

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9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 © (1997) 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。

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)

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	秋山 晴樹
(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・燃料研究部 次長	樋上 琇一
川崎重工業 (株) 鉄構事業部 橋梁技術総括部 技術部 部長	小川 一志
川田工業 (株) 研究室 室長	米田 昌弘
住友重機械工業 (株) 鉄構機器事業本部 技術部 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) 鉄構建設事業部 技術部 課長	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 課長	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8年度の成果を報告するものである。本年度は前年度に引きつづき構造特性に関する検討、空力特性に関する検討、新形式吊橋に関する検討を実施した。構造特性に関しては一箱桁形式補剛桁を有する吊橋を対象として3本ケーブル吊橋、クロスステイの最適設置位置、水平ステイや対角ステイとクロスステイの併用効果などの検討を実施した。空力特性に関しては二箱桁形式補剛桁を対象としてフェアリング形状、鉛直スタビライザーの高さなどの検討を実施した。新形式吊橋に関しては重力剛性桁、二箱桁／一箱桁併用吊橋、補剛桁の開口部分の形状、楕円断面及び多角形断面補剛桁、遮風壁の設置された補剛桁などの検討を実施した。

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. 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 3本ケーブル吊橋の検討	14
3. 2. 3 鉛直クロスステイの最適位置に関する検討	23
3. 2. 4 水平ステイ・対角ステイの検討	33
3. 2. 5 センターバリア、先端フェアリング形状の検討	42
3. 2. 6 開口部を持つ一箱桁の耐風性検討	50
3. 3 二箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究	75
3. 3. 1 概要	75
3. 3. 2 二箱桁断面の空力特性改善に関する研究	77
3. 3. 3 遮風効果を有する二箱桁形式の耐風性検討	87
3. 3. 4 鉛直スタビライザーを活用した二箱桁形式の耐風性検討	93
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	118
3. 4. 1 概要	118
3. 4. 2 重力剛性桁の耐風性検討	124
3. 4. 3 二箱桁／一箱桁併用吊橋の耐風性に関する検討	130
3. 4. 4 開口方法の差異に着目した耐風性検討	141
3. 4. 5 楕円断面と多角形断面の空力特性予備検討	150
3. 4. 6 遮風壁箱桁断面の耐風性検討	161
3. 4. 7 その他の形式	175
3. 5 フラッター解析に関するベンチマークテスト	179
3. 5. 1 概要	179
3. 5. 2 ベンチマークテスト結果	181
3. 5. 3 まとめ	231
4. あとがき	234
5. 付録	
5. 1 空力特性検討断面一覧表	235
5. 2 議事録	249

1. まえがき

現在、わが国では各地で海峡横断道路プロジェクトが構想されており、これらのプロジェクトでは既往の実績を上回る大規模橋梁が含まれる可能性がある。このような超長大橋の設計に従来のトラス補剛桁を適用して耐風性を確保する場合、経済性の面に大きな課題が生じると考えられる。超長大橋を含むこれらの道路プロジェクトを実現するためには、耐風性と経済性に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(株)、川崎重工業(株)、川田工業(株)、住友重機械工業(株)、日本鋼管(株)、日立造船(株)、三井造船(株)、三菱重工業(株)、により実施しているものである。

平成8年度の研究成果を取りまとめて以下に報告する。

なお、本共同研究は当初2年間の予定で実施することとなっていたが、対象橋梁の車線数が6車線の場合だけでなく4車線の場合も検討することとしたため、研究期間を1年延長し3年間とした。

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
藤城 泰行	建設省土木研究所 構造橋梁部長
佐藤 弘史	〃 構造橋梁部 構造研究室室長
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
松藤 洋照	〃 〃 構造研究室
辰巳 正明	本州四国連絡橋公団 設計部 部長（平成8年11月まで）
奥川 淳志	〃 〃 部長（平成8年12月より）
秋山 晴樹	〃 〃 設計第一課長
古家 和彦	〃 〃 設計第一課長代理
鳥海 隆一	〃 〃 設計第一課長代理
大谷 康史	〃 〃 設計第一課（平成8年7月まで）
河藤 千尋	〃 〃 〃（平成8年4月より）
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 秀一	石川島播磨重工業（株） 横浜技術研究所流体燃料・研究部 次長
松田 一俊	〃 〃 〃 研究員
上島 秀作	〃 〃 〃 〃
徳重 雅史	〃 〃 〃 〃
鈴木 正直	〃 〃 〃 〃
小川 一志	川崎重工業（株） 鉄構事業部 橋梁技術総括部技術部 部長
下土居 秀樹	〃 〃 〃 課長
斎藤 敏雄	〃 〃 〃 係長
橋本 靖智	〃 〃 〃 〃
野上 千秋	〃 〃 〃 〃
越後 滋	川田工業（株） 技術本部長代理
米田 昌弘	〃 研究室室長
木村 公男	〃 長大橋部技術開発課係長
大野 克紀	〃 長大橋部技術開発課
宮崎 正男	住友重機械工業（株） 鉄構機器事業本部技術部 部長
風間 浩二	〃 技術本部総合研究所熱流体グループ 研究員
中村 幸	〃 鉄構機器事業本部技術部橋鉄技術グループ 課長
久保田 浩	〃 鉄構機器事業本部技術部橋鉄技術グループ 〃
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研究員
武田 勝昭	〃 〃 主幹研究員
村上 琢哉	〃 〃 〃 耐風・構造チーム 研究員
小泉 幹男	〃 〃 〃 〃
高尾 道明	〃 〃 〃 〃
植田 利夫	日立造船（株） 鉄構事業本部 設計統括部主席技師
山村 信道	〃 〃 〃 〃
田中 洋	〃 〃 〃 〃
松岡 幸文	〃 〃 〃 〃
山口 映二	〃 〃 〃 〃

井上 浩男	三井造船（株） 鉄構建設事業部技術部 技術開発グループ 課長
大森龍一郎	” ” ”
森島 弘吉	” ” ”
林 健一	” ” ”
赤瀬 雅之	” ” ”
成田 和由	” ” 構造グループ 部長
逸見 雄人	三菱重工業（株） 広島製作所 鉄構技術部 橋梁設計課課長
斎藤 通	” 長崎研究所 流体研究室長
本田 明弘	” 長崎研究所 流体研究室主任
平井 滋登	” 長崎研究所 流体研究室
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主任

2.2 研究分担

研究の実施に先立ち、研究内容を表-2.2.1のようにブレイクダウンして、それぞれ担当幹事を定めた。

表-2.2.1 研究分担

グループ名	研究分担の内容	幹事	担当企業
A (一箱桁)	ケーブルシステムにより 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	日本鋼管	土本川住日 木州木田友本 研四研工重鋼 究国究業機 所連セ磨重機 絡ンタ工業 橋タ工業 公二業 団
B (二箱桁)	中央部に開口を有する 箱桁の空力特性の検討	日立造船	土本川住日 木州木田友本 研四研工重鋼 究国究業機 所連セ磨重機 絡ンタ工業 橋タ工業 公二業 団
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	三菱重工業	土本川住日 木州木田友本 研四研工重鋼 究国究業機 所連セ磨重機 絡ンタ工業 橋タ工業 公二業 団

3. 本年度の研究成果

3.1 本年度研究成果の概要

平成8年度の検討では、昨年度に引き続き一箱桁形式ではケーブルシステムを用いた超長大吊橋の耐風性能向上と、新たに補剛桁の断面形状の検討を実施した。また、二箱桁形式では同様に補剛桁そのものの耐風安定性を中心に検討がなされた。新形式では構造形式や桁断面形状の検討が実施された。一方、これらの検討に際してはフラッター解析が耐風安全性を評価する上で重要な役割を担っていることから、関係各機関で行われる解析の整合性を図る目的でフラッター解析のベンチマークを実施した。補剛桁の風洞実験成果については今後の資料蓄積のために今年度から書式を決めて保存を図ることとした。

(1) 一箱桁形式の検討

1箱桁形式におけるケーブルシステムの効果の検討では、3本ケーブル吊橋の耐風性、クロスステイの最適位置、水平ステイ・対角ステイの併用効果などについて昨年度に引き続きより詳細な検討を実施した。補剛桁の非定常空気力として昨年度は平板翼理論値を用いたが、本年度は一部実測された非定常空気力係数を使用し解析を実施した。しかしながら、ケーブルシステムによる効果だけでは必ずしも十分な耐風性の確保が難しいこともあることから、補剛桁断面の耐風性能の向上を図ることも併せて検討された。検討対象としてはセンターバリア、フェアリング、桁高、開口部の配置、透過型遮風壁などである。これらの結果からはまだ十分ではないが耐風性を確保する目処がある程度得られたと言えよう。

(2) 二箱桁形式の検討

2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7年度に検討された5断面のうち、3断面が引き続き詳細に検討された。2箱桁と1箱桁の併用吊橋案では、静的風荷重の作用による頭下げ変形を低減させる目的で、フェアリング形状の変更やフラップの適用あるいは検査車レール等の活用が検討された。これらのうち空力モーメント特性が良好な断面を対象にフラッター特性が確認された。また、平成7年度にフェアリングとの組合せで、フラッター特性への効果が確認された充実率30%の透過型遮風壁案では、今後予定される変形解析やフラッタ解析のために静的空気力としての三分力が計測された。鉛直スタビライザーを活用した2箱桁断面案では新たな断面の試験を実施し、平成7年度の成果と併せて総合的に検討し最良の桁断面を選定した。この断面に対して三分力と非定常空気力が測定され、二次元フラッター解析とバネ支持試験の結果が比較された。これら成果によれば、特定のケースでは耐風性能の大幅な向上も期待できそうであるが、これら効果は桁周辺の気流を著しく変局させたことによるものであり、模型化の方法やレイノルズ数影響など、検討すべき課題はまだ多いと言えよう。

(3) 新形式の検討

新形式の検討としては、重力剛性桁を始めとして5つの形式についての検討が実施された。重力剛性桁案ではケーブルの許容応力を高く設定した場合についてのフラッター解析が実施された。この結果からはケー

ブル重量の減少にフラッター風速の上昇が極慣性モーメント減少による同風速の低下を上回ることが確認された。2箱桁と1箱桁の併用吊橋案では風荷重による静的変形特性の改善や構造解析モデルの変更等で、平成7年度の検討案に比べ2割程度の耐風性の向上が図られた。1箱桁を対象にした開口部充実率・形状変化案では8つのパターンについて相互の耐風性能が比較された。楕円断面と多角形断面の案については、1:3及び1:5の楕円断面と1:5の20角形断面のレイノルズ数影響が実験で検討され、これら断面がレイノルズ数の変化に対して極めて敏感であるとの結果が得られている。遮風壁箱桁断面案についてはフェアリング形状の改善と中央分離帯部分への遮風壁の設置により耐風性の向上が期待できるとの結果が得られている。いずれにしても、新形式では今後より一層の検討が必要であると言えよう。

(4) その他の検討

超長大橋の耐風安定性を評価する場合、フラッター解析が重要な役割を果たすことになるが、個々の解析プログラムが異なることにより、自ずと結果の精度についても若干の相違が生じてくる可能性がある。これに類似した検討としては、明石海峡大橋の固有値解析における解析モデルやプログラムによる解析誤差の検討が挙げられる。そこで本年度はフラッター解析に関するベンチマークテストを実施した。具体的には、構造諸元を統一した対象吊橋の「標準モデル」を作成し、これを基本としてフラッター解析結果を比較検討した。その結果からは平板翼の空気力を用いたケースでは、比較の対象とした9機関での解析結果は極めてよく一致しており、また、直接法やモード組合せ法による誤差や計測空気力を用いた場合での差もほとんど無いことから、現状で使用されているフラッター解析は実用上なんら問題ないことが改めて確認されたと言えよう。

また、昨年度、今年度と多くの桁断面に対して風洞実験がなされているが、今後超長大吊橋の桁に対する空力特性の検討が進むとこれら実績をきちんとしたかたちで整理して置くことが重要となる。このことは、これら実験成果が重複検討されることなく活用されるかたちであることが望ましい。そこで今年度から空力特性検討断面一覧表として記入項目を統一して保存することとした。成果は最終報告書に付属資料としてまとめられる予定である。

3.2 1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

本節では、ケーブルシステムにより1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。昨年度に引き続き、従来詳細な検討が行われていない3本ケーブル吊橋の検討を行うとともに、クロスステイの効果をさらに向上させることを目的として、クロスステイの最適設置位置の検討、水平ステイ、対角ステイとの併用効果の検討を行った。昨年度は、桁に作用する空気力を平板翼理論値を用いていたが、本年度は、一部測定された非定常空気力係数も用いて検討を行った。また、今年度は、上記ケーブルシステムの検討に加えて、1箱桁断面形状の検討を行った。具体的には、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、3種の桁高に対して開口部の設置の検討およ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を、ばね支持試験及び測定空気力を用いたフラッター解析により実施した。

(2)ケーブルシステムの検討

1)想定橋梁の諸元

本研究では、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）を基本検討の対象とした。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 w_c は $w_c \approx 17.0\text{tf/m/Br.}$ 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 $w_c=11.0\text{tf/m/Br.}$ まで低減したことを付記しておく。

2)フラッター解析条件

フラッター解析条件を表-3.2.1.2に示す。立体骨組フラッター解析には、固有振動モードを組み合わせる方法（モード組合せ法）と基本となる非定常空気力を加えた運動方程式を直接解く方法（直接法）とがある。モード組合せ法は、直接法に比べ、大きな計算容量を必要としないが、超長大吊橋の解析にあたって考慮すべきモード次数についての定量的指標が与えられていないという短所を持つ。本研究では、各項毎に異なった解析法を用いているが、同一の条件下で両者の計算値がほぼ一致することを確かめている（3.5 参照）。また、桁に作用する非定常空気力には、図-3.2.1.1に示した平板翼理論値、桁高7m1箱桁の測定空気力を用いた。図中に示した空気力係数は次ページに示した定式化に基づいており、定数項を除いた4次多項式で近似して用いた。桁高7m1箱桁断面形状を図-3.2.1.2に示す。なお、有風時における横たわみの影響は大半は無視しているが、一部影響を考慮しているものもあり、その場合には文中に明記した。

【非定常空気力係数の定式化】

$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left[L_{zr} \frac{Z}{B} + L_{zi} \frac{\dot{Z}}{B\omega} + L_{\theta r} \theta + L_{\theta i} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right] \quad (3.2.1.1 a)$$

$$M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left[M_{zr} \frac{Z}{B} + M_{zi} \frac{\dot{Z}}{B\omega} + M_{\theta r} \theta + M_{\theta i} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right] \quad (3.2.1.1 b)$$

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。

3) ケーブルシステムの検討結果

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が行われた。その結果、3本ケーブル吊橋は桁の非定常空気力の影響を受けやすいこと、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、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）を付加した方式では、今回の測定空気力を用いたケースにおいて、2本ケーブル吊橋にクロスステイを付加する従来方式とほぼ同程度のフラッター発現風速を有することが明らかとなった。

両効き鉛直クロスステイの最適位置の検討については、作用空気力の相違（平板空気力、測定空気力）によって最適位置が大幅に変化する可能性があることが指摘された。

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。桁に作用する空気力に平板翼理論値を用いたケースにおいて、水平ステイを全長の約 48% 区間に設置し、さらに対角ステイを中央径間 $L/4$ 点付近に2カ所設置した場合には、ステイを全く設置しない場合に比べてフラッター発現風速が約 43% 上昇した。

以上の結果より、これらのケーブルシステムにより超長大橋のフラッター発現風速を効果的に改善することが可能であると考えられる。しかしながら、桁に作用する空気力の相違により、フラッター発現風速が大きく変化する場合も見られたため、今後は、測定空気力とケーブルシステムの組み合わせの影響、さらに、これらケーブルシステム同士の組み合わせの影響を検討する必要があると判断される。

(3) 1 箱桁断面の検討

桁高 7 m 1 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の約 2 割上昇し、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。

また、桁高の違う 3 種（7、5、3.5 m）の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 5 m が最も耐風性が良好であった。さらに、その桁高 5 m 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° 、 $\pm 3^{\circ}$ ）ともフラッター発現風速 75 m/s 以上が達成できた。本断面については、静的変形を考慮し、測定空気力を用いた3次元フラッター解析も実施され、ほぼ 80 m/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。

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, 2 5 0 + 2, 5 0 0 + 1, 2 5 0 m
	サグ比	1 / 9
主ケーブル	中心間隔	3 5. 5 m
	断面積	1. 2 m ² / B r
ハンガー	ハンガー間隔	7 0 m (3.2.2) 1 2 5 m (3.2.3) 1 0 0 m (3.2.4)
	断面積	0. 0 1 1 m ² / 格点 / B r (3.2.2) 0. 0 3 m ² / 格点 / B r (3.2.3) 0. 0 2 4 m ² / 格点 / B r (3.2.4)
補剛桁	断面積	1. 3 m ² / B r
	鉛直曲げ剛性	1 2. 0 m ⁴ / B r
	水平曲げ剛性	1 6 0 m ⁴ / B r
	ねじれ剛性	2 6 m ⁴ / B r
	極慣性	3 3 6. 7 t・s ² / m / B r
死荷重	吊構造部	2 4 t / m / B r
	ケーブル	1 1 t / m / B r
主 塔	塔高	3 6 9. 5 m
	底板下面	T P + 1 0. 5 m

表-3.2.1.2 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(3.2.2) 低次100モードを全て取り込む。 直接法(3.2.3)(3.2.4)																		
空気密度	0.125 kgf s ² /m ⁴																		
有風時静的変形	原則として考慮しない(一部考慮したケースもある)																		
構造減衰	全モード δ = 0.02 (モード組合せ法。直接法の一部) 全モード δ = 0 (直接法の大部分)																		
空気力係数	主桁： (振動方向) <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>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			鉛直	ねじれ	水平	空 気 力	L	○	○	×	M	○	○	×	D	×	×	△
		鉛直	ねじれ	水平															
空 気 力	L	○	○	×															
	M	○	○	×															
	D	×	×	△															
非定常空気力	平板翼理論値、桁高7m1箱桁断面の実測値のいずれか																		
準定常空気力	主桁： C _D = 0.75 A _n = 7.0 m ² /m/B _r ケーブル： C _{Dc} = 0.7 A _n = 2.0 m ² /m/B _r																		
その他	計算時の桁幅は、B = 41 mとした。																		

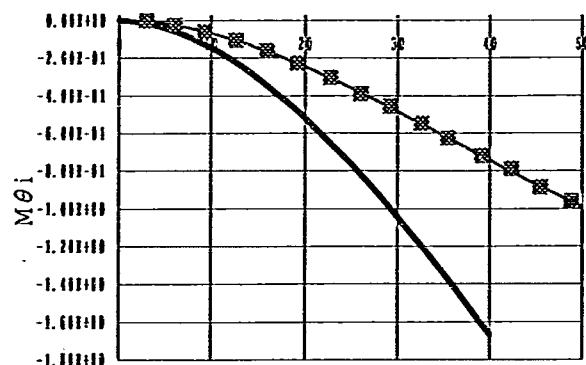
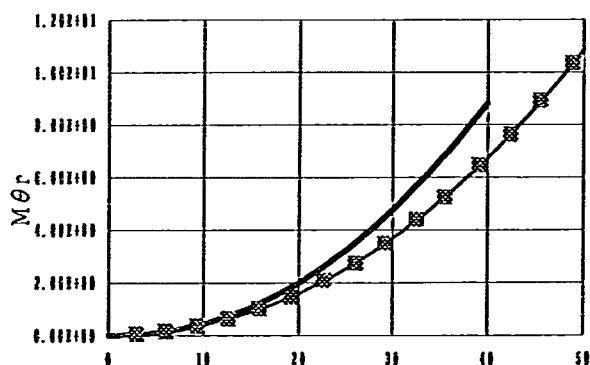
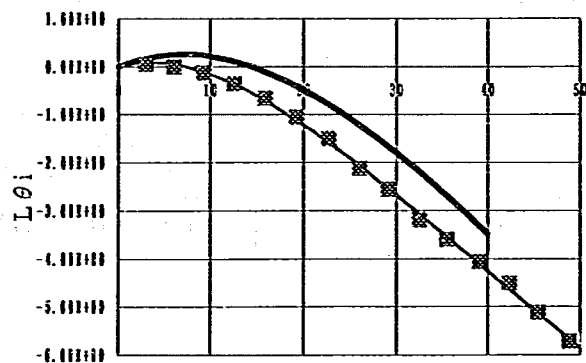
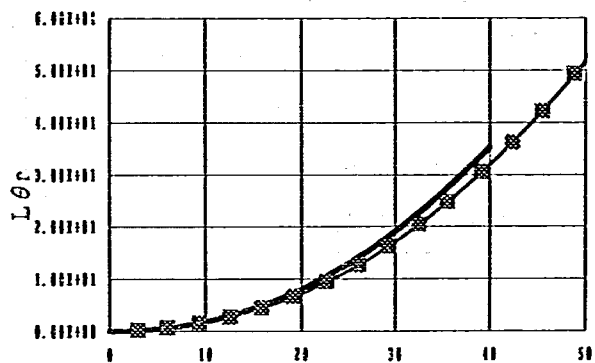
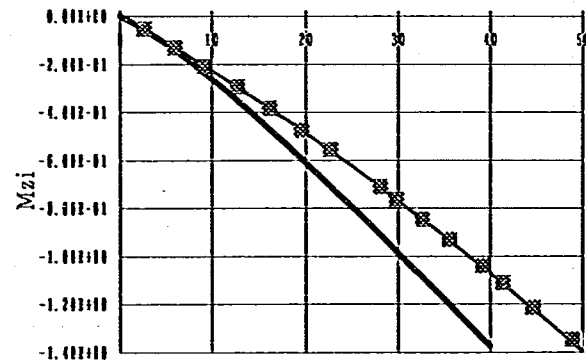
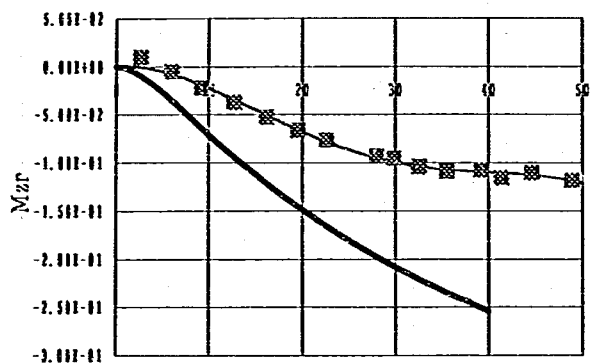
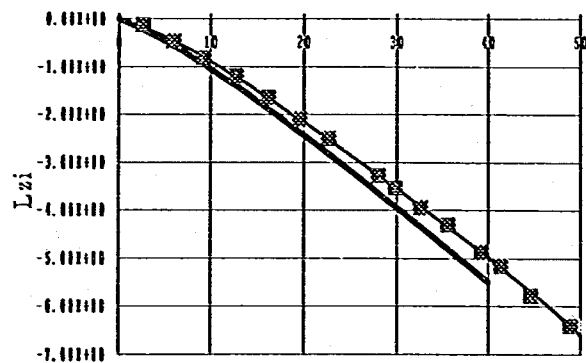
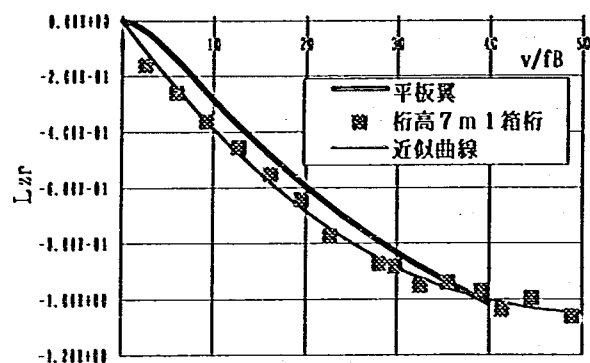


図-3.2.1.1 フラッター解析に用いた非定常空気力係数

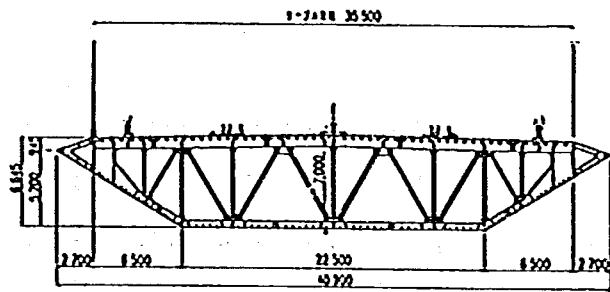


図-3.2.1.2 桁高7 m 1箱桁断面形状
(今回用いた測定空気力対象断面)

3.2.2 3本ケーブル吊橋の検討

(1)メインケーブル断面積比、斜めステイの断面積の検討

昨年度の報告では、主ケーブル断面積を、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）の基本検討を実施したが、ここでは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。斜めステイの概念図を図-3.2.2.1に示す。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ヶ所とし、桁に作用する空気力は、平板翼理論値、桁高7m1箱桁の実測値を用いている。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（抗圧）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を一覧表にして、表-3.2.2.1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。すなわち、ステイの断面積が十分に大きい場合は、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7m1箱桁断面の実測空気力を用いた場合

斜めステイの断面積を十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-3.2.2.2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。これより、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、平板翼と実測された非定常空気力が異なる事に起因するものと判断できる。また、同表の内、Case Cにおける $V-\delta$ 図を図-3.2.2.2に示す。これより、各ケースとも $V-\delta$ 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、実測空気力を用いた場合を比

較して、図-3.2.2.3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、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3本ケーブル吊橋の方が大きいことから、非連成項の減衰力が大きくなっ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、実測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、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。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片効きの場合のクロスステイ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 0.0055m^2 （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-3.2.2.3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。

各ケースにおける $V-\delta$ 図を図-3.2.2.4(1)~(3)に示す。

(3) 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 7 m 1 箱桁断面の実測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 6.6 m/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 5.2 m/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。

今後は、様々な桁断面の非定常空気力を用いてフラッター解析を実施することにより、桁断面形状とケーブルシステムの効果との関係について検討する予定である。

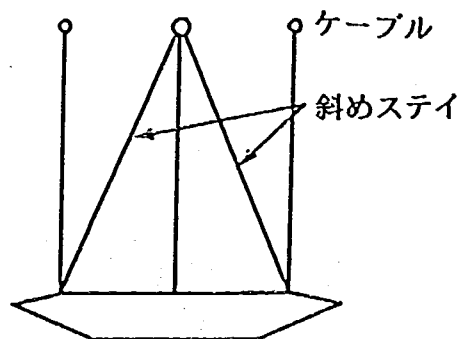


図-3.2.2.1 斜めステイの概念図

表-3.2.2.1 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

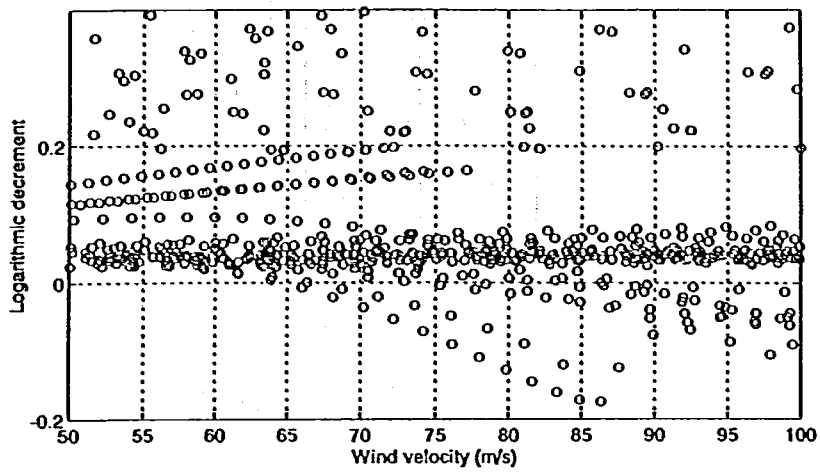
(備考) 桁に作用する空気力は平板翼理論値とした。

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 0.0055m^2)を示す。

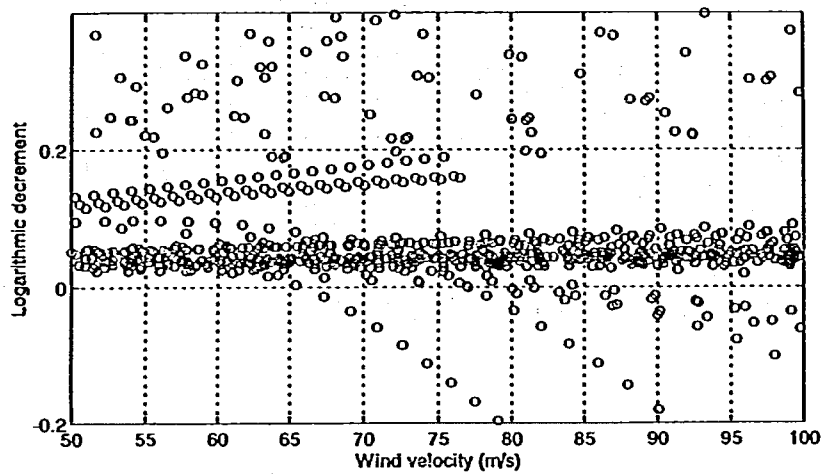
表-3.2.2.2 フラッター解析結果

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	($V=80\text{m/s}$)	1箱桁	考慮	66m/s (0.134Hz)	66m/s (0.131Hz)	52m/s (0.146Hz)

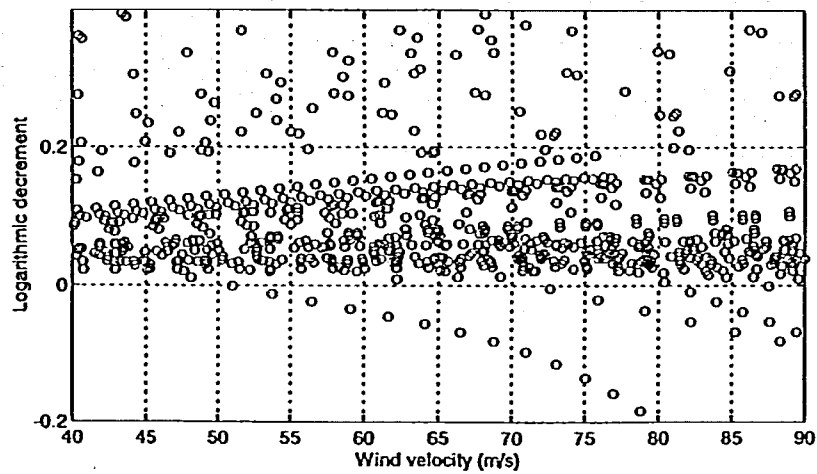
(備考) ステイ設置位置は、中央径間 $L/4$ 点と側径間中央部の計4ヶ所。断面積は、 0.055m^2 /本。



(a) 2本ケーブル吊橋+クロスステイ方式

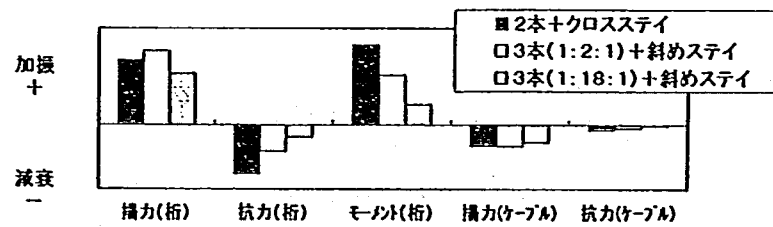


(b) 3本ケーブル吊橋（断面積比1:2:1）+斜めステイ方式

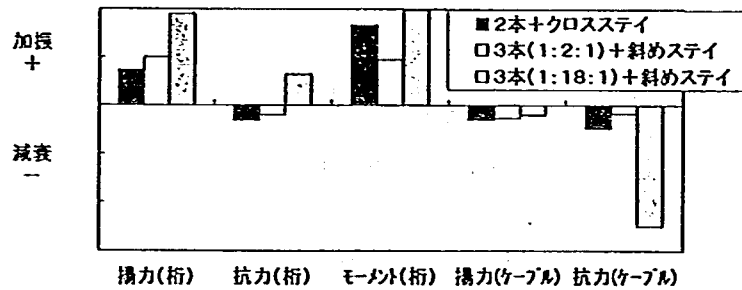


(c) 3本ケーブル吊橋（断面積比1:18:1）+斜めステイ方式

図-3.2.2.2 V- δ 曲線（桁高7 m 1箱桁断面）



(a) Case A



(b) Case C

図-3.2.2.3 各空気力成分が成す仕事量（フラッター発現風速付近）

表-3.2.2.3 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 発現風速 (m/s)
	設置位置	ステイ	設置位置	ステイ	
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

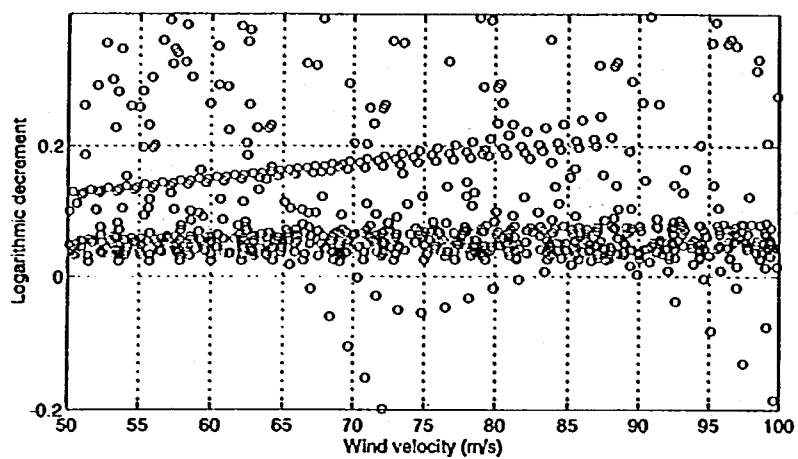
(備考)

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。

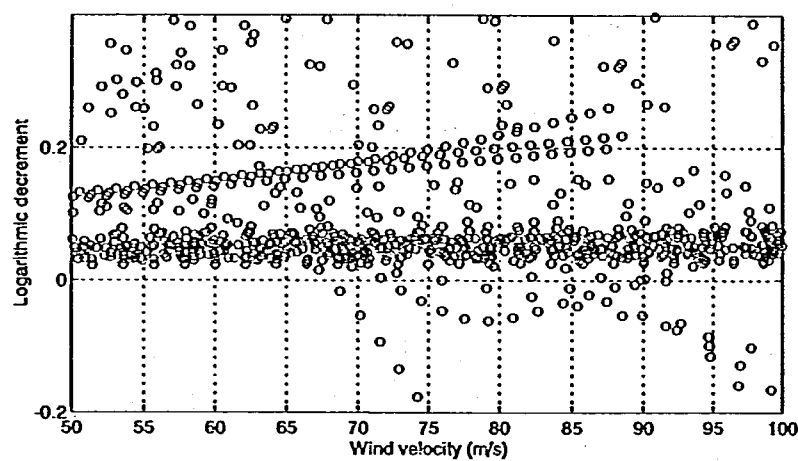
斜め: 斜めステイ、クロス: クロスステイ、傾斜: 傾斜クロスステイを示す。

括弧内は、(片): 片効き、(両): 両効きを示す。

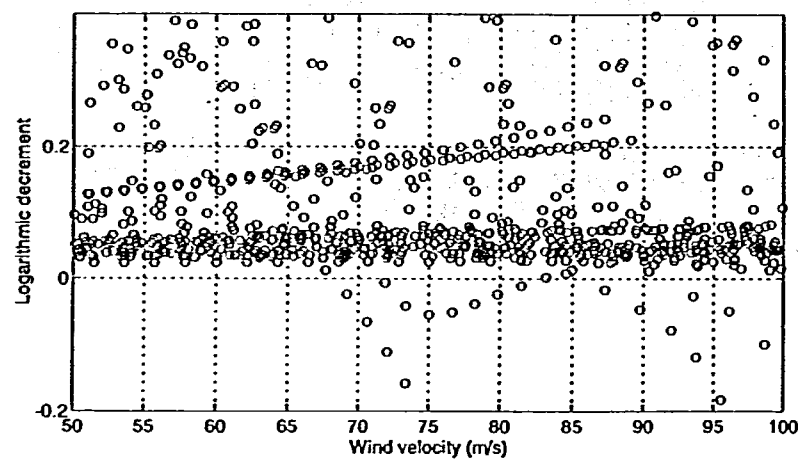
ステイの断面積は、1倍(0.0055m²)である。



(a) Case 1

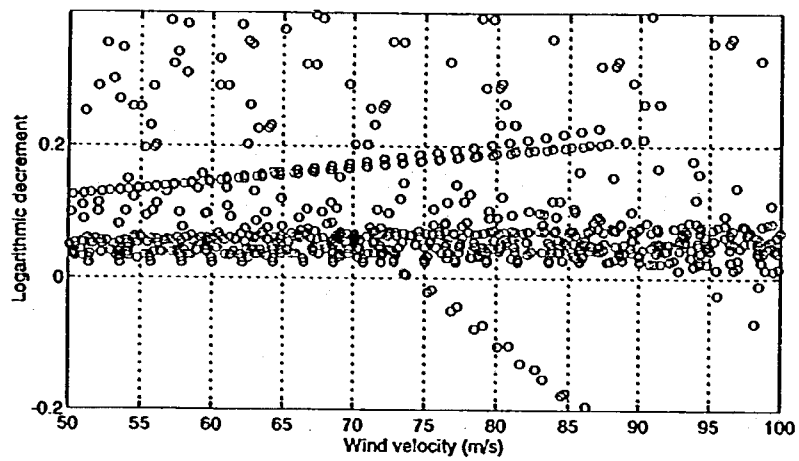


(b) Case 2

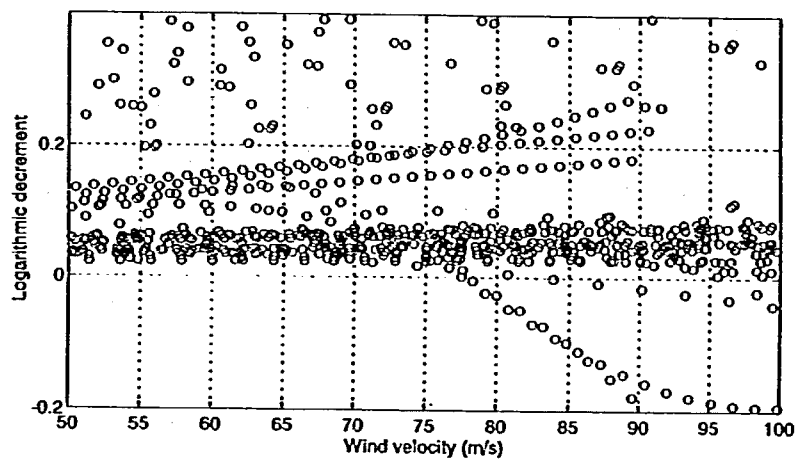


(c) Case 3

図-3.2.2.4(1) $V-\delta$ 曲線 (ステイの設置位置の検討)

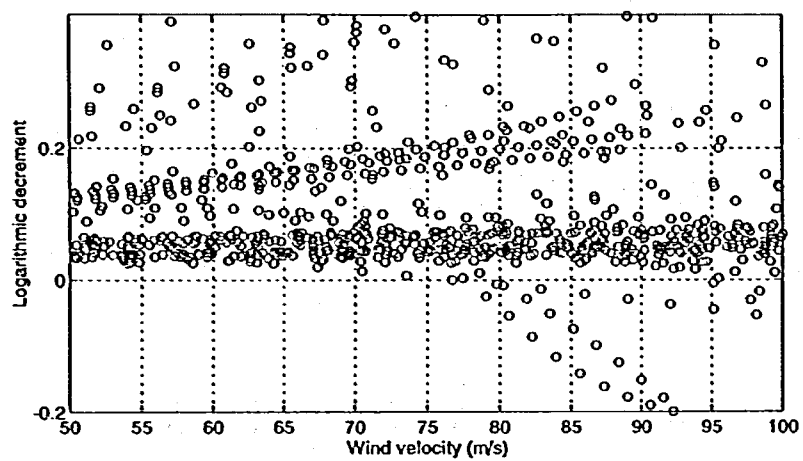


(d) Case 4

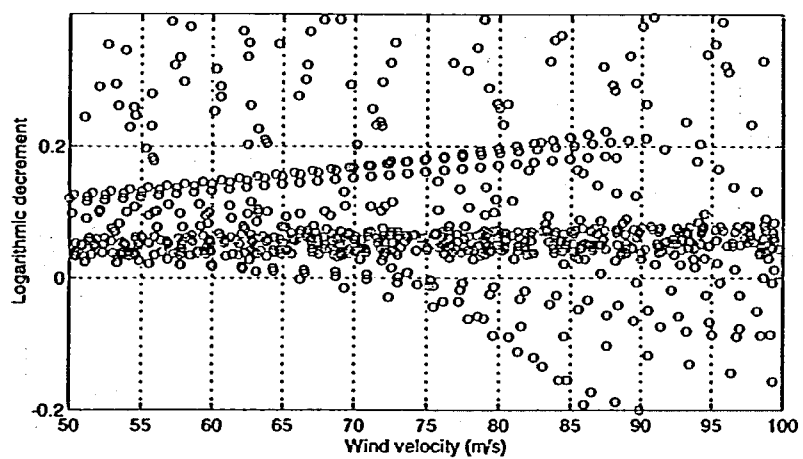


(e) Case 5

図-3.2.2.4(2) $V-\delta$ 曲線 (ステイの設置位置の検討)



(f) Case 6



(g) Case 7

図-3.2.2.4(3) $V-\delta$ 曲線 (ステイの設置位置の検討)

3.2.3 鉛直クロスステイの最適位置に関する検討

(1) 検討条件

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。ここに、鉛直クロスステイは抗圧部材（両効き状態）とするとともに、鉛直クロスステイの断面積 A_s は $A_s=0.01\text{m}^2/\text{本}$ に設定するものとした。なお、鉛直クロスステイの断面積を $A_s=0.01\text{m}^2/\text{本}$ としたのは、事前の予備計算結果から、これ以上の断面積を入力しても連成フラッター風速はほとんど上昇せず、鉛直クロスステイの最適断面積が $A_s=0.01\text{m}^2/\text{本}$ であったことによる。

(2) 側径間側のみに設置した場合の最適位置

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/L_s (x は塔側から鉛直クロスステイまでの距離、 L_s 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 $\delta_s=0$ および $\delta_s=0.02$ 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-3.2.3.1 に示す。図-3.2.3.1 から、構造対数減衰率を $\delta_s=0.02$ とした場合、 $x/L_s=0.3\sim 0.6$ のいずれかの位置に鉛直クロスステイを1対設置すれば、設置前の $V_f=57\text{m/s}$ ($x/L_s=0, 1.0$ での値) であった連成フラッター風速が $V_f=62\text{m/s}$ 程度まで上昇していることがわかる。一方、構造対数減衰率を $\delta_s=0$ とした場合、 $x/L_s=0.2\sim 0.6$ の位置に鉛直クロスステイを設置すれば、連成フラッター風速は $V_f=38\text{m/s}$ 程度まで大きく低下する結果となっている。これは図-3.2.3.2 に示した $V-\delta$ 曲線（風速と空力減衰の関係）からわかるように、 $V=38\text{m/s}\sim 60\text{m/s}$ 付近の限られた風速域において空力減衰が正から負へ変化したためである。なお、この風速域でのフラッターモードは図-3.2.3.2 中の①でのフラッターモードとは異なり、非常に励振力が小さいフラッターであったことを付記しておく。これに対し、平板空気力を用いた場合の連成フラッター風速は文献1)に示したように励振力が非常に強く、構造対数減衰率を $\delta_s=0$ から $\delta_s=0.02$ に増加させても連成フラッター風速は若干しか上昇しない。それゆえ、測定空気力を用いた場合、連成フラッター風速は構造対数減衰率によって大きく変化する可能性があり、実務設計にあたっては構造減衰の設定がきわめて重要であると言える。

(3) 中央径間側のみに設置した場合の最適位置

次に、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 $\delta_s=0$ および $\delta_s=0.02$ 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-3.2.3.3 に示す。なお、参考までに、この図には平板空気力を用いた場合の解析結果も併記している。図-3.2.3.3 からわかるように、中央径間側のみに鉛直クロスステイを設置した場合、構造対数減衰率を $\delta_s=0$ とすれば $x/L=0.4$ なる位置で連成フラッター風速の大幅な低下が見られる。しかしながら、その他の位置に鉛直クロスステイを設置した場合には、構造対数減衰率が $\delta_s=0$ であっても連成フラッター風速に大幅な低下は認められない。すなわち、中央径間側における鉛直クロスステイの最適位置は、構造対数減衰率が $\delta_s=0$ および $\delta_s=0.02$ であっても $x/L=0.3$ 付近にあると言え、特に $\delta_s=0.02$ を仮定した場合には設置前に $V_f=57\text{m/s}$ であった連成フラッター風速が $V_f=70\text{m/s}$ まで上昇する結果が得られている。なお、平板空気力を用いた場合の最適位置は、図-3.2.3.3 からわかるように $x/L=0.3\sim 0.35$ 付近にあり、連成フラッター風速は $V_f=71\text{m/s}$ となっている。それ

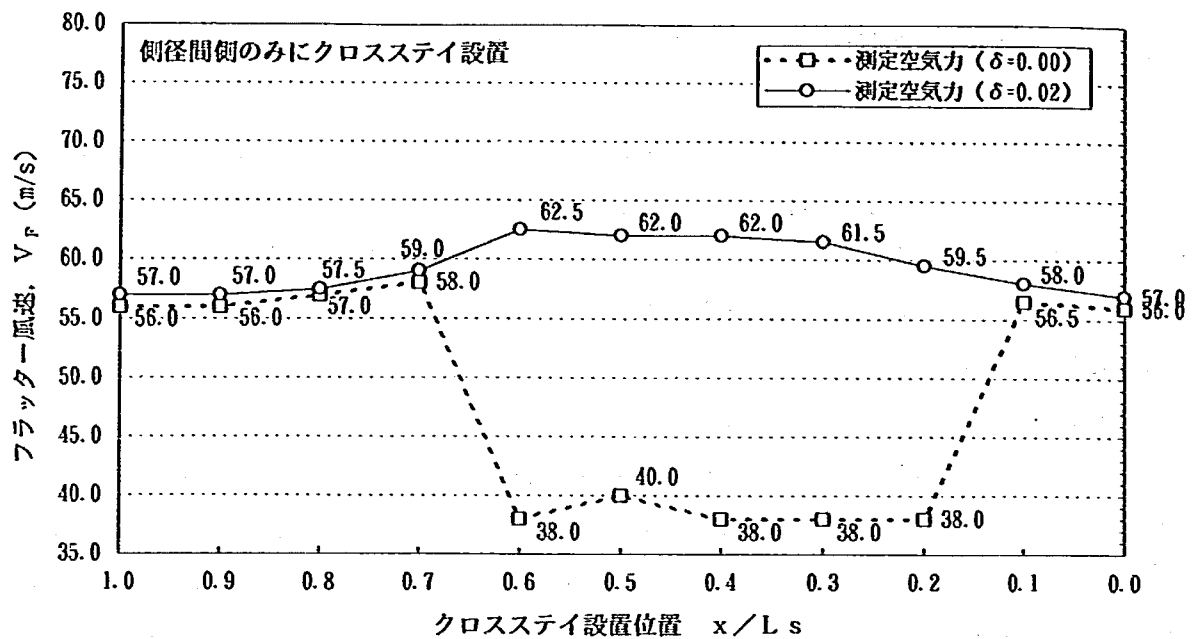


図-3.2.3.1 鉛直クロスステイ位置（側径間のみ）と連成フラッター風速

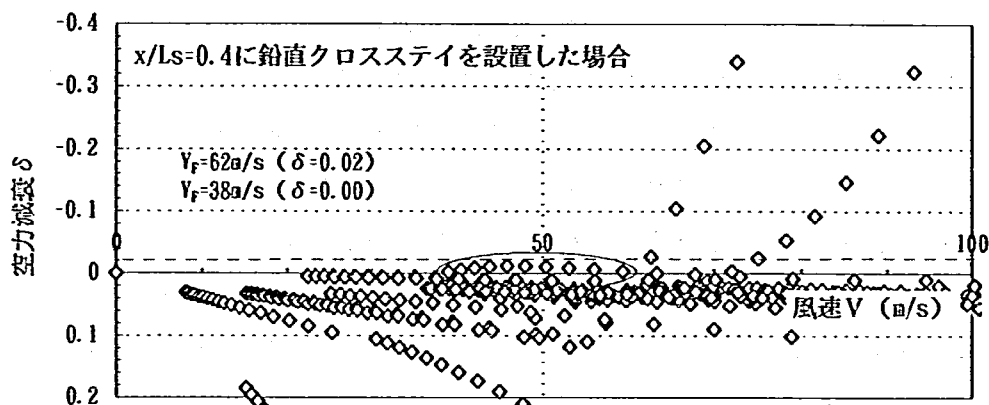


図-3.2.3.2 $V-\delta$ 曲線

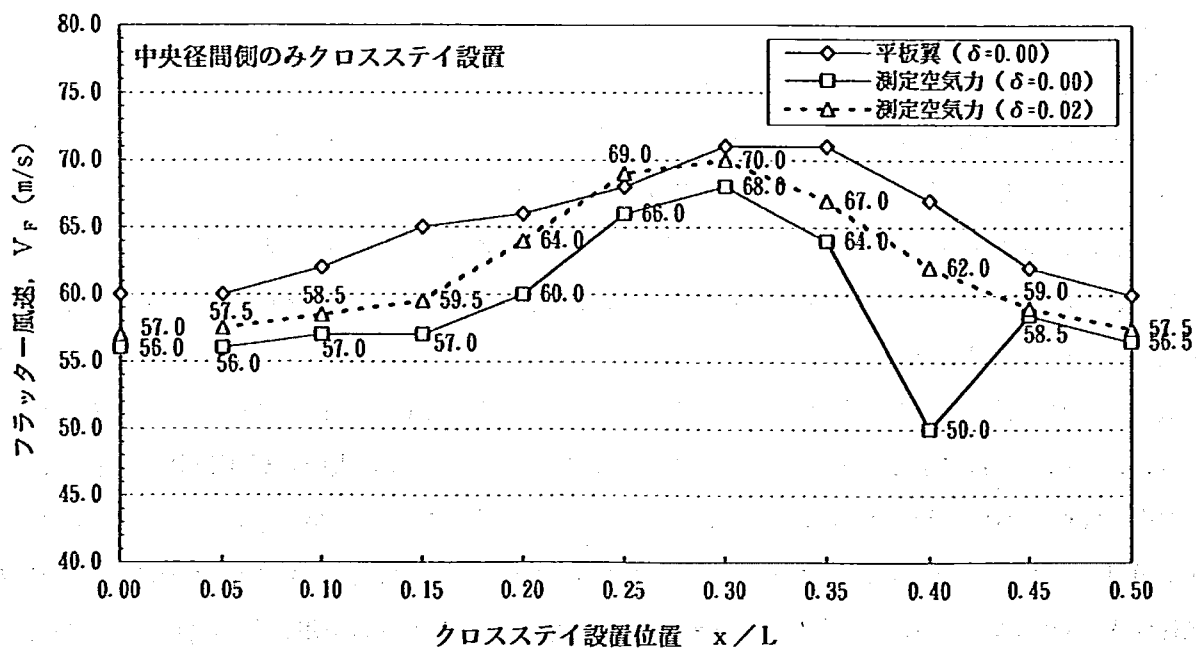


図-3.2.3.3 鉛直クロスステイ位置（中央径間のみ）と連成フラッター風速

ゆえ、中央径間側の最適位置については作用空気力が相違（平板空気力と測定空気力）してもさほど変化せず、さらに、中央径間側の最適な位置に鉛直クロスステイを設置すれば測定空気力を作用させても連成フラッター風速はさほど低下しないと考えられる。

(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

側径間側と中央径間側に 1 対の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 $x/L_s=0.3\sim0.6$ 、中央径間側で $x/L=0.3$ であることがわかった。それゆえ、側径間側の $x/L_s=0.5$ 、中央径間側の $x/L=0.3$ にそれぞれ鉛直クロスステイを設置した場合に、最大の連成フラッター風速が得られると予想される。しかしながら、図-3.2.3.4 に示した $V-\delta$ 曲線からわかるように側径間側の $x/L_s=0.5$ 、中央径間側の $x/L=0.3$ にそれぞれ鉛直クロスステイを設置した場合の連成フラッター風速は $V_f=59.5\text{m/s}$ ($\delta_s=0.02$) であり、側径間側の $x/L_s=0.5$ のみに鉛直クロスステイを設置した場合の $V_f=62.0\text{m/s}$ ($\delta_s=0.02$) よりも低下する結果となった。

そこで、側径間側の設置位置を $x/L_s=0.5$ 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新たに連成フラッター解析を実施した。その結果を図-3.2.3.5 に示す。この図から、中央径間側の設置位置を $x/L=0.4$ （側径間側の設置位置は $x/L_s=0.5$ ）とした場合に最大の連成フラッター風速 $V_f=66.5\text{m/s}$ が得られているものの、この風速は中央径間側の $x/L=0.3$ のみに鉛直クロスステイを設置した場合の $V_f=70.0\text{m/s}$ ($\delta_s=0.02$) よりも低下していることがわかる。一方、図-3.2.3.6 は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の結果である。この図より、側径間側の設置位置を $x/L_s=0.1\sim0.2$ （中央径間側の設置位置は $x/L=0.3$ ）とした場合に最大の連成フラッター風速 $V_f=71.0\text{m/s}$ ($\delta_s=0.02$) が得られているものの、この風速は中央径間側の $x/L=0.3$ のみに鉛直クロスステイを設置した場合の連成フラッター風速 $V_f=70.0\text{m/s}$ ($\delta_s=0.02$) とほぼ同程度である。すなわち、測定空気力を用いた場合、対象とした超長大吊橋では、中央径間側の $x/L=0.3$ のみに鉛直クロスステイを設置すれば、ほぼ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-3.2.3.7～図-3.2.3.10 に今回解析した全ケースの $V-\delta$ 曲線を示す。

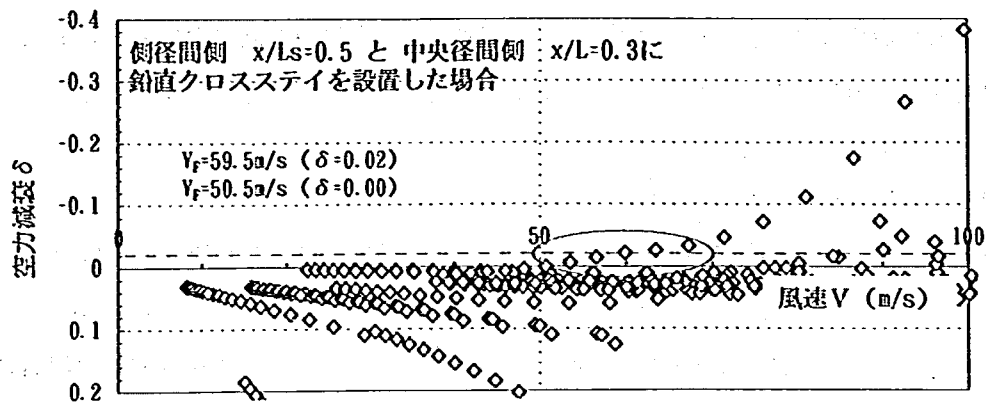


図-3.2.3.4 $V-\delta$ 曲線

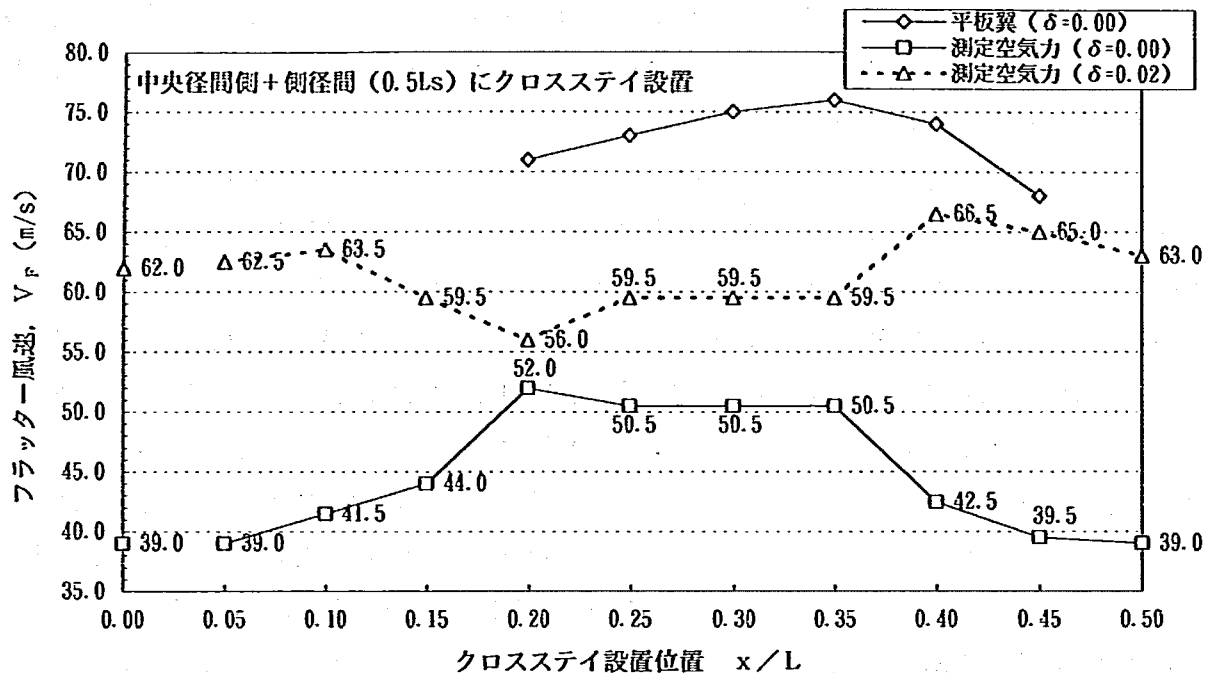


図-3.2.3.5 鉛直クロスステイ位置 (中央径間+側径間0.5Ls) と連成フラッター風速

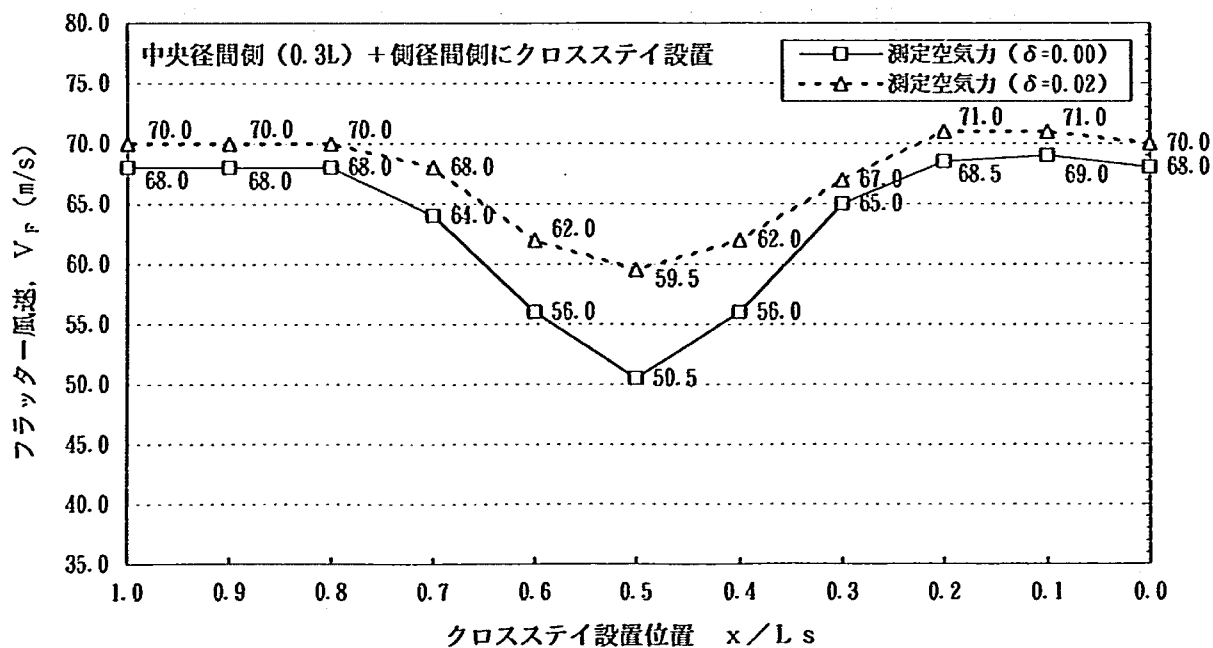


図-3.2.3.6 鉛直クロスステイ位置 (中央径間0.3L+側径間) と連成フラッター風速

(5) まとめ

補剛桁に測定空気力を作用させた場合について、両効き鉛直クロスステイの最適位置を検討した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

1) 側径間側のみに設置した場合

構造対数減衰率 δ_s を $\delta_s=0.02$ とした場合、 $x/L_s=0.3\sim0.6$ のいずれかの位置に鉛直クロスステイを1対設置すれば、設置前に $V_f=57\text{m/s}$ であった連成フラッター風速が $V_f=62\text{m/s}$ 程度 (約 109%) まで上昇する結果が得られた。一方、構造対数減衰率を $\delta_s=0$ とした場合、 $x/L_s=0.2\sim0.6$ の位置に鉛直クロスステイを設置すれば、連成フラッター風速は $V_f=38\text{m/s}$ 程度 (約 67%) まで大きく低下する結果となった。

2) 中央径間側のみに設置した場合

最適位置は構造対数減衰率が $\delta_s=0$ および $\delta_s=0.02$ であっても、 $x/L=0.3$ にあると言え、特に $\delta_s=0.02$ を仮定した場合には、設置前に $V_f=57\text{m/s}$ であった連成フラッター風速が $V_f=70\text{m/s}$ (123%) まで上昇する結果が得られた。

なお、平板空気力を用いた場合の最適位置は、 $x/L=0.3\sim0.35$ 付近にあり、設置前に $V_f=60\text{m/s}$ であった連成フラッター風速が $V_f=71\text{m/s}$ (118%) まで上昇した。それゆえ、中央径間側の最適位置については作用空気力が相違 (平板空気力と測定空気力) してもさほど変化せず、さらに、中央径間側の最適な位置に両効き鉛直クロスステイを設置すれば、測定空気力を作用させても連成フラッター風速はさほど低下しないと考えられる。

3) 中央径間側と側径間側にそれぞれ設置した場合

①側径間側の設置位置を $x/L_s=0.5$ 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 $x/L=0.4$ (側径間側の設置位置は $x/L_s=0.5$) としたときに最大の連成フラッター風速 $V_f=66.5\text{m/s}$ (117%) が得られた。しかしながら、この風速は中央径間側の $x/L=0.3$ のみに両効き鉛直クロスステイを設置した場合の $V_f=70.0\text{m/s}$ よりも低いものであった。

②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 $x/L_s=0.1\sim0.2$ (中央径間側の設置位置は $x/L=0.3$) としたときに最大の連成フラッター風速 $V_f=71.0\text{m/s}$ (125%) が得られた。しかしながら、この風速は中央径間側の $x/L=0.3$ のみに鉛直クロスステイを設置した場合の連成フラッター風速 $V_f=70.0\text{m/s}$ とほぼ同程度であった。

したがって、対象とした超長大吊橋に測定空気力を適用した場合、側径間側の鉛直クロスステイは不要で中央径間側の $x/L=0.3$ のみに両効き鉛直クロスステイを設置すれば、ほぼ最大の連成フラッター風速が得られる。

以上より、両効き鉛直クロスステイの最適位置は、作用空気力の相違 (測定空気力と平板空気力) によって大幅に変化する可能性があることを指摘できた。したがって、両効き鉛直クロスステイの検討にあたっては、偏平な箱桁を対象とする場合にも平板空気力を作用させた検討だけでは不十分な場合があり、また、非定常空気力の測定にあたっては今まで以上に細心の注意を払わなければならないと言える。

なお、今後は、片効き鉛直クロスステイの最適位置についても同様に検討を行う所存である。

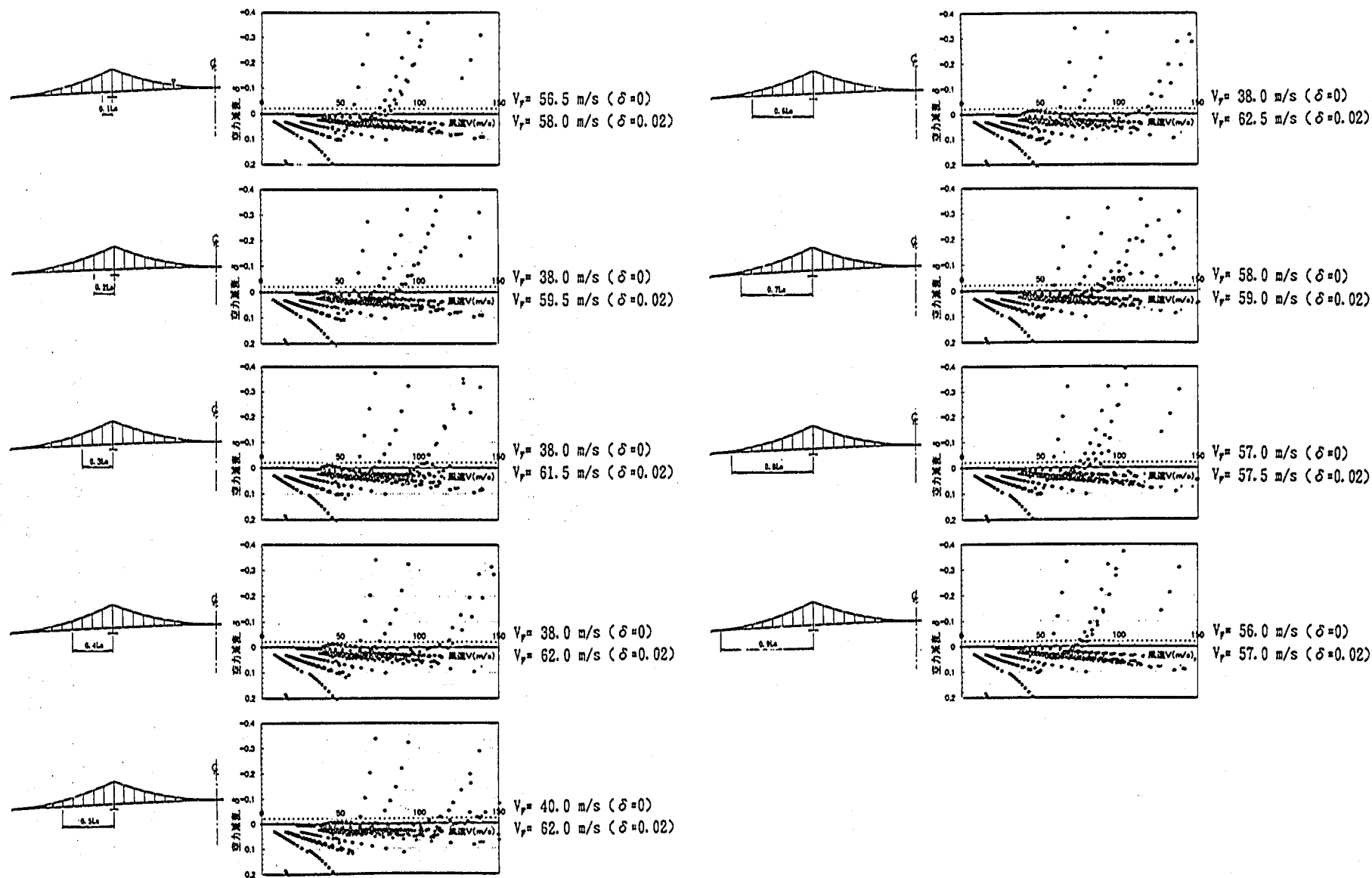


図-3.2.3.7 V-δ 曲線 (側径間のみクロスステイを設置した場合)

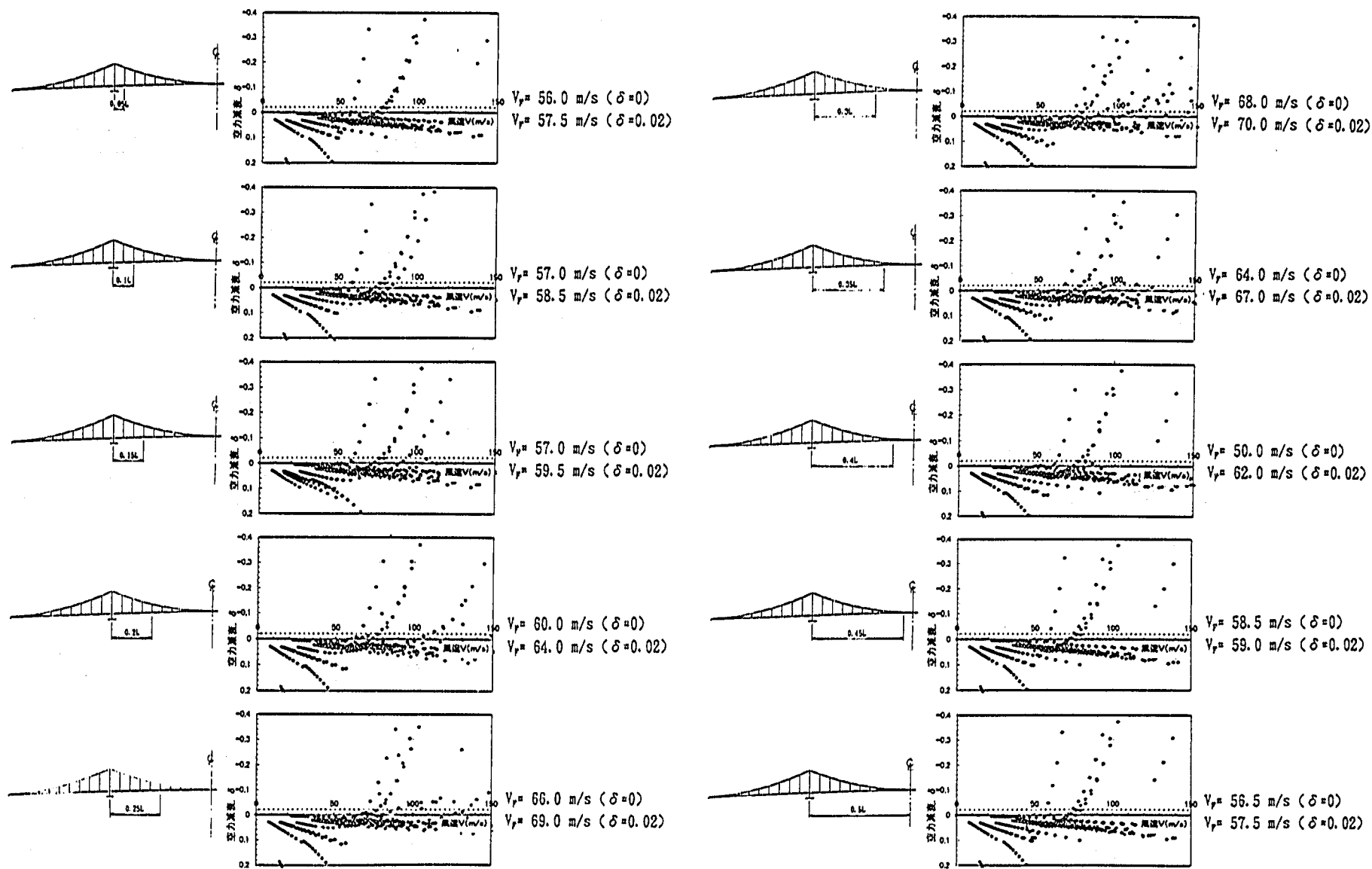


図-3.2.3.8 $V-\delta$ 曲線 (中央径間のみクロスステイを設置した場合)

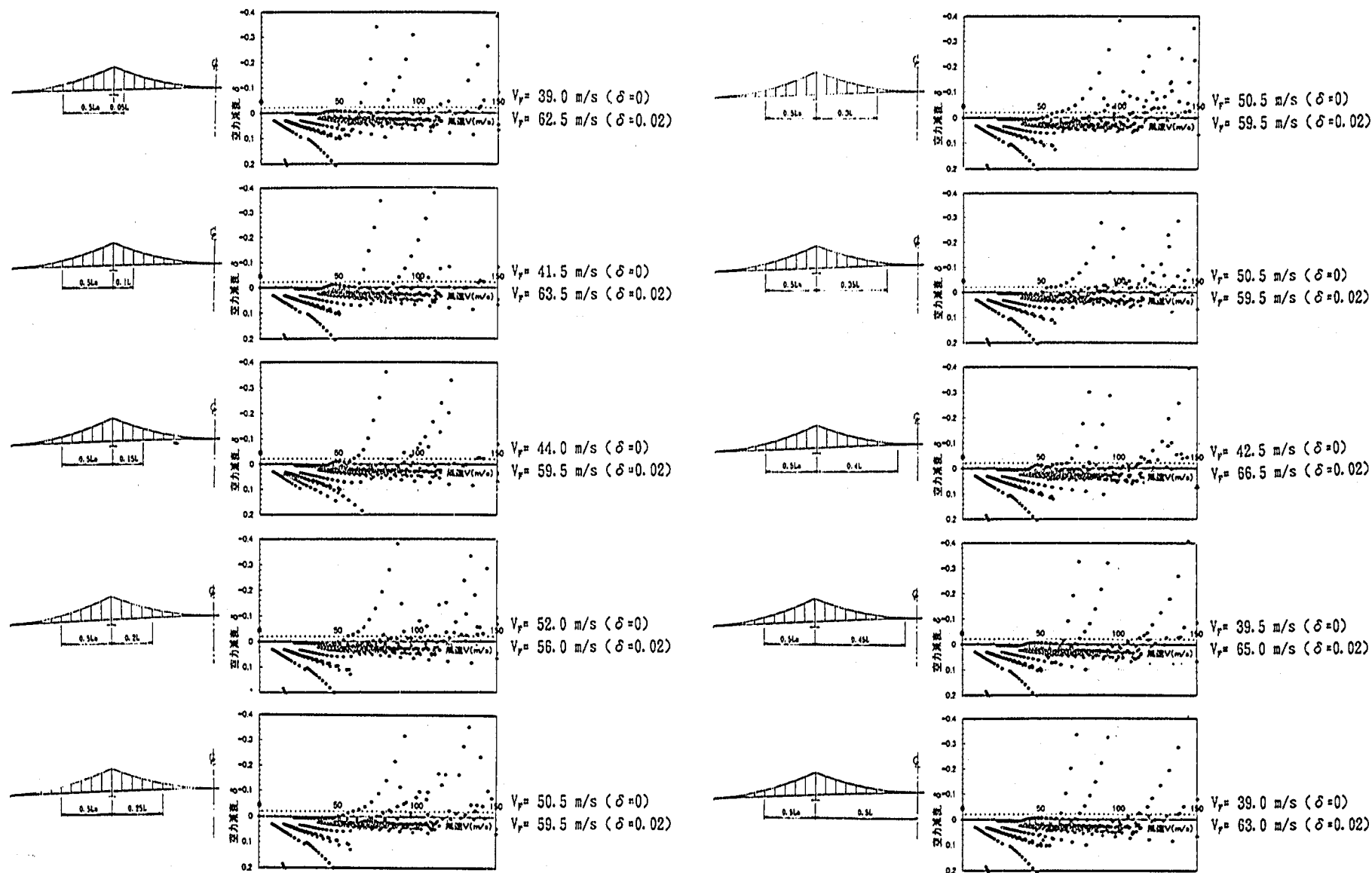


図-3.2.3.9 $V-\delta$ 曲線 (中央径間+側径間 ($0.5L_s$ に固定) にクロスステイを設置した場合)

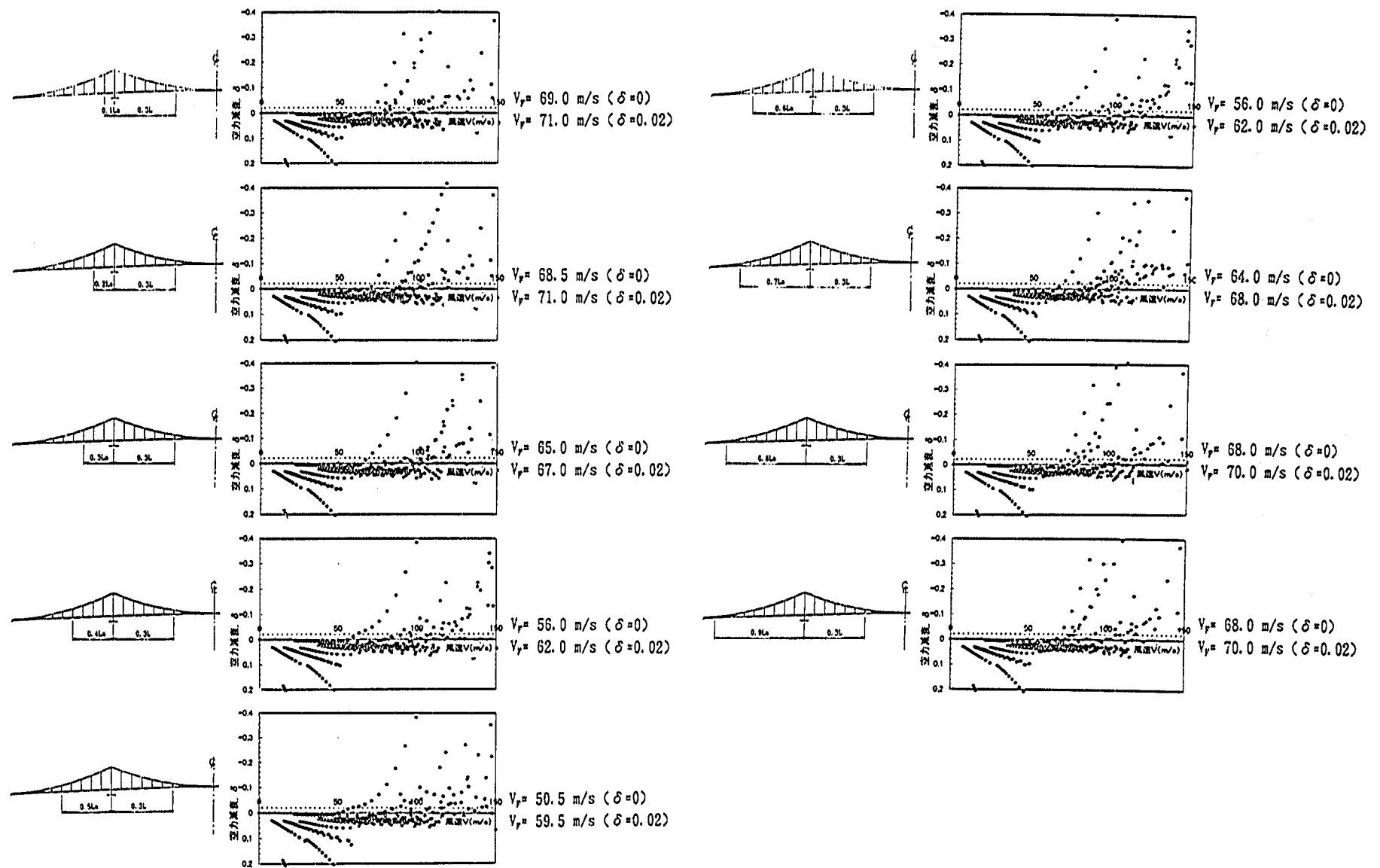


図-3.2.3.10 $V-\delta$ 曲線 (側径間+中央径間(0.3Lに固定)にクロスステイを設置した場合)

＜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ならびに傾斜クロスステイの効果について, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 713～724, 1997 年 3 月.

3.2.4 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-3.2.4.1 塔柱・水平材の剛性が振動数に及ぼす影響

モード	塔柱剛性			水平材剛性		
	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

・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-3.2.4.2および図-3.2.4.1～図-3.2.4.6に示す。

表-3.2.4.2 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			フラッター限界風速(m/s)	
	ねじれ	面外	面内	ねじれ	面外	面内		
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	
7								

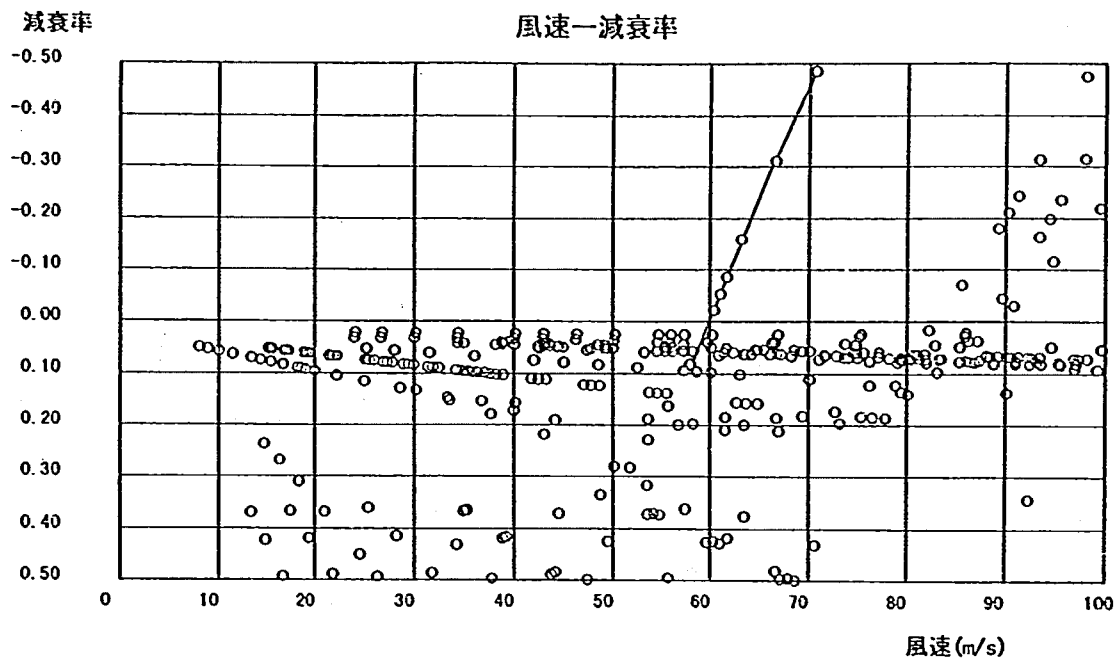


図-3.2.4.1 フラッター解析結果（標準モデル）

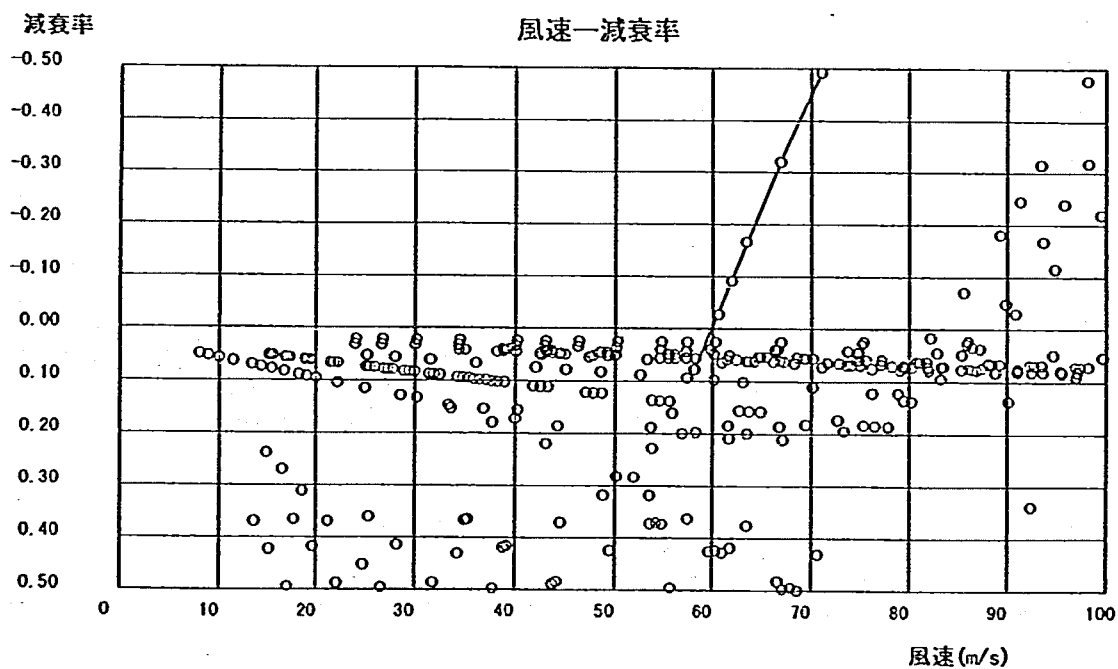


図-3.2.4.2 フラッター解析結果（塔柱面外剛性×2）

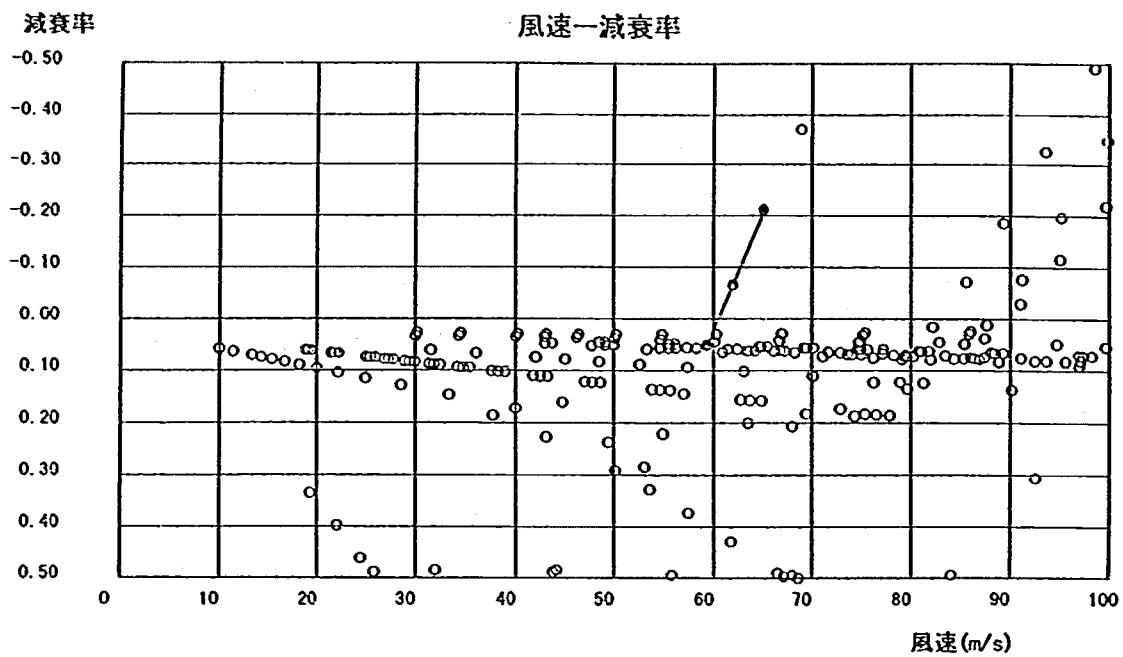


図-3.2.4.3 フラッター解析結果（塔柱面外剛性×10）

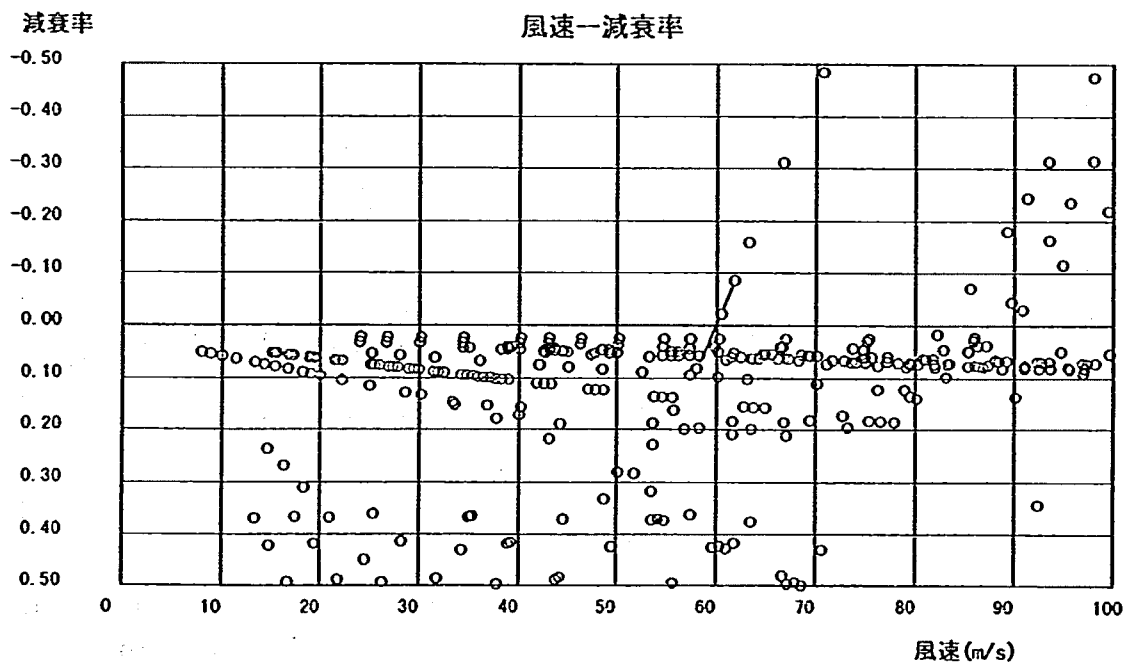


図-3.2.4.4 フラッター解析結果（塔頂水平材面外剛性×2）

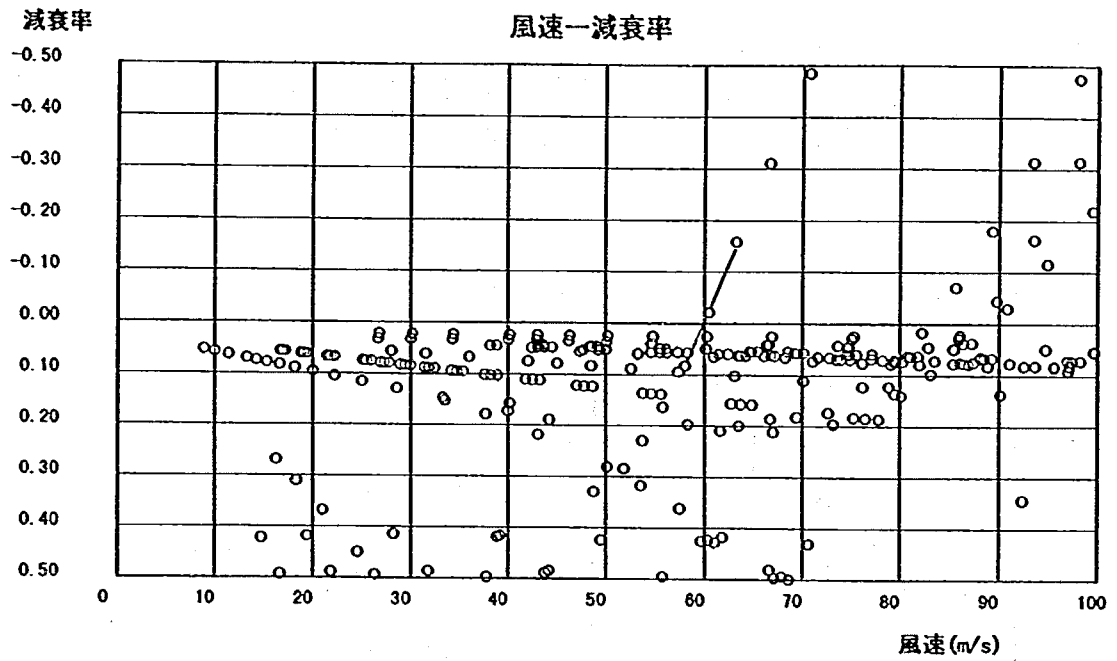


図-3.2.4.5 フラッター解析結果（塔頂水平材面外剛性×10）

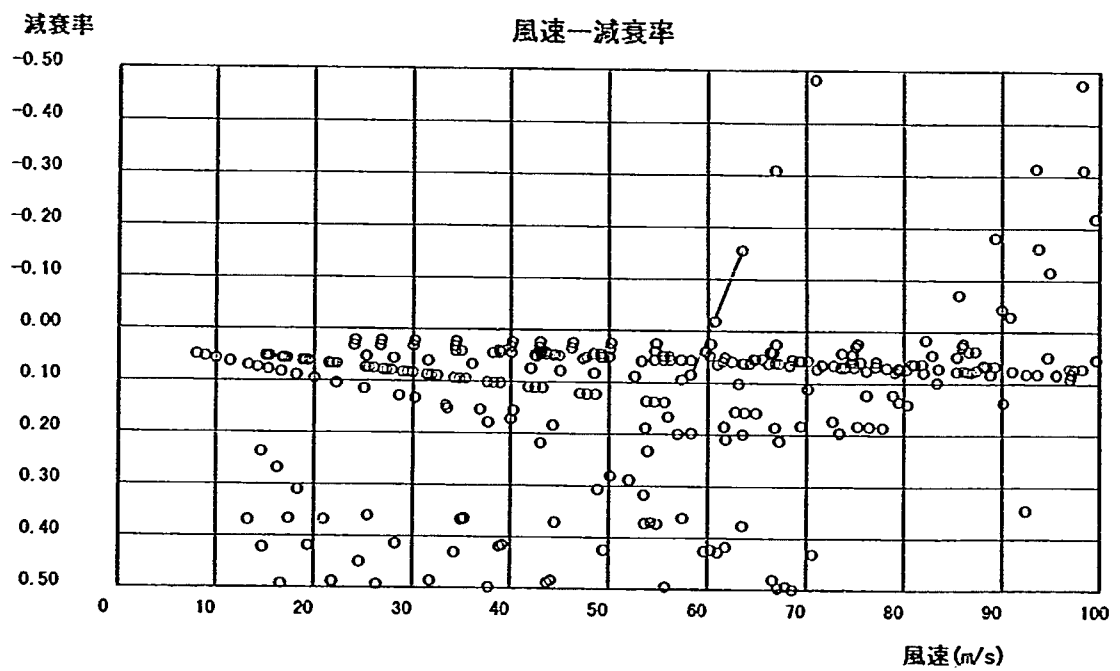


図-3.2.4.6 フラッター解析結果（塔頂水平材ねじれ剛性×10）

(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。解析結果を表-3.2.4.3、図-3.2.4.7～図-3.2.4.10に示す。

表-3.2.4.3 水平ステイ及び対角ステイのフラッター風速に及ぼす効果

	Vcr(m/s)	備 考
標準モデル	60	
水平ステイ設置	75	全長の約48%区間に設置
対角ステイ設置	69	中央径間1/4点付近に2カ所設置
水平ステイ + 対角ステイ設置	86	全長の約48%区間に設置 + 中央径間1/4点付近に2カ所設置

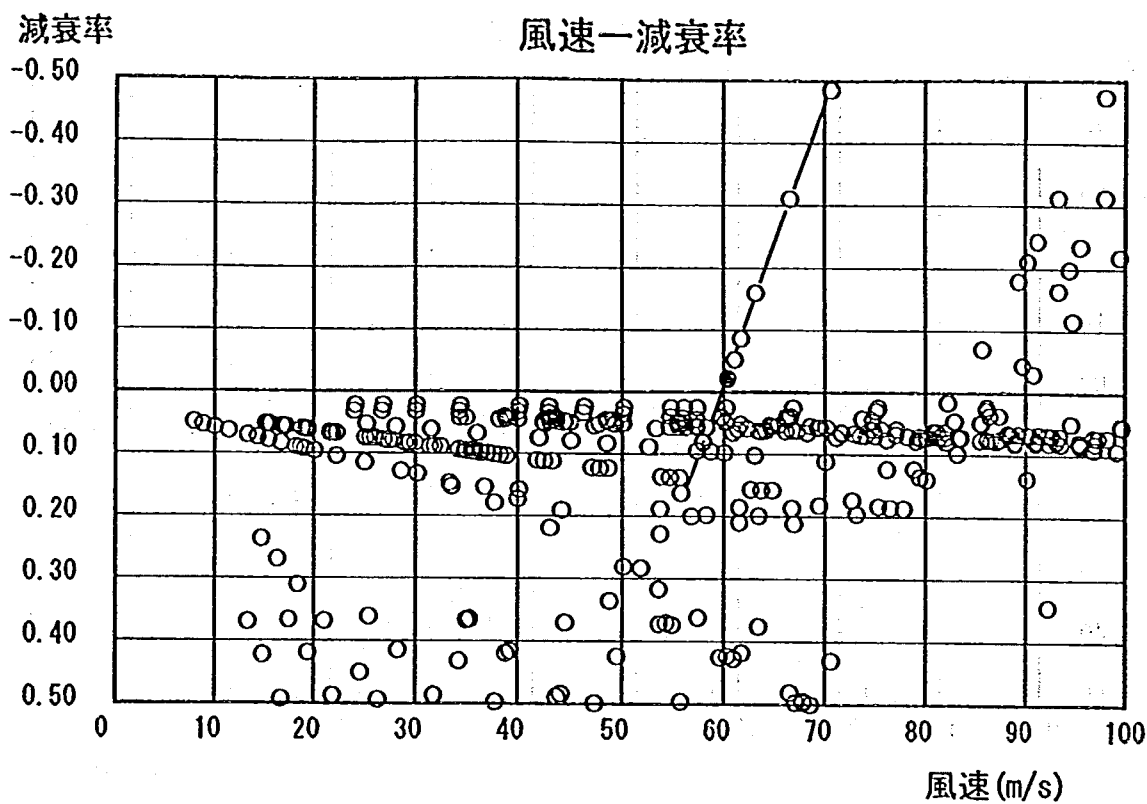


図-3.2.4.7 フラッター解析結果 (標準モデル)

$V_{cr} = 60 \text{ m/s}$

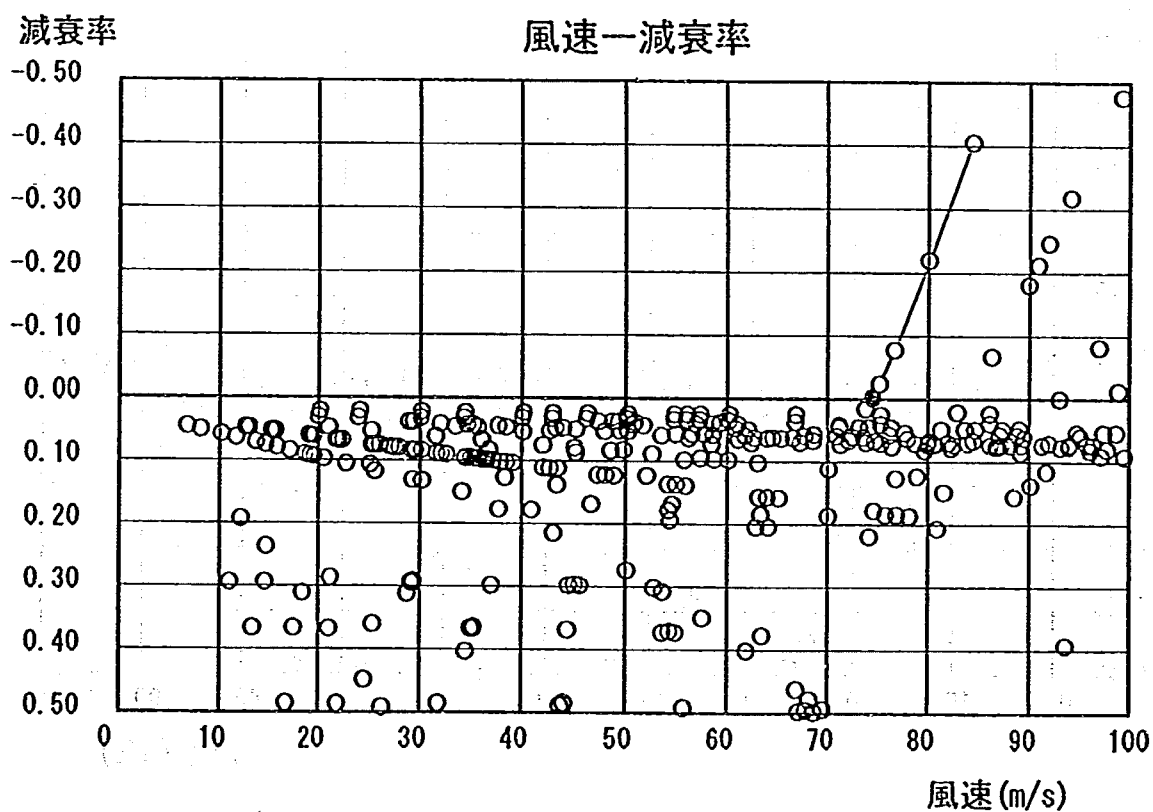


図-3.2.4.8 フラッター解析結果 (水平ステイ設置：全長の約48%区間)

$V_{cr} = 75 \text{ m/s}$

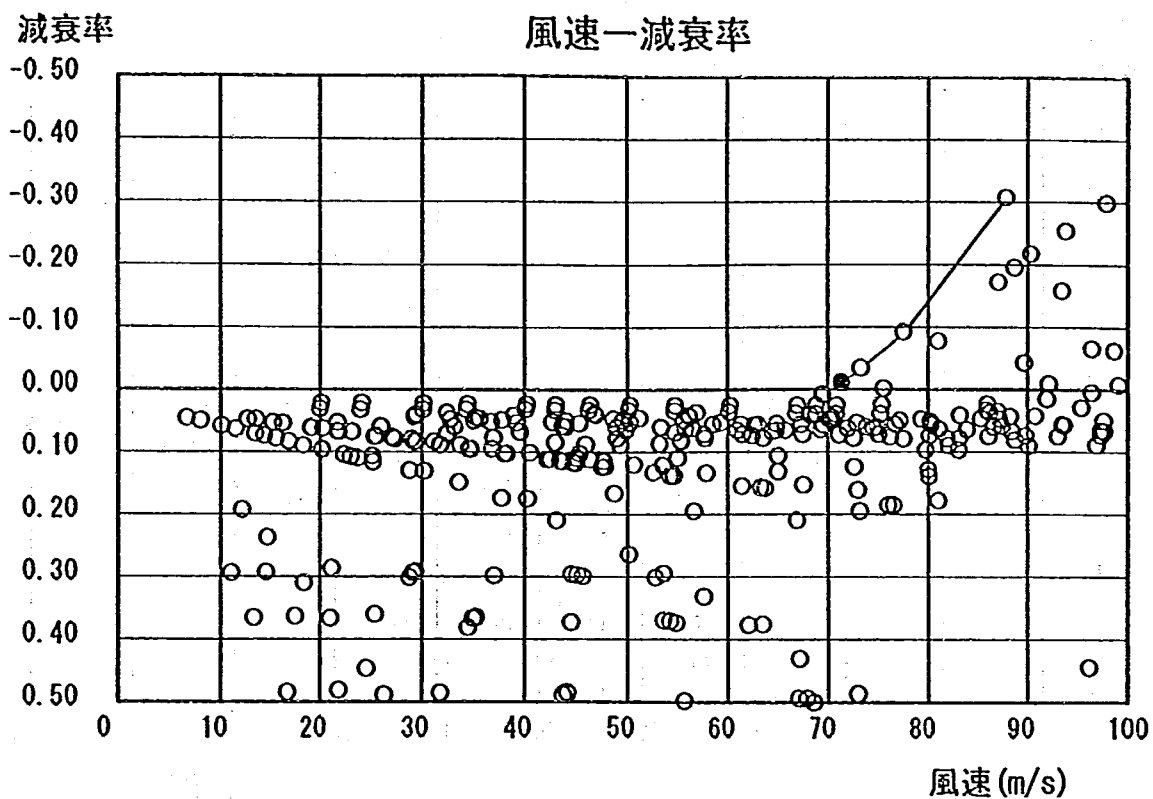
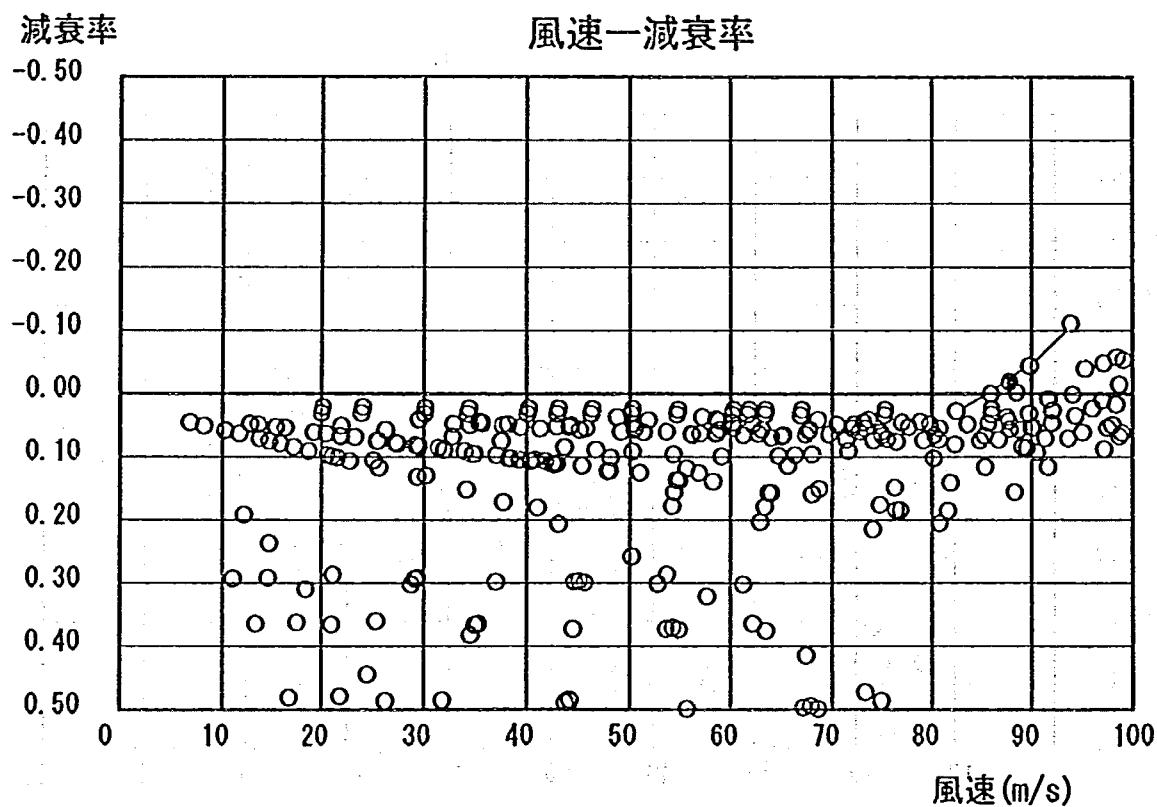


図-3.2.4.9 フラッター解析結果（対角スチ設置：中央径間 1/4 点付近 2 カ所）
 $V_{cr} = 69 \text{ m/s}$



側径間でフラッター発生

図-3.2.4.10 フラッター解析結果（水平スチ+対角スチ設置）
 $V_{cr} = 86 \text{ m/s}$

(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 ($V_{cr}=60\text{m/s}$) 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を設置（全長の約48%区間に設置）することによりフラッター発振風速を 75m/s （約25%）と上昇させる効果がある。
- ② 対角ステイシステムを設置（中央径間1/4点付近に2箇所設置）することによりフラッター発振風速を 69m/s （約15%）と上昇させる効果がある。
- ③ 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で適用（上記①、②の組合せ）することによりフラッター発振風速を 86m/s （約43%）と向上させる効果がある。

本検討の結果、ステイシステムを組み合わせで適用することにより超長大橋のフラッター発振風速を効果的に改善することが可能であると考えられる。

3.2.5 センターバリア、先端フェアリング形状の検討

(1) 概要

1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、1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を選定し、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。

(2) 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グン型、測定部寸法：幅2m×高さ3m×長さ15m）において実施した。対象とする桁断面形状は、図-3.2.5.1に示す幅員41m、桁高7mを有する1箱桁断面とした。縮尺は1/75、試験気流は全ケースとも一様流中である。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 h_u （デッキ面からの高さで定義）、下面バリア高さ h_l 、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（ $h_u=0.8\text{m}$ 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-3.2.5.1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た。

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 $V_{s,e1}$ と試験結果 V_f との比で定義される形状補正係数 κ （ $= V_f / V_{s,e1}$ ）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 $V_{s,e1}$ 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 $V_{s,e1}$ 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、 $0.125\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ とした。

(3) 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-3.2.5.2(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-3.2.5.2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 $+3^\circ$ 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-3.2.5.3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、 $\theta_u = 32.3^\circ$ 、 37.3° の2種類を選定し、上面バリア ($h_u=1.5\text{m}$)、下面バリア ($h_l=1.1\text{m}$) 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 ($\theta_u = 27.3^\circ$) と比較して、図-3.2.5.4(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については、選定したフェアリング形状は基本断面と異なり、影響は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、より詳細な検討が必要とされる。

(4) まとめ

桁高 7m 1箱桁断面の耐風性をばね支持試験により検討した。得られた結果を以下に示す。

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、今後より詳細な検討が必要とされる。

今後は、今回耐風性の良好な断面形状について、3分力係数、非定常空気力係数を測定し、全橋フラッター解析を実施する予定であり、各種ケーブルシステムと組み合わせた場合の耐風性を検討する予定である。

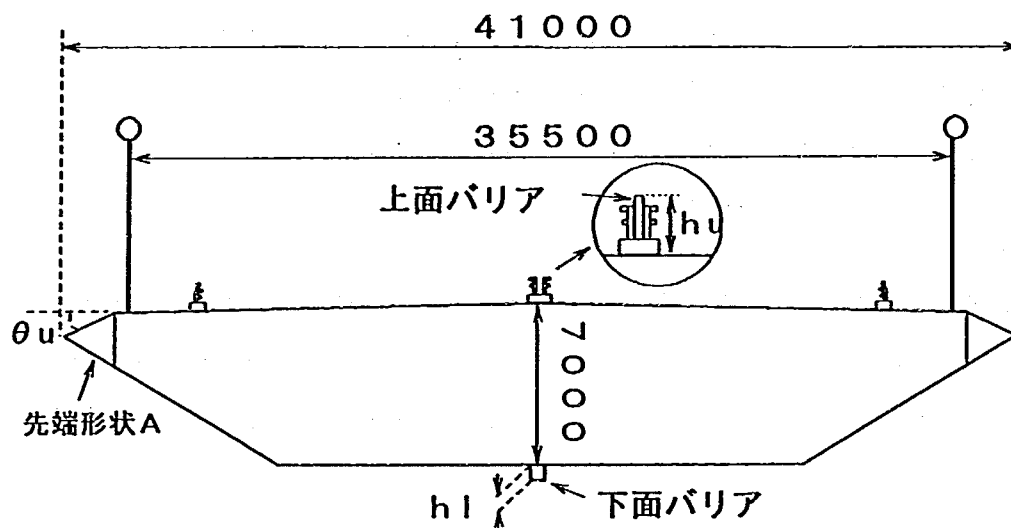


図-3.2.5.1 試験対象断面

表-3.2.5.1 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 tm ² /m	0.340 kgm ² /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

表-3.2.5.2(1) ばね支持試験結果 フラッター発現風速一覧表

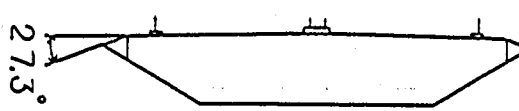
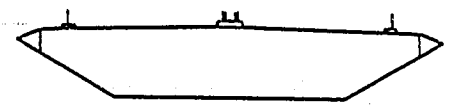
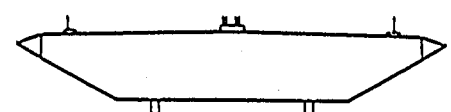
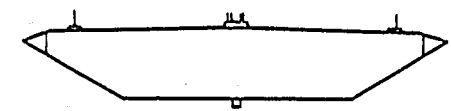
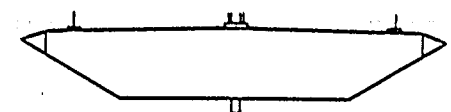
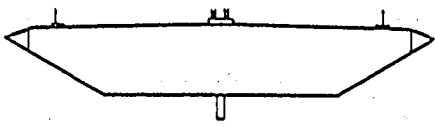
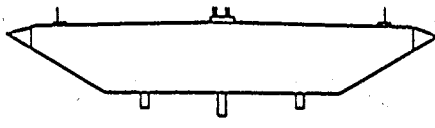
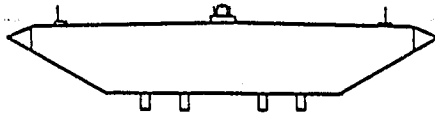
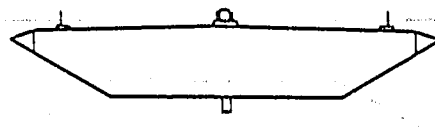
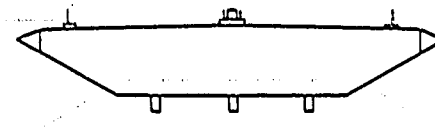
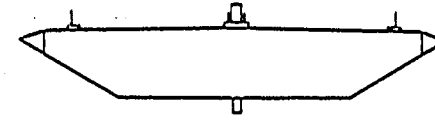
No.	断 面	フェアリング	上面バリア	下面バリア	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s)		
						迎角		
						-3°	0°	+3°
1		基本A	—	—	—	48	49	48
2		基本A	—	—	15	54	53	47
3		基本A	防護柵閉塞	—	—	49	51	47
4		基本A	防護柵閉塞	—	15	55	54	45
5		基本A	防護柵閉塞	高さ 0.525m	—	52	52	47
6		基本A	防護柵閉塞	高さ 1.125m	—	54	54	50

表-3.2.5.2(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°	0°	+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-3.2.5.2(3) ばね支持試験結果 フラッター発現風速一覧表

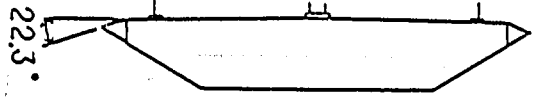
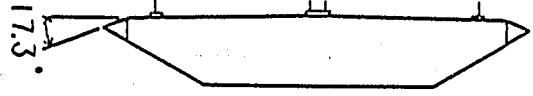
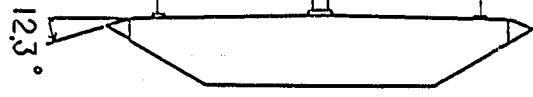
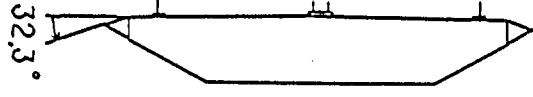
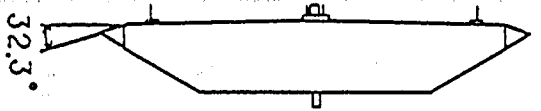
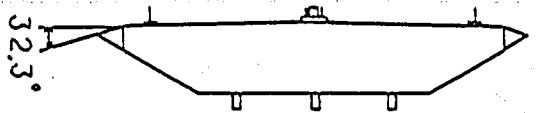
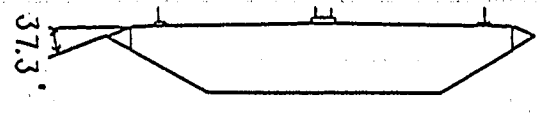
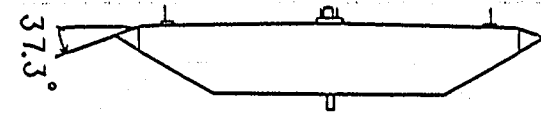
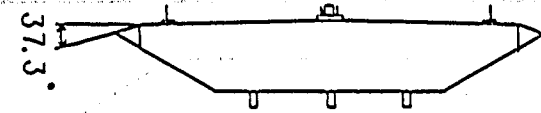
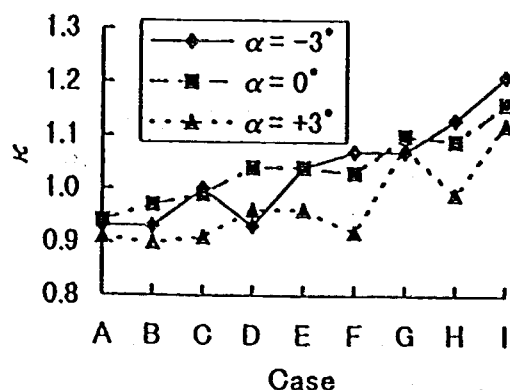
No.	断 面	フェアリング	上面ハリア	下面ハリア	レール間隔 (m)	フラッター発現風速 (m/s)		
						迎角		
						-3°	0°	+3°
13		基本B	—	—	—	43	51	42
14		基本B	高さ 1.5m	高さ 1.125m	—	58	57	50
15		基本A-1	—	—	—	45	51	41
16		基本A-2	—	—	—	45	51	29
17		基本A-3	—	—	—	49	51	27
18		基本A-4	—	—	—	50	51	48

表-3.2.5.2(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
$\theta u(\text{deg.})$	27.3								
$hu(\text{m})$	—	block	block	block	block	block	1.5	1.5	2.0
$hl(\text{m})$	—	—	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-3.2.5.2 バリアの効果

Case	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$\theta u(\text{deg.})$	27.3			32.3			37.3		
$hu(\text{m})$	—	1.5	—	—	1.5	—	—	1.5	—
$hl(\text{m})$	—	1.1	—	—	1.1	—	—	1.1	—
Rail	—	—	○	—	—	○	—	—	○

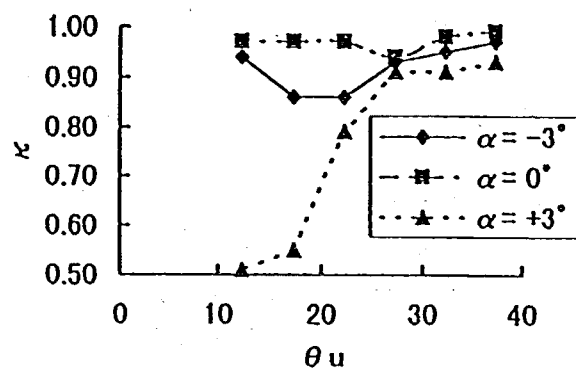
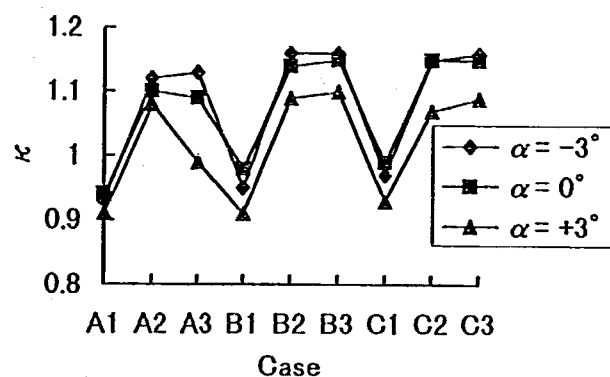
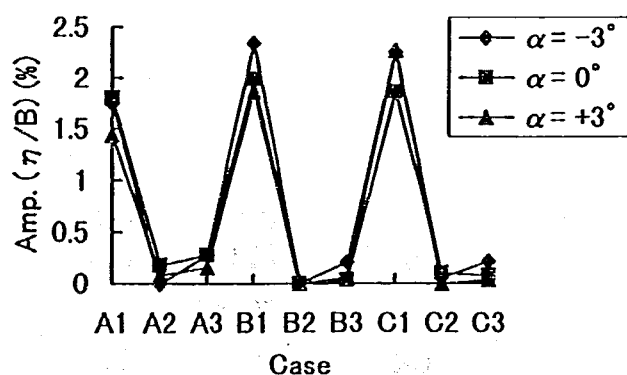


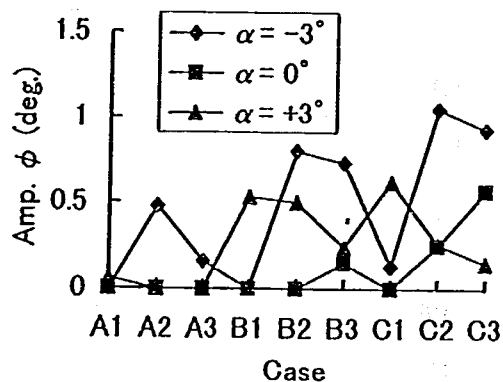
図-3.2.5.3 先端フェアリング形状の効果



(a) フラッター



(b) たわみ渦励振



(c) ねじれ渦励振

図-3.2.5.4 バリアと先端フェアリングの組合せの効果

3.2.6 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（7 m、5 m、3.5 m）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。

(1) ばね支持試験結果（桁高7 m、5 m、3.5 m）

1) 桁高7m案

下図に、ばね支持試験に用いた桁の断面図を示す。本検討では、7 m桁高の箱桁及びこれに開口部を設けた断面に対して検討を行った。所要動的諸元は標準モデルの値を目標としているが、模型の製作上、若干これを上回っているものもある。（所要値は重量40tf/m（縮尺1/65で1.575 kgf/ms²/model）、極慣性1094ts²（縮尺1/65で0.09990 kgfm s²/model）である。

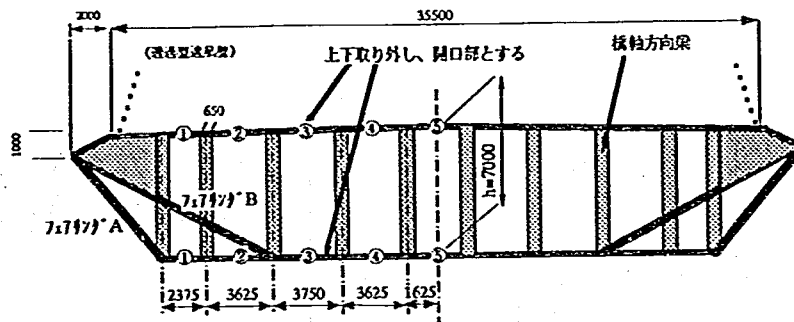


図-3.2.6.1 基本断面、h=7 m

表-3.2.6.1 ばね支持試験結果（h=7 m）

	開口部	透過型遮風壁	透過型フェリツカ*	-3°	0°	+3°
H7-1	—	○	○		35m/s	
H7-2	① ⑤	○	—		25m/s	
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	○	○		36.7m/s	
H7-6	① ④⑤	○	○	OK 渦1.6°	OK	OK 渦1.5°
H7-7	① ④⑤	○	—		13.6m/s	
H7-8	① ④⑤ (フェリツカ* B)	○	—		OK 渦1.5°	

2) 桁高5m案

ばね支持試験の結果を下表に示す。基本形の特徴は比較的良好で、後に示す3.5m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。

H5-1～5-4の+3° の耐風性の悪化を改善するために、透過型遮風壁に水平導流板を設置した。これにより、正迎角側の安定性が改善するとともに、開口部との組み合わせによって良好な結果が得られた。最終的にセンターバリアの設置で全迎角75m/s以上を確保した。

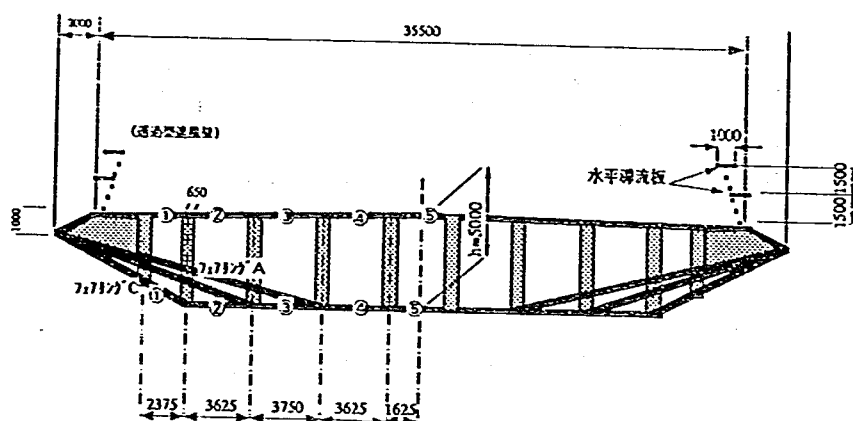


図-3.2.6.2 基本断面、 $h = 5\text{ m}$

表-3.2.6.2 ばね支持試験結果 ($h = 5\text{ m}$)

	開口部	透過型 遮風壁	外端 フィリッパ	水平 導流板	-3°	0°	+3°
H5-1	-	-	A	-	60.5 m/s	60.0 m/s	56.7 m/s
H5-2	-	○	A	-	60.5 m/s	61.6 m/s	39.9 m/s
H5-3	① ⑤	○	A	-	<u>79.6 m/s</u>	<u>75.6 m/s</u>	33.5 m/s
H5-4	① ⑤	○	C	-	39.7 m/s	44.3 m/s	31.5 m/s
H5-2F	-	○	A	有	58.2 m/s	57.1 m/s	51.6 m/s
H5-3F	① ⑤	○	A	有	<u>78.4 m/s</u>	<u>81.6 m/s</u>	60.0 m/s
H5-3FC センターバリア	① ⑤	○	A	有	<u>80.5m/s</u>	<u>87.0 m/s</u>	<u>77.2 m/s</u>

下線は $V_{cr} > 70\text{ m/s}$

3) 桁高 3.5m 案

桁高 3.5m 案のばね支持試験の結果（フラッター発振風速）を下表に示す。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、 $+3^\circ$ 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。

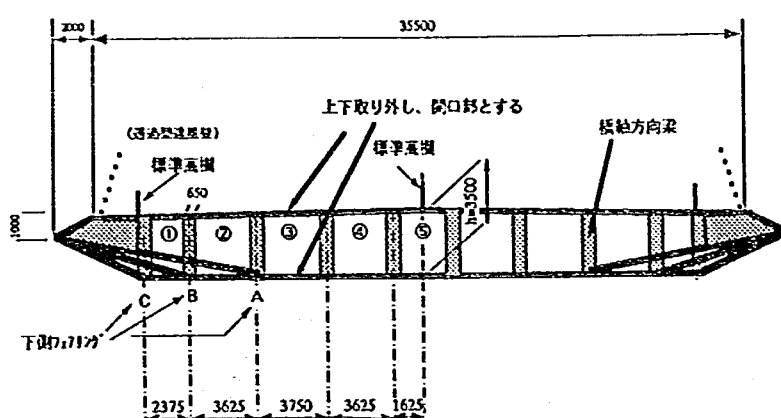
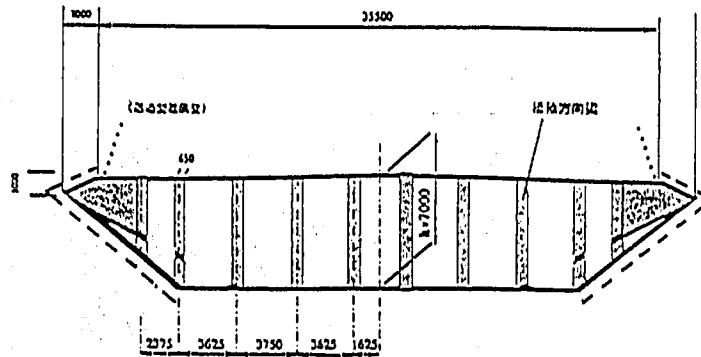


図-3.2.6.3 基本断面、 $h = 3.5$ m

表-3.2.6.3 ばね支持試験結果（ $h = 3.5$ m）

	開口部	透過型 遮風壁	外端 7.5mリソク*	透過型 7.5mリソク*	-3°	0°	$+3^\circ$
H35-1	-	-	A	-	54.8 m/s	60.0 m/s	57.0 m/s
H35-2	-	○	A	-	55.6 m/s	61.0 m/s	45.7 m/s
H35-3	① ⑤	○	A	-	69.4 m/s (38.0 渦)	<u>75.7 m/s</u>	46.6 m/s

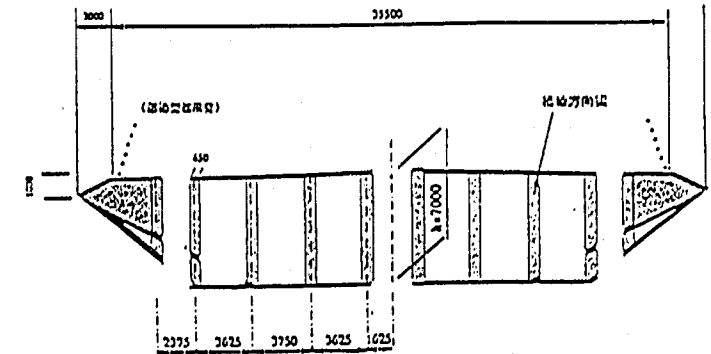
1Box H=7.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.4 断面図(H7-1)

1Box H=7.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.6 断面図(H7-2)

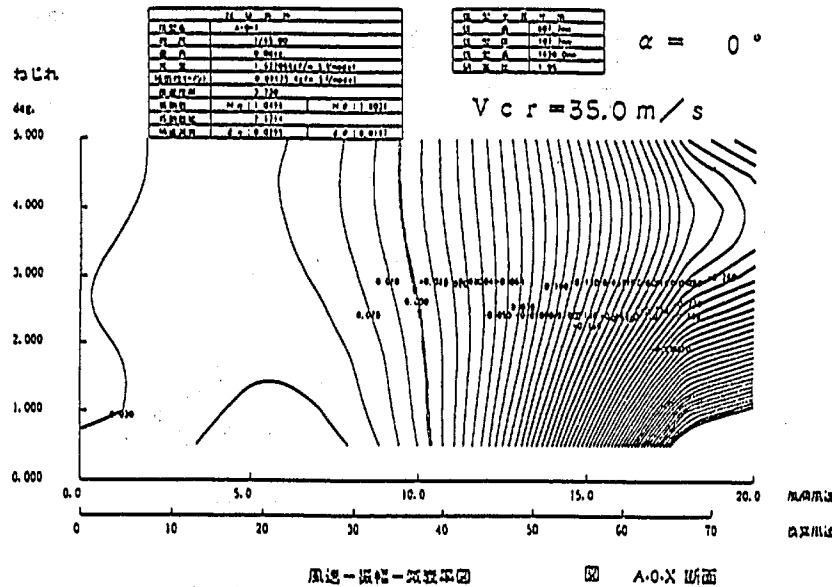


図-3.2.6.5 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-1)

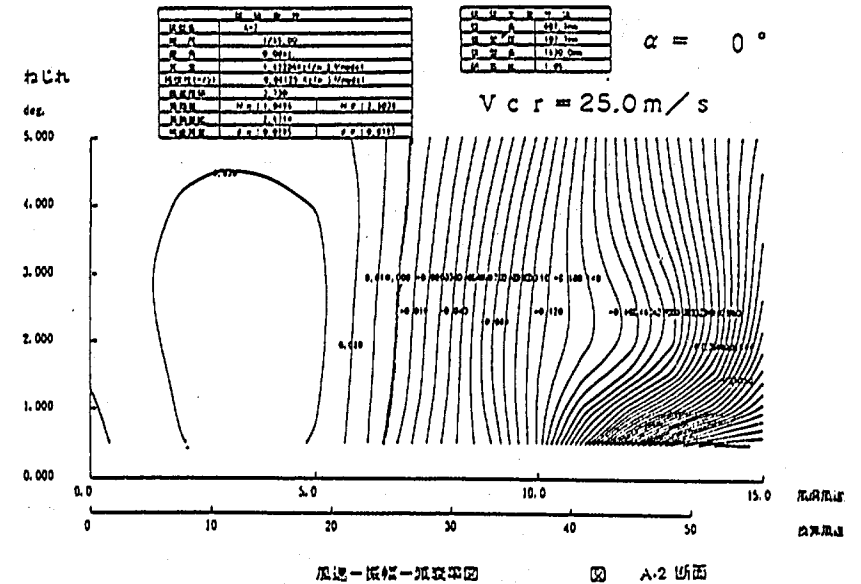
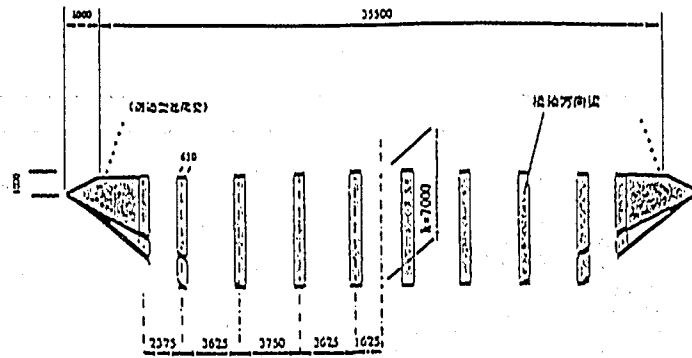


図-3.2.6.7 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-2)

Box H=7.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高橋を設置

図-3.2.6.8 断面図(H7-3)

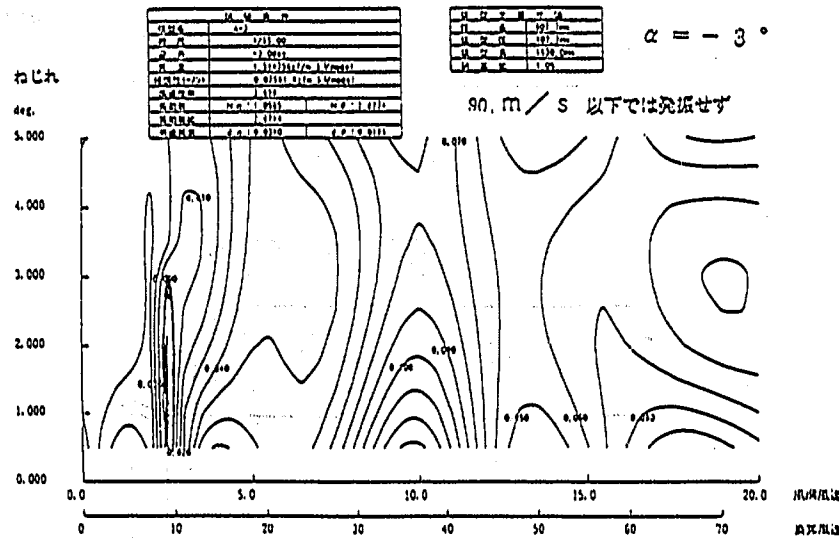


図-3.2.6.9 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-3)

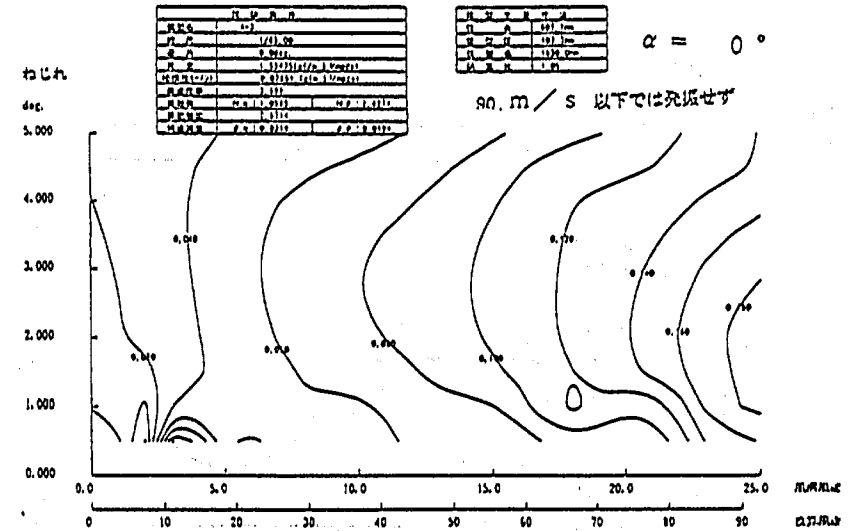


図-3.2.6.10 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-3)

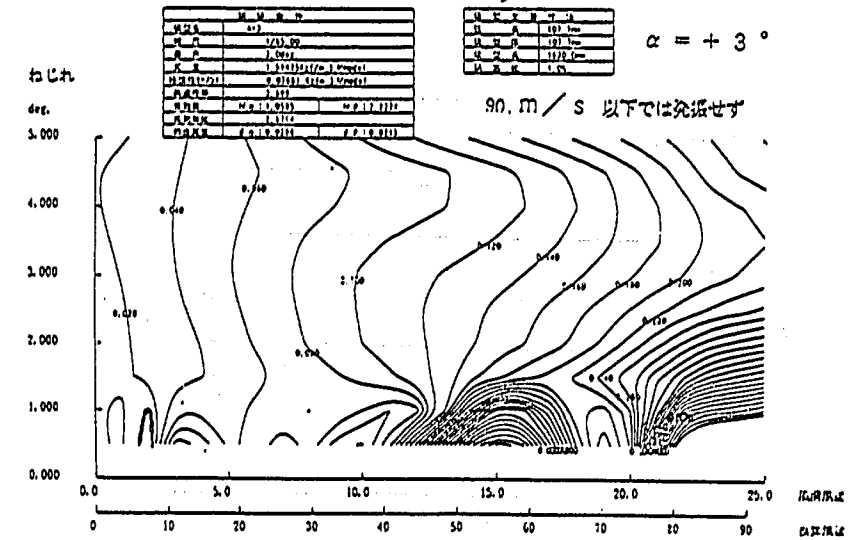
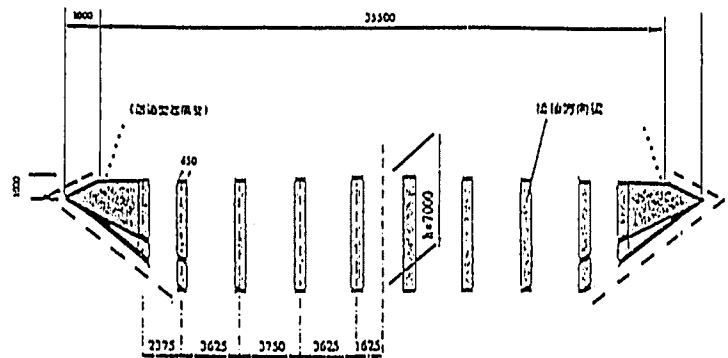


図-3.2.6.11 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-3)

180x H=7.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.12 断面図(H7-4)

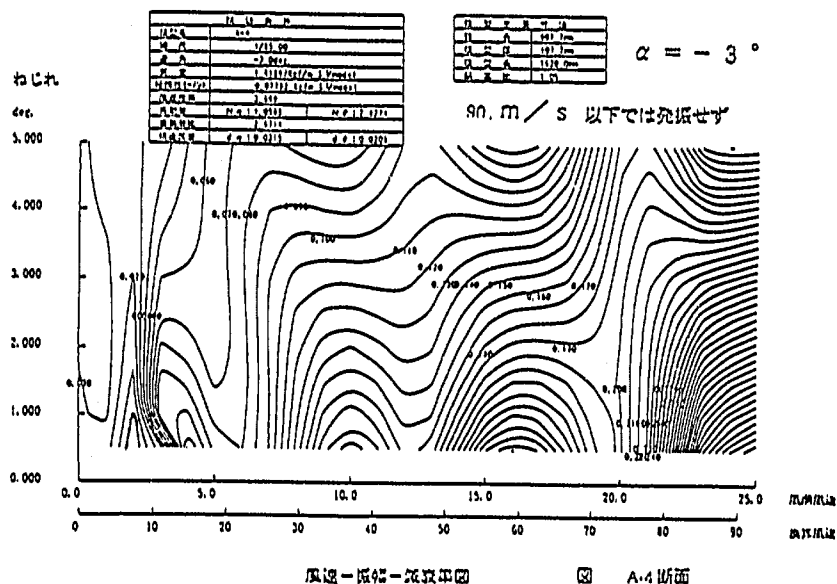


図-3.2.6.13 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-4)

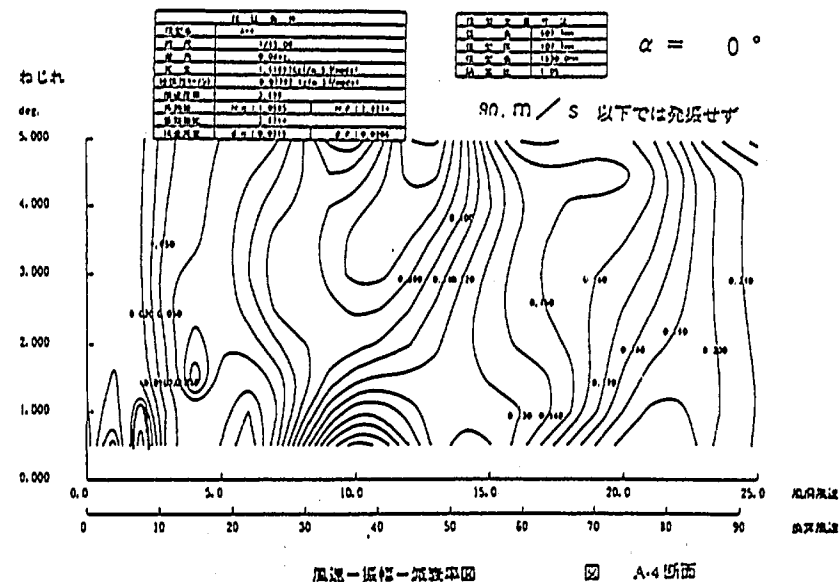


図-3.2.6.14 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-4)

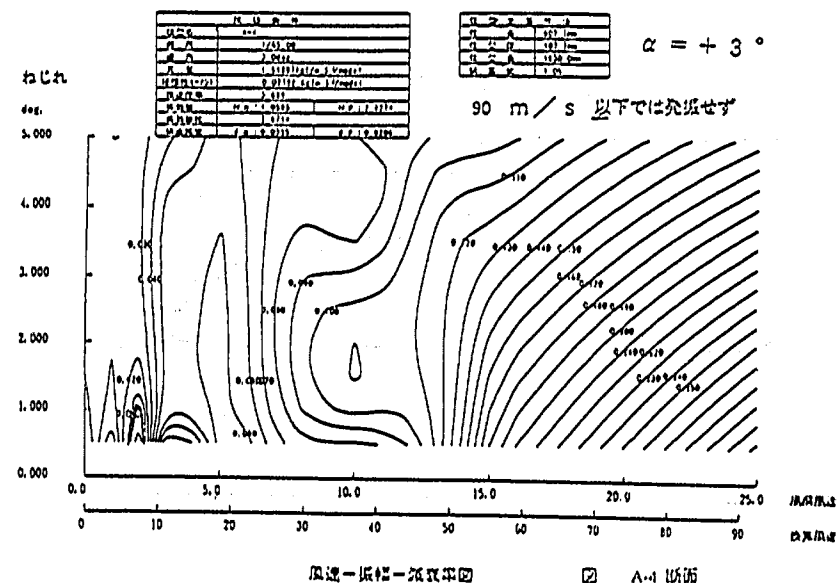
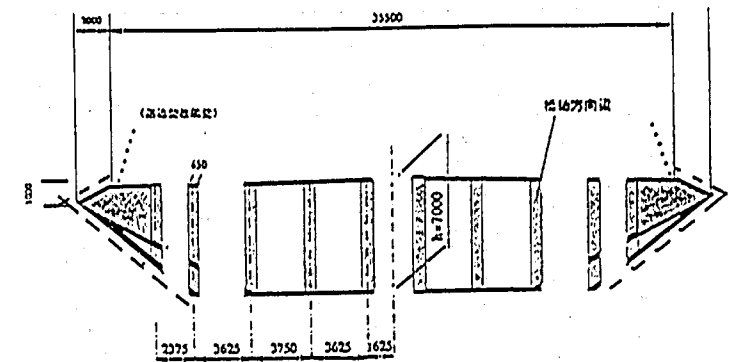


図-3.2.6.15 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-4)

1Box H=7.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.16 断面図(H7-5)

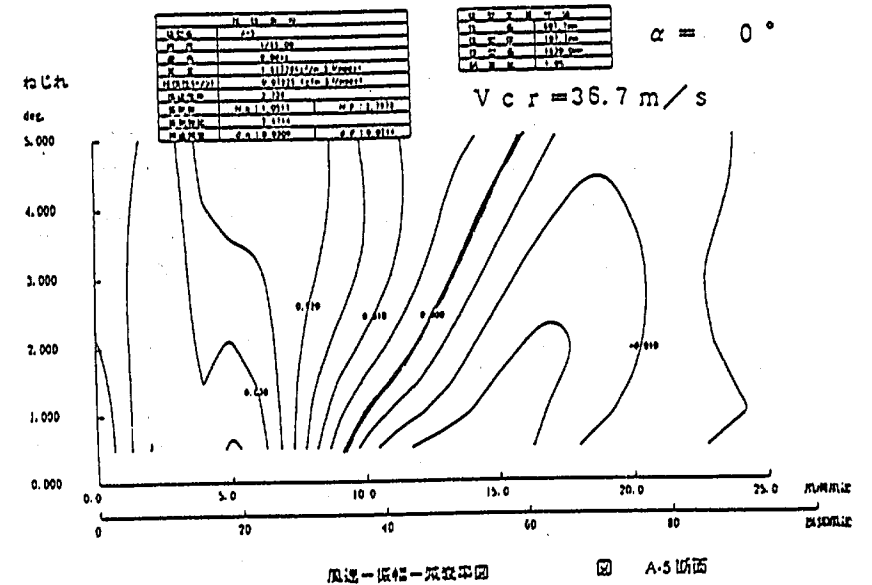
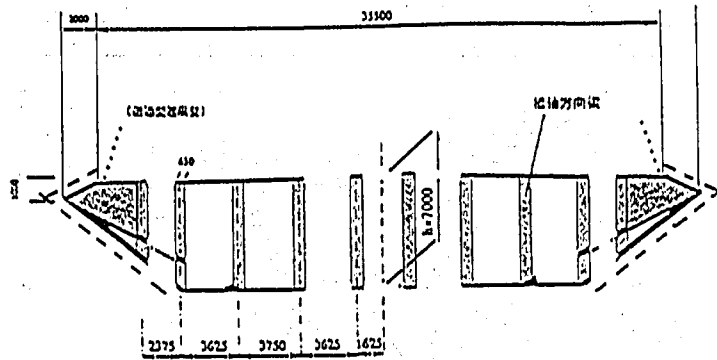


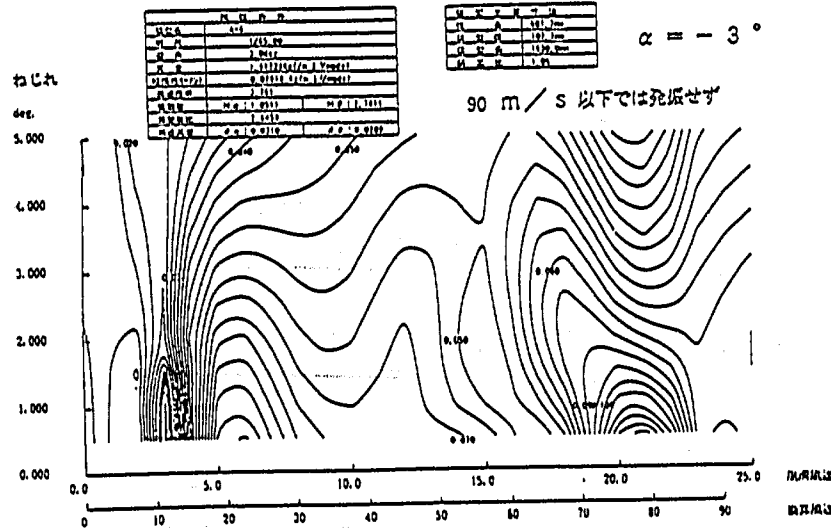
図-3.2.6.17 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-5)

1Box H=7.0m



路肩部、中央分離部に標準高橋を設置

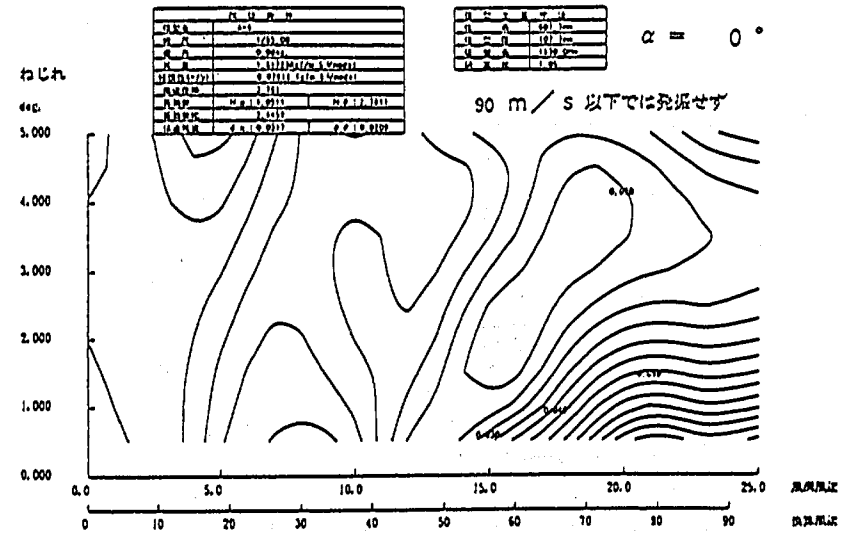
図-3.2.6.18 断面図(H7-6)



風速-振幅-減衰率図

図 A-G 断面

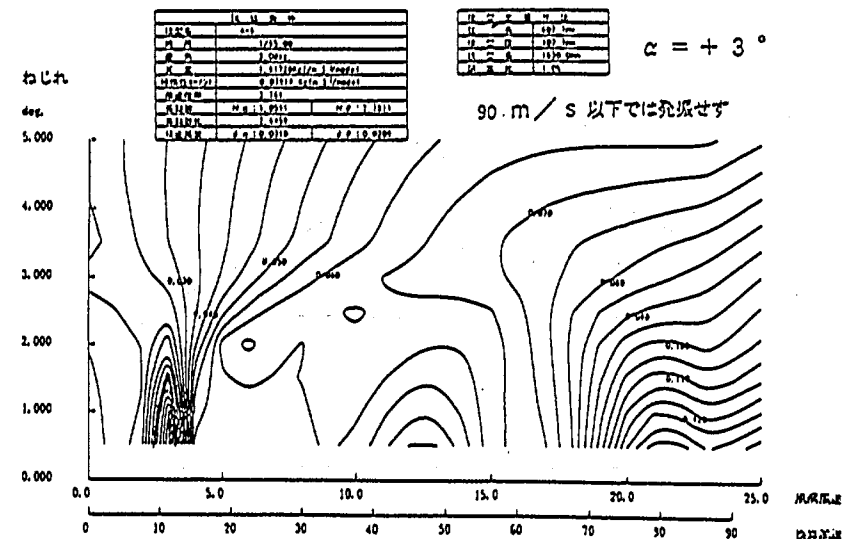
図-3.2.6.19 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-6)



超長大橋1BOXの支持試験 風速-振幅-減衰率図

図 A-G 断面

図-3.2.6.20 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-6)



風速-振幅-減衰率図

図 A-G 断面

図-3.2.6.21 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H7-6)

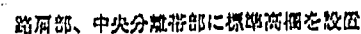
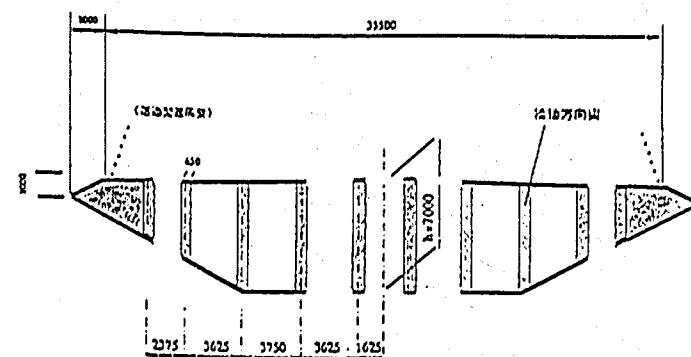
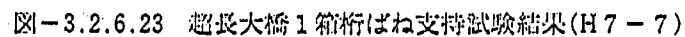
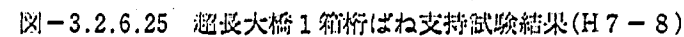


图-3.2.6.22 断面图(H 7-7)

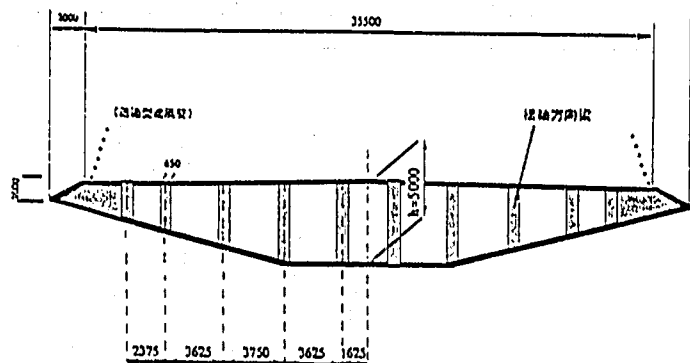


路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

图-3.2.6.24 断面图(H7-8)

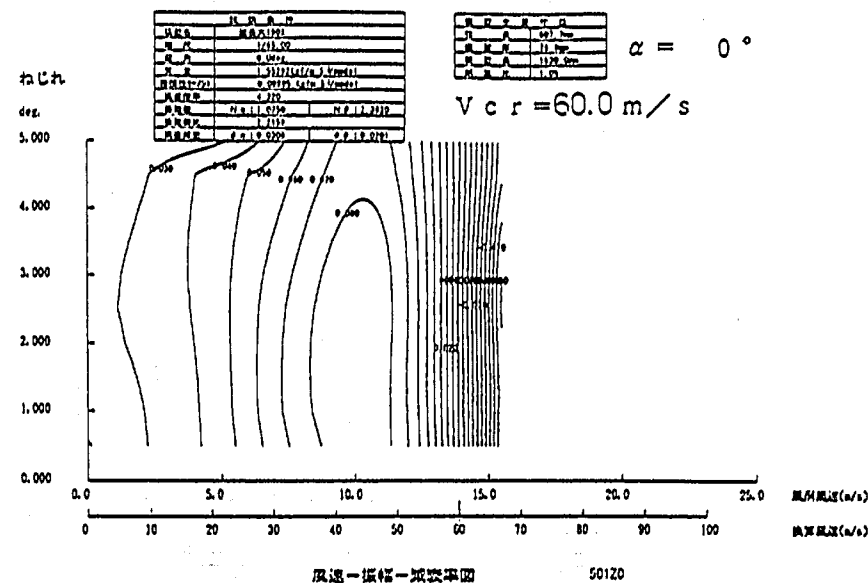


1 Box, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

图-3.2.6.26 断面图(H5-1)



【図】-3.2.6.28 超長大橋 1 箱桁ばね支持試験結果(H5-1)

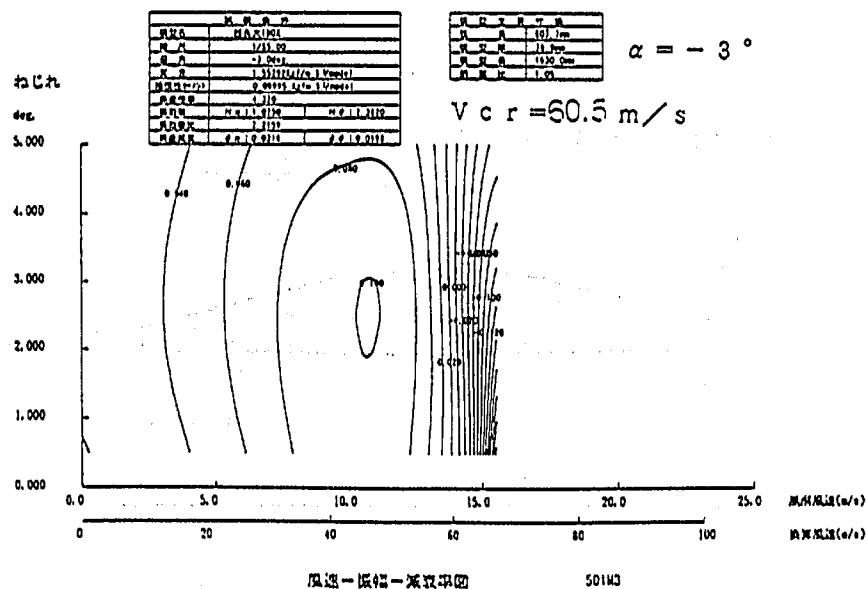


図-3.2.6.27 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-1)

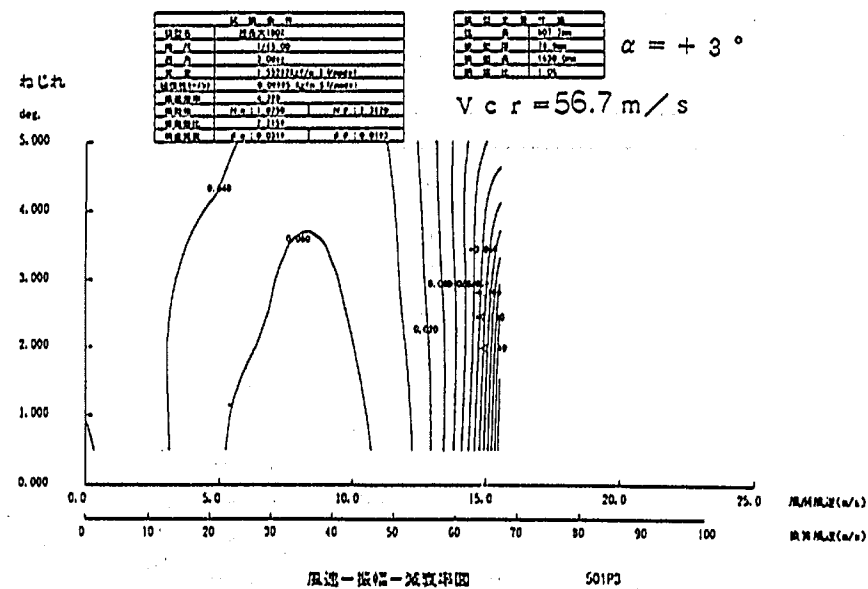
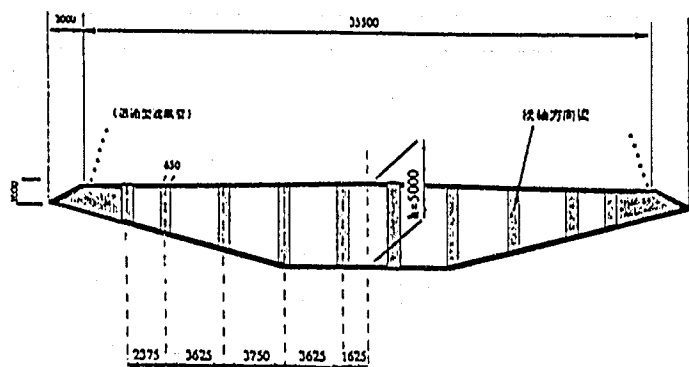


図-3.2.6.29 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-1)

1Box, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を配置

図-3.2.6.30 断面図(H5-2)

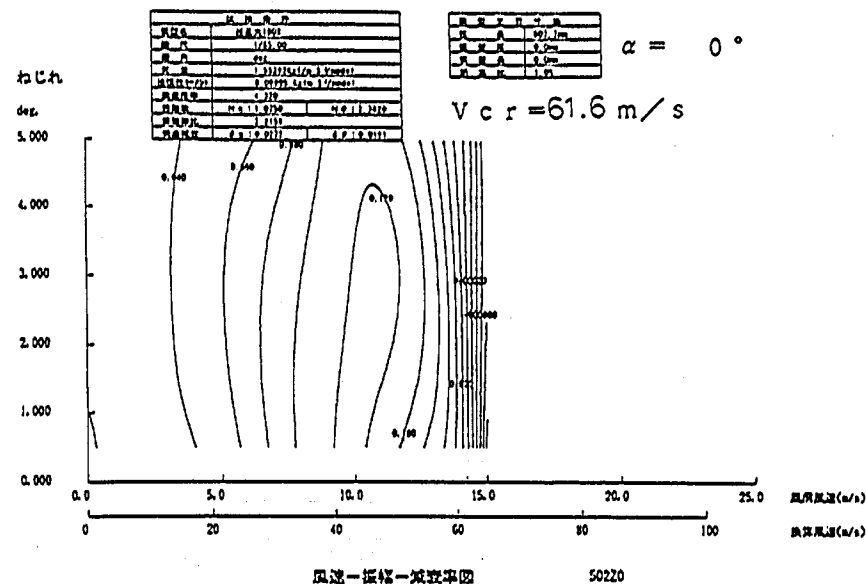


図-3.2.6.32 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2)

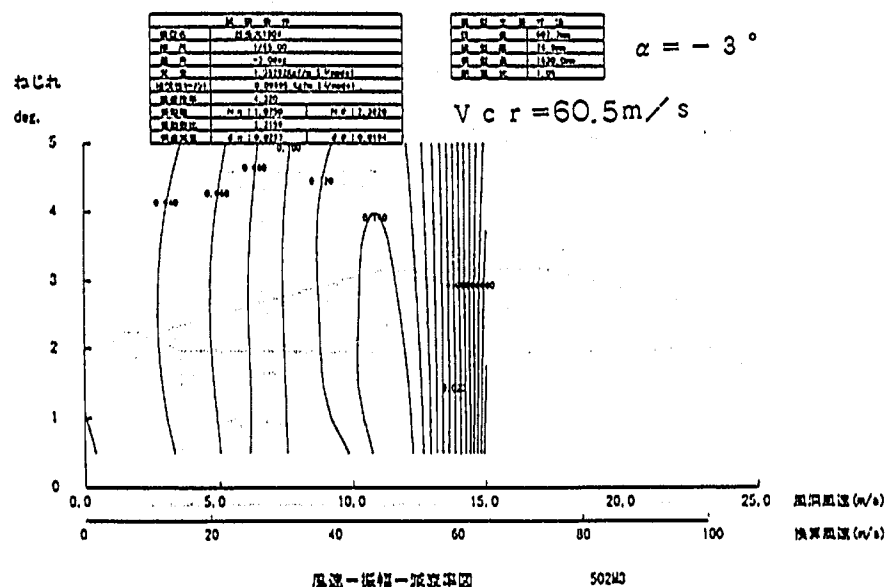


図-3.2.6.31 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2)

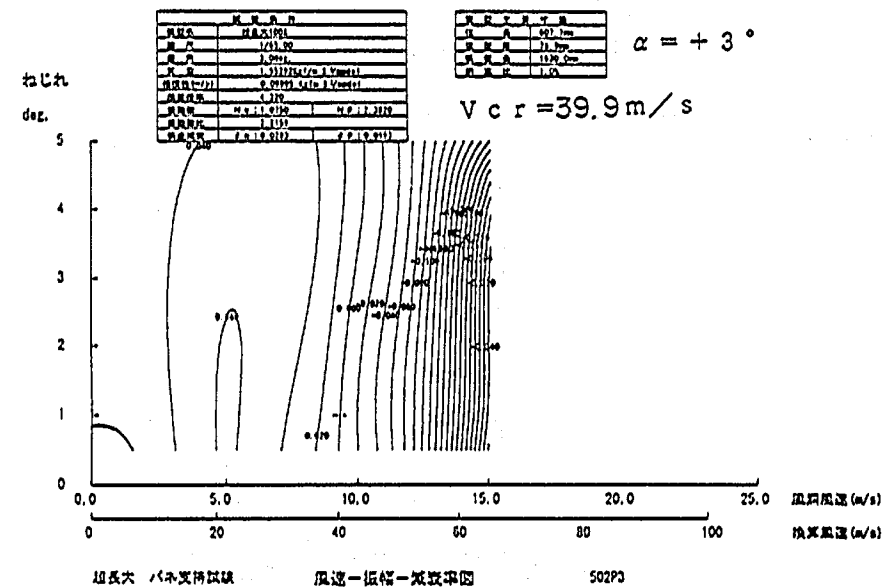
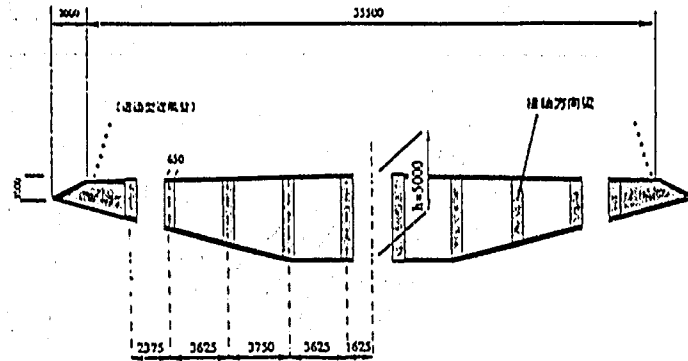


図-3.2.6.33 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2)

1Box, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.34 断面図(H5-3)

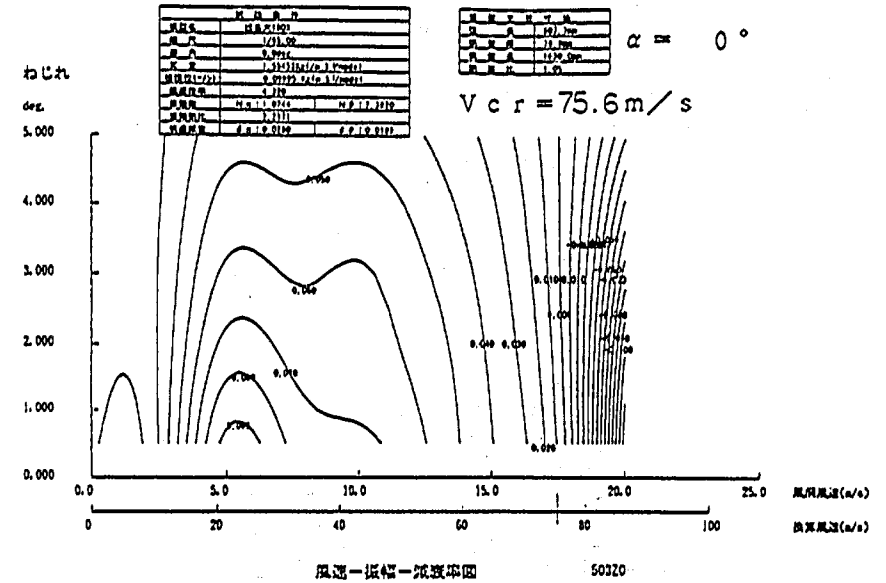


図-3.2.6.36 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3)

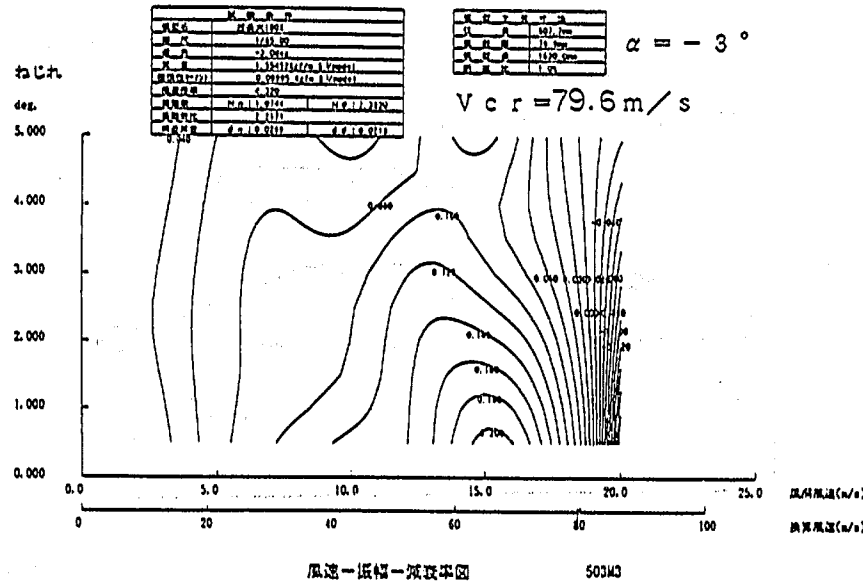


図-3.2.6.35 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3)

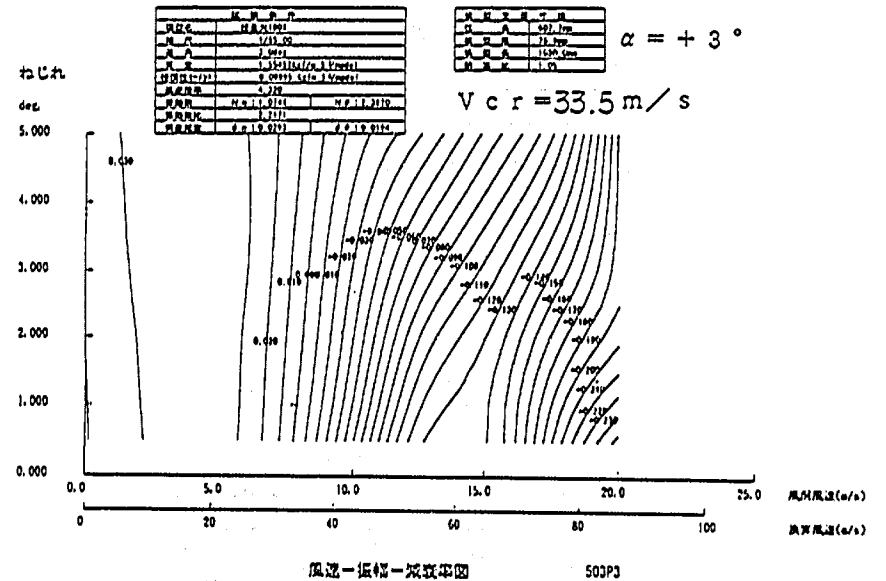
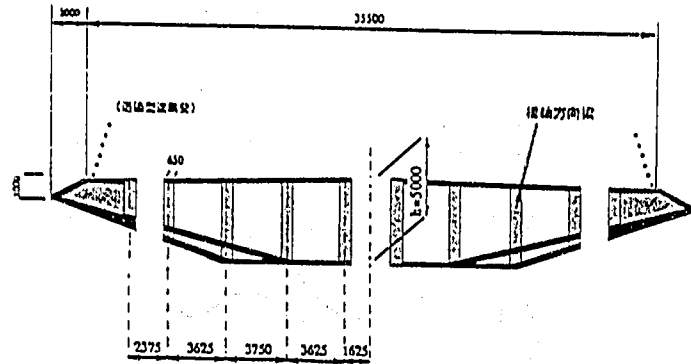


図-3.2.6.37 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3)

180x, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

図-3.2.6.38 断面図(H5-4)

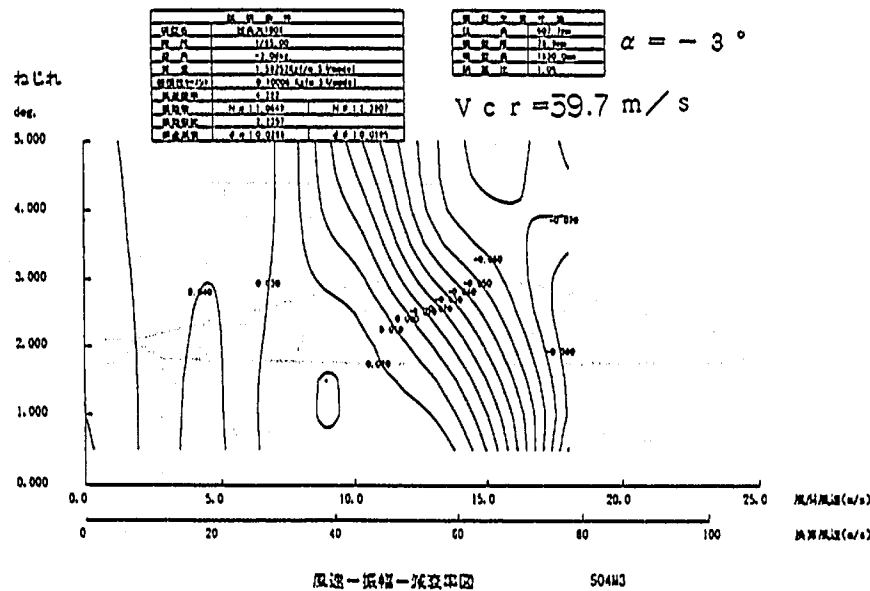


図-3.2.6.39 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-4)

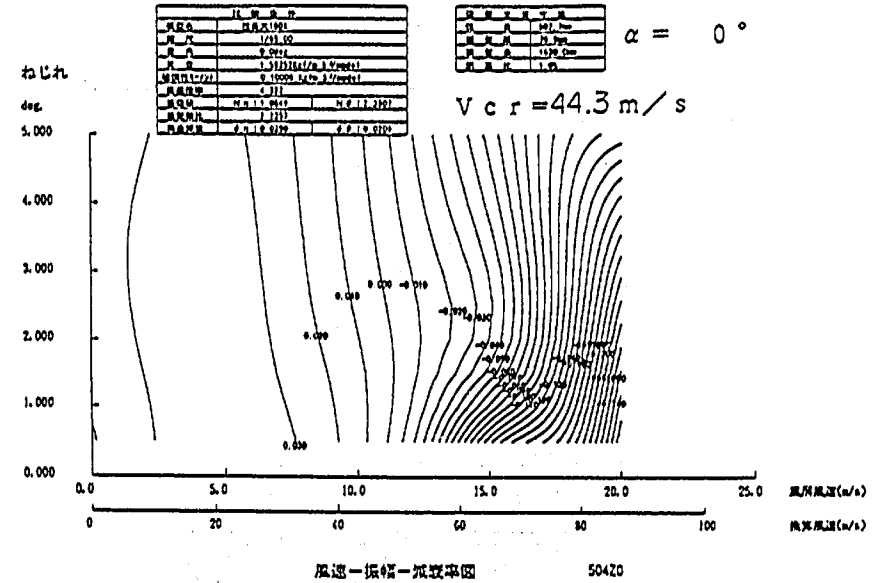


図-3.2.6.40 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-4)

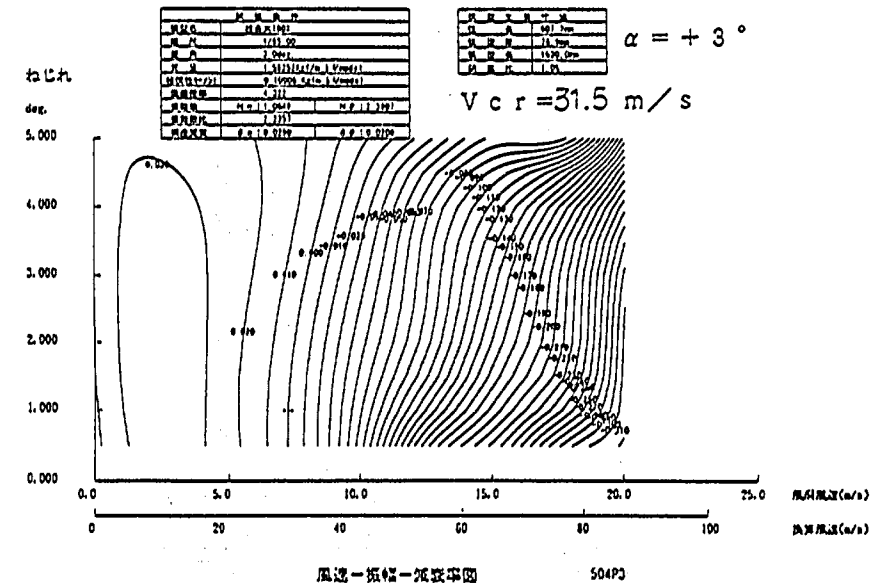
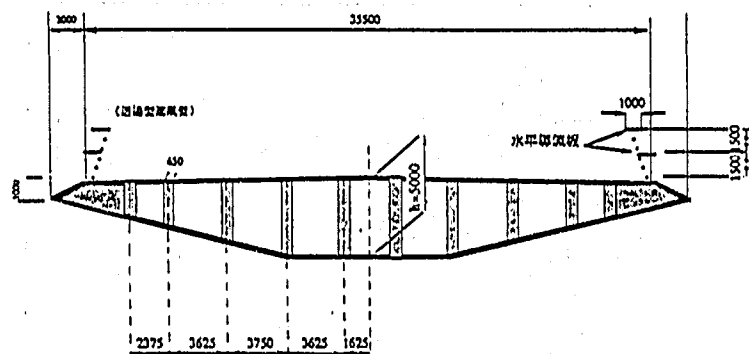


図-3.2.6.41 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-4)

1 Box, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

图-3.2.6.42 断面图(H5-2F)

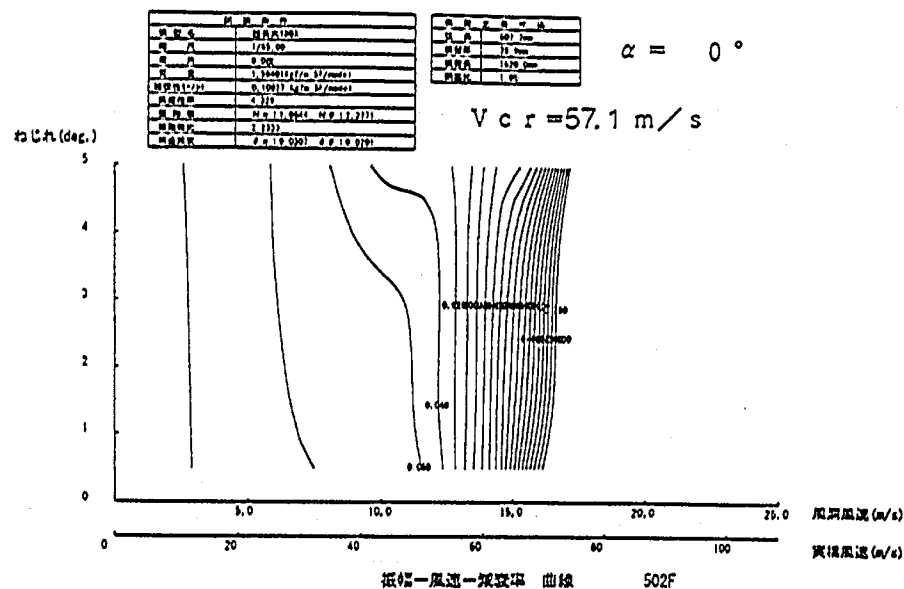


図-3.2.6.44 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2F)

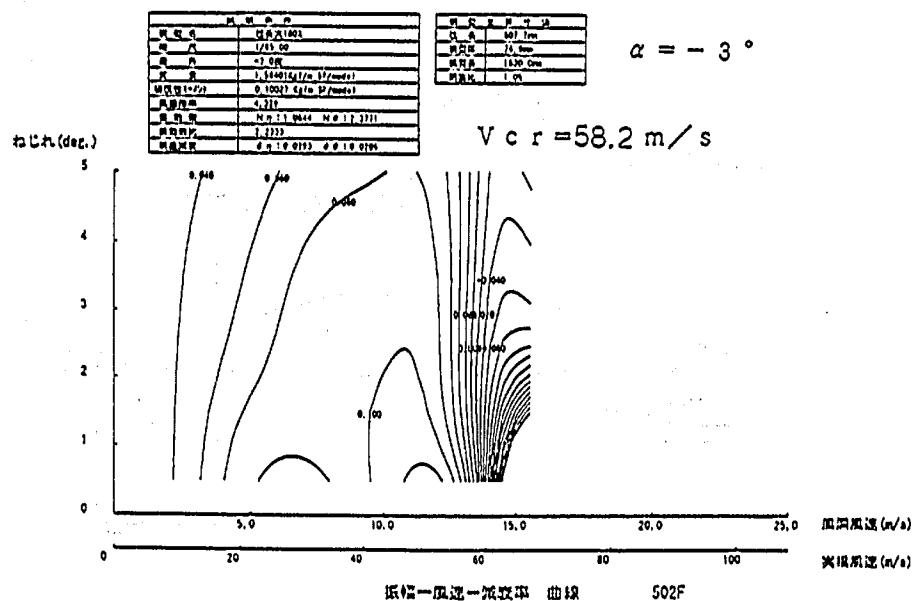


図-3.2.6.43 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2F)

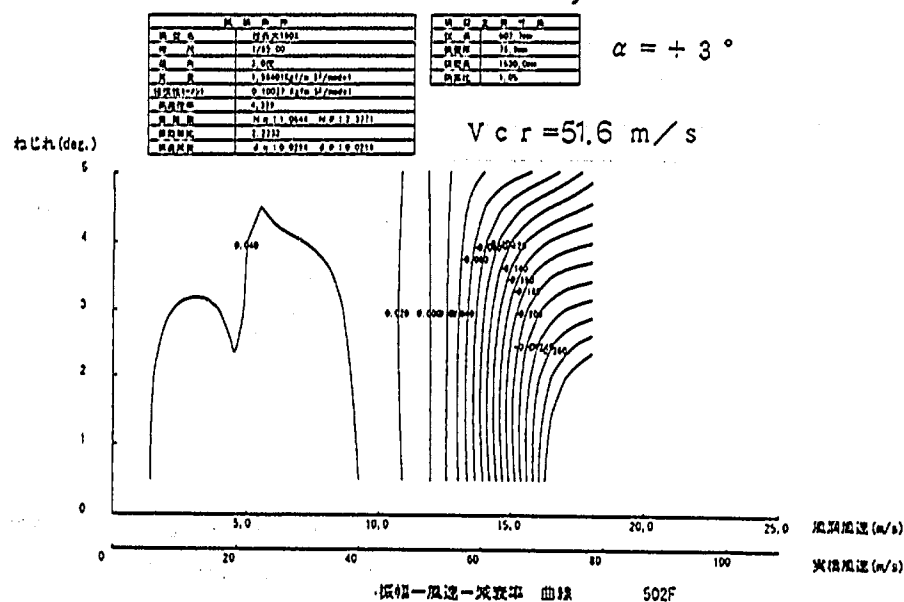
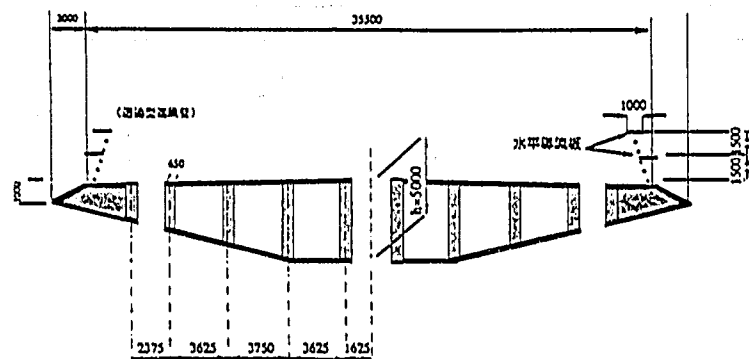


図-3.2.6.45 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-2F)

180x, H=5.0m



路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置

图-3.2.6.46 断面图(H5-3F)

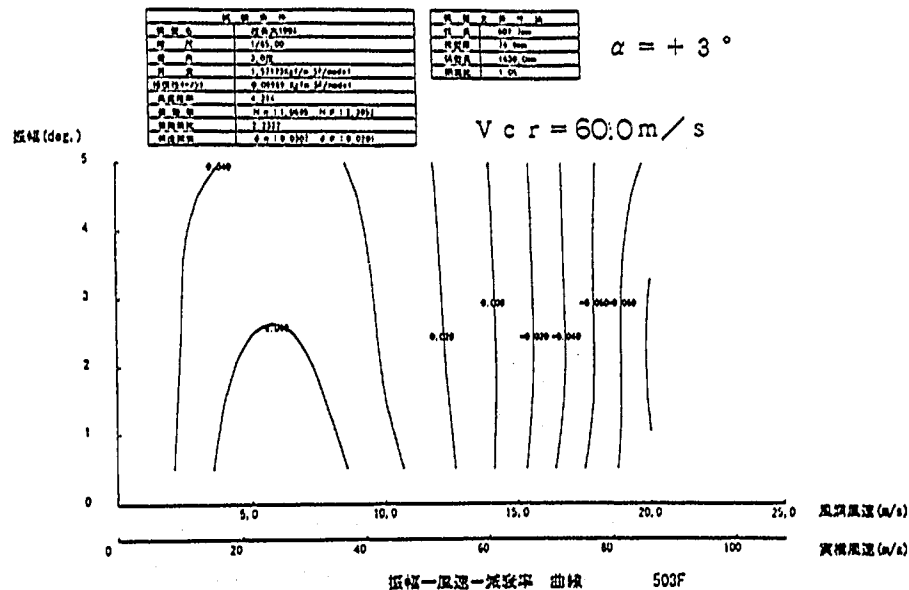


図-3.2.6.48 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3F)

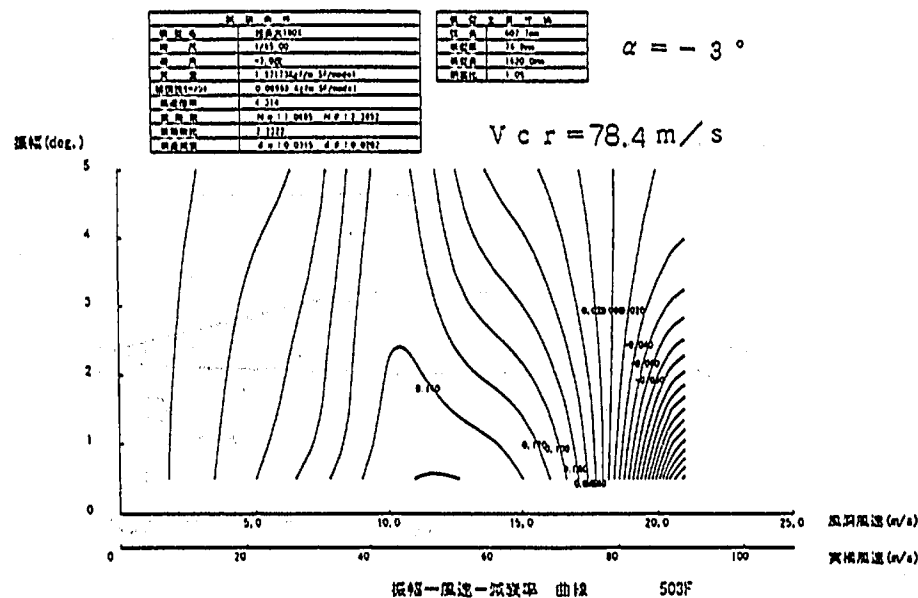


図-3.2.6.47 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3F)

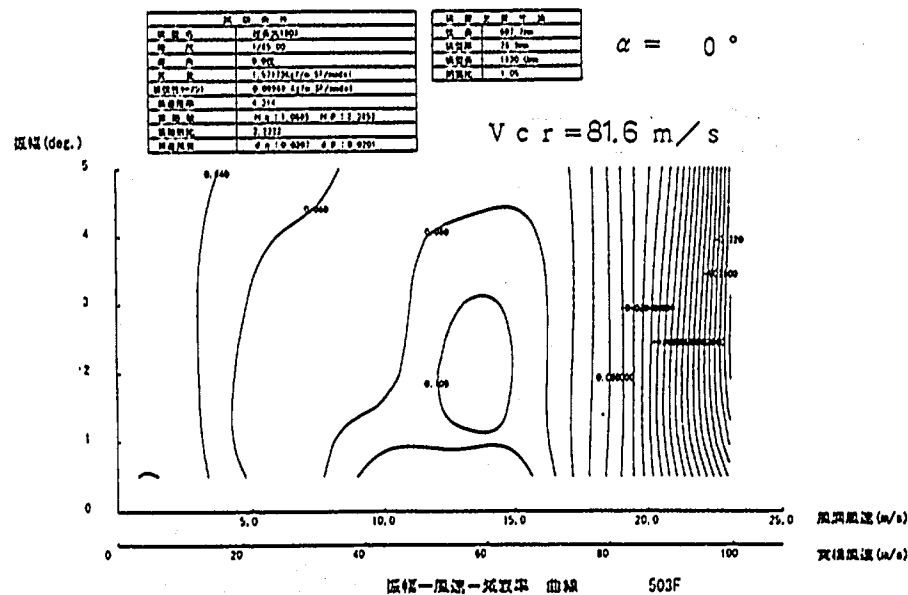


図-3.2.6.49 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3F)

1Box, H=5.0m

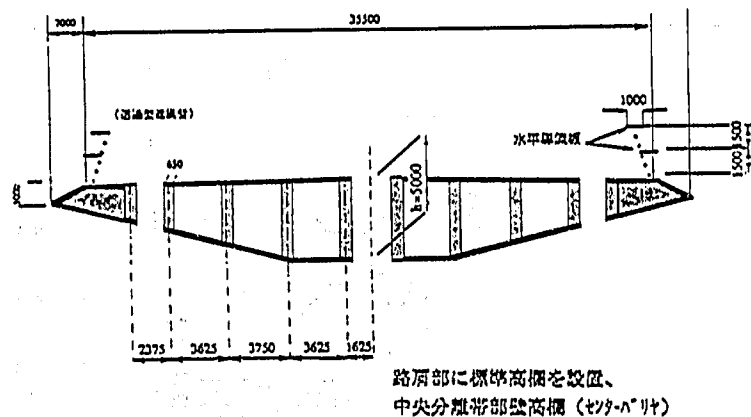


図-3.2.6.50 断面図(H5-3FC)

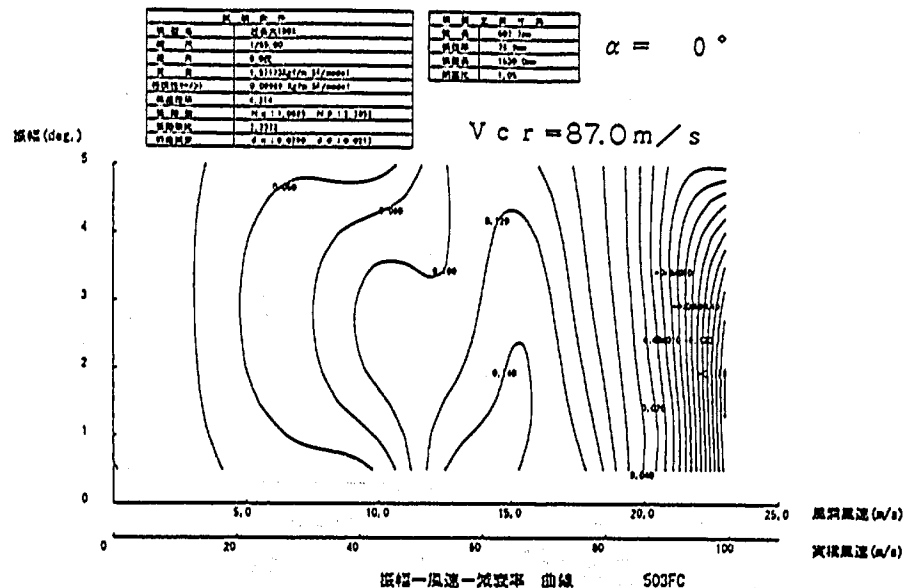


図-3.2.6.52 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3FC)

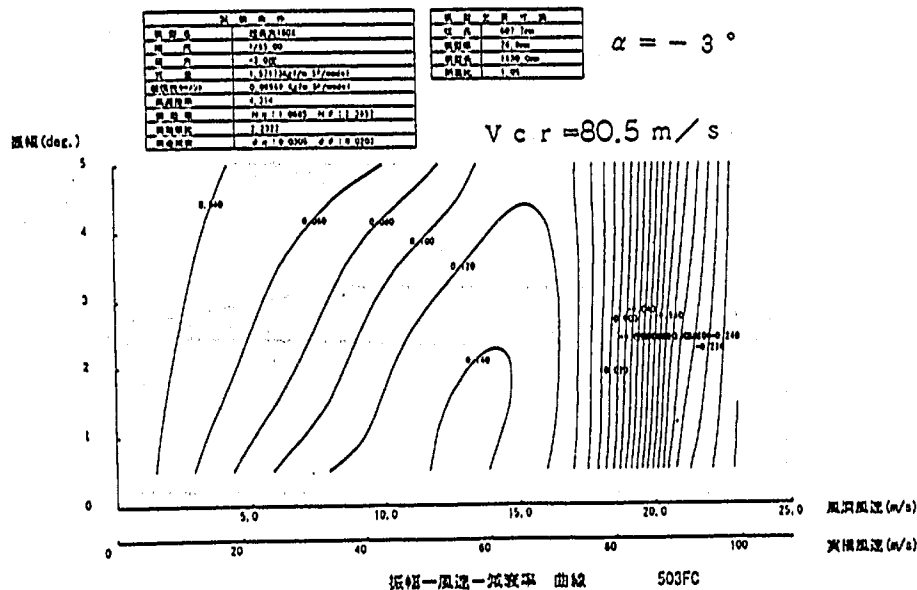


図-3.2.6.51 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3FC)

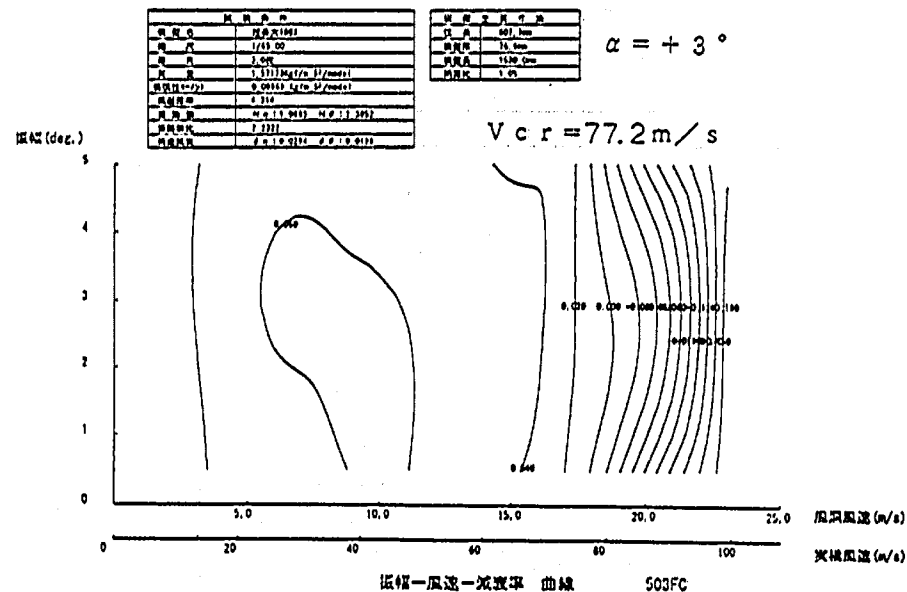


図-3.2.6.53 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H5-3FC)

1Box、H=3.5m

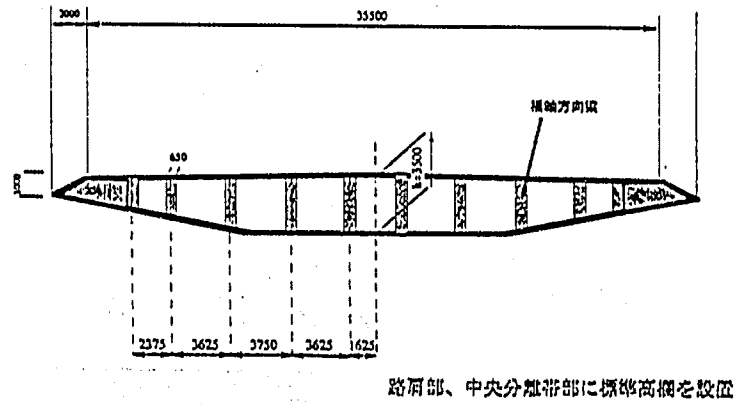


図-3.2.6.54 断面図(H35-1)

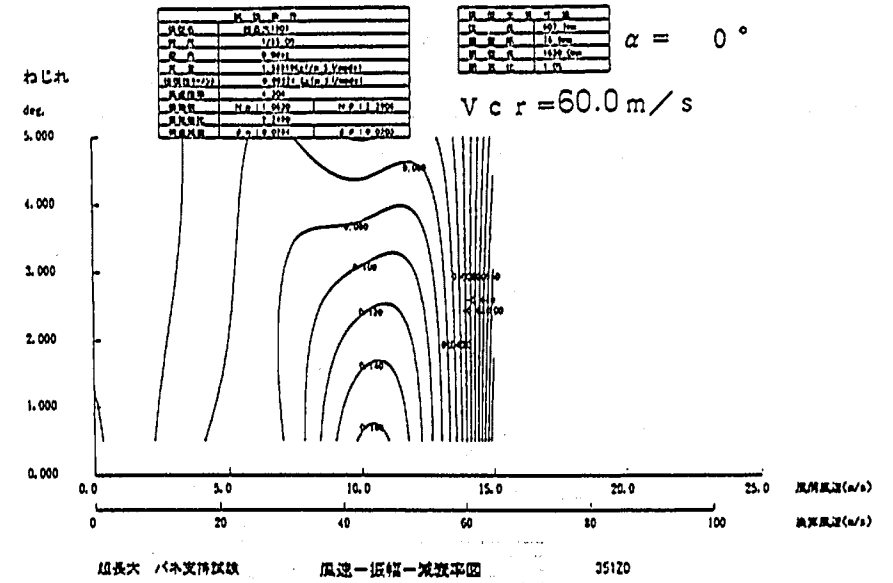


図-3.2.6.56 超長大橋 1 箱桁ばね支持試験結果(H35-1)

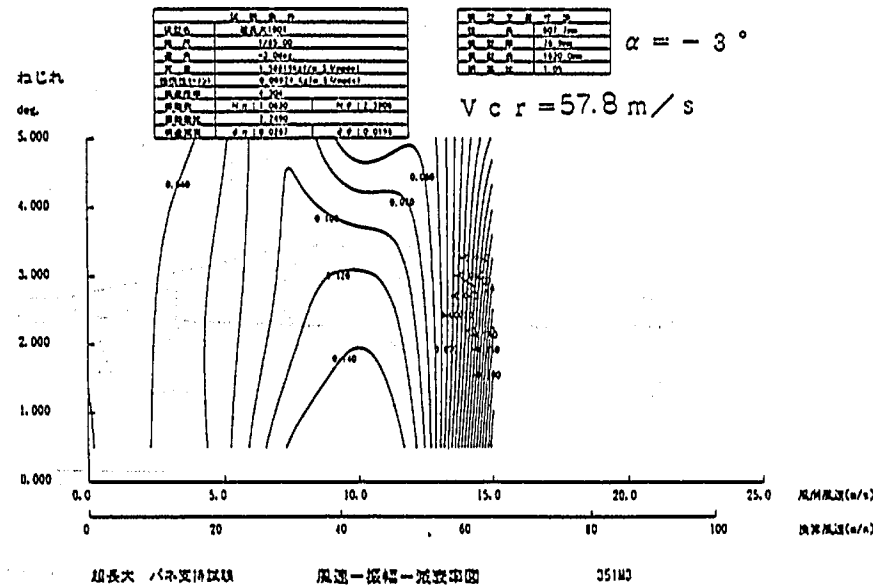


図-3.2.6.55 超長大橋 1 箱桁ばね支持試験結果(H35-1)

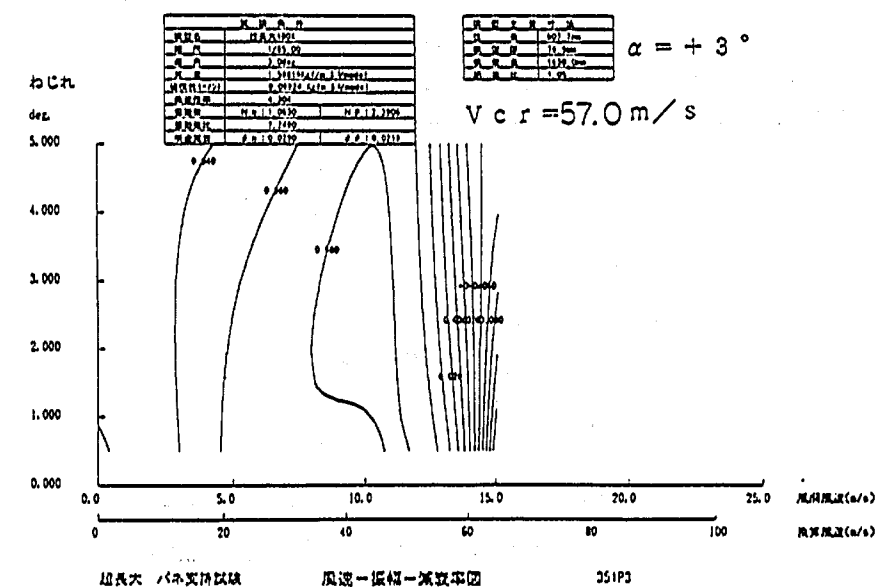
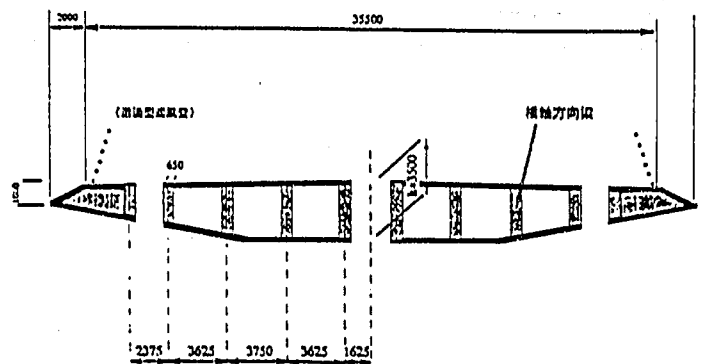


図-3.2.6.57 超長大橋 1 箱桁ばね支持試験結果(H35-1)

図-3.2.6.61 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-3.2.6.62 断面図(H35-3)

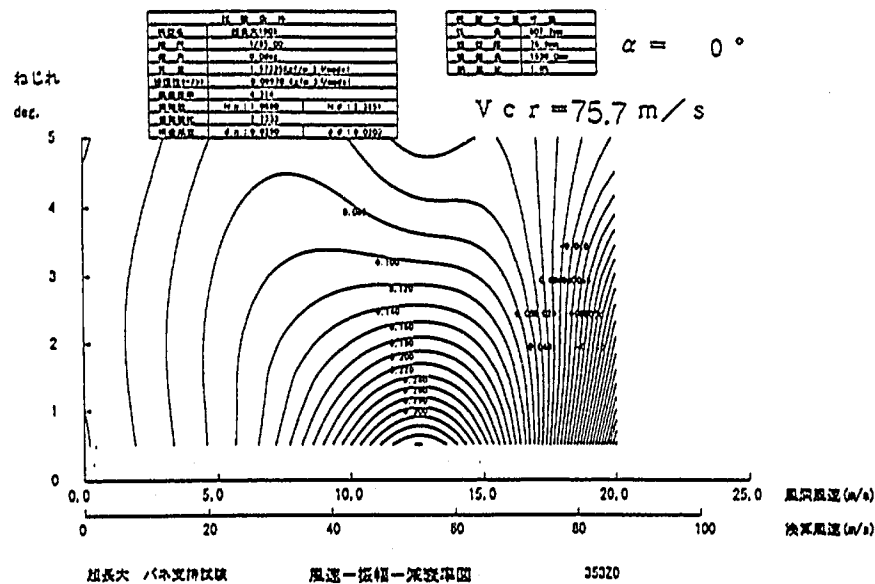


図-3.2.6.64 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H35-3)

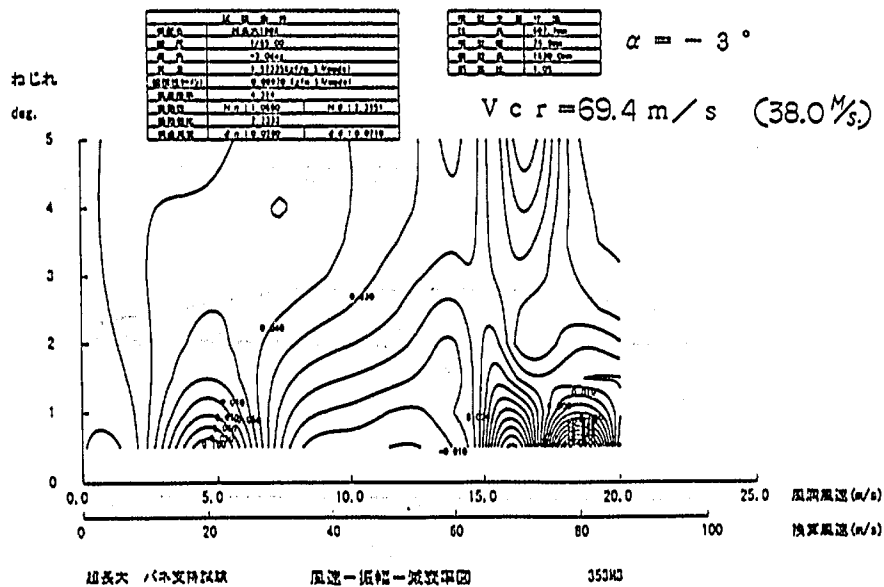


図-3.2.6.63 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H35-3)

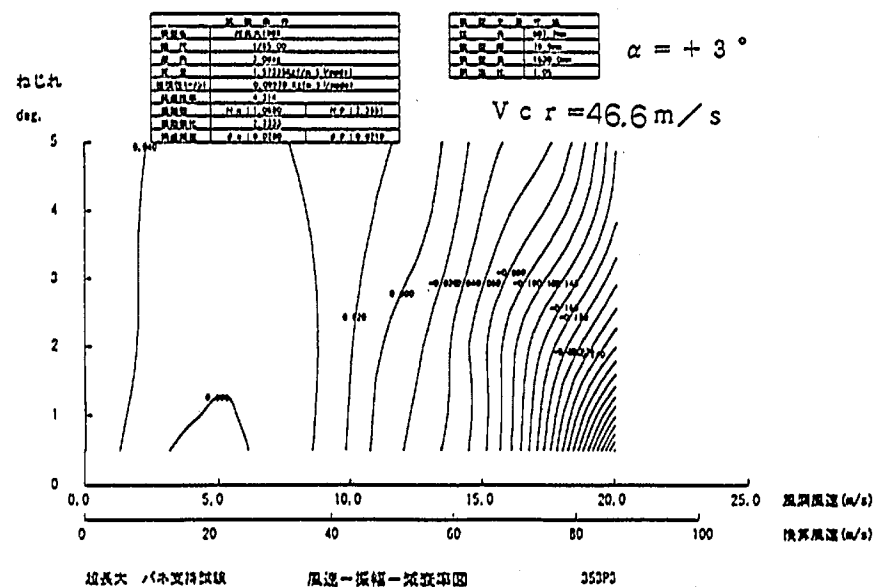


図-3.2.6.65 超長大橋1箱桁ばね支持試験結果(H35-3)

(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迎角ともフラッター風速75m/s以上の断面があること、対策無しでも3迎角ともフラッター風速が60m/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）

($V_{cr}=60.5(\alpha=-3^\circ)$, $60.0(\alpha=0^\circ)$, $56.7(\alpha=3^\circ)$)

2) 1箱桁（h=5m）空力対策断面（H5-3FC）

($V_{cr}=80.5(\alpha=-3^\circ)$, $87.0(\alpha=0^\circ)$, $77.2(\alpha=3^\circ)$)

三分力試験結果の概要を下表に示す。

耐風性（フラッター）の改善のために施した断面の改変が、抗力係数の増加と揚力傾斜、モーメント傾斜の減少となって現れている。

三分力試験結果概要

断面名	H5-1	H5-3FC
$CD(\alpha=0^\circ)$	0.0496	0.1240
$dCL/d\alpha$	3.9806	1.5742
$dCM/d\alpha$	1.2174	0.6825

今後、上記データを用いた変形解析を実施すると共に、非定常空気力係数の計測、フラッター解析を実施していく予定である。

3分力試驗結果

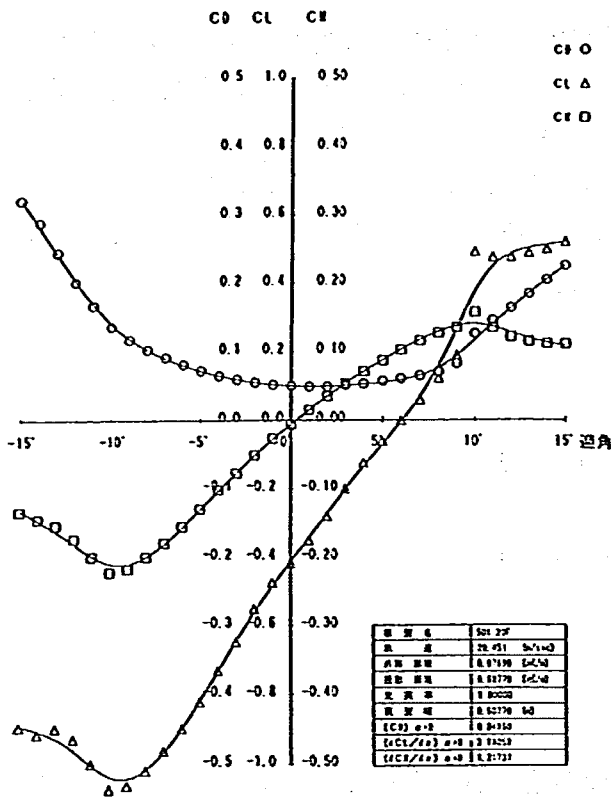


圖-3.2.6.66 H5-1 断面 三分力試驗結果

3分力試驗結果

迎角(度)	阻力係數	揚力係數	壓力中心係數
-15.0	0.3219	-0.8353	-0.1349
-14.0	0.2132	-0.9172	-0.1454
-13.0	0.2150	-0.9500	-0.1544
-12.0	0.2027	-0.9312	-0.1737
-11.0	0.1630	-1.0014	-0.2005
-10.0	0.1120	-1.0746	-0.2230
-9.0	0.1122	-1.0643	-0.2177
-8.0	0.1079	-1.0210	-0.2005
-7.0	0.0913	-0.9533	-0.1795
-6.0	0.0609	-0.8314	-0.1558
-5.0	0.0221	-0.8224	-0.1297
-4.0	0.0645	-0.7330	-0.1019
-3.0	0.0593	-0.6497	-0.0772
-2.0	0.0547	-0.5512	-0.0509
-1.0	0.0519	-0.4734	-0.0267
0.0	0.0438	-0.4164	-0.0062
1.0	0.0437	-0.3452	0.0152
2.0	0.0416	-0.2655	0.0342
3.0	0.0502	-0.1917	0.0530
4.0	0.0527	-0.1238	0.0705
5.0	0.0564	-0.0513	0.0851
6.0	0.0501	-0.0210	0.1019
7.0	0.0563	0.0577	0.1150
8.0	0.0639	0.1206	0.1265
9.0	0.0814	0.1835	0.1342
10.0	0.1255	0.2329	0.1552
11.0	0.1450	0.2739	0.1341
12.0	0.1622	0.2745	0.1212
13.0	0.1825	0.2473	0.1144
14.0	0.2044	0.2581	0.1112
15.0	0.2250	0.2197	0.1105

模型名=501.22°

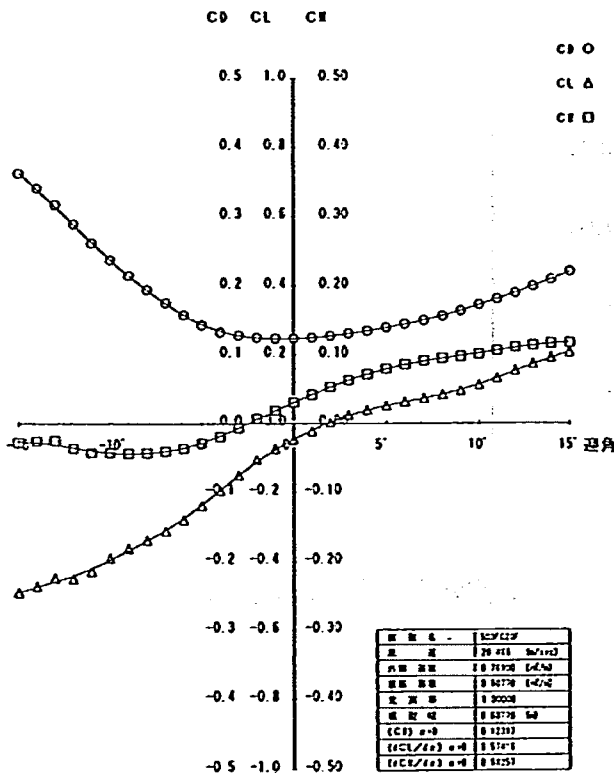


圖-3.2.6.67 H5-3 FC断面 三分力試驗結果

3分力試驗結果

迎角(度)	阻力係數	揚力係數	壓力中心係數
-15.0	0.3512	-0.4913	-0.0225
-14.0	0.3359	-0.4732	-0.0257
-13.0	0.3160	-0.4497	-0.0249
-12.0	0.2832	-0.4511	-0.0251
-11.0	0.2621	-0.4320	-0.0227
-10.0	0.2377	-0.3924	-0.0422
-9.0	0.2153	-0.3525	-0.0434
-8.0	0.1946	-0.3339	-0.0430
-7.0	0.1754	-0.3111	-0.0402
-6.0	0.1582	-0.2787	-0.0351
-5.0	0.1434	-0.2372	-0.0287
-4.0	0.1326	-0.1951	-0.0185
-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	-0.0463	0.0209
1.0	0.1252	-0.0225	0.0424
2.0	0.1227	0.0032	0.0537
3.0	0.1311	0.0245	0.0635
4.0	0.1349	0.0335	0.0720
5.0	0.1354	0.0523	0.0793
6.0	0.1445	0.0631	0.0852
7.0	0.1458	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	0.1051
12.0	0.1831	0.1547	0.1102
13.0	0.1838	0.1734	0.1134
14.0	0.2020	0.1917	0.1150
15.0	0.2204	0.2050	0.1122

模型名=503FC22°

(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) 風洞試験およびフラッター解析結果

風洞試験結果

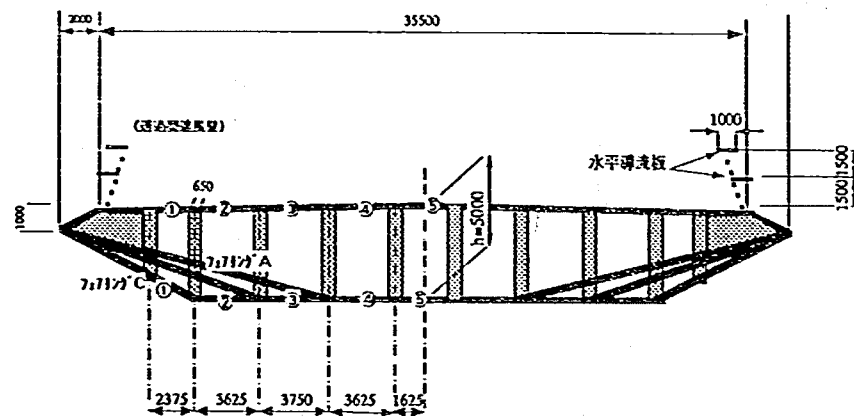


図-3.2.6.68 基本断面、 $h = 5\text{m}$

表-3.2.6.4 風洞試験、フラッター解析結果

	開口部	透過型 遮風壁	外端 センターバリア	水平 導流板	-3° (m/s)	0° (m/s)	+3° (m/s)	フラッター解析結果 (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	-	<u>79.6</u>	<u>75.6</u>	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	<u>78.4</u>	<u>81.6</u>	60.0	
H5-3FC センターバリア	① ⑤	○	A	有	<u>80.5</u>	<u>87.0</u>	<u>77.2</u>	88.4 (変形無) 79.1 (変形有)

下線は $V_{cr} > 70\text{m/s}$

フラッター解析結果

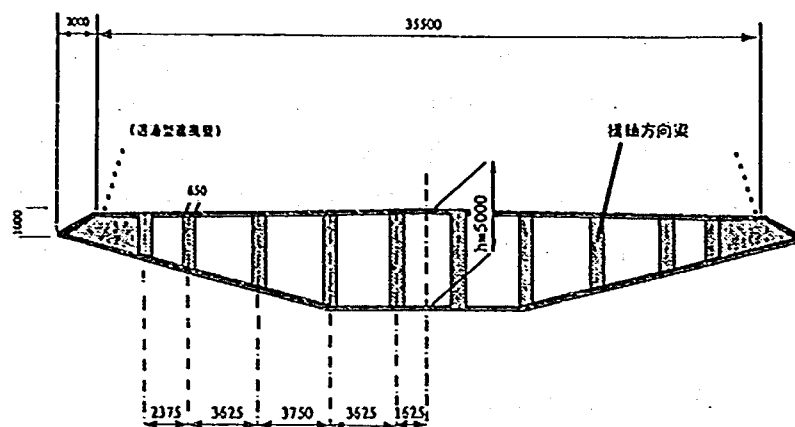
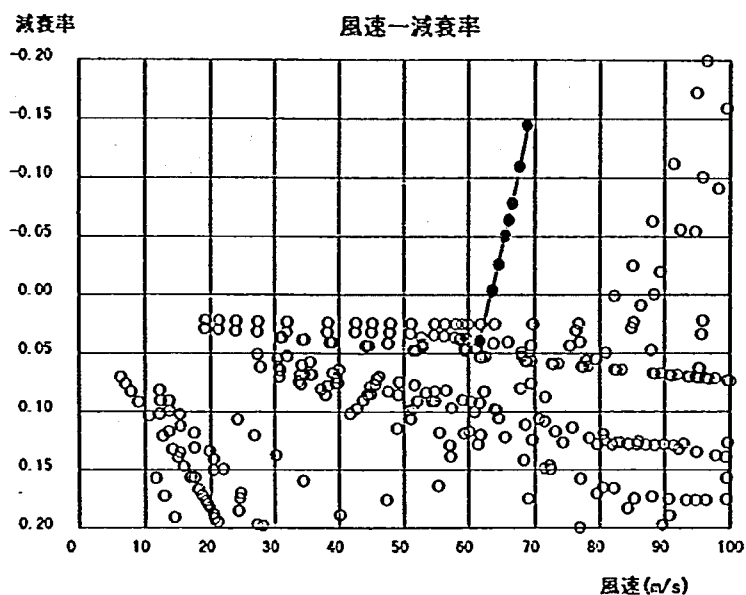
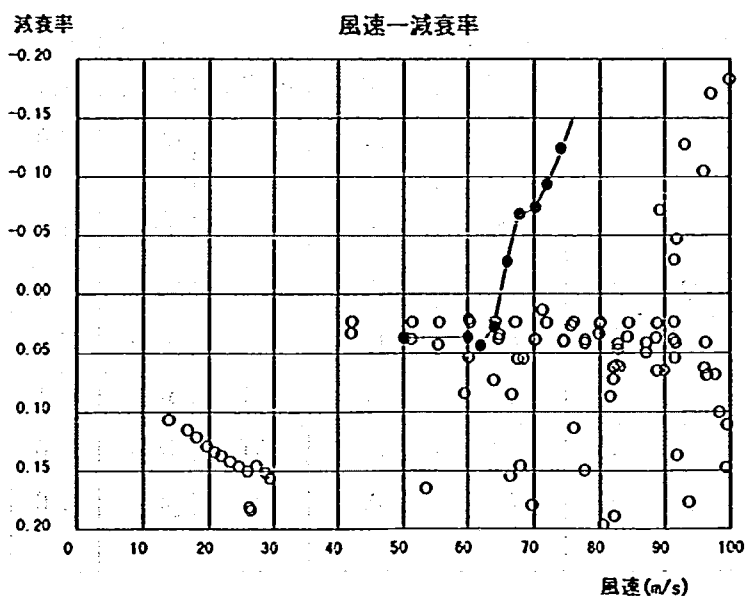


図-3.2.6.69 H5-1断面

路肩部、中央分離帯部に標準高欄を設置



$V_{cr} = 63.2 \text{ m/s}$ (風荷重変形考慮無し)



$V_{cr} = 64.3 \text{ m/s}$ (風荷重変形考慮有り)

図-3.2.6.70 フラッター解析結果 (H5-1)

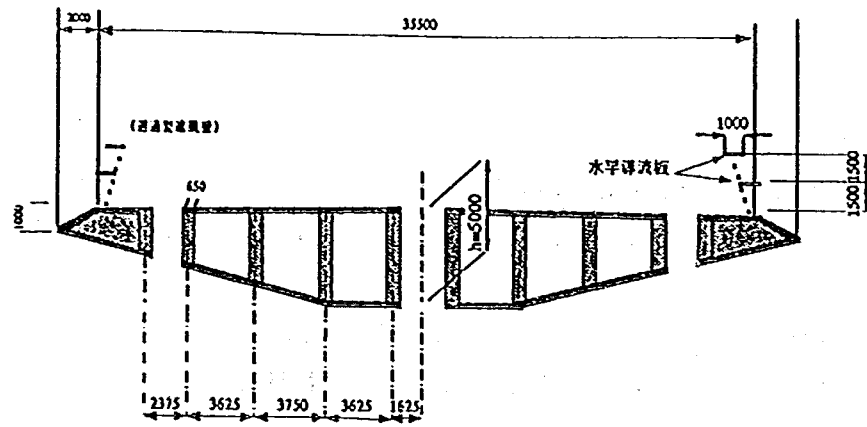
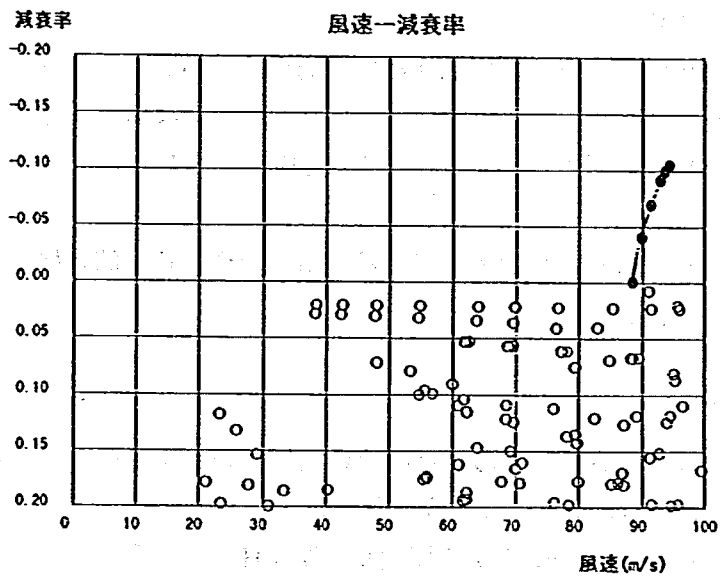
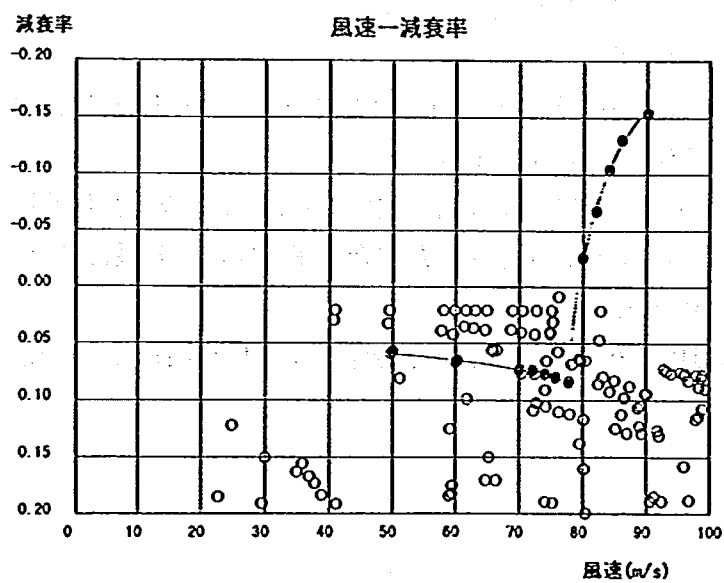


図-3.2.6.71 H5-3FC断面

路肩部に標準高欄を設置、
中央分層帯部壁高欄 (モノバール)



$V_{cr} = 88.4 \text{ m/s}$ (風荷重変形考慮無し)



$V_{cr} = 79.1 \text{ m/s}$ (風荷重変形考慮有り)

図-3.2.6.72 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($h=7\text{m}$, 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て風洞試験(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、 $V_{cr}=35\text{m/s}$ 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 $\sim 90\text{ m/s}$ の範囲で認められないものの、振幅 $1^\circ \sim 3^\circ$ 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。

<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($H=5\text{m}$, 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 79 m/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 64 m/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今後検討予定)
等のが明らかになった。

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。

3.3 2箱桁形式の超長大橋の耐風性に関する研究

3.3.1 概要

2箱桁形式については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断面の3断面についてさらに検討が続けられた。

(1) K断面に関する2箱桁断面の空力特性改善に関する検討

K断面の基本断面の強風時の負の回転変形を低減させるため、フェアリング下面に検査車レール、下フランジ下面に検査車レールに相当するプレートなどを追加した断面やフェアリング形状を変更した断面などの三分力特性が検討された。その中の良好断面について実施されたばね支持試験の結果、フェアリング下面の検査車レール、下フランジ下面の鉛直プレートおよび上側導流板を併用した改良断面が最も優れた特性を示し、基本断面よりフラッター限界風速は上昇し、負迎角側で耐風性が向上する傾向が確認された。この改良断面について自由振動法により動的空気力係数が測定されており、3.4.3項の2箱桁/1箱桁併用吊橋の多自由度フラッター解析による耐風性検討に活用されている。

(2) S断面に関する遮風効果を有する2箱桁形式の耐風性検討

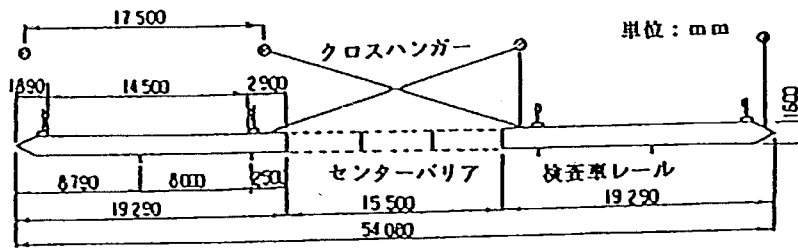
H7年度に検討された遮風壁を設けた断面に関するばね支持試験結果をもとにフラッター特性が良好な充実率30%の透過型遮風壁設置断面につき変形解析・フラッター解析に必要な三分力試験が実施された。

(3) 鉛直スタビライザーを活用した2箱桁形式であるH断面についての耐風性検討

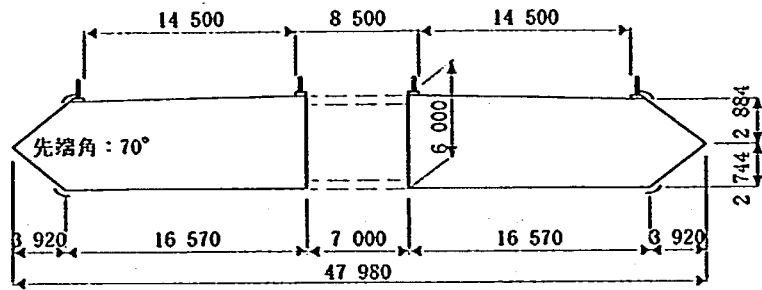
H7年度の桁高5mおよび7mに続き、H8年度は桁高3.5mのばね支持試験が実施された。その結果、桁高5m、空間幅5m、上下突出高が各1.5mの鉛直スタビライザー付断面が選定され、三分力測定データを用いた有風時のねじれ変形の算定とそれをもとにした迎角に対する非定常空気力測定が実施された。そして、2次元フラッター解析の結果がばね支持試験結果と比較されている。

また、鉛直スタビライザー付断面で比較的低風速で発生するたわみおよびねじれの渦励振は空間部へのグレーチング構造の設置や格子乱流中で消滅することが示されている。

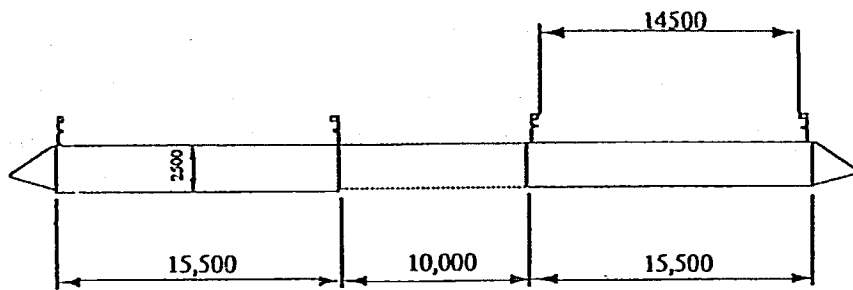
以上の他、2箱桁形式に関する各種断面の空力特性検討データを一覧にしてまとめる作業が続けられた。この結果については3.6節に記載されている。



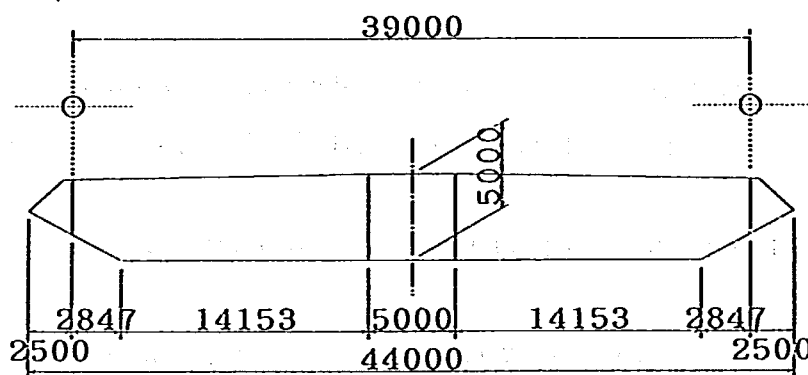
(I断面)



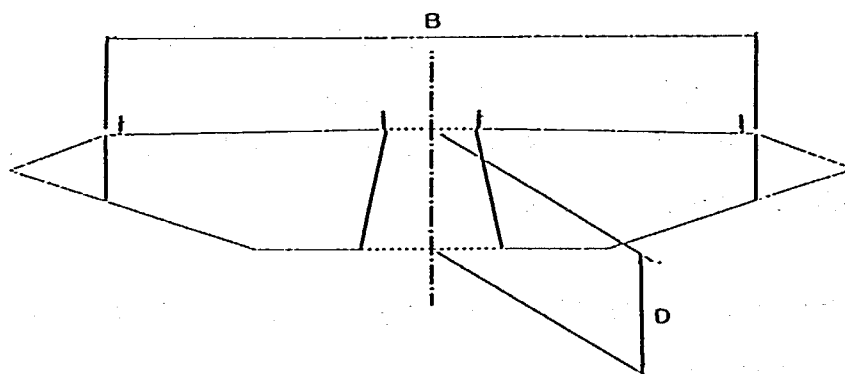
(K断面)



(S断面)



(H断面)



(M断面)

図-3.3.1.1 2箱桁形式検討対象の基本断面

3.3.2 2箱桁断面の空力特性改善に関する検討

(1) 概 要

平成7年度においては、6車線相当の幅員を有する偏平箱桁断面を対象に、2箱桁断面と1箱桁断面の静的ならびに動的な空力特性について比較を行い、中央開口部による耐風性への影響について検討を行った。その結果、中央開口の設置による2箱桁化により、断面のフラッター安定性は大幅に向上し、フラッター限界風速にして30%以上の上昇が期待できることが確認された。一方で、この基本検討断面に関しては、2箱桁断面、1箱桁断面のいずれについても、負迎角側で静的な空力モーメント係数が大きくなる傾向がみられ、これによって、強風時の風荷重による静的変形として過大な頭下げの回転変形が生じ、これに伴う相対迎角の影響により、フラッター安定性が大幅に低下する可能性のあることが明らかとなった。

このため、本検討においては、主として2箱桁断面の空力モーメント特性に着目し、その改善対策について、二次元剛体模型を用いた風洞試験による実験的検討を実施した。また、その結果、良好な空力モーメント特性の得られたいくつかの断面に関しては、各対策によるフラッター特性への影響についても検討を行った。

(2) 風洞試験の内容

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、平成7年度における検討断面と同じく、図-3.3.2.1に示すような6車線相当の桁幅を有する桁高6.0m、中央開口幅7.0mの偏平箱桁断面であり、縮尺1/70の二次元剛体模型を用いて、一様流中における以下の各試験を実施した。

1) 三分力試験

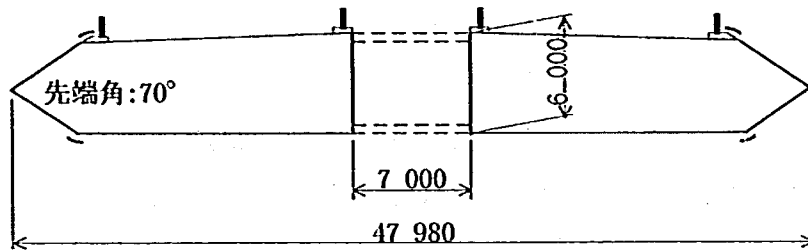
負迎角側における負の空力モーメント係数の軽減を目的とした、図-3.3.2.2に示すような各対策案、およびこれらを組合せた対策断面に対して、三分力天秤を用いた静的空気力計測試験を実施し、各対策断面についての抗力、揚力および空力モーメントの各空気力係数の評価を行った。

2) 2自由度バネ支持試験

上記の三分力試験の結果、良好な空力モーメント特性が得られたいくつかの対策断面を対象として、2自由度バネ支持振動試験を実施し、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。

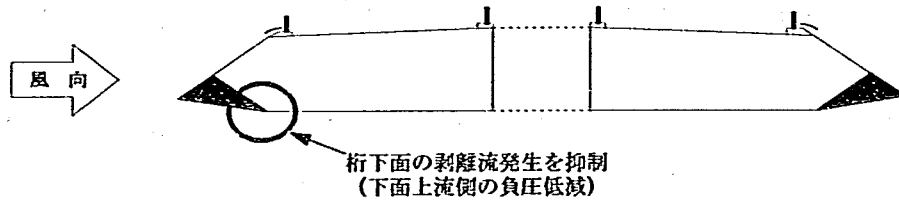
3) 動的空気力計測試験

上記の三分力試験および2自由度バネ支持試験の結果、静的な空力モーメント特性およびフラッター特性の両面から最良と考えられる対策断面に関しては、動的空気力計測試験により、動的揚力ならびに動的空力モーメントの各動的空気力係数の評価を行った。なお、動的空気力の計測においては、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および応答振動数と、曲げ・ねじれ2自由度にばね支持された模型の、同じく空力減衰、応答振動数ならびに曲げ／ねじれ振動の位相差と応答振幅比より動的空気力の評価を行う自由振動法を適用した。

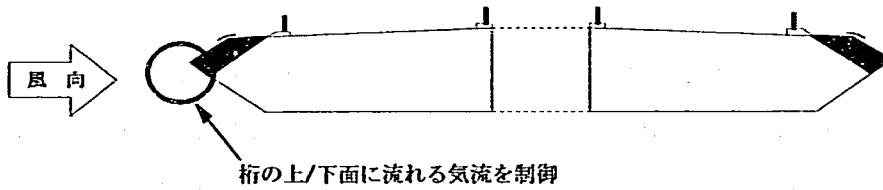


図—3.3.2.1 基本検討断面形状寸法図

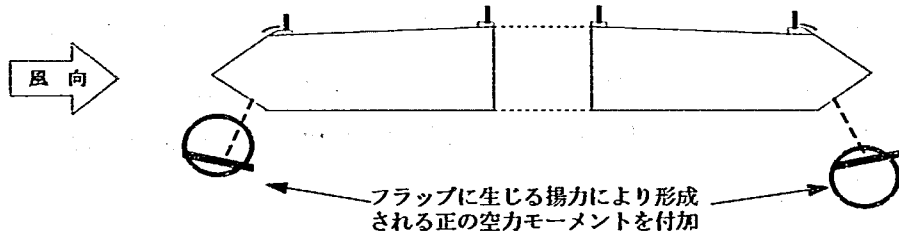
フェアリング形状変更(例1)



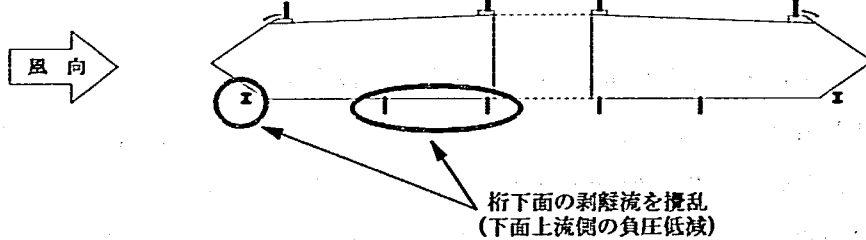
フェアリング形状変更(例2)



フラップの適用



検査車レール等の活用



図—3.3.2.2 空力モーメント特性改善のための各種対策案

(3) 各対策による空力モーメント特性の改善効果

本検討においては、断面の空力モーメント特性について、負迎角側でのモーメント係数の絶対値を小さくすることとともに、迎角 $\alpha=0^\circ$ 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標とした。また、これらの対策によりフラッター安定性が低下することを避けるため、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。

基本断面および空力対策断面に対する三分力試験により得られた各断面の三分力曲線を図-3.3.2.3に示す。なお、ここの三分力係数の無次元化においては、断面代表長として各断面の全桁幅（フェアリング先端を基準）を用いて整理した。

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B \cdot L} \quad (3.3.2.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B \cdot L} \quad (3.3.2.2)$$

$$C_M = \frac{F_M}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B^2 \cdot L} \quad (3.3.2.3)$$

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
 なお、空力モーメントの作用中心は、桁のせん断中心と重心との midpoint (断面の図心より0.29m上方; 実橋) としている。

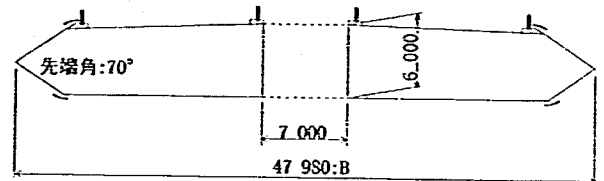
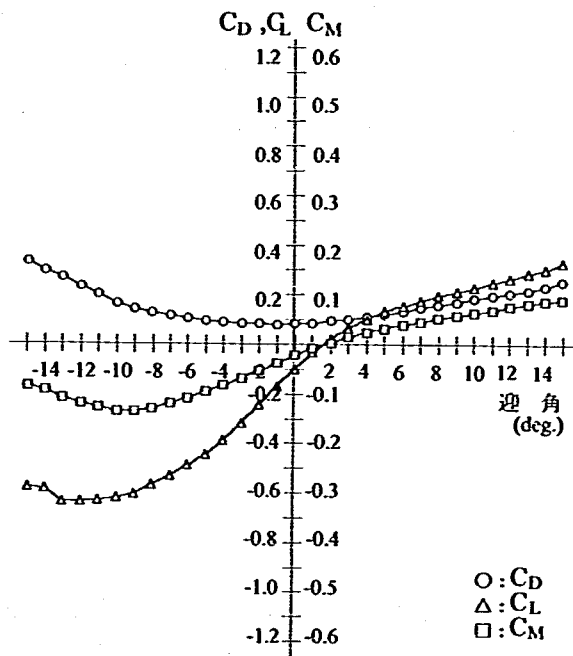


図-3.3.2.3.a 三分力曲線：基本断面

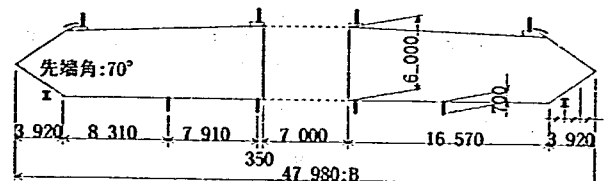
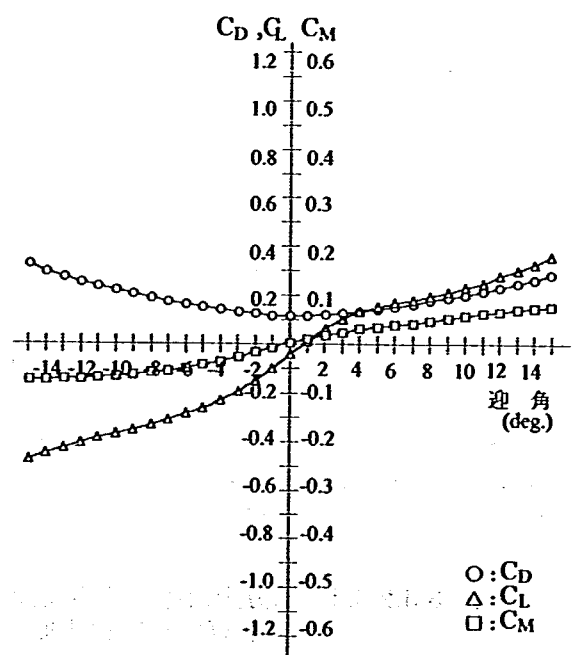
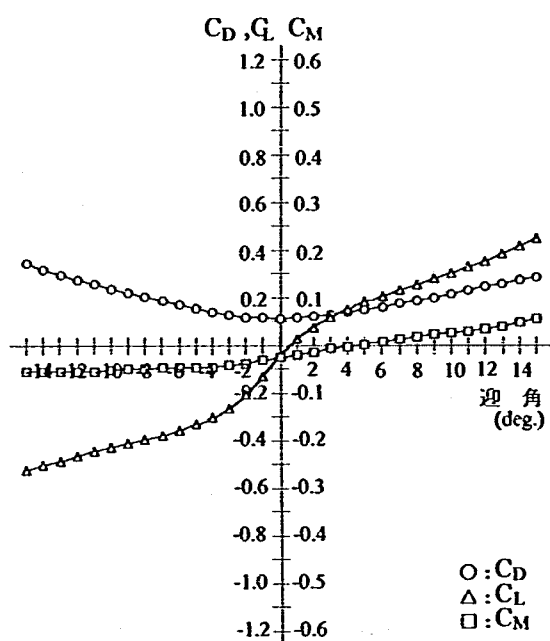


図-3.3.2.3.b 三分力曲線：改良断面-1
 (検査車 $\rightarrow$ 、下部鉛直プレート設置)

本検討で得られた、2箱桁断面の空力モーメント特性の改善対策に関する検討結果についてまとめれば以下のようなものである。

- 1) 基本断面においては、負側の高迎角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負の回転変形を増大する要因となっているものと考えられる。
- 2) 負の高迎角範囲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。(改良断面-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プレートを追加するのが有効となる。(改良断面-1)
- 4) また、改良断面-3のようなフェアリング形状の変更も、負迎角側でのモーメント特性の改善には比較的有効と考えられるが、正迎角側で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。



的有効と考えられるが、正迎角側で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。

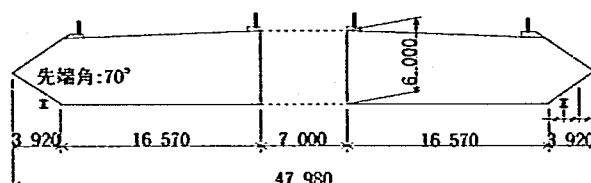


図-3.3.2.3.c 三分力曲線：改良断面-2
(検査車レール設置)

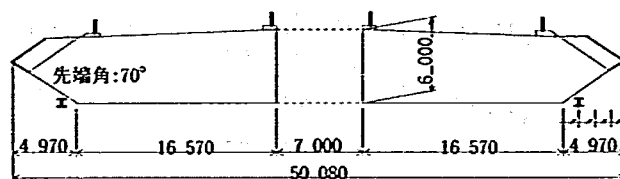
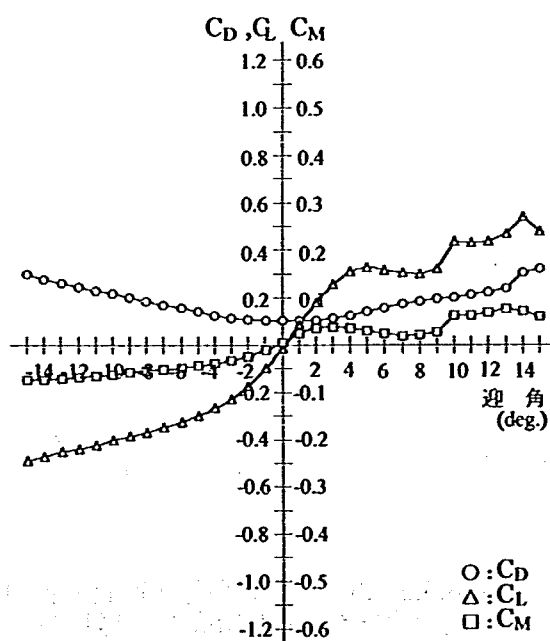


図-3.3.2.3.d 三分力曲線：改良断面-3
(フェアリング形状変更)

(4) 各対策によるフラッター特性への影響

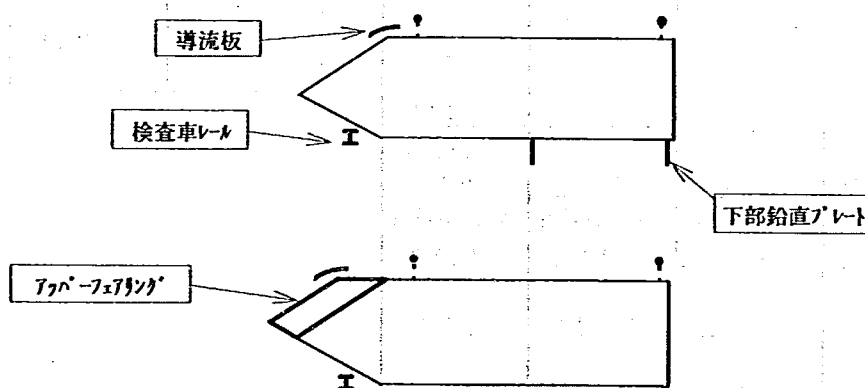
(3)項に示した、各種空力対策断面に対する三分力試験の結果、空力モーメント特性が良好であったいくつかの改良断面を対象として2自由度バネ支持試験を実施し、各対策によるフラッター特性への影響について検討を行った。バネ支持試験結果の一覧を表-3.3.2.1に、また、いくつかの断面に対して得られた風速と応答振幅との関係(V-A図)を図-3.3.2.4に示す。

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なものである。

- 1) 迎角 $\alpha=0^\circ$ 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改良断面-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、基本断面に比べて10%以上上昇することが確認された。

表-3.3.2.1 2自由度バネ試験結果一覧

断面形式	空力対策				迎角	無風時振動数(Hz)		振動数比 f_2/f_1	フラッター発現風速(m/s)	
	導流板	検査車レール	下部鉛直プレート	トップ・フック		曲げ f_1	ねじれ f_2		風洞風速	実橋換算値
基本断面	○				0°	1.015	2.223	2.190		67.3
					-3°	1.015	2.223	2.190		67.4
改良断面-1	○	○	○		5°	1.006	2.226	2.214	15.8	69.4
					3°	1.006	2.226	2.214	16.9	74.3
					0°	1.006	2.224	2.212	17.0	75.1
					-3°	1.006	2.226	2.213	17.6	77.5
					-5°	1.006	2.226	2.214	18.2	80.1
					-7°	1.006	2.226	2.214	13.9	61.0
改良断面-1-a		○	○		0°	1.006	2.225	2.213	17.5	76.9
改良断面-2		○			0°	1.007	2.229	2.214	15.2	66.8
改良断面-2-a	○	○			0°	1.006	2.228	2.215	15.8	69.6
改良断面-3		○		○	0°	1.002	2.242	2.238	14.6	63.8
					-3°	1.002	2.243	2.239	13.5	59.1
改良断面-3-a	○	○		○	0°	1.001	2.234	2.232	14.6	64.0
					-3°	1.000	2.235	2.234	12.7	55.7



2) また、この改良断面-1に関しては、特に負迎角側 $\alpha=-5^\circ$ までの範囲において、 $\alpha=0^\circ$ 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回転変位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判断される。しかしながら、この改良断面-1においても $\alpha=-7^\circ$ 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

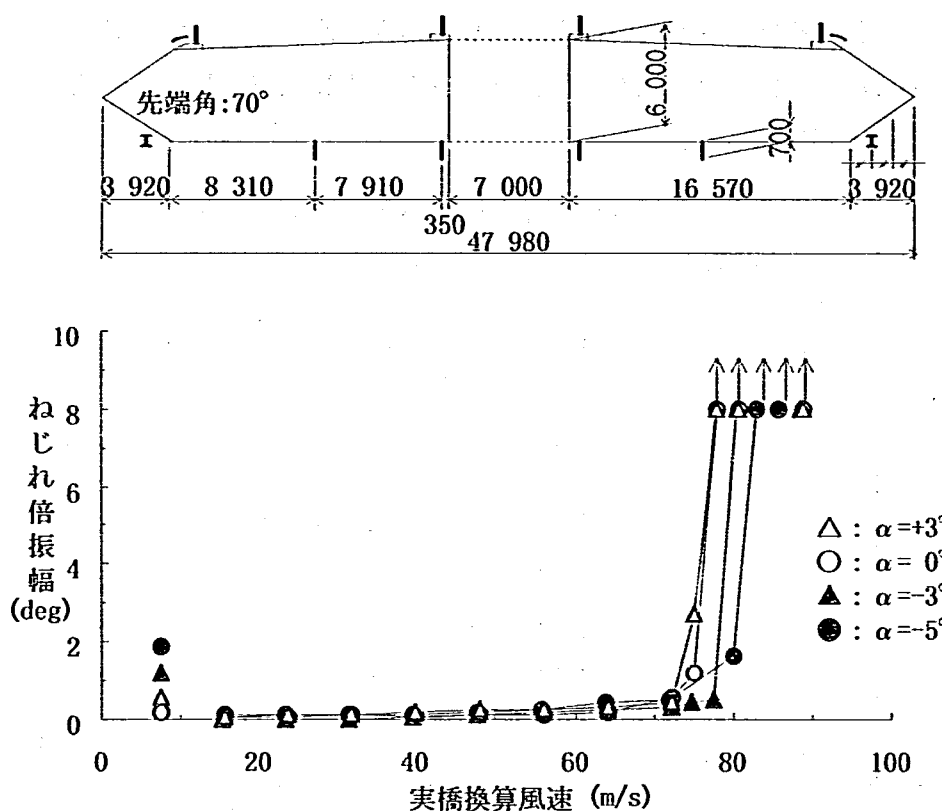


図-3.3.2.4a バネ支持試験結果 (V-A図; 改良断面-1)

《バネ支持試験条件》

		試験条件: 縮尺 1/70		
		実橋想定値	目標値	模型値
固有振動数	曲げ	Hz 0.053	Hz 0.752	Hz 1.006
	ねじれ	Hz 0.155	Hz 2.200	Hz 2.226
	振動数比	2.92	2.93	2.21
質量	等価質量	$\text{tf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 4.00	$\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 0.816	$\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 0.839
	等価極慣性	$\text{tf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 1287.6	$\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 0.0536	$\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 0.0555
減衰	曲げ	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$
	ねじれ	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$

《フラッター限界風速(V_{cf})一覧表》

α (deg.)	V_{cf} (m/s)	備 考
+5	69.4	
+3	74.3	
0	75.1	
-3	77.5	
-5	80.1	
-7	61.0	

おり、この改良断面-1を適用する場合においても、あまり大きな回転変形の発生は回避する必要があるものと考えられる。

- 3) その他の改良断面について、改良断面-2に関しては、基本断面とほぼ同等のフラッター安定性を示すことが、また、改良断面-3に関しては、基本断面に比べて、フラッター安定性は多少低下する傾向にあることが確認された。

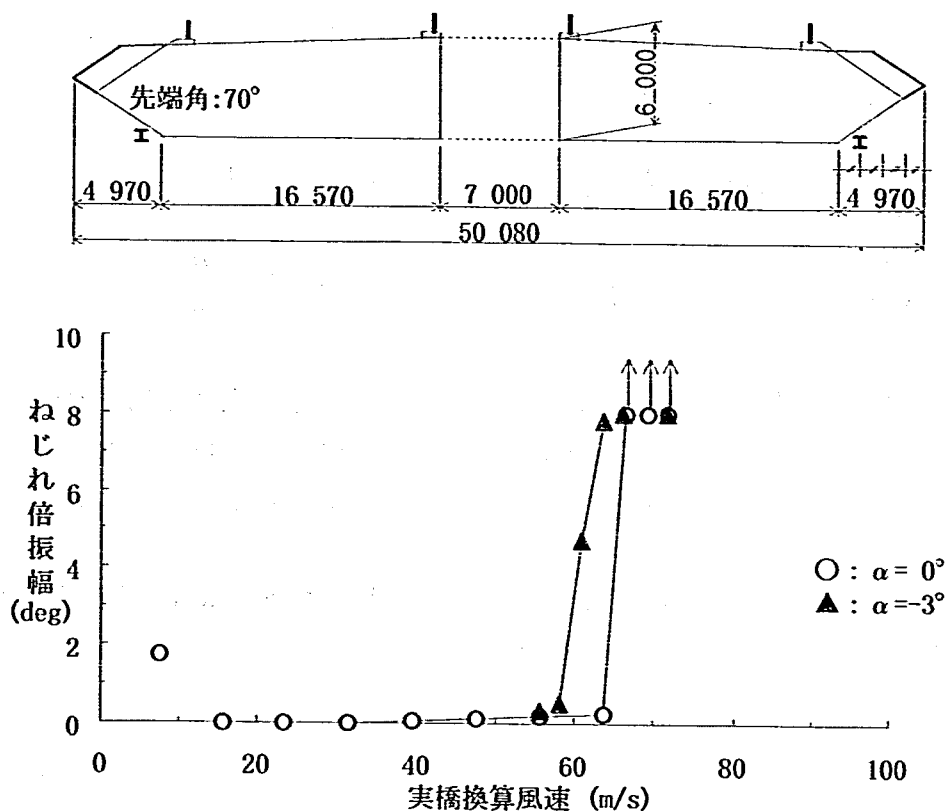


図-3.3.2.4.b バネ支持試験結果 (V-A図; 改良断面-3)

《バネ支持試験条件》

		実橋想定値	試験条件: 縮尺 1/70	
			目標値	模型値
固有振動数	曲げ	Hz 0.053	Hz 0.752	Hz 1.002
	ねじれ	Hz 0.155	Hz 2.200	Hz 2.242
	振動数比	2.92	2.93	2.24
質量	等価質量	$\text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 4.00	$\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 0.816	$\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 0.845
	等価極慣性	$\text{tf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 1287.6	$\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 0.0536	$\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 0.0547
減衰	曲げ	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$
	ねじれ	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$	$\delta=0.02$

《フラッター限界風速(Vcf)一覧表》

α (deg.)	Vcf(m/s)	備考
0	63.8	
-3	59.1	

(5) 動的空気力計測試験結果

上述した、各改良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改良断面-1を最良な対策断面と判断し、この改良断面-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気モーメントの各動的空気力係数の計測を行った。本試験で得られた改良断面-1に対する動的空気力係数を図-3.3.2.5に示す。なお、ここでの動的空気力係数は、三分力係数と同様に、断面代表長として全桁幅（フェアリング先端を基準）を用いて無次元化を行ったものであり、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。

$$L = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B}{1/(2 \cdot \pi \cdot k^2)} \cdot \left\{ C_{L\eta R} \cdot \frac{\eta}{B} + C_{L\dot{\eta}} \cdot \frac{\dot{\eta}}{B \cdot \omega} + C_{L\alpha R} \cdot \theta + C_{L\dot{\alpha}} \cdot \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\} \quad (3.3.2.4)$$

$$M = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B^2}{1/(2 \cdot \pi \cdot k^2)} \cdot \left\{ C_{M\eta R} \cdot \frac{\eta}{B} + C_{M\dot{\eta}} \cdot \frac{\dot{\eta}}{B \cdot \omega} + C_{M\alpha R} \cdot \theta + C_{M\dot{\alpha}} \cdot \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\} \quad (3.3.2.5)$$

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

B ：桁幅（ $=47.98\text{m}$ ）、 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

また、ここで得られた動的空気力係数は、3.4.3項に示す、改良2箱桁断面を適用した2箱桁/1箱桁併用吊橋の、多自由度フラッター解析による耐風安定性検討に適用した。

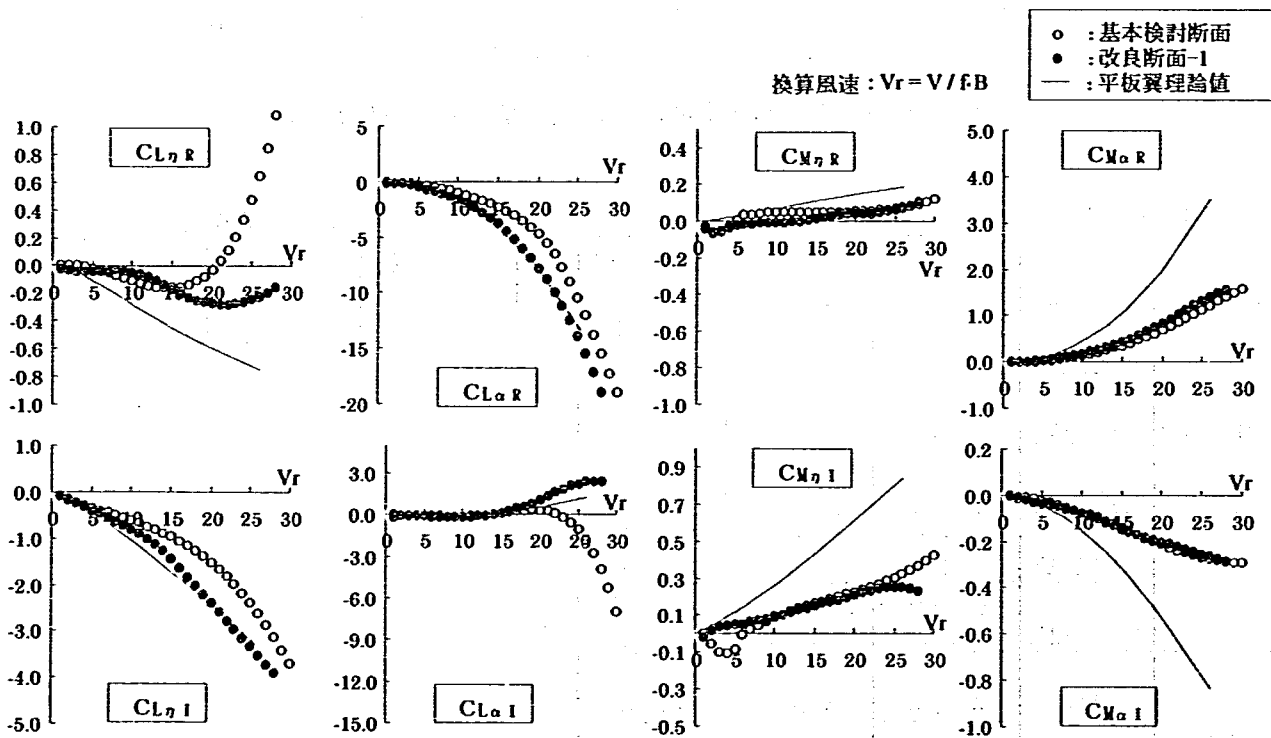


図-3.3.2.5.a 動的空気力係数（改良断面-1：迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

換算風速： $V_r = V/fB$

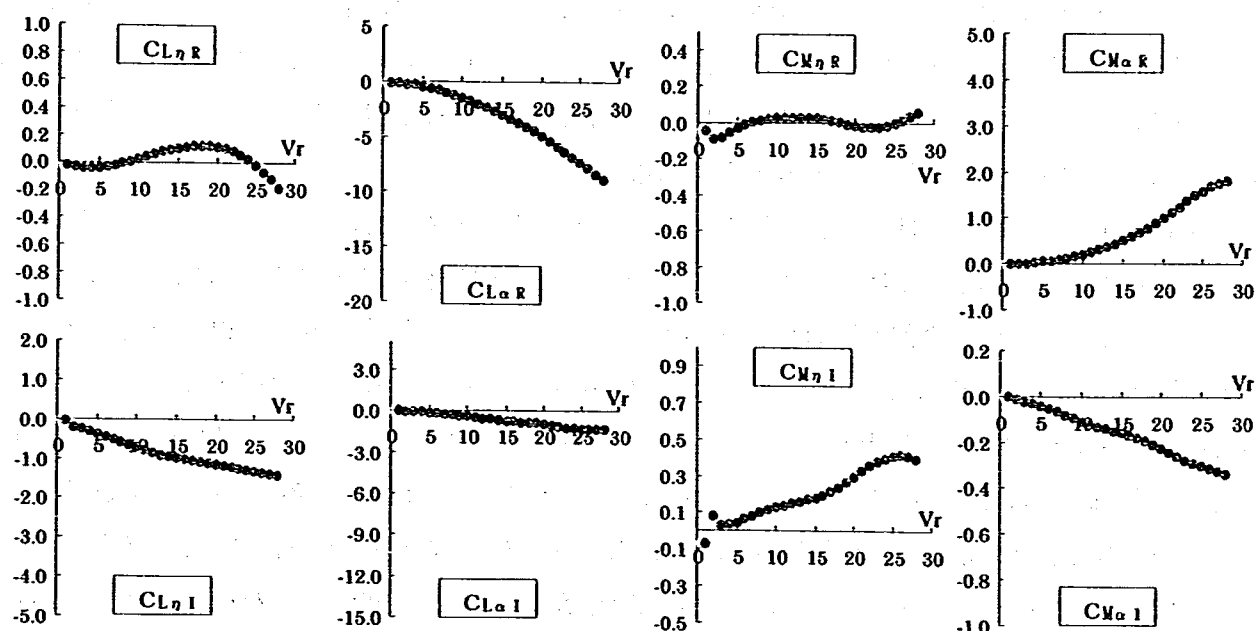


圖-3.3.2.5.b 動的空氣力係數 (改良断面-1: 迎角 $\alpha = -3^\circ$)

換算風速： $V_r = V/fB$

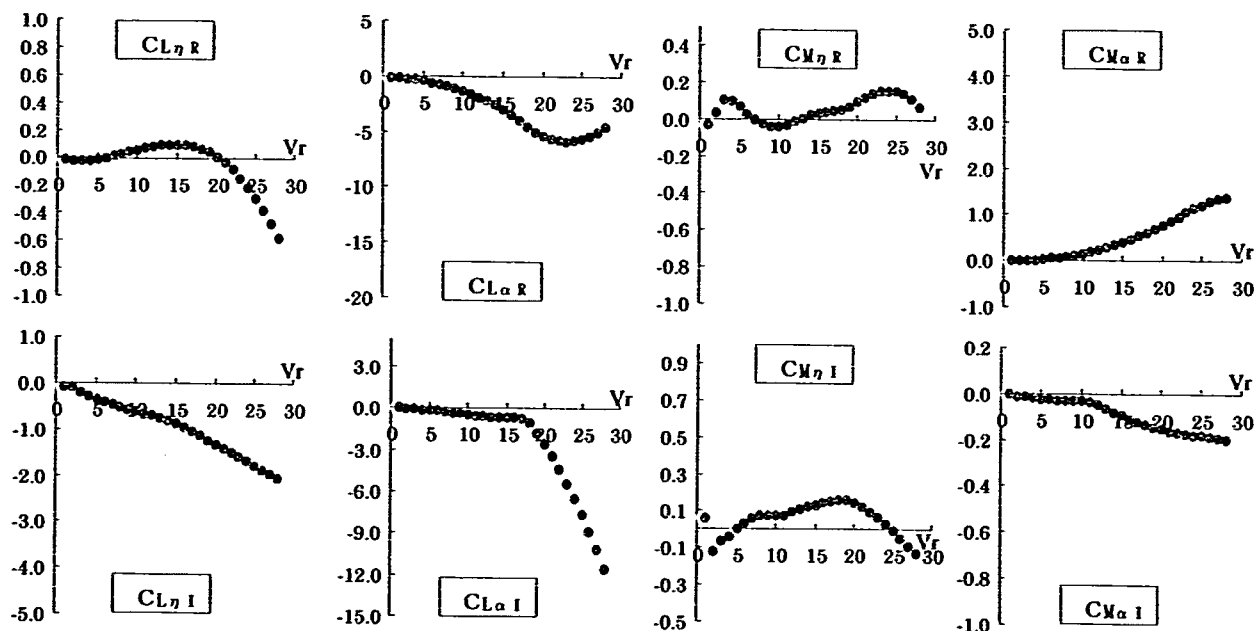


圖-3.3.2.5.c 動的空氣力係數 (改良断面-1: 迎角 $\alpha = +3^\circ$)

(6) ま と め

ここでは、平成7年度に実施した2箱桁断面の空力特性に対する検討結果を踏まえ、その静的な空力モーメント特性の改善（負迎角側における空力モーメントの低減）対策と、この対策によるフラッター特性への影響について、二次元剛体模型を用いた風洞試験による検討を実施した。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) 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切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 $\alpha=0^\circ$ 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、風荷重によって生ずる桁の静的な頭下げの回転変形については、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) 上記の2つの対策を併用した改良2箱桁断面に関しては、 $\alpha=-5^\circ \sim +5^\circ$ の広い迎角範囲で、基本断面の迎角 $\alpha=0^\circ$ におけるフラッター限界風速より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2箱桁断面の空力改善対策は、風荷重による静的な桁の回転変形の抑制と、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。

3.3.3 遮風効果を有する2箱桁形式の耐風性検討

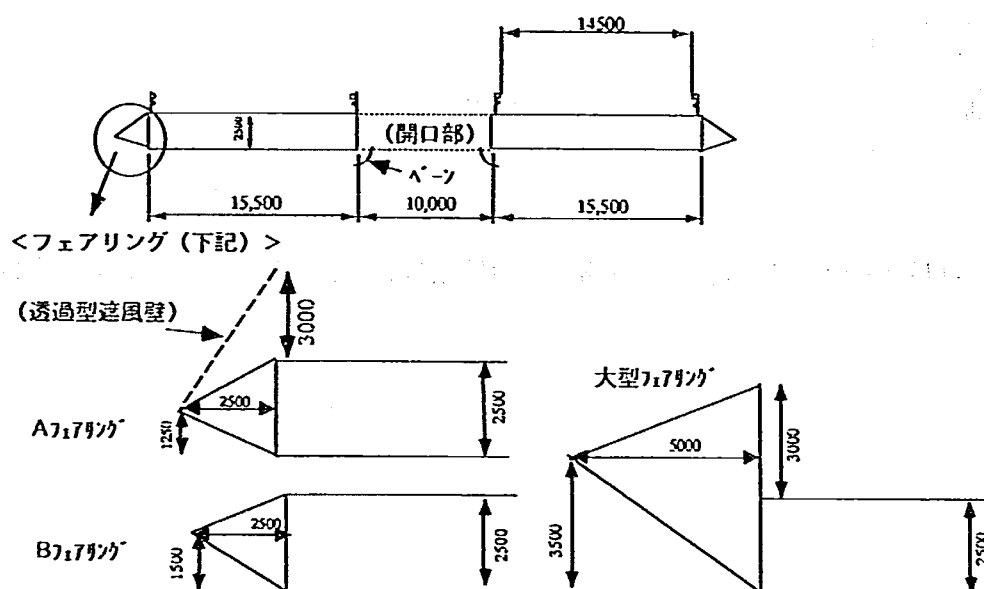
支間の長大化により、耐風安定性の確保が困難になる箱桁の耐風安定性を向上させるべく、2箱桁断面の検討を実施した。また、この中で強風時の車両走行性の改善を目的とした透過型遮風壁の検討を併せて実施した。

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。

(1) ばね支持試験結果

下図に、ばね支持試験に用いた桁の断面図を示す。本検討では、2.5m桁高の2箱桁及びこれに遮風壁（充実型、透過型）を設けた断面に対して迎角0度で検討を行った。

所要動的諸元（縮尺1/60）は標準モデルの値を目標としているが、模型の製作上、若干これを上回っているものもある。（所要値は重量40tf/m（縮尺1/65で1.575 kgf/ms²/model）、極慣性1094ts²（縮尺1/65で0.09990 kgfm s²/model）である。



図－3.3.3.1 断面図

表－3.3.3.1 ばね支持試験結果

NO.	フェアリング	透過型遮風壁	渦励振	フラッター	
1	A	なし	発生せず	86m/s	
2	B	なし	発生せず	83m/s	
3	大型	なし	5～8m/s、1度	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度	79m/s	ハーフ

ばね支持試験結果（二箱桁）

- 1) 大型フェアリングでは耐風性悪化
- 2) 透過型（充実率30%）遮風壁で耐風性良好
- 3) 下部ベーンは耐風性を悪化させた

(2) 三分力試験結果

桁高2.5m二箱桁の内、比較的耐が良好な透過型遮風壁設置断面に対して、後に実施する<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。

表－3.3.3.2 三分力試験結果概要

断面名	2箱桁（透過型遮風壁設置断面）
$CD(\alpha=0^\circ)$	0.0891
$dCL/d\alpha$	3.2766
$dCM/d\alpha$	0.4557

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

ねじれ

deg

5.00

4.50

4.00

3.50

3.00

2.50

2.00

1.50

1.00

0.50

0.00

0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0

0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0

風速-振幅図

迎角=0 deg A

試験条件	
模型名	2 BOX
寸 尺	1/60.00
迎 角	0.0deg
質 量	1.87182kg / (1/60 S / Model)
弾性係数(E)	0.13557 kg / (1/60 S / Model)
減速係数	3.477
振動数	N _g : 0.9550 N _θ : 2.7314
振動数比	2.8306
減速減速	δ _g : 0.0270 δ _θ : 0.0266

模型主要寸法	
柱 長	859.6mm
模型厚	41.7mm
模型長	1639.6mm
断面比	1.41

<フェアリング (下12)>

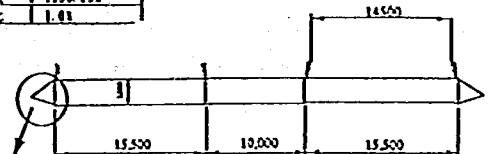
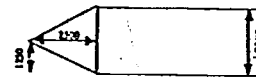


図-3.3.3.2 ばね支持試験結果

ねじれ

deg

5.00

4.50

4.00

3.50

3.00

2.50

2.00

1.50

1.00

0.50

0.00

0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0

0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0

風速-振幅図

迎角=0 deg B2

試験条件	
模型名	2 BOX
寸 尺	1/60.00
迎 角	0.0deg
質 量	1.82445kg / (1/60 S / Model)
弾性係数(E)	0.13453 kg / (1/60 S / Model)
減速係数	3.478
振動数	N _g : 0.9551 N _θ : 2.7376
振動数比	2.8470
減速減速	δ _g : 0.0310 δ _θ : 0.0211

模型主要寸法	
柱 長	859.6mm
模型厚	41.7mm
模型長	1639.6mm
断面比	1.41

<フェアリング (下12)>

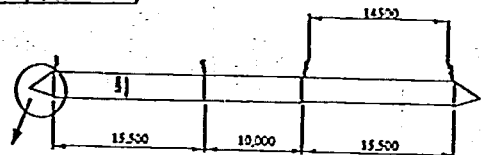
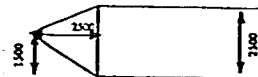


図-3.3.3.3 ばね支持試験結果

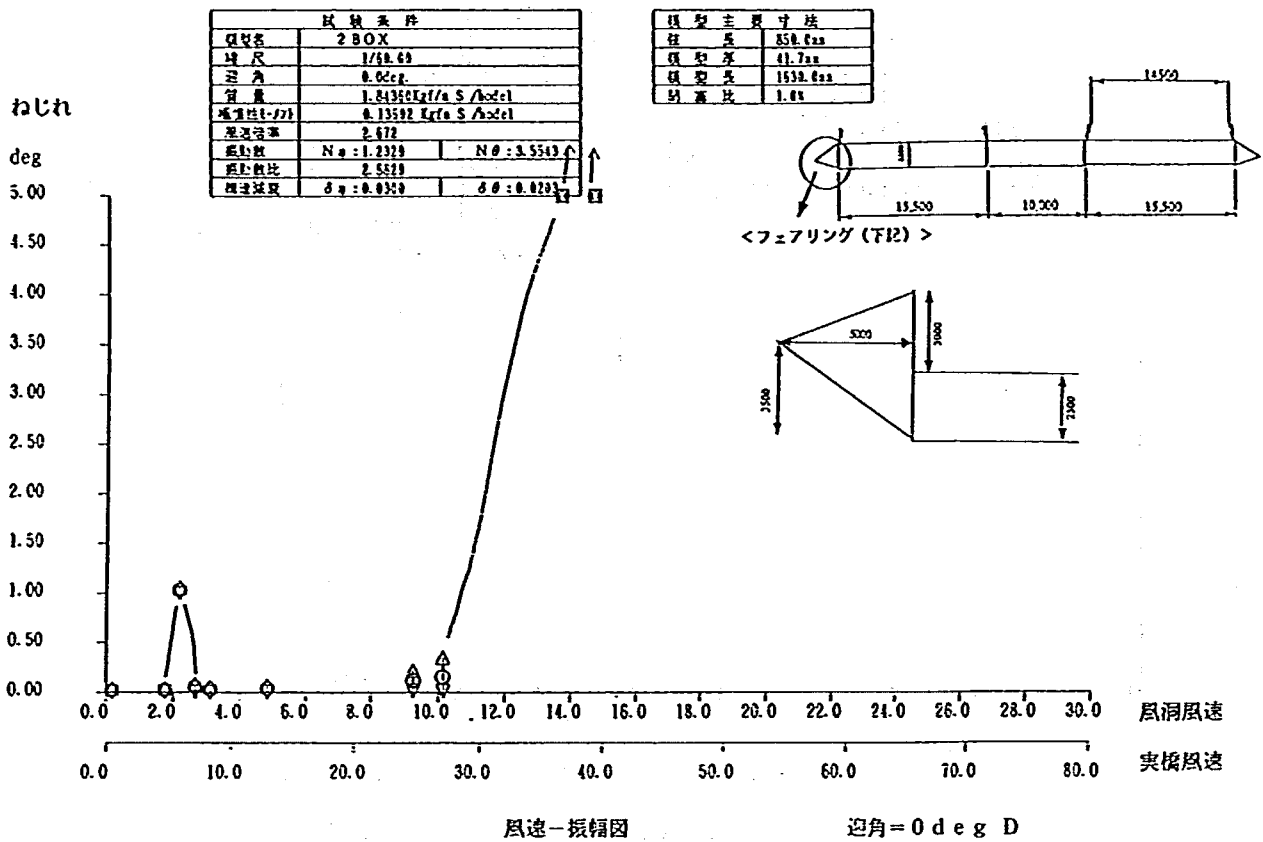


図-3.3.3.4 ばね支持試験結果

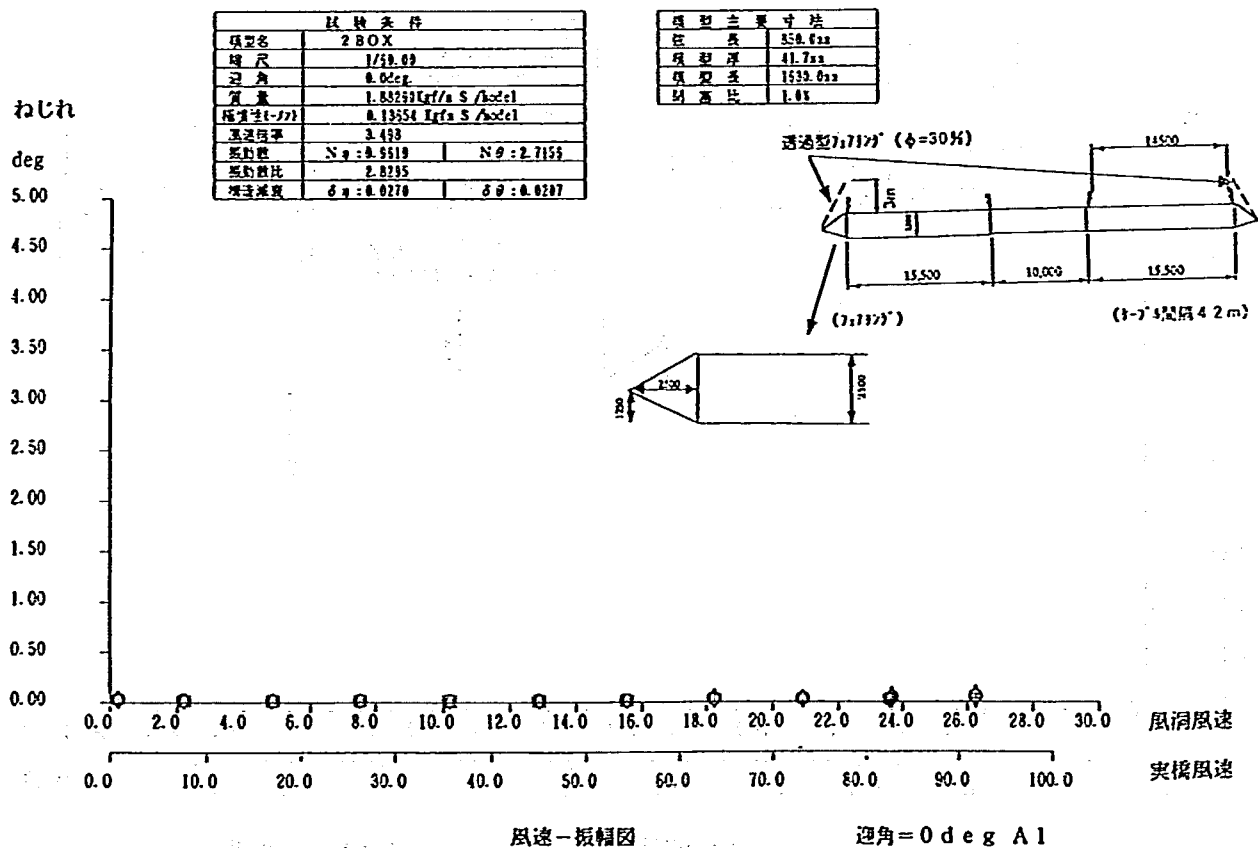


図-3.3.3.5 ばね支持試験結果

ねじれ

deg

5.00

4.50

4.00

3.50

3.00

2.50

2.00

1.50

1.00

0.50

0.00

0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0

0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0

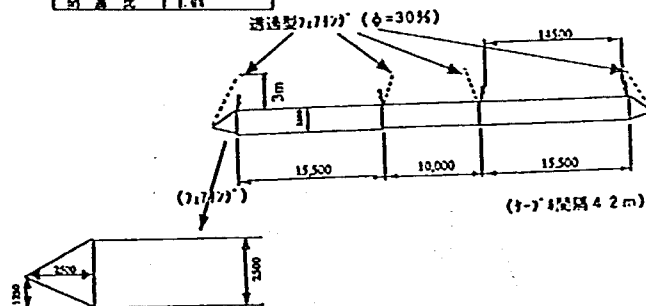
風速-振幅図

迎角=0 deg A2

図-3.3.3.6 ばね支持試験結果

試験条件	
模型名	2BOX
幅 尺	1/52.09
迎 角	0.0deg
質 量	1.83114kg/a S /model
振動数(fz)	0.13554 1/s S /model
風速係数	3.458
振動数比	Nθ:0.9524 Nθ:2.7217
増速減速	δθ:0.0232 δθ:0.0218

模型主要寸法	
位 置	852.0mm
模型厚	41.7mm
模型長	1538.0mm
引 高 比	1.01



ねじれ

deg

5.00

4.50

4.00

3.50

3.00

2.50

2.00

1.50

1.00

0.50

0.00

0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0

0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0

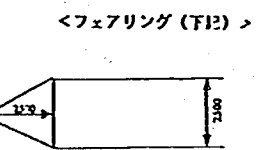
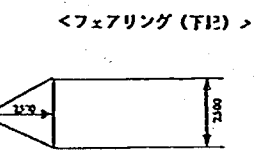
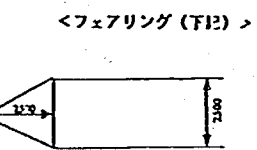
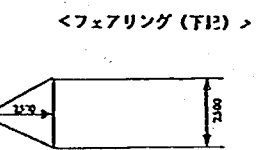
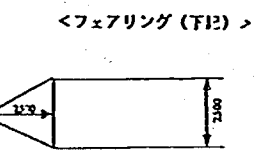
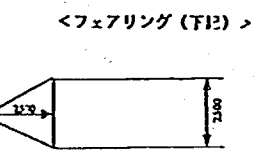
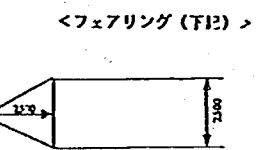
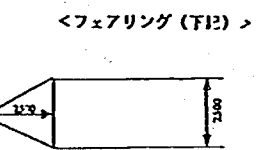
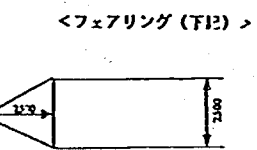
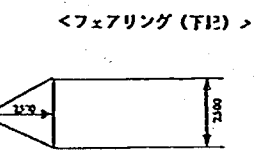
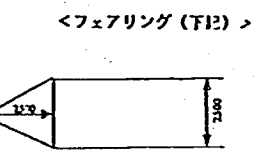
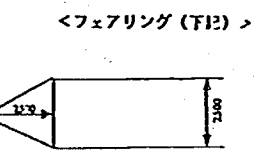
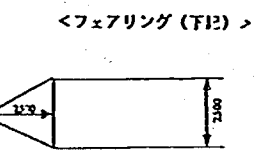
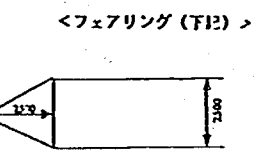
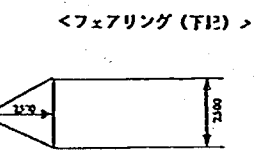
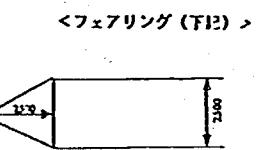
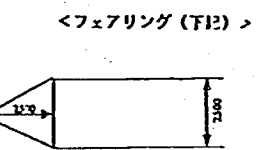
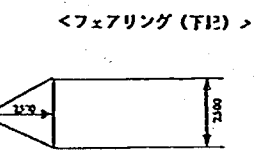
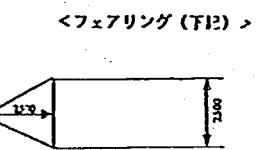
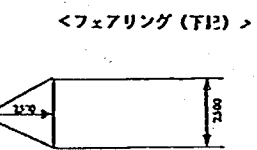
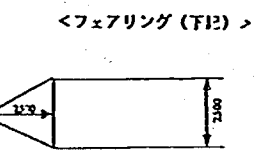
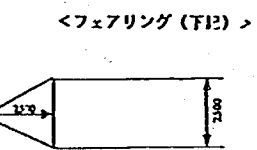
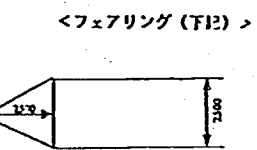
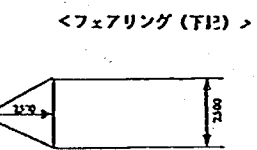
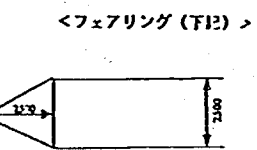
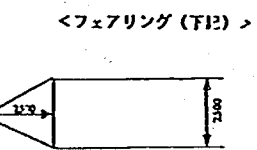
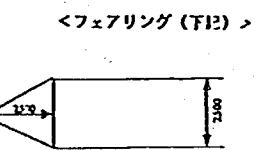
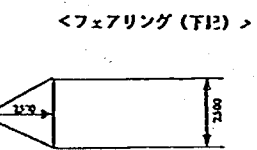
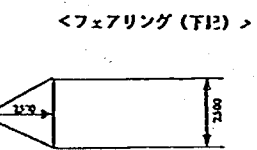
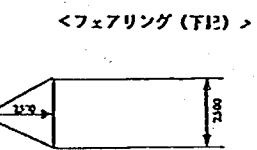
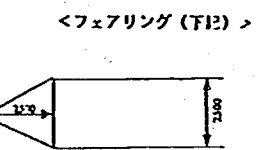
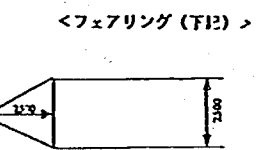
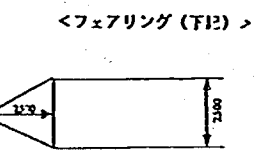
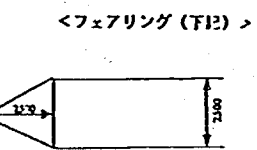
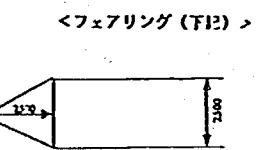
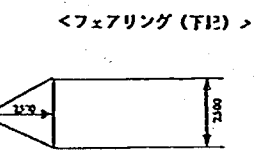
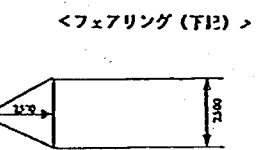
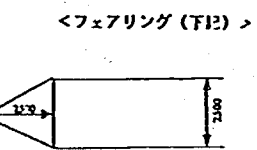
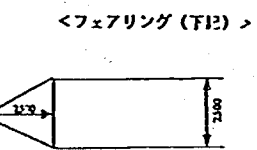
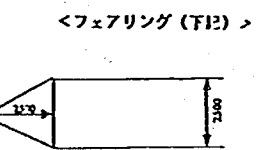
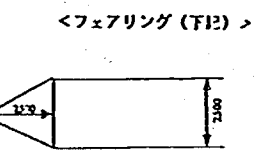
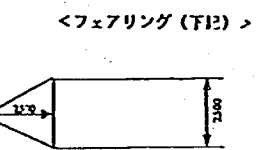
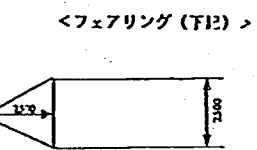
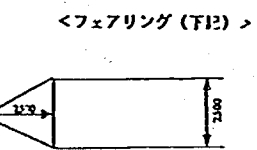
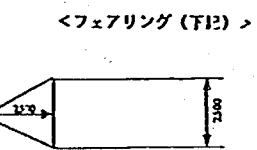
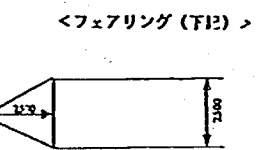
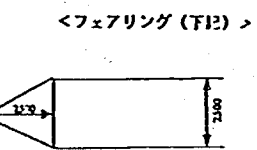
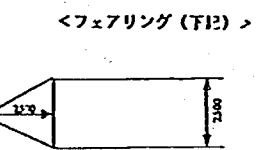
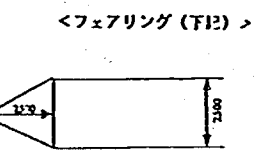
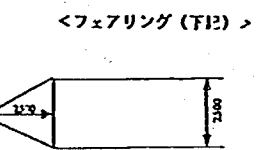
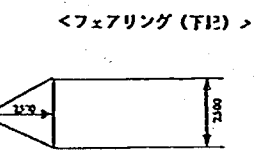
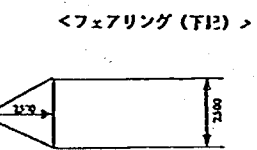
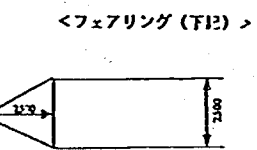
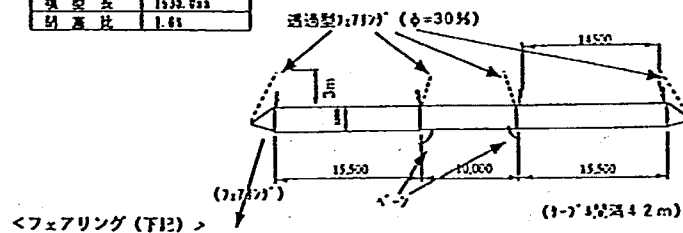
風速-振幅図

迎角=0 deg A3

図-3.3.3.7 ばね支持試験結果

試験条件	
模型名	2BOX
幅 尺	1/52.09
迎 角	0.0deg
質 量	1.83358kg/a S /model
振動数(fz)	0.13552 1/s S /model
風速係数	3.459
振動数比	Nθ:0.9518 Nθ:2.7219
増速減速	δθ:0.0314 δθ:0.0217

模型主要寸法	
位 置	852.0mm
模型厚	41.7mm
模型長	1538.0mm
引 高 比	1.01



三分力試験結果（二箱桁案：透過型遮風壁設置）

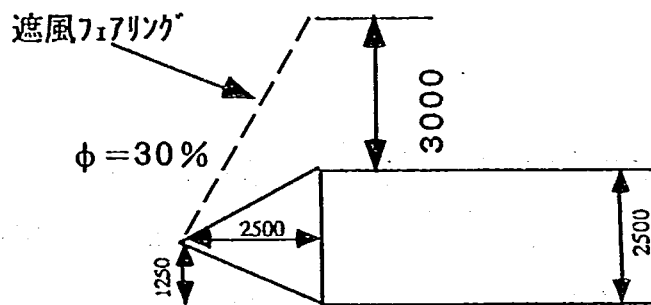
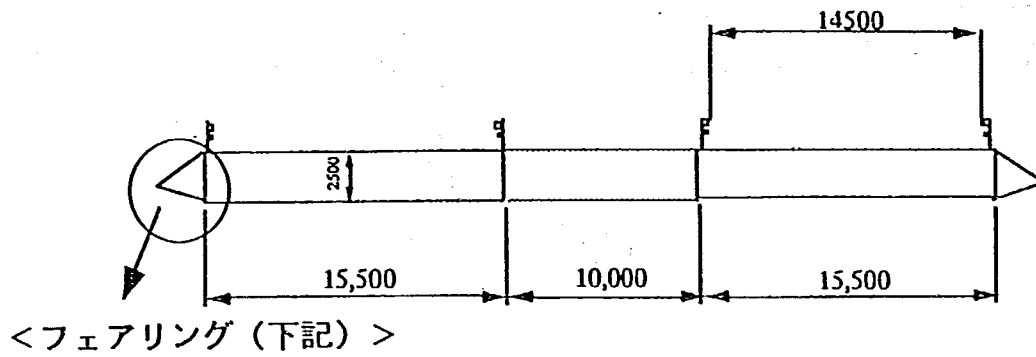


図-3.3.3.8 断面図

三分力試験結果

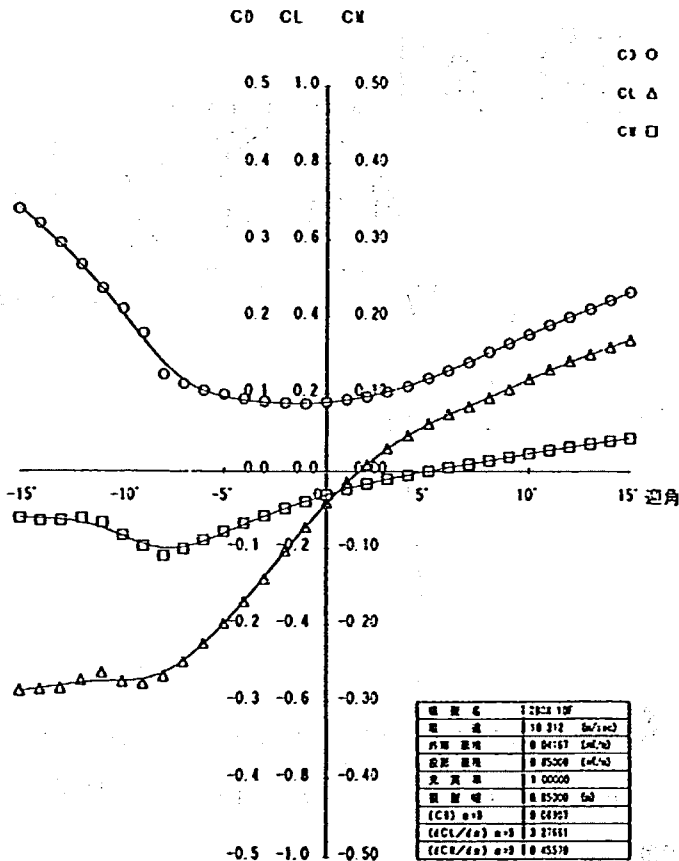


図-3.3.3.9 三分力試験結果

表-3.3.3.3 三分力試験結果

三分力試験結果			
迎角(deg)	抗力係数	揚力係数	弯力係数
-15.0	0.3413	-0.5707	-0.0606
-14.0	0.3223	-0.5676	-0.0541
-13.0	0.2968	-0.5648	-0.0639
-12.0	0.2682	-0.5440	-0.0809
-11.0	0.2372	-0.5255	-0.0654
-10.0	0.2108	-0.5485	-0.0331
-9.0	0.1793	-0.5525	-0.0972
-8.0	0.1255	-0.5334	-0.1059
-7.0	0.1131	-0.4958	-0.1011
-6.0	0.1044	-0.4450	-0.0355
-5.0	0.0524	-0.3954	-0.0782
-4.0	0.0935	-0.3399	-0.0673
-3.0	0.0905	-0.2804	-0.0578
-2.0	0.0831	-0.2072	-0.0479
-1.0	0.0872	-0.1454	-0.0355
0.0	0.0831	-0.0311	-0.0307
1.0	0.0924	-0.0282	-0.0231
2.0	0.0852	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	0.1655	0.0090
8.0	0.1543	0.1855	0.0134
9.0	0.1656	0.2118	0.0179
10.0	0.1759	0.2375	0.0225
11.0	0.1831	0.2630	0.0270
12.0	0.1928	0.2848	0.0313
13.0	0.2101	0.3028	0.0352
14.0	0.2216	0.3216	0.0332
15.0	0.2321	0.3329	0.0427

模型名=280X 10F

3.3.4 鉛直スタビライザーを活用した2箱桁形式の耐風性検討

(1) 概要

2箱桁の基本断面として、桁高3.5、5、7mについて中央部の空間幅を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ている。H7年度では、桁高5mと7mのばね支持試験結果を報告した。H8年度は、桁高3.5mについてばね支持試験を実施し、H7年度の結果と併せて総合的に耐風性良好断面として、桁高5m・空間幅5mで、上下突出高が各1.5mの鉛直スタビライザー付断面を選定した。鉛直スタビライザー付断面では10m/s以下の比較的低風速でたわみおよびねじれの渦励振が一樣流中のばね支持試験結果で発現するが、この渦励振が、空間部へのグレーチング構造の設置や格子乱流中で消滅することを確認した。

つぎに、選定断面およびその空間部を閉塞した平板翼類似断面につき三分力測定を行い、風荷重による静的ねじれ変形を立体骨組構造解析により求めた。この静的変形に対応する迎角に対して上下・回転・水平変位加振時の揚力・空力モーメント・抗力に関する非定常空気力測定を実施し、全18個のFlutter Derivativesを明らかにするとともに、フラッター解析を実施した。フラッター解析としては、まず、2次元ばね支持試験に対応する条件を与えた2次元フラッター解析を行い、そのフラッター発生風速をばね支持試験結果と比較し、ほぼ一致することを確認した。なお、マルチモード連成フラッター解析については現在実施中であるのでH9年度に報告する。

(2) ばね支持試験結果

1) 桁高3.5mに関するばね支持試験結果

桁高3.5mの断面形状は図-3.3.4.1に示すように桁高5mの下部1.5mを削除したものである。表-3.3.4.1に構造諸元を示す。

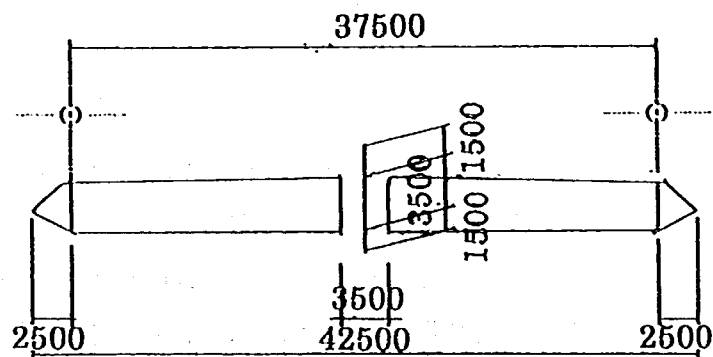
空間幅Sを3.5、5、7、9mに変化させた場合のV-A図を図-3.3.4.2に示す。

いずれも桁高5mの場合と同様、連成フラッターが発生しており、フラッター発生風速は表-3.3.4.2に示すとおりである。表中、開口部閉塞断面のフラッター発生風速 V_{rs} はSelberg式による推定値とほぼ一致していることを確認している。上下突出高が各1.5mの鉛直スタビライザーを設置した場合、空間幅Sに拘わらず、フラッター発生風速 V_F は上昇しており、 $V_F/V_{rs} > 1$ である。とくに、 $S = 5m$ 、 $7m$ は $V_F/V_{rs} = 1.35 \sim 1.69$ である。ただし、 V_F そのものは、いずれの迎角とも桁高5m・空間幅5mの場合に比べ下回っている。

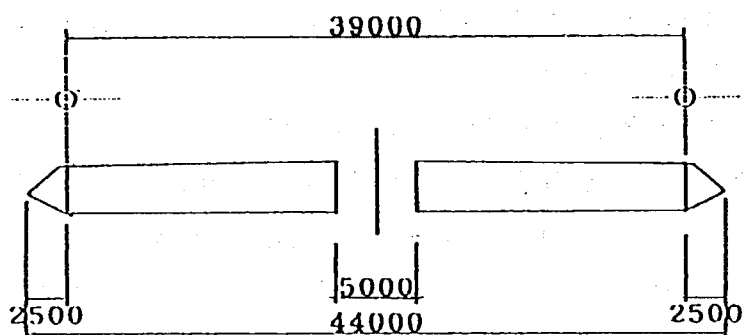
たわみおよびねじれの限定振動（渦励振と考えられる）の発生がみられるが、桁高5mの場合と同様な傾向である。

以上の結果、桁高3.5mのフラッター特性は桁高5mに比べ必ずしも良くない。

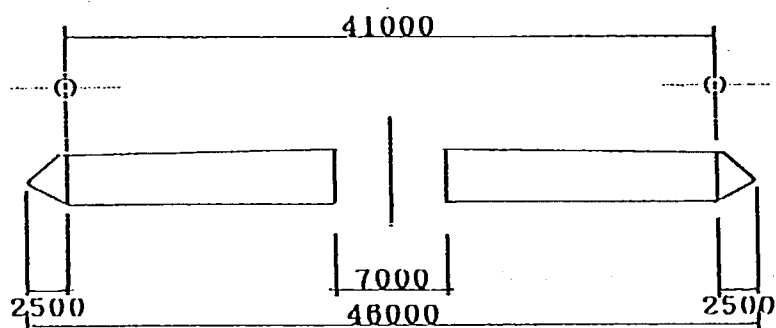
TYPE 3-1 (桁高 3.5 m、空間幅 3.5 m)



TYPE 3-2 (桁高 3.5 m、空間幅 5 m)



TYPE 3-3 (桁高 3.5 m、空間幅 7 m)



TYPE 3-4 (桁高 3.5 m、空間幅 9 m)

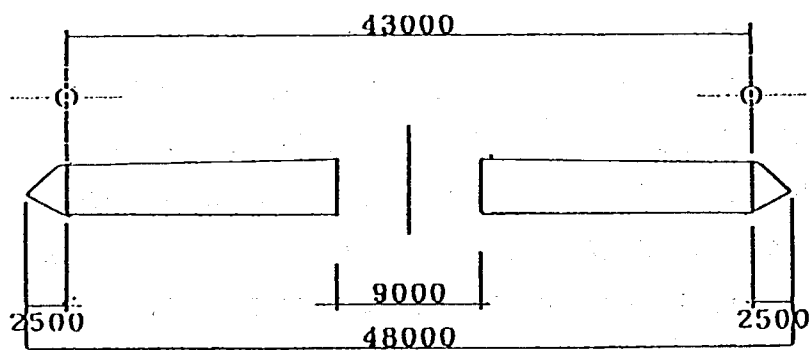


図-3.3.4.1 対象とした桁高 3.5 m の断面形状

表-3.3.4.1 構造諸元

		TYPE3-1	TYPE3-2	TYPE3-3	TYPE3-4
基本寸法 (m)	桁高	3.5	3.5	3.5	3.5
	桁間隔	3.5	5.0	7.0	9.0
	全幅	42.5	44.0	46.0	48.0
	ケーブル間隔	37.5	39.0	41.0	43.0
重量 (t/m)	吊構造	23.627	23.883	24.243	24.607
	ケーブル	12.800	12.800	12.800	12.800
	合 計	36.427	36.683	37.043	37.407
断面積 (m ²)	吊構造	1.325	1.325	1.325	1.325
	ケーブル	1.400	1.400	1.400	1.400
極慣性 モーメント (t.m ² /m)	吊構造	3058.5	3394.1	3878.0	4404.1
	ケーブル	4500.0	4867.2	5379.2	5916.8
	合 計	7558.5	8261.3	9257.2	10320.9
桁剛性	鉛直曲げ (m ⁻⁴)	3.265	3.265	3.265	3.265
	水平曲げ (m ⁻⁴)	183.458	204.732	235.417	268.751
	単純ねじれ (m ⁻⁴)	7.735	7.735	7.618	7.474
	曲げねじれ (m ⁻⁶)	303.157	358.778	441.883	530.551
振動数	たわみ f_z (Hz)	0.05238	0.05235	0.05232	0.05229
	ねじれ f_θ (Hz)	0.11979	0.11672	0.11294	0.10845
	振動数比 (f_θ / f_z)	2.28694	2.22961	2.15864	2.07401
質量回転半径	図心 (m)	1.634	1.634	1.634	1.634
	質量中心 (m)	1.066	1.073	1.083	1.093
	せん断中心 (m)	1.690	1.704	1.721	1.734
	吊構造 (m)	11.378	11.921	12.648	13.378
	合計 (m)	14.405	15.007	15.808	16.610
	換算マス (t/m)	36.7	37.0	37.3	37.7
換算極慣性モーメント (t.m ² /m)		8036.5	8970.9	9934.8	12437.0
ケーブル水平張力 (t)		101638	102353	103357	104373
フック-限界風速 VFS (m/s)		40.8	40.0	38.6	38.0

表-3.3.4.2 風洞試験条件

		TYPE3-1	TYPE3-2	TYPE3-3	TYPE3-4
重 量 (kgf/n)		5.692	5.742	5.788	5.845
質量慣性モーメント(kgf・cm・s ² /n)		1.887	2.040	2.306	2.572
振動数	たわみ f_z (Hz)	1.010	1.020	1.012	1.010
	ねじれ f_θ (Hz)	2.450	2.260	2.168	2.067
	振動数比 f_θ / f_z	2.430	2.220	2.142	2.047
構造減衰	たわみ δ_z	0.021	0.020	0.020	0.021
	ねじれ δ_θ	0.020	0.020	0.020	0.020

縮尺: 1/80、 模型長: 1.8m

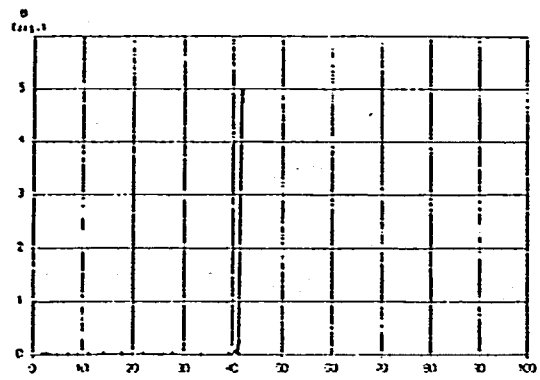
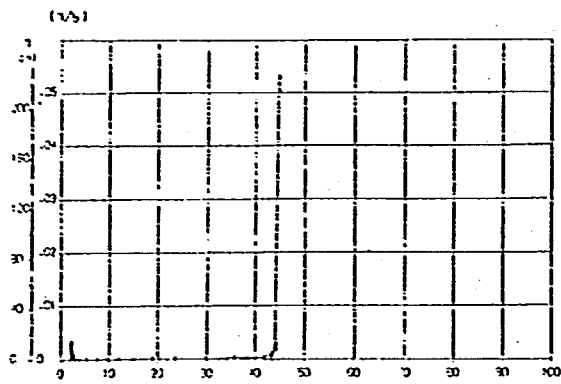
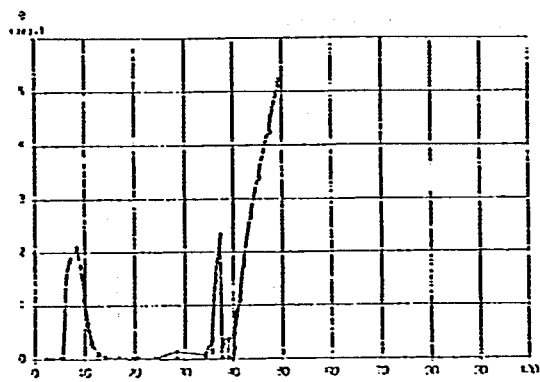
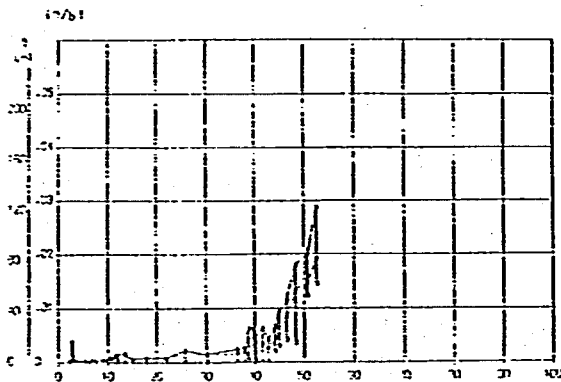
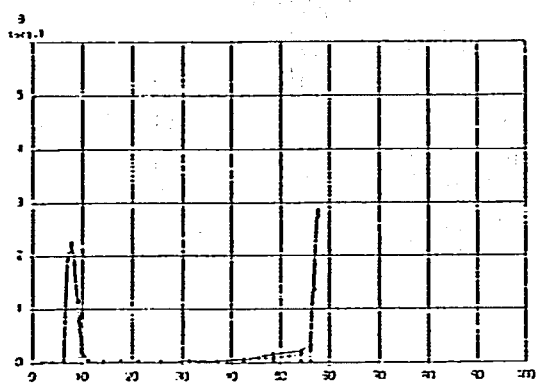
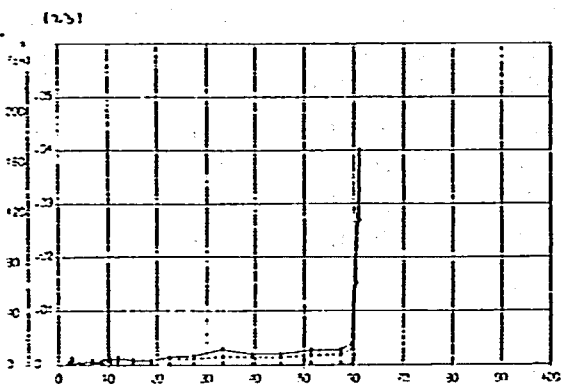


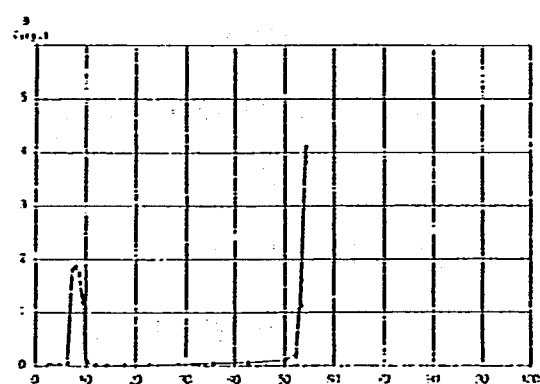
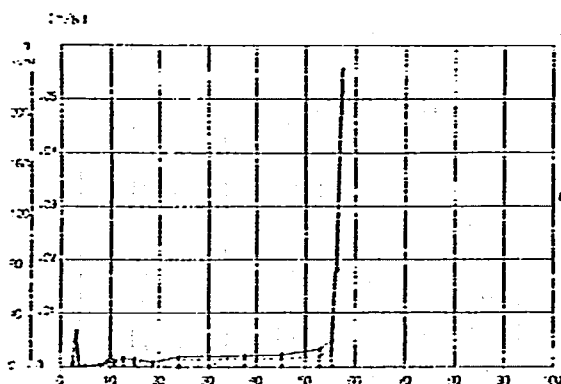
図-3.3.4.2(a) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 3.5m : 開口部閉塞、 $\alpha = 0^\circ$)



(a) $\alpha = -3^\circ$



(b) $\alpha = 0^\circ$



(c) $\alpha = +3^\circ$

図-3.3.4.2(b) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 3.5m : 鉛直スリット - $h_u = h_l = 1.5m$)

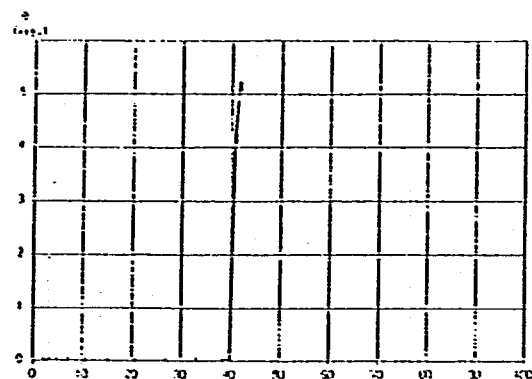
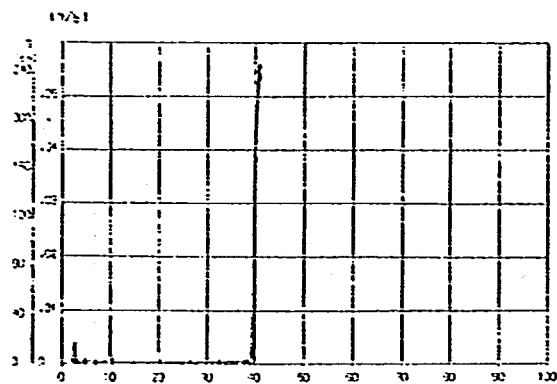
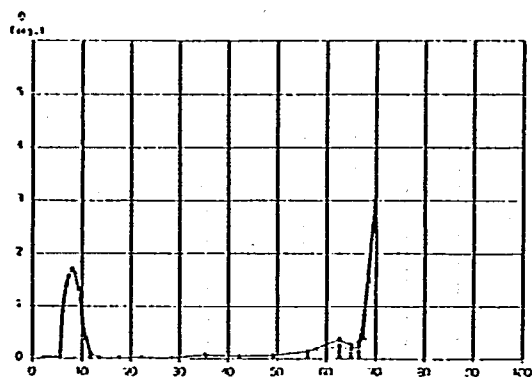
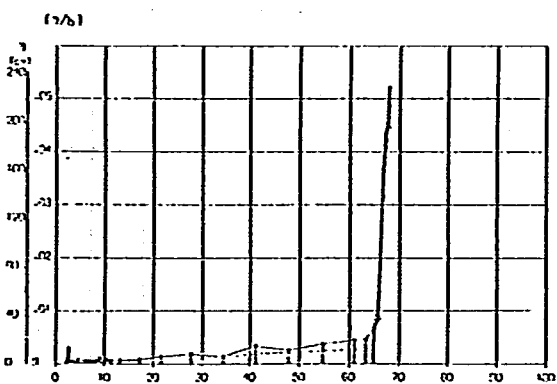
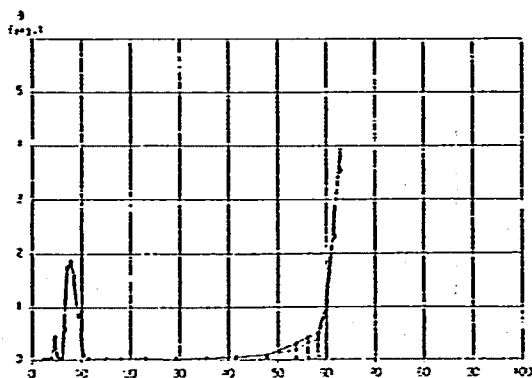
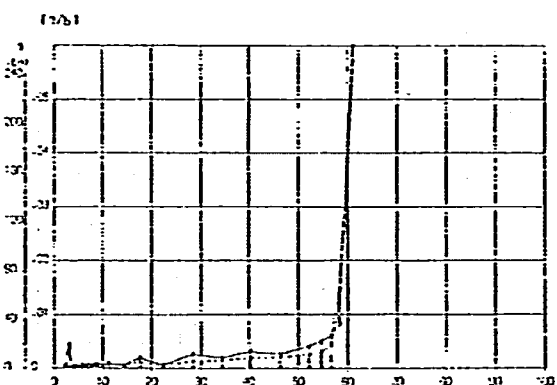


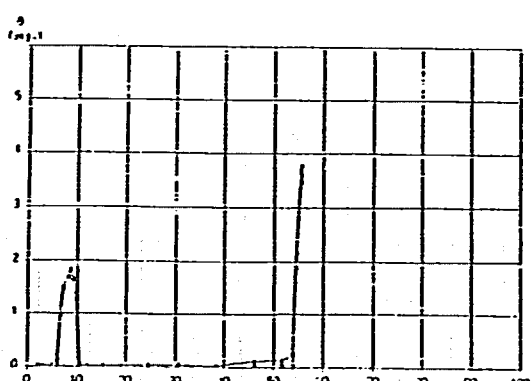
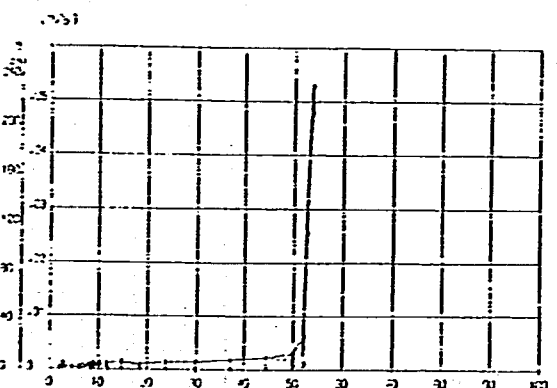
図-3.3.4.2(c) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 5m : 開口部閉塞、 $\alpha = 0^\circ$)



(a) $\alpha = -3^\circ$



(b) $\alpha = 0^\circ$



(c) $\alpha = +3^\circ$

図-3.3.4.2(d) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 5m : 鉛直方向に傾斜 - $h_u = h_l = 1.5m$)

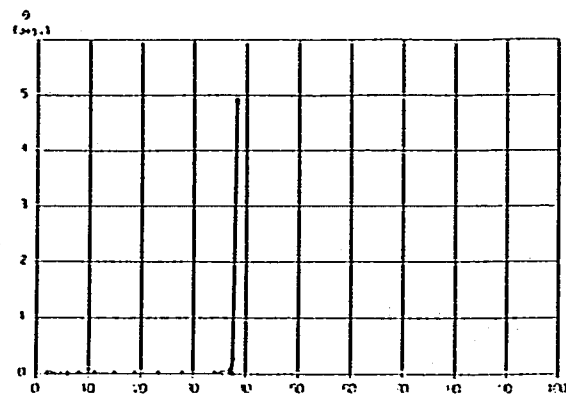
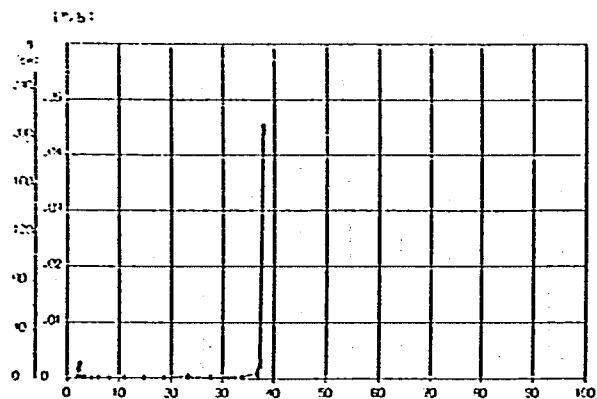
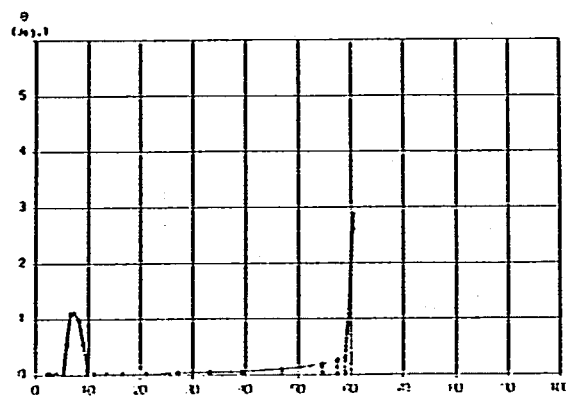
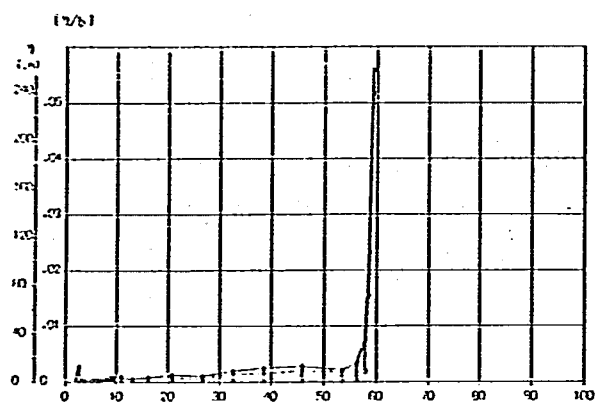
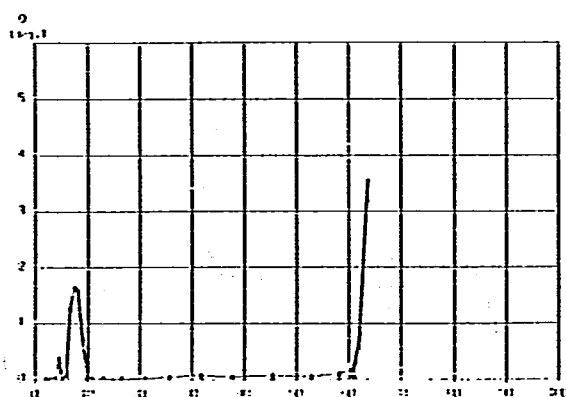
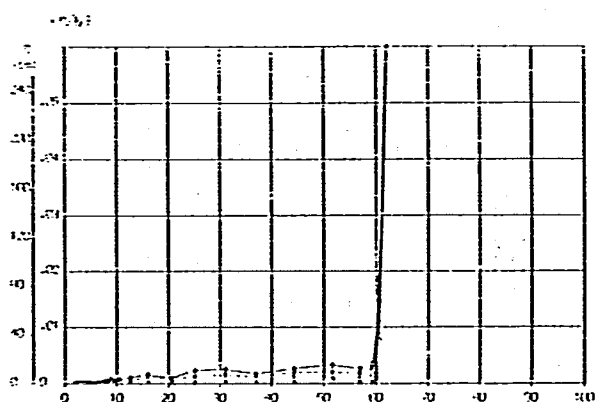


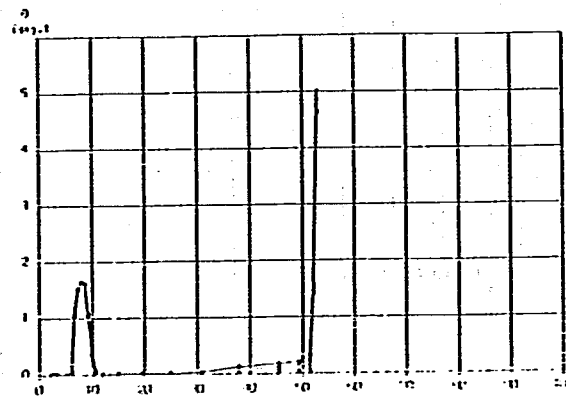
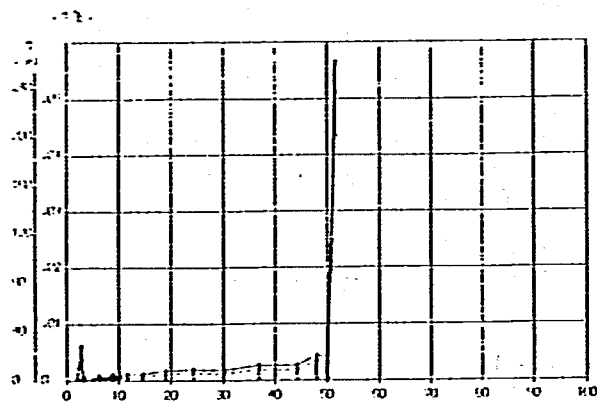
図-3.3.4.2(e) V-A図 (桁高 3.5n、空間幅 7n : 開口部閉塞、 $\alpha = 0^\circ$)



(a) $\alpha = -3^\circ$



(b) $\alpha = 0^\circ$



(c) $\alpha = +3^\circ$

図-3.3.4.2(f) V-A図 (桁高 3.5n、空間幅 7n : 鉛直スリット - $h_u = h_l = 1.5n$)

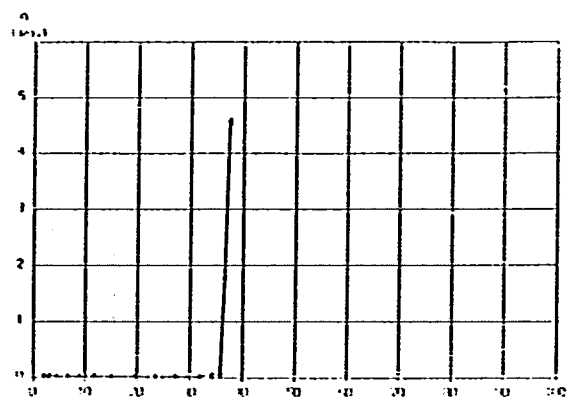
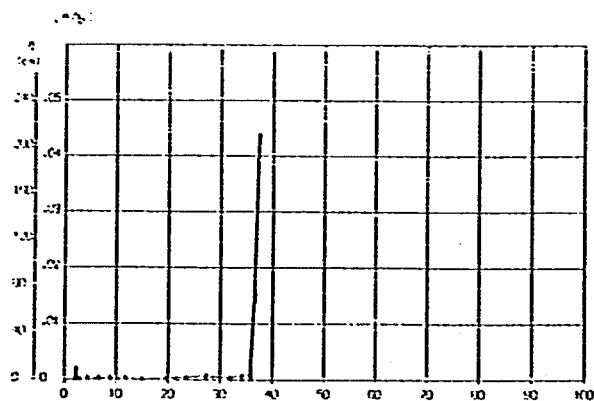
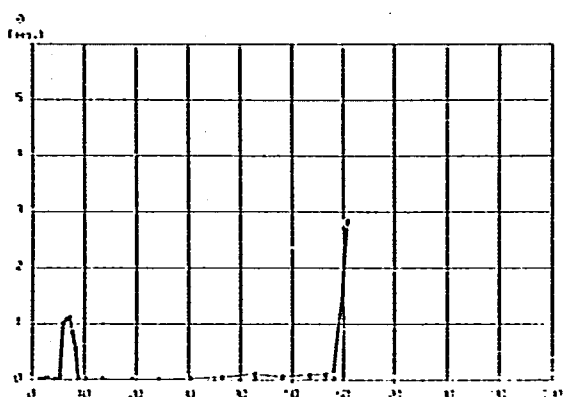
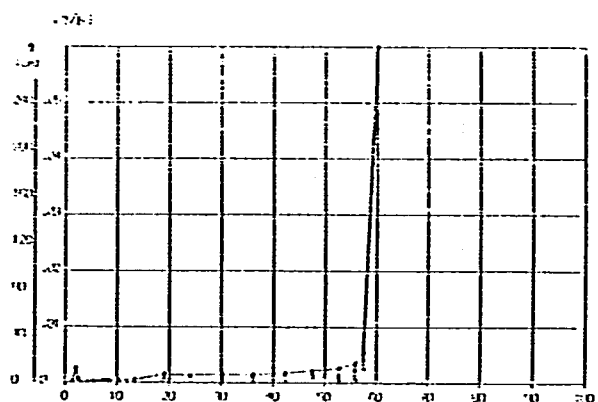
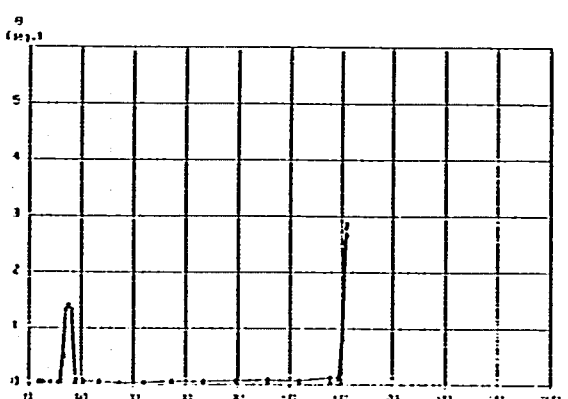
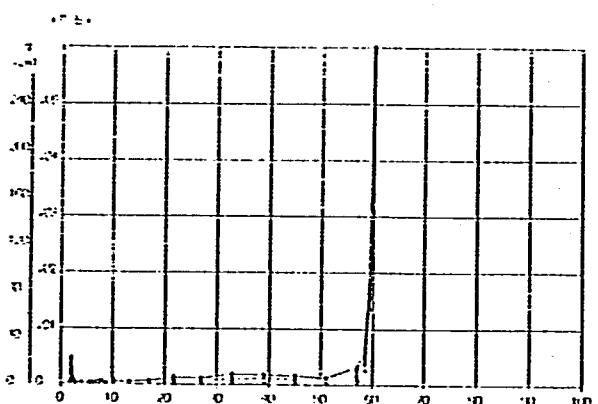


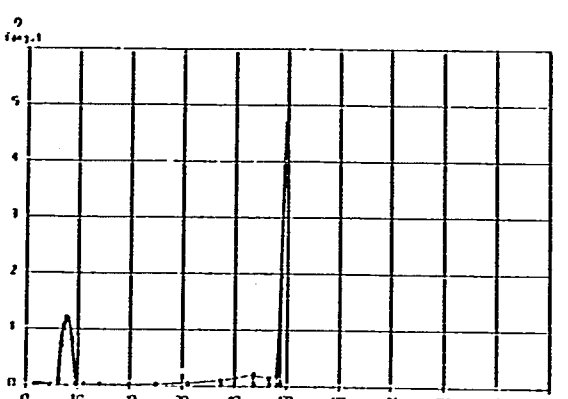
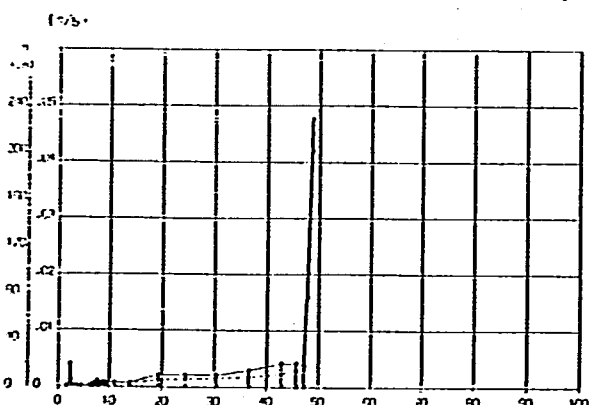
図-3.3.4.2(g) V-A図 (桁高 3.5n、空間幅 9n : 開口部閉塞、 $\alpha = 0^\circ$)



(a) $\alpha = -3^\circ$



(b) $\alpha = 0^\circ$



(c) $\alpha = +3^\circ$

図-3.3.4.2(h) V-A図 (桁高 3.5n、空間幅 9n : 鉛直スリット付 - $h_u = h_l = 1.5n$)

表-3.3.4.3 フラッター発生風速および V_F/V_{FS}

空間幅	S = 3.5 m			S = 5 m			S = 7 m			S = 9 m		
迎角	-3°	0°	+3°	-3°	0°	+3°	-3°	0°	+3°	-3°	0°	+3°
開口部閉塞 V_{FS}	40.8	41.3	42.1	/	40.0	/	/	37.6	/	/	36.2	/
鉛直スライダ有 V_F	40.7	56.3	52.9	67.5	60.0	54.0	59.3	62.0	51.8	59.0	60.0	48.6
V_F/V_{FS}	1.00	1.36	1.26	1.69	1.50	1.35	1.58	1.65	1.38	1.63	1.66	1.34

(/ : 実験せず)

2) 鉛直たわみ・ねじれの限定振動に及ぼすグレーチングの効果

平板翼類似断面である中央部閉塞断面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、ねじれの限定も発生する傾向がある。ここでは、桁高3.5m・空間幅9mの断面において、空間部上面にグレーチング構造の路面が設置されることを考慮し、その影響を検討した。グレーチング構造は真鍮製の金網（充実率50%：40メッシュ、線径0.17mm）でモデル化している。

図-3.3.4.3にV-A図を示す。グレーチング構造の設置により、鉛直たわみおよびねじれの限定振動は消滅している。なお、表-3.3.4.3に示すようにフラッター発生風速は若干低下する。

3) 鉛直たわみ・ねじれの限定振動に及ぼす乱れの効果

桁高3.5m・空間幅9mの断面において、乱れ強さ5%と10%の格子乱流中の振動応答を調査した。

図-3.3.4.4にV-A図を示す。乱れ強さ5%の場合、鉛直たわみ限定振動は消滅するが、ねじれ振動は振幅がわずかに減少するのみであるが、乱れ強さ10%の場合、ねじれ限定振動も消滅する。表-3.3.4.4に結果をまとめている。

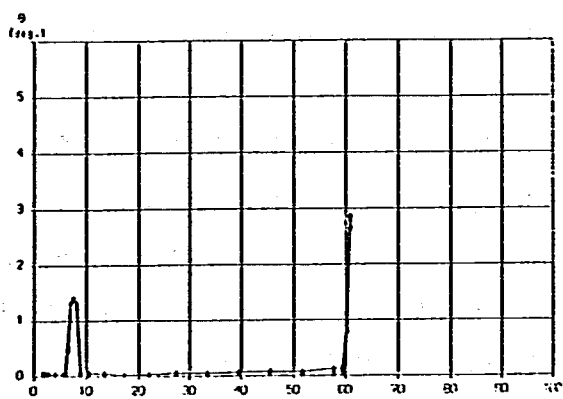
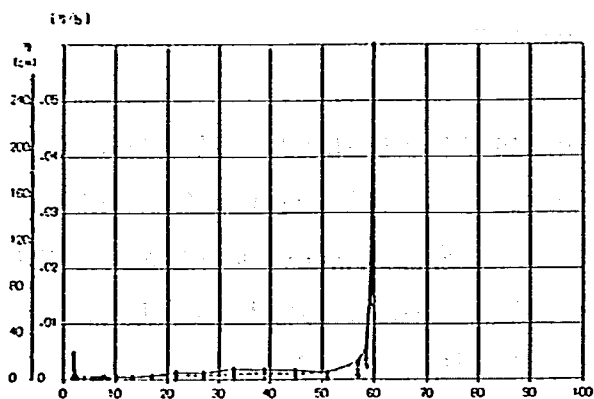
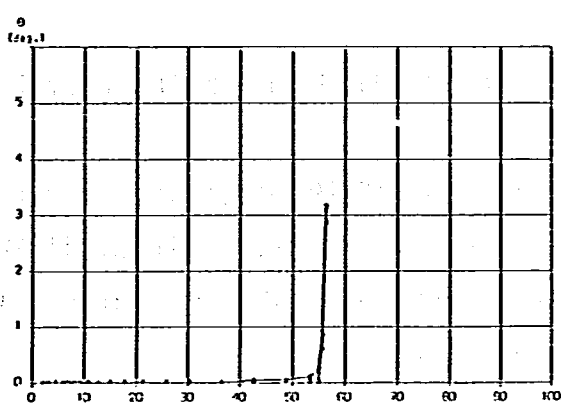
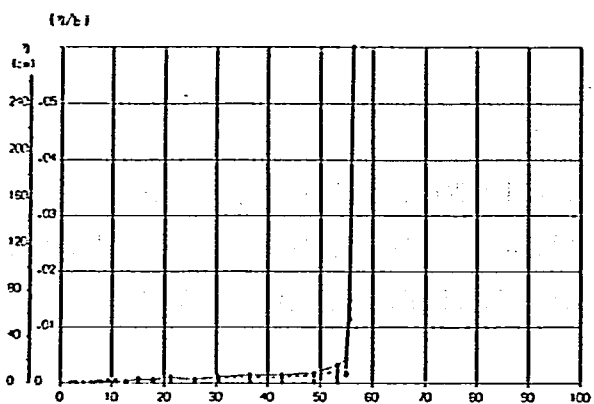
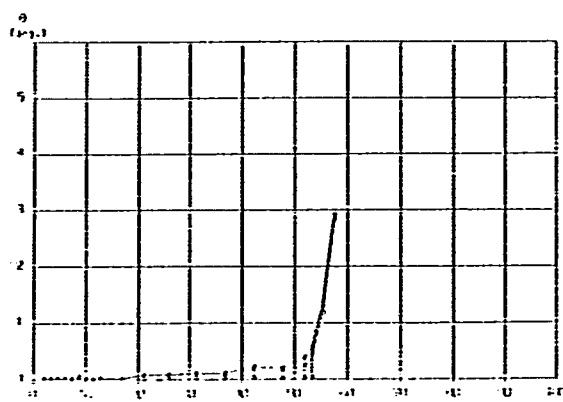
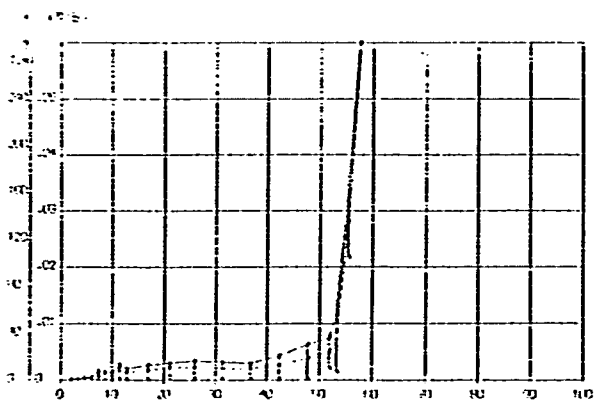


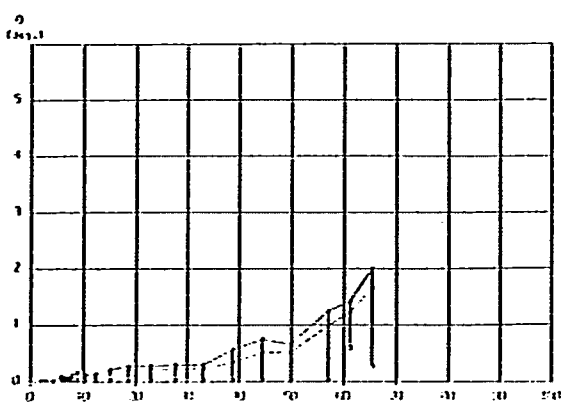
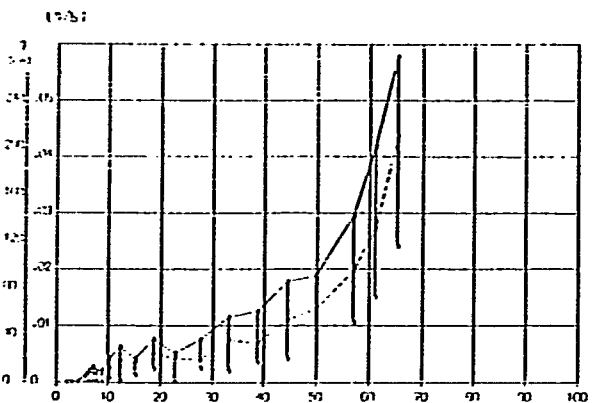
図-3.3.4.3(a) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 9m、鉛直スリット - $h_u = h_l = 1.5m$ 、 $\gamma'v-f\gamma'$ 無、 $\alpha = 0^\circ$: 一様流)



(a) 一様流

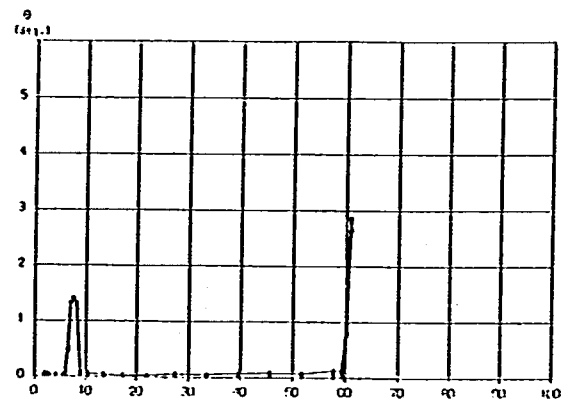
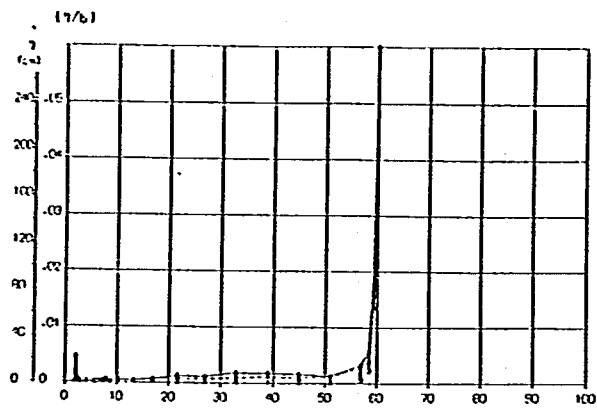


(b) 乱れ強さ 5%

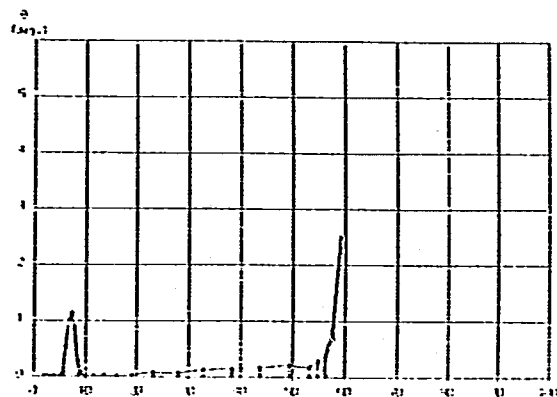
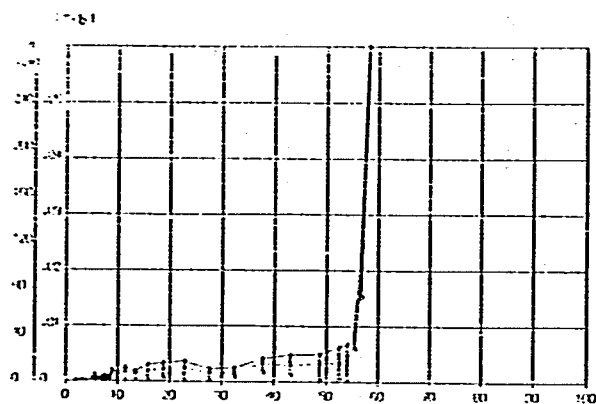


(c) 乱れ強さ 10%

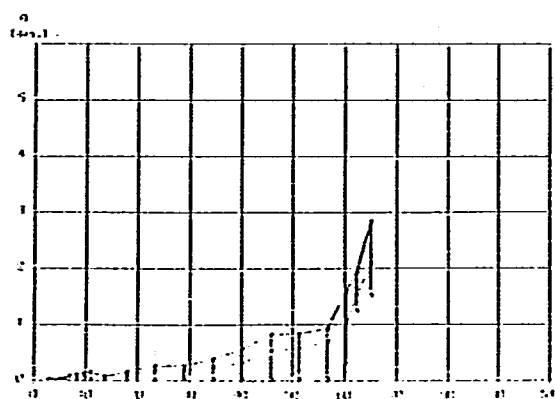
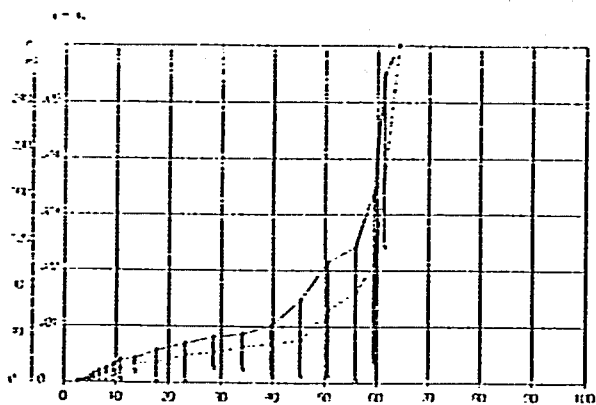
図-3.3.4.3(b) V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 9m、鉛直スリット - $h_u = h_l = 1.5m$ 、 $\gamma'v-f\gamma'$ 有、 $\alpha = 0^\circ$)



(a) 一様流



(b) 乱れ強さ 5%



(c) 乱れ強さ 10%

図-3.3.4.4 V-A図 (桁高 3.5m、空間幅 9m、鉛直スラット - $h_u = h_l = 1.5m$ 、 $\gamma_v = \gamma_l = 0$ 、 $\alpha = 0^\circ$)

表-3.3.4.4 空間部 グレーチング 構造の効果(桁高3.5m、空間幅9m、鉛直スタビライザ-有、 $\alpha = 0^\circ$)

	フラッター 発生風速 (m/s)	たわみ 渦励振 幅 (cm)	ねじれ渦励振 幅 (deg.)
グレーチング 無	60.0	23	1.4
グレーチング 有	55.5	発生せず	発生せず

表-3.3.4.5 乱れの効果(桁高3.5m、空間幅9m、鉛直スタビライザ-有)($\alpha = 0^\circ$)

グレーチング	格子乱流	フラッター 発生風速 (m/s)	たわみ渦励振 幅 (cm)	ねじれ渦励振 幅 (deg.)
空間部グレーチング 無	乱れ強さ 5%	57.5	発生せず	1.2
	乱れ強さ 10%		発生せず	発生せず
空間部グレーチング 有	乱れ強さ 5%	54.0	発生せず	発生せず
	乱れ強さ 10%		発生せず	発生せず

(3) 三分力試験結果と静的変形解析結果

桁高 5 m・空間幅 5 mの基本断面において、中央部閉塞、中央部開口、鉛直スタビライザー付の各断面について、風洞風速 7.5 m/s、15 m/sにおける三分力測定を実施した。三分力係数曲線を図-3.3.4.5に、また、三分力係数 C_D 、 C_L 、 C_M および $dC_L/d\alpha$ 、 $dC_M/d\alpha$ をまとめて表-3.3.4.5に示す。

中央部を開口すると C_D は若干増加するが、 C_L 、 C_M は減少する。また、 $dC_L/d\alpha$ および $dC_M/d\alpha$ も若干減少する。一方、鉛直スタビライザー付断面は、その存在のため受風面積が増えるため C_D は大きくなっている。 C_L および C_M は $\alpha = 0^\circ$ にてわずかに負の値を示し、 $dC_L/d\alpha$ および $dC_M/d\alpha$ は大幅に低下している。

つぎに、鉛直スタビライザー付断面について、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ の風が作用した場合の静的変形を立体骨組構造解析により求めた。

中央支間中央の桁のねじれ変形と風速の関係を図-3.3.4.6に示す。80 m/sにおけるねじれ変形は、 $\alpha = 0^\circ$ で -1.9° 、 $\alpha = -3^\circ$ で -0.6° 、 $\alpha = +3^\circ$ で $+3.3^\circ$ であり、いずれもねじれ変形量は比較的小さい。

80 m/sにおける桁全体のねじれ変形の分布は、図-3.3.4.7のとおりであり、側径間ではいずれも負のねじれ変形、中央径間では、 $\alpha = -3^\circ$ で負、 $\alpha = +3^\circ$ では正のねじれ変形となっている。

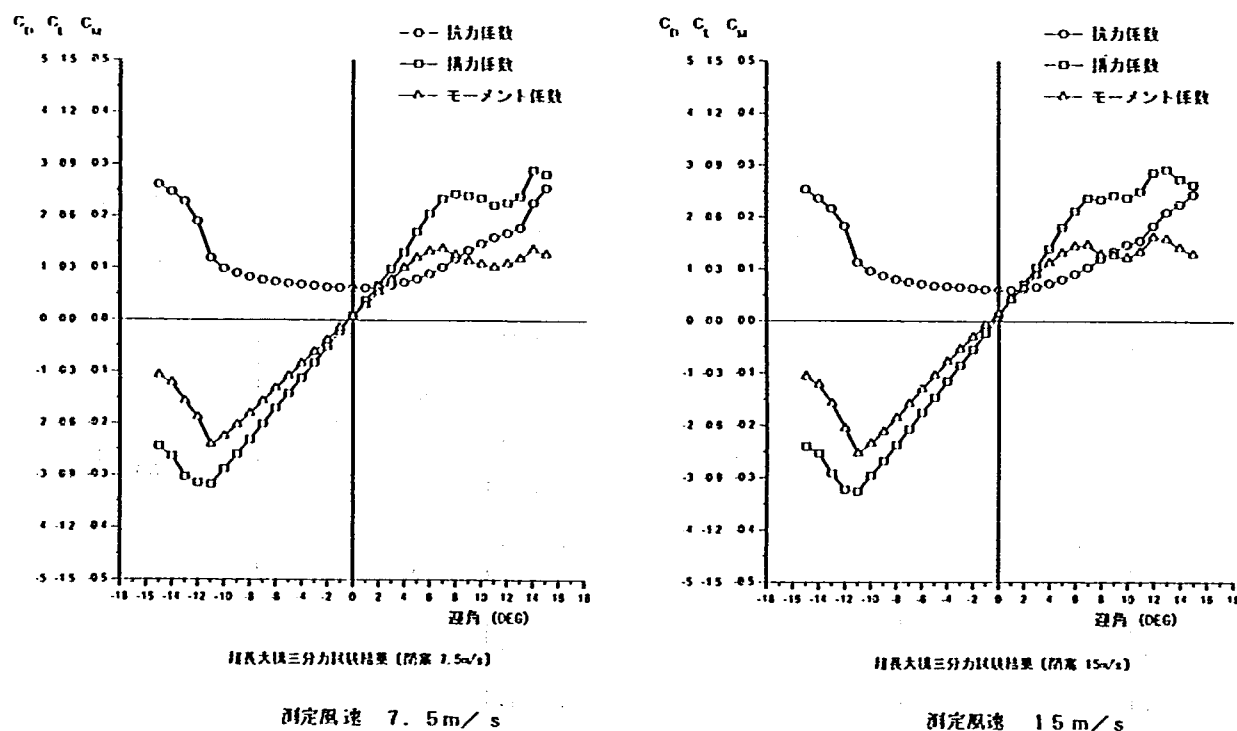


図-3.3.4.5(a) 三分力係数曲線 (桁高 5 m、空間幅 5 m : 開口部閉塞)

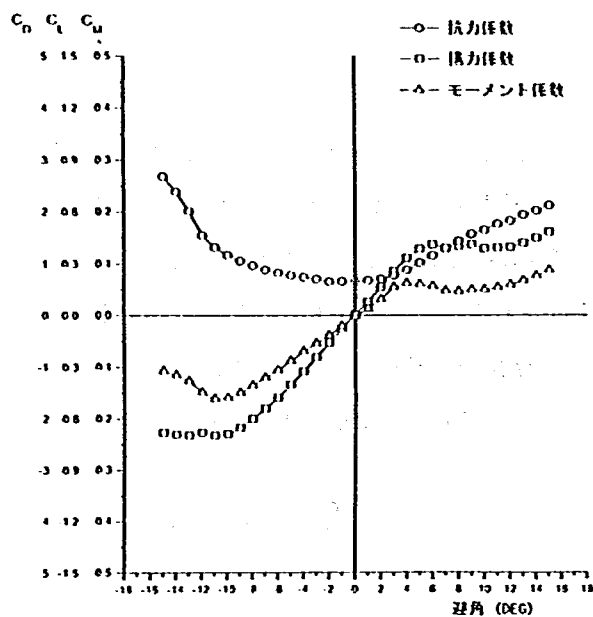


図3.3.4.5(b) 三分力係数曲線 (開口 7.5m/s)

測定風速 7.5 m/s

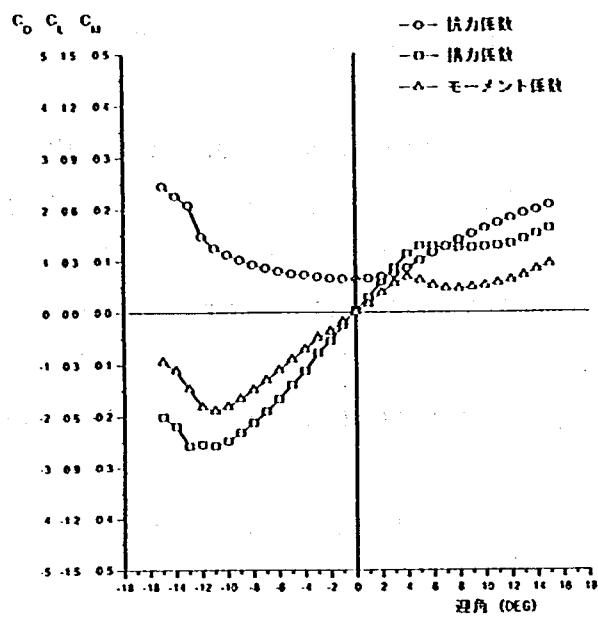


図3.3.4.5(b) 三分力係数曲線 (開口 15m/s)

測定風速 15 m/s

図-3.3.4.5(b) 三分力係数曲線 (桁高 5m、空間幅 5m : 開口)

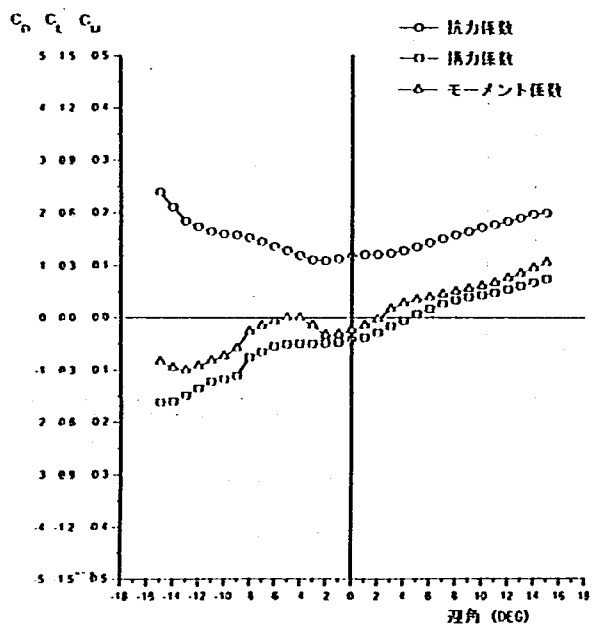


図3.3.4.5(c) 三分力係数曲線 (鉛直スタビライザー 7.5m/s)

測定風速 7.5 m/s

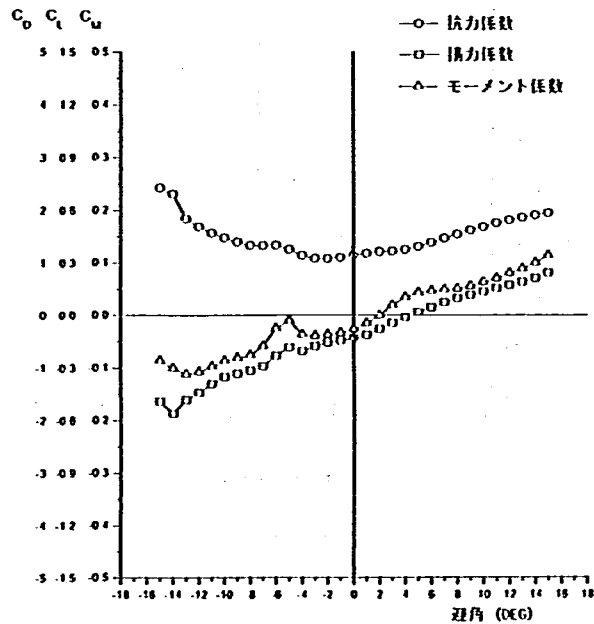


図3.3.4.5(c) 三分力係数曲線 (鉛直スタビライザー 15m/s)

測定風速 15 m/s

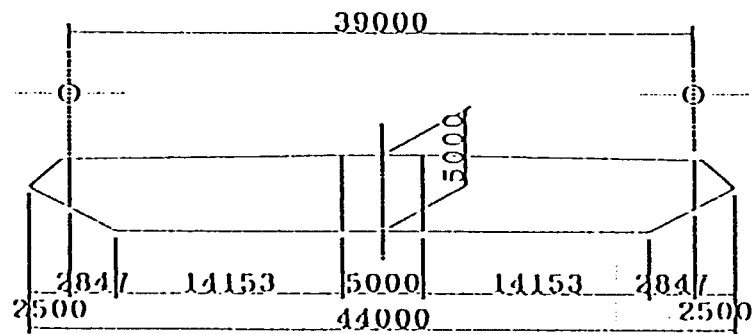
図-3.3.4.5(c) 三分力係数曲線 (桁高 5m、空間幅 5m : 鉛直スタビライザー $h_u = h_l = 1.5m$)

表-3.3.4.6 三分力係数

断 面	測定風速(m/s)	C_D	C_L	C_M	$dC_L/d\alpha$	$dC_M/d\alpha$
中央空間部 閉塞	7.61	0.613	0.025	0.007	5.06	1.27
	15.22	0.600	0.023	0.015	5.70	1.43
中央空間部 開口	7.59	0.662	0.008	-0.003	4.45	0.98
	15.20	0.637	0.011	0.000	4.63	1.00
鉛直スタビライザー	7.57	1.165	-0.131	-0.024	0.74	0.47
	15.20	1.143	-0.133	-0.027	0.92	0.52

$$C_D = D / (1/2 \rho V^2 H), C_L = L / (1/2 \rho V^2 B), C_M = M / (1/2 \rho V^2 B^2)$$

H : 桁高(=5m)、B : 桁全幅(=44m)



単位: DEG

迎角	風速 (m/s)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha = -3^\circ$	-0.0323	-0.1286	-0.2868	-0.5037	-0.7751	-1.0736	-1.0927	-0.6011	-0.7974	-1.6316
$\alpha = 0^\circ$	-0.0217	-0.0883	-0.2044	-0.3791	-0.6281	-0.9781	-1.4143	-1.9458	-2.5840	-3.2842
$\alpha = +3^\circ$	0.0189	0.0799	0.1990	0.4147	0.8280	1.4630	2.3130	3.3335	4.6188	6.8825

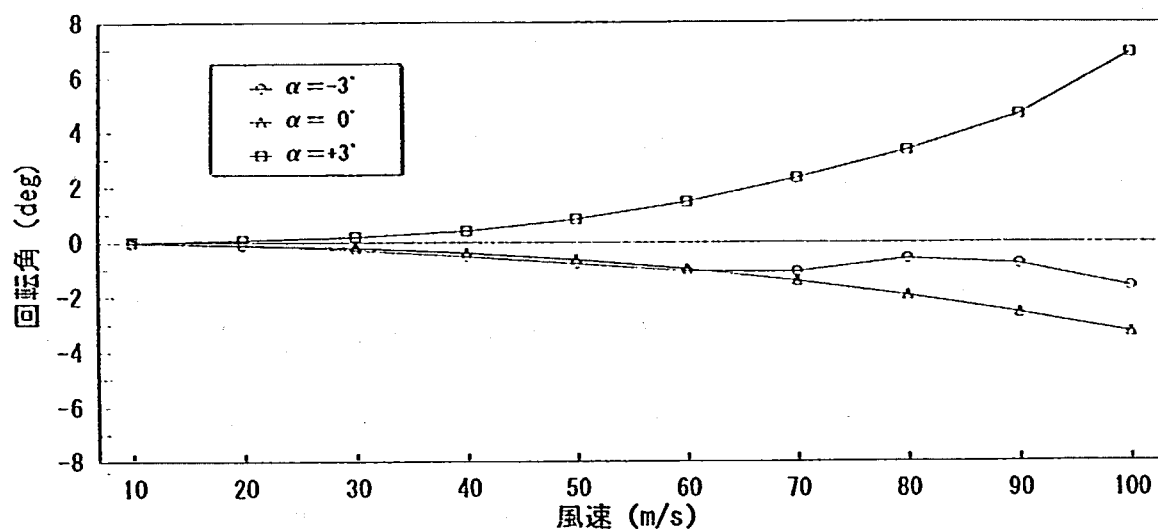


図-3.3.4.6 中央支間中央のねじれ変形

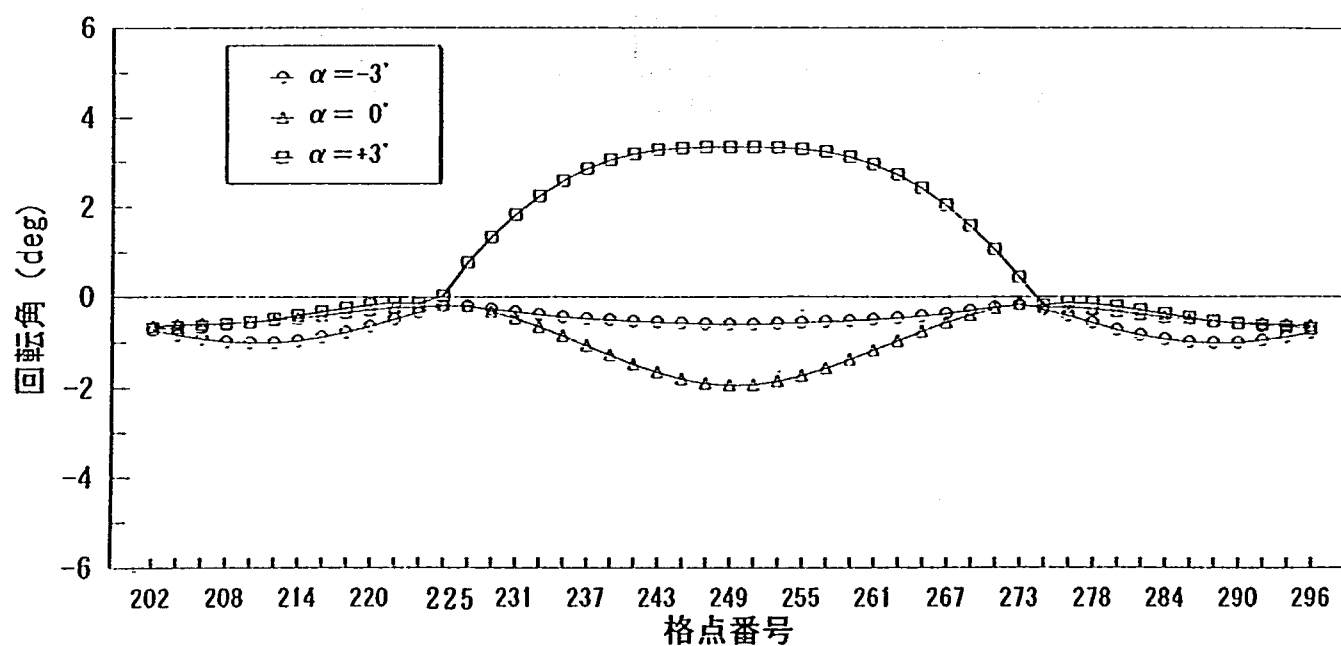


図-3.3.4.7 静的風荷重による桁全体のねじれ変形 (風速 80 m/s)

(4) 非定常空気力測定結果

桁高5m・空間幅5mの断面につき、中央部を閉塞した平板翼類似断面の $\alpha = 0^\circ$ 、および、鉛直スタビライザー付断面の $\alpha = -4^\circ \sim +7^\circ$ (1° ピッチ) について、上下・回転・水平の各単独加振時の動的揚力・空力モーメント・抗力を測定し、(3.3.4.1) 式で定義するFlutter Derivatives H_j^* 、 A_j^* 、 P_j^* ($j = 0 \sim 5$) を求めた。

$$\begin{aligned} L &= 1/2 \rho U^2 B \{ k \cdot H_0^* \cdot \dot{s}/U + k \cdot H_1^* \cdot \dot{h}/U + k \cdot H_2^* \cdot B \dot{\alpha}/U + k^2 \cdot H_3^* \cdot \alpha \\ &\quad + k^2 \cdot H_4^* \cdot h/B + k^2 \cdot H_5^* \cdot s/B \} \\ M &= 1/2 \rho U^2 B^2 \{ k \cdot A_0^* \cdot \dot{s}/U + k \cdot A_1^* \cdot \dot{h}/U + k \cdot A_2^* \cdot B \dot{\alpha}/U + k^2 \cdot A_3^* \cdot \alpha \\ &\quad + k^2 \cdot A_4^* \cdot h/B + k^2 \cdot A_5^* \cdot s/B \} \quad \text{--- (3.3.4.1)} \\ D &= 1/2 \rho U^2 A \{ k \cdot P_0^* \cdot \dot{h}/U + k \cdot P_1^* \cdot \dot{s}/U + k \cdot P_2^* \cdot B \dot{\alpha}/U + k^2 \cdot P_3^* \cdot \alpha \\ &\quad + k^2 \cdot P_4^* \cdot h/B + k^2 \cdot P_5^* \cdot s/B \} \end{aligned}$$

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。）

中央部を閉塞した平板翼類似断面の $\alpha = 0^\circ$ および鉛直スタビライザー付断面の $\alpha = -3^\circ$ 、 -2° 、 -1° 、 0° の各Flutter Derivativesを図-3.3.4.8に示す。図中、 $H_1^* \sim H_4^*$ 、 $A_1^* \sim A_4^*$ については(3.3.4.2) 式に示す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 $P_0^* \sim P_5^*$ は(3.3.4.3) 式に示す準定常理論による値を併記している。

Theodorsen理論による空気力

$$\begin{aligned} H_1^* &= -\pi/k \cdot F(k) \\ H_2^* &= \pi/(4k) \cdot \{1 + F(k) + 2G(k)/k\} \\ H_3^* &= \pi/(2k^2) \cdot \{F(k) - k \cdot G(k)/2\} \\ H_4^* &= \pi/k \cdot G(k) \\ A_1^* &= -\pi/(4k) \cdot G(k) \\ A_2^* &= -\pi/(16k) \cdot \{1 - F(k) - 2G(k)/k\} \\ A_3^* &= \pi/(8k^2) \cdot \{F(k) - k \cdot G(k)/2\} \\ A_4^* &= \pi/(4k) \cdot G(k) \end{aligned} \quad \text{----- (3.3.4.2)}$$

ここで、Theodorsen関数

$$C(k) = F(k) + i G(k)$$

$$= 1 - 0.165 / (1 - 0.04 / k \cdot i) - 0.335 / (1 - 0.32 / k \cdot i) \quad (\text{by } W. P. Jones)$$

準定常理論による空気力

$$H_0' = -2 / k \cdot C_L$$

$$H_5' = 0$$

$$\Lambda_0' = -2 / k \cdot C_M$$

$$\Lambda_5' = 0$$

$$P_0' = -1 / k \cdot \{ d C_D / d \alpha - C_L \cdot B / \Lambda \} \quad \text{-----} (3.3.4.3)$$

$$P_1' = -2 / k \cdot C_D$$

$$P_2' = -1 / (2k) \cdot \{ d C_D / d \alpha - C_L \cdot B / \Lambda \}$$

$$P_3' = 1 / (k^2) \cdot d C_D / d \alpha$$

$$P_4' = 0$$

$$P_5' = 0$$

中央部を閉塞した平板翼類似断面の空気力は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。

鉛直スタビライザー付断面は平板翼類似断面とは各非定常空気力係数が大幅に異なっていることも確認することができた。

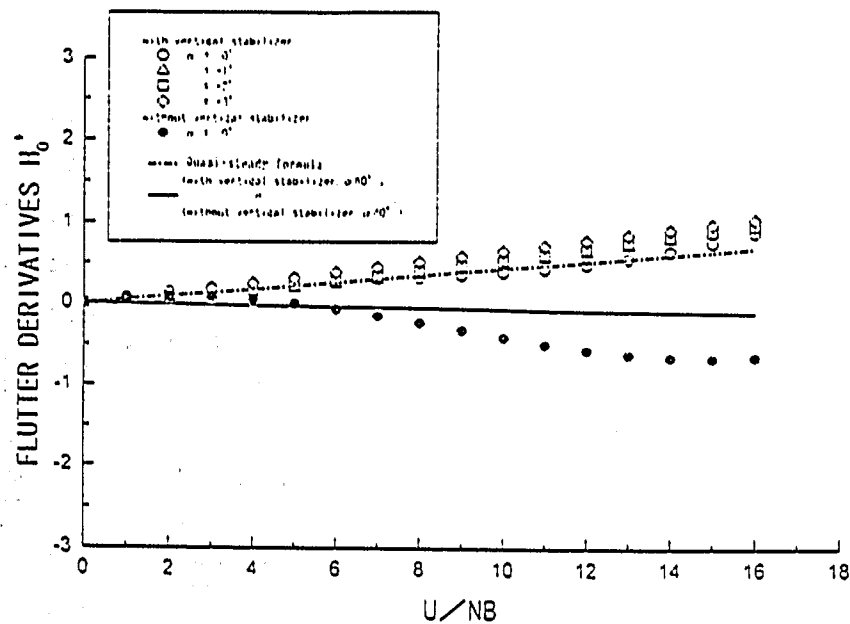


图-3.3.4.8(a) H_0'

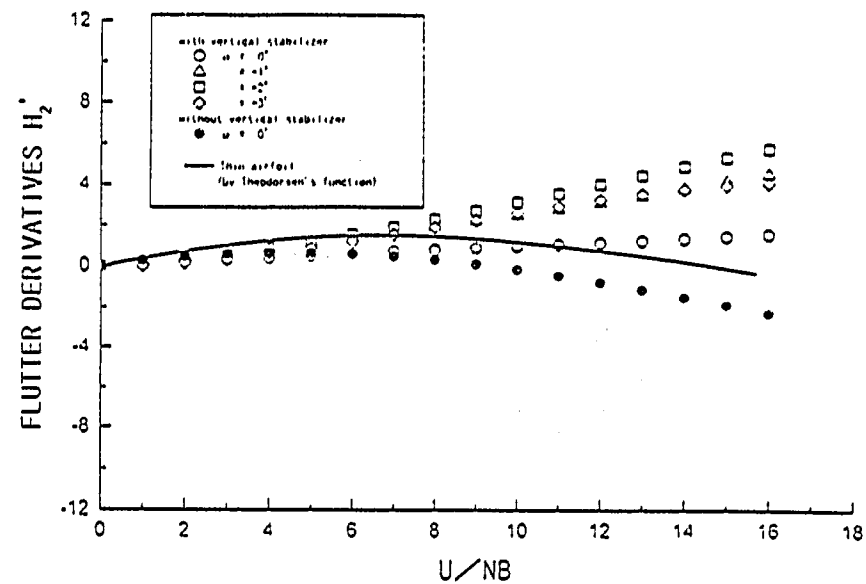


图-3.3.4.8(c) H_2'

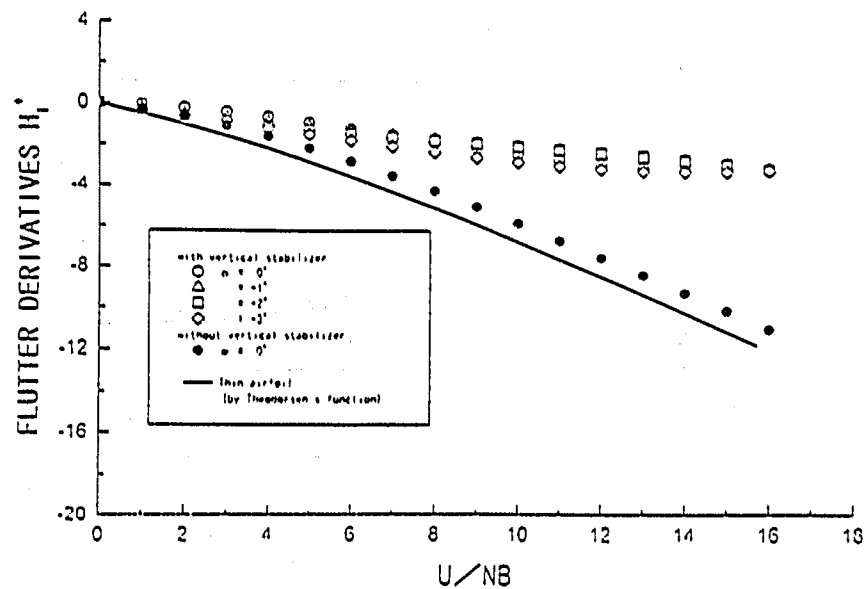


图-3.3.4.8(b) H_1'

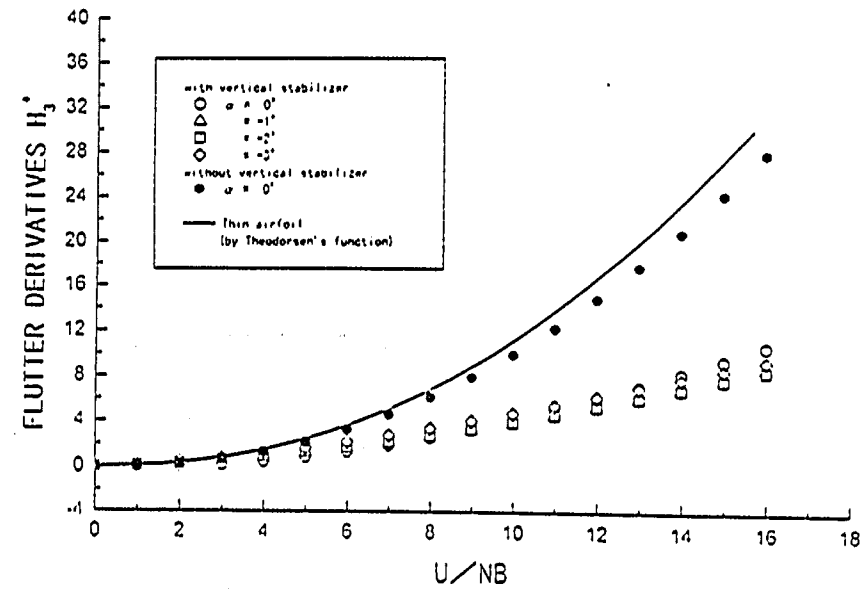


图-3.3.4.8(d) H_3'

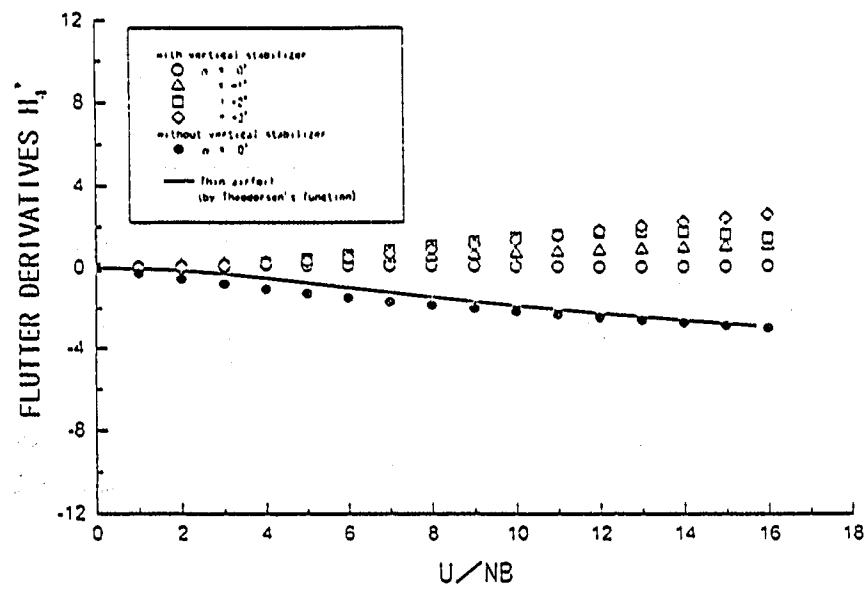


图-3.3.4.8(e) H_1^*

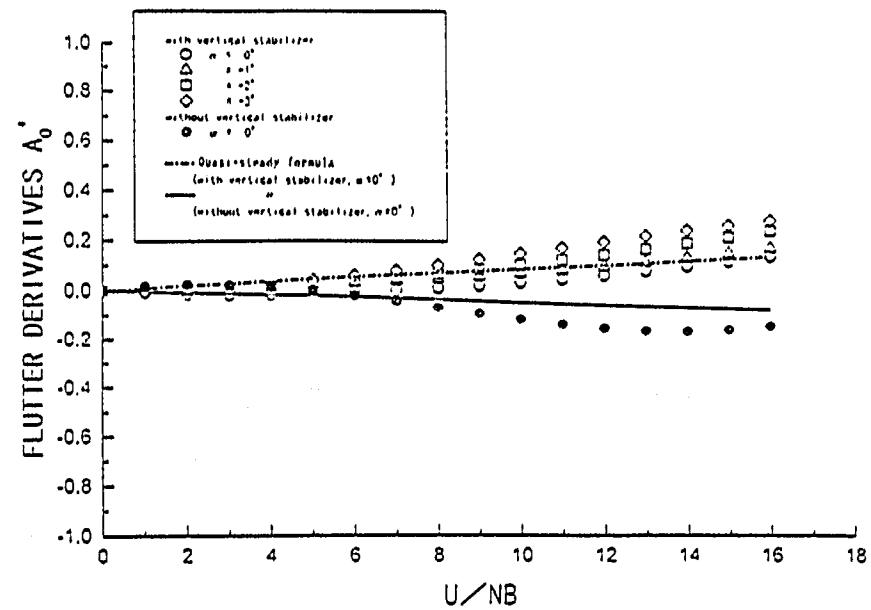


图-3.3.4.9(a) A_0^*

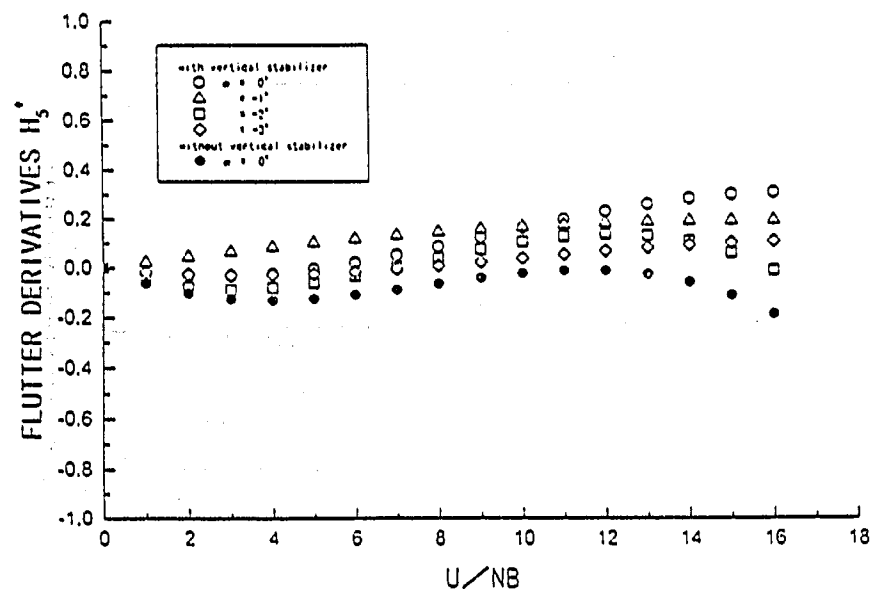


图-3.3.4.8(f) H_5^*

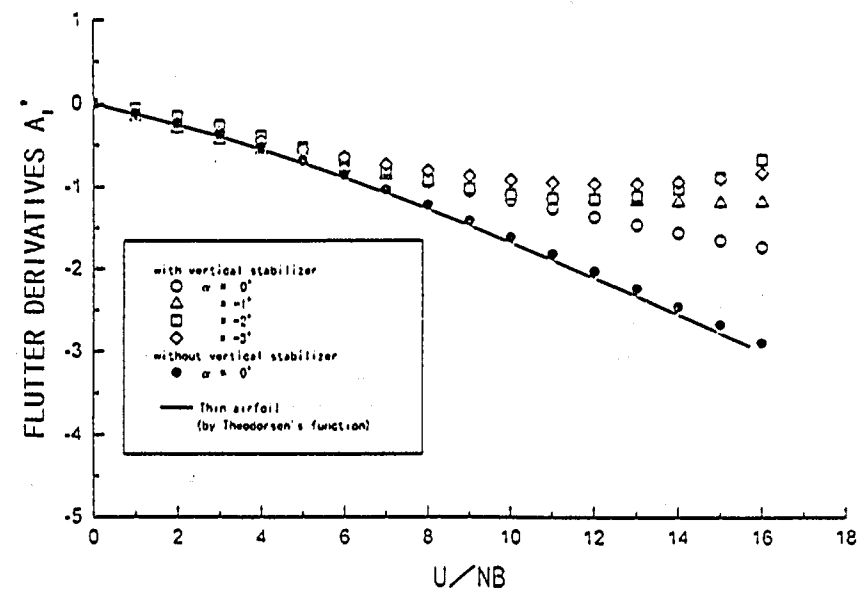


图-3.3.4.9(b) A_1^*

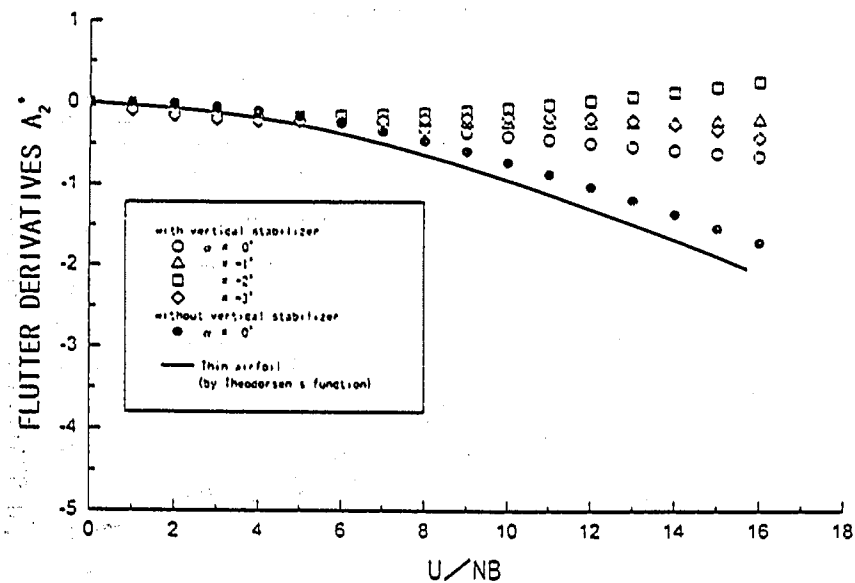


图-3.3.4.9(c) A_2^*

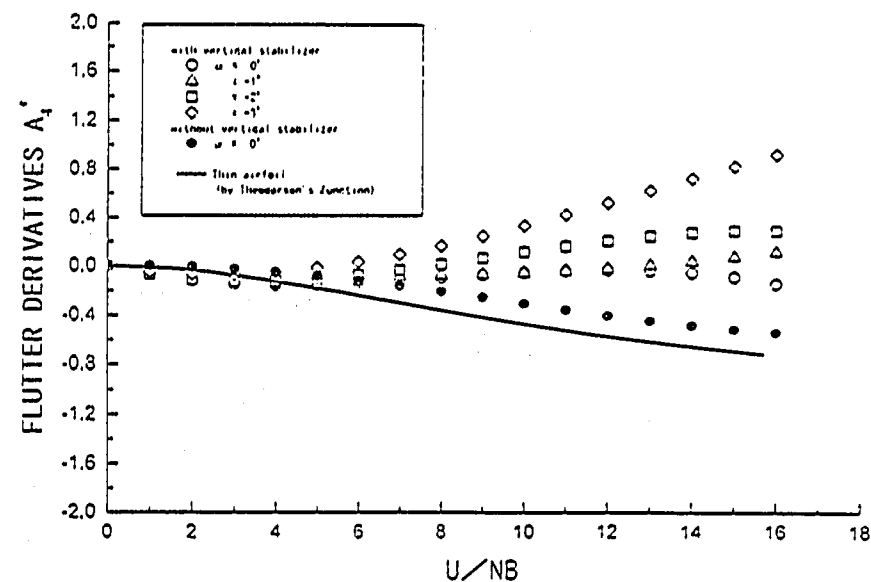


图-3.3.4.9(e) A_4^*

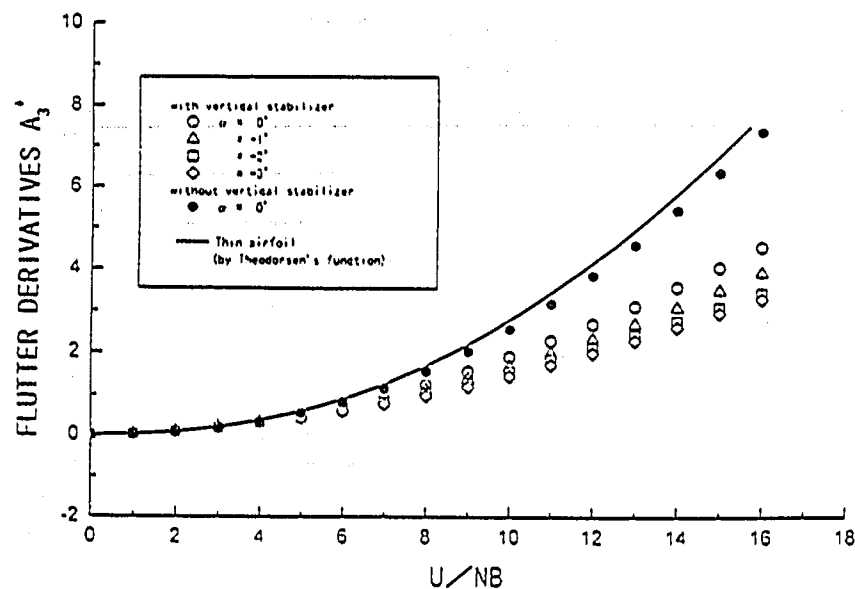


图-3.3.4.9(d) A_3^*

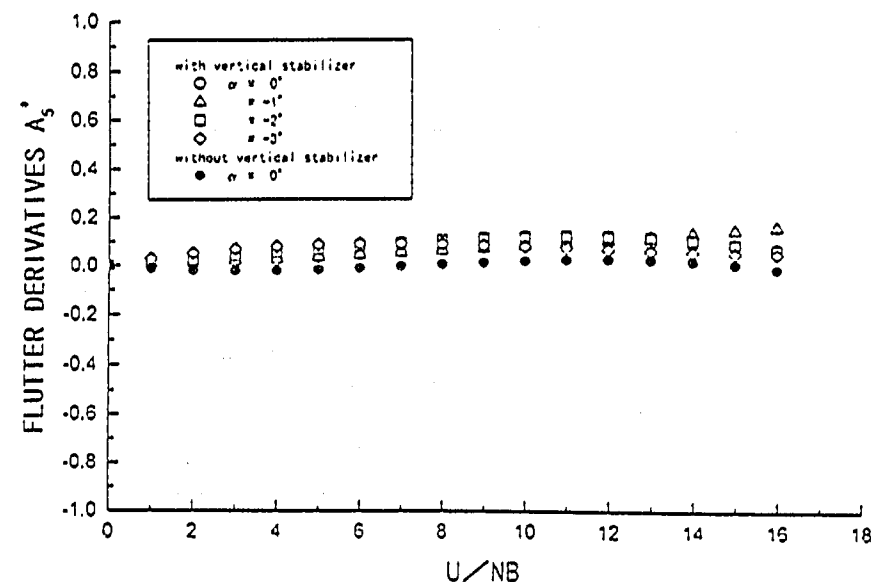
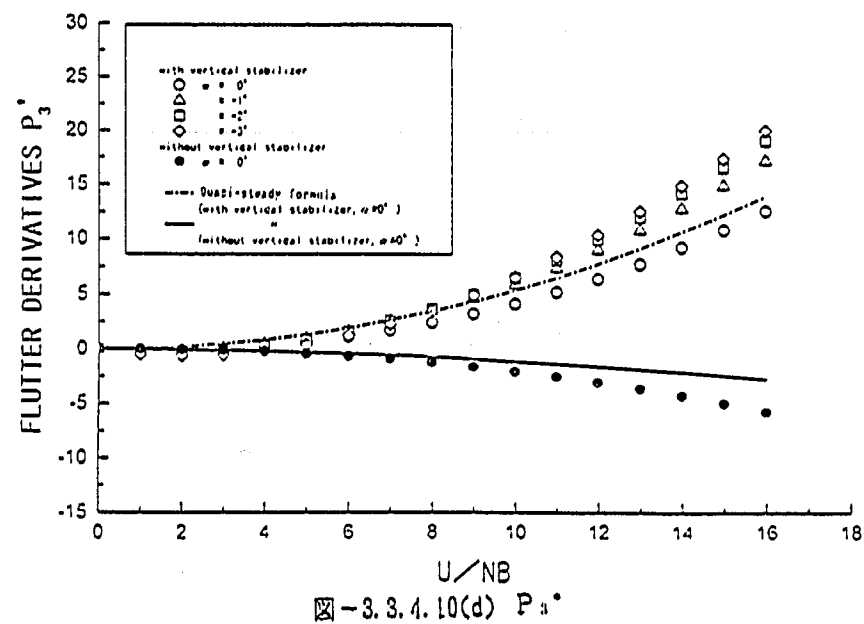
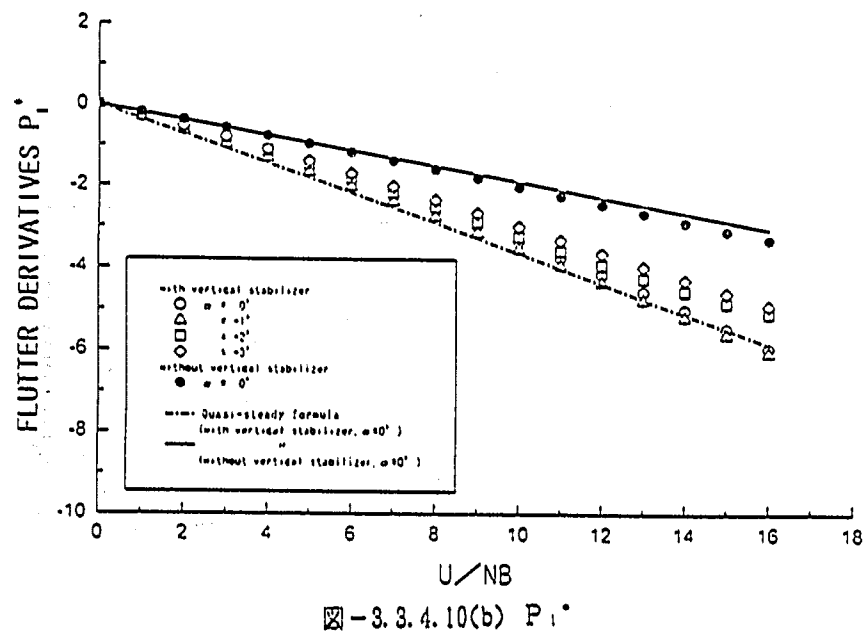
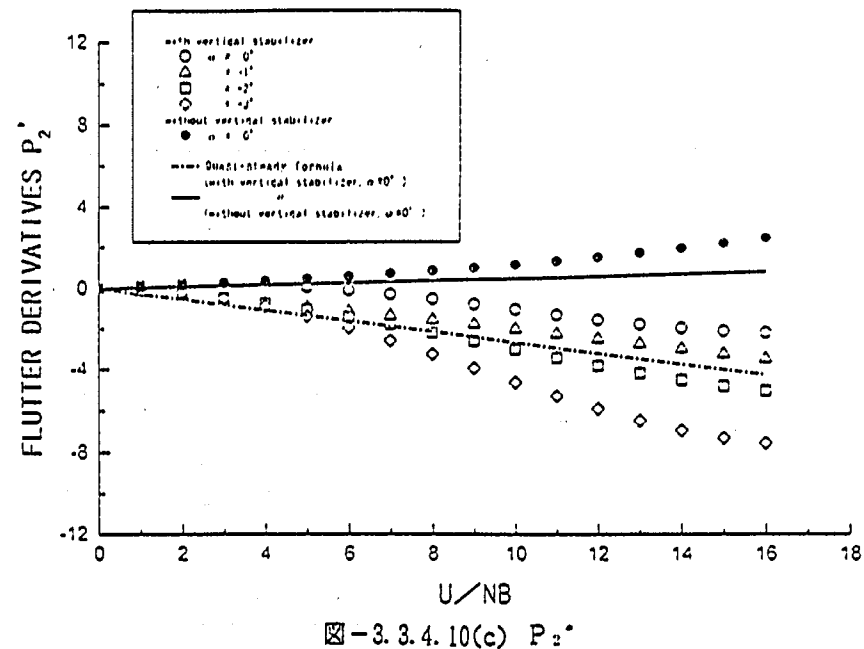
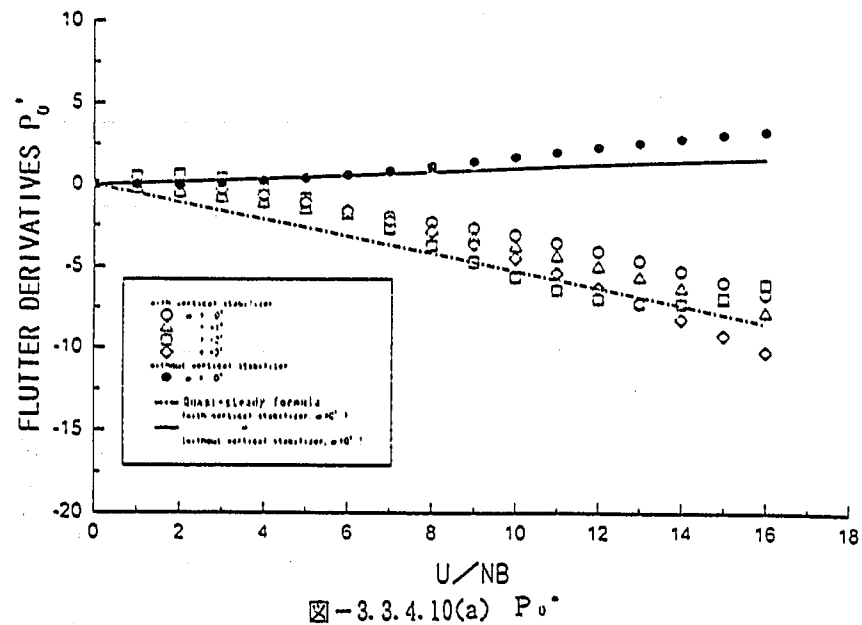
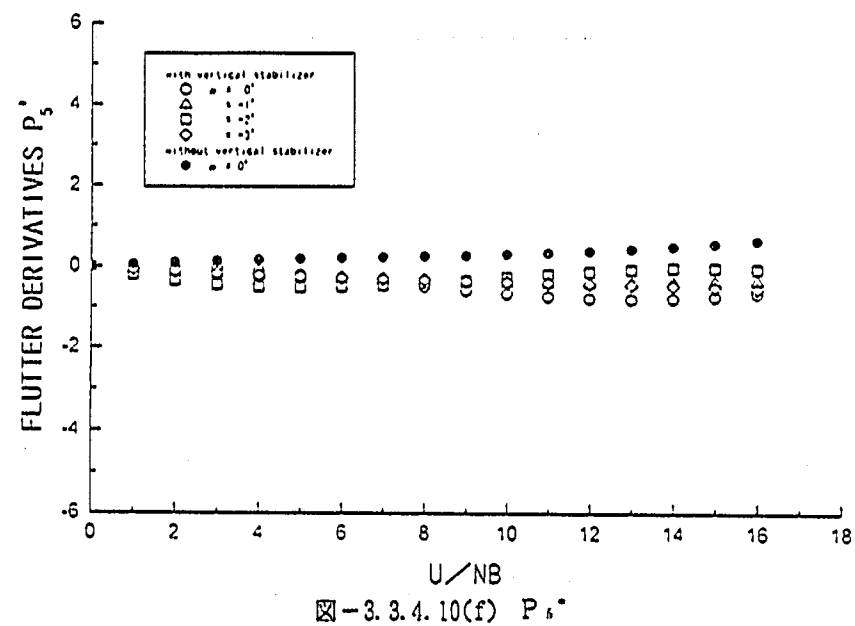
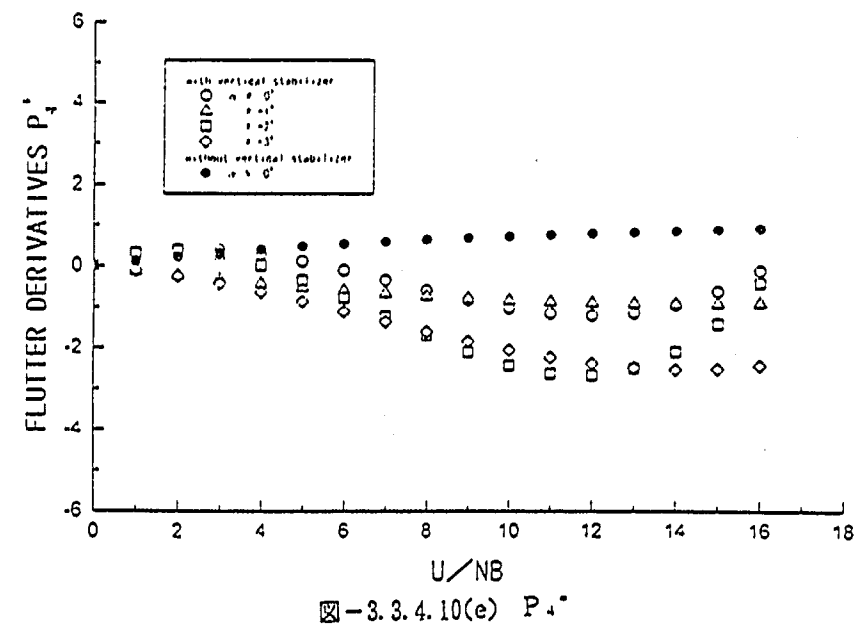


图-3.3.4.9(f) A_5^*





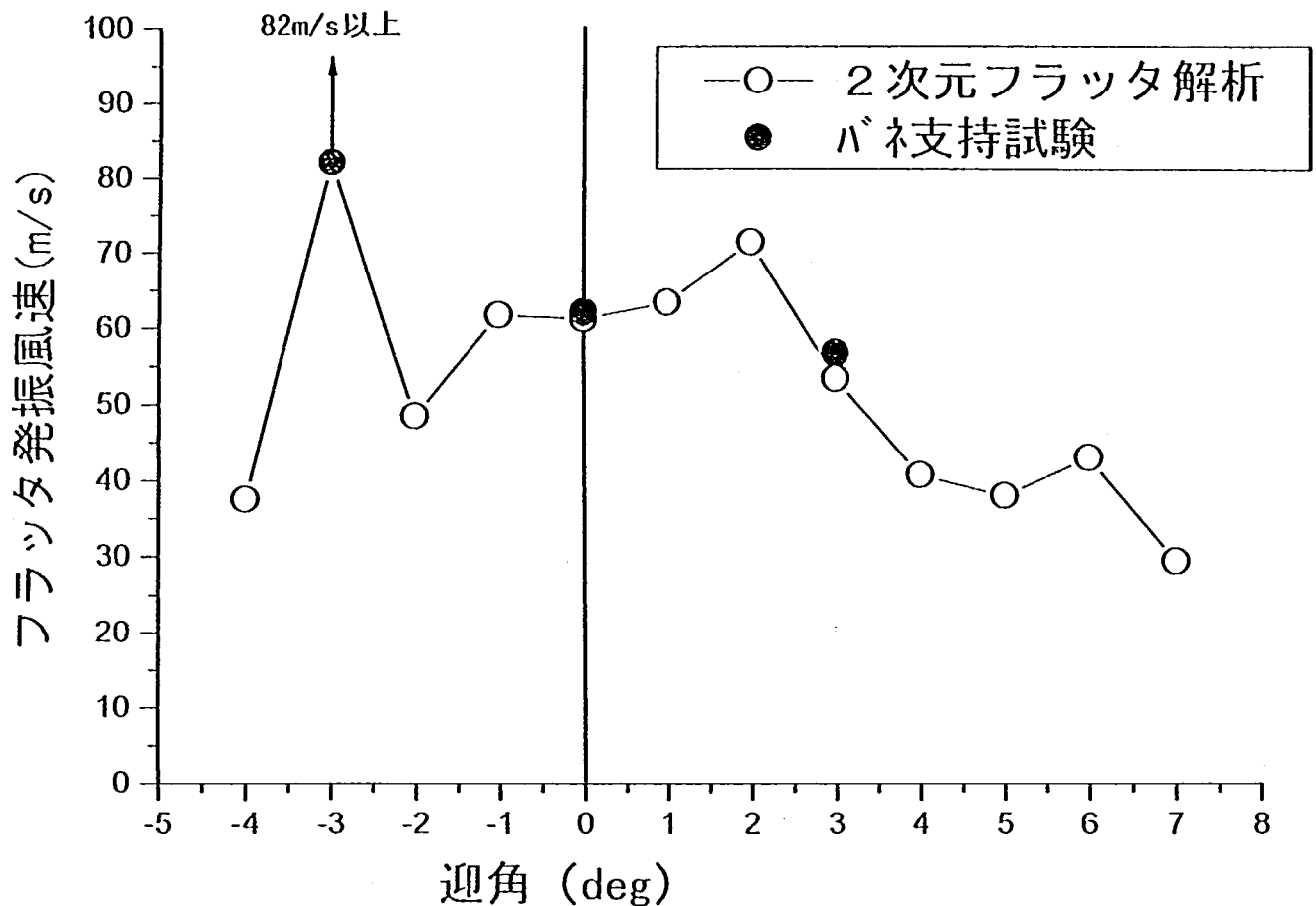


図-3.3.4.11 2次元フラッター解析結果とばね支持試験結果の比較

(5) 2次元フラッター解析結果

鉛直スタビライザー付断面につき測定した非定常空気力を使用し、ばね支持試験に対応した振動条件で2次元フラッター解析を行った結果を図-3.3.4.10に○印で示す。迎角によりフラッター発生風速が大きく変動していることがわかる。図中、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ についてはばね支持試験を●印で併記しているが、2次元フラッター解析結果とほぼ一致しており、非定常空気力の測定結果の精度は十分といえる。

(6) まとめ

- 1) 桁高3.5mに関するばね支持試験の結果、フラッター特性は桁高5mに比べ良くないので、桁高5m・空間幅5mで上下突出高が各1.5mの鉛直スタビライザー付断面を良好断面として選定した。

- 2) たわみおよびねじれの限定振動はグレーチング構造に相当する金網模型の設置により消滅すること、また、10%の格子乱流中でも消滅することがわかった。
- 3) 測定した三分力係数データをもとに静的変形解析を実施した結果、鉛直スタビライザー付断面のねじれ変形は比較的小さいことがわかった。
- 4) 上下・回転・水平の各単独加振時の動的空気力を測定し、18個のFlutter Derivativesを求め、中央部を閉塞した平板翼類似断面のそれらと比較し、大幅に異なっていることを確認した。
- 5) $\alpha = 0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ のばね支持試験に対応した2次元フラッター解析の結果は、試験結果とほぼ一致している。

なお、測定された非定常空気力を使用し、有風時の変形および振動モード・振動数を考慮したマルチモードの連成フラッター解析を行い、耐風性の評価を実施していく予定である。3次元フラッター解析の結果、耐風性が不十分な場合には水平スタビライザー(導流板)などの併用による耐風改善策も検討していきたい。

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

新形式橋梁の検討では、3.2の1箱桁形式、3.3の2箱桁形式以外及び両者を組み合わせた形式を検討対象とし、平成8年度は以下の形式に関して検討が進められた。

(1) 重力剛性桁に関する検討

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 $82\text{kgf}/\text{mm}^2$ として検討が行われてきたが、本年度は昨今のケーブル設計基準を勘案し、許容応力を $100\text{kgf}/\text{mm}^2$ 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、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風速低下要因をカバーして結果的にフラッター風速を向上させることが明らかとなった。

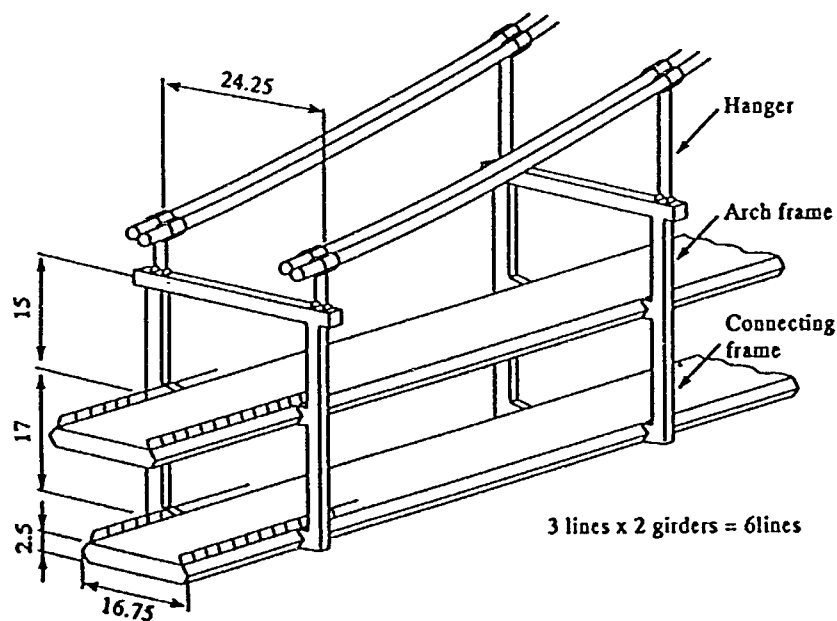


図-3.4.1.1 重力剛性桁概略

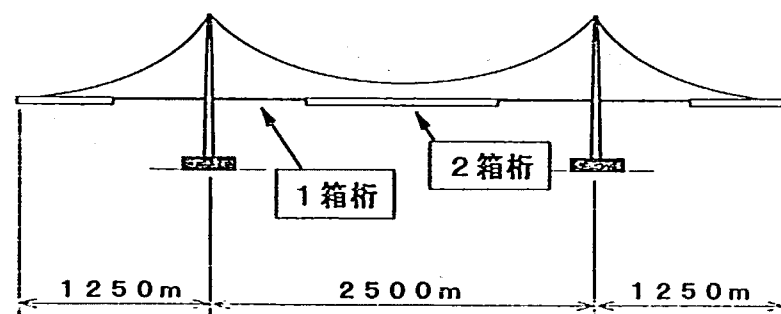
(2) 2箱桁／1箱桁併用吊橋の耐風性に関する検討

昨年度の検討においては、偏平箱桁断面の中央部に開口を設けた2箱桁断面を主径間中央部に用い、塔付き部には1箱桁断面を併用した2箱桁／1箱桁吊橋形式の適用により、従来型の1箱桁のみを用いた形式に比べ、30%以上のフラッタ限界風速の向上が期待できるとの結果が得られた。

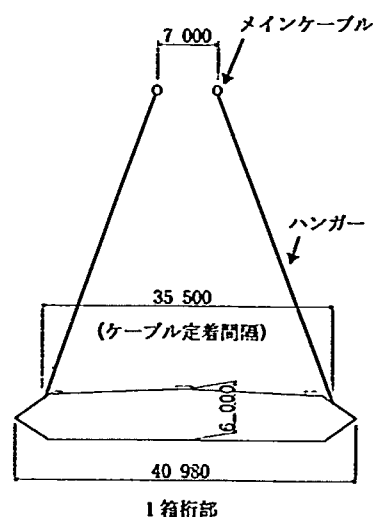
一方で、静的な風荷重の作用によって補剛桁に大きな頭下げの回転変形が生ずる傾向がみられ、この回転変形に伴うフラッタ安定性の低下が予想されるなどの問題点が明らかとなった。

これらの検討結果を踏まえ、今年度は、本報告書の3.3.2節に示すような2箱桁断面の空力特性の改善検討が行われ、その結果をもとに、改良2箱桁断面を適用した2箱桁／1箱桁併用吊橋のフラッタ特性について、有風時の静的変形ならびに主搭のモデル化による主搭頂部の変形による影響についても考慮した検討が行われた。

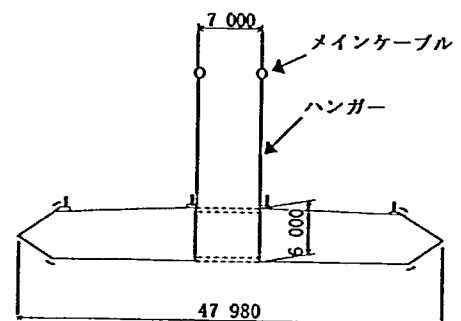
その結果、改良2箱桁断面を適用することによって、気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$ の風のもとでは、有風時の静的変形を考慮した場合においても、昨年度に検討した基本検討案に比べフラッタ限界風速を20%以上向上させることが可能となった。また、主搭頂部の変形を考慮することにより、フラッタ限界風速については上昇する傾向が認められた。



吊橋側面図



1箱桁部



2箱桁部

吊橋横断面形状

図-3.4.1.2 2箱桁／1箱桁併用橋概略図

(3) 開口方法の差異に関する検討

昨年度は、1箱桁断面において開口部の位置が耐風安定性に及ぼす影響について検討が行われた。その結果を踏まえて今年度は、最も耐風安定性が良好であった中央部（中央帯及び最内側車線）に開口を設けた場合を対象として、開口部の充実率（50%、60%、70%）及び開口形状（格子状・円孔状）の変化が耐風安定性に及ぼす影響について検討が行われた。

その結果、迎角が $+3^\circ$ の場合、中央部開口は渦励振・フラッターの両者に対して改善効果を持たないものの、迎角が -3° 、 0° の場合には、いずれの開口形状でも充実率を50%にすれば渦励振・フラッターの両者に対して改善効果を有することが明らかとなった。

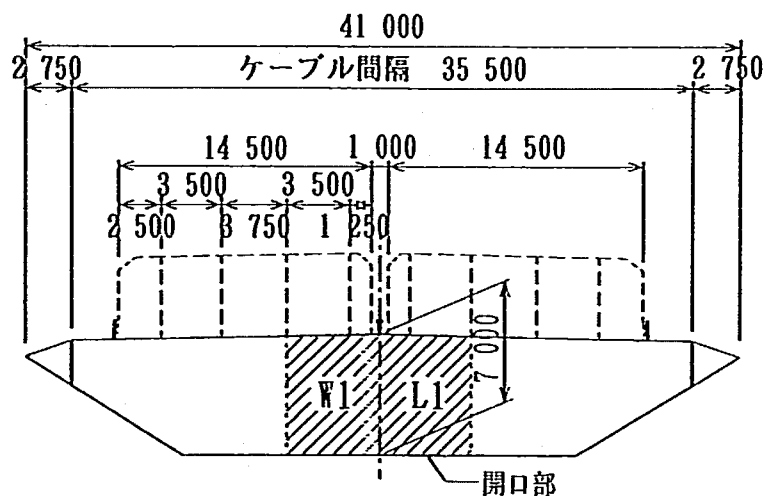


図-3.4.1.3 補剛桁基本断面

(4) 楕円断面及び多角形断面の空力特性に関する検討

昨年度の検討から引き続き、1:3, 1:5 の楕円断面及びその類似形状として1:5 の多角形断面 (20 角形) について検討が行われた。

一般に、楕円断面のように剥離点が非定常に変動する形状では種々の空力特性に対して Re 数依存性があると考えられたため、前縁部の表面粗度を変化させた楕円断面を用いた実験によって、 Re 数依存性に関する検討が行われ、さらに風速の変化による影響把握も行われた。

その結果、楕円断面においては、わずか倍・半分程度の Re 数の変化に対しても空力特性が敏感に変化することが明らかとなった。また、多角形断面についても、楕円断面同様 Re 数によって空力特性が敏感に変化することが示唆された。

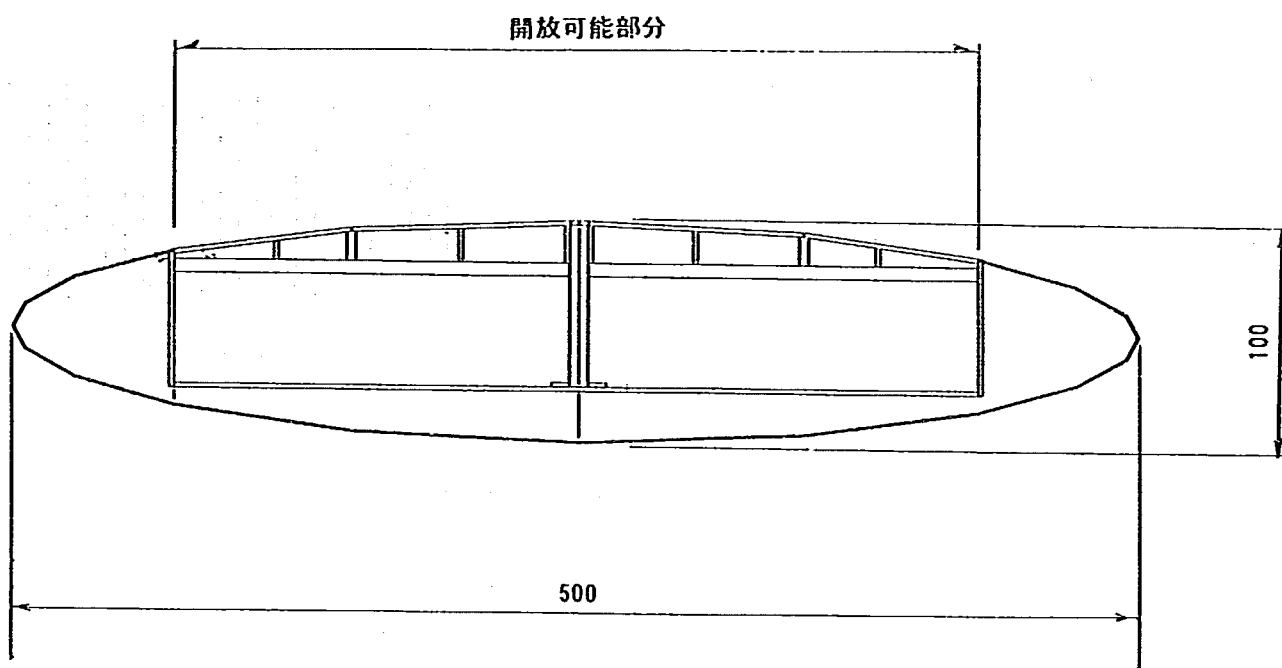


図-3.4.1.4 風洞実施断面

(5) 遮風壁箱桁断面に関する検討

1 箱桁断面に対して、高欄外側及び中央分離帯位置に種々の高さで遮風壁を取り付けた場合の耐風安定性について検討が行われた。

その結果、高欄外側に遮風壁を設置した場合には、遮風壁高さによらず概ね耐フラッター性能は低下することが明らかとなった。また、中央分離帯位置に遮風壁を設置した場合には、耐フラッター性能はさほど変化せず、迎角 $+3^\circ$ では逆に安定化することが明らかとなった。

さらに既往の断面形状に対してフェアリング形状が見直され、より耐風安定性に優れた断面形状が見出された。この新たな断面形状に対して、中央分離帯位置に遮風壁を設置した場合、概ね耐フラッター性能は改善される傾向にあることが明らかとなった。

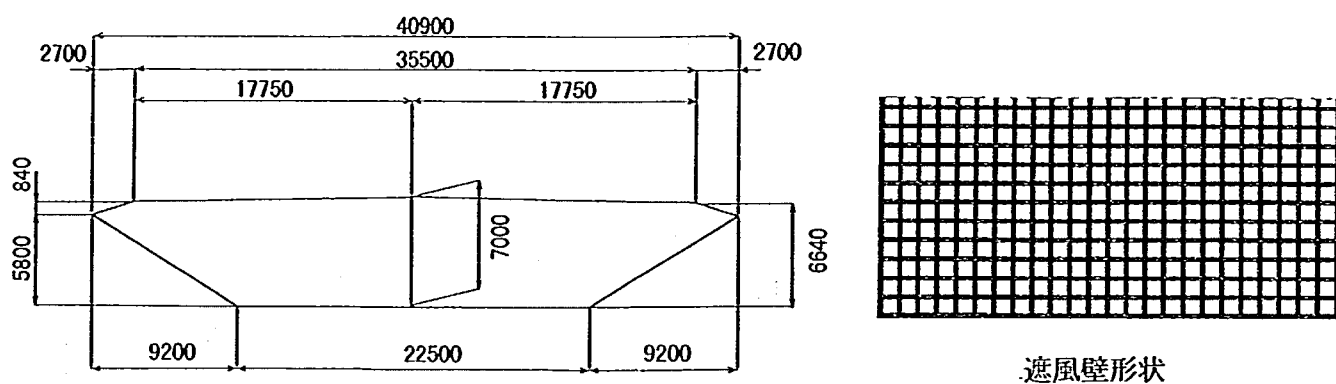
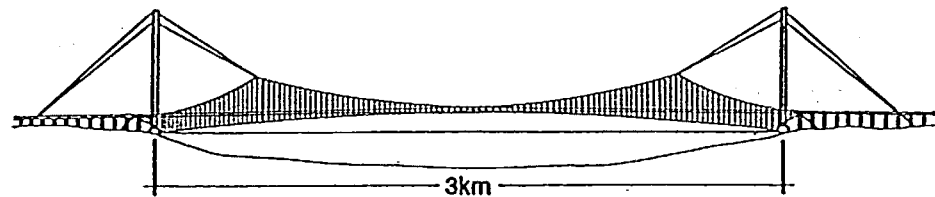


図-3.4.1.5 基本断面A概要図

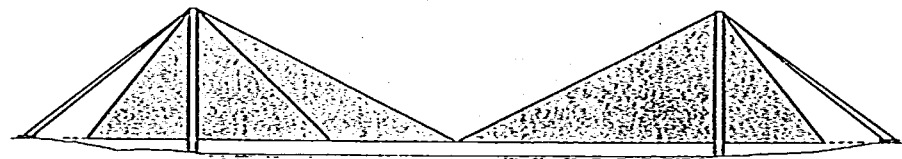
(6) その他の形式

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 Gimsink による Cable-Supported Bridge³⁾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³⁾や Pipe Truss 形式について簡単に紹介する。



張力構造の応用例



Cable-Supported Bridge

図-3.4.1.6 その他の形式例

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⁹⁾。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。

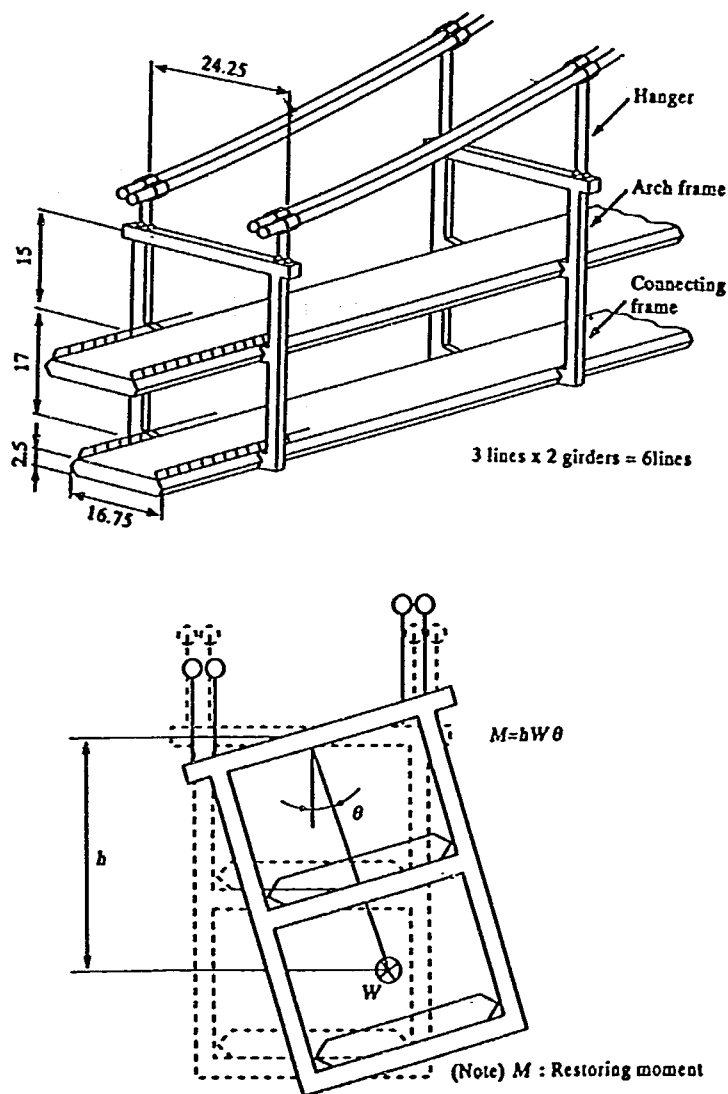


図-3.4.2.1 重力剛性桁概略図

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/mm ²)		82	100	82	100
支間割り(m)	ケーブル	1250-2500-1250			
	桁	1226-2480-1226			
sag比		1/10			
ケーブル断面積(m ²)		0.8725	0.715	0.8725	0.715
ハガー断面積(m ² /格点)		0.08288			
桁	断面積(m ² /deck)	0.684			
	ねじり定数(m ⁴ /deck)	0.0			
	断面二次モーメントI _v (m ⁴ /deck)	0.378			
	断面二次モーメントI _H (m ⁴ /deck)	10.7			
死 荷 重	桁(tf/m/br.)	23.08	23.08	23.08	23.08
	ケーブル(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・m ² /m/deck)		354			
投影 面積	桁(m ² /m)	6.07			
	ケーブル(m ² /m/片側)	1.177	1.07	1.177	1.07
ハガー(m ² /m/格点): 断面積		0.28			
桁幅(m): 解析に用いた代表幅		19.32	19.32	15.48	15.48
固有振動数	無風時 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、 $\sqrt{82/100}$ 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	ケーブル許容応力(kg/mm ²)
1	6	82
2	6	100
3	4	82
4	4	100

2) 使用空気力係数⁹⁾

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。

$$C_D = \frac{D_s}{1/2 \rho V^2 A_n} \quad C_L = \frac{L_s}{1/2 \rho V^2 B} \quad C_M = \frac{M_s}{1/2 \rho V^2 B^2} \quad (3.4.2.1)$$

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)

A_n : 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。

$$L_D = \pi \rho B^3 \omega^2 \left\{ (C_{L,R} + i C_{L,I}) \frac{\eta}{B} + (C_{L,R} + i C_{L,I}) \theta + (C_{LUR} + i C_{LUI}) \frac{u}{B} \right\} \quad (3.4.2.2)$$

$$M_D = \pi \rho B^4 \omega^2 \left\{ (C_{M,R} + i C_{M,I}) \frac{\eta}{B} + (C_{M,R} + i C_{M,I}) \theta + (C_{MUR} + i C_{MUI}) \frac{u}{B} \right\} \quad (3.4.2.3)$$

$$D_D = \pi \rho B^2 A_n \omega^2 \left\{ (C_{D,R} + i C_{D,I}) \frac{\eta}{B} + (C_{D,R} + i C_{D,I}) \theta + (C_{DUR} + i C_{DUI}) \frac{u}{B} \right\} \quad (3.4.2.4)$$

ここで、

D_0, L_0, M_0 : 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)

$C_{L, b, R} \sim C_{D, i}$: 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)

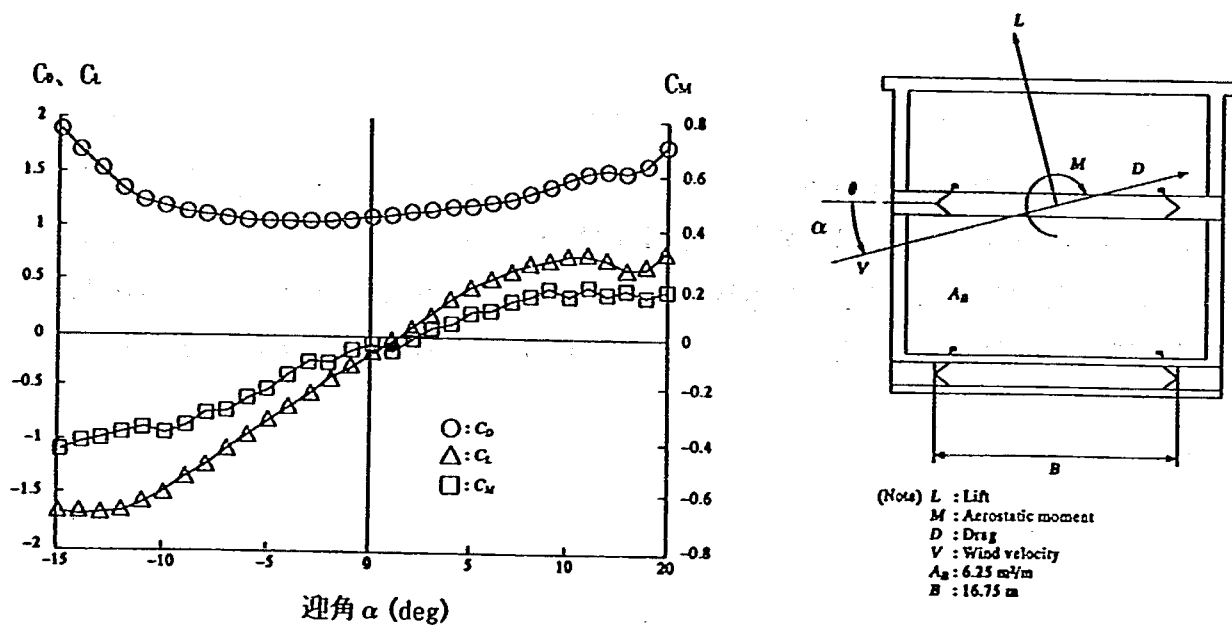


図-3.4.2.2 三分力係数

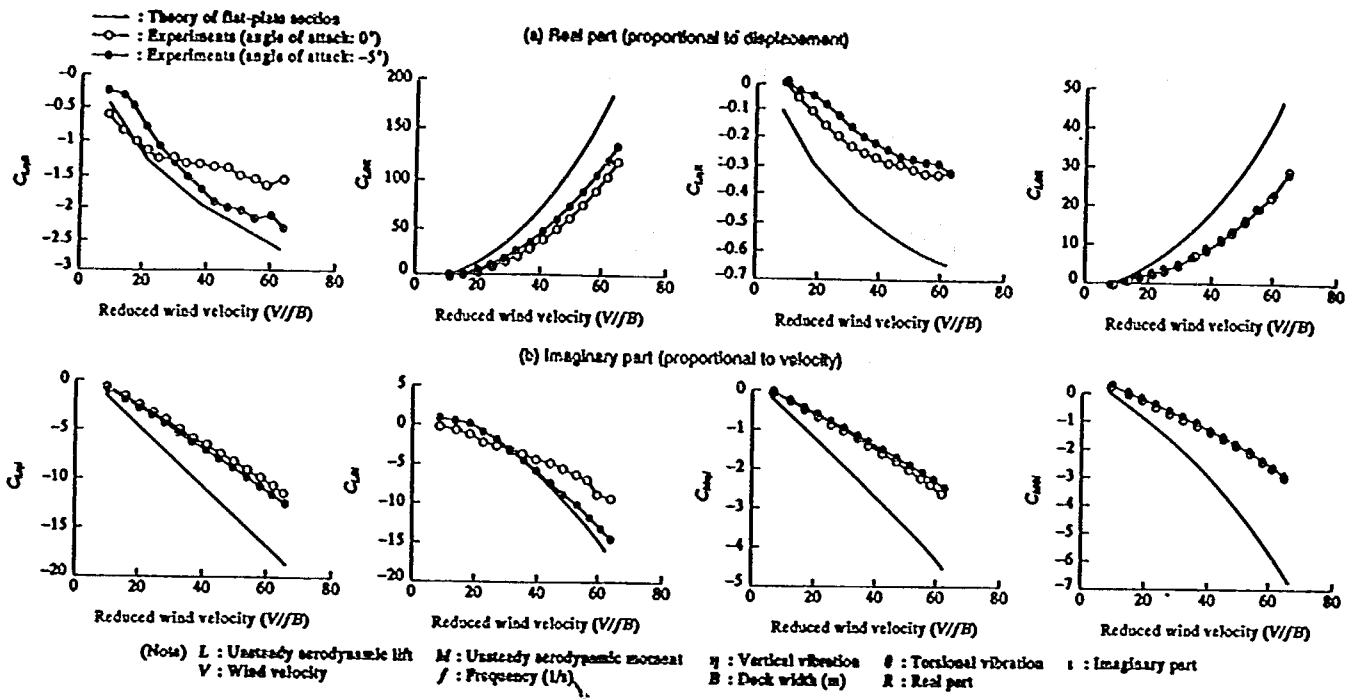


図-3.4.2.3 非定常空気力係数

3) 解析方法

フラッター解析はモード組み合わせ法を採用し、風速80m/sの静的風荷重載荷した状態における低次50モードを組み込んだ。また、風速80m/sにおけるねじれ静的変形を考慮して空気力係数を選択した。

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。

4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。

(3) 解析結果

表-3.4.2.3に解析結果の一覧表を示す。

表-3.4.2.3 解析結果

ケースNo.	1	2	3	4
車線数	6	6	4	4
ケーブル許容応力(kg/mm ²)	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/mm^2 から 100kg/mm^2 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/mm^2 から 100kg/mm^2 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。

(6) 今後の課題

計測非定常空気力の妥当性を確認する必要がある。具体的にはばね支持試験を行い、別途2次元模型試験を再現した解析モデルを用いたフラッター解析値と比較する。

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 2箱桁／1箱桁併用吊橋の耐風性に関する検討

平成7年度においては、新形式の吊橋として提案した、2箱桁断面と1箱桁断面の補剛桁を併用した2箱桁／1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2箱桁／1箱桁併用吊橋のフラッター特性に関しては、従来型の1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° を超える頭下げの回転変形を生じ、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。これに対して、本年度においては、まず、この風荷重による桁の回転変形の発生に対して支配的と考えられる桁の静的な空力モーメント特性に関して、3.3.2項に示すように、2箱桁断面を対象として、その空力特性の改善対策に関する検討を行った。

また、本検討においては、上記の検討結果を踏まえ、そこで得られた改良2箱桁断面を適用した場合の、2箱桁／1箱桁併用吊橋の耐風性（風荷重による静的変形特性ならびにフラッター特性）について、改めて、フラッター解析等の手法を用いた解析的な検討を実施した。また、本検討では、解析モデルにおける主塔部のモデル化による影響、ならびに風荷重によって生ずる桁の静的変形によるフラッター特性への影響についても併せて検討を行った。

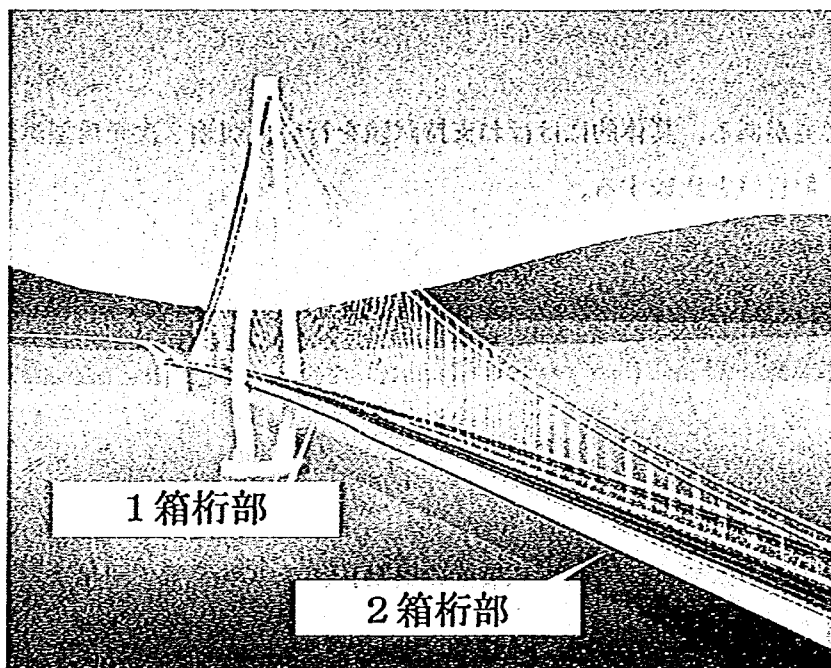


図-3.4.3.1 2箱桁／1箱桁併用吊橋のイメージ

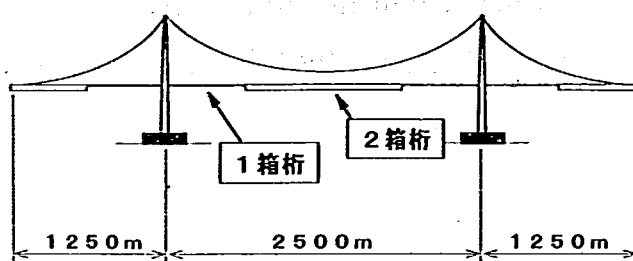
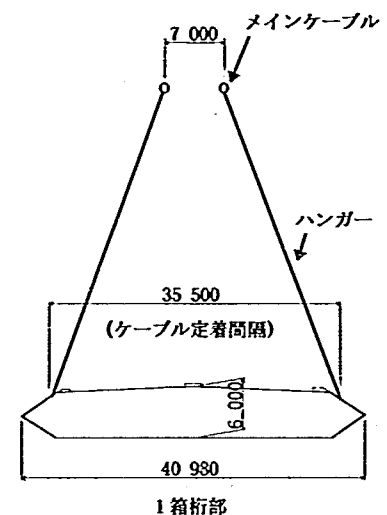
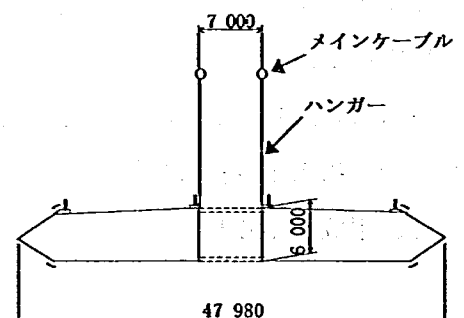


図-3.4.3.2 吊橋側面図



1箱桁部



2箱桁部

図-3.4.3.3 吊橋横断面形状

(1) 2箱桁／1箱桁併用吊橋の概要

図-3.4.3.1には、2箱桁／1箱桁併用吊橋のイメージ図を示すが、その構造の基本的な考え方としては以下のようである。

- 1) 箱桁断面としては、従来型の1箱桁断面に比べフラッター特性の向上が期待できる、幅員中央に開口部を設けた2箱桁断面を適用する。
 - 2) 一方で、2箱桁化に伴う桁鋼重の増加に対して、2箱桁の適用範囲としては空力的に支配的となる主径間中央部とし、残りの区間については1箱桁断面を適用することにより鋼重の軽減を図る。
- (図-3.4.3.2)
- 3) また、これによって、2箱桁化に伴う道路幅員の増加による主塔柱間隔（主塔規模／基礎工規模）の増大も回避する。
 - 4) 主ケーブルの配置としては、2箱桁の開口幅に合わせたケーブル間隔とし、ケーブル高さの低くなる2箱桁部ではハンガーを鉛直吊りとすることによって、ハンガーが道路建築限界を侵すことを回避する。（図-3.4.3.3）
 - 5) さらに、これに伴って1箱桁部においては斜めハンガーとなることで、吊橋の横断面に関して、桁とハンガーで構成される擬似トラスの効果により、構造系全体としてのねじれ剛性の上昇を期待する。

(2) 本検討の内容

本検討においては、図-3.4.3.4に示すような、3.3.2項の検討により得られた改良2箱桁断面と、平成7年度の検討でも用いた1箱桁断面の静的空気力（三分力）係数と動的空気力係数を用い、2箱桁／1箱桁併用吊橋の風荷重による静的変形特性とフラッター特性についての解析的な検討を行った。また、平成7年度の検討に用いた解析モデルにおいては、主塔部のモデル化は行わず、塔頂部でのケーブルの支持条件をスライド支持とした構造系を仮定したが、本検討では、主塔部についてもモデル化した解析モデルを用いて、主塔剛性が橋梁全体系の耐風性におよぼす影響についても検討を行った。 図-3.4.3.5には、

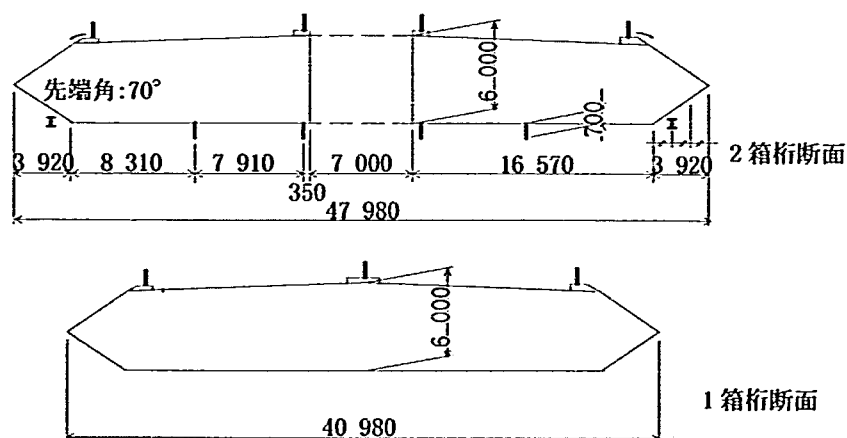


図-3.4.3.4 補剛桁断面形状寸法

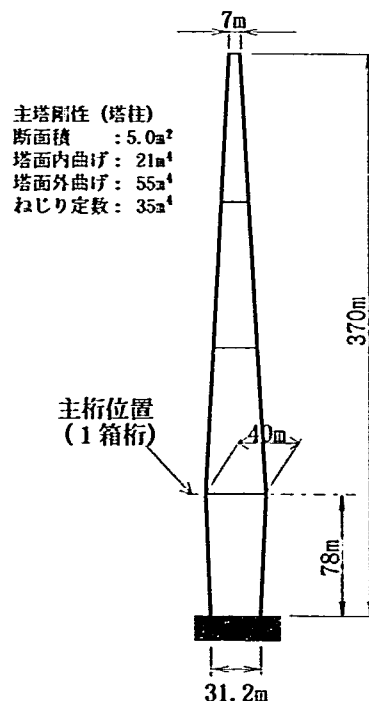


図-3.4.3.5 主塔概略寸法

想定した主塔の概略寸法図を示す。

本検討で実施した解析の内容については以下のようなものである。

1) 風荷重による静的変形解析

風荷重による静的変形特性については、立体骨組モデルを用いた有限変形解析の手法を用いて検討を行った。なお、気流の傾斜角としては $\alpha = -3^\circ$ 、 0° 、 $+3^\circ$ の3ケースを対象とし、桁の回転変位に伴う空気力の変化による影響についても考慮した、収束計算による釣り合い状態での変形量の評価を行った。また、主塔部のモデル化の有無による静的変形特性への影響（主塔の変形に伴う構造全体系の変形への影響）についても比較検討を行った。

2) 固有値解析

主塔部の剛性による固有振動特性への影響について把握するため、主塔部についてもモデル化した立体骨組モデルを用いた固有値解析を実施し、平成7年度に得られた2箱桁／1箱桁併用吊橋の振動特性（主塔モデルなし）との比較を行った。また、本解析結果は、フラッター特性評価のためのフラッター解析に適用した。

3) フラッター解析

フラッター特性の評価に関しては、モード組合せ法による多自由度フラッター解析の手法を用いて検討を行った。また、本解析では、主塔部のモデル化の有無による影響に関して比較検討を行うとともに、風荷重による桁の回転変形に伴う動的空気力の変化による影響についても評価を行った。ただし、本解析においては、接近流の気流傾斜角としては $\alpha = 0^\circ$ （水平風）のみを対象とすることとし、振動モードについても、無風時の振動モードを用いた解析とした。

(3) 風荷重による静的変形特性の評価

改良2箱桁断面を適用した2箱桁／1箱桁併用吊橋に対する静的変形解析結果を図-3.4.3.7に示す。なお、同図には、平成7年度の検討で得られた、2箱桁部に基本検討断面を適用した場合の、風の傾斜角 $\alpha=0^\circ$ における静的変形についても比較のため併せて示す。また、主塔をモデル化し、主塔部の変形についても考慮した場合の、橋梁全体系の静的変形特性への影響について図-3.4.3.8に示す。

これらの結果より、改良2箱桁断面を適用した2箱桁／1箱桁併用吊橋の、風荷重による静的変形特性についてまとめれば次のようである。

- 1) 2箱桁部に基本検討断面を用いた場合においては、傾斜角 $\alpha=0^\circ$ ，風速80m/sの風に対して、主径間中央部で補剛桁には約 -14° の過大な頭下げの回転変位が生ずるのに対し、改良2箱桁断面を適用することにより、回転変位は約 -5° まで大幅に低減される。これは負迎角における改良2箱桁断面の負の空力モーメントが、基本検討断面に比べ大幅に低減されていることに起因するものと考えられる。
- 2) 同じく、2箱桁部に基本検討断面を用いた場合においては、傾斜角 $\alpha=0^\circ$ ，風速80m/sの風に対して約 -14m の桁の鉛直変位を生ずるのに対し、改良2箱桁断面を適用した場合には、鉛直変位は約 -5m まで低減される。これは負迎角における改良2箱桁断面の負の揚力が基本断面に比べ大幅に低減されていることに加え、桁の回転変形が抑制されたことによる影響（断面の回転変位に伴う揚力の増加の抑制）も大きいものと推定される。
- 3) なお、接近流に対して吹上げ／吹下しの傾斜角を考慮した場合には、改良2箱桁断面を適用した場合においても、例えば $\alpha=-3^\circ$ ，風速80m/sの風に対して約 -9° の桁の回転変位を生じ、このときの桁に対する相対迎角としては -12° 程度の大迎角を考慮することが必要となる。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点と考えられる。

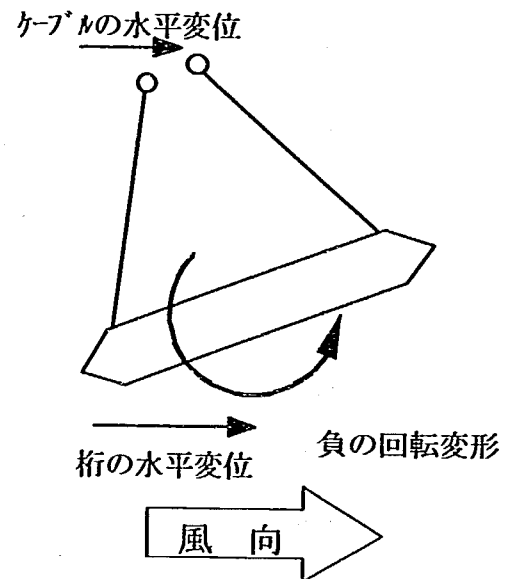


図-3.4.3.6 桁の回転変形

- 4) 主塔のモデル化による静的変形特性への影響について、風速70m/s以上の領域での変形量により比較を行った場合、主塔をモデル化した場合の主径間中央部での桁の水平変位は10%程度増加するのに対し、回転変位については20%程度減少する傾向がみられる。このうち、水平変位の増加に関しては、主塔の塔面内方向の変形に伴って、ケーブルの水平変位量が増加することに起因するものと考えられる。また、回転変位に関しては、このケーブルの水平変位の増加に伴い、ケーブルと桁との相対的な水平変位量の差としては低減されることによって（図-3.4.3.6参照）減少する傾向にあるものと推定される。

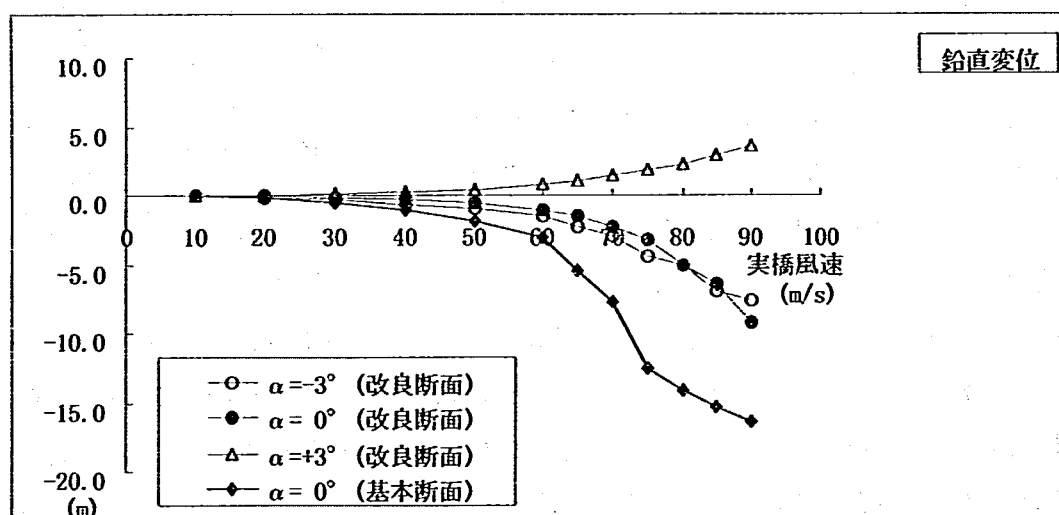
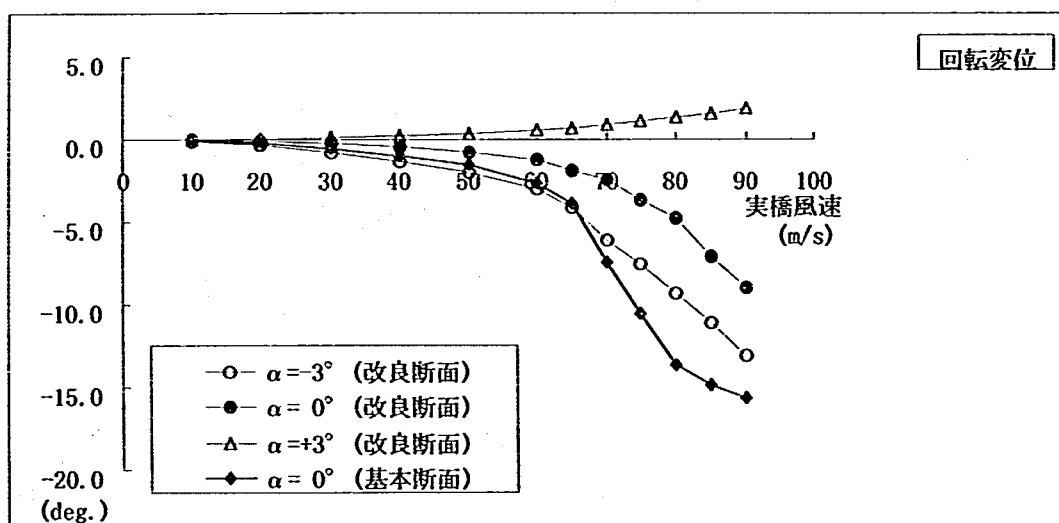
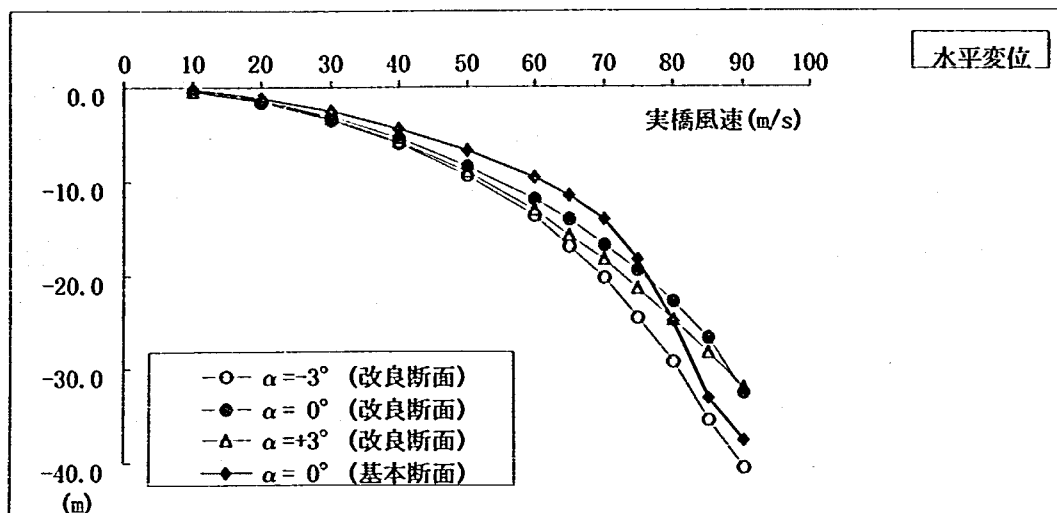


図-3.4.3.7 風荷重による主径間中央での桁の静的変位
(主塔部モデルなし)

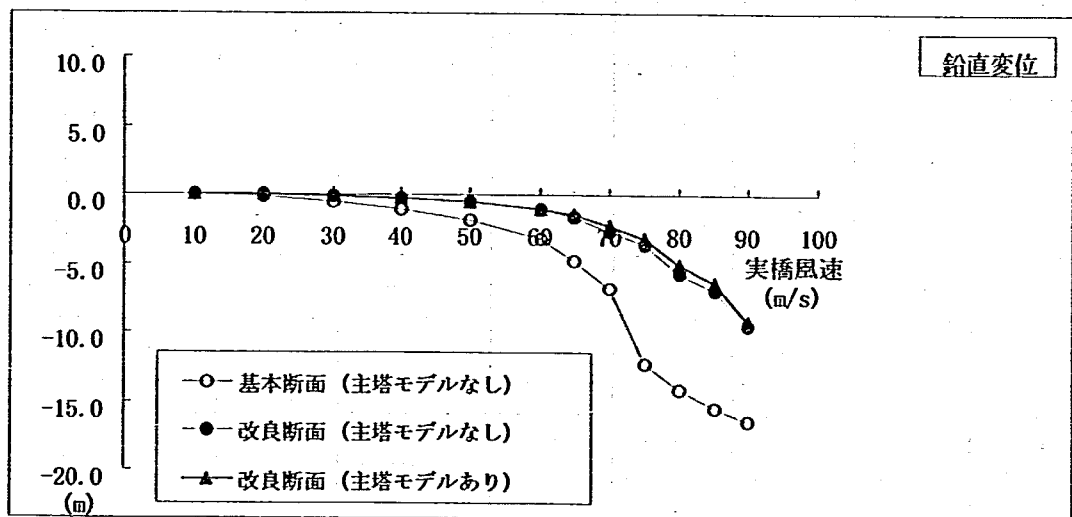
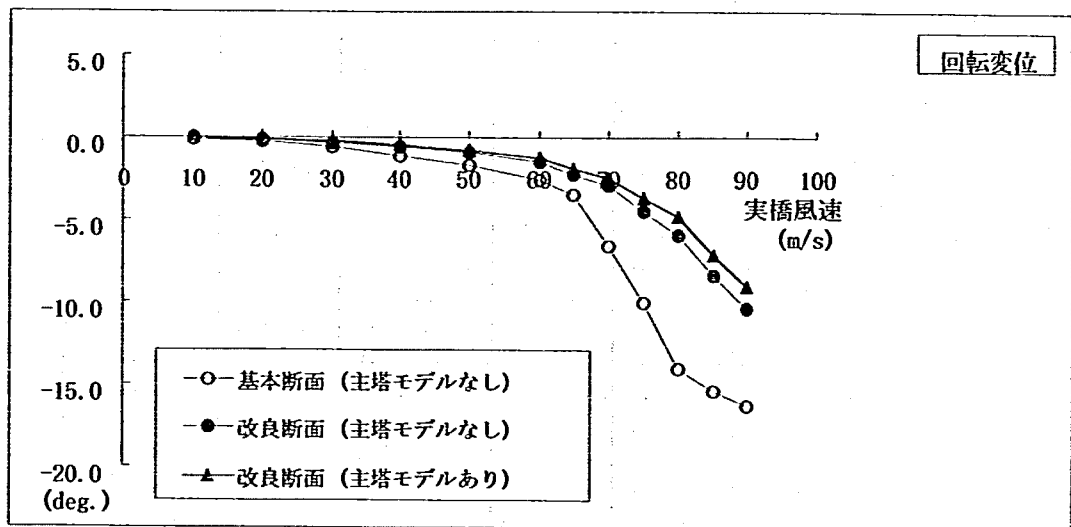
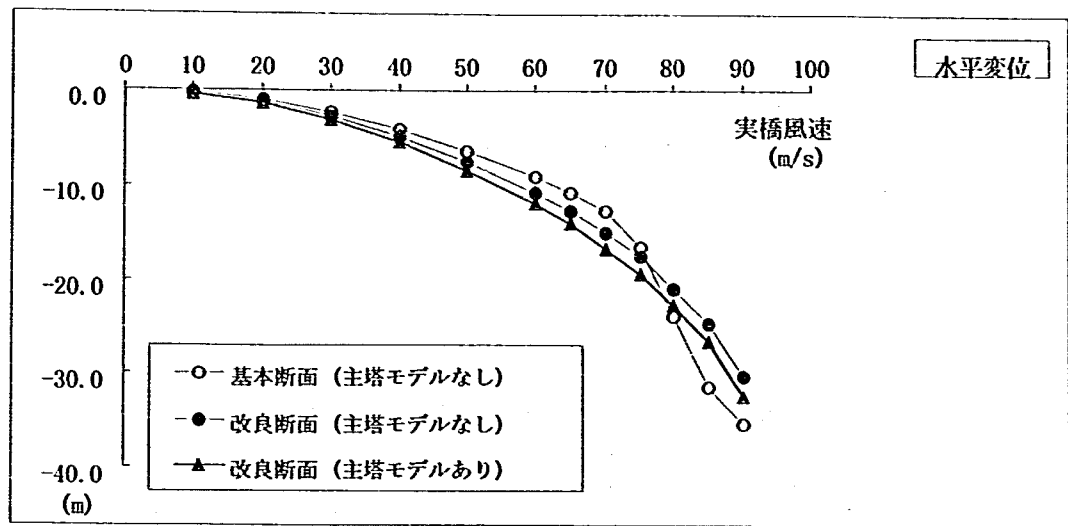


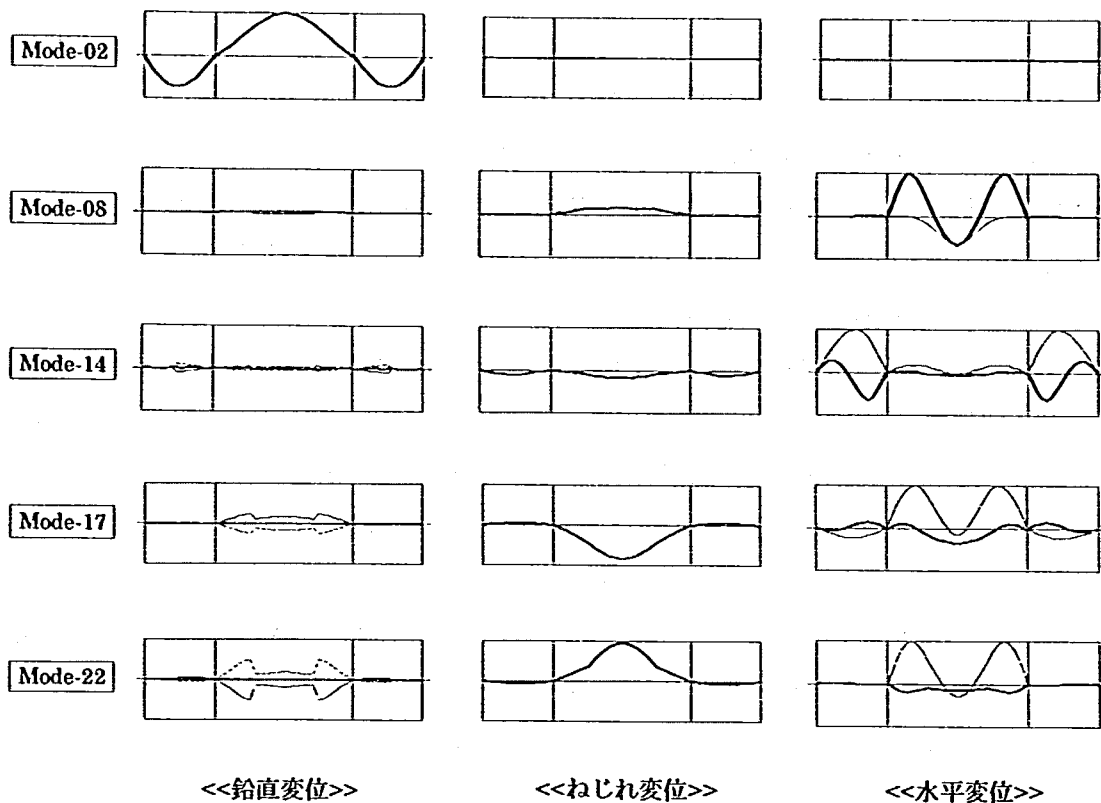
図-3.4.3.8 風荷重による主径間中央での桁の静的変位
 (主塔部モデルあり；改良2箱桁断面適用
 ；気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$)

(4) 主塔のモデル化による振動特性への影響

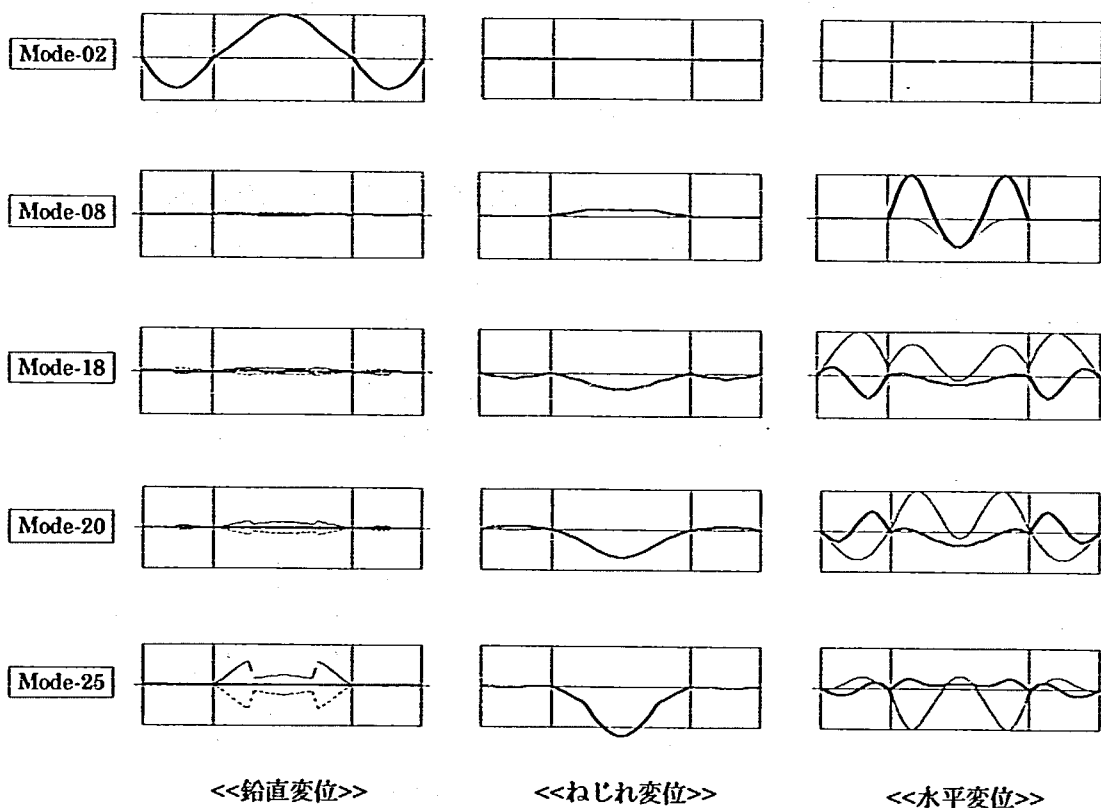
主塔部をモデル化し、主塔剛性の影響について考慮した場合の、2箱桁／1箱桁併用吊橋の固有振動特性への影響について、立体骨組モデルを用いた固有値解析により得られた固有値の一覧を表－3.4.3.1に、また、図－3.4.3.9には主要モードに関する振動モード図を示す。

表－3.4.3.1 2箱桁／1箱桁併用吊橋の固有値一覧表

	固有振動数				等価質量／等価極慣性				備 考
	主塔モデルなし		主塔モデルあり		主塔モデル化なし		主塔モデルあり		
	次数	振動数	次数	振動数	次数	質量／極慣性	次数	質量／極慣性	
曲げ 卓越モード		Hz		Hz		$t \cdot s^2/m/m$		$t \cdot s^2/m/m$	
	2 次	0.053	2 次	0.053	2 次	4.003	2 次	4.004	対称 1 次
	6 次	0.070	3 次	0.060	6 次	3.902	3 次	5.724	逆対称 1 次
	7 次	0.084	7 次	0.070	7 次	4.182	7 次	3.906	逆対称 1 次
	9 次	0.102	9 次	0.102	9 次	3.930	9 次	3.987	対称 2 次
	10 次	0.135	12 次	0.136	10 次	3.894	12 次	4.017	対称 2 次
	11 次	0.140	14 次	0.140	11 次	3.968	14 次	4.024	逆対称 2 次
	12 次	0.140	15 次	0.141	12 次	3.983	15 次	4.023	側径間 2 次
	13 次	0.140	16 次	0.141	13 次	4.002	16 次	4.001	側径間 2 次
	18 次	0.178	23 次	0.178	18 次	3.896	23 次	3.896	対称 3 次
	23 次	0.214	26 次	0.215	23 次	3.959	26 次	3.959	逆対称 3 次
	24 次	0.215	27 次	0.215	24 次	3.974	27 次	3.982	側径間 3 次
25 次	0.217	28 次	0.217	25 次	3.962	28 次	3.961	側径間 3 次	
ねじれ 卓越モード		Hz		Hz		$t \cdot m \cdot s^2/m$		$t \cdot m \cdot s^2/m$	
	8 次	0.101	8 次	0.101	8 次	25164.9	8 次	26087.5	
			17 次	0.148			17 次	38534.9	
	14 次	0.153			14 次	17276.9			
	15 次	0.153			15 次	45792.3			
	16 次	0.154			16 次	43798.2			
	17 次	0.155	18 次	0.148	17 次	1287.6	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	
	21 次	0.181			21 次	79577.3			
	22 次	0.186	25 次	0.188	22 次	1120.1	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	
	27 次	0.267	33 次	0.267	27 次	1973.9	33 次	1718.1	逆対称 1 次
26 次	0.255	34 次	0.281	26 次	4736.3	34 次	5737.9	側径間 1 次	



a) 主塔部モデルなし



b) 主塔部モデルあり

図-3.4.3.9 2箱桁/1箱桁併用吊橋の主要振動モード図

(5) フラッター特性の評価

本検討における、2箱桁／1箱桁併用吊橋のフラッター特性の評価は、平成7年度の検討と同様に、モード組合せ法による多自由度フラッター解析によるものとした。本検討でのフラッター解析条件を表-3.4.3.2に、解析により得られた風速と応答減衰率ならびに応答振動数との関係を図-3.4.3.10に示す。また、これらの結果より、改良2箱桁断面を適用した2箱桁／1箱桁併用吊橋のフラッター特性についてまとめれば以下のようなものである。

- 1) 平成7年度における検討と同様の条件（主塔モデルなし，風荷重による静的変形考慮せず）でのフラッター解析の結果、2箱桁部に改良断面を適用した場合のフラッター限界風速は $V_f=80\text{m/s}$ と、基本断面を適用した場合の限界風速 67m/s に比べ約20%の大幅な上昇がみられ、3.3.2項の検討で得られた2箱桁断面の空力特性の改善対策が、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、非常に有効となることが確認された。
- 2) 主塔部をモデル化し、主塔の変形による影響についても考慮した場合、フラッター限界風速は約 85m/s と、主塔部をモデル化しない場合の 80m/s に比べ約7%の上昇がみられた。その要因としては、両者の振動モードの差異によるものと考えられるが、特に、フラッターの発生に対して支配的と考えられる低次のねじれ卓越モード（主塔モデルなし：17次／主塔モデルあり：20次）についての等価極慣性モーメントの増加による影響が大きいものと推定される。
- 3) 風荷重による桁の静的な回転変形について考慮した場合（主塔モデルあり）、フラッター限界風速は約 90m/s まで、さらに上昇する傾向にあることが確認された。なお、これに関しては、接近流の気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$ のもとでの桁の回転変形量が、主径間中央で -5° 以下にまで抑制されていること、また、改良

2箱桁断面のフラッター特性として、 $\alpha=-5^\circ$ までの負迎角領域において、 $\alpha=0^\circ$ に比べ高いフラッター安定性を有することによるものと考えられる。

表-3.4.3.2 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	0.12kgf・s ² /m ⁴																								
有風時静的変形	桁の回転変位による動的空気力の変化を考慮																								
構造減衰	δ=0.02 (全モード)																								
空気力係数	主 桁： <table border="1"><thead><tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th colspan="3">振動方向</th></tr><tr><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr></thead><tbody><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></tbody></table> ○：非定常空気力 △：準定常空気力 ×：考慮せず						振動方向			鉛直	ねじれ	水平	空気力	L	○	○	×	M	○	○	×	D	△	△	△
		振動方向																							
		鉛直	ねじれ	水平																					
空気力	L	○	○	×																					
	M	○	○	×																					
	D	△	△	△																					
	ケーブル： 準定常抗力，準定常揚力																								
非定常空気力	動的空気力計測試験結果（3.3.2項参照）																								
準定常空気力	主 桁： C _D ：三分力試験結果（3.3.2項参照） ケーブル： C _D =0.70 A _n =2.08m ² /m/Rr																								

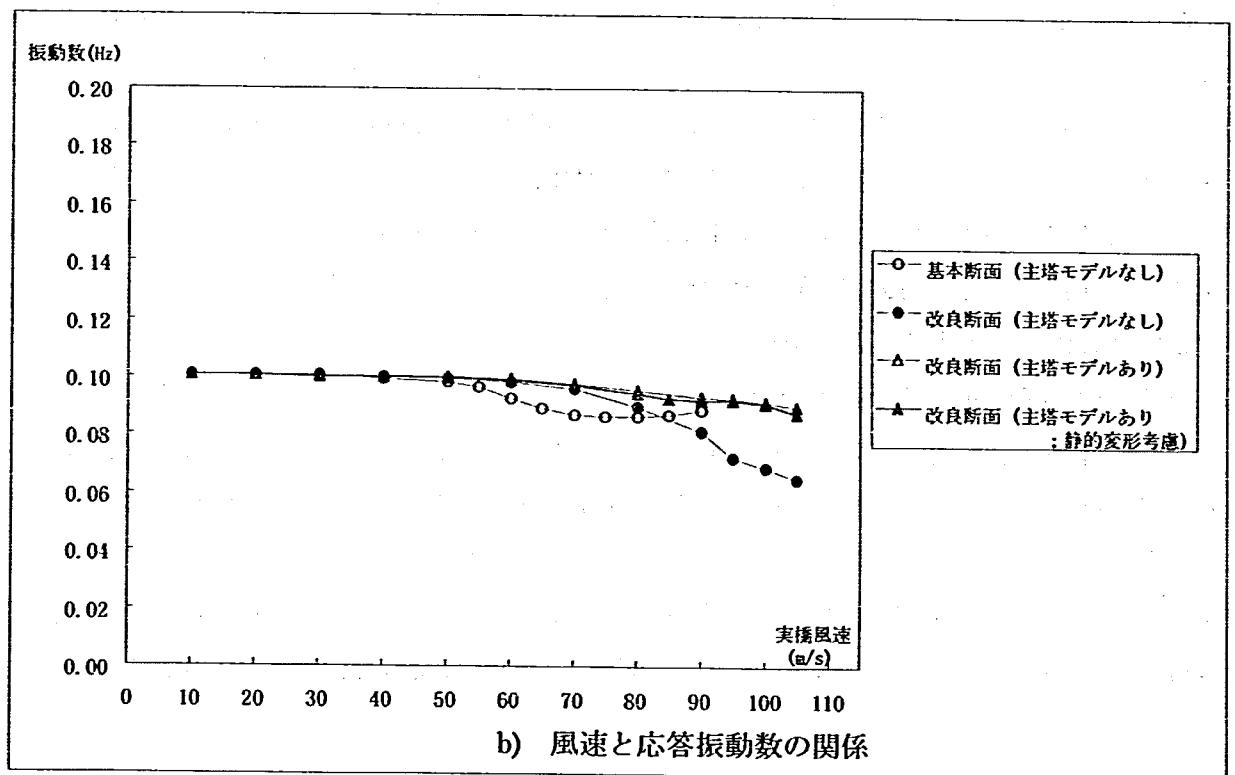
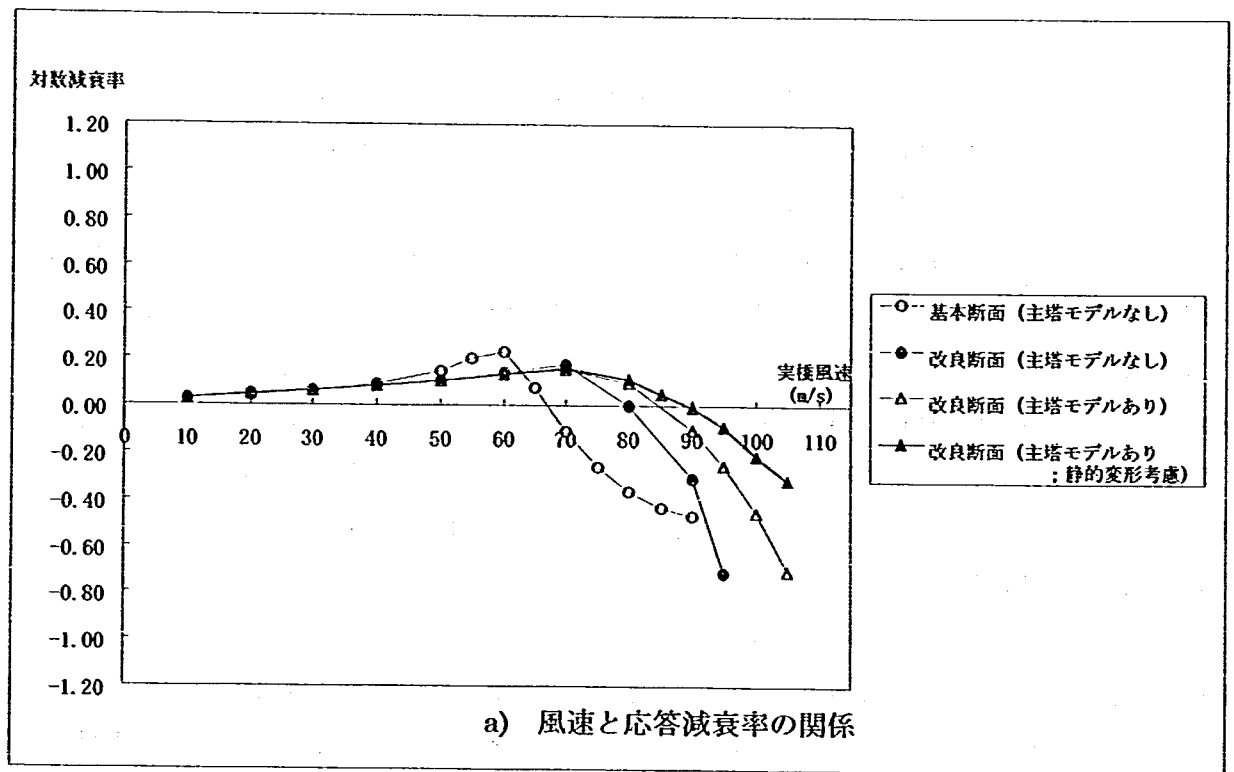


図-3.4.3.10 フラッター解析結果 (気流傾斜角: $\alpha=0^\circ$)

(6) ま と め

本検討においては、3.3.2項で得られた改良2箱桁断面を適用した、2箱桁／1箱桁併用吊橋の耐風性について、風荷重による静的変形特性ならびにフラッター特性の両面から検討を行った。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) 改良2箱桁断面を2箱桁／1箱桁併用吊橋に適用することにより、風荷重による桁の静的な回転変形は、基本検討断面を適用した場合に比べ大幅に減少し、気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$ （水平風）のもとでの主径間中央における桁の回転変位は -5° 以下まで抑制することが可能となる。
- 2) 改良2箱桁断面の適用により、フラッター安定性についても大幅に向上し、基本検討断面を適用した場合に比べ、フラッター限界風速で20%以上の上昇を期待することが可能となる。
- 3) 解析モデルにおける主塔部のモデル化の有無による、2箱桁／1箱桁併用吊橋のフラッター特性評価に与える影響として、本検討では、主塔部をモデル化し、主塔剛性の影響についても考慮することによって、フラッター限界風速としては約7%上昇するとの結果が得られた。
- 4) 気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$ （水平風）のもとでは、風荷重による静的変形（桁の回転変位に伴う動的空気力の変化）の影響について考慮することにより、フラッター限界風速はさらに上昇する傾向にあることが確認されたが、これに関しては、このときの桁の回転変形が主径間中央で -5° 以下となっていること、また、改良2箱桁断面のフラッター特性として、 $\alpha=-5^\circ$ までの負迎角領域では、 $\alpha=0^\circ$ に比べて高いフラッター安定性を有することによるものと考えられる。
- 5) 以上、本検討では、気流条件として水平風を想定し検討を行ったが、一方で、接近流に関して吹上げ／吹下しの傾斜を考慮した場合には、改良2箱桁断面を適用した場合においても、例えば $\alpha=-3^\circ$ ，風速80m/sの風に対して、桁には約 -9° の回転変位を生ずることから、この時の桁に対する相対迎角としては -12° 程度の大迎角を考慮することが必要となり、その場合のフラッター安定性は大幅に低下することが予想される。
- 6) 上記のような、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、超長大橋に対する設計基準とも関連して、今後検討すべき問題点と考えられるが、一方で、風荷重による静的変形を抑制し、さらに耐風安定性の向上を図るために有効な構造系の改良などの対策については、今後も引き続き検討を実施していきたいと考えている。
- 7) また、ここでは2箱桁断面の空力特性の改善による効果に着目して検討を行ったが、今後は、さらに、1箱桁断面の空力特性の改善による影響についても検討を行うことを予定している。

3.4.4 開口方法の差異に着目した耐風性検討

(1) 対象橋梁および風洞試験の概要

本検討では、表-3.4.4.1 に示した基本諸元を有する超長大吊橋（中央支間長 2,500m、側支間長 1,250m）を対象とした。開口化を施す前の桁断面（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 H 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。ここに、W1、L1 なる部分をオープングレーチング化したのは、偏平六角形断面を対象とした実験¹⁾において風上側と風下側の各 1 車線を開口した場合、いずれも最内側車線を開口した場合に最も良好な連成フラッター特性が得られたこと、また、この配置では風荷重作用時においてもオープングレーチング部の応力がさほど大きくならないと考えたことによる。また、比較対比を目的として、オープングレーチングを設けない基本断面（CASE-AD）と W1L1 部分を完全に開口した断面（CASE-W1L1）についても実験した。対象とした実験ケースを表-3.4.4.2 にまとめる。なお、表-3.4.4.2 に示した実験ケースにおいて、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 H はそれぞれオープングレーチングを金網で作製した場合、薄板に円形の孔を開けた場合を表す。

本試験で使用した風洞は川田工業(株)所有の水平回流式ゲッチングン型風洞（閉鎖型測定洞：幅 2.0m×高さ 2.5m×全長 15.0m）であり、試験模型としては縮尺 1/71 の 2 次元剛体部分模型（模型長 1,620mm）を使用した。基本断面（CASE-AD）に対するばね支持実験条件を表-3.4.4.3 に示す。ただし、対象とした橋梁の振動数比 f_g/f_n （ねじれ振動数 f_g と鉛直たわみ振動数 f_n の比）は $f_g/f_n=2.987$ と比較的高く、風洞実験では $f_g/f_n=2.621$ なる振動数比で実施せざるを得なかった。それゆえ、実橋風速に換算する場合には、振動数比の差異を Selberg 式で補正することとした。また、今回はオープングレーチング化に起因した空力安定効果のみに着目し、オープングレーチング化した各ケースについても表-3.4.4.3 に示した条件で風洞実験を実施した。ただし、オープングレーチング化した場合、加減衰機の設定目盛りが同一であっても、空力減衰の影響でたわみ振動の無風時減衰が CASE-AD や CASE-W1L1 よりも大きくなった。そこで、オープングレーチング化した実験ケースでは、上下面のオープングレーチング部をテープで塞いだ状態で所定の構造減衰に設定した後、有風時での挙動を把握するものとした。

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/mm ²
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・s ² ・m/m/Br.
	吊構造部	340 tf・s ² ・m/m/Br.
	合 計	690 tf・s ² ・m/m/Br.

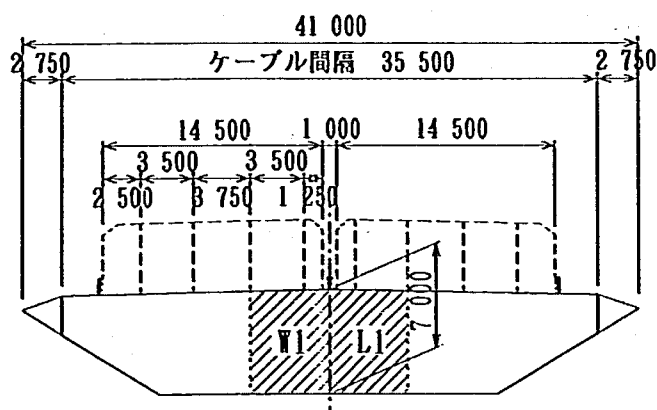


図- 3.4.4.1 補剛桁基本断面

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
CASE-AD	
CASE-W1L1	
CASE-W1L1/50G	
CASE-W1L1/50H	
CASE-W1L1/60G	
CASE-W1L1/60H	
CASE-W1L1/70G	
CASE-W1L1/70H	

表- 3.4.4.3 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・s ² ・m/m/Br.	0.0440 kgf・s ² ・m/model
振動数	たわみ	0.0537 Hz
	ねじれ	0.1604 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) 試験結果と考察

迎角 $\alpha = -3^\circ$ 、 0° 、 $+3^\circ$ なる一様流中のばね支持試験で得られた $V_{\text{ff}}-A$ 曲線（風洞風速 V_{ff} と振動振幅 A の関係）を図-3.4.4.2～図-3.4.4.4に示す。以下では、この実験結果を整理して、開口方法を変化させた場合の渦励振特性と連成フラッター特性について考察する。

1) 渦励振特性

一様流中のばね支持試験で得られた、迎角 α と渦励振の振動振幅の関係を整理して図-3.4.4.5に示す。図-3.4.4.5から、迎角 $\alpha = 0^\circ$ の場合、基本断面であるCASE-AD（図中の●記号）には渦励振が発現していないものの、WIL1部分を完全に開口したCASE-WIL1（図中の○記号）では、片振幅で100mm程度のたわみ渦励振と片振幅で1.7°程度のねじれ渦励振がそれぞれ発現していることがわかる。このように完全に開口した箱桁断面では従来から非常に低い風速域においてたわみやねじれの渦励振が発現することが知られているが、これは開口化によって当初の扁平な基本断面がずんぐりした2つの箱桁断面に分離されたことに起因すると考えられる。一方、オープングレーチング化を施した場合、CASE-WIL1/50Hで若干のたわみ渦励振が発現しているものの、その他のHシリーズとGシリーズの各ケースでは渦励振の発現は認められなかった。また、迎角 $\alpha = -3^\circ$ の場合、CASE-ADでは片振幅で500mm程度のたわみ渦励振が、また、CASE-WIL1で片振幅2.1°ものねじれ渦励振がそれぞれ発現しているのに対し、オープングレーチング化を施したGシリーズとHシリーズの各ケースでは渦励振が全く発現していない。これに対し、迎角 $\alpha = +3^\circ$ の場合、CASE-ADで片振幅1.2°、CASE-WIL1で片振幅0.9°のねじれ渦励振が、また、オープングレーチング化を施した全てのケースでも片振幅で1.0°～1.2°のねじれ渦励振が発現する結果となっている。それゆえ、今回の実験では、 $+3^\circ$ の傾斜風が橋桁に作用した場合、 $\alpha = 0^\circ$ や $\alpha = -3^\circ$ で認められたオープングレーチングの渦励振に対する制振効果は期待できないと考えられる。しかしながら、オープングレーチング化した全てのケースにおけるねじれ渦励振の発現風速域は基本断面であるCASE-ADとほぼ同じであったことから、フェアリング形状を若干変更することによって $\alpha = +3^\circ$ のねじれ渦励振を制振できる可能性が高いと思われる。

2) 連成フラッター特性

本検討においては、不安定なリミットサイクルの有無にかかわらず、ねじれの振動振幅が1°になった風速を連成フラッター風速と定義した。迎角が $\alpha = -3^\circ$ 、 0° 、 $+3^\circ$ なる一様流中のばね支持試験で得られた $V_{\text{ff}}-\alpha$ 曲線（連成フラッター風速 V_{ff} と迎角 α の関係）を図-3.4.4.6に示す。図-3.4.4.6から、迎角 $\alpha = -3^\circ$ の場合、金網でオープングレーチング化したGシリーズの各ケースでは、充実率の差異に関係なく連成フラッター風速がCASE-ADの約2倍に相当する90m/s程度まで上昇していることがわかる。しかしながら、薄板の開孔でオープングレーチング化したHシリーズでは、充実率の差異による著しい変化が認められ、CASE-WIL1/50Hで $V_{\text{ff}} = 90\text{m/s}$ であった連成フラッター風速がCASE-WIL1/70Hでは $V_{\text{ff}} = 50\text{m/s}$ 程度まで低下する結果となっている。一方、迎角 $\alpha = 0^\circ$ の場合、GシリーズとHシリーズのいずれのケースでも充実率の差異によって連成フラッター風速が変化しているが、CASE-WIL1/50GとCASE-WIL1/50Hの連成フラッター風速はそれぞれ $V_{\text{ff}} \approx 80\text{m/s}$ 、 $V_{\text{ff}} \approx 90\text{m/s}$ となっており、オープングレーチングの充実率が50%程度であれば比較的良好なフラッター特性を示すと考えられる。これに対し、迎角 $\alpha = +3^\circ$ の場合、GシリーズとHシリーズのすべてのケースにおいて連成フラッター風速が40～50m/s程度まで低下し、CASE-ADよりも低い風速で連成フラッターが発現する結果となった。

(3) まとめ

桁高 7m の流線形箱桁断面に対する風洞実験から、走行路面の一部（中央帯と最内側車線部）をオープングレーチング化した場合の耐風安定性について以下の知見が得られた。

- ・迎角が $\alpha = -3^\circ$ 、 0° の場合、開口部を G シリーズと H シリーズのいずれでオープングレーチング化しても、開口部を完全開口した場合に発現する渦励振を制振できる。
- ・迎角が $\alpha = -3^\circ$ 、 0° の場合、充実率が 50% 程度であれば、G シリーズと H シリーズのいずれでオープングレーチング化しても、開口部のない基本断面に比べ連成フラッター風速が約 2 倍程度も上昇する。
- ・迎角が $\alpha = +3^\circ$ の場合、今回のオープングレーチング化（G シリーズと H シリーズ）では渦励振特性と連成フラッター特性のいずれに対しても改善効果が認められなかった。

以上の本検討結果を踏まえ、今後は $\alpha = +3^\circ$ なる迎角に対しても良好な耐風安定性が得られるフェアリング形状を追究し、オープングレーチング化の有効性を検討していく所存である。

<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：主桁部に開口化を施した超長大箱桁形式吊橋の連成フラッター特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 945～954，1997 年 3 月。

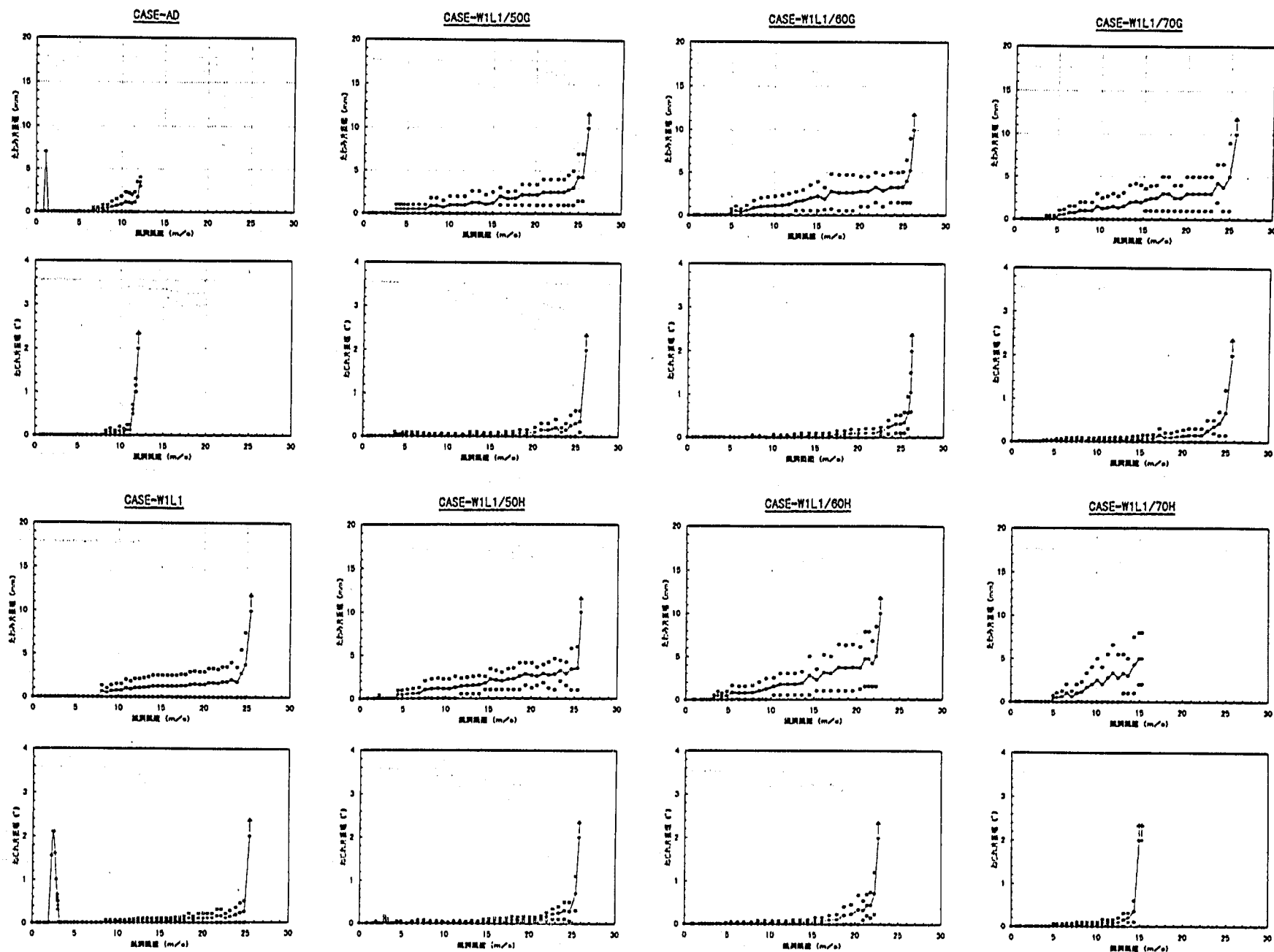


図-3.4.4.2 $V-A$ 曲線 ($\alpha = -3^\circ$)

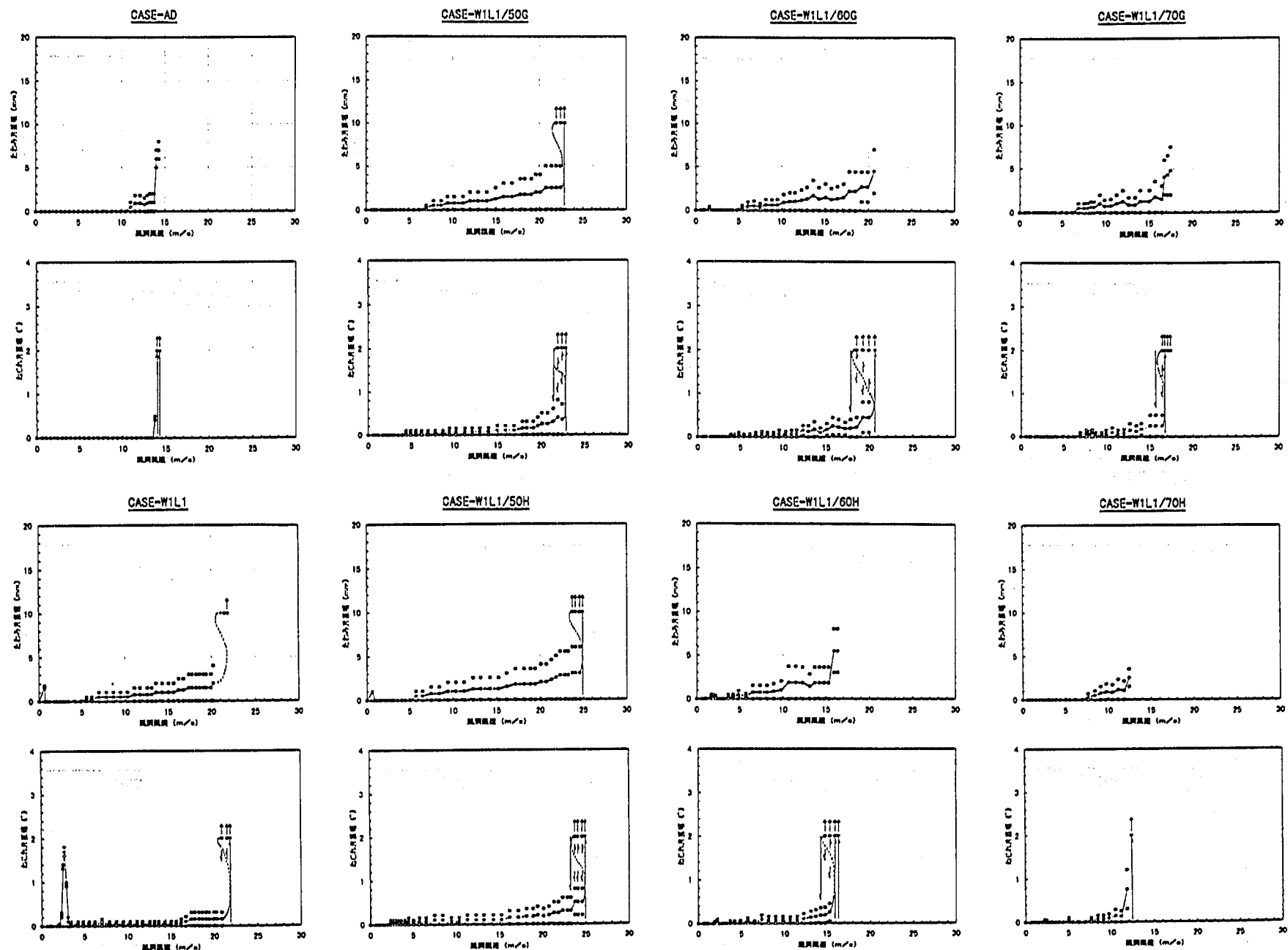


図-3.4.4.3 V_n-A 曲線 ($\alpha=0^\circ$)

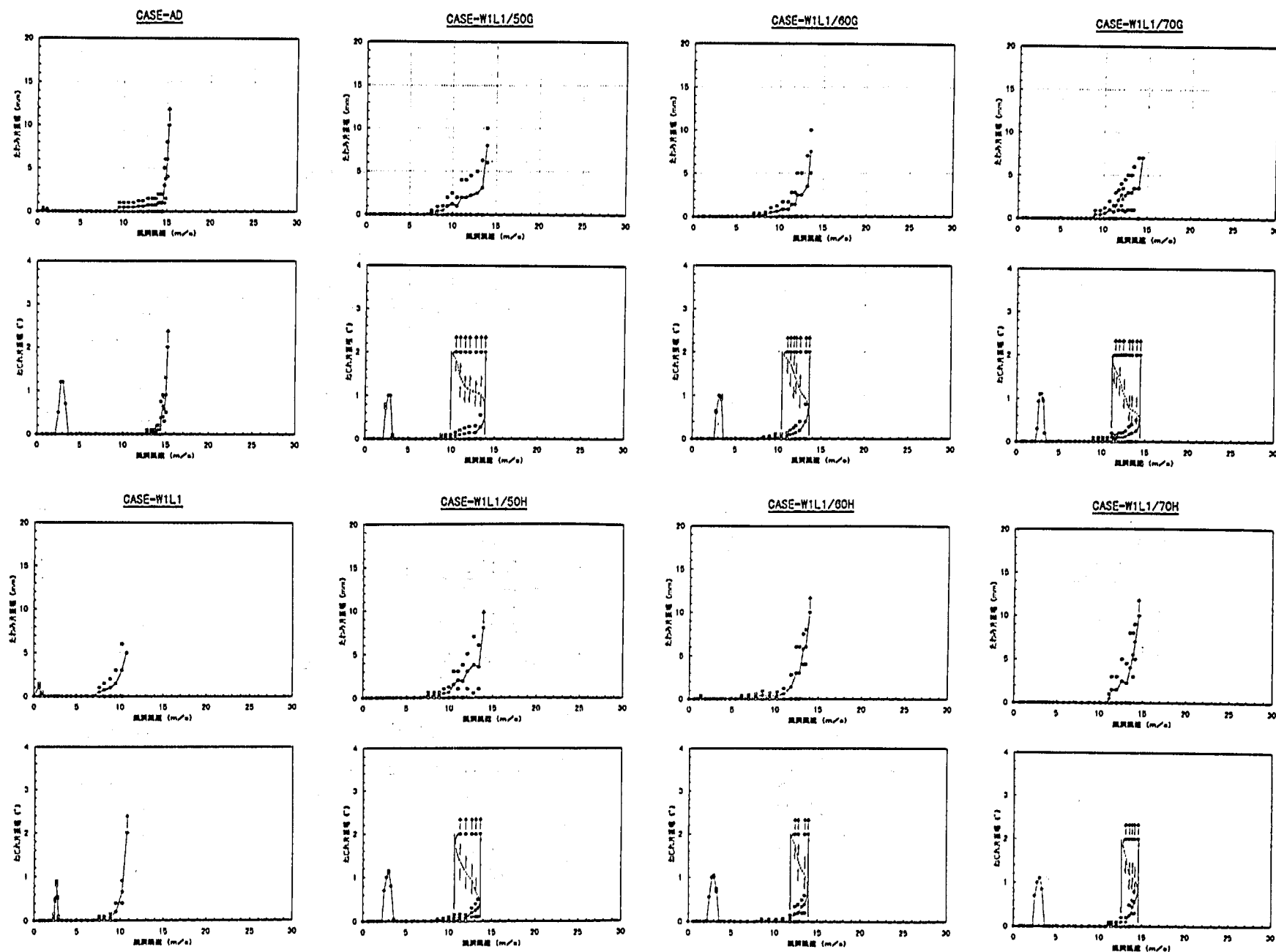


圖-3.4.4.4 $V_{\square}$ -A曲線 ($\alpha=+3^\circ$)

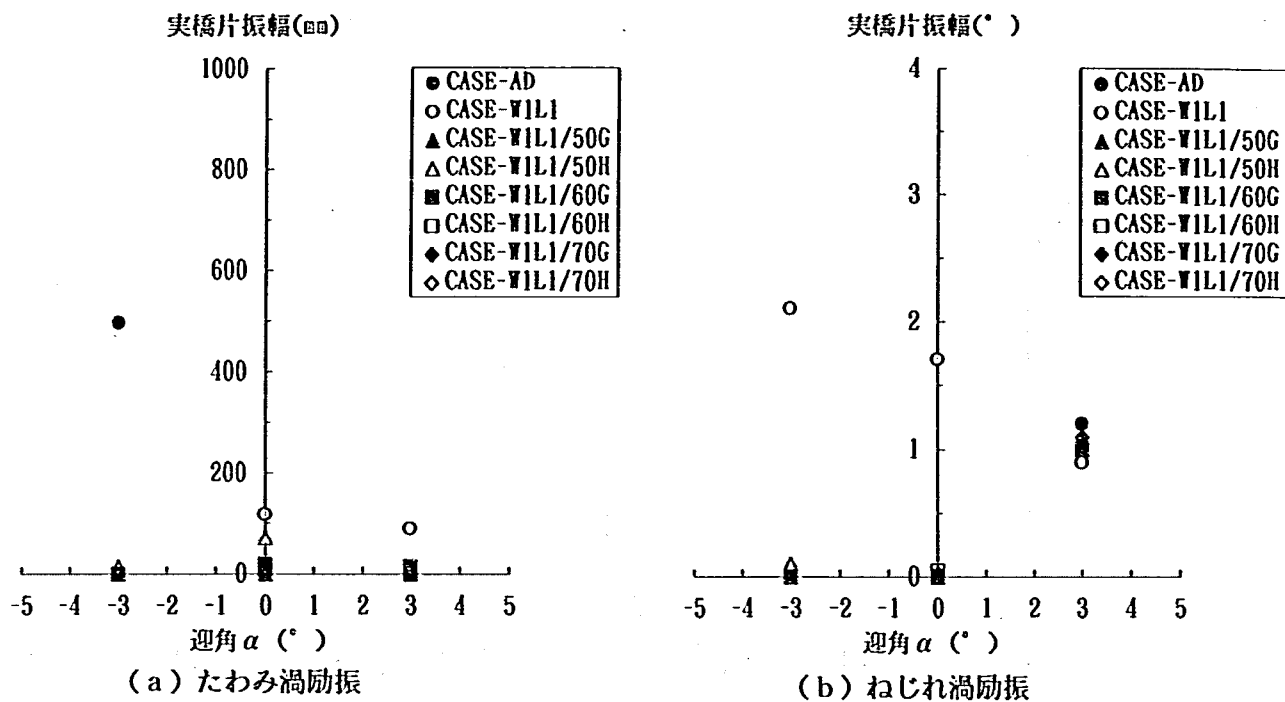


図-3.4.4.5 迎角ごとの渦励振振幅

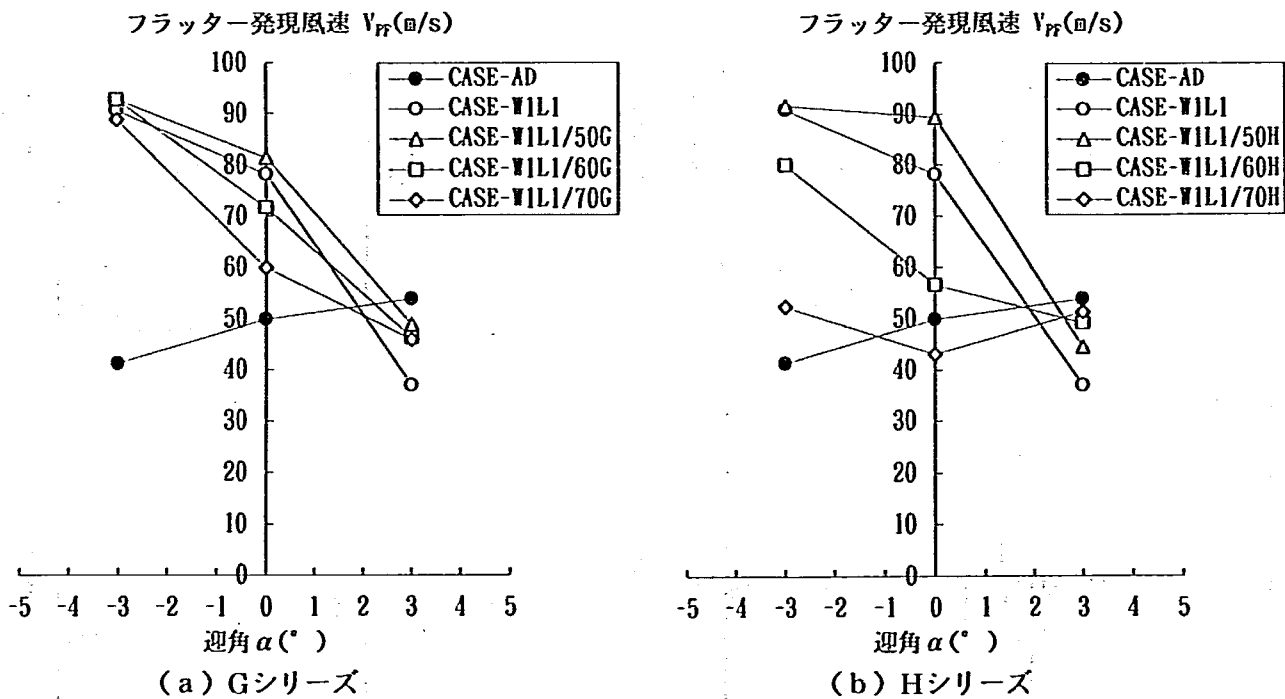


図-3.4.4.6 V_{FF} - α 曲線

(3) まとめ

桁高 7m の流線形箱桁断面に対する風洞実験から、走行路面の一部（中央帯と最内側車線部）をオープングレーチング化した場合の耐風安定性について以下の知見が得られた。

- ・迎角が $\alpha = -3^\circ$ 、 0° の場合、開口部を G シリーズと H シリーズのいずれでオープングレーチング化しても、開口部を完全開口した場合に発現する渦励振を制振できる。
- ・迎角が $\alpha = -3^\circ$ 、 0° の場合、充実率が 50% 程度であれば、G シリーズと H シリーズのいずれでオープングレーチング化しても、開口部のない基本断面に比べ連成フラッター風速が約 2 倍程度も上昇する。
- ・迎角が $\alpha = +3^\circ$ の場合、今回のオープングレーチング化（G シリーズと H シリーズ）では渦励振特性と連成フラッター特性のいずれに対しても改善効果が認められなかった。

以上の本検討結果を踏まえ、今後は $\alpha = +3^\circ$ なる迎角に対しても良好な耐風安定性が得られるフェアリング形状を追究し、オープングレーチング化の有効性を検討していく所存である。

<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：主桁部に開口化を施した超長大箱桁形式吊橋の連成フラッター特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 945～954，1997 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

これまでの概念とは異なる新しい形式の橋梁を開発・提案することにより、超長大橋の実現に向け、最も問題となる「経済性と耐風性」をクリアする可能性が期待できる。

そこで、ここでは、新形式橋梁として平成7年度の報告において提案した「楕円断面」について、その空力特性に着目し、風洞試験による予備検討を実施した。

具体的には、楕円断面の基本特性の把握と、ある程度実際の橋梁を想定した楕円断面類似形状の「多角形断面」についての予備検討を実施した。

今回検討を実施した断面の一覧を表－3.4.5.1に示す。

(1) 楕円断面の空力特性に関する予備検討

1) 検討概要

表－3.4.5.1に示す断面比1:3(E-13)及び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。

非定常空気力試験については、その結果を用いて非定常空気力係数を算出し、フラッター解析を行い各断面のフラッター特性差の予測を行うこととした。

なお、バネ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、重量的にバネ支持試験の実施が困難な状態となったため、楕円断面を用いたバネ支持試験の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。

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、表面粗度を変化させ、流れの剥離点を固定した場合の抗力係数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_d ・ C_o 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))。具体的には、高風速での C_o や揚力傾斜($dC_d/d\alpha$)が減少する傾向にある。

Re数としては、 1.02×10^4 (9.98m/s)と 2.08×10^4 (20.29m/s)でわずかに約倍半分の違いであるにも関わらず、特性差としては顕著にあらわれており、空力的に敏感な断面であることが伺える。

また、上流側に乱流促進・剥離位置固定用ラフネスを設けた場合(E-13-R1及びE-13-R2)について、基本断面の特性と比較すると、迎角 0° における C_o の増加や $dC_d/d\alpha$ の低下がみられ、上流端表面粗度を

上げることによりさらにその傾向が強まり、剥離点が移動するなど断面周りの流れの変化による抗力係数への影響がみられる（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)）。上流側の表面粗度を大きくした場合（E-15-R1）、断面周りの流れの変化による C_D への影響や、剥離による $dC_D/d\alpha$ の低下など、E-13 と同様の傾向を示しているが、 C_D の大きさの変化そのものは E-13 と異なる傾向にある（図－3.4.5.1(2)）。

なお、モーメントについては、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（ $\pm 15^\circ$ ）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、いずれの断面にも見られなかった。

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 数の依存性が大きいことは確認できた。しかし、実際には、 Re 数が極超臨界域にあると想定され、この状況を再現する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。

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－3.4.5.2 に示す。

ここでは、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が不十分であることから、各断面間でのフラッター特性の傾向及びその差を調べることで、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見られない。

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（ねじれの渦励振・フラッター）の発生が予想される結果となった。

(2) 多角形断面に関する予備検討

1) 概要

ここでは、実際の橋梁への適用を想定した楕円断面に類似形状の多角形（20 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 $D=9\text{m}$ 、全幅 $B=45\text{m}$ ）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 部と上に組んだトラス部で持たせる。上面及び両側面にある断面形状を形成する部分は、単なる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、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。実橋への適用の可否については検討中であるが、とりあえず実現の可能性の一案として想定した構造である。

以上のような新形式橋梁について、本年度は多角形断面の耐風安定性に着目し、風洞試験による予備検討を行った。以降にその概要を述べる。

2) 検討項目

多角形断面の耐風安定性を把握することを目的に、非定常空気力試験及びバネ支持試験を実施した。

表－3.4.5.4 に、実橋の振動諸元（想定値）、模型諸元（所要値）、模型諸元（実験値）を示す。前述のように、ここでの諸元は、概略検討時のものである。

模型は、縮尺 1/90 で 20 角形の楕円類似形状を再現し、上面開放可能な構造としてある。また、開放時のことを考慮して内部トラスも模型化した。断面図を図－3.4.5.4 に示す。

本年度は、まず基本断面 P-15 について、 $\alpha=0^\circ$ で非定常空気力試験及びバネ支持試験を実施し、耐風安定性の把握を試みた。

3) 試験結果

図－3.4.5.5 及び 3.4.5.6 に、基本断面 P-15 の $\alpha=0^\circ$ におけるバネ支持試験結果（ $V-\delta$ 図及び $V-A$ 図）を示す。結果では、迎角 0° でハードフラッターの特性を示し、限界風速は風洞風速で 9.74m/s （実橋想定： 54.7m/s ）となった。

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ため、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時点で、非定常空気力試験による評価・検討を実施することとした。

よって、以降では、P-15 断面のバネ支持試験結果についてのみ報告する。

以上のバネ支持試験の結果から判断すると、基本形における耐風安定性は十分とはいえず、何らかの耐風安定化策が必要であると考えられる。

ここで、多角形断面の場合、たとえ稜角があっても 8 角形をこえると Re 数の影響を受けると言われており、ここで取り上げた 20 角形断面についてもこれを思わせるような現象がバネ支持試験においても見

られた。具体的には、風洞風速 4 ～ 5m/s 付近で、揚力の作用する方向（下向きから上向きへ）が逆転するという不可解な現象が発生した。また、前述のように、非定常空気力係数の傾向も不安定で、特性をつかみにくい結果となっている。

本来、上下対称の断面であれば $\alpha=0^\circ$ において揚力は作用しないと思われるが、模型精度・設置精度などにより発生の可能性は否定できない。しかし、その作用方向が逆転することに関しては、模型精度などによるものとは考えにくい。よって、上述のように 20 角形断面であるが故、Re 数の影響を受けていると考えられ、風速によって剥離点が変わり、空力特性に何らかの影響を与えているものと推測される。

三分力試験の実施はもちろんのこと、Re 数の影響を受けにくくするような対策の検討、Re 数依存性が限界風速に与える影響を把握するなども必要となる可能性があると思われる。

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、今後検討を進めて行くにあたって、その空力特性については十分注意する必要がある。

(3) まとめ及び今後の課題

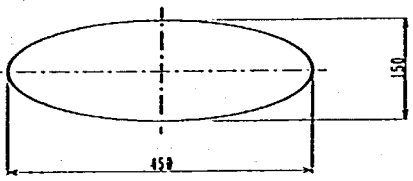
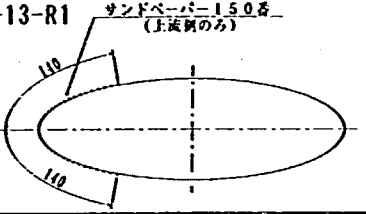
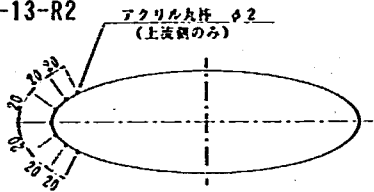
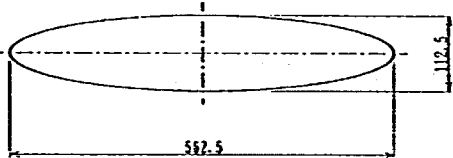
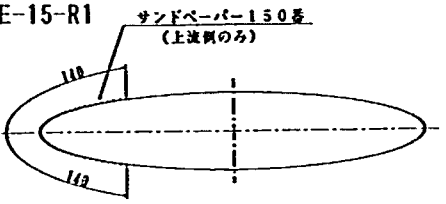
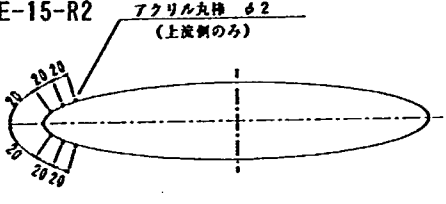
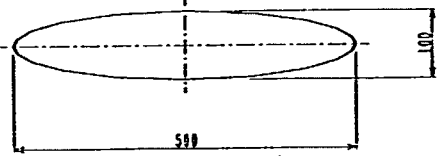
以上、本年度は予備検討ということもあり楕円断面の空力特性について十分な検討にまで至っていない。

楕円断面あるいは、それに類似の多角形断面については過去の検討例は少なく、不確定要素が比較的多い断面でもあり、Re 数依存性など十分な検討及び特性の把握が必要であると考えられる。

よって、現時点での耐風安定性に関する評価は難しく、三分力試験等を含めた空力特性に関する多角的な検討が必要であると思われる。

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、多角形断面の実橋への適用の可能性について総合的な検討の実施を考えている。

表- 3.4.5.1 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)	—	○	×
P-15 	多角形断面 断面比 1:5 基本形	—	○	○

(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今回は断念したもの。

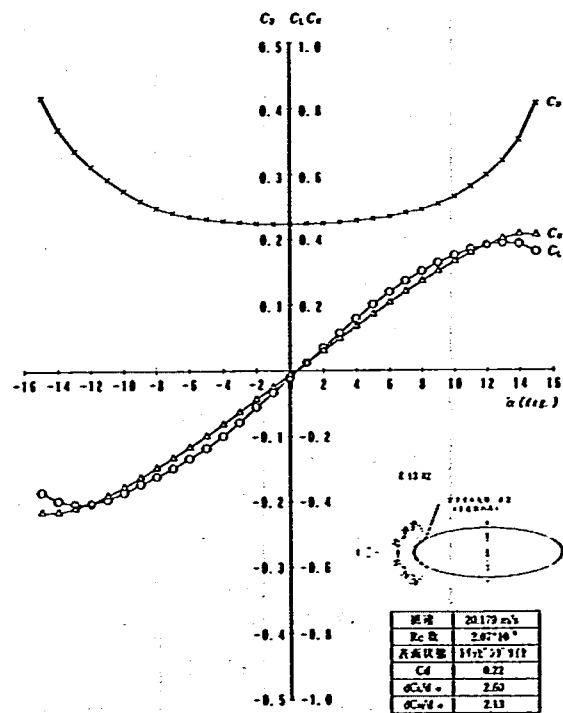
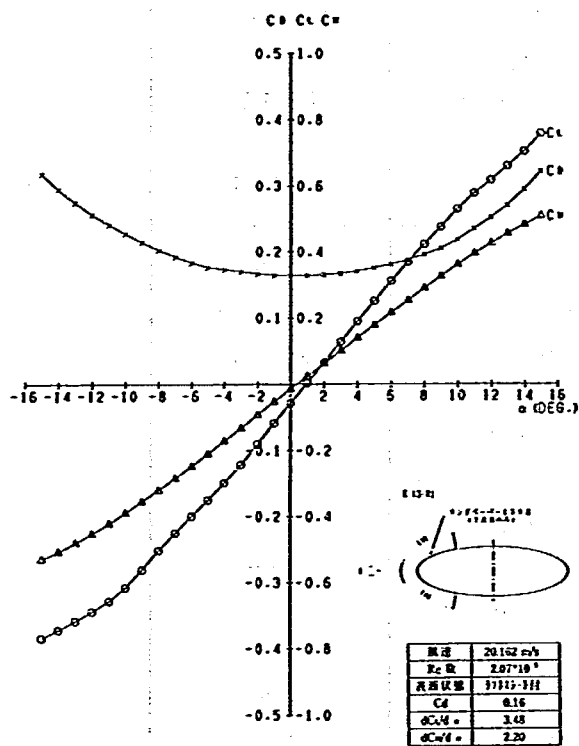
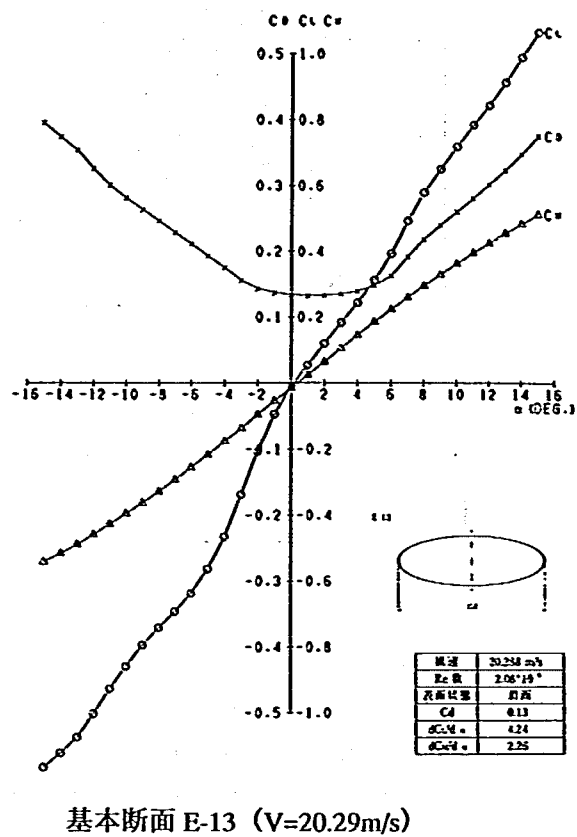
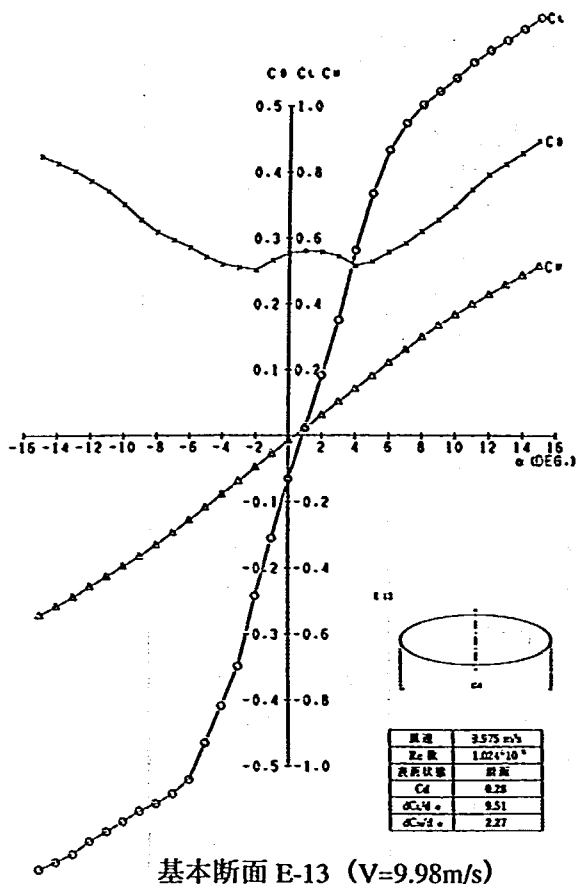
・三分力試験は-15°～+15°の範囲で実施。非定常空気力試験・バネ支持試験は $\alpha=0^\circ$ にて実施。

表- 3.4.5.2 楕円断面 (E-13/E-15) 2次元フラッタ解析諸元

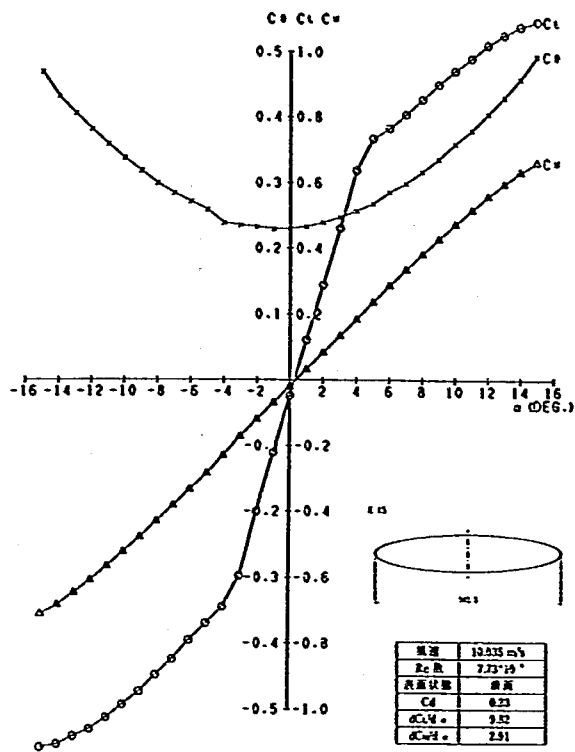
振動数	たわみ	0.050 Hz
	ねじれ	0.150 Hz
振動数比		3.0
構造減衰		0.02
代 表 幅		45.0 m
重 量		40.0 tf/m
極慣性モーメント		10,000 tm ² /m

表- 3.4.5.3 多角形断面 (P-15) 振動諸元

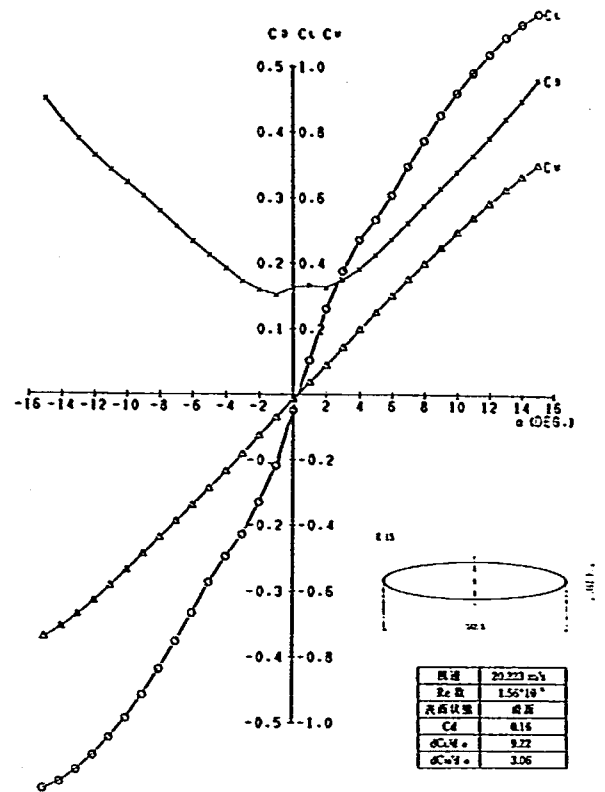
		実橋想定値 B/D=5	模型所要値	実験値
呼 称			P-15	P-15
縮 尺		—	1/90	1/90
全幅(代 表 幅) B		45.0m	0.500m	0.500m
桁高(代 表 高) D		9.0m	0.100m	0.100m
重 量		40.00 tf/m	4.938 kgf/m	5.074 kgf/m
極慣性モーメント		10000 tfm ² /m	0.0155 kgfs ² /m	0.0164kgfs ² /m
振 動 数	たわみ	0.050 Hz	0.900 Hz	1.051 Hz
	ねじれ	0.150 Hz	2.700 Hz	2.404 Hz
振 動 数 比		3.00	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



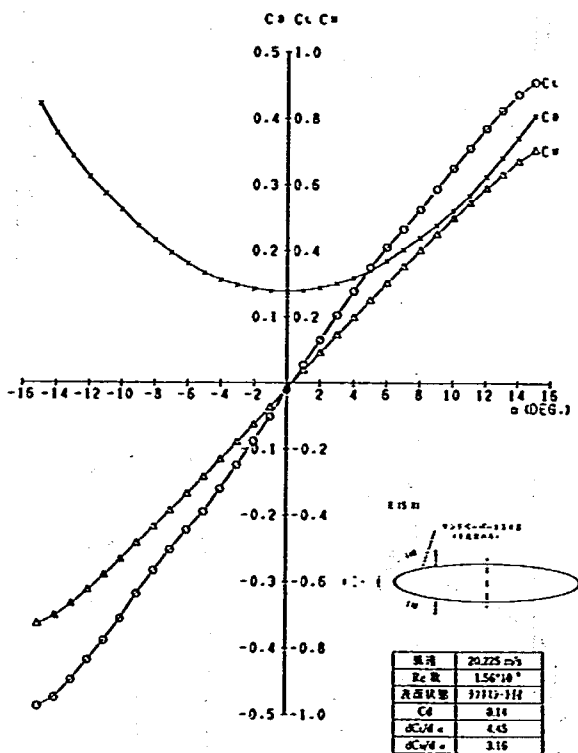
図一 3.4.5.1(1) 三分力試験結果（楕円断面 E-13 B/D=1:3）



基本断面 E-15 ($V=10.04\text{m/s}$)



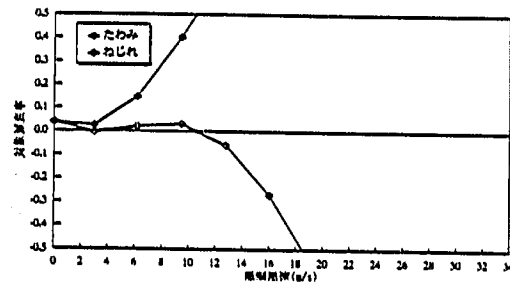
基本断面 E-15 ($V=20.23\text{m/s}$)



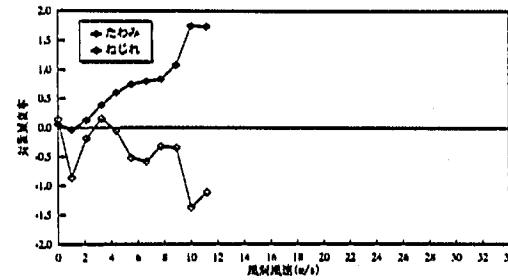
断面 E-15-R1 ($V=20.23\text{m/s}$)

断面 E-13-R2 ($V=20.179\text{m/s}$)

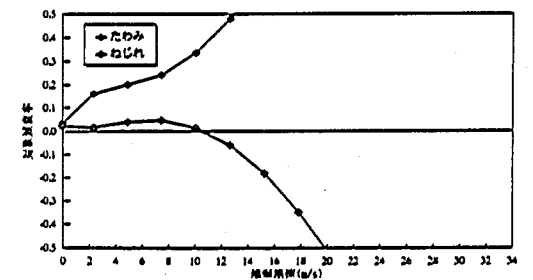
図-3.4.5.1(2) 三分力試験結果 (楕円断面 E-15 $B/D=1.5$)



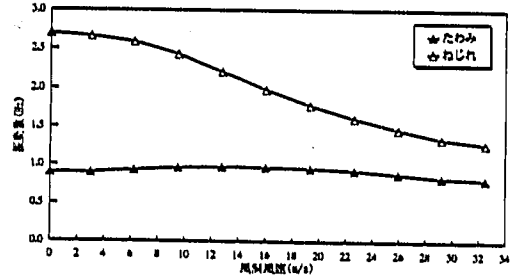
(1) E-13 (基本形)



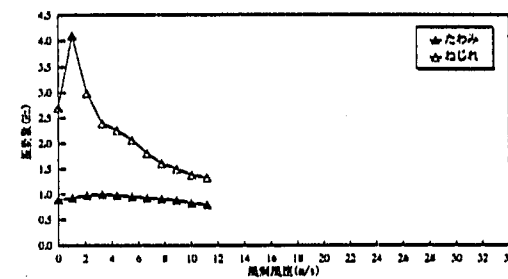
(2) E-13-R1 (上流にサンドペーパー)



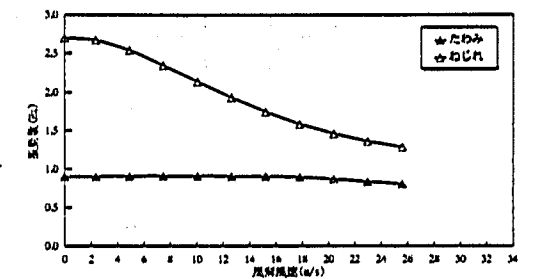
(3) E-13-R2 (上流にトリッピングワイヤ)



(4) E-15 (基本形)

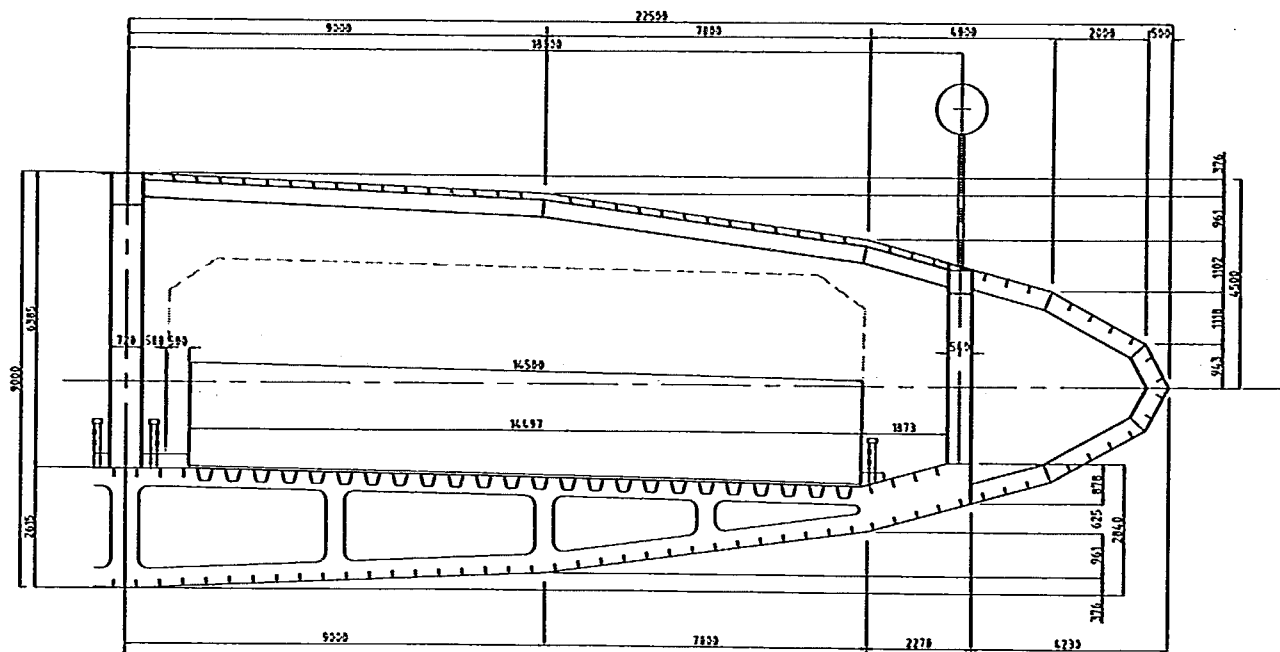


(5) E-15-R1 (上流にサンドペーパー)

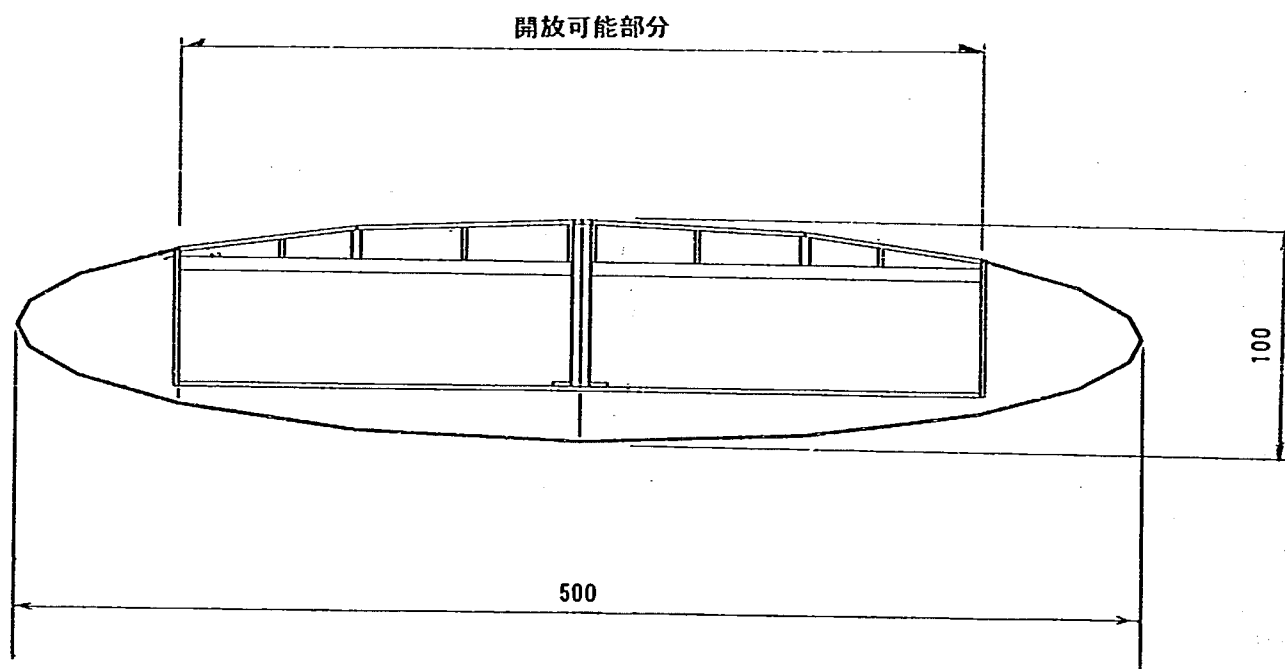


(6) E-15-R2 (上流にトリッピングワイヤ)

図-3.4.5.2 断面比 1:3 楕円断面 E-13 2次元フラッター解析結果 ($\alpha=0^\circ$)



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

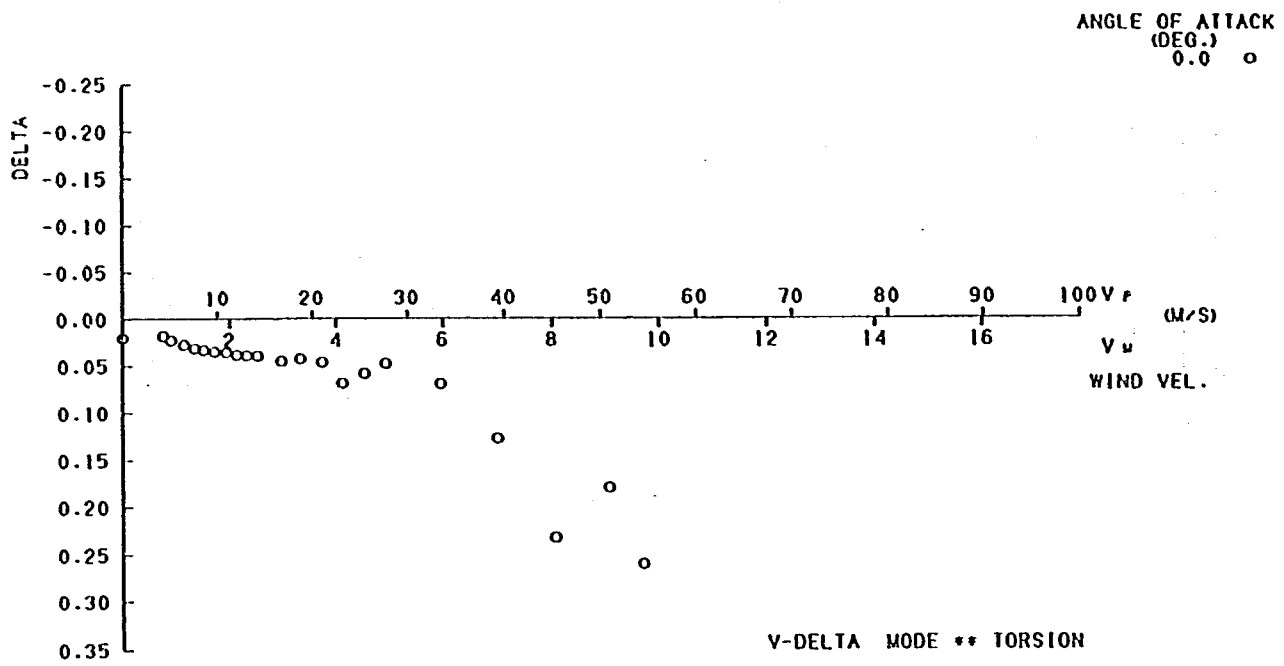


図- 3.4.5.5 バネ支持試験結果 V- δ θ 図 (多角形断面 P-15 B/D=1:5 $\alpha=0^\circ$)

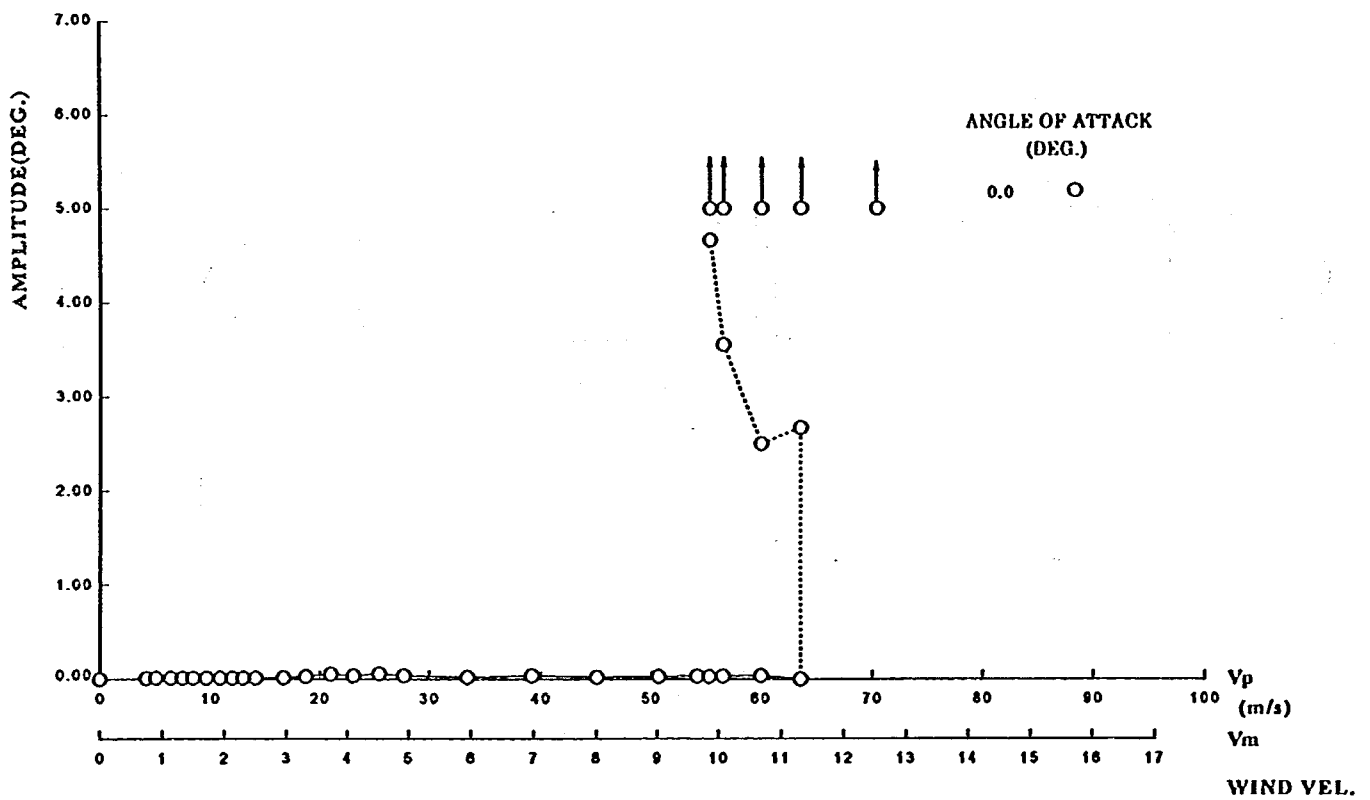


図- 3.4.5.6 バネ支持試験結果 V-A θ 図 (多角形面 P-15 B/D=1:5 $\alpha=0^\circ$)

3.4.6 遮風壁箱桁断面の耐風性検討

(1) 概要

本項では、図-3.4.6.1 に示す既提案の箱桁基本断面（以下基本断面 A と呼ぶ）に対して、高欄外側及び中央分離帯位置に種々の高さで遮風壁を取り付けた場合の耐風性について検討を行い、さらに、上記基本断面の桁高・フェアリング形状の見直しを行い、より耐フラッター性能に優れた新たな基本断面形状の提案を行った。

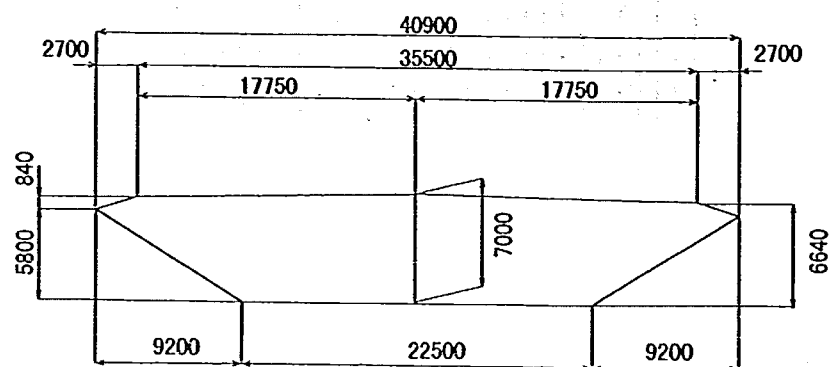


図-3.4.6.1 基本断面A

(2) 部分模型応答試験

1) 遮風壁設置が耐フラッター性能に及ぼす影響

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-3.4.6.1 に試験条件をまとめて示す。

表-3.4.6.1 想定吊橋の諸元及び模型測定値（縮尺：1/200）

項目	単位	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
単位桁長さ慣性モーメント	tf・s ² /kgf・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

設置する遮風壁としては、図-3.4.6.2 に示す格子状のものを想定し、昨年度の検討結果から橋面上の風速低減効果と耐フラッター性能の双方を考慮して、充実率を 50%に固定して試験を行った。尚、遮風壁の取り付け位置は、高欄外側及び中央分離帯位置とし、遮風壁高さについては 3m, 5m, 7m の三種類について検討を行った。

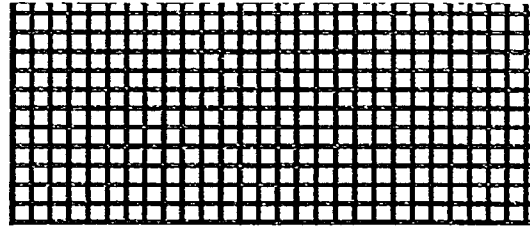


図-3.4.6.2 遮風壁形状

以下、試験結果についてまとめて記す。

① 高欄外側での遮風壁設置の影響

フラッター限界風速の迎角特性を図-3.4.6.3~3.4.6.4に示す。

- ・設置する遮風壁高さが増大するに伴い、フラッター限界風速は何れの迎角においても低下する傾向にある。しかし、高さ 3m 以上の部分の影響度は比較的小さいようである。

(図-3.4.6.3)

- ・上記の傾向を明らかにするため、5m の遮風壁の下部 3m を取り外した（高さ 3m~5m の範囲に遮風壁を設置した）場合について試験を行った。その結果、迎角 -3° ~ 0° におけるフラッター限界風速は遮風壁を設置しない場合よりも若干低下するものの、迎角 3° においては逆に安定化する傾向にある。

(図-3.4.6.4)

① 中央分離帯位置での遮風壁設置の影響

フラッター限界風速の迎角特性を図-3.4.6.5に示す。

- ・設置する遮風壁高さが増大しても、フラッター限界風速はさほど変化せず、迎角 -3° におけるフラッター限界風速は、遮風壁を設置しない場合に比べて若干低下するものの、迎角 0° , 3° については逆に安定化する傾向にある。

(図-3.4.6.5)

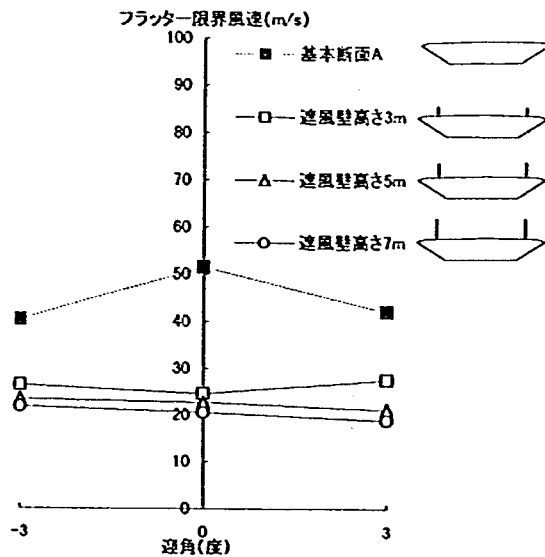


図-3.4.6.3 遮風壁高さの変化による
迎角特性の変化
(基本断面A : 高欄外側設置)

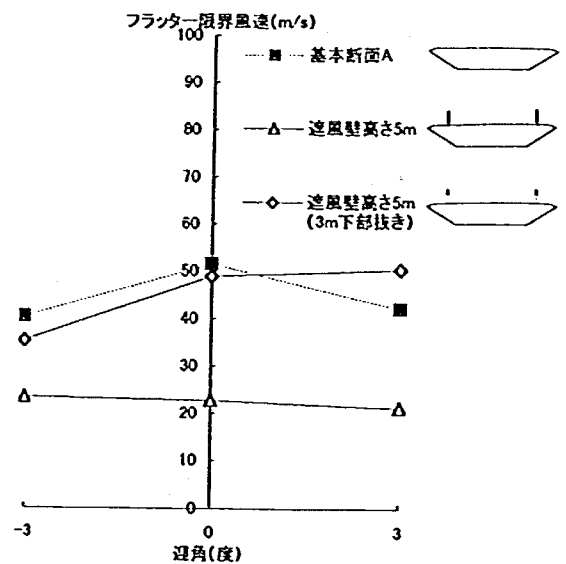


図-3.4.6.4 遮風壁下部の影響

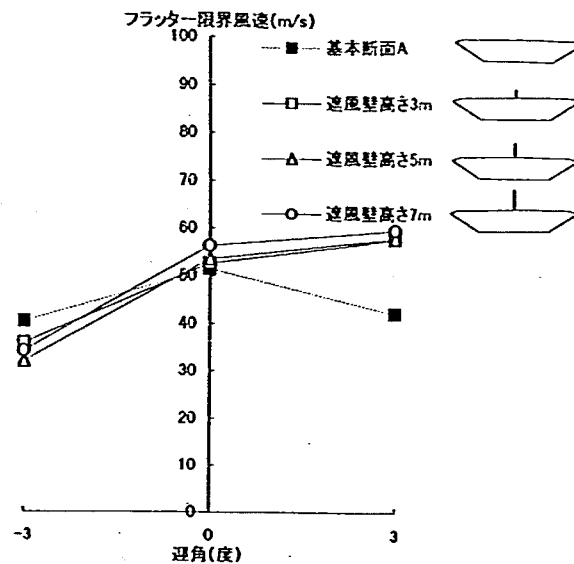


図-3.4.6.5 遮風壁高さによる迎角特性の変化
(基本断面A : 中央分離帯設置)

2) 基本断面形状の見直し

基本断面 A の断面形状の見直しを行い、図-3.4.6.6 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、前と同様、表-3.4.6.1 にしたがって試験を行った。

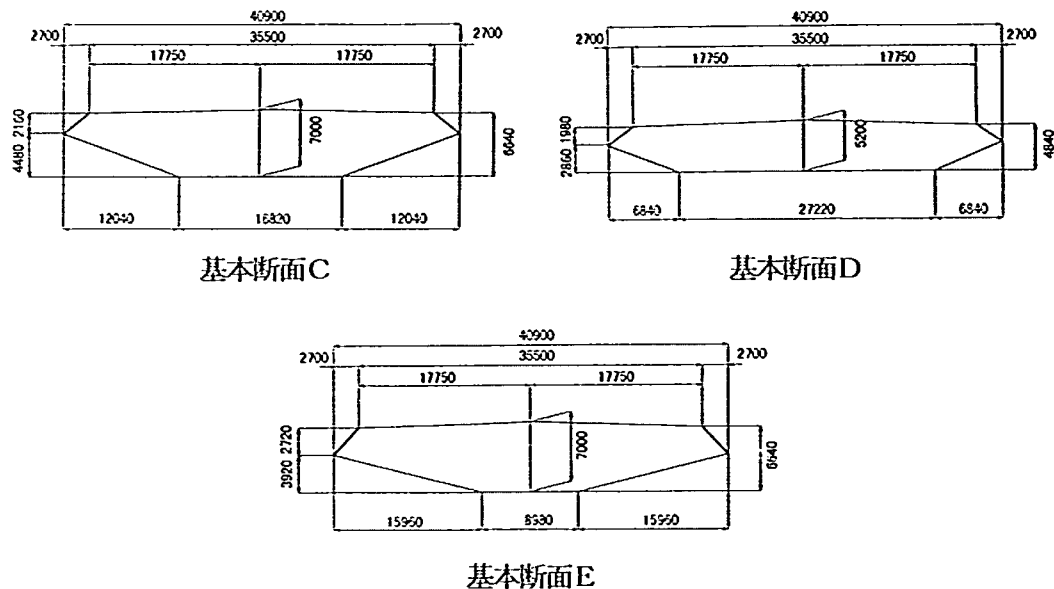


図-3.4.6.6 新たな基本断面形状

図-3.4.6.7 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。

- ・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。
- ・ $\pm 3^\circ$ 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。

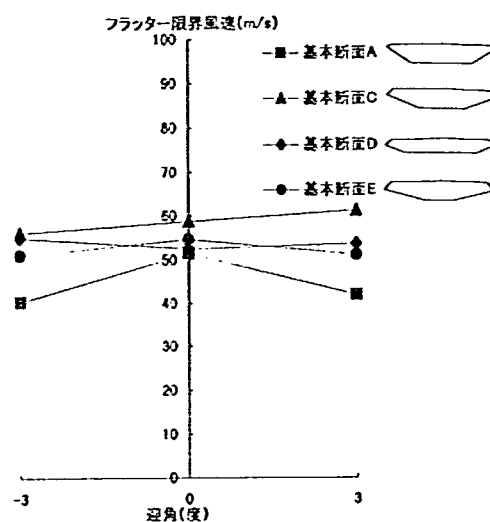


図-3.4.6.7 各基本断面の迎角特性

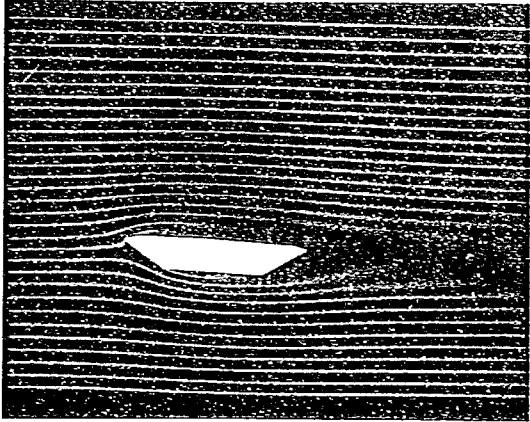
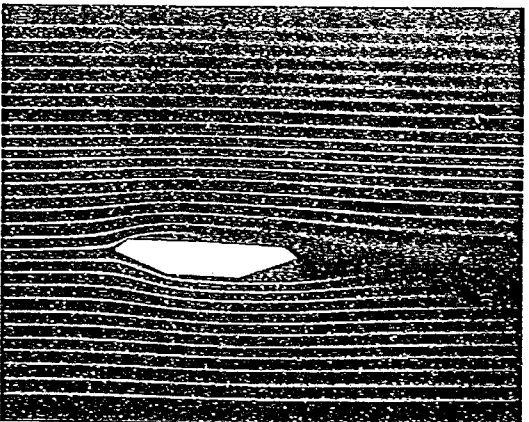
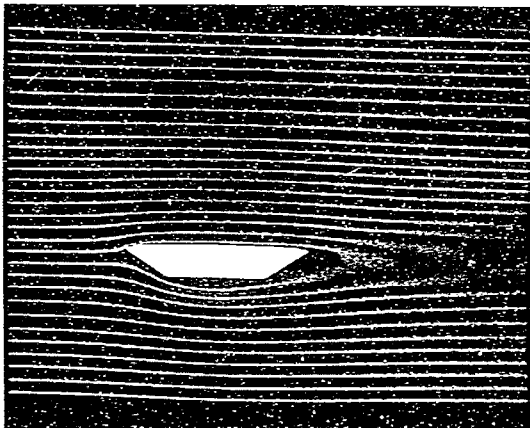
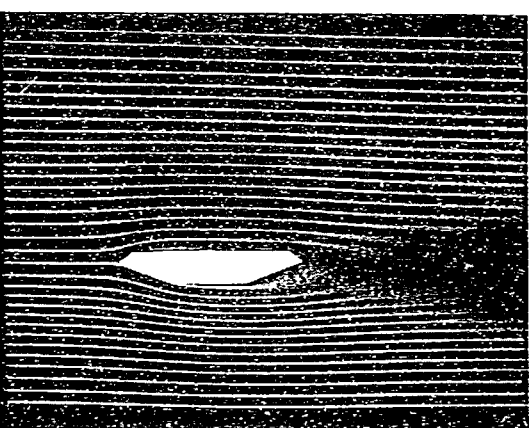
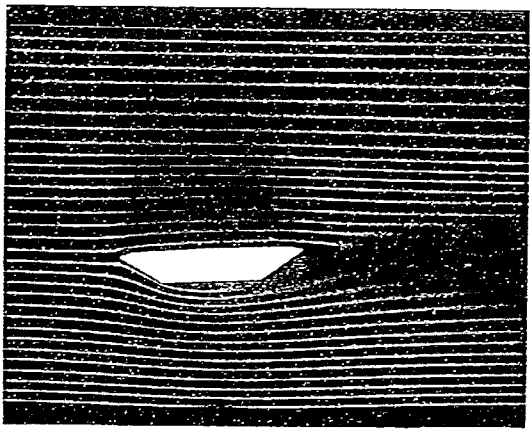
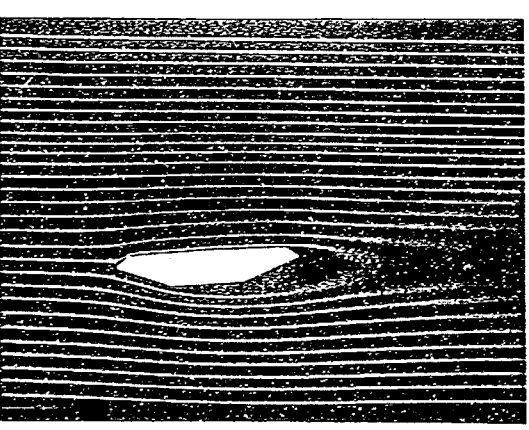
断面 迎角	 基本断面 A	 基本断面 C
+3°		
0°		
-3°		

図-3.4.6.8 可視化写真

図-3.4.6.8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。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顕著な剥離バブルの形成は認められない。

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、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。

次に、最も優れた耐フラッター性能を有する基本断面Cに対して遮風壁の設置を検討し、(1)の結果を踏まえて、中央分離帯位置に遮風壁(高さ3m, 7m)を設置した場合について応答試験を行った。

フラッター限界風速の迎角特性を図-3.4.6.9に示す。

- ・断面形状の差異によって、基本断面Aの場合とは若干異なった特性を示しており、遮風壁高さを7mとある程度高くした場合には、何れの迎角においても遮風壁を設置しない場合を上回る結果となっている。

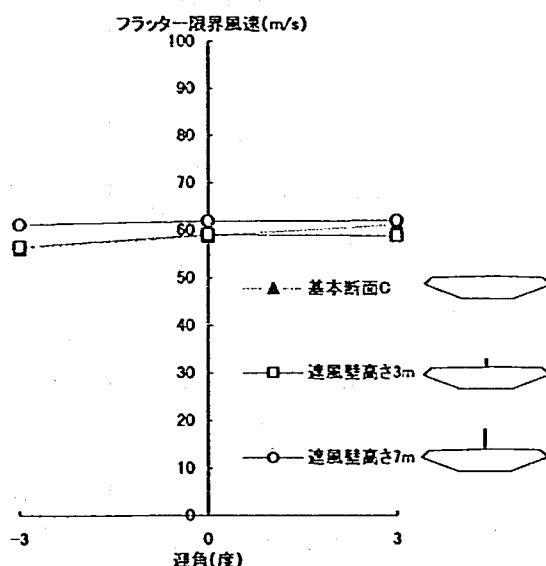


図-3.4.6.9 遮風壁高さによる迎角特性の変化
(基本断面C：中央分離帯位置設置)

(3) フラッター解析

1) 非定常空気力測定試験

前項にて最も優れた耐フラッター性能が得られた基本断面Cについて、自由振動法にて非定常空気力測定を行った。結果を図-3.4.6.10に示す。

尚、非定常空気力係数の定義は次の通りである。

$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left\{ A_{hh}(R) \bar{h} + \frac{A_{hh}(I)}{\omega} \dot{\bar{h}} + A_{h\alpha}(R) \bar{\alpha} + \frac{A_{h\alpha}(I)}{\omega} \dot{\bar{\alpha}} \right\} \dots\dots(3.4.6.1)$$

$$M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left\{ A_{\alpha h}(R) \bar{h} + \frac{A_{\alpha h}(I)}{\omega} \dot{\bar{h}} + A_{\alpha\alpha}(R) \bar{\alpha} + \frac{A_{\alpha\alpha}(I)}{\omega} \dot{\bar{\alpha}} \right\}$$

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)

$\bar{h}$: たわみ無次元変位 (上向き正)

$\bar{\alpha}$: ねじれ変位 (時計回り正)

A_{ij} : 非定常空気力係数 (換算振動数 $k=fB/U$ の関数)

(尚, 添え字は変位成分から力成分への寄与を示し, R , I はそれぞれ実部 (変位比例成分), 虚部 (速度比例成分) を表す。例えば, $A_{h\alpha}(R)$ は非定常揚力のねじれ変位比例成分を表す)

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

2) 二次元フラッター解析

図-3.4.6.10 に示した非定常空気力係数を用いて二次元フラッター解析を行い, 応答試験より得られたフラッター限界風速との比較を行った。尚, 解析は表-3.4.6.1 の諸元にしたがって行った。結果を表-3.4.6.2 に示す。

表-3.4.6.2 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
58.7 m/s	56.7 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 3.4%程度であり, 測定された非定常空気力の妥当性が確認できる。

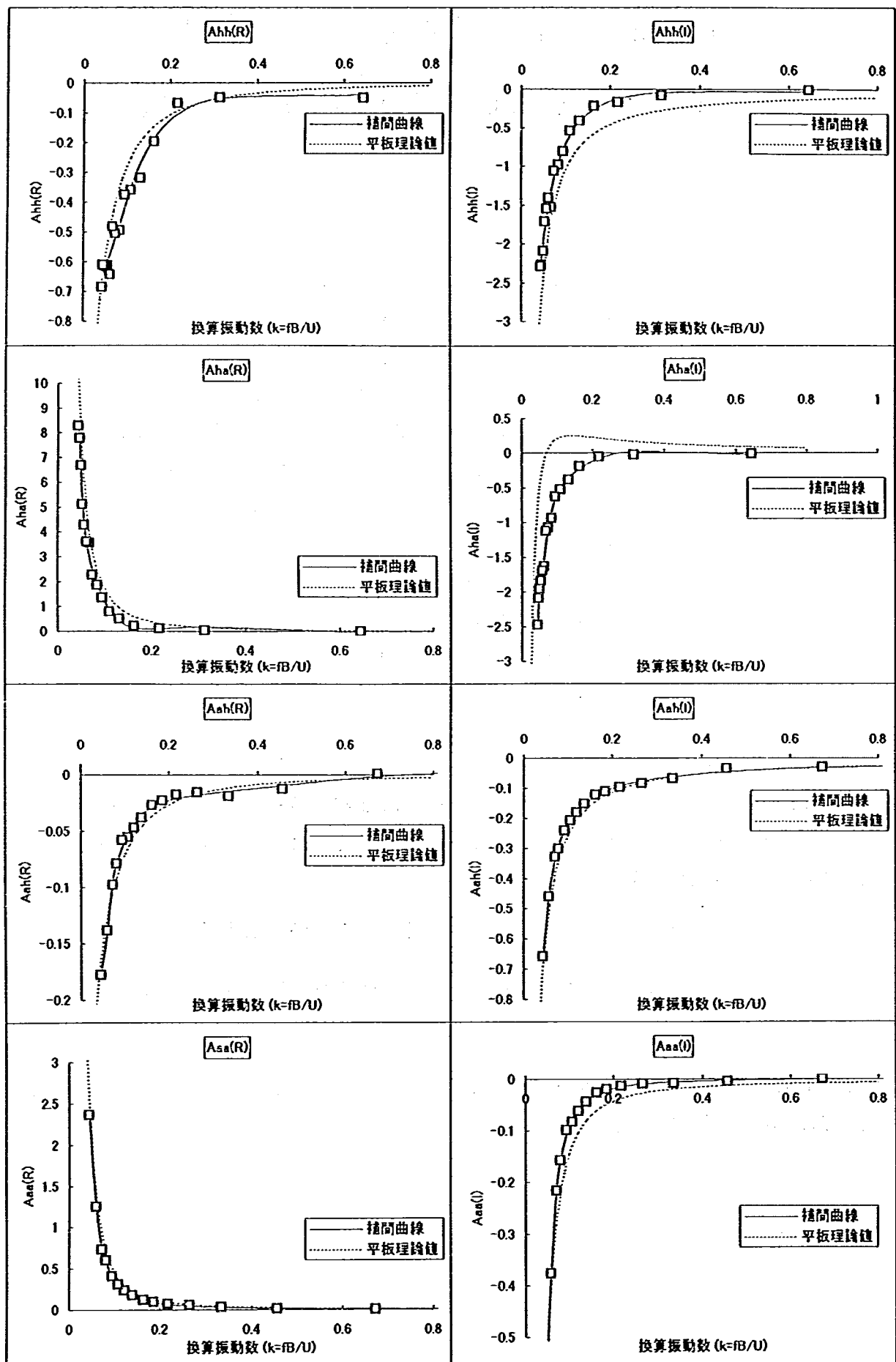


図-3.4.6.10 基本断面Cの非定常空気力係数

3) 三次元フラッター解析

表-3.4.6.2 に示す諸元にしたがって、三次元フラッター解析を行った。尚、解析方法はモード組み合わせ法を用い、取り込み次数は50次までとした。

まず、平板空気力の理論値を用いて解析を行い、次に基本断面Cの測定空気力を用いて解析を行った。

表-3.4.6.3 三次元フラッター解析に用いた想定吊橋の構造諸元

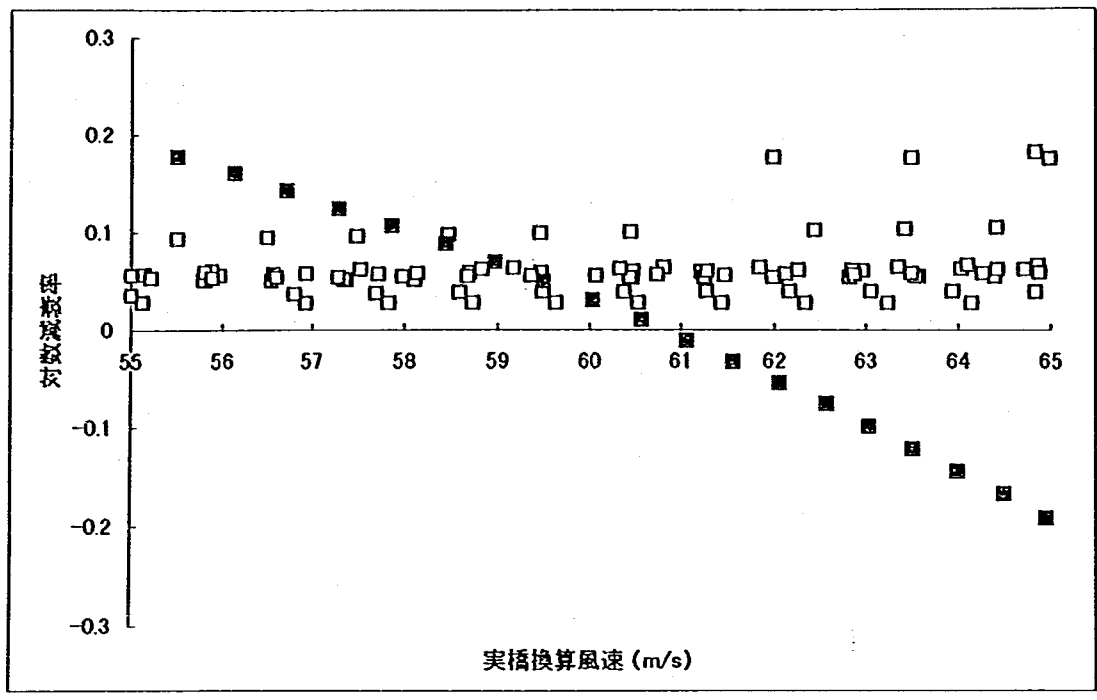
支 間		1,250m+2,500m+1,250m	
ケーブル	サグ比	(単位)	1/9
	ケーブル間隔	m	35.5
	有効断面積	m ² /Br.	2*06=1.2
	弾性係数	t/m ²	2.03*10 ⁷
	許容応力度	kg/mm ²	100
ハンガー	ハンガー間隔	m	105
	断面積	m ²	0.0056
	弾性係数	t/m ²	1.40*10 ⁷
補剛桁	断面積	m ² /Br.	1.3
	鉛直曲げ剛性	m ⁴ /Br.	12
	水平曲げ剛性	m ⁴ /Br.	160
	ねじれ剛性	m ⁴ /Br.	26
	極慣性	t*s ² /m/Br.	336.7
死荷重	吊構造部	t/m/Br.	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
	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

解析結果として、平板空気力、基本断面Cの各々について、対数減衰率及びフラッター振動数の変化を図-3.4.6.11, 12 に示す。また、平板・基本断面Cの各々についてフラッター発生風速時のモード形状を図-3.4.6.13, 14 に示す。

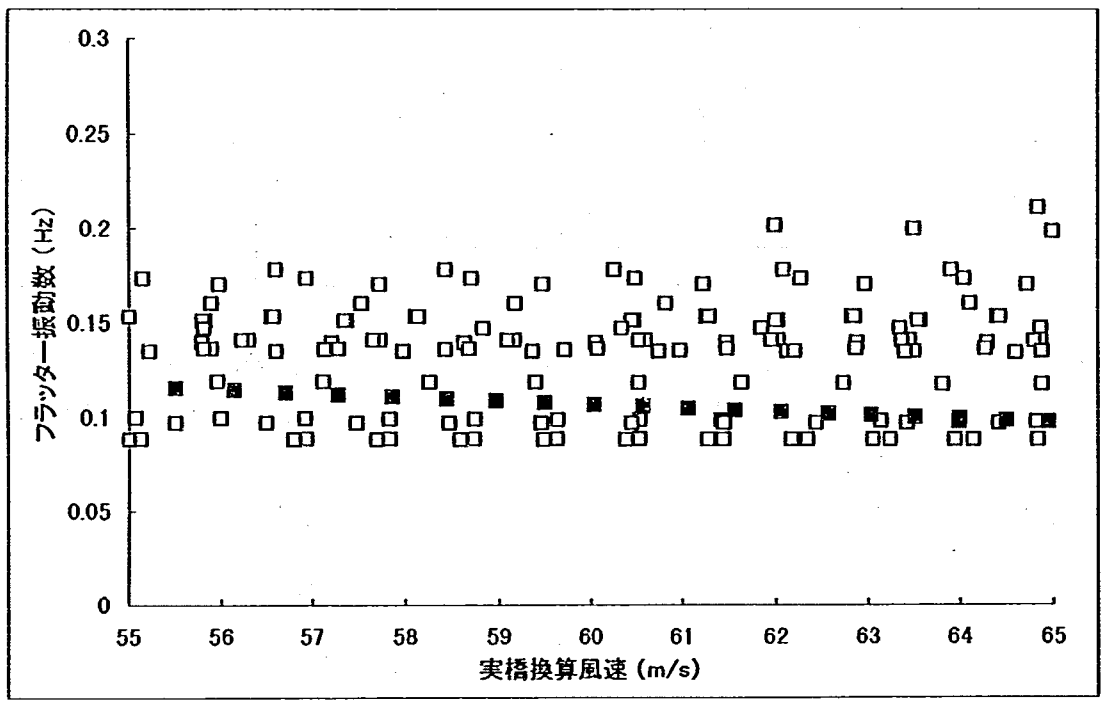
三次元フラッター解析の結果得られるフラッター限界風速を下表に示す。

表-3.4.6.4 三次元フラッター解析結果

平板	基本断面C
61m/s	61.5m/s

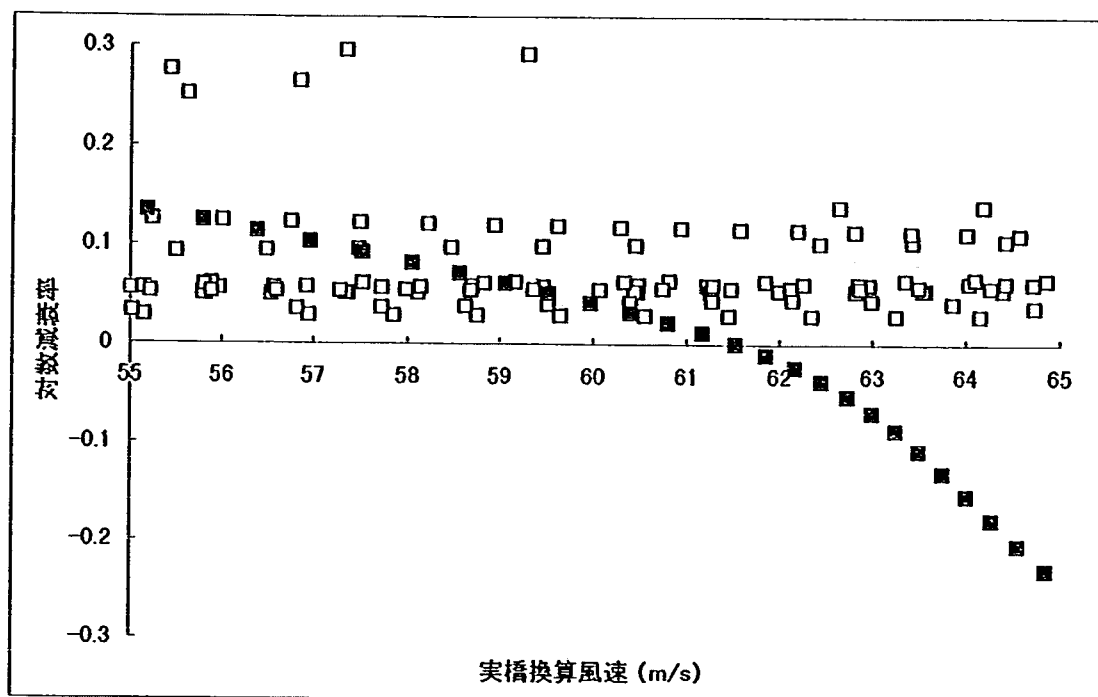


対数減衰率の変化

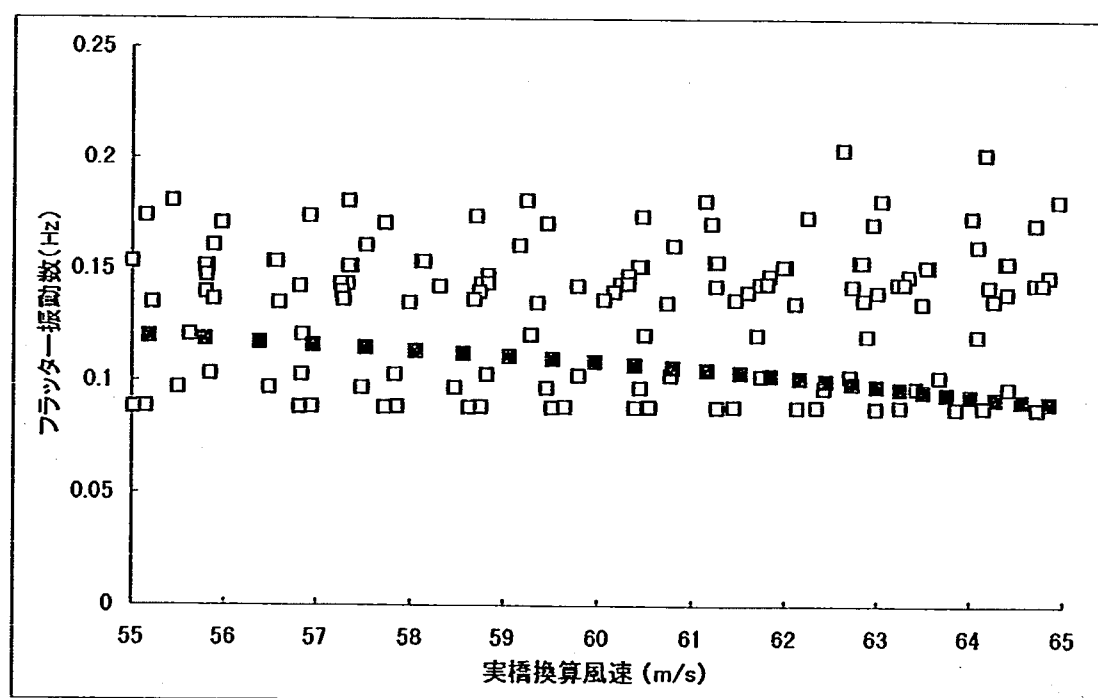


フラッター振動数の変化

図-3.4.6.11 平板空気力を用いた場合の解析結果



対数減衰率の変化



フラッター振動数の変化

図-3.4.6.12 測定空気力を用いた場合の解析結果

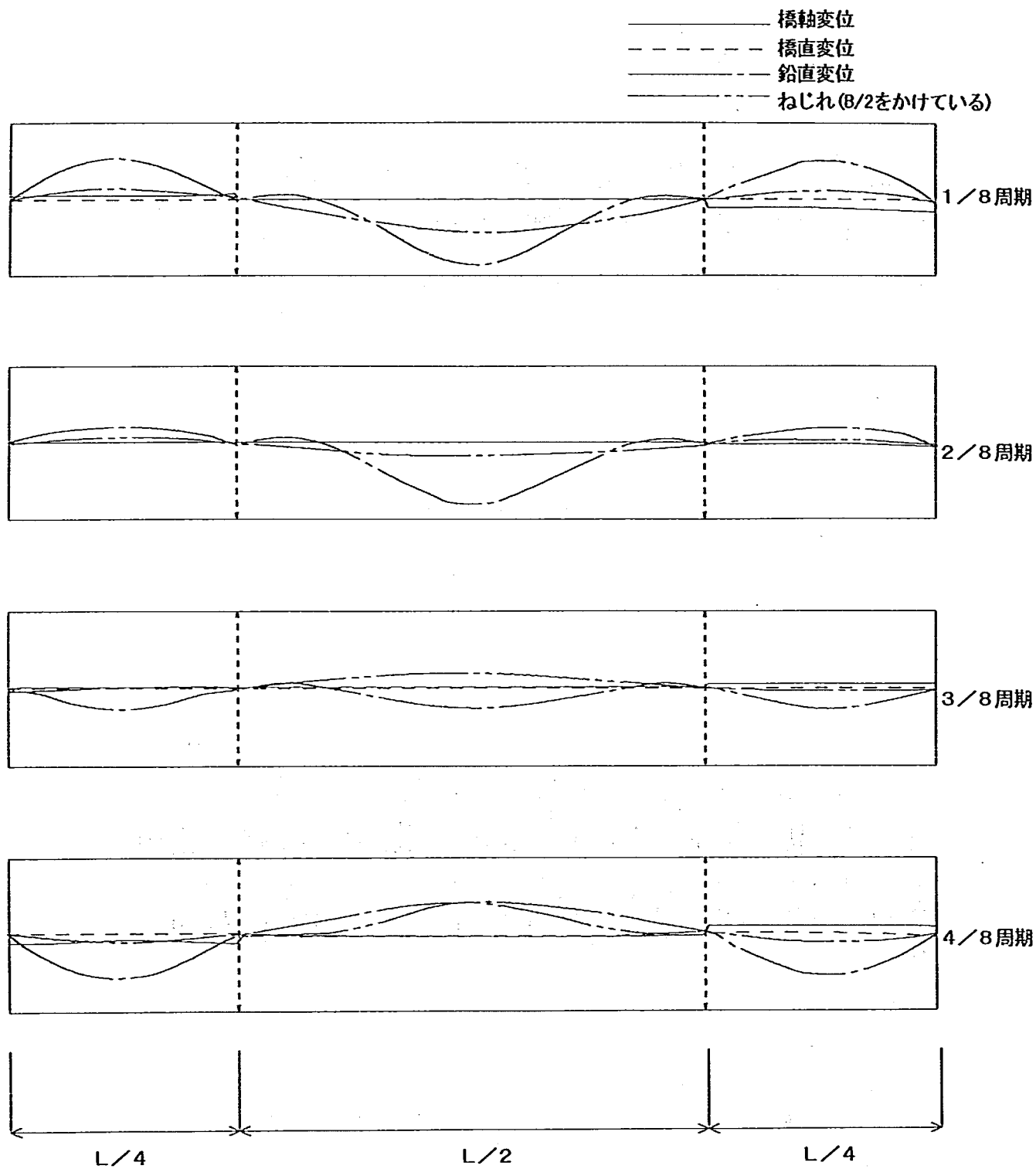


図-3.4.6.13 フラッターモード図 (平板空気力を用いた場合)

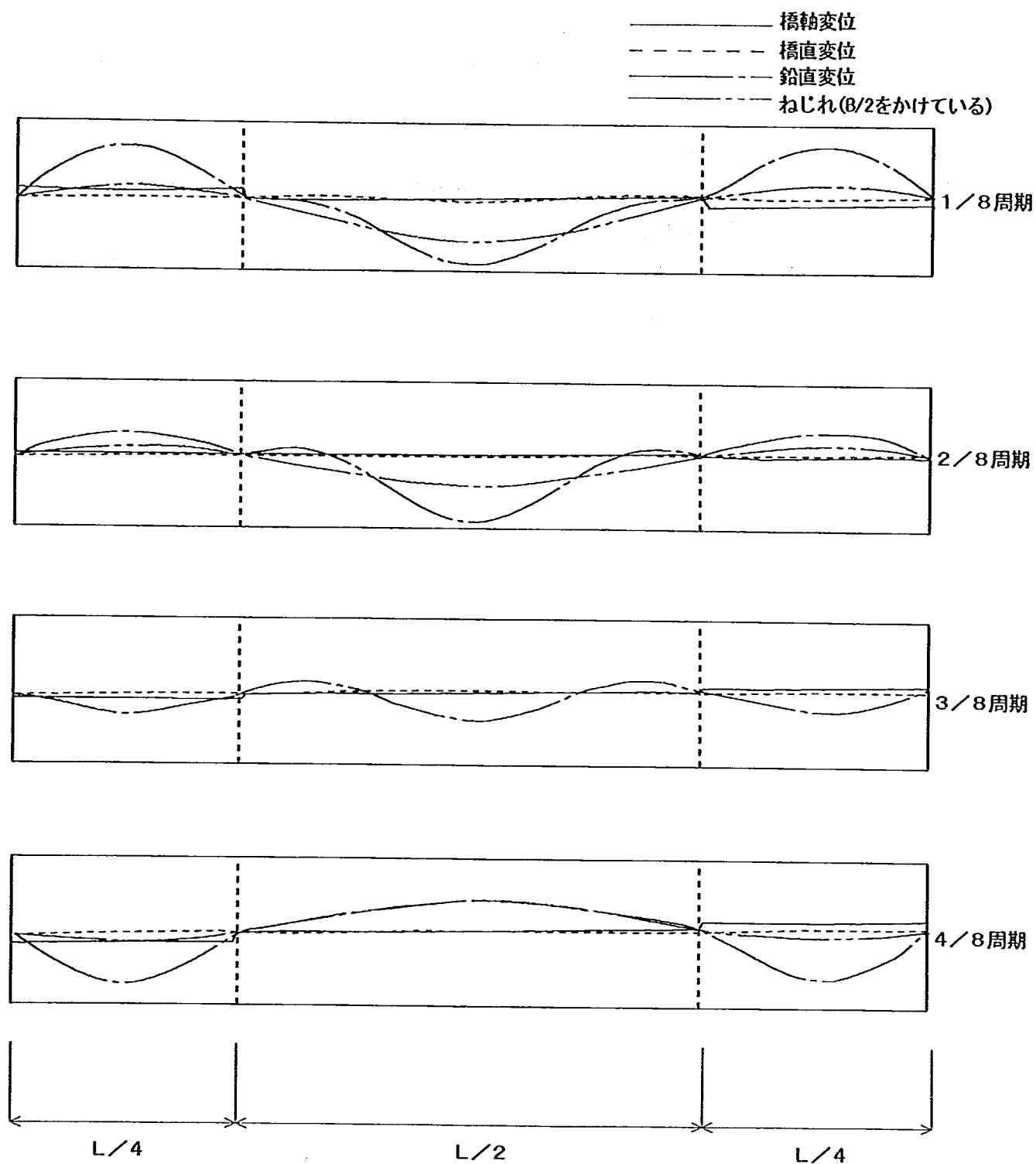


図-3.4.6.14 フラッターモード図 (測定空気力を用いた場合)

(4) 今後の課題

本研究では、遮風壁の設置がフラッター限界風速に及ぼす影響について検討し、さらに基本断面形状の見直しを行った。

今後は、本検討で得た最も耐フラッター性に優れた断面形状に対して、検査車レール等の細部形状を再現した大型部分模型試験を実施し、細部形状を見直すことによって、更なる耐フラッター性能の向上を図る必要があるものと考えられる。

また、中央分離帯位置に遮風壁を設置した場合の風速低減効果についても、橋面上の風速計測を行うなど、定量的な評価が望まれる。

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。

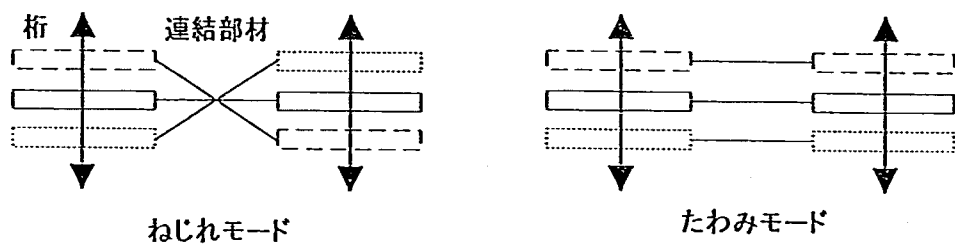


図-3.4.7.1 Twin Bridge 概念図

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 Grating⁵⁾

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。

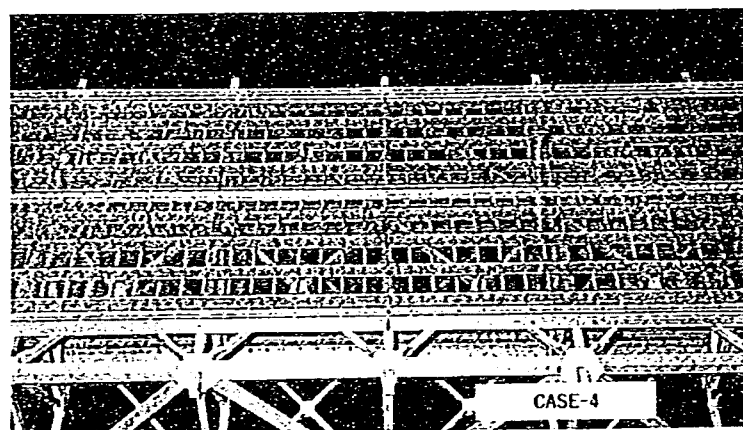


図-3.4.7.2 All Grating 形式の風洞模型

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

3.5 フラッター解析に関するベンチマークテスト

3.5.1 概要

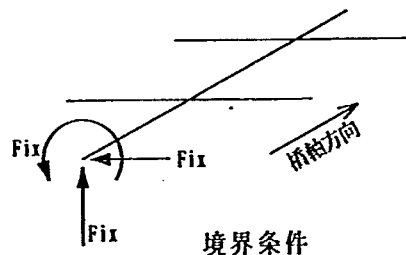
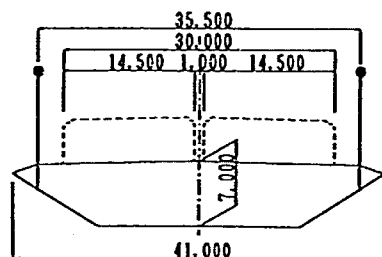
超長大橋の耐風安定性解析では、フラッター解析が中心的な役割を担う。本共同研究では、各社毎に異なる骨組モデル、解析プログラムを用いるため、これらの基本的な解析性能の共通化が必要である。このため、対象となる骨組モデルの諸元を統一した解析を行い、各社保有の解析ツールの比較検討を実施した。

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-3.5.1.1に示す。

表-3.5.1.1 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, 250 m
	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
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



3. 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-3.5.2.1に示す。

表-3.5.2.1 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/cm 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・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-3.5.2.2に示す。また、固有値解析結果を表-3.5.2.3に示す。

表-3.5.2.2 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 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：<table><tr><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>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		鉛直	ねじれ	水平	空気力	鉛直	○	○	×	モーメント	○	○	×	抗力	×	×	△
	鉛直	ねじれ	水平															
空気力	鉛直	○	○	×														
	モーメント	○	○	×														
	抗力	×	×	△														
非定常空気力	平板翼理論値																	
準定常空気力	主桁： CD=0.75 An=7.0 m²/m/Br. ケーブル： CD=0.7 An=2.0 m²/m/Br.																	
その他	計算時間幅はB=41 m																	

表-3.5.2.3 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-3.5.2.4、図-3.5.2.1～図-3.5.2.2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-3.5.2.4 フラッター解析結果

	土木研究所
フラッター風速	60m/s

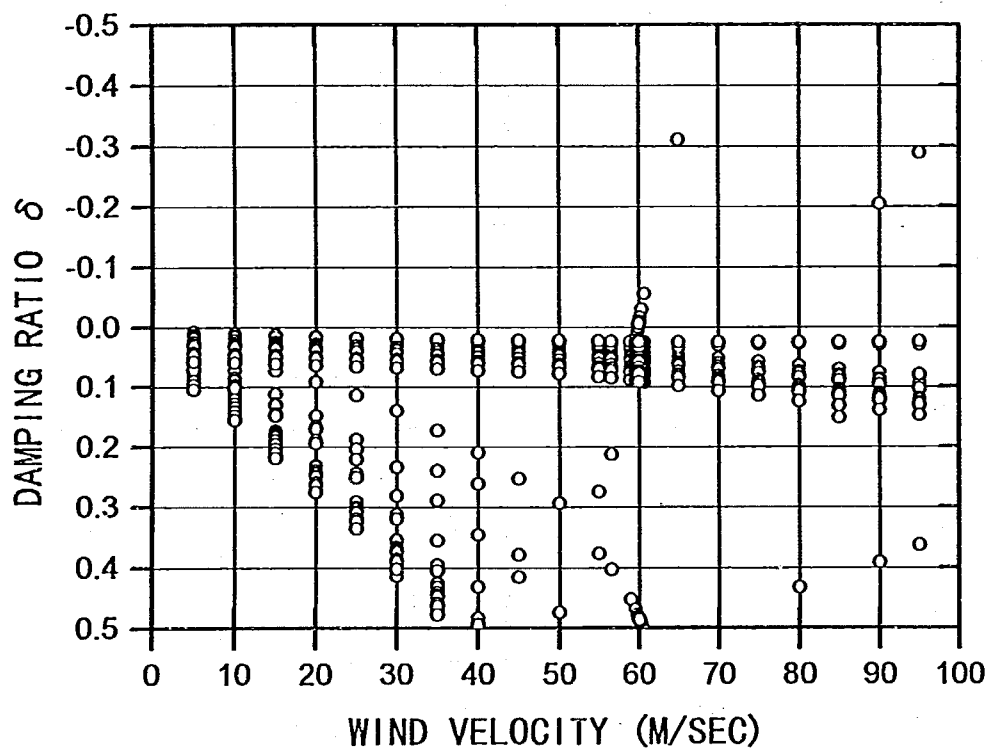


図-3.5.2.1 V- δ 図 (Vcr=60m/s)

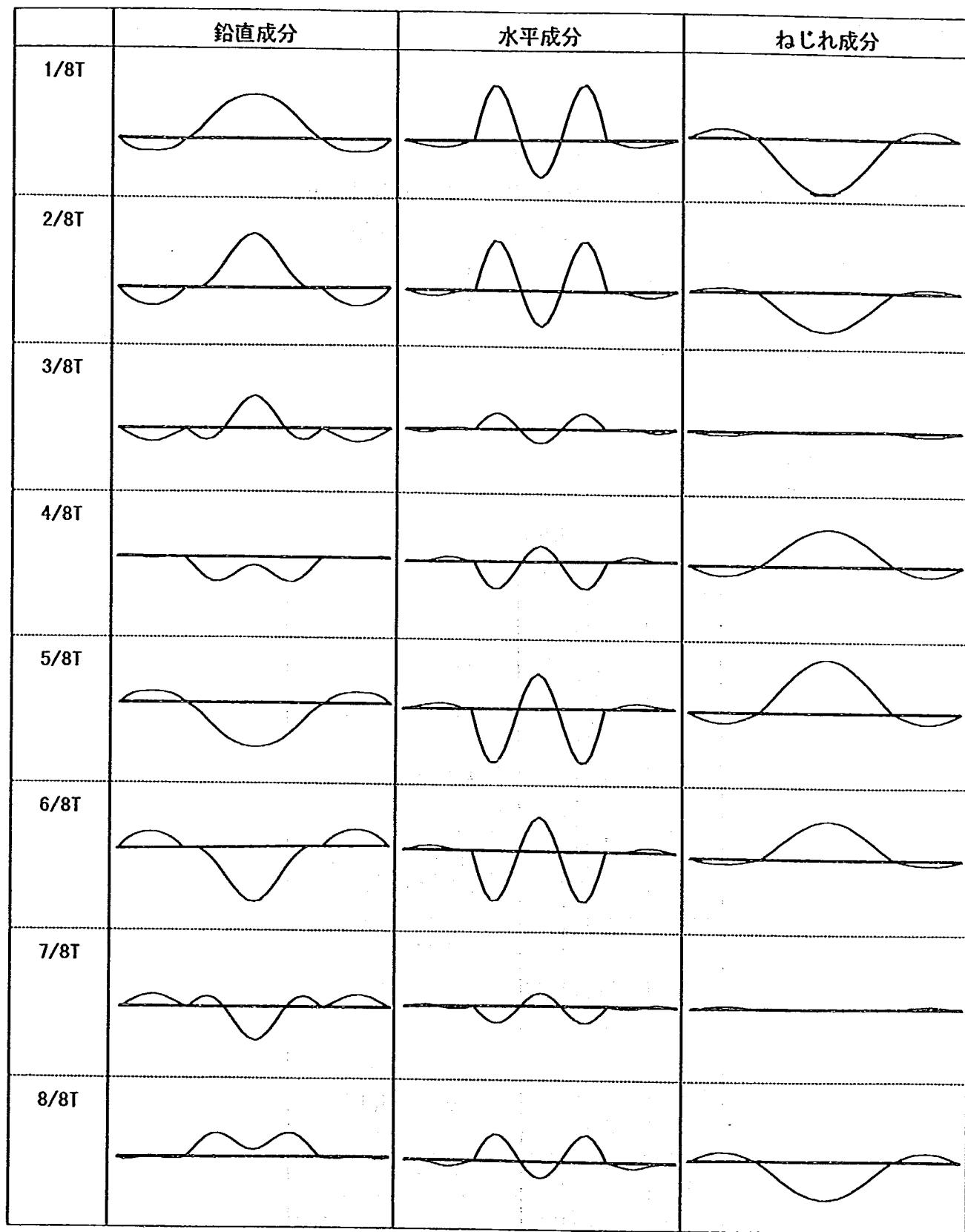


図-3.5.2.2 モード図 ($V_{cr}=60\text{m/s}$)

(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-3.5.2.5のとおり。

表-3.5.2.5 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脊をモデル化

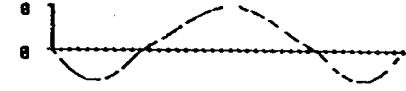
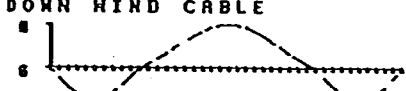
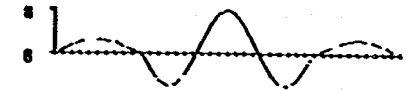
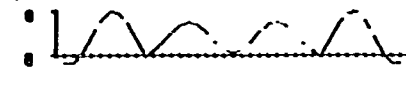
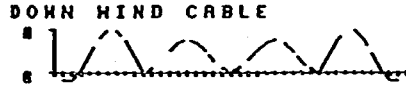
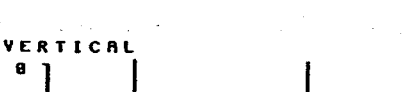
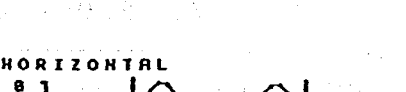
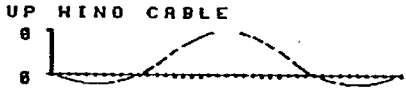
2) 固有振動解析結果

上記解析モデルを用いて、固有振動解析した結果を表-3.5.2.6および表-3.5.2.7に示す。

表-3.5.2.6 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-3.5.2.7 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)
1. 2. 0.052382 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 	1. 11 0.099710 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 	1. 15 0.136270 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 
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)
1. 18 0.137300 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 	1. 10 0.098123 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 	1. 25 0.160677 UP HIND CABLE  DOWN HIND CABLE  VERTICAL  HORIZONTAL  TORSION 

注) カッコ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-3.5.2.8に示す。

表-3.5.2.8 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モードを取り組む																
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： (振動方向) <table><tr><td></td><td>鉛 直</td><td>ね じ れ</td><td>水 平</td></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		鉛 直	ね じ れ	水 平	L	○	○	×	M	○	○	×	D	×	×	△
	鉛 直	ね じ れ	水 平														
L	○	○	×														
M	○	○	×														
D	×	×	△														
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 =7.0m ² /m/Br. ケーブル： C _D =0.7 A _n =2.0m ² /m/Br.																
その他	計算時の桁幅は、B=41mとした。																

4) 解析結果

フラッター解析結果を表-3.5.2.9、図-3.5.2.3～図-3.5.2.5に示す。

表-3.5.2.9 解析結果

フラッター風速	61 m/s
---------	--------

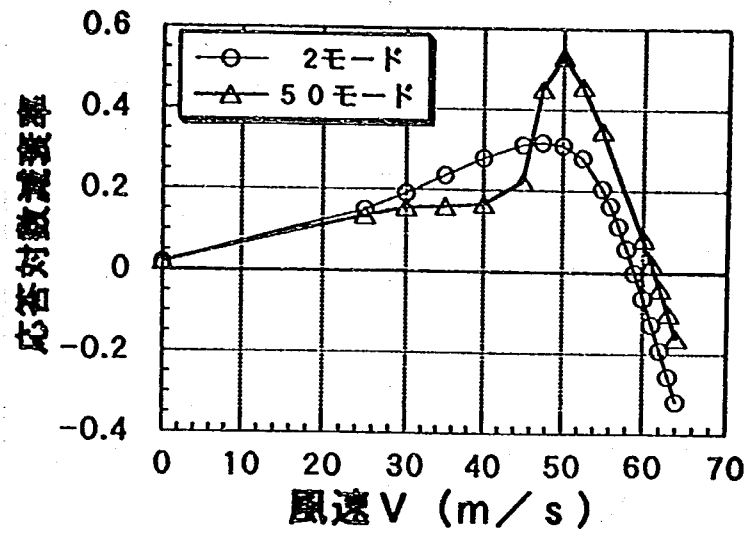


図-3.5.2.3 応答対数減衰率

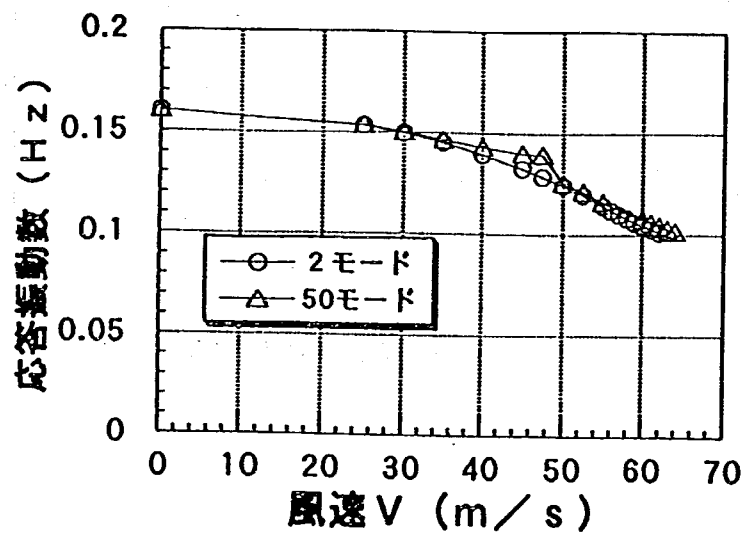


図-3.5.2.4 応答振動数

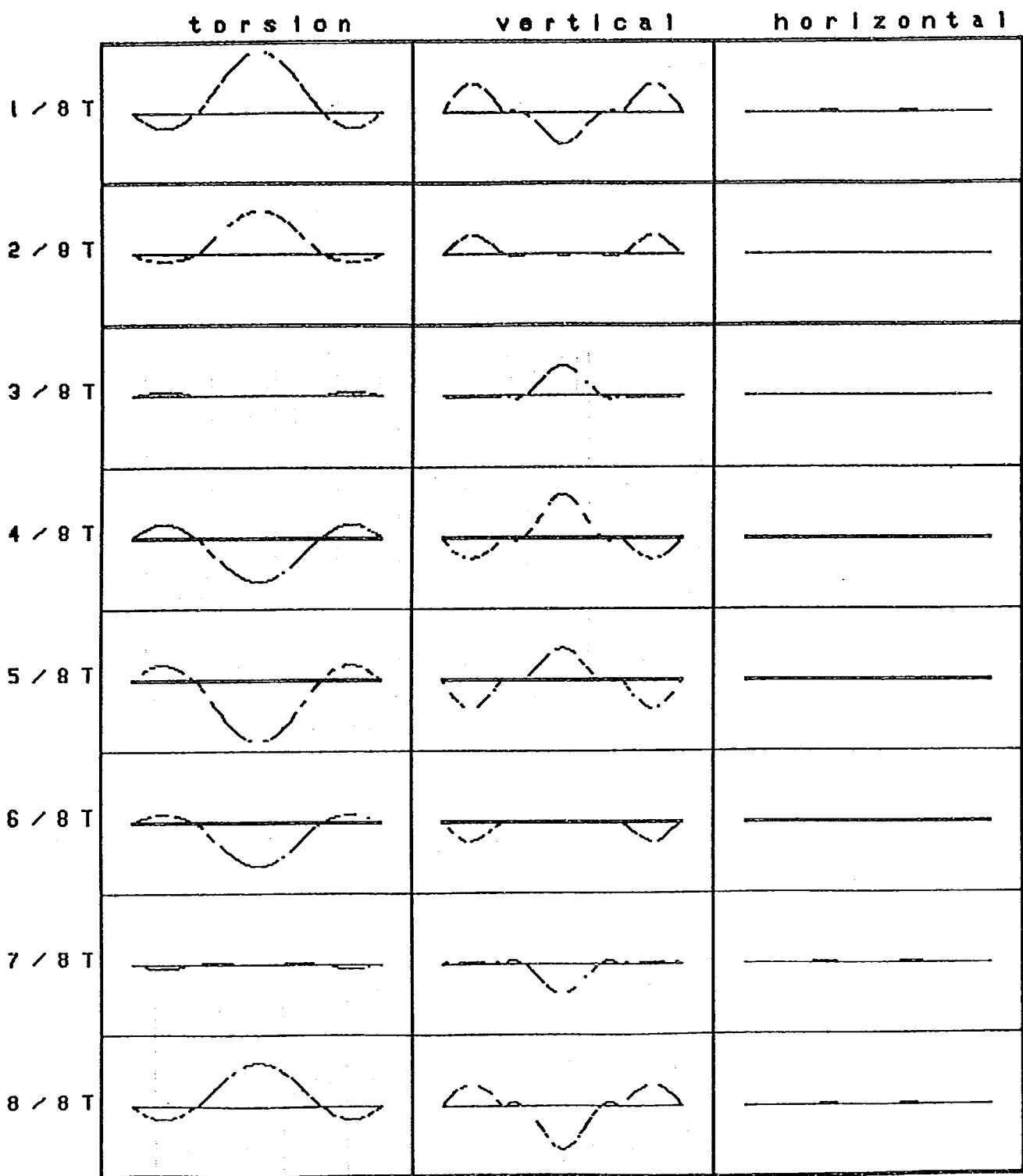


図-3.5.2.5 フラッター応答波形 (風速 $V = 6.2 \text{ m/s}$ 、 $\delta = -0.0382$)

(3) 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-3.5.2.10 に示す。

表-3.5.2.10 解析モデルの諸元

項 目		単位	川重モデル
構造諸元	支間長		1,250+2,500+1,250
	ケーブル	サグ比	1/9
		ケーブル間隔	m
		有効断面積	m ² /Br
		弾性係数	t/m ²
		許容応力度	kg/mm ²
	ハンガー	ハンガー間隔：L	m
		断面積：A	m ²
		弾性係数：E	t/m ²
		E A / L	t/m
	補剛桁	断面積	m ² /Br
		鉛直曲げ剛性	m ⁴ /Br
		水平曲げ剛性	m ⁴ /Br
		ねじれ剛性	m ⁴ /Br
		極慣性モーメント	t・m・s ² /m/Br
	死荷重	吊構造部	t/m/Br
		ケーブル	t/m/Br
		合計	t/m/Br
	塔	ケーブル理論頂	m
		面内剛性	m ⁴ /shaft
		面外剛性	m ⁴ /shaft
		ねじれ剛性	m ⁴ /shaft
モデル化	桁	境界条件	
		桁端の固定方法で対応	
	塔	重心位置	
		定着点と同じ	
		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-3.5.2.11に示す。

表-3.5.2.11 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・s ² /m ⁴																					
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： <table border="1"><tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="3">振動方向</td></tr><tr><td>鉛直</td><td>ねじれ</td><td>水平</td></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			振動方向			鉛直	ねじれ	水平	空気力	L	○	○	×	M	○	○	×	D	×	×	△
				振動方向																		
		鉛直	ねじれ	水平																		
空気力	L	○	○	×																		
	M	○	○	×																		
	D	×	×	△																		
	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 _a =7.0m ² /m/Br ケーブル： C _D =0.70 A _a =2.0m ² /m/Br																					
その他	桁幅はB=41.0mとした																					

3) 固有値解析結果

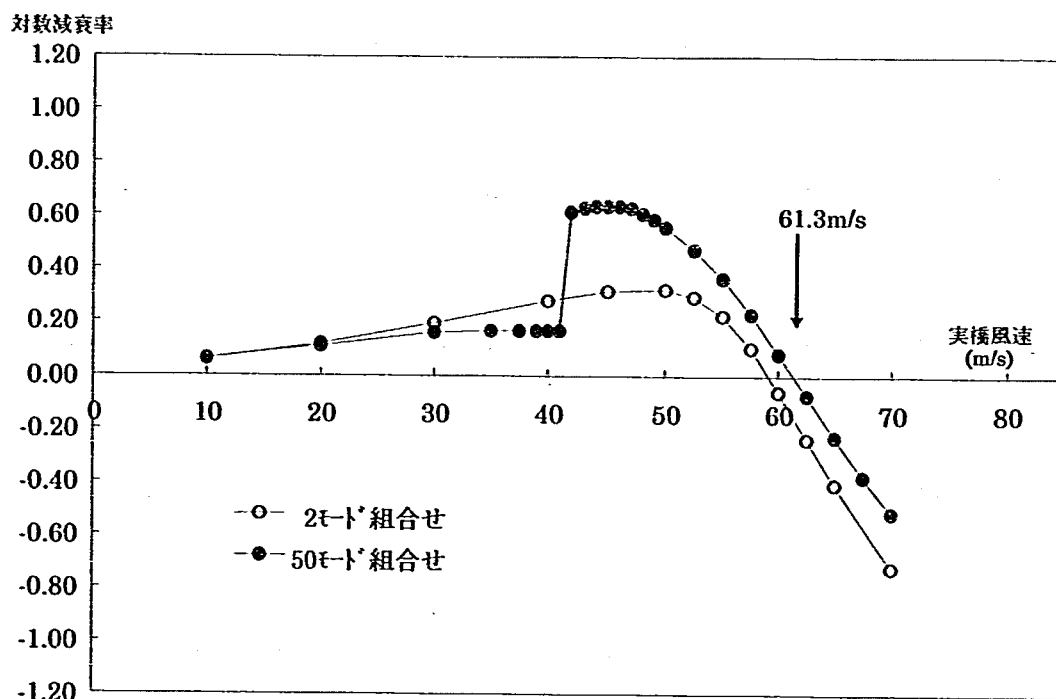
固有値解析により得られた、無風時振動モードに関する固有振動数の一覧を表-3.5.2.12に示す。

表-3.5.2.12 無風時振動モードの固有振動数

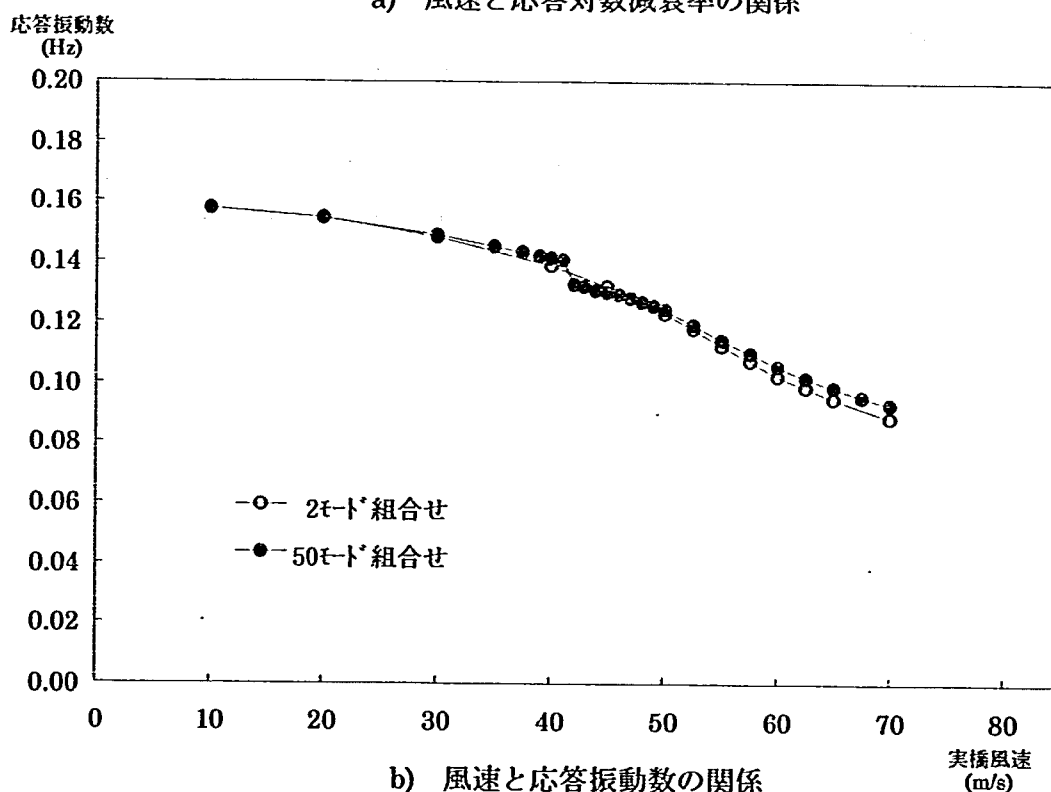
次数	振動数	モード形状	次数	振動数	モード形状	次数	振動数	モード形状
1 次	0.0311	水平曲げ 対称1次	21 次	0.1504	側径間ケーブル水平曲げ	41 次	0.2646	ケーブル水平曲げ
2 次	0.0524	鉛直曲げ 対称1次	22 次	0.1504	側径間ケーブル水平曲げ	42 次	0.2675	ケーブル水平曲げ
3 次	0.0573	鉛直曲げ逆対称1次	23 次	0.1522	ケーブル水平曲げ	43 次	0.2679	側径間ねじれ同相1次
4 次	0.0585	側径間水平逆相1次	24 次	0.1560	ケーブル水平曲げ	44 次	0.2703	ケーブル水平曲げ
5 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2次	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2次	29 次	0.1738	水平曲げ逆対称2次	49 次	0.3510	ケーブル水平曲げ
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	ケーブル水平曲げ
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2次	32 次	0.2118	側径間鉛直同相3次			
13 次	0.1360	ケーブル水平曲げ	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	ケーブル水平曲げ			
16 次	0.1372	側径間鉛直逆相2次	36 次	0.2447	ケーブル水平曲げ			
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	ケーブル水平曲げ	38 次	0.2558	ケーブル水平曲げ			
19 次	0.1481	水平曲げ逆対称2次	39 次	0.2624	側径間ケーブル水平曲げ			
20 次	0.1502	ケーブル水平曲げ	40 次	0.2624	側径間ケーブル水平曲げ			

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-3.5.2.6 に、図-3.5.2.7 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-3.5.2.6 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-3.5.2.6 フラッター解析結果

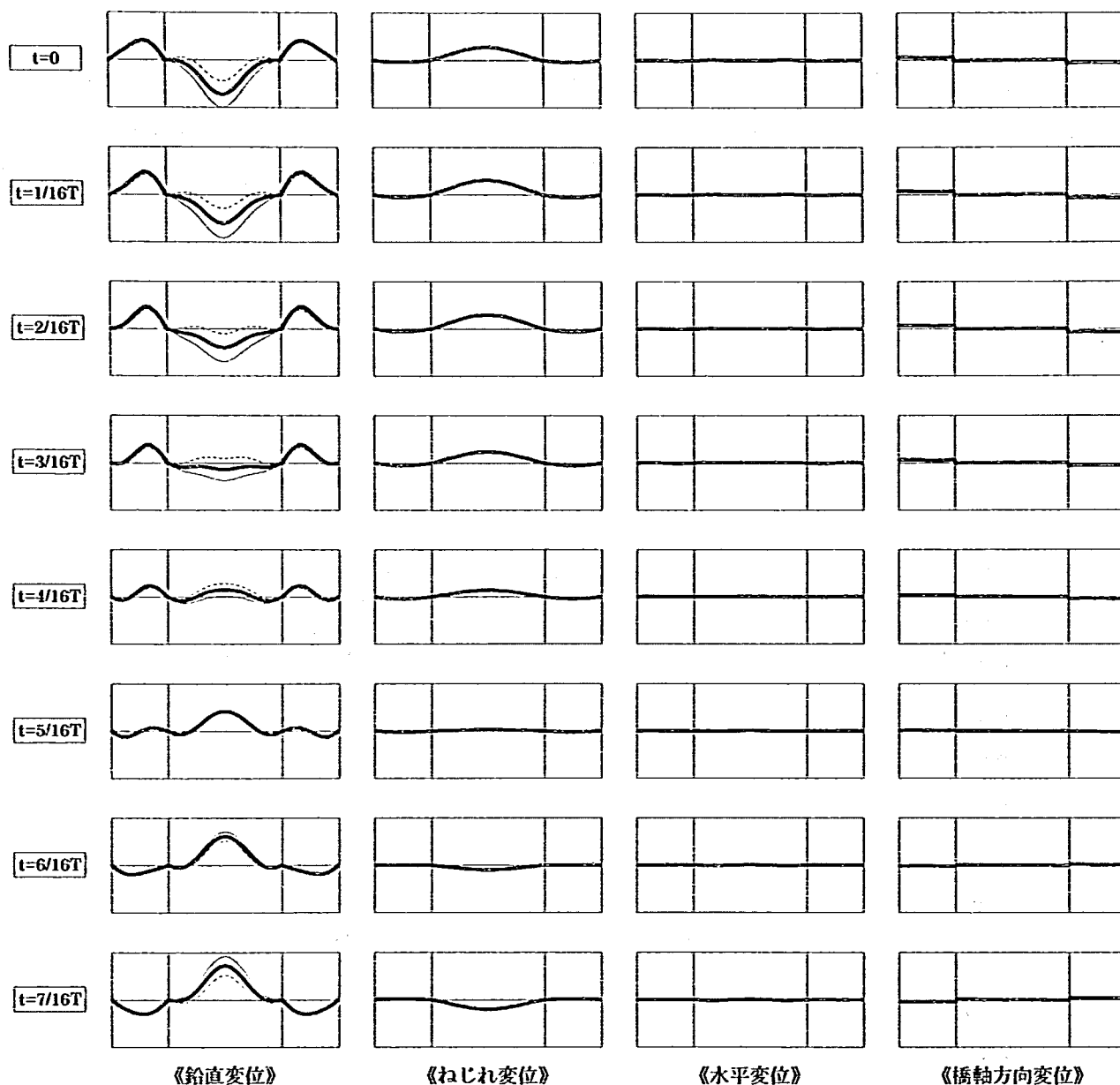


図-3.5.2.7 フラッター発生時の振動モード (風速 62.5m/s 時)

(4) 川田工業

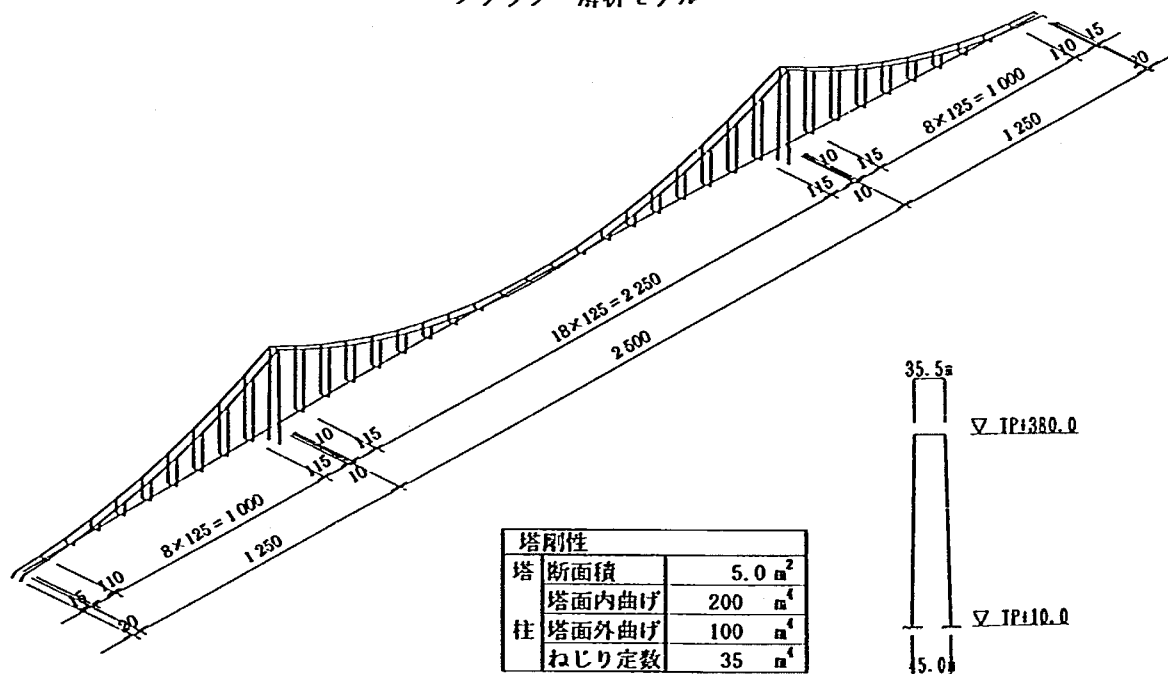
1) 解析モデルの諸元

解析に用いたモデルの諸元を表-3.5.2.13に示す。

表-3.5.2.13 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 ブ ル	サグ比	1/9	
	間 隔	35.5	m
	有効断面積	$2 \times 0.6 = 1.2$	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次鉛直 モーメント	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・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



2) 解析条件

フラッター解析条件を表-3.5.2.14に示す。

表-3.5.2.14 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	0.1 2 5 kgf・sec ² /m ⁴			
有風時静的変形	考慮しない			
空気力係数	桁	(振動方向)		
空 気 力		鉛直	ねじれ	水平
	L	○	○	×
	M	○	○	×
	D	×	×	△
○：非定常空気力 △：準定常空気力				
非定常空気力係数	平板翼理論値			
準定常空気力	桁：準定常抗力 C _D = 0.7 5 A _n = 7.0 m ² /m/Br. ケーブル：準定常抗力, 揚力 C _{DC} = 0.7 A _n = 2 × 1.0 m ² /m/Br.			

表-3.5.2.15 固有振動解析結果

次数	振動数 (Hz)	等価質量 ($t \cdot s^2/m$)			等価極慣性 ($t m^2 \cdot s^2/m$)	備考
		X (橋軸)	Y (水平)	Z (鉛直)		
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-3.5.2.8に示す。また、図-3.5.2.8中の①および②におけるフラッターモードを図-3.5.2.9、図-3.5.2.10に示す。

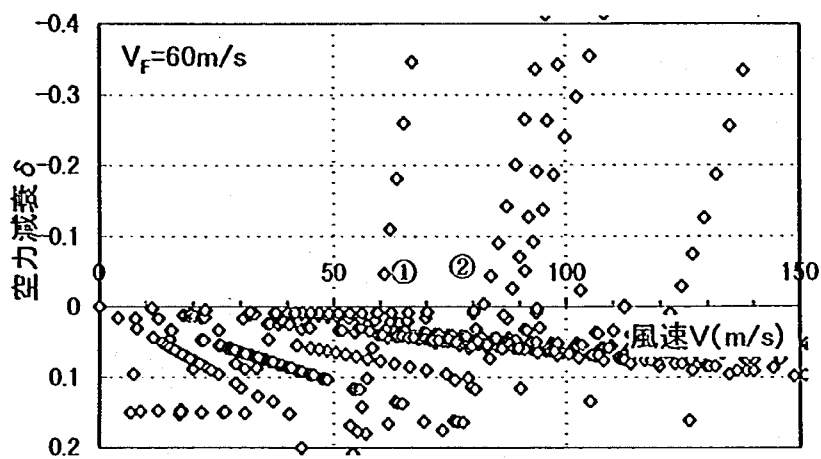


図-3.5.2.8 V- δ 曲線

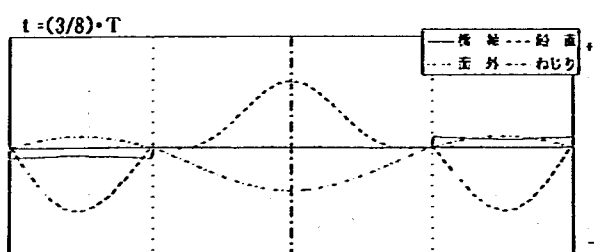
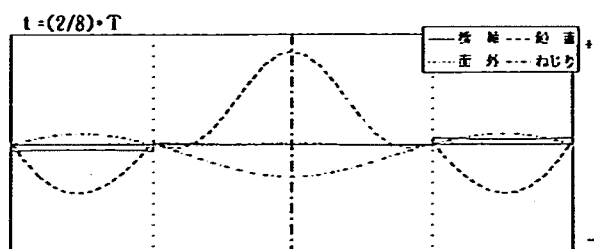
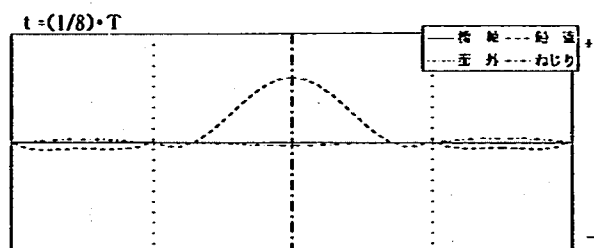
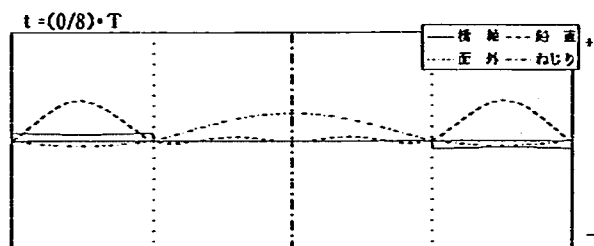


図-3.5.2.9 ①におけるフラッターモード図

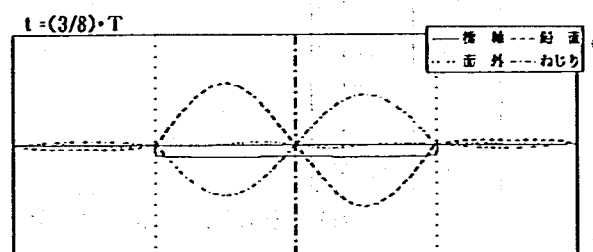
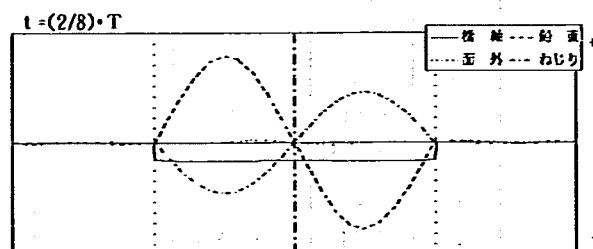
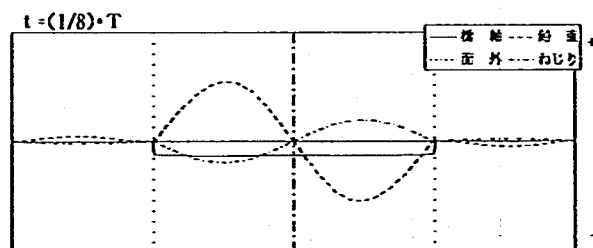
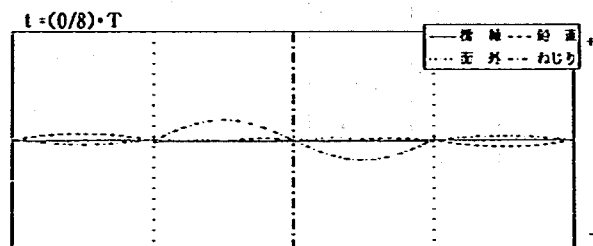


図-3.5.2.10 ②におけるフラッターモード図

(5) 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-3.5.2.16 に「標準モデル」と住重案のモデル化の相違を示す。

表-3.5.2.16 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	サグ比	1/9		
	ー	ケーブル間隔	m	35.5	
	ブ	有効断面積	m ² /Br.	2±0.6=1.2	
	ル	弾性係数	t/m ²	2.03×10 ⁷	
		許容応力度	kg/mm ²	100	
	ハン	ハンガー間隔 [※]	m	125	
	ガ	断面積	m ²	0.03	要因A
	ー	弾性係数	t/m ²	2.03×10 ⁷	
				1.40×10 ⁷	
	造	断面積	m ² /Br.	1.3	
	補	鉛直曲げ剛性	m ⁴ /Br.	12	
	剛	水平曲げ剛性	m ⁴ /Br.	160	
	桁	ねじれ剛性	m ⁴ /Br.	26	
	元	極慣性	t・s ² /m/Br.	336.7	要因B
	死	吊構造部	t/m/Br.	24	
	荷	ケーブル	t/m/Br.	11	
	重	合計	t/m/Br.	35	
モデル化	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	
	桁	境界条件	桁端の固定方法で対応	ウインド、クレーン等モデル化	要因C
		重心位置	定着点と同じ	定着点と同じ	要因D
モデル化	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-3.5.2.17に示す。

表-3.5.2.17 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	考慮しない																			
構造減衰	δ =0																			
空気力係数	主桁<table><tr><td></td><td>鉛直</td><td>ねじれ</td><td>水平</td></tr><tr><td>空揚力</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr><tr><td>気モーメント</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td></tr><tr><td>力抗力</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					鉛直	ねじれ	水平	空揚力	○	○	△	気モーメント	○	○	△	力抗力	○	○	△
	鉛直	ねじれ	水平																	
空揚力	○	○	△																	
気モーメント	○	○	△																	
力抗力	○	○	△																	
非定常空気力	平板翼理論値																			
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																			

3) 解析結果

表-3.5.2.16 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-3.5.2.18 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-3.5.2.19 に、フラッター解析結果を図-3.5.2.11 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-3.5.2.12～図-3.5.2.18 に示す。

表-3.5.2.18 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-3.5.2.19 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	

中央径間2500M 標準モデル（住重）

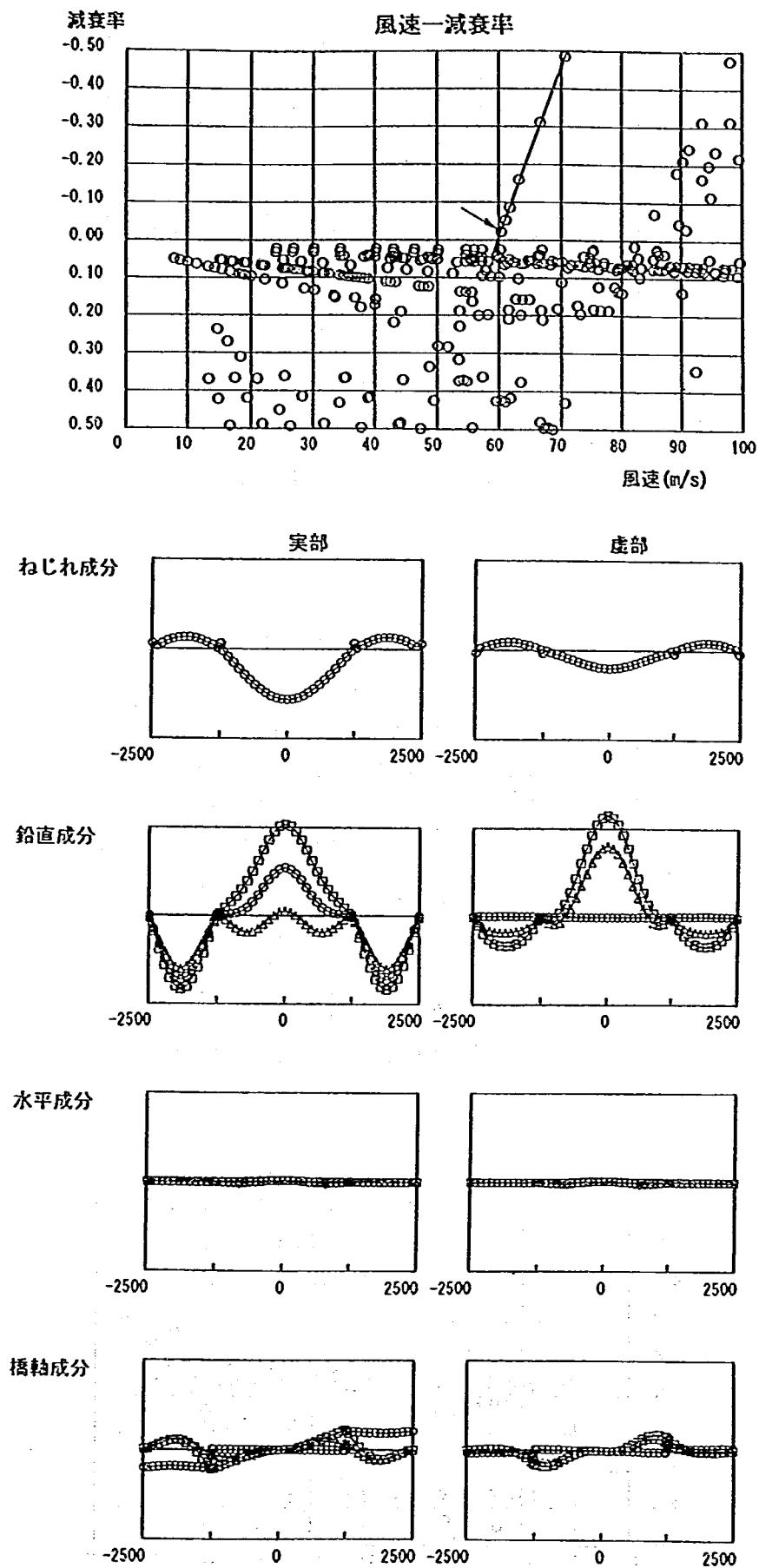


図-3.5.2.11 フラッター解析結果（標準モデルに準じたモデル、 $V_{cr}=60$ m/s）

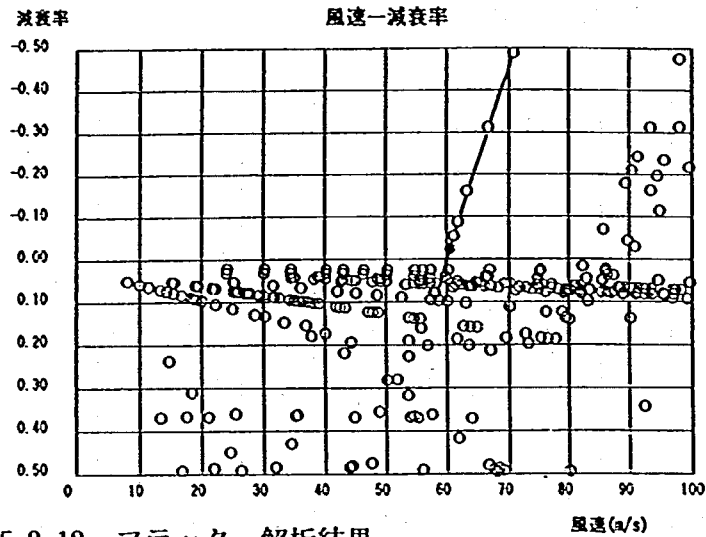


図-3.5.2.12 フラッター解析結果
(要因A：ハンガー断面、弾性係数の変更、 $V_{cr}=60$ m/s)

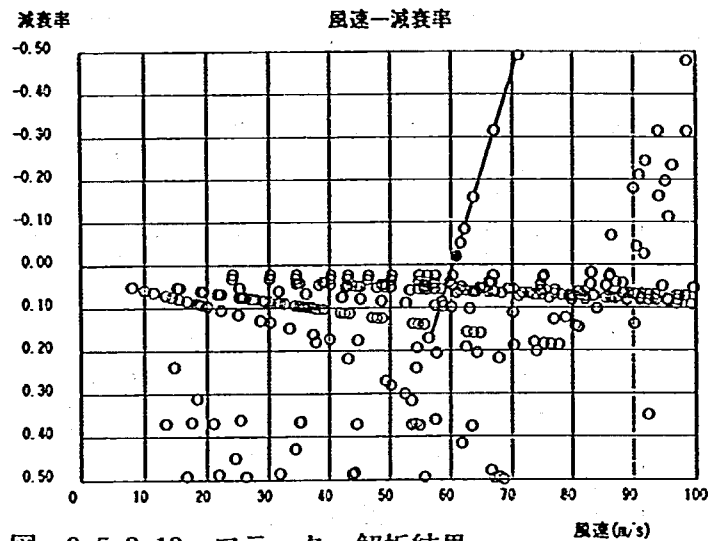


図-3.5.2.13 フラッター解析結果
(要因B：極慣性の変更、 $V_{cr}=60.5$ m/s)

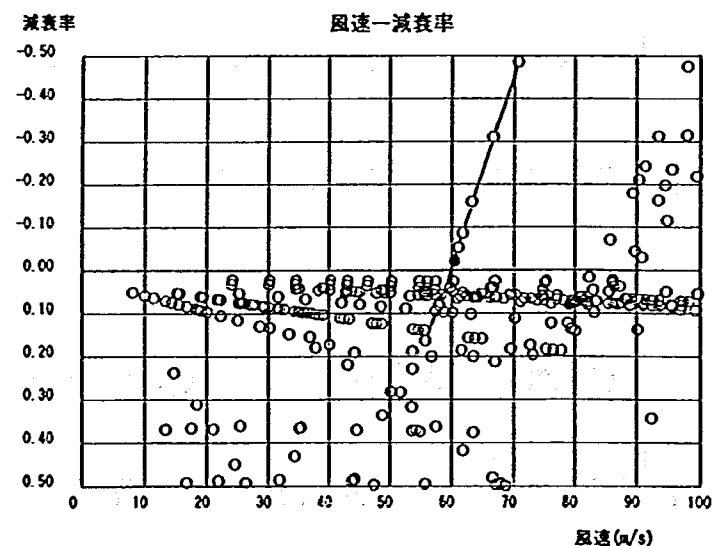


図-3.5.2.14 フラッター解析結果
(要因C：境界条件の変更、 $V_{cr}=60$ m/s)

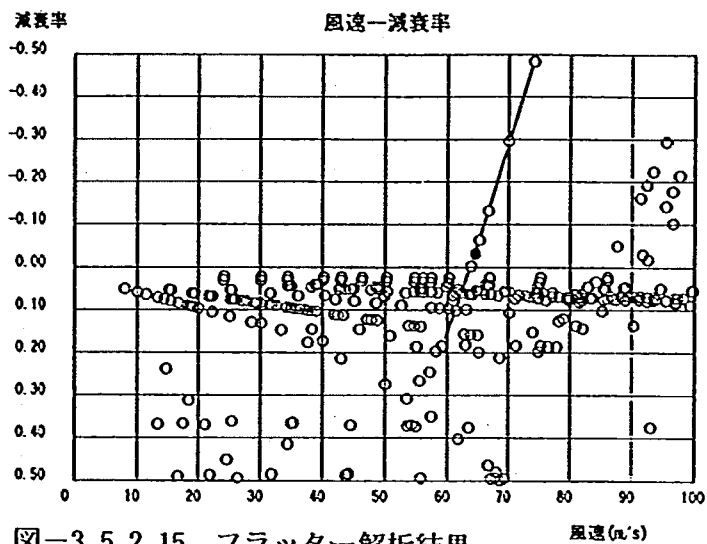


図-3.5.2.15 フラッター解析結果
(要因D : 重心位置を-3m、 $V_{cr}=64$ m/s)

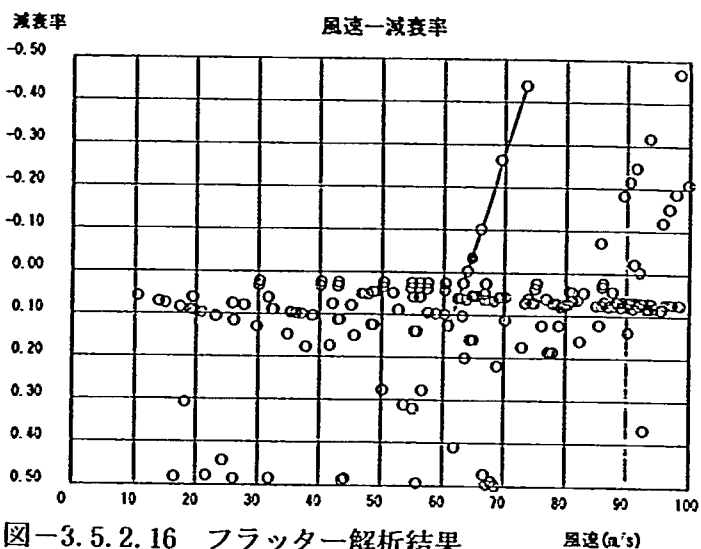


図-3.5.2.16 フラッター解析結果
(要因E : 塔に水平材を追加、 $V_{cr}=64$ m/s)

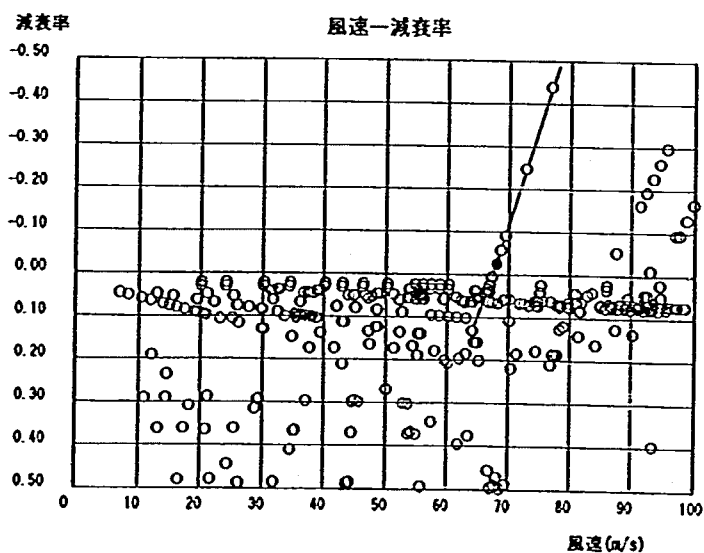


図-3.5.2.17 フラッター解析結果
(要因D+E、 $V_{cr}=67.5$ m/s)

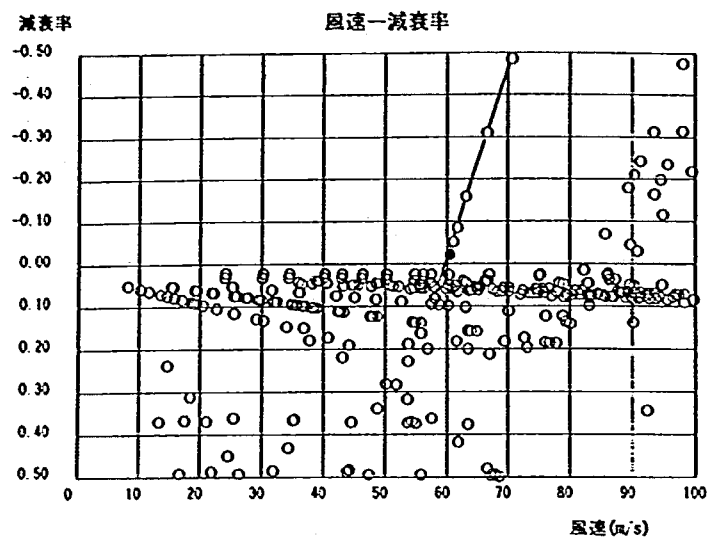


図-3.5.2.18 フラッター解析結果
(要因F : 塔基部の塔柱間隔の変更、 $V_{cr}=60 \text{ m/s}$)

(6) 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 7.5 m、ハンガー断面積 0.011 m²/格点/B r。

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 4.5 m (基部)。水平材はなし。

2) 解析条件

フラッター解析条件を表-3.5.2.20 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 7 m 1 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-3.5.2.21 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 7 m 1 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-3.5.2.19、図-3.5.2.20 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-3.5.2.22 に示す。

表-3.5.2.20 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 低次100モード（無風時のモード）を全て取り込む。																		
空気密度	0.125 kgf s ² /m ⁴																		
有風時静的変形	考慮しない																		
構造減衰	全モード $\delta = 0.02$																		
空気力係数	主桁： （振動方向） <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td><td></td><td>鉛直</td><td>ねじれ</td><td>水平</td></tr> <tr> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle;">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			鉛直	ねじれ	水平	空 気 力	L	○	○	×	M	○	○	×	D	×	×	△
		鉛直	ねじれ	水平															
空 気 力	L	○	○	×															
	M	○	○	×															
	D	×	×	△															
非定常空気力	平板翼理論値、桁高7m1箱桁断面の実測値のいずれか																		
準定常空気力	主桁： $C_o = 0.75$ $A_n = 7.0 \text{ m}^2/\text{m}/\text{Br}$ ケーブル： $C_{oc} = 0.7$ $A_n = 2.0 \text{ m}^2/\text{m}/\text{Br}$																		
その他	桁幅 $B = 4.1 \text{ m}$																		

表-3.5.2.21

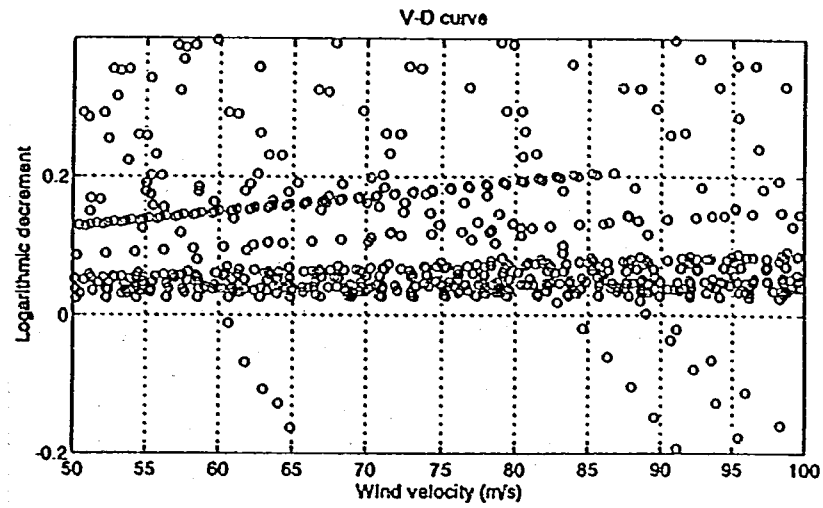
固有値解析結果

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	中央径間部 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	

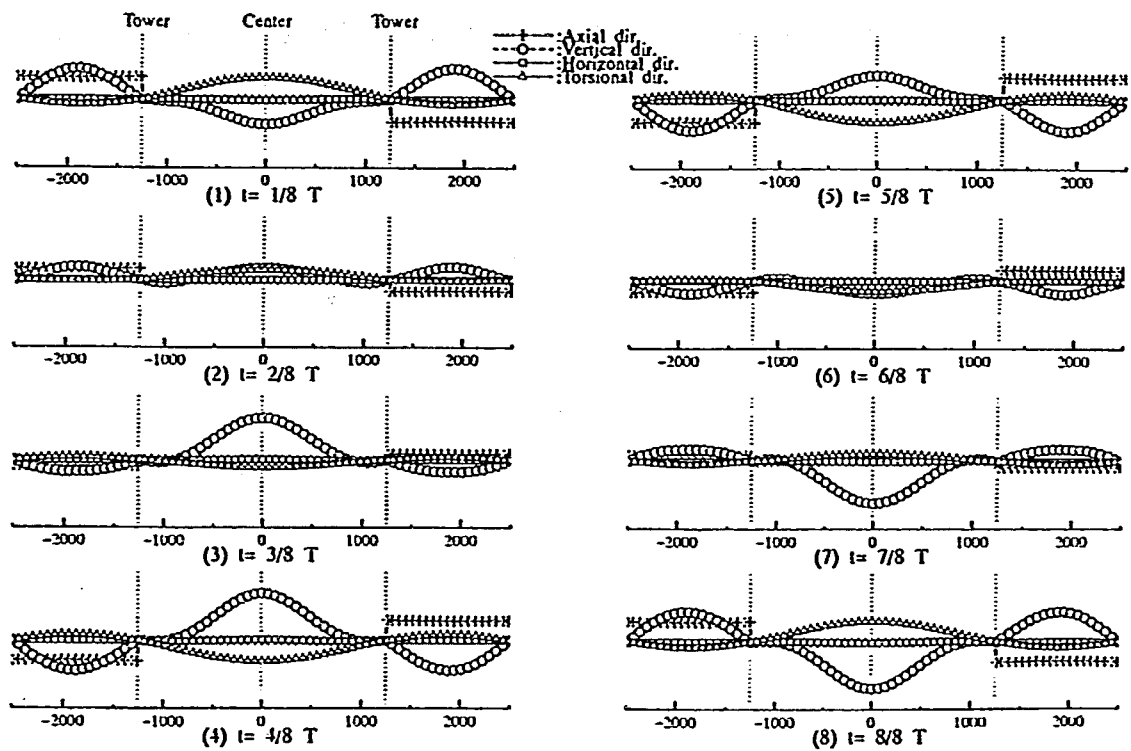
表-3.5.2.22 フラッター解析結果の比較

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7 m 1箱桁 測定空気力	56

(備考) 構造減衰は全モード $\delta = 0.02$ として比較した。



(a) 風速-対数減衰率の関係



(b) モード図

図-3.5.2.19 フラッター解析結果 (平板翼理論値を用いた場合)

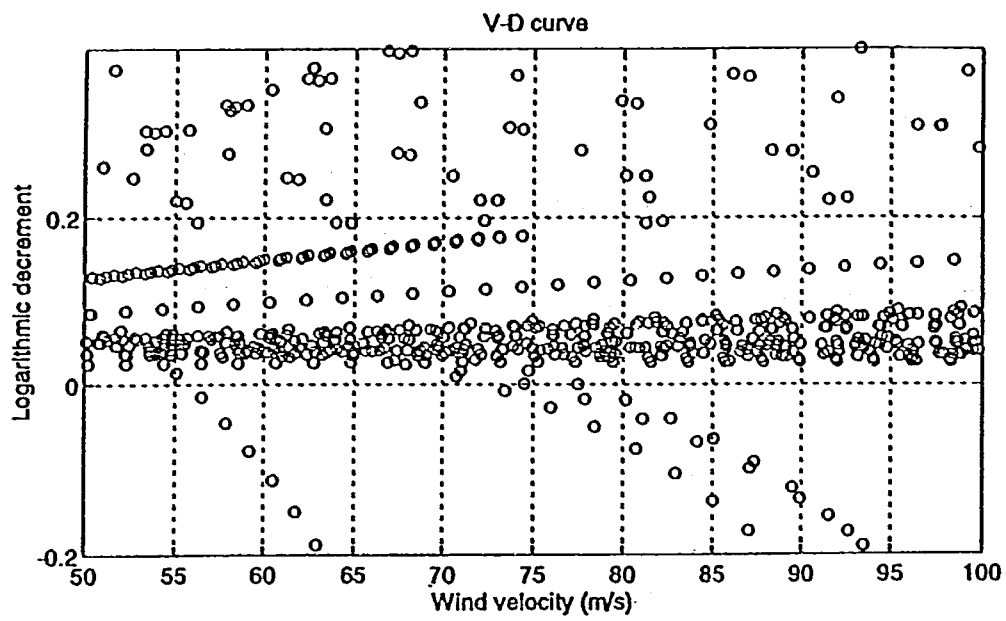
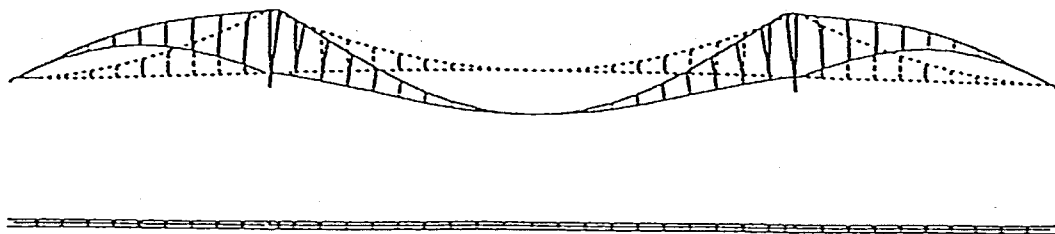


図-3.5.2.20 フラッター解析結果（桁高7 m 1 箱桁の測定空気力を用いた場合）

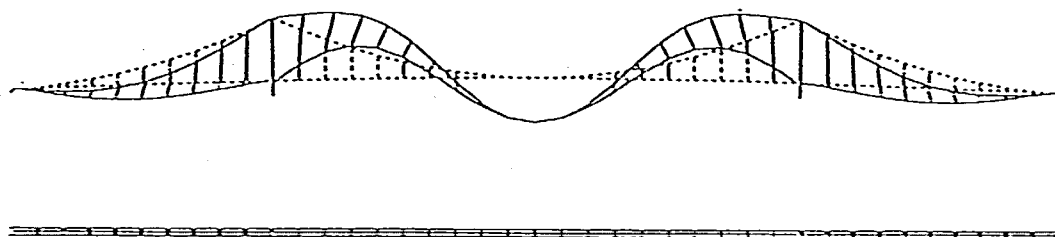
(7) 日立造船

1) 解析モデルの諸元

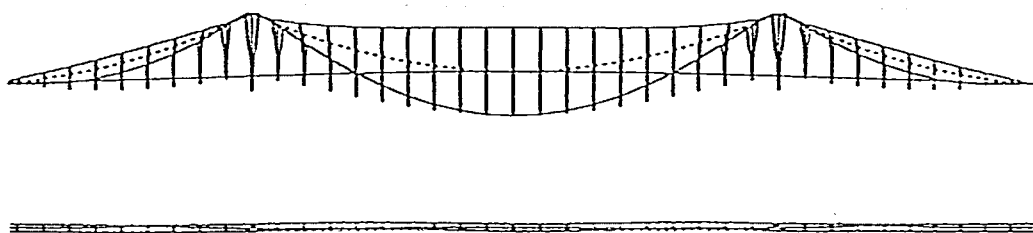
解析に用いたモデルの諸元は、「標準モデル」であり、表-3.5.5.1と同様である。よって、ここでは、構造諸元の表は割愛するが、参考のため主要モード図を下記に示す。



Mode-(2) : 鉛直曲げ対称 1 次 ($f=0.054\text{Hz}$)



Mode-(11) : 鉛直曲げ対称 2 次 ($f=0.100\text{Hz}$)



Mode-(25) : ねじれ対称 1 次 ($f=0.160\text{Hz}$)

図-3.5.2.21 主要モード図

2) 解析条件

フラッター解析条件を表-3.5.2.23に示す。

表-3.5.2.23 フラッター解析条件

項目	解 析 条 件																			
解析手法	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）																			
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<table><thead><tr><th></th><th>鉛直</th><th>ねじれ</th><th>水平</th></tr></thead><tbody><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></tbody></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					鉛直	ねじれ	水平	揚力	○	○	×	モーメント	○	○	×	抗力	×	×	△
	鉛直	ねじれ	水平																	
揚力	○	○	×																	
モーメント	○	○	×																	
抗力	×	×	△																	
非定常空気力	平板翼理論値																			
準定常空気力	主 桁 C ₀ =0.75、A _s =7.0m ² /m ケーブル C ₀ =0.7、A _s =1.0m ² /m																			
その他	桁幅 B=41m																			

表-3.5.2.24 固有値解析結果

モード次数	固有振動数(Hz)	モード形状
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-3.5.2.22～図-3.5.2.24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 $\delta = -0.00348$ で、 $f = 0.107\text{Hz}$ であった。

.. FLUTTER ANALYSIS: 2500M LONG-SPAN BRIDGE: DELTA = 0.02 ..

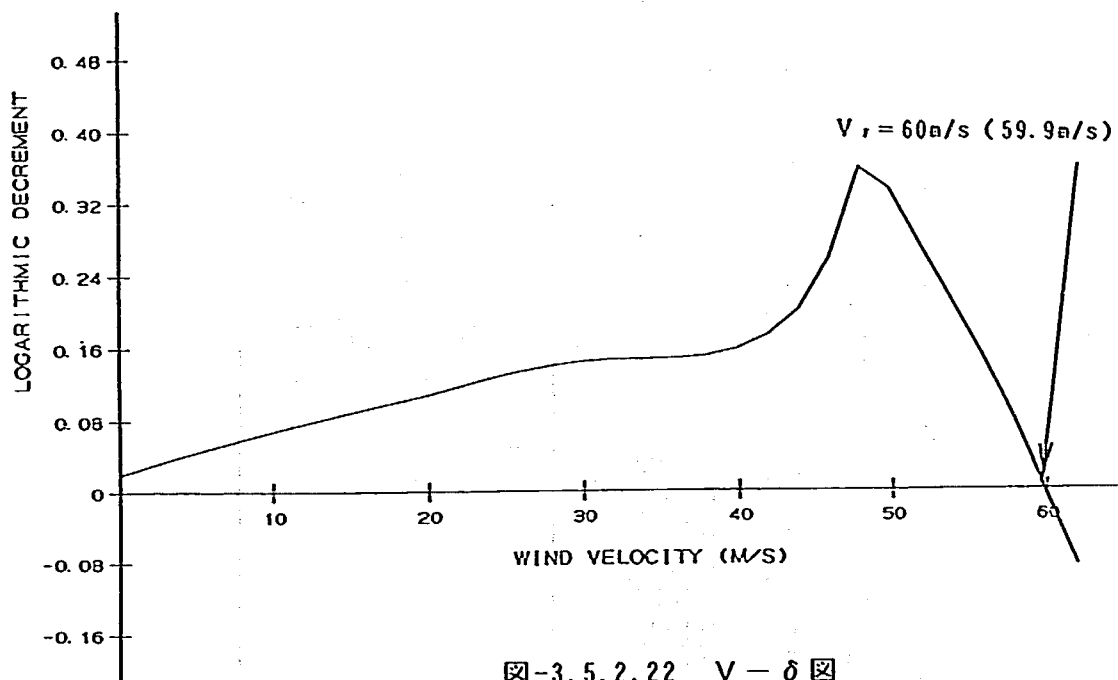


図-3.5.2.22 V- δ 図

.. FLUTTER ANALYSIS: 2500M LONG-SPAN BRIDGE: DELTA = 0.02 ..

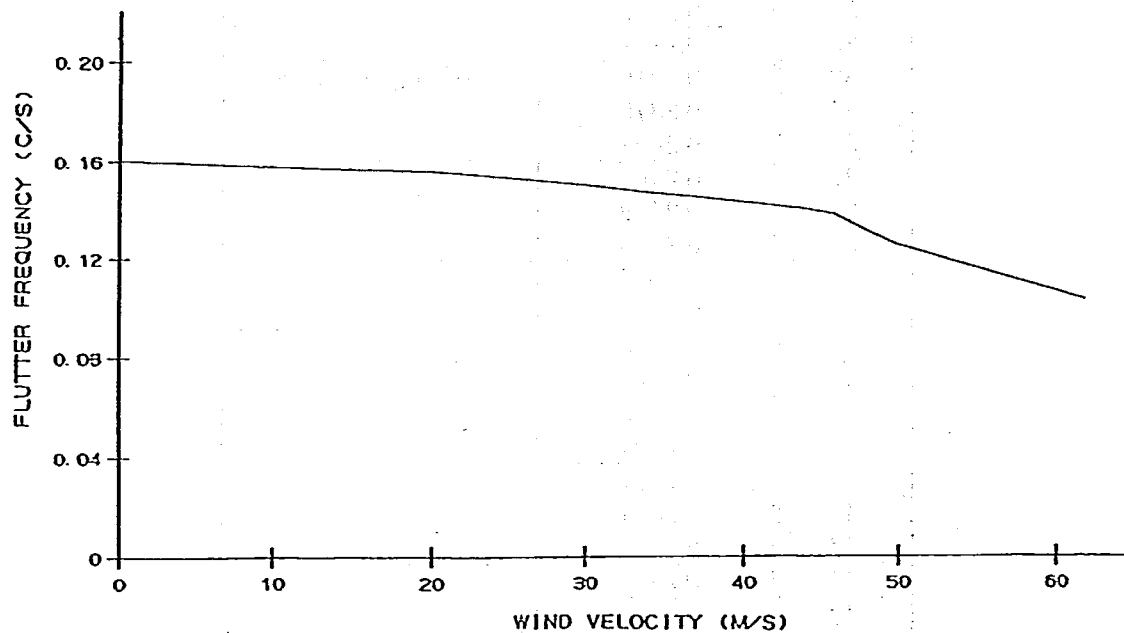
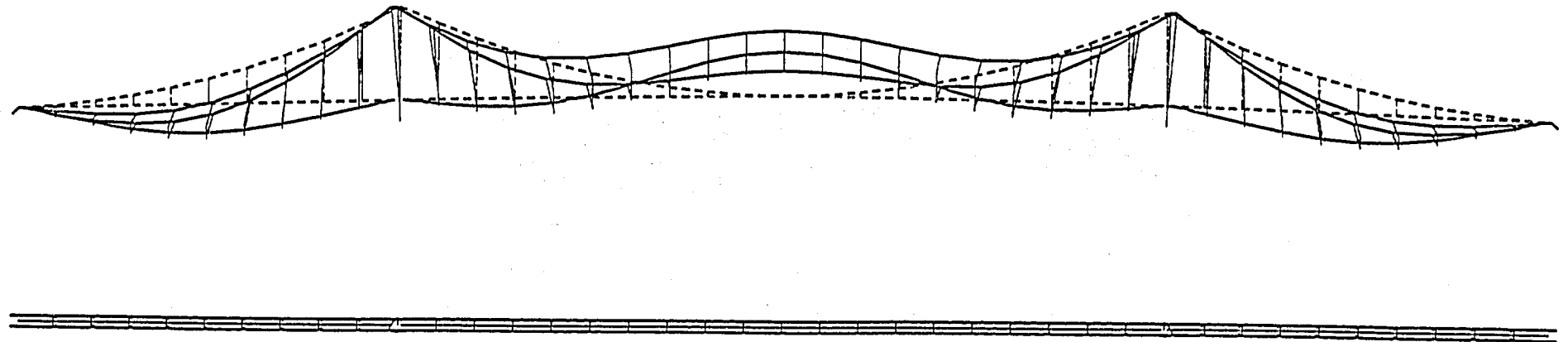


図-3.5.2.23 フラッター振動数

.. 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-3.5.2.24 フラッターモード図

参考) $f_r = 0.1048 \text{ c/s}$ ($\delta = -0.05$)

(8) 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-3.5.2.25に示す。

表-3.5.2.25 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	$2 \times 0.6 = 1.2 \text{ m}^2/\text{Br.}$
		弾性係数	$2.03 \times 10^7 \text{ t/m}^2$
		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	$2.03 \times 10^7 \text{ t/m}^2$
	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	$336.7 \text{ t} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{m}/\text{Br.}$
	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-3.5.2.26 に示す。

表-3.5.2.26 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-3.5.2.27に示す。

表-3.5.2.27 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： 無風時固有モードを使用 低次 40 モードの組み合わせ			
空 気 密 度	0.125 kgf・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	補 剛 桁：			
		鉛直	ねじれ	水平
	L	○	○	×
	M	○	○	×
	D	×	×	△
○：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				
非 定 常 空 気 力	平板翼理論値			
準 定 常 空 気 力	補 剛 桁：	C _D = 0.75, A _n = 7.0 m ² /m/Br.		
	ケーブル：	C _D = 0.7, A _n = 2.0 m ² /m/Br.		
そ の 他	桁幅は 41 m とした			

4) 解析結果

フラッター解析結果を表-3.5.2.28、図-3.5.2.25 および図-3.5.2.26 に示す。

表-3.5.2.28 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

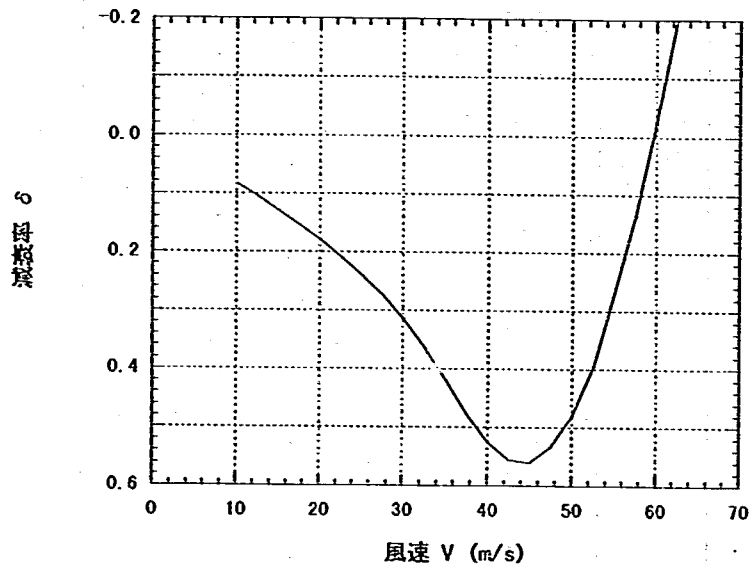


図-3.5.2.25 V- δ 図

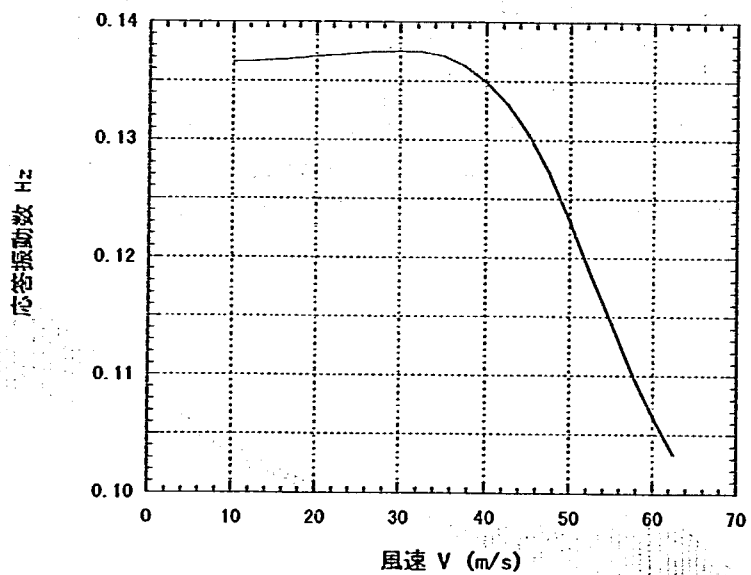


図-3.5.2.26 V-f図

(9) 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-3.5.2.29に示す。

表-3.5.2.29 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・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' 脊、ターリンクモデル化
		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。

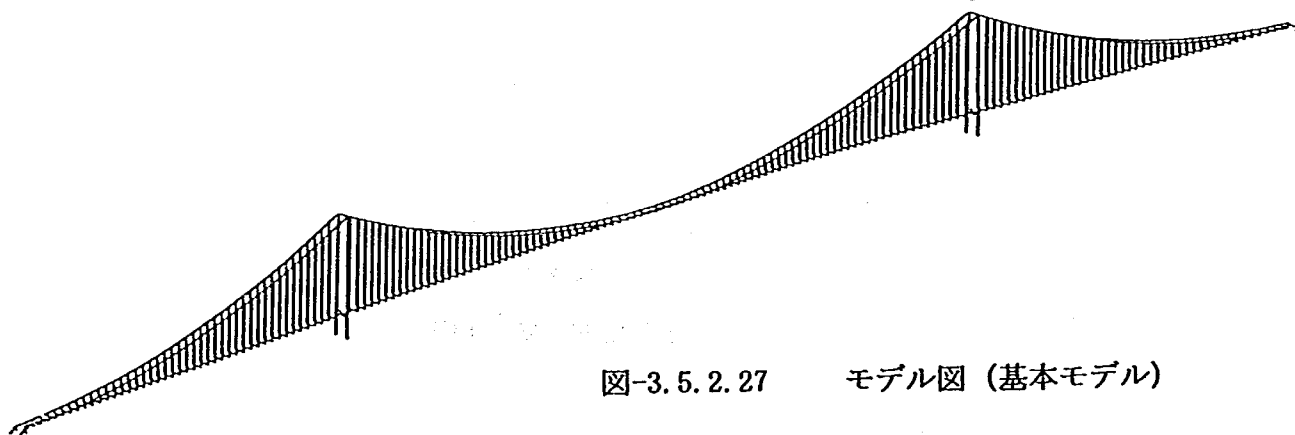


図-3.5.2.27 モデル図 (基本モデル)

2) 解析条件

フラッター解析条件を表-3.5.2.30に示す。

表-3.5.2.30 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使用。低次50モードを取り込む。																					
空気密度	0.125 kgf・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 (モード組合せ法)																					
空気力係数	主桁： <table><tr><td colspan="4">(振動方向)</td></tr><tr><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>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	(振動方向)					鉛直	ねじれ	水平	空 気 力	L	○	○	×	M	○	○	×	D	×	×	△
(振動方向)																						
	鉛直	ねじれ	水平																			
空 気 力	L	○	○	×																		
	M	○	○	×																		
	D	×	×	△																		
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 =7.0 m ² /m/Br ケーブル： C _D =0.75 A _n =2.0 m ² /m/Br																					
その他	桁幅 B=4.1m																					

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-3.5.2.31 に示す。

表-3.5.2.31 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	

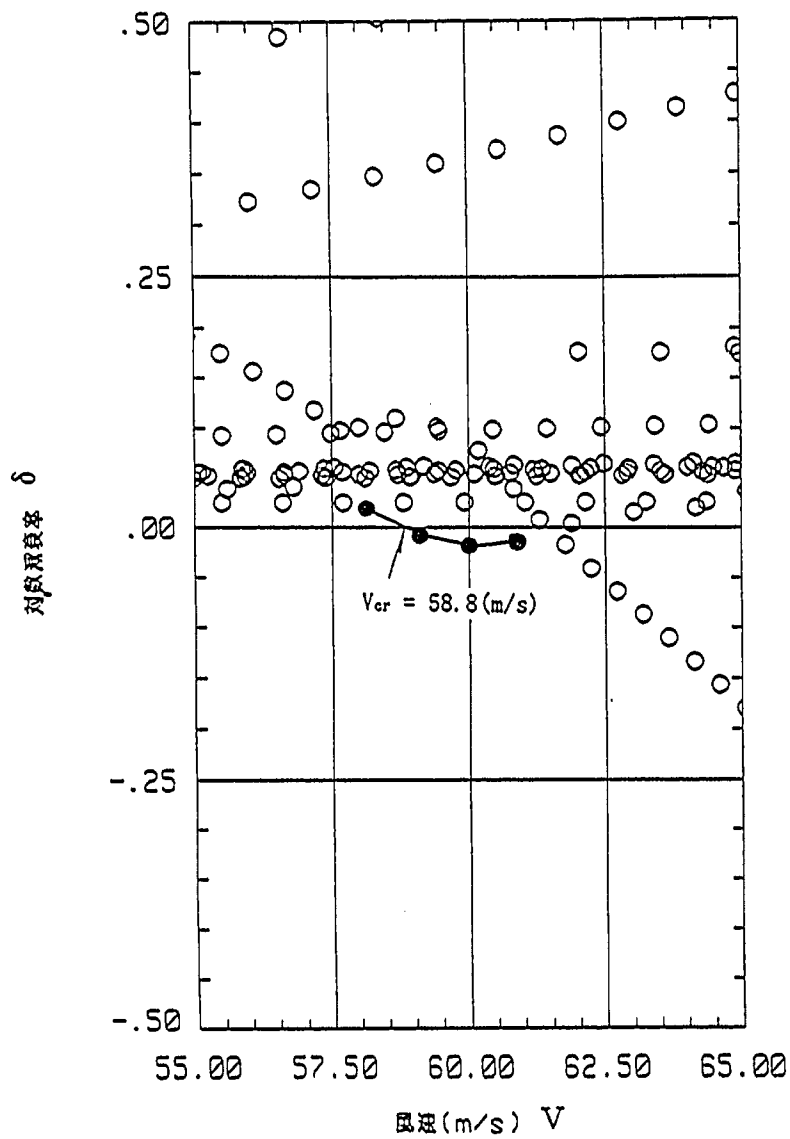
②フラッター解析結果

基本モデルのフラッター解析結果を図-3.5.2.28 および図-3.5.2.29 に示す。

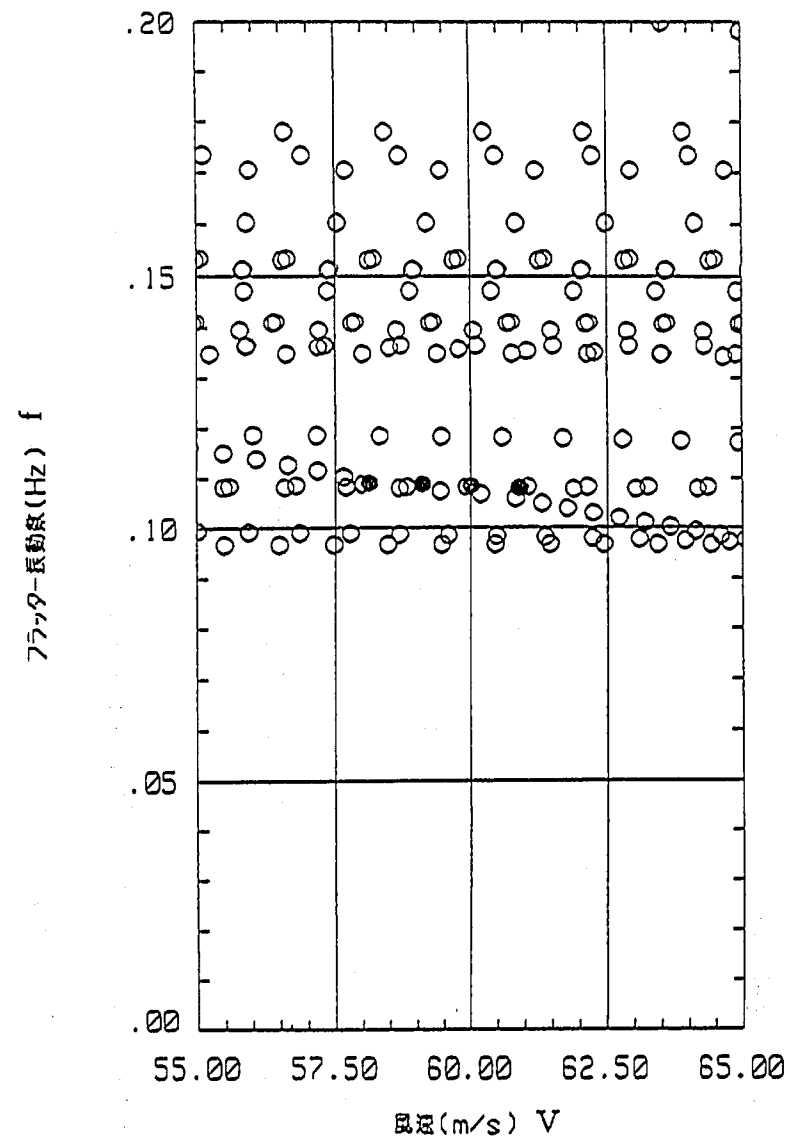
フラッター発振風速 (V_{cr}) は 58.8m/s であるが、 V_{cr} 付近における δ の低下の状況は単調ではなく、1度 δ が低下した後、また増加している。また、この時のフラッターモードは図-3.5.2.29 に示すように橋軸方向成分（遊動円木振動）が卓越した特異なモードである。

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) $V - \delta$ 図



(b) $V - f$ 図

図-3.5.2.28

フラッター解析結果 (基本モデル)

風速 ($V = 59.11 \text{ m/s}$)

—— 橋軸変位
- - - 橋面変位
- · - 鉛直変位
- · · - ねじれ ($B/2$ をかけた) (いる)

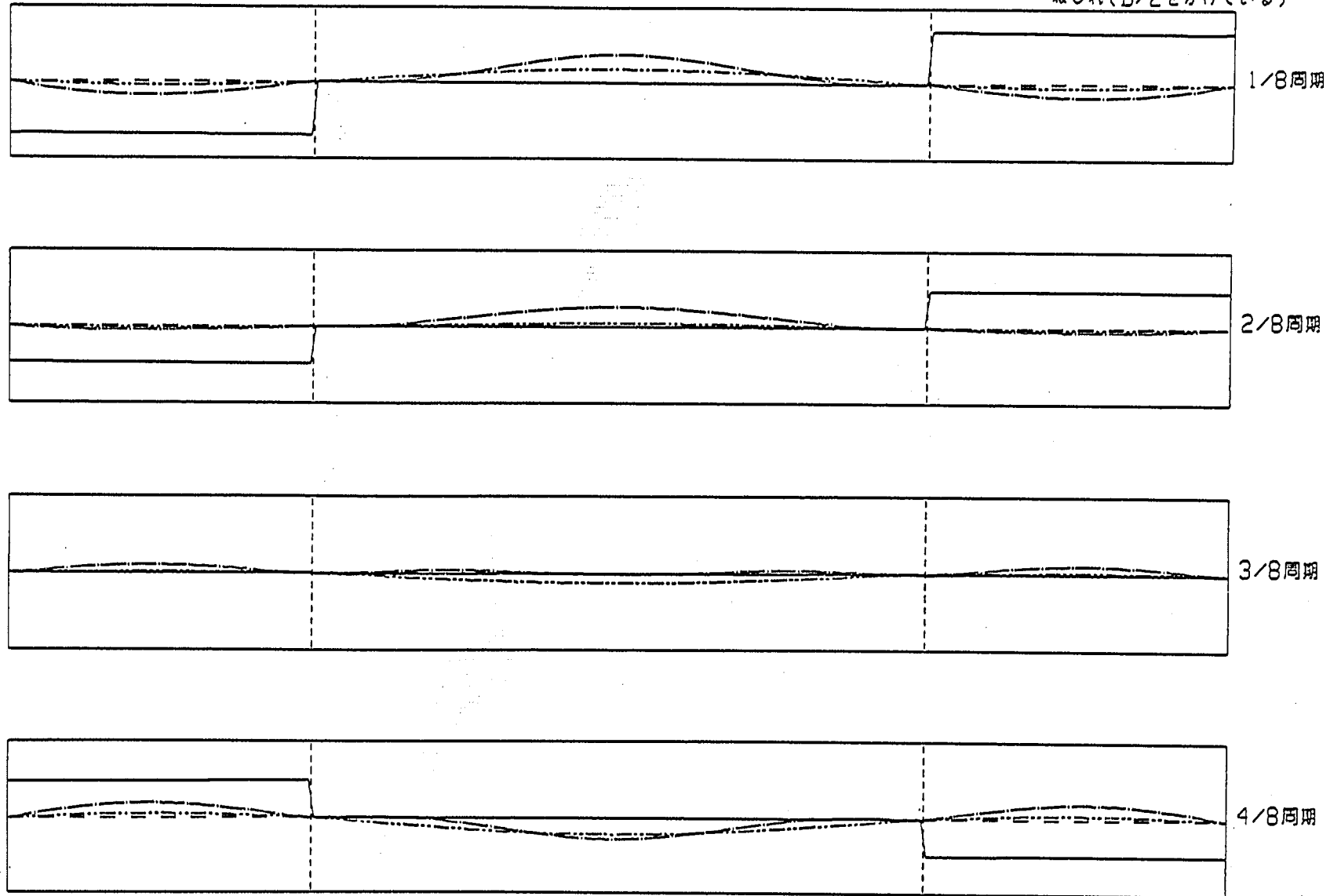


図-3.5.2.29 フラッターモード図 (基本モデル)

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-3.5.2.30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。

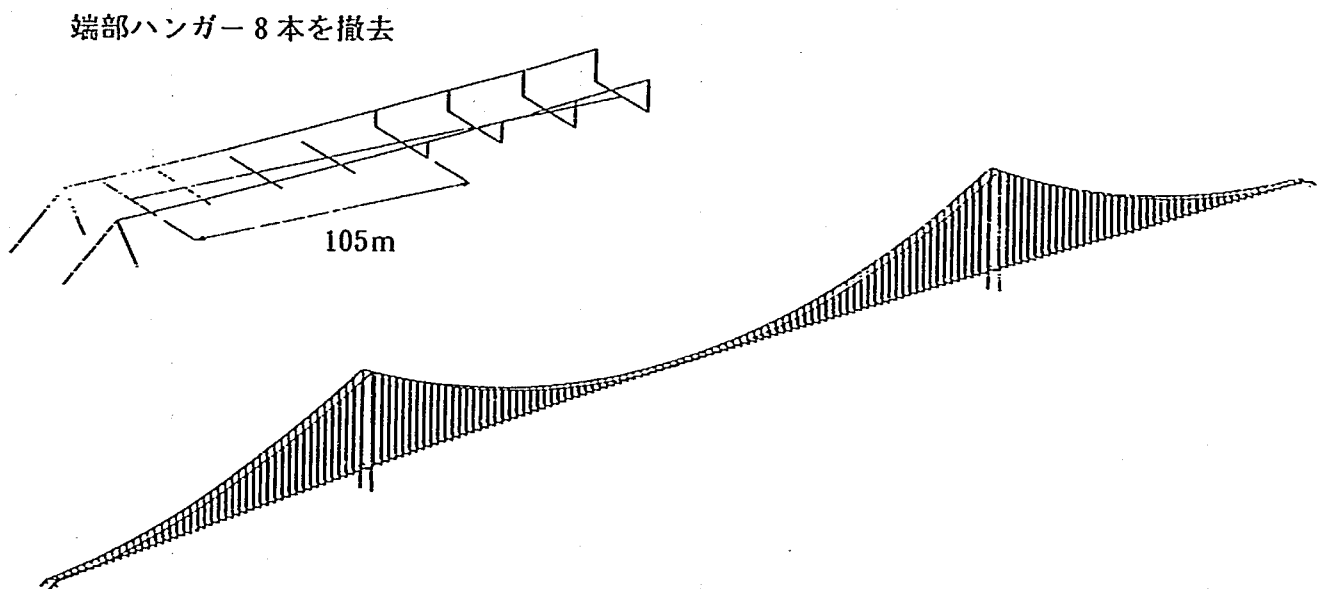


図-3.5.2.30 モデル図 (ハンガー撤去モデル)

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-3.5.2.32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-3.5.2.32 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

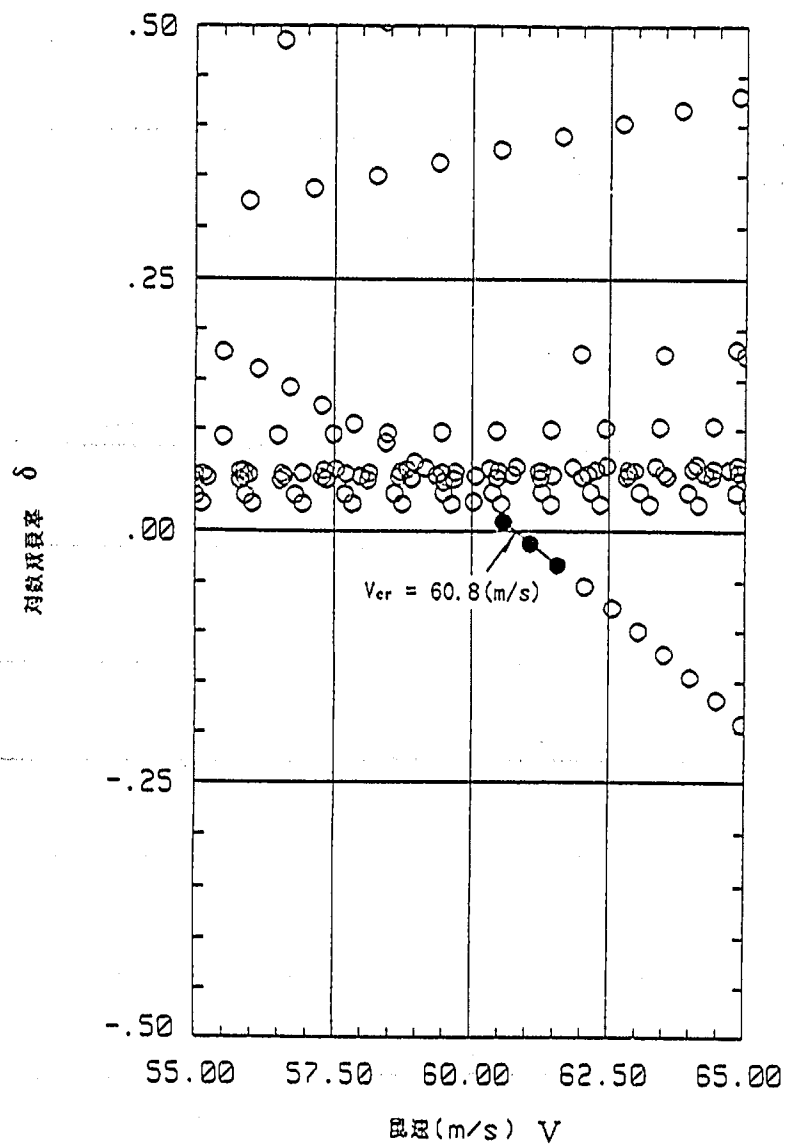
ハンガー撤去モデルのフラッター計算結果を図-3.5.2.31に示す。

$V_{cr}=60.8\text{m/s}$ である。また、図-3.5.2.32に V_{cr} 時のフラッターモードを示す。

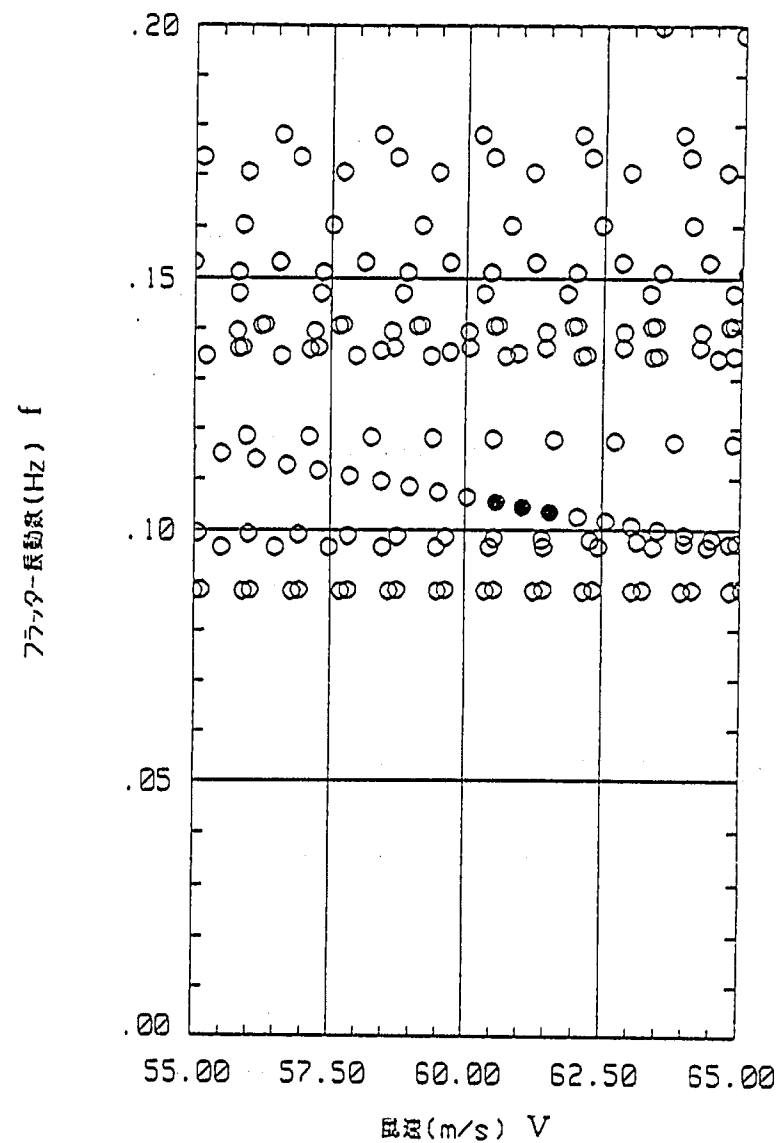
フラッター発振風速およびフラッターモードも他社結果とほぼ対応している。

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（ $f=0.108\text{Hz}$ ）がフラッター振動数（ $f=0.109\text{Hz}$ ）に近接したため影響をおよぼしたものと考えられる。



(a) $V - \delta$ 図



(b) $V - f$ 図

図-3.5.2.31 フラッター解析結果 (ハンガー撤去モデル)

風速 ($V = 61.06 \text{ m/s}$)

——— 橋軸変位
 - - - 橋面変位
 - · - 鉛直変位
 ····· ねじれ ($B/2$ をかけている)

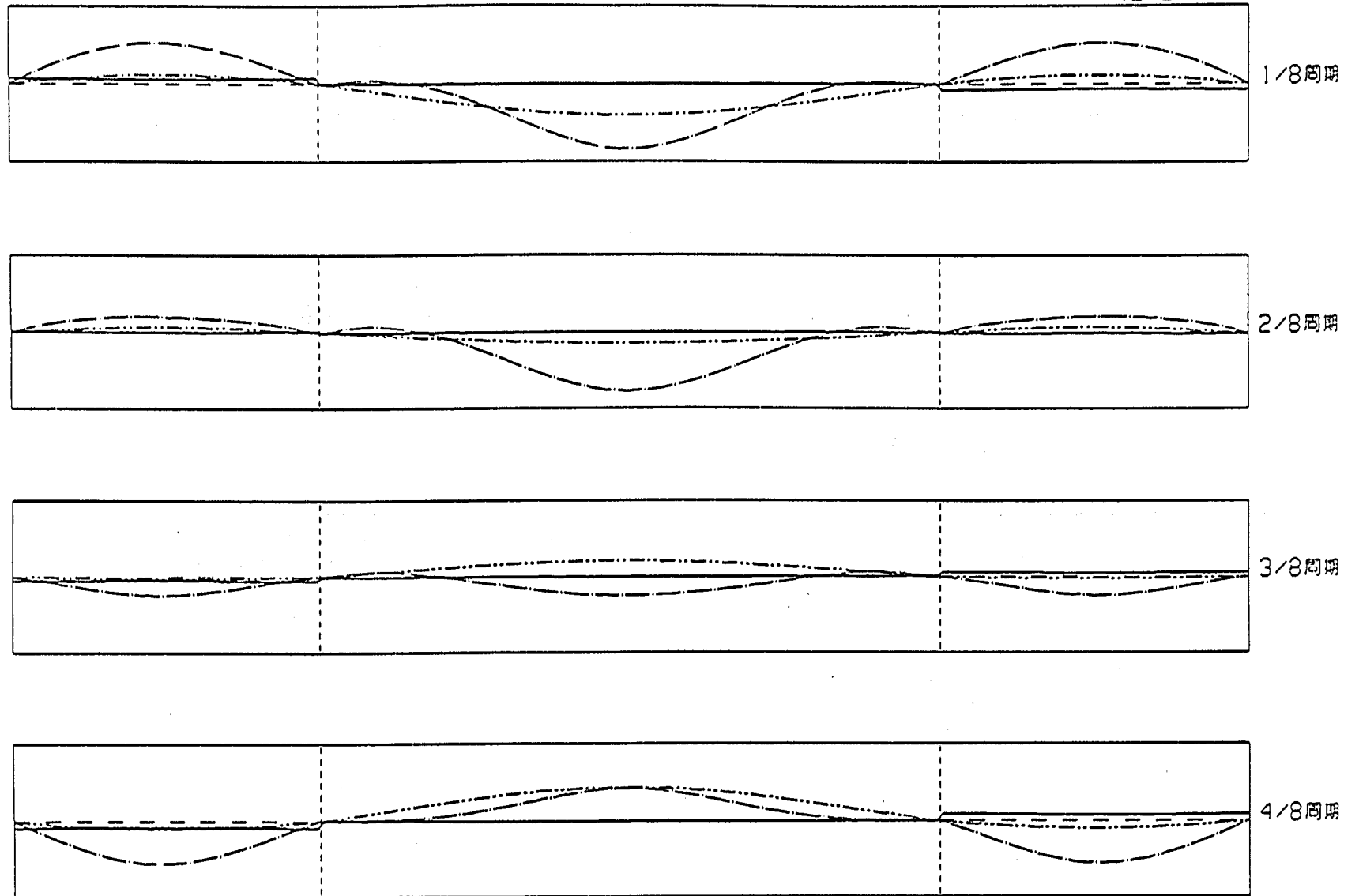


図-3.5.2.32 フラッターモード図 (ハンガー撤去モデル)

3.5.3 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-3.5.3.1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 $\pm 2\%$ 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-3.5.3.2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-3.5.3.1 固有値解析結果

モ ー ド 形 状	建設省 土木研究所		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
桁水平曲げ 対称 1 次	0.0311	1.00	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	0.0524	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	0.0586	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	0.0605	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	0.0686	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	0.0959	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	0.0972	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	0.0981	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	0.0996	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	0.1362	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	0.1607	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	0.2298	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-3.5.3.2 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	
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. あとがき

本共同研究は、超長大橋梁を計画するにあたり、最も重要な課題の1つとなる耐風安定性について、経済性も考慮した解決策を見いだすことを目的としている。当初、モデル橋梁を中央径間長2500mの6車線橋梁としていたが、社会情勢を鑑みると海峡横断プロジェクトにおいても4車線の可能性がでてきたことをふまえ、4車線も検討対象に加え、検討期間も2年から3年に延長した。

検討当初から、与えられた命題が技術的に困難な点が多く、必ずしも多くの解決策を短時間に見いだせるものではないことは予想された。このため、検討グループを3グループ編成し、効率的な検討業務の遂行を図ってきた。その結果、当初の計画では共同研究を集結する予定であった2年を経過した現時点において、耐風安定性の確保するという目的のみであれば有望な解決案がいくつかあげられる段階に来たものの、経済性も合わせ持った耐風安定性の良好な超長大橋の姿は、残念ながら漠然としたものが残っている。

4車線を検討対象に加えたことにより、与えられた最後の1年に向け、3グループでの検討を各々総括するとともに、各グループでの検討成果を組み合わせた形で、最善と考えられるシステム作りを進めてゆく予定である。耐風安定性の問題は、決して足し算、掛け算ができるような単純な性格ではない。それでも、耐風安定性の解決案の組み合わせにより若干でも優れたシステムが得られれば有意義な成果となるであろうし、問題の性格が単純ではないことは、組み合わせにより期待以上の相乗効果の可能性も合わせ持っている。更に課題の性格が複雑であることは、思いもかけぬ解決策が残されている可能性も秘めている。スケジュールをたててしまうと硬くなりがちな頭を柔らかくする必要もある。

付録

5. 1 空力特性検討断面一覧表

1875-1876, 1877-1878, 1879-1880, 1881-1882, 1883-1884, 1885-1886, 1887-1888, 1889-1890, 1891-1892, 1893-1894, 1895-1896, 1897-1898, 1899-1900, 1901-1902, 1903-1904, 1905-1906, 1907-1908, 1909-1910, 1911-1912, 1913-1914, 1915-1916, 1917-1918, 1919-1920, 1921-1922, 1923-1924, 1925-1926, 1927-1928, 1929-1930, 1931-1932, 1933-1934, 1935-1936, 1937-1938, 1939-1940, 1941-1942, 1943-1944, 1945-1946, 1947-1948, 1949-1950, 1951-1952, 1953-1954, 1955-1956, 1957-1958, 1959-1960, 1961-1962, 1963-1964, 1965-1966, 1967-1968, 1969-1970, 1971-1972, 1973-1974, 1975-1976, 1977-1978, 1979-1980, 1981-1982, 1983-1984, 1985-1986, 1987-1988, 1989-1990, 1991-1992, 1993-1994, 1995-1996, 1997-1998, 1999-2000, 2001-2002, 2003-2004, 2005-2006, 2007-2008, 2009-2010, 2011-2012, 2013-2014, 2015-2016, 2017-2018, 2019-2020, 2021-2022, 2023-2024, 2025-2026, 2027-2028, 2029-2030, 2031-2032, 2033-2034, 2035-2036, 2037-2038, 2039-2040, 2041-2042, 2043-2044, 2045-2046, 2047-2048, 2049-2050, 2051-2052, 2053-2054, 2055-2056, 2057-2058, 2059-2060, 2061-2062, 2063-2064, 2065-2066, 2067-2068, 2069-2070, 2071-2072, 2073-2074, 2075-2076, 2077-2078, 2079-2080, 2081-2082, 2083-2084, 2085-2086, 2087-2088, 2089-2090, 2091-2092, 2093-2094, 2095-2096, 2097-2098, 2099-2100, 2101-2102, 2103-2104, 2105-2106, 2107-2108, 2109-2110, 2111-2112, 2113-2114, 2115-2116, 2117-2118, 2119-2120, 2121-2122, 2123-2124, 2125-2126, 2127-2128, 2129-2130, 2131-2132, 2133-2134, 2135-2136, 2137-2138, 2139-2140, 2141-2142, 2143-2144, 2145-2146, 2147-2148, 2149-2150, 2151-2152, 2153-2154, 2155-2156, 2157-2158, 2159-2160, 2161-2162, 2163-2164, 2165-2166, 2167-2168, 2169-2170, 2171-2172, 2173-2174, 2175-2176, 2177-2178, 2179-2180, 2181-2182, 2183-2184, 2185-2186, 2187-2188, 2189-2190, 2191-2192, 2193-2194, 2195-2196, 2197-2198, 2199-2200, 2201-2202, 2203-2204, 2205-2206, 2207-2208, 2209-2210, 2211-2212, 2213-2214, 2215-2216, 2217-2218, 2219-2220, 2221-2222, 2223-2224, 2225-2226, 2227-2228, 2229-2230, 2231-2232, 2233-2234, 2235-2236, 2237-2238, 2239-2240, 2241-2242, 2243-2244, 2245-2246, 2247-2248, 2249-2250, 2251-2252, 2253-2254, 2255-2256, 2257-2258, 2259-2260, 2261-2262, 2263-2264, 2265-2266, 2267-2268, 2269-2270, 2271-2272, 2273-2274, 2275-2276, 2277-2278, 2279-2280, 2281-2282, 2283-2284, 2285-2286, 2287-2288, 2289-2290, 2291-2292, 2293-2294, 2295-2296, 2297-2298, 2299-2300, 2301-2302, 2303-2304, 2305-2306, 2307-2308, 2309-2310, 2311-2312, 2313-2314, 2315-2316, 2317-2318, 2319-2320, 2321-2322, 2323-2324, 2325-2326, 2327-2328, 2329-2330, 2331-2332, 2333-2334, 2335-2336, 2337-2338, 2339-2340, 2341-2342, 2343-2344, 2345-2346, 2347-2348, 2349-2350, 2351-2352, 2353-2354, 2355-2356, 2357-2358, 2359-2360, 2361-2362, 2363-2364, 2365-2366, 2367-2368, 2369-2370, 2371-2372, 2373-2374, 2375-2376, 2377-2378, 2379-2380, 2381-2382, 2383-2384, 2385-2386, 2387-2388, 2389-2390, 2391-2392, 2393-2394, 2395-2396, 2397-2398, 2399-2400, 2401-2402, 2403-2404, 2405-2406, 2407-2408, 2409-2410, 2411-2412, 2413-2414, 2415-2416, 2417-2418, 2419-2420, 2421-2422, 2423-2424, 2425-2426, 2427-2428, 2429-2430, 2431-2432, 2433-2434, 2435-2436, 2437-2438, 2439-2440, 2441-2442, 2443-2444, 2445-2446, 2447-2448, 2449-2450, 2451-2452, 2453-2454, 2455-2456, 2457-2458, 2459-2460, 2461-2462, 2463-2464, 2465-2466, 2467-2468, 2469-2470, 2471-2472, 2473-2474, 2475-2476, 2477-2478, 2479-2480, 2481-2482, 2483-2484, 2485-2486, 2487-2488, 2489-2490, 2491-2492, 2493-2494, 2495-2496, 2497-2498, 2499-2500, 2501-2502, 2503-2504, 2505-2506, 2507-2508, 2509-2510, 2511-2512, 2513-2514, 2515-2516, 2517-2518, 2519-2520, 2521-2522, 2523-2524, 2525-2526, 2527-2528, 2529-2530, 2531-2532, 2533-2534, 2535-2536, 2537-2538, 2539-2540, 2541-2542, 2543-2544, 2545-2546, 2547-2548, 2549-2550, 2551-2552, 2553-2554, 2555-2556, 2557-2558, 2559-2560, 2561-2562, 2563-2564, 2565-2566, 2567-2568, 2569-2570, 2571-2572, 2573-2574, 2575-2576, 2577-2578, 2579-2580, 2581-2582, 2583-2584, 2585-2586, 2587-2588, 2589-2590, 2591-2592, 2593-2594, 2595-2596, 2597-2598, 2599-2600, 2601-2602, 2603-2604, 2605-2606, 2607-2608, 2609-2610, 2611-2612, 2613-2614, 2615-2616, 2617-2618, 2619-2620, 2621-2622, 2623-2624, 2625-2626, 2627-2628, 2629-2630, 2631-2632, 2633-2634, 2635-2636, 2637-2638, 2639-2640, 2641-2642, 2643-2644, 2645-2646, 2647-2648, 2649-2650, 2651-2652, 2653-2654, 2655-2656, 2657-2658, 2659-2660, 2661-2662, 2663-2664, 2665-2666, 2667-2668, 2669-2670, 2671-2672, 2673-2674, 2675-2676, 2677-2678, 2679-2680, 2681-2682, 2683-2684, 2685-2686, 2687-2688, 2689-2690, 2691-2692, 2693-2694, 2695-2696, 2697-2698, 2699-2700, 2701-2702, 2703-2704, 2705-2706, 2707-2708, 2709-2710, 2711-2712, 2713-2714, 2715-2716, 2717-2718, 2719-2720, 2721-2722, 2723-2724, 2725-2726, 2727-2728, 2729-2730, 2731-2732, 2733-2734, 2735-2736, 2737-2738, 2739-2740, 2741-2742, 2743-2744, 2745-2746, 2747-2748, 2749-2750, 2751-2752, 2753-2754, 2755-2756, 2757-2758, 2759-2760, 2761-2762, 2763-2764, 2765-2766, 2767-2768, 2769-2770, 2771-2772, 2773-2774, 2775-2776, 2777-2778, 2779-2780, 2781-2782, 2783-2784, 2785-2786, 2787-2788, 2789-2790, 2791-2792, 2793-2794, 2795-2796, 2797-2798, 2799-2800, 2801-2802, 2803-2804, 2805-2806, 2807-2808, 2809-2810, 2811-2812, 2813-2814, 2815-2816, 2817-2818, 2819-2820, 2821-2822, 2823-2824, 2825-2826, 2827-2828, 2829-2830, 2831-2832, 2833-2834, 2835-2836, 2837-2838, 2839-2840, 2841-2842, 2843-2844, 2845-2846, 2847-2848, 2849-2850, 2851-2852, 2853-2854, 2855-2856, 2857-2858, 2859-2860, 2861-2862, 2863-2864, 2865-2866, 2867-2868, 2869-2870, 2871-2872, 2873-2874, 2875-2876, 2877-2878, 2879-2880, 2881-2882, 2883-2884, 2885-2886, 2887-2888, 2889-2890, 2891-2892, 2893-2894, 2895-2896, 2897-2898, 2899-2900, 2901-2902, 2903-2904, 2905-2906, 2907-2908, 2909-2910, 2911-2912, 2913-2914, 2915-2916, 2917-2918, 2919-2920, 2921-2922, 2923-2924, 2925-2926, 2927-2928, 2929-2930, 2931-2932, 2933-2934, 2935-2936, 2937-2938, 2939-2940, 2941-2942, 2943-2944, 2945-2946, 2947-2948, 2949-2950, 2951-2952, 2953-2954, 2955-2956, 2957-2958, 2959-2960, 2961-2962, 2963-2964, 2965-2966, 2967-2968, 2969-2970, 2971-2972, 2973-2974, 2975-2976, 2977-2978, 2979-2980, 2981-2982, 2983-2984, 2985-2986, 2987-2988, 2989-2990, 2991-2992, 2993-2994, 2995-2996, 2997-2998, 2999-3000, 3001-3002, 3003-3004, 3005-3006, 3007-3008, 3009-3010, 3011-3012, 3013-3014, 3015-3016, 3017-3018, 3019-3020, 3021-3022, 3023-3024, 3025-3026, 3027-3028, 3029-3030, 3031-3032, 3033-3034, 3035-3036, 3037-3038, 3039-3040, 3041-3042, 3043-3044, 3045-3046, 3047-3048, 3049-3050, 3051-3052, 3053-3054, 3055-3056, 3057-3058, 3059-3060, 3061-3062, 3063-3064, 3065-3066, 3067-3068, 3069-3070, 3071-3072, 3073-3074, 3075-3076, 3077-3078, 3079-3080, 3081-3082, 3083-3084, 3085-3086, 3087-3088, 3089-3090, 3091-3092, 3093-3094, 3095-3096, 3097-3098, 3099-3100, 3101-3102, 3103-3104, 3105-3106, 3107-3108, 3109-3110, 3111-3112, 3113-3114, 3115-3116, 3117-3118, 3119-3120, 3121-3122, 3123-3124, 3125-3126, 3127-3128, 3129-3130, 3131-3132, 3133-3134, 3135-3136, 3137-3138, 3139-3140, 3141-3142, 3143-3144, 3145-3146, 3147-3148, 3149-3150, 3151-3152, 3153-3154, 3155-3156, 3157-3158, 3159-3160, 3161-3162, 3163-3164, 3165-3166, 3167-3168, 3169-3170, 3171-3172, 3173-3174, 3175-3176, 3177-3178, 3179-3180, 3181-3182, 3183-3184, 3185-3186, 3187-3188, 3189-3190, 3191-3192, 3193-3194, 3195-3196, 3197-3198, 3199-3200, 3201-3202, 3203-3204, 3205-3206, 3207-3208, 3209-3210, 3211-3212, 3213-3214, 3215-3216, 3217-3218, 3219-3220, 3221-3222, 3223-3224, 3225-3226, 3227-3228, 3229-3230, 3231-3232, 3233-3234, 3235-3236, 3237-3238, 3239-3240, 3241-3242, 3243-3244, 3245-3246, 3247-3248, 3249-3250, 3251-3252, 3253-3254, 3255-3256, 3257-3258, 3259-3260, 3261-3262, 3263-3264, 3265-3266, 3267-3268, 3269-3270, 3271-3272, 3273-3274, 3275-3276, 3277-3278, 3279-3280, 3281-3282, 3283-3284, 3285-3286, 3287-3288, 3289-3290, 3291-3292, 3293-3294, 3295-3296, 3297-3298, 3299-3300, 3301-3302, 3303-3304, 3305-3306, 3307-3308, 3309-3310, 3311-3312, 3313-3314, 3315-3316, 3317-3318, 3319-3320, 3321-3322, 3323-3324, 3325-3326, 3327-3328, 3329-3330, 3331-3332, 3333-3334, 3335-3336, 3337-3338, 3339-3340, 3341-3342, 3343-3344, 3345-3346, 3347-3348, 3349-3350, 3351-3352, 3353-3354, 3355-3356, 3357-3358, 3359-3360, 3361-3362, 3363-3364, 3365-3366, 3367-3368, 3369-3370, 3371-3372, 3373-3374, 3375-3376, 3377-3378, 3379-3380, 3381-3382, 3383-3384, 3385-3386, 3387-3388, 3389-3390, 3391-3392, 3393-3394, 3395-3396, 3397-3398, 3399-3400, 3401-3402, 3403-3404, 3405-3406, 3407-3408, 3409-3410, 3411-3412, 3413-3414, 3415-3416, 3417-3418, 3419-3420, 3421-3422, 3423-3424, 3425-3426, 3427-3428, 3429-3430, 3431-3432, 3433-3434, 3435-3436, 3437-3438, 3439-3440, 3441-3442, 3443-3444, 3445-3446, 3447-3448, 3449-3450, 3451-3452, 3453-3454, 3455-3456, 3457-3458, 3459-3460, 3461-3462, 3463-3464, 3465-3466, 3467-3468, 3469-3470, 3471-3472, 3473-3474, 3475-3476, 3477-3478, 3479-3480, 3481-3482, 3483-3484, 3485-3486, 3487-3488, 3489-3490, 3491-3492, 3493-3494, 3495-3496, 3497-3498, 3499-3500, 3501-3502, 3503-3504, 3505-3506, 3507-3508, 3509-3510, 3511-3512, 3513-3514, 3515-3516, 3517-3518, 3519-3520, 3521-3522, 3523-3524, 3525-3526, 3527-3528, 3529-3530, 3531-3532, 3533-3534, 3535-3536, 3537-3538, 3539-3540, 3541-3542, 3543-3544, 3545-3546, 3547-3548, 3549-3550, 3551-3552, 3553-3554, 3555-3556, 3557-3558, 3559-3560, 3561-3562, 3563-3564, 3565-3566, 3567-3568, 3569-3570, 3571-3572, 3573-3574, 3575-3576, 3577-3578, 3579-3580, 3581-3582, 3583-3584, 3585-3586, 3587-3588, 3589-3590, 3591-3592, 3593-3594, 3595-3596, 3597-3598, 3599-3600, 3601-3602, 3603-3604, 3605-3606, 3607-3608, 3609-3610, 3611-3612, 3613-3614, 3615-3616, 3617-3618, 3619-3620, 3621-3622, 3623-3624, 3625-3626, 3627-3628, 3629-3630, 3631-3632, 3633-3634, 3635-3636, 3637-3638, 3639-3640, 3641-3642, 3643-3644, 3645-3646, 3647-3648, 3649-3650, 3651-3652, 3653-3654, 3655-3656, 3657-3658, 3659-3660, 3661-3662, 3663-3664, 3665-3666, 3667-3668, 3669-3670, 3671-3672, 3673-3674, 3675-3676, 3677-3678, 3679-3680, 3681-3682, 3683-3684, 3685-3686, 3687-3688, 3689-3690, 3691-3692, 3693-3694, 3695-3696, 3697-3698, 3699-3700, 3701-3702, 3703-3704, 3705-3706, 3707-3708, 3709-3710, 3711-3712, 3713-3714, 3715-3716, 3717-3718, 3719-3720, 3721-3722, 3723-3724, 3725-3726, 3727-3728, 3729-3730, 3731-3732, 3733-3734, 3735-3736, 3737-3738, 3739-3740, 3741-3742, 3743-3744, 3745-3746, 3747-3748, 3749-3750, 3751-3752, 3753-3754, 3755-3756, 3757-3758, 3759-3760, 3761-3762, 3763-3764, 3765-3766, 3767-3768, 3769-3770, 3771-3772, 3773-3774, 3775-3776, 3777-3778, 3779-3780, 3781-3782, 3783-3784, 3785-3786, 3787-3788, 3789-3790, 3791-3792, 3793-3794, 3795-3796, 3797-3798, 3799-3800, 3801-3802, 3803-3804, 3805-3806, 3807-3808, 3809-3810, 3811-3812, 3813-3814, 3815-3816, 3817-3818, 3819-3820, 3821-3822, 3823-3824, 3825-3826, 3827-3828, 3829-3830, 3831-3832, 3833-3834, 3835-3836, 3837-3838, 3839-3840, 3841-3842, 3843-3844, 3845-3846, 3847-3848, 3849-3850, 3851-3852, 3853-3854, 3855-3856, 3857-3858, 3859-3860, 3861-3862, 3863-3864, 3865-3866, 3867-3868, 3869-3870, 3871-3872, 3873-3874, 3875-3876, 3877-3878, 3879-3880, 3881-3882, 3883-3884, 3885-3886, 3887-3888, 3889-3890, 3891-3892, 3893-3894, 3895-3896, 3897-3898, 3899-3900, 3901-3902, 3903-3904, 3905-3906, 3907-3908, 3909-3910, 3911-3912, 3913-3914, 3915-3916, 3917-3918, 3919-3920, 3921-3922, 3923-3924, 3925-3926, 3927-3928, 3929-3930, 3931-3932, 3933-3934, 3935-3936, 3937-3938, 3939-3940, 3941-3942, 3943-3944, 3945-3946, 3947-3948, 3949-3950, 3951-3952, 3953-3954, 3955-3956, 3957-3958, 3959-3960, 3961-3962, 3963-3964, 3965-3966, 3967-3968, 3969-3970, 3971-3972, 3973-3974, 3975-3976, 3977-3978, 3979-3980, 3981-3982, 3983-3984, 3985-3986, 3987-3988, 3989-3990, 3991-3992, 3993-3994, 3995-3996, 3997-3998, 3999-4000, 4001-4002, 4003-4004, 4005-4006, 4007-4008, 4009-4010, 4011-4012, 4013-4014, 4015-4016, 4017-4018, 4019-4020, 4021-4022, 4023-4024, 4025-4026, 4027-4028, 4029-4030, 4031-4032, 4033-4034, 4035-4036, 4037-4038, 4039-4040, 4041-4042, 4043-4044, 4045-4046, 4047-4048, 4049-4050, 4051-4052, 4053-4054, 4055-4056, 4057-4058, 4059-4060, 4061-4062, 4063-4064, 4065-4066, 4067-4068, 4069-4070, 4071-4072, 4073-4074, 4075-4076, 4077-4078, 4079-4080, 4081-4082, 4083-4084, 4085-4086, 4087-4088, 4089-4090, 4091-4092, 4093-4094, 4095-4096, 4097-4098, 4099-4100, 4101-4102, 4103-4104, 4105-4106, 4107-4108, 4109-4110, 4111-4112, 4113-4114, 4115-4116, 4117-4118, 4119-4120, 412

5.1 空力特性検討断面一覧表

5.1.1 概要

本研究では、これまで 1BOX・2BOX・新形式と多種多様なアイデアが盛り込まれた橋梁の検討が行われている。特に、風洞試験で空力特性の検討が行われてきた断面については、かなりの数になるものと予想され、何らかの形で資料としてまとめ、記録に残す必要があると考えられる。

そこで、本研究に限らず、過去に検討されてきた断面について一覧表にまとめた資料の作成を提案、作成することとした。

ここでは、資料作成にあたり、その記入要領が統一されるよう記入に関する「定義」について解説する。

なお、以下に示す定義は、基本的には「本州四国連絡橋 風洞試験要領(1980)・同解説」(以下「試験要領」)に準ずるものとする。

5.1.2 一般項目の記入要領・定義

(1) 呼称

下記の記入例を参考に、各断面の呼称を決定する。

記入例：○-○-○○○○○

① ②

③

①各社略号(表-5.1.1.1 参照)

②タイプ(1:1BOX, 2:2BOX, N:新形式)

③オプション(各社対応:4~5桁程度)

表-5.1.1 各社略号

土研	本四	石播	川重	川田	住重	NKK	日立	三菱	三井
PR	HA	IH	KH	KW	SH	NK	HZ	MH	ME

(2) コメント欄

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、種類等)等を簡潔に記述する。

(3) 表記数値桁数

表中に表記する数値の有効桁数は、「4桁」までとする。(以降、四捨五入)

5.1.3 形状諸元定義

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する。

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」の表記とする。

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

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プランクとする。

(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）とする。

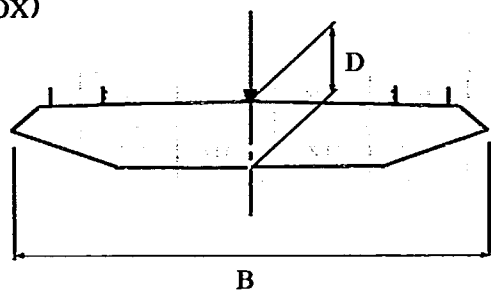
詳細は、「試験要領」にならい、「フェアリング以外の安定化策、添架物などの実験上取り外しを行うものを除いた寸法」とする。

(3) 桁高 D

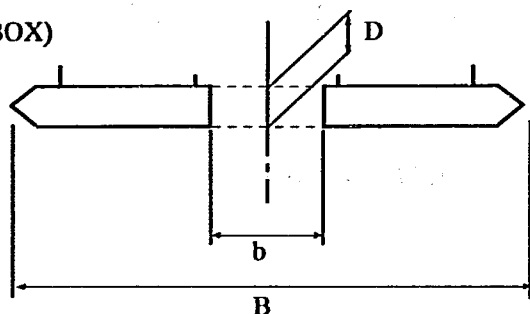
桁断面中心での桁高を基本とし（図参照）、添架物（高欄など）・安定化策（センタバリアなど）等その形状・形式に関わらず、実験上取り外しを行う付加物を除いた寸法とする。（形状・形式とは、高欄を例にとると、「充実（壁）・ポスト・透過（ネット）」等のこと。）

なお、「桁高」表記については、概略高さを記入する（記号的に、あるいは呼称的な意味あいを用いる）ことも可とする。

(1BOX)



(2BOX)



(2BOX : 床版勾配付きの場合)

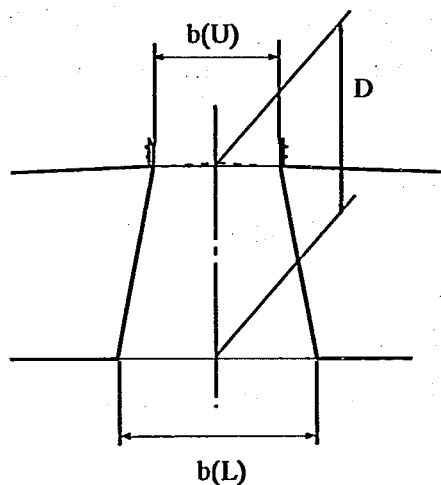


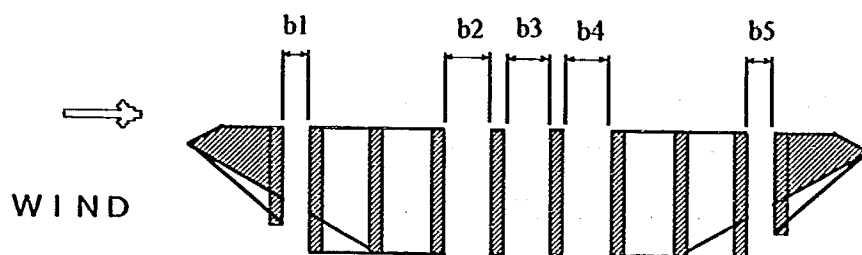
図- 5.1.3.1 「桁幅 B」「桁高 D」「開孔幅 b」の定義

(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、それぞれの開孔幅を上流側から順に列記する。なお、位置関係については、本表では省略する。

【例】



記入例（上流側より列記）： $b1+b2+b3+b4+b5$

図－ 5.1.3.2 記入例

(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。

5.1.4 振動諸元定義

(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) 但し、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 $N \theta$ のみ記述する。→振動数比からたわみ振動数は換算可。

2) 重量・極慣性

単位長さ(m)あたりで記述する。(重力単位系)

重量単位 ==> 実橋 tf/m , 模型 kgf/m

極慣性単位 ==> 実橋 $\text{tfs}^2\text{m/m}$, 模型 $\text{kgfs}^2\text{m/m}$

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。

$$\rho = 0.132 \times \frac{273}{T+273} \times \frac{p-0.378 \gamma F}{760} \quad (5.1.3.1)$$

ρ : 空気密度 (kgfs^2/m^4)
 p : 大気圧 (mmHg)
 T : 大気温度 ($^\circ\text{C}$)
 γ : 相対湿度
 F : 最大圧 (mmHg)

6) 限界風速 V_{cr}

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、() 付きで風洞風速表記とする。

7) Selberg の式 VF

「耐風構造」P285 より、

$$VF = 0.44 \omega_* B \sqrt{\left\{1 - (\omega_z / \omega_*)^2\right\} \frac{\sqrt{v}}{\mu}} \quad (5.1.3.2)$$

上式において、

$$\mu = \pi \rho B^2 / 2m, \quad v = 8r^2 / B^2, \quad r = \sqrt{I/m} \quad \text{である。}$$

ここで、 ω_z : たわみ振動数 ω_* : 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

算出にあつたては、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). で記入していない) の場合は、 $\rho = 0.1200 \text{ kgfs}^2/\text{m}^4$ 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

V_{cr} : 風洞試験結果 (実橋換算値 or 模型値) $\rightarrow$ 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 $\rightarrow$ 7). での値

算出式 : $\kappa = (V_{cr} / VF)$

5.1.5 実橋想定値への補正

本表では、風洞試験により得られた結果を用いることを基本とする。

「形状補正係数 κ の算出根拠を明確にする」、「算出過程で本表以外の値を用いての補正は後に混乱を招く可能性がある」、「現状では実橋想定諸元が流動的である (特に、2BOX)」ことなどを考え、実橋想定諸元に対する補正は行わない。(本表の形状補正係数 κ を用いることで、諸元変更時の V_{cr} が推定可能と解釈。)

5.1.6 記入例

以上の定義に基づいて作成した一覧表の一例を表 5.1.2.1 ~ 5.1.2.6 に示す。

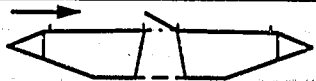
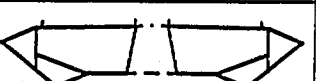
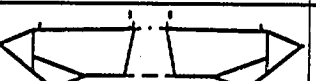
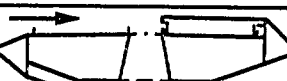
表 - 5.1.2.1 空力特性検討断面一覧 (1)

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															
N θ （Hz）	(1.862)			(1.816)			(1.864)			(1.864)			(1.864)			
N θ / N η	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 （tfs ² /m）	(0.04098kgfs ² /m)			(0.04106kgfs ² /m)			(0.04096kgfs ² /m)			(0.04080kgfs ² /m)			(0.04088kgfs ² /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 (kgfs ³ /m ⁴)		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	

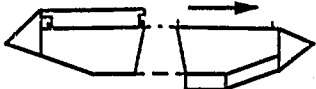
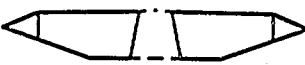
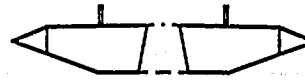
表 - 5.1.2.2 空力特性検討断面一覧 (2)

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)		(9.985kgf/m)			(10.002kgf/m)			(9.967kgf/m)			(10.062kgf/m)			(10.025gf/m)		
I (tfs ² /m)		(0.04089kgfs ² /m)			(0.04089kgfs ² /m)			(0.04088kgfs ² /m)			(0.04073kgfs ² /m)			(0.04072kgfs ² /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 (kgfs ² /m ⁴)			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	

表 - 5.1.2.3 空力特性検討断面一覧 (3)

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														
N θ (Hz)		(1.867)			(1.863)			(1.867)			(1.871)					
N θ / N η		1.817			1.812			1.816			1.820					
W (tf/m)		(10.02kgf/m)			(10.01kgf/m)			(10.02kgf/m)			(10.03kgf/m)					
I (tfs ² /m)		(0.04071kgfs ² /m)			(0.04089kgfs ² /m)			(0.04073kgfs ² /m)			(0.04056kgfs ² /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 (kgfs ³ /m ³)		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								

表 - 5.1.2.4 空力特性検討断面一覧 (4)

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														
N θ (Hz)		(1.886)			(1.885)			(1.871)			(1.860)					
N θ / N η		1.813			1.819			1.819			1.808					
W (tf/m)		(10.00kgf/m)			(9.872kgf/m)			(10.14kgf/m)			(10.16kgf/m)					
I (tfs ² /m)		(0.04075kgfs ² /m)			(0.04022kgfs ² /m)			(0.04159kgfs ² /m)			(0.04105kgfs ² /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 (kgfs ² /m ³)			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				

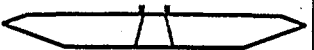
表 - 5.1.2.5 空力特性検討断面一覧 (5)

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)		(10.01kgf/m)			(10.00kgf/m)			(10.00kgf/m)								
I (tfs ² /m)		(0.04096kgfs ² /m)			(0.04040kgfs ² /m)			(0.04040kgfs ² /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 (kgfs ² /m ⁴)			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							

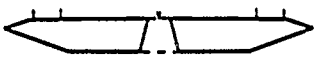
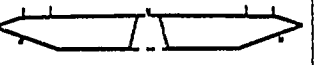
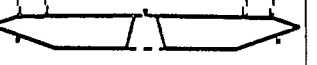
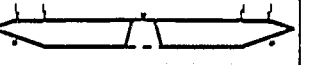
表 - 5.1.2.6 空力特性検討断面一覧 (6)

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														
N θ (Hz)		(1.877)			(1.875)			(1.875)			(1.870)			(1.871)		
N θ / N η		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 (tf ² /m)		(0.04034kgfs ² /m)			(0.04043kgfs ² /m)			(0.04036kgfs ² /m)			(0.04061kgfs ² /m)			(0.04041kgfs ² /m)		
ねじれ風速倍率																
減衰率	たわみ	(0.02472)			(0.02416)			(0.02289)			(0.02353)			(0.02353)		
	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	

表 - 5.1.2.7 空力特性検討断面一覧 (7)

略 号	ME-1-B000			ME-2-B000			ME-2-B001			ME-2-B002			ME-2-B003		
															
	桁高 4.3m 断面			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、検査車レール・ネット(30%)付き高欄		
縮 尺	1/60			1/60			1/60			1/60			1/60		
全幅 B (m)	32.3 (0.5383)			32.3 (0.5383)			32.3 (0.5383)			32.3 (0.5383)			30.9 (0.5150)		
桁高 D (m)	4.3 (0.0717)			3.3 (0.0550)			3.3 (0.0550)			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:4.00(0.0667)			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			9.79			9.79			11.94		
b / B	0.00			U:0.0774 L:0.1240			U:0.0774 L:0.1240			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 (tfs ² /m)	240.92 (0.0186 kgfs ² /m)			198.16 (0.0154 kgfs ² /m)			199.39 (0.0154 kgfs ² /m)			200.20 (0.0154 kgfs ² /m)			196.53 (0.0152 kgfs ² /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 (kgfs ³ /m ⁴)	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

5. 2 議事録

平成8年7月25日

共同研究「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」
全体会議 打合せ議事録（第4回）

1 日時 平成8年7月19日（金）15:30～18:00

2 場所 本四公団、垂水工事事務所会議室

3 出席者（敬称略）

佐藤、荻原（土研）鳥海、河藤（本四公団）

鈴木、松田、徳重（IHI）小川、橋本、下土居（川重）米田、木村、田巻、大野
（川田）宮崎、風間、久保田（住重）武田、高尾、村上（NKK）植田、田中（日立
造）大森、森島（三井造）増田、本田、佐々木（三菱重）鷹取、近藤（土研セ）

以上 29名

4 配布資料

資料 G 4-1 平成7年度共同研究報告書その1（案）

資料 G 4-2 A-W/G 議事録（NKK）

資料 G 4-3 A-W/G（NKK）

資料 G 4-4 WG-A（川田工業）

資料 G 4-5 2-BOX/WG 議事録（日立造船）

資料 G 4-6 今年度の検討内容（石川島播磨重工業）

資料 G 4-7 鉛直スライダ-を活用した2箱桁の風洞試験結果（日立造船）

資料 G 4-8 新形式橋梁「2箱桁/1箱桁併用吊橋」に対する検討（川崎重工）

資料 G 4-9 WG-C（川田工業）

資料 G 4-10 開発工程表（住友重機械工業）

資料 G 4-11 今後の工程（案）（三井造船）

5 議事内容

議事に先立ち、佐藤室長より超長大橋に関する調査について、第11次道路5カ年計画は平成9年度で終了すること。つづいて平成10年度より、12次道路5カ年計画がそれまでの調査結果を反映させて、本省土木研究所及び本四公団を中心にスタートすること等の話があった。

5. 1 平成7年度報告書について

①資料G4-1をもとに幹事長より説明があり、訂正箇所等があれば各社より事務局へ連絡することとした。

②報告書の発行承認印を事務局より別途回覧するので、押印をされてない人は至急押印をして頂くこととした。

5. 2 各グループの進捗状況について

(1) Aグループ

資料G4-2～4を用いて、幹事会社のNKK及び担当各社より進捗状況、今後の予定について説明があった。

(2) Bグループ

資料G4-5～8及びG4-11を用いて、幹事会社の日立造船及び担当各社より進捗状況、今後の予定について説明があった。

(3) Cグループ

資料G4-1及びG4-9, ~11を用いて、幹事会社の三菱重工及び担当各社より進捗状況、今後の予定について説明があった。

5. 3 今後の予定

次回の本会議は10月24日(木)午後13:30～17:00に東京(ホテル国際観光 予約)で行う。

また、WGは9月12日(木)A. B. Cの順で土木研究所センターで行うこととした。

以 上

共同研究「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」

全体会議 打合せ議事録（第5回）

1 日時 平成8年10月24日（木）13:30～17:30

2 場所 ホテル国際観光 寿の間

3 出席者（敬称略）

佐藤、荻原（土研）鳥海、河藤（本四公団）

樋上、鈴木（IHI）小川、下土居（川重）米田、田巻、大野（川田）宮崎、
風間（住重）藤沢、武田、村上（NKK）植田、田中（日立造）井上、大森、
森島（三井造）増田（三菱重）鷹取、近藤（土研セ）

以上 22名

4 配布資料

- 資料 G 5-1 第4回全体会議議事録
- 資料 G 5-2 Aグループ議事録（NKK）
- 資料 G 5-3 3本ケーブル、ばね支持試験資料（NKK）
- 資料 G 5-4 鉛直クロススティ資料（川田）
- 資料 G 5-5-1 ばね支持試験資料（住重）
- 資料 G 5-5-2 立体骨組みモデル資料（住重）
- 資料 G 5-6 Bグループ議事録（日立造）
- 資料 G 5-7 ばね支持試験資料（日立造）
- 資料 G 5-8 三分力特性改良に関する検討（川重）
- 資料 G 5-9 Cグループ議事録
- 資料 G 5-10 ばね支持試験、三分力試験資料（川田）
- 資料 G 5-11 風洞実験試料（三菱重）

5 議事内容

資料G 5-1にもとづき、土研センターより前回議事録の報告があり、第11次計画→第11次道路整備5ヵ年計画に訂正の上、異議なく承認された。

5. 1 Aグループ

資料G 5-2～G 5-5を用いて幹事会社NKK及び担当会社より説明がなされた。

3本ケーシング案、ばね支持試験、鉛直スラッシャー案等に関して空気力の取り扱い、フラック解析でのモデル化や対象とすべきモード次数について注意が必要であるとの報告があった。

また、遮風壁の効果、風洞実験結果の報告があった。

5. 2 Bグループ

資料G 5-6～G 5-8を用いて幹事会社日立造船及び担当会社より説明がなされた。

開口を有する風洞実験を中心に鉛直スラッシャーの効果、下面側の小バリアの効果について報告があった。

5. 3 Cグループ

資料G 5-9～G 5-11を用いて幹事会社三菱重工業及び担当会社より説明がなされた。

開口を有する桁の場合のレイムズ数影響、遮風壁の効果についてそれぞれ報告があった。

5. 4 その他

①共同研究で取り上げているテーマについて、他の機関との研究を実施する必要が生じた場合の対応についてどう対処すべきかとの問い合わせが三井造船からあった。この件については幹事会社で検討することとした。

②佐藤室長より

経済性が重要で車線数については最終的には6車線となろうが、経済性から見ると4車線も検討対象となるであろう。

5. 5 今後の予定

次回の全体会議とワーキンググループ会議は次の日程で開催することとした。

全体会議 平成9年1月23日(木) 13:30～

ワーキンググループ会議 平成8年12月11日(水) 10:30～

以 上

平成9年2月25日

共同研究「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」

全体会議 打合せ議事録（第7回）案

1 日時 平成9年2月12日（水）13:00～16:00

2 場所 弘済会館 1F 葵東の間

3 出席者（敬称略）

荻原（土研）鳥海、河藤（本四公団）

松田（IHI）小川、下土居（川重）米田、大野、田巻（川田）宮崎、風間

（住重）藤沢、武田、高尾、村上（NKK）植田、田中（日立造）井上、大森、
森島（三井造）佐々木、増田、本田（三菱重）鷹取、近藤（土研セ）

以上 28名

4 配布資料

- 資料 G 7-1 標準モデルのフラッター解析結果（IHI）
 資料 G 7-2 共同研究一覧表記入項目「定義」（案）（三井造）
 資料 G 7-3 平成9年度の研究内容（案）（IHI）
 資料 G 7-4 来年度の研究計画について（NKK）
 資料 G 7-5 平成9年度の研究内容について（川重）
 資料 G 7-6-1 WG-A 打合せ資料（川田工）
 資料 G 7-6-2 WG-C 打合せ資料（川田工）
 資料 G 7-7 平成9年度、検討内容（住重）
 資料 G 7-8 平成9年度の作業方針（案）（日立造）

5. 打合せ結果

5. 1 前回からの進捗報告

- (1) IHI 標準モデルについてフラッター解析結果が報告された。
 (2) 三井 桁断面のデータベースのフォーマットにつき提案があった。
 ・桁形状（寸法）をより詳細に盛り込む工夫をする。
 ・動的諸元見直し（重量慣性→質量慣性）
 →モデル作成し、後日提出

5. 2 1997年度計画案の各社からの提案

- (1) NKK 1箱、3本ケーブル、3本ケーブル2箱
 (2) IHI オートブッキング
 (3) 川重 1箱2箱併用橋

- (4)川田
 - ・クロスステイ+測定空気力 (Aグループ)
 - ・h=7m桁のオープンクレーシングの影響 (Cグループ)
- (5)住重
 - ・フラッター 支間割等主要目の変更が及ぼす影響をみる。
 - ・風洞 オープンクレーシング、トラス案、新形式トラス案
 - 4車線と6車線の比較、遮風壁の影響
 - ・構造 桁・塔・スライクフォーム
- (6)日立
 - ・観測空気力
 - ・試設計、フラッター解析
 - ・BOX4車線、トラス (6、4車線)
- (7)三井 多角形、楕円断面→フラッター解析まで
- (8)三菱 ウィンドシート (h=3m) 大型部分模型

5. 3 今後のとりまとめ方針

今後のとりまとめ方針は以下ようになった。

- (1) Aグループ：水平スレイと対角スレイを組合せることにより列7できる案ができています。その他の案として、桁高7m案でどこまでいけるかの検討、3本ケーブルと2箱桁との組合せ等により良い案を提案する。
- (2) Bグループ：フラッター解析の構造諸元には仮定値があるので、仮定の詰めが必要。構造との組合せを実施し、空力特性のいいものをいくつか残す。
- (3) Cグループ：これまでの検討内容を中心にとりまとめの方向でいく。
- (4) 今後A, B, C, グループの区分は行わない。
- (5) H9年度前半は既往の成果のとりまとめ作業を行い、後半は経済性の評価、トラス桁案、4車線と6車線の比較など、前向きな検討を実施する。
- (6) H7、8年度分のとりまとめをH9年度の早い時期に実施 (とりまとめの方針は幹事)

平成9年1月25日

共同研究「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」

全体会議 打合せ議事録 (第6回)

1 日時 平成9年1月23日(木) 13:30~17:30

2 場所 ホテル国際観光 寿の間

3 出席者(敬称略)

佐藤、荻原(土研) 秋山、鳥海、河藤(本四公団)

松田(IHI) 小川、下土居(川重) 米田、大野、田巻(川田) 宮崎、風間

(住重) 藤沢、武田、高尾、村上(NKK) 植田、田中(日立造) 井上、大森、
森島(三井造) 佐々木、増田、本田(三菱重) 鷹取、近藤(土研セ)

ワザハバ 松藤(土研)

以上 28名

4 配布資料

- 資料 G 6-1 第5回全体会議議事録
- 資料 G 6-2 Aグループ議事録(NKK)
- 資料 G 6-3 第6回全体会議資料(WG-A)(NKK)
- 資料 G 6-4 第6回全体会議資料(WG-A)(川田)
- 資料 G 6-5-1 第6回全体会議資料(1箱桁(1/2): 風洞試験資料(住重))
- 資料 G 6-5-2 第6回全体会議資料(1箱桁(2/2+1): 追加フラッター解析資料(住重))
- 資料 G 6-5-3 第6回全体会議資料(1箱桁(2/2): フラッター解析資料(住重))
- 資料 G 6-6 2-BOX/WG議事録(日立造)
- 資料 G 6-7 重力剛性桁の構造検討・耐風設計(IHI)
- 資料 G 6-8 2箱桁断面の改良による耐風安定化効果の検討(川重)
- 資料 G 6-9 第6回全体会議資料(2箱桁: 風洞試験資料)(住重)
- 資料 G 6-10 偏平箱桁断面の非定常空気力計測結果(日立造)
- 資料 G 6-11 検討断面一覧(2BOX・1BOX・新形式)[案](三井造)
- 資料 G 6-12 Cグループ打ち合せ議事録(三菱重)
- 資料 G 6-13 第6回全体会議資料(WG-C)(川田)
- 資料 G 6-14 楕円断面の検討について(三井造)
- 資料 G 6-15-1 WG-C資料(三菱重)
- 資料 G 6-15-2 可視化試験結果(三菱重)
- 資料 G 6-16 標準モデルに対するフラッタ解析(川崎重)
- 資料 G 6-17 フラッター解析のベンチマークテスト結果(日立造)
- 資料 G 6-18 標準モデルのフラッター解析(三菱重)

5. 1 前回議事録の確認

事務局より説明があり、特に問題はなかった。

5. 2 Aグループ

G-6-2のAグループ（1箱桁）の打合せ議事録を用いて幹事会社のNKKより経過報告が行われ、質疑応答があった。

（1）基準モデルについて

各社案の比較対象となる基準モデルについて、Aグループの他でも検討されているため、次の各社の検討結果を各社案の前に報告が行われた。

- (1) 川崎重工（資料 G-6-16）
- (2) 日立造船（資料 G-6-17）
- (3) 住友重機械（資料 G-6-5-3）
- (4) 三菱重工（資料 G-6-18）

（2）Aグループ（1箱桁）案

G-6-4を用いて川田工業よりクロスステイ案、G-6-5-1、G-6-5-2を用いて住友重機械より桁高5mm、開口部付き断面案について説明があった。

5. 3 Bグループ

（1）Bグループ（2箱桁）案

- ① G-6-4のBグループ（2箱桁）の議事録をもとに日立造船より経過報告が行われた。
- ② つづいてグループ各社よりG-6-7（IH1）により、重力剛性桁の説明およびG-6-8（川重）、G-6-9（住重）、G-6-10（日立造）を用いて3社より三分力試験、ばね支持試験の説明があり質疑応答を行った。

（2）実験モデルの一覧表

- ① 三井造船より各社で実施されているモデルの一覧表（G-6-11）が提示され、この表のフォーマットを検討の上、修正し、各グループで統一された一覧表を作成したらどうかと提案があった。
- ② これに対して略号に会社名（イニシャル）を入れること、倍率は省略して縮尺と減衰率を追加したフォーマットとすることとなった。
- ③ 新フォーマットは三井造船で作成、各社へ近日中にFAXすることになり、各社ではこのフォーマットに実験体の諸元、実験条件を記入することにした。

5. 4 Cグループ

- ① G-6-12のCグループ（新形式）の議事録をもとに三菱重工より経過説明があった。
- ② つづいてG-6-13（川田工業）開口1箱桁、G-6-14（三井）楕円断面、G-6-15-1、2（三菱重工）フェアリング、桁高の変化について担当各社より説明があり質疑応答を行った。

5. 5 今後の予定ほか

- (1) 平成8年度レポートについては、3月末迄の検討結果を整理しできるだけ早くまとめる。
- (2) 平成9年度については、研究成果の各論のとりまとめ作業を実施する必要があり、継続して共同研究を実施することとする。ただし、来年度の研究内容をWGで整理し、2月末までに土研センターと共同で土研へ申請書を提出する。（土研の審査会は3月初めに開催される予定）

- (3) 本四公団秋山課長より自己紹介を兼ねて挨拶があった。また本四公団（鳥海KII）より

本四公団で既存の研究データを捜したが、文献紹介の書物はあるが研究データとしてまとめられたものは存在していないことが報告された。

(4) 次回の予定は次のとおり

WG	2月12日(水) 13:00~17:00……弘済会館
全体会議	3月27日(木) 13:00~17:00……弘済会館

以上

平成9年6月6日

共同研究「耐風および経済性に優れた超長大橋の開発」

全体会議打合せ議事録（第8回）案

1. 日時 平成9年3月27日 12:30～17:00

2. 場所 弘済会館 4F 梅東の間

3. 出席者（敬称略）

佐藤、荻原（土研）鳥海、河藤（本四公団）

松田（IHI）小川、下土居（川重）米田、木村、大野、田巻（川田）宮崎、中村、久保田（住重）武田、高尾、村上（NKK）植田、田中（日立造）大森、森島（三井造）増田、本田（三菱重）鷹取、近藤（土研セ）

以上 25名

4. 配布資料

資料 G-8-1 全体会議 打合せ議事録（第6回および第7回）

資料 G-8-2 第8回全体会議 資料（建設省土木研究所）

資料 G-8-3 H9年度研究内容（案）（IHI）

資料 G-8-4 第8回全体会議 資料（NKK）

資料 G-8-5 第8回全体会議 資料（川田工業）

資料 G-8-6-1 平成9年度、検討内容（住重）

資料 G-8-6-2 風荷重変形を考慮したフラッター解析（住重）

資料 G-8-7 鉛直スタビライザー付・2-BOX桁の測定空気力を用いたフラッター解析結果（日立造）

資料 G-8-8-1 平成9年度の研究計画について（三井造）

資料 G-8-8-2 ベンチマークモデル固有振動解析結果について（三井造）

資料 G-8-8-3 楕円断面の2次元フラッタ解析結果について（三井造）

資料 G-8-9-1 平成9年度の研究内容について（川重）

資料 G-8-9-2 標準モデルに対するフラッタ解析（川重）

5. 打合せ内容

5. 1 前回からの進捗報告および平成9年度研究内容の提案

(1)土研 ・ H9年度研究内容（案）の提案および確認

・ 2箱桁バネ支持試験結果の報告

・ H8年度報告書執筆方針（案）の提案および確認

・ スパン2250m吊橋を対象とした大型風洞模型（1/125）の設計の紹介

(2)IHI ・ H9年度研究内容の提案

主搭形式の設計、2-BOX桁断面の基本設計

フラッター解析

(3)NKK ・ 3本ケーブル+斜めスチ方式に実測空気力（本四公団より提示）を用いた検討

・ 1箱桁バネ支持試験結果の報告

(4)川田 ・ オープングレーチング化による耐風安定性の報告

・ クロススチ設置位置の報告、測定空気力（本四公団より提示）を用いた解析

(5)住重 ・ H 9 年度検討内容の提案

フラッター解析：支間割等主要目の変更が及ぼす影響

構造：搭・桁・ステイケーブル等構造検討

風洞：オーブングレーチング、トラス案、4車線と6車線の比較、遮風壁の影響

・測定空気力を用い、有風時変形を考慮したフラッター解析結果の報告

(6)日立 ・ 鉛直スタビライザー付き・2-BOX桁のフラッター解析の報告

バネ支持試験結果、三分力係数と静的変形解析結果、非定常空気力測定結果

フラッター解析結果の報告

(7)三井 ・ H 9 年度検討内容の提案

楕円断面の検討（継続）、2-BOX、楕円断面以外に良い断面があったら検討

断面一覧表の形式の提案

・ベンチマークテスト結果、固有振動解析結果の報告

・楕円断面の2次元フラッター解析結果の報告

(8)川重 ・ H 9 年度検討内容の提案

クロスハンガー等耐風性向上に有効なケーブルシステムの検討

桁断面の耐風性向上

3000m級吊橋、4車線吊橋への適用

・ベンチマークテスト結果の報告

耐風性および経済性に優れた超長大橋の 共同研究報告書
開発に関する共同研究報告書(その2) 第187号平成9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8年度の成果を報告するものである。本年度は前年度に引きつづき構造特性に関する検討、空力特性に関する検討、新形式吊橋に関する検討を実施した。構造特性に関しては一箱桁形式補剛桁を有する吊橋を対象として3本ケーブル吊橋、クロスステイの最適設置位置、水平ステイや対角ステイとクロスステイの併用効果などの検討を実施した。空力特性に関しては二箱桁形式補剛桁を対象としてフェアリング形状、鉛直スタビライザーの高さなどの検討を実施した。新形式吊橋に関しては重力剛性桁、二箱桁／一箱桁併用吊橋、補剛桁の開口部分の形状、楕円断面及び多角形断面補剛桁、遮風壁の設置された補剛桁などの検討を実施した。

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

いは50
つ円切
て手
下を
さ

305-□□

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187号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印