共同研究報告書
整理番号第213号

耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究報告書(その3)

平成10年3月

建設省土木研究所構造橋梁部　本州四国連絡橋公団
財団法人土木研究センター　石川島播磨重工業株式会社
川崎重工業株式会社　川田工業株式会社
住友重機械工業株式会社　日本鋼管株式会社
日立造船株式会社　三井造船株式会社
三菱重工業株式会社

Copyright © (1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は，土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第213号 1998年 3 月

耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究報告書(その3)

建設省土木研究所 構造橋梁部 構造研究室 室長　佐藤　弘史
本州四国連絡橋公団 設計部 設計第一課長　古屋　信明
(財) 土木研究センター 理事　小林　茂敏
石川島播磨重工業 (株) 技術研究所 流体燃焼研究部 課長　松田　一俊
川崎重工業 (株) 橋梁技術総括部 開発部長　小川　一志
川田工業 (株) 技術開発本部 本部長　越後　滋
住友重機械工業 (株) 鉄構機器事業本部 技術部長　宮崎　正男
日本鋼管 (株) 基盤技術研究所 都市工学研究部 主幹研究員　武田　勝昭
日立造船 (株) 鉄構事業本部 設計統括部 主席技師　植田　利夫
三井造船 (株) 鉄構建設事業本部 技術部 技術開発G 部長　井上　浩男
三菱重工業 (株) 広島製作所 鉄構技術部 橋梁設計課 主務　逸見　雄人
(いずれも代表者のみ記す)

要　旨

本報告書は，耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究の平成9年度の成果を報告するとともに，共同研究期間である平成7年度から平成9年度までの3年間の成果をとりまとめて報告するものである。平成9年度は前年度までの検討に引き続き構造特性に関する検討，空力特性に関する検討および新形式吊橋に関する検討を実施するとともに，4車線案についても検討を行った。共同研究を実施した3年間の成果は，次のとおりである。構造特性に関しては，一箱桁断面を対象として検討を実施し，3本ケーブルに斜めステイを付加する形式の有効性，鉛直クロスステイ，水平ステイ，対角ステイの最適な設置位置が明らかとなった。空力特性に関しては，二箱桁断面を対象として検討を実施し，センターバリア，ガイドベーン等の耐風安定化部材の配置を系統的に検討を行い耐風性の良好な断面を見いだすことができた。新形式吊橋に関しては，二箱桁と一箱桁を併用した形式，楕円・多角形を補剛桁断面に採用した形式等について検討し，耐風特性の確認を行った。また，新たに開発された技術，耐風性の検討を実施した断面の一覧表を作成し巻末に添付した。

キーワード：超長大橋，風洞実験，耐風性，経済性，フラッター

目　　次

1．まえがき …… 1

2．研究体制 …… 2
2．1 共同研究参加企業と研究担当者 …… 2
2．2 研究計画と分担 …… 4

3．本年度の研究成果 …… 5
3．1 本年度の研究成果の概要 …… 5
3．1．1 一箱桁形式の検討 …… 5
3．1．2 二箱桁形式の検討 …… 5
3．1．3 新形式の検討 …… 6
3．1．4 その他の検討 …… 6
3．2 一箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究 …… 7
3．2．1 概要 …… 7
3．2．2 センターバリア、先端フェアリング形状の検討 …… 10
3．2．3 開口部を持つ一箱桁の耐風性検討 …… 30
3．2．4 桁断面形状に関する検討 …… 57
3．2．5 3本ケーブル吊橋の検討 …… 70
3．2．6 鉛直クロスステイの最適位置に関する検討 …… 83
3．2．7 水平ステイ・対角ステイの検討 …… 96
3．3 二箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究 …… 106
3．3．1 概要 …… 106
3．3．2 4本ケーブル軽量二箱桁の耐風性の検討 …… 109
3．3．3 二箱桁断面の空力特性改善に関する研究 …… 119
3．3．4 遮風効果を有する二箱桁形式の耐風性検討 …… 133
3．3．5 鉛直および水平スタビライザーを活用した二箱桁形式の耐風性検討 …… 140
3．3．6 センタバリアとガイドベーンを活用した6車線および4車線二箱桁の耐風性検討 …… 168
3．3．7 中央部グレーチング構造を追越車線とする4車線二箱桁形式の耐風性検討 …… 177
3．4 新形式橋梁における超長大橋の耐風安定性に関する研究 …… 186
3．4．1 概要 …… 186
3．4．2 重力剛性桁の耐風性検討 …… 193
3．4．3 二箱桁／一箱桁併用橋の耐風性に関する研究 …… 199
3．4．4 開口方法の差異に着目した耐風性検討 …… 217
3．4．5 楕円断面と多角形断面の空力特性予備検討 …… 226
3．4．6 遮風壁箱桁断面の耐風性検討 …… 262
3．4．7 その他の形式 …… 280

4．三年間の研究成果のまとめ …… 284
4．1 研究成果の概要 …… 284
4．2 空力特性に関する検討 …… 285
4．2．1 一箱桁に関する空力特性の検討 …… 285

4．2．2 二箱桁に関する空力特性の検討 …… 288
4．2．3 新型断面に関する空力特性の検討 …… 291
4．3 構造特性に関する検討 …… 293
4．3．1 ケーブルシステムに関する検討 …… 293
4．4 空力特性と構造特性の組み合わせ検討 …… 296
4．5 フラッター解析に関する条件 …… 298
4．5．1 概要 …… 298
4．5．2 ベンチマークテスト結果 …… 299
4．5．3 まとめ …… 353
4．6 開発された技術の一覧 …… 355

5．あとがき …… 384

6．付　　録 …… 385
6．1 空力特性検討断面一覧表 …… 385
6．1．1 概要 …… 385
6．1．2 空力特性検討断面一覧表 …… 385
6．1．3 記入要領概説 …… 386
6．2 フラッター解析条件一覧表 …… 460
6．3 打合せ記録 …… 467

1．まえがき

現在、わが国では各地で海峡横断道路ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄが構想されており、これらのﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄでは既往の実績を上回る規模の超長大橋が必要となる可能性がある。このような超長大橋に対して、これまで採用してきたトラス補剛桁を適用する場合、風荷重により主要な部材の断面が決定される等の理由から、経済性の面で大きな課題が生じる可能性がある。今後の超長大橋を含む道路プロジェクトを実現するためには、耐風性だけではなく経済性にも優れた超長大橋を開発する必要がある。

本共同研究は、以上の背景から耐風性及び経済性に優れた超長大橋の開発を目的として、土木研究所、本州四国連絡橋公団、土木研究センター、および石川島播磨重工業㈱、川崎重工業㈱、川田工業㈱、住友重機械工業㈱、日本鋼管㈱、日立造船㈱、三井造船㈱、三菱重工業㈱、により実施しているものである。また、短時間で効率的に研究を行なうため、検討は「一箱桁」、「二箱桁」及び「新形式橋梁」の３グループに分けて実施した。

当初、本研究は中央径間2,500mの６車線吊橋をモデル橋として平成7年度から2年間で実施される予定であった。しかし、昨今の社会情勢を鑑み４車線の場合も検討の対象に加え、平成9年度まで延長して実施した。本報告書は3年間の検討結果をとりまとめたものである。

2．研究体制

2.1　共同研究参加企業と研究担当者

表－2.1に参加企業とそれぞれの研究担当者を示す．

表－2.1　参加企業と研究担当者

氏　名	所　　属
横山　功一	建設省土木研究所　構造橋梁部長（～平成8年3月）
藤城　泰行	〃　構造橋梁部長（平成8年4月～平成9年3月）
岡原　美知夫	〃　構造橋梁部長（平成9年4月～）
佐藤　弘史	〃　構造橋梁部　構造研究室長
荻原　勝也	〃　〃　構造研究室主任研究員
松野　栄明	〃　〃　構造研究室研究員（～平成9年3月）
大儀　健一	〃　〃　構造研究室研究員（平成8年4月～）
松藤　洋照	〃　〃　構造研究室
奥川　淳志	本州四国連絡橋公団　設計部　部長
秋山　晴樹	〃　〃　設計第一課長（～平成9年6月）
古屋　信明	〃　〃　設計第一課長（平成9年7月～）
小川　和也	〃　〃　設計第一課長代理（平成9年4月～）
古家　和彦	〃　〃　設計第一課長代理（～平成9年3月）
鳥海　隆一	〃　〃　設計第一課長代理
竹口　昌弘	〃　〃　設計第一課
河藤　千尋	〃　〃　設計第一課
小林　茂敏	（財）土木研究センター　理事
鷹取　勲	〃　企画調査部長
島田　忠幸	〃　専門調査役
近藤　伸治	〃　専門調査役
樋上　琇一	石川島播磨重工業（株）技術研究所流体燃焼研究部次長（平成7年9月～平成9年3月）
松田　一俊	石川島播磨重工業（株）技術研究所流体燃焼研究部　課長
徳重　雅史	〃　〃
鈴木　政直	〃　機械鉄構事業本部橋梁事業部基本計画部課長代理
上島　秀作	〃　〃
小川　一志	川崎重工業（株）橋梁技術総括部開発部　部長
下土居　秀樹	〃　〃　〃　課長
斎藤　敏雄	〃　〃　〃　係長
橋本　靖智	〃　〃　〃
野上　千秋	〃　〃　〃
尾立　圭巳	〃　〃　〃

越後　滋	川田工業（株）技術開発本部長
米田　昌弘	〃　技術開発本部 技術研究室長（平成7年4月～平成9年3月）
木村　公男	〃　工事本部 工事計画課課長代理（平成7年4月～平成9年10月）
内海　靖	〃　技術開発本部 技術研究室主幹研究員（平成9年10月～）
大野　克紀	〃　技術開発本部 技術研究室
田巻　嘉彦	〃　〃
宮崎　正男	住友重機械工業（株）鉄構機器事業本部技術部長
中村　幸	〃　〃　課長（平成7年4月～平成9年11月）
斉藤　善央	〃　〃　課長代理（平成9年11月～）
風間　浩二	〃　〃　課長代理
久保田　浩	〃　〃
藤澤　伸光	日本鋼管（株）基盤技術研究所都市工学研究部 主幹（平成7年9月～平成9年3月）
武田　勝昭	日本鋼管（株）基盤技術研究所都市工学研究部 主幹
村上　琢哉	〃　〃　〃　耐風構造ﾁｰﾑ研究員
小泉　幹男	〃　橋梁・港湾建設部 橋梁計画室次長（平成7年9月～平成9年3月）
川畑　篤敬	〃　〃　開発技術室課長（平成9年4月～平成10年3月）
高尾　道明	〃　〃　〃　係長
山村　信道	日立造船（株）鉄構事業本部 橋梁設計部主席技師（平成7年9月～平成9年12月）
植田　利夫	〃　〃　設計統括部主席技師
田中　洋	〃　〃　橋梁設計部主管技師
松下　泰弘	〃　〃　〃　（平成9年4月～）
松岡　幸文	〃　〃　〃　（平成7年9月～平成9年3月）
山口　映二	〃　技術研究所 構造・流体研究センター
井上　浩男	三井造船（株）鉄構建設事業本部 技術部 技術開発Ｇ部長
成田　和由	〃　〃　構造Ｇ部長
佐野　健一	〃　〃　技術開発Ｇ課長補佐
酒井　正和	〃　〃　技術開発Ｇ課長補佐
大森　龍一郎	〃　〃　千葉鉄構工場設計部
森島　弘吉	〃　〃　技術開発Ｇ
林　健一	〃　〃　〃
赤瀬　雅之	〃　〃　〃
吉住　文太	〃　〃　〃　（平成9年4月～）
逸見　雄人	三菱重工業（株）広島製作所　鉄構技術部橋梁設計課主務
斎藤　通	〃　長崎研究所　流体研究室長
本田　明弘	〃　〃　〃　主任
平井　滋登	〃　〃　〃
所　伸介	〃　〃　〃
佐々木　伸幸	〃　広島研究所　鉄構土木研究室主務
増田　伊知郎	〃　広島製作所　鉄構技術部橋梁設計課課長

2.2 研究計画と分担

研究の実施に先立ち、研究内容を表－2.2.1のようにﾌﾞﾚｰｸﾀﾞｳﾝして、それぞれ担当幹事を定めた。

表－2.2.1 研究分担

ｸﾞﾙｰﾌﾟ名	研究分担の内容	担　当
A (一箱桁)	ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑにより 1箱桁形式補剛性桁を有する吊橋の耐風安定性を向上させる手法の研究	土木研究所 本州四国連絡橋公団 土木研究センター 川田工業 住友重機械工業 ○ 日本鋼管
B (二箱桁)	中央部に開口を有する箱桁の空力特性の検討	土木研究所 本州四国連絡橋公団 土木研究センター 石川島播磨重工業 川崎重工業 住友重機械工業 ○ 日立造船 三井造船
C (新形式)	一箱桁、二箱桁形式以外の形式及び両者の組合せ形式の検討	土木研究所 本州四国連絡橋公団 土木研究センター 石川島播磨重工業 川崎重工業 川田工業 三井造船 ○ 三菱重工業

○印は幹事

3．本年度の研究成果

3．1　本年度の研究成果の概要

平成９年度の検討では、昨年度に引き続き一箱桁形式、二箱桁形式及び新形式の３つの区分に従って研究を継続した。検討対象とした構造形式としては、これまでと同様、中央径間２５００m、橋長５０００mの３径間２ヒンジ吊橋であるが、今年度の検討では、これまでの６車線補剛桁に加え４車線補剛桁も検討対象とした。また、本年度は３年間の共同研究の最終年度に当たることから、これまでの研究成果のまとめを実施し、成果のなかで用いられたフラッタ解析結果や風洞試験結果等の条件を明確にしておくとともに、本共同研究で開発された技術の一覧を書式を定めて保存することとした。

3．1．1　一箱桁形式の検討

一箱桁形式における検討では、６車線を対象として桁高７m案を中心に、桁断面の風洞実験による耐風性の改善とケーブルシステムの検討が実施された。補剛桁断面の耐風性能向上のために、桁高７m案での上下面バリア・先端フェアリング等の検討、５m桁高案での開口位置検討や遮風スクリーン等の検討、桁高の効果や小部材の影響評価などが実施された。これらの結果では、２次元バネ支持試験で７５m／s、３次元フラッタ解析では８０m／sといったフラッタ発現風速が得られるケースもあり、補剛桁断面の耐風性改善のみでも、ある程度までは耐風性を確保できる見通しが出来たと言えよう。

ケーブルシステムの検討では、３本ケーブルに斜めスティを付加する方式の有効性検討や片効き鉛直クロススティの最適位置の検討、水平スティ・対角スティの最適設置位置の検討などが実施された。これらの結果からも、フラッタ発現風速が８０m／s以上となる耐風性に優れた効果的な対策が幾つか得られた。

3．1．2　二箱桁形式の検討

二箱桁形式における桁断面の空力特性の改善に関する検討では、平成８年度に検討された３断面のうち、２断面についてより一層の改善が実施されたほか、平成７年度に検討された１断面については主塔の詳細検討に基づく耐風性の再評価がなされた。桁高６m中央開口７mの６車線案では横撓み変形特性を考慮した耐風性の改善がなされたが、桁高４mの４車線の場合にも空力特性がほぼ同様となることが確認された。幅広の開口部を有する桁高１．６mの断面についても、４本ケーブルとクロスハンガーの併用で十分な耐風性の確保が可能である結果が得られている。

一方、これらとは別にセンターバリアとガイドベーンあるいは導流板や遮風壁を併用した、中央開口型の桁についての耐風性の検討結果が報告された。中央部をグレーチング構造とした断面では６車線、４車線のいずれでも耐風性の良好な結果が得られている。また、比較的コンパクトな断面構成とした場合についても、センターバリアと導流板の配置について系統的な検討が実施され、耐風性の良好な断面が見いだされている。遮風壁についての検討では、耐風性への影響は大きくなく、特定のケースでは耐風性が向上したという結果も得られている。

３．１．３　新形式の検討

平成９年度の検討では、昨年度の検討に引き続き重力補剛桁方式、二箱桁／一箱桁併用吊橋方式、開口桁方式、楕円・多角形断面桁方式、及び遮風壁箱桁方式についての耐風性に関する検討が実施された。重力補剛桁方式と二箱桁／一箱桁併用吊橋方式では６車線及び４車線案について検討がされたが、他の方式は昨年度と同様の６車線案である。補剛桁断面形状の検討については、二箱桁と開口桁について改良後に大幅な耐風性の向上が認められた。また、構造形式の検討では４車線案の重力補剛形式、６車及び４車線案の併用吊橋方式、６車線案の併用斜張吊橋方式とクロスケーブルシステムで、いずれも限界風速は目標値の８０ｍ／ｓを上回る成果が得られている。

その他の形式の検討成果としては、リチャードソンのツイン吊橋、ムスメチの張力構造の応用例、ギムシングのケーブル支持吊橋などのほか、最近話題のオールグレーチング形式やパイプトラス形式について、その特徴を紹介した。

３．１．４　その他の検討

今年度が３年間の共同研究の最終年であることから、３年間の研究成果のとりまとめを実施し、第４章として報告書に掲載することとした。検討された各種断面や構造形式については、その成果を将来に残すことを目的とした、開発された技術の一覧としてまとめておくこととした。また、昨年度からの継続として空力特性検討断面一覧表やフラッター解析条件一覧表の充実も図った。英文要約板は本共同研究の成果を広く海外に紹介していくことの手助けになるようにとまとめたものである。

3.2　一箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究

3.2.1　概要

(1)検討内容

一箱桁形式補剛桁を有する吊橋の耐風性を向上させる手法の検討を行った。基本対象とする吊橋は、昨年度と同じく、表－3.2.1.1 に示すような諸元を有する超長大吊橋（中央支間長 2,500m、側支間長 1,250m）である。同表から分かるように、本橋では使用鋼重量の低減を図って、より経済的な超長大吊橋が実現できるようにケーブルのサグ比を 1/9 とし、ケーブルの許容応力度も明石海峡大橋の 82kgf/mm² から 100kgf/mm² に変更することとしている。なお、ケーブルのサグ比を 1/10、ケーブルの許容応力度を 82kgf/mm² とした場合のケーブル重量 wc は wc≒17.0tf/m/Br. であり、サグ比 1/9、許容応力度を 100kgf/mm² に変更することによって、ケーブル重量は wc＝11.0tf/m/Br. まで低減したことを付記しておく。

本節では、まず、ばね支持試験を中心とした一箱桁断面形状の検討を行った。ケーブル間隔 35.5m（６車線を想定）の桁高７m一箱桁断面を基本断面として、以下の検討を実施した。

1)　ねじれ剛性を変化させない耐風安定化対策として、センターバリア、先端フェアリング形状の検討

2)　３種の桁高に対して、開口部の設置の検討及び強風時の車両走行性の改善を目的とした透過型遮風壁の検討

3)　フェアリング形状及び検査車レール・高欄などの微小部材の検討

検討の結果、耐風性が良好と認められた桁断面形状については、三分力係数、非定常空気力係数の測定、さらにはフラッター解析を実施した。

一方では、フラッター解析によるケーブルシステムの検討を実施した。検討項目を以下に示す。

4)　３本ケーブル吊橋及び斜めステイの検討

5)　クロスステイの最適設置位置とクロスステイの概略構造の検討

6)　水平ステイと対角ステイとの設置効果の検討

検討にあたっては、桁に作用する空気力に平板翼理論値を用いた基本検討の他、上記 1)～3)で耐風性が良好と認められた桁断面形状とケーブルシステムとの組み合わせの検討も実施した。

(2)一箱桁断面の検討

桁高７m一箱桁断面において、ねじれ剛性を変化させない耐風安定化対策として上面バリア、下面バリア、桁先端フェアリング形状を検討した。その結果、それらの対策の組み合わせにより、フラッター発現風速は対策前（49m/s）の約２割上昇し（約 60m/s）、たわみ渦励振振幅も大幅に低減した。しかし、ねじれ渦励振振幅については、やや大きくなる傾向が見られ、今後の検討が必要とされる。さらに、小さい中央開口部を設けた桁高５m一箱桁断面を検討したが、今回検討した断面では開口によるフラッター発現風速の向上は１割程度にとどまったため、今後の検討が必要とされる。

また、桁高７m一箱桁断面を基本断面として、フェアリング形状、桁高の検討、さらに、高欄形状、

検査車レールなどの微小部材の検討を実施した。最もフラッター発現風速の高かった桁断面形状については、静的３分力係数、非定常空気力を計測して、全橋フラッター解析を実施した。その結果、64.6m/sという一箱桁断面にしては良好なフラッター発現風速が得られた。

一方、桁高の違う３種（7、5、3.5m）の一箱桁基本断面について風洞試験を実施した。今回検討した断面の範囲では、桁高５ｍが最も耐風性が良好であった。さらに、その桁高５ｍ一箱桁断面において耐風安定化対策を施し、桁中央および端部に開口部を設け、透過型遮風壁、水平導流板、センターバリアを設置した場合には、３迎角（迎角０°、±３°）ともフラッター発現風速 75m/s 以上が達成できた。最終的には、本断面について測定空気力を用いた３次元フラッター解析を実施した結果、ほぼ80m/sのフラッター発現風速を有することが明らかとなった。

(3)ケーブルシステムの検討

３本ケーブル吊橋のメインケーブル断面積比の検討、斜めステイを付加する方式の検討を行った。桁に平板翼理論値を用いた場合では、３本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式は、ステイの断面積を充分に取れば従来方式（２本ケーブル吊橋にクロスステイを付加する方式）と同等の耐風性を有すること、桁の非定常空気力の影響を受けやすいこと、メインケーブルを中央に集めた構造形式ほどその傾向が強いことが示唆された。また、ステイの設置本数の増加によりフラッター発現風速の上昇は認められるが、建築限界に影響しない範囲全て設置した場合でも、通常のケース（中央径間 L/4 点、側径間中央の４ヶ所の設置）よりも 4m/s 程度の上昇しか認められない。断面積比 1:2:1 の３本ケーブル吊橋に斜めステイ（片効き）を付加した方式に着目し、ばね支持試験により改良された１箱桁断面と組み合わせ構造形式では、フラッター発現風速 80m/s 以上となった。これは、２本ケーブル吊橋にクロスステイを付加する方式との組み合わせよりも高いフラッター発現風速を有しており、３本ケーブル吊橋に斜めステイ方式の優位性が現れた形となった。

さらに、片効き鉛直クロスステイの最適位置を検討した。その結果、中央径間側の 0.3L、側径間側中央付近が最適であり、フラッター発現風速は 65.5m/s（設置しない場合より 15%増加）となった。但し、本結果は有風時変形を考慮しない解析ケースであり、有風時変形を考慮した解析ではフラッター発現風速がやや低下する傾向にある。また、暴風時の静的解析を行いクロスステイの概略構造検討を行った結果、非抗圧クロスステイ（片効き）としてはφ150程度のケーブル部材、抗圧クロスステイ（両効き）としては1800×900mm程度の箱断面が必要であることがわかった。

水平ステイ、対角ステイの検討では、これらステイの単独あるいは併用により、フラッター発現風速を向上させる効果があることが明らかとなった。測定空気力を用いたフラッター解析の結果、水平ステイの設置範囲を全長の約 12%区間（中央径間、側径間ともに 12%）とした場合では、対角ステイの併用によりフラッター発現風速は 82.7m/s となった。また、水平ステイの設置区間を延長して、全長の 28%とした場合には対角ステイの併用により最大 88.5m/s、全長の約 44%区間に設置した場合には 91.6m/s の高いフラッター発現風速を示した。

表－3.2.1.1　想定橋梁の諸元

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	支間長	1，250＋2500＋1．250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	35．5m
	有効断面積	1．2　m^2／Br
	許容応力度	100　kg／mm^2
ハンガー	ハンガー間隔	28m　(3.2.4) 70m　(3.2.5) 100m　(3.2.3)(3.2.7) 125m　(3.2.6)
	断面積	0．0056m^2／格点／Br (3.2.4) 0．011m^2／格点／Br (3.2.5) 0．024m^2／格点／Br (3.2.3)(3.2.7) 0．03m^2／格点／Br (3.2.6)
補剛桁	断面積	1．3　m^2／Br
	鉛直曲げ剛性	12．0　m^4／Br
	水平曲げ剛性	160　m^4／Br
	ねじれ剛性	26　m^4／Br
	極慣性	336．7　$t\cdot s^2$／m／Br
死荷重	吊構造部	24　t／m／Br
	ケーブル	11　t／m／Br
	合計	35　t／m／Br
主塔	塔高	369．5m
	底面下面	TP＋10．5m

3.2.2　センターバリア、先端フェアリング形状の検討

(1)　概要

一箱桁断面に各種ケーブルシステムを設置する方式に着目して、一箱桁断面の耐風性検討を行った。本検討では、フラッター特性に影響を与えるねじれ剛性を変更させない耐風安定化対策として、センターバリア、先端フェアリング形状に着目し、バリア高さ、先端フェアリング形状をパラメータに、どれ程のフラッター発現風速を確保できるかをばね支持試験により検討した。さらに、全橋（３次元）フラッター解析を実施するために、ばね支持試験により選定された耐風性の良好な断面を対象に、三分力試験、非定常空気力試験を実施した。

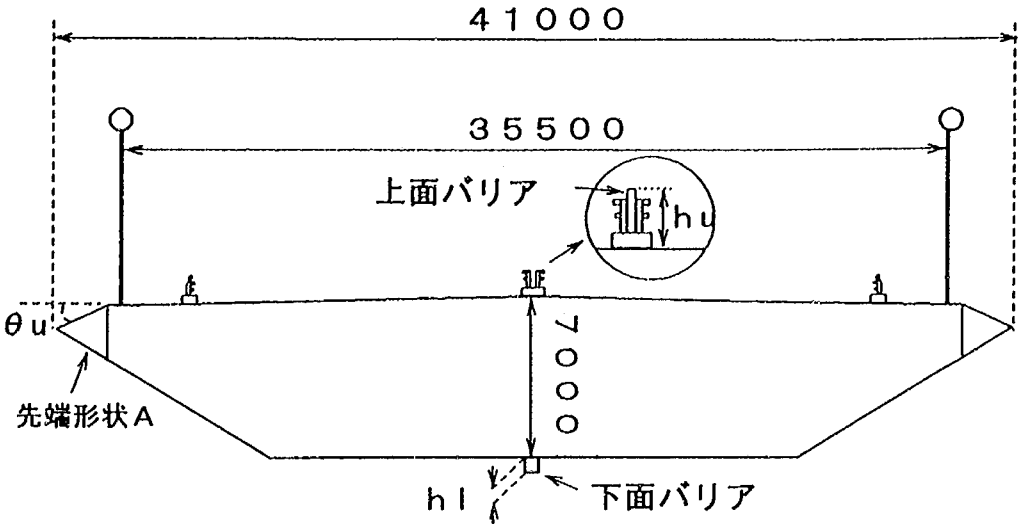
また、中央に狭い開口部を有する一箱桁断面についてもフラッター特性を検討した。本検討では、桁高５m、中央開口部３mを基本断面として、先端フェアリング形状の影響等を、測定された非定常空気力係数を用いた２次元フラッター解析により調査した。

(2)　一箱桁断面の耐風性検討

1)　ばね支持試験概要

本試験は、日本鋼管株式会社所有の構造物用風洞（水平単回路型ゲッチンゲン型、測定部寸法：幅２m×高さ３m×長さ１５m）において実施された。対象とする桁断面形状は、図－3.2.2.1 に示す幅員４１m（６車線を想定)、桁高７mを有する一箱桁断面とした。耐風安定化対策として、同図に示した桁上面のセンターバリア（以下、上面バリア)、桁下面のセンターバリア（以下、下面バリア)、フェアリング先端形状Ａを取り上げ、上面バリア高さ hu（デッキ面からの高さで定義)、下面バリア高さ hl、フェアリング先端形状Ａ（桁幅は不変とし、上部角度 θ_u で定義された形状）を適宜変化させ、その影響を調査した。上面バリアについては、中央防護柵を閉塞させた場合（hu=0.8m 相当）も併せて検討した。さらに、一部の断面については、検査車レールの有無の影響も調査した。設置位置は、レール間隔 15m、レール高さは 1.1mと一律に定めた。試験条件を表－3.2.2.1 に示す。これらの構造特性は、中央径間 2,500m、側径間 1,250m の超長大吊橋の試設計、固有値解析結果を基にして決定されている。また、試験縮尺は 1/75 とし、試験気流は全ケースとも一様流である。

実験結果については、各実験ケースの試験条件が微妙に異なっているため、実験結果を補正して、各ケース同士を比較することとした。すなわち、フラッター発現風速については、実際の実験条件を基に Selberg 式を用いて算定されたフラッター発現風速 V_{sel} と試験結果 V_f との比で定義される形状補正係数 κ（$= V_f / V_{sel}$）で整理した。κ の大小が、断面の耐風性の優劣を示す。したがって、各実験ケースにおけるフラッター発現風速は、表に示した試験条件から算定される V_{sel} に κ を乗じて算定できる。なお、表に示した試験条件から算定される V_{sel} は 52m/s（実橋値）であることを付記しておく。また、渦励振振幅については、試験条件から計算されるスクルートン数による補正を行って整理した。補正にあたっての空気密度は、0.125kgf･s^2/m^4 とした。



図－3.2.2.1　　ばね支持試験対象断面

表－3.2.2.1　　ばね支持試験条件

	Real Scale	Model
Width	41.0m	546.6mm
Height	7.0m	93.3mm
Mass	35 t/m	9.89 kg/model
Moment of inertia	6762 tm2/m	0.340 kgm2/model
Bending Freq.	0.0516Hz	1.19Hz
Torsional Freq.	0.1519Hz	3.68Hz
δ (Bending)	0.02	0.020
δ (Torsional)	0.02	0.020

2)　ばね支持試験結果

各ケースにおけるフラッター発現風速一覧表を表－3.2.2.2(1)～(4)に示し、以下、各耐風安定化対策の効果について個別に考察する。

①　センターバリアの効果

上面バリア、下面バリアの検討ケースとその試験結果をまとめて、図－3.2.2.2 に示す。これより、上面バリア単独よりも上面バリアと下面バリアを併用した方が、κ が大きくなっていることが分かる。バリアの高さについては、下面バリアよりも上面バリア高さの影響が支配的であり、上面バリア高さとともに κ が大きくなる傾向にある。但し、高いバリアを設置した断面では、一様流中の試験にもかかわらず、鉛直たわみの大きな不規則振動も同時に観測されており、高いバリアの設置にあたっては、より詳細な検討が必要とされる。たわみの不規則振動は、バリアにより風が乱されていることに起因するものと判断され、それが κ が大きくなった一因とも推察される。

また、迎角特性については、概ね＋３°において最も κ が小さくなっており、この傾向は、検査車レールを設置した場合に顕著に現れている。

②　フェアリング先端形状の効果

フェアリング先端形状の検討結果を図－3.2.2.3 に示す。これより、θ_u が小さい形状、すなわち、フェアリング先端部を桁上面にあげた形状では、迎角特性が悪化し、特に正迎角のフラッター発現風速が大きく低下していることがわかる。一方、フェアリングの先端部を桁下面に下げた形状では、やや大きくなっていることがわかる。

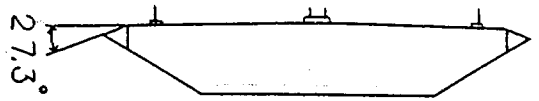
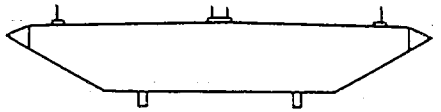
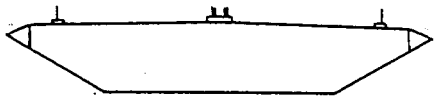
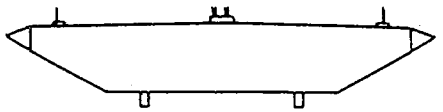
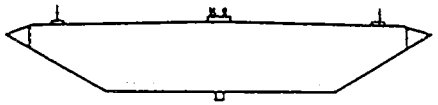
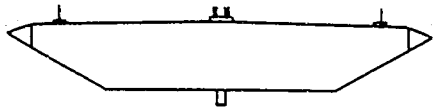
③　センターバリアと先端フェアリング形状との組合せの効果

以上の結果から、耐風性の良いフェアリング形状として、θ_u＝32.3°、37.3°の２種類を選定し、上面バリア（hu=1.5m)、下面バリア（hl=1.1m）を組み合わせた断面、さらにその断面に検査車レールを設置した断面を検討した。その検討結果を、基本断面（θ_u＝27.3°）と比較して、図－3.2.2.4(a)～(c)に示す。これより、どのフェアリングのケースにおいても、上面バリア、下面バリアを組み合わせると κ が大きくなっており、フェアリングの種類によらず、バリア設置の効果が確認できる。基本断面と比較すると、κ の値は２割程度高くなっており、フラッター発現風速は迎角０°において、約 60m/s となる。また、検査車レールの影響は、選定したフェアリング形状は基本断面と異なり、小さいことがわかる。また、たわみ渦励振については、各フェアリング先端形状とも、上面バリア、下面バリアの設置により振幅が大幅に低減されていることが確認できる。ねじれ渦励振については、明確な傾向は見られないものの、バリア設置により、振幅が大きくなっている傾向が見られ、今後より詳細な検討が必要とされる。

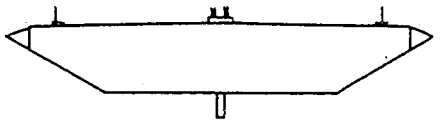
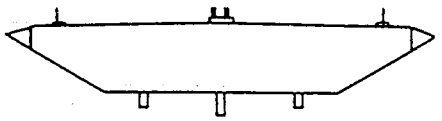
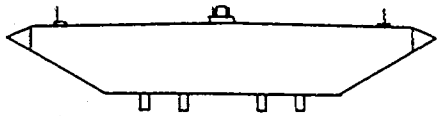
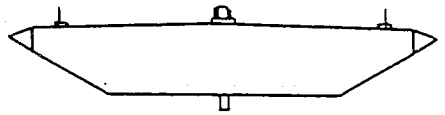
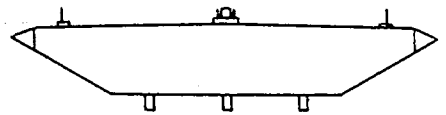
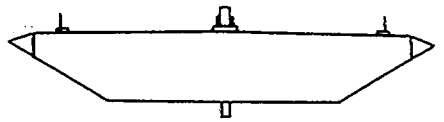
3)　三分力試験

基本断面（θ_u＝27.3°）の他、ばね支持試験で耐風性の良好であった θ_u＝32.3°、37.3°の２種類の一箱桁断面の桁先端フェアリングに、上面バリア（hu=1.5m)、下面バリア（hl=1.1m）を組み合わせた２断面（以下、それぞれ改良断面Ｄ、改良断面Ｅ）の計３断面について、三分力試験を実施した。試験結果を図－3.2.2.5(1)～(6)にまとめて示す。同図(1)(2)が基本断面、(3)(4)が改良断面Ｄ、(5)(6)が改良断面Ｅの試験結果であり、前者が風速 8m/s、後者が風速 16m/s の計測値を示している。これより、どの断面も－５°以下の迎角では三分力係数

表－3.2.2.2(1)　ばね支持試験結果　フラッター発現風速一覧表

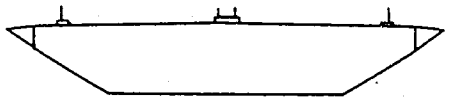
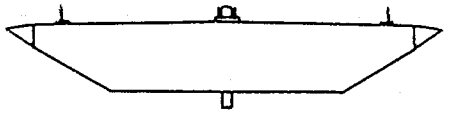
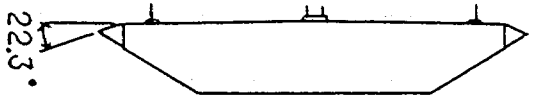
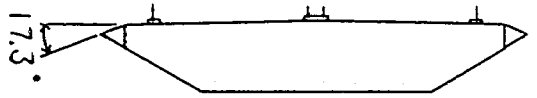
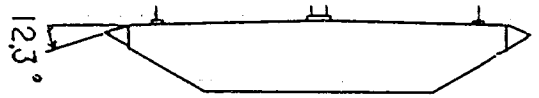
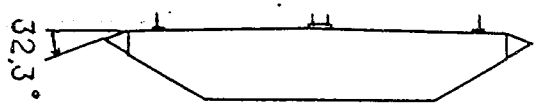
No.	断　面	フェアリング	上面バリア	下面バリア	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s) 迎角		
						-3°	0°	+3°
1		基本A	—	—	—	48	49	48
2		基本A	—	—	15	54	53	47
3		基本A	防護柵閉塞	—	—	49	51	47
4		基本A	防護柵閉塞	—	15	55	54	45
5		基本A	防護柵閉塞	高さ 0.525m	—	52	52	47
6		基本A	防護柵閉塞	高さ 1.125m	—	54	54	50

表－3.2.2.2(2)　ばね支持試験結果　フラッター発現風速一覧表

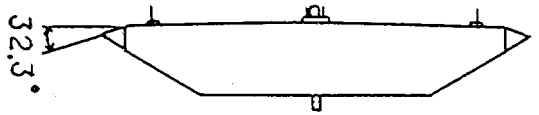
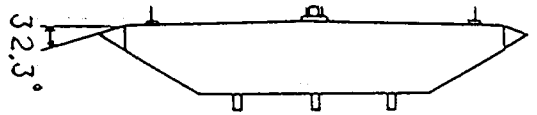
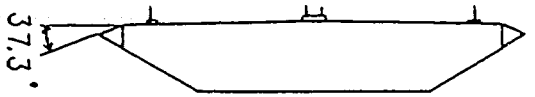
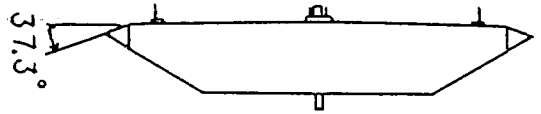
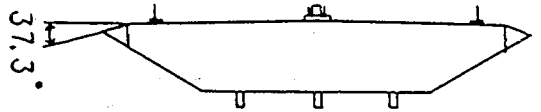
No.	断　面	フェアリング	上面バリア	下面バリア	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s) 迎角 −3°	迎角 0°	迎角 +3°
7		基本A	防護柵閉塞	高さ 2.025m	—	56	54	50
8		基本A	防護柵閉塞	高さ 2.025m	15	56	54	48
9		基本A	高さ 1.5m	—	7.5m, 15m に4枚設置	59	58	※1 54 以上
10		基本A	高さ 1.5m	高さ 1.125m	—	58	58	56
11		基本A	高さ 1.5m	高さ 1.125m	15	59	57	52
12		基本A	高さ 2.025m	高さ 1.125m	—	63	61	59

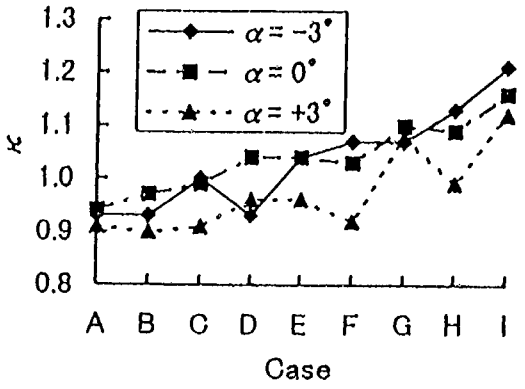
（備考）　※1　静的揚力変位が大きいため、54m/sで測定中止

表－3.2.2.2(3) ばね支持試験結果 フラッター発現風速一覧表

No.	断 面	ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ	上面ﾊﾞﾘｱ	下面ﾊﾞﾘｱ	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s) 迎角		
						-3°	0°	+3°
13		基本B	—	—	—	43	51	42
14		基本B	高さ 1.5m	高さ 1.125m	—	58	57	50
15		基本A-1	—	—	—	45	51	41
16		基本A-2	—	—	—	45	51	29
17		基本A-3	—	—	—	49	51	27
18		基本A-4	—	—	—	50	51	48

表－3.2.2.2(4)　ばね支持試験結果 フラッター発現風速一覧表

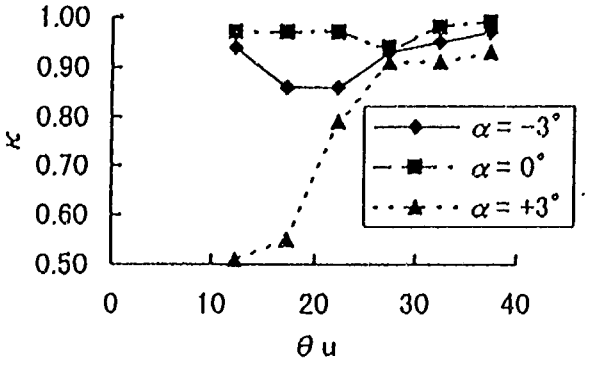
No.	断　面	フェアリング	上面バリア	下面バリア	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s) 迎角		
						-3°	0°	+3°
19		基本A-4	高さ 1.5m	高さ 1.125m	—	60	59	57
20		基本A-4	高さ 1.5m	高さ 1.125m	15	60	60	57
21		基本A-5	—	—	—	50	52	49
22		基本A-5	高さ 1.5m	高さ 1.125m	—	60	60	56
23		基本A-5	高さ 1.5m	高さ 1.125m	15	61	60	57
—	—	—	—	—	—	—	—	—



Case	A	B	C	D	E	F	G	H	I
θ u(deg.)	27.3								
hu(m)	—	block	block	block	block	block	1.5	1.5	2.0
hl(m)	—	—	0.5	1.1	2.0	2.0	1.1	1.1	1.1
Rail	—	—	—	—	—	○	—	○	—

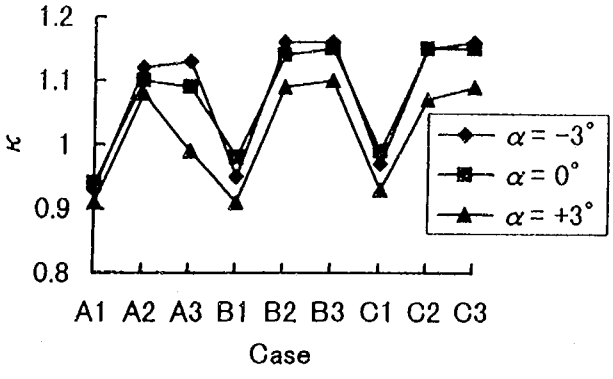
(Remarks) block : central guard fences are blockaded.
○: installed —: not installed

図－3.2.2.2　　バリアの効果

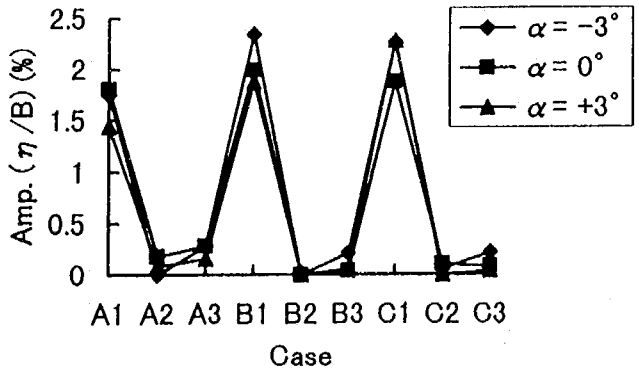


図－3.2.2.3　　先端フェアリング形状の効果
(一箱桁断面)

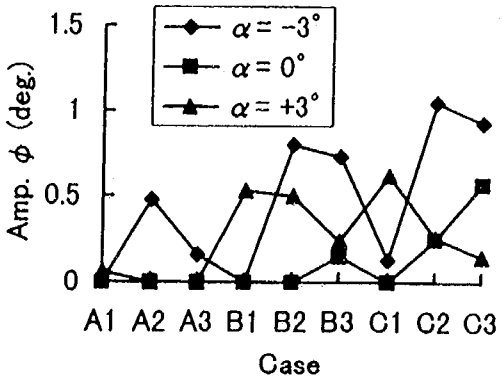
Case	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
θ u (deg.)	27.3			32.3			37.3		
hu (m)	—	1.5		—	1.5		—	1.5	
hl (m)	—	1.1		—	1.1		—	1.1	
Rail	—	—	○	—	—	○	—	—	○



(a)　フラッター

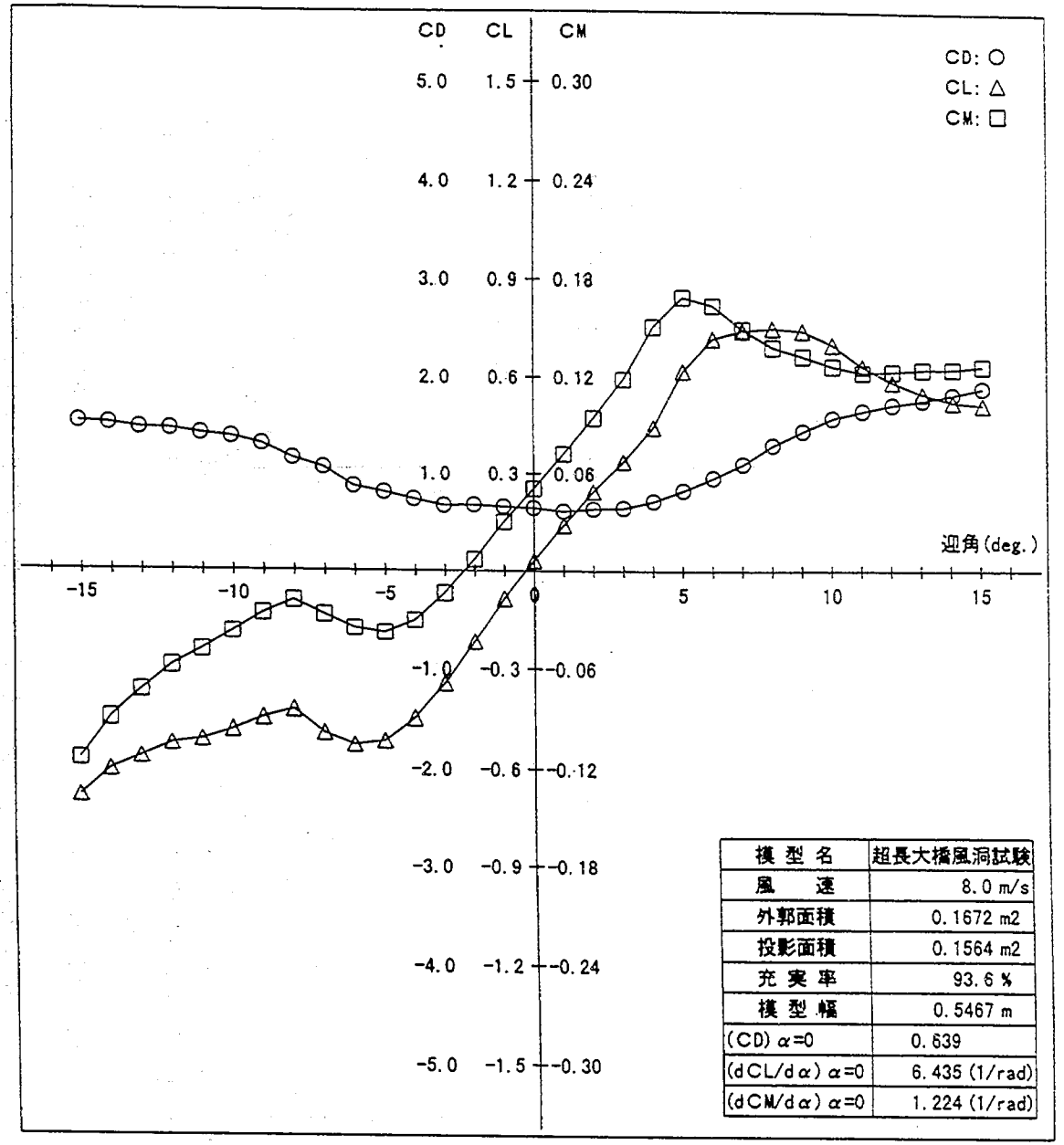


(b)　たわみ渦励振



(c)　ねじれ渦励振

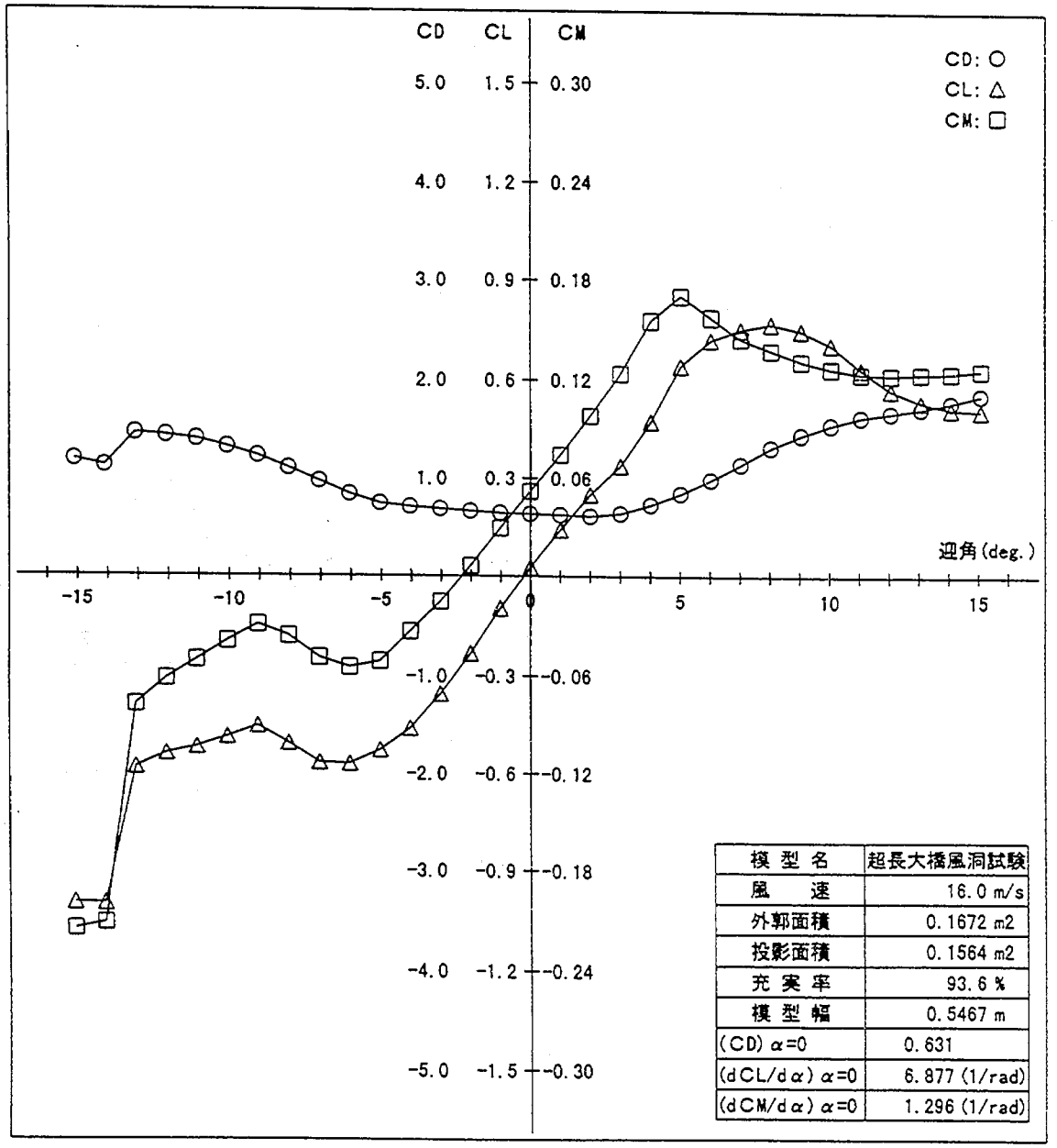
図－3.2.2.4　　バリアと先端フェアリングの組み合わせの効果



模型名	超長大橋風洞試験
風速	8.0 m/s
外郭面積	0.1672 m2
投影面積	0.1564 m2
充実率	93.6 %
模型幅	0.5467 m
(CD) α=0	0.639
(dCL/dα) α=0	6.435 (1/rad)
(dCM/dα) α=0	1.224 (1/rad)

迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.520	-0.685	-0.1142
-14	1.503	-0.604	-0.0898
-13	1.460	-0.564	-0.0734
-12	1.449	-0.522	-0.0587
-11	1.405	-0.511	-0.0491
-10	1.373	-0.482	-0.0379
-9	1.301	-0.447	-0.0265
-8	1.154	-0.424	-0.0186
-7	1.058	-0.491	-0.0271
-6	0.863	-0.526	-0.0356
-5	0.803	-0.516	-0.0384
-4	0.731	-0.448	-0.0308
-3	0.666	-0.345	-0.0141
-2	0.669	-0.220	0.0070
-1	0.652	-0.087	0.0296
0	0.639	0.031	0.0505
1	0.607	0.138	0.0723
2	0.631	0.244	0.0946
3	0.638	0.337	0.1186
4	0.710	0.444	0.1504
5	0.822	0.618	0.1687
6	0.953	0.715	0.1634
7	1.096	0.739	0.1487
8	1.294	0.746	0.1379
9	1.438	0.738	0.1323
10	1.568	0.696	0.1262
11	1.639	0.630	0.1223
12	1.702	0.581	0.1228
13	1.749	0.544	0.1241
14	1.805	0.519	0.1242
15	1.873	0.510	0.1262

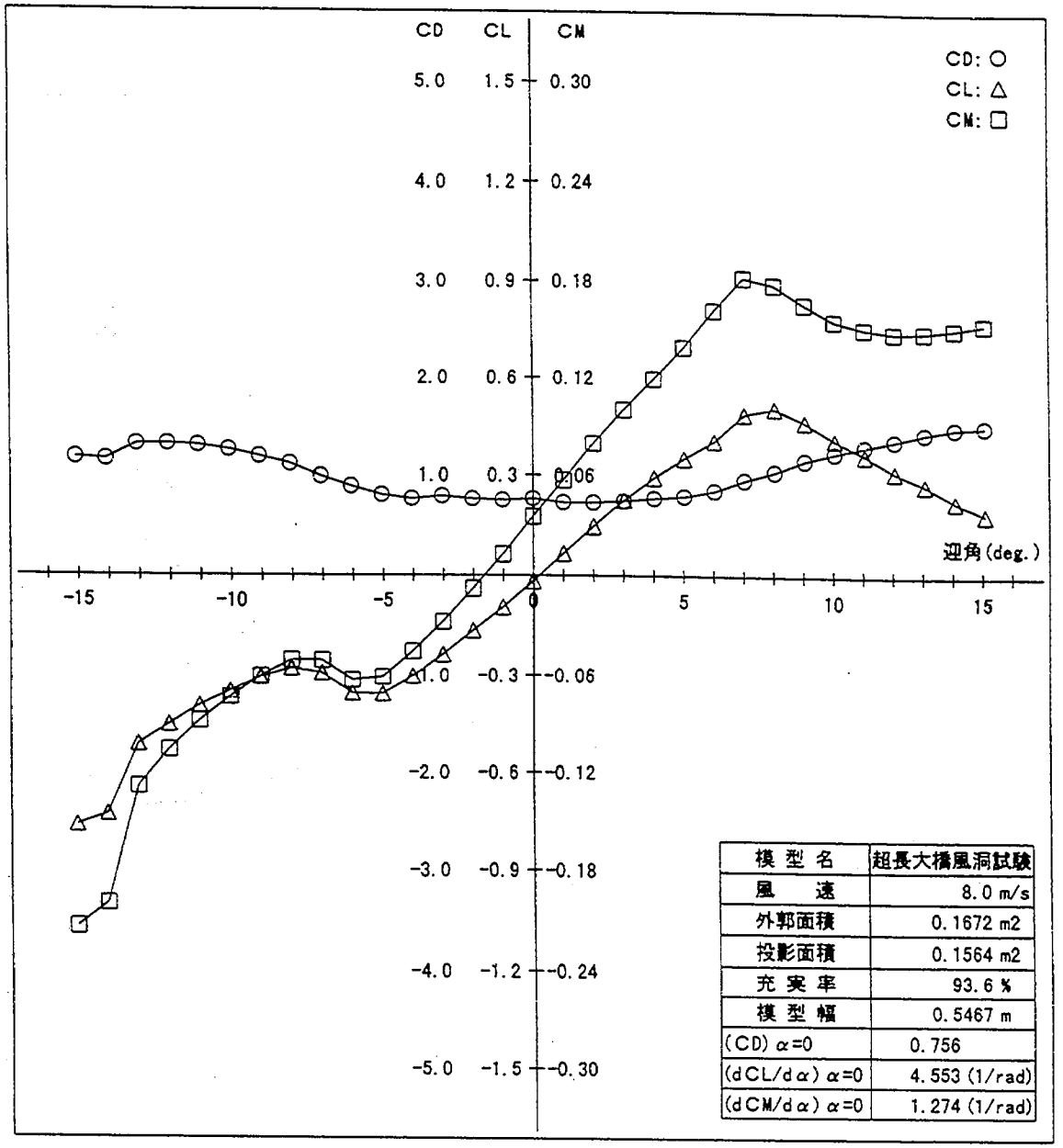
図－3.2.2.5(1) 三分力試験結果［基本断面 風速8m/s］



模型名	超長大橋風洞試験
風速	16.0 m/s
外郭面積	0.1672 m2
投影面積	0.1564 m2
充実率	93.6 %
模型幅	0.5467 m
(CD) α=0	0.631
(dCL/dα) α=0	6.877 (1/rad)
(dCM/dα) α=0	1.296 (1/rad)

迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.181	-1.000	-0.2159
-14	1.117	-1.002	-0.2122
-13	1.444	-0.582	-0.0779
-12	1.421	-0.540	-0.0620
-11	1.388	-0.520	-0.0507
-10	1.314	-0.488	-0.0395
-9	1.223	-0.453	-0.0296
-8	1.100	-0.508	-0.0363
-7	0.966	-0.567	-0.0491
-6	0.832	-0.571	-0.0549
-5	0.736	-0.529	-0.0515
-4	0.703	-0.462	-0.0337
-3	0.680	-0.357	-0.0156
-2	0.657	-0.234	0.0062
-1	0.641	-0.099	0.0291
0	0.631	0.026	0.0518
1	0.621	0.141	0.0743
2	0.609	0.250	0.0976
3	0.636	0.338	0.1238
4	0.726	0.472	0.1555
5	0.843	0.642	0.1699
6	0.985	0.720	0.1575
7	1.142	0.751	0.1447
8	1.314	0.769	0.1377
9	1.438	0.749	0.1312
10	1.537	0.706	0.1267
11	1.616	0.633	0.1237
12	1.660	0.568	0.1231
13	1.706	0.531	0.1237
14	1.763	0.509	0.1243
15	1.841	0.504	0.1260

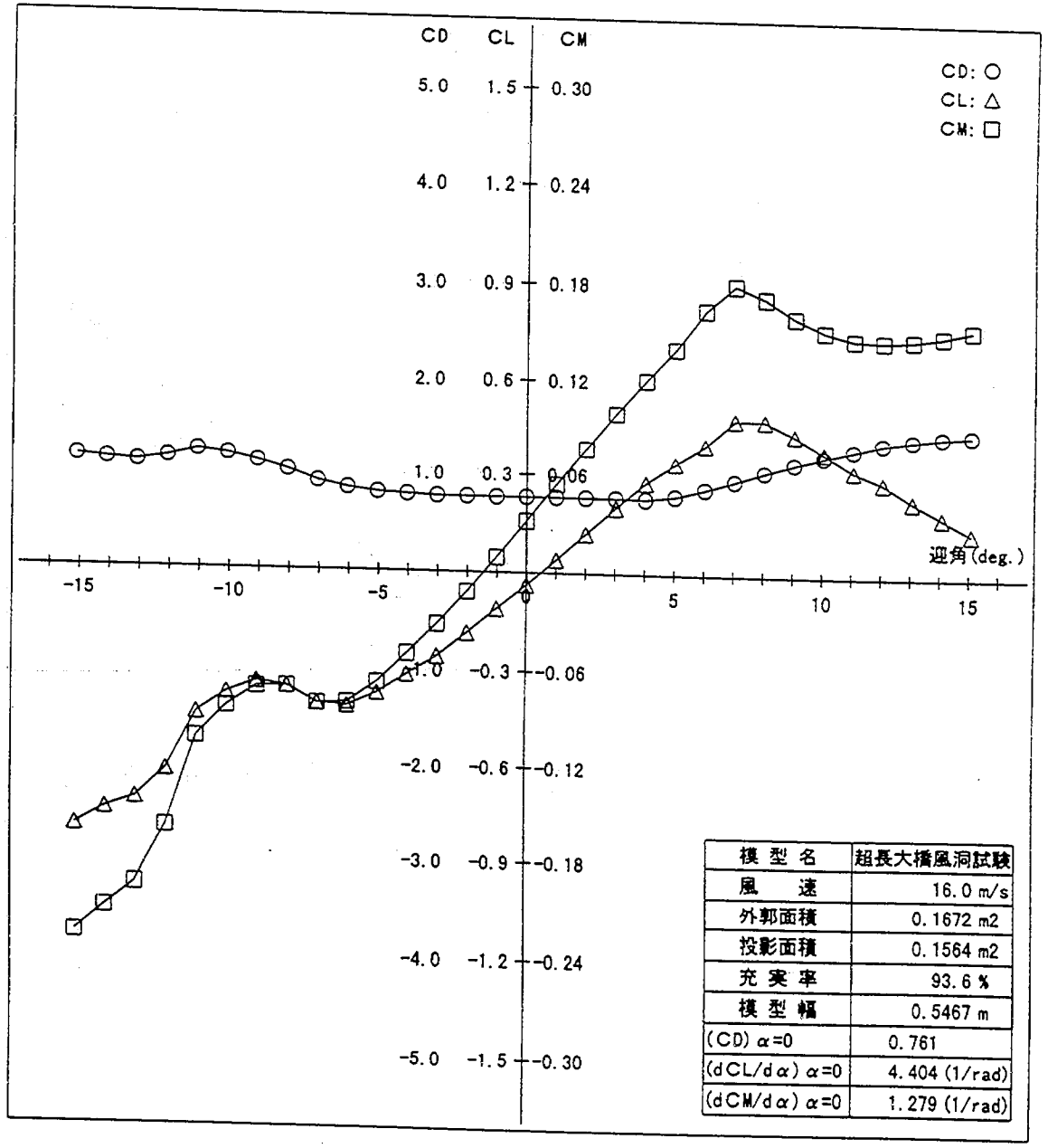
図－3.2.2.5(2) 三分力試験結果 [基本断面 風速16m/s]



模型名	超長大橋風洞試験
風速	8.0 m/s
外郭面積	0.1672 m2
投影面積	0.1564 m2
充実率	93.6 %
模型幅	0.5467 m
(CD) α=0	0.756
(dCL/dα) α=0	4.553 (1/rad)
(dCM/dα) α=0	1.274 (1/rad)

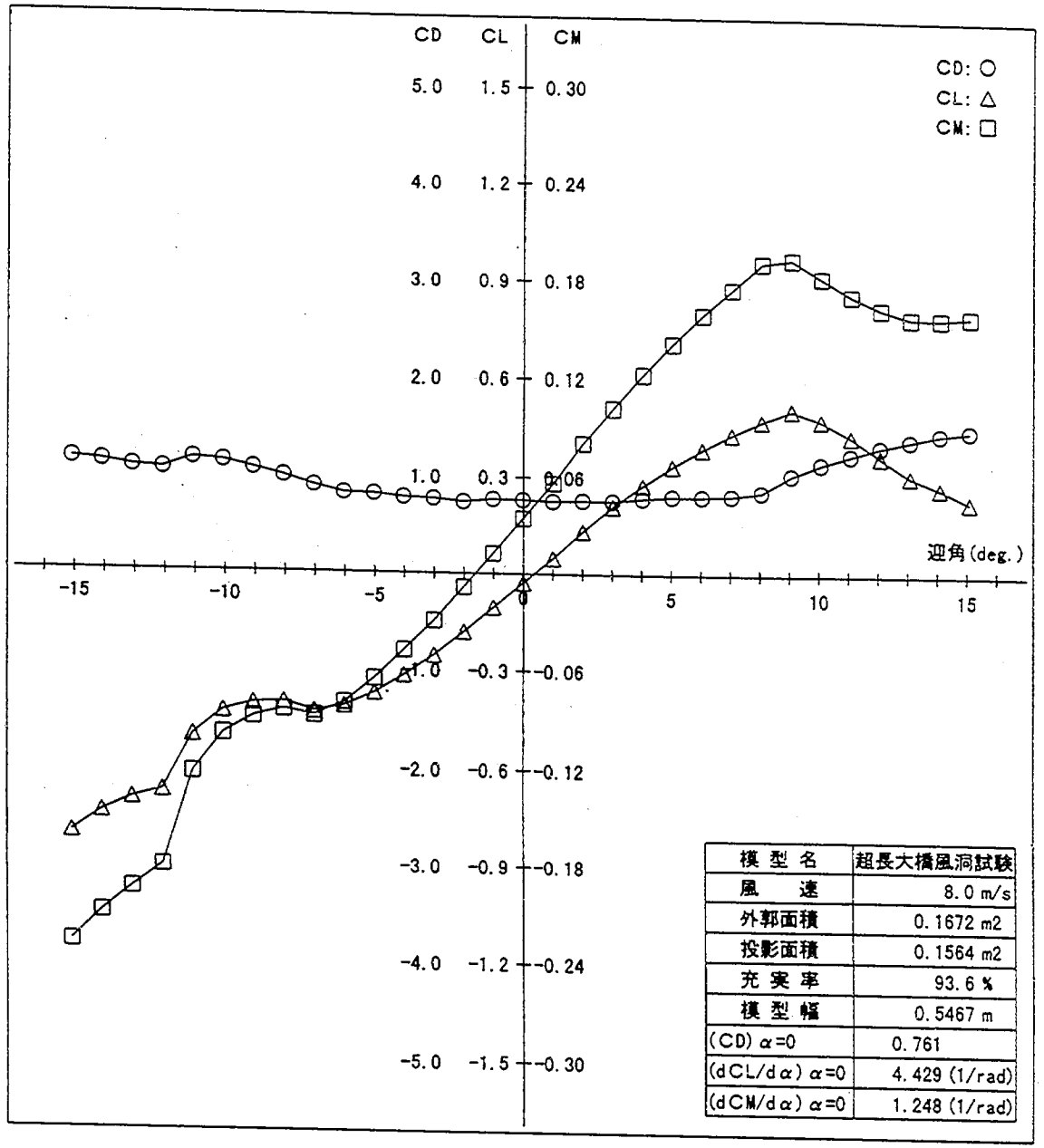
迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.167	-0.766	-0.2149
-14	1.149	-0.732	-0.2006
-13	1.305	-0.516	-0.1290
-12	1.308	-0.454	-0.1065
-11	1.293	-0.396	-0.0886
-10	1.246	-0.350	-0.0738
-9	1.177	-0.306	-0.0607
-8	1.101	-0.279	-0.0509
-7	0.977	-0.294	-0.0510
-6	0.878	-0.357	-0.0632
-5	0.793	-0.360	-0.0613
-4	0.751	-0.304	-0.0456
-3	0.778	-0.237	-0.0275
-2	0.751	-0.165	-0.0077
-1	0.740	-0.094	0.0125
0	0.756	-0.017	0.0345
1	0.719	0.065	0.0569
2	0.716	0.145	0.0791
3	0.734	0.223	0.1000
4	0.759	0.293	0.1191
5	0.783	0.351	0.1387
6	0.842	0.404	0.1619
7	0.954	0.488	0.1821
8	1.041	0.507	0.1780
9	1.155	0.466	0.1661
10	1.229	0.409	0.1559
11	1.298	0.363	0.1510
12	1.362	0.313	0.1487
13	1.438	0.275	0.1492
14	1.493	0.223	0.1513
15	1.514	0.185	0.1544

図－3.2.2.5(3) 三分力試験結果［改良断面D(フェアリングD＋上・下面バリア) 風速8m/s］



迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.129	-0.800	-0.2273
-14	1.102	-0.747	-0.2112
-13	1.080	-0.713	-0.1965
-12	1.129	-0.625	-0.1600
-11	1.208	-0.444	-0.1041
-10	1.170	-0.380	-0.0845
-9	1.099	-0.345	-0.0722
-8	1.009	-0.358	-0.0716
-7	0.895	-0.409	-0.0819
-6	0.828	-0.417	-0.0810
-5	0.788	-0.375	-0.0682
-4	0.772	-0.316	-0.0505
-3	0.761	-0.259	-0.0326
-2	0.759	-0.188	-0.0124
-1	0.759	-0.114	0.0091
0	0.761	-0.039	0.0312
1	0.761	0.040	0.0538
2	0.762	0.121	0.0769
3	0.760	0.201	0.0995
4	0.755	0.278	0.1208
5	0.788	0.340	0.1408
6	0.866	0.401	0.1653
7	0.957	0.483	0.1803
8	1.055	0.481	0.1729
9	1.149	0.438	0.1616
10	1.231	0.382	0.1534
11	1.303	0.324	0.1484
12	1.378	0.287	0.1478
13	1.422	0.233	0.1487
14	1.461	0.187	0.1514
15	1.482	0.139	0.1554

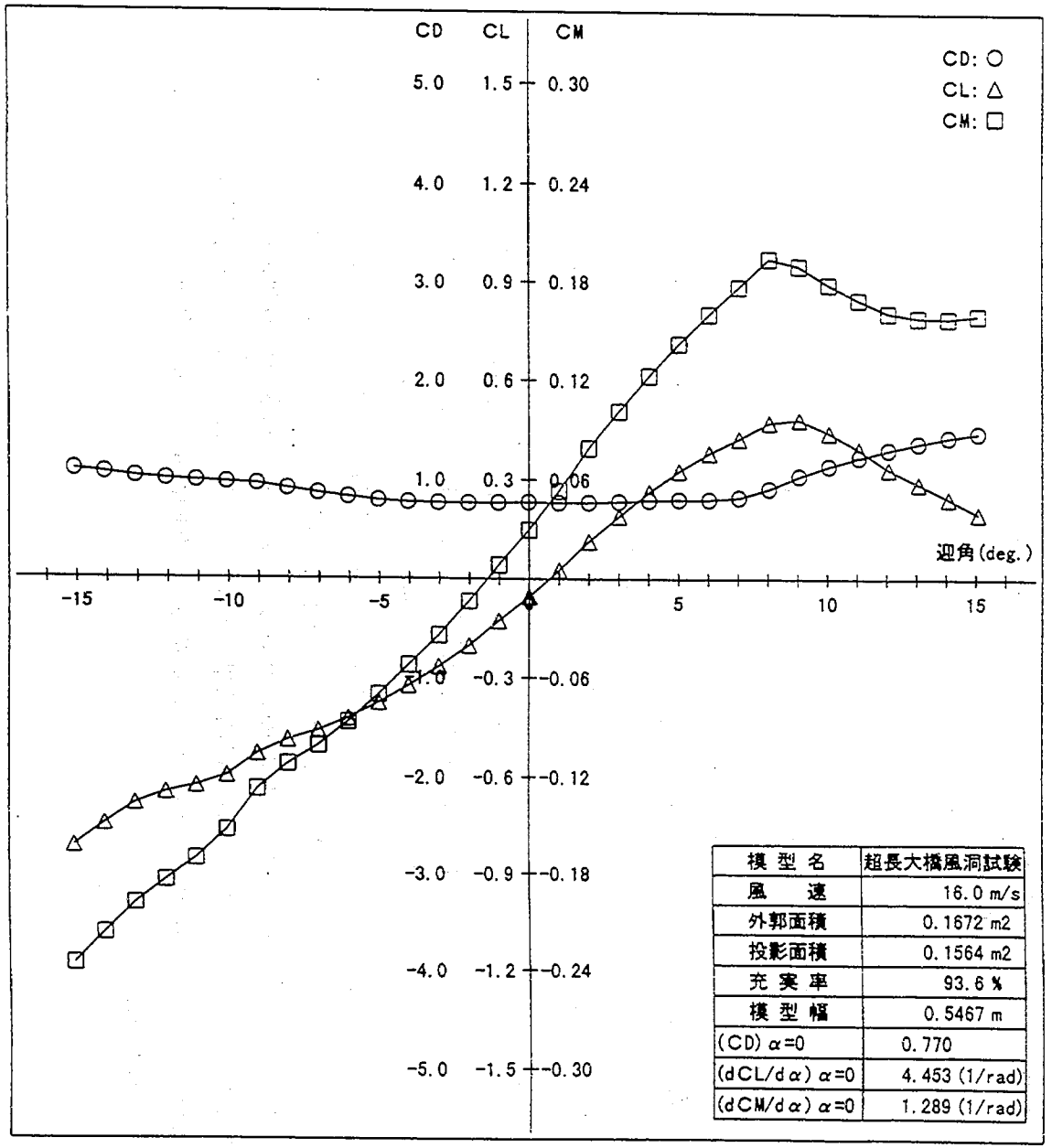
図－3.2.2.5(4) 三分力試験結果 [改良断面D(フェアリングD＋上・下面バリア) 風速16m/s]



模型名	超長大橋風洞試験
風速	8.0 m/s
外郭面積	0.1672 m2
投影面積	0.1564 m2
充実率	93.6 %
模型幅	0.5467 m
(CD) α=0	0.761
(dCL/dα) α=0	4.429 (1/rad)
(dCM/dα) α=0	1.248 (1/rad)

迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.146	-0.804	-0.2286
-14	1.120	-0.739	-0.2106
-13	1.072	-0.696	-0.1953
-12	1.052	-0.672	-0.1812
-11	1.158	-0.503	-0.1231
-10	1.135	-0.431	-0.0996
-9	1.066	-0.406	-0.0894
-8	0.990	-0.402	-0.0849
-7	0.894	-0.429	-0.0882
-6	0.819	-0.412	-0.0802
-5	0.814	-0.371	-0.0654
-4	0.783	-0.316	-0.0478
-3	0.771	-0.254	-0.0297
-2	0.741	-0.182	-0.0088
-1	0.768	-0.106	0.0127
0	0.761	-0.029	0.0342
1	0.748	0.049	0.0562
2	0.758	0.133	0.0810
3	0.754	0.210	0.1028
4	0.785	0.276	0.1228
5	0.806	0.337	0.1415
6	0.809	0.389	0.1589
7	0.816	0.436	0.1750
8	0.858	0.478	0.1915
9	1.037	0.512	0.1938
10	1.153	0.479	0.1824
11	1.242	0.429	0.1713
12	1.325	0.368	0.1630
13	1.396	0.308	0.1576
14	1.459	0.271	0.1572
15	1.496	0.228	0.1588

図－3.2.2.5(5) 三分力試験結果 [改良断面E(フェアリングE＋上・下面バリア) 風速8m/s]



迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15	1.092	-0.818	-0.2364
-14	1.062	-0.749	-0.2179
-13	1.026	-0.685	-0.1990
-12	1.000	-0.650	-0.1847
-11	0.983	-0.630	-0.1710
-10	0.969	-0.599	-0.1533
-9	0.952	-0.533	-0.1278
-8	0.907	-0.491	-0.1125
-7	0.860	-0.464	-0.1014
-6	0.822	-0.427	-0.0874
-5	0.788	-0.378	-0.0704
-4	0.769	-0.325	-0.0526
-3	0.763	-0.268	-0.0346
-2	0.762	-0.204	-0.0138
-1	0.763	-0.130	0.0081
0	0.770	-0.055	0.0295
1	0.765	0.026	0.0531
2	0.767	0.113	0.0790
3	0.777	0.189	0.1012
4	0.788	0.263	0.1226
5	0.799	0.327	0.1420
6	0.800	0.381	0.1600
7	0.819	0.424	0.1771
8	0.909	0.473	0.1943
9	1.042	0.481	0.1901
10	1.142	0.442	0.1789
11	1.231	0.394	0.1693
12	1.303	0.333	0.1615
13	1.369	0.289	0.1586
14	1.429	0.244	0.1581
15	1.472	0.198	0.1601

図－3.2.2.5(6) 三分力試験結果 [改良断面E(フェアリングE＋上・下面バリア) 風速16m/s]

の風速依存性が見られる箇所もあるものの、迎角０°付近では風速依存性が見られないことがわかる。また、迎角０°の抗力係数を比較すると、上、下面バリアの設置により、約２割大きくなっていることがわかる。また、桁先端フェアリング形状のみ異なっている改良断面Ｄ、改良断面Ｅの抗力係数（迎角０°）の差は数％と小さい。

4)　非定常空気力試験

三分力試験を実施した一箱桁断面の３断面について、非定常空気力試験を実施した。非定常空気力係数は以下に示す定式化に基づいている。試験方法はダミー重錘を用いた強制加振法に用いた。試験迎角は、風速 80m/s における静的ねじれ角を考慮したフラッター解析が可能となる様に適宜選定した。各断面の試験迎角を表－3.2.2.3 に示す。

表－3.2.2.3　　非定常空気力試験ケース一覧表

断面	試験迎角											
	−6°	−5°	−4°	−3°	−2°	−1°	0°	+1°	+2°	+3°	+4°	+5°
基本断面		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
改良断面D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
改良断面E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

（備考）○が試験した迎角を示す。

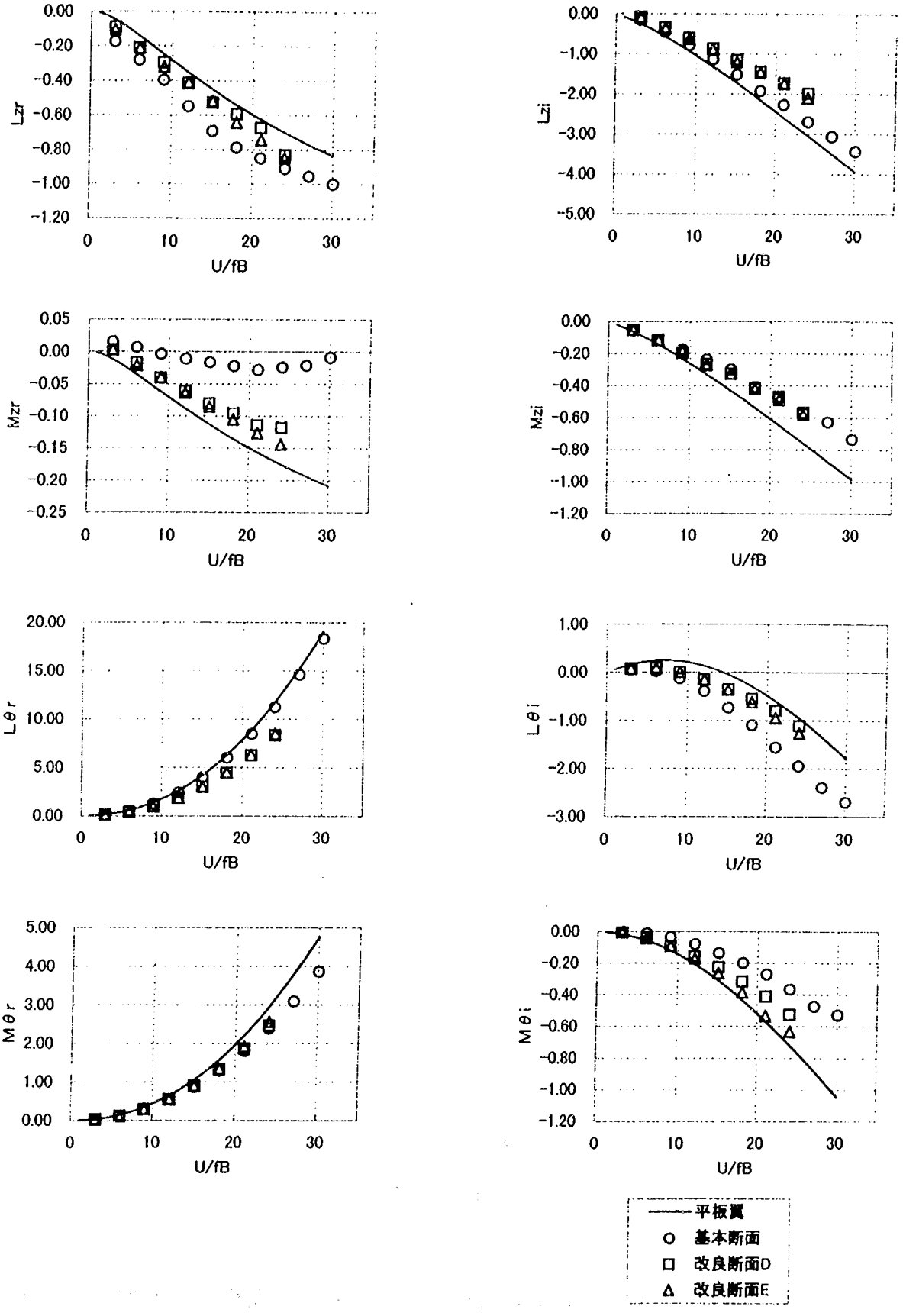
【非定常空気力係数の定式化】

$$L = \pi\rho B^3\omega^2\left[L_{zr}\frac{Z}{B} + L_{zi}\frac{\dot{Z}}{B\omega} + L_{\theta r}\theta + L_{\theta i}\frac{\dot{\theta}}{\omega}\right] \qquad (3.\ 2.\ 2.\ 1\ a)$$

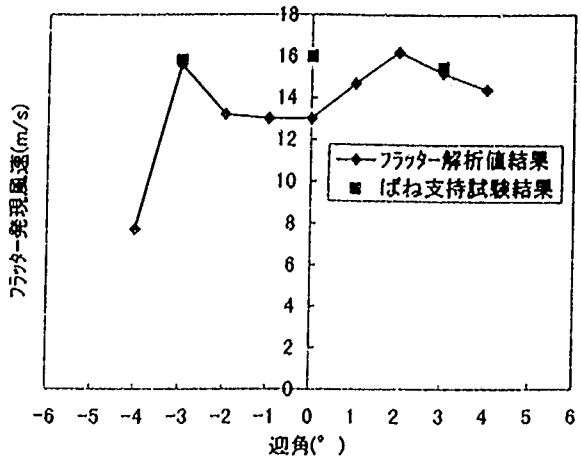
$$M = \pi\rho B^4\omega^2\left[M_{zr}\frac{Z}{B} + M_{zi}\frac{\dot{Z}}{B\omega} + M_{\theta r}\theta + M_{\theta i}\frac{\dot{\theta}}{\omega}\right] \qquad (3.\ 2.\ 2.\ 1\ b)$$

Ｚ、θはたわみ、ねじれ変位（たわみは上向き正、ねじれは頭上げ正）、ρは空気密度、Ｂは桁幅、ωは固有円振動数を示す。L_{zr}、L_{zi}、M_{zr}、M_{zi}、$L_{\theta r}$、$L_{\theta i}$、$M_{\theta r}$、$M_{\theta i}$が非定常空気力係数である。係数の添字ｚ、θは関与する変位の種類（ｚ：たわみ加振、θ：ねじれ加振）を、ｒ、ｉはそれぞれ変位同相成分、速度同相成分であることを表す。

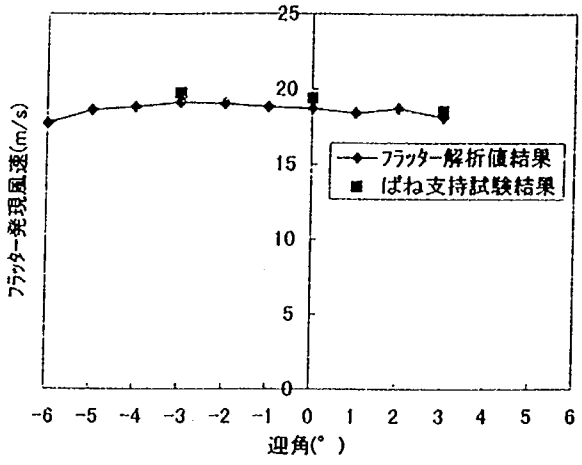
試験結果を、迎角０°のみ図－3.2.2.6 に示す。同図には、平板翼理論値も合わせて示した。これより、フラッター特性に大きな影響を及ぼす$M_{\theta i}$において、改良断面Ｄ、Ｅの方が基本断面よりも小さくなっており、平板翼理論値に近づいていることがわかる。上記試験結果をもとに、各断面毎に２次元フラッター解析を実施し、迎角とフラッター発現風速の関係を導き、前述のばね支持試験結果と比較した。その結果を図－3.2.2.7 に示す。同図(a)が基本断面、(b)が改良断面Ｄ、(c)が改良断面Ｅである。これより、基本断面の迎角０°では、ばね支持試験結果と２次元フラッター解析結果にやや差異が見られるものの、それ以外のケースではほぼ一致していることがわかる。したがって、今回測定した非定常空気力係数は概ね妥当であると判断できる。



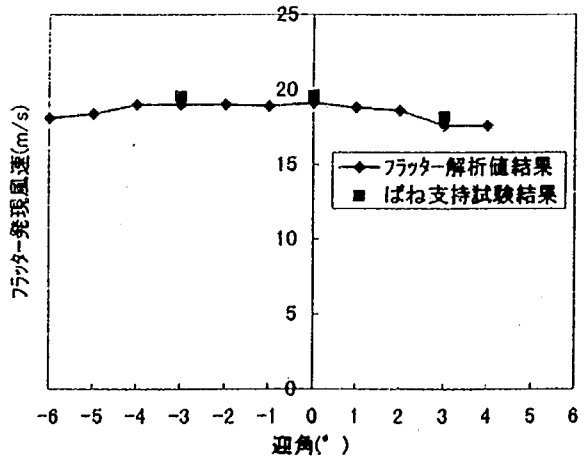
図－3.2.2.6 非定常空気力試験結果(迎角0°)



(a)　基本断面



(b)　改良断面 D



(c)　改良断面 E

図－3.2.2.7　　ばね支持試験結果とフラッター解析結果の比較

(3) 中央に狭い開口部を設けた一箱桁断面の耐風性検討

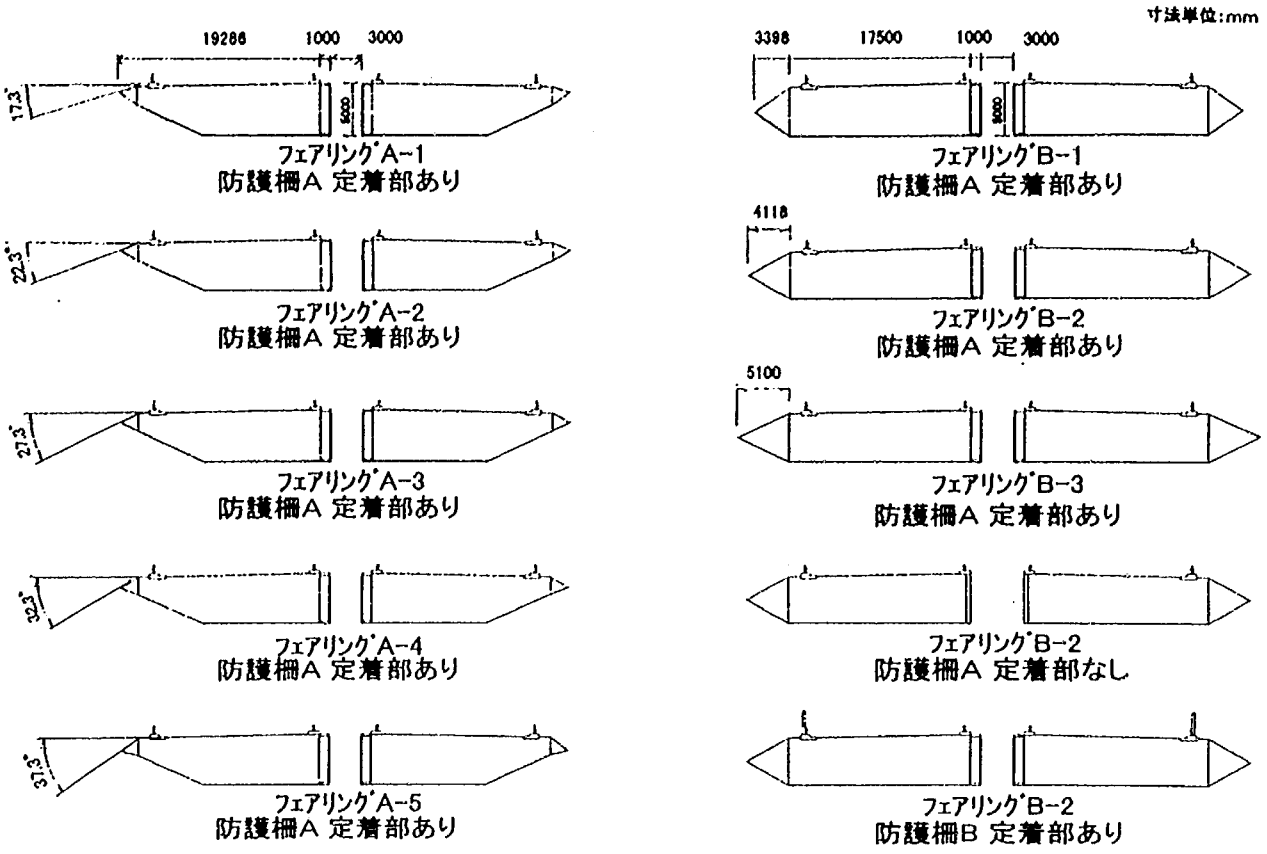
1)検討方法

中央に狭い開口部を設けた一箱桁断面を検討した。対象とする桁断面形状を図－3.2.2.8 に示す。本断面は、桁中央の開口部近傍と桁端近傍部にメインケーブルを吊るす構造（４本ケーブル吊橋）を想定している。基本断面形状は、開口部を設けない一箱桁断面に準じているが、桁高５m、桁幅については、中央に３m程度の開口部とハンガー定着部を設けたため、約 43.6m と約 2.6m ほど桁幅が大きくなっている。本断面では、フェアリング先端形状（桁幅は不変とし、上部角度θ_uで定義された形状）を変化させたケースを実施した。また、フェアリング形状、開口部の大きさを変更したケース、さらに、防護柵を設置したケースを実施した。検討方法は、測定された非定常空気力を用いた２次元フラッター解析とした。解析結果は、フラッター解析により算定されたフラッター発現風速V_f形と Selberg 式によるフラッター発現風速V_{sel}との比で定義される形状補正係数κ（$= V_f / V_{sel}$）で整理した。質量、振動数等の解析条件は、前述のばね支持試験条件に準じた。

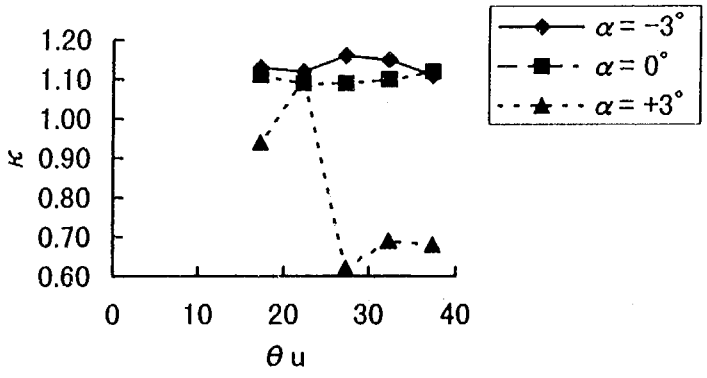
2)検討結果

フェアリング先端形状の検討結果を図-3.2.2.9 に示す。これより、中央開口部がある場合には、迎角０°におけるκはどのケースでも 1.1 程度であり、前述の中央開口部のない一箱桁断面よりもフラッター発現風速が１割程度高いことがわかる。フェアリング先端形状の影響については、中央開口部がない一箱桁断面では迎角特性が比較的良好であったθ_u=32.3°、37.3°のケースで迎角＋３°におけるフラッター特性が悪化していること、逆にθ_uの小さい形状の迎角特性は改善されており、開口部の設置によりフェアリング先端形状の影響が全く異なっていることがわかる。また、フェアリングの形状の検討結果、開口部距離の検討結果、防護柵を変更した結果をまとめて図-3.2.2.10 に示す。これより、今回検討したフェアリング形状の迎角０°におけるκはどれも 1.1 程度であり、フェアリング先端形状の検討を実施した場合と同程度であることがわかる。また、センターのケーブル定着部を外して開口部を大きくした場合にはκは 1.2 程度となり、耐風性の向上が確認できるが、防護柵を設置した場合にはκは約 1.0 であり、耐風性が悪化することがわかる。迎角特性については、防護柵を設置したケースが他の断面と大きく異なっており、他のケースで最もκが小さくなる迎角＋３°でκ=1.4 程度と大きくなっている反面、－３°では 0.6 にまで小さくなっていることがわかる。

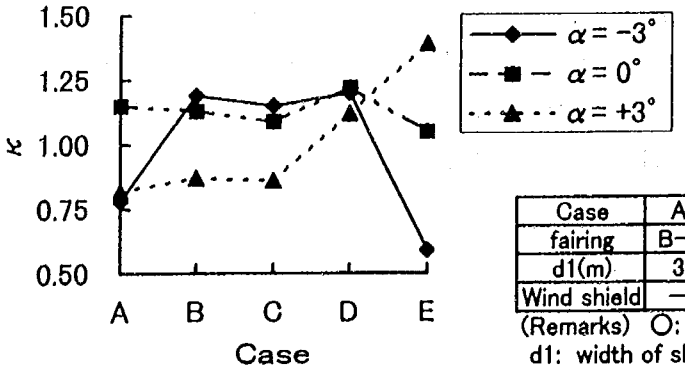
以上、今回検討した断面では、最も耐風性の良い断面でκが概ね 1.2 程度となった。この値は、開口部を設けないでセンターバリア、先端フェアリング形状で耐風安定化対策を施した場合よりもやや大きいものの、開口部を設けることにより耐風性を大幅に向上させてはおらず、今後、更なる検討が必要とされる。



図－3.2.2.8　　中央に狭い開口部を設けた一箱桁断面の検討断面形状一覧



図－3.2.2.9　　先端フェアリング形状の効果
（中央に狭い開口部を設けた一箱桁断面）



Case	A	B	C	D	E
fairing	B-1	B-2	B-3	B-2	B-2
d1(m)	3	3	3	5	3
Wind shield	—	—	—	—	○

(Remarks) ○: installed —: not installed
d1: width of slot in the center of the girder

図－3.2.2.10　　フェアリング形状等の効果

(4) まとめ

桁高７ｍ一箱桁断面の耐風性をばね支持試験により検討し、さらに耐風性の良好な断面について、三分力試験、非定常空気力試験を実施した。また、中央に小さな開口部を設けた桁高５ｍ一箱桁断面の非定常空気力試験を実施し、その空気力を基に２次元フラッター解析を実施した。

得られた結果を以下に示す。

＜桁高７ｍの一箱桁断面について＞

1) フラッター特性に影響を与えるねじれ剛性を変更させない耐風安定化対策として、上面バリア、下面バリア、フェアリング先端形状を選定した。これらの対策を適宜選択することにより、フラッター発現風速を高くさせることができ、その程度は２割程度であった。

2) バリアを過剰に高くすると、たわみの不規則振動が大きくなるため、バリアの高さの選定には注意を要する。

3) たわみ渦励振はバリア設置により大幅に低減するものの、ねじれ渦励振については、バリアの設置により、振幅が大きくなる傾向も見られた。今後、より詳細な検討が必要とされる。

4) 基本断面、耐風性が良好であった断面（改良断面Ｄ、Ｅ）の３断面について、三分力試験を実施した。上、下面バリアの設置により、迎角０° における抗力係数は約２割大きくなる。

5) 上記３断面について、非定常空気力を測定した。測定された非定常空気力を用いた 2 次元フラッター解析を実施し、ばね支持試験結果と比較した。その結果、基本断面の迎角０° を除いた全てのケースで両者はほぼ一致した。したがって、今回測定した非定常空気力係数の妥当性は概ね妥当であると判断できる。

＜桁高５ｍの小さな中央開口部を設けた一箱桁断面について＞

1) 桁先端フェアリング形状の検討の結果、桁先端フェアリング形状の影響は開口部を設けない一箱桁断面とは異なり、先端部を桁上面に上げた形状が最も耐風性が良い。

2) 今回検討した断面の範囲では、最も耐風性の良い断面の κ は 1.2 程度となった。この値は、開口部を設けないでセンターバリア、先端フェアリング形状で耐風安定化対策を施した場合よりもやや大きいものの、開口部を設けることにより耐風性を大幅に向上させてはおらず、今後、更なる検討が必要とされる。

３．２．３　開口部を持つ１箱桁の耐風性検討

支間の長大化により、耐風安定性の確保が困難になる箱桁の耐風安定性を向上させるべく、３種の桁高に対して（７ｍ、５ｍ、3.5ｍ）開口部の設置を含めた検討を実施した。また、この中で強風時の車両走行性の改善を目的とした透過型遮風壁の検討を併せて実施した。

具体的には、ばね支持試験により部分模型の耐フラッター性の評価を実施し、この中で耐風安定性の良好な断面に対して、後に実施する＜変形解析+フラッター解析＞に必要な三分力試験を実施した。最終的に、フラッター解析（直接法）を実施し、３次元系での安定評価を行うと共に、水平ステイ・対角ステイ等の構造的対策との併用効果の評価を行った。

本試験で使用した風洞は、住友重機械工業㈱所有の回流式ゲッチンゲン型風洞（閉鎖型測定洞：幅 2.0m ×高さ 3.0m ×全長 15.0m）で、風洞模型の縮尺は 1/65 の２次元剛体部分模型を使用した。試験で対象とした実橋標準モデルの動的諸元は、重量 40tf/m、極慣性 1094ts ^{2}であり、模型の所要値は重量 1.575　kgf/ms ^{2}/model、極慣性 0.09990　kgfms ^{2}/model を目標としているが、模型の製作上、所要値を若干上回っているものもある。

（１）ばね支持試験結果（桁高 7m、5m、3.5m）

１）桁高７ｍ案

ばね支持試験に用いた桁の断面図を図-3.2.3.1に、試験結果一覧を表-3.2.3.1にそれぞれ示す。本検討では、７ｍ桁高の箱桁を対象に開口部、透過型フェアリングの設置ならびに外端フェアリング形状の変更による耐風性の検討を実施した。試験は迎角０°を基本に、耐風性が良好な断面は他の迎角±３°を照査した。

以下に結果をまとめる。

○　開口部（①～⑤）を有する遮風壁設置断面は、風速 V=0 ～ 90m/s の範囲でフラッターの発振は認められないものの、振幅１°～３°の渦励振が発生する。
○　透過型フェアリング設置断面では、開口部を②～④に設けると耐風性が向上する。
○　開口部（①～⑤）を有する遮風壁設置断面に透過型フェアリングを設置した場合、迎角０°で渦励振を発生させ、迎角-3 °の渦励振低減と高風速の空力減衰を増加させる効果がある。
○　開口部（①④⑤）を有する遮風壁設置断面は、端部フェアリング形状によりフラッター発振風速は大きく変化する。最も耐風性が良好なフェアリング形状はＢタイプであった。

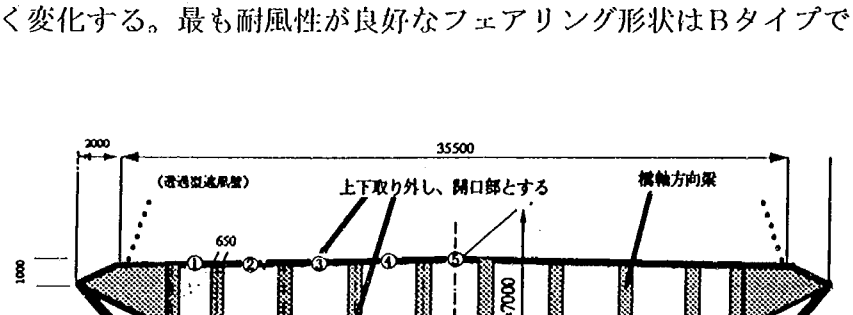


図-3.2.3.1　基本断面（h=7m）

表-3.2.3.1　ばね支持試験結果（h=7m）

	開口部	透過型遮風壁	透過型フェアリング	－3°(m/s)	0°(m/s)	＋3°(m/s)
H7-1	――――	○	○		35.0	
H7-2	①　⑤	○	――		25.0	
H7-3	①②③④⑤	○	――	OK 渦3°	OK	OK 渦1°
H7-4	①②③④⑤	○	○	OK 渦1°	OK 渦1°	OK 渦1°
H7-5	①②　⑤	○	○		36.7	
H7-6	①　④⑤	○	○	OK 渦1.6°	OK	OK 渦1.5°
H7-7	①　④⑤	○	――		13.6	
H7-8	①　④⑤ （フェアリングB）	○	――		OK 渦1.5°	

下線はV cr ＞ 70m/s

2）桁高5m案

ばね支持試験に用いた桁の断面図を図-3.2.3.2に、試験結果一覧を表-3.2.3.2にそれぞれ示す。基本形の特性は比較的良好で、後で示す3.5 m桁高案と大きな相違はないが、開口部を設置した状態での安定度はこの桁高5m案の方が高いようである。ここでは、耐風性の改善策として開口部、透過型遮風壁＋水平導流板、センターバリヤとの組合せを検討した。

以下に結果をまとめる。

○　開口部無し断面における透過型遮風壁の設置は、遮風壁上端からの剥離流れの影響で正迎角の耐風性を悪化させるが水平導流板設置により剥離流れをコントロールし耐風性の改善が可能となり、基本断面（H5-1）と同等の耐風性が確保出来ることが判った。

○　遮風壁設置断面における開口部の設置は、迎角0°および-3°の耐風性を向上させる効果があり、さらに水平導流板の設置により迎角0°および+3°の改善が可能となる。

○　遮風壁設置断面の外端フェアリングをCタイプ（下面の剥離点が上流側になる）に変更した場合、迎角0°および-3°の耐風性が悪化したのは加振力を受ける箱桁の底面が増加したことによると思われる。

○　開口部を有する遮風壁設置断面は、水平導流板およびセンターバリヤの設置により正迎角の耐風性が向上され3迎角ともにフラッター発振風速V cr=75m/s以上が確保できた。

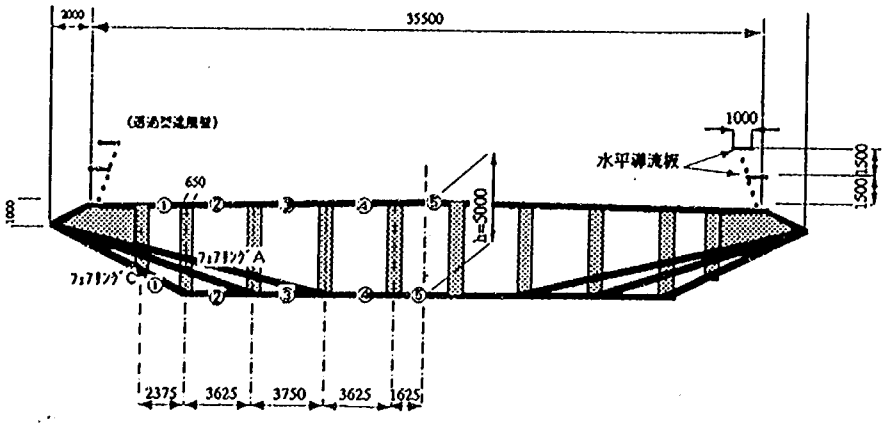


図-3.2.3.2　基本断面（h=5m）

表-3.2.3.2　ばね支持試験結果（h=5m）

	開口部	透過型遮風壁	外端フェアリング	透過型フェアリング	－3°(m/s)	0°(m/s)	＋3°(m/s)
H5-1	——	——	A	——	60.5	60.0	56.7
H5-2	——	○	A	——	60.5	61.6	39.9
H5-3	① ⑤	○	A	——	79.6	75.6	33.5
H5-4	① ⑤	○	C	——	39.7	44.3	31.5
H5-2F	——	○	A	有	58.2	57.1	51.6
H5-3F	① ⑤	○	A	有	78.4	81.6	60.0
H5-3FC センターバリヤ	① ⑤	○	A	有	80.5	87.0	77.2

下線はＶ cr ＞ 70m/s

3）桁高 3.5m 案

ばね支持試験に用いた桁の断面図を図-3.2.3.3に、試験結果一覧を表-3.2.3.3にそれぞれ示す。基本形（H35-1）は迎角による特性の変化も小さく、比較的良好な特性を示している。透過型遮風壁を設置した場合、+3 ° で耐風性が悪化する。さらに開口部を設けると、比較的低風速から渦励振（振幅２° ）が発生する。

以下に結果をまとめる。

○　基本断面（H35-1）は、迎角による特性の変化も小さく、比較的良好な特性を示している。
○　開口部無し断面における透過型遮風壁の設置は、正迎角の耐風性を悪化させる効果となる。
○　遮風壁設置断面における開口部の設置は、迎角 0 ° および-3 ° の耐風性を向上させるが、迎角-3 ° ではトレードオフの関係となる比較的低風速からの渦励振の発生がみられた。

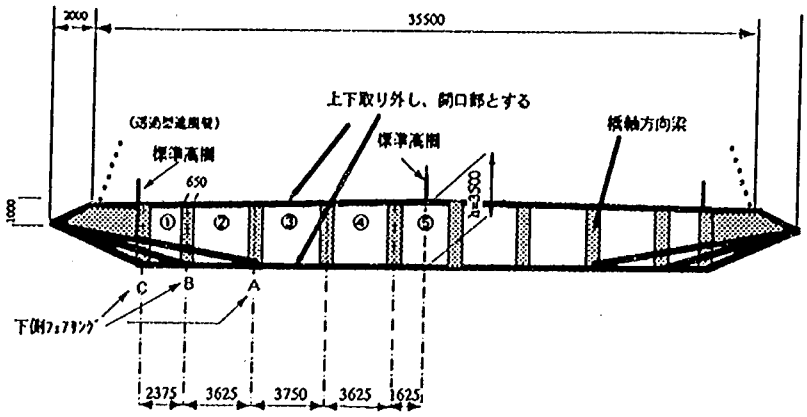
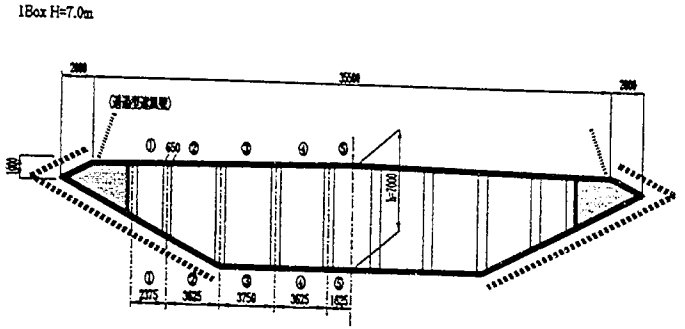


図-3.2.3.3　基本断面（h=3.5m）

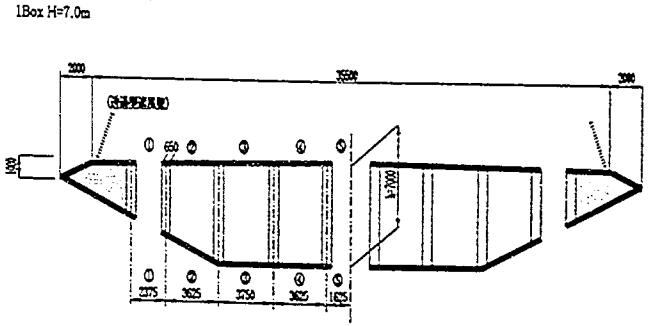
表-3.2.3.3　ばね支持試験結果（h=3.5m）

	開口部	透過型遮風壁	外端フェアリング	透過型フェアリング	－3°(m/s)	0°(m/s)	＋3°(m/s)
H35-1	——	○	A	——	54.8	60.0	57.0
H35-2	——	○	A	——	55.6	61.0	45.7
H35-3	① ⑤	○	A	——	69.4 (38.0 渦)	75.7	46.6



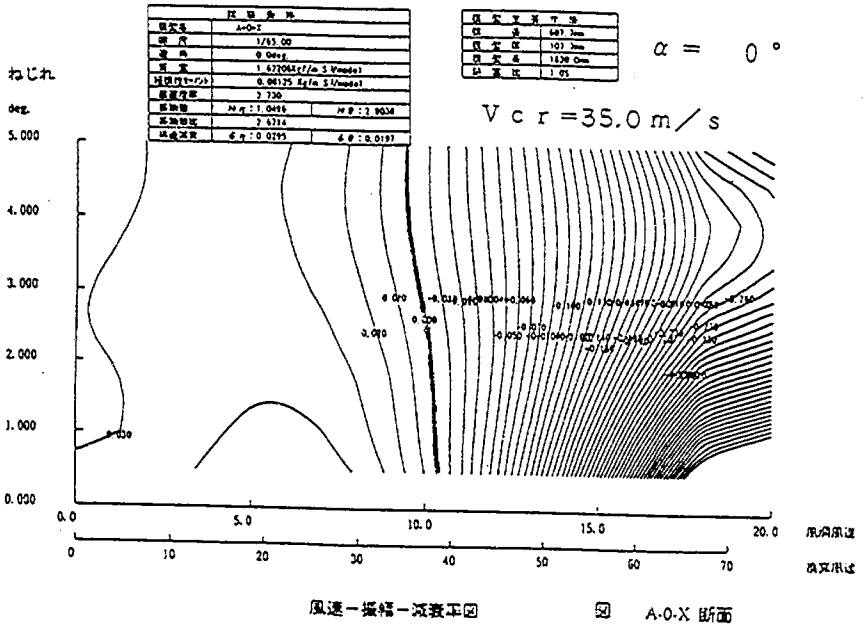
路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図－3.2.3.4　断面図（H７－１）

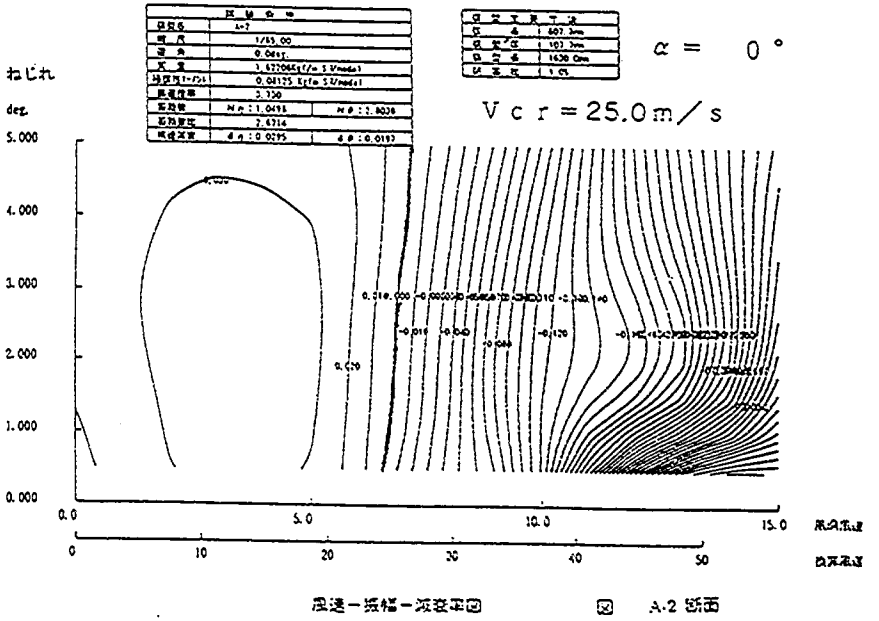


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

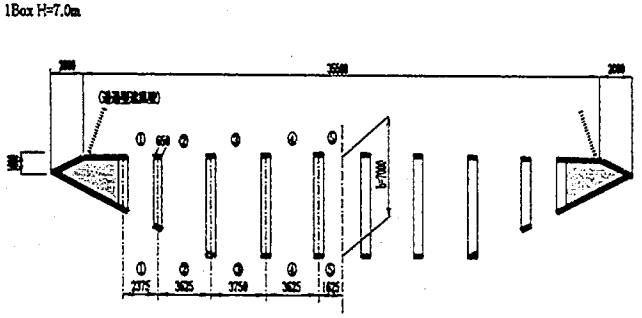
図－3.2.3.6　断面図（H７－２）



図－3.2.3.5　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－１）

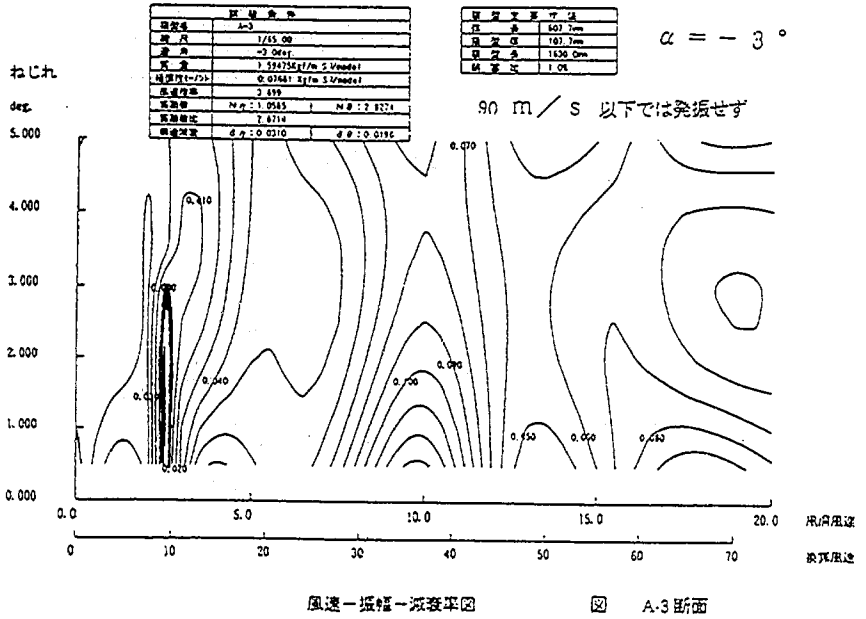


図－3.2.3.7　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－２）

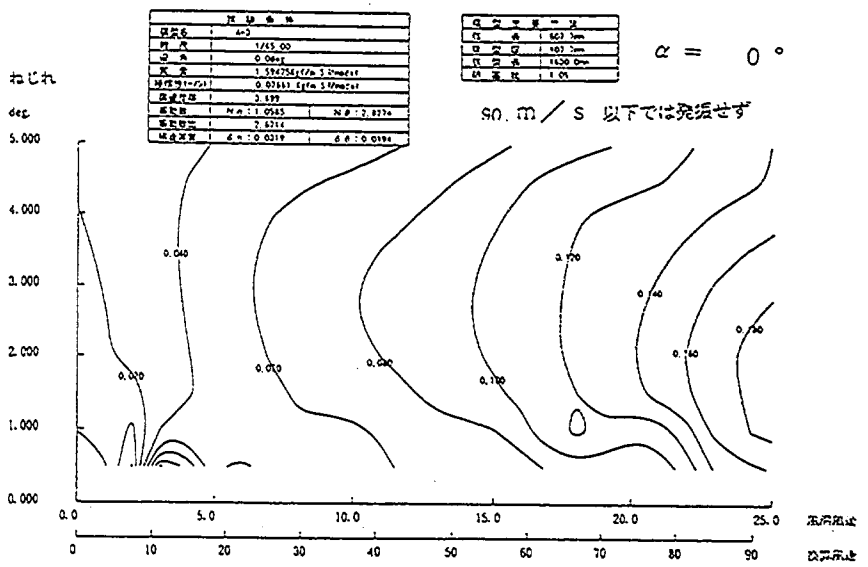


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

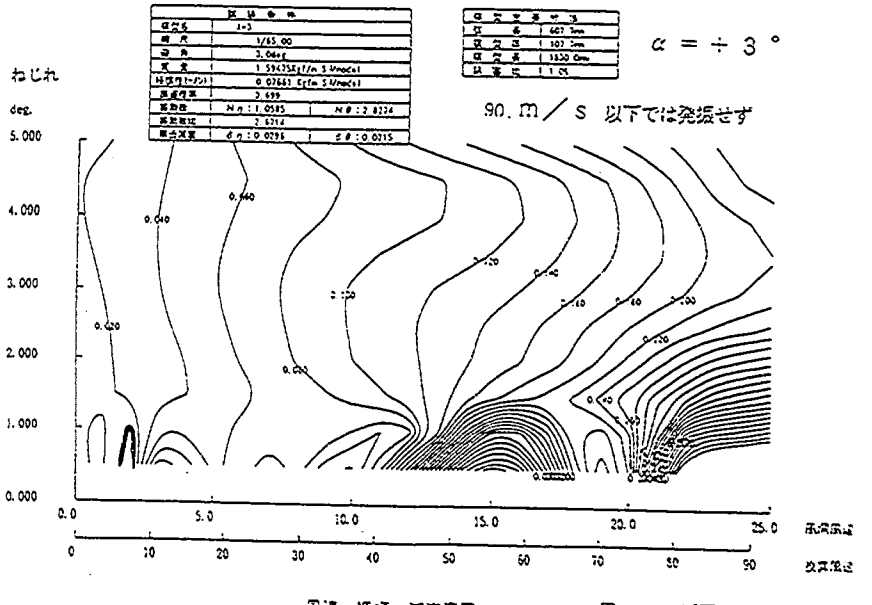
図－3.2.3.8　断面図（H７－３）



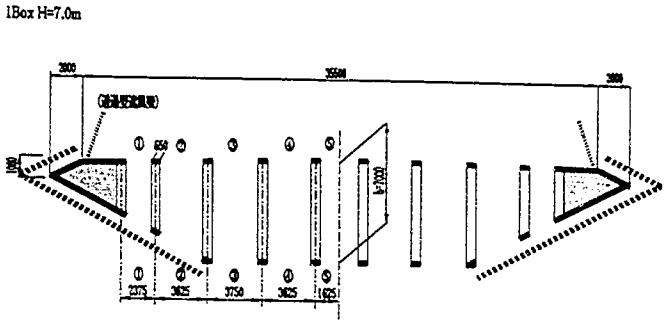
図－3.2.3.9　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－３）



図－3.2.3.10　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－３）

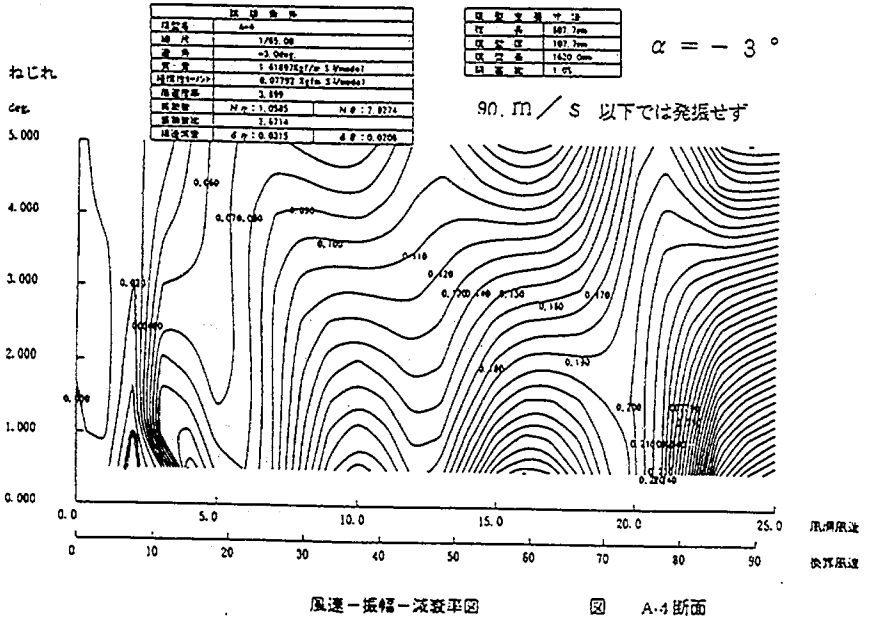


図－3.2.3.11　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－３）

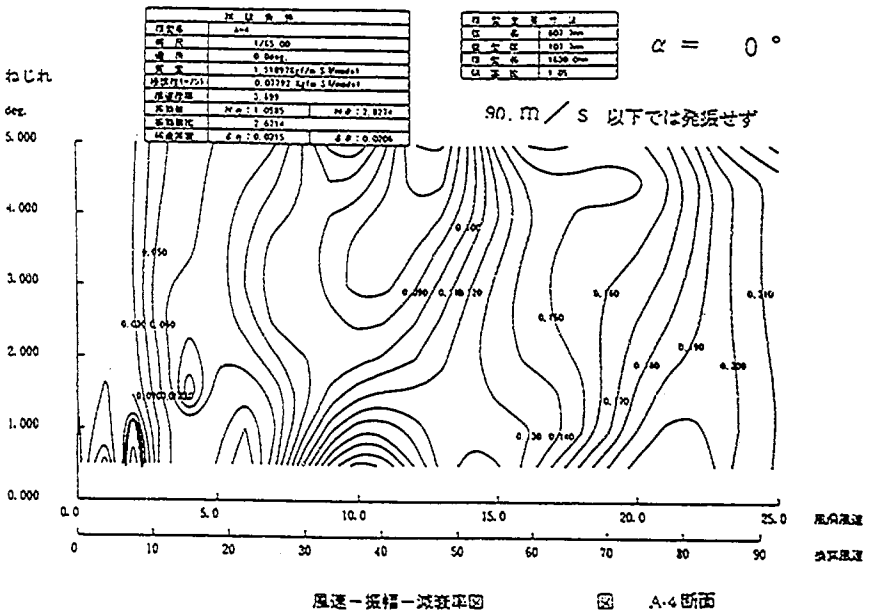


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

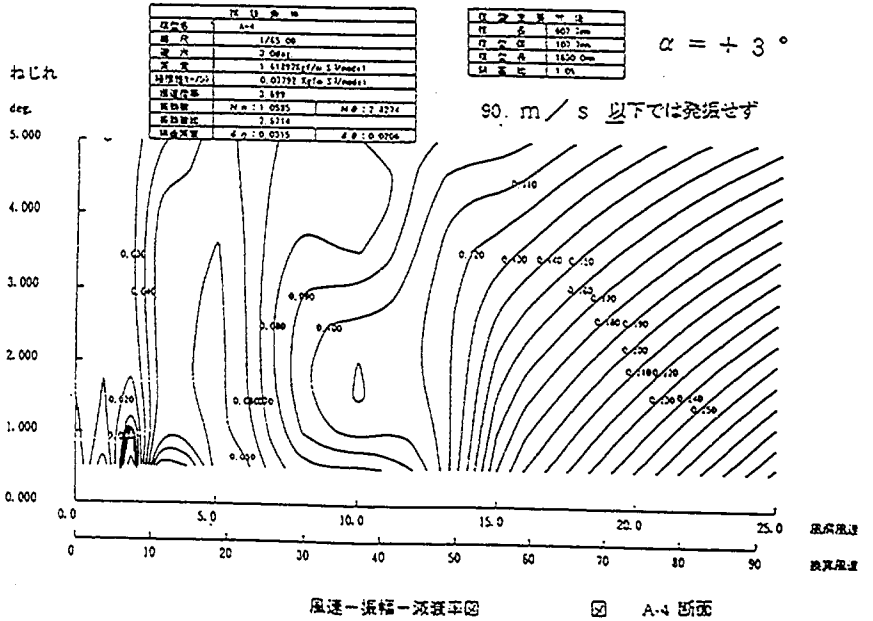
図－3.2.3.12　断面図（H７－４）



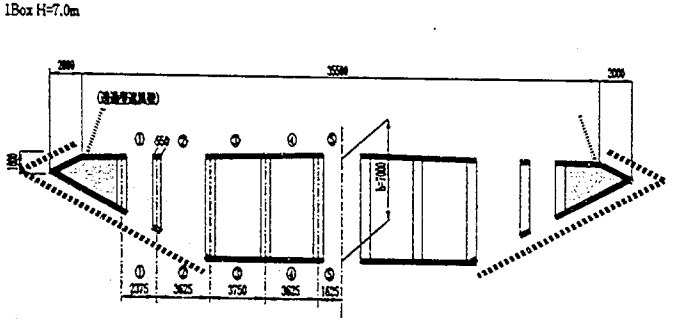
図－3.2.3.13　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－４）



図－3.2.3.14　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－４）

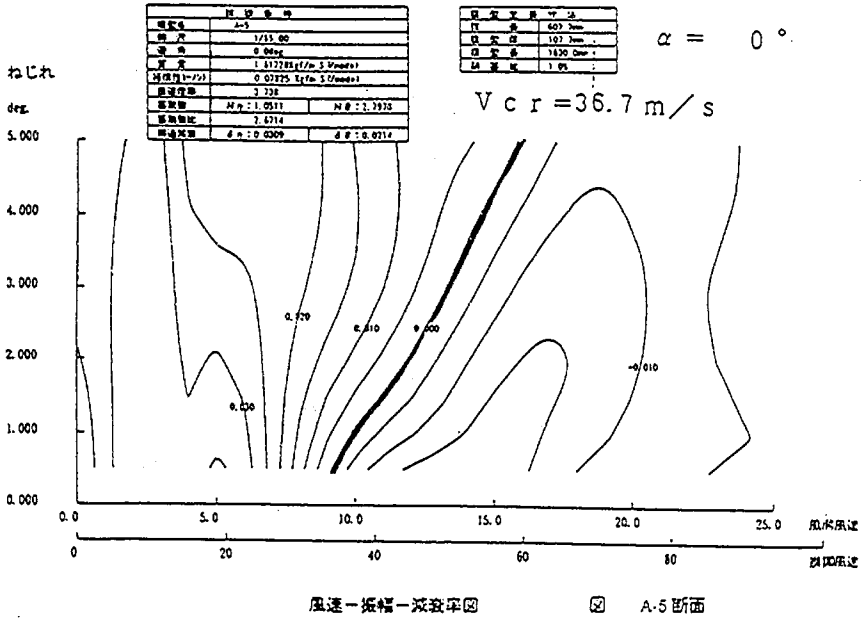


図－3.2.3.15　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－４）



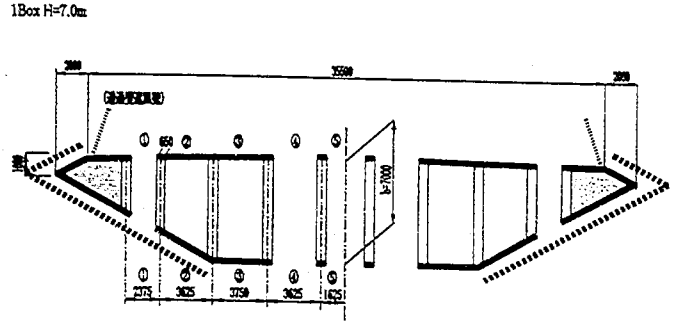
路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図－3.2.3.16　断面図（H７－５）



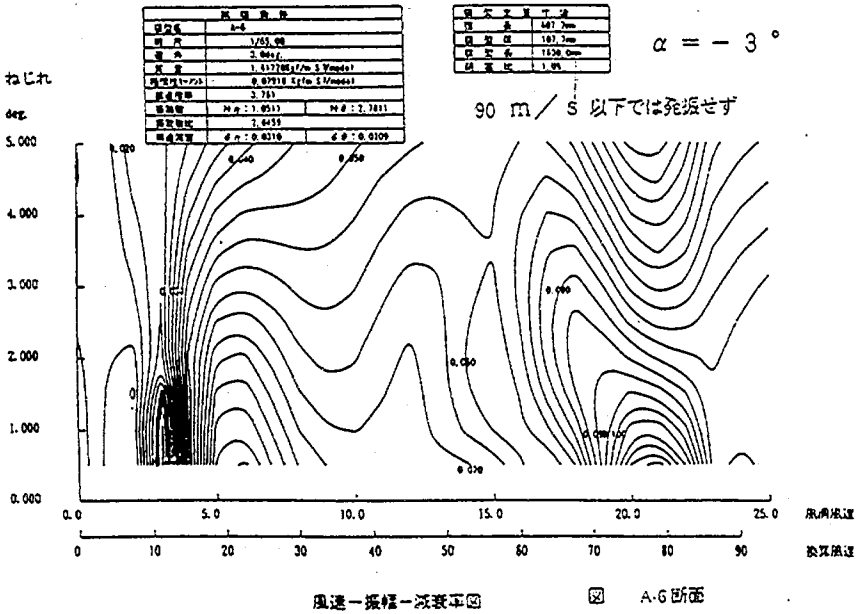
風速－振幅－減衰率図　　図　A-5 断面

図－3.2.3.17　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－５）

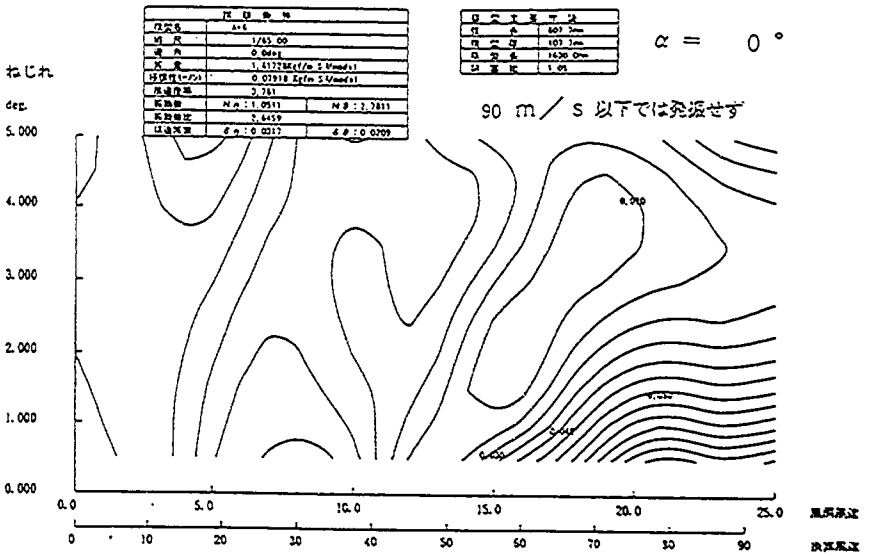


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

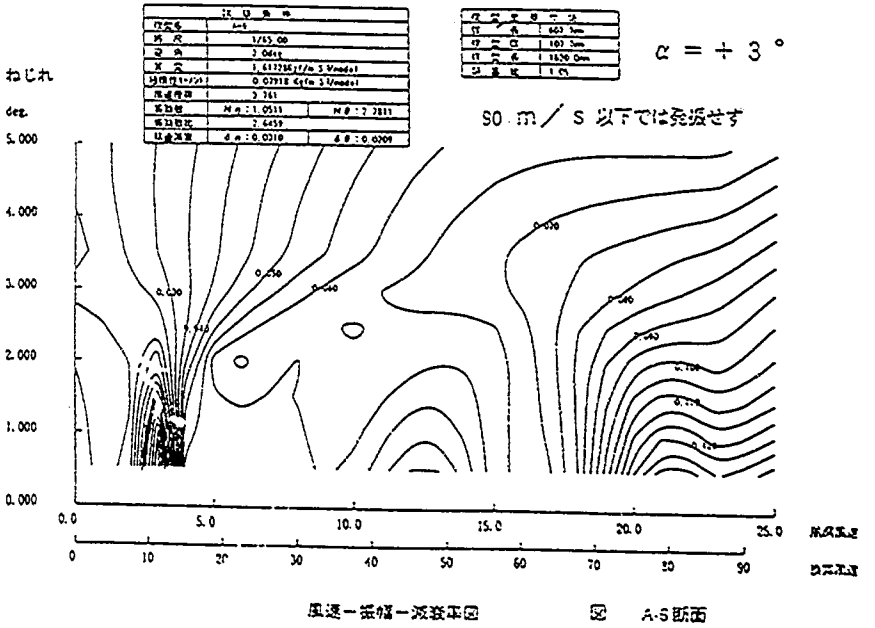
図－3.2.3.18　断面図（H７－６）



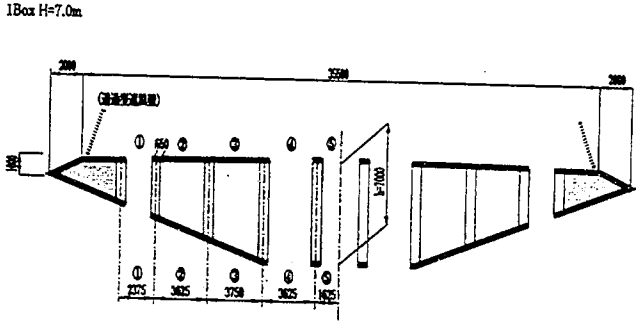
図－3.2.3.19　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－６）



図－3.2.3.20　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－６）

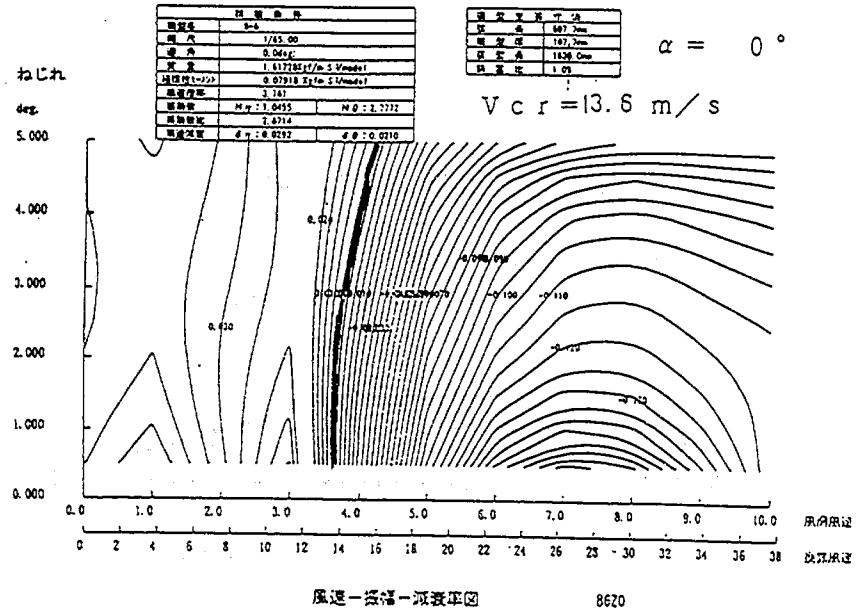


図－3.2.3.21　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－６）

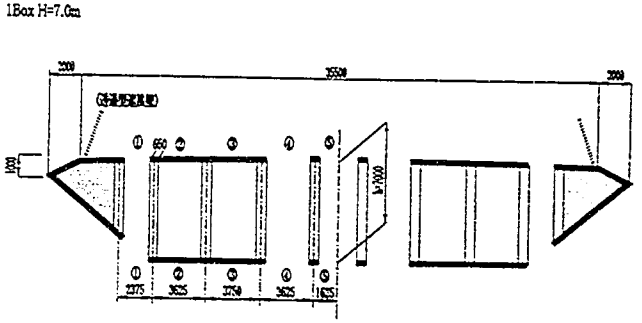


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図－3.2.3.22　断面図（H７－７）

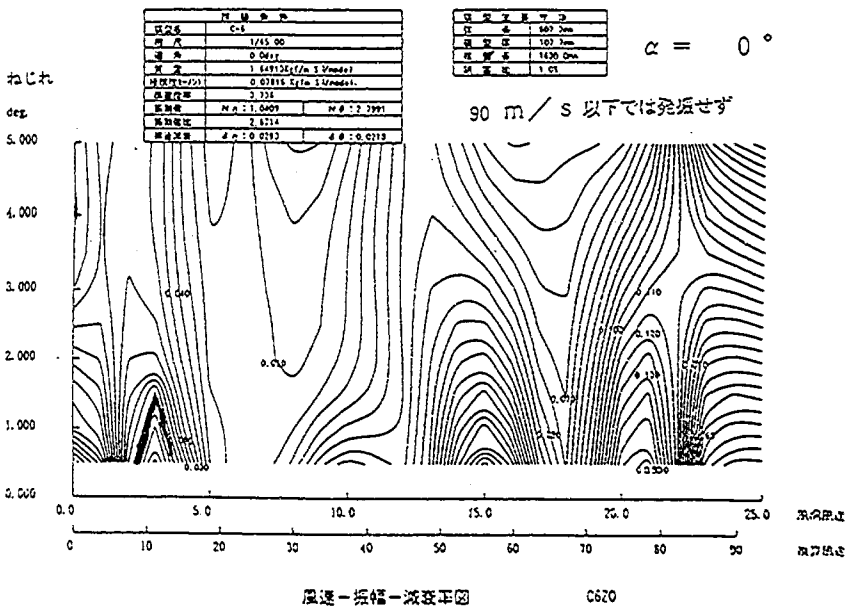


図－3.2.3.23　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－７）



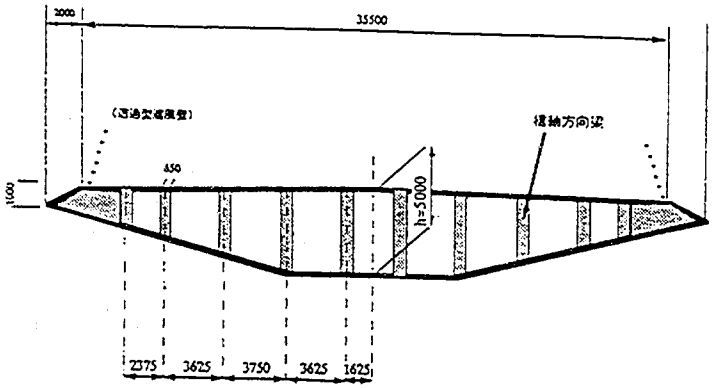
路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図－3.2.3.24　断面図（H７－８）



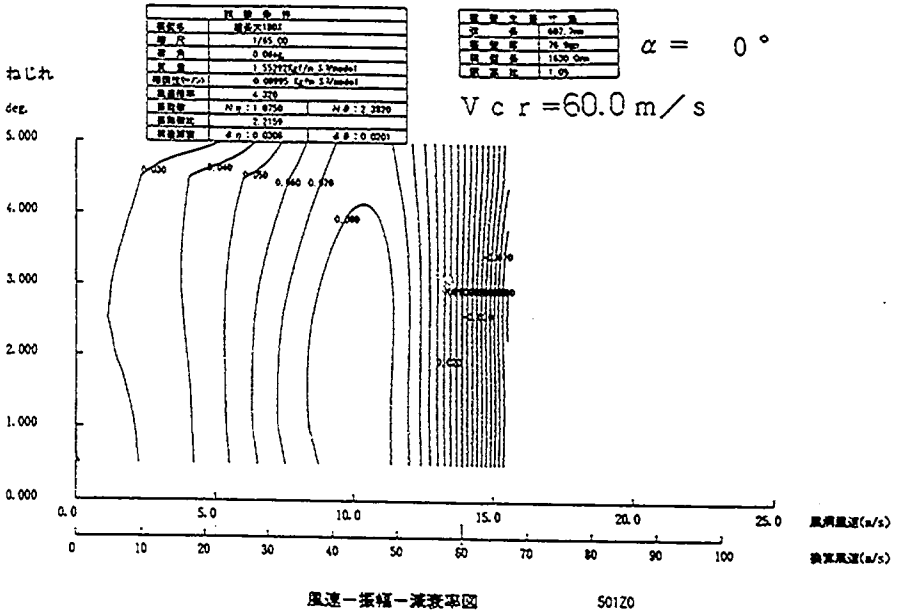
図－3.2.3.25　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H７－８）

18ox、H=5.0m

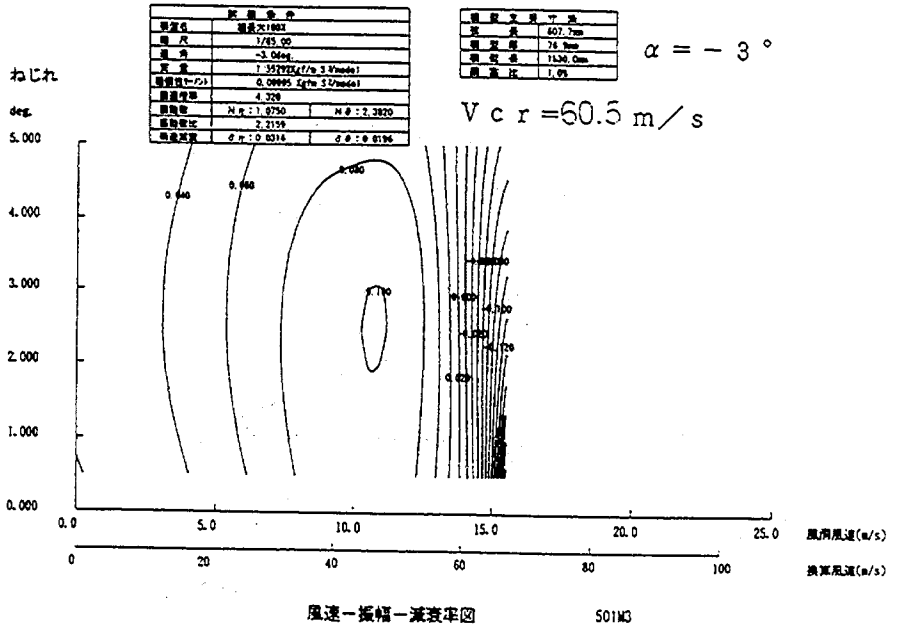


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

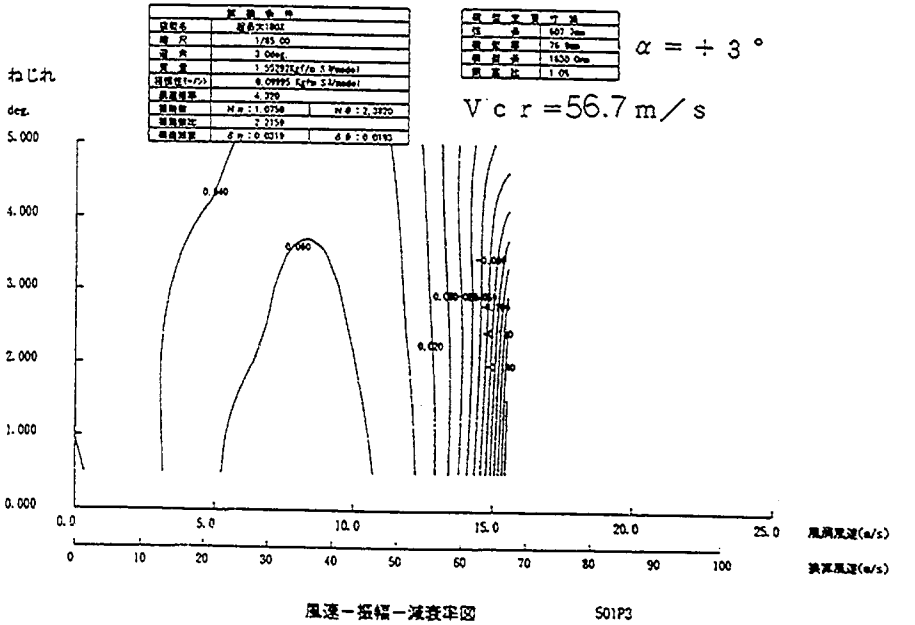
図－3.2.3.26　断面図（H５－１）



図－3.2.3.28　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－１）

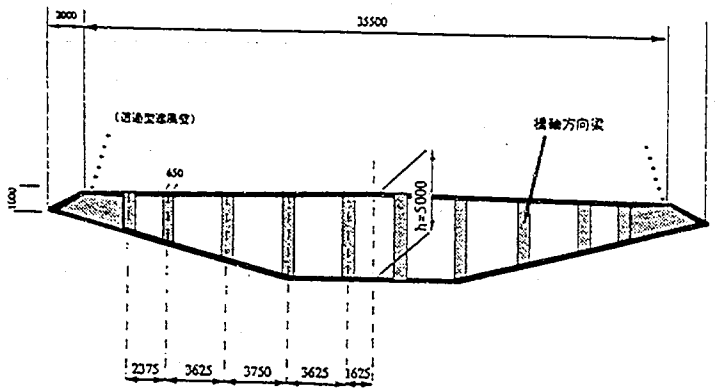


図－3.2.3.27　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－１）



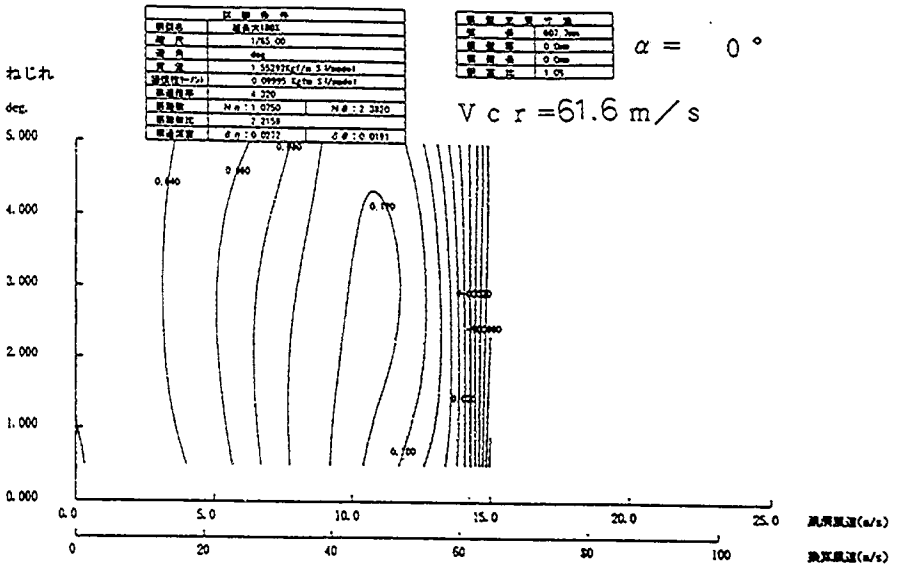
図－3.2.3.29　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－１）

18ox、H=5.0m

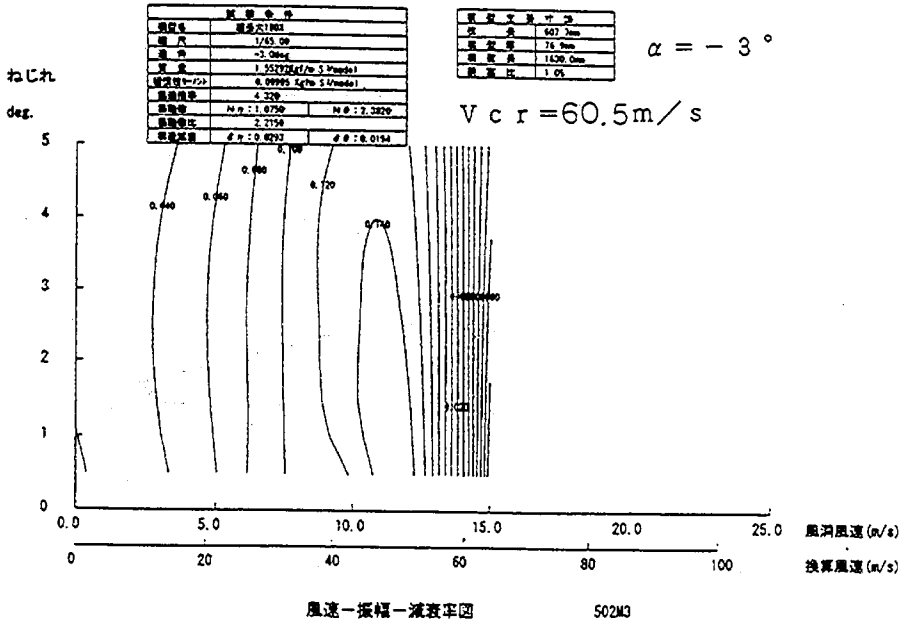


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

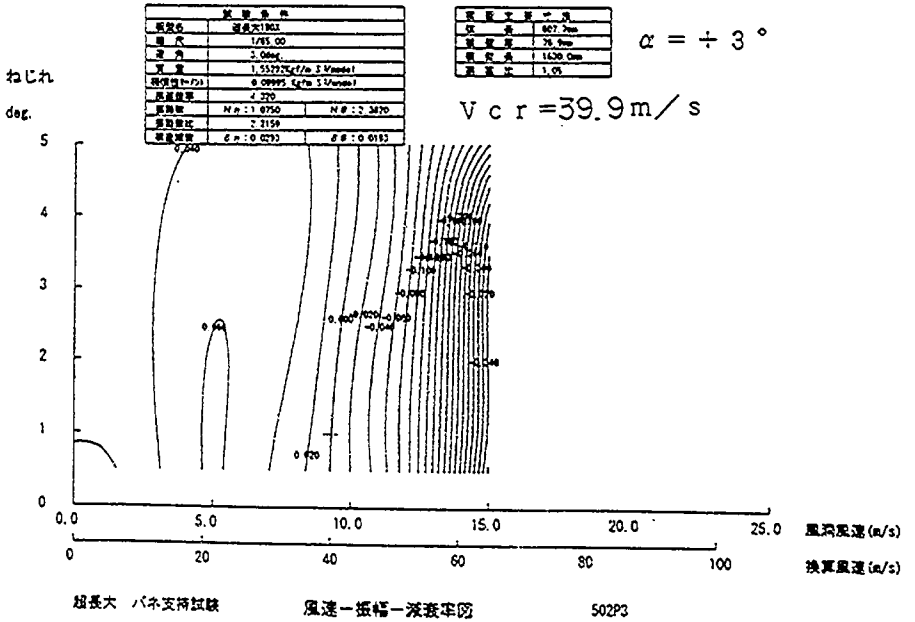
図－3.2.3.30　断面図（H５－２）



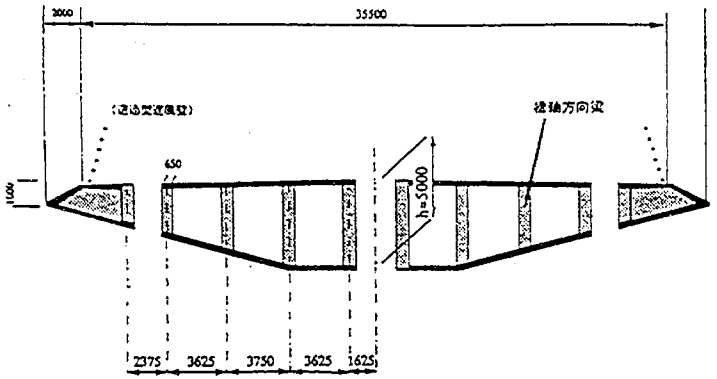
図－3.2.3.32　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２）



図－3.2.3.31　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２）

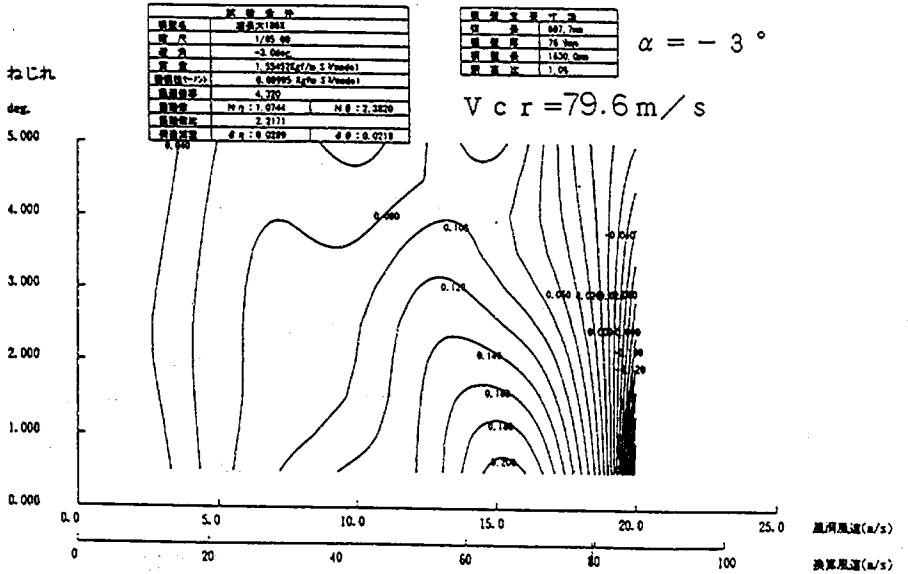


図－3.2.3.33　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２）

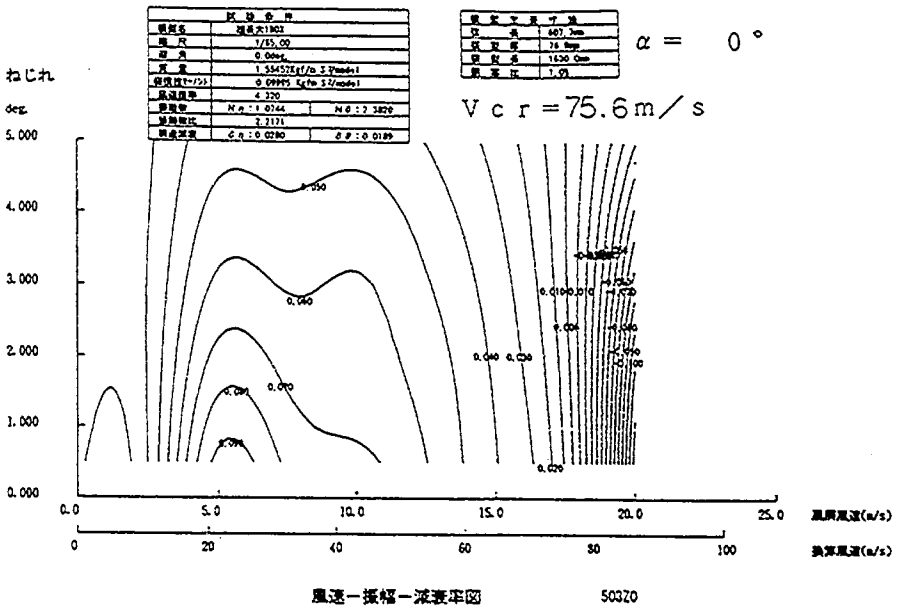


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

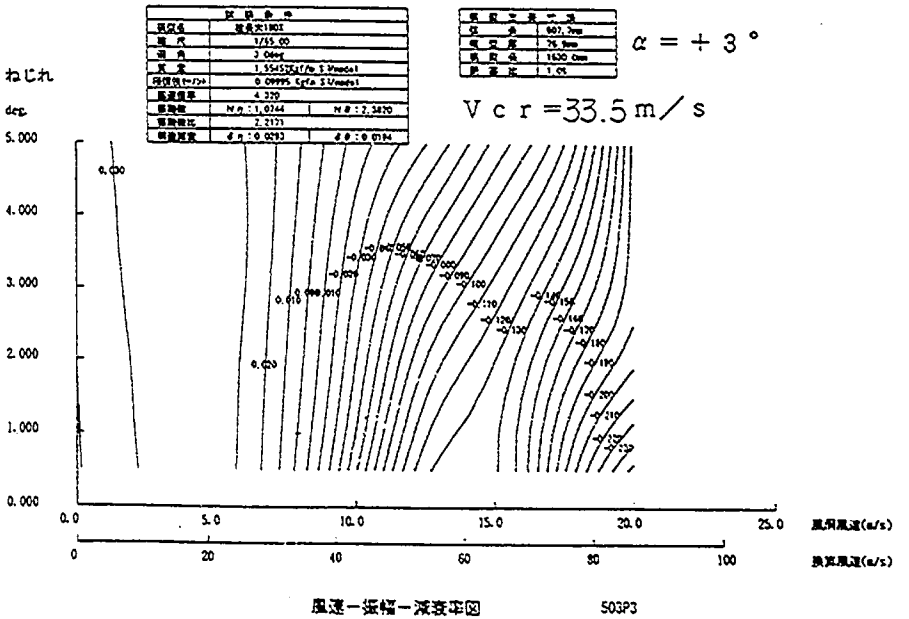
図－3.2.3.34　断面図（H５－３）



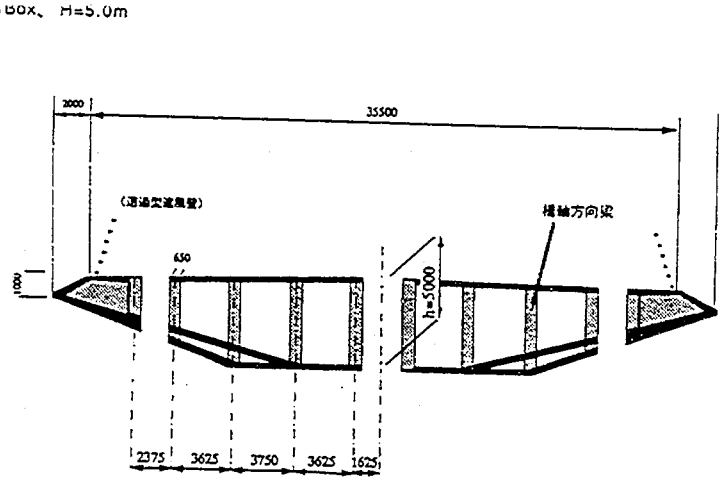
図－3.2.3.35　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３）



図－3.2.3.36　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３）

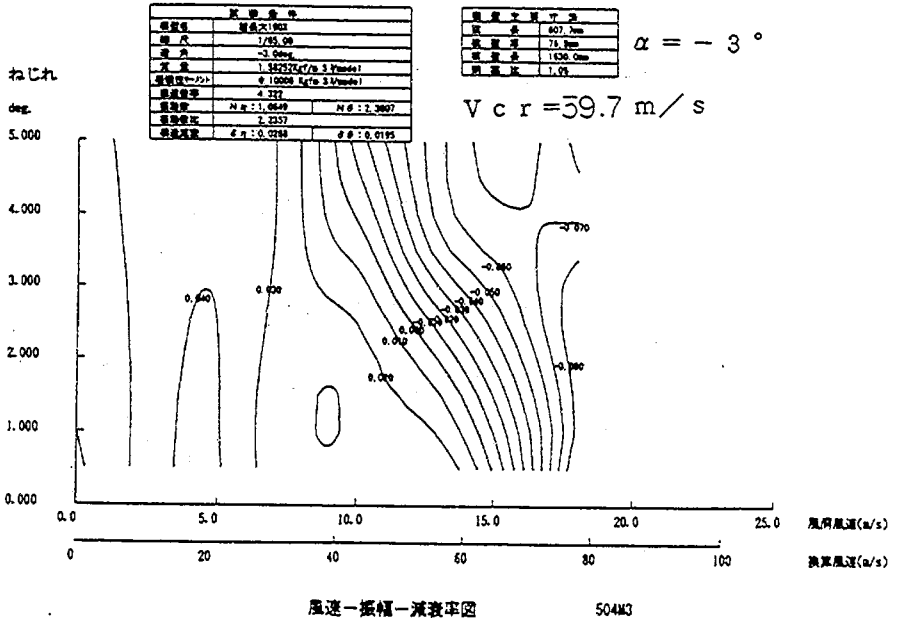


図－3.2.3.37　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３）

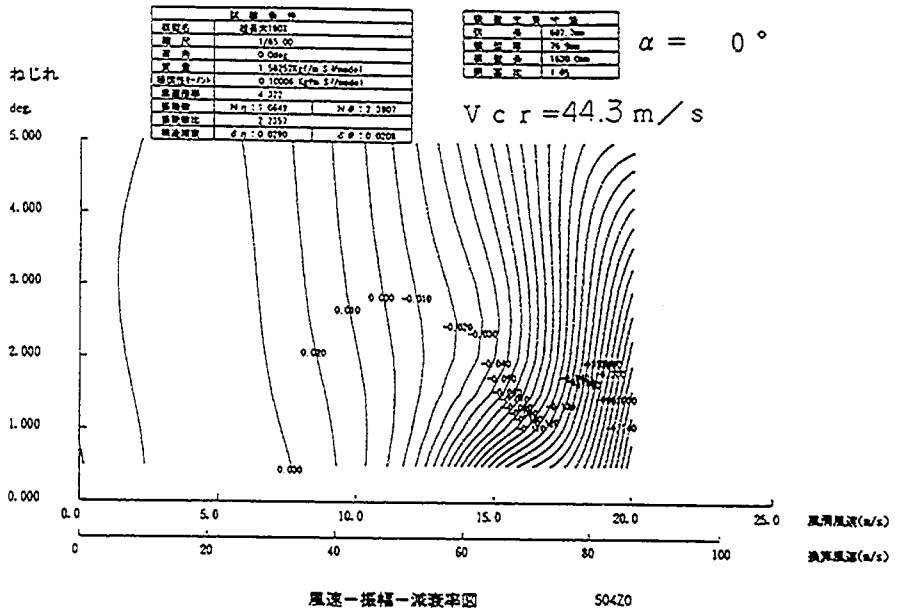


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

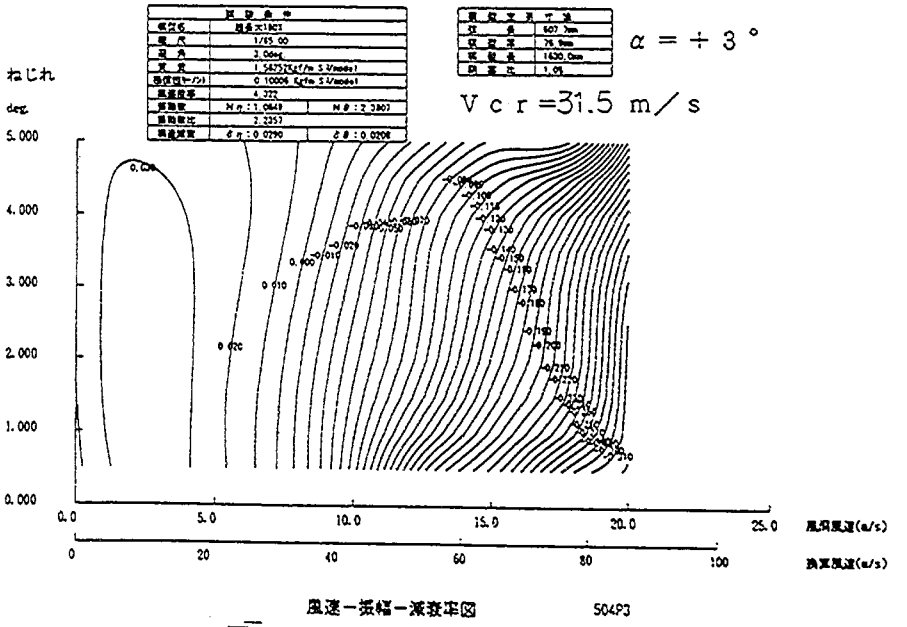
図－3.2.3.38　断面図（H５－４）



図－3.2.3.39　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－４）

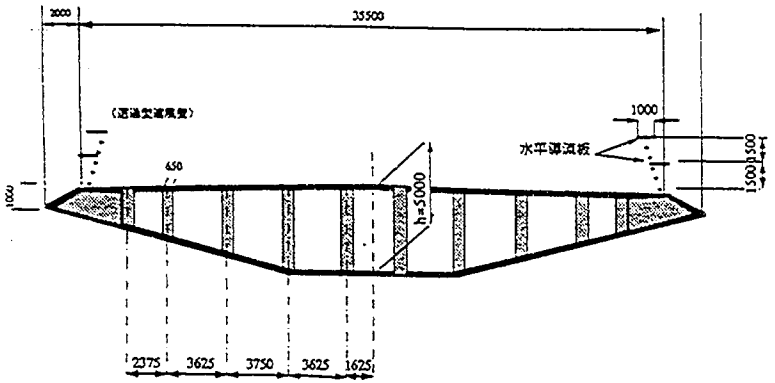


図－3.2.3.40　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－４）



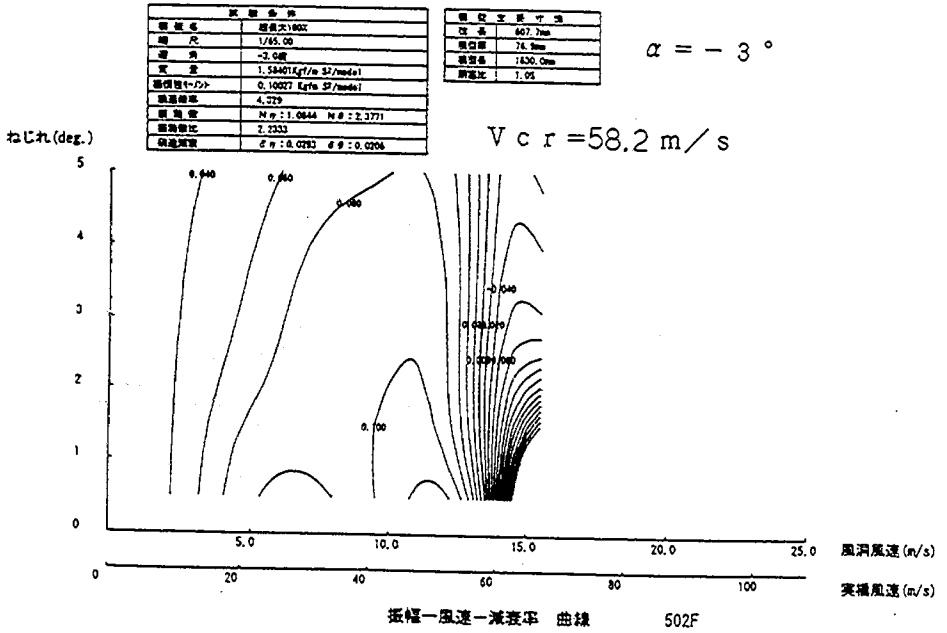
図－3.2.3.41　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－４）

18ox、H=5.0m

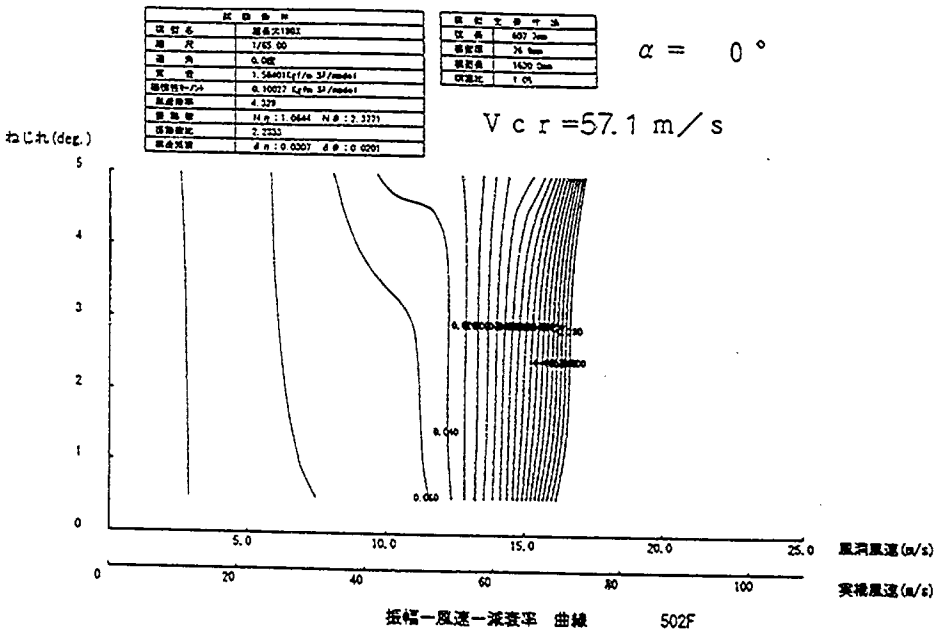


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

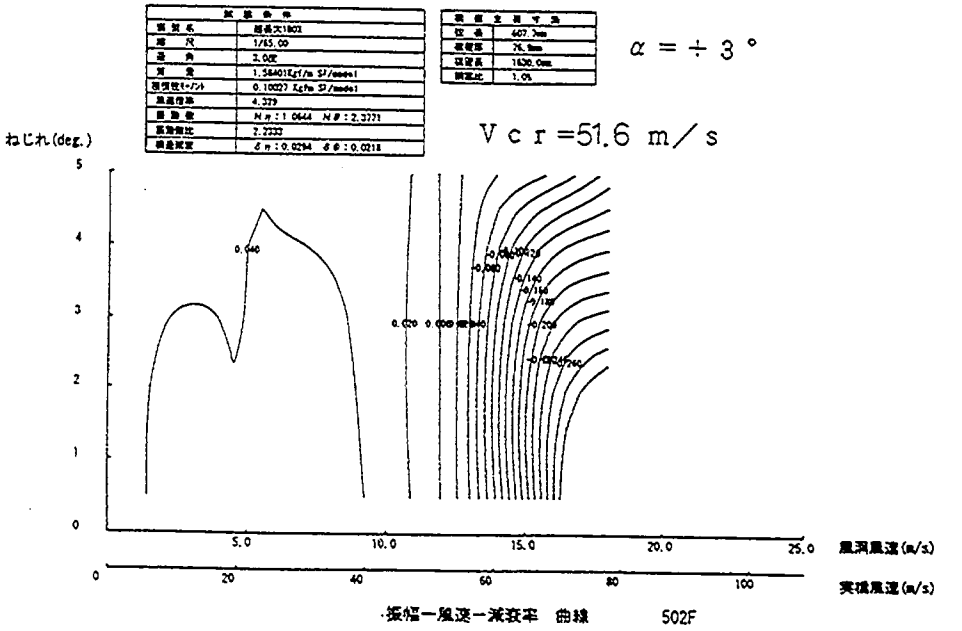
図－3.2.3.42　断面図（H５－２F）



図－3.2.3.43　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２F）

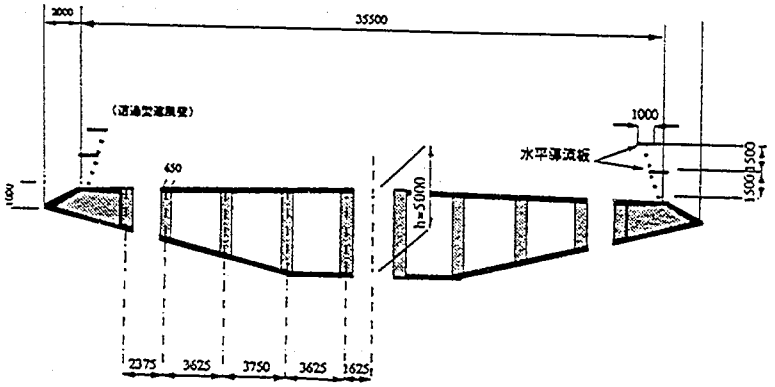


図－3.2.3.44　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２F）



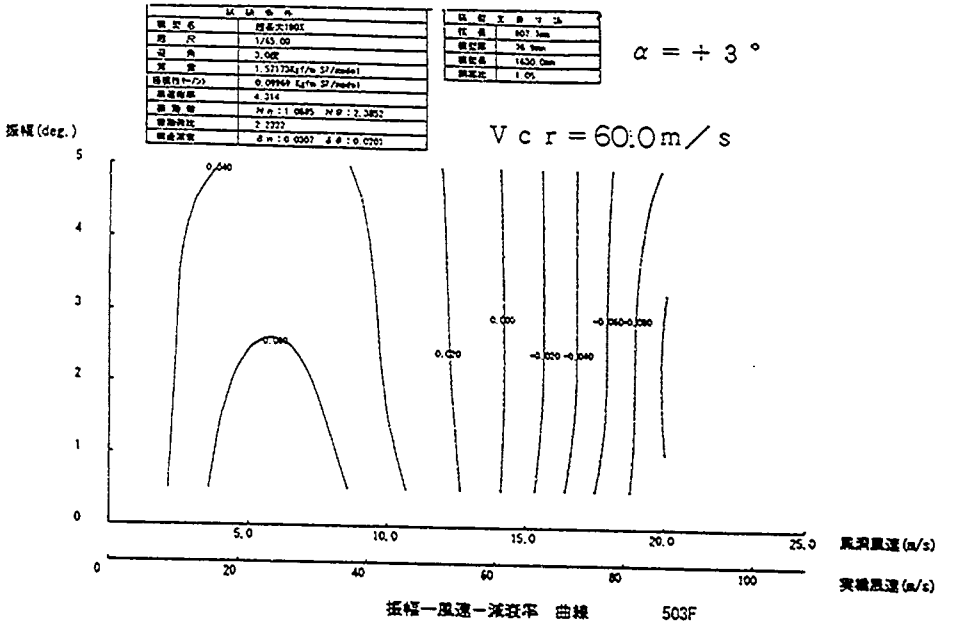
図－3.2.3.45　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－２F）

18ox、H=5.0m

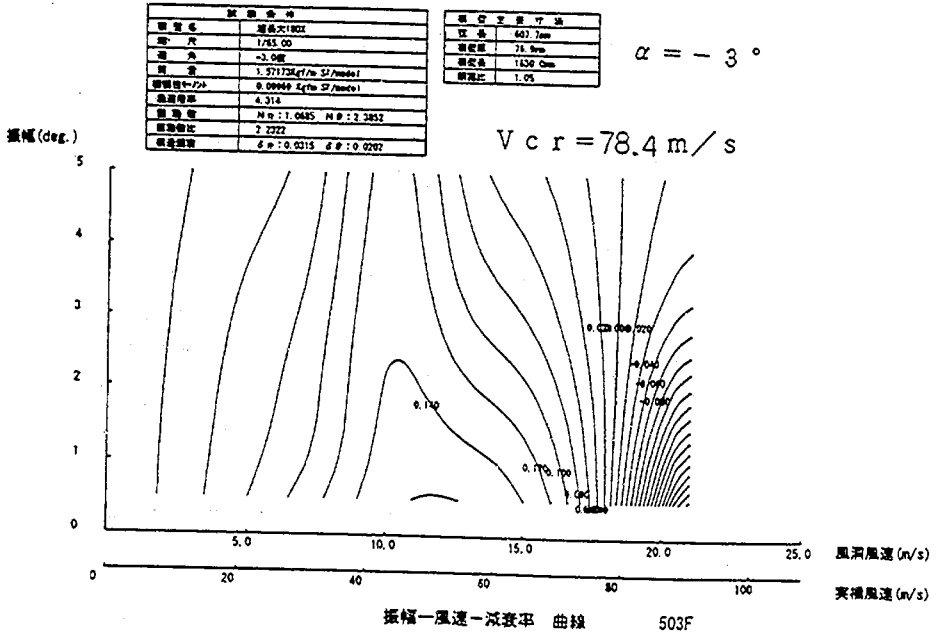


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

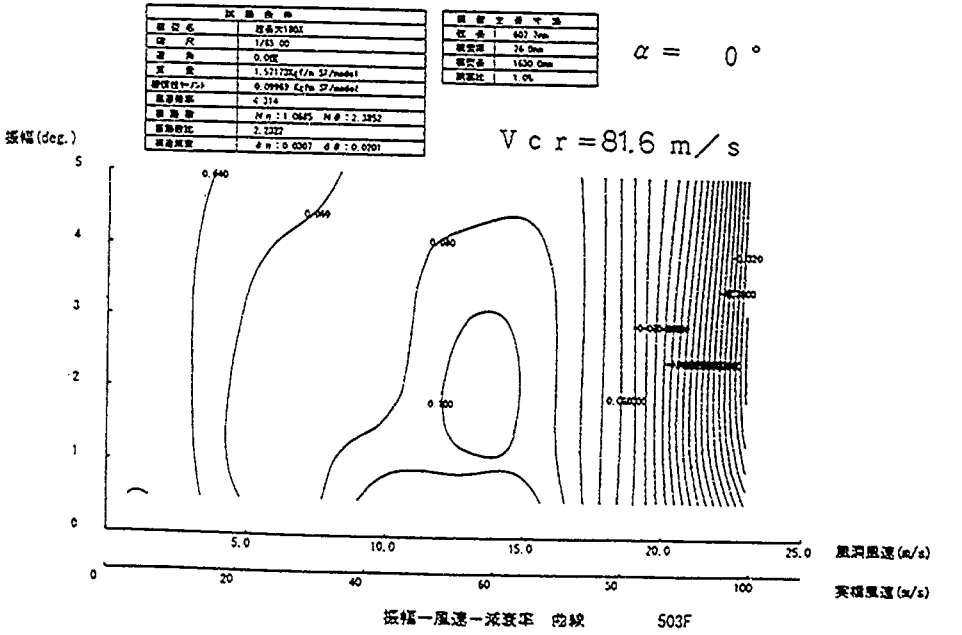
図－3.2.3.46　断面図（H５－３F）



図－3.2.3.48　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３F）

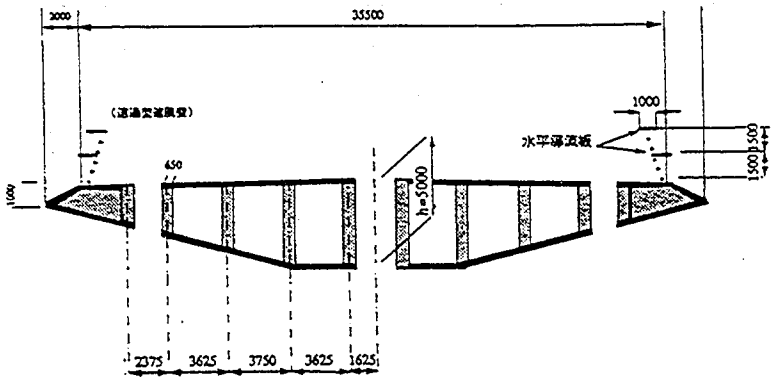


図－3.2.3.47　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３F）



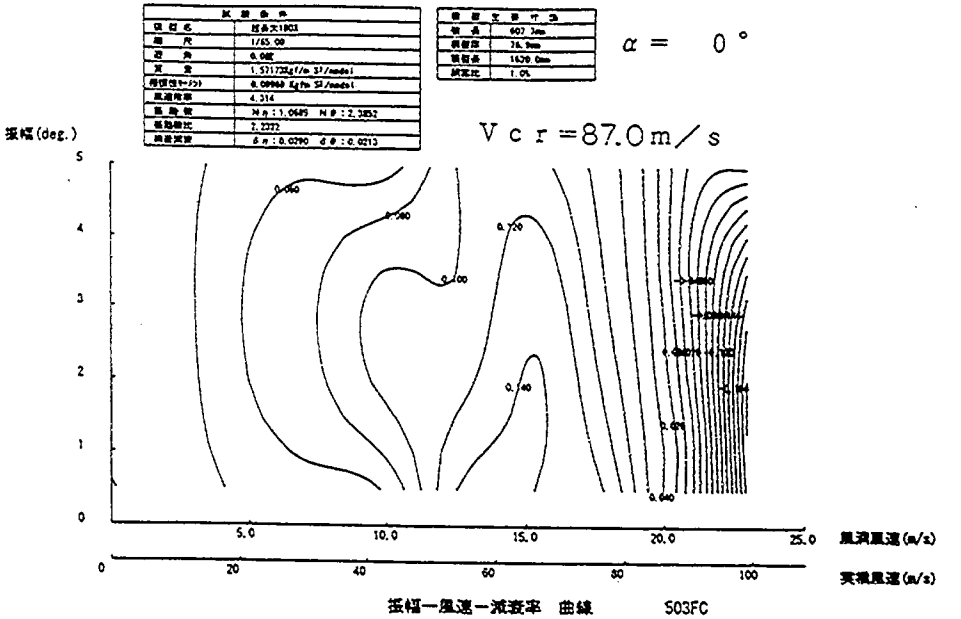
図－3.2.3.49　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３F）

18ox、H=5.0m

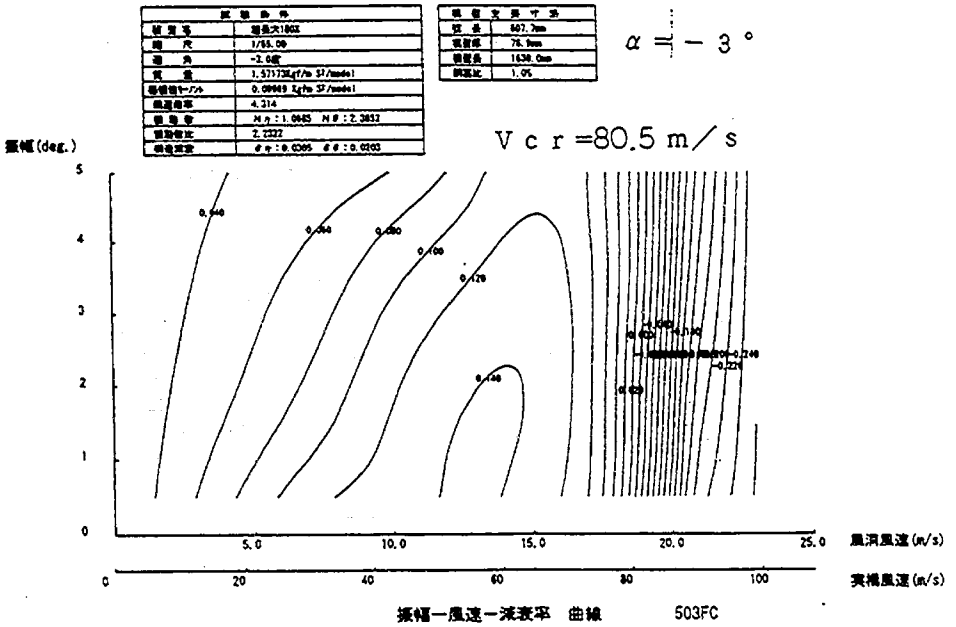


路肩部に標準高欄を設置、
中央分離帯部壁高欄（ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘﾔ）

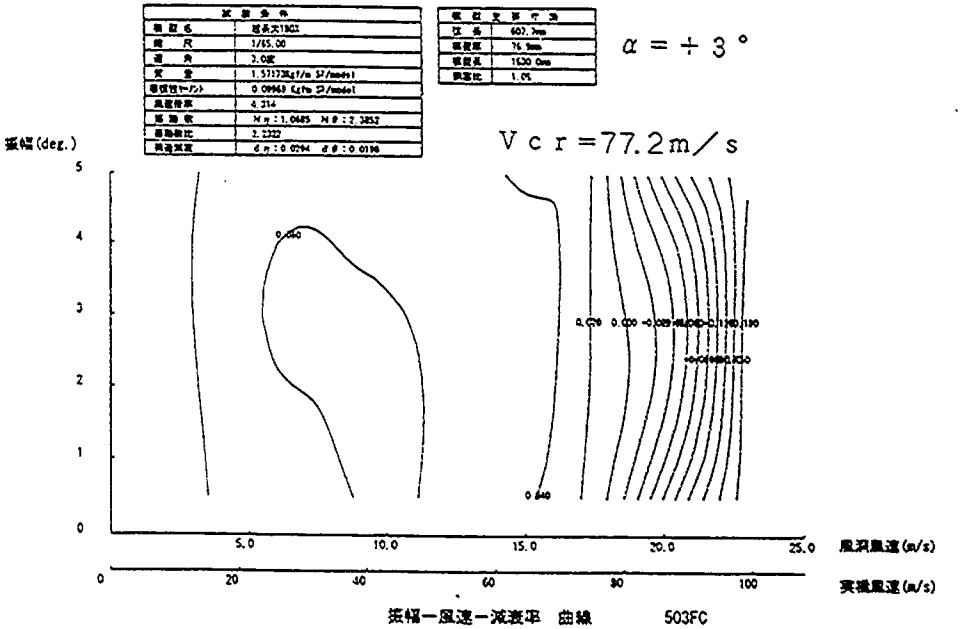
図－3.2.3.50　断面図（H５－３FC）



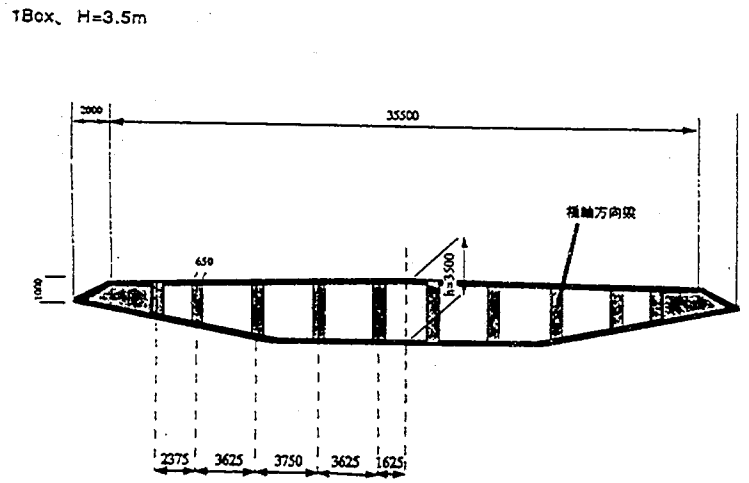
図－3.2.3.52　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３FC）



図－3.2.3.51　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３FC）

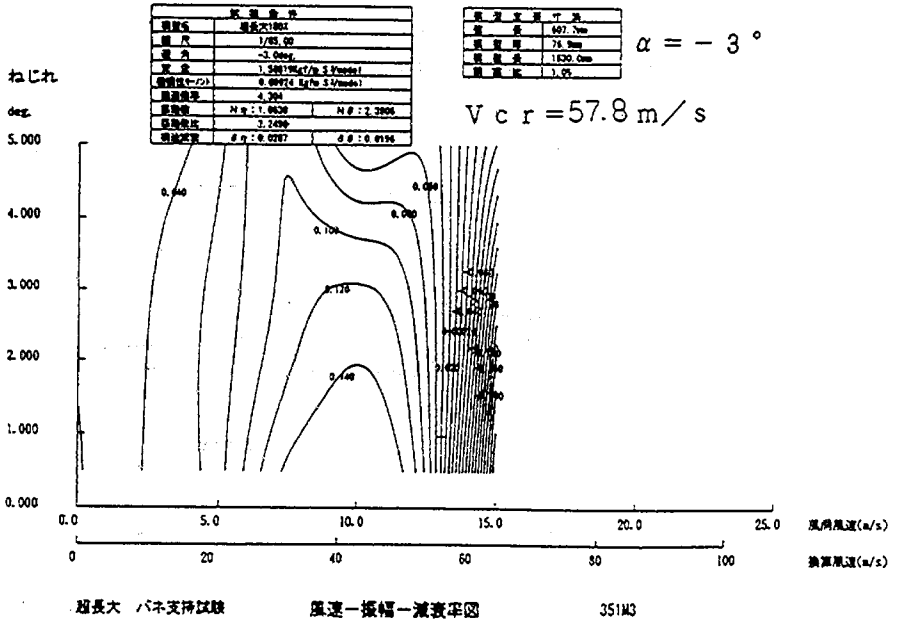


図－3.2.3.53　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H５－３FC）

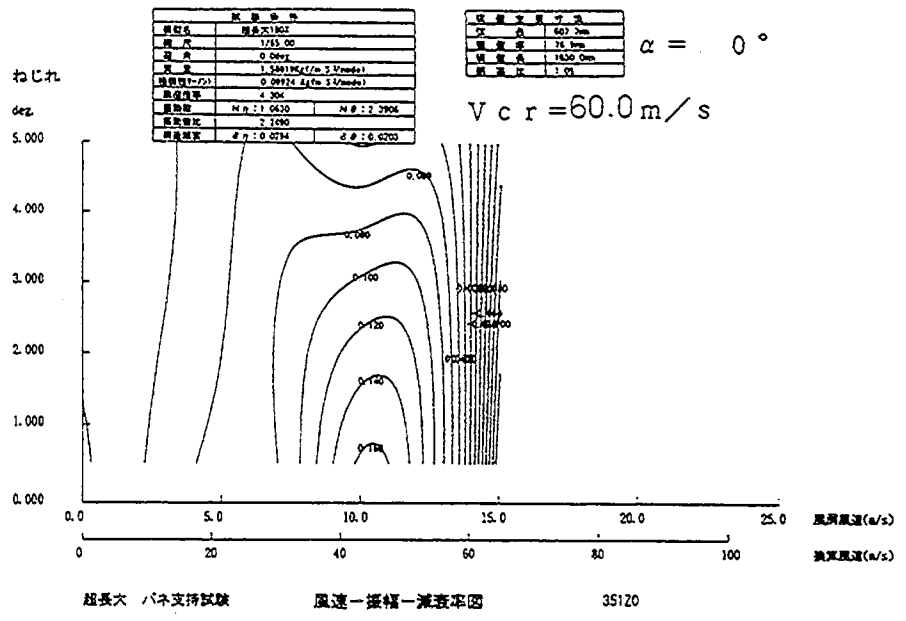


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

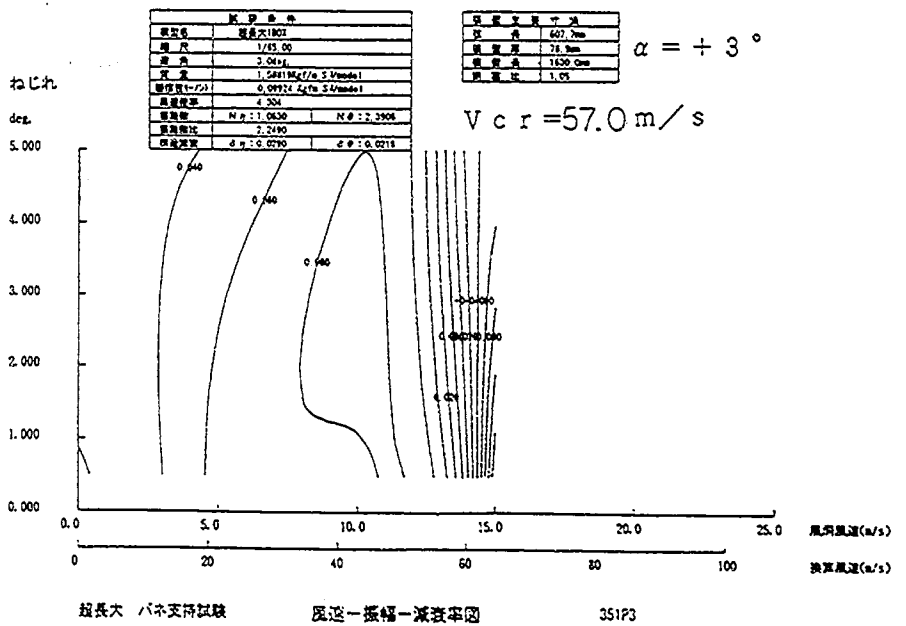
図－3.2.3.54　断面図（H３５－１）



図－3.2.3.55　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－１）

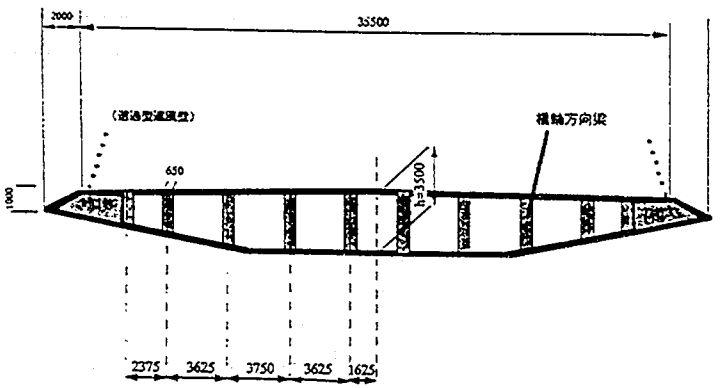


図－3.2.3.56　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－１）



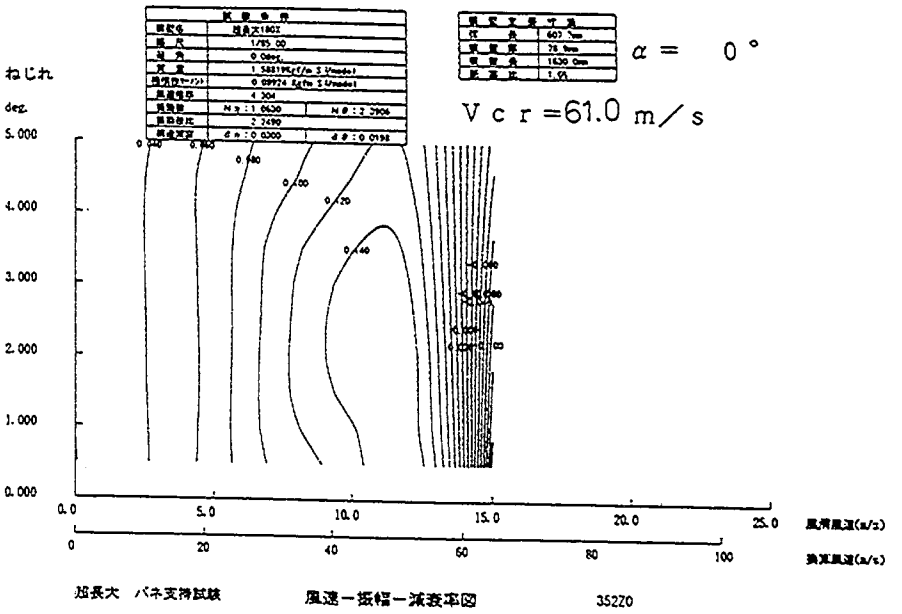
図－3.2.3.57　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－１）

1Box、H=3.5m

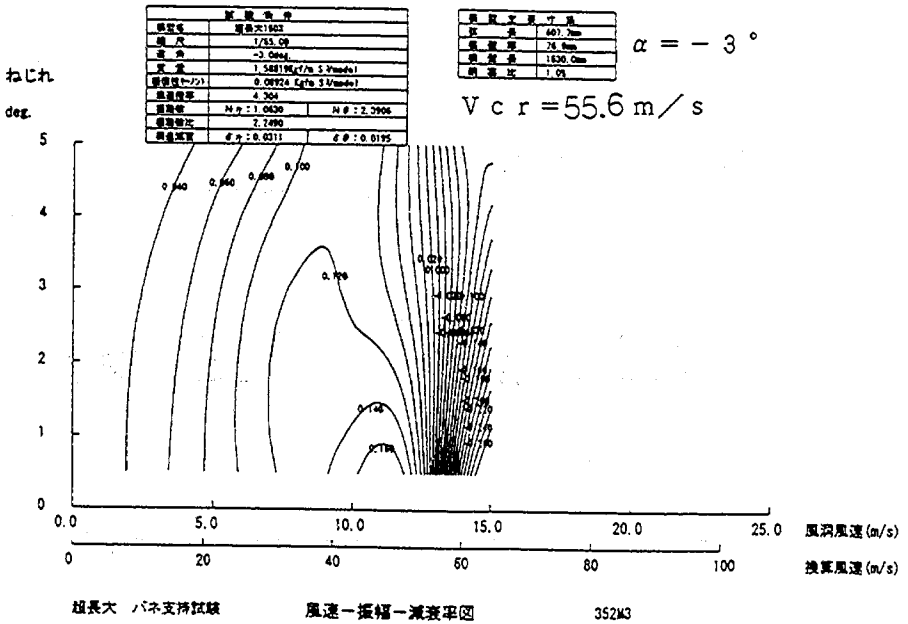


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

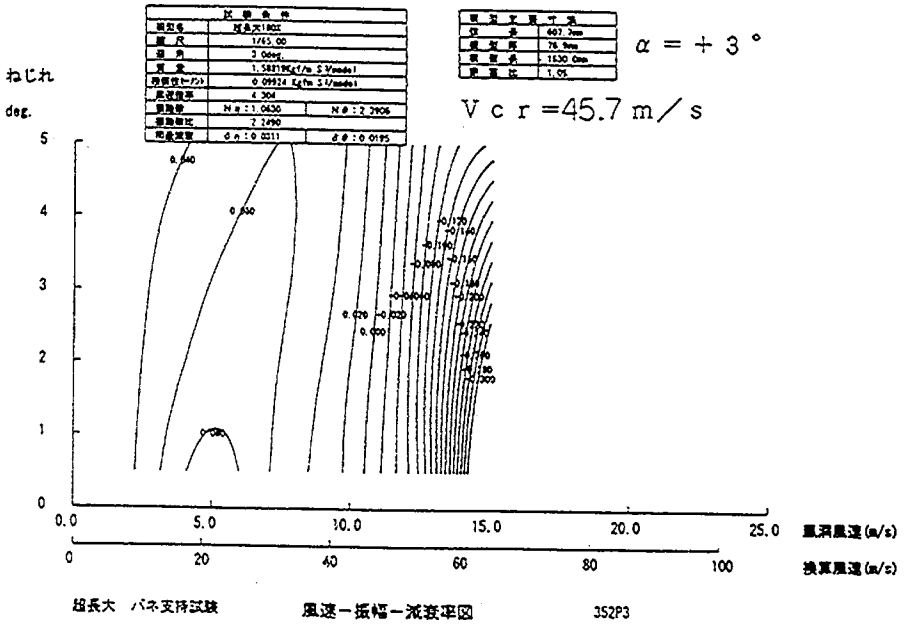
図－3.2.3.58　断面図（H３５－２）



図－3.2.3.60　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－２）

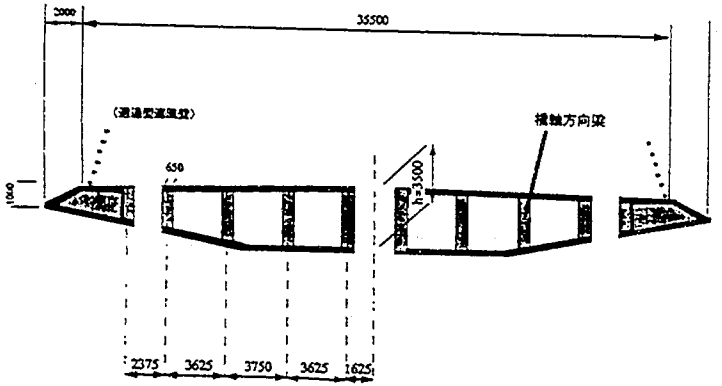


図－3.2.3.59　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－２）



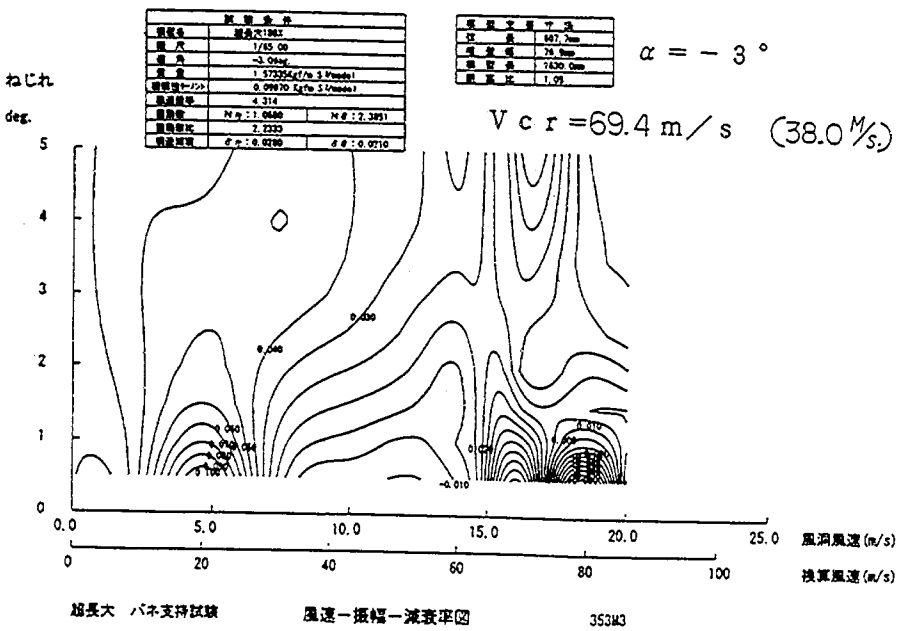
図－3.2.3.61　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－２）

1Box、H=3.5m

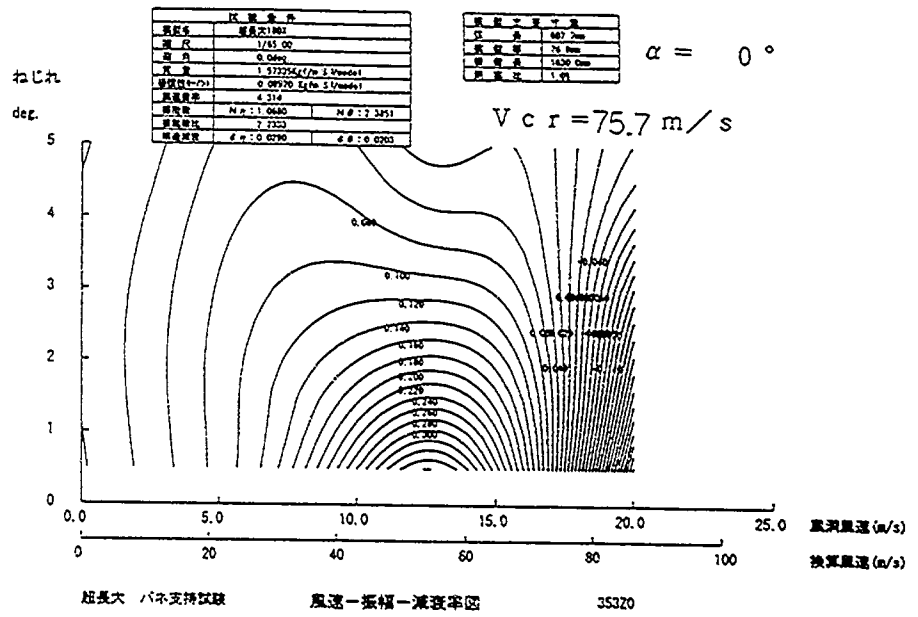


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

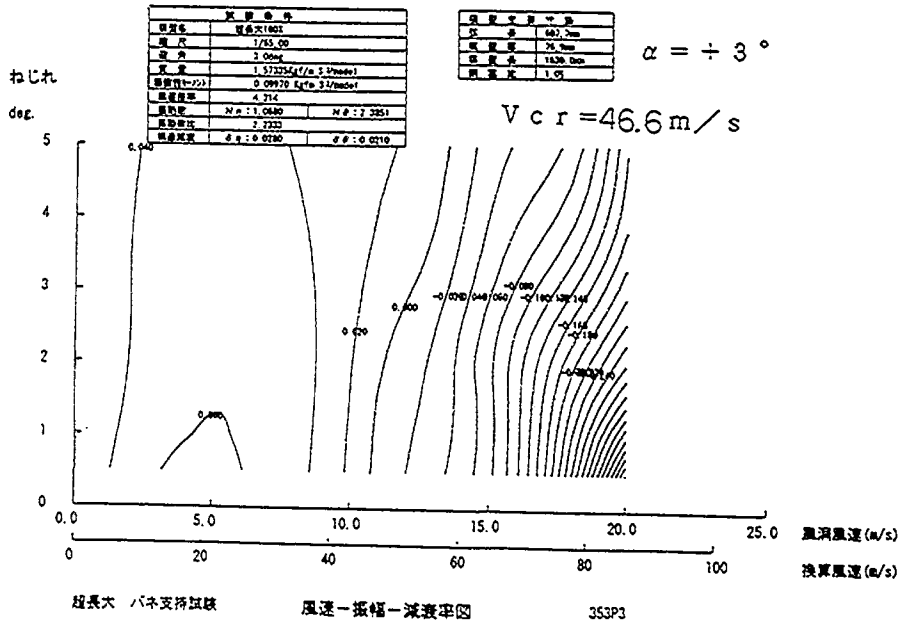
図－3.2.3.62　断面図（H３５－３）



図－3.2.3.63　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－３）



図－3.2.3.64　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－３）



図－3.2.3.65　超長大橋１箱桁ばね支持試験結果（H３５－３）

（2）三分力試験結果（桁高５m）

ばね支持試験の結果から、桁高 5m 箱桁を比較的耐風性が良好で３迎角ともにフラッター風速７５ m/s 以上の断面があること、対策無しでも３迎角ともにフラッター風速が６０ m/s 付近であること、渦励振の発生が無かったこと、等の理由からその後の検討対象として選定した。

桁高 5m 箱桁の内、基本断面（：H5-1）をステイシステムとの組み合わせで全体系の耐風性確保、対策断面（：H5-3FC）を桁形状の耐風性向上による全体系の耐風性確保との方針で以降の検討を進めることとし、両断面の三分力試験を実施した。

＜三分力試験対象断面＞

１）１箱桁（h=5m）基本断面（H5-1）

（V cr=60.5（α=-3°）、60.0（α=0°）、56.7（α=3°））

２）１箱桁（h=5m）空力対策（H5-3FC）

（V cr=80.5（α=-3°）、87.0（α=0°）、77.2（α=3°））

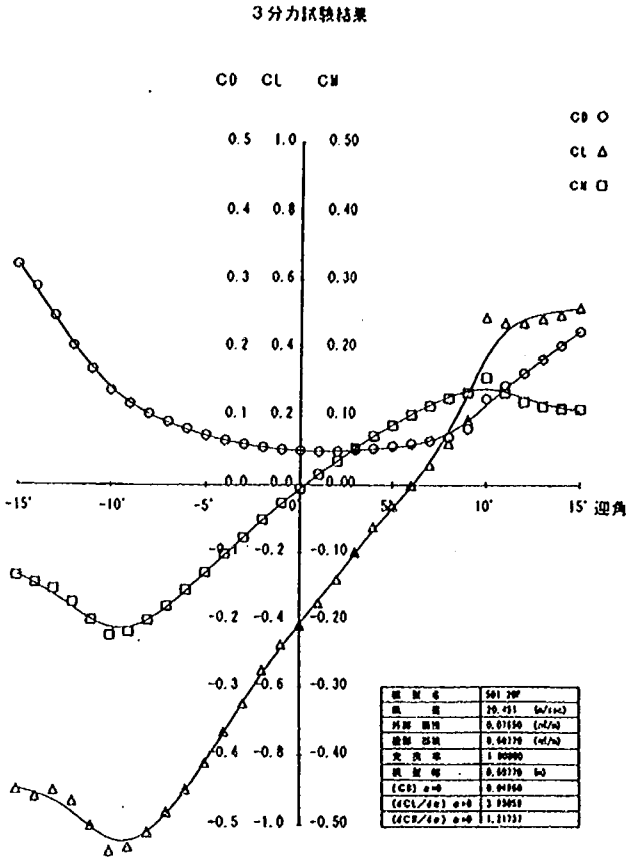
三分力試験結果を下表に示し、概要を以下にまとめる。

○　基本断面（H5-1）は、その断面形状の特徴が辺長比の大きい（B/D=7.9）偏平六角形断面であることから抗力係数ＣＤは 0.05 と小さく、迎角α=0°時に負の大きな揚力係数を示している。また、迎角α=0°時の揚力及びモーメント傾斜は正勾配で安定化を示しているが、迎角α=± 10°以上の大迎角では揚力及びモーメント傾斜は負勾配となり不安定化を示している。

○　対策断面では、透過型遮風壁の設置により辺長比が見掛け大きくなったことから投影面積の増加で抗力係数が大きくなり、迎角α=0°の揚力係数も小さい。また、迎角α=0°周りの揚力及びモーメント傾斜は共に小さく、迎角　α=-10°以上の大迎角ではモーメント傾斜が僅かながら負勾配を示すものの正迎角では全て正勾配の安定化を示す改善が出来た。

三分力試験結果概要

断　面　名	Ｈ5-1	Ｈ5-3ＦＣ
ＣＤ（α=0°）	０．０４９６	０．１２４０
ｄＣＬ／ｄα	３．９８０６	１．５７４２
ｄＣＭ／ｄα	１．２１７４	０．６８２５

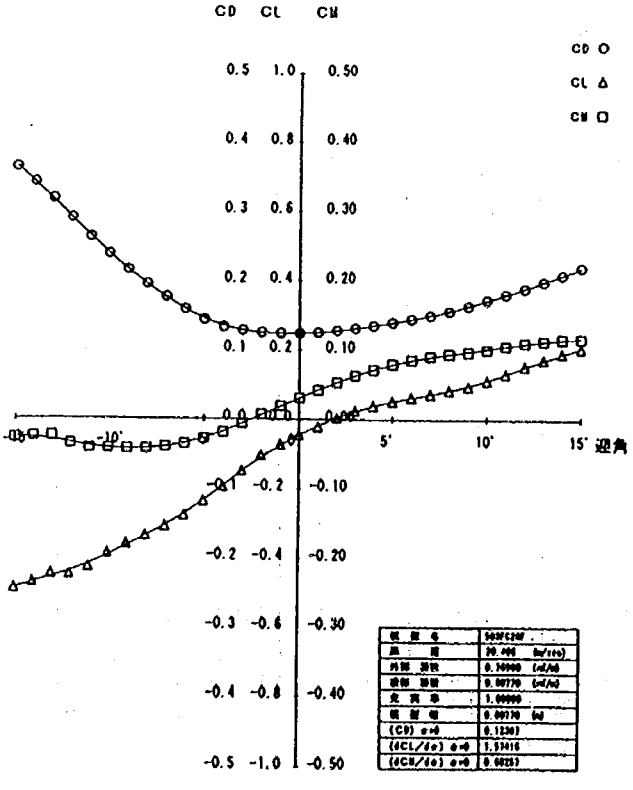


3分力試験結果

迎角(deg)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15.0	0.3219	-0.8963	-0.1249
-14.0	0.2892	-0.9172	-0.1454
-13.0	0.2460	-0.9500	-0.1544
-12.0	0.2027	-0.9312	-0.1737
-11.0	0.1680	-1.0014	-0.2005
-10.0	0.1370	-1.0745	-0.2230
-9.0	0.1172	-1.0643	-0.2172
-8.0	0.1029	-1.0210	-0.2005
-7.0	0.0913	-0.9633	-0.1795
-6.0	0.0809	-0.8984	-0.1558
-5.0	0.0721	-0.8224	-0.1297
-4.0	0.0645	-0.7330	-0.1019
-3.0	0.0593	-0.6497	-0.0777
-2.0	0.0547	-0.5512	-0.0508
-1.0	0.0513	-0.4734	-0.0267
0.0	0.0496	-0.4164	-0.0062
1.0	0.0487	-0.3499	0.0152
2.0	0.0486	-0.2805	0.0340
3.0	0.0502	-0.1987	0.0530
4.0	0.0527	-0.1238	0.0705
5.0	0.0564	-0.0613	0.0861
6.0	0.0601	-0.0010	0.1019
7.0	0.0643	0.0577	0.1150
8.0	0.0699	0.1206	0.1266
9.0	0.0814	0.1886	0.1342
10.0	0.1255	0.4899	0.1569
11.0	0.1450	0.4739	0.1341
12.0	0.1632	0.4746	0.1212
13.0	0.1835	0.4873	0.1144
14.0	0.2044	0.4981	0.1112
15.0	0.2250	0.5197	0.1106

模型名＝501 20F

図－3.2.3.66　Ｈ５－１断面 三分力試験結果



3分力試験結果

迎角(deg)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15.0	0.3613	-0.4913	-0.0275
-14.0	0.3399	-0.4732	-0.0257
-13.0	0.3160	-0.4497	-0.0249
-12.0	0.2892	-0.4511	-0.0361
-11.0	0.2621	-0.4300	-0.0427
-10.0	0.2377	-0.3904	-0.0427
-9.0	0.2153	-0.3625	-0.0434
-8.0	0.1946	-0.3383	-0.0430
-7.0	0.1754	-0.3111	-0.0403
-6.0	0.1580	-0.2787	-0.0361
-5.0	0.1434	-0.2372	-0.0287
-4.0	0.1326	-0.1951	-0.0195
-3.0	0.1280	-0.1500	-0.0066
-2.0	0.1252	-0.1055	0.0074
-1.0	0.1238	-0.0732	0.0192
0.0	0.1240	-0.0483	0.0309
1.0	0.1252	-0.0225	0.0424
2.0	0.1277	0.0032	0.0537
3.0	0.1311	0.0245	0.0635
4.0	0.1349	0.0395	0.0720
5.0	0.1394	0.0523	0.0798
6.0	0.1445	0.0631	0.0859
7.0	0.1498	0.0734	0.0912
8.0	0.1561	0.0842	0.0949
9.0	0.1631	0.0955	0.0975
10.0	0.1722	0.1123	0.1006
11.0	0.1802	0.1321	0.1058
12.0	0.1881	0.1542	0.1103
13.0	0.1988	0.1734	0.1134
14.0	0.2090	0.1917	0.1160
15.0	0.2204	0.2060	0.1172

模型名＝503FC20F

図－3.2.3.67　Ｈ５－３ＦＣ断面　三分力試験結果

（3）フラッター解析

1) 概要

これまで検討を進めてきた中央径間 2500m 吊橋の標準モデルを用い、基本断面の耐風性が比較的良好であった桁高 5m の箱桁案の測定空気力を用いてフラッター解析を実施した。フラッター解析の実施断面は開口部、遮風壁、水平導流板を設けない基本断面 H5-1 および透過型遮風壁に水平導流板を設置し、開口部とセンターバリアとの組合せにより最も耐風性に優れていた H5-3FC 断面について実施した。

また、両断面について風荷重による変形を考慮しない場合および考慮した場合についてそれぞれフラッター解析を実施した。

2) 風洞試験結果

試験対象の基本断面を図-3. 2. 3. 68に、ばね支持試験結果とフラッター解析結果を合わせた一覧を表-3. 2. 3. 4にそれぞれ示す。

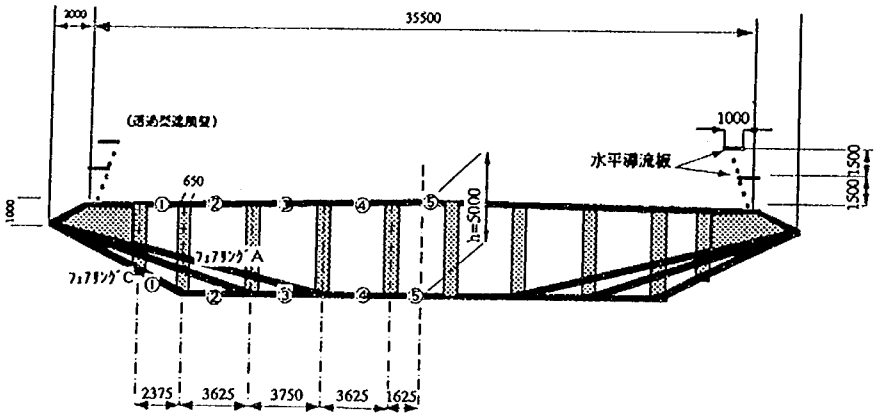


図-3. 2. 3. 68 基本断面（h=5m）

表-3. 2. 3. 4 風洞試験およびフラッター解析結果一覧

	開口部	透過型遮風壁	外端 フェアリング	水平導流板	-3° (m/s)	0° (m/s)	+3° (m/s)	フラッタ解析結果 (m/s)
H5-1	——	——	A	——	60.5	60.0	56.7	63.2（変形無） 64.3（変形有）
H5-2	——	○	A	——	60.5	61.6	39.9	
H5-3	① ⑤	○	A	——	79.6	75.6	33.5	
H5-4	① ⑤	○	C	——	39.7	44.3	31.5	
H5-2F	——	○	A	有	58.2	57.1	51.6	
H5-3F	① ⑤	○	A	有	78.4	81.6	60.0	
H5-3FC センターバリア	① ⑤	○	A	有	80.5	87.0	77.2	88.4（変形無） 79.1（変形有）

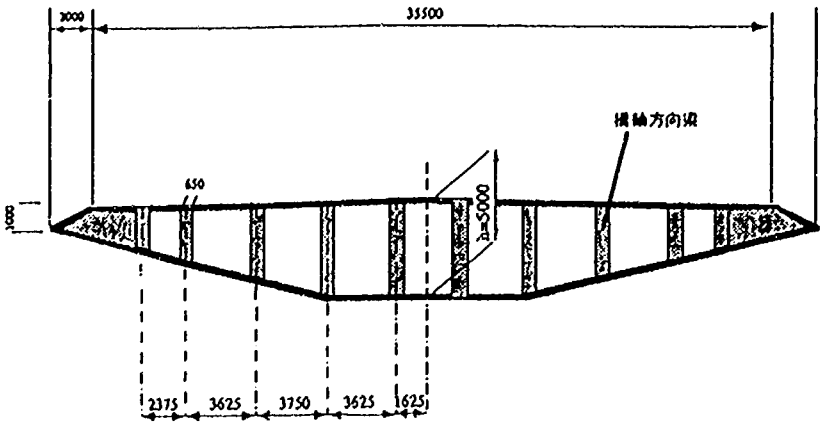
※ 変形無時のフラッター解析条件は一覧表 SH-2　　下線は V cr ＞ 70m/s
変形有時のフラッター解析条件は一覧表 SH-3

3)フラッター解析結果

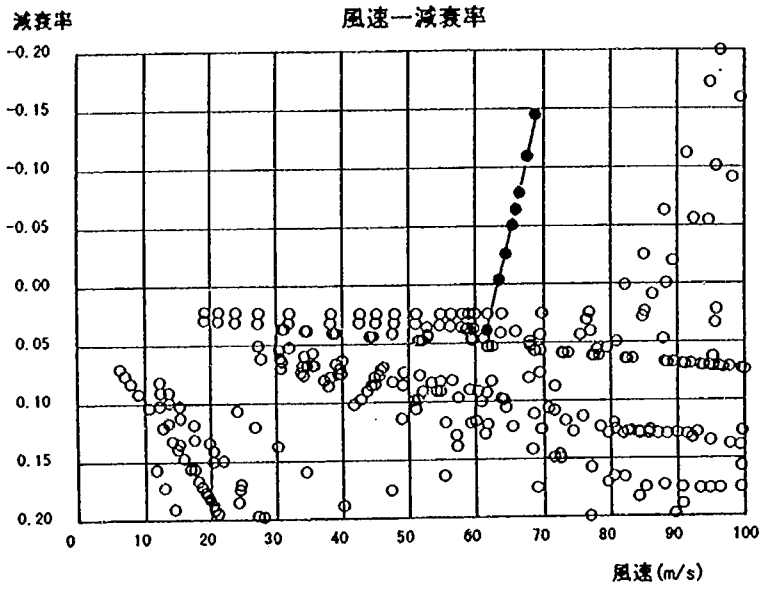
解析対象である H5-1 の断面図およびフラッター解析結果を図-3. 2. 3. 69～図-3. 2. 3. 70に、H5-3FC 断面図およびフラッター解析結果を図-3. 2. 3. 71～図-3. 2. 3. 72にそれぞれ示す。尚、フラッター解析結果は風荷重による変形の有無別に示している。

○ H5-1 断面は、迎角 0° におけるモーメント係数がＣM=-0.0062 と小さいことから有風時における回転方向（ねじれ方向）の静的変形量が小さくなり、フラッター発振風速の差が小さくなったと思われる。

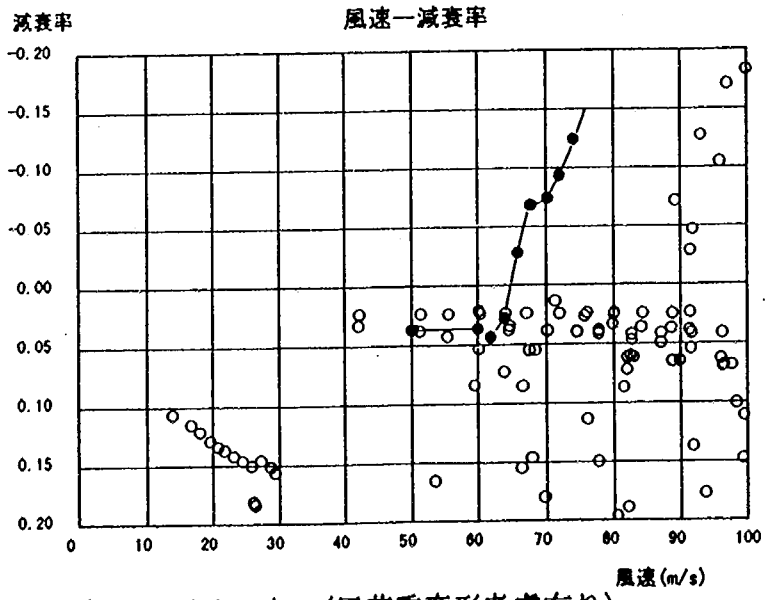
○ H5-3FC 断面は、迎角 0° におけるモーメント係数がＣM=0.0309 と正方向（頭上げ）の特性を示していることから有風時では正方向の静的変形となったことから、表中で 0° から +3° になるとフラッター発振風速が低下する特性が解析結果でも現れた思われる。



図－3.2.3.69　Ｈ５－１断面　　路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置



Vcr = 63.2 m/s　（風荷重変形考慮無し）



Vcr = 64.3 m/s　（風荷重変形考慮有り）

図－3.2.3.70　フラッター解析結果（Ｈ５－１）

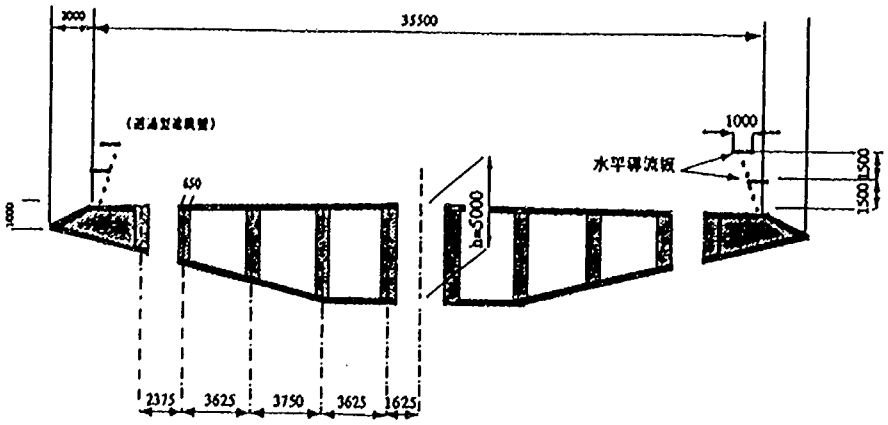
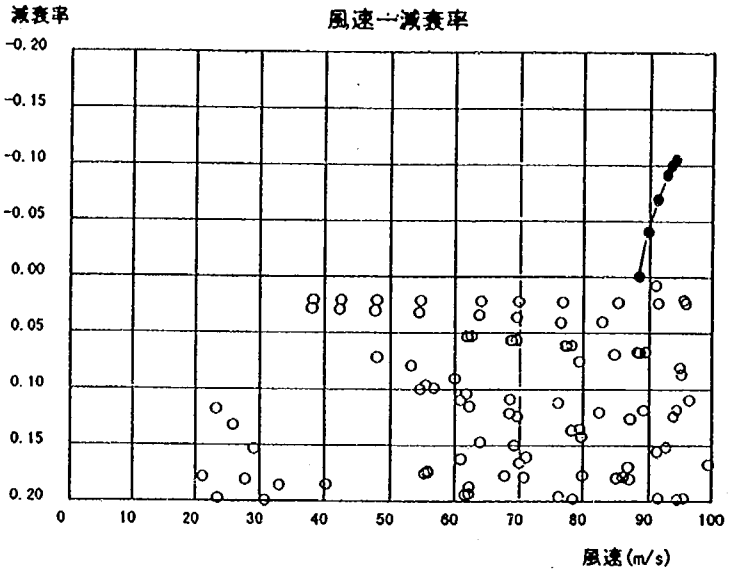
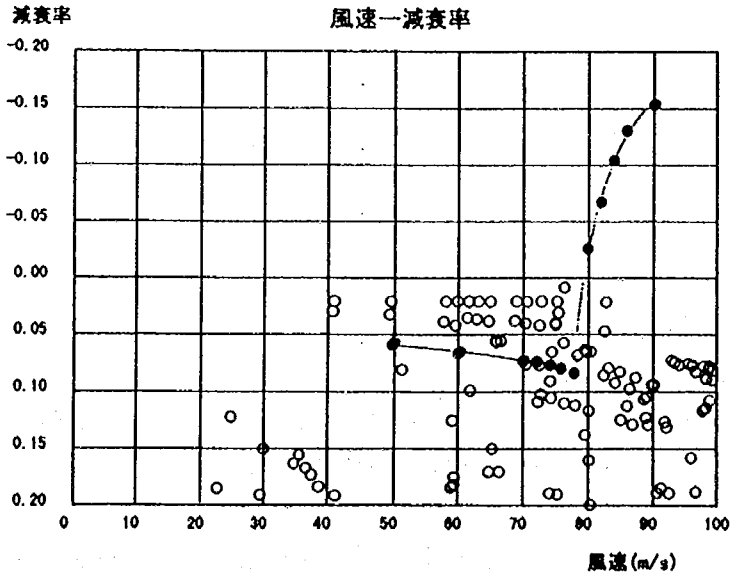


図 3.2.3.71　Ｈ５－３ＦＣ断面

路肩部に標準高欄を設置、
中央分離帯部壁高欄（ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ）



Vcr = 88.4 m/s　（風荷重変形考慮無し）



Vcr = 79.1 m/s　（風荷重変形考慮有り）

図－3.2.3.72　フラッター解析結果（Ｈ５－３ＦＣ）

（4）まとめ

＜ばね支持試験＞

桁高の違う3種（h=7m,5m,3.5m）の箱桁基本断面について耐フラッター性の評価とその改善を目的とした風洞試験（2次元ばね支持試験）を実施した。得られた結果を下記にまとめる。

1）桁高7m箱桁の基本断面の耐風性は悪く、V cr=35m/s程度である。また、明石（トラス桁）の開口部位置に相当する開口部を設置しても耐風性は悪化する。さらに、全開口部を解放した場合、フラッターの発現は0～90m/sの範囲で認められないものの、振幅1°～3°の渦励振が発生する。透過型フェアリングには渦励振低減効果はあるものの、1°程度の渦励振は残る。端部フェアリング形状の影響は大きく、この形状によりフラッター風速は大きく変化する。

2）桁高5m箱桁の基本断面の耐風性は比較的良好である。明石（トラス桁）と同様な位置への開口部の設置により、負迎角側のフラッター風速は向上するものの正迎角側で悪化する。水平導流板とセンターバリヤの設置により3迎角ともフラッター風速75 m/s以上が実現できる。

3）桁高3．5m箱桁の基本断面の耐風性は桁高5m案同様、比較的良好である。但し、開口部の設置等で渦励振が発生する。

＜三分力試験＞

ばね支持試験の結果が良好であった基本断面と対策断面を対象に、断面形状の静的空気力特性の把握ならびに全橋系としてのフラッター解析に使用するデータの収得のために三分力試験を実施した。結果を以下にまとめる。

1）基本断面（H5-1）の抗力係数は小さく、迎角α=0°周りの揚力及びモーメント傾斜は正勾配で安定化を示しているが、迎角α=±10°以上の大迎角では揚力及びモーメント傾斜は負勾配となり不安定化を示す。

2）対策断面（H5-3FC）は、投影面積の増加で抗力係数が大きく、迎角α=0°周りの揚力及びモーメント傾斜は正勾配で小さい。迎角　α=-10°以上でモーメント傾斜が僅かながら負勾配を示すものの、正迎角では全て正勾配の安定化を示す。

＜フラッター解析＞

ばね支持試験の結果が良好であった断面の実橋への適用を検討するために、フラッター解析（直接法）を実施した。フラッター解析は

①比較的耐風性の良好な桁形状の基本断面であるH5-1断面

②桁の空気力特性の改善によって、全橋の耐風安定性を確保することを狙ったH5-3FC断面

の2ケースを対象として実施した。

フラッター解析の結果、

1）桁形状を改善（h=5m、水平導流板、センターバリヤ）した断面を標準モデルに適用すると、フラッター発振風速はV cr=79m/sとなる。

2）5m桁高の標準桁を標準モデルに適用すると、フラッター発振風速はV cr=64m/sとなる。

（付加ケーブルシステムを適用した場合の耐風安定化効果については別章に掲載）

等のことが明らかとなった。

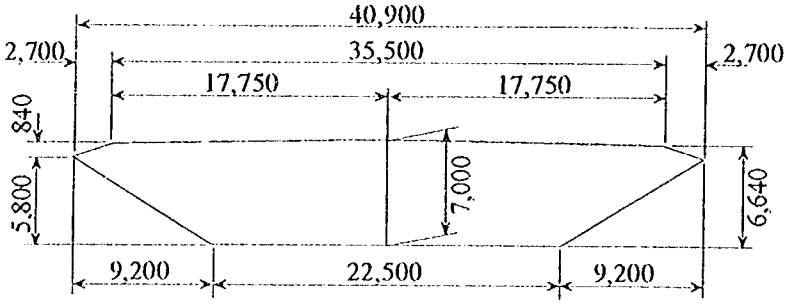
これは、断面形状のみの対策により十分耐風安定化が図れる可能性があることを示している。

3．2．4　桁断面形状に関する検討

(1)概要

本項では，まず縮尺 1/200 の小型模型を用いた部分模型応答試験を実施し，図--3.2.4.1 に示す既提案の一箱桁基本断面（以下基本断面 A と呼ぶ）に対する桁高・フェアリング形状の見直しを行い，優れた耐フラッター性能を有する一箱桁基本断面形状を提案した。

次に，縮尺 1/40 の大型模型を用いた部分模型応答試験によって検査車レール・高欄などの微小部材の影響について調査し，さらに，最適断面において測定された非定常空気力を用いた 3 次元フラッター解析を実施することによって全橋状態における耐フラッター性能の推定を行った。



単位：mm

図--3.2.4.1　基本断面 A

(2)部分模型応答試験（小型模型）

1)基本断面 A のフラッター特性

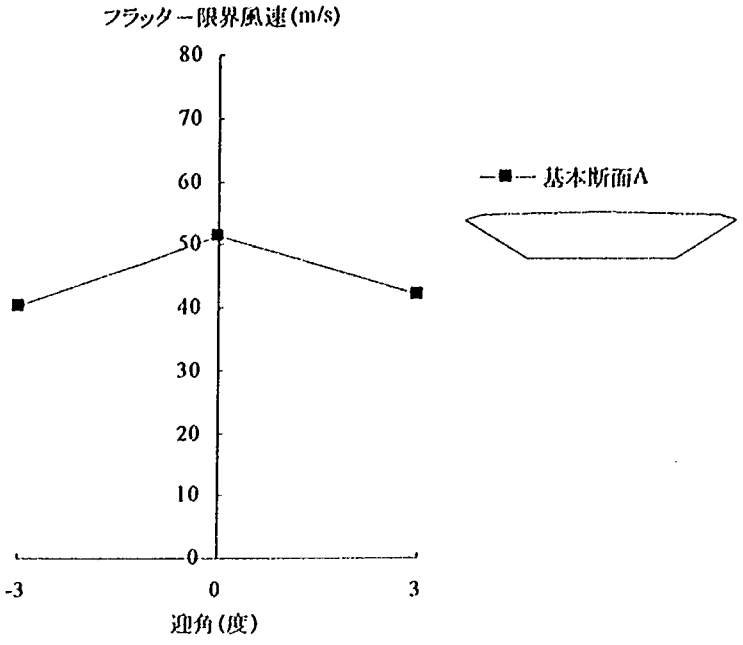
まず，基本断面 A に対して，縮尺 1/200 の模型を用いた部分模型応答試験を実施した。

表－3.2.4.1 に想定吊橋の諸元及び試験条件をまとめて示す。

表－3.2.4.1　想定吊橋の諸元及び試験条件（縮尺：1/200）

項目	単位（括弧内は模型値）	想定橋諸元（中央支間 2500 m）	模型測定値
全弦長	m	40.9	0.2045
単位桁長さ重量	tf/m (kgf/m)	35.0	0.875
単位桁長さ極慣性モーメント	$tf \cdot s^2$ ($kgf \cdot s^2$)	690	4.248×10^{-4}
固有振動数（たわみ一次）	Hz	0.0537	1.78
固有振動数（ねじれ一次）	Hz	0.1604	5.27
振動数比	-	2.987	2.97
対数減衰率	-	-	0.02

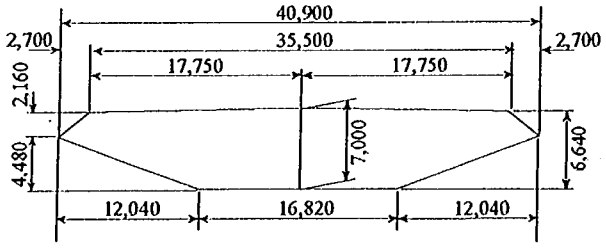
図－3.2.4.2に基本断面Aにおける応答試験結果を，迎角－フラッター限界風速特性図として示す。



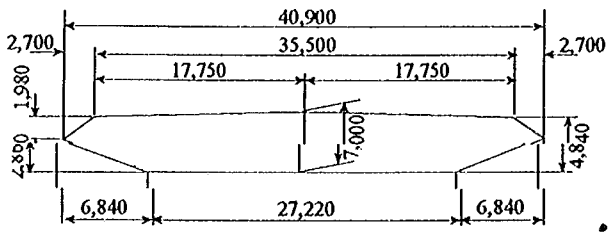
図－3.2.4.2　迎角－フラッター限界風速特性（基本断面A）

2)　断面形状の見直し

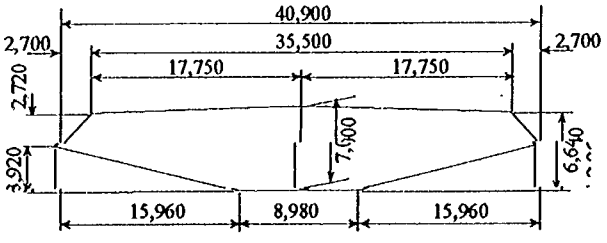
ここでは，基本断面Aの断面形状の見直しを行い，図－3.2.4.3に示すようにフェアリング形状及び桁高を変化させた三種類の断面形状について，部分模型応答試験を行った。　試験条件については，基本断面Aの場合と同様，表－3.2.4.1にしたがって試験を行った。



基本断面C



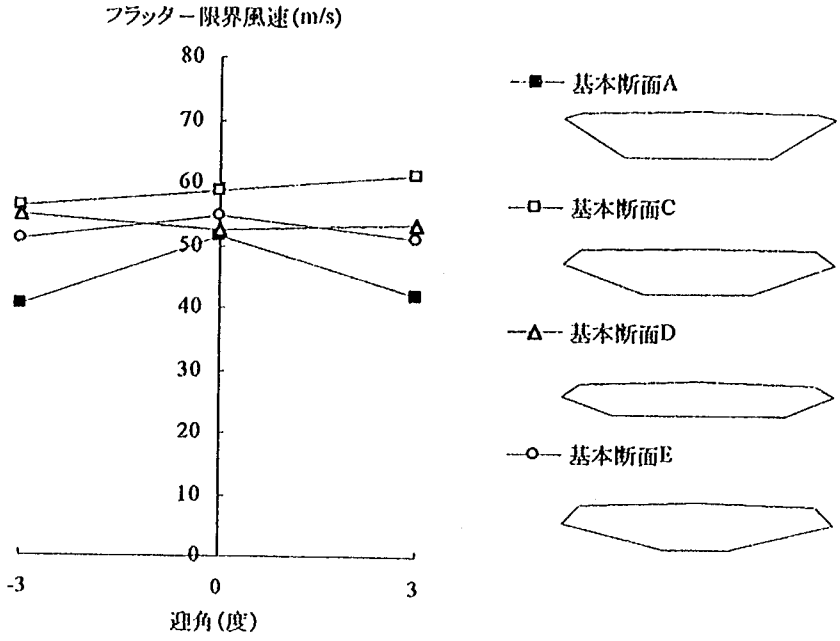
基本断面D



基本断面E

図－3.2.4.3　基本断面形状の変更案

図－3.2.4.4 に，各基本断面におけるフラッター限界風速の迎角特性を示す。



図－3.2.4.4　迎角－フラッター限界風速特性図（基本断面形状の変化の影響）

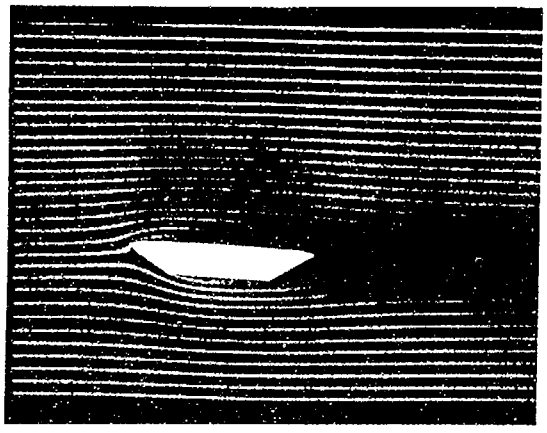
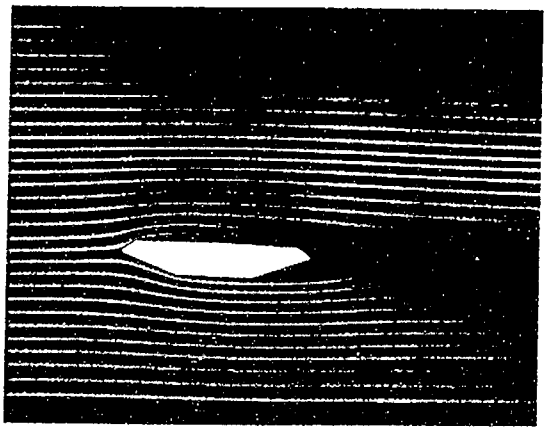
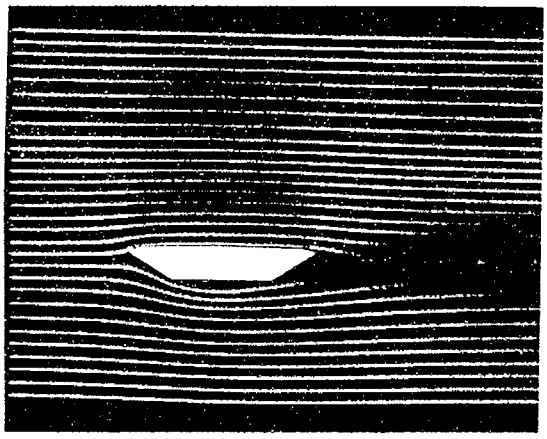
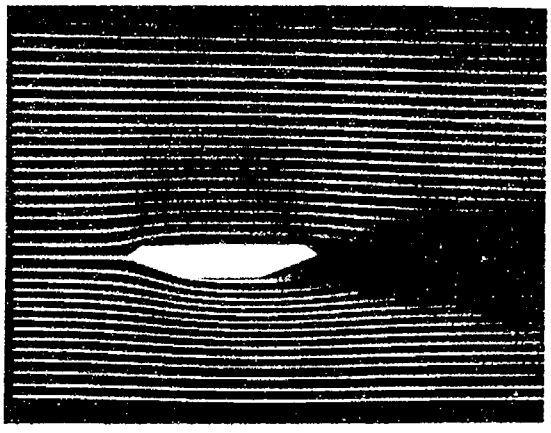
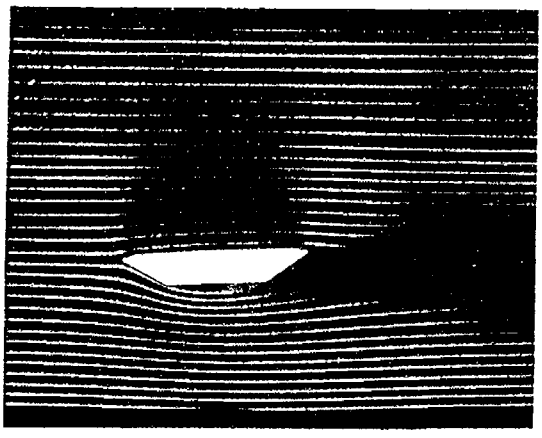
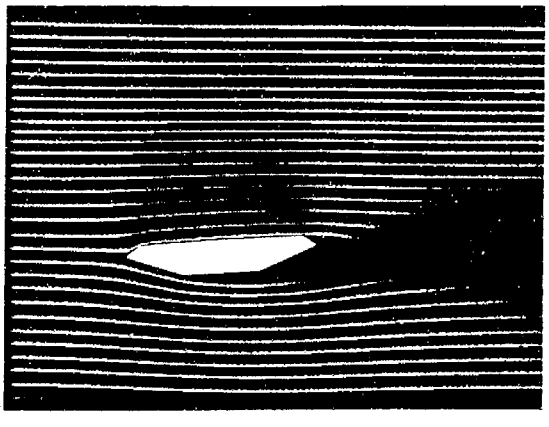
・基本断面 C，D，E におけるフラッター限界風速は，何れの迎角においても基本断面 A におけるフラッター限界風速を上回る結果となり，特に基本断面 C が最も優れた耐フラッター性能を有していることがわかる。　（下表に迎角 0 度における各基本断面の Selberg's flutter speed に対する比（形状補正係数：κ）を整理したものを示す。）

	基本断面 A	基本断面 C	基本断面 D	基本断面 E
形状補正係数 κ	0.91	1.04	0.93	0.97

・±3° の迎角の範囲において，各基本断面のフラッター限界風速の最低値を比較すると，基本断面 C の値は基本断面 A の値（両断面ともに迎角 -3° ）を約 4 割上回る結果となっている。

また，図－3.2.4.5 に基本断面 A 及び基本断面 C の可視化写真を迎角ごとに比較して示すが，図より，基本断面 A では下面前縁部において剥離バブルの形成が認められるが，基本断面 C では，何れの迎角においても剥離バブルの領域が小さくなっていることが判る。

即ち，基本断面 C が優れた耐フラッター性能を有する要因の一つとして，断面周りにおいてより流線形に近い流れ場が形成されていることが考えられる。

断面 / 迎角	基本断面A	基本断面C
+3°		
0°		
−3°		

図－3.2.4.5　可視化写真

(3) 部分模型応答試験（大型模型）

前述の検討の結果，最も優れた耐フラッター性能を有することが明らかとなった基本断面Cに対して縮尺 1/40 の大型部分模型を製作した。

大型模型の試験条件を表－3.2.4.2にまとめて示す。

表－3.2.4.2　試験条件（縮尺：1/40）

項目	単位 （括弧内は模型値）	想定橋諸元（中央支間 2500 m）	模型測定値
全弦長	m	40.9	1.023
桁重量*	tf/m (kgf/model)	35.0	59.063
桁極慣性モーメント*	$tf \cdot s^2$ $(kgf \cdot m \cdot s^2/model)$	690	0.734
固有振動数（たわみ一次）	Hz	0.0537	0.601
固有振動数（ねじれ一次）	Hz	0.1604	1.757
振動数比	-	2.987	2.923
対数減衰率	-	-	0.02

*：模型長さ=2.7m

大型模型においては，高欄形状として，小型模型で採用した簡易高欄模型ではなく明石海峡大橋型の詳細高欄模型を採用し，また，より実橋に近い状態を再現するために検査車レール（レール間隔：11m）を設置した状態で応答試験を実施した。

下図に大型模型の応答試験結果を，小型模型の場合の結果と比較して示す。

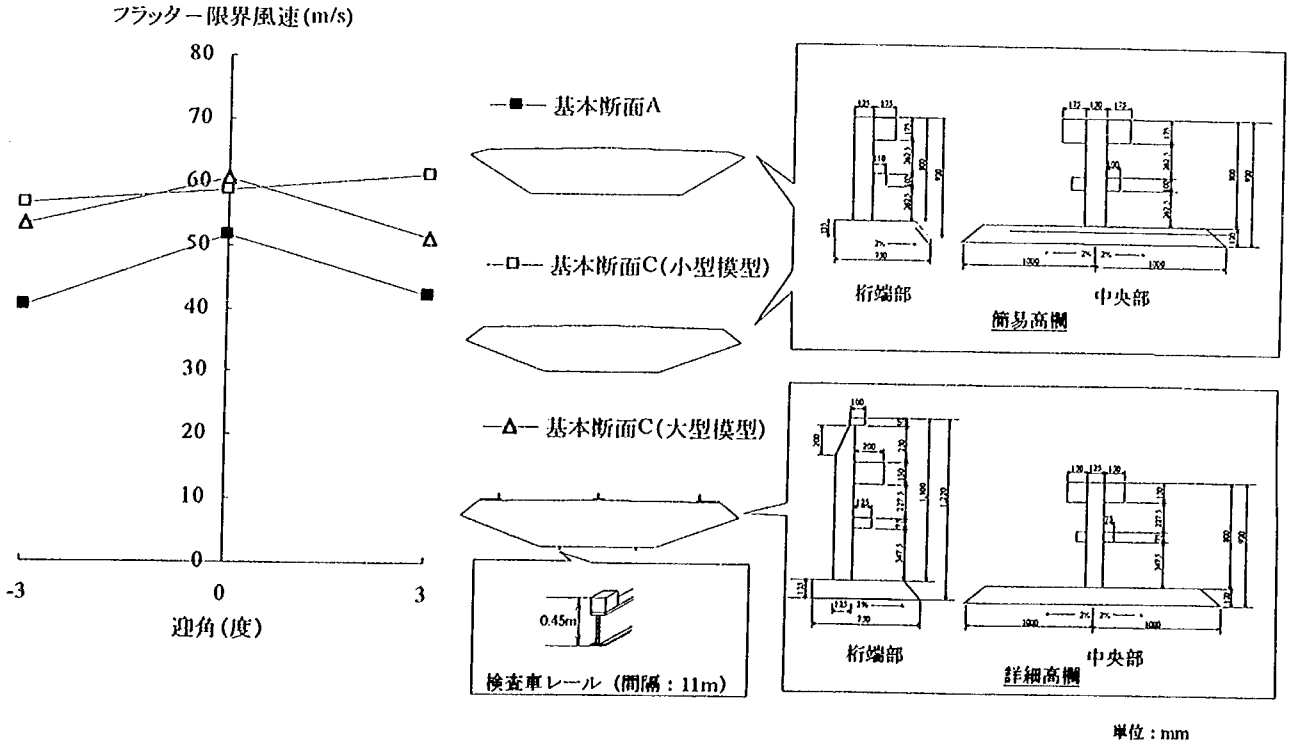


図-3.2.4.6　迎角－フラッター限界風速特性

図－3.2.4.6 より，大型模型では高欄形状及び検査車レールの影響によって，迎角+3 度で小型模型とは異なるフラッター特性を有することが認められるが，迎角 0 度，-3 度においてはほぼ一致したフラッター限界風速を示す結果となっている。

すなわち，大型模型を用いた部分模型試験においても，基本断面 C の優れた耐フラッター性能が確認された。

(4) 非定常空気力測定試験

ここでは，縮尺 1/40 の基本断面 C に対して，強制振動法にて非定常空気力測定試験を実施し，結果を下式に示す非定常空気力係数で整理した。

試験結果を次項表－3.2.4.3 に示す。

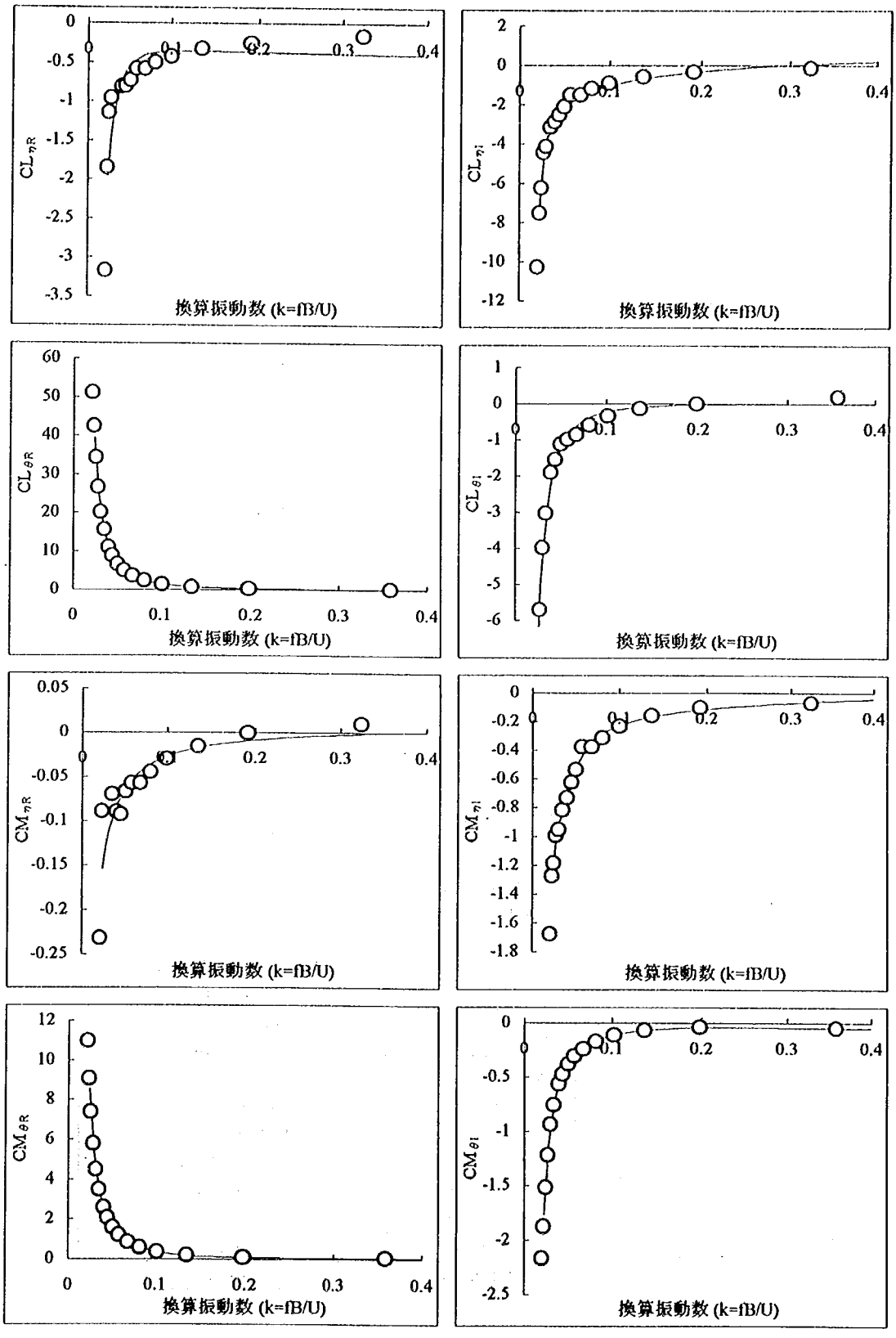
非定常空気力係数の定義：

$$L = \pi\rho B^3\omega^2\left\{\left(CL_{\eta R} + i\cdot CL_{\eta I}\right)\cdot\bar{\eta} + \left(CL_{\theta R} + i\cdot CL_{\theta I}\right)\cdot\theta\right\}$$

$$M = \pi\rho B^4\omega^2\left\{\left(CM_{\eta R} + i\cdot CM_{\eta I}\right)\cdot\bar{\eta} + \left(CM_{\theta R} + i\cdot CM_{\theta I}\right)\cdot\theta\right\}$$

但し，
- L ：非定常揚力（上向き正）
- M ：非定常モーメント（時計回り正）
- $\bar{\eta}$ ：たわみ無次元変位（上向き正）
- $\bar{\theta}$ ：ねじれ変位（時計回り正）
- $CL_{\eta R}$~CM_{θ} ：非定常空気力係数（換算振動数 k=fB/U の関数）
- ρ ：空気密度
- B ：桁幅員（全弦長）
- ω ：円振動数（rad/s）
- f ：振動数（Hz）（$\omega=2\pi f$）
- U ：風速

表－3.2.4.3　非定常空気力測定結果



*近似曲線は低換算振動数に重点をおいている

尚，部分模型応答試験結果と前項の非定常空気力を用いて2次元フラッター解析を実施した結果とを比較したものを表－3.2.4.4に示す。

表－3.2.4.4　実験及び解析により求められたフラッター限界風速の比較

部分模型応答試験結果	二次元フラッター解析結果
60.6 m/s	59.9 m/s

上表より，フラッター限界風速の実験値と解析値との差異は1.2%程度であり，表－3.2.4.3に示す非定常空気力が精度良く求められていることが確認できる。

(5)三次元フラッター解析

表－3.2.4.5に示す構造諸元及び次項表－3.2.4.6に示す解析条件にしたがって，三次元フラッター解析を行った。

表－3.2.4.5　三次元フラッター解析に用いた想定吊橋の構造諸元

項目			構造諸量
形式		構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
		支間長	1,250m+2,500m+1,250m
主ケーブル		サグ比	1/9
		ケーブル間隔	35.5 m
		有効断面積	2×0.6=1.2 m^2/Br.
		弾性係数	2.03×10^7 t/m^2
		許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー		ハンガー間隔	28 m
		断面積	0.0056 m^2
		弾性係数	1.40×10^7 t/m^2
補剛桁		断面積	1.3 m^2/Br.
		鉛直曲げ剛性	12 m^4/Br.
		水平曲げ剛性	160 m^4/Br.
		ねじれ剛性	26 m^4/Br.
		極慣性	336.7 t･m･s^2/m/Br.
死荷重		吊構造部	24 t/m/Br.
		ケーブル	11 t/m/Br.
		合計	35 t/m/Br.
主塔		ケーブル理論頂	TP+380.0 m
		面内剛性	200 m^4/shaft
		面外剛性	100 m^4/shaft
		ねじれ剛性	35 m^4/shaft
モデル化	桁	境界条件	ｳｨﾝﾄﾞ沓，ﾀﾘｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化
		重心位置	定着点と同じ
	塔	水平材	なし
		塔柱間隔	45 m

表－3.2.4.6　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項目</th><th>解析条件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法
低次 50 モードを取り込む
無風時固有モードを使用</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125kgf･s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ=0.02</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力，揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力係数</td><td>平板理論値，実測値（強制振動法）</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
C_D=0.75,　A_n=7.0 m²/m/Br.

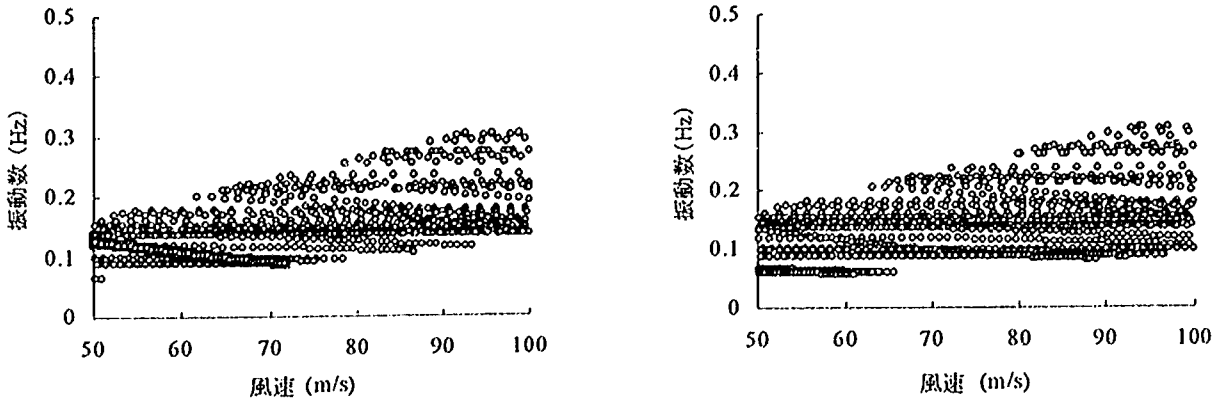
ケーブル：
C_D=0.75,　A_n=2.0 m²/m/Br.</td></tr>
</table>

平板及び今回開発した断面形状に対して，3 次元フラッター解析を実施した結果を下表にまとめて示す。

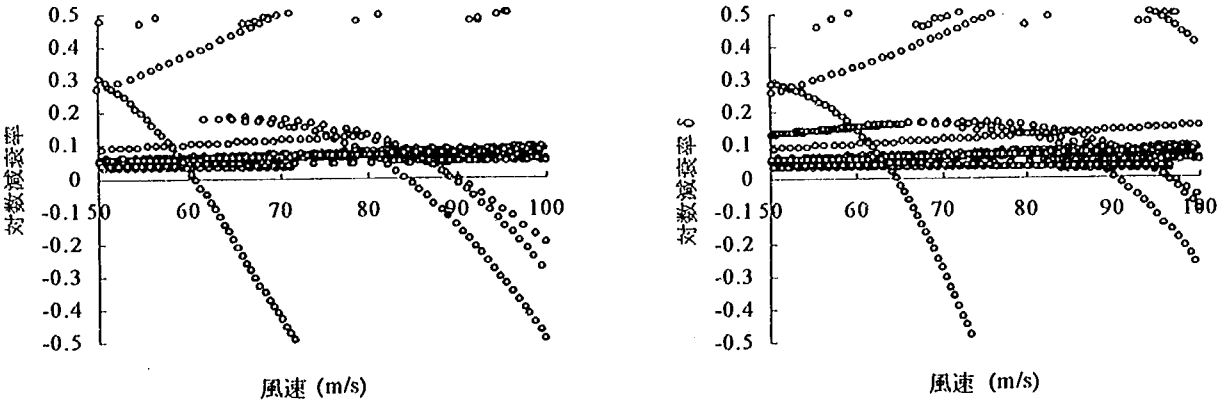
表－3.2.4.7　3 次元フラッター解析結果

平板	今回開発した断面
60.8 m/s	64.6 m/s

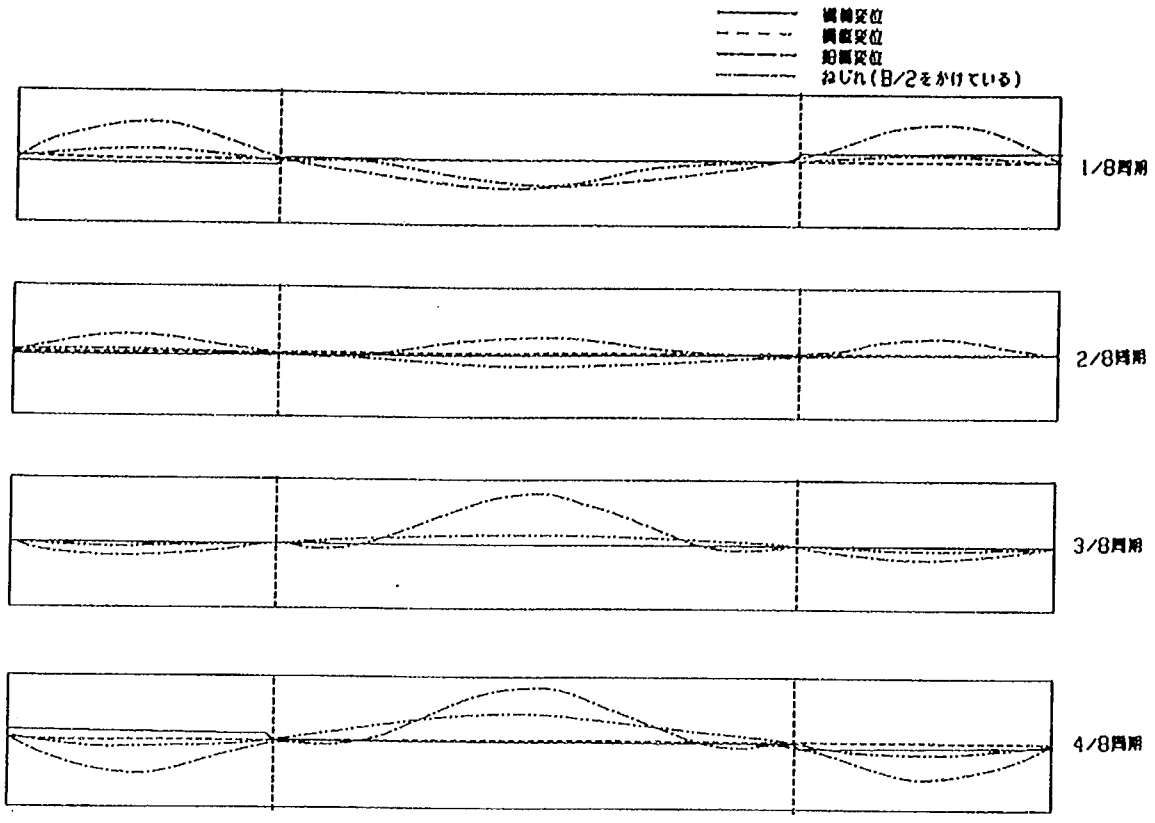
また，フラッター振動数及び対数減衰率，フラッターモード図は次項にそれぞれまとめて示す。



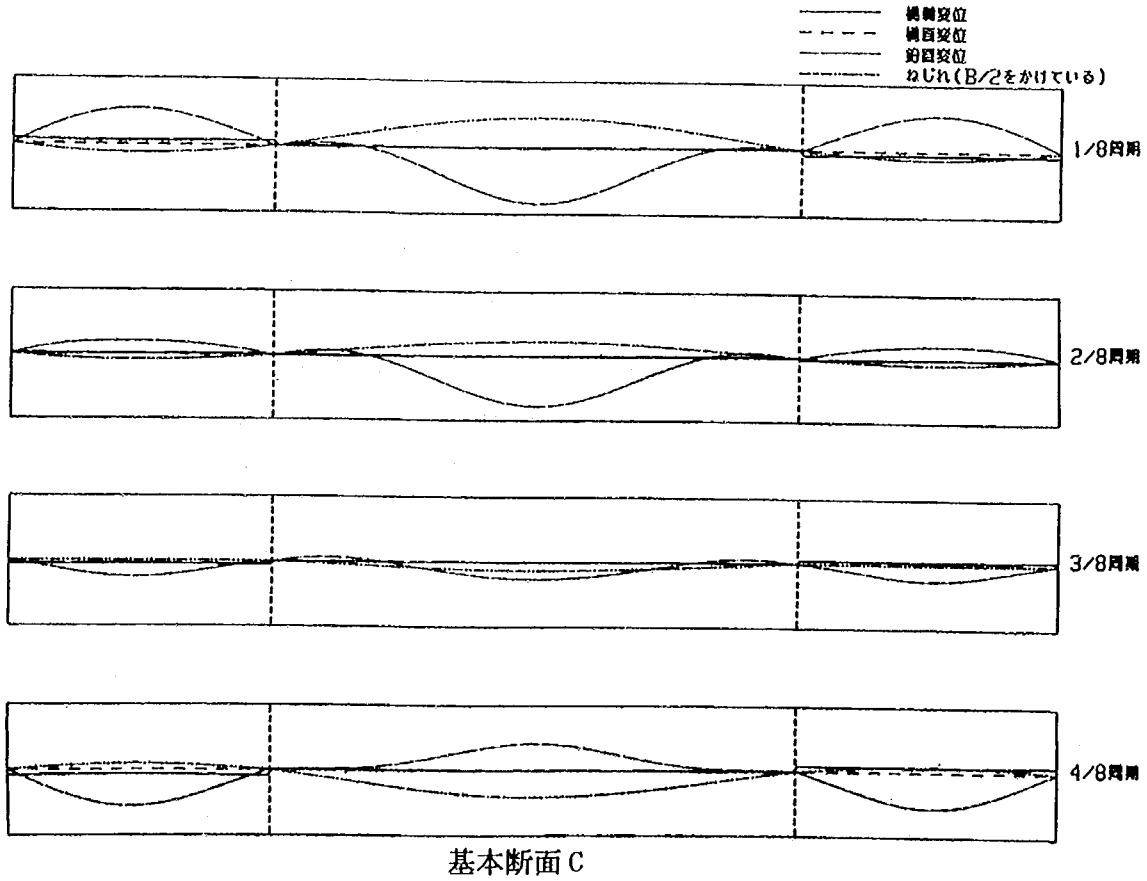
図－3.2.4.7　フラッター解析結果（フラッター振動数）



図－3.2.4.8　フラッター解析結果（対数減衰率）



平板

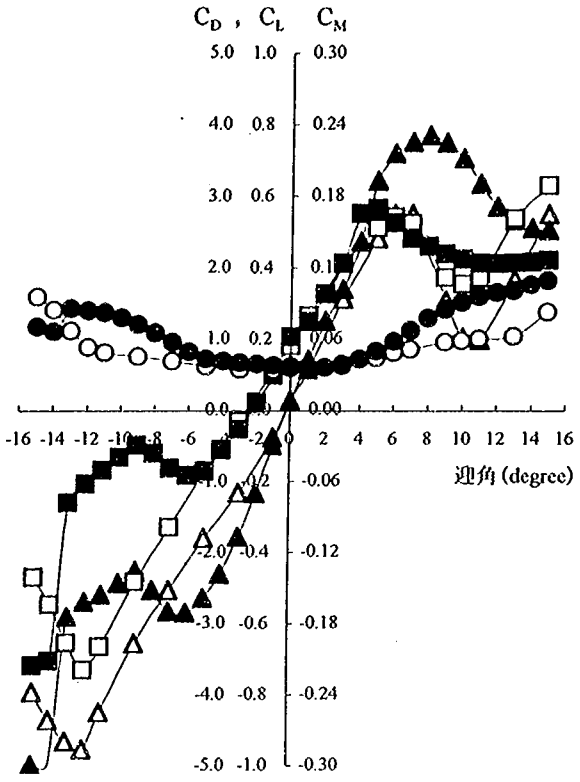


基本断面C

図－3.2.4.9　フラッター解析結果（フラッターモード図）

(6)　静的３分力測定試験

基本断面Ａ及び基本断面Ｃ（大型模型で測定）を比較したものを下図に示す。



●：C_D　▲：CL　■：C_M

模型名	基本断面Ａ
風速	16.0 m / s
外郭面積	0.1672 m2
投影面積	0.1564 m2
充実率	93.6 %
模型幅	0.5467
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.631
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	6.817　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.296　(1 / rad)

○：C_D　△：CL　□：C_M

模型名	基本断面Ｃ
風速	20.0 m / s
外郭面積	0.5559 m2
投影面積	0.5041 m2
充実率	90.7%
模型幅	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.599
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	4.939　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.201　(1 / rad)

図－3.2.4.10　静的３分力特性

上図より，抗力・モーメント係数に関しては，基本断面Ａと基本断面Ｃの特性に顕著な差異は認められないが，迎角０度における揚力勾配については，基本断面Ｃの方が３割程度小さくなっており，鉛直方向のガスト応答に対しては，基本断面Ｃの方が若干有利な特性を有するものと考えられる。

(7) まとめ及び今後の課題

1) まとめ

本節では，まず縮尺 1/200 の小型模型を用いて部分模型応答試験を実施し，既提案の一箱桁断面（基本断面 A）のフェアリング形状及び桁高を変更した 3 案（基本断面 C，D，E）に関して耐フラッター性能の検討を行った。 その結果，今回提案した何れの断面も基本断面 A より優れた耐フラッター性能を有することが明らかとなり，中でも，基本断面 C が最も優れた耐フラッター性能を示すことが判った。

次に，基本断面 C において，高欄形状・検査車レールなどの微小部材を再現した縮尺 1/40 の大型模型を製作し，上記同様部分模型応答試験を実施した。 その結果，迎角+3 度においては，小型模型の場合よりも若干フラッター限界風速が低下するものの，迎角 0 度においては，ほぼ同一のフラッター特性を有しており，基本断面 C の有する優れた耐フラッター性能が確認できた。

また，，本断面から得られた非定常空気力を用いて 3 次元フラッター解析を実施し，全橋状態におけるフラッター限界風速の推定を行った。 その結果，64.6m/s という一箱桁としては非常に良好なフラッター限界風速が得られ，本断面の優れた耐フラッター性能が確認できた。

さらに，基本断面 C の静的 3 分力を測定した結果，迎角 0 度における揚力勾配が基本断面 A よりも低減されており，鉛直方向のガスト応答に対しては若干有利な特性を有することが確認された。

尚，ここで見出された基本断面に対して，さらなるフラッター限界風速の向上を目的とした耐フラッター対策部材の設置及び新たなケーブルシステムの適用に関する検討に関しては，本報告書の 3.4.6 項に述べられているので，参照されたい。

2)今後の課題

ここでは，フラッター限界風速の向上を目的として検討を進めてきたが，渦励振・ガスト応答に関してもさらに検討を進めていく必要があるものと考えられる。

また，今回は 6 車線案を主眼において桁の耐風安定性検討が進められてきたが，諸々の状況から，今後は 4 車線案が有力になることも考えられ，桁幅を縮小した場合の耐風安定性についてもさらに検討を進めていく必要があるものと考えられる。

3.2.5　3本ケーブル吊橋の検討

3本ケーブル吊橋とは、従来の吊橋（以下、2本ケーブル吊橋）のメインケーブルの一部をを補剛桁中央部に移動させ、3本のメインケーブルにより補剛桁を支える吊橋形式であり、ケーブルの極慣性モーメントの減少によるねじれ振動数の向上を狙ったものである。さらに、ケーブルシステムとして、斜めステイ方式の検討も実施した。斜めステイの概念図を図－3.2.5.1 に示す。これは、クロスステイの錯綜を生じさせない様にセンターケーブルからサイドケーブルのハンガー定着点に設置する3 本ケーブル吊橋独特のケーブルシステムである。ここでは、メインケーブル断面積比、斜めステイの断面積の検討、ステイの設置位置の検討、ケーブルシステムと桁断面との組み合わせの検討を実施した。なお、3本ケーブル主ケーブル断面積比については、中央ケーブルに2、両側ケーブルに1の割合で配分した構造形式（断面積比 1:2:1 と称する）を基本とした。また、フラッター解析条件については、解析条件一覧表（付録参照）の記号で表示した。

(1)メインケーブル断面積比、斜めステイの断面積の検討

メインケーブル断面積比、斜めステイの断面積が、フラッター発現風速に及ぼす影響をフラッター解析により検討した。斜めステイの設置位置は、中央径間 L/4 点、側径間中央部の計4ヶ所を基本とし、桁に作用する空気力は、平板翼理論値、桁高7m一箱桁（3．2．2の基本断面に相当）の測定値を用いている。なお、斜めステイは、高風速下の水平たわみ変形状態において、張力が入る側のみステイを設置した（「片効き」状態）。また、比較対象として、従来方式である2本ケーブル吊橋にクロスステイを付加する方式（以下、ＣＳ方式）の検討結果を併記しているが、設置位置は斜めステイと同じである。

1)平板翼理論値を用いた場合

平板翼理論値を用いた場合の検討結果（解析条件：ＮＫ－１）を一覧表にして、表－3.2.5.1 に示す。これより、ステイのない場合には、メインケーブルを中央に集めるほど、フラッター発現風速は低下する傾向にあることが分かる。したがって、極慣性モーメントの低減よりも、両端ケーブルによるねじれ剛性付与効果の低減の方が支配的であると判断される。一方、斜めステイを設置した場合には、斜めステイの断面積によって傾向が異なっていることがわかる。すなわち、ステイの断面積が充分に大きい場合は、メインケーブルを中央に集中させる程、フラッター発現風速が高くなる傾向にあり、2本ケーブル吊橋（同表中の断面積比 1:0:1 に相当）と比較すると、断面積比 1:2:1 では2本ケーブル吊橋と同等であり、断面積比 1:18:1 では2m／s の上昇が見られる。しかしながら、ステイの断面積が充分でない場合には、斜めステイのない場合と同様、メインケーブルを中央に集中させる程、フラッター発現風速が低下する傾向にある。

2)桁高7m一箱桁断面（基本断面）の測定空気力を用いた場合

斜めステイの断面積を充分に大きい場合のフラッター解析結果を、2本ケーブル吊橋にクロスステイを設置する方式と比較して、表－3.2.5.2 に示す。なお、本解析結果には、有風時による横たわみの影響を考慮しており、風速 80m/s 時の有風時の振動モードを用いた。解析条件は、CaseA が解析条

件 NK－１、CaseB が解析条件 NK－２、CaseC が解析条件 NK－３である。同表より、３本ケーブル吊橋（断面積比 1:2:1）に斜めステイを付加する方式では、従来方式と同程度のフラッター発現風速を有することが分かる。一方、断面積比 1:18:1 については、発現風速が大幅に低下しており、平板翼理論値を用いた場合とは、全く逆の傾向を示している。空気力の迎角特性の影響については、ほとんど現れていないことから、この原因は、平板翼と測定された非定常空気力が異なる事によるものと判断できる。また、同表の内、Case　C におけるＶ－δ図を図－3.2.5.2 に示す。これより、各ケースともＶ－δの形状が異なっていることが分かる。すなわち、２本ケーブル吊橋（同図(a)）ではフラッター発現風速付近には２つの分枝が存在するのに対し、３本ケーブル吊橋（同図(b)(c)）では１つの分枝のみであること、また、フラッター発現風速の低い断面積比 1:18:1 については、風速の増加に伴う減衰の低下率が他のケースと比べて小さいことが分かる。さらに、各空気力成分が、フラッター発現風速付近において対象橋梁にした仕事量を、平板翼理論値を用いた場合、測定空気力を用いた場合を比較して、図－3.2.5.3 に示す。これより、３本ケーブル吊橋においては、平板翼理論値を用いた場合では、桁の抗力成分が成す仕事（減衰力）の寄与度が２本ケーブル吊橋と比べて小さく、それに対応して桁のモーメント成分が成す仕事（加振力）の寄与度が小さいことが分かる。抗力成分は、水平たわみに伴う準定常空気力であることから、その減少はフラッターモードの水平たわみ量の減少によるものである。一方、モーメントが成す仕事量については、非定常空気力の連成項が加振力、非連成項が減衰力となるが、３本ケーブル吊橋ではねじれ変形による剛性付与効果が小さいため、フラッターモードにおけるたわみに対するねじれの比が２本ケーブル吊橋よりも大きくなることから、３本ケーブル吊橋に見られるモーメント成分がなした仕事量の減少は、ねじれ量の増加によって、非連成項の減衰力が増加したことが一因であると判断される。以上より、３本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式は、２本ケーブル吊橋と同等の耐風性を確保するものの、フラッターモードは異なっており、桁の非定常空気力の寄与度は大きいことから、桁の非定常空気力の影響を受けやすい構造形式であることが示唆される。一方、測定空気力を用いた場合では、２本ケーブル吊橋、３本ケーブル吊橋（断面積比 1:2:1）については、平板翼理論値の場合と同様の仕事量分布を示しているものの、断面積比 1:18:1 では全く異なっており、フラッターモードが全く異なっていることが確認できる。ケーブルの抗力に伴う空力減衰が大きいが、これは桁両端のメインケーブルの振動が大きいことに起因している。

(2)　ステイの設置位置の検討

３本ケーブル吊橋（断面積比 1:2:1）において、斜めステイの設置位置および設置数の検討を行った。解析条件はＮＫ－１であり、桁断面に作用させる空気力には平板翼理論値を用いた。斜めステイ設置位置については、中央径間側の斜めステイ設置位置を L/4 点から L/3 点に変更した場合を検討した。この位置は、昨年度の研究におけるクロスステイ（片効き）の最適設置位置である。また、設置本数の検討については、建築限界に影響しない範囲に全て斜めステイを設置した場合を最大設置本数として、側径間側の設置本数を減らしたケース、昨年の報告書で効果が認められた傾斜クロスステイ

を設置した場合を検討した。なお、ステイの断面積は一律0.0055m²（上記ステイ1倍に相当）とし、斜めステイ設置における建築限界に影響しない範囲は主塔から中央径間側約 900m、側径間側約 900mの区間である。解析結果を表－3.2.5.3 に、各ケースにおけるＶ－δ図を図－3.2.5.4(1)～(3)に示す。これより、設置位置をL/3 点に変更したケースでは、フラッター発現風速の上昇がわずかながら認められており、クロスステイの場合と同様の傾向を示している。また、3本ケーブル吊橋にクロスステイを適用した場合では、斜めステイよりわずかながら大きな効果が見られるものの、2本ケーブル吊橋にクロスステイを適用した場合（昨年の報告では 72m/s）よりも効果は小さい。また、中央径間側に建築限界に影響しない範囲全域に設置した場合には、７４ｍ／ｓ、中央径間、側径間とも建築限界に影響しない範囲全域に設置した場合は７８ｍ／ｓと、ステイの設置箇所を増やせばフラッター発現風速が高くなることがわかる。一方、傾斜クロスステイについては、両効きの場合には、建築限界に影響しない範囲に斜めステイを全数設置した場合と同等の効果が得られるが、片効きの場合には発現風速が６６ｍ／ｓと低下するため、傾斜クロスステイによる効果については詳細な検討が必要と判断される。

(3)　一箱桁断面との組み合わせ検討

3本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式（以下、ＣＳ方式）は、主桁の非定常空気力の影響を受けやすい構造形式であることが示唆された。すなわち、耐風性の良い断面と組み合わせることによって、従来のクロスステイ方式（ＤＳ方式）よりもフラッター発現風速を高くできる可能性があるため、一箱桁断面との組み合わせを検討した。ステイ設置位置は、基本ケース（中央径間L/4 点と側径間中央）、対象とした桁断面は、ばね支持試験（3.2.2 参照）で耐風性が良好であった改良断面Ｄ、Ｅの2断面とした。解析条件は、ＮＫ－３に従った。フラッター解析結果を、CS 方式と DS 方式両者比較して、表－3.2.5.4 に、また、改良断面 D、改良断面 E と CS 方式、DS 方式をそれぞれ組み合わせた場合のＶ－δ図を図-3.2.5.5(1)～(4)に示す。桁断面形状を比較すると、改良断面Ｄ、改良断面Ｅの方が、基本断面よりもフラッター発現風速が2割程度高くなっており、ばね支持試験結果とほぼ同程度であることがわかる。また、ＣＳ方式とＤＳ方式を比較すると、改良断面Ｄ、Ｅと組み合わせた場合には、ＣＳ方式を用いた方が高いフラッター発現風速を示しており、80m/s 以上となっていることがわかる。また、両方式のフラッター発生時の応答振動数はほぼ同じであること、Ｖ－δ曲線については、ＣＳ方式ではフラッター発現風速付近には2つの分枝が存在するのに対し、ＤＳ方式では1つの分枝のみであり、平板翼を用いた場合とは異なっていることがわかる。改良断面Ｄと組み合わせた場合の、フラッター発現風速付近における各空気力成分が対象橋梁にした仕事量を図－3.2.5.6 に示す。同図(a)には各空気力成分がなした仕事量、(b)には桁になす仕事の橋軸方向分布を示している。同図(a)より、両者は桁の揚力とモーメント成分の寄与度が異なっており、3本ケーブル吊橋＋斜めステイ方式では揚力成分がより大きな加振力、モーメント成分が大きな減衰力として寄与していることがわかる。また、同図(b)より、モーメント成分がなす仕事は中央径間が大部分であり、たわみ振動が加振力に、ねじれ振動が減衰力になっていることがわかる。3 本ケーブル DS 方式ではメ

インケーブルのねじれ変形時の剛性付与効果が小さいため、フラッターモードのたわみに対するねじれ振幅が大きくなることから、モーメント成分がなす仕事量の変化はねじれ振動の減衰力が大きくなったものと推察される。一方、揚力成分については、同図(b)より、DS 方式の側径間のねじれ振動、たわみ振動による減衰力の寄与が大きくなっているものの、中央径間側のねじれ振動の加振力が大きくなっているため、全体として揚力がなす仕事が加振力となっているものと判断できる。総じて、DS 方式は桁に作用する加振力、減衰力ともに大きくなっていることから、桁の非定常空気力の影響を受けやすい構造形式であると判断される。しかしながら、今回見られた DS 方式の優位性は、フラッターモードの変化によって各空気力成分がなす仕事量の大きさ、橋軸分布が変わったことにより生じているため、吊橋のスパン割等の基本構造条件、桁断面形状との組み合わせの変更によってフラッターモードが変化する場合には、優位性が見られない場合もあると考えられるため、慎重な対応が望まれる。

(4) まとめ

3本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式について、フラッター解析による耐風性検討を、従来方式（2本ケーブル吊橋にクロスステイを付加する方式）と比較しつつ実施した。得られた結果を以下に示す。

1)桁に作用する非定常空気力に平板翼理論値を用いたケースでは、斜めステイの断面積が充分に大きい場合には、メインケーブルを中央に集中させる程、フラッター発現風速が高くなる傾向が見られた。一方、斜めステイの断面積が充分でない場合には、斜めステイを設置しない場合と同様に、メインケーブルを中央に集中させる程、フラッター発現風速が低くなる。

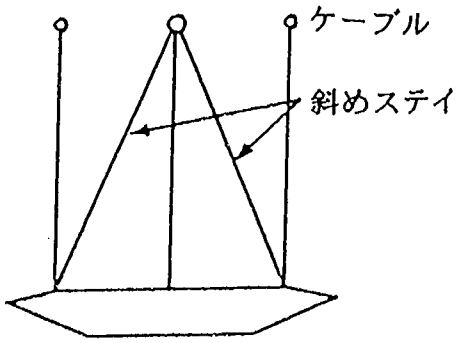
2)桁高7m一箱桁断面の測定空気力を用いたケースでは、断面積比 1:2:1 の場合には従来方式とほぼ同等のフラッター発現風速を有する（発現風速　66m／s）。一方、断面積比 1:18:1 の場合には、フラッター発現風速が52m／sと大幅に低下した。

3)各空気力成分がフラッター発現風速付近において対象橋梁にした仕事量を計算した結果、3本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式は、主桁の非定常空気力の影響を受けやすい構造形式であることが示唆された。

4)斜めステイの本数を増加させても、大幅なフラッター発現風速の上昇は認められない。

5) ばね支持試験結果で耐風性の良好な一箱桁改良断面D、Eと3本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式の組み合わたケースでは、フラッター発現風速が80m／s以上となり、従来方式よりも高いフラッター発現風速となった。

6)今回見られた3本ケーブル吊橋に斜めステイを付加する方式の優位性は、フラッターモードの変化によって各空気力成分がなす仕事量の大きさ、橋軸分布が変わったことにより生じているため、吊橋のスパン割等の基本構造条件、桁断面形状との組み合わせの変更によってフラッターモードが変化する場合には、優位性が見られない場合もあると考えられるため、慎重な対応が望まれる。



図－3.2.5.1　斜めステイの概念図

表－3.2.5.1　メインケーブル断面積比と
ステイ断面積の検討結果

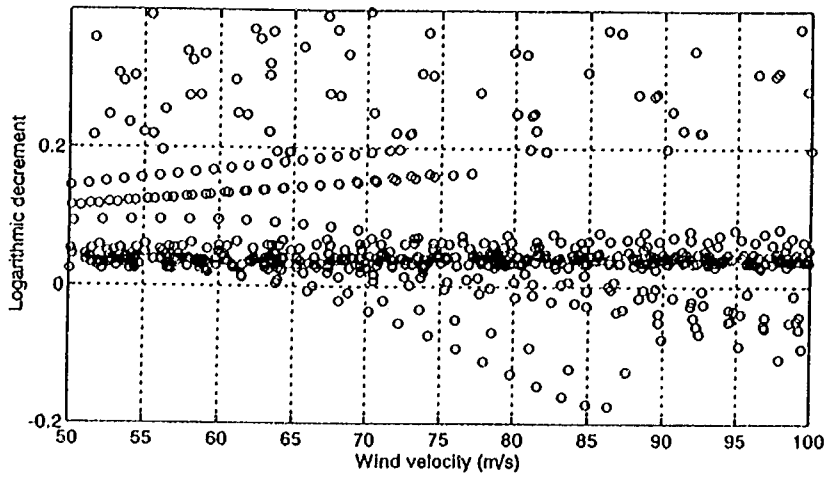
Case	メインケーブル断面積比	フラッター発現風速(m/s)		
		ステイなし	ステイ1倍	ステイ10倍
A	1:0:1	58	72	74
B	1:2:1	58	67	74
C	1:18:1	52	65	76
D	0:1:0	49	64	74

(備考)　桁に作用する空気力は平板翼理論値とした。
ステイ設置位置:中央径間L／4点と側径間中央部の計4ヶ所
ステイ1倍:ステイの断面積が1倍(本検討では0.0055m2)を示す。

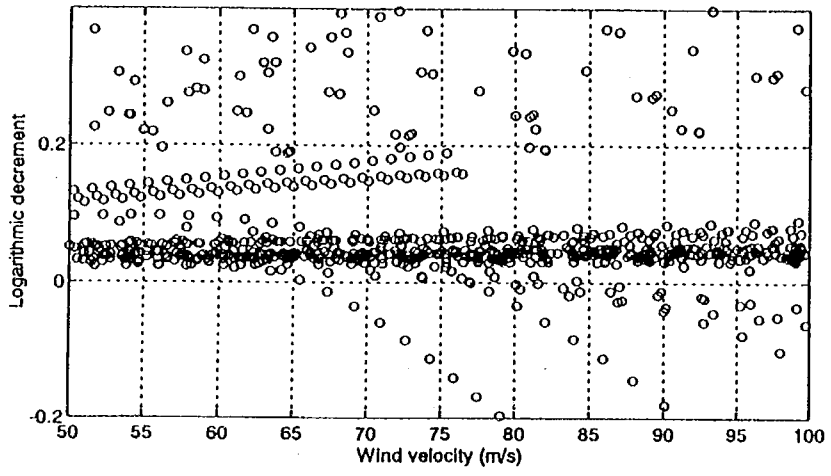
表－3.2.5.2　フラッター解析結果

Case	解析条件			フラッター発現風速(応答振動数)		
	使用モード	桁空気力		2本ケーブル吊橋＋クロスステイ方式	3本ケーブル吊橋＋斜めステイ方式	
		空気力	迎角特性		断面積比1:2:1	断面積比1:18:1
A	無風時	平板翼	無視	74m/s (0.099Hz)	74m/s (0.093Hz)	76m/s (0.089Hz)
B	有風時	桁高7m	無視	68m/s (0.116Hz)	68m/s (0.129Hz)	53m/s (0.145Hz)
C	(V=80m/s)	1箱桁	考慮	66m/s (0.134Hz)	66m/s (0.131Hz)	52m/s (0.146Hz)

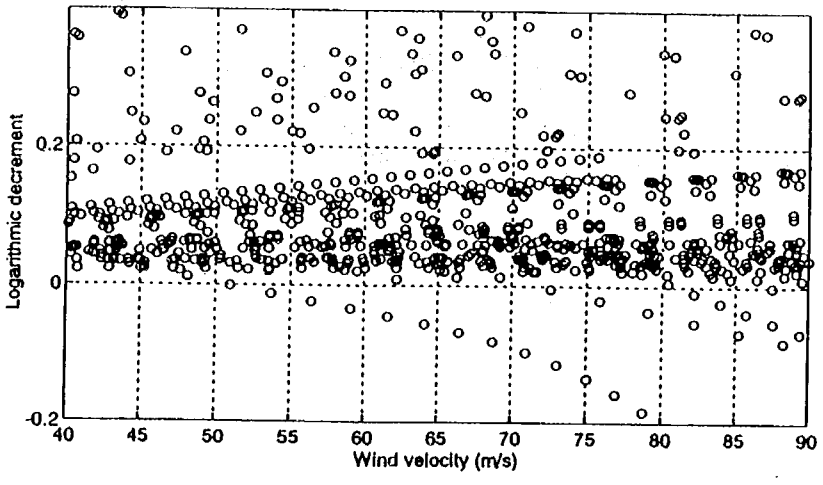
(備考)　ステイ設置位置は、中央径間L／4点と側径間中央部の計4ヶ所。断面積は、0.055m2／本。



(a)　２本ケーブル吊橋＋クロスステイ方式

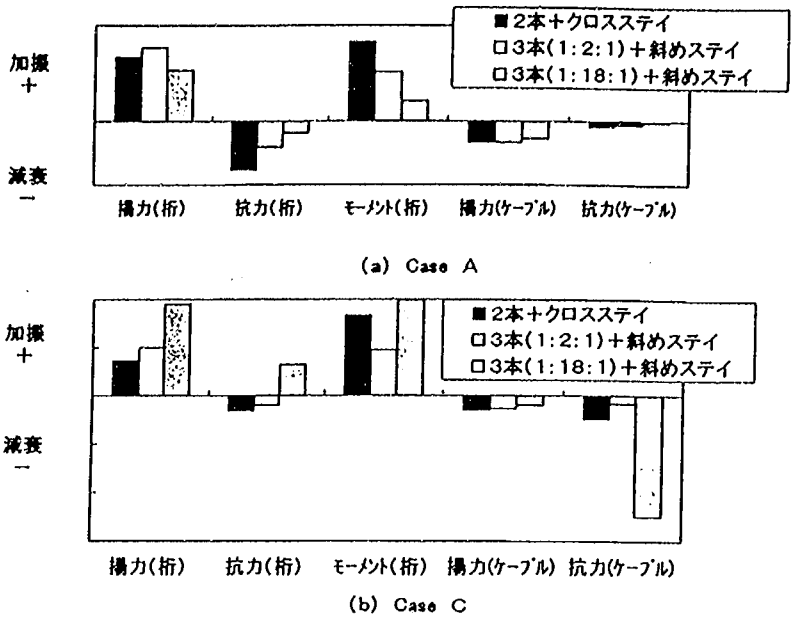


(b)　３本ケーブル吊橋（断面積比 1:2:1）＋斜めステイ方式



(c)　３本ケーブル吊橋（断面積比 1:18:1）＋斜めステイ方式

図－3.2.5.2　　Ｖ－δ曲線（桁高７ｍ１箱桁断面（基本断面）を用いたケース）

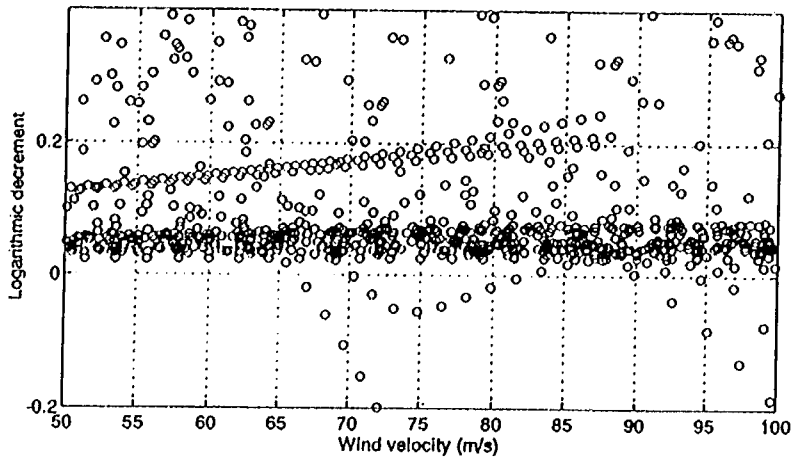


図－3.2.5.3　フラッター発現風速付近における
各空気力成分がなした仕事量（平板翼理論値）

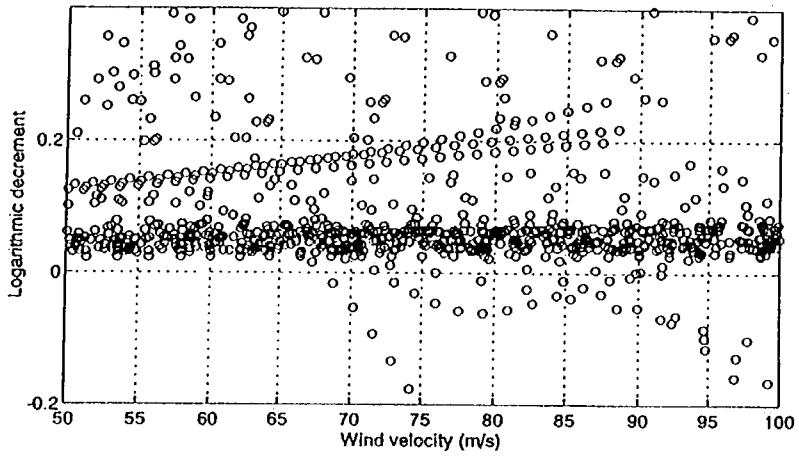
表－3.2.5.3　3本ケーブル吊橋におけるステイ設置位置の検討
（平板翼理論値を用いた場合）

Case	中央径間		側径間		フラッター
	設置位置	ステイ	設置位置	ステイ	発現風速（m/s）
1	L／4点	斜め(片)	中央	斜め(片)	67
2	L／4点	クロス(片)	中央	クロス(片)	68
3	L／3点	斜め(片)	中央	斜め(片)	68
4	建築限界	斜め(片)	中央	斜め(片)	74
5	建築限界	斜め(片)	建築限界	斜め(片)	78
6	建築限界	斜め(片)	中央	傾斜(両)	78
7	建築限界	斜め(片)	中央	傾斜(片)	66

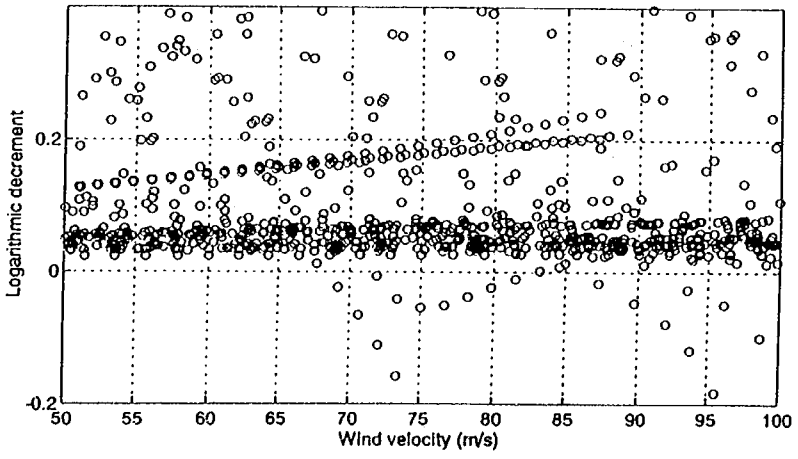
（備考）
建築限界：建築限界に影響しない範囲に全て設置したことを示す。
斜め：斜めステイ、クロス：クロスステイ、傾斜：傾斜クロスステイを示す。
括弧内は、(片)：片効き、(両)：両効きを示す。
ステイの断面積は、1倍(0.0055m2)である。



(a) Case 1

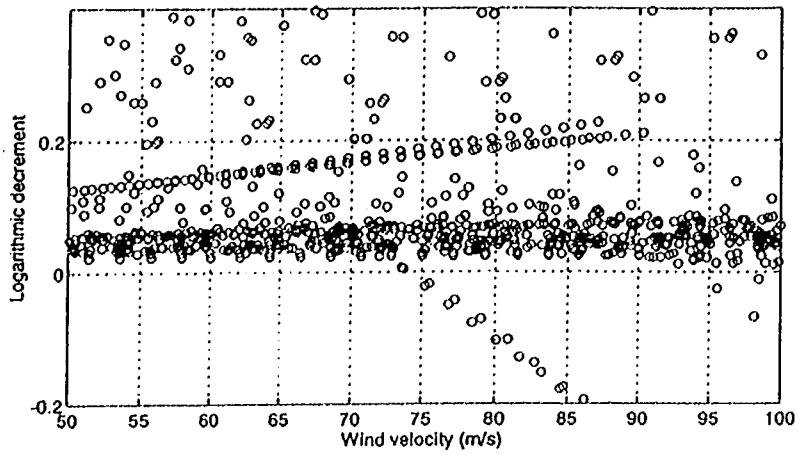


(b) Case 2

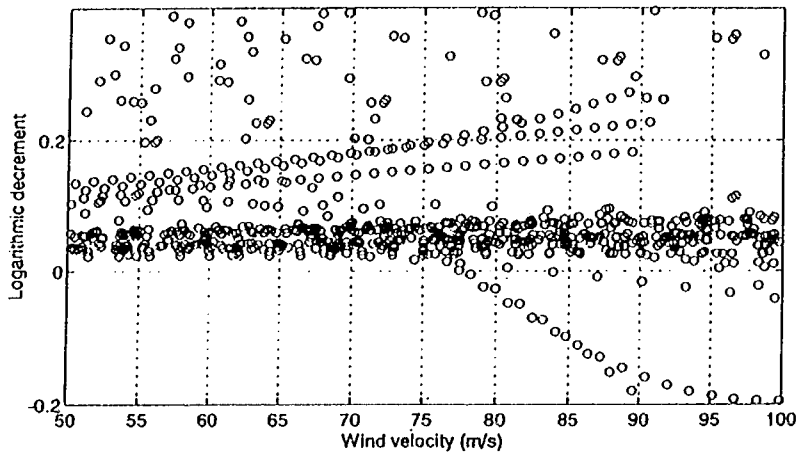


(c) Case 3

図－3.2.5.4(1)　　Ｖ－δ曲線（スティの設置位置の検討）

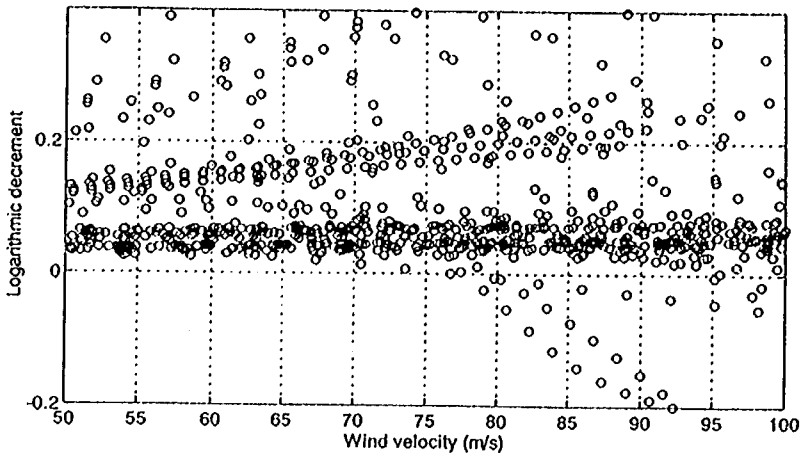


(d) Case 4

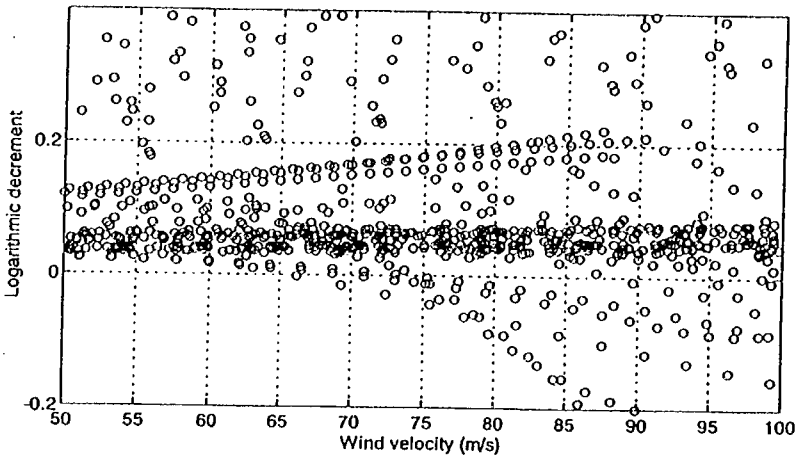


(e) Case 5

図－3.2.5.4(2)　Ｖ－δ曲線（ステイの設置位置の検討）

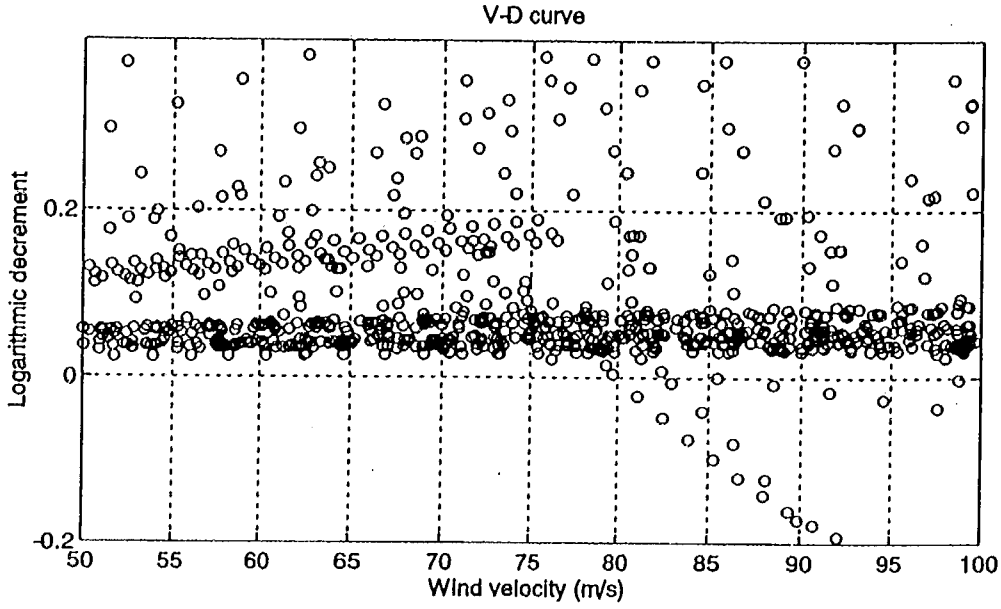


(f) Case 6

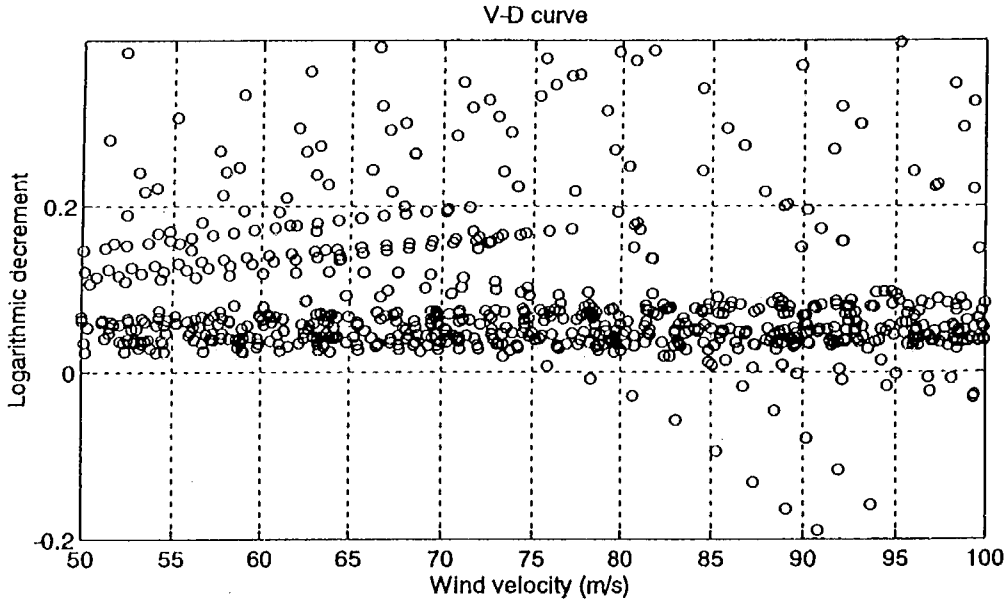


(g) Case 7

図－3.2.5.4(3)　Ｖ－δ曲線（ステイの設置位置の検討）

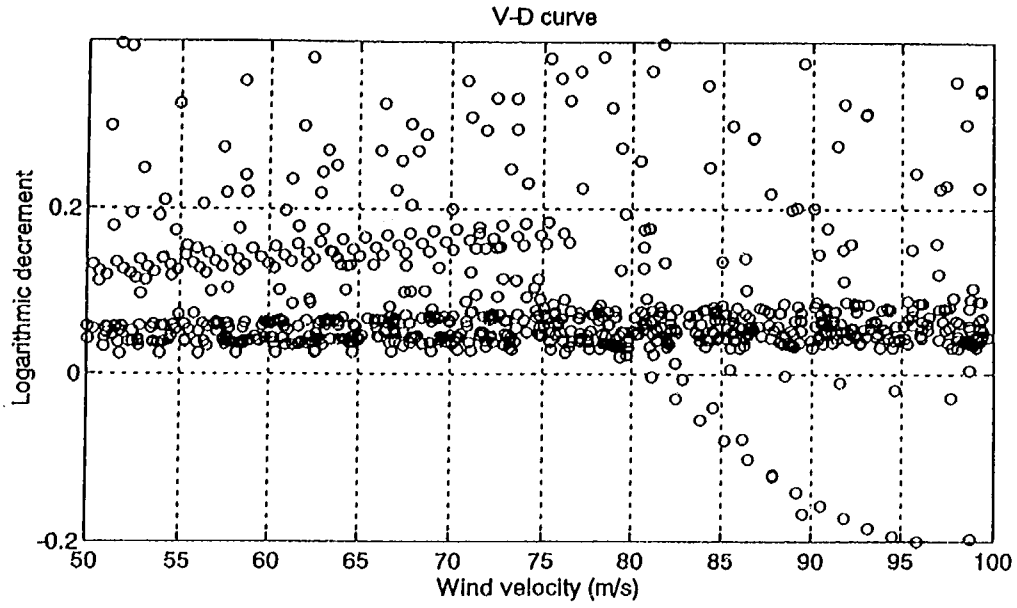


（ａ）　改良断面Ｄ＋ＤＳ方式

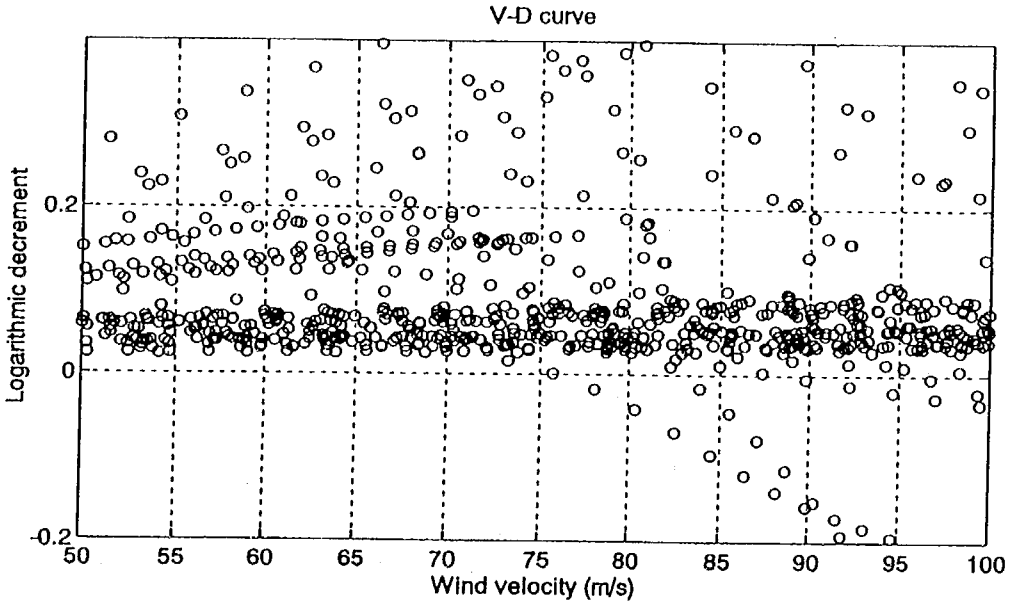


（ｂ）改良断面Ｄ＋ＣＳ方式

図－3.2.5.5(1)　　Ｖ－δ曲線（改良一箱桁断面Ｄとの組み合わせ）



（a）　改良断面Ｅ＋ＤＳ方式



（b）改良断面Ｅ＋ＣＳ方式

図－3.2.5.5(2)　　Ｖ－δ曲線（改良一箱桁断面Ｅとの組み合わせ）

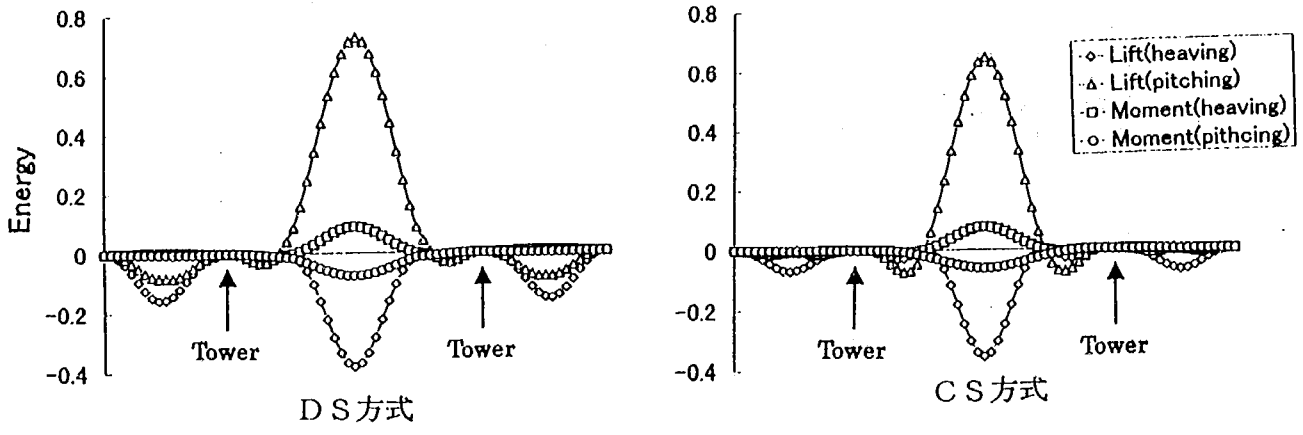
表－3.2.5.4　　一箱桁断面とケーブルシステムの組合せ検討結果

一箱桁断面形状	構造形式	
	CS方式	DS方式
基本断面	66m/s (0.134Hz)	66m/s (0.131Hz)
改良断面D	77m/s (0.116Hz)	80m/s (0.120Hz)
改良断面E	76m/s (0.115Hz)	81m/s (0.120Hz)

（備考）括弧内はフラッター発生時の振動数を示す。



（a）　各空気力成分がなした仕事量



（b）空気力が主桁になした仕事の橋軸方向分布

図－3.2.5.6　　フラッター発現風速付近における
各空気力成分がなした仕事量（測定空気力）

3．2．6　鉛直クロスステイの最適位置に関する検討

(1)　検討内容

昨年度は、作用させる空気力として測定空気力を使用した場合の鉛直クロスステイの最適位置について検討を行ったが、ここでの鉛直クロスステイは抗圧部材（両効き状態）とした検討であった。そこで今年度は、有風時において一方のステイ張力が抜けた場合を想定し、鉛直クロスステイを非抗圧部材（片効き状態）とした場合の鉛直クロスステイの最適位置について検討を行った。

また、昨年度の検討（両効き状態）において対象としたケースの中から数ケースについて、有風時変形を考慮したフラッター解析を実施した。さらに、暴風時の静解析を実施し、抗圧クロスステイ（両効き状態）および非抗圧クロスステイ（片効き状態）の概略構造を検討した。

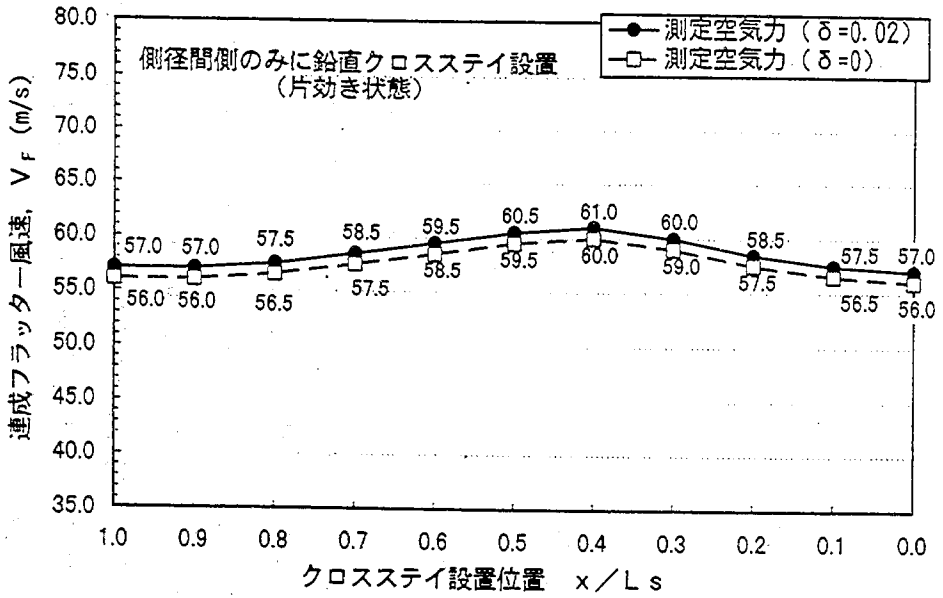
(2)　側径間側のみに設置した場合の最適位置（片効き状態）

片効き鉛直クロスステイの側径間側における最適位置を把握するため、鉛直クロスステイ位置 x/Ls（x は塔側から鉛直クロスステイまでの距離、Ls は側支間長）をパラメーターとした連成フラッター解析を実施した。構造対数減衰率 δ_S を δ_S=0 および δ_S=0.02 とした場合に得られた、鉛直クロスステイ位置と連成フラッター風速の関係を図－3.2.6.1 に示す。図－3.2.6.1 から、片効き状態では両効き状態での結果と異なり、たとえ構造対数減衰率が δ_S=0 であっても連成フラッター風速がステイ設置前の値（V_F=56.0m/s）を大幅に下回るような現象は認められず、x/Ls=0.4～0.5 付近に鉛直クロスステイを設置すれば V_F=60m/s 程度まで連成フラッター風速が上昇していることがわかる。一例として図－3.2.6.2 に x/Ls=0.4 の場合の V-δ 曲線（風速と空力減衰の関係）を示す。これより、この場合の連成フラッターは励振力が非常に強く、構造対数減衰率を δ_S=0 から $_S$=0.02 に増加させても連成フラッター風速は 1m/s 程度しか上昇せず、最適位置も構造対数減衰率を δ_S=0 とした場合と同じく x/Ls=0.4～0.5 付近にあることがわかる。それゆえ、側径間側における片効き鉛直クロスステイの最適位置は、両効き状態と相違し、構造減衰が幾分変化してもほとんど変化しないと言える。

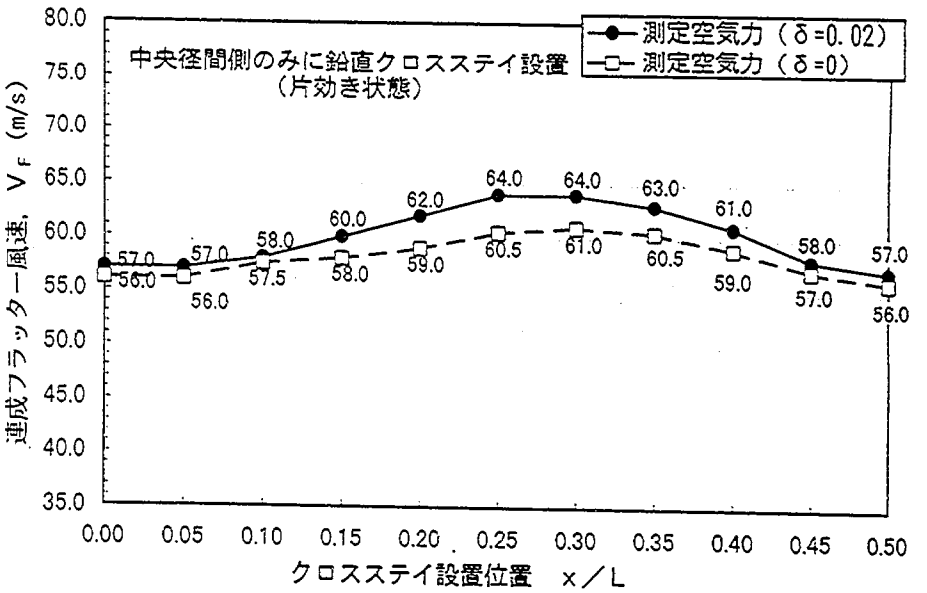
(3)　中央径間側のみに設置した場合の最適位置（片効き状態）

次に、片効き鉛直クロスステイの中央径間側における最適位置を把握するため、中央径間側の鉛直クロスステイ位置 x/L（x は塔側から鉛直クロスステイまでの距離、L は中央支間長）をパラメーターとした連成フラッター解析を実施した。構造対数減衰率を δ_S=0 および δ_S=0.02 とした場合に得られた、鉛直クロスステイ位置 x/L と連成フラッター風速 V_F の関係を図－3.2.6.3 に示す。

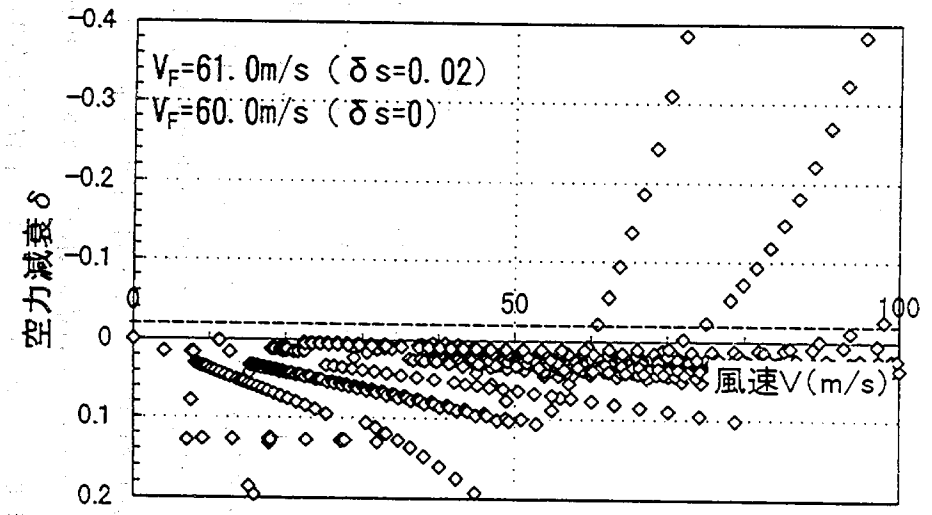
昨年度報告したように、両効きクロスステイを中央径間側のみに設置した場合、x/L=0.4 では連成フラッター風速がステイの設置前の値よりも大幅に低下する現象が認められた。これに対し、片効き鉛直クロスステイでは、図－3.2.6.3 からわかるように、中央径間側のいずれの場所に設置しても連成フラッター風速が低下する現象は認められていない。一方、図－3.2.6.4 の V-δ 曲線（x/L=0.3）とすでに示した図－3.2.6.2 を比較すればわかるように、中央径間側のみに片効き鉛直クロスステイを設置した場合の連成フラッターは、励振力が前節の側径間側のみに片効き鉛直クロスステイを設置した場合よりもやや弱く、たとえば、最適位置である x/L=0.3 では構造対数減衰率を δ_S=0 から δ_S=0.02 に増加させれば、連成フラッター風速は 61.0m/s から 64.0m/s まで上昇する結果（上昇分は約 3m/s）となっている。



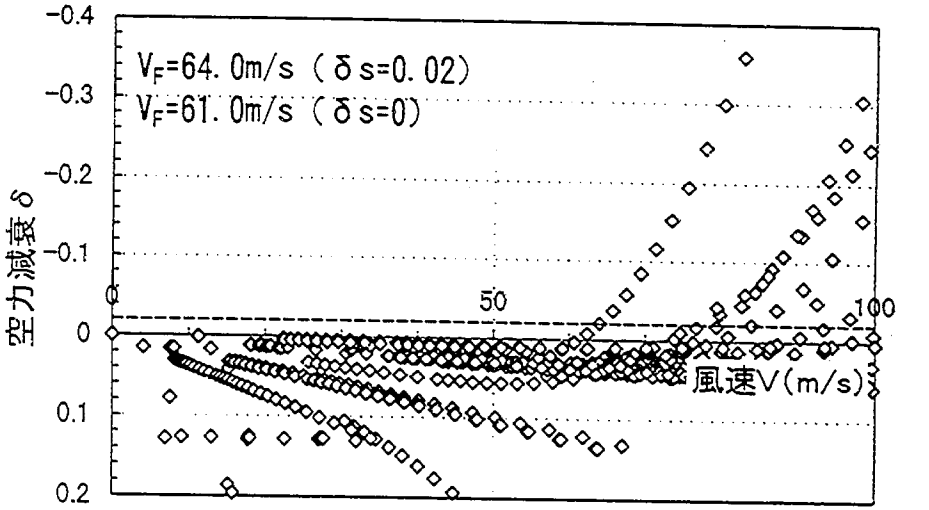
図－3.2.6.1　鉛直クロスステイ位置（側径間のみ）と連成フラッター風速



図－3.2.6.3　鉛直クロスステイ位置（中央径間のみ）と連成フラッター風速



図－3.2.6.2　V-δ曲線（x/Ls=0.4）



図－3.2.6.4　V-δ曲線（x/L=0.3）

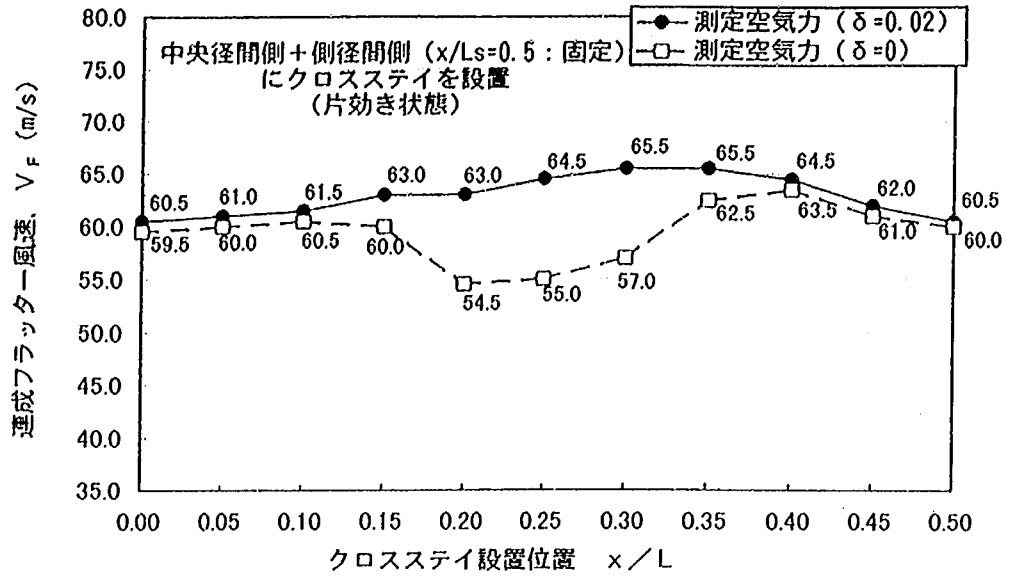
(4) 中央径間側と側径間側にそれぞれ設置した場合の最適位置（片効き状態）

上述の結果から、側径間側と中央径間側に1対の片効き鉛直クロスステイをそれぞれ単独に設置した場合、連成フラッター風速が最大となる最適位置は、側径間側で x/Ls=0.4～0.5、中央径間側で x/L=0.25～0.3 であることがわかった。ここでは、中央径間側と側径間側にそれぞれ設置した場合の最適位置を検討することとした。まず、側径間側の設置位置を x/Ls=0.5 に固定し、中央径間側の設置位置を変化させた場合について連成フラッター解析を実施した。その結果を図－3.2.6.5 に示す。この図から、中央径間側の設置位置を x/L=0.25～0.3 とした場合に最大の連成フラッター風速 V_F=65.5m/s（δ_S=0.02）が得られている。また、図－3.2.6.6 には、中央径間側の設置位置を x/L=0.3 に固定し、側径間側の設置位置を変化させた場合の結果を示す。この図から、側径間側の設置位置を x/Ls=0.4～0.6 とした場合に最大の連成フラッター風速 V_F=65.5m/s（δ_S=0.02）が得られている。

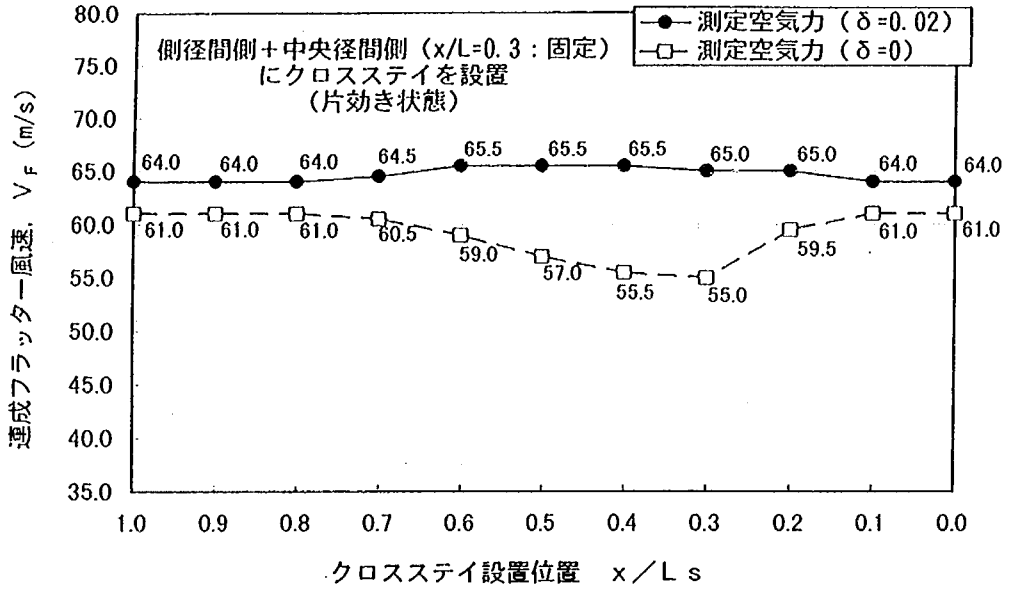
中央径間側と側径間側にそれぞれ片効きクロスステイを設置した場合の最適位置となった、側径間側の x/Ls=0.5、中央径間側の x/L=0.3 に設置した場合の V-δ 曲線を図－3.2.6.7 に示す。図－3.2.6.7 から、この場合の連成フラッター風速は、構造対数減衰率を δ_S=0.02 とすれば V_F=65.5m/s（δ_S=0 では V_F=57.0m/s）となっており、中央径間側の x/L=0.3 のみに鉛直クロスステイを設置した場合の V_F=64.0m/s（δ_S=0.02）よりも若干ではあるが確実に上昇していることがわかる。したがって、鉛直クロスステイの片効き状態では、測定空気力を作用させた場合にも両効き状態のような連成フラッター風速の低下現象は認められず、側径間側と中央径間側の最適位置にそれぞれ片効き鉛直クロスステイを設置すれば最大の連成フラッター風速が得られると言える。

参考までに、図－3.2.6.8～図－3.2.6.11 に今回解析した全ケースのＶ－δ 曲線を示す。

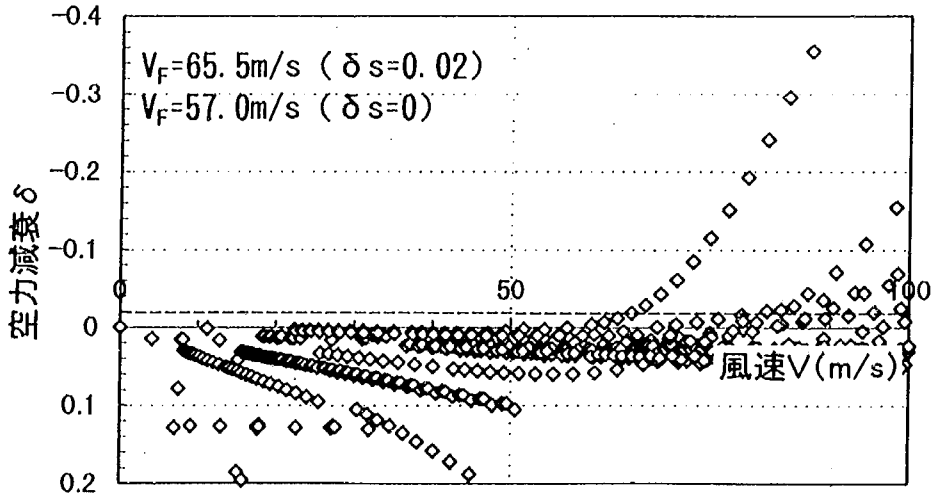
また、これまでに得られた検討結果から、平板翼空気力を使用した場合および測定空気力を使用した場合について、鉛直クロスステイの最適位置と連成フラッター風速を表－3.2.6.1、表－3.2.6.2 にまとめた。



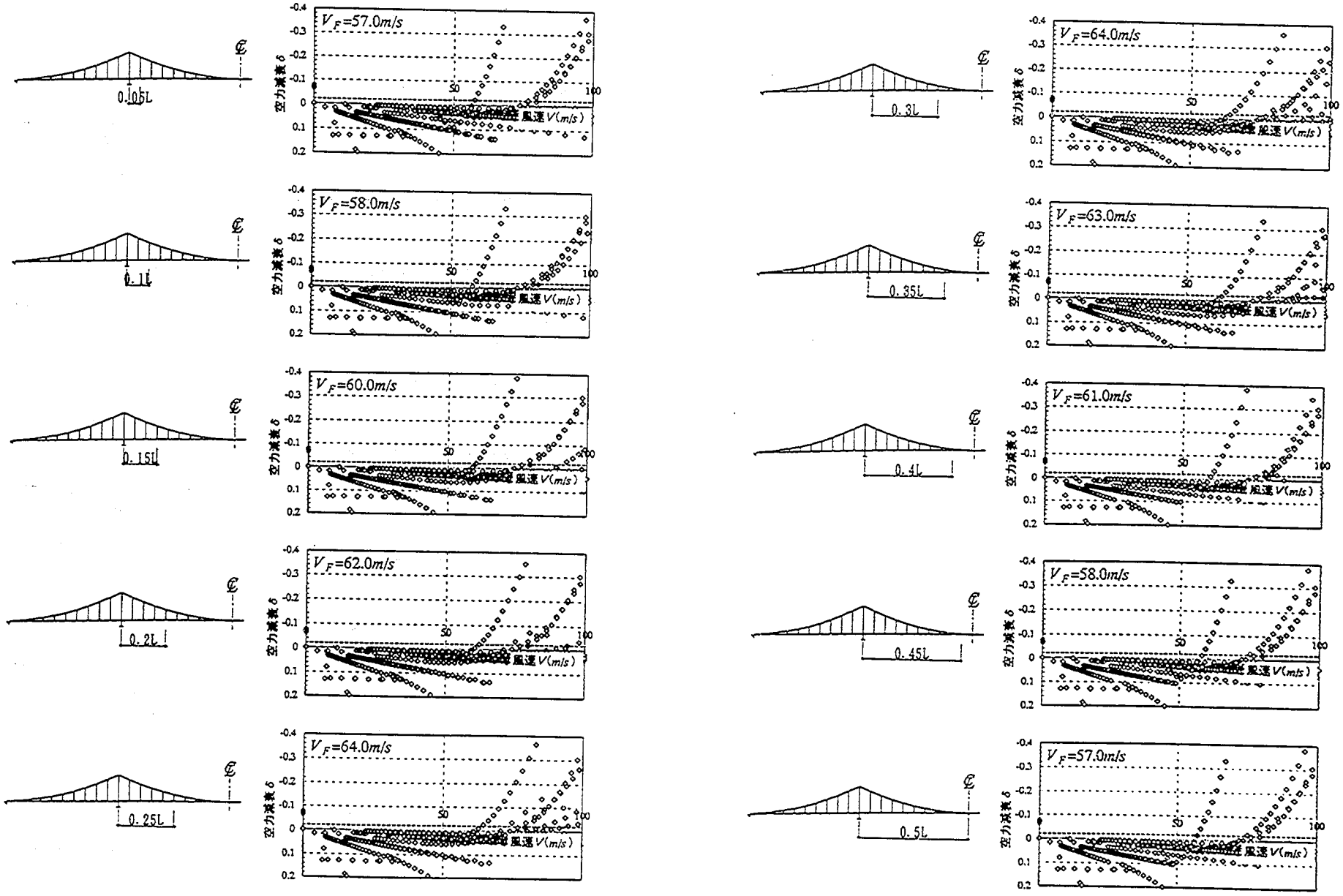
図－3.2.6.5 鉛直クロスステイ位置（中央径間+側径間 0.5Ls）と連成フラッター風速



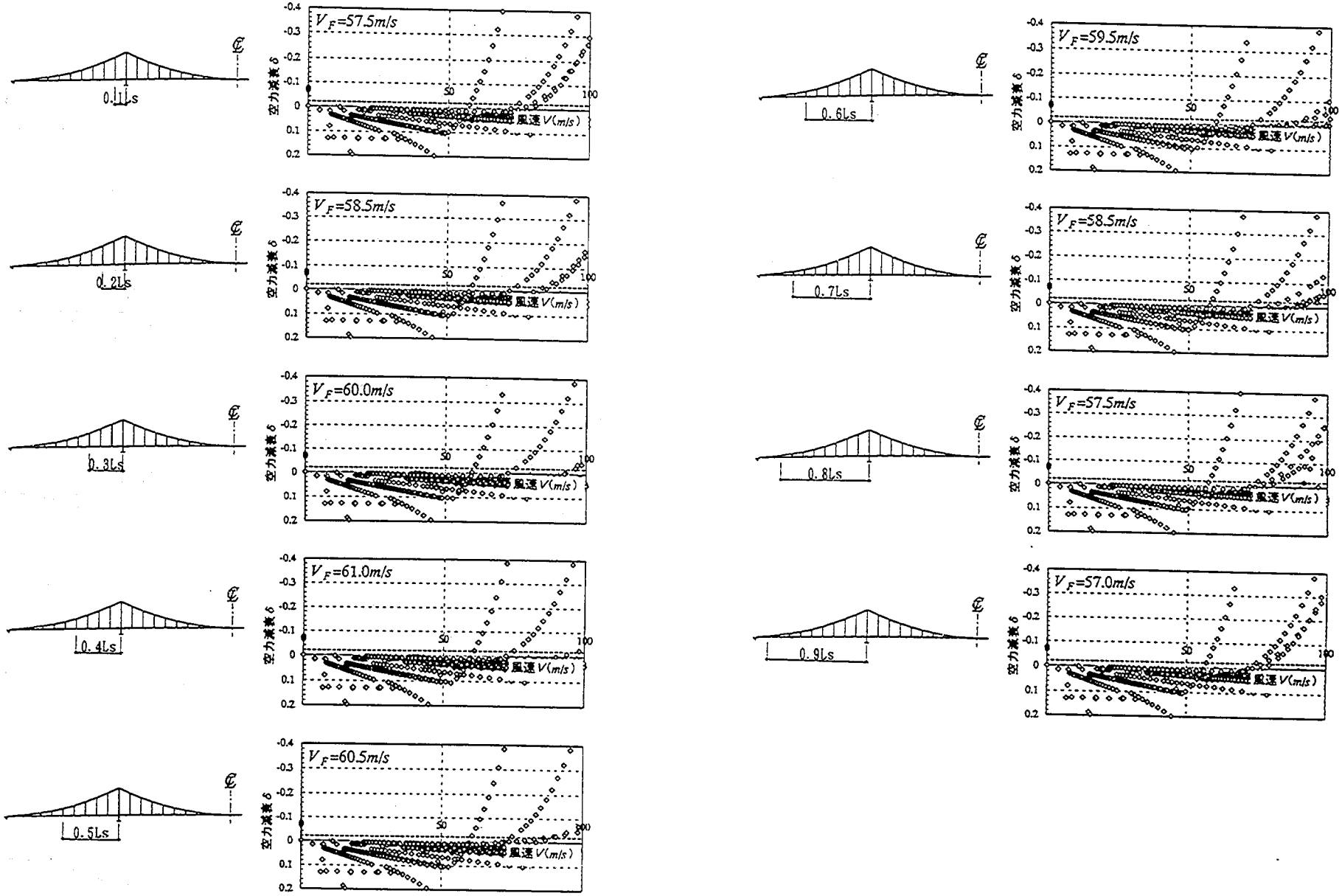
図－3.2.6.6 鉛直クロスステイ位置（中央径間 0.3L+側径間）と連成フラッター風速



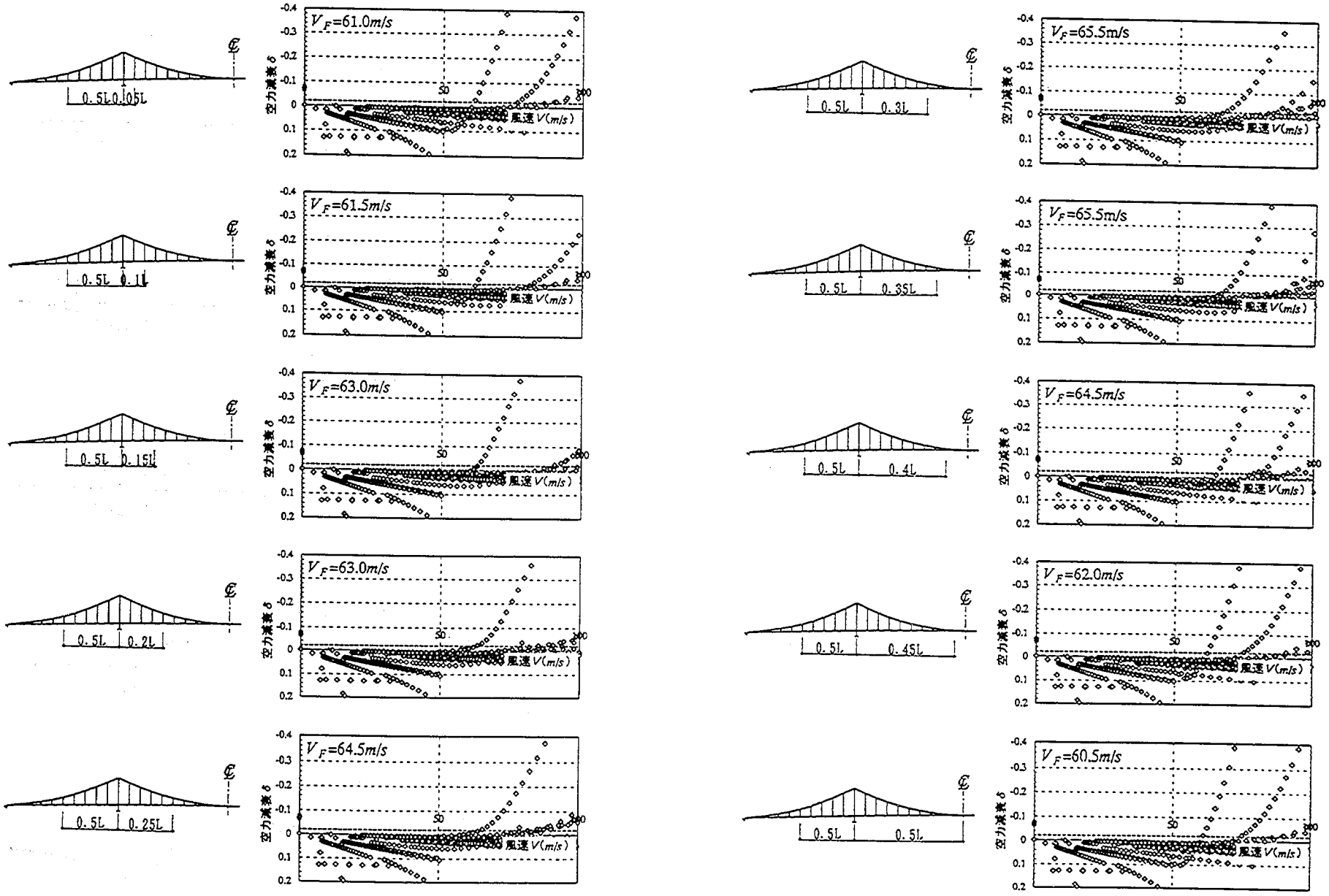
図－3.2.6.7 V-δ曲線（x/L=0.3, x/Ls=0.5）



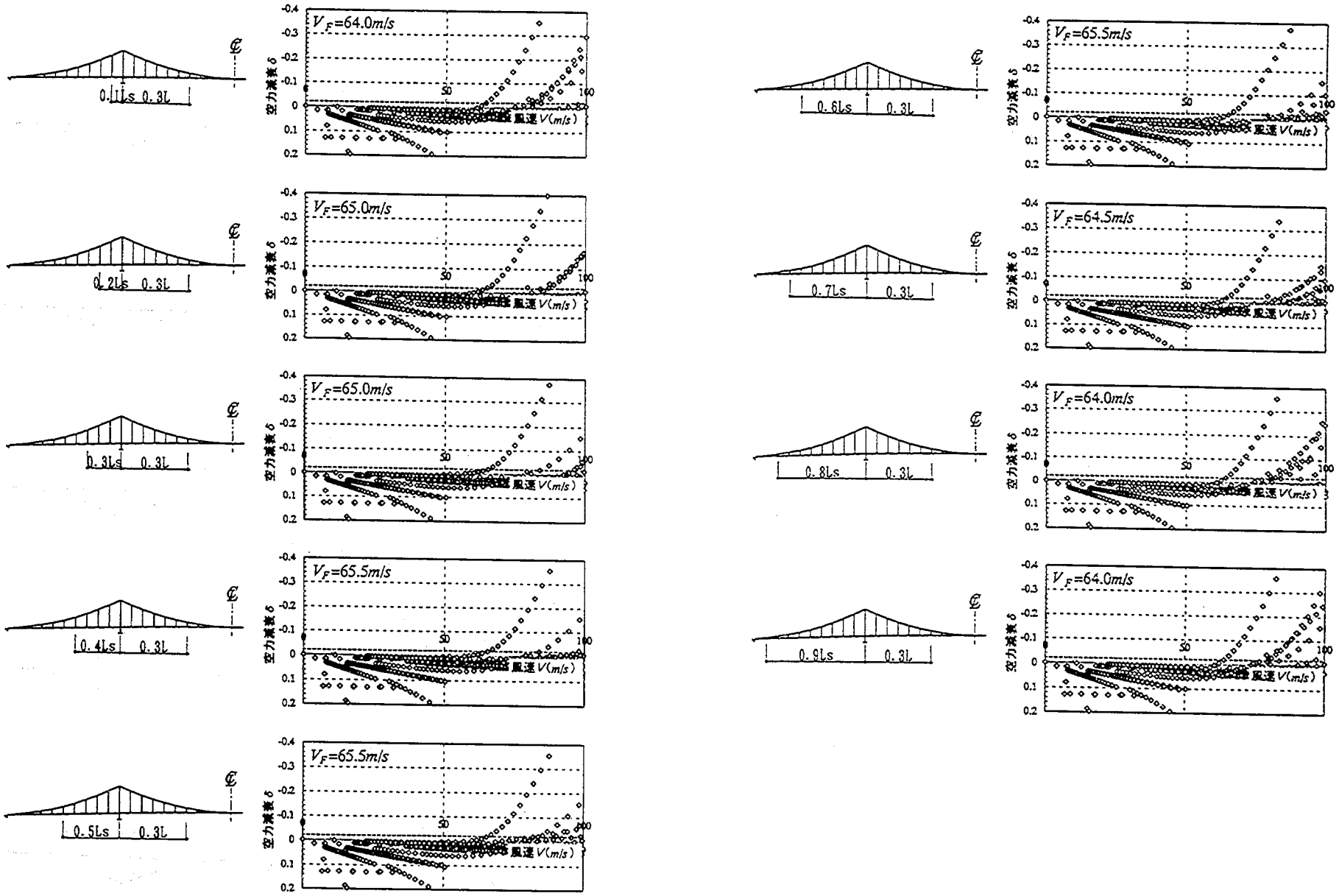
図－3.2.6.8　V-δ曲線（側径間のみに片効きクロスステイを設置した場合）



図－3.2.6.9　V-δ曲線（中央径間のみに片効きクロスステイを設置した場合）



図－3.2.6.10 V-δ曲線（中央径間+側径間(x/Ls=0.5 に固定)に片効きクロスステイを設置した場合）



図－3.2.6.11　V-δ曲線（中央径間(x/L=0.3に固定)+側径間に片効きクロスステイを設置した場合）

表－3.2.6.1　平板空気力を使用した場合のクロスステイ最適位置と連成フラッター風速

基本型	両効き鉛直クロスステイ設置				片効き鉛直クロスステイ設置			
	中央径間のみ	側径間のみ	中央径間＋側径間 (x/Ls=0.5)	側径間＋中央径間 (x/L=0.3)	中央径間のみ	側径間のみ	中央径間＋側径間 (x/Ls=0.5)	側径間＋中央径間 (x/L=0.3)
60m/s	71m/s x/L=0.3～0.35	66m/s x/Ls=0.4～0.5	76m/s x/L=0.3～0.35	76m/s x/Ls=0.4～0.5	70m/s x/L=0.3	64m/s x/Ls=0.4～0.5	74m/s x/L=0.3	74m/s x/Ls=0.4～0.5

表－3.2.6.2　測定空気力を使用した場合のクロスステイ最適位置と連成フラッター風速

基本型	両効き鉛直クロスステイ設置				片効き鉛直クロスステイ設置			
	中央径間のみ	側径間のみ	中央径間＋側径間 (x/Ls=0.5)	側径間＋中央径間 (x/L=0.3)	中央径間のみ	側径間のみ	中央径間＋側径間 (x/Ls=0.5)	側径間＋中央径間 (x/L=0.3)
57m/s	70m/s x/L=0.3	62m/s x/Ls=0.4～0.6	67m/s x/L=0.4	71m/s x/Ls=0.1～0.2	64m/s x/L=0.25～0.3	61m/s x/Ls=0.4～0.5	66m/s x/L=0.3～0.35	66m/s x/Ls=0.4～0.6

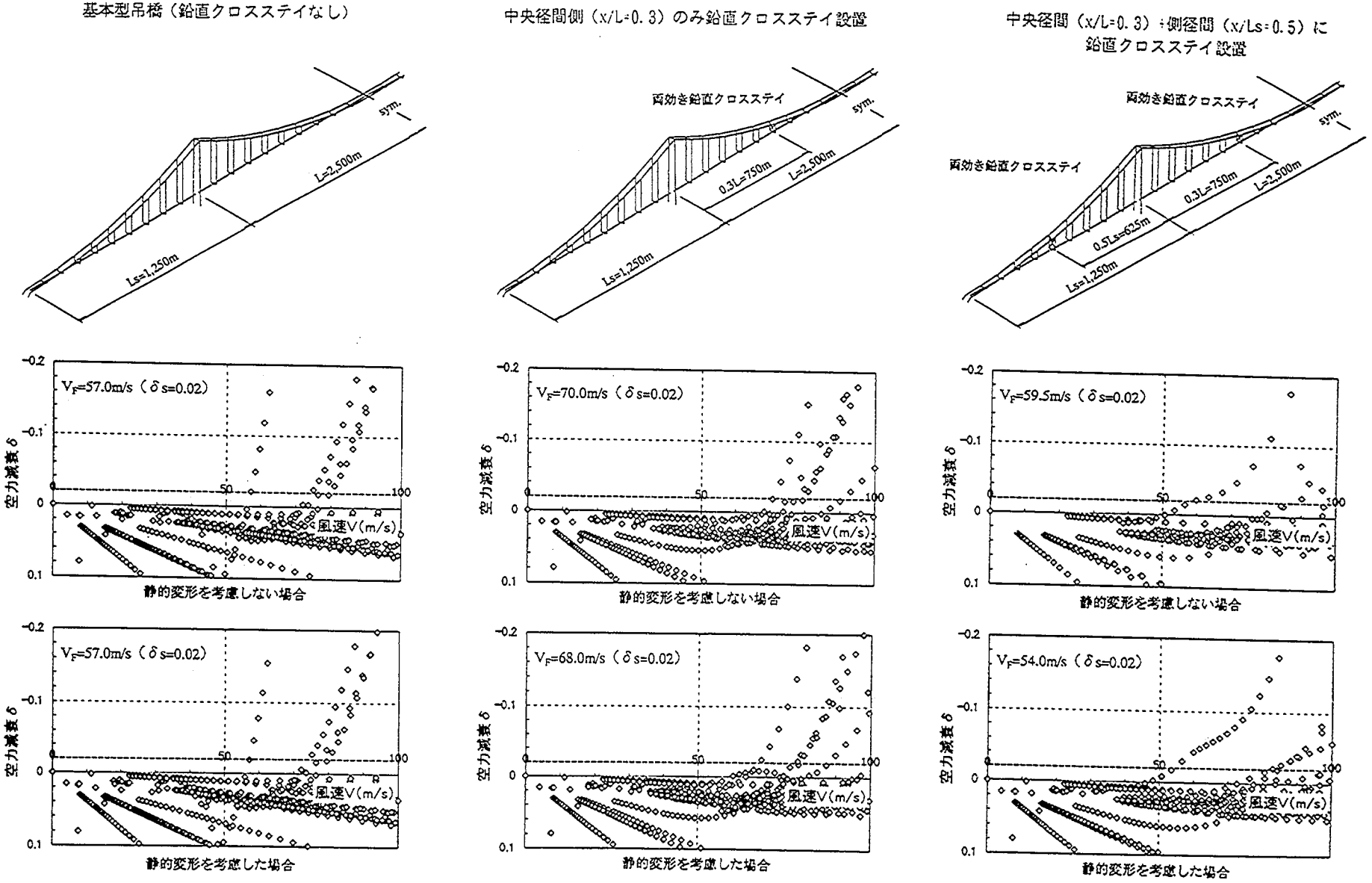
(5) 有風時の変形を考慮した検討

これまでの検討は、有風時の変形を無視した連成フラッター解析によるものであったが、ここでは、有風時における変形を考慮した連成フラッター解析を実施し、有風時の変形が連成フラッター風速に及ぼす影響について検討することとした。

対象としたケースは、鉛直クロスステイを設置しない基本型吊橋、中央径間側の x/L=0.3 のみに鉛直クロスステイを設置した場合（両効き状態）、中央径間側 x/L=0.3 および側径間側 x/Ls=0.5 に鉛直クロスステイを設置した場合(両効き状態)の3ケースである。図－3.2.6.12 に、3ケースの解析結果を示す。図--3.2.6.12 から、鉛直クロスステイのない基本型吊橋においては、有風時変形を考慮した場合においても、連成フラッター風速は V_F=57.0m/s となり、有風時変形を考慮しない場合と等しい結果となった。一方、中央径間側の x/L=0.3 のみに鉛直クロスステイを設置した場合（両効き状態）は、有風時変形を考慮すると連成フラッター風速は V_F=68.0m/s であり、有風時変形を考慮しない場合の値 V_F=70.0m/s から 2m/s 程度連成フラッター風速が低下する結果となった。また、中央径間側 x/L=0.3 および側径間側 x/Ls=0.5 に鉛直クロスステイを設置した場合（両効き状態）については、有風時変形を考慮すると連成フラッター風速は V_F=54.0m/s と有風時変形を考慮しない場合の値 V_F=59.5m/s に比べ 5.5m/s 程度低下する結果となった。

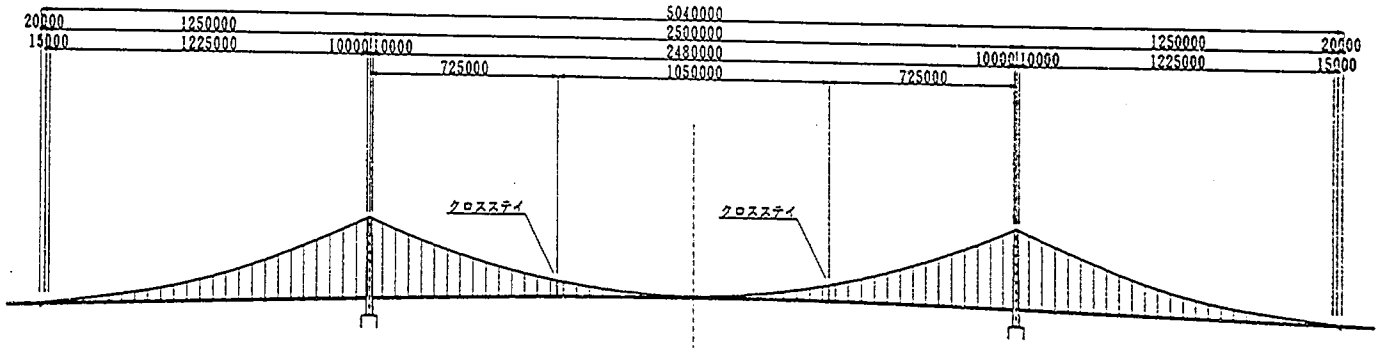
(6) 非抗圧クロスステイ・抗圧クロスステイの概略構造

暴風時（基本風速 U_{10}=46m/s）における風荷重解析を行い、非抗圧・抗圧クロスステイの概略構造検討を行った。ここでは、非抗圧クロスステイとしてケーブル部材を、抗圧クロスステイとして梁部材を想定した。今回は、鉛直クロスステイが中央径間側 x/L=0.3 なる位置に設置される場合を考えた。検討結果を図－3.2.6.13 に示す。図－3.2.6.13 に示すように、検討の結果、非抗圧クロスステイとしては φ150mm 程度のケーブル部材、抗圧クロスステイとしては 1800mm×900mm 程度の箱断面が必要となることがわかった。

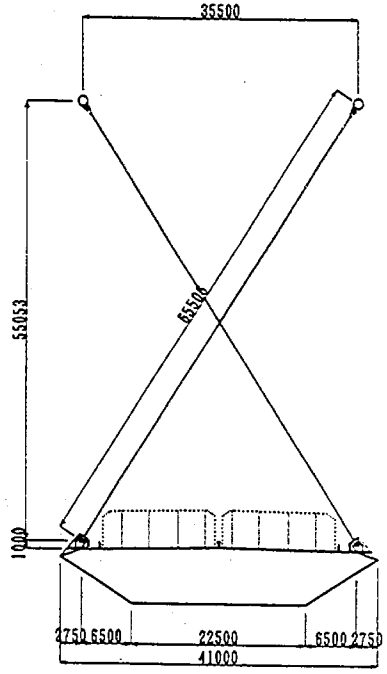


図－3.2.6.12　有風時変形を考慮した検討結果

鉛直クロスステイ設置位置側面図



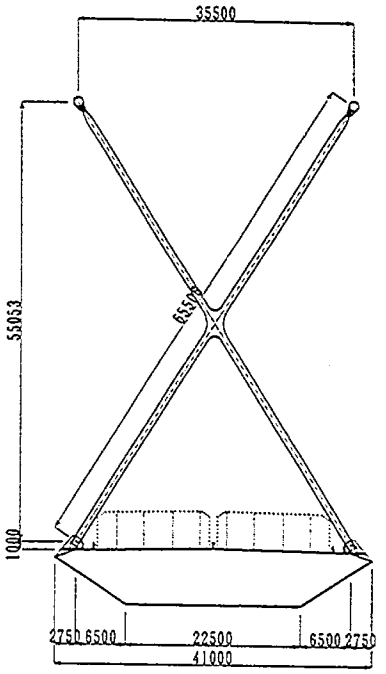
非抗圧クロスステイ構造図



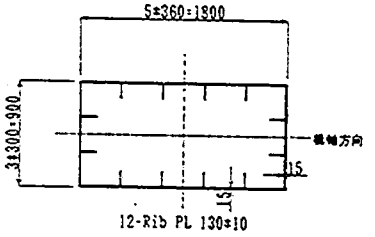
非抗圧クロスステイ断面図



抗圧クロスステイ構造図



抗圧クロスステイ断面図



図－3.2.6.13　鉛直クロスステイ構造一般図

(7) まとめ

今回は、補剛桁に測定空気力を作用させた場合における片効き鉛直クロスステイの最適位置の検討、有風時変形を考慮した解析検討、およびクロスステイの概略構造検討を行った。得られた主要な結果を以下にまとめる。

1)片効き鉛直クロスステイの最適位置の検討

① 側径間側のみに設置した場合

鉛直クロスステイ設置位置を x/Ls=0.4～0.5 とすれば、設置前に V_F=57m/s であった連成フラッター風速が V_F=61m/s 程度（約 107%）まで上昇する結果が得られた。

② 中央径間側のみに設置した場合

鉛直クロスステイ設置位置を x/L=0.25～0.3 とすれば、設置前に V_F=57m/s であった連成フラッター風速が V_F=64m/s 程度（約 112%）まで上昇する結果が得られた。

なお、片効き状態の場合、両効き状態での結果のような、クロスステイの設置位置によっては、クロスステイ設置前の連成フラッター風速よりも低下する現象はみられなかった。

③ 中央径間側と側径間側にそれぞれ設置した場合

(a)側径間側の設置位置を x/Ls=0.5 に固定し、中央径間側の設置位置を変化させた場合、中央径間側の設置位置を x/L=0.3～0.35 としたときに最大の連成フラッター風速 V_F=65.5m/s（115%）が得られた。

(b)中央径間側の設置位置を x/L=0.3 に固定し、鉛直クロスステイの側径間側位置を変化させた場合、側径間側の設置位置を x/Ls=0.4～0.6 としたときに最大の連成フラッター風速 V_F=65.5m/s（115%）が得られた。

したがって、鉛直クロスステイを片効き状態とした場合の最適位置は、中央径間側の x/L=0.3、側径間側の x/Ls=0.5 付近であると言える。

2)有風時変形を考慮した検討

両効き状態において、有風時変形を考慮した解析を行った結果、鉛直クロスステイのない基本型吊橋では、有風時変形を考慮しても結果はほとんど変わらないのに対し、中央径間のみ (x/L=0.3) に鉛直クロスステイを設置したケース、中央径間側 x/L=0.3 および側径間側 x/Ls=0.5 に鉛直クロスステイを設置したケースでは、変形を考慮しない場合に比べ、それぞれ 3%、10%程度連成フラッター風速が減少する結果となった。

3)クロスステイの概略構造検討

暴風時の静解析を行い、非抗圧クロスステイ（片効き状態）および抗圧クロスステイ（両効き状態）の概略構造検討を行った結果、非抗圧クロスステイとしてはφ150mm 程度のケーブル部材、抗圧クロスステイとしては 1800mm×900mm 程度の箱断面が必要となることがわかった。

< 参考文献 >

1) 米田昌弘，大野克紀，田巻嘉彦，木村公男：超長大吊橋の連成フラッター特性に及ぼす鉛直クロスステイの効果，構造工学論文集，Vol.44A，pp.907～916，1998年3月.

3．2．7　水平ステイ・対角ステイの検討

(1)　検討内容

水平ステイ・対角ステイの検討実施に当たり、構造の違いがフラッター解析結果に及ぼす影響の検討（主塔剛性の影響）および水平ステイ、対角ステイシステムの効果の検討を実施した。具体的な検討内容を以下に示す。

1)　構造の違いがフラッター解析結果に及ぼす影響の検討（主塔剛性の影響）

対象吊橋の構造の違いおよびモデル化の違いがフラッター特性に及ぼす影響を把握するため、主塔剛性の違いがフラッター特性に及ぼす影響を調べる。

2)　水平ステイ、対角ステイシステムの効果の検討

標準モデルを基本として、水平ステイおよび対角ステイがフラッター風速に及ぼす効果の検討を実施した。

(2)　構造の違いがフラッター解析結果に及ぼす影響の検討（主塔剛性の影響）

吊橋の構造の違いおよびそのモデル化の違いがフラッター特性に影響を与える(3.5 節参照)。そこで、その影響を把握するため、主塔剛性の違いがフラッター特性に及ぼす影響を検討する。

1)　主塔の剛性が振動数に及ぼす影響の評価

主塔の固有振動数に着目し、塔柱、水平材の剛性（ねじれ剛性、面外・面内曲げ剛性）の変化が固有振動数の変化に及ぼす影響を調べた。具体的には、各剛性を 10 倍、1/10 倍にそれぞれ変化させ、その時の各モードの固有振動数の変化を調べた。

表－3.2.7.1　塔柱・水平材の剛性が振動数に及ぼす影響

	塔柱剛性			水平材剛性		
モード	ねじれ	面外	面内	ねじれ	面外	面内
面外１次	×	○	×	×	×	×
面内１次	×	×	○	×	×	△
ねじれ１次	○	○	×	△	△	×

○：振動数に大きく影響する

△：振動数に若干影響する

×：振動数に影響しない

・検討結果

①面外１次モードの振動数には、塔柱の面外剛性の影響が大きい

②面内１次モードの振動数には、塔柱の面内剛性、水平材の面内剛性の影響が大きい

③ねじれ１次モードの振動数には、塔柱のねじれ、面外剛性および水平材のねじれ、面外剛性の影響が大きい

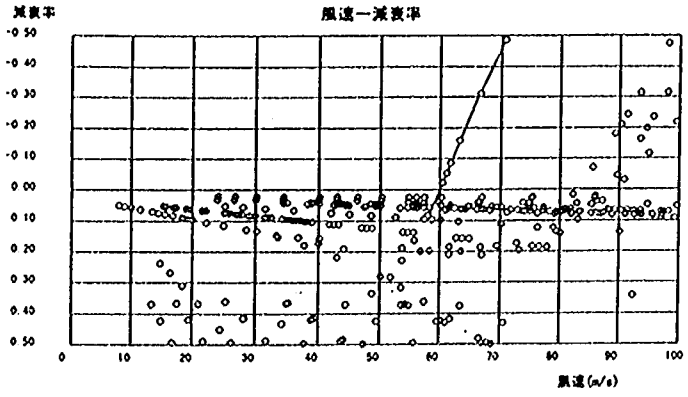
2) 主塔の剛性がフラッター解析結果に及ぼす影響

1)で実施した、主塔剛性の変化が振動数に及ぼす影響の検討結果を参考にし、振動数に及ぼす影響の大きいパラメータを中心に、標準モデルに着目し主塔の塔柱および水平材の剛性を変化させ、フラッター解析結果の変化を調べた。フラッター解析結果を表−3.2.7.2および図−3.2.7.1に示す。

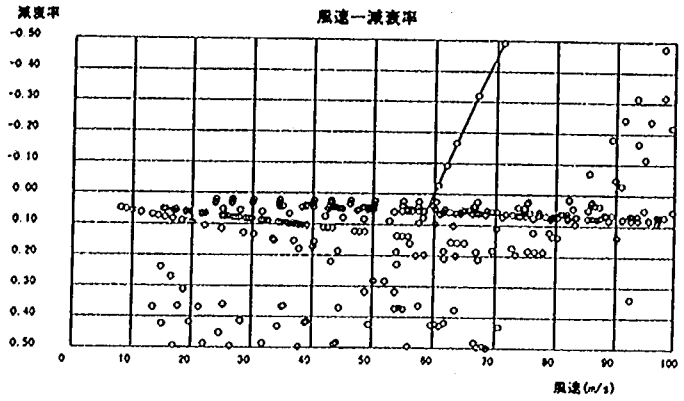
表−3.2.7.2 塔柱・水平材の剛性がフラッター解析結果に及ぼす影響

case	塔柱剛性比			塔頂水平材剛性比			ﾌﾗｯﾀ-限界風速*	
	ねじれ	面 外	面 内	ねじれ	面 外	面 内	(m/s)	
1	1	1	1	1	1	1	60.0	標準形
2		2					60.0	
3		10					60.6	
4					2		60.0	
5					10		60.0	
6				10			60.1	

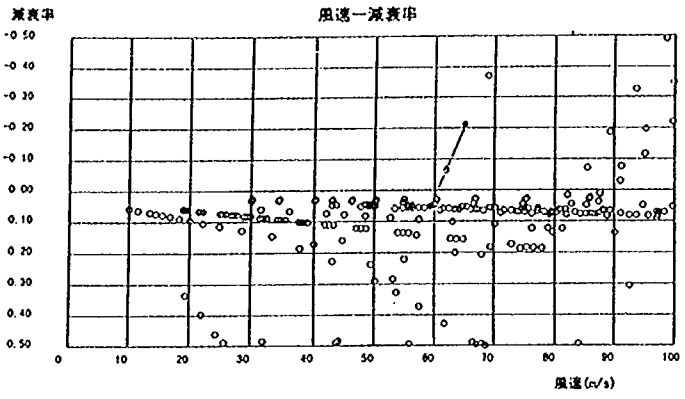
*：フラッター解析条件は一覧表のSH-1



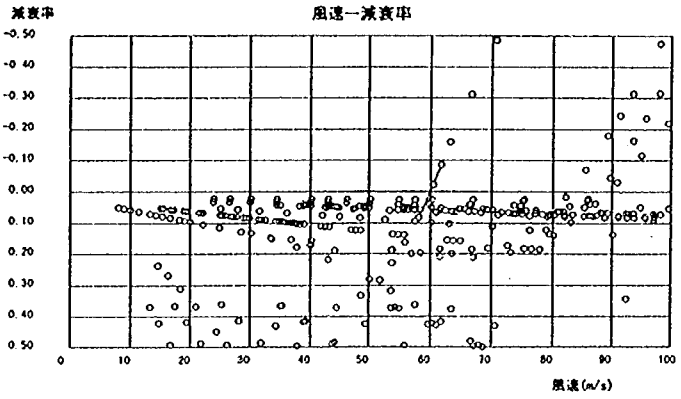
(A) 標準モデル



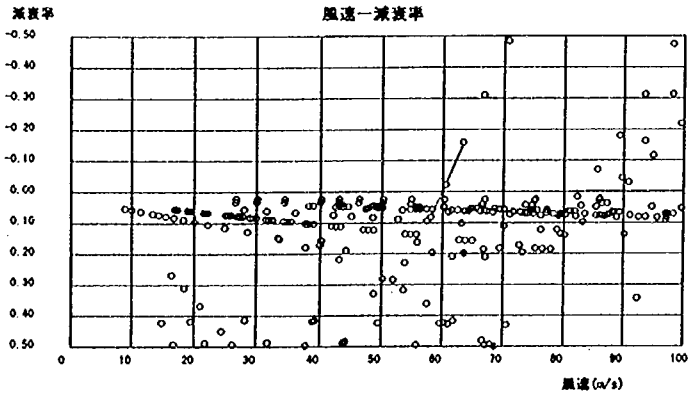
(B) 塔柱面外剛性×２



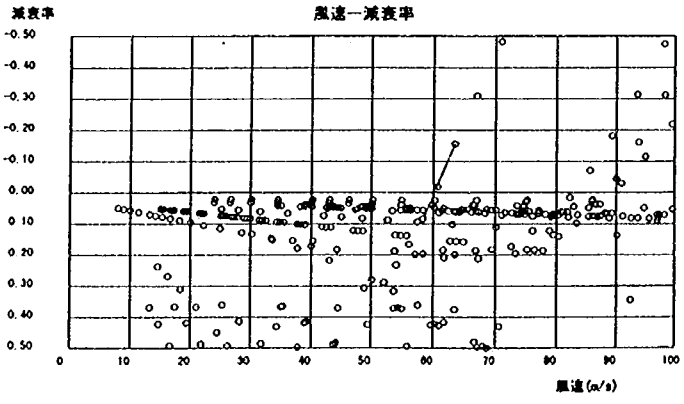
(C) 塔柱面外剛性×１０



(D) 塔頂水平材面外剛性×２



(E) 塔頂水平材面外剛性×１０



(F) 塔頂水平材ねじれ剛性×１０

図－3.2.7.1　フラッター解析結果

(3) 水平ステイ・対角ステイの効果

標準モデルを基本として、水平ステイおよび対角ステイがフラッターに及ぼす効果の検討を実施した。

解析は、水平ステイを中央径間の約 6%とし、中央径間の両主塔近傍にそれぞれ設置した場合（ケース①）、側径間側にも同程度の水平ステイを追加した場合（ケース②）、さらに対角ステイを中央径間の 1/4 点付近（ケース③）、中央径間 1/4 点付近および側径間側 1/2 点付近にそれぞれ設置した場合（ケース④）の各ケースについて、平板翼空気力および一部ケースに関しては風洞実験により計測された値を用いて実施した。解析結果を表－3.2.7.3 および図－3.2.7.2 に、各ケースのＶ－δ図を図－3.2.7.5～図－3.2.7.6 に示す。

平板翼空気力を用いた解析結果から、ステイを設置しない標準形に比べ、水平ステイを中央径間側に設置した場合（ケース①）、側径間側に追加した場合（ケース②）とフラッター発振風速は向上する。さらに、対角ステイと組合わせて適用することによりその効果は大きくなることが分かる。両システムの併用によりフラッター発振風速は最大で約 31%上昇（ケース④）する。測定空気力を用いた解析結果では水平ステイを中央径間側および側径間側に、対角ステイを中央径間のみに設置した場合(ケース③)が最も効果が期待でき、フラッター発振風速は約 31%上昇する。

水平ステイおよび対角ステイの設置位置は変えずに、水平ステイの設置範囲を中央径間の約 14%と増した場合(ケース⑤～⑧)の解析結果を解析結果を表－3.2.7.4 および図－3.2.7.3 に、各ケースのＶ－δ図を図－3.2.7.5～図－3.2.7.6 に示す。水平ステイを中央径間側および側径間側に、対角ステイを中央径間のみに設置した場合(ケース⑦)が平板翼空気力および測定空気力を用いた解析結果共に最も効果があり、両解析ともフラッター発振風速は約 40%向上している。

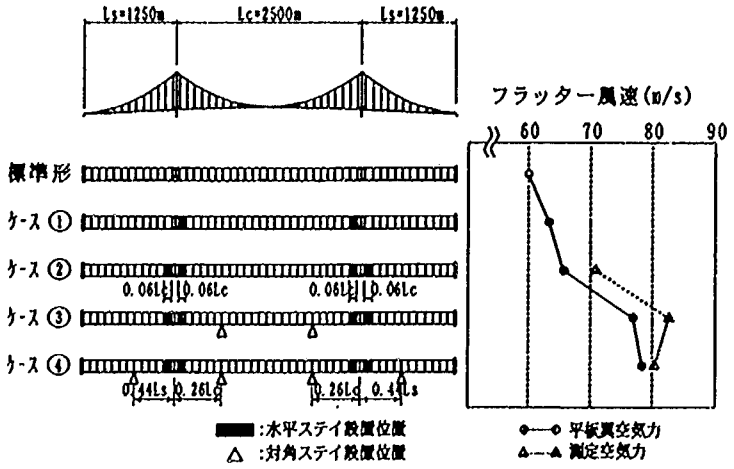
同様に水平ステイの設置範囲を中央径間の約 22%とした場合(ケース⑨～⑫)の解析結果を解析結果を表－3.2.7.5 および図－3.2.7.4 に、各ケースのＶ－δ図を図－3.2.7.5～図－3.2.7.6 に示す。平板翼空気力を用いた解析では、水平ステイおよび対角ステイを中央径間側および側径間側に設置した場合(ケース⑫)が最も効果があり、フラッター発振風速は約 43%上昇する。測定空気力を用いた解析では、水平ステイおよび中央径間のみに対角ステイを設置した場合(ケース⑪)が最も効果が高く、約 45%の上昇効果がある。

水平ステイの設置範囲の影響を見ると、設置範囲を 6%、14%、22%と増すことによりフラッター発振風速の向上効果が大きくなっている。また、水平ステイの設置範囲が小さい場合でも、対角ステイとの併用により充分なフラッター発振風速の改善効果があることが分かる。

表－3.2.7.3　フラッター解析結果（水平ステイ 6%設置）

ケース	ステイ設置区間、位置				平板翼理論値*1 (m/s)	測定空気力*2 (m/s)
	水平ステイ		対角ステイ			
	中央径間	側径間	中央径間	側径間		
標準形	—	—	—	—	60.0	63.2
ケース①	6%×2	—	—	—	63.3	
ケース②	6%×2	6%×2	—	—	65.6	70.8
ケース③	6%×2	6%×2	1/4点	—	76.8	82.7
ケース④	6%×2	6%×2	1/4点	1/2点	78.3	80.3

*1：フラッター解析条件は一覧表の SH-1
*2：フラッター解析条件は一覧表の SH-2

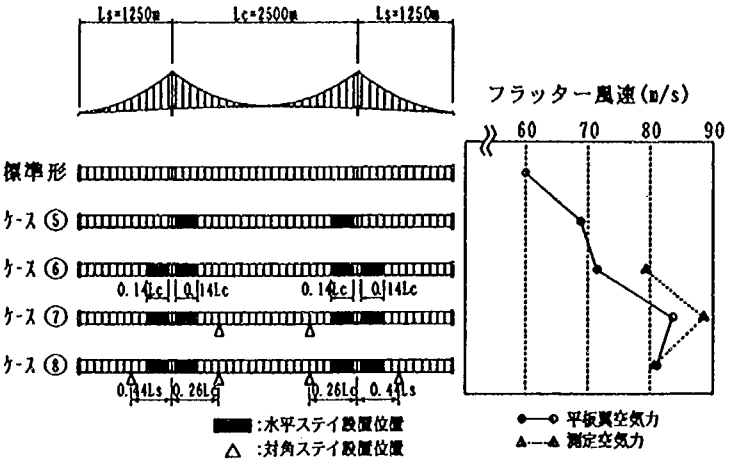


図－3.2.7.2　フラッター解析結果(水平ステイ 6%設置)

表－3.2.7.4　フラッター解析結果（水平ステイ 14%設置）

ケース	ステイ設置区間、位置				平板翼理論値*1 (m/s)	測定空気力*2 (m/s)
	水平ステイ		対角ステイ			
	中央径間	側径間	中央径間	側径間		
標準形	—	—	—	—	60.0	63.2
ケース⑤	14%×2	—	—	—	68.8	
ケース⑥	14%×2	14%×2	—	—	71.4	79.3
ケース⑦	14%×2	14%×2	1/4点	—	83.6	88.5
ケース⑧	14%×2	14%×2	1/4点	1/2点	81.1	80.7

*1：フラッター解析条件は一覧表の SH-1
*2：フラッター解析条件は一覧表の SH-2

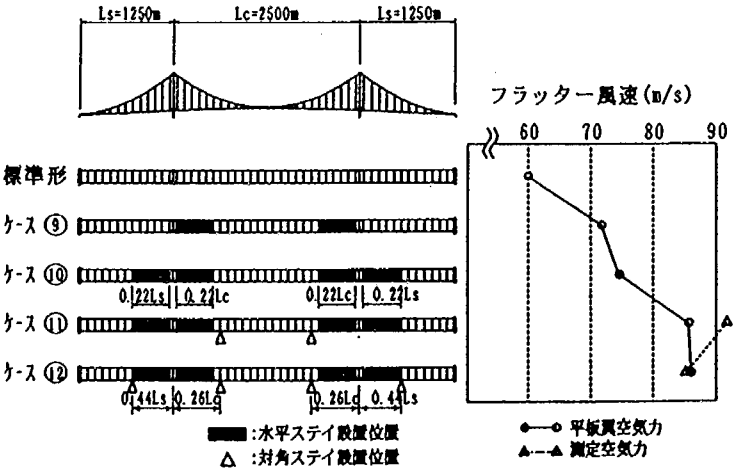


図－3.2.7.3　フラッター解析結果(水平ステイ 14%設置)

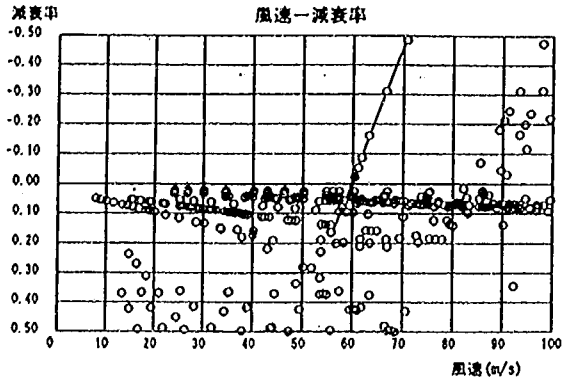
表－3.2.7.5　フラッター解析結果（水平ステイ 22%設置）

ケース	ステイ設置区間、位置				平板翼理論値*1 (m/s)	測定空気力*2 (m/s)
	水平ステイ		対角ステイ			
	中央径間	側径間	中央径間	側径間		
標準形	—	—	—	—	60.0	63.2
ケース⑨	22%×2	—	—	—	71.3	
ケース⑩	22%×2	22%×2	—	—	74.5	
ケース⑪	22%×2	22%×2	1/4点	—	85.7	91.6
ケース⑫	22%×2	22%×2	1/4点	1/2点	86.0	85.3

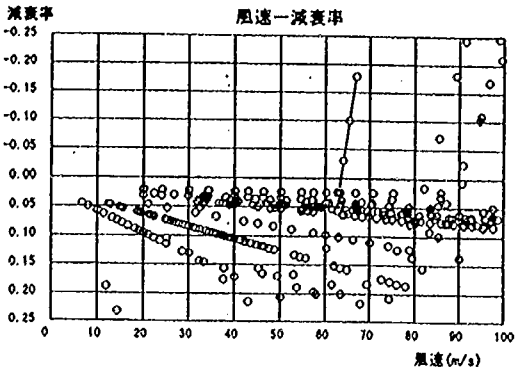
*1：フラッター解析条件は一覧表の SH-1
*2：フラッター解析条件は一覧表の SH-2



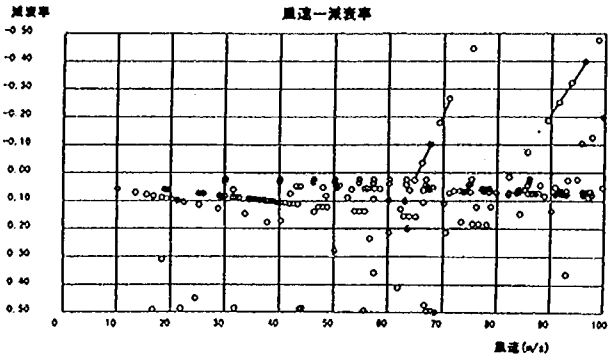
図－3.2.7.4　フラッター解析結果(水平ステイ 22%設置)



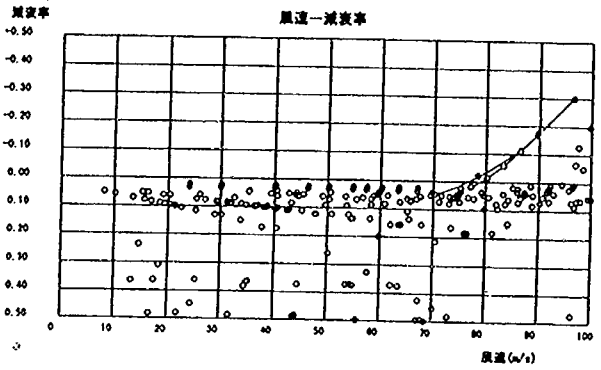
(A) 標準形　Vcr = 60.0 m/s



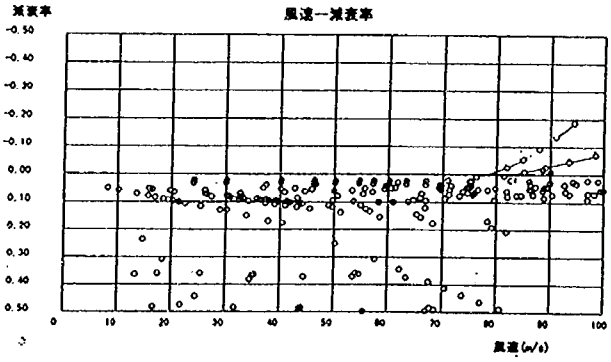
(B) ケース①　Vcr = 63.3 m/s



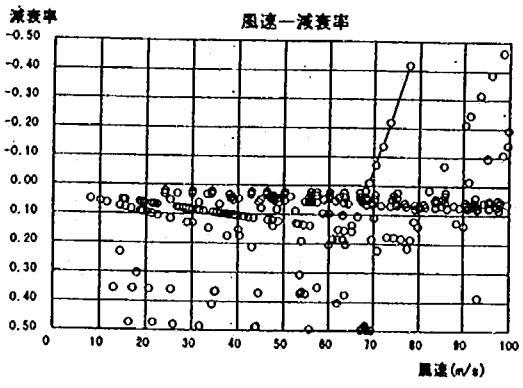
(C) ケース②　Vcr = 65.6 m/s



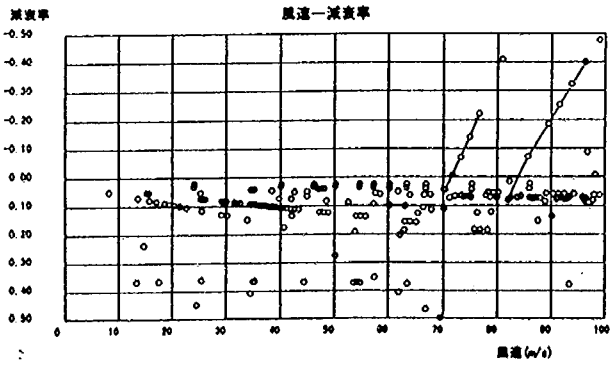
(D) ケース③　Vcr = 76.8 m/s



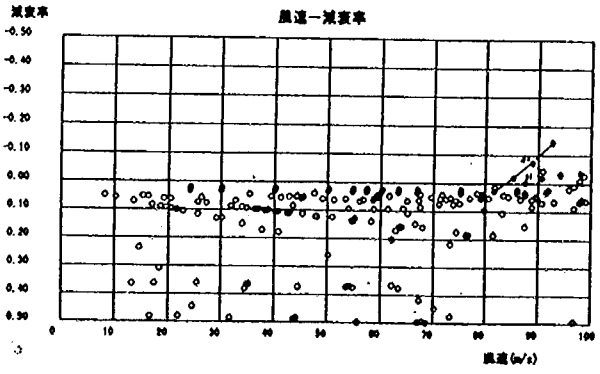
(E) ケース④　Vcr = 78.3 m/s



(F) ケース⑤　Vcr = 68.8 m/s

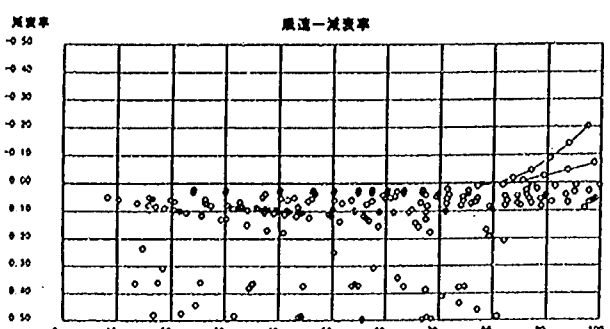


(G) ケース⑥　Vcr = 71.4 m/s

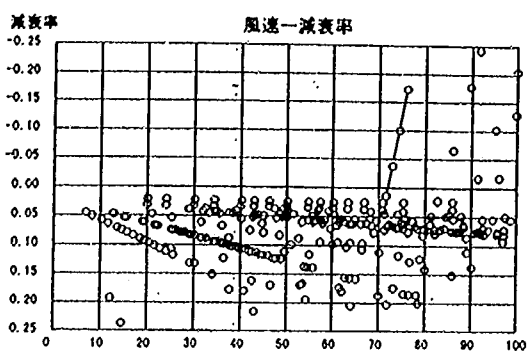


(H) ケース⑦　Vcr = 83.6 m/s

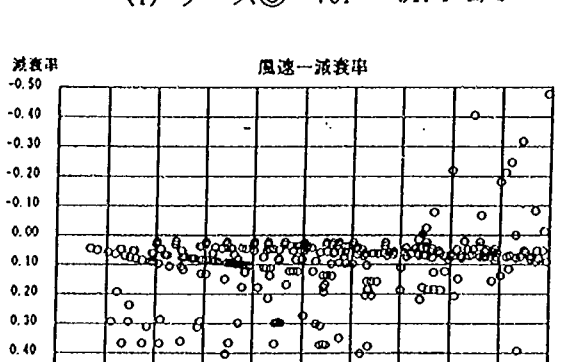
図－3.2.7.5(1)　フラッター解析結果（平板翼空気力による解析）



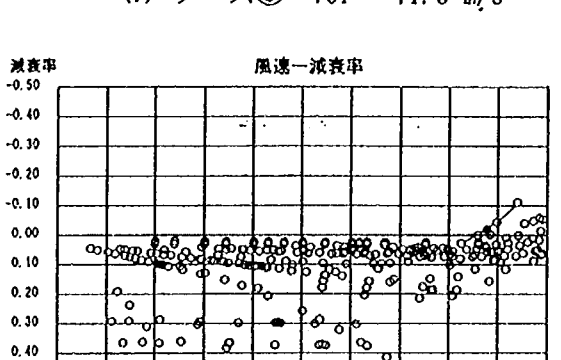
(I) ケース⑧ Vcr = 81.1 m/s



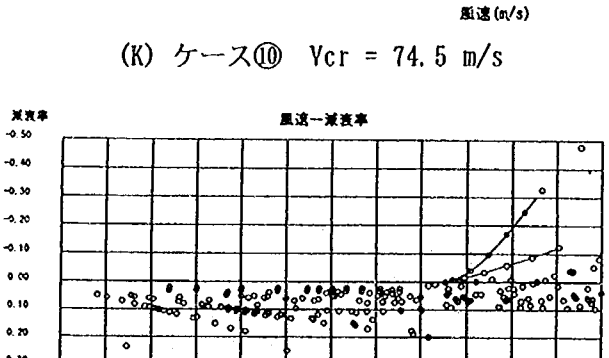
(J) ケース⑨ Vcr = 71.3 m/s



(K) ケース⑩ Vcr = 74.5 m/s

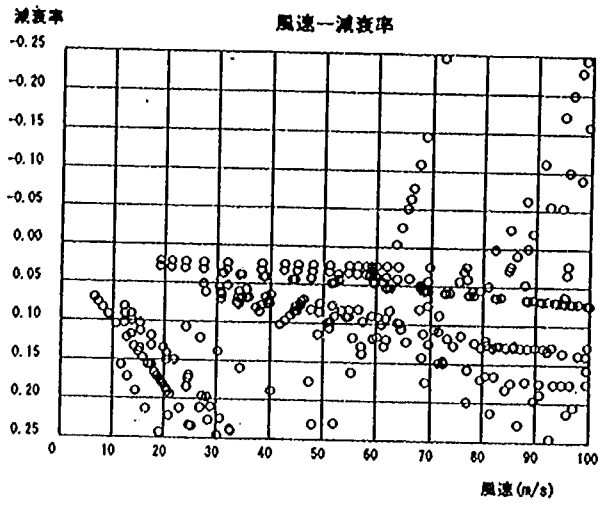


(L) ケース⑪ Vcr = 85.7 m/s

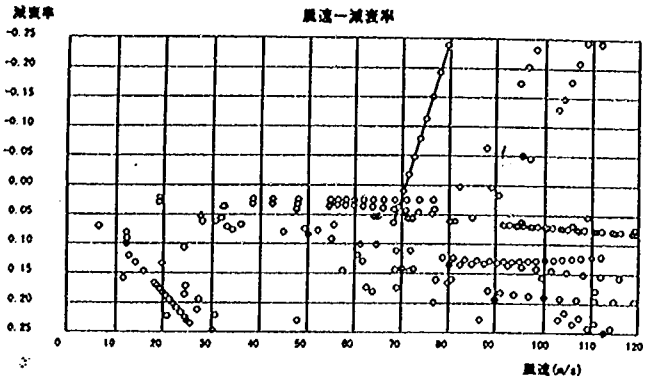


(M) ケース⑫ Vcr = 86.0 m/s

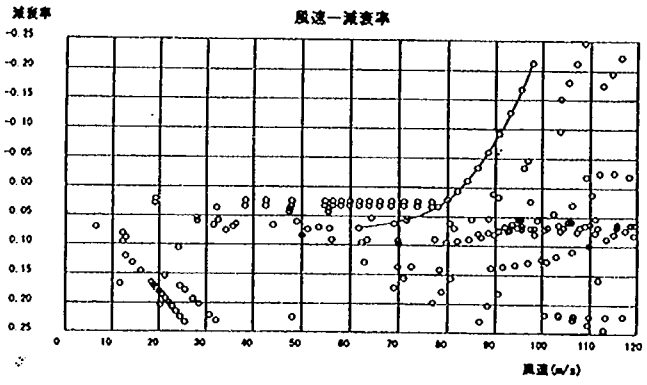
図－3.2.7.5(2) フラッター解析結果（平板翼空気力による解析）



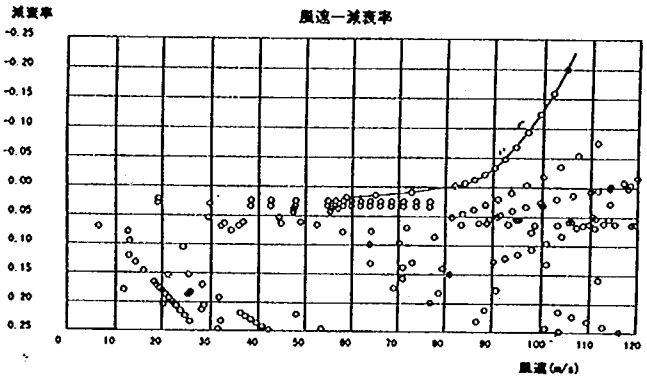
(A) 標準形　Vcr = 63.2 m/s



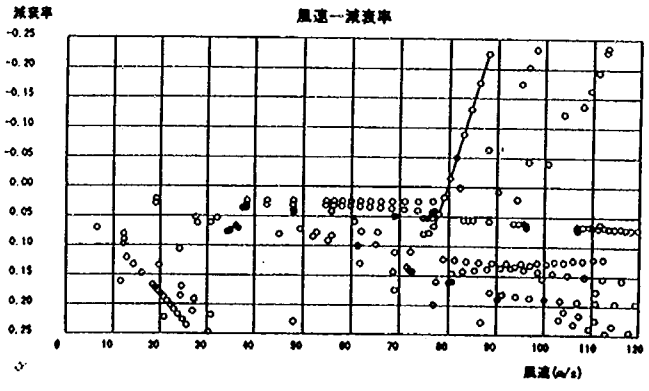
(B) ケース②　Vcr = 70.8 m/s



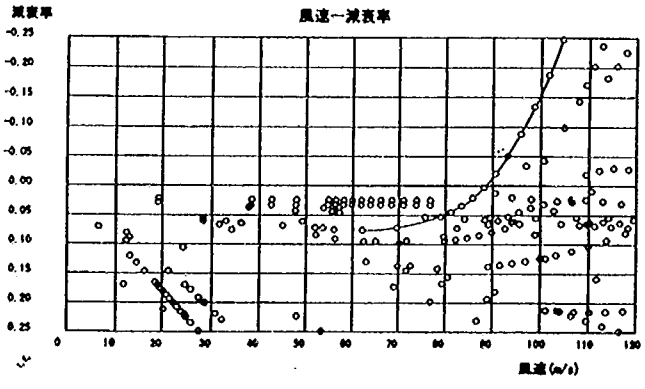
(C) ケース③　Vcr = 82.7 m/s



(D) ケース④　Vcr = 80.3 m/s

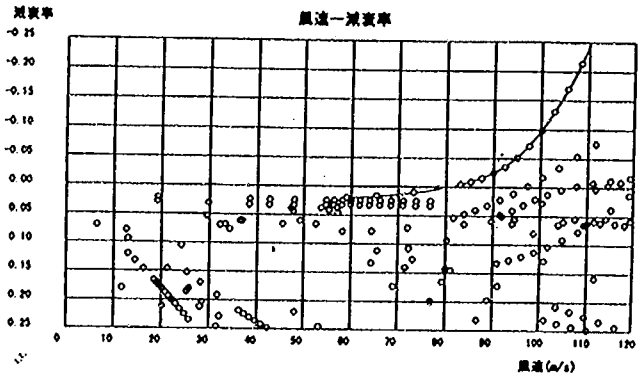


(E) ケース⑥　Vcr = 79.3 m/s

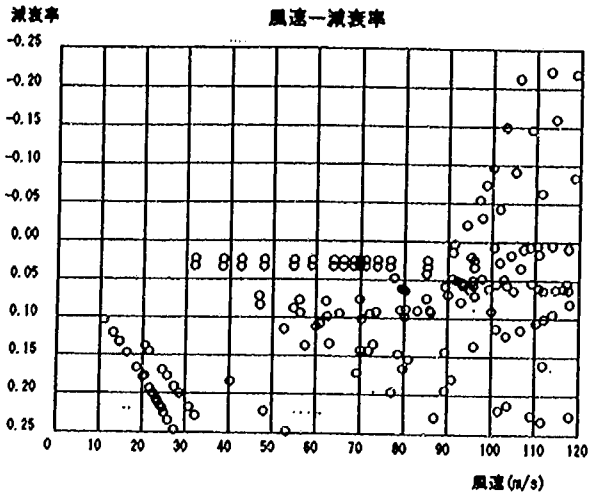


(F) ケース⑦　Vcr = 88.5 m/s

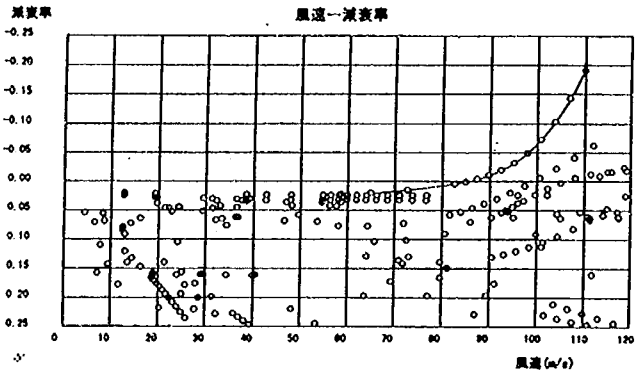
図－3.2.7.6(1)　フラッター解析結果（計測空気力による解析）



(G) ケース⑧　Vcr = 80.7 m/s



(H) ケース⑪　Vcr = 91.6 m/s



(I) ケース⑫　Vcr = 85.3 m/s

図－3.2.7.6(2)　フラッター解析結果（計測空気力による解析）

(4) まとめ

構造の違いがフラッター解析結果に及ぼす影響の検討（主塔剛性の影響）および水平ステイ、対角ステイシステムの効果の検討を実施した結果を以下にまとめる。

1) 構造の違いがフラッター解析結果に及ぼす影響の検討（主塔剛性の影響）

対象吊橋の構造の違いおよびモデル化の違いがフラッター特性に及ぼす影響を把握するため、主塔剛性の違いがフラッター特性に及ぼす影響を調べたが、本検討で実施した主塔塔柱の面外剛性を1～10倍、塔頂水平材の面外剛性を1～10倍、ねじれ剛性を10倍の範囲で変化させたケースに関しては有意な差は生じなかった。

2) 水平ステイ、対角ステイシステムの効果の検討

標準モデル（Vcr＝60m/s：平板翼空気力、Vcr＝63.2m/s：測定空気力）を基本として、水平ステイシステムおよび対角ステイシステムがフラッター風速に及ぼす効果の検討を実施した。

①水平ステイシステムの設置範囲を中央径間の約6%とし、対角ステイシステムと組み合わせて適用することにより、フラッター発振風速は平板翼空気力を用いた解析で78.3m/s(約31%)、測定空気力を用いた解析では82.7m/s（約31%）と上昇させる効果がある。

②同様に、水平ステイシステムの設置範囲を14%とした場合、フラッター発振風速は平板翼空気力を用いた解析で83.6m/s(約40%)、測定空気力を用いた解析では88.5m/s（約40%）と上昇させる効果がある。

③さらに、水平ステイシステムの設置範囲を22%とした場合、フラッター発振風速は平板翼空気力を用いた解析で最大86.0m/s(約43%)、測定空気力を用いた解析では最大91.6m/s（約45%）と上昇させる効果がある。

本検討の結果、水平ステイシステムおよび対角ステイシステムを組み合わせて適用することにより、少ない設置量でも超長大吊橋のフラッター発振風速の改善に有効であると考えられる。

3．3　二箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究

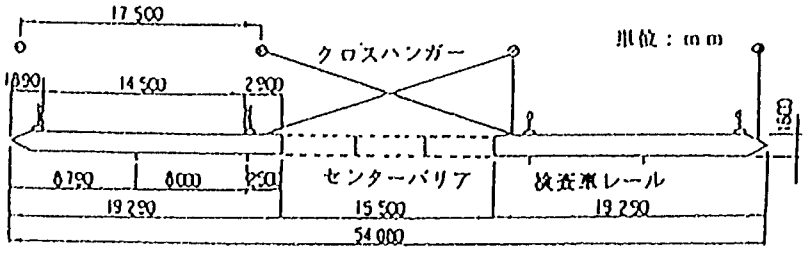
3．3．1　概要

二箱桁形式偏平箱桁を有する超長大橋の耐風性の検討は断面の空力特性の改善により耐フラッター性能を確保しようとするもので、H７年度では図－3.3.1.1に示すＩ、K、Ｓ、HおよびM断面の５系列の断面が対象とされたが、Ｈ８年度はこのうちK，ＳおよびH断面について検討が続けられた。いずれも６車線を対象としたものである。　Ｈ９年度はKおよびH断面でさらなる空力特性の改善について検討が進められた他、Ｉ断面については塔の詳細検討に基づく耐風性の再評価がなされた。この結果、桁高６m・中央開口幅７mで全幅47.98mのK断面では検査車レールに相当する下部鉛直プレートを付加して負の迎角で負の空力モーメントの絶対値を小さくし、頭下げの静的回転変形を大幅に低減して負の迎角側のフラッター安定性を向上させることができた。ただし、３次元的検討は3.4.3節で記述されるように中央支間二箱桁／側支間一箱桁併用で検討され80m/sをクリアしている。この６車線に関する検討結果を踏まえて、桁高４m・中央開口幅７mで全幅37.76m４車線の断面にも適用し、空力特性は６車線と同様な効果があることが確認されている。また、桁高５mで比較的狭い幅５mの中央開口部を有する全幅46mのH断面では鉛直と水平スタビライザーの併用によりほぼ80m/sを満たす良好な結果が得られている。つぎに、桁高1.6mで15.5mの広い幅の中央開口部にダブルセンタバリアを設置する全幅54.08mのＩ断面では、４本ケーブルとクロスハンガー併用によるケーブルシステムの効果を含め90m/s以上の良好な結果が得られている。

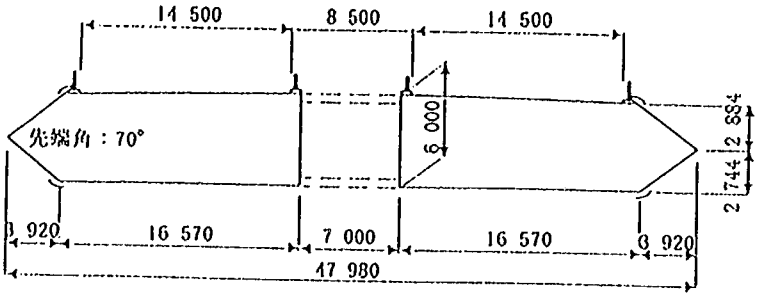
一方、鉛直スタビライザーと同じセンターバリアおよび水平スタビライザーと同じガイドベーンあるいは導流板を併用した図－3.3.1.2に示すＰR断面やＨＳ断面についての検討結果が報告された。ＰR断面ではさらに自動車防護柵に対応する部材（アンダーバリア）が付加されている。この断面に関してはそのベースとなる床版部開口位置・開口幅の検討が事前に実施され、また、センターバリアやガイドベーン等の付属物を設置せず断面形状の工夫による耐風性を向上させる案の検討も行われた。結果的には、図－3.3.1.2のＰR断面形状が良好であった。このＰR断面は桁中央部の開口幅は11.333mと広幅で６車線のため全幅50.533mとなっている。これに対して、桁中央開口部10.5mをグレーチング構造とし、追越車線に活用する全幅41.5mの６車線および34mの４車線でも耐風性が良好な結果が得られている。つぎに、ＨＳ断面は４車線で10.5m幅や9.8m幅の中央開口部をグレーチング構造とし、追越車線に活用するもので全幅34～30mと比較的コンパクトな断面構成となっている。ＨＳ断面では鉛直スタビライザーと導流板につきパラメトリックに検討された結果、良好な断面が見出されている。ただし、中央径間2500mの吊橋モデルに対して検討された結果ではフラッター発生風速は70m/s前後と推定され、目標風速80m/sを下回る。この断面に車輌走行性の改善を目的とした遮風壁を設置（ただし、強風時に不要な遮風壁を水平に倒して導流板の役割を代用させるため、上側導流板なし）した場合について検討されたが、耐風特性に及ぼす影響は大きくない結果が得られている。なお、透過型遮風壁を桁高2.5m・中央開口幅10mで全幅46mのＳ断面に設置した場合、迎角０°ではフラッター発生風速が向上する結果が得られている。

このように、この３年間の検討結果から、二箱桁形式の偏平箱桁の空力特性の改善を主体として設計目標の80m/sをクリアできる可能性がある断面が見出されており、今後の展開が期待される。

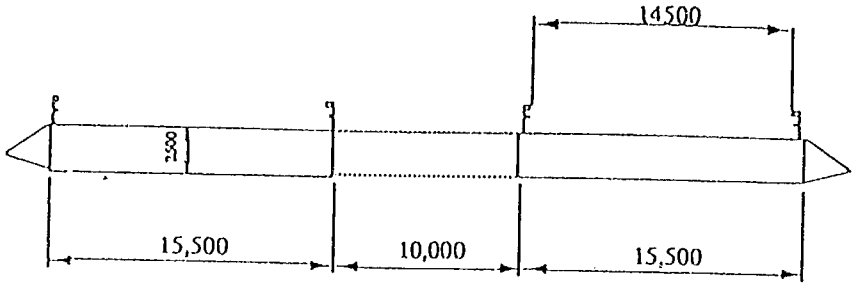
以下、各成果について報告する。



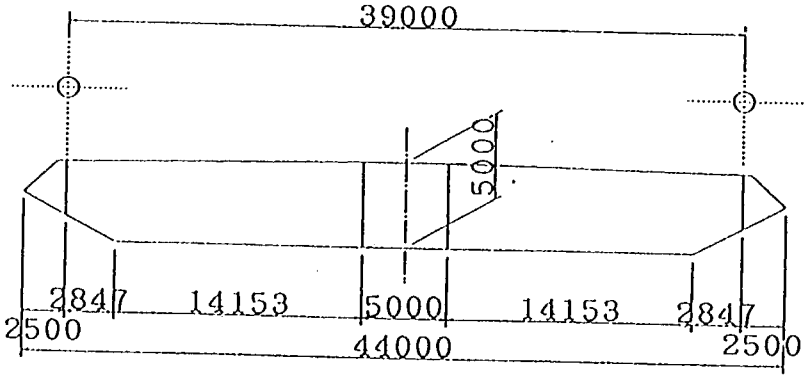
（I断面）



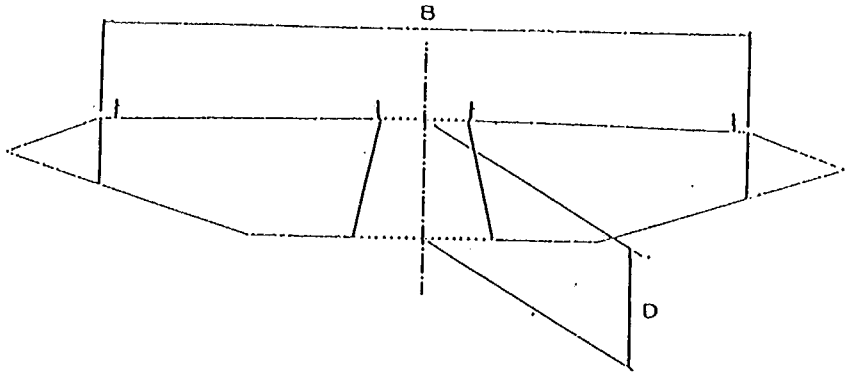
（K断面）



（S断面）

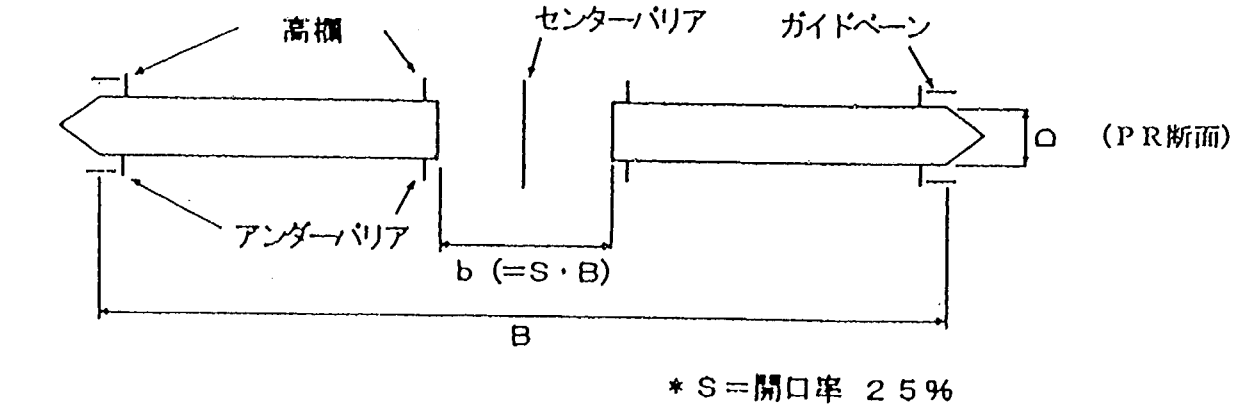


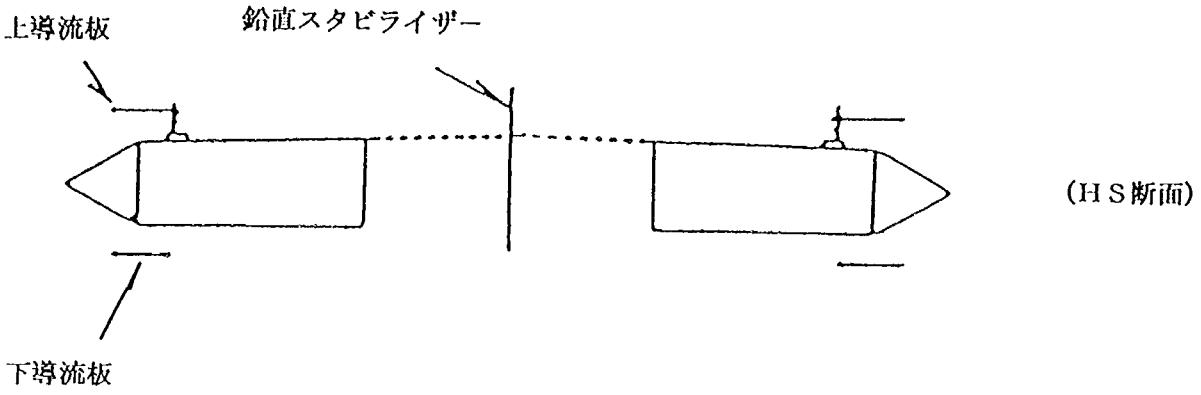
（H断面）



（M断面）

図－3.3.1.1　二箱桁形式検討対象の基本断面（その1）





図－3.3.1.2　二箱桁形式検討対象の基本断面（その２）

3.3.2　4本ケーブル軽量二箱桁の耐風性検討

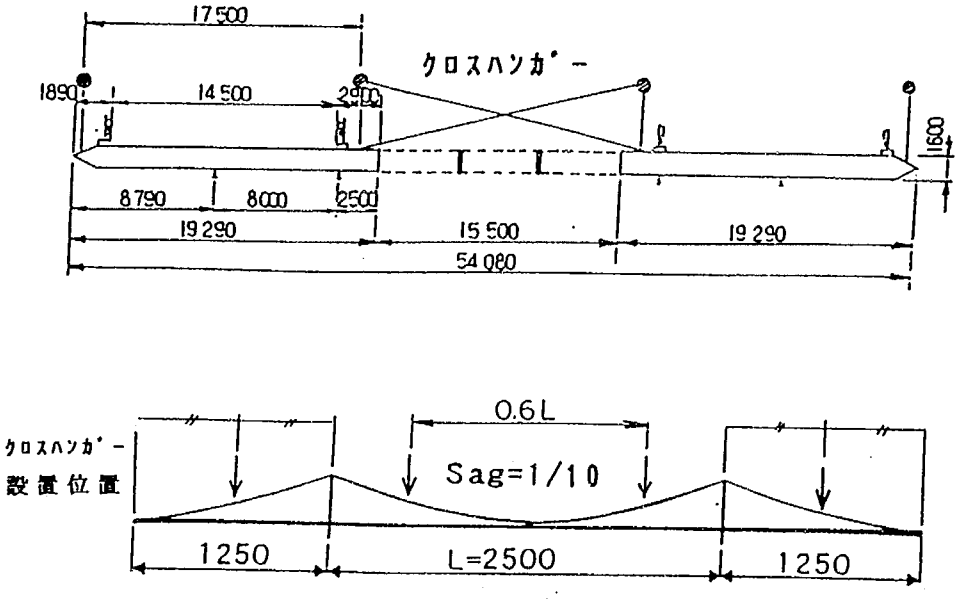
（1）概要

1)　目的

耐風安定性および経済性に優れた中央径間 2500m 級の超長大橋の開発を目的とした。桁＋ケーブルの単位長さ当たり重量は、経済性を考慮し 32.4tf/m（明石海峡大橋の約８割）に設定した。

2)　過去の検討結果

平成７年度の検討[1]において、耐風性及び経済性に優れた超長大橋案として図－3.3.2.1 に示す橋を提案した。主な検討結果を表－3.3.2.1　に示す。



図－3.3.2.1　提案橋梁

表－3.3.2.1　平成７年度の検討結果

	検討項目	目標値	検討結果
耐風安定性	フラッター	85m/s 以上	90m/s 以上
	ダイバージェンス	85m/s 以上	95m/s
経済性	単位長さあたりの鋼重	33tf/m 以下 (明石海峡大橋の８割)	32.4tf/m

なお、本橋の耐風性を良好にするために、様々な工夫を行った。それらを本橋の特徴として以下に示す。

① 桁の空力特性を改善するため、桁間隔中にダブルセンターバリアを配置した。ダブルセンターバリアを付加すると正迎角域（頭上げ）で飛躍的な良フラッター特性を示す。

② ①の特徴を生かすため、正迎角域での高いフラッター風速を維持しつつ、迎角０°のピッチングモーメント係数が正となるように配置した。。

③ ケーブルクロスハンガーは、ねじれ振動数が向上し、且つ、有風時のセンタースパン中央部の静的変形角が正迎角となる最適位置に配置した。

3)　本年度の検討内容

平成７年度の検討では、塔についての詳細な検討は施していなかった。そこで、今年度は４本ケーブル吊橋用の塔について新たに概略設計し、本橋に適用した際の耐風性を再度検討することとした。

4) 検討結果

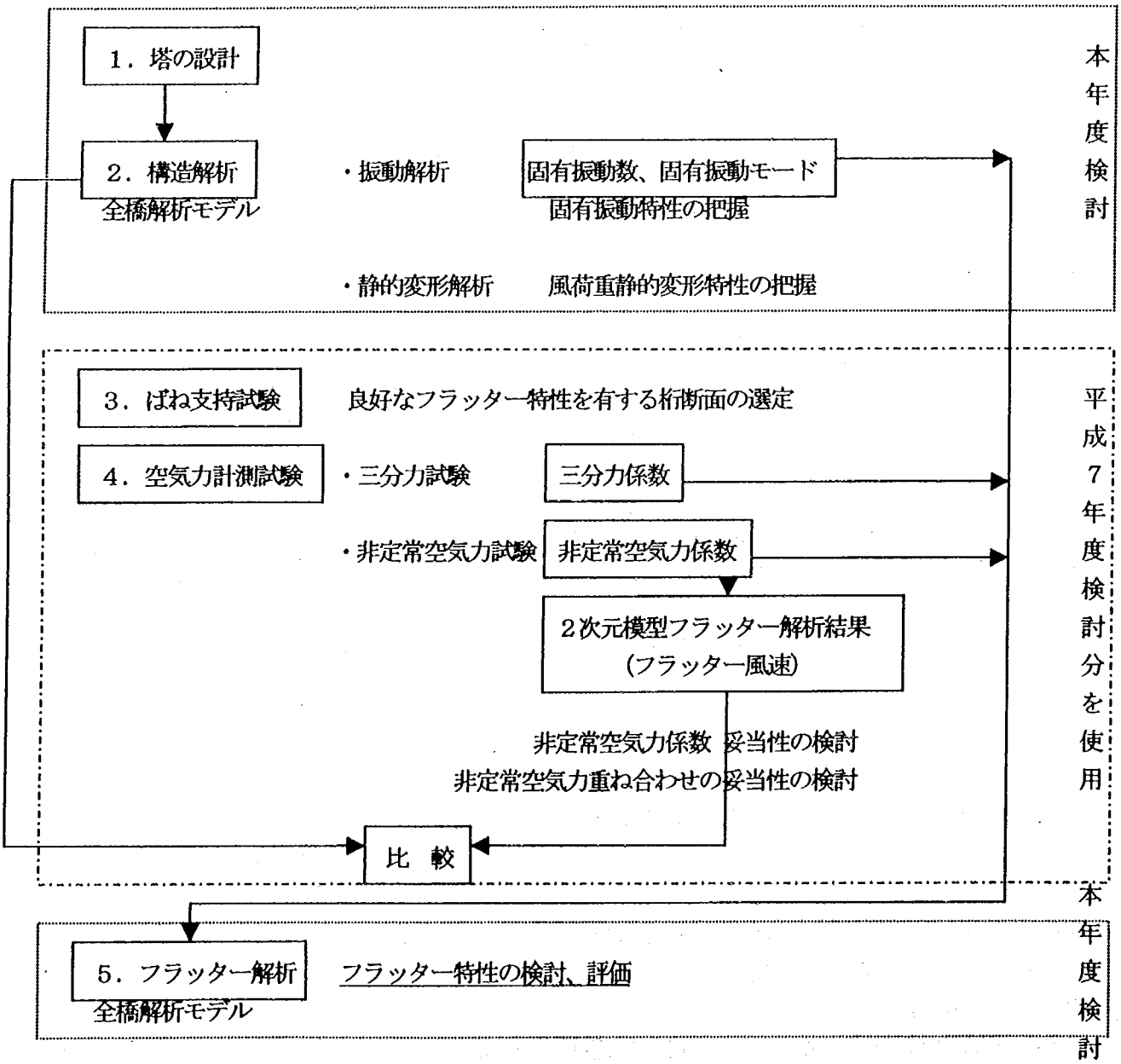
本年度の検討結果を表－3.3.2.2 に示す。今回新たに設計した塔を適用した場合でも、ダイバージェンス風速やフラッター風速は従来の検討結果とほとんど変わらず、耐風性に優れた特性を維持できることがわかった。

表－3.3.2.2　本年度の検討結果

	検討項目	目標値	検討結果
耐風安定性	フラッター	85m/s 以上	90m/s 以上
	ダイバージェンス	85m/s 以上	92m/s
経済性	単位長さあたりの鋼重	33tf/m 以下 (明石海峡大橋の８割)	32.4tf/m

(2)　検討内容と手順

本検討内容・手順を図－3.3.2.2 に示す。



図－3.3.2.2　検討内容、手順

（3） 塔の設計

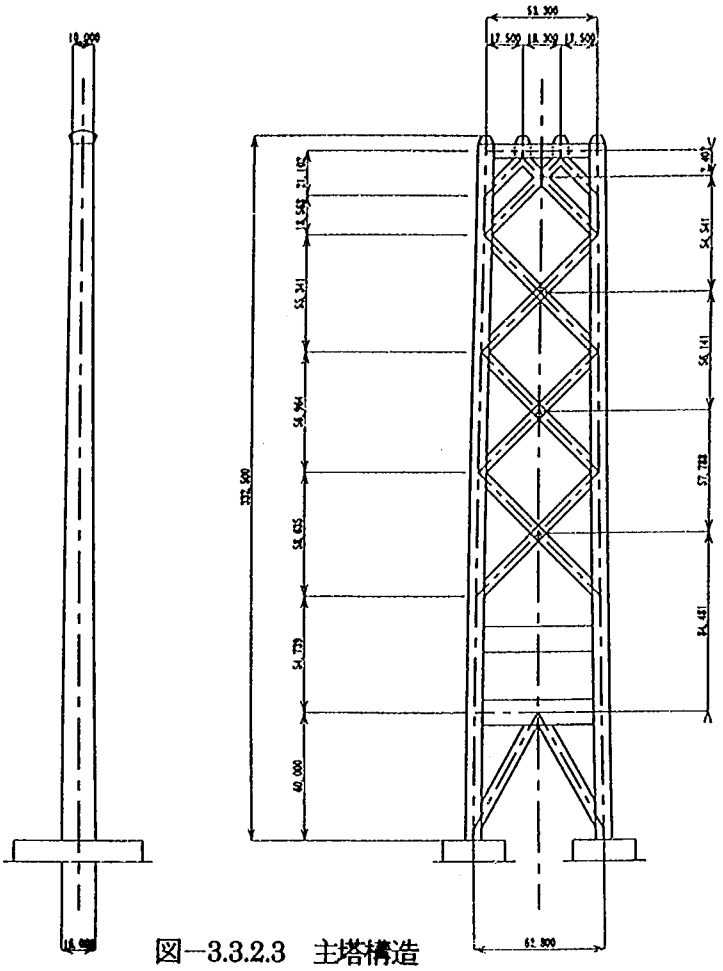
1) 主塔構造

想定した主塔構造を図－3.3.2.3 に示す。本主塔の特徴として以下が挙げられる。

① 門型塔（2柱構造）、トラス腹材を用いた。

② 4本のケーブルを支持するために上部水平材上にケーブルサドルを設置した。

③ 4本ケーブル吊橋主塔の最大の問題点として内側ケーブルの反力の伝達方法が挙げられる。本主塔では、内側ケーブル直下に腹材（斜材）を設けて、これに対応することとした。



図－3.3.2.3 主塔構造

2) 検討内容

図－3.3.2.3 に示した主塔構造について概略設計を行なった。設計は、下記資料に基づいている。

本州四国連絡橋公団、「上部構造設計基準・同解説」、平成元年4月

本州四国連絡橋公団、「吊橋主塔設計要領・同解説」、平成元年4月

今回の検討では、常時（死荷重＋活荷重）と暴風時（橋軸直角方向風荷重）の2種類の荷重状態を想定し、設計している。その際、以下を設定した。

① 柱断面は矩形とし、隅切りは考えない。

② 水平材、斜材断面は8m×8mの矩形断面とした。

③ フランジ・ウェブの板厚を同じとした。

④ 荷重は、次項のa)～c)の値を設定した。

a) 死荷重

桁：１８．３４tf/m/deck

ケーブル：３．５３３tf/m/cable

主塔：２５tf/m～３３tf/m

b) 活荷重

主荷重：p1=１２００kgf/m²

B＝５．５m

P1＝５．５×１２００／１０００＝６．６tf/m

従荷重：p2＝２０８kgf/m²

B ＝（３．５m/車線×３車線×２deck）－５．５m＝１５．５m

P2＝１５．５×２０８／１０００＝３．２２tf/m

よって、P＝６．６＋３．２２＝９．８２tf/m

c) 風荷重

風荷重については、表－3.3.2.3 を設定した。

表－3.3.2.3 風荷重一覧表

	風速 (m/s)	抗力係数	投影面積 (m^2/m)	荷重強度 (tf/m)
桁	６２	１．６８４ (2deck)	２．６２６	１．３１３ (2deck)
ケーブル	８２	０．７	０．７８３	０．２３５ (／cable)
塔	８３	１．８	１３．０ (平均)	１０．１５ (／shaft)
ハンガー	８２	０．７	———	０．１３８注)

注）ハンガーの風荷重は桁長さ当たりの平均値とした。載荷は桁とケーブルに分けて載荷した。

2) 検討結果

概略の主塔断面構成、性能を表－3.3.2.4 に示す。

断面決定は全断面において常時（死荷重＋活荷重）にて決定された。これは、塔柱間隔が広いため、風荷重による水平曲げモーメントが軸力に変換されているためと考えられる。

表－3.3.2.4 主塔断面構成

断面番号 (図－3.3.2.3 参照のこと)	板厚 (mm)	断面積 (m^2)	塔面外 断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ (m^4)	塔面内 断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ (m^4)
①基部	３２	２．６１８	１０５．２	４９．３
②	３９	２．５３６	８５．７	４０．３
③	３８	２．４７	８３．５	３９．３
④	４２	２．６４	７８．６	４１．３
⑤	４５	２．６４	７０．４	４０．１
⑥頂部	５８	３．２９	７６．０	４８．９
水平材	２２	０．８９	１．３４	１．３１
ｸﾛｽﾋﾞｰﾑ	２８	１．１４	１．７	１．６６

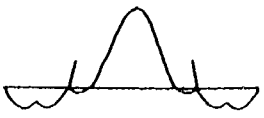
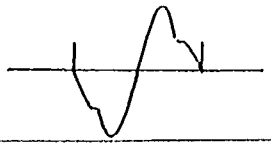
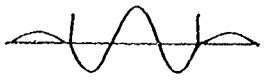
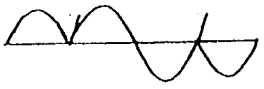
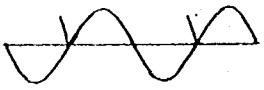
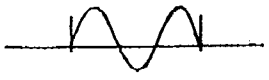
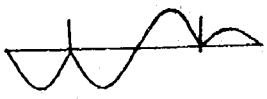
（4）構造解析

対象断面は、図－3.3.2.1 であり、塔以外は平成７年度の検討内容と同じである。構造解析に用いた実橋の諸元と解析モデルの条件を表－3.3.2.5 に示す。また、無風時の主要モード形の固有振動特性を表－3.3.2.6 に示す。無風時固有振動特性は、逆対称モード形の一部で一般化重量の偏差が大きいものの、平成７年度検討時と概ね一致している。

表－3.3.2.5　実橋諸元と解析モデルの条件

項　目		実橋諸元・モデルの条件
形式	構造形式	3 径間 2 ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250 m + 2500 m + 1250 m
	桁支間長	1226 m + 2480 m + 1226 m
	サグ比	1/10
ケーブル	中心間隔	17.5 m
	断面積	0.385 m^2/cable
	ケーブル本数	4 本
	水平張力	25318.3 tf/cable
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	0.04625 m^2/格点
補剛桁	断面積	0.516 m^2/deck
	鉛直曲げ剛性	0.301 m^2/deck
	水平曲げ剛性	11.39 m^4/deck
	ねじれ剛性	0.7695 m^4/deck
死荷重	桁+横梁	18.34 tf/m/Br.
	ケーブル	14.13 tf/m/Br.
	合計	32.49 tf/m/Br.
桁極慣性モーメント		163.7 tf·m^2/m/deck
主塔	塔高	342.5 m（ケーブル理論頂）
クロスハンガー	断面積	0.014 m^2
モデル化	桁境界条件	タワーリンクとウインド沓をモデル化
	桁重心位置	ケーブル定着点より 0.8m 下
	桁節点間隔	125m
桁幅（解析に用いた代表幅）		19.29 m

表－3.3.2.6　無風時　固有振動特性

	モード形		平成８年度 検討結果①	塔設計後の 検討結果②	偏差 ②/①
ねじれ 対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0934 15498	0.0912 16180	0.98 1.04
ねじれ 逆対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.1182 24419	0.1178 20650	1.00 0.85
鉛直曲げ 対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0549 57908	0.0542 58550	0.99 1.01
鉛直曲げ 対称２次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.1023 32883	0.1023 32900	1.00 1.00
鉛直曲げ 逆対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0624 109880	0.0618 114000	0.99 1.04
		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0714 76182	0.0714 80970	1.00 1.06
水平曲げ 対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0355 40945	0.0356 40930	1.00 1.00
水平曲げ 対称２次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.1195 32431	0.1194 38410	1.00 1.18
水平曲げ 逆対称１次		振動数(Hz) 一般化重量(tf)	0.0735 44526	0.0739 32310	1.01 0.73

（5）　桁の風洞試験

本橋の耐風性の最終的な評価は、図－3.3.2.2 にも示したが、全橋解析モデルに計測空気力を載荷した大変形解析やフラッター解析で行なわれる。そのためには、図－3.3.2.2 の一点鎖線囲みで示した桁の風洞試験（ばね支持試験、空気力計測試験）が必要である。ただし、今年度の検討は、塔の新たな設計に伴う橋梁の耐風性を調べるものであるため、この部分に関しては従来[1]と同じデータを使用した。詳細は、参考文献１）を参照されたい。

（6）多自由度フラッター解析

1) 解析条件

フラッター解析条件は、付録「6．2　フラッター解析条件一覧表」にある IH－1 を用いた。詳細は、付録を参照のこと。

2) 静的変形解析結果・考察

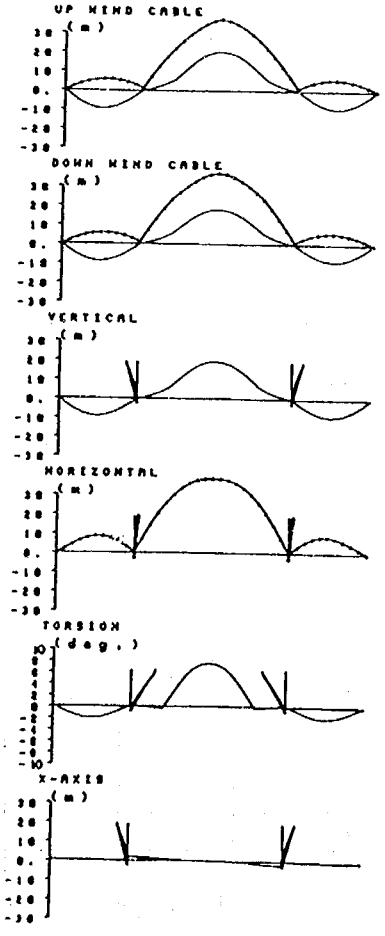
90m/s 時の静的変形結果を図－3.3.2.4 に示す。

本解析結果は、平成７年度検討結果に比べ風速 90m/s 時においては、水平変形量で８%、ねじれ変形量で 20% 程度大きくなっている。そのため、ダイバージェンス風速は 92m/s となり、平成８年度検討結果 95m/s に比べ若干低くなっている。

解析結果から以下のことが言える。

① 中央径間の中央部のねじれ変形は、桁のモーメント係数が迎角０° で正のため正の迎角に変形する。しかし、塔からクロスハンガー定着部までは、ケーブルクロスハンガーの影響を受け、負の迎角を示す。これは、引張り側クロスハンガー（上流側ケーブルと下流側桁を連結）が風速の増加とともに張力が増加し、下流側桁を押し上げる効果が、桁にかかる正のモーメントよりも大きくなることに起因するものと思われる。

② 風速 92m/s で、ダイバージェンスが発生する。ただし、耐風設計基準の設計風速×√1.7=85m/s を満足しており、耐風設計上問題はない。



図－3.3.2.4　風荷重静的変形解析結果（V=90m/s）

3) フラッター解析結果・考察

フラッター解析結果を表−3.3.2.7 に示す。また、図−3.3.2.5、図−3.3.2.6 にそれぞれフラッター特性図、フラッター振動モード形図を示す。なお、本断面は平成7年度の検討結果同様に 90m/s までフラッターを起こさないため、ここでは便宜上ねじれ対称1次の分岐をプロットした。

フラッター解析結果から言えることは以下の通り。

① フラッター風速は 90m/s まで発生せず、耐風安定性に優れた 2500m 級の超長大橋を開発した。また、本橋は、単位長さ当たりの桁+ケーブルの重量は 32.4tf/m であり経済性も兼ね備えている。

② 図−3.3.2.5 に示したように、ねじれ対称1次分岐の応答振動数および応答減衰は、風速とともに大きくなる傾向にあり、従来の連成フラッターとは傾向が異なる。

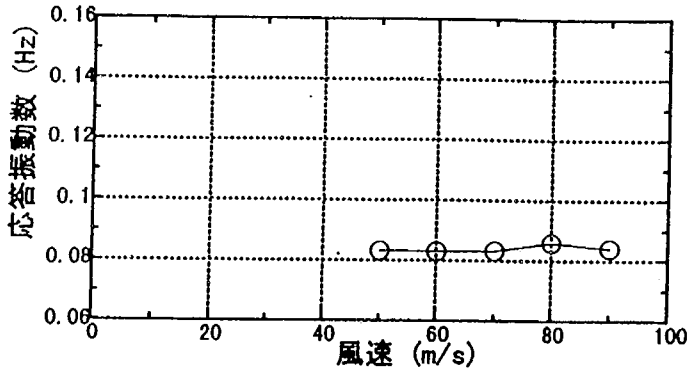
③ 上記②のような風速とともにフラッター特性が良好になるのは、中央径間の桁が風速とともに正の迎角に静的ねじれ変形を起こし（図−3.3.2.4）、ばね支持試験結果[1]に見られるような特異的な良フラッター域に達したことが主原因と思われる。

④ フラッター振動モード形の鉛直曲げ成分は、主に対称 1 次、対称 2 次の重ね合わせで成り立っており、ねじれ成分も対称1次のみではなく、他のモード形が混在している。このようにクロスハンガーを付加した断面では、複数の固有モード形の重ね合わせで構成される多自由度フラッター特性を有する。

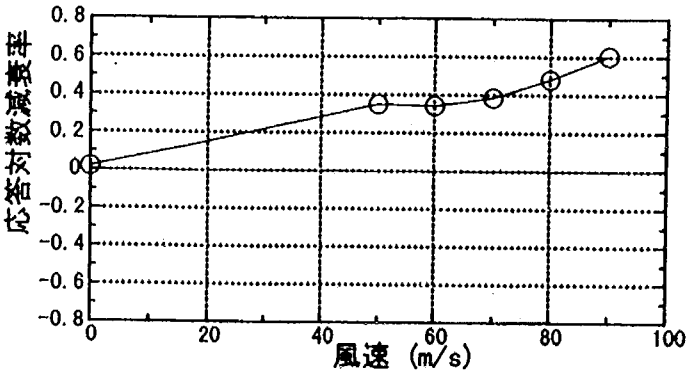
⑤ ばね支持試験の迎角 0 °のフラッター風速が 80m/s 程度である[1]ことを考えれば、上記④の多自由度フラッター特性も本橋が良好なフラッター特性を示す一因といえる。

表−3.3.2.7 フラッター解析結果（気流傾斜角0°）

フラッター風速	フラッター時応答振動数
90.0m/s 以上	0.084Hz(90m/s 時)

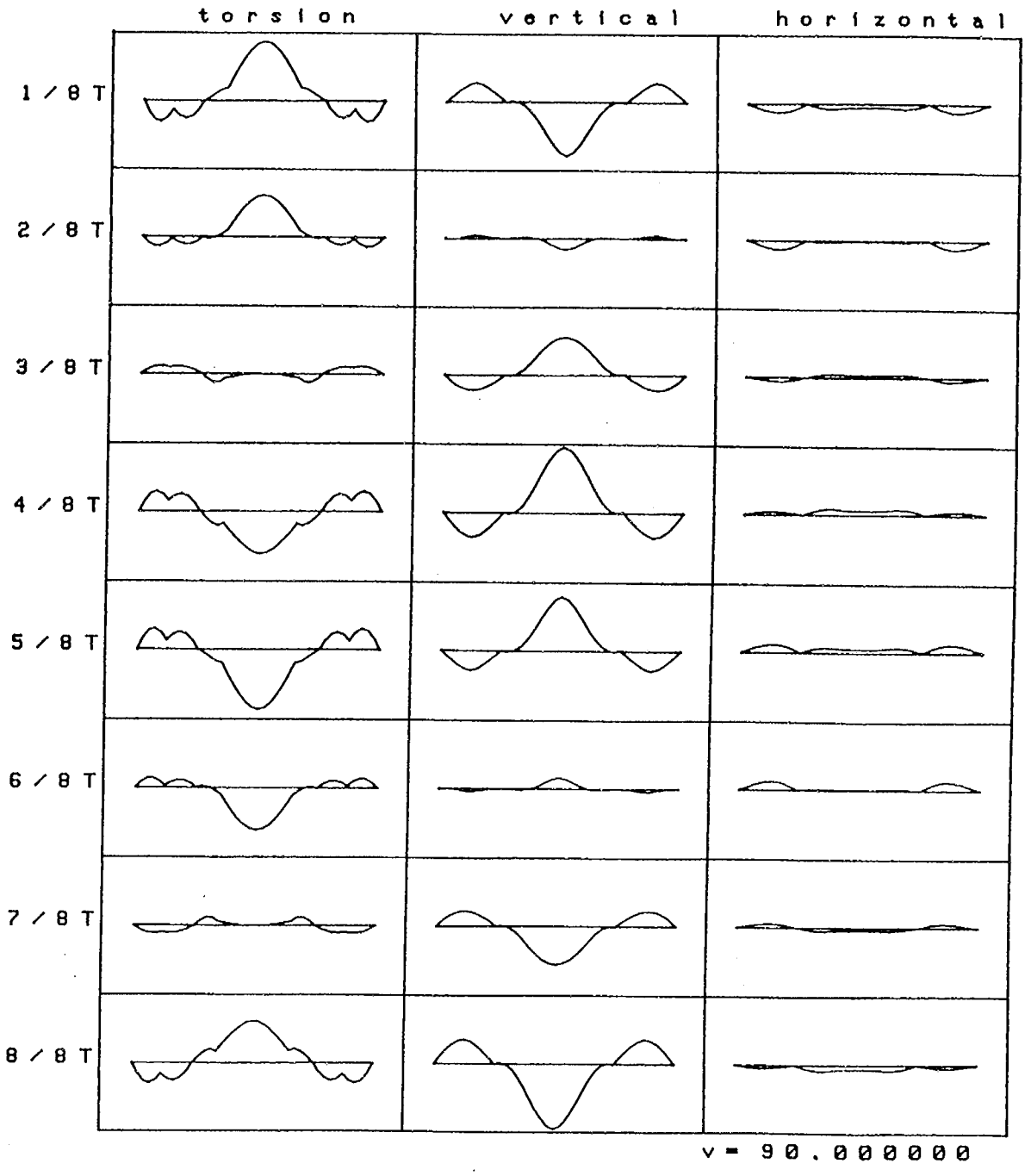


（a） V−f曲線



（b） V−δ曲線

図−3.3.2.5 フラッター特性図（ねじれ対称1次分岐）



図－3.3.2.6　フラッター振動モード形（V=90m/s、ねじれ対称１次分岐）

（6）　まとめ

耐風安定性および経済性に優れた中央径間 2500m 級の超長大橋の開発を目的として、４本ケーブル軽量二箱桁を提案し、計測空気力を用いて静的変形を考慮した多自由度フラッター解析を行った。

本検討で明らかとなった４本ケーブル軽量二箱桁案の特性をまとめると以下のようになる。

① 本検討で提案した４本ケーブル軽量二箱桁案は、耐風安定性に優れた断面である（表－3.3.2.8 参照）。

② 本断面は、有風時の中央径間の桁静的ねじれ変形をばね支持試験結果[1]で得られた良フラッター迎角域に変形させることでフラッター特性を向上させたものである。

③ フラッター振動モード形は、複数の固有モード形の重ね合わせによって構成された多自由度フラッター特性を有している。ばね支持試験の迎角０°のフラッター風速が 70m/s 程度である[1]ことを考えれば、この多自由度フラッター特性も本橋が良好なフラッター特性を有する一因といえる。

表－3.3.2.8　４本ケーブル軽量二箱桁の検討結果

	検討項目	目標値	検討結果
耐風安定性	フラッター	85m/s 以上	90m/s 以上
	ダイバージェンス	85m/s 以上	92m/s
経済性	単位長さあたりの鋼重	33tf/m 以下 (明石海峡大橋の８割)	32.4tf/m

参考文献

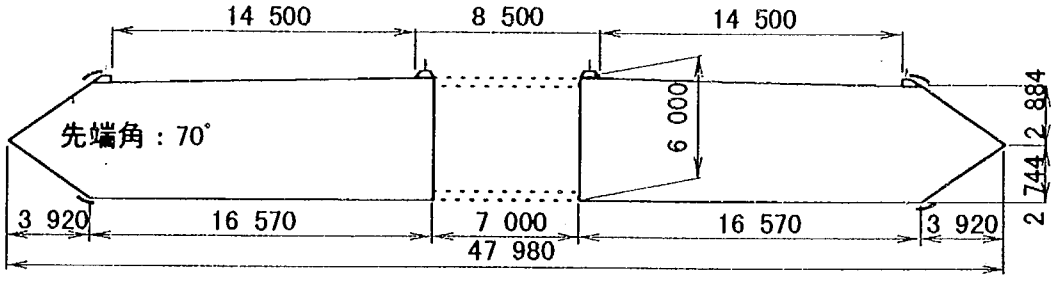
1）建設省土木研究所構造橋梁部　他、「耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究報告書（その2）」、平成８年３月

3.3.3　二箱桁断面の空力特性改善に関する研究

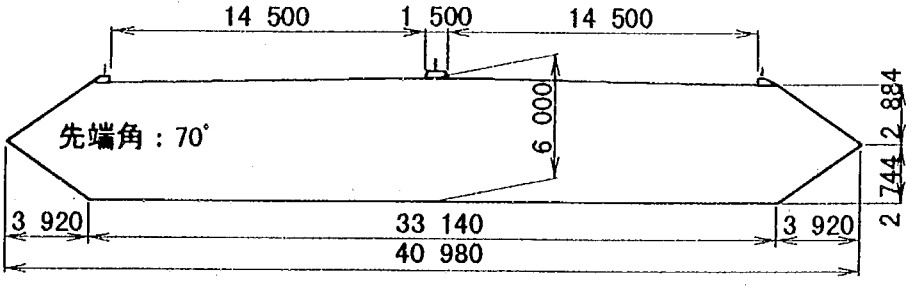
(1) 概　要

ここでは、偏平箱桁断面の中央部に開口部を設けて二箱桁断面とした場合の空力特性への影響と、この二箱桁断面の超長大橋への適用性向上のための空力特性改善策に関する検討結果について、とりまとめを行った。

図-3.3.3.1に、今回検討を行った６車線の幅員を想定した偏平箱桁断面の基本的な形状を示す。　これらの断面の空力特性を把握するために、二次元剛体模型を使用した風洞試験により、三分力天秤を用いた静的空気力計測、２自由度バネ支持試験によるフラッター応答特性調査および自由振動法による動的空気力計測を実施し、特性の比較を行った。　また、基本断面に関する検討の結果、二箱桁断面の空力特性に関する問題点（負迎角側で静的な空力モーメントが大きくなる等）が明らかになったため、これに対する各種空力対策を施した断面に関して同様の試験を実施し、その特性評価を行った。　さらに、建設コストの削減のための橋梁規模の縮小（４車線化）という方向性への対応という観点から、６車線断面として優れた空力特性を示した対策断面をもとに想定した４車線箱桁断面を対象として、その空力特性の評価を実施した。



二箱桁断面



一箱桁断面

図-3.3.3.1　検討対象とした箱桁断面形状（６車線断面）

(2) 風洞試験方法

本風洞試験は川崎重工業株式会社所有の構造物用風洞（水平単路回流式風洞、測定部寸法：幅2.5m×高さ3.0m×長さ20m）において実施した。 検討の対象とした箱桁断面は図-3.3.3.1に示す一箱桁および二箱桁基本断面（幅員想定：6車線）と、これらに耐風対策を施した数種の対策二箱桁断面、ならびに4車線の幅員を想定し、これに合わせて断面寸法を変更した断面である。 各対策断面および4車線断面形状に関しては以降に適宜示すものとする。 風洞模型は、6車線断面に関しては縮尺1/70、4車線断面に関しては縮尺1/100の二次元剛体模型とし、一様流中において各断面に対する以下の各試験を実施した。

1) 三分力試験

三分力天秤を用いて計測した二次元剛体模型の静的空気力を、抗力，揚力および空力モーメントの各空気力係数として評価した。 ここでの空気力係数は次式により定義したものである。

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B \cdot L} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B \cdot L} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$C_M = \frac{F_M}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B^2 \cdot L} \quad \cdots\cdots (3)$$

ここに、F_D：抗力，F_L：抗力，F_M：空力モーメント，B：桁幅(フェアリング先端を基準)
ρ：空気密度，V：風速，L：模型長

2) 2自由度バネ支持試験

曲げ、ねじれの2自由度にバネ支持された模型の、気流中における振動応答を計測することにより、各断面のフラッター特性（フラッター限界風速の差異）を評価した。

3) 動的空気力計測試験

曲げ1自由度およびねじれ1自由度にバネ支持された模型の、気流中における各振動状態での空力減衰、応答振動数と、曲げ・ねじれ2自由度にバネ支持された模型の、同じく空力減衰、応答振動数と、曲げ／ねじれ振動の位相差ならびに応答振幅比より動的空気力の評価を行う自由振動法の手法を用いて、動的揚力および動的空力モーメントを評価した。 各空気力は動的空気力係数で表すものとし、これらは以下の式で定義される。

$$L = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B}{1/(2 \cdot \pi \cdot k^2)} \cdot \left\{ C_{L\eta R} \cdot \frac{\eta}{B} + C_{L\eta I} \cdot \frac{\dot{\eta}}{B \cdot \omega} + C_{L\alpha R} \cdot \theta + C_{L\alpha I} \cdot \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$M = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B^2}{1/(2 \cdot \pi \cdot k^2)} \cdot \left\{ C_{M\eta R} \cdot \frac{\eta}{B} + C_{M\eta I} \cdot \frac{\dot{\eta}}{B \cdot \omega} + C_{M\alpha R} \cdot \theta + C_{M\alpha I} \cdot \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\} \quad \cdots\cdots (5)$$

ここに、L：動的揚力，M：動的空力モーメント，ρ：空気密度，V：風速，
B：桁幅（フェアリング先端で定義），η：曲げ振幅，θ：ねじれ振幅，
k：換算振動数（$=B \cdot \omega/V$），ω：応答円振動数，f：応答振動数

(3) 一箱桁および二箱桁基本断面の空力特性比較

図-3.3.3.1に示した一箱桁および二箱桁の基本断面に関して、縮尺1/70の２次元剛体模型を用いた風洞試験により空力特性の比較を行った結果を以下に示す。

1) 基本箱桁断面の三分力特性

一箱桁および二箱桁の基本断面に対する三分力試験試験によって得られた各断面の三分力曲線を図-3.3.3.2に示す。 この結果より、本検討で対象とした一箱桁および二箱桁断面の三分力特性についてまとめれば以下のようである。

① 抗力係数については各断面とも顕著な差異はなく、迎角 $\alpha=0^{\circ}$ における抗力係数 C_D=0.1程度の値となっている。

② 揚力係数に関しては、特に高迎角の範囲において、二箱桁断面のそれが一箱桁断面に比べて大きく低下する傾向がみられ、これは、開口による上下面の圧力差の緩和によるものであると考えられる。

③ 本検討で対象とした箱桁断面においては、一箱桁断面および二箱桁断面それぞれの、迎角 $\alpha=0^{\circ}$ における空力モーメント係数がともに負値となっていることから、風荷重による桁のねじれ変形については、気流に対して頭下げの方向となる傾向にあるものと考えられる。

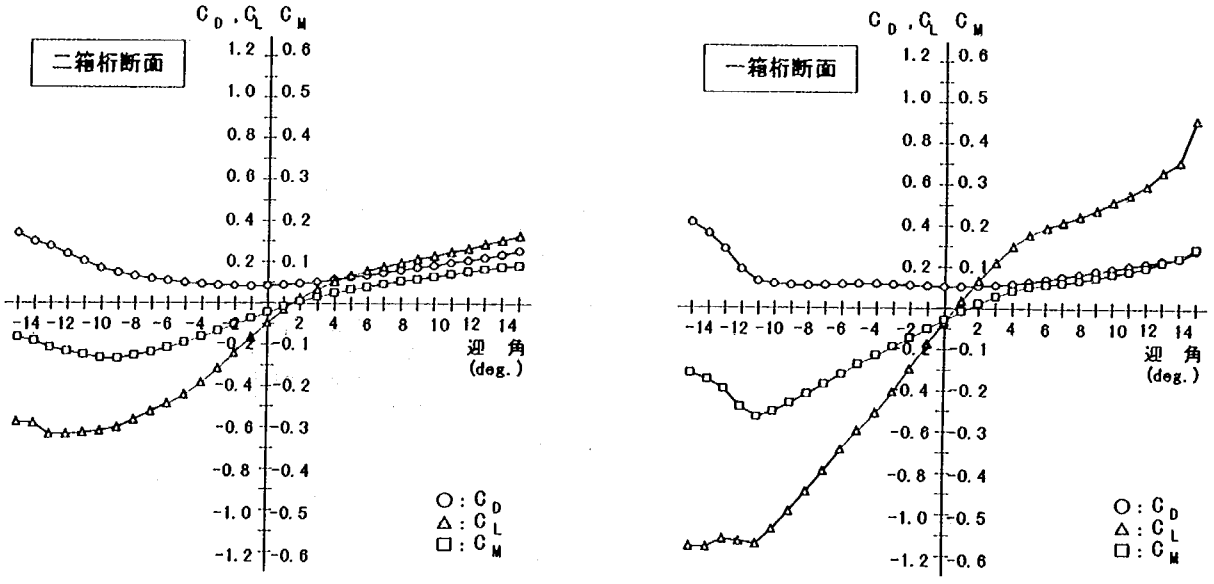


図-3.3.3.2 箱桁断面の三分力曲線（６車線基本断面）

2) 基本箱桁断面のフラッター応答特性

２自由度バネ支持試験においては、３．４．３項に示す二箱桁／一箱桁併用吊橋案に対する固有振動解析結果をもとに、表-3.3.3.1に示すような試験条件を想定した。 また、迎角については、風荷重による静的変形特性として、桁の回転変位が負迎角側になることが予想されることを考慮し、$\alpha=0^{\circ}$，$\alpha=-3^{\circ}$ の２迎角を対象とした。 本試験により得られた、一箱桁、二箱桁各断面における曲げ・ねじれ連成モードに関する対数減衰率および振動数と風速との対応について図-3.3.3.3に示す。 ここでのバネ支持試験結果についてまとめれば以下のようである。

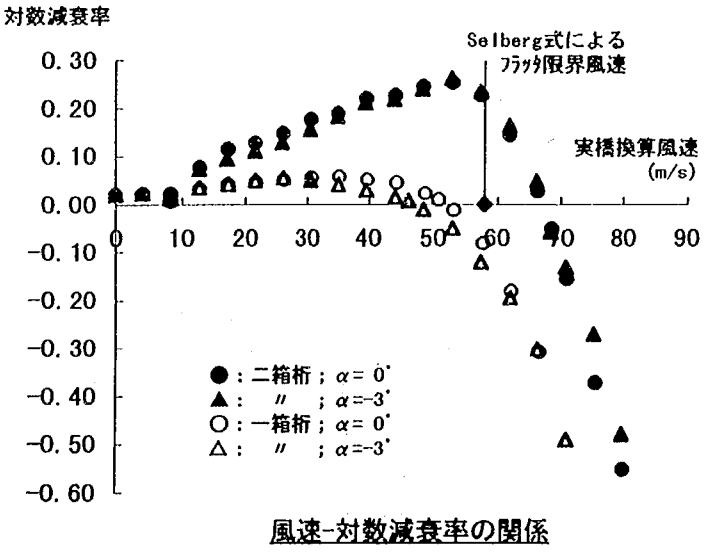
① 一箱桁断面・迎角α=0°においては、実橋換算風速50m/s付近でフラッターが発生し、迎角α=-3°におけるフラッター限界風速は45m/s付近まで低下する。

② これに対して、二箱桁断面・迎角α=0°におけるフラッター限界風速は67m/sとなっており、一箱桁断面に比べ30%以上の上昇がみられる。 また、迎角α=-3°における、フラッター限界風速の顕著な低下はみられない。

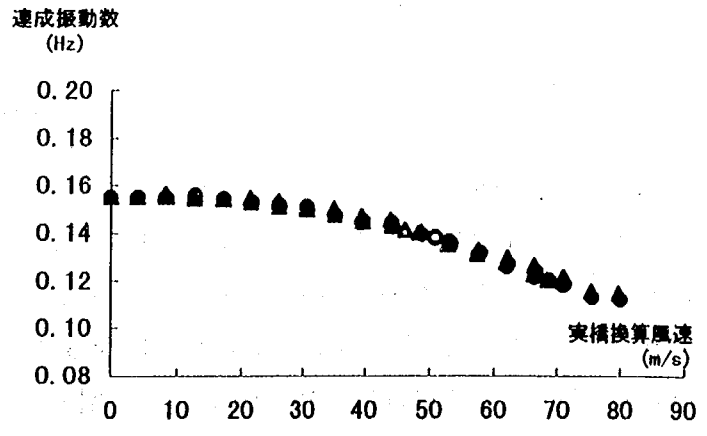
③ 二箱桁断面におけるフラッター限界風速は、Selberg式により評価される平板翼断面に対するフラッター限界風速（ただし、桁幅としては二箱桁断面のフェアリング先端で定義された桁幅47.98mを使用）に比べても17%程度高い値となっている。

表-3.3.3.1 バネ支持試験条件

		実橋想定値	試験条件：縮尺1/70 目標値	試験条件：縮尺1/70 模型値
固有振動数	曲げ	Hz 0.053	Hz 0.752	Hz 1.015
	ねじれ	Hz 0.155	Hz 2.200	Hz 2.223
	振動数比	2.92	2.92	2.19
質量	等価質量	tf・s²/m 4.00	kgf・s²/m 0.816	kgf・s²/m 0.816
	等価極慣性	tf・m・s²/m 1287.6	kgf・m・s²/m 0.0536	kgf・m・s²/m 0.0536
減衰	曲げ	δ=0.02	δ=0.02	δ=0.02
	ねじれ	δ=0.02	δ=0.02	δ=0.02



風速-対数減衰率の関係



風速-振動数の関係

図-3.3.3.3 一箱桁断面，二箱桁断面のフラッター応答特性

3) 基本箱桁断面の動的空気力係数

自由振動法により、一箱桁、二箱桁の各断面に対して得られた動的揚力、動的空力モーメントの各空気力係数を図-3.3.3.4に示す。 なお、図中においては換算風速 (=$V/f \cdot B$) を用いて整理を行っている。

ここで得られた動的空気力係数は、３．４．３項に示す二箱桁／一箱桁併用吊橋案の検討において、多自由度フラッター解析に適用した。

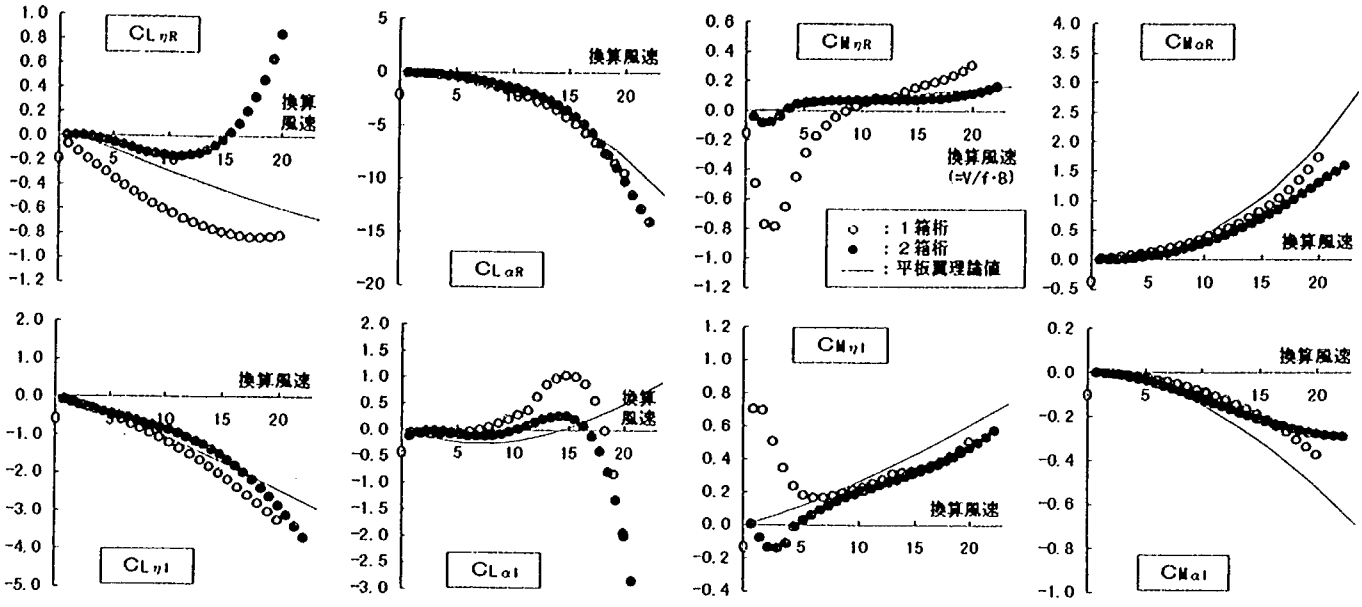


図-3.3.3.4 一箱桁断面，二箱桁断面の動的空気力係数（６車線基本断面：迎角 α=0° ）

(4) 二箱桁断面の空力特性改善

３．４．３項において、(3)で述べた一箱桁および二箱桁断面の静的空力特性を用いて、二箱桁／一箱桁併用吊橋案に対する静的変形解析を行った結果を示すが、その結果、例えば80m/s程度の風速域においては、主径間中央での補剛桁に-10°を超える頭下げの静的ねじれ変形が生じ、これに伴うフラッター安定性の低下が予想されることなどの問題点が明らかとなった。 また、(3)に示す検討の結果、一箱桁断面ならびに二箱桁断面それぞれの、迎角 α=0°における空力モーメント係数がともに負値となることが確認されたが、これより今回検討対象とした基本断面に関しては、頭下げのねじれ変形を生じやすい空力特性を有しているものと考えられ、このことが過大な静的ねじれ変形の主たる原因の一つであると判断された。

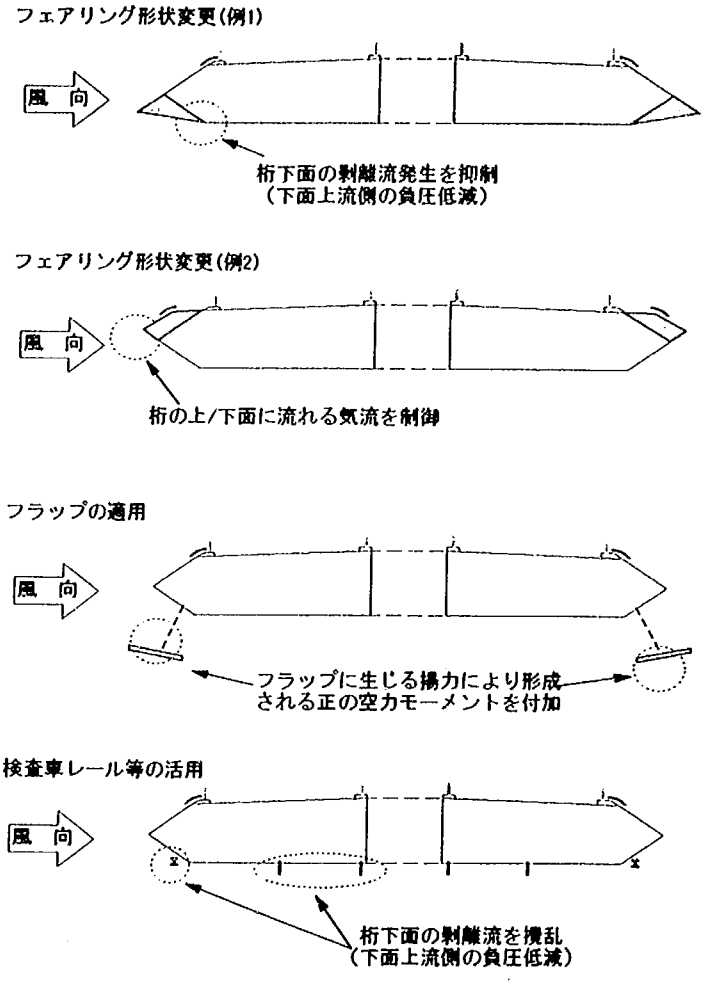
ここでは、二箱桁形式の補剛桁断面の空力モーメント特性の改善による静的なねじれ変形の低減と、さらに、フラッター安定性の向上を目的とした空力的な耐風対策について、風洞実験による実験的な検討を行った。 その結果を以下に示す。

1) 空力モーメント特性の改善対策

本検討においては、図-3.3.3.1に示した基本断面に対し、まず空力モーメント特性の改善として、負迎角側でのモーメント係数の絶対値を低減するとともに、迎角 α=0°におけるモーメント係数を正側にシフト

させることが可能となる対策を見出すことを目的として、図-3.3.3.5に示すような各種の空力対策ならびにこれらの組合せについて、縮尺1/70の２次元剛体模型を用いた三分力計測を実施した。　なお、その検討に際しては、これらの対策によるフラッター安定性の低下を避けるため、モーメント係数勾配に負勾配を生ずるような対策の適用は避けるよう配慮した。　次に、その検討結果をもとに、空力モーメント特性の改善に有効と考えられる、図-3.3.3.6に示すような、空力対策を施した３種類の二箱桁断面（以降対策断面と称する）を選定し、これらの断面について、同じく縮尺1/70の２次元剛体を用いた２自由度バネ支持試験によりフラッター特性の評価を行った。　さらに空力モーメント特性とフラッター特性の双方に優れた対策断面に関して、動的空気力計測を行った。

それぞれの検討結果を以下に示す。



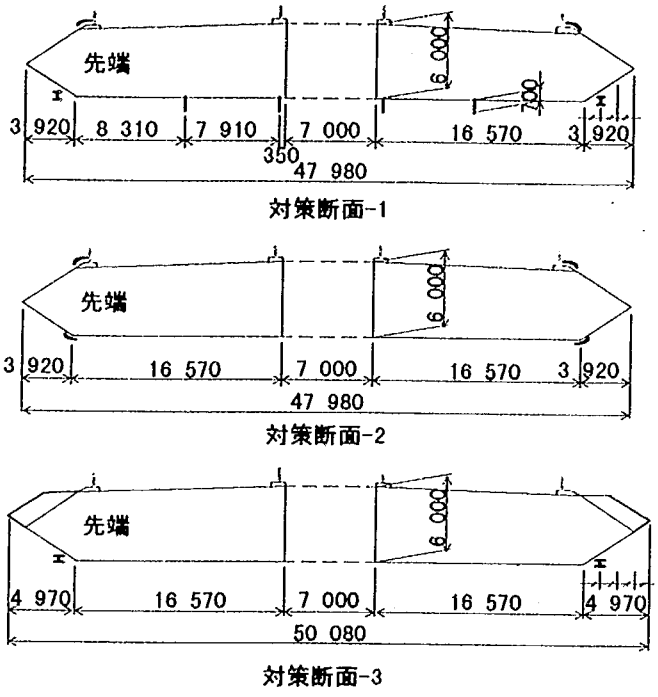


図-3.3.3.6　対策二箱桁断面（６車線断面）

図-3.3.3.5　空力モーメント特性改善のための各種対策案

2) 対策二箱桁断面の三分力特性

基本二箱桁断面および対策二箱桁断面に対する三分力試験試験によって得られた各断面の三分力曲線を図-3.3.3.7に示す。

この結果より、本検討で対象とした二箱桁断面の三分力特性についてまとめれば以下のようである。

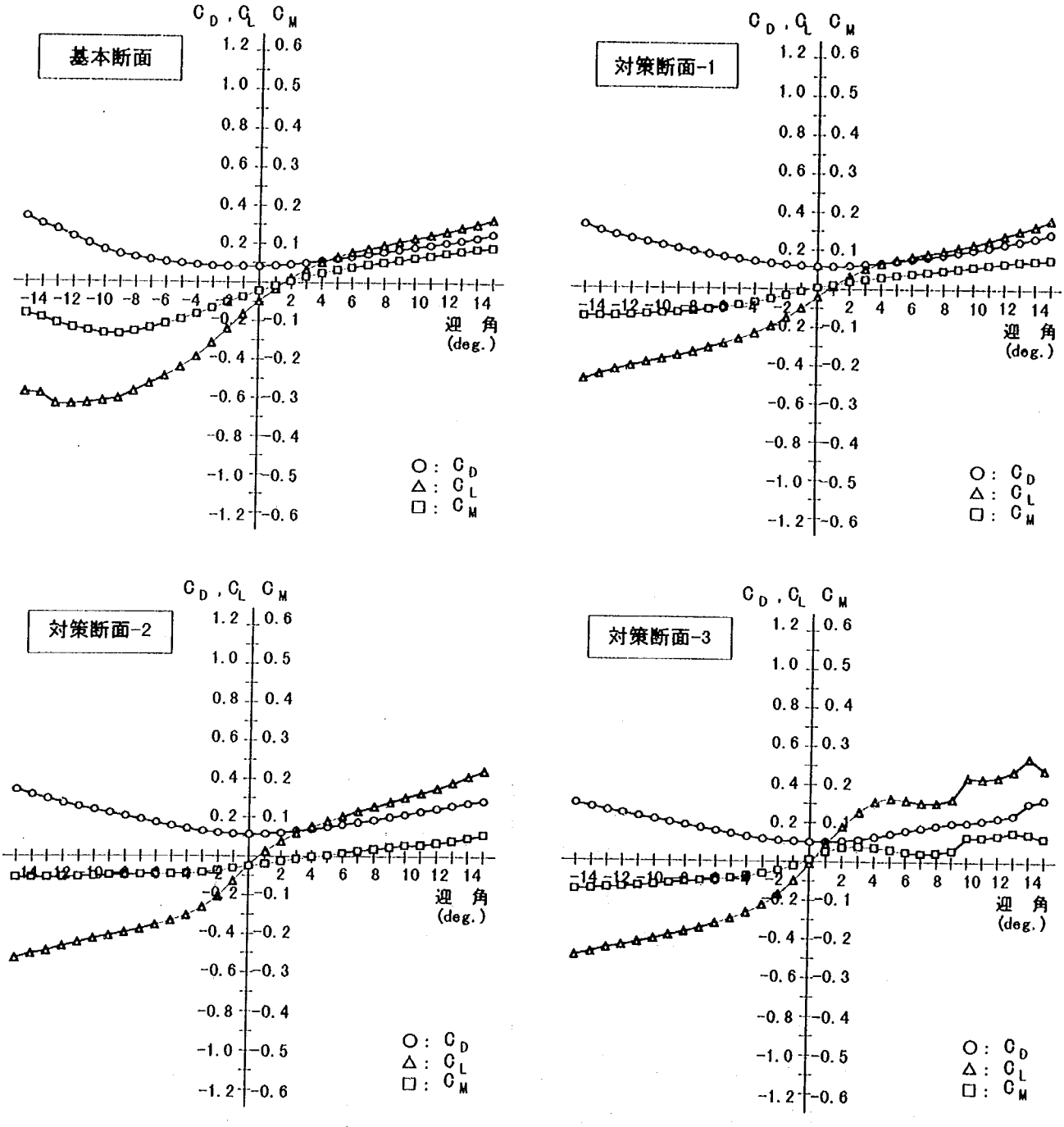


図-3.3.3.7 対策二箱桁断面の三分力曲線（6車線断面）

① 基本断面においては、負側の高迎角領域での負の空力モーメント係数が大きく、また、迎角0°における値も負となっており、これが強風時における頭下げのねじれ変形を増大する要因となっているものと考えられる。

② 負の高迎角領域における空力モーメント係数の低減を図るためには、フェアリング下面の適切な位置に検査車レールを配置するのが有効となる。（対策断面-2）

③ 迎角0°における空力モーメントを正側にシフトさせるためには、下フランジ下面（各箱桁の中央付近および開口部近傍）に検査車レールに相当する鉛直プレート（以降下部鉛直プレートと称する）を追加するのが有効である。（対策断面-1）

④ また、対策断面-3のようなフェアリング形状の変更も、負迎角側での空力モーメント特性の改善に効果的と考えられるが、正迎角側で空力モーメント係数勾配が負となる範囲がみられ、このためフラッター安定性に関しては低下する可能性のあることが予測される。

3) 対策二箱桁断面のフラッター応答特性

2)に示した、各種空力対策断面に対する三分力試験の結果、空力モーメント特性が良好であったいくつかの対策断面を対象として２自由度バネ支持試験を実施し、各対策によるフラッター特性への影響について検討を行った。　バネ支持試験結果の一覧を表**-3.3.3.2**に示す。

本検討で得られた、各対策によるフラッター特性への影響についてまとめれば以下のようである。

① 迎角α=0°におけるフラッター特性を比較した場合、検査車レールと下部鉛直プレートを併用した対策断面-1が最も優れた特性を示し、フラッター限界風速としては20%以上上昇することが確認された。

② また、この対策断面-1に関しては、特に負迎角側α=-5°までの範囲において、α=0°より高いフラッター安定性を示す傾向がみられ、また、正の迎角に対しても大幅なフラッター限界風速の低下はみられないことから、強風時における桁に静的なねじれ変形を生じた状態でのフラッター安定性の確保という観点からも有効な対策となるものと思われる。しかしながら、この対策断面-1についても、α=-7°を超える高迎角のもとでは、フラッター安定性は大幅に低下しており、この対策断面-1を適用する場合においても、過大なねじれ変形は回避する必要があるものと考えられる。

③ その他の対策断面について、対策断面-2では、基本断面よりフラッター限界風速が10%程度向上し、また、対策断面-3に関しても、基本断面に比べてフラッター安定性は若干向上する傾向がみられたが、いずれも対策断面-1ほどのフラッター安定性は得られていない。

表**-3.3.3.2**　２自由度バネ支持試験結果(6車線断面)

断面形式	迎角	フラッタ限界風速	
		風洞風速	平板との比
基本断面	0°	13.8m/s	1.17
	-3°	13.8m/s	1.17
対策断面-1	5°	15.8m/s	1.32
	3°	16.9m/s	1.42
	0°	17.0m/s	1.43
	-3°	17.6m/s	1.48
	-5°	18.2m/s	1.53
	-7°	13.9m/s	1.16
対策断面-2	0°	15.2m/s	1.27
対策断面-3	0°	14.6m/s	1.22
	-3°	13.5m/s	1.13

4) 対策二箱桁断面の動的空気力係数

上述した、各対策断面に対する三分力試験および２自由度バネ支持試験結果より、桁断面の空力モーメント特性の改善およびフラッター安定性の向上という両面から、フェアリング下面への検査車レールと、下部鉛直プレートを併設した対策断面-1を最良な断面と判断し、この対策断面-1を対象として、自由振動法による動的揚力および動的空力モーメントの各空気力係数の計測を行った。　本試験で得られた対策断面-1に対する動的空気力係数を図-3.3.3.8に示す。　なお、図中においては換算風速（$=V/f\cdot B$）を用いて整理を行っている。

また、ここで得られた動的空気力係数は、３．４．３項に示す二箱桁／一箱桁併用橋梁案の検討において、多自由度フラッター解析に適用した。

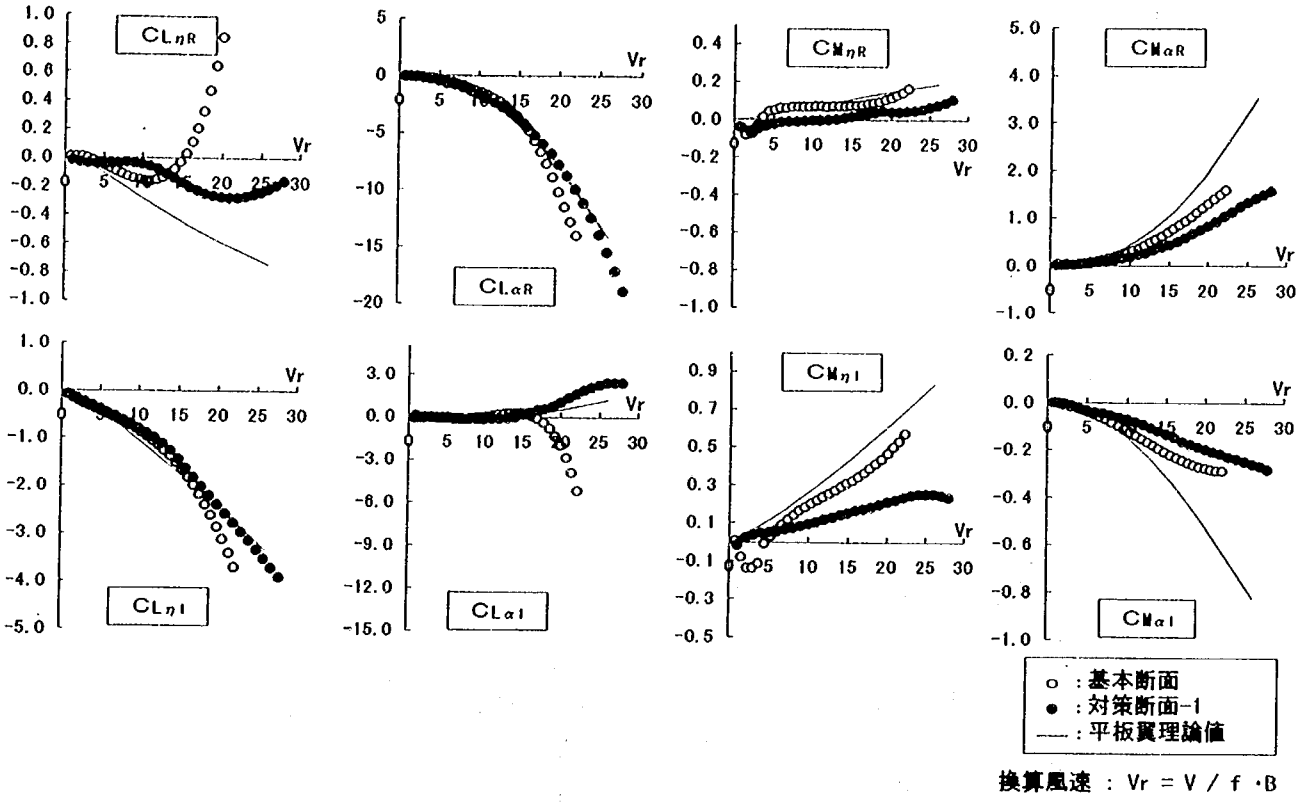


図-3.3.3.8　対策二箱桁断面の動的空気力係数（６車線断面：迎角 $\alpha=0°$ ）

(5)　４車線箱桁断面への適用性

ここでは、超長大橋の建設コスト削減方法の一つとして、橋梁規模（車線数）の縮小という方向性への対応という観点から、(4)に示した空力モーメント特性ならびにフラッター特性の改善対策を含めた６車線二箱桁断面を、４車線二箱桁断面に適用したものついて、縮尺1/100の２次元剛体模型を用いた風洞試験により空力特性の評価を行った。　その結果を以下に示す。

1)　想定した４車線二箱桁断面

本検討において対象とした４車線二箱桁断面は図-3.3.3.9に示すようであり、桁高については、車線数に応じて低減を行いD=4.0mを仮定した。　また、中央開口幅については、二箱桁／一箱桁併用吊橋における中央開口幅に合わせたケーブル配置のため、ある程度のケーブル間隔を確保することを考慮し、６車線二箱桁断面と同様にb=7.0mを想定した。　このため、全桁幅Bに対する開口比は、６車線二箱桁断面のb/B=0.146に対し、４車線二箱桁断面ではb/B=0.187と約30%増加しており、これに伴って断面の偏平比もB/D=8.00からB/D=9.34へと増加している。　なお、このような開口比の増加に伴って、４車線二箱桁断面においては、下流側箱桁前縁からの剥離による影響が大きく現れることも予想されることから、開口部のコーナー部に円弧状導流板を設けた対策についても併せて検討を行った。

それぞれの検討結果を以下に示す。

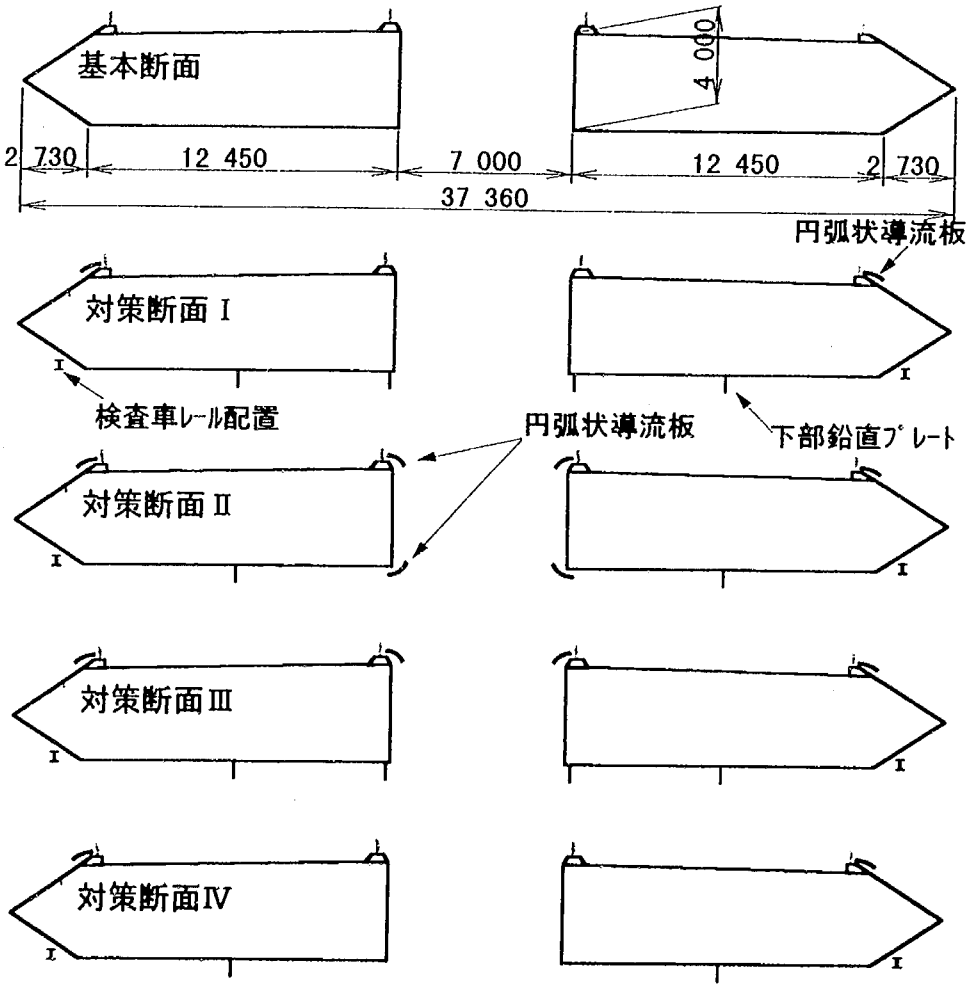


図-3.3.3.9　４車線二箱桁断面

2)　4車線二箱桁断面の三分力特性

4車線二箱桁対策断面に対する三分力試験試験によって得られた各断面の三分力曲線を図-3.3.3.10に示す。　この結果より、本検討で対象とした4車線二箱桁断面の三分力特性についてまとめれば以下のようである。

① 各断面とも静的空気力係数の特性に大きな差は認められず、負迎角における空力モーメント係数C_Mとしては、例えばα=-5°に対して、いずれもC_M=-0.03程度の小さな値を示しており、良好な空力モーメント特性を有しているものと考えられる。

② 開口部に設置した円弧状導流板の有無による三分力特性の差はほとんどみられないことから、下流側箱桁の前縁からの剥離による影響は小さいものと考えられ、検査車レール配置ならびにボトムプレートの設置が、静的な空気力特性を決定する大きな要因となっているものと考えられる

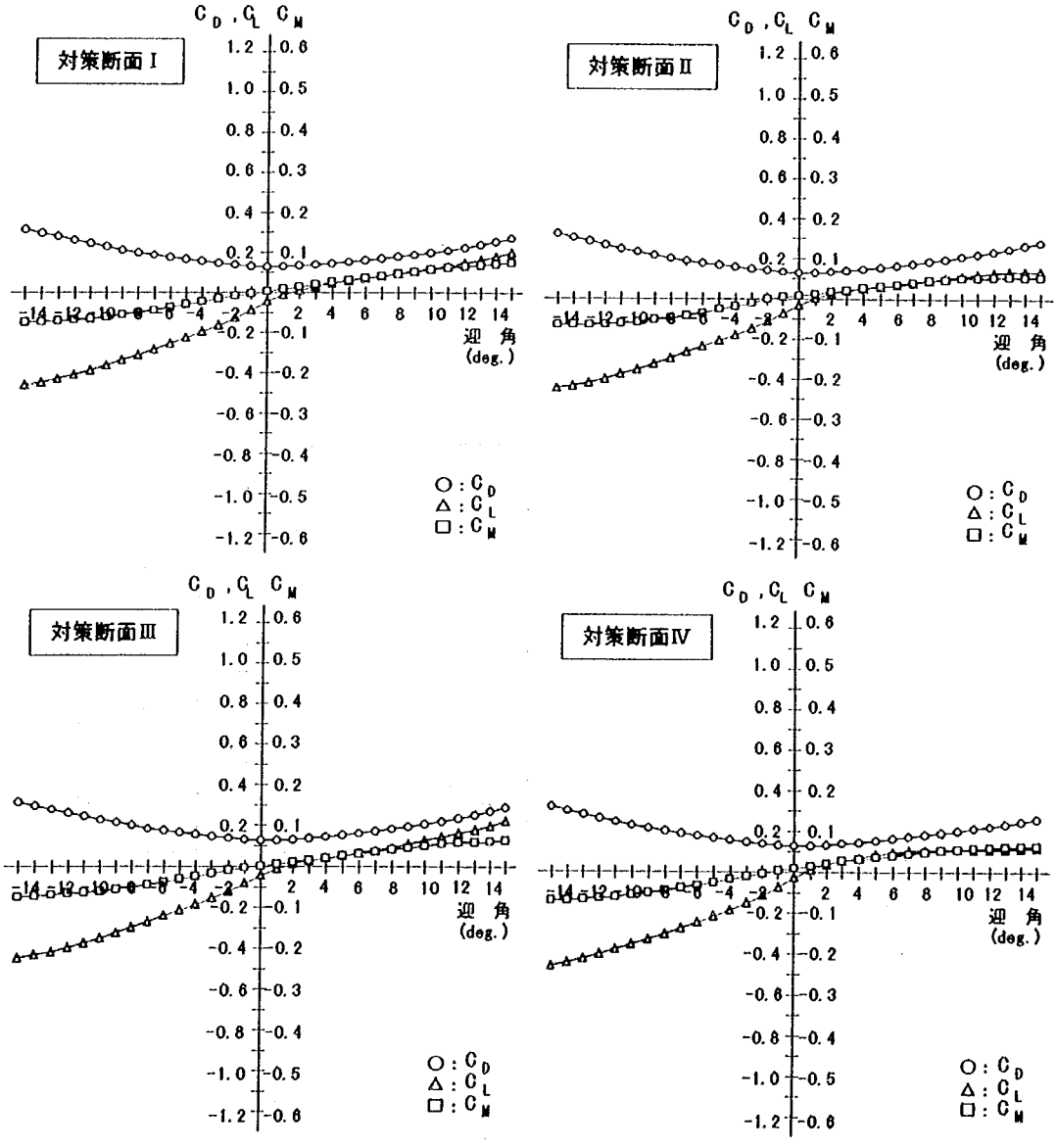


図-3.3.3.10　4車線二箱桁断面の三分力曲線

3)　4車線二箱桁断面のフラッター応答特性

2自由度バネ支持試験は、表-3.3.3.3に示す試験条件を想定して実施した。　本試験により得られた、4車線二箱桁対策断面における曲げ・ねじれ連成モードに関するフラッター特性について表-3.3.3.4に示す。なお、試験条件の異なる6車線断面との比較のため、ここでは、各断面の風洞試験によるフラッター限界風速と、同一条件のもとでSelberg式により評価される平板翼のフラッター限界風速との比により整理を行っている。

本検討で得られた、各対策断面のフラッター特性についてまとめれば以下のようである。

① 迎角 α=0°におけるフラッター安定性について、平板翼の限界風速との比（κ）により比較した場合、6車線二箱桁の対策断面Ⅰに対する κ=1.43に対し、4車線二箱桁では κ=1.99～2.21と、いずれの対策断面についても6車線断面より25%以上高い値を示している。

② また、6車線の対策断面では α=-7°を超える高迎角域では急激にフラッター安定性が低下する傾向が見られたのに対し、4車線二箱桁の対策断面Ⅰに関しては、計測を実施した α=+5°～-10°の広い迎角範囲にわたって、安定した良好なフラッター特性が得られている。

表-3.3.3.3　バネ支持試験条件（4車線断面）

		模型縮尺 1/100
固有振動数	曲げ	Hz 0.867
	ねじれ	Hz 1.734
	振動数比	2.00
質量	等価質量	kgf・s²/m 0.798
	等価極慣性	kgf・m・s²/m 0.0165
減衰	曲げ	δ=0.02
	ねじれ	δ=0.02

表-3.3.3.4　4車線二箱桁断面のフラッター特性

検討断面	迎角	フラッタ限界風速 風洞風速	平板との比
対策断面Ⅰ	5°	19.1m/s	2.16
	3°	18.4m/s	2.08
	1°	18.6m/s	2.10
	0°	17.7m/s	2.00
	-1°	17.1m/s	1.93
	-3°	16.4m/s	1.85
	-5°	16.9m/s	1.91
	-7°	17.4m/s	1.97
	-10°	18.4m/s	2.08
対策断面Ⅱ	3°	20.6m/s	2.33
	0°	19.6m/s	2.21
	-3°	15.9m/s	1.80
	-5°	16.5m/s	1.86
対策断面Ⅲ	0°	18.6m/s	2.10
対策断面Ⅳ	0°	17.6m/s	1.99
	-3°	15.6m/s	1.76

4)　4車線二箱桁断面の動的空気力係数

上述した各断面のうち、対策断面Ⅰを対象として、自由振動法による動的揚力および動的空力モーメントの各空気力係数の計測を行った。　本試験で得られた対策断面Ⅰに対する動的空気力係数を図-3.3.3.11に示す。　なお、図中においては換算風速（$=V/f\cdot B$）を用いて整理を行っている。

また、ここで得られた動的空気力係数は、3.4.3項に示す二箱桁／一箱桁併用橋梁案の検討において、多自由度フラッター解析に適用した。

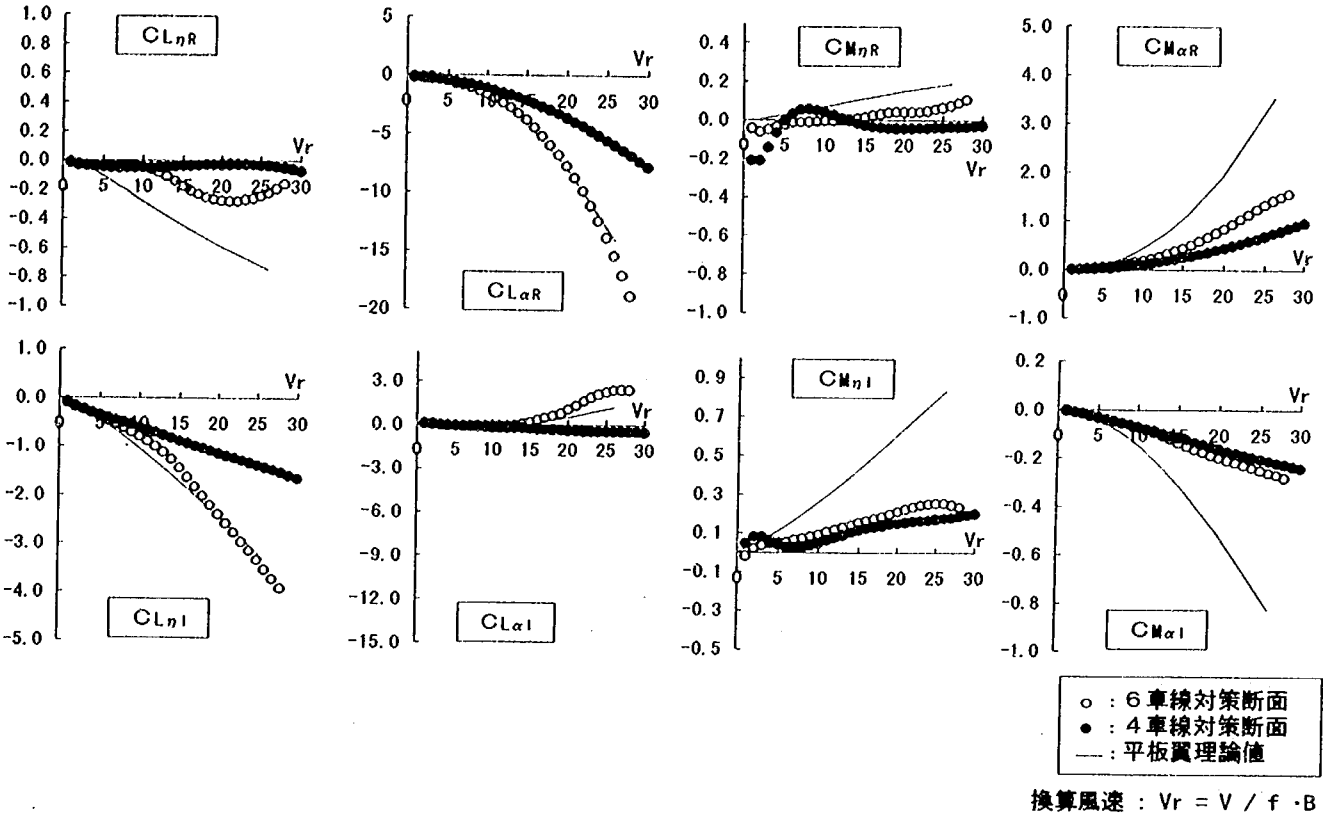


図-3.3.3.11　4車線二箱桁断面の動的空気力係数（迎角 $\alpha=0°$）

(6)　ま と め

ここでは、超長大橋への使用を前提とした桁断面として、偏平箱桁断面について空力的な面からその適用性の検討を行った。　本検討により得られた結果についてまとめれば以下のようである。

1)　一箱桁および二箱桁基本断面の空力特性比較

①　桁幅を代表長として無次元化した抗力係数としては、一箱桁断面，二箱桁断面ともに迎角 $\alpha=0°$ においては C_D=0.1程度の値となっており、両者の間に顕著な差異は見られない。

②　迎角の増加に伴う揚力係数の増加に関して、二箱桁断面においては一箱桁断面に比べ大幅に緩和される傾向にある。

③　本検討において対象とした箱桁断面においては、一箱桁断面，二箱桁断面のいずれについても、負迎角側での空力モーメント係数が比較的大きな値となる傾向がみられ、風荷重による静的変形の面から、その改善対策についての検討が必要となることが考えられる。

④　二箱桁断面のフラッター特性は、一箱桁断面に対して大幅に向上することが確認され、２自由度バネ支持試験における振動数比のもとでは、フラッター限界風速として30%以上の上昇がみられた。

⑤　本検討で想定した箱桁断面形状においては、一箱桁断面では、迎角α=0°に比べα=-3°ではフラッター限界風速の低下がみられたのに対し、二箱桁断面では、迎角α=0°とα=-3°におけるフラッター限界風速としてほぼ同様の値が得られた。

2)　二箱桁断面の空力特性改善

①　静的な空力モーメント特性の改善対策としては、フェアリング下面の適当な位置に検査車レールを設置することにより、負迎角側での空力モーメントを大幅に軽減することが可能となる。

②　また、左右の両箱桁中央部と開口部近傍の下フランジ下面に、検査車レール相当の鉛直プレート（下部鉛直プレート）を追加することによって、迎角α=0°における空力モーメント係数を正側にシフトさせることが可能となる。　以上のことから、この２つの対策を併用することにより、風荷重によって生じる桁の静的な頭下げのねじれ変形については、大幅に低減されることが期待できるものと考えられる。

③　上記２つの対策を併用した対策二箱桁断面に関しては、α=-5°～+5°の広い迎角範囲で、基本断面の迎角α=0°におけるフラッター限界風速よりも高い限界風速を示し、特に、負迎角側でフラッター安定性が向上する傾向にあることが確認された。

④　本検討で得られた二箱桁断面の空力改善対策は、風荷重による静的な桁のねじれ変形の抑制と、桁断面そのもののフラッター特性の向上の両者に対して有効となることから、超長大橋のフラッター安定性の向上を図るうえで、有効な対策の一つとなり得るものと考えられる。

3)　４車線箱桁断面への適用性

①　４車線化に伴って桁幅に対する開口幅の比を30%増加させた４車線二箱桁断面においては、６車線の対策二箱桁断面と同等の、良好な空力モーメント特性が得られた。

②　４車線二箱桁断面のフラッター安定性について、平板翼に対するフラッター限界風速の比により比較した場合、６車線二箱桁断面に対する値よりも25%以上の限界風速比の上昇が認められた。

③　また、迎角の変化に対しては、α=+5°～-10°の広い迎角範囲において、迎角α=0°と同等のフラッター安定性を有することが確認された。

３．３．４　遮風効果を有する二箱桁形式の耐風性検討

支間の長大化により、耐風安定性の確保が困難になる箱桁の耐風安定性を向上させるべく、二箱桁断面の検討を実施した。また、この中で強風時の車両走行性の改善を目的とした透過型遮風壁の検討を併せて実施した。

具体的には、ばね支持試験により耐フラッター性の評価を実施し、この中で耐風安定性の良好な断面に対して、後で実施する＜変形解析＋フラッター解析＞に必要な三分力試験を実施した。

（１）ばね支持試験結果

ばね支持試験に用いた桁の断面形状を図-3.3.4.1に、試験結果一覧を表-3.3.4.1に、風速と振幅の関係（V-A）を図-3.3.4.2～図-3.3.4.7にそれぞれ示す。本検討では、2.5m 桁高の２箱桁及びこれに遮風壁（ﾌｪｱﾘﾝｸﾞを兼ねた充実型、充実率 30%の透過型）を設けた断面に対して迎角０°で検討を実施した。

本試験で使用した風洞は、住友重機械工業㈱所有の回流式ゲッチンゲン型風洞（閉鎖型測定洞：幅 2.0m ×高さ 3.0m ×全長 15.0m）で、風洞模型の縮尺は 1/65 の２次元剛体部分模型を使用した。試験で対象とした実橋標準モデルの動的諸元は、重量 40tf/m、極慣性 1094ts ^{2}であり、模型の所要値は重量 1.575　kgf/ms ^{2}/model、極慣性 0.09990　kgfms ^{2}/model を目標としているが、模型の製作上、所要値を若干上回っているものもある。

以下に結果をまとめる。

○　基本断面では、ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ形状（Ａ・Ｂ）の違いによる耐風性の変化はほとんど見られない。
○　透過型遮風壁の設置は、耐風安定性を向上させる効果がある。また、設置位置の効果では中分側を追加しても耐風性は悪化しないことから路側端位置が支配的であると思われる。
○　透過型遮風壁に比べて大型フェアリングは耐風性が大幅に悪化する。これは、フェアリング上端（橋面３ｍ高位置）から発生する強い剥離流れによる影響と思われる。
○　開口部の下部ベーン設置は、耐風性を悪化させる。これは、ベーンによる開口部への導流効果に比べて、ベーン外端部からの再剥離流れによる影響が大きかったと思われる。

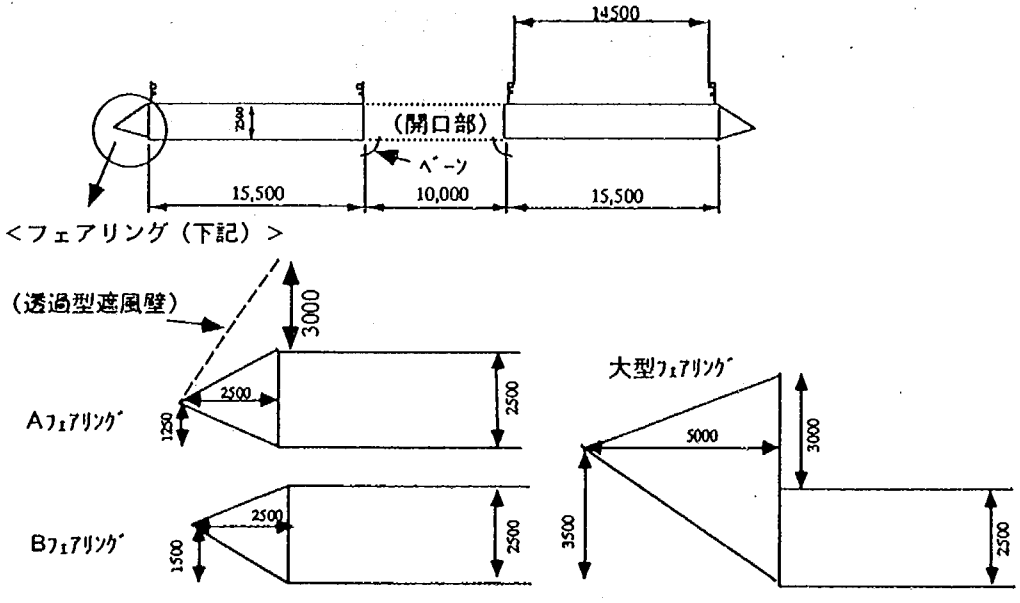


図-3.3.4.1　二箱桁対象断面図

表-3.3.4.1　ばね支持試験結果一覧

No.	フェアリング	透過型遮風壁	渦励振	フラッター発生風速	対策
1	A	無し	発生せず	86m/s	―
2	B	無し	発生せず	83m/s	―
3	大 型	無し	5～8m/s、1°	29m/s	―
4	A	設置（路側端）	発生せず	発生せず（95m/s 以上）	―
5	A	設置（路側端、中分）	発生せず	発生せず（95m/s 以上）	―
6	A	設置（路側端、中分）	7m/s、　0.1°	79m/s	ﾍﾞｰｽ

（2）三分力試験結果

桁高 2.5m 二箱桁の内、比較的耐風性が良好な透過型遮風壁設置断面（図-3.3.4.8参照）に対して、後で実施する＜変形解析＋フラッター解析＞に用いるための三分力試験を実施した。試験結果概要を表-3.3.4.2に、迎角と３分力係数の関係を図-3.3.4.9および計測結果を表-3.3.4.3にそれぞれ示す。

以下に結果をまとめる。

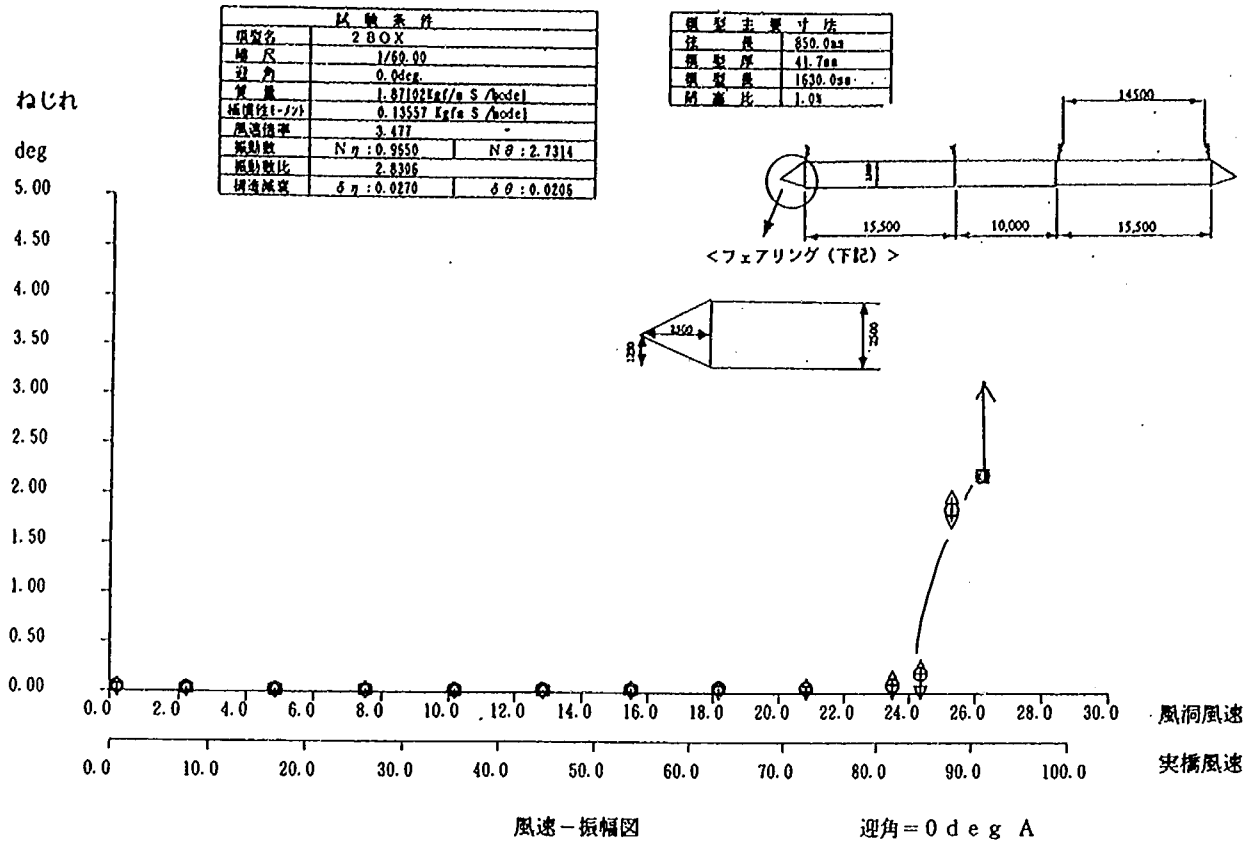
○　抗力係数ＣＤは、遮風壁が設置されているためやや大きめとなる。

○　迎角０°周りの揚力及びモーメント傾斜は正勾配で安定化を示すが、迎角－８°以上では揚力傾斜が鈍くなりモーメント傾斜も負勾配となり不安定化を示している。

○　迎角０°周りの揚力傾斜が大きいことから、乱流による鉛直曲げのバフェッティング振動が大きくなると思われる。

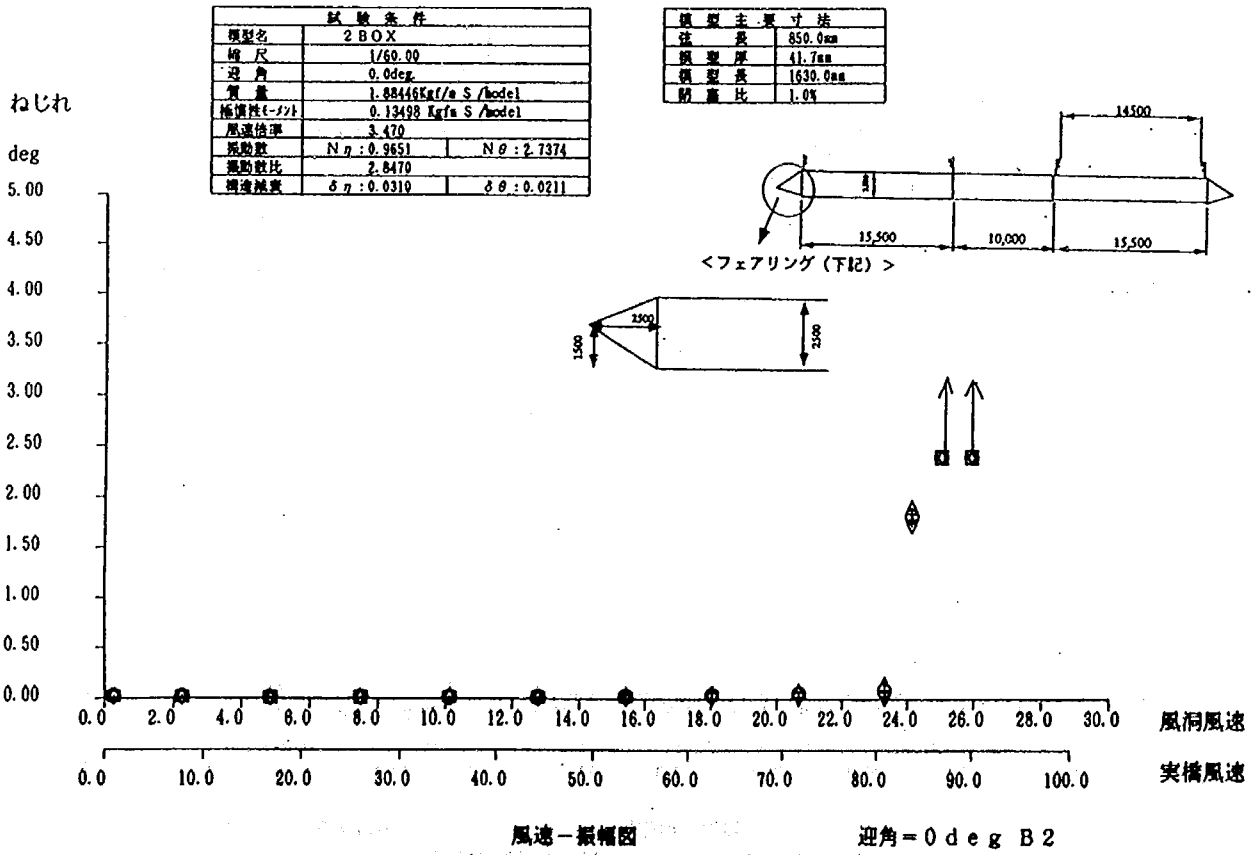
表-3.3.4.2　三分力試験結果概要

断　面　名	二箱桁（透過型遮風壁設置断面）
ＣＤ（α=0°）	０．０８９１
ｄＣＬ／ｄα	３．２７６６
ｄＣＭ／ｄα	０．４５５７



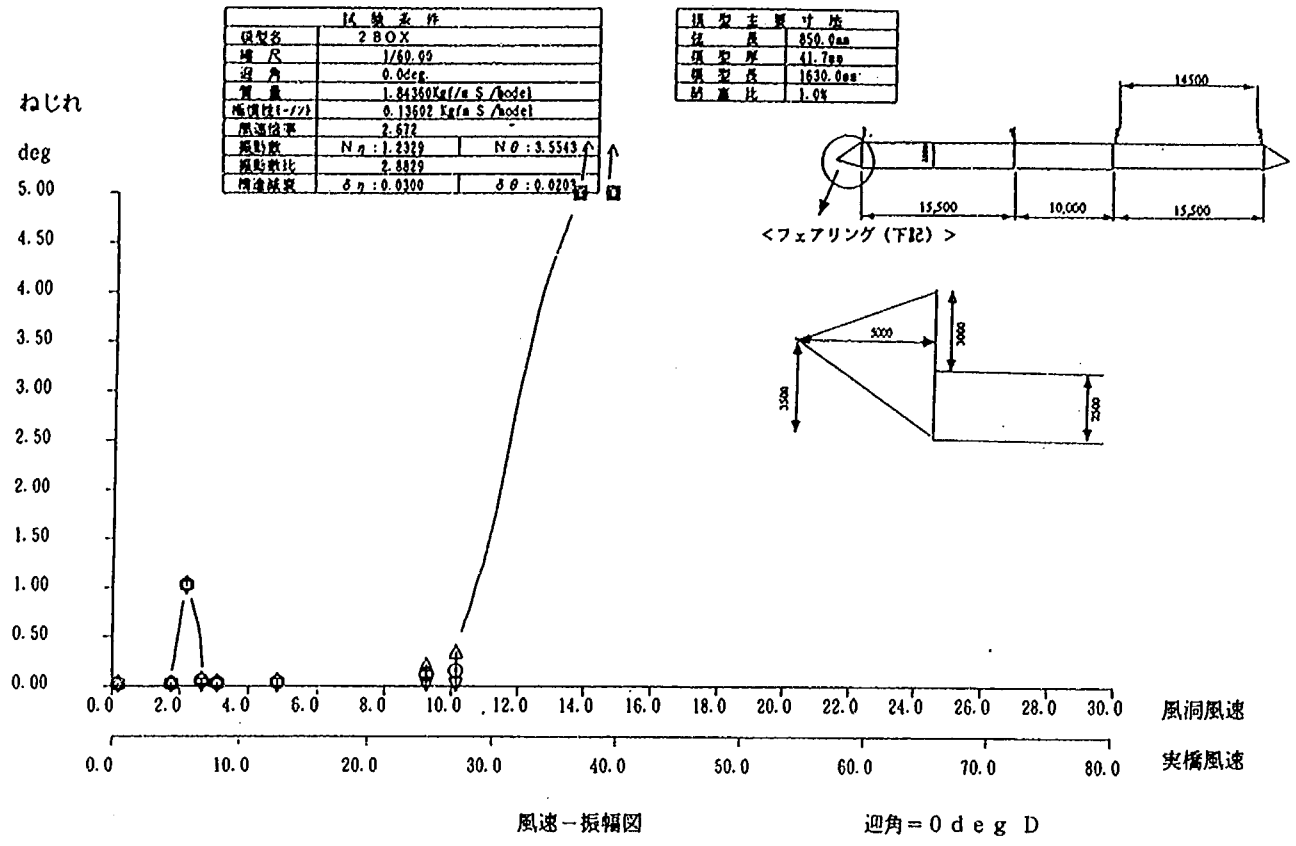
風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ａ

図－３．３．４．２　ばね支持試験結果



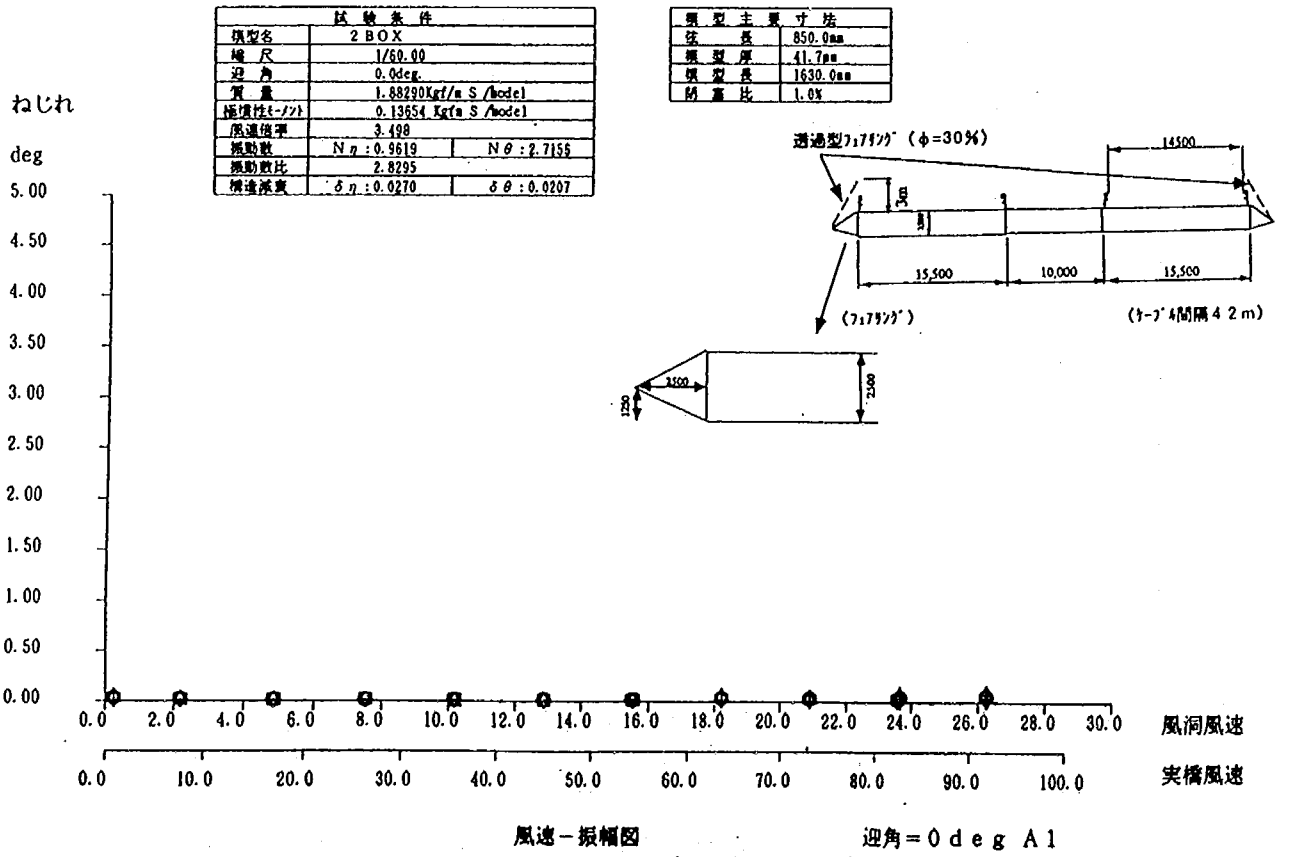
風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ｂ２

図－３．３．４．３　ばね支持試験結果



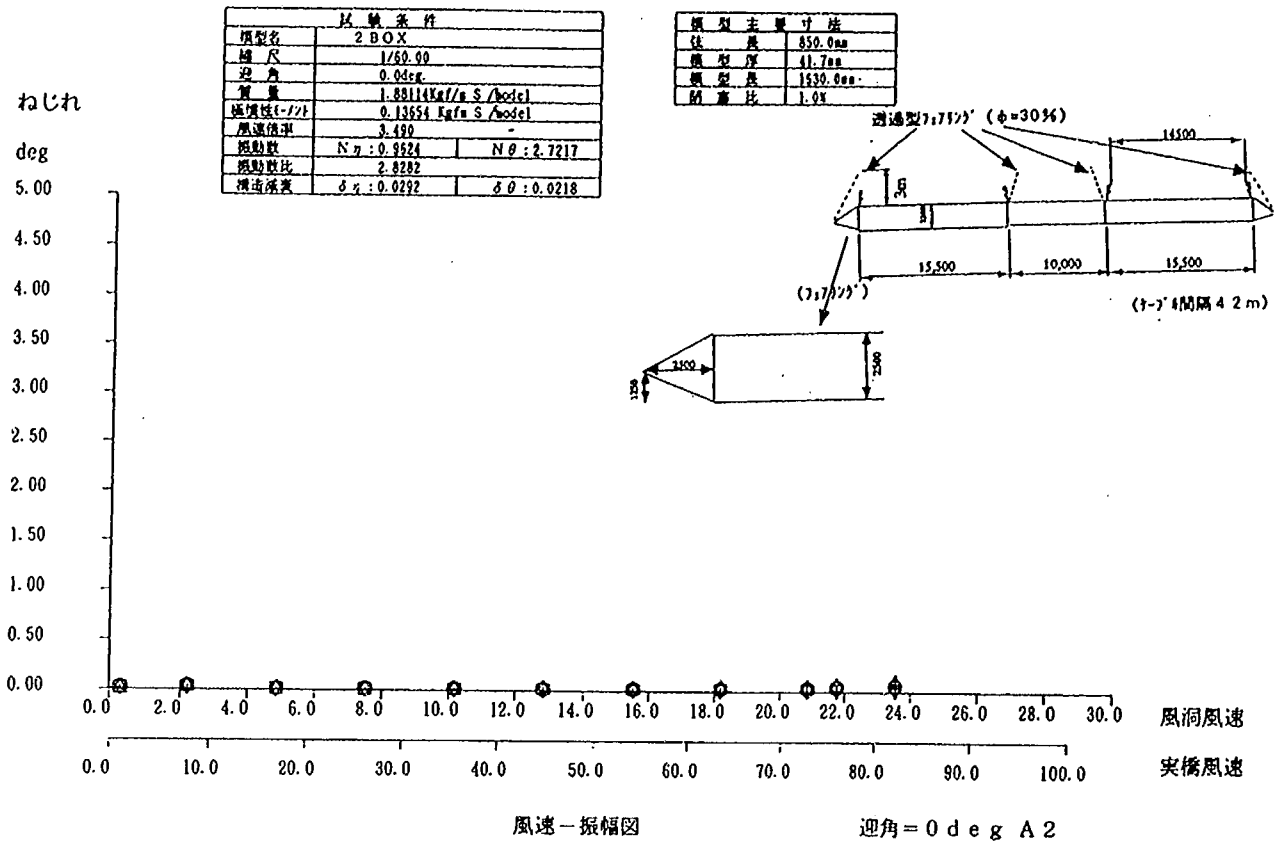
風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ｄ

図－３．３．４．４　ばね支持試験結果



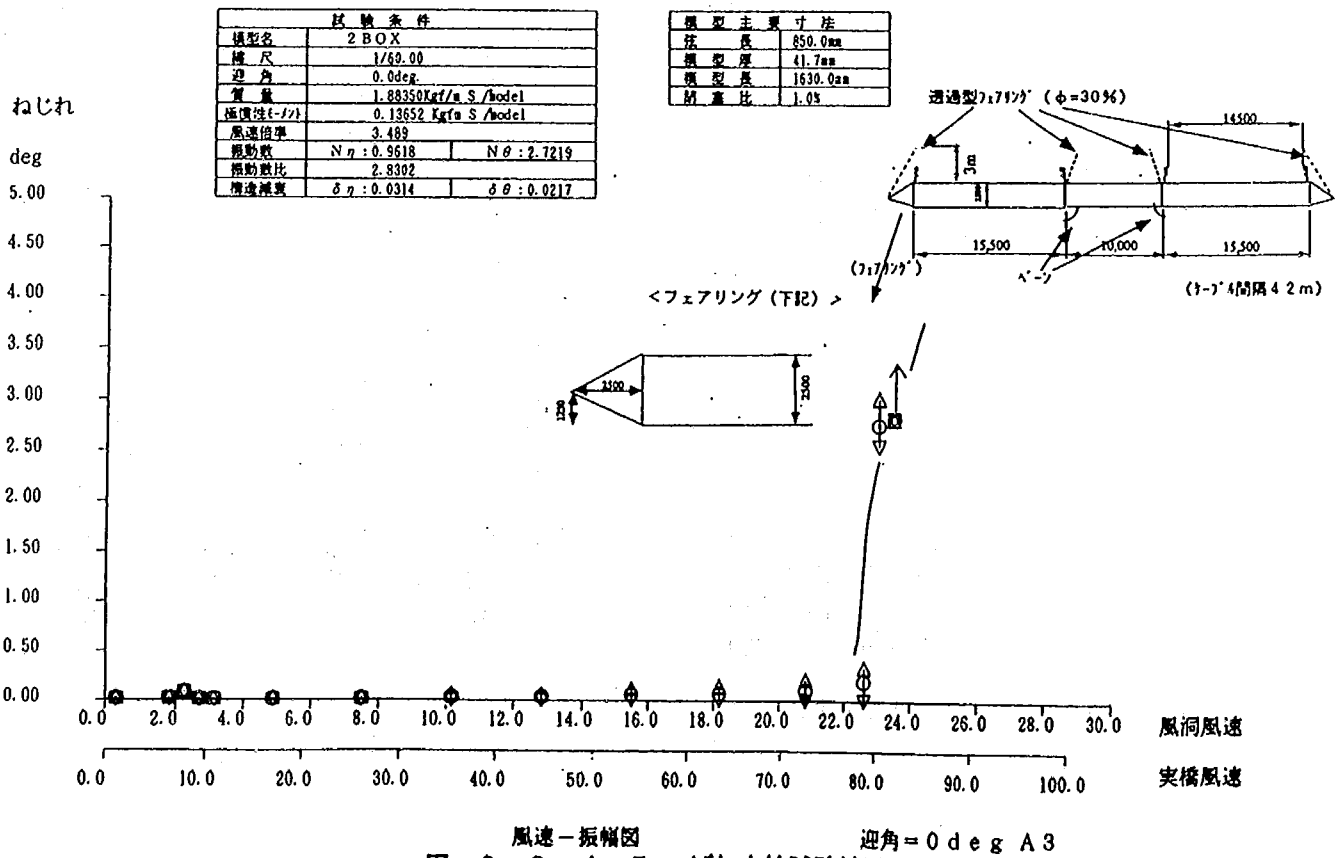
風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ａ１

図－３．３．４．５　ばね支持試験結果



風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ａ２

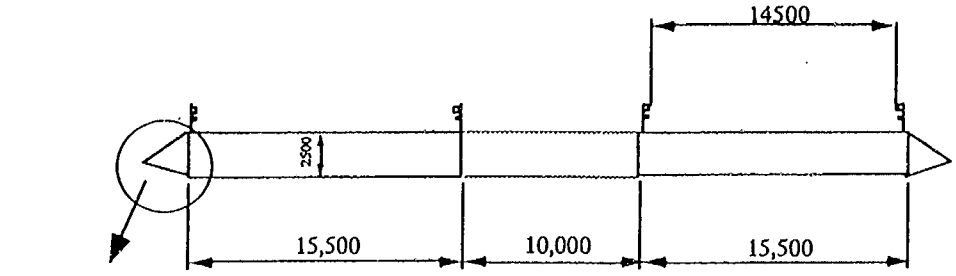
図－３．３．４．６　ばね支持試験結果



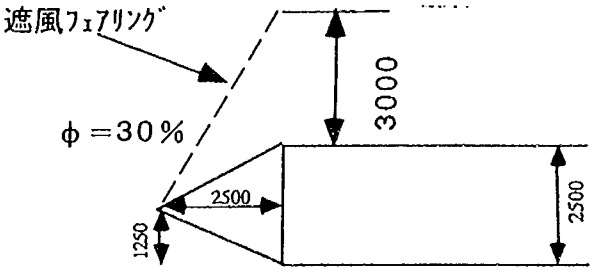
風速－振幅図　　迎角＝０ｄｅｇ　Ａ３

図－３．３．４．７　ばね支持試験結果

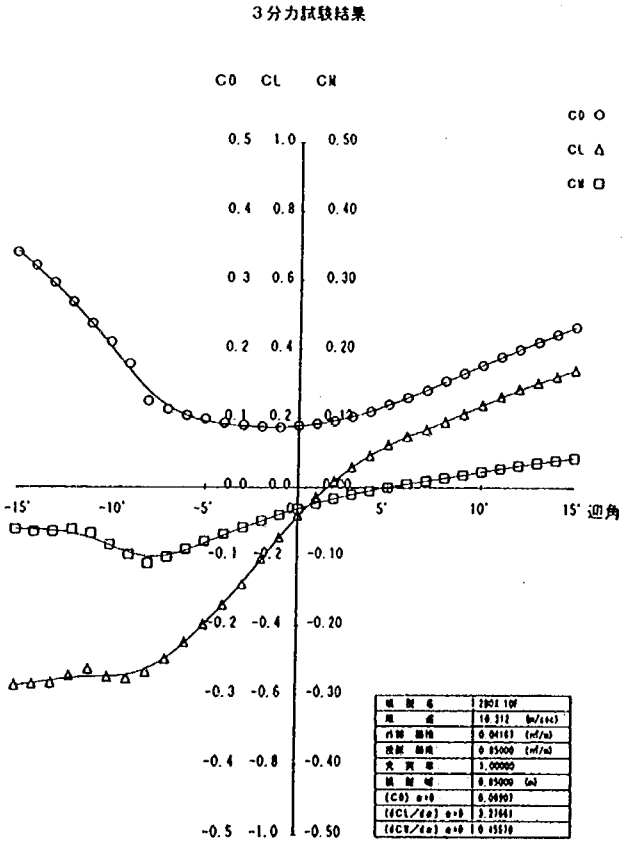
三分力試験結果（二箱桁案：透過型遮風壁設置）



<フェアリング（下記）>



図－３．３．４．８　断面図



図－３．３．４．９　三分力試験結果

表－３．３．４．３　三分力試験結果

３分力試験結果

迎角(deg.)	抗力係数	揚力係数	空力モーメント係数
-15.0	0.3413	-0.5707	-0.0605
-14.0	0.3223	-0.5676	-0.0641
-13.0	0.2968	-0.5648	-0.0639
-12.0	0.2682	-0.5440	-0.0609
-11.0	0.2372	-0.5255	-0.0664
-10.0	0.2108	-0.5486	-0.0831
-9.0	0.1793	-0.5525	-0.0972
-8.0	0.1255	-0.5334	-0.1099
-7.0	0.1131	-0.4958	-0.1011
-6.0	0.1044	-0.4480	-0.0896
-5.0	0.0994	-0.3964	-0.0782
-4.0	0.0935	-0.3390	-0.0673
-3.0	0.0905	-0.2804	-0.0578
-2.0	0.0881	-0.2072	-0.0479
-1.0	0.0872	-0.1454	-0.0395
0.0	0.0891	-0.0811	-0.0307
1.0	0.0924	-0.0282	-0.0231
2.0	0.0962	0.0173	-0.0160
3.0	0.1028	0.0590	-0.0099
4.0	0.1100	0.0917	-0.0048
5.0	0.1205	0.1228	0.0004
6.0	0.1304	0.1468	0.0048
7.0	0.1408	0.1665	0.0090
8.0	0.1543	0.1895	0.0134
9.0	0.1656	0.2118	0.0179
10.0	0.1769	0.2375	0.0225
11.0	0.1891	0.2630	0.0270
12.0	0.1998	0.2848	0.0313
13.0	0.2101	0.3028	0.0352
14.0	0.2216	0.3216	0.0392
15.0	0.2321	0.3399	0.0427

模型名＝280X 10F

（3）まとめ

二箱桁断面（桁高 2.5m）を対象に、基本断面及び透過型遮風壁設置断面の応答特性ならびに静的空気力特性を調査する目的に風洞試験を実施した。

得られた結果を下記にまとめる。

＜ばね支持試験＞

1) 基本断面におけるﾌｪｱﾘﾝｸﾞ形状（A・B）の違いによる耐風性への影響は小さい。
2) 透過型遮風壁設置は耐風安定性を向上させる効果があり、設置位置は路側端が耐風性に対して支配的である。
3) 透過型遮風壁に比べて大型フェアリングは耐風性が大幅に悪化することが判った。
4) 開口部の下部ベーン設置は、耐風性を悪化させることが判った。

＜三分力試験＞

1) 遮風壁の設置により抗力係数ＣＤはやや大きめとなる。
2) 迎角－８° 以上では、揚力傾斜が鈍くモーメント傾斜も負勾配となることから耐風性が不安定化すると思われる。
3) 迎角０° の揚力傾斜が大きいため、鉛直曲げのバフェッティング振動の発生が推測される。

今後は、迎角０° 以外のばね支持試験、非定常空気力計測、フラッター解析を実施していく予定である。

3．3．5　鉛直および水平スタビライザーを活用した二箱桁形式の耐風性検討

(1)　概　要

偏平箱桁の中央部に開口を設けた二箱桁の基本断面に鉛直スタビライザーを活用する空力特性改善策を検討してきた。まず、H７年度では、桁構造とケーブルの合計死荷重が約40tf/m以下となる二箱桁形式の概略設計検討を行い、この断面諸元を用いた固有振動解析結果をもとに縮尺1/80の剛体部分模型を用いたばね支持風洞試験を実施した。対象は桁高が７、５、3.5mで、それぞれ、中央開口部の幅を３、５、７、９mに変化させ、鉛直スタビライザー設置による耐フラッター性能の改善策を検討した。

H８年度では、H７年度の２次元ばね支持試験で耐風性良好断面として選定された桁高５m、中央部開口幅５mで上下突出高が各1.5mの鉛直スタビライザー付断面（断面B）に関して実施した三分力測定、有風時静的変形解析、非定常空気力測定結果を報告するとともに、２次元フラッター解析結果とばね支持試験結果との整合性を検討した。

H９年度では、断面Bに関して$\alpha=0°$の風作用時について有風時の変形を考慮した３次元マルチモード連成フラッター解析を実施した。その結果、フラッター発生風速は63.1m/sとなり、目標値の80m/sを下回ることが明らかとなった。そこで、この断面にさらに桁の両端部上下面に幅２mの導流板（ここでは水平スタビライザーと称す）を設置併用案（断面C）を検討することとし、これまでと同様な手法で耐風性を評価し、ほぼ目標値の80m/sを満たすことを明らかにした。以上はすべて両端フエアリングの形状は上下非対称断面であったが、これを上下対称とした断面についても２次元ばね支持試験で比較検討したが、空力特性はほとんど変わらないことを確認した。

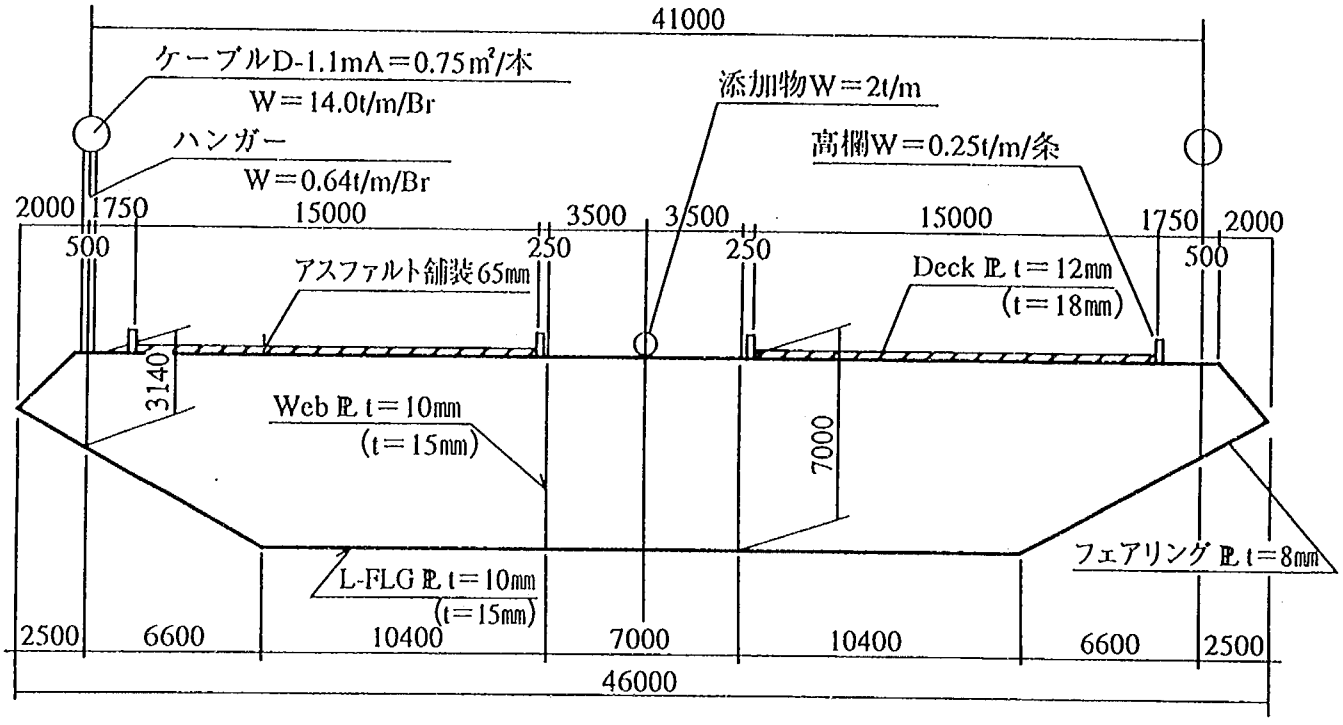
なお、H８年度には２次元ばね支持試験で中央開口部のグレーチングの設置、乱れの存在が振動応答に及ぼす影響について検討し、一様流中の比較的低風速で発生する鉛直たわみおよびねじれの限定振動は消滅する傾向であることを確認した。

(2)　概略設計検討結果

下記の基本条件で概略設計検討を実施した。

（基本条件）	支間長	： 1250m＋2500m＋1250m、	サグ比	：	1／9
	車　線	： ６車線（車道幅員：14.5m×２）、100km/h（明石海峡大橋と同じ）			
	重　量	： 40tf/m（ｹｰﾌﾞﾙ＋吊構造）、	ケーブル強度	：	100kgf/mm^2
	抗　力	： ７（A×C_d）以下、	ﾌﾗｯﾀｰ限界風速	：	80m/s以上
	桁下空間	： 65m	航路幅	：	2000m
	舗装厚	： 75mm	公共添加物	：	2tf/m
	付属物	： 1tf/m			

図－3.3.5.1に桁高７m、中央開口幅７mの断面構成を示す。桁高５mおよび3.5mについては、桁高７mの断面からボトムプレート下面より上方２mあるいは3.5mだけ切除した断面としている。



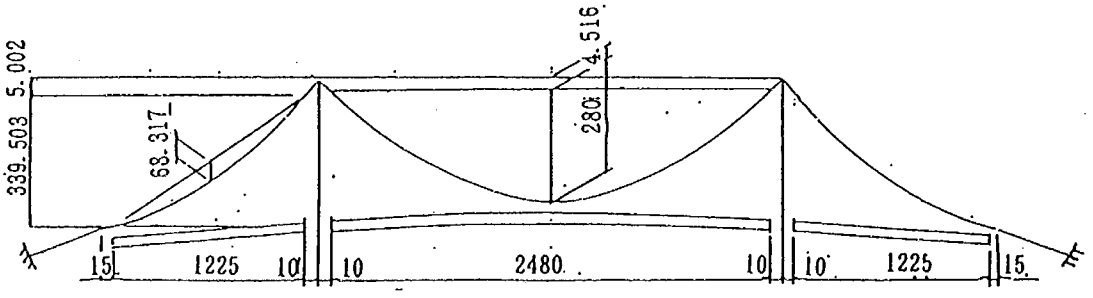
図－3.3.5.1　対象断面の構成（桁高７m、中央開口幅７mの例）

表－3.3.5.1　構造諸元（桁高7，5，3.5m）

タイプ		TYPE0	TYPE1	TYPE2	TYPE3
基本寸法 (m)	桁高	7.0	7.0	5.0	3.5
	中央開口幅	7.0	7.0	5.0	3.5
	全幅	46.0	46.0	44.0	42.5
	ケーブル間隔	41.0	41.0	39.0	37.5
重量 (t/m)	桁本体		17.6	15.5	13.7
	舗装、フェアリング等		9.9	9.9	9.9
	吊構造合計	29.3	27.5	25.4	23.6
	ケーブル	15.4	12.8	12.8	12.8
	合　計	44.7	40.3	38.2	36.4
断面積 (m^2)	吊構造	1.5	1.5	1.4	1.3
	ケーブル	1.7	1.4	1.4	1.4
極慣性モーメント ($t\,m^2/m$)	吊構造	4635.4	4525.0	3651.6	3058.1
	ケーブル	6419.0	5379.2	4867.2	4500.0
	合　計	11054.4	9904.2	8518.8	7558.1
桁剛性	鉛直曲げ　(m4)	12.5	12.4	6.7	3.3
	水平曲げ　(m4)	258.4	250.8	212.6	185.3
	単純ねじれ(m4)	25.1	25.1	15.2	7.7
	曲げねじれ(m6)	1105.3	1105.3	635.3	307.8

注）TYPE0は、明石大橋検討時の値を示す。

基本寸法



表－3.3.5.2　振動諸元（桁高５ｍ：中央開口幅３，５，７，９ｍ）

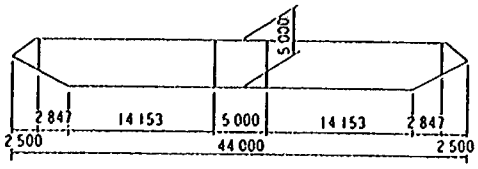
		TYPE2-1	TYPE2-2	TYPE2-3	TYPE2-4	TYPE1
基本寸法 (m)	桁高	5.0	5.0	5.0	5.0	7.0
	中央開口幅	3.0	5.0	7.0	9.0	7.0
	全幅	42.0	44.0	46.0	48.0	46.0
	ｹｰﾌﾞﾙ間隔	37.0	39.0	41.0	43.0	41.0
重量 (t/m)	吊構造	25.1	25.4	25.8	26.2	27.5
	ｹｰﾌﾞﾙ	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
	合　計	37.9	38.2	38.6	39.0	40.3
断面積 (m^2)	吊構造	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5
	ｹｰﾌﾞﾙ	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
極慣性モーメント ($t\,m^2/m$)	吊構造	3181.9	3651.0	4164.7	4723.5	4525.0
	ｹｰﾌﾞﾙ	4380.8	4867.2	5379.2	5916.8	5379.2
	合　計	7562.7	8518.2	9543.9	10640.3	9904.2
桁剛性	鉛直曲げ　(m^4)	6.5	6.5	6.5	6.5	12.4
	水平曲げ　(m^4)	179.6	208.0	239.2	273.2	250.8
	単純ねじれ　(m^4)	15.2	15.2	14.9	14.5	25.1
	曲げねじれ　(m^6)	475.9	622.4	795.7	980.6	1105.3
振動数	たわみ　f_z (Hz)	0.05236	0.05233	0.05230	0.05226	0.05231
	ねじれ　f_θ (Hz)	0.13781	0.13328	0.12844	0.12275	0.11239
	振動数比　(f_θ/f_z)	2.632	2.547	2.456	2.349	2.722
換算マス　(t/m)		38.1	38.5	38.9	39.2	40.6
換算極慣性モーメント　($t\,m^2/m$)		8824	9360	10866	12215	11711

注）TYPE2-4のみ塔水平材面内剛性を他のTYPEの1.3倍を用いた。

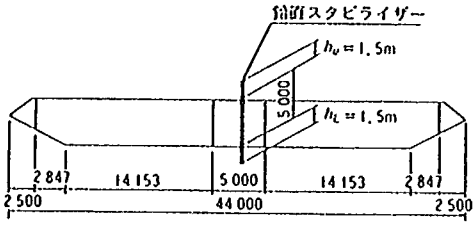
表－3.3.5.3　風洞試験条件（桁高５ｍ：中央開口幅３，５，７，９ｍ）

		TYPE2-1	TYPE2-2	TYPE2-3	TYPE2-4	TYPE1
重量　(kgf/m)		5.994	5.977	6.135	6.141	6.422
質量慣性モーメント　($kgf\cdot cm\cdot s^2/m$)		2.198	2.352	2.689	3.045	2.912
振動数	たわみ　f_z (Hz)	0.930	0.929	0.918	0.912	0.8966
	ねじれ　f_θ (Hz)	2.409	2.318	2.249	2.133	2.357
	振動数比　(f_θ/f_z)	2.590	2.495	2.450	2.317	2.629
構造減衰	たわみ　δ_z	0.0201	0.0218	0.0205	0.0192	0.0199
	ねじれ　δ_θ	0.0201	0.0219	0.0201	0.0200	0.0209
重心　(m)		1.434	1.449	1.464	1.479	1.988
せん断中心　(m)		2.590	2.620	2.647	2.669	3.903

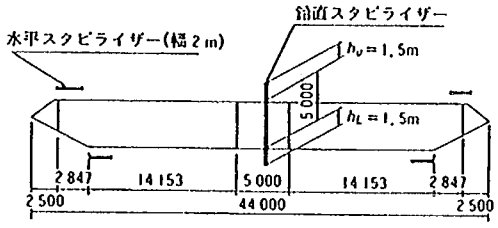
注）回転中心は、明石大橋の時の考え方にあわせて、桁中心(TYPE2-1～4：ﾎﾞﾄﾑﾌﾟﾚｰﾄから2.5m, TYPE1：ﾎﾞﾄﾑﾌﾟﾚｰﾄから3.5m）とした。



(a) 断面 A



(b) 断面 B



(c) 断面 C

図－3. 3. 5. 2　桁高５ｍの検討断面

表－3.3.5.1に各桁高において中央開口幅が桁高と同じ場合の各構造諸元を示す。

(3) ばね支持試験結果

表－3.3.5.2に桁高5mで中央開口幅が3、5、7、9mおよび桁高7mで中央開口幅7mの構造諸元と各固有振動解析結果を、また、表－3.3.5.3に風洞試験条件を示す。

ばね支持試験では、中央開口部を閉塞した基本断面（図-3.3.5.2(a)参照、以後、断面Aと称す）、中央開口部ありの断面、鉛直スタビライザー設置断面を比較検討した。試験の結果、桁高5mが比較的良好な空力特性を示した。いずれも鉛直曲げとねじれの連成フラッターが発生した。フラッター発生風速V_Fを図－3.3.5.3に、桁の全幅をもとにSelberg式で算出したフラッター発生風速V_{FS}に対する比率$k=V_F/V_{FS}$を図－3.3.5.4に示す。

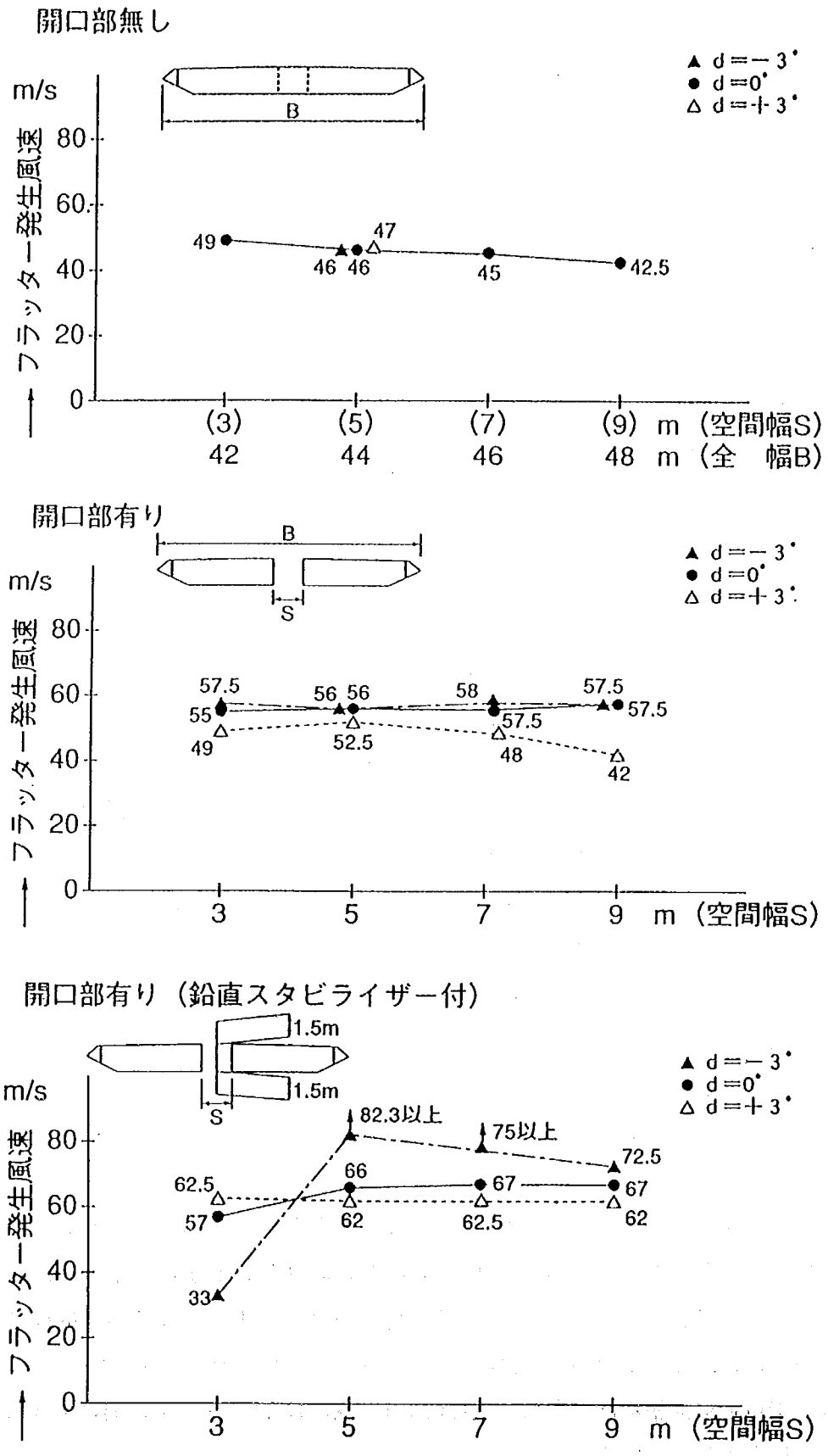
断面Aでは$V_F \fallingdotseq 45$m/sであり、$k=0.95\sim0.98$でSelberg式による算出値とほぼ一致している。中央部を開口すると、迎角$\alpha=0°$、$-3°$では10m/s強、$+3°$ではわずかに発生風速が上昇する傾向である。

これに対して、比較的良好な特性を示した上方突出高$h_u=1.5$m、下方突出高$h_L=1.5$mの鉛直スタビライザーを設置すると（図－3.3.5.2(b)参照、以後、断面Bと称す）、中央部開口幅が5mの場合が良好で、$\alpha=0°$で$V_F=66$m/s、$-3°$で82.3m/s以上、$+3°$で62m/sである。

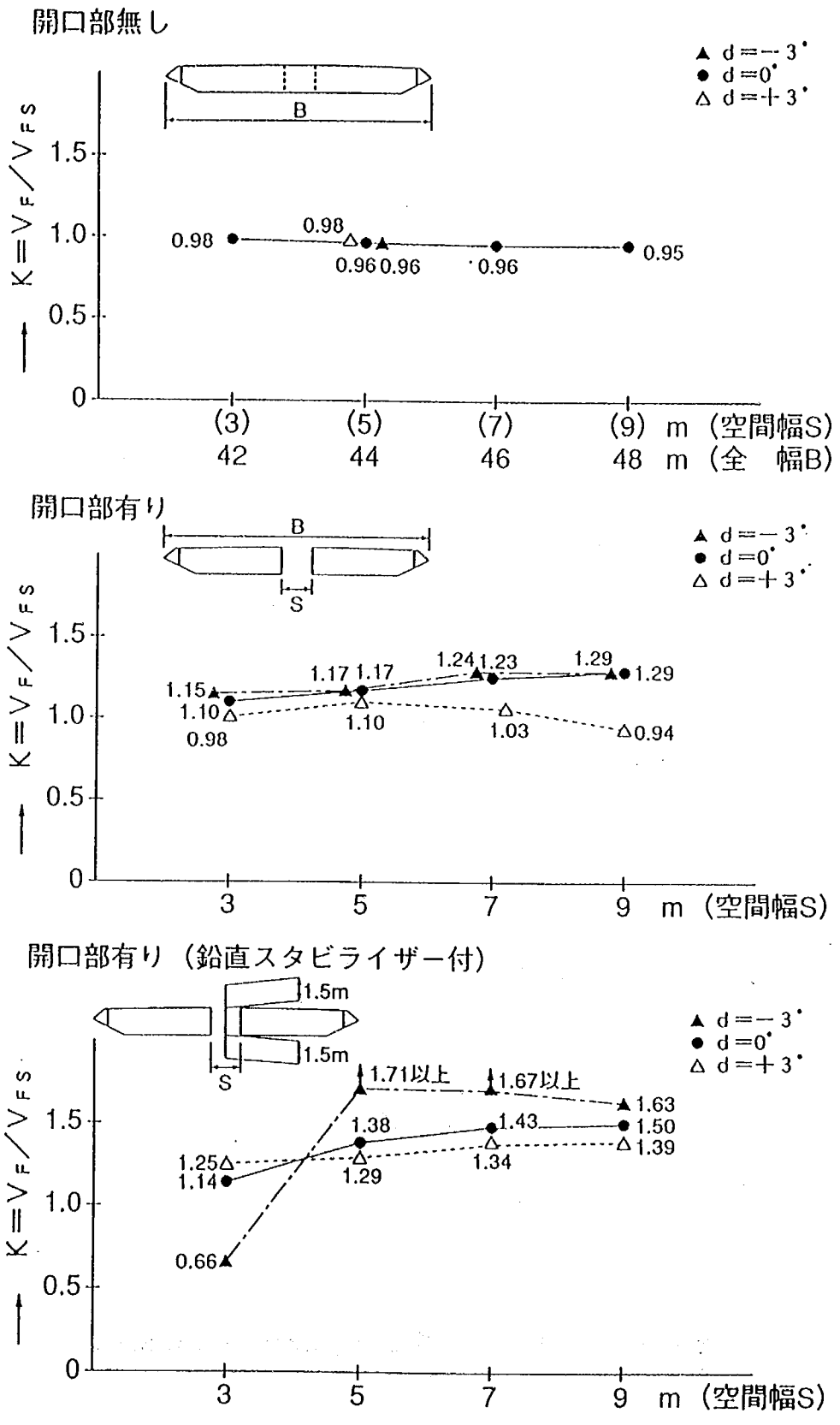
有風時の静的変形は相対的に負の迎角となる傾向であるので、3次元フラッター解析で評価するとき、断面Bは耐風性を確保できると期待された。しかし、後述するように、$\alpha=0°$の風作用時でも、フラッター解析結果は約65m/sで耐風性が不十分となった。

そこで、図－3.3.5.2(c)に示すように、断面Bに幅2mの導流板（ここでは水平スタビライザーと称す）を併用設置した断面（以後、断面Cと称す）を検討した。図－3.3.5.5に振動応答を、図－3.3.5.6にフラッター発生風速を断面Aおよび断面Bと比較して示す。断面Cの$\alpha=0°$、$-3°$、$+3°$のフラッター発生風速はいずれも約80m/sで極めて良好である。有風時の変形を考慮して他の迎角についても検討したが、図－3.3.5.7(a)に示すように$-5°$以上の負の迎角で約60m/sに低下しているので、これを改善するため、鉛直スタビライザーの上下突出高を変化させて検討した結果、下側突出高$h_L=1$mに縮小する案（図－3.3.5.2(d)参照、以後、断面Dと称す）では図－3.3.5.7(b)に示すように負の迎角$-2°$以上で比較的良好なフラッター特性を有することがわかった。したがって、後述するように有風時の変形が負の迎角の大きい部分で断面D、それ以外の部分には断面Cとする橋軸方向に異なった断面を適用することも検討した（図－3.3.5.8参照）。

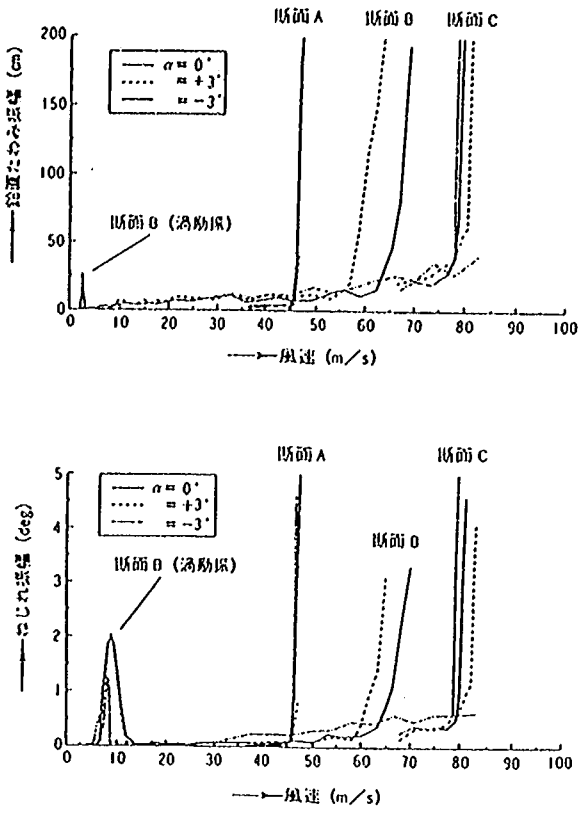
以上はすべて両端フエアリングの形状は図－3.3.5.1に示すように上下非対称であったが、これを図－3.3.5.9に示すように上下対称とした断面についても検討した（上下非対称断面の断面A、BおよびCに対応する各断面を断面E、FおよびGと称す）。結果は、図－3.3.5.10に示すように断面Eについては断面Aとほぼ同じであるが、断面Fは断面Bと異なり、$\alpha=0°$、$+3°$ではフラッター発生風速は10m/s弱上昇するが、$-3°$では逆に大幅に低下する。これに対して断面Gは$-7°$で断面Cより若干上昇するが，$-3°\sim+3°$では若干劣っている。



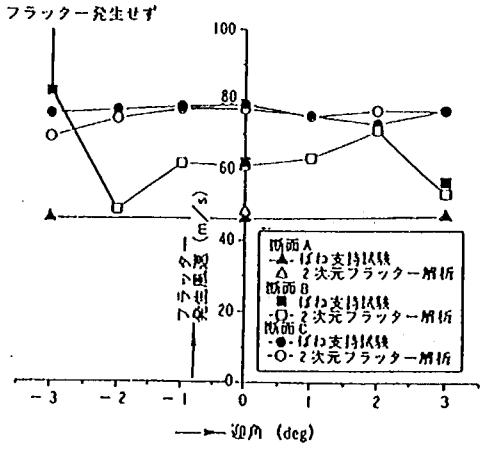
図－3.3.5.3　フラッター発生風速V_F（桁高5m：中央開口幅3，5，7，9m）



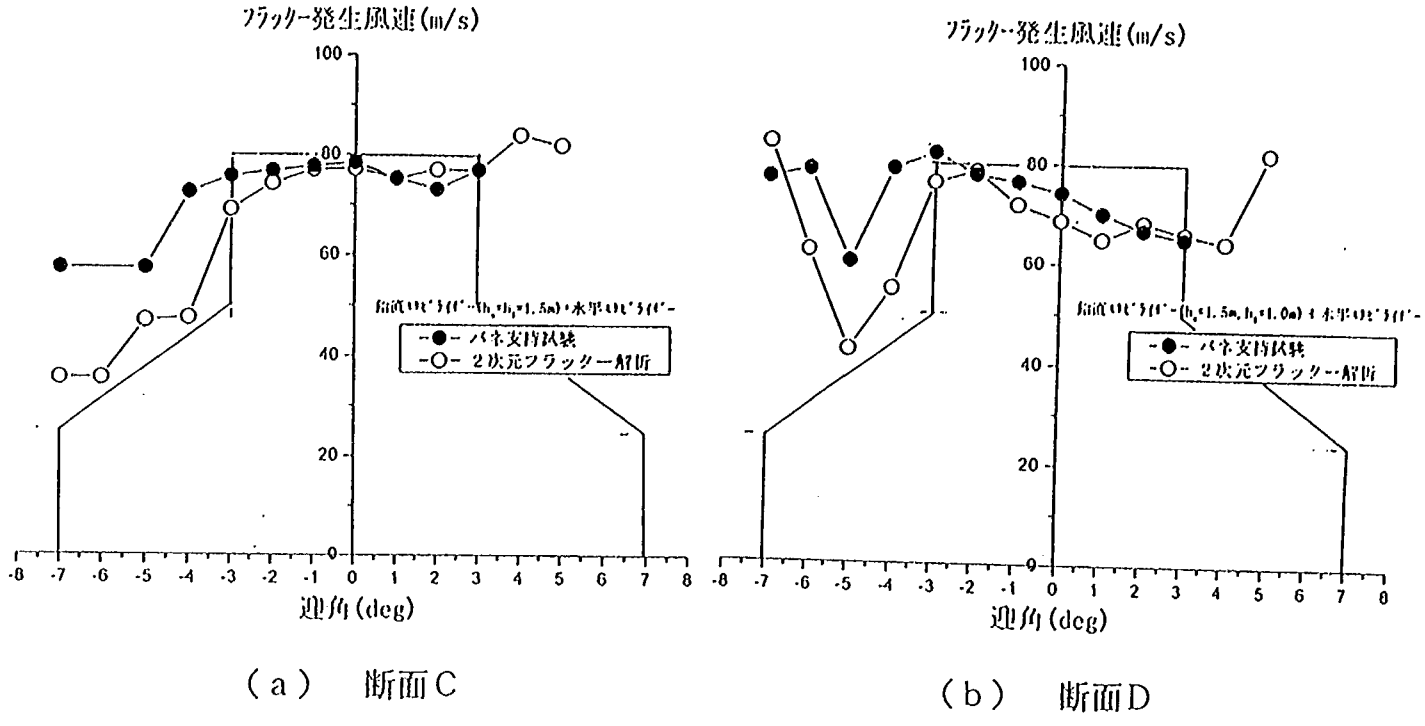
図－3.3.5.4　k＝Vf／Vfs（桁高５m：中央開口幅３，５，７，９m）



図－3.3.5.5　振動応答の比較（断面A，B，C）

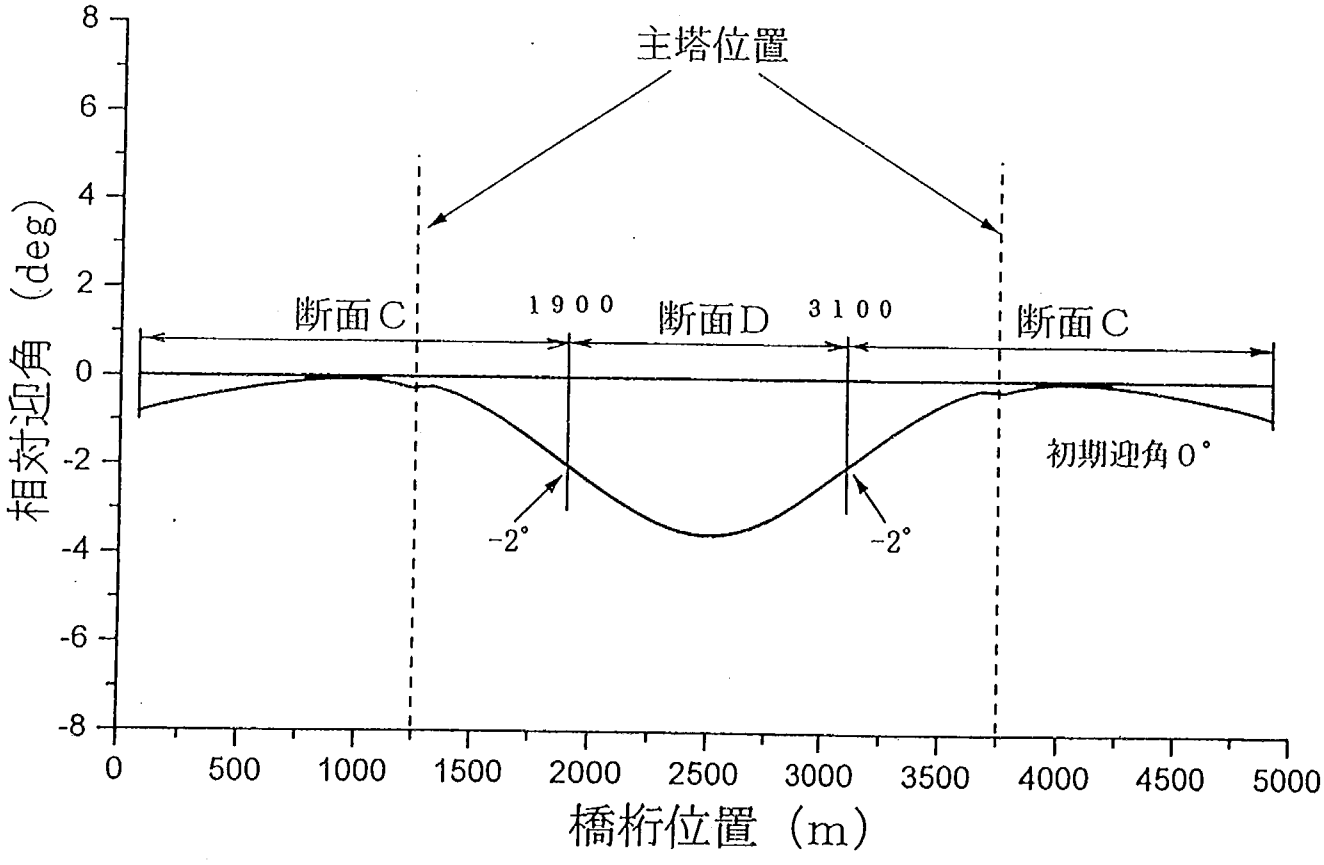


図－3.3.5.6　フラッター発生風速V_Fの比較（断面A，B，C）

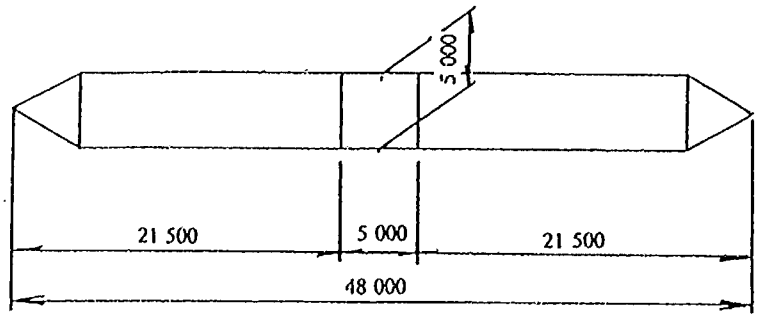


（a）　断面C　　（b）　断面D

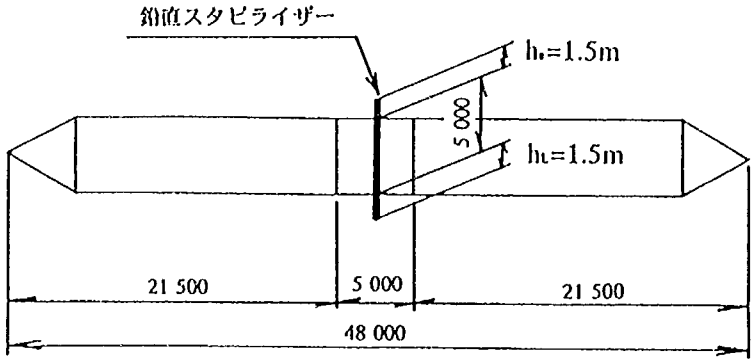
図－3.3.5.7　フラッター発生風速V_Fの比較（断面C，D）



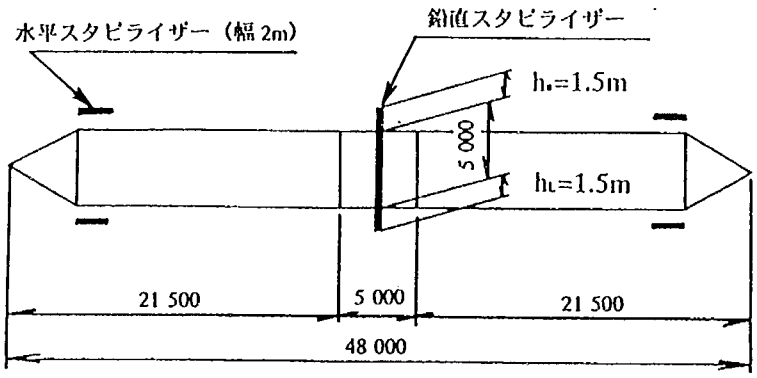
図－3.3.5.8　断面Cと断面Dの適用範囲



（a）断面 E

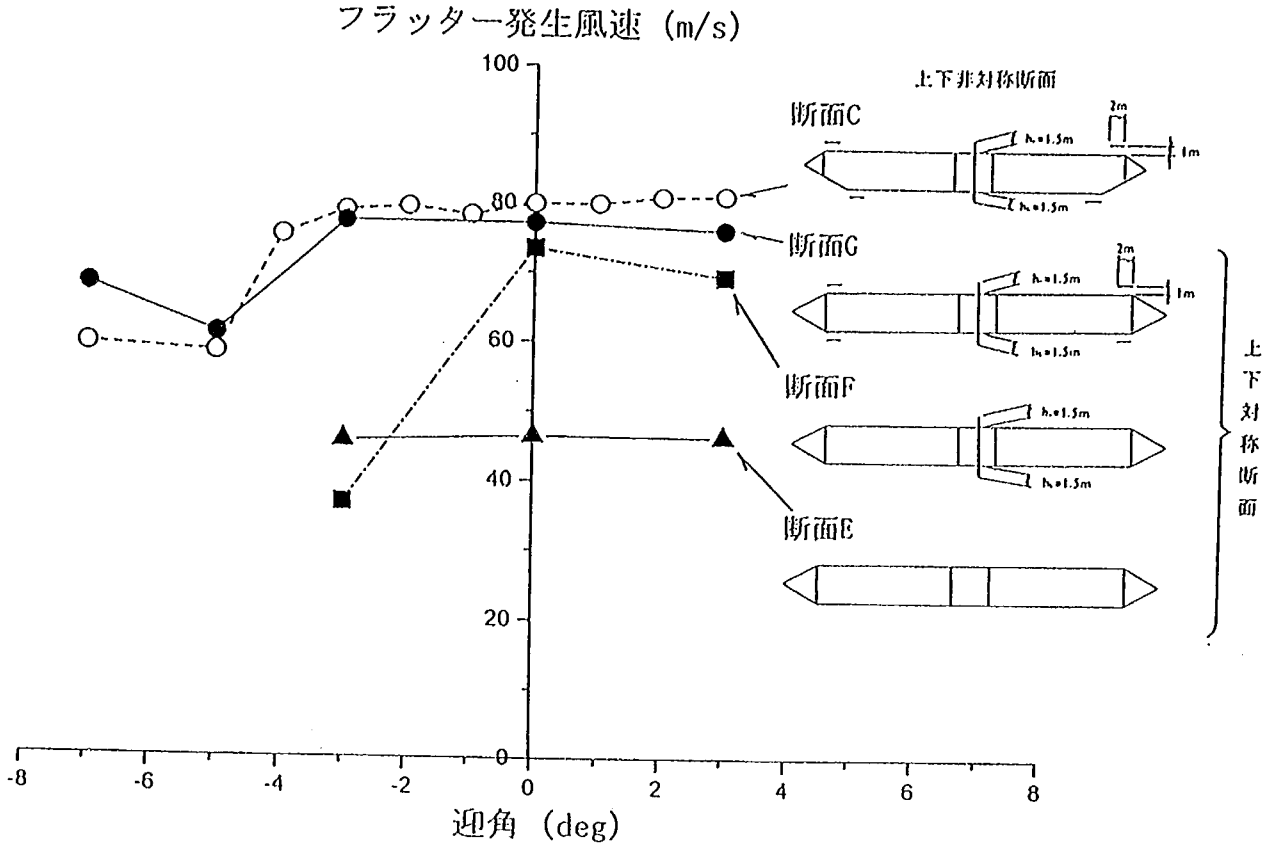


（b）断面 F

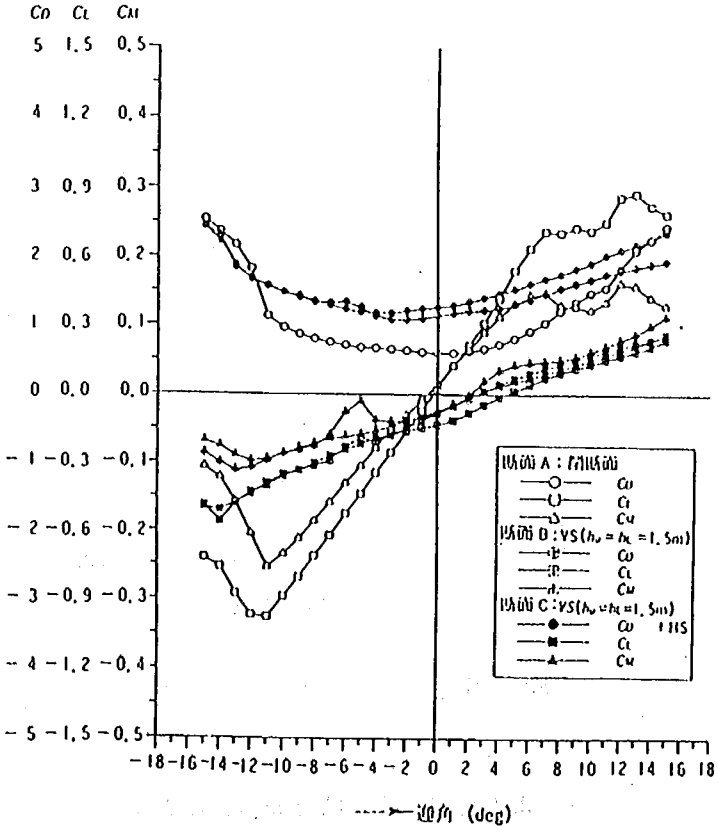


（c）断面 G

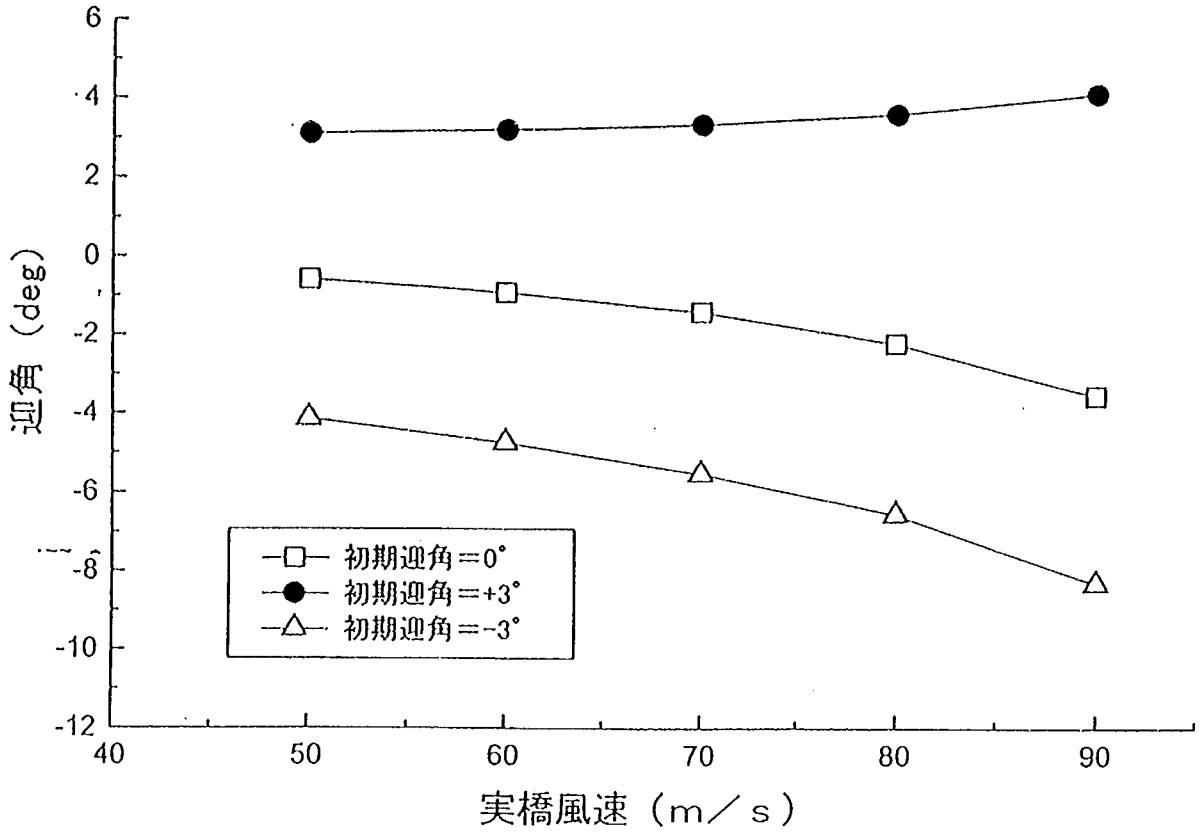
図－3.3.5.9　フエアリング部上下対称断面（断面E，F，G）



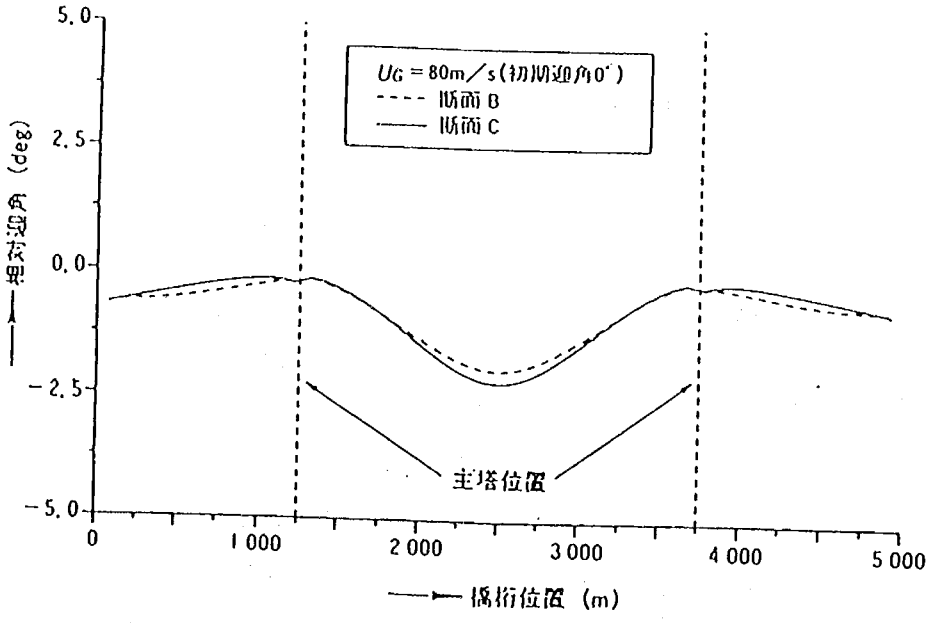
図－3.3.5.10　フラッター発生風速V_Fの比較（断面E，F，G）



図－3.3.5.11　三分力係数（断面A，B，C）



(a)　風速と静的ねじれ変形の関係（断面C）



(b)　80m/s作用時（断面B，C：α＝0°）

図－3.3.5.12　有風時静的ねじれ変形

(4)　有風時のねじれ変形

1)　三分力係数測定結果

(3.3.5.1)式で定義した断面A、B、Cの三分力係数を図−3.3.5.11に示す。鉛直スタビライザー設置により抗力は当然増加する。ところが、揚力・空力モーメント係数曲線の勾配は極めて小さくなり、さらに、水平スタビライザーの併用により、−5°近傍の空力モーメントの局部的な急変はなくなりスムーズになっている。

$$\begin{aligned} &\text{抗力係数} \quad C_D = D/(qH) \\ &\text{揚力係数} \quad C_L = L/(qB) \\ &\text{空力モーメント係数} \quad C_M = M/(qB^2) \end{aligned} \qquad \text{----------(3.3.5.1)}$$

ここで、D、L、M：単位長当り抗力、揚力、空力モーメント

$q = 1/2\,\rho U^2$、H：桁高、B：桁全幅

2)　有風時のねじれ変形による相対迎角

断面Cの場合の風速と静的ねじれ変形の関係を図−3.3.5.12(a)に示す。図では−3°、0°、+3°の作用風に対する相対迎角で表示している。80m/s作用時の相対迎角はそれぞれ約−6°、−2°、+4°である。

水平風（0°）で80m/s作用時の橋全体のねじれ変形（相対迎角に相当）は図−3.3.5.12(b)のとおりで、全径間にわたり負の相対迎角となっている。

(5)　3次元マルチモード連成フラッター解析結果

1)　非定常空気力係数（Flutter Derivatives）

前項の相対迎角を考慮して、各角度について鉛直・水平・回転の各強制振動に関する非定常空気力を測定し、(3.3.5.2)式でFlutter Derivativesを求めた。このうち、相対迎角0°に関する断面A、B、Cの

$$\begin{aligned} L &= 1/2\,\rho U^2 B \left\{ k\cdot H_0^*\cdot \dot{s}/U + k\cdot H_1^*\cdot B\dot{h}/U + k\cdot H_2^*\cdot B\dot{\alpha}/U + k^2\cdot H_3^*\cdot \alpha \right. \\ &\qquad \left. + k^2\cdot H_4^*\cdot h/B + k^2\cdot H_5^*\cdot s/B \right\} \\ M &= 1/2\,\rho U^2 B^2 \left\{ k\cdot A_0^*\cdot \dot{s}/U + k\cdot A_1^*\cdot B\dot{h}/U + k\cdot A_2^*\cdot B\dot{\alpha}/U + k^2\cdot A_3^*\cdot \alpha \right. \\ &\qquad \left. + k^2\cdot A_4^*\cdot h/B + k^2\cdot A_5^*\cdot s/B \right\} \\ D &= 1/2\,\rho U^2 A \left\{ k\cdot P_0^*\cdot B\dot{h}/U + k\cdot P_1^*\cdot \dot{s}/U + k\cdot P_2^*\cdot B\dot{\alpha}/U + k^2\cdot P_3^*\cdot \alpha \right. \\ &\qquad \left. + k^2\cdot P_4^*\cdot h/B + k^2\cdot P_5^*\cdot s/B \right\} \end{aligned} \qquad \text{--(3.3.5.2)}$$

ここで、L、M、D：非定常揚力・空力モーメント・抗力

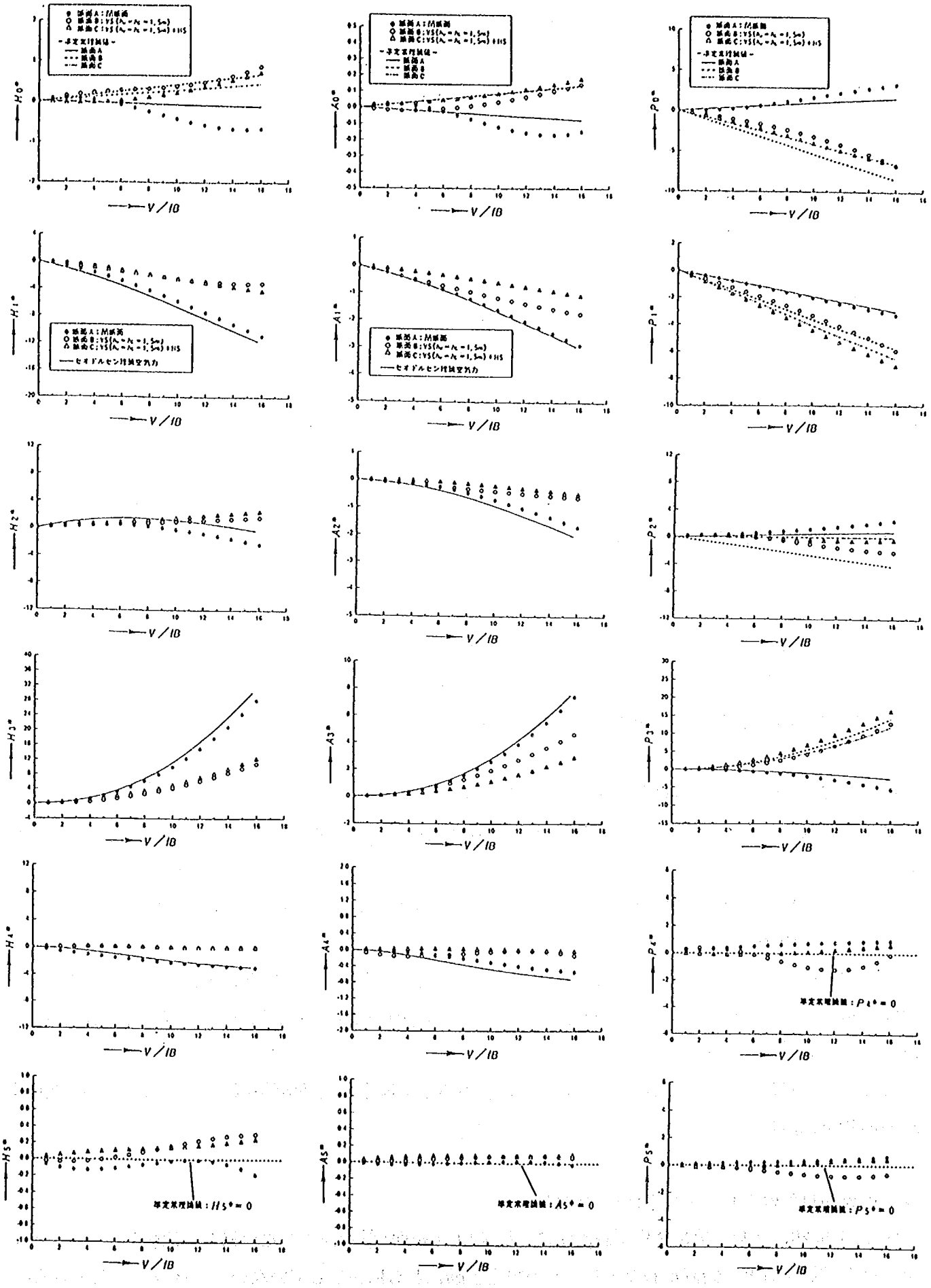
ρ：空気密度、　U：風速、　$k = 2\pi f B/U$、　B：全幅、　f：加振振動数

h、α、s：上下、回転、水平加振振幅　（ドットは時間に関する微分を示す。）

結果を比較して図－3.3.5.13に示す。図中、H_1^*～H_4^*、A_1^*～A_4^*については(3.3.5.3)式のTheodorsen理論による空気力を実線で併記、また、H_0^*、H_5^*、A_0^*、A_5^*、および、P_0^*～P_5^*は(3.3.5.4)式に示す準定常理論による値を併記している。中央部を閉塞した基本断面Aの空気力はTheodorsen理論による空気力とほぼ一致している。また、準定常理論による空気力は測定値とほぼ類似した傾向であることが確認できた。

Theodorsen理論による空気力

$$
\begin{aligned}
H_1' &= -\pi / k \cdot F(k) \\
H_2' &= \pi /(4k) \cdot \{1 + F(k) + 2G(k)/k\} \\
H_3' &= \pi /(2k^2) \cdot \{F(k) - k \cdot G(k)/2\} \\
H_4' &= \pi / k \cdot G(k) \qquad \text{－－－



図－3.3.5.13　非定常空気力係数　Flutter Derivatives（断面A, B, C）

3)　3次元マルチモード連成フラッター解析結果による耐風性の評価

1)の測定した非定常空気力を適用し、有風時の静的変形および固有振動モード・振動数を用いた3次元マルチモード連成フラッター解析（解析条件：ＨＺ－３）を実施して耐風性を評価した。

①　断面Ｂに関する耐風性の評価結果

断面Ｂ使用時の水平風（迎角０°）に対する解析結果を有風時の変形を考慮しない場合（解析条件：ＨＺ－２）と比較して風速と減衰率の関係を図−3.3.5.14に示す。フラッター発生風速は、変形を考慮しない場合64.9m/s、変形を考慮した場合63.1m/sで、変形を考慮すると若干低下する。フラッターモードおよび連成振動数は図−3.3.5.15のとおりで、フラッター発生に寄与しているモード形状は表−3.3.5.4に記述されるモードの中、図−3.3.5.16に示すものが主体である。いずれにしても断面Ｂは80m/sを下回る。

②　断面Ｃ、および、断面Ｃと断面Ｄの混合採用に関する耐風性の評価結果

断面Ｃ使用時、および、断面Ｃと断面Ｄの混合採用時（断面Ｃ+Ｄと称す）の迎角０°、＋３°、－３°に対する解析結果（解析条件：ＨＺ－３）をそれぞれ、図−3.3.5.17および図−3.3.5.18に示す。
迎角０°作用時に有風時変形を考慮すると、断面Ｃでは76m/s、断面Ｃ+Ｄでは78m/sでほぼ目標値80m/sを満たしている。

図−3.3.5.19に断面Ｃのフラッターモード、フラッター発生に寄与している固有振動モードを示す。断面Ｃの静的変形による相対迎角は80m/sで－２°強であり、この範囲ではフラッターに対する空力特性が安定していること、鉛直たわみ対称１次モードの寄与が比較的大きいことから、フラッター発生風速は迎角０°に関する２次元ばね支持試験結果と大差のない結果となっている。

(6)　鉛直たわみ・ねじれの限定振動に関する検討結果

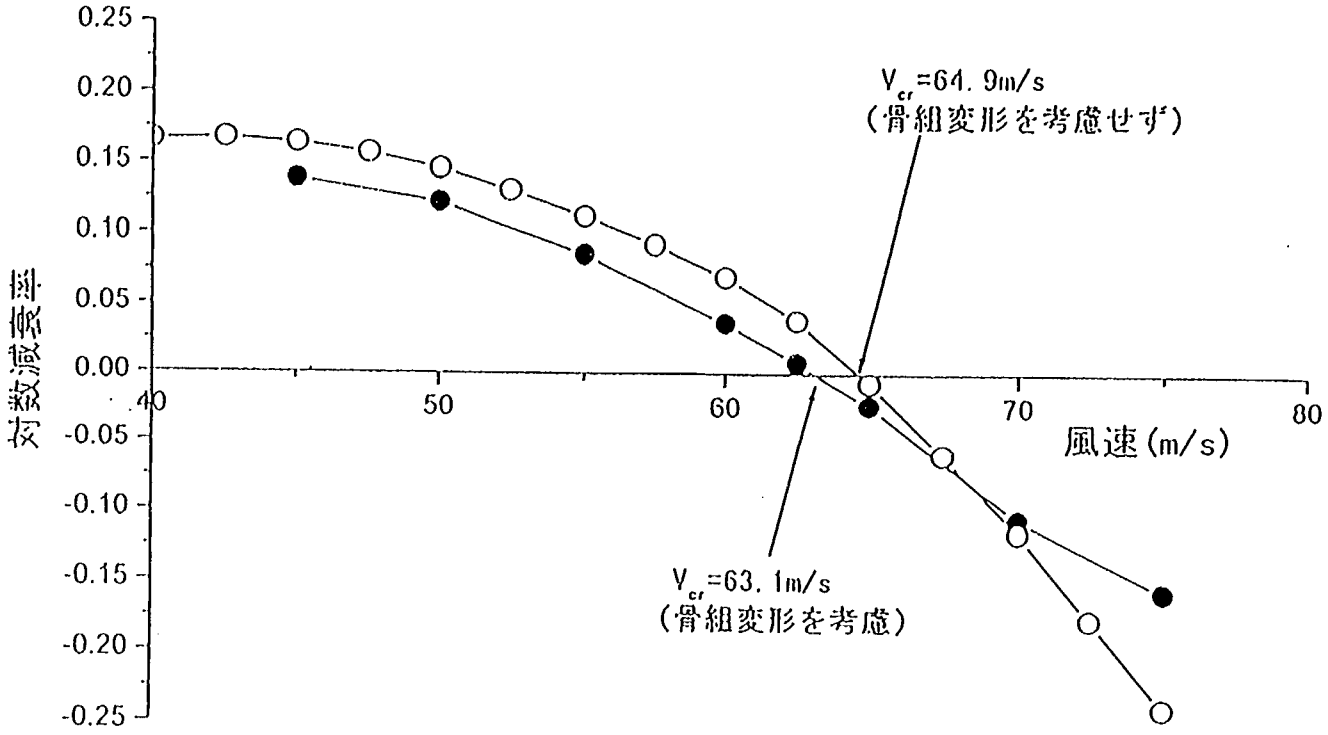
平板翼類似断面である断面Ａでは鉛直たわみの限定振動がわずかに発生する場合があるが、比較的発生し難い。ところが、中央部開口によりこの振動が発生し易くなり、鉛直スタビライザーを設置した場合には、さらに、ねじれの限定振動も発生する傾向がある。鉛直たわみの限定振動は２～３m/sで、ねじれの限定振動は７～９m/sで発生している。

中央開口部上面のグレーチング構造は以上の風洞試験では模型化していないが、それを模型化（充実率50％；40メッシュ、線径0.17mmの真鍮製の金網）した場合の振動応答の変化を検討した。対象とした断面は、桁高3.5m・開口幅９mである。

また、この断面に関して乱れの強さ５％、10％の格子乱流中の振動応答を検討し、限定振動に及ぼす乱れの影響を把握した。

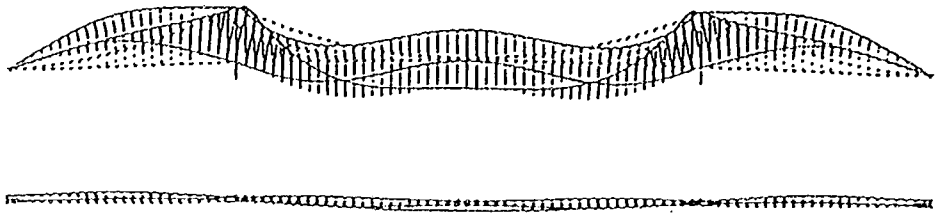
1)　中央開口部のグレーチング構造の影響

図-3.3.5.20にグレーチング模型設置時の一様流中の振動応答を設置しない場合と比較して示す。グレーチングを設置すると、鉛直たわみ・ねじれの限定振動はともに発生していない。フラッター発生風速は極

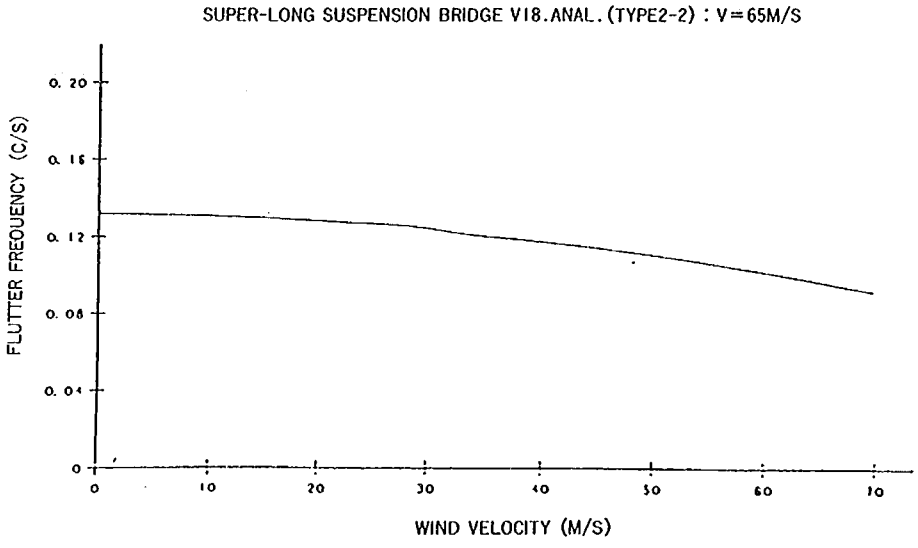


図－3.3.5.14　3次元マルチモード連成フラッター解析（断面B）

・WIND VELOCITY＝55.000 (M/S)



FLUTTER-MODE CASE-(Ⅰ) : AUTO-SELECTION : ALL MODE
FREQUENCY F(U)＝0.09689 (C/9)　DELTA＝－0.02340



骨組変形を考慮

図－3.3.6.15　フラッターモード・連成振動数（断面B）

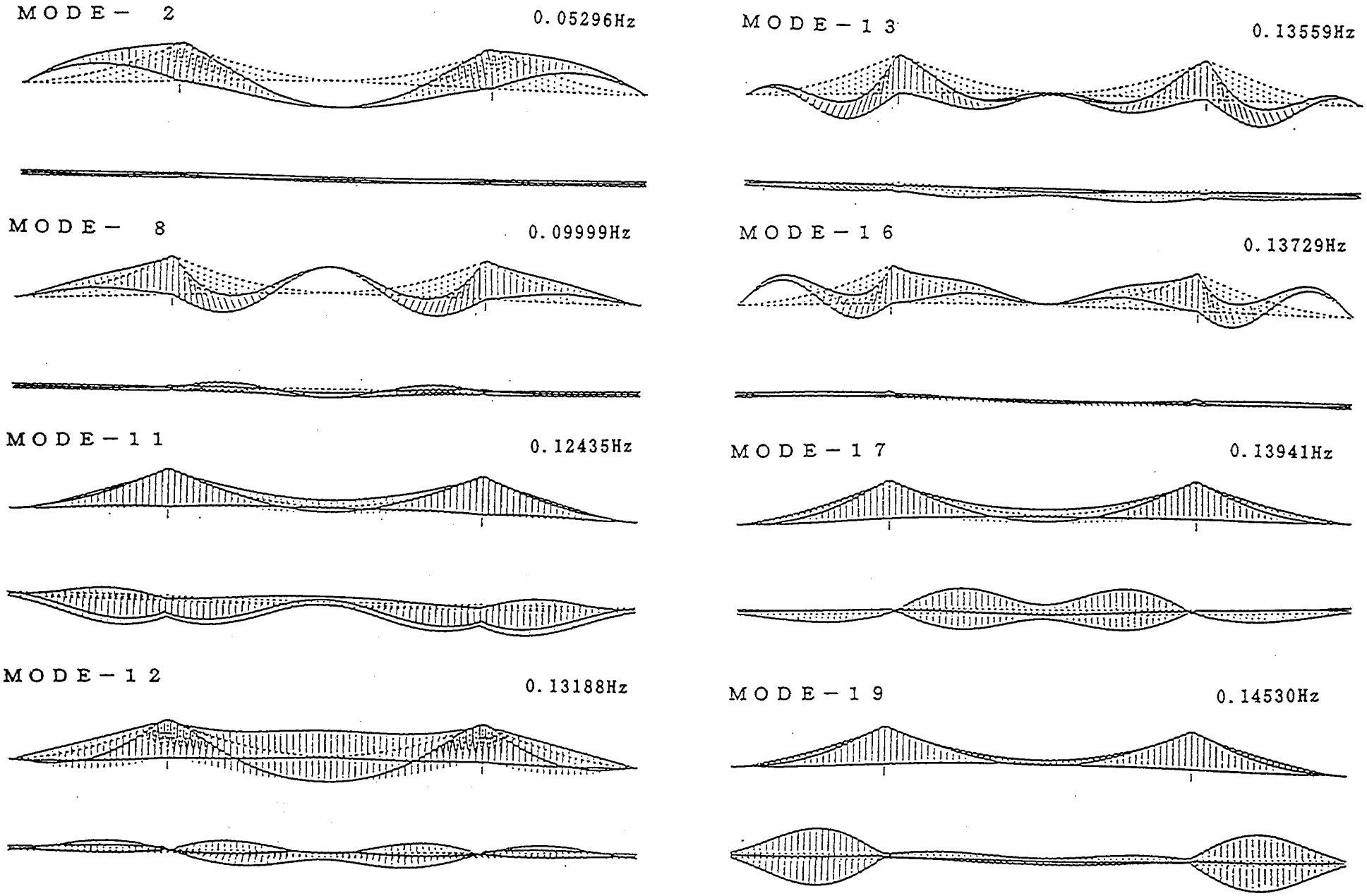
表－３．３．５．４　有風時変形を考慮した固有振動解析結果（断面Ｂ、65m/s 作用時）

(a)　骨組変形を考慮せず

No.	固有振動数（Hz）	モード名称
1	0.0299	水平たわみ対称１次
2	0.0523	沿直たわみ対称１次
3	0.0509	水平たわみ逆対称１次
4	0.0676	沿直たわみ逆対称１次
5	0.0715	側径間卓越水平たわみ
6	0.0717	側径間卓越水平たわみ
7	0.0730	沿直たわみ逆対称２次
8	0.0987	沿直たわみ対称２次
9	0.1007	ケーブル卓越水平たわみ
10	0.1219	ケーブル卓越水平たわみ
11	0.1227	ケーブル卓越水平たわみ
12	0.1333	ねじれ対称１次
13	0.1342	側径間卓越沿直たわみ
14	0.1343	側径間卓越沿直たわみ
15	0.1346	沿直たわみ逆対称３次
16	0.1349	ケーブル卓越水平たわみ
17	0.1393	沿直たわみ対称３次
18	0.1418	ケーブル卓越水平たわみ
19	0.1418	ケーブル卓越水平たわみ
20	0.1428	ケーブル卓越水平たわみ

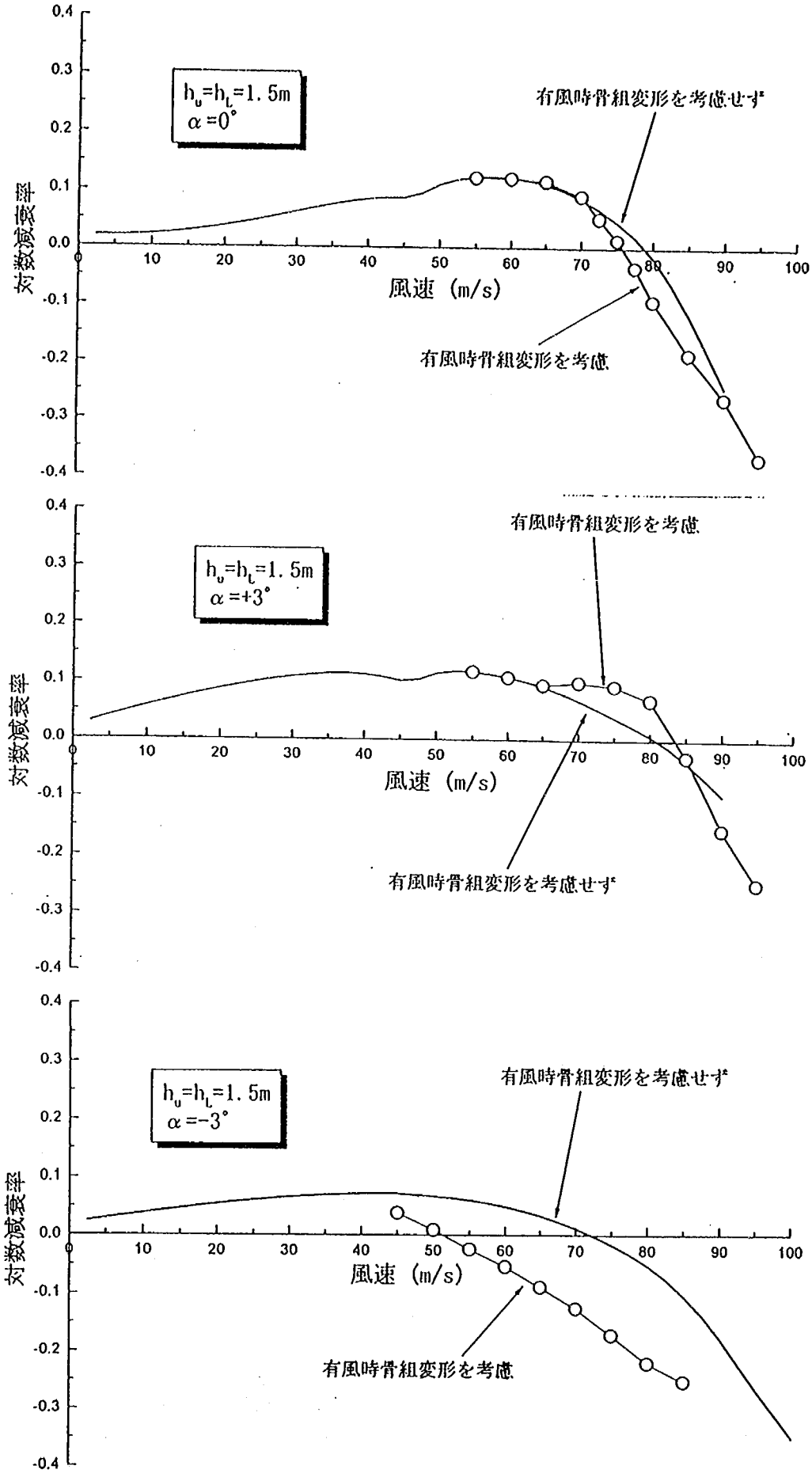
(b)　骨組変形を考慮（65m/s）

No.	固有振動数（Hz）	モード名称
1	0.0313	水平たわみ対称１次
2	0.0530	沿直たわみ対称１次
3	0.0594	水平たわみ逆対称１次
4	0.0688	沿直たわみ逆対称１次
5	0.0720	側径間卓越水平たわみ
6	0.0722	側径間卓越水平たわみ
7	0.0752	沿直たわみ逆対称２次
8	0.1000	沿直たわみ対称２次
9	0.1016	ケーブル卓越水平たわみ
10	0.1237	ケーブル卓越水平たわみ
11	0.1244	ケーブル卓越水平たわみ
12	0.1319	ねじれ対称１次
13	0.1356	沿直たわみ対称３次
14	0.1365	沿直たわみ逆対称３次
15	0.1367	側径間卓越沿直たわみ
16	0.1373	側径間卓越沿直たわみ
17	0.1394	ケーブル卓越水平たわみ
18	0.1446	ケーブル卓越水平たわみ
19	0.1453	ケーブル卓越水平たわみ
20	0.1456	ケーブル卓越水平たわみ

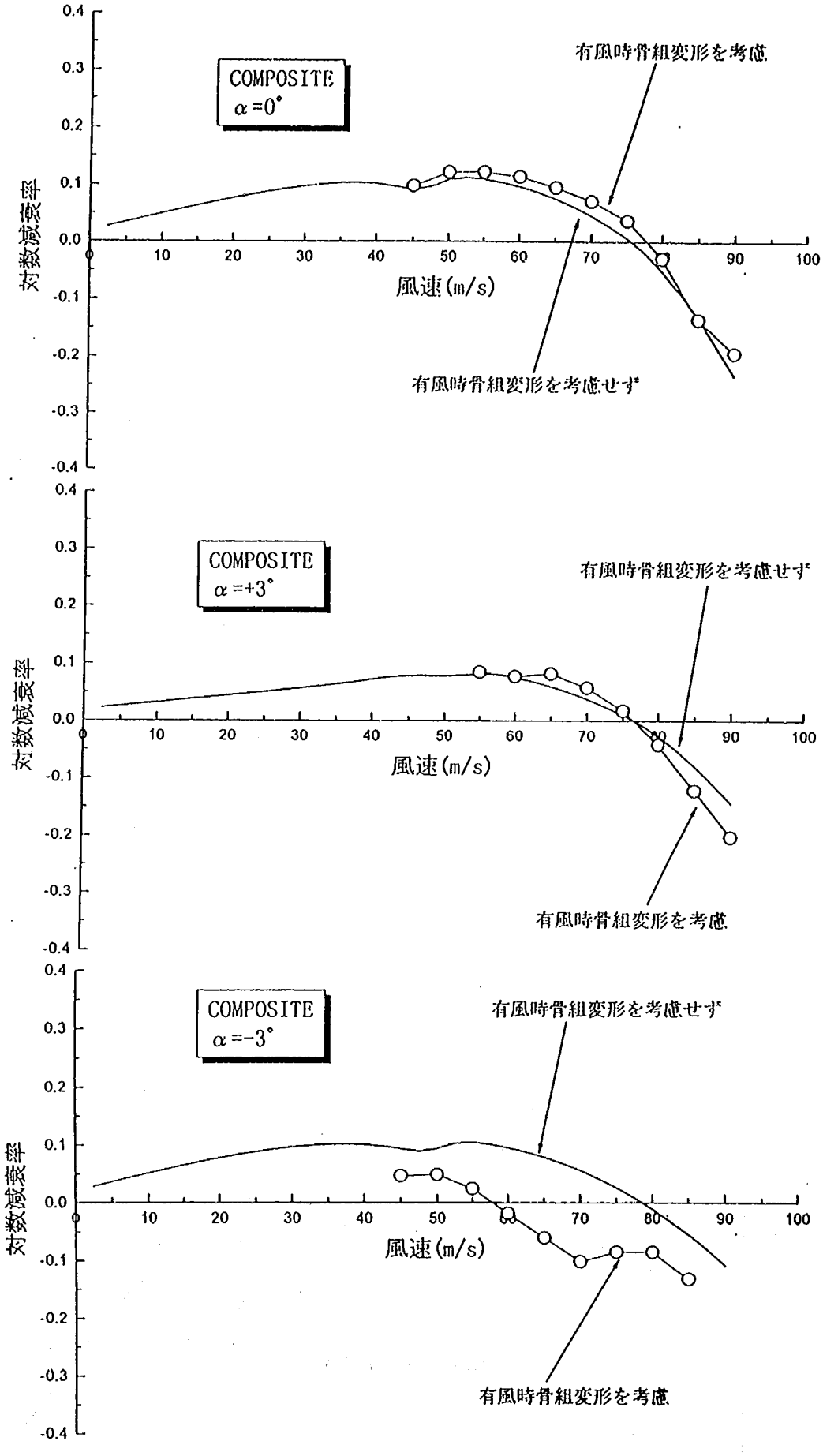


骨組変形を考慮

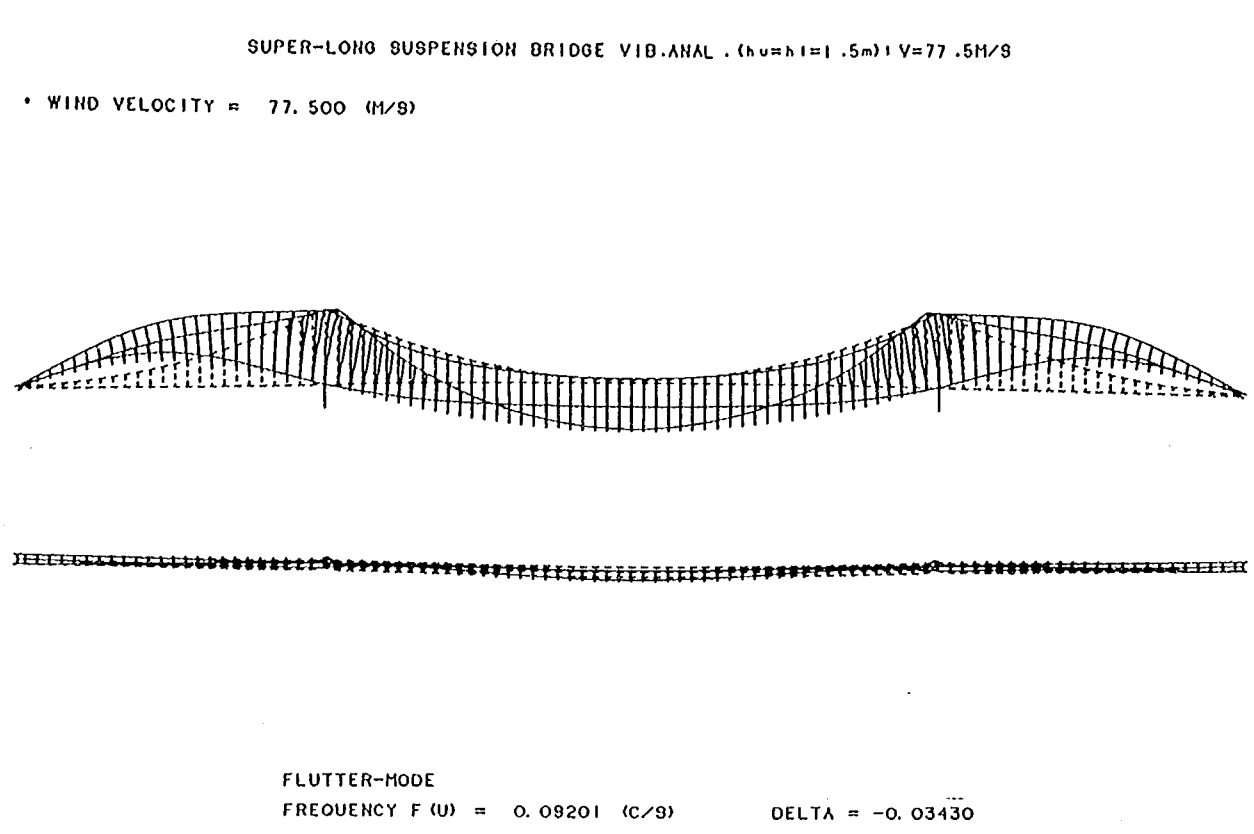
図－3.3.5.16　フラッター発生に寄与するモード（断面B）



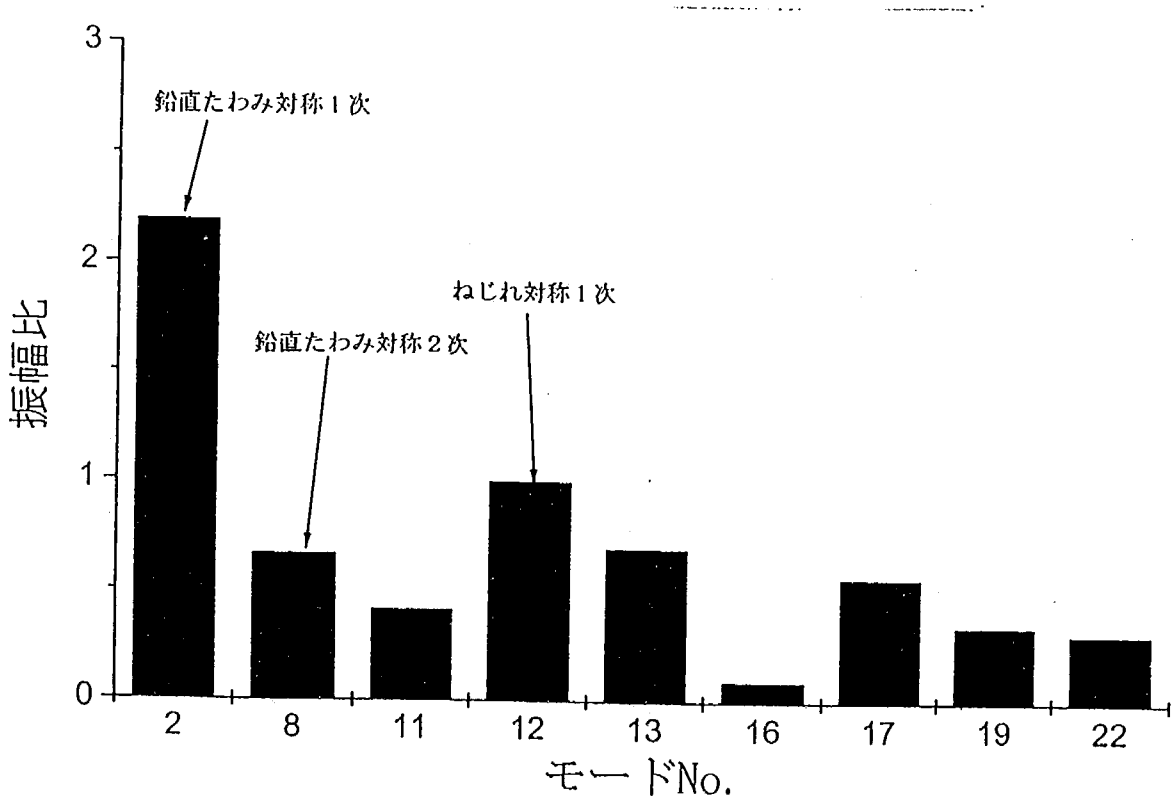
図－3.3.5.17　3次元マルチモード連成フラッター解析（断面C）



図－3.3.5.18　3次元マルチモード連成フラッター解析（断面C＋D）

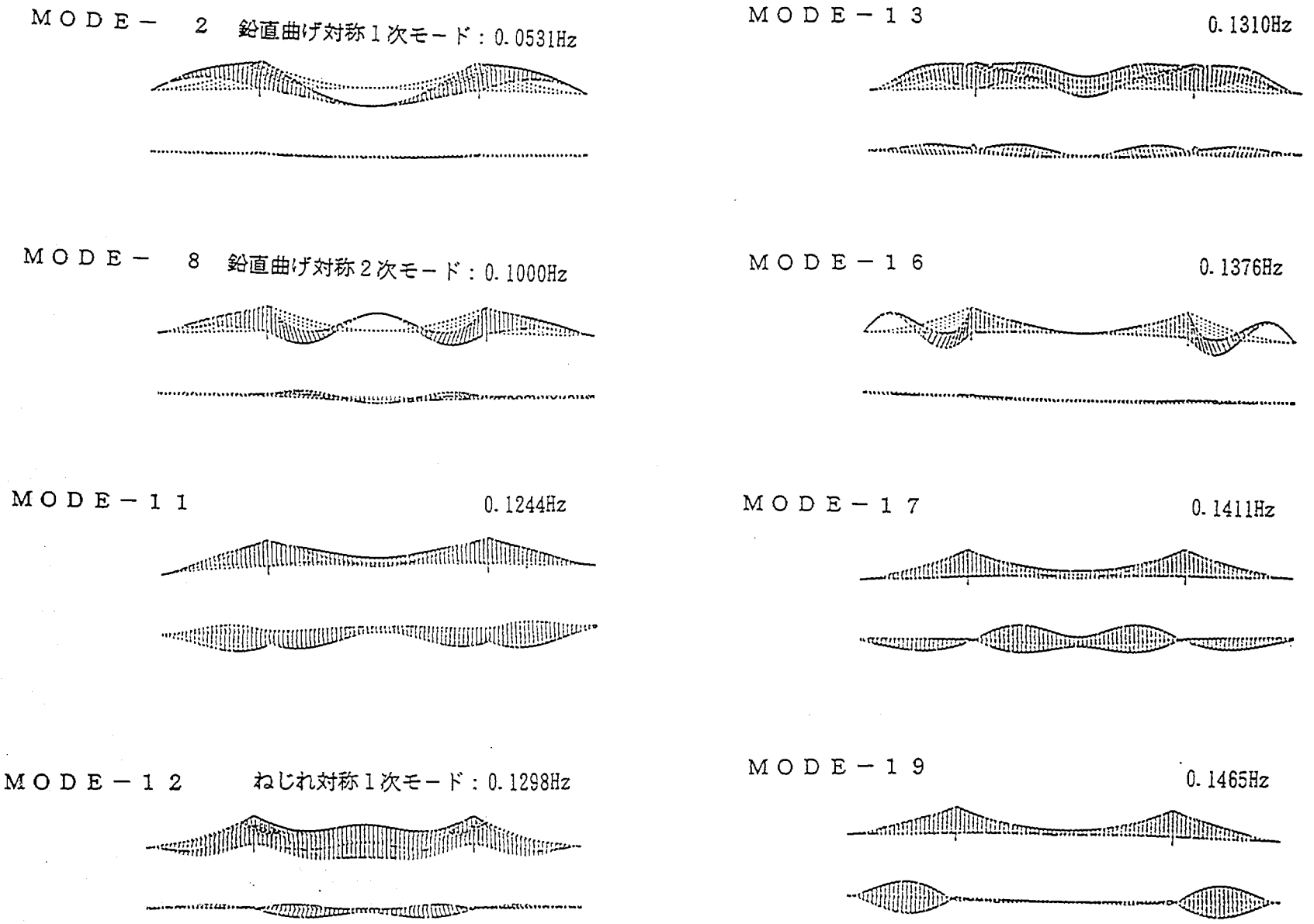


（a） フラッターモード（77.5m/s）

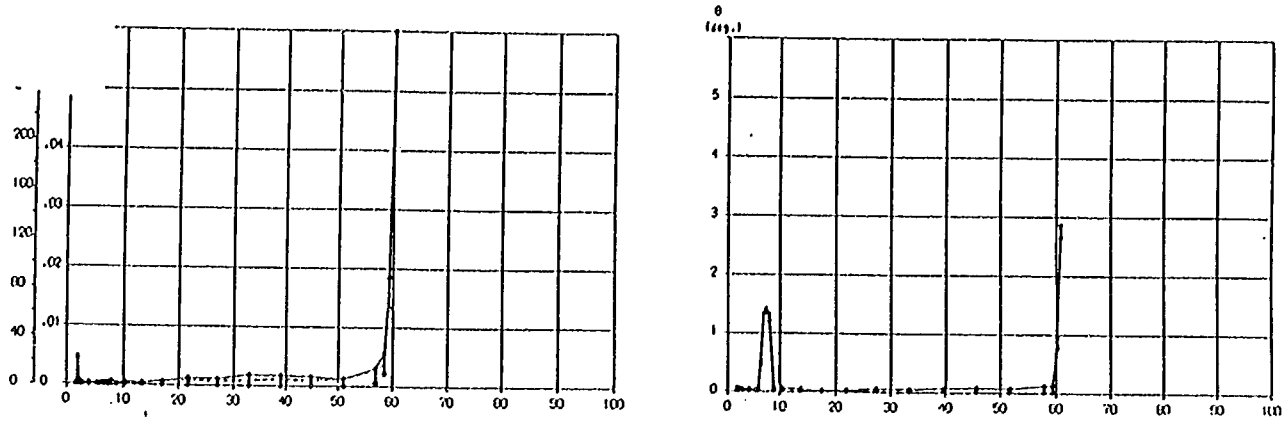


（b） 固有振動モードの寄与

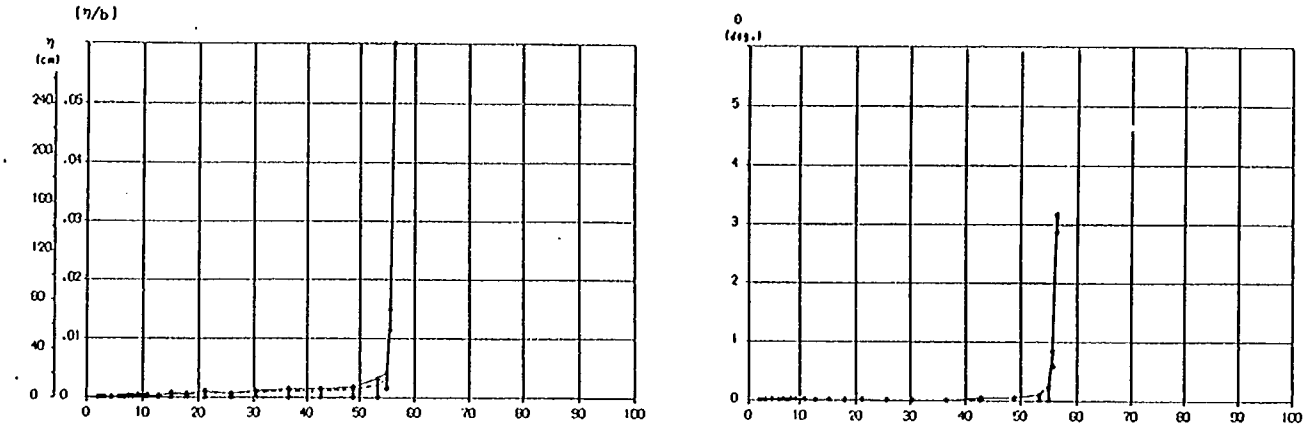
図−3.3.5.19 フラッターモードおよび固有振動モードの寄与（断面C）



（ｃ）　フラッター発生に寄与している固有振動モード

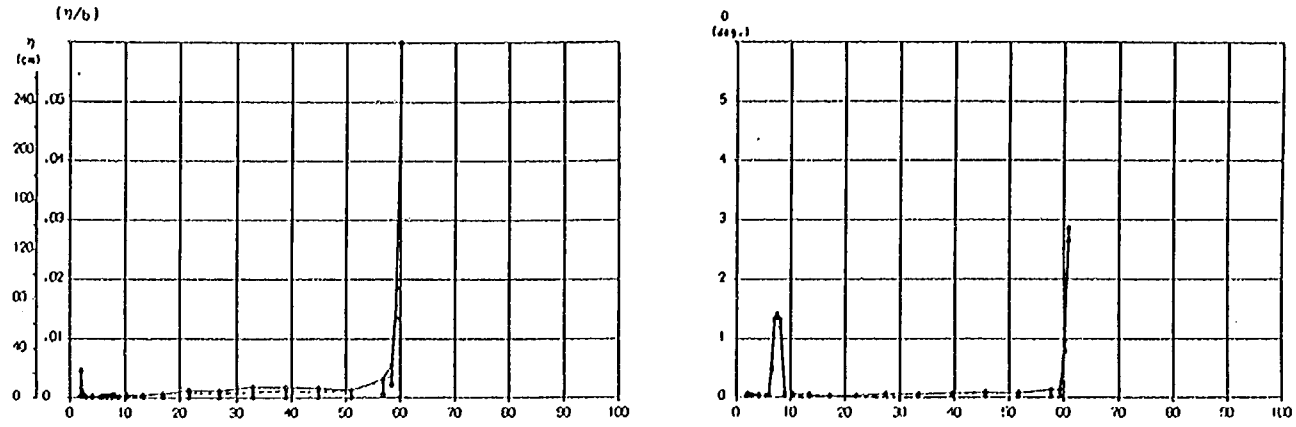


(a)　グレーチングなし

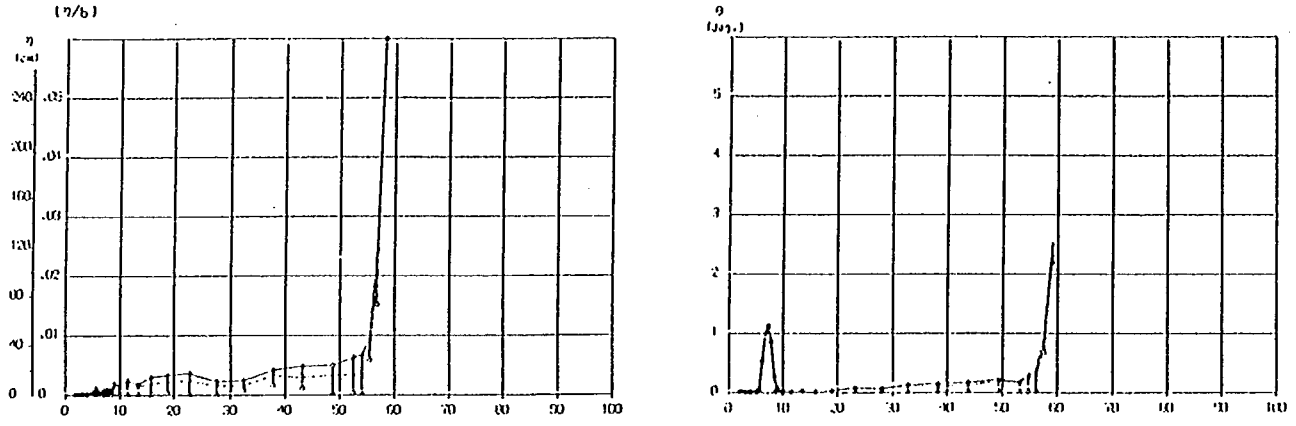


(b)　グレーチングあり

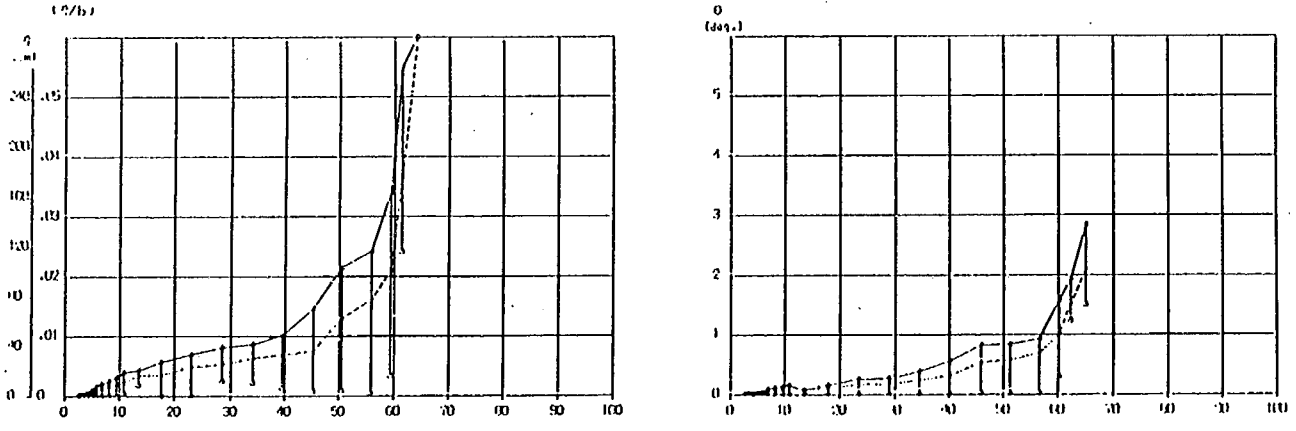
図－3.3.5.20　一様流中振動応答の比較（桁高3.5m、中央開口幅９m、鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ付）
（グレーチングの効果）



（a） 一様流



（b） 乱れ強さ５％



（c） 乱れ強さ１０％

図－3.3.5.21 乱流中振動応答（桁高3.5m、中央開口幅９m、鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ付、グレーチングなし）

わずかに低下の傾向である。

2) 乱れの効果

乱れの強さ５%、10%の格子乱流中の振動応答を一様流と比較して図−3.3.5.21に示す。５%では鉛直たわみの限定振動は消滅するが、ねじれの限定振動は振幅が若干小さくなるのみである。これに対して、10%では両限定振動振動ともに消滅している。乱れによりガスト応答が発生しているが、フラッターの発生風速はほとんど変化していない。

(7) まとめ

以上、偏平箱桁の耐風性改善対策として中央部に開口を設けたいわゆる二箱桁断面で、鉛直スタビライザーおよび水平スタビライザーの適用を検討してきた。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 桁高５m、中央開口幅５mで上下突出高各1.5mの鉛直スタビライザーを設置した断面Bは、$\alpha=0°$の水平風作用時の連成フラッター発生風速は63.1m/sで、目標値80m/sを下回る。
2) 断面Bに幅２mの水平スタビライザーを併用設置した断面C、および、断面Cの鉛直スタビライザーの下側突出高を１mに縮小した断面Dを中央径間中央部1,200mに配し、他の部分に断面Cを配した混合使用の場合の$\alpha=0°$のフラッター発生風速は、それぞれ、76m/sおよび78m/sである。目標値の80m/sを若干下回るが、鉛直と水平スタビライザーの相乗効果で耐フラッター性能を大幅に改善することができた。
3) 断面Cの両端フエアリング部を上下対称とした断面Gは、断面Cとほぼ同程度の耐フラッター性能であった。
4) 偏平箱桁では一様流中の比較的低風速でたわみあるいはねじれの限定振動（渦励振動）が発生することがある。今回対象とした断面では、中央部開口によりたわみの限定振動が２〜３m/s、さらに、鉛直スタビライザー設置によりねじれの限定振動が７〜９m/sで発生している。しかし、中央開口部上面にグレーチング構造を設置した場合には両限定振動は消滅する。また、低風速で予測される10%程度の乱流中でも両限定振動は消滅しており、実橋では問題となる可能性は少ないと考えられる。

3.3.6　センターバリアとガイドベーンを活用した６車線および４車線二箱桁の耐風性検討

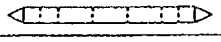
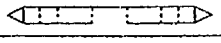
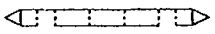
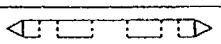
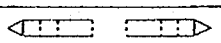
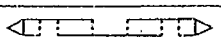
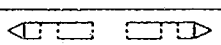
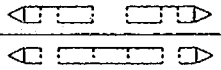
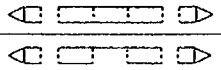
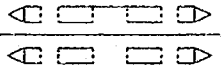
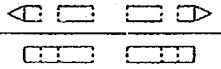
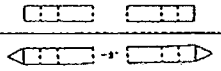
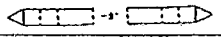
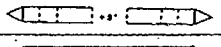
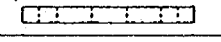
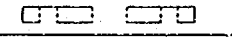
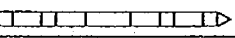
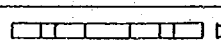
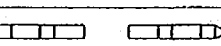
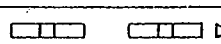
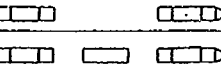
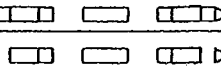
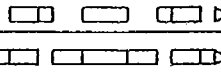
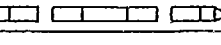
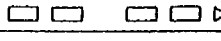
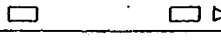
(1) 概要

開口部を有する箱桁に着目し、その耐風性を調査するとともに、センターバリア、ガイドベーン等の設置による耐風性の向上効果を明らかにするために風洞試験を実施した。

(2) 基礎的な検討（H5～H6）

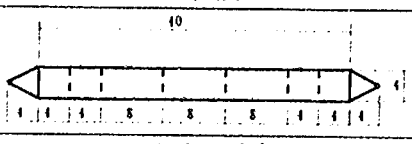
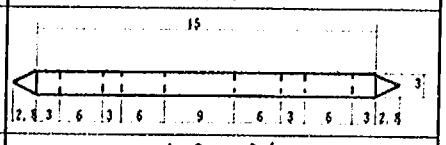
箱桁断面の開口部が耐風性に与える影響について確認を行った。試験の詳細は文献１で紹介されているため、ここでは試験結果のみを表3.3.6.1～表3.3.6.2に示す。これにより、桁端部の開口は耐風性の向上にあまり効果が無く、桁中央部の開口が有効であることが確認された。また、この開口幅は大きい方が効果が高いことも確認された。

表3.3.6.1　試験結果

ケース	模型	開口パターン	開口率	迎角	フェアリング	フラッター発現風速
1	A		0%	0°	有	39 m/s
2	A		0%	0°	〃	38 m/s
3	A		0%	0°	〃	37 m/s
4	A		0%	0°	〃	37 m/s
5	A		20%	0°	〃	51 m/s
6	A		20%	0°	〃	37 m/s
7	A		20%	0°	〃	47 m/s
8	A		20%	0°	〃	25 m/s
9	A		20%	0°	〃	21 m/s
10	A		40%	0°	〃	19 m/s
11	A		20%	0°	無	18 m/s
12	A		20%	−3°	有	53 m/s
13	A		20%	+3°	〃	53 m/s
14	A		0%	0°	無	27 m/s
15	A		20%	0°	〃	16 m/s
16	B		0%	0°	有	39 m/s
17	B		13%	0°	〃	38 m/s
18	B		20%	0°	〃	54 m/s
19	B		33%	0°	〃	51 m/s
20	B		47%	0°	〃	80 m/s
21	B		26%	0°	〃	62 m/s
22	B		40%	0°	〃	57 m/s
23	B		13%	0°	〃	46 m/s
24	B		47%	0°	〃	64 m/s
25	B		73%	0°	〃	74 m/s
26	B		33%	0°	〃	68 m/s
27	B		40%	0°	〃	69 m/s

注：フラッター発現風速は実橋換算値

表3.3.6.2　想定した吊橋の諸元

		想定吊橋　A	想定吊橋　B
断面形状（単位：m）			
重量		46 tf/m	46 tf/m
極慣性モーメント		1280 tf·m·s²/m	1620 tf·m·s²/m
振動数	たわみ	0.050 Hz	0.050 Hz
	ねじれ	0.105 Hz	0.105 Hz

桁中央部に出来るだけ大きな開口部を設けることにより耐風性は向上するが、それにより桁幅が広くなると主塔や基礎工の工費増大につながることになる。そこで、比較的耐風性の良い想定吊橋Bの断面に対して、ある程度制約された開口幅の条件の下で空力特性の改善を図ることができる部材の設置について検討を行った。

試験は、開口率が25%である図3.3.6.1に示す断面に対して、センターバリア（CB）、ガイドベーン（GV）の有無の状態で実施し、フラッターの発生風速（U_{cr}）とSelberg式から計算される風速（$U_{selberg}$）との比（形状補正係数 $\kappa = U_{cr}/U_{selberg}$）により、それぞれの対策が耐風性にどの様な影響を与えるかの確認を行った。結果は図3.3.6.2に示すとおり、センターバリアを設置することにより耐風性はかなり向上している。また、この断面にガイドベーンを設置することにより、迎角－3°における耐風性はわずかに向上している。

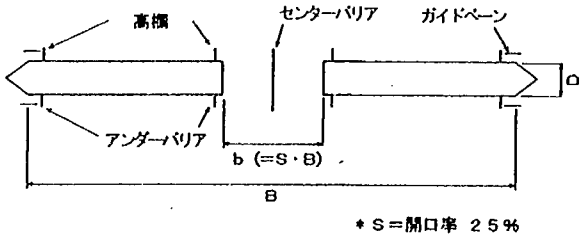


図3.3.6.1　試験対象断面

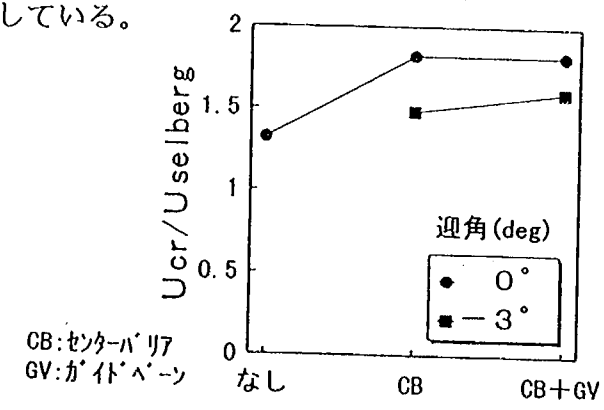


図3.3.6.2　耐風対策部材の効果

しかしながら、迎角－3°のケースは迎角0°、＋3°のケースに比べ耐風性の向上効果が小さい。そのため、さらに高欄を桁下面にも設置し（アンダーバリア）、上下対称な断面とすることによる負の迎角における耐風性の向上を図った。試験結果は図3.3.6.3に示すとおりであり、アンダーバリアを設置することにより、負の迎角における耐風性の向上が確認された。（詳細は文献2参照）

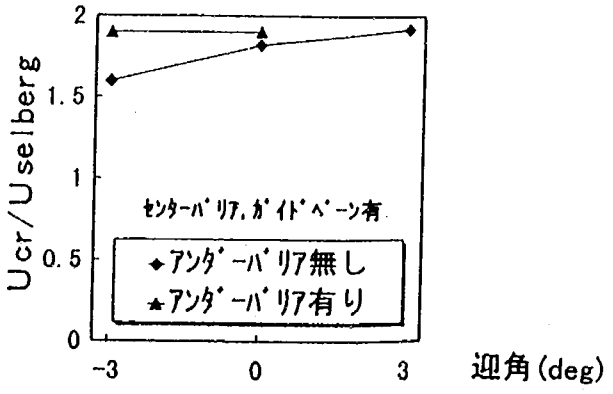


図3.3.6.3　アンダーバリアの効果

(3) 断面形状の影響に関する調査（H7）

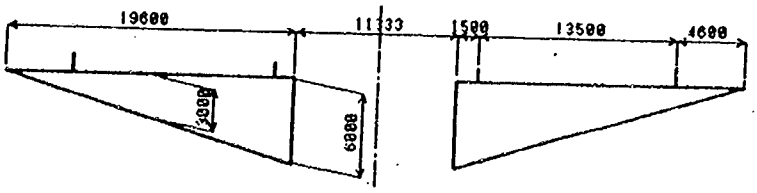
開口部の影響、付属物の影響は基礎的な検討で明らかとなったが、付属物を設置せず断面形状を工夫することにより耐風性の向上が図られないかという検討を行った。風洞試験を実施した断面は、桁幅50.533m、桁中央部の開口幅11.333mを基本とした図3.3.6.4および図3.3.6.5に示す14断面である。それぞれの断面の形状補正係数κは表3.3.6.3に示すとおりであり、フェアリング先端は上下対称とし、開口部下面を大きく切り込んだ断面(PR-2-7F8H3)が最も良い耐風性を示した。しかし、この断面の迎角0°における形状補正係数は1.5程度であり、先のセンターバリア、ガイドベーン等を設置した断面の約2.0には及ばない結果となった。

なお、試験を実施した条件は付録として巻末にまとめて掲載してある。

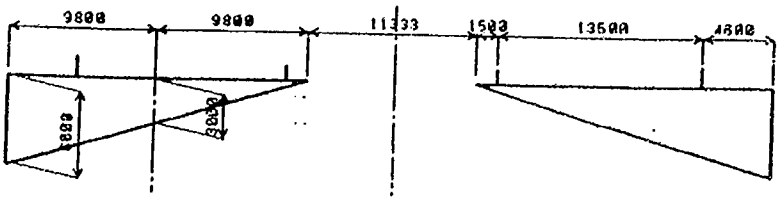
表3.3.6.3 断面形状による耐風性の違い

断面形状	κ			断面形状	κ		
	-3	0	+3		-3	0	+3
① PR-2-71H6	1.30	1.23	0.36	⑧ PR-2-7F2H3	1.31	—	—
② PR-2-72H6	—	0.30	—	⑨ PR-2-7F3H3	1.33	—	—
③ PR-2-73H3	1.46	1.22	1.35	⑩ PR-2-7F4H3	1.36	—	—
④ PR-2-74H3	1.47	1.33	1.21	⑪ PR-2-7F5H3	1.42	—	—
⑤ PR-2-75H3	—	0.49	—	⑫ PR-2-7F6H3	1.37	—	—
⑥ PR-2-76H2	1.32	1.42	1.55	⑬ PR-2-7F7H3	1.34	—	—
⑦ PR-2-7F1H3	1.38	—	—	⑭ PR-2-7F8H3	1.56	1.53	1.83

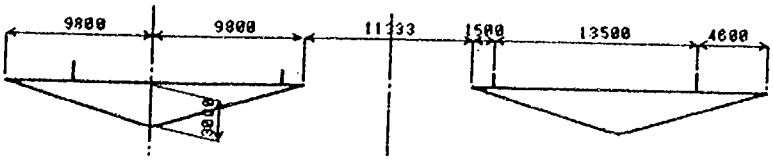
PR－2－71H6



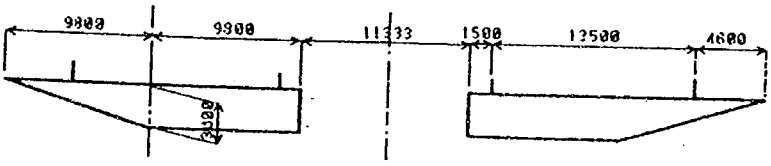
PR－2－72H6



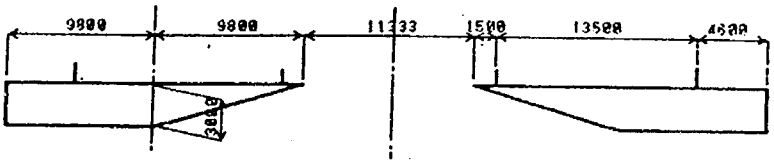
PR－2－73H3



PR－2－74H3



PR－2－75H3



PR－2－76H2

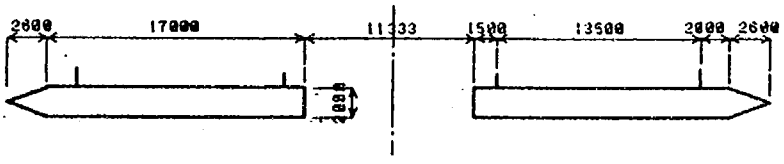
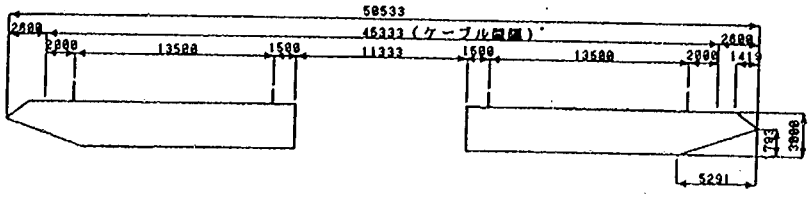
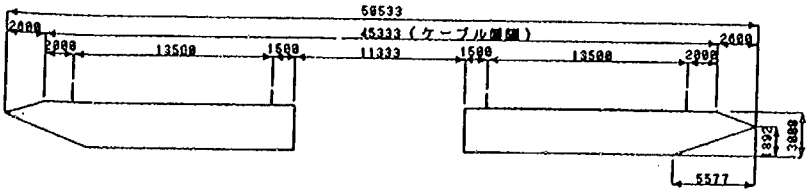


図3.3.6.4　試験実施断面①

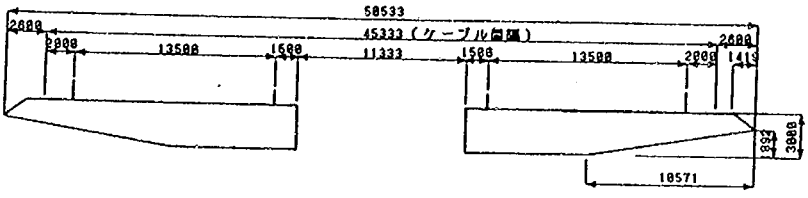
PR－2－7F1H3



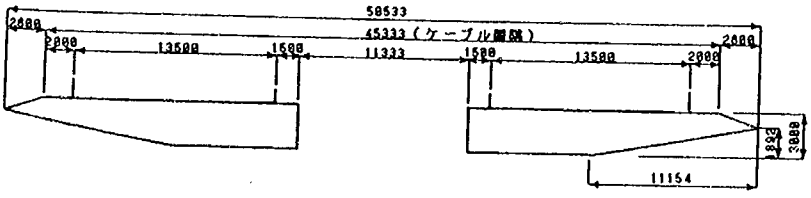
PR－2－7F2H3



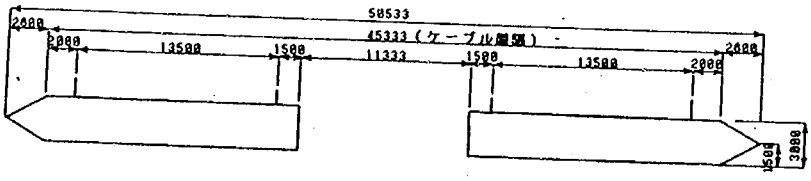
PR－2－7F3H3



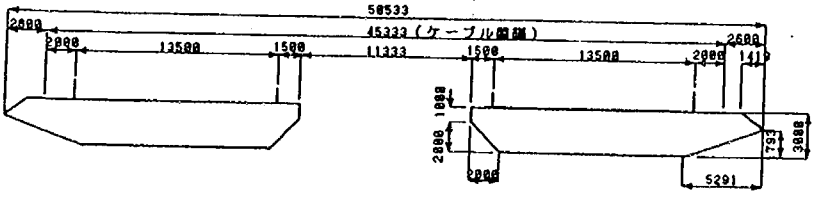
PR－2－7F4H3



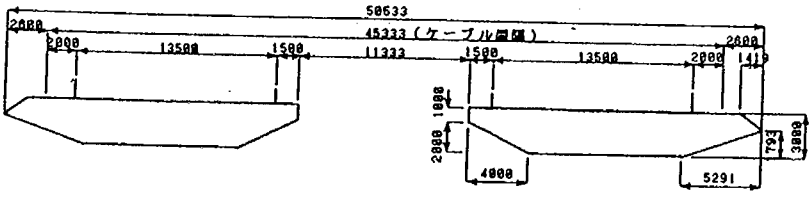
PR－2－7F5H3



PR－2－7F6H3



PR－2－7F7H3



PR－2－7F8H3

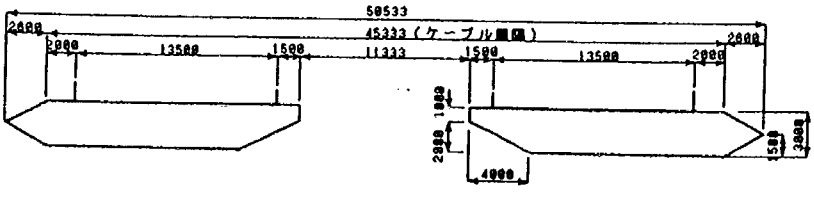
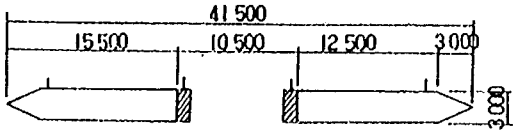
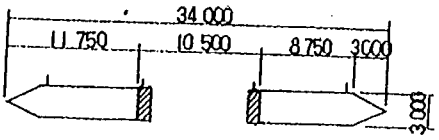


図3.3.6.5　試験実施断面②

(4) 車線数の影響に関する検討(H8～H9)

これまでは車線数として６車線を考えていたが、将来想定される超長大橋の車線数は未確定であるため、車線数による耐風性の違いについての検討を実施した。風洞試験を実施した基本となる断面および実橋諸元は、表3.3.6.4に示すとおりである。

表3.3.6.4　風洞試験実施断面（縮尺1/130）

		６車線断面	４車線断面
断面形状			
重　　量		２９．３２　tf/m	２３．８４　tf/m
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		５９４　tf･m･s²/m	３０６　tf･m･s²/m
振動数	たわみ	０．０７４　Hz	０．０７４　Hz
	ねじれ	０．１３０　Hz	０．１４０　Hz

耐風性の良い代表的な断面の試験結果は、表3.3.6.5に示すとおりであり、他の試験との比較を容易に行うため形状補正係数で整理してある。耐風対策のない基本断面では４車線の場合の方が６車線の場合より低い耐風性となっている。しかし、センターバリアとガイドベーンの設置により耐風性は向上し、４車線の場合の形状補正係数は1.96以上と基礎的な検討で良好であった試験結果とほぼ同等の十分な耐風性を有しているものと考えられる。

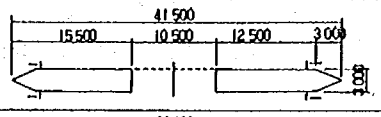
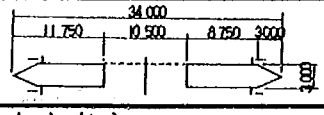
表3.3.6.5　車線数による耐風性の違い（迎角０°）

	６車線断面	４車線断面
基本断面	κ＝1.49　(1.00)	κ＝1.35　(0.91)
上記＋センターバリア	κ＝1.64　(1.10)	実施せず
上記＋ガイドベーン	κ＝1.68　(1.13)	κ＝1.96↑　(1.32↑)

（　　）書きは６車線断面（基本断面）とのκの比を表す。↑はその値以上を表す

さらに、車線内側の高欄（表3.3.6.4の斜線部）を撤去して開口幅を広げ、そこにグレーチングを施すことにより追い越し車線としてさらに１車線利用可能な構造とした場合の検討を行った。試験結果は表3.3.6.6に示すとおりであり、、負の迎角の場合に耐風性の低下が見られるものの、６車線、４車線の両方断面とも十分な耐風性を有している。

表3.3.6.6　迎角の影響

	断面形状	α＝－３°	α＝０°	α＝－３°
６車線断面		κ=2.07	κ=2.59↑	κ＝2.59↑
４車線断面		κ=1.44	κ=1.97↑	κ=1.97↑

↑はその値以上を表す

負の迎角に対してアンダーバリアは効果的であることがわかっているので、４車線の断面に対して桁の下フランジ面に路面の高欄と同じもの（アンダーバリア）を設置してその効果の確認を行った。試験は、今後の中央支間長が増大に伴うねじれ振動数の減少を考慮して桁高を4mとした場合の縮尺1/85の模型（図3.3.6.6）を使用して実施した。結果は表3.3.6.7に示すとおりであり、元々良好な耐風性を示している断面のため、迎角０°および＋３°では試験風速内でのフラッターの発生は認められていない。迎角－３°の場合にはアンダーバリアを設置しなければ試験風速内でフラッターが発生して形状補正係数は2.10となっているが、アンダーバリアの設置により試験風速内でのフラッター発生が抑制されており、耐風性向上の効果が認められた。

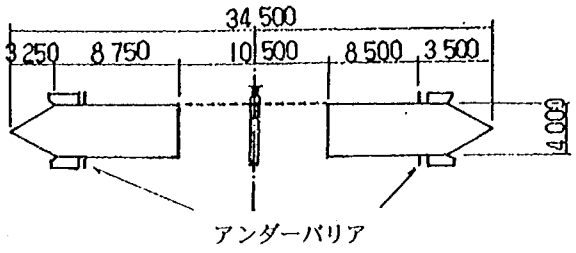


図3.3.6.6　試験断面

表3.3.6.7　アンダーバリアの効果

ｱﾝﾀﾞｰﾊﾞﾘｱ	－３	０	＋３
無し	κ=2.10	κ=2.14↑	κ=2.14↑
有り	κ=2.13↑	κ=2.13↑	κ=2.14↑

↑はその値以上を表す

(5) 三分力の計測結果結果

車線数の違いおよびセンターバリア、ガイドベーンの設置により空気力がどの様に変化するかについて三分力試験を実施し調査した。

前節で用意した縮尺1/130の模型による三分力係数の計測結果は、図3.3.6.5～付図3.3.6.8に示すとおりであり、桁高が同じであれば６車線断面よりも４車線断面のほうが、抗力係数は大きく、揚力係数勾配、空力モーメント係数勾配は小さくなることがわかる。さらに、耐風性が向上するセンターバリアおよびガイドベーンを設置することにより、これらの係数は表3.3.6.8に示すとおり、抗力係数は上昇し、揚力係数勾配、空力モーメント係数勾配は減少することが確認された。

表3.3.6.8　抗力係数、揚力係数勾配、空力モーメント係数勾配（α=0°）

	Type3　（６車線断面）		Type4　（４車線断面）	
	基本断面	対策つき	基本断面	対策つき
C_D	1.117	1.689	1.248	1.748
$dC_L/d\alpha$	4.412	3.008	3.767	2.005
$dC_M/d\alpha$	0.971	0.166	0.669	0.146

(6) まとめ

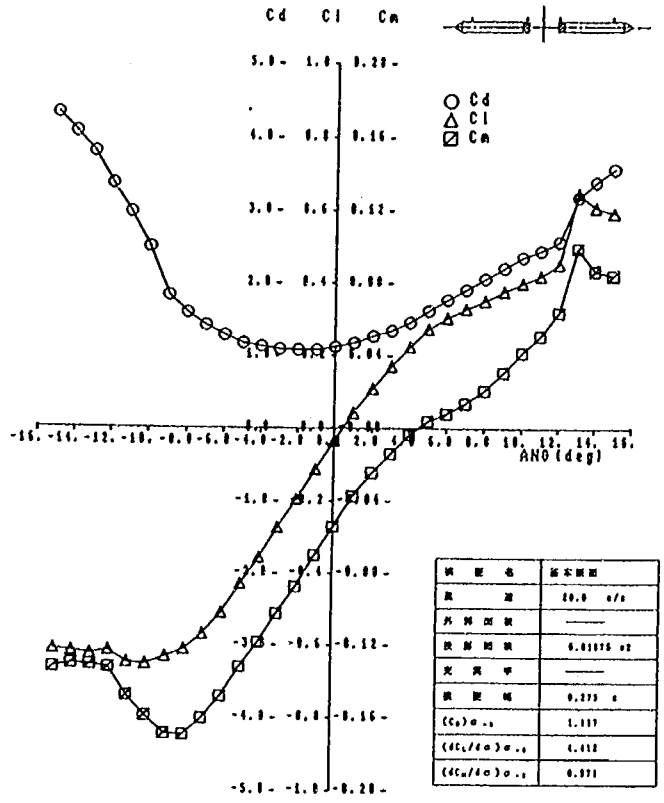
箱桁断面の中央部に開口を設け、センターバリア、ガイドベーンおよびアンダーバリアを設置することによりフラッターの発生風速が上昇し耐風性の向上に効果があることが確認された。

これまでの検討は、二次元模型によるものであるため、今後は大型風洞試験等により三次元性も考慮した検討を行い、その効果を確認する必要がある。

参考文献

1）佐藤、鳥海他：超長大橋の耐風安定性確保に関する基礎的検討、第13回風工学ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ、pp.419-424、1994、

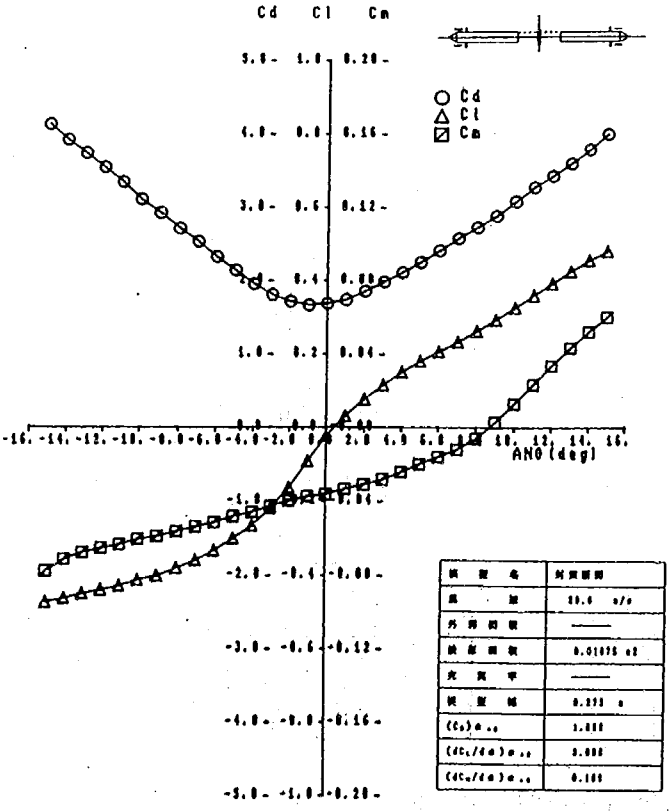
2）佐藤、荻原他：開口部付き箱桁を有する超長大橋の耐風性に関する検討、第14回風工学ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ、pp.407-412、1996



模型長さ　0.841 m
幅員　0.273 m
投影面積　0.01875 m^2
空気密度　0.1257 kg・s^2/m^4
風速　20 m／s

迎角(度)	CD	CL	CM		dCl/dα	dCm/dα
15	3.579	0.595	0.0845			
14	3.401	0.610	0.0871		-0.859	-0.146
13	3.192	0.649	0.0984		-2.235	-0.708
12	2.983	0.453	0.0638		11.259	2.040
11	2.454	0.421	0.0508		1.833	0.745
10	2.366	0.401	0.0416		1.117	0.530
9	2.215	0.378	0.0307		1.346	0.625
8	2.067	0.351	0.0207		1.518	0.573
7	1.916	0.329	0.0137		1.261	0.398
6	1.774	0.304	0.0081		1.461	0.324
5	1.620	0.273	0.0039		1.748	0.241
4	1.459	0.224	-0.0036		2.807	0.427
3	1.342	0.170	-0.0140		3.123	0.593
2	1.267	0.108	-0.0245		3.552	0.604
1	1.173	0.042	-0.0374		3.753	0.736
0	1.117	-0.035	-0.0543		4.412	0.971
-1	1.080	-0.113	-0.0700		4.469	0.900
-2	1.076	-0.195	-0.0876		4.698	1.008
-3	1.089	-0.273	-0.1025		4.440	0.851
-4	1.127	-0.356	-0.1186		4.784	0.922
-5	1.170	-0.429	-0.1322		4.154	0.782
-6	1.281	-0.511	-0.1484		4.727	0.928
-7	1.415	-0.570	-0.1605		3.352	0.693
-8	1.589	-0.613	-0.1694		2.492	0.510
-9	1.830	-0.633	-0.1688		1.146	-0.034
-10	2.497	-0.654	-0.1589		1.175	-0.570
-11	2.971	-0.649	-0.1480		-0.258	-0.622
-12	3.358	-0.616	-0.1326		-1.891	-0.885
-13	3.789	-0.626	-0.1311		0.544	-0.083
-14	4.058	-0.618	-0.1306		-0.430	-0.029
-15	4.306	-0.613	-0.1326			

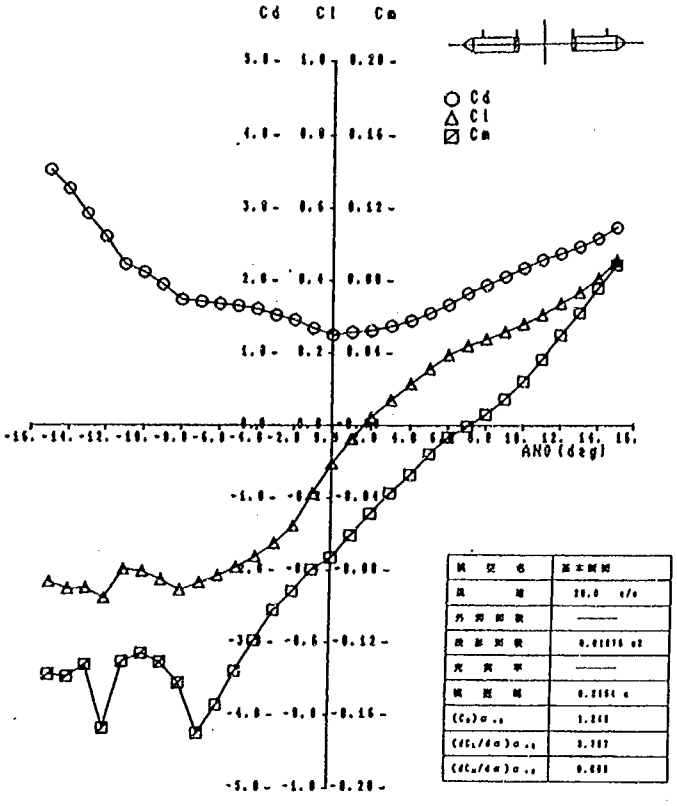
図3.3.6.7　三分力試験結果（６車線、基本断面）



模型長さ　0.841 m
幅員　0.215 m
投影面積　0.01875 m^2
空気密度　0.1256 kg・s^2/m^4
風速　10 m／s

迎角(度)	CD	CL	CM		dCl/dα	dCm/dα
15	3.669	0.414	0.0495			
14	3.539	0.392	0.0353		1.261	0.814
13	3.366	0.357	0.0244		2.005	0.625
12	3.237	0.330	0.0170		1.547	0.424
11	3.107	0.289	0.0040		1.776	0.745
10	3.021	0.264	-0.0061		2.005	0.579
9	2.779	0.233	-0.0156		1.776	0.544
8	2.633	0.207	-0.0187		1.490	0.178
7	2.503	0.176	-0.0231		1.776	0.252
6	2.331	0.143	-0.0311		1.891	0.458
5	2.227	0.114	-0.0317		1.662	0.034
4	2.089	0.088	-0.0302		1.490	-0.086
3	1.942	0.053	-0.0316		2.005	0.080
2	1.813	0.018	-0.0370		2.005	-0.309
1	1.726	-0.031	-0.0406		2.807	0.206
0	1.683	-0.062	-0.0462		1.776	0.321
-1	1.683	-0.114	-0.0430		2.979	-0.183
-2	1.726	-0.158	-0.0470		2.521	0.229
-3	1.856	-0.207	-0.0465		2.807	-0.029
-4	1.942	-0.238	-0.0462		1.776	-0.017
-5	2.089	-0.264	-0.0486		1.490	0.138
-6	2.218	-0.286	-0.0455		1.261	-0.178
-7	2.417	-0.304	-0.0475		1.031	0.115
-8	2.546	-0.321	-0.0451		0.974	-0.138
-9	2.762	-0.330	-0.0466		0.516	0.086
-10	2.918	-0.335	-0.0463		0.286	-0.017
-11	3.064	-0.343	-0.0476		0.458	0.074
-12	3.263	-0.352	-0.0474		0.516	-0.011
-13	3.410	-0.370	-0.0602		1.031	0.733
-14	3.539	-0.383	-0.0612		0.745	0.057
-15	3.712	-0.387	-0.0617			

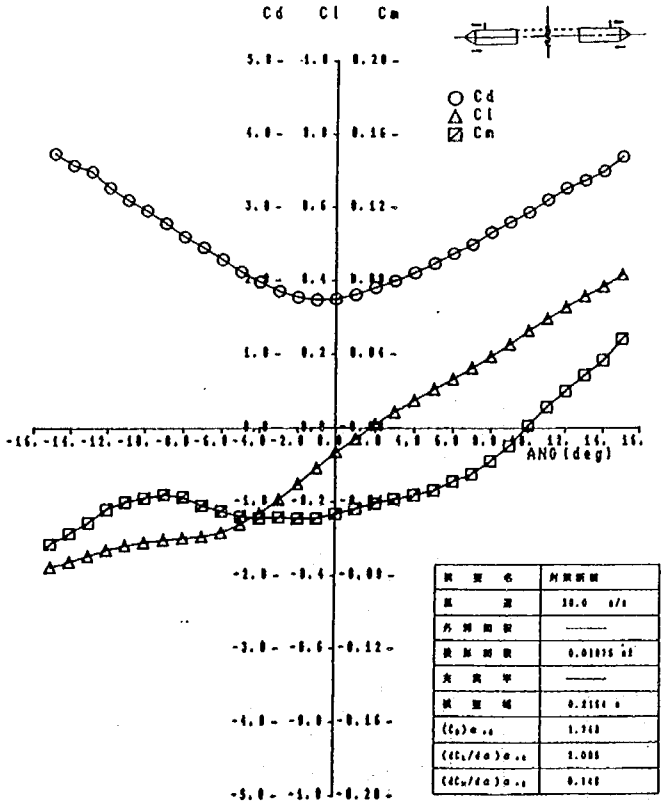
図3.3.6.8　三分力試験結果（６車線、基本断面＋ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ＋ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ）



模型長さ　0.841 m
幅員　0.273 m
投影面積　0.01875 m^2
空気密度　0.1281 kg・s^2/m^4
風速　20 m/s

迎角(度)	CD	CL	CM		dCl/dα	dCm/dα
15	2.739	0.456	0.0888			
14	2.591	0.407	0.0760		2.807	0.733
13	2.474	0.368	0.0622		2.206	0.794
12	2.379	0.337	0.0500		1.805	0.696
11	2.295	0.306	0.0366		1.748	0.771
10	2.178	0.281	0.0245		1.461	0.690
9	2.062	0.259	0.0145		1.261	0.573
8	1.945	0.239	0.0061		1.117	0.484
7	1.830	0.221	-0.0005		1.031	0.375
6	1.671	0.195	-0.0065		1.490	0.344
5	1.555	0.157	-0.0158		2.206	0.533
4	1.449	0.115	-0.0273		2.406	0.656
3	1.374	0.070	-0.0375		2.578	0.584
2	1.311	0.021	-0.0487		2.779	0.645
1	1.290	-0.038	-0.0606		3.380	0.682
0	1.248	-0.106	-0.0732		3.867	0.719
-1	1.343	-0.188	-0.0796		4.698	0.370
-2	1.459	-0.277	-0.0917		5.128	0.693
-3	1.523	-0.325	-0.1021		2.750	0.596
-4	1.607	-0.362	-0.1190		2.120	0.968
-5	1.649	-0.392	-0.1359		1.690	0.968
-6	1.682	-0.414	-0.1543		1.289	1.054
-7	1.708	-0.435	-0.1698		1.175	0.888
-8	1.734	-0.455	-0.1423		1.175	-1.578
-9	1.946	-0.426	-0.1309		-1.690	-0.653
-10	2.115	-0.402	-0.1259		-1.346	-0.284
-11	2.220	-0.397	-0.1305		-0.315	0.264
-12	2.601	-0.477	-0.1669		4.584	2.086
-13	2.918	-0.449	-0.1321		-1.604	-1.934
-14	3.256	-0.451	-0.1388		0.143	0.381
-15	3.516	-0.431	-0.1375			

図3.3.6.9　三分力試験結果（４車線、基本断面）



模型長さ　0.841 m
幅員　0.273 m
投影面積　0.01875 m^2
空気密度　0.1254 kg・s^2/m^4
風速　20 m/s

迎角(度)	CD	CL	CM		dCl/dα	dCm/dα
15	3.691	0.415	0.0481			
14	3.496	0.383	0.0366		1.833	0.659
13	3.372	0.357	0.0286		1.490	0.456
12	3.264	0.327	0.0200		1.719	0.496
11	3.107	0.296	0.0116		1.776	0.478
10	2.935	0.264	0.0014		1.862	0.584
9	2.800	0.227	-0.0095		2.091	0.622
8	2.660	0.194	-0.0177		1.891	0.473
7	2.493	0.163	-0.0249		1.776	0.410
6	2.369	0.133	-0.0288		1.748	0.223
5	2.234	0.105	-0.0337		1.604	0.281
4	2.110	0.075	-0.0361		1.690	0.138
3	1.996	0.044	-0.0384		1.805	0.135
2	1.905	0.010	-0.0409		1.919	0.140
1	1.808	-0.030	-0.0438		2.292	0.169
0	1.748	-0.065	-0.0464		2.005	0.146
-1	1.737	-0.108	-0.0488		2.435	0.138
-2	1.775	-0.151	-0.0488		2.492	0.000
-3	1.856	-0.193	-0.0482		2.406	-0.032
-4	1.980	-0.231	-0.0487		2.149	0.029
-5	2.121	-0.260	-0.0478		1.662	-0.052
-6	2.287	-0.282	-0.0448		1.261	-0.172
-7	2.449	-0.293	-0.0418		0.659	-0.175
-8	2.595	-0.297	-0.0371		0.229	-0.269
-9	2.779	-0.302	-0.0358		0.286	-0.072
-10	2.951	-0.309	-0.0378		0.401	0.115
-11	3.097	-0.317	-0.0399		0.458	0.117
-12	3.269	-0.329	-0.0437		0.688	0.221
-13	3.485	-0.345	-0.0509		0.917	0.410
-14	3.572	-0.361	-0.0567		0.888	0.332
-15	3.733	-0.375	-0.0625			

図3.3.6.10　三分力試験結果（４車線、基本断面＋ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ＋ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ）

３．３．７　追い越し車線をグレーチングとした４車線二箱桁の耐風性検討

（１）概要

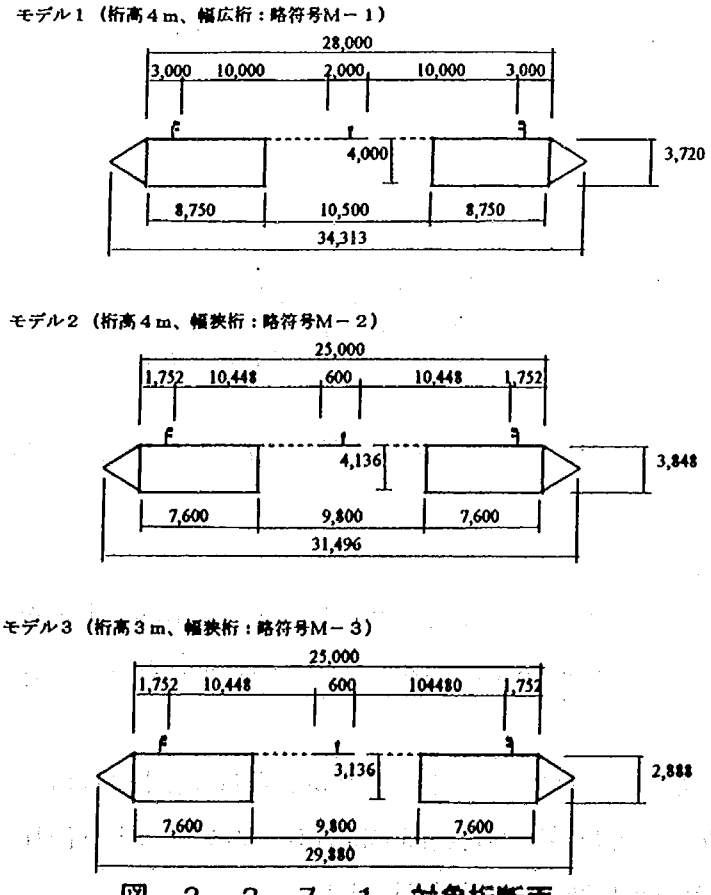
４車線を対象として空力的に有利である桁形状の１案として、桁中央部の追い越し車線部をグレーチングとした桁形状の空力特性を調査した。二箱桁間のスリット部分に車線を載せない形式とすると、桁の全体幅が広がり工費的に不利になることが考えられるため、スリット部にグレーチングを設置し、追い越し車線とする形式を調査した。

その結果、耐風対策部材を設置しない基本形状ではフェアリング形状により耐風特性が大きく変化することが判った。また、スリット部の中央に鉛直スタビライザーを設置し、桁端に導流板を組み合わせて設置することにより空力特性が向上する。

導流板は、充腹版と比較して充実率５０％程度の有孔板としても耐風特性の悪化はあまり見られなかった。また、この有孔版を鉛直に立て遮風壁としたケースでも、大幅な耐風特性悪化は認められず、路面上の風速低減は期待できる。これらより、常時は有孔版を立て遮風壁とし、強風時はこれを寝かせることにより導流板とする案が考えられる。

（２）対象桁形状

本節においては、複数の桁断面により試験した結果をとりまとめて説明する。試験に用いた桁断面（３断面）を図－3.3.7.1 に示す。各項目において用いた桁断面は、図中の略符号で記載する。

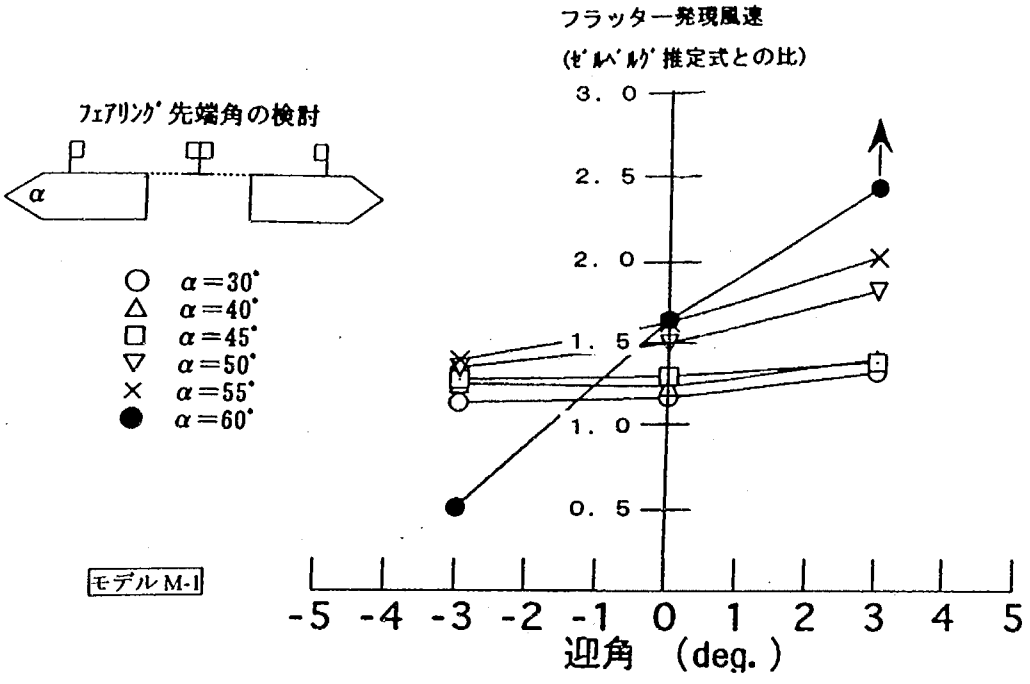


図－３．３．７．１　対象桁断面

（3）基本特性

基本特性として、耐風対策部材を設置しない状態での風洞試験結果を図－ 3.3.7.2 に示す。パラメーターとして、フェアリング先端の角度を変化させた。また、図中の縦軸はｾﾞﾙﾍﾞﾙｸﾞの推定式によるフラッター風速と実験結果として得られたフラッター風速の比を示す（本節では、試験条件の差違を補正するため、全てこの表示を用いることとする）。なお、ｾﾞﾙﾍﾞﾙｸﾞの推定値を計算するにあたり、桁幅はフェアリング先端角６０° のケースで、ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端から先端までの全幅を用いた。

実験結果より、耐風対策部材を設置しないケースでは、フラッター発現風速がﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角により大きく変化する。先端角を３０° から鈍くしてゆくに伴い、フラッター発現風速は全体的に上昇する。そして、先端角６０° において急激に変化し、負迎角ではフラッター特性が悪化するものの、正迎角側ではフラッター特性が大幅に向上した。

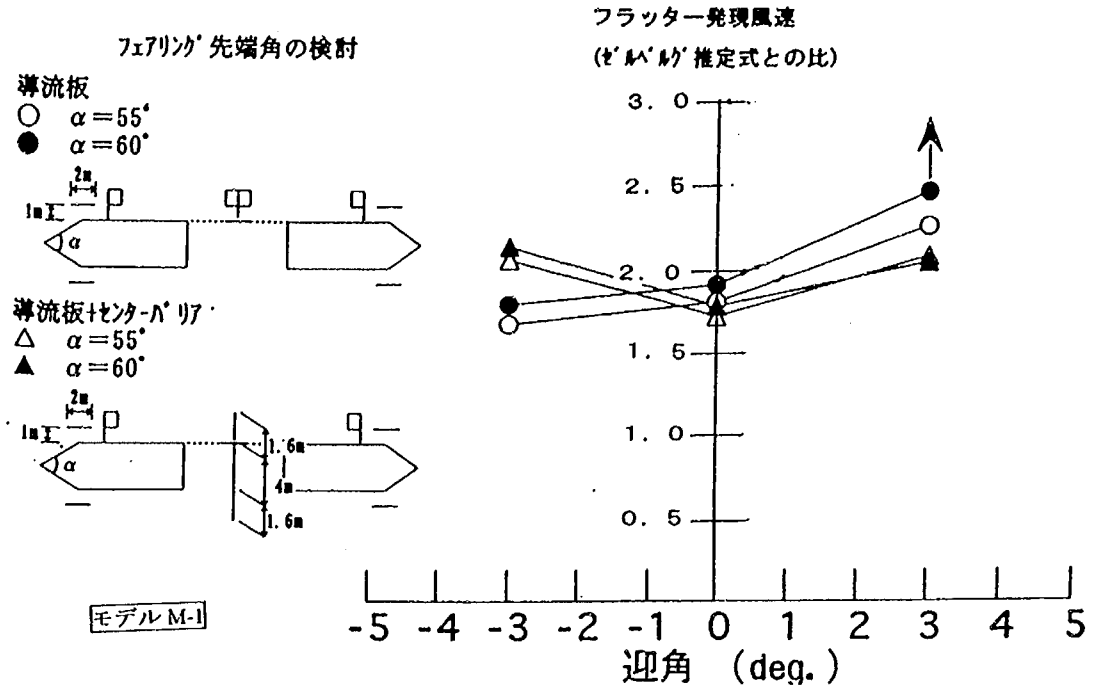


図－３．３．７．２　基本特性（ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角の影響）

（4）耐風対策部材の効果

耐風対策部材として、スリット中央部に鉛直スタビライザー、桁端に導流板を設置した場合のフラッター特性を図－ 3.3.7.3 に示す。ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角は図－ 3.3.7.2 の結果を参考に、５５° と６０° の２ケースとした。

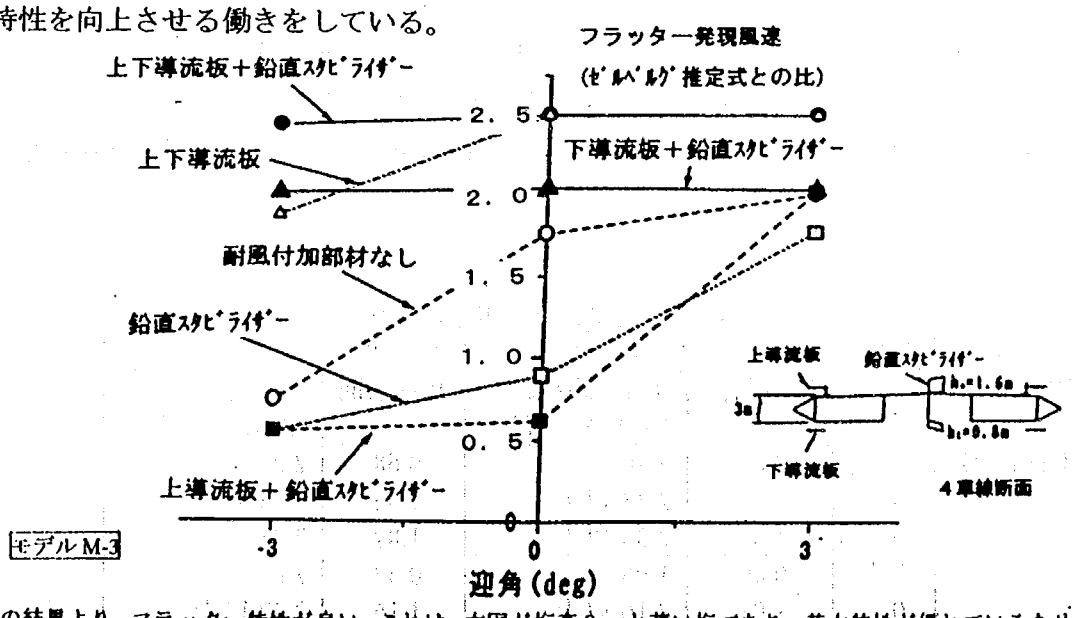
その結果、ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角５５° のケースでは、全体的に耐風安定性が向上していることが判る。また、ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角６０° のケースでは試験迎角範囲では５５° のケースより優れた特性を示した。特に、基本特性では耐風特性の悪かった負迎角での向上が著しい。



図－3.3.7.3　導流板、鉛直スタビライザーの効果

各耐風付加部材の効果を調査する目的で、部分的に耐風付加部材を設置したケースの試験結果を図－3.3.7.4 に示す。①鉛直スタビライザーのみのケースでは、基本特性より悪化が見られる。一方、②上下導流板のみを設置したケースでは基本特性に比べて耐風特性の向上が見られ、③上下導流板＋鉛直スタビライザーを追加するとさらに耐風特性が良くなる。

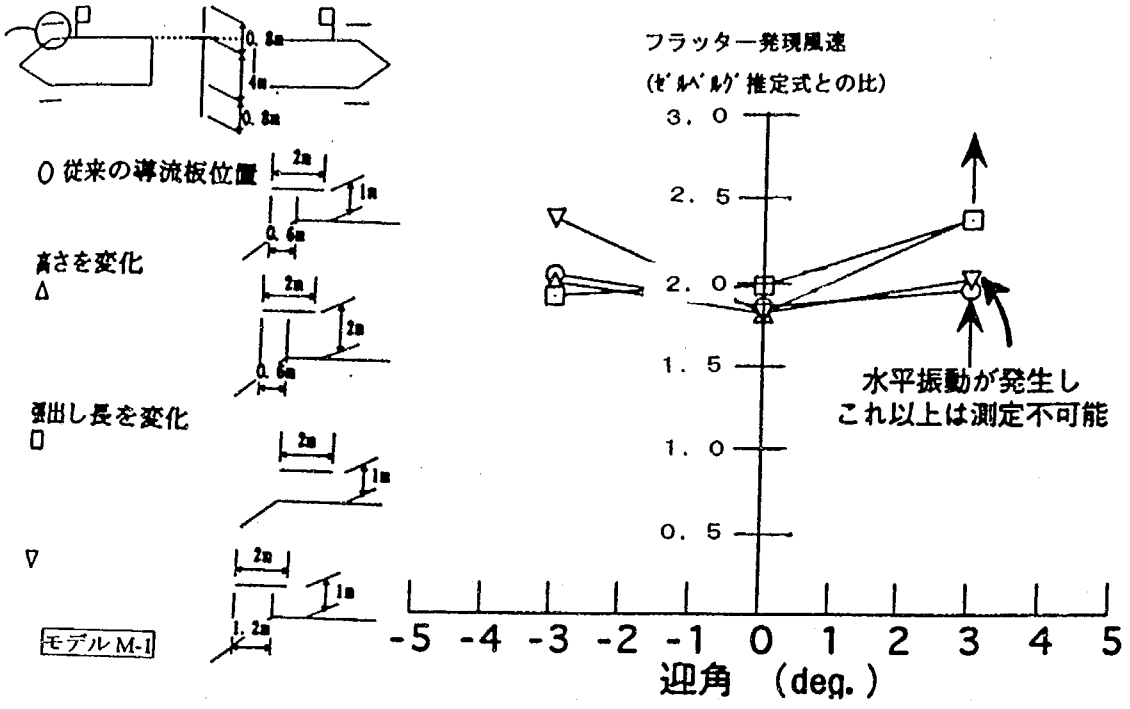
③のケースから、下導流板を除いた。④上導流板＋鉛直スタビライザーの耐風特性は基本特性より劣る。一方、③のケースから、上導流板を除いた。⑤下導流板＋鉛直スタビライザーの耐風特性は比較的良好であることから、下導流板の効果が大きいものと考えられる。しかし、面白いことに、⑤下導流板＋鉛直スタビライザーのケースに上導流板を追加する③のケースになり耐風特性は向上する。この場合は、上導流板が耐風特性を向上させる働きをしている。



注：図－３の結果より、フラッター特性が良い。これは、本図が桁高３ｍと薄い桁であり、基本特性が優れているためと考えられる。

図－3.3.7.4　各耐風付加部材の効果

上下の導流板の効果が大きいことが明らかとなったため、その位置の影響を調査した。パラメーターとしては、導流板の張り出し長さ、および、導流板高さとした。試験結果を図－ 3.3.7.5 に示す。試験ケースの範囲では導流板の位置の影響は大きくなく、迎角０°ではどのケースでも、ほぼ同等のフラッター特性を示した。また、迎角の影響も極端ではなく、一様に正または負の迎角を有する方が迎角０°のケースより耐風特性が良好である。



図－3.3.7.5　導流板位置の影響

（5）桁高の影響

中央径間長を統一した条件で、桁高を３m・４mに変化させた場合の影響を調査した。調査方法として、概略計算した構造系をもとにしてゼルベルグの推定式でフラッター風速を計算し、二箱桁とすることによる耐風性向上効果（補正率）を風洞試験結果で評価し、この補正率を乗ずることにより両桁高の耐風特性とした。結果を表－ 3.3.7.1 に示す。

表－３．３．７．１　桁高の影響

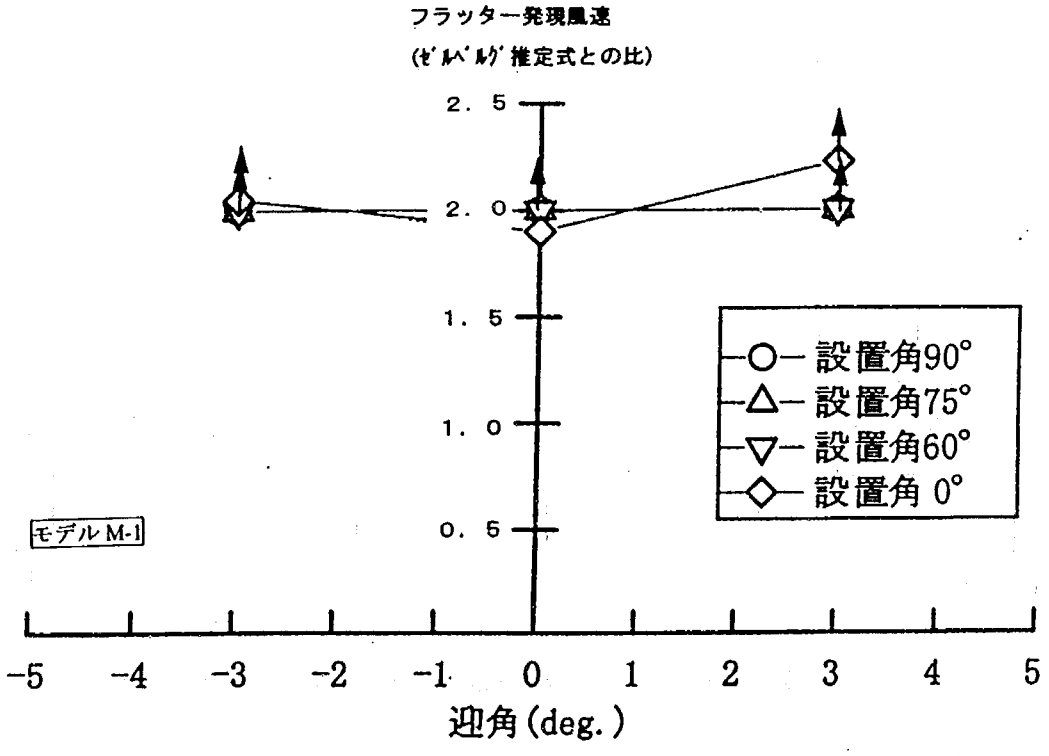
桁高	①ゼルベルグ推定値	迎角	②二箱桁による効果		①×②	
			基本断面	上下導流板＋鉛直スタビライザー	基本断面	上下導流板＋鉛直スタビライザー
３m	1.00(基準値)	-3 °	0.68	2.26	0.68	2.26
		0 °	1.64	2.33 以上	1.64	2.33 以上
		+3 °	1.87	2.33 以上	1.87	2.33 以上
４m	1.07	-3 °	0.49	1.95	0.52	2.09
		0 °	1.08	2.16 以上	1.16	2.32 以上
		+3 °	1.83	2.16 以上	1.96	2.31 以上

桁高が高い方がねじれ剛性が高いことを反映してｾﾞﾙﾍﾞﾙｸﾞの推定値は高くなっているが、二箱桁にする効果の補正係数が桁高が低い方が高く、結果として両者の積は桁高が低い方が全体としては良好な耐風特性を示している。鋼重面でも桁高が低い方が有利であり、本検討範囲では桁高が低い方が有利と考えられる。

（6）遮風壁の影響

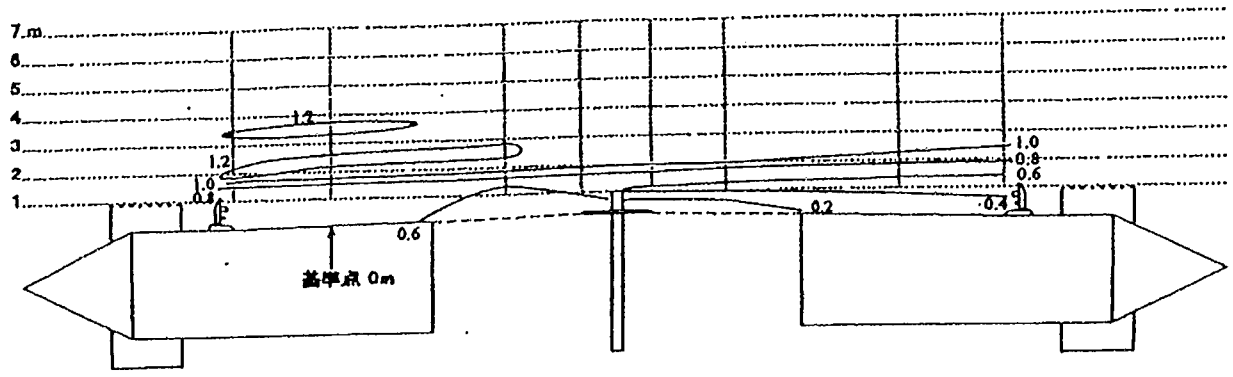
壁高さ２ｍの遮風壁を設置した場合のフラッター特性を調査した。この遮風壁と上導流板は設置位置が競合するため、本試験では上導流板は設置していない。遮風壁の充実率は５０％とした。また、路面から１ｍの範囲は高欄があり、遮風効果が期待できると考え、遮風壁は路面から１ｍ高さの位置から上に設置した。遮風壁を傾けた場合には、遮風壁のサイズは変更していないため、遮風壁最上端が９０°に立てた場合より低くなっている。また、設置角０°は導流板と同じ位置に設置したことになる。

試験結果を図－ 3.3.7.6 に示す。遮風壁を設置すると桁周囲の風のフローパターンは変化していると考えられるが、遮風壁角度によってフラッター特性は変化しない。設置角０°の場合と比較しても耐風特性の極度の悪化が見られないことから、遮風壁の影響による耐風特性の悪化は大きくないと考えられる。

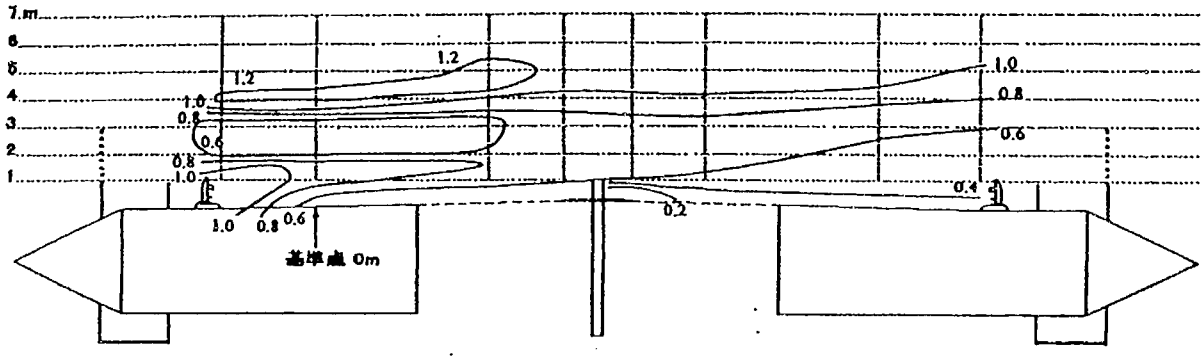


図－３．３．７．６　遮風壁の影響

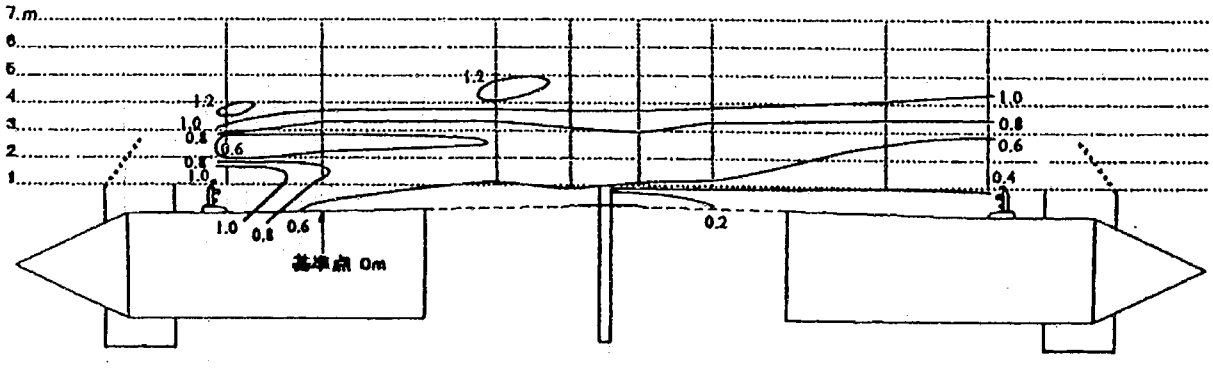
一方、遮風壁設置による路面の風速分布の変化を図-- 3.3.7.7 に示す。路面から１～３ｍの範囲で風速の低減が読みとれ、遮風壁の効果が期待できる事が判る。



路面風速分布（導流板：充実率５０%）



路面風速分布（遮風壁：充実率５０%、設置角度９０°）



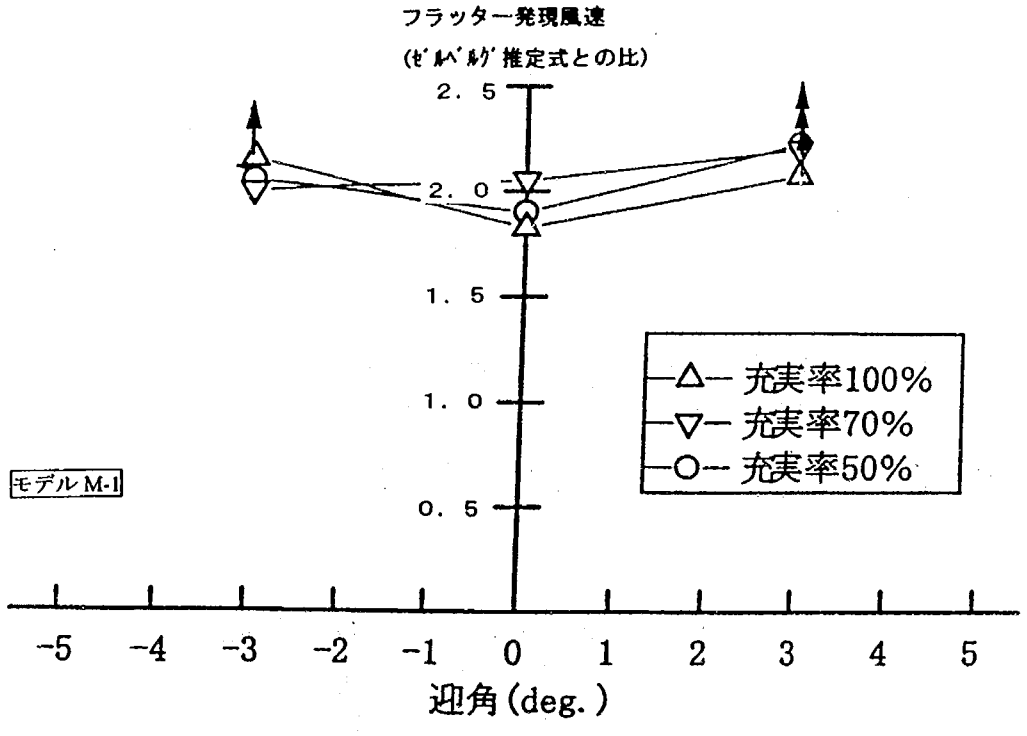
路面風速分布（遮風壁：充実率５０%、設置角度６０°）

モデルM-1

図－３．３．７．７　遮風壁の効果（風速低減）

（7）有孔導流板の効果

遮風壁の検討において、遮風壁による耐風性悪化の程度は少ないことが判明した。そこで、遮風壁として設置している有孔版を導流板位置に設置した場合の耐風特性を調査した。試験結果を図－ 3.3.7.8 に示す。導流板の充実率を変化させてもフラッター特性に大きな変化は見られない。充実率１００%は充腹の導流板を意味する。このことから、常時は有孔版を立てることにより遮風壁として利用し、強風時にはこれを水平に移動し、導流板として利用することが考えられる。遮風壁として立てたままでもフラッター特性の悪化は認められないが、風荷重を考えると強風時には水平に移動する方が有利となる。



図－３．３．７．８　有孔導流板の効果

（8）耐風安定性の推定

中央径間 2,500m の吊橋を想定し、上述の桁高４ｍのモデルを作成し、固有振動数を計算した。計算条件、および、計算結果を表－ 3.3.7.2 に示す。

この結果を用いゼルベルグのフラッター発生風速推定値を計算し、さらに、上述の風洞試験結果より二箱桁断面を用いた場合のフラッター発現風速を推定した。推定結果を表－ 3.3.7.3 に示す。

表－３．３．７．２　固有振動数計算モデル・計算結果

項目				諸元
スパン割り				1,250+2,500+1,250 m
サグ比				1/9
桁	形式			二箱桁
	桁高			４ｍ
	桁幅（ケーブル間隔）			３４．３１３ｍ（２８ｍ）
	断面定数	断面積		１．０３m^2
		断面２次ﾓｰﾒﾝﾄ	鉛直	２．６４m^4
			水平	１４．０８m^4
		ねじり定数		５．３０m^4
	質量	単位長さ当たり質量		１７．３２ t/m
		単位長さ当たり極慣性		1,６９９t・m^2/m
ｹｰﾌﾞﾙ	断面積			0.40m^2/cable
	単位長さ当たり質量			3.48t/m/cable
固有振動数	鉛直たわみ対称１次			0.0540 Hz
	ねじれ対称１次			0.1375 Hz

表－３．３．７．３　フラッター発現風速推定値

解析条件	迎角		
	－３°	０°	＋３°
ゼルベルグ式	36 m/s		
鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ＋導流板（充実率 100%）	78m/s 以上	66 m/s	75m/s 以上
鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ＋導流板（充実率 70%）	72 m/s	75 m/s	78m/s 以上
鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ＋導流板（充実率 50%）	75 m/s	69 m/s	81m/s 以上

(9) まとめ

4車線の二箱桁（追い越し車線をグレーチング化）は、導流板・鉛直スタビライザーの設置により空力特性が向上し、ゼルベルグのフラッター発現風速推定値と比較（形状係数）して、2倍以上の優れた特性を示すことが風洞試験で確認された。

この桁を用いた中央径間2,500mの吊橋モデルに対して、ゼルベルグ式、および、風洞試験より求めた形状係数から、そのフラッター発現風速を推定した。その結果、70m/s前後のフラッター風速が推定され、目標風速である80m/sには至らないものの、比較的良好な耐風特性と考えられる。二箱桁の空力特性は、風抜き幅を増すことにより向上する特性があるため、スパンなどの条件により最適な桁形状を選定することが可能と考えられる。

また、遮風壁を設置したケースでも極端な耐風特性の悪化が認められなかった事から、遮風壁を設置できる可能性があると考えられる。ただし、風荷重の増大は大きいことが考えられるため、強風時には倒すなどの工夫が必要である。

なお、これらの検討はバネ支持風洞試験、ゼルベルグ式を基本としている。今後、フラッター解析などによる詳細な検討が必要である。

3．4　新形式橋梁における超長大橋の耐風安定性に関する研究

3．4．1　概要

本項では，3．2の一箱桁形式，3．3の二箱桁形式以外の形式，及びそれらを組合わせた形式を検討対象とし，平成9年度は既往の検討に引き続き下記5つの項目に関して検討が進められた。

(1)　重力剛性桁の耐風性検討

(2)　二箱桁／一箱桁併用橋の耐風性に関する研究

(3)　開口方法の差異に着目した耐風性検討

(4)　楕円断面と多角形断面の空力特性予備検討

(5)　遮風壁箱桁断面の耐風性検討

まず，下表に上記の各項目で得られた成果をまとめて示し，次項以降にその概要を述べる。

表－3.4.1.1　各形式で得られた成果の概要

改善対象	形式	車線数	フラッター限界風速（実橋換算値）		備考
			改良前	改良後	
桁断面形状（フラッター限界風速は迎角0°におけるばね支持応答試験結果）	(2)二箱桁断面	6	形状補正係数：κ=1.17	形状補正係数：κ=1.43	二箱桁／一箱桁併用吊橋に用いることを想定して二箱桁の断面形状を改良（設置対策：導流板，検査車レール，下部鉛直プレート）
	(3)開口部を設けた断面	6	49.8 m/s	81.4 m/s	一箱桁断面の中央部に開口を設け，グレーチング（充実率：50%）を設置　（迎角+3°でフラッター限界風速が著しく低下するが，フェアリング形状の変更によって，限界風速は30%程度上昇可能）
	(4)楕円・多角形断面	6	-	-	形状補正係数κで評価，Re数の影響顕著 κ=1を上回る断面ではないが，抗力小
	(4)ひし形断面	6	-	-	κ=1を上回る断面ではないが，迎角によるフラッター特性の変化が少なく，抗力も小
	(4)開孔六角形断面	6	-	-	空力対策部材なしでは，κ=0.72程度であるが，桁上面外側バリアの設置によってフラッター限界風速が60%程度上昇
	(5)遮風壁箱桁断面	6	51.5 m/s	60.6 m/s	フェアリング形状の見直し
				64.3 m/s	上記＋中央遮風壁（高さ：3m，充実率66%）を設置
構造形式（フラッター限界風速は傾斜角0°におけるフラッター解析結果）	(1)重力剛性桁	6	72 m/s	75 m/s	ケーブル許容応力の変更（82→100kgf/mm²）がフラッター限界風速に及ぼす影響を調査
		4	81 m/s	85 m/s	
	(2)二箱桁／一箱桁併用吊橋	6	67 m/s	約90 m/s	二箱桁断面の改良による影響を調査 但し，改良前：静的変形無視 改良後：静的変形考慮
		4	-	約90 m/s	4車線案への変更によるフラッター特性への影響を調査
	(2)二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋	6	-	≧85 m/s	静的回転変形特性の改善対策として検討

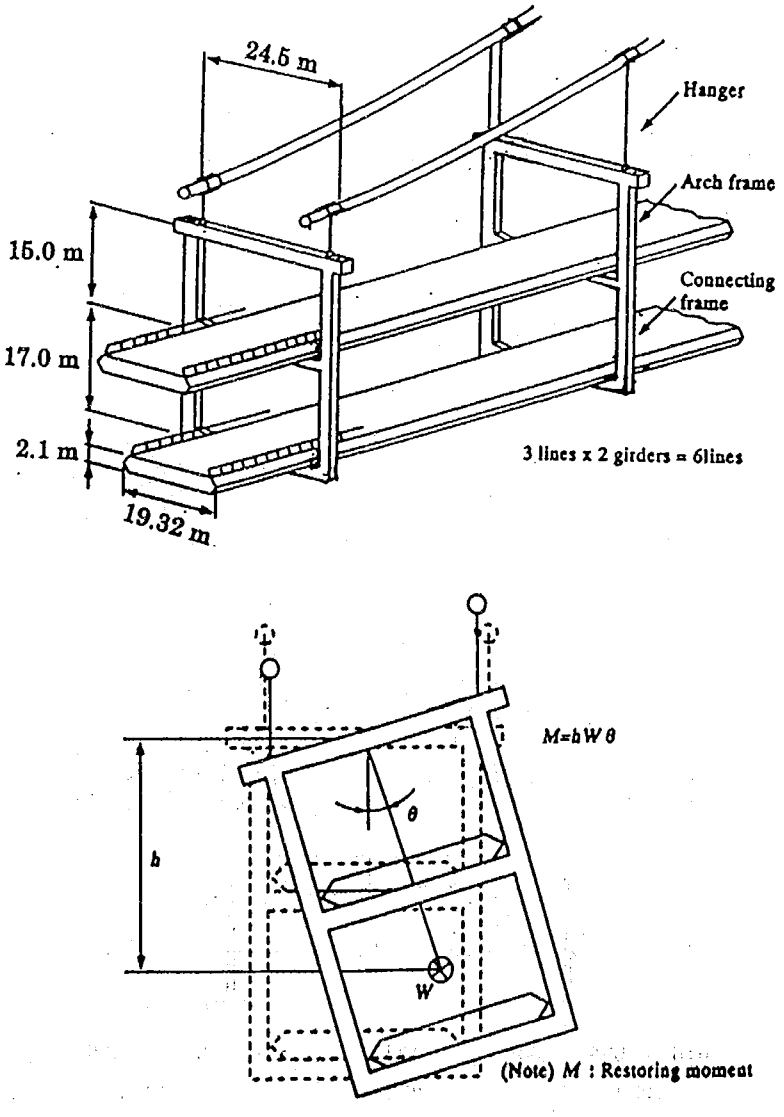
♯：形式名の括弧付きの番号は上記の項目別の番号に対応

(1) 重力剛性桁の耐風性検討

重力剛性桁とは，桁のケーブル定着点とその重心位置との間の距離を大きくすることによって，重力による復元力を利用し，ねじれ剛性を高める目的で考案された新形式吊橋である。

従来はケーブルの許容応力を 82kgf/mm² として検討が行われてきたが，今年度は昨今のケーブル設計基準を勘案し，許容応力を 100kgf/mm² とした場合（ケーブル重量が減少した場合）の耐フラッター性について検討が行われた。

その結果，本橋の場合にはケーブル重量の減少はねじれ振動数や振動数比の上昇に寄与し，極慣性モーメントの減少に伴うフラッター限界風速低下要因をカバーして結果的にフラッター限界風速を向上させることが明らかとなった。



図－3.4.1.1　重力剛性桁概念図

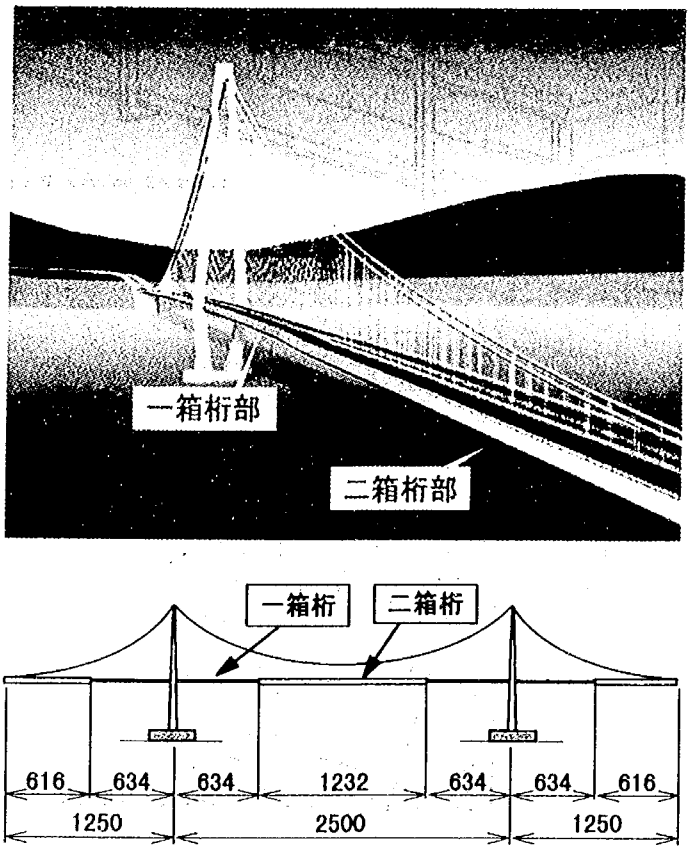
(2) 二箱桁／一箱桁併用橋の耐風性に関する研究

既往の検討においては，新形式の吊橋として提案した二箱桁断面と一箱桁断面の補剛桁を併用した二箱桁／一箱桁併用吊橋の基本的な耐風性について検討を行い，その結果，従来の一箱桁のみを用いた吊橋に比べて 30%以上のフラッター限界風速の上昇が期待できることが確認された。 一方で，本形式においては，設計風速として設定されている風速 80m/s において-10 度以上の静的な回転変形が生じることが明らかとなり，さらなるフラッター限界風速の向上も含めた実用化のための問題点が明らかとなった。

このため，引き続いて，上記の問題点に対して，本文 3.3.2 項で紹介した静的空力モーメント特性及び耐フラッター特性に優れた改良二箱桁断面を本形式の橋梁に適用した場合について検討し，その結果，静的回転変形は大幅に低減され，耐フラッター特性も大幅に改善されることが明らかとなった。

さらに，今年度は，静的回転変形の問題を構造的に改善する一つの試みとして，本形式を二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋とした場合についても検討した。 その結果，構造的に問題となるような静的回転変形は発生せず，耐フラッター特性についても上記同様優れた特性を有することが確認された。

また，従来 6 車線橋梁として検討を進めてきた本橋梁形式に対して，建設コスト縮減のための車線数の縮小という方向性についても考慮し，4 車線橋梁案に二箱桁／一箱桁併用吊橋を適用した場合の検討を行った。 その結果，6 車線案の場合同様，構造的に問題となるような静的回転変形は発生せず，耐フラッター特性についても優れた特性を有することが確認された。



図－3.4.1.2 一箱桁／二箱桁併用吊橋 概念図

(3) 開口方法の差異に着目した耐風性検討

昨年度は，1 箱桁断面を対象として開口方法の差異（開口部充実率，開口形状）による耐風性検討として，ばね支持実験の結果を主にまとめた。 実験の結果，迎角が+3 度の場合，開口方法による改善効果は得られなかったが，迎角が-3° ，0° の場合には充実率 50%の中央開口により渦励振・フラッターの両者に対し改善効果が得られることがわかった。

今年度は，昨年度の実験において迎角-3° ，0° において良好な結果の得られたケース（充実率 50%の中央開口）を対象に，迎角+3° において，そのフェアリング形状を変化させた場合のばね支持試験結果を報告する。

また，昨年度ばね支持試験を行った各ケースの 3 分力試験結果も報告する。

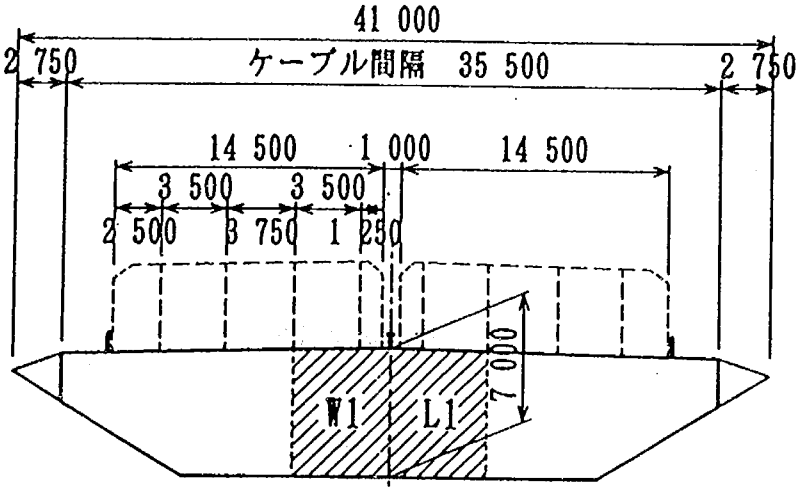


図-3.4.1.3 開口部を有する一箱桁断面概要図

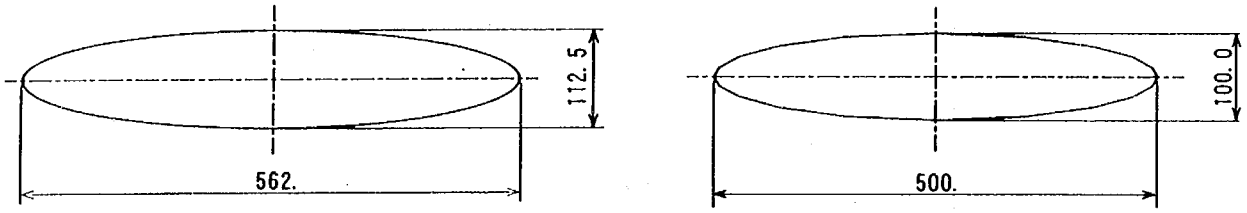
(4) 楕円断面と多角形断面の空力特性予備検討

まず，昨年度から継続して検討を行っている「楕円断面」及びその類似形状である「多角形（20 角形）断面」について，三分力試験及び非定常空気力試験を実施し，基本的な空力特性の把握を試みた。

その結果，本断面に関しては，Selberg 式から求まる形状補正係数 $\kappa=1$ を大きく上回るような耐風性に優れた断面を見出すことは困難であったものの，抗力係数 C_D が非常に小さく，風荷重に対しては有利であることが明らかとなった。　一方で，三分力試験ではその特性に対する風速依存性が顕著であることなどが確認され，Re 数依存性に対する検討といった今後の課題も明らかとなった。

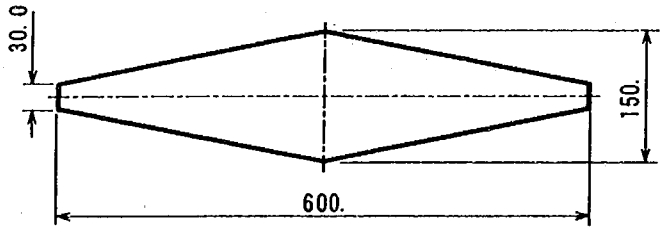
さらに，今年度は，新たに「ひし形断面」と「開孔六角形断面」についても，ばね支持試験及び三分力試験を実施し，その基本的な空力特性に関して検討を行った。

その結果，ひし形断面に関しては，上記の多角形断面同様 $\kappa=1$ を上回る特性は得られなかったものの，フラッター限界風速の迎角に対する変化が少なく，抗力係数 C_D が小さいなど耐風設計上有利な特性を有することが明らかとなった。　また，開孔六角形断面に関しては，上面外側バリアの設置によって基本断面に比べて 6 割以上のフラッター限界風速の向上が期待でき，さらに，フェアリング形状と上下面開孔幅の関係によっては，静的変形の抑制も期待できることが明らかとなった。

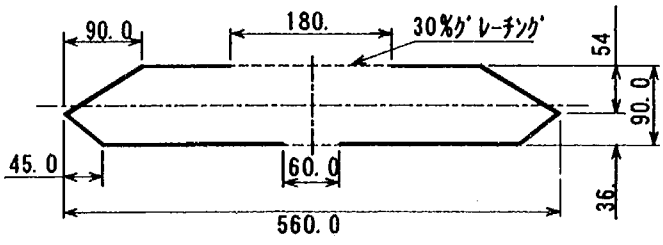


楕円断面（1:5）　　多角形断面（1:5）

楕円断面・多角形断面（20 角形）



ひし形断面



開孔六角形断面

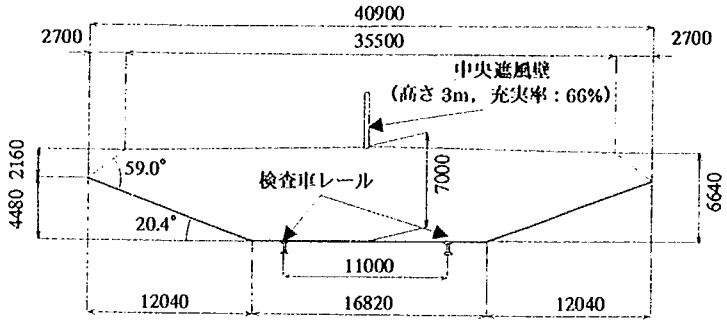
図－3.4.1.4　検討対象断面

(5) 遮風壁箱桁断面の耐風性検討

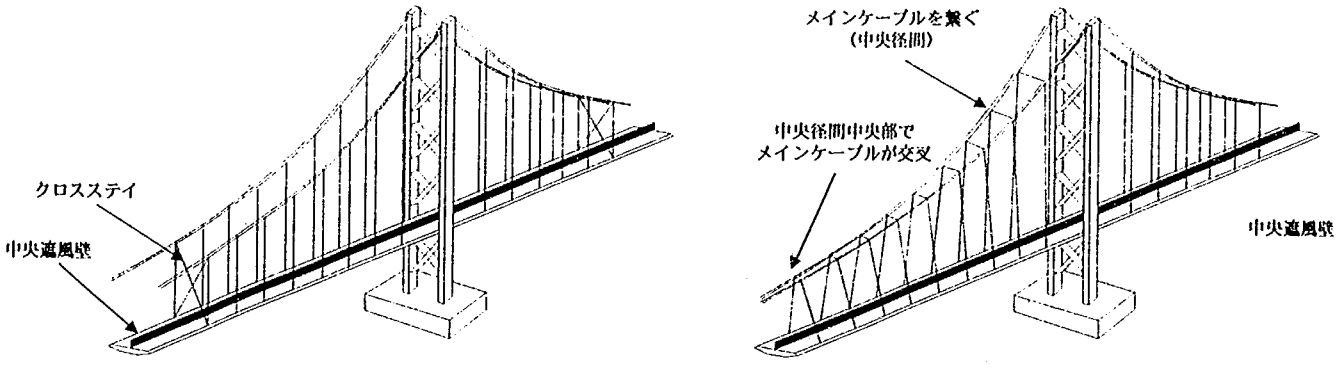
昨年度は，既提案の一箱桁断面に遮風壁を設置した場合のフラッター限界風速の変化特性について検討し，さらにフェアリング形状・桁高の見直しを行い，優れた耐フラッター性能を有する一箱桁断面を提案した。

今年度はまず，昨年度得られた一箱桁断面の大型部分模型を用いたばね支持応答試験を実施し，その優れた耐フラッター性能を確認する（本文 3.2.4 項参照）とともに，中央遮風壁を設置した場合の耐フラッター性能について検討し，さらに橋面上風速分布を測定することによって遮風壁の風速低減効果について検討を行った。 その結果，大型模型においても中央遮風壁がフラッター限界風速の向上に対して寄与することが確認された。 また，橋面上風速については，中央遮風壁の風下側のみならず風上側においても，1 車線程度には風速低減効果が期待できることが明らかとなった。

さらに，ケーブルシステムについても，クロスステイの設置や Crossing Main Cable システムについても三次元フラッター解析を用いた検討を実施し，それぞれのケーブルシステムがフラッター限界風速の向上に対して有効であることが明らかとなった。



図－3.4.1.5 中央遮風壁を設置した断面



クロスステイ設置　　Crossing Main Cable システム

図－3.4.1.6 ケーブルシステムの概念図

(6) その他の形式

近年盛んに検討されている斬新な構造形式，桁形式について簡単に紹介する。

具体的には，吊形式に特徴を有するものとして，Richardson による Twin Bridge 構想[1]，Musmesci による張力構造の応用例[2]，さらに Gimsing による Cable-Supported Bridge[3]の概念について触れ，また，桁形状に特徴を有するものとしては，最近注目を集めている All Grating 形式[4]や Pipe Truss 形式について簡単に紹介する。

<参考文献>

1) J.R. Richardson, "Influence of Aerodynamic Stability on the design of Bridges", 12th Congress of IABSE, pp. 729-736, September, 1984.

2) 長井正嗣，「吊形式橋梁の超長大化と構造形態」，海峡横断 vol. 8, pp10-12, 1997年2月

3) Niels J. Gimsing, "Large bridges of the future", Aerodynamics of large bridges, pp. 295-304, February, 1992.

4) 山岸一彦他，「長大吊橋の耐風安定性に関するグレーチングの効果とその使用実績」，海峡横断 vol. 8, pp. 13-16, 1997年2月

３．４．２　重力剛性桁の耐風性検討

（１）概　要

１）検討目的

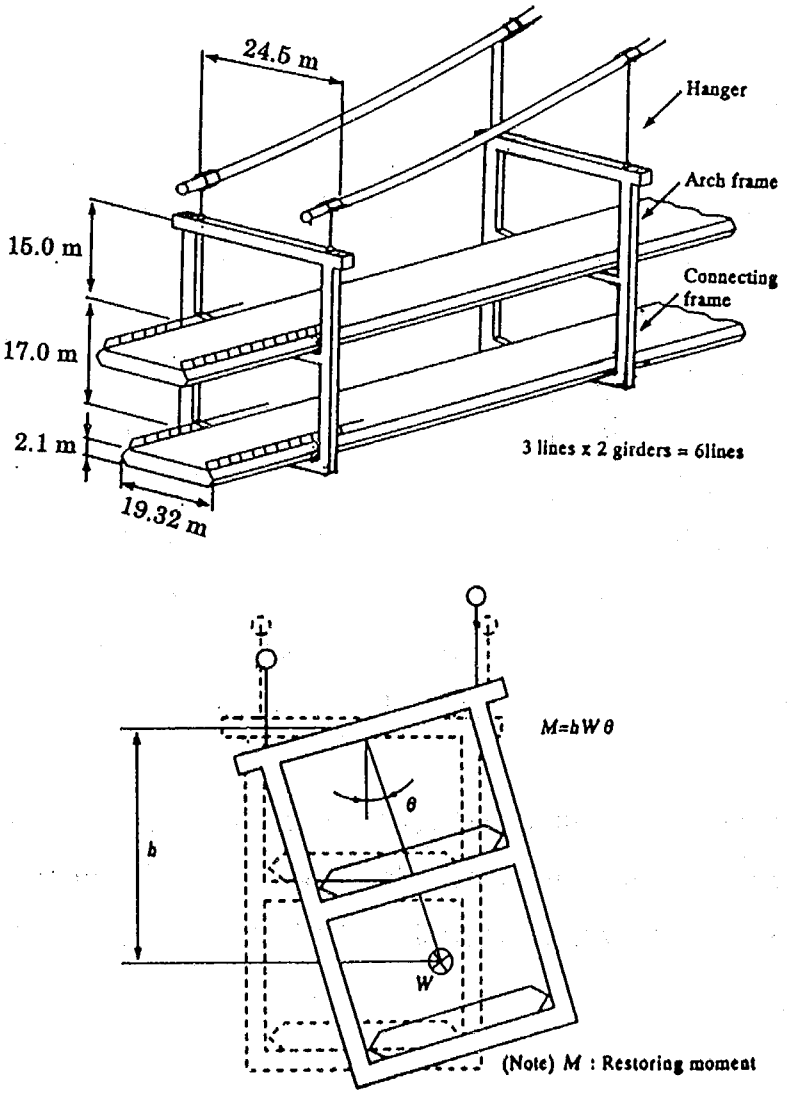
重力剛性桁のフラッター特性についてはすでに検討済である[1]。しかし、その際ケーブルの許容応力は82 kgf/mm²を採用している。ここでは、昨今のケーブル設計基準を勘案し、ケーブル許容応力を100kgf/mm²に変更した場合のフラッター特性に与える影響を解析によって調査することを目的とする。

また、超長大橋の計画において、通行車両の車線数が６車線と４車線の２案について検討されていることを考慮して、桁幅のみが変化したとき、それぞれのフラッター特性を比較検討した。

なお、ここでは上記のパラメーターがフラッター特性に与える影響度、傾向性を調べることを主としたことから概略の検討であることを記しておく。

２）検討対象橋梁

本検討で対象とした橋梁の概略図を図-3.4.2.1に示す。



図－3.4.2.1　重力剛性桁概略図

3）構造・振動諸元

検討対象橋梁の構造・振動諸元を表-3.4.2.1に示す。

表-3.4.2.1　重力剛性桁の構造・振動諸元

ケースNo.			1	2	3	4
車線数			6	6	4	4
ケーブル許容応力(kg/mm²)			82	100	82	100
支間割り(m)		ケーブル	1250-2500-1250			
		桁	1226-2480-1226			
sag比			1/10			
ｹｰﾌﾞﾙ断面積(m²)			0.8725	0.715	0.8725	0.715
ﾊﾝｶﾞｰ断面積(m²/格点)			0.08288			
桁	断面積(m2/deck)		0.684			
	ねじり定数(m⁴/deck)		0.0			
	断面二次ﾓｰﾒﾝﾄI_v(m⁴/deck)		0.378			
	断面二次ﾓｰﾒﾝﾄI_H(m⁴/deck)		10.7			
死荷重	桁(tf/m/br.)		23.08	23.08	23.08	23.08
	ｹｰﾌﾞﾙ(tf/m/br.)		17.0	13.94	17.0	13.94
	合計(tf/m)		40.08	37.02	40.08	37.02
桁極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ(tf･m²/m/deck)			354			
投影面積	桁(m²/m)		6.07			
	ケーブル(m²/m/片側)		1.177	1.07	1.177	1.07
	ﾊﾝｶﾞｰ(m²/m/格点):部材方向		2.24			
桁幅(m):解析に用いた代表幅			19.32	19.32	15.48	15.48
無風時固有振動数		ねじれ対称1次	0.1146	0.1196	0.1146	0.1196
		鉛直曲げ対称1次	0.0548	0.0535	0.0548	0.0535
振動数比			2.09	2.24	2.09	2.24

注１）ケーブル許容応力82kg/mm² → 100kg/mm²の変更にあたって、許容応力100kg/mm²のケーブル断面積・重量は、許容応力82kg/mm²の82/100倍、ケーブル径は、√(82/100)倍とした。

注２）４車線案は、桁・ケーブルの剛性、重量等は変更せず、代表幅（桁幅）のみを変更した。

（2）フラッター解析

1）解析ケース

フラッター解析のケース一覧表を表-3.4.2.2に示す。

表-3.4.2.2　検討ケース

ケースNo.	検討項目	
	車線数	ｹｰﾌﾞﾙ許容応力(kg/mm²)
1	6	82
2	6	100
3	4	82
4	4	100

2）使用空気力係数[2)]

フラッター解析に使用した三分力係数、非定常空気力係数はいずれも縮尺1/120の２次元模型による風洞試験結果を採用した。それぞれ図-3.4.2.2、図-3.4.2.3に示す。

三分力係数の定義式は次のとおり。なお、空気力作用点はupper deckの断面中心とした。

$$C_D=\frac{D_s}{1/2\,\rho V^2 An}\qquad C_L=\frac{L_s}{1/2\,\rho V^2 B}\qquad C_M=\frac{M_s}{1/2\,\rho V^2 B^2}\qquad (1)$$

ここで、

C_D, C_L, C_M ： 抗力係数、揚力係数、空力ﾓｰﾒﾝﾄ係数

D_s, L_s, M_s ： 抗力(kgf/m)，揚力(kgf/m)、空力ﾓｰﾒﾝﾄ(kgf･m/m)

ρ ： 空気密度(kgf･s²/m⁴)

v ： 風速(m/s)

An ： 投影面積(m²/m)　(2deck分)

B ： 桁幅(m)

非定常空気力係数の定義式は次のとおり。空気力作用点は上記と同様である。

$$L_D=\pi\rho B^3\ \omega^2\left\{(C_{L\eta R}+iC_{L\eta I})\frac{\eta}{B}+(C_{L\theta R}+iC_{L\theta I})\theta+(C_{LUR}+iC_{LUI})\frac{u}{B}\right\}\qquad (2)$$

$$M_D=\pi\rho B^4\ \omega^2\left\{(C_{M\eta R}+iC_{M\eta I})\frac{\eta}{B}+(C_{M\theta R}+iC_{M\theta I})\theta+(C_{MUR}+iC_{MUI})\frac{u}{B}\right\}\qquad (3)$$

$$D_D=\pi\rho B^2 An\omega^2\left\{(C_{D\eta R}+iC_{D\eta I})\frac{\eta}{B}+(C_{D\theta R}+iC_{D\theta I})\theta+(C_{DUR}+iC_{DUI})\frac{u}{B}\right\}\qquad (4)$$

ここで、

D_D, L_D, M_D ： 非定常抗力(kgf/m)，非定常揚力(kgf/m)、非定常空力ﾓｰﾒﾝﾄ(kgf･m/m)

ρ ： 空気密度(kgf･s²/m⁴)

ω ： 円振動数(1/s)

C_{LhR}～C_{DUi}： 非定常空気力係数（準定常空気力係数）

i ：$\sqrt{(-1)}$

η, θ, u ： 鉛直たわみ振動、ねじれ振動、水平たわみ振動(m, rad, m)

B ： 桁幅(m)

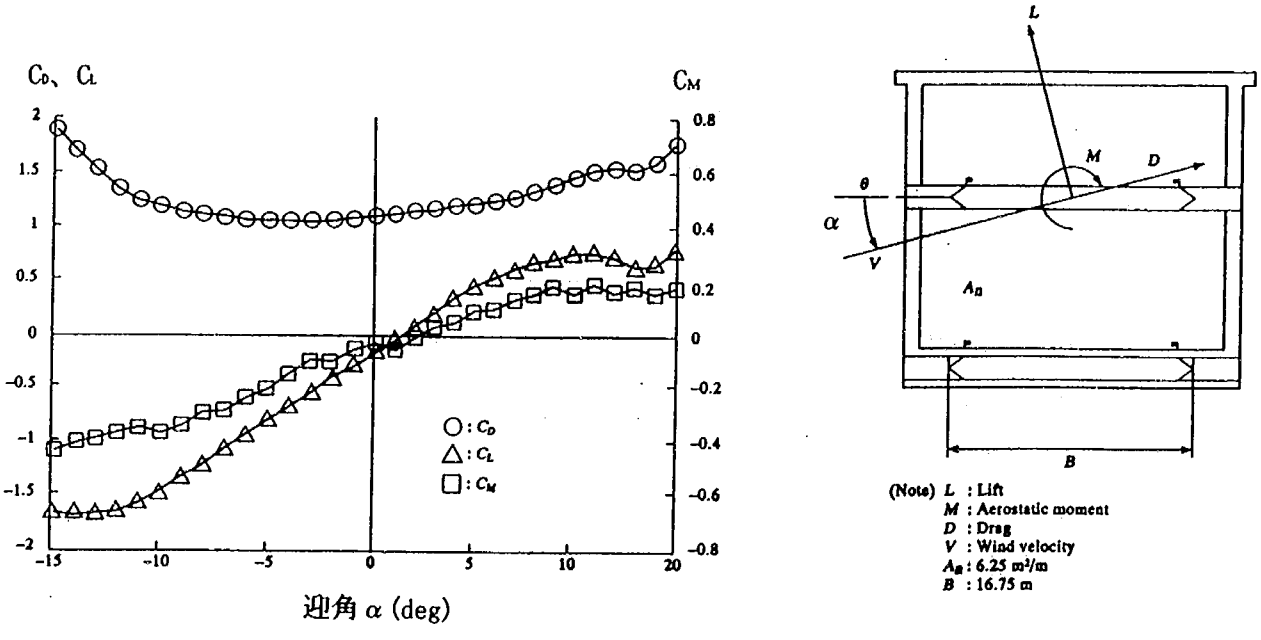


図-3.4.2.2　三分力係数

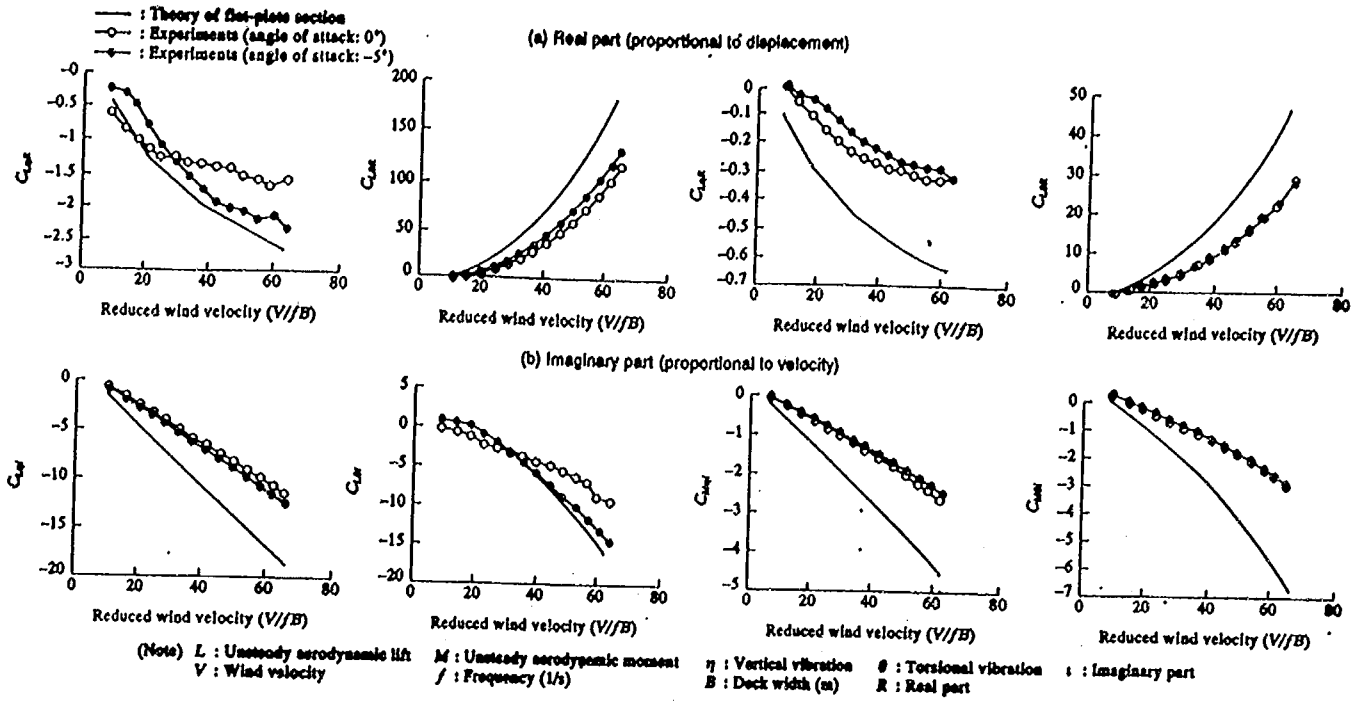


図-3.4.2.3　非定常空気力係数

3）解析条件

フラッター解析条件を表-3.4.2.3に示す。なお、表中各略記号の解析内容の詳細は、付録の「６．２　フラッター解析条件一覧表」を参照されたい。

本フラッター解析条件の主な点は以下の通りである。

①モード組み合わせ法を用いた。

②風速８０m/sの静的変形状態における低次５０モードを組み込んだ。

③本橋梁断面は抗力作用点とハンガー定着点間の距離が約２０ｍと長いことから、明石海峡大橋のフラッター解析における教訓[3]を踏まえて、ここでは鉛直たわみ振動、ねじれ振動に伴う非定常抗力を考慮した。

④４車線の解析で使用した空気力係数は便宜上６車線用であり、桁幅Ｂのみの数値を変更しただけである。

表-3.4.2.3　フラッター解析条件

ケースＮｏ.	1	2	3	4
フラッター解析条件[注1)]	IH-2	IH-3	IH-4	IH-5

注１）フラッター解析条件の各略記号は、付録「６．２　フラッター解析条件一覧表」と対応している。解析条件の詳細は、付録を参照のこと。

（3）解析結果

表-3.4.2.4に解析結果の一覧表を示す。

表-3.4.2.4　解析結果

ケースNo.	1	2	3	4
車線数	6	6	4	4
ｹｰﾌﾞﾙ許容応力(kg/mm²)	82	100	82	100
フラッター風速(m/s)	72	75	81	85

（4）考　察

1)重力剛性桁のケーブル許容応力を82kg/mm²から100kg/mm²に変更することによってケーブル重量は減少するが、フラッター風速は低下しない。ケーブル重量の減少は①ねじれ振動数や振動数比の上昇に寄与しフラッター風速を向上させる効果と、②極慣性モーメントの減少に伴うフラッター風速低下効果の両面がある。本橋の場合、前者が後者を上回り結果的にフラッター風速はやや向上する。

2)４車線案（桁幅を狭くし空気力小さくする）にすると、６車線案に比べ約10m/sのフラッター風速の向上が期待できる。

（5）まとめ

1)重力剛性桁を有する超長大橋解析モデルを対象にフラッター解析を行い、ケーブル許容応力度および通行車両車線数の影響について調査した。

2)重力剛性桁のケーブル許容応力を82kg/mm²から100kg/mm²に変更することによってケーブル重量は減少するが、フラッター風速は低下しない。

3)４車線案（桁幅を狭くし空気力小さくする）にすると、６車線案に比べ約10m/sのフラッター風速の向上が期待できる。

参考文献

1）樋上、宇野：「超長大橋の設計上考慮すべき対風応答と新形式橋梁の提案」、土木学会第49回年次学術講演会論文集、Ⅰ-551、平成６年９月

2）Y.Hikami, K.Matsuda, "Aerodynamic characteristics of Super-Long-Span Bridges and New Idea of Gravity-Stiffened Girder Bridge, Proceedings of BRIDGES INTO THE 21ST CENTURY, Hong Kong, 1995

3）樋上、松田：「長大橋梁のフラッター応答に影響を与える非定常空気力の特性」、日本風工学会誌第63号、平成７年４月

3.4.3　二箱桁／一箱桁併用橋の耐風性に関する研究

(1) 概　要

平成７年度においては、新形式の吊橋として提案した、二箱桁断面と一箱桁断面の補剛桁を併用した二箱桁／一箱桁併用吊橋の基本耐風性について検討を行った。　その結果、この二箱桁／一箱桁併用吊橋のフラッター特性に関しては、従来型の一箱桁を用いた吊橋に比べて、30%以上のフラッター限界風速の上昇が期待できることが確認された。　一方で、その実用化のためには、さらなるフラッター安定性の向上が必要と考えられ、また、静的な風荷重の作用により、フラッター限界風速の目標値と想定した80m/sの風速に対して補剛桁に-10° を超える頭下げのねじれ変形を生じ、これに伴うフラッター安定性の低下が予測されるなどの問題点も明らかとなった。　この問題に関する対策として、ここでは、３.３.３項で述べた静的空力モーメント特性およびフラッター特性の改善を目的とした対策二箱桁断面を本形式の橋梁に適用した場合の検討と、静的ねじれ変形の問題を構造的に改善する一つの試みとして、吊形式と斜張形式を併用した二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋の適用性に関する検討を実施した。　さらに、これまで６車線橋梁として検討を進めてきた本橋梁形式に対し、建設コストの削減のための車線数の縮小という方向性への対応という観点から、４車線とした二箱桁／一箱桁併用吊橋に対する検討も併せて実施した。

(2) 二箱桁／一箱桁併用吊橋（６車線案）の耐風性

本検討において対象とした二箱桁／一箱桁併用吊橋は、主径間2500m、側径間1250mの３径間２ヒンジ吊橋である。　二箱桁／一箱桁併用吊橋のイメージを図-**3.4.3.1**に示すように、ここではメインケーブル間隔を二箱桁の開口幅に合わせて7.0mとし、両主塔より主径間ならびに側径間側の各々約600mの区間を一箱桁、残りの区間を二箱桁（ハンガー定着間隔7.0m）とした構造系を想定している。　桁の区間配置については図-**3.4.3.2**に示すようであり、橋梁全体系としての空力特性に支配的となる主径間中央部に、空力特性に優れた二箱桁を配し、残りの区間については軽量な一箱桁とすることで、吊構造部全体の鋼重の軽減を図っている。　また、主塔付き部に桁幅の狭い１箱桁を用いることにより主塔柱間隔を小さくすることで、主塔規模および基礎工規模の増大を抑制することも意図している。　さらに、一箱桁部のハンガーを斜め

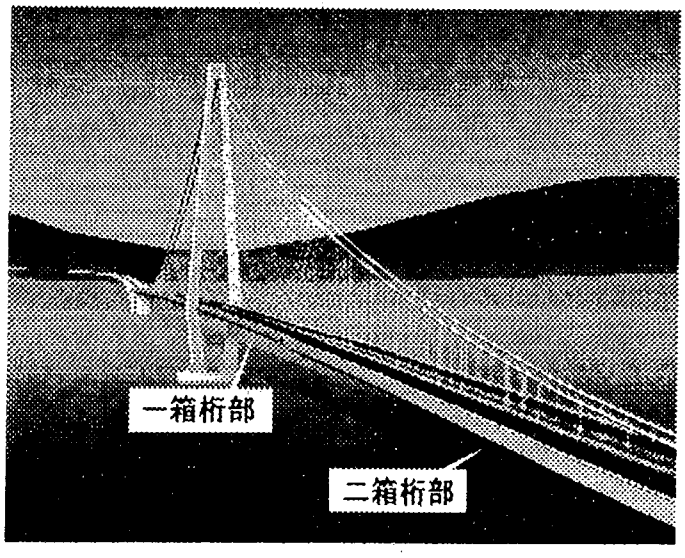


図-**3.4.3.1**　二箱桁／一箱桁併用吊橋イメージ図

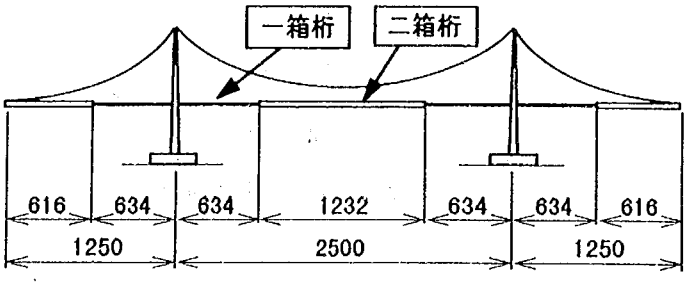


図-**3.4.3.2**　二箱桁／一箱桁の配置

吊りとし、桁とハンガーによって構成される疑似トラスの効果によって、全体系としてのねじれ剛性の増加を期待する一方で、二箱桁部のハンガーを鉛直吊りとすることで、メインケーブルと補剛桁天端が接近する主径間中央および側径間端部での道路建築限界を確保するものとしている。　吊構造部の横断面形状を図-3.4.3.3に示す。

本検討において想定した二箱桁／一箱桁併用吊橋の構造諸元を表-3.4.3.1に、主塔の概略形状および構造諸元については図-3.4.3.4に示す。　なお、二箱桁部の補剛桁断面に関しては、図-3.4.3.5に対策断面として示すように、頭下げの静的なねじれ変形の低減に有効な空力モーメント改善策として、フェアリング下面に検査車レールと下フランジ下面に下部鉛直プレートを設置した断面を適用した。（断面形状の詳細については３．３．３項を参照）

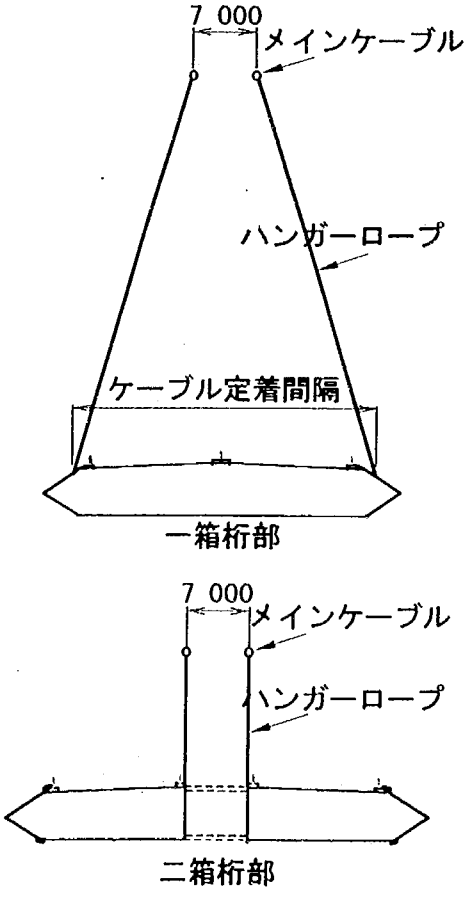


図-3.4.3.3　横断面形状

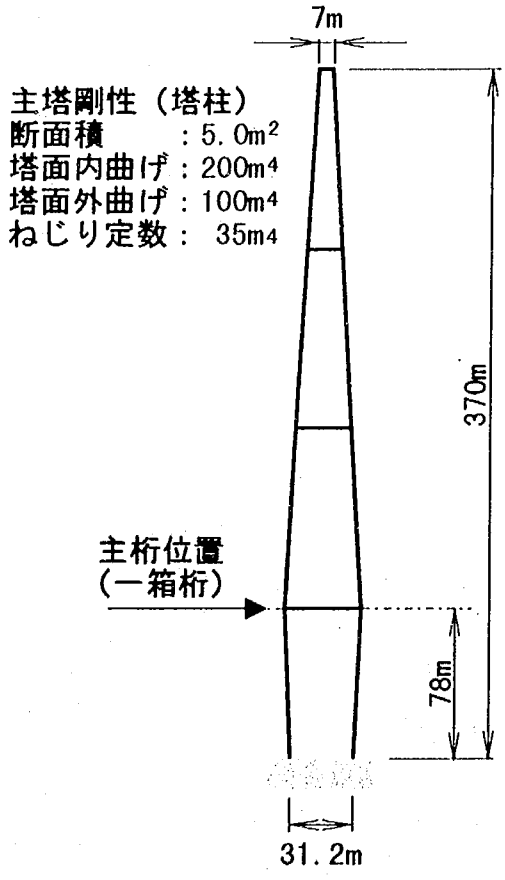


図-3.4.3.4　主塔モデルの諸元

表-3.4.3.1　構造諸元

補剛桁（一箱桁）	
断面積	1.289 m²
鉛直曲げ剛性	9.542 m⁴
水平曲げ剛性	133.333 m⁴
ねじり剛性	19.753 m⁴
重量	35.690 tf/m
極慣性モーメント	2795 tf-m²/m
補剛桁（二箱桁）	
断面積	1.516 m²
鉛直曲げ剛性	9.660 m⁴
水平曲げ剛性	263.326 m⁴
ねじり剛性	20.979 m⁴
重量	40.120 tf/m
極慣性モーメント	5100 tf-m²/m
メインケーブル	
断面積	0.685 m²

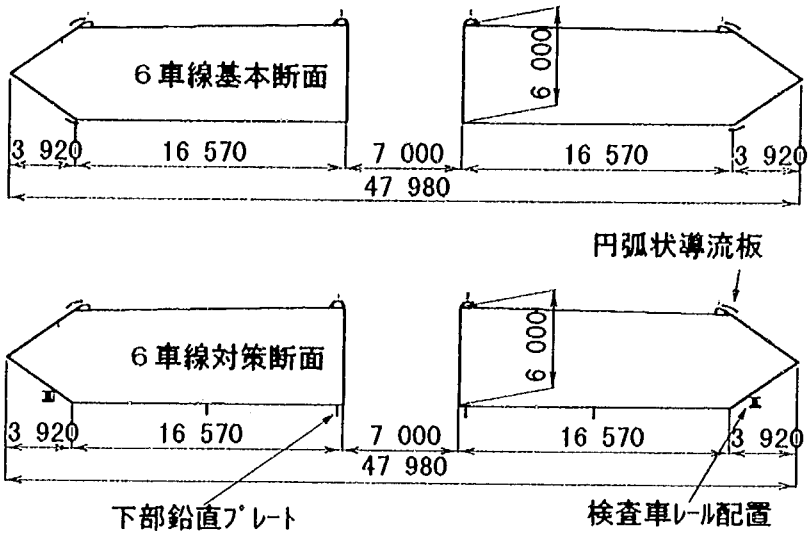


図-3.4.3.5　補剛桁断面形状（二箱桁）

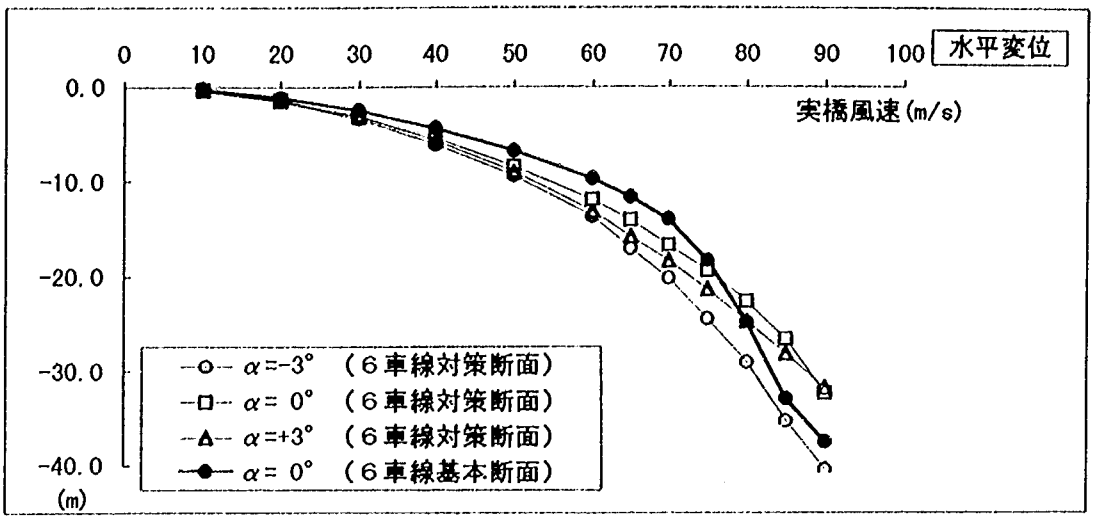
1)　静的変形特性

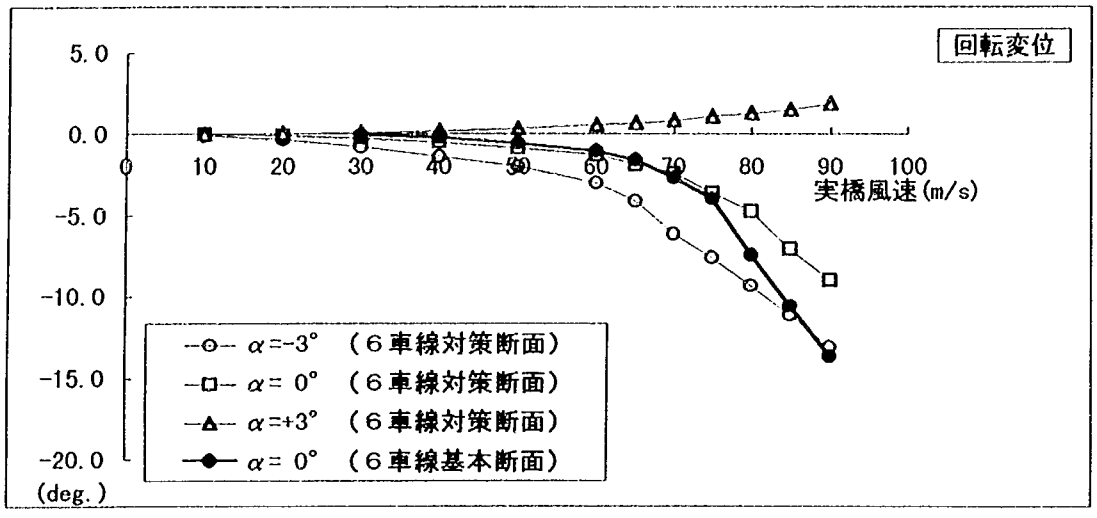
風洞試験により得られた三分力係数（３.３.３項参照）を用いた風荷重に対して、立体骨組みモデルによる有限変形解析を実施した。　風荷重による静的変形解析結果を図-3.4.3.6に示す。　なお、図中の値は主径間中央における補剛桁の変位を示している。　ここでの検討結果についてまとめれば以下のようである。

①　気流傾斜角 α=0°，風速80m/sの風に対して、基本断面では-14°の過大なねじれ変形が生じているのに対し、対策断面を用いた場合の変形量は-5°まで低減されており、この対策断面の適用により大幅なねじれ変形の抑制効果が認められる。

②　接近流について吹上げ／吹下しの傾斜角を考慮したとき、対策断面を用いた場合においても、例えば α=-3°，風速80m/sの風に対しては約-9°の桁のねじれ変形を生じ、このときの桁に対する相対迎角としては-12°という大迎角を考慮することが必要となる。

③　しかしながら、このような定常的な接近流の吹上げ／吹下しについての取り扱いに関しては、超長大橋に関する設計基準とも関連して、今後検討すべき問題と考えられる。





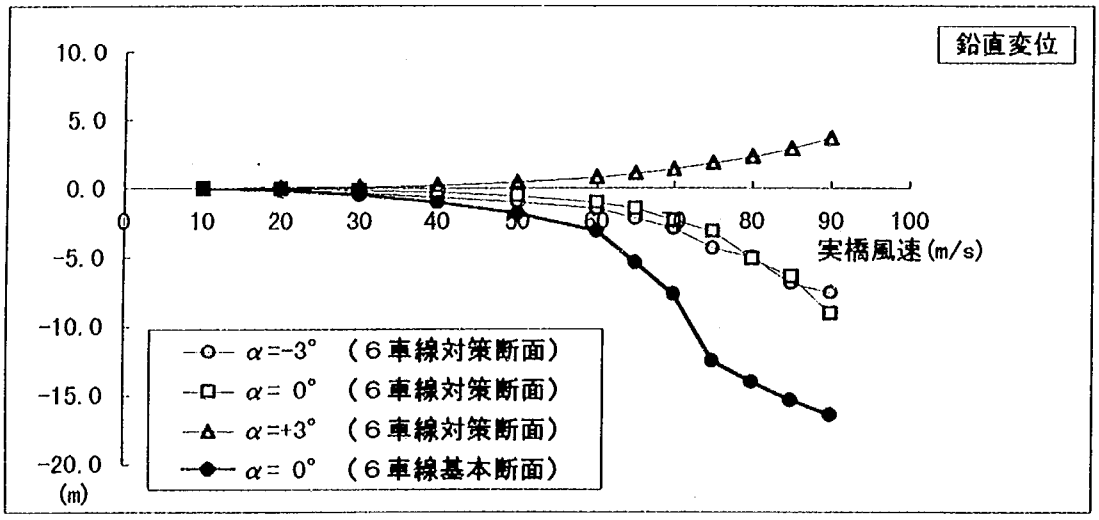


図-3.4.3.6　静的変形解析結果：主径間中央での補剛桁変位（6車線併用吊橋案）

2) フラッター特性の評価

二箱桁／一箱桁併用吊橋全体系のフラッター特性に関しては、２次元バネ支持剛体模型を用いて自由振動法により求められた動的空気力係数を適用した多自由度フラッター解析により評価を行った。 図-3.4.3.7には、解析に用いた動的空気力係数の一部を示すが、ここでの動的空気力係数は次式によって定義されたものであり、図中においては換算風速（$=V/f\cdot B$）を用いて整理を行っている。 また、動的空気力は迎角 $\alpha=+3^{\circ}\sim-7^{\circ}$ の範囲のものを解析に用いている。

$$L=\frac{1/2\cdot\rho\cdot V^2\cdot B}{1/(2\cdot\pi\cdot k^2)}\cdot\left\{C_{L\eta R}\cdot\frac{\eta}{B}+C_{L\eta I}\cdot\frac{\dot{\eta}}{B\cdot\omega}+C_{L\alpha R}\cdot\theta+C_{L\alpha I}\cdot\frac{\dot{\theta}}{\omega}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

$$M=\frac{1/2\cdot\rho\cdot V^2\cdot B^2}{1/(2\cdot\pi\cdot k^2)}\cdot\left\{C_{M\eta R}\cdot\frac{\eta}{B}+C_{M\eta I}\cdot\frac{\dot{\eta}}{B\cdot\omega}+C_{M\alpha R}\cdot\theta+C_{M\alpha I}\cdot\frac{\dot{\theta}}{\omega}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

ここに、L：動的揚力， M：動的空力ﾓｰﾒﾝﾄ， ρ：空気密度， V：風速，

B：桁幅（=47.98m）， η：曲げ振幅， θ：ねじれ振幅，

k：換算振動数（$=B\cdot\omega/V$）， ω：応答円振動数， f：応答振動数

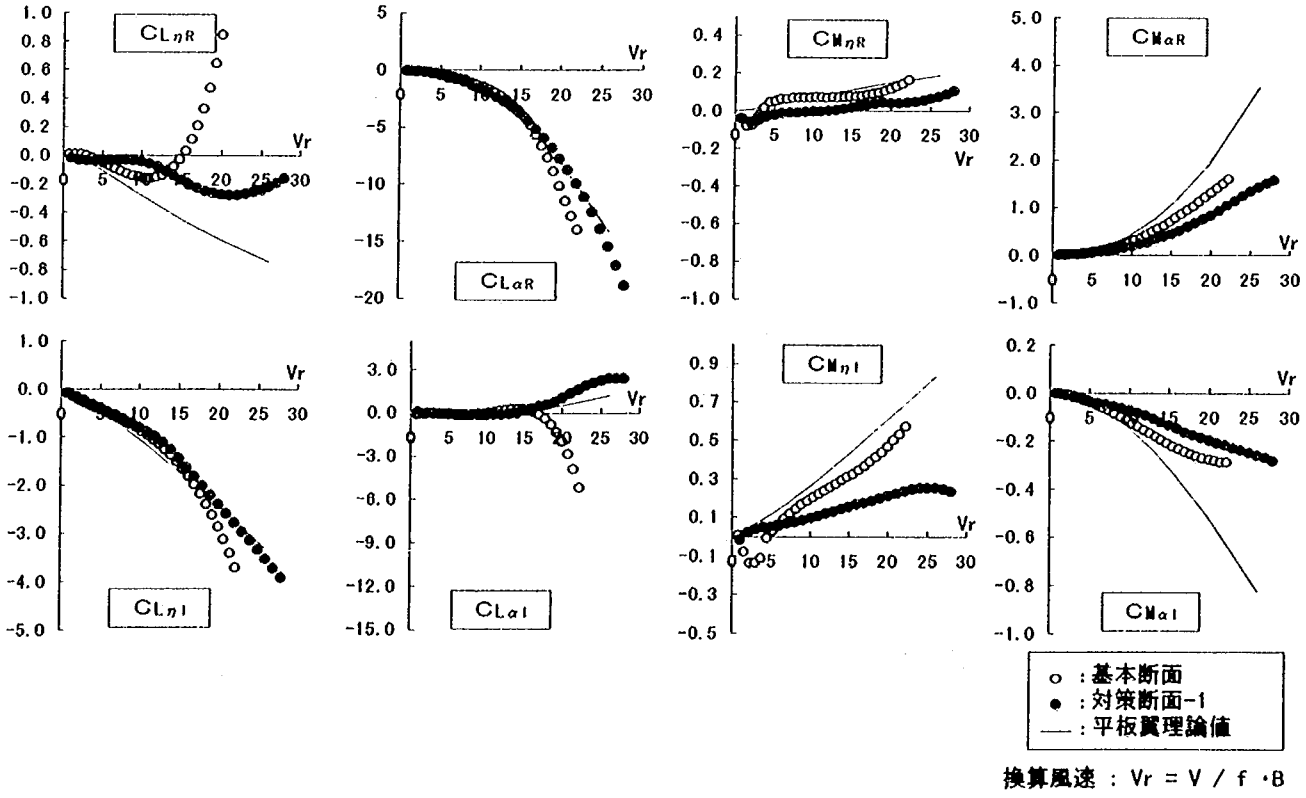


図-3.4.3.7 ６車線二箱桁断面の動的空気力係数（迎角 $\alpha=0^{\circ}$）

本検討におけるフラッター解析手法としてはモード組合せ法によるものとし、振動モードについては無風時の固有振動モードを用いて低次50次までのモードの重ね合わせを行っている。　また、空気力としては、桁に対する動的空気力のほか、桁およびケーブルに作用する準定常抗力の影響を考慮した。　なお、気流傾斜角としては$\alpha=0^{\circ}$とし、風荷重による静的ねじれ変形に伴う空気力への影響についても考慮した。（フラッター解析条件については表-6.2.1.1(2)のKH-1参照）　得られた固有値解析結果の一部を表-**3.4.3.2**に、また、６車線併用吊橋案における代表的な振動モード形状を図-**3.4.3.8**に示す。

表-**3.4.3.2**　６車線併用吊橋案の振動特性（主要振動モード）

	固有振動数		等価質量／等価極慣性		備　考
	次数	振動数	次数	質量／極慣性	
曲げ卓越ﾓｰﾄﾞ		Hz		$t\cdot s^2/m/m$	
	2 次	0.053	2 次	4.004	対称1次
	3 次	0.060	3 次	5.724	逆対称1次
	7 次	0.070	7 次	3.906	逆対称1次
	9 次	0.102	9 次	3.987	対称2次
	12 次	0.136	12 次	4.017	対称2次
	14 次	0.140	14 次	4.024	逆対称2次
	15 次	0.141	15 次	4.023	側径間2次
	16 次	0.141	16 次	4.001	側径間2次
	23 次	0.178	23 次	3.896	対称3次
	26 次	0.215	26 次	3.959	逆対称3次
	27 次	0.215	27 次	3.982	側径間3次
	28 次	0.217	28 次	3.961	側径間3次
ねじれ卓越ﾓｰﾄﾞ		Hz		$t\cdot m\cdot s^2/m$	
	8 次	0.101	8 次	26087.5	
	17 次	0.148	17 次	38534.9	
	18 次	0.148	18 次	5903.6	対称1次
	19 次	0.154	19 次	43773.8	
	20 次	0.155	20 次	2345.1	
	22 次	0.178	22 次	11438.1	
	24 次	0.181	24 次	85299.3	
	25 次	0.188	25 次	946.5	対称1次
	29 次	0.251	29 次	45440.6	
	31 次	0.258	31 次	2766.7	
	32 次	0.262	32 次	6640.7	
	33 次	0.267	33 次	1718.1	逆対称1次
	34 次	0.281	34 次	5737.9	側径間1次

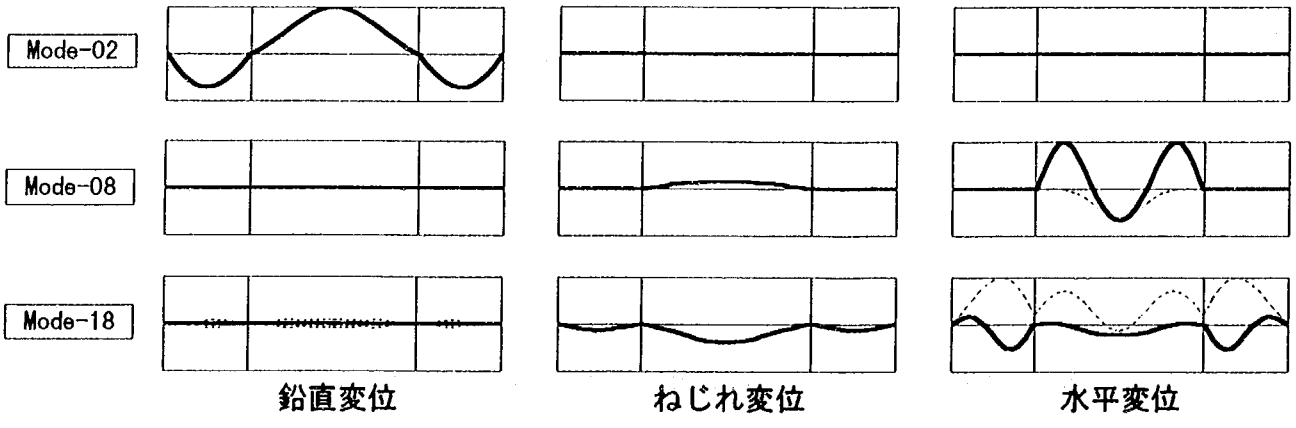
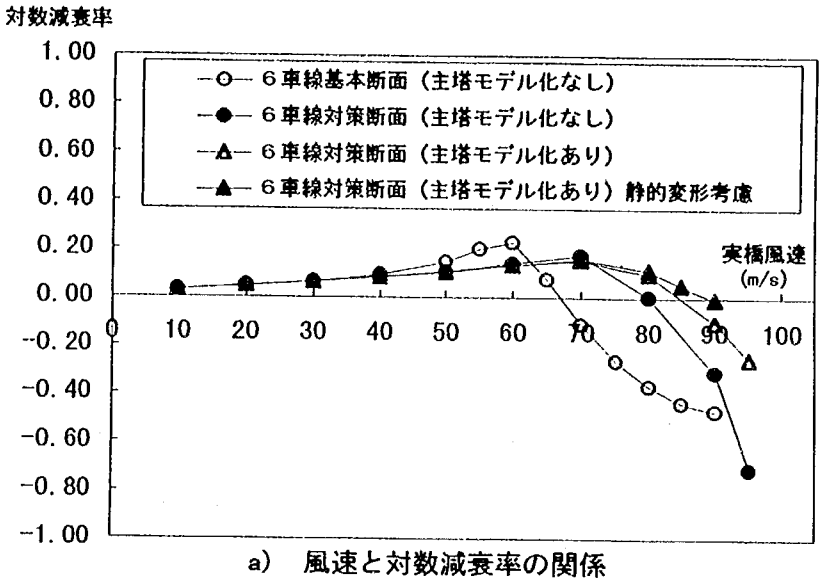


図-**3.4.3.8**　主要振動モード形状（６車線併用吊橋案）

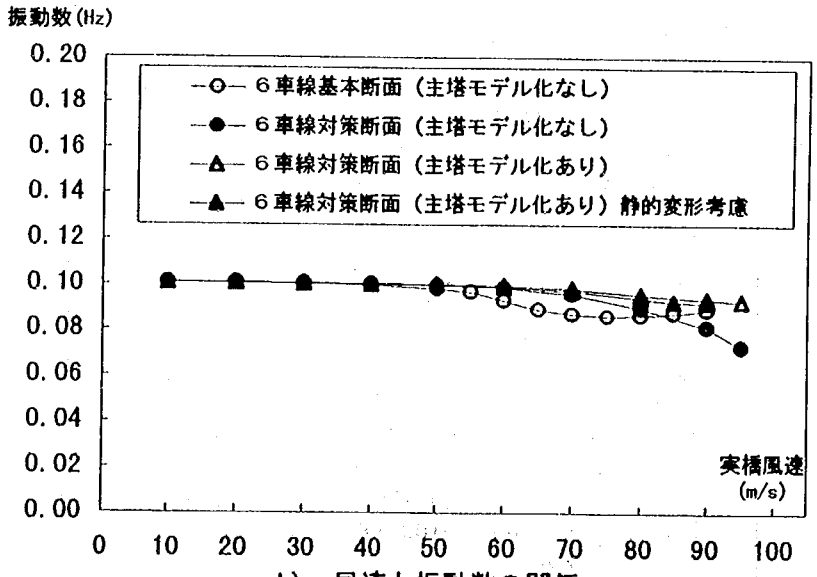
本検討で得られた６車線併用吊橋案に対するフラッター解析結果を図-3.4.3.9に示す。　なお、ここでは比較のため、二箱桁部に基本断面を適用した場合の解析結果を示しているが、その際の解析においては主塔部をモデル化せず、また静的変形による影響についても考慮していないため、これと同様の解析条件のもとでの対策断面を適用した場合の解析結果も併せて示した。　ここでの検討結果についてまとめれば、以下のようである。

① 二箱桁部に対策断面を適用した場合のフラッター限界風速はV_f=80m/sと、基本断面を適用した場合のV_f=67m/sに比べて約20%の大幅な上昇が見られ、ここで適用した二箱桁断面の空力改善対策は、吊橋全体系としてのフラッター安定性の向上に対して有効であるものと判断される。

② また、主塔のモデル化を行い、静的変形の影響についても考慮した解析結果によれば、さらにフラッター限界風速は約90m/sまで上昇する結果となっているが、この要因の一つとして、適用した対策断面の



a)　風速と対数減衰率の関係



b)　風速と振動数の関係

図-3.4.3.9　フラッター解析結果（６車線併用吊橋案）

迎角 α=0° ～-5° の領域におけるフラッター安定性が、負迎角側で高くなる傾向を示していることが考えられる。

(3) 二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋（６車線案）の耐風性

風荷重による桁の静的なねじれ変形を抑制し、フラッター安定性の向上を図るためには、橋梁全体系としての補剛桁のねじれ剛性を高める構造的な対応も有効となることが考えられるが、ここでは、そのための一つの試みとして、二箱桁／一箱桁併用吊橋の一部に斜張構造を併用した斜張吊橋形式の適用性について検討を行った。　ここで検討対象とした二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋は、主径間2500m、側径間1250mの３径間連続斜張吊橋（６車線案）であり、メインケーブル間隔は吊橋形式と同様7.0mとした。　また、二箱桁と一箱桁の配置については吊橋形式と同様とし、一箱桁部を斜張構造、残りの二箱桁部を吊構造とした橋梁系を想定している。　図-3.4.3.10に斜張吊橋の概略側面図を、表-3.4.3.3に今回想定した構造諸元を示すが、主塔の諸元に関しては吊橋形式と同一の条件を仮定した。　なお、斜張ケーブルのヤング係数に関しては、サグの効果を考慮したErnstの等価ヤング係数により評価を行った。

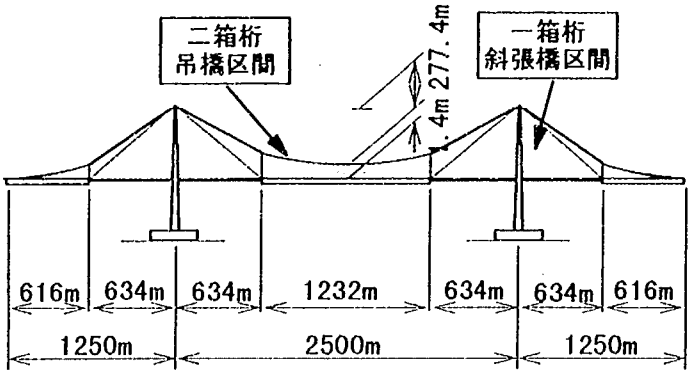


図-3.4.3.10　斜張吊橋概略側面図

表-3.4.3.3　斜張吊橋構造諸元（吊橋案との比較）

	吊橋案	斜張吊橋案
補剛桁（一箱桁）		
断面積	1.289 m²	1.776 m²
鉛直曲げ剛性	9.524 m⁴	13.278 m⁴
水平曲げ剛性	133.333 m⁴	183.200 m⁴
ねじり剛性	19.753 m⁴	31.000 m⁴
重量	35.690 tf/m	38.210 tf/m
極慣性モーメント	2795 tf-m²/m	3218 tf-m²/m
補剛桁（二箱桁）		
断面積	1.516 m²	1.516 m²
鉛直曲げ剛性	9.660 m⁴	9.660 m⁴
水平曲げ剛性	263.326 m⁴	263.300 m⁴
ねじり剛性	20.979 m⁴	20.979 m⁴
重量	40.120 tf/m	36.820 tf/m
極慣性モーメント	5100 tf-m²/m	5100 tf-m²/m
メインケーブル		
断面積	0.685 m²	0.475 m²

1) 静的変形特性

二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋に対する、気流傾斜角 $\alpha=0^{\circ}$ での風荷重による静的変形解析結果を、吊橋形式の場合と比較して図-3.4.3.11に示す。　ここでの検討結果をまとめると以下のようである。

① 斜張吊橋形式でのねじれ変形量は、風速80m/sの風に対して+3.4°であり、構造的に問題となるような過大なねじれ変形は生じないことが確認された。

② 吊橋形式では頭下げのねじれ変形を生じていたものが、斜張吊橋形式では頭上げのねじれ変形を生じており、これについては、斜張吊橋において桁を３径間連続としたことにより、主塔付近の補剛桁の水平変位が主塔（斜張ケーブル定着点）の水平変位に比べて相対的に小さくなったことに起因するものと考えられる。

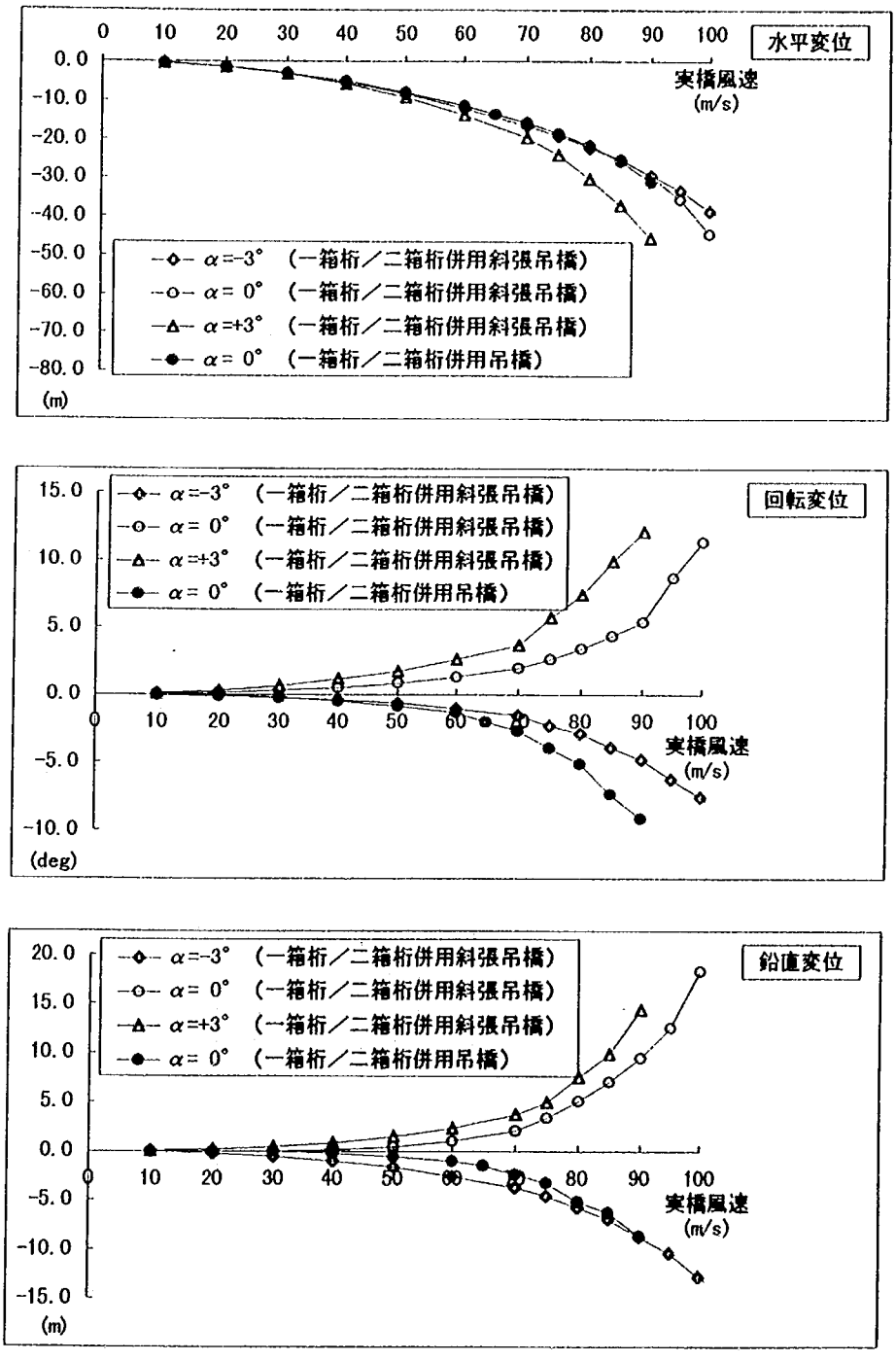


図-3.4.3.11　静的変形解析結果：主径間中央での補剛桁変位

2) フラッター特性の評価

二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋のフラッター特性に関して、前述の吊橋形式と同様に多自由度フラッター解析による検討を行った。 なお、本検討においても、気流傾斜角としてはα=0°を想定し、風荷重による静的変形の影響について考慮した解析とし、振動モードについては低次側50次までのモードについて重ね合わせを行った。（フラッター解析条件については表-6.2.1.1(3)のKH-2参照） 斜張吊橋形式に対して得られた固有値解析結果を表-3.4.3.4に、代表的な振動モード形状を図-3.4.3.12に示す。 また、本検討で得られた斜張吊橋案に対するフラッター解析結果を図-3.4.3.13に示す。 なお、本解析においては、α>+5°を超える正の大迎角領域での動的空気力係数が得られていないため、85m/sまでの風速範囲での解析を行っている。 この検討結果として、斜張吊橋形式に関しては85m/s以下の風速範囲ではフラッターの発現は見られず、吊橋形式とほぼ同様の高いフラッター安定性を有していることが明らかになった。

表-3.4.3.4(a) 斜張吊橋の振動特性

	固有振動数				等価質量／等価極慣性				
	吊橋		斜張吊橋		吊橋		斜張吊橋		備考
	次数	振動数	次数	振動数	次数	質量／極慣性	次数	質量／極慣性	
		Hz				$t\cdot s^2/m/m$			
	2 次	0.053	2 次	0.053	2 次	4.004	2 次	3.802	対称1次
	3 次	0.060	5 次	0.072	3 次	5.724	5 次	3.816	逆対称1次
	7 次	0.070	7 次	0.104	7 次	3.906	7 次	4.044	逆対称1次
	9 次	0.102	9 次	0.119	9 次	3.987	9 次	3.822	対称2次
	12 次	0.136	10 次	0.144	12 次	4.017	10 次	3.915	対称2次
曲げ卓越ﾓｰﾄﾞ	14 次	0.140	16 次	0.157	14 次	4.024	16 次	3.051	逆対称2次
	15 次	0.141			15 次	4.023			側径間2次
	16 次	0.141			16 次	4.001			側径間2次
	23 次	0.178	20 次	0.164	23 次	3.896	20 次	3.138	対称3次
			23 次	0.187			23 次	4.914	側径間2次
			24 次	0.189			24 次	4.757	側径間2次
	26 次	0.215	25 次	0.191	26 次	3.959	25 次	4.720	逆対称3次
	27 次	0.215			27 次	3.982			側径間3次
	28 次	0.217			28 次	3.961			側径間3次
		Hz				$t\cdot m\cdot s^2/m$			
	8 次	0.101	8 次	0.109	8 次	26087.526	8 次	37206.8	
	17 次	0.148	12 次	0.147	17 次	38534.857	12 次	79493.0	
	18 次	0.148			18 次	5903.6			対称1次
	19 次	0.154	19 次	0.163	19 次	43773.8	19 次	38815.3	
	20 次	0.155	21 次	0.182	20 次	2345.1	21 次	88595.8	
	22 次	0.178			22 次	11438.1			
	24 次	0.181			24 次	85299.3			
ねじれ卓越ﾓｰﾄﾞ	25 次	0.188	22 次	0.184	25 次	946.5	22 次	551.6	対称1次
	29 次	0.251			29 次	45440.6			
	31 次	0.258			31 次	2766.7			
	32 次	0.262			32 次	6640.7			
	33 次	0.267			33 次	1718.1			逆対称1次
	34 次	0.281			34 次	5737.9			側径間1次

表-3.4.3.4(b)　斜張吊橋の振動特性（主要振動モード）

	①吊橋	②斜張吊橋	②/①
鉛直曲げ対称１次			
振動モード次数	2 次	2 次	—
固有振動数	0.053 Hz	0.053 Hz	0.993
等価質量	4.004 tf·s²/m²	3.802 tf·s²/m²	0.950
水平曲げ対称２次			
振動モード次数	8 次	8 次	—
固有振動数	0.101 Hz	0.109 Hz	1.079
等価極慣性モーメント	26088 tf·s²	37207 tf·s²	1.426
ねじれ対称１次			
振動モード次数	18 次		
固有振動数	0.148 Hz		
等価極慣性モーメント	5904 tf·s²		
振動モード次数	25 次	22 次	—
固有振動数	0.188 Hz	0.184 Hz	0.979
等価極慣性モーメント	947 tf·s²	552 tf·s²	0.583

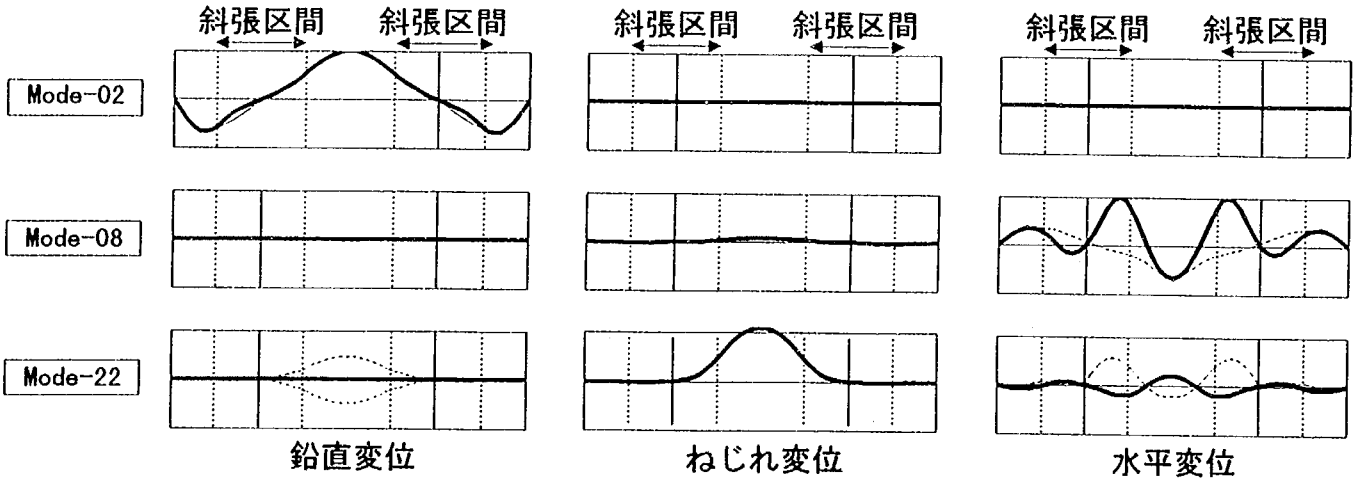
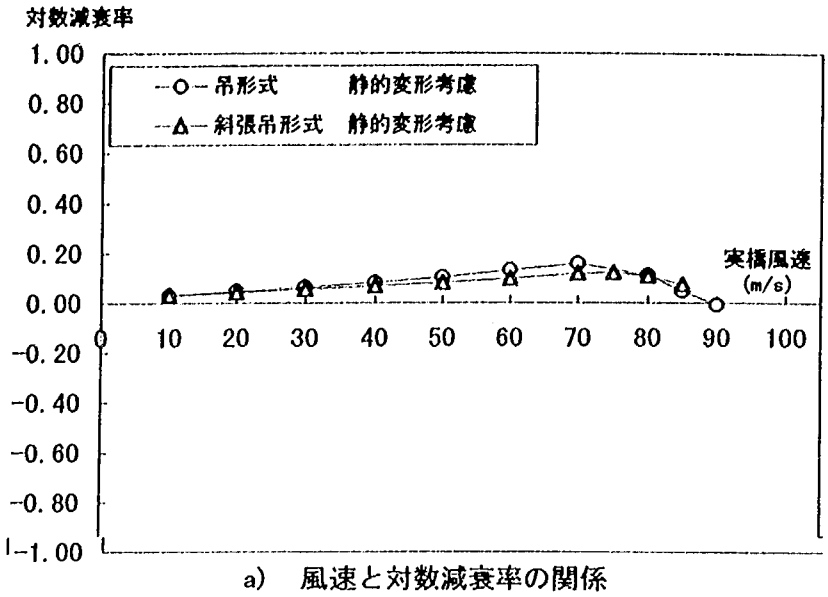
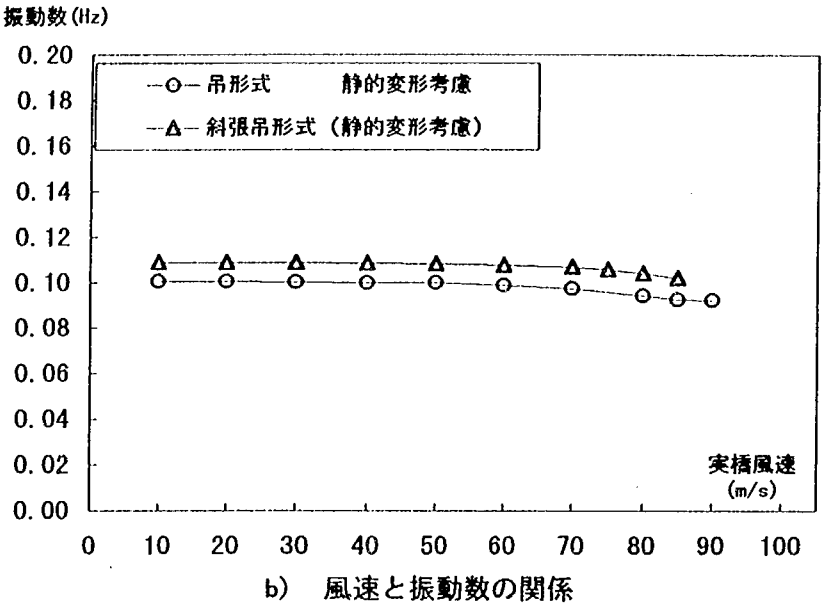


図-3.4.3.12　斜張吊橋の振動モード形状（主要振動モード）



a)　風速と対数減衰率の関係



b)　風速と振動数の関係

図-3.4.3.13　斜張吊橋に対するフラッター解析結果

(4)　４車線二箱桁／一箱桁併用吊橋の耐風性

ここでは、これまで６車線の幅員を想定して検討を行ってきた二箱桁／一箱桁併用吊橋に対し、これを４車線規模の橋梁に適用した場合の耐風性について検討を行った。　なお、４車線二箱桁／一箱桁併用吊橋の構造諸元については、６車線案に対して想定した諸元をもとに、幅員の減少に伴う死荷重および活荷重の影響について考慮し、その概算評価を行った。

本検討において想定した４車線案の二箱桁／一箱桁併用吊橋の構造諸元を表-3.4.3.5に示す。　なお、二箱桁部の補剛桁断面に関しては、図-3.4.3.14に示すように、６車線断面の場合と同様、頭下げの静的ねじれ変形の低減に有効な空力モーメント改善策として、フェアリング下面に検査車レールと下フランジ下面に下部鉛直プレートを設置した断面を適用した。

表-3.4.3.5　構造諸元の比較（６車線／４車線）

	６車線案	4車線案
補剛桁（一箱桁）		
断面積	1.289 m²	0.954 m²
鉛直曲げ剛性	9.542 m⁴	3.164 m⁴
水平曲げ剛性	133.333 m⁴	51.474 m⁴
ねじり剛性	19.753 m⁴	4.856 m⁴
重量	35.690 tf/m	23.912 tf/m
極慣性モーメント	2795 tf-m²/m	1034 tf-m²/m
補剛桁（二箱桁）		
断面積	1.516 m²	1.141 m²
鉛直曲げ剛性	9.660 m⁴	3.378 m⁴
水平曲げ剛性	263.326 m⁴	113.437 m⁴
ねじり剛性	20.979 m⁴	5.730 m⁴
重量	40.120 tf/m	26.880 tf/m
極慣性モーメント	5100 tf-m²/m	2091 tf-m²/m
メインケーブル		
断面積	0.685 m²	0.475 m²

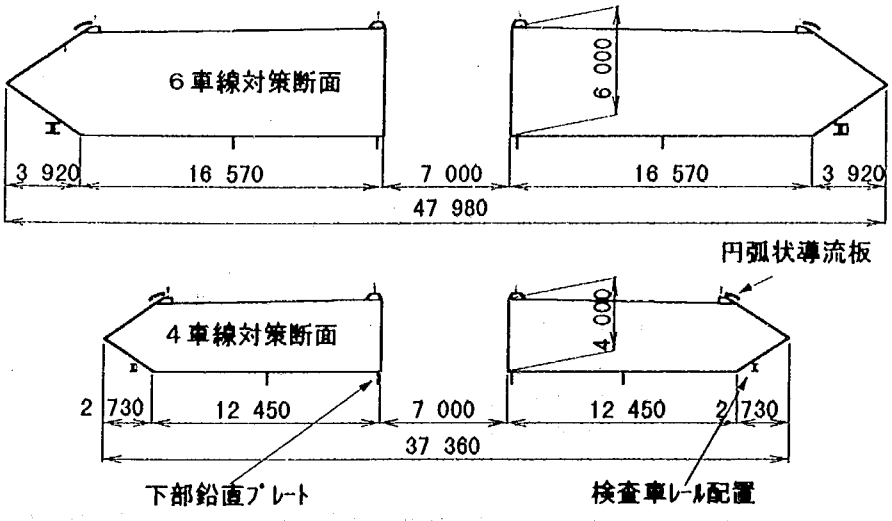


図-3.4.3.14　補剛桁断面形状（６車線／４車線二箱桁）

1) 静的変形特性

風洞試験により得られた三分力係数（３.３.３項参照）を用いた風荷重に対して、立体骨組みモデルによる有限変形解析を実施した。 風荷重による静的変形解析結果を図-3.4.3.15に示す。 なお、図中の値は主径間中央における補剛桁の変位を示している。 この検討の結果より、気流傾斜角 α=0°，風速80m/sに対するねじれ変形量は-5°程度であり、これよりも高い風速域では６車線案に比べて変形量の増加は大きくなる傾向がみられるものの、実用上の風速域内で過大なねじれ変形が発生することはないものと判断される。

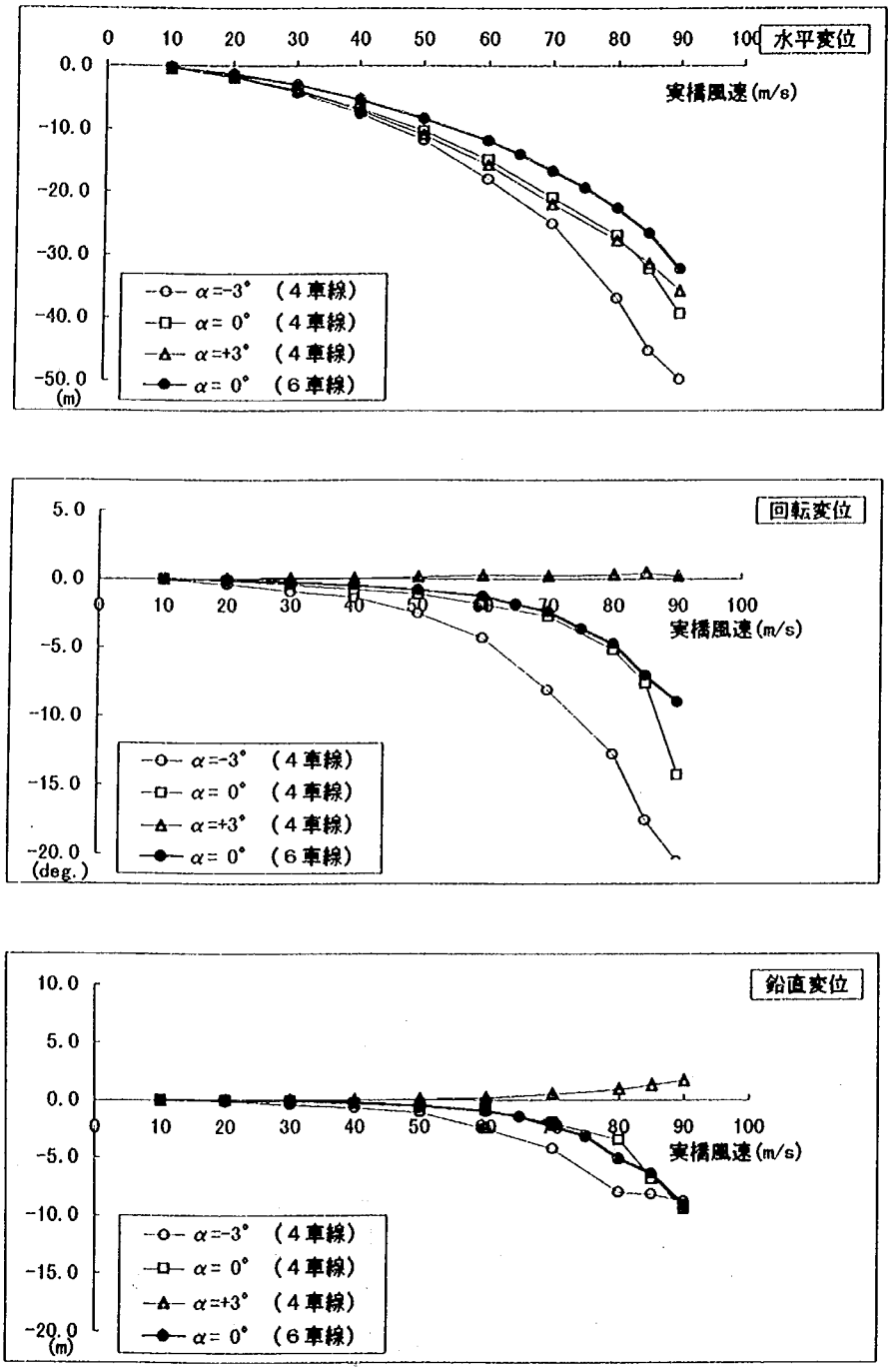


図-3.4.3.15 静的変形解析結果：主径間中央での補剛桁変位（４車線併用吊橋案）

2)　フラッター特性の評価

４車線二箱桁／一箱桁併用吊橋のフラッター特性に関しても、前述の６車線案と同様に多自由度フラッター解析による検討を行った。　図-3.4.3.16に、解析に用いた４車線二箱桁断面の動的空気力係数の一部を示す。　なお、本検討においても、気流傾斜角としてはα=0°を想定し、風荷重による静的変形の影響について考慮した解析とし、振動モードについては低次側50次までのモードについて重ね合わせを行った。（フラッター解析条件については表-6.2.1.1(3)のKH-2参照）　４車線吊橋形式に対して得られた固有値解析結果のうち、基本モードに対する固有値を６車線案と比較し表-3.4.3.6に示す。　また、本検討で得られた４車線吊橋案に対するフラッター解析結果を図-3.4.3.17に示す。　ここでの検討結果についてまとめれば次のようである。

①　４車線案に関しても約90m/sというフラッター限界風速が得られており、６車線案と同様に高いフラッター安定性を確保することが可能であることが確認された。

②　４車線案と６車線案の振動特性の違いに着目した場合、曲げ、ねじれの最低次モードに関する固有振動数については両者ともほぼ同様であるものの、等価質量および等価極慣性モーメントに関しては、４車線案では大幅に低下しており、また、フラッターの支配的振動モードの一つと考えられる桁のねじれを伴う水平曲げモード（８次モード）の振動数および等価極慣性モーメントについても低下していることから、振動特性の面からは、４車線化によるフラッター安定性の低下が予想される。　しかしながら、今回の検討に用いた４車線二箱桁断面のフラッター特性が、６車線断面に比べてかなり優れていることにより、橋梁全体系としては同等の高いフラッター特性が維持できたものと考えられる。

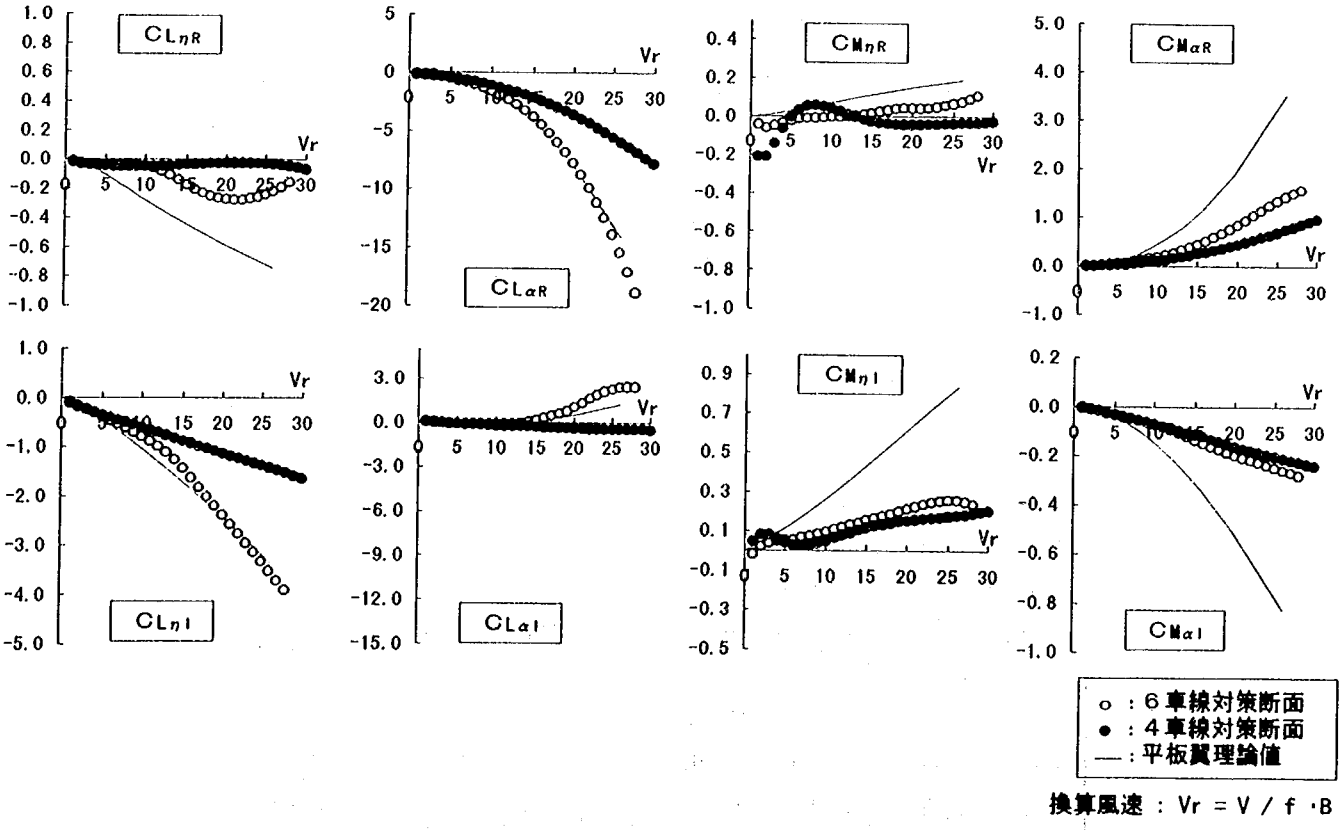


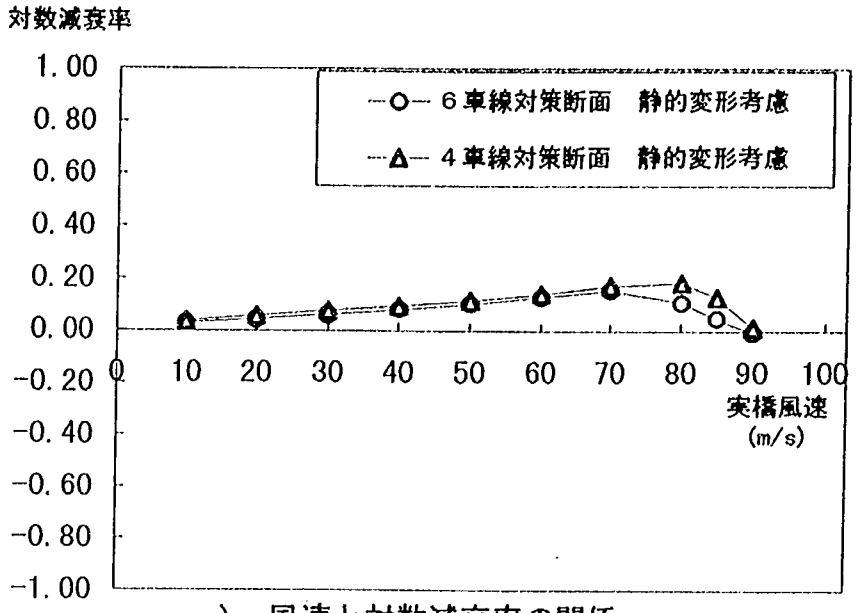
図-3.4.3.16　４車線二箱桁断面の動的空気力係数（迎角α=0°）

表-3.4.3.6(a)　4車線併用吊橋の振動特性

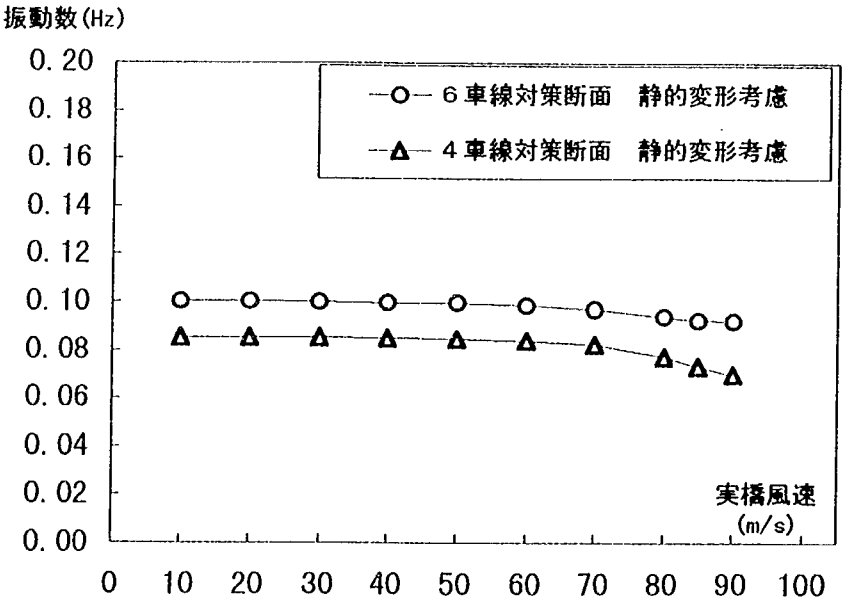
	固有振動数		等価質量／等価極慣性		備　考
	次数	振動数	次数	質量／極慣性	
		Hz		$t\cdot s^2/m/m$	
曲げ卓越ﾓｰﾄﾞ	2 次	0.053	2 次	2.669	対称1次
	6 次	0.060	6 次	3.791	逆対称1次
	7 次	0.070	7 次	2.605	逆対称1次
	9 次	0.102	9 次	2.645	対称2次
	15 次	0.136	15 次	2.709	対称2次
	16 次	0.138	16 次	7.900	逆対称2次
	17 次	0.139	17 次	2.780	逆対称2次
	18 次	0.139	18 次	2.741	側径間2次
	19 次	0.139	19 次	2.677	側径間2次
	25 次	0.176	25 次	2.610	対称3次
	27 次	0.210	27 次	2.656	逆対称3次
	28 次	0.211	28 次	2.678	側径間3次
	29 次	0.213	29 次	2.659	側径間3次
		Hz		$t\cdot m\cdot s^2/m$	
ねじれ卓越ﾓｰﾄﾞ	8 次	0.085	8 次	21741.3	
	12 次	0.133	12 次	56325.6	
	13 次	0.133	13 次	50626.1	
	14 次	0.134	14 次	75097.6	
	20 次	0.147	20 次	474.7	対称1次
	21 次	0.156	21 次	17663.8	
	22 次	0.160	22 次	1253.9	
	23 次	0.167	23 次	13330.8	
	24 次	0.174	24 次	718.6	対称1次
	26 次	0.200	26 次	19003.5	
	30 次	0.236	30 次	306.7	逆対称1次

表-3.4.3.6(b)　6車線案／4車線案の振動特性の比較（主要振動ﾓｰﾄﾞ）

	①6車線案	②4車線案	②/①
鉛直曲げ対称1次			
振動ﾓｰﾄﾞ次数	2 次	2 次	—
固有振動数	0.053 Hz	0.053 Hz	0.993
等価質量	4.004 $tf\cdot s^2/m^2$	2.669 $tf\cdot s^2/m^2$	0.667
水平曲げ対称2次			
振動ﾓｰﾄﾞ次数	8 次	8 次	—
固有振動数	0.101 Hz	0.085 Hz	0.846
等価極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	26088 $tf\cdot s^2$	21741 $tf\cdot s^2$	0.833
ねじれ対称1次			
振動ﾓｰﾄﾞ次数	18 次	20 次	—
固有振動数	0.148 Hz	0.147 Hz	0.993
等価極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	5904 $tf\cdot s^2$	475 $tf\cdot s^2$	0.080



a)　風速と対数減衰率の関係



b)　風速と振動数の関係

図-3.4.3.17　フラッター解析結果（４車線併用吊橋案）

5) まとめ

ここでは、二箱桁／一箱桁併用吊橋ならびに二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋の２形式を対象として、その耐風性について検討を行った。　また、本検討においては、箱桁断面として、静的な空力モーメント特性の改善とフラッター特性の向上のための空力対策を施した対策二箱桁断面を適用し、その有効性に対する評価を行った。　さらに、二箱桁／一箱桁併用吊橋に関しては、６車線橋梁案に対する検討に加え、これを４車線規模に縮小した場合の耐風性についても併せて検討を実施した。　本検討により得られた結果についてまとめれば以下のようである。

1)　二箱桁／一箱桁併用吊橋（６車線案）の耐風性

①　風荷重による静的変形に関しては、気流傾斜角 $\alpha=0^{\circ}$，風速80m/sの風に対して、基本断面では-14°の過大なねじれ変形が生じているのに対し、対策断面を用いた場合の変形量は-5°まで低減されており、この対策断面の適用により大幅なねじれ変形の抑制効果が確認された。

②　二箱桁部に対策断面を適用した場合のフラッター限界風速は V_f=90m/sと、基本断面を適用した場合と比較して大幅な上昇が見られ、ここで適用した二箱桁断面の空力改善対策が、吊橋全体系としてのフラッター安定性の向上に対しても有効であることが確認された。

2)　二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋（６車線案）の耐風性

①　斜張吊橋形式における、気流傾斜角 $\alpha=0^{\circ}$、風速80m/sでの風荷重による静的なねじれ変形量としては+3.4°程度であり、構造的に問題となるような過大なねじれ変形は生じないことが確認された。

②　斜張吊橋形式に関しては85m/s以下の風速範囲ではフラッターの発現は見られず、吊橋形式とほぼ同様の高いフラッター安定性を有していることが認められた。

3)　４車線二箱桁／一箱桁併用吊橋の耐風性

①　４車線案における、気流傾斜角 $\alpha=0^{\circ}$，風速80m/sでの風荷重によるねじれ変形量は、６車線案と同様に-5°程度となっており、これよりも高い風速域では６車線案に比べて変形量の増加は大きくなる傾向がみられるものの、実用上の風速域内で過大なねじれ変形が発生することはないものと判断された。

②　４車線案に関しても約90m/sというフラッター限界風速が得られており、６車線案と同様に高いフラッター安定性を確保することが可能であることが確認された。

3．4．4　開口方法の差異に着目した耐風性検討

(1)　検討内容

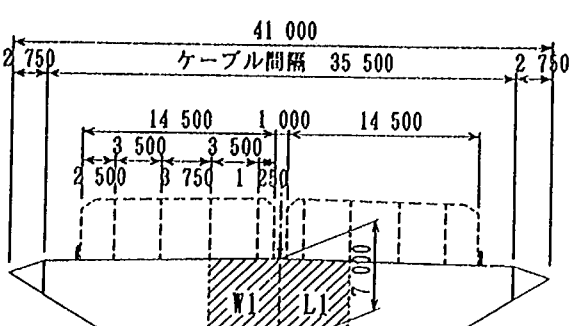
昨年度は、1箱桁断面を対象として開口方法の差異（開口部充実率、開口パターン）による耐風性検討として、ばね支持試験の結果を主にまとめた。今年度は、昨年度ばね支持試験を行った各ケースについて静的3分力試験を実施した結果についてまとめる。また、昨年度の検討の結果、迎角α=+3°の場合には対象とした全てのケースにおいて、開口化による改善効果がで認められなかったので、迎角α=+3°の場合に着目し、迎角α=0°、-3°で最も良好な結果となったケース（CASE-W1L1/50G）を対象に、フェアリング形状を変更させて、ばね支持試験を実施した結果についてまとめる。

対象とした橋梁の基本諸元を表－3.4.4.1に示す。開口化を施す前の補剛桁断面（基本断面）を図－3.4.4.1に示す。

耐風安定性に及ぼすオープングレーチング化の影響は、図－3.4.4.1に示したW1、L1部分（風上側と風下側の中央帯および最内側車線）に、充実率ϕが50%、60%、70%なる2種類のオープングレーチング（金網で作製したGシリーズおよび薄板に円形の孔を開けたIIシリーズ）をそれぞれ設置した状態で実験することとした。図－3.4.4.2にオープングレーチングの種類を示す。静的3分力試験およびばね支持試験で対象とした実験ケースを表－3.4.4.2にまとめた。ここで、静的3分力試験の対象とした各ケースにおいて、CASE-W1L1/の後に記した50、60、70なる数字はオープングレーチングの充実率であり、また、それに続くGおよびIIは図－3.4.4.2に示したようなオープングレーチングの種類を表す。また、ばね支持試験の対象とした各ケースにおいて、ケース名の数字はフェアリングの上面傾斜角度を表す。表－3.4.3.3にばね支持試験条件を示す。

表－3.4.4.1　対象橋梁の基本諸元

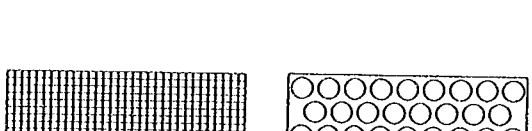
支間割		1,250m + 2,500m + 1,250m
サグ比		1/9
ケーブル間隔		35.5 m
ケーブル許容応力度		100 kgf/mm²
死荷重	ケーブル部	11.0 tf/m/Br.
	吊構造部	24.0 tf/m/Br.
	合計	35.0 tf/m/Br.
極慣性モーメント	ケーブル部	350 tf·s²·m/m/Br.
	吊構造部	340 tf·s²·m/m/Br.
	合計	690 tf·s²·m/m/Br.



図－3.4.4.1　補剛桁基本断面

表－3.4.4.2　対象とした実験ケース

実験ケース名		開口パターン
静的3分力試験	CASE-AD	WIND
	CASE-W1L1	WIND W1 L1
	CASE-W1L1/50G CASE-W1L1/50H	WIND W1 L1 φ=50%（金網 or 円孔）
	CASE-W1L1/60G CASE-W1L1/60H	WIND W1 L1 φ=60%（金網 or 円孔）
	CASE-W1L1/70G CASE-W1L1/70H	WIND W1 L1 φ=70%（金網 or 円孔）
ばね支持試験	CASE-50G/F10S	WIND 10° W1 L1 φ=50%（金網） 2750
	CASE-50G/F30S	WIND 30° W1 L1 φ=50%（金網）
	CASE-50G/F40S	WIND 40° W1 L1 φ=50%（金網）
	CASE-50G/F10L	WIND 10° W1 L1 φ=50%（金網） 5500
	CASE-50G/F15L	WIND 15° W1 L1 φ=50%（金網）
	CASE-50G/F20L	WIND 20° W1 L1 φ=50%（金網）



(a)　Gシリーズ　　(b)　Hシリーズ

図－3.4.4.2　オープングレーチングの種類

表－3.4.4.3　ばね支持試験条件（縮尺 1/71）

		実橋諸元	模型値
重量		35.0 tf/m/Br.	11.25 kgf/model
極慣性モーメント		690 tf·s²·m/m/Br.	0.0440 kgf·s²·m/model
振動数	たわみ	0.0537 Hz	1.235 Hz
	ねじれ	0.1604 Hz	3.237 Hz
振動数比		2.987	2.621
構造対数減衰率	たわみ	——	0.02
	ねじれ	——	0.02
風速倍率		——	3.585(注)

注）振動数比の差異をSelberg式で補正した場合の風速倍率

(2) 静的3分力試験結果

昨年度のばね支持試験による検討結果から、偏平箱桁断面の連成フラッター特性はオープングレーチング部の充実率や製作方法（Gシリーズと日シリーズ）によって有意な差異が生じたことから、それぞれのケースについて静的3分力試験を実施し検討を行った。

なお、本章で提示する静的3分力係数は、

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_m^2 A_n} \qquad (3.4.4.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_m^2 B\ell} \qquad (3.4.4.2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_m^2 B^2\ell} \qquad (3.4.4.3)$$

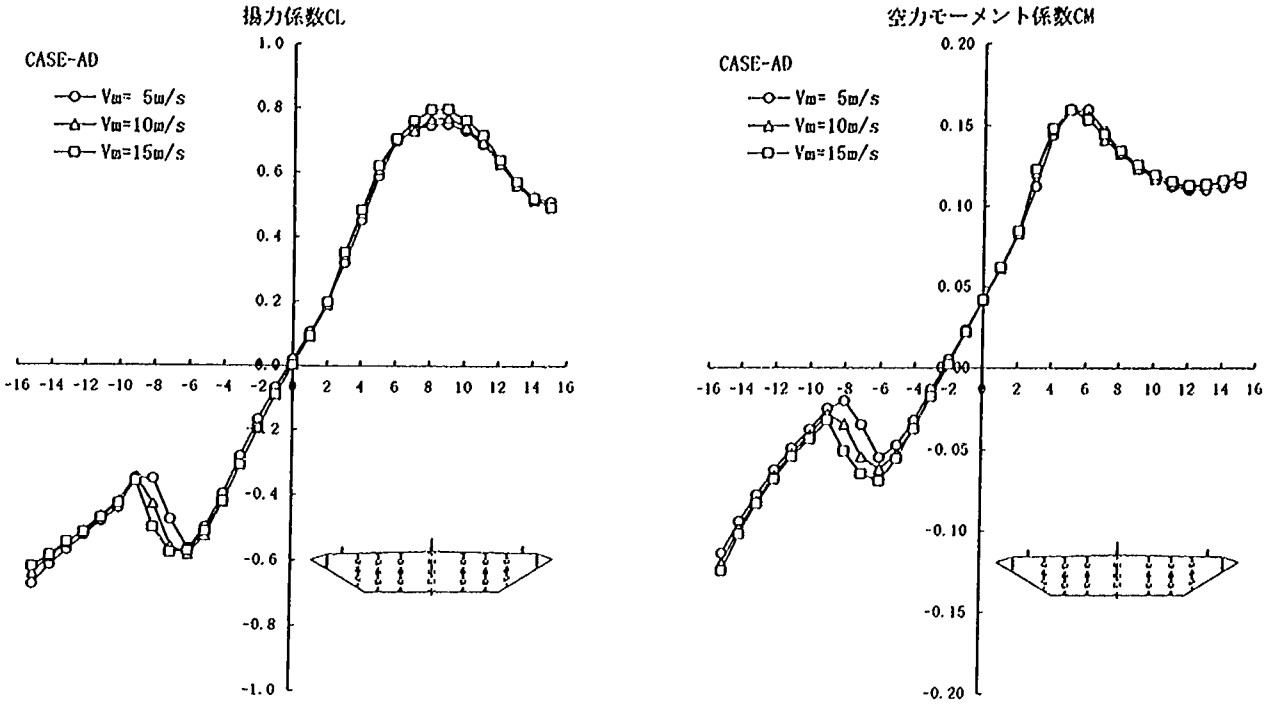
ただし、

D, C_D；抗力と抗力係数
L, C_L；揚力と揚力係数
M, C_M；空力モーメントと空力モーメント係数
ρ；空気密度, B；弦長(模型幅), ℓ；模型長
V_m；風洞風速, A_n；模型の投影面積

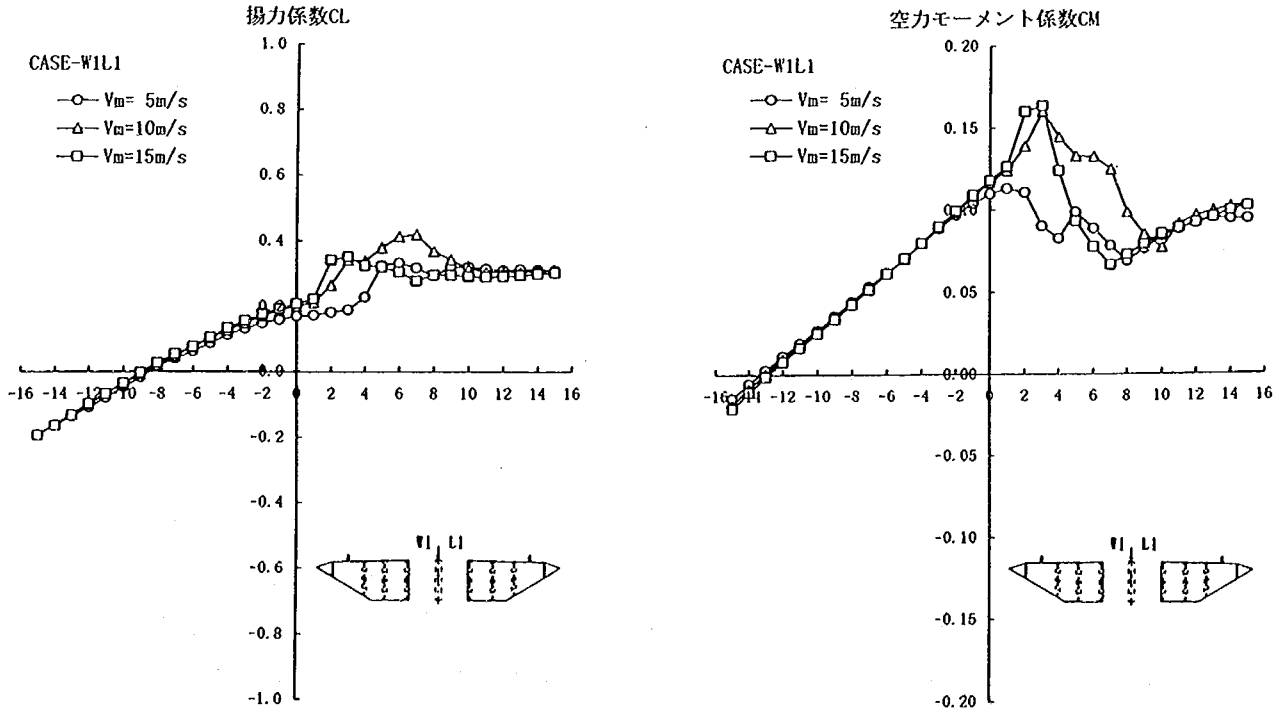
で定義したものである。

静的3分力試験は一様流中で実施した。ここで、レイノルズ数の影響を把握するため、V=5m/s、V=10m/s、V=15m/sなる3つの風速域（模型幅を代表長とした場合のレイノルズ数Reはそれぞれ$Re=1.98\times10^5$、3.96×10^5、5.94×10^5）で測定することとした。CASE-ADとCASE-W1L1の揚力係数C_Lおよび空力モーメント係数C_Mをそれぞれ図－3.4.4.3、図－3.4.4.4に示す。図－3.4.4.3と図－3.4.4.4を比較すればわかるように、CASE-ADの揚力係数C_Lと空力モーメント係数C_Mにはほとんどレイノルズ数依存性（風速依存性）が認められないのに対し、CASE-W1L1では$2^\circ \leqq \alpha \leqq 10^\circ$の迎角範囲において揚力係数と空力モーメント係数に明らかなレイノルズ数依存性が認められている。それゆえ、W1L1部分を完全に開口したCASE-W1L1に対するばね支持試験では、$2^\circ \leqq \alpha \leqq 10^\circ$の迎角範囲における応答がレイノルズ数によって変化する可能性があることに留意しなければならないと言える。

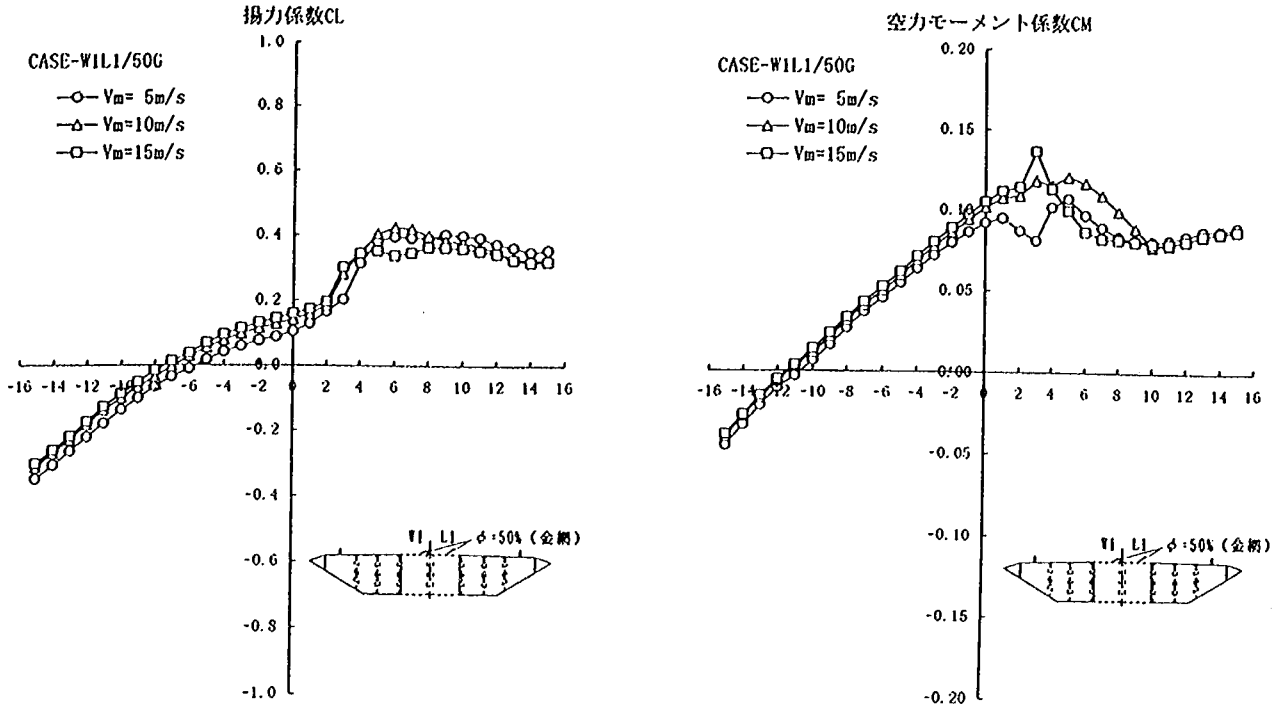
一方、オープングレーチングを設置した場合、製作方法（金網で製作したGシリーズと薄板に円形の孔を開けて製作した日シリーズ）による影響はほとんど認められなかったことから、ここではGシリーズの各ケース（CASE-W1L1/50G、CASE-W1L1/60G、CASE-W1L1/70G）に対する揚力係数および空力モーメント係数をそれぞれ図－3.4.4.5～図－3.4.4.7に示すこととする。これらの図から、オープングレーチングを設置した場合、充実率を50%～70%の範囲で変化させても揚力係数には大きなレイノルズ数依存性が認められないことがわかる。また、CASE-W1L1/50Gの空力モーメント係数には$2^\circ \leqq \alpha \leqq 10^\circ$なる迎角範囲においてレイノルズ数依存性が幾分認められるものの、CASE-W1L1/60GとCASE-W1L1/70Gではレイノルズ数依存性が非常に小さくなっていることがわかる。



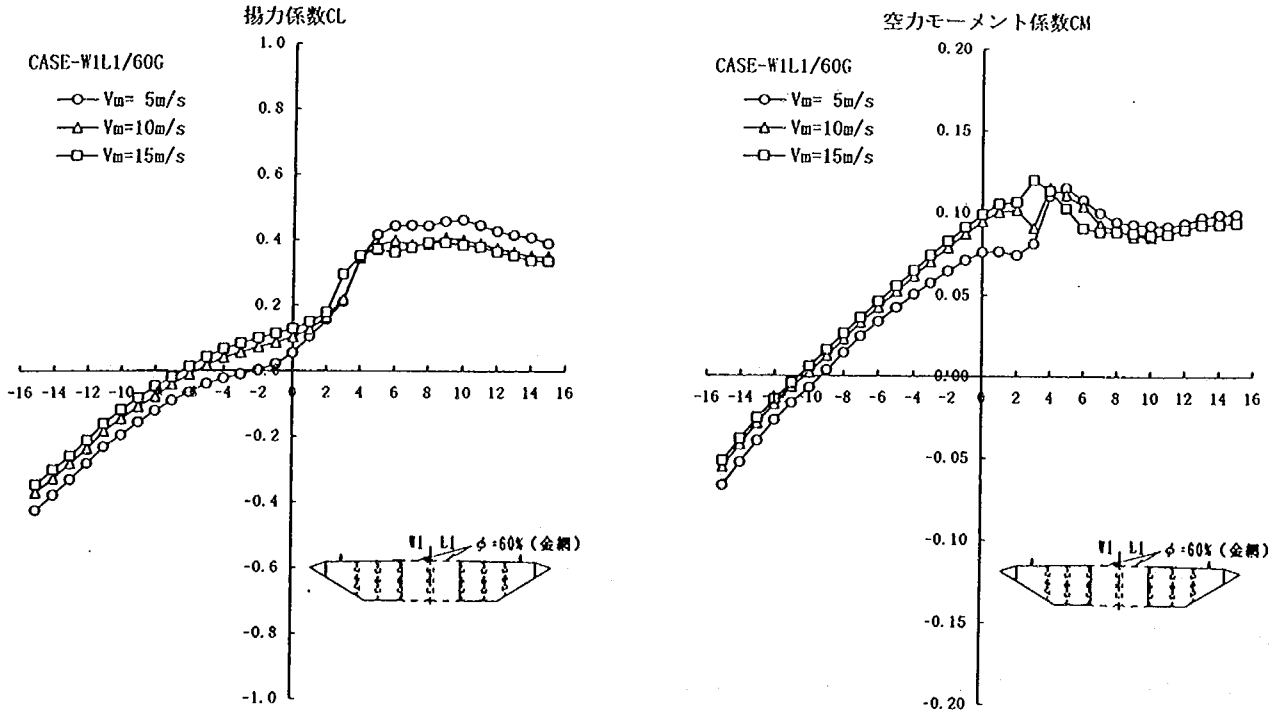
図－3.4.4.3　揚力係数 CL および空力モーメント係数 CM（CASE-AD）



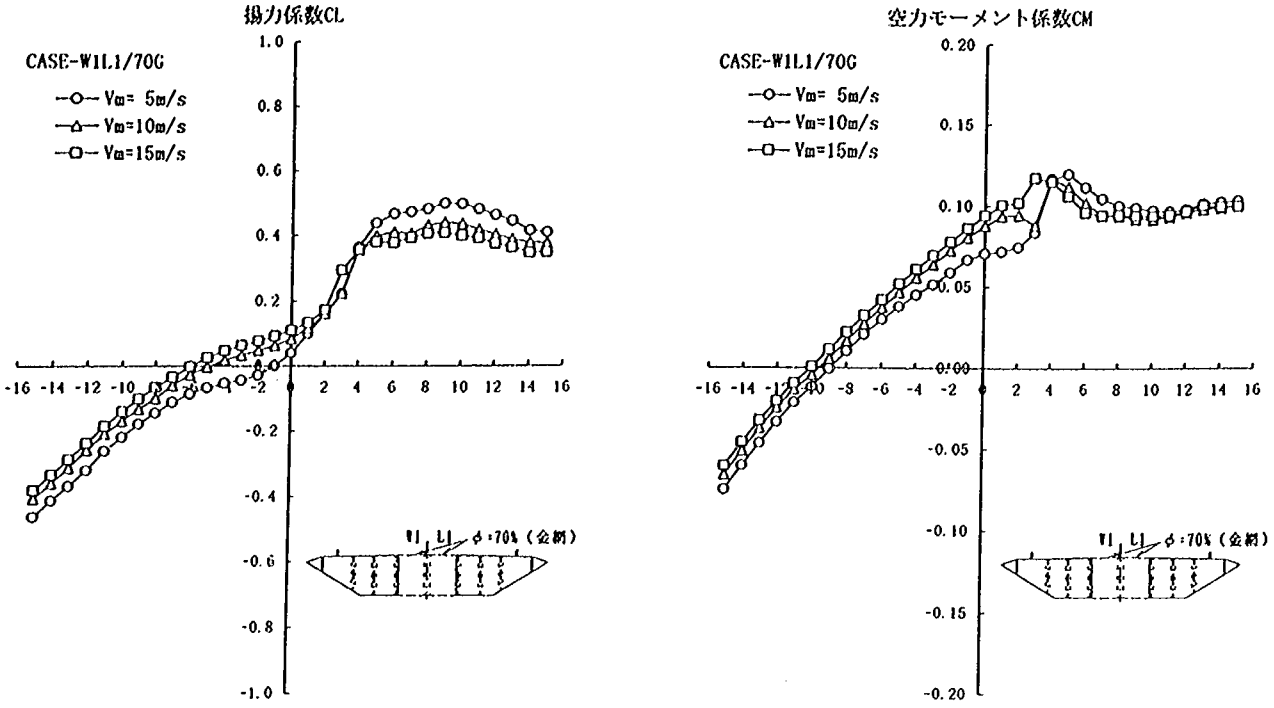
図－3.4.4.4　揚力係数 CL および空力モーメント係数 CM（CASE-W1L1）



図－3.4.4.5　揚力係数 CL および空力モーメント係数 CM（CASE-W1L1/50G）



図－3.4.4.6　揚力係数 CL および空力モーメント係数 CM（CASE-W1L1/60G）



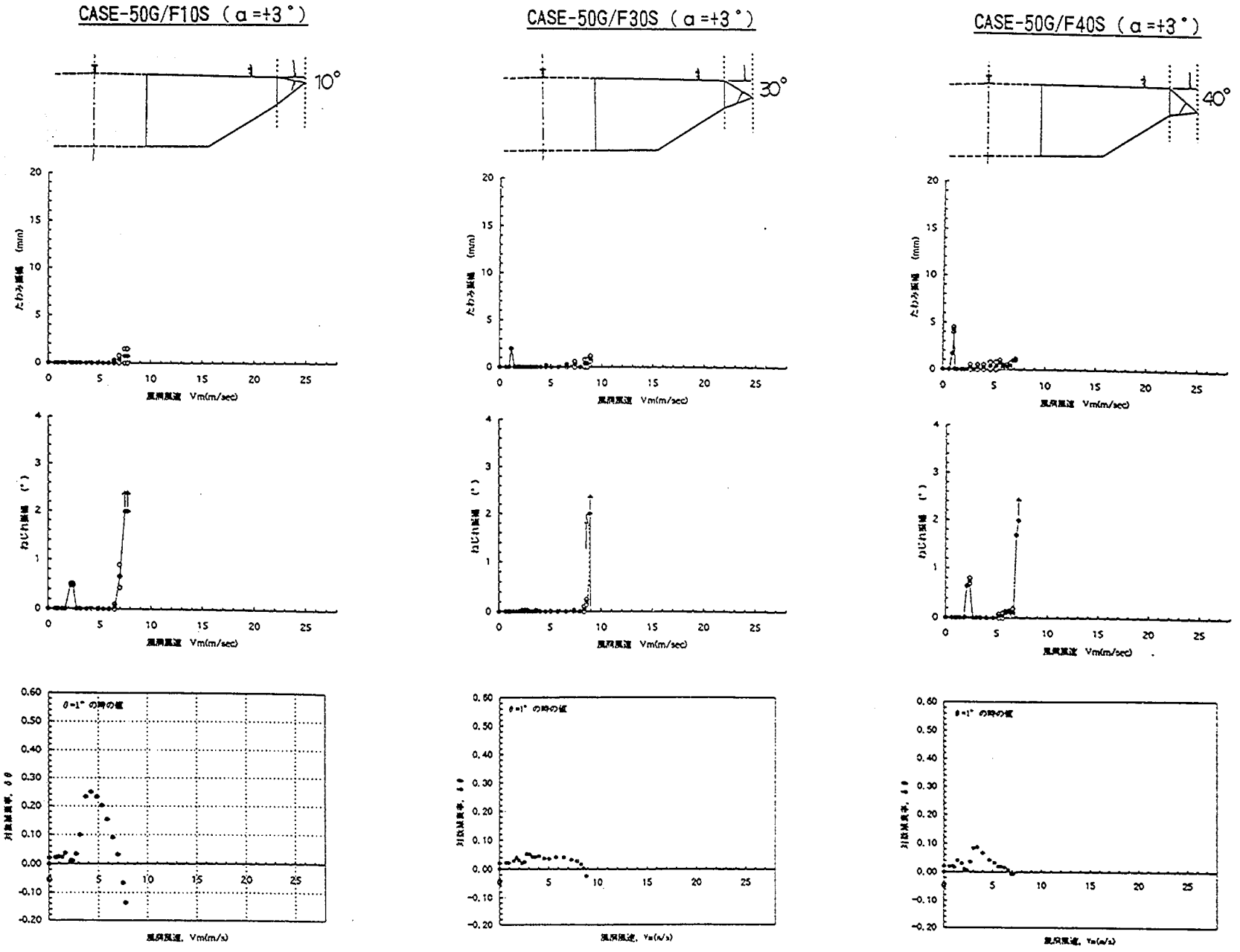
図－3.4.4.7　揚力係数 CL および空力モーメント係数 CM（CASE-W1L1/70G）

(3)　フェアリング形状を変化させた場合のばね支持試験結果

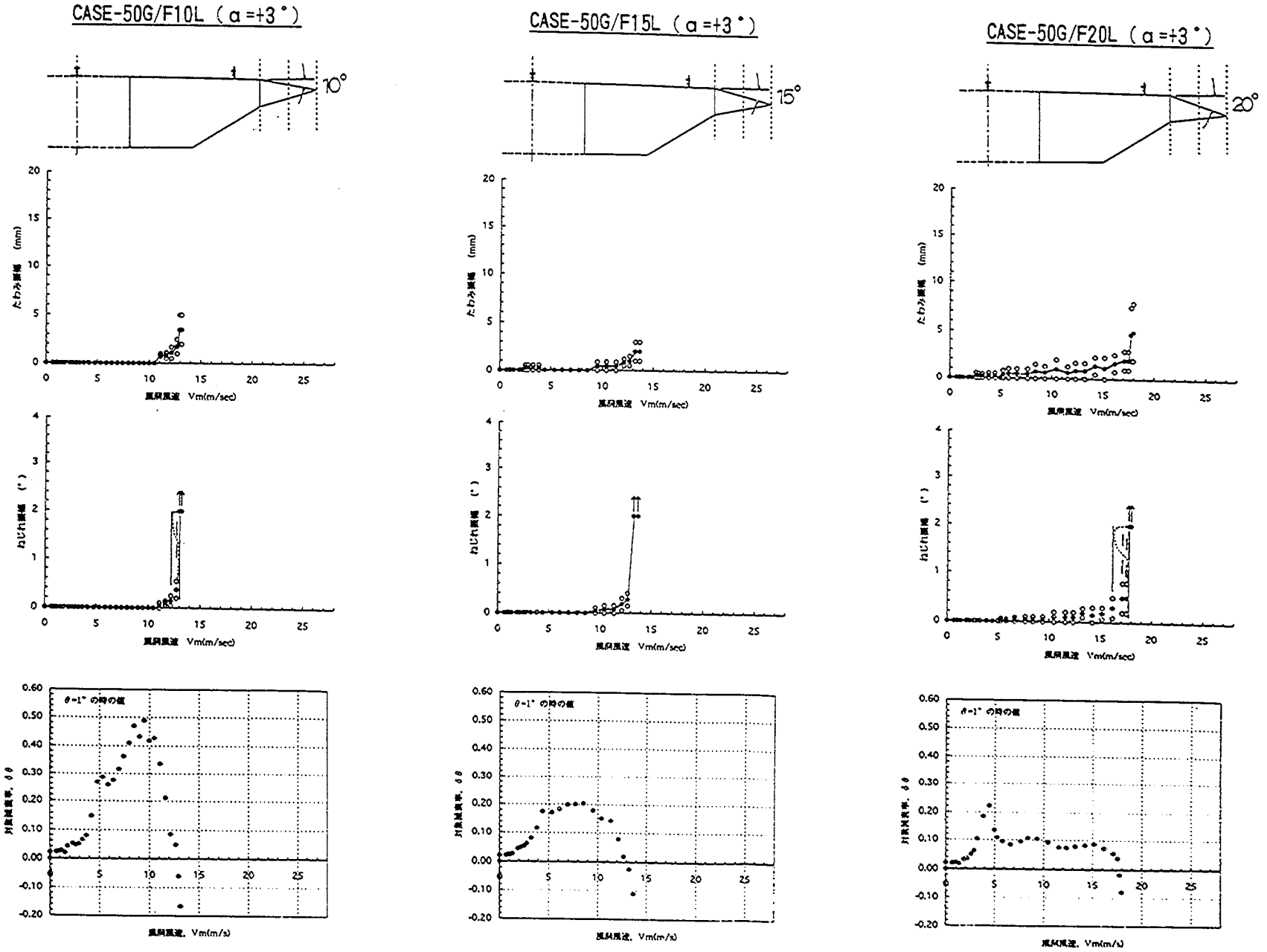
昨年度の検討結果から、迎角α=+3°の場合には、開口化による改善効果はいずれのケースにおいても認められないものの、迎角α=0°、-3°の場合には充実率50%の中央開口（CASE-W1L1/50G）により渦励振、フラッターの両者に対して改善効果が得られることがわかった。ここでは、迎角α=+3°の場合の耐風安定性の向上を目的とし、CASE-W1L1/50Gについて、そのフェアリング形状を変化させた場合について、ばね支持試験を実施し検討を行った。

図－3.4.4.8に、CASE-W1L1/50Gのフェアリング幅を変えずにフェアリングの上面傾斜角のみを変化させた場合のばね支持試験結果を示す。図－3.4.4.8から、CASE-50G/F10SでVm=7m/s、CASE-50G/F30SでVm=8.5m/s、CASE-50G/F40SでVm=6.5m/s程度のフラッター発現風速（風洞風速）となり、CASE-W1L1/50Gにおける値（Vm=13.6m/s）を下回ることから、これらのケースについてはフラッター特性の改善効果が得られないことがわかる。渦励振特性については、CASE-50G/F30Sでねじれの渦励振が発現せず改善効果が見られるものの、CASE-50G/F10S、CASE-50G/F40Sについては、ねじれの渦励振が発現する結果となった。

図－3.4.4.9には、CASE-W1L1/50Gのフェアリング幅を２倍とし、さらにフェアリングの上面傾斜角を変化させた場合の結果を示す。図－3.4.4.9から、渦励振特性については、各ケースともたわみ及びねじれの渦励振が発現せず改善効果が見られる。フラッター特性については、CASE-50G/F10LでVm=12.5m/s、CASE-50G/F15LでVm=13m/s、CASE-50G/F20LでVm=17.5m/s程度のフラッター発現風速（風洞風速）となり、CASE-50G/F20Lについては、CASE-W1L1/50の値（Vm=13.6m/s）を上回る結果となり改善効果が認められた。



図－3.4.4.8 フェアリング形状を変化させた場合の結果（CASE-50G/F10S、CASE-50G/F30S、CASE-50G/F40S）



図－3.4.4.9 フェアリング形状を変化させた場合の結果（CASE-50G/F10L、CASE-50G/F15L、CASE-50G/F20L）

(4) まとめ

今回の検討の結果を以下にまとめる。

・静的３分力試験結果から、開口部のない基本断面においてはレイノルズ数依存性は認められないのに対し、中央部を完全開口した断面（CASE-W1L1）では、$2° \leqq \alpha \leqq 10°$の迎角範囲において揚力係数と空力モーメント係数に明らかなレイノルズ数依存性が認められた。

・開口部にオープングレーチング化を施した断面については、揚力係数には大きな レイノルズ数依存性は認められないが、空力モーメント係数には CASE-W1L1/50G の場合、$2° \leqq \alpha \leqq 10°$の迎角範囲においてレイノルズ数依存性が幾分認められた。

・迎角$\alpha = +3°$において、CASE-W1L1/50G のフェアリング幅を２倍、フェアリング上面傾斜角を 20°とした場合に、CASE-W1L1/50G に比べ、渦励振特性およびフラッター特性の改善効果が認められた。

＜参考文献＞

1) 米田昌弘，大野克紀，田巻嘉彦，木村公男，宮地真一：走行路面部オープングレーチング化を施した超長大箱桁形式吊橋の耐風安定性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 917～928，1998 年 3 月.

3.4.5　楕円断面と多角形断面の空力特性予備検討

本検討では、超長大橋の実現に向け問題のひとつとなる「経済性と耐風性」をクリアする可能性を期待し、これまでの概念とは異なる新形式の橋梁を開発・提案することを試みた。

具体的には、構造検討よりも、まず断面空力特性に着目し、耐風安定性に優れた断面の開発を目的として、ばね支持試験および三分力試験を中心とした風洞試験による検討を基本に実施し、ある程度、耐風性が良好となれば構造検討を本格化することとした。

ここでは、上述のように新形式の橋梁断面の提案・開発を目的とし、あえて、過去に事例の少ない異色な断面を採用しその可能性を探ることとした。

検討の対象とした断面は、「多角形（20 角形）断面」（以降、「多角形断面」と称す）を中心に、「ひし形断面」、「開孔六角形断面」の計３断面を基本とした。

これらの断面は、次の特徴・メリットを考慮して選定した。

・強風時の交通遮断が少ない桁内通行の採用

・耐風安定性が良好と予想される断面形状、あるいは良好と報告されている断面に近い形状の採用

・２箱桁断面における開孔部の耐風安定性への効果

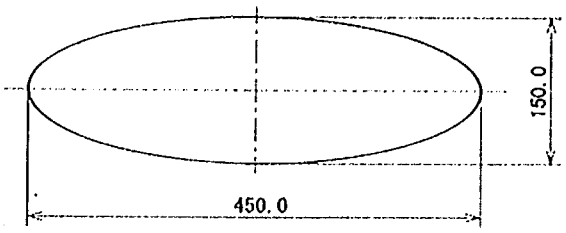
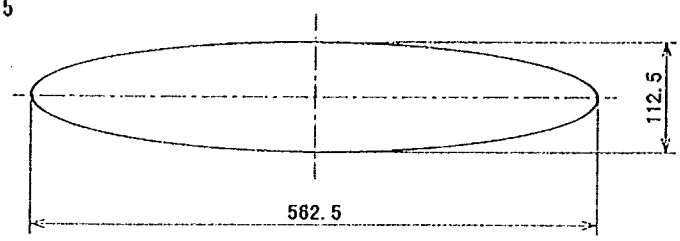
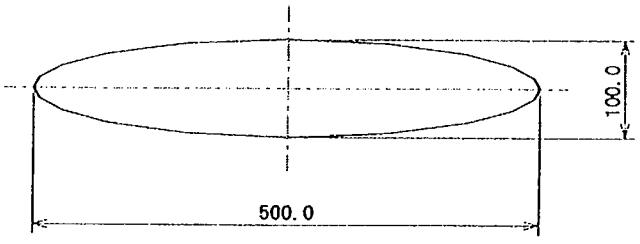
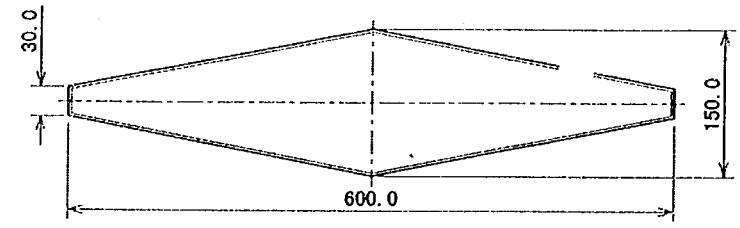
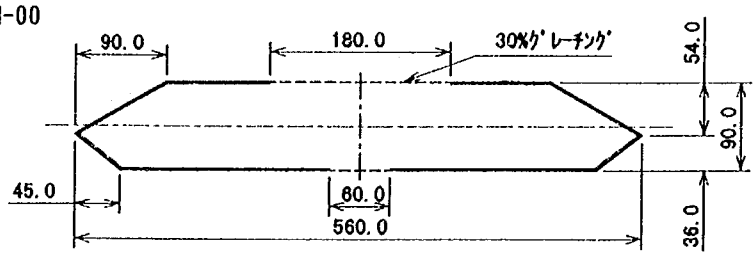
ここで、多角形断面は、楕円断面の持つ空力特性を期待して提案した断面で、楕円類似形状として実橋への適用を考慮した形状である。よって、この多角形断面を検討するにあたって、その原型でもある楕円断面についても予備検討を実施し、その空力特性の把握を試みた。

以上の検討断面（基本形）の一覧を表－ 3.4.5.1 に示す。

風洞試験を実施する際の各諸元については、いずれの断面も実用化をある程度想定した形状ではあるが、構造的なアプローチによる実橋への適用の可否の評価については二の次としていることから、ここでは明石海峡大橋二箱桁案の諸元を仮に適用することとした。よって、耐風性（フラッター特性）の評価は、実風速には言及せず形状補正係数（κ）で評価することとした。表－ 3.4.5.2 に諸元表（多角形断面への適用例）を示す。

また、形状諸元（断面比 B/D）については、６車線確保を前提に設定することとした。

表－3.4.5.1　検討断面（基本形）一覧

断　面　図	概　要
E-13 	楕円断面：E-13 断面比 1:3 基本形状 試験：三・非
E-15 	楕円断面：E-15 断面比 1:5 基本形 試験：三・非
P-15 	多角形断面：P-15 断面比 1:5 基本形 実橋を意識した楕円類似形状 20 角形 試験：ば・三・（非）
R-00 	ひし形断面：R-00 断面比 1:4 基本形 左右端を切り落とした変形型 試験：ば・三
H-00 	開孔六角形断面：H-00 基本形 中央開孔部（30%グレーチング付き）を有する 試験：ば・三

注　1)　断面図左上の記号は、各断面の呼称を示す。

2)　概要欄の試験項目記号は、以下の試験を実施したことを示す。（ ）付きは、実施後未検討のもの。
ば：ばね支持試験実施、三：三分力試験、非：非定常空気力試験

表－ 3.4.5.2　想定振動諸元（多角形断面（P-15）例）

		実橋想定値 B/D=5	模型所要値	実験値
呼　　称			P-15	P-15
縮　　尺		－	1/90	1/90
全幅(代 表 幅) B		45.0m	0.500m	0.500m
桁高(代 表 高) D		9.0m	0.100m	0.100m
重　　量		40.00 tf/m	4.938 kgf/m	5.074 kgf/m
極慣性モーメント		10000 tfm^2/m	0.0155 $kgfs^2m/m$	0.0164$kgfs^2m/m$
振 動 数	たわみ	0.050 Hz	0.900 Hz	1.051 Hz
	ねじれ	0.150 Hz	2.700 Hz	2.404 Hz
振 動 数 比		3.00	3.00	2.29
回 転 中 心		2.700 m	0.030 m	0.030 m
対数減衰率	たわみ	0.02	0.02	0.019
	ねじれ	0.02	0.02	0.020
風速倍率	たわみ	－	5.0	4.28
	ねじれ	－	5.0	5.62

注 (1).　本表は明石海峡大橋 2BOX 案検討時の値を参考に設定した諸元。（超長大橋、6 車線を想定）
(2). ひし形断面などにも、そのままスライドして使用しており、構造的には未検討である。

(1) 楕円断面の空力特性に関する予備検討

1) 概要

表－ 3.4.5.1 に示す断面比 1:3 (E-13) および 1:5 (E-15) の楕円断面について、三分力試験・非定常空気力試験を実施し、楕円断面の基本的な空力特性の把握を試みた。

なお、ばね支持試験については、模型製作過程で模型表面を滑面の状態とすることを考慮した（具体的には、表面コーティング処理）結果、重量的にばね支持試験の実施が困難な状態となったため、楕円断面を用いた試験実施を断念することとした。

試験は、基本形２断面の他、各断面の上流端に乱流促進、剥離位置固定を目的としたラフネス（サンドペーパー、トリッピングワイヤ）を設けた断面についても数ケース行い、同一風速（同一 Re 数）での基本断面特性との違いを調べることを試みた。検討断面を表－ 3.4.5.3 に示す。

楕円断面のような流線形状は、Re 数依存性が顕著に現れる断面であることがよく知られている。本来ならば、三分力試験などで Re 数依存性を調べるため、同一断面で風速を変化（Re 数を変化）させてその影響を把握するべきであるが、今回は、上述のように同じ Re 数領域で、表面粗度の変化による特性への影響を調べることとした。

2)試験・解析結果まとめ

①三分力試験

各断面の三分力試験結果を図－ 3.4.5.1(1)・(2)に示す。

E-13（基本形 1:3）で風速を変えた場合（9.975m/s, 20.288m/s）の三分力特性では、C_L・C_D における風速依存性（Re 数依存性）が顕著に現れていることがわかる（図－ 3.4.5.1(1)）。

Re 数としては、1.02×10^5 (9.98m/s)と 2.08×10^5 (20.29m/s) でわずか約倍半分の違いであるにも関わらず、特性差が顕著に現れており、空力的に敏感な断面であることが伺える。

また、上流端表面粗度の違いによる三分力特性への影響も顕著で、基本形との違いはもとより、ラフネスの違いによっても三分力特性に差がみらる。剥離点移動などによる断面周りの流れの変化が抗力係数に影響していると思われる（図－ 3.4.5.1(1)）。

E-15（基本形 1:5）でも風速依存性はみられるが、E-13 に比べその差は小さいものとなっている。
（図－ 3.4.5.1(2)）。

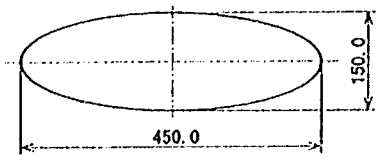
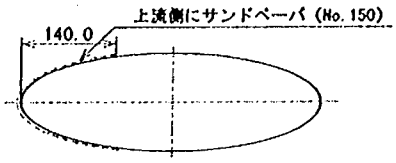
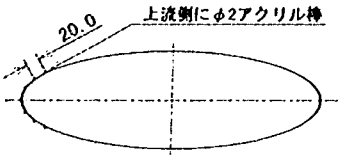
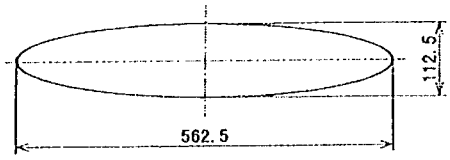
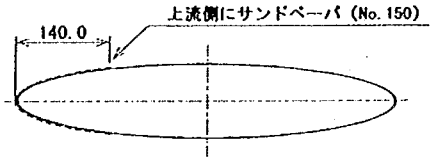
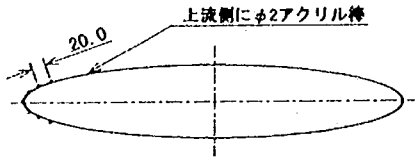
なお、モーメント係数については、いずれの場合も断面間での特性の違いは少ない。

全体的な特性として、翼断面の三分力特性と似た傾向を示している。また、今回の計測範囲内（± 15°）では、大迎角で揚力傾斜が負勾配となりはじめる断面も一部見受けられるが、失速して急激に負勾配へと変化するような傾向は、いずれの断面にもみられなかった。

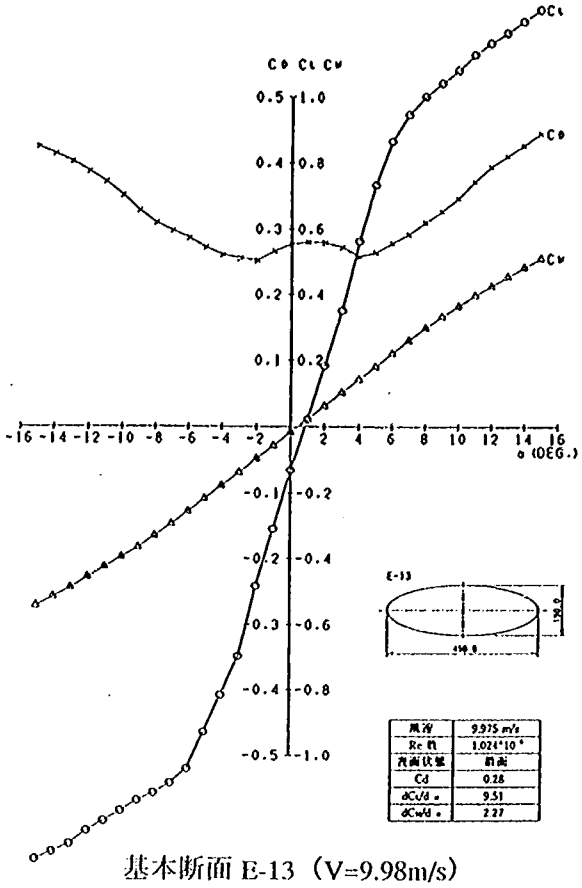
しかし、迎角に依存した空気力の変化が大きい（各係数の勾配が急）ことから、迎角に伴う静的変形について注意が必要であると思われる。

今回の検討では、Re 数依存性が大きいことは確認できた。しかし、実際の橋梁では Re 数が極超臨界域にあると予想され、この状況を再現する、あるいは Re 数の影響が少ない状態で試験を行うための手法としては、残念ながら検討量が不十分でその特定まではできなかった。

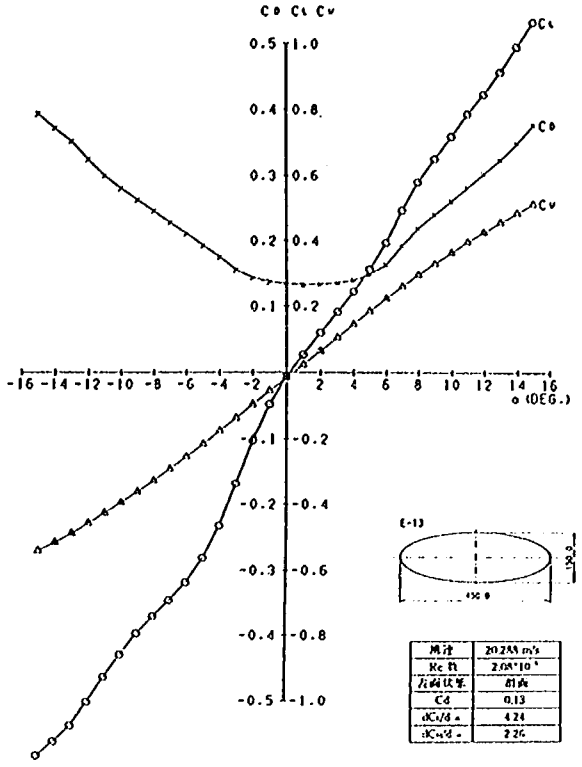
表－ 3.4.5.3　検討断面一覧

断　　面	概　　要	三分力	非定常	バネ支持
E-13 	楕円断面 断面比 1:3 基本形	○	○	×
E-13-R1 	楕円（断面比 1:3） 上流側剥離促進・位置固定 対策（サンドペーパー）	○	○	×
E-13-R2 	楕円（断面比 1:3） 上流側剥離促進・位置固定 対策（トリッピングワイヤ）	○	○	×
E-15 	楕円断面 断面比 1:5 基本形	○	○	×
E-15-R1 	楕円（断面比 1:5） 上流側剥離促進・位置固定 対策（サンドペーパー）	○	○	×
E-15-R2 	楕円（断面比 1:5） 上流側剥離促進・位置固定 対策（トリッピングワイヤ）	－	○	×

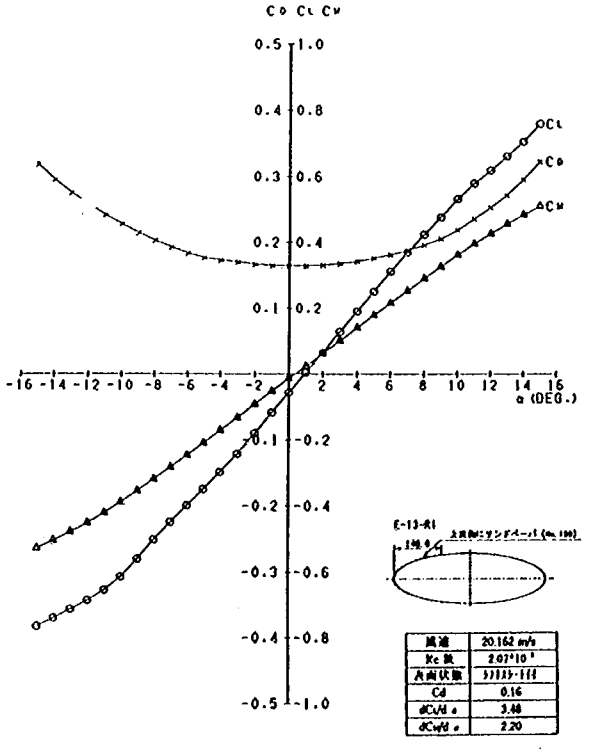
（注）・断面図左上の記号は、各断面の呼称。
・○は実施、－は未実施、×は調整が難しいため断念したもの。
・三分力試験は-15°～+15°の範囲で実施。非定常空気力試験 α=0°にて実施。



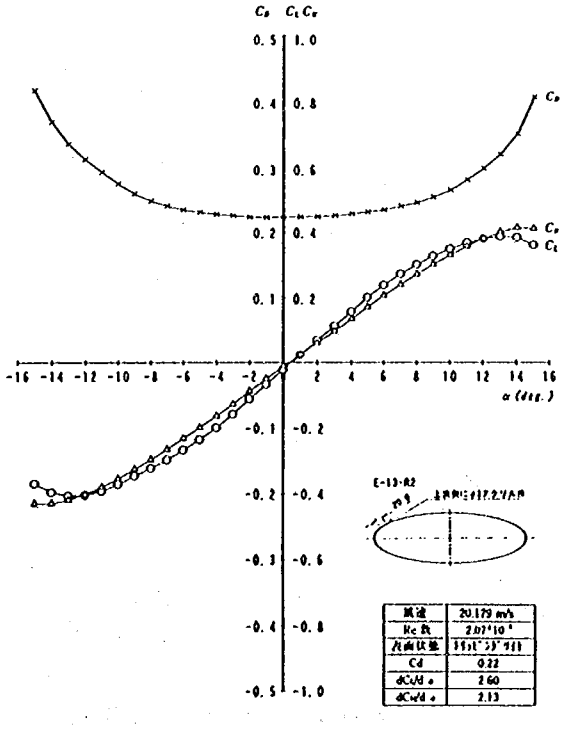
基本断面 E-13（V=9.98m/s）



基本断面 E-13（V=20.29m/s）

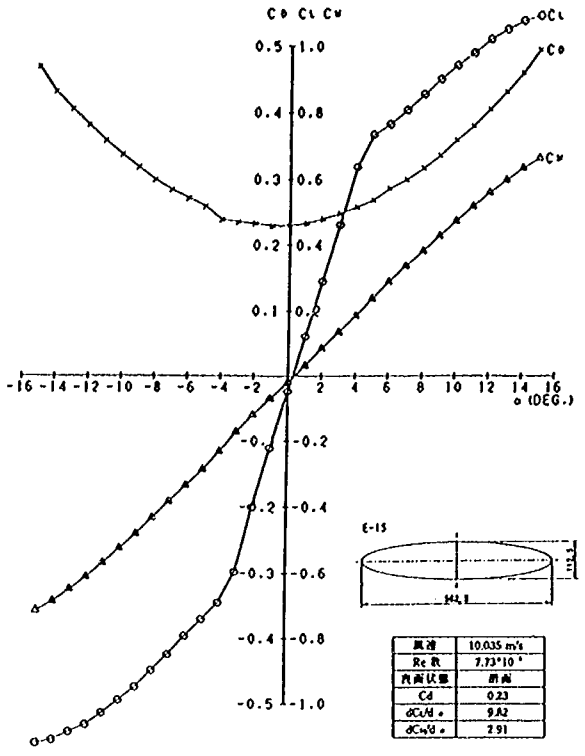


断面 E-13-R1（V=20.16m/s）

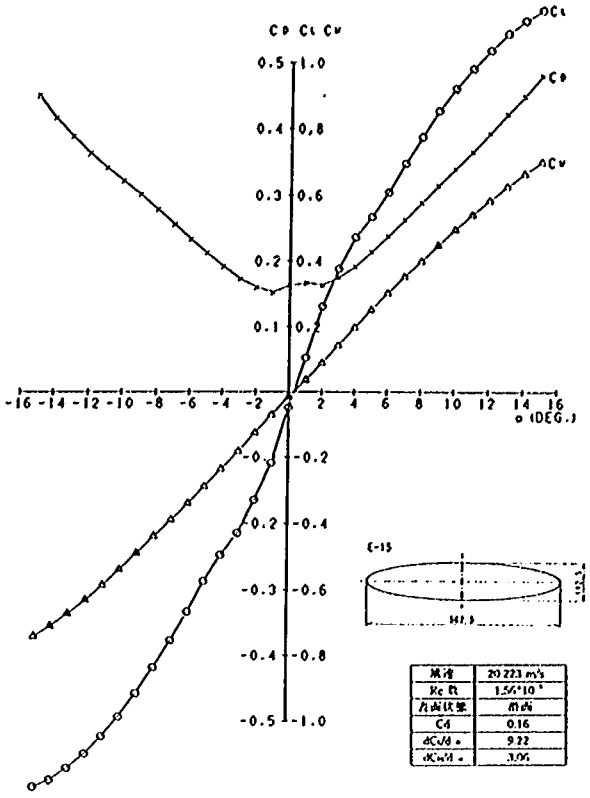


断面 E-13-R2（V=20.18m/s）

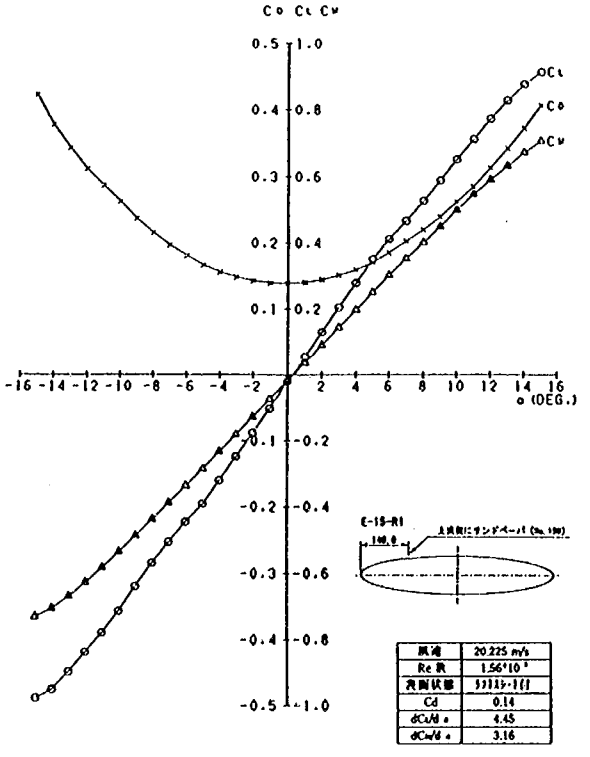
図－ 3.4.5.1(1)　三分力試験結果（楕円断面 E-13　B/D=1:3）



基本断面 E-15（V=10.04m/s）



基本断面 E-15（V=20.23m/s）



断面 E-15-R1（V=20.23m/s）

図－ 3.4.5.1(2)　三分力試験結果（楕円断面 E-15　B/D=1:5）

②非定常空気力試験（２次元フラッター解析結果）

表－ 3.4.5.1 に示す断面の迎角 0°における２次元フラッター解析結果を図－ 3.4.5.2(1)～(6)に示す。

また、このときの解析条件を表－ 3.4.5.4 に示す。ここでの条件は、表－ 3.4.5.2 の諸元を用いることとした。(明石二箱桁断面案検討時の諸元を参考にした値)

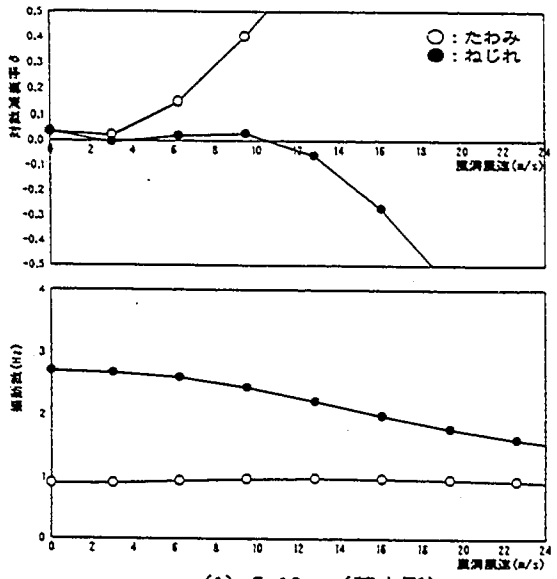
楕円断面は実橋への構造・形状的な適用が難しく具体的な検討も不十分であることから、ここでは各断面間でのフラッター特性の傾向およびその差を調べることまでとし、実橋風速などの実際値には言及しないこととした。

解析の結果からは、E-13-R1 を除いて、各断面間でのフラッター特性に顕著な違いはみられない。

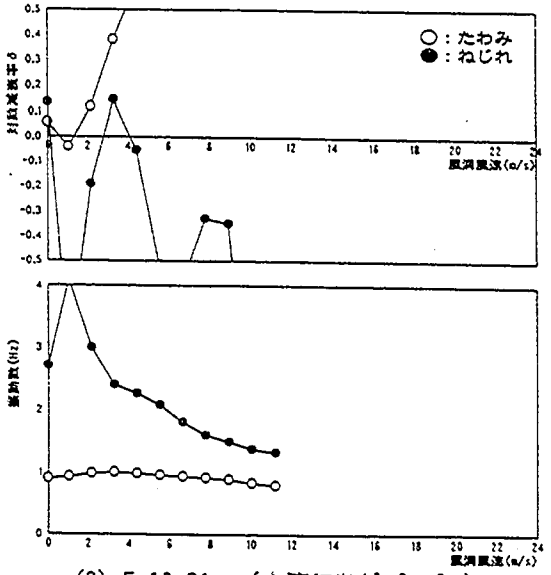
E-13-R1 については、他のケースに比べ不安定傾向を示しており、低風速域で不安定振動の発生が予想される結果となった。ただし、この断面については、非定常空気力係数の傾向も不安定で、今回の結果だけによる耐風性の評価は難しいと考えられる。

表－ 3.4.5.4　楕円断面（E-13/E-15）２次元フラッタ解析諸元

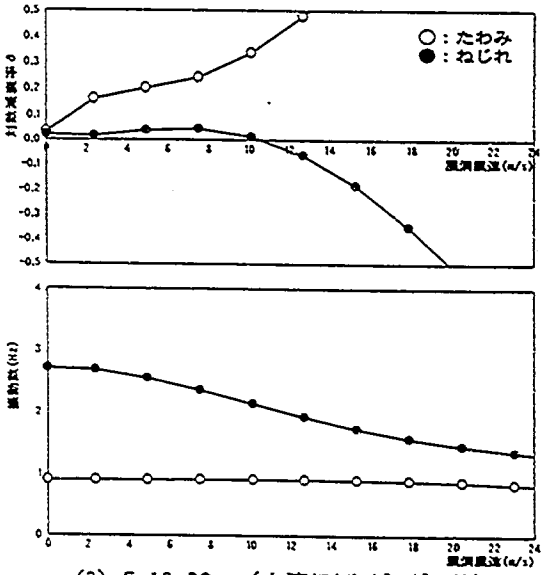
振動数	たわみ	0.050 Hz
	ねじれ	0.150 Hz
振動数比		3.0
構造減衰		0.02
代 表 幅		45.0 m
重　　量		40.0 tf/m
極慣性モーメント		10,000 tm2/m



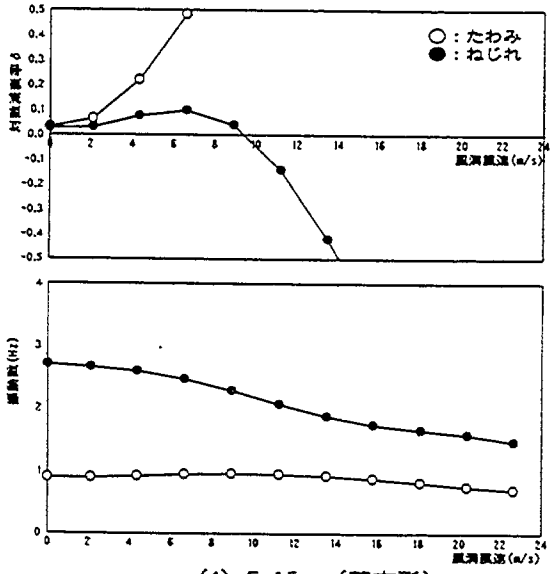
(1). E-13　(基本形)



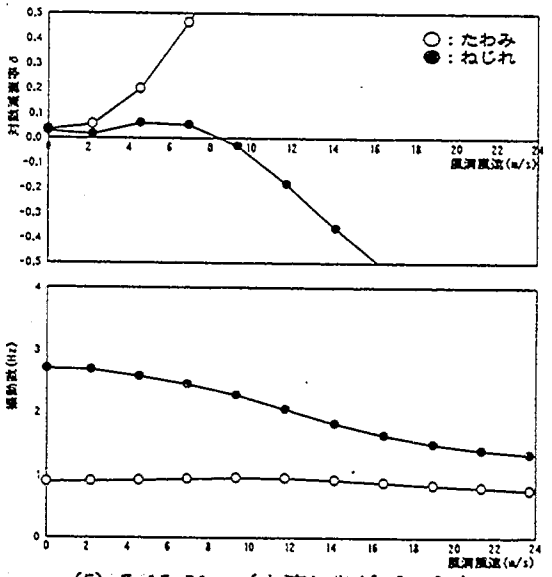
(2). E-13-R1　(上流にｻﾝﾄﾞﾍﾟｰﾊﾟｰ)



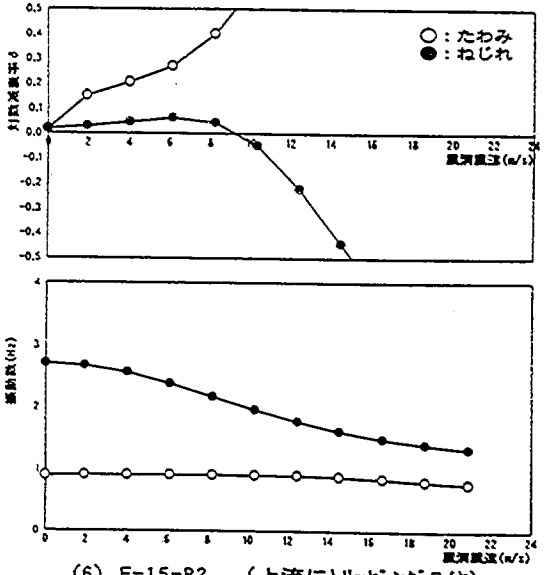
(3). E-13-R2　(上流にﾄﾘｯﾋﾟﾝｸﾞﾜｲﾔ)



(4). E-15　(基本形)



(5). E-15-R1　(上流にｻﾝﾄﾞﾍﾟｰﾊﾟｰ)



(6). E-15-R2　(上流にﾄﾘｯﾋﾟﾝｸﾞﾜｲﾔ)

図－3.4.5.2　楕円断面　２次元フラッター解析結果

(2) 多角形断面の空力特性に関する検討

1) 概要

ここでは、実際の橋梁への適用を想定した楕円類似形状の多角形断面に関する検討を行った。図－3.4.5.3に想定した実橋の概略構造図を示す。

断面形状は、B/D=5（桁高 D=9m，全幅Ｂ=45m）の楕円に近い多角形断面（20 角形）とした。

これは、超長大橋として６車線確保すること、B/D をこれ以上小さくすると上下部に余空間が多くなり経済的に不利になる可能性があること、純粋な楕円断面を実橋に適用するのは製作上難しいと考えられることなどを考慮して決定したものである。

構造的には、楕円類似形状の多角形断面を有する吊り橋を考え、桁の剛性は路面下の BOX 部と桁中央・左右に組んだトラスで持たせる。上面および両側面にある断面形状を形成する部分は、強度部材ではなく単なる空力的な形状保持のための外形材とし、特に上面は、採光・排気を考慮し開放も検討可能な構造としている。なお、これらの構造については、実用化をある程度考慮して想定した構造ではあるが、基本的には解析などによる詳細検討を実施する前の草案の段階のものである。

以上のような新形式橋梁について、その耐風安定性に着目し風洞試験による検討を行った。

具体的には、多角形断面の耐風安定性を把握するため、ばね支持試験・三分力試験・非定常空気力測定試験を実施した。

模型は、縮尺 1/90 で、上面開放時の検討を考慮し、上面外形材は着脱可能な構造として内部トラスまで模型化した。断面概略図を図－3.4.5.4 に示す。

2)試験結果

①ばね支持試験

表－3.4.5.2 の諸元で迎角 0°におけるばね支持試験を実施した。試験は、基本断面および検査車レールやセンタバリア・デフレクタなどの添架物を基本断面に設置した状態、さらには上部開放状態について実施した。これらの試験結果を表－3.4.5.5 (1)～(3)および図－3.4.5.5 (1)～(3)に示す。

なお、基本断面・上部開放断面以外は、フラッター特性に着目した試験を実施した。

②三分力試験

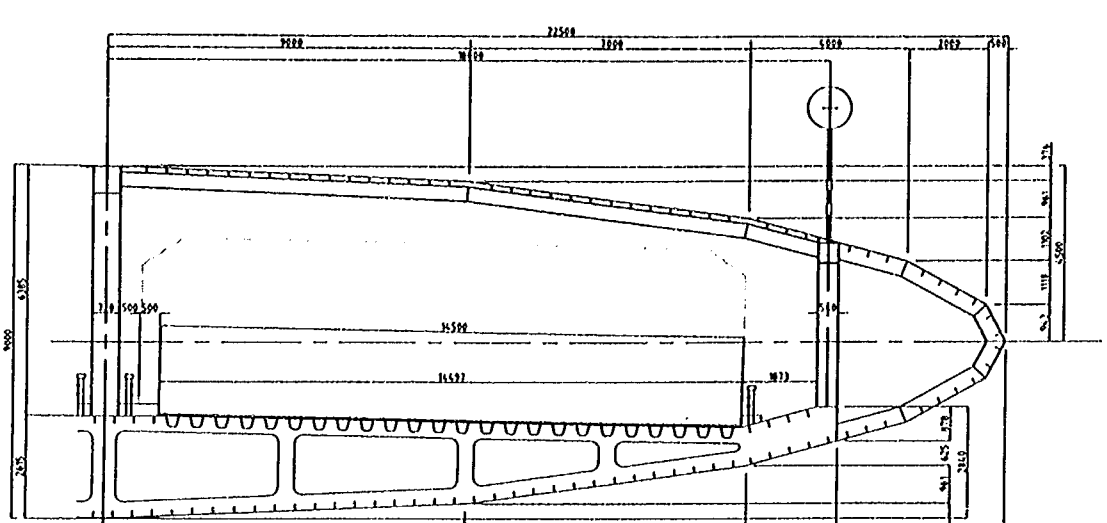
ここでは、基本形（ME-N-P1500）を中心に、検査車レール設置断面（ME-N-P15K0）、上部開放状態２断面（全開放：ME-N-P15FO、中央開放：ME-N-P15CO）の計４断面について試験を実施した。

試験結果を図－3.4.5.6 (1)～(5)に示す。

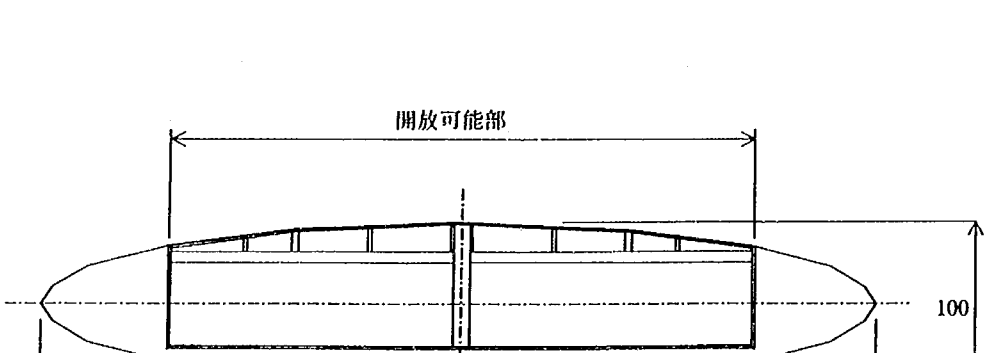
なお、無次元化手法は、「本州四国連絡橋風洞試験要領（1980)・同解説」に準ずることとした。（代表幅Ｂを用いて無次元化）

③非定常空気力測定試験

非定常空気力試験結果については、その係数の特性が不安定で、フラッター解析による評価も信頼性に欠ける結果となることが予想された。よって、今後数ケースの試験を重ね、Re 数依存性など空力特性がある程度明らかになったうえでの検討が望ましいと判断し、今回は非定常空気力試験による評価・検討は断念することとした。

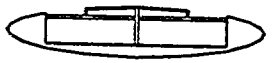


図－ 3.4.5.3　実橋の構造想定図



図－ 3.4.5.4　風洞試験実施断面

表－ 3.4.5.5 (1)　ばね支持試験試験結果（１）

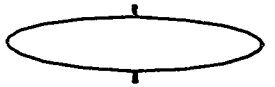
略　　号	実橋値			ME-N-P1500			ME-N-P15FO			ME-N-P15CO			ME-N-P15SO		
															
	想定実橋諸元 多角形（20角形）断面 断面比=1:5			1:5多角形断面 （基本形）			1:5多角形断面 上面全開放			1:5多角形断面 上面部分開放：中央			1:5多角形断面 上面部分開放：両端		
縮尺	1/90														
全幅B　(m)	45.0　(0.5)														
桁高D　(m)	5.0　(0.1)														
開孔幅b(m)	0.0														
B/D	5.0														
b/B	0.0														
Nθ　(Hz)	0.1500　(2.700)			0.1500　(2.404)			0.1500　(2.424)			0.1500　(2.393)			0.150　(2.404)		
Nθ／Nη	3.000			2.288			2.305			2.275			2.287		
W　(tf/m)	40.00　(4.938kgf/m)			41.10　(5.074kgf/m)			41.19　(5.085kgf/m)			41.22　(5.089kgf/m)			41.27　(5.095kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	1020.　(0.01550kgfs²m/m)			1077.　(0.01641kgfs²m/m)			1059.　(0.01614kgfs²m/m)			1086.　(0.01655kgfs²m/m)			1076.　(0.01641kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	5.00			5.62			5.57			5.64			5.62		
減衰率　たわみ	－			(0.0195)			(0.0204)			(0.0197)			(0.0194)		
減衰率　ねじれ	－			(0.0196)			(0.0180)			(0.0196)			(0.0197)		
迎角α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1221			0.1202			0.1206			0.1194	
Vcr　(m/s)		－			54.9			－			52.7			51.4	

Selbergの式による補正

VF　(m/s)		54.4			55.4			55.69			55.8			56.0	
形状補正係数　κ		－			0.99			－			0.95			0.92	

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 3.4.5.5 (2)　ばね支持試験試験結果（２）

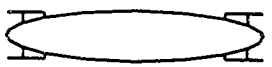
略　　号		ME-N-P15K0			ME-N-P15K3			ME-N-P15B05			ME-N-P15B10					
																
		1:5 多角形断面 検査車レール（H=D/20)設置 （その１）			1:5 多角形断面 検査車レール（H=D/20)設置 （その２）			1:5 多角形断面 センタバリア設置 H=D/20			1:5 多角形断面 センタバリア設置 H=D/10					
縮尺		1/90														
全幅 B　(m)		45.0　(0.5)														
桁高 D　(m)		5.0　(0.1)														
開孔幅 b (m)		0.0														
B / D		5.0														
b / B		0.0														
N θ　(Hz)		0.1500　(2.381)			0.1500　(2.398)			0.1500　(2.403)			0.1500　(2.402)					
N θ ／ N η		2.281			2.296			2.295			2.298					
W　(tf/m)		41.80　(5.160kgf/m)			41.82　(5.162kgf/m)			41.56　(5.131kgf/m)			41.75　(5.154kgf/m)					
I　(tfs²m/m)		1097.　(0.01671kgfs²m/m)			1081.　(0.01647kgfs²m/m)			1077.　(0.01642kgfs²m/m)			1078.　(0.01642kgfs²m/m)					
ねじれ風速倍率		5.67			5.63			5.62			5.62					
減衰率	たわみ	(0.0186)			(0.0181)			(0.0194)			(0.0191)					
	ねじれ	(0.0198)			(0.0206)			(0.0207)			(0.0205)					
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1191			0.1192			0.1192			0.1202				
Vcr　(m/s)			52.9			46.7			44.3			30.54				

Selberg の式による補正

VF　(m/s)			56.5			56.4			56.2			56.1				
形状補正係数　κ			0.94			0.83			0.79			0.55				

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－3.4.5.5 (3)　ばね支持試験試験結果（3）

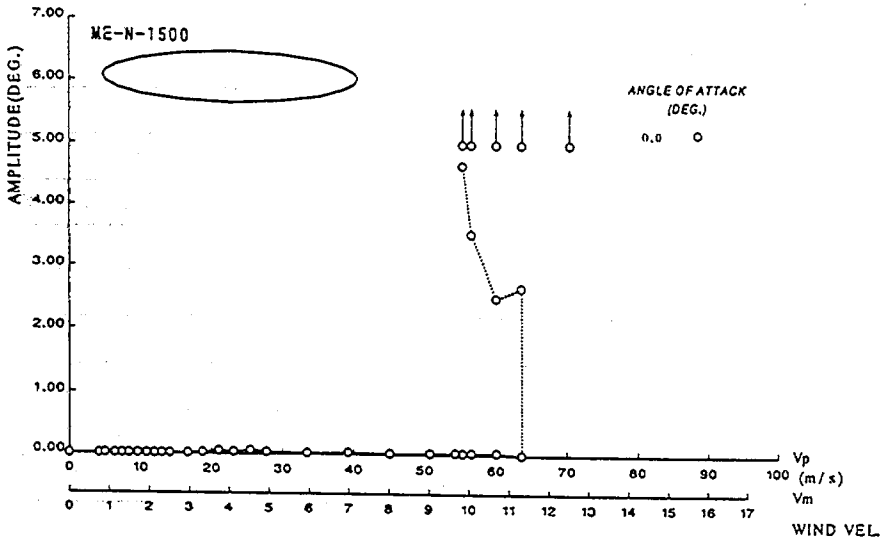
略　　号	ME-N-P15D1	ME-N-P15D2	ME-N-P15F		
					
	1:5 多角形断面 デフレクタ設置 （その１）	1:5 多角形断面 デフレクタ設置 （その２）	1:5 多角形断面 フラップ設置		
縮尺	1/90				
全幅 B　(m)	45.0　(0.5)				
桁高 D　(m)	5.0　(0.1)				
開孔幅 b (m)	0.0				
B / D	5.0				
b / B	0.0				
N θ　(Hz)	0.1500　(2.348)	0.1500　(2.342)	0.1500　(2.312)		
N θ ／ N η	2.268	2.262	2.264		
W　(tf/m)	42.53　(5.251kgf/m)	42.55　(5.253kgf/m)	43.78　(5.405kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	1128.　(0.01720kgfs²m/m)	1134.　(0.01728kgfs²m/m)	1163.　(0.01773kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	5.75	5.76	5.84		
減衰率　たわみ	(0.0196)	(0.0204)	(0.0200)		
減衰率　ねじれ	(0.01912)	(0.0209)	(0.0197)		

迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1190			0.1194							
Vcr　(m/s)		52.5			51.39			47.39							

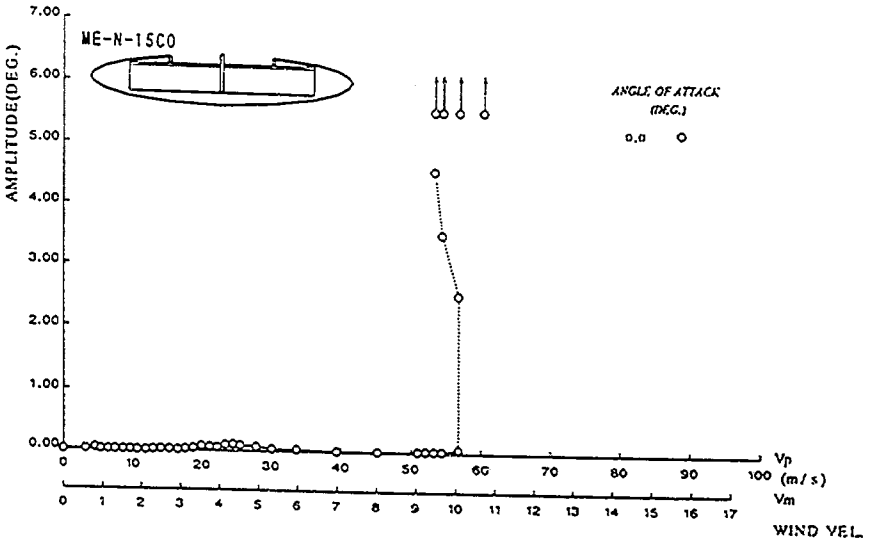
Selberg の式による補正

VF　(m/s)		56.84			57.14			57.81							
形状補正係数　κ		0.92			0.90			0.82							

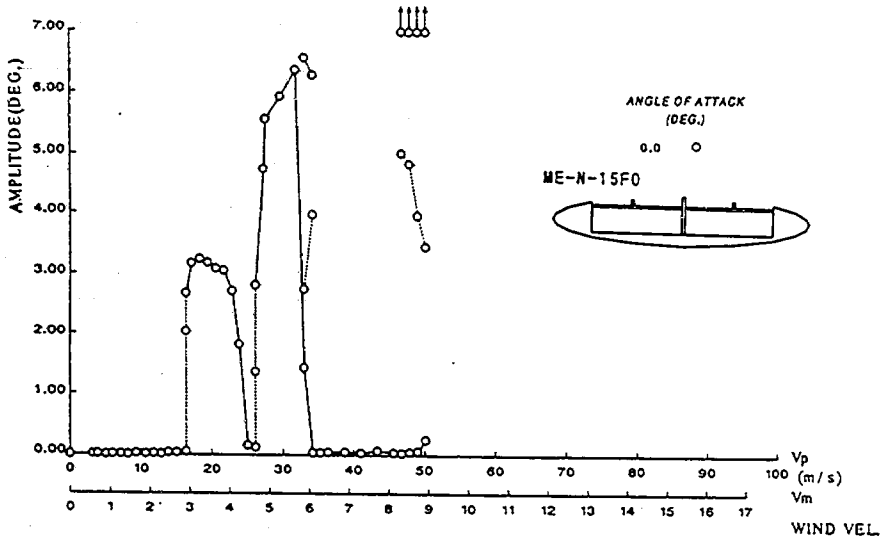
（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。



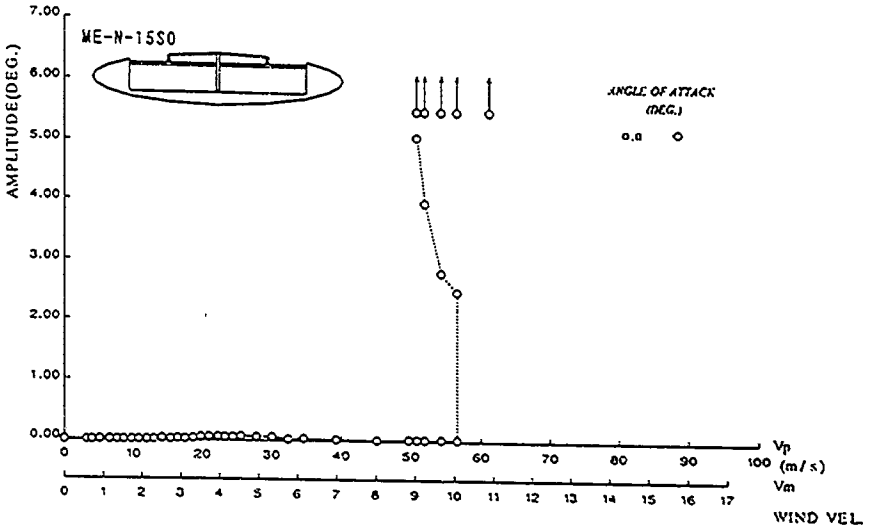
V-Aθ特性図（多角形断面　基本形P-15：一様流中）



V-Aθ特性図（多角形断面　上面中央開放P-15-C0：一様流中）

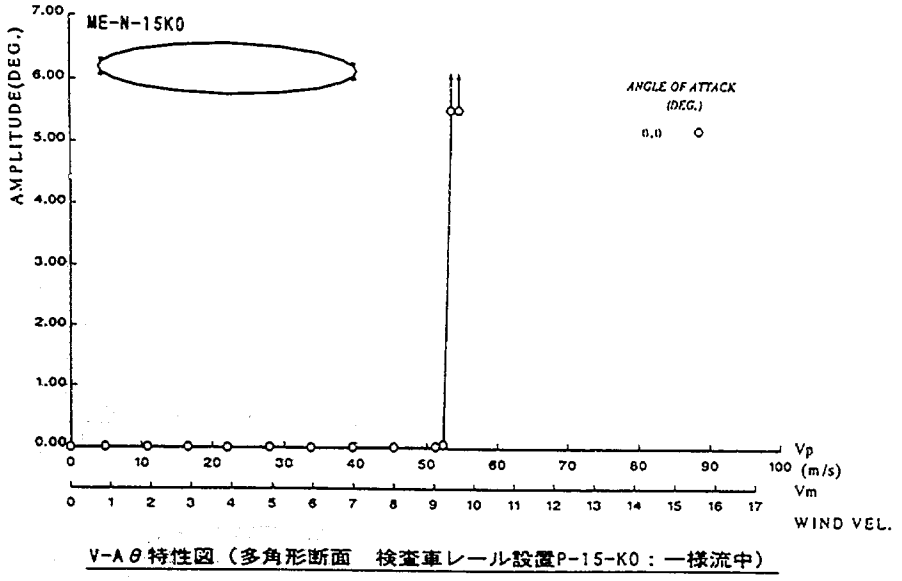


V-Aθ特性図（多角形断面　上面全開P-15-F0：一様流中）

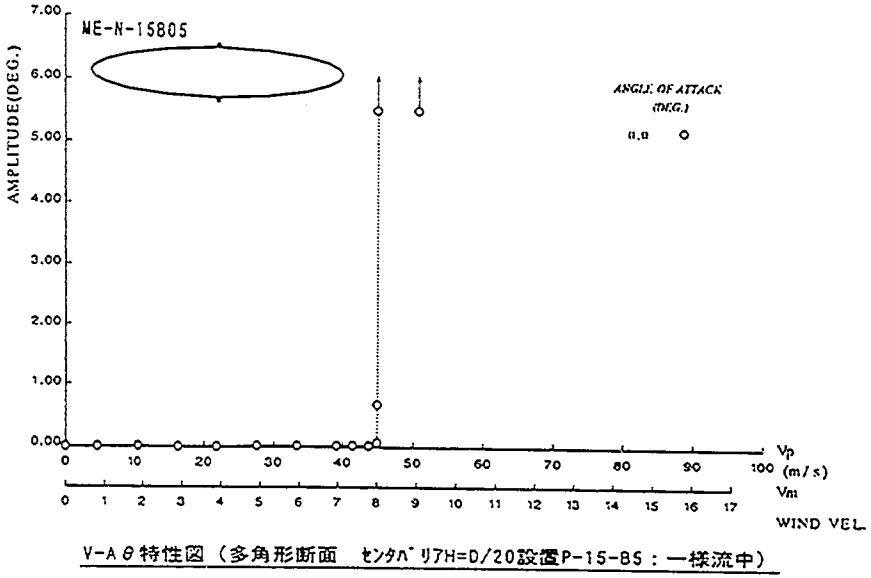


V-Aθ特性図（多角形断面　上面部分開放P-15-S0：一様流中）

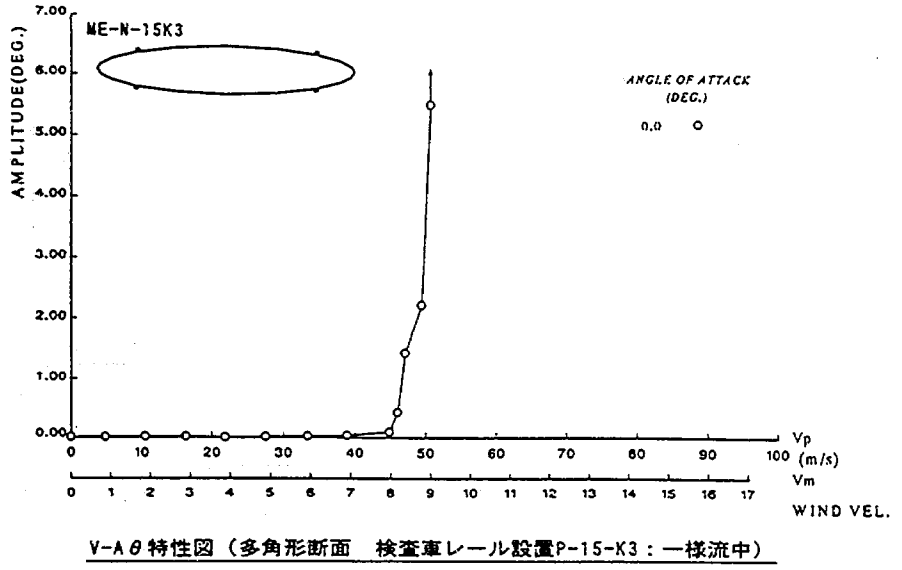
図－3.4.5.5 (1)　V-Aθ特性図（1）



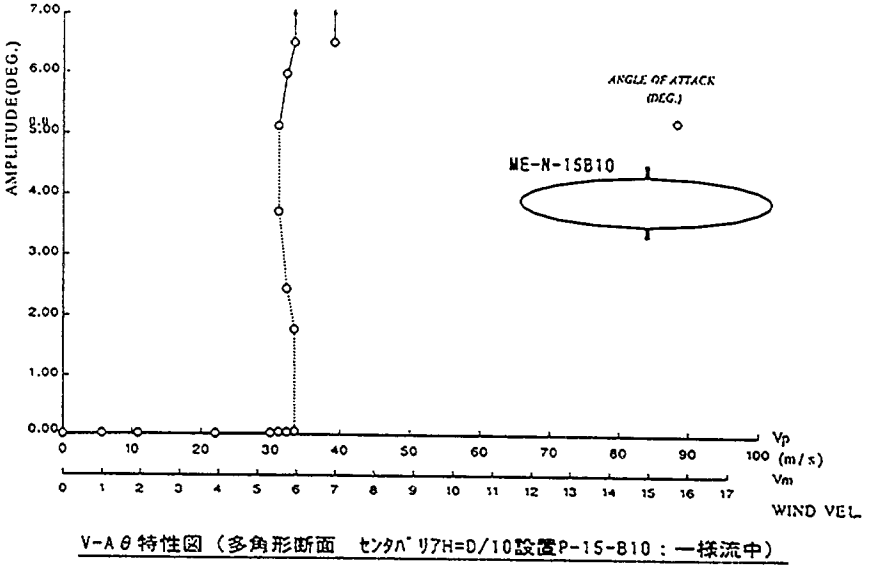
V-Aθ特性図（多角形断面　検査車レール設置P-15-K0：一様流中）



V-Aθ特性図（多角形断面　ｾﾝﾀﾊﾞﾘ7H=D/20設置P-15-B5：一様流中）

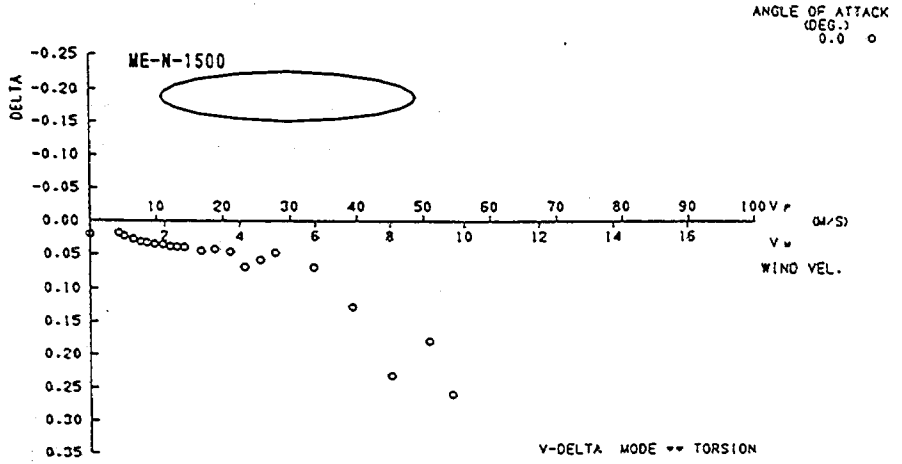


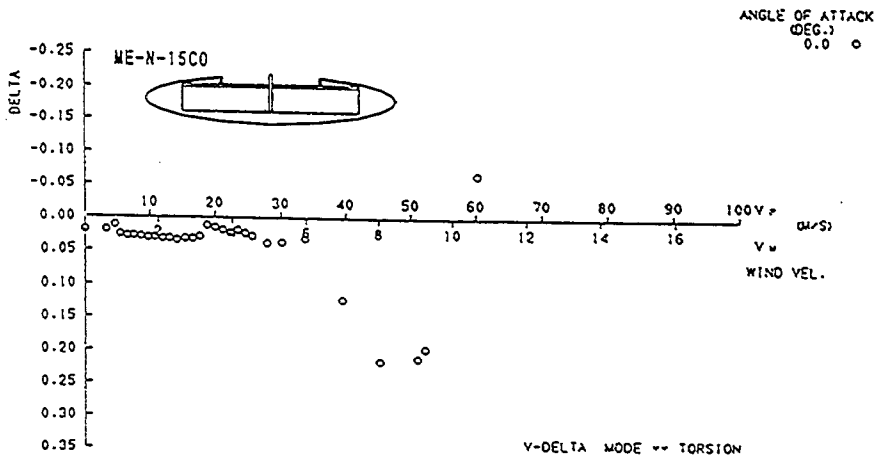
V-Aθ特性図（多角形断面　検査車レール設置P-15-K3：一様流中）

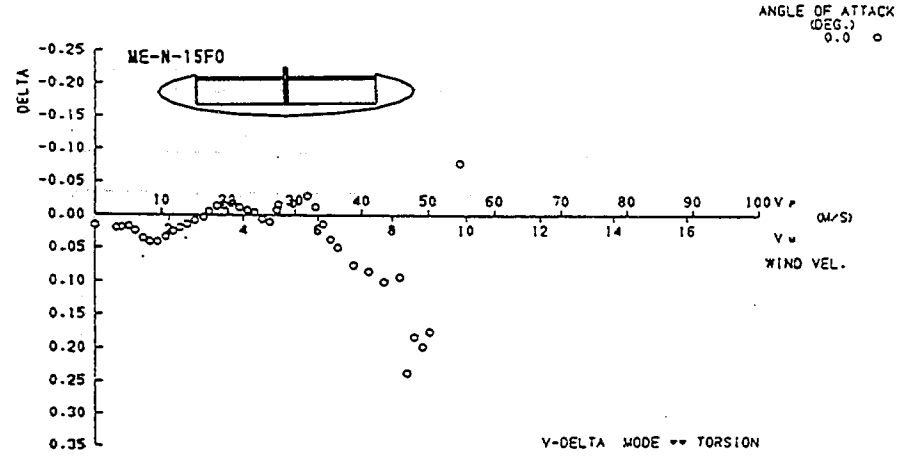


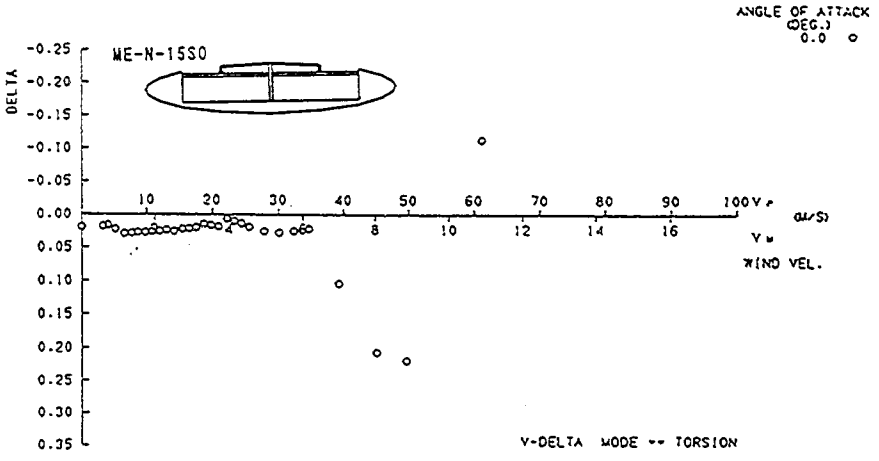
V-Aθ特性図（多角形断面　ｾﾝﾀﾊﾞﾘ7H=D/10設置P-15-B10：一様流中）

図－3.4.5.5 (2)　V-Aθ特性図（2）

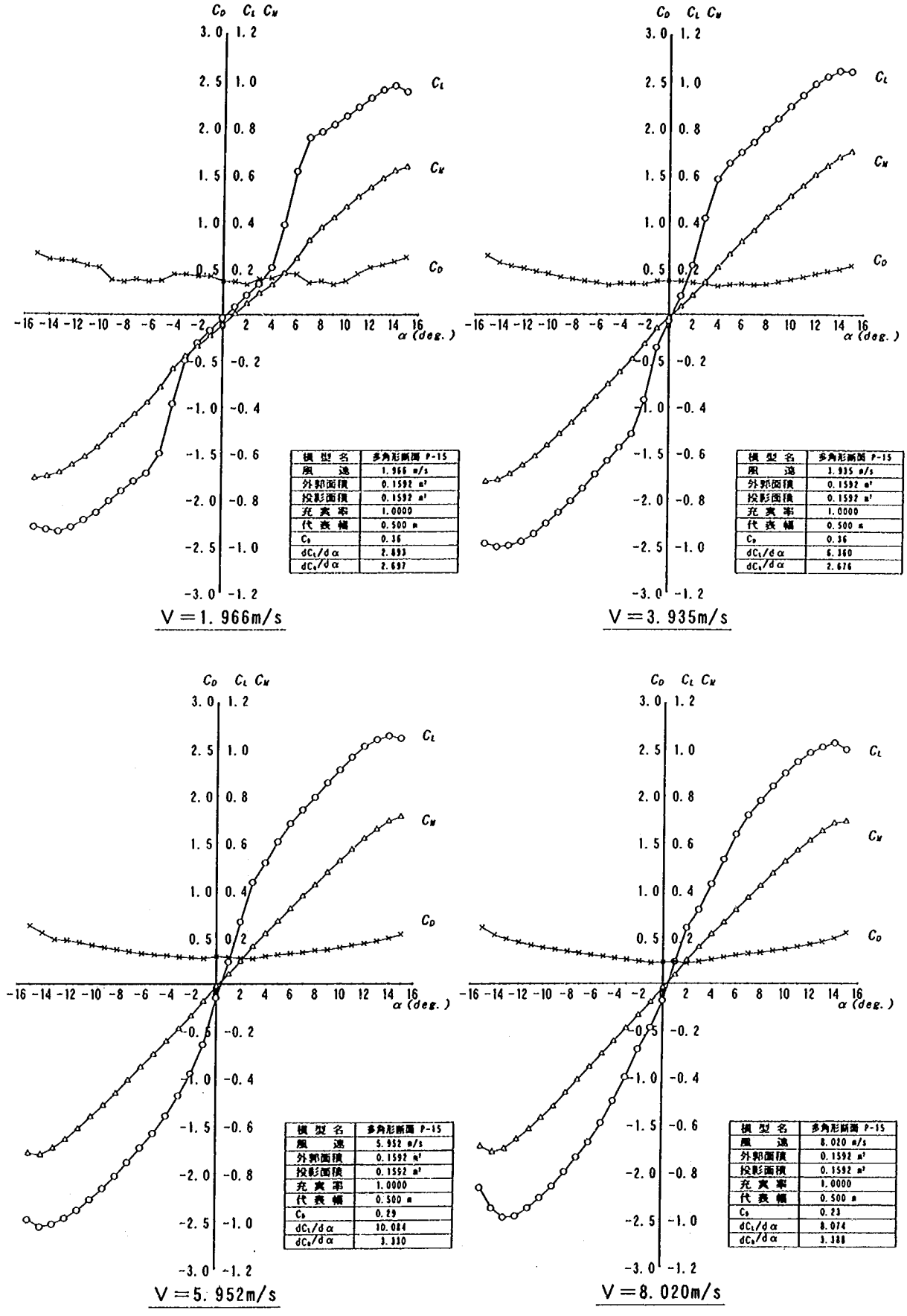




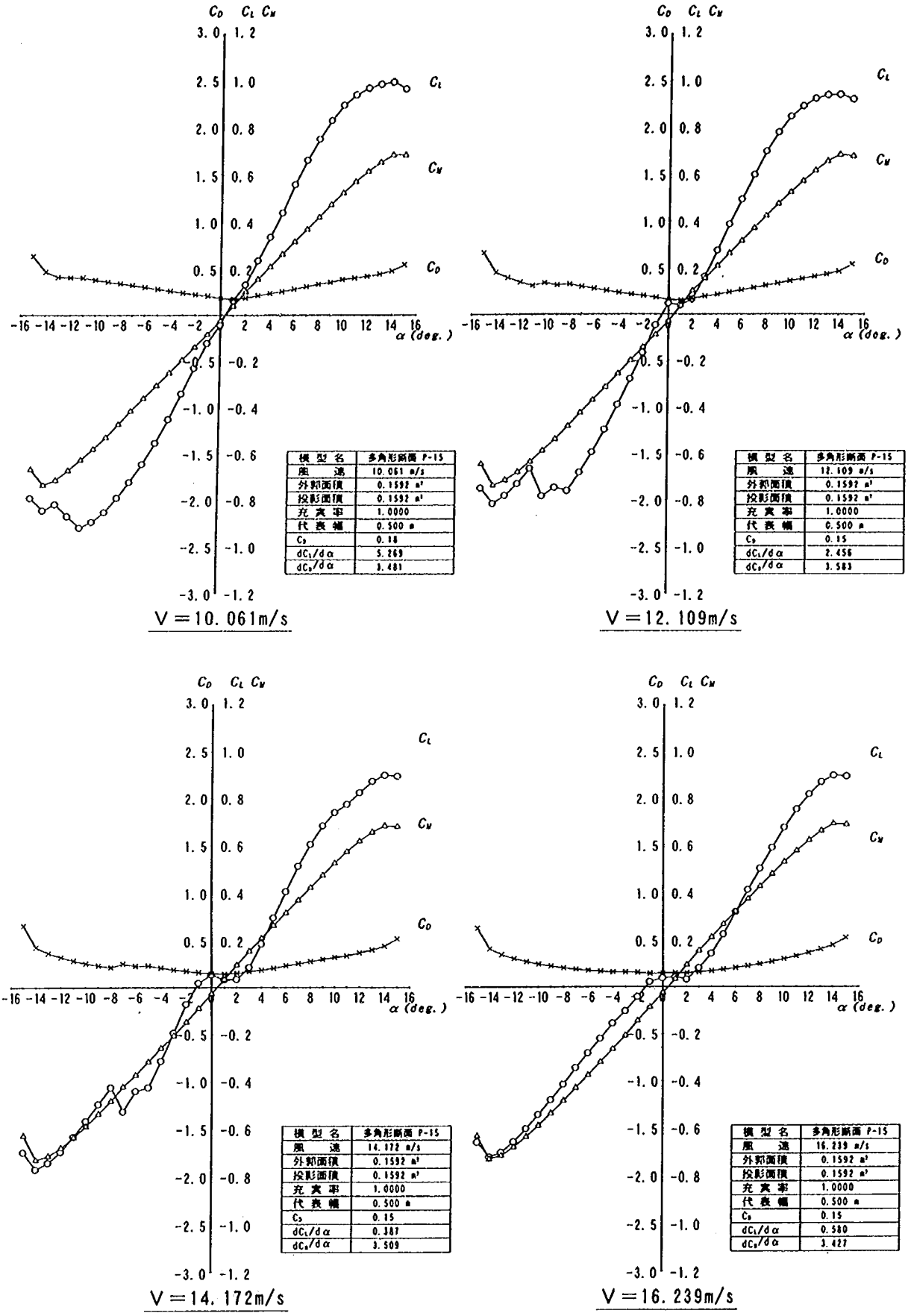




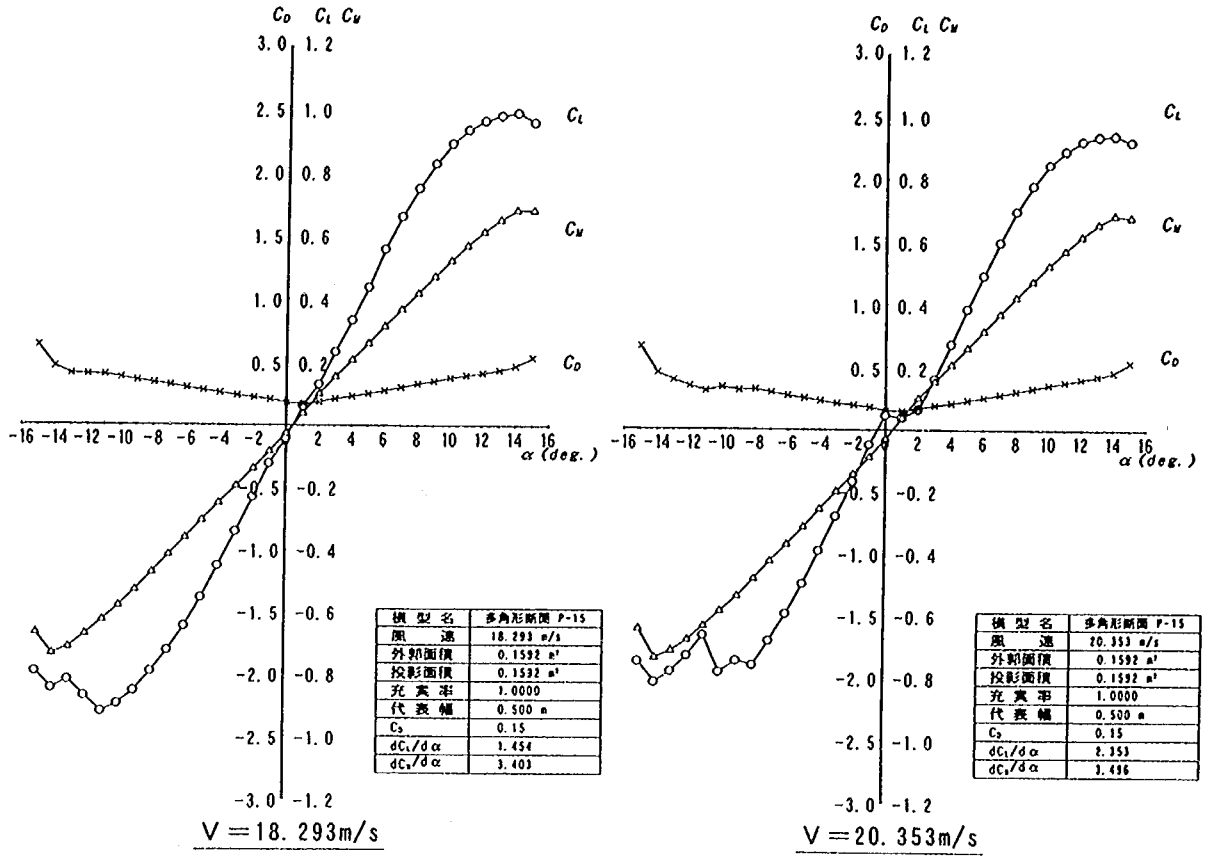
図－3.4.5.5 (3)　V-δ θ特性図



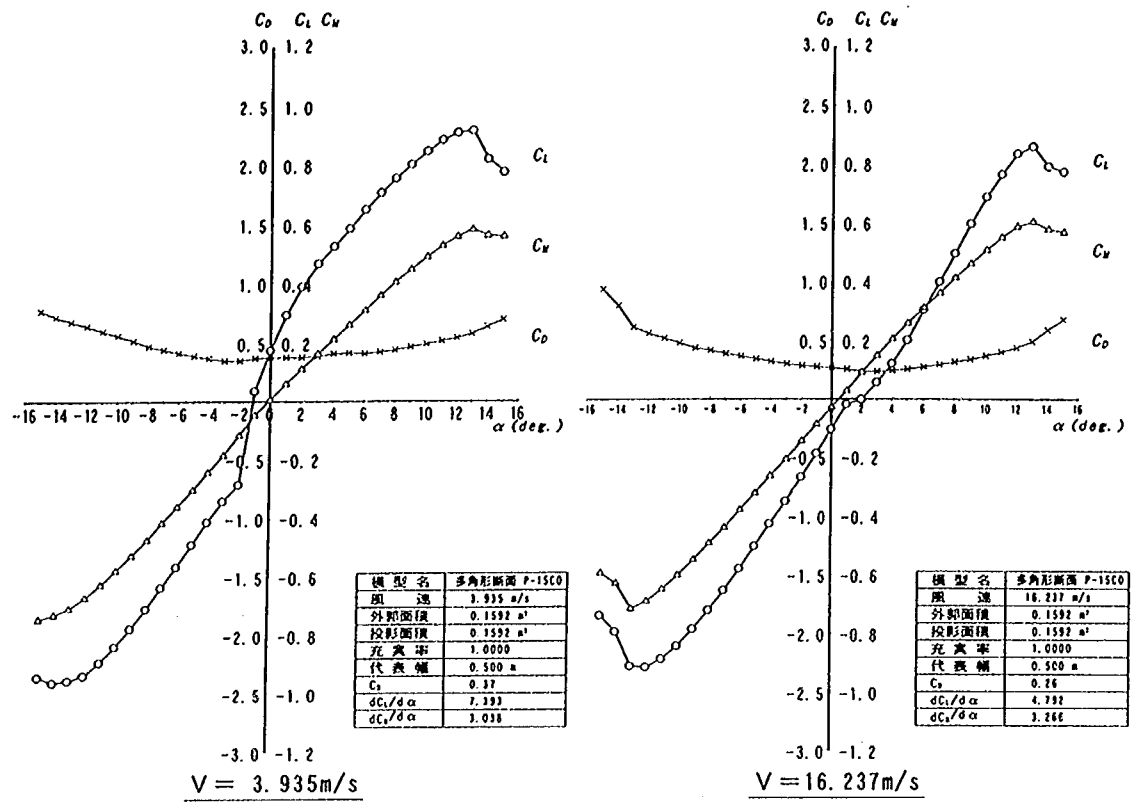
図－3.4.5.6(1)　三分力特性図　V=2m/s～8m/s（多角形断面：基本形P-1500）



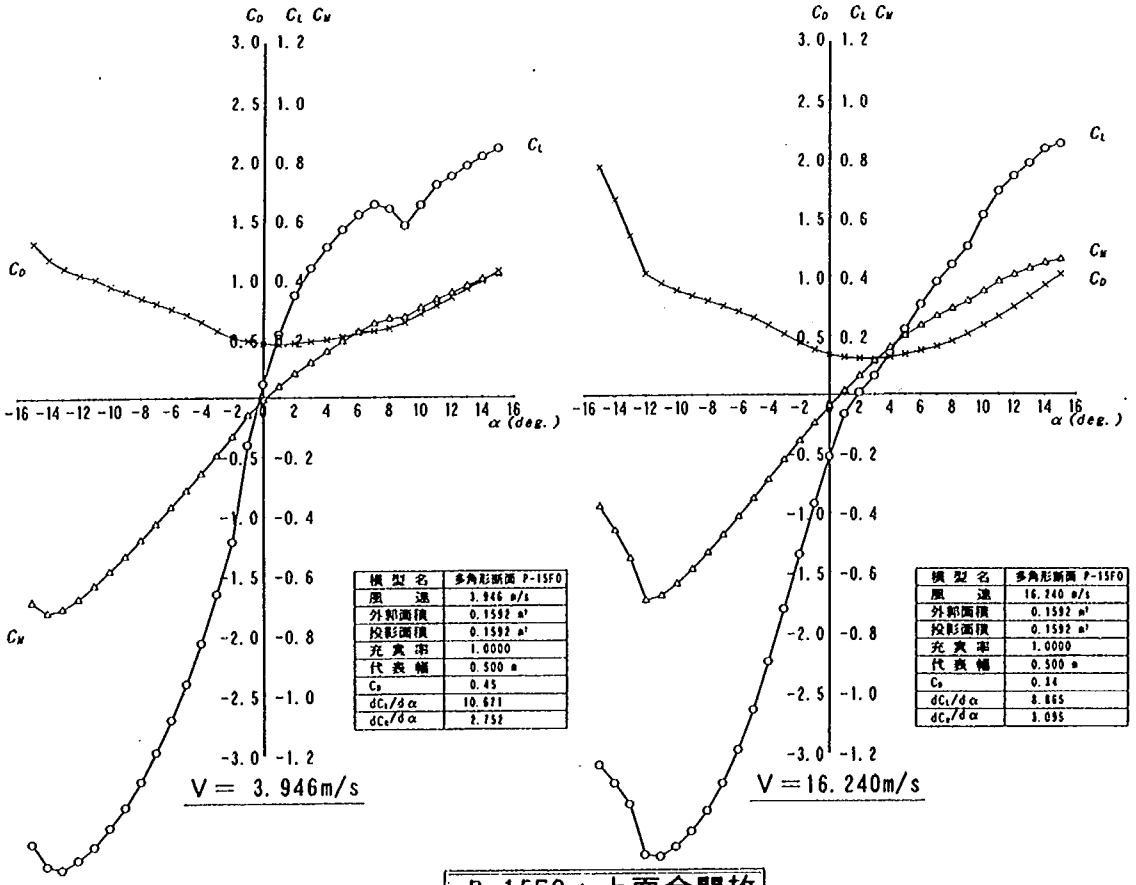
図－3.4.5.6(2)　三分力特性図　V=10m/s～16m/s（多角形断面：基本形P-1500）



図－3.4.5.6(3)　三分力特性図　V=18m/s～20m/s（多角形断面：基本形P-1500）

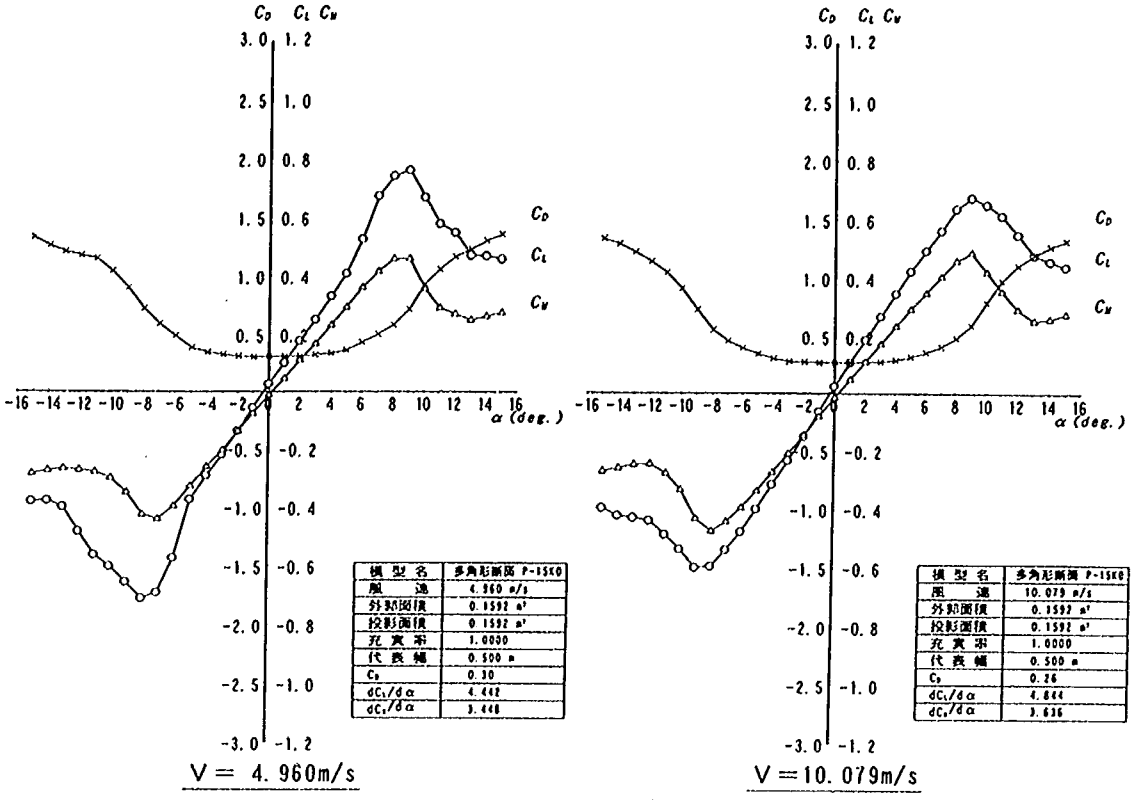


P-15C0 : 上面中央部開放



P-15F0 : 上面全開放

図－3.4.5.6(4)　三分力特性図



P-15K0：検査車レール付

図－3.4.5.6(5)　三分力特性図

3)試験結果まとめ

今回、検討の対象としている B/D=5 の多角形断面（楕円類似形状）では、超長大橋を意識した偏平箱桁断面と同諸元（剛性・重量など）を想定して、ばね支持試験による検討を実施している。(剛性は偏平なトラス部で確保、楕円類似形状を形成する部分は外形保持のためのもので、剛性には寄与しない。)

この場合、耐風安定性が大幅に良好となる結果（形状補正係数 κ =1 を大きく上回る）は得られず、耐風安定性に優れた断面は見つかっていない。(一部を除き、平板（κ =1)と大差ない。)

今回の検討では、添架物や上面開放による耐風性への効果も期待できず、結果的には基本断面が最も良好な結果となった。特に、上面全開放やセンタバリアなど、基本の形を大きく崩すような対策は逆効果となる傾向が見受けられる。

また、三分力試験では、その特性に対する風速依存性が顕著であることが確認された。

多角形断面の場合、たとえ稜角があっても 8 角形を越えると Re 数の影響を受けるとの報告があり、ここで取り上げた 20 角形断面についても Re 数の影響は無視できない形状であるといえる。

参考に、基本断面の Re 数に伴う C_D の変化を図－ 3.4.5.7 に示す。

円柱とよく似た傾向で、Re 数の影響が確認できる。高風速域では Re 数に伴う C_D の変化はほとんどみられなくなる傾向にあるが、揚力係数の風速に伴う変化は依然残っており、Re 数に対する注意が必要であると思われる。

なお、C_D の値そのものについては、非常に小さく、風荷重に対しては有利な要素であるといえる。

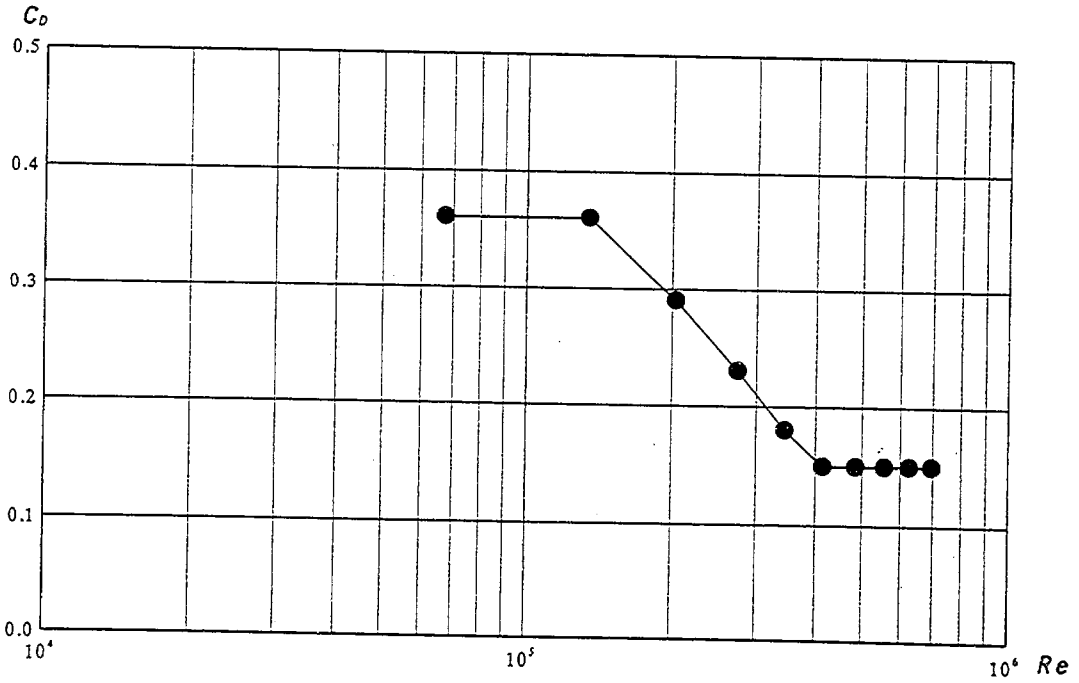
楕円・多角形断面などで実用化を考えた場合、桁高が高い（B/D が小さい）ため、偏平断面よりも高いねじれ剛性が確保できるともの考えられ、限界風速の向上が期待できる。

すなわち、耐風性としては、流線型の断面であるが故、平板以上（κ =1 以上）となる可能性が少ないものの、上述の様に構造上の特性によっては、フラッター特性への効果（限界風速の向上）が期待できる。

いずれにしても、空力的に敏感な特性をもつ断面のようであり、今後、実橋を想定した検討を進めて行く場合は、その空力特性については十分注意する必要がある。

楕円断面については文献も少なく、調査不足であることも否めないが、文献での見解、試験結果を考慮すると、超長大橋などへの適用（実用化）を考えた場合、必ずしも有効な断面であるとは言い切れないようである。

ケーブルシステムとの併用やシェル構造としての可能性を探るなど、経済性・耐風性・構造などトータルバランスとして、実用化に向け楕円断面や多角形断面がどの程度有利となるかの評価・検討が必要であると考えられる。



図－3.4.5.7　　C_DとReの関係（多角形断面：基本形　P-1500）

(3) ひし形断面・開孔六角形断面

1)概要

多角形断面と同様に、桁内通行をメリットとした断面の一案として、Rc 数の影響が少ないと思われるひし形断面の基本特性について検討を行った。６車線確保を条件に、上下左右の余空間ができるだけ少なくなるような断面比を選定することとし、超概略の検討による結果ではあるが、断面比 B/D=4 のひし形断面を採用することとした。なお、形状は純粋なひし形ではなく、上下流端を切り落とした六角形の変型ひし形断面となっている。

また、桁内通行で２箱桁断面における開孔部の耐風安定性への効果を取り入れた開孔六角形断面についても検討を行った。形状は過去の同種断面の実績から上下非対称の扁平六角形断面とした。６車線確保の条件から下面開孔部をできるだけ小さくする必要があり、過去の同種断面の耐風性を損なわないようにフェアリング形状と開孔幅の関係を保持することとし、一般的な形状とは上下逆転した断面形状とした。なお、上下開孔部には充実率 30%のグレーチングを設けてある。

以上の２断面について、その空力特性を把握するため、ばね支持試験・三分力試験による検討を行った。

2)試験結果

①ばね支持試験

ここでは、断面特性の把握を目的とし、表－ 3.4.5.2 の振動諸元目標値にはこだわらず、未調整のまま実施することとした。

ひし形断面は、基本形で迎角 α=0°, +3° の２迎角について実施した。(上下対称断面であることから、-3° については実施せず。)

一方、開孔六角形断面については、基本形を中心に、フェアリングを逆向きにした状態や基本形に耐風安定化策として上下面に添架物（バリア）を設置した断面について検討を行った。実施迎角は、基本形のみ３迎角（α=0°, ±3°）で実施し、その他は迎角 α=0° でのみ実施することとした。

表－ 3.4.5.6 に、ばね支持試験結果を示す。(参考として、多角形断面基本形の試験結果も併記してある。)

また、ひし形および開孔六角形断面の基本形の V-A 図を図－ 3.4.5.8 に示す。

②三分力試験

三分力試験は、ひし形・開孔六角形の基本断面について実施した（２風速実施)。

それぞれの断面の試験結果を図－ 3.4.5.9(1)～(2)に示す。(参考として、多角形断面基本形の結果も添付した。)

3)結果まとめ

ひし形断面については、κ で評価する限り、κ=1 を大きく上回るような耐風性良好との結果は得られなかった。

また、三分力特性では、楕円断面や多角形断面と同様に、迎角に依存した空気力の変化が大きい（各係数の勾配が急）ことから、迎角に伴う静的変形について注意が必要であると思われる。

ただし、迎角による限界風速の差が少ないことや C_D の値が多角形同様小さく風荷重に対して有利であること、実用化の際には扁平断面に比べ高いねじれ剛性が期待できるなど、有利な要素も見受けられる。

開孔六角形断面については、従来の二箱桁断面のκを越えるような結果は得られなかった。

基本形に対する耐風安定化策の検討・評価では、上面外側のバリア設置（H003）が耐風安定化策として有効であるとの結果を得た。耐風安定性としては、基本形に比べ６割以上の向上が期待できる。

しかし、三分力特性からも明らかなように、迎角α=0°, +3°での静的変形が非常に大きく、H003やH004断面では、迎角α=0°において-6.0deg近い頭下げのねじれ静的変形がばね支持試験において確認された。

なお、迎角α=-3°については、ねじれ静的変形はほとんどなく、三分力特性の傾向がばね支持試験においても顕著に現れている。

基本形では、迎角α=-3°で耐風性は安定傾向にあることから、頭下げの静的変形は耐風性に有利に働くことも考えられるが、迎角に伴う各係数変化が大きく、かつ傾向が不安定であり、構造的な安全性などを考えた場合、静的変形を抑制する対策・検討が必要であると思われる。

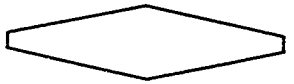
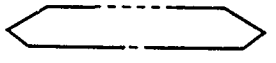
ここで、フェアリングを上下逆転した断面（H100）について、ばね支持試験を実施し、迎角α=0°における静的変形や耐風性の評価を試みた。

フェアリングを上下逆転すると、迎角α=0°では、ねじれの静的変形はほとんどなく、耐風性も基本断面κ=0.72と大差ないκ=0.70との結果を得た。

この結果より、迎角に伴う耐風性・三分力特性の差は、フェアリング形状と上下面の開孔幅の関係が大きく影響しているものと思われ、これらの関係を把握するには、よりパラメトリックな検討が必要であると考えられる。

少なくとも迎角α=0°で、耐風性を損なわずにねじれ変形抑制の効果はみられており、迎角α=±３°での評価、バリア付きの断面の評価によっては、良好な耐風性が期待できる断面であると考えられる。

表－ 3.4.5.6 (1)　ばね支持試験試験結果（１）

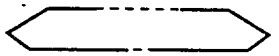
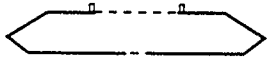
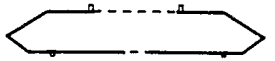
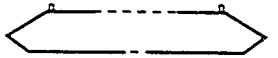
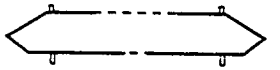
略　　号		実橋値			ME-N-P1500			ME-N-R000			ME-N-H000			ME-N-H100		
																
		想定実橋諸元			多角形（20角形）断面 （基本形） 断面比 (B/D)=1:5			ひし形断面（基本形） 断面比 (B/D)=1:4			開孔六角形断面 （基本形）			開孔六角形断面 フェアリング逆に設置		
縮尺					1/90			1/90			1/90			1/90		
全幅 B　(m)					45.0　(0.5)			54.0　(0.6)			50.4　(0.56)			50.4　(0.56)		
桁高 D　(m)					5.0　(0.1)			13.5　(0.15)			8.1　(0.09)			8.1　(0.09)		
開孔幅 b (m)					0.0			0.0			U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)			U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)		
B / D					5.0			4.0			6.2			6.2		
b / B					0.0			0.0			U:0.32　L:0.11			U:0.32　L:0.11		
N θ　(Hz)		0.1500　(2.700)			0.1500　(2.404)			0.1500　(2.519)			0.1500　(2.520)			0.1500　(2.520)		
N θ ／ N η		3.000			2.288			2.433			2.366			2.364		
W　(tf/m)		40.00　(4.938kgf/m)			41.10　(5.074kgf/m)			52.16　(6.439kgf/m)			49.31　(6.088kgf/m)			49.23　(6.078kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		1020.　(0.01550kgfs²m/m)			1077.　(0.01641kgfs²m/m)			1304.　(0.01987kgfs²m/m)			1303.　(0.01986kgfs²m/m)			1304.　(0.01987kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		5.00			5.62			5.36			5.36			5.36		
減衰率	たわみ	－			(0.0195)			(0.0206)			(0.0403)			(0.0405)		
	ねじれ	－			(0.0196)			(0.0196)			(0.0187)			(0.0188)		
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1221		0.1268	0.1271		0.1288	0.1296	0.1283		0.1294	
Vcr　(m/s)			－			54.9		51.4	52.4		50.1	40.2	25.9		39.1	

Selberg の式による補正

VF　(m/s)		54.4			55.4		56.0	55.9		56.3	56.2	56.4		56.16		
形状補正係数　κ		－			0.99		0.92	0.94		0.89	0.72	0.46		0.70		

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

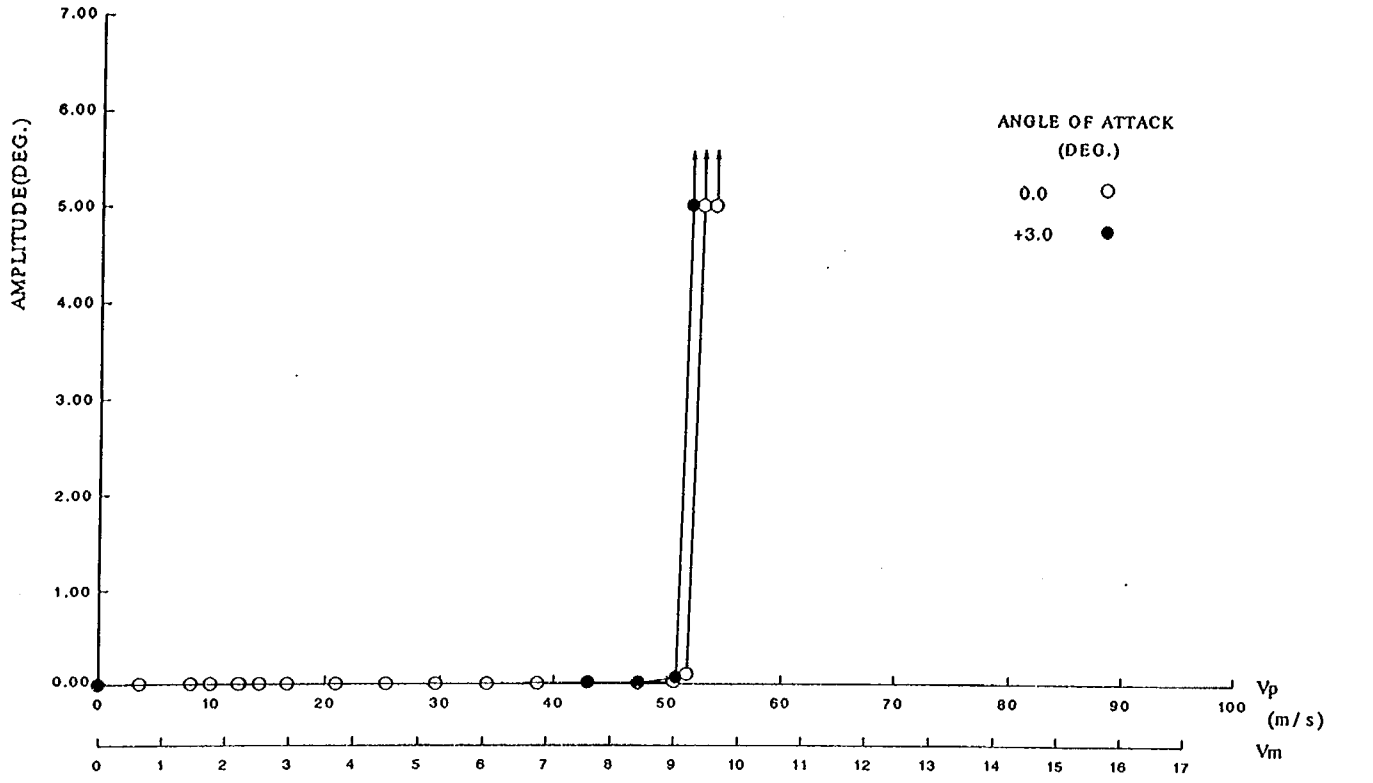
表－ 3.4.5.6 (2)　ばね支持試験試験結果（２）

略　　号		ME-N-H000			ME-N-H001			ME-N-H002			ME-N-H003			ME-N-H004		
																
		開孔六角形形断面 （基本形） 断面比(B/D)=4/1			開孔六角形断面 上面内側バリア(h=10mm) 設置			開孔六角形断面 上面内側バリア(h=10mm) 下面バリア(h=5mm)設置			開孔六角形断面 上面外側バリア(h=10mm) 設置			開孔六角形断面 上面外側バリア(h=10mm) 下面バリア(h=16mm)設置		
縮尺		1/90														
全幅 B　(m)		50.4　(0.56)														
桁高 D　(m)		8.1　(0.09)														
開孔幅 b (m)		U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)														
B / D		6.2														
b / B		U:0.32　L:0.11														
N θ　(Hz)		0.1500		(2.520)		(2.520)			(2.511)			(2.510)			(2.491)	
N θ ／ N η		2.366			2.369			2.368			2.365			2.363		
W　(tf/m)		49.31		(6.088kgf/m)		(6.188kgf/m)			(6.138kgf/m)			(6.126kgf/m)			(6.210kgf/m)	
I　(tfs²m/m)		1303.		(0.01986kgfs²m/m)		(0.01992kgfs²m/m)			(0.02000kgfs²m/m)			(0.02002kgfs²m/m)			(0.2032kgfs²m/m)	
ねじれ風速倍率		5.36														
減衰率	たわみ	(0.0403)			(0.0393)			(0.0394)			(0.0397)			(0.0396)		
	ねじれ	(0.0187)			(0.0185)			(0.0175)			(0.0186)			(0.0182)		
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1288	0.1296	0.1283		0.1278			0.1273			0.1265			0.1262	
Vcr　(m/s)		50.1	40.2	25.9		(11.6)			(10.4)			(12.1)			(12.8)	

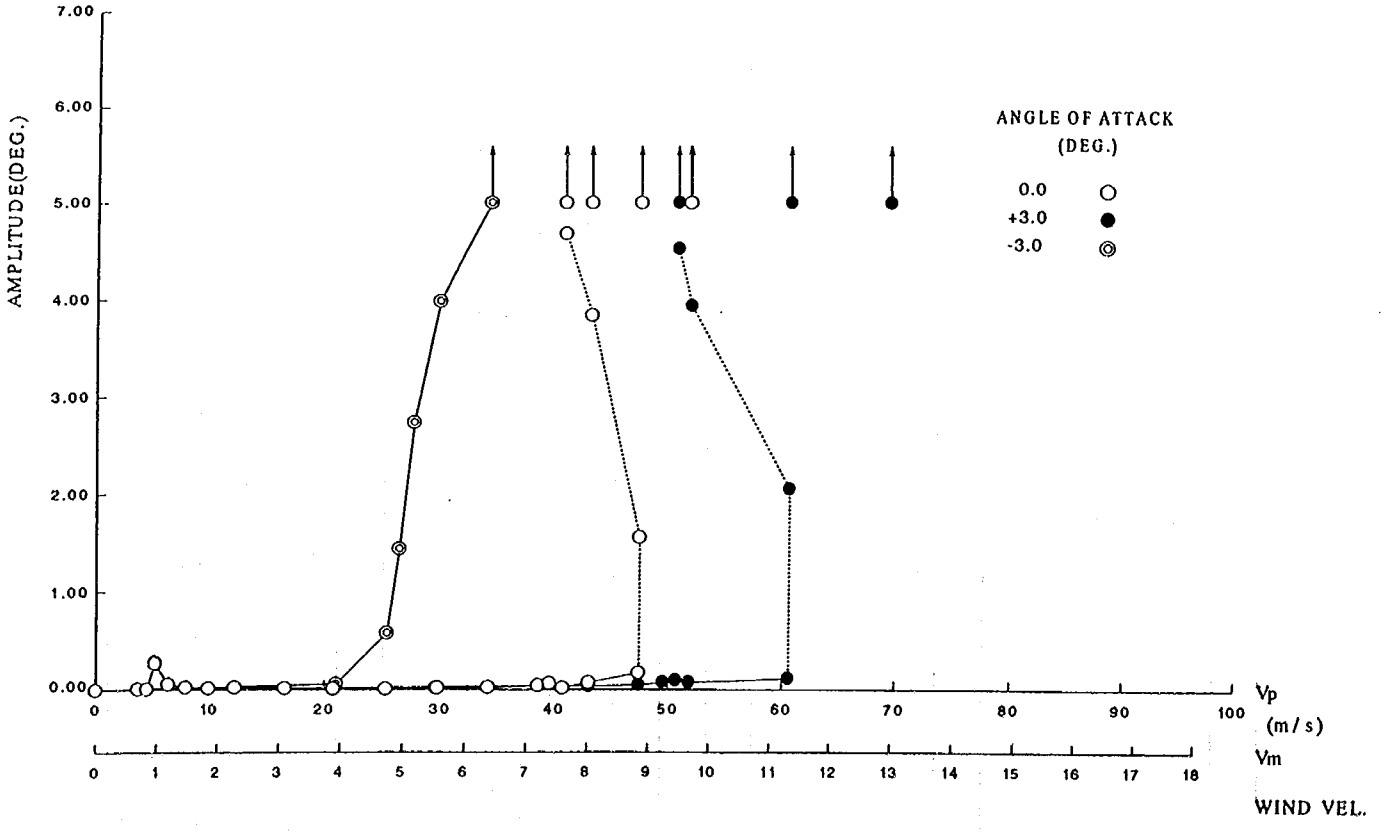
Selberg の式による補正

VF　(m/s)		56.3	56.2	56.4		(10.6)			(10.6)			(10.6)			(10.6)	
形状補正係数 κ		0.89	0.72	0.46		1.09			0.98			1.14			1.21	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

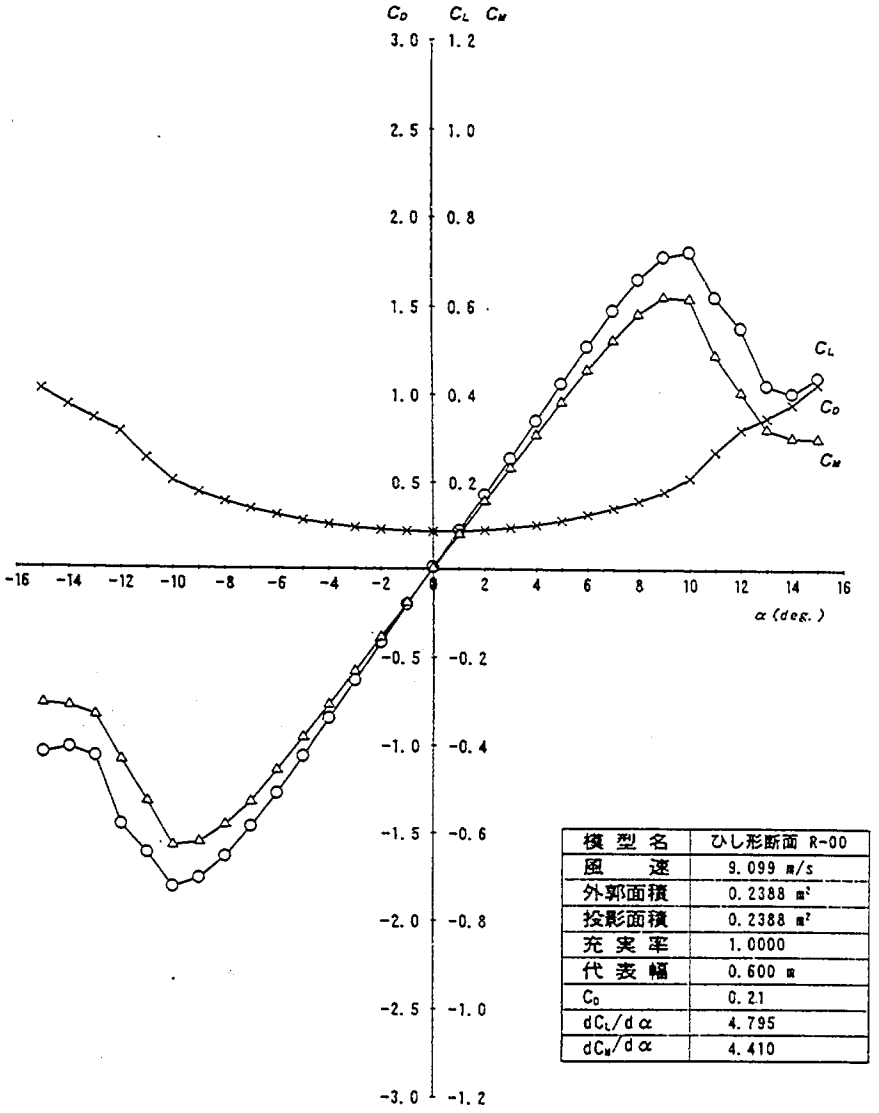


V-Aθ特性図（ひし形断面　基本形R000：一様流）



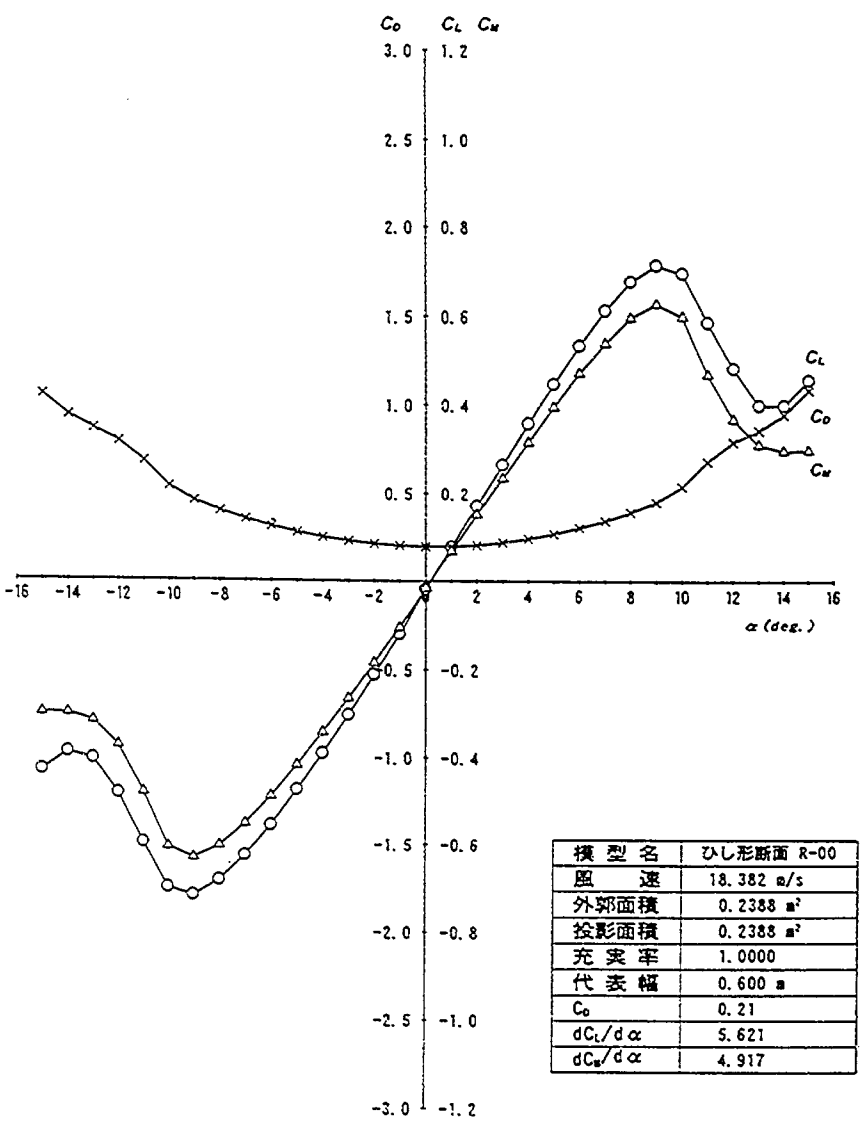
V-Aθ特性図（開孔６角形断面　：一様流中）

図－3.4.5.8　ひし形・開孔六角形断面　V-Aθ特性図



模型名	ひし形断面 R-00
風速	9.099 m/s
外郭面積	0.2388 m²
投影面積	0.2388 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.600 m
C_D	0.21
$dC_L/d\alpha$	4.795
$dC_M/d\alpha$	4.410

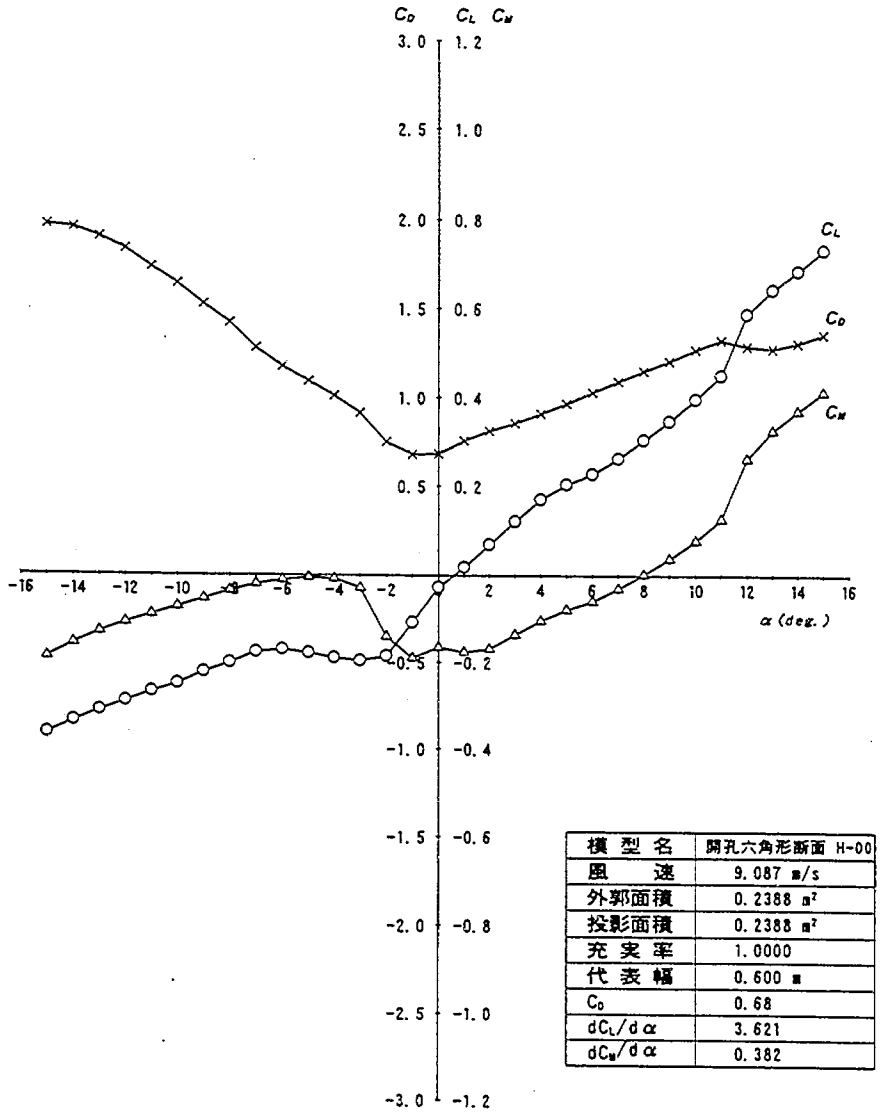
基本断面：風速V＝9.099m/s)



模型名	ひし形断面 R-00
風速	18.382 m/s
外郭面積	0.2388 m²
投影面積	0.2388 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.600 m
C_D	0.21
$dC_L/d\alpha$	5.621
$dC_M/d\alpha$	4.917

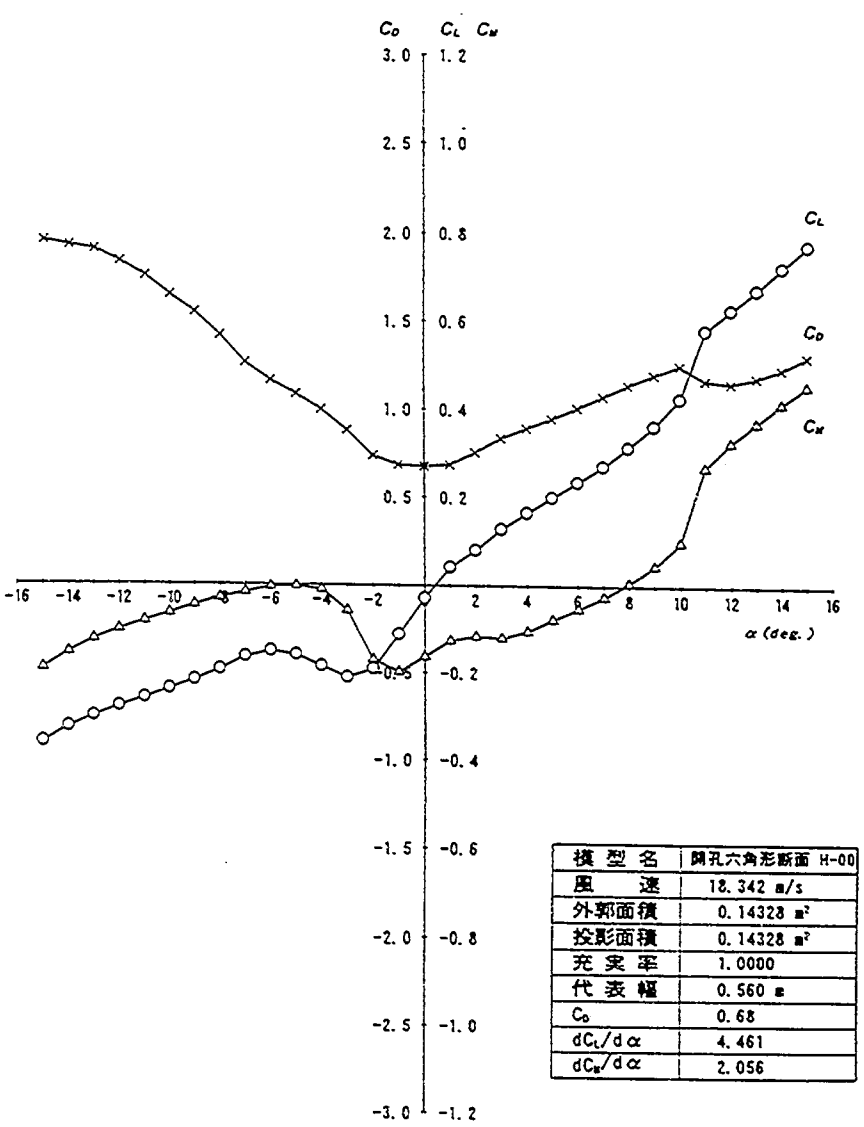
基本断面：風速V＝18.382m/s

図－3.4.5.9（1） 三分力特性図（ひし形断面：基本形 R-00）



模型名	開孔六角形断面 H-00
風速	9.087 m/s
外郭面積	0.2388 m²
投影面積	0.2388 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.600 m
C_D	0.68
$dC_L/d\alpha$	3.621
$dC_M/d\alpha$	0.382

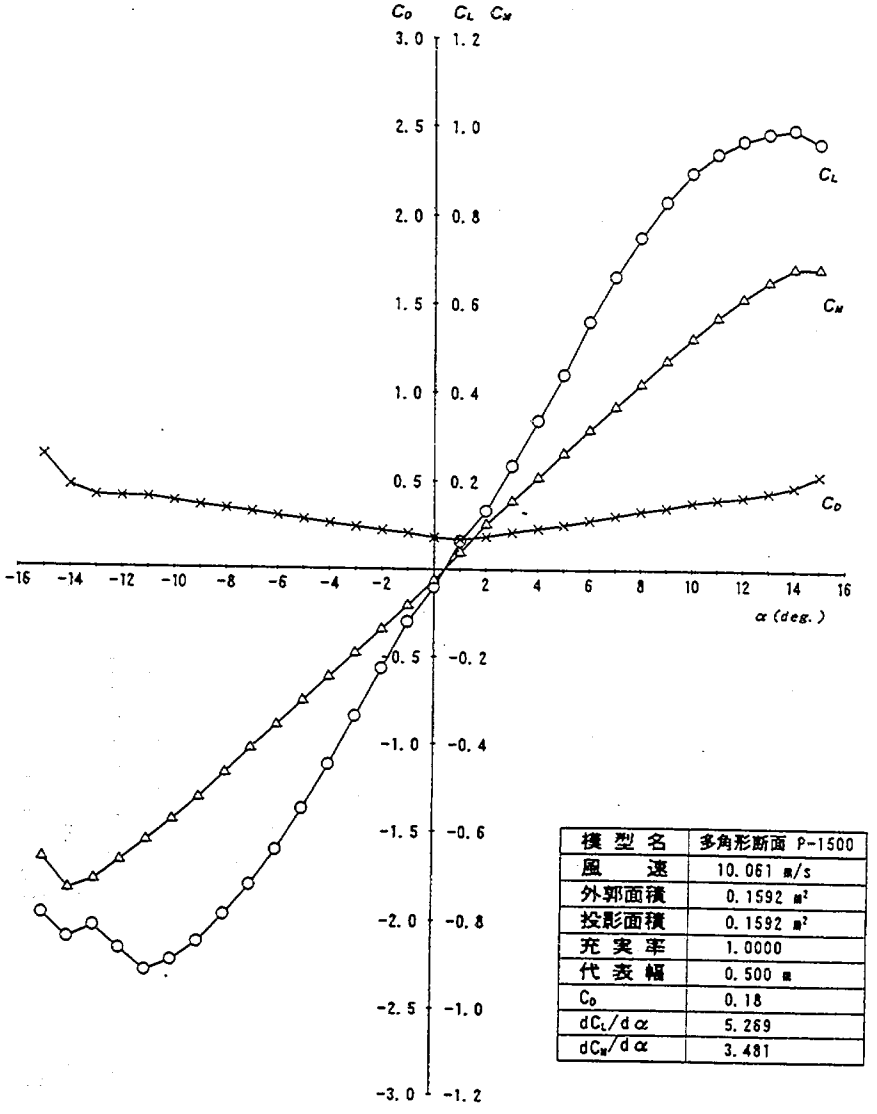
基本断面：風速V＝9.087m/s



模型名	開孔六角形断面 H-00
風速	18.342 m/s
外郭面積	0.14328 m²
投影面積	0.14328 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.560 m
C_D	0.68
$dC_L/d\alpha$	4.461
$dC_M/d\alpha$	2.056

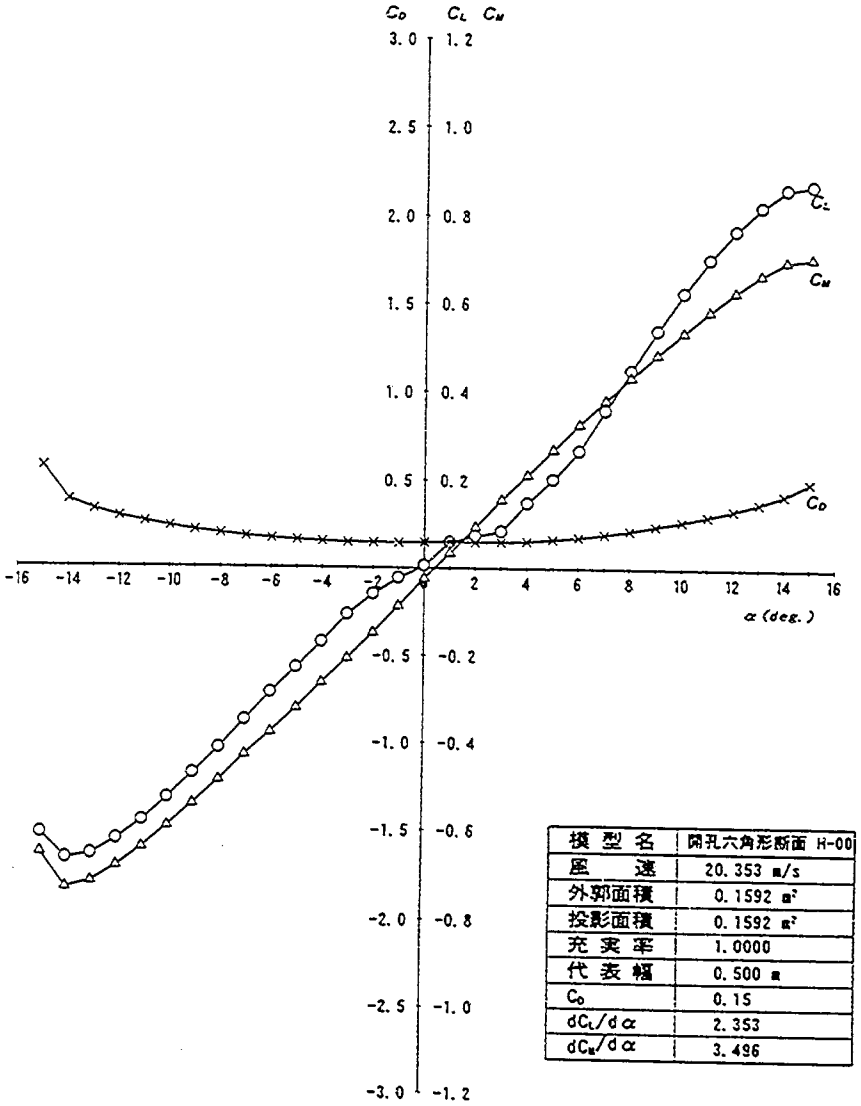
基本断面：風速V＝18.342m/s

図－3.4.5.9（2） 三分力特性図（開孔六角形断面：基本形 H-00）



模型名	多角形断面 P-1500
風速	10.061 m/s
外郭面積	0.1592 m²
投影面積	0.1592 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.500 m
C_D	0.18
$dC_L/d\alpha$	5.269
$dC_M/d\alpha$	3.481

基本断面：風速V＝10.061m/s



模型名	開孔六角形断面 H-00
風速	20.353 m/s
外郭面積	0.1592 m²
投影面積	0.1592 m²
充実率	1.0000
代表幅	0.500 m
C_D	0.15
$dC_L/d\alpha$	2.353
$dC_M/d\alpha$	3.496

基本断面：風速V＝20.353m/s

図－3.4.5.9（3）　三分力特性図（多角形断面：基本形 P-1500）

(4)　楕円断面に関する追加検討

1)楕円断面のメリット

文献によれば、楕円断面のメリットとして、主に以下のことが挙げられている。

(いずれも断面比 1:3 の楕円断面についての検討結果である。)

○ B/D=20 矩形断面と B/D=3 楕円断面のフラッター解析結果（同諸元）を比較すると、フラッター風速にほとんど違いがみられない。断面比を考慮すると楕円断面では耐風安定性が向上していると考えられる。

○実用化を考えた場合、桁高が高い（B/D が小さい）ため、偏平断面よりも高いねじれ剛性が確保でき、限界風速の向上が期待できる。

○楕円断面は、矩形断面などに比べ抗力係数が小さく、風荷重に対して有利である。

○強風時でも交通を遮断する必要がない。

以上のように、構造的な要因から耐風安定性に対して有利であるとの見解がなされており、断面の空力特性として、平板などに比べフラッター特性が著しく良好であるとの見解は見あたらないのが現状である。

1:5 多角形断面の試験結果においても、κ=1 以上となる結果は得られていない。

また、デメリットとして、次のコメントが文献で挙げられている。

○剛性確保により必然的に重量の増加につながり、実用化に向け、経済性などを考えると致命的なデメリットである。

しかし、楕円・多角形断面ではシェル構造の可能性も十分考えられ、新形式橋梁を模索する場合は、これまでの形式にはこだわらず、ある程度の新技術・アイデアの導入が必要であるといえ、この発想の転換によっては、上述のメリットと合わせ実用化の可能性も期待できると考えられる。

2)概略構造検討

楕円断面を有する補剛桁について、概略構造検討を行った。

なお、ここでは、6 車線で構造の観点から最も経済的であると思われる断面比を選択することとし、風洞試験で採用した断面あるいは断面比には、特にこだわらないこととした。

本検討では、6 車線走行が可能で上下左右の余空間が最も少なくなるような断面比を選択することとし、結果的には断面比 B/D=4 の楕円断面について検討することとした。

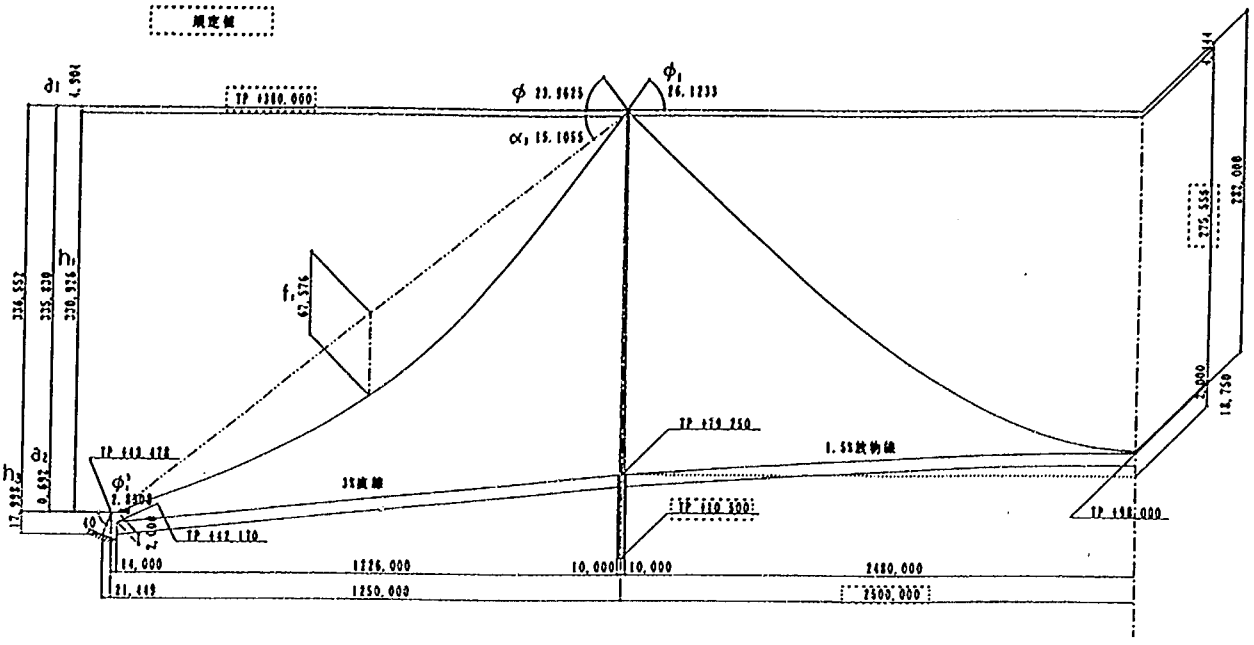
①基本条件

検討の際用いた基本条件は以下の通りである。

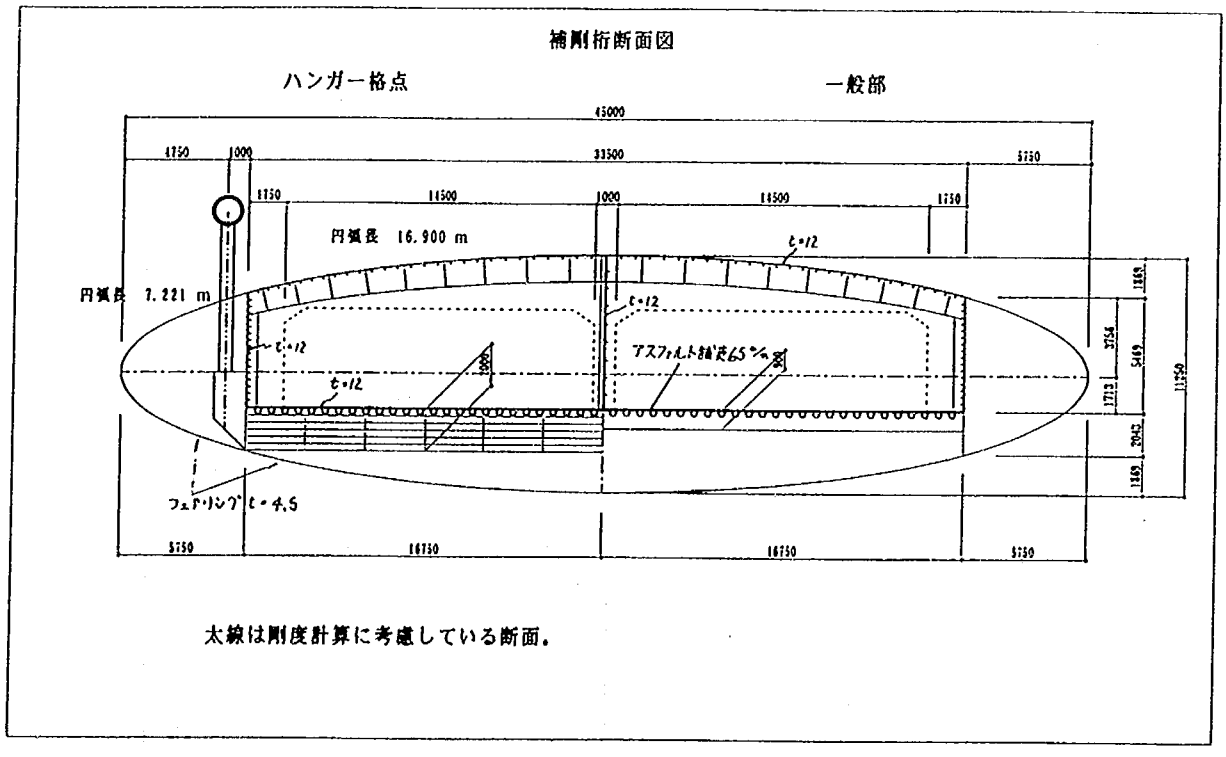
また、吊橋基本形状および補剛桁断面を図－ 3.4.5.10 に示す。

(1).道路線形	:	第 1 級第 2 種
(2).道路幅員	:	2@14,500
(3).活荷重	:	TL-20, TT43
(4).舗装厚	:	65 mm
(5).公共添架物	:	1.25 t/m/Br.
(6).ケーブル支間	:	1,250+2,500+1,250 m
(7).補剛桁支間	:	1,226+2,480+1,226 m
(8).ケーブル中心間隔	:	35.5 m
(9).ハンガー間隔	:	鉛直　12 m

吊橋形状



吊橋基本形状



補剛桁断面図

図－3.4.5.10　吊橋基本形状及び補剛桁断面図

②検討結果（死荷重強度）

ここでは前述の条件のもと、死荷重強度に関する検討を実施することとし、本研究の目標諸元の一つである重量 40tf/m 以下がクリアできるかの評価を行った。

検討結果を表-- 3.4.5.7 に示す。

概略検討ではあるが、断面比 B/D=4 の楕円断面は 40t/m 以下とはならないものの、それを大きく越えるような結果でもなく、耐風性などを含めた総合的な評価によっては、「耐風性」と「経済性」のトータルバランスとして優れた橋梁実現の可能性も期待できる。

表－ 3.4.5.7　構造検討結果（死荷重強度）

(t/m/Bridge)

			中央径間	側径間
吊構造	橋面工	アスファルト舗装	4.49	4.49
		防護工	0.40	0.40
		小計	4.89	4.89
	補剛桁	トッププレート	5.56	5.56
		デッキプレート	5.60	5.60
		ウェブプレート	2.58	2.58
		横桁・横リブ	1.84	1.84
		フェアリング	5.19	5.19
		ハンガーブラケット	0.70	0.70
		小計	21.47	21.47
	ハンガー関係		0.56	0.57
	公共構造物		1.25	1.25
	その他			
	小計		1.81	1.82
	吊構造合計		28.16	28.16
ケーブル関係	主ケーブル		11.07	11.20
	ハンドロープ		0.06	0.06
	ケーブルバンド		0.37	0.37
	ラッピングワイヤー		0.15	0.15
	ハンガー関係		0.50	0.50
	ケーブル合計		12.15	12.28
総計			40.31	40.45

(5) まとめおよび今後の課題

1)多角形断面

・本検討では、形状補正係数 κ=1 を大きく上回る耐風性に優れた断面は見つからなかった。

・基本形の耐風性が最も良好で、基本形状を大きく崩すような対策は逆効果となる傾向が見受けられた。

・三分力試験では、その特性に対する風速依存性が顕著であること、迎角に伴う各係数の変化が大きいことなどが確認された。

・抗力係数 C_D が非常に小さく風荷重に対して有利であること、偏平断面に比べ高いねじれ剛性が期待でき限界風速の向上が期待できることなどは、有利な要素といえる。

2)ひし形断面

・多角形と同様に、κ=1 を上回る特性は得られなかった。

・迎角による限界風速の差が少ないこと、C_D が小さいこと、高いねじれ剛性による限界風速の向上など有利な点も見受けられる。

3)開孔六角形断面

・上面外側バリア設置によって、基本断面に比べ6割以上の限界風速の向上が期待できる。しかし、バリア設置による渦励振発生の可能性が懸念される。

・頭下げの静的変形量が大きく、この静的変形を抑制する対策・検討が必須である。

・フェアリング形状と上下面開孔幅の関係によっては、静的変形の抑制が期待できる。

今回実施した断面形状は、過去の事例や6車線化などの超長大橋としての条件のもと、耐風性良好といわれている断面の周辺をあたったもので、耐風性や空力的に最良の断面であるとは言い切れない。

過去に例の少ない新形式橋梁については、基本形に対するよりパラメトリックな検討の実施、さらには実用化に向けた空力的・構造的な検討が必須であり、さらには、設計上ある程度の発想の転換も必要であるといえる。さらには、全く新しい断面・形式へのアプローチも考えられる。

また、楕円断面あるいは類似形の多角形断面については過去の検討例が少なく、不確定要素が比較的多い断面でもあることから、Re 数依存性の検討などの基本的な空力特性把握が必要であると考えられる。

今後は、これらの課題をある程度クリアにしながら、耐風安定性が良好な断面を見つけだし、多角形断面などの実橋への適用の可能性について総合的な検討の実施が必要であると思われる。

(6) 参考文献

1) 耐風構造
岡内、伊藤、宮田　　丸善株式会社　昭和52年5月

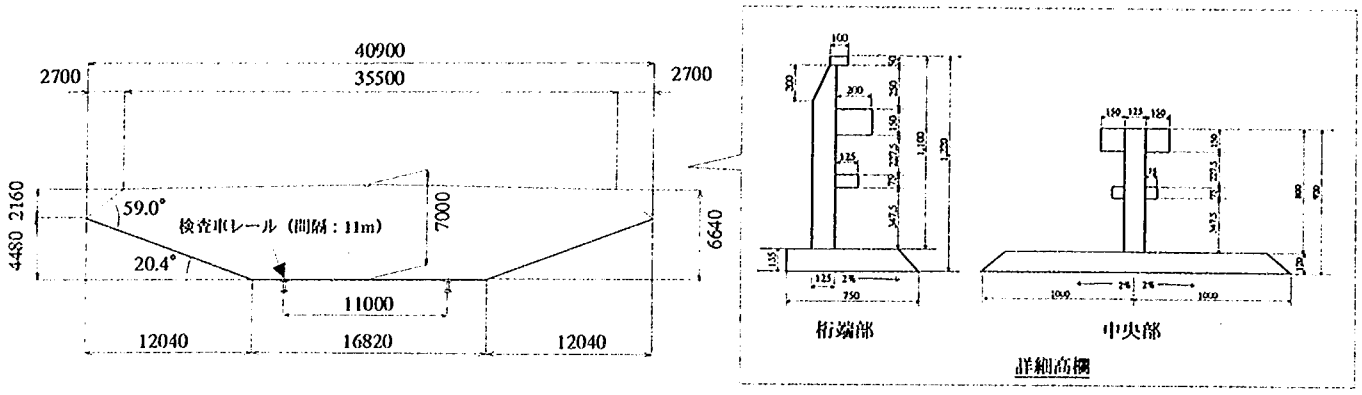
2) ***WIND RESISTANT DESIGN OF THE GIBRALTAR STRAITS CROSSING BRIDGE***
M.A. Astiz

3) ***Bridge engineering and aerodynamics***
Klaus H.Ostenfield & Allan Larsen , Aerodynamics of Large Bridges , A.Larsen(ed.) , 1992 elkema , Rotterdam. ISBN 90 5410 042 7

３．４．６　遮風壁箱桁断面の耐風性検討

(1)概要

３．２．４項では，昨年度開発した基本断面 C の縮尺 1/40 の大型模型（下図参照）を用いて部分模型応答試験を実施し，検査車レール・高欄などの微小部材が耐フラッター特性に及ぼす影響について調査した。　また，測定された非定常空気力を用いて 3 次元フラッター解析を実施することによって，全橋状態における耐フラッター性能の推定を行った。



図－3.4.6.1　基本断面 C

本項では，上記断面の中央部に遮風壁（高さ 3m，充実率 66%；以下，中央遮風壁と呼ぶ）を設置した場合を想定して下記の検討を実施し，中央遮風壁を設置した断面の基本的な空力特性について調査した。

・ばね支持応答試験
・非定常空気力測定試験
・3 次元フラッター解析
・橋面上風速測定試験
・静的 3 分力測定試験

さらに，新たなケーブルシステムに関しても提案を行い，3 次元フラッター解析を実施することによって，フラッター特性の改善に対するその有用性について検討した。

(2) ばね支持応答試験

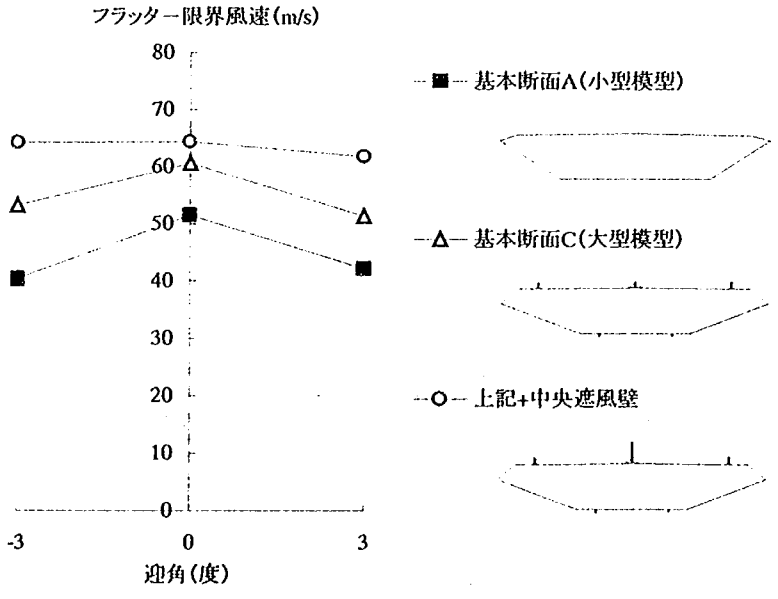
下表にばね支持試験条件をまとめて示す。

表－3.4.6.1　試験条件（縮尺 1/40）

項目	単位 （括弧内は模型値）	想定橋諸元 （中央支間 2500 m）	模型測定値
全弦長	m	40.9	1.023
桁重量*	tf/m (kgf/model)	35.0	59.063
桁極慣性モーメント*	$tf \cdot s^2$ $(kgf \cdot m \cdot s^2/model)$	690	0.734
固有振動数（たわみ一次）	Hz	0.0537	0.601
固有振動数（ねじれ一次）	Hz	0.1604	1.757
振動数比	-	2.987	2.923
対数減衰率	-	-	0.02

*：模型長さ=2.7m

また，下図に応答試験結果を迎角－フラッター限界風速特性図として，既往の試験結果と比較して示す。



図－3.4.6.2　応答試験結果

上図より，中央遮風壁を設置することによって，基本断面 A→基本断面 C の変更で向上したフラッター限界風速はさらに向上し，迎角 0° において 64.3m/s という結果を得た。　また，迎角によるフラッター限界風速の変化も少なく，本断面が優れた耐フラッター性能を有することが判る。

下表に各断面のフラッター限界風速をまとめて示す。

（括弧内の数字は基本断面Aから向上した割合を示す。）

表－3.4.6.2　フラッター限界風速一覧

迎角（度）	断面形状		
	基本断面A	基本断面C	左記+中央遮風壁 （高さ3m，充実率66%）
+3	42 m/s	51.2 m/s (21.9%)	61.7 m/s (46.9%)
0	51.5 m/s	60.6 m/s (21.7%)	64.3 m/s (30.5%)
-3	40.3 m/s	53.2 m/s (30.7%)	64.2 m/s (56.9%)

尚，今回の応答試験では渦励振に関する検討は未実施であり，断面中央部に突起を設けた場合には渦励振特性が悪化する可能性もあり，今後さらなる検討が必要であろう。

(3)非定常空気力測定試験

基本断面Cに中央遮風壁を設置した断面に対して，強制振動法にて迎角0°における非定常空気力を測定し，結果を下式に示す非定常空気力係数で整理した。

試験結果を次項表－3.4.6.3に示す。　尚，表中には中央遮風壁なしの場合も比較して示す。

非定常空気力係数の定義：

$$L = \pi\rho B^3\omega^2\left\{\left(CL_{\eta R} + i\cdot CL_{\eta I}\right)\cdot\overline{\eta} + \left(CL_{\theta R} + i\cdot CL_{\theta I}\right)\cdot\theta\right\}$$

$$M = \pi\rho B^4\omega^2\left\{\left(CM_{\eta R} + i\cdot CM_{\eta I}\right)\cdot\overline{\eta} + \left(CM_{\theta R} + i\cdot CM_{\theta I}\right)\cdot\theta\right\}$$

但し，　L　：非定常揚力（上向き正）

M　：非定常モーメント（時計回り正）

$\overline{\eta}$　：たわみ無次元変位（上向き正）

$\overline{\theta}$　：ねじれ変位（時計回り正）

$CL_{\eta R}$~CM_{θ}：非定常空気力係数（換算振動数 k=fB/U の関数）

ρ　：空気密度

B　：桁幅員（全弦長）

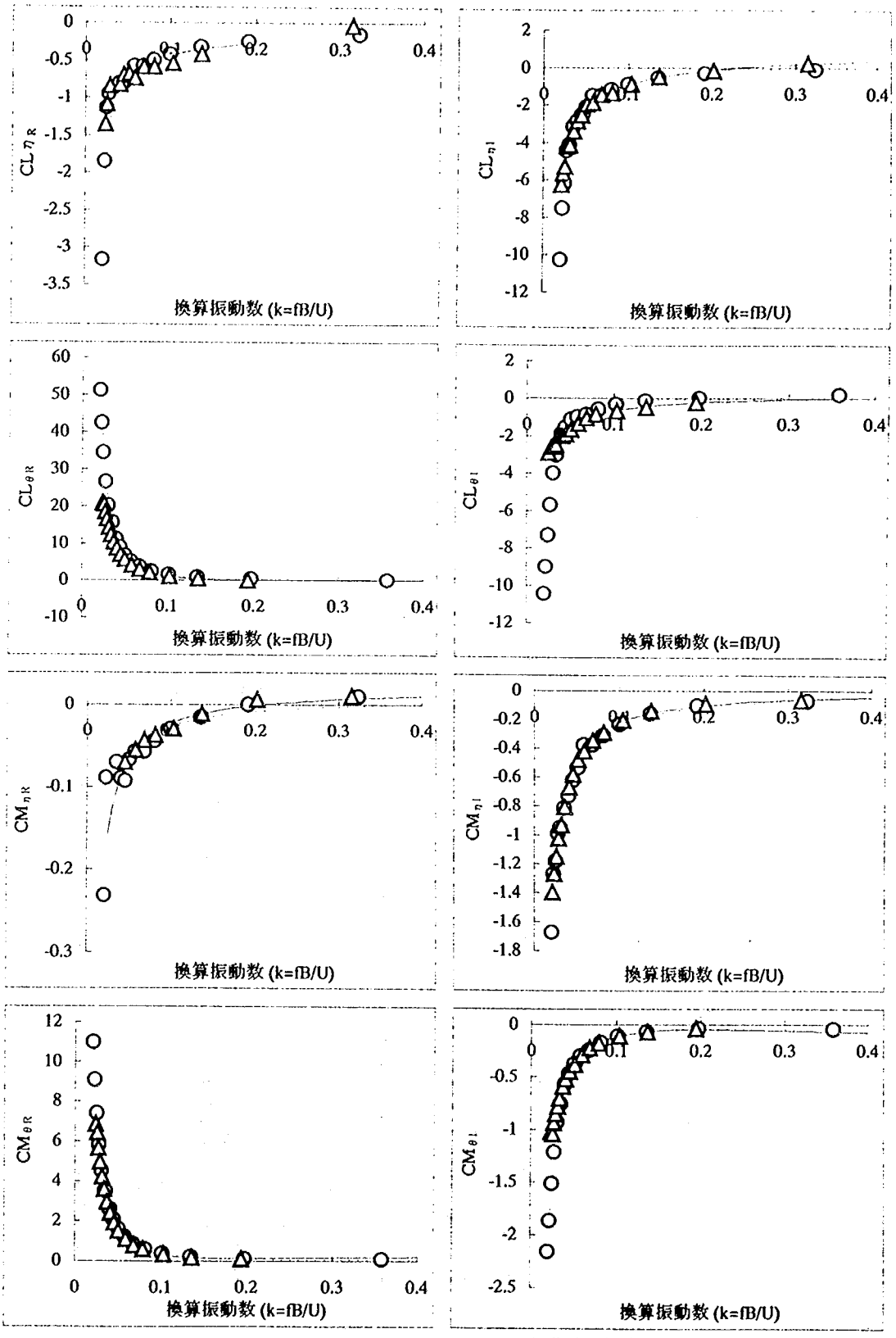
ω　：円振動数（rad/s）

f　：振動数（Hz）（$\omega=2\pi f$）

U　：風速

表－3.4.6.3　非定常空気力測定結果（迎角 0°）

○：中央遮風壁なし
△：中央遮風壁あり



*近似曲線は低換算振動数に重点をおいている

各断面の部分模型応答試験結果と，前項表－3.4.6.3 に示す非定常空気力を用いて 2 次元フラッター解析を実施した結果とを比較したものを表－3.4.6.4 に示す。

表－3.4.6.4　実験及び解析により求められたフラッター限界風速の比較

	部分模型応答試験結果	二次元フラッター解析結果
中央遮風壁なし	60.6 m/s	59.9 m/s
中央遮風壁あり	64.3 m/s	63.5 m/s

上表より，フラッター限界風速の実験値と解析値との差異は遮風壁なし・ありともに 1.2%程度であり，表－3.4.6.3 に示す非定常空気力が精度良く求められていることが確認できる。

(4)3 次元フラッター解析

表－3.4.6.5 に示す構造諸元及び次項表－3.4.6.6 に示す解析条件にしたがって，三次元フラッター解析を行った。

表－3.4.6.5　3 次元フラッター解析に用いた想定吊橋の構造諸元

項目			構造諸量
形式		構造形式	3 径間 2 ヒンジ吊橋
		支間長	1,250m+2,500m+1,250m
主ケーブル		サグ比	1/9
		ケーブル間隔	35.5 m
		有効断面積	2×0.6=1.2 m^2/Br.
		弾性係数	2.03×10^7 t/m^2
		許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー		ハンガー間隔	28 m
		断面積	0.0056 m^2
		弾性係数	1.40×10^7 t/m^2
補剛桁		断面積	1.3 m^2/Br.
		鉛直曲げ剛性	12 m^4/Br.
		水平曲げ剛性	160 m^4/Br.
		ねじれ剛性	26 m^4/Br.
		極慣性	336.7 t·m·s^2/m/Br.
死荷重		吊構造部	24 t/m/Br.
		ケーブル	11 t/m/Br.
		合計	35 t/m/Br.
主塔		ケーブル理論頂	TP+380.0 m
		面内剛性	200 m^4/shaft
		面外剛性	100 m^4/shaft
		ねじれ剛性	35 m^4/shaft
モデル化	桁	境界条件	ｳｨﾝﾄﾞ沓，ﾀﾜｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化
		重心位置	定着点と同じ
	塔	水平材	なし
		塔柱間隔	45 m

表－3.4.6.6　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項目</th><th>解析条件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法
低次 50 モードを取り込む
無風時固有モードを使用</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125kgf･s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ=0.02</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力，揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力係数</td><td>平板理論値，実測値（強制振動法）</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
C_D=0.75,　A_n=7.0 m²/m/Br.

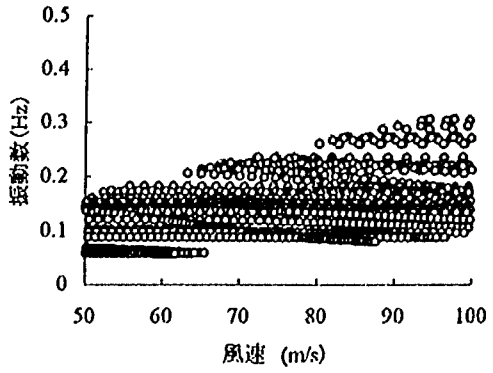
ケーブル：
C_D=0.75,　A_n=2.0 m²/m/Br.</td></tr>
</table>

今回開発した中央遮風壁を設置した断面に対して，3 次元フラッター解析を実施した結果を中央遮風壁を設置しない場合と比較して下表に示すが，通常のケーブルシステムにおいても一箱桁断面としては良好なフラッター特性が得られていることが判る。

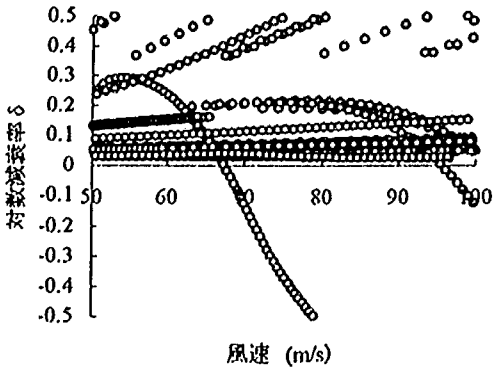
表－3.4.6.7　3 次元フラッター解析結果

中央遮風壁なし	中央遮風壁あり
64.6 m/s	67.4 m/s

また，中央遮風壁を設置した断面に関するフラッター振動数及び対数減衰率，フラッターモード図は次項にまとめて示す。

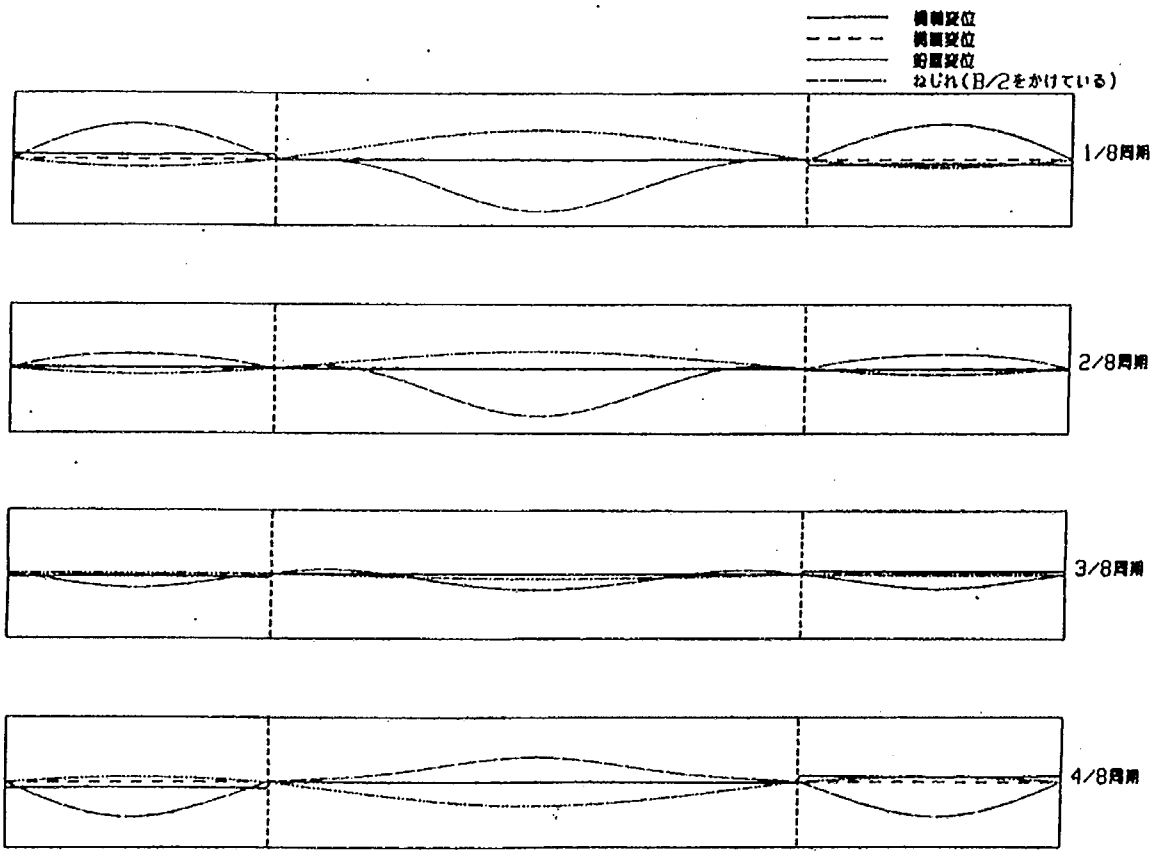


フラッター振動数



対数減衰率

図－3.4.6.7　フラッター解析結果（フラッター振動数，対数減衰率）



図－3.4.6.8　フラッター解析結果（フラッターモード）

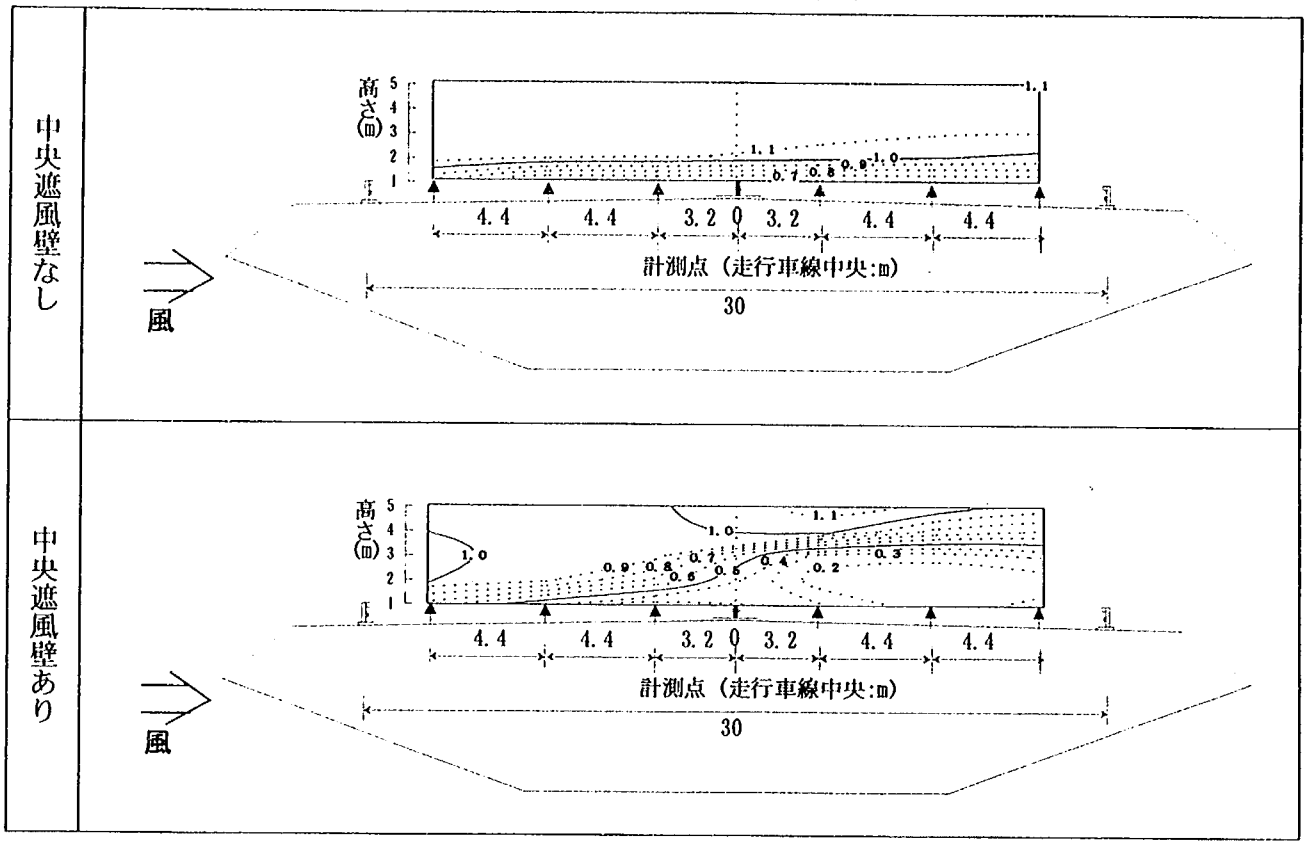
(5)　橋面上風速測定試験

中央遮風壁は耐フラッター対策部材として考案されたものであるが，ここではその風速低減効果を詳細に調査するために橋面上風速測定試験を実施した。

下表に中央遮風壁あり・なしの場合における風速低減率をコンター図にまとめたものを示す。

（尚，下表は風速 10m/s における計測結果であるが，風速 20m/s において計測された結果との差異が微小であることを確認している。）

表－3. 4. 6. 8　橋面上風速計測試験結果

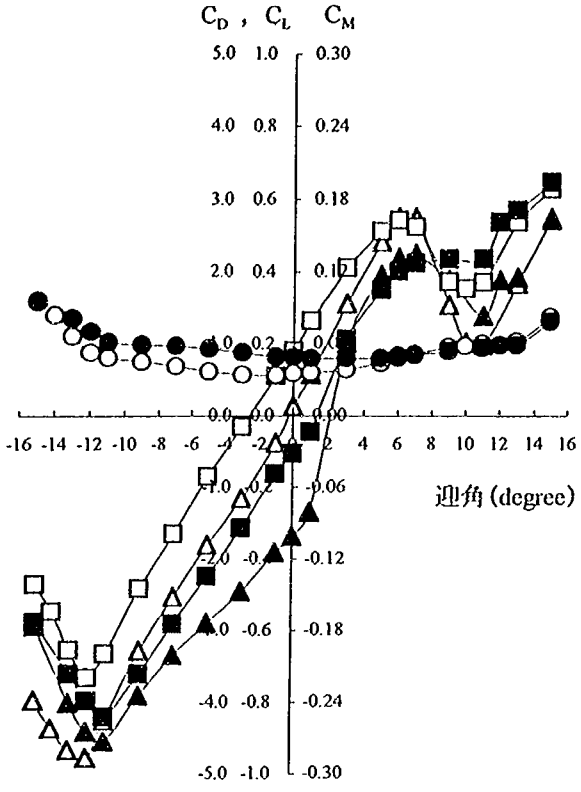


上表に示すように，中央遮風壁を設置した場合には，遮風壁の風下側で大きな風速低減効果が認められるだけなく，風上側においても，遮風壁近傍の車線においては風速低減効果が期待できることが判る。すなわち，強風時には 6 車線の内，風下側 3 車線と風上側 1 車線の交通を確保するなど，より柔軟な対応が可能となるものと考えられる。

(6)　静的３分力測定試験

基本断面Ｃについて，中央遮風壁あり・なしの場合の静的３分力特性を比較したものを下図に示す。

（尚，何れも遮風壁を含まない投影面積あるいは桁高で無次元化を行っている）



●：C_D　▲：CL　■：C_M

模型名	基本断面Ｃ（中央遮風壁あり）
風速	20.0 m / s
外郭面積	0.5559 m^2
投影面積	0.5041 m^2
充実率	90.7%
模型幅	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.836
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	3.270　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.397　(1 / rad)

○：C_D　△：CL　□：C_M

模型名	基本断面Ｃ（中央遮風壁なし）
風速	20.0 m / s
外郭面積	0.5559 m^2
投影面積	0.5041 m^2
充実率	90.7%
模型幅	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.599
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	4.939　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.201　(1 / rad)

図－3.4.6.9　静的３分力特性

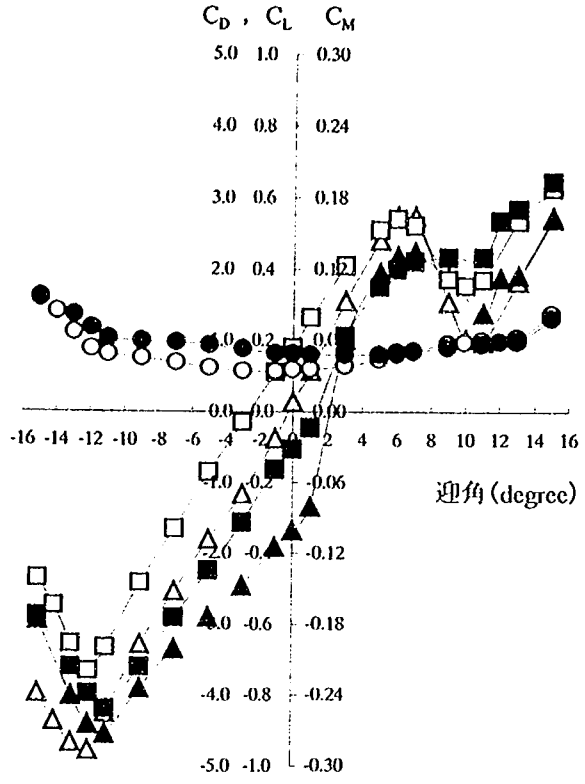
上図より，中央遮風壁がない場合には有風時に正のモーメントが生じるのに対して，中央遮風壁を設置した場合には基本断面の約半分に相当する負のモーメント及び下向きの揚力が生じることが判る。　これは，表－3.4.6.8 に示すように中央遮風壁を設置したことによって上下面の負圧領域のバランスが変化したためと考えられるが，詳細については今後の検討を要する。

また，中央遮風壁を設置した場合には，抗力係数が約 40%上昇しており，さらには，揚力勾配が迎角に対して大きく変動しているため，今後設計的な評価を行っていく際には注意が必要であろう。

(6)　静的3分力測定試験

基本断面Cについて，中央遮風壁あり・なしの場合の静的3分力特性を比較したものを下図に示す。

（尚，何れも遮風壁を含まない投影面積あるいは桁高で無次元化を行っている）



●：C_D　▲：CL　■：C_M

模型名	基本断面C（中央遮風壁あり）
風速	20.0 m / s
外郭面積	0.5559 m^2
投影面積	0.5041 m^2
充実率	90.7%
模型幅	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.836
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	3.270　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.397　(1 / rad)

○：C_D　△：CL　□：C_M

模型名	基本断面C（中央遮風壁なし）
風速	20.0 m / s
外郭面積	0.5559 m^2
投影面積	0.5041 m^2
充実率	90.7%
模型幅	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.599
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	4.939　(1 / rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.201　(1 / rad)

図－3.4.6.9　静的3分力特性

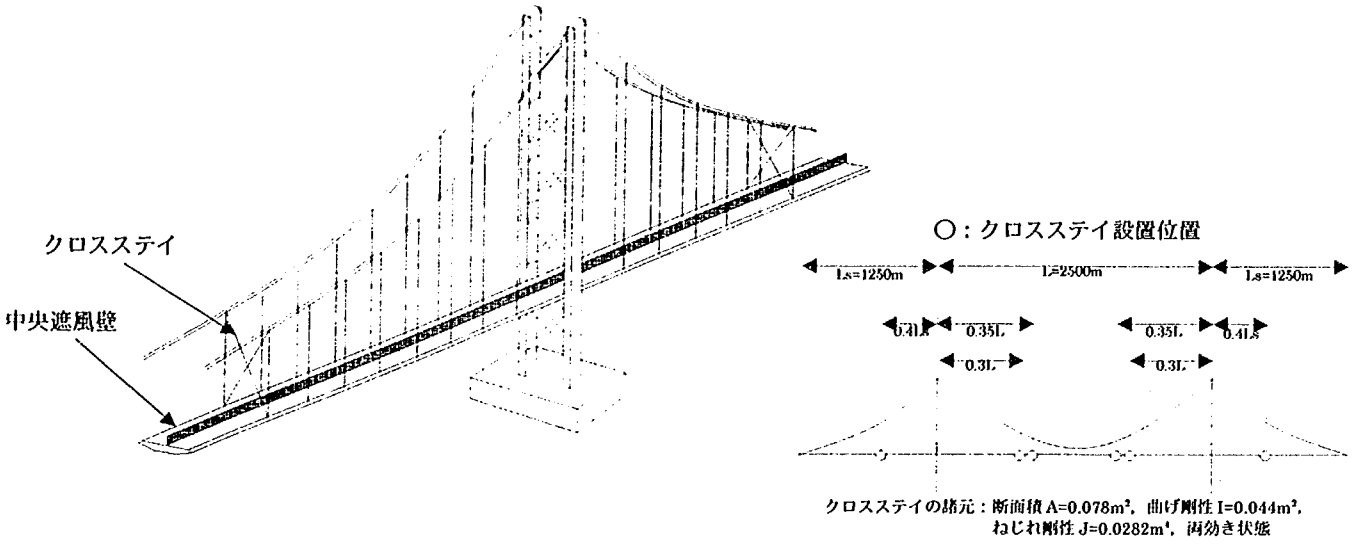
上図より，中央遮風壁がない場合には有風時に正のモーメントが生じるのに対して，中央遮風壁を設置した場合には基本断面の約半分に相当する負のモーメント及び下向きの揚力が生じることが判る。　これは，表－3.4.6.8 に示すように中央遮風壁を設置したことによって上下面の負圧領域のバランスが変化したためと考えられるが，詳細については今後の検討を要する。

また，中央遮風壁を設置した場合には，抗力係数が約 40%上昇しており，さらには，揚力勾配が迎角に対して大きく変動しているため，今後設計的な評価を行っていく際には注意が必要であろう。

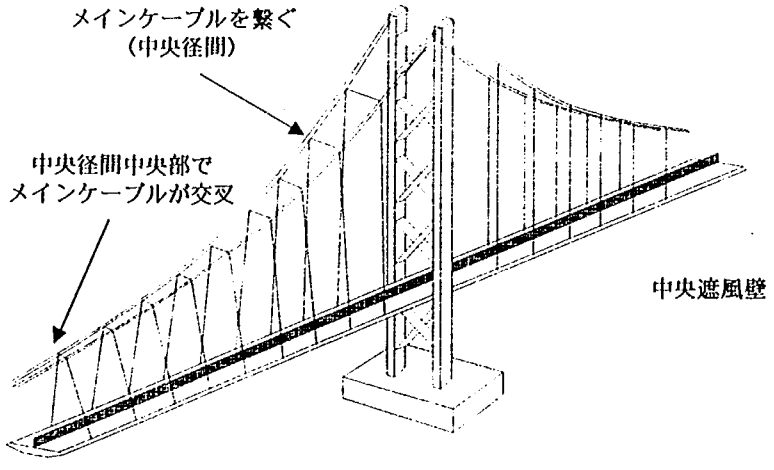
(7) 新たなケーブルシステムに関する検討

ここでは，過去にも提案されているクロスステイの設置及び今回新たに提案した「メインケーブルを交叉させる」Crossing Main Cable システムについて，3 次元フラッター解析を実施し，そのフラッター特性改善への有用性を検討した。 尚，フラッター解析条件は，表－3.4.6.5，6 に示したものとし，桁の非定常空気力係数は基本断面 C の中央遮風壁あり・なしの 2 種について検討を実施した。

下図にそれぞれのケーブルシステムの概要図を示す。



クロスステイの設置



Crossing Main Cable システム

図－3.4.6.10 ケーブルシステム概要図

下表に3次元フラッター解析結果をまとめて示す。

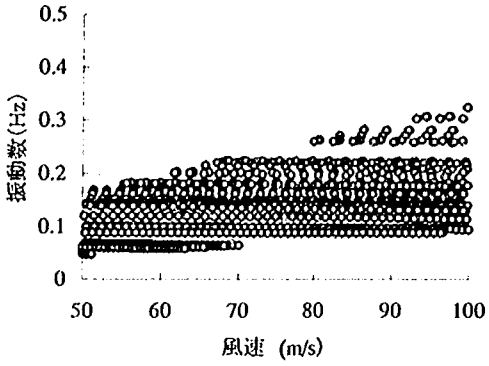
表－3.4.6.9　3次元フラッター解析結果（ケーブルシステムの変更による影響）

ケーブルシステム	断面形状	
	中央遮風壁なし	中央遮風壁あり
標準モデル	64.6 m/s	67.4 m/s
クロスステイ設置	89.7 m/s	96.3 m/s
Crossing Main Cable システム	79.1 m/s	82.8 m/s

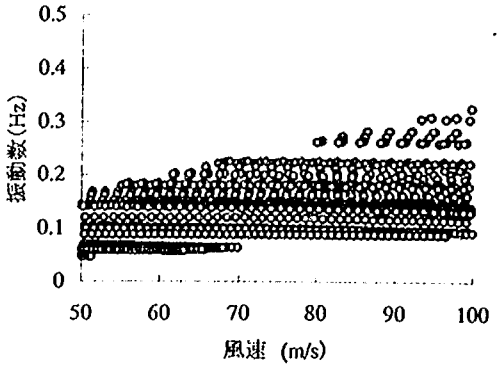
上表より，何れのケーブルシステムもフラッター特性の改善に大きく寄与することが判る。

尚，今回の解析結果ではクロスステイを設置した方が高いフラッター限界風速を算出する結果となったが，クロスステイを設置する場合には，暴風時のステイの信頼性が問題となる可能性も考えられ，今後Crossing Main Cable システムの詳細な構造を検討していくことによって，本システムがクロスステイの代替案として有効な手段となりうることも考えられる。

尚，今回検討したケーブルシステムを用いた場合のフラッター振動数，対数減衰率，フラッターモードについては，次項以降にまとめて示す。

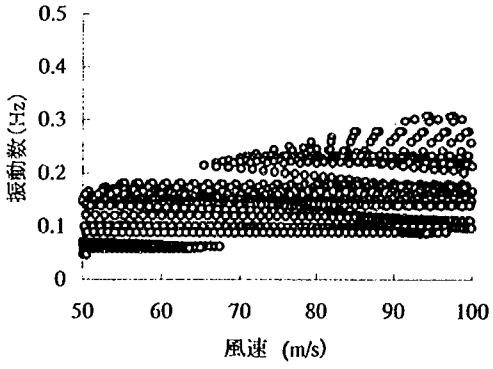


中央遮風壁なし

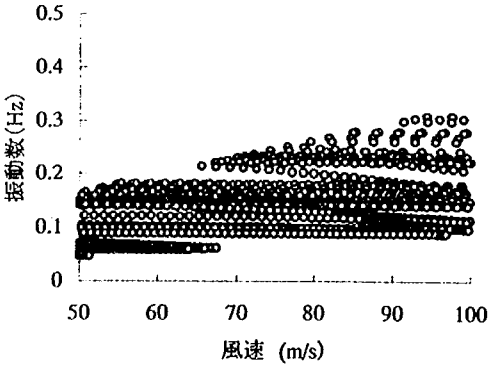


中央遮風壁あり

クロスステイ設置



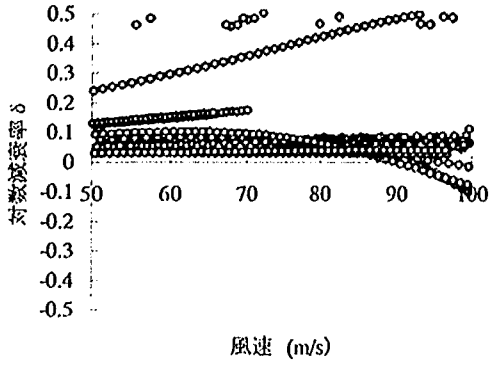
中央遮風壁なし



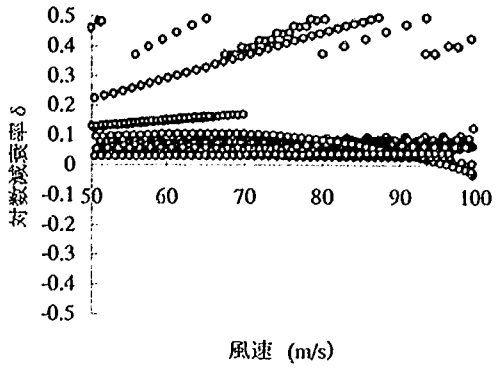
中央遮風壁あり

Crossing Main Cable システム

図－3.4.6.11　3次元フラッター解析結果（フラッター振動数）

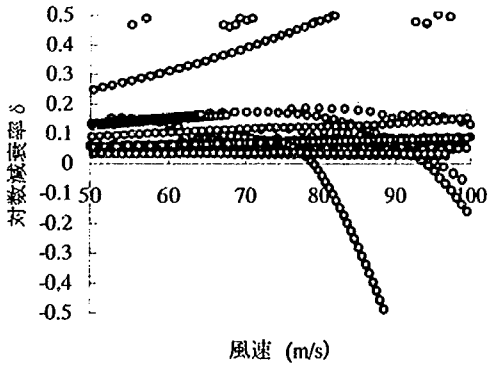


中央遮風壁なし

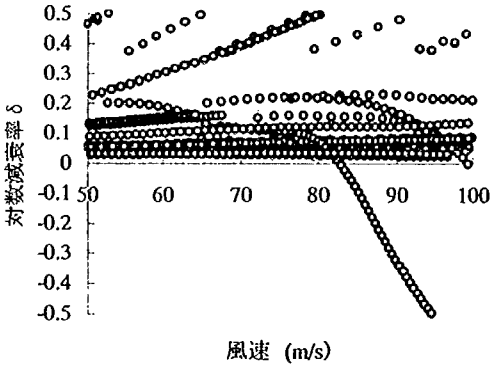


中央遮風壁あり

クロスステイ設置



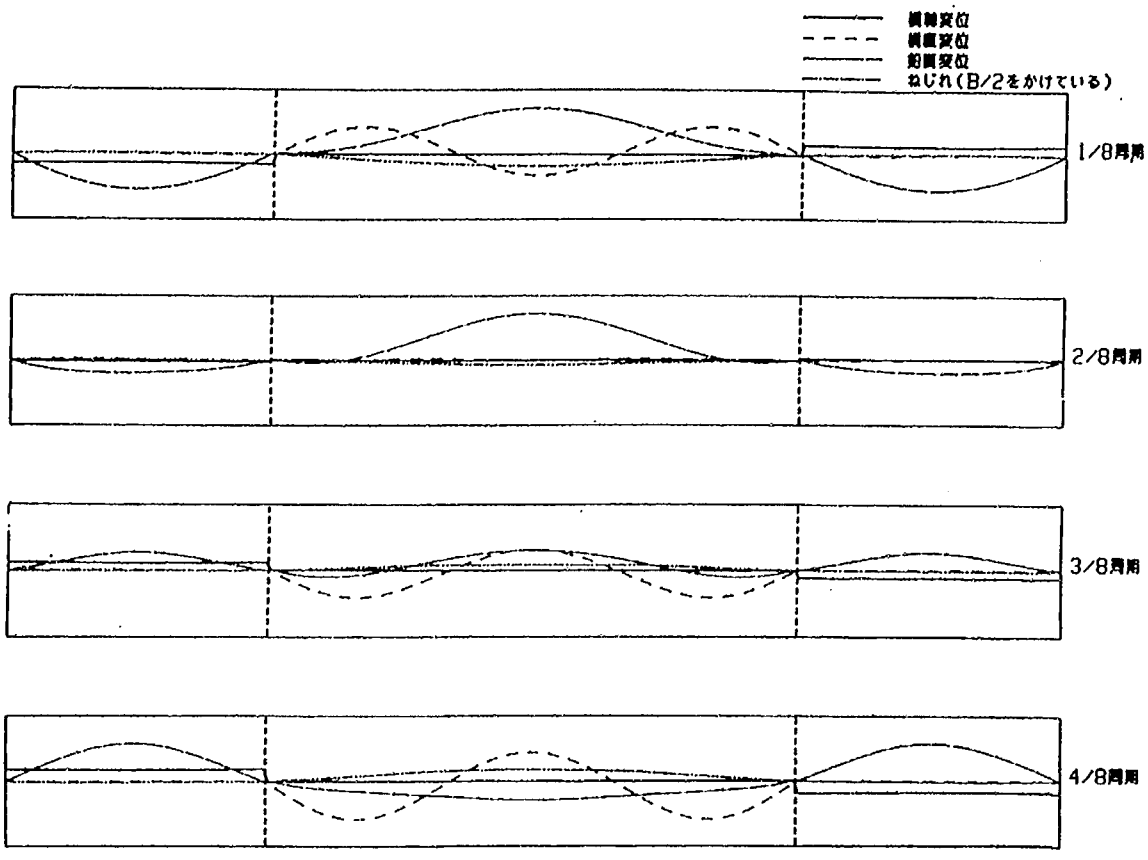
中央遮風壁なし



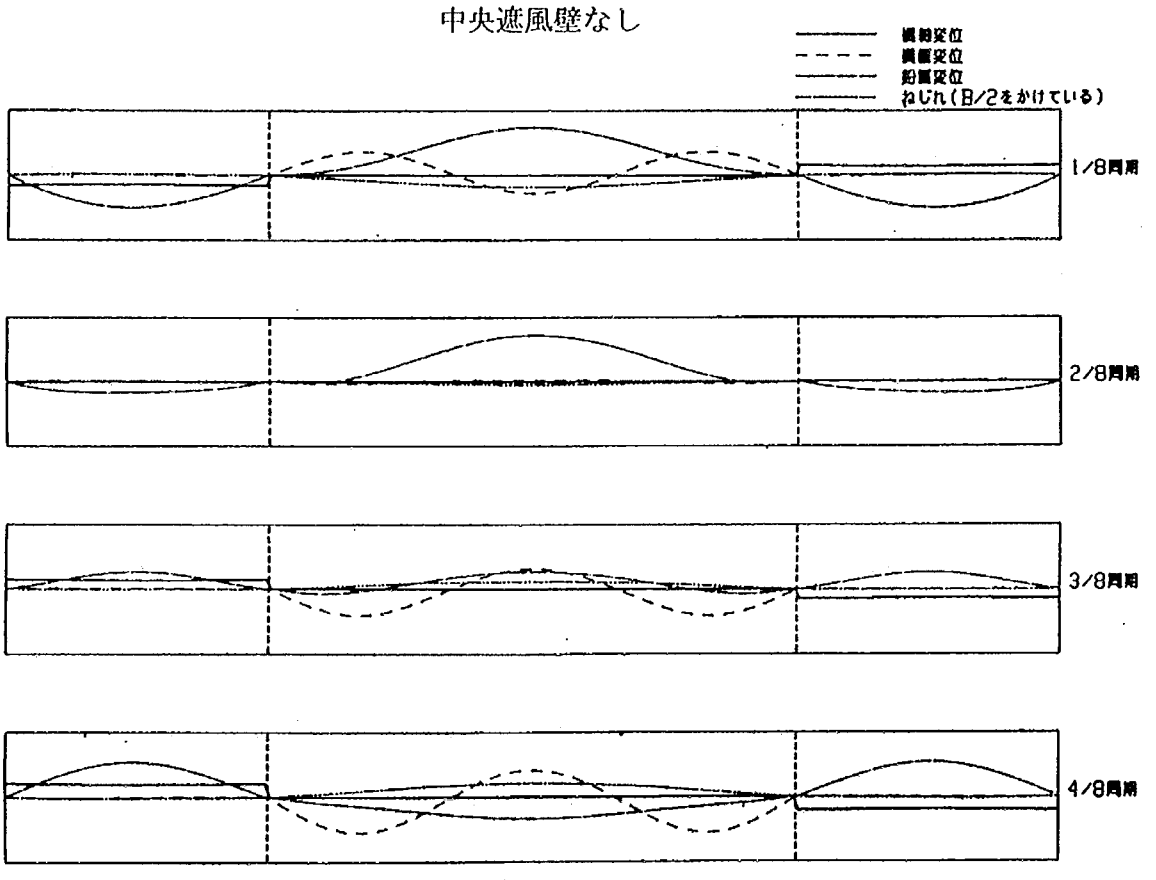
中央遮風壁あり

Crossing Main Cable システム

図－3.4.6.12　3次元フラッター解析結果（対数減衰率）

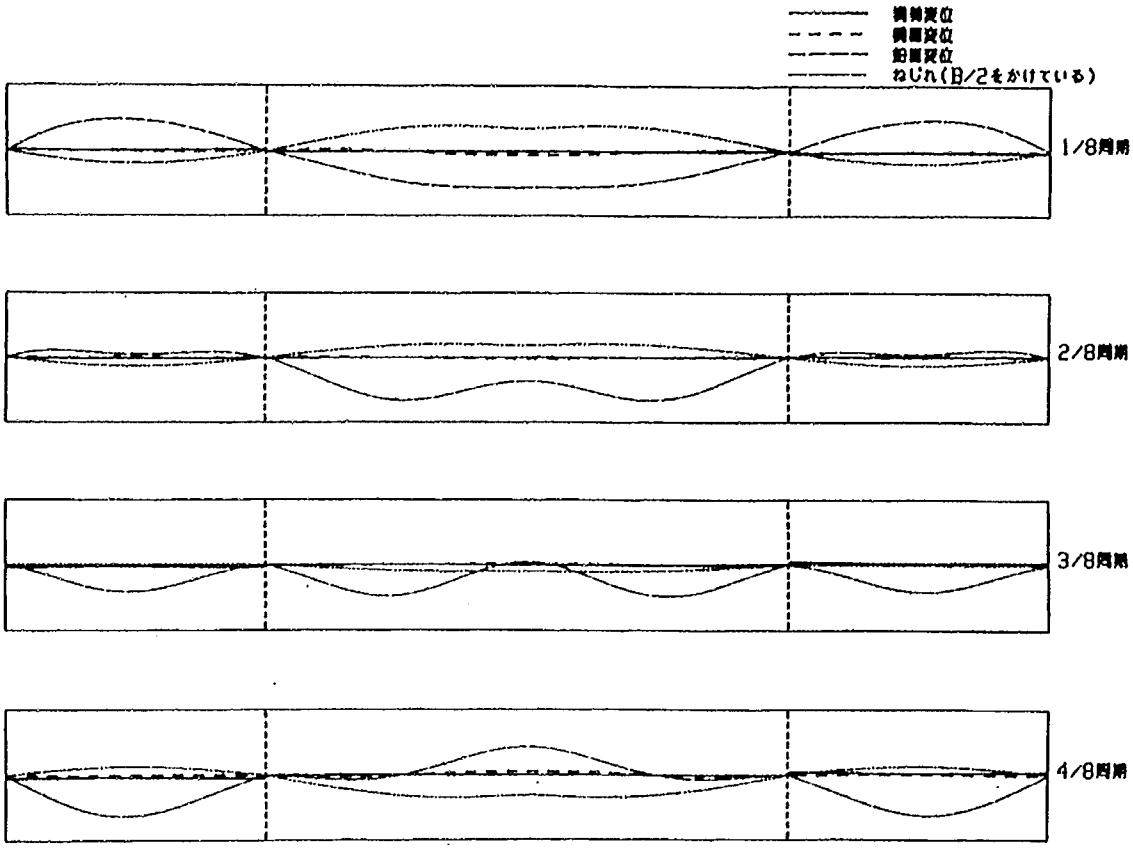


中央遮風壁なし

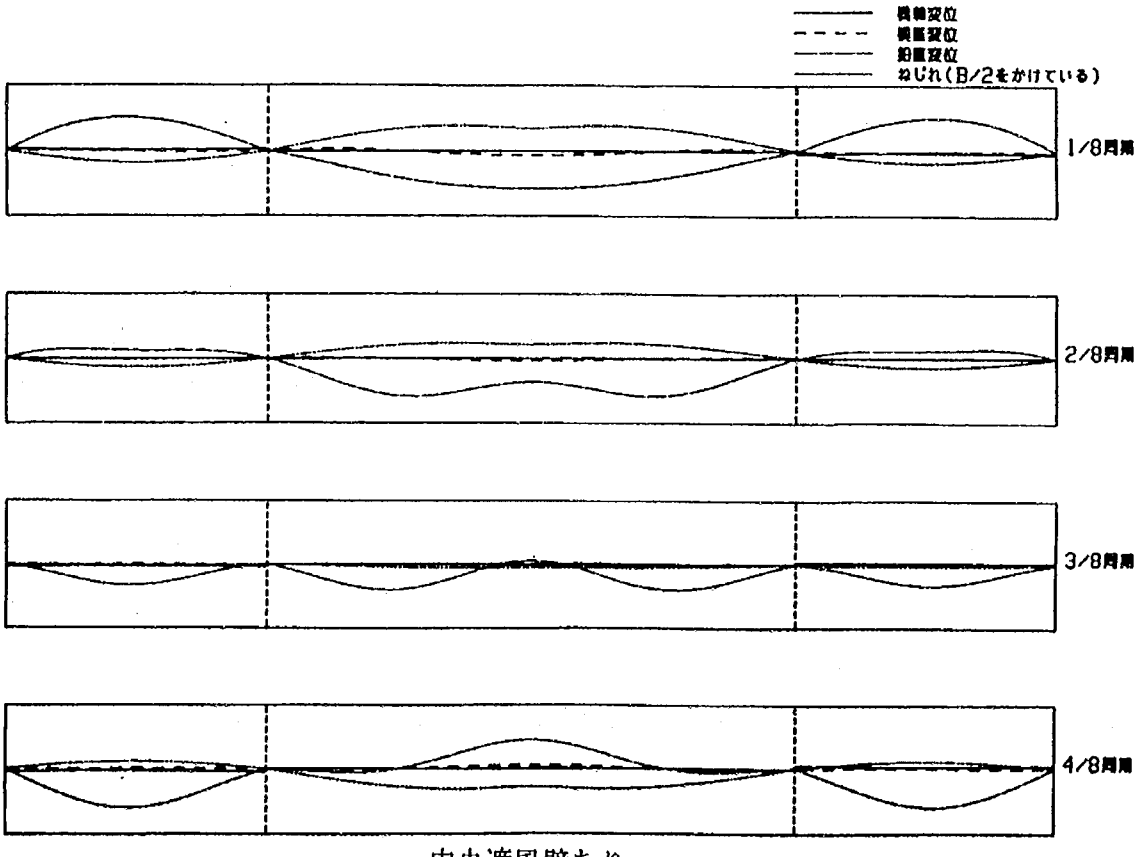


中央遮風壁あり

図－3.4.6.13　3次元フラッター解析結果（フラッターモード，クロスステイ設置）



中央遮風壁なし



中央遮風壁あり

図－3.4.6.14　3次元フラッター解析結果（フラッターモード，Crossing Main Cable システム）

(8) まとめ及び今後の課題

1) まとめ

本項では，大型模型を用いた風洞試験によって優れた耐フラッター性能を有することが確認された基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ3m，充実率66%）を設置した場合の基本的な空力特性を調査した。

以下に，その結果得られた成果の概要を試験項目毎にまとめて示す。

・ばね支持応答試験

基本断面Cの中央部に遮風壁を設置することによって，迎角0°におけるフラッター限界風速が約4m/s向上する（60.6m/s→64.3m/s）ことが明らかとなった。 さらに，本断面においては迎角に対するフラッター限界風速の変化も小さく，基本断面Cよりも一層優れた耐フラッター性能を有することが判った。

・非定常空気力測定試験及び3次元フラッター解析

基本断面Cの中央部に遮風壁を設置した断面に対して，非定常空気力を測定し，さらにその結果を用いて3次元フラッター解析を実施したところ，全橋状態でのフラッター限界風速は67.4m/sと推定され，通常のケーブルシステムにおいても，一箱桁断面としては比較的良好なフラッター特性が得られることが判った。

・橋面上風速測定試験

中央遮風壁を設置した場合に関して，その風速低減効果を調査するために橋面上風速測定試験を実施したところ，遮風壁の風下側だけでなく風上側においても風速低減効果が期待できることが明らかとなった。

・静的3分力測定試験

中央遮風壁を設置した場合には，抗力係数が約40%上昇し，さらには揚力勾配が迎角に対して大きく変動することが明らかとなった。 今後設計的な評価を行っていく際には注意が必要であるものと考えられる。

さらに本項では，上記検討に加えてケーブルシステムについても検討を行い，クロスステイを設置した場合，及び今回新たに提案した「メインケーブルを交叉させる」Crossing Main Cable システムに関して3次元フラッター解析を実施した。

その結果，両者ともフラッター特性の改善に有効であることが明らかとなった。

2) 今後の課題

以下に今後の課題を列挙する。

・今回は，フラッターを中心に諸検討が進められたため，渦励振及びガスト応答に関しては未検討である。　しかし，優れた断面形状を提案するためには，上に挙げたフラッター以外の空力振動も必須の検討課題であり，今後はこれらの空力振動に関しても，さらなる検討が必要であるものと考えられる。

・中央遮風壁を設置した断面は，良好なフラッター特性を有することが明らかとなったものの，その抗力係数は中央遮風壁を設置しない場合と比較すると 40%程度大きくなるため，今後設計的な評価を行っていく上では細心の注意が必要になるものと考えられる。

・今回新たなケーブルシステムとして，Crossing Main Cable システムを提案したが，今後はさらに構造の詳細を検討し，暴風時にも信頼性の高いケーブルシステムについてさらに開発を進めていく必要があるものと考えられる。

3．4．7　その他の形式

(1)　吊形式

1)　Twin Bridge (J.R. Richardson)[1)]

一般に重心位置に偏りがない場合，ねじれ／たわみの振動数比が大きいほど，フラッター限界風速が高くなることが知られているが，たわみ・ねじれの振動数比が 1 の場合，連成フラッターは理論的に発生しなくなる。Twin Bridge はこのようなフラッターの物理的特徴に着目し，図-3.4.7.1 に示すように二つの桁断面を離れた位置に設置し，相互に剛性のない部材で連結する構造とすることで，たわみ・ねじれの振動数を等しくし，構造特性の面から耐フラッター性能の向上を目指したものである。

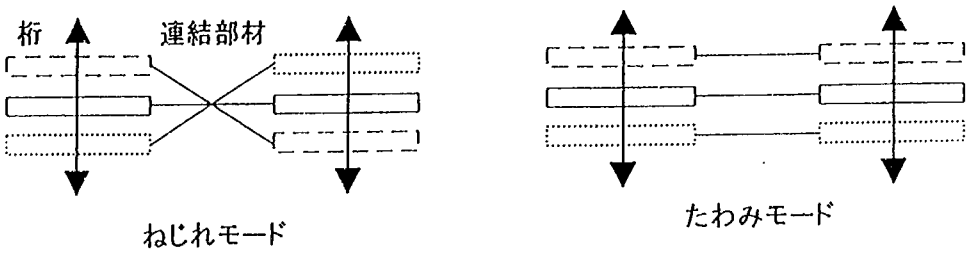


図-3.4.7.1　Twin Bridege　概念図

2) Messina Strait Bridge (Sergio Musmesci)[2),3)]

現在，メッシナ海峡ではイタリア本土とシチリア島とを道路鉄道併用橋で結ぶ計画が進行中である。 1970年，ANAS（イタリア道路公団）が競争設計を募集し，Sergio Musmesciによる下記のようなアイデアが提出された。

即ち，張力構造の原理を吊橋に応用し，桁の上下にケーブルを配した単径間吊橋の形態とするものである。 このような吊構造とすることで，三径間吊橋の中央支間長を縮小するのと等価な効果が得られると考えられる。

3) Cable Supported Bridge (Niels J Gimsink)[4)]

桁の両脇に計4本の主塔を設置し，一部他定式の吊構造とする案である。中央支間長は特定されていないが，ケーブルを立体構造として系の安定化を試みている点においては 2) 案との類似性を見出すことができる。

(2) 桁断面

1) All Grating[5)]

既にアメリカの Mackinac 橋などで実績のあるグレーチング構造を図-3.4.7.2 に示すように桁全面にわたって採用する案である。 即ち，桁上下面の風通しを良くし，不安定振動の原因となる空気力そのものを可能な限り除去しようとするものである。 現在国内の研究機関でも風洞実験による検討が盛んに行われ，成果が得られつつある状況である[5)]。

しかし，走行車両の安全性や維持管理・車両走行時の騒音の問題など，解決すべき問題点も多い。

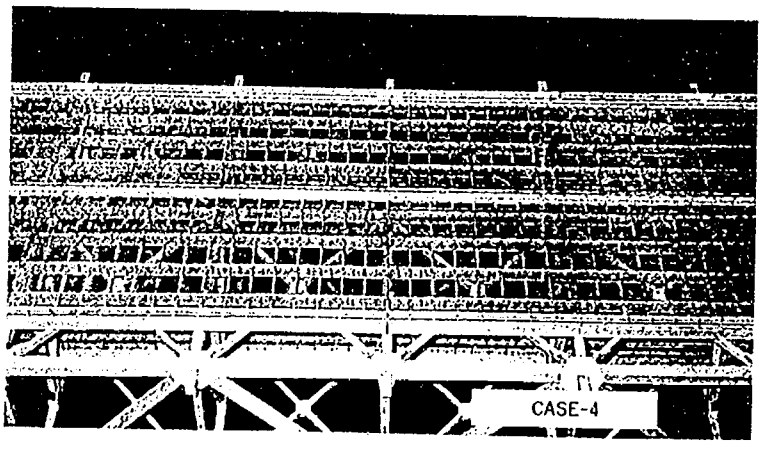


図-3.4.7.2 All Grating 形式の風洞模型

2) Pipe Truss

従来のトラス補剛桁の弦材に鋼管を用いる形式である。

鋼管を弦材として用いることで，工期短縮による工費の低減，さらに抗力の低減による耐風安定性の向上が望めると考えられる。

<参考文献>

1) J.R. Richardson, "Influence of Aerodynamic Stability on the design of Bridges", 12th Congress of IABSE, pp.729-736, September, 1984.

2) 長井正嗣, 「吊形式橋梁の超長大化と構造形態」, 海峡横断 vol.8, pp10-12, 1997年2月

3) Niels J.Gimsing, "Large bridges of the future", Aerodynamics of large bridges, pp.295-304, February, 1992.

4) 村上永一, 「海外における長大橋計画の動向」, 長大橋に関する技術論文集, pp18-31, 1982年6月

5) 山岸一彦他, 「長大吊橋の耐風安定性に関するグレーチングの効果とその使用実績」, 海峡横断 vol.8, pp.13-16, 1997年2月

4．三年間の研究成果のまとめ

4．1　研究成果の概要

1995年度から３年間に渡って実施された本研究では、対象とする超長大吊橋を、中央支間長２５００m、橋長５０００mの３径間２ヒンジ吊橋とし、フラッター限界風速８０m／s以上を目標に、まずその構造諸元を定めることから始めた。検討の方法としては、補剛桁の耐風性の改善よりもケーブル形式等の構造形式の工夫に力点を置いた一箱桁形式、耐風性の改善を補剛桁の形状検討に求めた二箱桁形式、新しい発想でより一層の耐風性の改善を目指した新形式の３つに大別し、より詳細に検討を進めてきた。

空力特性の検討では、一箱桁断面を対象にし、フェアリング、中央部開口、遮風壁などの形状配置によった検討がなされ、設計目標値である８０m／s付近まで耐風性が向上した桁断面が提案された。さらに二箱桁断面を対象に鉛直スタビライザーや導流板、フェアリング、箱桁下面突起プレート、外部遮音壁などの設置により耐風性を一挙に改善しようとする試みもなされた。また、連成フラッタのみならず、比較的低風速で発現する渦励振についての検討や、経済性に着目した４車線案補剛桁についても具体的な検討がなされた。新形式断面の空力特性の検討では、形状に着目したものとしたは楕円断面や多角形断面、ひし形断面、開孔六角形断面、二箱桁／一箱桁断面の併用などが検討対象とされた。

一方、構造特性の検討では、一箱桁形式で基本とした桁断面では若干耐風性に劣るところがあり、構造形式の工夫だけでは十分な成果が得られないと判断された。そこで、一箱桁断面の形状を改善したところ、構造形式に積極的な改善を施さない状態でも十分な耐風性が確保されるケースも得られてた。ここで開発された有望な技術としては、鉛直クロスステイ方式、水平ステイ・対角ステイ方式、開口補剛桁方式、改良断面・斜めステイ方式などが挙げられよう。また、新しい構造形式の検討では、重力剛性桁が挙げられよう。

空力特性と構造特性の組み合わせでは、３本ケーブルに斜めステイを付加したケーブルシステムと一箱桁断面の併用、４本ケーブル・クロスハンガーと二箱桁断面の組み合わせ。クロスステイ及びクロスメインケーブルと中央遮風壁設置断面。斜張構造と二箱下駄と一箱桁併用断面。

４．２　空力特性に関する検討

４．２．１　一箱桁に関する空力特性の検討

一箱桁断面を基本断面として、剛体部分模型を用いた２次元ばね支持試験、あるいは非定常空気力試験と２次元フラッター解析により、耐風性の良好な断面を追究する検討を行った。上記検討の結果、耐風性が良好な断面については、三分力試験、非定常空気力試験を実施し、それらの空気力を用いた３次元マルチモードフラッター解析によりフラッター発現風速を算定することにより耐風性を評価した。なお、検討に用いた各断面の諸元は、使用鋼重量の低減を図ってより経済的な超長大吊橋が実現できるように６車線、サグ比 1/9、ケーブル許容応力度 100kgf/mm² とした基本設計条件を基にして算定した。本試設計では、吊構造部の死荷重は 35tf/m まで低減されている。

主な研究成果は以下の通りである。

(1)　フェアリング形状に関する検討

1)　フェアリング形状の変更により、フラッター発現風速は約１割上昇する。さらに、検査車レール位置、高欄形状を工夫すると、フラッター発現風速は約２割上昇する（図－4.2.1.1)。

2)　桁先端フェアリング形状（図－4.2.1.2）の変更によりフラッター発現風速は約１割上昇する。

(2)　センターバリアに関する検討

桁中央部に設置するバリア（センターバリア）として、桁上面・下面にバリアを設置した場合には、フラッター発現風速は上昇し、さらに、たわみ渦励振も大幅に低減する。但し、バリア高さを過剰に大きくすると、たわみの不規則振動が大きくなるため、高さの選定には注意を要する。適当な桁先端フェアリング形状と組み合わせた場合には、フラッター発現風速は約２割上昇する（図－4.2.1.2)。

(3)　中央部開口に関する検討

1)　桁高７ｍ、５ｍ、３ｍの中では、桁高５ｍ、３ｍが比較的良好である。

2)　桁高５ｍで主桁中央開口部が３ｍと比較的小さい開口部を設けた場合のフラッター発現風速の上昇は２割程度にとどまる。

3)　桁高５ｍのケースでは、開口部の位置を桁中央部および路肩部に設けた場合（図－4.2.1.3）には、負迎角側のフラッター発現風速は大きく上昇するものの、正迎角側では悪化する。

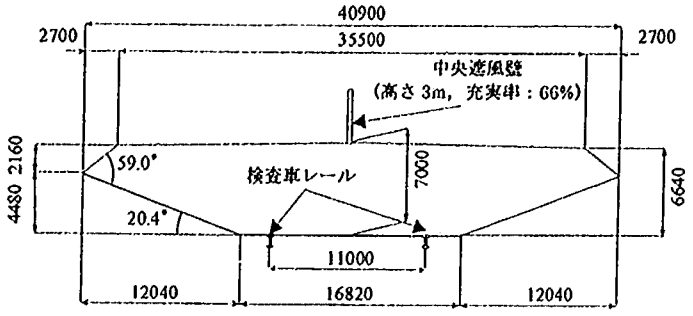
4)　主桁中央開口部（上下一車線）を充実率５０％程度にオープングレーチング化（図－4.2.1.4）することで、比較的良好なフラッター特性が得られる。但し、正迎角側のフラッター発現風速は低下するため、今後の検討が必要である。

(4)　遮風壁に関する検討

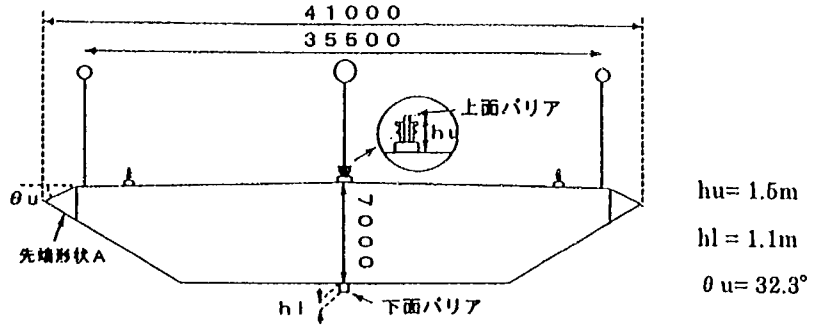
1)　路肩部と中央分離帯部に開口部を設置した桁高５ｍの箱桁に、水平導流板を設置した透過型遮風壁を設置した場合には、正迎角のフラッター特性が改善される。さらに、センターバリアを付加した場合には最も耐風性が良好となり、設計目標値 80m/s 近くとなる（図－4.2.1.3)。

2)　桁断面遮風壁を中央分離帯部分に設置した場合（図－4.2.1.1）には、従来の桁端部に設置される遮風壁がフラッター発現風速の低下を招くのに対して、フラッター発現風速が上昇する。また、高さ 3m・充実率 66％程度の場合の遮風壁としての効果は、遮風壁風下側の車線における風速低

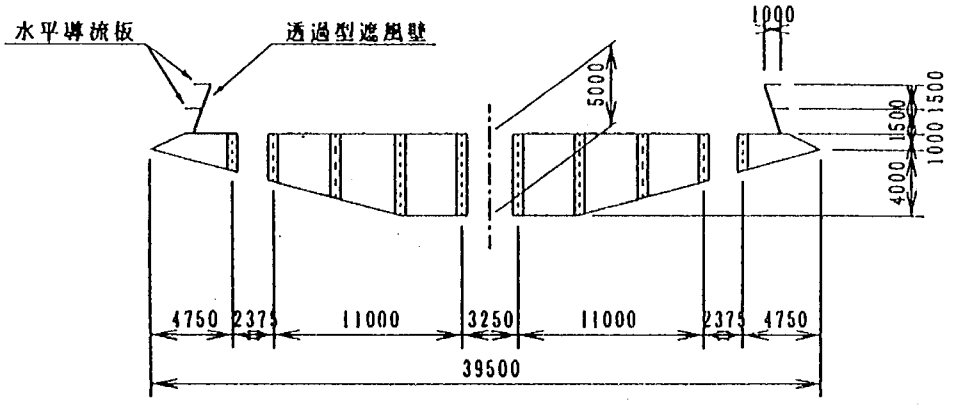
減の他、遮風壁風上についても一車線程度は期待できる。但し、抗力係数が増大するため、設計上注意を払う必要がある。



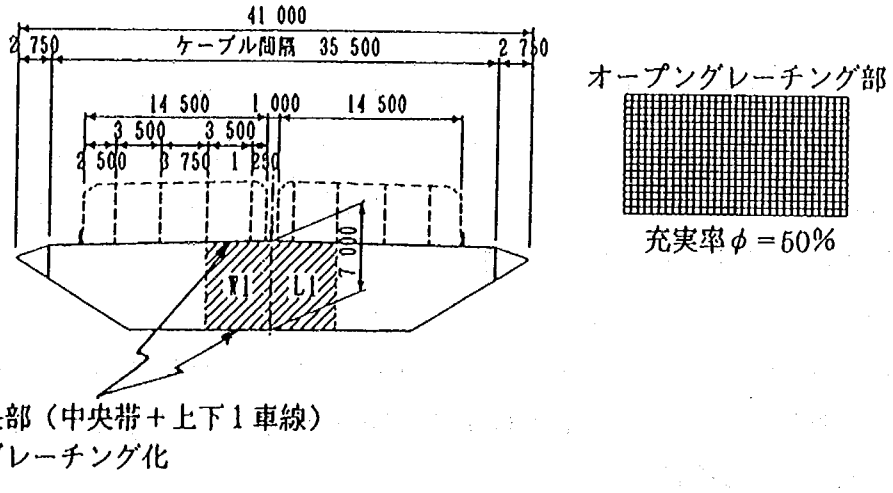
図－4.2.1.1　フェアリング形状・検査車レール・中央遮風壁



図－4.2.1.2　桁先端フェアリング・桁上面バリア・桁下面バリア



図－4.2.1.3　開口部・水平導流板を設置した透過型遮風壁・センターバリア



図－4.2.1.4　桁中央部オープングレーチング

4．2．2　二箱桁に関する空力特性の検討

トラス補剛桁における床組の空力特性の改善策として採用されている部分的開口の方式を参考に明石海峡大橋の試設計で提案されたような偏平箱桁の中央部を開口した断面ﾘを取り上げ、これを二箱桁形式と称して検討を実施した。

各研究機関ではそれぞれ偏平箱桁に関する既往の風洞実験例などを参考に基本断面を任意に設定し、これに対して剛体部分模型を用いた２次元ばね支持試験で耐風性良好断面を追究する作業を行った。各基本断面の諸元は４．２．１節の一箱桁と同様の基本設計条件（６車線、上部工重量40tf/m以下など）で概略算定されている。耐風性良好と考えられる断面については三分力試験、そのデータに基づく有風時の静的変形解析、これらの変形を考慮して測定した非定常空気力を用いた３次元マルチモード連成フラッター解析により算定したフラッター発現風速により耐風性を評価した。

主な成果は以下の通りである。

(1)　鉛直スタビライザー・導流板に関する検討

1)　中央部開口により耐風性は向上するが、開口率の効果は基本断面形状・幅高さ比により変化する。ただし、これのみでは80m/sを満たすことは出来ない。

2)　中央開口部に鉛直スタビライザー（図－4.2.2.1）あるいはセンターバリア（図－4.2.2.2）と称する鉛直の帯板を設置すると耐風性が向上する。開口幅が大きい場合は効果が大きい。開口幅が15.5mと大きくした場合でダブルセンタバリアを配して良好な特性が得られている（図－4.2.2.4）。

3)　鉛直スタビライザーやセンターバリアなどに水平スタビライザー（図－4.2.2.1）あるいはガイドベーン（図－4.2.2.2）とも称せられる導流板（図－4.2.2.3）を併用すると、両者の相乗効果により、耐風性が大幅に向上し、設計目標値80m/sを満たすものが見出されている。

4)　鉛直スタビライザーと導流板の併用案で中央開口幅を大きくする方が耐風性が向上する場合がある。この場合、開口部をグレーチング構造とし、追越車線に活用することにより桁全幅を大きくしないで耐風性が良好となる断面案が見出されている（図－4.2.2.3）。

(2)　フエアリングに関する検討

二箱桁断面においてはフエアリングの先端角度は60°、70°が比較的良好である。

(3)　箱桁下面の突起プレートに関する検討

側部フエアリングが上下対称断面では路面上の自動車防護柵・地覆・横断勾配などの影響に対処してアンダーバリア（図－4.2.2.2）や鉛直プレート（図－4.2.2.5）、検査車レール（図－4.2.2.5）などの突起を箱桁下面に配置することにより、空力モーメント特性を改善し負のねじれ変形を抑え、フラッター特性を向上させることができる。

(4)　外側部遮風壁に関する検討

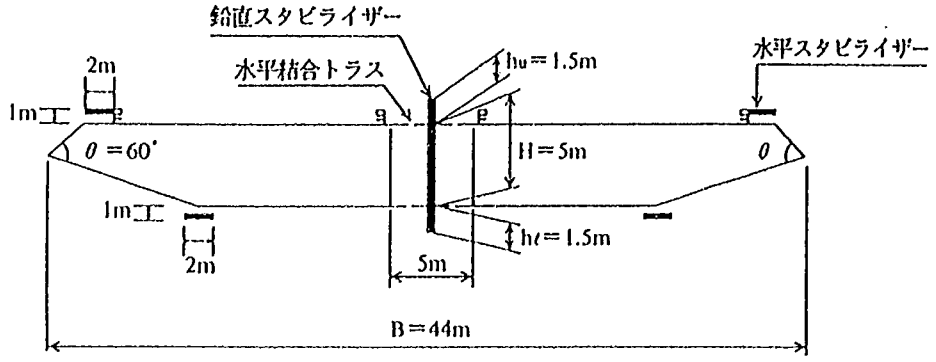
強風時の走行性を確保する透過型遮風壁（充実率30%、50%）を外側部（自動車防護柵あるいはその外側）に設置した場合、耐風性に及ぼす影響が比較的小さいことがわかった（図－4.2.2.3）。

(5)　渦励振に関する検討

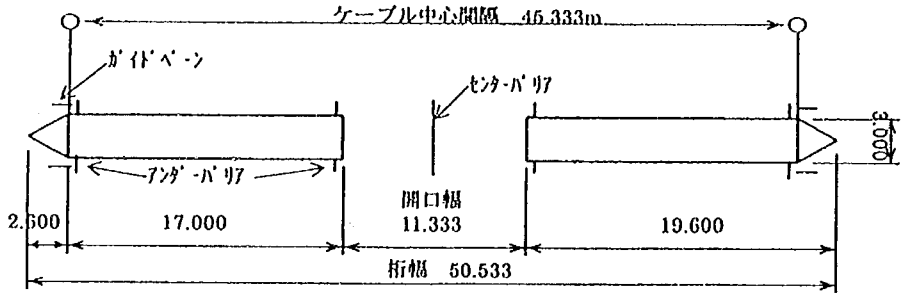
中央開口および鉛直スタビライザー設置により、一様流中の比較的低風速で発生する鉛直たわみやねじれの渦励振は５～10%の格子乱流中で消滅することがわかった（図－4.2.2.1）。

(6)　車線数に関する検討

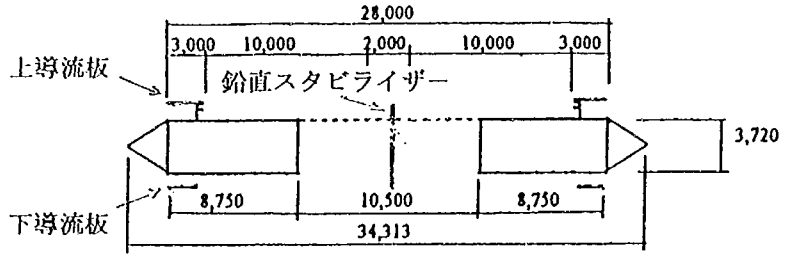
当初、６車線を基本として軽量化を図った断面について検討された結果、上述したように耐風性に優れた断面が見出されたが、経済性の面からこれを４車線にした場合についても同様な成果が得られている（図－4.2.2.2、図－4.2.2.3）。



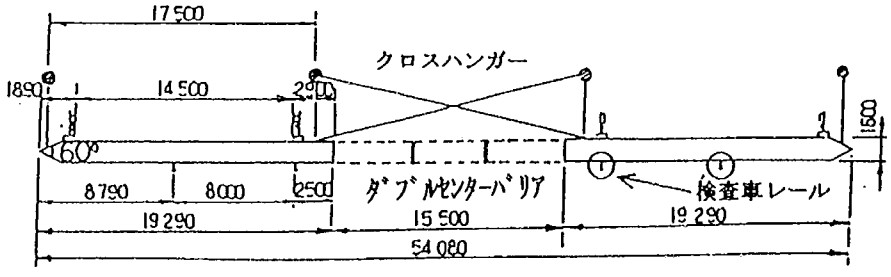
図－4.2.2.1　鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ・水平ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ



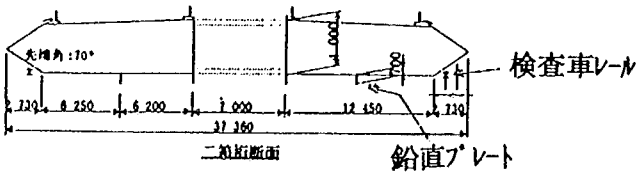
図－4.2.2.2　ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ・ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ・ｱﾝﾀﾞｰﾊﾞﾘｱ



図－4.2.2.3　鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ・導流板



図－4.2.2.4　ﾀﾞﾌﾞﾙｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ



図－4.2.2.5　鉛直ﾌﾟﾚｰﾄ・検査車ﾚｰﾙ

４．２．３　新型断面に関する空力特性の検討

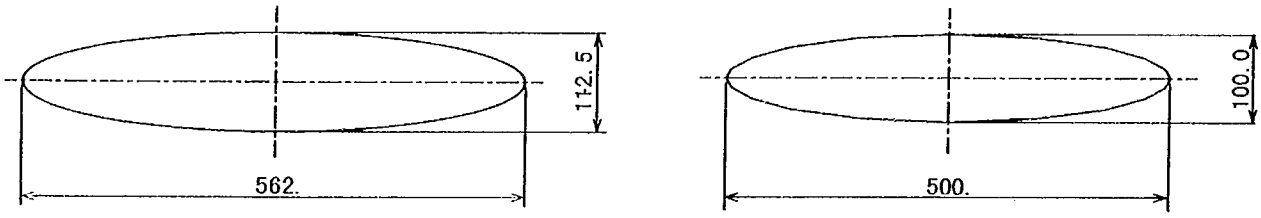
上記一箱桁断面、二箱桁断面以外の形式及びそれらを組合わせた形式を検討対象とし、新たな観点から耐風安定性に優れた断面形状を模索した。

その成果の概要は以下の通りである。

(1)　一箱桁形式・二箱桁形式以外の断面形状

1)　楕円断面、多角形断面

従来から優れた空力特性を有することが知られている「楕円断面」及びその類似形状である「多角形（20 角形）断面」（図－4.2.3.1）については、平板翼の空力特性に近い。平板翼を大きく上回るような耐風性に優れた断面は見出すことは困難であったものの、抗力係数 C_D が非常に小さいため風荷重に対しては有利である。これを利用して、桁高を大きくしてねじれ剛性の増加に繋げることで耐フラッター性を向上できる可能性もある。一方で、三分力係数の風速依存性が顕著であることなどが確認された。Re 数依存性に対する検討については今後の課題である。

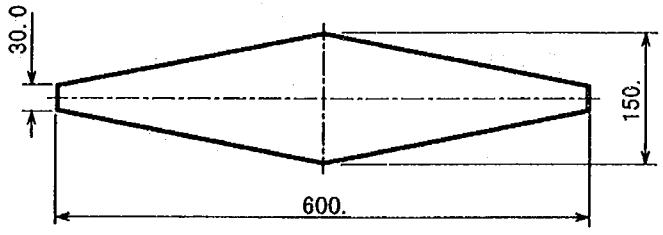


楕円断面（1:5）　　多角形断面（1:5）

図－4.2.3.1　楕円断面・多角形断面（20角形）（風洞模型）

2)　ひし形断面

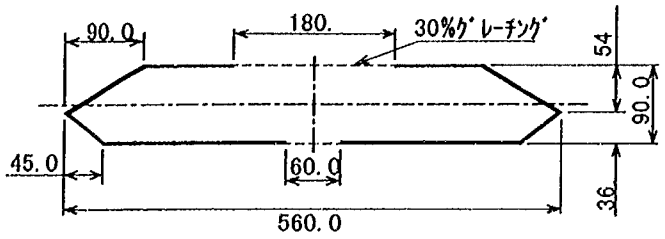
ひし形断面（図－4.2.3.2）においても、平板翼を上回るような空力特性は得られなかったものの、フラッター発現風速の迎角に対する変化が少なく、また抗力係数 C_D が小さいなど耐風設計上有利な特性を有する。また、抗力が小さいため上記同様大きな桁高を構造的な剛性アップに繋げることなどで、耐フラッター性を向上できる可能性もある。



図－4.2.3.2　ひし形断面（風洞模型）

3) 開孔六角形断面（図－4.2.3.3）

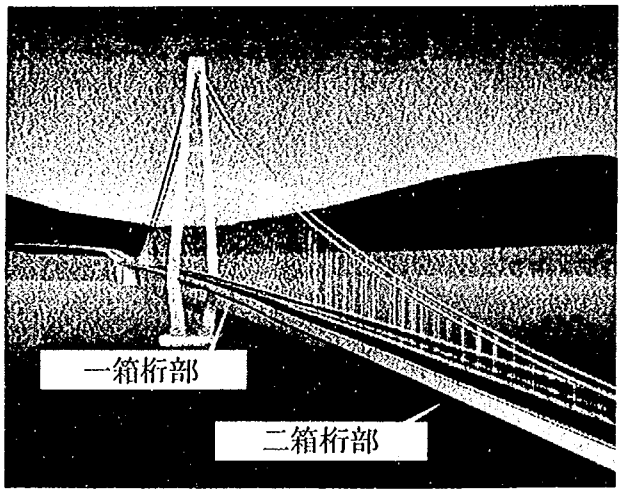
上面外側バリアを設置すれば基本断面に比べて6割以上のフラッター発現風速の向上が期待できる。、さらに、フェアリング形状と上下面開孔幅の関係によっては、静的変形の抑制も期待できる。



図－4.2.3.3 開孔六角形断面（風洞模型）

(2) 二箱桁／一箱桁断面の併用

本形式は、中央径間部分の桁の空力特性が吊橋全体系のフラッター特性に対して支配的であることに着目して、空力的に優れた二箱桁断面を中央径間部分に用い、また下部工の経済性の観点から主塔幅の拡大を抑制するために中央径間以外の部分では一箱桁断面を用いることで、耐風性・経済性の両方に優れた吊橋の実現を指向したものである。フラッター発現風速は、設計目標値 80m/s を上回る。また、当初問題となった静的なねじれ変形に対しても、二箱桁部分の断面形状改良によって十分に対処可能である。



図－4.2.3.4 二箱桁／一箱桁併用吊橋 概念図

4．3　構造特性に関する検討

4．3．1　ケーブルシステムに関する検討

ケーブルシステムにより吊橋の耐風性を向上させる手法としては、メッシナ海峡連絡橋の検討過程において提案された、主ケーブルを主桁の上下左右に張りめぐらした案[2),3)]や、ジブラルタル海峡連絡橋の検討時に提案された、塔基部から斜め上方に横梁を出してこれを斜めケーブルで支えることにより、見掛け上の吊橋のスパンを短縮させた案[3)]などが有名である。ケーブルシステムの工夫によって吊橋の耐風性を向上させる試みは最近でも活発になされているが、それらは全体系としてのケーブルの張り方に係わるものと、部分的にステイなどを取り付ける方法に分類できる。前者の例としては、斜材併用タイプ[3),8),10),19)]、MONO ケーブル[4),5),8),10)]、MONO-DUO ケーブル[3),16),17)]、ケーブル間隔変更案[12),14)]、中央連結ケーブル方式[15)]、ストームケーブル[8),10)]などが挙げられる。また、後者の例としては、クロスステイ[3),4),8),9),10),13)]や水平ステイ[7),11),18)]を取り付ける方式や、中央支間中央で剛体吊材を使用する案[6)]などが提案されている。これらの検討の中で、クロスステイ（論文中ではクロスハンガーと記述されているものあり）の効果が著しいことなどが明らかになっている。

このような過去の研究成果を踏まえて、本研究では、メインケーブルの検討、ステイの検討を行った。主な研究成果は以下の通りである。

(1)　メインケーブルに関する検討

1)　３本ケーブル

従来形式（２本ケーブル吊橋）のメインケーブルの一部を補剛桁中央部に移動させ、３本のメインケーブルにより補剛桁を支える吊橋形式である（図－4.3.1.4)。極慣性モーメントの低減によるフラッター発現風速の向上を狙いの１つとしたが、その効果は見られず、従来形式と同等のフラッター発現風速を有する。

2)　Crossing Main Cable

メインケーブルを中央径間中央部で交差させる形式（図－4.3.1.1）で、径間中央部のねじれ剛性増大を目的としたものであり、直下吊架設時にも効果が期待できる。一箱桁断面を採用した場合には、従来形式と比べてフラッター発現風速は約２割上昇する。

(2)　ステイに関する検討

1)　クロスステイ

クロスステイ（対角ステイ）については、最適設置位置の検討を行った。その結果、クロスステイの最適設置位置は、概ね中央径間の 0.3L 付近、側径間 0.5Ls 付近（L:中央径間長、Ls:側径間長）である（図－4.3.1.2)。一箱桁断面との組み合わせでは、非抗圧ステイ（片効き）の場合、抗圧ステイ（両効き）ともにフラッター発現風速の上昇は１割程度である。両者を比較すると抗圧ステイ（両効き）のフラッター発現風速が高く、この場合には、中央径間のみに設置した方が高いフラッター発現風速を有している。

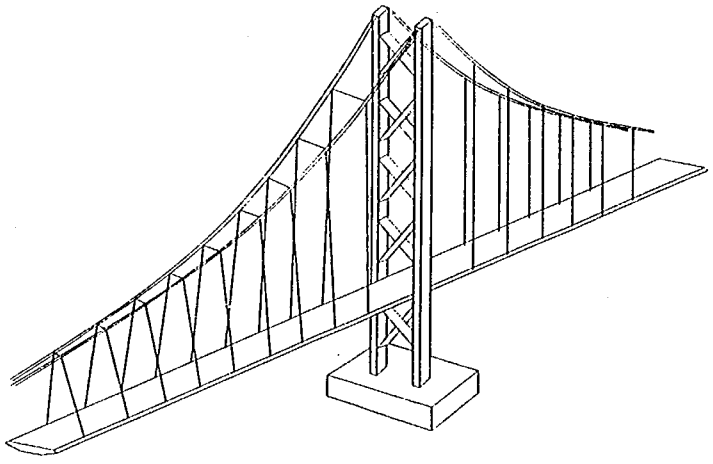
2)　クロスステイと他のケーブルシステムとの併用

クロスステイと他のケーブルシステムとの併用については、水平ステイとの併用した場合にフラッター発現風速が大きく上昇する（図－4.3.1.3)。水平ステイの設置範囲を全長の約 12%（中央径間、側径間ともに 12%）とし、さらにクロスステイを中央径間 0.26L、側径間 0.44Ls に設置した場合には、設計目標値 80m/s 以上を満足する。水平ステイの設置区間を大きくすると、フラッター発現風速はさらに高くなる。

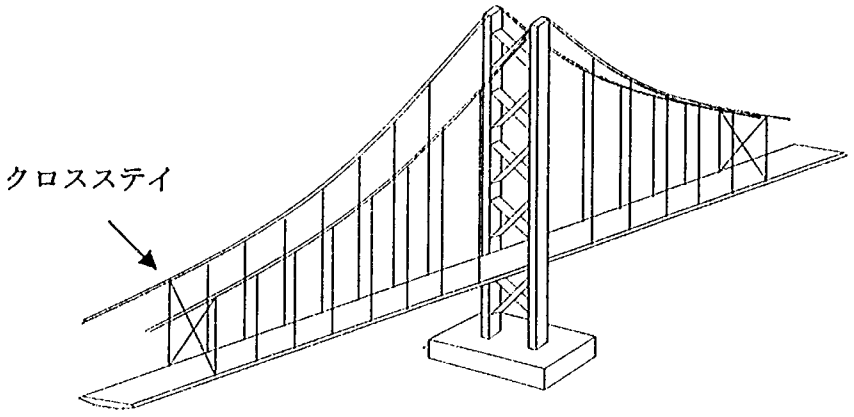
一方、タワークロスステイ、塔頂水平ステイなど他のケーブルシステムとの併用ではクロスステイ単独設置よりもフラッター発現風速が低下しており、併用による効果は認められない。傾斜クロスステイについては、効果が見られたケースもあるものの、測定空気力を用いた場合にフラッター発現風速は大きく低下する。

3) 斜めステイ

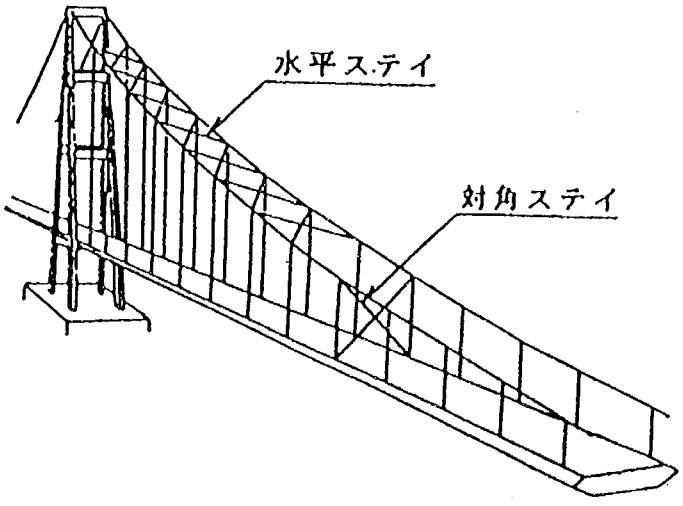
斜めステイは、景観上の配慮からクロスステイの錯綜を生じさせないようにセンターケーブルからサイドケーブルのハンガー定着点に設置する３本ケーブル吊橋独特の方法である（図－4.3.1.4)。クロスステイ方式と同等のフラッター発現風速を有しているが、桁の非定常空気力の影響を受けやすいことが示唆されており、適当な空気力を有する主桁と組み合わせることによりフラッター発現風速を大きく上昇できる可能性を有している。



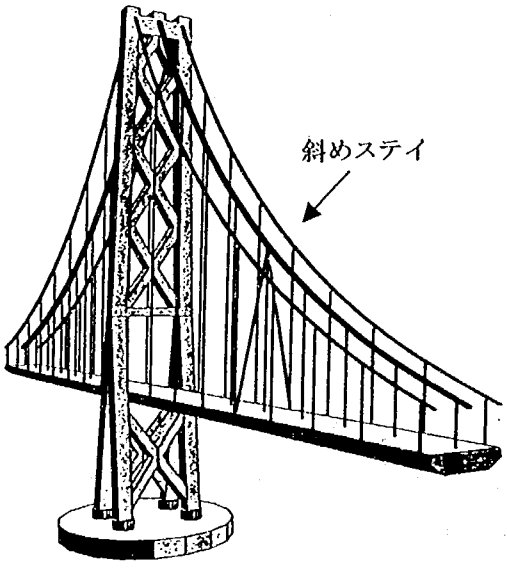
図－4.3.1.1　Crossing Main Cable



図－4.3.1.2　　クロスステイ



図－4.3.1.3　　クロスステイ（対角ステイ）と水平ステイの併用



斜めステイ設置位置
中央径間側：L／4点
側径間側：中央
（合計4ヶ所）

図－4.3.1.4　　斜めステイ

４．４　空力特性と構造特性の組み合わせ検討

(1)　３本ケーブルに斜めステイを付加したケーブルシステムと改良一箱桁断面の併用

本方式は、図－4.2.2.1 の一箱桁断面と図－4.3.1.4 のケーブルシステムの組み合わせにより、フラッター発現風速を向上させている。フラッター発現風速は、設計目標値 80m/s 以上を確保している。

(2)　４本ケーブル・クロスハンガーと二箱桁断面

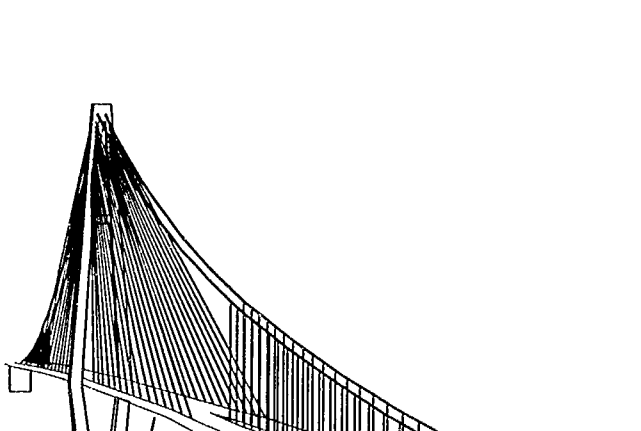
本方式は、二箱桁断面と 4 本ケーブルとクロスハンガーによる構造特性向上対策の組み合わせ（図－4.3.2.4）によってフラッター発現風速を向上させており、設計目標値 80m/s 以上を確保している。

(3)　クロスステイ及びCrossing Main Cable と中央遮風壁設置断面

本方式は、図－4.2.1.4 の中央遮風壁を設置した一箱桁断面と図－4.3.1.1 の Crossing Main Cable、あるいは図－4.3.1.2 のクロスステイとの組み合わせにより、フラッター発現風速を向上させている。いずれの組合わせにおいても設計目標値 80m/s 以上を確保している。

(4)　斜張構造と二箱桁／一箱桁併用断面

４．２．３で述べた二箱桁／一箱桁併用における一箱桁部分を、斜張橋形式としてねじれ剛性の増大を期待した形式である（図－4.4.1）。4 車線案・6 車線案ともに設計目標値 80m/s を確保している。



図－4.4.1　斜張構造と二箱桁／一箱桁箱桁併用断面

＜参考文献＞

1)　保田雅彦、中垣亮二、植田利夫：超長大吊橋補剛桁の耐フラッター特性改善対策、土木学会第 42 回年次学術講演会概要集、Ⅰ－341、1987 年 10 月

2)　原崎郁夫、「メッシナ海峡連絡橋」、道路 1992-1.

3)　C. Borri、M. Majowiecki and P. Spinelli、"The Aerodynamic advantages of a double-effect large、span suspension bridge under wind loading"、 J. of Wind Engineering and Industrial

Aerodynamics 48 317-328、 1993.

4) 米田昌弘、木村公男、大野克紀、中崎俊三、野村国勝、「3000m 級吊橋の静的特性と連成フラッター特性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果について」、構造工学論文集 Vol.40A、 1994.

5) 大坪千明、鵜飼昌一、田中春夫、江崎正浩、二ノ宮健治、「加茂ゆらりんこばしの設計と施工」、橋梁と基礎 95-3.

6) 鈴木政直、樋上秀一、宇野名右衛門、「超長大橋の設計上考慮すべき対風応答と新形式橋梁の提案」、土木学会第 49 回年次学術講演会、1994.

7) 荒居祐基、宮崎正男、久保田浩、「超長大吊橋の耐風設計における水平ステイケーブルの効果」、土木学会第 49 回年次学術講演会、1994.

8) 佐藤弘史、鳥海隆一、渡辺正剛、「超長大橋のケーブルシステムに関する検討」、土木学会第 49 回年次学術講演会、1994.

9) 鈴木周一、北川信、「長大箱桁吊橋の耐風安定化構造の検討」、土木学会第 49 回年次学術講演会、1994.

10) 佐藤弘史、鳥海隆一、関谷光昭、渡辺正剛、「超長大橋の耐風安定性確保に関する基礎的検討」、第 13 回風工学シンポジウム、1994.

11) 荒居祐基、宮崎正男、「超長大吊橋の耐風設計と水平ステイシステムに関する研究」、第 13 回風工学シンポジウム、1994.

12) 小川一志、下土居秀樹、磯江暁、橋本靖智、「新形式の超長大吊橋の振動特性に関する一考察」、日本風工学会誌 第 63 号、1995.

13) 大谷康史、北川信、金崎智樹、勝地弘、「長大吊橋のフラッター限界風速に対するクロスハンガーの改善効果に関する検討」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

14) 小川一志、橋本靖智、下土居秀樹、磯江暁、「新形式の超長大吊橋の振動特性改善策に関する研究」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

15) 佐々木誠、久保喜延、河村進一、坂田隆博、「中央連結ケーブル形式を導入した超長大橋のフラッター特性」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

16) 田平秀和、森園康之、藤野陽三、前田研一、長井正嗣、「MONO-DUO 形式による超長大吊橋の耐風安定化対策と静的構造特性」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

17) 保坂俊晃、前田研一、藤野陽三、森園康之、長井正嗣、「MONO-DUO 形式による超長大吊橋の耐風安定化対策とねじり振動特性」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

18) 荒居祐基、宮崎正男、久保田浩、鈴木義光、「ケーブルステイ方式による超長大吊橋の耐風安定化に関する研究」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

19) 野村國勝、中崎俊三、田巻嘉彦、成田信之、前田研一、「超長大斜張吊橋の耐風安定性に関する基礎的研究」、土木学会第 50 回年次学術講演会、1995.

４．５　フラッター解析に関する条件

４．５．１　概要

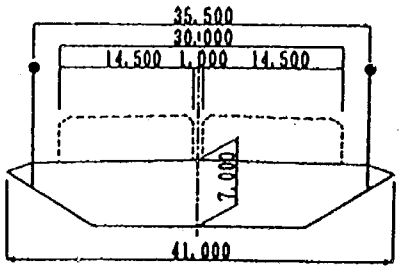
超長大橋の耐風安定性解析では、フラッター解析が中心的な役割を担う。本共同研究では、各社毎に異なる骨組モデル、解析プログラムを用いるため、これらの基本的な解析性能の共通化が必要である。このため、対象となる骨組モデルの諸元を統一した解析を行い、各社保有の解析ツールの比較検討を実施した。

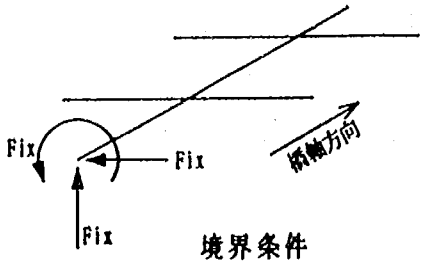
１箱桁ワーキンググループではベンチマークテストとして諸元を統一した対象吊橋の「標準モデル」を基本として比較検討を実施した。「標準モデル」の構造諸元を表－4.5.1.1に示す。

表－4.5.1.1　構造諸元

項　目		構　造　諸　量
形　式	構造形式	３径間２ヒンジ吊橋*1)
	支間長	１，２５０＋２，５００＋１，２５０m
	サグ比	１／９*1)
主ケーブル	中心間隔	３５．５　m
	有効断面積	１．２　m^2／Ｂｒ
	許容応力度	１００　Ｋｇ／mm^2
ハンガー	ハンガー間隔	１２５　m
	断面積	０．０３　m^2／格点
補剛桁	断面積	１．３　m^2／Ｂｒ
	鉛直曲げ剛性	１２．０　m^4／Ｂｒ
	水平曲げ剛性	１６０　m^4／Ｂｒ*1)
	ねじれ剛性	２６　m^4／Ｂｒ*1)
	極慣性	３３６．７　t・s^2／m／Ｂｒ*1)
死荷重	吊構造部	２４　t／m／Ｂｒ
	ケーブル	１１　t／m／Ｂｒ
	合計	３５　t／m／Ｂｒ
主　塔	ケーブル理論頂	ＴＰ＋３８０．０　m
	その他	塔　高　３６９．５　m 底面下面　ＴＰ＋１０．５　m
		面内剛性　２００　m^4／shaft 面外剛性　１００　m^4／shaft ねじれ剛性　３５　m^4／shaft
境界条件	桁端部支持条件	鉛直方向、水平方向、橋軸回りの回転を固定

（備考）　*1)　予備検討時には一部変更





4．5．2　ベンチマークテスト結果

（1）建設省土木研究所

1）解析モデルの諸元

解析に使用したモデルを表-4.5.2.1に示す。

表-4.5.2.1　解析モデル諸元

項目			単位	川田モデル・土研モデル
構造諸元	支間長		m	1,250+2,500+1,250
	ケーブル	サグ比		1/9
		ケーブル間隔	m	35.5
		有効断面積	m^2/Br.	2*0.6=1.2
		弾性係数	t/m^2	2.03*10^7
		許容応力度	kg/mm^2	100
	ハンガー	ハンガー間隔	m	125
		断面積	m^2	0.03
		弾性係数	t/m^2	2.03*10^7
	補剛桁	断面積	m^2/Br.	1.3
		鉛直曲げ剛性	m^4/Br.	12
		水平曲げ剛性	m^4/Br.	160
		ねじれ剛性	m^4/Br.	26
		極慣性	$t \cdot s^2/m$/Br.	336.7
	死荷重	吊構造部	t/m/Br.	24
		ケーブル	t/m/Br.	11
		合計	t/m/Br.	35
	塔	ケーブル理論頂	m	TP+ 380.0
		面内剛性	m^4/shaft	200
		面外剛性	m^4/shaft	100
		ねじれ剛性	m^4/shaft	35
モデル化	桁	境界条件		桁端の固定方法で対応
		重心位置		定着点と同じ
	塔	水平材		無し
		塔柱間隔（基部）	m	45

2）解析条件

フラッター解析条件を表-4.5.2.2に示す。また、固有値解析結果を表-4.5.2.3に示す。

表-4.5.2.2　解析条件

<table>
<tr><th>項目</th><th>解析条件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法
無風時固有振動モードを使用。低次５０モードを取り込む</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>０．１２５ kgf･s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ=０．０２</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
空気力
<table>
<tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td>鉛直</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
ＣＤ＝０．７５　　Ａｎ＝７．０ m²/m/Br.
ケーブル：
ＣＤ＝０．７　　Ａｎ＝２．０ m²/m/Br.</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>計算時桁幅はＢ＝４１ m</td></tr>
</table>

表-4.5.2.3　固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	モード形状	次数	固有振動数 (Hz)	モード形状
1	0.0311	桁水平曲げ対称１次	26	0.1659	
2	0.0524	桁鉛直曲げ対称１次	27	0.1709	
3	0.0572	桁鉛直曲げ逆対称１次	28	0.1729	
4	0.0584		29	0.1730	
5	0.0593		30	0.2077	
6	0.0604	桁水平曲げ逆対称１次	31	0.2097	
7	0.0685	桁鉛直曲げ逆対称１次	32	0.2120	
8	0.0868	遊動円木	33	0.2292	桁ねじれ逆対称１次
9	0.0872	遊動円木	34	0.2370	
10	0.0980	桁水平曲げ対称２次	35	0.2387	
11	0.0994	桁鉛直曲げ対称２次	36	0.2413	
12	0.1177		37	0.2449	
13	0.1335		38	0.2449	
14	0.1355		39	0.2526	
15	0.1357		40	0.2576	
16	0.1362	桁鉛直曲げ逆対称２次	41	0.2576	
17	0.1371		42	0.2611	
18	0.1375		43	0.2638	
19	0.1467		44	0.2655	
20	0.1476		45	0.2664	
21	0.1476		46	0.2829	
22	0.1480		47	0.2859	
23	0.1500		48	0.2860	
24	0.1542		49	0.3233	
25	0.1593	桁ねじれ対称１次	50	0.3252	

3）解析結果

フラッター解析結果を表-4.5.2.4、図-4.5.2.1～図-4.5.2.2に示す。フラッター解析の結果、川田工業の解析結果とフラッター発現風速はほぼ一致した。

表-4.5.2.4　フラッター解析結果

	土木研究所
フラッター風速	60m/s

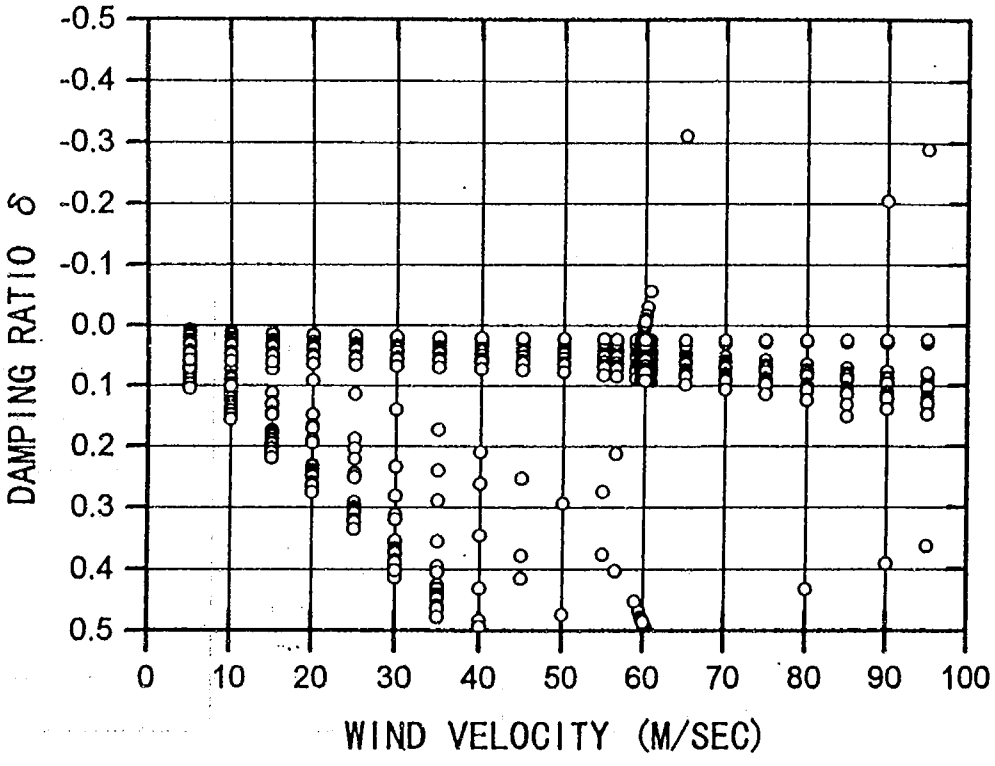


図-4.5.2.1　V-δ図　(Vcr=60m/s)

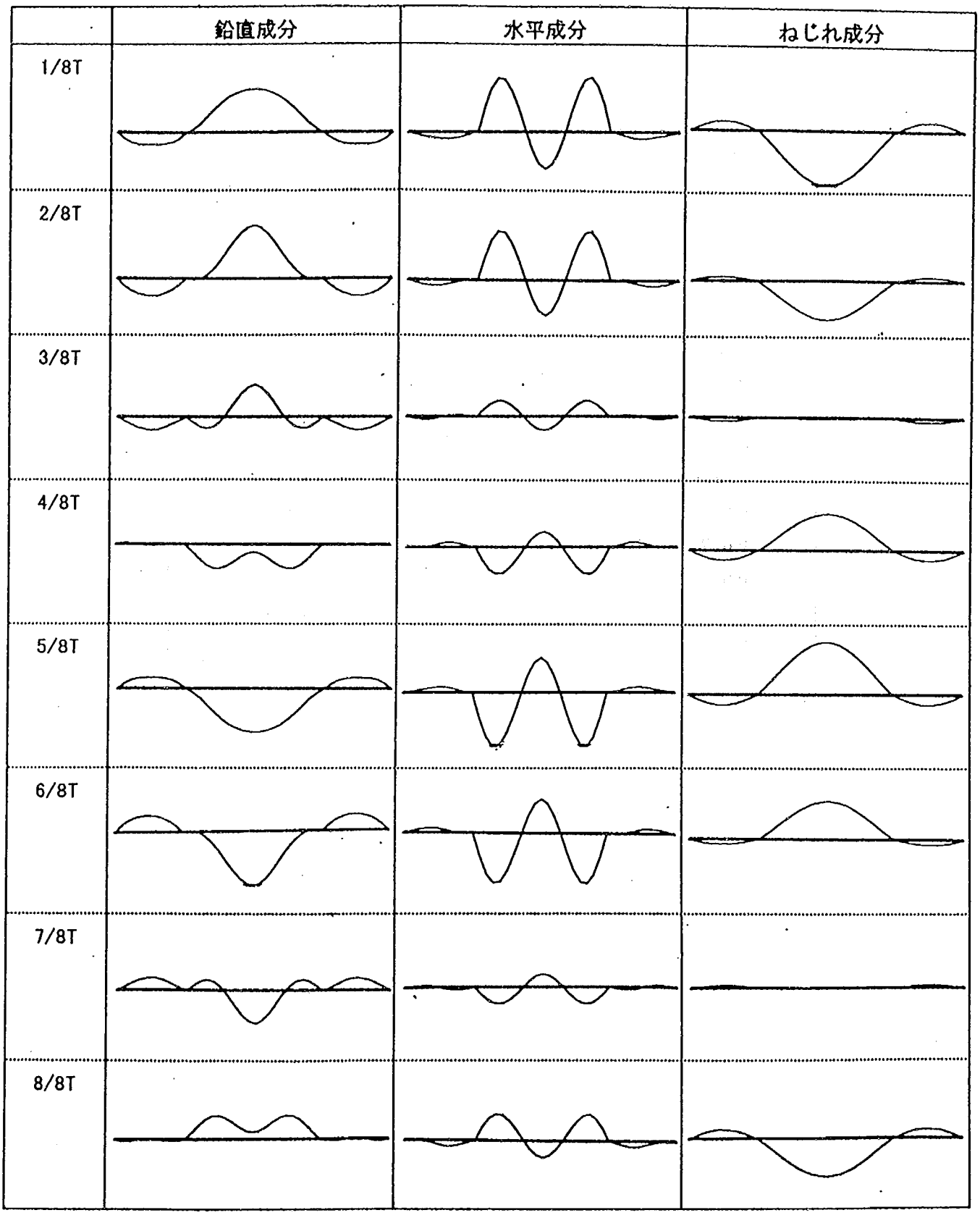


図-4.5.2.2　モード図　(Vcr=60m/s)

（2）本州四国連絡橋公団

1）解析モデル

解析に使用したモデルは、標準モデルの諸元を用いた。

2）固有振動解析結果

主要モードの振動数を表-4.5.2.5にまとめる。

表-4.5.2.5　主要な固有振動数の比較

川田工業		本四公団
振動数	モード	固有値
0.0314	水平曲げ対称１次	0.0314
0.0537	鉛直曲げ対称１次	0.0537
0.0580	鉛直曲げ逆対称１次	0.0580
0.0697	鉛直曲げ逆対称１次	0.0697
0.0869	遊動円木	0.0869
0.0873	遊動円木	0.0873
0.0997	鉛直曲げ対称２次	0.0997
0.1365	鉛直曲げ逆対称２次	0.1366
0.1604	ねじれ対称１次	0.1602

3）フラッター解析条件

表-4.5.2.6　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項目</th><th>解析条件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法（５０次）
無風時モード</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125kgf･s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ=0.02</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>鉛直</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず
ケーブル：準定常抗力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁　　CD=0.75　An=7.0m²/m/Br.
ケーブル CD=0.70　An=2.0m²/m/Br.</td></tr>
<tr><td>計算時の桁幅</td><td>桁幅　B=41m</td></tr>
<tr><td>解析モデル</td><td>・タワーリンク、エンドリンクのモデル化は無し
・ハンガー間隔　125m
・塔は立体モデル</td></tr>
</table>

4）解析結果

表-4.5.2.7　解析結果

	標準モデル	本四公団
フラッター風速	６０ m/s	６０ m/s

風速－振動数

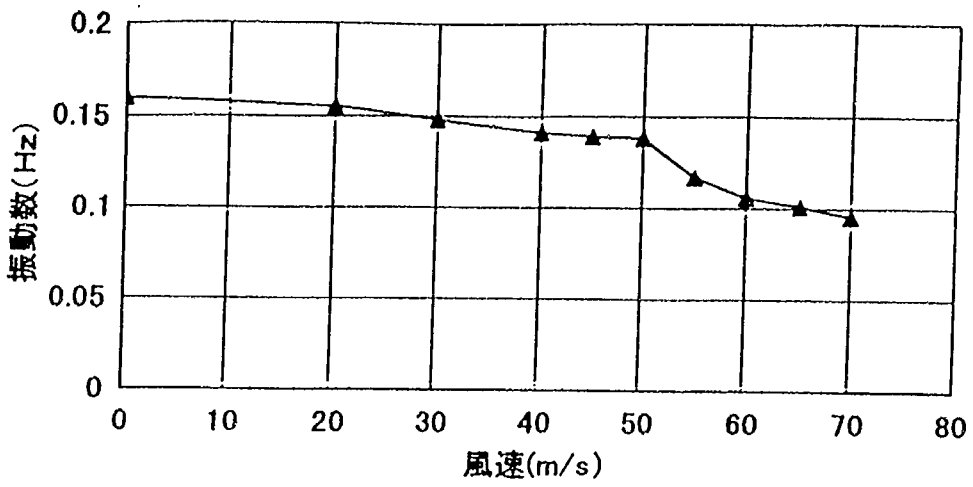


図-4.5.2.3　風速－振動数図

風速－減衰率

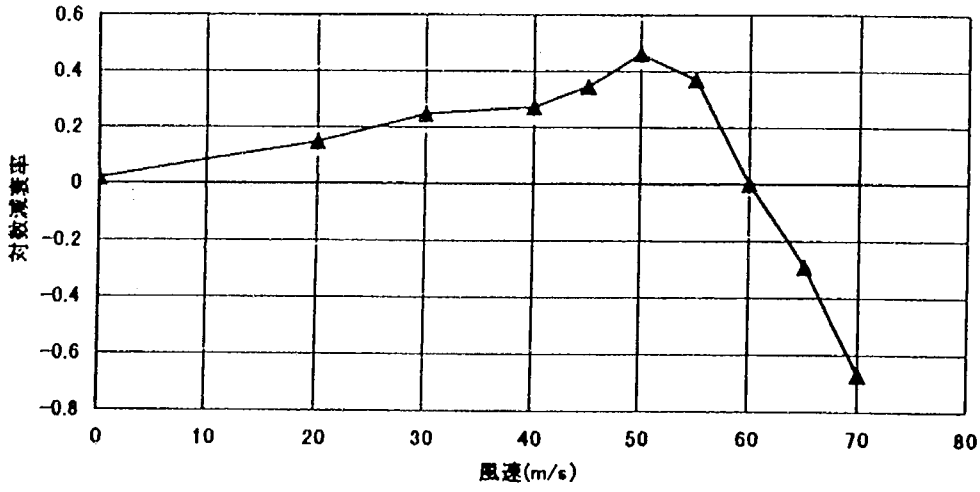


図-4.5.2.4　風速－減衰率図

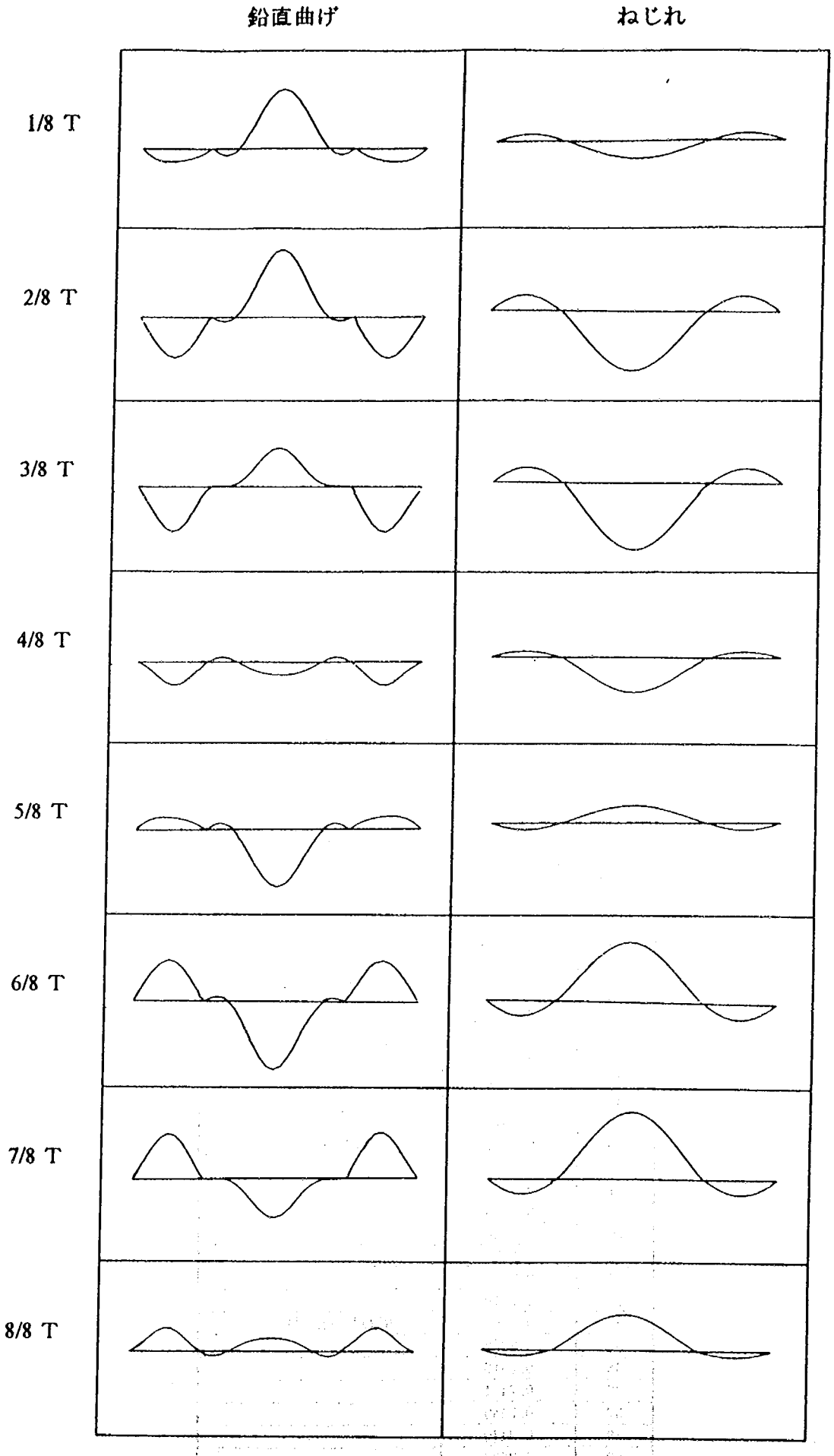


図-4.5.2.5　フラッターモード形（風速 60m/s）

(2) 石川島播磨重工業

1) 解析モデル

解析に使用したモデルは弊社（以下、ＩＨＩ）の既往モデルをベースとして、標準モデルの構造特性をできるだけ取り入れたものである。両モデルの相違点は表-4.5.2.8のとおり。

表-4.5.2.8 解析モデルの相違点

	標準モデル	ＩＨＩモデル
桁境界条件	桁端部の境界条件で設定	タワーリンクとウィンド沓をモデル化

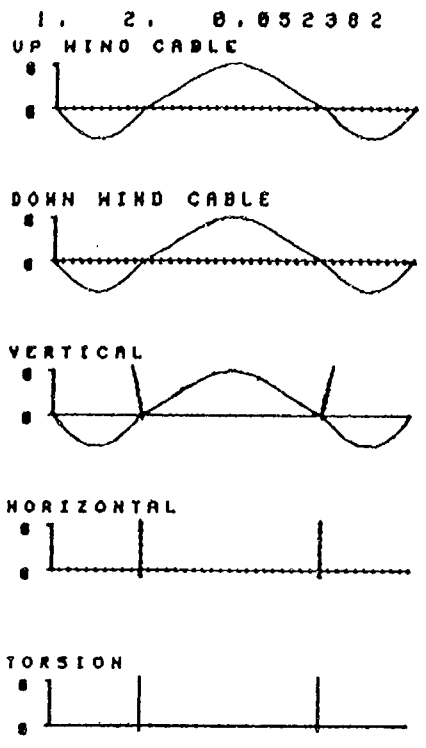
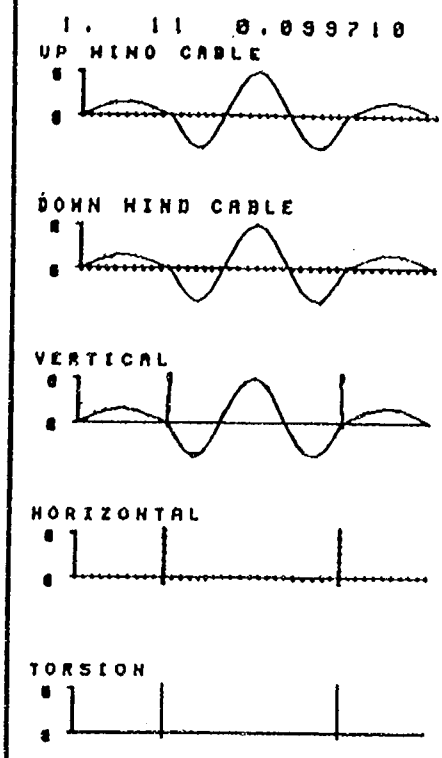
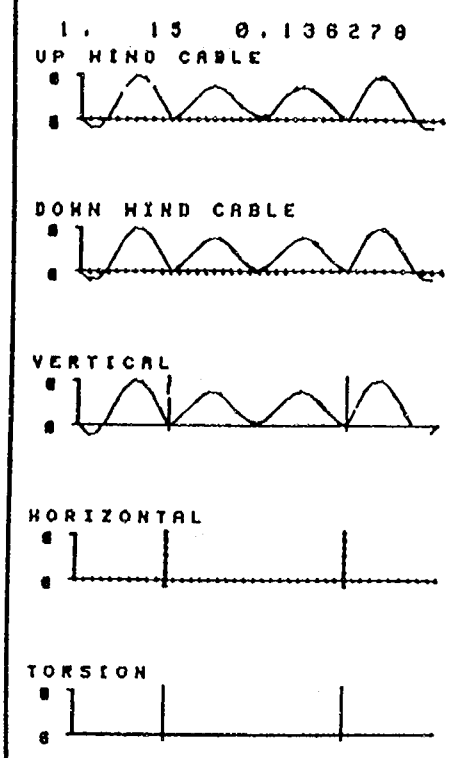
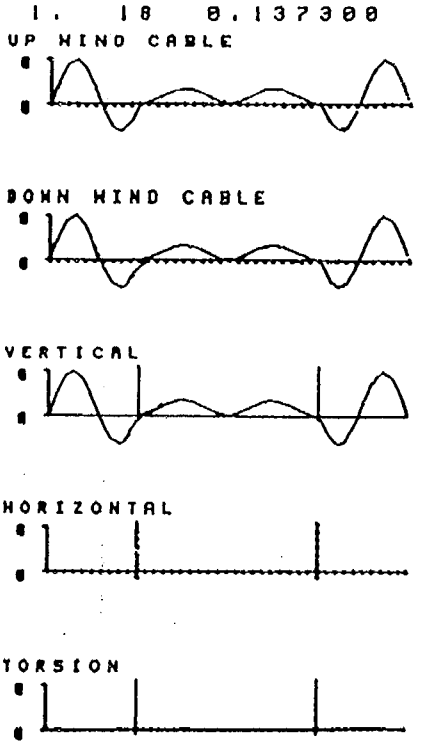
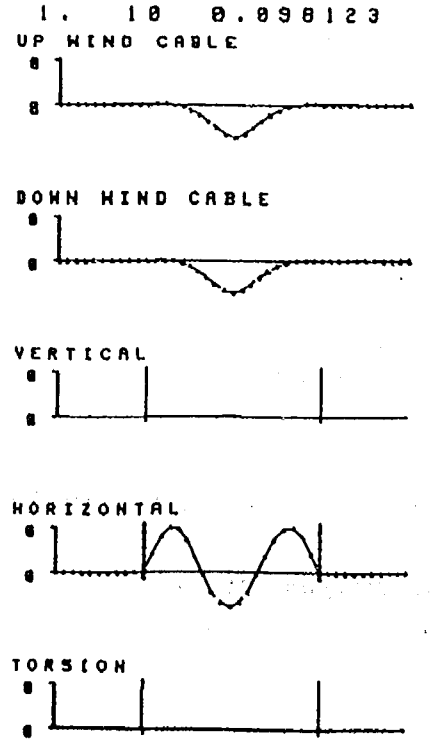
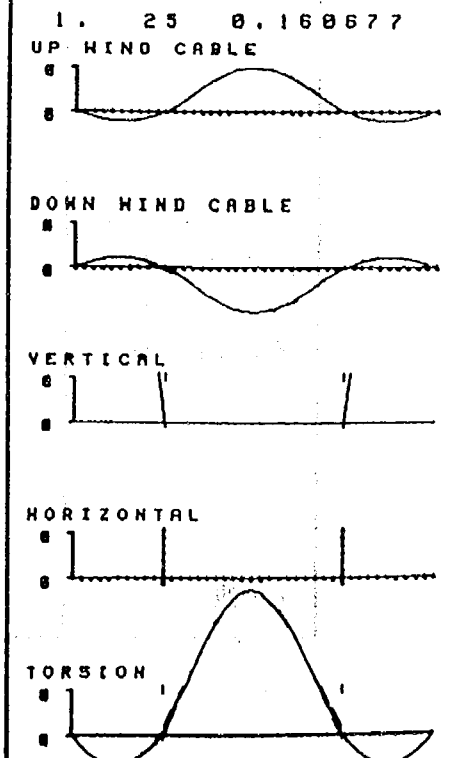
2) 固有振動解析結果

上記解析モデルを用いて、固有振動解析した結果を表-4.5.2.9および表-4.5.2.10に示す。

表-4.5.2.9 固有振動数

次数	固有振動数	モード形状
1	0.0313	桁水平曲げ対称１次
2	0.0524	桁鉛直曲げ対称１次
3	0.0586	桁鉛直曲げ逆対称１次
4	0.0594	
5	0.0605	桁水平曲げ逆対称１次
6	0.0615	
7	0.0686	桁鉛直曲げ逆対称１次
8	0.0959	遊動円木
9	0.0972	遊動円木
10	0.0981	桁水平曲げ対称２次
11	0.0997	桁鉛直曲げ対称２次
12	0.1245	
13	0.1352	
14	0.1362	桁鉛直曲げ逆対称２次
15	0.1363	桁鉛直曲げ対称３次
16	0.1371	
17	0.1371	
18	0.1373	桁鉛直曲げ対称
19	0.1469	
20	0.1476	
21	0.1477	
22	0.1483	
23	0.1501	
24	0.1544	
25	0.1607	桁ねじれ対称１次
26	0.1658	
27	0.1709	
28	0.1729	
29	0.1730	
30	0.2077	
31	0.2096	
32	0.2119	
33	0.2298	桁ねじれ逆対称１次
34	0.2382	
35	0.2410	
36	0.2421	
37	0.2449	
38	0.2470	
39	0.2534	
40	0.2575	

表-4.5.2.10 固有振動モード

桁鉛直曲げ対称１次(2)	桁鉛直曲げ対称２次(11)	桁鉛直曲げ対称３次(15)
		
桁鉛直曲げ対称(18)	桁水平曲げ対称２次(10)	桁ねじれ対称１次(25)
		

注）かっこ内の数値はモード次数

3) 解析条件

本解析条件の一覧表を表-4.5.2.11に示す。

表-4.5.2.11 解析条件

<table>
<tr><th>項　目</th><th>解析条件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法
無風時固有振動モードを使用。低次５０モードを取り組む</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>０．１２５kgf･s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない。</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　　δ＝０．０２</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
（振動方向）
<table>
<tr><th></th><th>鉛 直</th><th>ねじれ</th><th>水 平</th></tr>
<tr><td>L</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>M</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>D</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力　　△：準定常空気力　　×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
C₀＝０．７５　　An＝７．０m²/m/Br.

ケーブル：
C₀＝０．７　　An＝２．０m²/m/Br.</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>計算時の桁幅は、B＝４１mとした。</td></tr>
</table>

4) 解析結果

フラッター解析結果を表-4.5.2.12、図-4.5.2.6～図-4.5.2.8に示す。

表-4.5.2.12 解析結果

フラッター風速	61m/s

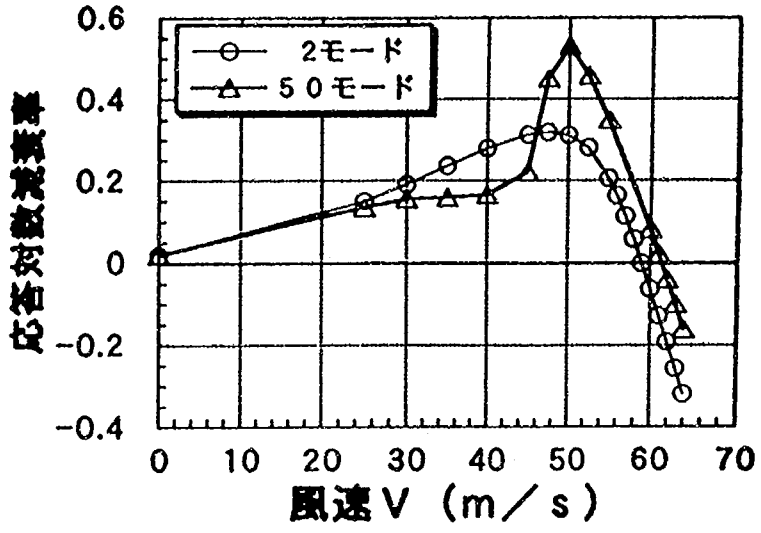


図-4.5.2.6 応答対数減衰率

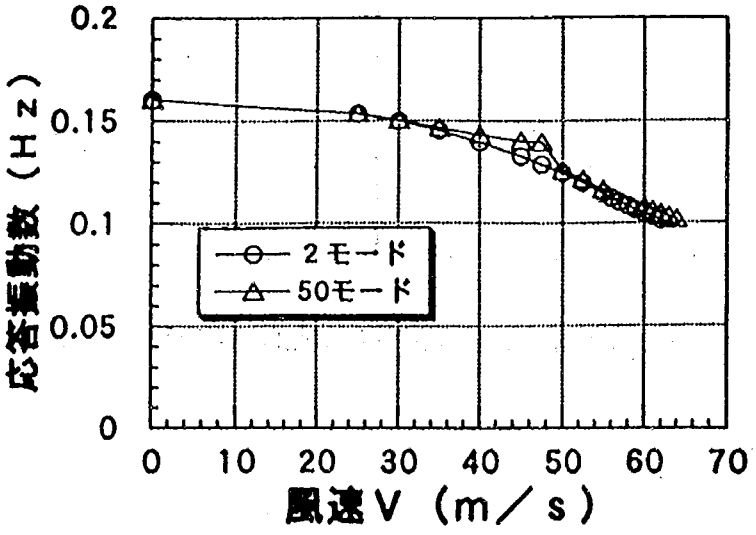


図-4.5.2.7 応答振動数

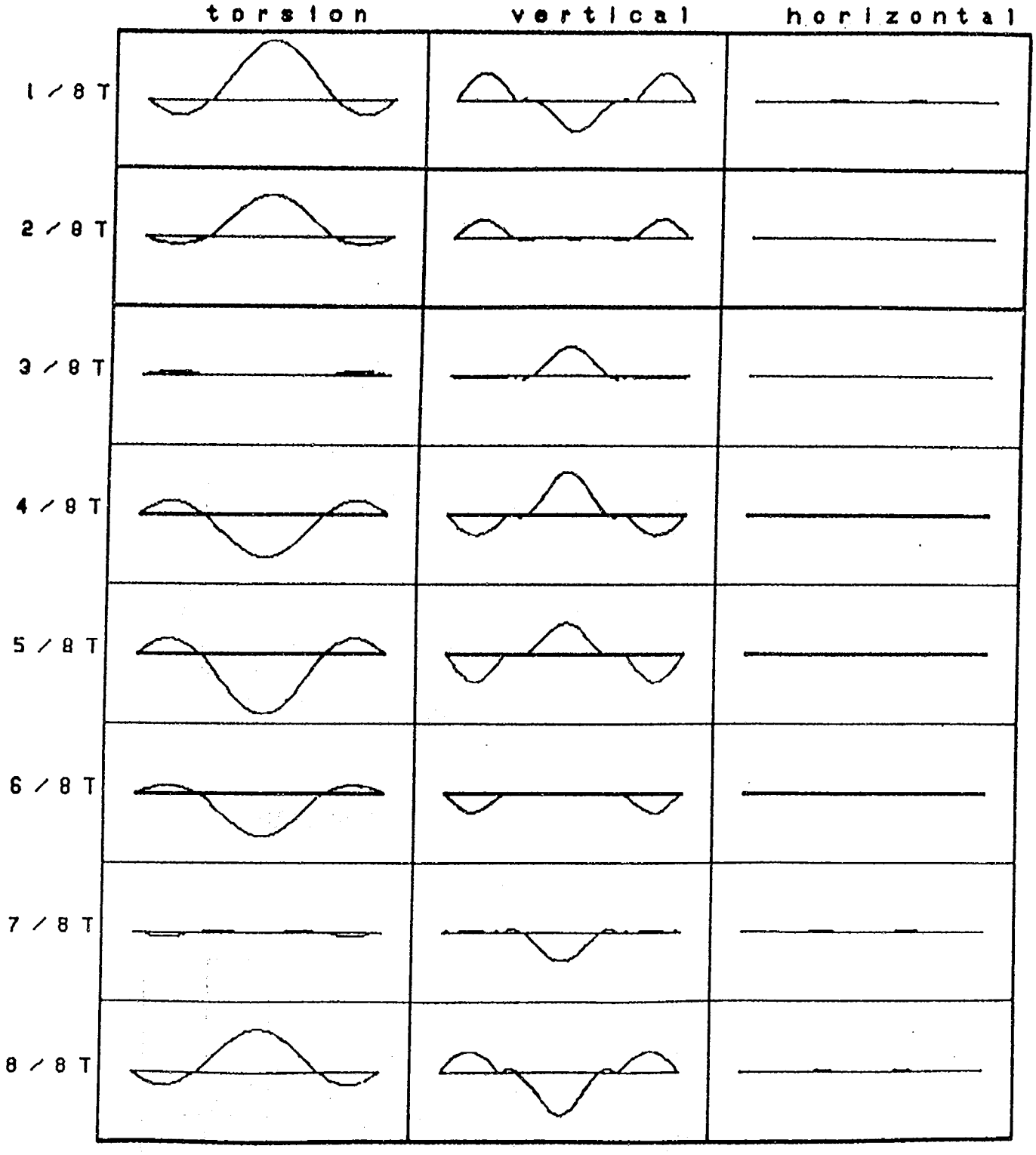


図-4.5.2.8　フラッター応答波形（風速Ｖ＝６２m/s、δ＝－０．０３８２）

(4) 川崎重工業

1) 解析モデルの諸元

本解析に用いたモデルの諸元については標準モデルに準拠した。 解析モデルの諸元を表-4. 5. 2. 13に示す。

表-4. 5. 2. 13 解析モデルの諸元

項目			単位	川重モデル
構造諸元	支間長		m	1,250+2,500+1,250
	ｹｰﾌﾞﾙ	サグ比		1/9
		ケーブル間隔	m	35.5
		有効断面積	m^2/Br	1.20
		弾性係数	t/m^2	2.03E+07
		許容応力度	kg/mm^2	100
	ﾊﾝｶﾞｰ	ハンガー間隔：L	m	125.0
		断面積：A	m^2	0.0300
		弾性係数：E	t/m^2	2.03E+07
		EA／L	t/m	4.87E+03
	補剛桁	断面積	m^2/Br	1.300
		鉛直曲げ剛性	m^4/Br	12.00
		水平曲げ剛性	m^4/Br	160.0
		ねじれ剛性	m^4/Br	26.00
		極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	$t\cdot m\cdot s^2/m$/Br	336.7
	死荷重	吊構造部	t/m/Br	24.0
		ケーブル	t/m/Br	11.0
		合計	t/m/Br	35.0
	塔	ｹｰﾌﾞﾙ理論頂	m	TP+380.0
		面内剛性	m^4/shaft	200.0
		面外剛性	m^4/shaft	100.0
		ねじれ剛性	m^4/shaft	35.00
モデル化	桁	境界条件		桁端の固定方法で対応
		重心位置		定着点と同じ
	塔	水平材		塔頂のみ
		塔柱間隔（基部）		45m

2) 解析条件

本解析におけるフラッター解析条件を表-4.5.2.14に示す。

表-4.5.2.14 フラッター解析条件

項　目	解　析　条　件
解析手法	モード組合せ法 無風時固有モードを適用 低次50モードの組合せ
空気密度	0.125kgf·s²/m⁴
有風時静的変形	考慮せず
構造減衰	δ=0.02 (全モード)
空気力係数	主　桁： 振動方向：鉛直／ねじれ／水平 空気力 L：○／○／× 空気力 M：○／○／× 空気力 D：×／×／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル： 準定常抗力，準定常揚力
非定常空気力	平板翼理論値
準定常空気力	主　桁： C_D=0.75　　A_n=7.0m²/m/Br ケーブル： C_D=0.70　　A_n=2.0m²/m/Br
その他	桁幅はB=41.0mとした

3) 固有値解析結果

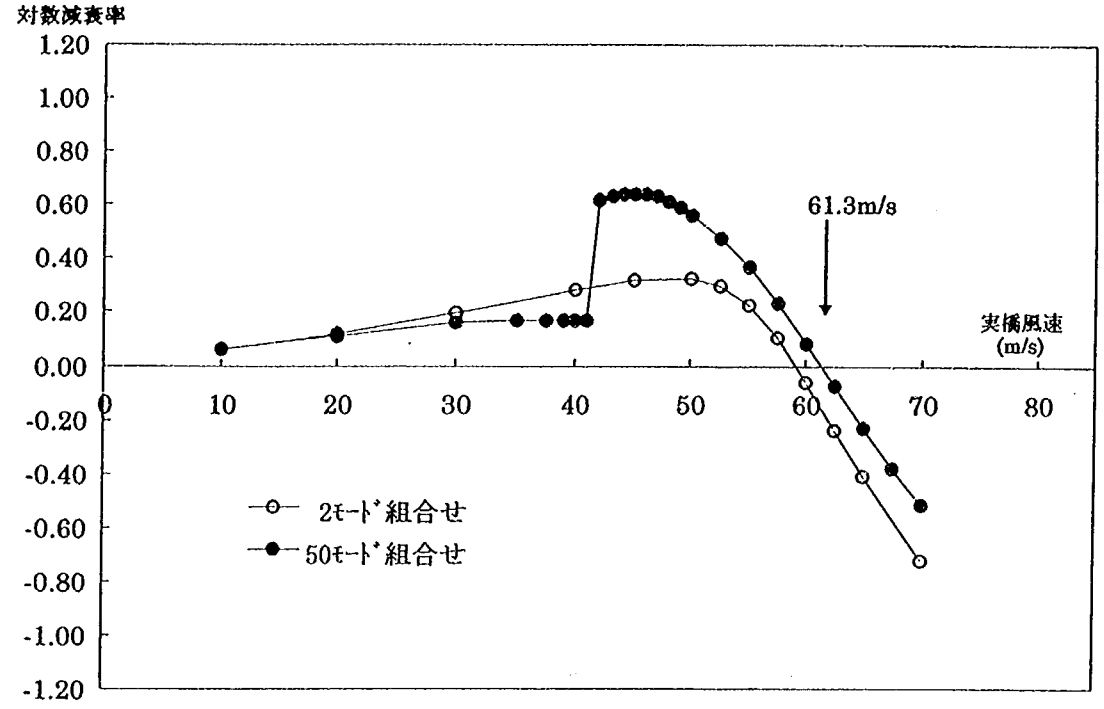
固有値解析により得られた、無風時振動モードに関する固有振動数の一覧を表-4.5.2.15に示す。

表-4.5.2.15 無風時振動モードの固有振動数

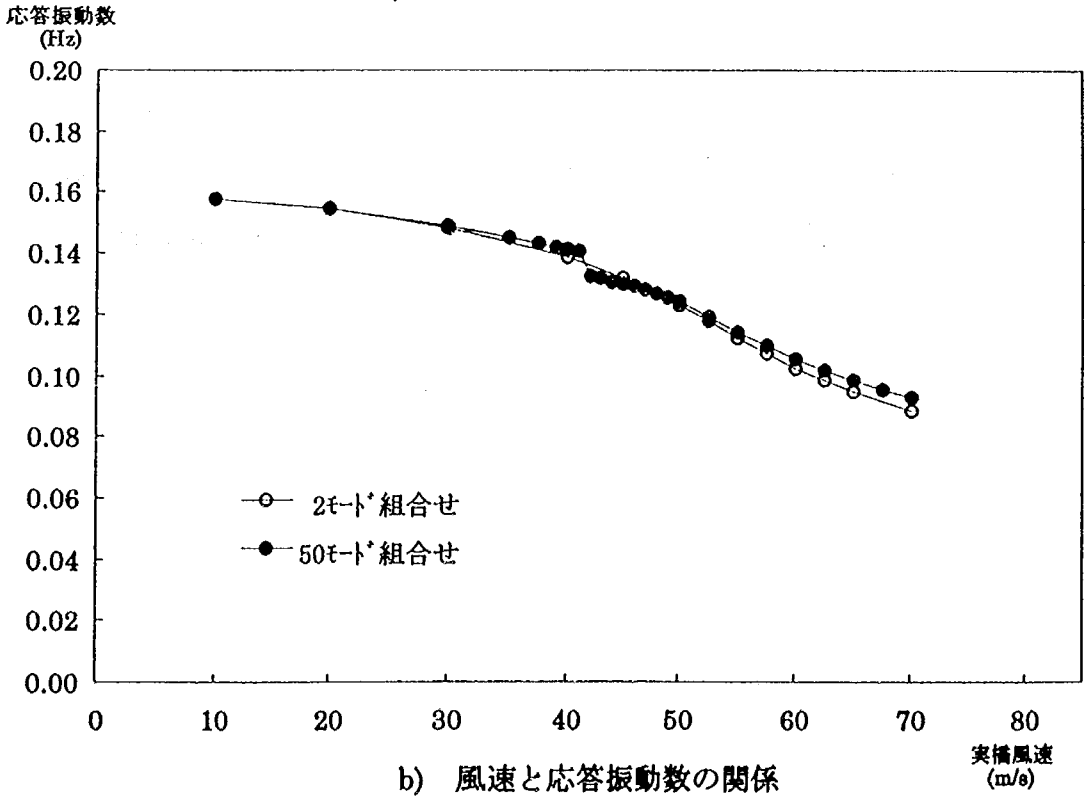
次数	振動数	ﾓｰﾄﾞ形状	次数	振動数	ﾓｰﾄﾞ形状	次数	振動数	ﾓｰﾄﾞ形状
1 次	0.0311	水平曲げ　対称1次	21 次	0.1504	側径間ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	41 次	0.2646	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ
2 次	0.0524	鉛直曲げ　対称1次	22 次	0.1504	側径間ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	42 次	0.2675	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ
3 次	0.0573	鉛直曲げ逆対称1次	23 次	0.1522	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	43 次	0.2679	側径間ねじれ同相1次
4 次	0.0585	側径間水平逆相1次	24 次	0.1560	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	44 次	0.2703	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ
5 次	0.0593	側径間水平同相1次	25 次	0.1597	ねじれ　対称1次	45 次	0.3162	鉛直曲げ　対称4次
6 次	0.0604	水平曲げ逆対称1次	26 次	0.1663	水平曲げ逆対称2次	46 次	0.3287	水平曲げ逆対称3次
7 次	0.0686	鉛直曲げ逆対称1次	27 次	0.1718	側径間水平同相2次	47 次	0.3340	側径間水平同相3次
8 次	0.0867	側径間橋軸逆相ｽｳｪｲ	28 次	0.1734	鉛直曲げ　対称3次	48 次	0.3439	水平曲げ逆対称3次
9 次	0.0871	側径間橋軸同相ｽｳｪｲ	29 次	0.1738	水平曲げ逆対称2次	49 次	0.3510	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ
10 次	0.0979	水平曲げ　対称2次	30 次	0.2079	鉛直曲げ逆対称3次	50 次	0.3687	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ
11 次	0.0996	鉛直曲げ　対称2次	31 次	0.2095	側径間鉛直逆相3次			
12 次	0.1178	主径間橋軸ｽｳｪｲ	32 次	0.2118	側径間鉛直同相3次			
13 次	0.1360	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	33 次	0.2310	ねじれ　逆対称1次			
14 次	0.1363	側径間鉛直同相1次	34 次	0.2376	水平曲げ　対称3次			
15 次	0.1365	鉛直曲げ逆対称2次	35 次	0.2429	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ			
16 次	0.1372	側径間鉛直逆相2次	36 次	0.2447	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ			
17 次	0.1375	側径間鉛直同相2次	37 次	0.2471	側径間ねじれ逆相1次			
18 次	0.1381	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	38 次	0.2558	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ			
19 次	0.1481	水平曲げ逆対称2次	39 次	0.2624	側径間ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ			
20 次	0.1502	ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ	40 次	0.2624	側径間ｹｰﾌﾞﾙ水平曲げ			

4) フラッター解析結果

フラッター解析により得られた風速と応答対数減衰率ならびに応答振動数との関係を図-4.5.2.9に、図－4.5.2.10には、フラッター発生時の振動モード形状図を示す。 また、図－4.5.2.9には、曲げ・ねじれ最低次の2モードの組合せに対する解析結果も参考のため併せて示す。 本解析の結果、1次～50次モードの組合せに対するフラッター発生風速としては61.3m/sが得られた。



a) 風速と応答対数減衰率の関係



b) 風速と応答振動数の関係

図-4.5.2.9 フラッター解析結果

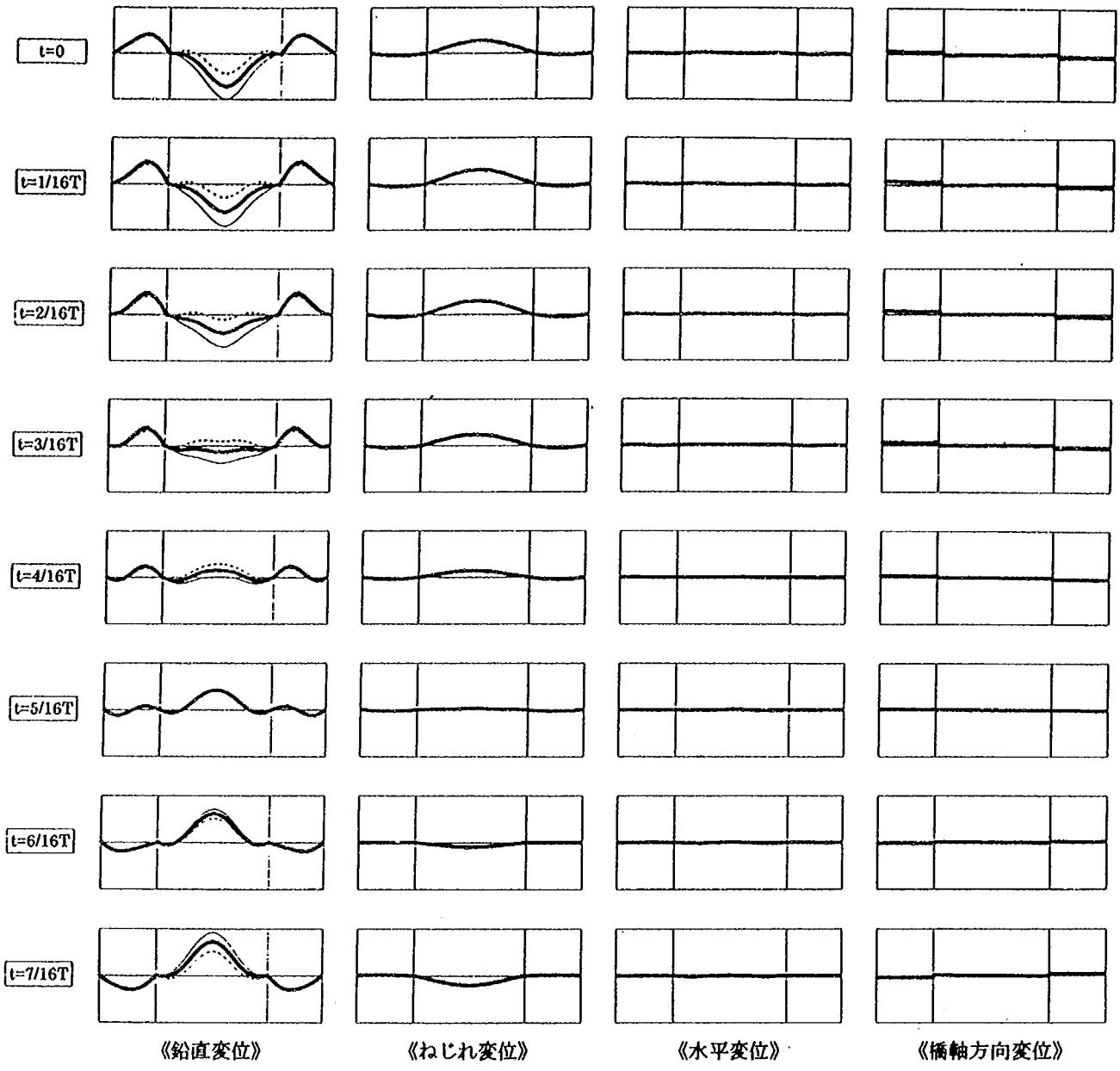


図-4. 5. 2. 10　フラッター発生時の振動モード（風速 62.5m/s 時）

(5)　川田工業

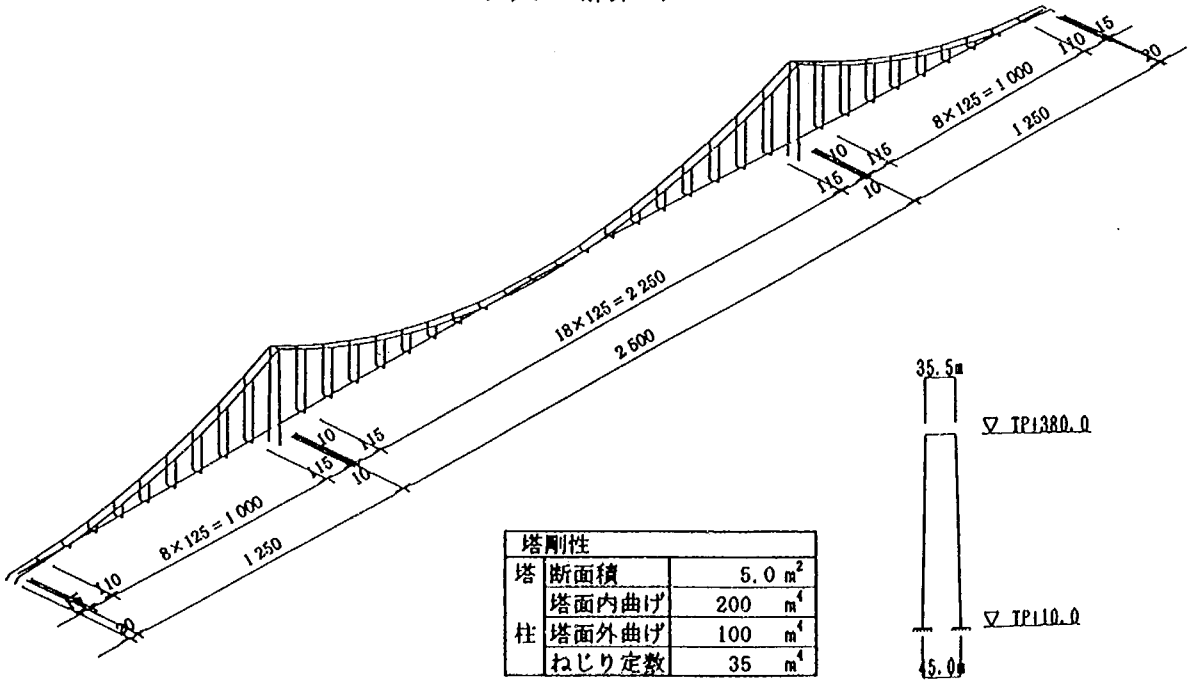
1）解析モデルの諸元

解析に用いたモデルの諸元を表-4.5.2.16 に示す。

表-4.5.2.16　対象橋梁の基本諸元

項目			構造諸量	
支間長			1,250m + 2,500m + 1,250m	
ケーブル	サグ比		1/9	
	間隔		35.5	m
	有効断面積		2×0.6 = 1.2	m^2/Br.
	許容応力度		100	kg/mm^2
補剛桁	総幅		41	m
	桁高		7	m
	断面2次モーメント	鉛直	12	m^4/Br.
		水平	160	m^4/Br.
	純ねじり定数		26	m^4/Br.
死荷重	吊構造部		24	t/m /Br.
	ケーブル		11	t/m /Br.
	合計		35	t/m /Br.
吊構造部重量極慣性			3,300	$t\cdot m^2$/m /Br.
ハンガー断面積			0.03	m^2/125m/Cable.

フラッター解析モデル



塔剛性		
塔柱	断面積	5.0 m^2
	塔面内曲げ	200 m^4
	塔面外曲げ	100 m^4
	ねじり定数	35 m^4

2） 解析条件

フラッター解析条件を表-4.5.2.17 に示す。

表-4.5.2.17　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項　　目</th><th>解　析　条　件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>直接法</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125 kgf･sec²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>桁　　（振動方向）
空気力
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>L</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>M</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>D</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力　△：準定常空気力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力係数</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>桁：準定常抗力
C_D ＝0.75　　An＝7.0 m²/m/Br.
ケーブル：準定常抗力，揚力
C_{DC}＝0.7　　An＝2×1.0 m²/m/Br.</td></tr>
</table>

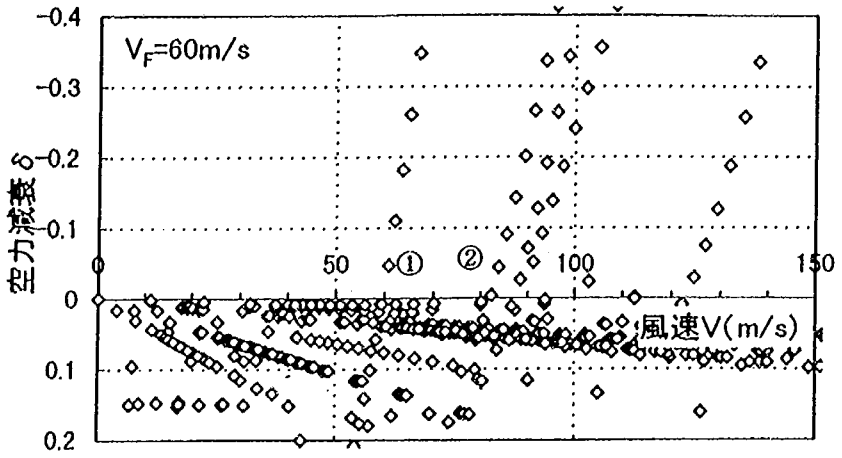
表-4.5.2.18　固有振動解析結果

次数	振動数	等価質量($t \cdot s^2/m/m$)			等価極慣性	備考
	(Hz)	X (橋軸)	Y (水平)	Z (鉛直)	($tm^2 \cdot s^2/m/m$)	
1	0.0314		3.38		96836200	水平対称１次
2	0.0537	1383.06		3.75		鉛直対称１次
3	0.0580	7.48		6.23		鉛直逆対称１次
4	0.0589		2.84			
5	0.0595		2.84			
6	0.0604		2.73			水平逆対称１次
7	0.0697	170.50		3.91		鉛直逆対称１次
8	0.0869	2.49		214.87		遊動円木
9	0.0873	2.49		270.81		遊動円木
10	0.0979		2.73		15593600	水平対称２次
11	0.0997	337.50		3.69		鉛直対称２次
12	0.1175	3.49		13.17		
13	0.1364	725.43		3.87		鉛直対称２次
14	0.1365	10942.90		3.63		鉛直逆対称２次
15	0.1375	3600.45		3.90		
16	0.1377	2528.98		3.89		
17	0.1386		13.15			
18	0.1408		14.63		33822600	
19	0.1482		6.93		38256300	
20	0.1502					
21	0.1508					
22	0.1508					
23	0.1522					
24	0.1569		9.78		980432	
25	0.1604		6713.97		701	ねじり対称１次
26	0.1673		3.12		6520980	
27	0.1721		3.90		22126500	
28	0.1734	10589.00		3.60		
29	0.1739		3.91		23649200	
30	0.2080	1582.56		3.58		
31	0.2099	1388.27		3.99		
32	0.2122	6008.57		3.92		
33	0.2313		7835.71		810	ねじり逆対称１次
34	0.2379		2.88		13352900	
35	0.2452	11752.90		3.54		
36	0.2469		29.23		73956	
37	0.2482		739.55		906	
38	0.2485		20.47		45468600	
39	0.2558					
40	0.2630					

注）等価質量，等価極慣性の欄の空白は，値が非常に大きいことを示す．

3） 解析結果

基本系吊橋におけるフラッター解析の結果を図-4.5.2.11に示す。また，図-4.5.2.11中の①および②におけるフラッターモードを図-4.5.2.12，図-4.5.2.13に示す。



図－4.5.2.11 V－δ曲線

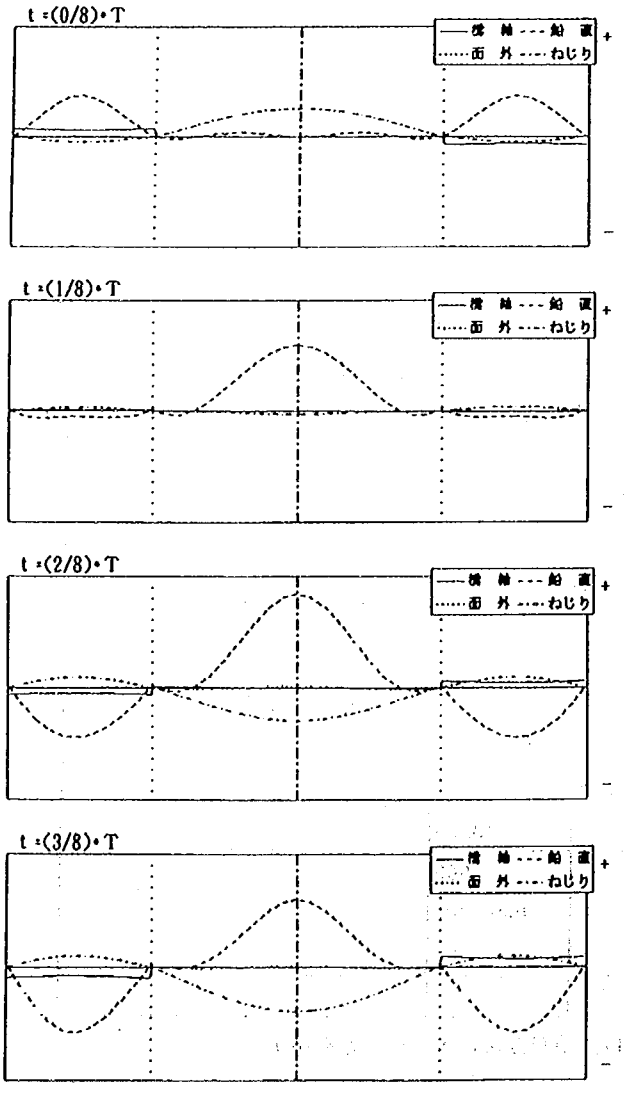


図-4.5.2.12 ①におけるフラッターモード図

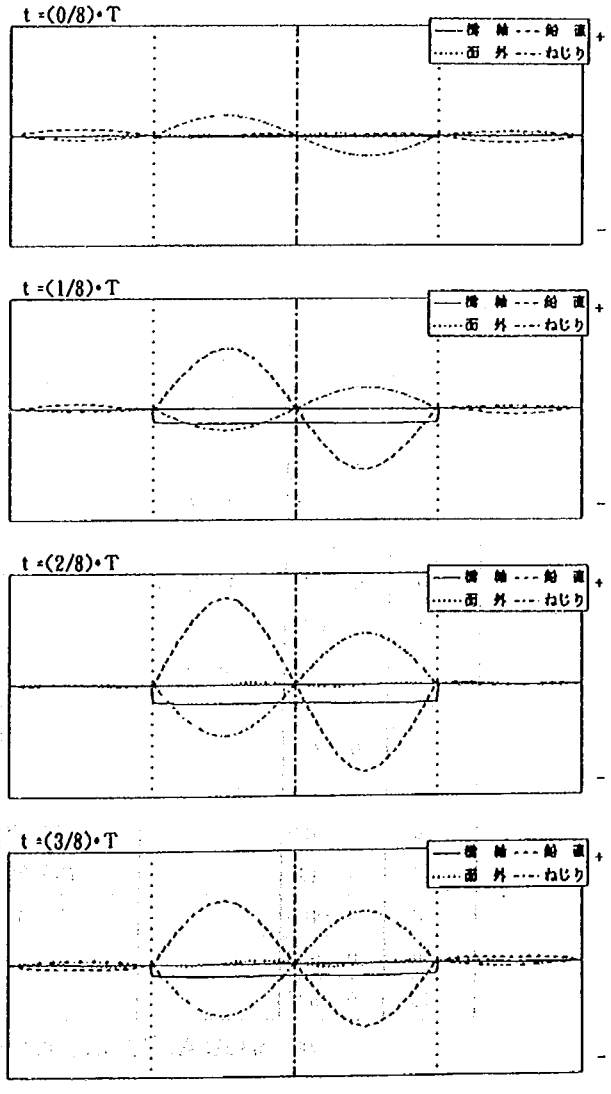


図-4.5.2.13 ②におけるフラッターモード図

(6)　住友重機械工業

1)　解析モデルの諸元

1箱桁ワーキンググループでは「標準モデル」を基本として検討を進めてきた。一連の検討の中で、同モデルに対するフラッター解析結果に差が生じたため、要因の分析を行った。

具体的には、標準モデルと住重で独自に作成したモデルのフラッター解析結果（フラッター発振風速）に8 m/sほどの差が生じた。この差の原因を明らかにすることを目的として「標準モデル」とのモデル化の相違の分析を行い、その相違点がフラッター特性に及ぼす影響把握を実施した。

表-4.5.2.19に「標準モデル」と住重案のモデル化の相違を示す。

表-4.5.2.19　解析モデルの相違点

	項目		単位	標準モデル	住重モデル	備考
構造諸元	支間長			1,250m+2,500m+1,250m		
	ケーブル	サグ比		1/9		
		ケーブル間隔	m	35.5		
		有効断面積	m^2/Br.	2*0.6=1.2		
		弾性係数	t/m^2	$2.03*10^7$		
		許容応力度	kg/mm^2	100		
	ハンガー	ハンガー間隔'	m	125	100	
		断面積	m^2	0.03	0.08	要因A
		弾性係数	t/m^2	$2.03*10^7$	$1.40*10^7$	
	補剛桁	断面積	m^2/Br.	1.3		
		鉛直曲げ剛性	m^4/Br.	12		
		水平曲げ剛性	m^4/Br.	160		
		ねじれ剛性	m^4/Br.	26		
		極慣性	$t\cdot s^2/m$/Br.	336.7	310.0	要因B
	死荷重	吊構造部	t/m/Br.	24		
		ケーブル	t/m/Br.	11		
		合計	t/m/Br.	35		
	塔	ケーブル理論頂	m	TP+380.0		
		面内剛性	m^4/shaft	200		
		面外剛性	m^4/shaft	100		
		ねじれ剛性	m^4/shaft	35		
モデル化	桁	境界条件		桁端の固定方法で対応	ｳｲﾝﾄﾞ査、ﾀﾜｰﾘﾝｸ等ﾓﾃﾞﾙ化	要因C
		重心位置		定着点と同じ	定着点と同じ	要因D
	塔	水平材		無し	有り（3カ所）	要因E
		塔柱間隔（基部）		45 m	65 m	要因F

*：立体骨組モデル化の際のハンガー間隔

2) 解析条件

フラッター解析条件を 表-4.5.2.20 に示す。

表-4.5.2.20 フラッター解析条件

<table>
<tr><td>項目</td><td>解 析 条 件</td></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>直接法</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125 kgf・s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>δ=0</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁
<table><tr><td></td><td></td><td>鉛直</td><td>ねじれ</td><td>水平</td></tr><tr><td rowspan="3">空気力</td><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr><tr><td>抗力</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力、△：準定常空気力
ケーブル 準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主 桁 CD=0.75、An=7.0 m²/m
ケーブル CD=0.7 、An=1.0 m²/m</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>桁幅 B=41 m</td></tr>
</table>

3) 解析結果

表－4.5.2.19に示した要因を逐次変更してフラッター解析を実施した。解析結果の一覧を表－4.5.2.21 に示す。表からも明らかなように解析モデルの諸元をできるだけ合わせた解析では、フラッター発振風速は他社での解析結果とほぼ一致することが確認できた。本モデルの固有値解析結果を表-4.5.2.22 に、フラッター解析結果を図-4.5.2.14 に示す。

また、相違した各要因の解析結果から、桁重心位置（要因D）および 主塔水平材の存在（要因E）がフラッター風速でそれぞれ約4 m/s の差を与えており、フラッター解析結果に与える影響が大きいがことが明らかとなった。その他の要因についても検討を実施したが、その影響はあまり大きくないものと思われる。すべてのケースのフラッター解析結果を図-4.5.2.15 ～ 図-4.5.2.21 に示す。

表-4.5.2.21 構造モデル化の違いがフラッター風速に及ぼす影響

	モデル	内　　容	フラッター風速 (m/s)
1	標準モデル	標準モデルに準じたモデル	60
2	要因A	ハンガー断面、弾性係数の変更	60
3	要因B	極慣性の変更	60.5
4	要因C	境界条件の変更	60
5	要因D	重心位置を-3m とする	64
6	要因E	塔に水平材を追加(3 カ所)	64
7	要因D＋E	要因D、Eを変更	67.5
8	要因F	塔基部の塔柱間隔の変更	60

表－4.5.2.22　固有値解析結果

MODE 番号	周波数 (HZ)	モード形状
1	0.0309	水平曲げ　対称１次
2	0.0514	鉛直曲げ　対称１次
3	0.0564	鉛直曲げ逆対称１次
4	0.0578	水平曲げ逆対称１次
5	0.0591	
6	0.0605	水平曲げ逆対称１次
7	0.0675	鉛直曲げ逆対称１次
8	0.0932	遊動円木
9	0.0936	遊動円木
10	0.0980	水平曲げ　対称２次
11	0.0999	鉛直曲げ　対称２次
12	0.1037	
13	0.1040	
14	0.1178	
15	0.1369	
16	0.1374	鉛直曲げ逆対称２次
17	0.1386	
18	0.1388	
19	0.1485	
20	0.1505	
21	0.1512	
22	0.1512	
23	0.1516	
24	0.1525	
25	0.1556	
26	0.1569	ねじれ　対称１次
27	0.1697	
28	0.1746	
29	0.1751	
30	0.1814	
31	0.1830	
32	0.2109	
33	0.2125	
34	0.2157	
35	0.2291	ねじれ逆対称１次
36	0.2384	
37	0.2389	
38	0.2498	
39	0.2574	
40	0.2652	
41	0.2652	
42	0.2666	
43	0.2670	
44	0.2697	
45	0.2710	
46	0.2764	
47	0.2807	
48	0.2897	
49	0.2935	
50	0.2937	

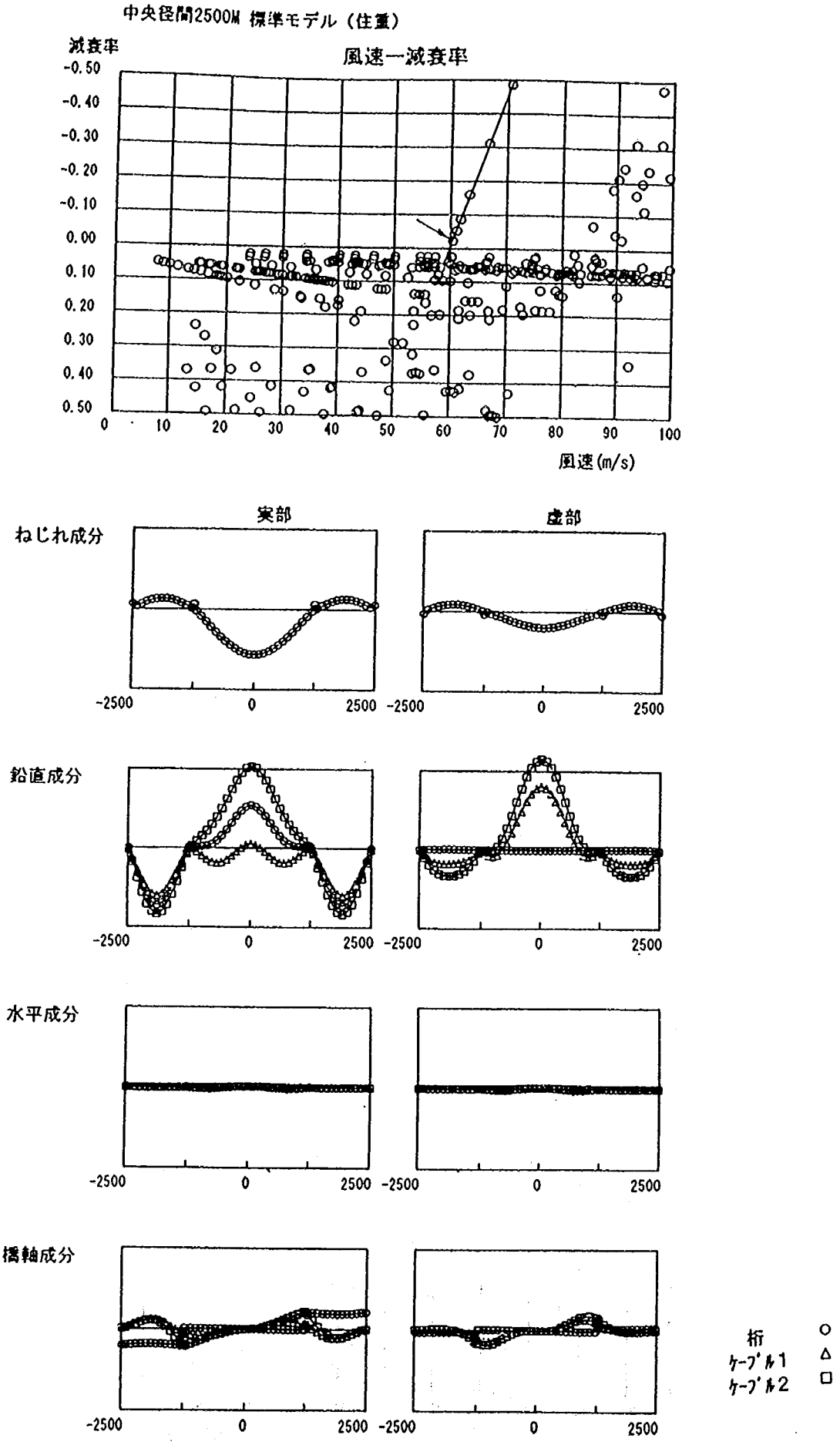


図-4.5.2.14　フラッター解析結果（標準モデルに準じたモデル、Vcr=60 m/s ）

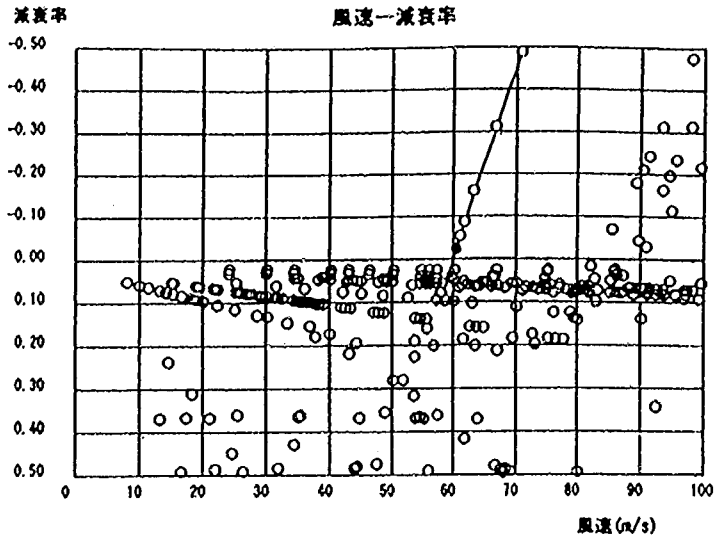


図-4.5.2.15　フラッター解析結果

(要因Ａ：ハンガー断面、弾性係数の変更、Vcr=60 m/s)

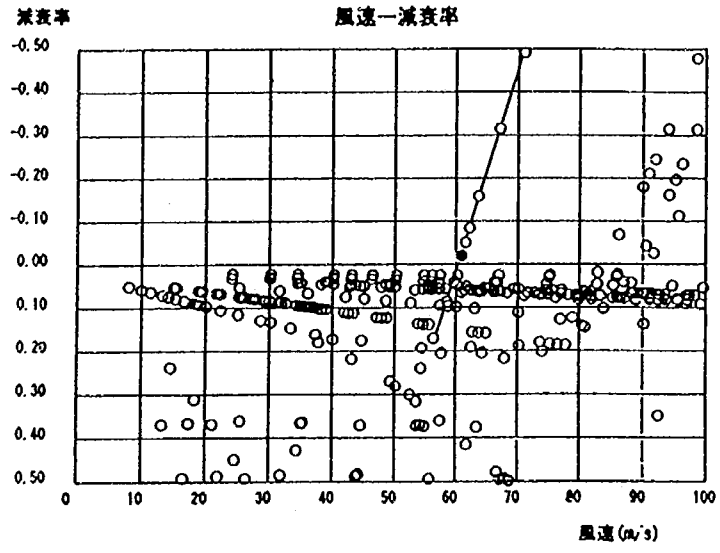


図-4.5.2.16　フラッター解析結果

(要因Ｂ：極慣性の変更、Vcr=60.5 m/s)

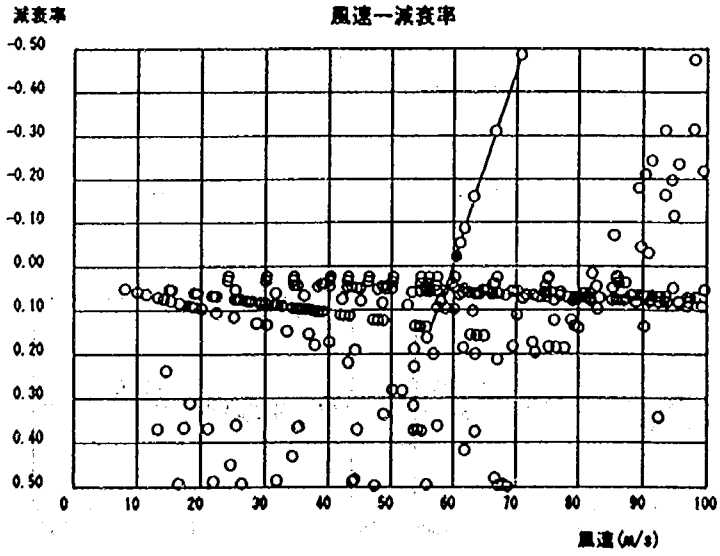


図-4.5.2.17　フラッター解析結果

(要因Ｃ：境界条件の変更、Vcr=60 m/s)

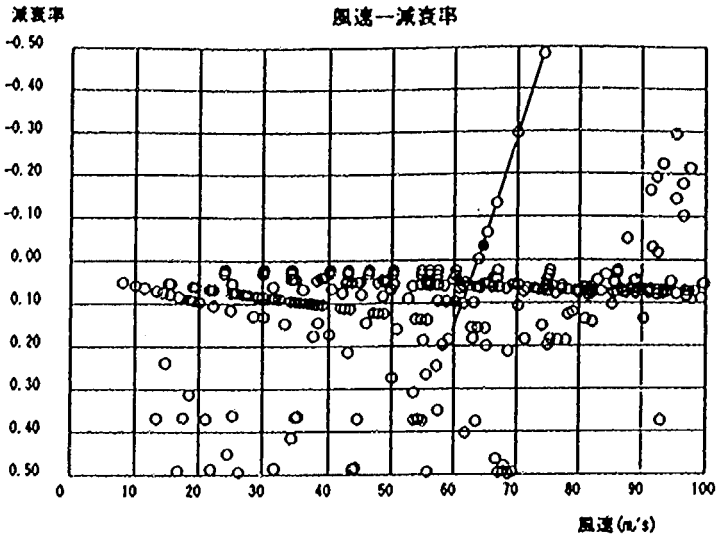


図-4.5.2.18　フラッター解析結果

（要因Ｄ：重心位置を-3m、Vcr=64 m/s ）

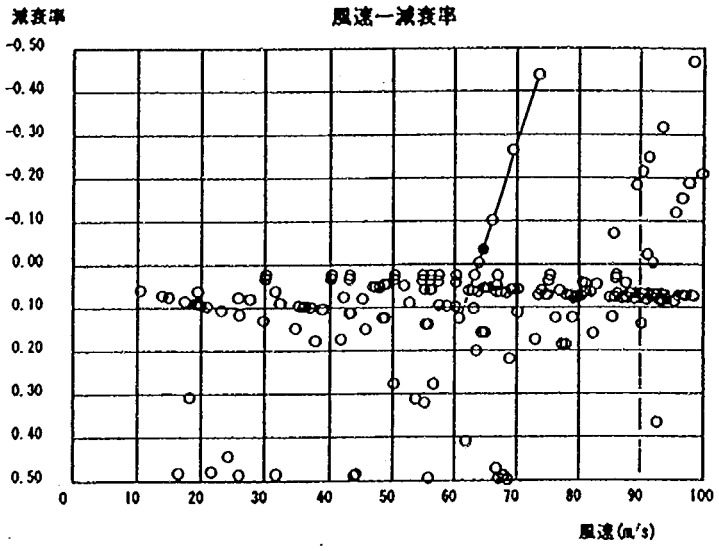


図-4.5.2.19　フラッター解析結果

（要因Ｅ：塔に水平材を追加、Vcr=64 m/s）

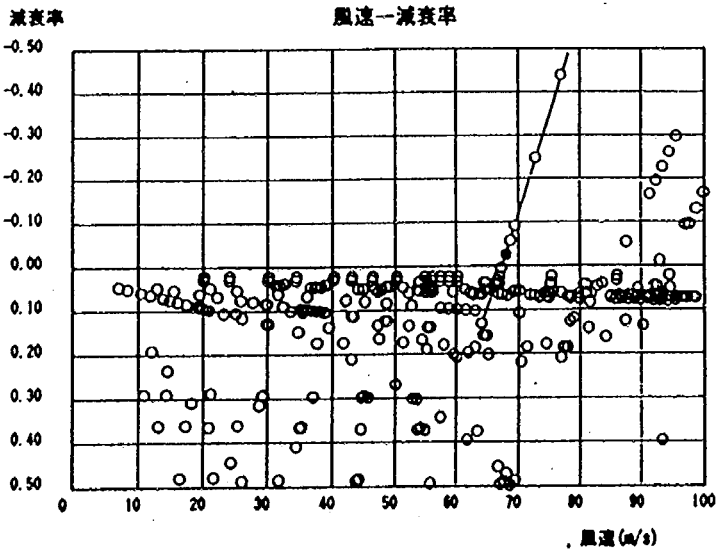


図-4.5.2.20　フラッター解析結果

（要因Ｄ＋Ｅ、Vcr=67.5 m/s）

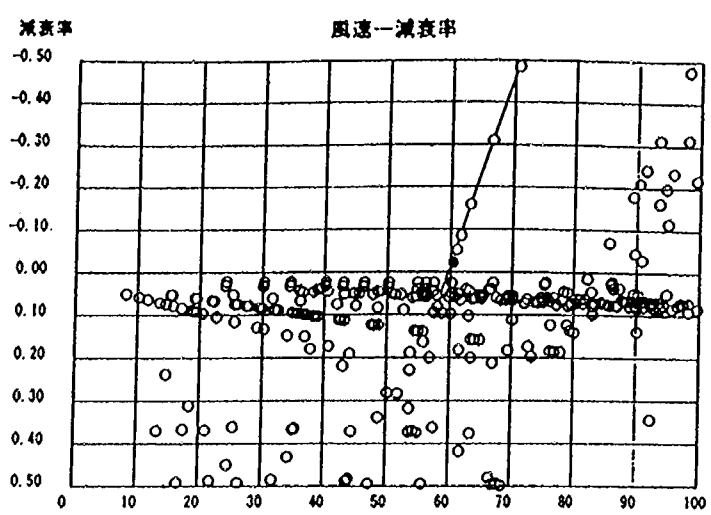


図-4.5.2.21　フラッター解析結果

(要因Ｆ：塔基部の塔柱間隔の変更、Vcr=60 m/s)

(7) 日本鋼管

1)解析モデルの諸元

解析に用いたモデルの諸元は標準モデルに準じているが、モデル化については以下の様に行われている。

ハンガー　：ハンガー間隔７５m、ハンガー断面積０．０１１m^2／格点／Ｂｒ。

桁境界条件：桁端の固定方法で対応。

桁重心位置：定着点と同じ高さ。

主塔　　：塔柱間隔４５m（基部）。水平材はなし。

2)解析条件

フラッター解析条件を 表-4.5.2.23 に示す。ここではモード組合せ法を用いており、低次１００モードを全て取り込み、３．２に示した平板翼理論値を用いた場合、桁高７m１箱桁の測定非定常空気力係数を用いた場合の２ケースについて比較検討した。なお、両ケースとも有風時の静的変形は考慮していない。

3)解析結果

フラッター解析結果に先んじて固有値解析が実施された。固有値解析結果を 表-4.5.2.24 に示す。さらに、平板翼理論値を用いた場合のフラッター解析結果、桁高７m１箱桁の測定空気力を用いた場合のフラッター解析結果をそれぞれ 図-4.5.2.22、図-4.5.2.23 に示す。平板翼理論値を用いた場合についてはフラッター発現風速付近の振動モードも示した。また、これらのフラッター解析結果を 表-4.5.2.25 に示す。

表-4.5.2.23　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項　目</th><th>解　析　条　件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組合せ法
低次１００モード（無風時のモード）を全て取り込む。</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>０．１２５　kgf s^2/m^4</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　$\delta = 0.02$</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
（振動方向）
<table>
<tr><th></th><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td rowspan="3">空気力</td><td>L</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>M</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>D</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず
ケーブル：
準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値、桁高７m１箱桁断面の実測値のいずれか</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
$C_D = 0.75$　An＝7.0m^2／m／Ｂｒ
ケーブル：
$C_{Dc} = 0.7$　An＝2.0m^2／m／Ｂｒ</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>桁幅　Ｂ＝４１m</td></tr>
</table>

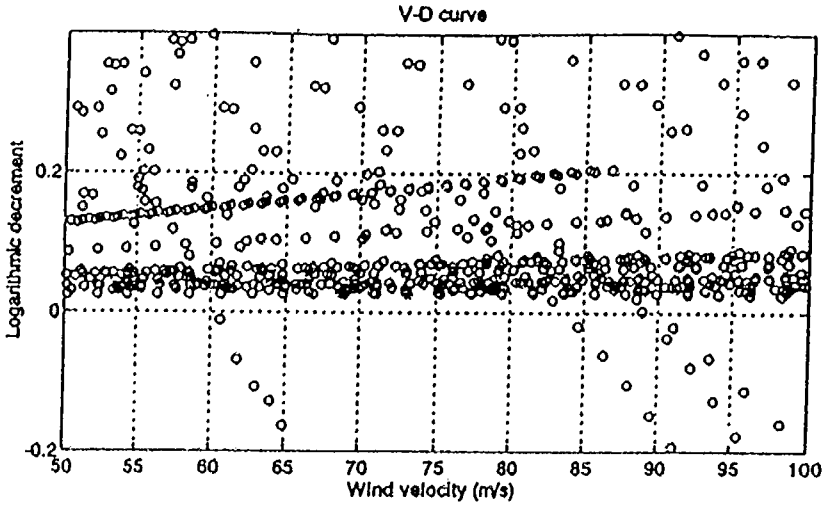
表-4.5.2.24　　固有値解析結果

Mode	固有振動数(Hz)	モード名
1	0.0311	桁中央径間部　水平たわみ対称１次
2	0.0525	桁鉛直たわみ対称１次
3	0.0573	桁鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0586	桁水平たわみ逆対称１次
5	0.0595	桁側径間部　水平たわみ対象１次
6	0.0605	桁水平たわみ逆対称１次
7	0.0688	桁鉛直たわみ逆対称１次
8	0.0981	桁中央径間部　水平たわみ対称２次
9	0.0992	桁鉛直たわみ対称２次
10	0.1021	遊動円木
11	0.1024	遊動円木
12	0.1180	
13	0.1337	
14	0.1358	
15	0.1369	桁鉛直たわみ対称２次
16	0.1377	中央後間部　鉛直逆対称２次
17	0.1387	
18	0.1388	
19	0.1471	
20	0.1484	
21	0.1484	
22	0.1486	
23	0.1505	
24	0.1547	
25	0.1595	桁ねじれ対称１次
26	0.1662	
27	0.1716	
28	0.1735	
29	0.1760	
30	0.2125	
31	0.2145	
32	0.2170	
33	0.2302	桁ねじれ逆対称１次
34	0.2374	
35	0.2403	
36	0.2427	
37	0.2461	
38	0.2524	
39	0.2553	
40	0.2615	
41	0.2615	
42	0.2642	
43	0.2668	
44	0.2670	
45	0.2701	
46	0.2936	
47	0.2966	
48	0.2967	
49	0.3289	
50	0.3344	

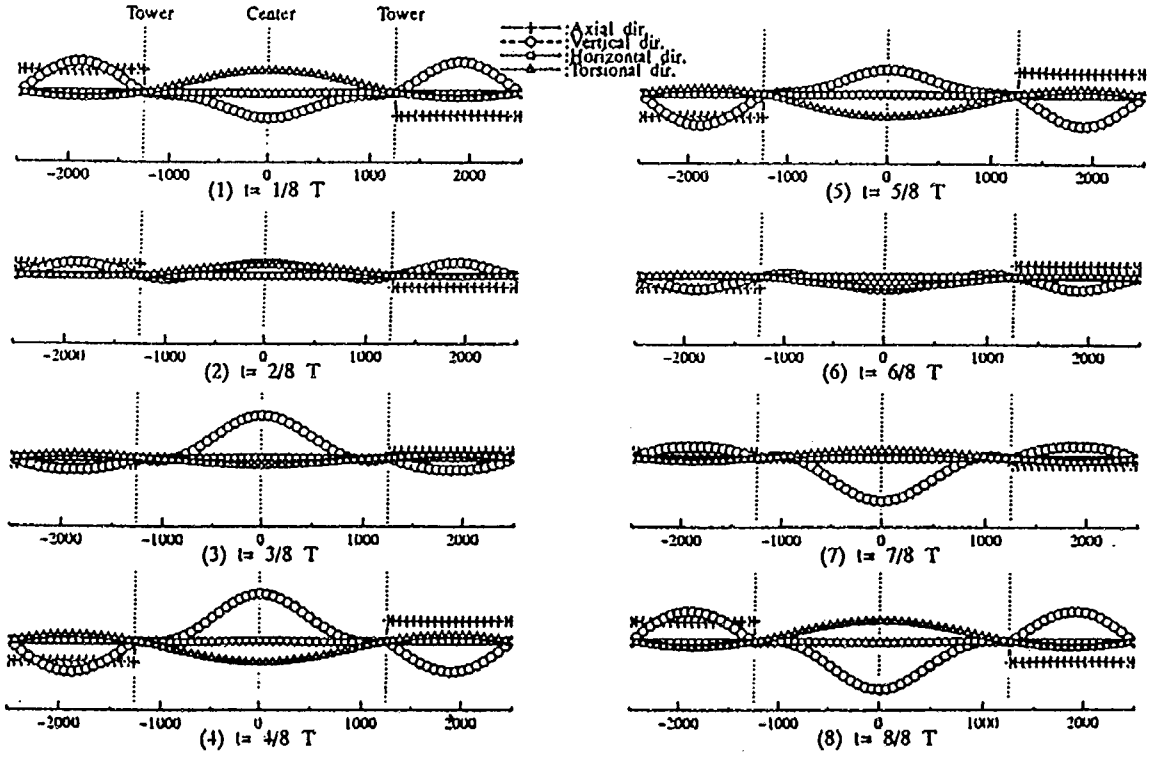
表-4.5.2.25　　フラッター解析結果の比較

桁に作用する空気力	フラッター発現風速(m/s)
平板空気力	60
桁高７ｍ１箱桁 測定空気力	56

（備考）構造減衰は全モードδ＝０．０２として比較した。

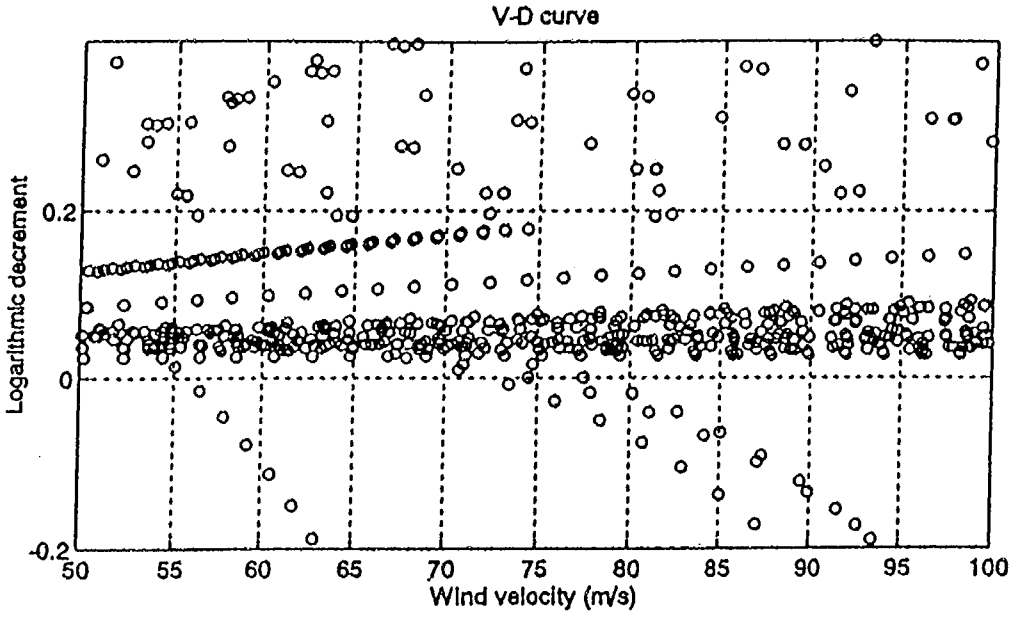


（a）風速－対数減衰率の関係



（b）モード図

表－4.5.2.22　フラッター解析結果（平板翼理論値を用いた場合）

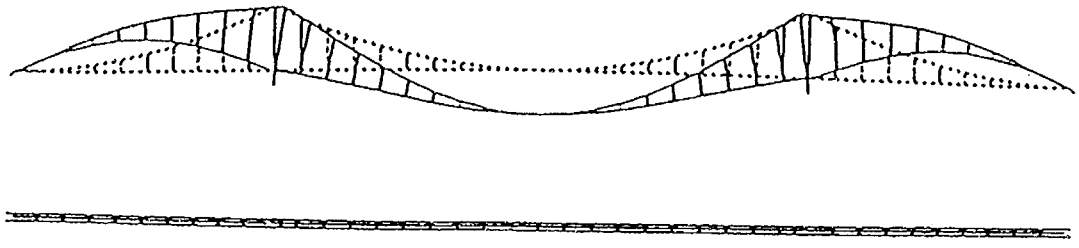


表－4.5.2.23　フラッター解析結果（桁高７ｍ１箱桁の測定空気力を用いた場合）

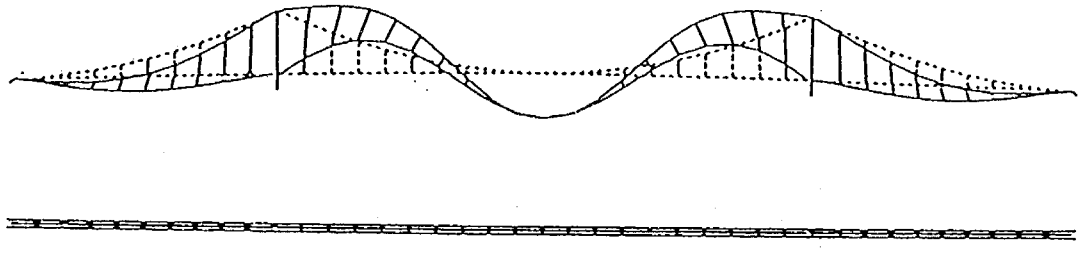
(8)　日立造船

1）解析モデルの諸元

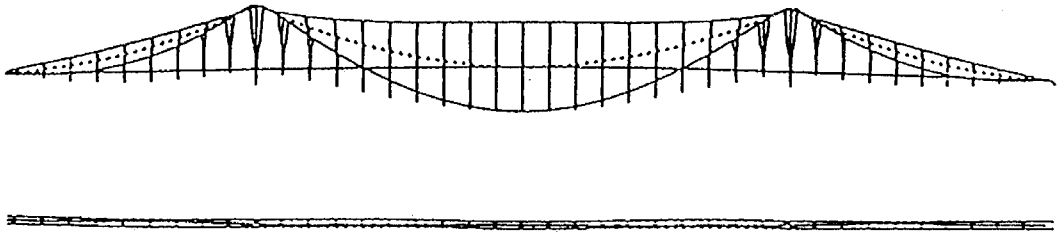
解析に用いたモデルの諸元は、「標準モデル」であり、 表-4.5.1.1と同様である。よって、ここでは、構造諸元の表は割愛するが、参考のため主要モード図を下記に示す。



Mode-(2)：鉛直曲げ対称１次（f=0.054Hz）



Mode-(11)：鉛直曲げ対称２次（f=0.100Hz）



Mode-(25)：ねじれ対称１次（f=0.160Hz）

図-4.5.2.24　主要モード図

2）解析条件

フラッター解析条件を 表-4.5.2.26 に示す。

表-4.5.2.26 フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項目</th><th>解　析　条　件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組合わせ法（無風時固有モードを使用、低次50モード）</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125kgf s^2/m^4</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード：δ=0.02</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○:非定常空気力、△:準定常空気力、×:考慮せず
ケーブル　準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主　　桁　C_D=0.75、A_n=7.0m^2/m
ケーブル　C_D=0.7 、A_n=1.0m^2/m</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>桁幅　B=41m</td></tr>
</table>

表-4. 5. 2. 27　固有値解析結果

ﾓｰﾄﾞ次数	固有振動数(Hz)	ﾓｰﾄﾞ形状
1	0.0314	水平曲げ対称1次
2	0.0537	鉛直曲げ対称1次
3	0.0580	鉛直曲げ逆対称1次
4	0.0589	
5	0.0595	
6	0.0604	水平曲げ逆対称1次
7	0.0697	鉛直曲げ逆対称1次
8	0.0869	遊動円木
9	0.0873	遊動円木
10	0.0979	水平曲げ対称2次
11	0.0997	鉛直曲げ対称2次
12	0.1176	
13	0.1364	
14	0.1365	鉛直曲げ逆対称2次
15	0.1375	
16	0.1377	
17	0.1386	
18	0.1408	
19	0.1482	
20	0.1502	
21	0.1508	
22	0.1508	
23	0.1523	
24	0.1569	
25	0.1602	ねじれ対称1次
26	0.1673	
27	0.1721	
28	0.1734	
29	0.1739	
30	0.2080	
31	0.2099	
32	0.2122	
33	0.2310	ねじれ逆対称1次
34	0.2379	
35	0.2452	
36	0.2469	
37	0.2479	
38	0.2485	
39	0.2559	
40	0.2630	
41	0.2630	
42	0.2648	
43	0.2679	
44	0.2681	
45	0.2707	
46	0.2831	
47	0.2857	
48	0.2858	
49	0.3234	
50	0.3311	

3）解析結果

フラッター解析結果を図-4.5.2.25 ～ 表-4.5.2.27に示す。フラッター発振風速は、約60 m/s、フラッター振動数はδ=-0.00348で、f=0.107Hzであった。

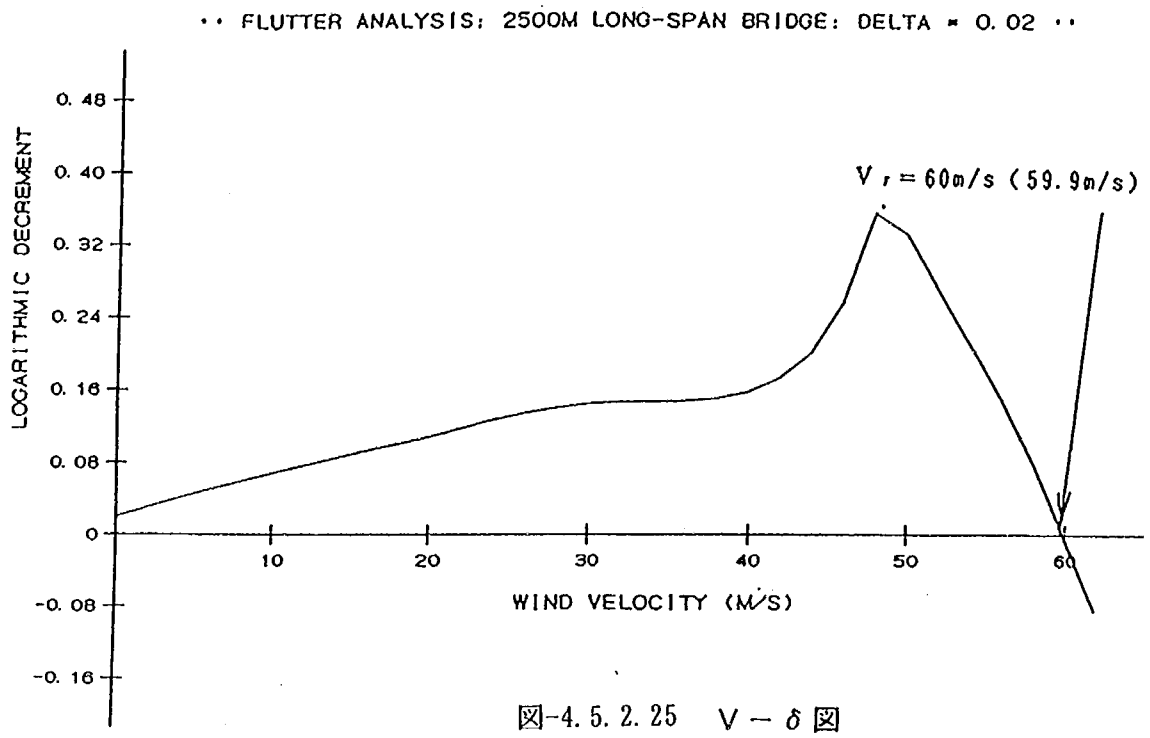


図-4.5.2.25　V－δ図

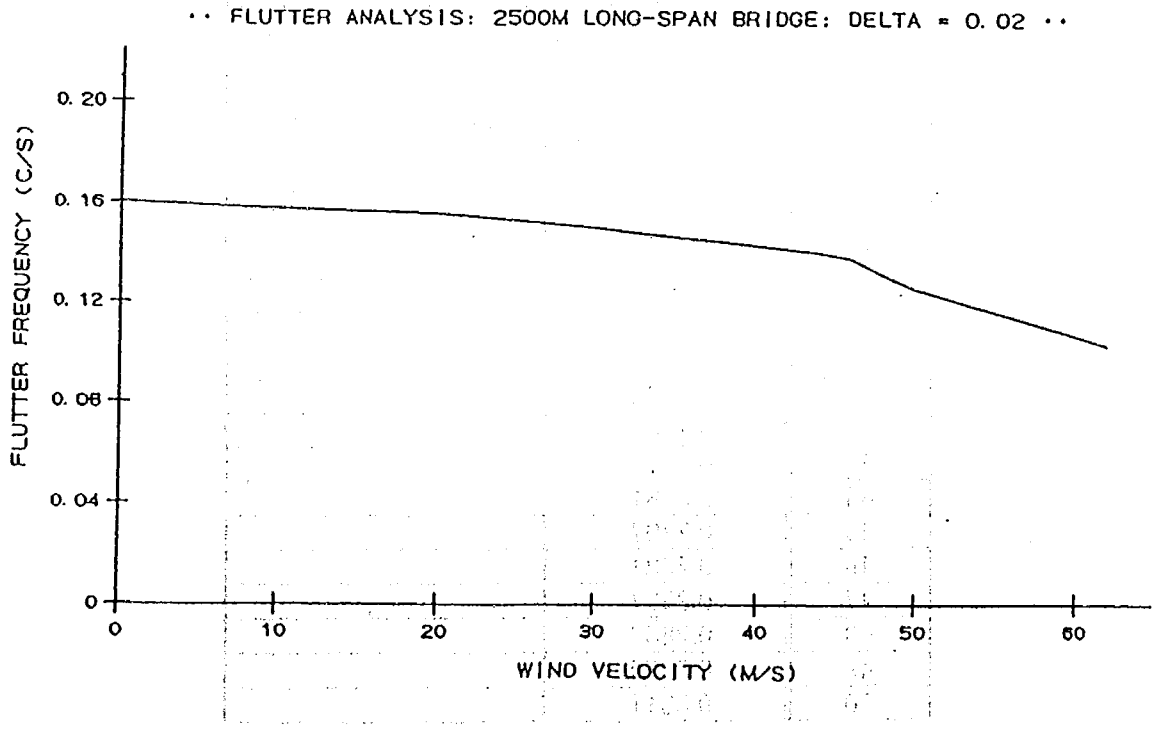
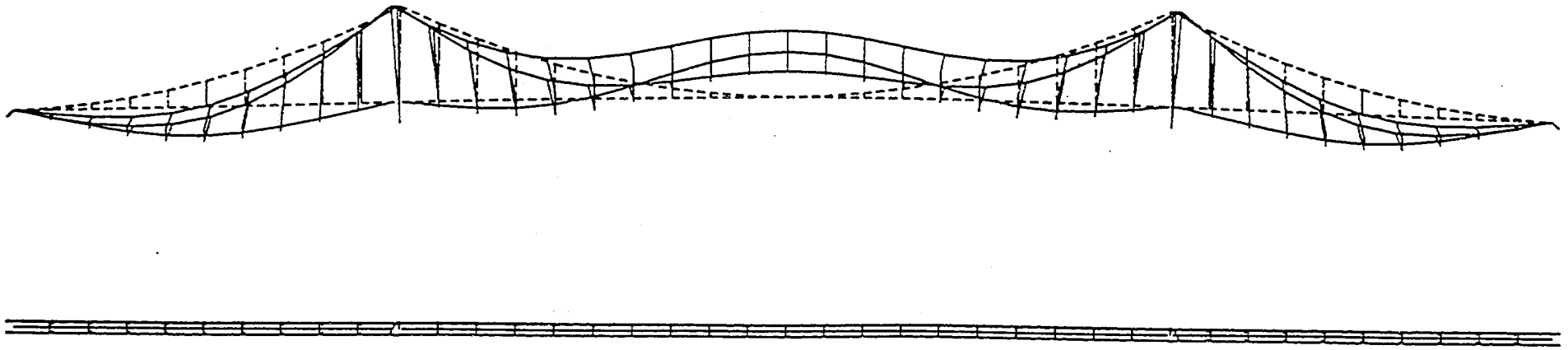


図-4.5.2.26　フラッター振動数

•• FLUTTER ANALYSIS: 2500M LONG-SPAN BRIDGE: DELTA = 0.02 ••

• WIND VELOCITY = 60.000 (M/S)



FREQUENCY F(U) = 0.10700 (C/S) DELTA = -0.00348

図-4.5.2.27 フラッターモード図 参考) f_F=0.1048c/s (δ=-0.05)

(9) 三井造船

1) 解析モデルの諸元

解析に用いたモデルの諸元を表-4.5.2.28 に示す。

表-4.5.2.28 解析モデル諸元

項目			構造諸量	備考
構造諸元	支間長		1,250 m + 2,500 m + 1,250 m	
	ケーブル	サグ比	1/9	
		間隔	35.5 m	
		有効断面積	2×0.6 = 1.2 m^2/Br.	
		弾性係数	2.03×10^7 t/m^2	
		許容応力度	100 kg/mm^2	
	ハンガー	間隔	125 m	
		断面積	0.03 m^2	
		弾性係数	2.03×10^7 t/m^2	
	補剛桁	断面積	1.3 m^2/Br.	
		鉛直曲げ剛性	12 m^4/Br.	
		水平曲げ剛性	160 m^4/Br.	
		ねじれ剛性	26 m^4/Br.	
		極慣性モーメント	336.7 $t\cdot m\cdot s^2/m$/Br.	
	死荷重	吊構造部	24 t/m/Br.	
		ケーブル	11 t/m/Br.	
		合計	35 t/m/Br.	
	塔	ケーブル理論頂	TP + 380.0 m	
		断面積	5.0 m^2/shaft	
		面内剛性	200 m^4/shaft	
		面外剛制	100 m^4/shaft	
		ねじれ剛性	35 m^4/shaft	
モデル化	桁	境界条件	桁端の固定方法で対応	
		重心位置	定着点と同じ	
	塔	水平材	なし	
		塔柱間隔（基部）	45 m	

2)　固有振動解析結果

固有振動解析結果を表-4.5.2.29に示す。

表-4.5.2.29　固有振動解析結果一覧

次数	振動数 Hz	備　　考
1	0.031435	水平曲げ対称1次
2	0.053665	鉛直曲げ対称1次
3	0.057989	鉛直曲げ逆対称1次
4	0.058856	
5	0.059499	
6	0.060408	水平曲げ逆対称1次
7	0.069680	鉛直曲げ逆対称1次
8	0.086911	遊動円木
9	0.087341	遊動円木
10	0.097915	水平曲げ対称2次
11	0.099661	鉛直曲げ対称2次
12	0.117557	
13	0.136391	鉛直曲げ対称2次
14	0.136495	鉛直曲げ逆対称2次
15	0.137497	
16	0.137732	
17	0.138640	
18	0.140829	
19	0.148204	
20	0.150210	
21	0.150771	
22	0.150771	
23	0.152250	
24	0.156888	
25	0.160362	ねじれ対称1次
26	0.167322	
27	0.172095	
28	0.173377	
29	0.173911	
30	0.207967	
31	0.209863	
32	0.212158	
33	0.231290	ねじれ逆対称1次
34	0.237895	
35	0.245189	
36	0.246898	
37	0.248163	
38	0.248503	
39	0.255847	
40	0.262958	

3) 解析条件

フラッター解析条件を表-4.5.2.30 に示す。

表-4.5.2.30' フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項　目</th><th>解　析　条　件</th></tr>
<tr><td>解　析　手　法</td><td>モード組み合せ法：
無風時固有モードを使用
低次 40 モードの組み合わせ</td></tr>
<tr><td>空　気　密　度</td><td>0.125 kgf·s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構　造　減　衰</td><td>全モード　δ = 0.02</td></tr>
<tr><td>空 気 力 係 数</td><td>補 剛 桁：
<table>
<tr><th></th><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td rowspan="3">空
気
力</td><td>L</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>M</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>D</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮しない
ケーブル：準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非 定 常 空 気 力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準 定 常 空 気 力</td><td>補 剛 桁：
C_D = 0.75, An = 7.0 m²/m/Br.
ケーブル：
C_D = 0.7, An = 2.0 m²/m/Br.</td></tr>
<tr><td>そ　の　他</td><td>桁幅は 41 m とした</td></tr>
</table>

4) 解析結果

フラッター解析結果を表-4.5.2.31 、図-4.5.2.28 および図-4.5.2.29 に示す。

表-4.5.2.31　フラッター解析結果

項　　目	三井造船
フラッター発現風速	59.6 m/s
応答振動数	0.107 Hz

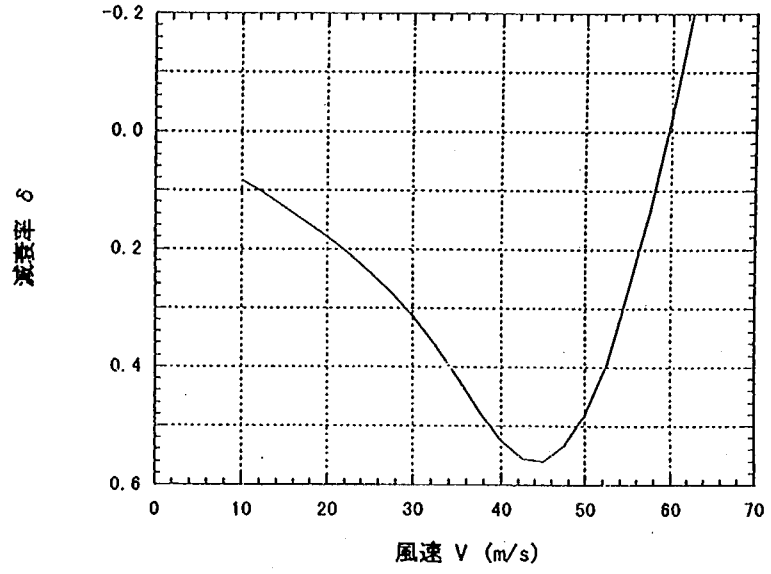


図-4.5.2.28　V－δ図

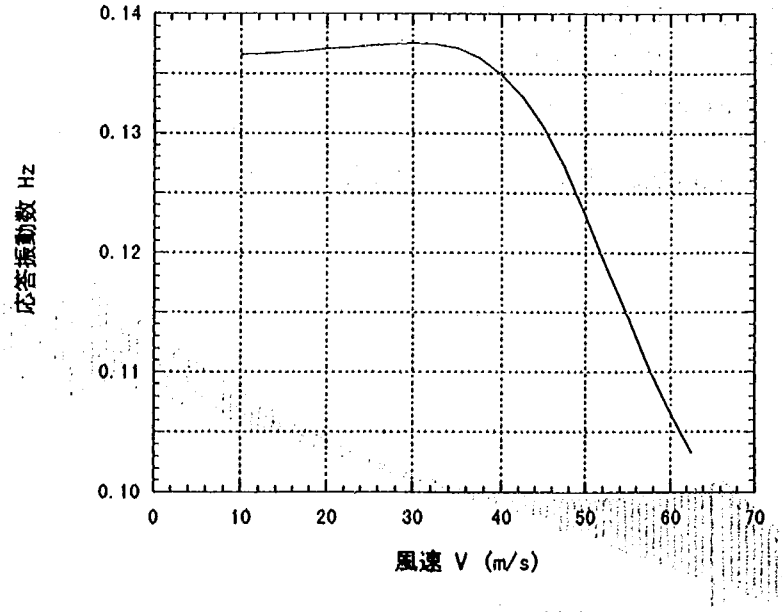


図-4.5.2.29　V－f図

(10)　三菱重工業

1)解析モデルの諸元

解析モデルに用いたモデルの諸元を表-4.5.2.32に示す。

表-4.5.2.32　解析モデル諸元

	項　目		単位	構造諸量
構造諸元	支間長			1,250m+2,500m+1,250m
	ケーブル	サグ比		1/9
		ケーブル間隔	m	35.5
		有効断面積	m^2/Br.	2×0.6=1.2
		弾性係数	t/m^2	2.03×10^7
		許容応力度	kg/mm^2	100
	ハンガー	ハンガー間隔	m	28　*1)
		断面積	m^2	0.0056
		弾性係数	t/m^2	1.40×10^7
	補剛桁	断面積	m^2/Br.	1.3
		鉛直曲げ剛性	m^4/Br.	12
		水平曲げ剛性	m^4/Br.	160
		ねじれ剛性	m^4/Br.	26
		極慣性	$t\cdot s^2/m$/Br.	336.7
	死荷重	吊構造部	t/m/Br.	24
		ケーブル	t/m/Br.	11
		合計	t/m/Br.	35
	塔	ケーブル理論頂	m	TP+380.0
		面内剛性	m^4/shaft	200
		面外剛性	m^4/shaft	100
		ねじれ剛性	m^4/shaft	35
モデル化	桁	境界条件		ｳｲﾝﾄﾞ沓、ﾀﾜｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化
		重心位置		定着点と同じ
	塔	水平材		無し
		塔柱間隔（基部）		45m

注*1)ハンガー間隔28mを基本モデルとしたが、この値は他社モデルのハンガー間隔（100～125m）と大きく異なっている。この値については、後述(9)の4)に示すように1部区間のハンガー間隔を変更したモデルについても解析した。

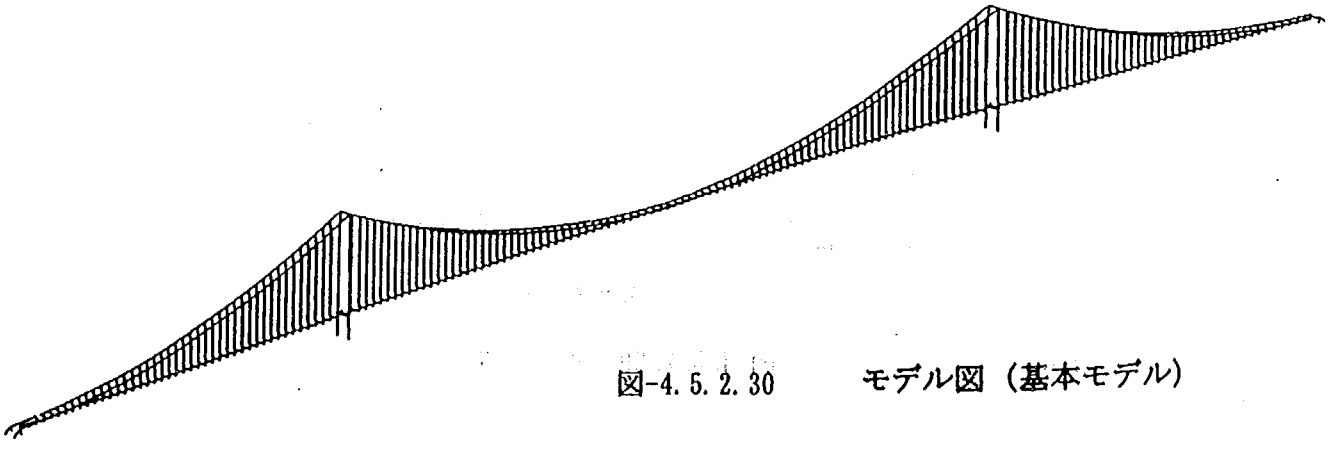


図-4.5.2.30　モデル図（基本モデル）

2) 解析条件

フラッター解析条件を 表-4.5.2.33 に示す。

表-4.5.2.33　　フラッター解析条件

<table>
<tr><th>項　目</th><th>解　析　条　件</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組合せ法
無風時固有モードを使用。低次５０モードを取り込む。</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>０．１２５ kgf・s^2/m^4</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ＝０．０２（モード組合せ法）</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
（振動方向）
<table>
<tr><th></th><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td rowspan="3">空気力</td><td>L</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>M</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>D</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
C_D＝０．７５　　A_n＝７．０ m^2/m/Br
ケーブル：
C_D＝０．７５　　A_n＝２．０ m^2/m/Br</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>桁幅　Ｂ＝４１ｍ</td></tr>
</table>

3)解析結果（基本モデル）

①固有振動解析結果

基本モデル（ハンガー間隔が全て 28m のモデル）の実固有値計算結果を 表-4.5.2.34 に示す。

表-4.5.2.34　　固有振動解析結果（基本モデル）

モード番号	振動数（Hz）	
1	0.0315	水平曲げ対称１次
2	0.0523	鉛直曲げ対称１次
3	0.0580	
4	0.0585	
5	0.0586	鉛直曲げ逆対称１次
6	0.0598	水平曲げ逆対称１次
7	0.0686	鉛直曲げ逆対称１次
8	0.0967	水平曲げ対称２次
9	0.0999	鉛直曲げ対称２次
10	0.1082	遊動円木対称
11	0.1083	遊動円木逆対称
12	0.1195	
13	0.1347	
14	0.1364	
15	0.1372	
16	0.1381	鉛直曲げ逆対称２次
17	0.1395	
18	0.1397	
19	0.1473	
20	0.1513	
21	0.1514	
22	0.1514	
23	0.1532	
24	0.1535	
25	0.1589	ねじれ対称１次
26	0.1604	
27	0.1706	
28	0.1735	
29	0.1763	
30	0.2117	
31	0.2121	
32	0.2131	
33	0.2152	
34	0.2179	
35	0.2311	ねじれ逆対称１次
36	0.2351	
37	0.2428	
38	0.2531	
39	0.2612	
40	0.2676	
41	0.2676	
42	0.2684	
43	0.2709	
44	0.2724	
45	0.2742	
46	0.2883	
47	0.2942	
48	0.2949	
49	0.2983	
50	0.2985	

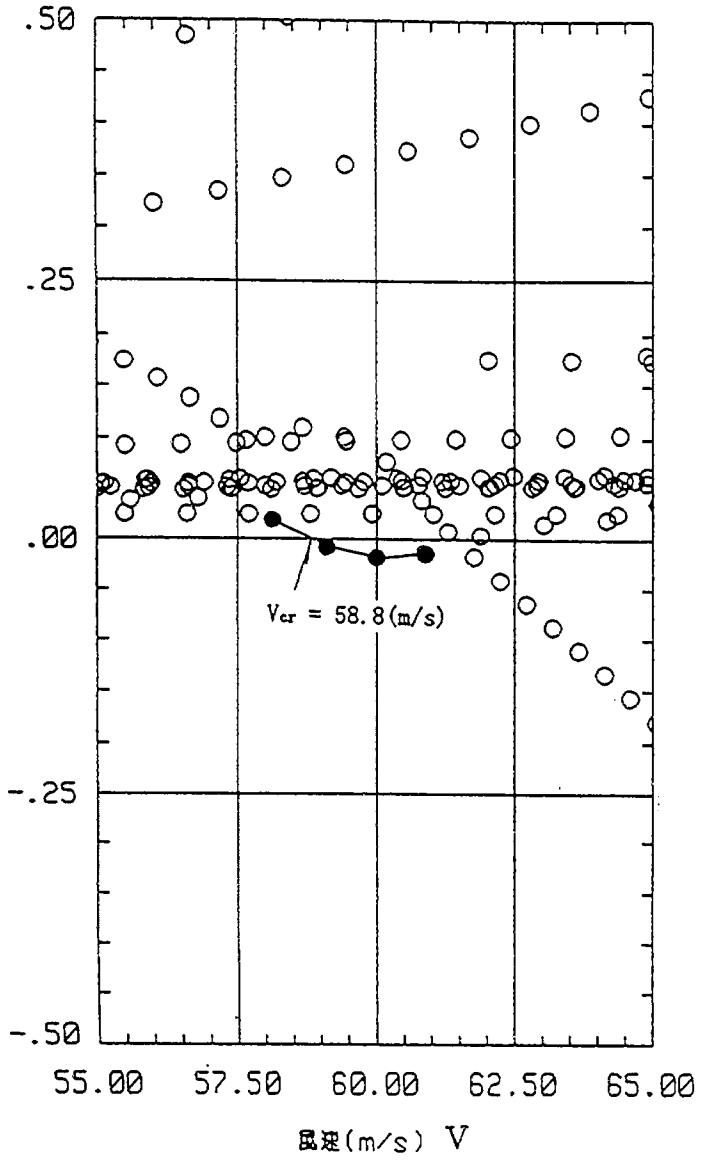
②フラッター解析結果

基本モデルのフラッター解析結果を 図-4.5.2.31 および 図-4.5.2.32 に示す。

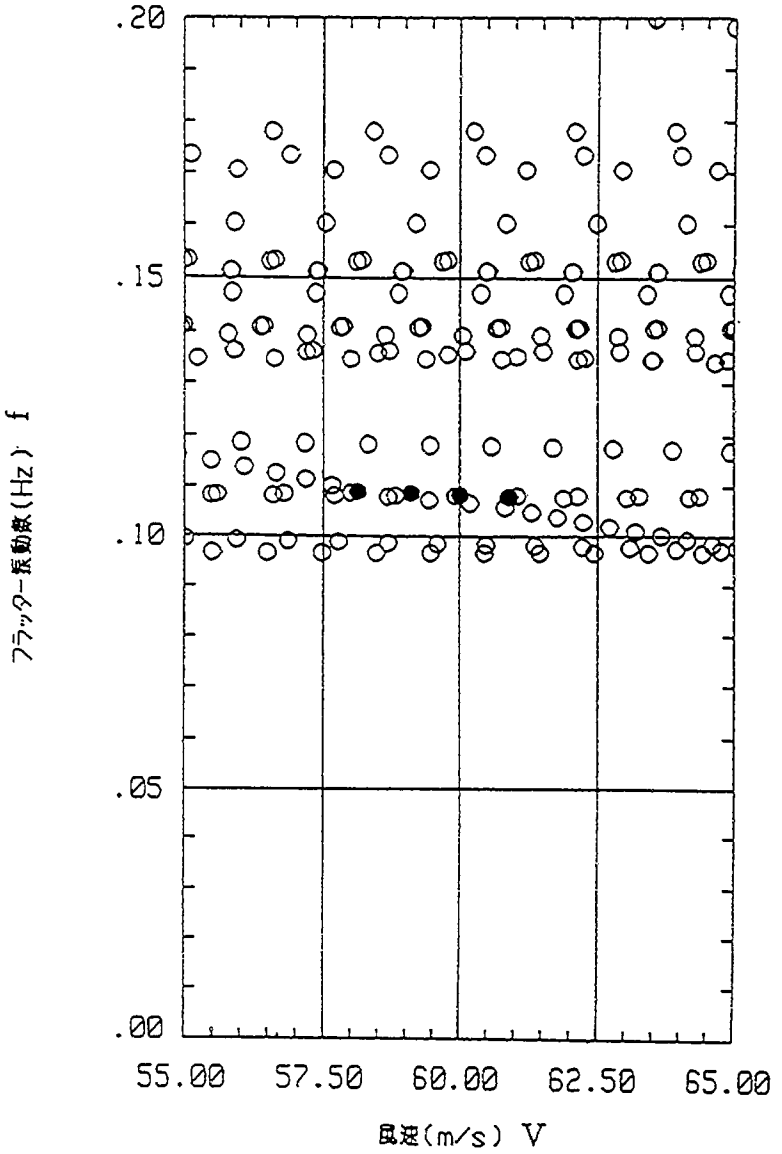
フラッター発振風速（V cr）は 58.8m/s であるが、V cr 付近における δ の低下の状況は単調ではなく、1度 δ が低下した後、また増加している。また、この時のフラッターモードは図-4.5.2.32 に示すように橋軸方向成分（遊動円木振動）が卓越した特異なモードである。

このような δ 低下状況の複雑さ、および特異なフラッターモードは他社結果と異った結果である。

この原因としては、解析モデルにおけるハンガー長の違いによる影響が考えられるため次にこの点を検討した。

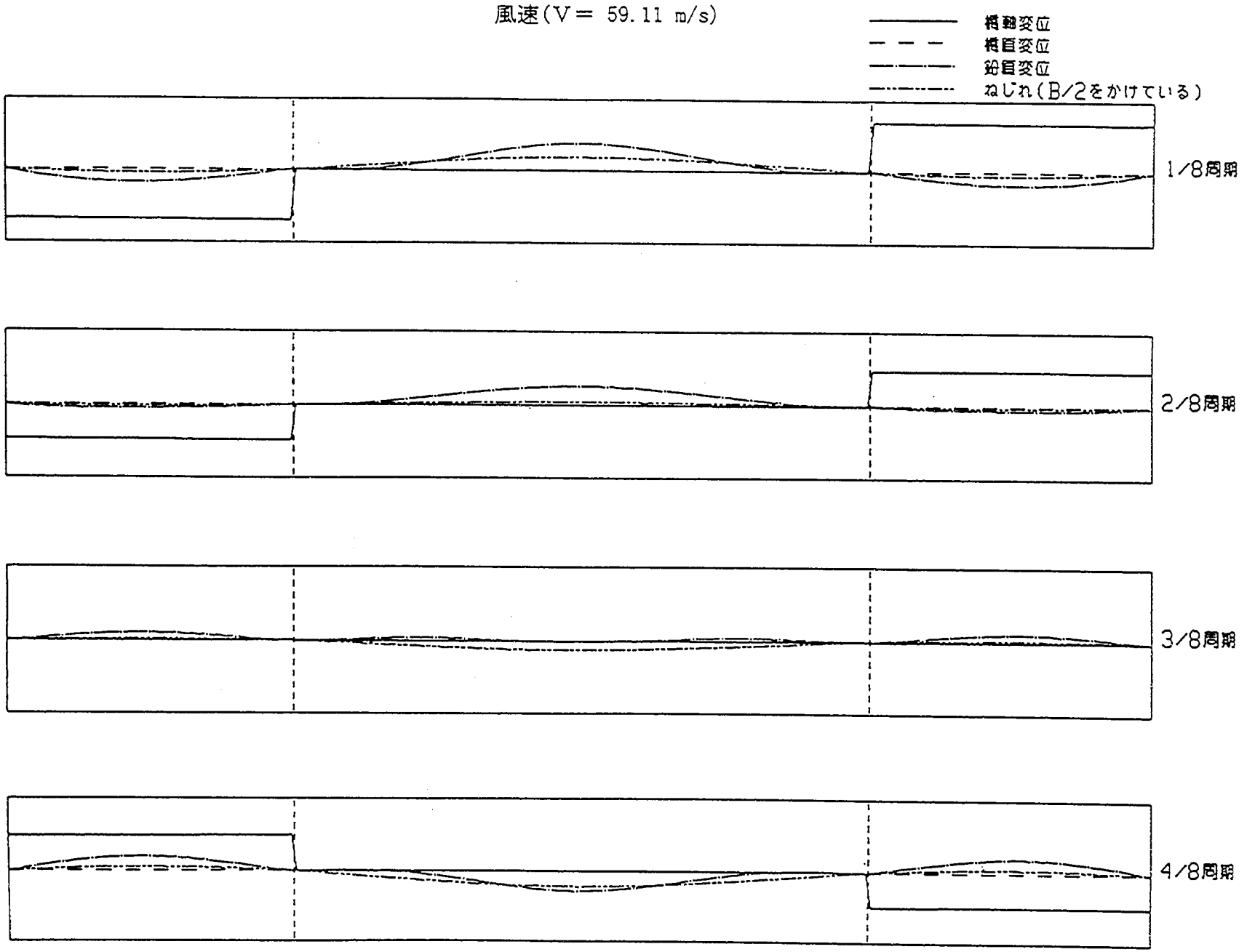


(a) V－δ図



(b) V－f図

図-4.5.2.31　フラッター解析結果（基本モデル）



図－4.5.2.32　　フラッターモード図（基本モデル）

4)　ハンガー間隔の違い影響の検討

①解析モデルの変更

フラッター解析結果に差異が生じた要因として、ハンガー間隔の違いの影響が考えられた。

この影響を近似的に検討するため、図-4.5.2.33 に示すように側径間端部のみのハンガー８本づつを撤去し、両側の側径間端部のハンガー長が他社モデルとほぼ同程度になるモデルを設定し、同じ解析を行った。

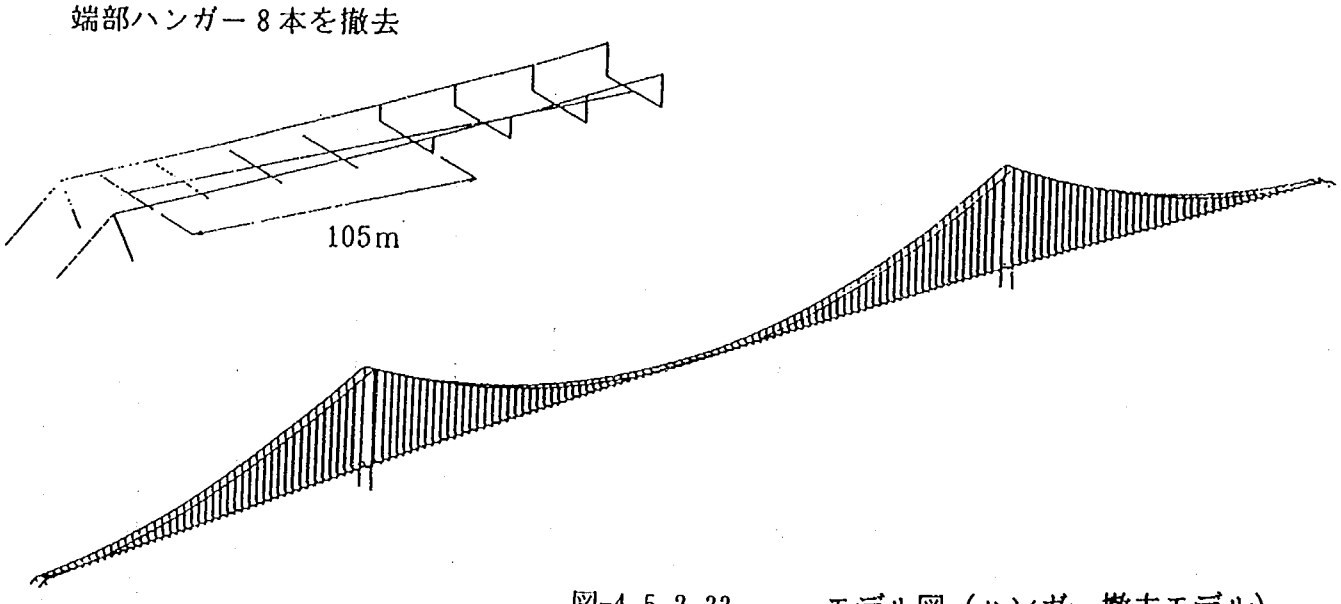


図-4.5.2.33　　モデル図（ハンガー撤去モデル）

②変更後モデルの固有振動解析結果

ハンガー撤去モデルの固有振動解析結果を基本モデルの結果と対比して 表-4.5.2.35 に示す。

ハンガー撤去により、遊動円木振動の振動数が低下している。それ以外の振動モードについての変化は殆ど見られない。

表-4.5.2.35　固有振動数の変化

モード番号	ハンガー撤去モデル 振動数（Hz）	基本モデル 振動数（Hz）	
1	0.0315	0.0315	水平曲げ対称１次
2	0.0522	0.0523	鉛直曲げ対称１次
3	0.0579	0.0580	
4	0.0583	0.0585	
5	0.0585	0.0586	鉛直曲げ逆対称１次
6	0.0598	0.0598	水平曲げ逆対称１次
7	0.0685	0.0686	鉛直曲げ逆対称１次
8	0.0879	0.1082	遊動円木対称
9	0.0883	0.1083	遊動円木逆対称
10	0.0967	0.0967	水平曲げ対称２次
11	0.1002	0.0999	鉛直曲げ対称２次
12	0.1194		
13	0.1347		
14	0.1363		
15	0.1370		
16	0.1381	0.1381	鉛直曲げ逆対称２次
17	0.1391		
18	0.1394		
19	0.1472		
20	0.1512		
21	0.1512		
22	0.1513		
23	0.1532		
24	0.1533		
25	0.1588	0.1589	ねじれ対称１次
26	0.1604		
27	0.1707		
28	0.1736		
29	0.1763		
30	0.2117		
31	0.2121		
32	0.2131		
33	0.2148		
34	0.2175		
35	0.2310	0.2311	ねじれ逆対称１次
36	0.2351		
37	0.2427		
38	0.2531		
39	0.2612		
40	0.2667		
41	0.2667		
42	0.2684		
43	0.2709		
44	0.2719		
45	0.2736		
46	0.2879		
47	0.2940		
48	0.2949		
49	0.2978		
50	0.2980		

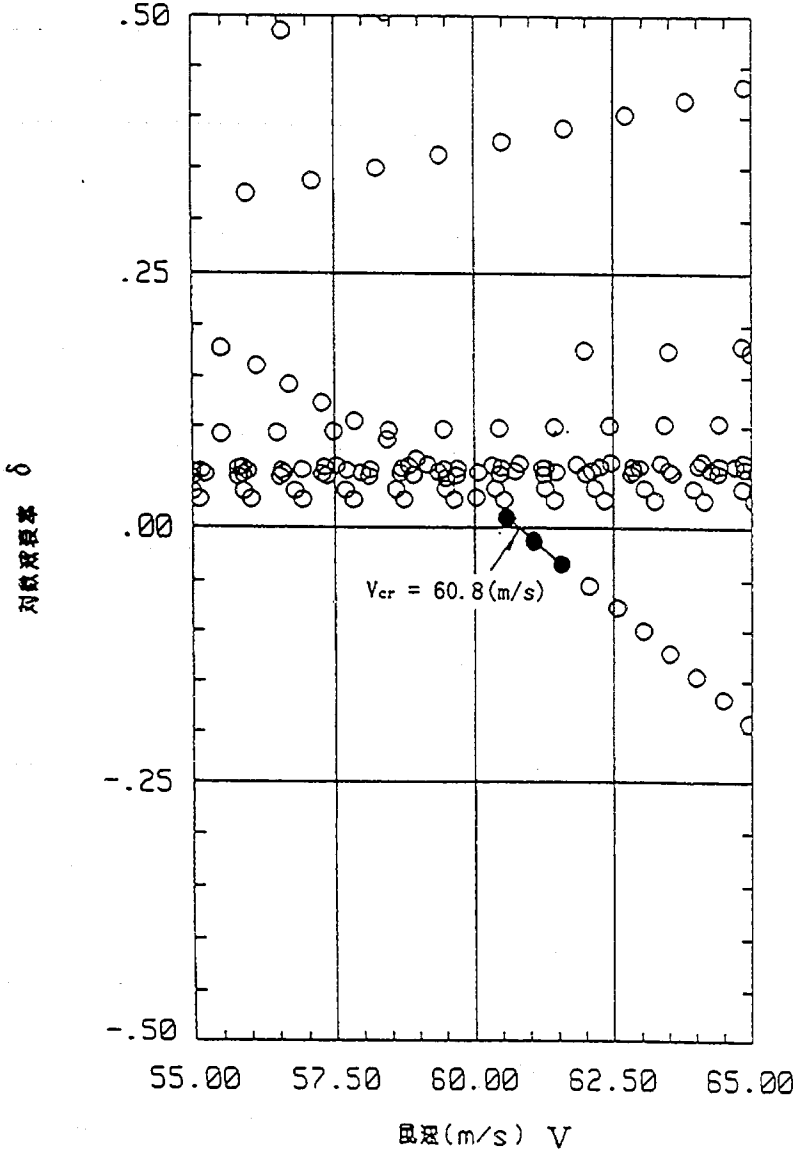
③変更後モデルのフラッター解析結果

ハンガー撤去モデルのフラッター計算結果を図-4.5.2.34 に示す。

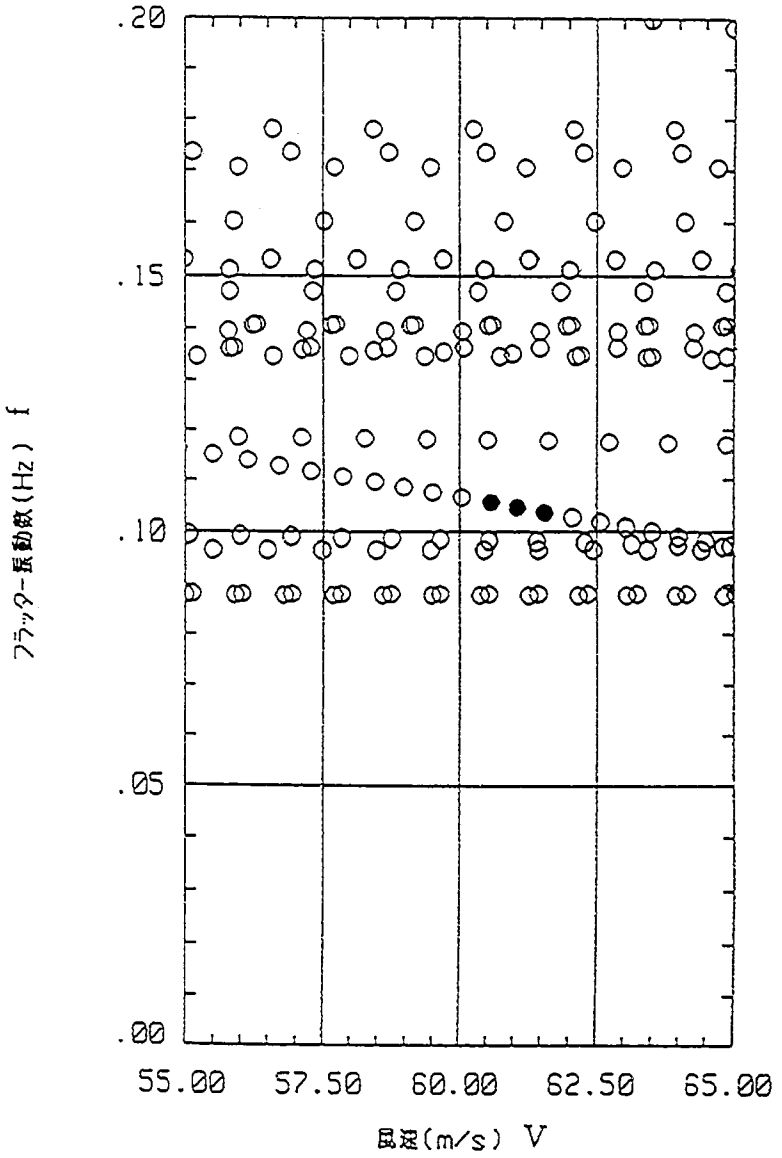
V cr＝60.8m/s である。また、図-4.5.2.35 にV cr 時のフラッターモードを示す。フラッター発振風速およびフラッターモードも他社結果とほぼ対応している。

以上のことから、他社モデルと遊動円木振動数がほぼ等しくなるように、モデルのハンガー間隔を変更すると、フラッター計算結果が一致していると判断できる。

なお、基本モデル（ハンガー長が短いモデル）でフラッター風速が低下した理由は、このモデルの遊動円木振動数（f＝0.108Hz）がフラッター振動数（f＝0.109Hz）に近接したため影響をおよぼしたものと考えられる。



(a) V－δ図



(b) V－f図

図-4.5.2.34　フラッター解析結果（ハンガー撤去モデル）

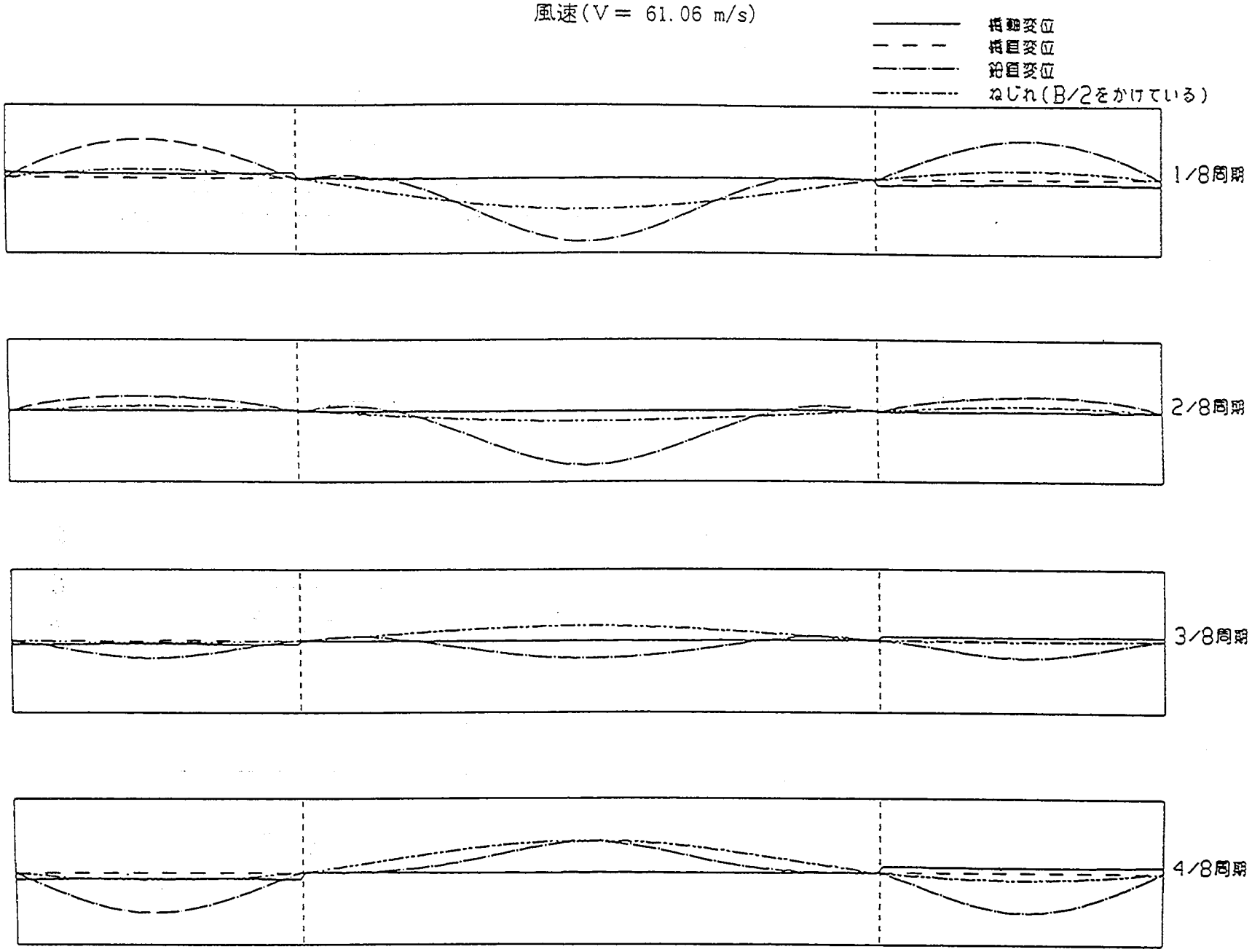


図-4.5.2.35　フラッターモード図（ハンガー撤去モデル）

4.5.3 まとめ

解析ツールとしてのフラッター解析プログラムの比較を行うために、中央支間 2500m の吊橋を想定し、その諸元を統一した吊橋に対し各社解析モデルの作成を行った上、固有値解析およびフラッター解析を実施した。

各社で実施した固有値解析結果の主要なモードの振動数を表－4.5.3.1 に示す。比較のために建設省土木研究所にて実施した結果との比を同表に示す。各社での固有値解析結果は、遊動円木モードを除いて±2%の範囲で非常によく一致している。

各社で実施したフラッター解析結果を表－4.5.3.2 に示す。平板翼空気力を用いた解析では、フラッター解析手法に直接法とモード組み合わせ法の違いはあるものの、各社での解析結果はほぼ一致している。

測定空気力（桁高 7m の 1 箱桁）を用いた場合の解析結果も、実施した機関の間でほぼ一致していることが確認できた。

一部ハンガー等のモデル化によっては、フラッター発生モードに微妙な影響が出る場合があることが明らかになった。この点については、今後検討していく予定である。

表－4.5.3.1　固有値解析結果

モード形状	建設省土木研究所		本州四国連絡橋公団		石川島播磨重工業		川崎重工業		川田工業		住友重機械工業		日本鋼管		日立造船		三井造船		三菱重工業	
	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比	振動数	比
桁水平曲げ　対称１次	0.0311	1.00	0.0314	1.01	0.0313	1.01	0.0311	1.00	0.0314	1.01	0.0309	0.99	0.0311	1.00	0.0314	1.01	0.0314	1.01	0.0315	1.01
桁鉛直曲げ　対称１次	0.0524	1.00	0.0537	1.02	0.0524	1.00	0.0524	1.00	0.0537	1.02	0.0514	0.98	0.0525	1.00	0.0537	1.02	0.0537	1.02	0.0522	1.00
桁鉛直曲げ逆対称１次	0.0572	1.00	0.0580	1.01	0.0586	1.02	0.0573	1.00	0.0580	1.01	0.0564	0.99	0.0573	1.00	0.0580	1.01	0.0580	1.01	0.0585	1.02
桁水平曲げ逆対称１次	0.0604	1.00	0.0604	1.00	0.0605	1.00	0.0604	1.00	0.0604	1.00	0.0605	1.00	0.0605	1.00	0.0604	1.00	0.0604	1.00	0.0598	0.99
桁鉛直曲げ逆対称１次	0.0685	1.00	0.0697	1.02	0.0686	1.00	0.0686	1.00	0.0697	1.02	0.0675	0.99	0.0688	1.00	0.0697	1.02	0.0697	1.02	0.0685	1.00
遊動円木	0.0868	1.00	0.0869	1.00	0.0959	1.10	0.0867	1.00	0.0869	1.00	0.0932	1.07	0.1021	1.18	0.0869	1.00	0.0869	1.00	0.0879	1.01
遊動円木	0.0872	1.00	0.0873	1.00	0.0972	1.11	0.0871	1.00	0.0873	1.00	0.0936	1.07	0.1024	1.17	0.0873	1.00	0.0873	1.00	0.0883	1.01
桁水平曲げ　対称２次	0.0980	1.00	0.0979	1.00	0.0981	1.00	0.0979	1.00	0.0979	1.00	0.0980	1.00	0.0981	1.00	0.0979	1.00	0.0979	1.00	0.0967	0.99
桁鉛直曲げ　対称２次	0.0994	1.00	0.0997	1.00	0.0997	1.00	0.0996	1.00	0.0997	1.00	0.0999	1.01	0.0992	1.00	0.0997	1.00	0.0997	1.00	0.1002	1.01
桁鉛直曲げ逆対称２次	0.1362	1.00	0.1366	1.00	0.1362	1.00	0.1365	1.00	0.1365	1.00	0.1374	1.01	0.1377	1.01	0.1365	1.00	0.1365	1.00	0.1381	1.01
桁ねじれ　対称１次	0.1593	1.00	0.1602	1.01	0.1607	1.01	0.1597	1.00	0.1604	1.01	0.1569	0.98	0.1595	1.00	0.1602	1.01	0.1604	1.01	0.1588	1.00
桁ねじれ逆対称１次	0.2292	1.00	0.2311	1.01	0.2298	1.00	0.2310	1.01	0.2313	1.01	0.2291	1.00	0.2302	1.00	0.2310	1.01	0.2313	1.01	0.2310	1.01

表－4.5.3.2　フラッター解析結果

	解析手法	フラッター風速 平板翼空気力	フラッター風速 測定空気力
建設省土木研究所	モード法(50 次)	60 m/s	
本州四国連絡橋公団	モード法(50 次)	60 m/s	
石川島播磨重工業	モード法(50 次)	61 m/s	
川崎重工業	モード法(50 次)	61.3 m/s	
川田工業	直接法	60 m/s	57 m/s
住友重機械工業	直接法	60 m/s	
日本鋼管	モード法(100 次)	60 m/s	56 m/s
日立造船	モード法(50 次)	60 m/s	
三井造船	モード法(40 次)	59.6 m/s	
三菱重工業	モード法(50 次)	60.8 m/s (58.8 m/s)	

(　)：ハンガー間隔を 28m とした場合の解析結果

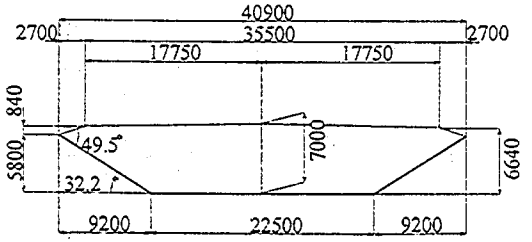
4．6　開発された技術の一覧

技術	名　　称
空力特性に関する技術	フェアリングの最適化及び中央遮風壁の設置によって耐フラッター性能を改良した一箱桁断面
	開口部及び付属物による桁の耐風安定化対策
	主桁中央部にオープングレーチングを施した一箱桁
	鉛直および水平スタビライザーを活用した二箱桁
	センターバリア、ガイドベーン、アンダーバリアを施した開口部を有する箱桁
	導流板、鉛直スタビライザー付き（追い越し車線グレーチング）二箱桁
	多角形断面
	二箱桁と一箱桁の併用形式（6 車線案 ＆ 4 車線案）
構造特性に関する技術	鉛直クロスステイの最適設置位置
	水平ステイシステムと対角ステイシステムの組合せ効果
空力特性と構造特性を併用した技術	３本ケーブルに斜めステイを付加したケーブルシステムとフェアリング、上下面バリアを工夫した一箱桁断面との併用方式
	中央遮風壁を設置した一箱桁断面及び新ケーブルシステムとの併用
	４本ケーブルとクロスハンガーによる構造特性向上策とダブルバリアーによる空力特性向上策を併用させた二箱桁
	二箱桁／一箱桁併用形式と斜張形式を併用したケーブルシステムの組合せ

フェアリングの最適化及び中央遮風壁の設置によって耐フラッター性能を改良した一箱桁断面
1-box girder with modified fairing and center wind shield

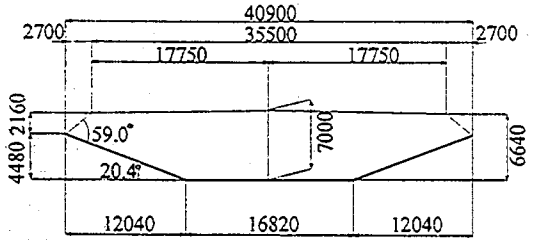
三菱重工業

概　要



既往提案断面

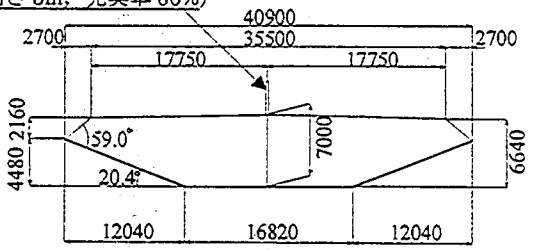
フェアリング形状を最適化



改良断面①

中央遮風壁を設置

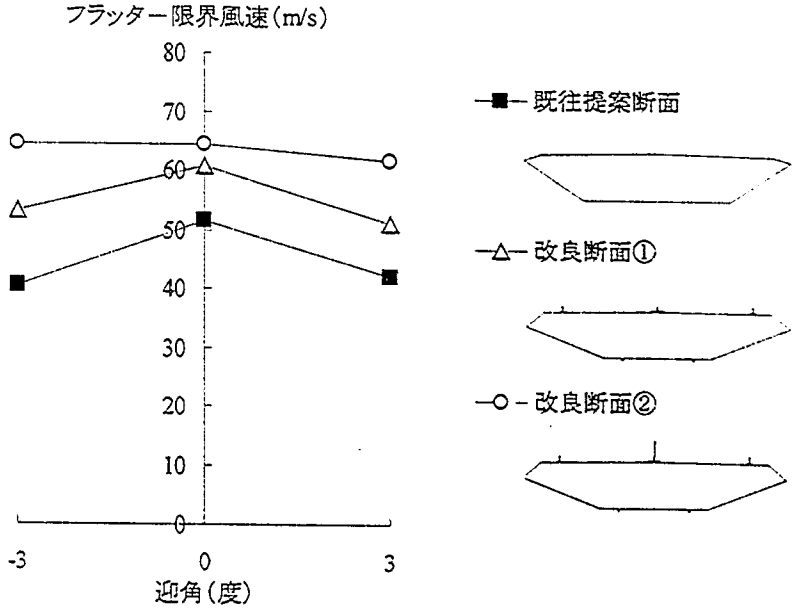
中央遮風壁（高さ 3m，充実率 66%）



改良断面②

耐フラッター特性

・フラッター限界風速（ばね支持試験）



（括弧内の数値は既往提案断面から向上した割合を示す）

		桁断面形状		
		既往提案断面	改良断面①	改良断面②
迎角	+3°	42 m/s	51.2 m/s (21.9%)	61.7 m/s (46.9%)
	0°	51.5 m/s	60.6 m/s (21.7%)	64.3 m/s (30.5%)
	-3°	40.3 m/s	53.2 m/s (30.7%)	64.2 m/s (56.9%)

静的空気力特性

模型名	既往提案断面	改良断面①	改良断面②
風速	16.0 m / s	20.0 m / s	20.0 m / s
外郭面積	0.1672 m^2	0.5559 m^2	0.5559 m^2
投影面積	0.1564 m^2	0.5041 m^2	0.5041 m^2
充実率	93.6 %	90.7%	90.7%
模型幅	0.5467	2.70	2.70
$(C_D)_{\alpha=0}$	0.631	0.599	0.836
$(dC_L/d\alpha)_{\alpha=0}$	6.817 (1/rad)	4.939 (1/rad)	3.270 (1/rad)
$(dC_M/d\alpha)_{\alpha=0}$	1.296 (1/rad)	1.201 (1/rad)	1.397 (1/rad)

・改良断面①では既往提案断面に比較して揚力傾斜が低減される

→ 鉛直ガストには有利な特性

・改良断面②では抗力が増加し，揚力傾斜が迎角によって変化する

特徴及びコメント

・フェアリング形状を最適化することによって，既往提案断面のフラッター限界風速を大幅に上回ることが可能。

・さらに中央遮風壁を設置することによっても，フラッター限界風速の向上が望める。

・フェアリング形状を最適化することによって，静的空気力特性も改善される。

・渦励振については未検討

耐風性能を検討した条件等

・ばね支持応答試験条件

項目	単位 (模型値)	実橋	小型模型	大型模型
縮尺	−	−	1/200	1/40
全弦長	m	40.9	0.205	1.023
桁重量	tf/m (kgf/model)	35.0	0.875*	59.063**
桁極慣性モーメント	$tf \cdot s^2$ ($kgf \cdot m \cdot s^2$/model)	690	4.25×10^{-4}	0.734**
振動数 (たわみ)	Hz	0.0537	1.78	0.601
振動数 (ねじれ)	Hz	0.1604	5.27	1.757
振動数比	−	2.987	2.97	2.923
構造減衰 (対数減衰率)	−	0.02	0.02	0.02
風速倍率 (たわみ)	−	−	6.03	3.57
風速倍率 (ねじれ)	−	−	6.09	3.65

：模型長さ 1m、**：模型長さ 2.7m

・既往提案断面：縮尺 1/200 の小型模型で試験を実施

・改良断面①②：縮尺 1/40 の大型模型で試験を実施

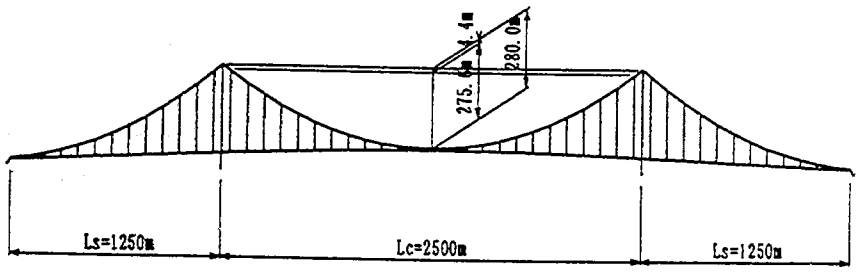
開口部及び付属物による桁の耐風安定化対策

Modified 1-box girder with opening and fairings

住友重機械工業

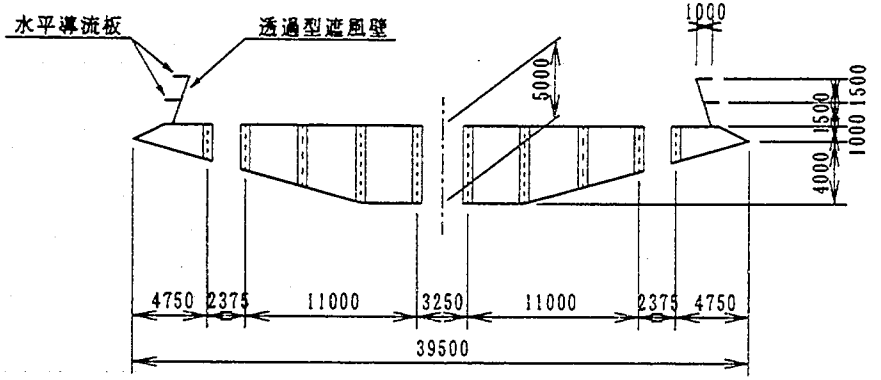
概　要

全体図



構　造　形　式	３径間２ヒンジ吊橋
ケーブル支間長	1,250 m＋2,500 m＋1,250 m
サ　グ　比	１／９
桁　形　状	開口部を有した箱桁 （桁高 5m）

桁断面形状



特徴・コメント

・桁高 5m の箱桁案に、開口部を設置（路肩部と中央分離帯部）することにより負迎角の耐フラッター性が向上。

・センターバリヤ、透過型遮風壁に水平導流板を設置することにより正迎角の安定性が改善。

・上記２者の組合せにより、桁の空力対策のみで３迎角ともフラッター風速 75m/s 以上を実現。

耐風性能

・ばね支持試験結果

迎　角	－3°	0°	＋3°
フラッター発振風速	80.5m/s	87.0m/s	77.2m/s

・フラッター解析結果

88.4 m/s（有風時静的変形考慮無し）

79.1 m/s（有風時静的変形考慮）

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	支間長	1,250m+2,500m+1,250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	35.5 m
	有効断面積	1.2 m ^{2}/Br
	許容応力度	100 Kg/mm ^{2}
ハンガー	ハンガー間隔	100 m
	断面積	0.024 m ^{2}/格点
補剛桁	断面積	1.3 m ^{2}/Br
	鉛直曲げ剛性	12.0 m ^{4}/Br
	水平曲げ剛性	160.0 m ^{4}/Br
	ねじれ剛性	26.0 m ^{4}/Br
	極慣性	336.7 t・s ^{2}/m/Br
死荷重	吊構造部	24.0 t/m/Br
	ケーブル	11.0 t/m/Br
	合計	35.0 t/m/Br
主塔	ケーブル理論頂	TP +380.0 m
境界条件	桁端部支持条件	鉛直方向、橋軸直角方向、橋軸回りの回転を拘束

フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	直接法
空気密度	0.125 kgf・s^2/m^4
有風時静的変形	考慮 考慮しない
構造減衰	δ=0　（解析時） δ=0.02（フラッター風速算出時）
空気力係数	主桁

空気力		鉛直	ねじれ	水平
	揚力	○	○	△
	モーメント	○	○	△
	抗力	○	○	△

○：非定常空気力、△：準定常空気力

ケーブル　準定常抗力、揚力

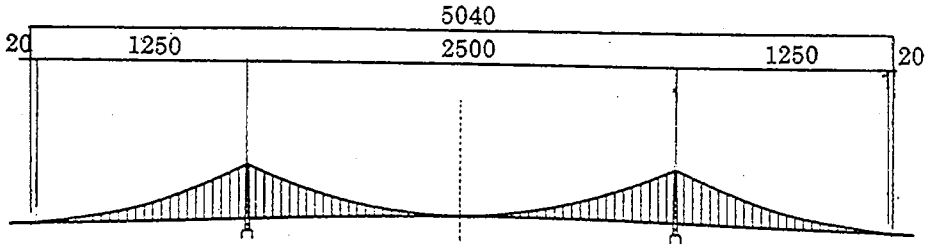
非定常空気力	実測値
準定常空気力	主　桁　CD=0.75、An=7.0 m^2/m ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m^2/m
その他	桁幅　B=41 m

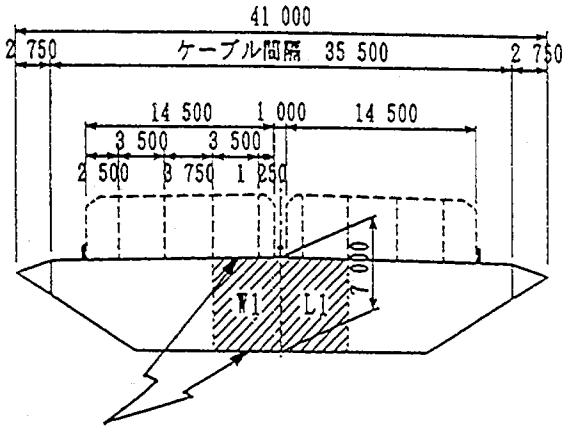
主桁中央部にオープングレーチングを施した一箱桁
1-box girder with open gratings

川田工業

概　要

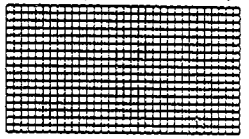
全体図





桁断面中央部（中央帯＋上下１車線）
オープングレーチング化

オープングレーチング部



充実率φ＝50%

構造形式	３径間２ヒンジ吊橋
ケーブル支間長	1250m+2500m+1250m
サグ比	1／9

特徴・コメント

●桁断面中央部(中央帯＋上下１車線)にオープングレーチング化を施した形式.
●オープングレーチング化により渦励振特性向上
（α=0°,−3°）
●充実率φ＝50%程度であれば，完全開口(φ=0%)の場合と同程度のフラッターの発現風速となる.

耐風性能

●渦励振最大振幅(ばね支持試験(一様流, δ=0.02))

迎角	たわみ渦励振	ねじれ渦励振
−3°	発現せず	発現せず
0°	〃	〃
+3°	〃	2.1deg.

●フラッター発現風速(ばね支持試験(一様流, δ=0.02))

迎角	フラッター発現風速
−3°	92.9 m/s
0°	81.4 m/s
+3°	48.8 m/s

耐風性能を検討した条件等

表　　解析モデルの諸条件

項目		構造諸元
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250 m+2500 m+1250 m
	サグ比	1/9
主ケーブル	中心間隔	35.5 m
	有効断面積	1.2 m^2/Br.
	ケーブル本数	2 本/Br.
	水平張力	98143 tf/Br.
	許容応力度	100 kgf/mm^2
補剛桁	断面積	1.3 m^2/Br.
	鉛直曲げ剛性	12.0 m^4/Br.
	水平曲げ剛性	160 m^4/Br.
	ねじれ剛性	26 m^4/Br.
	極慣性モーメント	336.7 $tf \cdot s^2$/Br.
死荷重	桁	24 tf/m/Br.
	ケーブル	11 tf/m/Br.
	合計	35 tf/m/Br.
主塔	塔高	370.0 m
桁幅（解析に用いた代表幅）		41 m

表　　ばね支持実験条件（縮尺 1/71）

		実橋諸元	模型値
重量		35.0 tf/m/Br.	11.25 kgf/model
極慣性モーメント		690 $tf \cdot s^2 \cdot m$/m/Br.	0.0440 $kgf \cdot s^2 \cdot m$/model
振動数	たわみ	0.0537 Hz	1.235 Hz
	ねじれ	0.1604 Hz	3.237 Hz
振動数比		2.987	2.621
構造対数減衰率	たわみ	——	0.02
	ねじれ	——	0.02
風速倍率		——	3.585 注)

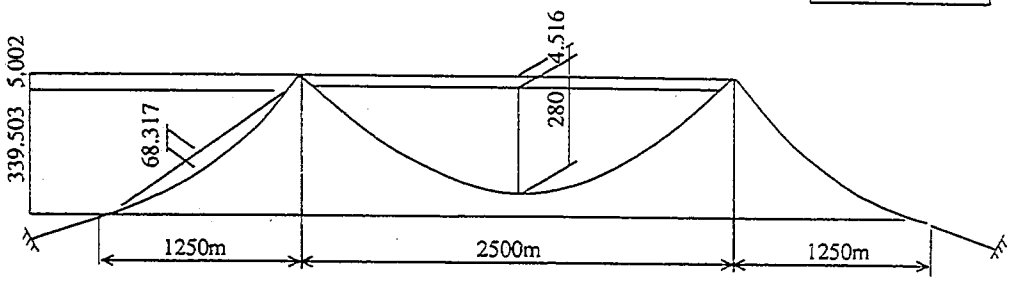
注）振動数比の差異をSelberg式で補正した場合の風速倍率

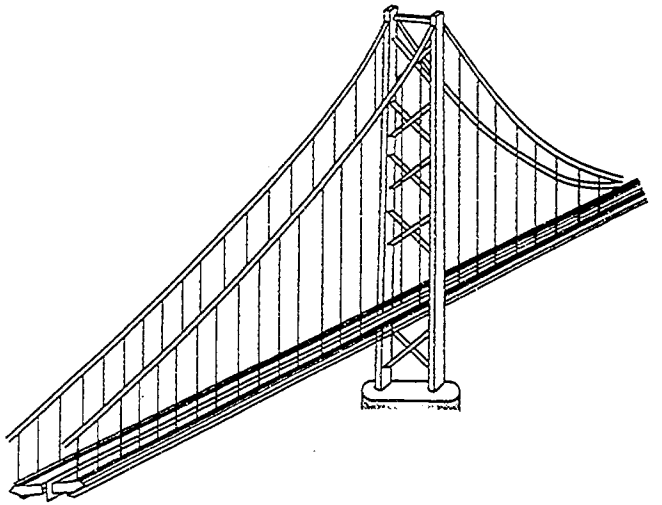
鉛直および水平スタビライザーを活用した二箱桁
2-box girder with vertical and horizontal stabilizers

日立造船

概　要

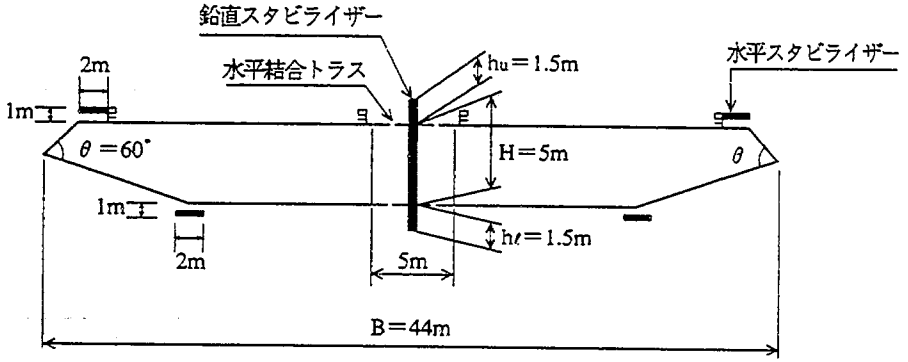
全体図





構　造　形　式：3径間2ヒンジ吊橋
ケーブル支間長：1250m＋2500m＋1250m
サ　グ　比：1／9
桁　形　式：鉛直および水平スタビライザーを活用した二箱桁（6車線）

桁断面形状



特徴・コメント

- 鉛直および水平スタビライザーの相乗効果で耐風性能を改善した二箱桁を採用している。
- 中央部開口幅を出来るだけ小さくし、ケーブル間隔、塔柱間隔を抑えている。
- ケーブル・ハンガー形式は実績のある従来形式を採用。

耐風性能

- フラッター発現風速（有風時変形を考慮した3次元マルチモード連成フラッター解析による）：78m/s（気流傾斜角0°）
- 鉛直たわみ・ねじれの渦励振は10m/s以下で発生するが中央開口部にグレーチングを設置すれば消滅する。あるいは10%の乱れにより消滅する。

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250m＋2500m＋1250m
	サグ比	1/9
主ケーブル	中心間隔	39m
	有効断面積	1.4m²/Br.
	ケーブル本数	2本/Br.
	ケーブル張力	66,100tf/本
	許容応力度	100kgf/mm²
ハンガー	断面積	0.014m²/格点
補剛桁	断面積	1.4m²/Br.
	鉛直曲げ剛性	6.5m⁴/Br.
	水平曲げ剛性	208.0m⁴/Br.
	単純ねじれ剛性	15.2m⁴/Br.
	曲げねじれ剛性	622.4m⁵/Br.
	極慣性モーメント	372.6tf·m·s²/m
死荷重	桁	25.4tf/m/Br.
	ケーブル	12.8tf/m/Br.
	合計	38.2tf/m/Br.
主塔	塔高	408.75m
モデル化	桁境界条件	タワーリンクとウインド沓をモデル化
	桁重心位置	ボトムプレートより3.95m上
	桁節点間隔	50m
桁幅（解析に用いた代表幅）		44m

フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	モード組合せ法、最低20次モードを全て取り込む。 有風時固有振動モード（10m/s毎に更新）
空気密度	0.125kgf·s²/m⁴
有風時静的変形	非定常空気力は各節点の桁のねじれ変形を考慮
構造減衰	全モード $\delta = 0.02$
空気力係数	主　桁： 鉛直 / ねじれ / 水平 揚力 ○ ○ ○ モーメント ○ ○ ○ 抗力 ○ ○ ○ ○：非定常空気力 ケーブル： 準定常抗力、揚力 主　塔： 準定常抗力
非定常空気力係数	実測値（強制振動法）
準定常空気力	ケーブル： $C_D = 0.7$、$An = 1.1m^2/m/Br.$ 主　塔： $C_D = 1.4$

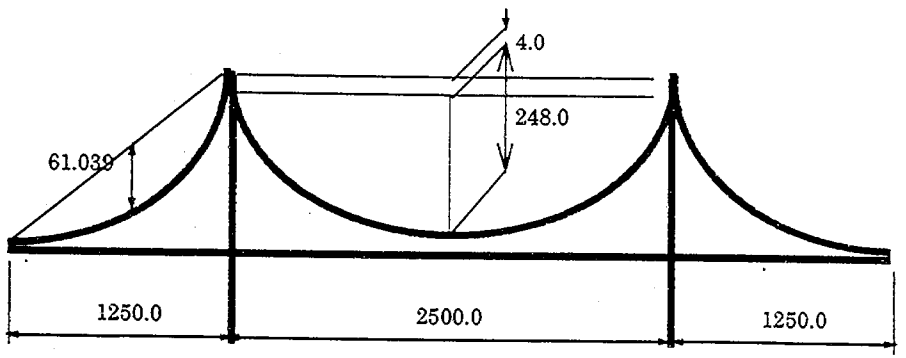
センターバリア、ガイドベーン、アンダーバリアを施した開口部を有する箱桁

Slotted girder with center-barrier, guide-vane and under-barrier

建設省土木研究所

概　要

全体図



構　造　形　式　　３径間２ヒンジ吊橋

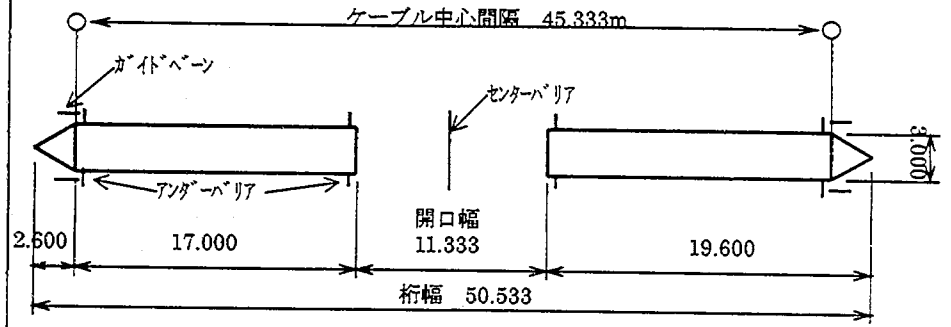
ケーブル支間長　　1250m+2500m+1250m

サ　グ　比　　１／１０

特徴・コメント

・従来のトラス桁、一箱桁に変わり、耐風性を向上させるための基本的な対策として、桁の中央部に約 20%の開口部を有する箱桁断面を補剛桁に採用。

桁断面形状



耐風性能

・フラッター発生風速（気流傾斜角０°）

８５m/s（実験値を用いたフラッター解析）

３５m/s（平板翼理論値を用いたフラッター解析）

耐風性能を検討した条件等

表　　解析モデルの諸条件

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250m+2500m+1250m
	サグ比	1／10
主ケーブル	中心間隔	45.333 m
	有効断面積	1.1 m^2/Br
	水平張力	79,670 tf/Br
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	0.0082 m^2/格点
補剛桁	断面積	1.54 m^4/Br
	鉛直曲げ剛性	2.17 m^4/Br
	水平曲げ剛性	288.2 m^4/Br
	ねじれ剛性	8.91 m^4/Br
死荷重	桁	25.70 tf/m/Br
	ケーブル	16.99 tf/m/Br
	合計	42.69 tf/m/Br
極慣性モーメント		1470 tfm·s^2/m
主塔	塔高	350 m
モデル化	桁境界条件	桁端の固定方法で対応
	桁重心位置	定着点と同じ
	桁節点間隔	125 m
桁幅（解析に用いた代表幅）		45.333m

表　　フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	モード組み合わせ法 無風時固有振動モードを使用 低次 50 モードを取り込む
空気密度	0.125 kgf·s^2/m^3
有風時静的変形	考慮
構造減衰	全モード　δ=0.02
空気力係数	主桁： 鉛直 ○ ○ ○ モーメント ○ ○ ○ 抗力 ○ ○ ○ （鉛直／ねじれ／水平） ○:非定常空気力　△:準定常空気力　×:考慮せず ケーブル：準定常抗力、揚力 主塔：考慮せず
非定常空気力係数	実験値（強制振動法、適用範囲=迎角±3°）
準定常空気力	ケーブル：　C_D=0.7　A_n=2.6m^2/m/Br

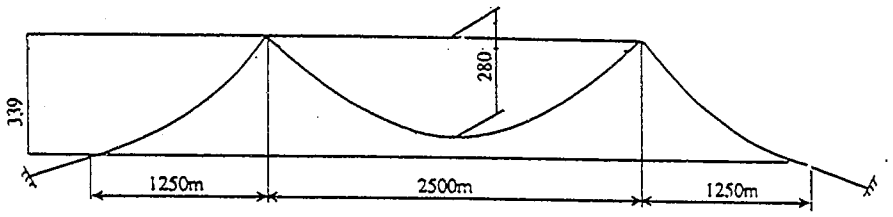
導流板、鉛直スタビライザー付き（追い越し車線グレーチング）二箱桁

2-box girder with open grating for inner lanes, guide vane and vertical stabilizer

本州四国連絡橋公団

概　要

全体図

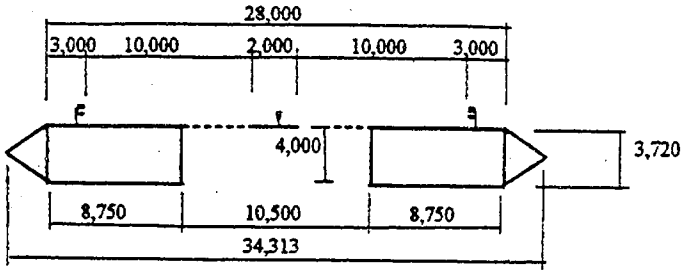


構　造　形　式：３径間２ヒンジ吊橋
ケーブル支間長：1250m＋2500m＋1250m
サ　　グ　　比：1／9

特徴・コメント

・４車線の追い越し車線をｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞとした二箱桁
・耐風特性を向上させるため、桁端に導流板、ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ部に鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰを設置。
・ｹｰﾌﾞﾙ、ﾊﾝｶﾞｰは従来形式

桁断面形状



耐風性能

・本桁形状の採用により、ゼルベルグの式と比較して２倍以上のフラッター発現風速となる（２次元風洞試験）。
・フラッター発現風速は（ゼルベルグの式により推定した結果を、風洞試験結果で補正）は、７０m/s 前後。
・気流傾斜角±３°の範囲では、迎角のフラッター発現風速への影響は小さい。比較的、迎角０°の特性が悪い。

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件

項目		構造諸量
形式	構造形式	３径間２ヒンジ吊橋
	ｹｰﾌﾞﾙ支間長	1,250m+2,500m+1,250m
	サグ比	1/9
主ケーブル	中心間隔	28m
	有効断面積	0.40m^2/cable
	ｹｰﾌﾞﾙ本数	２本/Br.
	ｹｰﾌﾞﾙ最大張力	約 38,000ton/cable
	許容応力度	100 kgf/mm^2
補剛桁	断面積	1.03m^2
	鉛直曲げ剛性	2.64 m^4
	水平曲げ剛性	14.08 m^4
	単純ねじれ剛性	5.30 m^4
	極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	1,699ton・m^2/m
死荷重	桁	17.32ton/m
	ｹｰﾌﾞﾙ	3.48ton/m/cable
	合計	24.28ton/m/Br.
主塔	塔高	370m
モデル化	桁境界条件	ﾘﾝｸのﾓﾃﾞﾙ化省略
	桁重心位置	ﾊﾝｶﾞｰ定着高さとﾚﾍﾞﾙ
	桁節点間隔	125m
桁幅（解析に用いた代表幅）		34.313m

フラッター発現風速推定手法

項目	解析条件他
解析手法	フラッター発現風速は、下記の手法により推定した。 ①解析モデルより固有振動数を求める。 ②ｾﾞﾙﾍﾞﾙｸﾞの式によるﾌﾗｯﾀｰ発現風速推定値を求める。 ③②で求めた値を、２次元バネ支持風洞試験結果により補正し、フラッター発現風　速の推定値とする。
空気密度	0.125 kgf・s^2/m^3

固有振動数

モード	固有振動数
鉛直たわみ対称１次	0.0540 Hz
ねじれ対称１次	0.1375 Hz

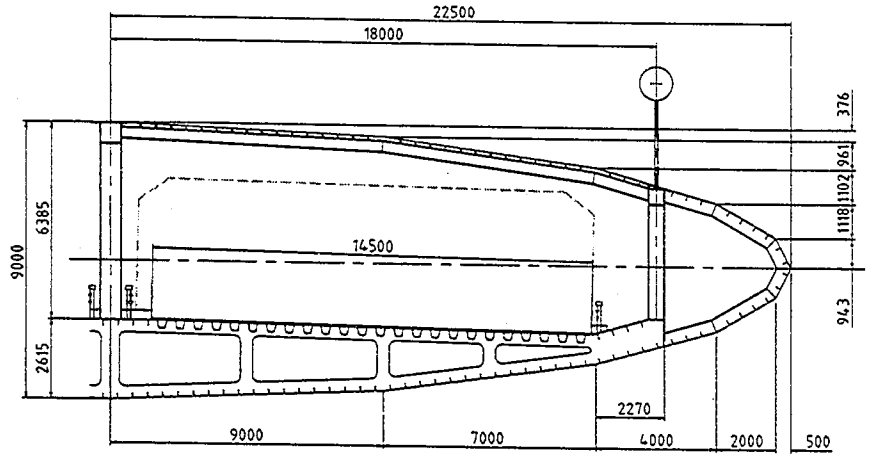
多角形断面
Polygonal cross section

三井造船

概　要

全体図

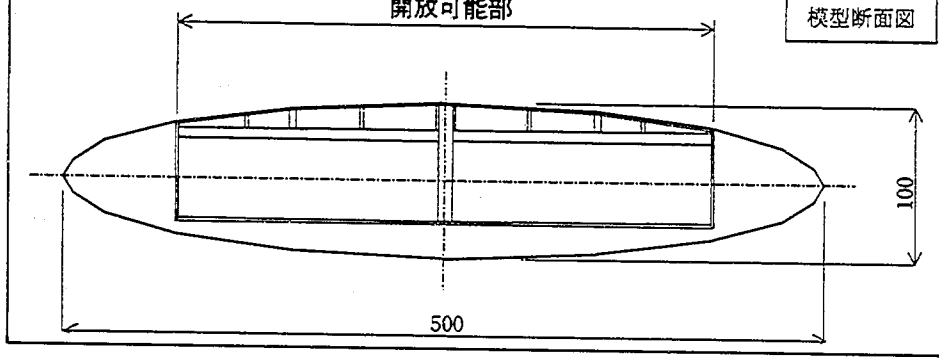
実橋想定図



桁断面形状

開放可能部

模型断面図



特徴・コメント

・従来にない断面をあえて模索する中で、楕円断面の空力特性に期待し、実橋を想定した多角形断面（20 角形）を採用。
・強風時の交通遮断が少ない桁内通行。
・特性が良好な場合、天井部（上面）の開口による採光・排気の可能性まで検討を展開。
・抗力係数が小さく風荷重に対し有利。（C_D=0.15　at 20m/s）
・桁高が高いため偏平断面より高い剛性が確保でき、耐風性の向上が期待できる。
・シェル構造などでの剛性増・軽量化等も期待できるが、これらの検討は今後の課題。

耐風性能

ばね支持試験：一様流、迎角 α=0.0deg、 δ=0.02
・フラッター発現風速
　　κ=0.99　（基本形）
　　ハードフラッター
・渦励振
　　発生確認されず（迎角 α=0.0deg）

耐風性能を検討した条件等

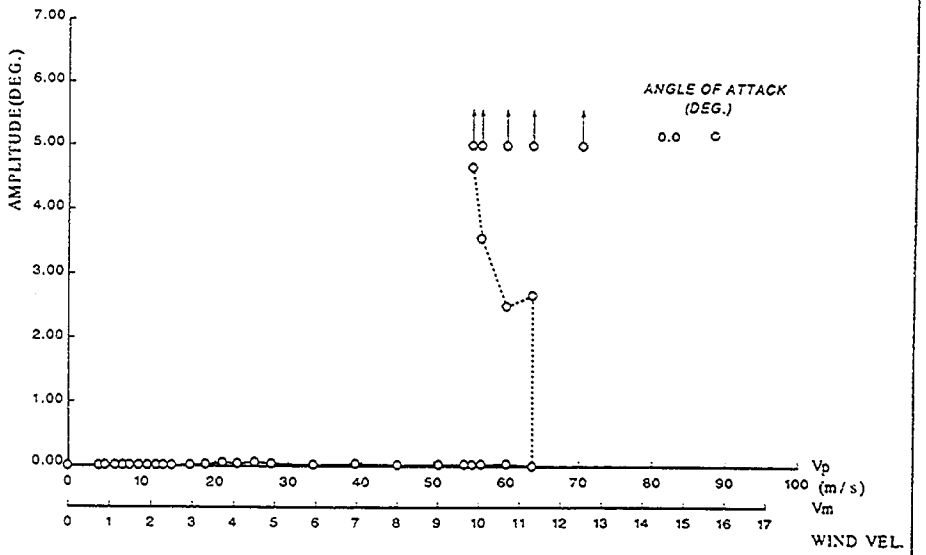
表　想定振動諸元（多角形断面（P-15））

		実橋想定値 B/D=5	模型所要値	実験値
呼　　称			P-15	P-15
縮　　尺		−	1/90	1/90
全幅(代表幅) B		45.0m	0.500m	0.500m
桁高(代表高) D		9.0m	0.100m	0.100m
重　　量		40.00 tf/m	4.938 kgf/m	5.074 kgf/m
極慣性モーメント		10000 tfm^2/m	0.0155 $kgfs^2m/m$	0.0164$kgfs^2m/m$
振動数	たわみ	0.050 Hz	0.900 Hz	1.051 Hz
	ねじれ	0.150 Hz	2.700 Hz	2.404 Hz
振動数比		3.00	3.00	2.29
対数減衰率	たわみ	0.02	0.02	0.019
	ねじれ	0.02	0.02	0.020
風速倍率	たわみ	−	5.0	4.28
	ねじれ	−	5.0	5.62

注 (1). 本諸元は明石海峡大橋2BOX案検討時を参考に設定した値である。（6車線を想定）

V-A 特性

V-Aθ 特性図（一様流：α=0°）



フラッター解析

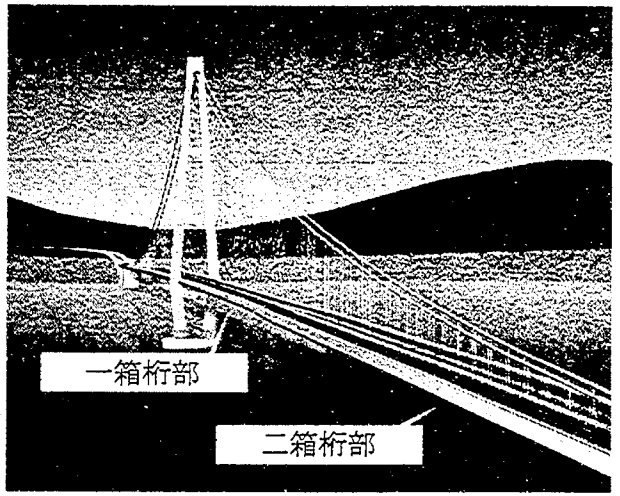
・フラッター解析は、詳細検討をするに値する良好な耐風特性を得るに至らず未実施

二箱桁と一箱桁の併用形式（6車線案 & 4車線案）
Girder-system composed of 2-box and 1-box girder (6-lane type & 4-lane type)

川崎重工業

概　要

全体図



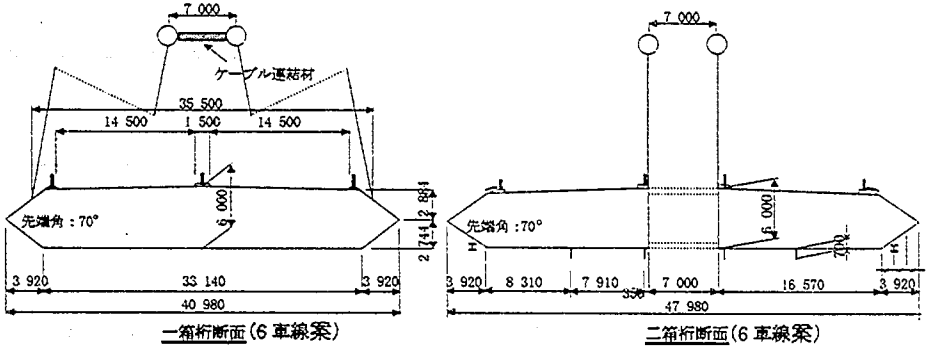
二箱桁区間
主径間側：
中央部 Lc/2 区間
側径間側：
橋端部 Ls/2 区間

構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
ケーブル支間	1250m+2500m+1250m
サグ比	1／9

特徴・コメント

・主径間中央に二箱桁を配置し耐風性の向上を図る一方、塔付き部には一箱桁を適用し鋼重の増加を抑制。
・ケーブルは二箱桁の中央開口幅に合わせて配置し、一箱桁部の傾斜ハンガーによるねじれ剛性の上昇を期待。二箱桁部では鉛直ハンガーとして道路建築限界を確保。
・二箱桁断面に対しては、静的な空力モーメント特性の改善と、フラッター安定性の向上のため、フェアリング下面への検査車レールと、下フランジへの鉛直プレートを設置。
（フラッター限界風速は20%以上上昇：6車線断面）
・4車線案も、6車線案と同等のフラッター安定性を確保

桁断面形状



耐風性能

・フラッター発現風速（フラッター解析による）
6車線案：約 90m/s（気流傾斜角 0°）
4車線案：約 90m/s（気流傾斜角 0°）
・渦励振最大振幅（6車線案：バネ支持試験[一様流，δ=0.02]）

迎角	たわみ	ねじれ
+3°	発現せず	0.3 deg.
0°	発現せず	0.1 deg. 以下
-3°	発現せず	0.6 deg.

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件（6 車線案）

項　目		構造諸量
形　式	構造形式	3 径間 2 ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250m+2500m+1250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	7.0 m
	有効断面積	1.370 m^2/Br.
	ケーブル本数	2 本/Br.
	死荷重張力	120,760 tf/Br.
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	9.34×10^{-4} m^2/m/Br.
補剛桁	断面積	1.516 (1.280) m^2/Br.
	鉛直曲げ剛性	9.660 (9.524) m^4/Br.
	水平曲げ剛性	263.3 (133.3) m^4/Br.
	ねじれ剛性	21.0 (19.8) m^4/Br.
	極慣性モーメント	5100 (2795) tf·s^2·m/m
死荷重	補剛桁	27.97 (23.54) tf/m/Br.
	ケーブル	12.15 tf/m/Br
	合　計	40.12 (35.69) tf/m/Br.
主　塔	塔　高	370 m
付加ステイ	ー	なし
モデル化	桁境界条件	ﾀﾜｰﾘﾝｸ，ｳｨﾝﾄﾞ沓をﾓﾃﾞﾙ化
	桁重心位置	ｹｰﾌﾞﾙ定着点より 3.0m 下
	桁節点間隔	98 m
桁幅（解析に用いた代表幅）		47.98 (40.98 m)

注）（　）内の数値は一箱桁部の諸量を示す

フラッター解析条件

項　目	解析条件
解析手法	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次 50 モードを取り込む
空気密度	0.12 $kgf\cdot s^2/m^4$
有風時静的変形	考慮（桁の回転変異による非定常空気力の変化を考慮）
構造減衰	全モード　$\delta=0.02$
空気力係数	主桁：

	鉛直	ねじれ	水平
揚　力	○	○	×
モーメント	○	○	×
抗　力	△	△	△

○：非定常空気力
△：準定常空気力

ケーブル：　準定常抗力，準定常揚力

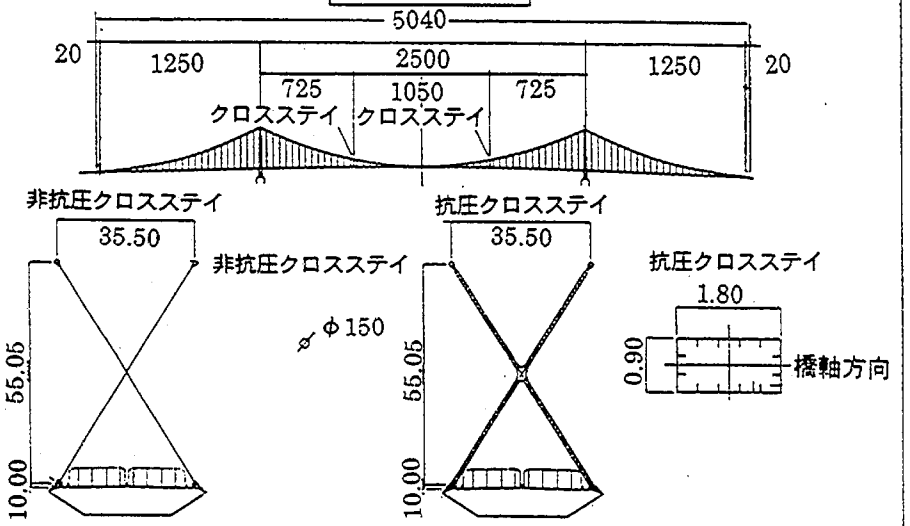
非定常空気力	実測値（自由振動法）
準定常空気力 （数値は 6 車線案）	主　　桁：実測三分力係数を使用 C_D=0.921，　A_n=6.00 m^2/m/Br （二箱桁，$\alpha=0°$）
	ケーブル：　C_D=0.7，　A_n=2.08 m^2/m/Br

鉛直クロスステイの最適設置位置
Optimum position of vertical cross stays

川田工業

概　要

全体図

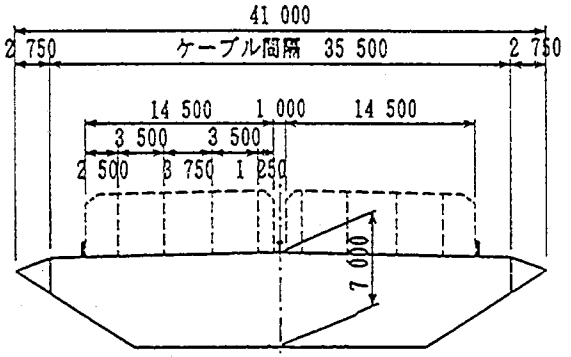


構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
ケーブル支間長	1250 m+ 2500 m+ 1250 m
サグ比	1／9

特徴・コメント

●抗圧（両効き）クロスステイ および
非抗圧（片効き）クロスステイを有する形式である.
●クロスステイ最適位置（測定空気力使用）
抗　圧：中央径間側のみ 0.3L(L:中央径間長)付近.
クロスステイ無しの基本形式に比べ,
2割程度フラッター発現風速上昇.
非抗圧：中央径間側 0.3L+側径間側 0.5Ls(Ls:側径間長)
付近. クロスステイ無しの基本形式に比べ,
1.5 割程度フラッター発現風速上昇.

桁断面形状



耐風性能

●フラッター発現風速（フラッター解析による）

抗　　圧：70m/s(中：0.3L) →　有風時変形考慮 68m/s

非 抗 圧：66m/s(中：0.3L＋側：0.5Ls)

基本形式：57m/s
(クロスステイなし)

耐風性能を検討した条件等

表　　解析モデルの諸条件

項　目		構造諸元
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250 m+2500 m+1250 m
	サグ比	1/9
主ケーブル	中心間隔	35.5 m
	有効断面積	1.2 m^2/Br.
	ケーブル本数	2 本/Br.
	水平張力	98143 tf/Br.
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	0.03 m^2/125m/Cable
補剛桁	断面積	1.3 m^2/Br.
	鉛直曲げ剛性	12.0 m^4/Br.
	水平曲げ剛性	160 m^4/Br.
	ねじれ剛性	26 m^4/Br.
	極慣性モーメント	336.7 $tf \cdot s^2$/Br.
死荷重	桁	24 tf/m/Br.
	ケーブル	11 tf/m/Br.
	合計	35 tf/m/Br.
主塔	塔高	370.0 m
付加ステイ	クロスステイ断面積	0.01 m^2/本
モデル化	桁境界条件	タワーリンクとウィンド沓のモデルには無し
	桁重心位置	ケーブル定着点
	桁節点間隔	125 m
桁幅（解析に用いた代表幅）		41 m

表　　フラッター解析条件一覧表

項目	KW1
解析手法	直接法
空気密度	0.125 $kgf \cdot s^2/m^4$
有風時静的変形	考慮なし および 考慮
構造減衰	$\delta = 0$　（解析） $\delta = 0.02$（フラッター風速算出用）
空気力係数	主桁 ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル　準定常抗力、揚力
非定常空気力	実測値
準定常空気力	主桁　$C_D = 0.75$, An = 7.0 m^2/m/Br. ｹｰﾌﾞﾙ　$C_D = 0.7$, An = 2×1.0 m^2/m/Br.
計算時の桁幅	桁幅　B = 41m

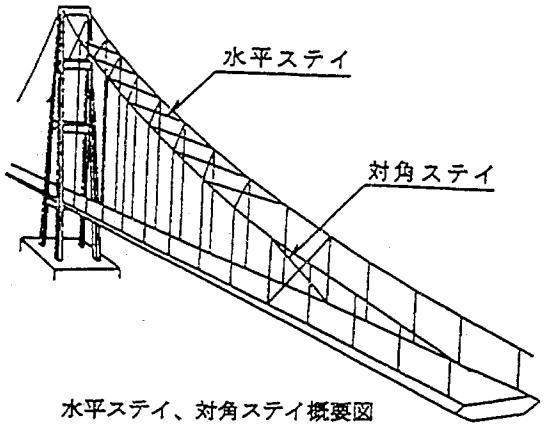
	鉛直	ねじれ	面外
揚力	○	○	×
モーメント	○	○	×
抗力	×	×	△

水平ステイシステムと対角ステイシステムの組合せ効果
Combination effects of horizontal stay system and cross stay system

住友重機械工業

概　要

全体図



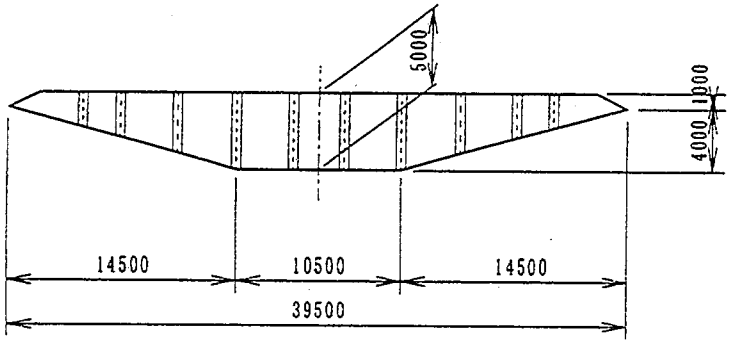
水平ステイ、対角ステイ概要図

構　造　形　式	3径間2ヒンジ吊橋
ケーブル支間長	1,250 m＋2,500 m＋1,250 m
サ　グ　比	1／9

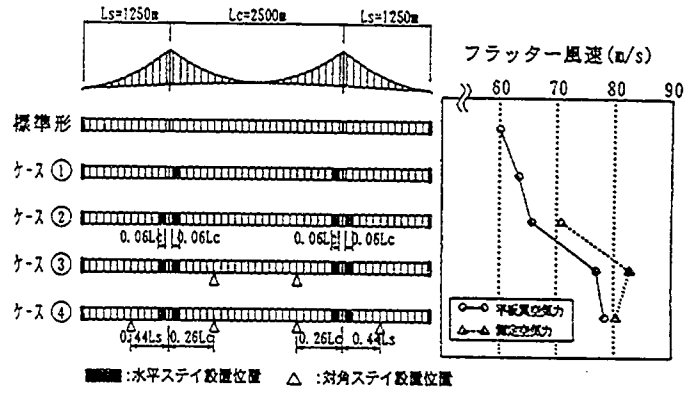
特徴・コメント

・桁断面の空力対策は施さず、ケーブルシステムによる構造対策のみにより耐風性能を改善。
・水平ステイシステム、対角ステイシステムの併用により、平板翼空気力、測定空気力を用いた解析ともにフラッター発振風速は最大約31%高くなる。
・水平ステイシステムの設置区間を大きくすると、その効果は高くなる。

桁断面形状



耐風性能



耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	支間長	1,250m+2,500m+1,250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	35.5 m
	有効断面積	1.2 m^2/Br
	許容応力度	100 Kg/mm^2
ハンガー	ハンガー間隔	100 m
	断面積	0.024 m^2/格点
補剛桁	断面積	1.3 m^2/Br
	鉛直曲げ剛性	12.0 m^4/Br
	水平曲げ剛性	160.0 m^4/Br
	ねじれ剛性	26.0 m^4/Br
	極慣性	336.7 $t \cdot s^2$/m/Br
死荷重	吊構造部	24.0 t/m/Br
	ケーブル	11.0 t/m/Br
	合計	35.0 t/m/Br
主塔	ケーブル理論頂	TP +380.0 m
境界条件	桁端部支持条件	鉛直方向、橋軸直角方向、橋軸回りの回転を拘束

フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	直接法
空気密度	0.125 $kgf \cdot s^2/m^4$
有風時静的変形	考慮しない
構造減衰	δ=0　（解析時） δ=0.02（フラッター風速算出時）
空気力係数	主桁

		鉛直	ねじれ	水平
空気力	揚力	○	○	△
	モーメント	○	○	△
	抗力	○	○	△

○：非定常空気力、△：準定常空気力

ケーブル　準定常抗力、揚力

非定常空気力	実測値 平板翼空気力
準定常空気力	主　桁　CD=0.75、An=7.0 m^2/m ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m^2/m
その他	桁幅　B=41 m

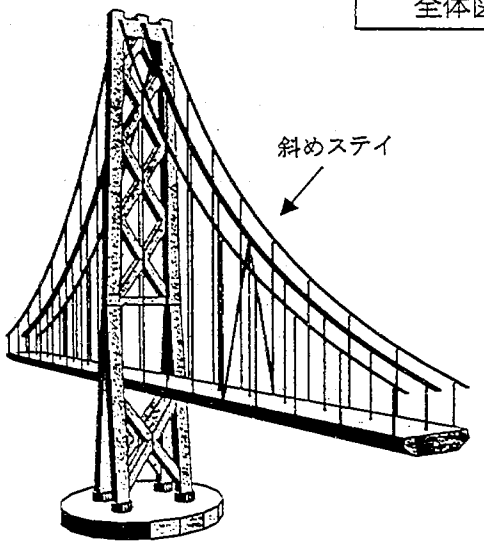
３本ケーブルに斜めステイを付加したケーブルシステムと フェアリング、上下面バリアを工夫した一箱桁断面との併用方式

Combination of three main cables with auxiliary diagonal stay cables and 1-box girder with modified fairing and center-barrier

日本鋼管

概　要

全体図



斜めステイ設置位置

中央径間側：L／４点

側径間側：中央

（合計４ヶ所）

構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
ケーブル支間長	1250m＋2500m＋1250m
サグ比	1／9
メインケーブル断面積比	1:2:1(センターが2)

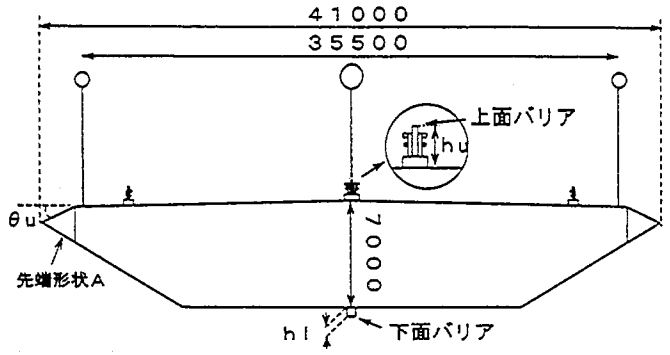
特徴・コメント

・３本ケーブル吊橋＋斜めステイ方式と改良１箱桁断面とを組み合わせた構造形式である。

・一箱桁断面は、上下面バリアの設置、桁先端フェアリング形状の変更により、フラッター発現風速２割向上。

・同じ断面を用いた２本ケーブル吊橋＋クロスステイ方式よりもフラッター発現風速は高い。

桁断面形状



hu= 1.5m

hl = 1.1m

θu= 32.3°

耐風性能

・フラッター発現風速（フラッター解析による）

８０m／ｓ（気流傾斜角０°）

・渦励振最大振幅（ばね支持試験（一様流、δ=0.02））

迎角	たわみ	ねじれ
－３°	発現せず	0.77deg.
０°	発現せず	発現せず
＋３°	発現せず	0.52deg.

耐風性能を検討した条件等

表　　解析モデルの諸条件

項　　目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250m+2500m+1250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	35．5m
	有効断面積	1．2m²／Br．
	ケーブル本数	3本／Br．
	水平張力	98143tf／Br
	許容応力度	100kgf／mm²
ハンガー	断面積	0．011m²／格点
補剛桁	断面積	1．3 m²／Br．
	鉛直曲げ剛性	12．0 m⁴／Br．
	水平曲げ剛性	160m⁴／Br．
	ねじれ剛性	26m⁴／Br．
	極慣性モーメント	336．7 tf·s²/m
死荷重	桁	24 tf／m／Br．
	ケーブル	11 tf／m／Br．
	合計	35 tf／m／Br．
主塔	塔高	370．0m
付加ステイ	斜めステイ断面積	0．011m²／格点（片効き）
モデル化	桁境界条件	タワーリンクとウィンド沓をモデル化
	桁重心位置	ケーブル定着点より3．5m下
	桁節点間隔	70m
桁幅（解析に用いた代表幅）		41 m

表　　フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	モード組み合わせ法。最低100次モードを全て取り込む。 有風時固有振動モード （風速80m／s時のモードを全風速に適用）
空気密度	0．125kgf·s²／m³
有風時静的変形	非定常空気力は各節点の桁のねじれ変形を考慮
構造減衰	全モード　δ＝0．02
空気力係数	主桁： 鉛直：揚力 ○、モーメント ○、抗力 × ねじれ：揚力 ○、モーメント ○、抗力 × 水平：揚力 ×、モーメント ×、抗力 △ ○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず ケーブル：準定常抗力、揚力　　主塔：考慮せず
非定常空気力係数	実測値（強制振動法）
準定常空気力	主桁：実測3分力係数を使用 C_D＝0．75（α＝0°） An＝7．0m²／m／Br． ケーブル： C_D＝0．7　An＝2．0m²／m／Br．

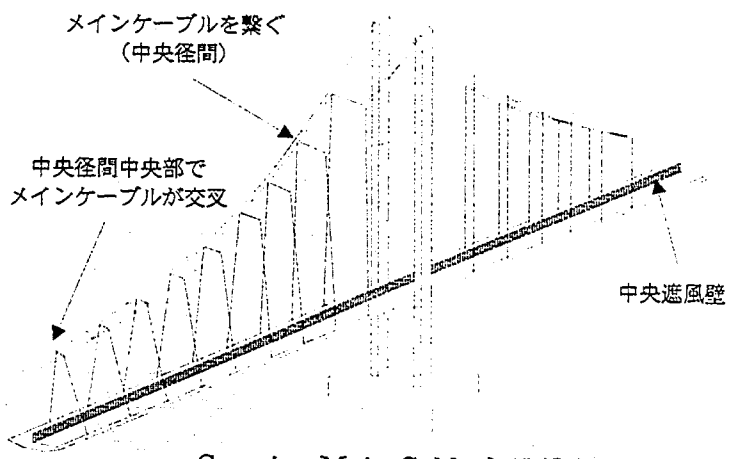
中央遮風壁を設置した一箱桁断面及び新ケーブルシステムとの併用

Combination of 1-box girder with center wind shield and new cable system

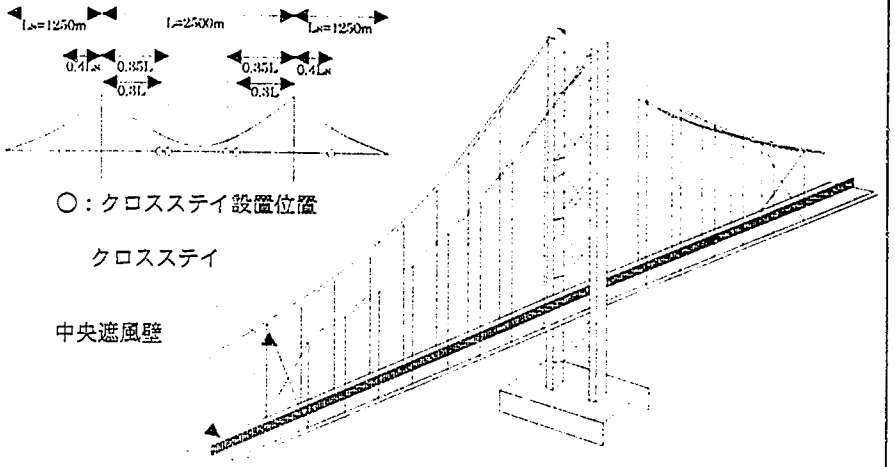
三菱重工業

概　要

全体図



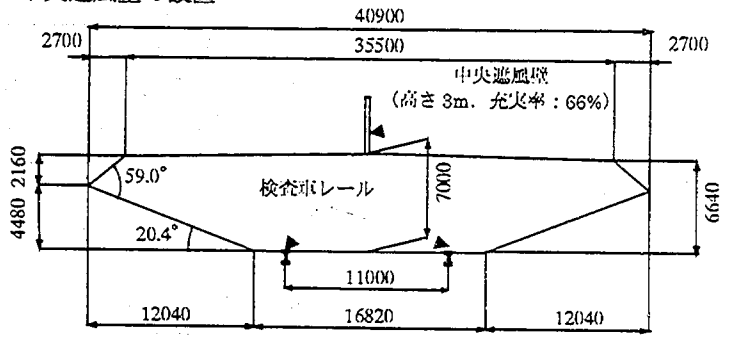
Crossing Main Cable システム



クロスステイ

桁断面形状

・フェアリング形状，検査車レール設置位置の最適化
・中央遮風壁の設置



特徴・コメント

・強風時における走行車両の安全性確保及び耐フラッター性能向上の両方に効果的な中央遮風壁を設置した一箱桁断面を採用。
・新形式として Crossing Main Cable システム，あるいはクロスステイ

耐風性能

・フラッター発現風速（3 次元フラッター解析による値；気流傾斜角 0°）：

	Crossing Main Cable システム	クロスステイ（6 箇所）
中央遮風壁あり	82.8m/s	96.3m/s
中央遮風壁なし	79.1m/s	89.7m/s

・渦励振については未検討

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸元

項目		構造諸量
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	支間長	1,250m+2,500m+1,250m
主ケーブル	サグ比	1/9
	ケーブル間隔	35.5 m
	有効断面積	2×0.6=1.2 m^2/Br.
	弾性係数	2.03×10^7 t/m^2
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	ハンガー間隔	28 m
	断面積	0.0056 m^2
	弾性係数	1.40×10^7 t/m^2
補剛桁	断面積	1.3 m^2/Br.
	鉛直曲げ剛性	12 m^4/Br.
	水平曲げ剛性	160 m^4/Br.
	ねじれ剛性	26 m^4/Br.
	極慣性	336.7 t·m·s^2/m/Br.
死荷重	吊構造部	24 t/m/Br.
	ケーブル	11 t/m/Br.
	合計	35 t/m/Br.
主塔	ケーブル理論頂	TP+380.0 m
	面内剛性	200 m^4/shaft
	面外剛性	100 m^4/shaft
	ねじれ剛性	35 m^4/shaft
モデル化 桁	境界条件	ｳｨﾝﾄﾞ沓，ﾀﾜｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化
	重心位置	定着点と同じ
モデル化 塔	水平材	なし
	塔柱間隔	45 m
桁幅（解析に用いた代表値）		41 m

フラッター解析条件

項目	解析条件
解析手法	モード組み合わせ法 低次50モードを取り込む 無風時固有モードを使用
空気密度	0.125kgf·s^2/m^4
有風時静的変形	考慮しない
構造減衰	全モード　δ=0.02
空気力係数	主桁： 揚力：○　○　× モーメント：○　○　× 抗力：×　×　△ （鉛直　ねじれ　水平） ○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず ケーブル： 準定常抗力，揚力
非定常空気力係数	実測値（強制振動法）
準定常空気力	主桁： C_D=0.75，　A_n=7.0 m^2/m/Br. ケーブル： C_D=0.75，　A_n=2.0 m^2/m/Br.

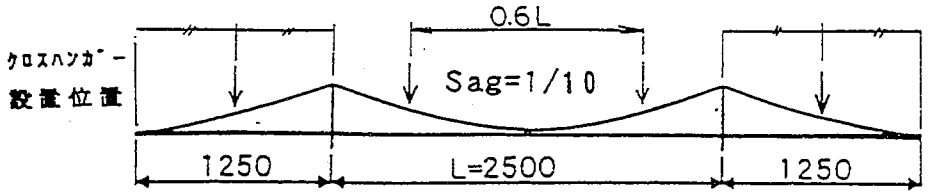
４本ケーブルとクロスハンガーによる構造特性向上策と ダブルバリアーによる空力特性向上策を併用させた二箱桁

2-box girder with both four main cables, cross hangers for structural improvement and double barriers for aerodynamic improvement

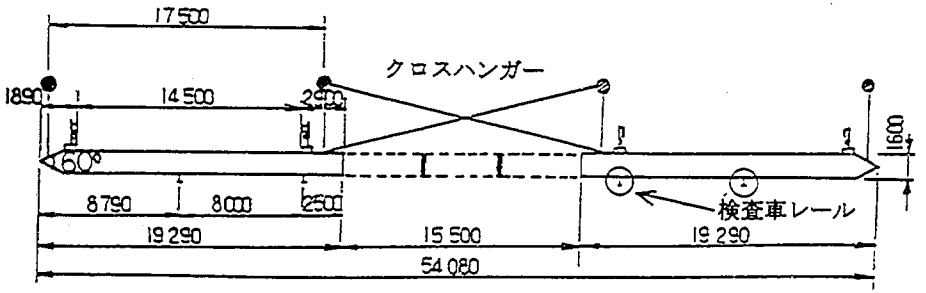
石川島播磨重工業

概　要

全体図



桁断面形状



特徴・コメント

・本橋は、フラッター風速 90m/s 以上(気流傾斜角０°)であり、耐風性に優れている。

・本橋の桁＋ケーブルの鋼重は、32.4tf/m であり、経済性にも優れている。

・本二箱桁断面は、ダブルバリアーの設置によって、正迎角域(頭上げ)のフラッター風速が飛躍的に向上した。
(ばね支持試験結果は、迎角+1°～+5°で 97m/s 以上)

・検査車レールの設置にあたっては、正迎角域での高いフラッター風速を維持しつつ、迎角０°のピッチングモーメント係数が正になるように左下図のように設置した。

・クロスハンガーは、ねじれ振動数が向上し、且つ、有風時のセンタースパン中央部の静的変形角が正となる最適位置（左上図）に設置した。

耐風性能

・フラッター風速（フラッター解析による）
９０m/s 以上（気流傾斜角０°）

耐風性能を検討した条件等

項　目		構造解析・モデルの条件
形式	構造形式	3径間2ヒンジ吊橋
	ケーブル支間長	1250 m + 2500 m + 1250 m
	桁支間長	1226 m + 2480 m + 1226 m
	サグ比	1/10
ケーブル	中心間隔	17.5 m
	断面積	0.385 m^2/cable
	ケーブル本数	4 本
	水平張力	25318.3 tf/cable
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	0.04625 m^2/格点
補剛桁	断面積	0.516 m^2/deck
	鉛直曲げ剛性	0.301 m^2/deck
	水平曲げ剛性	11.39 m^4/deck
	ねじれ剛性	0.7695 m^4/deck
死荷重	桁+横梁	18.34 tf/m/Br.
	ケーブル	14.13 tf/m/Br.
	合計	32.49 tf/m/Br.
桁極慣性モーメント		163.7 tf·m^2/m/deck
主塔	塔高	342.5 m（ケーブル理論頂）
クロスハンガー	断面積	0.014 m^2
モデル化	桁境界条件	タワーリンクとウインド沓をモデル化
	桁重心位置	ケーブル定着点より0.8m下
	桁節点間隔	125m
桁幅（解析に用いた代表幅）		19.29 m

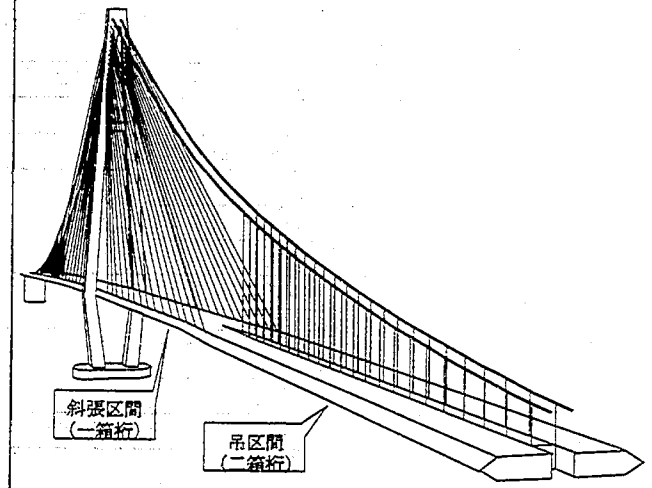
項目	フラッター解析条件
解析手法	モード組み合わせ法 有風時固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む
空気密度	0.120 $kgf·s^2/m^4$
有風時静的変形	考慮
構造減衰	全モード　δ=0.02
空気力係数	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力　○／○／△ モーメント　○／○／△ 抗力　○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力
非定常空気力	実測値（強制加振法）
準定常空気力	主桁：CD=1.684(迎角 0°)、An=2.626 m^2/m ケーブル：CD=0.7、An=4×0.783 m^2/m/Br. ハンガー：CD=0.7、An=1.25 m^2/m/格点(部材軸方向)

二箱桁／一箱桁併用形式と斜張形式を併用したケーブルシステムの組合せ
Combination of 2-box and 1-box combined girder and stay-cable

川崎重工業

概　要

全体図



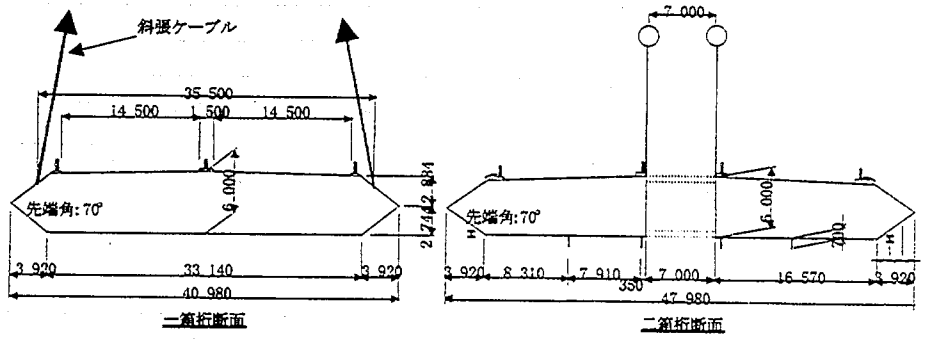
吊区間（二箱桁部）
主径間側：
中央部 Lc/2 区間
側径間側：
橋端部 Ls/2 区間

構造形式	3径間連続斜張吊橋
ケーブル支間	1250m+2500m+1250m
サグ比	1／9

特徴・コメント

・主径間中央に二箱桁を配置し耐風性の向上を図る一方、塔付き部には一箱桁を適用し鋼重の増加を抑制。
・二箱桁部は吊区間とし、ケーブルを開口幅に合わせ配置。
・一箱桁部を斜張区間とし、風荷重によるねじれ変形を低減。
・フラッタ限界風速は、二箱桁／一箱桁併用吊橋とほぼ同等。
・ケーブル重量（張力）の低減と、アンカレイジ規模の縮小による工費低減の可能性。
・ケーブル架設に平行して斜張区間の張出架設を行うことにより、架設工期短縮の可能性。

桁断面形状



耐風性能

・フラッター発現風速（フラッター解析による）
85m/s 以上（気流傾斜角 0°）
・渦励振最大振幅（バネ支持試験[一様流，δ=0.02]

迎角	たわみ	ねじれ
+3°	発現せず	0.5 deg.
0°	発現せず	0.1 deg. 以下
-3°	発現せず	1.0 deg.

耐風性能を検討した条件等

解析モデルの諸条件

項　目		構造諸量
形　式	構造形式	3径間連続斜張吊橋
	ケーブル支間長	1250m+2500m+1250m
	サグ比	1／9
主ケーブル	中心間隔	7.0 m
	有効断面積	0.950 m^2/Br.
	ケーブル本数	2 本/Br.
	死荷重張力	85,980 tf/Br.
	許容応力度	100 kgf/mm^2
ハンガー	断面積	9.34×10^{-4} m^2/m/Br.
斜張ケーブル	断面積	$1.02\sim2.58\times10^{-3}$ m^2/m/Br.
補剛桁	断面積	1.516 (1.776) m^2/Br.
	鉛直曲げ剛性	9.660 (13.278) m^4/Br.
	水平曲げ剛性	263.3 (183.2) m^4/Br.
	ねじれ剛性	21.0 (31.0) m^4/Br.
	極慣性モーメント	5100 (3218) tf·s^2·m/m
死荷重	補剛桁	27.97 (30.75) tf/m/Br.
	ケーブル	8.85 (7.45) tf/m/Br
	合　計	36.82 (38.20) tf/m/Br.
主　塔	塔　高	370 m
モデル化	桁境界条件	ﾀﾜｰﾘﾝｸ，ｳｨﾝﾄﾞ沓をﾓﾃﾞﾙ化
	桁重心位置	ｹｰﾌﾞﾙ定着点より 3.0m 下
	桁節点間隔	98 m（二箱／一箱境界部は密に配置）
桁幅（解析に用いた代表幅）		47.98 m (40.98m)

注）（ ）内の数値は一箱桁部の諸量を示す

フラッター解析条件

項　目	解析条件
解析手法	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次 50 モードを取り込む
空気密度	0.12 $kgf\cdot s^2/m^4$
有風時静的変形	考慮（桁の回転変異による非定常空気力の変化を考慮）
構造減衰	全モード　$\delta=0.02$
空気力係数	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚　力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗　力：△／△／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：　準定常抗力，準定常揚力 斜張ケーブル：　考慮せず
非定常空気力	実測値（自由振動法）
準定常空気力	主　　桁：実測三分力係数を使用 C_D=0.921，　A_n=6.00 m^2/m/Br （二箱桁，$\alpha=0°$）
	ケーブル：　C_D=0.7，　A_n=1.74 m^2/m/Br

5．あとがき

超長大橋では、耐風安定性がその設計において最も重要な検討課題となるが、現時点での世界最長の吊橋である明石海峡大橋で用いられた技術を適用すると、非常に重い桁が必要となり、経済性を考えると現実的でないものと考えられる。一方、日本各地で計画のある海峡横断道路プロジェクトにおいて超長大橋が含まれており、その建設を経済的に実施することがプロジェクト全体の成否を決する大きな要因となることは明らかである。

このような現状認識のもと、平成７年度に「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」という大きなテーマを掲げた共同研究を開始し、この度３年の期間を経て終了した。当初は６車線断面を対象としたが、その後の社会情勢から４車線断面を検討対象に追加した。

研究の成果として、耐風部材を設置した２箱桁案、１箱桁で耐風特性を向上されるケーブルを追加した案などにおいて目標としたフラッター発現風速８０m/sを満足するものが得られた。その他にも、本検討結果ではフラッター発現風速が目標値には至らなかったものの、耐風性を向上させる効果が認められた案が数多く検討された。もちろん、これらの案はプロトタイプとして検討された結果であり、荒削りな面が残されている事が考えられる。しかし、経済性を考慮に入れた中で超長大橋の耐風安定性を向上させる方策の、基本情報としては貴重な研究成果が得られたと考えている。

冒頭に記したように、超長大橋の建設が必要とされるプロジェクト計画が進められている。その現実化が求められた時に、優れた特性を有する構造を提示することが必要であり、その案は、経済性においても優れていることが必要である。このためには、今後とも、より最適化のなされた構造系を求めて行くことが必要である。本共同研究の成果が、そのための足がかりとして有効に活用されることを期待する。

6．付　　録

6．1　空力特性検討断面一覧表

6.1.1　概要

本共同研究では、これまで 1BOX・2BOX・新形式と多種多様のアイデアが盛り込まれた橋梁の検討が行われており、その断面形状についても多種多様である。

そこで、ここでは、特に風洞試験（２次元）による空力特性検討が行われてきた断面について、断面形状からその耐風性まで把握できるように一覧表としてまとめ、これまでの研究成果として本報告書に掲載することとした。

なお、本共同研究に限らず、過去に検討されてきた断面についても一部掲載し、今後の研究に役立つ資料、過去の成果記録として充実を図った。

また、本表の作成にあったては、「耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究報告書（その２）付録 5.1　空力特性検討断面一覧表（P.237 ～）」の定義を基本とした。（一部改正があるため、記入要領については「６．１．３　記入要領概説」で述べることとする。）

6.1.2　空力特性検討断面一覧表

空力特性検討断面一覧表を、表－ 6.1.1.1 ～表－ 6.1.10.5 に示す。

本表では、「ばね支持試験」および「非定常空気力測定試験結果によるフラッター解析」による検討結果の掲載を基本とした。なお、表中での両者の区別は以下の通りとする。

・表番号・表題の後に【ばね支持試験結果】または【フラッター解析結果】と明記
（一つの表に両方記載の場合は【ばね支持試験結果／フラッター解析結果】と明記）
・フラッター解析検討結果については、略号の最後に (F) を追加
・必要に応じ、コメント欄にフラッター解析による検討結果である旨明記

本資料では、断面空力特性に着目し構造的には未検討の断面が多く、また、新形式断面については、構造的な各諸元の実橋想定が詳細検討なしでは困難であると考えられることから、耐風性に関しては形状補正係数 κ での評価を基本とし、特に実橋値にはこだわらないこととした。

6.1.3　記入要領概説

以下の定義は、基本的に「本州四国連絡橋　風洞試験要領(1980)・同解説」（以下「試験要領」）に準じている。

(1)　一般項目

1)　呼称

下記例に示す様に、「研究機関略号」「橋梁形式（タイプ）」（1BOX・2BOX・新形式の区別）「オプション」を明記することで、各断面の呼称とした。

ここで、「オプション」は各機関での断面識別記号である。

記入例：○－○－○○○○○ (F)
①　②　③　④

①研究機関略号

②タイプ（1：1BOX，2：2BOX，N：新形式）

③オプション

④無し：ばね支持試験による検討結果
(F)　：フラッター解析による検討結果

機関名－表番号　対応一覧表

略号	研究機関名	表番号	略号	研究機関名	表番号
PR	建設省土木研究所	表－ 6.1.1.1 ～ 9	SH	住友重機械工業（株）	表－ 6.1.6.1 ～ 4
HA	本州四国連絡橋公団	表－ 6.1.2.1 ～ 9	NK	ＮＫＫ	表－ 6.1.7.1 ～ 7
IH	石川島播磨重工業(株)	表－ 6.1.3.1 ～ 2	HZ	日立造船（株）	表－ 6.1.8.1 ～ 6
KH	川崎重工業（株）	表－ 6.1.4.1 ～ 7	ME	三井造船（株）	表－ 6.1.9.1 ～ 13
KW	川田工業（株）	表－ 6.1.5.1 ～ 7	MH	三菱重工業（株）	表－ 6.1.10.1 ～ 5

2)　断面図・コメント欄

断面図ついては、その形状や特徴が把握できる程度の概略図とした。

断面の特徴、特記事項（耐風安定化策、2BOX 開孔部のグレーチングなどの有無、種類他）等のコメントについては、必要に応じて断面図下欄に記述した。

(2) 形状諸元項目

以下 1)～ 5)に示す形状諸元は、実橋換算値での記入を基本とした。

但し、実橋換算の必要性が特にない（κで評価、諸元未調整など）、またはできないと判断される場合は、（ ）付きで「模型値」の表記とした。

また、各項目内で、別途定義されている場合は、それに従う。

1) 縮尺

ブランクの場合は、実橋換算の必要性が特にない（κで評価、諸元未調整など）、またはできないと判断された場合を示す。

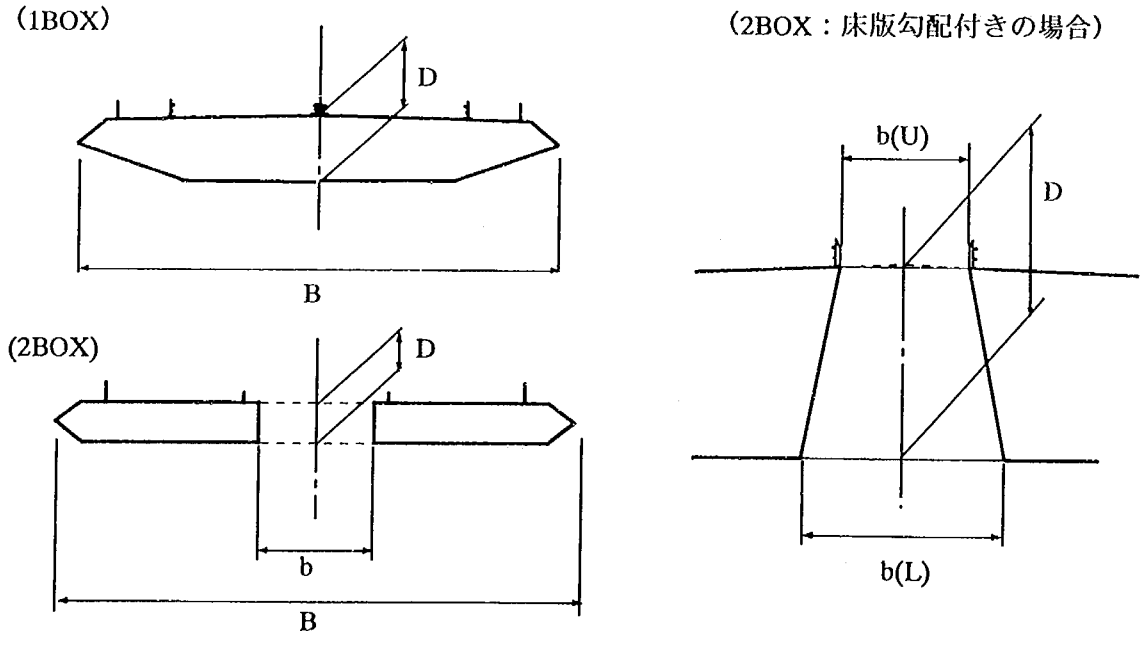
2) 桁幅 B

フェアリングを含む全幅（充腹桁橋：開孔部も含む最外側の間隔）を示す。

詳細は、「試験要領」にならい、「フェアリング以外の安定化策、添架物などの実験上取り外しを行うものを除いた寸法」とした。

3) 桁高 D

桁断面中心での桁高を基本とし（図参照）、添架物（高欄など）・安定化策（センタバリアなど）等その形状・形式に関わらず、実験上取り外しを行う付加物を除いた寸法とする。（形状・形式とは、高欄を例にとると、「充実（壁）・ポスト・透過（ネット）」等のこと。）



図－ 6.1 「桁幅 B」「桁高 D」「開孔幅 b」の定義】

4) 開孔幅 b

上下面で非対称の場合は、「U:*** L:***」で記述する。

開孔部が中央だけではなく、数カ所に設けられている場合は、それぞれの開孔幅合計を記入する。なお、位置関係については、本表では省略する。

5) 開孔率

開孔幅と桁幅の比（b/B）。

開孔部が数カ所に設けられている場合は、開孔幅トータル値を用いる。

(3) 振動諸元項目

1) 基本定義

①平板翼理論（Selbergの式）値 VF（形状補正係数κ）の根拠を示すものとする。

②迎角 0°の値で他迎角についても代表する。

③各項目は、「模型値（実験値）」から換算した「実橋値（実験値）」を基本とし、（ ）付きで「模型値（実験値）」も併記することとする。よって、実橋値について、想定諸元への補正までは行わないこ ととする。

④実橋値と模型値で単位が異なる項目（重量・極慣性）は、単位まで記入する。

⑤基本断面に対する耐風安定化策の効果などを調べるため、振動諸元未調整で、基本断面との 差をκのみで評価している等、実橋値への換算の必要性が無い（または、できない）と判断される場合 は、（ ）付きで「模型値（実験値）」のみの表記とする。

2) 詳細定義

①振動数

ねじれ振動数 N θのみ記述する。（たわみ振動数は、振動数比から換算）

②重量・極慣性

単位長さ(m)あたりでの記述を基本とする。

重量単位 ==>実橋 tf/m ， 模型 kgf/m

極慣性単位==>実橋 tfs^2m/m ， 模型 $kgfs^2m/m$

③風速倍率

「ねじれ」のみ記述する。上記項目で「模型値のみ表記」の場合は、ブランクとする。

④減衰率

実験値を( )付きで記述する。

模型実験値を実橋値としてそのままスライドできるが、ここでは、あくまで模型実験により得られた値との解釈（調整不能などによる限界が考えられるため）で、（ ）付き表記とする。

⑤空気密度 ρ

風洞試験時の大気データにより算出した値（実験値）を基本とし、算出には、下記の「試験要領」算出式（P11：4.風速の測定 4.1 空気密度）を用いることとする。

なお、過去のデータで、不明の場合は記入しないこととする。

$$\rho = 0.132 \times \frac{273}{T+273} \times \frac{p-0.378\gamma F}{760} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.1.1)$$

ρ ：空気密度 (kgfs²/m⁴)
p ：大気圧 (mmHg)
T ：大気温度 (°C)
γ ：相対湿度
F ：最大圧 (mmHg)

⑥限界風速 Vcr

風速の算出は、「試験要領」算出式（P12：4.風速の測定 4.2 風速）を用い、実橋換算値（ ③風速倍率を用いて換算した値）で表記することを基本とする。

上述の各項目で「模型値のみ表記」の場合は、（ ）付きで風洞風速での表記とする。

⑦ Selberg の式 VF

「耐風構造」P285 より、

$$VF = 0.44\omega_\phi B\sqrt{\{1-(\omega_z/\omega_\phi)^2\}\frac{\sqrt{\nu}}{\mu}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.1.2)$$

上式において、

$\mu = \pi\rho B^2/2m$ ， $\nu = 8r^2/B^2$ ， $r = \sqrt{I/m}$ である。

ここで、 ω_z：たわみ振動数 ω_ϕ：ねじれ振動数
ρ ：空気密度
B ：桁幅
m ：質量 I ：極慣性モーメント

算出にあったては、上記の式を用い、実橋換算値（実験値）での算出を基本とする。

上記の各項目で、「模型値のみ表記」の場合は、（ ）付きで風洞風速での表記とする。

空気密度 ρ は⑤での値を用いることを基本とする。

但し、過去のデータで不明（ ⑤でブランク ）の場合は、$\rho = 0.1200 kgfs^2/m^4$ とする。

（「耐風設計基準(1976)・同解説」P11 の、「設計風速程度の暴風時での気圧・温度を考慮した場合の値」を用いる。）

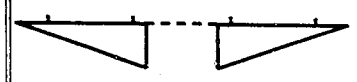
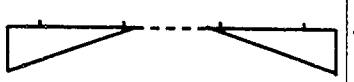
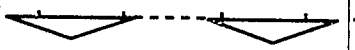
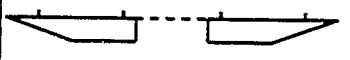
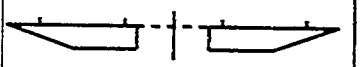
⑧形状補正係数 κ

Vcr：風洞試験結果（実橋換算値　or　模型値）→ ⑥での値

VF ：風洞試験結果から求まる諸元を用いて Selberg の式から算出した値→ ⑦での値

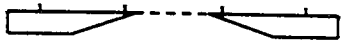
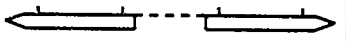
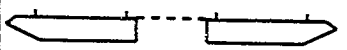
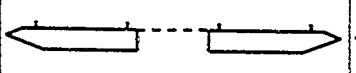
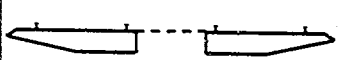
算出式：κ ＝ （Vcr ／ VF）

表－ 6.1.1.1　空力特性検討断面一覧　（１－１）【ばね支持試験結果】

略　　号		PR-2-71H6			PR-2-72H6			PR-2-73H3			PR-2-74H3			PR-2-74H3B		
																
		断面①（桁高６ｍ）			断面②（桁高６ｍ）			断面③（桁高３ｍ）			断面④（桁高３ｍ）			断面④＋センターバリア		
縮尺		1/110			1/110			1/110			1/110			1/110		
全幅Ｂ　（ｍ）		50.533　(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)		
桁高Ｄ　（ｍ）		6.000　(0.0545)			(0.0545)			3.000　(0.0273)			(0.0273)			(0.0273)		
開孔幅ｂ（ｍ）		11.333　(0.1030)			(U:0.1030　L:0.4594)			(U:0.1030　L:0.2812)			(0.1030)			(0.1030)		
Ｂ／Ｄ		8.422			(8.422)			(16.844)			(16.844)			(16.844)		
ｂ／Ｂ		0.224			(U:0.224　L:1.000)			(U:0.224　L:0.612)			(0.224)			(0.224)		
Ｎθ　(Hz)		0.105　(2.56)			(2.55)			(2.55)			(2.54)			(2.54)		
Ｎθ／Ｎη		2.100　(2.09)			(2.09)			(2.08)			(2.08)			(2.08)		
Ｗ　(tf/m)		49.0　(4.057kgf/m)			(4.088kgf/m)			(4.071kgf/m)			(4.105kgf/m)			(4.112kgf/m)		
Ｉ　(tfs²m/m)		1470　(0.0098kgfs²m/m)			(0.150kgfs²m/m)			(0.0151kgfs²m/m)			(0.152kgfs²m/m)			(0.0152kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		(4.52)			(4.52)			(4.53)			(4.55)			(4.55)		
減衰率	たわみ	0.020　(0.018)			(0.020)			(0.019)			(0.018)			(0.020)		
	ねじれ	0.020　(0.020)			(0.021)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)		(12.96)*	(12.23)	(3.61)	－	(2.96)	－	(14.50)	(12.10)	(13.36)*	(14.64)	(13.23)	(12.00)	－	(13.41)	(11.69)
Selberg の式による補正																
VF　(m/s)		(9.95)	(9.96)	(9.93)	－	(9.97)	－	(9.94)	(9.94)	(9.90)	(9.94)	(9.93)	(9.92)	－	(9.94)	(9.92)
形状補正係数　κ		(1.30)	(1.23)	(0.36)	－	(0.30)	－	(1.46)	(1.22)	(1.35)	(1.47)	(1.33)	(1.21)	－	(1.35)	(1.18)

（注）・表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。また、＊印のケースは迎角変動が大きく高風速では信頼性は少ない。

表－ 6.1.1.2　空力特性検討断面一覧（１－２）【ばね支持試験結果】

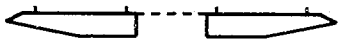
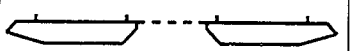
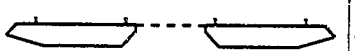
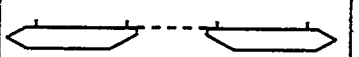
略　　号		PR-2-75H3			PR-2-76H2			PR-2-7F1H3			PR-2-7F2H3			PR-2-7f3H3		
																
		断面⑤（桁高３ｍ）			断面⑥（桁高２ｍ）			フェアリング①			フェアリング②			フェアリング③		
縮尺		1/110			1/110			1/110			1/110			1/110		
全幅Ｂ　（ｍ）		50.533　(0.4594)			(0.4594)			50.533　(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)		
桁高Ｄ　（ｍ）		3.000　(0.0273)			2.000　(0.0182)			3.000　(0.0273)			(0.0273)			(0.0273)		
開孔幅ｂ（ｍ）		(U:0.1030　L:0.2812)			(0.1030)			11.333　(0.1030)			(0.1030)			(0.1030)		
Ｂ／Ｄ		(16.844)			(25.267)			(16.844)			(16.844)			(16.844)		
ｂ／Ｂ		(U:0.244　L:0.612)			(0.224)			(0.224)			(0.224)			(0.224)		
Ｎθ　(Hz)		(2.52)			(2.53)			0.105　(2.59)			(2.59)			(2.58)		
Ｎθ／Ｎη		(2.07)			(2.05)			2.10　(2.12)			(2.12)			(2.11)		
Ｗ　(tf/m)		(4.091kgf/m)			(4.008kgf/m)			49.0　(3.963kgf/m)			(3.978kgf/m)			(3.953kgf/m)		
Ｉ　(tfs²m/m)		(0.0154kgfs²m/m)			(0.0153kgfs²m/m)			1470　(0.0148kgfs²m/m)			(0.0148kgfs²m/m)			(0.0148kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		(4.58)			(4.58)			(4.47)			(4.47)			(4.47)		
減衰率	たわみ	(0.020)			(0.018)			0.020　(0.018)			(0.019)			(0.019)		
	ねじれ	(0.019)			(0.021)			0.020　(0.020)			(0.020)			(0.021)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)		－	(4.87)	－	(12.99)	(13.86)	(15.17)	(13.80)	－	－	(13.15)	－	－	(13.33)	－	－

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	－	(9.88)	－	(9.81)	(9.79)	(9.79)	(10.02)	－	－	(10.04)	－	－	(9.99)	－	－
形状補正係数　κ	－	(0.49)	－	(1.32)	(1.42)	(1.55)	(1.38)	－	－	(1.31)	－	－	(1.33)	－	－

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.1.3　空力特性検討断面一覧（１－３）【ばね支持試験結果】

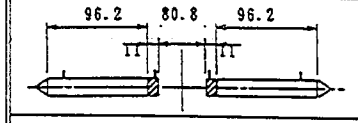
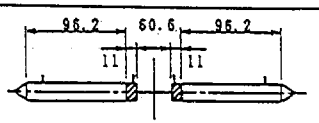
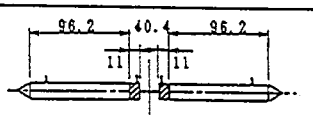
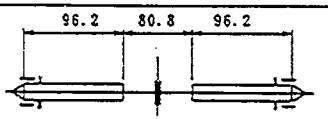
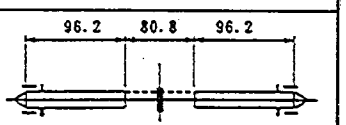
略　　号		PR-2-7F4H3			PR-2-7F5H3			PR-2-7F6H3			PR-2-7F7H3			PR-2-7F8H3		
																
		フェアリング④			フェアリング⑤			フェアリング⑥			フェアリング⑦			フェアリング⑧		
縮尺		1/110			1/110			1/110			1/110			1/110		
全幅B　(m)		50.533　(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)			(0.4594)		
桁高D　(m)		3.000　(0.0273)			(0.0273)			(0.0273)			(0.0273)			(0.0273)		
開孔幅b (m)		11.333　(0.1030)			(0.1030)			(U:0.1030　L:0.1394)			(U:0.1030　L:0.1758)			(U:0.1030　L:0.1758)		
B/D		(16.844)			(16.844)			(16.844)			(16.844)			(16.844)		
b/B		(0.224)			(0.224)			(U:0.224　L:0.303)			(U:0.224　L:0.383)			(U:0.224　L0.383)		
Nθ　(Hz)		(2.58)			(2.59)			(2.59)			(2.59)			(2.59)		
Nθ／Nη		(2.11)			(2.12)			(2.12)			(2.12)			(2.11)		
W　(tf/m)		(3.953kgf/m)			(3.961kgf/m)			(3.967kgf/m)			(3.965kgf/m)			(3.925kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		(0.0148kgfs²m/m)			(0.0148kgfs²m/m)			(0.0147kgfs²m/m)			(0.0148kgfs²m/m)			(0.0147kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		(4.47)			(4.47)			(4.46)			(4.47)			(4.46)		
減衰率	たわみ	(0.021)			(0.019)			(0.020)			(0.018)			(0.019)		
	ねじれ	(0.022)			(0.022)			(0.021)			(0.020)			(0.020)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)		(13.56)	－	－	(14.22)	－	－	(13.70)	－	－	(13.38)	－	－	(15.60)	(15.22)	(18.16)

Selbergの式による補正

VF　(m/s)		(9.99)	－	－	(10.01)	－	－	(10.02)	－	－	(10.01)	－	－	(10.01)	(9.97)	(9.94)
形状補正係数　κ		(1.36)	－	－	(1.42)	－	－	(1.37)	－	－	(1.34)	－	－	(1.56)	(1.53)	(1.83)

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.1.4　空力特性検討断面一覧（１－４）【ばね支持試験結果】

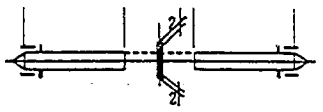
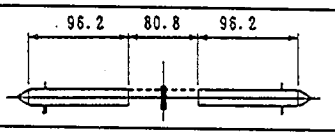
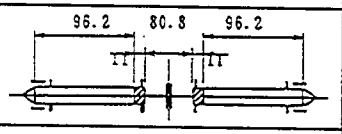
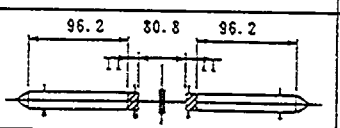
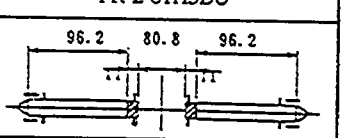
略　　号		PR-2-81H3			PR-2-81H3K1			PR-2-81H3K2			PR-2-81H3CB			PR-2-81H3CBG		
																
		6 車断面（基本断面）			6 車断面（開口幅 2/3）			6 車断面（開口幅 1/2）			6 車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン			6 車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン ＋グレーチング		
縮尺		1/130			1/130			1/130			1/130			1/130		
全幅 B （m）		35.500 (0.2732)			32.900 (0.2530)			30.300 (0.2328)			35.500 (0.2732)			(0.2732)		
桁高 D （m）		3.000 (0.0231)			3.000 (0.0231)			3.000 (0.0231)			3.000 (0.0231)			(0.0231)		
開孔幅 b（m）		10.500 (0.0808)			7.900 (0.0606)			5.250 (0.0404)			10.500 (0.0808)			(0.0808)		
B／D		11.8 (11.8)			11.0 (11.0)			10.1 (10.1)			11.8 (11.8)			(11.8)		
b／B		0.296 (0.296)			0.240 (0.240)			0.173 (0.174)			0.296 (0.296)			(0.296)		
N θ (Hz)		0.130 (2.123)			(2.121)			(2.120)			(2.128)			(2.129)		
N θ ／N η		1.76 (1.76)			(1.75)			(1.75)			(1.76)			(1.76)		
W (tf/m)		29.32 (4.119kgf/m)			(4.103kgf/m)			(4.119kgf/m)			(4.115kgf/m)			(4.120kgf/m)		
I (tfs²m/m)		594 (0.00821kgfs²m/m)			(0.00822kgfs²m/m)			(0.00823kgfs²m/m)			(0.00817kgfs²m/m)			(0.00816kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		(7.961)			(7.967)			(7.973)			(7.942)			(7.938)		
減衰率	たわみ	0.02 (0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
	ねじれ	0.02 (0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ (kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr (m/s)		－	(12.9)	－	－	(12.5)	－	－	(11.7)	－	－	(22.5 ↑)	－	－	(22.5 ↑)	－

Selberg の式による補正

VF (m/s)	－	(8.68)	－	－	(8.98)	－	－	(9.37)	－	－	(8.68)	－	－	(8.69)	－
形状補正係数 κ	－	(1.49)	－	－	(1.39)	－	－	(1.25)	－	－	(2.59 ↑)	－	－	(2.59 ↑)	－

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。↑はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

表－6.1.1.5　空力特性検討断面一覧（1－5）【ばね支持試験結果】

略　　号	PR-2-81H3C'BG	PR-2-81H3CG	PR-2-81H3CBU	PR-2-81H3CU	PR-2-81H3BU
					
	6車断面（基本断面） ＋センターバリア（大） ＋ガイドベーン ＋グレーチング	6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋グレーチング	6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン ＋アンダーバリア	6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋アンダーバリア	6車断面（基本断面） ＋ガイドベーン ＋アンダーバリア
縮尺	1/130	1/130	1/130	1/130	1/130
全幅B　(m)	35.500　(0.2732)	(0.2732)	(0.2732)	(0.2732)	(0.2732)
桁高D　(m)	3.000　(0.0231)	(0.0231)	(0.0231)	(0.0231)	(0.0231)
開孔幅b(m)	10.500　(0.0808)	(0.0808)	(0.0808)	(0.0808)	(0.0808)
B/D	11.8　(11.8)	(11.8)	(11.8)	(11.8)	(11.8)
b/B	0.296　(0.296)	(0.296)	(0.296)	(0.296)	(0.296)
Nθ　(Hz)	0.130　(2.128)	(2.126)	(2.133)	(2.123)	(2.135)
Nθ／Nη	1.76　(1.76)	(1.76)	(1.76)	(1.75)	(1.75)
W　(tf/m)	29.32　(4.122kgf/m)	(4.104kgf/m)	(4.108kgf/m)	(4.104kgf/m)	(4.068kgf/m)
I　(tfs²m/m)	594　(0.00817kgfs²m/m)	(0.00819kgfs²m/m)	(0.00813kgfs²m/m)	(0.00821kgfs²m/m)	(0.00812kgfs²m/m)
ねじれ風速倍率	(7.941)	(7.950)	(7.924)	(7.959)	(7.916)
減衰率　たわみ	0.02　(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)
減衰率　ねじれ	0.02　(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)

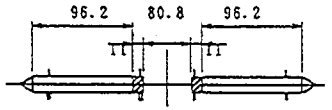
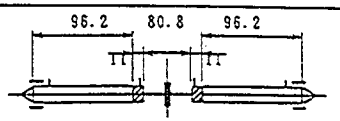
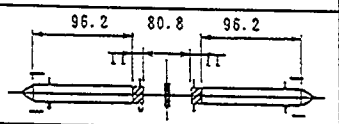
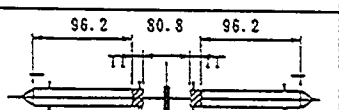
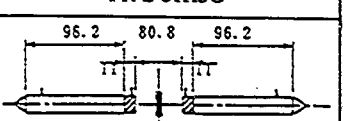
迎角α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)	－	(22.5↑)	－	－	(18.3)	－	－	(13.6)	－	－	(13.0)	－	－	(13.2)	－

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	－	(8.69)	－	－	(8.67)	－	－	(8.69)	－	－	(8.64)	－	－	(8.65)	－
形状補正係数　κ	－	(2.59↑)	－	－	(2.11)	－	－	(1.57)	－	－	(1.50)	－	－	(1.53)	－

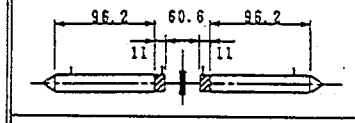
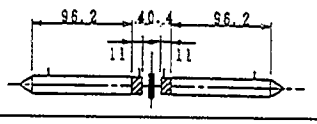
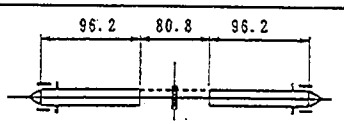
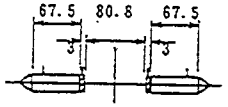
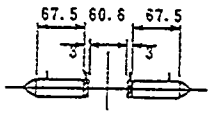
（注）・表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。↑はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

表－6.1.1.6　空力特性検討断面一覧（1－6）【ばね支持試験結果】

略　　号		PR-2-81H3U			PR-2-81H3CB			PR-2-81H3CBU			PR-2-81H3CB'U			PR-2-81H3C		
																
		6車断面（基本断面） ＋アンダーバリア			6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン			6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン ＋アンダーバリア			6車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン(h=2m) ＋アンダーバリア			6車断面（基本断面） ＋センターバリア		
縮尺		1/130			1/130			1/130			1/130			1/130		
全幅B　(m)		35.500　(0.2732)			(0.2732)			(0.2732)			(0.2732)			(0.2732)		
桁高D　(m)		3.000　(0.0231)			(0.0231)			(0.0231)			(0.0231)			(0.0231)		
開孔幅b(m)		10.500　(0.0808)			(0.0808)			(0.0808)			(0.0808)			(0.0808)		
B/D		11.8　(11.8)			(11.8)			(11.8)			(11.8)			(11.8)		
b/B		0.296　(0.296)			(0.296)			(0.296)			(0.296)			(0.296)		
$N\theta$　(Hz)		0.130		(2.123)	(2.136)			(2.134)			(2.133)			(2.136)		
$N\theta / N\eta$		1.76		(1.74)	(1.76)			(1.76)			(1.76)			(1.758)		
W　(tf/m)		29.32		(4.067kgf/m)	(4.079kgf/m)			(4.098kgf/m)			(4.100kgf/m)			(4.079kgf/m)		
I　(tfs^2m/m)		594		(0.00821kgfs^2m/m)	(0.00811kgfs^2m/m)			(0.00812kgfs^2m/m)			(0.00813kgfs^2m/m)			(0.00811kgfs^2m/m)		
ねじれ風速倍率		(7.960)			(7.911)			(7.919)			(7.923)			(7.941)		
減衰率	たわみ	0.02		(0.02)	(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
	ねじれ	0.02		(0.02)	(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　($kgfs^2/m^4$)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)		－	(12.7)	－	－	(14.6)	－	－	(13.9)	－	－	(14.2)	－	－	(14.2)	－
Selbergの式による補正																
VF　(m/s)		－	(8.60)	－	－	(8.68)	－	－	(8.69)	－	－	(8.69)	－	－	(8.68)	－
形状補正係数 κ		－	(1.48)	－	－	(1.68)	－	－	(1.60)	－	－	(1.64)	－	－	(1.64)	－

（注）・表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。↑はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

表－6.1.1.7　空力特性検討断面一覧（１－７）【ばね支持試験結果】

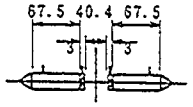
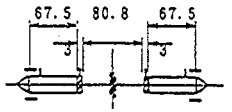
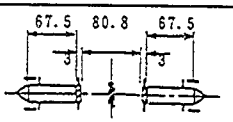
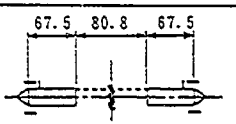
略　　号	PR-2-81H3K1C			PR-2-81H3K2C			PR-2-81H3CBG			PR-2-82H3			PR-2-82H3K1		
															
	６車断面（開口幅 2/3）＋センターバリア			６車断面（開口幅 1/2）＋センターバリア			６車断面（基本断面）＋センターバリア＋ガイドベーン＋グレーチング			４車断面（基本断面）			４車断面（開口幅 2/3）		
縮尺	1/130			1/130			1/130			1/130			1/130		
全幅 B　(m)	32.900　(0.2530)			33.100　(0.2732)			35.500　(0.2732)			28.000　(0.2158)			25.400　(0.1956)		
桁高 D　(m)	3.000　(0.0231)			3.000　(0.0231)			3.000　(0.0231)			3.000　(0.0231)			3.000　(0.0231)		
開孔幅 b (m)	7.900　(0.0606)			5.250　(0.0404)			10.500　(0.0808)			10.500　(0.0808)			7.900　(0.0606)		
B / D	11.0　(11.0)			10.1　(10.1)			11.8　(11.8)			9.33　(9.33)			8.47　(8.47)		
b / B	0.240　(0.240)			0.173　(0.174)			0.296　(0.296)			0.375　(0.374)			0.311　(0.310)		
N θ　(Hz)	0.130　(2.128)			(2.130)			(2.133)			0.140　(2.421)			(2.422)		
N θ ／ N η	1.76　(1.76)			(1.76)			(1.76)			1.89　(1.89)			(1.891)		
W　(tf/m)	29.32　(4.099kgf/m)			(4.102kgf/m)			(4.108kgf/m)			23.84　(3.678kgf/m)			(3.677kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	594　(0.00817kgfs²m/m)			(0.00816kgfs²m/m)			(0.00813kgfs²m/m)			360　(0.00910kgfs²m/m)			(0.00909kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	(7.944)			(7.935)			(7.925)			(7.516)			(7.514)		
減衰率　たわみ	0.02　(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
減衰率　ねじれ	0.02　(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)		
迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)	－	(13.8)	－	－	(13.8)	－	(18.0)	(22.5 ↑)	(22.5 ↑)	－	(15.4)	－	－	(17.4)	－

Selberg の式による補正

VF　(m/s)	－	(8.68)	－	－	(8.68)	－	(8.69)	(8.69)	(8.69)	－	(11.45)	－	－	(12.03)	－
形状補正係数 κ	－	(1.59)	－	－	(1.59)	－	(2.07)	(2.59 ↑)	(2.59 ↑)	－	(1.35)	－	－	(1.45)	－

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。↑はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

表－ 6.1.1.8　空力特性検討断面一覧（１－８）【ばね支持試験結果】

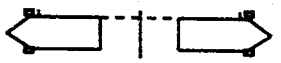
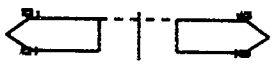
略　　号		PR-2-82H3K2			PR-2-82H3CB			PR-2-82H3CBU			PR-2-82H3CBG			PR-2-8		
																
		４車断面（開口幅 1/2）			４車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン			４車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン ＋アンダーバリア			４車断面（基本断面） ＋センターバリア ＋ガイドベーン ＋グレーチング					
縮尺		1/130			1/130			1/130			1/130			1/130		
全幅 B　（m）		22.800　(0.1754)			28.000　(0.2158)			(0.2158)			(0.2158)			0		
桁高 D　（m）		3.000　(0.0231)			3.000　(0.0231)			(0.0231)			(0.231)			0		
開孔幅 b（m）		5.250　(0.0404)			10.500　(0.0808)			(0.0808)			(0.0808)			0		
B / D		7.60　(7.60)			9.33　(9.34)			(9.34)			(9.34)			0		
b / B		0.230　(0.230)			0.375　(0.374)			(0.374)			(0.374)			0		
N θ　(Hz)		0.140　(2.424)			(2.424)			(2.425)			(2.425)			0		
N θ / N η		1.89　(1.89)			(1.89)			(1.90)			(1.89)			0		
W　(tf/m)		23.84　(3.676kgf/m)			(3.676kgf/m)			(3.702kgf/m)			(3.664kgf/m)			(kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		306　(0.00908kgfs²m/m)			(0.00908kgfs²m/m)			(0.00907kgfs²m/m)			(0.00907kgfs²m/m)			(kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		(7.510)			(7.506)			(7.506)			(7.504)			0		
減衰率	たわみ	0.02　(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			0		
	ねじれ	0.02　(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.02)			(0.020)		
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)			(16.8)		(22.1)	(22.5 ↑)	(22.5 ↑)	(22.5 ↑)	(22.5 ↑)		(16.5)	(22.5 ↑)	(22.5 ↑)	－	0	0

Selberg の式による補正

VF　(m/s)		(12.71)		(11.46)	(11.46)	(11.46)	(11.50)	(11.50)		(11.45)	(11.45)	(11.45)	－	0	0
形状補正係数 κ		(1.32)		(1.93)	(1.96 ↑)	(1.96 ↑)	(1.96 ↑)	(1.96 ↑)		(1.44)	(1.97 ↑)	(1.97 ↑)	－	0	0

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。↑はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

表－6.1.1.9　空力特性検討断面一覧（1－9）【ばね支持試験結果】

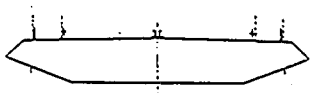
略　　号	PR-2-9F1H4			PR-2-9F1H4'			PR-2-_____			PR-2-_____			PR-2-_____		
															
	基本断面			基本断面＋下面高欄											
縮尺	1/85			1/85											
全幅 B　(m)	28.000　(0.3294)			(0.3294)											
桁高 D　(m)	4.000　(0.0471)			(0.0471)											
開孔幅 b (m)	10.500　(0.1236)			(0.1236)											
B / D	(7.000)			(7.000)											
b / B	(0.375)			(0.375)											
N θ　(Hz)	0.147　(2.28)			(2.27)											
N θ ／ N η	2.04　(2.07)			(2.08)											
W　(tf/m)	25.47　(3.279kgf/m)			(3.306kgf/m)											
I　(tfs²m/m)	336　(0.0082kgfs²m/m)			(0.0082kgfs²m/m)											
ねじれ風速倍率	(5.50)			(5.50)											
減衰率　たわみ	0.020　(0.044)			(0.045)											
減衰率　ねじれ	0.020　(0.020)			(0.021)											
迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1200			0.1200			0.1200			0.1200	
Vcr　(m/s)	(17.96)	(18.2 ↑)	(18.2 ↑)	(18.2 ↑)	(18.2 ↑)	(18.2 ↑)									

Selberg の式による補正

VF　(m/s)	(8.55)	(8.52)	(8.51)	(8.55)	(8.53)	(8.51)									
形状補正係数 κ	(2.10)	(2.14 ↑)	(2.14 ↑)	(2.13 ↑)	(2.13 ↑)	(2.14 ↑)									

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。 ↑ はその風速以上でもフラッターが発生しないことを表す。

来島大橋検討モデル　　表－6.1.2.1　空力特性検討断面一覧（２－１）【ばね支持試験結果】

略　　号	HA-1-4.3-00	HA-1-4.3-10	HA-1-4.3-13	HA-1-4.3-13'	HA-I-4.3-12'
					
	桁高 4.3m 断面	4.3-00 断面＋ 検査車レール(27m 間隔)	4.3-10 断面＋ ﾈｯﾄ：外側・車道側高欄 （30%，2.5m)	4.3-10 断面＋ ﾈｯﾄ：外側・車道側高欄 （15％，2.5m）	4.3-10 断面＋ ﾈｯﾄ：車道側高欄のみ （15%，2.5m）
縮　尺	1/60				
全幅 B　(m)	32.3　(0.5383)				
桁高 D　(m)	4.3　(0.0717)				
開孔幅 b (m)	0.00				
B / D	7.51				
b / B	0.00				
N θ　(Hz)	0.361　(3.77)	0.361　(3.76)	0.361　(3.77)	0.361　(3.77)	0.361　(3.78)
N θ ／ N η	2.33	2.33	2.34	2.34	2.34
W　(tf/m)	22.42　(6.23kgf/m)	22.50　(6.25kgf/m)	22.64　(6.29kgf/m)	22.64　(6.29kgf/m)	22.57　(6.27kgf/m)
I　(tfs²m/m)	241.06　(0.0186 kgfs²m/m)	242.35　(0.0187 kgfs²m/m)	241.06　(0.0186 kgfs²m/m)	241.06　(0.0186 kgfs²m/m)	239.76　(0.0185 kgfs²m/m)
ねじれ風速倍率	5.74	5.76	5.75	5.74	5.72
減衰率　たわみ	(0.0201)	(0.0195)	(0.0199)	(0.0208)	(0.0205)
減衰率　ねじれ	(0.0200)	(0.0200)	(0.0200)	(0.0196)	(0.0195)

迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)	0.1223	0.1170	0.1208	0.1185	0.1193	0.1190	0.1223	0.1205	0.1201	0.1213	0.1212	0.1217	0.1187	0.1186	0.1181
V cr(E)　(m/s)	82.9 ↑	89.2	78.1	87.9 ↑	89.2	76.1	78.3 ↑	82.9	63.5	78.2 ↑	85.6	64.2	82.6 ↑	90.1	75.6

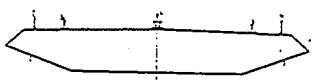
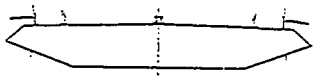
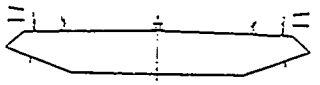
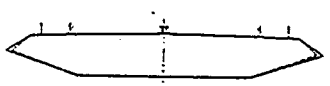
SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	93.1	95.2	93.7	94.8	94.4	94.6	93.5	94.2	94.3	93.9	93.9	93.7	94.6	94.7	94.9
形状補正係数　κ	0.89 ↑	0.94	0.83	0.93 ↑	0.94	0.80	0.84 ↑	0.88	0.67	0.83 ↑	0.91	0.69	0.87 ↑	0.95	0.80

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

来島大橋検討モデル

表－ 6.1.2.2　空力特性検討断面一覧（２－２）【ばね支持試験結果】

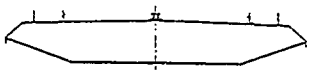
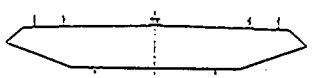
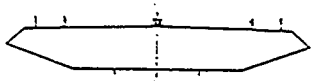
略　　号	HA-1-4.3-11'			HA-1-4.3-14'			HA-1-4.3-14'-D1			HA-1-4.3-14'-DF'			HA-1-4.3-00-F1		
															
	4.3-10 断面＋ ﾈｯﾄ：外側高欄のみ （15%，2.5m）			4.3-10 断面＋ ﾈｯﾄ：外側(15%，2.0m) 車道側(15%，1.5m)			4.3-14'断面＋ 耐風対策：ﾃﾞﾌﾚｸﾀ			4.3-14'断面＋ 耐風対策：ﾀﾞﾌﾞﾙﾌﾗｯﾌﾟ			4.3-00 断面＋ 耐風対策：ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ変更		
縮　尺	1/60														
全幅 B　(m)	32.3　(0.5383)												33.5　(0.5583)		
桁高 D　(m)	4.3　(0.0717)												4.3　(0.0717)		
開孔幅 b (m)	0.00												0.00		
B / D	7.51												7.79		
b / B	0.00												0.00		
N θ　(Hz)	0.361　(3.77)			0.361　(3.85)			0.361　(3.88)			0.361　(3.84)			0.355　(3.77)		
N θ ／ N η	2.34			2.31			2.33			2.30			2.29		
W　(tf/m)	22.64　(6.29kgf/m)			22.54　(6.26kgf/m)			22.46　(6.24kgf/m)			22.46　(6.24kgf/m)			23.08　(6.41kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	241.06　(0.0186 kgfs²m/m)			241.06　(0.0184 kgfs²m/m)			238.46　(0.0184 kgfs²m/m)			243.65　(0.0188 kgfs²m/m)			254.02　(0.0196 kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	5.74			5.63			5.57			5.65			5.65		
減衰率　たわみ	(0.0193)			(0.0201)			(0.0203)			(0.0195)			(0.0205)		
減衰率　ねじれ	(0.0195)			(0.0197)			(0.0202)			(0.0195)			(0.0199)		
迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)	0.1207	0.1215	0.1206	0.1155	0.1171	0.1167	0.1156	0.1162	0.1162	－	－	0.1181	－	0.1225	0.1236
V cr(E)　(m/s)	82.9 ↑	87.9	65.4	85.5	85.2	61.7	84.6	86.6	54.4	－	－	73.5	－	82.1	80.7

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	94.1	93.8	94.1	95.9	95.3	95.4	95.5	95.3	95.3	－	－	94.8	－	91.3	90.9
形状補正係数 κ	0.88 ↑	0.94	0.69	0.89	0.89	0.65	0.89	0.91	0.57	－	－	0.78	－	0.90	0.89

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

来島大橋検討モデル　　表－6.1.2.3　空力特性検討断面一覧（2－3）【ばね支持試験結果】

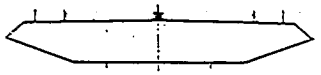
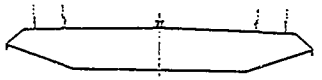
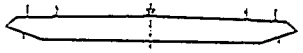
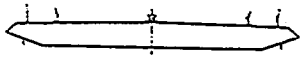
略　　号		HA-1-4.3-10-F1			HA-1-4.3-20			HA-1-4.3-30			HA-1-4.3-40			HA-1-4.3-50		
																
		4.3-10 断面＋ 耐風対策：ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ変更			4.3-00 断面＋ 検査車レール(29.7m 間隔)			4.3-00 断面＋ 検査車レール(32m 間隔)			4.3-00 断面＋ 検査車レール(13m 間隔)			4.3-00 断面＋ 検査車レール(9m 間隔)		
縮　尺		1/60														
全幅 B　(m)		33.5　(0.5583)			32.3　(0.5383)											
桁高 D　(m)		4.3　(0.0717)			4.3　(0.0717)											
開孔幅 b (m)		0.00			0.00											
B / D		7.79			7.51											
b / B		0.00			0.00											
N θ　(Hz)		0.361　(3.77)			0.361　(3.85)			0.361　(3.84)			0.361　(3.86)			0.355　(3.86)		
N θ / N η		2.28			2.32			2.31			2.34			2.34		
W　(tf/m)		23.04　(6.40kgf/m)			22.57　(6.27kgf/m)			22.57　(6.27kgf/m)			22.68　(6.30kgf/m)			22.75　(6.32kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		252.72　(0.0195 kgfs²m/m)			242.35　(0.0187 kgfs²m/m)			242.35　(0.0187 kgfs²m/m)			241.06　(0.0186 kgfs²m/m)			242.35　(0.0187 kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		5.65			5.63			5.63			5.61			5.62		
減衰率	たわみ	(0.0211)			(0.0198)			(0.0197)			(0.0194)			(0.0203)		
	ねじれ	(0.0200)			(0.0199)			(0.0198)			(0.0196)			(0.0197)		
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1232	0.1239	0.1230	0.1184	0.1171	0.1181	－	0.1187	0.1185	－	0.1270	－	－	0.1254	0.1254
V cr(E)　(m/s)		78.8	85.4	75.9	86.1 ↑	89.8	81.4	－	89.8	87.3	－	70.6	－	－	85.8	67.1

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)		91.0	90.7	91.0	94.8	95.3	94.9	－	94.7	94.8	－	91.8	－	－	92.5	92.5
形状補正係数　κ		0.87	0.94	0.83	0.91 ↑	0.94	0.86	－	0.95	0.92	－	0.77	－	－	0.93	0.73

（注）・表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

来島大橋検討モデル　　表－6.1.2.4　空力特性検討断面一覧（２－４）【ばね支持試験結果】

略　　号	HA-1-4.3-60	HA-1-4.3-34'	HA-1-4.3-33'	HA-1-2.5-10	HA-1-2.5-14'
					
	4.3-00 断面＋ 検査車レール(11m 間隔)	4.3-30 断面＋ ネット：外側(15%，2.0m) 車道側(15%，1.5m)	4.3-30 断面＋ ネット：外側・車道側高欄 （30%，2.5m）	桁高 2.5m 断面 検査車レール(27 m 間隔)	2.5-10 断面＋ ネット：外側(15%，2.0m) 車道側(15%，1.5m)
縮　尺	1/60				
全幅 B　(m)	32.3　(0.5383)			30.7　(0.5117)	
桁高 D　(m)	4.3　(0.0717)			2.5　(0.0417)	
開孔幅 b (m)	0.00			0.00	
B / D	7.51			12.28	
b / B	0.00			0.00	
N θ　(Hz)	0.361　(3.86)	0.361　(3.86)	0.361　(3.84)	0.477　(3.48)	0.477　(3.46)
N θ ／ N η	2.34	2.33	2.32	2.25	2.25
W　(tf/m)	22.75　(6.32kgf/m)	22.68　(6.30kgf/m)	22.68　(6.30kgf/m)	18.61　(5.17kgf/m)	18.83　(5.23kgf/m)
I　(tfs²m/m)	242.35　(0.0187 kgfs²m/m)	241.06　(0.0186 kgfs²m/m)	242.35　(0.0187 kgfs²m/m)	171.07　(0.0132 kgfs²m/m)	172.37　(0.0133 kgfs²m/m)
ねじれ風速倍率	5.62	5.62	5.63	8.23	8.28
減衰率　たわみ	(0.0189)	(0.0200)	(0.0190)	(0.0195)	(0.0200)
減衰率　ねじれ	(0.0197)	(0.0200)	(0.0200)	(0.0193)	(0.0195)

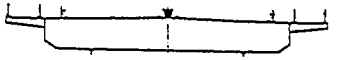
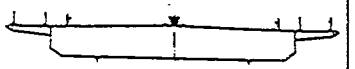
迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)	－	0.1243	－	0.1171	0.1155	0.1164	0.1291	0.1298	0.1283	0.1204	0.1181	0.1191	0.1185	0.1189	0.1190
V cr(E)　(m/s)	－	85.9	－	78.4	86.3	74.0	73.9	80.3	64.6	94.3	98.0 ↑	92.0	89.6	98.6 ↑	74.4

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	－	92.9	－	95.4	96.1	95.7	91.0	90.8	91.3	110.6	111.7	111.2	112.1	112.0	111.9
形状補正係数　κ	－	0.92	－	0.82	0.90	0.77	0.81	0.88	0.71	0.85	0.88 ↑	0.83	0.80	0.88 ↑	0.66

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

多々羅大橋検討モデル　　表－ 6.1.2.5　空力特性検討断面一覧（２－５）【ばね支持試験結果】

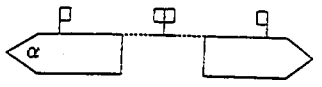
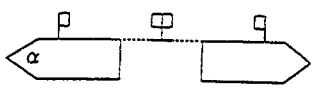
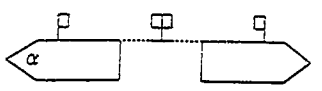
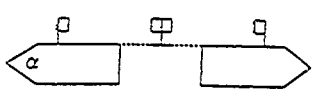
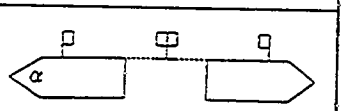
略　　号	HA-1-C-F			HA-1-D-F			HA-1-C-S			HA-1-C-S-F					
															
	桁高 3.0m 断面 検査車レール(15m 間隔) ﾌｪｱﾘﾝｸﾞﾀｲﾌﾟ			C-F 断面＋ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ変更			桁高 3.0m 断面 検査車レール(15m 間隔) ﾌﾞﾗｹｯﾄﾀｲﾌﾟ			C-S 断面＋ ﾌﾞﾗｹｯﾄ先端にﾌｪｱﾘﾝｸﾞ付					
縮　尺	1/45														
全幅 B　(m)	28.11 (0.6247)			29.21 (0.6491)			31.49 (0.6998)			32.42 (0.720)					
桁高 D　(m)	3.0 (0.0667)			3.0 (0.0667)			3.0 (0.0667)			3.0 (0.0667)					
開孔幅 b (m)	0.00			0.00			0.00			0.00					
B/D	9.37			9.74			10.50			10.81					
b/B	0.00			0.00			0.00			0.00					
$N\theta$　(Hz)	0.483 (4.67)			0.483 (4.68)			0.483 (4.68)			0.483 (4.67)					
$N\theta / N\eta$	2.28			2.28			2.26			2.25					
W　(tf/m)	21.28 (10.51kgf/m)			21.41 (10.58kgf/m)			21.55 (10.64kgf/m)			21.44 (10.59kgf/m)					
I　(tfs²m/m)	172.23 (0.0420 kgfs²m/m)			173.05 (0.0422 kgfs²m/m)			173.46 (0.0423 kgfs²m/m)			173.05 (0.0422 kgfs²m/m)					
ねじれ風速倍率	4.65			4.64			4.64			4.66					
減衰率　たわみ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)					
減衰率　ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)					
迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)	実験時の値が不明のため ρ=0.120 と仮定して、以下の Selbelg 式の計算を行った。														
V cr(E)　(m/s)	80 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑	68 ↑	80 ↑	80 ↑	80 ↑			

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	121	121	121	119	119	119	115	115	115	113	113	113			
形状補正係数 κ	0.66 ↑	0.66 ↑	0.66 ↑	0.67 ↑	0.67 ↑	0.67 ↑	0.70 ↑	0.70 ↑	0.59 ↑	0.71 ↑	0.71 ↑	0.71 ↑			

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

超長大吊橋モデル(スパン 2250m)　　表－ 6.1.2.6　空力特性検討断面一覧（２－６）【ばね支持試験結果】

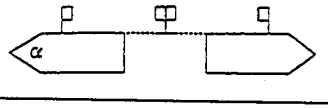
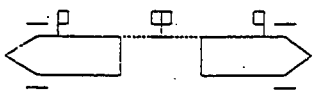
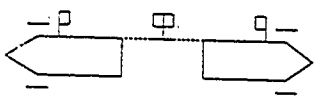
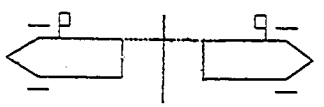
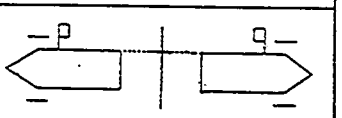
略　　号	HA-2-F30			HA-2-F40			HA-2-F45			HA-2-F50			HA-2-F55		
															
	桁高 4.0m 断面 ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 30°			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 40°			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 45°			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 50°			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 55°		
縮　尺	1/80														
全幅 B (m)	41.8 (0.523)			38.2 (0.478)			37.0 (0.462)			36.0 (0.450)			35.1 (0.439)		
桁高 D (m)	4.0 (0.050)			4.0 (0.050)			4.0 (0.050)			4.0 (0.050)			4.0 (0.050)		
開孔幅 b (m)	10.5 (0.131)			10.5 (0.131)			10.5 (0.131)			10.5 (0.131)			10.5 (0.131)		
B / D	10.45			9.55			9.25			9.00			8.78		
b / B	0.25			0.27			0.28			0.29			0.30		
N θ (Hz)	0.147 (2.139)			0.147 (2.141)			0.147 (2.143)			0.147 (2.145)			0.147 (2.151)		
N θ / N η	2.00			2.01			2.01			2.01			2.01		
W (tf/m)	25.27 (3.948kgf/m)			25.34 (3.959kgf/m)			25.29 (3.951kgf/m)			25.26 (3.947kgf/m)			25.19 (3.936)		
I (tfs²m/m)	342.73 (0.082 kgfs²m/m)			338.55 (0.081 kgfs²m/m)			338.55 (0.081 kgfs²m/m)			338.55 (0.081 kgfs²m/m)			338.55 (0.081)		
ねじれ風速倍率	5.50			5.49			5.49			5.48			5.47		
減衰率 たわみ	(0.053)			(0.046)			(0.051)			(0.041)			(0.040)		
減衰率 ねじれ	(0.019)			(0.023)			(0.016)			(0.011)			(0.007)		
迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ (kgfs²/m⁴)	0.121			0.122			0.123			0.122			0.123		
V cr(E) (m/s)	44.8	46.1	52.1	49.1	48.8	55.3	50.5	51.4	54.7	53.4	59.5	72.2	55.2	64.6	80.3

SELBELG の式による補正

V cr(N) (m/s)	36.1	36.1	36.1	37.5	37.5	37.5	38.0	38.0	38.0	38.6	38.6	38.6	38.9	38.9	38.9
形状補正係数 κ	1.24	1.28	1.44	1.31	1.30	1.47	1.33	1.35	1.44	1.38	1.54	1.87	1.42	1.66	2.06

（注）・（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

超長大吊橋モデル(スパン 2250m)　　表－ 6.1.2.7　空力特性検討断面一覧（２－７）【ばね支持試験結果】

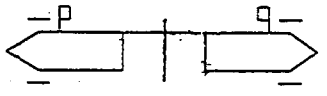
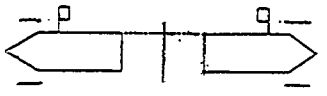
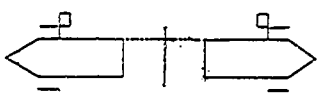
略　　号		HA-2-F60			HA-2-F55-G1			HA-2-F60-G2			HA-2-F55-G1-C1			HA-2-F60-G1-C1		
																
		桁高 4.0m ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ先端角 60°			F55 断面＋ 導流板 2m：外側張出 0.6m			F60 断面＋ 導流板 2m：外側張出 0.6m			F55-G1 断面＋ ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ：上下張出 1.6m			F60-G1 断面＋ ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ：上下張出 1.6m		
縮　尺		1/80														
全幅 B （m）		34.3		(0.429)	35.1		(0.439)	34.3		(0.429)	35.1		(0.439)	34.3		(0.429)
桁高 D （m）		4.0		(0.050)	4.0		(0.050)	4.0		(0.050)	4.0		(0.050)	4.0		(0.050)
開孔幅 b（m）		10.5		(0.131)	10.5		(0.131)	10.5		(0.131)	10.5		(0.131)	10.5		(0.131)
B / D		8.58			8.78			8.58			8.78			8.58		
b / B		0.31			0.30			0.31			0.30			0.31		
N θ （Hz）		0.147		(2.152)	0.147		(2.143)	0.147		(2.135)	0.147		(2.134)	0.147		(2.132)
N θ / N η		2.02			2.03			2.00			2.02			2.01		
W （tf/m）		25.41		(3.970kgf/m)	25.85		(4.039kgf/m)	25.25		(3.945kgf/m)	25.75		(4.023kgf/m)	25.57		(3.996)
I （tfs²m/m）		334.37		(0.080 kgfs²m/m)	338.55		(0.081 kgfs²m/m)	342.73		(0.082 kgfs²m/m)	342.73		(0.082 kgfs²m/m)	342.73		(0.082)
ねじれ風速倍率		5.46			5.49			5.51			5.51			5.52		
減衰率	たわみ	(0.038)			(0.037)			(0.036)			(0.040)			(0.032)		
	ねじれ	(0.020)			(0.014)			(0.010)			(0.019)			(0.018)		
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ （kgfs²/m⁴）		0.118			0.122			0.122			0.121			0.121		
V cr(E) (m/s)		19.6	65.1	96.8	66.4	71.5	89.3	71.2	75.6	97.5 ↑	82.0	68.0	S2.0	85.1	70.4	S0.6

SELBELG の式による補正

V cr(N) (m/s)	40.2	40.2	40.2	39.4	39.4	39.4	39.7	39.7	39.7	39.6	39.6	39.6	40.0	40.0	40.0
形状補正係数 κ	0.49	1.62	2.41	1.69	1.81	2.27	1.79	1.90	2.46 ↑	2.07	1.72	2.07	2.13	1.76	2.02

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

超長大吊橋モデル(スパン 2250m)　　表－ 6.1.2.8　空力特性検討断面一覧（２－８）【ばね支持試験結果】

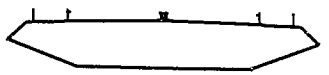
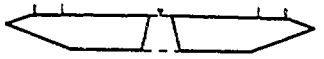
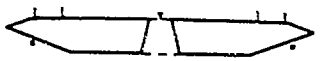
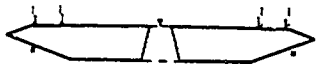
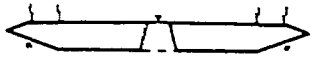
略　　号	HA-2-F60-G1-C2			HA-2-F60-G2-C2			HA-2-F60-G3-C2								
															
	F60-G1 断面 ＋ ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ：上下張出 0.8m			F60 断面 ＋ 導流板 2m：外側張出 1.2m ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ：上下張出 0.8m			F60 断面 ＋ 導流板 2m：外側張出 0m ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ：上下張出 0.8m								
縮　尺	1/80														
全幅 B　(m)	34.3　(0.429)														
桁高 D　(m)	4.0　(0.050)														
開孔幅 b (m)	10.5　(0.131)														
B / D	8.58														
b / B	0.31														
N θ　(Hz)	0.147　(2.156)			0.147　(2.164)			0.147　(2.161)								
N θ ／ N η	2.04			2.03			2.04								
W　(tf/m)	25.72　(4.019kgf/m)			25.48　(3.982kgf/m)			25.66　(4.009kgf/m)								
I　(tfs²m/m)	334.37　(0.080 kgfs²m/m)			334.37　(0.080 kgfs²m/m)			334.37　(0.080 kgfs²m/m)								
ねじれ風速倍率	5.45			5.44			5.44								
減衰率　たわみ	(0.039)			(0.037)			(0.039)								
減衰率　ねじれ	(0.014)			(0.010)			(0.010)								
迎角 α (DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)	0.118			0.119			0.119								
V cr(E)　(m/s)	81.0	73.3	77.2	94.5	71.9	79.8	75.9	78.4	94.2 ↑						

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	40.3	40.3	40.3	40.0	40.0	40.0	40.1	40.1	40.1						
形状補正係数 κ	2.00	1.82	1.92	2.36	1.80	2.00	1.89	1.96	2.35 ↑						

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.2.9　空力特性検討断面一覧（２－９）【ばね支持試験結果】

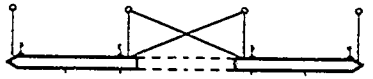
略　　号		HA-1-4.3-00			HA-2-3.3-00			HA-2-3.3-01			HA-2-3.3-02			HA-2-3.3-03		
																
		桁高 4.3m 断面 表－6.1.2.1 と同断面 二箱桁比較用に掲載			桁高 3.3m 断面			桁高 3.3m 断面 検査車レール付き			同左、ﾈｯﾄ(30%)付き高欄			桁高 2.5m 断面、検査車レ-ﾙ･ﾈｯﾄ(30%)付き高欄		
縮　尺		1/60			1/60									1/60		
全幅 B （m）		32.3		(0.5383)	32.3		(0.5383)							30.9		(0.5150)
桁高 D （m）		4.3		(0.0717)	3.3		(0.0550)							2.5		(0.0417)
開孔幅 b（m）		0.00			U:2.5(0.0417)　L:4.00(0.0667)									U:2.5(0.0417)　L:3.6(0.0600)		
B / D		7.51			9.79									11.94		
b / B		0.00			U:0.0774　L:0.1240									U:0.0809　L:0.1165		
N θ　(Hz)		0.3610		(3.77)	0.3355		(3.76)	0.3355		(3.75)	0.3355		(3.74)	0.3355		(3.78)
N θ ／ N η		2.330			2.221			2.219			2.217			2.236		
W　(tf/m)		22.42		(6.23kgf/m)	21.47		(5.96kgf/m)	21.56		(5.99kgf/m)	21.60		(6.00kgf/m)	21.58		(5.99kgf/m)
I　(tfs²m/m)		240.92		(0.0186 kgfs²m/m)	198.16		(0.0154 kgfs²m/m)	199.39		(0.0154 kgfs²m/m)	200.20		(0.0154 kgfs²m/m)	196.53		(0.0152 kgfs²m/m)
ねじれ風速倍率		5.74			5.35			5.37			5.38			5.33		
減衰率	たわみ	(0.0201)			(0.0396)			(0.0405)			(0.0404)			(0.0397)		
	ねじれ	(0.0200)			(0.0197)			(0.0200)			(0.0196)			(0.0197)		
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1233	0.1170	0.1208	0.1278	0.1273	0.1287	0.1266	0.1284	0.1296	0.1275	0.1279	0.1273	0.1262	0.1267	0.1267
V cr(E)　(m/s)		82.9 ↑	89.2	78.1	79.0	90.5	85.8	81.3	92.8	89.1	82.2	90.9	94.3	79.3	92.3	100.4 ↑

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)		93.1	95.2	93.7	78.9	79.0	78.6	79.4	78.9	78.5	79.3	79.2	79.4	81.3	81.1	81.1
形状補正係数　κ		0.89 ↑	0.94	0.83	1.00	1.15	1.09	1.02	1.18	1.14	1.04	1.15	1.19	0.98	1.14	1.24 ↑

（注）・表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－ 6.1.3.1　空力特性検討断面一覧（３－１）【ばね支持試験結果】

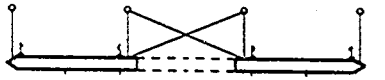
略　　号	IH-2-1								IH-2-2					IH-2-3		
																
	センターバリア２本								センターバリア１本					センターバリアなし		
縮尺	1/80															
全幅Ｂ　（ｍ）	54.080　(0.676)															
桁高Ｄ　（ｍ）	1.600　(0.02)															
開孔幅ｂ（ｍ）	15.500　(0.194)															
Ｂ／Ｄ	33.8															
ｂ／Ｂ	0.287															
Ｎθ　(Hz)	0.0988　(1.393)															
Ｎθ／Ｎη	1.80															
Ｗ　(tf/m)	33.54　(5.224kgf/m)															
Ｉ　(tfs^2m/m)	15030.0　($0.3643kgf\cdot m^2/m$)															
ねじれ風速倍率	5.67															
減衰率　たわみ	(0.013)								(0.015)					(0.015)		
減衰率　ねじれ	(0.006)								(0.008)					(0.008)		
迎角α　(DEG)	-5	-3	-2	-1	0	+1	+3	+5	-3	0	+1	+2	+3	-3	0	+3
ρ　($kgfs^2/m^4$)	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.125	0.125	0.125
Vcr　(m/s)	63.2	62.5	61.9	65.0	75.3	102 ↑	97 ↑	99 ↑	57.7	72.8	79.9	99 ↑	97 ↑	60.3	68.5	81.9

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.5	31.5	31.5
形状補正係数　κ	2.05	2.02	2.00	2.10	2.44	3.30 ↑	3.14 ↑	3.20 ↑	1.86	2.34	2.57	3.18 ↑	3.12 ↑	1.91	2.17	2.60

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）を示す。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.3.2　空力特性検討断面一覧（３－２）【２次元フラッター解析検討結果】

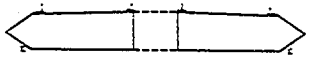
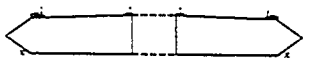
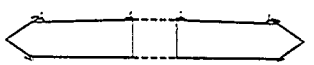
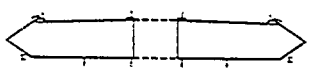
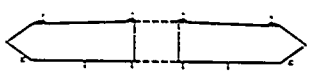
略　　号		IH-2-1(F)										IH-2-3(F)		
														
		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ２本 ２次元フラッター解析										ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱなし ２次元フラッター解析		
		表中の実橋諸元は、中央径間のクロスハンガー間隔を 0.4L（L：中央径間長 2,500m）とした時の値 （多自由度フラッター解析では中央径間クロスハンガー間隔は 0.6L）												
縮尺		1/80												
全幅Ｂ　(m)		54.080　(0.676)												
桁高Ｄ　(m)		1.600　(0.02)												
開孔幅ｂ(m)		15.500　(0.194)												
Ｂ/Ｄ		33.8												
ｂ/Ｂ		0.287												
Ｎθ　(Hz)		0.0988　(1.393)												
Ｎθ／Ｎη		1.80												
Ｗ　(tf/m)		33.54　(5.224kgf/m)												
Ｉ　(tfs²m/m)		15030.0　(0.3643kgf・m²/m)												
ねじれ風速倍率		5.67												
減衰率	たわみ	(0.013)										(0.015)		
	ねじれ	(0.006)										(0.008)		
迎角α　(DEG)		-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.125	0.125	0.125
Vcr　(m/s)		61.8	61.8	61.2	67.5	89.0	101.0	113 ↑	113 ↑	113 ↑	113 ↑	55.0	70.9	85.6

Selbergの式による補正

VF　(m/s)		30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	31.5	31.5	31.5
形状補正係数　κ		2.00	2.00	1.98	2.18	2.88	3.27	3.67 ↑	3.67 ↑	3.67 ↑	3.67 ↑	1.75	2.25	2.72

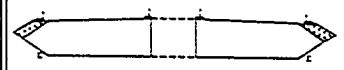
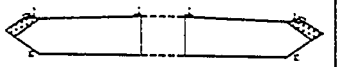
（注１）表中の（ ）付き表示は、解析時の値。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。
（注２）表中 IH-2-1 の迎角-3°、-1°、+1°、+3°の非定常空気力係数は、それぞれの迎角を挟む迎角の空気力を線形補間して求めた。

表－6.1.4.1 空力特性検討断面一覧（４－１）【ばね支持試験結果】

略号		KH-2-6L01			KH-2-6L02			KH-2-6L03			KH-2-6L04			KH-2-6L05		
																
		開口部トラス構造			開口部トラス構造 フェアリング上部導流板設置			開口部トラス構造 フェアリング上部導流板設置 検査車レール非設置			開口部トラス構造 フェアリング上部導流板設置 下部鉛直プレート設置			開口部トラス構造 下部鉛直プレート設置		
縮尺																
全幅B (m)		(0.6852)														
桁高D (m)		(0.0857)														
開口幅b(m)		(0.1000)														
B/D		8.00														
b/B		0.146														
Nθ (Hz)		(2.229)			(2.228)			(2.227)			(2.224)			(2.225)		
Nθ/Nη		2.214			2.215			2.212			2.212			2.213		
W (tf/m)		(8.151kgf/m)			(8.162kgf/m)			(8.113kgf/m)			(8.169kgf/m)			(8.169kgf/m)		
I (tfs^2m/m)		(0.05495kgfs2m/m)			(0.05499kgfs2m/m)			(0.05359kgfs2m/m)			(0.05517kgfs2m/m)			(0.05513kgfs2m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0200)			(0.0198)			(0.0210)			(0.0197)			(0.0194)		
	ねじれ	(0.0196)			(0.0195)			(0.0202)			(0.0195)			(0.0193)		
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)																
Vcr (m/s)			(15.2)			(15.8)			(13.8)	(13.8)	(16.9)	(17.0)	(17.6)		(17.5)	
SELBELGの式による補正																
VF (m/s)			(11.9)			(11.9)			(11.8)	(11.8)	(11.9)	(11.9)	(11.9)		(11.9)	
形状補正係数 κ			1.28			1.33			1.17	1.17	1.42	1.43	1.48		1.47	

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.4.2 空力特性検討断面一覧（4－2）【ばね支持試験結果】

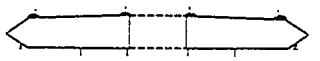
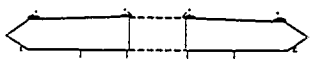
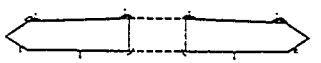
略号		KH-2-6L06			KH-2-6L07												
																	
		開口部トラス構造 アッパータイプフェアリング			開口部トラス構造 アッパータイプフェアリング フェアリング上部導流板設置												
縮尺																	
全幅B (m)		(0.7152)															
桁高D (m)		(0.0857)															
開口幅b(m)		(0.1000)															
B/D		8.35															
b/B		0.140															
Nθ (Hz)		(2.242)			(2.234)												
Nθ/Nη		2.238			2.232												
W (tf/m)		(8.233kgf/m)			(8.239kgf/m)												
I (tfs^2m/m)		(0.05432kgfs2m/m)			(0.05468kgfs2m/m)												
ねじれ風速倍率																	
減衰率	たわみ	(0.0193)			(0.0198)												
	ねじれ	(0.0191)			(0.0193)												
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	
ρ ($kgfs^2/m^4$)																	
Vcr (m/s)			(14.6)	(13.5)		(14.6)	(12.7)										

SELBELGの式による補正

VF (m/s)			(11.7)	(11.7)		(11.7)	(11.7)										
形状補正係数 κ			1.24	1.15		1.25	1.08										

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.4.3 空力特性検討断面一覧（４－３）【ばね支持試験結果】

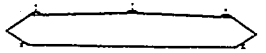
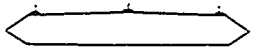
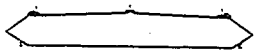
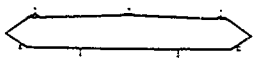
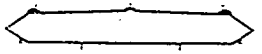
略号	KH-2-4L01			KH-2-4L02			KH-2-4L03			KH-2-4L04					
															
	開口部トラス構造 下部鉛直プレート設置			開口部トラス構造 下部鉛直プレート設置			開口部トラス構造 フェアリング上部及び開口部導流板設置 下部鉛直プレート設置			開口部トラス構造 フェアリング上部及び開口部導流板設置 下部鉛直プレート設置					
縮尺															
全幅B (m)	(0.3736)														
桁高D (m)	(0.0400)														
開口幅b(m)	(0.0700)														
B/D	9.34														
b/B	0.187														
Nθ (Hz)	(1.736)			(1.735)			(1.736)			(1.736)					
Nθ/Nη	1.987			2.000			2.011			2.006					
W (tf/m)	(7.658kgf/m)			(7.768kgf/m)			(7.853kgf/m)			(7.811kgf/m)					
I (tfs^2m/m)	(0.01645kgfs2m/m)			(0.01647kgfs2m/m)			(0.01646kgfs2m/m)			(0.01646kgfs2m/m)					
ねじれ風速倍率															
減衰率 たわみ	(0.0200)			(0.0201)			(0.0200)			(0.0202)					
減衰率 ねじれ	(0.0205)			(0.0206)			(0.0207)			(0.0206)					
迎角α (deg.)	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.124	0.124	0.124	0.124	0.124		0.124		0.123	0.123	0.123			
Vcr (m/s)		(17.6)	(15.6)	(18.4)	(17.7)	(16.4)		(18.6)		(20.6)	(19.6)	(15.9)			

SELBELGの式による補正

VF (m/s)		(8.7)	(8.7)	(8.8)	(8.8)	(8.8)		(8.8)		(8.8)	(8.8)	(8.8)			
形状補正係数 κ		2.02	1.79	2.10	2.02	1.87		2.11		2.34	2.22	1.80			

(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

表－6.1.4.4 空力特性検討断面一覧（４－４）【ばね支持試験結果】

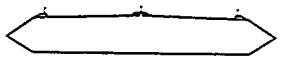
略号		KH-1-4L01			KH-1-4L02			KH-1-4L03			KH-1-4L04			KH-1-4L05		
																
					検査車レール非設置			フェアリング上部導流板設置			下部鉛直プレート設置			フェアリング上部導流板設置 下部鉛直プレート設置		
縮尺																
全幅B (m)		(0.3036)														
桁高D (m)		(0.0400)														
開口幅b(m)																
B/D		7.59														
b/B																
Nθ (Hz)		(1.731)			(1.733)			(1.732)			(1.733)			(1.730)		
Nθ/Nη		2.009			2.011			2.004			2.012			2.015		
W (tf/m)		(7.727kgf/m)			(7.720kgf/m)			(7.677kgf/m)			(7.727kgf/m)			(7.783kgf/m)		
I (tfs^2m/m)		(0.01651kgfs2m/m)			(0.01646kgfs2m/m)			(0.01649kgfs2m/m)			(0.01647kgfs2m/m)			(0.01653kgfs2m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0205)			(0.0199)			(0.0203)			(0.0206)			(0.0202)		
	ねじれ	(0.0204)			(0.0203)			(0.0202)			(0.0205)			(0.0202)		
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.126	0.122	0.125		0.124		0.123	0.123	0.123		0.122		0.123	0.124	
Vcr (m/s)		(3.5)	(6.5)	(5.7)		(8.3)		(4.1)	(5.5)	(5.4)		(5.7)		(3.9)	(4.8)	

SELBELGの式による補正

VF (m/s)		(9.8)	(9.8)	(9.8)		(9.7)		(9.7)	(9.7)	(9.7)		(9.8)		(9.7)	(9.7)	
形状補正係数 κ		0.35	0.66	0.58		0.86		0.43	0.57	0.55		0.58		0.40	0.49	

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.4.5 空力特性検討断面一覧（４－５）【ばね支持試験結果】

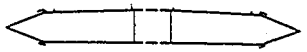
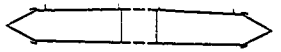
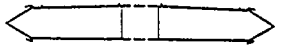
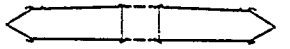
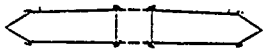
略号		KH-1-6L01															
																	
		検査車レール非設置															
縮尺																	
全幅B (m)		0.5852															
桁高D (m)		0.0857															
開口幅b (m)																	
B/D		6.8284714															
b/B																	
Nθ (Hz)		(2.224)															
Nθ/Nη		2.19															
W (tf/m)		(7.964kgf/m)															
I (tfs^2m/m)		(0.05323kgfs2m/m)															
ねじれ風速倍率																	
減衰率	たわみ	(0.0197)															
	ねじれ	(0.0198)															
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	
ρ ($kgfs^2/m^4$)																	
Vcr (m/s)			(10.4)	(9.5)													

SELBELGの式による補正

VF (m/s)			(12.6)	(12.6)													
形状補正係数 κ			0.82	0.75													

(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

表－6.1.4.6 空力特性検討断面一覧（4－6）【ばね支持試験結果(本共同研究外での成果)】

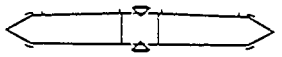
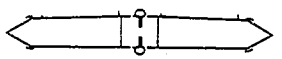
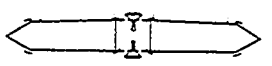
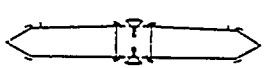
略号		KH-2-7L01			KH-2-7L02			KH-2-7L03			KH-2-7L04			KH-2-7L05		
																
		開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 フェアリング先端角：50°			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 フェアリング先端角：60°			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 フェアリング先端角：70°			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 開口部上下導流板設置			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 開口部上下複導流板設置		
縮尺																
全幅B (m)		(0.5601)			(0.5312)			(0.5100)			(0.5100)			(0.5100)		
桁高D (m)		(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)		
開口幅b(m)		(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)		
B/D		8.00			7.59			7.29			7.29			7.29		
b/B		0.125			0.132			0.137			0.137			0.137		
Nθ (Hz)		(2.501)			(2.563)			(2.578)			(2.568)			(2.566)		
Nθ/Nη		2.032			2.067			2.062			2.171			2.182		
W (tf/m)		(7.168kgf/m)			(7.066kgf/m)			(6.955kgf/m)			(7.178kgf/m)			(7.266kgf/m)		
I (tfs^2m/m)		(0.02023kgfs2m/m)			(0.01926kgfs2m/m)			(0.01904kgfs2m/m)			(0.01912kgfs2m/m)			(0.01915kgfs2m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0291)			(0.0178)			(0.0169)			(0.0243)			(0.0248)		
	ねじれ	(0.0235)			(0.0135)			(0.0136)			(0.0135)			(0.0139)		
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.129	0.129	0.128	0.128	0.128	0.128	0.129	0.129	0.129	0.129	0.128	0.128	0.131	0.129	0.130
Vcr (m/s)		(12.0)	(11.8)	(12.0)	(12.5)	(12.3)	(12.5)	(13.6)	(12.9)	(13.2)	(14.3)	(13.9)	(14.0)	(15.2)	(15.1)	(14.5)

SELBELGの式による補正

VF (m/s)		(10.5)	(10.5)	(10.5)	(11.0)	(11.0)	(11.0)	(11.1)	(11.1)	(11.1)	(11.4)	(11.4)	(11.4)	(11.3)	(11.4)	(11.3)
形状補正係数 κ		1.15	1.13	1.14	1.14	1.12	1.14	1.22	1.16	1.19	1.26	1.22	1.23	1.35	1.33	1.28

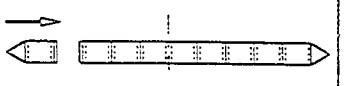
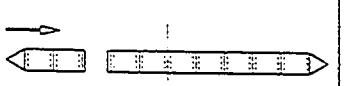
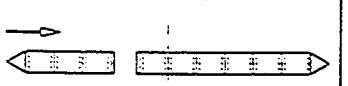
(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

表－6.1.4.7 空力特性検討断面一覧（4－7）【ばね支持試験結果(本共同研究外での成果)】

略号		KH-2-7L06			KH-2-7L07			KH-2-7L08			KH-2-7L09			KH-2-7L10		
																
		開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 センタースポイラー①設置			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 センタースポイラー②設置			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 センタースポイラー③設置			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 開口部上下導流板＋ センタースポイラー②			開口部ﾄﾗｽ構造／検査車ﾚｰﾙ非設置 フェアリング上下導流板設置 開口部上下複導流板＋ センタースポイラー②		
縮尺																
全幅B (m)		(0.5100)			(0.5100)			(0.5100)			(0.5100)			(0.5100)		
桁高D (m)		(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)		
開口幅b(m)		(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)			(0.0700)		
B/D		7.29			7.29			7.29			7.29			7.29		
b/B		0.137			0.137			0.137			0.137			0.137		
Nθ (Hz)		(2.566)			(2.566)			(2.565)			(2.568)			(2.569)		
Nθ/Nη		2.186			2.199			2.200			2.233			2.234		
W (tf/m)		(7.289kgf/m)			(7.378kgf/m)			(7.391kgf/m)			(7.596kgf/m)			(7.596kgf/m)		
I (tfs^2m/m)		(0.01915kgfs2m/m)			(0.01915kgfs2m/m)			(0.01916kgfs2m/m)			(0.01912kgfs2m/m)			(0.01911kgfs2m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0301)			(0.0174)			(0.0243)			(0.0278)			(0.0278)		
	ねじれ	(0.0137)			(0.0139)			(0.0136)			(0.0135)			(0.0136)		
迎角α (deg.)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.129	0.130	0.129	0.128	0.128	0.132	0.129	0.128	0.129	0.130	0.128	0.129	0.128	0.129	0.129
Vcr (m/s)		(13.9)	(14.3)	(15.1)	(15.0)	(15.5)	(17.2)	(14.9)	(15.5)	(16.4)	(15.6)	(16.1)	(17.2)	(15.9)	(16.9)	(18.4)
SELBELGの式による補正																
VF (m/s)		(10.9)	(10.8)	(10.9)	(11.3)	(11.3)	(11.1)	(11.5)	(11.5)	(11.5)	(11.6)	(11.6)	(11.6)	(11.6)	(11.6)	(11.6)
形状補正係数 κ		1.28	1.32	1.39	1.33	1.38	1.55	1.30	1.35	1.43	1.34	1.38	1.48	1.37	1.46	1.59

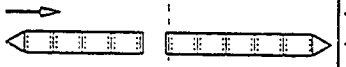
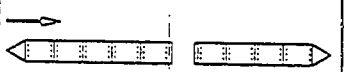
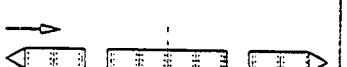
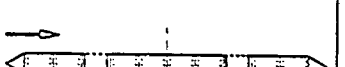
(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

表－6.1.5.1 空力特性検討断面一覧（５－１）【ばね支持試験結果】

略　号		KW-N-F000			KW-N-F001			KW-N-F002			KW-N-F003			KW-N-F004		
																
		偏平箱桁断面 基本断面（開口部なし）			偏平箱桁断面 風上側のみ開口			偏平箱桁断面 風上側のみ開口			偏平箱桁断面 風上側のみ開口			偏平箱桁断面 風上側のみ開口		
縮　尺		1/71														
全幅B (m)		(0.564)														
桁高D (m)		(0.037)														
開孔幅b(m)		(0.0)			(0.04)											
B／D		(15.24)														
b／B		(0.0)			(0.0709)											
Nθ (Hz)		(3.243)			(3.255)			(3.249)			(3.249)			(3.243)		
Nθ／Nη		(2.650)			(2.653)			(2.644)			(2.639)			(2.628)		
W (tf/m)		(6.938kgf/m)														
I (tfs^2m/m)		($0.02716kgfs^2m/m$)														
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0201)			(0.0197)			(0.0203)			(0.0206)			(0.0199)		
	ねじれ	(0.0197)			(0.0201)			(0.0201)			(0.0207)			(0.0195)		
迎角α (DEG)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.1194	0.1265			0.1245			0.1204		0.1276	0.1194		0.1286	0.1235	
Vcr (m/s)		15.5	15.0			15.0			11.0		17.0	17.5		17.0	17.5	
Selbergの式による補正																
VF (m/s)		16.0	15.5			15.7			15.9		15.5	16.0		15.4	15.7	
形状補正係数 κ		0.97	0.97			0.96			0.69		1.10	1.09		1.10	1.11	

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.5.2 空力特性検討断面一覧（5－２）【ばね支持試験結果】

略　号	KW-N-F005	KW-N-F006	KW-N-F007	KW-N-F008	KW-N-F009
					
	偏平箱桁断面 風上側のみ開口	偏平箱桁断面 風下側のみ開口	偏平箱桁断面 風下側のみ開口	偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口	偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ
縮　尺	1/71				
全幅B (m)	(0.564)				
桁高D (m)	(0.037)				
開孔幅b (m)	(0.04)			(0.08)	
B／D	(15.24)				
b／B	(0.0709)			(0.1418)	
Nθ (Hz)	(3.243)	(3.249)	(3.243)	(3.255)	(3.249)
Nθ／Nη	(2.637)	(2.631)	(2.634)	(2.633)	(2.657)
W (tf/m)	(6.938kgf/m)				
I (tfs^2m/m)	($0.02716kgfs^2m/m$)				
ねじれ風速倍率					
減衰率 たわみ	(0.0199)	(0.0201)	(0.0205)	(0.0203)	(0.0418)
減衰率 ねじれ	(0.0200)	(0.0200)	(0.0197)	(0.0202)	(0.0200)

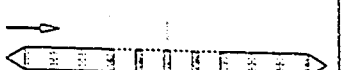
迎角α (DEG)	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)	0.1276	0.1184			0.1276			0.1286			0.1265			0.1245	
Vcr (m/s)	17.0	17.5			16.0			16.5			18.5			18.0	

Selbergの式による補正

VF (m/s)	15.5	16.0			15.5			15.4			15.6			15.7	
形状補正係数 κ	1.10	1.09			1.03			1.07			1.19			1.15	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.5.3 空力特性検討断面一覧（５－３）【ばね支持試験結果】

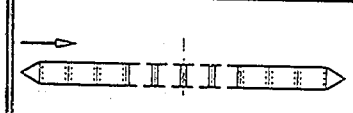
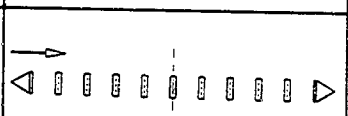
略　号		KW-N-F010			KW-N-F011			KW-N-F012			KW-N-F013			KW-N-F014		
																
		偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口			偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ			偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口 開口部に充実率70%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ			偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口			偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ		
縮　尺		1/71														
全幅Ｂ (m)		(0.564)														
桁高Ｄ (m)		(0.037)														
開孔幅ｂ(m)		(0.08)									(0.16)					
Ｂ／Ｄ		(15.24)														
ｂ／Ｂ		(0.1418)									(0.2837)					
Ｎθ (Hz)		(3.243)			(3.243)			(3.232)			(3.237)			(3.237)		
Ｎθ／Ｎη		(2.626)			(2.647)			(2.647)			(2.606)			(2.632)		
Ｗ (tf/m)		(6.938kgf/m)														
Ｉ (tfs^2m/m)		($0.02716kgfs^2m/m$)														
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.0200)			(0.0452)			(0.0207)			(0.0190)			(0.0590)		
	ねじれ	(0.0198)			(0.0195)			(0.0197)			(0.0198)			(0.0207)		
迎角α (DEG)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ ($kgfs^2/m^4$)			0.1255			0.1245			0.1224			0.1255			0.1214	
Vcr (m/s)			19.0			18.5			18.0			27.0			25.5	

Selbergの式による補正

VF (m/s)			15.6			15.7			15.8			15.5			15.8	
形状補正係数 κ			1.22			1.18			1.14			1.74			1.61	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.5.4 空力特性検討断面一覧（5－4）【ばね支持試験結果】

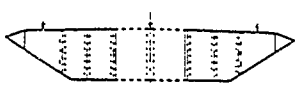
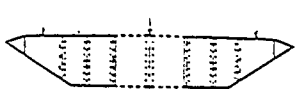
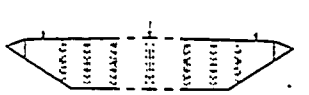
略　号		KW-N-F015			KW-N-F016												
																	
		偏平箱桁断面 風上側・風下側対称開口 開口部に充実率70%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ			偏平箱桁断面 全開口												
縮　尺		1/71															
全幅B (m)		(0.564)															
桁高D (m)		(0.037)															
開孔幅b(m)		(0.16)			(0.4)												
B／D		(15.24)															
b／B		(0.2837)			(0.7092)												
Nθ (Hz)		(3.227)			(3.255)												
Nθ／Nη		(2.643)			(2.606)												
W (tf/m)		(6.938kgf/m)															
I (tfs^2m/m)		(0.02716$kgfs^2m/m$)															
ねじれ風速倍率																	
減衰率	たわみ	(0.0248)			(0.0201)												
	ねじれ	(0.0202)			(0.0204)												
迎角α (DEG)		+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	
ρ ($kgfs^2/m^4$)			0.1224			0.1265											
Vcr (m/s)			23.0			18.0↑											

Selbergの式による補正

VF (m/s)			15.7			15.5											
形状補正係数 κ			1.46			1.16↑											

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.5.5 空力特性検討断面一覧（5－5）【ばね支持試験結果】

略　号	KW-N-H7m00	KW-N-H7m01	KW-N-H7m02	KW-N-H7m03	KW-N-H7m04
					
	H=7m断面 基本断面（開口部なし）	H=7m断面　中央部開口	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ	H=7m断面　中央部開孔 円孔による充実率50%開孔	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率60%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ
縮　尺	1/71				
全幅B　(m)	41.0　(0.577)				
桁高D　(m)	7.0　(0.099)				
開孔幅b(m)	0.0　(0.0)	10.5　(0.148)			
B／D	5.857				
b／B	0.0	0.2561			
Nθ　(Hz)	0.1604　(3.237)	0.1604　(3.237)	0.1604　(3.237)	0.1604　(3.237)	0.1604　(3.243)
Nθ／Nη	2.987　(2.621)	2.987　(2.583)	2.987　(2.604)	2.987　(2.583)	2.987　(2.615)
W　(tf/m)	35.0　(6.944kgf/m)				
I　(tfs^2m/m)	690.0　(0.02716$kgfs^2m/m$)				
ねじれ風速倍率	3.518	3.518	3.518	3.518	3.512
減衰率　たわみ	(0.0203)	(0.0197)	(0.0578)	(0.0276)	(0.0401)
減衰率　ねじれ	(0.0197)	(0.0199)	(0.0203)	(0.0194)	(0.0199)

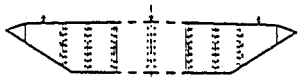
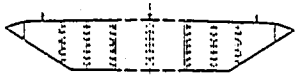
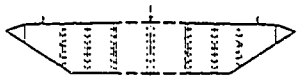
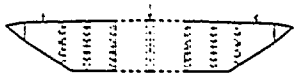
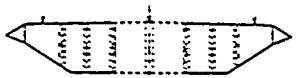
迎角α　(DEG)	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　($kgfs^2/m^4$)	0.1173	0.1204	0.1245	0.1194	0.1194	0.1255	0.1235	0.1194	0.1235	0.1224	0.1163	0.1286	0.1286	0.1255	0.1214
Vcr　(m/s)	53.8	49.8	41.2	36.9	78.2	90.7	48.8	81.4	92.9	44.5	89.3	91.4	46.2	71.7	92.9

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	57.0	56.2	55.3	56.5	56.5	55.1	55.5	56.5	55.5	55.8	57.2	54.4	54.4	55.1	56.0
形状補正係数　κ	0.94	0.89	0.75	0.65	1.38	1.65	0.88	1.44	1.67	0.80	1.56	1.68	0.85	1.30	1.66

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.5.6 空力特性検討断面一覧（５－６）【ばね支持試験結果】

略　号	KW-N-H7m05	KW-N-H7m06	KW-N-H7m07	KW-N-H7m08	KW-N-H7m09
					
	H=7m断面　中央部開孔 円孔による充実率60%開孔	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率70%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ	H=7m断面　中央部開孔 円孔による充実率70%開孔	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上面角度変更	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上面角度変更
縮　尺	1/71				
全幅B　(m)	41.0　(0.577)				
桁高D　(m)	7.0　(0.099)				
開孔幅b(m)	10.5　(0.148)				
B／D	5.857				
b／B	0.2561				
Nθ　(Hz)	0.1604　(3.232)	0.1604　(3.237)	0.1604　(3.226)	0.1604　(3.243)	0.1604　(3.237)
Nθ／Nη	2.987　(2.577)	2.987　(2.617)	2.987　(2.587)	2.987　(2.601)	2.987　(2.596)
W　(tf/m)	35.0　(6.944kgf/m)				
I　(tfs^2m/m)	690.0　(0.02716$kgfs^2m/m$)				
ねじれ風速倍率	3.524	3.518	3.530	3.512	3.518
減衰率　たわみ	(0.0346)	(0.0357)	(0.0434)	(0.0532)	(0.0548)
減衰率　ねじれ	(0.0194)	(0.0198)	(0.0195)	(0.0206)	(0.0206)

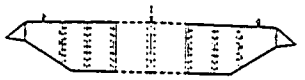
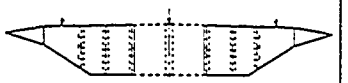
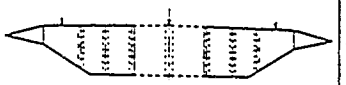
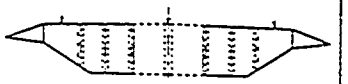
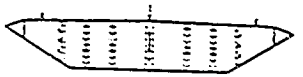
迎角α　(DEG)	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　($kgfs^2/m^4$)	0.1235	0.1235	0.1214	0.1224	0.1214	0.1224	0.1194	0.1245	0.1245	0.1122			0.1163		
Vcr　(m/s)	49.1	56.6	79.9	45.9	59.9	88.9	51.3	43.0	52.3	25.9			31.2		

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	55.5	55.5	56.0	55.8	56.0	55.8	56.5	55.3	55.3	54.7			53.7		
形状補正係数 κ	0.88	1.02	1.43	0.82	1.07	1.59	0.91	0.78	0.95	0.47			0.58		

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.5.7 空力特性検討断面一覧（５－７）【ばね支持試験結果／フラッター解析結果】

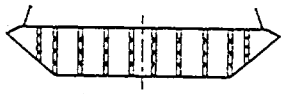
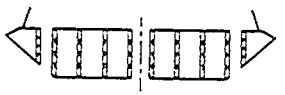
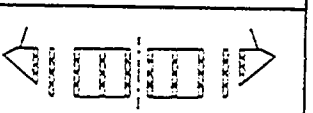
略　号	KW-N-H7m10	KW-N-H7m11	KW-N-H7m12	KW-N-H7m13	KW-N-H7m14 (F)
					
	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上面角度変更	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上面角度・長さ変更	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上面角度・長さ変更	H=7m断面　中央部開口 開口部に充実率50%ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ長さ変更	H=7m断面 基本断面（開口部なし） フラッター解析による
縮　尺	1/71				
全幅B (m)	41.0 (0.577)	46.5 (0.655)			—
桁高D (m)	7.0 (0.099)				41.0
開孔幅b (m)	10.5 (0.148)				7.0
B／D	5.857	6.643			0.0
b／B	0.2561	0.2258			5.9
Nθ (Hz)	0.1604 (3.226)	0.1604 (3.191)	0.1604 (3.203)	0.1604 (3.186)	0.0
Nθ／Nη	2.987 (2.587)	2.987 (2.565)	2.987 (2.577)	2.987 (2.565)	0.1604
W (tf/m)	35.0 (6.944kgf/m)				2.987
I (tfs^2m/m)	690.0 ($0.02716kgfs^2m/m$)				35.0
ねじれ風速倍率	3.530	3.569	3.556	3.575	690.0
減衰率 たわみ	(0.0539)	(0.0617)	(0.0608)	(0.0617)	—
減衰率 ねじれ	(0.0203)	(0.0206)	(0.0203)	(0.0211)	—
迎角α (DEG)	+3 / 0 / -3	+3 / 0 / -3	+3 / 0 / -3	+3 / 0 / -3	(0.02) / +3 / 0 / -3
ρ ($kgfs^2/m^4$)	0.1163	0.1133	0.1122	0.1153	0.125
Vcr (m/s)	24.3	45.9	46.5	63.2	57.0

Selbergの式による補正

VF (m/s)	53.7			54.4			54.7			54.0				55.2		
形状補正係数 κ	0.45			0.84			0.85			1.17				1.03		

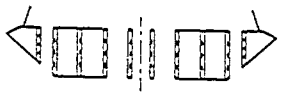
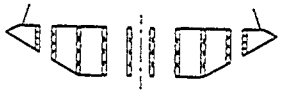
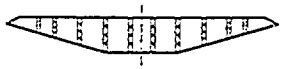
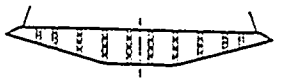
（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）

表－6.1.6.1 空力特性検討断面一覧（６－１）【ばね支持試験結果】

略　号		SH-1-H7-1			SH-1-H7-2			SH-1-H7-3			SH-1-H7-4			SH-1-H7-5		
																
		桁高7.0m、 透過型遮風壁、 透過型フェアリング設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁、 透過型フェアリング設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁、 透過型フェアリング設置		
縮　尺		1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65		
全幅Ｂ　(m)		39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)
桁高Ｄ　(m)		7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)
開孔幅ｂ(m)		0.0		0.0000	8.0		(0.1231)	28.8		(0.4423)	28.8		(0.4423)	28.8		(0.4423)
Ｂ／Ｄ		5.64			5.64			5.64			5.64			5.64		
ｂ／Ｂ		0.00			0.20			0.73			0.73			0.73		
Ｎθ　(Hz)		0.1569		(2.8038)	0.1569		(2.8038)	0.1569		(2.8274)	0.1569		(2.8274)	0.1569		(2.7978)
Ｎθ／Ｎη		3.05			3.05			3.05			3.05			3.05		
Ｗ　(tf/m)		24.00		(9.75)	24.00		(9.75)	24.00		(9.59)	24.00		(9.73)	24.00		(9.72)
Ｉ　(tfs^2m/m)		336.70		(0.0498)	336.70		(0.0498)	336.70		(0.0470)	336.70		(0.0478)	336.70		(0.0480)
ねじれ風速倍率		3.64			3.64			3.61			3.61			3.65		
減衰率	たわみ			(0.0295)			(0.0295)			(0.0310)			(0.0315)			(0.0309)
	ねじれ			(0.0197)			(0.0197)			(0.0196)			(0.0206)			(0.0214)
迎角α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　($kgfs^2/m^4$)			0.1216			0.1218		0.1216	0.1217	0.1226	0.1196	0.1196	0.1200		0.1200	
Vcr　(m/s)								90.0↑	90.0↑	90.0↑	90.0↑	90.0↑	90.0↑			
Selbergの式による補正																
VF　(m/s)			42.79			42.79		42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79		42.79	
形状補正係数 k			0.82			0.58		2.10↑	2.10↑	2.10↑	2.10↑	2.10↑	2.10↑		0.86	

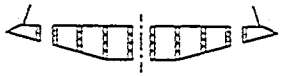
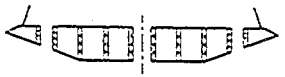
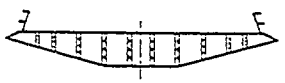
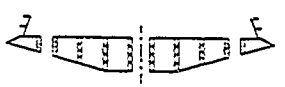
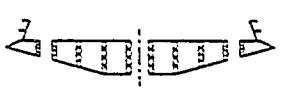
（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.6.2 空力特性検討断面一覧（6－2）【ばね支持試験結果】

略　号		SH-1-H7-6			SH-1-H7-7			SH-1-H7-8			SH-1-H5-1			SH-1-H5-2		
																
		桁高7.0m、 透過型遮風壁、 透過型フェアリング設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁設置			桁高7.0m、 透過型遮風壁設置			桁高5.0m			桁高5.0m、 透過型遮風壁設置		
縮　尺		1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65		
全幅 B　(m)		39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)
桁高 D　(m)		7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)	7.0		(0.1077)	5.0		(0.0769)	5.0		(0.0769)
開孔幅 b (m)		15.3		(0.2346)	15.3		(0.2346)	15.3		(0.2346)	0.0		0.0000	0.0		0.0000
B／D		5.64			5.64			5.64			7.90			7.90		
b／B		0.39			0.39			0.39			0.00			0.00		
Nθ (Hz)		0.1569		(2.7811)	0.1569		(2.7772)	0.1569		(2.7991)	0.1569		(2.3820)	0.1569		(2.3820)
Nθ／Nη		3.05			3.05			3.05			3.05			3.05		
W　(tf/m)		24.00		(9.72)	24.00		(9.72)	24.00		(9.92)	24.00		(9.34)	24.00		(9.34)
I (tfs^2m/m)		336.70		(0.0486)	336.70		(0.0485)	336.70		(0.0480)	336.70		(0.0613)	336.70		(0.0613)
ねじれ風速倍率		3.67			3.67			3.64			4.28			4.28		
減衰率	たわみ			(0.0310)			(0.0292)			(0.0293)			(0.0316)			(0.0293)
	ねじれ			(0.0209)			(0.0210)			(0.0218)			(0.0196)			(0.0194)
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ ($kgfs^2/m^4$)		0.1191	0.1191	0.1202		0.1199			0.1181		0.1196	0.1133	0.1193	0.1166	0.1187	0.1166
Vcr　(m/s)		90.0↑	90.0↑	90.0↑					90.0↑							
Selbergの式による補正																
VF　(m/s)		42.79	42.79	42.79		42.79			42.79		42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79
形状補正係数 k		2.10↑	2.10↑	2.10↑		0.32			2.10↑		1.41	1.40	1.33	1.41	1.44	0.93

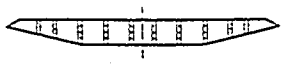
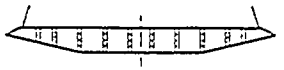
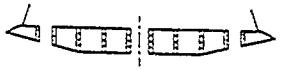
（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.6.3 空力特性検討断面一覧（6－3）【ばね支持試験結果】

略　号		SH-1-H5-3			SH-1-H5-4			SH-1-H5-2F			SH-1-H5-3F			SH-1-H5-3FC		
																
		桁高5.0m、 透過型遮風壁設置			桁高5.0m、 透過型遮風壁設置			桁高5.0m、 透過型遮風壁、水平導流板設置			桁高5.0m、 透過型遮風壁、水平導流板設置			桁高5.0m、 透過型遮風壁、水平導流板設置 センターバリヤ設置		
縮　尺		1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65			1/ 65		
全幅 B （m）		39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)
桁高 D （m）		5.0		(0.0769)	5.0		(0.0769)	5.0		(0.0769)	5.0		(0.0769)	5.0		(0.0769)
開孔幅 b （m）		8.0		(0.1231)	8.0		(0.1231)	0.0		0.0000	8.0		(0.1231)	8.0		(0.1231)
B／D		7.90			7.90			7.90			7.90			7.90		
b／B		0.20			0.20			0.00			0.20			0.20		
Nθ （Hz）		0.1569		(2.3820)	0.1569		(2.3807)	0.1569		(2.3771)	0.1569		(2.3852)	0.1569		(2.3852)
Nθ／Nη		3.05			3.05			3.05			3.05			3.05		
W （tf/m）		24.00		(9.35)	24.00		(9.51)	24.00		(9.52)	24.00		(9.45)	24.00		(9.45)
I （tfs^{2}m/m）		336.70		(0.0613)	336.70		(0.0614)	336.70		(0.0615)	336.70		(0.0612)	336.70		(0.0612)
ねじれ風速倍率		4.28			4.28			4.29			4.28			4.28		
減衰率	たわみ			(0.0289)			(0.0288)			(0.0293)			(0.0315)			(0.0305)
	ねじれ			(0.0218)			(0.0195)			(0.0206)			(0.0202)			(0.0203)
迎角 α （DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ （kgfs^2/m^4）		0.1177	0.1187	0.1187	0.1186	0.1179	0.1186	0.1217	0.1210	0.1210	0.1245	0.1217	0.1245	0.1220	0.1245	0.1220
Vcr （m/s）		79.6	75.6	33.5	39.7	44.3	31.5	58.2	57.1	51.6	78.4	81.6	60.0	80.5	87.0	77.2
Selbergの式による補正																
VF （m/s）		42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79
形状補正係数 k		1.86	1.77	0.78	0.93	1.04	0.74	1.36	1.33	1.21	1.83	1.91	1.40	1.88	2.03	1.80

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.6.4 空力特性検討断面一覧（6－4）【ばね支持試験結果】

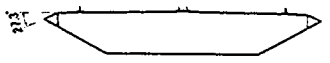
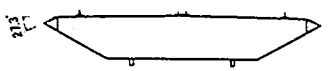
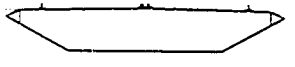
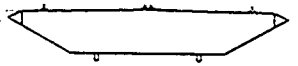
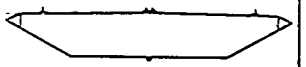
略　号		SH-1-H35-1			SH-1-H35-2			SH-1-H35-3								
																
		桁高3.5m			桁高3.5m、 透過型遮風壁設置			桁高3.5m、 透過型遮風壁設置								
縮　尺		1/ 65			1/ 65			1/ 65								
全幅 B （m）		39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)	39.5		(0.6077)						
桁高 D （m）		3.5		(0.0538)	3.5		(0.0538)	3.5		(0.0538)						
開孔幅 b （m）		0.0		0.0000	0.0		0.0000	8.0		(0.1231)						
B／D		11.29			11.29			11.29								
b／B		0.00			0.00			0.20								
Nθ （Hz）		0.1569		(2.3906)	0.1569		(2.3906)	0.1569		(2.3851)						
Nθ／Nη		3.05			3.05			3.05								
W （tf/m）		24.00		(9.55)	24.00		(9.55)	24.00		(9.46)						
I （tfs^{2}m/m）		336.70		(0.0609)	336.70		(0.0609)	336.70		(0.0612)						
ねじれ風速倍率		4.27			4.27			4.28								
減衰率	たわみ			(0.0287)			(0.0311)			(0.0280)						
	ねじれ			(0.0196)			(0.0195)			(0.0210)						
迎角 α （DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ （kgfs^2/m^4）		0.1210	0.1202	0.1202	0.1188	0.1210	0.1204	0.1204	0.1192	0.1192						
Vcr （m/s）		54.8	60.0	57.0	55.6	61.0	45.7	69.4	75.7	46.6						

Selbergの式による補正

VF （m/s）	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79	42.79						
形状補正係数 k	1.28	1.40	1.33	1.30	1.43	1.07	1.62	1.77	1.09						

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.7.1　空力特性検討断面一覧（７－１）【ばね支持試験結果】

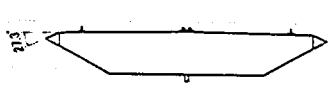
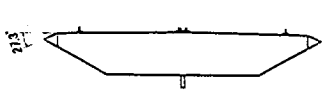
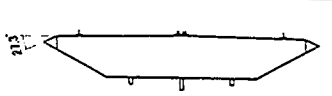
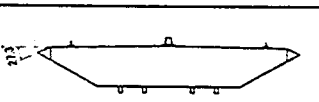
略　　号		NK-1-001			NK-1-002			NK-1-003			NK-1-004			NK-1-005		
																
		フェアリング基本Ａ（27.3°）			フェアリング基本Ａ（27.3°） レール間隔 15m			フェアリング基本Ａ（27.3°） 上面バリア 防護柵閉塞			フェアリング基本Ａ（27.3°） 上面バリア 防護柵閉塞 レール間隔 15m			フェアリング基本Ａ（27.3°） 上面バリア 防護柵閉塞 下面バリア （H=0.525 m）		
縮尺		1/75														
全幅Ｂ　（m）		41.0　(0.5467)														
桁高Ｄ　（m）		7.0　(0.0933)														
開孔幅ｂ（m）		0.0														
Ｂ／Ｄ		5.857														
ｂ／Ｂ		0.0														
Ｎθ　(Hz)		(3.72)			(3.72)			(3.69)			(3.67)			(3.72)		
Ｎθ／Ｎη		3.100			3.126			3.075			3.110			3.100		
Ｗ　(tf/m)		35.00　(6.292kgf/m)			35.00　(6.413kgf/m)			35.00　(6.293kgf/m)			35.00　(6.492kgf/m)			35.00　(6.330kgf/m)		
Ｉ　(tfs²m/m)		690.　(0.02185kgfs²m/m)			690.　(0.02145kgfs²m/m)			690.　(0.02174kgfs²m/m)			690.　(0.02201kgfs²m/m)			690.　(0.02139kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		3.06			3.06			3.09			3.10			3.06		
減衰率	たわみ	(0.0203)			(0.0201)			(0.0203)			(0.0203)			(0.0201)		
	ねじれ	(0.0201)			(0.0197)			(0.0200)			(0.0200)			(0.0201)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.117	0.122	0.123	0.118	0.122	0.121	0.121	0.124	0.123	0.121	0.123	0.123	0.119	0.118	0.118
Vcr　(m/s)		50.7	50.3	48.5	57.0	54.5	48.4	50.2	51.4	47.3	57.1	55.3	46.3	54.3	53.3	49.1

Selbergの式による補正

VF　(m/s)	54.6	53.3	53.0	54.7	53.3	53.5	53.8	52.8	52.8	54.0	53.6	53.7	54.4	54.0	54.2
形状補正係数　κ	0.93	0.94	0.91	1.04	1.02	0.90	0.93	0.97	0.90	1.06	1.03	0.86	1.00	0.99	0.91

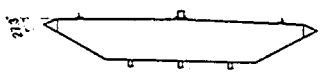
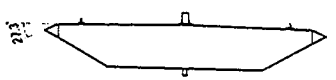
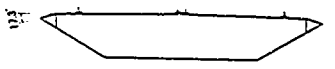
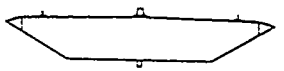
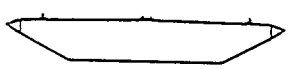
（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.7.2　空力特性検討断面一覧（７－２）【ばね支持試験結果】

略　　号		NK-1-006			NK-1-007			NK-1-008			NK-1-009			NK-1-010		
																
		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本Ａ（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ 防護柵閉塞 下面ﾊﾞﾘｱ （H=1.125ｍ）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本Ａ（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ 防護柵閉塞 下面ﾊﾞﾘｱ （H=2.025ｍ）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本Ａ（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ 防護柵閉塞 下面ﾊﾞﾘｱ （H=2.025ｍ） ﾚｰﾙ間隔 15m			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本Ａ（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） ﾚｰﾙ間隔 7.5m,15m			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本Ａ（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ （H=1.125ｍ）		
縮尺		1/75														
全幅Ｂ　（m）		41.0　(0.5467)														
桁高Ｄ　（m）		7.0　(0.0933)														
開孔幅ｂ（m）		0.0														
Ｂ／Ｄ		5.857														
ｂ／Ｂ		0.0														
Ｎθ　(Hz)		(3.69)			(3.68)			(3.68)			(3.67)			(3.68)		
Ｎθ／Ｎη		3.101			3.092			3.119			3.137			3.119		
Ｗ　(tf/m)		35.00　(6.381kgf/m)			35.00　(6.382kgf/m)			35.00　(6.474kgf/m)			35.00　(6.565kgf/m)			35.00　(6.438kgf/m)		
Ｉ　(tfs²m/m)		690.　(0.02181kgfs²m/m)			690.　(0.02190kgfs²m/m)			690.　(0.02193kgfs²m/m)			690.　(0.02201kgfs²m/m)			690.　(0.02190kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		3.09			3.10			3.10			3.10			3.10		
減衰率	たわみ	(0.0196)			(0.0200)			(0.0203)			(0.0196)			(0.0197)		
	ねじれ	(0.0196)			(0.0200)			(0.0199)			(0.0201)			(0.0196)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.119	0.123	0.123	0.119	0.118	0.118	0.120	0.121	0.122	0.125	0.119	0.119	0.126	0.119	0.119
Vcr　(m/s)		55.8	55.2	51.1	58.0	56.9	52.5	58.4	55.7	49.4	59.7	60.8	54 ↑	58.9	60.1	58.7
Selbergの式による補正																
VF　(m/s)		54.4	53.3	53.2	54.3	54.5	54.4	54.3	54.1	53.7	53.0	54.7	54.7	52.7	54.4	54.3
形状補正係数　κ		1.03	1.04	0.96	1.07	1.04	0.96	1.07	1.03	0.92	1.13	1.11	1.02 ↑	1.12	1.10	1.08

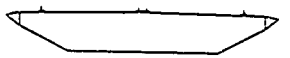
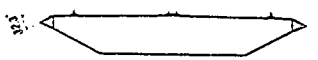
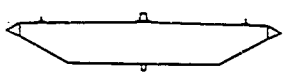
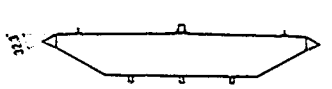
（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.7.3　空力特性検討断面一覧（7－3）【ばね支持試験結果】

略　　号		NK-1-011			NK-1-012			NK-1-013			NK-1-014			NK-1-015		
																
		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本A（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m） ﾚｰﾙ間隔 15m			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本A（27.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=2.025m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本B			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本B 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本A-1（22.3°）		
縮尺		1/75														
全幅B　(m)		41.0　(0.5467)						41.8　(0.5567)						41.0　(0.5467)		
桁高D　(m)		7.0　(0.0933)														
開孔幅b(m)		0.0														
B/D		5.857						5.964						5.857		
b/B		0.0														
Nθ　(Hz)		(3.68)			(3.68)			(3.68)			(3.67)			(3.69)		
Nθ／Nη		3.119			3.119			3.067			3.110			3.075		
W　(tf/m)		35.00　(6.520kgf/m)			35.00　(6.493kgf/m)			35.00　(6.340kgf/m)			35.00　(6.474kgf/m)			35.00　(6.330kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		690.　(0.02199kgfs²m/m)			690.　(0.02194kgfs²m/m)			690.　(0.02199kgfs²m/m)			690.　(0.02203kgfs²m/m)			690.　(0.02183kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		3.10			3.10			3.10			3.10			3.09		
減衰率	たわみ	(0.0200)			(0.0203)			(0.0200)			(0.0200)			(0.0198)		
	ねじれ	(0.0199)			(0.0197)			(0.0198)			(0.0200)			(0.0198)		
迎角α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.126	0.119	0.119	0.127	0.120	0.119	0.129	0.117	0.117	0.129	0.117	0.117	0.127	0.120	0.120
Vcr　(m/s)		59.5	59.4	54.2	63.3	63.1	61.2	42.8	52.6	43.2	58.1	59.0	52.5	44.7	52.4	42.6
Selbergの式による補正																
VF　(m/s)		52.7	54.7	54.6	52.3	54.3	54.5	51.7	54.6	54.5	51.9	54.9	54.7	51.8	53.8	53.8
形状補正係数　κ		1.13	1.09	0.99	1.21	1.16	1.12	0.83	0.96	0.79	1.12	1.07	0.96	0.86	0.97	0.79

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.7.4　空力特性検討断面一覧（7－4）【ばね支持試験結果】

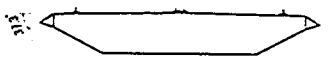
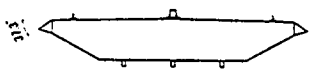
略　　号		NK-1-016			NK-1-017			NK-1-018			NK-1-019			NK-1-020		
																
		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-2（17.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-3（12.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-4（32.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-4（32.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-4（32.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m） ﾚｰﾙ間隔 15m		
縮尺		1/75														
全幅 B （m）		41.0 (0.5467)														
桁高 D （m）		7.0 (0.0933)														
開孔幅 b（m）		0.0														
B / D		5.857														
b / B		0.0														
N θ （Hz）		(3.69)			(3.68)			(3.70)			(3.70)			(3.71)		
N θ ／ N η		3.075			3.067			3.083			3.109			3.092		
W （tf/m）		35.00 (6.338kgf/m)			35.00 (6.352kgf/m)			35.00 (6.269kgf/m)			35.00 (6.381kgf/m)			35.00 (6.472kgf/m)		
I （tfs²m/m）		690. (0.02178kgfs²m/m)			690. (0.02192kgfs²m/m)			690. (0.02177kgfs²m/m)			690. (0.02179kgfs²m/m)			690. (0.02173kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		3.09			3.10			3.08			3.08			3.07		
減衰率	たわみ	(0.0200)			(0.0199)			(0.0204)			(0.0201)			(0.0199)		
	ねじれ	(0.0220)			(0.0202)			(0.0201)			(0.0205)			(0.0200)		
迎角 α （DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ （kgfs²/m⁴）		0.128	0.121	0.120	0.129	0.119	0.119	0.127	0.119	0.119	0.127	0.120	0.121	0.129	0.127	0.127
Vcr （m/s）		44.7	51.9	29.5	48.4	52.6	27.8	49.6	52.6	49.2	60.8	61.5	58.5	60.1	60.2	57.3

Selberg の式による補正

VF （m/s）		51.8	53.6	53.7	51.5	54.2	54.1	52.0	53.9	53.8	52.4	53.9	53.6	51.9	52.5	52.3
形状補正係数 κ		0.86	0.97	0.55	0.94	0.97	0.51	0.95	0.98	0.91	1.16	1.14	1.09	1.16	1.15	1.10

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.7.5　空力特性検討断面一覧（７－５）【ばね支持試験結果】

略　　号	NK-1-021			NK-1-022			NK-1-023								
															
	ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-5（37.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-5（37.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ基本 A-5（37.3°） 上面ﾊﾞﾘｱ（H=1.5m） 下面ﾊﾞﾘｱ（H=1.125 m） ﾚｰﾙ間隔 15m								
縮尺	1/75														
全幅 B　（m）	41.0　(0.5467)														
桁高 D　（m）	7.0　(0.0933)														
開孔幅 b（m）	0.0														
B / D	5.857														
b / B	0.0														
N θ　(Hz)	(3.70)			(3.69)			(3.71)								
N θ ／ N η	3.083			3.101			3.092								
W　(tf/m)	35.00　(6.261kgf/m)			35.00　(6.394kgf/m)			35.00　(6.472kgf/m)								
I　(tfs²m/m)	690.　(0.02174kgfs²m/m)			690.　(0.02183kgfs²m/m)			690.　(0.02167kgfs²m/m)								
ねじれ風速倍率	3.08			3.09			3.07								
減衰率　たわみ	(0.0196)			(0.0198)			(0.0198)								
減衰率　ねじれ	(0.0200)			(0.0201)			(0.0199)								
迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3						
ρ　(kgfs²/m⁴)	0.127	0.120	0.121	0.125	0.121	0.121	0.128	0.127	0.125						
Vcr　(m/s)	50.1	53.0	49.8	60.8	61.7	57.7	60.8	60.2	57.7						

Selberg の式による補正

VF　(m/s)	51.9	53.6	53.3	53.0	53.8	53.7	52.3	52.5	52.8						
形状補正係数　κ	0.97	0.99	0.93	1.15	1.15	1.07	1.16	1.15	1.09						

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.7.6　空力特性検討断面一覧（７－６）【２次元フラッター解析検討結果】

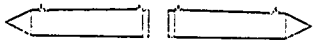
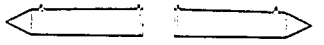
略　　号		NK-2-001(F)			NK-2-002(F)			NK-2-003(F)			NK-2-004(F)			NK-2-005(F)		
																
		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ A-1（17.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ A-2（22.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ A-3（27.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ A-4（32.3°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ A-4（37.3°）		
縮尺		1/75														
全幅 B　(m)		43.62　(0.5816)														
桁高 D　(m)		5.0　(0.0933)														
開孔幅 b (m)		3.0														
B / D		8.724														
b / B		0.0688														
N θ　(Hz)		(3.68)														
N θ ／ N η		2.943														
W　(tf/m)		35.00 (6.22 kgf/m)														
I　(tfs²m/m)		690. (0.0218kgfs²m/m)														
ねじれ風速倍率		-														
減衰率	たわみ	(0.0200)														
	ねじれ	(0.0200)														
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.125			0.125			0.125			0.125			0.125		
Vcr　(m/s)		(18.6)	(18.2)	(15.4)	(18.4)	(17.9)	(18.0)	(19.0)	(17.9)	(10.2)	(18.8)	(18.1)	(11.3)	(18.2)	(18.3)	(11.2)

Selberg の式による補正

VF　(m/s)		(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)	(16.4)
形状補正係数　κ		1.13	1.11	0.94	1.12	1.09	1.10	1.16	1.09	0.62	1.15	1.10	0.69	1.11	1.12	0.68

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。κ の算出は、フラッター解析による。

表－6.1.7.7　空力特性検討断面一覧（７－７）【２次元フラッター解析検討結果】

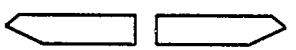
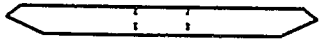
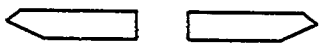
略　　号		NK-2-006(F)			NK-2-007(F)			NK-2-008(F)			NK-2-009(F)			NK-2-010(F)		
																
		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ B-1 （先端角 70°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ B-2 （先端角 60°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ B-3 （先端角 50°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ B-2 （先端角 60°）			ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ B-2 （先端角 60°） 防風柵設置		
縮尺		1/75														
全幅 B　(m)		46.845 (0.6246)			48.285 (0.6438)			50.25 (0.6700)			48.285 (0.6438)			48.285 (0.6438)		
桁高 D　(m)		5.0　(0.0933)														
開孔幅 b (m)		3.0			3.0			3.0			5.0			3.0		
B / D		9.369			9.657			10.05			9.657			9.657		
b / B		0.0640			0.0621			0.0597			0.1036			0.0621		
N θ　(Hz)		(3.68)														
N θ / N η		2.943														
W　(tf/m)		35.00 (6.22 kgf/m)														
I　(tfs²m/m)		690. (0.0218kgfs²m/m)														
ねじれ風速倍率		-														
減衰率	たわみ	(0.0200)														
	ねじれ	(0.0200)														
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.125			0.125			0.125			0.125			0.125		
Vcr　(m/s)		(12.3)	(18.2)	(13.0)	(18.6)	(17.7)	(13.6)	(17.5)	(16.6)	(13.1)	(18.7)	(19.0)	(17.5)	(9.1)	(15.9)	(21.7)

Selberg の式による補正

VF　(m/s)	(15.8)	(15.8)	(15.8)	(15.6)	(15.6)	(15.6)	(15.2)	(15.2)	(15.2)	(15.6)	(15.6)	(15.6)	(15.6)	(15.6)	(15.6)
形状補正係数 κ	0.78	1.15	0.82	1.19	1.13	0.87	1.15	1.09	0.86	1.20	1.22	1.12	0.59	1.02	1.39

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。κの算出は、フラッター解析による。

表－ 6.1.8.1　空力特性検討断面一覧（８－１）【ばね支持試験結果】

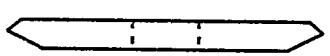
略　　号		HZ-2-530			HZ-2-531			HZ-2-532			HZ-2-550			HZ-2-551		
											断面 A 					
		桁高５ｍ　開口幅３ｍ 基本断面（開口部閉塞）			同左、中央部開口			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 ｈｕ＝ｈｌ＝ 1.5m			桁高５ｍ　開口幅５ｍ 基本断面（開口部閉塞）			同左、中央部開口		
縮　　尺		1/80			1/80			1/80			1/80			1/80		
全幅Ｂ　（ｍ）		42.0			42.0			42.0			44.0			44.0		
桁高Ｄ　（ｍ）		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0		
開孔幅ｂ（ｍ）					3.0			3.0						5.0		
Ｂ／Ｄ		8.4			8.4			8.4			8.8			8.8		
ｂ／Ｂ					0.071			0.071						0.114		
Ｎθ　　（Hz）		0.138			0.138			0.138			0.133			0.133		
Ｎθ／Ｎｎ		2.632			2.632			2.632			2.547			2.547		
Ｗ　　（tf/m）		37.9			37.9			37.9			38.2			38.2		
Ｉ　（tfs２m/m）		772			772			772			869			869		
ねじれ風速倍率		4.58			4.58			4.58			4.60			4.60		
減衰率	たわみ	(0.0201)			(0.0201)			(0.0201)			(0.0218)			(0.0218)		
	ねじれ	(0.0201)			(0.0201)			(0.0201)			(0.0219)			(0.0219)		
迎角α　（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ（kgfs２/m４）			0.125			0.125			0.125			0.125			0.125	
Vcr　（m/s）			49.0		57.5	55.0	49.0	33.0	57.0	62.5	46.0	46.0	47.0	56.0	56.0	52.5

Selbergの式による補正

ＶＦ（m/s）			50.1			50.1			50.1			47.9			47.9	
形状補正係数　ｋ			0.98		1.15	1.10	0.98	0.66	1.14	1.25	0.96	0.96	0.98	1.17	1.17	1.10

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.8.2　空力特性検討断面一覧（８－２）【ばね支持試験結果】

略　　号		HZ-2-552			HZ-2-570			HZ-2-571			HZ-2-572			HZ-2-590		
		断面 B 														
		同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 h u ＝ h l ＝ 1.5m			桁高５ｍ　開口幅７ｍ 基本断面（開口部閉塞）			同左、中央部開口			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 h u ＝ h l ＝ 1.5m			桁高５ｍ　開口幅９ｍ 基本断面（開口部閉塞）		
縮　　尺		1/80			1/80			1/80			1/80			1/80		
全　幅　B（ｍ）		44			46.0			46.0			46.0			48..0		
桁　高　D（ｍ）		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0		
開孔幅 b（ｍ）		5.0						7 .0			7 .0					
B ／ D		8.8			9.2			9.2			9.2			9.6		
b ／ B		0.114						0.152			0.152					
N θ　（H z）		0.133			0.128			0.128			0.128			0.123		
N θ ／ N n		2.547			2.456			2.456			2.456			2.349		
W　（tf/m）		38.2			38.6			38.6			38.6			39.0		
I　（tfs ^{2} m/m）		869			974			974			974			1086		
ねじれ風速倍率		4.60			4.57			4.57			4.57			4.60		
減衰率	たわみ	(0.0218)			(0.0205)			(0.0205)			(0.0205)			(0.0192)		
	ねじれ	(0.0219)			(0.0201)			(0.0205)			(0.0205)			(0.0200)		
迎角 α　（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　（kgfs ^{2}/m ^{4}）			0.125			0.125			0.125			0.125			0.125	
V cr　（m/s）		82 ↑	66.0	62.0		45.0		58.0	57.5	48.0	75 ↑	67.0	62.5		42.5	
Selberg の式による補正																
V F　（m/s）			47.9			46.7			46.7			46.7			44.5	
形状補正係数　k		1.71 ↑	1.38	1.29		0.96		1.24	1.23	1.03	1.61 ↑	1.43	1.34		0.96	

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.8.3　空力特性検討断面一覧（8－3）【ばね支持試験結果】

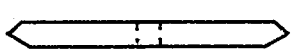
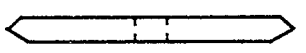
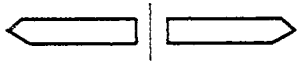
略号		HZ-2-591			HZ-2-592			HZ-2-770			HZ-2-771			HZ-2-772		
																
		同左、中央部開口			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_2 = h_1 = 1.5m$			桁高7m　開口幅7m 基本断面（開口部閉塞）			同左、中央部開口			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_2 = 1.5m$		
縮尺		1/80			1/80			1/80			1/80			1/80		
全幅 B（m）		48			48.0			46.0			46.0			46.0		
桁高 D（m）		5.0			5.0			7.0			7.0			7.0		
開孔幅 b（m）		9.0			9..0						7.0			7.0		
B／D		9.6			9.6			6.57			6.57			6.57		
b／B		0.188			0.188						0.152			0.152		
$N\theta$（Hz）		0.123			0.123			0.142			0.142			0.142		
$N\theta / N_n$		2.349			2.349			2.722			2.722			2.722		
W（tf/m）		39.0			39.0			40.3			40.3			40.3		
I（$tfs^2 m/m$）		1086			1086			1011			1011			1011		
ねじれ風速倍率		4.60			4.60			4.83			4.83			4.83		
減衰率	たわみ	(0.0192)			(0.0192)			(0.0199)			(0.0199)			(0.0199)		
	ねじれ	(0.0200)			(0.0200)			(0.0209)			(0.0209)			(0.0209)		
迎角 α（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ（$kgfs^2/m^4$）			0.125			0.125			0.125			0.125			0.125	
V cr（m/s）		57.5	57.5	42.0	72.5	67.0	62.0		52.5		56.0	65.0	36.0	73.0	67.0	42.0

Selbergの式による補正

V F（m/s）			44.5			44.5			54.1			54.1			54.1	
形状補正係数 k	1.29	1.29	0.94	1.63	1.51	1.39		0.97		1.04	1.20	0.67	1.35	1.24	0.78

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.8.4　空力特性検討断面一覧（８－４）【ばね支持試験結果】

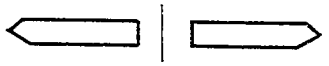
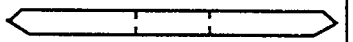
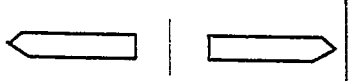
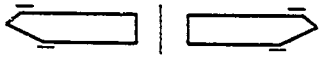
略　　号		HZ-2-330			HZ-2-332			HZ-2-350			HZ-2-352			HZ-2-370		
																
		桁高 3.5m,開口幅 3.5m 基本断面（開口部閉塞）			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_1 = h_2 = 1.5m$			桁高 3.5m,開口幅 5 m 基本断面（開口部閉塞）			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_1 = h_2 = 1.5m$			桁高 3.5m,開口幅 7 m 基本断面（開口部閉塞）		
縮　　尺		1/80			1/80			1/80			1/80			1/80		
全幅 B（m）		42..5			42.5			44.0			44.0			46.0		
桁高 D（m）		3.5			3.5			3.5			3.5			3.5		
開孔幅 b（m）					3.5						5.0					
B／D		12.14			12.14			12.57			12.57			13.14		
b／B					0.082						0.114					
$N\theta$（Hz）		0.120			0.120			0.117			0.117			0.113		
$N\theta / Nn$		2.287			2.287			2.230			2.230			2.159		
W（tf/m）		36.4			36.4			36.7			36.7			37.0		
I（$tfs^2 m/m$）		771			771			843			843			945		
ねじれ風速倍率		3.91			3.91			4.13			4.13			4.17		
減衰率	たわみ	(0.021)			(0.021)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
	ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
迎角 α（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ（$kgfs^2/m^4$）			0.125			0.125			0.125			0.125			0.125	
V cr（m/s）		40.8	41.3	42.1	40.7	56.3	52.9		40.0		67.5	60.0	54.0		37.6	

Selbergの式による補正

V F（m/s）			41.3			41.3			40.0			40.0			37.6	
形状補正係数 k	0.99	1.00	1.02	0.99	1.36	1.28		1.00		1.69	1.50	1.35		1.00		

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.8.5　空力特性検討断面一覧（８－５）【ばね支持試験結果】

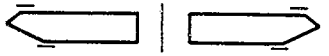
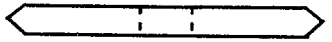
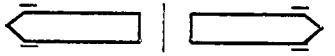
略　　号		HZ-2-372			HZ-2-390			HZ-2-392			HZ-2-55H			HZ-2-C		
														断面 C 		
		同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_2 = h_1 = 1.5m$			桁高 3.5m,開口幅 9 m 基本断面（開口部閉塞）			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 $h_2 = h_1 = 1.5m$			桁高 5 m,開口幅 5 m 水平ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰのみ			同左 鉛直＋水平ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ $h_2 = h_1 = 1.5m$		
縮　　尺		1/80			1/80			1/80			1/80			1/80		
全 幅 B（m）		46.0			48.0			48.0			44.0			44.0		
桁 高 D（m）		3.5			3.5			3.5			5.0			5.0		
開孔幅 b（m）		7.0						9			5.0			5.0		
B／D		13.14			13.71			13.71			8.8			8.8		
b／B		0.152						0.188			0.114			0.114		
$N\theta$（Hz）		0.113			0.108			0.108			0.133			0.133		
$N\theta / N_n$		2.159			2.074			2.074			2.547			2.547		
W（tf/m）		37.0			37.4			37.4			38.2			38.2		
I（$tfs^2 m/m$）		945			1053			1053			869			869		
ねじれ風速倍率		4.17			4.20			4.20			4.60			4.60		
減衰率	たわみ	(0.020)			(0.021)			(0.021)			(0.0218)			(0.0218)		
	ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.0219)			(0.0219)		
迎角 α（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ（$kgfs^2/m^4$）			0.125			0.125			0.125			0.125			0.125	
$\dot{V}$ cr（m/s）		59.3	62.0	51.8		36.2		59.0	60.0	48.6	60.7	58.9	25.7	78.6	80.0	81.1

Selbergの式による補正

V_F（m/s）			37.6			36.2			36.2			46.0			46.0	
形状補正係数 k	1.58	1.65	1.38		1.00		1.63	1.66	1.34	1.32	1.28	0.56	1.71	1.74	1.76	

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.8.6　空力特性検討断面一覧（８－６）【ばね支持試験結果】

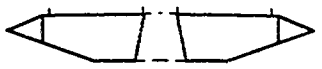
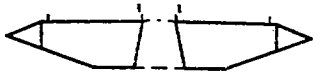
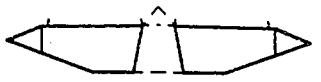
略　　号		HZ-2-D			HZ-2-E			HZ-2-F			HZ-2-G					
		断面 D 			断面 E 			断面 F 			断面 G 					
		桁高 5 m,開口幅 5 m 鉛直＋水平ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ h ｄ＝ h ｕ＝ 1.5m			桁高 5 m,開口幅 5 m ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ上下対称 基本断面（開口部閉塞）			同左 鉛直ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ設置 h ｄ＝ h ｕ＝ 1.5m			同左 鉛直＋水平ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ h ｄ＝ h ｕ＝ 1.5m					
縮　　尺		1/80			1/80			1/80			1/80					
全　幅　B（m）		44.0			48.0			48.0			48.0					
桁　高　D（m）		5.0			5.0			5.0			5.0					
開孔幅 b（m）		5.0						5.0			5.0					
B／D		9.6			9.6			9.6			9.6					
b／B		0.114						0.104			0.104					
N θ　（H z）		0.133			0.133			0.133			0.133					
N θ／N n		2.547			2.547			2.547			2.547					
W　（tf/m）		38.2			38.2			38.2			38.2					
I　（tfs ² m/m）		869			869			869			869					
ねじれ風速倍率		4.60			4.60			4.60			4.60					
減衰率	たわみ	(0.0218)			(0.0218)			(0.0218)			(0.0218)					
	ねじれ	(0.0219)			(0.0219)			(0.0219)			(0.0219)					
迎角 α　（DEG）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　（kgfs ²/m ⁴）			0.125			0.125			0.125			0.125				
V cr　（m/s）		83.5	74.3	66.8	45.4	46.5	46.5	36.2	73.5	69.5	76.6	76.9	76.2			

Selberg の式による補正

V F　（m/s）			46.0			46.5			46.5			46.5				
形状補正係数 k	1.82	1.62	1.45	0.98	1.00	1.00	0.78	1.58	1.49	1.65	1.65	1.64			

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.1　空力特性検討断面一覧（９－１）【ばね支持試験結果】

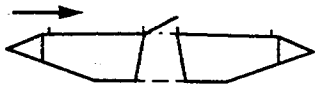
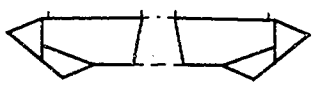
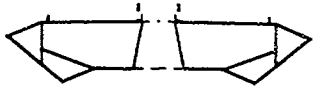
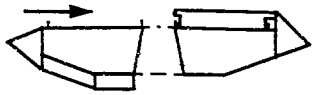
略　　号		ME-2-ANA00			ME-2-ANA01			ME-2-ANA02			ME-2-ANA03			ME-2-ANA04		
																
		基本断面（明石案と同形状、諸元を変更）			内側にﾈｯﾄ付き高欄（30%ﾈｯﾄ）			開孔部に三角形状ﾈｯﾄ			開孔部に平行版（２枚）			開口部に傾斜板（千鳥に配置）		
縮　尺																
全幅Ｂ　（m）		(0.6857)														
桁高Ｄ　（m）		(0.100)														
開孔幅ｂ（m）		(U:0.0719　L:0.1142)														
Ｂ／Ｄ		6.86														
ｂ／Ｂ		U:0.104　L:0.166														
Ｎθ　(Hz)		(1.862)			(1.816)			(1.864)			(1.864)			(1.864)		
Ｎθ／Ｎη		1.812			1.812			1.804			1.805			1.810		
Ｗ　(tf/m)		(10.03kgf/m)			(10.09kgf/m)			(9.938kgf/m)			(9.922kgf/m)			(9.976kgf/m)		
Ｉ　(tfs²m/m)		(0.04098kgfs²m/m)			(0.04106kgfs²m/m)			(0.04096kgfs²m/m)			(0.04080kgfs²m/m)			(0.04088kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.01945)			(0.01934)			(0.01980)			(0.02002)			(0.01919)		
	ねじれ	(0.01956)			(0.02024)			(0.01966)			(0.01993)			(0.02005)		
迎角α(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1285			0.1290			0.1252			0.1256			0.1238	
Vcr　(m/s)			(10.7)			(11.4)			(11.7)			(9.90)			(11.73)	

SELBELG の式による補正

VF　(m/s)			(8.8)			(8.78)			(8.86)			(8.85)			(8.93)	
形状補正係数　κ			1.22			1.30			1.32			1.12			1.31	

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.2　空力特性検討断面一覧（９－２）【ばね支持試験結果】

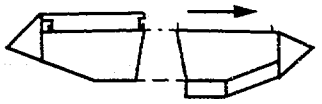
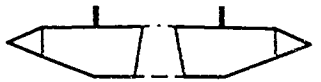
略　　号		ME-2-ANA05			ME-2-ANA06			ME-2-ANB00			ME-2-ANB01			ME-2-ANB02		
																
		開孔部に傾斜板（上流側閉鎖）			開孔部に傾斜板（上流側開放）			下面に逆勾配をつける			下面に逆勾配をつける 開孔部にネット付き高欄			上下流非対称（段差） 上流側低		
縮　尺																
全幅 B　(m)		(0.6857)														
桁高 D　(m)		(0.100)														
開孔幅 b (m)		(U:0.0719　L:0.1142)														
B / D		6.86														
b / B		U:0.104　L:0.166														
N θ　(Hz)		(1.864)			(1.864)			(1.867)			(1.867)			(1.867)		
N θ ／ N η		1.811			1.811			1.815			1.820			1.816		
W　(tf/m)		(9.985kg/fm)			(10.002kgf/m)			(9.967kgf/m)			(10.062kgf/m)			(10.025gf/m)		
I　(tfs²m/m)		(0.04089kgfs²m/m)			(0.04089kgfs²m/m)			(0.04088kgfs²m/m)			(0.04073kgfs²m/m)			(0.04072kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.01932)			(0.02012)			(0.01931)			(0.01945)			(0.02008)		
	ねじれ	(0.01800)			(0.01961)			(0.02045)			(0.01975)			(0.01985)		
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1241			0.1263			0.1277			0.1271			0.1257	
Vcr　(m/s)			(9.78)			(※)			(11.16)			(11.95)			(12.64)	

SELBELG の式による補正

VF　(m/s)			(8.85)			(8.85)			(8.82)			(8.86)			(8.96)	
形状補正係数 κ			1.10			(※)			1.27			1.35			1.42	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。（※）は、特性が不安定で Vcr の特定できなかった断面。

表－6.1.9.3　空力特性検討断面一覧（9－3）【ばね支持試験結果】

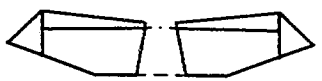
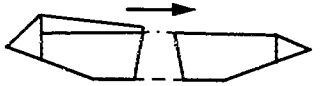
略　　号		ME-2-ANB03			ME-2-ANC00			ME-2-ANC01			ME-2-ANC02			ME-2-ANC03		
																
		上下流非対称（段差） 上流側高			基本断面から高欄撤去			壁高欄(H=0.040) 床版中央付近			壁高欄(H=0.016) 床版中央付近					
縮　　尺																
全幅B　(m)		(0.6857)														
桁高D　(m)		(0.100)														
開孔幅b(m)		(U:0.0719　L:0.1142)														
B/D		6.86														
b/B		U:0.104　L:0.166														
Nθ　(Hz)		(1.867)			(1.863)			(1.867)			(1.871)					
Nθ／Nη		1.817			1.812			1.816			1.820					
W　(tf/m)		(10.02kg/fm)			(10.01kgf/m)			(10.02kgf/m)			(10.03kgf/m)					
I　(tfs²m/m)		(0.04071kgfs²m/m)			(0.04089kgfs²m/m)			(0.04073kgfs²m/m)			(0.04056kgfs²m/m)					
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.01983)			(0.02048)			(0.01942)			(0.02004)					
	ねじれ	(0.01985)			(0.01948)			(0.01946)			(0.01977)					
迎角α(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1272			0.1249			0.1240			0.1247				
Vcr　(m/s)			(7.56)			(12.27)			(10.88)			(12.61)				

SELBELGの式による補正

VF　(m/s)			(8.85)			(8.90)			(8.96)			(8.96)				
形状補正係数　κ			0.86			1.38			1.21			1.40				

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.4　空力特性検討断面一覧（９－４）【ばね支持試験結果】

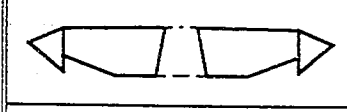
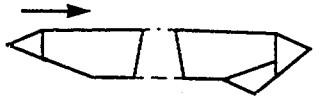
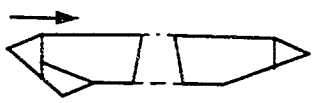
略　　号		ME-2-AND00			ME-2-AND01			ME-2-AND02			ME-2-AND03					
																
		床版逆勾配			床版上流側逆勾配 （上下流非対称）			床版下流側逆勾配 （上下流非対称）			フェアリング大 （上面張り出）					
縮　　尺																
全幅Ｂ　（m）		(0.6857)														
桁高Ｄ　（m）		(0.100)														
開孔幅ｂ（m）		(U:0.0719　L:0.1142)														
Ｂ／Ｄ		6.86														
ｂ／Ｂ		U:0.104　L:0.166														
Ｎθ　　(Hz)		(1.886)			(1.885)			(1.871)			(1.860)					
Ｎθ／Ｎη		1.813			1.819			1.819			1.808					
Ｗ　　(tf/m)		(10.00kg/fm)			(9.872kgf/m)			(10.14kgf/m)			(10.16kgf/m)					
Ｉ　　(tfs²m/m)		(0.04075kgfs²m/m)			(0.04022kgfs²m/m)			(0.04159kgfs²m/m)			(0.04105kgfs²m/m)					
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.02035)			(0.02062)			(0.01975)			(0.02000)					
	ねじれ	(0.01982)			(0.02000)			(0.01965)			(0.01943)					
迎角α(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1278			0.1255			0.1258			0.1266				
Vcr　(m/s)			(10.24)			(6.24)			(11.52)			(3.37)				

SELBELGの式による補正

VF　(m/s)			(8.81)			(8.94)			(8.91)			(8.83)				
形状補正係数　κ			1.16			0.70			1.29			0.38				

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.5　空力特性検討断面一覧（9－5）【ばね支持試験結果】

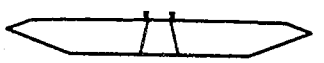
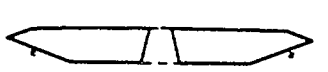
略　　号		ME-2-ANE00			ME-2-ANE01			ME-2-ANE02								
																
		フェアリング大 （下面張り出）			下流側下面逆勾配 （上下流非対称）			下流側下面逆勾配 （上下流非対称）								
縮　　尺																
全幅 B　（m）		(0.6857)														
桁高 D　（m）		(0.100)														
開孔幅 b（m）		(U:0.0719　L:0.1142)														
B／D		6.86														
b／B		U:0.104　L:0.166														
N θ　(Hz)		(1.862)			(1.8072)			(1.874)								
N θ ／ N η		1.809			1.821			1.821								
W　(tf/m)		(10.01kg/fm)			(10.00kgf/m)			(10.00kgf/m)								
I　(tfs²m/m)		(0.04096kgfs²m/m)			(0.04040kgfs²m/m)			(0.04040kgfs²m/m)								
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.02005)			(0.02062)			(0.01988)								
	ねじれ	(0.02064)			(0.02048)			(0.02005)								
迎角 α (DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1232			0.1275			0.1252							
Vcr　(m/s)			(10.75)			(9.97)			(10.56)							

SELBELG の式による補正

VF　(m/s)			(8.96)			(8.85)			(8.94)							
形状補正係数　κ			1.20			1.13			1.18							

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.6　空力特性検討断面一覧（９－６）【ばね支持試験結果】

略　　号	ME-2-BN000	ME-2-BN001	ME-2-BN-002	ME-2-BN003	ME-2-BN004
					
	基本断面 添架物無し	壁高欄(H=0.016)中央	壁高欄内	壁高欄外	検査車レールのみ
縮　尺					
全幅Ｂ　(m)	(0.4500)				
桁高Ｄ　(m)	(0.0565)				
開孔幅ｂ(m)	(U:0.0416　L:0.0666)				
Ｂ/Ｄ	7.965				
ｂ/Ｂ	U:0.0924　L:0.148				
Ｎθ　(Hz)	(1.877)	(1.875)	(1.875)	(1.870)	(1.871)
Ｎθ／Ｎη	1.824	1.829	1.831	1.825	1.820
Ｗ　(tf/m)	(10.01kgf/m)	(10.07kgf/m)	(10.08kgf/m)	(10.08kgf/m)	(10.01kgf/m)
Ｉ　(tfs^2m/m)	(0.04034$kgfs^2m/m$)	(0.04043$kgfs^2m/m$)	(0.04036$kgfs^2m/m$)	(0.04061$kgfs^2m/m$)	(0.04041$kgfs^2m/m$)
ねじれ風速倍率					
減衰率　たわみ	(0.02472)	(0.02416)	(0.02289)	(0.02353)	(0.02353)
減衰率　ねじれ	(0.01912)	(0.01973)	(0.0197)	(0.01927)	(0.01927)

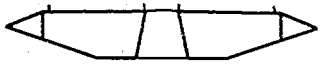
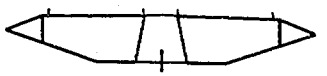
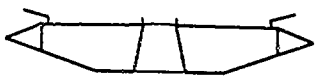
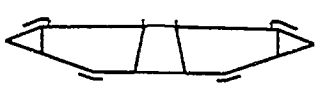
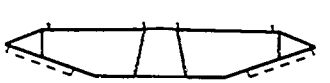
	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	-3			
ρ　($kgfs^2/m^4$)		0.1248			0.1236			0.1223			0.1242			0.1241	
Vcr　(m/s)		(11.14)			(12.16)			(12.12)			(6.10)			(10.94)	

SELBELG の式による補正

VF　(m/s)		(10.12)			(10.19)			(10.26)			(10.15)			(10.11)	
形状補正係数　κ		1.10			1.29			1.18			0.60			1.08	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.7　空力特性検討断面一覧（9－7）【ばね支持試験結果（本共同研究外での成果）】

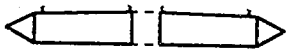
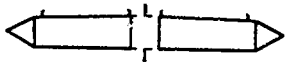
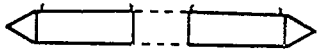
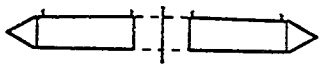
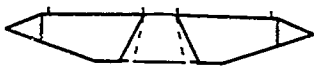
略　　号	ME-2-A000			ME-2-A001			ME-2-A002			ME-2-A003			ME-2-A004		
															
	基本断面 （明石 2BOX 案）			下部センターバリア+鉛直スタビライザ（共に H=0.285D）			フラップ(L=0.429D)			デフレクタ			斜めウェブに 剥離促進プレート		
縮　尺	1/70														
全幅 B　(m)	48.0　(0.6857)														
桁高 D　(m)	7.000　(0.1000)														
開孔幅 b (m)	U:5.0 (0.0714)　L:8.0 (0.1143)														
B/D	6.86														
b/B	U:0.1040　L:0.1667														
N θ　(Hz)	0.165　(2.89)			0.165　(2.89)			0.165　(2.88)			0.165　(2.88)			0.165　(2.91)		
N θ / N η	2.78			2.78			2.77			2.76			2.78		
W　(tf/m)	44.25　(9.03kgf/m)			44.25　(9.03kgf/m)			43.86　(8.95kgf/m)			43.76　(8.93kgf/m)			43.56　(8.89kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	1094.9　(0.0456 kgfs²m/m)			1092.5　(0.0455 kgfs²m/m)			1097.2　(0.0457 kgfs²m/m)			1094.9　(0.0456 kgfs²m/m)			1075.6　(0.0448 kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	4.01			4.00			4.01			4.01			3.97		
減衰率　たわみ	0.0201			0.0204			0.0202			0.0202			0.0203		
減衰率　ねじれ	0.0202			0.0202			0.0201			0.0203			0.0201		
迎角 α（DEG）	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)															
V cr(E)　(m/s)	73.5 ↑	74.8	65.3	72.5	71.4	57.8		66.6	51.8		70.8		72.2	77.7	

SELBELG の式による補正

V cr(N)　(m/s)	62.0	62.0	62.0	61.9	61.9	61.9		61.6	61.6		61.6		61.4	61.4	
形状補正係数 κ	1.19 ↑	1.21	1.06	1.17	1.15	0.93		1.08	0.84		1.15		1.18	1.27	

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.8　空力特性検討断面一覧（9－8）【ばね支持試験結果（本共同研究外での成果）】

略　　号	ME-2-C000	ME-2-C001	ME-2-C002	ME-2-C003	ME-2-A005
					
	基本断面 b/D=1.0、 上下対称	基本断面（b/D=1） ＋上下センタバリア（h=0.43D）	基本断面 b/D=2.0 上下対称	基本断面(b/D=2) ＋貫通センタバリア(h=0.4D)	ME-2-A000の開孔部下面 を拡大
縮　尺	1/75				1/70
全幅B　(m)	49.0 (0.6533)		54.0 (0.7200)		48.0 (0.6857)
桁高D　(m)	5.000 (0.0667)		5.000 (0.0667)		7.0 (0.100)
開孔幅b(m)	5.000 (0.0667)		10.000 (0.1334)		U:5.0 (0.0174)　L:12.0 (0.1714)
B/D	9.80		10.80		6.86
b/B	0.1020		0.1852		U:0.1040　L:0.2500
Nθ　(Hz)	0.149 (2.74)	0.149 (2.89)	0.149 (2.68)	0.149 (2.69)	0.165 (2.82)
Nθ／Nη	2.43	2.78	2.23	2.24	2.78
W　(tf/m)	42.53 (7.56kgf/m)	42.41 (7.54kgf/m)	44.49 (7.91kgf/m)	44.55 (7.92kgf/m)	44.84 (9.15kgf/m)
I　(tfs²m/m)	1025. (0.0324 kgfs²m/m)	1022. (0.0323 kgfs²m/m)	1395. (0.0441 kgfs²m/m)	1389. (0.0439 kgfs²m/m)	974.8 (0.0406 kgfs²m/m)
ねじれ風速倍率	4.07	4.07	3.81	3.79	4.09
減衰率　たわみ	0.019	0.020	0.020	0.020	0.0210
減衰率　ねじれ	0.020	0.020	0.019	0.020	0.0199

迎角α（DEG）	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ　(kgfs²/m⁴)															
V cr(E)　(m/s)	53.9 ↑	61.2	67.5		64.6		55.5	63.3	70.8	62.3	78.6	73.4	75.2	74.5	63.3

SELBELGの式による補正

V cr(N)　(m/s)	62.0	62.0	62.0		61.9			61.6	61.6				61.4	61.4	
形状補正係数　κ	1.19 ↑	1.21	1.06		1.15			1.08	0.84		1.15		1.18	1.27	

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.9　空力特性検討断面一覧（9－9）【ばね支持試験結果】

略　　号	実橋値			ME-N-P1500			ME-N-P15FO			ME-N-P15CO			ME-N-P15SO		
															
	想定実橋諸元 多角形（20角形）断面 断面比=1:5			1:5多角形断面 （基本形）			1:5多角形断面 上面全開放			1:5多角形断面 上面部分開放：中央			1:5多角形断面 上面部分開放：両端		
縮尺	1/90														
全幅B　(m)	45.0　(0.5)														
桁高D　(m)	5.0　(0.1)														
開孔幅b(m)	0.0														
B/D	5.0														
b/B	0.0														
Nθ　(Hz)	0.1500　(2.700)			0.1500　(2.404)			0.1500　(2.424)			0.1500　(2.393)			0.150　(2.404)		
Nθ／Nη	3.000			2.288			2.305			2.275			2.287		
W　(tf/m)	40.00　(4.938kgf/m)			41.10　(5.074kgf/m)			41.19　(5.085kgf/m)			41.22　(5.089kgf/m)			41.27　(5.095kgf/m)		
I　(tfs²m/m)	1020.　(0.01550kgfs²m/m)			1077.　(0.01641kgfs²m/m)			1059.　(0.01614kgfs²m/m)			1086.　(0.01655kgfs²m/m)			1076.　(0.01641kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率	5.00			5.62			5.57			5.64			5.62		
減衰率　たわみ	－			(0.0195)			(0.0204)			(0.0197)			(0.0194)		
減衰率　ねじれ	－			(0.0196)			(0.0180)			(0.0196)			(0.0197)		
迎角α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1221			0.1202			0.1206			0.1194	
Vcr　(m/s)		－			54.9			－			52.7			51.4	

Selbergの式による補正

VF　(m/s)		54.4			55.4			55.69			55.8			56.0	
形状補正係数　κ		－			0.99			－			0.95			0.92	

（注）表中の（）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.9.10　空力特性検討断面一覧（９－１０）【ばね支持試験結果】

略　　号	ME-N-P15K0	ME-N-P15K3	ME-N-P15B05	ME-N-P15B10	
					
	1:5 多角形断面 検査車ﾚｰﾙ（H=D/20)設置 （その１）	1:5 多角形断面 検査車ﾚｰﾙ（H=D/20)設置 （その２）	1:5 多角形断面 センタバリア設置 H=D/20	1:5 多角形断面 センタバリア設置 H=D/10	
縮尺	1/90				
全幅Ｂ　（m）	45.0　(0.5)				
桁高Ｄ　（m）	5.0　(0.1)				
開孔幅ｂ（m）	0.0				
Ｂ／Ｄ	5.0				
ｂ／Ｂ	0.0				
Ｎθ　(Hz)	0.1500　(2.381)	0.1500　(2.398)	0.1500　(2.403)	0.1500　(2.402)	
Ｎθ／Ｎη	2.281	2.296	2.295	2.298	
Ｗ　(tf/m)	41.80　(5.160kgf/m)	41.82　(5.162kgf/m)	41.56　(5.131kgf/m)	41.75　(5.154kgf/m)	
Ｉ　(tfs²m/m)	1097.　(0.01671kgfs²m/m)	1081.　(0.01647kgfs²m/m)	1077.　(0.01642kgfs²m/m)	1078.　(0.01642kgfs²m/m)	
ねじれ風速倍率	5.67	5.63	5.62	5.62	
減衰率　たわみ	(0.0186)	(0.0181)	(0.0194)	(0.0191)	
減衰率　ねじれ	(0.0198)	(0.0206)	(0.0207)	(0.0205)	

迎角α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1191			0.1192			0.1192			0.1202				
Vcr　(m/s)		52.9			46.7			44.3			30.54				

Selbergの式による補正

VF　(m/s)		56.5			56.4			56.2			56.1				
形状補正係数　κ		0.94			0.83			0.79			0.55				

（注）表中の（　）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.11　空力特性検討断面一覧（９－１１）【ばね支持試験結果】

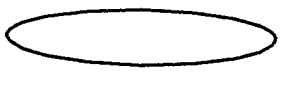
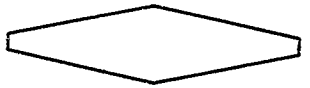
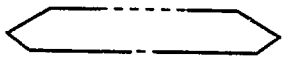
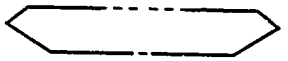
略　　号	ME-N-P15D1			ME-N-P15D2			ME-N-P15F								
															
	1:5 多角形断面 デフレクタ設置 （その１）			1:5 多角形断面 デフレクタ設置 （その２）			1:5 多角形断面 フラップ設置								
縮尺	1/90														
全幅 B　（m）	45.0　(0.5)														
桁高 D　（m）	5.0　(0.1)														
開孔幅 b（m）	0.0														
B / D	5.0														
b / B	0.0														
N θ　(Hz)	0.1500　(2.348)			0.1500　(2.342)			0.1500　(2.312)								
N θ ／ N η	2.268			2.262			2.264								
W　(tf/m)	42.53　(5.251kgf/m)			42.55　(5.253kgf/m)			43.78　(5.405kgf/m)								
I　(tfs²m/m)	1128.　(0.01720kgfs²m/m)			1134.　(0.01728kgfs²m/m)			1163.　(0.01773kgfs²m/m)								
ねじれ風速倍率	5.75			5.76			5.84								
減衰率　たわみ	(0.0196)			(0.0204)			(0.0200)								
減衰率　ねじれ	(0.01912)			(0.0209)			(0.0197)								
迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)		0.1200			0.1190			0.1194							
Vcr　(m/s)		52.5			51.39			47.39							

Selberg の式による補正

VF　(m/s)		56.84			57.14			57.81							
形状補正係数　κ		0.92			0.90			0.82							

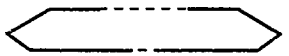
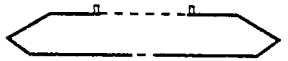
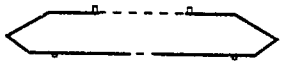
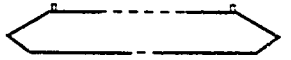
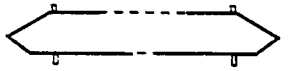
（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.12　空力特性検討断面一覧（９－１２）【ばね支持試験結果】

略　　号		実橋値			ME-N-P1500			ME-N-R000			ME-N-H000			ME-N-H100		
																
		想定実橋諸元			多角形（20角形）断面 （基本形） 断面比 (B/D)=1:5			ひし形断面（基本形） 断面比 (B/D)=1:4			開孔六角形断面 （基本形）			開孔六角形断面 フェアリング逆に設置		
縮尺					1/90			1/90			1/90			1/90		
全幅 B　(m)					45.0　(0.5)			54.0　(0.6)			50.4　(0.56)			50.4　(0.56)		
桁高 D　(m)					5.0　(0.1)			13.5　(0.15)			8.1　(0.09)			8.1　(0.09)		
開孔幅 b (m)					0.0			0.0			U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)			U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)		
B / D					5.0			4.0			6.2			6.2		
b / B					0.0			0.0			U:0.32　L:0.11			U:0.32　L:0.11		
N θ　(Hz)		0.1500　(2.700)			0.1500　(2.404)			0.1500　(2.519)			0.1500　(2.520)			0.1500　(2.520)		
N θ / N η		3.000			2.288			2.433			2.366			2.364		
W　(tf/m)		40.00　(4.938kgf/m)			41.10　(5.074kgf/m)			52.16　(6.439kgf/m)			49.31　(6.088kgf/m)			49.23　(6.078kgf/m)		
I　(tfs²m/m)		1020.　(0.01550kgfs²m/m)			1077.　(0.01641kgfs²m/m)			1304.　(0.01987kgfs²m/m)			1303.　(0.01986kgfs²m/m)			1304.　(0.01987kgfs²m/m)		
ねじれ風速倍率		5.00			5.62			5.36			5.36			5.36		
減衰率	たわみ	－			(0.0195)			(0.0206)			(0.0403)			(0.0405)		
	ねじれ	－			(0.0196)			(0.0196)			(0.0187)			(0.0188)		
迎角 α　(DEG)		-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)			0.1200			0.1221		0.1268	0.1271		0.1288	0.1296	0.1283		0.1294	
Vcr　(m/s)			－			54.9		51.4	52.4		50.1	40.2	25.9		39.1	
Selberg の式による補正																
VF　(m/s)			54.4			55.4		56.0	55.9		56.3	56.2	56.4		56.16	
形状補正係数　κ			－			0.99		0.92	0.94		0.89	0.72	0.46		0.70	

（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－ 6.1.9.13　空力特性検討断面一覧（９－１３）【ばね支持試験結果】

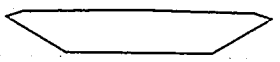
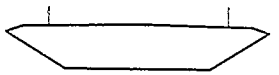
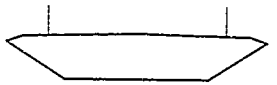
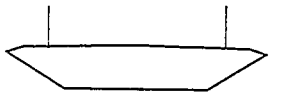
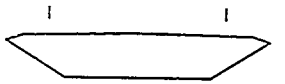
略　　号	ME-N-H000			ME-N-H001			ME-N-H002			ME-N-H003			ME-N-H004		
															
	開孔六角形形断面 （基本形） 断面比 (B/D)=4/1			開孔六角形断面 上面内側バリア (h=10mm) 設置			開孔六角形断面 上面内側バリア (h=10mm) 下面バリア (h=5mm) 設置			開孔六角形断面 上面外側バリア (h=10mm) 設置			開孔六角形断面 上面外側バリア (h=10mm) 下面バリア (h=16mm) 設置		
縮尺	1/90														
全幅 B　(m)	50.4　(0.56)														
桁高 D　(m)	8.1　(0.09)														
開孔幅 b (m)	U:16.2(0.180)　L:5.4(0.06)														
B / D	6.2														
b / B	U:0.32　L:0.11														
N θ　(Hz)	0.1500		(2.520)		(2.520)			(2.511)			(2.510)			(2.491)	
N θ ／ N η	2.366			2.369			2.368			2.365			2.363		
W　(tf/m)	49.31		(6.088kgf/m)		(6.188kgf/m)			(6.138kgf/m)			(6.126kgf/m)			(6.210kgf/m)	
I　(tfs²m/m)	1303.		(0.01986kgfs²m/m)		(0.01992kgfs²m/m)			(0.02000kgfs²m/m)			(0.02002kgfs²m/m)			(0.2032kgfs²m/m)	
ねじれ風速倍率	5.36														
減衰率　たわみ	(0.0403)			(0.0393)			(0.0394)			(0.0397)			(0.0396)		
減衰率　ねじれ	(0.0187)			(0.0185)			(0.0175)			(0.0186)			(0.0182)		
迎角 α　(DEG)	-3	0	+3	-3	0	+3	+3	0	-3	+3	0	-3	+3	0	-3
ρ　(kgfs²/m⁴)	0.1288	0.1296	0.1283		0.1278			0.1273			0.1265			0.1262	
Vcr　(m/s)	50:1	40.2	25.9		(11.6)			(10.4)			(12.1 ↑)			(12.8 ↑)	

Selberg の式による補正

VF　(m/s)	56.3	56.2	56.4		(10.6)			(10.6)			(10.6)			(10.6)	
形状補正係数　κ	0.89	0.72	0.46		1.09			0.98			1.14 ↑			1.21 ↑	

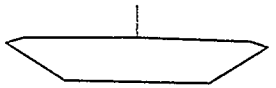
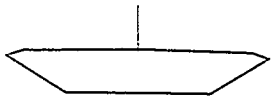
（注）表中の（ ）付き表示は、模型値（実験値）。また、↑は限界風速がそれ以上であることを示す。

表－6.1.10.1 空力特性検討断面一覧（10－1）【ばね支持試験結果】

略号		MH-1-A-0			MH-1-A-OWS-3-50			MH-1-A-OWS-5-50			MH-1-A-OWS-7-50			MH-1-A-OWS-5-50(2)		
																
		基本断面A			基本断面Aの高欄外側に遮風壁（高さ:3m，充実率50%）を設置			基本断面Aの高欄外側に遮風壁（高さ:5m，充実率50%）を設置			基本断面Aの高欄外側に遮風壁（高さ:7m，充実率50%）を設置			基本断面Aの高欄外側に遮風壁（高さ:5m，充実率50%，下3m部分空白）を設置		
縮尺		1/200			1/200			1/200			1/200			1/200		
全幅B （m）		0.2045			0.2045			0.2045			0.2045			0.2045		
桁高D （m）		0.035			0.035			0.035			0.035			0.035		
開口幅b （m）		-			-			-			-			-		
B/D		5.8			5.8			5.8			5.8			5.8		
b/B		-			-			-			-			-		
Nθ （Hz）		5.268			5.214			5.068			5.047			5.248		
Nθ/Nη		2.968			2.936			2.897			2.871			2.955		
W （tf/m）		0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)			0.915 (kgf/m)			0.918 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)		
I （tf·s2）		0.000425 (kgf·s^2)			0.000434 (kgf·s^2)			0.000459 (kgf·s^2)			0.000463 (kgf·s^2)			0.000428 (kgf·s^2)		
ねじれ風速倍率		6.09			6.15			6.33			6.36			6.11		
減衰率	たわみ	(0.019)			(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
	ねじれ	(0.020)			(0.018)			(0.020)			(0.016)			(0.020)		
迎角α （deg.）		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ （kgf·s^2/m^4）		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vcr		40.4	51.5	42.0	26.5	24.7	27.7	23.9	23.2	21.6	22.2	21	19.3	35.3	49.0	50.3
SERBERG式による補正																
VF （m/s）			56.4			56.6			57.7			57.8			56.5	
形状補正係数κ		0.716	0.913	0.744	0.468	0.436	0.489	0.414	0.402	0.374	0.384	0.363	0.334	0.625	0.867	0.890

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.10.2 空力特性検討断面一覧（10－2）【ばね支持試験結果】

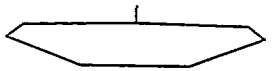
略号		MH-1-A-CWS-3-50			MH-1-A-CWS-5-50			MH-1-A-CWS-7-50									
																	
		基本断面Aの中央部に遮風壁（高さ:3m，充実率50%）を設置			基本断面Aの中央部に遮風壁（高さ:5m，充実率50%）を設置			基本断面Aの中央部に遮風壁（高さ:7m，充実率50%）を設置									
縮尺		1/200			1/200			1/200									
全幅B (m)		0.2045			0.2045			0.2045									
桁高D (m)		0.035			0.035			0.035									
開口幅b (m)		-			-			-									
B/D		5.8			5.8			5.8									
b/B		-			-			-									
Nθ (Hz)		5.248			5.241			5.256									
Nθ/Nη		2.957			2.954			2.956									
W (tf/m)		0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)									
I (tf·s2)		0.000428 ($kgf \cdot s^2$)			0.000429 ($kgf \cdot s^2$)			0.000427 ($kgf \cdot s^2$)									
ねじれ風速倍率		6.11			6.12			6.10									
減衰率	たわみ	(0.020)			(0.020)			(0.020)									
	ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)									
迎角α (deg.)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3							
ρ ($kgf \cdot s^2/m^4$)		-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Vcr		35.7	52.7	58.2	33.2	53.7	57.5	34.1	56.3	59.8							

SERBERG式による補正

VF (m/s)			56.5			56.5			56.4								
形状補正係数κ		1.030	0.933	0.744	0.587	0.950	1.017	0.604	0.997	1.059							

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.10.3 空力特性検討断面一覧(10－３)【ばね支持試験結果】

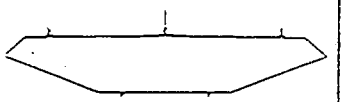
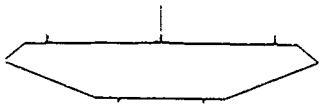
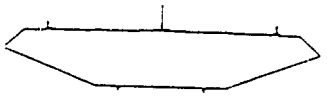
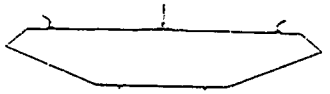
略号		MH-1-C-0			MH-1-D-0			MH-1-E-0			MH-1-C-CWS-3-50			MH-1-C-CWS-7-50		
																
		基本断面C			基本断面D			基本断面E			基本断面Cの中央部に遮風壁(高さ:3m, 充実率50%)を設置			基本断面Cの中央部に遮風壁(高さ:7m, 充実率50%)を設置		
縮尺		1/200			1/200			1/200			1/200			1/200		
全幅B (m)		0.2045			0.2045			0.2045			0.2045			0.2045		
桁高D (m)		0.035			0.035			0.035			0.035			0.035		
開口幅b (m)		-			-			-			-			-		
B/D		5.8			5.8			5.8			5.8			5.8		
b/B		-			-			-			-			-		
Nθ (Hz)		5.240			5.237			5.239			5.241			5.237		
Nθ/Nη		2.947			2.952			2.950			2.946			2.955		
W (tf/m)		0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)			0.893 (kgf/m)		
I (tf·s2)		0.000459 ($kgf \cdot s^2$)			0.000430 ($kgf \cdot s^2$)			0.000429 ($kgf \cdot s^2$)			0.000429 ($kgf \cdot s^2$)			0.000430 ($kgf \cdot s^2$)		
ねじれ風速倍率		6.12			6.13			6.12			6.12			6.11		
減衰率	たわみ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
	ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)		
迎角α (deg.)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3
ρ ($kgf \cdot s^2/m^4$)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vcr		56.3	58.9	61.4	55.0	52.5	53.7	51.0	54.8	51.2	57.0	59.3	59.0	61.4	62.8	62.3

SERBERG式による補正

VF (m/s)		56.5			56.5			56.5			56.5			56.5		
形状補正係数κ	0.996	1.042	1.086	0.973	0.929	0.950	0.902	0.969	0.906	1.009	1.049	1.044	1.086	1.111	1.102	

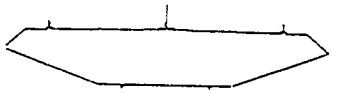
(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

表－6.1.10.4 空力特性検討断面一覧（10－4）【ばね支持試験結果】

略号		MH-1-C-IR11-CWS-3-66			MH-1-C-IR11-CWS-5-66			MH-1-C-IR11-CWS-3-100			MH-1-C-IR11-CWS-3-66-F					
																
		基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ:3m, 充実率66%)を設置 断面下部に検査車レール（高さ:0.45m, 間隔:11m)を設置			基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ:5m, 充実率66%)を設置 断面下部に検査車レール（高さ:0.45m, 間隔:11m)を設置			基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ:3m, 充実率100%)を設置 断面下部に検査車レール（高さ:0.45m, 間隔:11m)を設置			基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ:3m, 充実率66%)を設置 断面下部に検査車レール（高さ:0.45m, 間隔:11m)を設置 高欄上にフラップ（長さ1m, 水平角30°）					
縮尺		1/40			1/40			1/40			1/40					
全幅B (m)		1.023			1.023			1.023			1.023					
桁高D (m)		0.175			0.175			0.175			0.175					
開口幅b (m)		-			-			-			-					
B/D		5.8			5.8			5.8			5.8					
b/B		-			-			-			-					
Nθ (Hz)		1.734			1.724			1.734			1.718					
Nθ/Nη		2.843			2.812			2.843			2.812					
W (tf/m)		22.24 (kgf/m)			22.71 (kgf/m)			22.24 (kgf/m)			22.55 (kgf/m)					
I (tf·s2)		0.2790 ($kgf \cdot s^2$)			0.2823 ($kgf \cdot s^2$)			0.2790 ($kgf \cdot s^2$)			0.2843 ($kg \cdot s^2$)					
ねじれ風速倍率		3.70			3.72			3.70			3.73					
減衰率	たわみ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)					
	ねじれ	(0.020)			(0.020)			(0.020)			(0.020)					
迎角α (deg.)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3			
ρ ($kgf \cdot s^2/m^4$)		0.1219	0.1219	0.1219	0.1274	0.1274	0.1274	-	0.1219	-	0.1236	0.1236	0.1236			
Vcr		64.6	64.7	62.1	64.4	65.7	63.0	-	62.5	-	63.3	63.1	63.9			
SERBERG式による補正																
VF (m/s)		56.3	56.3	56.3	55.4	55.4	55.4	-	56.3	-	56.3	56.3	56.3			
形状補正係数κ		1.147	1.149	1.103	1.162	1.185	1.136	-	1.110	-	1.125	1.121	1.136			

（注）表中（ ）付き表示は、模型値（実験値）。

表－6.1.10.5 空力特性検討断面一覧（10－5）【フラッター解析結果】

略号		MH-1-A-0 (F)			MHI-C-0 (F)			MH-1-C-IR11-CWS-3-66 (F)									
																	
		基本断面A			基本断面C			基本断面Cの中央部に遮風壁（高さ:3m, 充実率66%)を設置 断面下部に検査車レール（高さ:0.45m, 間隔:11m)を設置									
縮尺		-			-			-									
全幅B (m)		40.9			40.9			40.9									
桁高D (m)		7			7			7									
開口幅b (m)		-			-			-									
B/D		5.8			5.8			5.8									
b/B		-			-			-									
Nθ (Hz)		0.1604			0.1604			0.1604									
Nθ/Nη		2.987			2.987			2.987									
W (tf/m)		35.0 (tf/m)			35.0 (tf/m)			35.0 (tf/m)									
I (tf·s2)		690 ($tf \cdot s^2$)			690 ($tf \cdot s^2$)			690 ($tf \cdot s^2$)									
ねじれ風速倍率		-			-			-									
減衰率	たわみ	0.02			0.02			0.02									
	ねじれ	0.02			0.02			0.02									
迎角α (deg.)		-3	0	+3	-3	0	+3	-3	0	+3							
ρ ($kgf \cdot s^2/m^4$)		-	0.125	-	-	0.125	-	-	0.125	-							
Vcr(フラッター解析値)		-	48.1	-	-	56.8	-	-	63.5	-							
SERBERG式による補正																	
VF (m/s)			55.3			55.3		-	55.3	-							
形状補正係数κ			0.870			1.027		-	1.148	-							

(注)表中( )付き表示は、模型値(実験値)。

６．２　フラッター解析条件一覧表

本文中の各フラッター解析に用いた条件を表－6.2.1.1に示す。

表－6.2.1.1(1)　フラッター解析条件一覧表

項目	PR	IIA	III-1	III-2	III-3
解析手法	モード組み合わせ法 無風時固有振動モードを使用 低次50モードを取り込む	モード組み合わせ法（５０次） 無風時モード	モード組み合わせ法 有風時固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む	モード組み合わせ法 80m/s時の固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む	モード組み合わせ法 80m/s時の固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む
空気密度	0.125kgf･s²/m⁴	0.125kgf･s²/m⁴	0.120 kgf･s²/m⁴	0.120 kgf･s²/m⁴	0.120 kgf･s²/m⁴
有風時静的変形	考慮しない	考慮しない	考慮	考慮（80m/s）	考慮（80m/s）
構造減衰	全モード　δ=0.02	全モード　δ=0.02	全モード　δ=0.02	全モード　δ=0.02	全モード　δ=0.02
空気力係数	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 鉛直：○／○／× モーメント：○／○／× 抗力：×／×／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル：準定常抗力、揚力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 鉛直：○／○／× モーメント：○／○／× 抗力：×／×／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル：準定常抗力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／△ モーメント：○／○／△ 抗力：○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／△ モーメント：○／○／△ 抗力：○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／△ モーメント：○／○／△ 抗力：○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力
非定常空気力	平板翼理論値	平板翼理論値	実測値	実測値	実測値
準定常空気力	主桁　CD=0.75　An=7.0m²/m/Br. ケーブル CD=0.70　An=1.2m²/m/Br.	主桁　CD=0.75　An=7.0m²/m/Br. ケーブル CD=0.70　An=2.0m²/m/Br.	主桁：CD=1.684(迎角 0°)、An=2.626 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=4×0.783 m²/m/Br. ハンガー：CD=0.7 、 An=1.25 m²/m/格点(部材軸方向)	主桁：CD=1.088(迎角 0°)、An=6.07 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=2×1.177 m²/m/Br. ハンガー：CD=0.7、 An=2.24 m²/m/格点(部材軸方向)	主桁：CD=1.088(迎角 0°)、An=6.07 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=2×1.070 m²/m/Br. ハンガー：CD=0.7、 An=2.24 m²/m/格点(部材軸方向)
計算時の桁幅	桁幅　B=41m	桁幅　B=41m	桁幅　B=19.29 m	桁幅　B=19.32 m	桁幅　B=19.32 m
解析モデル	・主塔剛性：面内剛性　200m⁴ 面外剛性　100m⁴ ねじれ剛性　35m⁴ ・ハンガー間隔　125m ・端部の境界条件：タワーリンク等のモデル化は無し	・タワーリンク、エンドリンクのモデル化は無し ・ハンガー間隔　125m ・塔は立体モデル	・主塔剛性： 塔面内剛性　40.1～49.3 m⁴/shaft 塔面外剛性　70.4～105.2m⁴/shaft 塔ねじれ剛性 21.24～39.7 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	・主塔剛性： 塔面内剛性　25.68～46.29 m⁴/shaft 塔面外剛性　50.89～203.0 m⁴/shaft 塔ねじれ剛性 29.85～69.25 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	・主塔剛性： 塔面内剛性　25.68～46.29 m⁴/shaft 塔面外剛性　50.89～203.0 m⁴/shaft 塔ねじれ剛性 29.85～69.25 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化
備考		資料 Ｇ１０－２	４本ケーブル軽量二箱桁用	重力剛性桁６車線 ケーブル許容応力 82kgf/mm²用	重力剛性桁６車線 ケーブル許容応力 100kgf/mm²用

表－6.2.1.1(2)　フラッター解析条件一覧表

項目	TH-4	TH-5	TH-6	KH-1	
解析手法	モード組み合わせ法 80m/s時の固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む	モード組み合わせ法 80m/s時の固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む	モード組み合わせ法 無風時固有振動モードを使用 低次５０モードを取り込む	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次50モードを取り込む	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次30モードを取り込む
空気密度	0.120 kgf･s²/m⁴	0.120 kgf･s²/m⁴	0.125 kgf･s²/m⁴	0.12 kgf･s²/m⁴	
有風時静的変形	考慮（80m/s）	考慮（80m/s）	考慮しない	考慮（桁の回転変異による非定常空気力の変化を考慮）	考慮しない
構造減衰	全モード　δ＝0.02	全モード　δ＝0.02	全モード　δ＝0.02	全モード　δ＝0.02	
空気力係数	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／△ モーメント：○／○／△ 抗力：○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／△ モーメント：○／○／△ 抗力：○／○／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：準定常抗力、揚力 ハンガー：準定常抗力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗力：×／×／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル：準定常抗力、揚力	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚　力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗　力：△／△／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ケーブル：　準定常抗力，準定常揚力	
非定常空気力	実測値	実測値	平板翼理論値	実測値	実測値
準定常空気力	主桁：CD=1.088（迎角 0°）、An=6.07 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=2×1.177 m²/m/Br. ハンガー：CD=0.7、 An=2.24 m²/m/格点（部材軸方向）	主桁：CD=1.088（迎角 0°）、An=6.07 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=2×1.070 m²/m/Br. ハンガー：CD=0.7、 An=2.24 m²/m/格点（部材軸方向）	主　桁：CD=0.75、An=7.0 m²/m ケーブル：CD=0.7、An=2×1.0 m²/m/Br.	主　桁：　実測値 CD=0.921，An=6.0 m²/m/Br （改良二箱桁，α=0°） ケーブル：　CD=0.7，An=2.08 m²/m/Br	主　桁：　実測値 CD=0.693，An=6.0 m²/m/Br （基本二箱桁，α=0°） ケーブル：　CD=0.7，An=2.08 m²/m/Br
計算時の桁幅	桁幅　B=15.48 m	桁幅　B=15.48 m	桁幅　B=41 m	全桁幅　B=47.98 m（二箱桁部）	全桁幅　B=47.98 m（二箱桁部）
解析モデル	・主塔剛性： 塔面内剛性　25.68～46.29 m⁴/shaft 塔面外剛性　50.89～203.0 m⁴/shaft 塔ねじれ剛性 29.85～69.25 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	・主塔剛性： 塔面内剛性　25.68～46.29 m⁴/shaft 塔面外剛性　50.89～203.0 m⁴/shaft 塔ねじれ剛性 29.85～69.25 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	・主塔剛性： 塔面内剛性　200 m⁴/shaft 塔面外剛性　100 m⁴/shaft 塔ねじれ剛性　35 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125m ・端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	主塔，タワーリンクをモデル化	主塔部のモデル化なし
備考	重力剛性桁４車線 ケーブル許容応力 82kgf/mm²用	重力剛性桁４車線 ケーブル許容応力 100kgf/mm²用	フラッター解析のベンチマークテスト用	二箱桁／一箱桁併用吊橋（６車線）	

表－6.2.1.1(3)　フラッター解析条件一覧表

<table>
<tr><th>項目</th><th colspan="2">KH-2</th><th>KW-1</th><th>KW-2</th><th>SH-1</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組合せ法
無風時固有振動モードを使用
低次 50 モードを取り込む</td><td>モード組合せ法
無風時固有振動モードを使用
低次 50 モードを取り込む</td><td>直接法</td><td>直接法</td><td>直接法</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td colspan="2">0.12 kgf·s²/m⁴</td><td>0.125 kgf·s²/m⁴</td><td>0.125 kgf·s²/m⁴</td><td>0.125 kgf·s²/m⁴</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮（桁の回転変異による
非定常空気力の変化を考慮）</td><td>考慮（桁の回転変異による
非定常空気力の変化を考慮）</td><td>考慮</td><td>考慮しない</td><td>考慮しない</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td colspan="2">全モード　δ=0.02</td><td>δ＝ 0　（解析）
δ＝ 0.02（フラッター風速算出用）</td><td>δ＝ 0　（解析）
δ＝ 0.02（フラッター風速算出用）</td><td>δ=0（解析）
δ=0.02（フラッター風速算出用）</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td colspan="2">主桁：
<table>
<tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td>揚　力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>抗　力</td><td>△</td><td>△</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力
△：準定常空気力
ケーブル：　準定常抗力，準定常揚力</td><td>主桁
<table>
<tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力
△：準定常空気力
×：考慮せず
ケーブル　準定常抗力、揚力</td><td>主桁
<table>
<tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力
△：準定常空気力
×：考慮せず
ケーブル　準定常抗力、揚力</td><td>主桁
<table>
<tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr>
<tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr>
<tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr>
<tr><td>抗力</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr>
</table>
○：非定常空気力
△：準定常空気力
ケーブル　準定常抗力、揚力</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>実測値</td><td>実測値</td><td>平板翼理論値
実測値</td><td>平板翼理論値
実測値</td><td>平板翼理論値</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主　　桁：　実測値
C_D=1.174，A_n=4.0 m²/m/Br
（改良二箱桁，α=0°）
ケーブル：C_D=0.7，A_n=1.70 m²/m/Br</td><td>主　　桁：　実測値
C_D=0.921，A_n=6.0 m²/m/Br
（改良二箱桁，α=0°）
ケーブル：C_D=0.7，A_n=1.74 m²/m/Br
ステイケーブル：考慮せず</td><td>主桁　CD = 0.75、An = 7.0m²/m/Br.
ｹｰﾌﾞﾙ　CD = 0.7、 An = 2×1.0m²/m/Br.</td><td>主桁　CD = 0.75、An = 7.0m²/m/Br.
ｹｰﾌﾞﾙ　CD = 0.7、 An = 2×1.0m²/m/Br.</td><td>主　　桁　CD=0.75、An=7.0 m²/m
ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m²/m</td></tr>
<tr><td>計算時の桁幅</td><td>全桁幅　B=37.36 m（二箱桁部）</td><td>全桁幅　B=47.98 m（二箱桁部）</td><td>桁幅　B = 41m</td><td>桁幅　B = 41m</td><td>桁幅　B=41 m</td></tr>
<tr><td>解析モデル</td><td>主塔，タワーリンクをモデル化</td><td>主塔をモデル化</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200m⁴/shaft
面外剛性　100m⁴/shaft
ねじれ剛性　35m⁴/shaft
・ハンガー間隔：125m
・端部の境界条件：タワーリンク等の
モデル化は無し</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200m⁴/shaft
面外剛性　100m⁴/shaft
ねじれ剛性　35m⁴/shaft
・ハンガー間隔：125m
・端部の境界条件：タワーリンク等の
モデル化は無し</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200 m⁴/shaft
面外剛性　100 m⁴/shaft
ねじれ剛性　35 m⁴/shaft
・ハンガー間隔：100m
・端部の境界条件：タワーリンク等の
モデル化は無し</td></tr>
<tr><td>備考</td><td>二箱桁／一箱桁併用吊橋（4 車線）</td><td>二箱桁／一箱桁併用斜張吊橋（6 車線）</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

表－6.2.1.1(4)　フラッター解析条件一覧表

<table>
<tr><th>項目</th><th>SH-2</th><th>SH-3</th><th>SH-4</th><th>NK－1</th><th>NK－2</th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>直接法</td><td>直接法</td><td>直接法</td><td colspan="2">モード組み合わせ法。最低１００次モードを全て取り込む。</td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125 kgf･s²/m⁴</td><td>0.125 kgf･s²/m⁴</td><td>0.125 kgf･s²/m⁴</td><td>無風時固有振動モードを使用</td><td>有風時固有振動モード
（風速80m/s時を一律使用）</td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td><td>考慮</td><td>考慮しない</td><td colspan="2">０．１２５ kgf･s²／m⁴</td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>δ=0（解析）
δ=0.02（フラッター風速算出）</td><td>δ=0（解析）
δ=0.02（フラッター風速算出）</td><td>δ=0（解析）
δ=0.02（フラッター風速算出）</td><td colspan="2">考慮せず</td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁
鉛直／ねじれ／水平
揚力：○／○／△
モーメント：○／○／△
抗力：○／○／△
○：非定常空気力
△：準定常空気力
ケーブル　準定常抗力、揚力</td><td>主桁
鉛直／ねじれ／水平
揚力：○／○／△
モーメント：○／○／△
抗力：○／○／△
○：非定常空気力
△：準定常空気力
ケーブル　準定常抗力、揚力</td><td>主桁
鉛直／ねじれ／水平
揚力：○／○／△
モーメント：○／○／△
抗力：○／○／△
○：非定常空気力
△：準定常空気力
ケーブル　準定常抗力、揚力</td><td colspan="2">全モード　δ＝０．０２
主桁：
鉛直／ねじれ／水平
揚力：○／○／×
モーメント：○／○／×
抗力：×／×／△
○：非定常空気力　△：準定常空気力　×：考慮せず
ケーブル：準定常抗力、揚力
主塔：考慮せず</td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>実測値</td><td>実測値</td><td>平板翼理論値</td><td>平板翼理論値</td><td>実測値（強制振動法）</td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主　桁　CD=0.75、An=7.0 m²/m/Br.
ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m²/m/Br.</td><td>主　桁　CD=0.75、An=7.0 m²/m/Br.
ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m²/m/Br.</td><td>主　桁　CD=0.75、An=7.0 m²/m
ケーブル　CD=0.7 、An=1.0 m²/m</td><td>主桁：C_D＝０．７５（α＝０°）
An=7.0 m²／m／Br.
ケーブル：C_D＝０．７　An＝２．０m²／m／Ｂｒ.</td><td>主桁：実測３分力係数を使用
An=7.0 m²／m／Br.</td></tr>
<tr><td>計算時の桁幅</td><td>桁幅　B=41 m</td><td>桁幅　B=41 m</td><td>桁幅　B=41 m</td><td colspan="2">４１m</td></tr>
<tr><td>解析モデル</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200 m⁴/shaft
面外剛性　100 m⁴/shaft
ねじれ剛性　35 m⁴/shaft
・ハンガー間隔：100m
・端部の境界条件：タワーリンク等のモデル化は無し</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200 m⁴/shaft
面外剛性　100 m⁴/shaft
ねじれ剛性　35 m⁴/shaft
・ハンガー間隔：100m
・端部の境界条件：タワーリンク等のモデル化は無し</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200 m⁴/shaft
面外剛性　100 m⁴/shaft
ねじれ剛性　35 m⁴/shaft
・ハンガー間隔：100m
・端部の境界条件：タワーリンク等をモデル化</td><td colspan="2">主塔剛性：
塔面内剛性：１５～３０m⁴/shaft
塔面外剛性：３０～９０m⁴/shaft
塔ねじれ剛性：２０～４０m⁴/shaft
ハンガー間隔：７５m
端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化</td></tr>
<tr><td>備考</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

表－6.2.1.1(5)　フラッター解析条件一覧表

項目	NK－3	HZ－1	HZ－2	HZ－3	MES
解析手法	モード組み合わせ法。 最低１００次モードを全て取り込む。 有風時固有振動モード （風速80m/s時を一律使用）	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次５０モード取り込む	モード組合せ法 無風時固有振動モードを使用 低次２０モードを取り込む	モード組合せ法 有風時変形固有振動モードを使用 低次２０モードを取り込む	モード組み合わせ法 無風時固有振動モードを使用 低次４０モードを取り込む
空気密度	０．１２５ kgf·s²／m⁴	0.125 kgf・S²／m⁴	0.125 kgf・S²／m⁴	0.125 kgf・S²／m⁴	0.125 kgf·s²/m⁴
有風時静的変形	考慮	考慮しない	考慮しない	考　慮	考慮しない
構造減衰	全モード　δ＝０．０２	全モード　δ＝0.02	全モード　δ＝0.02	全モード　δ＝0.02	全モード　δ ＝ 0.02
空気力係数	主桁： 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗力：×／×／△ ○：非定常空気力　△：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル：準定常抗力、揚力　主塔：考慮せず	主　桁 鉛　直／ねじれ／水　平 揚　力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗　力：×／×／△ ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル　準定常抗力、揚力	主　桁 鉛　直／ねじれ／水　平 揚　力：○／○／○ モーメント：○／○／○ 抗　力：○／○／○ ○：非定常空気力 ケーブル　準定常抗力、揚力	主　桁 鉛　直／ねじれ／水　平 揚　力：○／○／○ モーメント：○／○／○ 抗　力：○／○／○ ○：非定常空気力 ケーブル　準定常抗力、揚力	主桁 鉛直／ねじれ／水平 揚力：○／○／× モーメント：○／○／× 抗力：×／×／∧ ○：非定常空気力 ∧：準定常空気力 ×：考慮せず ケーブル　準定常抗力、揚力
非定常空気力	実測値（強制振動法）	平板翼理論値	実測値	実測値	平板翼理論値
準定常空気力	主桁：実測３分力係数を使用 An＝7.0 m²／m／Br. ケーブル：C D＝０．７、 An＝２．０m²／m／Ｂｒ.	主　桁　CD＝0.75, An＝7.0m²／m／Br ケーブル　CD＝0.7, An＝1.0m²／m／Br	ケーブル　CD＝0.7, An＝1.1m²／m／Br	ケーブル　CD＝0.7, An＝1.1m²／m／Br	主　桁　C_D = 0.75、An = 7.0 m²/m ケーブル　C_D = 0.7 、An = 2.0 m²/m
計算時の桁幅	４１m	桁　幅　B＝41 m	桁　幅　B＝全幅	桁　幅　B＝全幅	桁幅　B = 41 m
解析モデル	主塔剛性： 塔面内剛性：１５～３０m⁴／shaft 塔面外剛性：３０～９０m⁴／shaft 塔ねじれ剛性：２０～４０m⁴／shaft ハンガー間隔：７５m 端部の境界条件：タワーリンクとウィンド沓をモデル化	標準モデル	標準モデル	標準モデル	・主塔剛性：面内剛性　200 m⁴/shaft 面外剛性　100 m⁴/shaft ねじれ剛性　35 m⁴/shaft ・ハンガー間隔：125 m ・端部の境界条件：タワーリンク等のモデル化は無し
備考		ベンチマークテスト結果	有風時変形を考慮しない場合の結果	有風時の変形を考慮する場合の結果	

表－6.2.1.1(6)　フラッター解析条件一覧表

<table>
<tr><th>項目</th><th>MHI－1</th><th>MHI－2</th><th></th></tr>
<tr><td>解析手法</td><td>モード組み合わせ法
低次 50 モードを取り込む
無風時固有モードを使用</td><td>モード組み合わせ法
低次 50 モードを取り込む
無風時固有モードを使用</td><td></td></tr>
<tr><td>空気密度</td><td>0.125kgf•s^2/m^4</td><td>0.125kgf•s^2/m^4</td><td></td></tr>
<tr><td>有風時静的変形</td><td>考慮しない</td><td>考慮しない</td><td></td></tr>
<tr><td>構造減衰</td><td>全モード　δ=0.02</td><td>全モード　δ=0.02</td><td></td></tr>
<tr><td>空気力係数</td><td>主桁：
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力，揚力</td><td>主桁：
<table><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr><tr><td>揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>×</td></tr><tr><td>抗力</td><td>×</td><td>×</td><td>△</td></tr></table>○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず

ケーブル：
準定常抗力，揚力</td><td></td></tr>
<tr><td>非定常空気力</td><td>平板理論値</td><td>実測値（強制振動法）</td><td></td></tr>
<tr><td>準定常空気力</td><td>主桁：
C_D=0.75,　A_n=7.0 m^2/m/Br.

ケーブル：
C_D=0.75,　A_n=2.0 m^2/m/Br.</td><td>主桁：
C_D=0.75,　A_n=7.0 m^2/m/Br.

ケーブル：
C_D=0.75,　A_n=2.0 m^2/m/Br.</td><td></td></tr>
<tr><td>計算時の桁幅</td><td>B=41m</td><td>B=41m</td><td></td></tr>
<tr><td>解析モデル</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200m^4 / shaft
：面外剛性　100m^4 / shaft
：ねじれ剛性　35m^4 / shaft
・ハンガー間隔：28m
・ｳｨﾝﾄﾞ省，ﾀﾜｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化</td><td>・主塔剛性：面内剛性　200m^4 / shaft
：面外剛性　100m^4 / shaft
：ねじれ剛性　35m^4 / shaft
・ハンガー間隔：28m
・ｳｨﾝﾄﾞ省，ﾀﾜｰﾘﾝｸﾓﾃﾞﾙ化</td><td></td></tr>
<tr><td>備考</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

6.3 打合せ記録

開催年月日	会議名	開催場所	出席者数	主な議題
H. 7. 9.29	第1回全体会議	鉄鋼会館 803号室	３７名	①各社の特許に関する現状と研究希望内容について ②共同研究体制について ③共同研究協定書、成果の帰属覚書、申請書について ④平成7年度運営費について
H. 7.12.14	第2回全体会議	鉄鋼会館 601号室	２６名	①Aｸﾞﾙｰﾌﾟの総括報告(NKK) ②Bｸﾞﾙｰﾌﾟの総括報告（日立造） ③C ｸﾞﾙｰﾌﾟの総括報告（三菱） ④今後の方針
H. 8. 3.19	第3回全体会議	鉄鋼会館 601号室	２６名	①各ｸﾞﾙｰﾌﾟ報告 ②報告書について ③研究成果の帰属に関する覚書（案）について
H. 8. 7.19	第4回全体会議	本四公団	２９名	①平成7年度報告書について ②各ｸﾞﾙｰﾌﾟの進捗状況について ③平成7年度決算及び平成8年度予算について
H. 8.10.24	第5回全体会議	ﾎﾃﾙ国際観光	２２名	①各ｸﾞﾙｰﾌﾟ報告
H. 9.1.23	第6回全体会議	ﾎﾃﾙ国際観光	２８名	①各ｸﾞﾙｰﾌﾟ報告
H. 9.2.12	第7回全体会議	弘済会館	２８名	①1997年度計画案の各社からの提案 ②今後のとりまとめ方針
H. 9.3.27	第8回全体会議	弘済会館	２５名	①平成９年度研究内容の提案 ②平成８年度報告書作成
H. 9. 6. 6	第9回全体会議	弘済会館	２６名	①各機関からの報告 ②平成8年度報告書 ③ﾌﾗｯﾀｰ解析のﾍﾞﾝﾁﾏｰｸﾃｽﾄ ④成９年度の研究内容 ⑤予算決算報告
H. 9.8.29	第10回全体会議	弘済会館	２５名	①各機関からの報告
H. 9.11.21	第11回全体会議	弘済会館	２９名	①各機関からの報告
H.10. 1.30	第12回全体会議	弘済会館	２７名	①各機関からの報告
H.10. 3.27	第13回全体会議	弘済会館	２２名	①各機関からの報告 ②最終報告について

耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究報告書(その3)

共同研究報告書
第213号平成10年3月

建設省土木研究所構造研究室

要旨　本報告書は，耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発に関する共同研究の平成9年度の成果を報告するとともに，共同研究期間である平成7年度から平成9年度までの3年間の成果をとりまとめて報告するものである。平成9年度は前年度までの検討に引き続き構造特性に関する検討，空力特性に関する検討および新形式吊橋に関する検討を実施するとともに，4車線案についても検討を行った。共同研究を実施した3年間の成果は，次のとおりである。構造特性に関しては，一箱桁断面を対象として検討を実施し，3本ケーブルに斜めステイを付加する形式の有効性，鉛直クロスステイ，水平ステイ，対角ステイの最適な設置位置が明らかとなった。空力特性に関しては，二箱桁断面を対象として検討を実施し，センターバリア，ガイドベーン等の耐風安定化部材の配置を系統的に検討を行い耐風性の良好な断面を見いだすことができた。新形式吊橋に関しては，二箱桁と一箱桁を併用した形式，楕円・多角形を補剛桁断面に採用した形式等について検討し，耐風特性の確認を行った。また，新たに開発された技術，耐風性の検討を実施した断面の一覧表を作成し巻末に添付した。

キーワード：超長大橋，風洞実験，耐風性，経済性，フラッター

郵便はがき

50円切手をはって下さい

3 0 5-0 0 0 0

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室　行

No.

No.

配布先氏名

配布先住所

○

共同研究報告書第213号　　部

上記のとおり受領しました。

所　属（住所）

氏　名　　印