003
ISSN 0386－5878
土木研究所資料第3429号

土 木 研 究 所 資 料

超長大橋の耐風安定性に関する調査研究報告書

平 成 8 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1996) 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。

土木研究所資料
第3429号1996年3月

超長大橋の耐風安定性に関する調査研究報告書

構造研究室　室　長　佐藤弘史
主任研究員　荻原勝也
松藤洋照
部外研究員*1　嶋本栄治
部外研究員*2　星加益朗

要　旨

スパンが2000mを超える超長大橋梁の設計においては、耐風安定性の確保することが最重要課題の一つである。そこで本報告書では、中央開口部を有する二箱桁断面に着目して、その空気力特性の改善を目的としたバネ支持模型実験を実施するとともに、有効な対策を実施した断面については、三分力試験、非定常空気力計測を行い、多自由度フラッター解析を行った。

キーワード：超長大橋梁，バネ支持模型実験、三分力試験、非定常空気力試験、多自由度フラッター解析

＊1　部外研究員在職期間（平成6年4月から平成8年3月まで）
＊2　部外研究員在職期間（平成6年4月から平成7年9月まで）

目　　次

1．まえがき …… 1

2．耐風性に優れた桁断面の調査 …… 3
2.1　目的 …… 3
2.2　バネ支持模型実験 …… 4
2.2.1　3000mクラスの吊橋補剛桁の基礎試験 …… 4
(1)　橋梁諸元の選定 …… 4
1）想定橋の桁断面形状 …… 4
2）想定橋の構造特性 …… 6
(2)　実験方法および実験条件 …… 8
1）実験方法 …… 8
2）実験条件 …… 10
3）実験ケース …… 12
(3)　実験結果および考察 …… 14
1）模型タイプーAの結果および考察 …… 19
2）模型タイプーBの結果および考察 …… 28
3）模型タイプーA、Bの比較 …… 41
4）考察 …… 42
2.2.2　有効な空力対策の選定 …… 43
(1)　実験内容 …… 43
(2)　実験方法および実験条件 …… 43
1）実験方法 …… 43
2）実験条件 …… 44
3）実験ケース …… 45
(3)　実験結果 …… 56
1）各種空力対策部材の効果 …… 65
2）高欄と迎角変化の影響 …… 70
3）空力対策の組合せ効果 …… 76
4）旧Bモデルの耐風性 …… 77
2.2.3　2箱桁改良断面案に関する実験（その1） …… 78
(1)　実験内容 …… 78
(2)　実験方法および実験条件 …… 78
(3)　実験結果 …… 88
1）開口部設置部材および開口部形状の影響 …… 93

2）フェアリング形状の最適化 …… 95
3）重量の影響およびセンターバリアーガイドベーンの効果 …… 96
4）迎角－3°における耐風性改善策（高欄部材の影響） …… 98
2.2.4 2箱桁改良断面案に関する実験（その2） …… 99
(1) 実験内容 …… 99
(2) 実験方法および実験条件 …… 99
(3) 実験結果 …… 113
1）高欄の形状が耐風性に及ぼす影響 …… 122
2）桁高Dと開口率ϕの関係 …… 123
3）桁高Dと迎角αの関係 …… 125
4）限定振動について …… 127
2.2.5 まとめ …… 130
2.3 非定常空気力の測定 …… 131
2.3.1 目的 …… 131
2.3.2 実験方法 …… 132
(1) 実験施設および気流条件 …… 132
(2) 非定常空気力係数の算出方法 …… 136
(3) 非定常空気力係数の理論値 …… 138
2.3.3 実験ケース …… 141
2.3.4 実験結果（非定常空気力係数） …… 145
2.3.5 考察 …… 161
2.3.6 まとめ …… 164
2.4 三分力試験 …… 165
2.4.1 実験方法および実験条件 …… 165
(1) 実験方法 …… 165
(2) 実験条件 …… 166
2.4.2 実験結果 …… 168
(1) 抗力係数C_D …… 168
(2) 揚力係数C_L …… 168
(3) ピッチング・モーメント係数C_M …… 168
2.4.3 まとめ …… 180
(1) 抗力係数C_D …… 180
(2) 揚力係数C_L …… 180
(3) ピッチング・モーメント係数C_M …… 180
3．振動特性の優れた構造系の調査 …… 181
3.1 目的 …… 181

3.2 1箱桁 …… 182
3.2.1 解析手法 …… 182
(1) 解析対象吊橋の諸元 …… 182
1）吊橋の基本諸元 …… 182
2）補剛桁諸元 …… 183
3）ケーブル諸元 …… 183
4）主塔諸元 …… 184
(2) 検討項目 …… 184
1）ケーブルシステムに対する検討 …… 184
2）主塔剛性に対する検討 …… 184
(3) 結果の評価 …… 187
(4) 解析条件 …… 188
1）使用プログラム …… 188
(5) 解析ケース …… 190
1）ケーブルシステム …… 190
2）主塔剛性 …… 190
3）ストームケーブル …… 191
(6) 解析条件および解析モデル …… 192
1）基本ケースの構造諸元 …… 192
2）主塔の諸元 …… 197
3）吊橋の基本形状および解析モデル …… 201
(7) 各ケースにおける構造諸元 …… 203
1）ケーブルシステム …… 203
2）主塔の剛性 …… 206
3）ストームケーブル …… 209
3.2.2 固有値解析結果 …… 218
(1) 固有振動数および振動モード …… 218
1）ケーブルシステムの影響 …… 218
2）主塔剛性の影響 …… 234
3）ストームケーブルの影響 …… 242
(2) 等価質量および等価極慣性モーメント …… 252
(3) フラッター発現風速の推定 …… 255
1）ケーブルシステムの影響 …… 255
2）主塔剛性の影響 …… 257
3）ストームケーブルの影響 …… 259
3.2.3 まとめ …… 262

3.3 2箱桁 …… 263
3.3.1 方法 …… 263
(1) 解析手法 …… 263
(2) 解析対象吊橋の諸元 …… 263
1）吊橋の基本諸元 …… 263
2）補剛桁の諸元 …… 266
3）ケーブルの諸元 …… 266
4）塔の諸元 …… 267
5）その他の諸元 …… 267
6）物理定数 …… 268
(3) 解析条件および解析モデル …… 269
1）使用プログラム …… 269
2）解析ケース …… 272
3）2箱断面の断面諸量 …… 274
4）追加部材の剛性 …… 287
5）解析モデル …… 289
3.3.2 結果 …… 295
(1) 結果の評価方法 …… 295
1）等価質量と等価極慣性モーメント …… 295
2）Selbelg式によるフラッター限界風速 …… 297
(2) 固有値解析結果 …… 298
(3) 鉛直たわみ対称1次とねじれ対称1次のモード図 …… 314
(4) 固有値解析結果の評価 …… 343
1）ケーブルシステムについて …… 343
2）桁高の違いについて …… 345
3.3.3 まとめ …… 350

4．フラッター解析 …… 351
4.1 目的 …… 351
4.2 方法 …… 352
(1) 使用プログラム …… 352
1）解析フロー …… 352
2）空気力の向きと座標系 …… 353
3）システム設計 …… 353
4）解析手法 …… 355
(2) 解析ケース …… 360

(3) 非定常空気力係数 …… 361
4.3 結果 …… 371
(1) 静的造解析結果 …… 371
1）載荷した荷重 …… 371
2）計算結果 …… 372
(2) フラッター解析結果 …… 377
1）フラッター発現風速 …… 377
2）U－δの関係 …… 383
3）フラッター発現時のモード …… 387
4.4 まとめ …… 410

5．まとめ …… 411

付録－1 非定常空気力係数の計測方法及び計算方法
1.1 非定常空気力係数計測のフロー …… 415
1.2 要旨
(1) 模型長さ …… 416
(2) 器具の設置、模型長さ …… 416
(3) 計測機械の設置 …… 416
(4) 加振方向の決定 …… 416
(5) 振幅の調整 …… 416
(6) 迎角の調整 …… 416
(7) 慣性力の除去 …… 416
1.3 非定常空気力係数の算出
(1) 非定常空気力の向きと座標系 …… 424
(2) 非定常空気力の定義 …… 424
(3) 算出方法 …… 425
1.4 解析上の留意点
(1) 解析プログラム …… 429
(2) 力の方向 …… 429
1.5 二自由度の非定常空気力係数理論値
(1) 二箱断面の非定常空気力係数 …… 430
(2) Theodorsenの非定常空気力係数 …… 433

1．まえがき

近年の我が国における橋梁技術の進歩はめざましいものがあり、現在は世界最大支間（Ｌ＝１９９０ｍ）を有する明石海峡大橋の建設が進められている。一方、東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡など、全国各地の海峡部を横断する海峡横断道路プロジェクトに関する調査が行われているが、このプロジェクトには、明石海峡大橋を超える支間長を有する超長大橋が含まれる可能性がある。

明石海峡大橋を超える超長大橋では風による静的変形が大きく、風荷重により主要な部材の断面が決定される可能性がある。ちなみに、明石海峡大橋では補剛トラスの上下弦材の最高材質は、ＨＴ８０にも達している。これは、明石海峡大橋がフラッターなどに対する耐風性の確保のためトラス構造を補剛桁として採用しており、トラス構造の抗力が比較的大きいことが原因の一つである。また、フラッター（風速がある値を超えるとねじれ振動を主体として橋桁の振動がだんだん大きくなってやがては破壊に至る振動）に対する耐風安定性の確保も、超長大橋を設計する上での重要である。

そこで、補剛桁の断面形状を改善する方法と、構造特性を改善させる方法とにより、耐風安定性に優れた超長大橋を開発することを目的とし、調査を行った。

補剛桁の断面形状を改善する方法として、２．で「耐風性に優れた桁断面の調査」を行った。基本の補剛桁断面は、抗力が比較的小さく、維持管理のしやすい偏平箱桁断面とした。検討の流れは、開口部の最適な位置を探し出し、つぎにセンターバリアなどのいろいろな耐風対策部材でさらなる空力特性の向上を図った。また、非定常空気力の測定と、三分力試験を実施し、断面形状の特性を確認した。

構造特性を改善させる方法として、３．で「振動特性の優れた構造系の調査」を行った。ステイケーブル併用、モノケーブルシステム、クロスハンガーシステムなどのケーブルシステムについて固有値解析を行い、各システムの耐風安定性に対する効果を調査した。

最後に、「４．フラッター解析」で、２．および３．の結果を踏まえた桁断面及び構造系の耐風安定性の調査を行った。

その結果、耐風対策部材を設置した２箱桁断面が超長大橋の補剛桁として耐風性に優れることと、クロスハンガーシステム、モノケーブルシステムが耐風性向上にある程度有効であることが確認された。

なお、超長大橋の耐風性に関する調査・研究は現在も継続中であり、本報告は平成４年度から平成７年度までに実施した調査・研究をとりまとめた中間報告であることをお断りしておく。

2．耐風性に優れた桁断面の調査

2．1　目的

本調査は、空力的に優れた主桁断面の開発を行うものである。補剛桁形状としては、トラス桁と偏平箱桁に大きく分類される。トラス桁は明石海峡大橋、瀬戸大橋という日本の長大吊橋に採用された実績のある形式である。この形式をさらに大きなスパンに適用するにあたっては、所要の耐風安定性が確保できる可能性を有しているが、主構重量の増加は避けられない。

一方、偏平箱桁は海外ではハンバー橋、ボスポラス橋など、国内では中央支間長1000m級の来島大橋で採用されているが、明石海峡大橋の検討時に候補には挙がっていたが、トラス桁の方が解決すべき課題が少ないとして採用には至らなかった。

経済性を重視した超長大橋の場合、軽量で空力的に優れた断面を構成できる可能性は、トラス桁よりも大きいと考えられるため、偏平箱桁断面を調査の対象とし、超長大橋の耐風性（耐フラッター性）を満足する桁断面の開発を目的として調査を実施した。

2．2　バネ支持模型実験

2．2．1　3,000mクラスの吊橋補剛桁の基礎実験

（1）橋梁諸元の選定

1）　想定橋の桁断面形状

実験に用いる橋桁の断面は、次に示す項目を基本条件として形状の選定を行った。

・超長大橋で問題となる強風時の横たわみ量を小さくすることの出来る、抗力係数の小さい箱桁断面を基本とする。
・耐風安定性が向上すると考えられている中間に開口部を持つ構造とし、開口部の有無、位置、大きさ等を比較検討出来るものとする。
・開口部を持つこと、また多車線を想定して広幅員とする。
・桁高は、可能な限り低くする。

上記条件に従い、以下に示す２つのタイプの桁断面について、実験を行うこととした。

①タイプ－A　……　多連箱桁タイプ

複数の箱桁が適当な間隔で横方向に連なり、吊り位置の横桁により支えられた構造を持つタイプ。このような構造的な特徴から、タイプ－Bよりも広幅員・低桁高断面とする。

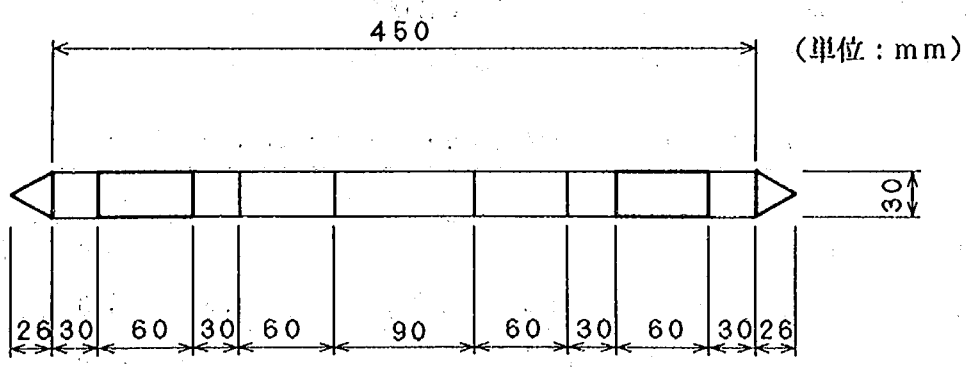
この模型では、２～４連の箱桁を持つ断面について箱げたの桁の数、開口部の位置および大きさ等を変化させて実験を行い、その影響を調べる。また、桁端部のフェアリング付け根に開口部を設けた場合の影響も調べる。

②タイプ－B　……　ボックス・トラスタイプ

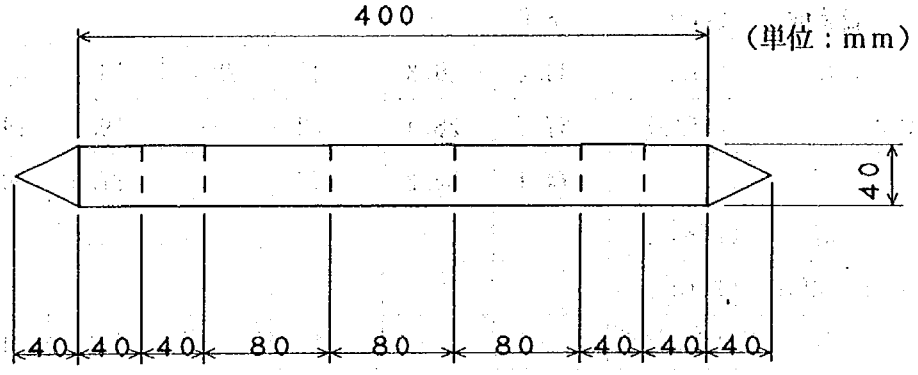
上・下床版に開口部を有する箱桁断面とし、開口部をトラス構造で補強した構造をもつタイプ。開口部が広い場合は、フェアリングを有する桁高の低いトラス断面と類似の構造となる。

この模型では、上下別々の位置に開口部を設けることができるので、開口部位置を様々に組み合わせて実験を行い、その影響を調べる。

これら２つの断面の、構造寸法図を図－２・２・１および図－２・２・２に示す。



図－２・２・１　模型タイプ－Ａ断面図



図－２・２・２　模型タイプ－Ｂ断面図

2） 想定橋の構造特性

橋桁の耐風安定性には、桁の断面形状の他にケーブルや桁の重量、橋梁の固有振動数など橋梁全体の構造特性が、大きな要因となる。今回実験の対象としている中央径間３０００ｍの吊橋に対しては、中央径間長が同程度の吊り橋の試設計例を参考にして、その構造特性を決定した。

参考にした試設計例の文献および橋梁の構造特性を表－２・２・１に示す。

表－２・２・１　中央径間３０００ｍクラス吊橋の設計例

			A	B	C	D	E	F
幅員	B	（ｍ）	－	－	－	－	36.0	35.5
桁高	h	（ｍ）	5.0	(10.2)	－	(2.6)	7.0	14.0
断面諸元	I	（m^4）	12.1	－	－	－	11.0	36.0
	J	（m^4）	34.6	－	－	－	22.0	39.8
	Im	（$\times 10^3 tf \cdot m^2/m$）	9.22	－	－	－	－	－
	r	（ｍ）	8.85	－	－	－	－	－
	G・J	（$\times 10^8 tf \cdot m^2/m$）	2.80	－	－	－	－	－
桁重量	鋼	(tf/m)	15.6	－	－	－	－	－
	ｺﾝｸﾘｰﾄ	(tf/m)	17.8	－	－	－	－	－
	舗装他	(tf/m)	3.0	－	－	－	－	－
	計	(tf/m)	36.4	26.8	41	22.4	18.0	30.57
ケーブル重量		(tf/m)	37.7	26.4	32	－	19.5	19.67
合計			74.1	53.2	73	－	37.5	50.24
極慣性モーメント	桁	($tf \cdot s^2$)	－	－	－	－	214	－
	ケーブル	($tf \cdot s^2$)	－	－	－	－	－	－
	計	($tf \cdot s^2$)	－	－	－	－	－	1266
固有振動数（Hz）	鉛直（対称）		0.082	－	0.05	0.03	0.089	0.055
	〃（非対称）		0.064	－	－	－	0.064	－
	ねじれ（対称）		0.165	－	0.12	－	0.166	0.144
	〃（非対称）		0.197	－	－	－	0.187	－
振動数比		（対称）	2.012	－	2.4	－	1.865	2.618

《出典》A：合成補剛桁を有する超長大吊橋の提案　橋梁と基礎　92-1

B：現代の吊橋　第７章　これからの吊橋　川田　忠樹　著

C：海洋架橋調査会　耐風設計部会　トラス補剛桁

D：メッシナ海峡連絡橋の近況と耐震設計　橋梁と基礎　93-1

E：スパン３０００ｍ級吊橋のケーブルシステムについて　第４７回土木学会

F：超長大吊橋の耐風安定化構造　第４８回土木学会

想定橋の構造特性を決定するにあたっては、次に示す事柄に留意した。

・タイプ－A、Bおよびそれぞれの実験ケースに対し、実験結果の比較検討が容易となるように、ケーブル・補剛桁の重量および固有振動数は、基本的に同じ値を用いる。

・ケーブルと桁の重量比は、1：1する。（A，B，E）

・補剛桁の重量は、箱桁断面を対象として平均的な値を用いる。（B，D，E）

・固有振動数に関しては、ねじれ振動数および振動数比がフラッター発現風速に及ぼす影響が大きいことから、厳しめの条件としてねじれ振動数の小さい値を用いることにする。（C）

なお、実際の実験では風洞施設の風速範囲や許容模型重量、使用するバネ値などの影響により振動数比の調整範囲に制約を受けたため、ねじれ振動数 0.105Hz、振動数比 2.1を想定橋の固有振動数とした。

・構造減衰率は、振動の状態が観測しやすいように、できるだけ小さい値を用いる。

上記の条件により決定した想定橋の構造特性を表－2・2・2に示す。なお、補剛桁の極慣性モーメントは、桁の幅員に応じ"耐風設計便覧"の推定式*1をもとに算定した値を用いた。

表－2.2 想定橋の構造特性

		タイプ－A	タイプ－B
補剛桁形状	幅員*2	45.0 m	40.0 m
	桁高	3.0 m	4.0 m
ケーブル間隔		45.0 m	40.0 m
単位重量	補剛桁	23.0 tf/m	23.0 tf/m
	ケーブル	23.0 tf/m	23.0 tf/m
	計	46.0 tf/m	46.0 tf/m
極慣性モーメント	補剛桁	430 tf・m・s²/m	340 tf・m・s²/m
	ケーブル	1190 tf・m・s²/m	940 tf・m・s²/m
	計	1620 tf・m・s²/m	1280 tf・m・s²/m
振動数	鉛直振動	0.050 Hz	0.050 Hz
	ねじれ振動	0.105 Hz	0.105 Hz
振動数比		2.10	2.10

＊1　極慣性モーメント　補剛桁　$I_{pb}=(0.3B_b)^2 \cdot m_b$

ケーブル　$I_{pc}=B_c^2/4 \cdot m_c$

ここに　B_b：補剛桁の幅

B_c：ケーブル間隔

m_b：補剛桁の質量

m_c：ケーブルの質量

＊2　フェアリングを除く

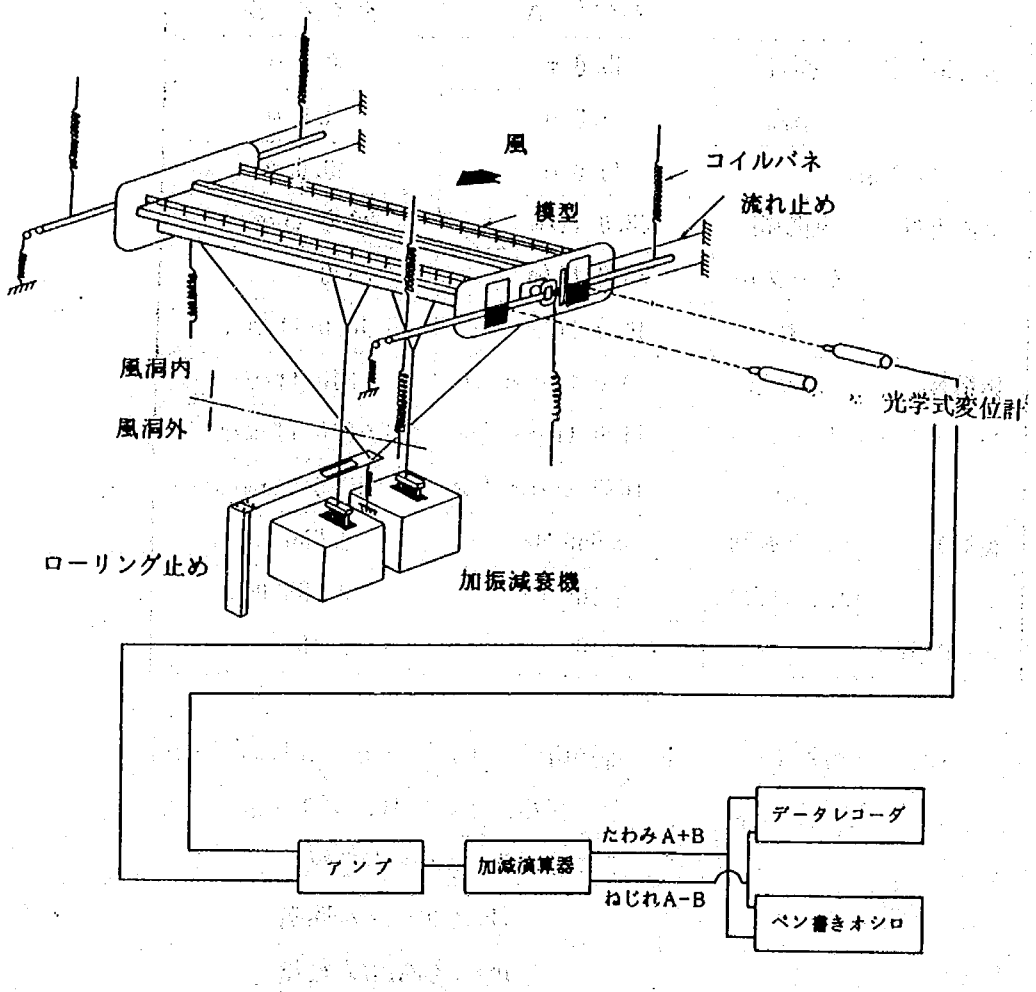
（２）実験方法および実験条件

１）　実験方法

バネ支持模型実験は橋桁の一部を模型化した二次元剛体模型を風洞内にバネで支持し、一様気流および乱流中での応答を計測するものであり、橋梁の耐風安定性を検証する上で実績のある簡便な方法である。今回実施したバネ支持模型実験の手法の概要を図－２・２・３に示す。

実験は建設省土木研究所耐風工学実験施設内の非定常空気力風洞を用いて実施した。非定常空気力風洞の主要諸元は表－２・２・３および図－２・２・４に示す通りである。

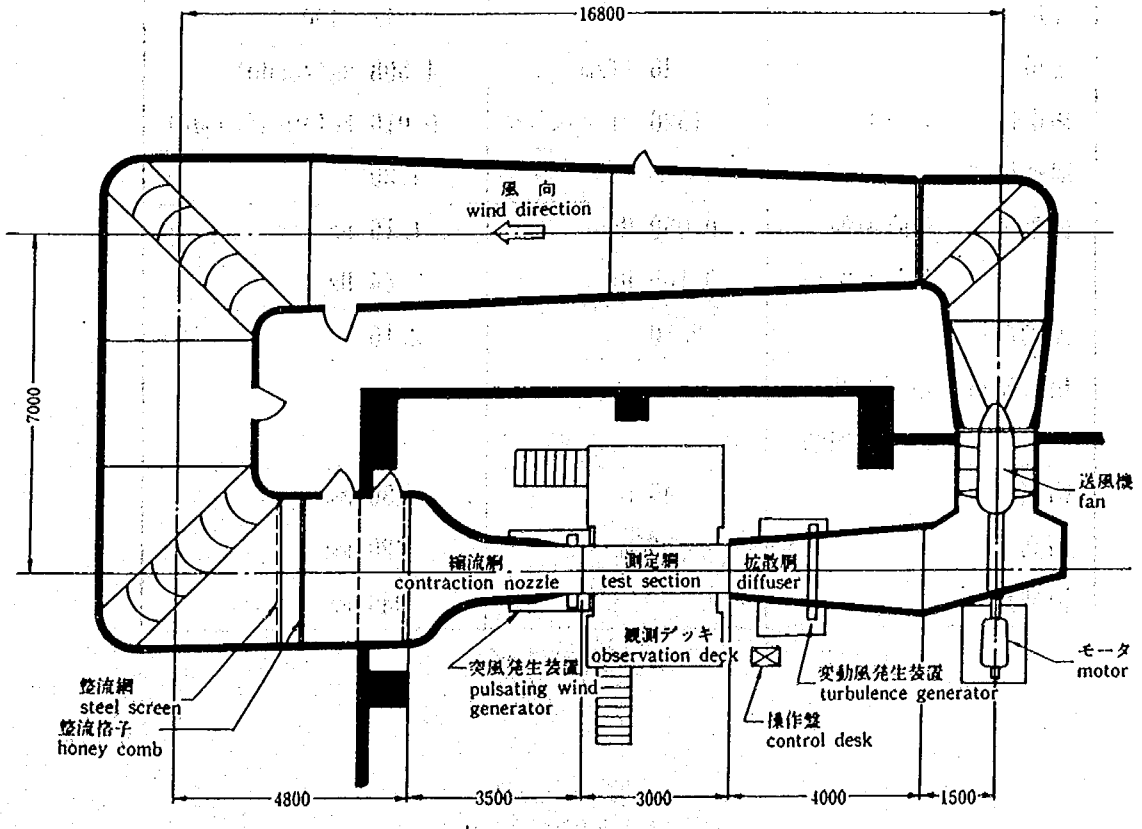
模型は縮尺 1/100とし、６本のコイルバネにより風洞内に支持し、風速を変化させて各ケース毎に模型の挙動を観測した。使用した気流は乱れのほとんどない一様気流であり、風速の測定はピトー管およびマノメータを用いて行った。模型の挙動は２台の光学式変位計により測定し、それぞれの出力を加算によってたわみ変位量に、減算によってねじれ変位量に換算しデータレコーダおよびペン書きレコーダに記録した。振幅はペン書きレコーダの記録紙上に記録された振動振幅を読みとることによって求めた。



図－２・２・３　主桁バネ支持模型実験の概要

表－２・２・３　非定常空気力風洞の諸元

風洞名	非定常空気力風洞
風洞方式	単回路還流式
測定胴　幅	1,000 mm
測定胴　高	2,000 mm
測定胴　長	3,000 mm
風路全長	55 m
送風機　動翼直径	1,530 mm
送風機　有効全圧	40.0 mmAq
送風機　風量	70.0 m^3/sec
送風機　回転数	1,250 rpm
送風機　容量	50.0 kw
気流　風速	1.0～25.0 m/sec
気流　乱れ率	0.5 %



非定常空気力風洞平面図
Low Speed Wind Tunnel B

図－２・２・４　非定常空気力風洞平面図

2） 実験条件

バネ支持模型実験では、相似条件として幾何学的形状を相似させることの他に、次の６つの無次元量を実橋と模型で一致させる必要がある。

$m/\rho B^2$， $V/N\eta B$， $\delta\eta$， $I_P/\rho B^4$， $V/N\theta B$， $\delta\theta$

ここに、 m ：単位長さ当たりの質量　　ρ ：空気密度

B ：構造物の代表長さ　　V ：風速

N ：固有振動数　　δ ：無風時における対数減衰率

I_P ：極慣性モーメント

添字η，θ：それぞれの鉛直たわみ振動、ねじれ振動を表す。

これらの相似条件により導かれた実験条件を表－２・２・４および表－２・２・５に示す。減衰率に関しては、想定橋を対象とする実験上振動が発現しやすいよう小さな値をとることとしたため、模型の自由振動時の減衰率を用いることにした。

表－２・２・４　実験条件（模型タイプ－Ａ）

	想定橋	模型
縮尺	--	1/ 100
重量	46 tf/m	4.508 kgf/model
極慣性モーメント	1620 tf•m•s²/m	0.016 kgf•m•s²/model
風速倍率	－	4.30
振動数　鉛直振動	0.050 Hz	1.16 Hz
振動数　ねじれ振動	0.105 Hz	2.44 Hz
振動数比	2.10	2.10
構造減衰　鉛直振動	－	－
構造減衰　ねじれ振動	－	－
桁幅	45 m	450 mm
桁高	3 m	30 mm
模型長	－	980 mm

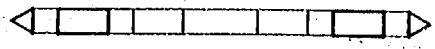
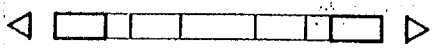
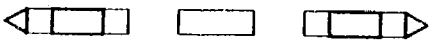
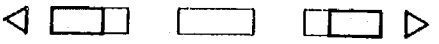
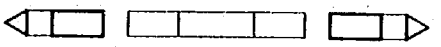
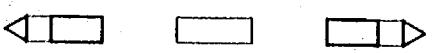
表－２・２・５　実験条件（模型タイプ－Ｂ）

	想定橋	模型
縮尺	－	1/ 100
重量	46 tf/m	4.508 kgf/model
極慣性モーメント	1280 tf•m•s²/m	0.013 kgf•m•s²/model
風速倍率	－	4.30
振動数　鉛直振動	0.050 Hz	1.16 Hz
ねじれ振動	0.105 Hz	2.44 Hz
振動数比	2.10	2.10
構造減衰　鉛直振動	－	－
ねじれ振動	－	－
桁幅	40 m	400 mm
桁高	4 m	40 mm
模型長	－	980 mm

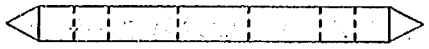
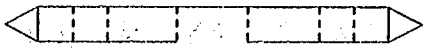
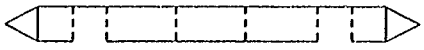
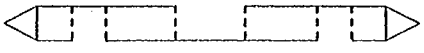
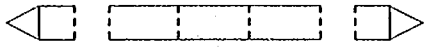
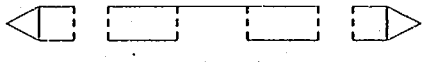
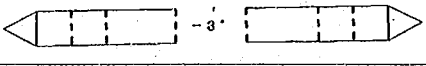
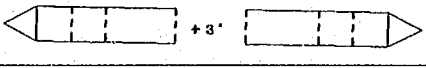
3）　実験ケース

実験ケースを表－2・2・6および表－2・2・7に示す。模型タイプーA，Bともに開口部の位置を変えて実験を行い、その影響について調べた。また、模型タイプーBについては、耐風性が比較的良い断面について、迎角およびフェアリングの影響についても実験を行った。

表－2・2・6　実験ケース（タイプーA）

ケース	タイプ	形状	断　　面	ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ	迎角
1	A	1		有	0°
2		2			
3		3			
4		4			
5		5			
6		6			
7		7			
8		8			
9		9			
10		10			
11		11			
12		12			

表－2・2・7　実験ケース（タイプ－B）

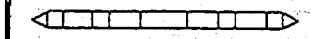
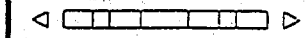
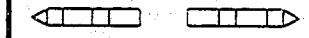
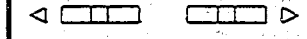
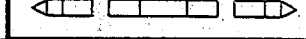
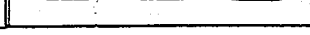
ケース	タイプ	形状	断　　面	ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ	迎角
13	B	1		有	0°
14		2			
15		3			
16		4			
17		5			
18		6			
19		7			
20		8			
21		9			
22		10			
23		5		無	
24		5		有	－3°
25		5			＋3°
26		1		無	0°
27		7			

（３）　実験結果および考察

実験結果の総括表を表－２・２・８～２・２・11に示す。

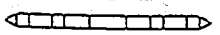
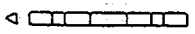
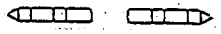
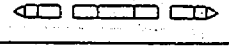
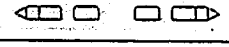
表－２・２・８　模型タイプ－Ａ　実験結果一覧表（実橋風速）
表－２・２・９　模型タイプ－Ａ　実験結果一覧表（無次元風速）
表－２・２・10　模型タイプ－Ｂ　実験結果一覧表（実橋風速）
表－２・２・11　模型タイプ－Ｂ　実験結果一覧表（無次元風速）

表－２・２・８　模型タイプ－Ａ　実験結果一覧表（実橋風速）

Case No.	模型タイプ	たわみ渦励振			たわみ自励振動		ねじれ渦励振			ねじれ自励振動		振動状態		
		発現風速域	極大振幅		450(mm)	2250(mm)	発現風速域	極大振幅		1(deg)	5(deg)	状態	フラッター形状	振動数(Hz)
			発現風速	振幅(mm)	発現風速	発現風速		発現風速	振幅	発現風速	発現風速			
1		——	—	—	39.40	ねじれ発散	——	—	—	38.53	39.47	連成	ソフト	2.054
2		——	—	—	ねじれ発散	〃	——	—	—	40.88	37.81	連成	ハード	1.895
3		——	—	—	53.07	54.42	——	—	—	たわみ発散	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.985
4		0.00～3.03	1.75	153	ねじれ発散	ねじれ発散	1.71～3.82	2.96	0.13	51.49	51.49	連成	ハード	1.914
5		——	—	—	69.81	80.17	——	—	—	77.21	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.959
6		——	—	—	60.93	62.32	1.69～3.79	3.39	0.35	たわみ発散	〃	たわみ	ソフト	1.950
7		——	—	—	58.66	57.42	1.70～3.80	2.94	0.29	〃	〃	たわみ	ハード	2.147
8		——	—	—	45.91	ねじれ発散	——	—	—	45.82	46.29	連成	ソフト	2.056
9		0.00～2.97	1.71	63	65.27	〃	1.66～3.72	2.88	0.10	63.31	64.25	連成	ハード	2.019
10		——	—	—	67.01	73.98	——	—	—	65.61	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.705
11		——	—	—	55.09	ねじれ発散	——	—	—	57.64	67.61	連成	ソフト	2.284
12		——	—	—	69.59	〃	——	—	—	67.78	68.96	連成	ソフト	1.992

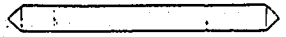
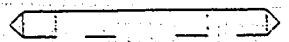
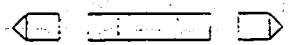
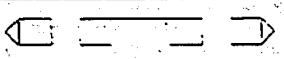
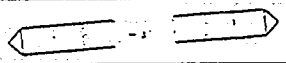
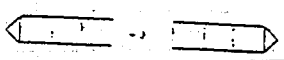
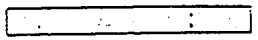
注）風速(m/s)、振幅は実橋換算

表－2・2・9　模型タイプ－A　実験結果一覧表（無次元風速）

Case No.	模型タイプ	たわみ渦励振			たわみ自励振動		ねじれ渦励振			ねじれ自励振動		振動状態		
		発現風速域	極大振幅		0.01	0.05	発現風速域	極大振幅		1(deg)	5(deg)	状態	フラッター形状	振動数 (Hz)
			発現風速	振幅	発現風速	発現風速		発現風速	振幅	発現風速	発現風速			
1		——	—	—	17.50	ねじれ発散	——	—	—	8.15	8.35	迷成	ソフト	2.054
2		——	—	—	ねじれ発散	〃	——	—	—	8.65	8.00	迷成	ハード	1.895
3		——	—	—	23.60	24.20	——	—	—	たわみ発散	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.985
4		0.00～1.35	0.78	0.0034	ねじれ発散	ねじれ発散	0.36～0.81	0.63	0.13	10.90	10.90	迷成	ハード	1.914
5		——	—	—	31.00	35.60	——	—	—	16.35	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.959
6		——	—	—	27.10	27.70	0.36～0.80	0.72	0.35	たわみ発散	〃	たわみ	ソフト	1.950
7		——	—	—	26.05	25.50	0.36～0.80	0.60	0.29	〃	〃	たわみ	ハード	2.147
8		——	—	—	20.40	ねじれ発散	——	—	—	9.70	9.80	迷成	ソフト	2.056
9		0.00～1.32	0.76	0.0014	29.00	〃	0.35～0.79	0.61	0.10	13.40	13.60	迷成	ハード	2.019
10		——	—	—	29.80	32.90	——	—	—	13.90	たわみ発散	たわみ	ソフト	1.705
11		——	—	—	24.50	ねじれ発散	——	—	—	12.20	14.30	迷成	ソフト	2.284
12		——	—	—	30.90	〃	——	—	—	14.35	14.60	迷成	ソフト	1.992

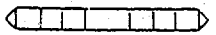
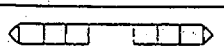
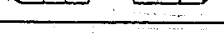
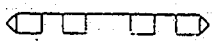
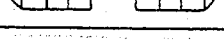
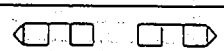
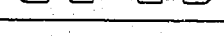
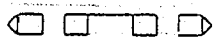
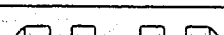
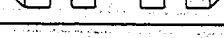
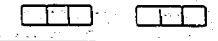
注）．風速は無次元風速、振幅は無次元振幅で示す。

表－2・2・10　模型タイプ－B　実験結果一覧表（実橋風速）

Case No.	模型タイプ	たわみ渦励振			たわみ自励振動		ねじれ渦励振			ねじれ自励振動		振動状態		
		発現風速域	極大振幅		400 (mm)	2000 (mm)	発現風速域	極大振幅		1 (deg)	5 (deg)	状態	フラッター形状	振動数 (Hz)
			発現風速	振幅(mm)	発現風速	発現風速		発現風速	振幅	発現風速	発現風速			
13		0.00～3.89	1.74	52	ねじれ発散	ねじれ発散	——	—	—	38.22	38.86	連成	ソフト	1.985
14		——	—	—	〃	〃	1.71～6.17	2.96	0.27	37.81	38.22	連成	ソフト	1.980
15		0.00～3.01	1.74	24	36.41	〃	1.70～4.49	3.80	0.26	37.80	36.57	連成	ハード	2.080
16		——	—	—	ねじれ発散	〃	1.69～5.06	2.92	0.38	38.01	37.17	連成	ハード	1.985
17		——	—	—	49.15	〃	——	—	——	49.93	51.26	連成	ソフト	1.953
18		——	—	—	30.57	〃	1.71～4.51	2.95	0.30	24.98	36.78	ねじれ	ハード	2.300
19		——	—	—	ねじれ発散	〃	1.71～5.12	4.52	0.13	48.80	46.44	連成	ハード	2.118
20		——	—	—	25.39	〃	——	—	—	15.94 18.04 20.98	24.93	ねじれ	ハード	2.368
21		——	—	—	ねじれ発散	〃	3.82～5.13	4.52	0.31	18.91	21.22	ねじれ	ハード	2.391
22		1.74～3.90	3.02	204	〃	〃	2.97～5.15	4.54	1.06	19.17	18.54	ねじれ	ハード	2.424
23		0.00～2.99	1.73	332	〃	〃	3.80～5.64	4.50	0.80	15.14	18.08	ねじれ	ソフト	2.368
24		0.00～2.99	1.73	52	51.95	〃	2.92～4.45	3.76	0.50	51.67	52.51	連成	ソフト	1.944
25		0.00～2.98	1.72	80	52.16	〃	——	—	—	51.48	53.37	連成	ソフト	1.923
26		——	—	—	25.21	〃	——	—	—	23.73	26.46	ねじれ	ソフト	2.250
27		0.00～2.99	1.73	424	ねじれ発散	〃	3.79～6.11	5.09	0.52	13.23	15.96	ねじれ	ソフト	2.414

注）風速(m/s)、振幅は実橋換算

表－2・2・11　模型タイプ－B　実験結果一覧表（無次元風速）

Case No.	模型タイプ	たわみ渦励振			たわみ自励振動		ねじれ渦励振			ねじれ自励振動		振動状態		
		発現風速域	極大振幅		0.01	0.05	発現風速域	極大振幅		1(deg)	5(deg)	状態	フラッター形状	振動数 (Hz)
			発現風速	振幅	発現風速	発現風速		発現風速	振幅	発現風速	発現風速			
13		0.00～1.94	0.87	0.0013	ねじれ発散	ねじれ発散	——	—	—	9.10	9.25	連成	ソフト	1.985
14		——	—	—	〃	〃	0.41～1.47	0.71	0.27	9.00	9.10	連成	ソフト	1.980
15		0.00～1.51	0.87	0.0006	18.20	〃	0.40～1.07	0.90	0.26	9.00	8.70	連成	ハード	2.080
16		——	—	—	ねじれ発散	〃	0.40～1.20	0.70	0.38	9.05	8.85	連成	ハード	1.985
17		——	—	—	24.60	〃	——	—	——	11.89	12.20	連成	ソフト	1.953
18		——	—	—	15.30	〃	0.41～1.07	0.70	0.30	5.95	8.76	ねじれ	ハード	2.300
19		——	—	—	ねじれ発散	〃	0.41～1.22	1.08	0.13	11.62	11.06	連成	ハード	2.118
20		——	—	—	12.70	〃	——	—	—	3.80 4.30 5.00	5.94	ねじれ	ハード	2.368
21		——	—	—	ねじれ発散	〃	0.91～1.22	1.08	0.31	4.50	5.05	ねじれ	ハード	2.391
22		0.87～1.95	1.51	0.0051	〃	〃	0.71～1.23	1.08	1.06	4.55	4.40	ねじれ	ハード	2.424
23		0 ～1.50	0.86	0.0083	〃	〃	0.91～1.34	1.07	0.80	3.60	4.30	ねじれ	ソフト	2.368
24		0 ～1.49	0.86	0.0013	26.00	〃	0.69～1.06	0.90	0.50	12.30	12.50	連成	ソフト	1.944
25		0 ～1.49	0.86	0.0020	26.10	〃	——	—	—	12.25	12.70	連成	ソフト	1.923
26		——	—	—	12.60	〃	——	—	—	5.65	6.30	ねじれ	ソフト	2.250
27		0 ～1.50	0.86	0.0106	ねじれ発散	〃	0.90～1.46	1.21	0.52	3.15	3.80	ねじれ	ソフト	2.414

注）．風速は無次元風速、振幅は無次元振幅で示す。

1）　模型タイプ－Ａの結果および考察

模型タイプ－Ａにおいては、開口部の無い１箱桁タイプ（ケース１、断面１）のフラッター限界風速は、39m／ｓであった。開口部を有する場合に耐風安定性が最も改善されたケースは、桁中央に開口部を有する２箱桁タイプのうち開口率の最も大きいケース５（断面５）で、そのフラッター限界風速は80m／ｓであった。

なお、Selbergの式による模型タイプ－Ａのフラッター限界風速は、43m／ｓである。

以下に各ケースを要因ごとに比較検討し、考察を行う。

①　開口率および端部開口の影響

開口率とフラッター限界風速との関係を表－２・２・12および図－２・２・５に示す。図－２・２・４では、フェアリング付け根部に開口部を持つもケースとそうでないケースに分けて比較を行った。２つのグループに分けた場合、箱桁の数により多少ばらつきはあるものの、開口率が大きくなるほど限界風速が高くなる傾向を示す結果となった。また、フェアリング付け根部に開口部がある場合は、開口部が無い場合に比べて全体として耐風安定性が劣るようである。

図－２・２・６は、フェアイング付け根の開口部を無視して開口率を計算した値に対し、箱桁数ごとに限界風速をプロットしたものである。また、図－２・２・７～２・２・10は、フェアリングを除いて箱桁数の同じ断面についてＶ－Ａ重ね合わせ図を描いたものである。フェアリング付け根の開口部を無視した場合は、開口率の一番大きなケース10を除いて、開口率に応じて限界風速が上昇することが示されている。なお、この場合でもフェアリング付け根に開口部を持つケースの限界風速がやや劣る結果であった。Ｖ－Ａ重ね合わせ図からもフェアリング付け根に開口部を有するケースは、ハードフラッター的な発散振動の性状を示すようになり、このような傾向をうかがうことができる。

以上のことから多連箱桁断面では、フェアリング付け根の開口部は耐風性の向上にほとんど効果がないばかりか、逆に耐風性を悪くする危険性があること、また、桁中間の開口率が大きくなると限界風速が大きくなる傾向にあるといえる。

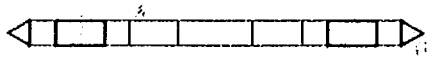
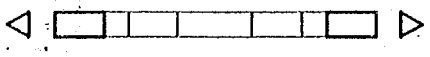
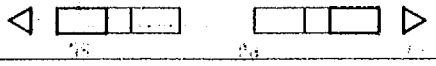
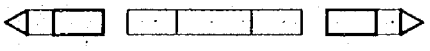
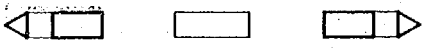
②　箱桁数の影響

①で示した図－２・２・６において、フェアリング付け根に開口部が無いケースに注目すると、３箱桁断面で開口率の一番大きなケースが他のケースに比較して耐風性が多少劣っている。２，４箱桁断面は桁中央に開口部を有するが、３箱桁断面では中央に開口部が無い構造である。今回の実験では、同じ開口率で箱桁数の異なるケースや同開口率・同箱桁数で開口部位置の異なるケースについての実験を行わなかったため、箱桁数の違いによる影響を明確にすることができなかった。しかし、桁中央に開口部を持つ断面構成とするほうが効率よく耐風性を向上させる可能性があるものと考えられる。図－２・２・11に１～４箱桁断面のフェアリング付け根に開口部のないケースでそえぞれ開口率が一番大きいケースについてのＶ－Ａ重ね合わせ図を示す。

③　渦励振に関する検討

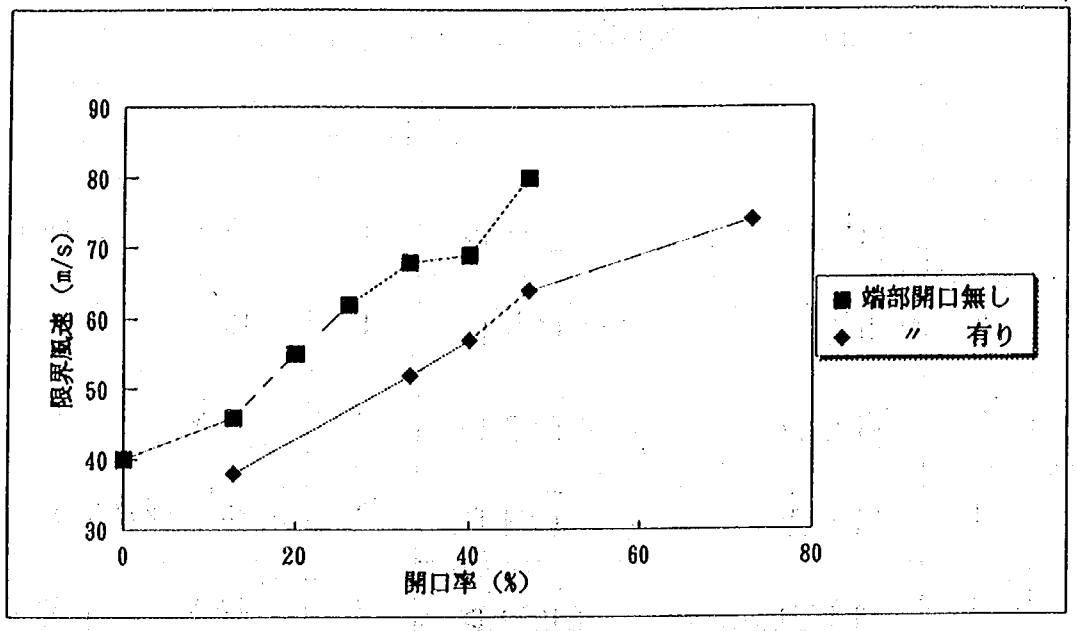
模型タイプーAにおいて渦励振が発生したケースは、全12ケース中ケース4，6，7，9の4ケースであった。このうち3ケースがフェアリング付け根に開口部を持つ断面であった。フェアリング付け根に開口部が有る全ケースに渦励振が発生したわけではないものの、この位置に開口部を設けることは渦励振に対しても良い影響を与えないようである。

表－２・２・12　　開口率によるフラッター限界風速

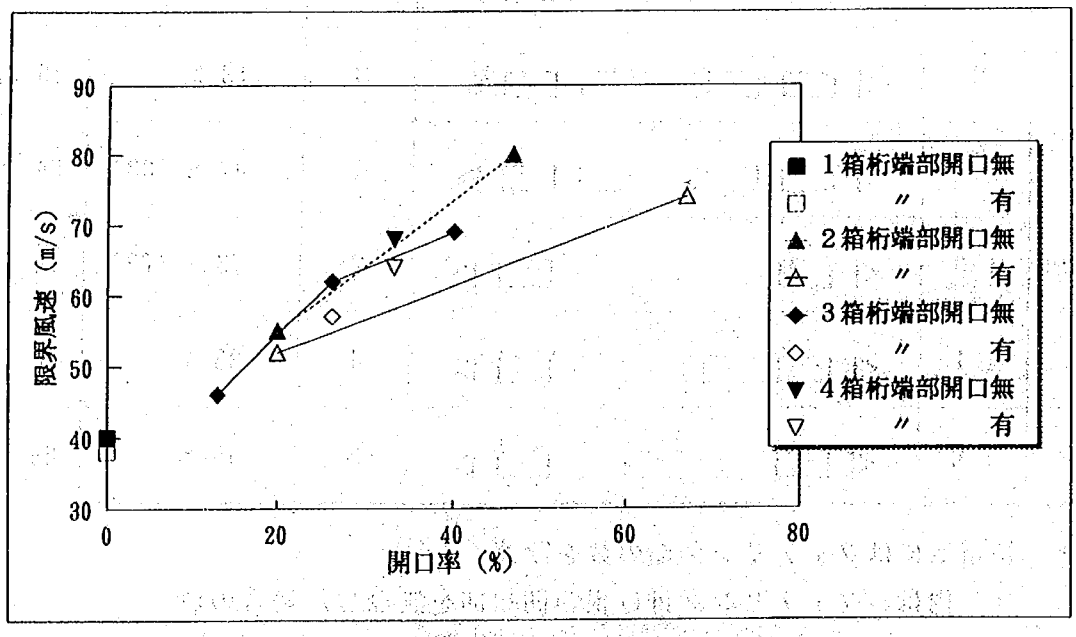
ケース	断面		箱桁数	開口率	限界風速
1	1		1	0 %	39 m/s
2	2		1	13 % (0)	38 m/s
3	3		2	20 %	54 m/s
4	4		2	33 % (20)	51 m/s
5	5		2	47 %	80 m/s
6	6		3	26 %	62 m/sP
7	7		3	40 % (26)	57 m/s
8	8		3	13 %	46 m/s
9	9		4	47 % (33)	64 m/s
10	10		2	73 % (67)	74 m/s
11	11		4	33 %	68 m/s
12	12		3	40 %	69 m/s

＊　箱桁数にはフェアリング部の数を除く

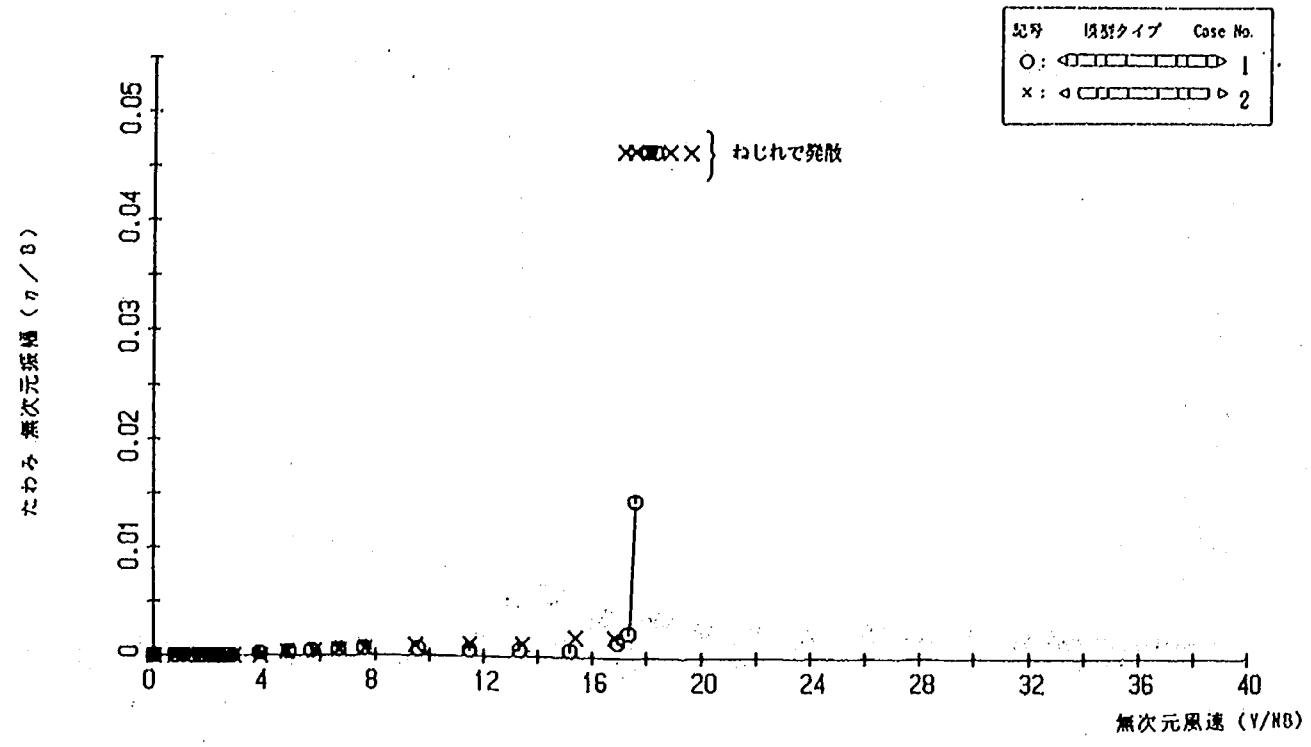
（）内は、フェアリング付け根の開口部を無視した場合の値



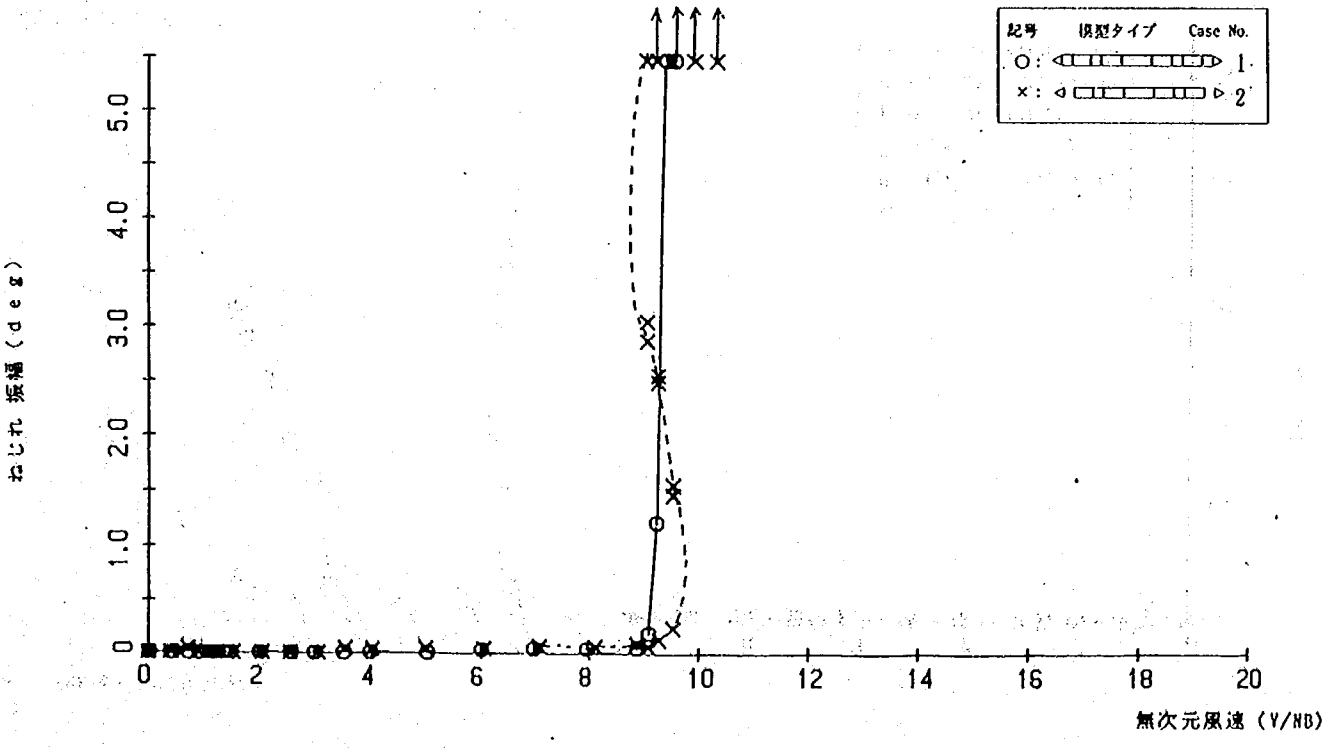
図－２・２・５　開口率による限界風速の影響



図－２・２・６　箱桁数による限界風速の影響

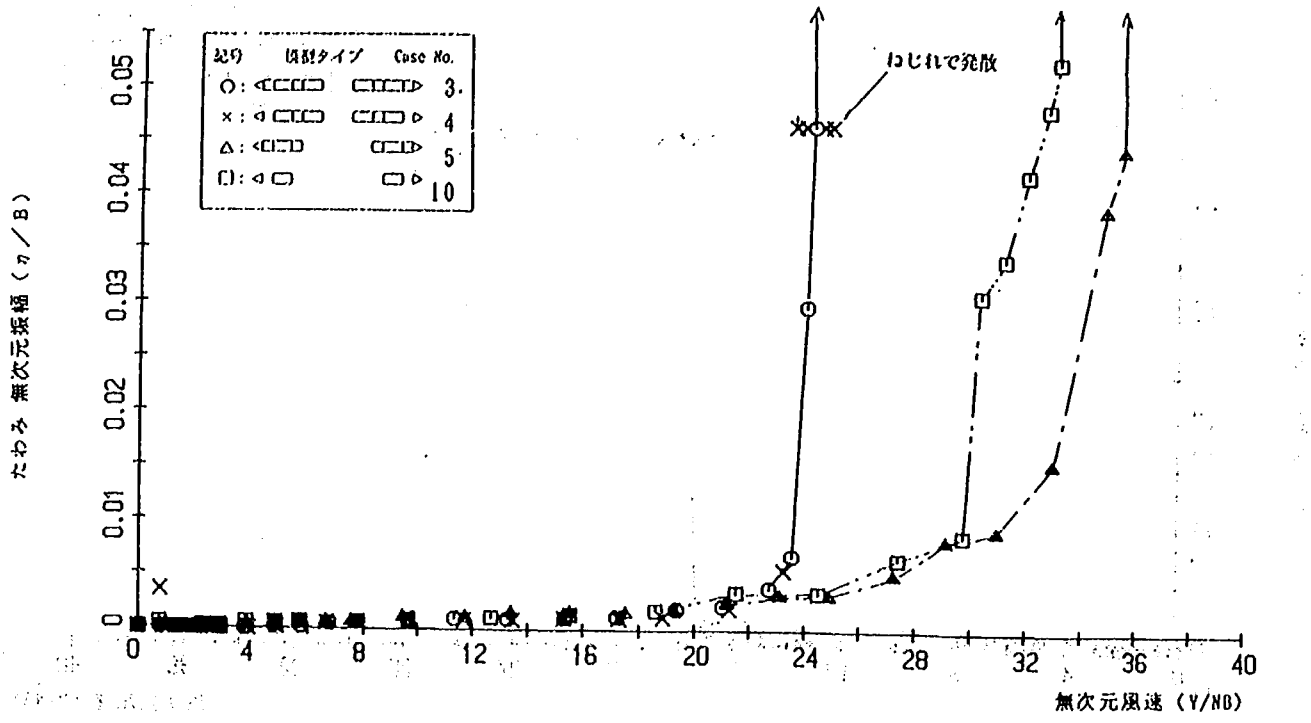


（１）たわみ

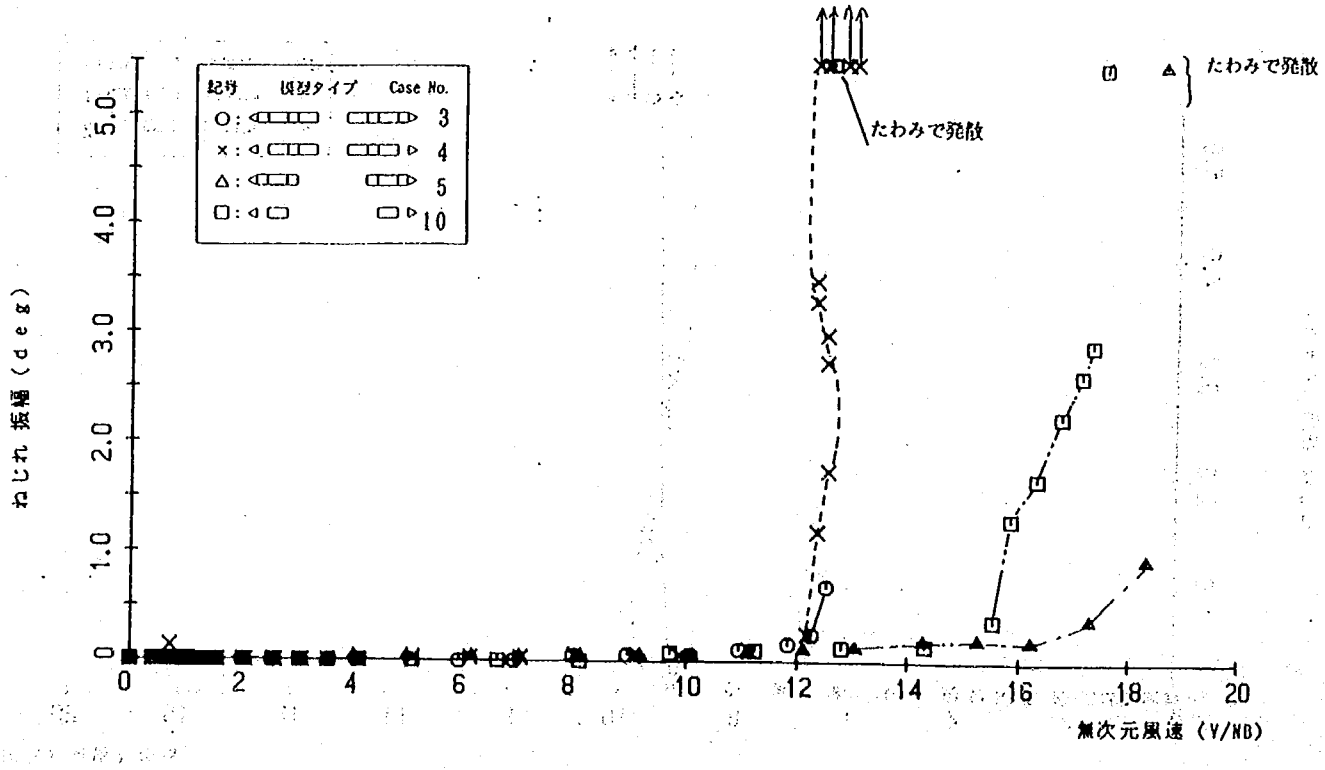


（２）ねじれ

図－２・２・７　風速－振幅曲線重ね合わせ図（一箱桁断面）

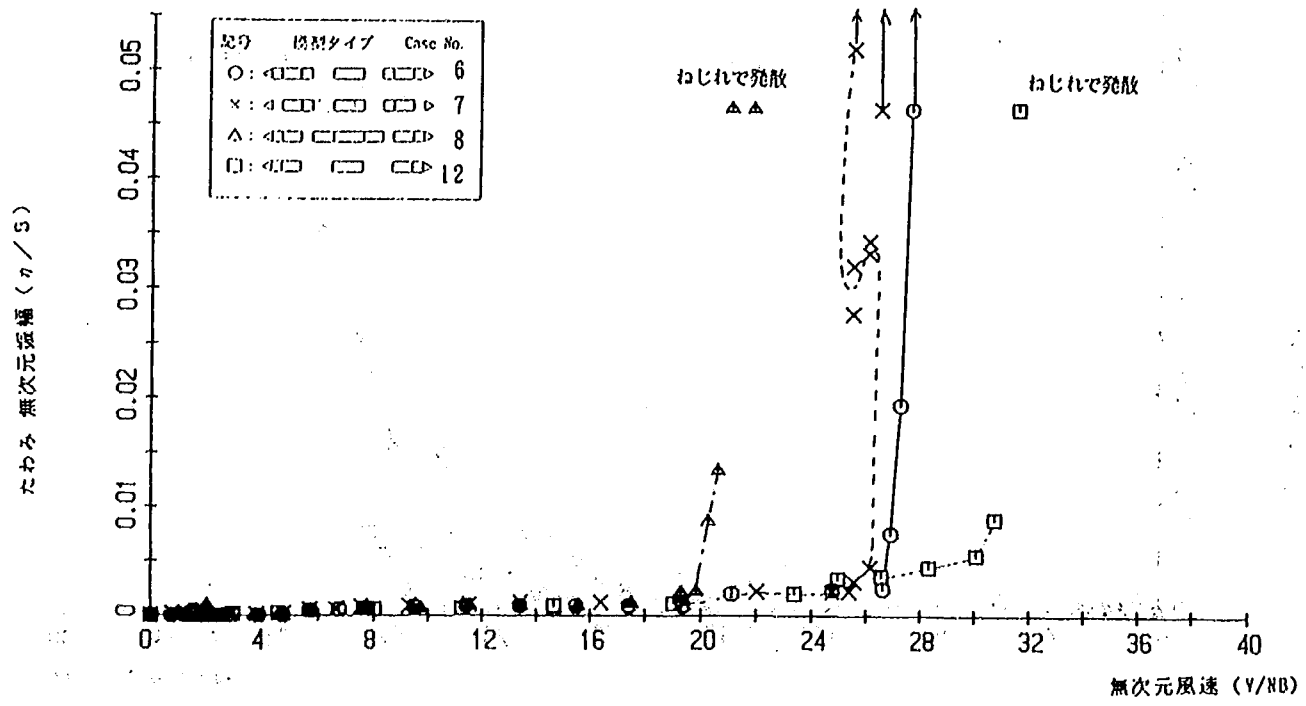


（１）たわみ

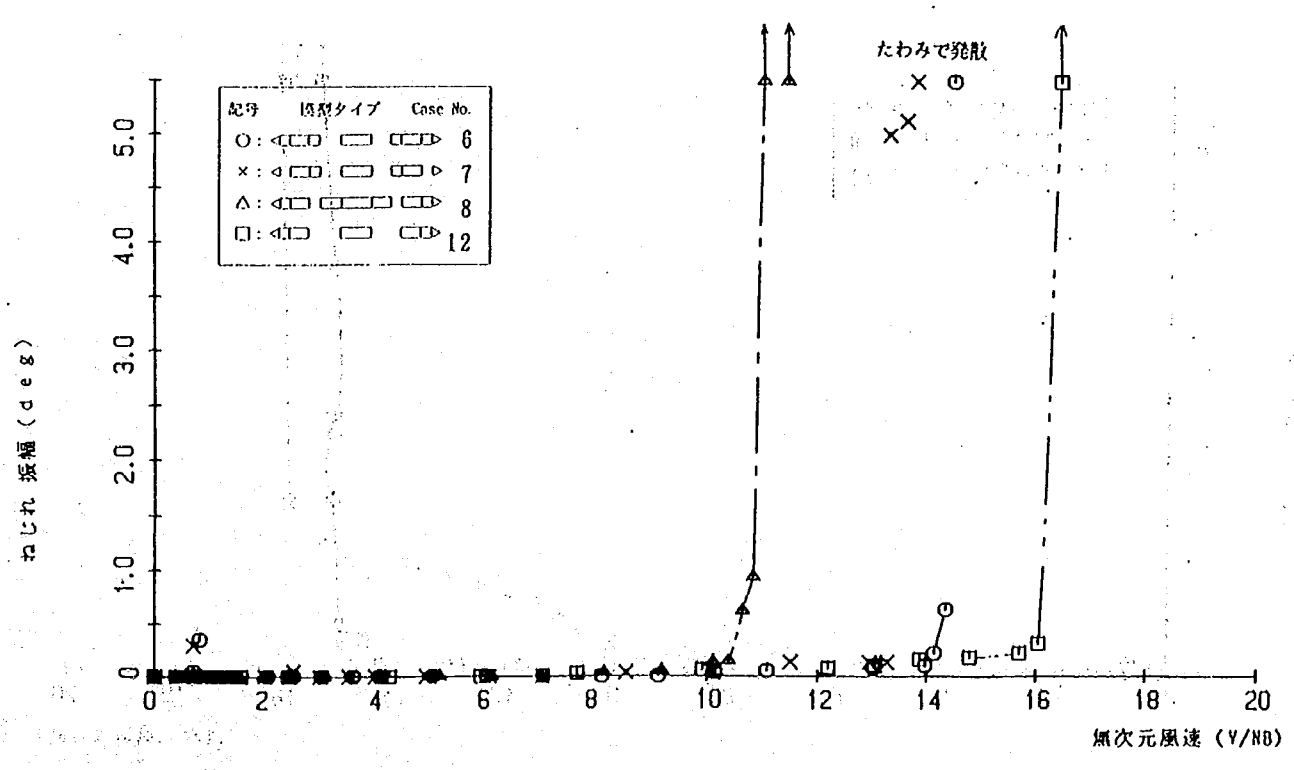


（２）ねじれ

図－２・２・８　風速－振幅曲線重ね合わせ図（二箱桁断面）

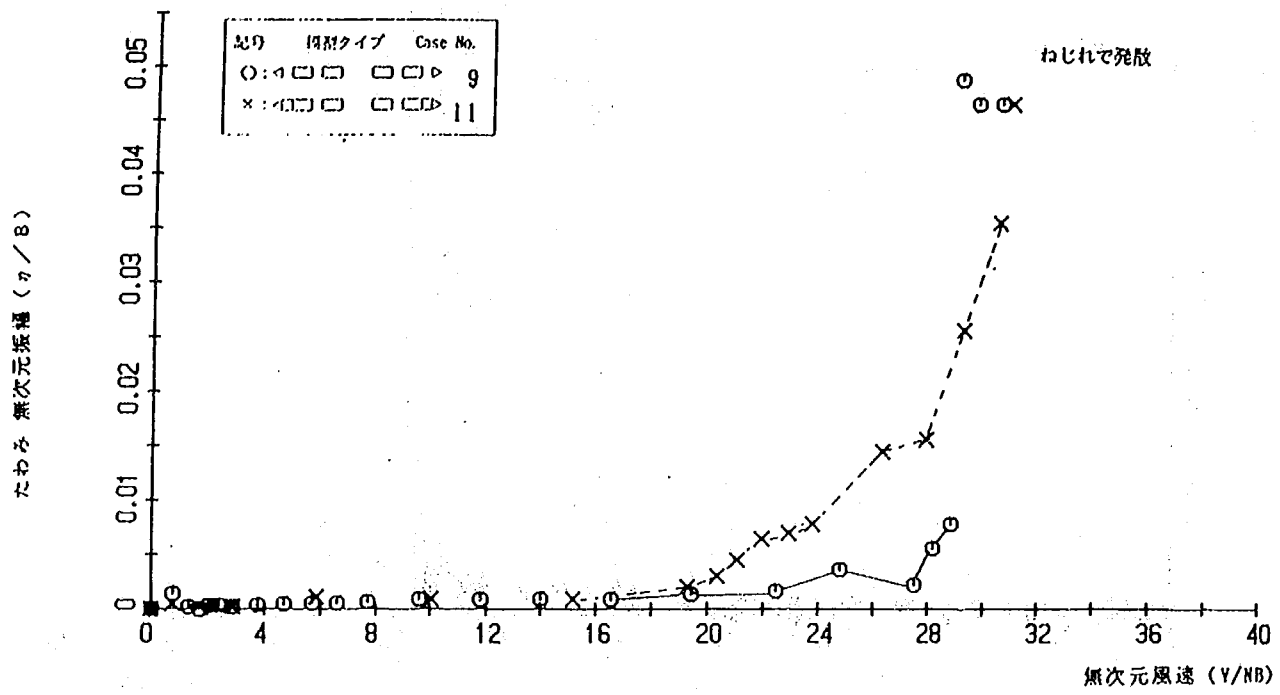


（１）たわみ

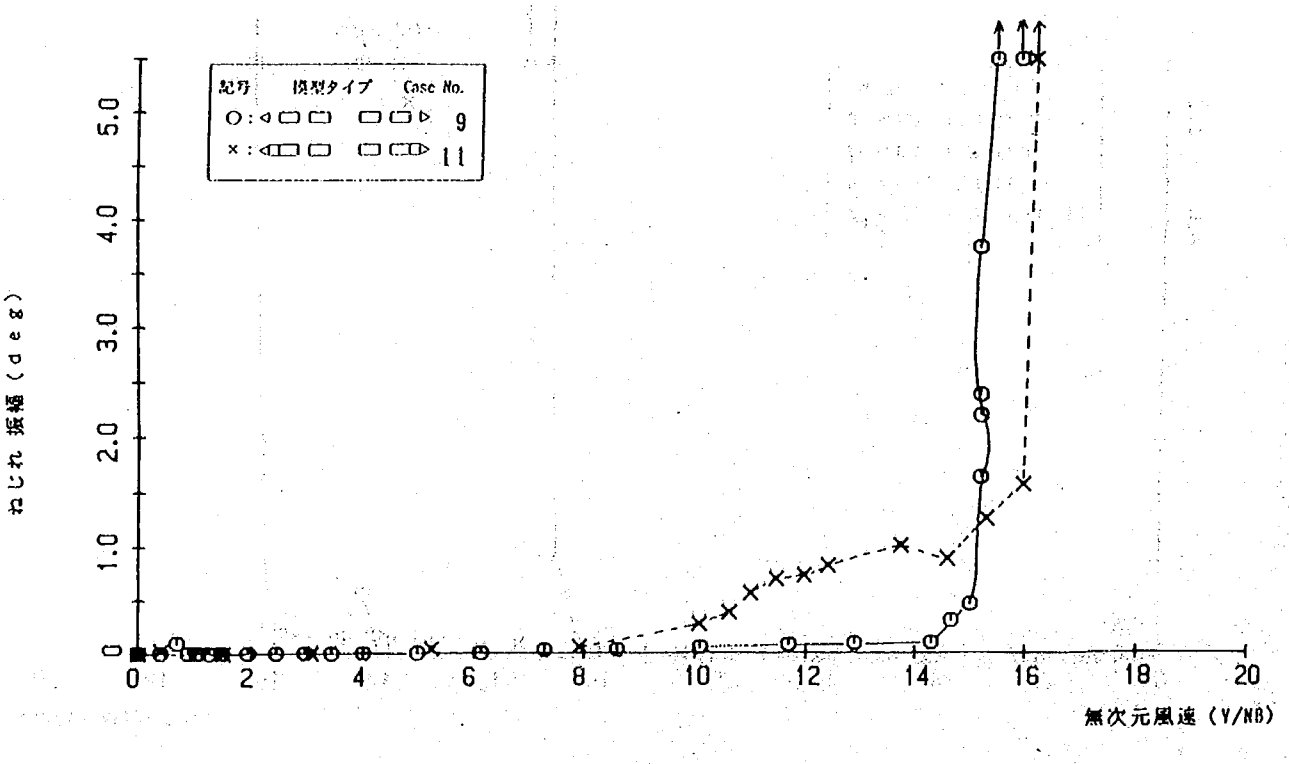


（２）ねじれ

図－2・2・9　風速－振幅曲線重ね合わせ図（三箱桁断面）

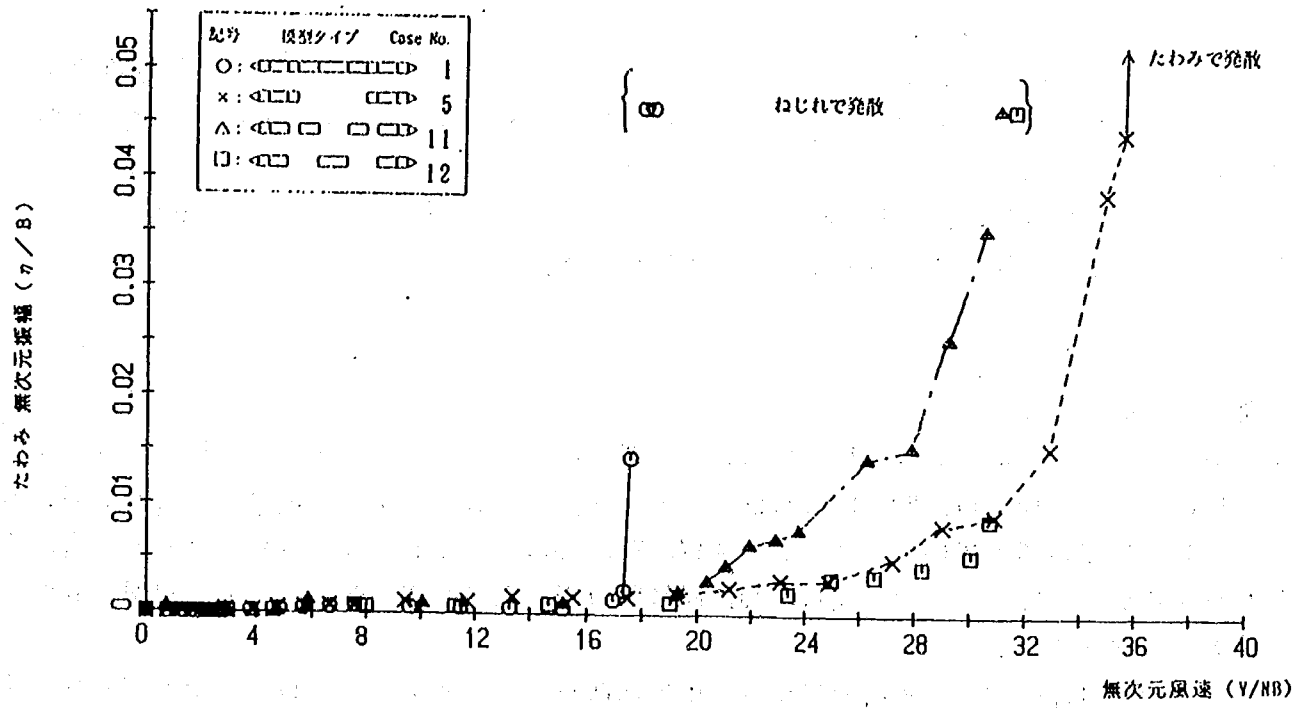


（１）たわみ

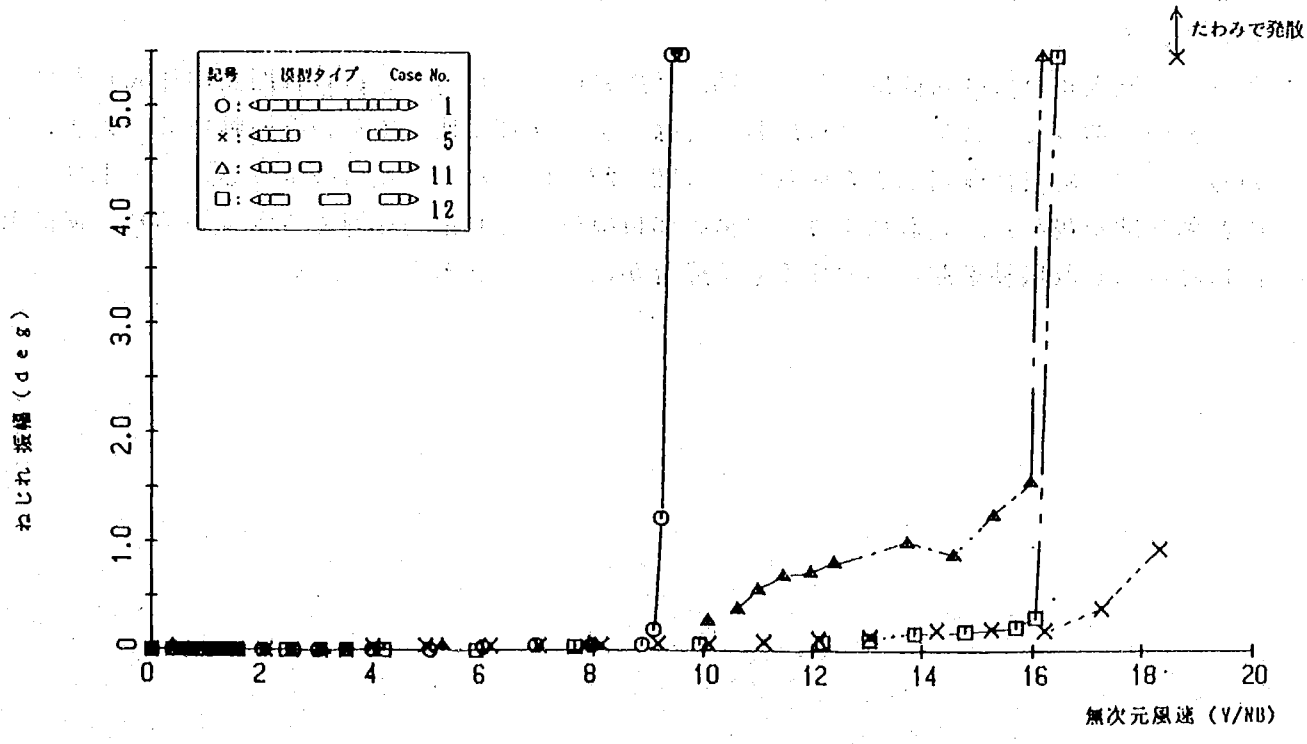


（２）ねじれ

図－２・２・10　風速－振幅曲線重ね合わせ図（四箱桁断面）



（１）たわみ



（２）ねじれ

図－２・２・11　風速－振幅曲線重ね合わせ図（箱桁数の影響）

2）　模型タイプ－Bの結果および考察

模型タイプ－Bにおいて、開口部の無い一箱桁タイプ（ケース13）のフラッター限界風速は、39m／sであった。開口部を設けた場合に耐風安定性が最も改善されたケースは、中央上下面に開口部を有するケース17で、そのフラッター限界風速は51m／sであった。

なお、Selbergの式による模型タイプ－Bのフラッター限界風速は、43m／sである。

以下に各ケースを要因ごとに比較検討し、考察を行う。

① 開口部位置の影響

上下同じ位置に開口部を設けた場合において、開口部の位置の影響について比較を行う。図－2・2・12に、ケース13，17，20，22（断面形状1，5，8，10）のV－A図の重ね合わせ図を示す。ケース13は開口部の無いケース、ケース17，20，22はそれぞれ中央、両脇、そして両方に開口部を有するケースである。ケース17と20は同じ開口率（20%）で、ケース22の開口率（40%）が一番大きくなっている。

ケース13の開口部の無い基本断面に比べ、中央に開口部を有するケース17では耐風安定性の改善がみられ、開口部を設けることの有効性が示されている。しかし、両脇に開口部を有するケース20，22では逆に限界風速が低くなっている。特に中央と両脇の両方に開口部を有するケース22では、限界風速が最も低いうえに渦励振が発生しており、耐風安定性を著しく損ねている。

このことは、床版の開口率を上げることが必ずしも耐風安定性の向上につながらないばかりでなく、開口部の位置や組み合わせによっては、開口部を設けることが逆効果となる場合があることを示している。

フラッター発生時の振動状態は、ケース13，17においてはたわみとねじれ振動が連成したソフトフラッターであった。特にケース17においては、ケース13に比べてたわみ振動成分が大きくなっている。一方、両脇に開口部を有するケース20，22では、ねじれ振動の卓越したハードフラッターの振動状態が現れた。これにより、中央の開口部はねじれ振動を抑える働きがあり、逆に両端の開口部はねじれ振動を起こしやすくする働きがあるものと考えられる。

② 下面開口部の影響

上面に同じ位置に開口部を有するケースについて、下面開口部の位置の影響を比較する。

図－2・2・13は、上面に開口部が無いケースについて重ね合わせ図を描いたものである。下面開口部の位置により発散形態がややハード的になるケースもみられるが、限界風速は開口部の無い基本ケースと比較して大差のない結果となった。このように、上下面で風の吹き抜けが起こらないケースにおいては、下面を変化させることの効果はあまりないようである。

図－2・2・14は、上面中央に開口部を有するケースについて、重ね合わせ図を描いたものである。下面も上面と同じ中央に開口部を有するケース17，19において耐風性の向上がみられ、風の吹き抜け経路がシンプルで効率の良い下面も中央部にのみに開口部を持つケース17が、より優れた結果となった。下面には両脇のみに開口部を有するケース18では、吹き抜け経路が複雑になり開口部の効率が悪いためか、基本ケースに比べて耐風性が低下し複雑な振動性状を示した。

③ 迎角の影響

ケース13～22のうち最も耐風性の優れた断面５（ケース17）について、迎角を±３°変化させてその影響を調べた。図－２・２・16にＶ－Ａ重ね合わせ図を示す。各ケースともほぼ同じ風域で発散振動を生じており、断面５については仰角－３°～＋３°の範囲内で耐風性の低下はみられなかった。

④ フェアリングの影響

基本断面（ケース13）および耐風性の改善効果の良好な断面５，７（ケース17，19）の３断面に対して、フェアリングの影響を比較した。各断面におけてフェアリングの有無による限界風速の比較図を図－２・２・17に、各断面ごとのＶ－Ａ重ね合わせ図を図－２・２・18～２・２・20に示す。

フェリングが無い場合は各断面とも耐風性が著しく低下し、フェアリングの有効性を示している。フェアリングがある場合に耐風安定性の向上に効果を示した中央に開口部を持つ断面が、フェアリング無しの場合では基本断面の限界風速が24ｍ／ｓであったのに対し、断面５で18ｍ／ｓ，断面７で15ｍ／ｓと耐風性の劣る結果であった。

これは、中央に開口部をもうけて耐風性を向上させる方法は、あらゆる桁断面形状に対して有効な方法ではないことを示している。よって、橋桁に開口部を設ける場合には、その効果がフェアリングなど桁端部の形状の影響を受けるものと考えられるので、開口部の位置や大きさの決定には、桁端部の形状を含めた全体的な検討が必要である。

⑤　渦励振に関する検討

図－2・2・21は、各ケースの渦励振の最大振幅を示したものである。渦励振発生の特徴は、次の通りである。

・断面1では、フェアリング有りのケース13では渦励振が発生するがフェアリング無しのケース26では発生しない。逆に断面5では、フェアリング無しのケース23で渦励振が発生しフェアリング有りのケース17では発生しない。なお、断面5では迎角を有する場合はフェアリング有りでも渦励振が発生する。

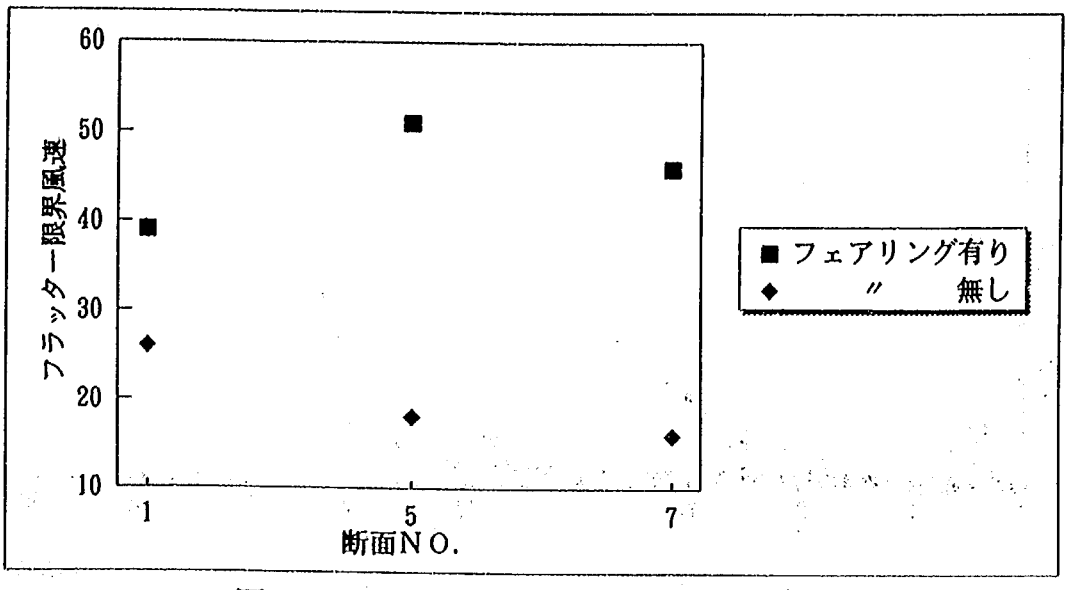
・上下中央のみに開口部を有するケース17および上下両脇のみに開口部を有するケース20では渦励振が発生するが、両方に開口部を有するケース22では渦励振が発生し、最大振幅も大きい。

・フェアリングが無いケースについて、ケース23, 27では渦励振が発生し、特にたわみ振動の最大振幅が大きい。しかし、ケース26では渦励振が発生しない。

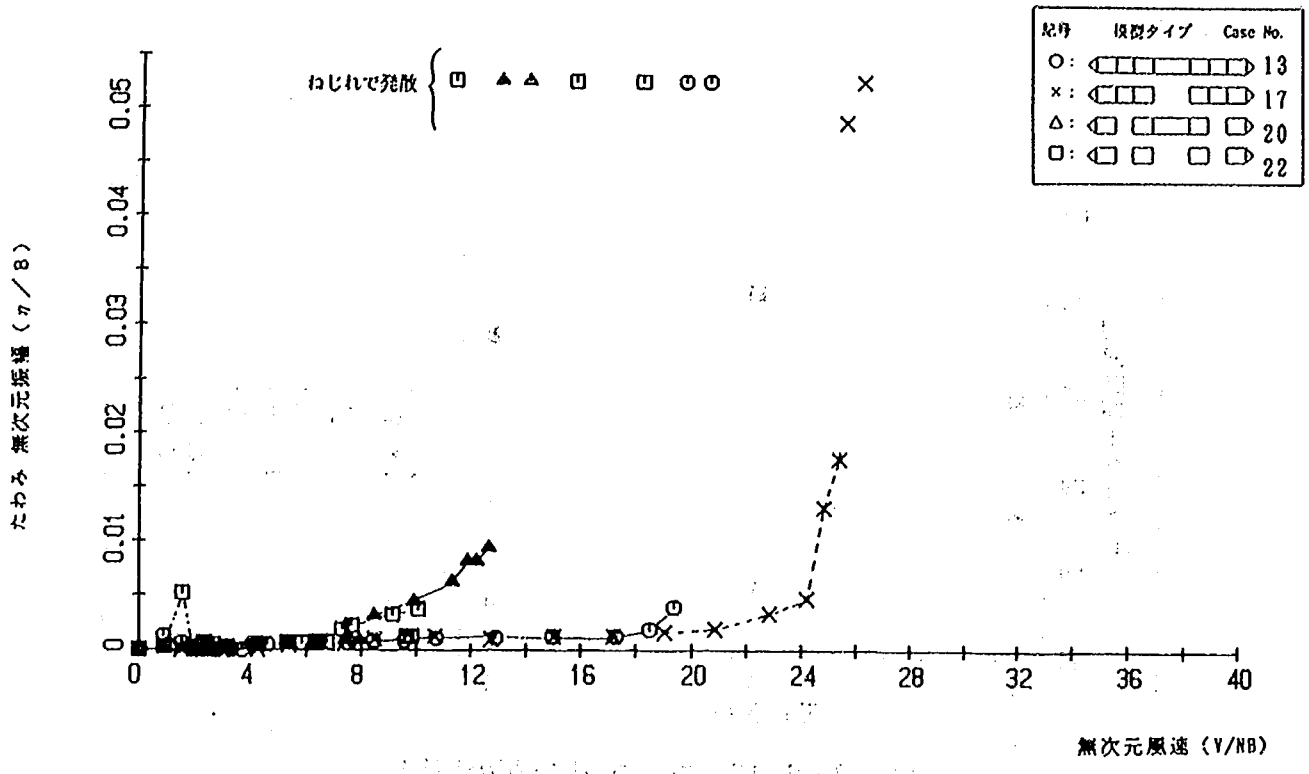
・上下面非対称に開口部を持つ断面は、すべてのケースでねじれ渦励振が発生している。しかし、ねじれ渦励振で最大振幅一番大きかったのは、上下対称に開口部を持つケース23である。

以上のように渦励振発生の有無は各ケースの条件により様々であり、渦励振に及ぼす開口部の影響を明確にすることは出来なかった。

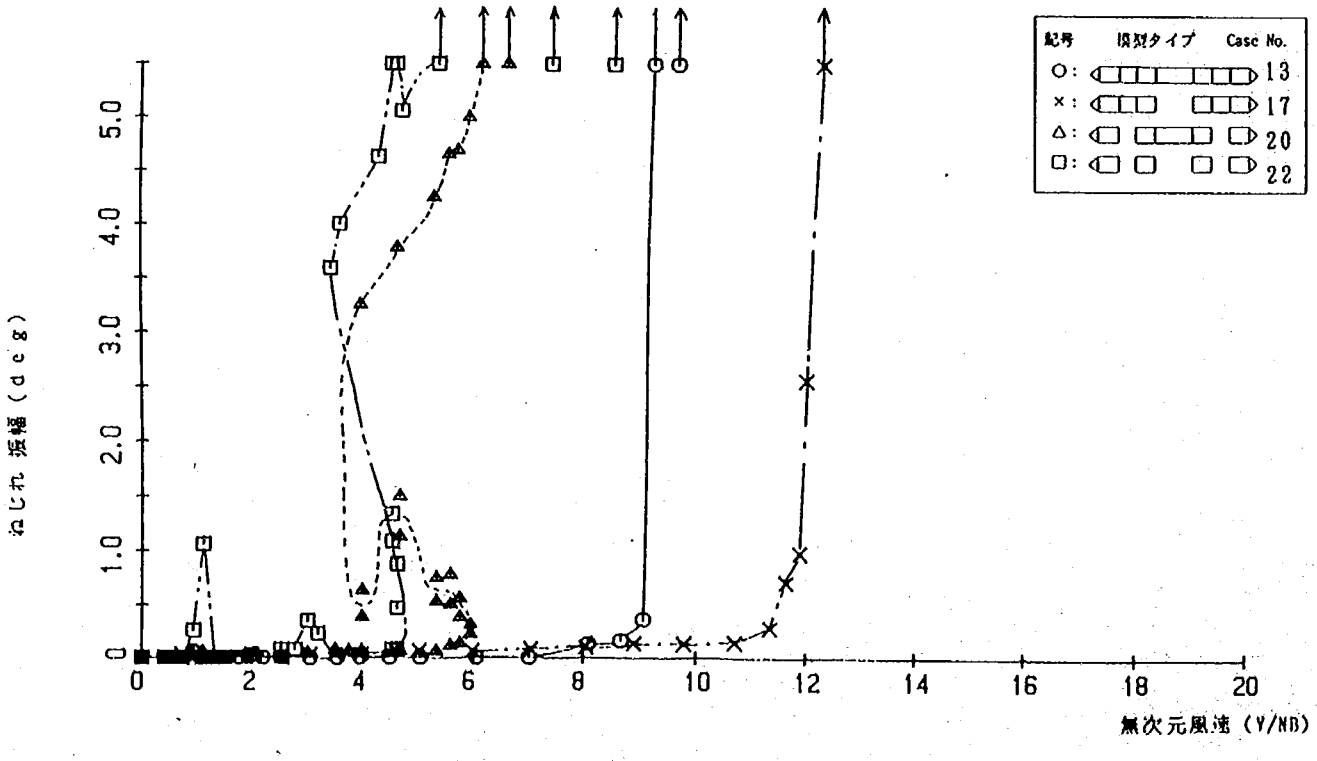
平板の渦励振は、上下面に発生する渦のフローパターンの影響を受けることから、渦の剥離に影響を与える端部の形状や迎角および渦による空気力の作用する桁中間部の形状の組み合わせにより、様々な応答を示すものと考えられる。



図－2・2・17　フェアリングの影響

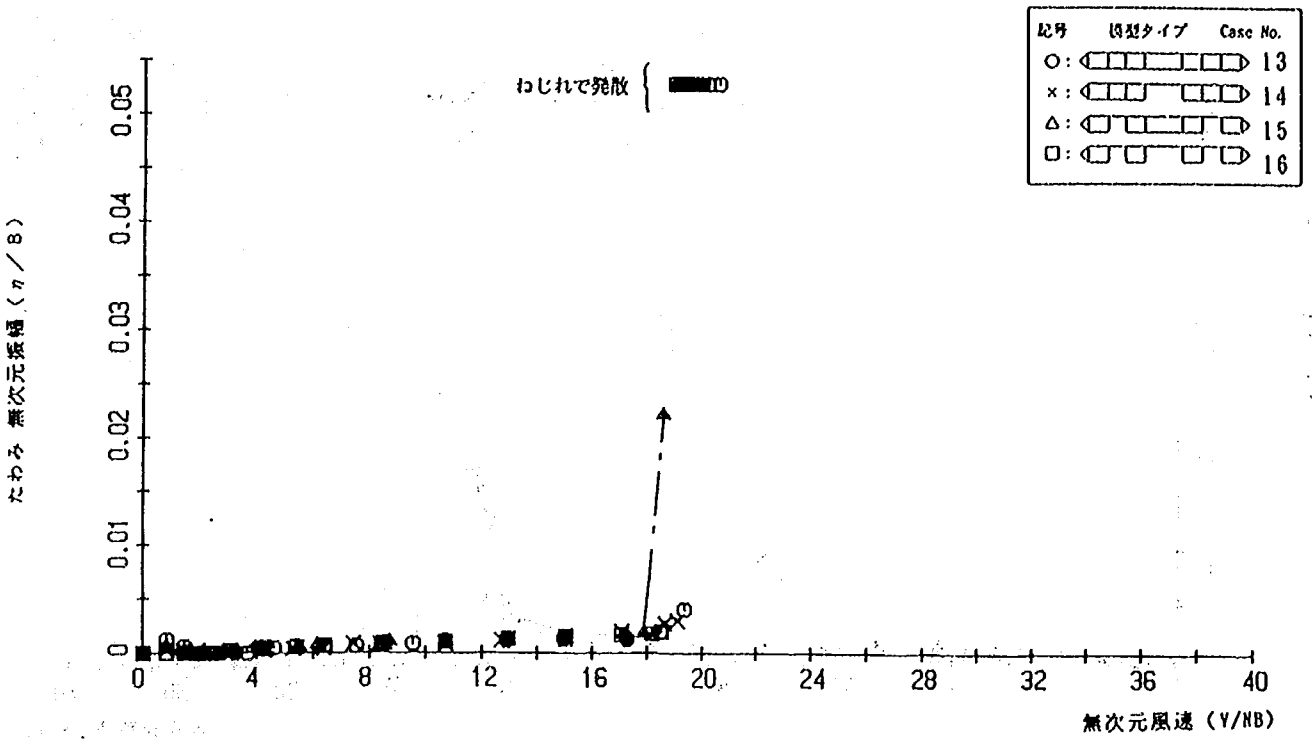


（１）たわみ

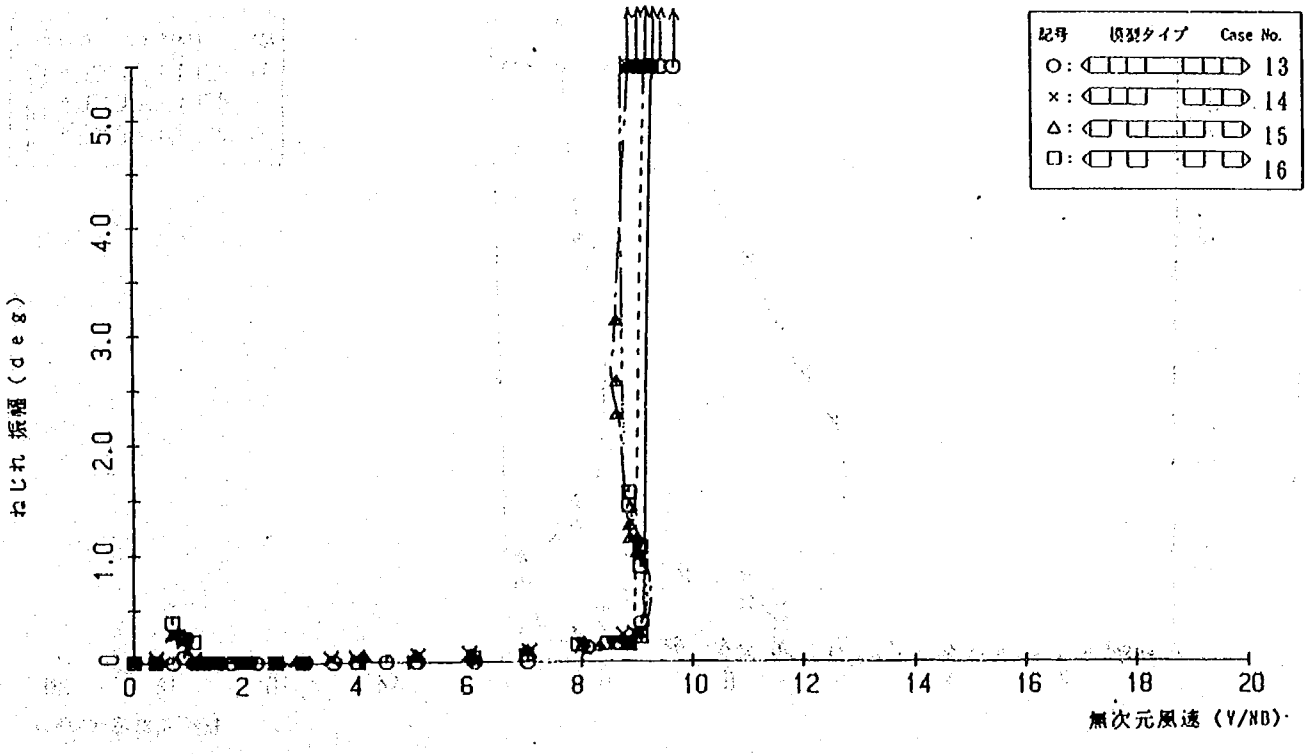


（２）ねじれ

図－２・２・12　風速－振幅曲線重ね合わせ図（開口部位置の影響）

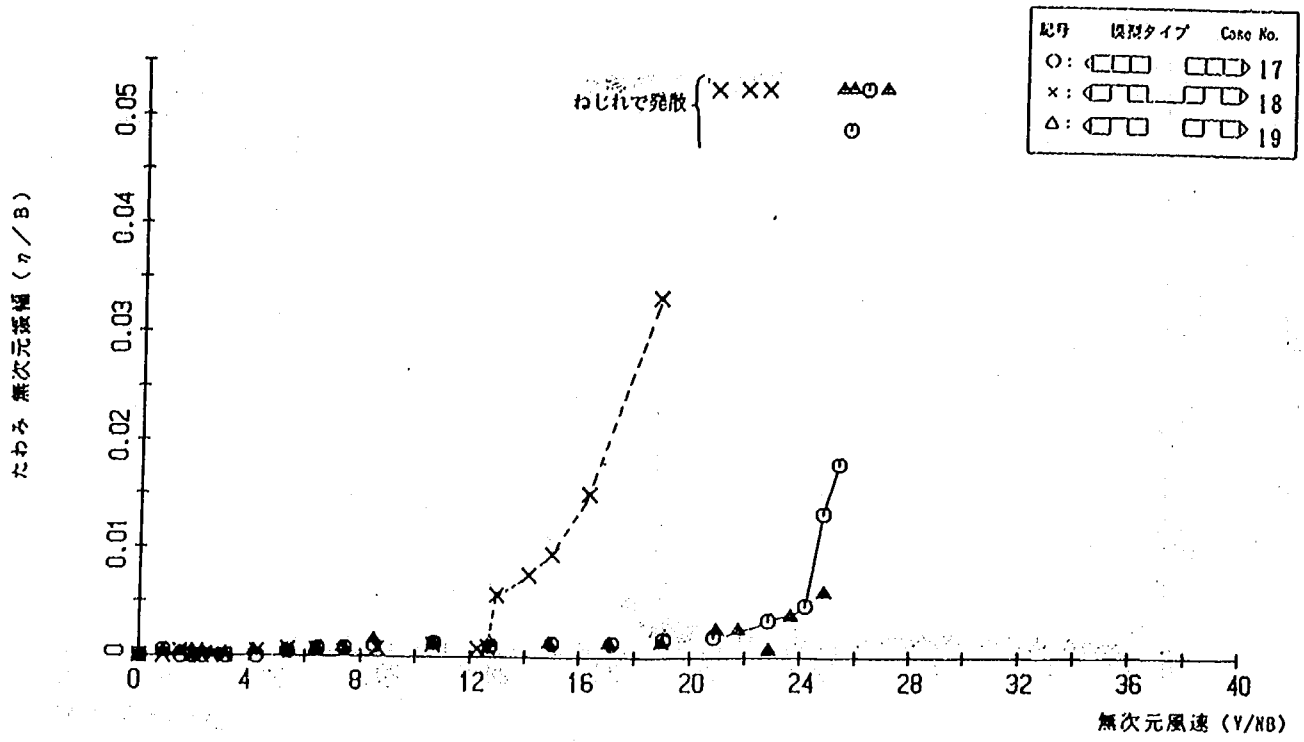


（１）たわみ

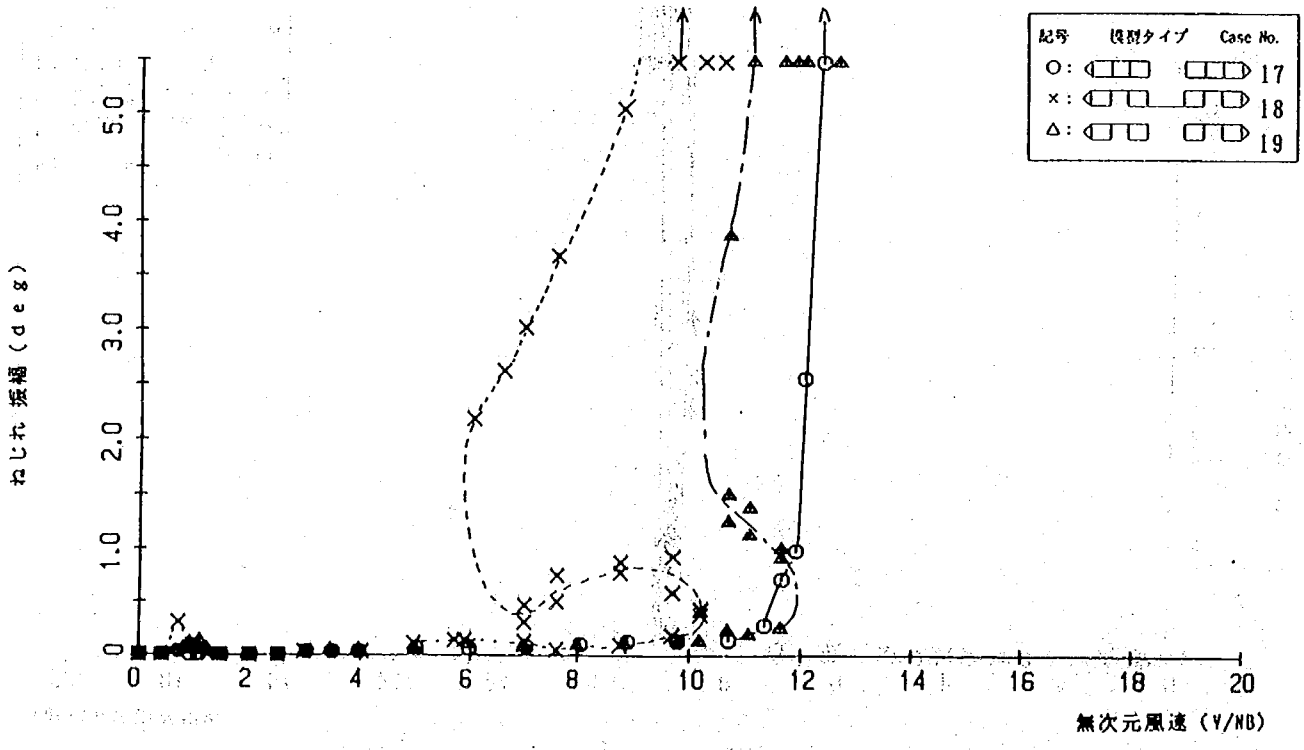


（２）ねじれ

図－２・２・13　風速－振幅曲線重ね合わせ図（下面開口部の影響①）

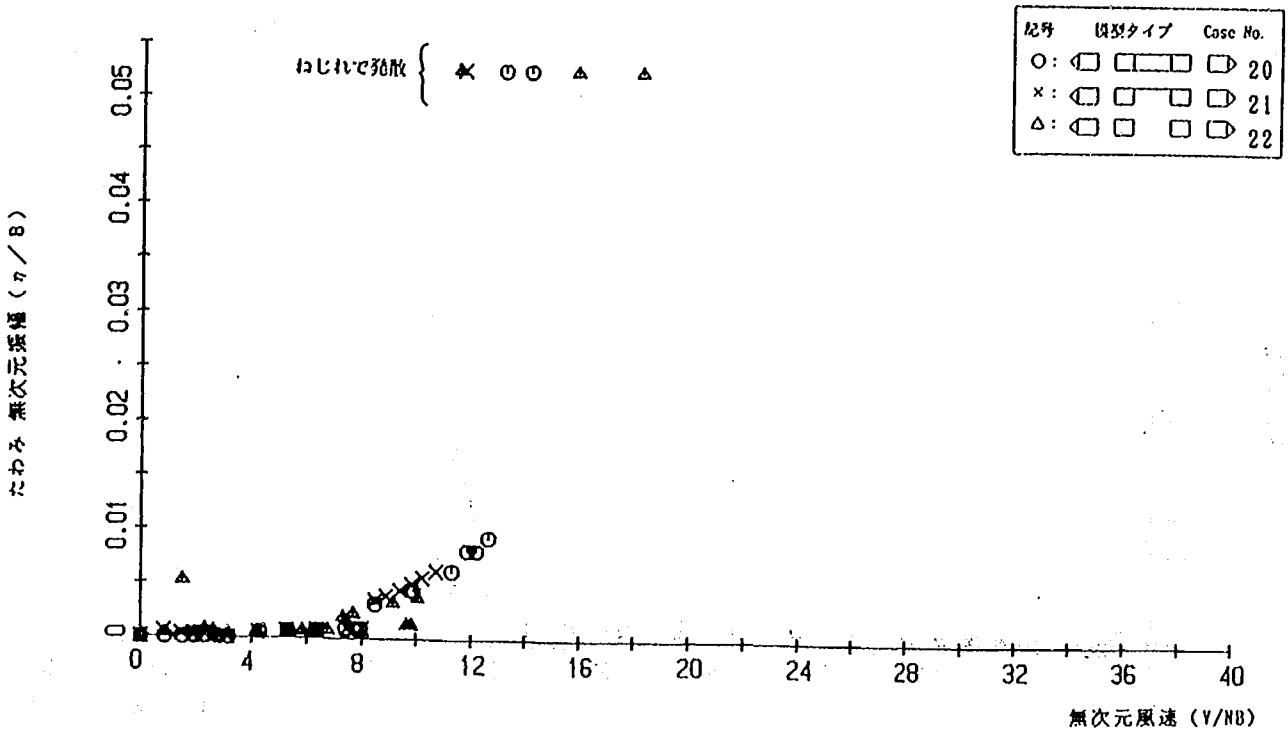


（１）たわみ

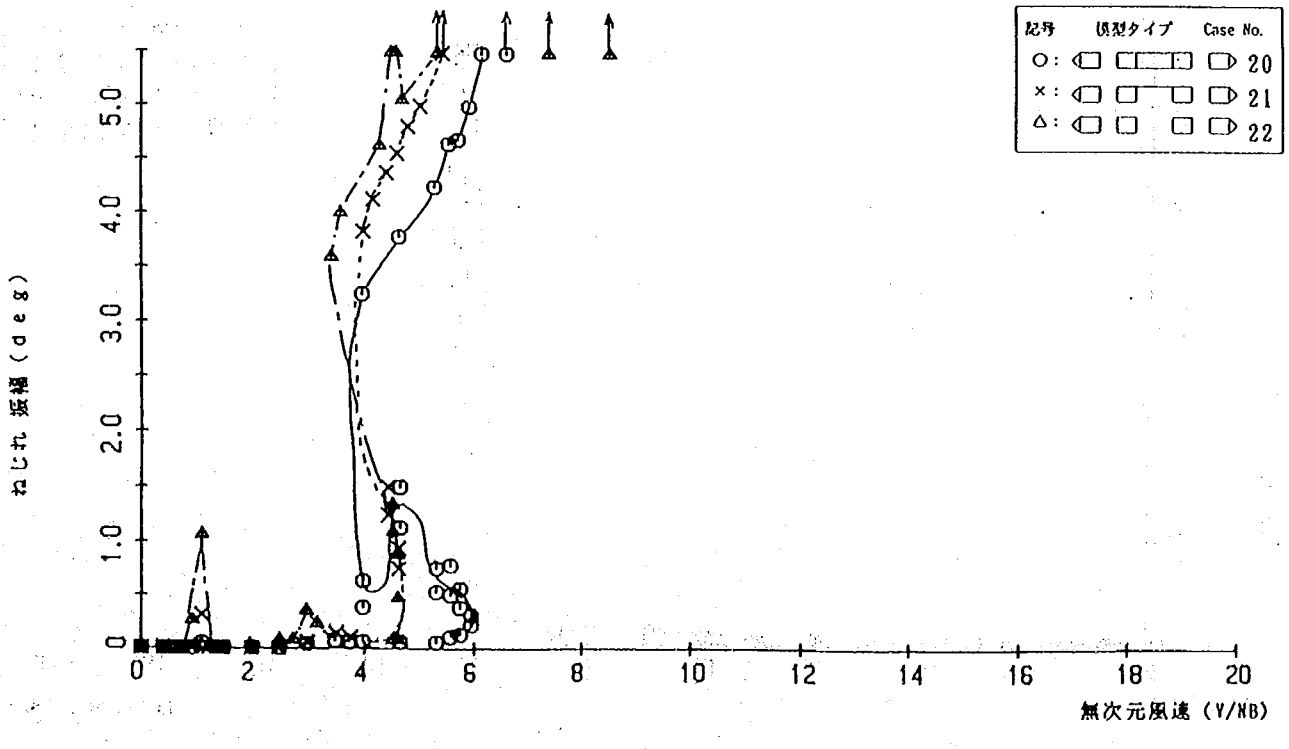


（２）ねじれ

図－２・２・14　風速－振幅曲線重ね合わせ図（下面開口部の影響②）

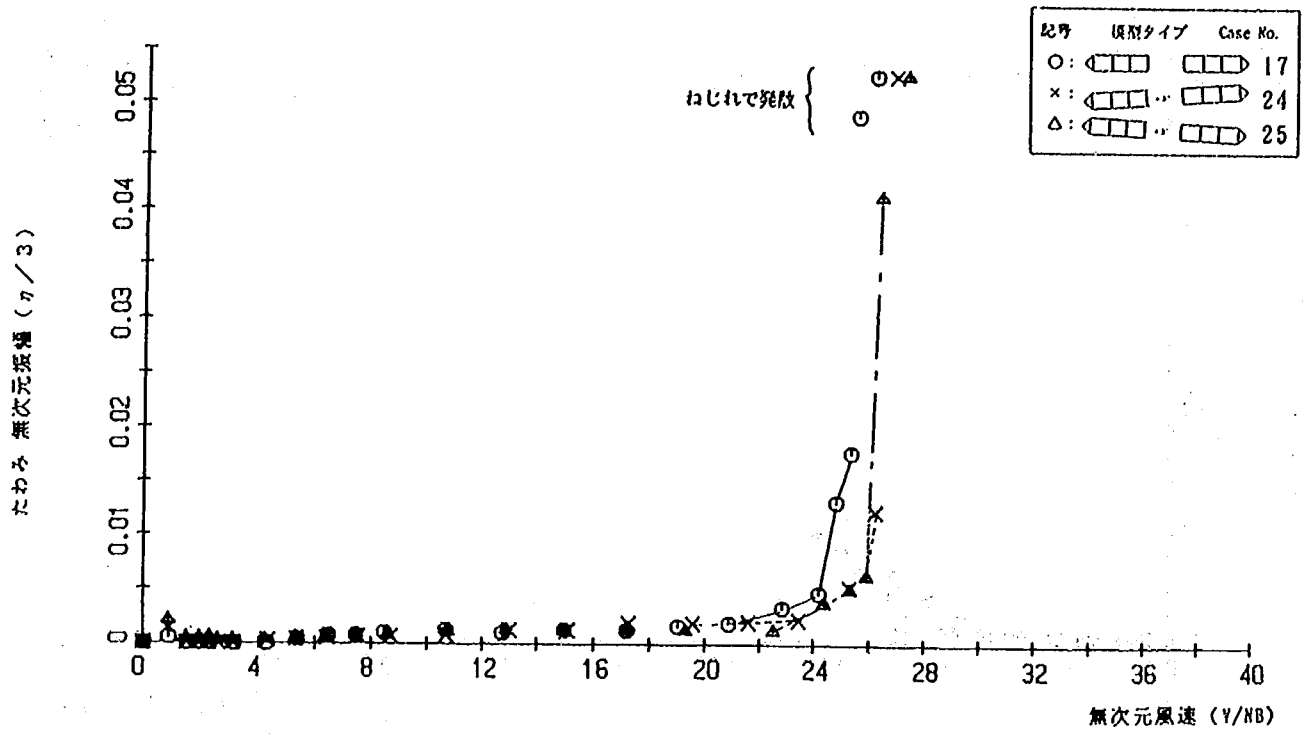


（１）たわみ

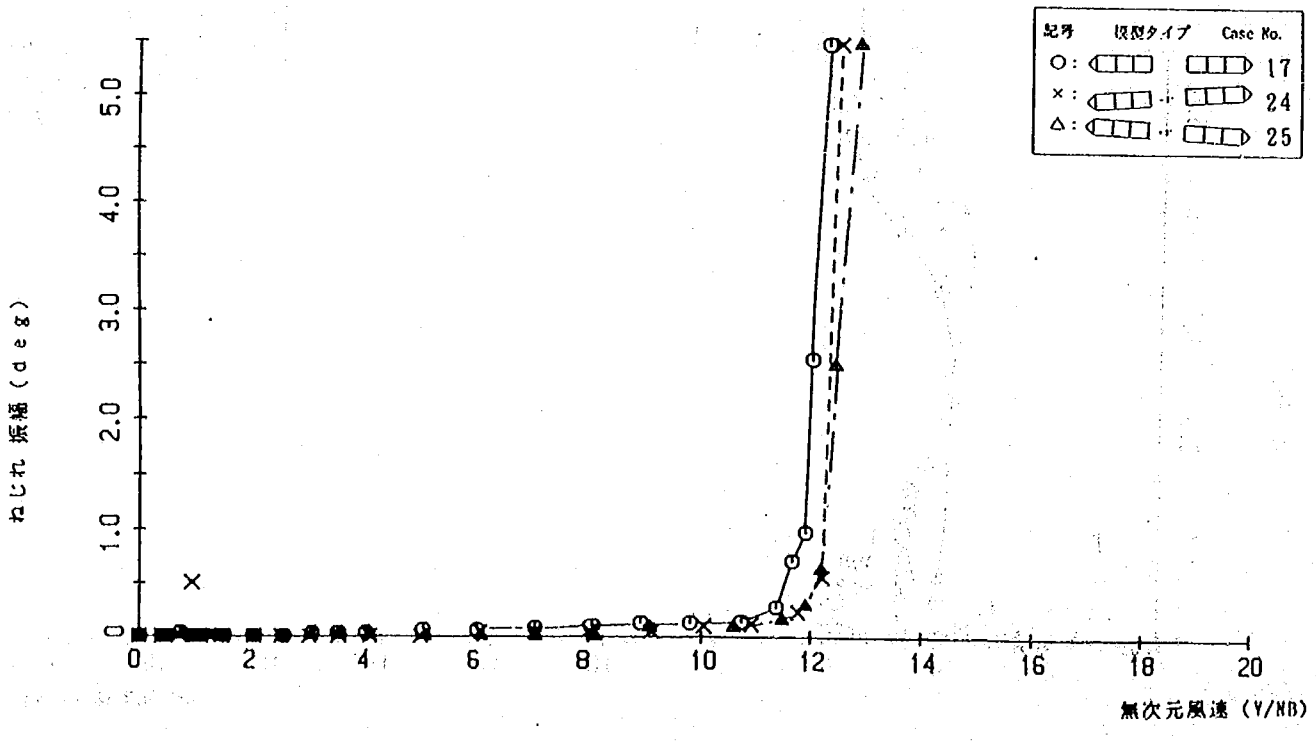


（２）ねじれ

図－２・２・15　風速－振幅曲線重ね合わせ図（下面開口部の影響③）

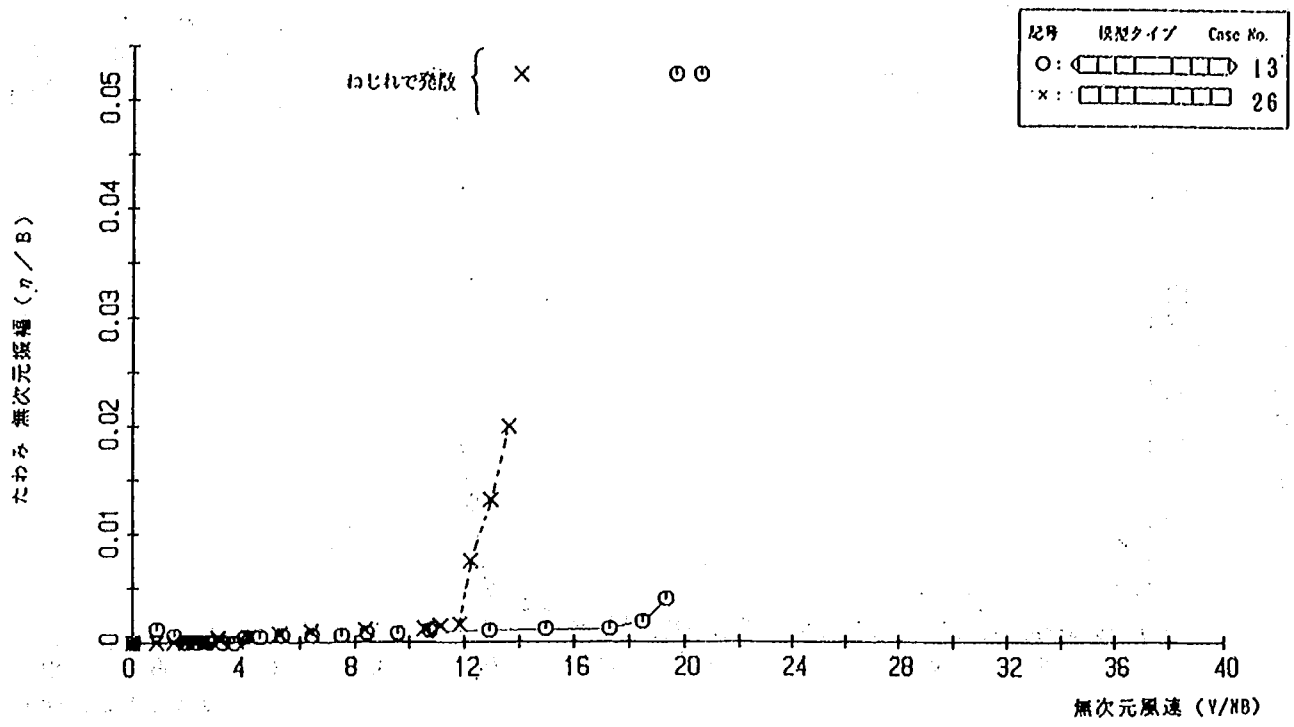


（１）たわみ

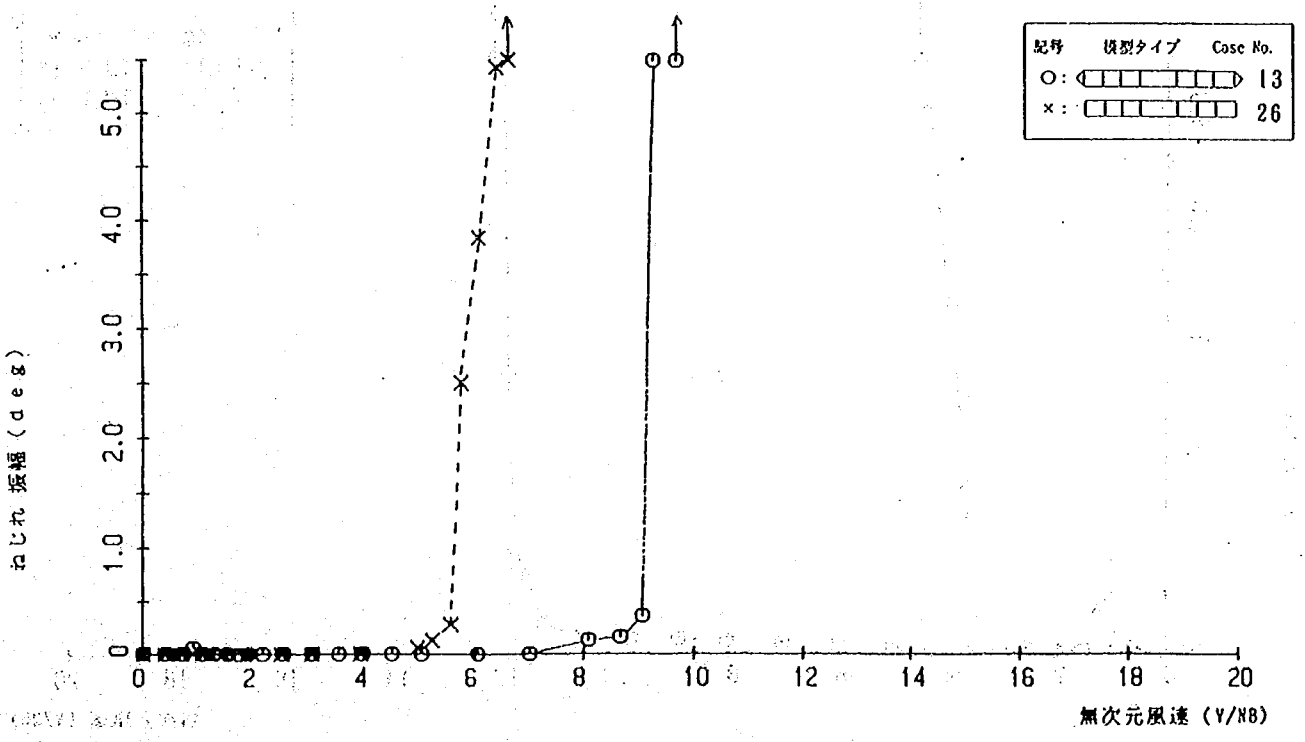


（２）ねじれ

図－2・2・16　風速－振幅曲線重ね合わせ図（迎角の影響）

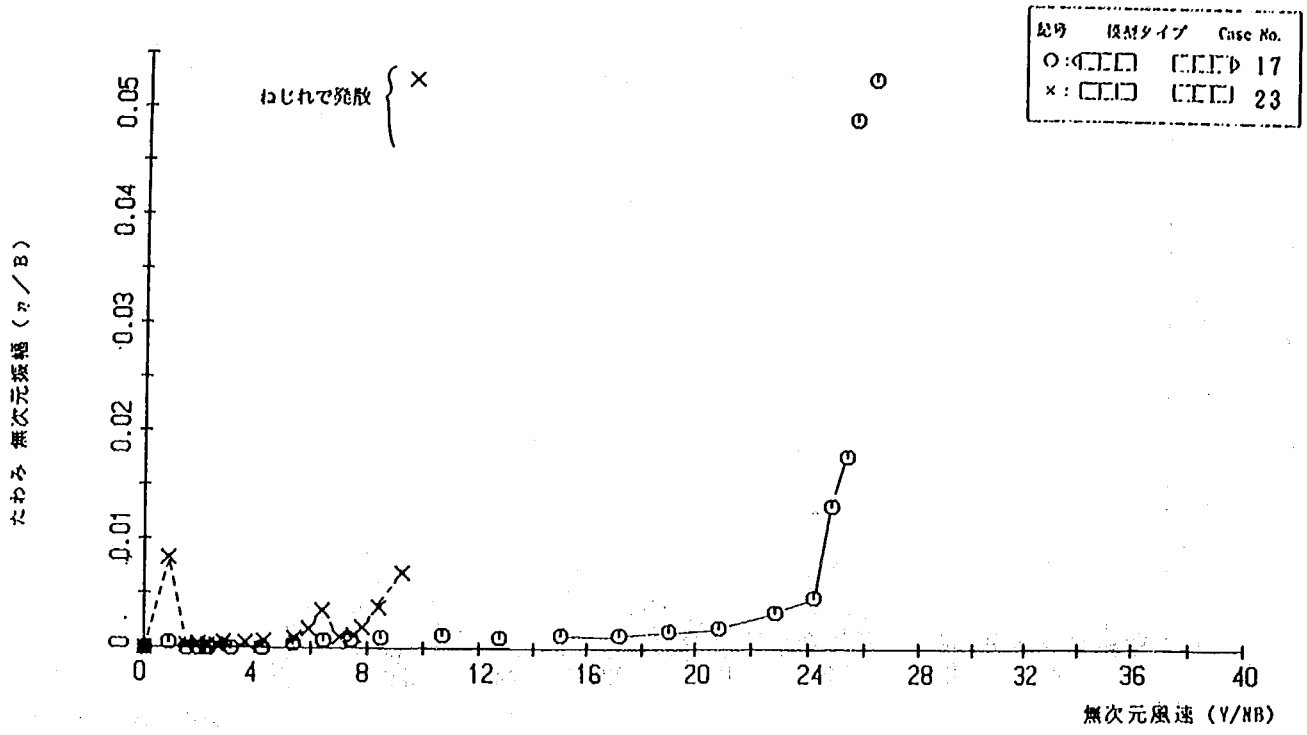


（１）たわみ

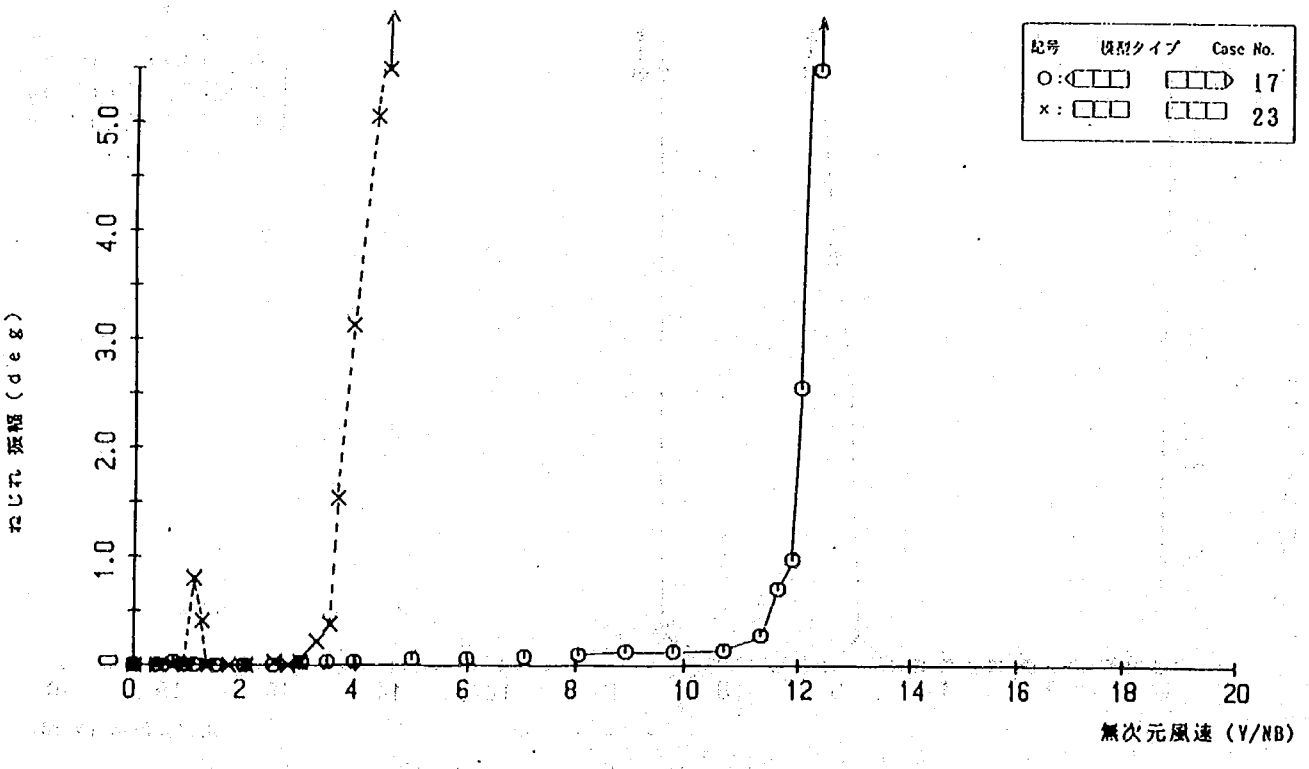


（２）ねじれ

図－2・2・18 風速－振幅曲線重ね合わせ図（フェアリングの影響①）

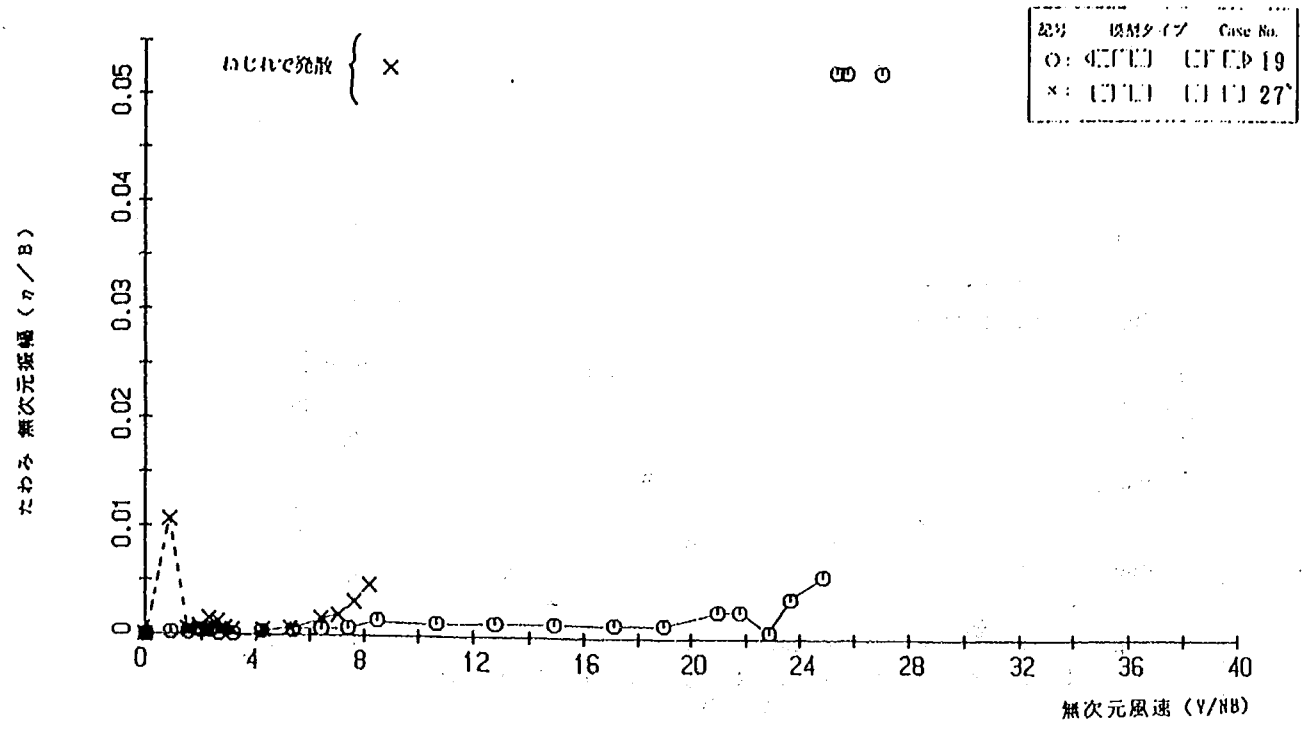


（１）たわみ

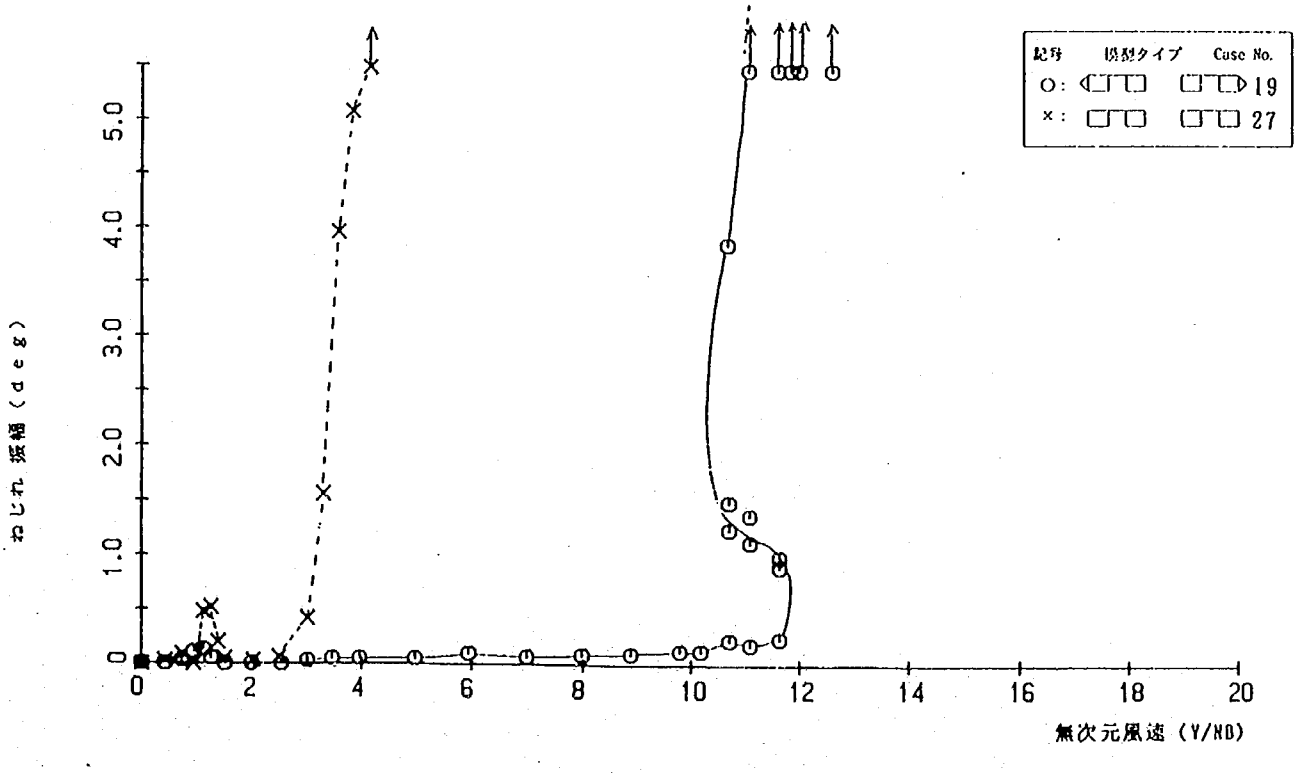


（２）ねじれ

図－２・２・19　風速－振幅曲線重ね合わせ図（フェアリングの影響②）

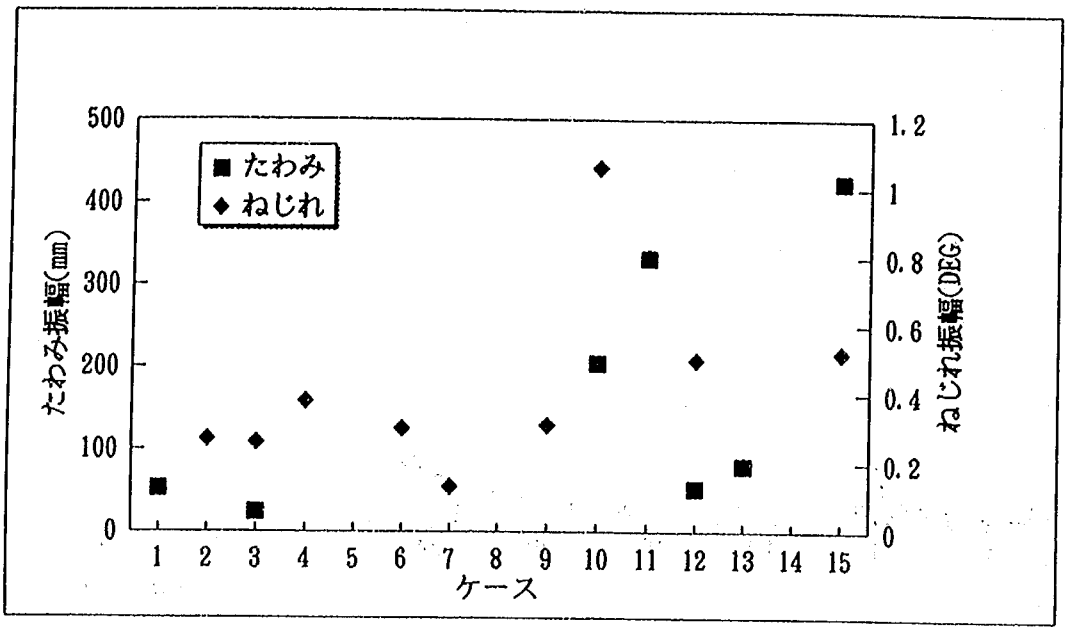


（１）たわみ



（２）ねじれ

図－２・２・20　風速－振幅曲線重ね合わせ図（フェアリングの影響③）



図－2・2・21　　渦励振最大振幅

3）　模型タイプ－A，Bの比較

模型タイプ－A，Bにおけるフラッター限界風速の実験結果を比較すると、以下に示す共通点および相違点がみられる。

・開口部の無い基本断面に対し耐風性が最も向上したものは、タイプA，Bともに断面中央に開口部を持つケースであった。
・最も耐風性が向上したケースを比べると、模型タイプ－Aのほうがタイプ－Bよりも優れていた。
・模型タイプ－Bでは上下面両脇に開口部を設けた場合、基本断面に比べいちじるしく耐風性が低下した。しかし、タイプ－Aでは、フェアリング付け根に開口部が有る場合多少の低下がみられるものの、全体としては開口率に応じて耐風性が向上する結果となった。

模型タイプ－A，Bの主な相違点は、

・桁幅桁高比　タイプ－A＝15　タイプ－B＝10
・タイプ－Bは桁内に空気の流れが生じるが、タイプ－Aは全て閉断面

である。これらの影響が実験結果の違いに現れたものと考えられる。

今回の実験結果からは、桁幅桁高比が大きく閉断面の構造とした模型タイプ－Aの構造を持つ桁断面の方が耐風性に有利であるといえる。

4） 考察

今回のバネ支持模型実験の結果をまとめて以下に示す。

① 模型タイプ－A

・橋桁中央部に広い開口部を持つ2連箱桁断面が最も耐風性が向上した。

・フェアリング付け根の開口部を除き、開口率が大きいほど耐風性が向上した。

・フェアリング付け根の開口部は、渦励振および自励振動に対しほとんど効果が無く、逆に耐風性に悪影響を与えた。

② 模型タイプ－B

・橋桁中央の上下面に開口部を持つケースが最も耐風性が向上した。

・橋桁中央部に開口部を設けることは、ねじれ振動を抑える働きがあると考えられる。

・開口部の位置や組み合わせによっては、耐風性を損ねる場合があり、開口率をあげることが必ずしも耐風性の向上につながらなかった。

・上面の開口部に対し下面開口部を変化させても耐風性の向上にならなかった。

・中央部上下に開口部を持つケースでは、迎角の影響をほとんど受けなかった。

・フェアリングは、耐風性の向上に極めて有効であった。しかし、開口部を設ける場合はフェアリングとの組み合わせで検討する必要がある。

・渦励振に及ぼす開口部の影響については明確な結果を得られなかった。

③ 模型タイプ－A，Bの比較

・両者とも橋桁中央に開口部を設けることで耐風性をもっとも効率よく向上させることが出来た。

・タイプ－Aでは開口部の位置によっては耐風性が著しく低下したが、タイプ－Bではフェアリング付け根の開口部を除き開口率が大きいほど耐風性が向上した。これは、桁幅桁高比の　違いや開断面と閉断面の違いによるものと考えられる。

・閉断面を持つタイプ－Aの方が耐風性の向上性が大きく、より優れた断面であると考えられる。

2．2．2　有効な空力対策の選定

（1）　実験内容

前節の基礎実験においては、図－2・2・5にも示すように開口率が大きく、かつ開口部を桁中央に集めた断面はフラッター限界風速が大きくなるという結論を得た。そこで本実験では、桁中央のみに開口部を有する2箱桁断面に着目し、さらなる耐風性の向上を目指して、様々な空力対策を施してその効果の確認を行った。

桁高3mの旧A模型（2．2．1節のタイプ－A模型）に着目すると、開口率（0%、20%、47%）が大きいほどフラッター限界風速も大きくなっているのであるが、開口率47%のものは実際の車線構成を考えた場合に桁幅が小さいこと（図－2・2・22参照）から、本実験においては開口率20%の断面を基本とし、この断面の耐風性を向上させる空力対策を見いだすことを目標とした。

この実験で試みた対策は、センターバリア、フェアリング部ガイドベーン、開口部ガイドベーン、フェアリングプレート、吹き抜け部材、開口部フェアリングである。これらの対策をその部材寸法や設置位置を変えながら、迎角0°にセットした模型に取り付け、フラッター限界風速を調査した。

さらに、効果の認められた空力対策については迎角±3°の耐風性を調査するとともに、対策の組み合わせ効果および高欄の影響についても調査した。また、桁高4mの旧B模型（2．2．1節のタイプ－B模型）についても同項目について実験を行い、断面の違いが空力対策の効果に及ぼす影響についても調査した。

（2）　実験方法および実験条件

1）　実験方法

実験は前節と同様に建設省土木研究所耐風工学実験施設内の非定常空気力風洞を用いて実施した。

実施したバネ支持模型実験に用いた模型および実験概要は、2．2．1（2）と同様である。ただし、模型の挙動の計測には、光学式変位計に変えてポジションセンサーを使用した。

2）　実験条件

相似条件より導かれた実験条件を表－２・２・13および２・２・14に示す。

表－２・２・13　実験条件（旧Ａモデル：桁高３ｍ）

		想定実橋値	模型所要値
重　　量		49.0 tf/m	4.802 kgf
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1620 tf•m•s²/m	0.016 kgf•m•s²
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44
振動数比		2.10	2.10
構造減衰	たわみ	0.02	0.02
	ねじれ	0.02	0.02
風速倍率	たわみ	——	4.30
	ねじれ	——	4.30

表－２・２・14　実験条件（旧Ｂモデル：桁高４ｍ）

		想定実橋値	模型所要値
重　　量		46.0 tf/m	4.508 kgf
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1280 tf•m•s²/m	0.013 kgf•m•s²
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44
振動数比		2.10	2.10
構造減衰	たわみ	0.02	0.02
	ねじれ	0.02	0.02
風速倍率	たわみ	——	4.30
	ねじれ	——	4.30

3） 実験ケース

実施した実験ケースを表－2・2・15および2・2・16に示す。また、模型断面および空力対策部材を図－2・2・23～2・2・31に示す。

表－2・2・15 実験ケース（旧Aモデル：桁高3m）

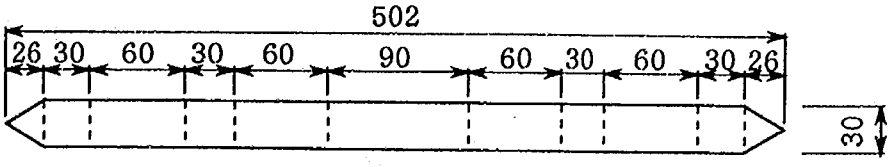
実験ケース	模型断面	識別記号	高欄	空力対策部材	設置位置等	迎角(deg)
1	旧A	B	なし	なし		0
2						+3
3						-3
4		C1		センターバリア	突出なし	0
5		C2a			上下突出 D/8	0
6		C2b			上下突出 D/4	0
7						+3
8						-3
9		C3a			上のみ突出 D/8	0
10		C3b			上のみ突出 D/4	0
11		C5b			上のみ設置 D/4	0
12		G1		ガイドベーン	D/2	0
13		G2			D/4(平行)+D/2	0
14						+3
15						-3
16		G3			D/4+D/2	0
17		G4			D/2+D/2	0
18		G5			D/4+D/4	0
19		G7			開口に設置	0
20						+3
21						-3
22		F1a		フェアリングプレート	センター・D/8	0
23		F1b			センター・D/4	0
24		F2a			上方・D/8	0
25		F2b			上方・D/4	0
26		F3a			下方・D/8	0
27		F3b			下方・D/4	0
28		F1a'			下センター・D/8	0
29		S		吹き抜け部材		0
30					+導流板	0
31		IF		内側フェアリング		0
32		R	あり	なし		0
33						+3
34						-3
35		RC		センターバリア	上下突出 D/4	0
36						+3
37						-3
38		RC2			中空D/4	0
39		RG		ガイドベーン	開口に設置	0
40						+3
41						-3
42		RG2			D/2	0
43						+3
44						-3
45		RG3			D/4(平行)+D/2	0
46						+3
47						-3
48		RG4			端部フラップ	0
49		RCG		センターバリア+開口ガイド		0
50		RCG2		センターバリア+ガイドD/2		0
51		RCG3		センターバリア+ガイド D/4(平行)+D/2		0
52						+3
53						-3

表－2・2・16　実験ケース（旧Bモデル：桁高4ｍ）

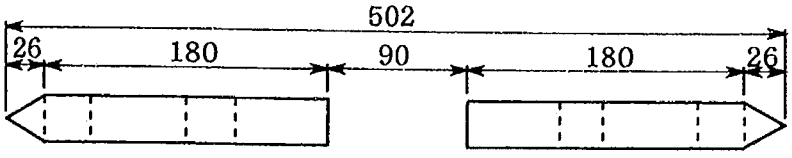
実験ケース	模型断面	識別記号	高欄	空力対策部材	設置位置等	迎角(deg)
1	旧B	B	なし	なし		0
2						+3
3						-3
4		C		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	0
5						+3
6						-3
7		G1		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	D/4(平行)+D/2	0
8						+3
9						-3
10		G2			開口に設置	0
11						+3
12						-3
13		R	あり	なし		0
14						+3
15						-3
16		RC		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	0
17						+3
18						-3
19		RG		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	開口に設置	0
20						+3
21						-3
22		RG2			D/4(平行)+D/2	0
23						+3
24						-3
25		RCG		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ+ｶﾞｲﾄﾞ	D/4(平行)+D/2	0
26						+3
27						-3

縮尺　1/100

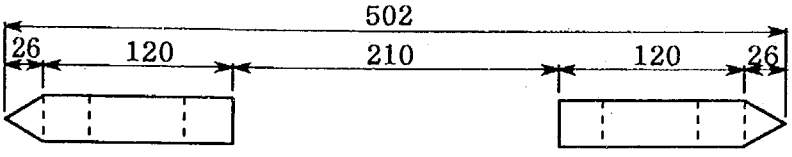
旧Ａモデル（開口率０％）



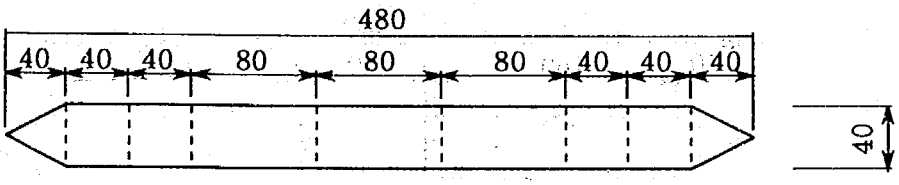
旧Ａモデル（開口率20％）



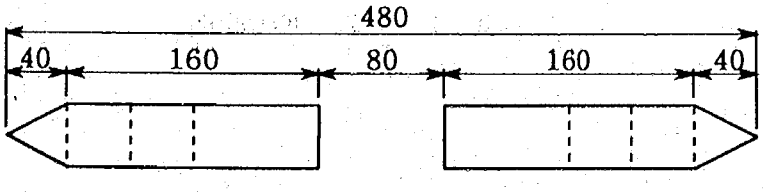
旧Ａモデル（開口率47％）



旧Ｂモデル（開口率０％）



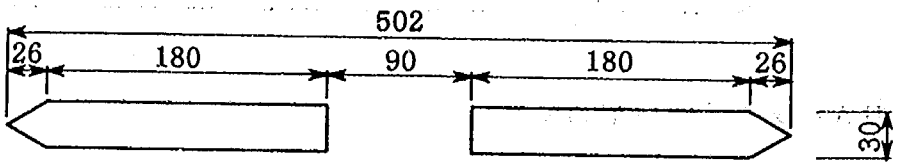
旧Ｂモデル（開口率20％）



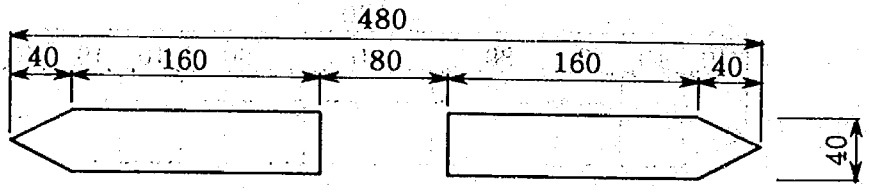
図－２・２・22　模型断面図

縮尺1/100

旧Aモデル



旧Bモデル

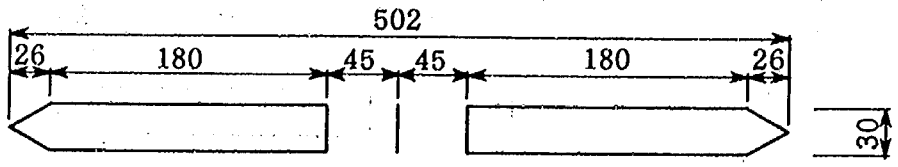


図－2・2・23　模型断面

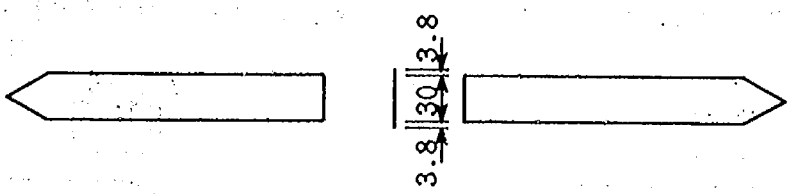
旧Aモデル　センターバリア

縮尺1/100

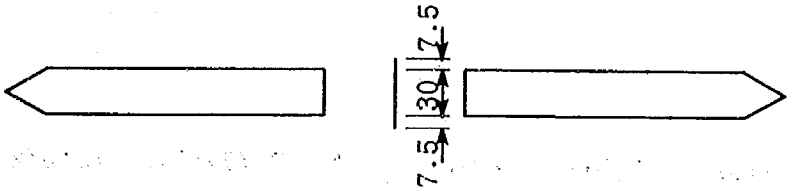
Ⅰ．突出なし（実験ケース４）



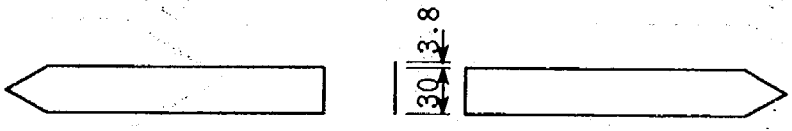
Ⅱ．上下突出　D/8（実験ケース５）



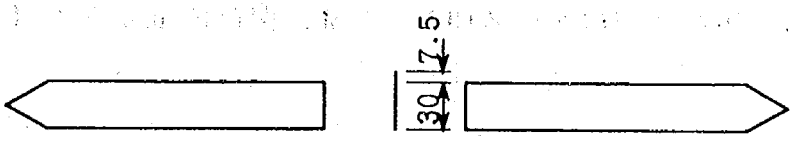
Ⅲ．上下突出　D/4（実験ケース６，７，８）



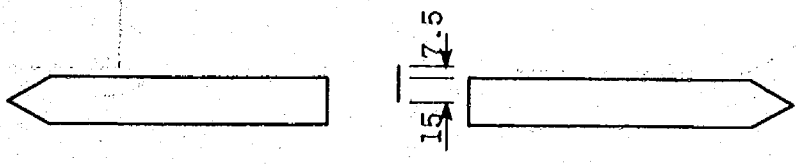
Ⅳ．上のみ突出　D/8（実験ケース９）



Ⅴ．上のみ突出　D/4（実験ケース10）



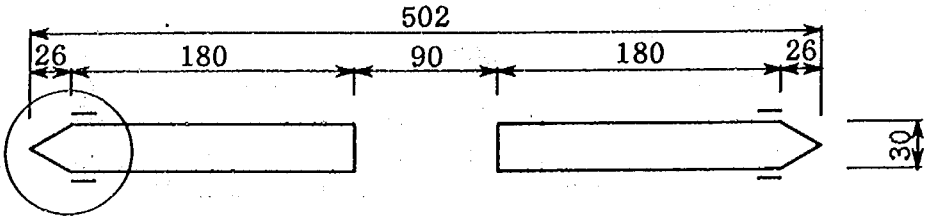
Ⅵ．上のみ設置　D/4（実験ケース11）



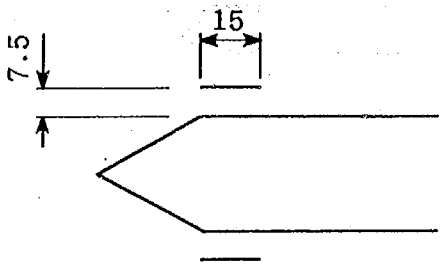
図－2・2・24　旧Aモデル　センターバリア

旧Aモデル　ガイドベーン

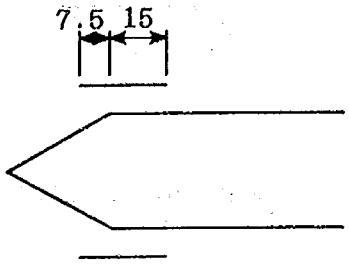
縮尺1/100



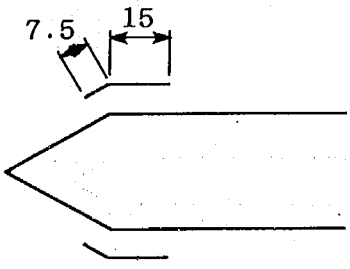
Ⅰ．ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ部 D/2 （実験ケース12）



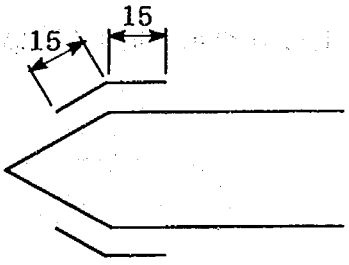
Ⅱ．ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ部D/4(平行)+D/2
（実験ケース13,14.15）



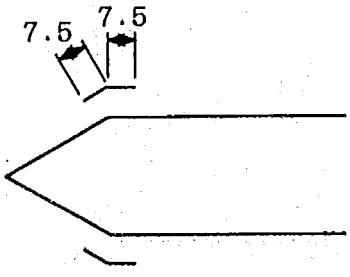
Ⅲ．ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ部 D/4+D/2 （実験ケース16）



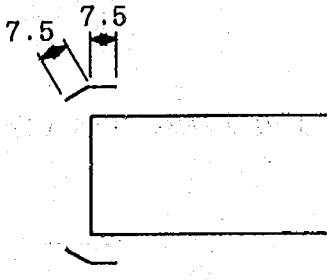
Ⅳ．ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ部 D/2+D/2 （実験ケース17）



Ⅴ．ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ部 D/4+D/4 （実験ケース18）



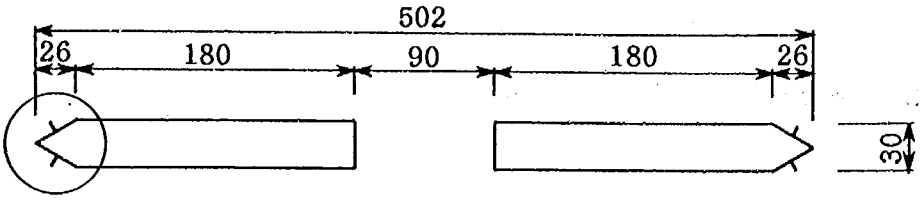
Ⅵ．開口部 D/4+D/4 （実験ケース19,20,21）



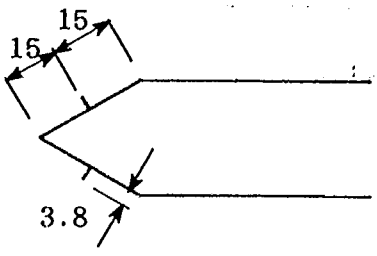
図－2・2・25 旧Aモデル ガイドベーン

旧Aモデル　フェアリングプレート

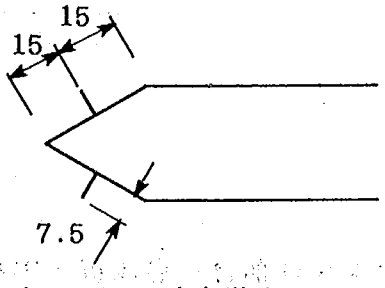
縮尺1/100



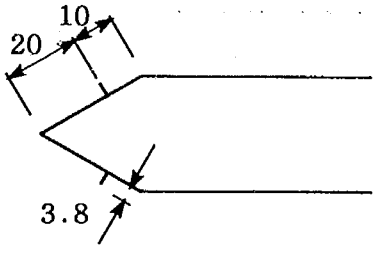
Ⅰ．センター・D/8　（実験ケース22）



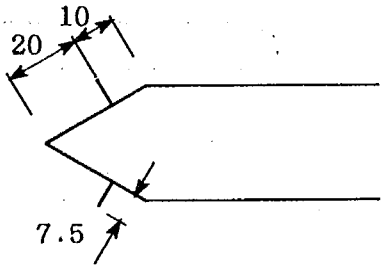
Ⅱ．センター・D/4　（実験ケース23）



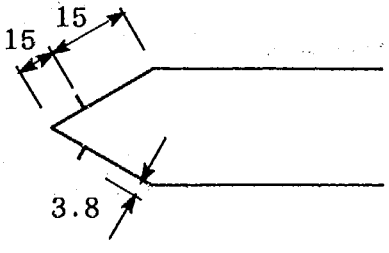
Ⅲ．上方・D/8　（実験ケース24）



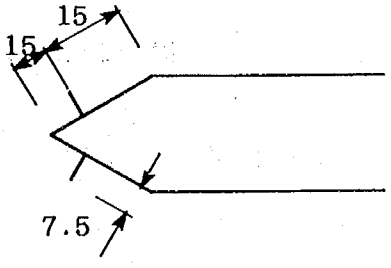
Ⅳ．上方・D/4　（実験ケース25）



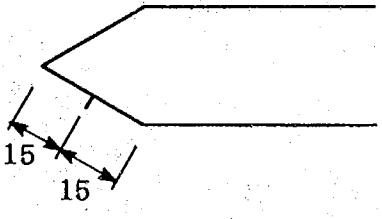
Ⅴ．下方・D/8　（実験ケース26）



Ⅵ．下方・D/4　（実験ケース27）



Ⅶ．センター下のみ・D/8　（実験ケース28）

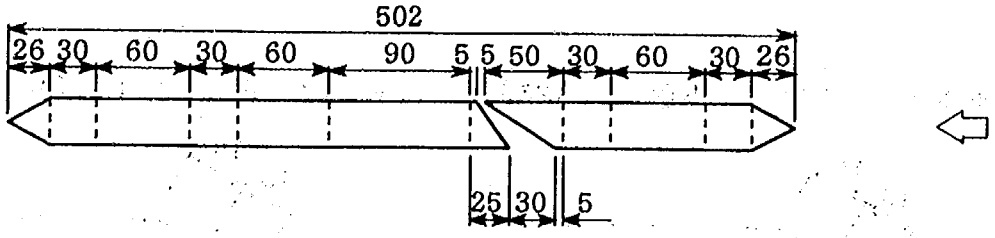


図－2・2・26　旧Aモデル　フェアリングプレート

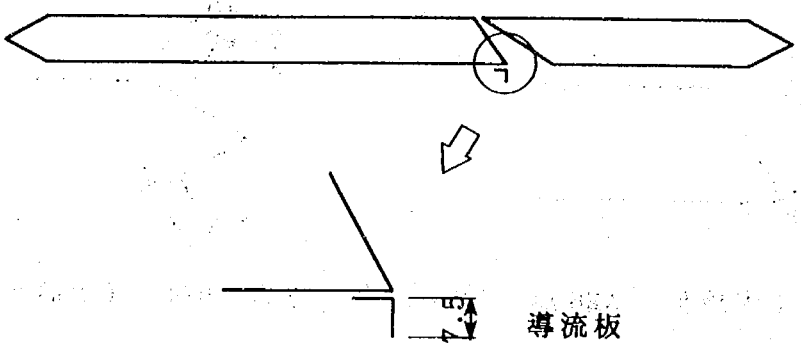
旧Aモデル　吹き抜け部材

縮尺1/100

Ⅰ．吹き抜け部材のみ（実験ケース29）

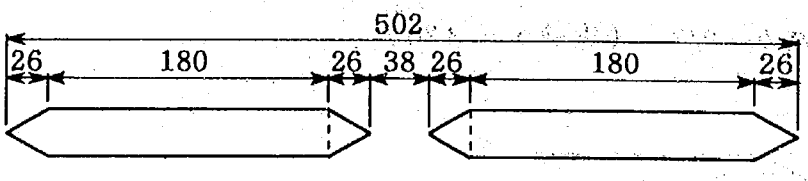


Ⅱ．吹き抜け部材＋導流板（実験ケース30）



図－2・2・27　旧Aモデル　吹き抜け部材

内側フェアリング

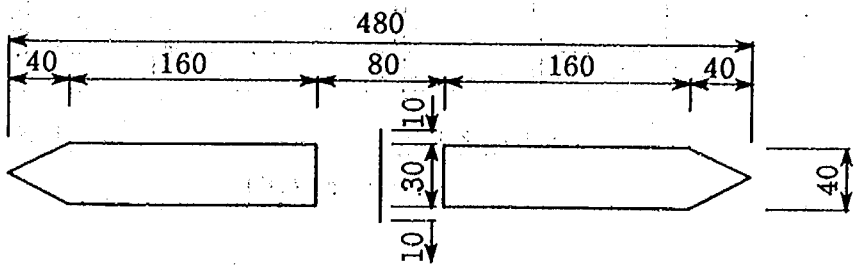


図－2・2・28　旧Aモデル　内側フェアリング

旧Ｂモデル　センターバリア

縮尺1/100

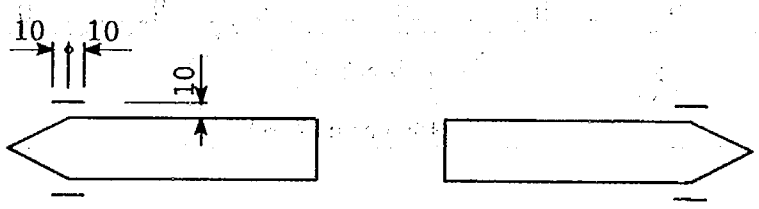
上下突出　D/4（実験ケース４，５，６）



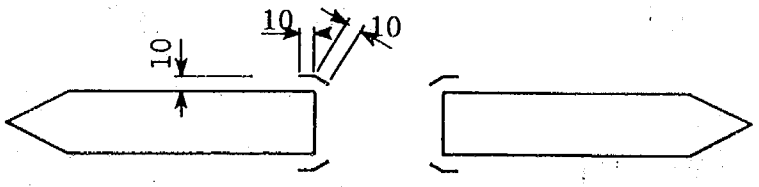
旧Ｂモデル　ガイドベーン

縮尺1/100

Ⅰ．フェアリング部　D/4（平行）＋D/4　（実験ケース７，８，９）



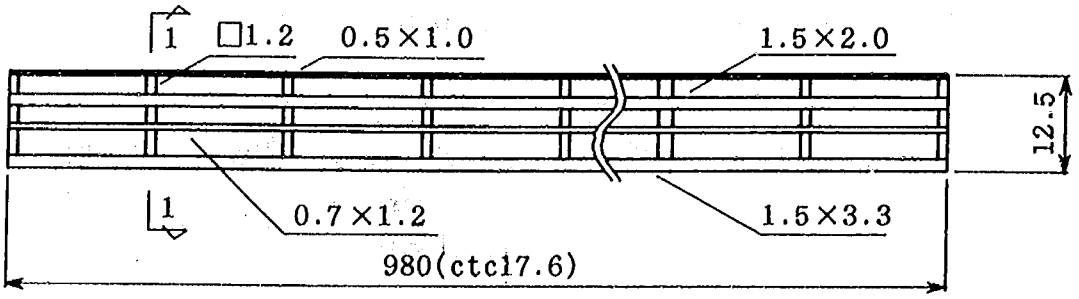
Ⅱ．開口部　D/4＋D/4　（実験ケース10，11，12）



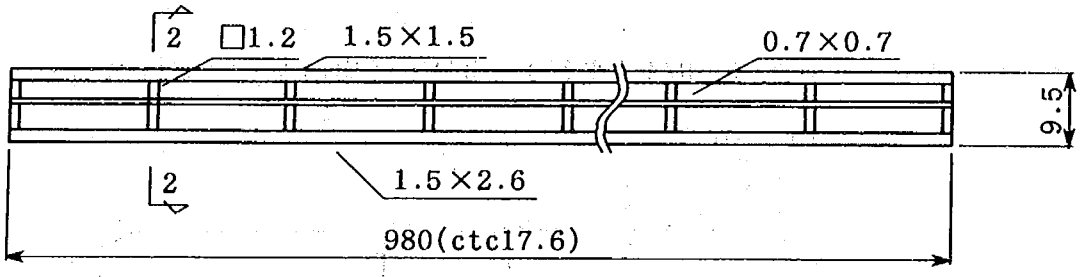
図－2・2・29　旧Ｂモデル　センターバリア・ガイドベーン

旧A，Bモデル高欄　　縮尺　1/100

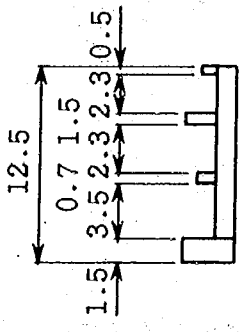
ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ側



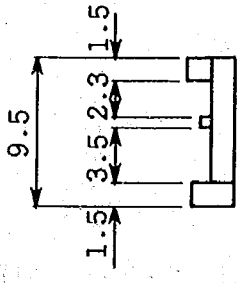
開口部側



1-1



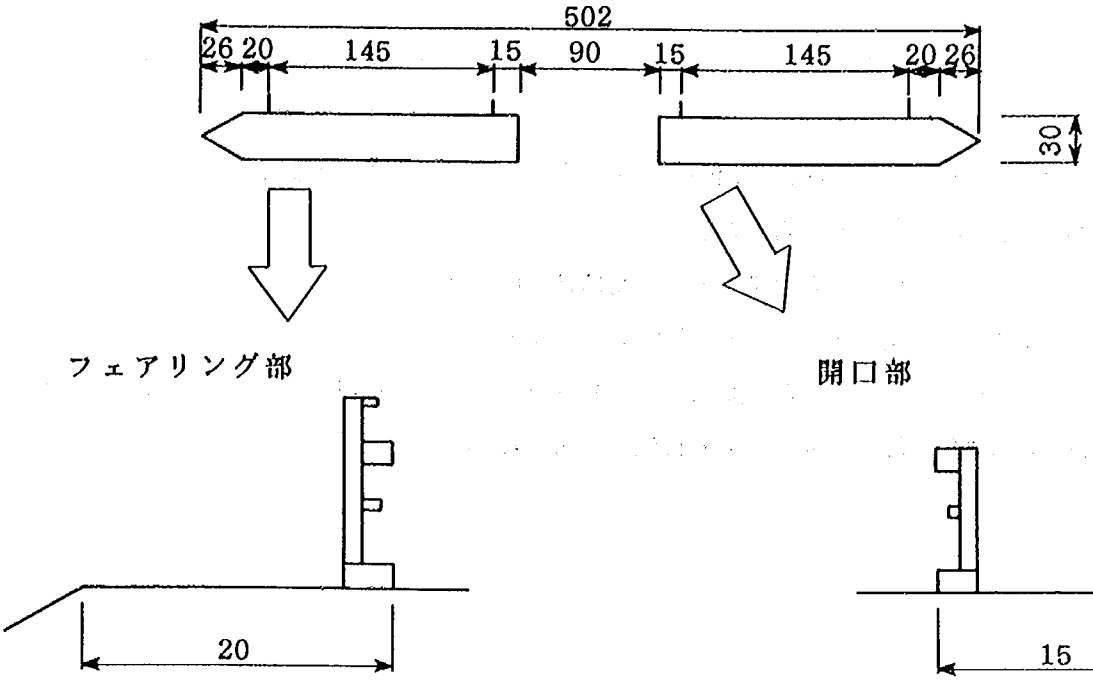
2-2



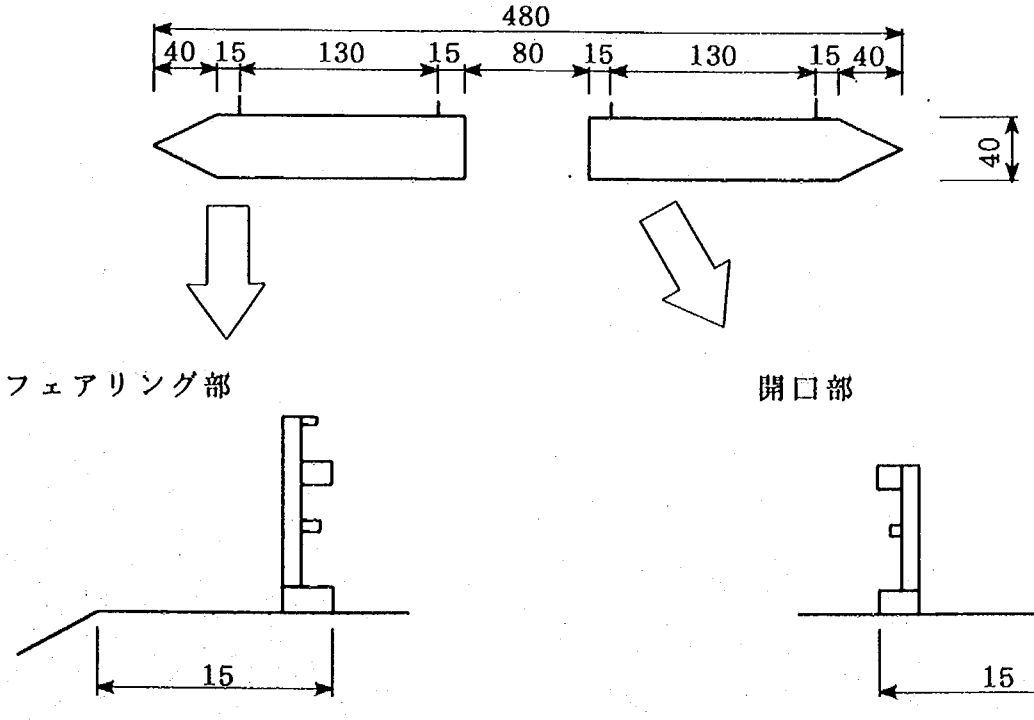
図－2・2・30　高欄

高欄設置位置

旧Aモデル



旧Bモデル



図－2・2・31　高欄設置位置

（3） 実験結果

実験結果を表－2・2・17～2・2・20に示す。結果の要点を以下に示す。

・桁の上下面に突出したセンターバリアは耐風性向上に効果があり、桁面からの突出量が大きいほど効果も大きい。

・ガイドベーンは、フェアリング側に突出のある平板をフェアリング部に設置したもの、くの字型の板を開口部に設置したものに効果が認められた。

・フェアリング・プレートや吹き抜け部材では、耐風性を改善することができなかった。

・迎角－3°を除いて、高欄の設置により耐風性が向上する。

・桁高3m、4mのモデルともに、耐風対策としてセンターバリアと端部ガイドベーンを併用することにより、桁基本断面に対して最大約30%の耐風性改善効果が認められた。

表－２・２・17　実験結果（旧Ａモデル：桁高３ｍ）

実験ケース	模型断面	識別記号	高欄	空力対策部材	設置位置等	迎角(deg)	実橋風速(m/s)	基本断面との比
1						0	60.0	1.000
2		B		なし		+3	59.2	0.986
3						-3	59.1	0.984
4		C1			突出なし	0	60.3	1.004
5		C2a			上下突出 D/8	0	63.0	1.049
6						0	65.8	1.096
7		C2b		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	+3	54.8	0.912
8						-3	65.7	1.094
9		C3a			上のみ突出 D/8	0	61.6	1.025
10		C3b			上のみ突出 D/4	0	62.7	1.044
11		C5b			上のみ設置 D/4	0	62.2	1.037
12		G1			D/2	0	62.6	1.042
13						0	62.4	1.040
14		G2			D/4(平行)+D/2	+3	65.2	1.085
15			なし			-3	63.0	1.049
16		G3		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	D/4+D/2	0	52.9	0.882
17		G4			D/2+D/2	0	56.8	0.946
18		G5			D/4+D/4	0	55.5	0.924
19						0	64.7	1.078
20		G7			開口に設置	+3	60.6	1.009
21						-3	64.0	1.067
22		F1a			ｾﾝﾀｰ・D/8	0	52.8	0.880
23		F1b			ｾﾝﾀｰ・D/4	0	41.9	0.698
24		F2a			上方・D/8	0	47.2	0.787
25	旧Ａ	F2b		ﾌｪｱﾘﾝｸﾞﾌﾟﾚｰﾄ	上方・D/4	0	28.7	0.478
26		F3a			下方・D/8	0	55.2	0.920
27		F3b			下方・D/4	0	49.8	0.830
28		F1a'			下ｾﾝﾀｰ・D/8	0	55.1	0.917
29		S		吹き抜け部材		0	46.4	0.773
30					+導流板	0	46.0	0.767
31		IF		内側ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ		0	53.9	0.898
32						0	63.5	1.058
33		R		なし		+3	72.0	1.199
34						-3	59.1	0.985
35						0	76.2	1.269
36		RC		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	+3	78.0	1.299
37						-3	65.4	1.089
38		RC2			中空D/4	0	66.8	1.112
39						0	67.0	1.117
40		RG			開口に設置	+3	75.1	1.250
41			あり			-3	61.5	1.024
42						0	67.2	1.119
43		RG2		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	D/2	+3	35.7	0.594
44						-3	65.4	1.089
45						0	63.0	1.049
46		RG3			D/4(平行)+D/2	+3	65.7	1.094
47						-3	66.1	1.101
48		RG4			端部ﾌﾗｯﾌﾟ	0	58.0	0.967
49		RCG		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ+開口ｶﾞｲﾄﾞ		0	72.5	1.208
50		RCG2		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ+ｶﾞｲﾄﾞD/2		0	77.7	1.294
51				ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ+ｶﾞｲﾄﾞ		0	76.3	1.271
52		RCG3			D/4(平行)+D/2	+3	75.9	1.264
53						-3	61.5	1.024

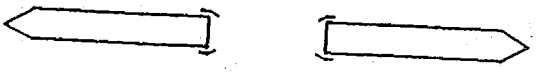
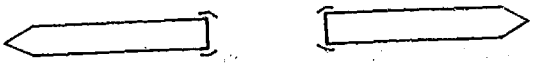
表－２・２・18　実験結果（旧Ｂモデル：桁高４ｍ）

実験ケース	模型断面	識別記号	高欄	空力対策部材	設置位置等	迎角(deg)	実橋風速(m/s)	基本断面との比
1	旧Ｂ	B	なし	なし		0	54.8	1.000
2						+3	55.6	1.014
3						-3	55.2	1.006
4		C		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	0	60.8	1.109
5						+3	61.7	1.125
6						-3	59.5	1.085
7		G1		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	D/4(平行)+D/2	0	60.3	1.099
8						+3	57.1	1.041
9						-3	51.4	0.938
10		G2			開口に設置	0	60.2	1.098
11						+3	60.4	1.102
12						-3	56.8	1.035
13		R	あり	なし		0	55.8	1.018
14						+3	59.8	1.090
15						-3	53.2	0.971
16		RC		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ	上下突出 D/4	0	61.6	1.123
17						+3	68.5	1.250
18						-3	57.6	1.050
19		RG		ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	開口に設置	0	60.4	1.102
20						+3	61.9	1.129
21						-3	57.2	1.044
22		RG2			D/4(平行)+D/2	0	59.3	1.082
23						+3	65.8	1.199
24						-3	58.2	1.061
25		RCG		ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱ+ｶﾞｲﾄﾞ D/4(平行)+D/2		0	70.0	1.276
26						+3	70.7	1.289
27						-3	65.4	1.193

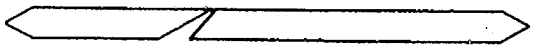
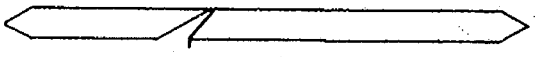
表－2・2・19(a)　実験結果（旧Aモデル：桁高3m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	E	V_{F1}/V_{F1}
1		0°						1.000
2		+3°						0.986
3		−3°						0.984
4		0°		I				1.004
5		0°		II				1.049
6		0°		III				1.096
7		+3°		III				0.912
8		−3°		III				1.094
9		0°		IV				1.025
10		0°		V				1.044
11		0°		VI				1.037
12		0°			I			1.042
13		0°			II			1.040
14		+3°			II			1.085

表－2・2・19(b)　実験結果（旧Aモデル：桁高3m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	E	V_{Fi}/V_{Fi}
15		－3°			II			1.049
16		0°			III			0.882
17		0°			IV			0.946
18		0°			V			0.924
19		0°			VI			1.078
20		＋3°			VI			1.009
21		－3°			VI			1.067
22		0°				I		0.880
23		0°				II		0.698
24		0°				III		0.787
25		0°				IV		0.478
26		0°				V		0.920
27		0°				VI		0.830
28		0°				VII		0.917

表－2・2・19(c)　実験結果（旧Aモデル：桁高３m）

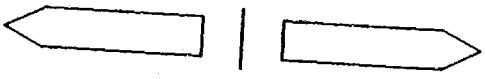
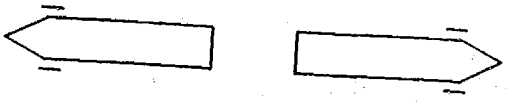
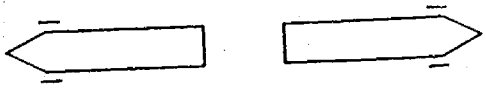
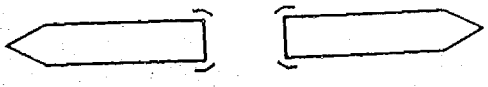
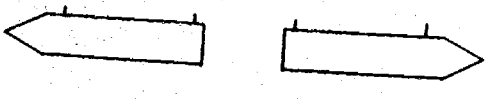
Case No.	模　型　図	迎　角	R	C	G	F	E	V_{F1}/V_{F1}
29		0°					I	0.773
30		0°					II	0.767
31		0°					○	0.898
32		0°	○					1.058
33		+3°	○					1.199
34		−3°	○					0.985
35		0°	○	III				1.269
36		+3°	○	III				1.299
37		−3°	○	III				1.089
38		0°	○	○				1.112
39		0°	○		VI			1.117
40		+3°	○		VI			1.250
41		−3°	○		VI			1.024
42		0°	○		I			1.119

表－2・2・19(d)　実験結果（旧Aモデル：桁高3m）

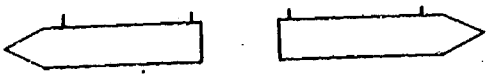
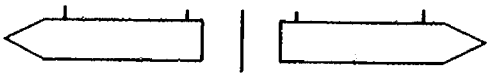
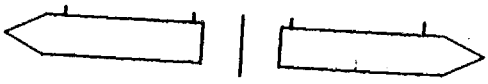
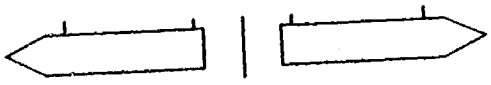
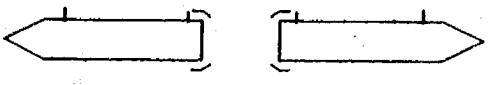
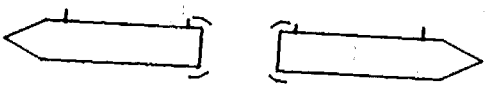
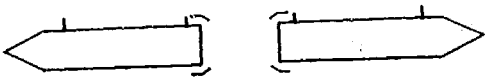
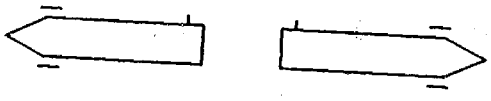
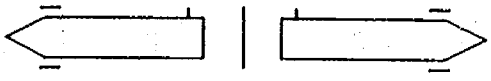
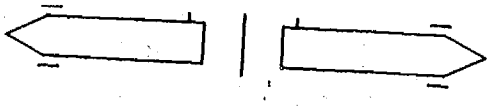
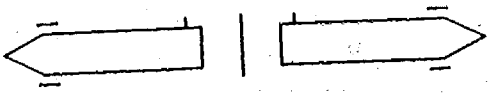
Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	E	V_{F1}/V_{F1}
43		+3°	○		I			0.594
44		−3°	○		I			1.089
45		0°	○		II			1.049
46		+3°	○		II			1.094
47		−3°	○		II			1.101
48		0°	○		○			0.967
49		0°	○	III	VI			1.208
50		0°	○	III	I			1.294
51		0°	○	III	II			1.271
52		+3°	○	III	II			1.264
53		−3°	○	III	II			1.024

R：高欄
C：センターバリア
G：ガイドベーン
F：フェアリングプレート
E：その他

表－2・2・20(a)　実験結果（旧Bモデル：桁高4m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	E	V_{F1}/V_{F1}
1		0°						1.000
2		+3°						1.014
3		−3°						1.006
4		0°		○				1.109
5		+3°		○				1.125
6		−3°		○				1.085
7		0°			I			1.099
8		+3°			I			1.041
9		−3°			I			0.938
10		0°			II			1.098
11		+3°			II			1.102
12		−3°			II			1.035
13		0°	○					1.018
14		+3°	○					1.090

表－2・2・20(b)　実験結果（旧Bモデル：桁高４ｍ）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	E	V_{F1}/V_{F1}
15		－3°	○					0.971
16		0°	○	○				1.123
17		＋3°	○	○				1.250
18		－3°	○	○				1.050
19		0°	○		Ⅱ			1.102
20		＋3°	○		Ⅱ			1.129
21		－3°	○		Ⅱ			1.044
22		0°	○		Ⅰ			1.082
23		＋3°	○		Ⅰ			1.199
24		－3°	○		Ⅰ			1.061
25		0°	○	○	Ⅰ			1.276
26		＋3°	○	○	Ⅰ			1.289
27		－3°	○	○	Ⅰ			1.193

R：高欄
C：センターバリア
G：ガイドベーン
F：フェアリングプレート
E：その他

1） 各種空力対策部材の効果

フラッター限界風速を向上させる目的で多くの空力対策部材を用意し、その効果について調査を行った。なお、「フラッターに対して効果のある空力対策部材を見い出す」という実験の主旨より、限界風速付近の対風応答のみを調べた。渦励振を含む低風速域からの詳細な対風応答については、次節以降の実験に譲った。

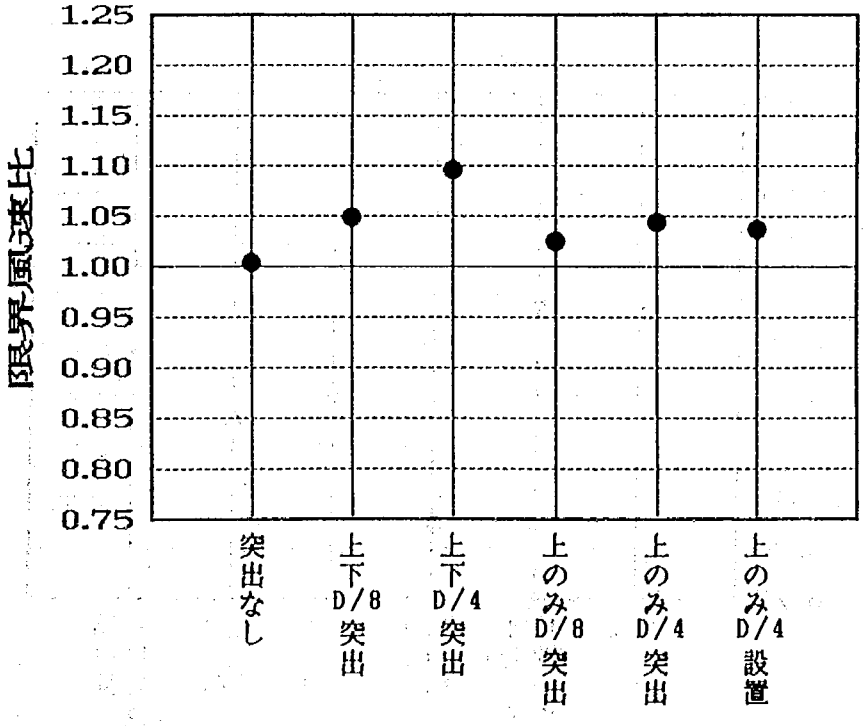
最初に、高欄のない旧Aモデルを用いて、各対策部材の寸法や設置位置による影響を調査した（実験ケース1～31）。以下に各部材ごとのフラッター限界風速の結果を示すが、いずれも無対策の基本断面の限界風速に対する比で示している。

① センターバリア

図－2・2・32にセンターバリア（実験ケース1～11）に関するフラッター限界風速の比較を示す。

まず、桁断面からの突出量についてみる。突出がない場合には基本断面とほとんど変わらない。桁からの突出量を桁高Dの1/8、1/4と大きくするに従い、限界風速も大きくなり、最大で10%程度改善されている。これは迎角α=0°での比較であり、突出なしでは開口部への流れの導入がなく、突出部からの剥離も生じない等の理由によると考えられる。また、限界風速は突出量に比例するように増加しているが、開口部への流れが増加して吹き抜け効果が促されたためなのか、突出部からの剥離パターンが良かったためなのかはこの結果だけでは判断できない。

設置方法については、桁の上下面とも突出させた場合も、上面のみを突出させた場合も突出量に比例して限界風速は増加している。ただし、その改善効果については、後者は前者に比べて半減している。



図－2・2・32 センターバリアの効果

② ガイドベーン

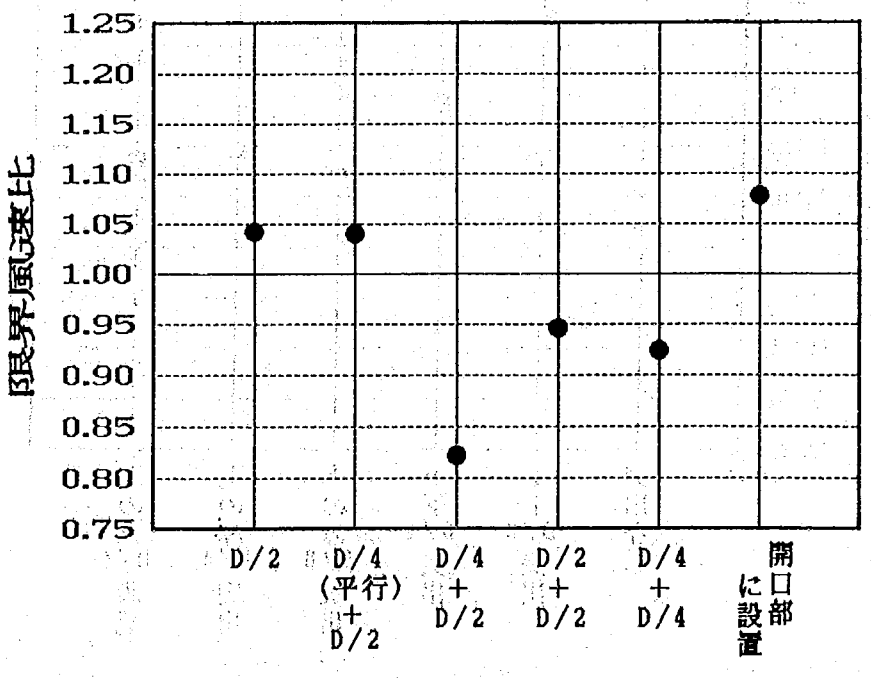
ガイドベーンは、桁端からの剥離渦の形成を抑制してその発達を防ぐことを目的としたものである。図－2・2・33にガイドベーン（実験ケース12～21）に関するフラッター限界風速の比較を示す。

まず、フェアリング側に取り付けたガイドベーンの効果について述べる。用意したガイドベーンの種類は5種類で、図－2・2・25に示すように実験ケース12、13は桁面に平行に配置するもので、実験ケース16、17、18はフェアリングに合わせてくの字形に配置したものである。その配置形状で改善効果が異なり、平行配置のものは限界風速が向上しているが、くの字配置のものはいずれも悪化している。

平行配置のものについては、迎角α=0°に関してはフェアリング部への突出の有無に関わらず、ほぼ同程度の改善効果がみられる。ただし、次項で述べるが、高欄設置の断面で迎角が付いたときには効果に差がみられ、突出のある方が良いようである。

くの字配置のものは、いずれも耐風性が悪化しているのであるが、これは設置高さの影響がある可能性もある。この実験では、ガイドベーン寸法のみをパラメータにして、設置高さについては桁面からD/4に固定した。2．2．4項で述べるCモデルの実験結果からも分かるが、同じ平行ガイドベーンを設置した場合でもその設置高さを低くすると耐風性が大きく悪くなることがある。よって、今回の場合も設置高さが低かったためにガイドベーン内への流れの取り込み状況が悪く、渦剥離を抑制するどころか逆に助長していた可能性もあり、今後検討の余地はある。

また、開口部にガイドベーンを設けた実験ケース19は最も良い改善効果があった。開口部に設置することで開口部隅角部からの気流の剥離が抑制されるために耐風性が向上するとする研究成果もあるが、むしろセンターバリアと同じように開口部の吹き抜けを促進していることも考えられ、そのメカニズムは必ずしもはっきりしない。

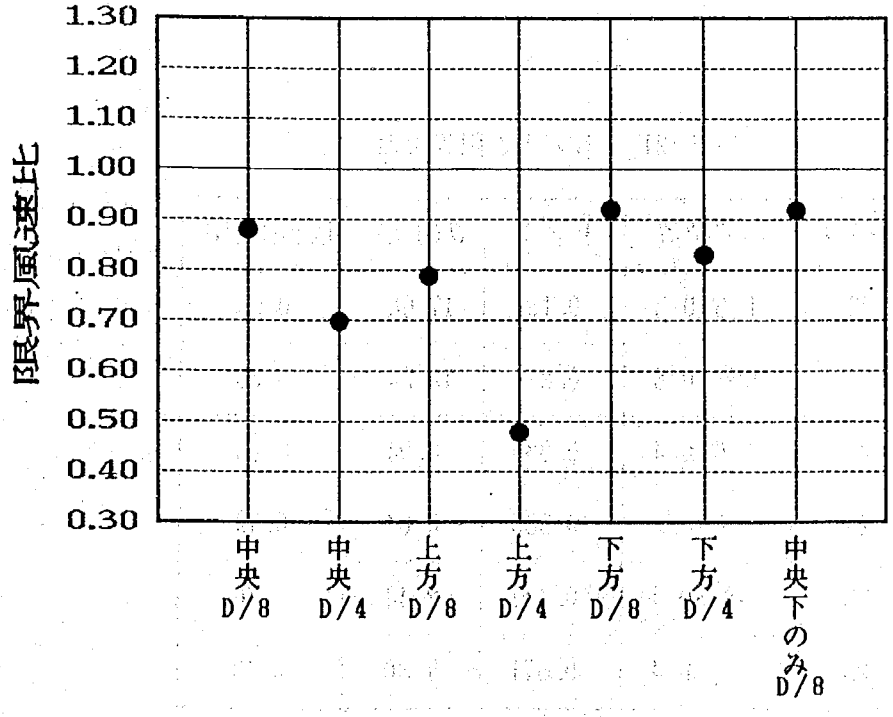


図－2・2・33 ガイドベーンの効果

③ フェアリング・プレート

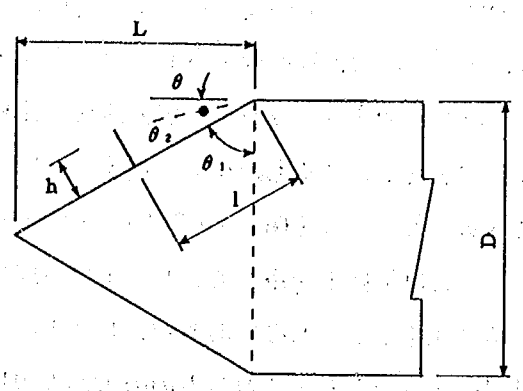
フェアリング・プレートは、ガイドベーンとは逆にフェアリングに設置したプレートからの剥離と桁端からの剥離と干渉させることで限界風速の向上を狙ったものである。来島大橋においては、フェアリングに設置した検査車レールは、その設置位置によっては耐風性を向上させるという報告もある。図－2・2・34にフェアリング・プレート（実験ケース22～28）に関するフラッター限界風速の比較を示す。

結果は、今回実施したケースに限界風速を向上させるものを見い出すことはできなかった。ただ、結果に方向性があるので参考のため以下に述べる。各ケースを図－2・2・35に示すように桁高D、フェアリング長さL、フェアリングプレート高さh、取り付け位置lを用いて、h／lで整理する。表－2・2・21はh／lの小さい順に並べ変えて、併せて限界風速比を示したものであるが、h／lの小さい方が限界風速は大きくなっていることがわかる。剥離干渉効果の小さいと考えられるものの方が限界風速は大きくなっているわけで、極論すればh／l＝0、つまりフェアリングには何もない方が良いという結果になっている。来島大橋の風洞実験でも、検査車レールはフェアリング先端に取り付ける方が良いとの結果も出ており、今回の結果と良く似た傾向を示している。



図－2・2・34 フェアリング・プレートの効果高欄

フェアリング・プレート取り付け位置



D：桁高
L：フェアリング長
h：プレート高さ
l ：取り付け位置

図－2・2・35　フェアリング・プレートの設置位置

表－2・2・21　h／lと限界風速

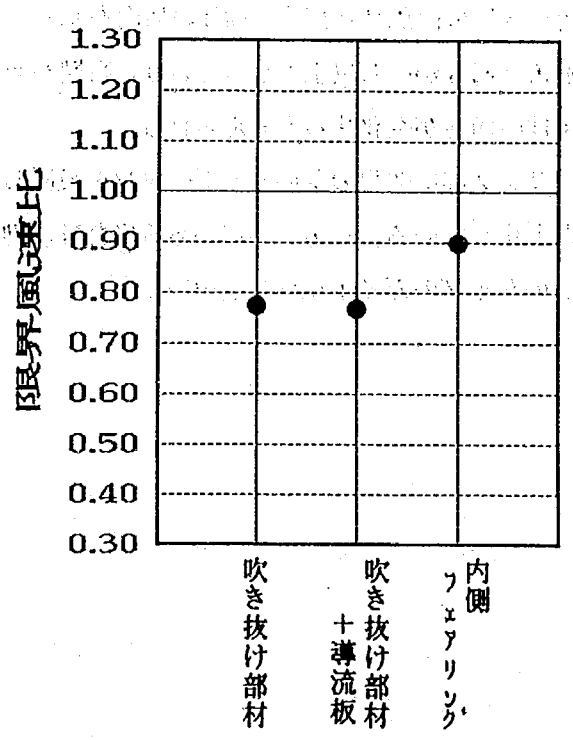
実験ｹｰｽ	設置位置	h／l	θ(deg)	限界風速比
26	下方・D/8	0.167	17.08	0.92
22	ｾﾝﾀｰ・D/8	0.224	13.94	0.88
27	下方・D/4	0.335	8.04	0.83
24	上方・D/8	0.335	8.04	0.79
23	ｾﾝﾀｰ・D/4	0.447	2.48	0.70
25	上方・D/4	0.671	-7.30	0.48

④　その他の対策

図－2・2・36に吹き抜け部材（実験ケース29、30）および内側フェアリング（実験ケース31）に関するフラッター限界風速の比較を示す。

吹き抜け部材は、斜め上方への吹き抜けを促すように図－2・2・27のような部材を桁断面の上流部に設置したものである。吹き出し口のスリット幅を狭くすることで、ジェット的な吹き出し流れを作り、剥離の干渉でフラッター限界風速を向上させることを意図したものである。しかしながら、限界風速比は0.77と悪化した。これは、実質的に桁の開口幅が小さくなっていることが原因と思われる。昨年度の実験結果によれば、旧Aモデルにおける開口率0％と20％の断面の限界風速比は0.73（40m/s÷55m/s）であり、今回の結果に近いものとなっている。つまり、吹き抜け効果よりも開口部閉塞の影響が大きいために、開口率0％の1箱桁断面に近い結果になったものと考えられる。

内側フェアリングは、開口部にも桁端と同じフェアリングを設置して、開口部の流れのパターンを変えることで限界風速の向上を狙ったものであるが、これも限界風速は小さくなった。原因は吹き抜け部材と同じで、開口部にフェアリングを設置したときの開口率は8％程度と狭くなっているためと考えられる。



図－2・2・36　その他の対策

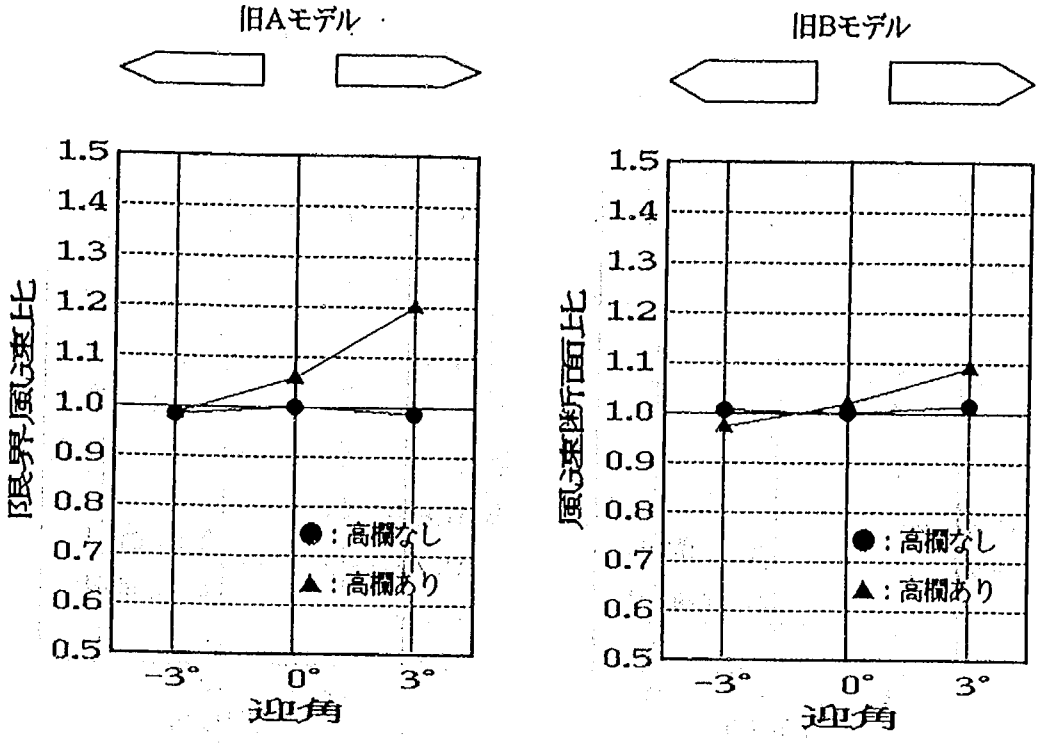
2）　高欄と迎角変化の影響

前項の結果を踏まえて、より現実的な桁断面を想定した高欄付きの断面に効果のあった空力対策部材を設置するとともに、迎角を$\alpha = \pm 3°$に設定して効果の比較を行った。使用した対策部材は、上下にD/4突出したセンターバリア、桁面に平行設置したガイドベーン、開口部に設置したガイドベーンの3種類とその組合せである。図－2・2・37～2・2・42に高欄の影響および迎角の影響を合わせて示す。なお、図－2・2・41の旧Aモデルにおける迎角－3°での実験では、ダウンフォースが強くバネの伸びが大きくなったため、それ以上風速上げなかったためであり、図示の値が限界風速を示すものではない。

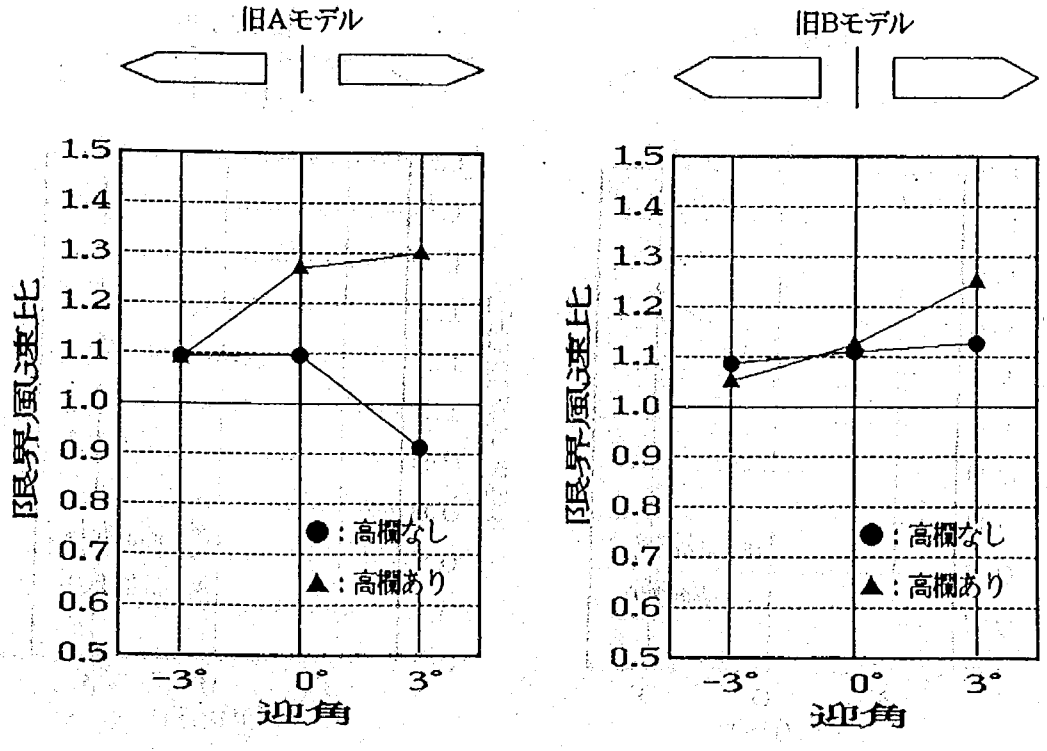
高欄の影響に関する一般的な傾向として、迎角3°における耐風性が向上していることが挙げられる。可視化実験を参考にすれば、高欄は上端からの剥離渦を生成するというよりも横桟間を抜ける流れが桁への再付着を促しているようであり、バネ支持実験でもダウンフォースが作用していた。よって、迎角3°では風速の増加にともなって迎角が大きくなろうとするのを高欄が抑制して、結果的に耐風性が向上しているようである。ただし、高欄は縦桟の影響が大きいことが後の実験で分かっており、上記考察は参考である。

迎角変化による耐風性に着目すると、高欄のない上下対象断面ではセンターバリア付きの断面を除いて、おおよそ対称性が見られる。しかし、高欄を設置した断面では上下の対称性が崩れることもあって、迎角－3°での耐風性が悪くなっている。図－2・2・43は明石海峡大橋や来島大橋の桁断面として検討された2箱桁断面の迎角特性を示したものであるが、桁幅・桁高比B／D＝10程度の薄い断面においては今回の実験（B／D＝16.7）と同様に迎角－3°の耐風性が悪く、同様の傾向を示している。逆にB／Dが小さくなると迎角－3°の耐風性は他の迎角と同等かそれ以上となっており、高欄を設置した断面においては桁のB／Dによって迎角変化による耐風性の傾向が変化すると考えられる。

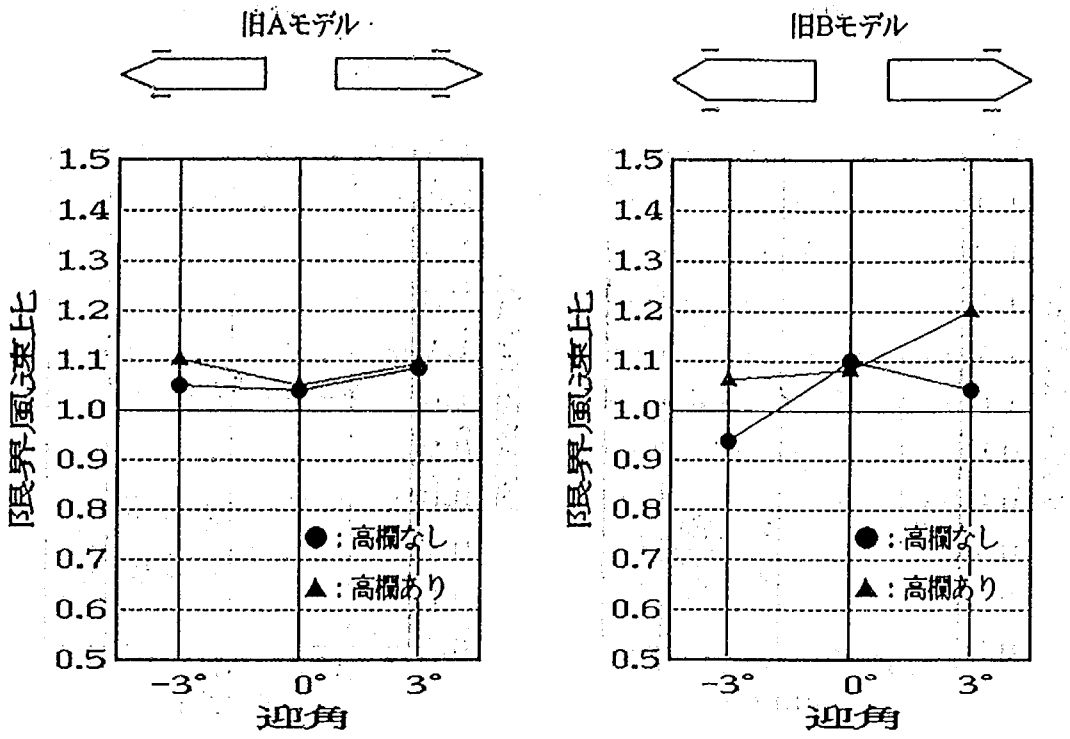
また、図－2・2・42はフェアリング部に突出のないガイドベーンを設置したときの迎角特性を示しているが、迎角3°で大きく耐風性が悪化している。一方、突出がある場合は、迎角が変化しても耐風性に大きな変化はなく、以降の実験ではこのタイプのガイドベーンを用いた。



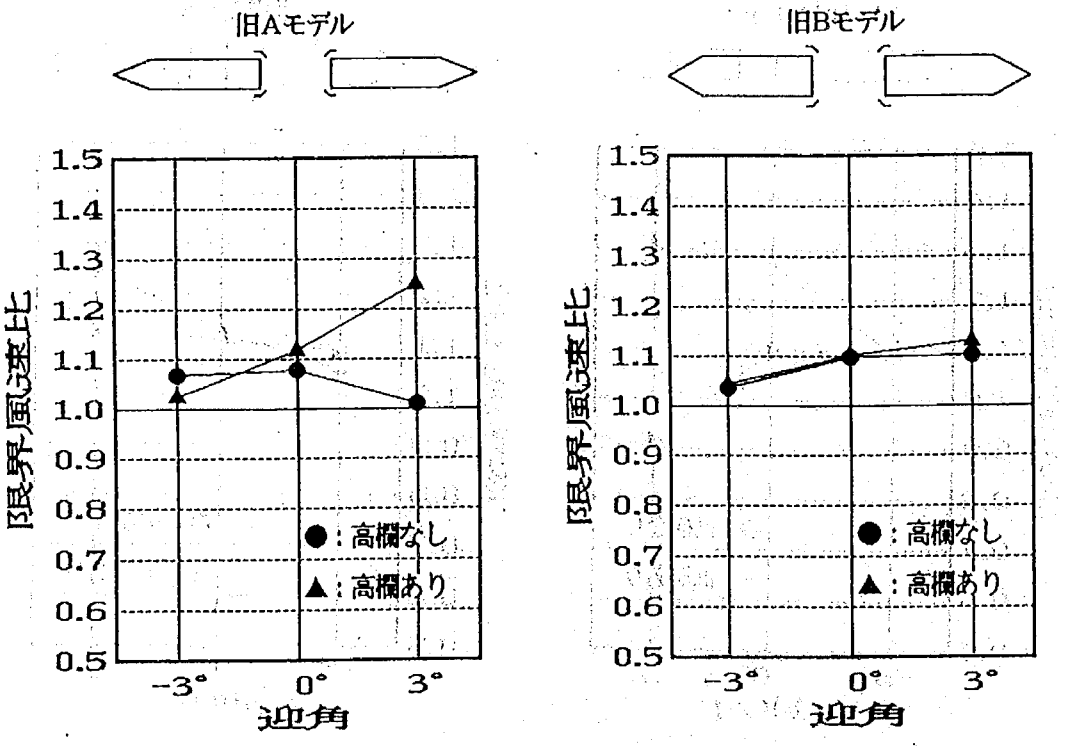
図－2・2・37　基本断面の耐風性



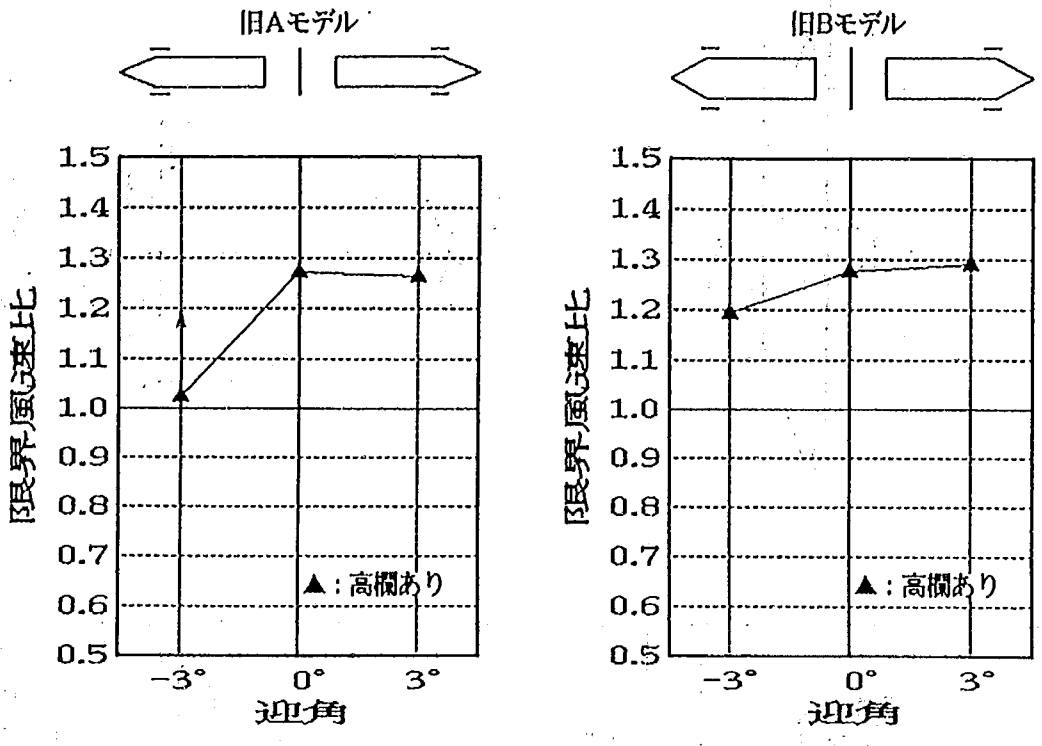
図－2・2・38　センターバリア付き断面の耐風性



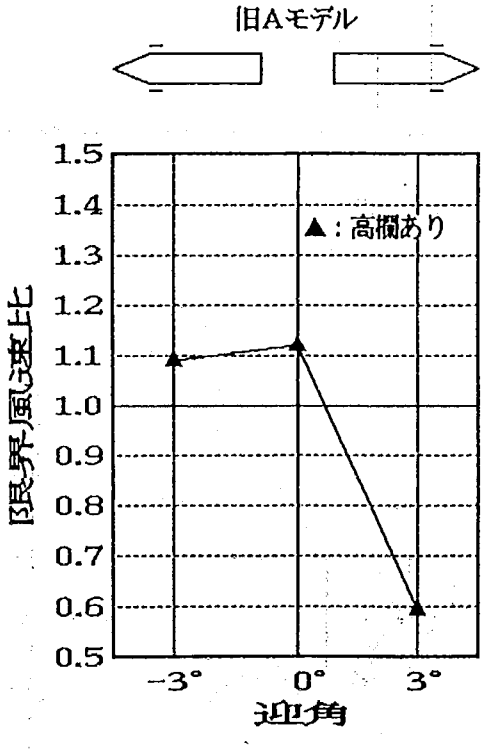
図－2・2・39　フェアリング部ガイドベーン付き断面の耐風性（その１）



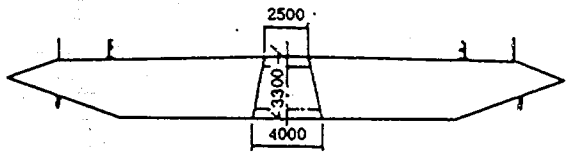
図－2・2・40　開口部ガイドベーン付き断面の耐風性

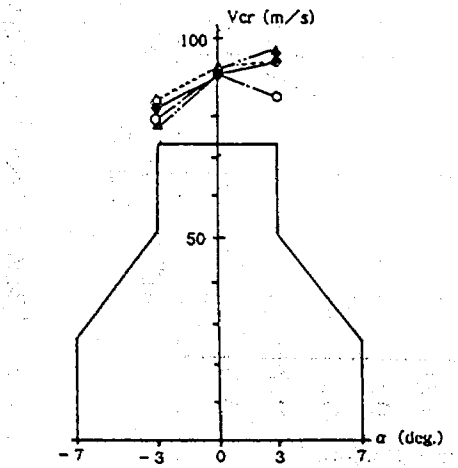


図－2・2・41　センターバリア＋ガイドベーン付き断面の耐風性



図－2・2・42　フェアリング部ガイドベーン付き断面の耐風性（その２）





a) 防護ネットの影響 (管理路は開口部に設置)

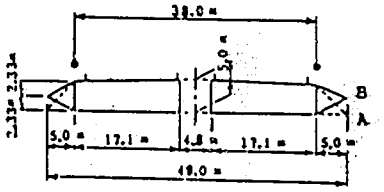
α	基本形	ネット15%	管理路設置 ネット15%	管理路設置 ネット30%
+3°	1.09	1.19	1.18	1.23
0°	1.15	1.15	1.15	1.18
−3°	1.00	1.04	1.05	0.98

図－13 二箱桁断面の耐風性（一様流）

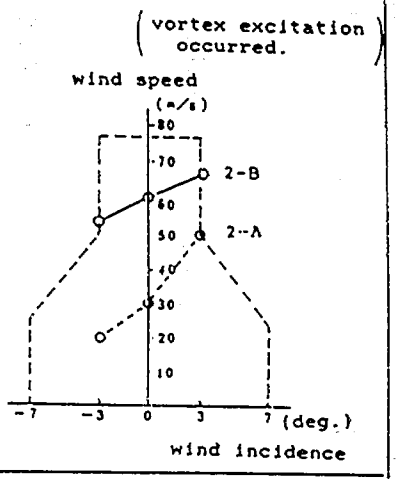
$B/D = 32.3/3.3 = 9.79$

9

2-boxes

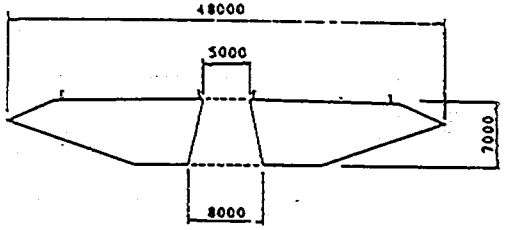


5



54

$B/D = 49.0/5.0 = 9.80$



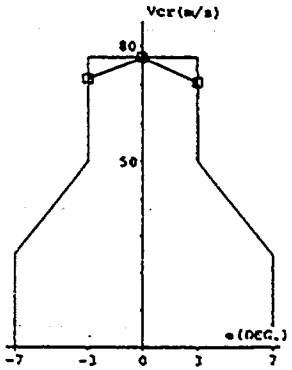


図11 $V_{cr}-\alpha$図
(Model 3-7)

$B/D = 48.0/7.0 = 6.86$

図－2・2・43 2箱桁断面の耐風性

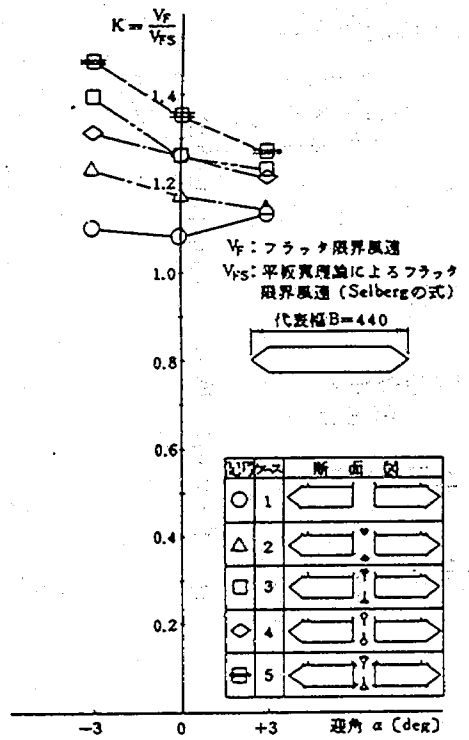


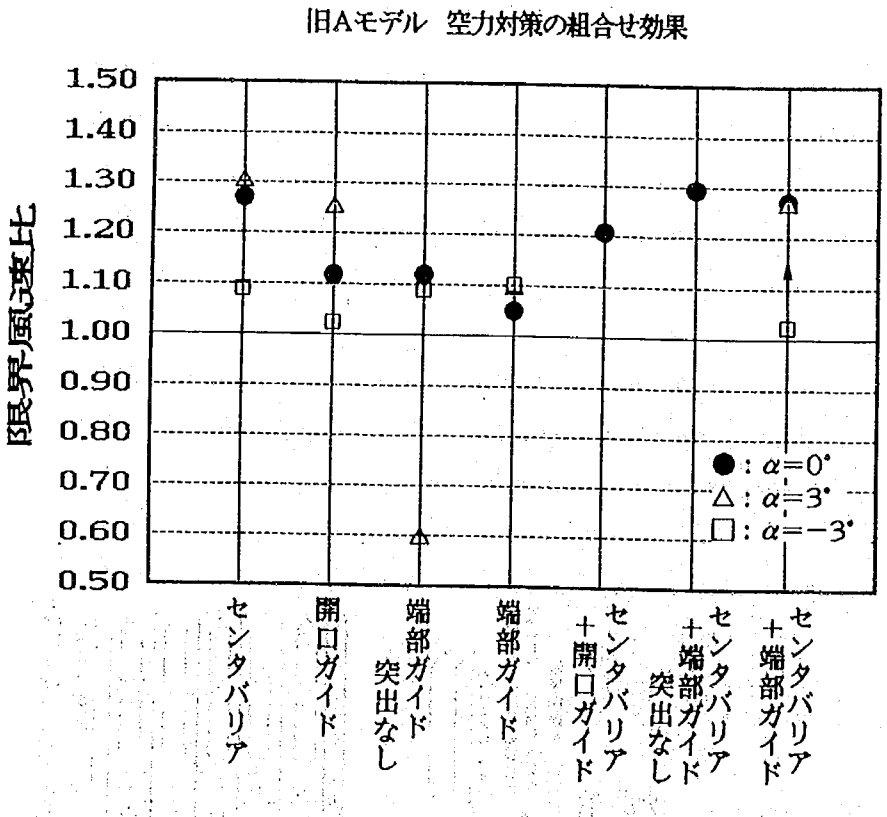
図5　α－K図（実橋を想定した箱桁断面）

$B/D = 44/7 = 6.29$

3） 空力対策の組合せ効果

図－2・2・44は効果の認められた空力対策の組合せにより、さらに耐風性が向上するかを検討したものである。まず、迎角0°での比較を行うと、センターバリアおよびセンターバリアと端部ガイドベーンを併用したものの耐風性が良い。センターバリアと開口部のガイドベーンを併用したものは、センターバリアのみよりも耐風性が劣る。両者はともに開口部周辺の流れを操作するものであり、それぞれの効果の足し算にはならなかったものと思われる。また、端部ガイドベーンとの組合せでは、フェアリング部に突出のないものの方が耐風性が良い。しかし、突出なし端部ガイドベーンのみの実験結果から迎角3°の耐風性が悪くなると考えられる。

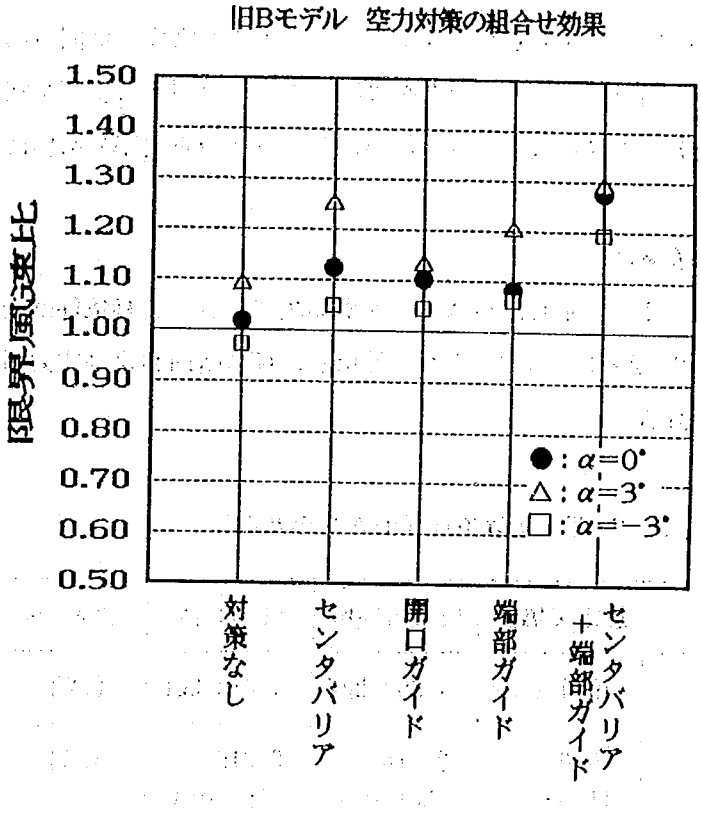
また、センターバリアと端部ガイドベーンを組合せても、センターバリアのみの場合と比較して、フラッター限界風速に関する限り、耐風性が改善されてはいない。しかし、組合せたものは、高風速域におけるたわみ成分の振動安定性が非常に良いという特徴がある。



図－2・2・44 空力対策の組合せ効果

4） 旧Bモデルの耐風性

図－2・2・45は桁高4mの高欄付き旧Bモデルを用いて、空力対策の組合せ効果を含めた耐風性の検討を行ったものである。傾向としては旧Aモデルとほぼ同じであり、各対策単独の耐風性では、センターバリア、開口ガイドベーン、端部ガイドベーンの順に限界風速は高くなっている。ただ、組合せた場合には、旧Aモデルではセンターバリア単独のものと耐風性に大きな差がなかったのに比較して、旧Bモデルでは大きく改善されている。さらに、迎角－3°でも比較的高い耐風安定性が得られていることが特徴である。



図－2・2・45 旧Bモデル 空力対策の組合せ効果

2．2．3　2箱桁改良断面に関する実験（その１）

（１）　実験内容

本実験では、先の実験において有効性の認められた対策を施した断面について、より具体的な設計案の絞り込みを行うことを目的とした。主な調査項目は以下の３つである。

① 開口率の決定

② 有効な対策の調整

③ 現実的な部材の影響調査

実験は旧Ａ模型を改造することにより行った。①については開口部に付加部材を設置することにより開口率（20%、25%、30%）および開口部の形状の異なる断面について調査を行った。②についてはセンターバリア高さやフェアリング形状の影響を調査した。③については実際の橋梁では開口部に桁間トラス等の部材が設置されることを考慮して、開口部グレーチングを設置して、その閉塞の影響を調査した。

また、高欄が耐風性に及ぼす影響が大きかったため、その形状や充実率の影響についても調査した。

（２）　実験方法および実験条件

実験方法は、２．２．１（２）で示したバネ支持模型実験である。実験条件は表－２・２・22の通りである。実施した実験ケースを表－２・２・23に示す。また、使用した模型断面および空力対策部材は図－２・２・46～図－２・２・53に示す通りである。

表－２・２・22　実験条件（旧Ａモデル改）

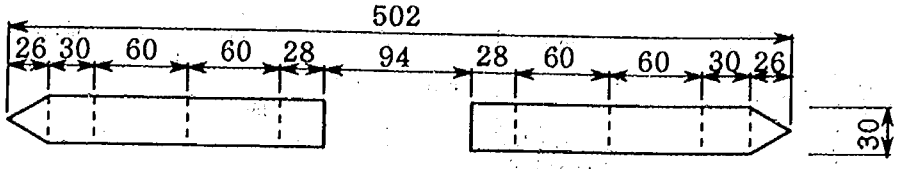
		想定実橋値	模型所要値	計 測 値	誤差(%)
重　　量		49.0 tf/m	4.802 kgf	4.813 kgf	0.23
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1620 tf•m•s²/m	0.016 kgf•m•s²	0.0163 kgf•m•s²	1.88
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16	1.174	——
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44	2.471	——
振動数比		2.10	2.10	2.105	0.24
構造減衰	たわみ	0.02	0.02	0.0196	——
	ねじれ	0.02	0.02	0.0201	——
風速倍率	たわみ	——	——	4.237	——
	ねじれ	——	——	4.242	——

表－2・2・23　実験ケース（旧Aモデル改：桁高３ｍ）

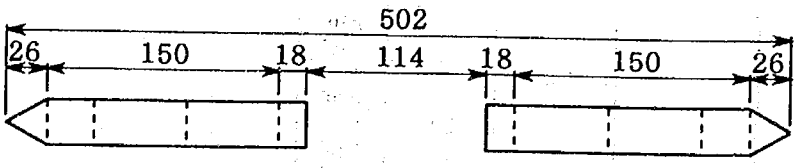
実験ケース	模型	迎角	開口率	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	グレーチング	中央ガイド	重量	極慣性	実験種別
0	旧A改	0°	25%	上面のみ	45mm	なし	30°	なし	なし	標準(49tf)	標準(1620)	標準
1		0°				あり						標準
2		0°								軽量(42tf)	1561	簡易
3		0°						45%				簡易
4		+3°										標準
5		-3°										標準
6 a		-3°			50mm(10+10)							効果
6 b					50mm(15+5)							
7		0°			なし	なし			あり			標準
8		-3°	30%		45mm	あり		なし	なし			簡易
9 a		-3°	20%斜									効果
9 b			25%斜									
10		-3°	20%							標準	標準	簡易
11 a		-3°	25%				上20°	45%				効果
11 b							下20°					
11 c							上10°					
11 d							下10°					
12 e		-3°					30°					簡易
12 a							上20°					効果
12 b						なし	下20°					
12 c							上10°					
12 d							下10°					
13 a		-3°	25%			下のみ	30°	45%	なし			効果
13 b						上のみ						
14 f		0°		上流上下内外		あり						効果
14 c		-3°		上流上下内外								
14 h				3段横桟なし								
14 i				1、3段横桟なし								
14 g				上流上下内外		高さ変更						
14 d				上流上下外		あり						
14 j				なし								
14 k				閉塞								
14 l				ポストのみ								
14 m				ポスト間引き								

旧Aモデル改　　縮尺　1/100

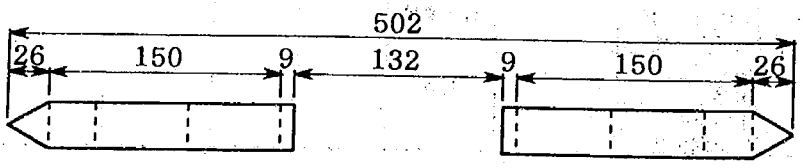
開口率20％（実験ケース10）



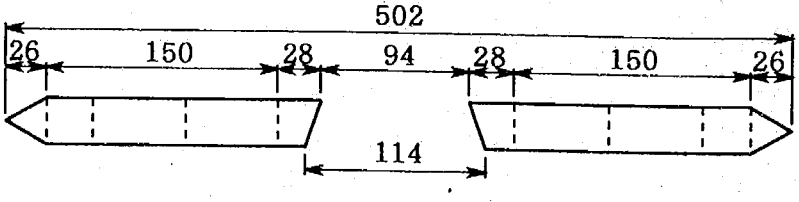
開口率25％（実験ケース多数）



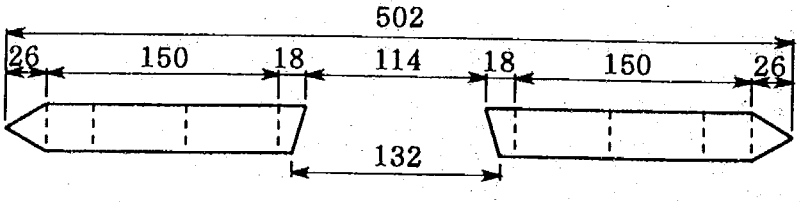
開口率30％（実験ケース８）



開口率20％斜（実験ケース９－ａ）



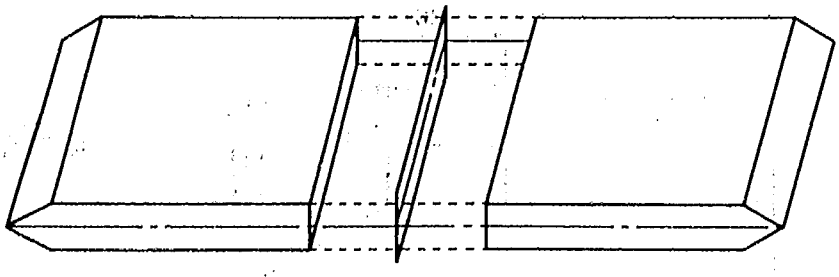
開口率25％斜（実験ケース９－ｂ）



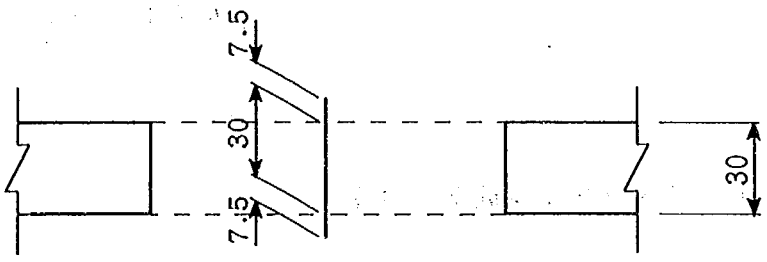
図－２・２・46　模型断面

旧Aモデル改　センターバリア

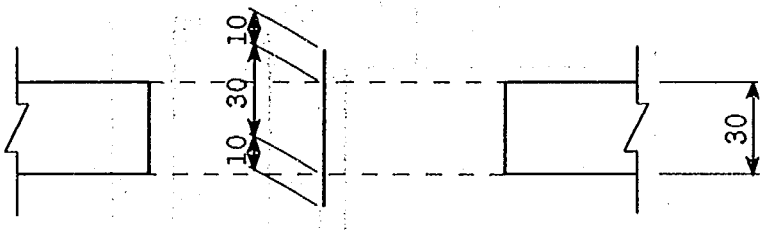
縮尺　1/100



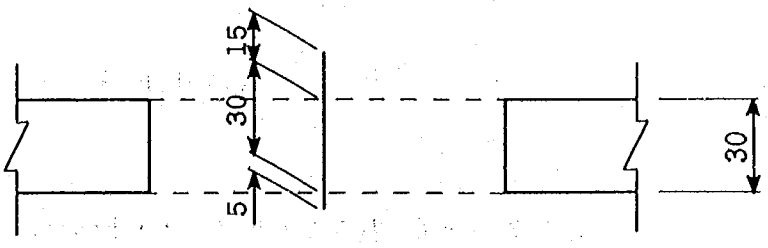
Ⅰ．H＝45㎜（上下ともD/4突出型、実験ケース多数）



Ⅱ．H＝50㎜（上下ともD/3突出型、実験ケース6-a）



Ⅲ．H＝50㎜（上D/2・下D/6突出型、実験ケース6-b）

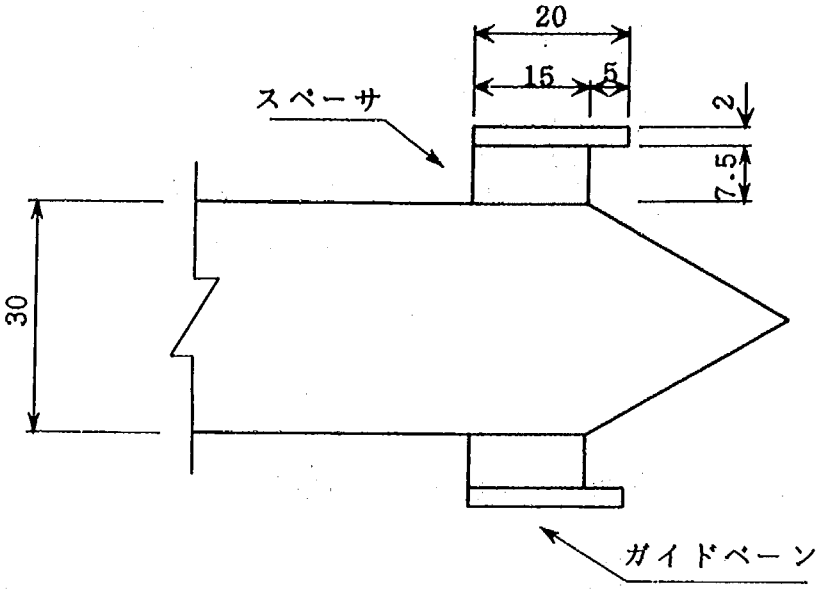


図－2・2・47　旧Aモデル改　センターバリア

旧Aモデル改　ガイドベーン

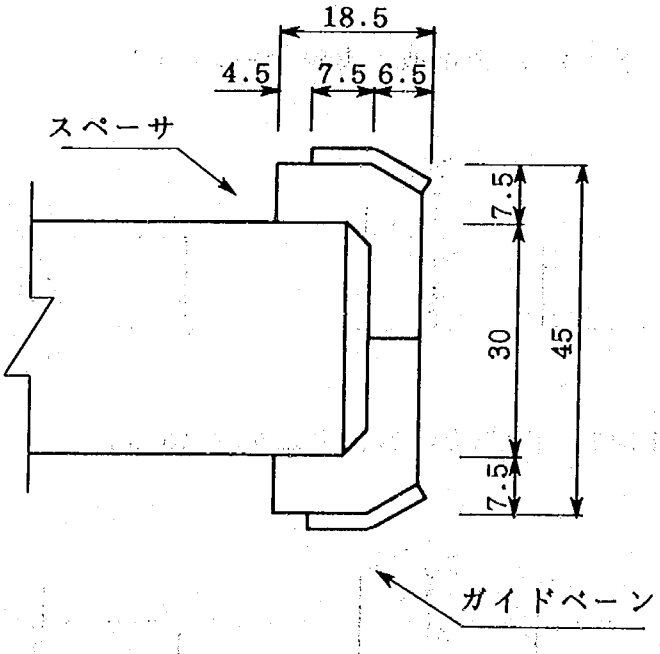
縮尺　1/100

Ⅰ．上流ガイドベーン



設置高さ　D/4

Ⅱ．中央ガイドベーン（実験ケース７）



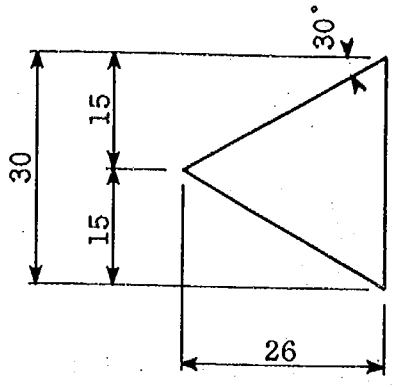
設置高さ　D/4

図－2・2・48　旧Aモデル改　ガイドベーン

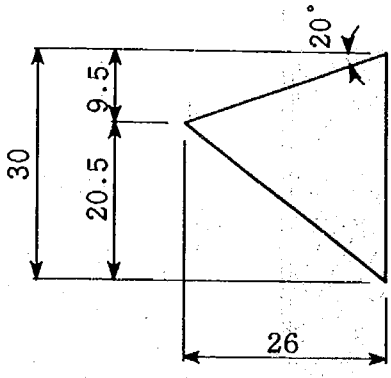
旧Aモデル改　フェアリング

縮尺　1/100

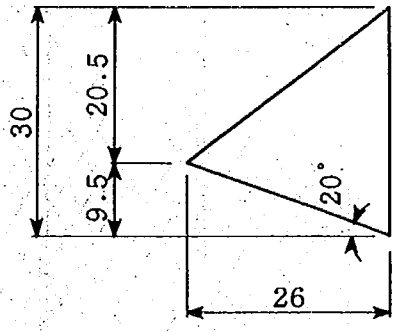
Ⅰ．θ＝30°（実験ケース多数）



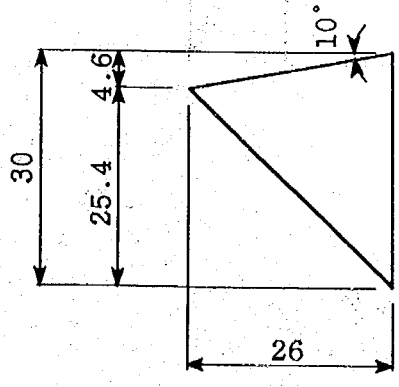
Ⅱ．θ＝上20°（実験ケース11-a、12-a）



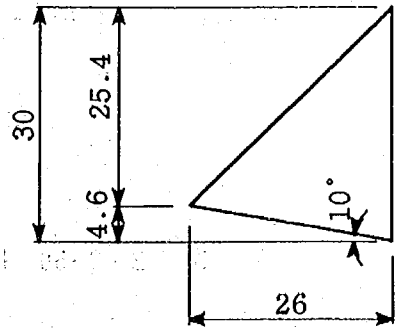
Ⅲ．θ＝下20°（実験ケース11-b、12-b）



Ⅳ．θ＝上10°（実験ケース11-c、12-c）



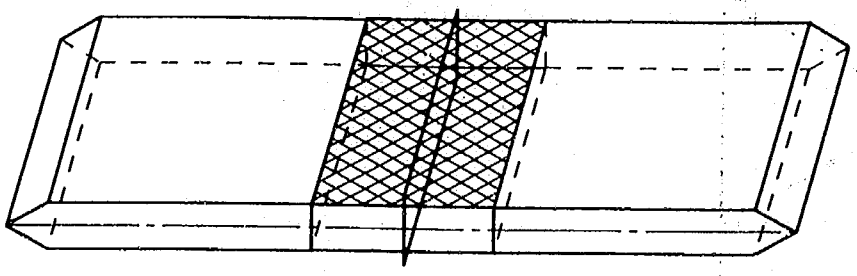
Ⅴ．θ＝下20°（実験ケース11-d、12-d）



図－2・2・49　旧Aモデル改　フェアリング

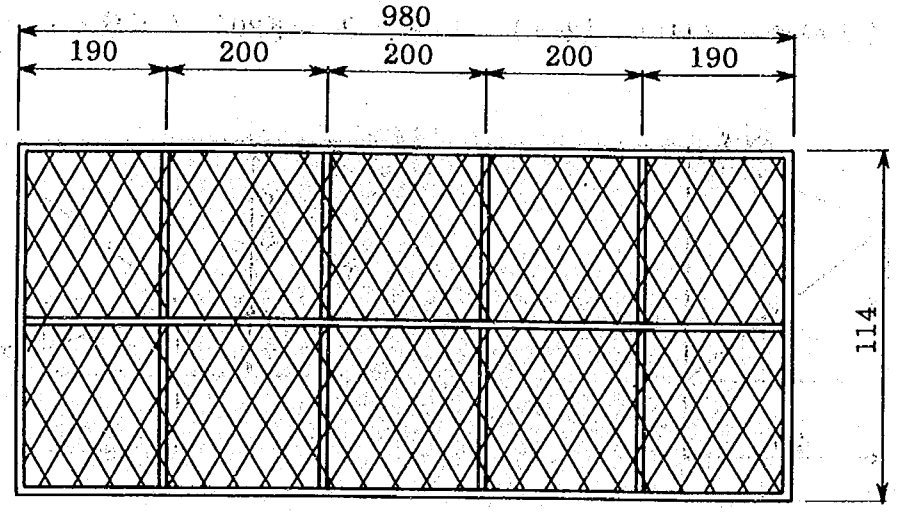
旧Aモデル改　グレーチング

縮尺　1/100

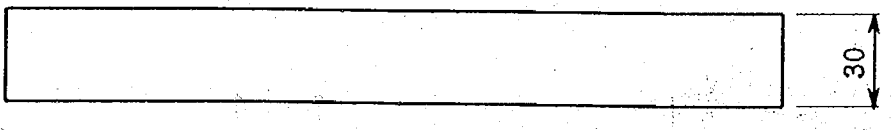


充実率45％（上下面とも）

平面図



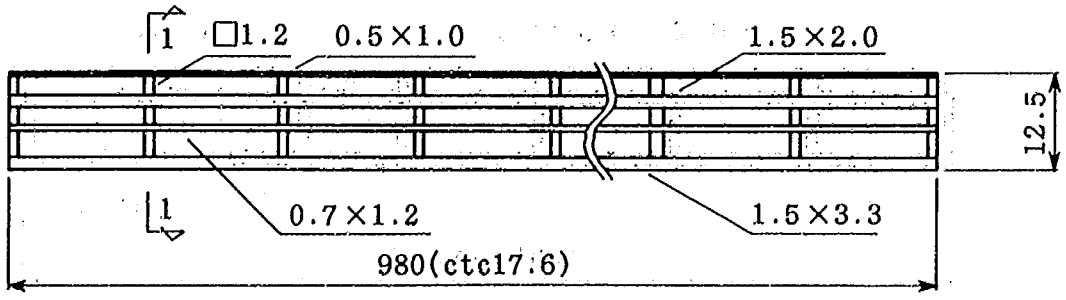
側面図



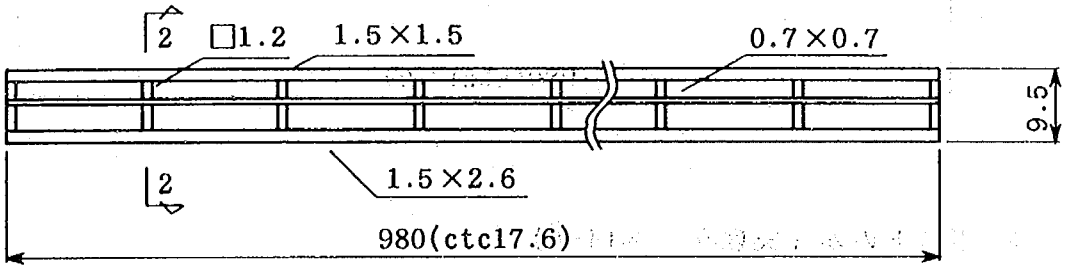
図－2・2・50　旧Aモデル改　グレーチング

旧Aモデル改 高欄　　縮尺 1/100

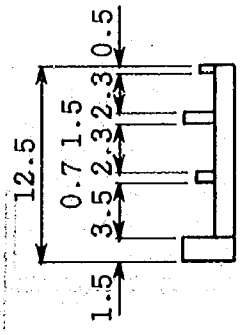
Ⅰ.ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ側



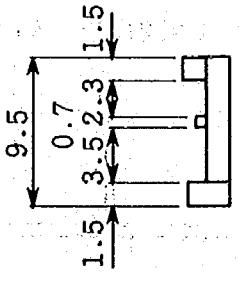
Ⅰ.開口部側



1-1



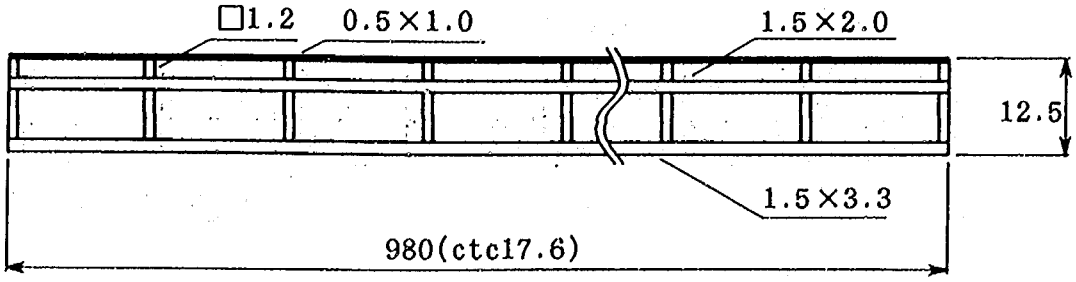
2-2



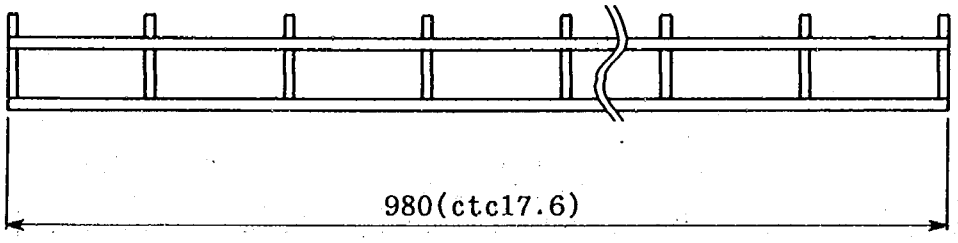
図－2・2・51 旧Aモデル改 高欄（その1）

旧Aモデル改 高欄　　縮尺 1/100

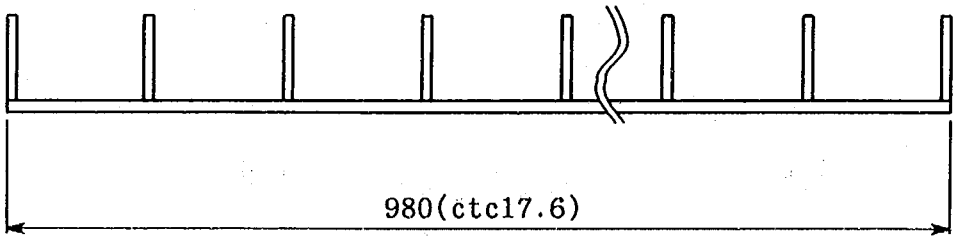
Ⅱ．3段横桟なし（実験ケース14-h）



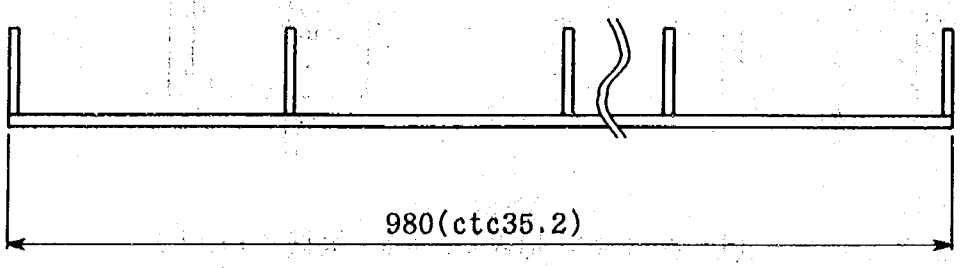
Ⅲ．1，3段横桟なし（実験ケース14-i）



Ⅳ．ポストのみ（実験ケース14-l）



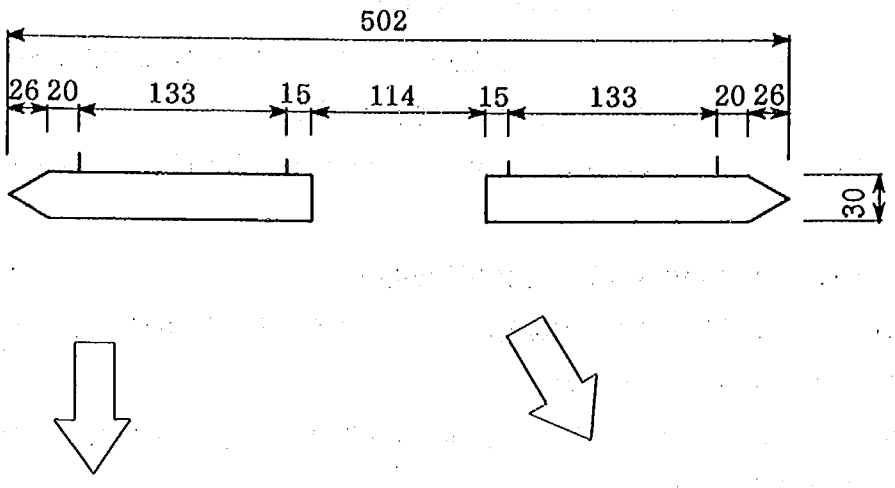
Ⅴ．ポスト間引き（実験ケース14-m）



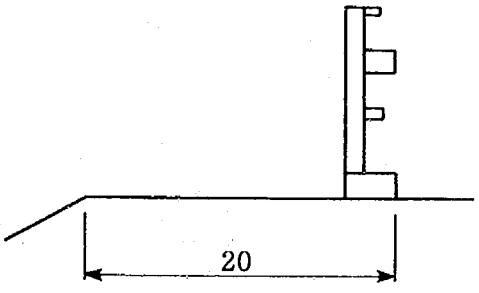
図－2・2・52　旧Aモデル改　高欄（その2）

高欄設置位置

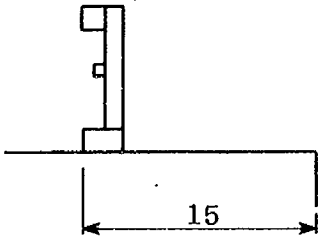
旧Ａモデル改（開口率２５％）



フェアリング部



開口部



図－２・２・53　旧Ａモデル改　高欄設置位置

（3） 実験結果

実験結果の総括を表－2・2・24に示す。なお表中に示す発現風速は、ねじれ振幅が1degに達したときの実橋換算風速である。

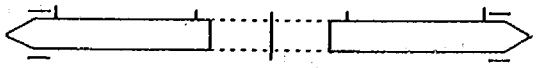
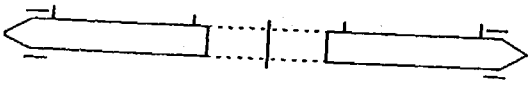
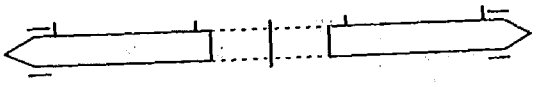
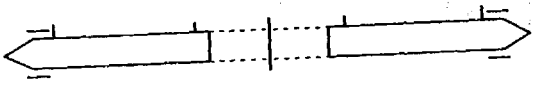
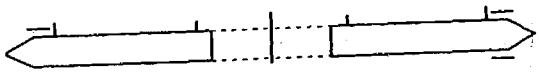
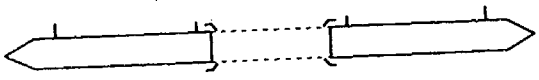
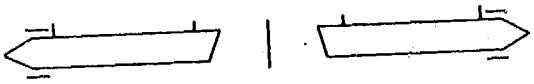
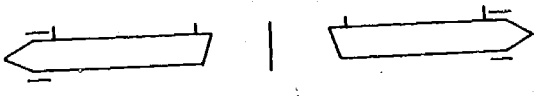
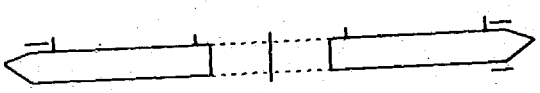
本実験による結果の要約を以下に示す。

・重量を約15%軽くしてもフラッター発現風速は変わらない。
・開口部の上下に充実率45%のグレーチングを設置してもフラッター発現風速は変わらない。
・センターバリアは桁面からの突出量が大きいほど効果が大きい。
・開口部の形状に関わらず、最も狭い部分に対する開口率が同じであれば、フラッター発現風速もほぼ同じである。
・フェアリング形状は上下対称のものが最も耐風性が良い。
・桁下面にも高欄部材を取り付けて上下対称断面にしたところ、十分な耐風性が得られていなかった迎角－3°においても優れた耐風性が得られた。
・高欄部材が耐風性に及ぼす影響は大きく、特にポストの影響が大きいと推測されるが、その形状および充実率等について更に検討を要する。

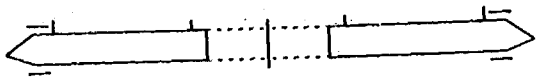
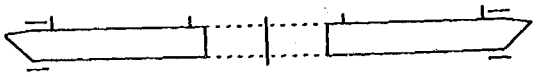
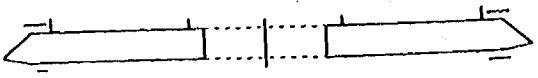
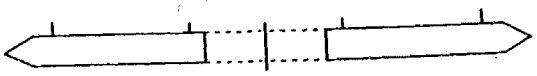
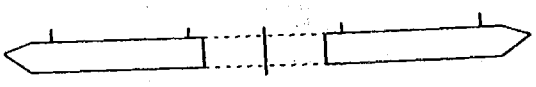
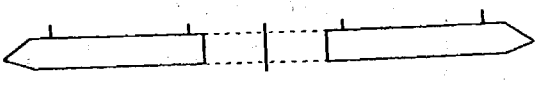
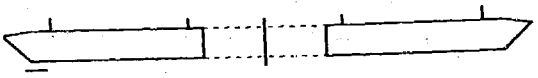
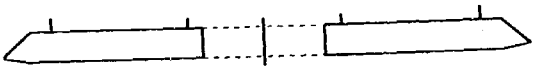
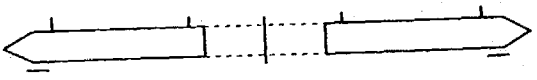
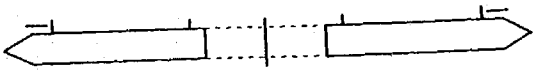
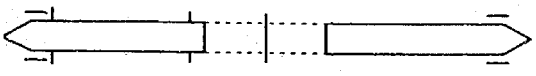
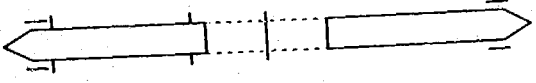
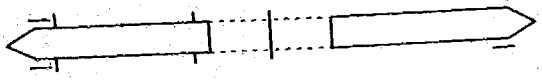
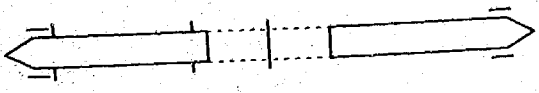
表－2・2・24　実験結果（旧Ａモデル改：桁高３ｍ）

実験ケース	迎角	開口率	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	グレーチング	中央ガイド	重量	発現風速
0	0°	25%	上面のみ	45mm	なし	30°	なし	なし	標準	82.9
1	0°				あり					85.0
2	0°								軽量	85.0
3	0°						45%			87.1
4	+3°									88.8
5	-3°									72.3
6 a	-3°			50mm(10+10)						74.8
b				50mm(15+5)						86.3↑
7	0°			なし	なし			あり		63.5
8	-3°	30%		45mm	あり		なし	なし	標準	80.1
9 a	-3°	20%斜								65.2
b		25%斜								70.7
10	-3°	20%								65.7
11 a	-3°	25%				上20°	45%			67.2
b						下20°				68.9
c						上10°				71.4
d						下10°				24.7
12 e	-3°				なし	30°				61.9
a						上20°				42.4
b						下20°				48.8
c						上10°				25.7
d						下10°				29.4
13 a	-3°				下のみ	30°				69.7
b					上のみ					62.0
14 f	0°		上流上下内外		あり					85.9↑
c	-3°		上流上下内外							86.0↑
h			3段横桟なし							85.8↑
i			1、3段横桟なし							85.9↑
g			上流上下内外		設置高さ変更					85.4↑
d			上流上下外		あり					86.1↑
j			なし							70.2
k			閉塞							15.5
l			ポストのみ							86.3↑
m			ポスト間引き							62.5

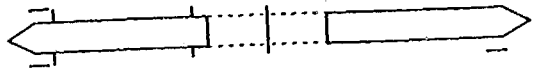
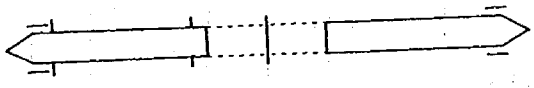
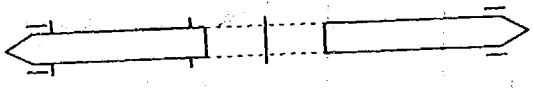
表－2・2・25(a)　実験結果（旧Aモデル改：桁高3m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	Gt	V_F(m/s)
0		0°	I	I		I		82.9
1		0°	I	I	I	I		85.0
2		0°	I	I	I	I		85.0
3		0°	I	I	I	I	○	87.1
4		+3°	I	I	I	I	○	88.8
5		−3°	I	I	I	I	○	72.3
6-a		−3°	I	II	I	I	○	74.8
6-b		−3°	I	III	I	I	○	86.3↑
7		0°	I		II	I	○	63.5
8		−3°	I	I	I	I		80.1
9-a		−3°	I	I	I	I		65.2
9-b		−3°	I	I	I	I		70.7
10		−3°	I	I	I	I		65.7
11-a		−3°	I	I	I	II	○	67.2

表－2・2・25(b)　実験結果（旧Aモデル改：桁高3m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	Gt	V_F(m/s)
11-b		－3°	I	I	I	III	○	68.9
11-c		－3°	I	I	I	IV	○	71.4
11-d		－3°	I	I	I	V	○	24.7
12-e		－3°	I	I		I	○	61.9
12-a		－3°	I	I		II	○	42.4
12-b		－3°	I	I		III	○	48.8
12-c		－3°	I	I		IV	○	25.7
12-d		－3°	I	I		V	○	29.4
13-a		－3°	I	I	III	I	○	69.7
13-b		－3°	I	I	IV	I	○	62.0
14-f		0°	I	I	I	I	○	85.9↑
14-c		－3°	I	I	I	I	○	86.0↑
14-h		－3°	II	I	I	I	○	85.8↑
14-i		－3°	III	I	I	I	○	85.9↑

表－2・2・25(c)　実験結果（旧Aモデル改：桁高3m）

Case No.	模型図	迎角	R	C	G	F	Gt	V_F(m/s)
14-g		－3°	I	I	V	I	○	85.4↑
14-d		－3°	I	I	I	I	○	86.1↑
14-j		－3°		I	I	I	○	70.2
14-k		－3°	閉	I	I	I	○	15.5
14-l		－3°	IV	I	I	I	○	86.3↑
14-m		－3°	V	I	I	I	○	62.5

R　：高欄
C　：センターバリア
G　：ガイドベーン
F　：フェアリング
Gt：グレーチング

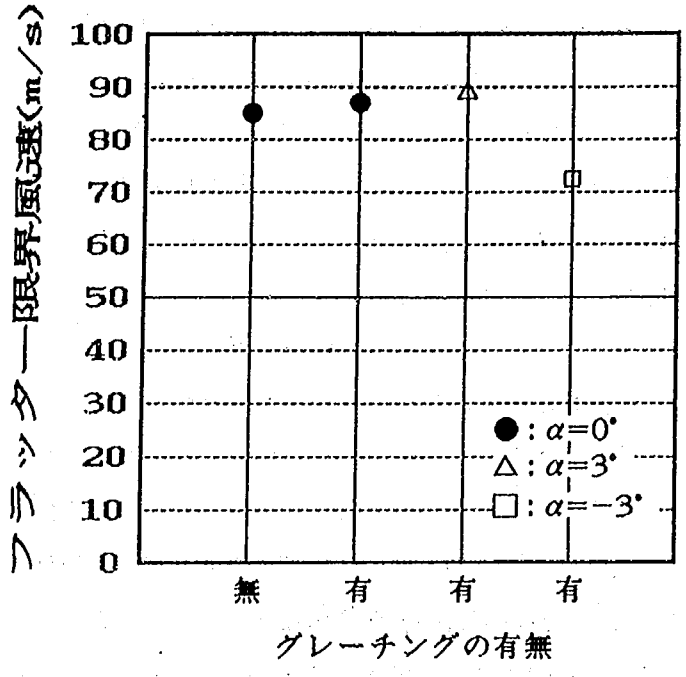
1） 開口部設置部材および開口部形状の影響

主桁断面として、中央開口部を有する２箱桁断面を採用する場合、開口部には連結トラス等の構造部材および検査通路や落下防止用ネット等の付属施設が設置されると考えられる。中央開口部は耐風性を向上させる要因であるが、風通しを阻害するものを設置した場合には、その耐風性を悪化させる懸念がある。そこで、本実験において開口部に設置される部材の影響を考察することにした。連結トラスについては、そのパターンや所要強度から決まる部材寸法等が必ずしも明らかではないため、閉塞率が支配的な要因と仮定し、金網を用いたグレーチング部材により、開口部に設置される部材の影響を調べた。

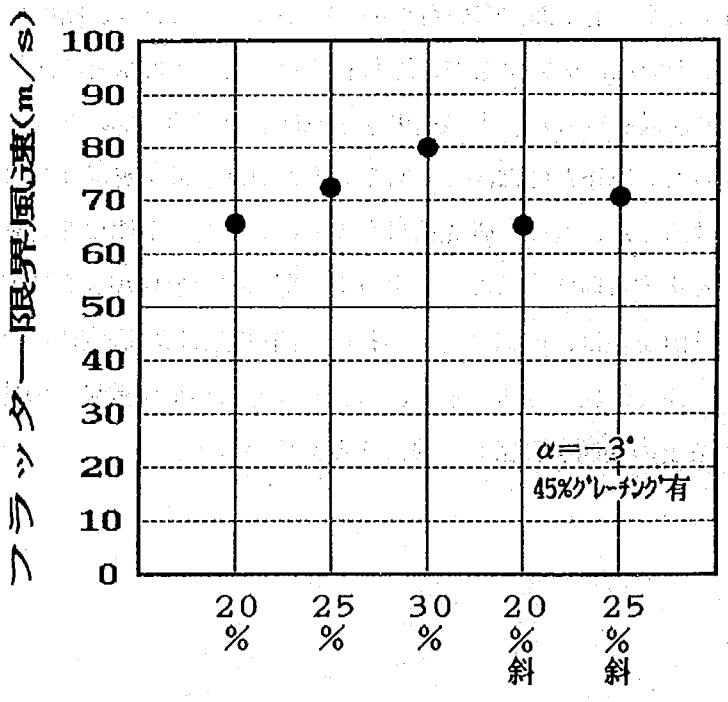
図－２・２・54には、グレーチングの有無によるフラッター限界風速の比較を示している。グレーチングの充実率は45％であり、これを桁上下面に設置した。迎角０°で比較をするとグレーチングを設置してもフラッター発現風速に大きな変化は認められない。さらに、迎角をつけた場合でも、迎角－３°の耐風性は予備実験においても他の迎角に比べて悪かったことを考え合わせれば、グレーチングの設置により耐風性が悪化したとは考えられない。よって、かなり大きな充実率のものを開口部に設置しても耐風性への影響は小さいと判断して、次章での実験では開口部に設置される部材の影響を無視することにした。

図－２・２・55には開口率および開口部形状が耐風性に及ぼす影響について示している。図中の「20％斜」とは桁上面の開口率が20％の台形開口部であることを示す。まず、開口率については、20％、25％、30％と開口幅が大きくなるに伴い、フラッター限界風速も大きくなっている。これは、開口率が大きいほど耐風性は良いという昨年度の実験結果を再確認する結果となっている。

また、本実験での開口部形状は長方形として検討を進めているが、明石海峡大橋の検討における２箱桁断面の開口部形状をみると、桁上面が狭く、桁下面が広い台形のものが多い。これは、路面の幅員確保に関係のない桁下面の寸法を削り、桁重量の軽減に努めたものと思われるが、長方形形状との比較を行うため、図－２・２・46に示す台形形状について検討を行った。実験結果をみれば、台形開口部のフラッター限界風速は上面の開口率が同じ長方形開口部の限界風速とほぼ同じである。本検討は、最も耐風性の劣る迎角－３°のケースについてのみ行ったものではあるが、既往の研究結果を参考にしても台形開口部を有する２箱桁断面で迎角が０°、３°でも耐風性が悪化する傾向にはない。よって、開口部の形状が長方形でも台形でも、桁上面における開口率が同じであれば耐風性はほぼ同じと思われる。開口部形状の決定にあたっては、台形では箱桁部分の重量は小さくなるが、逆に連結トラスの重量は大きくなるため全体重量での比較が必要であり、桁との接合面が斜めになる等の構造上の問題を勘案して検討する必要がある。



図－2・2・54　開口部グレーチングの影響



図－2・2・55　開口率および開口部形状の影響

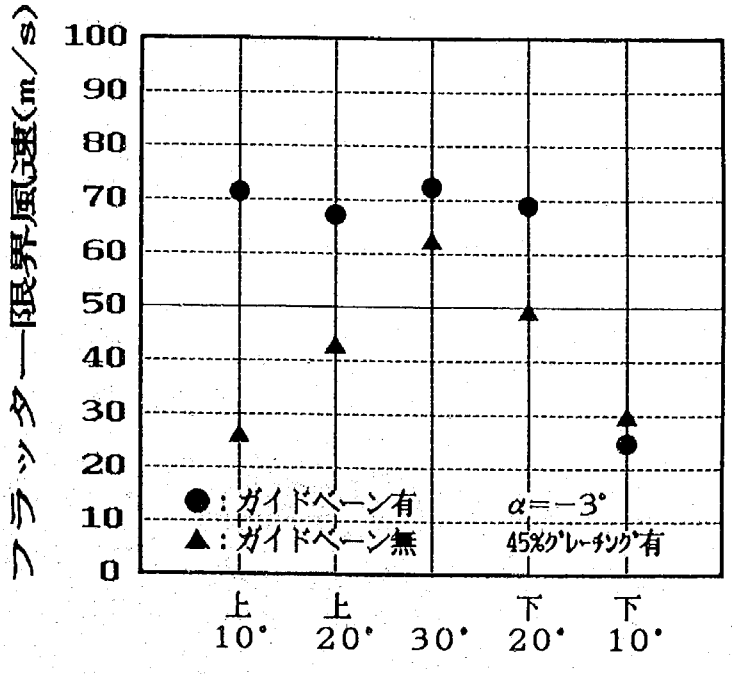
2）　フェアリング形状の最適化

ここまでの検討では上下断面対称となるようなフェアリングを用いてきた。しかし、実験ケース５にみられるように、迎角－３°における耐風性が他の迎角に比べて劣ることもあり、フェアリングを最適化することにより耐風性の向上を試みた。図－２・２・49に使用したフェアリングの形状を示す。実験は、フェアリング近傍の流れが結果に大きく影響すると思われたため、フェアリング部のガイドベーンが無い断面と有る断面の両方に対して実施した。図－２・２・56に実験結果を示す。

まず、ガイドベーンの無い断面についてみる。この断面の方がフェアリング形状の影響を大きく受けると考えられる。結果は、上下対称（30°）のものが最も良く、フェアリングの先端位置が桁の中心線からずれるに伴い、耐風性は大きく悪化する。特に上10°および下10°のケースでは、低風速域で典型的なねじれフラッターを生じている。

また、ガイドベーンを設置した断面でも、上下対称のものよりも耐風性の優れたものはなかった。しかし、ガイドベーンなしと大きく異なるのは、下10°以外はその耐風性が大幅に低下することはないということである。迎角－３°は吹き下ろしであり、桁上面のガイドベーンの影響が大きく、ガイドベーン内への流れの取り込みや先端部からの剥離が耐風性に影響すると考えられる。よって、フェアリング形状の影響が顕著に現れなかったのではなかろうか。ただし、ガイドベーン内への流れフェアリング先端が桁上面のガイドベーンから遠い下10°のケースは、ガイドベーンの無い場合と同様にねじれフラッターを生じており、ガイドベーンの影響は少ないと考えられる。上10°についても迎角３°にすれば、同様にねじれフラッターを生じると推測される。

結局、フェアリング形状は上下対称のものが最も良いという結論である。



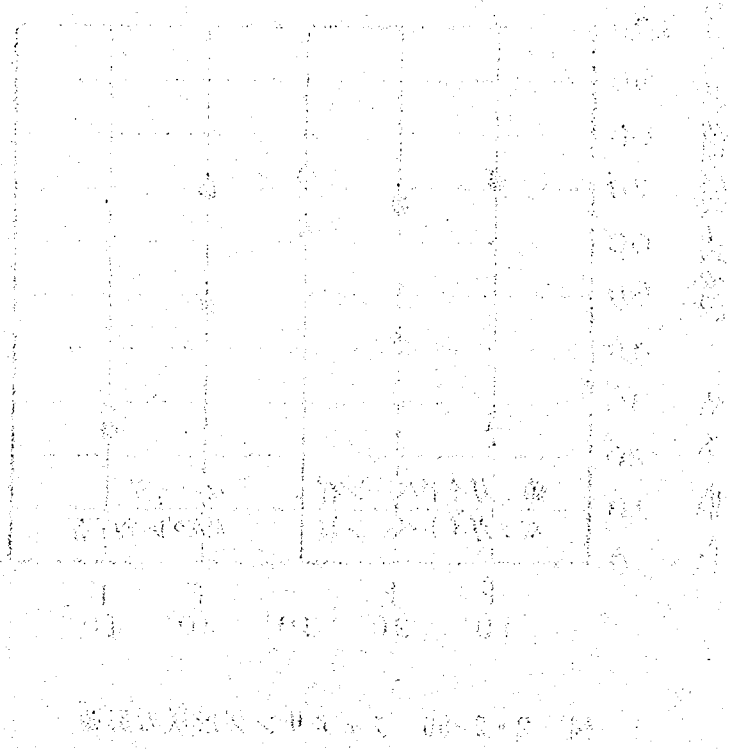
図－２・２・56　フェアリング形状の影響

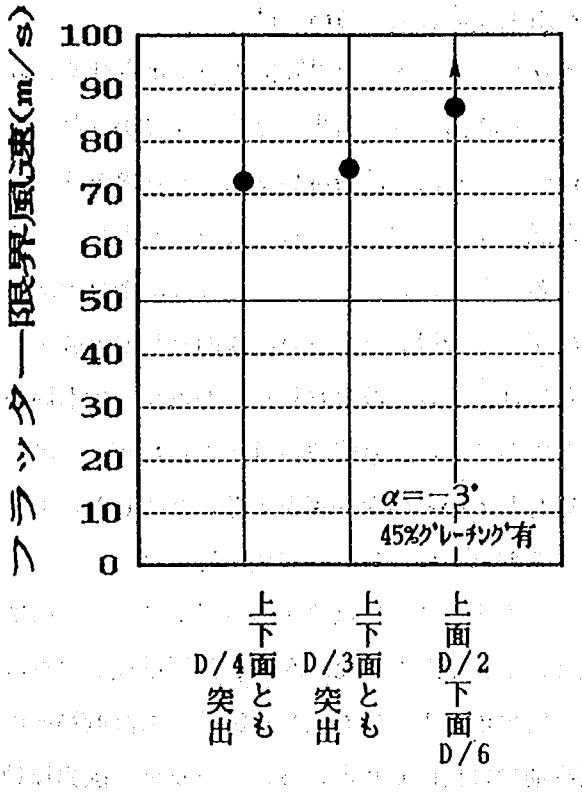
3）　重量の影響およびセンターバリア・ガイドベーンの効果

これからの超長大橋の実現のためには、耐風性を満足する構造形式を模索するだけでなく、経済性も重視される。経済性を考慮する場合の最も簡易な指標の一つに桁重量が挙げられる。一般に桁重量を軽くすれば耐風性は悪化すると考えられるが、ここでは桁重量を軽くした場合の耐風性について調査した。結果は表－2・2・24に示す通りであり、約15%の重量軽減を行ってもフラッター限界風速に差は見られなかった。模型縮尺と模型製作の関係上、重量をこれ以上小さくすることは不可能であったので、重量と耐風性の関係について十分検討できなかった。これが今回使用した風洞でできることの限界であると考えられ、この点について検討するにはさらに大きな模型を用いる必要がある。

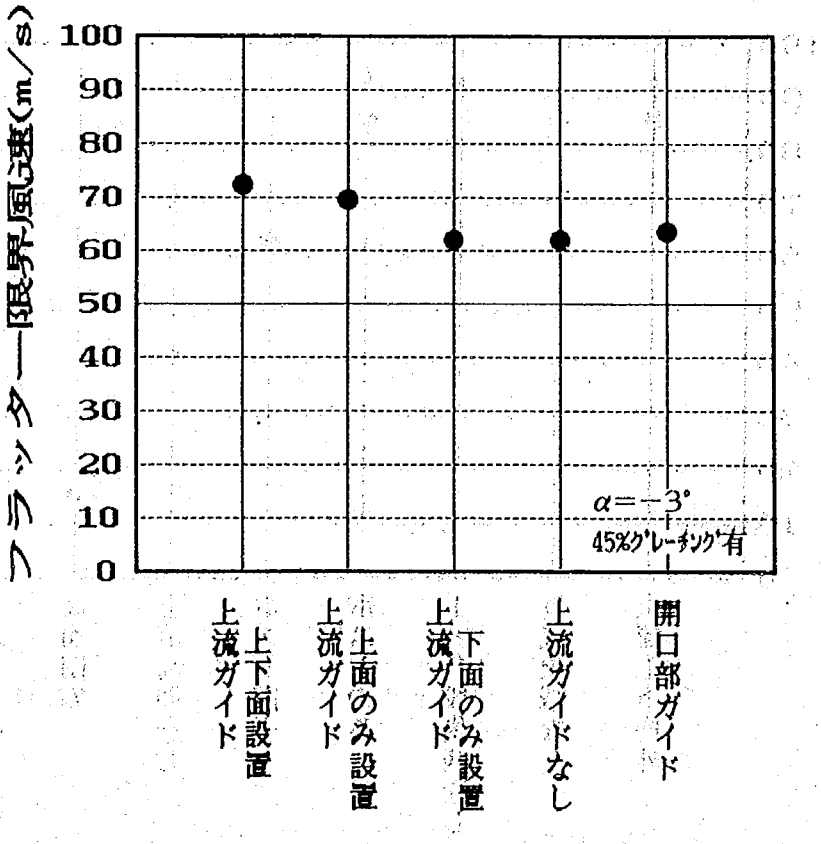
図－2・2・57はセンターバリアの突出量を変えて、耐風性を調査したものである。第3章の予備実験の結果と同様に、突出量が大きいほどフラッター限界風速は大きくなっており、桁高Dの半分突出したものについては計測範囲内でフラッターは観測されなかった。センターバリアの有効性は確認できたが、一方で突出量の増加に伴い抗力も大きくなり、桁断面の設計が風荷重に支配されるようになると考えられる。よって、センターバリアの寸法決定にあたっては、耐風性への効果と桁断面の増加のトレードオフを考慮する必要がある。

図－2・2・58は迎角－3°の耐風性を改善すべく、ガイドベーンの設置位置を変えて、耐風性を調査したものである。高欄が桁上面のみに設置されているため、断面上下の対称性がなくなっているが、ガイドベーンを片面のみに設置してこれを操作してみた。しかし、ガイドベーンを桁上面のみにつけた場合は、上下面に設置したものより耐風性が劣り、桁下面のみに設置した場合は、ガイドベーンを設置しないものとほぼ同じである。よって、ガイドベーンについては上下面とも設置するのがよいという結論である。





図－2・2・57　センターバリア　突出量の影響



図－2・2・58　ガイドベーン　設置位置の影響

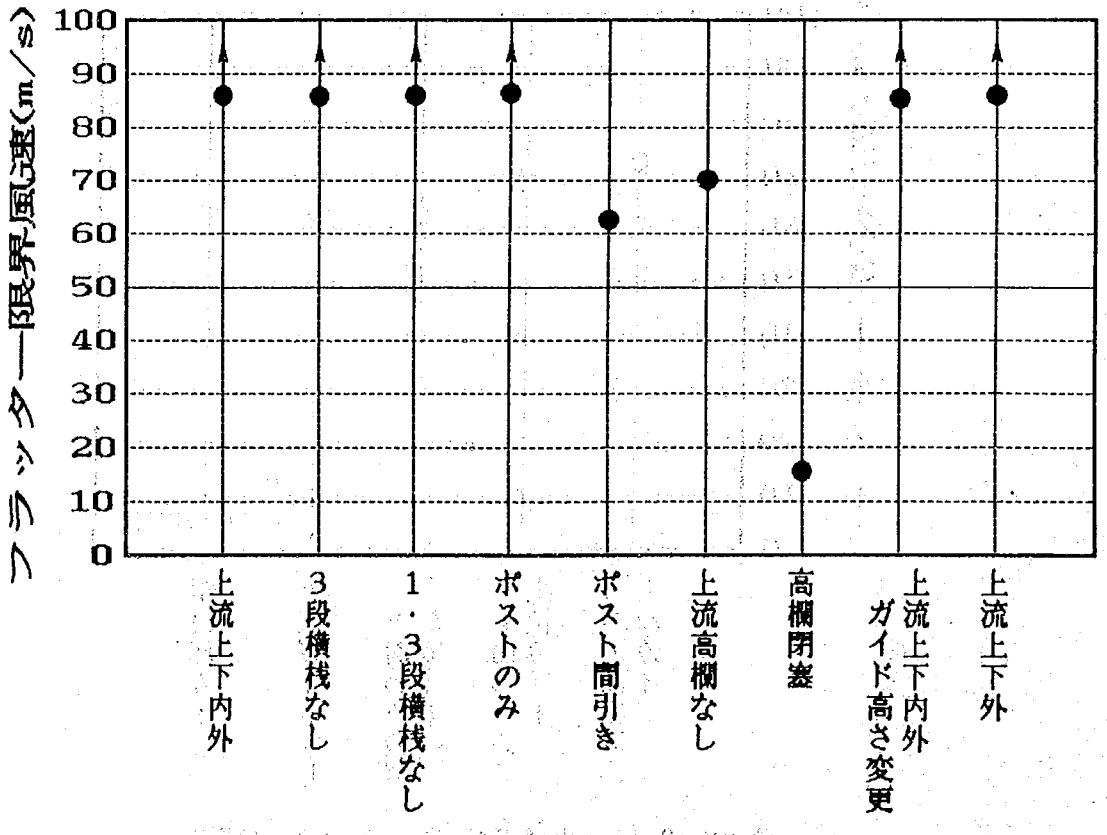
4）　迎角－3°における耐風性改善策（高欄部材の影響）

前項までにフェアリング形状やガイドベーン設置位置を変化させて、迎角－3°における耐風性の向上を試みたが、優れた耐風性を有する断面を見い出すことはできなかった。この原因についてであるが、第3章の予備実験においても、高欄のない断面では迎角が変化しても耐風性に大きな差はないが、高欄を付けると他の迎角に対して－3°の耐風性が悪くなっている。このことより、－3°における耐風性の悪化は高欄設置による断面の非対称化にあると考えた。また、高欄の設置により耐風性が向上する傾向にあることを考慮し、下流側の高欄を上流側の下面に設置した上下対称断面として実験を行った。その結果、計測範囲内ではフラッターは観測されず、耐風性は大きく改善された。迎角0°でも同様の効果が得られている。

ところで、高欄を上下設置することにより耐風性は向上したが、その効果が思いのほか大きいため、高欄のどの部分が耐風性向上に寄与しているのかを調査することにした。図－2・2・51および2・2・51に示すように、段階的に高欄を構成する部材を取り外し、実験を行った。

結果を図－2・2・59に示す。まず、高欄に近接するガイドベーンとの関係を調べるため、ガイドベーンの高さを高くしてみたが耐風性に変化はなかった。次に、高欄構成部材を段階的に外しながら実験を行ったが、横桟の寄与は小さいようで、縦のポストだけを残した実験でも計測範囲内でフラッターは観測されなかった。しかし、ポストの設置間隔を通常の倍にしたところ、フラッター限界風速はかなり小さくなった。さらに、壁高欄のようなものを考えて高欄の隙間を閉塞したものは、実橋換算風速にして高々 16m/sでねじれフラッターを生じた。

以上より、高欄ポストの耐風性への影響が大きいことが分かったが、更に次章において充実率やポスト径の異なる高欄を用いて、考察を行うことにする。



図－2・2・59　高欄部材の影響

2．2．4　2箱桁改良断面案に関する実験（その2）

（1）　実験内容

前節までの実験結果を受けて、桁高の異なる3体の模型を用いて、空力的な対策を施さない基本断面と対策断面の耐風性を見ると同時に、主に桁高Dと開口率φの影響について調査を行った。調査対象とする桁高の決定にあたっては、桁断面の構成において構造的な要因から桁高さがどの程度になるのかわからないため、先の実験で対象とした3mはもちろんのこと、明石海峡大橋の検討における2箱桁断面の多くが7mで検討されていたことを考慮し、3m、5m、7mの3種類とした。また、開口率については3模型とも20%、25%、30%の3種類とした。また、より現実的な断面構成とするため、道路構造令に配慮した車線構成を考え、図－2・2・60のように1箱分の桁幅を17mとした。

なお、本実験を行うに先立ち、高欄部材形状の影響を調査する実験を行った。これは前節の実験において、高欄部材が耐風性に大きな影響を及ぼすことが分かったためである。これまで使用した標準的な高欄と充実率φ（約38%）を合わせ、ポスト径の太いもの、細いものおよび充実率の異なる金網を用意し、これらを耐風性に影響の大きい上流側の高欄位置に設置して、耐風性の比較を行った。

（2）　実験方法および実験条件

実験方法は、2．2．1節（2）に示したバネ支持模型実験である。実験条件を表－2・2・26～2・2・28に示す。検討時における方針として、桁高が増加しても単位長さ当たりの総重量は変わらないものとした。よって極慣性モーメントは、開口部の連結トラスを含む吊り構造全体の重量が不変であるとの仮定から、桁断面の板厚を調整することで重量を合わせ、その断面に相当する極慣性モーメントを求め、これを所要値とした。ただし実験においては、使用する風洞の寸法から決まる縮尺条件から模型縮尺を小さくせざるを得ず、重量および極慣性モーメントの所要値も小さくなったために、実験では所要値を満足できなかった。よって、同じ模型を用いる実験では開口率や対策部材の設置の有無に関係なく同一値を用いることとし、その条件下で計測値が最も小さくなるようにした。

表－2・2・29に実験ケースを示す。また、この実験に用いた模型断面および空力対策部材を図－2・2・61～2・2・69に示す。

表－２・２・26　実験条件（Ａモデル：桁高３ｍ）

		想定実橋値	模型所要値	計 測 値	誤差(%)
重　　量		49.0 tf/m	3.696 kgf	4.019 kgf	1.26
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1470 tf•m•s²/m	0.0098 kgf•m•s²	0.0146 kgf•m•s²	48.98
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16	1.224	——
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44	2.579	——
振 動 数 比		2.10	2.10	2.107	0.33
構造減衰	たわみ	0.02	0.02	0.0199	——
	ねじれ	0.02	0.02	0.0203	——
風速倍率	たわみ	——	——	4.493	——
	ねじれ	——	——	4.478	——

表－２・２・27　実験条件（Ｂモデル：桁高５ｍ）

		想定実橋値	模型所要値	計 測 値	誤差(%)
重　　量		49.0 tf/m	3.969 kgf	4.396 kgf	10.76
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1522 tf•m•s²/m	0.0102 kgf•m•s²	0.0162 kgf•m•s²	58.82
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16	1.175	——
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44	2.471	——
振 動 数 比		2.10	2.10	2.103	0.14
構造減衰	たわみ	0.02	0.02	0.0200	——
	ねじれ	0.02	0.02	0.0197	——
風速倍率	たわみ	——	——	4.681	——
	ねじれ	——	——	4.674	——

表－2・2・28　実験条件（Cモデル：桁高７m）

		想定実橋値	模型所要値	計 測 値	誤差(%)
重　　量		49.0 tf/m	3.969 kgf	4.882 kgf	23.00
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ		1554 $tf \cdot m \cdot s^2/m$	0.0104 $kgf \cdot m \cdot s^2$	0.0176 $kgf \cdot m \cdot s^2$	69.23
振動数	たわみ(Hz)	0.050	1.16	1.114	——
	ねじれ(Hz)	0.105	2.44	2.373	——
振動数比		2.10	2.10	2.130	1.43
構造減衰	たわみ	0.02	0.02	0.0195	——
	ねじれ	0.02	0.02	0.0202	——
風速倍率	たわみ	——	——	4.937	——
	ねじれ	——	——	4.867	——

表－2・2・29　実験ケース

Aモデル（桁高3m）

実験ケース	模型	迎角	開口率	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	極慣性	実験種別
14' a	A	-3°	20%	上下面	あり	あり	30°	標準(49tf)	標準(2096)	効果
b				なし						
c				太径ポスト						
d				細径ポスト						
e				金網25%						
g				金網40%						
15 a		0°	20%	上面のみ	なし	なし				
b			25%							
c			30%							
15' a			20%	なし						
b			25%							
c			30%							
16			25%	上下面	あり	あり				標準
17			30%							簡易
18		-3°	25%							標準
19		-3°	30%							簡易
20		+3°	25%							標準

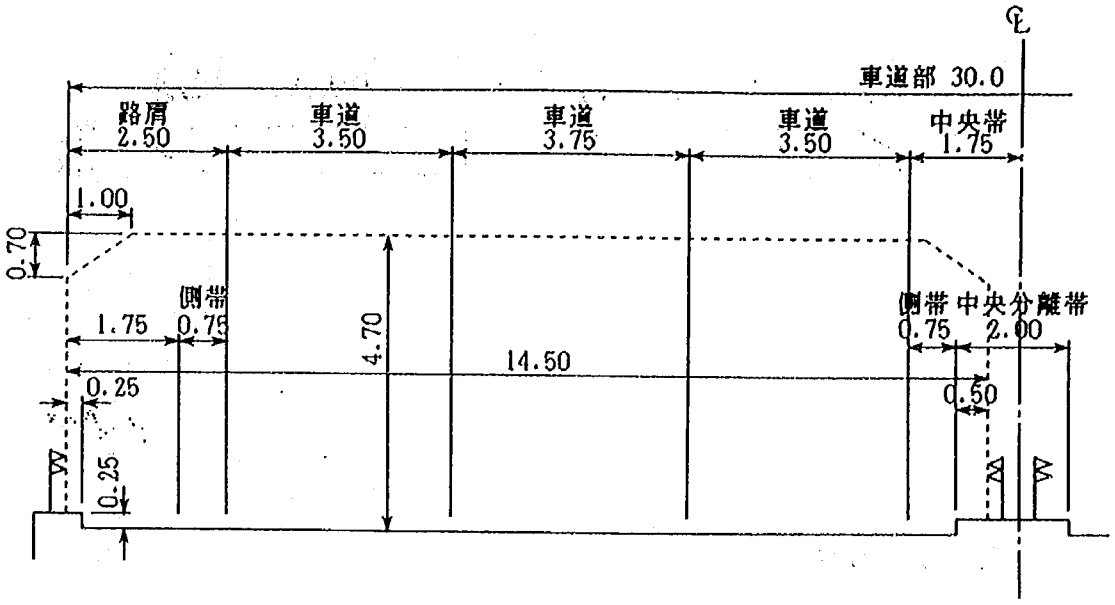
Bモデル（桁高5m）

実験ケース	模型	迎角	間隔	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	極慣性	実験種別
21 a	B	0°	20%	上面のみ	なし	なし	30°	標準(54tf)	標準(2444)	効果
b			25%							
c			30%							
22 a			20%		あり	あり				
b			25%							
c			30%							
22' a			20%	上下面						
b			25%							
c			30%							
23		-3°	25%	上面のみ						簡易
24		-3°	30%							
25		+3°	25%							

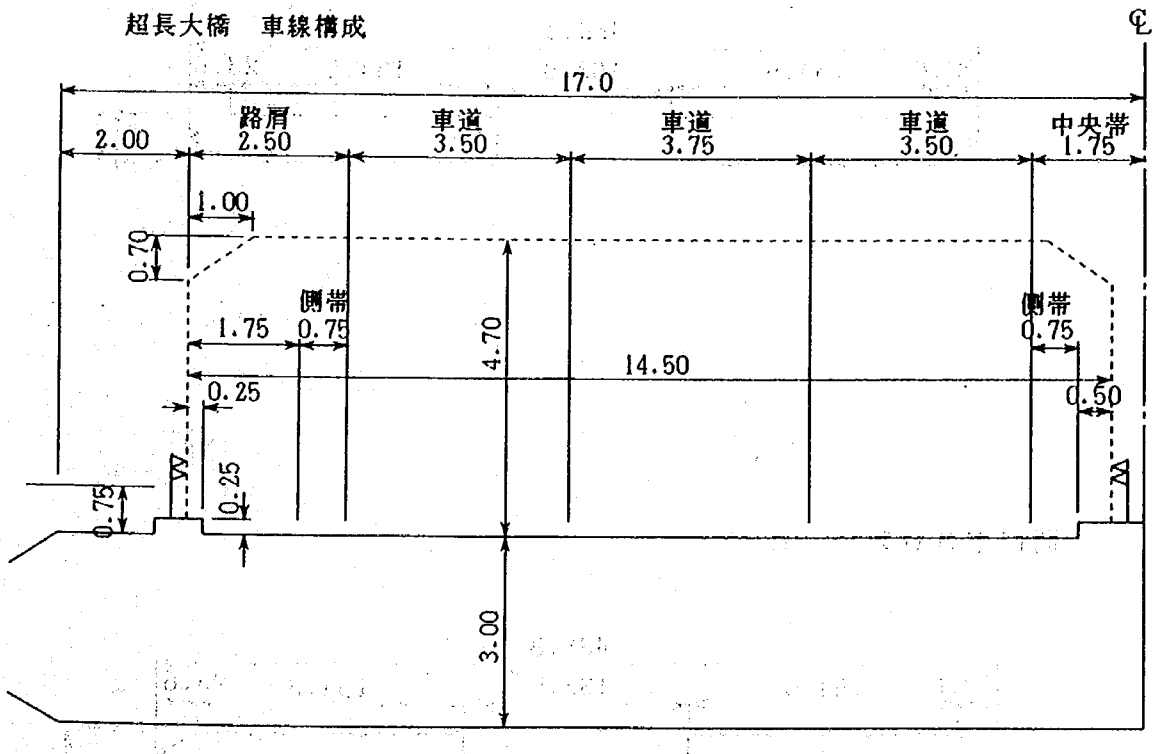
Cモデル（桁高7m）

実験ケース	模型	迎角	間隔	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	極慣性	実験種別
26 a	C	0°	20%	上面のみ	なし	なし	30°	標準(59tf)	標準(2616)	効果
b			25%							
c			30%							
27 a			20%	上下面	あり	あり				
b			25%							
c			30%							
28		-3°	25%							簡易
29			20%							簡易
29'			20%			低く設置				効果
30		+3°	25%			あり				簡易

明石海峡大橋　車線構成



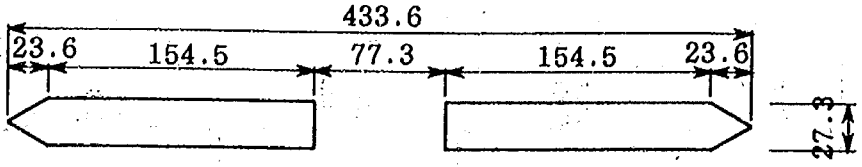
超長大橋　車線構成



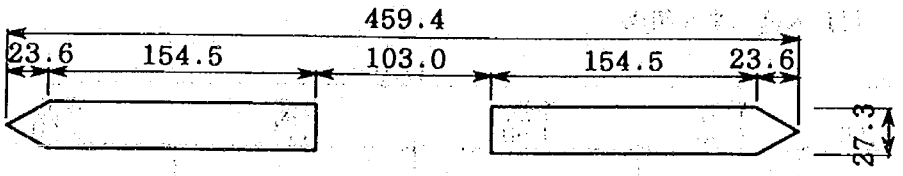
図－2・2・60　想定する車線構成

Aモデル（D＝3．0m）

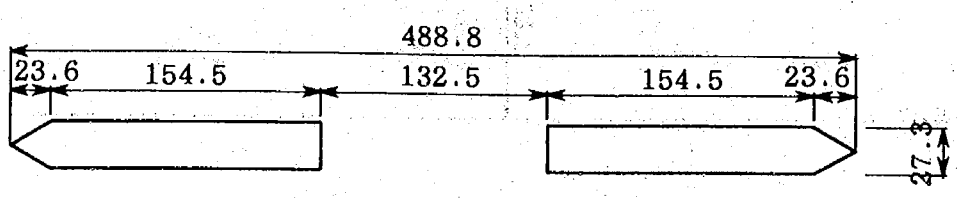
開口率２０％



開口率２５％



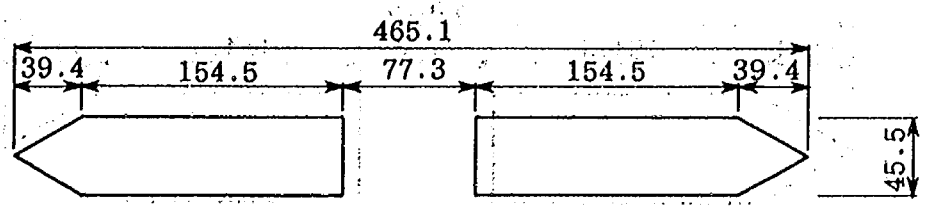
開口率３０％



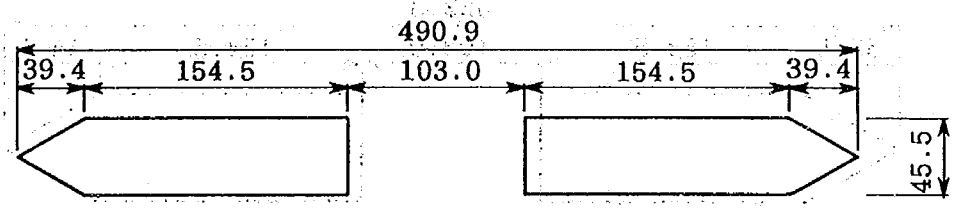
図－2・2・61　模型断面（Aモデル）

Ｂモデル（Ｄ＝５．０ｍ）

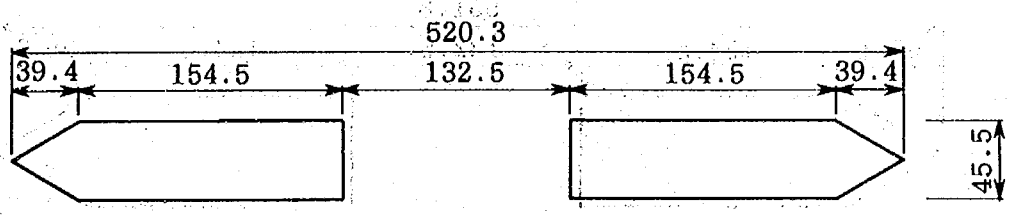
開口率２０％



開口率２５％



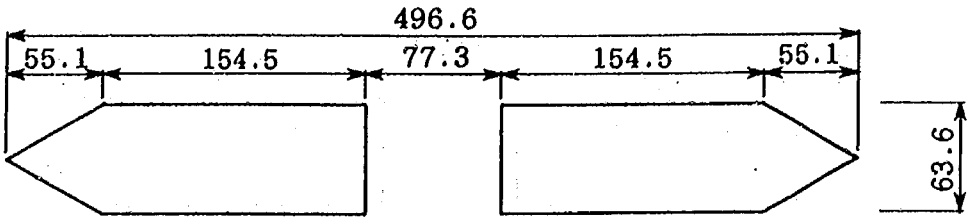
開口率３０％



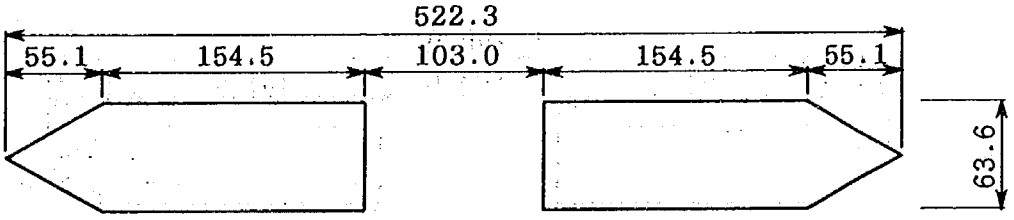
図－２・２・62　模型断面（Ｂモデル）

Cモデル（D＝7．0m）

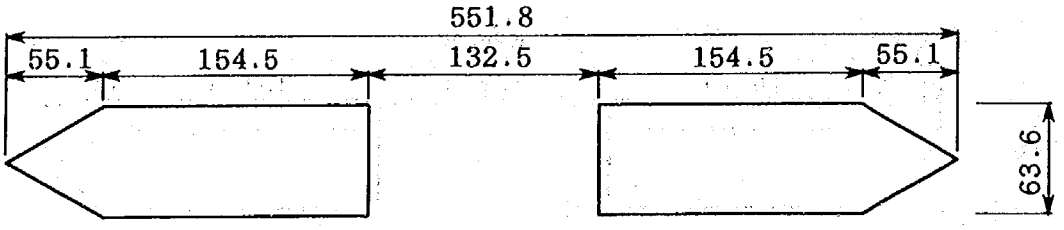
開口率２０％



開口率２５％



開口率３０％

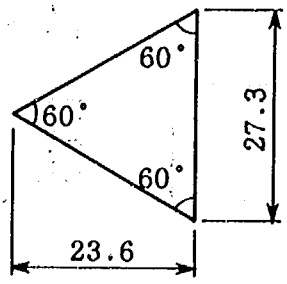


図－2・2・63　模型断面（Cモデル）

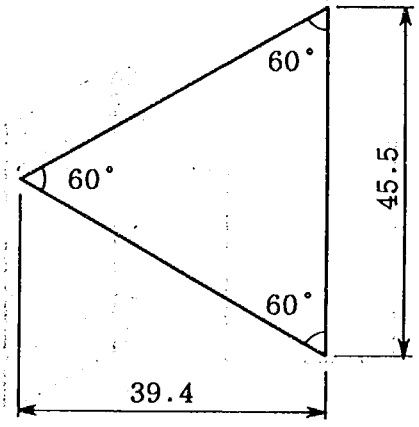
フェアリング

縮尺　1/110

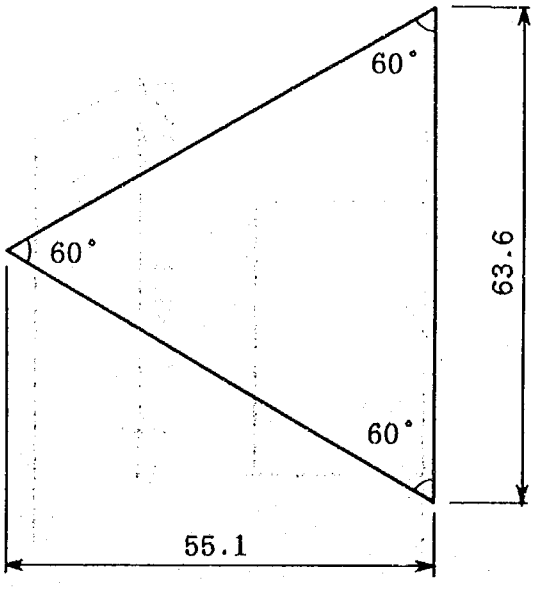
Aモデル（D＝3.0m）



Bモデル（D＝5.0m）



Cモデル（D＝7.0m）

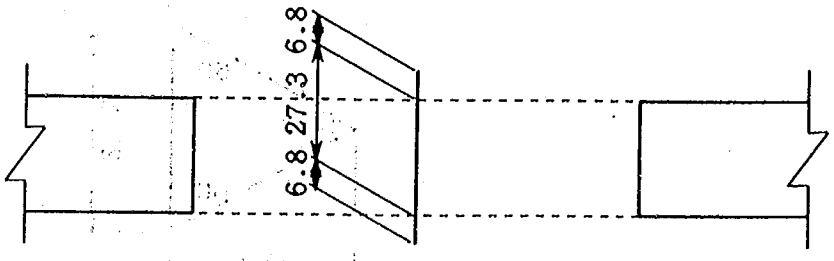


図－2・2・64　フェアリング

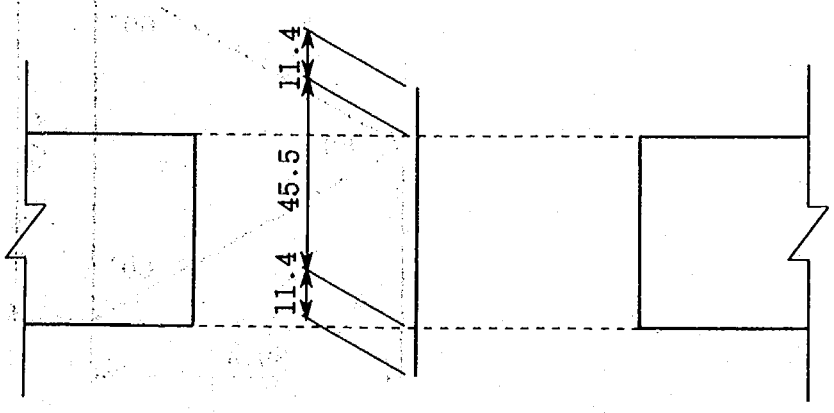
センターバリア

縮尺　1/110

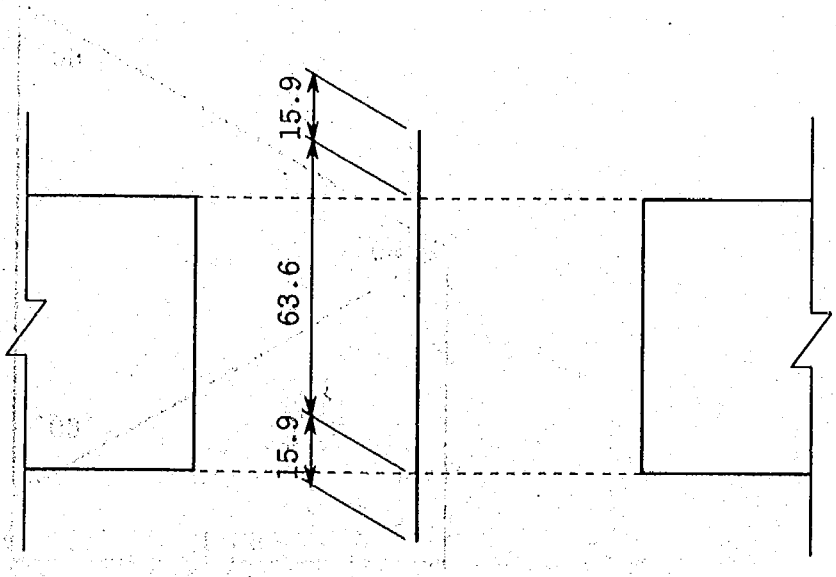
Aモデル（D＝3.0m）



Bモデル（D＝5.0m）



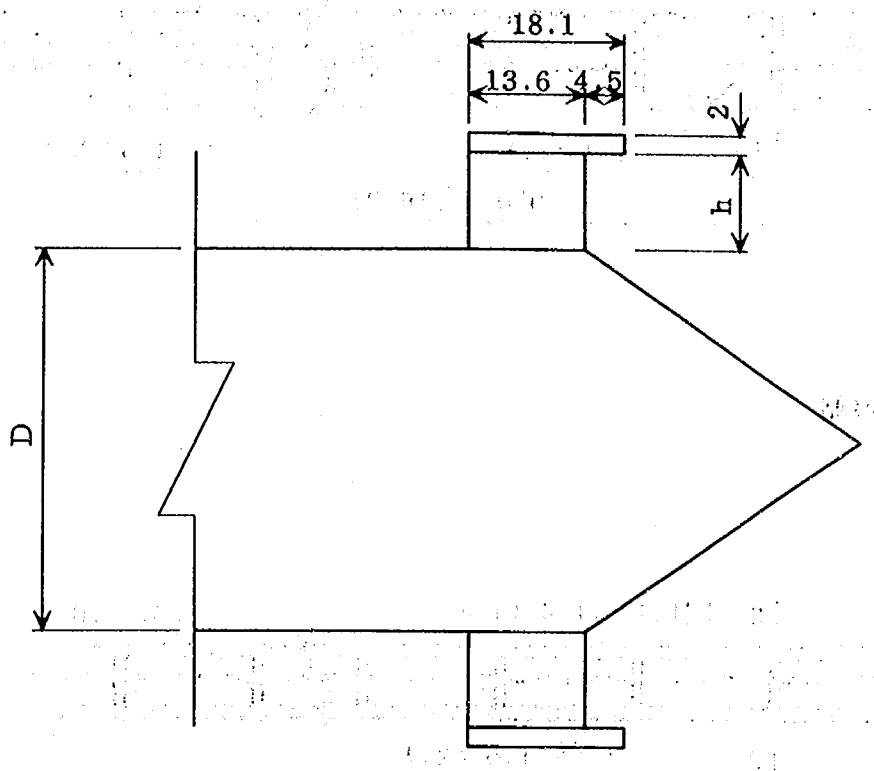
Cモデル（D＝7.0m）



図－2・2・65　センターバリア

ガイドベーン

縮尺　1/110

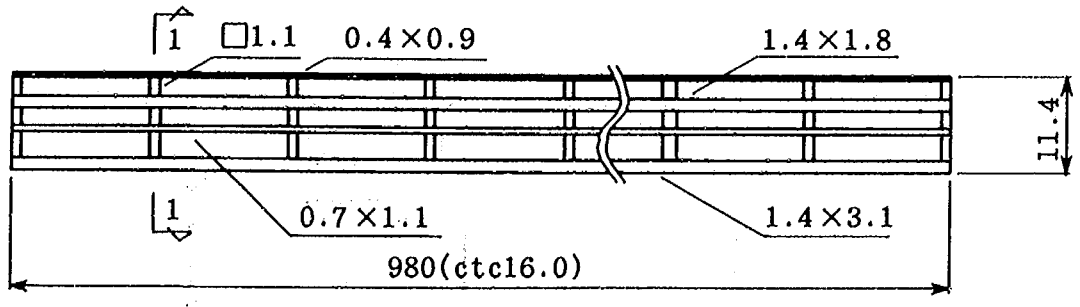


	D	h
Aモデル	27.3	6.8
Bモデル	45.5	11.4
Cモデル	63.6	15.9

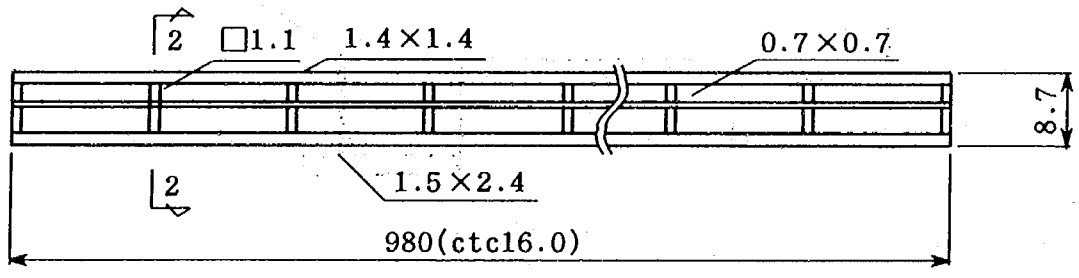
図－2・2・66　ガイドベーン

高欄　　縮尺　1/110

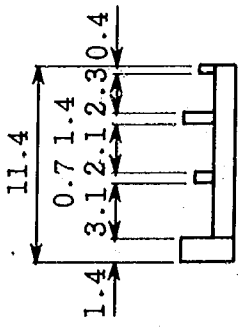
Ⅰ.ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ側



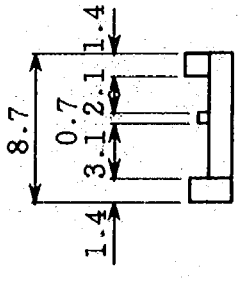
Ⅰ.開口部側



1-1



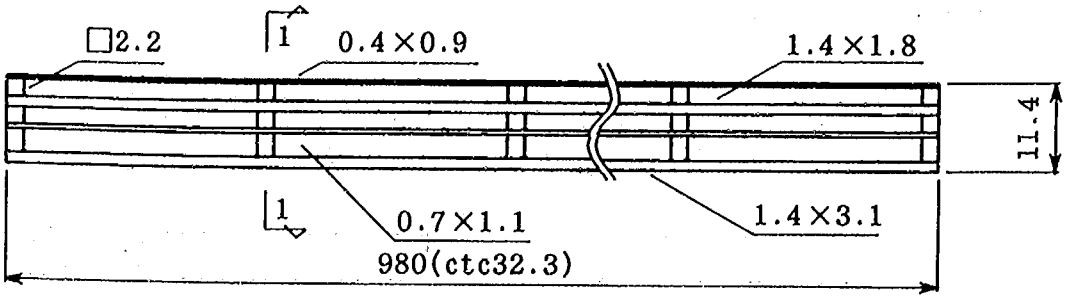
2-2



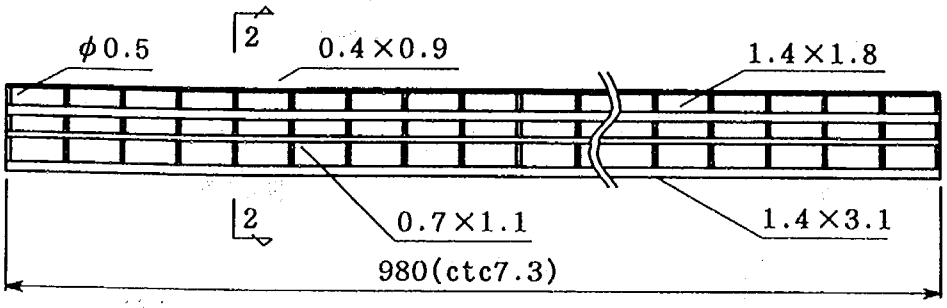
図－2・2・67　高欄（その1）

高欄（フェアリング側）　　縮尺　1/110

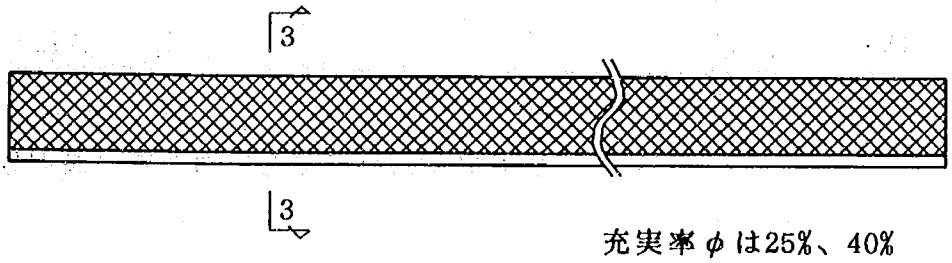
太径ポスト



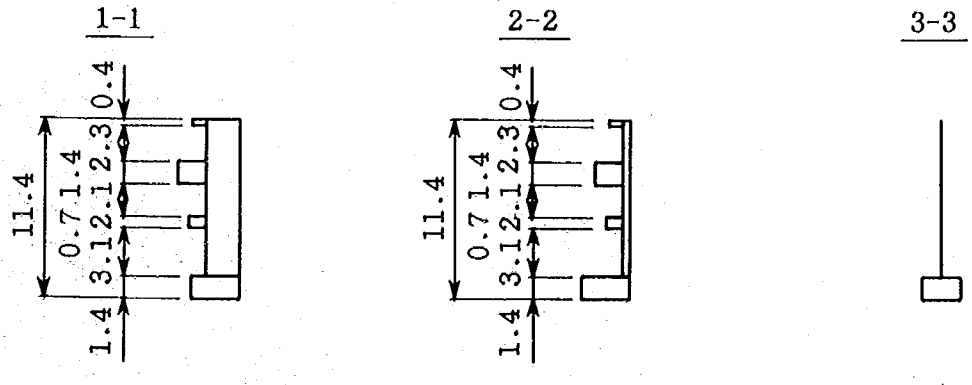
細径ポスト



金網



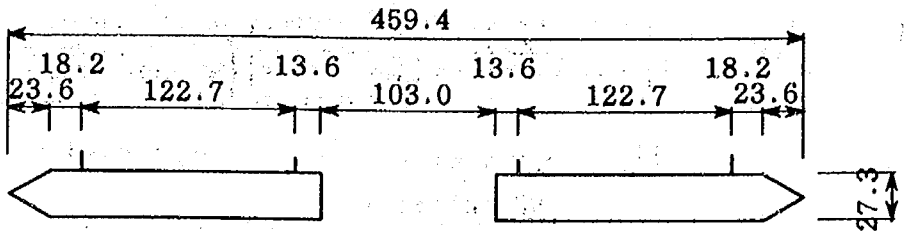
充実率φは25%、40%



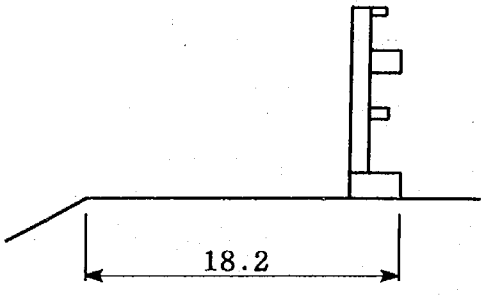
図－2・2・68　高欄（その2）

高欄設置位置

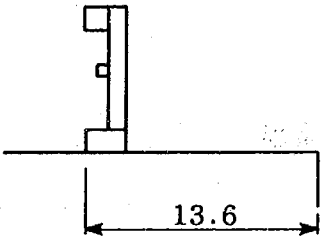
Aモデル（開口率２５％）



フェアリング部



開口部



B，Cモデルについても桁端からの設置距離は同じ

図－2・2・69　高欄設置位置

（3） 実験結果

実験結果の総括を表－2・2・31に示す。なお表中に示す発現風速は、ねじれ振幅が1degに達したときの実橋換算風速である。

本実験における結果の要約を以下に示す。

・高欄による耐風性向上の要因は、ポスト径およびその配置間隔にあり、充実率だけで効果を説明することはできない。
・メッシュタイプの高欄は、充実率がポスト高欄と同程度でも耐風性を悪化させる。
・桁高に関わらず、開口率が大きい方が耐風性も良い。
・桁高が大きくなっても、桁下面にも高欄タイプの対策部材を設置することで、耐風性を向上させることは可能である。
・ガイドベーンの設置高さは重要であり、低すぎると耐風性を悪化させる要因となる。Bモデル（桁高5m）で十分な耐風性が得られなかったのはこのためと考えられる。
・実験条件の都合上、計測範囲内においてフラッターを観測できないものが多く、定量的な比較が十分でない。今後の検討が必要である。
・AおよびCモデルはフラッターに対しては良好な結果を得ているが、AおよびBモデルではたわみ渦励振、Cモデルではねじれ渦励振が低風速域において発生しており、その対策について検討が必要である。

表－2・2・30　対策断面の耐風性

（a.）Aモデル（桁高3m）

		迎角		
		－3°	0°	3°
開	20%	72.0		
口	25%	91.6↑	91.6↑	96.1↑
率	30%	93.1↑	92.8↑	

（b）Bモデル（桁高5m）

		迎角		
		－3°	0°	3°
開	20%		77.4	
口	25%	64.1	85.6	96.1
率	30%	68.6	95.8	

（C）Cモデル（桁高7m）

		迎角		
		－3°	0°	3°
開	20%	99.5	99.2↑	
口	25%	101.8	99.5↑	102.4↑
率	30%		99.5↑	

表－2・2・31　実験結果

Aモデル（桁高3m）

実験ケース	模型	迎角	開口率	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	発現風速
14' a	A	−3°	20%	上下面	あり	あり	30°	標準	72.0
b				なし					65.2
c				太径ポスト					65.9
d				細径ポスト					68.8
e				金網25%					36.0
g				金網40%					16.7
15 a		0°	20%	上面のみ	なし	なし			63.8
b			25%						64.9
c			30%						67.7
15' a			20%	なし					58.9
b			25%						59.5
c			30%						60.9
16			25%	上下面	あり	あり			91.6↑
17			30%						92.8↑
18		−3°	25%						91.6↑
19		−3°	30%						93.1↑
20		+3°	25%						96.1↑

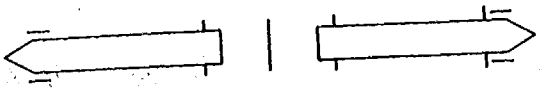
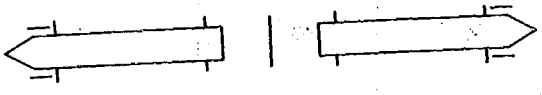
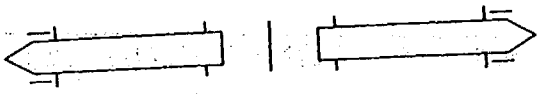
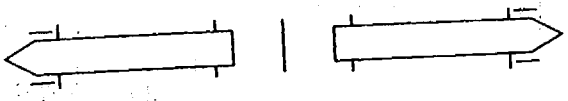
Bモデル（桁高5m）

実験ケース	模型	迎角	間隔	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	発現風速
21 a	B	0°	20%	上面のみ	なし	なし	30°	標準	61.5
b			25%						64.3
c			30%						64.4
22 a			20%		あり	あり			77.4
b			25%						85.6
c			30%						95.8
22' a			20%	上下面					20.6
b			25%						24.0
c			30%						28.2
23		−3°	25%	上面のみ					64.1
24		−3°	30%						68.6
25		+3°	25%						96.1

Cモデル（桁高7m）

実験ケース	模型	迎角	間隔	高欄	センターバリア	上流ガイド	フェアリング	重量	発現風速
26 a	C	0°	20%	上面のみ	なし	なし	30°	標準	62.7
b			25%						64.9
c			30%						66.7
27 a			20%	上下面	あり	あり			99.2↑
b			25%						99.5↑
c			30%						99.5↑
28		−3°	25%						101.8
29			20%						99.5
29'			20%			低く設置			16.7
30		+3°	25%			あり			102.4↑

表－2・2・32(a)　実験結果（Aモデル：桁高３ｍ）

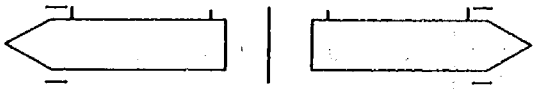
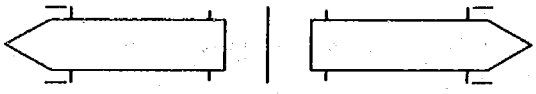
ケース	模型図	迎角	開口率	R	C	G	V_F(m/s)
14'a		-3°	20%	II	○	○	72.0
14'b		-3°	20%		○	○	65.2
14'c		-3°	20%	III 太	○	○	65.9
14'd		-3°	20%	IV 細	○	○	68.8
14'e		-3°	20%	V 25	○	○	36.0
14'g		-3°	20%	VI 40			16.7
15a		0°	20%	I			63.8
15b		0°	25%	I			64.9
15c		0°	30%	I			67.7
15'a		0°	20%				58.9

表－2・2・32(b)　実験結果（Aモデル：桁高3m）

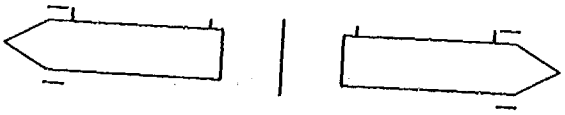
ケース	模型図	迎角	開口率	R	C	G	V_P(m/s)
15'b		0°	25%				59.5
15'c		0°	30%				60.9
16		0°	25%	II	○	○	91.6↑
17		0°	30%	II	○	○	92.8↑
18		-3°	25%	II	○	○	91.6↑
19		-3°	30%	II	○	○	93.1↑
20		+3°	25%	II	○	○	96.1↑

R　：高欄
C　：センターバリア
G　：ガイドベーン

表－2・2・33(a)　実験結果（Bモデル：桁高5m）

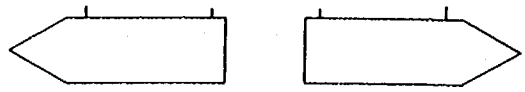
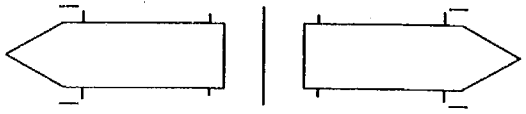
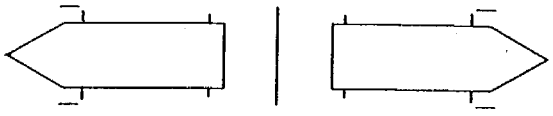
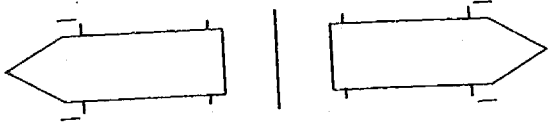
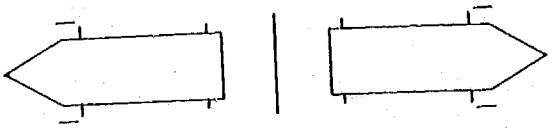
ケース	模型図	迎角	開口率	R	C	G	V_F(m/s)
21a		0°	20%	I			61.5
21b		0°	25%	I			64.3
21c		0°	30%	I			64.4
22a		0°	20%	I	○	○	77.4
22b		0°	25%	I	○	○	85.6
22c		0°	30%	I	○	○	95.8
22'a		0°	20%	II	○	○	20.6
22'b		0°	25%	II	○	○	24.0
22'c		0°	30%	II	○	○	28.2
23		-3°	25%	I	○	○	64.1

表－2・2・33(b)　実験結果（Bモデル：桁高5m）

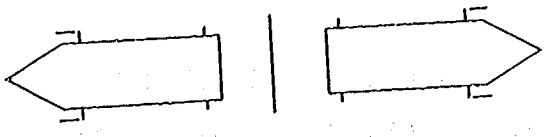
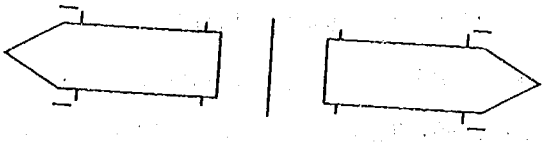
ケース	模型図	迎角	開口率	R	C	G	V_F(m/s)
24		-3°	30%	I	○	○	68.6
25		+3°	25%	I	○	○	96.1

R　：高欄
C　：センターバリア
G　：ガイドベーン

表－2・2・34(a)　実験結果（Cモデル：桁高７m）

ケース	模　型　図	迎角	開口率	R	C	G	V_F(m/s)
26a		0°	20%	I			62.7
26b		0°	25%	I			64.9
26c		0°	30%	I			66.7
27a		0°	20%	II	○	○	99.2↑
27b		0°	25%	II	○	○	99.5↑
27c		0°	30%	II	○	○	99.5↑
28		-3°	25%	II	○	○	101.8
29		-3°	20%	II	○	○	99.5

表－2・2・34(b)　実験結果（Cモデル：桁高7m）

ケース	模型図	迎角	開口率	R	C	G	V_F(m/s)
29'		-3°	20%	II	○	○ 低	16.7
30		+3°	25%	II	○	○	102.4↑

R　：高欄
C　：センターバリア
G　：ガイドベーン

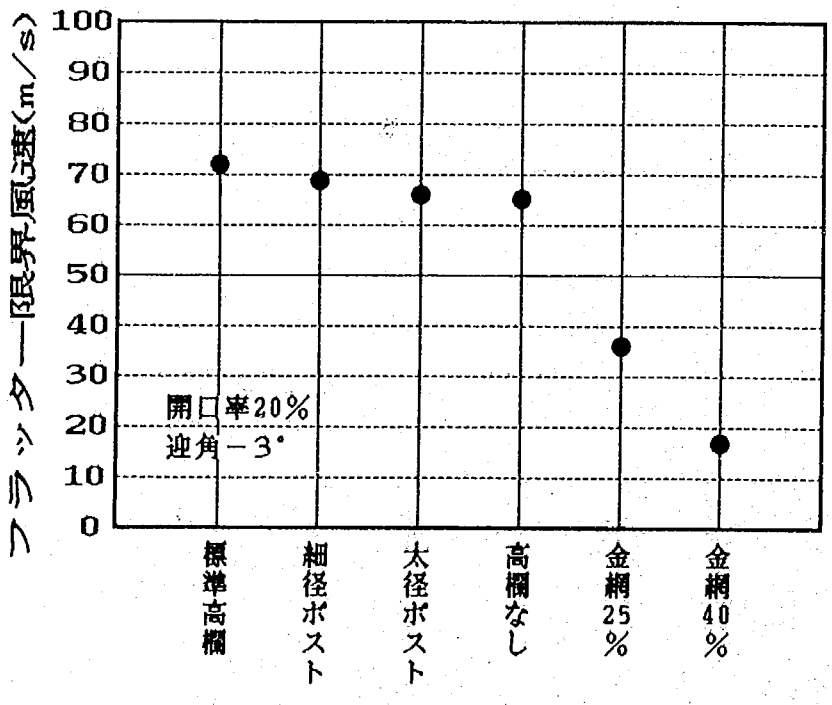
1） 高欄の形状が耐風性に及ぼす影響

2．2．3節において、高欄部材特にそのポストが耐風性に影響することが分かった。そこで、桁高の異なる3体の模型を用いた実験を行う先立ち、ポスト径や充実率の異なる高欄部材を用いて、高欄形状の影響について検討を行った。

使用した高欄部材は図－2・2・68に示す通りである。まず、高欄ポストの影響が大きかったことから、ポスト径の異なる部材を2種類用意した。図－2・2・67に示す標準的な高欄の充実率が約40%であったことから、横桟寸法は変えずに各ポスト間隔を調整して充実率を40%に合わせた。また、高欄の充実率の影響を考察するため、充実率の異なる金網メッシュタイプの部材（25%、40%）を用意した。

実験結果を図－2・2・70に示す。図中の実験条件に示すように、実験は開口率20%、迎角－3°で実施した。この理由は、前節の結果より、開口率が25%では計測範囲内でフラッターが観測されない可能性が大きく、各高欄部材の影響の比較ができないと考えたためである。結果を見ると、ポスト径を小さくして密に配置したものも、ポスト径を大きくして粗に配置したものも、標準タイプの高欄よりも耐風性は悪くなっている。さらに、金網メッシュタイプに至っては充実率を25%と小さくしたものでさえ、耐風性は大幅に低下している。図－2・2・59で示した閉塞した高欄の耐風性も悪かったことから考えても、風の流れを一様に妨げるタイプの高欄はむしろ耐風性を低下させる作用をすると考えられる。

前節の結果と併せて考えれば、ポストを間引くと耐風性が悪くなったように、ポストが太くても間隔が大きいと効果が少なく、逆に間隔を狭くしてもポストが細いと耐風性は良くないようである。従って、高欄形状が耐風性に及ぼす影響は、ポスト径とその配置間隔に依存すると考えられ、標準タイプの高欄が現在のところ最も良い。



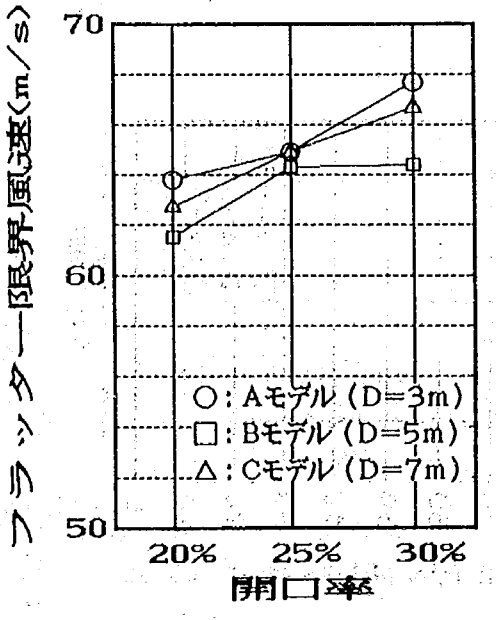
図－2・2・70 高欄部材の影響

2） 桁高Dと開口率φの関係

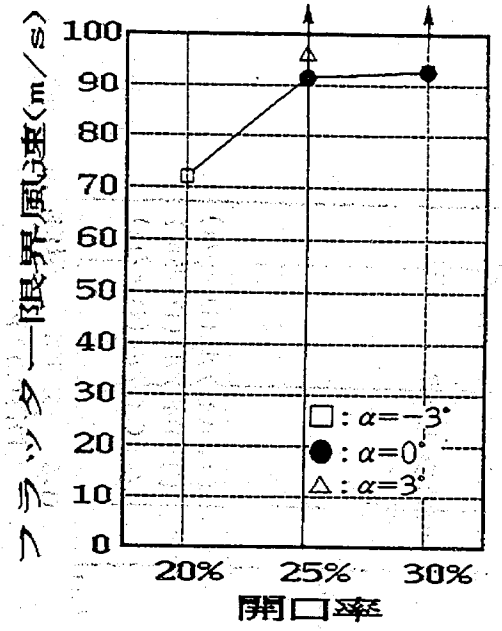
桁高と開口率の関係についてまとめたものを図－2・2・71および2・2・72に示す。図－2・2・71は対策を施さない高欄のみ設置した基本断面（迎角0°）について、桁高と開口率の関係を示したものである。これまでの結果と同様に、すべての桁高に対して開口率が大きくなるほどフラッター限界風速も大きくなっている。しかし、開口率が同じであれば、限界風速は桁高3m、7m、5mの順に高いが、各モデル間での差は小さく、桁高の影響は顕著でない。

また、図－2・2・72は各モデルの対策断面について、開口率と迎角の関係を示したものである。実験の都合上、開口率と迎角のすべての組合せについて結果を得ることができなかった。また、AモデルやCモデルの対策断面については、計測範囲内でフラッターを観測することができないケースが多く、明確な比較ができなくなっている。また、傾向のわかるBモデルは、実験ケース22´の結果が示すように、高欄を桁上下面に設置した断面では耐風性が大幅に低下したため、桁下面の高欄を取り外した断面を対策断面としている。そのため、図－2・2・72（b）に示すように迎角－3°の耐風性が改善されていない。センターバリアとガイドベーンによる改善効果はあるが、特性は基本断面と同様に開口率が大きいほど限界風速も大きくなっている。

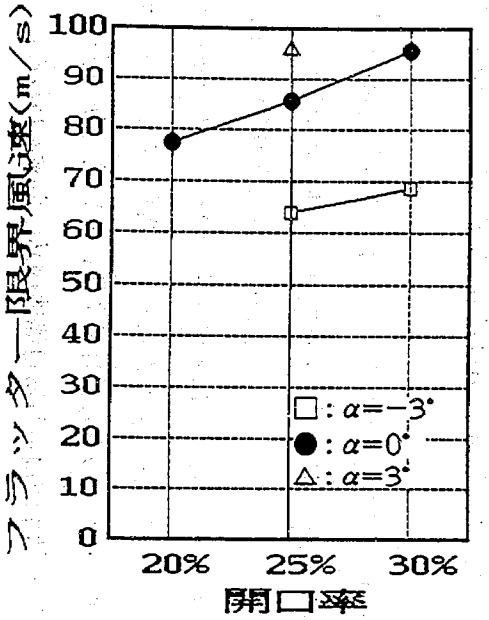
Bモデルで、AモデルやCモデルと同じ対策を施したにも関わらず、十分な耐風性が得られなかったのは以下の理由によると考えられる。実験の過程で、Bモデルよりも桁高の高いCモデルでAモデルと同様の効果が得られたため、桁高の増加が直接の原因ではない。各モデル間で桁高Dの増加に伴い、センターバリアの突出量とガイドベーンの設置高さをD／4となるように変化させている。このうちガイドベーンの設置高さに着目し、Cモデルにおいて設置高さがBモデルと同じとなるよう低くしたところ、実験ケース29´に示すようにフラッター限界風速が大幅に低下した。つまり、Bモデルにおいてもガイドベーンの設置高さをもう少し高くすれば、A，Cモデルと同様の効果が得られる可能性が高いと考えられる。



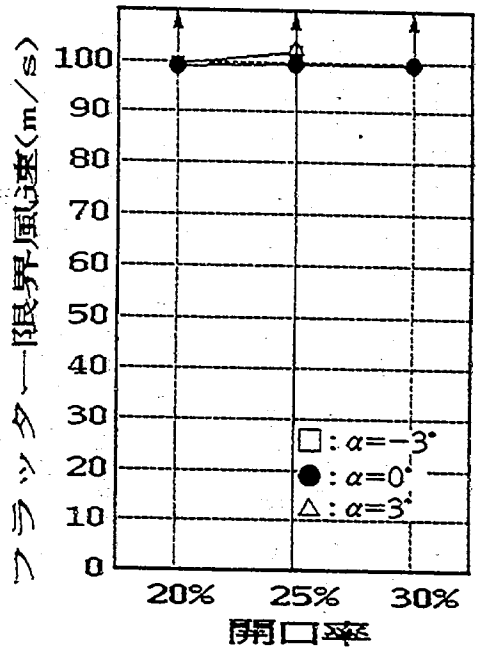
図－2・2・71 桁高Dと開口率φの関係（基本断面）



(a)Aモデル（D＝3ｍ）



(b)Bモデル（D＝5ｍ）



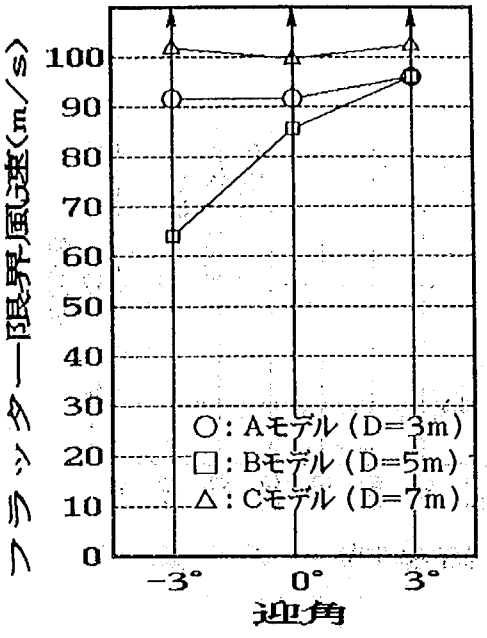
(c)Cモデル（D＝7ｍ）

図－2・2・72　桁高Dと開口率φの関係

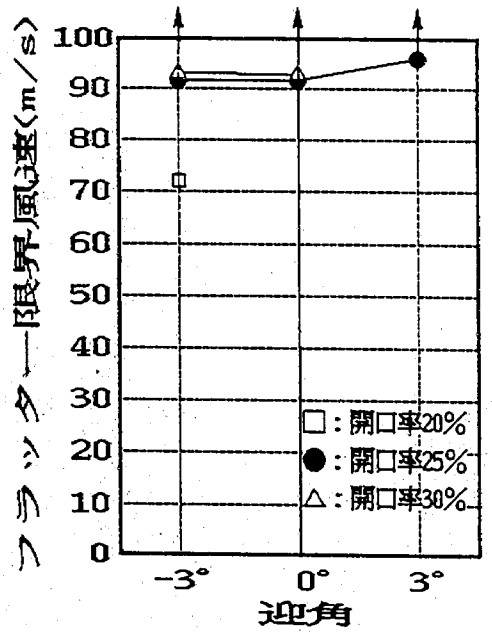
3） 桁高Dと迎角αの関係

桁高と迎角の関係についてまとめたものを図－2・2・73および2・2・74に示す。図－2・2・73は対策断面（開口率25％）について、桁高と迎角の関係を示したものである。この場合もAモデルおよびCモデルはフラッターが観測されなかったので比較にならない。Bモデルもこれまでの結果と同様に、迎角－3°の耐風性が他の迎角に比べて劣る結果である。

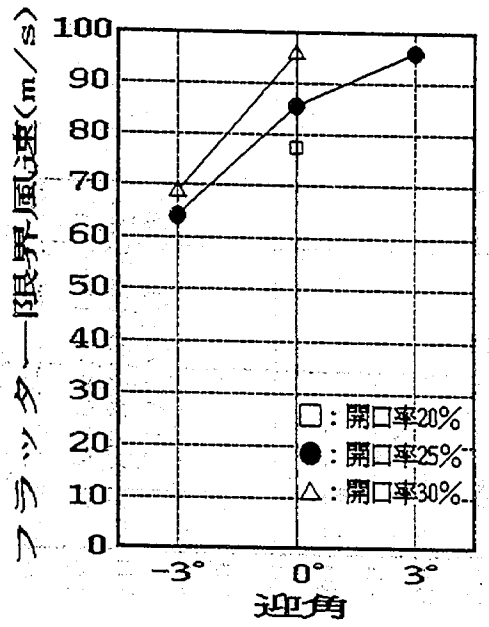
また、図－2・2・74は各モデルの対策断面について、迎角と開口率の関係を示したものである。前項と同じ理由によりBモデルについてのみコメントすれば、迎角が同じであれば開口率が大きいほど限界風速も大きくなっている。



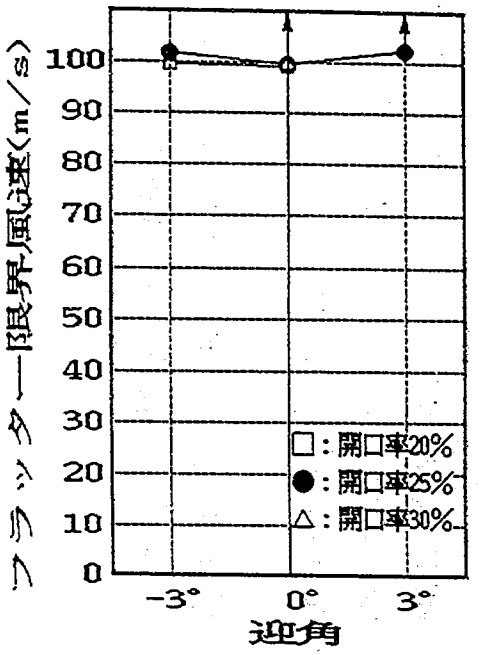
図－2・2・73 桁高Dと迎角αの関係（対策断面）



(a)Aモデル（D＝3ｍ）



(b)Bモデル（D＝5ｍ）



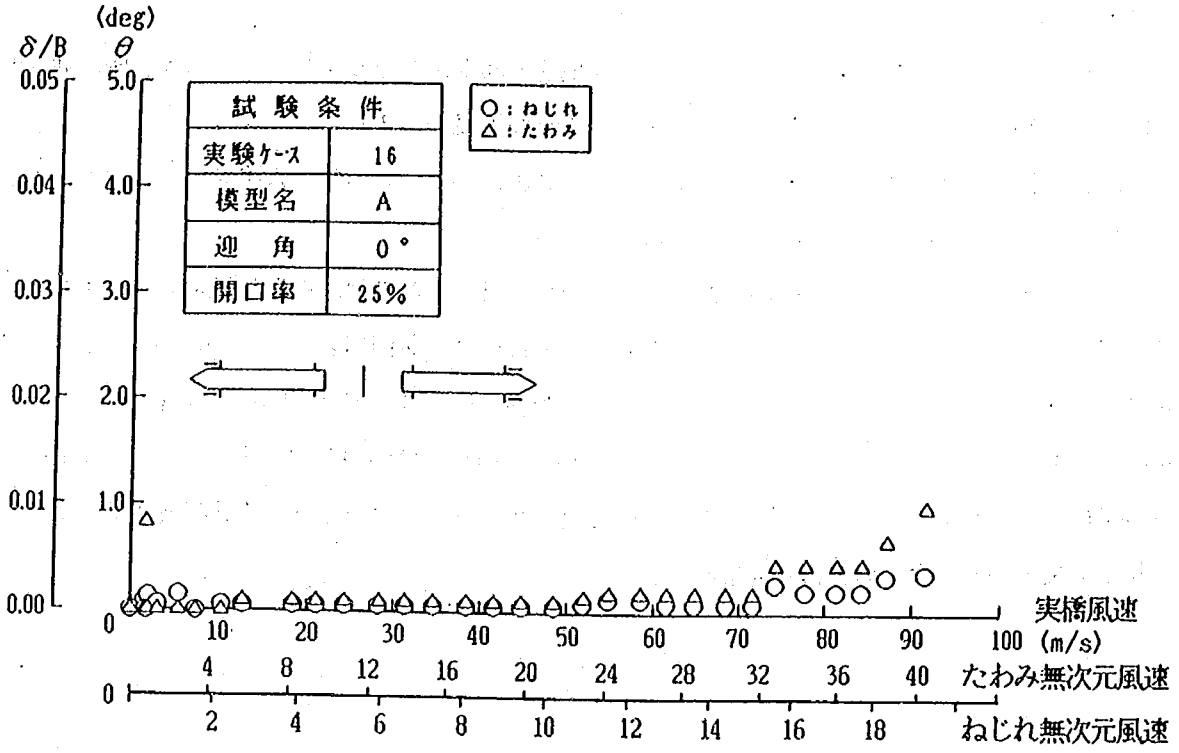
(c)Cモデル（D＝7ｍ）

図－2・2・74　桁高Dと迎角αの関係

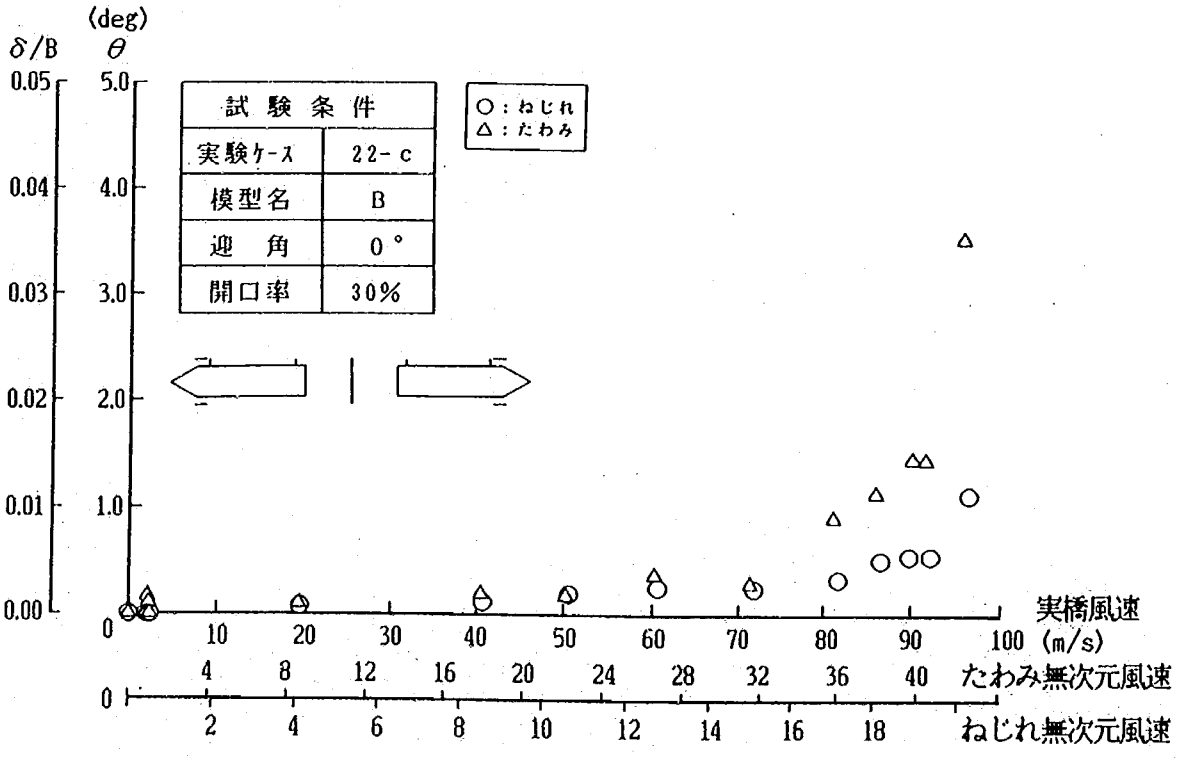
4）　限定振動について

今回の実験では、フラッターに主眼をおいてその限界風速の向上に努めてきた。その結果、既に述べたような対策部材の設置により、優れたフラッター特性を示す断面を見い出すことができた。その一方で、すべての桁高の断面において低風速での渦励振が確認された。詳細は各ケースのV－Λ図を参考されたいが、一例として各モデルの対策断面について図－2・2・75～2・2・77に示す。

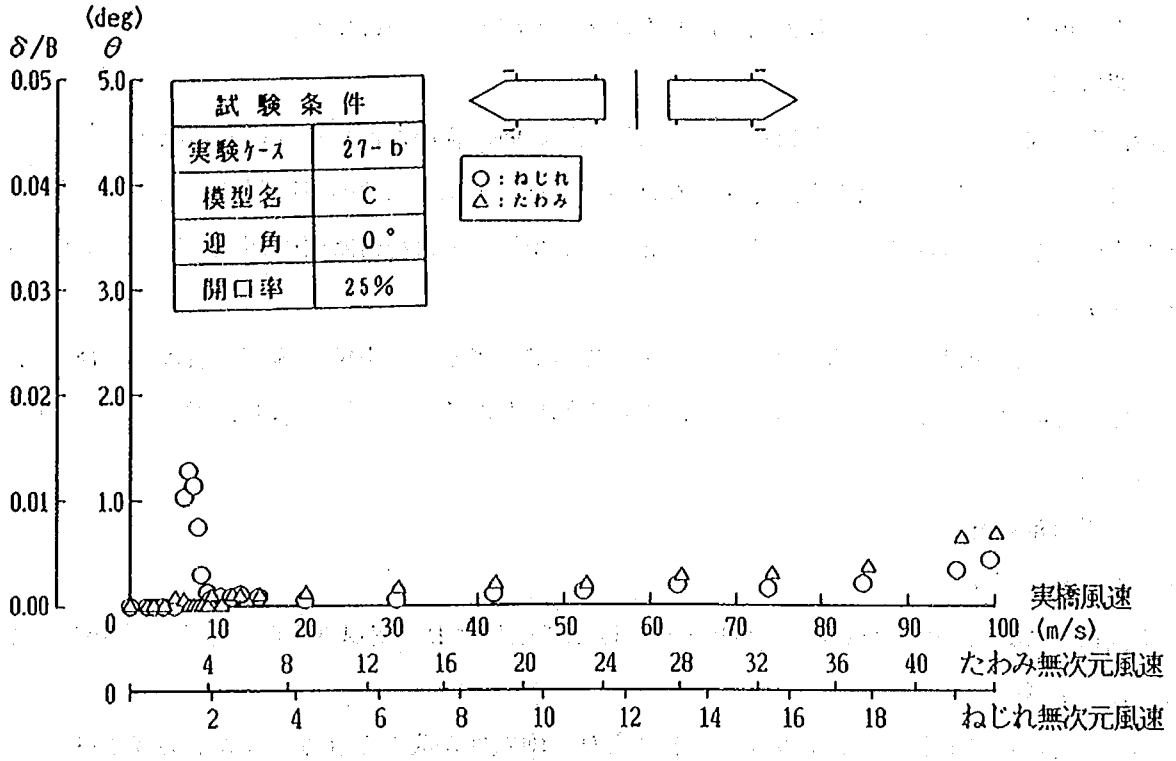
ΛモデルおよびBモデルではたわみの渦励振が、Cモデルではねじれの渦励振が極低風速域において発生している。図に示したのは対策断面であるが、桁上面高欄のみの基本断面においても渦励振は一応振幅を示す。昨年度の実験結果を見ても、桁高3mの旧Λモデル（実験ケース3）では渦励振は発生していないが、桁高4mの旧Bモデル（実験ケース17、24、25）ではたわみとねじれの渦励振が発生している。高欄もない断面でも渦励振が発生していることから、断面固有の振動と考えられ、フラッターと渦励振をともに満足する制振対策が必要であり、今後の検討課題である。



図－２・２・75　風速－振幅曲線　（Ａモデル：Ｄ＝３ｍ）



図－２・２・76　風速－振幅曲線　（Ｂモデル：Ｄ＝５ｍ）



図－２・２・77　風速－振幅曲線　（Ｃモデル：Ｄ＝７ｍ）

2．2．5　まとめ

バネ支持模型実験により、超長大橋の桁断面に関して次のことが言える。

（1）開口部

箱桁に開口部を設ける場合、開口位置は中央に設け、開口幅が大きくするほど耐風性は上昇する。一方、桁端等に設けた場合は、耐風性を悪化させる傾向がある。また、上面の開口幅を一定とした場合、下面の開口幅を広げても、耐風性を向上することはできず、最小幅の開口が桁断面の耐風性に影響を及ぼす。

（2）フェアリング

フェアリングは耐風性に影響が大きく、上下対称のフェアリングを桁外端部に設けた場合耐風性が良好となる。開口部のフェアリングは、耐風性にほとんど影響がなく、（1）に示した通り、最小開口幅が耐風性に影響する。

（3）耐風対策部材

1）センターバリア

中央開口部にd/4突出したセンターバリアを設けることにより、耐風性を改善することができる。

2）ガイドベーン

桁外端に所定のガイドベーンを設けることにより、耐風性が改善できる。また、ガイドベーンの設置高さは重要であり、低い位置に設けても効果は期待できない。設置高さは桁高のd/4とし、2/3dの長さの内、桁端にd/4突出した形状で設置した場合耐風性は良好となる。

3）高欄

高欄は耐風性を向上させる効果があり、下面に高欄型部材を取り付け上下対称断面にした場合、負の迎角時の耐風性を改善することができる。

2．3　非定常空気力の測定

2．3．1　目的

バネ支持模型実験では、2箱桁断面に対して様々な空力対策部材を設置してその耐風性を調査した。その結果、センターバリア、ガイドベーンおよび桁下面の高欄型部材に耐風性改善効果があり、逆に壁高欄のように閉塞型の高欄を設置すると耐風性が極度に悪くなることがわかった。しかしながら、それがどのような機構により生じているのかはわかっていない。機構を調べるために、煙風洞による可視化を試みたものの、模型の精度や縮尺の影響、対策断面の複雑な形状、トレーサーの風速の影響などにより、対策部材の効果を顕著に捉えることはできなかった。

そこで、1箱桁や2箱桁といった箱桁の基本特性の把握、また各空力対策部材の効果について、その機構の手がかりを得るため、各種桁断面に対して非定常空気力の測定を行った。そして、得られたデータを解析して非定常空気力係数を求め、各断面の迎角特性や対策部材間の違いについて比較を行った。

2．3．2　実験方法

（1）実験施設および気流条件

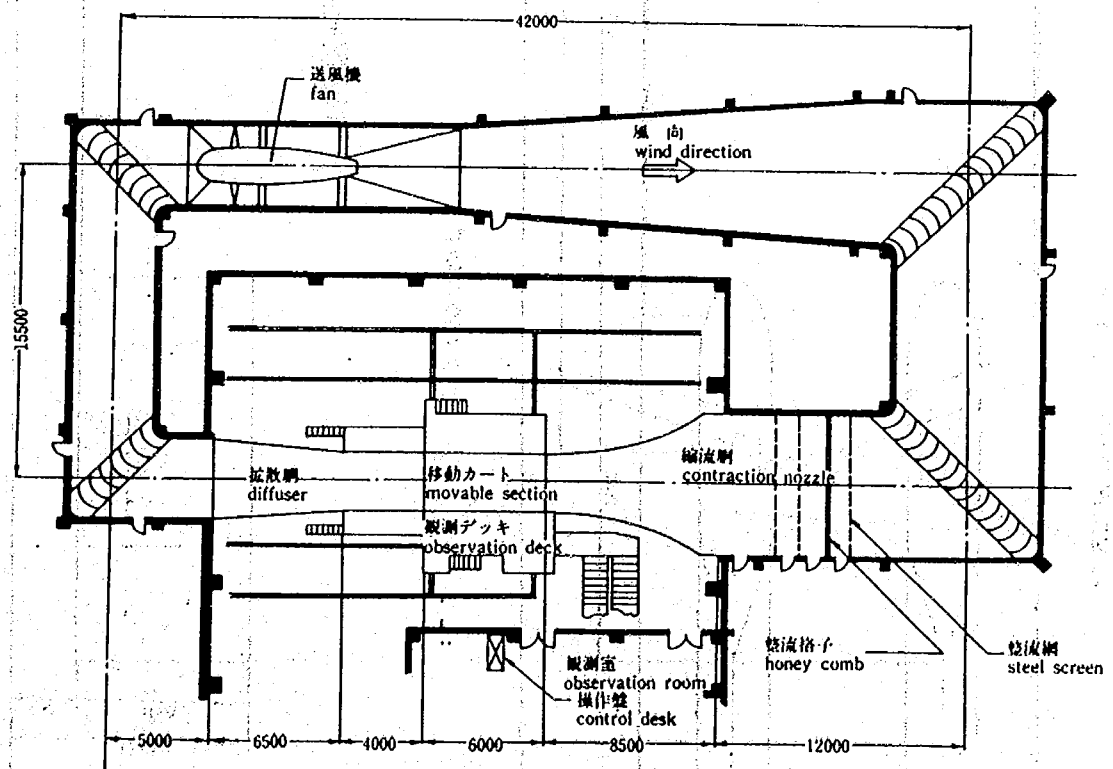
振動状態にある橋桁に作用する空気力、つまり非定常空気力を測定する方法には、自由振動法と強制振動法があるが、本実験では後者により行った。この場合、2次元剛体模型を一定振幅で加振し、非定常空気力検出装置に備えられた空気力測定天秤により、非定常空気力は検出される。

実験は、建設省土木研究所耐風工学実験施設内のフラッター風洞を使用して行った。フラッター風洞の主要諸元を図－2・3・1および表－2・3・1に示す。この風洞内に、図－2・3・2に示すように、非定常空気力検出装置および地面板を設置し、実験を行った。使用した模型は縮尺1／130の剛体模型である。

なお、正確さを期するためには気流計測を行う必要があるが、使用した気流は一様流のみである。そのため改めて気流計測は行わず、マノメータの風速と模型位置の風速の関係は過去の実験で得られた結果をそのまま使用した。参考までに図－2・3・3にピトー管位置の風速と模型位置の風速の関係を示すが、線形関係となっていることがわかる。

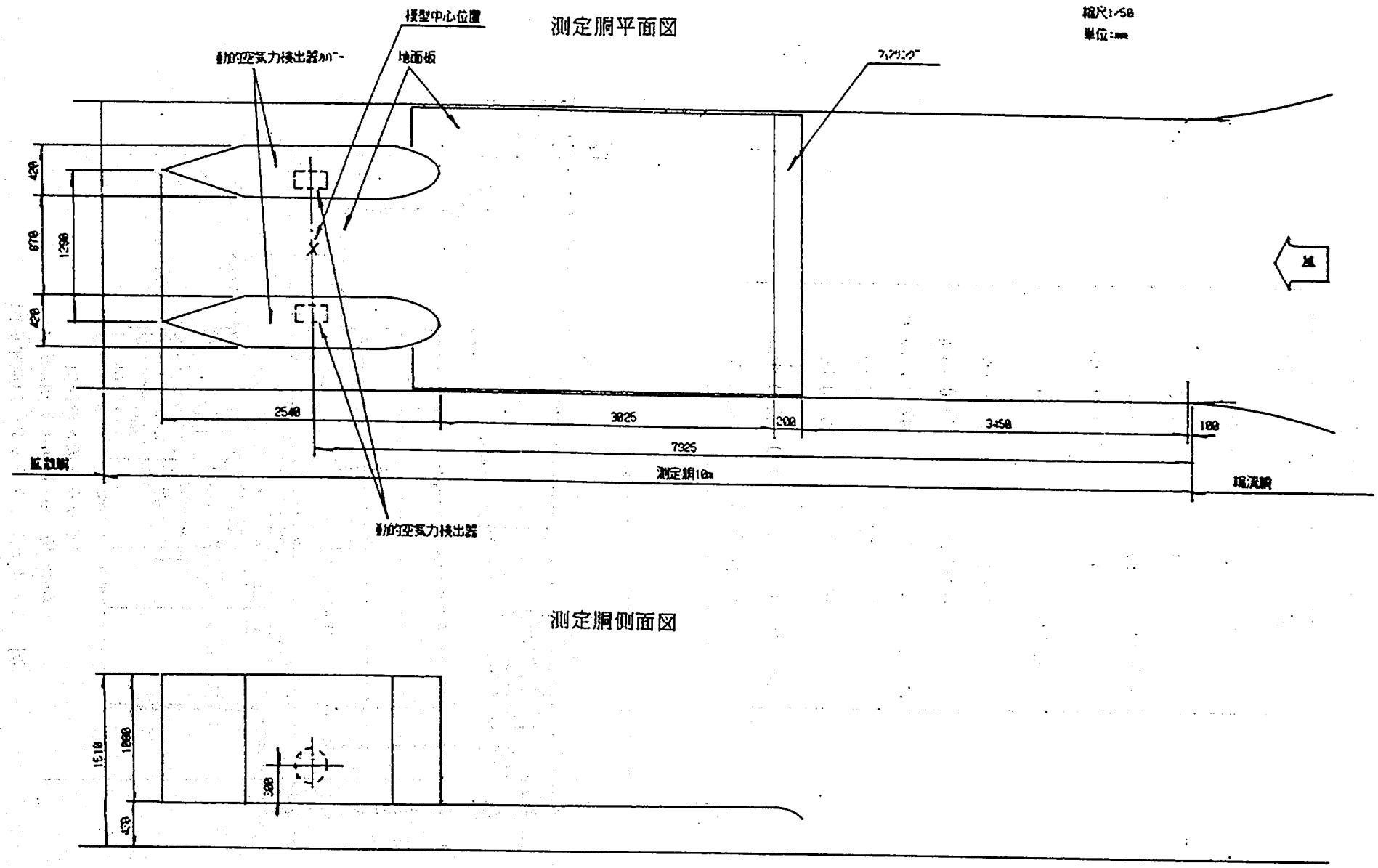
表－２・３・１　フラッター風洞 主要諸元

風 洞 名		フラッター風洞
風洞方式		単回路還流式
測定胴	幅	2,500 mm
	高	4,000 mm
	長	10,000 mm
風路全長		115 m
送風機	動翼直径	4,000 mm
	有効全圧	40.0 mmAq
	風　量	242.0 m^3/sec
	回転数	400 rpm
	容　量	250.0 kw
気流	風　速	1.0～25.0 m/sec
	乱れ率	0.5 %

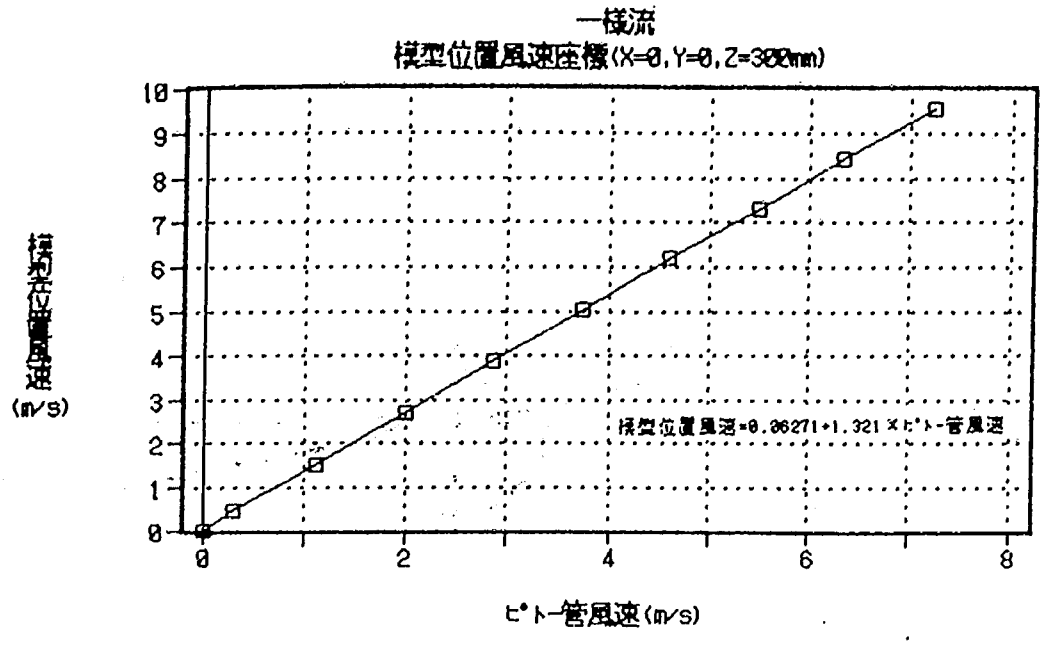


フラッター風洞平面図
Low Speed Wind Tunnel A

図－２・３・１　フラッター風洞平面図



図－２・３・２　非定常空気力実験概要図

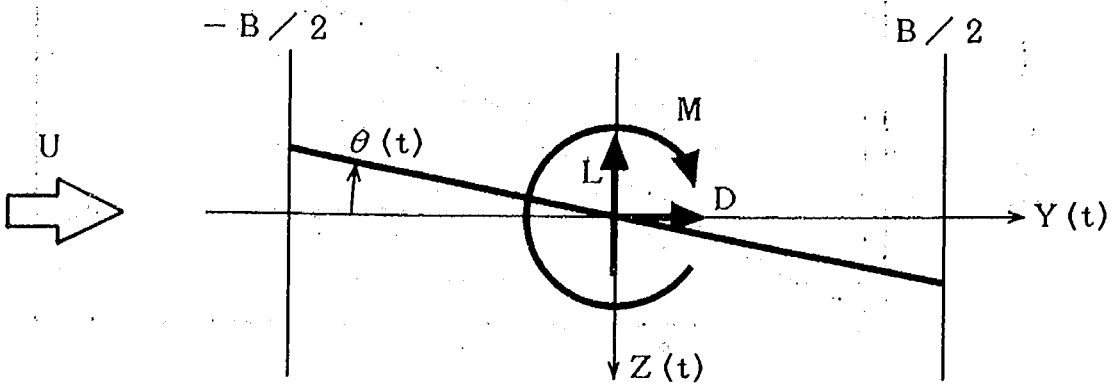


図－２・３・３　模型位置の風速

（2）非定常空気力係数の算出方法

1）非定常空気力の向きと座標系

非定常空気力の算出に用いる空気力の向きと座標系を図－2・3・4に示す。



図－2・3・4　空気力の向きと座標系

2）非定常空気力の定義

非定常空気力は以下のように定義する。

$$L=\pi\rho B^2\left[L_{zR}\omega^2 z+L_{zI}\omega\dot{z}\right]+\pi\rho B^3\left[L_{\theta R}\omega^2\theta+L_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]$$
$$+\pi\rho B^2\left[L_{yR}\omega^2 y+L_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

$$M=\pi\rho B^3\left[M_{zR}\omega^2 z+M_{zI}\omega\dot{z}\right]+\pi\rho B^4\left[M_{\theta R}\omega^2\theta+M_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]$$
$$+\pi\rho B^3\left[M_{yR}\omega^2 y+M_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

$$D=-\pi\rho dB\left[D_{zR}\omega^2 z+D_{zI}\omega\dot{z}\right]-\pi\rho dB^2\left[D_{\theta R}\omega^2\theta+D_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]$$
$$-\pi\rho Bd\left[D_{yR}\omega^2 y+D_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

----------式(2・3・1)

ここに、　L，M，D：揚力、モーメント、抗力

z，θ，y：鉛直、回転、水平変位

ρ：空気密度

B，d：桁幅（模型有効幅）、桁高（模型有効高）

ω：円振動数

L_{zR}，L_{zI}，$L_{\theta R}$，$L_{\theta I}$，L_{yR}，L_{yI}，

M_{zR}，M_{zI}，$M_{\theta R}$，$M_{\theta I}$，M_{yR}，M_{yI}，

D_{zR}，D_{zI}，$D_{\theta R}$，$D_{\theta I}$，D_{yR}，D_{yI}

：非定常空気力係数（断面形状により決まる固有の係数）

添字 z ：鉛直（上下）加振時　　R：実部

θ ：モーメント（回転）加振時　　I：虚部

y ：抗力（水平）加振時

3）非定常空気力係数

非定常空気力係数は以下の式で算出できる。

$$L_{zR}=\frac{K_{zL}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2} \qquad L_{zI}=\frac{-Q_{zL}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2}$$

$$L\theta_R=\frac{K\theta_L(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3} \qquad L\theta_I=\frac{-Q\theta_L(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3}$$

$$L_{yR}=\frac{K_{yL}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2} \qquad L_{yI}=\frac{-Q_{yL}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2}$$

--------- 式(2・3・2a)～(2・3・2f)

$$M_{zR}=\frac{K_{zM}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3} \qquad M_{zI}=\frac{-Q_{zM}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3}$$

$$M\theta_R=\frac{K\theta_M(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^4} \qquad M\theta_I=\frac{-Q\theta_M(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^4}$$

$$M_{yR}=\frac{K_{yM}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3} \qquad M_{yI}=\frac{-Q_{yM}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^3}$$

--------- 式(2・3・3a)～(2・3・3f)

$$D_{zR}=\frac{K_{zD}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2} \qquad D_{zI}=\frac{-Q_{zD}(\omega)}{S_{zz}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2}$$

$$D\theta_R=\frac{K\theta_D(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2} \qquad D\theta_I=\frac{-Q\theta_D(\omega)}{S\theta\theta(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2}$$

$$D_{yR}=\frac{K_{yD}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2} \qquad D_{yI}=\frac{-Q_{yD}(\omega)}{S_{yy}(\omega)}\frac{1}{\omega^2\pi\rho B^2}$$

--------- 式(2・3・4a)～(2・3・4f)

ここに、　K_{ab}：a方向加振時、a方向変位、b成分空気力のｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙC_{ab}の実部

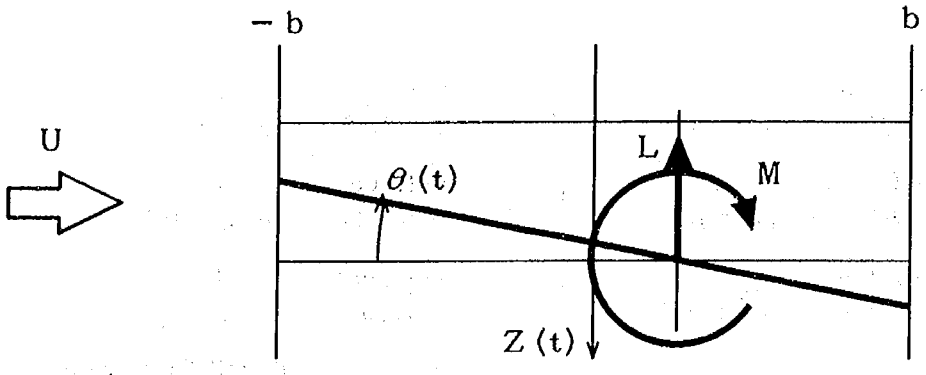
Q_{ab}：　〃　〃　〃　〃　虚部

S_{aa}：a　方向加振時、a　方向変位ﾊﾟﾜｰｽﾍﾟｸﾄﾙ

（3）非定常空気力係数理論値

1）平板の非定常空気力係数

調和振動を行う2次元平板剛翼に作用する非定常空気力については、Theodorsenが解析的に求めており、それに関連する文献も多数ある[1)、2)]。よって詳細はそれらに譲り、空気力の定義と係数の算出結果のみを以下に示す。



図－2・3・5　2自由度平板の振動

一般に図－2・3・5に示す揚力Lおよび空力モーメントを下式のように表せる。

$$L=\pi\rho B^3\omega^2\{(L_{zR}+iL_{zI})z/B+(L\theta_R+iL\theta_I)\theta\}$$
$$=\pi\rho b^3\omega^2\{4\cdot(L_{zR}+iL_{zI})z/b+8\cdot(L\theta_R+iL\theta_I)\theta\}$$

---------- 式(2・3・5a)

$$M=\pi\rho B^4\omega^2\{(M_{zR}+iM_{zI})z/B+(M\theta_R+iM\theta_I)\theta\}$$
$$=\pi\rho b^4\omega^2\{8\cdot(M_{zR}+iM_{zI})z/b+16\cdot(M\theta_R+iM\theta_I)\theta\}$$

---------- 式(2・3・5b)

ここに、　B：桁の全幅（B＝2b）

また、上記の式中に含まれる非定常空気力係数は以下の通りである。ただし、フラッター解析プログラムの都合上、$L\theta$およびM_zの符号は逆転している。

$$L_{zR}=\{2.0\times G(k)/k\}/4$$
$$L_{zI}=\{-2.0\times F(k)/k\}/4$$
$$L\theta_R=\{2.0\times F(k)/k^2-G(k)/k\}/8$$
$$L\theta_I=\{2.0\times G(k)/k^2+(1.0+F(k))/k\}/8$$
$$M_{zR}=\{G(k)/k\}/8$$
$$M_{zI}=\{-F(k)/k\}/8$$
$$M\theta_R=\{F(k)/k^2-G(k)/2.0/k\}/16$$
$$M\theta_I=\{G(k)/k^2-(F(k)-1.0)/2.0/k\}/16$$

--------- 式(2・3・6a)～(2・3・6h)

ここに、F(k)、G(k)はセオドルセン関数C(k) の実部および虚部であり、次式で求められる。

$$F(k)=\frac{J_1(J_1+Y_0)+Y_1(Y_1-J_0)}{(J_1+Y_0)^2+(Y_1-J_0)^2}$$

---------- 式(2・3・7a)

$$G(k)=-\frac{Y_0Y_1+J_0J_1}{(J_1+Y_0)^2+(Y_1-J_0)^2}$$

---------- 式(2・3・7b)

ここに、J_ν ：ν次の第１種ベッセル関数

Y_ν ：ν次の第２種ベッセル関数

k ：換算振動数

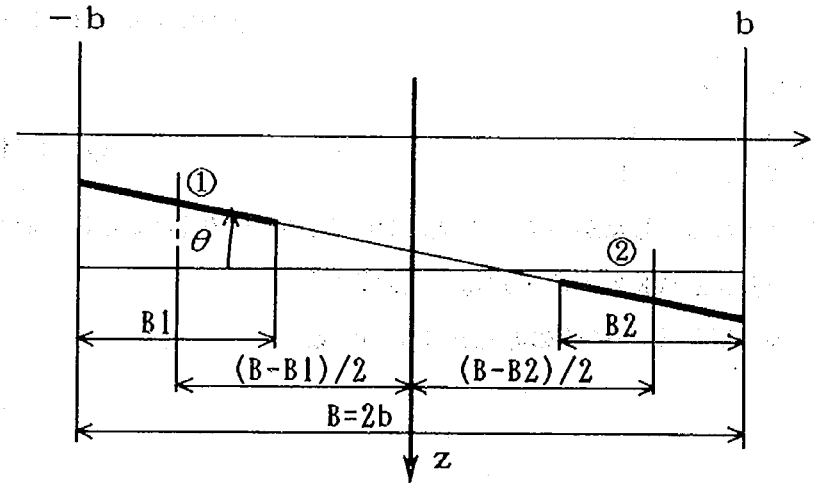
２）２箱桁断面の非定常空気力係数

前節に示した平板の非定常空気力係数を用いて、図－２・３・６に示すような２自由度における２箱桁断面の非定常空気力係数の推定を、以下に示す仮定により誘導する。

・各箱桁には非定常空気力が独立に作用し、他の箱桁の影響を受けないものとする。

・桁全体に作用する非定常空気力は、各箱桁に作用する非定常空気力の合計と考える。

つまり、実際は風下側の桁は風上側の桁の後流の影響を受けるのであるが、これを無視する。



図－２・３・６　２箱桁断面の振動

上図において左右の桁幅B1およびB2が等しい場合には、空気力係数も等しいと考えれば、桁全体に作用する空気力は以下のようになる。

$$L=L_1+L_2$$

$$=\pi\rho B^3\omega^2[\{(2d_1^2L_{zR1})+i(2d_1^2L_{z11})\}z/B+\{(2d_1^3L\theta_{R1})+i(2d_1^3L\theta_{11})\}\theta]$$

---------- 式(2・3・8)

$$M=M_1+M_2$$

$$=\pi\rho B^4\omega^2\{[(2d_1^3M_{zR1})+i(2d_1^3M_{z11})]z/B$$
$$+[\{2d_1^4M\theta_{R1}+d_1^2(1-d_1)^2L_{zR1}/2\}$$
$$+i\{2d_1^4M\theta_{11}+d_1^2(1-d_1)^2L_{z11}/2\}]\theta\}$$

---------- 式(2・3・9)

ここに、$d_1=B_1/B$

L_{*1}、M_{*1}は平板①に作用する非定常空気力係数

以上により、2箱桁断面の非定常空気力係数は次のように与えられる。

$$L_{zR}=2d_1^2L_{zR1}$$
$$L_{z1}=2d_1^2L_{z11}$$
$$L\theta_R=2d_1^3L\theta_{R1}$$
$$L\theta_1=2d_1^3L\theta_{11}$$
$$M_{zR}=2d_1^3M_{zR1}$$
$$M_{z1}=2d_1^3M_{z11}$$
$$M\theta_R=2d_1^4M\theta_{R1}+d_1^2(1-d_1)^2L_{zR1}/2$$
$$M\theta_1=2d_1^4M\theta_{11}+d_1^2(1-d_1)^2L_{z11}/2$$

------- 式(2・3・10a)～(2・3・10h)

なおこのとき、換算振動数kは

$$k=\frac{\omega B}{2U}=\frac{\omega B_1}{2d_1U}=\frac{k_1}{d_1}$$ ---------- 式(2・3・11)

であるから、$k_1=d_1k$となる。したがって、上式において非定常空気力係数はそれぞれ、

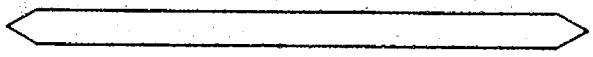
L_{**}, M_{**} ：換算振動数kの時の非定常空気力係数

L_{*1}, M_{*1}：換算振動数k_1の時の非定常空気力係数

2・3・3　実験ケース

非定常空気力の測定を行った桁断面は表－２・３・２に示す８種類である。

表－２・３・２　桁断面

桁断面の種類		模型図	高欄	CB	GV
1	1箱桁				
2	2箱桁				
3	2箱桁(高欄) 基本断面		上のみ		
4	2箱桁 高欄+ｾﾝﾀﾊﾞﾘｱ		上のみ	○	
5	2箱桁 高欄 +ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ		上のみ		○
6	2箱桁 上下高欄		上下		
7	2箱桁 高欄+ 開口率30％		上のみ		
8	2箱桁 対策断面		上下	○	○

表中の　ＣＢ：センタバリア

ＧＶ：ガイドベーン

本実験は強制加振法により非定常空気力を測定する方法であるため、前述に示した18個すべての非定常空気力係数を求めるためには、迎角ごとに揚力Ｌ、モーメントＭおよび抗力Ｄの各方向の加振を行う必要がある。ただ、２自由度フラッター解析を行うだけならば８個の非定常空気力係数が分かれば良い。よって、ケースの多くは揚力とモーメントの２方向のみ計測した。内訳を表－２・３・３に示す。

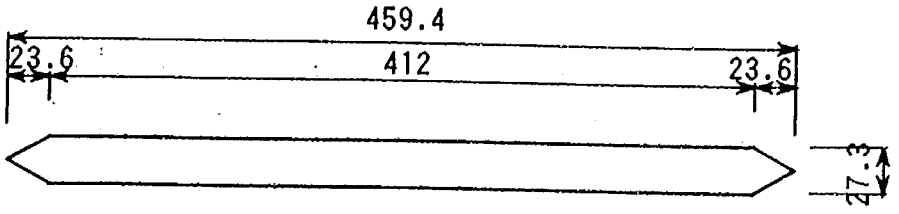
表－２・３・３　実験ケース一覧表

断面形状		迎角	揚力加振	モーメント加振	抗力加振
1	１箱桁	0°	○	○	
		+3°	○	○	
		-3°	○	○	
2	２箱桁	0°	○	○	
		+3°	○	○	
		-3°	○	○	
3	２箱桁（高欄）基本断面	0°	○	○	○
		+3°	○	○	○
		-3°	○	○	○
4	２箱桁 高欄+ｾﾝﾀﾊﾞﾘｱ	0°	○	○	○
		+3°	○	○	○
		-3°	○	○	○
5	２箱桁 高欄 +ｶﾞｲﾄﾞﾍﾞｰﾝ	0°	○	○	○
		+3°	○	○	○
		-3°	○	○	○
6	２箱桁 上下高欄	0°	○	○	
		+3°	○	○	
		-3°	○	○	
7	２箱桁 高欄+ 開口率30％	0°	○	○	
		+3°	○	○	
		-3°	○	○	
8	２箱桁 対策断面	0°	○	○	○
		+3°	○	○	○
		-3°	○	○	○

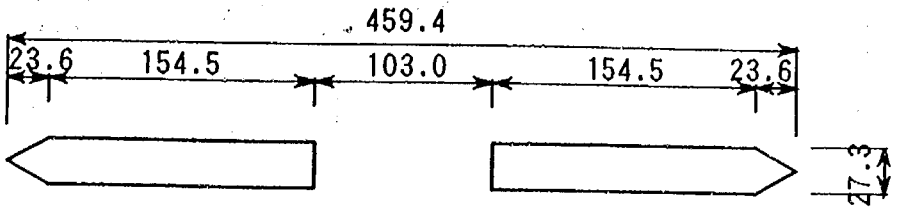
Aモデル（D＝3．0m）

縮尺　1/110

1箱桁



2箱桁



2箱桁（基本断面）



2箱桁（高欄＋センタバリア）



2箱桁（高欄＋ガイドベーン）

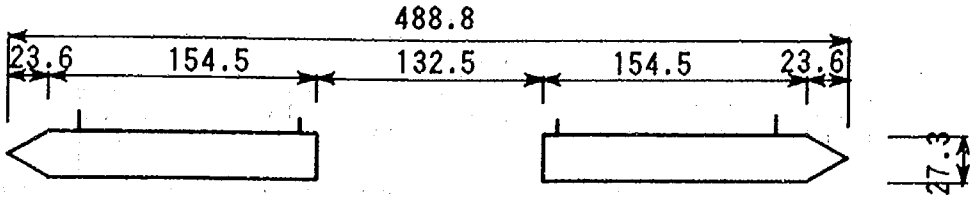


図－2・3・7(a)　桁断面詳細図（その1）

２箱桁（上下高欄）



２箱桁（開口率30%＋高欄）



２箱桁（対策断面）



図－２・３・７(b)　桁断面詳細図（その２）

2．3．4　実験結果（非定常空気力係数）

測定結果により得られた非定常空気力係数を図－２・３・８～２・３・２５に示す。

図－２・３・８　非定常空気力係数L_{zR}（揚力、揚力加振、実部）

図－２・３・９　非定常空気力係数L_{zI}（揚力、揚力加振、虚部）

図－２・３・１０　非定常空気力係数M_{zR}（モーメント、揚力加振、実部）

図－２・３・１１　非定常空気力係数M_{zI}（モーメント、揚力加振、虚部）

図－２・３・１２　非定常空気力係数$L_{\theta R}$（揚力、モーメント加振、実部）

図－２・３・１３　非定常空気力係数$L_{\theta I}$（揚力、モーメント加振、虚部）

図－２・３・１４　非定常空気力係数$M_{\theta R}$（モーメント、モーメント加振、実部）

図－２・３・１５　非定常空気力係数$M_{\theta I}$（モーメント、モーメント加振、虚部）

図－２・３・１６　非定常空気力係数D_{zR}（抗力、揚力加振、実部）

図－２・３・１７　非定常空気力係数D_{zI}（抗力、揚力加振、虚部）

図－２・３・１８　非定常空気力係数$D_{\theta R}$（抗力、モーメント加振、実部）

図－２・３・１９　非定常空気力係数$D_{\theta I}$（抗力、モーメント加振、虚部）

図－２・３・２０　非定常空気力係数L_{yR}（揚力、抗力加振、実部）

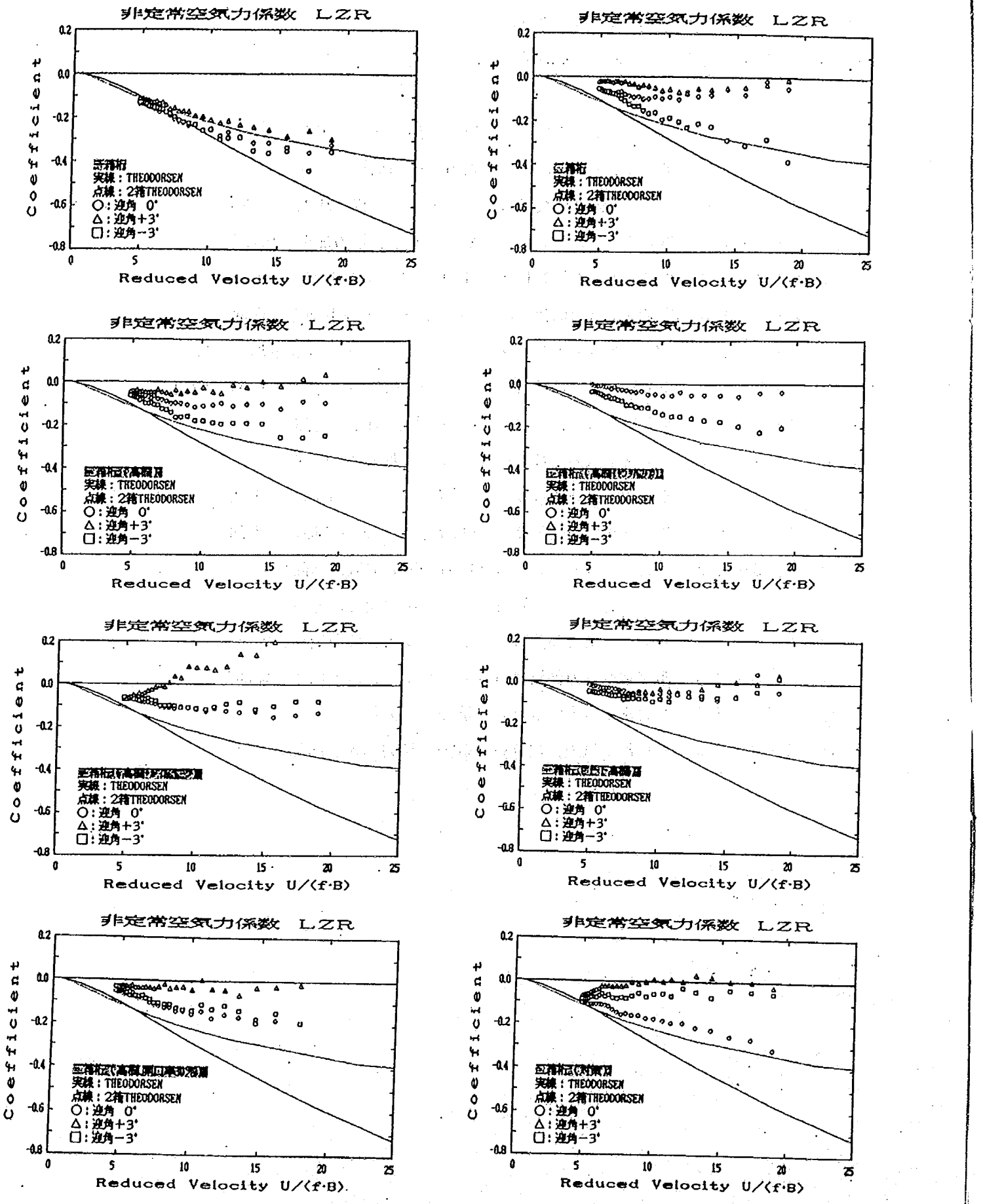
図－２・３・２１　非定常空気力係数L_{yI}（揚力、抗力加振、虚部）

図－２・３・２２　非定常空気力係数M_{yR}（モーメント、抗力加振、実部）

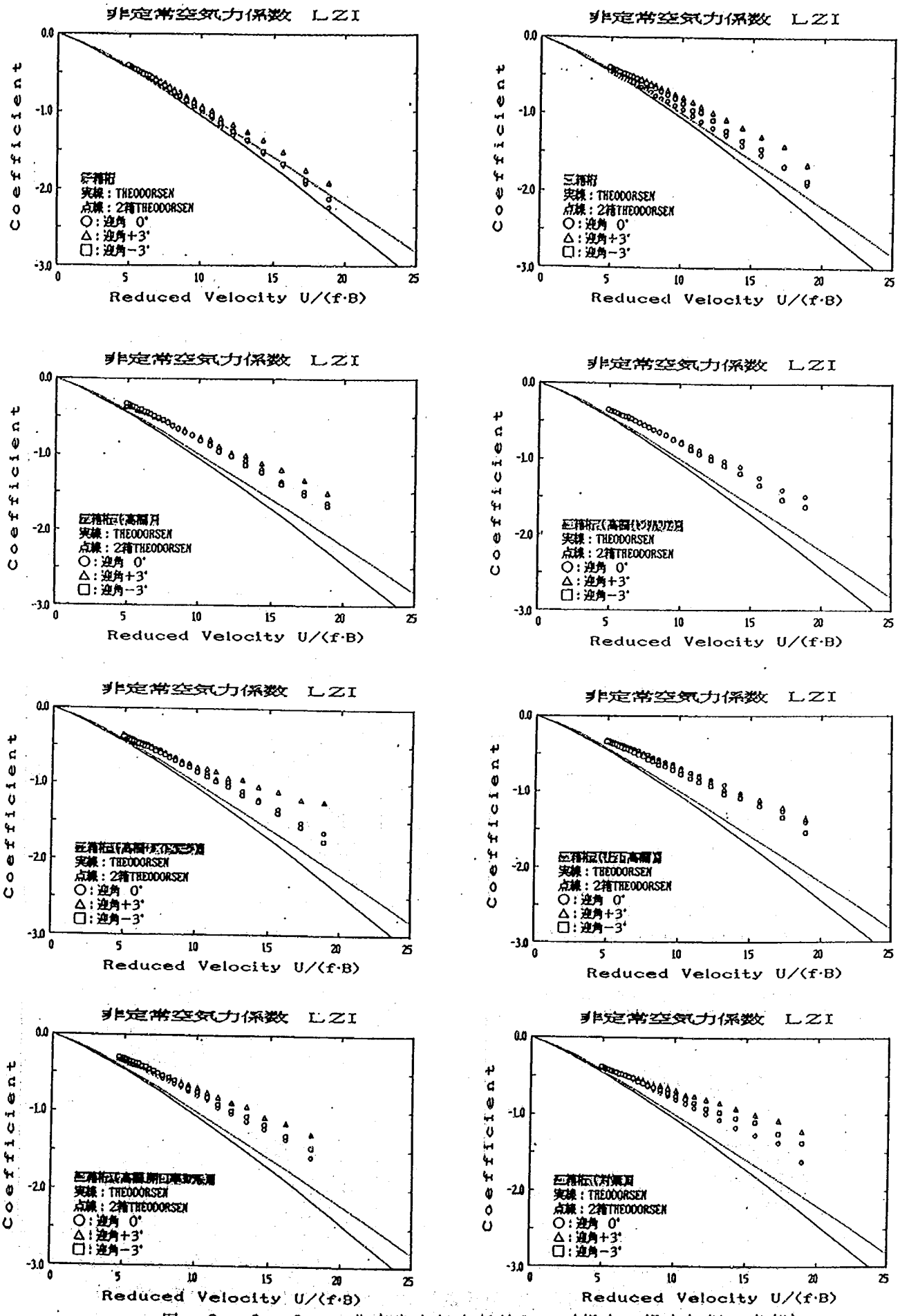
図－２・３・２３　非定常空気力係数M_{yI}（モーメント、抗力加振、虚部）

図－２・３・２４　非定常空気力係数D_{yR}（抗力、抗力加振、実部）

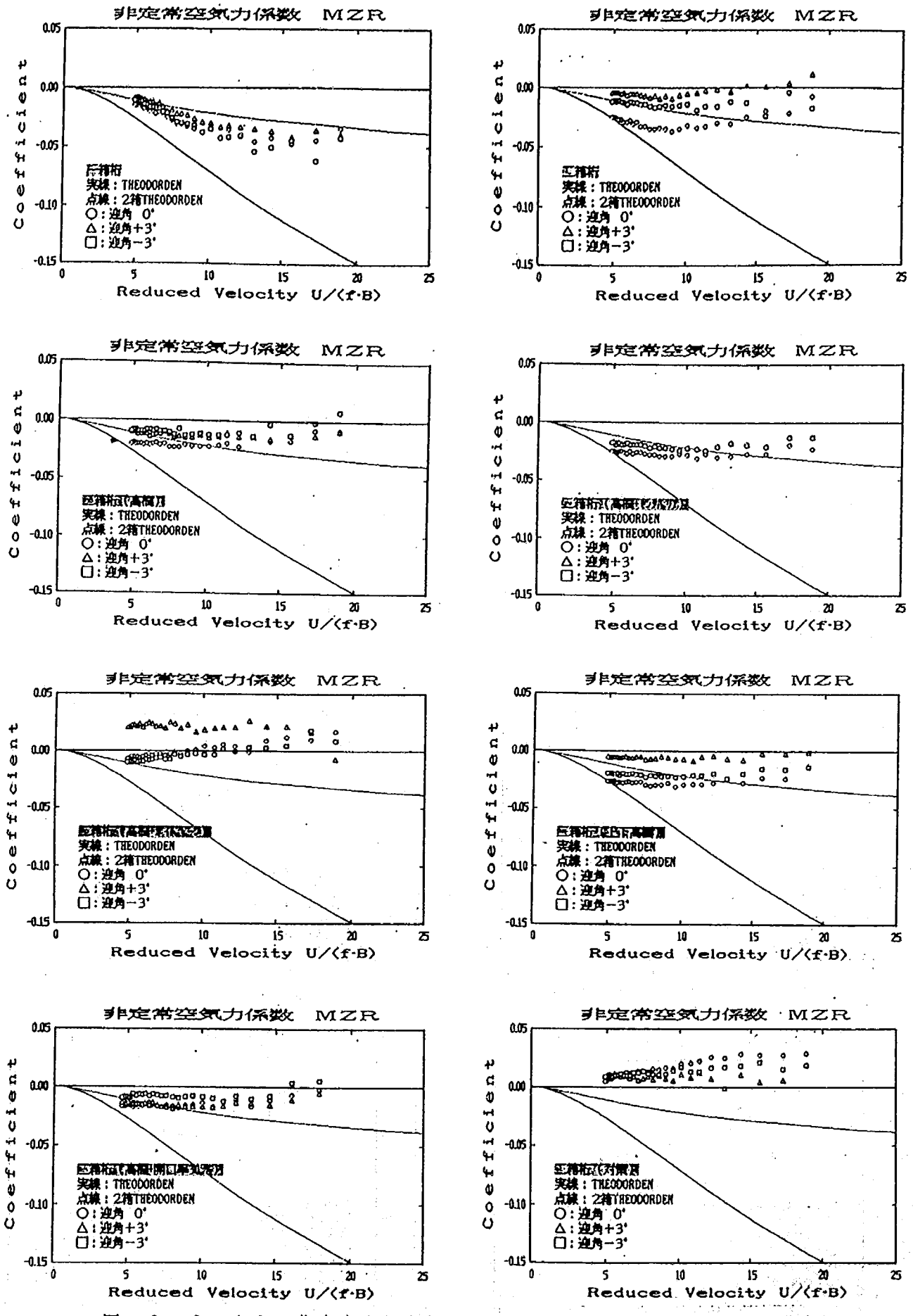
図－２・３・２５　非定常空気力係数D_{yI}（抗力、抗力加振、虚部）



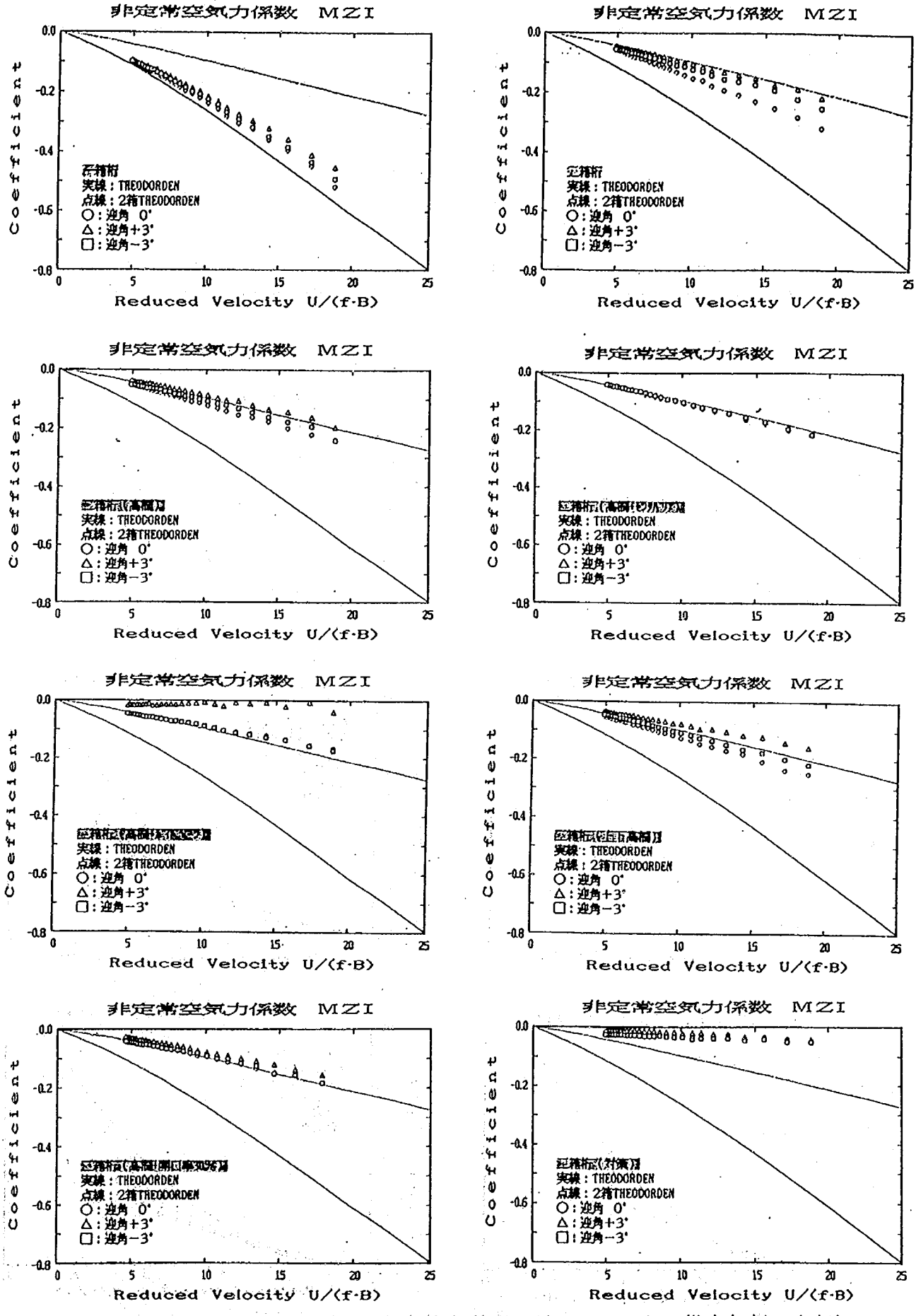
図－２・３・８　非定常空気力係数 L_{zR}（揚力、揚力加振、実部）



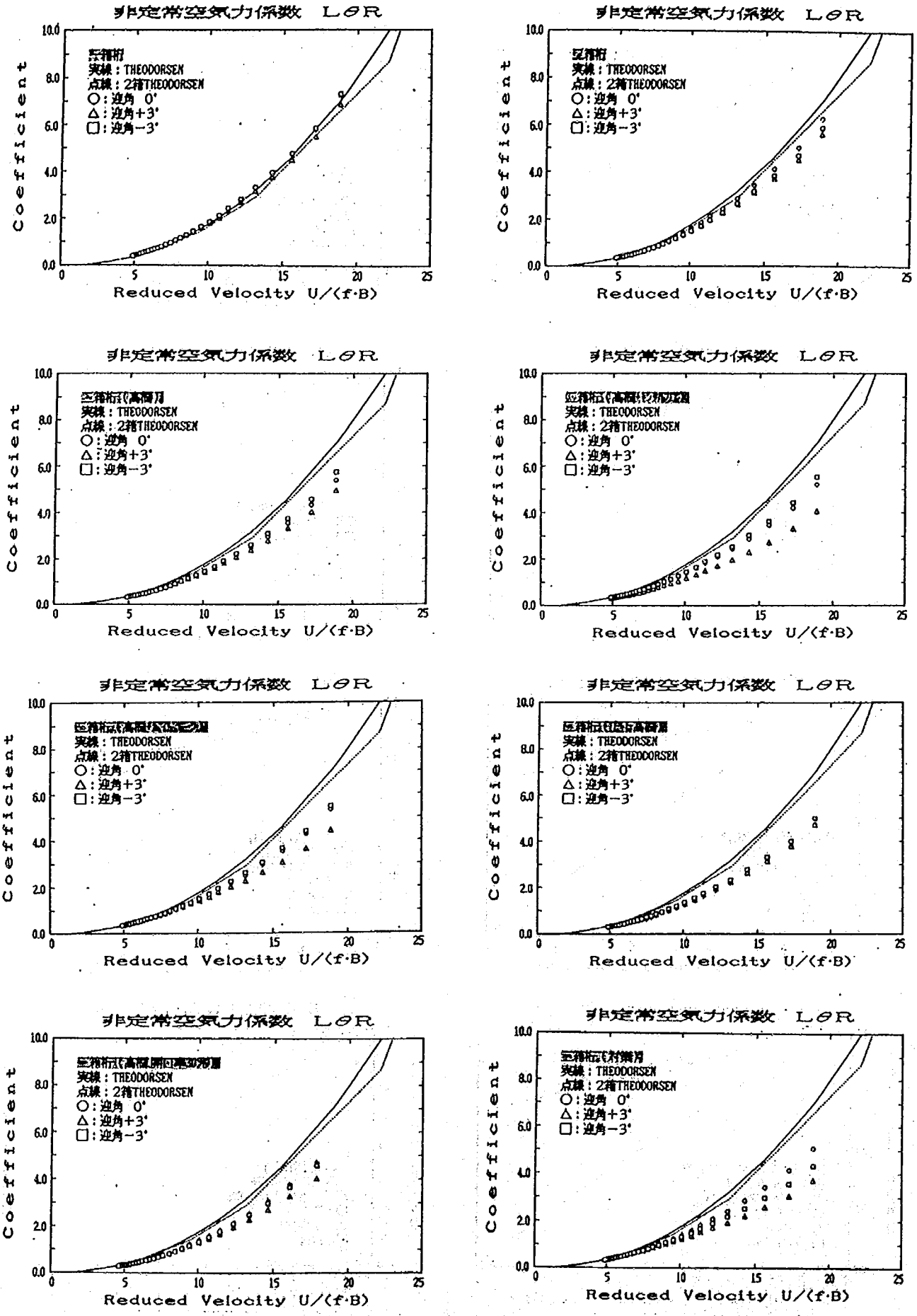
図－２・３・９　非定常空気力係数 L_{z1}（揚力、揚力加振、虚部）



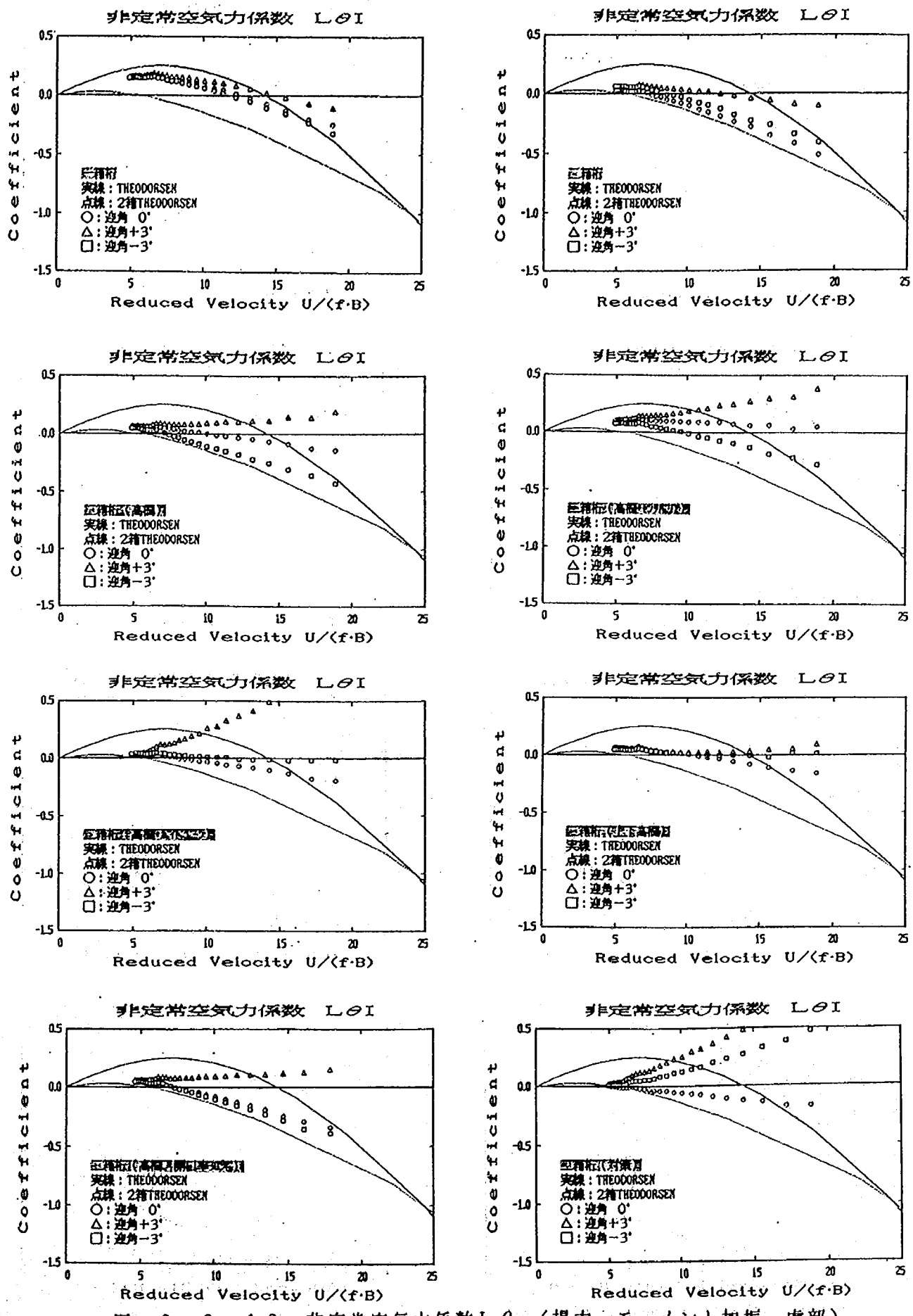
図－２・３・１０　非定常空気力係数M_{ZR}（モーメント、揚力加振、実部）



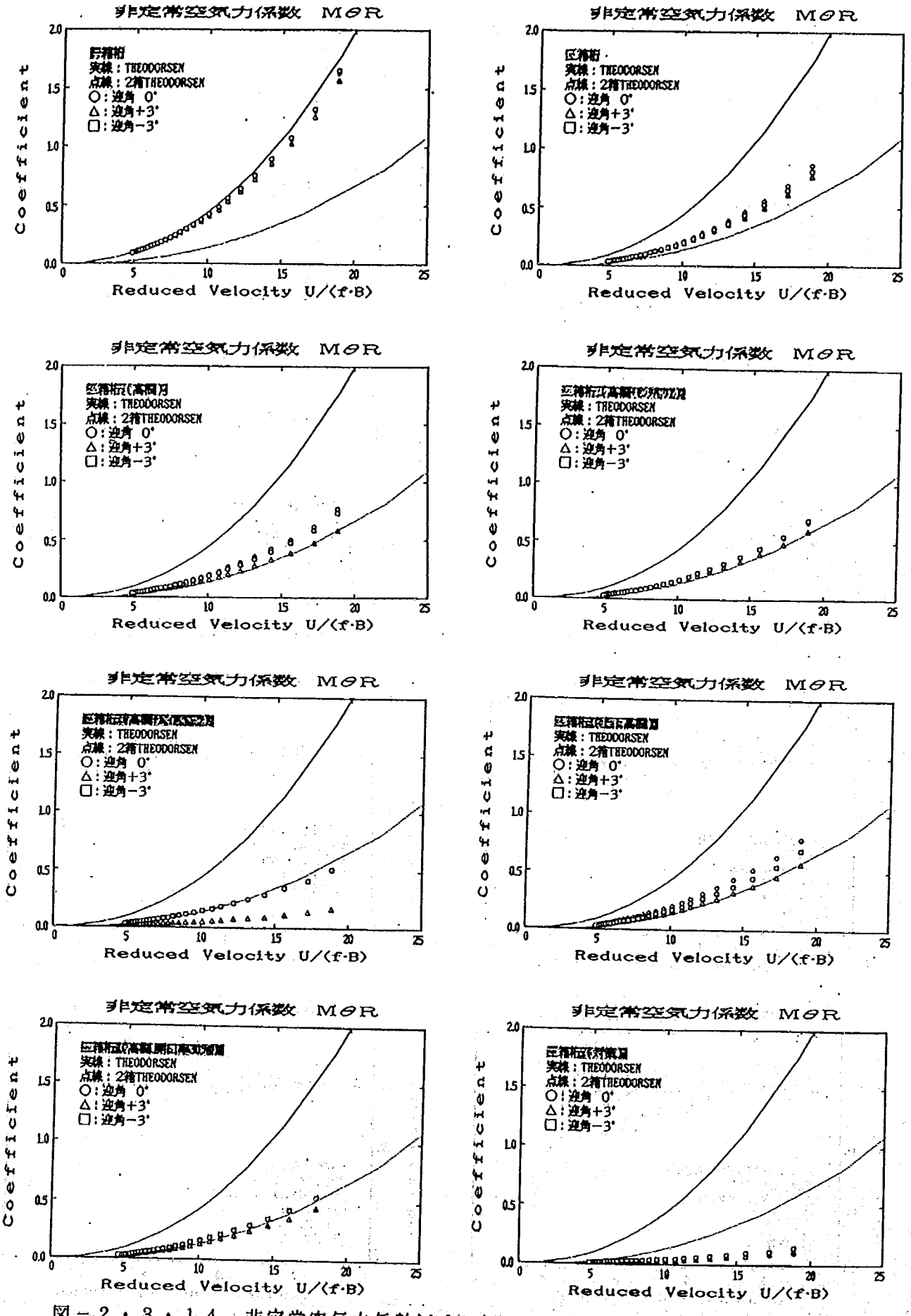
図－2・3・11 非定常空気力係数M_{zI}（モーメント、揚力加振、虚部）



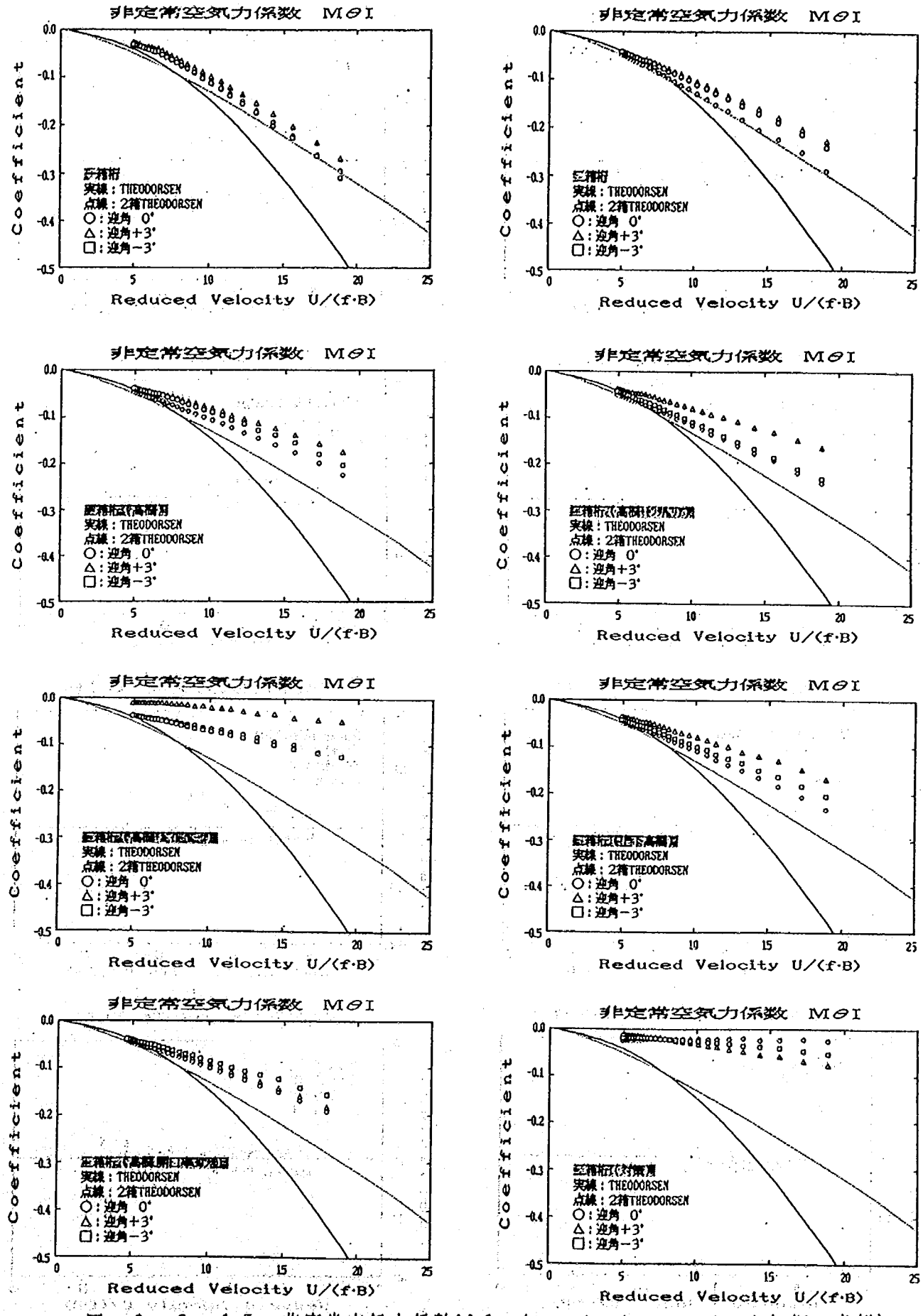
図－２・３・１２　非定常空気力係数Ｌθｒ（揚力、モーメント加振、実部）



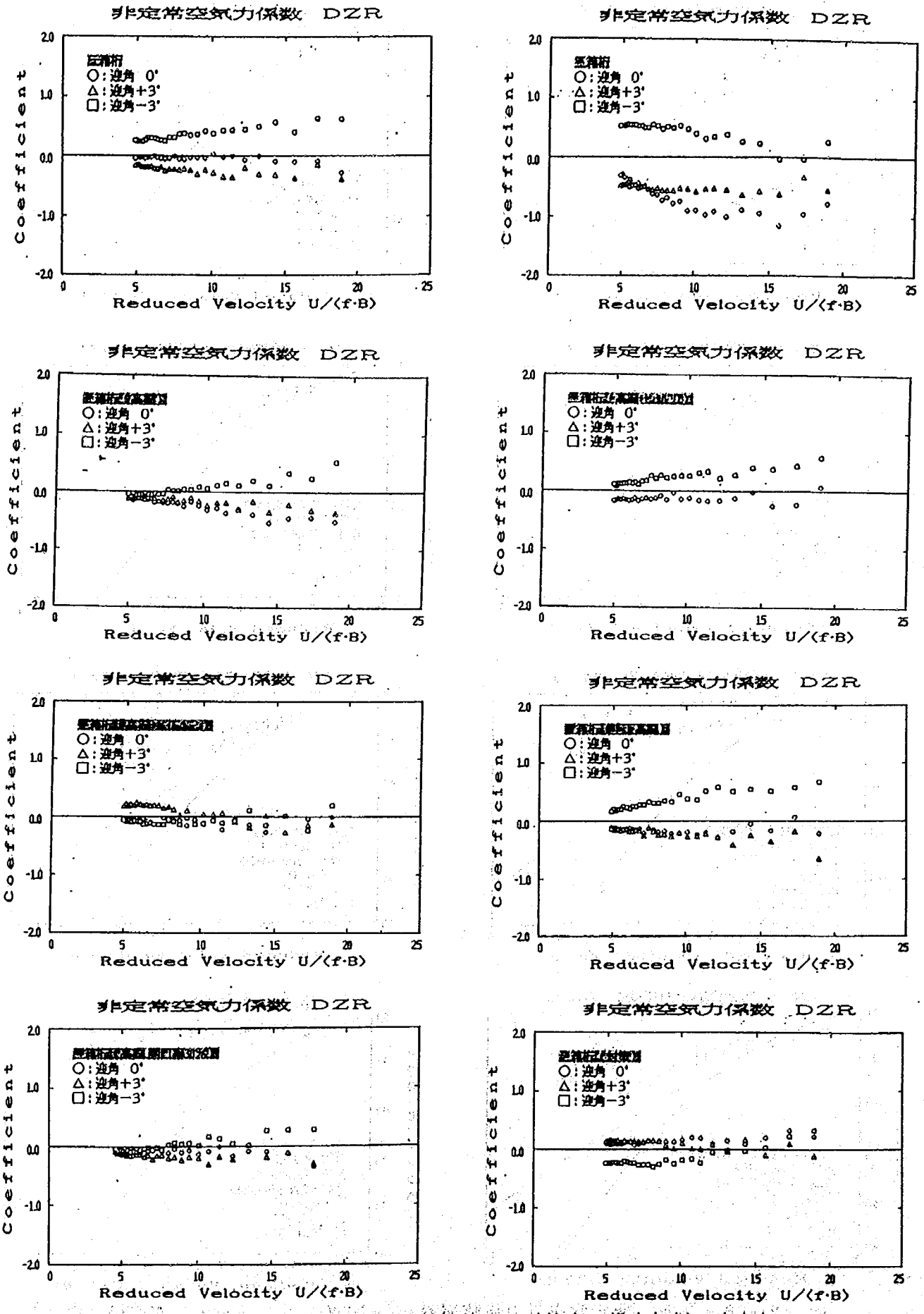
図－2・3・13 非定常空気力係数Lθi（揚力、モーメント加振、虚部）



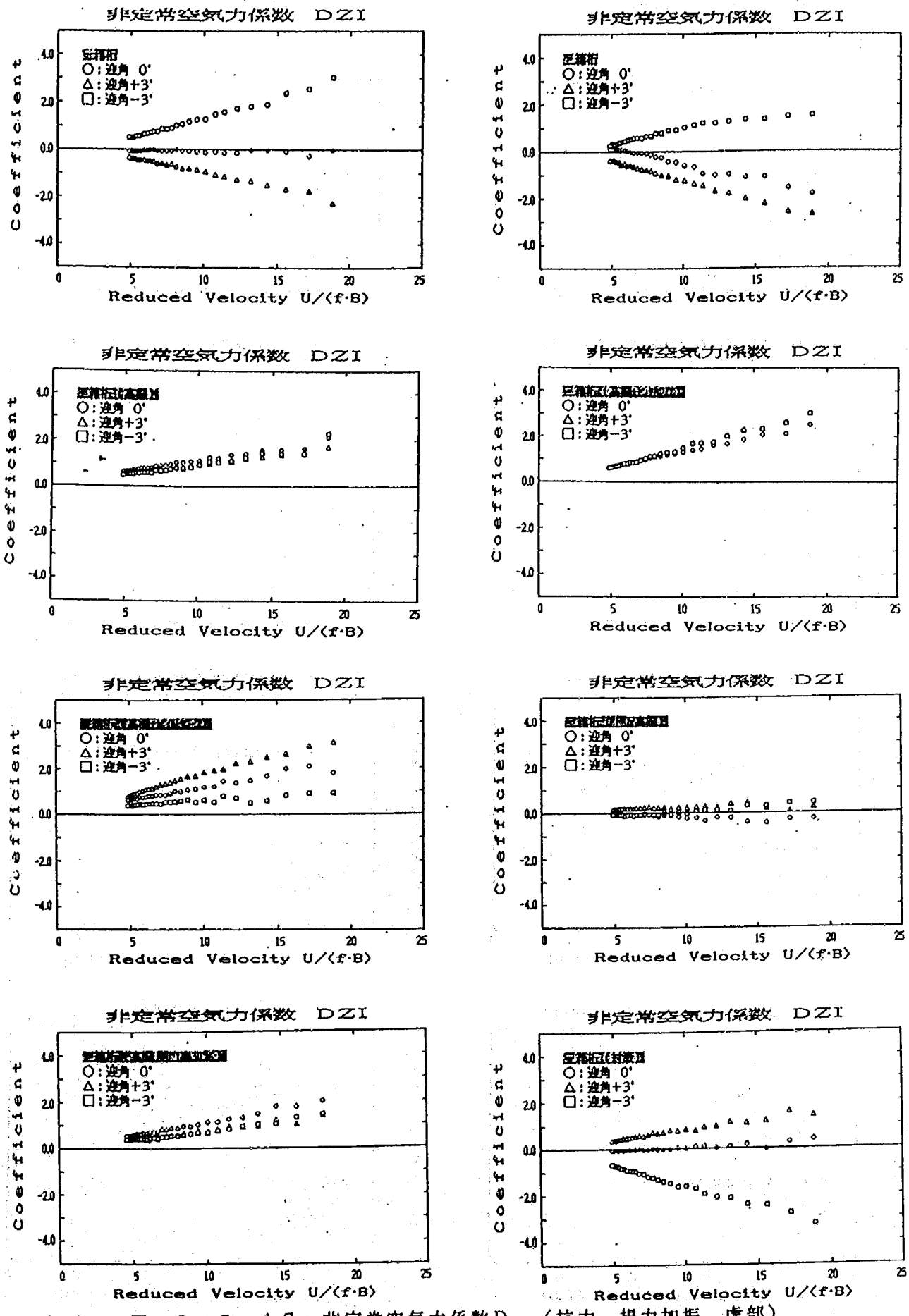
図－２・３・１４　非定常空気力係数Ｍθｒ（モーメント、モーメント加振、実部）



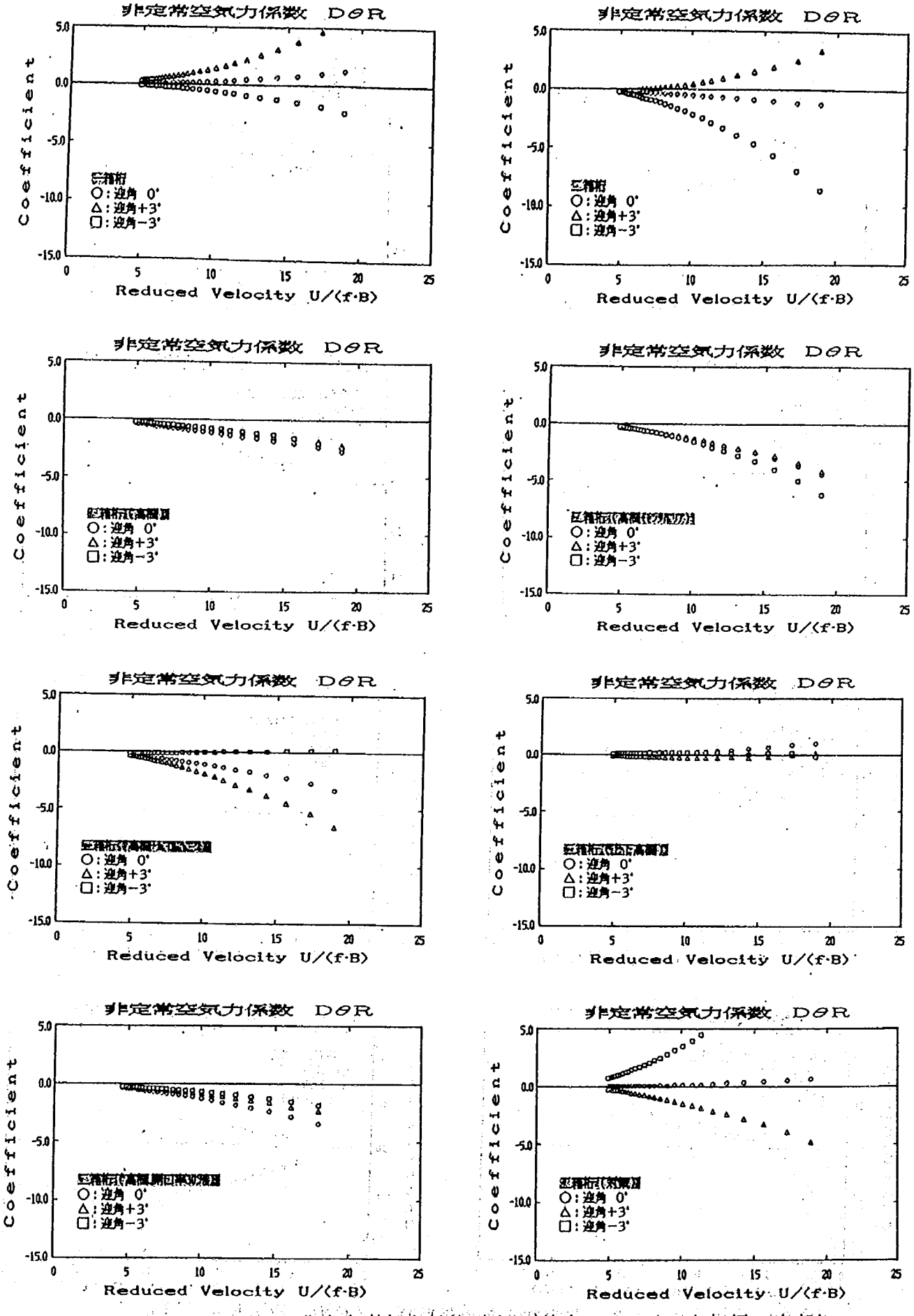
図－2．3．15 非定常空気力係数Mθ1（モーメント、モーメント加振、虚部）



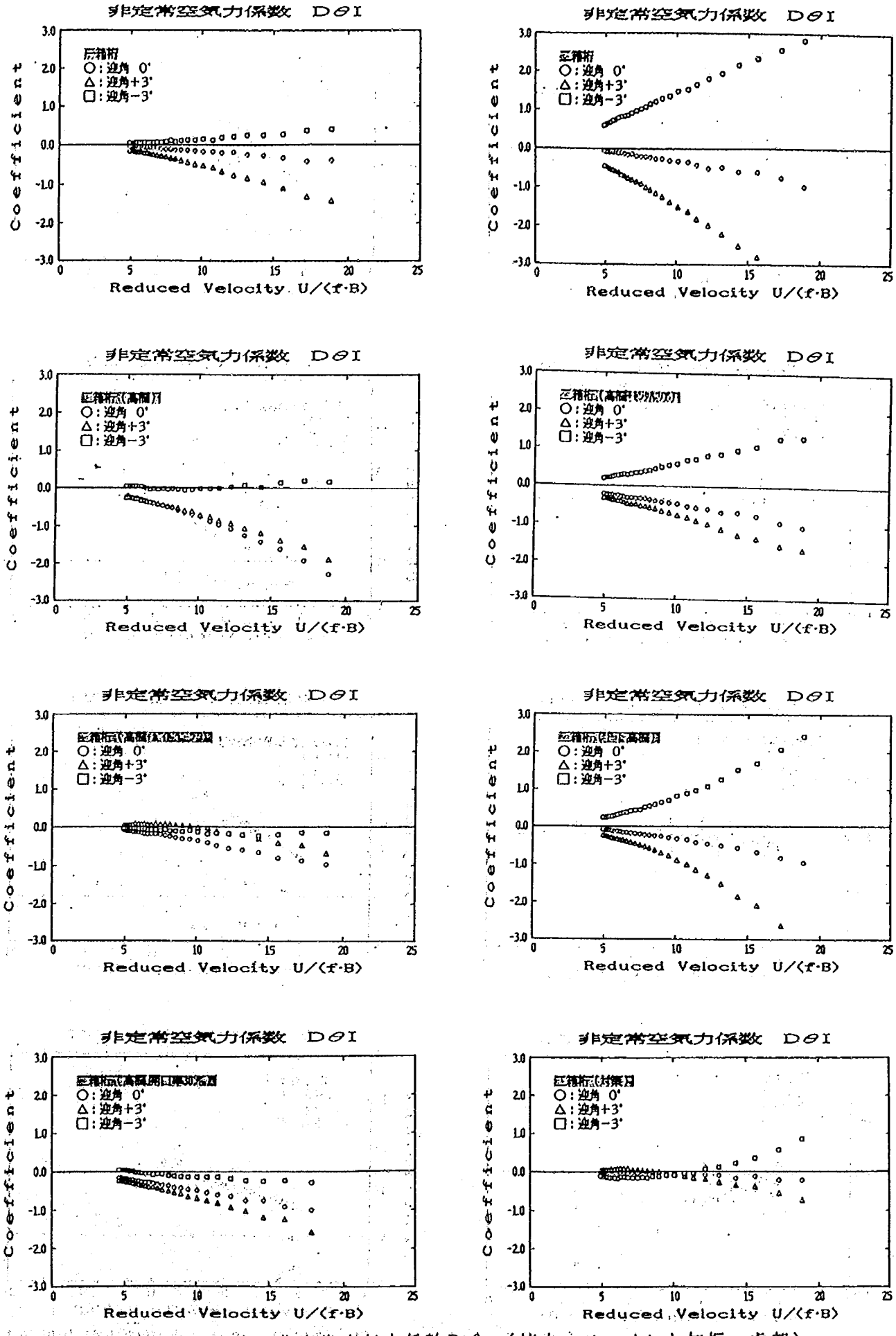
図－２・３・１６　非定常空気力係数D_{ZR}（抗力、揚力加振、実部）



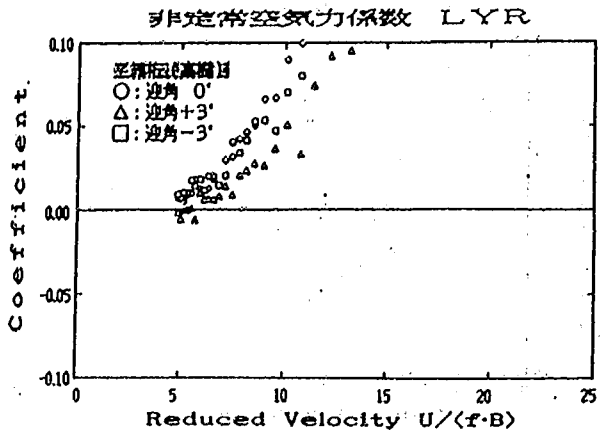
図－2・3・17 非定常空気力係数D_{zI}（抗力、揚力加振、虚部）

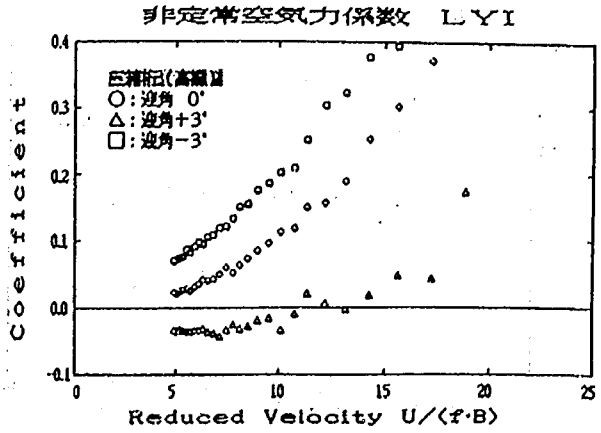


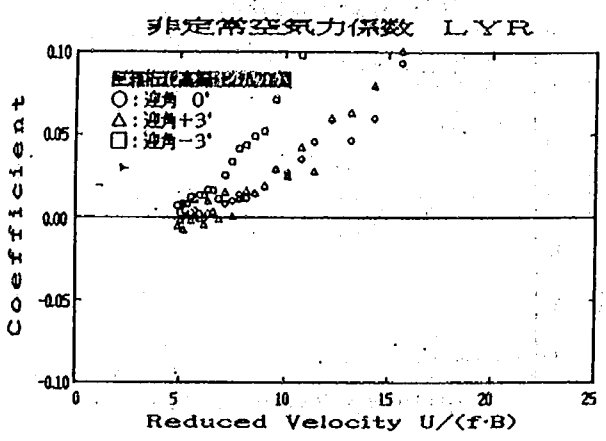
図－２・３・１８　非定常空気力係数$D\theta_R$（抗力、モーメント加振、実部）

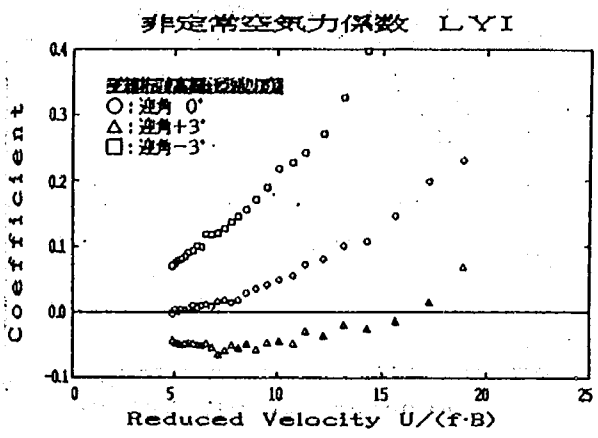


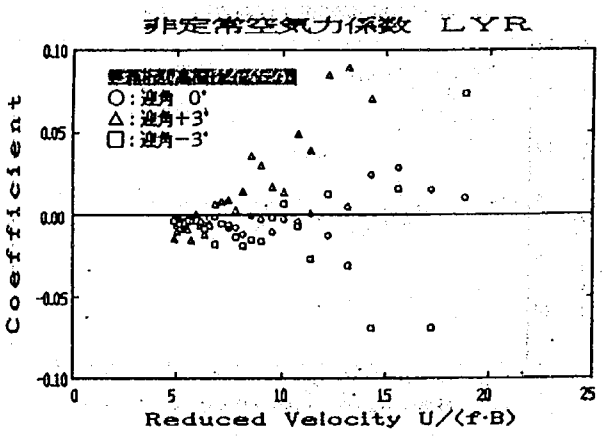
図－２．３．１９ 非定常空気力係数Dθi（抗力、モーメント加振、虚部）

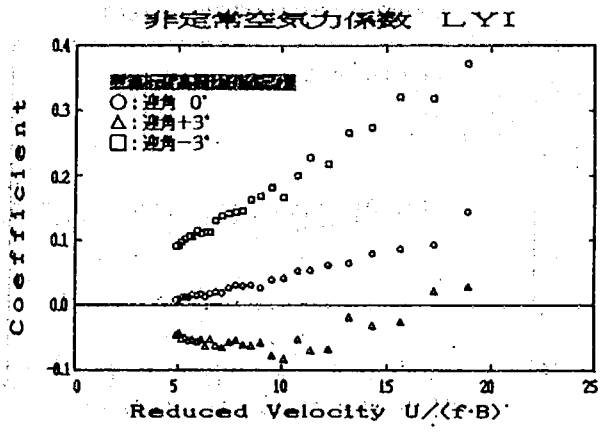


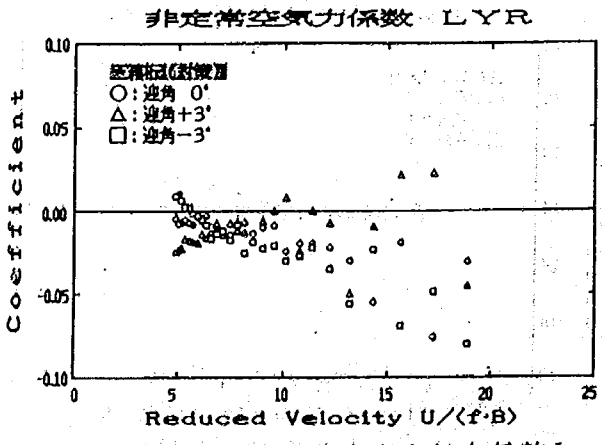


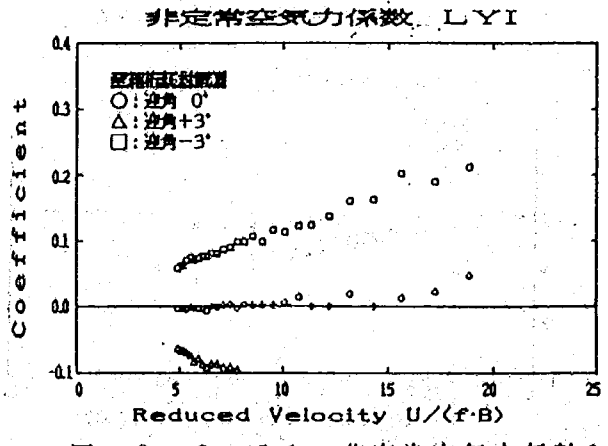






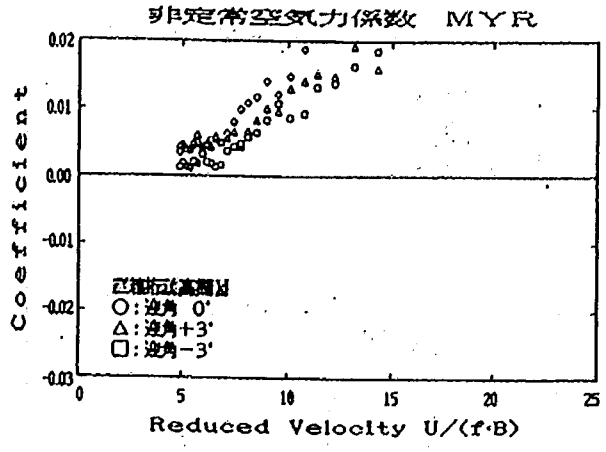


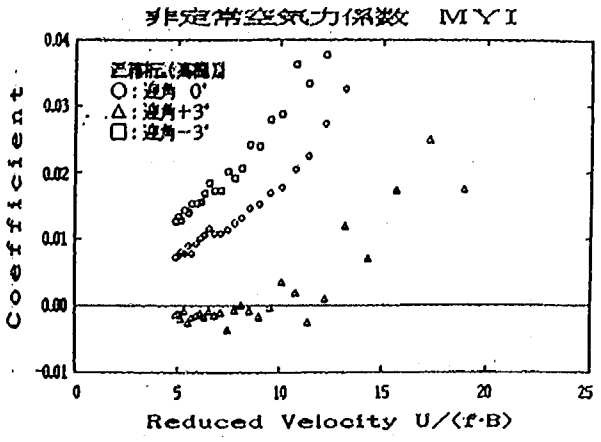


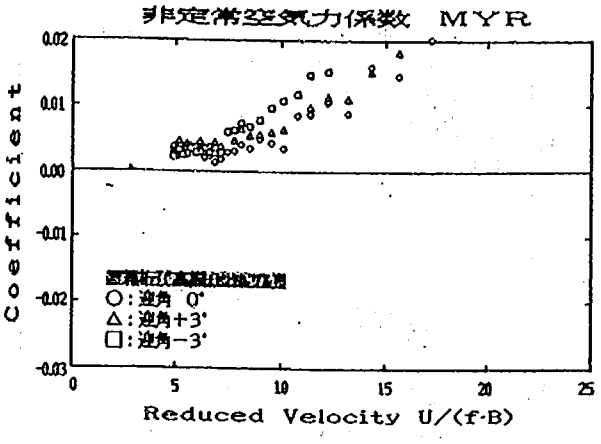


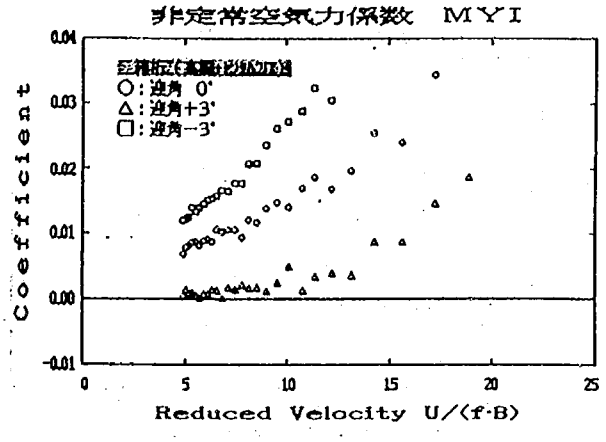
図－２・３・２０　非定常空気力係数 L_{YR}

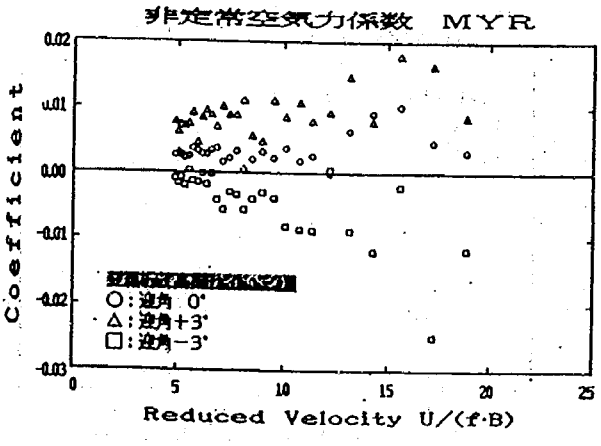
図－２・３・２１　非定常空気力係数 L_{YI}

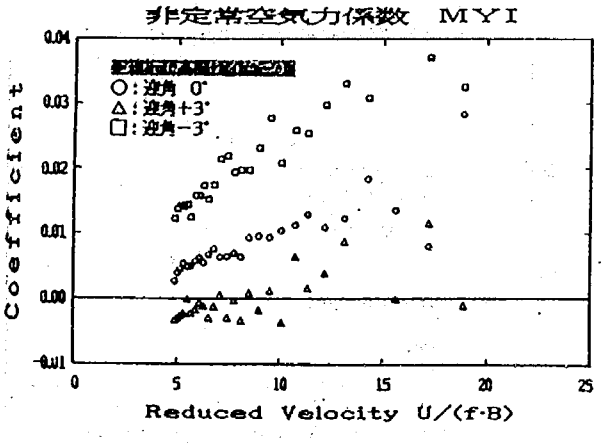


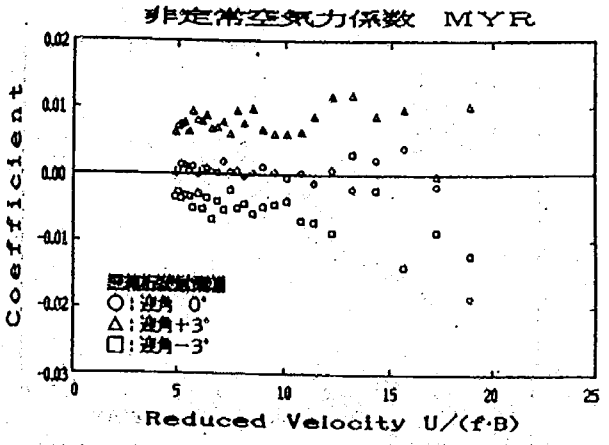




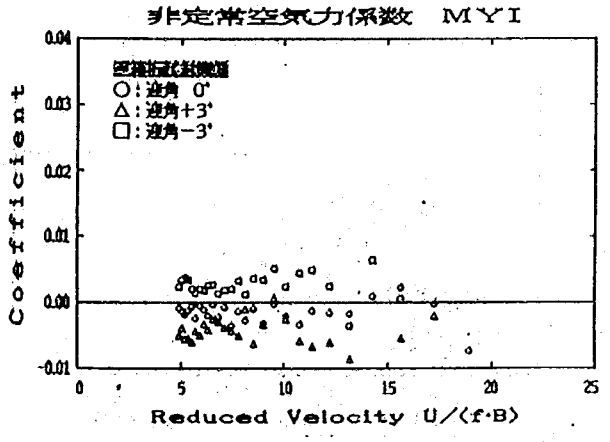




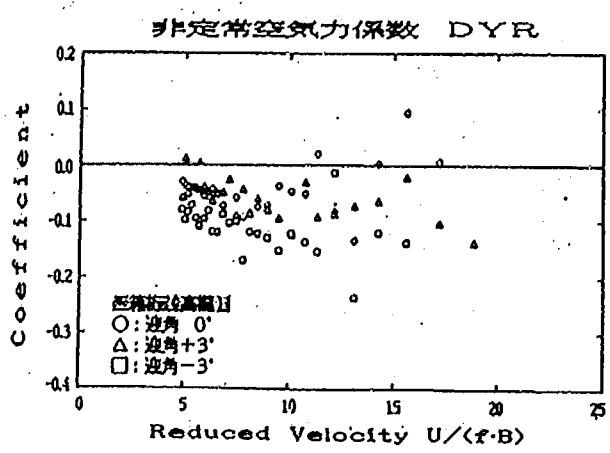


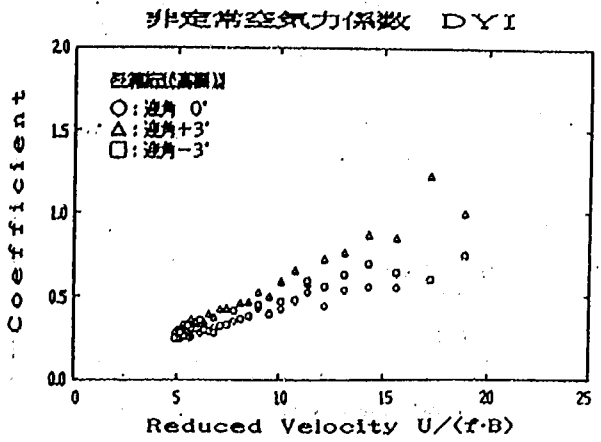


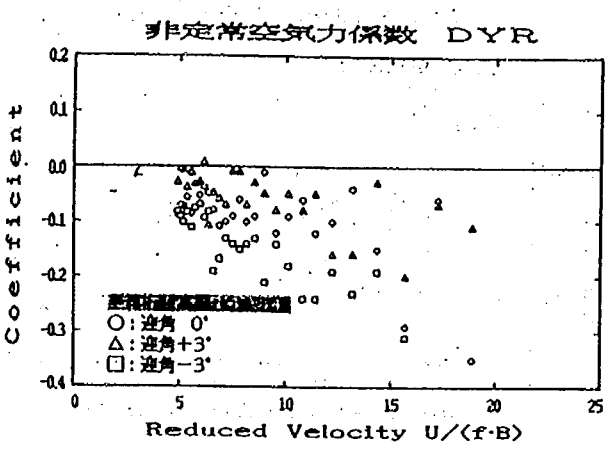
図－２・３・２２　非定常空気力係数M_{YR}

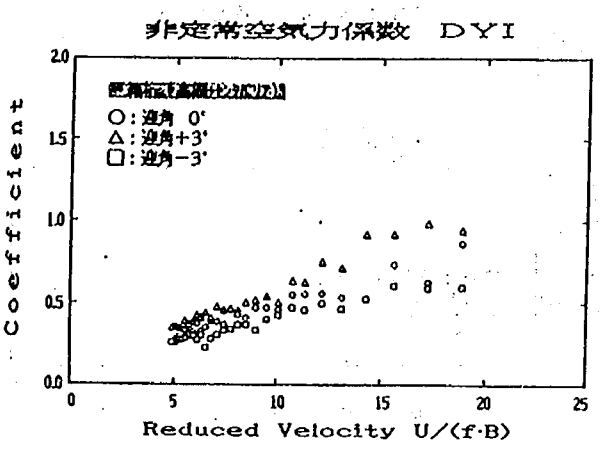


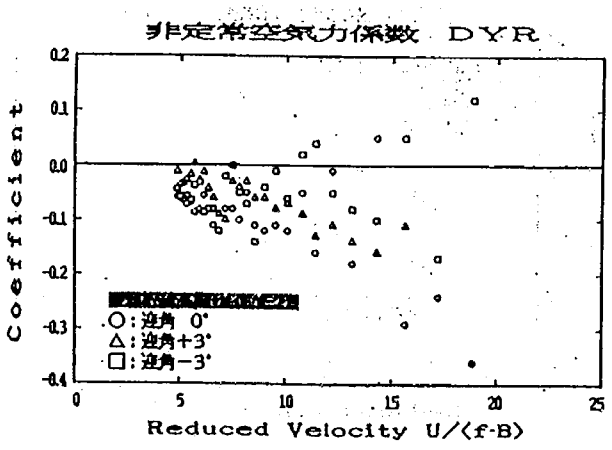
図－２・３・２３　非定常空気力係数M_{YI}

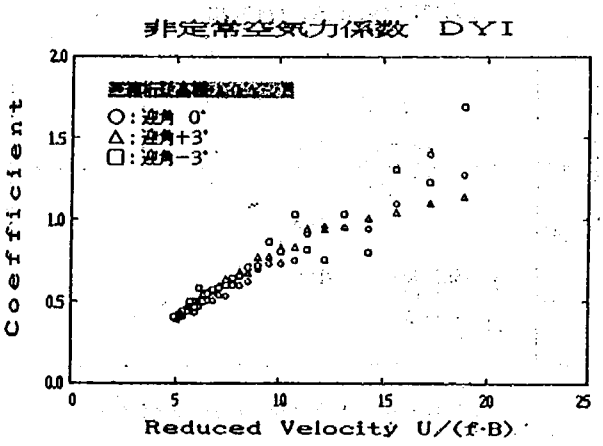


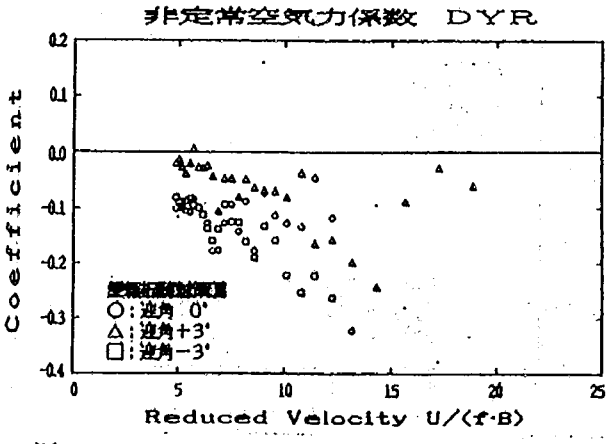


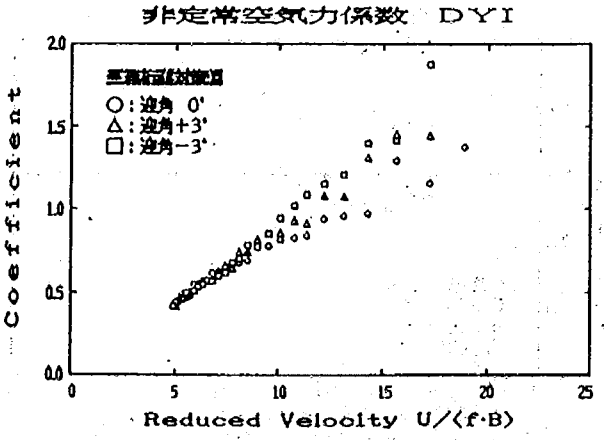








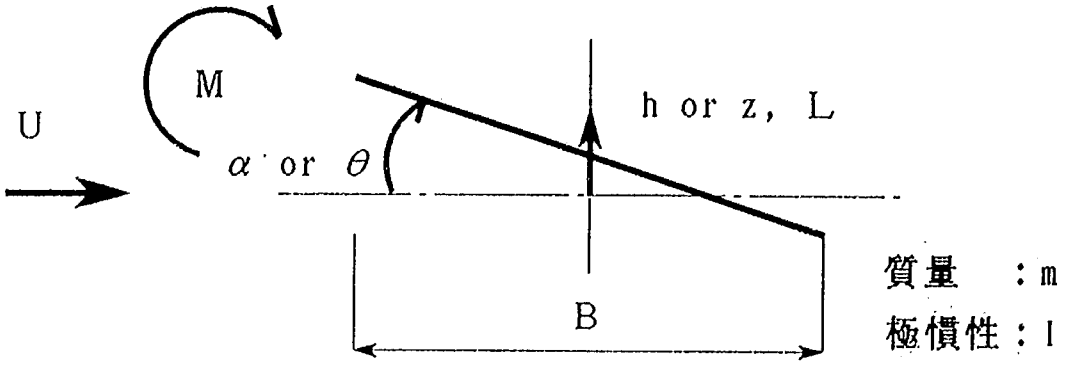




図－２・３・２４　非定常空気力係数D_{YR}

図－２・３・２５　非定常空気力係数D_{YI}

2．3．5　考察



図－2・3・26　二自由度の模式図

理論値が存在することと、バネ支持実験との比較を行えるため、二自由度で非定常空気力係数実験結果の考察を行う。実験で仮定した非定常空気力の式は二自由度で表すと2．3．2で示した式の抗力方向の成分を省略し、以下のようになる。

$$L=\pi\rho B^2\left[L_{zR}\omega^2 z+L_{zI}\dot{\omega}z\right]+\pi\rho B^3\left[L_{\theta R}\omega^2\theta+L_{\theta I}\dot{\omega}\theta\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot1)$$

$$M=\pi\rho B^3\left[M_{zR}\omega^2 z+M_{zI}\dot{\omega}z\right]+\pi\rho B^4\left[M_{\theta R}\omega^2\theta+M_{\theta I}\dot{\omega}\theta\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot2)$$

また、中村等[3]の式では、以下の式で示され(図－2・3・6参照)、二自由度の非定常空気力係数の考察を行っている。

$$L=1/2\pi\rho U^2 B\left[C_{LHR}(h/B)+C_{LHI}(\dot{h}/U)+C_{LTR}\alpha+C_{LTI}(B/U)\dot{\alpha}\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot3)$$

$$M=1/2\pi\rho U^2 B^2\left[C_{MHR}(h/B)+C_{MHI}(\dot{h}/U)+C_{MTR}\alpha+C_{MTI}(B/U)\dot{\alpha}\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot4)$$

運動方程式として構造減衰を省略すると、下式のようになる。

$$m\ddot{h}+m(2\pi f_h)^2 h=L \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot6)$$

$$I\ddot{\alpha}+I(2\pi f_\theta)^2 h=M \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot7)$$

式(2・3・5・3)～式(2・3・5・7)の各諸量を無次元化し、式を変化させると以下の式となる。

$$\eta''+R^2\sigma^2\eta=(Ur^2/8\pi^2\mu)\left[C_{LHR}\eta+C_{LHI}(2\pi/Ur)\eta'+C_{LTR}\alpha+C_{LTI}(2\pi/Ur)\alpha'\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot8)$$

$$\alpha''+\sigma^2\alpha=(Ur^2/8\pi^2\nu)\left[C_{MHR}\eta+C_{MHI}(2\pi/Ur)\eta'+C_{MTR}\alpha+C_{MTI}(2\pi/Ur)\alpha'\right] \qquad 式(2\cdot3\cdot5\cdot9)$$

ここで、

$\eta=h/B$，$Ur=U/fB$，$R=f_h/f_\theta$，$\sigma=f\theta/f$

$\mu=m/\rho B^2$，，$\nu=I/\rho B^4$

f_h：たわみ1次振動数

f_θ：ねじれ1次振動数

*3)中村泰治、渡辺公彦：吊橋断面の2自由度フラッター解析，土木学会第32回年次学術講演会

式(2・3・5・8)と式(2・3・5・9)の方程式で解を以下のように仮定する。

$$\eta = \eta_0 e^{(\beta/2\pi+i)\tau} = X\alpha_0 e^{-i\phi}$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{(\beta/2\pi+i)\tau+i\phi} = \eta/X e^{i\phi} \qquad X=\eta_0/\alpha_0$$

ここで、$|\beta|<<1$, $|\phi|<<1$の時、

$$\eta'' \fallingdotseq (\beta i/\pi - 1)\eta,\quad \eta' = (\beta/2\pi + i)\eta$$

$$\alpha'' \fallingdotseq (\beta i/\pi - 1)\alpha,\quad \alpha' = (\beta/2\pi + i)\alpha$$

$$e^{i\phi} \fallingdotseq 1 + i\phi,\quad e^{-i\phi} \fallingdotseq 1 - i\phi$$

これを代入し虚数部と実数部に分けると下式のようになる。

式(2・3・5・8)虚数部より

$$\beta X = (Ur^2/8\pi^2\mu)\left[C_{LHI}(2\pi X/Ur) + C_{LTR}\phi + C_{LTI}(2\pi/Ur)\right] \qquad 式(2・3・5・10)$$

式(2・3・5・9)虚数部より

$$\beta = (Ur^2/8\pi^2\nu)\left[C_{MHR}X(-\phi) + C_{MHI}(2\pi X/Ur) + C_{MTI}(2\pi/Ur)\right] \qquad 式(2・3・5・11)$$

式(2・3・5・8)実数部より

$$(-1+R^2\sigma^2)X = (Ur^2/8\pi^2\mu)\left[C_{LHR}X + C_{LHI}(\beta/Ur)X + C_{LTR} + C_{LTI}(2\pi/Ur)(\beta/2\pi - \phi)\right] \qquad 式(2・3・5・12)$$

式(2・3・5・9)虚数部より

$$-1+\sigma^2 = (Ur^2/8\pi^2\nu)\left[C_{MHR}X + C_{MHI}(2\pi X/Ur)(\beta/2\pi + \phi) + C_{MTR} + C_{MTI}(\beta/Ur)\right] \qquad 式(2・3・5・13)$$

式(2・3・5・10)～式(2・3・5・13)でϕ, βを含む項を無視すると、

$$\beta X = (Ur/4\mu)\left[C_{LHI}X + C_{LTI}\right] \qquad 式(2・3・5・10)'$$

$$\beta = (Ur/4\nu)\left[C_{MHI}X + C_{MTI}\right] \qquad 式(2・3・5・11)'$$

$$(-1+R^2\sigma^2)X = (Ur^2/8\pi^2\mu)\left[C_{LHR}X + C_{LTR}\right] \qquad 式(2・3・5・12)'$$

$$-1+\sigma^2 = (Ur^2/8\pi^2\nu)\left[C_{MHR}X + C_{MTR}\right] \qquad 式(2・3・5・13)'$$

$|X|<<1$が仮定できると、

$$\sigma^2 = 1 + (Ur^2/8\pi^2\nu)C_{MTR} \qquad 式(2・3・5・14)$$

$$X = Ur^2 C_{LTR}/\{(-1+R^2\sigma^2)8\pi^2\mu\} \qquad 式(2・3・5・15)$$

$$\beta = (Ur/4\nu)\left[C_{MHI}X + C_{MTI}\right] \qquad 式(2・3・5・16)$$

で表される。

ここで、

σ^2は振動数の割合、Xは振幅の割合を表し、フラッターに重要な対数減衰率がβで定義される。

式(2・3・5・14)～式(2・3・5・16)を式(2・3・5・1)と式(2・3・5・2)の定義で表した場合、以下の式となる。

$$\sigma^2 = 1 + \frac{\pi M_{\theta R}}{\nu} \qquad \text{式(2・3・5・17)}$$

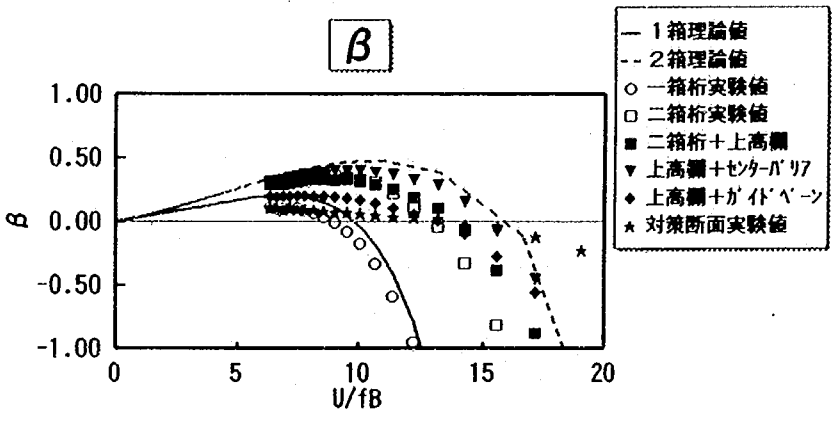
$$X = \frac{\pi L_{\theta R}}{(-1 + R^2\sigma^2)\mu} \qquad \text{式(2・3・5・18)}$$

$$\beta = \frac{-\pi^2}{\nu}\left[M_{z1}X + M_{\theta 1}\right] \qquad \text{式(2・3・5・19)}$$

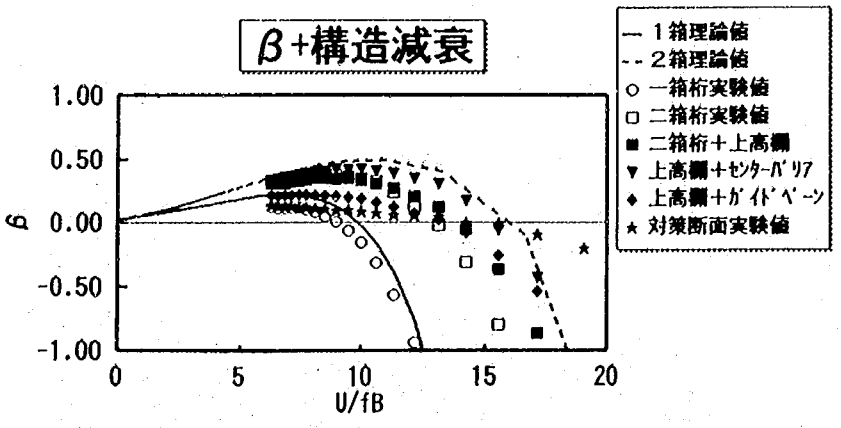
迎角０度に限定して、各係数を比較した場合、対策部材を１つだけ設置した場合については、係数に差はないが、対策断面においては、式中の係数の中でM_{z1}、$M_{\theta R}$、M_{z1}は理論値よりも絶対値でかなり小さい値を示している。理論値でも１枚の平板に比べ２枚の平板では値が小さくなっていることがわかる。

対数減衰率に直接関係がある係数はM_{z1}と$M_{\theta 1}$であるが、M_{z1}が小さくなることは、負減衰になりにくくなることを示しているため、対策断面の効果が得られている理由となるが、$M_{\theta 1}$が小さくなると正減衰が小さくなることを示し、悪影響を示す傾向になってしまう。しかしながら、Xの項が$M_{\theta R}$の影響により小さくなっていることも考慮され全体的に負減衰の傾向が小さくなっていると考えられる。

図－２・３・２６に式（2・3・5・19)の計算値を示し、図－２・３・２７に初期構造減衰を付加した値を示す。これより、対策断面は正減衰から負減衰になる勾配が小さいことが特徴であり、この効果によりフラッター風速が増加していると言える。



図－２・３・２６　βの計算



図－２・３・２７　初期構造減衰を付加したβの計算

2．3．6　まとめ

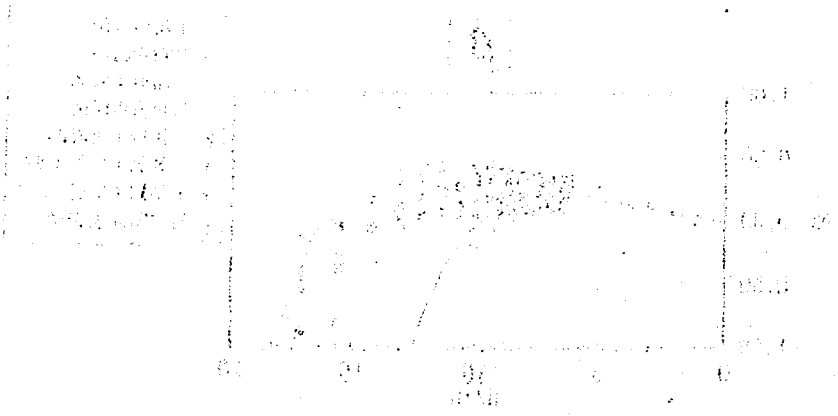
バネ支持模型試験より耐風性が良好と判断された超長大橋補剛桁断面の非定常空気力特性は以下のとおりである。

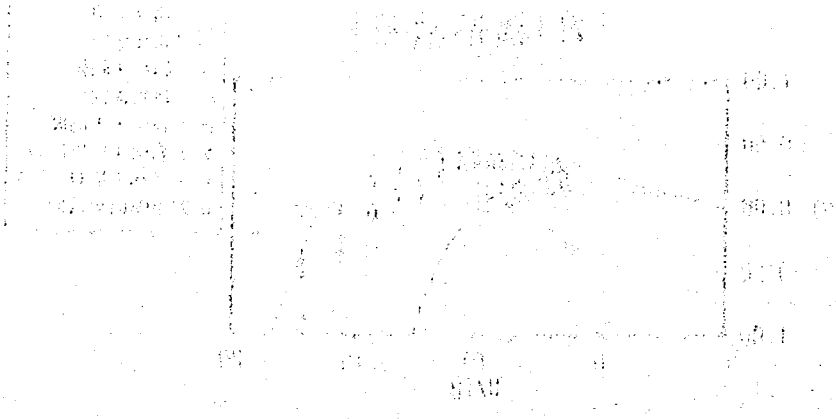
（1）2箱桁の特性

2箱桁にした場合、1箱桁よりも非定常空気力係数の絶対値が全般的に小さくなる。特に、$M_{\theta R}$の絶対値が小さくなり、ねじれに対するたわみの振幅の割合が小さくなり、さらに非定常空気力係数M_{z1}の絶対値が小さくなっていることで、フラッター発現風速が向上するものと考えられる。

（2）対策断面の特性

対策断面では、2箱桁以上にM_{z1}，$M_{\theta R}$の絶対値が小さくなっているためフラッター発現風速が向上しているものと考えられる。





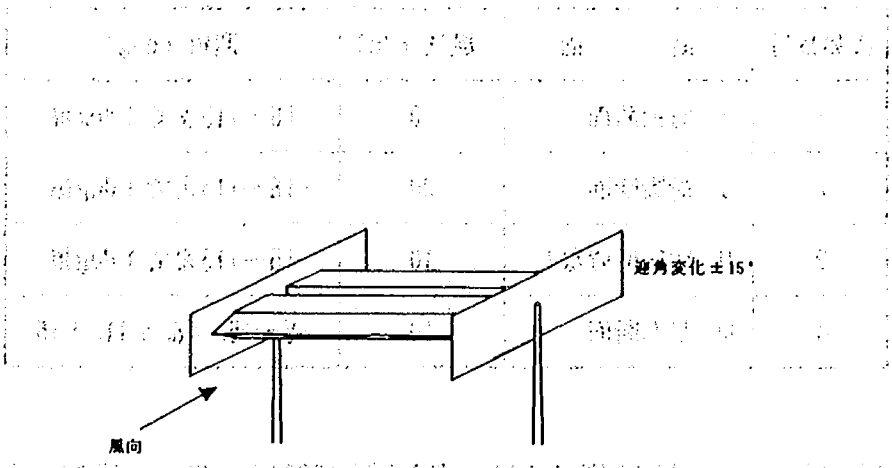
2．4　三分力試験

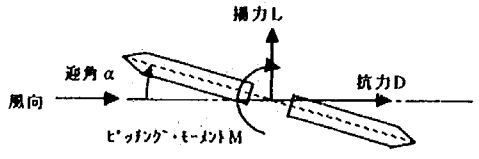
2．4．1　実験方法および実験条件

（1）実験方法

三分力試験は、非定常空気力風洞を用いて行った。風洞諸元は図－2・2・4と表－2・2・3に示す通りである。

実験は非定常空気力風洞内にストラット型三分力天秤を設置し、これに模型を取り付けて行った。実験概要を図－2・4・1に示す。





図－2・4・1　三分力試験の概要

（2） 実験条件

実験には、バネ支持実験において良好な結果の得られた開口率を25％としたA模型を用いた。断面形状は、図－2・4・2に示す3タイプについて実験を行った。断面Iはセンターバリア、フェアリング部ガイドベーンおよび桁下面高欄を設置した対策断面、断面IIは対策断面からセンターバリアを取ったもの、断面IIIは桁上面の高欄のみを取り付けた基本断面である。

実験風速および測定迎角は、表－2・4・1に示す通りである。

表－2・4・1 三分力試験条件一覧

実験番号	断　　面	風速(m/s)	迎角（deg）
1	I 対策断面	10	-15～+15まで1deg毎
2	I 対策断面	20	-15～+15まで1deg毎
3	II ｾﾝﾀｰﾊﾞﾘｱなし	10	-15～+15まで1deg毎
4	III 基本断面	10	-5～+5, ±8, ±11, ±15

三分力係数の算出方法は、「本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)」に従い、下記の方法で求めた。

$$C_D = \frac{D}{1/2\rho \cdot V^2 \cdot A_n}$$

$$C_L = \frac{L}{1/2\rho \cdot V^2 \cdot B \cdot 1}$$

$$C_M = \frac{M}{1/2\rho \cdot V^2 \cdot B^2 \cdot 1}$$

ここに、D ： 抗力(kg)

L ： 揚力(kg)

M ： ピッチングモーメント(kg・m)

ρ ： 空気密度($kg \cdot s^2/m^4$)

V ： 風速(m/s)

A_n ： 投影面積(m^2)

B ： 模型代表長(m)

1 ： 模型長(0.98m)

Aモデル（開口率25%）

Ⅰ　対策断面



Ⅱ　センターバリアなし



Ⅲ　基本断面



図－2・4・2　使用模型断面

2．4．2　実験結果

実験結果を図－2・4・3～図－2・4・6および表－2・4・2に示す。また、図－2・4・7～図－2・4・9には抗力係数、揚力係数、ピッチングモーメント係数それぞれの断面毎の比較図を示す。

表－2・4・2　三分力試験結果

模型断面	単位	I	I	II	III
風速	m/s	10.0	20.0	10.0	10.0
投影面積	m^2	0.0451	0.0451	0.0398	0.0311
模型幅	m	0.3562	0.3562	0.3562	0.3562
$(C_D)\ \alpha=0$		1.081	1.104	1.286	1.171
$(dC_L/d\alpha)\ \alpha=0$		4.655	4.770	4.658	5.206
$(dC_M/d\alpha)\ \alpha=0$		0.026	0.016	0.128	0.734

得られた各係数の特性は以下の通りである。

（1）抗力係数C_D

・迎角0°を軸にほぼ対称である。

・既往の研究による箱桁断面の抗力係数曲線は、迎角-5～+5°程度の範囲において勾配が緩やかで鍋底のような形状が多いが、本断面は勾配の緩やかな範囲が非常に狭い。また、単位長さ当たりの抗力P_Dを比較すると、相応桁高の箱桁断面に対して大きな値となっている。

・ガイドベーンがセンターバリアと同じ高さに設置されているためか、ガイドベーン付きの断面においてはセンターバリアの有無に関わらず、静的風荷重はほぼ同じである。

（2）揚力係数C_L

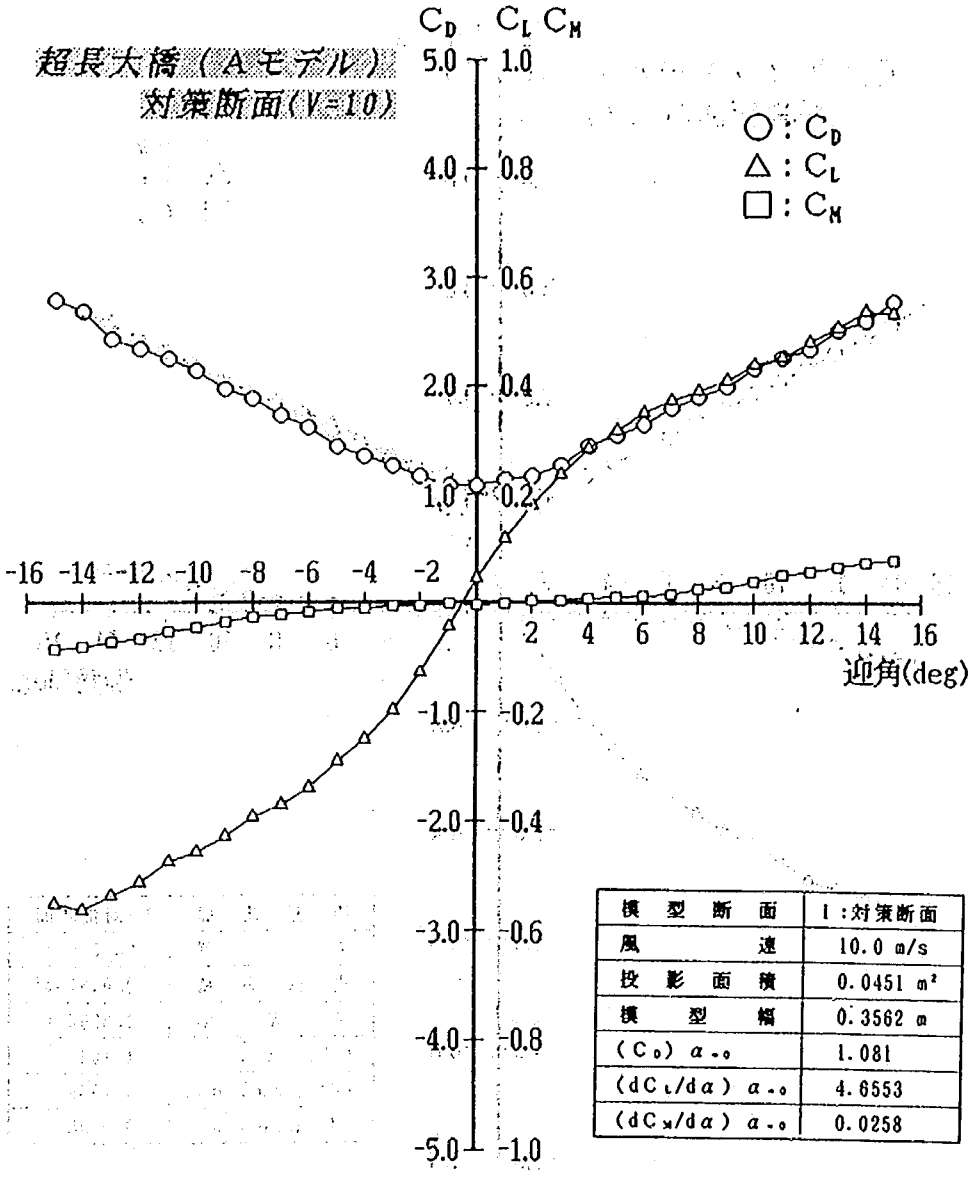
・上下非対称断面の基本断面を除いて、迎角±15°の範囲では失速しない。

・揚力係数は迎角-0.5°付近で0となる。

・対策断面とセンターバリア無し断面の揚力係数はほぼ同じである。

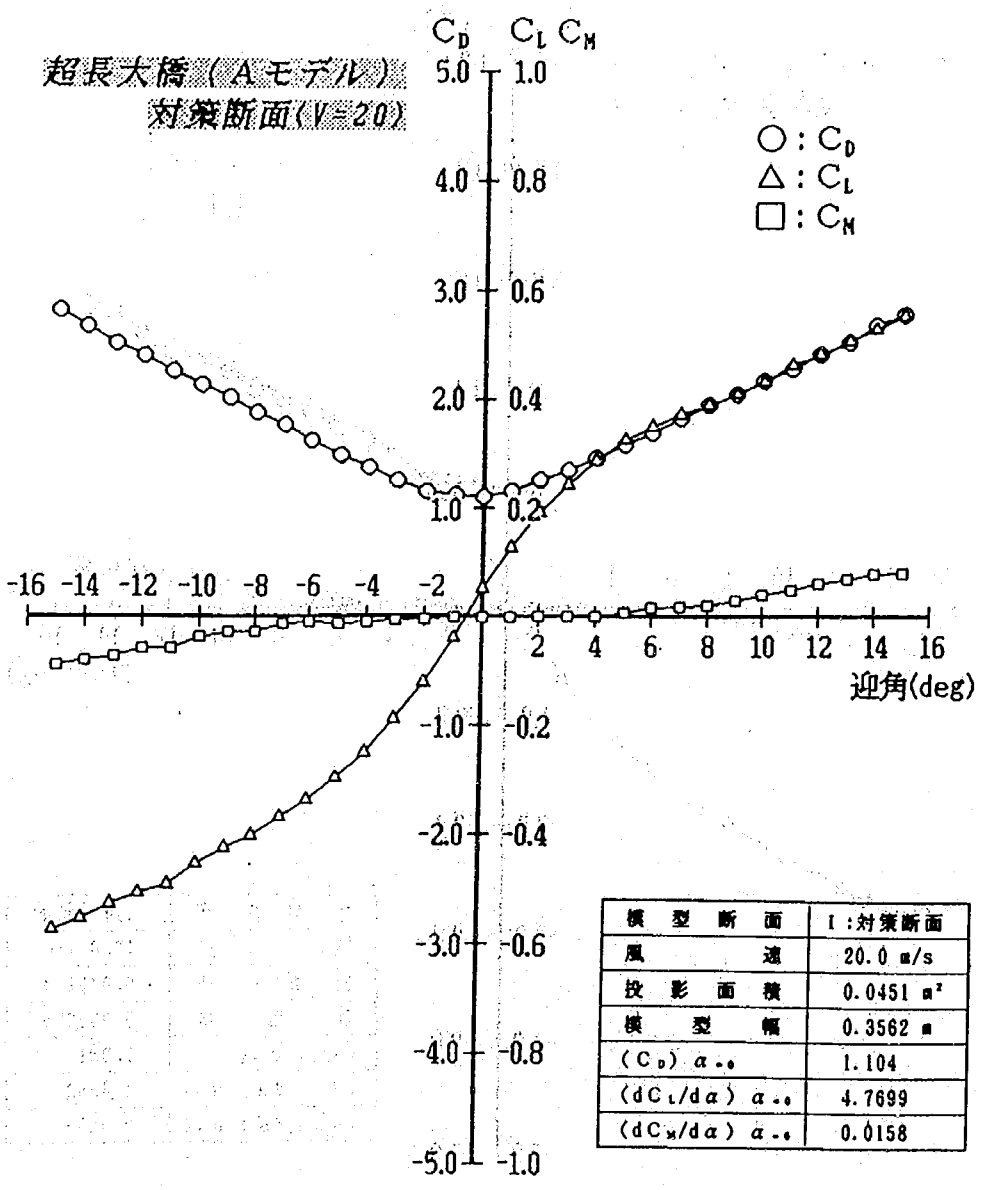
（3）ﾋﾟｯﾁﾝｸﾞ・ﾓｰﾒﾝﾄ係数C_M

・対策断面とセンターバリア無し断面のﾋﾟｯﾁﾝｸﾞ・ﾓｰﾒﾝﾄ係数はほぼ同じである。

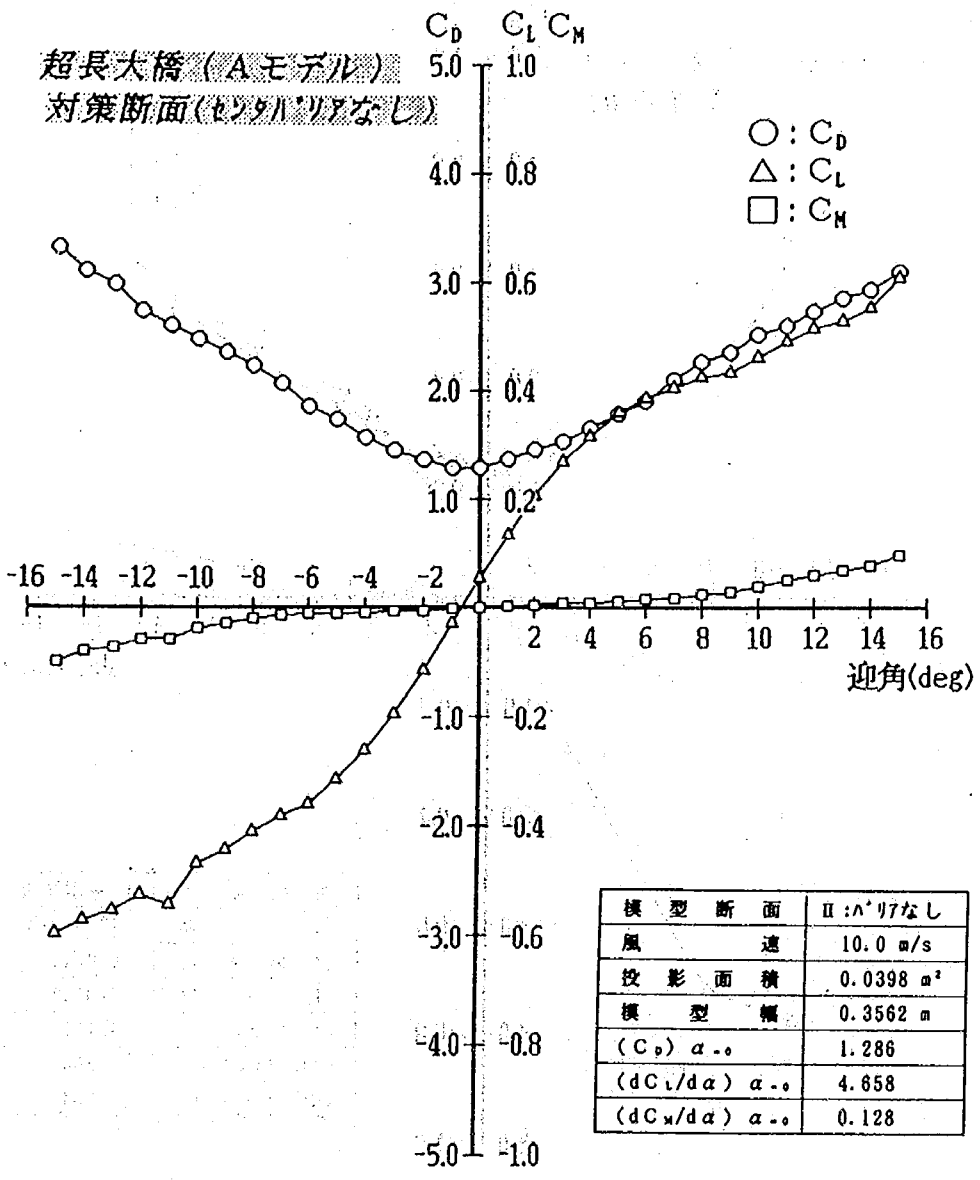


模型断面	1:対策断面
風速	10.0 m/s
投影面積	0.0451 m²
模型幅	0.3562 m
$(C_0)\ \alpha_{-0}$	1.081
$(dC_L/d\alpha)\ \alpha_{-0}$	4.6553
$(dC_M/d\alpha)\ \alpha_{-0}$	0.0258

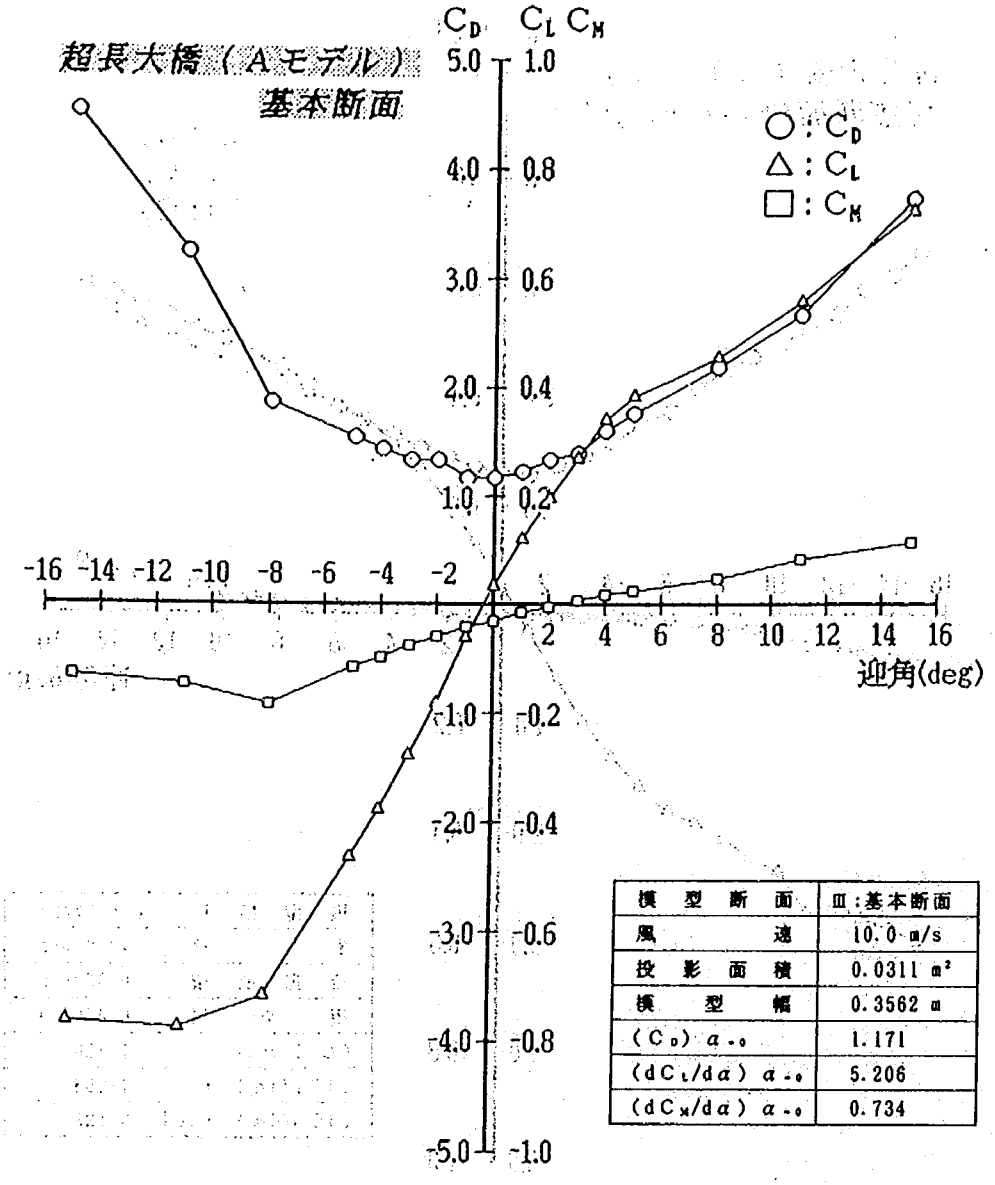
図－２・４・３　三分力曲線　対策断面（V=10m/s）



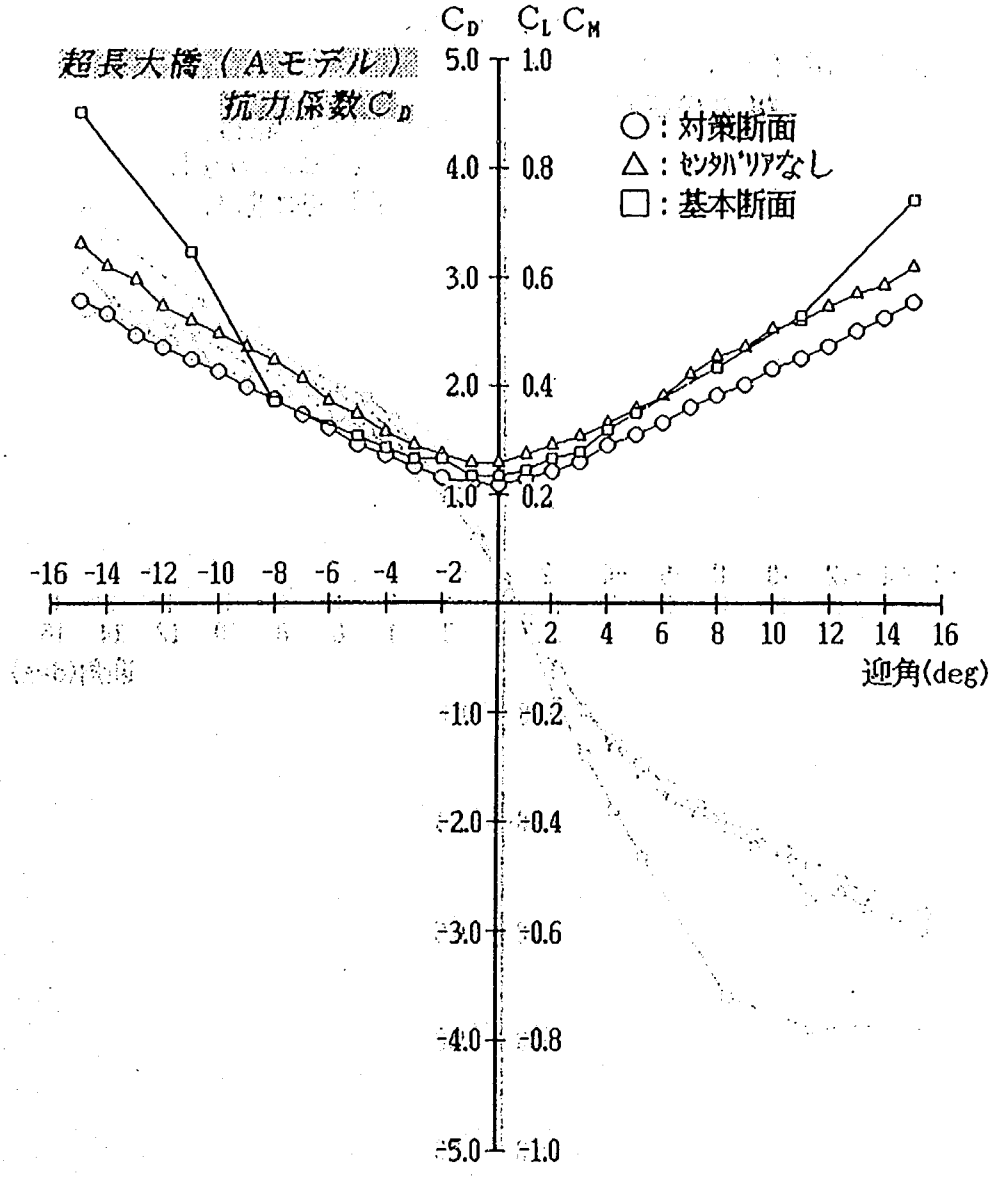
図－２・４・４　三分力曲線　対策断面（V=20m/s）



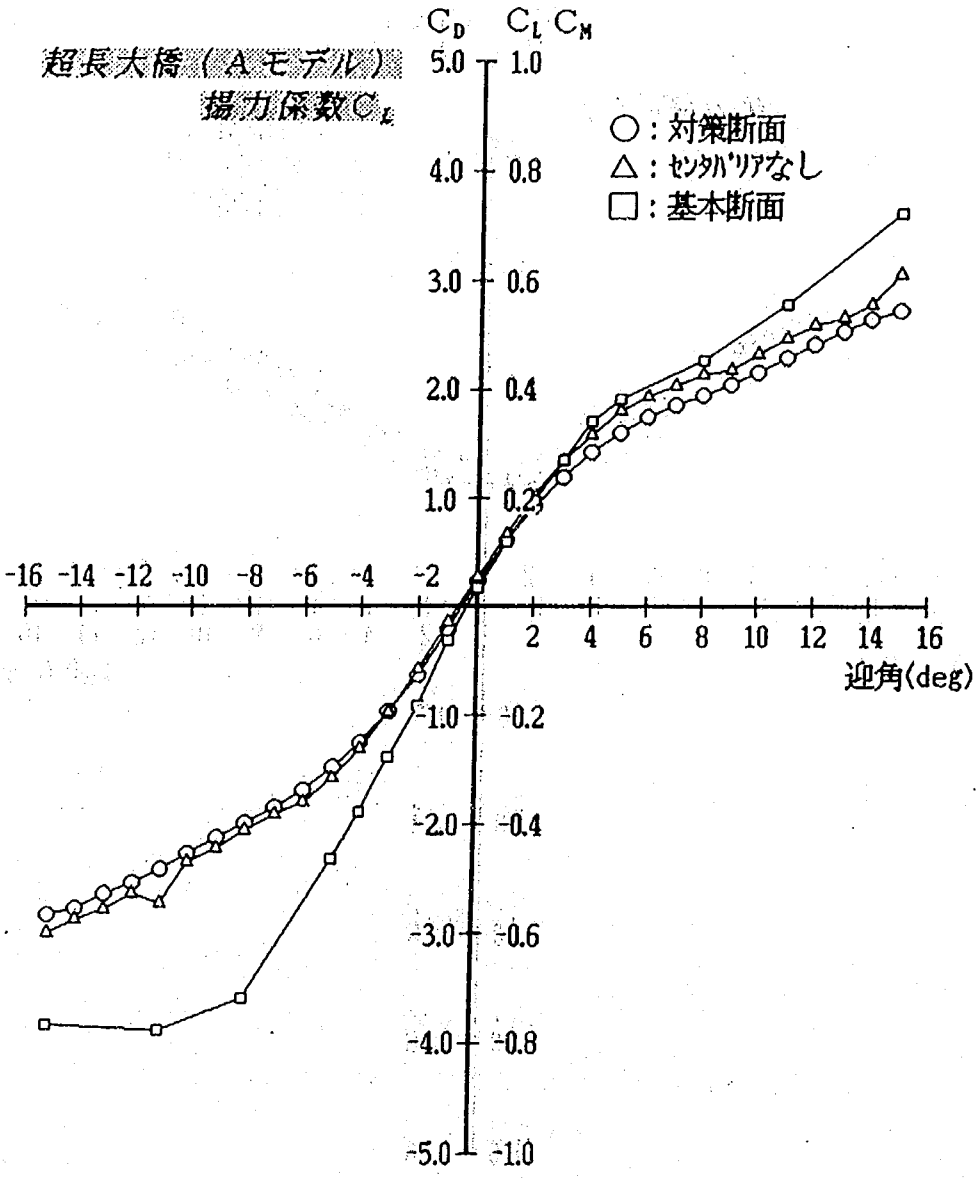
図－2・4・5　三分力曲線　センターバリアなし（V=10m/s）



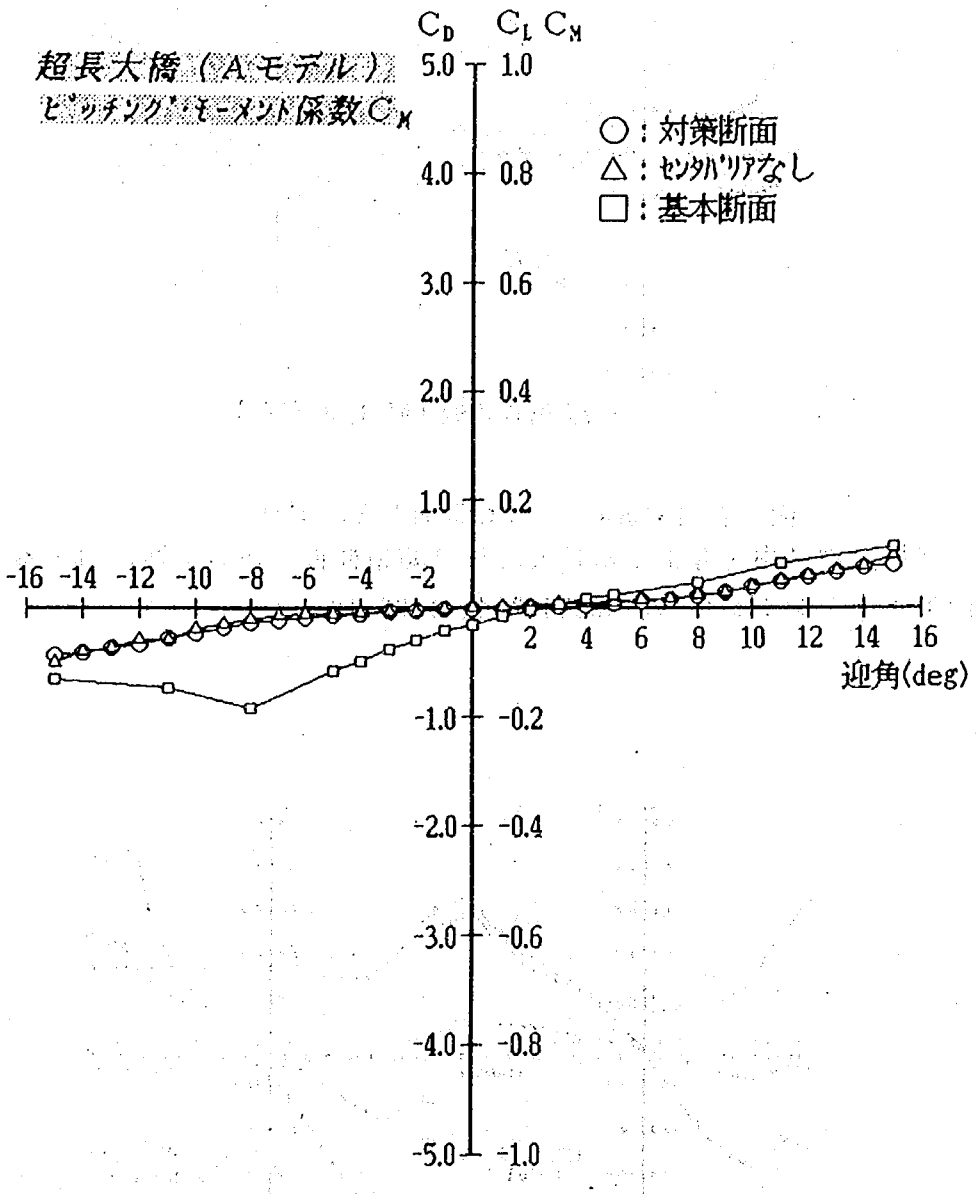
図－2・4・6　三分力曲線　基本断面（V=10m/s）


超長大橋（Aモデル）
抗力係数CD
CD CL CM
○：対策断面
△：ｾﾝﾀﾊﾞﾘｱなし
□：基本断面
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
-1.0
-2.0
-3.0
-4.0
-5.0
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2
2 4 6 8 10 12 14 16
迎角(deg)

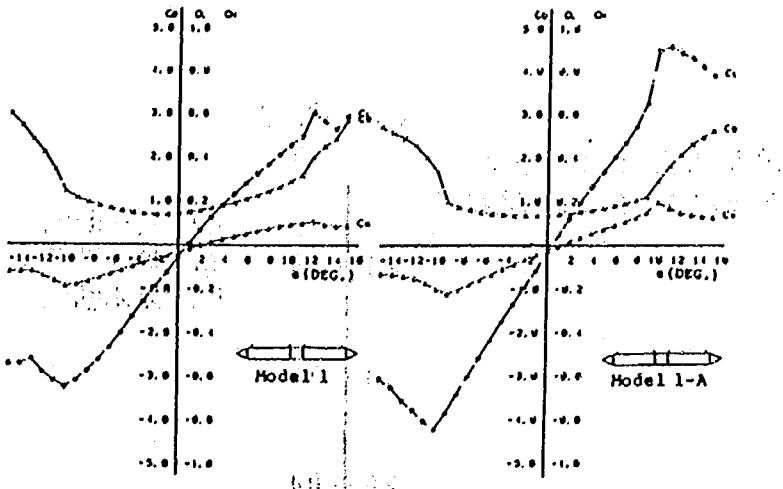
図－2・4・7　抗力係数CD


超長大橋（Aモデル）
揚力係数C_L
C_D C_L C_M
○：対策断面
△：ｾﾝﾀﾊﾞﾘｱなし
□：基本断面
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
-1.0
-2.0
-3.0
-4.0
-5.0
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2
2 4 6 8 10 12 14 16
迎角(deg)

図－2・4・8　揚力係数C_L



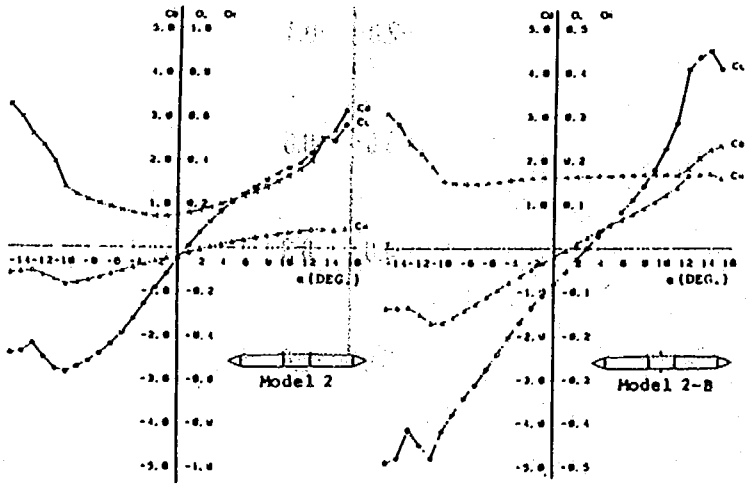
図－2・4・9　ピッチングモーメント係数 C_M



三分力特性比較（開口部の効果）

図－2・4・10(a)　二箱桁断面の三分力特性

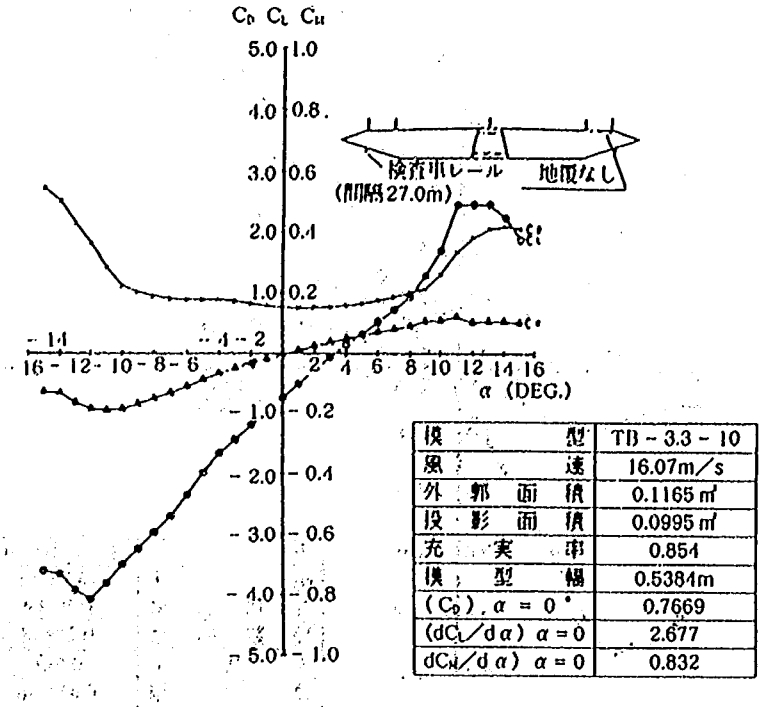
山口・岩屋・池ノ内・井上：超長大吊橋2箱桁断面の空力特性に関する実験的考察、第9回風工学シンポジウム、pp229-234、1986.12



三分力特性比較（センタバリヤの効果）

図－2・4・10(b)　二箱桁断面の三分力特性

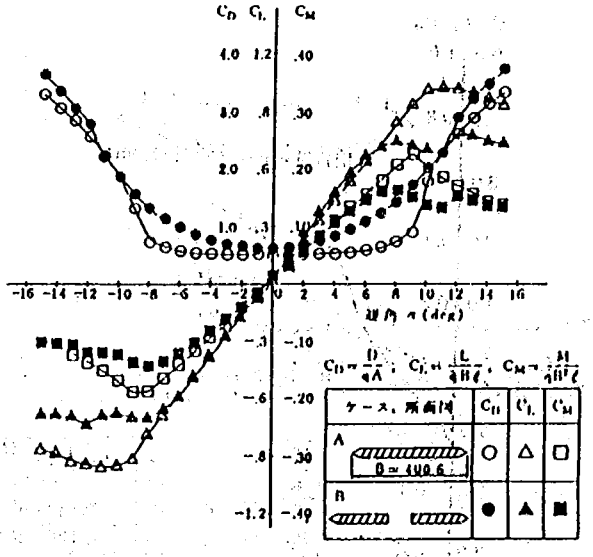
山口・岩屋・池ノ内・井上：超長大吊橋2箱桁断面の空力特性に関する実験的考察、第9回風工学シンポジウム、pp229-234、1986.12



模型	TB－3.3－10
風速	16.07m／s
外郭面積	0.1165㎡
投影面積	0.0995㎡
充実率	0.854
模型幅	0.5384m
(C_D), $\alpha = 0°$	0.7669
$(dC_L/d\alpha)$ $\alpha = 0$	2.677
$dC_M/d\alpha)$ $\alpha = 0$	0.832

図－2・4・10(c)　二箱桁断面の三分力特性

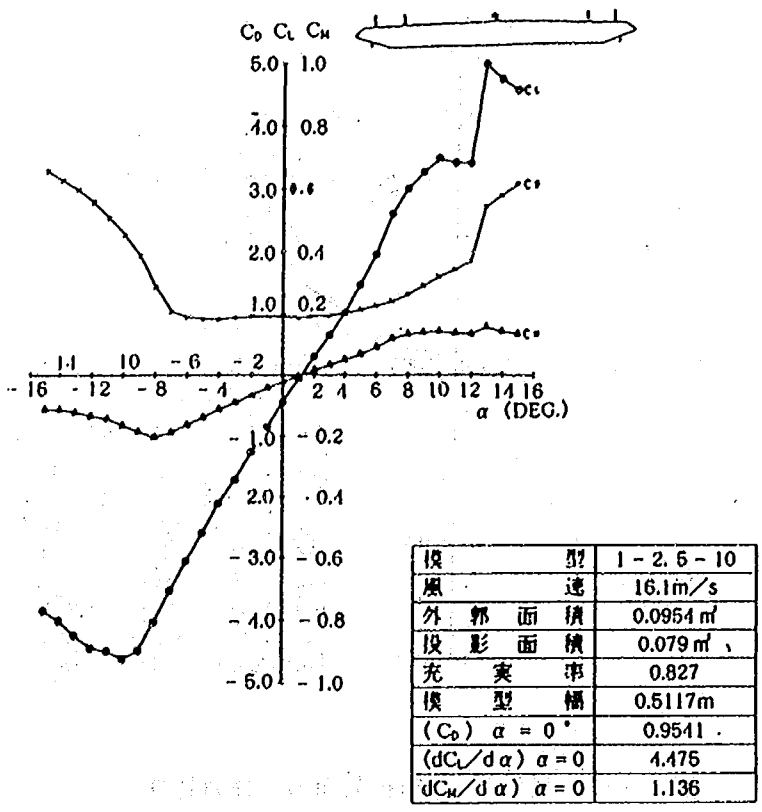
大橋治一：来島大橋補剛桁の耐風性、本四技報Vol.17 No.65、1993.1



三分力係数曲線

図－2・4・10(d)　二箱桁断面の三分力特性

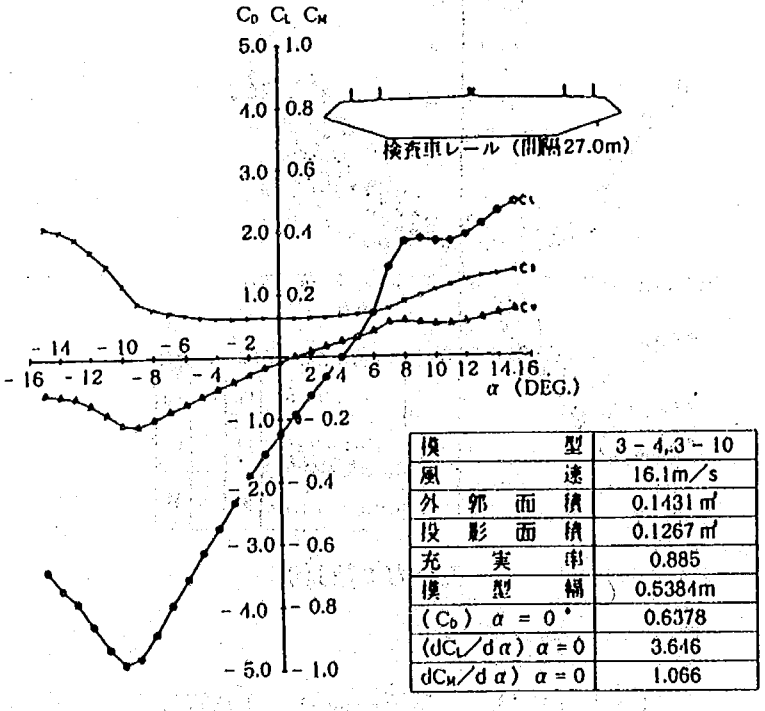
多田・小川・松田：開口部のある流線型箱桁断面の空力特性およびその改善策に関する研究、第9回風工学シンポジウム、pp211-216、1986.12



模型	1－2.5－10
風速	16.1m／s
外郭面積	0.0954㎡
投影面積	0.079㎡
充実率	0.827
模型幅	0.5117m
(C_D) $\alpha = 0°$	0.9541
($dC_L/d\alpha$) $\alpha = 0$	4.475
$dC_M/d\alpha$) $\alpha = 0$	1.136

図－2・4・11(a)　箱桁断面の三分力特性

大橋治一：来島大橋補剛桁の耐風性、本四技報Vol.17 No.65、1993.1



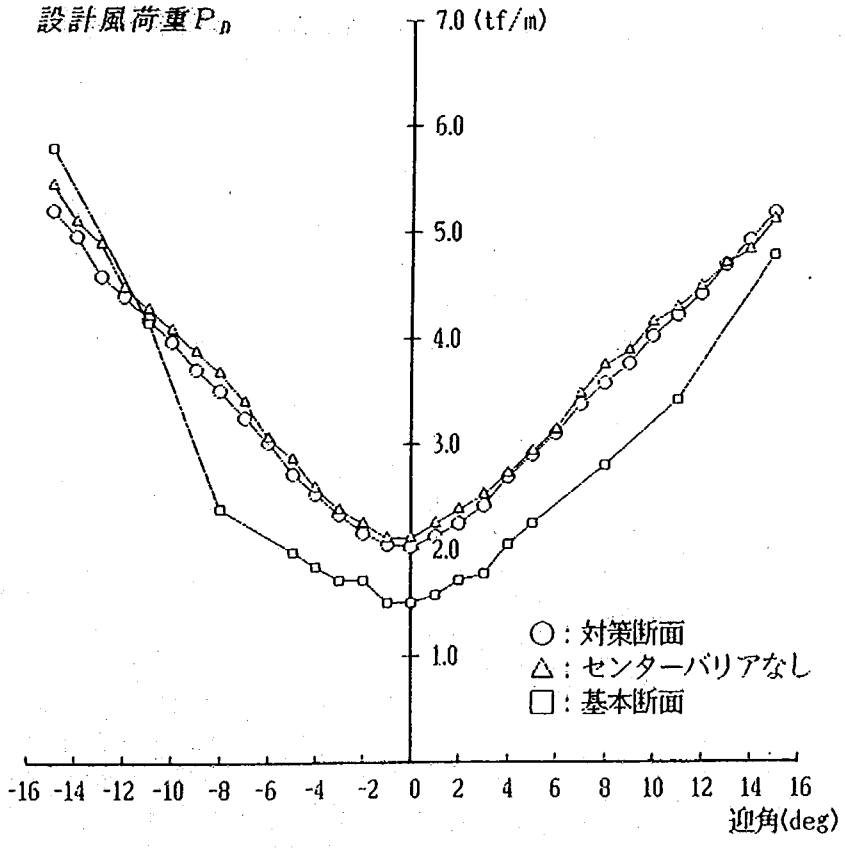
模型	3－4.3－10
風速	16.1m／s
外郭面積	0.1431㎡
投影面積	0.1267㎡
充実率	0.885
模型幅	0.5384m
(C_D) $\alpha = 0°$	0.6378
($dC_L/d\alpha$) $\alpha = 0$	3.646
$dC_M/d\alpha$) $\alpha = 0$	1.066

図－2・4・11(b)　箱桁断面の三分力特性

大橋治一：来島大橋補剛桁の耐風性、本四技報Vol.17 No.65、1993.1

表－２・４・２　抗力の比較

橋　名		超長大	超長大	来島第三	来島第三	来島第一	明石	明石
断面形式		対策	基本	2箱桁	偏平六角	偏平六角	トラス	偏平六角
桁　高　D	m	3.0	3.0	3.3	4.3	2.5	14.0	7.0
桁　幅　B	m	50.5	50.5	32.3	32.3	30.7	37.5	39.0
辺長比　B/D		16.8	16.8	9.8	7.5	12.3	2.7	5.6
縮　尺　n		110	110	60	60	60		
模型長　l	m	0.98	0.98	1.592	1.592	1.592		
模型投影面積 Anm	m2	0.0451	0.0311	0.0995	0.1267	0.079		
補正係数 μ2		1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.55	1.7
空気密度 ρ	kgf·s2·m-4	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
設計風速 Uz	m/s	60	60	60	60	60	60	60
抗力係数 CD		1.093	1.171	0.767	0.638	0.954	2.17	0.6
投影面積 An	m2/m	5.062	3.491	3.750	4.715	2.977	6.82	7.45
抗　力　PD	tf/m	2.03	1.50	1.06	1.12	1.04	4.95	1.64
		0.41	0.30	0.21	0.23	0.21	1.00	0.33



図－２・４・12　設計風荷重の比較

2．4．3　まとめ

超長大橋の2箱桁断面の三分力特性は以下のとおりである。

（1）抗力係数C_D

・迎角0°を軸にほぼ対称である。

・既往の研究による箱桁断面の抗力係数曲線は、迎角-5～+5°程度の範囲において勾配が緩やかで鍋底のような形状が多いが、本断面は勾配の緩やかな範囲が非常に狭い。また、単位長さ当たりの抗力P_Dを比較すると、同様な桁高の箱桁断面に対して大きな値となっている。

・ガイドベーンがセンターバリアと同じ高さに設置されているためか、ガイドベーン付きの断面においてはセンターバリアの有無に関わらず、静的風荷重はほぼ同じである。

（2）揚力係数C_L

・上下非対称断面の基本断面を除いて、迎角±15°の範囲では失速しない。

・揚力係数は迎角-0.5°付近で0となる。

・対策断面とセンターバリア無し断面の揚力係数特性はほぼ同じである。

（3）ﾋﾟｯﾁﾝｸﾞ･ﾓｰﾒﾝﾄ係数C_M

・対策断面とセンターバリア無し断面のﾋﾟｯﾁﾝｸﾞ･ﾓｰﾒﾝﾄ係数特性はほぼ同じである。

3．　振動特性の優れた構造系の調査

3．1　目的

現在、本州四国連絡橋では最新の耐風技術等を用いて、世界有数の長大橋が建設されている。なかでも明石海峡大橋は中央径間が1990mあり、世界最大の吊り橋である。海峡が多く存在する我が国では今後これを上回る超長大橋建設の計画があり、より良好な耐風構造を有する橋梁を考えなければならない。

耐風性を検討する場合、風洞実験と解析による方法に分類できる。風洞実験は実橋に応じた耐風特性をかなり明確に捕らえることができるが、時間と費用を多く費やすことや風洞施設が必要であるという条件から安易に検討を行うことはできない。しかし、解析はそれらの点を補うことができ、耐風性を明確に表現することができれば有効的に活用できる。

明石海峡大橋を超えるような超長大吊り橋の耐風安定性を確保する１つの方法として、橋桁断面に対する対策の他に、ケーブルシステムなどによる構造対策が考えられる。そして、これまで様々な方法が提案されている。

本調査では、耐風性が良好とされるケーブルシステムについて固有値解析を行い、各システムの耐風安定性に対する効果を検討した。

検討を行ったケーブルシステムは、ステイケーブル併用タイプ・モノケーブルシステム・クロスハンガーシステム・ストームケーブルなどで、それぞれパラメータを変えて固有値解析を行いSelbergの式によりフラッター発現風速を推定して耐風安定性の照査を行った。

3．2　1箱桁

3．2．1　解析手法

今回検討を行う対象構造物は吊橋であることより、本質的には非線形有限変形理論により解析を行うことが望ましい。しかし、検討内容が振動解析であり、解析対象が死荷重状態後の変形分に限られることより、線形化有限変形理論により解析を行うものとする。

（1）　解析対象吊橋の諸元

解析の対象は、中央径間3,000m、橋長6,000m（側径間1,500m）の超長大吊橋とし、以下に示す諸元を基本として考える。

1）吊橋の基本諸元

表－3・2・1　吊橋の基本諸元

項　　目	形式・数値
形式	3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋
橋長	6,000 m
支間割　ケーブル 補剛桁	1,500m + 3,000m + 1,500m 1,476m + 2,980m + 1,476m
サグ比	1 / 10
縦断勾配　側径間 中央径間	2 %　直線勾配 1 %　放物線勾配
ケーブル間隔	40 m
桁下空間（中央径間中央）	100 m

2）補剛桁諸元

補剛桁の諸元は、基本的にバネ支持模型試験の桁高3mのタイプと同様とし、質量効果による耐風性の向上を期待して補剛桁重量を 26tf/m とする。また、断面定数は断面形状を矩形箱断面と仮定して、補剛桁の重量より算定したものである。

表－３・２・２　補剛桁の諸元

項　　目	形式、数値
補剛桁形状	箱　桁
補剛桁幅	40.0 m
補剛桁高	4.0 m
単位重量	26.0 tf/m
極慣性モーメント	3,744　tf･m²/m
断面積	2.3 m²
断面２次モーメント　鉛直	8.5 m⁴
〃　　水平	360　m⁴
ねじれ定数	30　m4

表－３・２・３　補剛桁断面性能の計算

桁高		H	4.0 m	
桁幅		B	40.0 m	
重量	主構部	Wb	18.0 tf/m	横桁、隔壁、舗装、高欄他
	その他	Wf	8.0 tf/m	
	計	W	26.0 tf/m	
極慣性モーメント		Ip	3744 tf･m²/m	Ip=(0.3･B)²･W
断面性能	換算板厚	t	0.026 m	t=A/2(H+B)
	断面積	A	2.3 m²	A=Wb/7.85
	断面２次	Iz	8.5 m⁴	Iz=(H³･B-(H-2t)³･(B-2t))/12
	モーメント	Iy	360 m⁴	Iy=(B³･H-(B-2t)³･(H-2t))/12
	ねじれ剛性	Jx	30 m⁴	JX=(H-t)²･(B-t)²/((H-t)/t+(B-t)/t)

3）ケーブル諸元

自重、活荷重、温度の影響および各ケーブルシステム影響を考慮して、メインケーブルの形状・張力計算により定めるものとする。

4）主塔諸元

基本ケースのメインケーブルの反力により算定するものとする。

（2） 検討項目

一般的なケーブル構造を持つ吊橋形式を基本ケースとし、以下に示す項目について検をを行う。

1）ケーブルシステムに対する検討

メインケーブルのケーブルシステムとして、表－3・2・4に示すタイプの構造形式を考えて各パラメータに対し検討を行う。

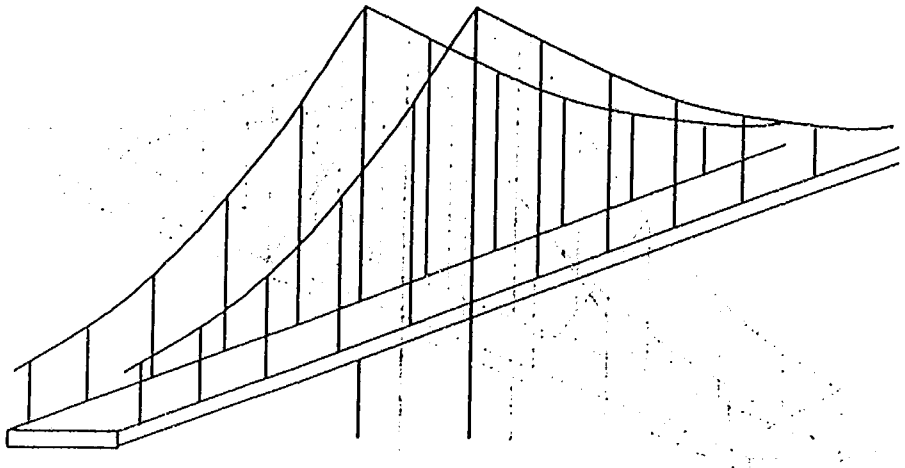
表－3・2・4 ケーブルシステムのタイプ

タイプ	ケーブルシステム	解析パラメータ
1	基本ケース	
2	ステイケーブル併用タイプ （斜張橋タイプ）	ケーブルの段数
3	モノケーブルシステム	
4	クロスハンガーシステム	ハンガーの位置および段数

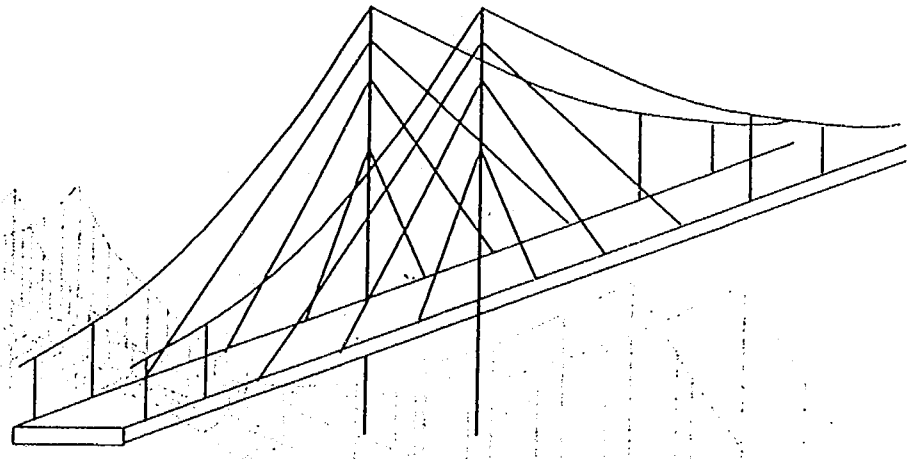
各ケーブルシステムの概念図を図－3・2・1～図－3・2・5に示す。

2）主塔剛性に対する検討

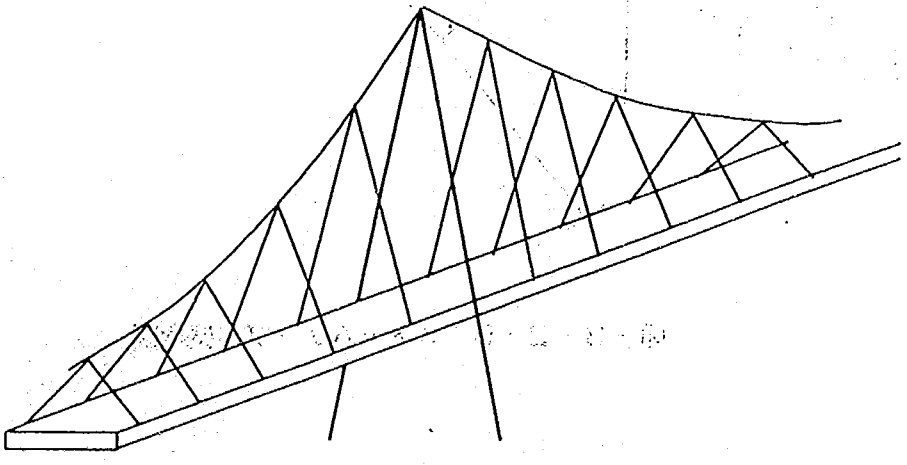
1）の各ケーブルシステムに対して、主塔剛性の影響を検討する。



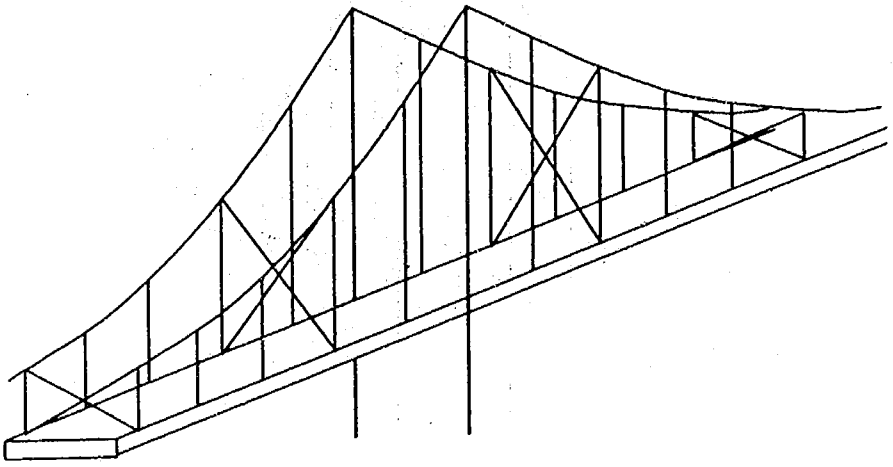
図－３・２・１　基本ケース概念図



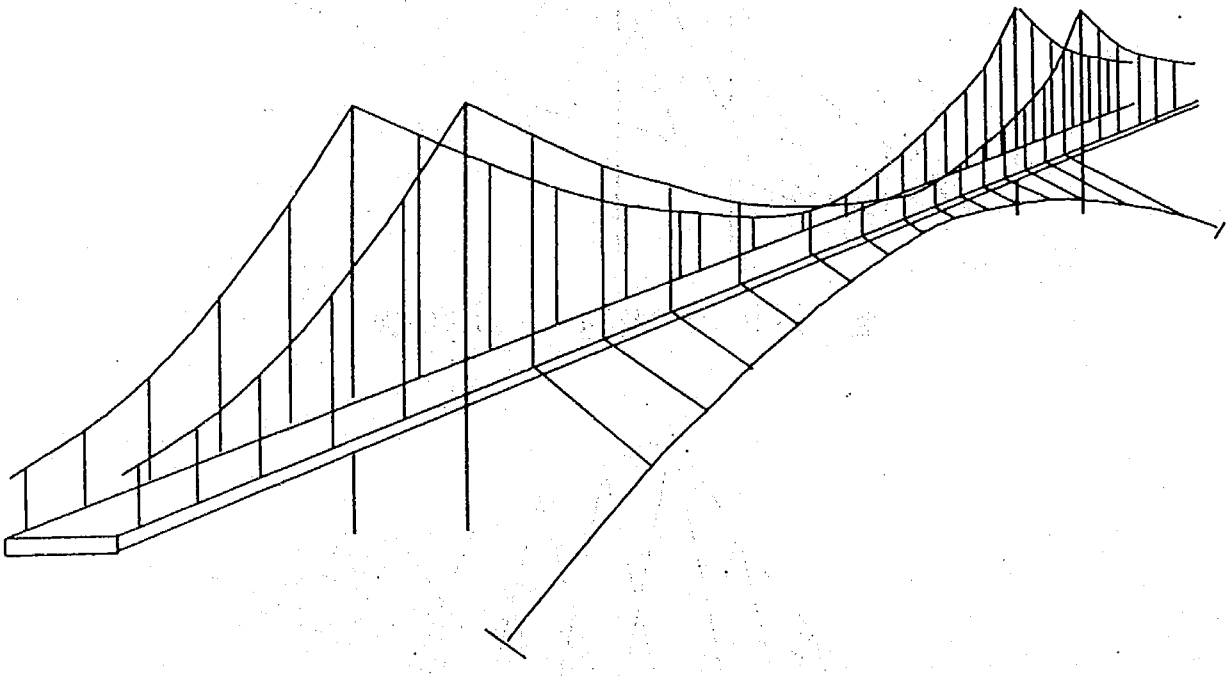
図－３・２・２　スティケーブル概念図



図－３・２・３　モノケーブル概念図



図－３・２・４　クロスハンガー概念図



図－３・２・５　ストームケーブル概念図

（３）　結果の評価

固有値解析結果の評価のために式（３・２・１）に示すSelbergのフラッター発現風速の推定式（平板のフラッター発現風速値）を用い評価を行った。

$$VF=0.44\cdot\omega_0\cdot B\sqrt{\{1-(\omega_z/\omega_0)^2\}\cdot\frac{\nu}{\mu}}$$ ---------式（３・２・１）

ここに、

B　：桁幅(m)

ν　：$8\cdot r^2/B^2$

μ　：$\pi\cdot\rho\cdot B^2/(2\cdot m)$

ω_0　：ねじれ円振動数

ω_z　：たわみ円振動数

式（３・２・１）を、重量W(tf/m)、極慣性モーメントΦ(tf•m²/m)、たわみ振動数f_z(Hz)、ねじれ振動数f_0(Hz)で表現すると以下のようになる。

$r^2=\Phi/W$, $\omega_z=2\cdot\pi\cdot f_z$, $\omega_0=2\cdot\pi\cdot f_0$　より

$$VF=0.44\cdot2\cdot\pi\cdot f_0\cdot B\sqrt{\{1-(f_z/f_0)^2\}\cdot\frac{4\sqrt{2}\cdot W\cdot\Phi}{\pi\cdot\rho\cdot g\cdot B^3}}$$

$$=1.185\cdot f_0\sqrt{\{1-(f_z/f_0)^2\}\cdot W\cdot\Phi/(\rho\cdot B)}$$

（4）解析条件

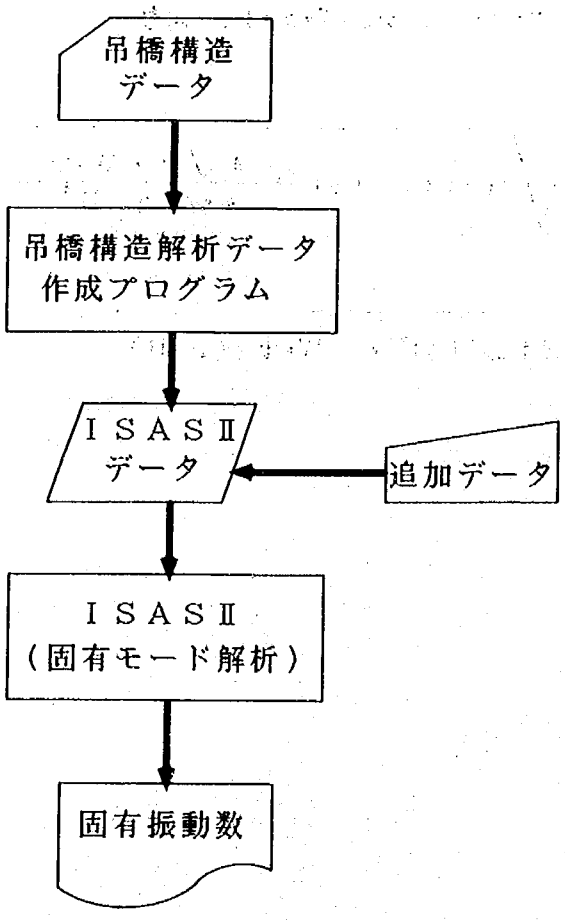
1）　使用プログラム

解析には、ケーブルシステムに対するの検討および主塔剛性に対する検討については、基本的に建設省土木研究所所有の吊橋構造解析データ作成プログラムおよび総合構造解析システムISASⅡを使用した。また、ストームケーブルについては、ストームケーブル応力を別計算を行ったため、別のプログラムを使用した。

①ケーブルシステムおよび主塔剛性に対する解析

本プログラムによる解析では、まず吊橋の構造データから吊橋構造解析データ作成プログラムによりケーブルの形状・張力・剛性および補剛桁の形状・質量分布等を計算し、ISASⅡ用の入力データを作成する。このデータを用いてISASⅡの固有モード解析により固有振動数等を求める。なお、固有モード解析にはサブスペース法を用いる。

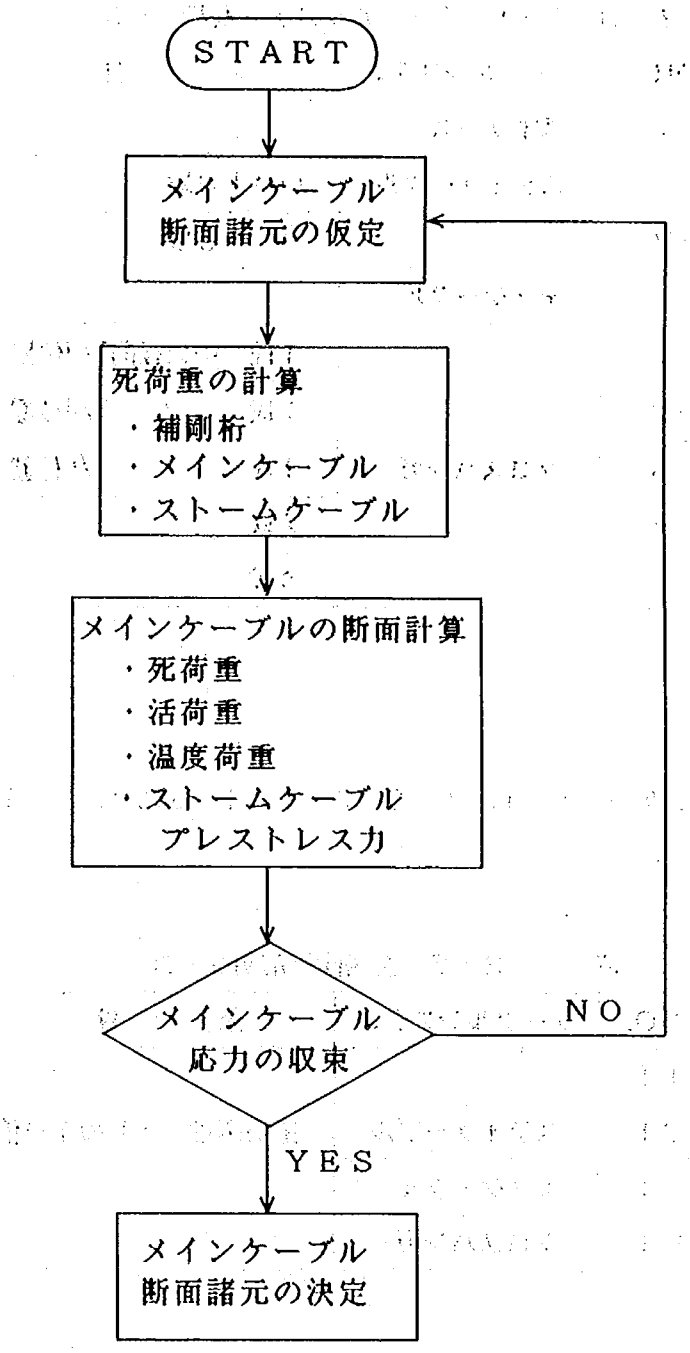
解析のフローを図－３・２・６に示す。



図－３・２・６　固有振動数解析フロー図

② ストームケーブルに対する解析

ストームケーブルを有する吊橋の解析においては、ストームケーブルの条件に応じてメインケーブルの諸元を算定し直す必要がある。メインケーブルの諸元決定のフローを図－３・２・７に示す。



図－３・２・７　メインケーブル断面諸元決定のフロー

（5）解析ケース

1）ケーブルシステム

表－3・2・5　ケーブルシステム解析ケース

ケースNO.	ケーブルシステム	条　　件
1－1	基本ケース	
2－1	ステイケーブル	斜材10段
2－2		〃　15段
3－1	モノケーブル	
4－1	クロスハンガー	1段　中央径間1/3位置
4－2		1段　〃　1/4位置
4－3		1段　〃　1/6位置
4－4		2段
4－5		4段

2）主塔剛性

1）のケースのうち、ケース1－1，2－2，3－1，4－5について、主塔剛性を10倍にして解析を行う。

表－3・2・6　主塔剛性解析ケース

ケースNO.	ケーブルシステム	条　　件
1－1T		主塔剛性（1）の10倍
2－2T	ステイケーブル	
3－1T	モノケーブル	
4－5T	クロスハンガー	

3）ストームケーブル

表－３・２・７　ストームケーブル解析ケース

NO.	ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
1	無				
2	有	1/4	1/60	30°	5,000 tf
3	有	1/8	1/60	30°	5,000 tf
4	有	1/8	1/45	30°	5,000 tf
5	有	1/8	1/30	30°	5,000 tf
6	有	1/8	1/60	15°	5,000 tf
7	有	1/8	1/60	45°	5,000 tf
8	有	1/8	1/60	30°	1,000 tf
9	有	1/8	1/60	30°	10,000 tf

＊基本ケースのメインケーブルとの断面積比

（6） 解析条件および解析モデル

1） 基本ケースの構造諸元

①材料定数およびメインケーブルの諸元

表－３・２・８ メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.45mm	
ケーブル断面積	1.3390m²	
ケーブル径	146.8cm²	ラッピングを含む

表－３・２・９ メインケーブル特性値

	密度 ρ (g/cm³)	引張強度 σ_B (kgf/mm²)	弾性定数 E (kgf/cm²)	線膨張係数 μ (1/°C)
180キロ級	7.85	180	2.1×10^{6}	1.2×10^{-5}

表－３・２・１０ ハンガーケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
ハンガー断面積	0.0082m²	

表－３・２・１１ アンカー部ケーブル水平バネ定数

項　　目	Kx(tf/m)	備　　考
左　　側	757038.5	
右　　側	757038.5	

表－３・２・１２ 物理定数

		弾性定数 E (kgf/cm²)	せん断定数 G (kgf/cm²)	線膨張係数 μ
1	吊構造部	2.1×10^{6}	8.1×10^{6}	1.2×10^{-5}
2	ケーブル	2.0×10^{6}	－	1.2×10^{-5}
3	ハンガー	1.4×10^{6}	－	1.2×10^{-5}

②質量諸元

表－３・２・１３　質量諸元

	構造区分		単位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.00	26.00
	ケーブル		(tf/m/Br)	23.08	23.43
	合計		(tf/m/Br)	49.08	49.43
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm^2/m/Br)	3744.0	3744.0
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	(m)	40.00	40.00
		ケーブル関係重量 Wc	(tf/m/Br)	23.08	23.43
		ケーブル関係の極慣性モーメント ($1/4 \cdot Bc^2 \cdot Wc$)	(tfm^2/m/Br)	9232.0	9372.0
	合計		(tfm^2/m/Br)	12976.0	13116.0

③荷重条件

メインケーブルの諸元決定の際に考慮した荷重条件は以下のとおり。

（ａ）活荷重

メインケーブルの算定において考慮した活荷重を次ページ以降に示す。

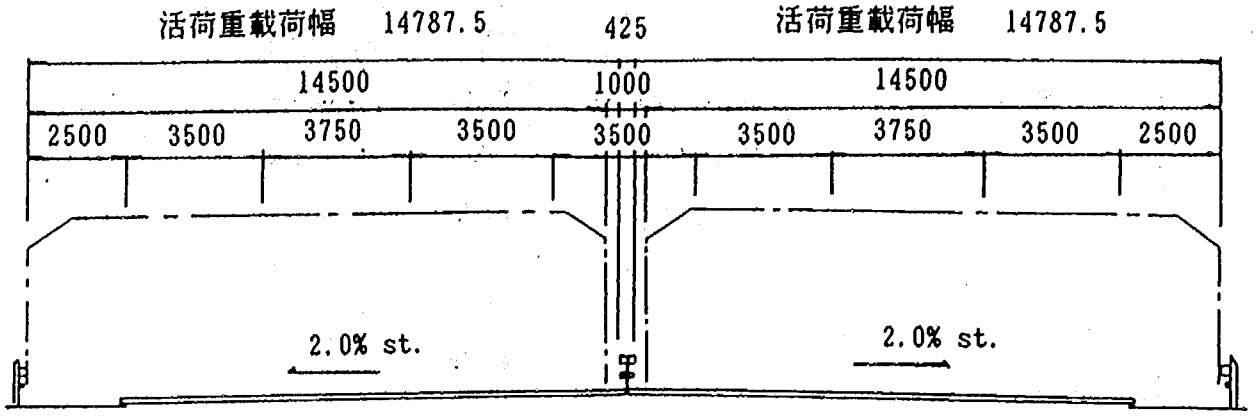
（ｂ）温度荷重

温度荷重の影響として、基本温度20°Cに対して±30°Cを考慮する。

活荷重（主ケーブル

載荷幅

下図に示す幅員で活荷重（L活荷重）載荷幅を考慮する。

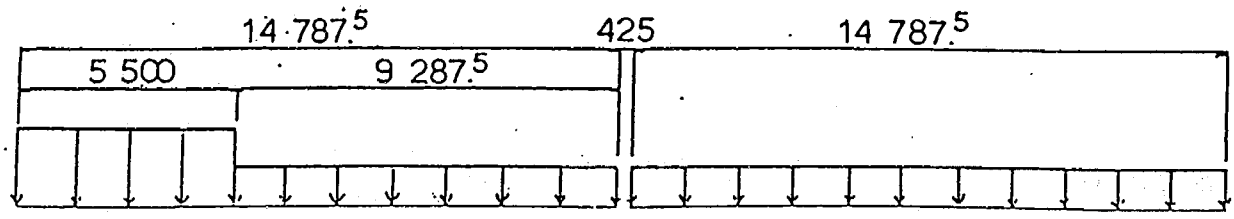


□ H

＊…150×2+125=425

載荷幅は予備検討時と異なり中央部ガードレール形状を考慮した。

鉛直荷重最大の場合



線荷重（等価L荷重）

$$P = (11.8+0.0005\times 2980)\times 5.5+2.50\times(9.2875+14.7875)$$

$$= 73.095+60.188$$

$$= 133.283\text{t}\ (1\text{橋分})$$

P=66.64t（片側分）

等分布荷重（等価L荷重）

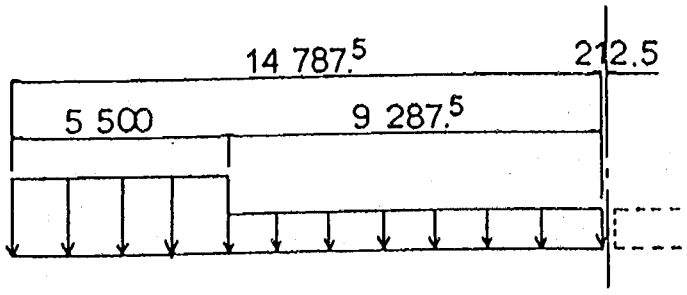
$$p = \{0.300\times(0.57+\frac{300}{200+2980})\}\times(5.5+1/2\times 24.075)$$

$$= 0.1993\text{t/m}^2\times 17.5375\text{m}$$

$$= 3.495\text{t/m}\ (1\text{橋分})$$

p=1.748t/m（片側分）

偏心トルクモーメント最大の場合



：線荷重

$$P = (11.8+0.0005\times 2980)\times 5.5+2.50\times 9.2875$$

$$= 73.095+23.219$$

$$= 96.314\text{t}\ (1\text{橋分})$$

P＝48.16t（片側分）

偏心トルクモーメント

$$T_p = 73.095\times 12.25+23.219\times 4.85625$$

$$= 895.41+112.76$$

$$= 1008.2\text{t}\cdot\text{m}\ (1\text{橋分})$$

T_p＝1008.2t･m（1橋分）

分布荷重

$$p = \left\{0.300\times\left(0.57+\frac{300}{200+2980}\right)\right\}\times\left(5.5+\frac{1}{2}\times 9.2875\right)$$

$$= 0.1993\times 10.144$$

$$= 2.022\text{t/m}\ (1\text{橋分})$$

p＝1.011t/m（片側分）

偏心トルクモーメント

$$T_p = 0.1993\times 5.5\times 12.25+0.1993\times\frac{1}{2}\times 9.2875\times 4.85625$$

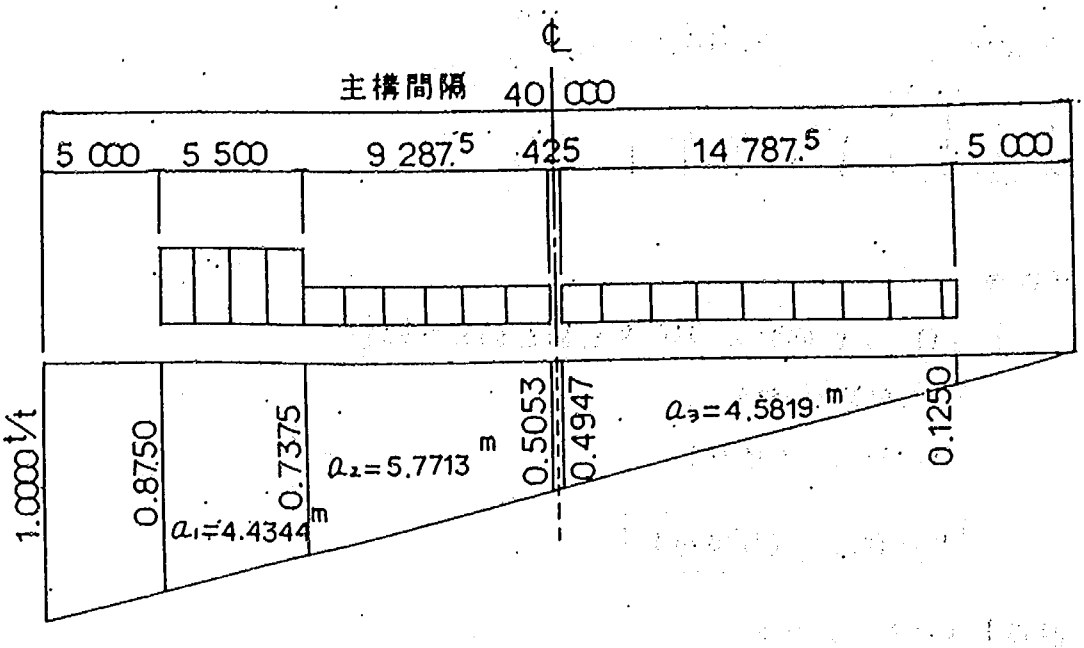
$$= 13.43+4.49$$

$$= 17.92\text{t}\cdot\text{m}\ (1\text{橋分})$$

T_p＝17.92t･m（1橋分）

1－0分配による活荷重

活荷重載荷状態



線荷重（等価L荷重）

$$P = (11.8+0.0005\times 2980\,t/m)\times 4.4344m+2.5\,t/m\times(5.7713+4.5819)m$$

$$= 58.933+25.883$$

$$= 84.816t\ (片側分)$$

P＝84.82t（片側分）

分布荷重（等価L荷重）

$$p = \left\{0.300\times\left(0.57+\frac{300}{200+2980}\right)t/m^2\right\}\times\left(4.4344+\frac{1}{2}\times 5.7713+\frac{1}{2}\times 4.5819\right)$$

$$= 0.1993\,t/m^2\times 9.6110m$$

$$= 1.9155\,t/m\ (片側分)$$

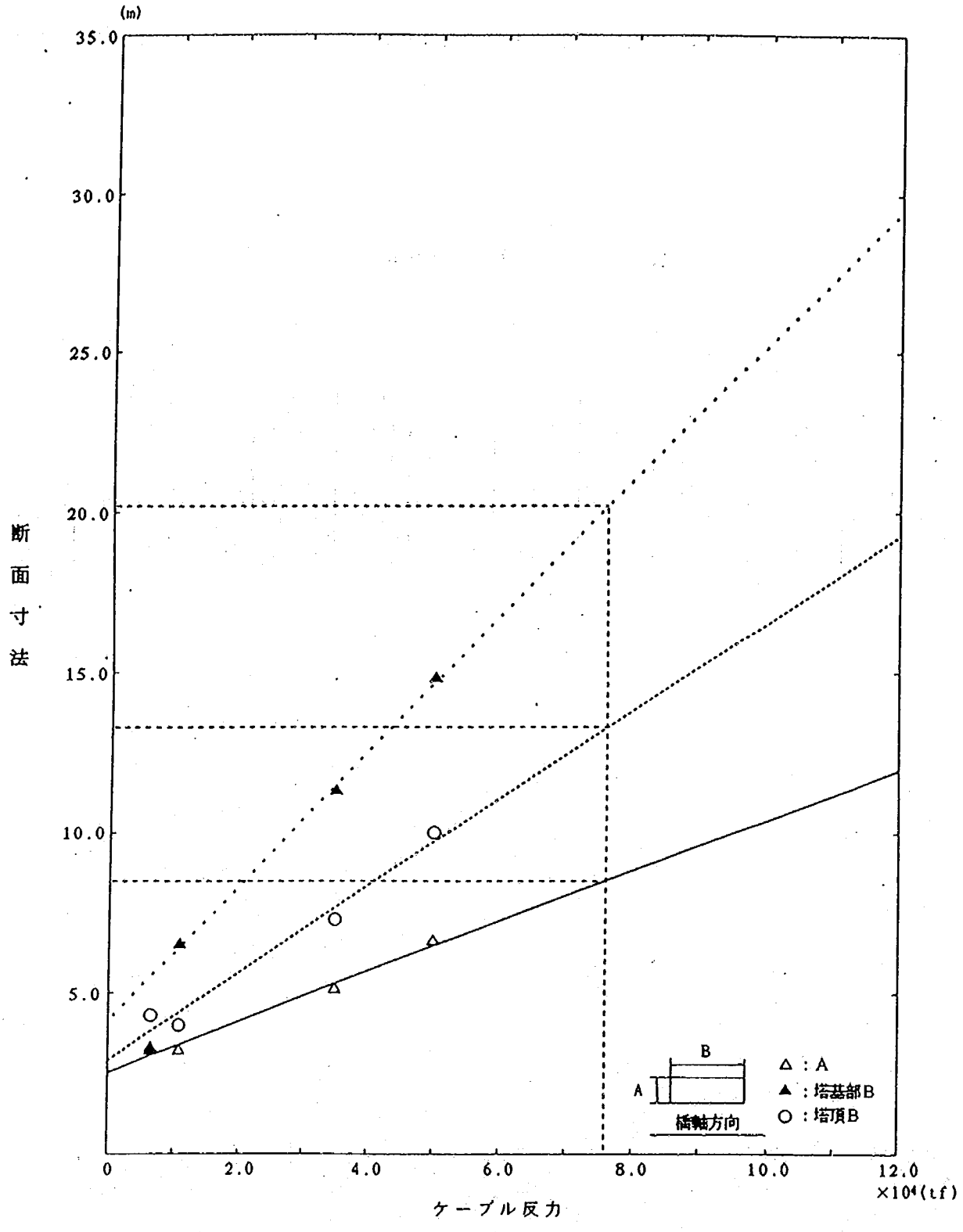
p＝1.916t/m（片側分）

2）主塔諸元

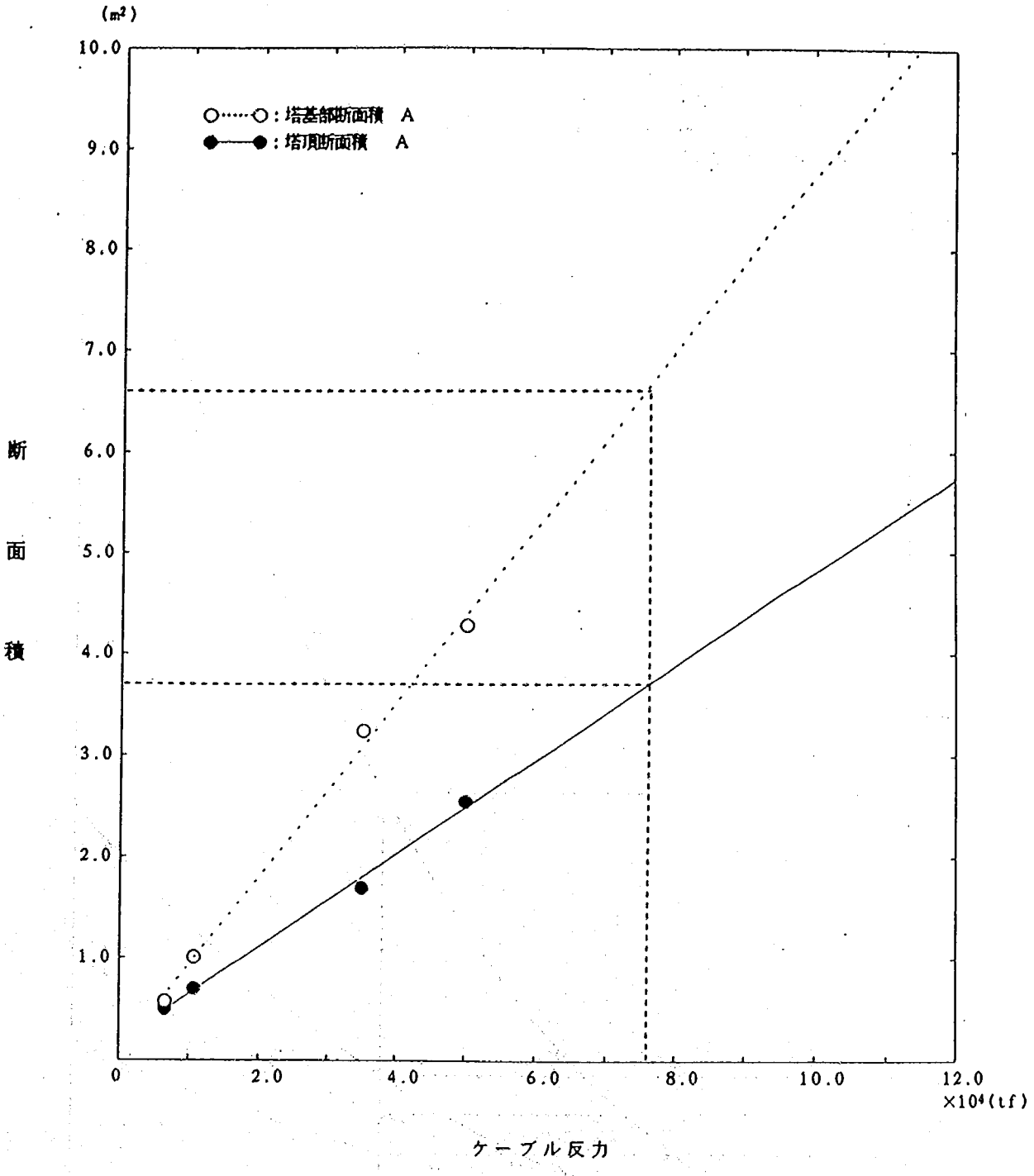
主塔については、メインケーブルの反力によりその構造諸元を決定する。表－３・２・１４ に主塔の諸元を図－３・２・８～図－３・２・８に諸元決定に用いた資料を示す。

表－３・２・１４　主塔の諸元

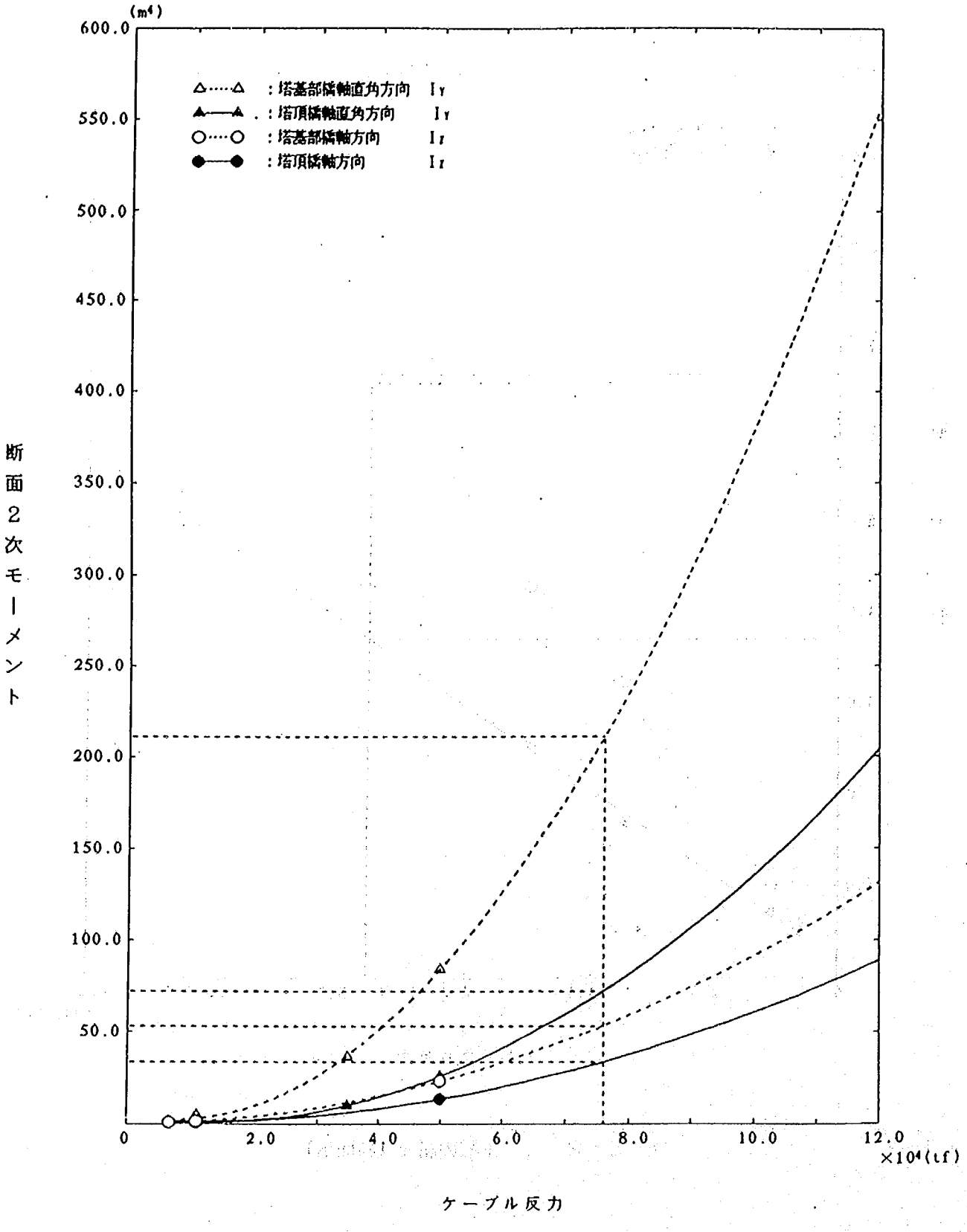
	ケーブル反力 (tf/片側)	塔頂高 (m)	断面性能						断面寸法	
			塔頂			塔基部			塔頂 (m) (A×B)	塔基部 (m) (A×B)
			A(m²)	I_Y(m⁴)	I_X(m⁴)	A(m²)	I_Y(m⁴)	I_X(m⁴)		
大鳴大橋	6633	88.35	0.500	1.325	0.910	0.512	0.908	0.954	3.3×3.2	3.3×4.3
因島大橋	10788	135.65	0.703	1.423	0.996	1.005	4.597	1.633	3.2×4.0	3.2×5.5
南備讃瀬戸大橋(SP)	34863	179.55	1.692	9.866	——	3.239	36.415	——	5.1×7.3	5.1×11.3
明石海峡大橋	49890	282.80	2.555	25.880	13.500	4.281	83.910	23.3	6.6×10.0	6.6×14.8
3000N	76000	408.0	3.700	72.093	33.622	6.647	211.034	53.147	8.5×13.3	8.5×20.2



図－３・２・８　主塔の諸元（断面寸法）



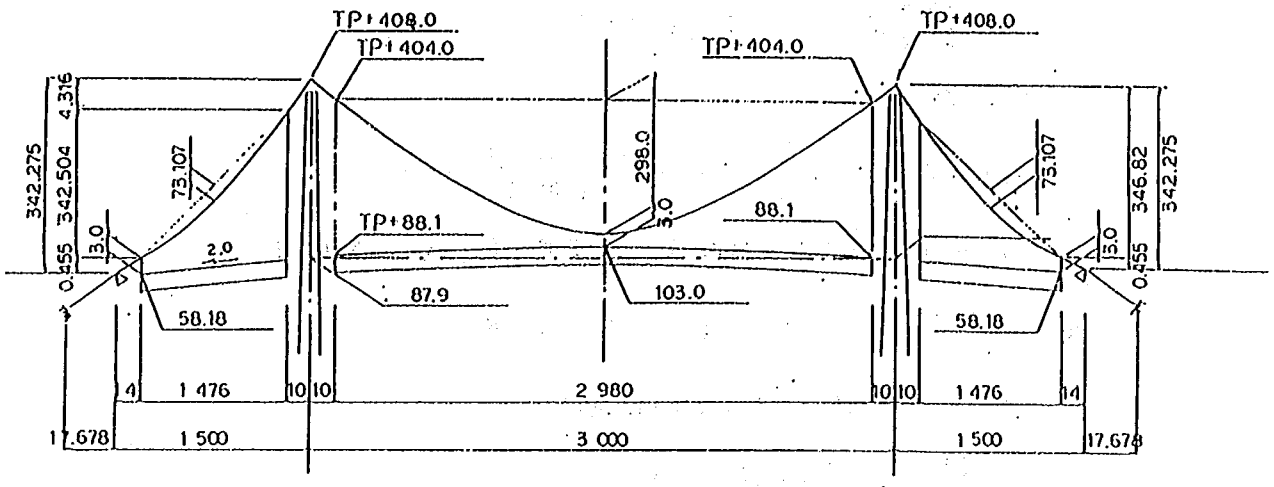
図－３・２・９　主塔の諸元（断面積）



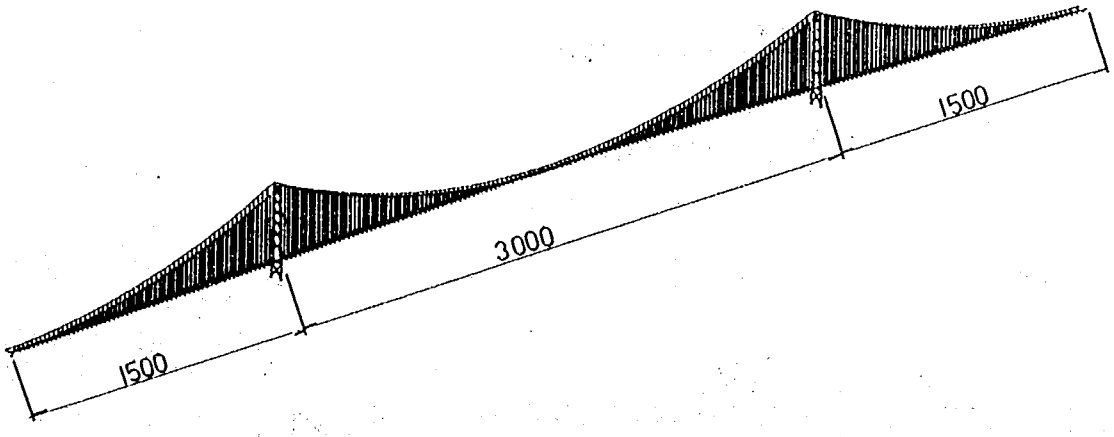
図－３・２・１０　主塔の諸元（断面二次モーメント）

3）吊橋の基本形状および解析モデル

基本諸元および上記条件により求めた吊橋の基本形状を図－３・２・１１に、また解析に用いたモデルを図－３・２・１２に示す。



図－３・２・１１　吊橋の基本形状



図－３・２・１２　解析モデル（基本ケース）

基本数値

サグ比：$f / \ell = 1/10.0$

$$f_1 = \left(\frac{\ell_1}{\ell}\right)^2 \times \frac{W_1}{W} \times f$$

$$= \left(\frac{1476.0}{2980.0}\right)^2 \times \frac{49.43}{49.08} \times 298.0$$

$$= 73.628$$

$$a = b \cdot \tan\phi = b \times \frac{4f}{\ell} = 10.0 \times \frac{4 \times 298.0}{2980.0} = 4.0$$

$$h_0 = a_1 + h_1 = (TP+408.0) - (TP+61.18) = 346.82$$

$$a_1 = \frac{b_1}{\ell_1 + b_1} \times (h_0 + 4 \cdot f_1) = 4.316$$

$$h_1 = h_0 - a_1 = 346.82 - 4.316 = 342.504$$

$$\tan\phi = \frac{4f}{\ell} = \frac{4 \times 298.0}{2980} = 0.4$$

$$\sec\phi = \sqrt{1+\tan^2\phi} = 1.077033$$

$$\tan\alpha_1 = \frac{h_1}{\ell_1} = \frac{342.504}{1476.0} = 0.232049$$

$$\sec\alpha_1 = \sqrt{1+\tan^2\alpha_1} = 1.026570$$

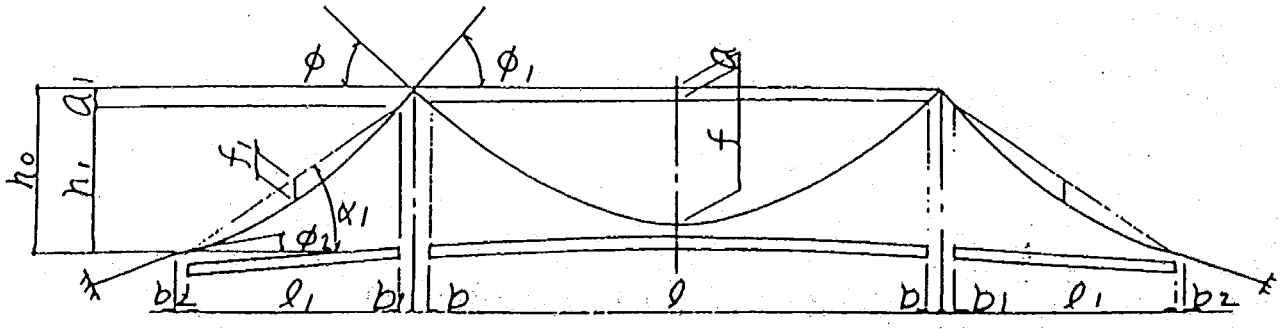
$$\tan\phi_1 = \tan\alpha_1 + \frac{4f_1}{\ell_1} = 0.431583$$

$$\sec\phi_1 = \sqrt{1+\tan^2\phi_1} = 1.089157$$

$$\tan\phi_2 = \tan\alpha_1 - \frac{4f_1}{\ell_1} = 0.032515$$

$$\sec\phi_2 = \sqrt{1+\tan^2\phi_2} = 1.000528$$

［記号］



（7）　各ケースにおける構造諸元

解析条件に応じ各ケースで定まる構造諸元を以下に示す。また、解析に用いたモデルを図－３・２・１４～図－３・２・２１に示す。

なお、特に記載の無いものは　基本ケースの構造諸元と同様である。

1）ケーブルシステム

○ケース２－１

ステイケーブル併用タイプ（１０段）

表－３・２・１５　メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.45mm	
ケーブル断面積	1.275m²	
ケーブル径	143.5cm	ラッピングを含む

表－３・２・１６　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.00	26.00
	ケーブル		(tf/m/Br)	21.97	22.30
	合　　計		(tf/m/Br)	47.97	48.30
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.0	3744.0
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	(m)	40.00	40.00
		ケーブル関係重量 Wc	(tf/m/Br)	21.97	22.30
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tfm²/m/Br)	8788.0	8920.0
	合　　計		(tfm²/m/Br)	12532.0	12664.0

表－３・２・１７　ステイケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
ケーブル断面積	0.0101m²	
弾性係数	2.0×10⁶kgf/cm²	

○ケース２－２

ステイケーブル併用タイプ（１５段）

表－３・２・１８　メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.45mm	
ケーブル断面積	1.218m²	
ケーブル径	140.3cm	ラッピングを含む

表－３・２・１９　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.00	26.00
	ケーブル		(tf/m/Br)	21.00	21.32
	合　　計		(tf/m/Br)	47.00	47.32
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.0	3744.0
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	(m)	40.00	40.00
		ケーブル関係重量 Wc	(tf/m/Br)	21.00	21.32
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4・Bc²・Wc)	(tfm²/m/Br)	8400.0	8528.0
	合　　計		(tfm²/m/Br)	12144.0	12272.0

表－３・２・２０　ステイケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
ケーブル断面積	0.0101m²	内側７段
〃	0.0125m²	外側８段
弾性係数	2.0×10⁶kgf/cm²	

○ケース３－１

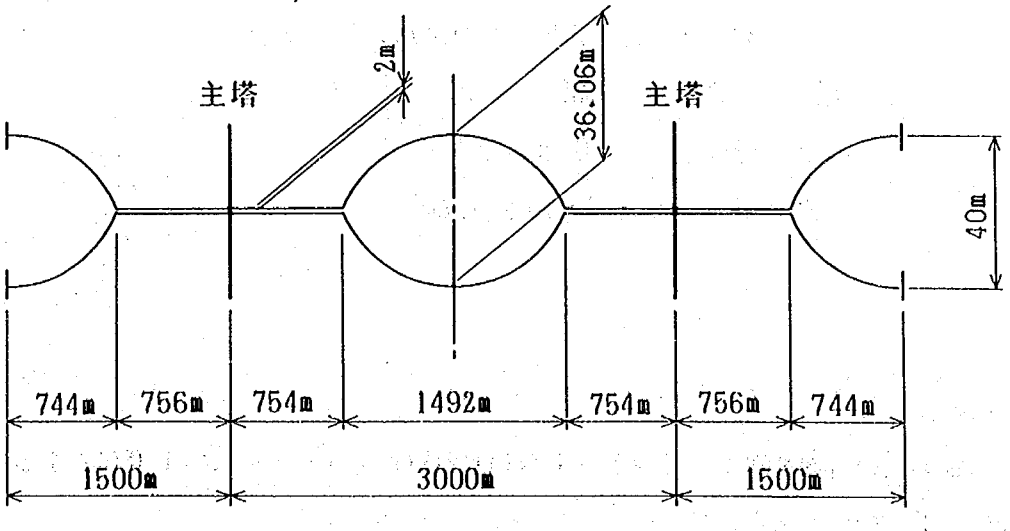
モノケーブルタイプ

表－３・２・２１　メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.45mm	
ケーブル断面積	1.3390m²	
ケーブル径	146.8cm	ラッピングを含む

表－３・２・２２　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.00	26.00
	ケーブル		(tf/m/Br)	23.08	23.43
	合　　計		(tf/m/Br)	49.08	49.43
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.0	3744.0
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	(m)	36.06	—
		ケーブル関係重量 Wc	(tf/m/Br)	23.08	23.43
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tfm²/m/Br)	7503.0	—
	合　　計		(tfm²/m/Br)	11247.0	—



図－３・２・１３　モノケーブル平面形状

○ケース４－１～４－５

クロスハンガータイプ

表－３・２・２３　メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.45mm	
ケーブル断面積	1.3390m²	
ケーブル径	146.8cm	ラッピングを含む

表－３・２・２４　質量諸元

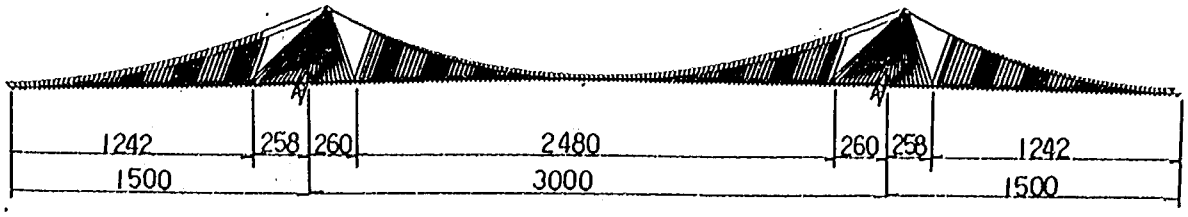
	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.00	26.00
	ケーブル		(tf/m/Br)	23.08	23.43
	合　　計		(tf/m/Br)	49.08	49.43
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.0	3744.0
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	(m)	40.00	40.00
		ケーブル関係重量 Wc	(tf/m/Br)	23.08	23.43
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tfm²/m/Br)	9232.0	9372.0
	合　　計		(tfm²/m/Br)	12976.0	13116.0

表－３・２・２５　クロスハンガーの諸元

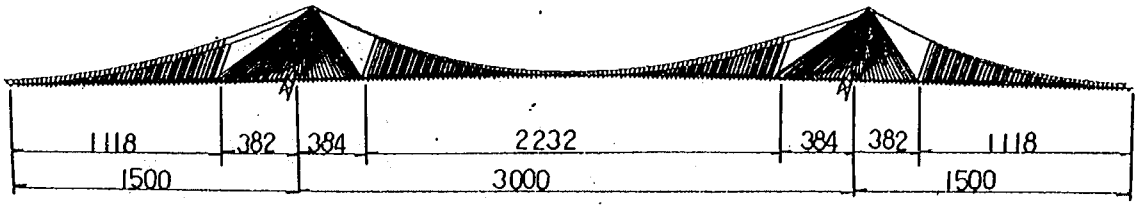
項　　目	諸　　元	備　　考
ハンガー断面積	0.00824m²	
弾性係数	1.4×10⁶kgf/cm²	

２）主塔の剛性

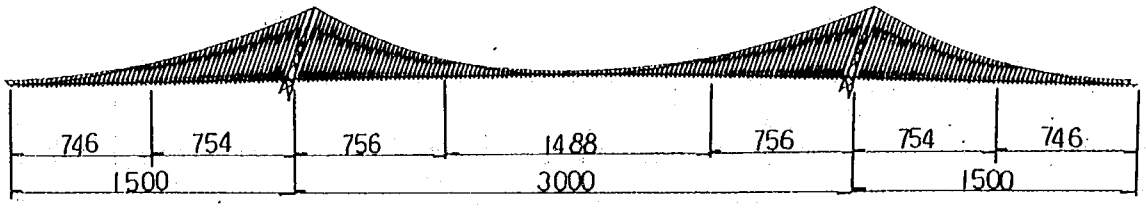
主塔の橋軸方向の断面２次モーメントおよびねじれ剛性を基本ケースの１０倍とする。他の諸元は、１）のケースと同じ。



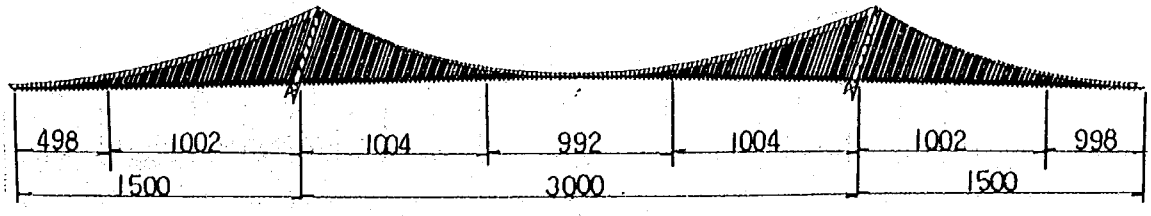
図－３・２・１４　解析モデル（ステイケーブル併用タイプ：１０段）



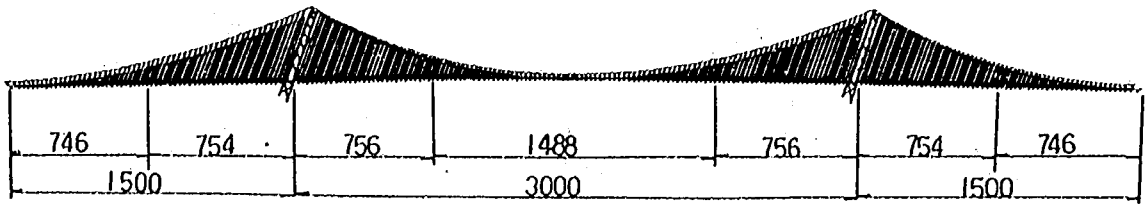
図－３・２・１５　解析モデル（ステイケーブル併用タイプ：１５段）



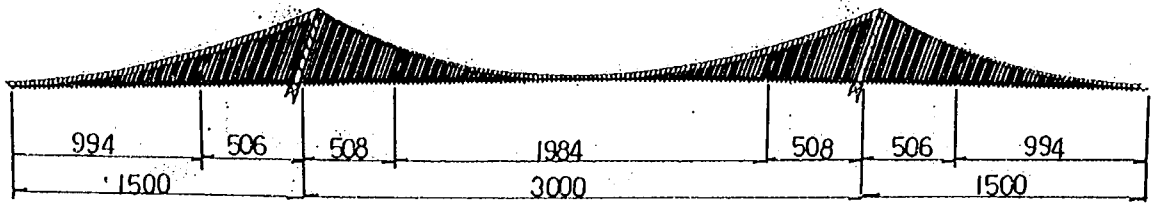
図－３・２・１６　解析モデル（モノケーブルタイプ）



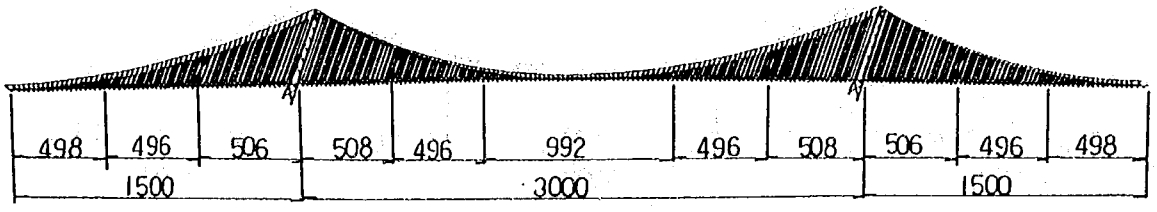
図－３・２・１７　解析モデル（クロスハンガータイプ：１段１／３位置）



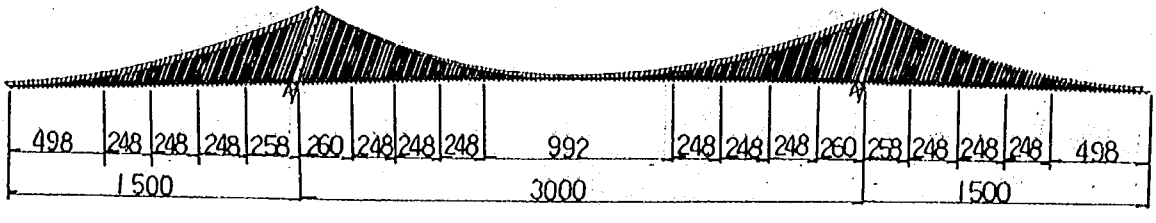
図－３・２・１８　解析モデル（クロスハンガータイプ：１段１／４位置）



図－３・２・１９　解析モデル（クロスハンガータイプ：１段１／６位置）



図－３・２・２０　解析モデル（クロスハンガータイプ：２段）



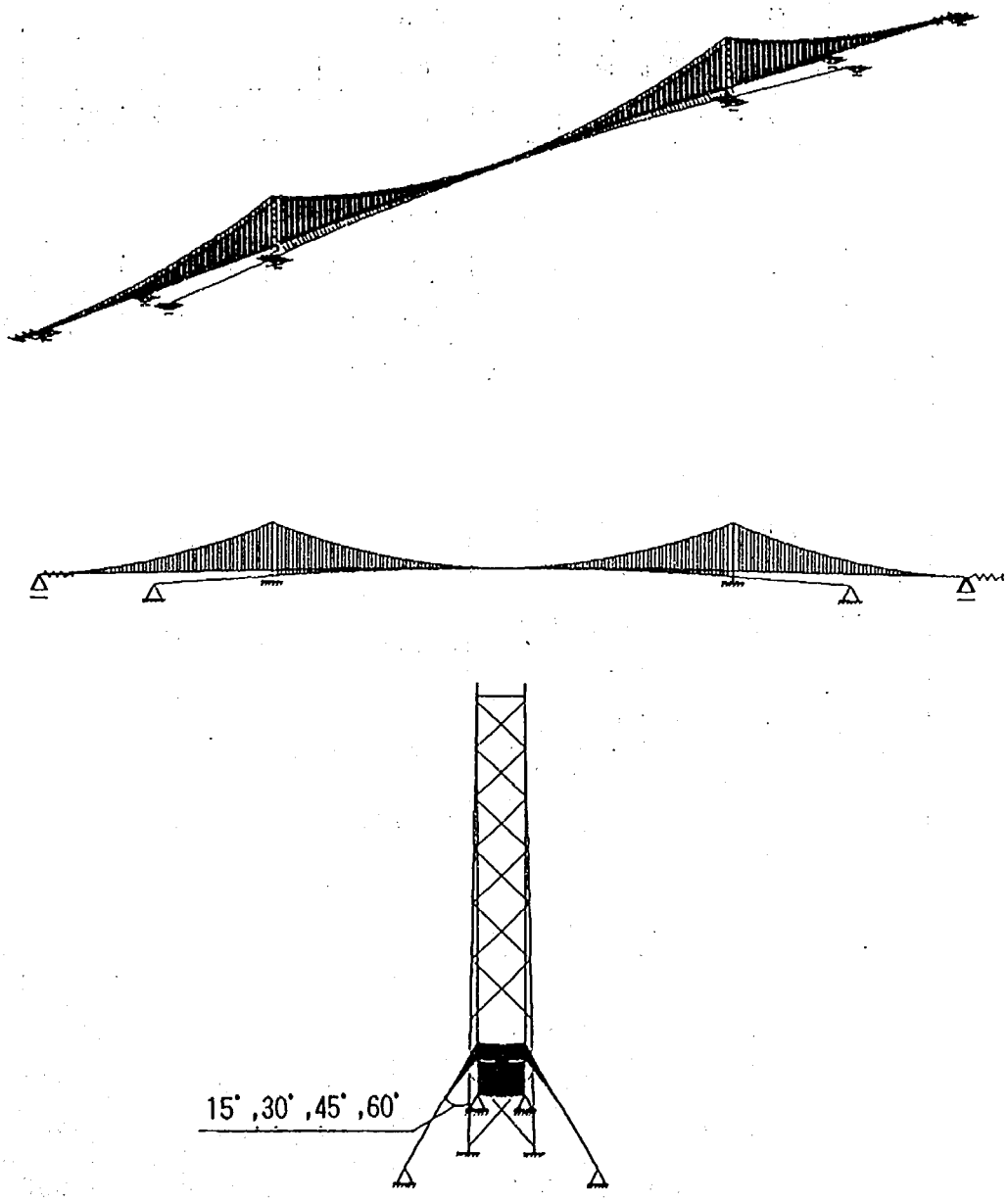
図－３・２・２１　解析モデル（クロスハンガータイプ：４段）

3）ストームケーブル

ストームケーブルの解析条件に応じ、各ケースごとに定まる構造諸元を次ページ以降に示す。また、解析モデルを図－３・２・２２に示す。

表－３・２・２６　ストームケーブルの材質

		弾性係数E (kgf/cm^2)	線膨張係数　μ
1	ケーブル	2.0×10^6	1.2×10^6
2	ハンガー	1.4×10^6	1.2×10^6



図－３・２・２２　解析モデル図（ストームケーブル）

①解析ケース2

表－3・2・27（1）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/4	1/60	30°	5,000 tf

＊1：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－3・2・27（2）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	2本／橋
素線径	5.93mm	
ケーブル断面積	1.645m²	
ケーブル径	162.6cm	ラッピングを含む

表－3・2・27（3）　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/B_r)	26.03	26.0
	ケーブル		(tf/m/B_r)	28.12	28.55
	合　計		(tf/m/B_r)	54.15	54.55
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	28.12	28.55
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tm²/m/Br)	11248.	11420.
	合　計		(tfm²/m/Br)	14992.	15164.

表－3・2・27（4）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　位	数　値
ケーブル断面積	(m²)	0.33475
ケーブル重量	(tf/m/½ Br)	3.029
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	6380.
プレストレス力	(tf／1本)	5,000

②解析ケース３

表－３・２・２８（１）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/60	30°	5,000 tf

＊１：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－３・２・２８（２）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.67mm	
ケーブル断面積	1.5039m²	
ケーブル径	155.5cm	ラッピングを含む

表－３・２・２８（３）　質量諸元

	構造区分		単位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.03	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.80	26.19
	合計		(tf/m/Br)	51.83	52.19
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.80	26.19
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tm²/m/Br)	10320.	10476.
	合計		(tfm²/m/Br)	14064.	14220.

表－３・２・２８（４）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　　位	数　　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	3191.
プレストレス力	(tf／１本)	5,000

③解析ケース4

表－3・2・29（1）　ストームケーブルの条件

ストームケーブル	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/45	30°	5,000 tf

＊1：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－3・2・29（2）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	2本／橋
素線径	5.63mm	
ケーブル断面積	1.4828m²	
ケーブル径	154.4cm	ラッピングを含む

表－3・2・29（3）　質量諸元

	構造区分		単位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.04	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.45	25.84
	合計		(tf/m/Br)	51.49	51.84
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.45	25.84
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4・Bc²・Wc)	(tm²/m/Br)	10180.	10336.
	合計		(tfm²/m/Br)	13924.	14080.

表－3・2・29（4）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　　位	数　　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	3841.
プレストレス力	(tf／1本)	5,000

④解析ケース5

表－３・２・３０（１）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/30	30°	5,000 tf

＊１：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－３・２・３０（２）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.60mm	
ケーブル断面積	1.4670m²	
ケーブル径	153.6cm	ラッピングを含む

表－３・２・３０（３）　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.05	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.19	25.58
	合　計		(tf/m/Br)	15.24	51.58
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.19	25.58
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tm²/m/Br)	10076.	10232.
	合　計		(tfm²/m/Br)	13820.	13976.

表－３・２・３０（４）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　位	数　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½ Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	5320.
プレストレス力	(tf／１本)	5,000

⑤解析ケース6

表－３・２・３１（１）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/60	15°	5,000 tf

＊１：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－３・２・３１（２）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.65mm	
ケーブル断面積	1.4934m²	
ケーブル径	155.0cm	ラッピングを含む

表－３・２・３１（３）　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.03	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.63	26.02
	合　計		(tf/m/Br)	51.66	52.02
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.63	26.02
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tm²/m/Br)	10252.	10408.
	合　計		(tfm²/m/Br)	13996.	14152.

表－３・２・３１（４）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　位	数　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½ Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	2273.
プレストレス力	(tf／１本)	5,000

⑥解析ケース7

表－３・２・３２（１）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/60	45°	5,000 tf

＊１：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－３・２・３２（２）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.67mm	
ケーブル断面積	1.5039m²	
ケーブル径	155.5cm	ラッピングを含む

表－３・２・３２（３）　質量諸元

	構造区分		単位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.03	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.80	26.19
	合計		(tf/m/Br)	51.83	52.19
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.80	26.19
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4·Bc²·Wc)	(tm²/m/Br)	10320.	10476.
	合計		(tfm²/m/Br)	14064.	14220.

表－３・２・３２（４）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　　位	数　　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½ Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	4967.
プレストレス力	(tf／１本)	5,000

⑦解析ケース8

表－３・２・３３（１）　ストームケーブルの条件

ストームケーブル	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/60	60°	5,000 tf

＊１：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－３・２・３３（２）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	２本／橋
素線径	5.93mm	
ケーブル断面積	1.5093m²	
ケーブル径	155.8cm	ラッピングを含む

表－３・２・３３（３）　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.05	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.88	26.28
	合　計		(tf/m/Br)	51.93	52.28
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.88	26.28
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4・Bc²・Wc)	(tm²/m/Br)	10352.	10512.
	合　計		(tfm²/m/Br)	14096.	14256.

表－３・２・３３（４）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　位	数　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	8327.
プレストレス力	(tf／１本)	5,000

⑧解析ケース9

表－3・2・34（1）　ストームケーブルの条件

ｽﾄｰﾑｹｰﾌﾞﾙ	断面積*1	サグ比	鉛直角度	プレストレス力
有	1/8	1/60	30°	10,000 tf

＊1：基本ケースのメインケーブル断面積との比

表－3・2・34（2）　主ケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	2本／橋
素線径	5.69mm	
ケーブル断面積	1.5146m²	
ケーブル径	156.1cm	ラッピングを含む

表－3・2・34（3）　質量諸元

	構造区分		単　位	中央径間	側径間
死荷重強度	吊構造部		(tf/m/Br)	26.03	26.0
	ケーブル		(tf/m/Br)	25.97	26.37
	合　計		(tf/m/Br)	52.00	52.37
極慣性モーメント	吊構造部		(tfm²/m/Br)	3744.	3744.
	ケーブル関係	主ケーブル中心間隔 Bc	m	40.0	40.0
		ケーブル関係重量 Wc	(t/m/Br)	25.97	26.37
		ケーブル関係の極慣性モーメント (1/4・Bc²・Wc)	(tm²/m/Br)	10388.	10548.
	合　計		(tfm²/m/Br)	14132.	14292.

表－3・2・34（4）　ストームケーブルの諸元

項　　目	単　位	数　値
ケーブル断面積	(m²)	0.16738
ケーブル重量	(tf/m/½ Br)	1.515
極慣性モーメント	(tm²/m/Br)	3191.
プレストレス力	(tf／1本)	10,000

3．2．2　固有値解析結果

（1）固有振動数および振動モード

1）ケーブルシステムの影響

表－3・2・35および図－3・2・23～図－3・2・25 に各ケーブルシステムのたわみ対称1次およびねじれ対称1次の振動数の計算結果を示す。また、表－3・2・36～表－3・2・44に計算を行った全モードの振動数および振動モードを、図－3・2・26～図－3・2・34にたわみ対称1次およびねじれ対称1次のモード図を示す。なお、ねじれ対称1次はねじれ対称1次振動が生じているモードにおいて橋桁の等価極慣性モーメントが最小となるモードを選んだ。

たわみ対称1次振動においては、ステイケーブル併用タイプ（斜材タイプ）で僅かに振動数が基本ケースに比べて増加したが、他のケーブルシステムでは基本ケースと同じ振動数であった。これより、各ケーブルシステムはたわみ振動にはほとんど影響を与えないことがわかる。斜材タイプにおいて振動数が増加したのは、斜材タイプのみその構造上補剛桁を連続桁としたこと、ステイケーブルが補剛桁重量を負担する分メインケーブル重量を軽くしていること、またステイケーブルの存在により主塔まわりの剛性が高まり振動上の支間を短くする働きがあることなどの影響によるものと考えられる。

ねじれ対称1次振動においては、各ケーブルシステムにおいて振動数の増加が見られる。特にモノケーブルおよびクロスハンガーにおいて増加率が大きく、モノケーブルにおいてねじれ振動数が最大であった。

斜材タイプでは、上記影響により振動数が増加するものと考えられ、その効果はねじれに対してのほうが大きいようである。しかし、水平方向に拘束がないためか他のシステムに比べてねじれの増加率は小さかった。

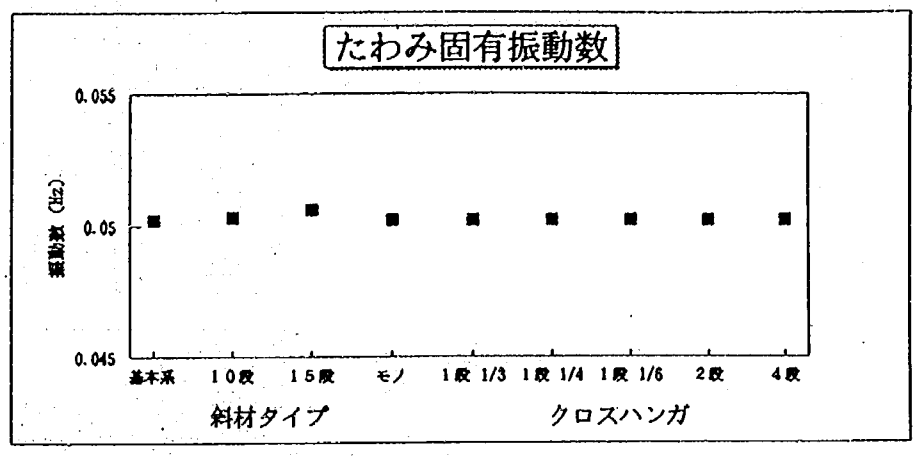
クロスハンガータイプでは、1段配置しただけでも十分な効果を示しており、その中でも中央径間1／4位置に配置した場合が振動数が最も増加した。配置段数を増やすとそれに応じて振動数も増加するが、その増加率は僅かであった。実橋にクロスハンガーを設置する場合は、ハンガーに生じる応力より必要となる段数を効率の良い位置に配置することが効果的な方法であるものと言える。

モノケーブルタイプでは、モノケーブル区間がケーブルと補剛桁とで三角形構造となることから、その区間すべてにクロスハンガーを配置したのと同じような効果を示すものと考えられることや、ケーブル間隔が小さいため極慣性が小さくなることなどの影響で、最もねじれ振動数が、大きくなったものと考えられる。

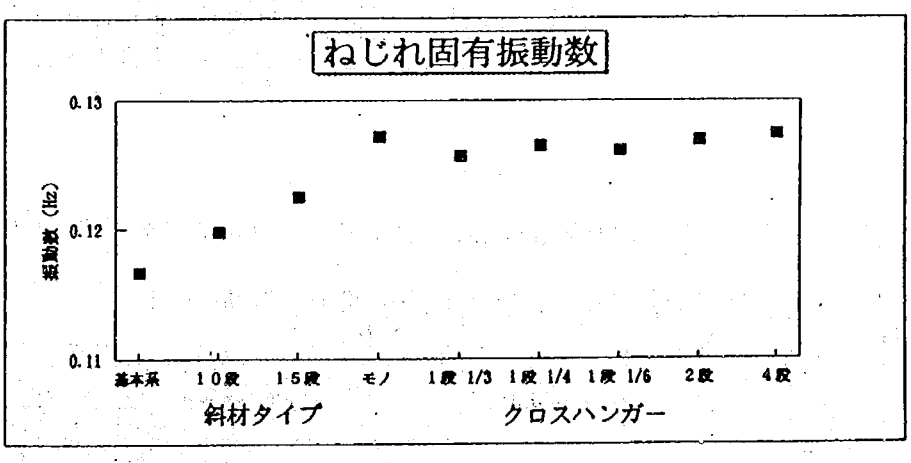
振動数比においては、各システムでたわみ振動数にほとんど変化がないことからねじれ振動数と同様な傾向であった。

表－３・２・３５　固有振動数および振動数比

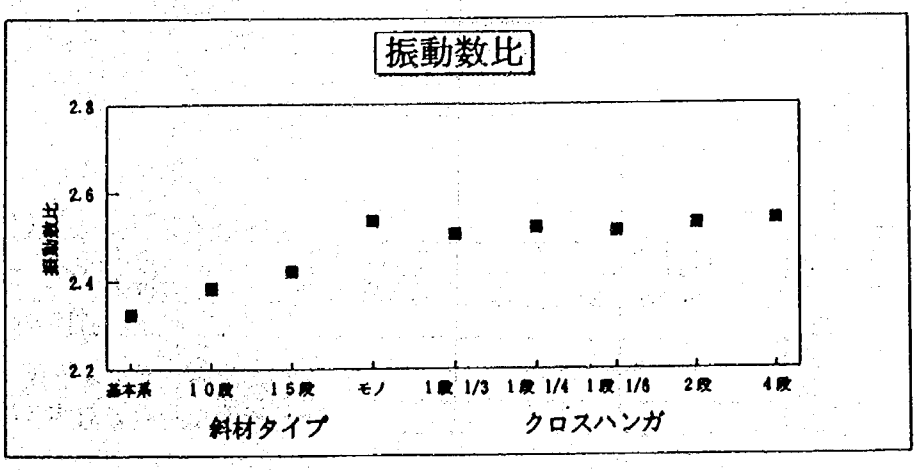
	基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
		１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
たわみ対称１次	0.0502	0.0503	0.0506	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502
ねじれ対称１次	0.1167	0.1198	0.1225	0.1272	0.1257	0.1265	0.1261	0.1269	0.1274
振動数比	2.325	2.382	2.421	2.534	2.504	2.520	2.512	2.528	2.538



図－３・２・２３　たわみ対称１次の固有振動数



図－３・２・２４　ねじれ対称１次の固有振動数



図－３・２・２５　振動数比

表－３・２・３６　固有値解析結果（基本ケース）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0312				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,135	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0583				側径間水平たわみ
5	0.0597				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0659				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0940				水平たわみ対称２次
11	0.0941				鉛直たわみ対称２次
12	0.1104				ケーブル
13	0.1104				ケーブル
14	0.1127				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1130				側径間水平たわみ（ケーブル）
16	0.1145				ケーブル
17	0.1148				ケーブル
18	0.1167	518,821	－	1,387,982	ねじれ対称１次
19	0.1179				水平たわみ逆対称１次（ケーブル）
20	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次
21	0.1280				水平たわみ対称２次（ケーブル）
22	0.1281				側径間鉛直たわみ逆対称１次
23	0.1284				鉛直たわみ逆対称２次
24	0.1300				鉛直たわみ対称３次
25	0.1604				ねじれ逆対称１次

表－３・２・３７　固有値解析結果（ステイケーブル併用タイプ：１０段）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0330				水平たわみ対称１次
2	0.0503	－	5,037	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0600				水平たわみ逆対称１次
4	0.0643				鉛直たわみ逆対称１次
5	0.0674				側径間鉛直たわみ対称１次
6	0.0676				側径間水平たわみ
7	0.0676				側径間水平たわみ
8	0.0997				鉛直たわみ対称２次
9	0.1051				水平たわみ対称２次
10	0.1119				ケーブル
11	0.1119				ケーブル
12	0.1144				ケーブル
13	0.1147				ケーブル
14	0.1163				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1188	11,400	－	3,565,109	ねじれ対称１次
16	0.1198	18,385	－	2,259,422	ねじれ対称１次
17	0.1207				水平たわみ逆対称２次（ケーブル）
18	0.1280				ケーブル
19	0.1292				鉛直たわみ対称３次
20	0.1295				鉛直たわみ逆対称２次（遊動円木）

表－３・２・３８　固有値解析結果（ステイケーブル併用タイプ：１５段）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0330				水平たわみ対称１次
2	0.0506	－	4,955	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0599				水平たわみ逆対称１次
4	0.0652				鉛直たわみ逆対称１次
5	0.0677				側径間水平たわみ
6	0.0702				側径間鉛直たわみ（遊動円木）
7	0.0768				側径間水平たわみ
8	0.1034				鉛直たわみ対称２次
9	0.1048				水平たわみ対称２次
10	0.1119				ケーブル
11	0.1119				ケーブル
12	0.1142				ケーブル
13	0.1145				ケーブル
14	0.1158				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1187				水平たわみ対称３次（ケーブル）
16	0.1200				水平たわみ（ケーブル）
17	0.1225	139,873	－	1,357,266	ねじれ対称１次
18	0.1276				鉛直たわみ逆対称２次（遊動円木）
19	0.1276				水平たわみ（ケーブル）
20	0.1300				鉛直たわみ対称３次

表－３・２・３９　固有値解析結果（モノケーブル）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0313				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,113	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0602				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0652				側径間水平たわみ
5	0.0613				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0679				側径間水平たわみ
8	0.0788				側径間遊動円木
9	0.0789				側径間遊動円木
10	0.0939				鉛直たわみ対称２次
11	0.0989				水平たわみ対称１次
12	0.1181				側径間水平たわみ（ケーブル）
13	0.1184				側径間水平たわみ（ケーブル）
14	0.1243				ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1272	18,551	393,992	10,015,570	ねじれ対称１次
16	0.1272				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1276				側径間鉛直たわみ逆対称１次
18	0.1276				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1298				鉛直たわみ対称３次
20	0.1417				遊動円木（鉛直たわみ逆対称２次）

表－３・２・４０　固有値解析結果（クロスハンガー：１段1/3）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量（kgf・s2/m/m, kgf・m・s2/m）			振動モード
		y	z	xθ	
1	0.0315				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,128	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0612				側径間水平たわみ
5	0.0623				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0676				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0941				鉛直たわみ対称２次
11	0.0959				水平たわみ対称２次
12	0.1203				側径間水平たわみ（ケーブル）
13	0.1210				側径間水平たわみ（ケーブル）
14	0.1245	9,705	－	21,376,999	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1257	18,925	－	7,359,833	ねじれ対称１次
16	0.1276				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1281				側径間鉛直たわみ逆対称１次
18	0.1284				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1300				鉛直たわみ対称３次
20	0.1312				ケーブル

表－３・２・４１　固有値解析結果（クロスハンガー：１段1/4）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量（kgf・s2/m/m, kgf・m・s2/m）			振動モード
		y	z	xθ	
1	0.0314				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,128	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0603				側径間水平たわみ
5	0.0614				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0676				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0941				鉛直たわみ対称２次
11	0.0968				水平たわみ対称２次
12	0.1181				側径間水平たわみ（ケーブル）
13	0.1192				側径間水平たわみ（ケーブル）
14	0.1228	11,875	－	19,105,099	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1265	19,859	－	8,644,239	ねじれ対称１次
16	0.1271				ケーブル
17	0.1272				ケーブル
18	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次
19	0.1281				側径間鉛直たわみ逆対称１次
20	0.1284				鉛直たわみ逆対称２次

表－３・２・４２　固有値解析結果（クロスハンガー：１段1/6）

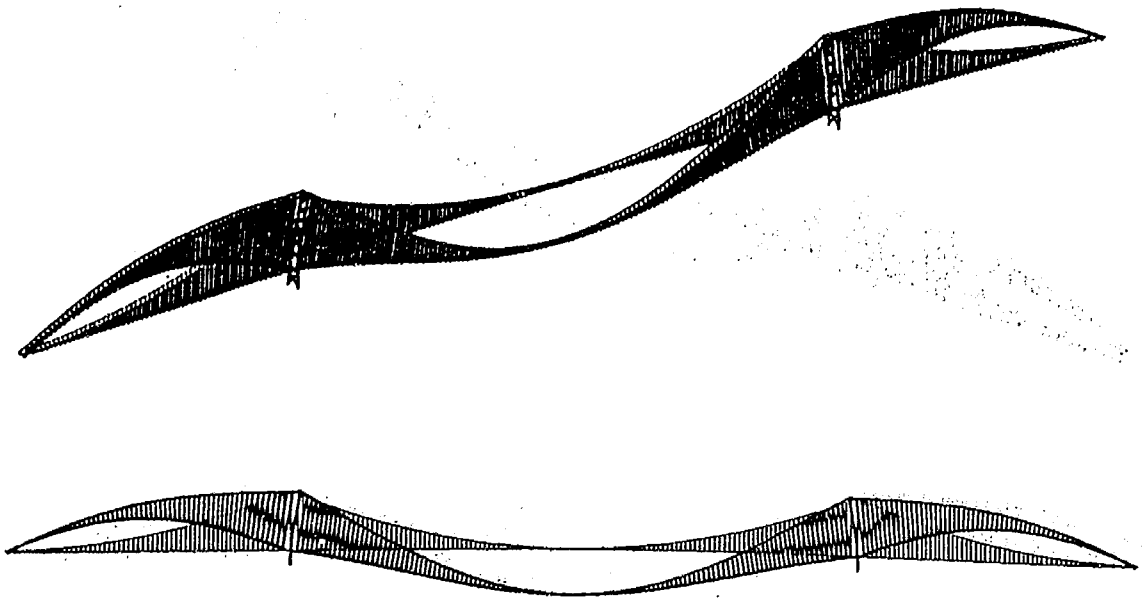
次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0313				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,128	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0591				側径間水平たわみ
5	0.0604				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0667				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0941				鉛直たわみ対称２次
11	0.0960				水平たわみ対称２次
12	0.1149				ケーブル
13	0.1149				ケーブル
14	0.1151				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1156				側径間水平たわみ（ケーブル）
16	0.1196				ケーブル
17	0.1199				ケーブル
18	0.1203	12,731	－	46,397,707	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
19	0.1261	21,822	－	5,912,038	ねじれ対称１次
20	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次

表－３・２・４３　固有値解析結果（クロスハンガー：２段1/3、1/6）

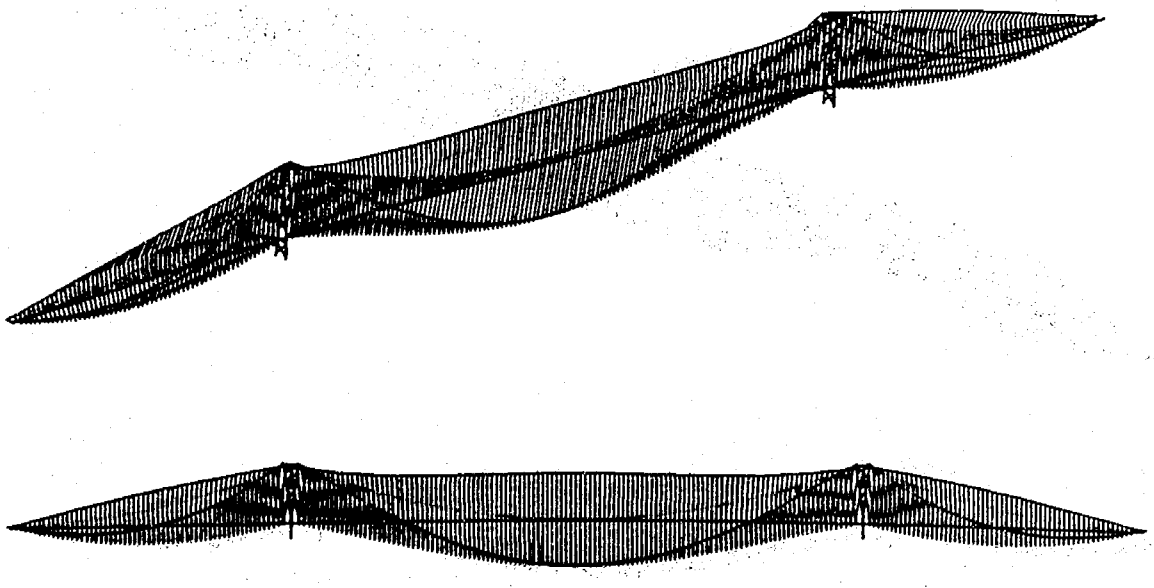
次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0315				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,128	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0613				側径間水平たわみ
5	0.0623				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0679				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0941				鉛直たわみ対称２次
11	0.0967				水平たわみ対称２次
12	0.1206				側径間水平たわみ（ケーブル）
13	0.1218	11,108	－	15,815,490	側径間水平たわみ（ケーブル）
14	0.1246	10,084	－	17,171,195	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1269	18,952	－	9,300,083	ねじれ対称１次
16	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1281				側径間鉛直たわみ逆対称１次
18	0.1284				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1300				鉛直たわみ対称３次
20	0.1367				ケーブル

表－３・２・４４　固有値解析結果（クロスハンガー：４段1/3,1/4,1/6）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量（kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m）			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0315				水平たわみ対称１次
2	0.0502	－	5,128	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0577				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0615				側径間水平たわみ
5	0.0625				水平たわみ逆対称１次
6	0.0655				鉛直たわみ逆対称１次
7	0.0681				側径間水平たわみ
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0797				側径間遊動円木
10	0.0941				鉛直たわみ対称２次
11	0.0972				水平たわみ対称２次
12	0.1210				側径間水平たわみ（ケーブル）
13	0.1225				側径間水平たわみ（ケーブル）
14	0.1250				ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1274	18,217	－	9,849,673	ねじれ対称１次
16	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1282				側径間鉛直たわみ逆対称１次
18	0.1285				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1300				鉛直たわみ対称３次
20	0.1367				ケーブル

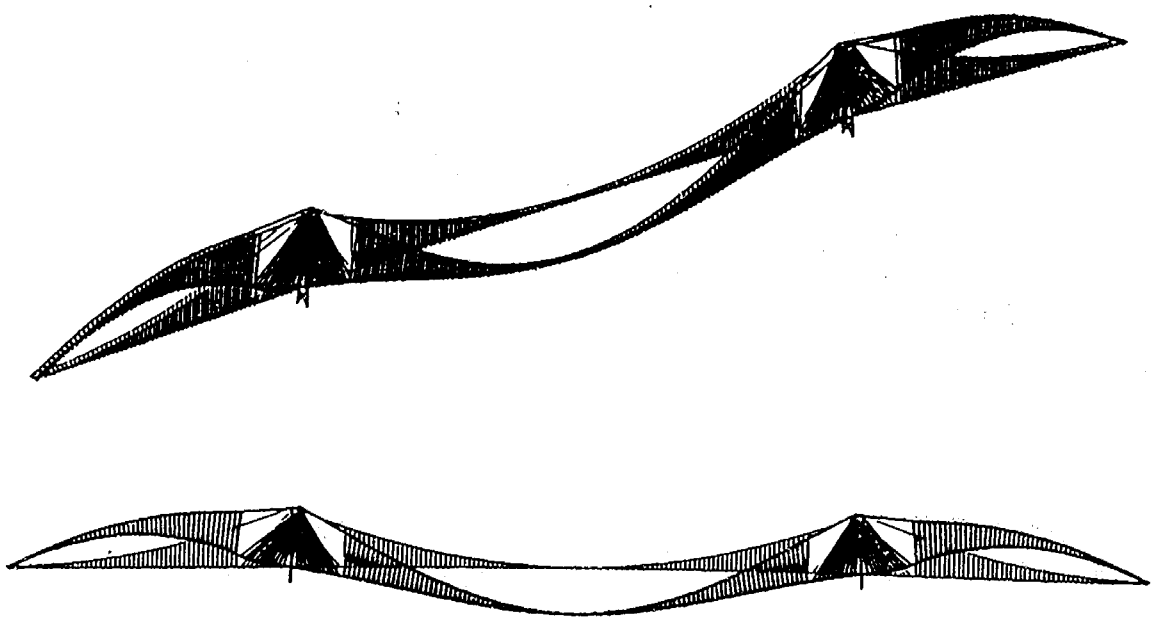


鉛直たわみ対称1次　Mode-2　f=0.0502Hz

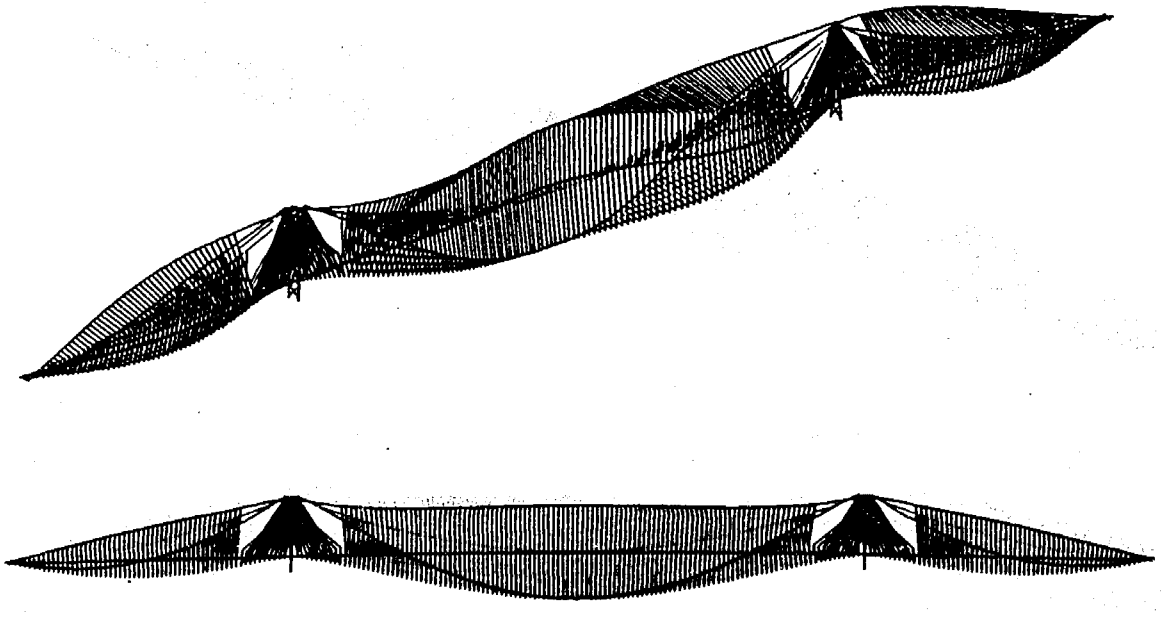


ねじれ対称1次　Mode-18　f=0.1167Hz

図－3・2・26　振動モード図（基本ケース）

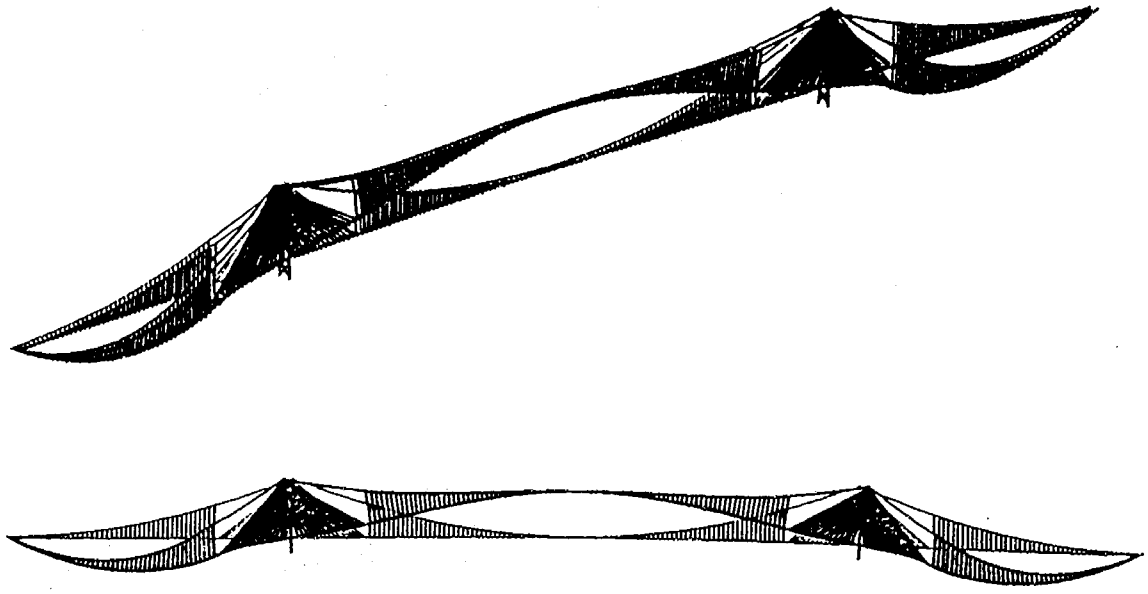


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0503Hz

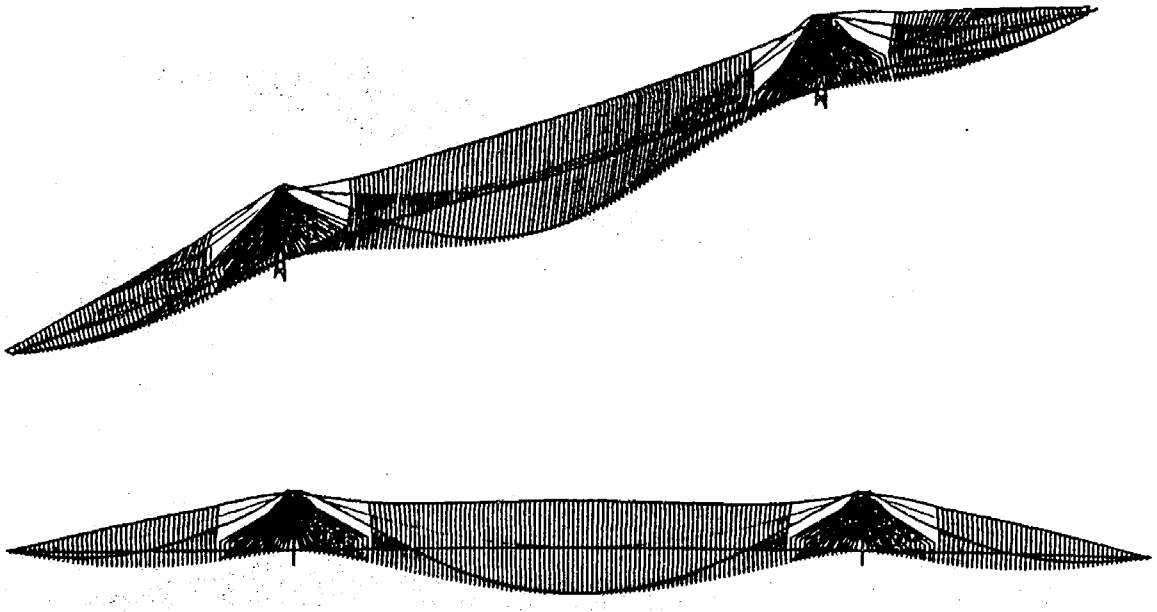


ねじれ対称１次　Mode-16　f=0.1198Hz

図－３・２・２７　振動モード図（ステイケーブル併用タイプ：１０段）

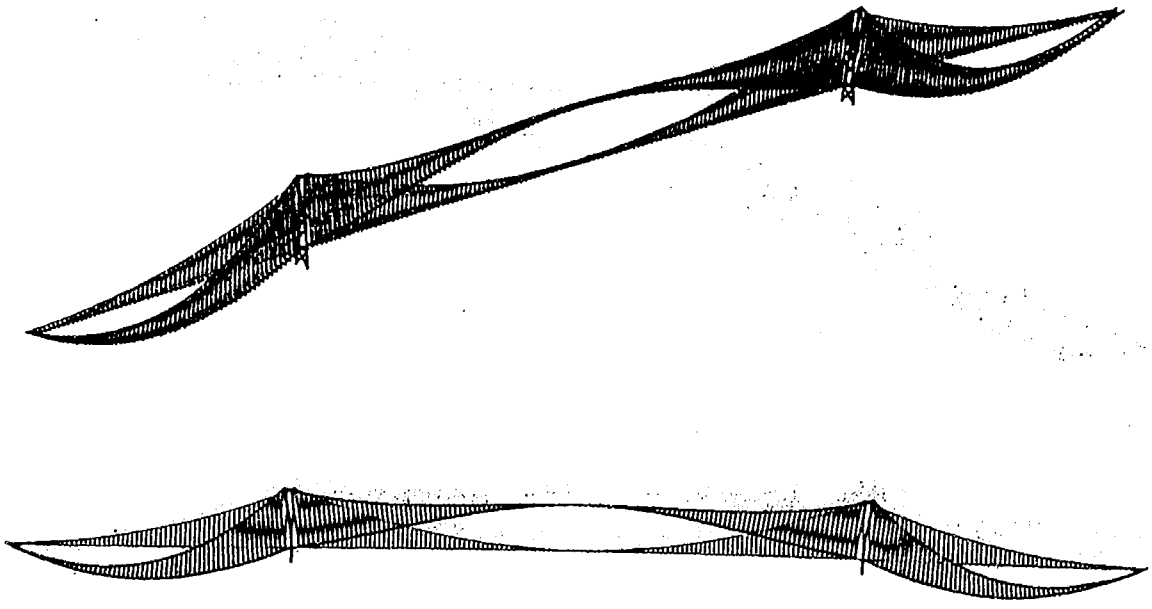


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0506Hz

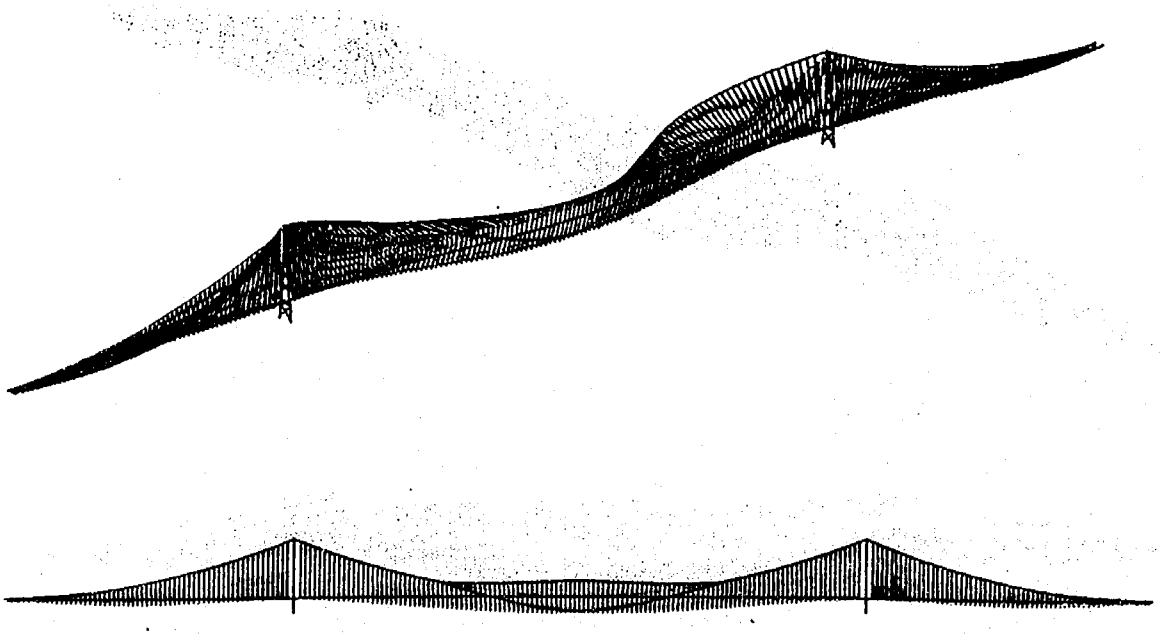


ねじれ対称１次　Mode-17　f=0.1225Hz

図－３・２・２８　振動モード図（ステイケーブル併用タイプ：１５段）

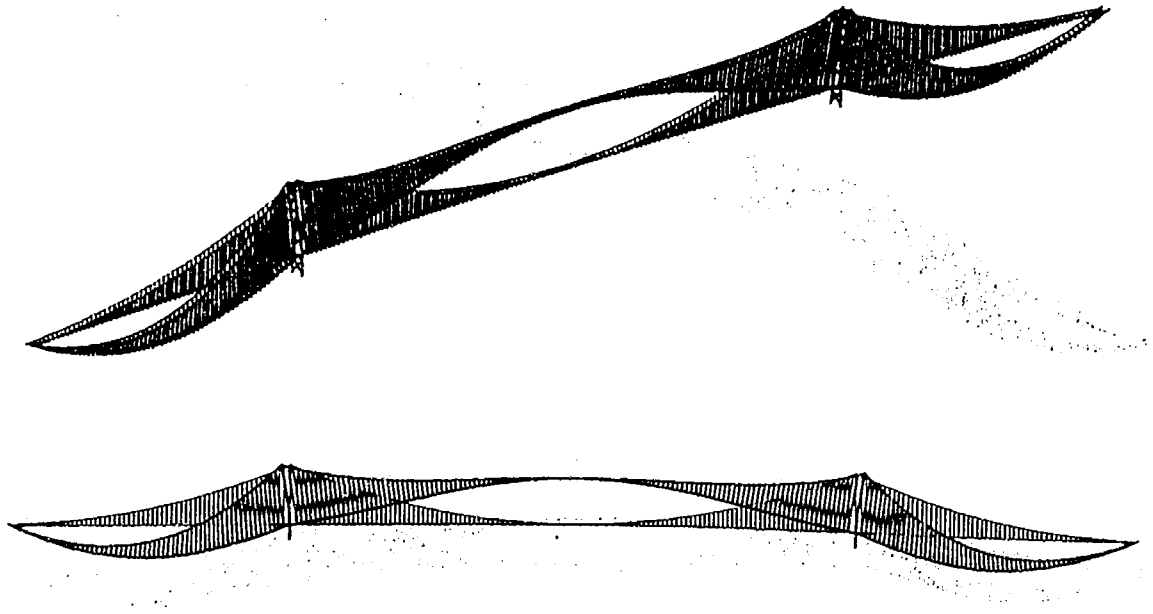


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz

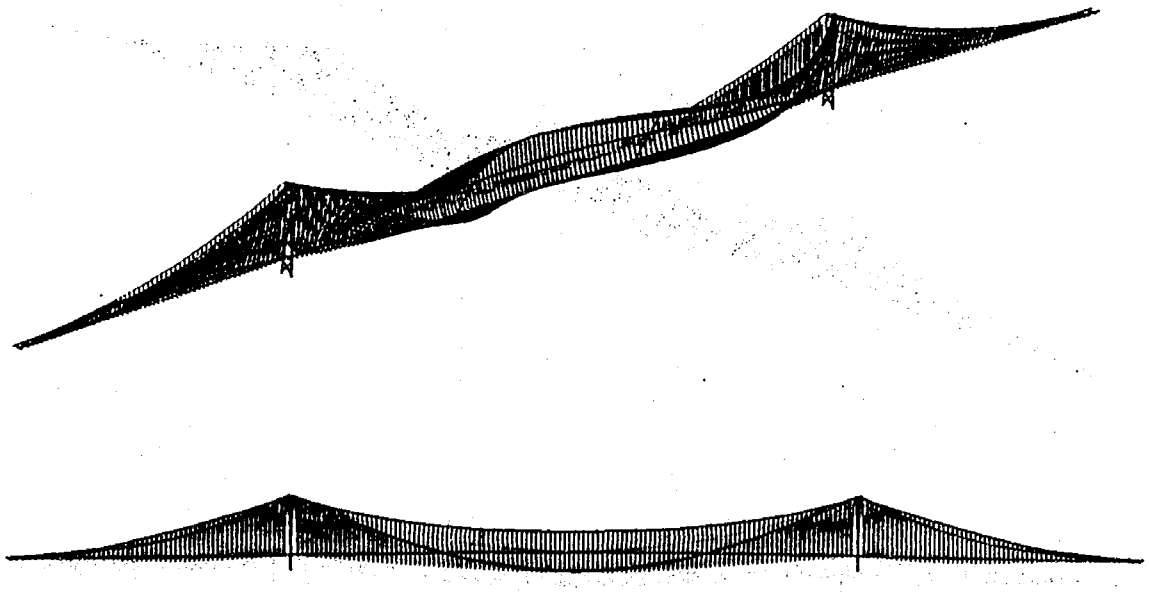


ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1272Hz

図－３・２・２９　振動モード図（モノケーブルタイプ）

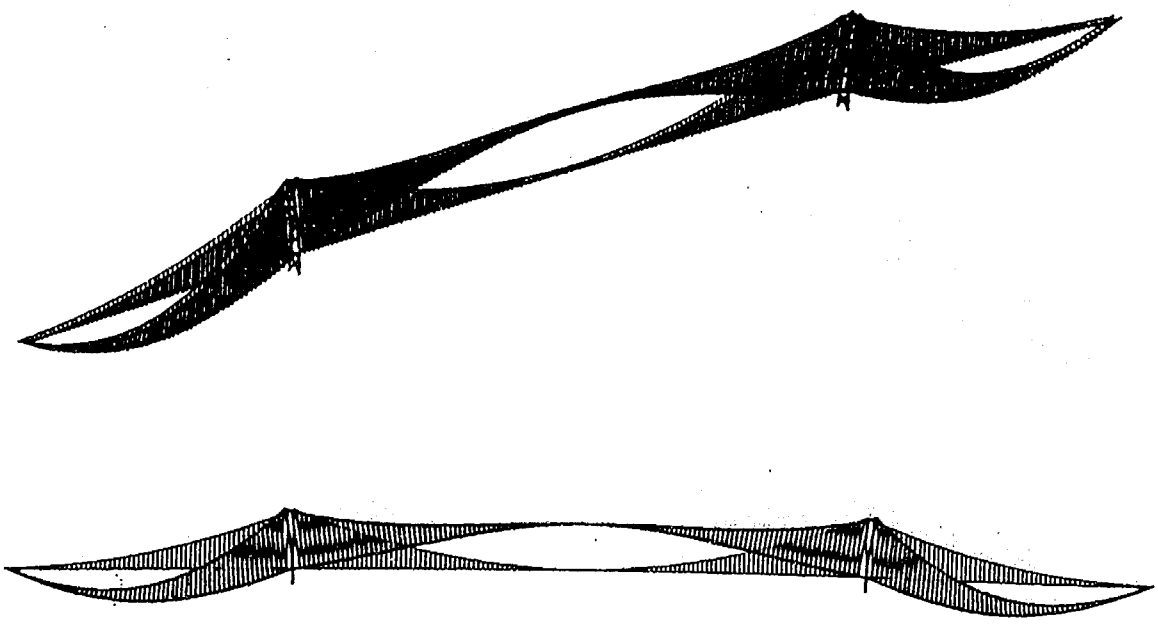


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz

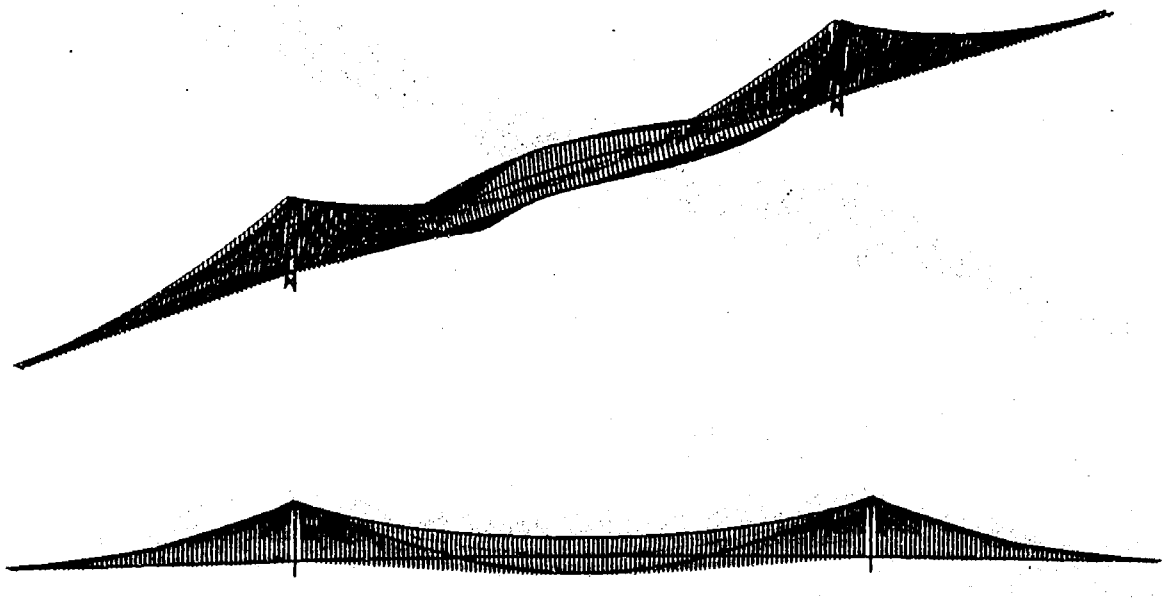


ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1257Hz

図－３・２・３０　振動モード図（クロスハンガータイプ：１段1/3）

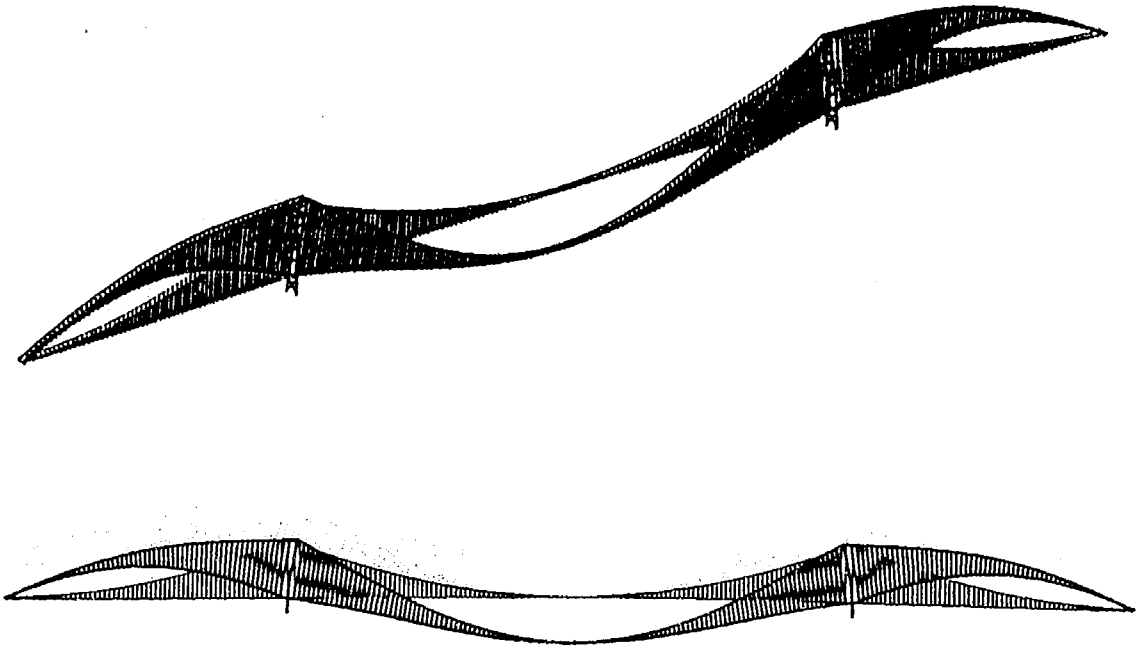


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz

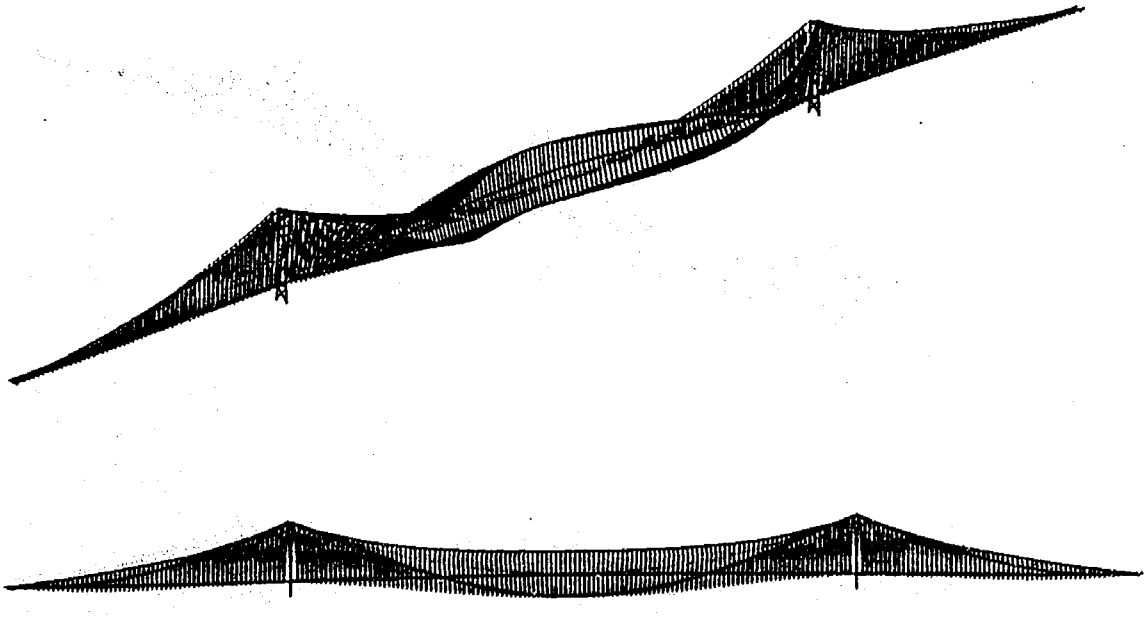


ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1265Hz

図－３・２・３１　振動モード図（クロスハンガータイプ：１段1/4）

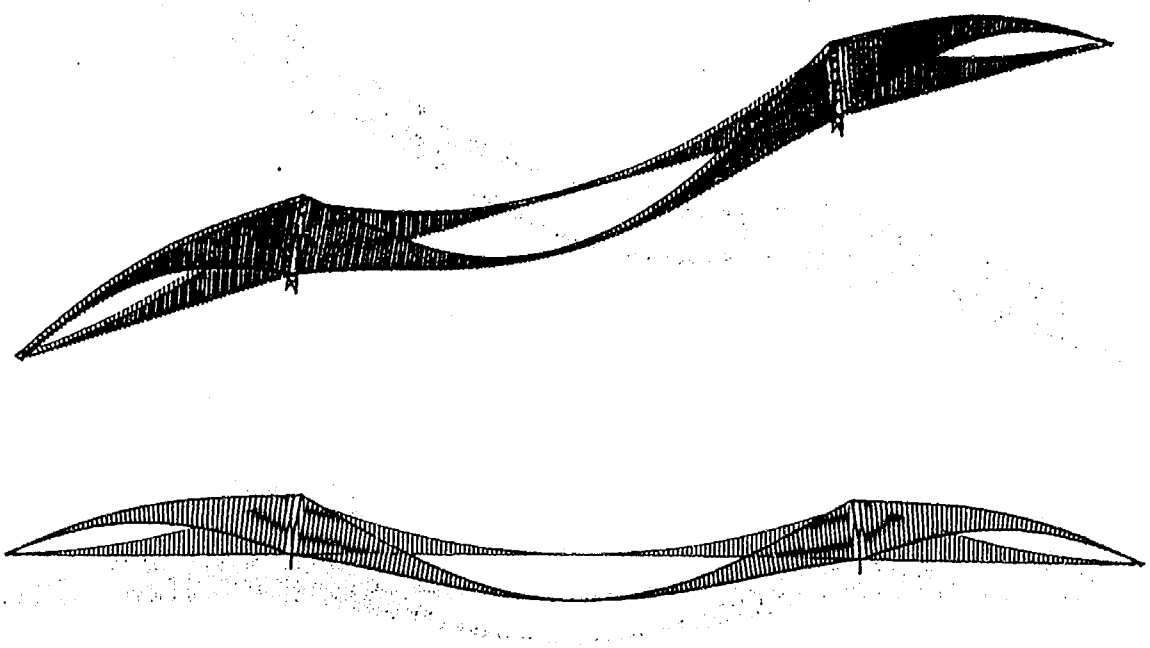


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz

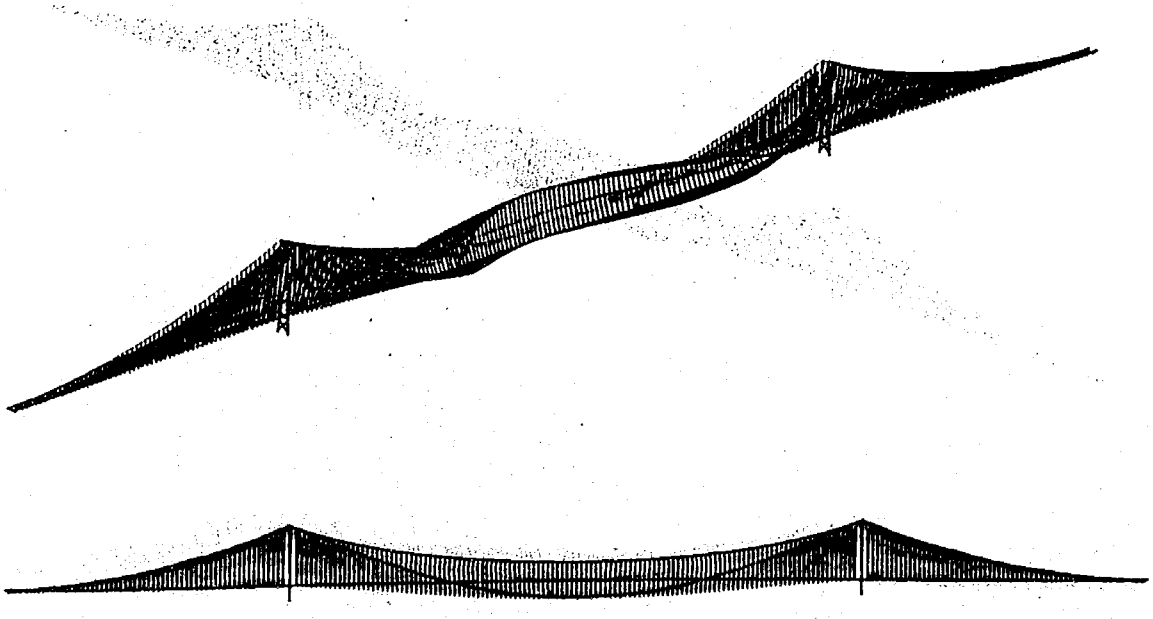


ねじれ対称１次　Mode-19　f=0.1261Hz

図－３・２・３２　振動モード図（クロスハンガータイプ：１段1/6）

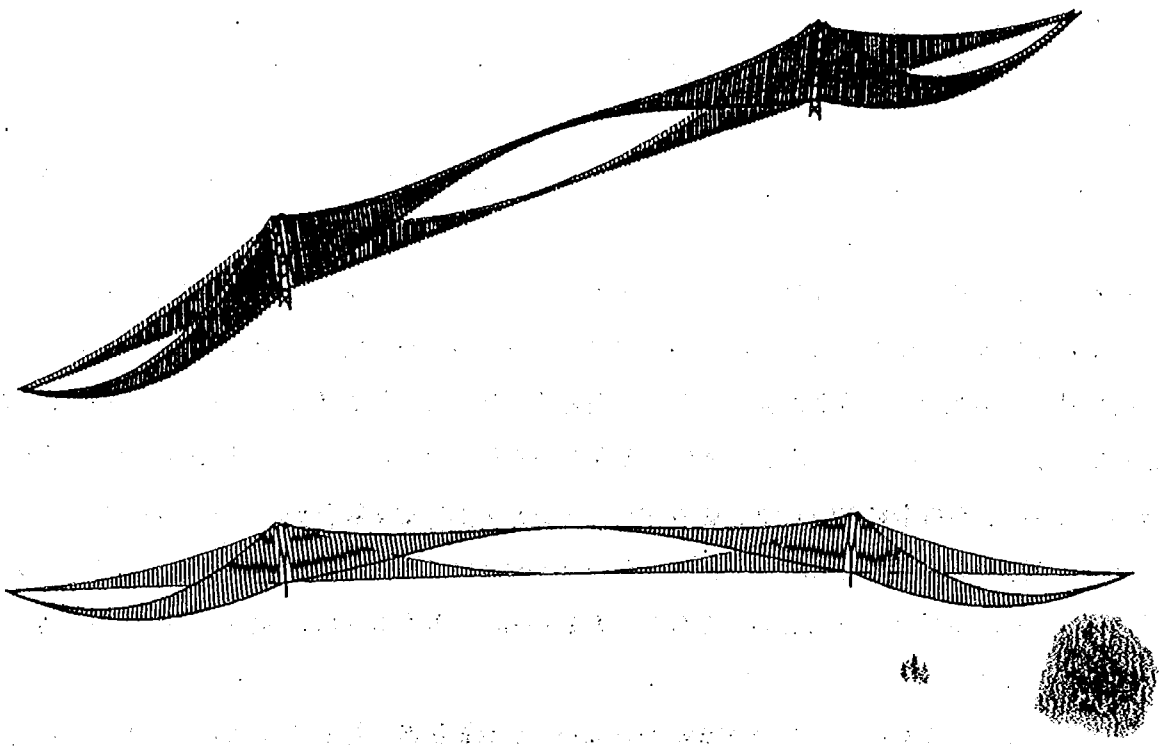


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz

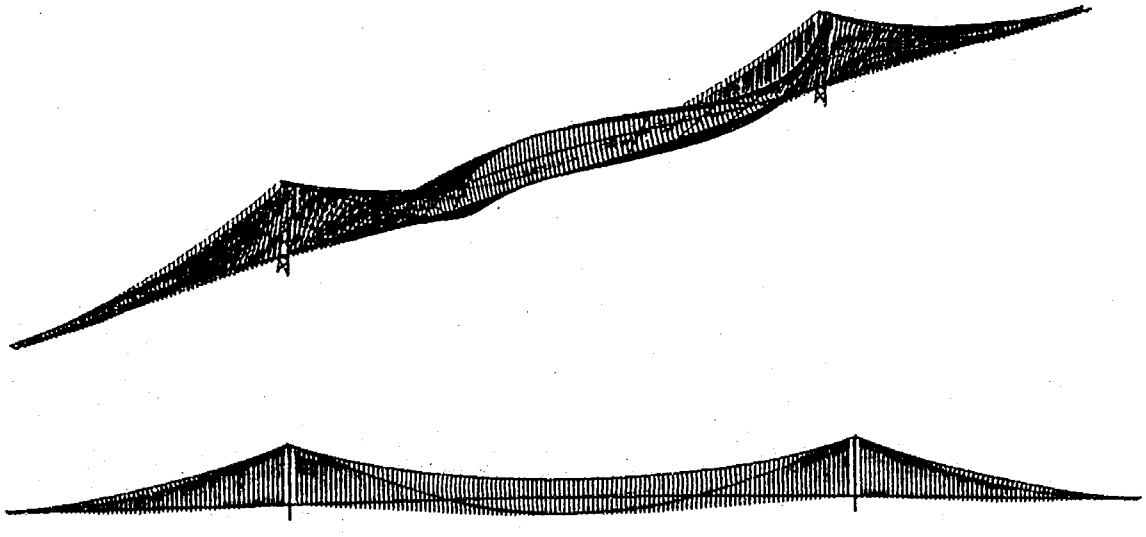


ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1269Hz

図－３・２・３３　振動モード図（クロスハンガータイプ：２段1/3,1/6）



鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0502Hz



ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1274Hz

図－３・２・３４　振動モード図（クロスハンガータイプ：４段1/3,1/4,1/6）

2）主塔剛性の影響

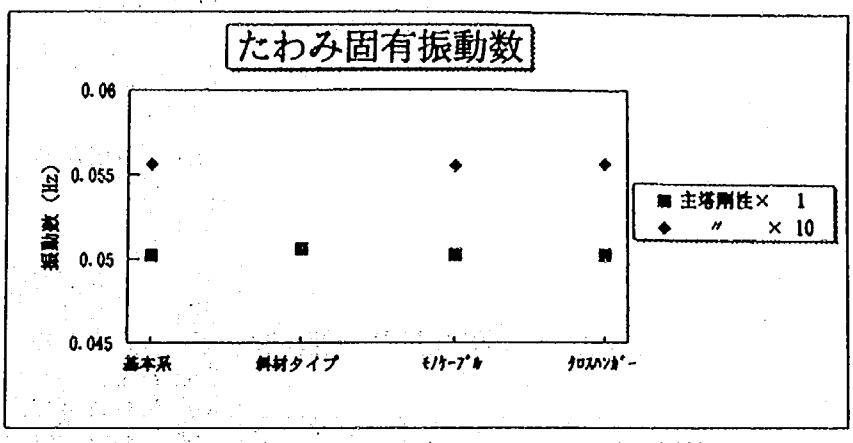
主塔剛性を１０倍とした場合の、たわみ対称１次およびねじれ対称１次振動数を表－３・２・４５および図－３・２・３５～図－３・２・３７に示している。また、解析を行った全モードの振動数および振動モードを表－３・２・４６～表－３・２・４９に示し、たわみ対称１次のモードとねじれ対称１次のモード図を図－３・２・３８～図－３・２・４１に示す。　主塔剛性を１０倍とした場合、たわみ対称１次振動においては、基本ケース・モノケーブルタイプ・クロスハンガータイプでは振動数が一割程度上昇したが、斜材タイプではほとんど変化が無かった。これは斜材タイプのみ補剛桁を連続桁（他は２ヒンジ）としており、たわみ振動に及ぼす側径間の影響が大きいことや、斜材と主塔の三角形構造によりすでに主塔付近の剛性が大きくなっていることのため、主塔自信の剛性の影響をあまり受けなかったのではないかと考えられる。

一方ねじれ対称１次振動においては、基本ケース・斜材タイプで振動数が上昇したが、モノケーブル・クロスハンガーではあまり変化しなかった。モノケーブルやクロスハンガーでは、このケーブルシステムにより橋梁全体のねじれ剛性が十分に上がっており、ねじれ振動に対する主塔の剛性の寄与率が小さかったのでないかと考えられる。

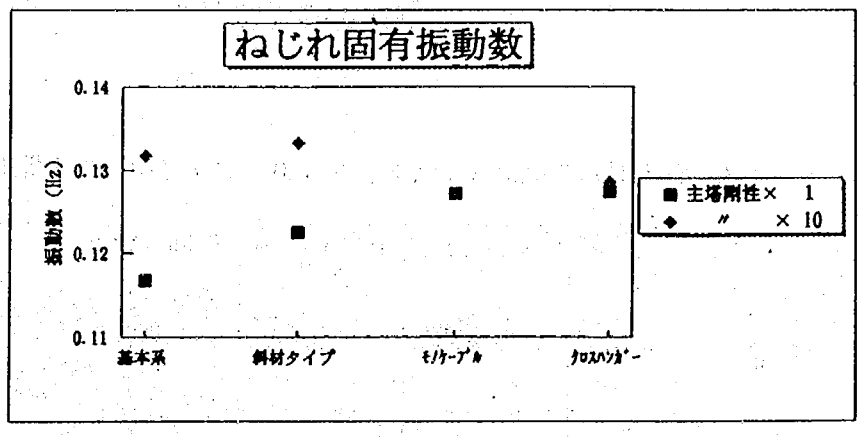
各ケーブルシステムにおいて、たわみ振動数およびねじれ振動数に対して主塔剛性の及ぼす影響が異なることから、その振動数比は斜材タイプにおいて上昇し、モノケーブル・クロスハンガーでは逆に低下した。また、基本ケースでは、ほぼ同程度の比率であった。

表－３・２・４５　主塔剛性の影響

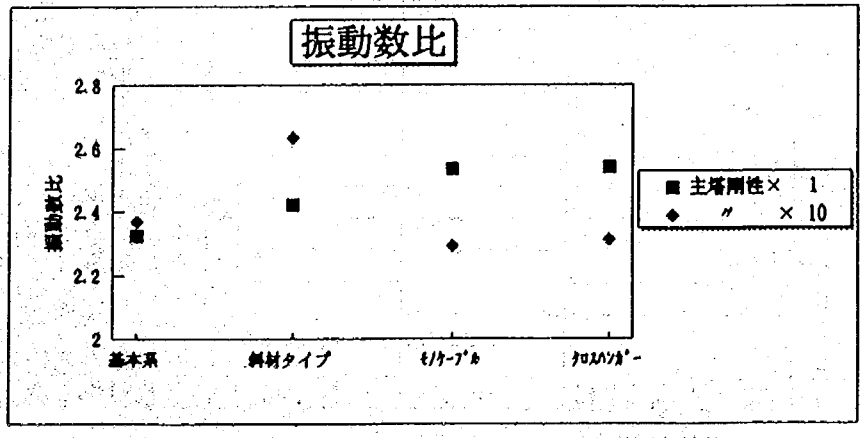
主塔剛性		基本系	斜材タイプ １５段	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ ４段
1	たわみ対称１次	0.0502	0.0506	0.0502	0.0502
	ねじれ対称１次	0.1167	0.1225	0.1272	0.1274
	振動数比	2.325	2.421	2.534	2.538
×１０	たわみ対称１次	0.0556	0.0506	0.0555	0.0556
	ねじれ対称１次	0.1317	0.1332	0.1272	0.1285
	振動数比	2.369	2.632	2.292	2.311



図－３・２・３５　主塔剛性の影響（たわみ振動数）



図－３・２・３６　主塔剛性の影響（ねじれ振動数）



図－３・２・３７　主塔剛性の影響（振動数比）

表－３・２・４６　固有値解析結果（主塔剛性×１０－基本ケース）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	xθ	
1	0.0312				水平たわみ対称１次
2	0.0556	－	5,121	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0583				側径間水平たわみ
4	0.0597				水平たわみ逆対称１次
5	0.0598				鉛直たわみ逆対称１次
6	0.0659				側径間水平たわみ
7	0.0714				鉛直たわみ逆対称１次（側径間鉛直１
8	0.0795				側径間遊動円木
9	0.0798				側径間遊動円木
10	0.0940				水平たわみ対称２次
11	0.0944				鉛直たわみ対称２次
12	0.1104				ケーブル
13	0.1104				ケーブル
14	0.1127				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1131				側径間水平たわみ（ケーブル）
16	0.1145				ケーブル
17	0.1148				ケーブル
18	0.1179				水平たわみ逆対称１次（ケーブル）
19	0.1275				側径間鉛直たわみ逆対称１次
20	0.1277	18,977	63,750,768	19,803,800	水平たわみ対称２次（ねじれ１次）
21	0.1281				側径間鉛直たわみ逆対称１次
22	0.1284				鉛直たわみ逆対称２次
23	0.1297				鉛直たわみ対称３次
24	0.1317	469,992	－	1,446,751	ねじれ対称１次
25	0.1604				ねじれ逆対称１次（水平逆対称２次）

表－３・２・４７　固有値解析結果（主塔剛性×１０－ステイケーブル併用タイプ：１５段）

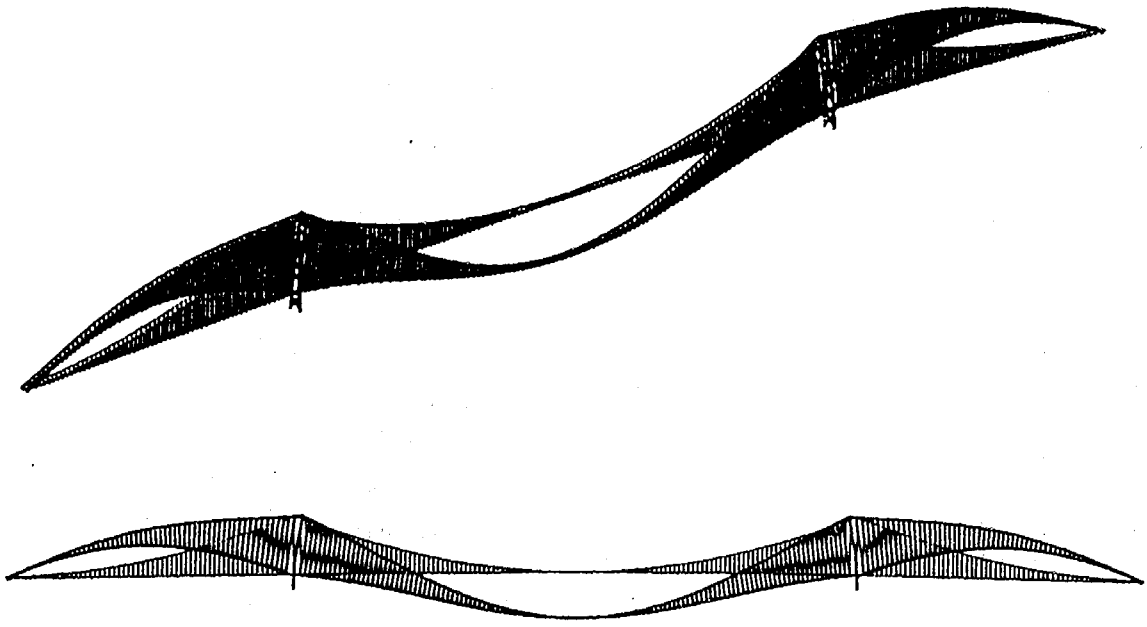
次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	xθ	
1	0.0331				水平たわみ対称１次
2	0.0506	－	4,955	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0600				水平たわみ逆対称１次
4	0.0652				鉛直たわみ逆対称１次
5	0.0679				側径間水平たわみ
6	0.0702				側径間鉛直たわみ
7	0.0771				側径間水平たわみ
8	0.1034				鉛直たわみ対称２次
9	0.1050				水平たわみ対称２次
10	0.1120				ケーブル
11	0.1120				ケーブル
12	0.1143				ケーブル
13	0.1145				ケーブル
14	0.1160				側径間水平たわみ（ケーブル）
15	0.1195				水平たわみ対称３次（ケーブル）
16	0.1209				水平たわみ（ケーブル）
17	0.1276				鉛直たわみ逆対称２次（水平たわみ）
18	0.1279				ケーブル水平たわみ（ねじれ）
19	0.1300				鉛直たわみ対称３次
20	0.1332	2,598,232	－	1,311,384	ねじれ対称１次

表－３・２・４８　固有値解析結果（主塔剛性×１０－モノケーブルタイプ）

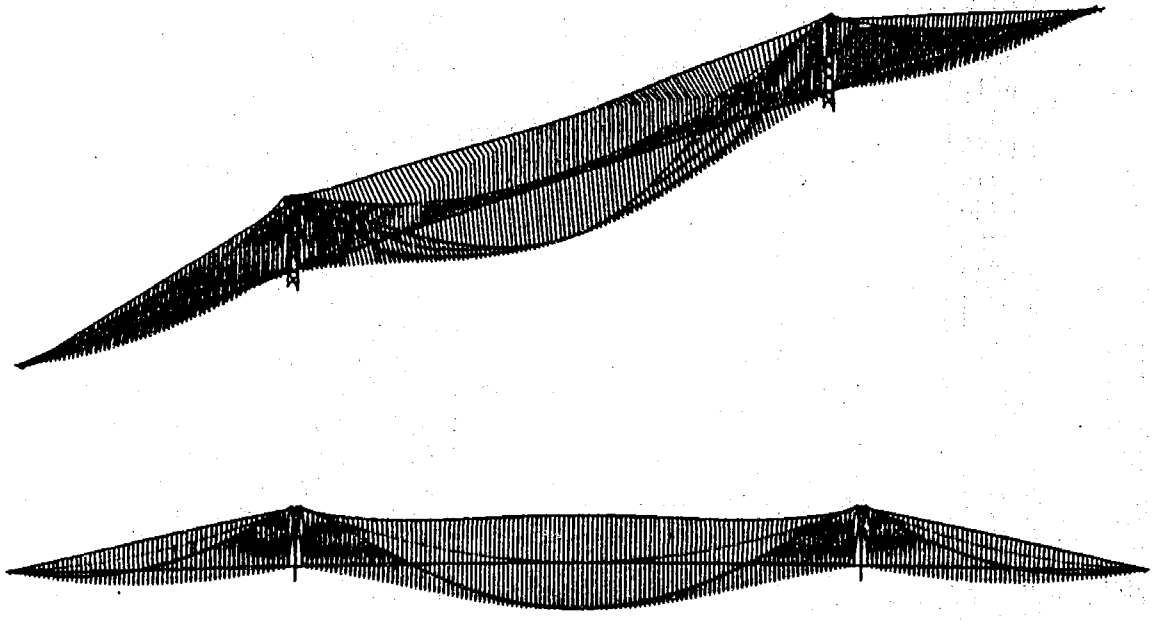
次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0313				水平たわみ対称１次
2	0.0555	－	5,105	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0595				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0602				側径間水平たわみ
5	0.0613				水平たわみ逆対称１次
6	0.0679				側径間水平たわみ
7	0.0713				鉛直たわみ逆対称１次
8	0.0788				側径間遊動円木
9	0.0791				側径間遊動円木
10	0.0943				鉛直たわみ対称２次
11	0.0989				水平たわみ対称１次
12	0.1181				側径間水平たわみ（ねじれ、ケーブル
13	0.1184				側径間水平たわみ（ねじれ、ケーブル
14	0.1243	10,653	－	19,719,652	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1272	18,441	－	9,955,959	ねじれ対称１次
16	0.1272				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1276				側径間鉛直たわみ逆対称１次
18	0.1276				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1298				鉛直たわみ対称３次
20	0.1417				遊動円木（鉛直たわみ逆対称２次）

表－３・２・４９　固有値解析結果（主塔剛性×１０－クロスハンガータイプ：４段）

次数	固有振動数 (Hz)	等価質量 (kgf•s2/m/m, kgf•m•s2/m)			振動モード
		y	z	x θ	
1	0.0315				水平たわみ対称１次
2	0.0556	－	5,122	－	鉛直たわみ対称１次
3	0.0598				鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0617				側径間水平たわみ
5	0.0625				水平たわみ逆対称１次
6	0.0683				側径間水平たわみ
7	0.0715				鉛直たわみ逆対称１次
8	0.0796				側径間遊動円木
9	0.0798				側径間遊動円木
10	0.0944				鉛直たわみ対称２次
11	0.0981				水平たわみ対称２次
12	0.1222				側径間水平たわみ、ねじれ（ケーブル
13	0.1238				側径間水平たわみ、ねじれ（ケーブル
14	0.1255	10,250	－	15,458,307	ねじれ逆対称１次（ケーブル）
15	0.1277				側径間鉛直たわみ逆対称１次
16	0.1282				側径間鉛直たわみ逆対称１次
17	0.1285	20,900	－	9,156,759	ねじれ対称１次
18	0.1285				鉛直たわみ逆対称２次
19	0.1300				鉛直たわみ対称３次
20	0.1497				ケーブル

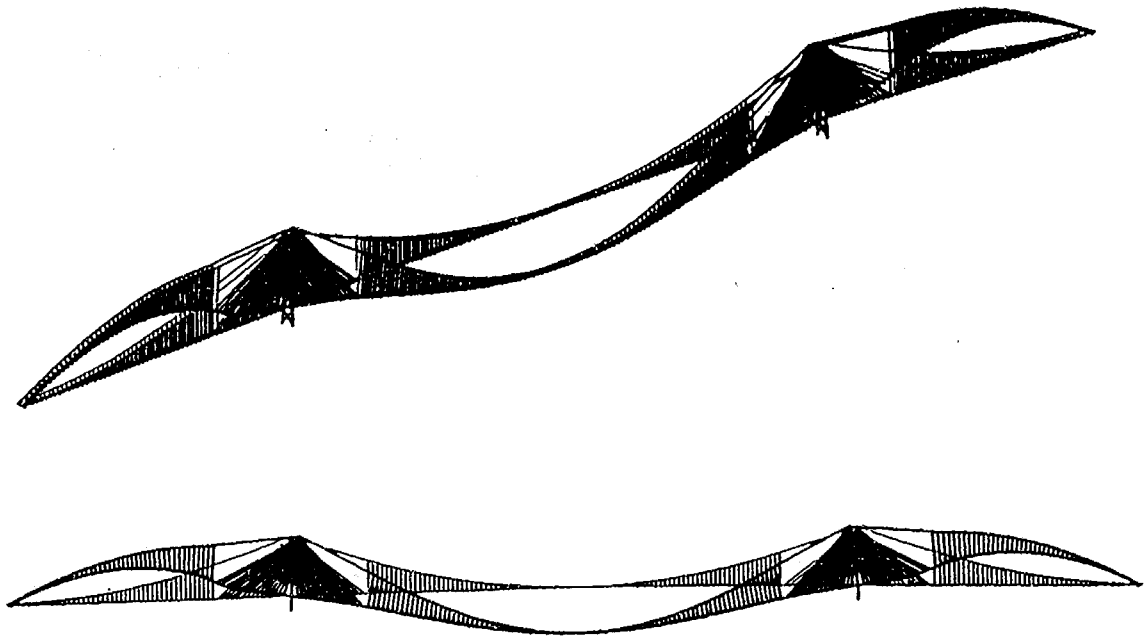


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0556Hz

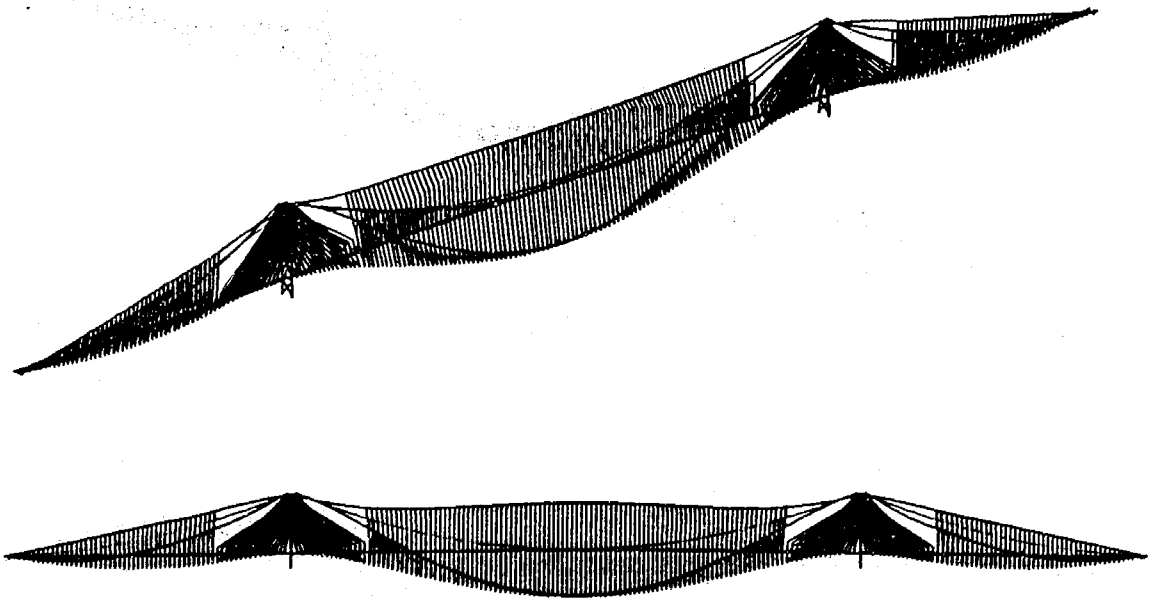


ねじれ対称１次　Mode-24　f=0.1317Hz

図－３・２・３８　振動モード図（主塔剛性×１０－基本ケース）

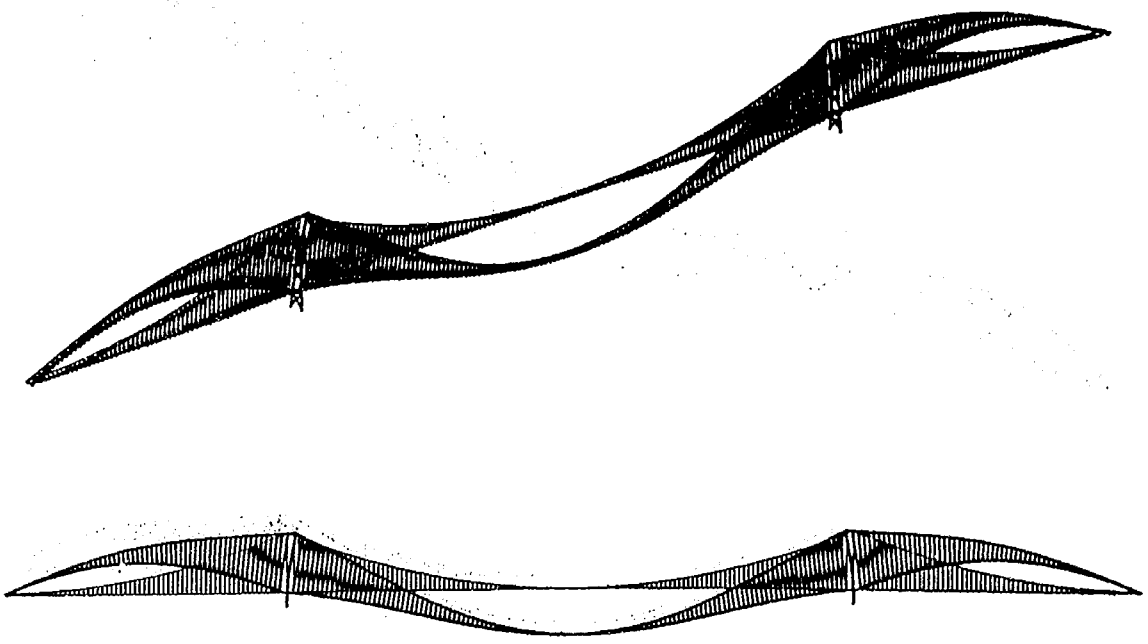


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0506Hz

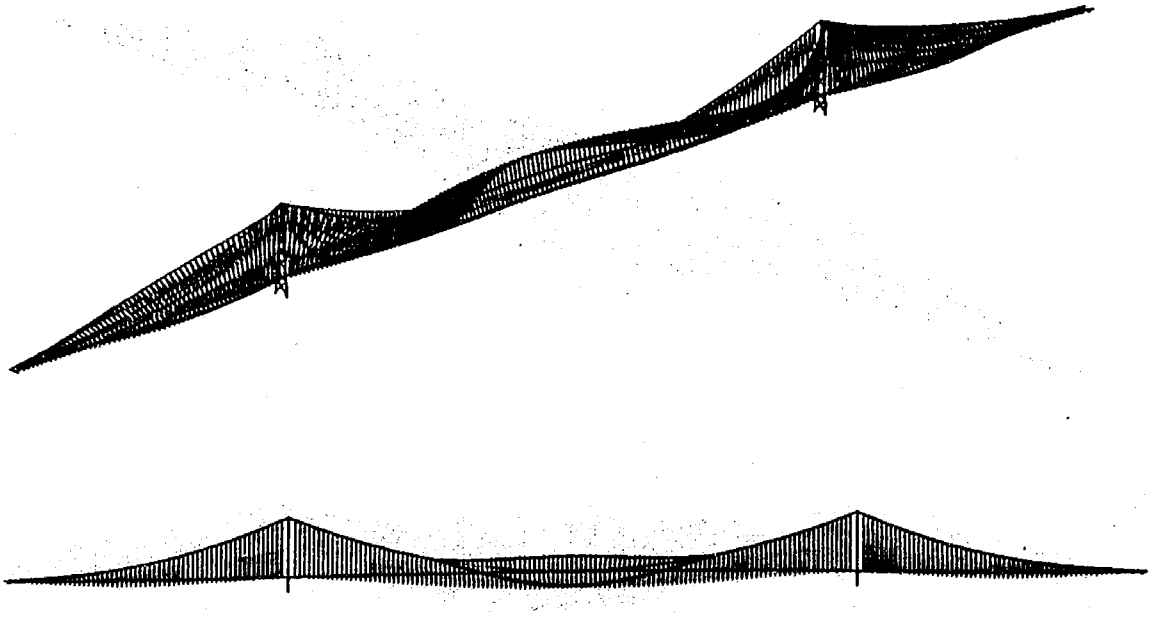


ねじれ対称１次　Mode-20　f=0.1332Hz

図－３・２・３９　振動モード図（主塔剛性×１０－ステイケーブル併用タイプ：１５段）

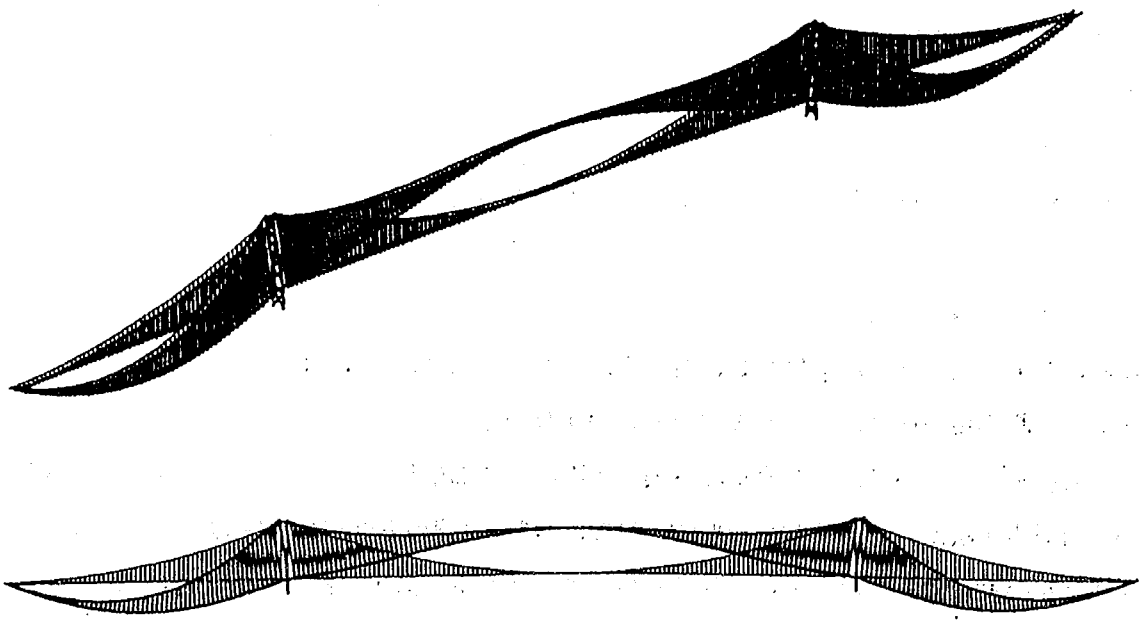


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0552Hz

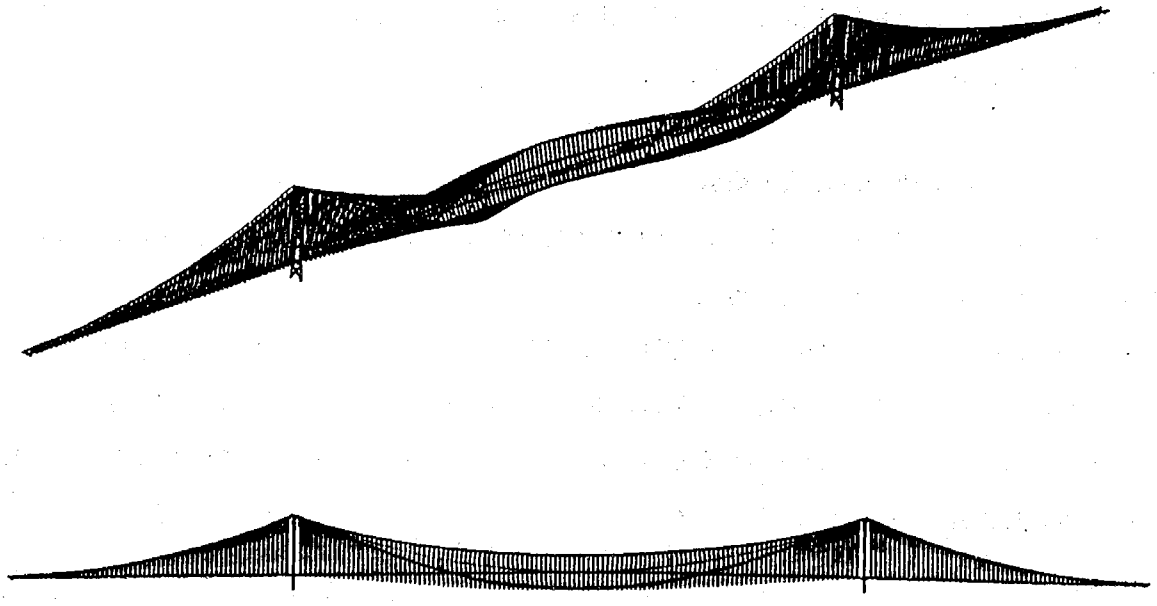


ねじれ対称１次　Mode-15　f=0.1272Hz

図－３・２・４０　振動モード図（主塔剛性×１０－モノケーブルタイプ）



鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f=0.0556Hz



ねじれ対称１次　Mode-17　f=0.1285Hz

図－３・２・４１　振動モード図（主塔剛性×１０－クロスハンガータイプ：４段）

3）ストームケーブルの影響

ストームケーブルのたわみ1次とねじれ1次についての解析結果を表－３・２・５０に示し、この時のモード図を図－３・２・４２～図－３・２・４９に示す。結果より各ケースの振動特性の比較を、ストームケーブルの断面積および各種ストームケーブル設置方法の違いについて行う。

①ストームケーブルの断面積

鉛直たわみ対称1次モードおよびねじれ対称1次のモードより、1/4, 1/8ではいずれの振動モードでも大きな違いがなく、断面積の違いによる影響が小さいのが分かる。

また、固有振動数については、鉛直たわみ対称1次は、断面積1/4, 1/8で0.0504, 0.0500と1/8の方が多少小さく、ねじれ対称1次は、断面積1/4, 1/8で0.1119, 0.1131と1/8の方が1/4に比べ大きくなっており、ストームケーブル面積の減少にともなう重量（及び極慣性モーメント）減少の影響が現れている。

②ストームケーブルのサグ比による影響

鉛直たわみ対称1次のモードにはサグ比を1/30, 1/45, 1/60と変化させても影響がほとんどないが、ねじれ対称1次のモードではサグ比の影響が顕著に見られる。サグ比1/30の場合は中央径間において橋軸直角方向の振動モードが現れ、明確なねじれの振動モードが現れない。一方、サグ比1/60, 1/45の場合では、中央径間にねじれの振動モードのみが明確に現れており、特にサグ比1/45の場合では、側・中央径間いずれにおいてもねじれの振動モードのみが現れており、ストームケーブル設置の影響は小さい。

固有振動数については、鉛直たわみ対称1次ではサグ比1/30, 1/45, 1/60で、0.0506, 0.0500, 0.0500とサグ比1/30で多少大きく、ねじれ対称1次では、サグ比1/30, 1/45, 1/60で、0.1126, 0.1150, 0.1131とサグ比1/45が最も大きくなっている。

③ストームケーブルの鉛直角度による影響

ストームケーブルの鉛直角度を15°, 30°, 45°, 60°と変化させた場合、鉛直たわみ対称1次の振動モード及びねじれ対称1次の振動モードでは影響はほとんどない。

また、固有振動数については、鉛直たわみ対称1次では、θ＝15°, 30°, 45°, 60°で0.0499, 0.0500, 0.0499, 0.0499とほとんど変わらず、ねじれ対称1次では、θ＝15°, 30°, 45°, 60°で0.1133, 0.1131, 0.1131, 0.1130と鉛直角度が大きくなるに従い、振動数が若干小さくなっている。これは、鉛直角度が大きくなるに従い、ストームケーブルの極慣性モーメントが大きくなるためである。

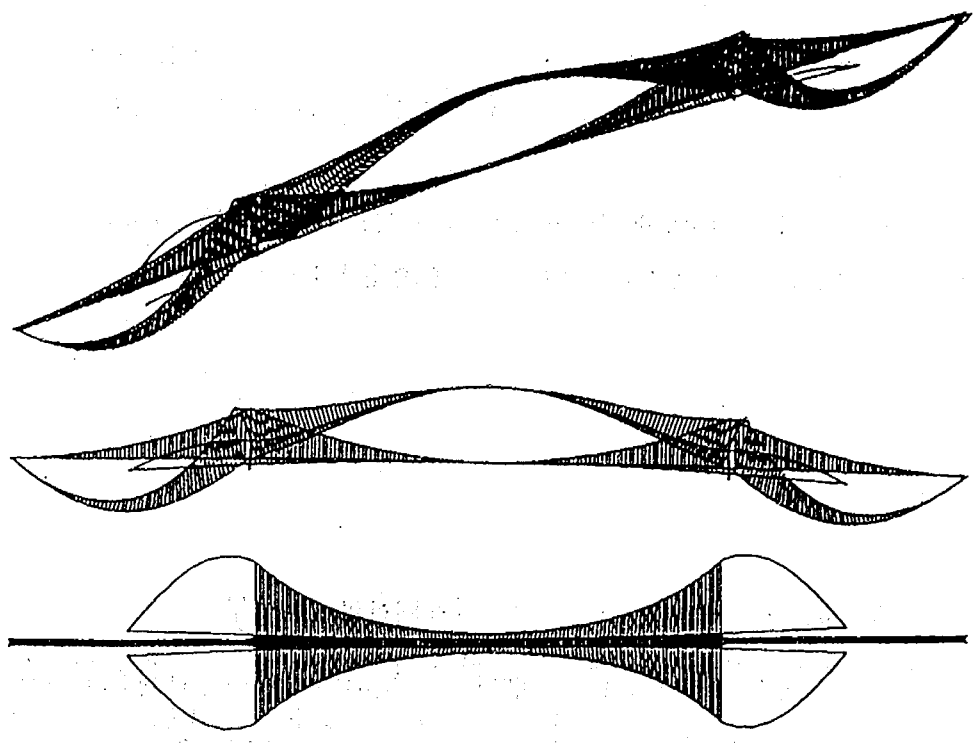
④ストームケーブルのプレストレスによる影響

ストームケーブルのプレストレス力を5000,10000tfと変化させた場合鉛直たわみ対称1次の振動モードではほとんど変化がないが、ねじれ対称1次の振動モードでは中央径間における振動モードはほぼ等しいが、側径間においては多少異なっている。

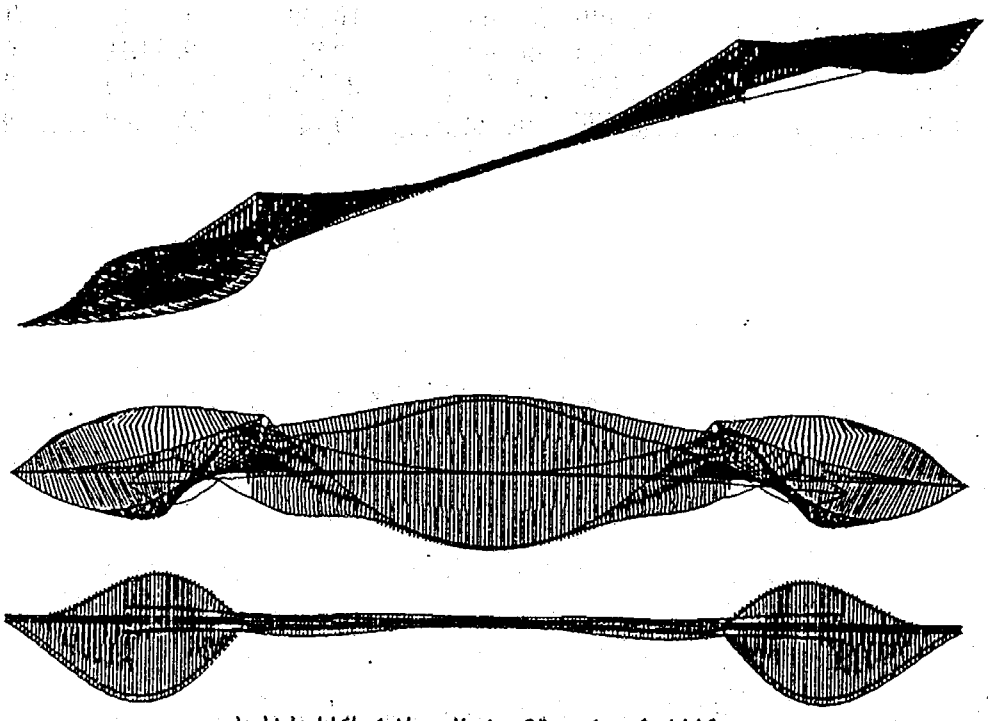
固有振動数については、プレストレス力が5000,10000tfでたわみ対称1が0.0500,0.0504、ねじれ対称1次が0.1131,0.1139となり、プレストレス力が大きくなるに従い振動数も大きくなっている。

表－３・２・５０　ストームケーブル固有値解析結果

ケース No.	断面積*1)	サグ比	鉛直角度 θ（度）	プレストレス （tf）	重量 （tf）	極慣性モーメント （tfm2/m）	ねじれ対称1次 固有振動数	鉛直たわみ1次 固有振動数
2	1/4	1/60	30	5,000	63.33	21372	0.1119	0.0504
3	1/8	1/60	30	5,000	56.42	17255	0.1131	0.0500
4	1/8	1/45	30	5,000	55.28	17765	0.1150	0.0500
5	1/8	1/30	30	5,000	54.30	19140	0.1126	0.0506
6	1/8	1/60	15	5,000	56.05	16269	0.1133	0.0499
7	1/8	1/60	45	5,000	56.43	19031	0.1131	0.0499
8	1/8	1/60	60	5,000	54.64	22423	0.1130	0.0499
9	1/8	1/60	30	10,000	56.59	17323	0.1139	0.0504

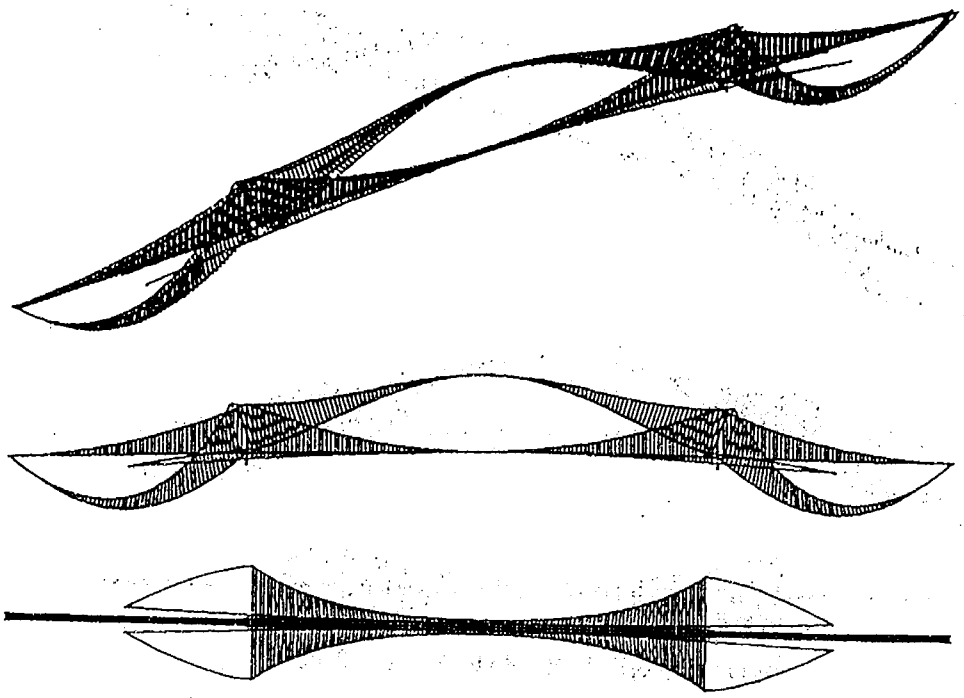


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f ＝0.0504

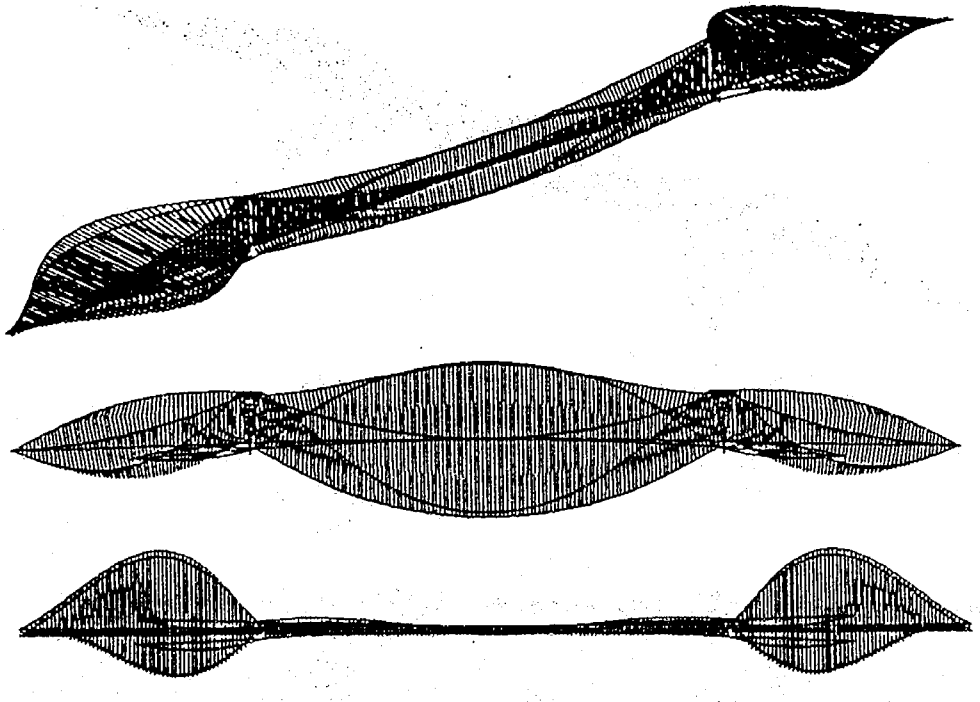


ねじれ対称１次　Mode-28　f ＝0.1119

図－３・２・４２　CASE-2（断面積1/4，サグ比1/60，鉛直角度30°，プレストレス力5,000tf）

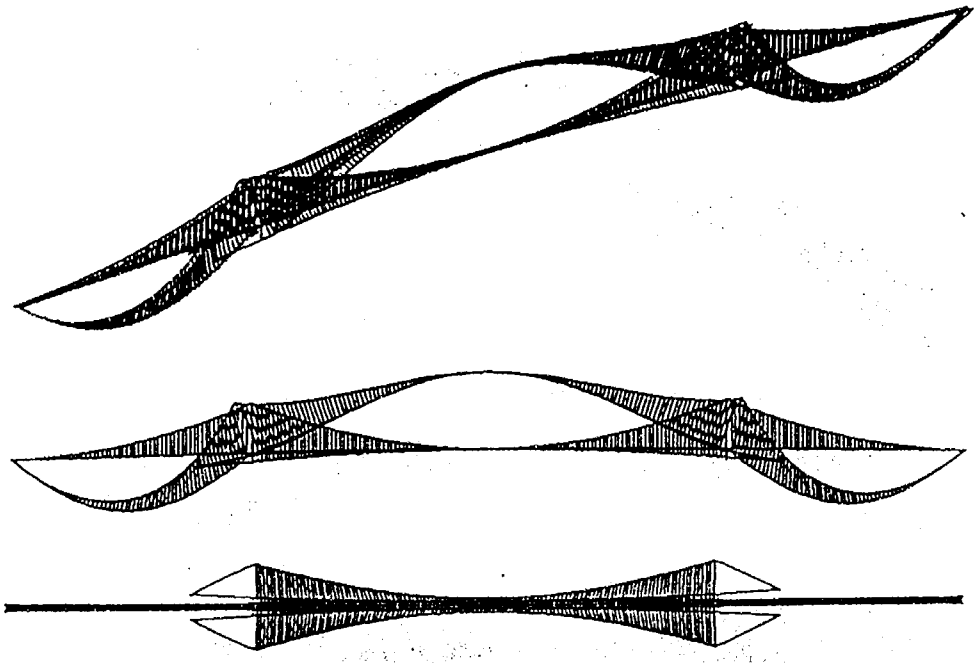


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f＝0.0500

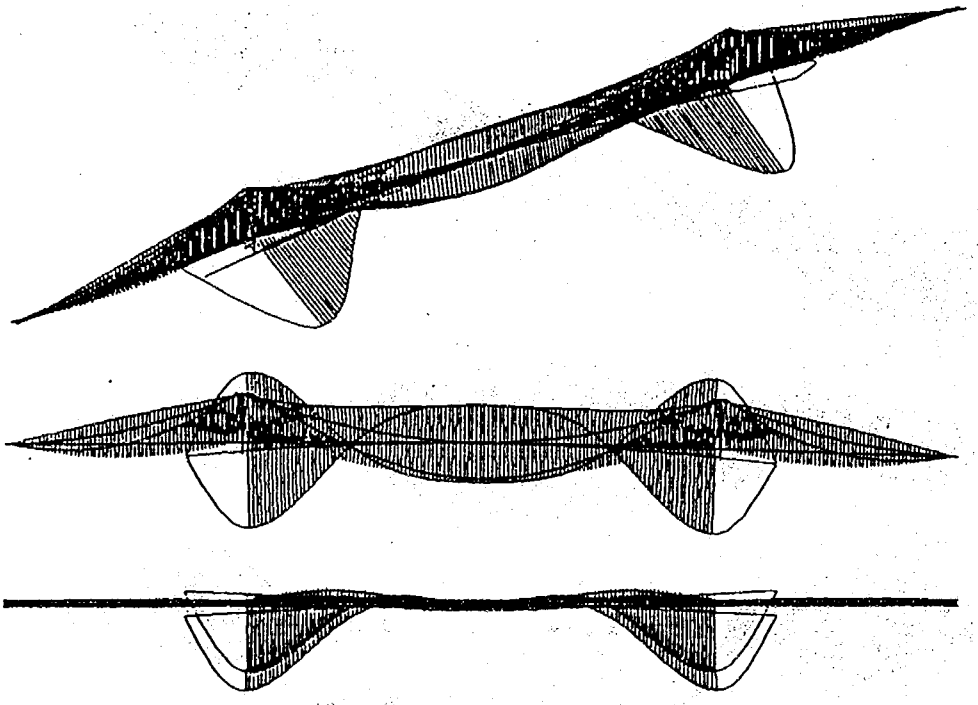


ねじれ対称１次　Mode-20　f＝0.1131

図－３・２・４３　CASE-3（断面積1/8，サグ比1/60，鉛直角度30°，プレストレス力5,000tf）

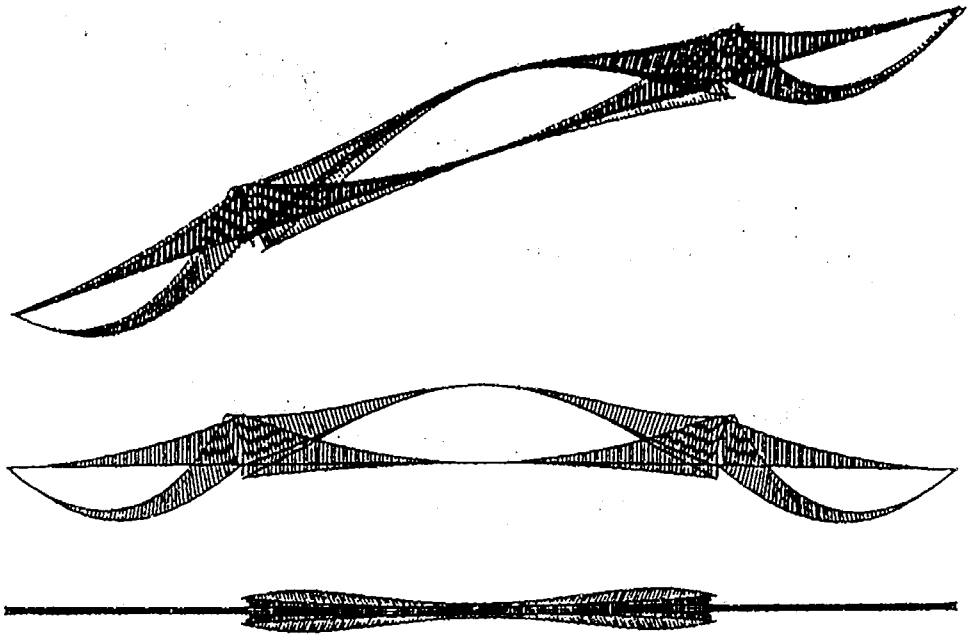


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f＝0.0500

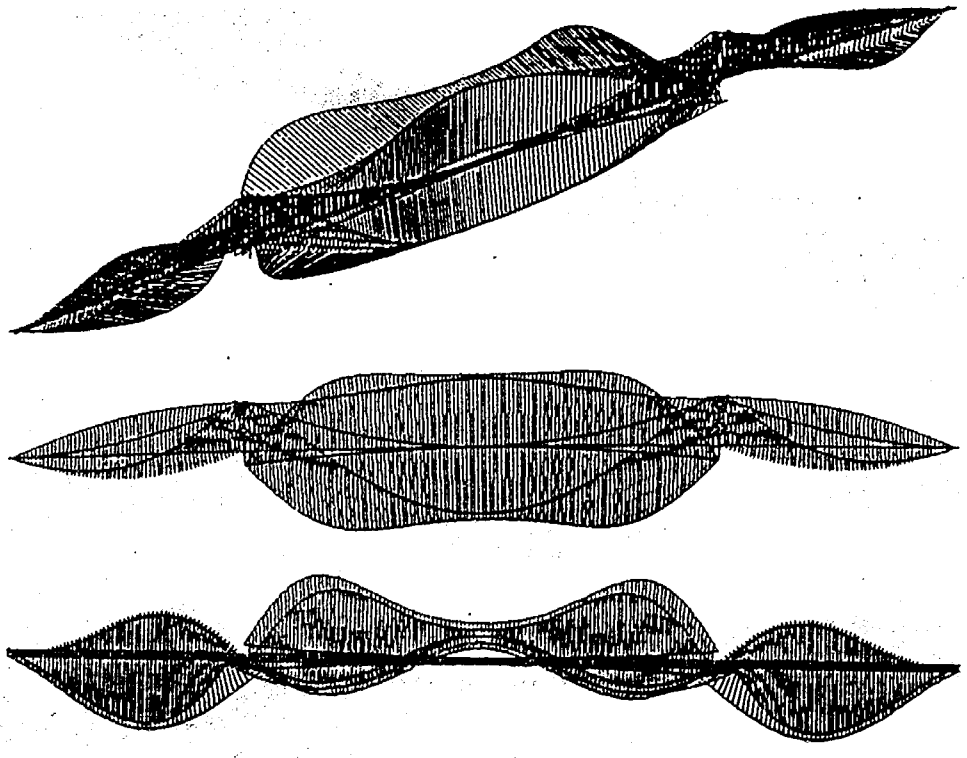


ねじれ対称１次　Mode-21　f＝0.1150

図－３・２・４４　CASE-4（断面積1/4，サグ比1/45，鉛直角度30°，プレストレス力5,000tf）

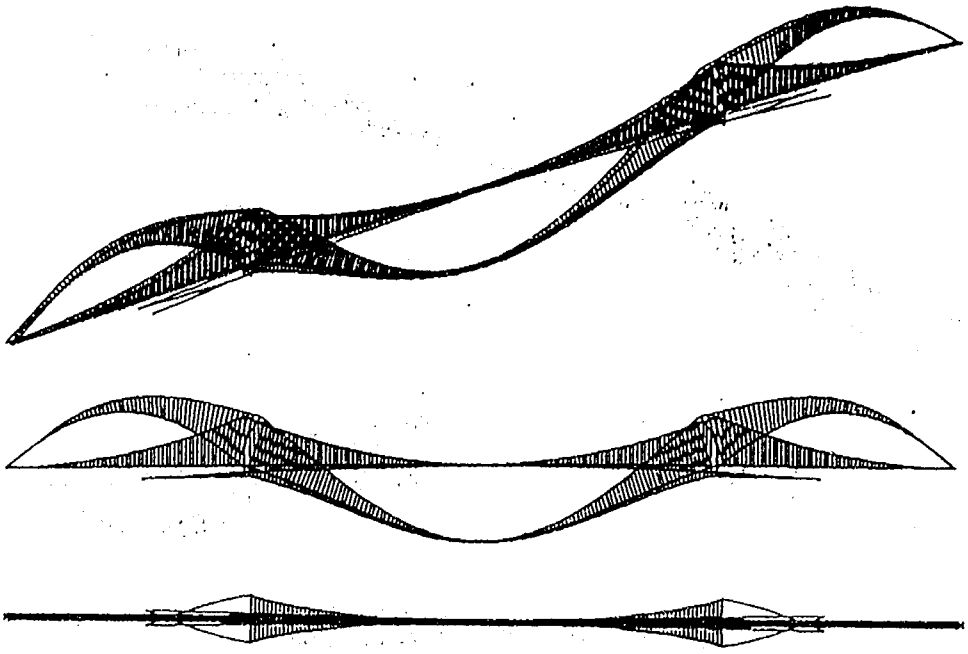


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f＝0.0506

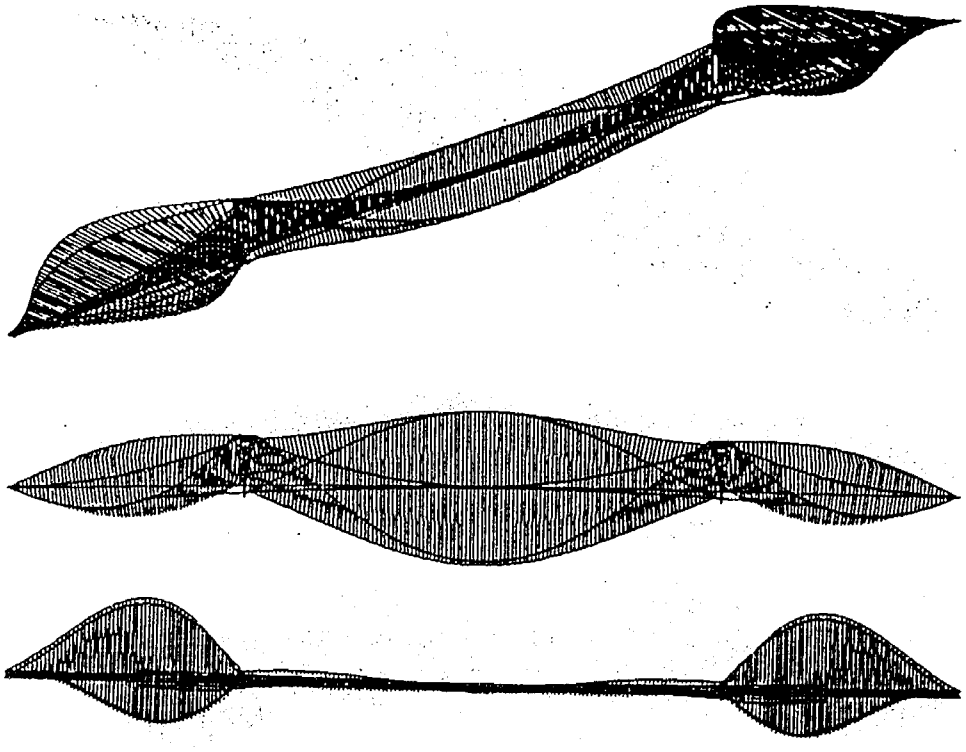


ねじれ対称１次　Mode-14　f＝0.1126

図－３・２・４５　CASE-5（断面積1/8，サグ比1/30，鉛直角度30°，プレストレス力5,000tf）

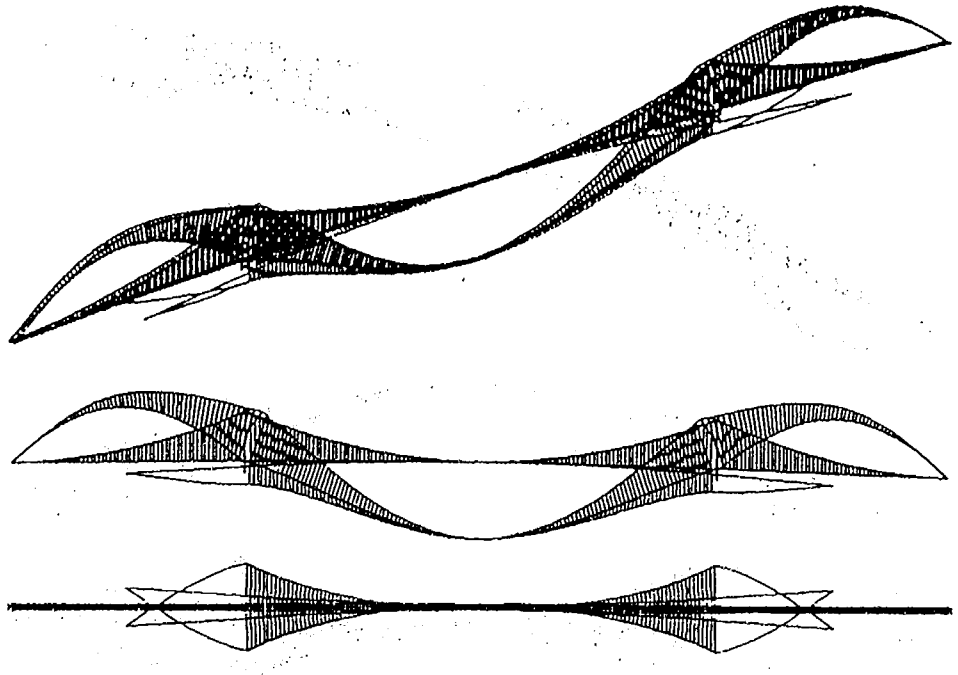


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f ＝0.0499

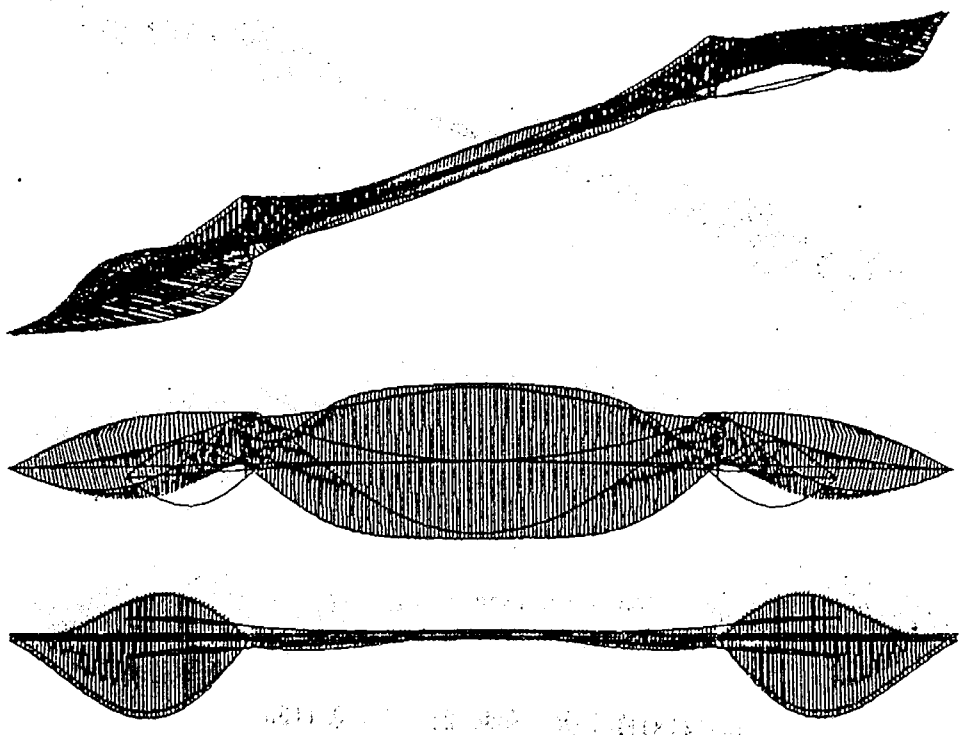


ねじれ対称１次　Mode-20　f ＝0.1133

図－３・２・４６　CASE-6（断面積1/8, サグ比1/60, 鉛直角度15°, プレストレス力5,000tf）

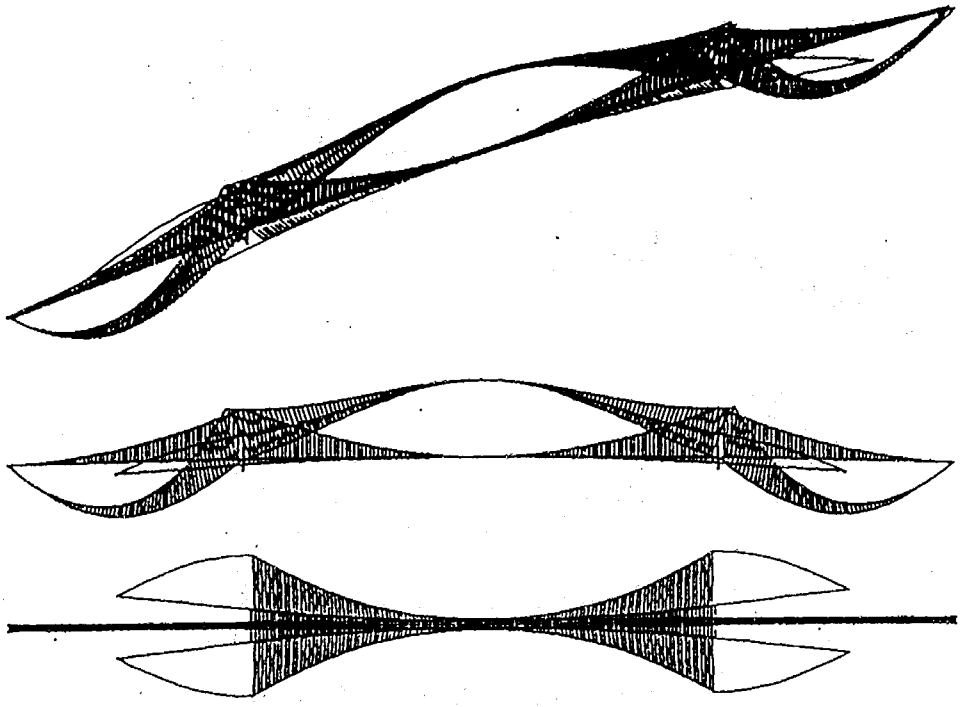


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f ＝0.0499

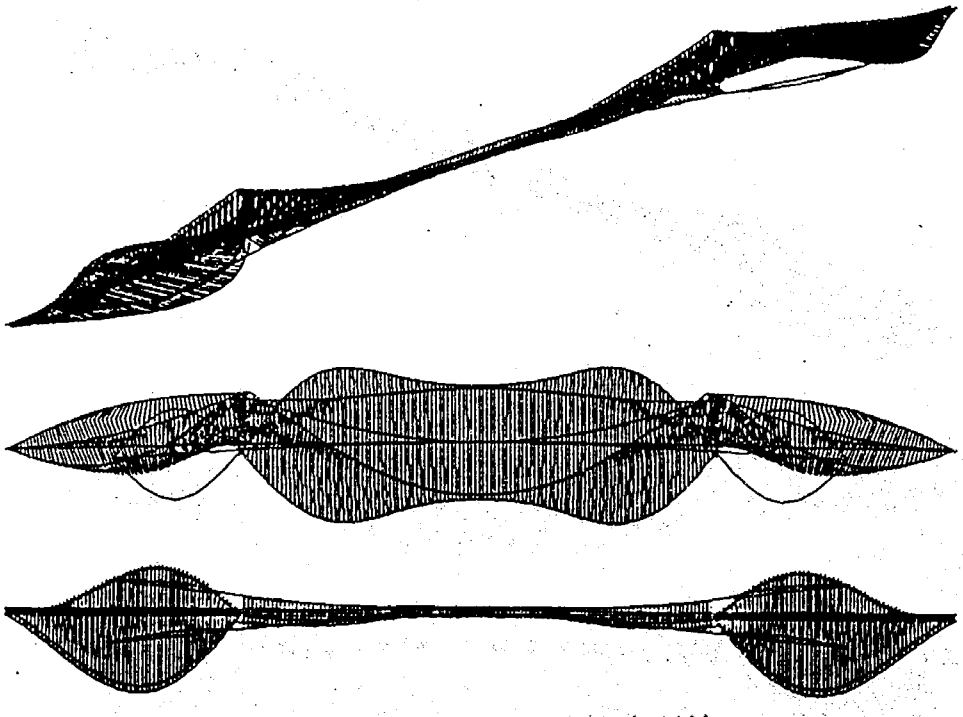


ねじれ対称１次　Mode-20　f ＝0.1131

図－３・２・４７　CASE-7（断面積1/8，サグ比1/60，鉛直角度45°，プレストレス力5,000tf）

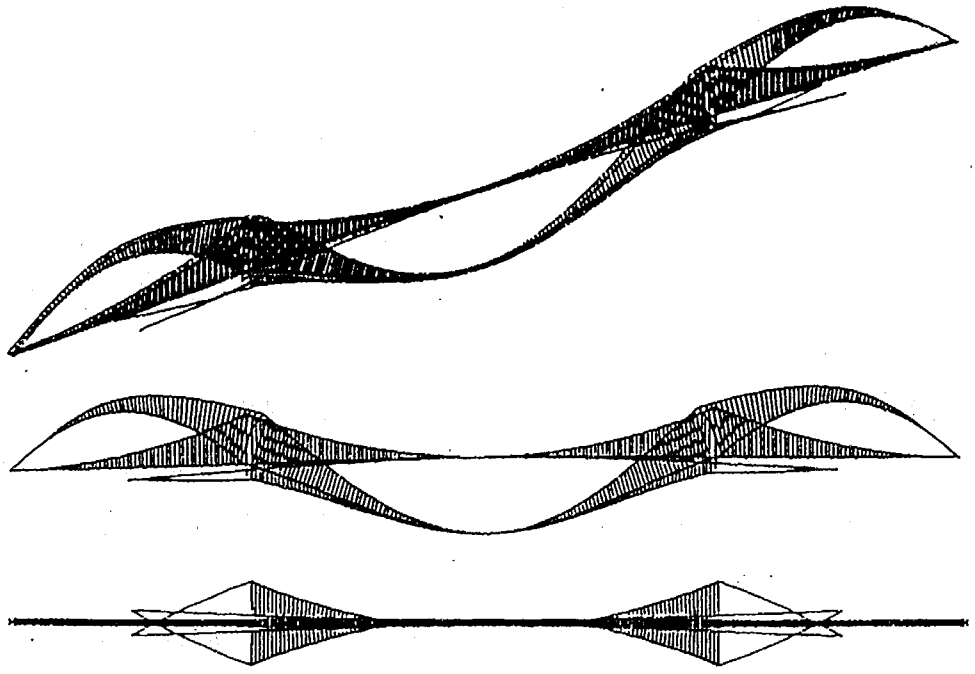


鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f ＝0.0499

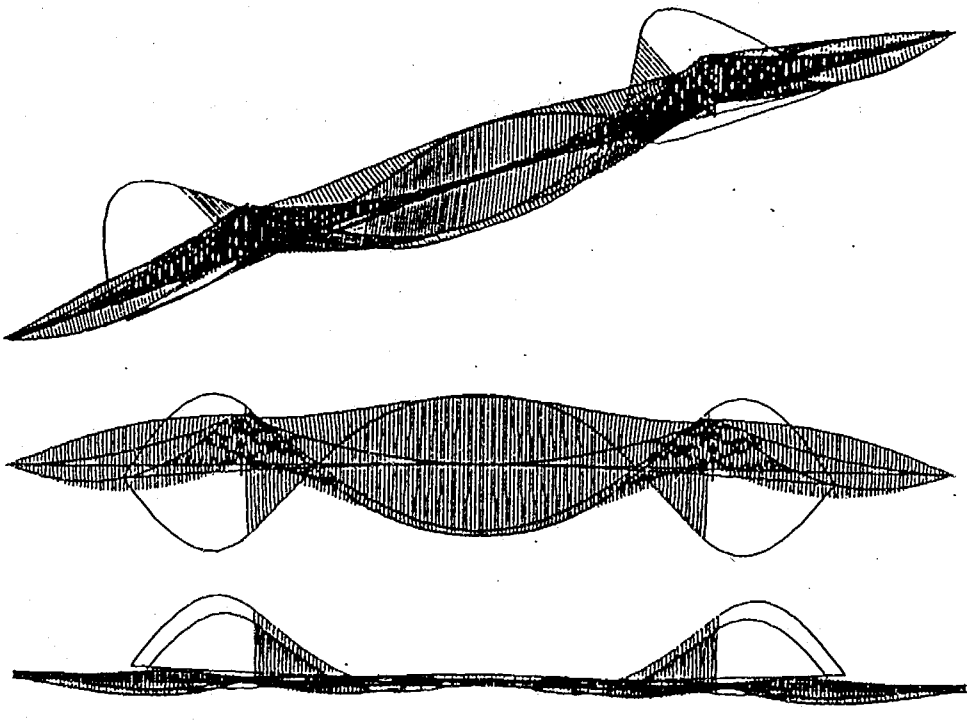


ねじれ対称１次　Mode-24　f ＝0.1130

図－３・２・４８　CASE-8（断面積1/8, サグ比1/60, 鉛直角度60°, プレストレス力5,000tf）



鉛直たわみ対称１次　Mode-2　f＝0.0504



ねじれ対称１次　Mode-20　f＝0.1139

図－３・２・４９　CASE-9（断面積1/8, サグ比1/60, 鉛直角度30°, プレストレス力10,000tf）

（2）等価質量および等価極慣性モーメント

表－３・２・５１にたわみ対称１次およびねじれ対称１次振動の鉛直・水平たわみに対する等価質量およびねじれに対する等価極慣性モーメントの計算結果を示す。表中'***'は 非常に大きい値を示す。また、図－３・２・５０にたわみ対称１次振動の鉛直たわみに対する等価質量を、図－３・２・５１にねじれ対称１次振動のねじれに対する等価極慣性モーメントを示す。なお、これらの図表には、主塔剛性１０倍時の計算結果も併せて記してある。

たわみ対称１次振動時の等価質量は、どのケースにおいても橋桁単位長さ当たりの質量にほぼ等しく、振動が純粋な鉛直たわみ振動であることがわかる。一方、ねじれ対称１次振動時の等価極慣性モーメントは、基本ケースおよび斜材タイプでは単位長さ当たりの極慣性モーメントと大差ないものの、モノケーブルおよびクロスハンガーでは約４．５倍～８．７倍と大きな値となった。

モード図からわかるように、これらのケーブルシステムの橋桁のねじれ振動はメインケーブルおよび桁の水平振動との連成振動になっている。このことは、ねじれ対称１次振動時の水平たわみの等価質量が小さいことからも伺うことができる。

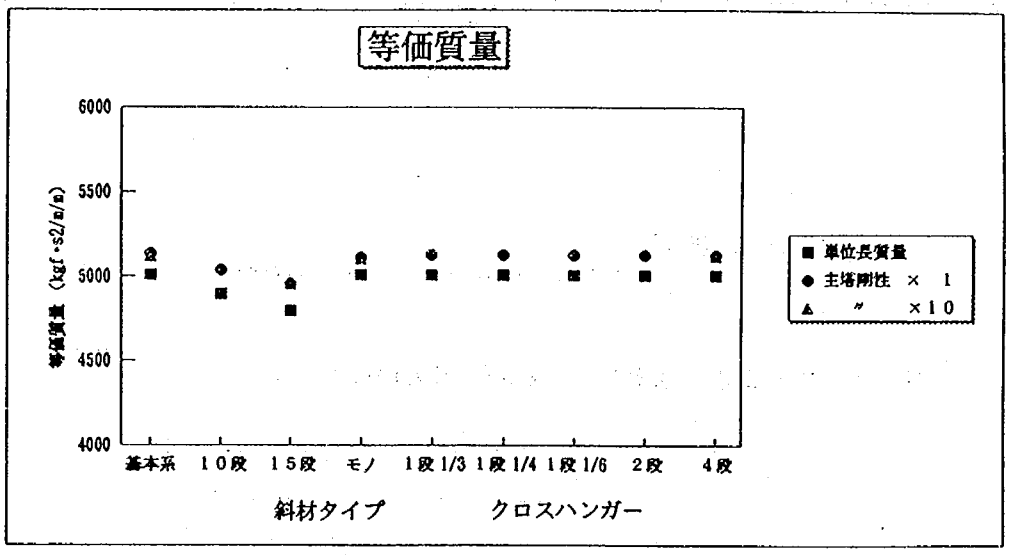
図－３・２・５２は、基本ケースのモードが21番目のモード図でメインケーブルと橋桁の水平対称２次の連成モードになっている。（f=0.128Hz） モノケーブルおよびクロスハンガーのモード形状がこれと類似しており振動数が近いことから、これらケーブルシステムのねじれ振動はメインケーブルの水平振動モードに支配されているものと考えられる。

主塔剛性に関しては、等価質量および等価極慣性モーメントに対しほとんど影響を及ぼさない結果であった。

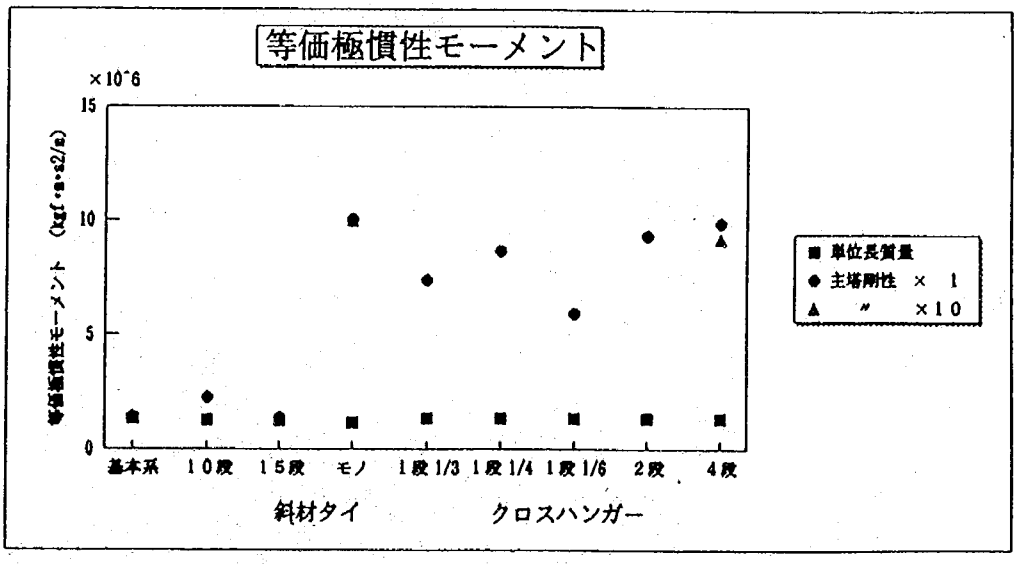
表－３・２・５１　等価質量及び等価極慣性モーメント

単位：kgf・s2/m，kgf・m・s2/m

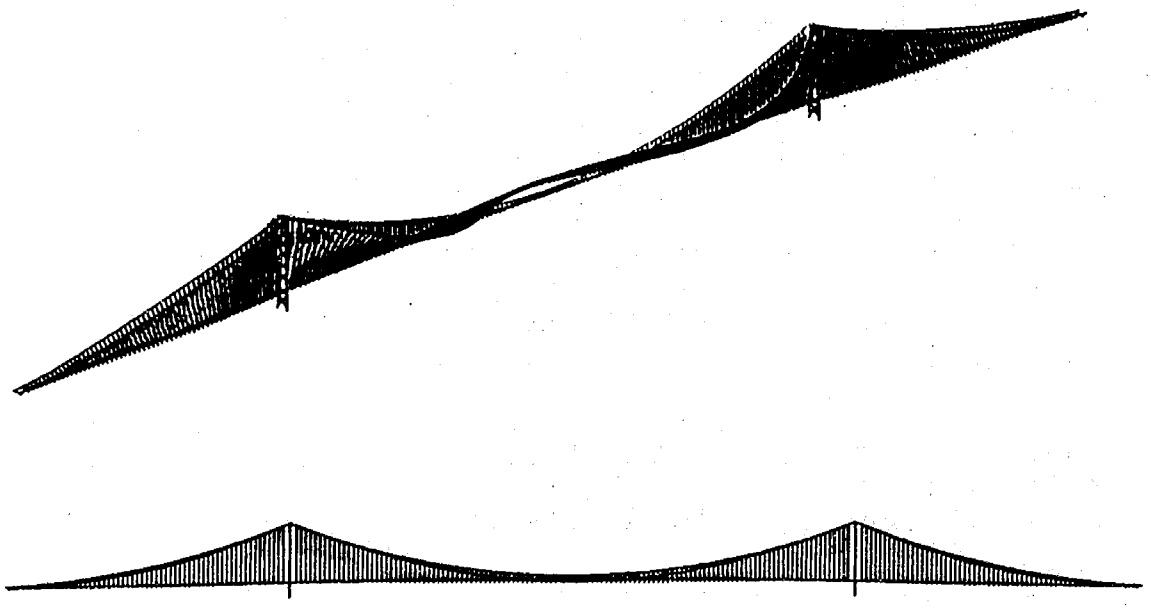
主塔剛性			基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
				１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
	単位長質量		5008	4895	4796	5008	5008	5008	5008	5008	5008
	単位長極慣性		1324000	1279000	1239000	1148000	1324000	1324000	1324000	1324000	1324000
1	たわみ対称１次	y	***	***	***	***	***	***	***	***	***
		z	5135	5037	4955	5113	5128	5128	5128	5128	5128
		xθ	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	ねじれ対称１次	y	518821	18385	139873	18551	18925	19859	21822	18952	18217
		z	***	***	***	393992	***	***	***	***	***
		xθ	1387982	2259422	1357266	10015570	7359833	8644239	5912038	9300083	9849673
×１０	たわみ対称１次	y	***		***	***					***
		z	5121		4955	5105					5122
		xθ	***		***	***					***
	ねじれ対称１次	y	469992		2598232	18441					20900
		z	***		***	***					***
		xθ	1446751		1311384	9955959					9156759



図－３・２・５０　等価質量



図－３・２・５１　等価極慣性モーメント



図－３・２・５２　基本ケースMode＝21の振動モード

（3）フラッター発現風速の推定

これまでに得られた固有値解析の結果をもとに、Selbergの式によりフラッター発現風速の推定を行う。なお、計算にあたっては質量および極慣性モーメントとして単位長さ当たりの質量・極慣性モーメントおよび等価質量・等価極慣性モーメントの両方を用いて行う。

1）ケーブルシステムの影響

表－3・2・52に単位長さ当たりの質量を用いた計算結果を、表－3・2・53に等価質量を用いた計算結果を、また図－3・2・53に基本ケースを1としたときの各ケースのフラッター発現風速の比の比較図を示す。

斜材タイプでは、メインケーブルを軽減したために質量効果が減少したこと、たわみ振動数・ねじれ振動数ともに上昇したために振動数比があまり上がらなかったこと、単位長さ当たりの質量と等価質量の間にあまり差が認められなかったことから、どちらの質量を用いてもフラッター発現風速の顕著な上昇は見られなかった。

モノケーブルおよびクロスハンガータイプにおいては、単位長さ当たりの質量を用いた場合のフラッター発現風速比は最大で11%増とあまり効果がない計算結果となった。しかし、これらのタイプに対して単位長さ当たりの質量を用た計算では、メインケーブルとの連成振動の影響を評価することが出来ない。この影響を考慮するために等価質量を用いた計算では、モノケーブルとクロスケーブル4段のケースにおいて発現風速比が1．85倍となった。このように、等価質量を用いて発現風速を推定する方法は、橋桁が不等断面（質量、剛性など）のような場合には有効であると考えられるが、これらのケースのようにケーブルと連成振動をする場合には推定結果の精度に疑問が残る。しかし、等価極慣性モーメントが大きくなることは、明らかにねじれにくさが増しているものと考えられることから、モノケーブルやクロスハンガーのケーブルシステムはフラッター発現風速がかなり向上するものと期待できる。

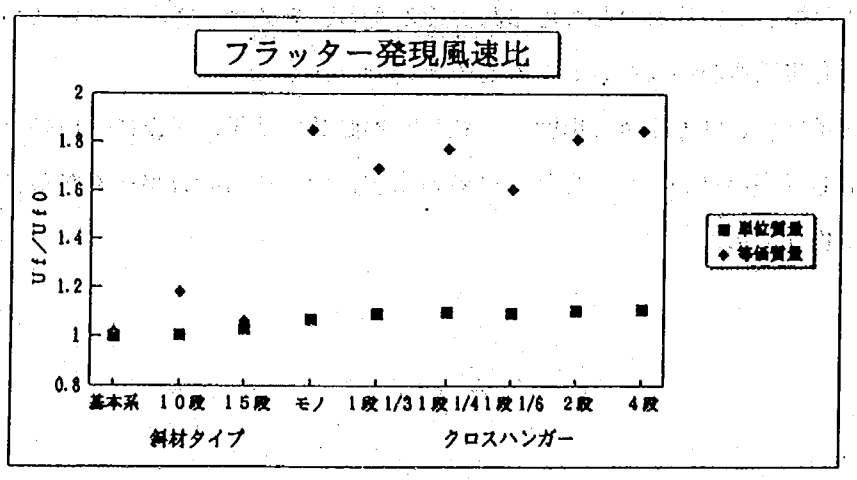
クロスハンガータイプにおける段数の影響は、ねじれ振動数の結果と同様に1段のみでもかなり有効であり、1／4位置が最も効率が良かった。また、段数の影響についても段数が多くなるに従い発現風速は上昇するが、その割合は僅かである。

表－３・２・５２　フラッター発現風速（Selbergの式）　単位質量使用

	基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
		１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
B	40	40	40	40	40	40	40	40	40
W	49080	47970	47000	49080	49080	49080	49080	49080	49080
m	5008	4895	4796	5008	5008	5008	5008	5008	5008
mr	25.04	24.47	23.98	25.04	25.04	25.04	25.04	25.04	25.04
Ip	1324000	1279000	1239000	1148000	1324000	1324000	1324000	1324000	1324000
$f\eta$	0.0502	0.0503	0.0506	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502
$f\theta$	0.1167	0.1188	0.1225	0.1272	0.1257	0.1265	0.1260	0.1269	0.1274
$f\theta/f\eta$	2.3247	2.3618	2.4209	2.5339	2.5040	2.5199	2.5100	2.5279	2.5378
$\omega\eta$	0.3154	0.3160	0.3179	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154
$\omega\theta$	0.7332	0.7464	0.7697	0.7992	0.7898	0.7948	0.7917	0.7973	0.8005
ν	1.3218	1.3065	1.2917	1.1461	1.3218	1.3218	1.3218	1.3218	1.3218
μ	0.0627	0.0642	0.0655	0.0627	0.0627	0.0627	0.0627	0.0627	0.0627
Ucf	49.9	50.2	51.4	53.4	54.6	55.0	54.7	55.2	55.4
比	1.00	1.01	1.03	1.07	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11

表－３・２・５３　フラッター発現風速（Selbergの式）　等価質量使用

	基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
		１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
B	40	40	40	40	40	40	40	40	40
W	49080	47970	47000	49080	49080	49080	49080	49080	49080
m	5135	5037	4955	5113	5128	5128	5128	5128	5128
mr	25.68	25.19	24.78	25.57	25.64	25.64	25.64	25.64	25.64
Ip	1387981	2259422	1357266	10015570	7359833	8644239	5912038	9300083	9849665
$f\eta$	0.0502	0.0503	0.0506	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502	0.0502
$f\theta$	0.1167	0.1198	0.1225	0.1272	0.1257	0.1265	0.1260	0.1269	0.1274
$f\theta/f\eta$	2.3247	2.3817	2.4209	2.5339	2.5040	2.5199	2.5100	2.5279	2.5378
$\omega\eta$	0.3154	0.3160	0.3179	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154	0.3154
$\omega\theta$	0.7332	0.7527	0.7697	0.7992	0.7898	0.7948	0.7917	0.7973	0.8005
ν	1.3515	2.2428	1.3696	9.7942	7.1761	8.4285	5.7645	9.0679	9.6038
μ	0.0612	0.0624	0.0634	0.0614	0.0613	0.0613	0.0613	0.0613	0.0613
Ucf	50.8	58.9	53.0	92.2	84.3	88.4	80.0	90.4	92.1
比	1.02	1.18	1.06	1.85	1.69	1.77	1.60	1.81	1.85



図－３・２・５３　フラッター発現風速比

2）　主塔剛性の影響

表－３・２・５４ に単位長さ当たりの質量を用いた計算結果を、表－３・２・５５に等価質量を用いた計算結果を、また図－３・２・５４に主塔剛性１の基本ケースに対する各ケースのフラッター発現風速の比の比較図を示す。

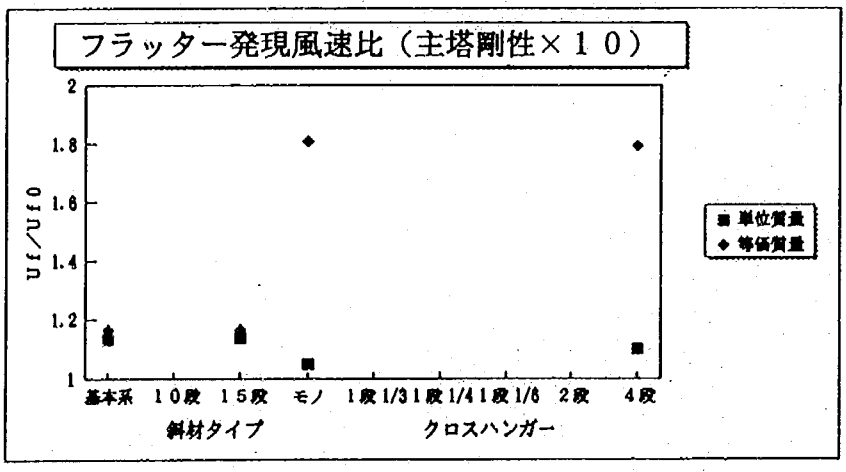
ねじれ振動数の上昇した基本ケースおよび斜材タイプにおいては、フラッター発現風速が１割程度上昇した。しかし、モノケーブルおよびクロスハンガータイプでは、振動数比が下がることにより、わずかではあるが発現風速は逆に低下した。

表－３・２・５４　フラッター発現風速（Selbergの式）　単位質量使用　主塔剛性*10

	基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
		１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
B	40		40	40					40
W	49080		47000	49080					49080
m	5008		4796	5008					5008
mr	25.04		23.98	25.04					25.04
Ip	1324000		1239000	1148000					1324000
$f\eta$	0.0556		0.0506	0.0555					0.0556
$f\theta$	0.1317		0.1332	0.1272					0.1285
$f\theta/f\eta$	2.3687		2.6324	2.2919					2.3112
$\omega\eta$	0.3493		0.3179	0.3487					0.3493
$\omega\theta$	0.8275		0.8369	0.7992					0.8074
ν	1.3218		1.2917	1.1461					1.3218
μ	0.0627		0.0655	0.0627					0.0627
Ucf	56.5		56.8	52.3					54.8
比	1.13		1.14	1.05					1.10

表－３・２・５５　フラッター発現風速（Selbergの式）　等価質量使用　主塔剛性*10

	基本系	斜材タイプ		ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	クロスハンガー				
		１０段	１５段		１段 1/3	１段 1/4	１段 1/6	２段	４段
B	40		40	40					40
W	49080		47000	49080					49080
m	5121		4955	5105					5122
mr	25.61		24.78	25.53					25.61
Ip	1446751		1311384	9955959					9156759
$f\eta$	0.0556		0.0506	0.0555					0.0556
$f\theta$	0.1317		0.1332	0.1272					0.1285
$f\theta/f\eta$	2.3687		2.6324	2.2919					2.3112
$\omega\eta$	0.3493		0.3179	0.3487					0.3493
$\omega\theta$	0.8275		0.8369	0.7992					0.8074
ν	1.4126		1.3233	9.7512					8.9387
μ	0.0613		0.0634	0.0615					0.0613
Ucf	58.1		58.0	90.2					89.4
比	1.17		1.16	1.81					1.79



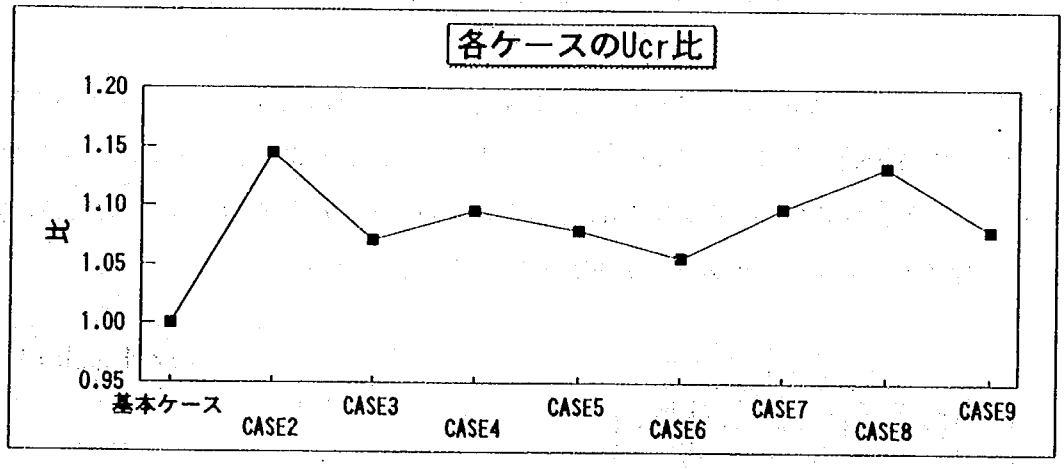
図－３・２・５４　フラッター発現風速比　主塔剛性*10

3） ストームケーブルの影響

ストームケーブルのSelberg式によるフラッター発現風速を表－３・２・５６と図－３・２・５５に示す。これより、ストームケーブル設置によるフラッター発現風速の増加は１割前後であり、仮定したストームケーブルは規模の割に、耐風性に関して良好なシステムとは言えない。また、次ページ以降にストームケーブルの断面積および各種ストームケーブルの設置方法の違いについての比較を行う。

表－３・２・５６ ストームケーブルのフラッター発現風速

	基本ケース	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9
断面積	---	1/4	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8
サグ比	---	1/60	1/60	1/45	1/30	1/60	1/60	1/60	1/60
鉛直角度	---	30	30	30	30	15	45	60	30
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力	---	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	10,000
B	40	40	40	40	40	40	40	40	40
W	49,080	63,330	56,420	55,280	54,300	56,050	56,430	54,640	56,590
m	5,008	6,462	5,757	5,641	5,541	5,719	5,758	5,576	5,774
Ip	1,324,000	2,180,816	1,760,714	1,812,755	1,953,061	1,660,102	1,941,939	2,288,061	1,767,653
$f\eta$	0.0502	0.0504	0.0500	0.0500	0.0506	0.0499	0.0499	0.0499	0.0504
$f\theta$	0.1167	0.1119	0.1131	0.1150	0.1126	0.1133	0.1131	0.1130	0.1139
$f\theta/f\eta$	2.3247	2.2202	2.2620	2.3000	2.2253	2.2705	2.2665	2.2645	2.2599
$\omega\eta$	0.3154	0.3167	0.3142	0.3142	0.3179	0.3135	0.3135	0.3135	0.3167
$\omega\theta$	0.7332	0.7031	0.7106	0.7226	0.7075	0.7119	0.7106	0.7100	0.7157
ν	1.3218	1.6874	1.5292	1.6068	1.7624	1.4513	1.6862	2.0519	1.5306
μ	0.0627	0.0486	0.0546	0.0557	0.0567	0.0549	0.0546	0.0563	0.0544
Ucr	49.9	57.11	53.40	54.64	53.83	52.68	54.76	56.53	53.86
比	1.00	1.15	1.07	1.10	1.08	1.06	1.10	1.13	1.08



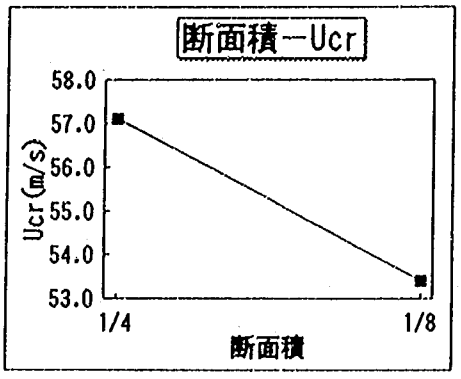
図－３・２・５５ ストームケーブル設置によるフラッター発現風速の上昇率

①ストームケーブルの断面積による影響

表－３・２・５７と図－３・２・５６にストームケーブルの断面積をそれぞれ1/4, 1/8倍とした場合のフラッター発現風速を示す。これより、断面積1/4の方が1/8に比べて、フラッター発現風速が大きいのが分かる。これは、表からわかるようにたわみおよびねじれ振動数がほとんど変わらないことから、ケーブル断面積の増加による死荷重強度および極慣性の増加による影響であることが分かる。

表－３・２・５７　フラッター発現風速
（断面積変化）

	CASE2	CASE3
断面積	1/4	1/8
サグ比	1/60	1/60
鉛直角度	30	30
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力	5,000	5,000
B	40	40
W	63,330	56,420
m	6,462	5,757
Ip	2,180,816	1,760,714
$f\eta$	0.0504	0.0500
$f\theta$	0.1119	0.1131
$f\theta/f\eta$	2.2202	2.2620
$\omega\eta$	0.3167	0.3142
$\omega\theta$	0.7031	0.7106
ν	1.6874	1.5292
μ	0.0486	0.0546
Ucr	57.11	53.40
比	1.15	1.07



図－３・２・５６　フラッター発現風速
（断面積変化）

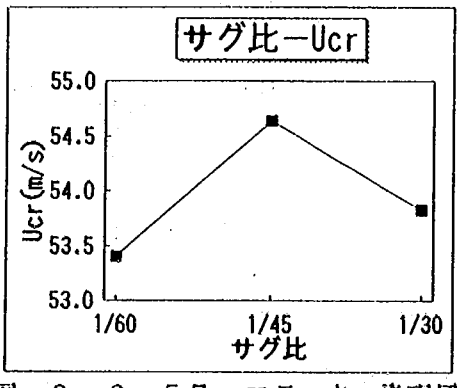
②ストームケーブルのサグ比による影響

表－３・２・５８と図－３・２・５７にストームケーブルのサグ比を1/30, 1/45, 1/60と変化させた場合のフラッター発現風速の比較を行った。これより、サグ比1/60, 1/30, 1/45の順にフラッター発現風速が大きくなっていることが分かる。

サグ比1/45で最もフラッター発現風速が大きいのは、死荷重強度および極慣性モーメントがいずれも２番目に大きいこと、ねじれ固有振動数が最も大きいことに起因する。また、1/30と1/60で1/30の方がフラッター発現風速が大きいのは、死荷重強度が1/60が1/30に比べて大きいこと、たわみおよびねじれの振動数がほぼ等しいことから、極慣性モーメントの増大のみに起因していることが分かる。

表－３・２・５８　フラッター発現風速
（サグ比変化）

	CASE3	CASE4	CASE5
断面積	1/8	1/8	1/8
サグ比	1/60	1/45	1/30
鉛直角度	30	30	30
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力	5,000	5,000	5,000
B	40	40	40
W	56,420	55,280	54,300
m	5,757	5,641	5,541
Ip	1,760,714	1,812,755	1,953,061
$f\eta$	0.0500	0.0500	0.0506
$f\theta$	0.1131	0.1150	0.1126
$f\theta/f\eta$	2.2620	2.3000	2.2253
$\omega\eta$	0.3142	0.3142	0.3179
$\omega\theta$	0.7106	0.7226	0.7075
ν	1.5292	1.6068	1.7624
μ	0.0546	0.0557	0.0567
Ucr	53.40	54.64	53.83
比	1.07	1.10	1.08



図－３・２・５７　フラッター発現風速
（サグ比変化）

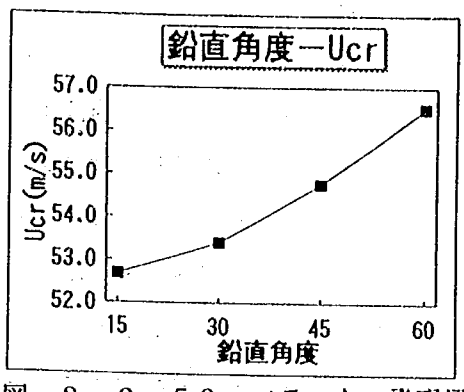
③ストームケーブルの鉛直角度による影響

表－３・２・５９と図－３・２・５８にストームケーブルの鉛直角度を15°,30°45,°60°と変化させた場合のフラッター発現風速を示す。これより、ストームケーブルの鉛直角度が大きくなるのに比例し、フラッター発現風速が大きくなっていることが分かる。

これは、死荷重強度および極慣性モーメントが鉛直角度に比例して大きくなっていること、鉛直およびねじれの振動数がほぼ等しいことより、死荷重強度および極慣性モーメントが起因していることが分かる。特に極慣性モーメントは、死荷重強度に比べて鉛直角度に対する変化の割合が大きく、フラッター発現風速に大きく関与している。

表－３・２・５９　フラッター発現風速
（鉛直角度変化）

	CASE6	CASE3	CASE7	CASE8
断面積	1/8	1/8	1/8	1/8
サグ比	1/60	1/60	1/60	1/60
鉛直角度	15	30	45	60
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力	5,000	5,000	5,000	5,000
B	40	40	40	40
W	56,050	56,420	56,430	54,640
m	5,719	5,757	5,758	5,576
Ip	1,660,102	1,760,714	1,941,939	2,288,061
$f\eta$	0.0499	0.0500	0.0499	0.0499
$f\theta$	0.1133	0.1131	0.1131	0.1130
$f\theta/f\eta$	2.2705	2.2620	2.2665	2.2645
$\omega\eta$	0.3135	0.3142	0.3135	0.3135
$\omega\theta$	0.7119	0.7106	0.7106	0.7100
ν	1.4513	1.5292	1.6862	2.0519
μ	0.0549	0.0546	0.0546	0.0563
Ucr	52.68	53.40	54.76	56.53
比	1.06	1.07	1.10	1.13



図－３・２・５８　フラッター発現風速
（鉛直角度変化）

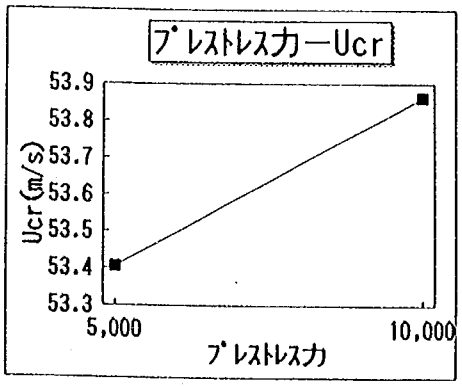
④ストームケーブルのサグ比による影響

表－３・２・６０と図－３・２・５９にストームケーブルのプレストレス力を変化させた場合のフラッター発現風速を示している。これより、プレストレス力に比例してフラッター発現風速が大きくなっていることが分かる。

これは、プレストレス力に比例し、死荷重強度・極慣性モーメントが大きくなっていることと、鉛直およびねじれの固有振動数が多少大きくなっていることに起因する。

表－３・２・６０　フラッター発現風速
（ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力変化）

	CASE3	CASE9
断面積	1/8	1/8
サグ比	1/60	1/60
鉛直角度	30	30
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力	5,000	10,000
B	40	40
W	56,420	56,590
m	5,757	5,774
Ip	1,760,714	1,767,653
$f\eta$	0.0500	0.0504
$f\theta$	0.1131	0.1139
$f\theta/f\eta$	2.2620	2.2599
$\omega\eta$	0.3142	0.3167
$\omega\theta$	0.7106	0.7157
ν	1.5292	1.5306
μ	0.0546	0.0544
Ucr	53.40	53.86
比	1.07	1.08



図－３・２・５９　フラッター発現風速
（ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ力変化）

3．2．3　まとめ

固有値解析およびSelbergの式により、1箱桁を有する超長大橋のケーブルシステムのフラッター特性を推定した。主要な成果は以下のとおりである。

・ステイケーブル併用タイプは、単独ではフラッター発現風速を上昇させる効果をあまり期待できない。ただし、主塔をA型とするような主塔剛性を大きくする方法との組み合わせである程度効果を期待できる。なお、ステイケーブルを用いることによりメインケーブルを軽減することは可能である。

・モノケーブルおよびクロスハンガータイプでは、橋桁のねじれ振動はメインケーブルの水平振動を伴う。このため、ねじれ振動に対する橋桁の等価極慣性モーメントが大きくなり、フラッター発現風速の上昇が期待できる。

・クロスハンガータイプでは、1段のみ設置した場合でもフラッター特性を向上させる効果が期待できる。今回の検討では、中央径間1／4位置に配置することが最も効果的であった。

・クロスハンガーの段数を増やすことによりフラッター発現風速も上昇するが、その割合は僅かである。

・モノケーブルおよびクロスハンガータイプでは、主塔剛性が大きくなると振動数比が小さくなり、逆にフラッター発現風速が低くなる結果となった。

・ストームケーブルシステムでは、ストームケーブルの材質および設置方法によっては1割程度のフラッター発現風速の上昇を示すことがあるが、システムの規模に比べフラッター発現風速の上昇効果はそれほど大きくない。

3．3　2箱桁

3．3．1　方法

（1）解析手法

検討は線形化有限変形理論に基づいた固有値解析を介し、算出されたモードを用い多自由度フラッター解析を行い、吊橋の耐風性とケーブルシステムの影響を考察するものである。

（2）解析対称吊橋の諸元

解析の対象は、中央径間2,500m、橋長5,000m（側径間1,250m）の2箱断面を有する超長大橋とし、以下に示す諸元を基本として考える。なお、ケーブルシステムの概念図を図－3・3・1～図－3・3・4に示す。

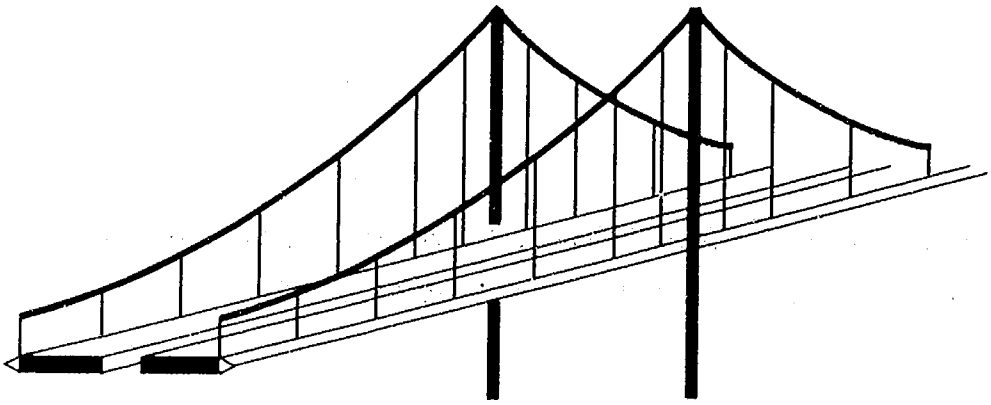
1）吊橋の基本諸元

表－3・3・1　吊橋の構造諸元

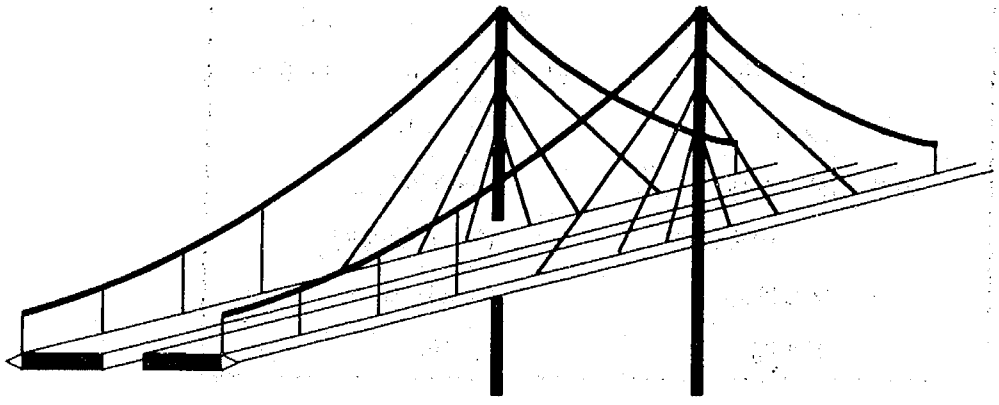
項　　目	形　式・数　値
形　　式	3径間補剛箱桁吊橋
橋　　長	5,000m
支間割　ケーブル	1,250m+2,500m+1,250m
補剛桁	1226 m + 2480 m + 1226 m
サグ比	1/10
縦断勾配　側径間	2%直線勾配
中央径間	1%放物線勾配
ケーブル間隔	45.333 m
桁下空間	100 m

表－3・3・2　ケーブルシステムのケース

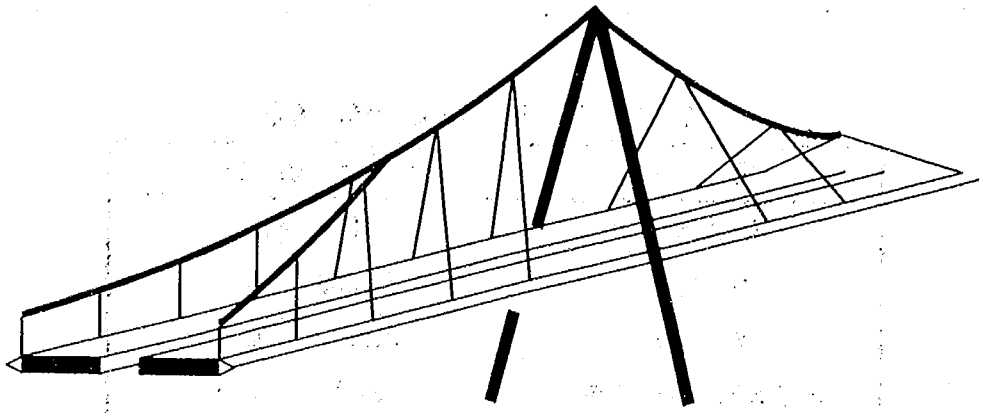
ケース	ケーブルシステム	パラメーター，備考
1	基本断面	塔形式
2	ステイケーブル併用 （斜張橋タイプ）	中央径間約L/4, L/8, L/12までｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ断面積，塔形式，斜め張り
3	モノケーブルシステム	中央径間約L/4までモノケーブル (Monoduoﾀｲﾌﾟ) ｼﾝｸﾞﾙﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ（仮称） 単一なﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ
4	クロスハンガーシステム	1段　中央径間約1/4位置 交互片引き，片側片引き，X型，断面積



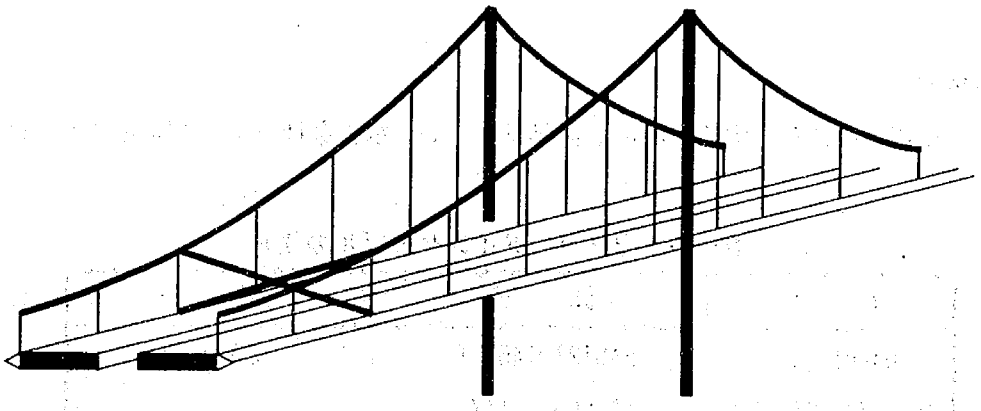
図−３・３・１　基本断面概念図



図−３・３・２　ステイケーブル概念図



図－３・３・３　モノケーブル概念図



図－３・３・４　クロスハンガー概念図

2）補剛桁の諸元

補剛桁の諸元は以下の通りとする。なお、詳細は「（３）解析条件および解析モデル」にて記述する。

表－３・３・３　補剛桁の構造諸元

項　　目	形　式・数　値
補剛桁形状	箱　桁
補剛桁幅	50.533　m
補剛桁高	3,5,7　m
吊り構造部単位重量	25.7　tf/m
鋼材部単位重量	16.95　tf/m
その他	8.75　tf/m
極慣性モーメント	1470,1522,1554　$t\cdot m\cdot sec^2/m$
断面積	1.54,1.53,1.51　m^2
断面2次モーメント　鉛直	2.17,5.26,10.03　m^4
水平	288.2,290.9,296.2　m^4
ねじれ定数	8.91,20.02,35.55　m^4

3）ケーブルの諸元

ケーブルの諸元は以下の通りとする。なお、詳細は「（３）解析条件および解析モデル」にて記述する。

表－３・３・４　メインケーブルの諸元

項　　目	諸　　元	備　　考
断面構成	PWS127×469ST	2本／橋
ケーブル単位重量	16.990　tf/m	
ケーブル断面積	1.068　m^2	
ケーブル径	1.304　m	ラッピングを含む

表－３・３・５　メインケーブル特性値

	密度 ρ (gf/cm^3)	引張強度 σs (kgf/mm^2)	弾性係数 E (kgf/cm^2)	線膨張係数 μ (1/℃)
180キロ級	7.85	180	2.1×10^6	1.2×10^{-5}

4）塔の諸元

塔の諸元は基本断面のメインケーブルの反力により算定するものとする。なお、詳細は「3．解析条件および解析モデル」にて記述する。

5）その他の諸元

補剛桁の諸元は以下の通りとする。なお、詳細は「（3）解析条件および解析モデル」にて記述する。

表－3・3・6　ハンガーケーブルの諸元

項　　目	諸　元	備　考
ハンガー断面積	0.0082 m^2	

表－3・3・7　ステイケーブル諸元

項　　目	諸　元	備　考
ステイケーブル　L/4	0.0082～0.217 m^2	一塔当たり40本
ステイケーブル　L/4	0.0164～0.434 m^2	一塔当たり40本
ステイケーブル　L/8	0.0164～0.276 m^2	一塔当たり24本
ステイケーブル　L/12	0.0082～0.106 m^2	一塔当たり16本
ステイケーブル　L/12	0.0164～0.212 m^2	一塔当たり16本

表－3・3・8　クロスハンガー諸元

項　　目	諸　元	備　考
クロスハンガー断面積	0.0099, 0.0102 m^2	4カ所
剛性＝I	同一位置のﾊﾝｶﾞｰと同じI	CASE4
クロスハンガー断面積	0.0099, 0.0102 m^2	4カ所
剛性＝I	I=0	CASE43,CASE44
クロスハンガー断面積	0.0396, 0.0408 m^2	4カ所
剛性＝I	I=0	CASE46

6）物理定数

表－３・３・９　物理定数

		弾性係数 E (kgf/cm²)	せん断定数 G (kgf/cm²)	線膨張係数 μ
1	吊構造部	2.1×10^6	8.1×10^6	1.2×10^{-5}
2	ケーブル	2.0×10^6	---	1.2×10^{-5}
3	ハンガー	1.4×10^6	---	1.2×10^{-5}
4	ステイケーブル	1.4×10^6	---	1.2×10^{-5}
5	クロスハンガー	1.4×10^6	---	1.2×10^{-5}

（３）解析条件および解析プログラム

１）使用プログラム

①吊橋構造解析データ作成プログラム

吊橋構造解析データ作成プログラムはＩＳＡＳⅡの入力データを作成するための予備プログラムであり、ＩＳＡＳⅡで対応できないケーブルとハンガーのプレストレスを部材剛性を変更することにより、張力（プレストレス）を与えた場合と同じ固有値解析を行えるようにするものである。

（ａ）張力（プレストレス）について

$$\therefore\ Iv' = \frac{12 \cdot E \cdot Iv + PL_o^2}{12 \cdot E}$$

ここに、

Iv ： 部材の第一基準面内断面二次モーメント

E ： 弾性係数

L_o ： 初期要素長

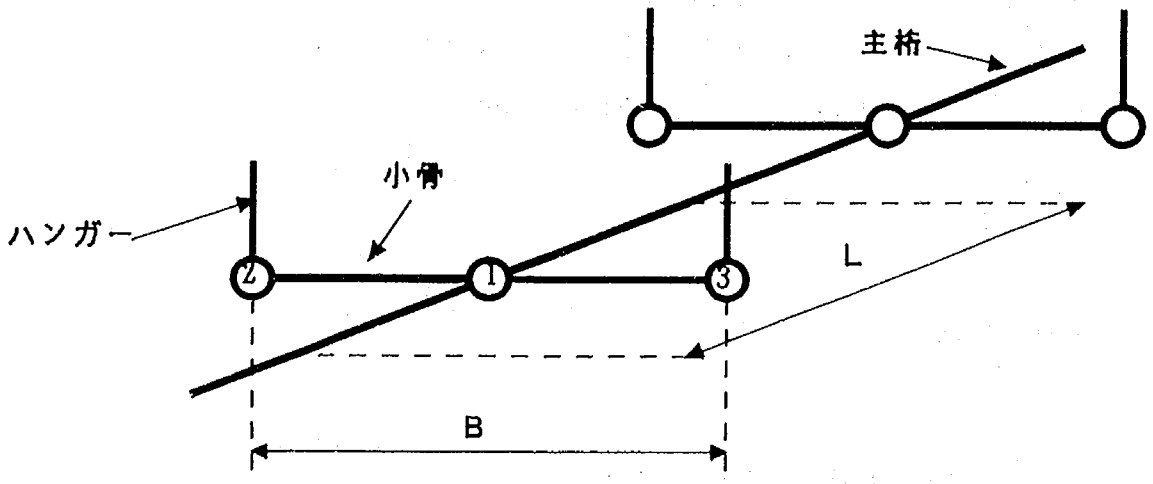
L ： $L_o + \Delta L$

P ： 張力

また、第一基準面内断面二次モーメント＝第二基準面内断面二次モーメントとする。

（b）主桁と小骨の単位質量

フレームモデルで固有値解析を行うため、橋桁の極慣性モーメントを一致させるために、以下のように主桁と小骨の単位質量を計算する。



図－３・３・５　フレームモデル

W　　：桁の単位重量(t/m)

I_θ　　：桁の単位長当たりの極慣性モーメント(t•m²/m)

W1, W2, W3：図－３・３・５の①②③に割り当てられた質量(t)

B　　：②－③間の長さ

W1, W2, W3からW, I_θを逆算する。

$$W2=W3=(2\times I_\theta/B^2)\times L \qquad \text{----------式(３・３・１)}$$

Waを主桁の単位質量

Wbを小骨の単位質量とすると

$$W2=W3=(Wb\times B/2 \qquad \text{----------式(３・３・２)}$$

$$W1=\{(Wb\times B/2)\}\times 2+Wa\times L \qquad \text{----------式(３・３・３)}$$

式(３・３・１),(３・３・２),(３・３・３)からWa, Wbを逆算すると

$$Wb=4\times W2/B$$

$$Wa=[W1-\{(Wb\cdot B/2)/2\}\times 2]/L$$

$\therefore$

$$Wa=W-8\times I_\theta/B^2\times L$$

$$Wb=(8\times I_\theta/B^3)\times L$$

②ＩＳＡＳⅡ

（ａ）固有値解析

固有値計算は総合構造解析システムＩＳＡＳⅡの固有値解析手法中のｻﾌﾞｽﾍﾟｰｽ法を用いる。ｻﾌﾞｽﾍﾟｰｽ法は同時反復法の一種で、絶対値の小さい方からｑ個の固有値を同時に求める方法である。ｑの大きさは、行列の自由度の次元ｎ以下であり、1≦ｑ≦90の範囲で解くことができる。システムで用いている方法は、正確にはｼﾞｪﾆﾝｸﾞｽ法と呼ばれる同時反復法であるがＩＳＡＳⅡではｻﾌﾞｽﾍﾟｰｽ法と定義している。ｻﾌﾞｽﾍﾟｰｽ法の手順を図－３・３・６に示す。

a)部分空間の次元mの設定　m=min(n,2q,q+8)　n:もとの行列の次元　q:固有値数

b)初期ベクトル行列[Go](nXm)の設定　[G]=[Go]とする。

→ c)[K][Z]=[G]　[Z](nXm)を求める。

[K]は b)の直後で、あらかじめ[L][D][L]'分解しておく。

e)[K]=[Z]'[G]　[K](mXm)を計算する。

f)[M]=[Z]'[M][Z]　[M](mXm)を計算する。

g)[K][Q]=[Λ][M][Q]　一般化ﾔｺﾋﾞ法で固有値行列[Λ]、固有ﾍﾞｸﾄﾙ[Q]を求める。

[Q](mXm)

h)固有値を上昇順にｿｰﾄして、小さい方からq個が収束していれば n)に分岐する。

i)収束していなければ、固有値のｿｰﾄ順に固有ﾍﾞｸﾄﾙを並べ直したものを

[P](mXm)とする。

j)[G']=[M][Z][P]　([M][Z]はあらかじめ e)で計算して保存しておく。)

k)[S]=[G']'[G']　(mXm)

l)[S]=[U]'[U]　[S]をｺﾚｽｷｰ分解して上三角行列[U]を求める。

m)[G]=[G'][U]$^{-1}$　[G](nXm)を求めて c)へ戻る。

n)収束しただけの個数の固有値、固有ﾍﾞｸﾄﾙをファイルに書き出す。

o)結果を出力する。

図－３・３・６　ｻﾌﾞｽﾍﾟｰｽ法の計算手順

2）解析ケース

解析では、桁高３m・５m・７mの補剛桁を４つのケーブルシステムケースを用いて吊橋の解析を行う。

表－３・３・１０　解析ケース（１／２）

No	ケース番号	桁高	ケーブルシステム	ﾌﾗｯﾀｰ解析時の非定常空気力
1	TYPE1-CASE1	3m	基本断面	Theodorsen AEF 実験値
2	TYPE1-CASE2	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/4,A=1倍	Theodorsen AEF 実験値
3	TYPE1-CASE3	3m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen AEF 実験値
4	TYPE1-CASE4	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(X型,I≠0)	Theodorsen AEF
5	TYPE2-CASE1	5m	基本断面	Theodorsen AEF
6	TYPE2-CASE2	5m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/4,A=1倍	Theodorsen AEF
7	TYPE2-CASE3	5m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen AEF
8	TYPE2-CASE4	5m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(X型,I≠0)	Theodorsen AEF
9	TYPE3-CASE1	7m	基本断面	Theodorsen AEF
10	TYPE3-CASE2	7m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/4,A=1倍	Theodorsen AEF
11	TYPE3-CASE3	7m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen AEF
12	TYPE3-CASE4	7m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(X型,I≠0)	Theodorsen AEF
13	TYPE1-CASE22	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍	実験値
14	TYPE1-CASE23	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=2倍	固有値解析のみ
15	TYPE1-CASE24	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/8,A=2倍	固有値解析のみ
16	TYPE1-CASE2G	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/4,A=2倍	固有値解析のみ
17	TYPE1-CASE42	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(交互片引き I≠0)	固有値解析のみ
18	TYPE1-CASE43	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(片側片引き I=0)	Theodorsen AEF 実験値
19	TYPE1-CASE44	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(X型,I=0)	Theodorsen AEF 実験値

表－３・３・１１　解析ケース（２／２）

No	ケース番号	桁高	ケーブルシステム	ﾌﾗｯﾀｰ解析時の非定常空気力
20	TYPE1-CASE25	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍 斜め張り	固有値解析のみ
21	TYPE1-CASE26	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍 斜め張り ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔	固有値解析のみ
22	TYPE1-CASE27	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍 斜め張り 明石の塔相当	固有値解析のみ
23	TYPE1-CASE28	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍 斜め張り 明石の塔相当, Ｊは基本断面と同じ	固有値解析のみ
24	TYPE1-CASE1T	3m	基本断面 ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔	固有値解析のみ
25	TYPE1-CASE46	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ(片側片引き I=0) ﾊﾝｶﾞｰ直径2倍	固有値解析のみ
26	TYPE1-CASE29	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ,L/12,A=1倍 ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減 9.55tf/m	Theodorsen　AEF 実験値
27	TYPE1-CASE2Y	3m	ｽﾃｲｼｽﾃﾑ　（仮称） 剛性は0	固有値解析のみ
28	TYPE1-CASE31	3m	ｼﾝｸﾞﾙﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ（仮称） 単一なﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	固有値解析のみ

3）2箱断面の断面諸量

①仮定条件

桁高 H　　＝ 3.000 m、5.000 m、7.000 m

桁幅 B　　＝45.333 m

ｽﾘｯﾄ間隔 B-2b (20%)　＝11.333 m

片側箱幅 b　　＝17.000 m

ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ長 bf　　＝ 2.600 m

吊り構造部重量 W　　＝25.700 tf/m（本四モデル参考）

鋼材部重量 Wb　　＝16.950 tf/m（本四モデル参考）

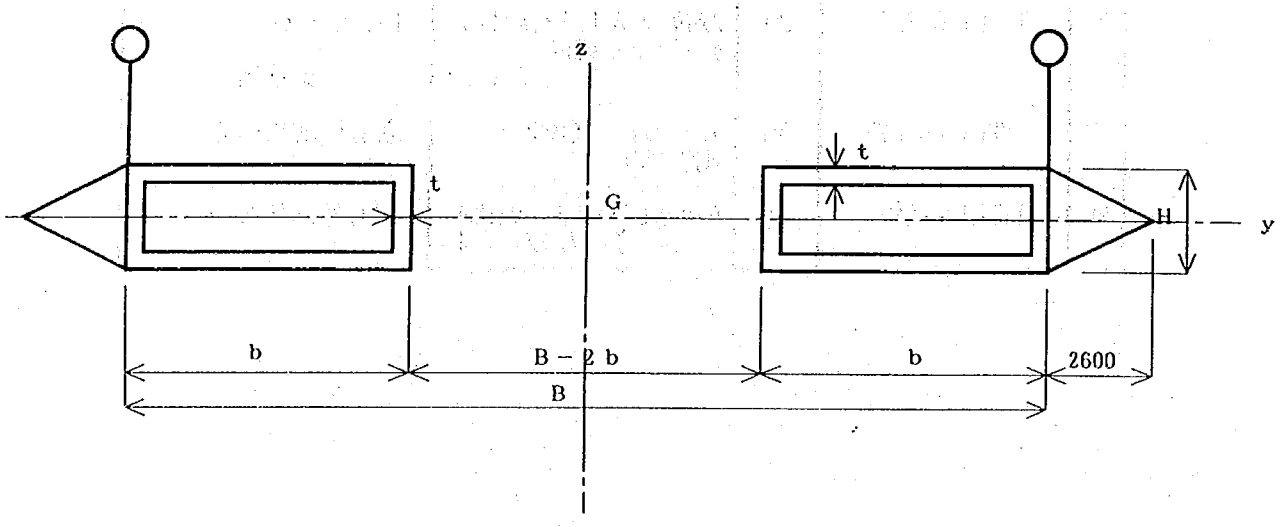
その他 Wf　　＝ 8.750 tf/m（本四モデル参考）

ケーブル重量 Wc　　＝16.990 tf/m（本四モデル参考）

ケーブル間隔 Bc　　＝45.333 m（桁幅と同じとする）

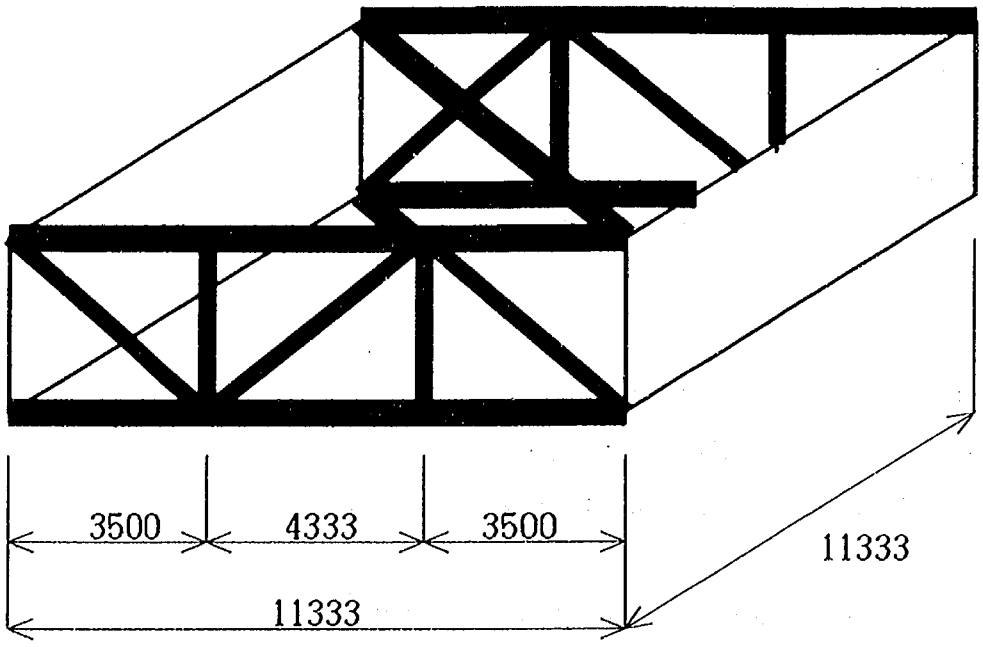
連結トラス部材因島2倍タイプ

横材間隔 BB　　＝11.333 m



図－3・3・7　2箱断面図

②桁厚の算出



図－３・３・８　トラス部材

表－３・３・１２　トラス部材の断面定数

	板厚 (m)	部材 (m)	断面積 (m^2)	断面2次ーメント (m^4)	ねじり定数 (m^4)	単位重量 (tf/m)	長さ (m)	1本当り重量 (tf)
斜材	0.020	0.60	0.0464	2.60E-06	3.90E-06	0.364	16.027	5.838
横材	0.020	0.60	0.0464	2.60E-06	3.90E-06	0.364	11.333	4.128
組材1	0.016	0.40	0.0246	6.05E-07	9.06E-07	0.193	3.000	0.579
組材2	0.016	0.40	0.0246	6.05E-07	9.06E-07	0.193	5.270	1.017
組材3	0.016	0.40	0.0246	6.05E-07	9.06E-07	0.193	4.610	0.889

8.5m相当重量　WW＝斜材×2＋横材×2＋組材1×2＋組材2＋組材3×2 ＝ 23.884 tf

1m相当重量　　WT＝WW／11.333＝ 2.108 tf/m

8.5m枠相当充実断面積 AA＝斜材（部材高×長さ）＋横材（部材高×長さ）

＝16.416 m^2

連結トラス部材のスリット間での充実率 ＝22.7 %

連結トラス部材を除く鋼材の重量の算出

WA＝Wb－Wbt＝14.842　tf/m

来島の設計計算を参考にWAを基準にリブを除く箱部の重量を0.635倍、ダイヤフラムの重量を0.184とする。

リブを含まない箱部の重量WWは

WW ＝WA×0.635　　＝9.425 tf

リブを含む重量WW'は

WW'＝WA×(1-0.184)＝12.111 tf

箱端部の厚さを4倍としフェアリング部を考慮し計算を行う。

W　＝t(or t')×L×7.85 tf/m³

桁高H=3mの時

〔t:厚さ L:周長＝2×(17.0m×2+3.0×5)＝98.00m〕

∴　t ＝WW／(7.85×98.00m)＝0.0190 (m)(Ix,Iy,J計算用)

　t'＝WA／(7.85×98.00m)＝0.0125 (m)(Ips計算用)

③断面積A、断面2次モーメントIy, Izの算出（フェアリング部を考慮）

$A = WW' / 7.85$

$AA = WW / 7.85$

$Iy = BH^3/12 - \{2(b-5t)(H-2t)^3/12 + (B-2b)H^3/12\}$

$Iz = 2\{Iz' + AA/2 \times (y')^2\}$

ここで、

$Iz' = Hb^3/12 - (H-2t)(b-5t)^3/12$　　$y' = (B-2b)/2 + b/2$

H=3m	H=5m	H=7m
t = 12.5 mm	t = 10.0 mm	t = 9.0 mm
A = 1.543 m²	A = 1.528 m²	A = 1.512 m²
AA = 1.201 m²	AA = 1.189 m²	AA = 1.177 m²
Iy = 2.171 m⁴	Iy = 5.262 m⁴	Iy = 10.030 m⁴
Iz'= 23.620 m⁴	Iz'= 26.126 m⁴	Iz'= 30.010 m⁴
y' = 14.167 m	y' = 14.167 m	y' = 14.167 m
Iz = 288.195 m⁴	Iz = 290.904 m⁴	Iz = 296.167 m⁴

表－３・３・１３　来島設計数量

吊り構造部
重量(tf)

	来島第一	来島第二	来島第三
Deck	4.23	4.18	4.18
Web	0.63	1.09	1.09
TFlg	2.91	2.91	2.91
小　計	7.77	8.18	8.18
ﾀﾞｲﾔﾌﾗﾑ	1.73	2.29	2.29
ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ	0.94	1.35	1.35
補剛桁重量計	10.44	11.82	11.82
その他	5.99	6.02	6.03
吊り構造部重量(tf)	16.43	17.84	17.85
諸数値			
桁　高	2.5	4.3	4.3
桁　幅:B(ﾌｪｱﾘﾝｸﾞ長含む)	30.7	32.3	32.3
有効桁幅	27.0	27.0	27.0
断面積	1.043	1.145	1.145
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ Iy	1.13	3.4	3.4
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ Iz	83.89	103.1	103.1
ねじり剛度 J	3.33	9.31	9.31
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	126.6	152.2	152.4
ケーブル関係			
ｹｰﾌﾞﾙ重量(tf/m)	2.34	4.95	4.75
ｹｰﾌﾞﾙ間隔(m)	27.0	27.0	27.0
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	43.5	92.1	88.3

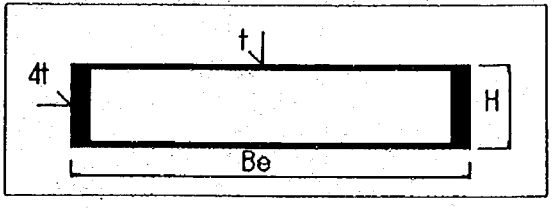
比較表
実数量／計算値×１００

	第一	第二	第三
断面積 A	94	94	94
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ Iy	110	103	103
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ Iz	111	99	99
ねじり剛度 J	93	89	89
吊り構造部極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	126	122	122
ケーブル部極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	100	100	100

来島概略計算値

吊り構造部
諸数値

	来島第一	来島第二	来島第三
桁　高(H:m)	2.5	4.3	4.3
有効幅員(Be:m)	27.0	27.0	27.0
補剛桁重量計(Wb:tf)	10.44	11.82	11.82
その他(Wf:tf)	5.99	6.02	6.03
純補剛桁重量計(Wbb:tf)	8.71	9.53	9.53
換算板厚(t':m)	0.016	0.015	0.015
断面積(A:m2)	1.110	1.214	1.214
板厚(t:m)	0.011	0.011	0.011
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ (Iy:m4)	1.03	3.31	3.31
断面二次ﾓｰﾒﾝﾄ (Iz:m4)	75.70	104.47	104.47
ねじり剛度 (J:m4)	3.59	10.49	10.49
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ(補剛桁)	63.7	82.1	82.1
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ(その他)	37.0	42.9	43.0
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ(Ips)	100.7	125.0	125.0
リブを除く鋼重(WW:tf)	6.39	7.63	7.63
WW/Wb	0.61	0.65	0.65
ﾀﾞｲﾌﾗﾑ(Wdai)/Wb	0.17	0.19	0.19
計算に用いるリブを除いた鋼重の割合 WW/Wb=			0.635
計算に用いるダイヤフラムの割合 W(dai)/Wb=			0.184
ケーブル関係			
ｹｰﾌﾞﾙ重量(Wc:tf)	2.34	4.95	4.75
ｹｰﾌﾞﾙ間隔(Bc:m)	27.0	27.0	27.0
極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ(Ipc)	43.52	92.05	88.34



t:実際の値（平均）

$t' = Wb/(2 \cdot Be + 8 \cdot H) * 7.85$

$A = Wbb/7.85$

$WW = 7.85 * (2 * t * Be + 2 * t * H)$
　　0.01634

$Iy = Be \cdot H^3/12 - (Be - 8t)(H - 2t)^3/12$

$Iz = H \cdot Be^3/12 - (H - 2t)(Be - 8t)^3/12$

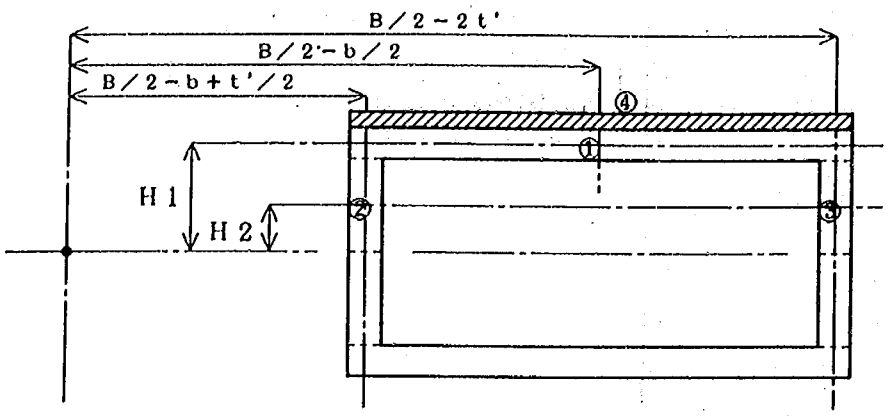
$J = 8t(Be - 4t)^2 * (H - t)^2/(4Be + H - 17t)$

$Ips = 4 * [((B/4)^2 + (H/2 - t')^2) * (t' * B/2 * 7.85) + \{(B/2 - 2t')^2 + ((H/2 - t')/2)^2\} * \{t' * (H/2 - t') * 7.85\}]/9.8 + Wf * [(B/4)^2 + (H/2)^2]/9.8$

$Ipc = 1/4 * Bc^2 * Wc/9.8$

④主桁の極慣性モーメントIpsの算出

回転中心は桁のみを考えたときの重心と仮定



H1＝H／2－t'／2

H2＝（H／2－t'）／2

図－３・３・９　主桁の極慣性モーメント模式図

断面の1/4を考えIpを算出

$Ip=\int (x^2+y^2)dm$

①,②,③,④の各重量		①,②,③,④のx，y	
W①	t'・b×ρ	x①=B/2−b/2	y①=H/2−t'/2
W②	t'・(H/2−t')×ρ	x②=B/2−b+t'/2	y②=(H/2−t')/2
W③	4t'・(H/2−t')×ρ	x③=B/2−2t'	y③=(H/2−t')/2
W④	8.75/4 tf/m	x④=B/2−b/2	y④=H/2

①,②,③,④の極慣性モーメント

Ips①　$t'\cdot b\times\rho\times[(B/2-b/2)^2+(H/2-t'/2)^2]$

Ips②　$t'\cdot(H/2-t')\times\rho\times[(B/2-b+t'/2)^2+\{(H/2-t')/2\}^2]$

IPS③　$4t'\cdot(H/2-t')\times\rho\times[(B/2-2t')^2+\{(H/2-t')/2\}^2]$

IPS④　$8.75/4\ tf/m\times[(B/2-b/2)^2+(H/2)^2]$

全断面の極慣性モーメント

Ips＝4×(Ips①＋Ips②＋Ips③＋Ips④)

H＝3mの時、表－3・3・14のようになる。

表－3・3・14　極慣性モーメントの計算表

	W(tf/m)	X(m)	Y(m)	$W \cdot X^2$	$W \cdot Y^2$	$W \cdot X^2 + W \cdot Y^2$
①	2.536	14.167	1.491	508.859	5.633	514.492
②	0.221	5.676	0.741	7.116	0.121	7.238
③	0.884	22.629	0.741	452.428	0.484	452.913
合計	3.640			968.404	6.239	974.642
④	4.375	14.167	1.500	878.018	9.844	887.861

IP＝ΣIPXY(箱部)×4＋④×2/9.8 ＝579 $t \cdot m \cdot sec^2/m$

ケーブルの極慣性モーメント：Ipc

$Ipc = (1/4) \cdot Bc^2 \cdot Wc/9.8 = 891\ t \cdot m \cdot sec^2/m$

Bc：ケーブル間隔

Wc：ケーブル重量

全体の極慣性モーメント：Ip

$Ip = Ips + Ipc = 579 + 891 = 1470\ t \cdot m \cdot sec^2/m$

⑤ねじり定数Ｊの算出

２箱断面のねじり定数の算出には、換算板厚を考慮する方法[*1)]などがあるが、連結トラス部材の影響も同時に考慮することを考え、ISAS2により、長さ45.332m（2ブロック分）のモデルを用いて解析し算出した。

解析によると、片端に1.0kgf･mのモーメントを載荷し回転変位を算出した。
解析結果として以下の回転変位θxが生じた。
H=3mで6.297516E-10rad、H=5mで2.803655E-10rad、H=7mで1.578933E-10rad
せん断弾性係数Ｇ＝8.0769×10^{9}kgf/m^{2}を用い下式によりＪを算出した。

$$\therefore \quad J = \frac{1.0}{8.0769\times10^{9}\cdot(\theta x/45.332)}$$

⑥計算結果一覧

表－３・３・１５　補剛桁基本断面諸量一覧

断面諸量計算値				
摘　　要		H=3m	H=5m	H=7m
板厚	:t　mm	12.5	10.0	9.0
換算断面積	:A　m^2	1.54	1.53	1.51
断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ	:Iy　m^4	2.17	5.26	10.03
	:Iz　m^4	288.2	290.9	296.2
ねじり定数	:Jt　m^4	8.91	20.02	35.55
主桁極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	:Ips t･m･sec^2/m	579	631	663
ｹｰﾌﾞﾙ極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	:Ipc t･m･sec^2/m	891	891	891
質量極慣性ﾓｰﾒﾝﾄ	:Ipm t･m･sec^2/m	1470	1522	1554

*1)中村・長井他：合成補剛桁を有する超長大吊橋の提案；橋梁と基礎　1992年12月

⑦ケーブル径

ケーブル断面積Ａは以下の式より求めた。

$$A = \frac{Wc}{\rho g} = 2.164\ m^2\ (1本分 = 1.082\ m^2)$$

Wc：荷重（16.99 tf/m）

ρg：7.85tf/m^3

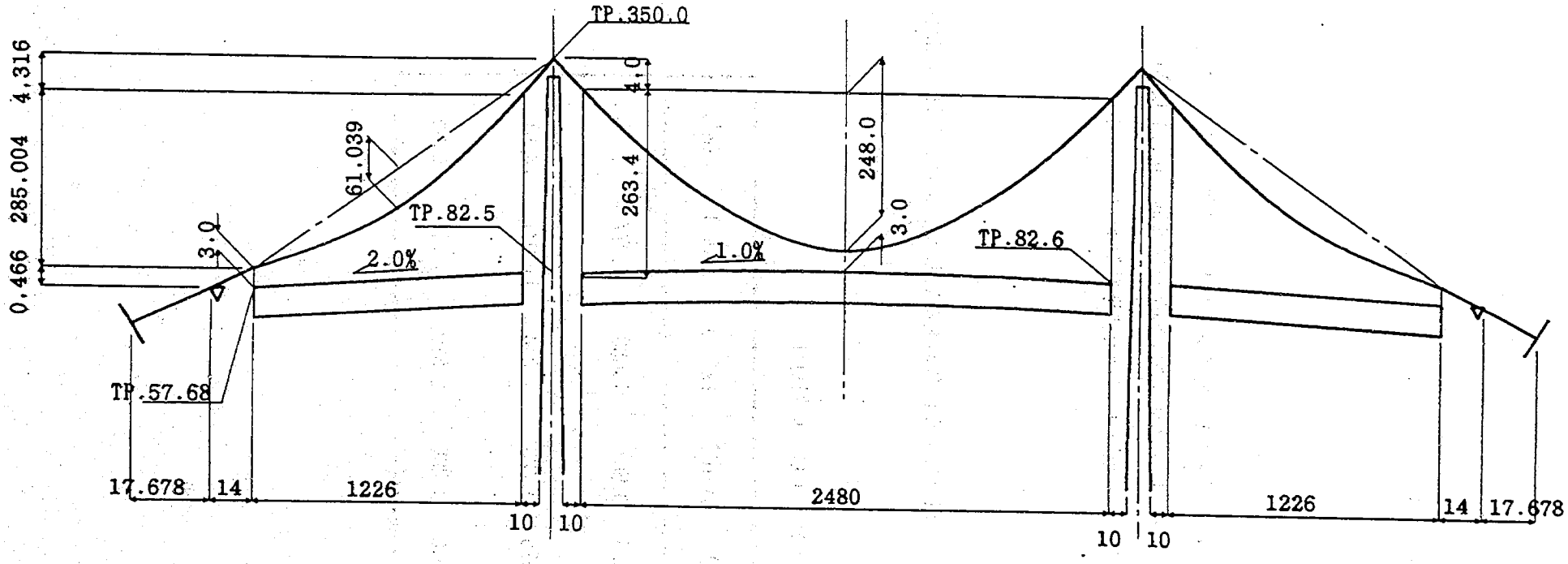
この時の見かけの径は1.174mとなり、ラッピングワイヤー径を来島大橋を参考に 4mmとすると、ラッピングを除くケーブル径は1.166mとなる。また、ラッピングを 除く純ケーブル断面積は1.068m^2となる。ここで、空隙率を仮定し、1本当たりの見かけのケーブル径を1.304mで構造計算を行う。ハンガー径は一箱桁に使用した断面を用いる。

⑧塔寸法

塔の寸法は、４つの橋より補完を行い次ページ以降のように断面を決定した。また、斜材寸法は因島大橋を参考に表－３・３・１６の断面とする。

表－３・３・１６　塔斜材寸法

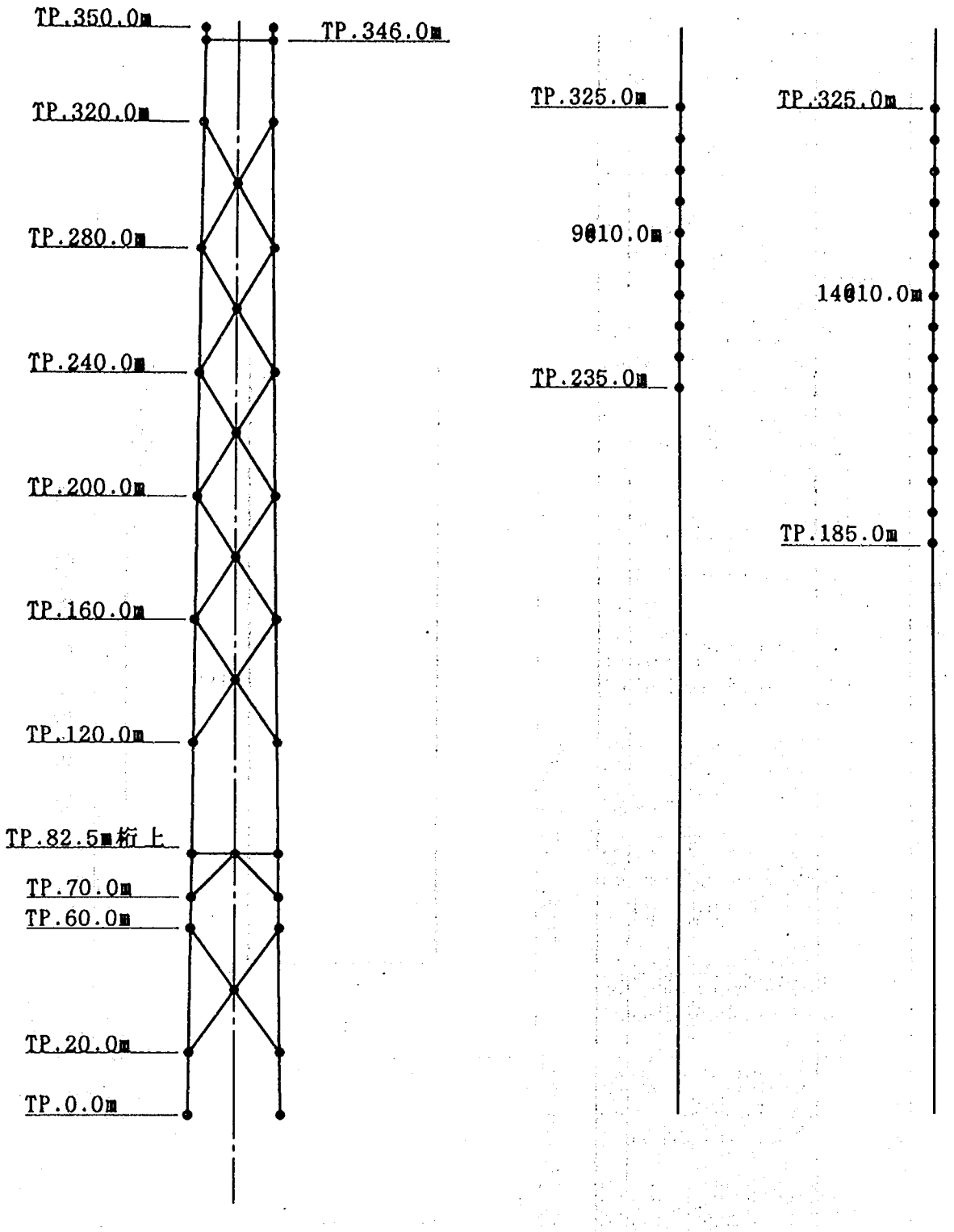
	A	B	t(m)	A(m^2)	Ix(m^4)	Iy(m^4)	J(m^4)
上部水平材	8.347	3.00	0.025	0.567	1.030	4.977	2.71
下部水平材	11.451	3.00	0.025	0.723	1.374	11.071	4.01
斜　　材	4.000	3.20	0.020	0.288	0.510	0.714	0.90



図－３・３・１０　橋梁諸寸法

$$Wd = 25.7\ tf/m^2$$

$$Hd = \frac{Wd \cdot L^2}{8 \cdot f} = 79670\ tf$$



塔モデル図　　斜材取付け位置図　　予備節点

図－３・３・１１　塔解析モデル図

表－３・３・１７　塔断面諸量

	ケーブル反力 (tf/片側)	塔頂高 (m)	断面性能 塔頂部 AA(m2)	Ix(m4)	Iy(m4)	断面性能 塔基部 AA(m2)	Ix(m4)	Iy(m4)	断面寸法 塔頂部(m) (A×B)	断面寸法 塔基部(m) (A×B)
大島大橋	6633	88.35	0.500	1.325	0.910	0.512	0.908	0.954	3.3 × 3.2	3.3 × 4.3
因島大橋	10788	135.85	0.703	1.423	0.996	1.005	4.597	1.633	3.2 × 4.0	3.2 × 5.5
南備讃瀬戸大橋	34863	179.55	1.692	9.866	-----	3.237	36.415	-----	5.1 × 7.3	5.1 × 11.3
明石海峡大橋	49890	282.80	2.555	25.880	13.500	4.281	83.910	23.300	6.6 × 10.0	6.6 × 14.8
2500m級	39835	350.00	2.100	15.814	8.800	3.500	52.195	15.060	5.6 × 8.3	5.6 × 12.4
3000m級	76000	408.00	3.700	72.093	33.622	6.647	211.034	53.147	8.5 × 13.3	8.5 × 20.2
2500m剛性向上	79670	350.00	3.870	63.299	33.582	7.000	211.260	58.549	5.6 × 8.3	5.6 × 12.4

ねじり剛性

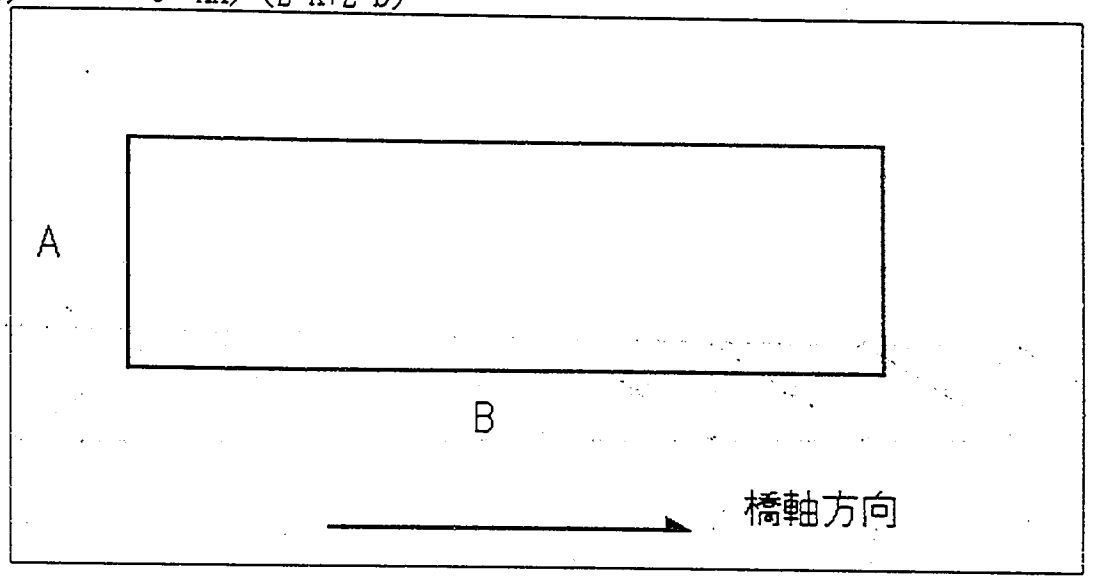
$J=2 \cdot t \cdot (A-t)^2 \times (B-t)^2/(A+B-2 \cdot t)$　　$t=AA/(2 \cdot A+2 \cdot B)$

2500m級
塔頂部
t=0.0755m, J=22.67m^4

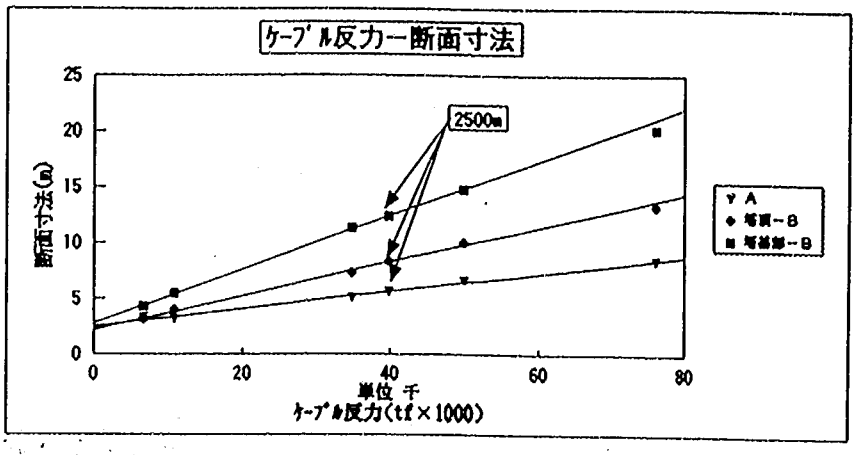
塔基部
t=0.0972m, J=50.04m^4

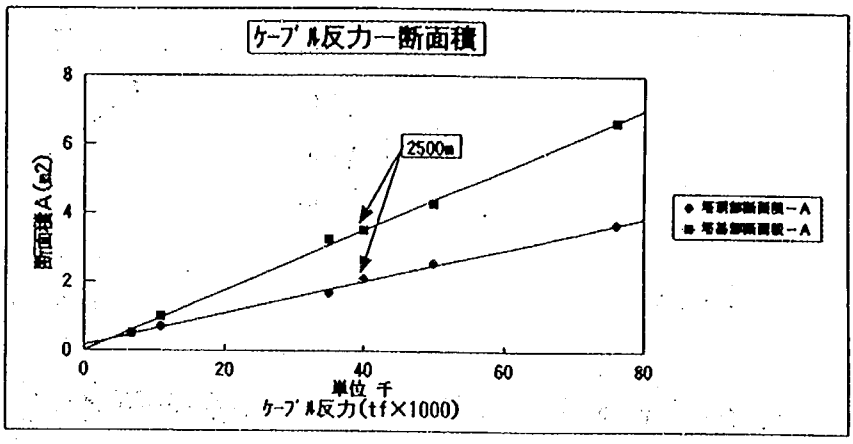
明石海峡大橋
塔頂部
J=15.00m^4

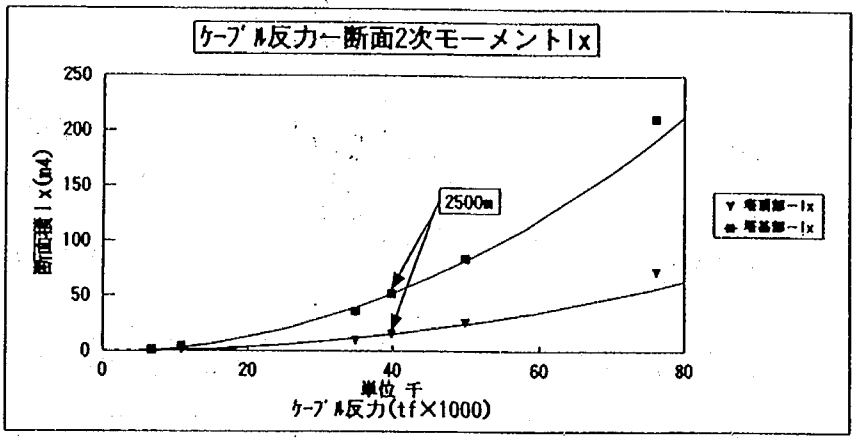
塔基部
J=36.18m^4

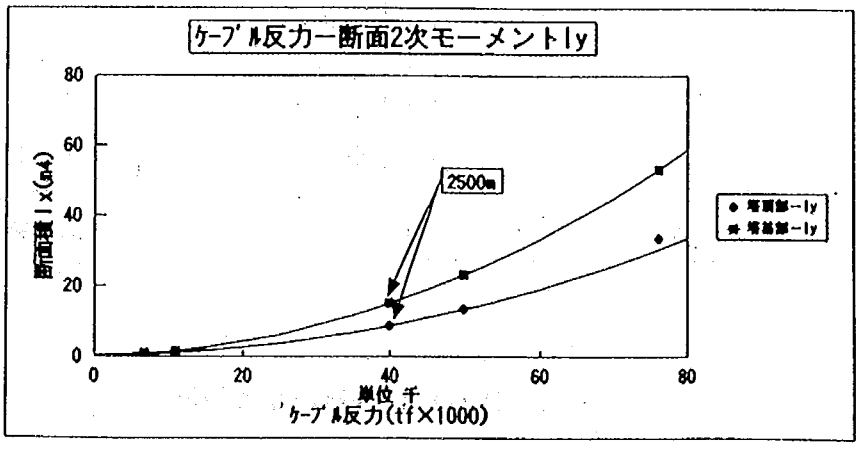


図－３・３・１２　塔断面模式図





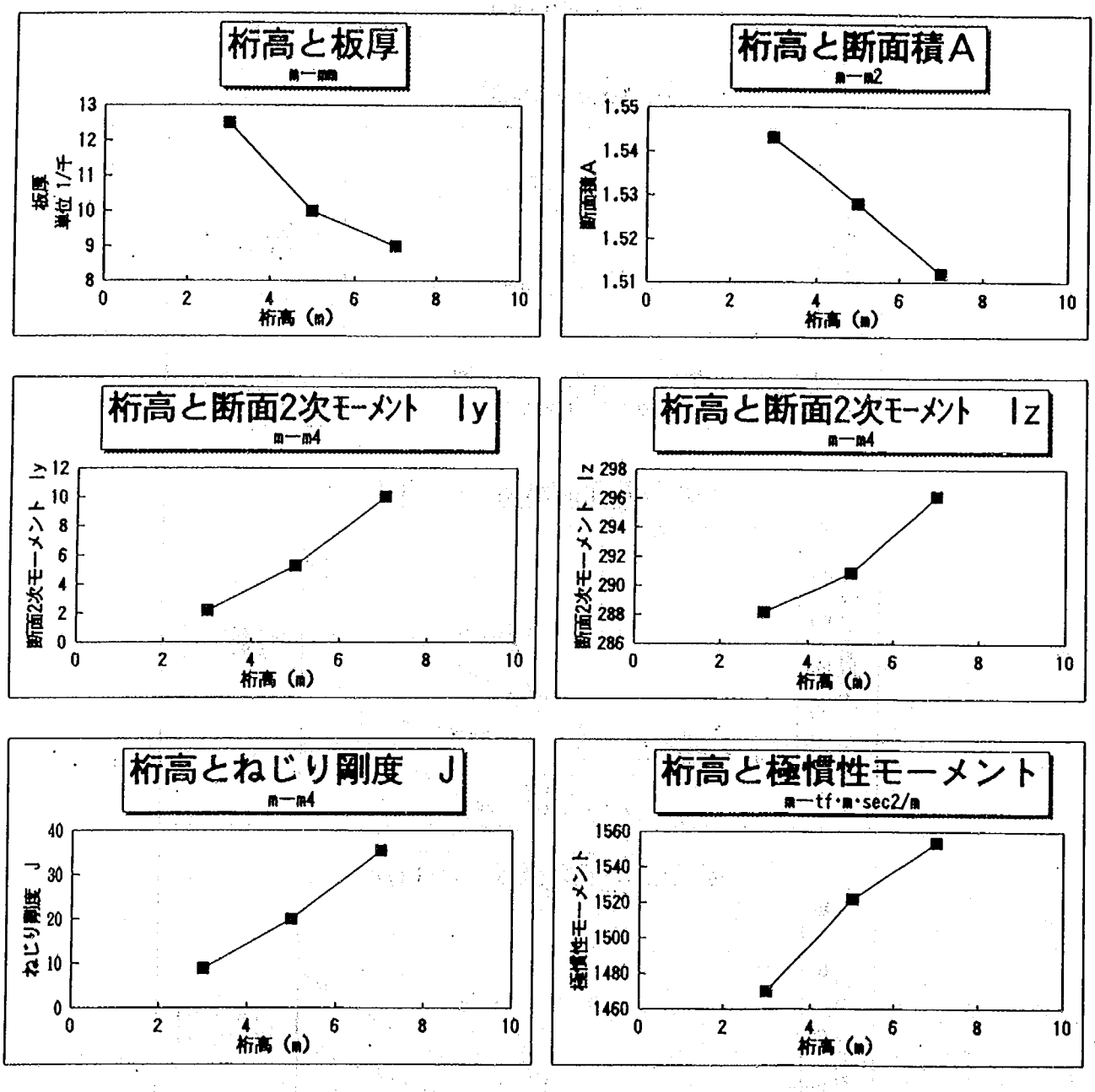




図－３・３・１３　ケーブル反力ー塔断面諸量

表－３・３・１８　桁高別断面諸量

		板厚(m)	A(m2)	Iy(m4)	Iz(m4)	J(m4)	極慣性モーメント
桁高	H=3m	0.0125	1.54	2.17	288.20	8.91	1470
	H=5m	0.0100	1.53	5.26	290.90	20.02	1522
	H=7m	0.0090	1.51	10.03	296.17	35.55	1554



図－３・３・１４　桁高－断面諸量

4）追加部材の剛性

基本断面以外の場合の斜材、クロスハンガー等の剛性は実際には詳細設計により計算しなければならないが、簡易的に基本の吊橋と比較するために以下のように諸量を決定した。

ＩＳＡＳⅡはプレストレスを考慮できないため、ケーブル・ハンガー等の部材の剛性Iv'を以下のように求めている

$$\therefore \quad Iv' = \frac{12 \cdot E \cdot Iv + PL_0^2}{12 \cdot E} \qquad \text{-----式（３・３・４）}$$

ここに、

Iv ： 部材の第一基準面内断面二次モーメント

E ： 弾性係数

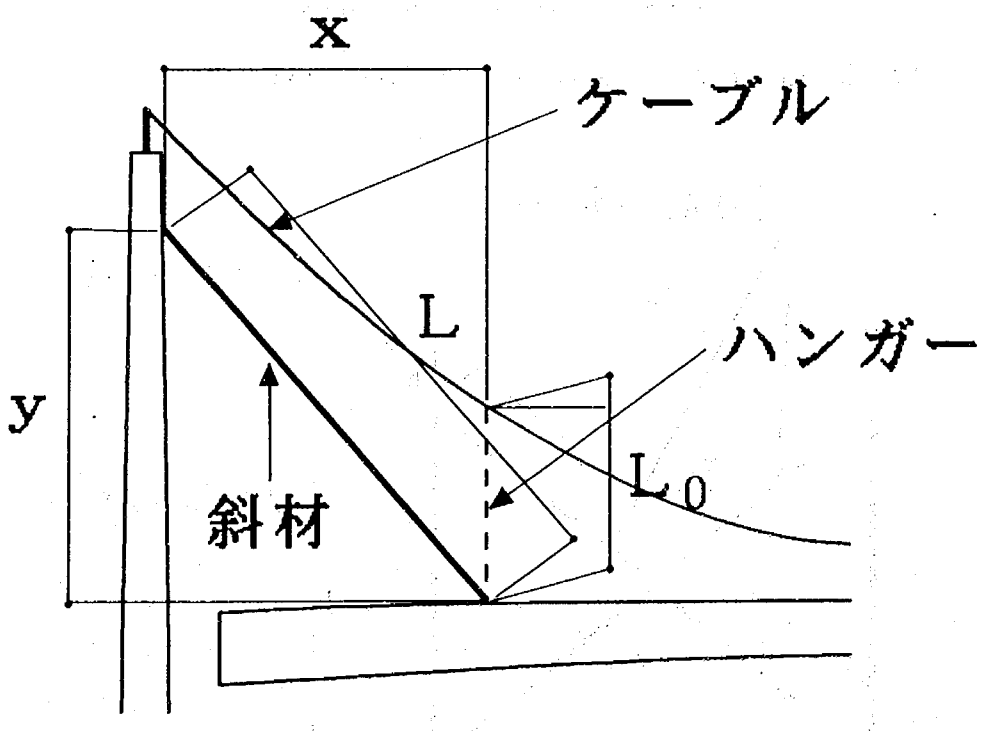
L_0 ： 初期要素長

L ： $L_0 + \triangle L$

ここで、ハンガーは張力のみを考慮するので初期断面二次モーメントIvは0であり、式（３・３・４）は

$$\therefore \quad Iv' = \frac{PL_0^3}{12 \cdot E} \qquad \text{-----式（３・３・５）}$$

となる。

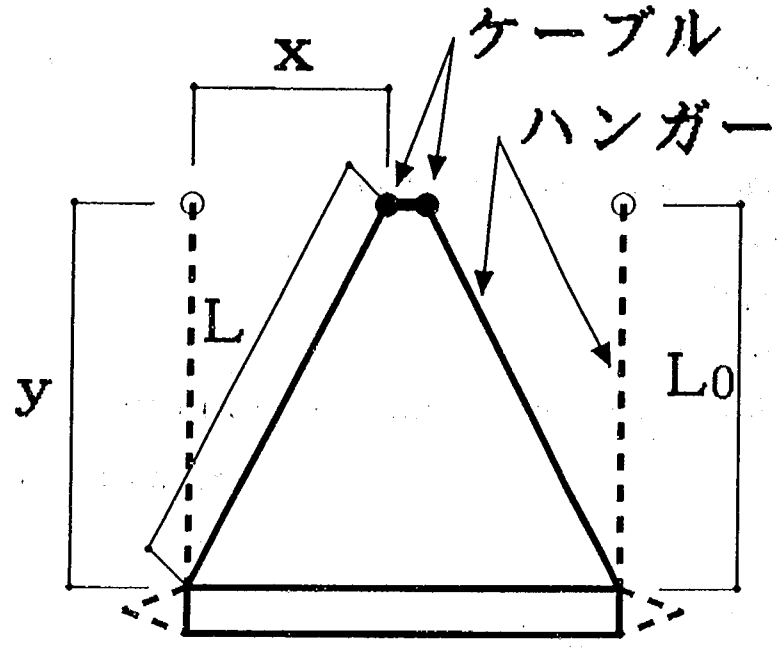


図－３・３・１５　斜材の剛性についての模式図

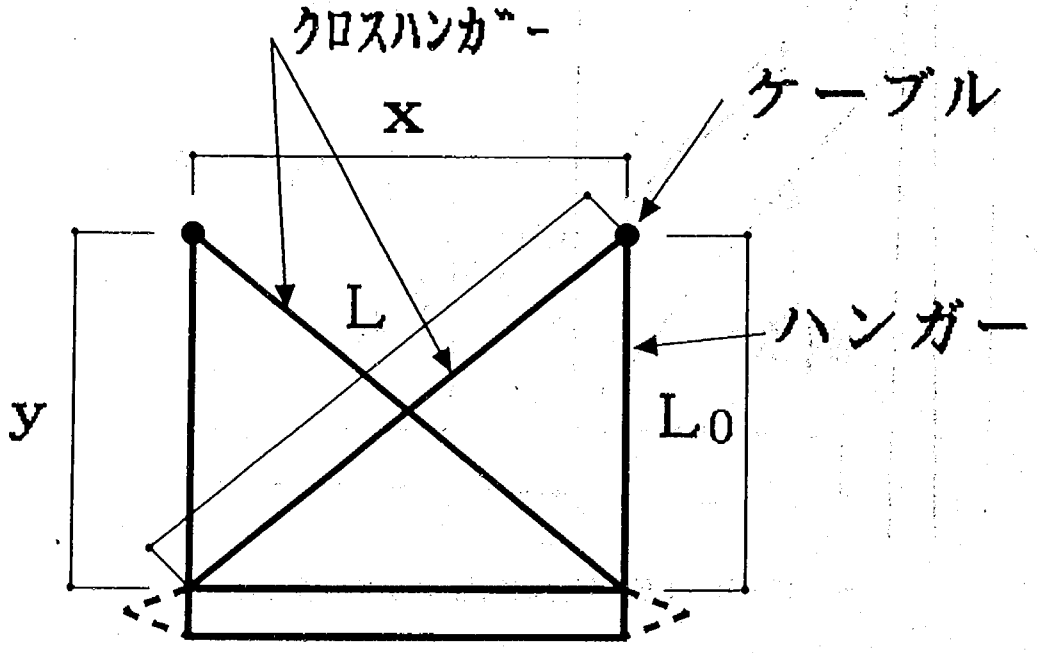
斜材タイプではハンガーの一部を斜材に変更するため変更前のハンガーの剛性と同量の値を斜材の剛性に置換すればよい。

入力した値は図－３・３・１５より断面積Ａとねじり定数Ｊを Ｌ／ｙ倍としている。

ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙのハンガー、ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰも同様に断面積Ａとねじり定数Ｊを Ｌ／ｙ倍としている。



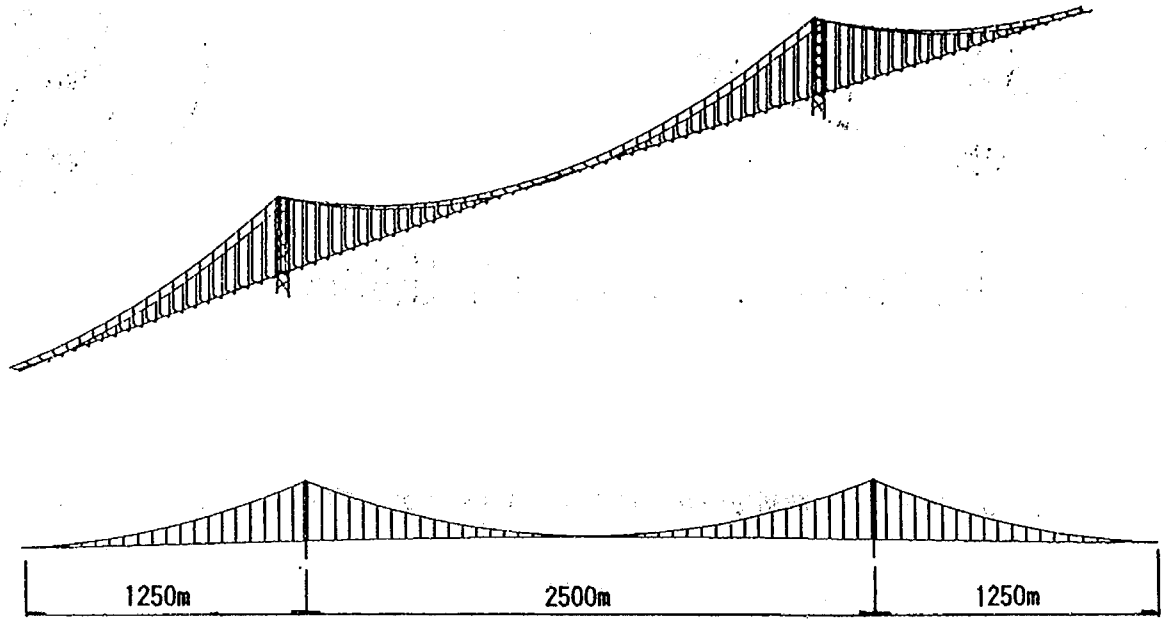
図－３・３・１６　ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙのハンガー剛性についての模式図



図－３・３・１７　ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰの剛性についての模式図

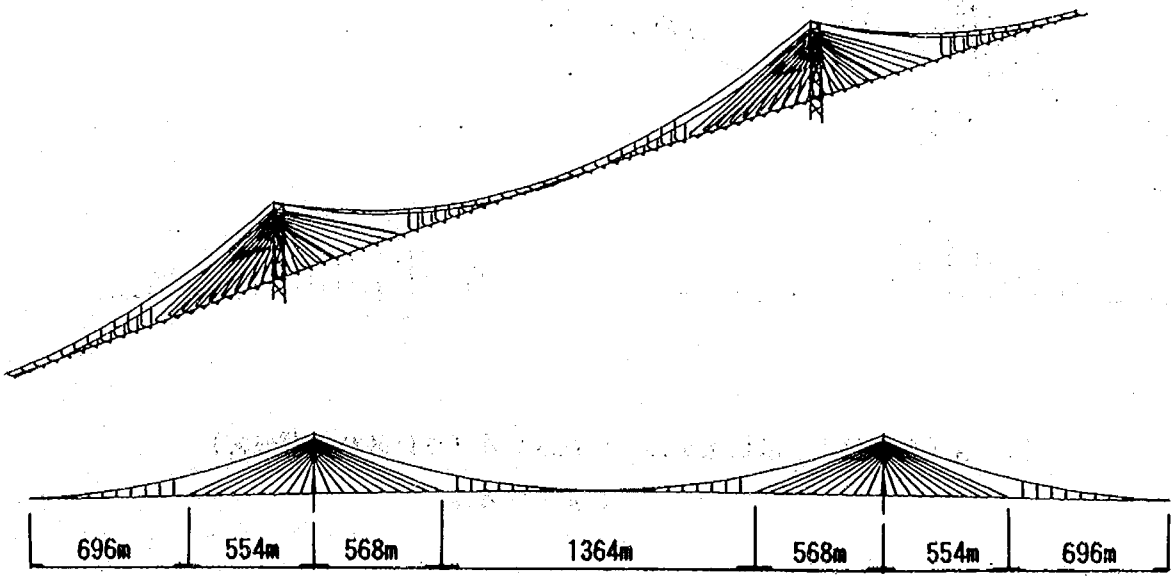
5）解析モデル

固有値解析に用いたフレームモデルを図－３・３・１８～図－３・３・２８に示す。



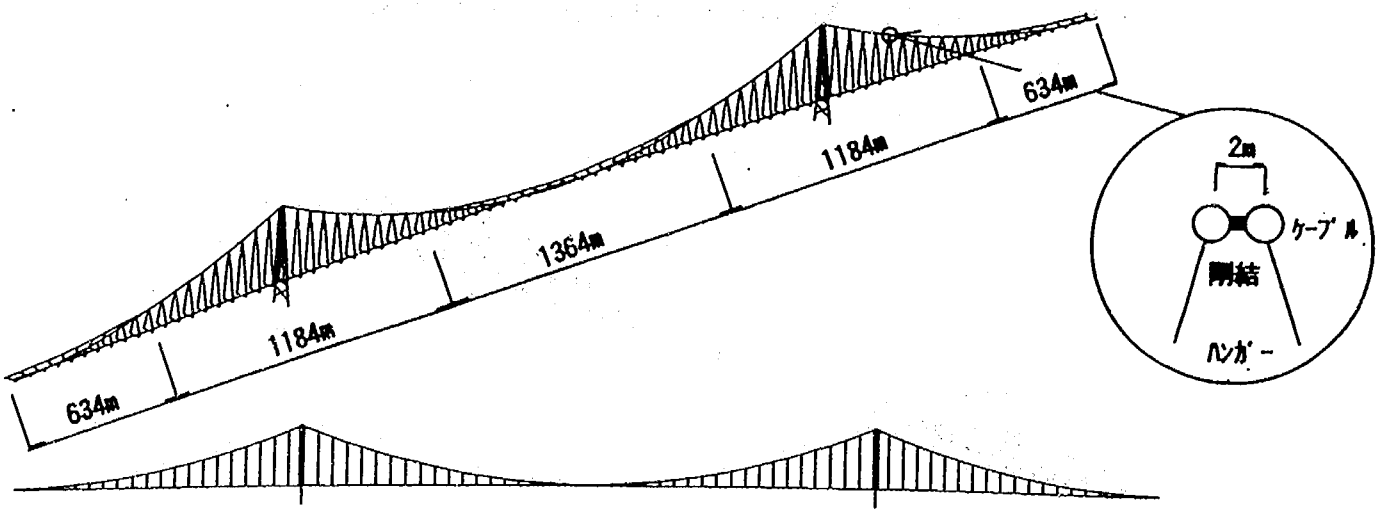
図－３・３・１８　解析モデル－ＣＡＳＥ１（基本ケース）

ＣＡＳＥ１Ｔ

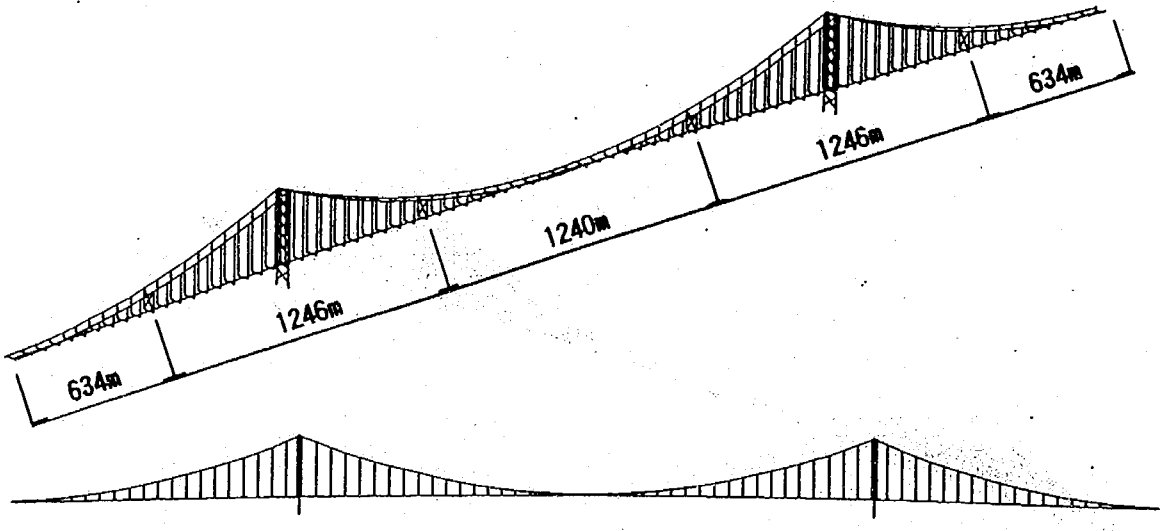


図－３・３・１９　解析モデル－ＣＡＳＥ２（ステイケーブル）

ＣＡＳＥ２Ｇ

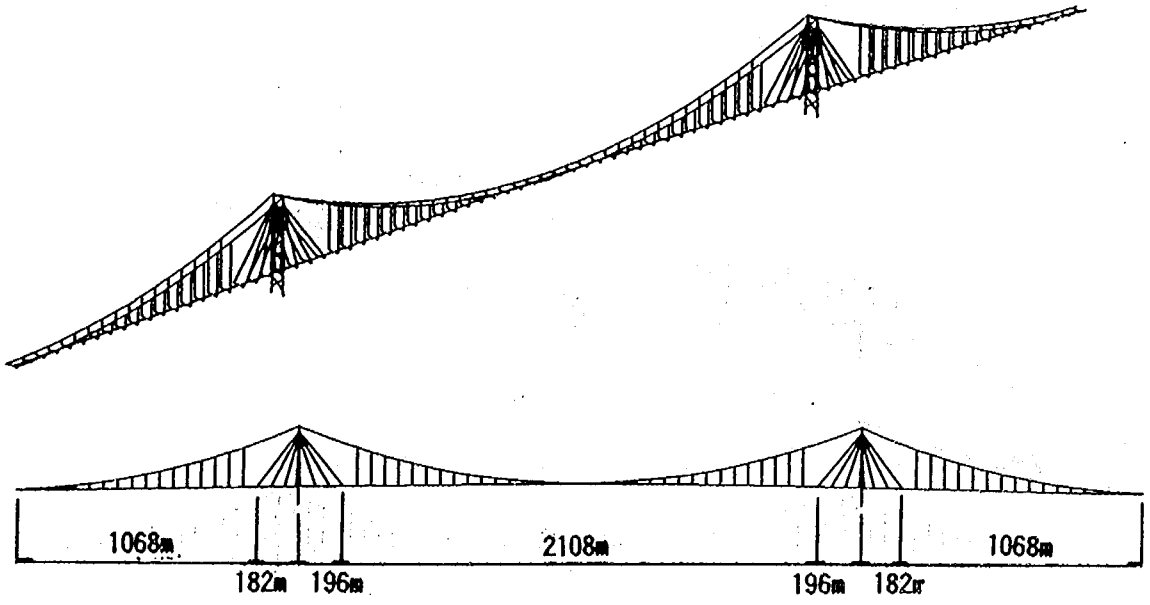


図－３・３・２０　解析モデル－ＣＡＳＥ３（モノケーブル）



図－３・３・２１　解析モデル－ＣＡＳＥ４（クロスハンガーＸ）

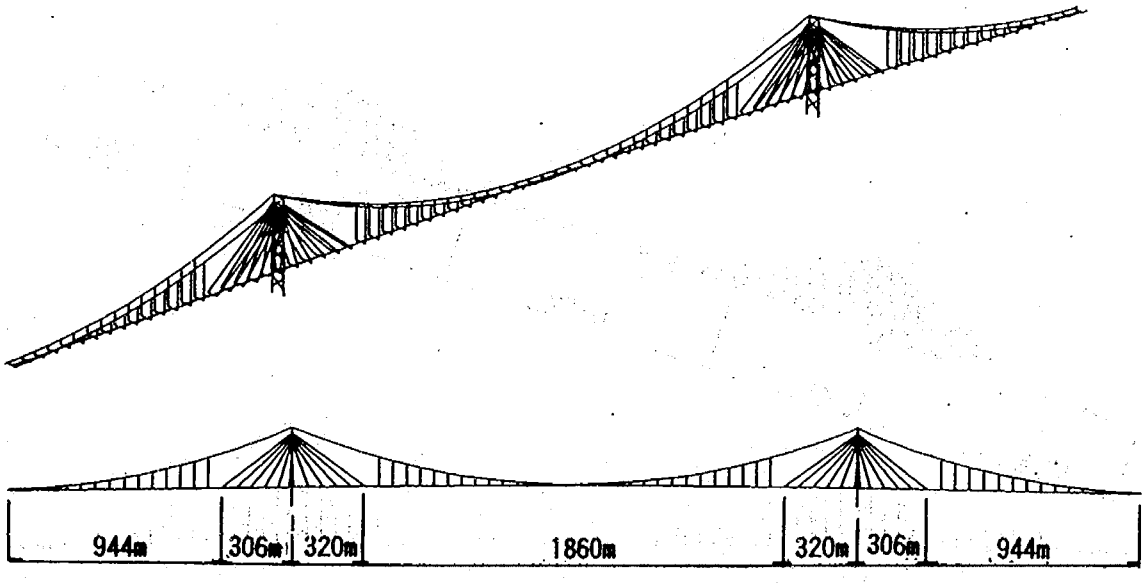
ＣＡＳＥ４４



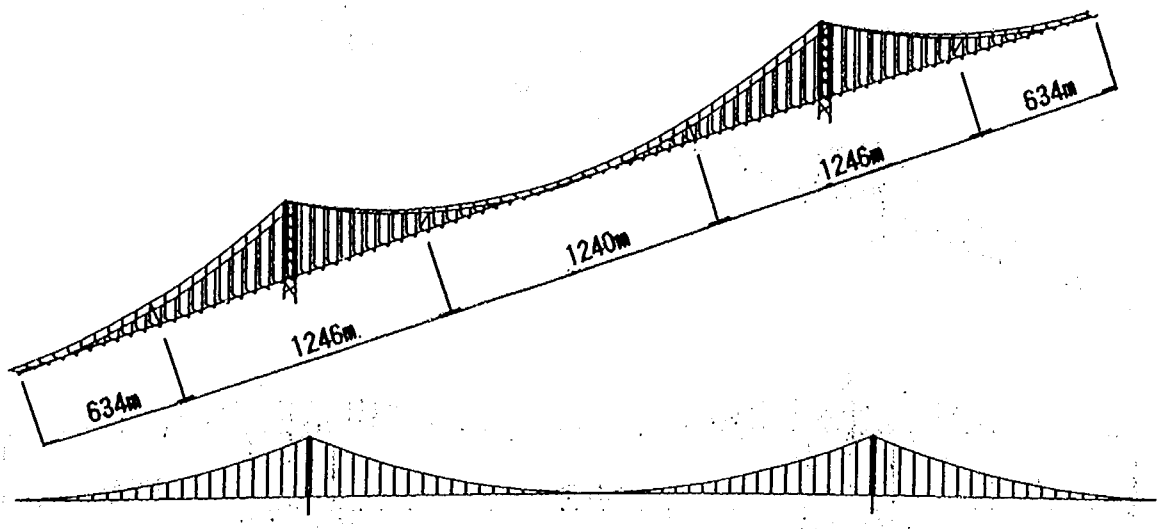
図－３・３・２２　解析モデル－ＣＡＳＥ２２（ステイケーブルL/12）

ＣＡＳＥ２３

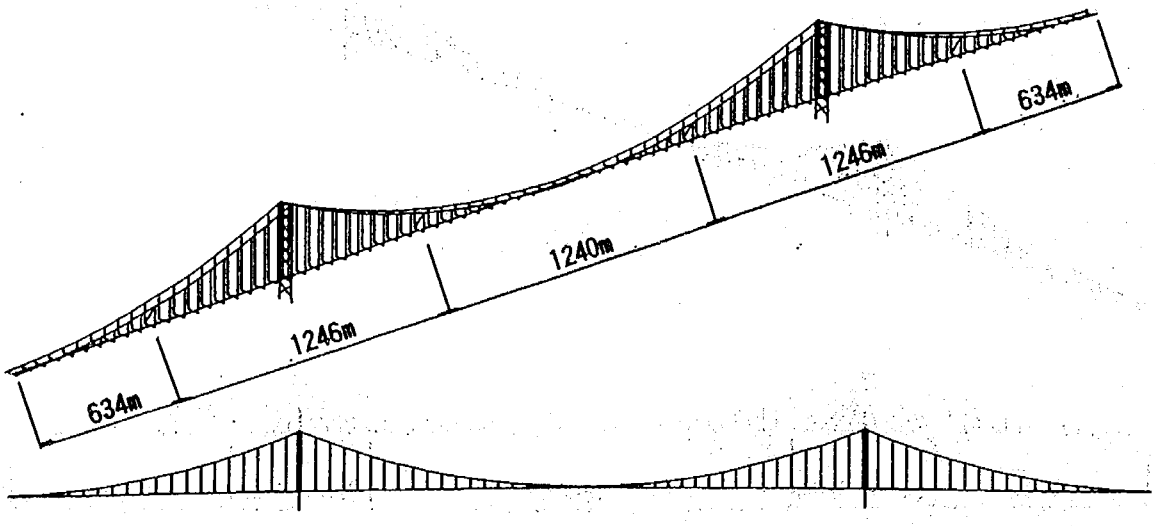
ＣＡＳＥ２９



図－３・３・２３　解析モデル－ＣＡＳＥ２４（ステイケーブルL/8）

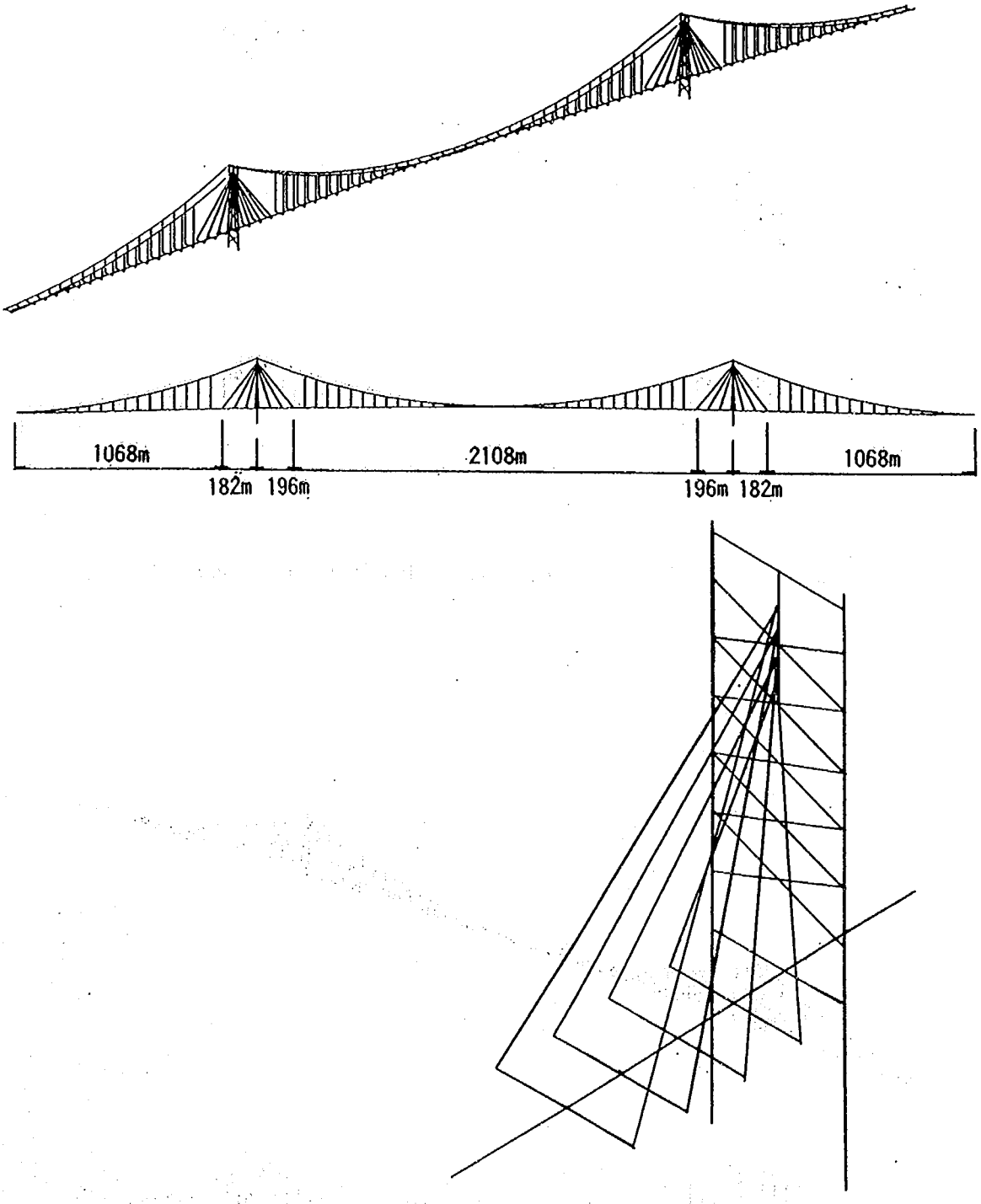


図－３・３・２４　解析モデル－ＣＡＳＥ４２（クロスハンガー交互片引き型）



図－３・３・２５　解析モデル－ＣＡＳＥ４３（クロスハンガー片側片引き型）

ＣＡＳＥ４６

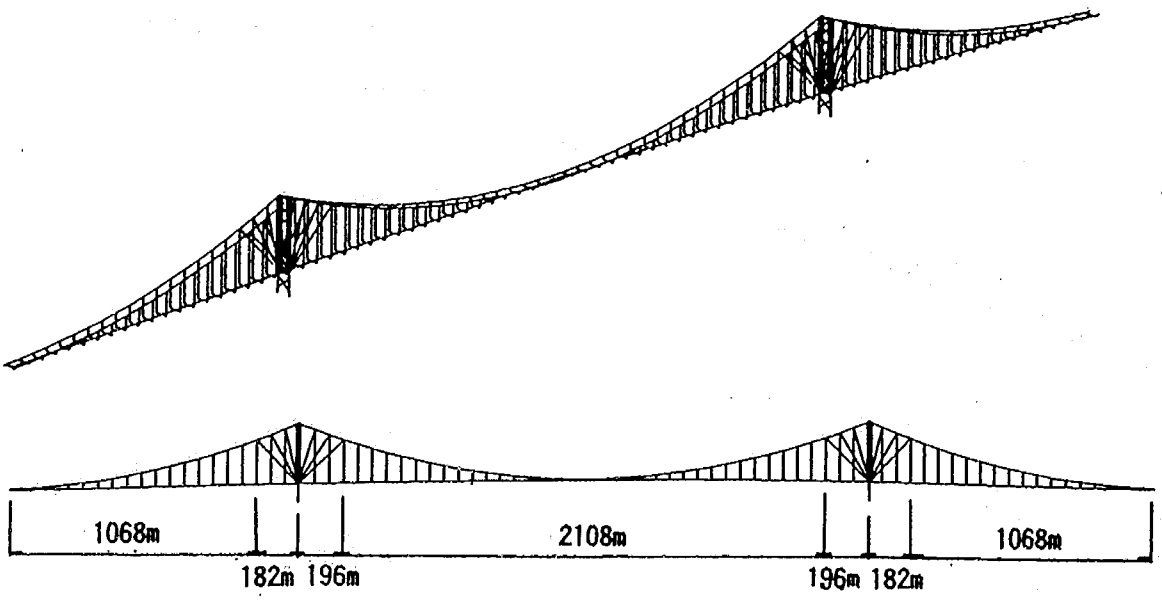


図－３・３・２６　解析モデル－ＣＡＳＥ２５（ステイケーブル斜め張り型）

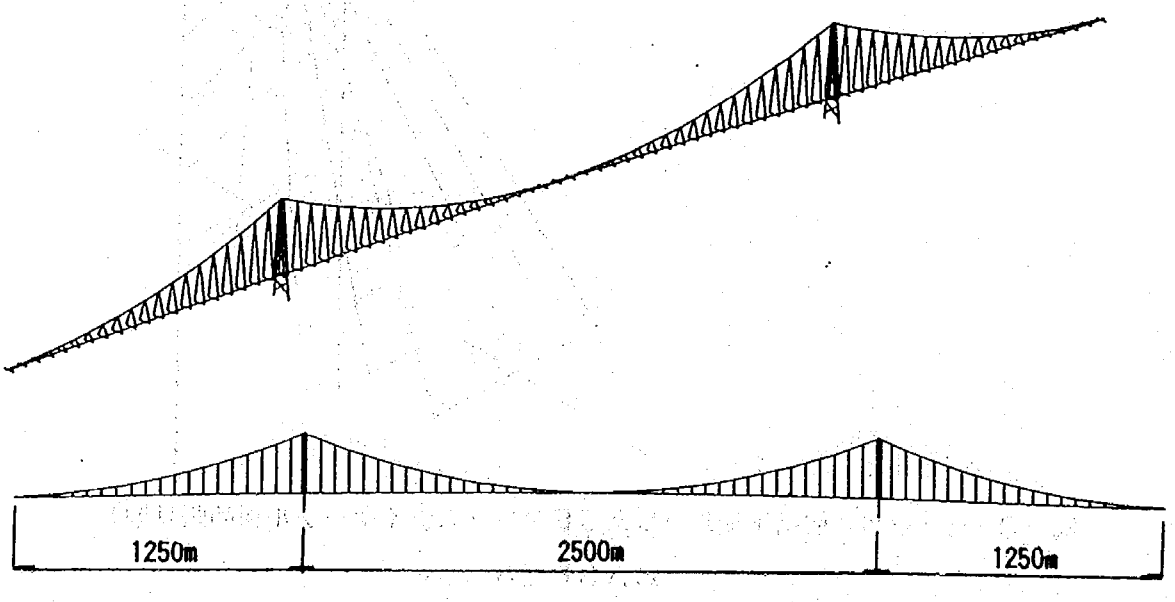
ＣＡＳＥ２６

ＣＡＳＥ２７

ＣＡＳＥ２８



図－３・３・２７　解析モデル－ＣＡＳＥ２Ｙ（スティシステム）



図－３・３・２８　解析モデル－ＣＡＳＥ３１
シングルモノケーブル（全区間モノケーブル）

3．3．2　結果

（1）結果の評価方法

1）等価質量と等価極慣性モーメント

固有値解析結果で得られるモード図だけでは、振動モードが判定できにくい形がある場合、また二次元のフラッター判定式を用いる場合にモードの相似を反映するために等価質量と等価極慣性モーメントを算出した。以下に算出方法を示す。

$$\text{等価質量} = \frac{\int m\phi^2 dx}{\int \phi_z^2 dx}$$

$$\text{等価極慣性モーメント} = \frac{\int m\phi^2 dx}{\int \phi_\theta^2 dx}$$

ここで、

$m\phi^2$：$[\phi]^T[m][\phi]$となり

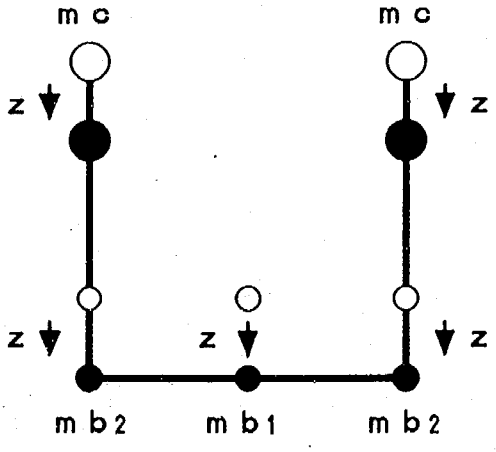
$\int m\phi^2 dx$はＩＳＡＳ２でOUTPUTされる一般化質量を使用

ϕ_z　：着目する部材の自由度（変位成分）

ϕ_θ　：着目する部材の自由度（回転成分）

また、たわみ１次・ねじれ１次の例を図－３・３・２９と図－３・３・３０に示す。

・たわみ１次の場合



一般化質量$=(2mc+mb_1+2mb_2)x^2=Mx^2$

$$\text{等価質量} = \frac{Mx^2}{x^2} = M$$

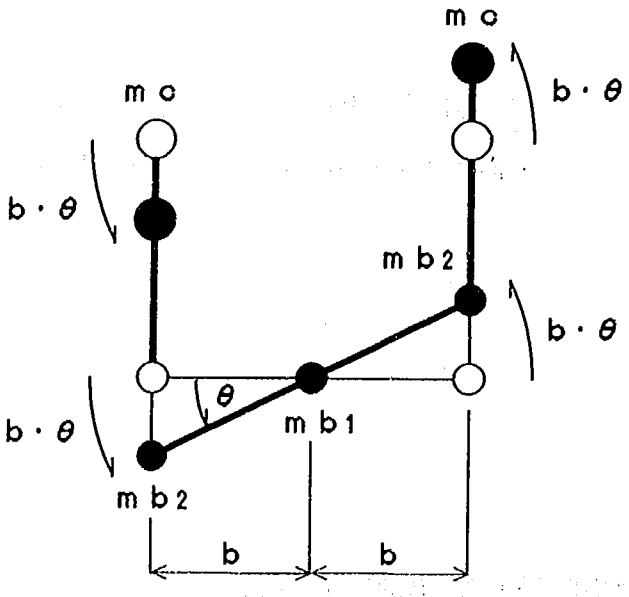
等価極慣性モーメント

$$= \frac{Mx^2}{0} = \infty$$

図－３・３・２９　たわみ１次模式図

・ねじれ１次の場合

一般化質量＝$(2mc+2mb_2)b^2\theta$



$$\text{等価質量}=\frac{(2mc+2mb_2)b^2\theta^2}{0}$$

$$=\infty$$

等価極慣性モーメント

$$=\frac{(2mc+2mb_2)b^2\theta^2}{\theta^2}$$

$$=(2mc+2mb_2)b^2$$

図－３・３・３０　ねじれ１次模式図

2）Selbelg式によるフラッター限界風速

固有値解析結果だけでの評価のために式（３・３・６）に示すSelbergのフラッター発現風速の推定式（平板のフラッター発現風速値）を用い評価を行った。

$$VF=0.44\cdot\omega_0\cdot B\sqrt{\{1-(\omega_z/\omega_0)^2\}\cdot\frac{\sqrt{\nu}}{\mu}} \qquad \text{---------式（３・３・６）}$$

ここに、

B　：桁幅(m)

ν　：$8\cdot r^2/B^2$

μ　：$\pi\cdot\rho\cdot B^2/(2\cdot m)$

ω_0　：ねじれ円振動数

ω_z　：たわみ円振動数

式（３・３・１２）を、重量W(tf/m)、極慣性モーメントΦ(tf・m²/m)、たわみ振動数ｆz(Hz)、ねじれ振動数ｆo(Hz)で表現すると以下のようになる。

$r^2=\Phi/W$, $\omega_z=2\cdot\pi\cdot f_z$, $\omega_0=2\cdot\pi\cdot f_0$　より

$$VF=0.44\cdot2\cdot\pi\cdot f_0\cdot B\sqrt{\{1-(f_z/f_0)^2\}\cdot\frac{4\sqrt{2}\cdot\sqrt{W\cdot\Phi}}{\pi\cdot\rho\cdot g\cdot B^3}}$$

$$=1.185\cdot f_0\sqrt{\{1-(f_z/f_0)^2\}\cdot\sqrt{W\cdot\Phi}/(\rho\cdot B)}$$

空気密度は解析対象となる風速が暴風時であることを考え以下の値を用いる。

$\rho=0.125\times10^{-3}\,tf\cdot sec^2\cdot m^{-4}$

ゆえに、Selbergのフラッター発現風速は式（３・３・７）のようになる。

$$VF=105.99\cdot f_0\sqrt{\{1-(f_z/f_0)^2\}\cdot\sqrt{W\cdot\Phi}/(\rho\cdot B)} \qquad \text{---------式（３・３・７）}$$

（2）固有値解析結果

各ケースの固有値解析結果の固有振動数，一般化質量，等価質量，等価極慣性モーメント，および振動モード形状の一覧を表－３・３・１９～表－３・３・４６に示している。

・ステイケーブルシステムについて

ステイケーブルシステムでは、ねじれの振動数も上昇するが鉛直たわみの２次成分が大きく上昇していることが特徴づけられる。ステイケーブルシステムは塔と連結しているため、ステイケーブル設置点の鉛直方向の拘束が増加し、鉛直成分のたわみに大きく影響するためである。この影響はステイケーブルの位置により変化し、ステイケーブル区間が長い（本数が多い）ほど固有振動数は大きくなっている。一方、ねじれの固有振動数は若干の向上しか示していない（表－３・３・２４～表－３・３・２６）。これは、桁のねじれ振動時に塔も同時にねじれるため、塔の剛性によりねじれの固有振動数が決定づけられるためであると考えられる。この時、基本断面と塔の動きは異なり、基本断面では塔の面内剛性がねじれ振動に影響するが、ステイケーブルシステムでは面外剛性も同時に影響してくる。この時、塔の水平材が意味を持ち２本の塔が一定の動きを呈するほどねじれの振動数は上昇すると考えられる。

表－３・３・２３と表－３・３・３８を比較すると、スイケーブル区間が同じ位置であるなら、ステイケーブルを斜めに張った場合の方がねじれの振動数は大きくなっており、斜めに張ることによりステイケーブルの軸力が桁に伝わり、見かけ上剛性が増加したためであると考えられる。

ステイケーブル自体の剛性を増加させるとねじれの固有振動数も若干上昇するが、ハンガーに比べて斜材の占める体積は多くなり全体的な剛性が増加するためであり、ケーブルシステム自体の効果ではないと考えられる。

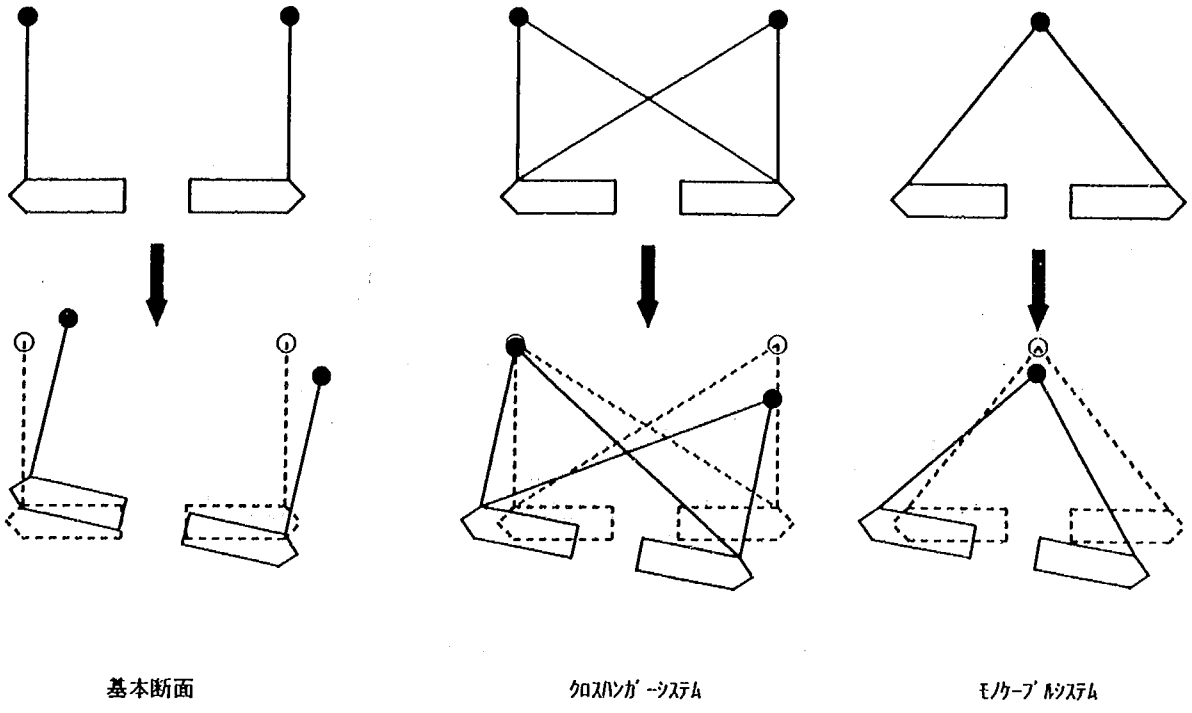
表－３・３・２３と表－３・３・４４を比較すると、ケーブル重量が減少した場合、ねじれの固有振動数は上昇し、極慣性モーメントの減少に伴う一般的な傾向をしめしているが、たわみの振動数は全体重量が減少したにもかかわらず大きくなっている。モード形状としては、高次のケーブルモードの振動数が著しく大きくなっている。

・モノケーブルシステムについて

モノケーブルシステムでは鉛直たわみの固有振動数の変化は少ないが、ねじれの固有振動数は大きく上昇している。基本断面で桁がねじれるためにはケーブルが手前側と奥側で別方向に動くが、モノケーブルシステムではケーブルが一体化し、両桁端に結ばれる三角形構造になり、ねじれ時に桁の水平変位を伴うため、桁の復元力によりねじれの固有振動数が上昇する（図－３・３・３１）。そして、ハンガーが斜めになることにより、ハンガー軸力が橋軸直角方向に分配され桁の剛性が見かけ上増加した様になり、ねじれの固有振動数が上昇する事も考えられる。また、モノケーブルシステムではケーブル間がなくなることにより極慣性が減少しねじれの固有振動数が上昇することも明らかである。

モノケーブルシステムでケーブルシステム形式ををMonoduoタイプにした方がシングルモノケーブル（単一なモノケーブルより）ねじれの固有振動数は上昇している（表－３・３・２２，表－３・３・４６）。これ

は、ケーブルを橋軸直角方向に角度を持たせることにより、ケーブル変化部でケーブル軸力が橋軸直角方向に分配される事によるのではないかと考えられる。



図－３・３・３１　ねじれ模式図

・クロスハンガーシステムについて

クロスハンガーシステムでは、モノケーブルシステムと同じことが言え、設置位置でねじれが拘束され、主径間が短い橋のような状態となりねじれの固有振動数が上昇している。この時、クロスハンガー部材の剛性はほとんど意味も持たず軸力を伝える断面積のパラメーターを与えることが固有値解析の上での条件となる。

表－３・３・１９　固有値解析結果　TYPE1-CASE1：桁高＝3m，基本断面

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kgf・sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg・sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg・m・sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,013,250	-----	4,275	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,814,870	23,450,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0718	10,135,700	5,727,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0797	4,272,430	-----	3,266	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0817	10,617,400	738,800	-----	4,805	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0978	7,719,740	-----	6,518	-----	3,179,000	**ねじれ対称１次**
7	0.1017	8,334,530	-----	8,183	-----	2,890,000	ねじれ対称２次
8	0.1026	4,651,180	-----	4,188	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1029	4,580,960	22,290,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1269	3,996,060	-----	1,501,000	-----	1,579,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1340	5,369,680	-----	5,334	-----	-----	水平たわみ対称２次
12	0.1364	1,036,410	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1364	1,036,280	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1367	2,104,310	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1369	4,520,870	-----	66,380	-----	1,857,000	ねじれ逆対称２次
16	0.1381	2,041,270	-----	-----	-----	-----	ケーブル
17	0.1392	6,062,380	21,470,000	-----	4,362	-----	鉛直たわみ逆対称３次
18	0.1405	4,538,780	11,320,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ対称３次
19	0.1411	5,852,290	9,459,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
20	0.1437	4,108,320	-----	8,056	-----	17,060,000	水平たわみ逆対称３次

表－３・３・２０　固有値解析結果　TYPE1-CASE2：桁高＝3m，ステイケーブル，L/4，A=1倍

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg・sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg・sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg・m・sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,023,300	-----	4,292	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0579	6,591,070	19,460,000	-----	4,547	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0778	7,207,890	4,871,000	-----	4,642	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0786	4,150,130	-----	3,111	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0949	5,842,970	481,900	-----	5,449	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0970	5,404,260	-----	4,420	-----	6,307,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1023	4,720,430	-----	4,243	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1025	5,124,180	-----	15,070	-----	2,111,000	**ねじれ対称１次**
9	0.1159	3,976,930	16,000,000	-----	4,731	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1268	3,397,960	-----	7,900	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1298	2,058,460	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1300	1,021,200	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1300	1,021,050	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1311	1,980,500	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1319	3,101,900	-----	10,710	-----	18,970,000	ケーブル
16	0.1334	2,807,150	-----	10,600	-----	36,460,000	ケーブル
17	0.1350	4,222,980	-----	5,672	-----	-----	水平たわみ対称４次
18	0.1372	6,150,940	-----	122,300	-----	2,328,000	ねじれ逆対称１次
19	0.1486	4,413,130	-----	6,054	-----	-----	水平たわみ対称５次
20	0.1487	3,430,120	1,559,000	-----	3,027	-----	鉛直たわみ逆対称３次

表－３・３・２１　固有値解析結果　TYPE1-CASE3：桁高＝3m，モノケーブル

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 X θ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0394	5,049,460	-----	4,268	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0557	7,790,570	23,380,000	-----	4,413	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0717	10,192,700	5,699,000	-----	4,397	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0806	4,323,480	-----	3,322	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0814	10,644,600	749,200	-----	4,796	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1018	4,101,710	-----	3,602	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1027	4,591,090	22,260,000	-----	4,400	-----	鉛直たわみ対称２次
8	0.1047	4,505,210	-----	4,089	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1365	5,709,440	-----	7,166	-----	13,040,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
10	0.1383	3,748,060	-----	9,542	-----	5,067,000	**ねじれ対称１次**
11	0.1384	6,136,890	21,170,000	-----	4,326	-----	鉛直たわみ逆対称３次
12	0.1394	4,508,280	11,610,000	-----	4,369	-----	鉛直たわみ対称３次
13	0.1403	5,953,560	8,820,000	-----	4,349	-----	鉛直たわみ逆対称４次
14	0.1438	4,129,710	-----	7,626	-----	9,421,000	ねじれ逆対称１次
15	0.1444	3,232,460	-----	14,410	-----	10,550,000	ねじれ逆対称２次
16	0.1446	6,355,710	21,880,000	-----	4,362	-----	鉛直たわみ対称４次
17	0.1509	7,432,800	-----	4,529	-----	12,340,000	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
18	0.1731	4,679,380	26,040,000	-----	4,242	-----	鉛直たわみ対称５次
19	0.2047	4,998,290	12,430,000	-----	4,096	-----	鉛直たわみ逆対称５次
20	0.2069	5,206,680	357,000	-----	4,222	-----	鉛直たわみ逆対称６次

表－３・３・２２　固有値解析結果　TYPE1-CASE4：桁高＝3m，クロスハンガー（X型，ｌ≠0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 X θ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,008,030	-----	4,280	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,814,790	23,390,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0719	10,150,500	5,749,000	-----	4,412	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0806	4,466,700	-----	3,408	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0818	10,638,000	733,100	-----	4,806	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0992	4,317,420	-----	3,744	-----	35,780,000	水平たわみ対称２次
7	0.1026	4,729,730	-----	4,260	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	4,581,380	22,320,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1220	4,669,240	-----	17,370	-----	2,734,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1392	6,038,630	21,840,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
11	0.1405	4,499,380	11,300,000	-----	4,389	-----	鉛直たわみ対称３次
12	0.1411	5,793,960	9,387,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
13	0.1415	3,708,240	-----	18,450	-----	5,974,000	ねじれ逆対称１次
14	0.1419	4,379,310	-----	9,462	-----	7,267,000	ねじれ逆対称２次
15	0.1421	5,179,300	-----	7,317	-----	9,208,000	水平たわみ対称３次
16	0.1453	6,737,150	22,900,000	-----	4,329	-----	鉛直たわみ対称４次
17	0.1567	5,980,390	-----	5,065	-----	11,520,000	水平たわみ対称４次
18	0.1624	4,725,540	-----	15,380	-----	3,626,000	ねじれ対称３次
19	0.1695	1,921,110	-----	-----	441,200	-----	ケーブル
20	0.1696	1,926,570	-----	-----	270,100	-----	ケーブル

表--３・３・２３　固有値解析結果　TYPE1-CASE22：桁高＝3m，ステイケーブル（L/12，A=1倍）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,010,740	-----	4,279	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0562	7,614,880	21,900,000	-----	4,433	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0731	9,103,410	5,740,000	-----	4,450	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0798	4,273,600	-----	3,267	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0839	9,211,660	701,200	-----	4,823	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0985	5,877,470	-----	5,014	-----	5,017,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1024	6,130,130	-----	13,190	-----	2,175,000	**ねじれ対称１次**
8	0.1026	4,678,280	-----	4,220	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1066	4,200,940	26,090,000	-----	4,475	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1316	4,279,720	-----	982,300	-----	1,574,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1337	5,209,530	-----	5,447	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1361	1,040,280	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1361	1,040,320	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1363	2,113,590	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1378	2,043,190	-----	-----	-----	-----	ケーブル
16	0.1405	6,595,660	-----	14,640	-----	3,357,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1438	3,271,300	-----	10,530	-----	16,190,000	水平たわみ逆対称３次
18	0.1445	5,997,670	-----	21,270	-----	4,261,000	ねじれ逆対称３次
19	0.1452	7,563,730	23,530,000	-----	4,325	-----	鉛直たわみ対称３次
20	0.1453	4,402,480	-----	5,822	-----	-----	水平たわみ対称４次

表－３・３・２４　固有値解析結果　TYPE1-CASE23：桁高＝3m，ステイケーブル（L/12，A=2倍）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,009,560	-----	4,280	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0563	7,587,040	21,540,000	-----	4,434	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0733	8,963,850	5,809,000	-----	4,454	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0798	4,272,750	-----	3,268	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0844	9,033,800	691,100	-----	4,817	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0988	5,232,240	-----	4,491	-----	7,130,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1026	4,679,860	-----	4,225	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	5,341,870	-----	19,040	-----	1,928,000	**ねじれ対称１次**
9	0.1073	4,147,550	26,200,000	-----	4,476	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1333	4,405,930	-----	772,000	-----	1,575,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1337	5,209,720	-----	5,447	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1361	1,040,620	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1361	1,040,180	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1363	2,114,130	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1378	2,043,260	-----	-----	-----	-----	ケーブル
16	0.1415	4,361,740	-----	9,579	-----	7,059,000	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む
17	0.1439	2,750,050	-----	12,290	-----	67,570,000	ケーブル
18	0.1453	7,618,640	23,850,000	-----	4,322	-----	鉛直たわみ対称３次
19	0.1454	4,393,890	-----	5,826	-----	-----	水平たわみ対称４次
20	0.1456	5,904,540	-----	40,570	-----	2,284,000	ねじれ逆対称２次

表－３・３・２５　固有値解析結果　TYPE1-CASE24：桁高＝3m，ステイケーブル（L/8，A=2倍）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,007,230	-----	4,287	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0569**	**7,259,700**	**19,810,000**	-----	**4,465**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0750	8,105,920	6,157,000	-----	4,531	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0798	4,266,800	-----	3,253	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0878	7,854,480	616,600	-----	4,889	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0989	4,870,400	-----	4,162	-----	10,320,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1026	4,726,560	-----	4,268	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	**0.1034**	**4,685,380**	-----	**27,490**	-----	**1,795,000**	**ねじれ対称１次**
9	0.1115	3,864,240	27,120,000	-----	4,613	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1326	4,783,980	-----	5,748	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1351	2,132,460	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1351	2,081,070	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1353	2,138,650	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1367	2,037,270	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1372	5,869,630	-----	112,400	-----	1,752,000	ねじれ逆対称１次
16	0.1410	3,860,750	-----	7,472	-----	26,610,000	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む
17	0.1423	2,895,300	-----	14,740	-----	39,860,000	水平たわみ逆対称４次（ねじれ含む
18	0.1438	4,151,460	-----	5,963	-----	-----	水平たわみ対称４次
19	0.1467	6,716,080	25,600,000	-----	4,341	-----	鉛直たわみ対称３次
20	0.1511	4,813,170	-----	7,035	-----	-----	水平たわみ対称５次

表－３・３・２６　固有値解析結果　TYPE1-CASE2G：桁高＝3m，ステイケーブル（L/4，A=2倍）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,024,950	-----	4,294	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0581**	**6,459,720**	**18,230,000**	-----	**4,566**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0786	4,148,470	-----	3,114	-----	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0787	7,090,330	5,439,000	-----	4,727	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0974	5,003,120	-----	4,116	-----	8,388,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
6	0.0974	5,807,810	425,300	-----	5,481	-----	鉛直たわみ逆対称２次
7	0.1023	4,722,420	-----	4,250	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	**0.1033**	**4,616,670**	-----	**20,270**	-----	**1,968,000**	**ねじれ対称１次**
9	0.1174	3,972,520	15,690,000	-----	4,937	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1269	3,395,650	-----	7,920	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1298	2,058,100	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1300	1,021,280	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1300	1,021,170	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1311	1,980,110	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1320	2,994,900	-----	9,801	-----	33,360,000	水平たわみ逆対称３次
16	0.1335	2,681,330	-----	11,240	-----	65,390,000	水平たわみ逆対称４次
17	0.1350	4,209,190	-----	5,684	-----	-----	水平たわみ対称４次
18	0.1391	6,166,460	-----	187,700	-----	2,220,000	ねじれ逆対称１次
19	0.1486	4,432,120	-----	6,018	-----	-----	水平たわみ対称５次
20	0.1547	5,675,560	19,950,000	-----	4,364	-----	鉛直たわみ対称３次

表－３・３・２７　固有値解析結果　TYPE2-CASE1：桁高＝5m，基本断面

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,008,450	-----	4,277	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0559	7,838,690	24,250,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0719	10,255,500	5,809,000	-----	4,410	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0800	4,273,240	-----	3,273	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0821	10,697,100	770,400	-----	4,804	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0999	4,205,460	-----	3,677	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1029	4,684,530	-----	4,230	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1034	4,534,030	22,500,000	-----	4,404	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1168	4,304,560	-----	169,700	-----	1,602,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1344	5,287,710	-----	5,496	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1364	1,035,830	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1364	1,036,380	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1367	2,104,440	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1381	2,041,040	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1401	6,885,580	20,420,000	-----	4,369	-----	鉛直たわみ逆対称３次
16	0.1419	4,456,280	11,610,000	-----	4,390	-----	鉛直たわみ対称３次
17	0.1429	3,309,540	-----	7,509	-----	-----	水平たわみ逆対称３次
18	0.1429	6,540,010	9,980,000	-----	4,392	-----	鉛直たわみ逆対称４次
19	0.1444	2,720,980	-----	12,640	-----	-----	ケーブル
20	0.1456	6,442,080	22,220,000	-----	4,318	-----	鉛直たわみ対称４次

表－３・３・２８　固有値解析結果　TYPE2-CASE2：桁高＝5m，ステイケーブル，L/4，A=1倍

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,018,160	-----	4,297	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0579	6,630,150	19,750,000	-----	4,530	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0778	7,464,640	4,871,000	-----	4,596	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0789	4,149,280	-----	3,119	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0955	6,009,210	490,500	-----	5,379	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0985	4,159,100	-----	3,488	-----	94,980,000	水平たわみ対称２次
7	0.1026	4,764,000	-----	4,305	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1156	4,027,870	17,110,000	-----	4,614	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1158	4,088,280	-----	110,700	-----	1,722,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1271	3,422,650	-----	8,250	-----	50,560,000	水平たわみ対称３次
11	0.1298	2,058,720	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1300	1,020,860	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1300	1,021,090	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1311	1,980,670	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1324	2,993,470	-----	8,122	-----	-----	水平たわみ逆対称３次
16	0.1337	2,582,400	-----	13,180	-----	-----	ケーブル
17	0.1353	4,103,670	-----	5,748	-----	-----	水平たわみ対称４次
18	0.1483	4,854,780	13,930,000	-----	3,437	-----	鉛直たわみ対称３次
19	0.1484	3,580,080	4,036,000	-----	3,056	-----	鉛直たわみ逆対称３次
20	0.1488	4,575,850	-----	5,890	-----	-----	水平たわみ対称５次

表－３・３・２９　固有値解析結果　TYPE2-CASE3：桁高＝5m，モノケーブル

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0397	5,054,400	-----	4,257	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,814,230	24,180,000	-----	4,413	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0718	10,308,900	5,780,000	-----	4,397	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0813	4,375,120	-----	3,379	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0818	10,728,200	781,000	-----	4,794	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1027	4,199,890	-----	3,704	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1032	4,542,900	22,470,000	-----	4,401	-----	鉛直たわみ対称２次
8	0.1054	4,572,530	-----	4,163	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1393	6,971,120	20,240,000	-----	4,333	-----	鉛直たわみ逆対称３次
10	0.1395	3,695,020	-----	12,570	-----	7,304,000	**ねじれ対称１次**
11	0.1402	5,094,690	-----	5,193	-----	9,791,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
12	0.1407	4,469,650	12,030,000	-----	4,375	-----	鉛直たわみ対称３次
13	0.1421	6,777,260	9,249,000	-----	4,352	-----	鉛直たわみ逆対称４次
14	0.1450	5,894,140	20,900,000	-----	4,361	-----	鉛直たわみ対称４次
15	0.1482	3,105,410	-----	8,833	-----	13,610,000	水平たわみ逆対称３次
16	0.1490	3,473,620	-----	9,695	-----	10,950,000	水平たわみ逆対称４次
17	0.1553	6,079,480	-----	4,745	-----	14,830,000	水平たわみ対称４次
18	0.1755	4,748,030	26,080,000	-----	4,252	-----	鉛直たわみ対称５次
19	0.2081	6,067,700	12,130,000	-----	4,104	-----	鉛直たわみ逆対称５次
20	0.2117	6,487,640	279,000	-----	4,273	-----	鉛直たわみ逆対称６次

表－３・３・３０　固有値解析結果　TYPE2-CASE4：桁高＝5m，クロスハンガー（X型，I≠0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	4,998,800	-----	4,284	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0559	7,838,490	24,190,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0720	10,263,100	5,830,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0813	4,530,210	-----	3,468	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0822	10,709,700	764,400	-----	4,805	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1001	4,377,580	-----	3,830	-----	74,550,000	水平たわみ対称２次
7	0.1031	4,826,440	-----	4,363	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1034	4,534,500	22,530,000	-----	4,404	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1291	8,154,790	-----	8,422	-----	4,259,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1402	6,883,750	20,480,000	-----	4,369	-----	鉛直たわみ逆対称３次
11	0.1419	4,482,560	11,590,000	-----	4,392	-----	鉛直たわみ対称３次
12	0.1429	6,612,650	9,955,000	-----	4,392	-----	鉛直たわみ逆対称４次
13	0.1442	3,482,930	-----	9,917	-----	9,944,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
14	0.1456	6,463,130	22,200,000	-----	4,331	-----	鉛直たわみ対称４次
15	0.1475	3,890,720	-----	8,985	-----	9,609,000	水平たわみ逆対称３次
16	0.1479	3,356,320	-----	12,510	-----	8,104,000	ねじれ逆対称１次
17	0.1601	5,567,040	-----	4,968	-----	14,100,000	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
18	0.1704	1,842,870	-----	-----	554,300	-----	ケーブル
19	0.1705	1,851,550	-----	-----	347,800	-----	ケーブル
20	0.1744	2,127,870	-----	-----	37,260	-----	ケーブル

表－３・３・３１　固有値解析結果　TYPE3-CASE1：桁高＝7m，基本断面

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0388	5,003,470	-----	4,280	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0560	7,865,730	25,210,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0721	10,379,800	5,895,000	-----	4,410	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0804	4,279,680	-----	3,283	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0826	10,775,000	801,500	-----	4,802	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1005	4,227,660	-----	3,705	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1034	4,741,290	-----	4,300	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1041	4,481,660	22,700,000	-----	4,405	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1327	6,969,580	-----	11,230	-----	2,788,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1359	8,183,130	-----	9,841	-----	4,225,000	ねじれ対称２次
11	0.1364	1,036,200	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1364	1,036,310	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1367	2,104,780	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1381	2,041,400	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1416	7,626,420	18,860,000	-----	4,374	-----	鉛直たわみ逆対称３次
16	0.1432	3,330,460	-----	7,298	-----	-----	水平たわみ逆対称３次
17	0.1437	4,464,360	12,600,000	-----	4,386	-----	鉛直たわみ対称３次
18	0.1446	2,706,240	-----	12,570	-----	-----	水平たわみ逆対称４次
19	0.1454	7,412,080	10,650,000	-----	4,399	-----	鉛直たわみ逆対称４次
20	0.1462	5,525,470	19,640,000	-----	4,327	-----	鉛直たわみ対称４次

表－３・３・３２　固有値解析結果　TYPE3-CASE2：桁高＝7m，ステイケーブル，L/4，A=1倍

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0389	5,010,580	-----	4,303	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0581	6,617,930	20,090,000	-----	4,524	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0781	7,579,550	4,871,000	-----	4,589	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0793	4,155,090	-----	3,129	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0969	6,154,760	489,800	-----	5,342	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0993	4,165,880	-----	3,504	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1032	4,857,280	-----	4,408	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1162	4,054,790	18,080,000	-----	4,613	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1265	3,721,810	-----	8,916	-----	16,600,000	水平たわみ対称３次
10	0.1298	2,057,430	-----	-----	-----	-----	ケーブル
11	0.1300	1,021,260	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1300	1,021,260	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1311	1,980,230	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1316	5,438,470	-----	22,860	-----	2,342,000	**ねじれ対称１次**
15	0.1327	2,996,810	-----	8,018	-----	-----	水平たわみ逆対称３次
16	0.1339	2,584,380	-----	12,510	-----	-----	水平たわみ逆対称４次
17	0.1364	4,687,950	-----	7,043	-----	9,493,000	水平たわみ対称４次
18	0.1493	4,882,090	-----	5,614	-----	-----	水平たわみ対称５次
19	0.1507	5,752,710	13,450,000	-----	3,720	-----	鉛直たわみ対称３次
20	0.1527	4,073,870	9,100,000	-----	3,166	-----	鉛直たわみ逆対称３次

表－３・３・３３　固有値解析結果　TYPE3-CASE3：桁高＝7m，モノケーブル

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 X0 kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0400	5,060,020	-----	4,253	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0559	7,841,060	25,150,000	-----	4,413	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0720	10,430,200	5,867,000	-----	4,396	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0820	4,425,840	-----	3,443	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0823	10,809,100	812,300	-----	4,792	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1038	4,312,710	-----	3,817	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1039	4,489,100	22,660,000	-----	4,402	-----	鉛直たわみ対称２次
8	0.1063	4,656,790	-----	4,252	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1408	7,680,550	18,670,000	-----	4,338	-----	鉛直たわみ逆対称３次
10	0.1423	2,909,840	-----	15,080	-----	6,759,000	**ねじれ対称１次**
11	0.1425	4,574,700	13,260,000	-----	4,386	-----	鉛直たわみ対称３次
12	0.1433	4,313,670	-----	4,275	-----	17,290,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
13	0.1446	7,548,250	9,827,000	-----	4,359	-----	鉛直たわみ逆対称４次
14	0.1457	5,215,460	18,260,000	-----	4,357	-----	鉛直たわみ対称４次
15	0.1526	2,934,690	-----	9,157	-----	16,950,000	ねじれ逆対称１次
16	0.1548	3,379,030	-----	8,137	-----	13,120,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1603	5,102,590	-----	5,032	-----	16,840,000	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
18	0.1788	4,870,550	26,000,000	-----	4,265	-----	鉛直たわみ対称５次
19	0.2130	6,902,630	4,469,000	-----	4,123	-----	鉛直たわみ逆対称５次
20	0.2185	7,425,370	191,600	-----	4,348	-----	鉛直たわみ逆対称６次

表－３・３・３４　固有値解析結果　TYPE3-CASE4：桁高＝7m，クロスハンガー（X型，I≠0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 X0 kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0389	4,989,690	-----	4,289	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0560	7,865,410	25,150,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0721	10,382,200	5,916,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0821	4,600,390	-----	3,539	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0827	10,781,600	795,300	-----	4,803	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1011	4,486,500	-----	3,953	-----	-----	水平たわみ対称２次
7	0.1037	4,937,280	-----	4,478	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1041	4,482,180	22,730,000	-----	4,405	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1345	5,797,030	-----	5,705	-----	6,872,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1416	7,612,190	18,790,000	-----	4,374	-----	鉛直たわみ逆対称３次
11	0.1437	4,449,610	12,560,000	-----	4,390	-----	鉛直たわみ対称３次
12	0.1454	7,380,710	10,630,000	-----	4,399	-----	鉛直たわみ逆対称４次
13	0.1461	3,025,660	-----	13,710	-----	8,527,000	ねじれ対称２次
14	0.1462	5,503,860	19,620,000	-----	4,337	-----	鉛直たわみ対称４次
15	0.1536	3,971,470	-----	7,415	-----	12,970,000	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む
16	0.1545	3,198,840	-----	12,020	-----	10,860,000	ねじれ逆対称１次
17	0.1643	4,978,990	-----	5,013	-----	17,190,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
18	0.1710	1,912,470	-----	-----	739,300	-----	ケーブル
19	0.1710	1,920,260	-----	-----	512,500	-----	ケーブル
20	0.1750	1,960,650	-----	-----	120,400	-----	ケーブル

表－３・３・３５　固有値解析結果　TYPE1-CASE42：桁高＝3m，クロスハンガー（交互片引き型，Ｉ≠0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,009,440	-----	4,278	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,815,160	23,420,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0719	10,084,300	5,738,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0804	4,417,410	-----	3,370	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0818	10,514,500	736,100	-----	4,805	-----	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
6	0.0991	4,330,300	-----	3,747	-----	29,780,000	鉛直たわみ逆対称２次
7	0.1026	4,705,910	-----	4,238	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	4,580,980	22,300,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1178	4,465,810	-----	35,670	29,760,000	2,335,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1354	1,955,400	-----	10,100	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1355	2,149,220	-----	344,000	68,440,000	6,207,000	ねじれ逆対称１次
12	0.1372	2,352,700	-----	4,294,000	-----	13,340,000	ケーブル
13	0.1392	6,052,950	21,610,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
14	0.1401	2,199,560	-----	20,600	-----	-----	ケーブル
15	0.1405	4,404,940	11,330,000	14,210,000	4,394	-----	鉛直たわみ対称４次
16	0.1411	2,727,680	-----	10,370	4,477,000	8,670,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1411	5,764,180	9,432,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
18	0.1415	1,600,000	-----	15,970	4,117,000	12,750,000	水平たわみ逆対称４次
19	0.1450	2,411,780	-----	14,310	40,440,000	15,460,000	水平たわみ対称４次
20	0.1453	6,618,000	22,910,000	16,050,000	4,320	-----	鉛直たわみ対称５次

表－３・３・３６　固有値解析結果　TYPE1-CASE43：桁高＝3m，クロスハンガー（片側片引き型，Ｉ＝0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,010,140	-----	4,277	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,795,340	23,450,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0718	10,076,800	5,727,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0803	4,404,910	-----	3,359	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0817	10,523,400	738,800	95,360,000	4,806	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0989	4,334,400	-----	3,740	-----	26,720,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1026	4,696,250	-----	4,228	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	4,520,310	22,290,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1170	4,628,330	-----	36,730	27,090,000	2,399,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1352	2,163,710	-----	9,694	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1353	2,076,060	-----	130,300	-----	5,142,000	ねじれ逆対称１次
12	0.1365	2,425,510	-----	319,300	-----	8,914,000	ねじれ逆対称２次
13	0.1392	6,021,950	21,530,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
14	0.1392	2,202,530	-----	27,900	4,016,000	-----	ケーブル
15	0.1404	2,019,880	-----	10,270	-----	12,030,000	水平たわみ逆対称３次
16	0.1405	4,512,720	11,320,000	18,850,000	4,392	-----	鉛直たわみ対称３次
17	0.1411	5,790,170	9,441,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
18	0.1415	1,322,330	-----	18,830	-----	25,000,000	水平たわみ逆対称４次
19	0.1448	2,738,800	-----	14,940	128,400	14,440,000	水平たわみ対称４次
20	0.1453	6,668,930	23,830,000	312,600	4,471	-----	鉛直たわみ対称４次

表－３・３・３７　固有値解析結果　TYPE1-CASE44：桁高＝3m，クロスハンガー（X型，ｌ＝0）

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,009,620	-----	4,277	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0558	7,813,760	23,450,000	-----	4,419	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0719	10,163,700	5,728,000	-----	4,412	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0804	4,434,610	-----	3,380	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0817	10,645,600	738,500	-----	4,807	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0990	4,300,070	-----	3,711	-----	31,470,000	水平たわみ対称２次
7	0.1026	4,706,410	-----	4,237	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	4,581,660	22,290,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
9	0.1210	4,949,730	-----	17,670	-----	2,837,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1392	6,046,530	21,570,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
11	0.1397	3,715,790	-----	19,490	-----	6,007,000	ねじれ逆対称１次
12	0.1401	4,414,280	-----	9,506	-----	7,244,000	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む
13	0.1405	4,512,660	11,320,000	-----	4,389	-----	鉛直たわみ対称３次
14	0.1411	5,818,390	9,432,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
15	0.1419	5,095,050	-----	7,643	-----	9,089,000	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
16	0.1452	6,728,660	22,970,000	-----	4,330	-----	鉛直たわみ対称４次
17	0.1553	6,443,320	-----	4,793	-----	12,520,000	水平たわみ対称４次
18	0.1615	4,386,030	-----	17,170	-----	3,419,000	ねじれ逆対称２次
19	0.1690	1,887,940	-----	-----	435,400	-----	ケーブル
20	0.1691	1,893,850	-----	-----	277,700	-----	ケーブル

表－３・３・３８　固有値解析結果　TYPE1-CASE25：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 XO kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,011,050	-----	4,278	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0562	7,616,770	21,940,000	-----	4,433	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0731	9,109,650	5,759,000	-----	4,450	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0798	4,270,100	-----	3,264	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0839	9,218,900	701,300	-----	4,823	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0988	4,866,650	-----	4,187	-----	9,831,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1026	4,664,120	-----	4,205	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1044	4,755,560	-----	26,900	-----	1,802,000	**ねじれ対称１次**
9	0.1066	4,201,690	26,020,000	-----	4,474	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1332	3,808,390	-----	655,400	-----	1,615,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1338	5,230,520	-----	5,427	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1361	1,039,890	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1361	1,039,790	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1363	2,108,560	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1378	2,040,860	-----	-----	-----	-----	ケーブル
16	0.1408	5,056,040	-----	12,340	-----	4,426,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1440	2,782,530	-----	11,190	-----	58,430,000	水平たわみ逆対称３次
18	0.1452	7,623,780	23,830,000	-----	4,323	-----	鉛直たわみ対称３次
19	0.1454	6,224,800	-----	25,990	-----	2,753,000	ねじれ逆対称３次
20	0.1455	4,421,320	-----	5,826	-----	-----	水平たわみ対称４次

表－３・３・３９　固有値解析結果　TYPE1-CASE26：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り

塔をｹｰﾌﾞﾙ反力2倍として計算

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0400	4,846,070	-----	4,319	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0574**	**7,548,350**	**48,020,000**	-----	**4,444**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0738	9,704,160	5,700,000	-----	4,459	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0844	4,016,940	-----	3,404	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0851	9,754,200	3,371,000	-----	4,801	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1049	4,269,070	-----	4,007	-----	63,710,000	水平たわみ対称２次
7	0.1060	4,342,100	-----	4,188	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1067	4,229,900	26,860,000	-----	4,476	-----	鉛直たわみ対称２次
9	**0.1167**	**3,667,300**	-----	**143,800**	-----	**1,571,000**	**ねじれ対称１次**
10	0.1336	3,721,250	-----	794,200	-----	1,638,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1361	1,038,480	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1361	1,038,430	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1363	2,106,410	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1378	2,044,150	-----	-----	-----	-----	けーぶR
15	0.1402	5,710,360	-----	4,883	-----	87,340,000	水平たわみ対称３次
16	0.1449	3,254,590	-----	7,474	-----	84,970,000	水平たわみ逆対称３次
17	0.1457	2,628,210	-----	12,040	-----	-----	ケーブル
18	0.1459	7,639,640	18,120,000	-----	4,321	-----	鉛直たわみ対称３次
19	0.1469	4,855,930	38,760,000	-----	4,509	-----	鉛直たわみ逆対称３次
20	0.1473	5,034,120	-----	5,650	-----	-----	水平たわみ対称４次

表－３・３・４０　固有値解析結果　TYPE1-CASE27：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り

明石海峡大橋の塔の剛性

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0390	4,979,900	-----	4,282	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0565**	**7,601,300**	**32,620,000**	-----	**4,436**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0732	9,200,870	5,544,000	-----	4,453	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0806	4,235,480	-----	3,281	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0844	9,271,120	1,315,000	-----	4,808	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0993	6,000,760	-----	5,161	-----	4,718,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1032	4,573,750	-----	4,162	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	**0.1034**	**6,027,470**	-----	**12,450**	-----	**2,252,000**	**ねじれ対称１次**
9	0.1066	4,208,810	26,890,000	-----	4,475	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1331	3,883,770	-----	795,100	-----	1,604,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1348	5,327,490	-----	5,248	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1361	1,039,610	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1361	1,039,240	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1363	2,111,150	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1378	2,044,530	-----	-----	-----	-----	ケーブル
16	0.1402	6,191,730	-----	22,340	-----	2,605,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1444	2,957,510	-----	9,845	-----	59,050,000	ケーブル
18	0.1447	4,845,520	-----	16,210	-----	5,049,000	ねじれ逆対称３次
19	0.1455	7,625,160	21,550,000	-----	4,323	-----	鉛直たわみ対称３次
20	0.1460	4,540,410	-----	5,887	-----	-----	鉛直たわみ逆対称４次

表－３・３・４１　固有値解析結果　TYPE1-CASE28：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り

明石海峡大橋の塔の剛性でJが2,500の値

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0390	4,969,510	-----	4,285	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0565**	**7,601,270**	**32,620,000**	-----	**4,436**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0732	9,200,770	5,544,000	-----	4,453	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0809	4,220,470	-----	3,291	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0844	9,271,010	1,315,000	-----	4,808	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0999	5,286,590	-----	4,594	-----	6,680,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1034	4,555,130	-----	4,167	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	**0.1047**	**5,215,230**	-----	**18,250**	-----	**1,977,000**	**ねじれ対称１次**
9	0.1066	4,208,740	26,890,000	-----	4,475	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1332	3,807,010	-----	750,700	-----	1,613,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1352	5,357,330	-----	5,226	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1361	1,038,940	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1361	1,039,520	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1363	2,111,120	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1378	2,044,420	-----	-----	-----	-----	ケーブル
16	0.1412	5,485,580	-----	14,450	-----	3,793,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1445	2,756,400	-----	10,620	-----	-----	ケーブル
18	0.1455	7,623,740	21,550,000	-----	4,323	-----	鉛直たわみ対称４次
19	0.1458	6,808,230	-----	21,800	-----	3,015,000	ねじれ逆対称３次
20	0.1461	4,538,970	-----	5,861	-----	-----	水平たわみ対称４次

表－３・３・４２　固有値解析結果　TYPE1-CASE1T：桁高＝3m，基本断面、ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0400	4,847,030	-----	4,316	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0569**	**7,748,900**	**48,810,000**	-----	**4,431**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0725	10,891,600	5,870,000	-----	4,420	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0830	11,468,800	3,556,000	-----	4,786	-----	鉛直たわみ逆対称２次
5	0.0844	4,015,920	-----	3,402	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
6	0.1029	4,613,490	21,040,000	-----	4,404	-----	鉛直たわみ対称２次
7	0.1048	4,313,460	-----	4,041	-----	39,710,000	水平たわみ対称２次
8	0.1060	4,329,820	-----	4,172	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	**0.1144**	**4,030,960**	-----	**115,300**	-----	**1,584,000**	**ねじれ対称１次**
10	0.1274	3,883,290	-----	1,625,000	-----	1,612,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1364	1,035,090	-----	-----	-----	-----	ケーブル
12	0.1364	1,035,090	-----	-----	-----	-----	ケーブル
13	0.1367	2,093,940	-----	-----	-----	-----	ケーブル
14	0.1381	2,035,630	-----	-----	-----	-----	ケーブル
15	0.1392	6,075,630	20,630,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
16	0.1404	5,765,210	-----	4,774	-----	-----	水平たわみ対称３次
17	0.1406	4,543,990	11,040,000	-----	4,389	-----	鉛直たわみ対称３次
18	0.1411	5,801,110	10,950,000	-----	4,387	-----	鉛直たわみ逆対称４次
19	0.1452	3,287,350	-----	7,802	-----	34,880,000	水平たわみ逆対称３次
20	0.1459	6,989,550	17,780,000	-----	4,315	-----	鉛直たわみ対称４次

表－３・３・４３　固有値解析結果　TYPE1-CASE46：桁高＝3m，クロスハンガー

CASE43でｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰの直径を2倍

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,009,980	-----	4,277	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0558**	**7,794,170**	**23,450,000**	-----	**4,419**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0718	10,071,600	5,727,000	-----	4,411	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0803	4,403,010	-----	3,364	97,380,000	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0817	10,517,100	738,800	91,860,000	4,806	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0989	4,323,000	-----	3,731	-----	27,740,000	水平たわみ対称２次
7	0.1026	4,698,270	-----	4,231	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1029	4,520,840	22,290,000	-----	4,403	-----	鉛直たわみ対称２次
9	**0.1176**	**4,366,930**	-----	**35,060**	**26,340,000**	**2,496,000**	**ねじれ対称１次**
10	0.1352	2,085,060	-----	9,918	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1353	1,863,850	-----	121,400	-----	5,319,000	ねじれ逆対称１次
12	0.1365	2,440,920	-----	315,400	-----	8,872,000	ねじれ逆対称２次
13	0.1392	6,018,420	21,530,000	-----	4,363	-----	鉛直たわみ逆対称３次
14	0.1393	2,059,500	-----	26,700	3,594,000	-----	ケーブル
15	0.1405	2,017,860	-----	10,170	-----	12,500,000	ケーブル
16	0.1405	4,511,520	11,320,000	16,540,000	4,392	-----	鉛直たわみ対称３次
17	0.1411	5,791,490	9,440,000	-----	4,388	-----	鉛直たわみ逆対称４次
18	0.1415	1,315,600	-----	18,710	-----	25,350,000	ケーブル
19	0.1451	3,835,300	69,740,000	20,930	13,350	20,550,000	ケーブル
20	0.1453	8,479,360	34,250,000	39,010	6,389	41,800,000	鉛直たわみ対称４次

表－３・３・４４　固有値解析結果　TYPE1-CASE29：桁高＝3m，ステイケーブル

CASE22でｹｰﾌﾞﾙ重量を軽減

次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0397	4,131,220	-----	3,530	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	**0.0569**	**6,417,070**	**17,490,000**	-----	**3,646**	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0735	7,553,170	4,878,000	-----	3,658	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0807	3,879,970	-----	2,939	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0878	7,403,050	568,100	-----	3,863	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.1027	3,518,960	-----	3,055	-----	37,990,000	水平たわみ対称２次
7	0.1075	3,564,040	-----	3,116	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
8	0.1081	3,396,010	22,260,000	-----	3,661	-----	鉛直たわみ対称２次
9	**0.1149**	**3,230,350**	-----	**99,270**	-----	**1,145,000**	**ねじれ対称１次**
10	0.1432	3,492,170	-----	3,140	-----	-----	水平たわみ対称３次
11	0.1485	3,273,910	-----	1,580,000	-----	1,125,000	ねじれ逆対称１次
12	0.1488	3,896,450	18,480,000	-----	3,670	-----	鉛直たわみ逆対称３次
13	0.1496	2,767,340	6,655,000	-----	3,674	-----	鉛直たわみ逆対称４次
14	0.1496	2,784,170	8,518,000	-----	3,673	-----	鉛直たわみ対称３次
15	0.1545	5,802,350	20,470,000	-----	3,565	-----	鉛直たわみ対称４次
16	0.1625	3,700,170	-----	116,300	-----	1,304,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1702	575,754	-----	-----	-----	-----	ケーブル
18	0.1702	575,984	-----	-----	-----	-----	ケーブル
19	0.1703	1,905,920	-----	14,600	-----	-----	ケーブル
20	0.1704	2,097,770	-----	18,200	-----	19,560,000	ケーブル

表－３・３・４５　固有値解析結果　TYPE1-CASE2Y：桁高＝3m，ステイシステム

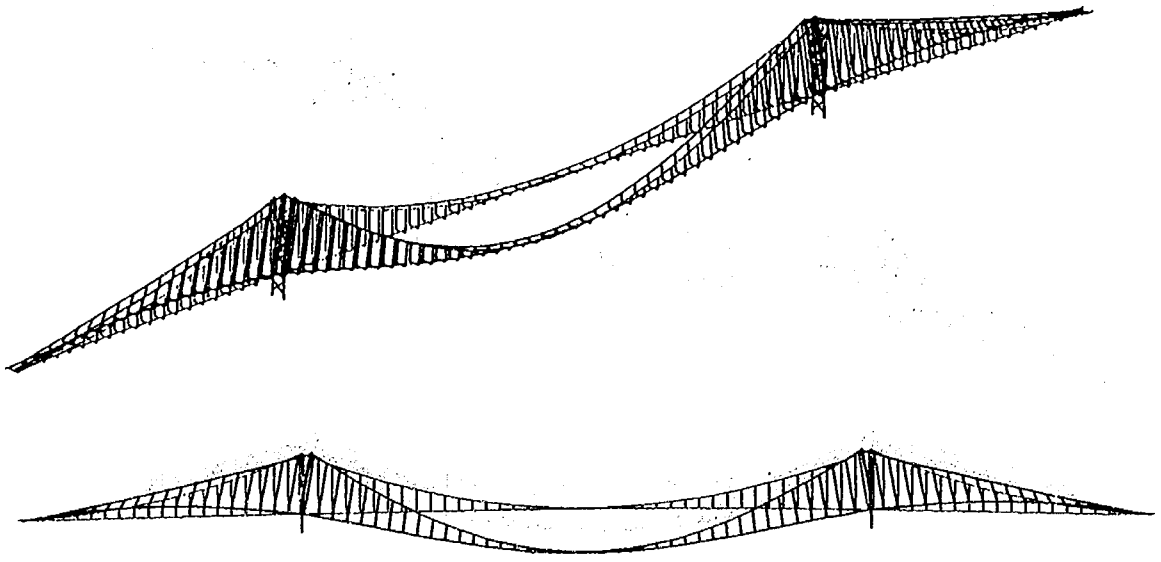
次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0387	5,010,900	-----	4,276	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0570	7,615,540	19,170,000	-----	4,420	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0743	8,515,540	7,494,000	-----	4,423	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0798	4,271,540	-----	3,270	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
5	0.0873	8,249,890	640,500	-----	4,728	-----	鉛直たわみ逆対称２次
6	0.0985	6,201,960	-----	5,302	-----	4,427,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	0.1022	6,621,520	-----	11,550	-----	2,295,000	**ねじれ対称１次**
8	0.1026	4,646,820	-----	4,188	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1109	3,891,550	15,440,000	-----	4,384	-----	鉛直たわみ対称２次
10	0.1327	4,710,430	-----	1,002,000	-----	1,532,000	ねじれ逆対称１次
11	0.1341	5,371,840	-----	5,318	-----	-----	水平たわみ対称３次
12	0.1364	1,036,480	-----	-----	31,860,000	-----	ケーブル
13	0.1364	1,036,290	-----	-----	31,880,000	-----	ケーブル
14	0.1367	2,104,560	-----	-----	67,500,000	-----	ケーブル
15	0.1381	2,041,530	-----	-----	20,050,000	-----	ケーブル
16	0.1413	6,075,500	-----	14,340	-----	3,509,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1445	3,095,230	-----	10,830	-----	19,050,000	ケーブル
18	0.1451	6,231,340	-----	21,330	-----	3,778,000	ねじれ逆対称３次
19	0.1452	7,672,590	25,500,000	-----	4,315	-----	鉛直たわみ対称３次
20	0.1459	4,580,600	-----	5,749	-----	-----	水平たわみ対称４次

表－３・３・４６　固有値解析結果　TYPE1-CASE31：桁高＝3m，シングルモノケーブル

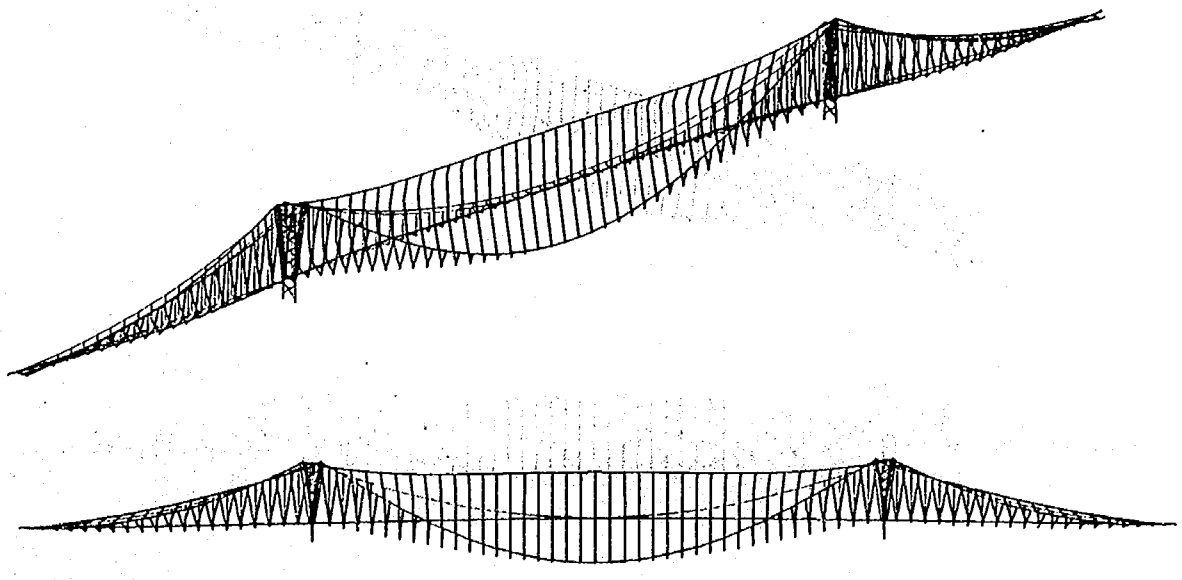
次数	振動数 (HZ)	一般化質量 kg•sec2/m	等価質量 X	等価質量 Y kg•sec2/m	等価質量 Z	等価極慣性 Xθ kg•m•sec2/m	振動モード
1	0.0390	5,034,460	-----	4,293	-----	-----	水平たわみ対称１次
2	0.0552	6,796,390	23,240,000	-----	4,374	-----	**鉛直たわみ対称１次**
3	0.0708	11,818,400	10,540,000	-----	4,848	-----	鉛直たわみ逆対称１次
4	0.0714	10,649,800	4,723,000	-----	4,398	-----	鉛直たわみ逆対称２次
5	0.0815	4,516,060	-----	3,462	-----	-----	水平たわみ逆対称１次
6	0.1008	3,001,920	22,580,000	-----	4,171	-----	鉛直たわみ対称２次
7	0.1008	4,348,940	-----	3,692	-----	29,700,000	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
8	0.1044	4,576,960	-----	4,149	-----	-----	水平たわみ逆対称２次
9	0.1226	2,561,390	-----	7,415	-----	1,829,000	**ねじれ対称１次**
10	0.1377	5,090,840	-----	8,549	-----	8,813,000	ねじれ対称２次
11	0.1379	7,584,500	19,290,000	-----	4,289	-----	鉛直たわみ逆対称３次
12	0.1387	4,807,970	10,790,000	-----	4,338	-----	鉛直たわみ対称３次
13	0.1392	7,425,660	11,170,000	-----	4,314	-----	鉛直たわみ逆対称４次
14	0.1438	3,153,580	-----	9,355	-----	5,949,000	ねじれ逆対称１次
15	0.1446	7,490,350	30,080,000	-----	4,277	-----	鉛直たわみ対称４次
16	0.1457	2,914,770	-----	11,070	-----	5,287,000	ねじれ逆対称２次
17	0.1519	7,766,910	-----	5,575	-----	10,520,000	水平たわみ対称３次
18	0.1661	1,827,940	32,030,000	-----	3,770	-----	鉛直たわみ対称５次
19	0.2006	4,467,500	4,517,000	-----	3,896	-----	鉛直たわみ逆対称５次
20	0.2032	5,251,560	479,400	-----	4,051	-----	鉛直たわみ逆対称６次

（3）鉛直たわみ1次とねじれ対称1次のモード図

各ケースのフラッター発現に最も関連深い鉛直たわみ1次とねじれ1次のモード図を図－3・3・32～図－3・3・59に示す。ステイケーブルシステムでは鉛直のモード形状がステイケーブル設置部で拘束され、モノケーブルシステムとクロスハンガーシステムでは、ケーブルシステム設置部でねじれのモードが拘束されていることが見られる。

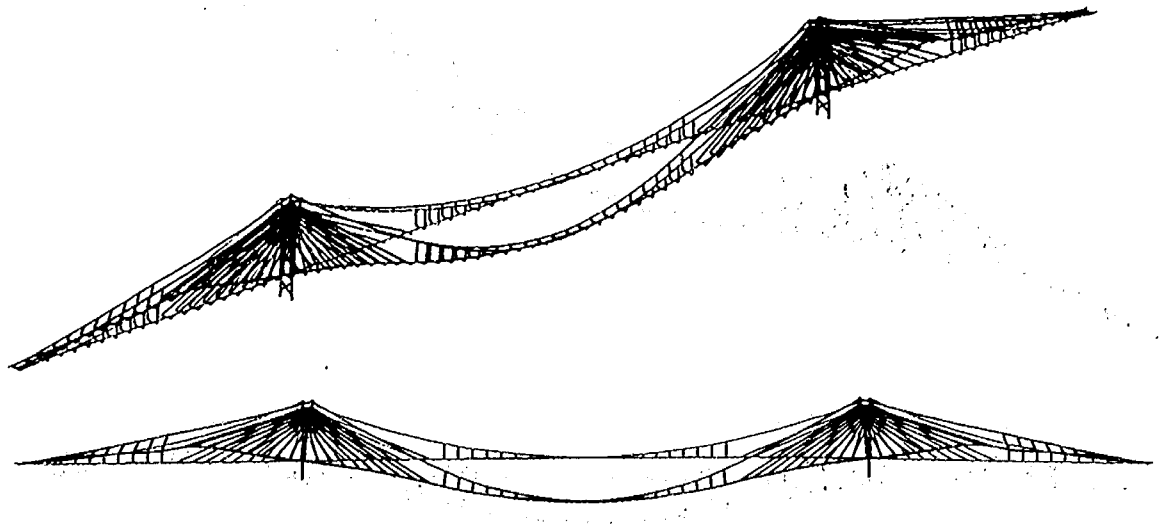


TYPE-1,CASE-1　,MODE=　2，固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

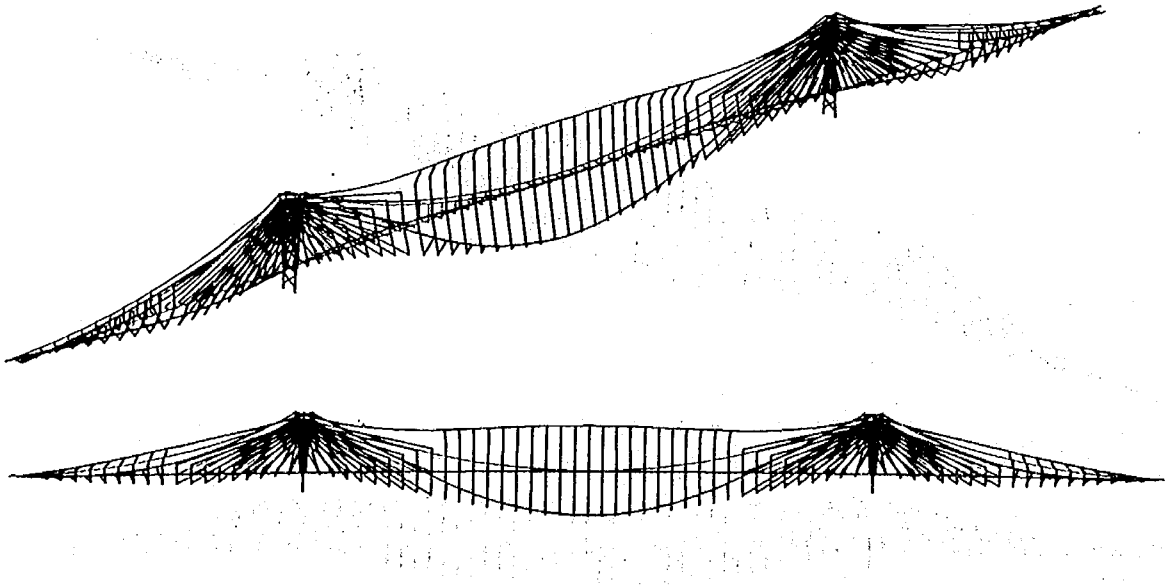


TYPE-1,CASE-1　,MODE=　6，固有振動数= 0.0978 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３２　振動モード　TYPE1-CASE1：桁高＝3m，基本断面

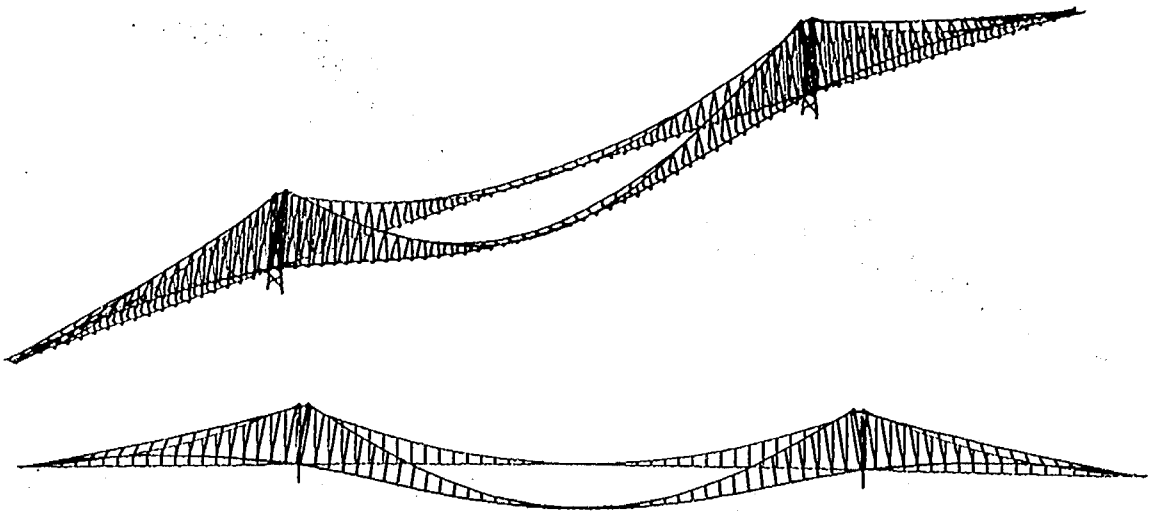


TYPE-1,CASE-2 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0579 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

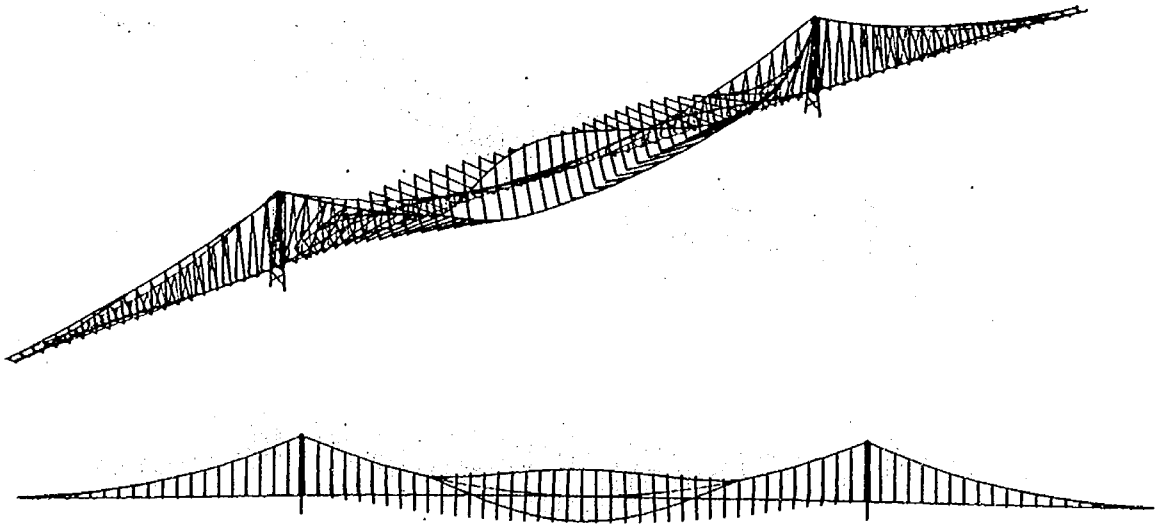


TYPE-1,CASE-2 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1025 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３３ 振動モード TYPE1-CASE2：桁高＝3m, ステイケーブル, L/4, A=1倍

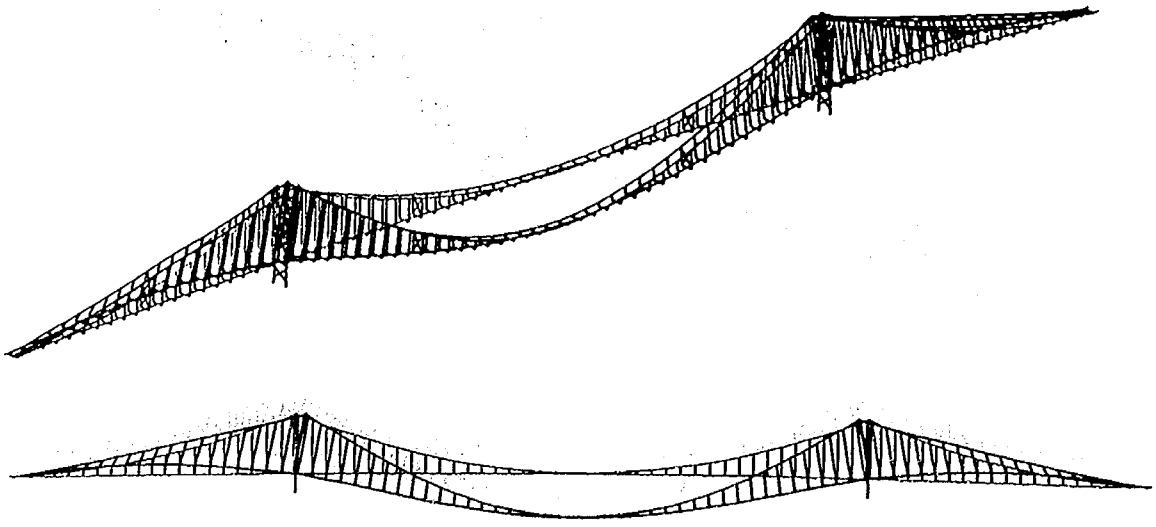


TYPE-1,CASE-3 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0557 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

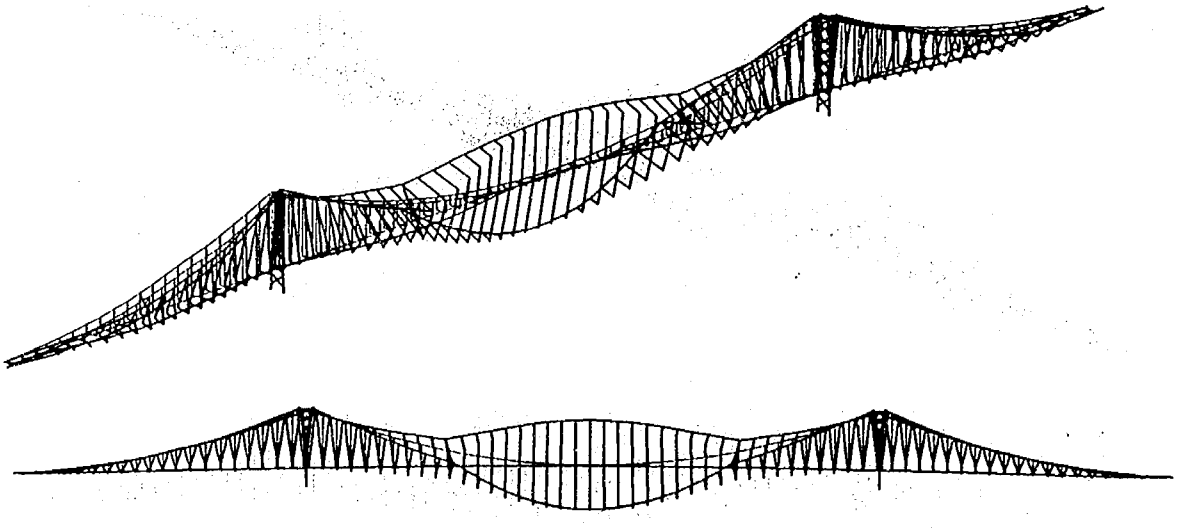


TYPE-1,CASE-3 ,MODE= 10 , 固有振動数= 0.1383 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３４ 振動モード TYPE1-CASE3：桁高＝3m, モノケーブル

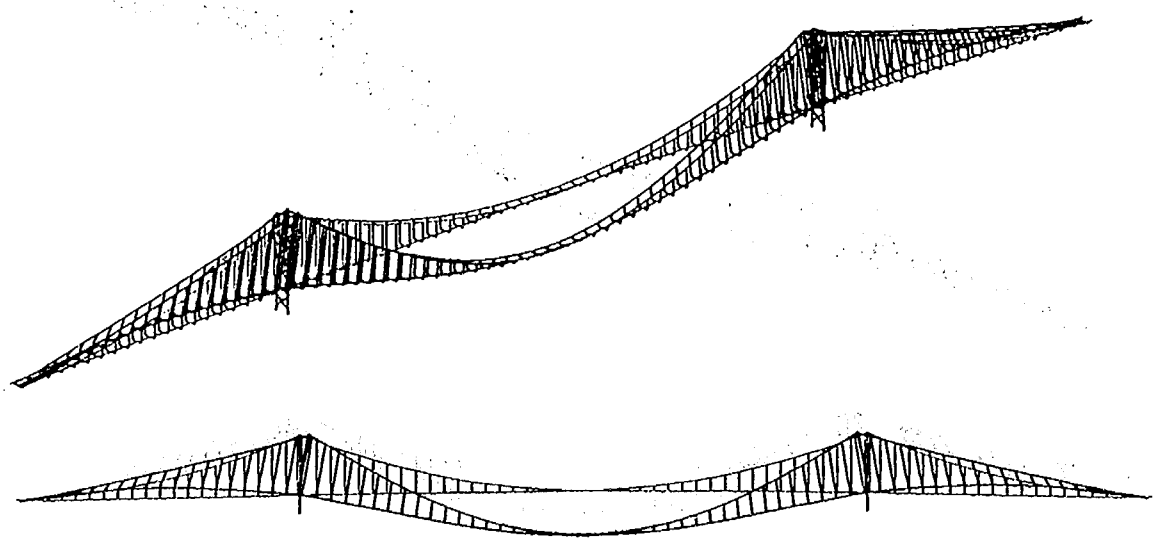


TYPE-1,CASE-4 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

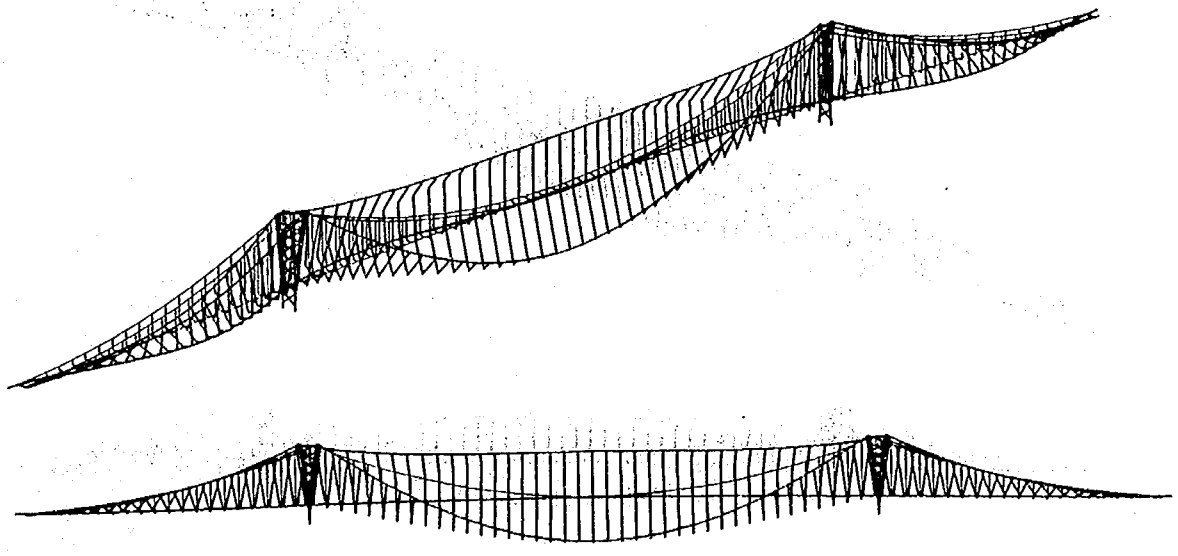


TYPE-1,CASE-4 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1220 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３５ 振動モード TYPE1-CASE4：桁高＝3m, クロスハンガー（X型, I≠0)

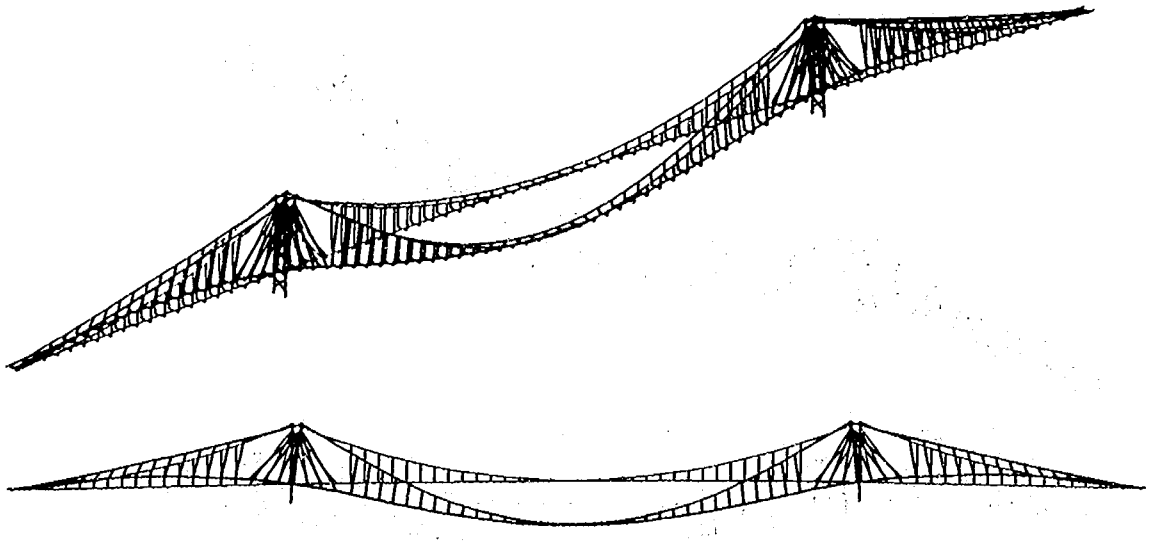


TYPE-2,CASE-1 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0559 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

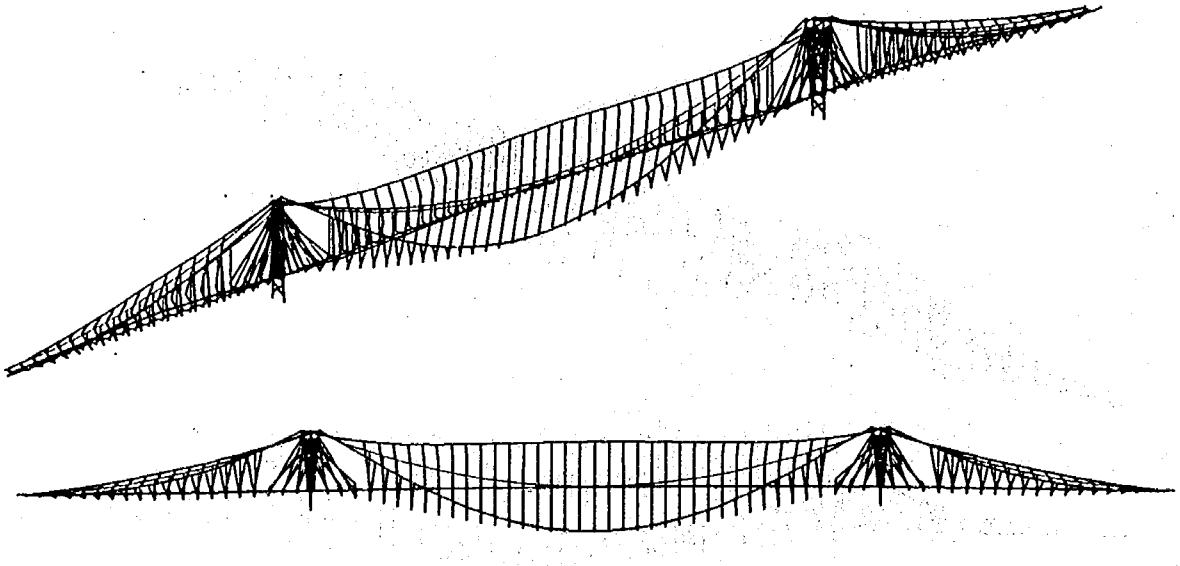


TYPE-2,CASE-1 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1168 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３６ 振動モード TYPE1-CASE22：桁高＝3m, ステイケーブル (L/12, A=1倍)

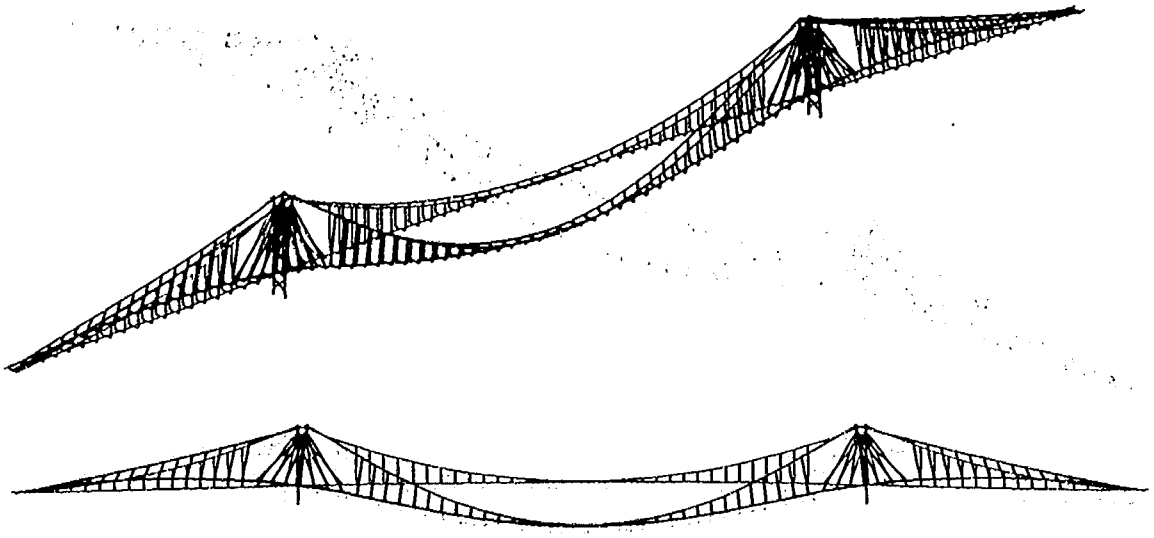


TYPE-1,CASE-22 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0562 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

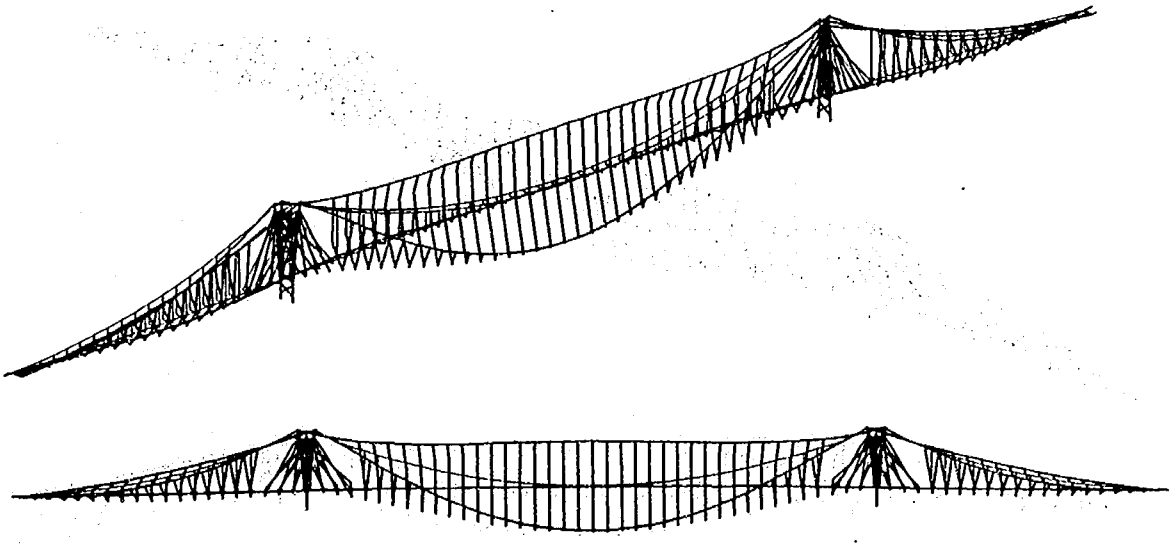


TYPE-1,CASE-22 ,MODE= 7 , 固有振動数= 0.1024 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３７　振動モード　TYPE1-CASE23：桁高＝3m, ステイケーブル（L/12, A=2倍）

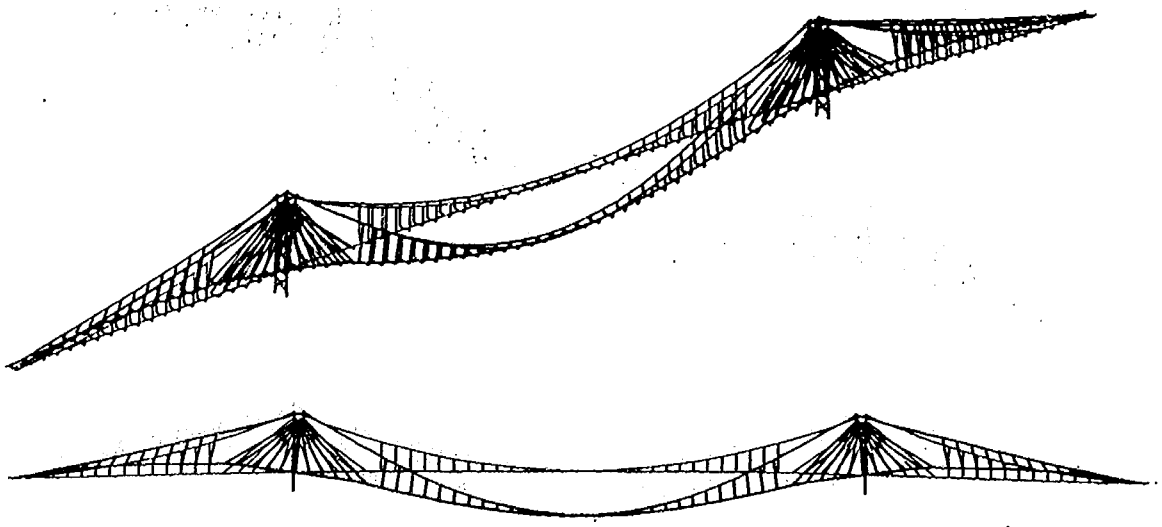


TYPE-1,CASE-23 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0563 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

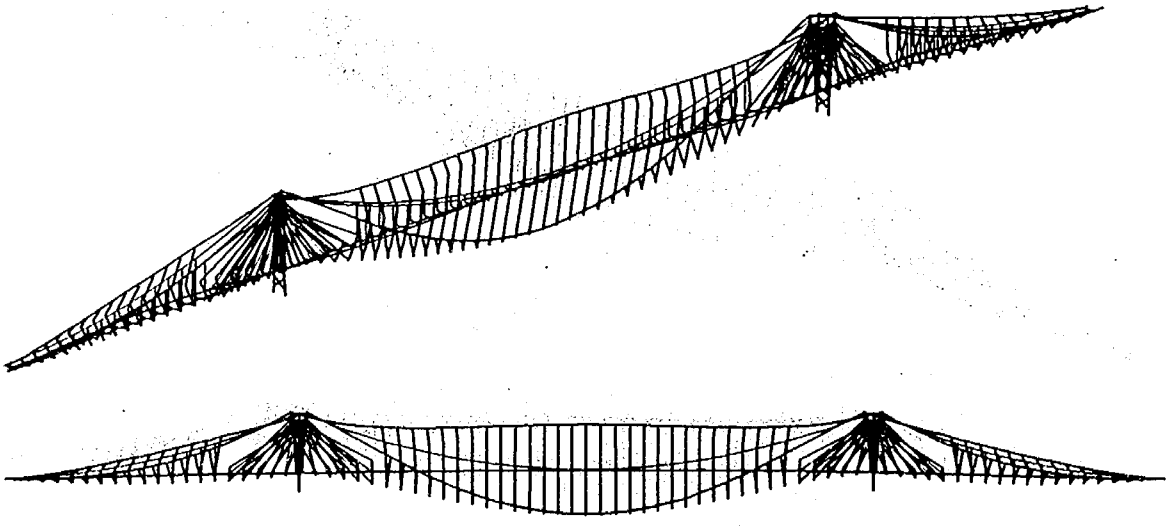


TYPE-1,CASE-23 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1029 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３８ 振動モード TYPE1-CASE24：桁高＝3m, ステイケーブル (L/8, A=2倍)

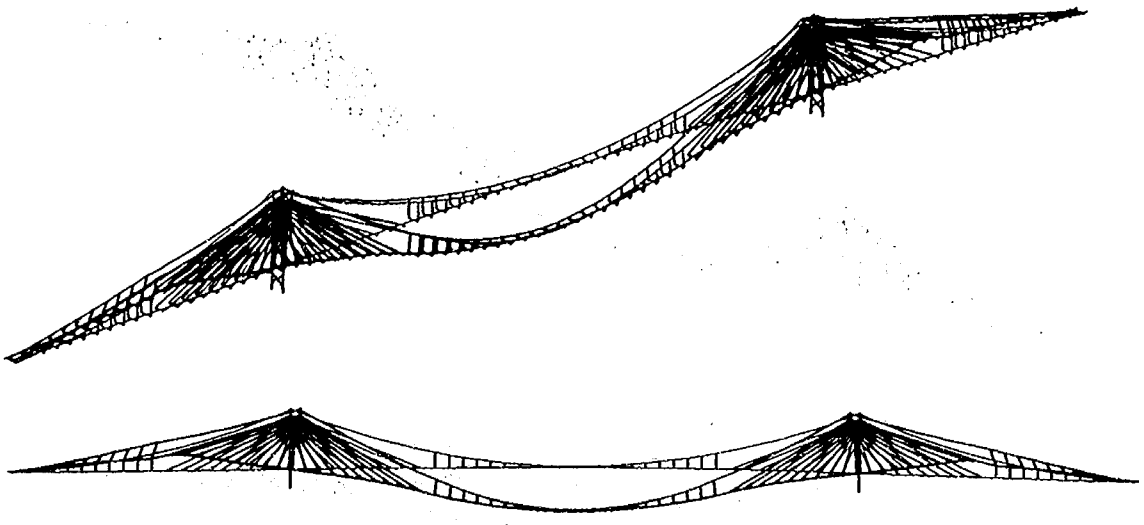


TYPE-1,CASE-24 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0569 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

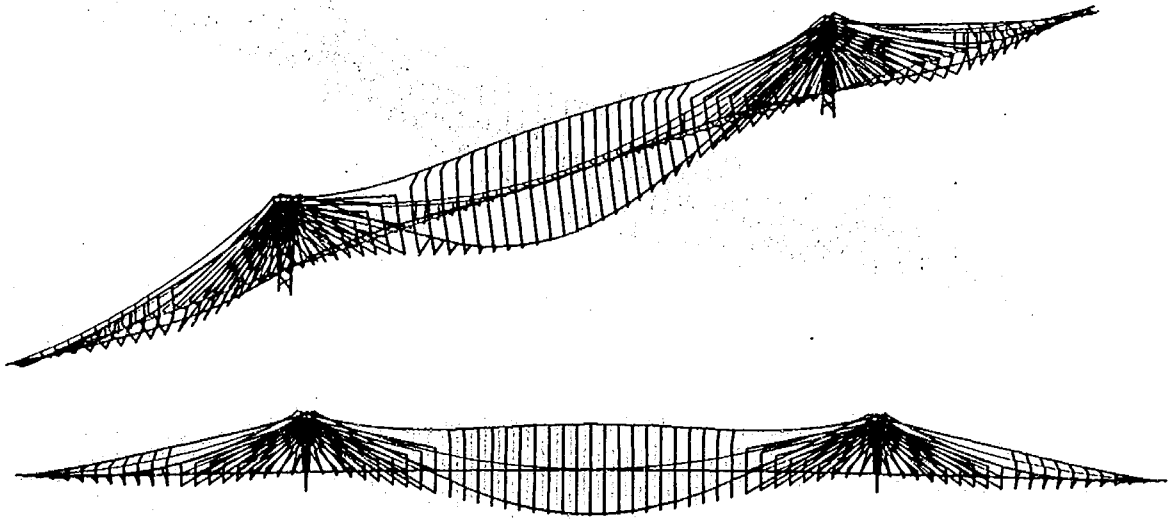


TYPE-1,CASE-24 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1034 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・３９　振動モード　TYPE1-CASE2G：桁高＝3m，ステイケーブル（L/4，A=2倍）

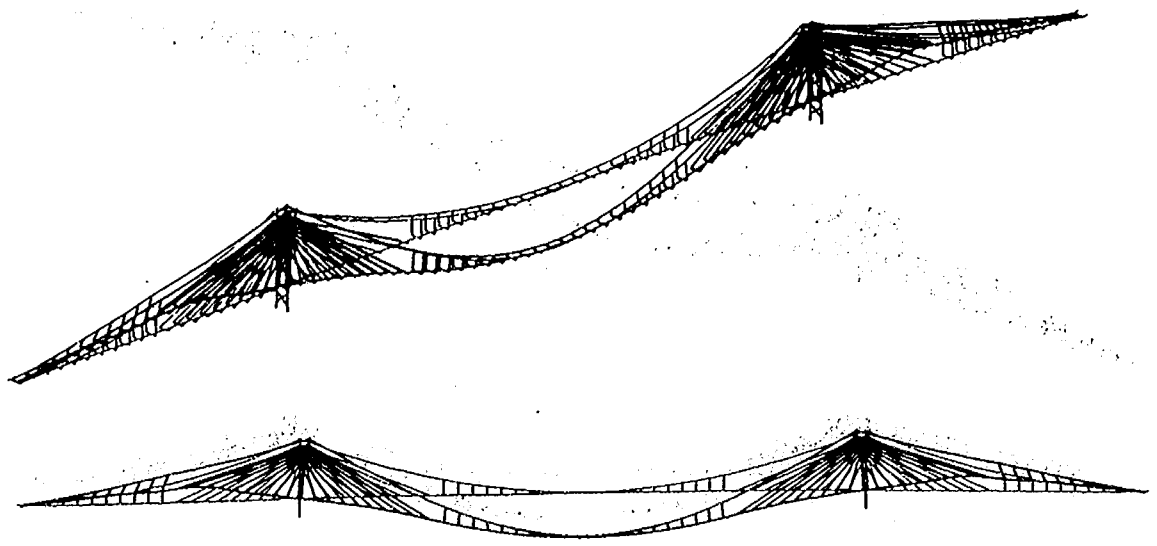


TYPE-1,CASE-2G ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0581 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

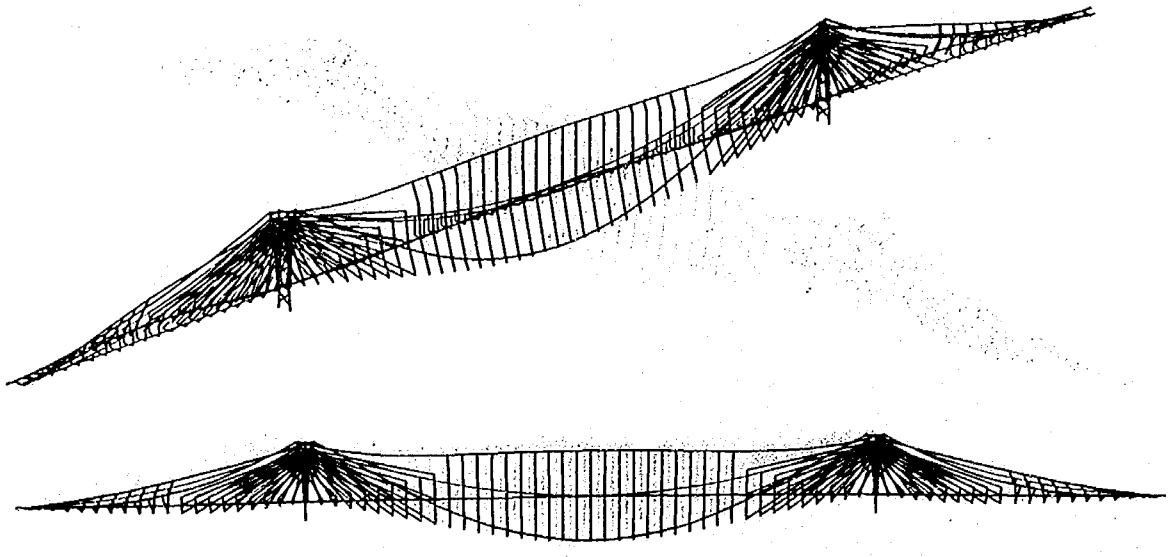


TYPE-1,CASE-2G ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1033 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４０　振動モード　TYPE2-CASE1：桁高＝5m，基本断面

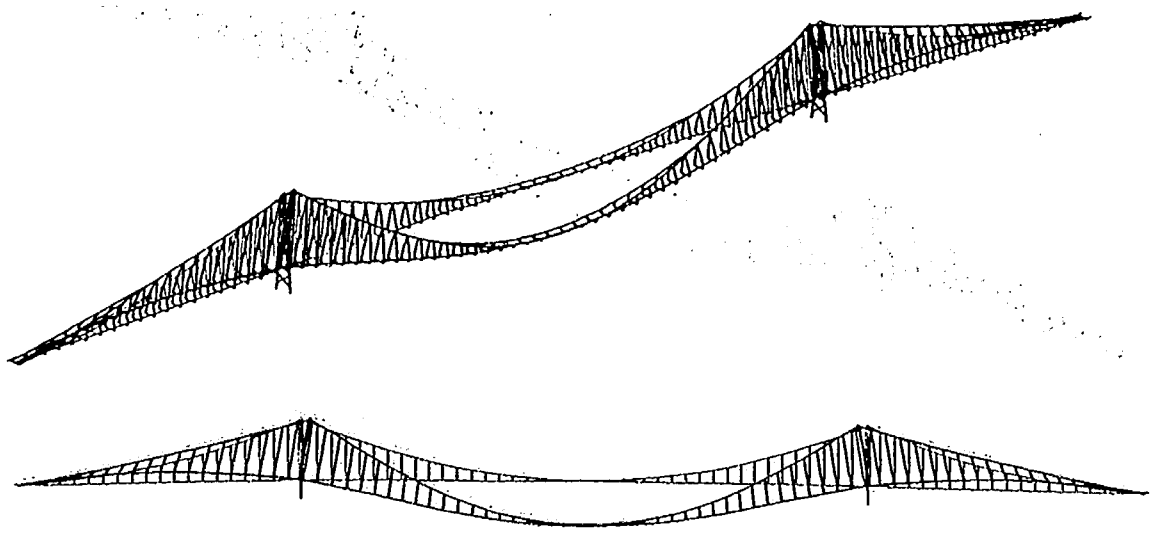


TYPE-2,CASE-2 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0579 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

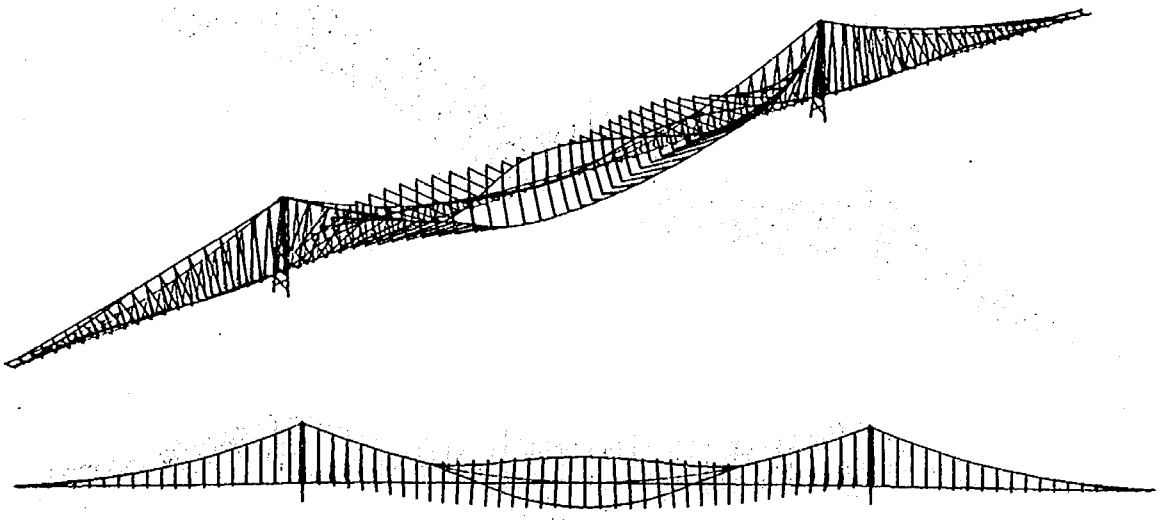


TYPE-2,CASE-2 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1158 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４１　振動モード　TYPE2-CASE2：桁高＝5m，ステイケーブル，L/4，A=1倍

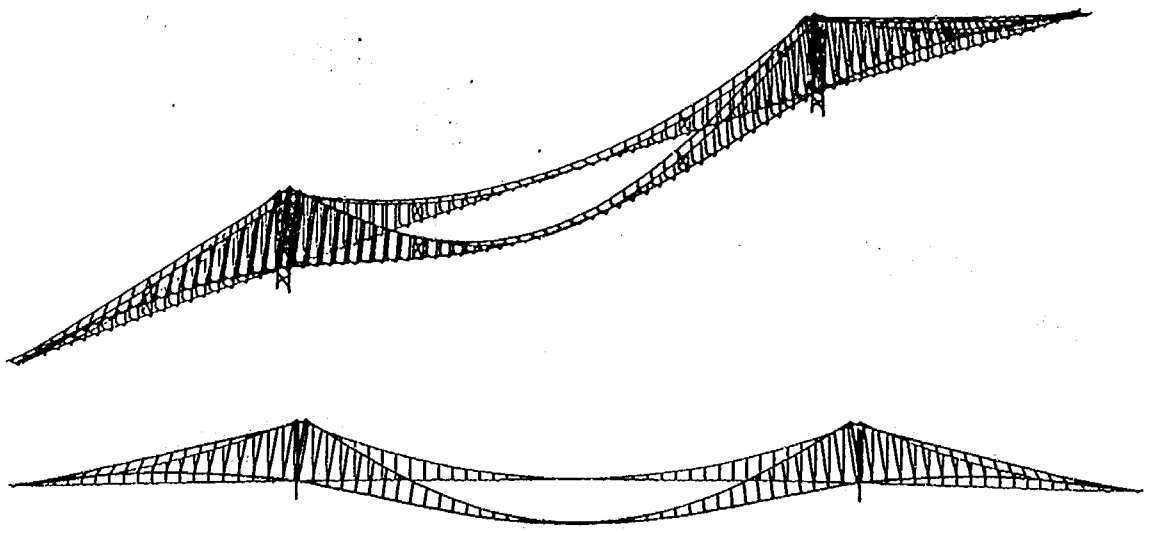


TYPE-2,CASE-3 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

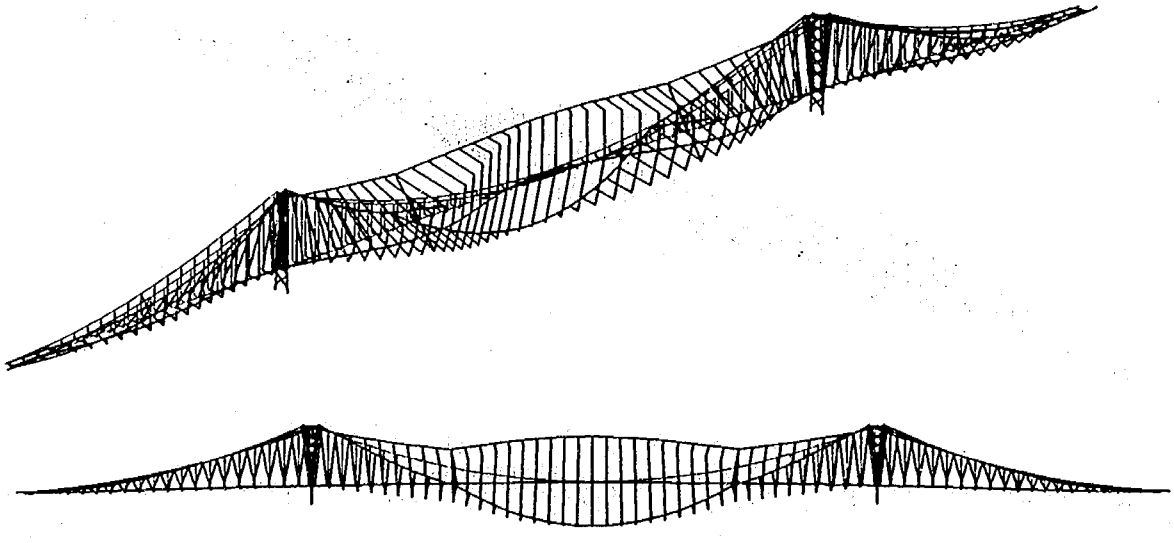


TYPE-2,CASE-3 ,MODE= 10 , 固有振動数= 0.1395 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４２ 振動モード TYPE2-CASE3：桁高＝5m, モノケーブル

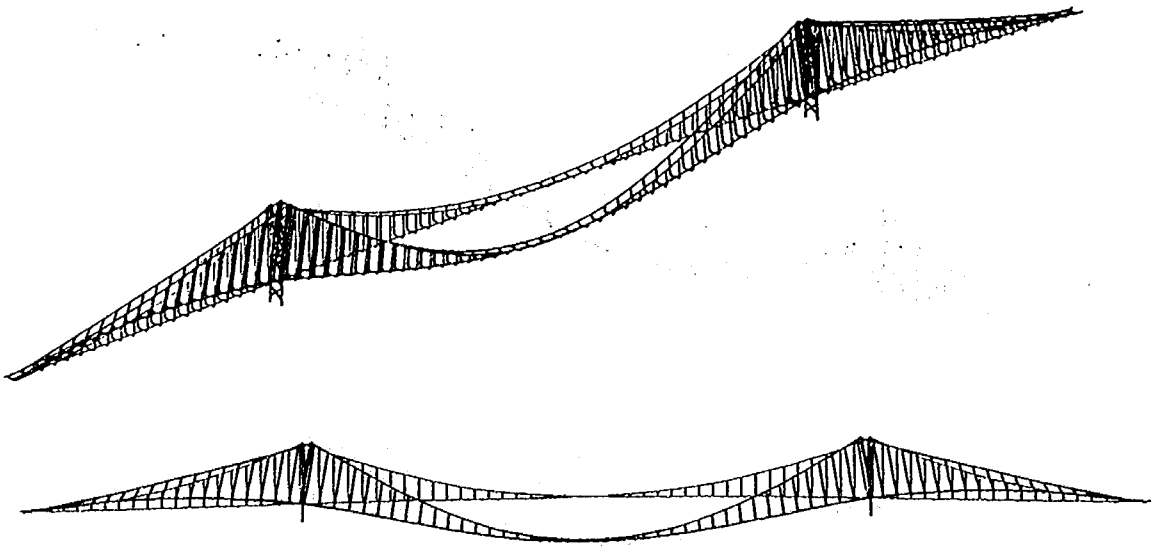


TYPE-2,CASE-4 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0559 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

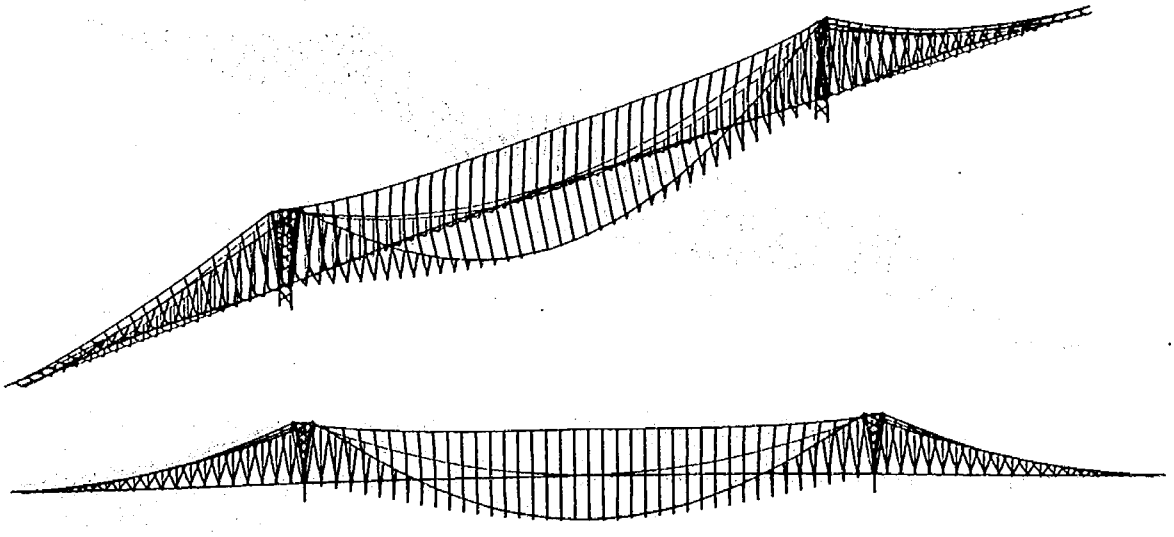


TYPE-2,CASE-4 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1291 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４３ 振動モード TYPE2-CASE4：桁高＝5m，クロスハンガー（X型，I≠0）

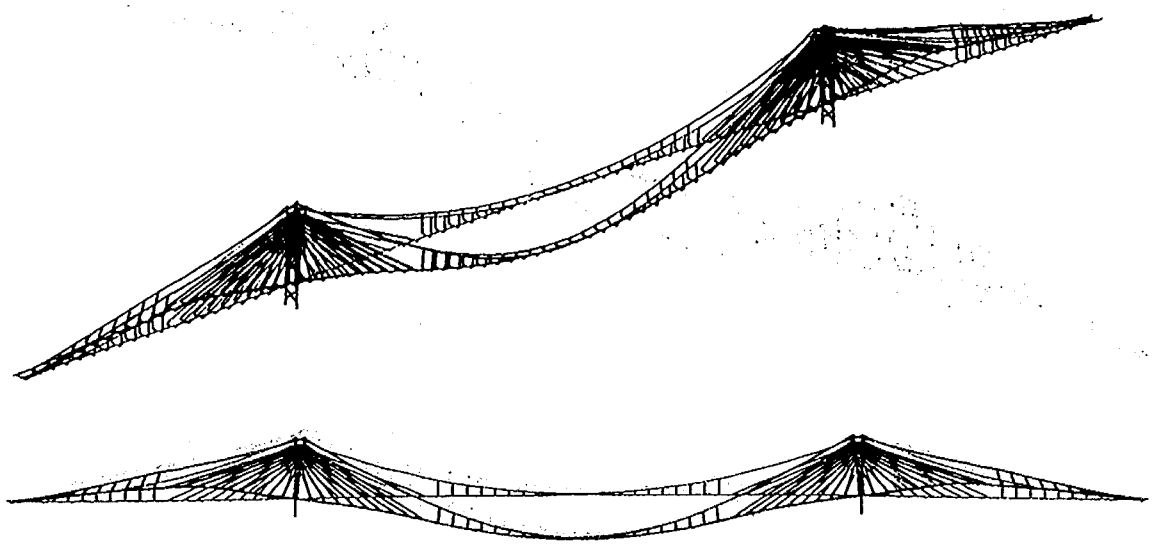


TYPE-3,CASE-1 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0560 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

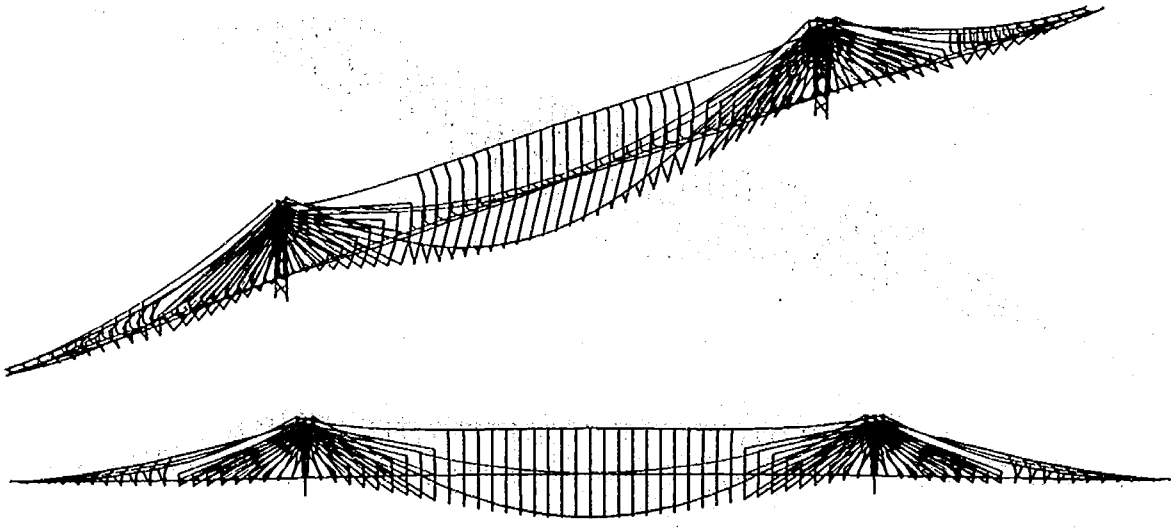


TYPE-3,CASE-1 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1327 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４４　振動モード　TYPE3-CASE1：桁高＝7m，基本断面

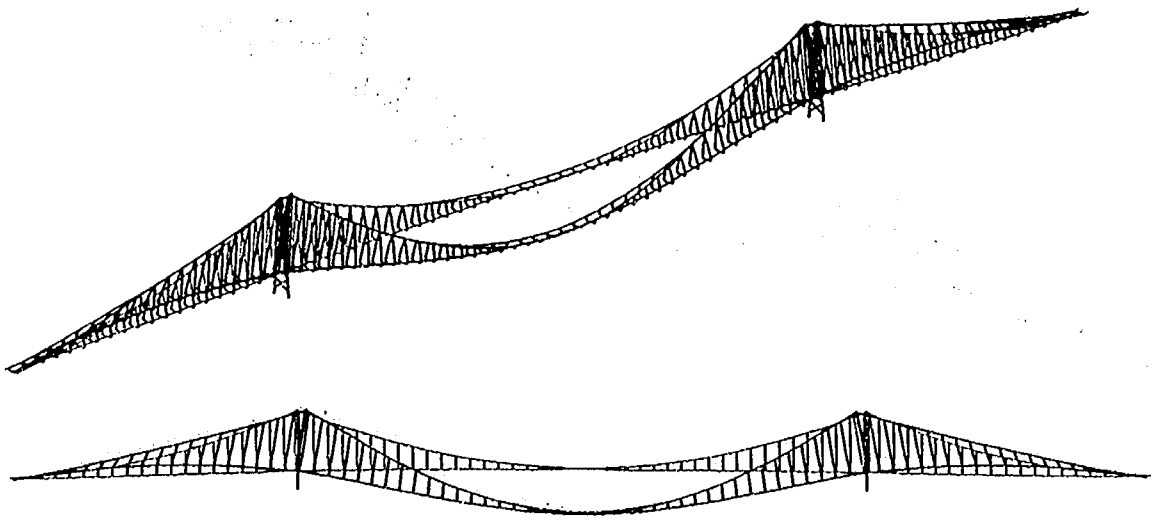


TYPE-3,CASE-2 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0581 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

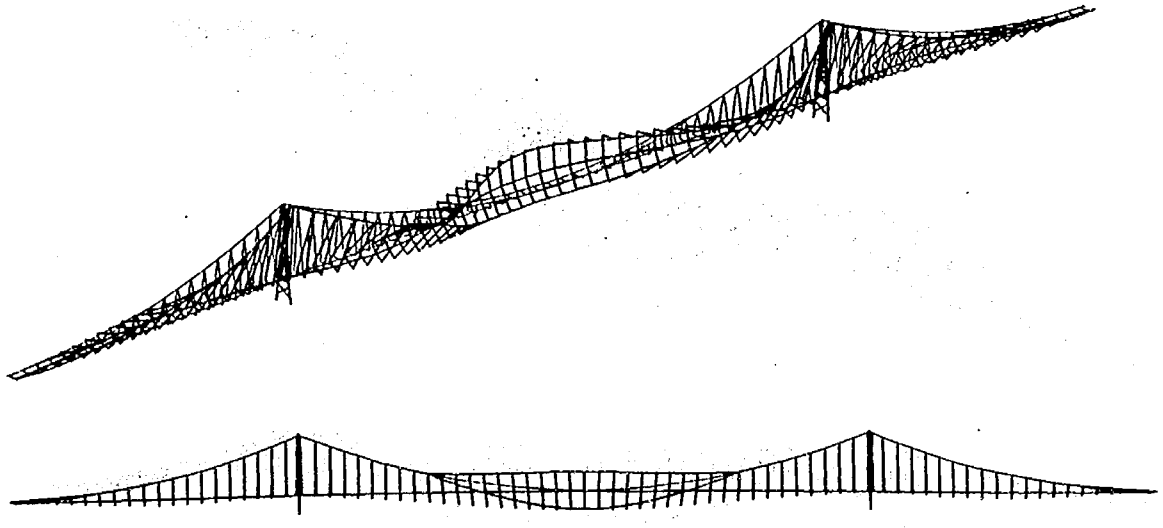


TYPE-3,CASE-2 ,MODE= 14 , 固有振動数= 0.1316 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４５ 振動モード TYPE3-CASE2：桁高＝7m, ステイケーブル, L/4, A=1倍

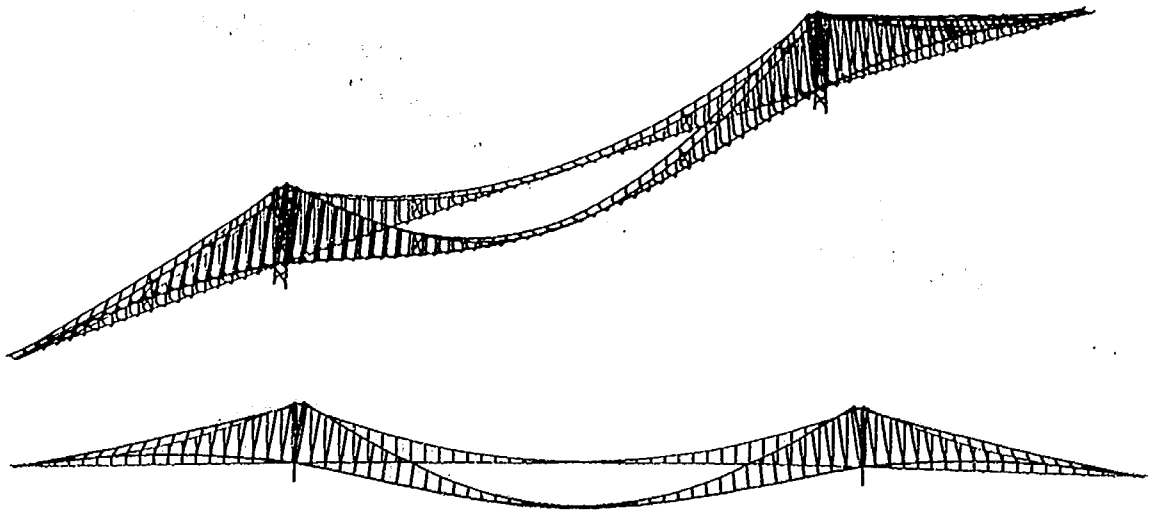


TYPE-3,CASE-3 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0559 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

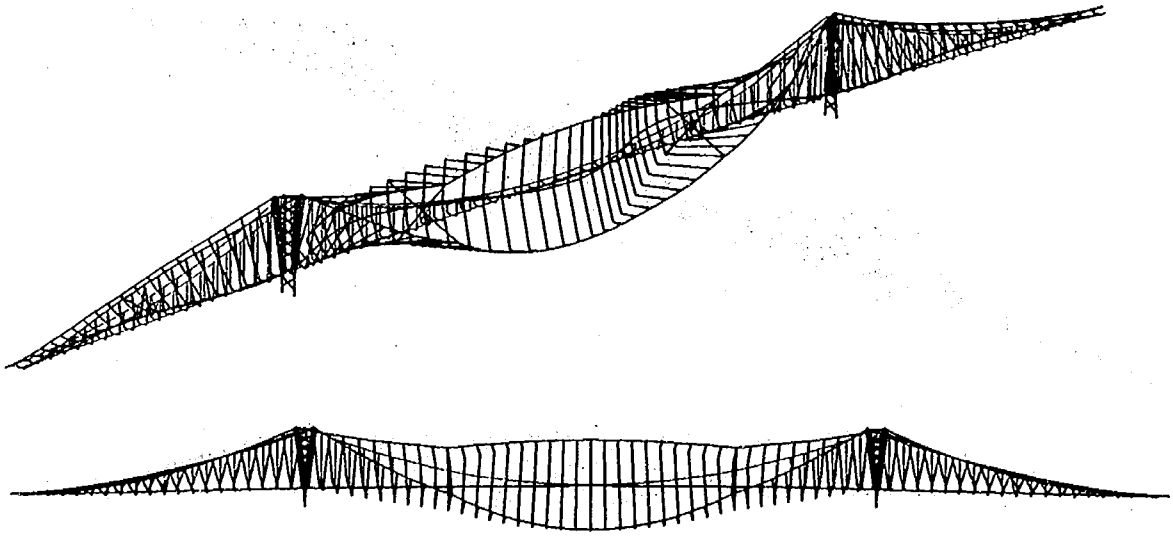


TYPE-3,CASE-3 ,MODE= 10 , 固有振動数= 0.1423 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４６ 振動モード TYPE3-CASE3：桁高＝7m, モノケーブル

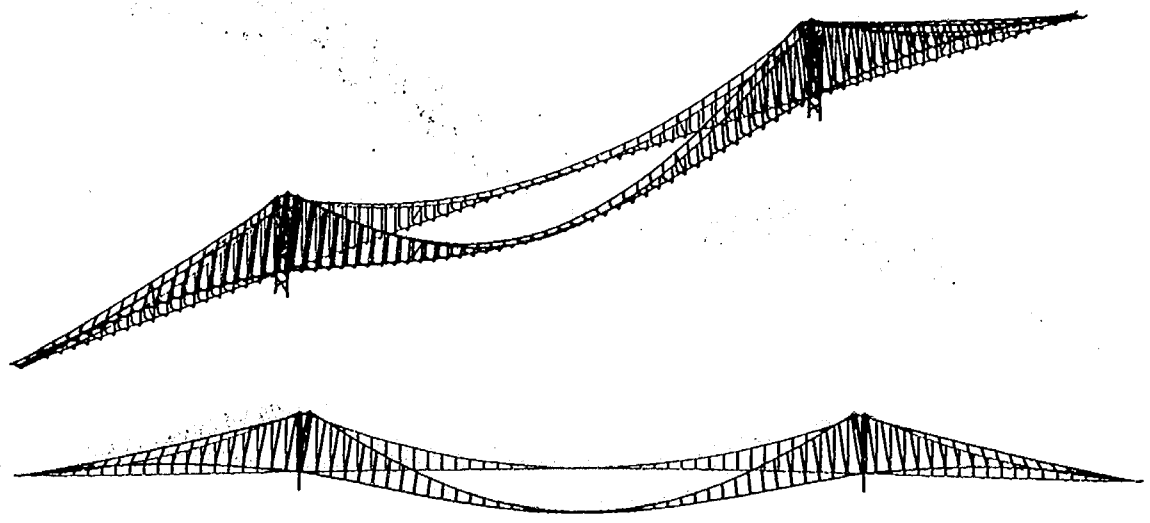


TYPE-3,CASE-4 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0560 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

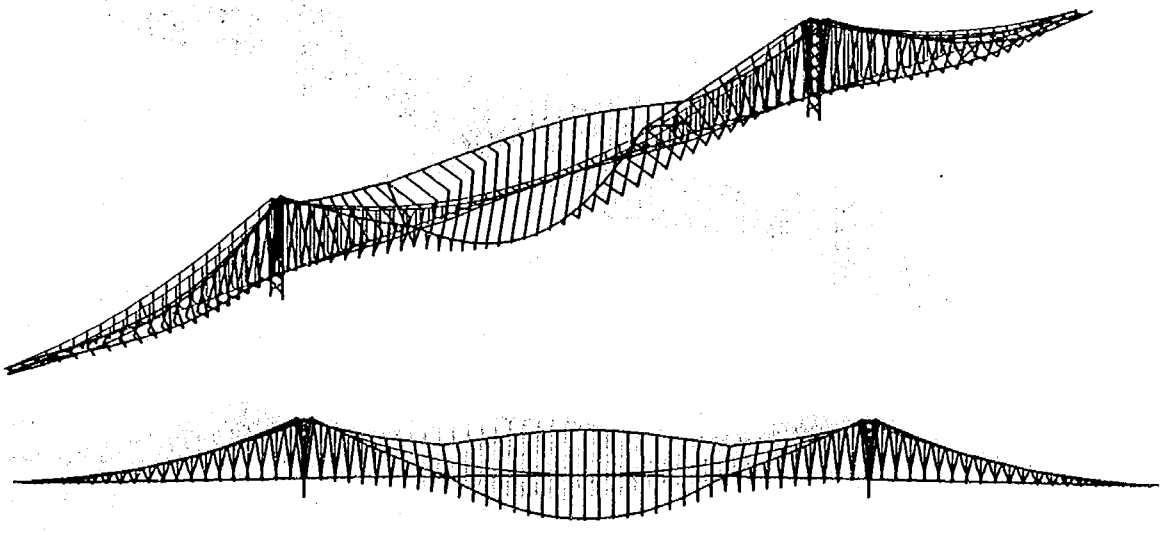


TYPE-3,CASE-4 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1345 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４７ 振動モード TYPE3-CASE4：桁高＝7m, クロスハンガー（X型, I≠0)

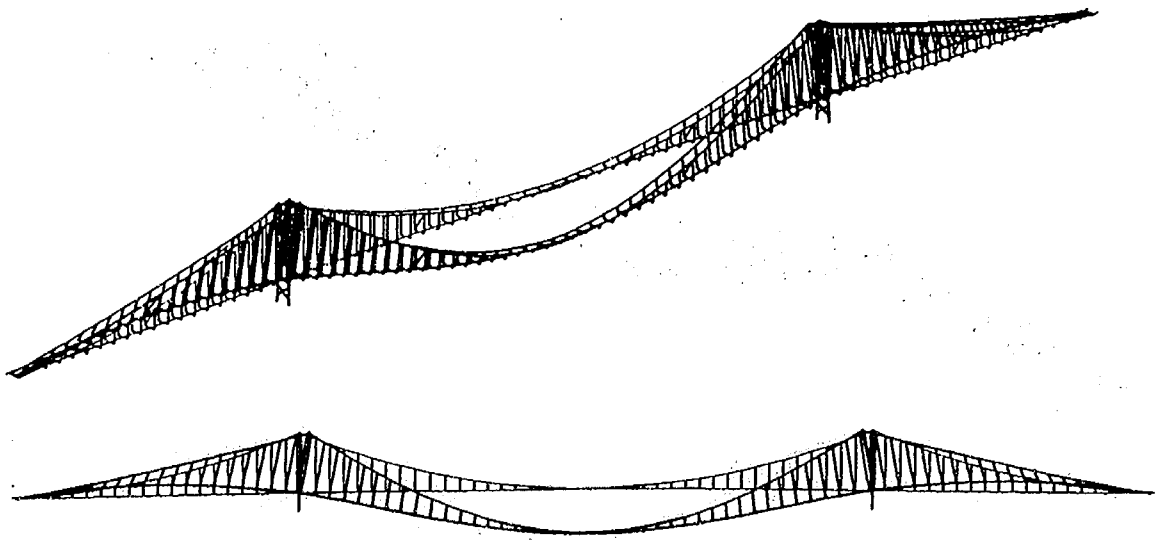


TYPE-1,CASE-42 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

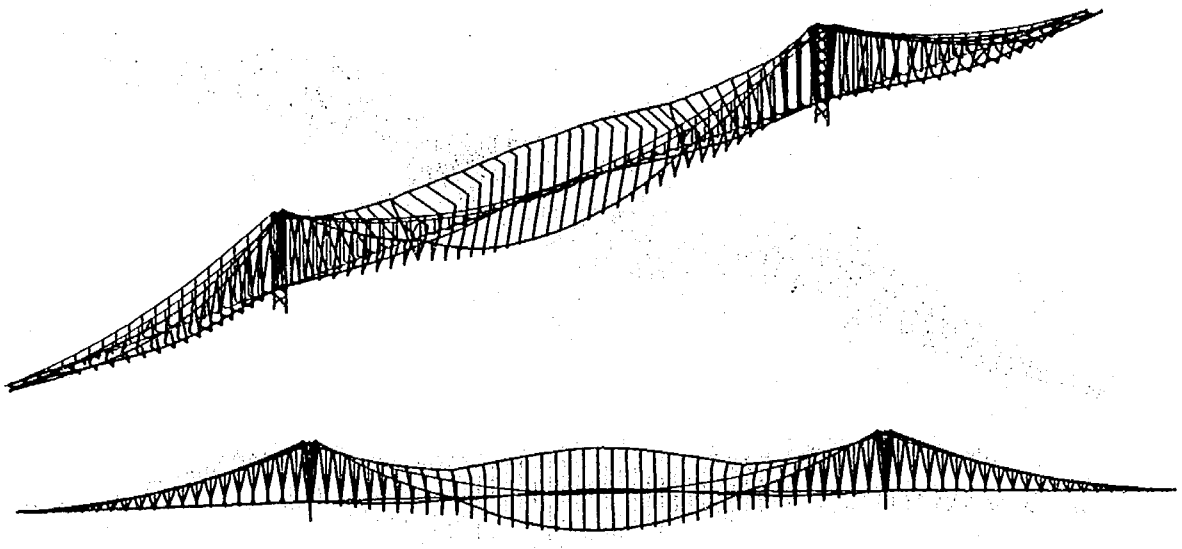


TYPE-1,CASE-42 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1178 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４８ 振動モード TYPE1-CASE42：桁高＝3m, クロスハンガー（交互片引き型, I≠0)

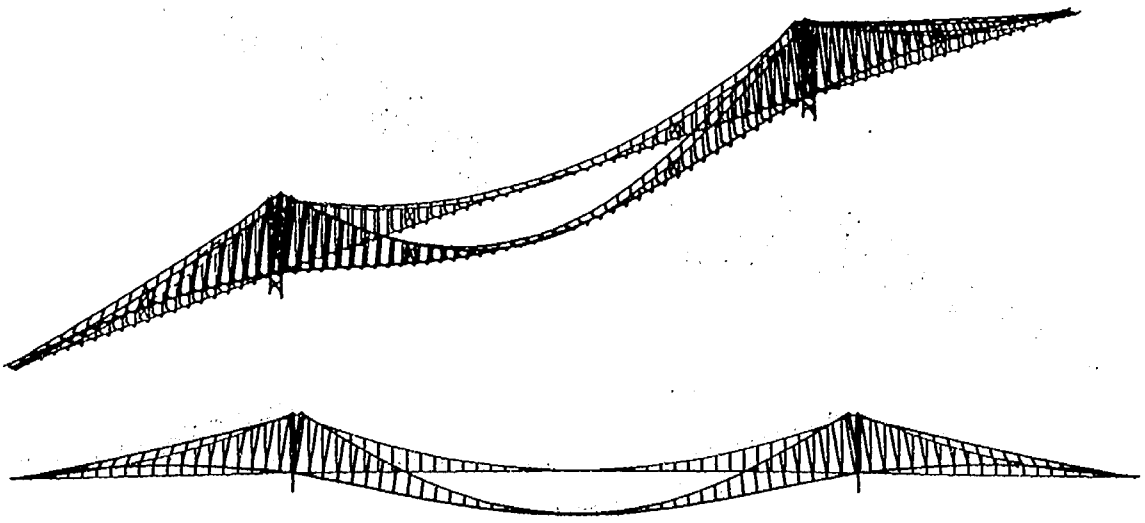


TYPE-1,CASE-43 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

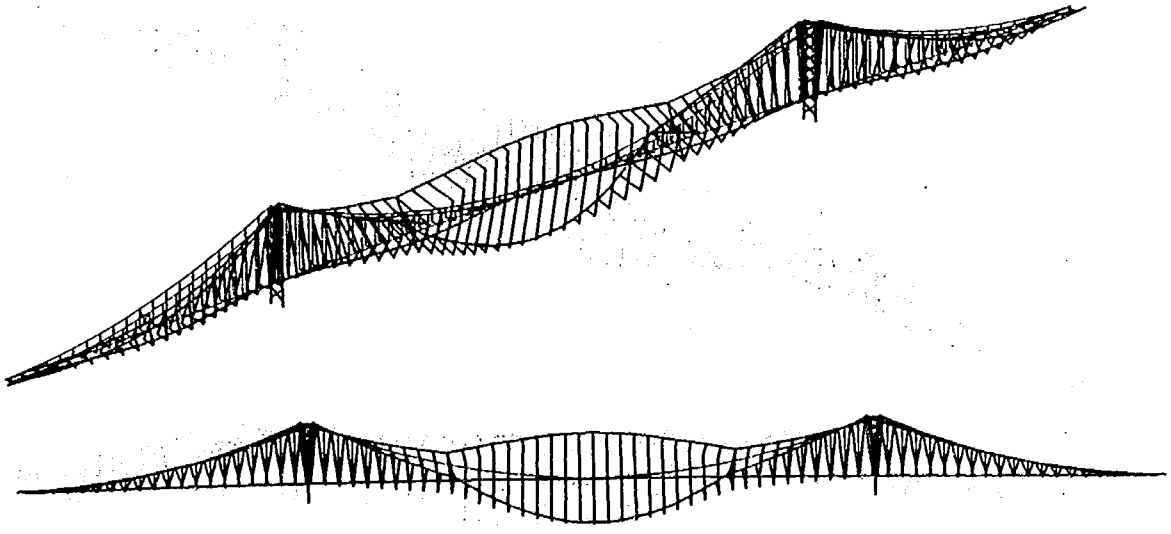


TYPE-1,CASE-43 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1170 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・４９　振動モード　TYPE1-CASE43：桁高＝3m，クロスハンガー（片側片引き型，Ｉ＝0）

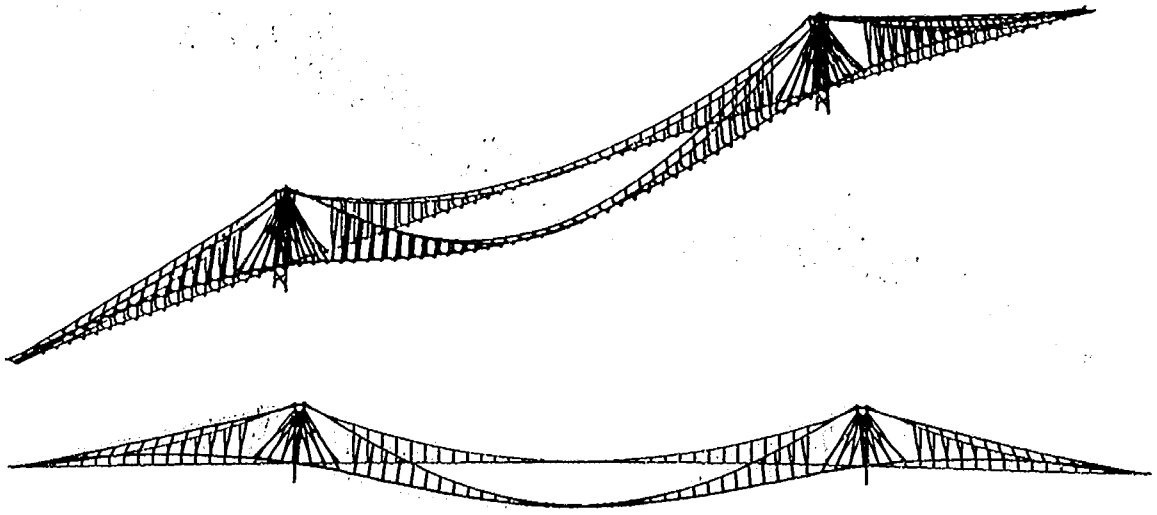


TYPE-1,CASE-44 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

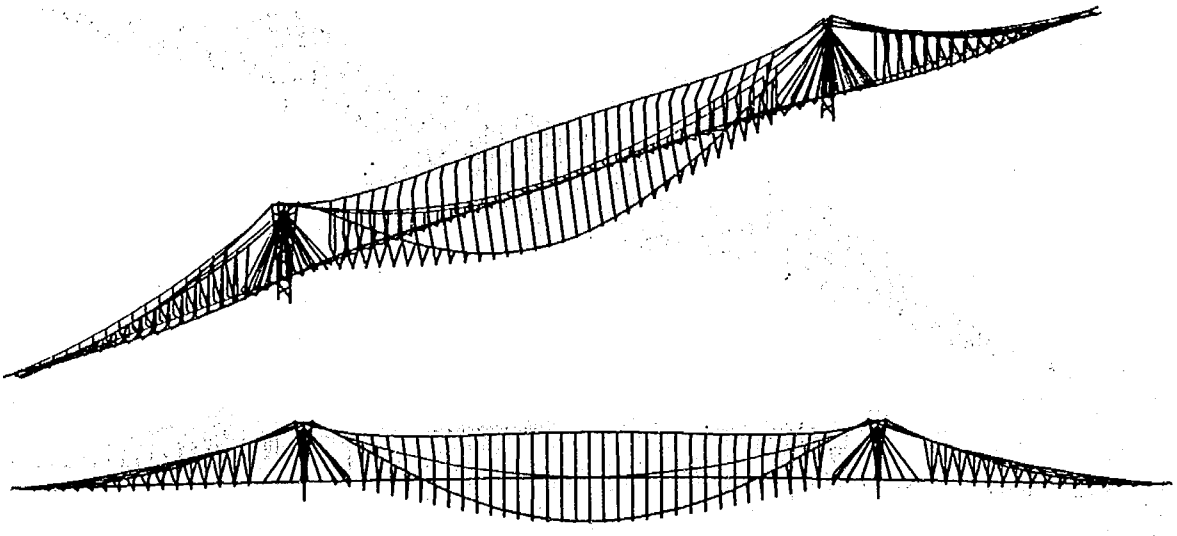


TYPE-1,CASE-44 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1210 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５０　振動モード　TYPE1-CASE44：桁高＝3m，クロスハンガー（X型，I＝0）

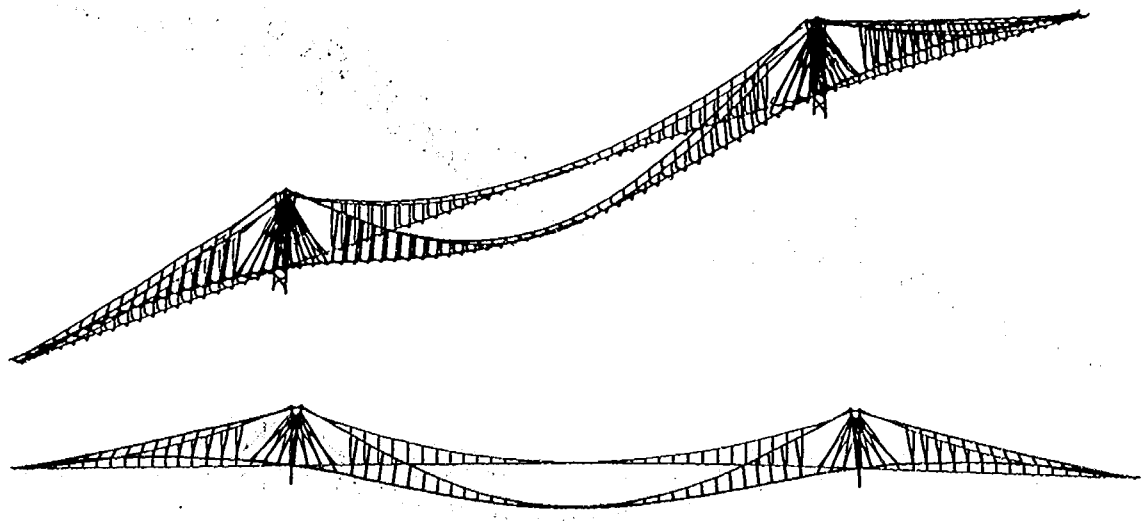


TYPE-1,CASE-25 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0562 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

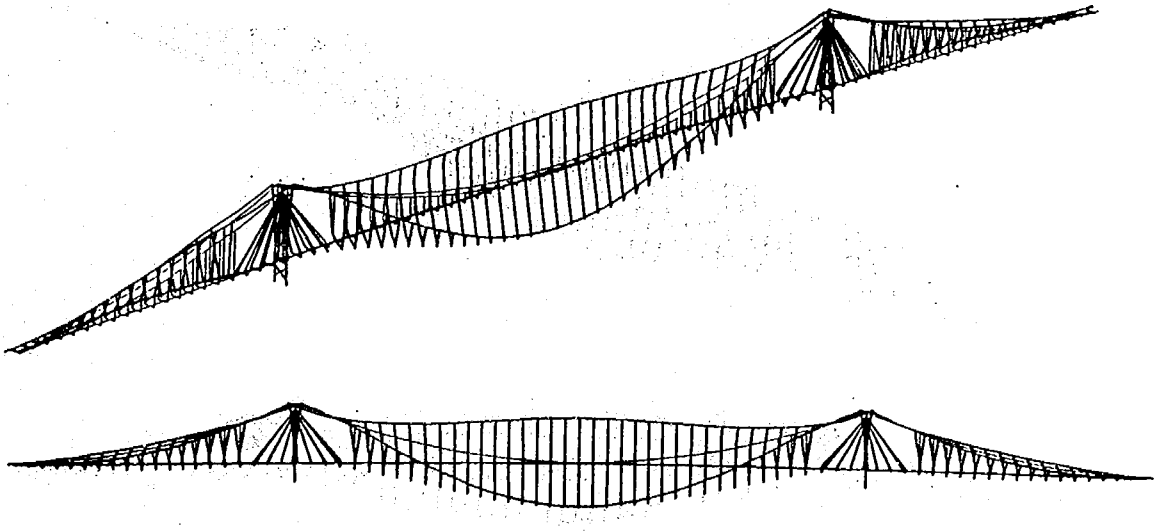


TYPE-1,CASE-25 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1044 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５１　振動モード　TYPE1-CASE25：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り

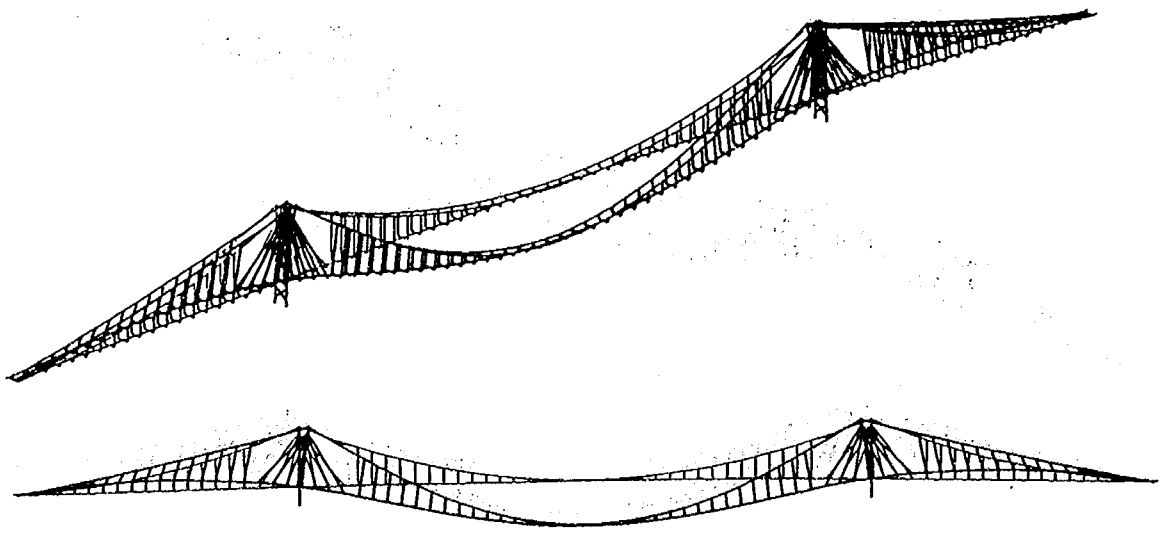


TYPE-1,CASE-26 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0574 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

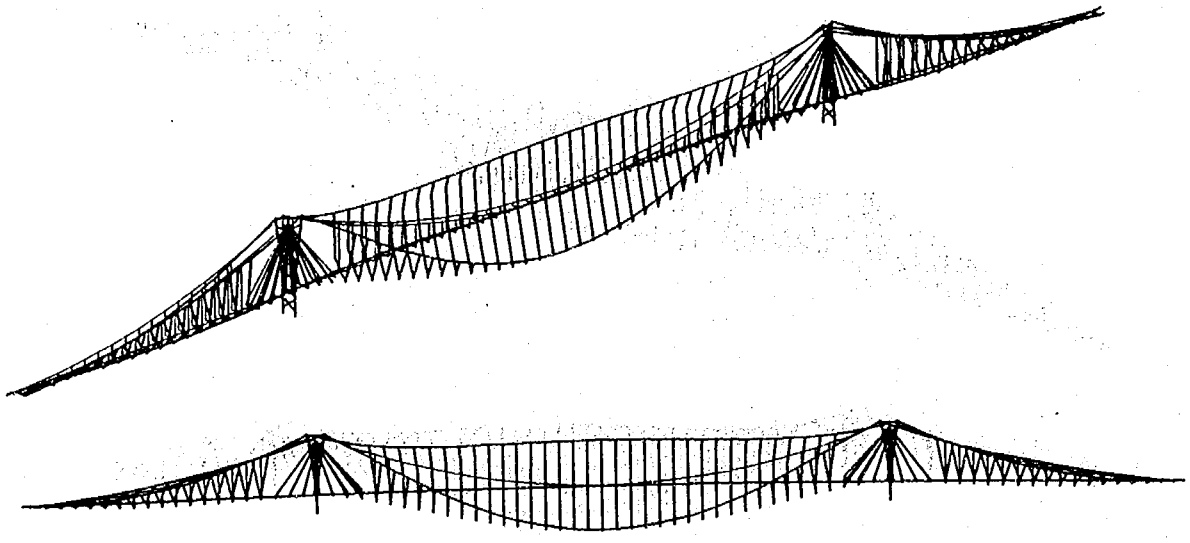


TYPE-1,CASE-26 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1167 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５２　振動モード　TYPE1-CASE26：桁高＝3m，斜材4本斜め吊り
塔をｹｰﾌﾞﾙ反力2倍として計算



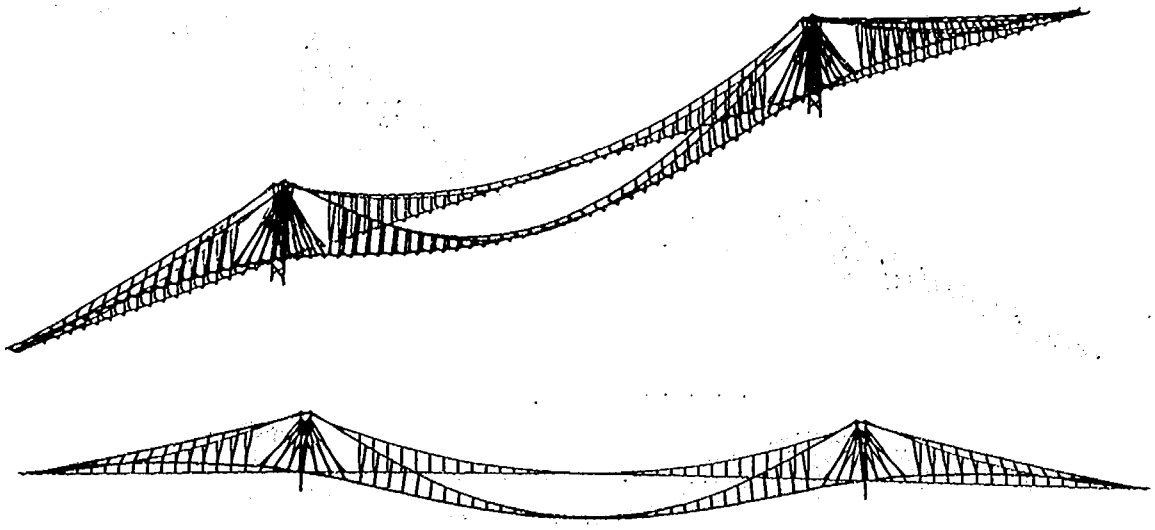
TYPE-1,CASE-27 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0565 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次



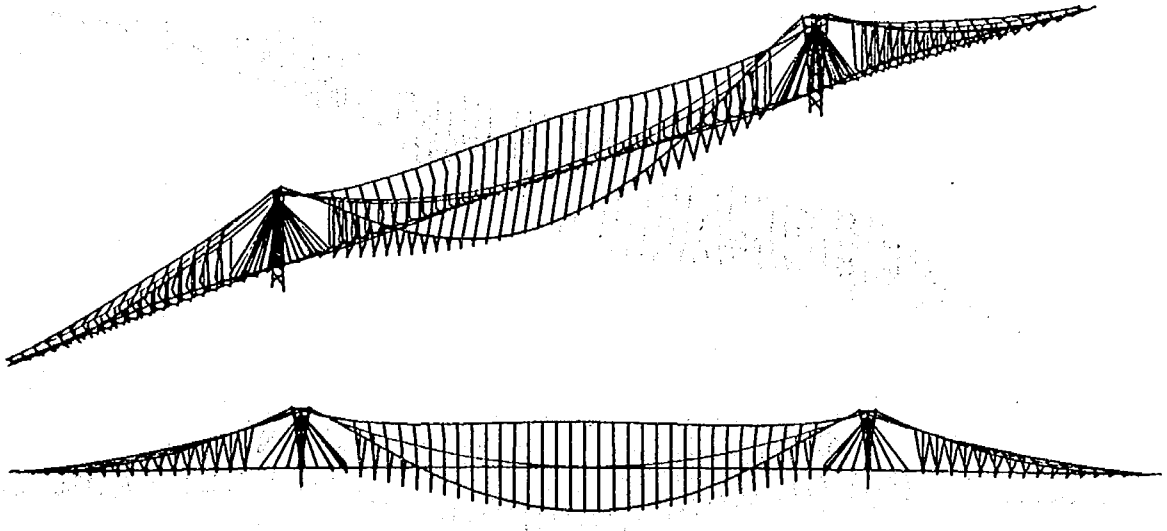
TYPE-1,CASE-27 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1034 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５３ 振動モード TYPE1-CASE27：桁高＝3m, 斜材4本斜め吊り

明石海峡大橋の塔の剛性

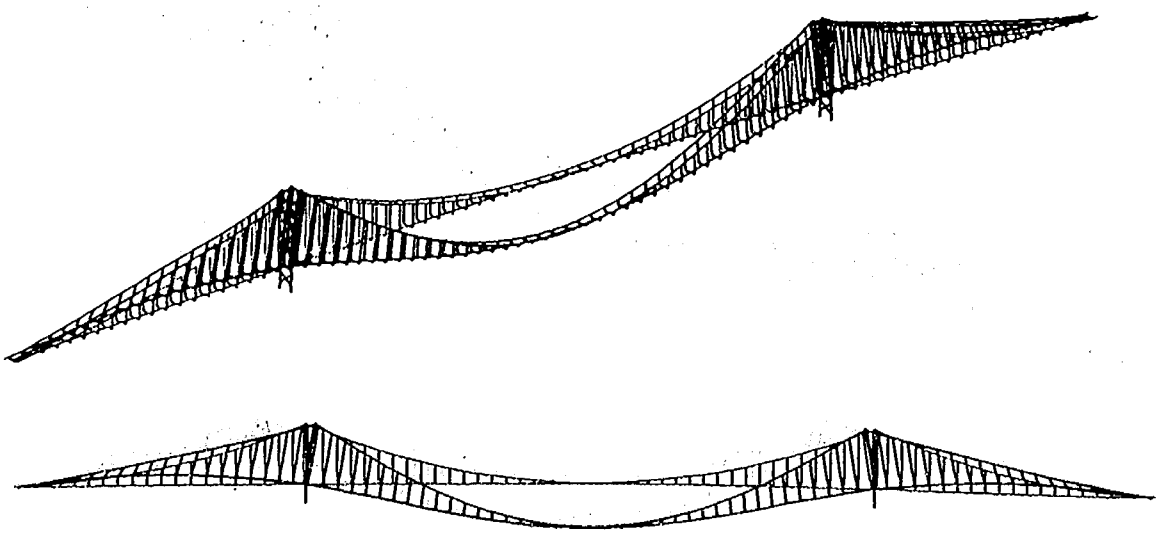


TYPE-1,CASE-28 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0565 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

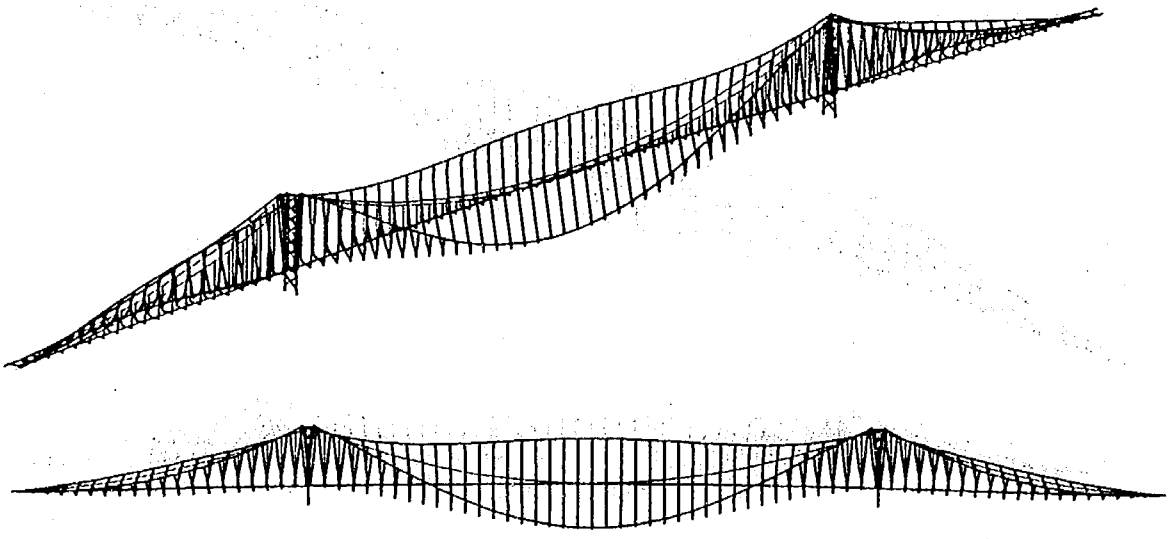


TYPE-1,CASE-28 ,MODE= 8 , 固有振動数= 0.1047 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５４　振動モード　TYPE1-CASE28：桁高＝3m, 斜材4本斜め吊り
明石海峡大橋の塔の剛性でJが2,500の値

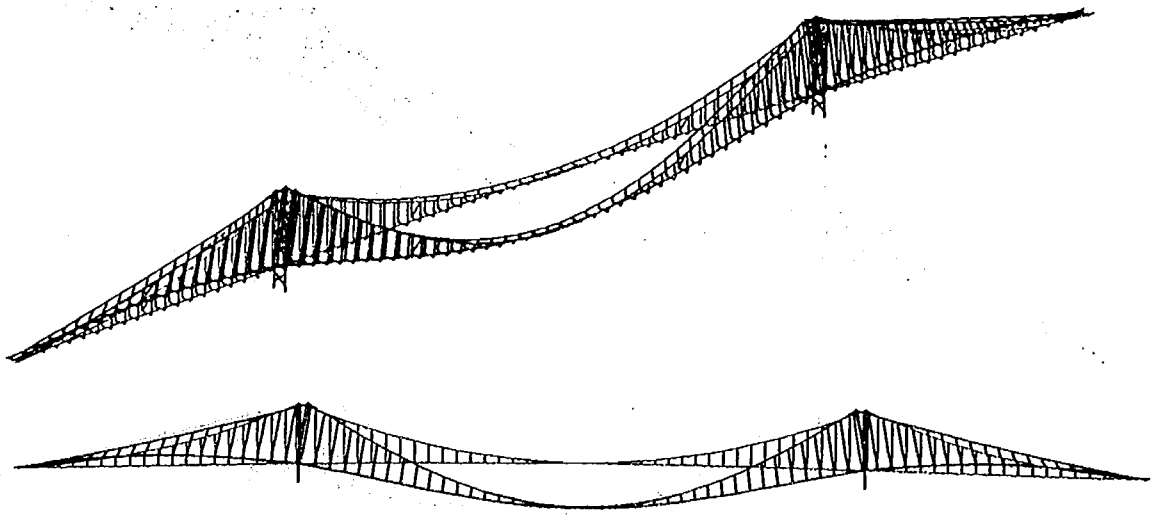


TYPE-1,CASE-1T ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0569 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

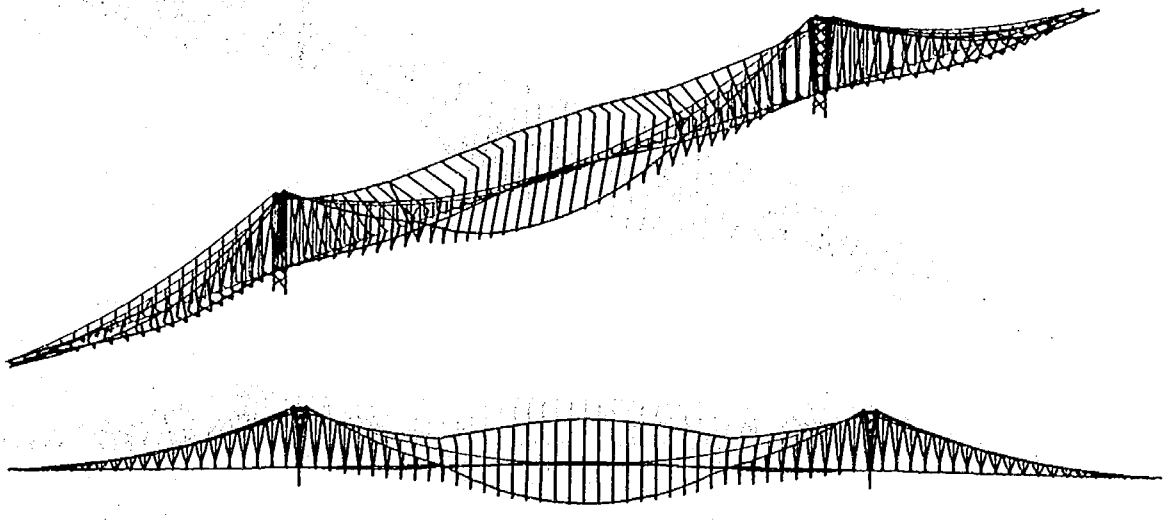


TYPE-1,CASE-1T ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1144 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５５ 振動モード TYPE1-CASE1T：桁高＝3m, 基本断面、ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔

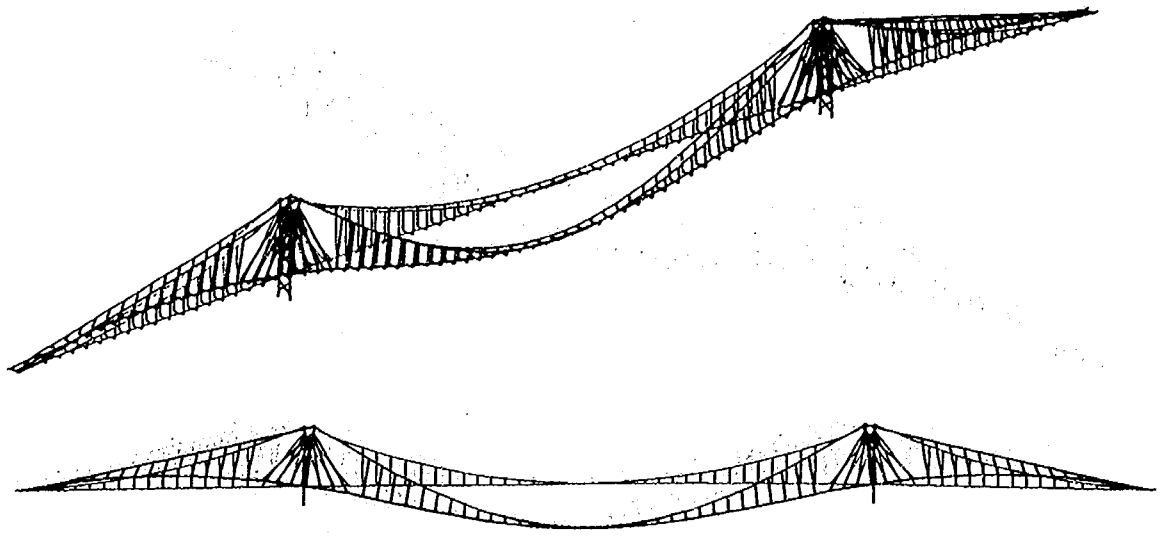


TYPE-1,CASE-46 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0558 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

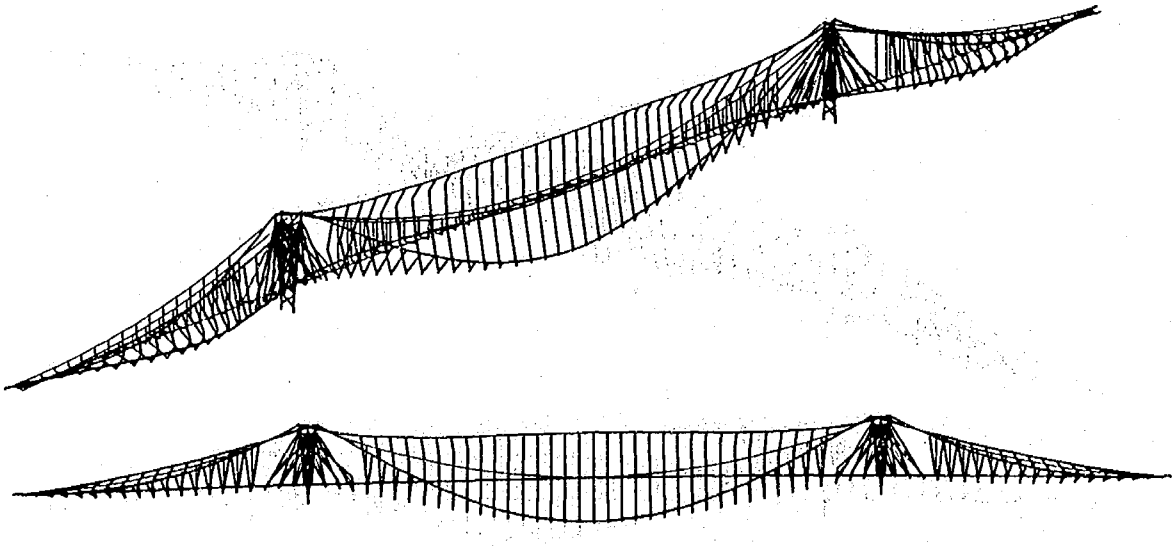


TYPE-1,CASE-46 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1176 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５６ 振動モード TYPE1-CASE46：桁高＝3m, クロスハンガー
CASE43でｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰの直径を2倍

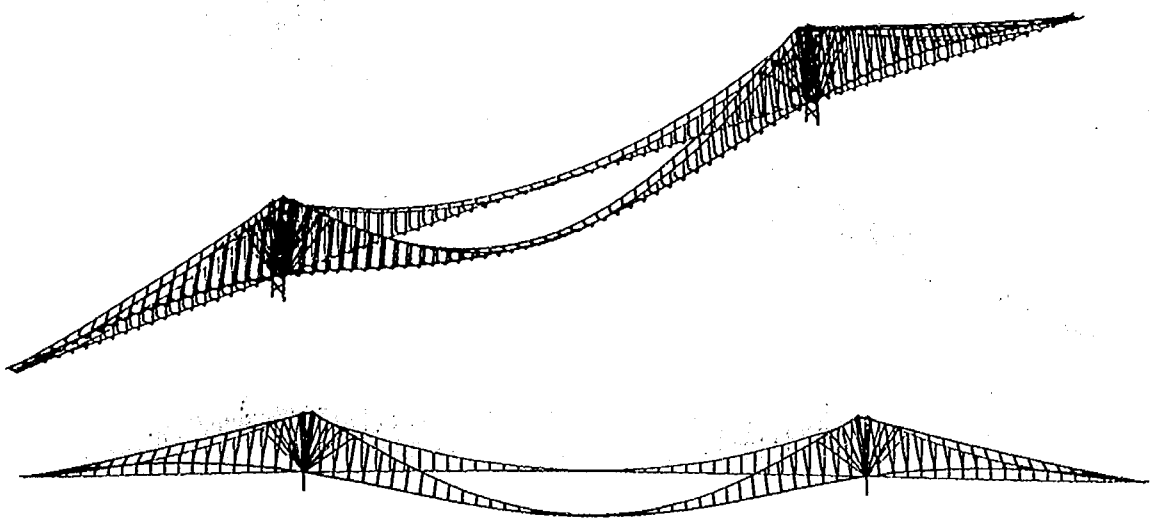


TYPE-1,CASE-29 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0569 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

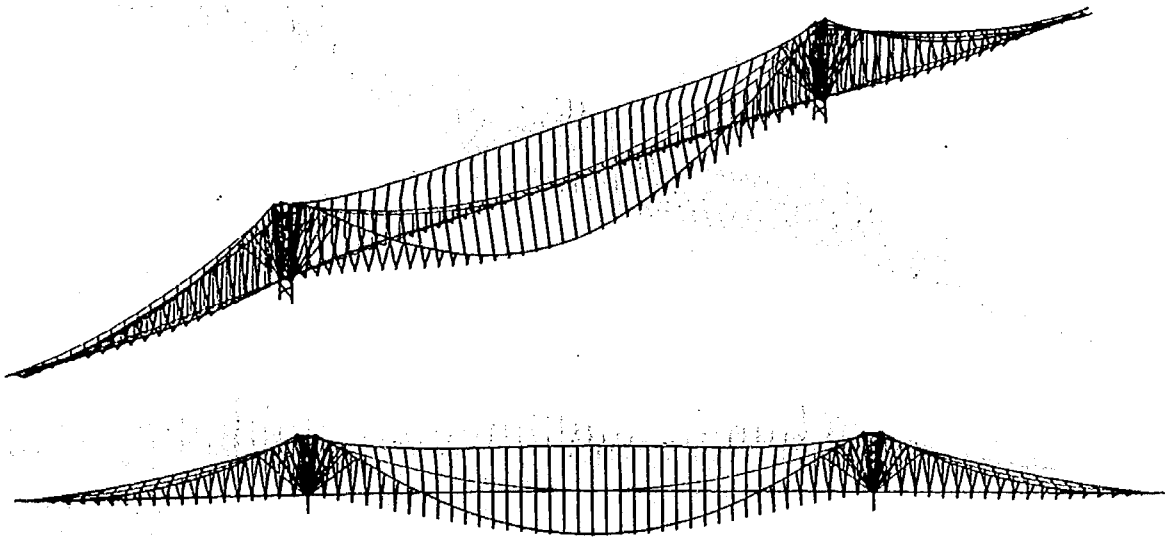


TYPE-1,CASE-29 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1149 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５７ 振動モード TYPE1-CASE29：桁高＝3m, ステイケーブル CASE22でｹｰﾌﾞﾙ重量を軽減

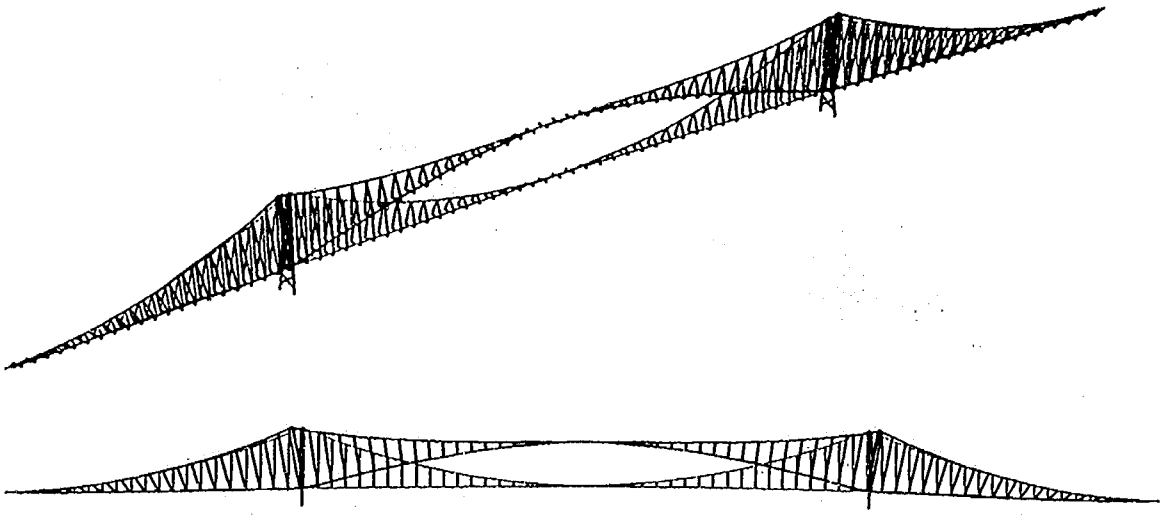


TYPE-1,CASE-2Y ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0570 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次

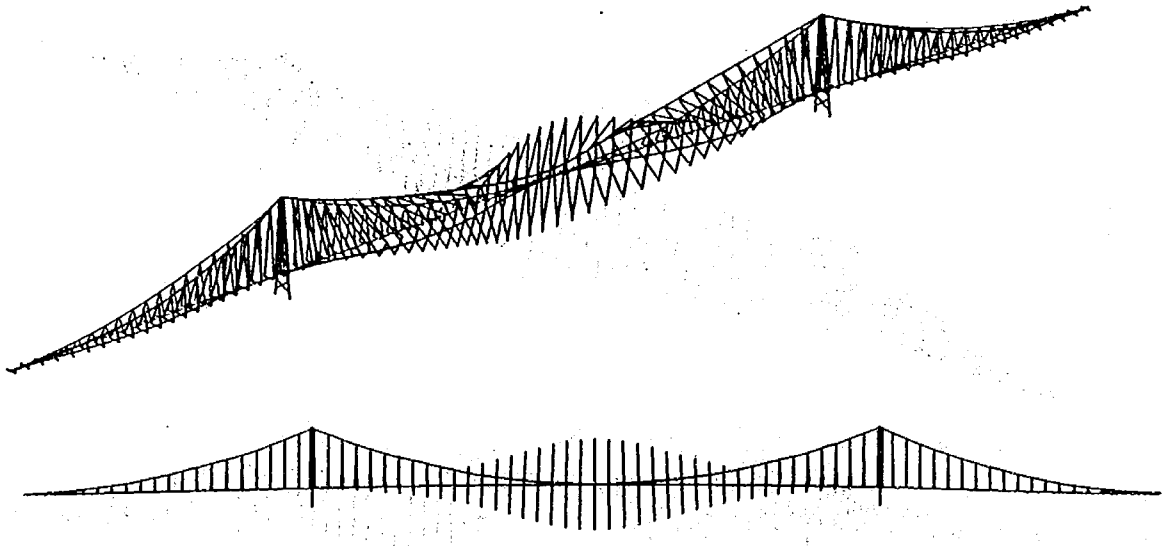


TYPE-1,CASE-2Y ,MODE= 7 , 固有振動数= 0.1022 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５８　振動モード　TYPE1-CASE2Y：桁高＝3m，ステイシステム



TYPE-1,CASE-31 ,MODE= 2 , 固有振動数= 0.0552 ,振動モード 鉛直たわみ対称１次



TYPE-1,CASE-31 ,MODE= 9 , 固有振動数= 0.1226 ,振動モード ねじれ対称１次

図－３・３・５９　振動モード　TYPE1-CASE31：桁高＝3m, シングルモノケーブル

（４）固有値解析結果の評価

表－３・３・４６，表－３・３・４７に固有値解析結果の評価一覧を示す。

１）ケーブルシステムについて

表より、ケーブルシステムの違いにより、たわみ対称１次の固有振動数にはあまり変化が見られないが、ステイケーブル，モノケーブル，クロスハンガーともにねじれ対称１次の固有振動数は高くなることにより振動数比が大きくなり（図－３・３・６０参照)、
Selberg式を用いた単位質量・極慣性モーメントによるフラッター発現風速は各々のケースで上昇している（図－３・３・６１参照)。

・ステイケーブルシステム

ステイケーブルシステムに関しては、ケーブルの諸元や塔の諸元を基本断面と同一にしてステイケーブルの諸元を変化させ解析を行った場合、フラッター発現風速は著しい上昇を示さなかった。これより、ステイケーブルシステム自体のフラッターに対する効果はあまり影響がなく、耐風性に関しての構造形式を考えるよりも他の設計項目・施工性・景観等の面から、構造形式を選定した方がよいことが伺える。

塔の剛性を変化させた場合は、剛性が大きいほどフラッター発現風速は大きくなるが、基本断面に関しても同じ割合の上昇を示すため塔の剛性はステイケーブルだけのフラッター特性には大きく影響しないことが示されている。しかしながら、塔の剛性は全体的に大きくした形の上での解析であり、前述したように塔の面外剛性のみを増加させるような塔形式にした場合は評価は異なってくると考えられる。どちらにしても、塔の剛性を増加させることは基本断面とステイケーブルに関して、耐風性に有効となる結果より、経済性と施工性を考慮してできるだけ剛性が大きい断面を用いることが望ましいと考えられる。

ケーブルの重量を軽減した場合はフラッター発現風速は数mの発現風速の上昇が見られた。これは、固有値解析でケーブルの重量が減ることによりねじれの振動数が上昇したためである。しかし、ケーブル重量が減ることにより極慣性モーメントも同時に減少するため、耐風性の向上を大きく期待はできない。

ステイケーブル併用システムでは、他のシステムと比べて振動数に大きな変化は生じないと考えることができ、耐風性を確保するためにはあまり有効ではないであろう。しかし、ケーブル重量が減少することによる経済性の向上や他のシステムより施工に関しては、過去の経験（斜張橋）を生かせるため、その活用性は考えられる。

・モノケーブルシステム

モノケーブルシステムに関しては振動数比が大きくなることにより、単位質量・極慣性モーメントを用いたSelberg式によるフラッター発現風速でもかなり上昇するが、等価質量・極慣性モーメントを用いた場合では２倍強のフラッター発現風速が得られている。これは、ねじれ１次モードの形状で水平振動の影響が大きくなり（表中の水平方向の等価質量を参照）、等価極慣性モーメントが大きくなるため、フラッター発現風速が大きく上昇していると考えられる。

・クロスハンガーシステム

クロスハンガーシステムに関しても、モノケーブルシステムと同様のことが言える。クロスハンガーの断面積や結合形式に関しては、固有値解析の結果を見る限りでは大きな変化は見られず、クロスハンガーの活用性は施工性と実用性および振動状態におけるハンガーの応力的な問題をクリアできれば、有効であると考えられる。

クロスハンガーの張り型で交互に張るＸ型と片側だけの／型の解析を行ったが、フラッターに影響する低次のモードでの固有振動数およびモード形状はほとんど差がなかった。

ケーブルシステムの変更は、固有値解析を見る限りでは有効的に耐風性を確保できるが、この段階での評価は方法が平板翼理論に基づいているため、予備的な評価となる。

2）桁高の違いについて

桁高を大きくすると各ケーブルシステムとも振動数比およびフラッター発現風速は比例的に上昇していることが判る(図－３・３・６２～図－３・３・６３参照)。ただし、ケーブルシステムの違いにより比例の度合いは異なり、基本断面で桁高７ｍでフラッター発現風速が4割程度上昇しているのに対して、モノケーブルは1割程度となっている。これは、モノケーブルシステムは、固有振動数が桁の剛性よりもケーブルの剛性により決定づけられているためであると考えられ、モノケーブルシステムの有効性が判断できる。

実際には５ｍと７ｍの断面構成は桁高３ｍの重量を規準に決定しているため、実用的な断面かどうかは疑問であり、この結果は１つの判断材料にしかならない。

表－３・３・４６　固有値解析検討結果評価表（その１）

桁高＝８ｍ　単位質量：　4.356 kg・sec2/m　単位極慣性：　1,470.000 kg・m・sec2/m

ケース			TYPE-1, CASE-1	TYPE-1, CASE-2	TYPE-1, CASE-3	TYPE-1, CASE-4
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ				ステイケーブル	モノケーブル	クロスハンガー
条　件			基本ケース	L/4位置, A=1倍		X型, l≠0
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0558	0.0579	0.0557	0.0558
		ねじれ対称1次	0.0978	0.1025	0.1383	0.1220
振動数比			1.75	1.77	2.48	2.19
基本断面の振動数比との比較			1.00	1.01	1.42	1.25
たわみ１次	y	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg・sec2/m)	4.419	4.547	4.413	4.419
	xθ	(kg・m・sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg・sec2/m)	6.518	15.070	9.542	17.370
	z	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	xθ	(kg・m・sec2/m)	3,179.000	2,111.000	5,067.000	2,734.000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		33.54	35.32	52.85	45.30
	基本断面との比較		1.00	1.05	1.58	1.35
	等価質量・等価極慣性使用		40.81	39.08	72.25	53.09
	基本断面との比較		1.00	0.96	1.77	1.30

ケース			TYPE-1, CASE-22	TYPE-1, CASE-23	TYPE-1, CASE-24	TYPE-1, CASE-2G
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ			ステイケーブル	ステイケーブル	ステイケーブル	ステイケーブル
条　件			L/12位置, A=1倍	L/12位置, A=2倍	L/8位置, A=2倍	L/4位置, A=2倍
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0562	0.0563	0.0569	0.0581
		ねじれ対称1次	0.1024	0.1029	0.1034	0.1033
振動数比			1.82	1.83	1.82	1.78
基本断面の振動数比との比較			1.04	1.04	1.04	1.01
たわみ１次	y	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg・sec2/m)	4.433	4.434	4.465	4.566
	xθ	(kg・m・sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg・sec2/m)	13.190	19.040	27.490	20.270
	z	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	xθ	(kg・m・sec2/m)	2,175.000	1,928.000	1,795.000	1,968.000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		35.74	35.96	36.05	35.66
	基本断面との比較		1.07	1.07	1.07	1.06
	等価質量・等価極慣性使用		39.59	38.66	38.13	38.82
	基本断面との比較		0.97	0.95	0.93	0.95

ケース			TYPE-1, CASE-25	TYPE-1, CASE-26	TYPE-1, CASE-27	TYPE-1, CASE-28
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ			ステイケーブル	ステイケーブル	ステイケーブル	ステイケーブル
条　件			L/12位置, 斜め張り	L/12位置, 斜め張り ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔	L/12位置, 斜め張り 明石の塔相当	L/12位置, 斜め張り 明石の塔Jは UP
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0562	0.0574	0.0565	0.0565
		ねじれ対称1次	0.1044	0.1167	0.1034	0.1047
振動数比			1.86	2.03	1.83	1.85
基本断面の振動数比との比較			1.06	1.16	1.04	1.06
たわみ１次	y	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg・sec2/m)	4.433	4.444	4.436	4.436
	xθ	(kg・m・sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg・sec2/m)	26.900	143.800	12.450	18.250
	z	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	xθ	(kg・m・sec2/m)	1,802.000	1,571.000	2,252.000	1,977.000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		36.74	42.42	36.16	36.80
	基本断面との比較		1.10	1.27	1.08	1.10
	等価質量・等価極慣性使用		38.82	43.35	40.41	39.81
	基本断面との比較		0.95	1.06	0.99	0.98
			33.73	44.17	32.12	33.71

ケース			TYPE-1, CASE-42	TYPE-1, CASE-43	TYPE-1, CASE-44	TYPE-1, CASE-46
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ			クロスハンガー	クロスハンガー	クロスハンガー	クロスハンガー
条　件			交互片引き, l≠0	片側片引き, l=0	X型, l=0	片側片引き, l=0 ﾊﾝｶﾞｰ直径2倍
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0558	0.0558	0.0558	0.0558
		ねじれ対称1次	0.1178	0.1170	0.1210	0.1176
振動数比			2.11	2.10	2.17	2.11
基本断面の振動数比との比較			1.20	1.20	1.24	1.20
たわみ１次	y	(kg・sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg・sec2/m)	4.419	4.419	4.419	4.419
	xθ	(kg・m・sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg・sec2/m)	35.670	36.730	17.670	35.060
	z	(kg・sec2/m)	29,760.000	27,090.000	**	26,340.000
	xθ	(kg・m・sec2/m)	2,335.000	2,399.000	2,837.000	2,496.000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		43.32	42.94	44.83	43.22
	基本断面との比較		1.29	1.28	1.34	1.29
	等価質量・等価極慣性使用		48.80	48.71	53.03	49.52
	基本断面との比較		1.20	1.19	1.30	1.21

表－３・３・４７　固有値解析検討結果評価表（その２）

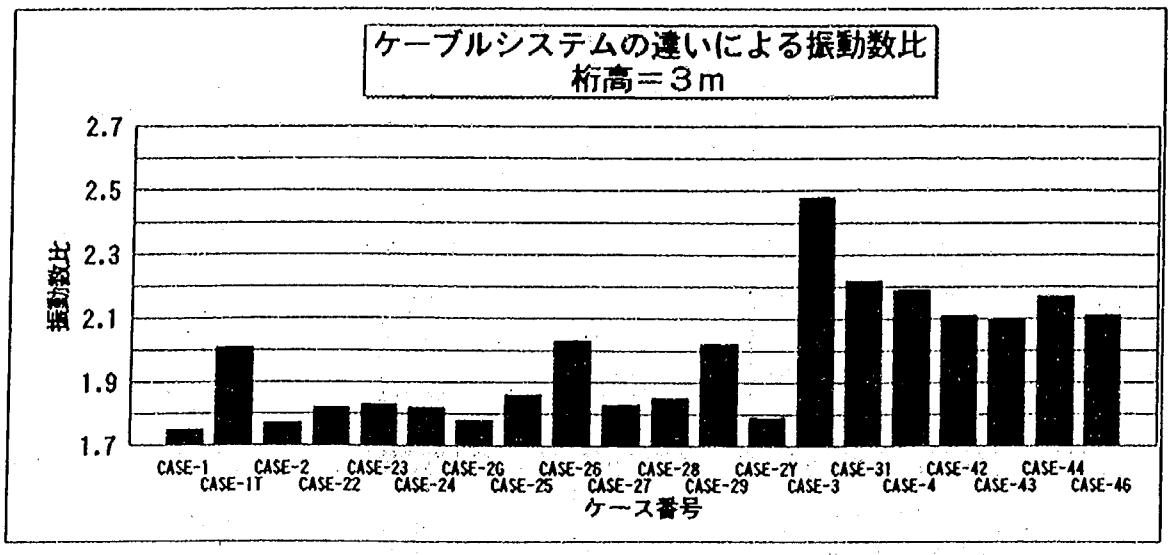
ケース ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ 条　件			TYPE-1, CASE-1T 基本断面 ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔	TYPE-1, CASE-2Y ステイケーブル L/12位置, A=1倍 ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減	TYPE-1, CASE-2Y ステイシステム 剛性は0	TYPE-1, CASE-3L ｼﾌﾞﾙﾓﾉｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0569	0.0569	0.0570	0.0552
		ねじれ対称1次	0.1144	0.1149	0.1022	0.1226
振動数比			2.01	2.02	1.79	2.22
基本断面の振動数比との比較			1.15	1.15	1.02	1.27
たわみ１次	y	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg･sec2/m)	4,431	3,646	4,420	4,374
	x θ	(kg･m･sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg･sec2/m)	115,300	99,270	11,550	7,415
	z	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	x θ	(kg･m･sec2/m)	1,584,000	1,145,000	2,295,000	1,829,000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		41.44	38.59	35.42	45.71
	基本断面との比較		1.24	1.15	1.06	1.36
	等価質量・等価極慣性使用		42.40	37.45	39.74	48.32
	基本断面との比較		1.04	0.92	0.97	1.18

桁高＝５ｍ　単位質量：　4,356 kg･sec2/m　単位極慣性：　1,522,000 kg･m･sec2/m

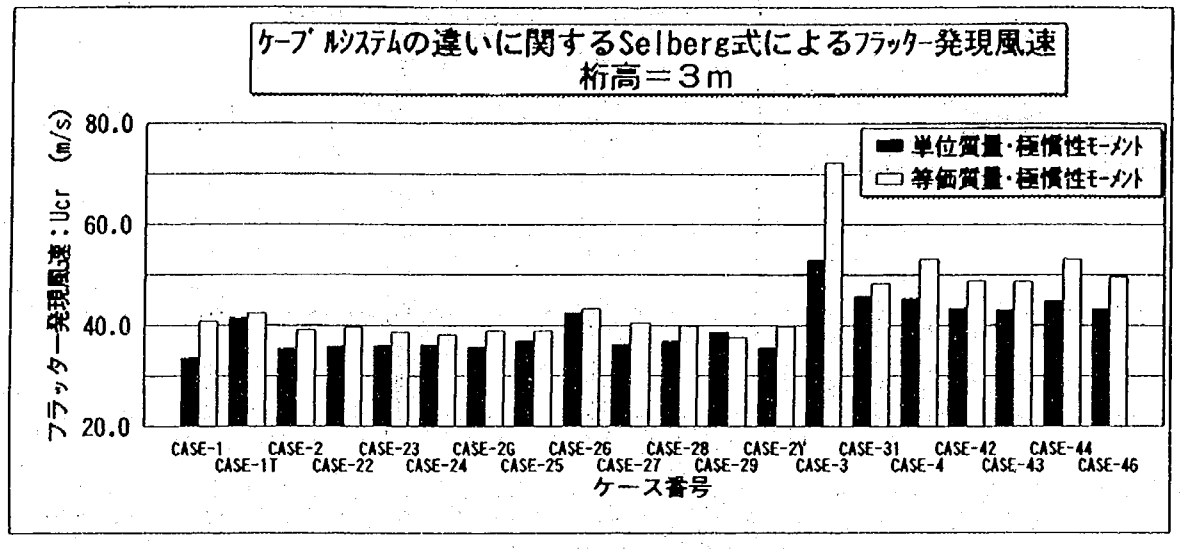
ケース ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ 条　件			TYPE-2, CASE-1 基本ケース	TYPE-2, CASE-2 ステイケーブル L/4位置, A=1倍	TYPE-2, CASE-3 モノケーブル	TYPE-2, CASE-4 クロスハンガー X型, I＝0
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0559	0.0579	0.0558	0.0559
		ねじれ対称1次	0.1168	0.1158	0.1395	0.1291
振動数比			2.09	2.00	2.50	2.31
桁高3mの動数比との比較			1.19	1.13	1.01	1.06
たわみ１次	y	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg･sec2/m)	4,419	4,530	4,413	4,419
	x θ	(kg･m･sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg･sec2/m)	169,700	110,700	12,570	8,422
	z	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	x θ	(kg･m･sec2/m)	1,602,000	1,722,000	7,304,000	4,259,000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		43.19	42.24	53.85	49.01
	桁高3mとの比較		1.29	1.20	1.02	1.08
	等価質量・等価極慣性使用		43.91	43.99	79.96	63.62
	桁高3mとの比較		1.08	1.13	1.11	1.20

桁高＝７ｍ　単位質量：　4,356 kg･sec2/m　単位極慣性：　1,554,000 kg･m･sec2/m

ケース ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ 条　件			TYPE-3, CASE-1 基本ケース	TYPE-3, CASE-2 ステイケーブル L/4位置, A=1倍	TYPE-3, CASE-3 モノケーブル	TYPE-3, CASE-4 クロスハンガー X型, I＝0
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0560	0.0581	0.0559	0.0560
		ねじれ対称1次	0.1327	0.1316	0.1423	0.1345
振動数比			2.37	2.27	2.55	2.40
桁高3mの動数比との比較			1.35	1.28	1.03	1.10
たわみ１次	y	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	z	(kg･sec2/m)	4,419	4,524	4,413	4,419
	x θ	(kg･m･sec2/m)	**	**	**	**
ねじれ１次	y	(kg･sec2/m)	11,230	22,860	15,080	5,705
	z	(kg･sec2/m)	**	**	**	**
	x θ	(kg･m･sec2/m)	2,788,000	2,342,000	6,759,000	6,872,000
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性使用		50.93	49.99	55.40	51.77
	桁高3mとの比較		1.52	1.42	1.05	1.14
	等価質量・等価極慣性使用		59.16	55.92	80.27	75.35
	桁高3mとの比較		1.45	1.43	1.11	1.42

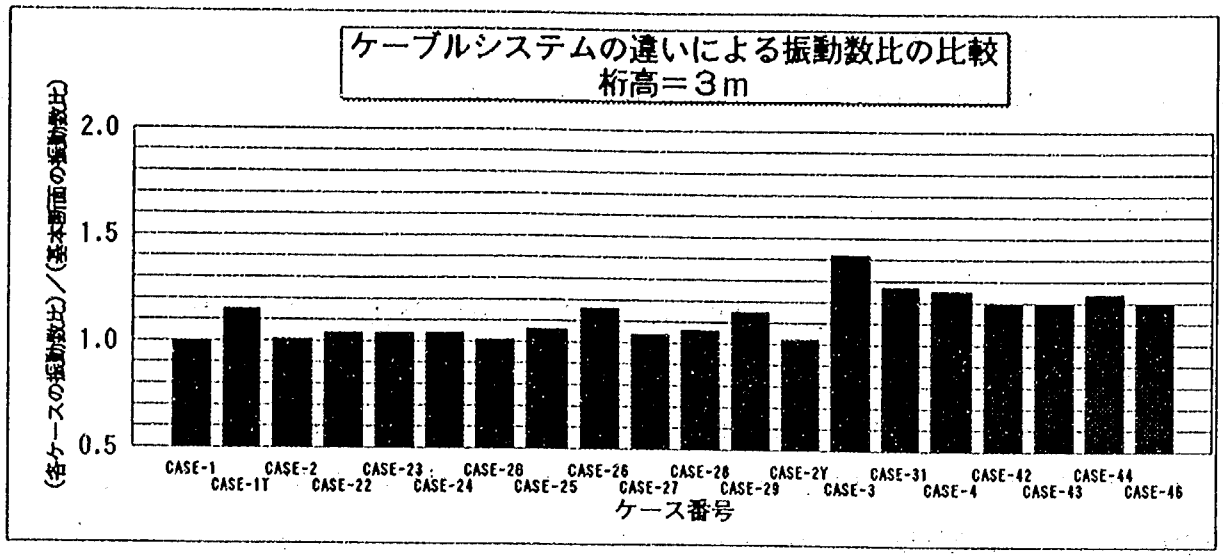


図－３・３・６０　ケーブルシステムの違いによる振動数比

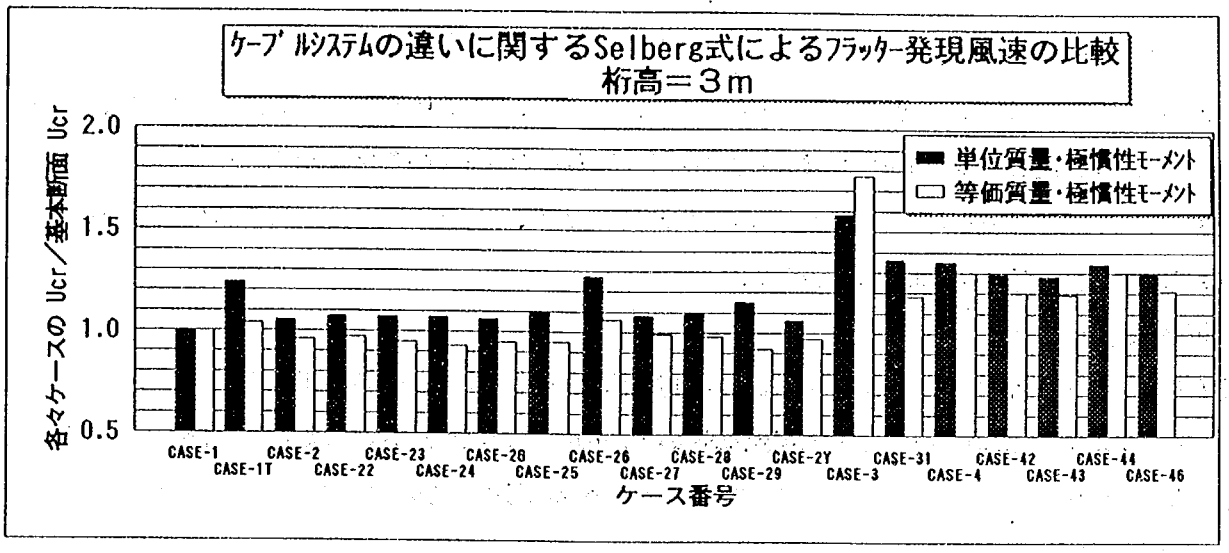


図－３・３・６１　ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑの違いに関するSelberg式によるﾌﾗｯﾀｰ発現風速

CASE-1 ：　基本断面
CASE-1T ：　基本断面（ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔）
CASE-2 ：　ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
CASE-22:　ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）
CASE-23:　ステイケーブル（L/12位置，A=2倍）
CASE-24:　ステイケーブル（L/8位置，A=2倍）
CASE-2G:　ステイケーブル（L/4位置，A=2倍）
CASE-25:　ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍）
CASE-26:　ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔）
CASE-27:　ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，明石の塔相当）
CASE-28:　ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，
明石の塔相当でＪは基本断面と同じ）
CASE-29:　ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減
CASE-2Y:　ステイシステム　剛性は0
CASE-3 ：　モノケーブル(Monoduoﾀｲﾌﾟ)
CASE-31 ：　シングルモノケーブル
CASE-4 ：　クロスハンガー（X型，Ｉ≠0）
CASE-42:　クロスハンガー（交互片引き，Ｉ≠0）
CASE-43:　クロスハンガー（片側片引き，Ｉ＝0）
CASE-44　クロスハンガー（X型，Ｉ＝0）
CASE-46　クロスハンガー（片側片引き，Ｉ＝0，ﾊﾝｶﾞｰ直径2倍）



図－３・３・６２　ケーブルシステムの違いによる振動数比の比較



図－３・３・６３　ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑの違いに関するSelberg式によるﾌﾗｯﾀｰ発現風速の比較

CASE-1 ： 基本断面
CASE-1T ：基本断面（ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔）
CASE-2 ： ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
CASE-22： ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）
CASE-23： ステイケーブル（L/12位置，A=2倍）
CASE-24： ステイケーブル（L/8位置，A=2倍）
CASE-26： ステイケーブル（L/4位置，A=2倍）
CASE-25： ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍）
CASE-26： ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，ｹｰﾌﾞﾙ反力2倍の塔）
CASE-27： ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，明石の塔相当）
CASE-28： ステイケーブル 斜め張り（L/12位置，A=1倍，
明石の塔相当でＪは基本断面と同じ）
CASE-29： ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減
CASE-2Y： ステイシステム　剛性は0
CASE-3 ： モノケーブル(Monoduoﾀｲﾌﾟ)
CASE-31 ：シングルモノケーブル
CASE-4 ： クロスハンガー（X型，I≠0）
CASE-42： クロスハンガー（交互片引き，I≠0）
CASE-43： クロスハンガー（片側片引き，I＝0）
CASE-44　クロスハンガー（X型，I＝0）
CASE-46　クロスハンガー（片側片引き，I＝0，ﾊﾝｶﾞｰ直径2倍）

3．3．3　まとめ

固有値解析およびSelbergの式により、２箱桁を有する超長大橋のケーブルシステムのフラッター特性を推定した。

主要な成果は以下のとおりである。

・ステイケーブルシステム

ステイケーブルシステムに関しては、１箱桁の場合と同じように耐風性の改善の効果は小さい。

・モノケーブルシステム

モノケーブルシステムに関しては振動数比が大きくなることにより、単位質量・極慣性モーメントを用いたSelberg式によるフラッター発現風速でもかなり上昇するが、等価質量・極慣性モーメントを用いた場合では２倍強のフラッター発現風速が得られている。これは、ねじれ１次モードの形状で水平振動の影響が大きくなり等価極慣性モーメントが大きくなるため、フラッター発現風速が大きく上昇しているものと考えられる。

・クロスハンガーシステム

クロスハンガーシステムに関しても、モノケーブルシステムと同様のことが言える。クロスハンガーの断面積や結合形式に関しては、固有値解析の結果を見る限りでは大きな変化は見られない。クロスハンガーの張り型で交互に張るＸ型と片側だけの／型の解析を行ったが、フラッターに影響する低次のモードでの固有振動数およびモード形状はほとんど差がなかった。

・桁高の違いについて

桁高を高くすると各ケーブルシステムとも振動数比およびフラッター発現風速が上昇する。ただし、ケーブルシステムの違いによりフラッター発現風速の増加の度合いは異なる。桁高を４ｍから７ｍに変化させた場合、通常の吊橋のケーブルシステムではフラッター発現風速が4割程度上昇しているのに対して、モノケーブルの場合は1割程度となっている。

4．フラッター解析

4．1　目的

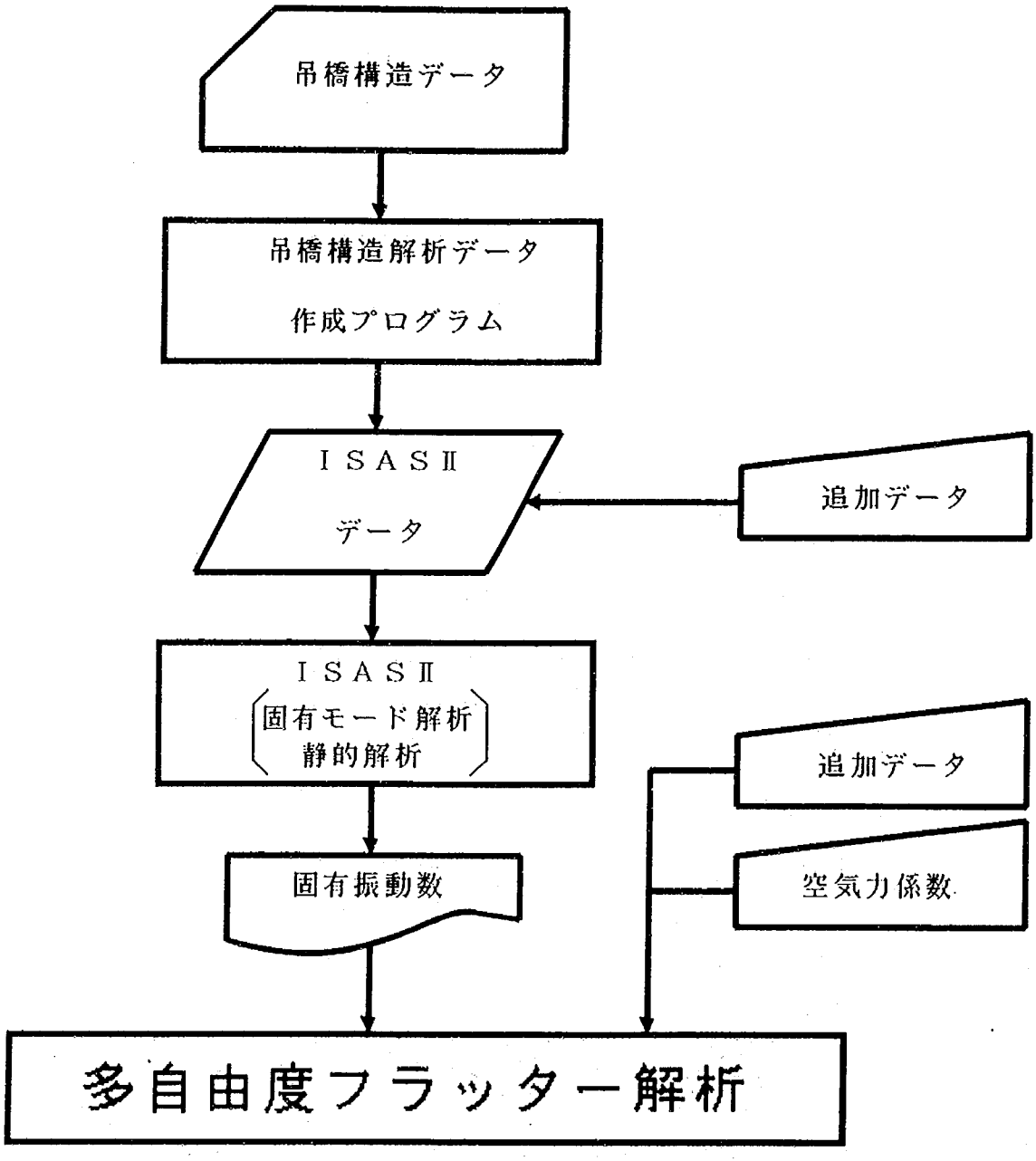
3章では、Selbergの式にもとづきフラッター特性を推定したが、この方法では補剛桁の空気力特性あるいはケーブルシステムの構造特性の詳細は反映されていない。本章では、計測された補剛桁の非定常空気力を用い、高次の振動モードも考慮したフラッター解析により、超長大橋のフラッター特性を推定した。

4．2　方法

（1）使用プログラム

1）解析フロー

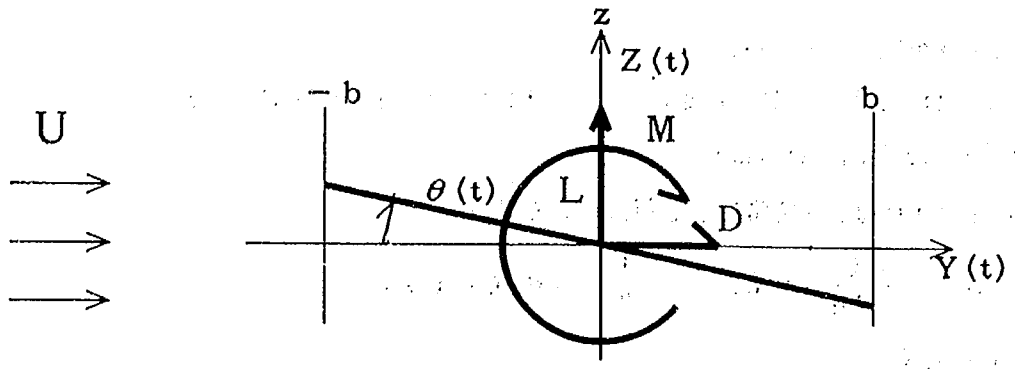
多自由度フラッター解析を行うために、入力されるモードデータは土木研究所所有の吊橋構造解析データ作成プログラムを介して、フレームモデルにより総合構造解析システムＩＳＡＳⅡを演算させ作成する。また、多自由度フラッター解析プログラムは平成５年度に作成された、主塔・ケーブルのモードも考慮することができるものである。解析のフロー図を図－４・２・１に示す。



図－４・２・１　解析フロー図

2）空気力の向きと座標系

多自由度フラッター解析で使用する空気力の向きと座標系を図－４・２・２に示す。



図－４・２・２　空気力の向きと座標系

3）システム設計

・運動方程式

$$m_{zs}\{\ddot{z}_s+2h_z\omega_z\dot{z}_s+\omega_z^2 z_s\}=L_s$$

$$m_{\theta s}\{\ddot{\theta}_s+2h_\theta\omega_\theta\dot{\theta}_s+\omega_\theta^2\theta_s\}=M_s$$

$$m_{ys}\{\ddot{y}_s+2h_y\omega_y\dot{y}_s+\omega_y^2 y_s\}=D_s$$

$$m_{zc}\{\ddot{z}_c+2h_z\omega_z\dot{z}_c+\omega_z^2 z_c\}=L_c$$

$$m_{yc}\{\ddot{y}_c+2h_y\omega_y\dot{y}_c+\omega_y^2 y_c\}=D_c$$

$$m_{zt}\{\ddot{z}_t+2h_z\omega_z\dot{z}_t+\omega_z^2 z_t\}=L_t$$

$$m_{yt}\{\ddot{y}_t+2h_y\omega_y\dot{y}_t+\omega_y^2 y_t\}=D_t$$

ここで、mは質量、hは減衰比、ωは円振動数、zは鉛直たわみ、θはねじれ、yは水平たわみ、Lは揚力、Mは空力ﾓｰﾒﾝﾄ、Dは抗力であり、添字のsは桁、cはケーブル、tは主塔を表す。

・非定常空気力

$$L_s = \pi\rho b^2 [L_{zR}\omega^2 z_s + L_{z1}\omega \dot{z}_s] + \pi\rho b^3 [L_{\theta R}\omega^2 \theta_s + L_{\theta 1}\omega \dot{\theta}_s]$$
$$+ \pi\rho b^2 [L_{yR}\omega^2 y_s + L_{y1}\omega \dot{y}_s]$$

$$M_s = \pi\rho b^3 [M_{zR}\omega^2 z_s + M_{z1}\omega \dot{z}_s] + \pi\rho b^4 [M_{\theta R}\omega^2 \theta_s + M_{\theta 1}\omega \dot{\theta}_s]$$
$$+ \pi\rho b^3 [M_{yR}\omega^2 y_s + M_{y1}\omega \dot{y}_s]$$

$$D_s = -\pi\rho d b [D_{zR}\omega^2 z_s + D_{z1}\omega \dot{z}_s] - \pi\rho d b^2 [D_{\theta R}\omega^2 \theta_s + D_{\theta 1}\omega \dot{\theta}_s]$$
$$- \pi\rho b d [D_{yR}\omega^2 y_s + D_{y1}\omega \dot{y}_s]$$

また、ケーブルおよび主塔は、準定常的な空気力として扱う。

$$L_c = -\frac{1}{2}\rho d_c \frac{dC_{Lc}}{d\alpha} U\dot{z}_c \fallingdotseq -\frac{1}{2}\rho d_c C_{Dc} U\dot{z}_c$$

$$D_c = -\rho d_c C_{Dc} U\dot{y}_c$$

$$L_t = -\frac{1}{2}\rho b_t \frac{dC_{Lt}}{d\alpha} U\dot{z}_t \fallingdotseq -\frac{1}{2}\rho b_t C_{Dt} U\dot{z}_t$$

$$D_t = -\rho d_t C_{Dt} U\dot{y}_t$$

ここで、非定常空気力係数L_{zR}、L_{z1}、$L_{\theta R}$、$L_{\theta 1}$、L_{yR}、L_{y1}、M_{zR}、M_{z1}、$M_{\theta R}$、$M_{\theta 1}$、M_{yR}、M_{y1}、D_{zR}、D_{z1}、$D_{\theta R}$、$D_{\theta 1}$、D_{yR}、D_{y1}、は断面形状により決まる固有の係数で、いずれも迎角αと無次元振動数$k = bf/U$の関数で与えられる。また、bは桁の有効幅員、dは桁高、d_cはケーブル径、b_tは塔柱面内幅、d_tは塔柱面外幅、Uは風速であり、C_{Ds}は桁の抗力係数、

C_{Dc}はケーブルの抗力係数、C_{Dt}は主塔の抗力係数である。

4）解析手法

構造物の運動方程式は、一般に次式で与えられる。

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = P \qquad \text{--------式(4・2・1)}$$

z：桁の鉛直たわみz_s、ねじれθ_s、水平たわみy_s、ケーブルの鉛直たわみz_c、水平たわみy_c、主塔の面外水平たわみz_t、および主塔の面内水平たわみy_tの変位ベクトル

$$z = \{z_s,\ \theta_s,\ y_s,\ z_c,\ y_c,\ z_t,\ y_t\}$$

M：各変位ベクトルに対応する質量マトリックス

$$M = \{m_{zs},\ m_{\theta s},\ m_{ys},\ m_{zc},\ m_{yc},\ m_{zt},\ m_{yt}\}$$

C：各変位ベクトルに対応する減衰ベクトル

$$C = 2\omega h \times \{m_{zs},\ m_{\theta s},\ m_{ys},\ m_{zc},\ m_{yc},\ m_{zt},\ m_{yt}\}$$

K：各変位ベクトルに対応する剛性マトリックス

$$K = \omega^2 \times \{m_{zs},\ m_{\theta s},\ m_{ys},\ m_{zc},\ m_{yc},\ m_{zt},\ m_{yt}\}$$

P：各変位ベクトルに対応する風外力ベクトル

$$P = \{L_s,\ M_s,\ D_s,\ L_c,\ D_c,\ L_t,\ D_t\}$$

式（4・2・1）は多自由度の運動方程式として行列表示すると次式のようになる。

$$\{M\}\{\ddot{z}\} + \{C\}\{\dot{z}\} + \{K\}\{z\} = \{E\}\{\dot{z}\} + \{F\}\{z\} \qquad \text{--------式(4・2・2)}$$

ここで、

$$\{M\} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & & \vdots \\ \vdots & & m_i & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \qquad m_i = \begin{bmatrix} m_{zs} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{\theta s} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_{yt} \end{bmatrix}$$

$$\{C\} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_2 & & \vdots \\ \vdots & & c_i & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & c_n \end{bmatrix} \qquad c_i = \begin{bmatrix} 2m_{zs}h_i\omega_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2m_{\theta s}h_i\omega_i & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 2m_{yt}h_i\omega_i \end{bmatrix}$$

$$\{K\} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_2 & & \vdots \\ \vdots & & k_i & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & k_n \end{bmatrix} \qquad k_i = \begin{bmatrix} m_{zs}\omega_i^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{\theta s}\omega_i^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_{yt}\omega_i^2 \end{bmatrix}$$

$$[E]=\begin{bmatrix} e_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e_2 & & \vdots \\ \vdots & & e_i & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & e_n \end{bmatrix}$$

$$e_i=\pi\rho b^2\omega \begin{bmatrix} L_{zi} & bL_{\theta i} & L_{yi} & 0 & \cdots & 0 \\ bM_{zi} & b^2M_{\theta i} & bM_{yi} & & & \vdots \\ dD_{zi}/b & dD_{\theta i} & dD_{yi}/b & & & \vdots \\ 0 & & & -dC_{Dc}U/2T & & \vdots \\ \vdots & & & & -dC_{Dc}U/T & \vdots \\ \vdots & & & & & -b_iC_{Di}U/2T \quad 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \quad -d_iC_{Di}U/T \end{bmatrix}$$

$$T=\pi\rho b^2\omega$$

$$[F]=\begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 & & \vdots \\ \vdots & & f_i & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & f_n \end{bmatrix}$$

$$f_i=\pi\rho b^2\omega^2 \begin{bmatrix} L_{zR} & bL_{\theta R} & L_{yR} & \cdots & 0 \\ bM_{zR} & b^2M_{\theta R} & bM_{yR} & & \vdots \\ dD_{zR}/b & dD_{\theta R} & dD_{yR}/b & & \vdots \\ 0 & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

いま、各変位ベクトルの振動成分を次のように表現する。

$z_s=q_{zs}\phi_{zs}$

$\theta_s=q_{\theta s}\phi_{\theta s}$

$y_s=q_{ys}\phi_{ys}$

$z_c=q_{zc}\phi_{zc}$

$y_c=q_{yc}\phi_{yc}$

$z_t=q_{zt}\phi_{zt}$

$y_t=q_{yt}\phi_{yt}$

ここに、q_{zs}, $q_{\theta s}$, q_{ys}, q_{zc}, q_{yc}, q_{zt}, q_{yt}：変位ベクトルにおける各振動成分の規準座標

ϕ_{zs}, $\phi_{\theta s}$, ϕ_{ys}, ϕ_{zc}, ϕ_{yc}, ϕ_{zt}, ϕ_{yt}：変位ベクトルにおける各振動のモード成分

式(4・2・2)の変位ベクトル{Z}をモード関数(Φ)と規準座標{q}に置き換え、モード形状に従い橋軸方向に積分すると、次式のように得られる。

$$\{M^*\}\{\ddot{q}\}+\{C^*\}\{\dot{q}\}+\{K^*\}\{q\}=\{E^*\}\{\dot{q}\}+\{F^*\}\{q\} \quad \text{--------式(4・2・3)}$$

ここで、

$\{M^*\}=\{\Phi\}'\{M\}\{\Phi\}$ (対角マトリックス)

$\{C^*\}=\{\Phi\}'\{C\}\{\Phi\}$ (対角マトリックス)

$\{K^*\}=\{\Phi\}'\{K\}\{\Phi\}$ (対角マトリックス)

であり、また外力マトリックスは

$\{E^*\}=\{\Phi\}'\{E\}\{\Phi\}$

$\{F^*\}=\{\Phi\}'\{F\}\{\Phi\}$

である。

今、格点mのi次モード座標を$\Phi_{mi}=\{\phi_{zsmi}、\phi_{\theta smi}、\phi_{ysmi}、\phi_{zcmi}、\phi_{ycmi}、\phi_{ztmi}、\phi_{ytmi}\}$と置くと、各マトリックス内要素の一般式は、

$$M_{ij}=\sum_{m=1}^{M}(m_{zsm}\phi_{zsmi}^2+m_{\theta sm}\phi_{\theta smi}^2+m_{ysm}\phi_{ysmi}^2+m_{zcm}\phi_{zcmi}^2+m_{ycm}\phi_{ycmi}^2+m_{ztm}\phi_{ztmi}^2+m_{ytm}\phi_{ytmi}^2)\,dx$$

$$C_{ij}=2h_i\omega_i\sum_{m=1}^{M}(m_{zsm}\phi_{zsmi}^2+m_{\theta sm}\phi_{\theta smi}^2+m_{ysm}\phi_{ysmi}^2+m_{zcm}\phi_{zcmi}^2+m_{ycm}\phi_{ycmi}^2+m_{ztm}\phi_{ztmi}^2+m_{ytm}\phi_{ytmi}^2)\,dx$$

$$K_{ij}=\omega_i^2\sum_{m=1}^{M}(m_{zsm}\phi_{zsmi}^2+m_{\theta sm}\phi_{\theta smi}^2+m_{ysm}\phi_{ysmi}^2+m_{zcm}\phi_{zcmi}^2+m_{ycm}\phi_{ycmi}^2+m_{ztm}\phi_{ztmi}^2+m_{ytm}\phi_{ytmi}^2)\,dx$$

$$E_{ij}=\pi\rho b^2\omega\sum_{m=1}^{M}\{(L_{zim}\phi_{zsmi}+bM_{zim}\phi_{\theta smi}-d/bD_{zim}\phi_{ysmi})\phi_{zsmj}$$

$$+(bL_{\theta im}\phi_{zsmi}+b^2M_{\theta im}\phi_{\theta smi}-dD_{\theta im}\phi_{ysmi})\phi_{\theta smj}$$

$$+(L_{yim}\phi_{zsmi}+bM_{yim}\phi_{\theta smi}-d/bD_{yim}\phi_{ysmi})\phi_{ysmj}$$

$$-\frac{d_cC_{Dc}U}{2\pi b^2\omega}\phi_{zcmi}\phi_{zcmj}-\frac{d_cC_{Dc}U}{\pi b^2\omega}\phi_{ycmi}\phi_{ycmj}$$

$$-\frac{b_tC_{Dt}U}{2\pi b^2\omega}\phi_{ztmi}\phi_{ztmj}-\frac{d_tC_{Dt}U}{\pi b^2\omega}\phi_{ytmi}\phi_{ytmj}\}dx$$

$$F_{ij}=\pi\rho b^2\omega^2\sum_{m=1}^{M}\{(L_{zRm}\phi_{zsmi}+bM_{zRm}\phi_{\theta smi}-d/bD_{zRm}\phi_{ysmi})\phi_{zsmj}$$

$$+(bL_{\theta Rm}\phi_{zsmi}+b^2M_{\theta Rm}\phi_{\theta smi}-dD_{\theta Rm}\phi_{ysmi})\phi_{\theta smj}$$

$$+(L_{yRm}\phi_{zsmi}+bM_{yRm}\phi_{\theta smi}-d/bD_{yRm}\phi_{ysmi})\phi_{ysmj}\}dx$$

となる。

式（4・2・3）の右辺を移行して［C*－E*］＝［C_E］、［K*－F*］＝［K_F］と置くと次式のようになる。

$$\{M^*\}\{\ddot{q}\}+\{C_E\}\{\dot{q}\}+\{K_F\}\{q\}=0 \qquad \text{--------式（4・2・4）}$$

ここで、

$$\{M^*\}=\begin{bmatrix} M_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_{22} & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & M_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\{C_E\}=\begin{bmatrix} C_{11}-E_{11}, & -E_{12}, & \cdots & -E_{1n} \\ -E_{21}, & C_{22}-E_{22}, & \cdots & -E_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ -E_{n1}, & -E_{n2}, & \cdots & C_{nn}-E_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\{K_F\}=\begin{bmatrix} K_{11}-F_{11}, & -F_{12}, & \cdots & -F_{1n} \\ -F_{21}, & K_{22}-F_{22}, & \cdots & -F_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ -F_{n1}, & -F_{n2}, & \cdots & K_{nn}-F_{nn} \end{bmatrix}$$

式（４・２・４）はu＝$\begin{Bmatrix}\dot{q}\\ q\end{Bmatrix}$を用いて

$$\begin{vmatrix}0, & M^*\\ M^*, & C_E\end{vmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{q}\\ q\end{Bmatrix}+\begin{vmatrix}-M^*, & 0\\ 0, & K_F\end{vmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{q}\\ q\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}0\\ 0\end{Bmatrix}$$

$$P\dot{u}+Qu=0$$

とおけるので、この解を$u=u_0\exp(\lambda t)$と仮定すると、特性方程式は

$$\lambda P u_0+Q u_0=0 \qquad \text{--------式（４・２・５）}$$

となる。この特性方程式において有意な解が存在するためには、

$$\det|\lambda P+Q|=\det|-P^{-1}Q-\lambda E|=0 \qquad \text{--------式（４・２・６）}$$

が満足されなければならない。

ここで、

$$-P^{-1}Q=-\begin{vmatrix}1/M^{*2}, & 0\\ 0, & 1/M^{*2}C_E\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}-C_E, & M^*\\ M^{*2}, & 0\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}-M^*, & 0\\ 0, & K_F\end{vmatrix}$$

$$=\begin{vmatrix}-C_E/M^*, & -K_F/M^*\\ E, & 0\end{vmatrix}$$

である。式（４・２・６）はλに関する実係数の高次方程式であり、振動を示す解は共役複素数となる。この解の固有値を$\lambda=\lambda_R+i\lambda_i$（$i=\sqrt{-1}$）とおくと、フラッター発現風速は$\lambda_R=0$となる風速であり、その時の$\lambda_i$がフラッター発現時の円振動数$\omega_F$となる。

また、この解の固有ベクトルを$x=x_R+ix_i$とおくと、たわみとねじれの振幅比は次式のように各々の振幅$\sqrt{(x_R^2+x_i^2)}$の比で与えられ、

$$Amp=\sqrt{(x_{zR}^2+x_{zi}^2)}/\sqrt{(x_{\theta R}^2+x_{\theta i}^2)}$$

位相差は次式のように求められる。

$$\tau_{z\theta}=\alpha_z-\alpha_\theta$$

$$\tan(\alpha_z-\alpha_\theta)=\sin(\alpha_z-\alpha_\theta)/\cos(\alpha_z-\alpha_\theta)$$

なお、式（４・２・５）は無次元振動数kと風速Uの関数となるため、発現風速を得るにはk（無次元振動数ω）及び風速Uを仮定して収束計算を行う。

（2）解析ケース

解析は、「3．3　2箱桁」の固有値解析を行った結果を用いて行う。使用する非定常空気力係数は、基本的にTheodorsenの空気力係数を使用し、桁高3mの補剛桁に関しては、実験値も同時に使用する。

表－4・2・1　解析ケース

No	ケース番号	桁高	ケーブルシステム	非定常空気力
1	TYPE1-CASE1	3m	基本断面	Theodorsen　AEF
2	TYPE1-CASE2	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/4, A=1倍	Theodorsen　AEF
3	TYPE1-CASE22	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/12, A=1倍	Theodorsen　AEF
4	TYPE1-CASE29	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/12, A=1倍 ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減	Theodorsen　AEF
5	TYPE1-CASE3	3m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen　AEF
6	TYPE1-CASE4	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型, I≠0）	Theodorsen　AEF
7	TYPE1-CASE43	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（片側片引き I=0）	Theodorsen　AEF
8	TYPE1-CASE44	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型, I=0）	Theodorsen　AEF
9	TYPE2-CASE1	5m	基本断面	Theodorsen　AEF
10	TYPE2-CASE2	5m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/4, A=1倍	Theodorsen　AEF
11	TYPE2-CASE3	5m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen　AEF
12	TYPE2-CASE4	5m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型, I≠0）	Theodorsen　AEF
13	TYPE3-CASE1	7m	基本断面	Theodorsen　AEF
14	TYPE3-CASE2	7m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/4, A=1倍	Theodorsen　AEF
15	TYPE3-CASE3	7m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	Theodorsen　AEF
16	TYPE3-CASE4	7m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型, I≠0）	Theodorsen　AEF
17	TYPE1-CASE1	3m	基本断面	実験値
18	TYPE1-CASE22	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/12, A=1倍	実験値
19	TYPE1-CASE29	3m	ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ, L/12, A=1倍 ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減	実験値
20	TYPE1-CASE3	3m	ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ	実験値
21	TYPE1-CASE43	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（片側片引き I=0）	実験値
22	TYPE1-CASE44	3m	ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型, I=0）	実験値

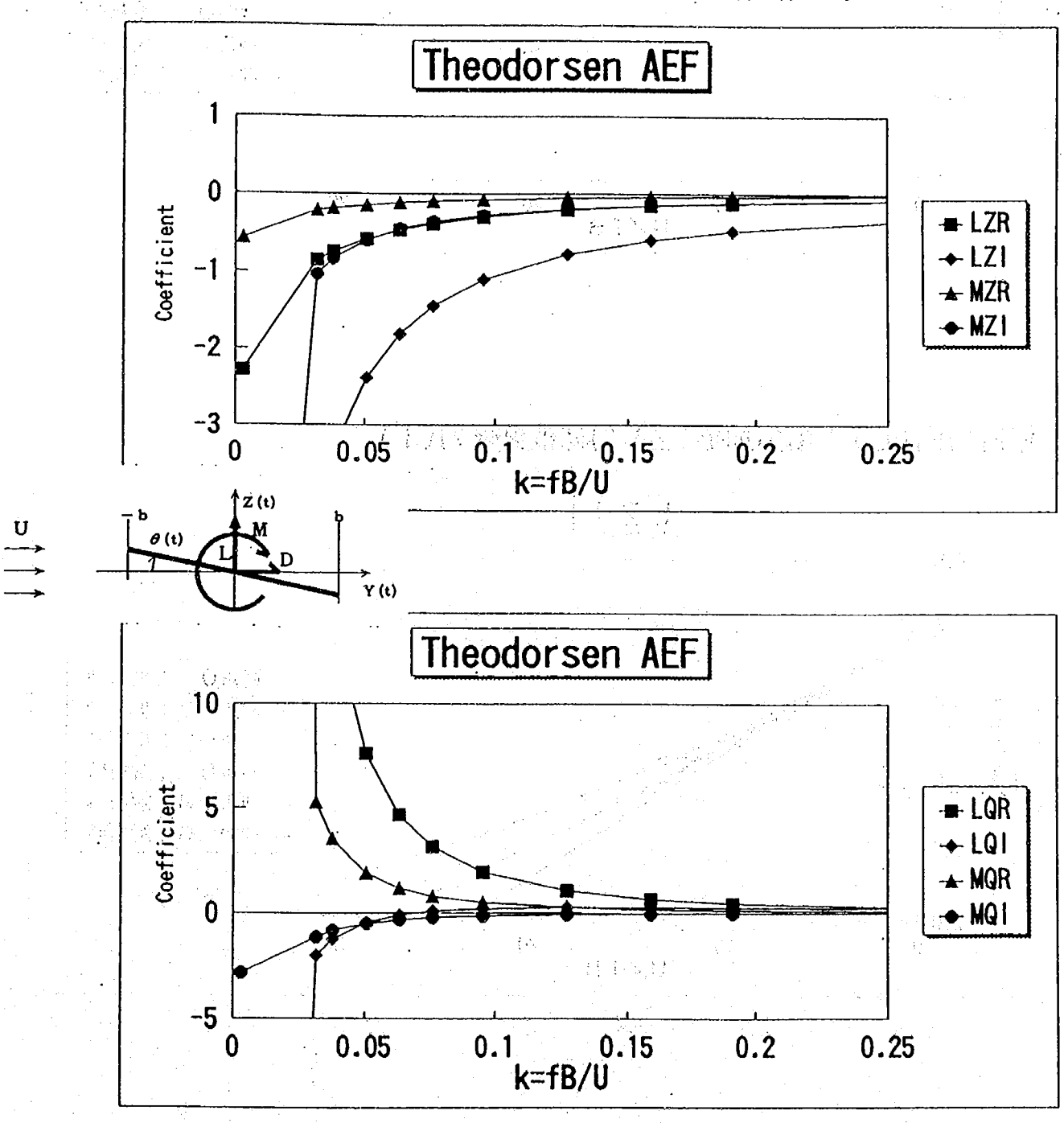
（３）非定常空気力係数

１）Theodorsenの非定常空気力係数

多自由度フラッター解析に用いたTheodorsenの非定常空気力係数を図－４・２・３に示す。

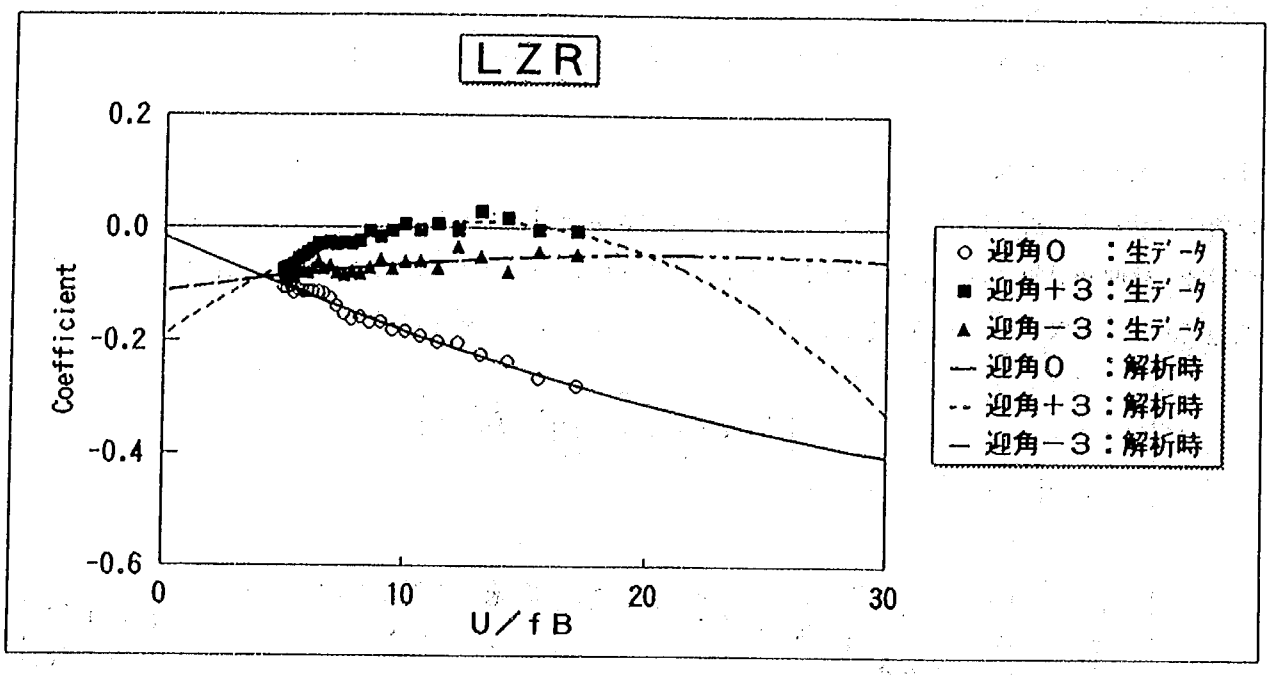
２）非定常空気力係数実験値

多自由度フラッター解析に用いた非定常空気力係数実験値を図－４・２・４～図４・２・１２に示す。なお、解析時には収束計算を行うため、空気力係数データのばらつきは収束計算を妨げる可能性があるため、２次曲線（aX^2+bX+c）で補完し、図中に示す曲線のデータを与えて解析を行った。

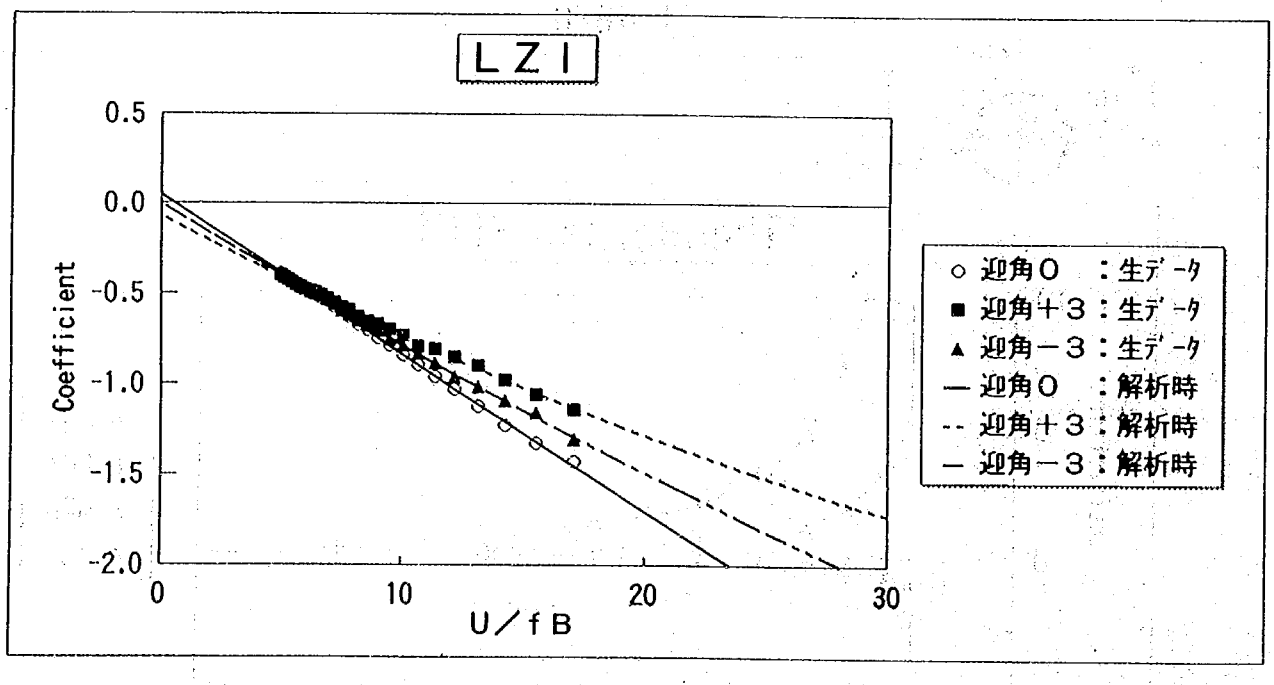


図－４・２・３　Theodorsenの非定常空気力係数

鉛直方向(L)：揚力加振(Z)：実部空気力(R)

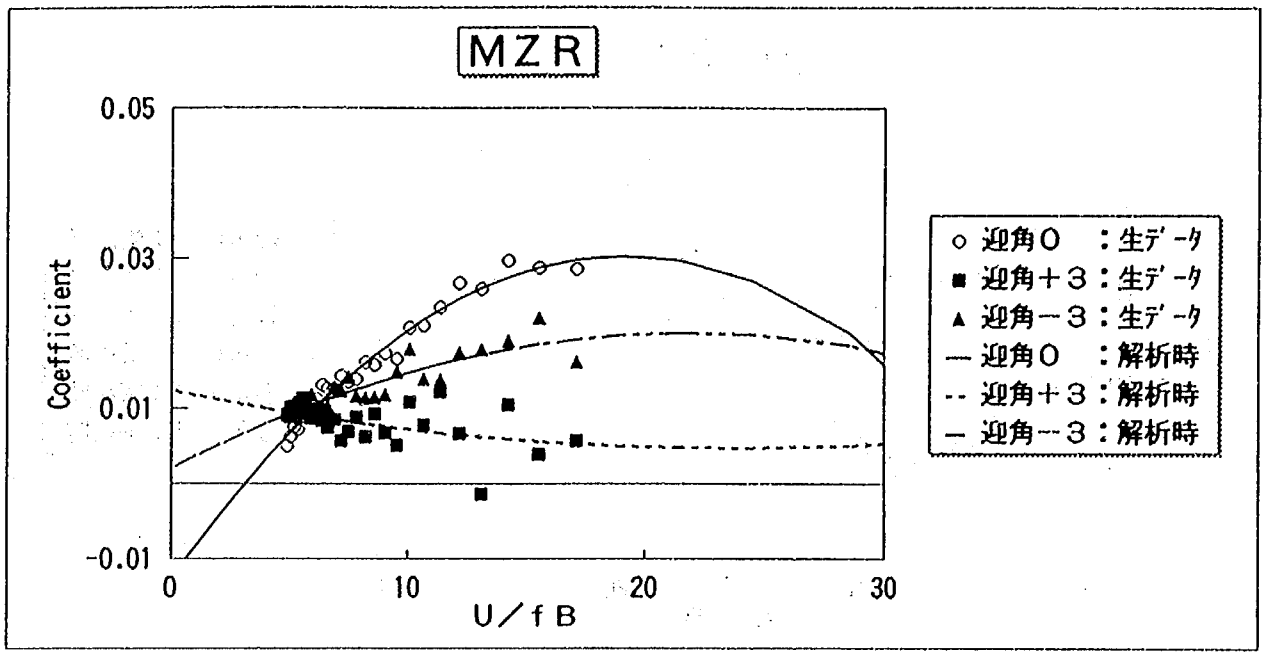


鉛直方向(L)：揚力加振(Z)：虚部空気力(I)

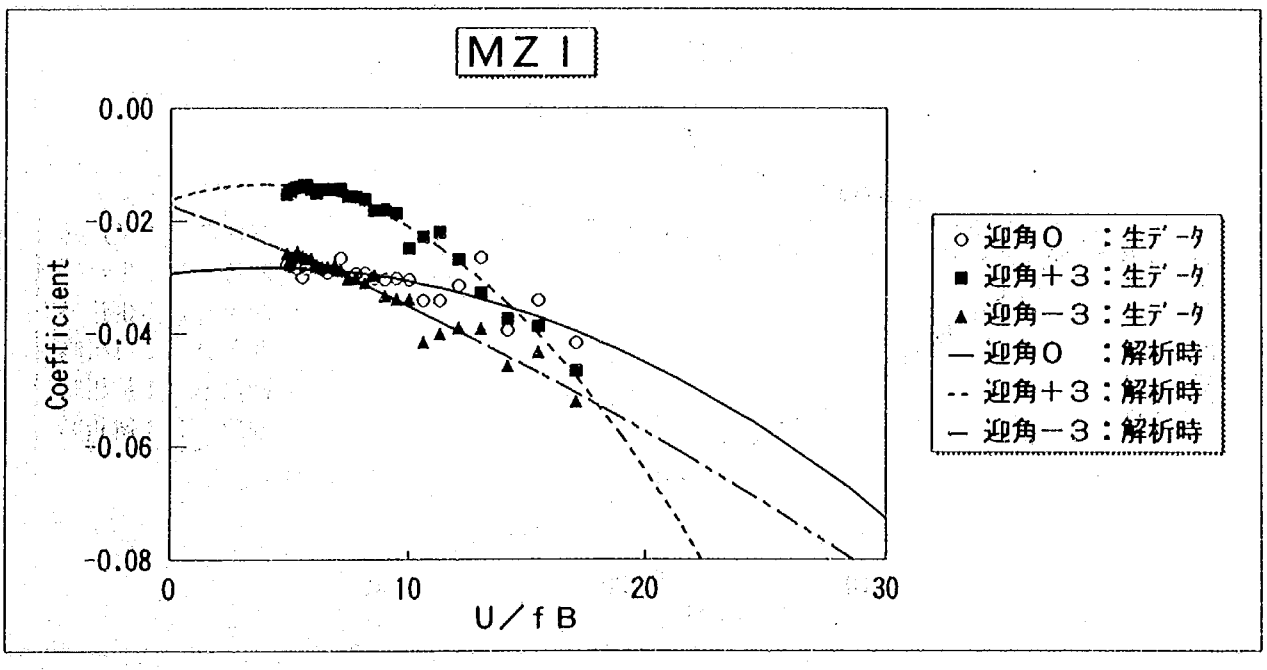


図－４・２・４　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

モーメント方向(M)：揚力加振(Z)：実部空気力(R)

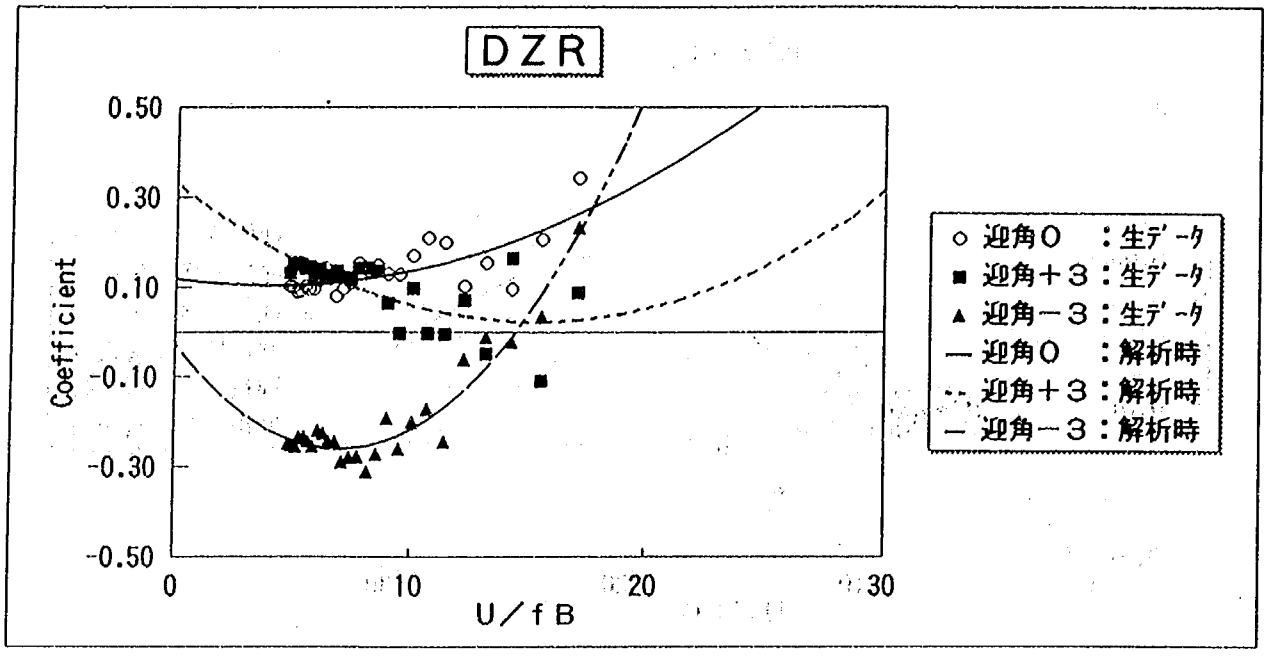


モーメント方向(M)：揚力加振(Z)：虚部空気力(I)

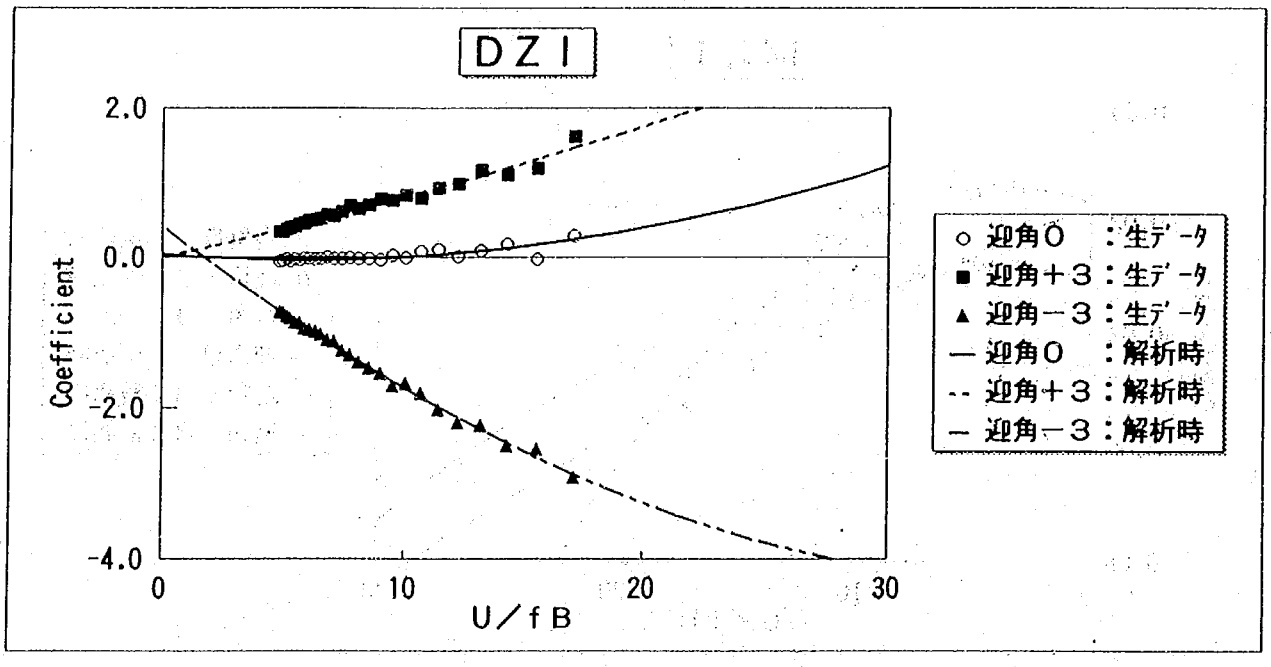


図－４・２・５　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

抗力方向(D)：揚力加振(Z)：実部空気力(R)

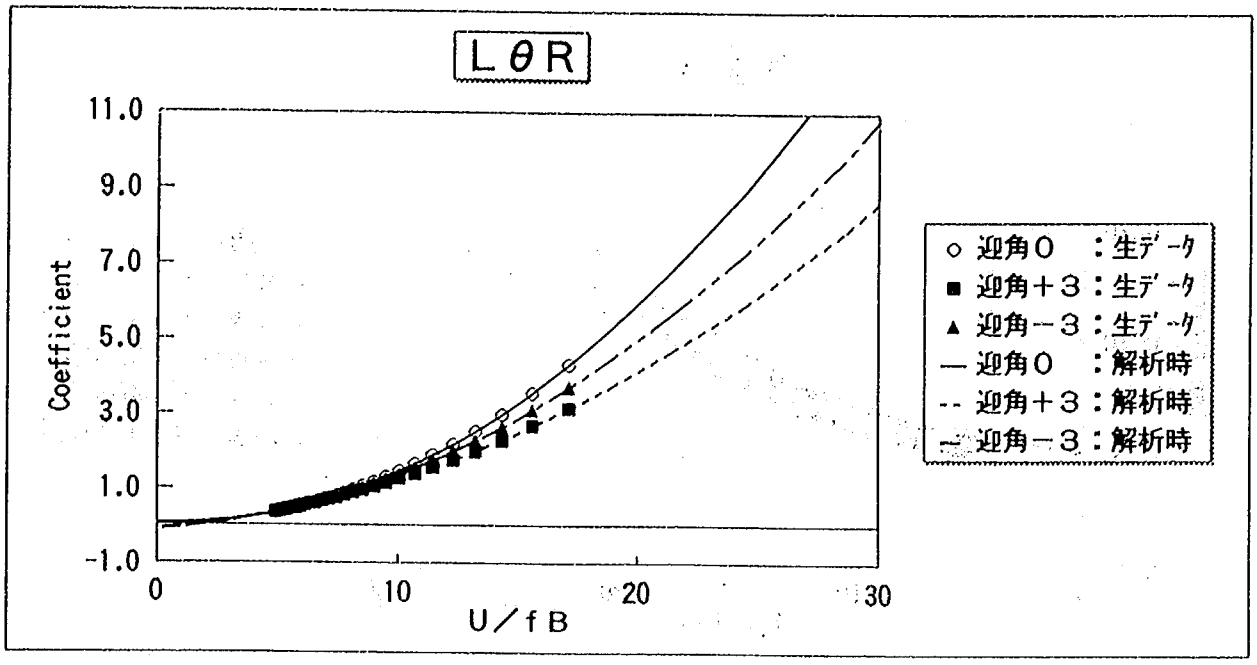


抗力方向(D)：揚力加振(Z)：虚部空気力(I)

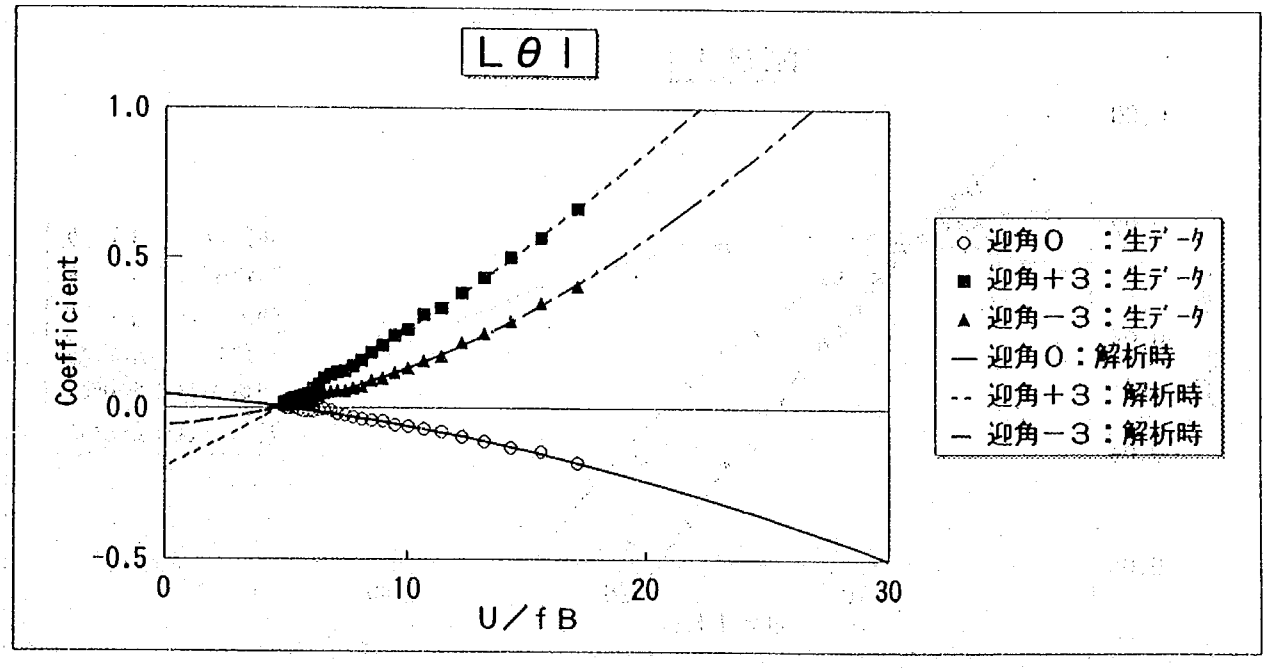


図－４・２・６　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

鉛直方向(L)：モーメント加振(θ)：実部空気力(R)

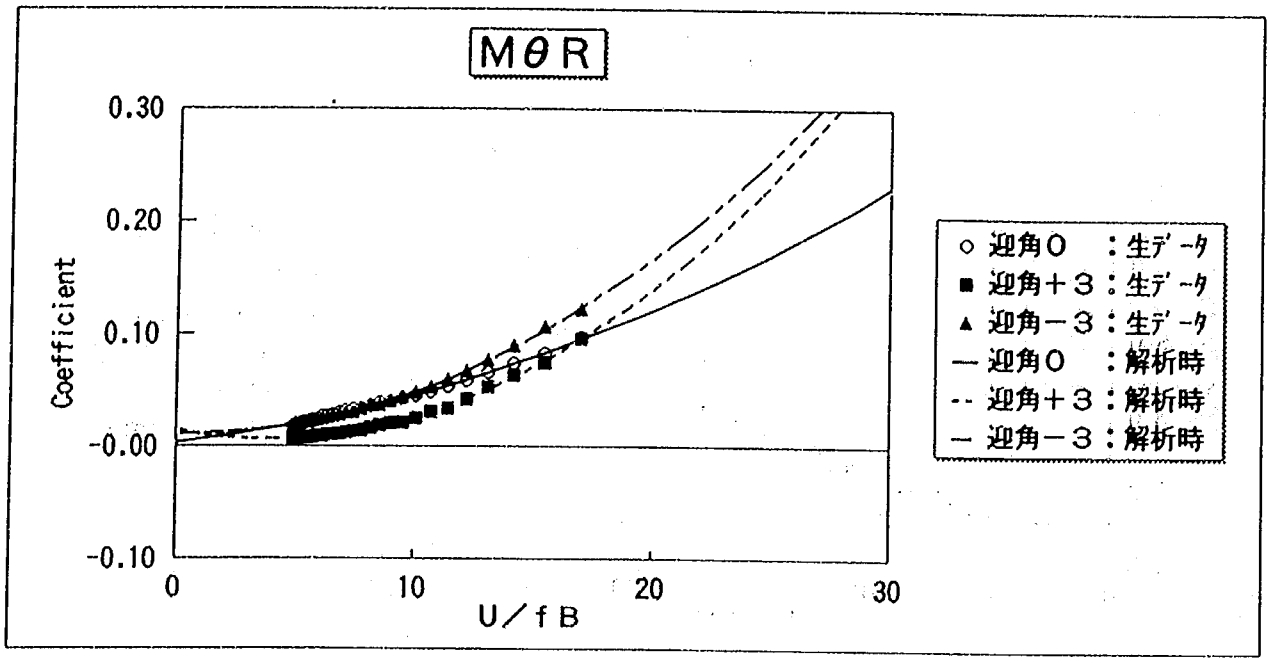


鉛直方向(L)：モーメント加振(θ)：虚部空気力(I)

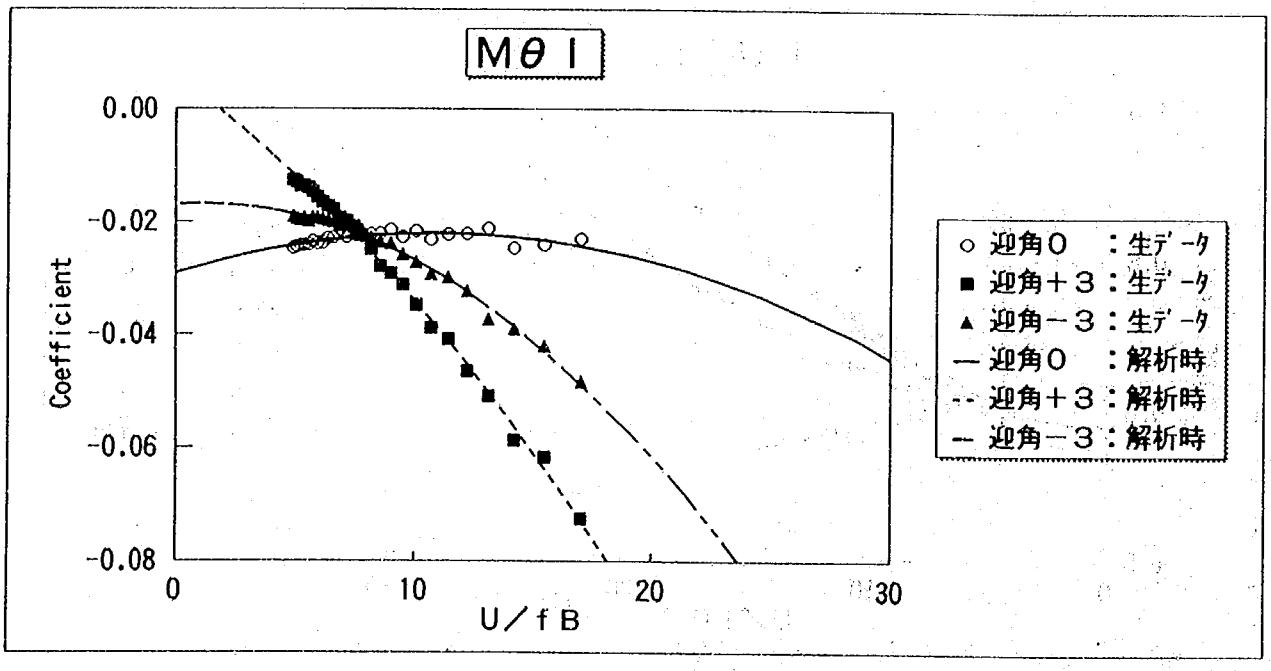


図－４・２・７　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

モーメント方向(M)：モーメント加振(θ)：実部空気力(R)

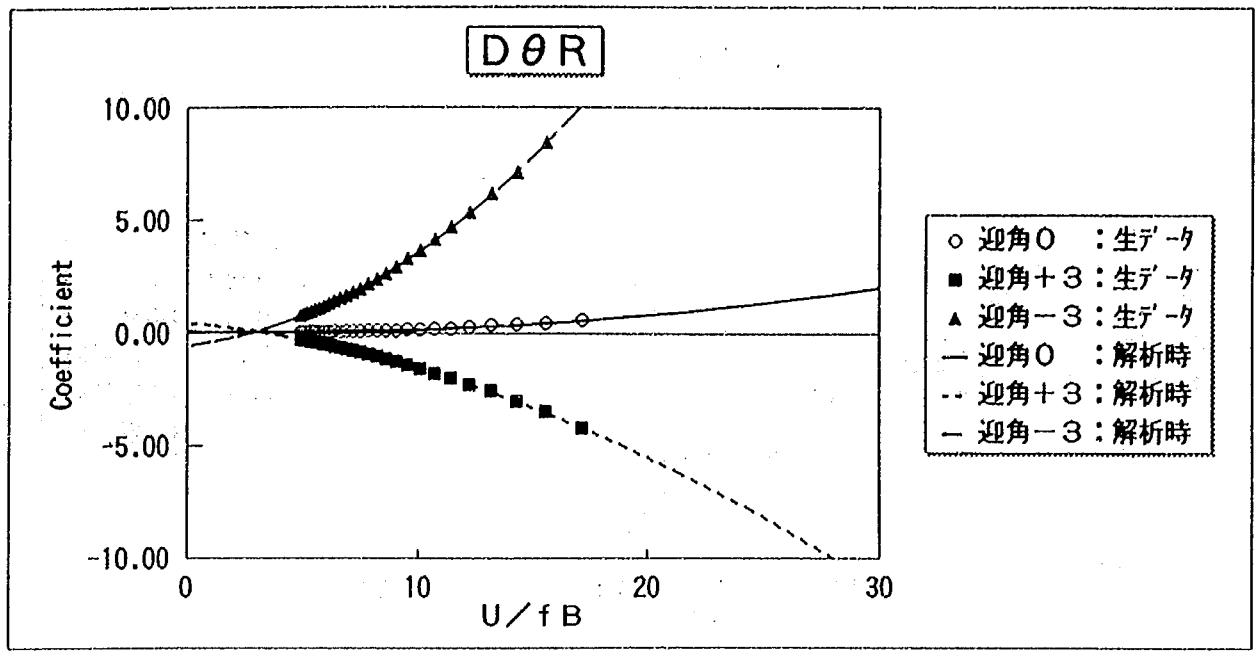


モーメント方向(M)：モーメント加振(θ)：虚部空気力(Ｉ)

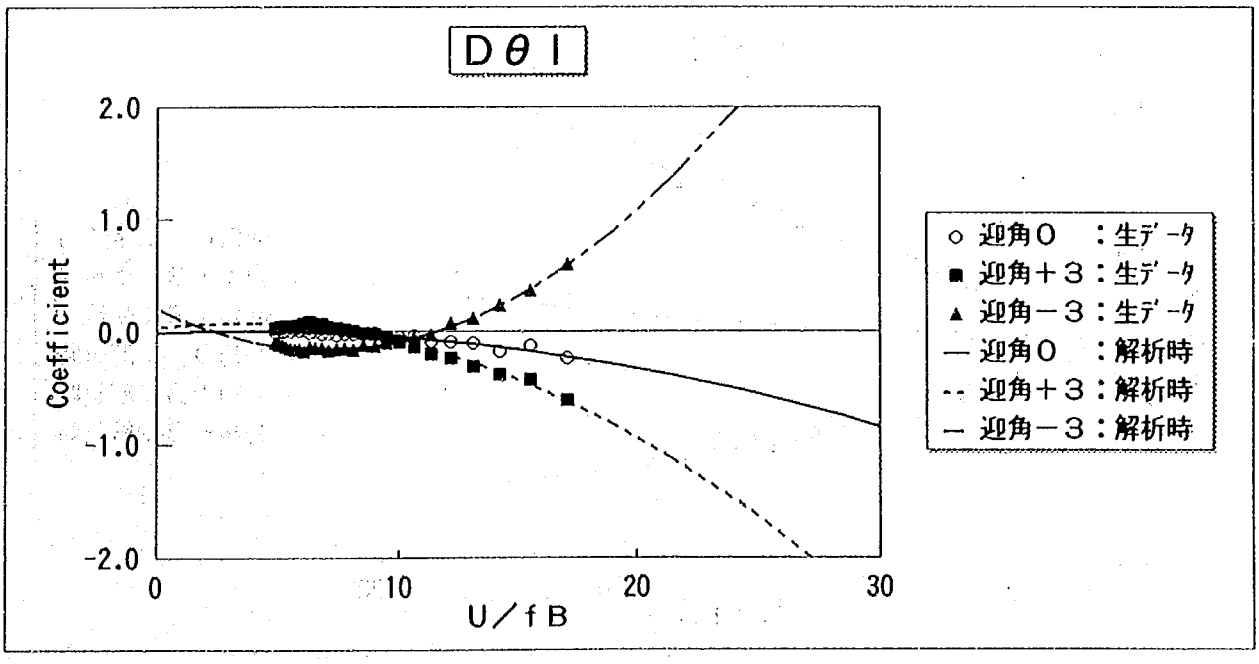


図－４・２・８　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

抗力方向(D)：モーメント加振(θ)：実部空気力(R)

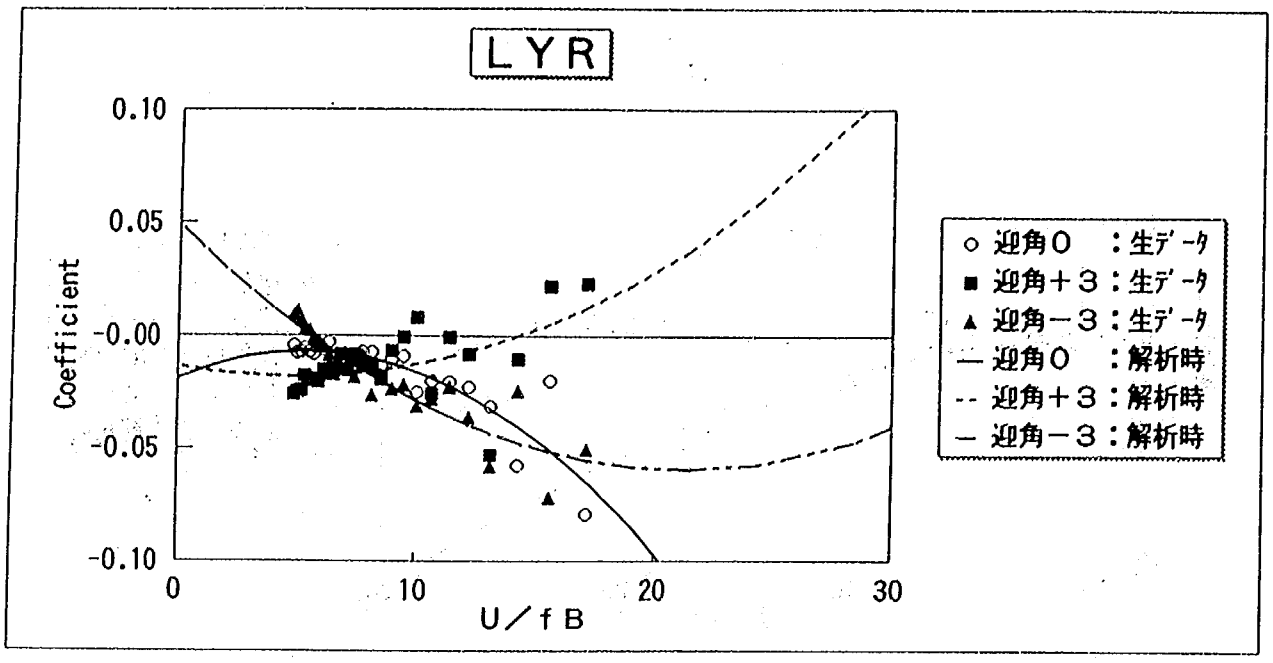


抗力方向(D)：モーメント加振(θ)：虚部空気力(I)

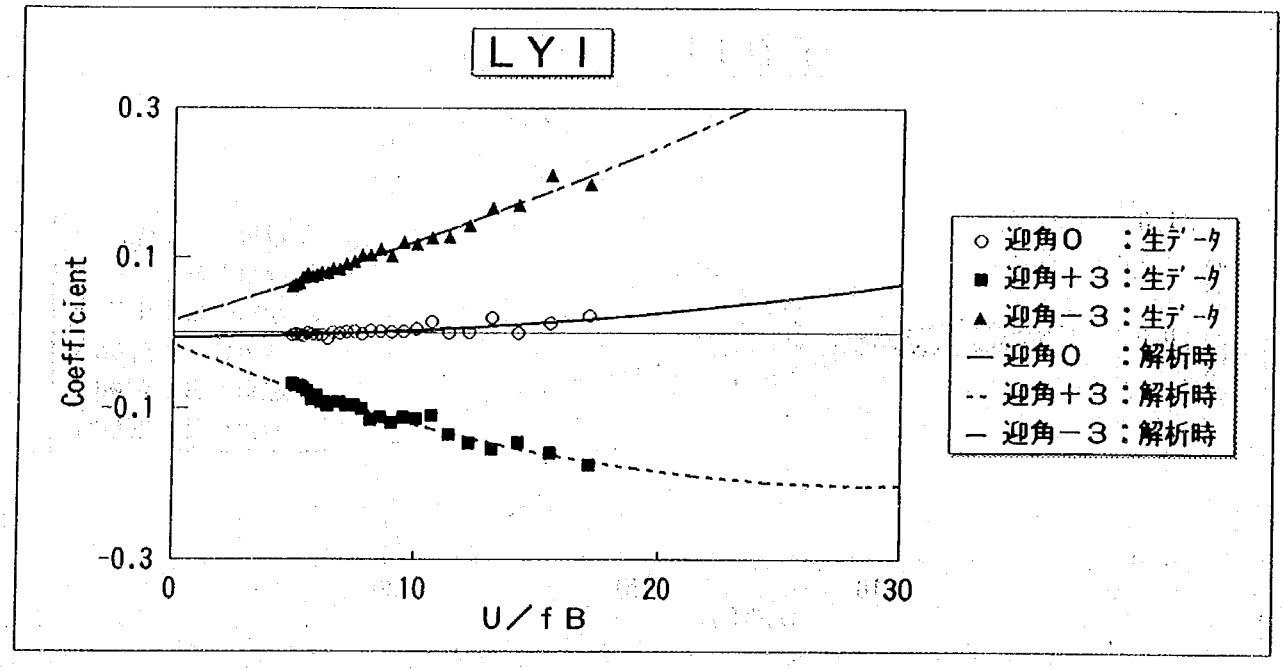


図－４・２・９　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

鉛直方向(L)：抗力加振(Y)：実部空気力(R)

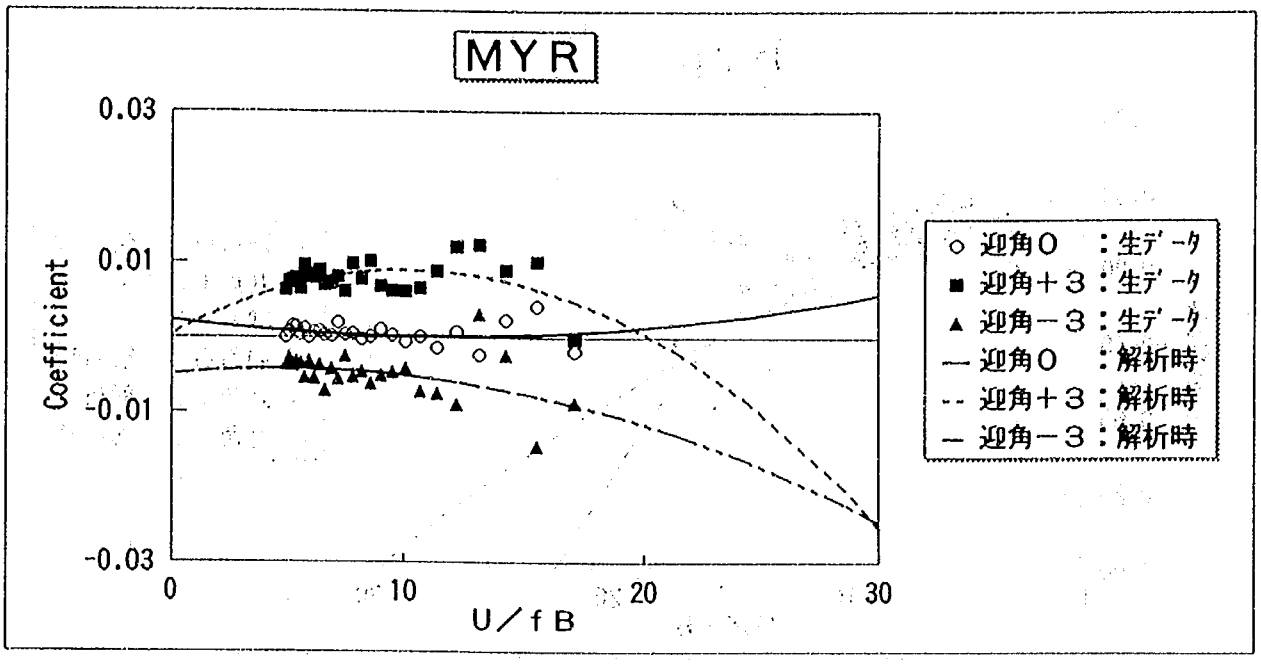


鉛直方向(L)：抗力加振(Y)：虚部空気力(I)

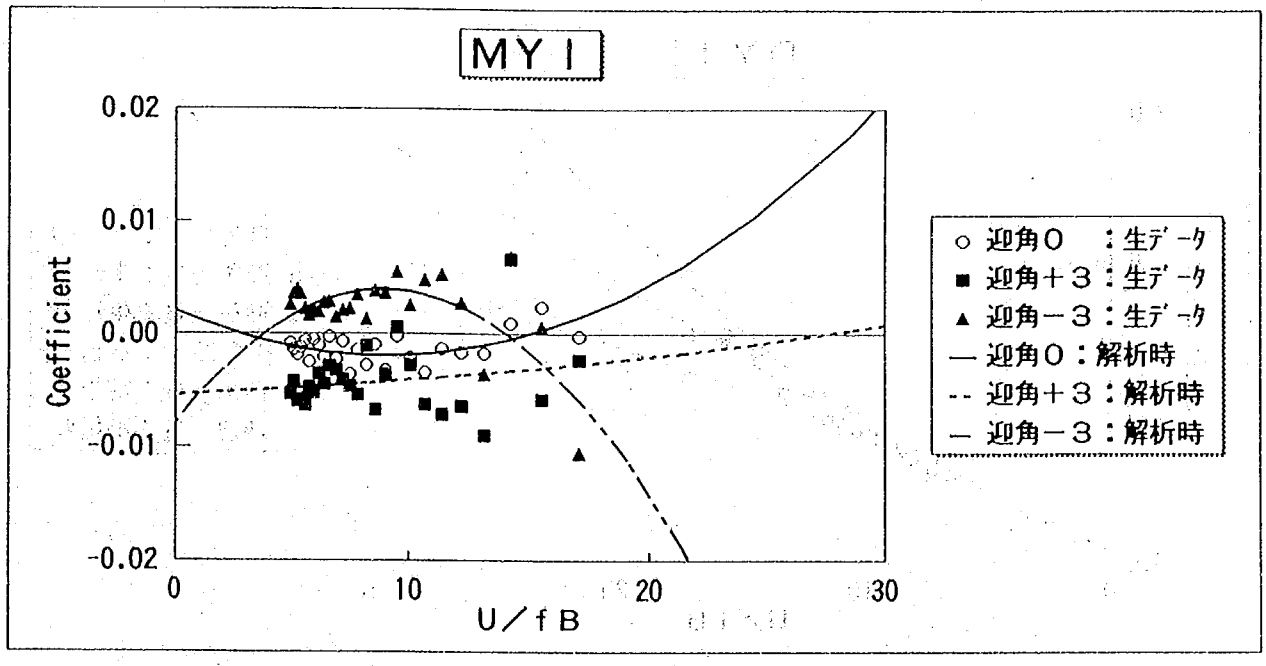


図－４・２・１０　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

モーメント方向(M)：抗力加振(Y)：実部空気力(R)

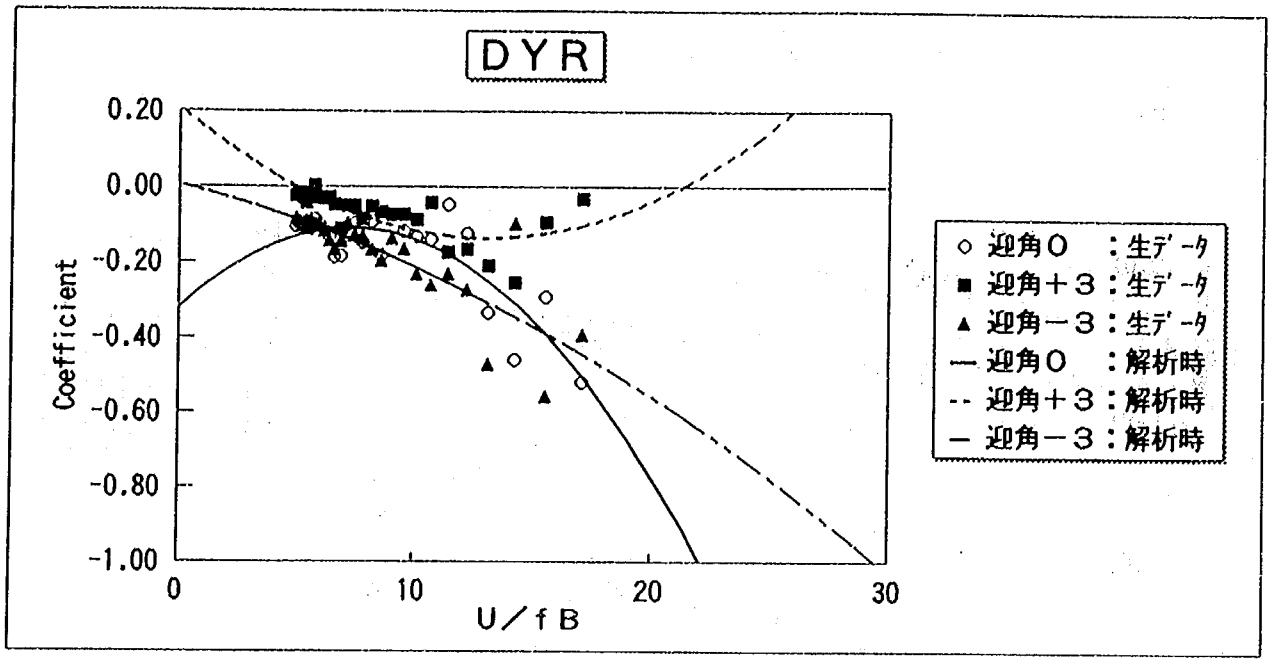


モーメント方向(M)：抗力加振(Y)：虚部空気力(I)

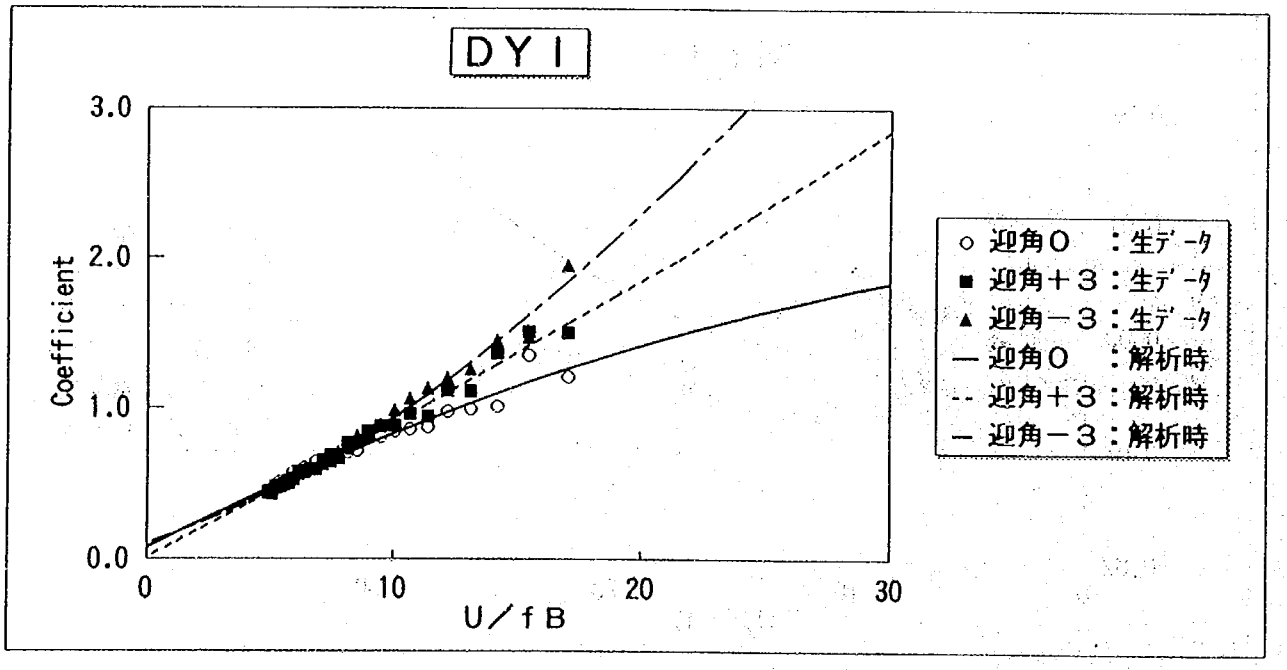


図－4・2・11　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

抗力方向(D)：抗力加振(Y)：実部空気力(R)



抗力方向(D)　：抗力加振(Y)：虚部空気力(I)



図－４・２・１２　超長大橋非定常空気力係数実験値（平成6年度）

4．3　結果

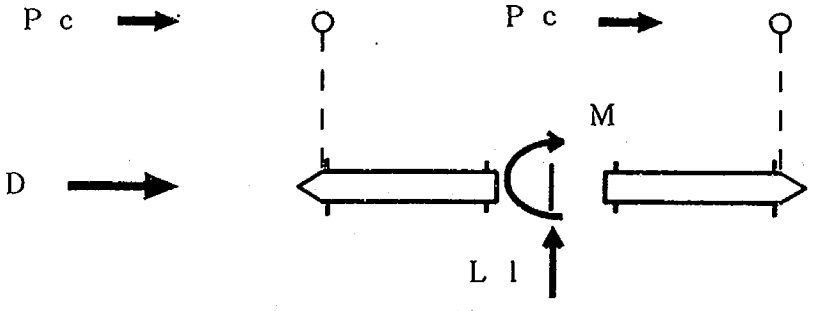
（1）静的構造解析

多自由度フラッター解析では、有風時の静的ねじれ角が必要であるため、固有値解析で使用したモデルのケーブル及び桁に空気力を荷重として加え、静的ねじれ角を算出した。解析は幾何学的非線形を考慮して行った。

1）載荷した荷重

当初に桁のねじれ変形を0と仮定して風荷重（抗力、揚力、空力モーメント）を載荷し、構造系全体の変形を算出した。風荷重は、桁とケーブルのみに載荷した。図－4・3・1に載荷モデル図を示す。

ねじれ変形により桁は橋軸方向に迎角（ねじれ角）変化を生じるが、この迎角変化を考慮した桁の空気力（抗力、揚力、空力モーメント）を再度載荷し変形量を算出した。変形量が収束するまでこの操作を繰り返し、最終的な静的変形量を算出した。



図－4・3・1　載荷モデル図

$$D = (\rho v^2 C_{Dc} D_c L) / 2$$

$$P_k = (\rho v^2 C_{Dk} H_k L) / 2$$

$$L_l = (\rho v^2 C_{Lk} B_k L) / 2$$

$$M = (\rho v^2 C_{Mk} B_k^2 L) / 2$$

ここで、

ρ　：空気密度 $(0.125\times10^{-3}$　$tf\cdot sec^2\cdot m^{-4})$
v　：風速(m/s)
C_{Dc}：0.7
D_c　：ケーブル直径(m)
L　：節点の有効長さ(m)
C_{Dk}, C_{Lk}, C_{Mk}：三分力試験で算出されている値
H_k　：桁の有効高(m)
B_k　：桁幅(m)

2）計算結果

図－４・３・２～図－４・３・９に静的解析結果を示す。

①ケーブルシステムについて

図－４・３・２より、水位変位に関してはケーブルシステムについて、大きな変化が見られないことが判る。図－４・３・３よりねじれ角に関しては、中央支間部で吊橋の特性である負のねじれ角が生じていることが判る。

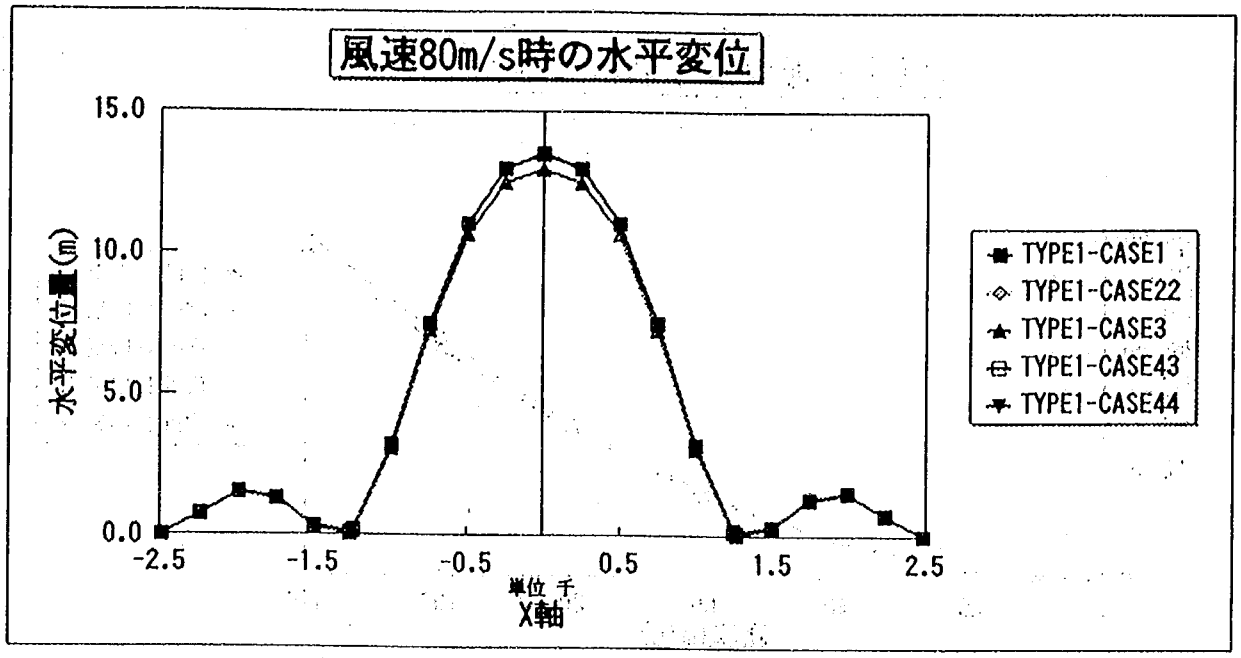
ステイケーブルシステムでは、斜張橋で正のねじれ角が生じる特性より、ステイケーブル部で正のねじれ角を生じ、ステイの区間が長い程、その度合いは大きくなっている。TYPE1-CASE2の中央支間のL/4までステイケーブルを張った断面では、最大ねじれ角も正となっている。また、ステイケーブル部を導入することにより、中央径間部のねじれ角は小さくなっている。

モノケーブルシステムでは、荷重を加えたときの桁の回転半径が他のシステムと比べて大きくなるため、静的ねじれ角は大きくなっている。

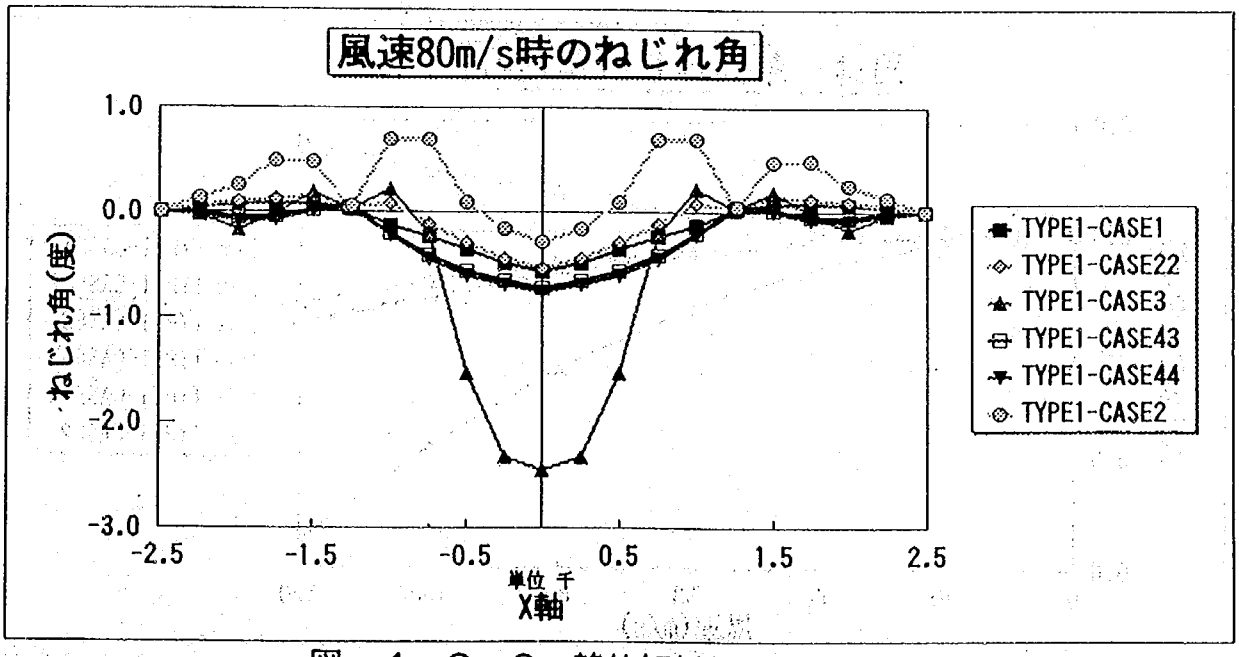
クロスハンガーシステムでは、基本断面と大きな差は見られていない。

②桁高の違いについて

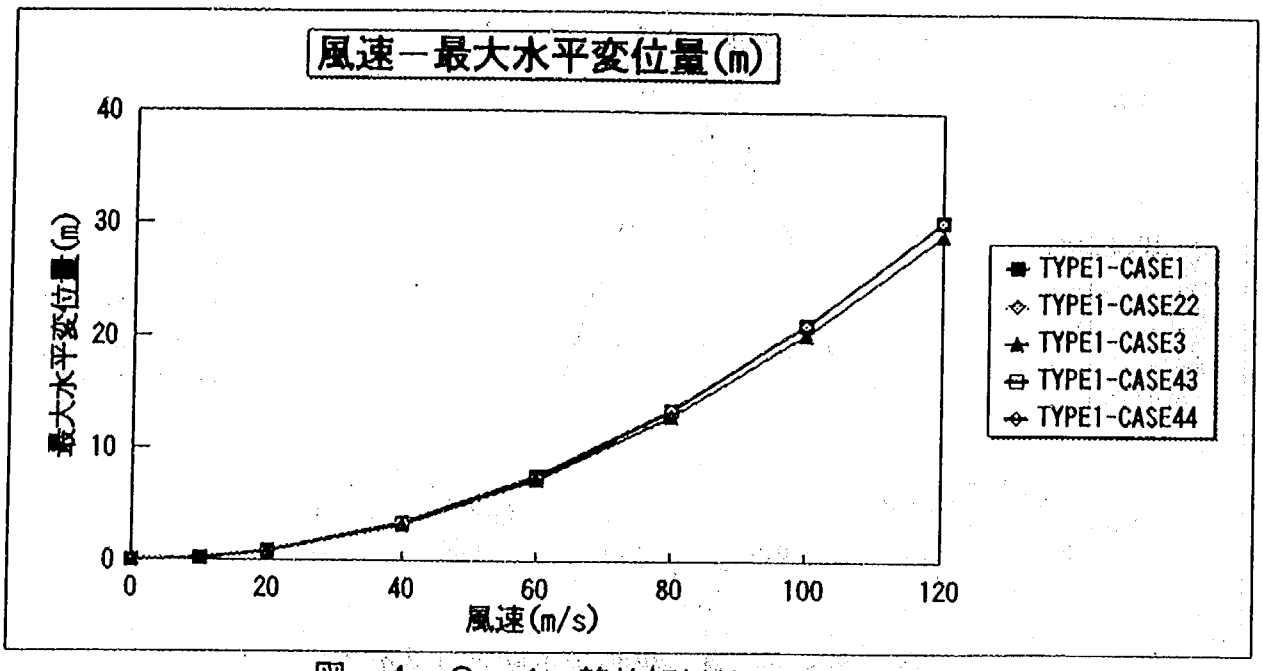
桁高が大きくなるに従い、受風面積が大きくなることにより荷重が増加し、水平変位，ねじれ角とも比例的に増加していることが判る。



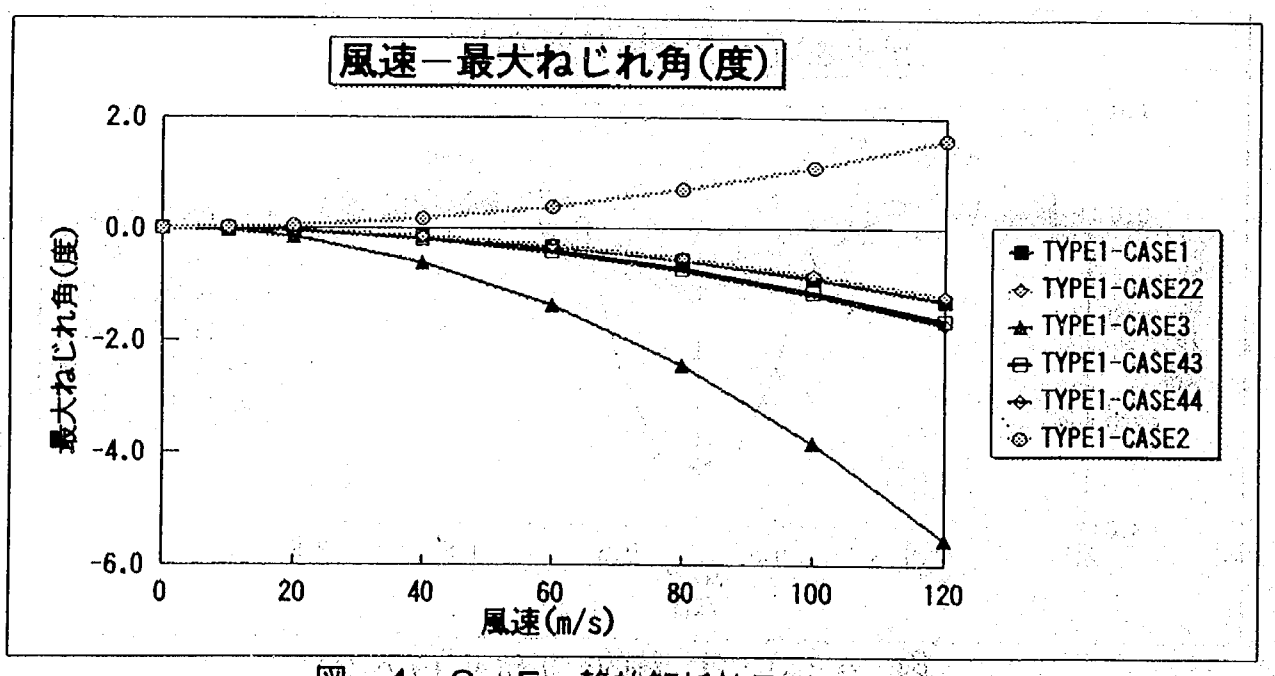
図－４・３・２　静的解析結果（その１）



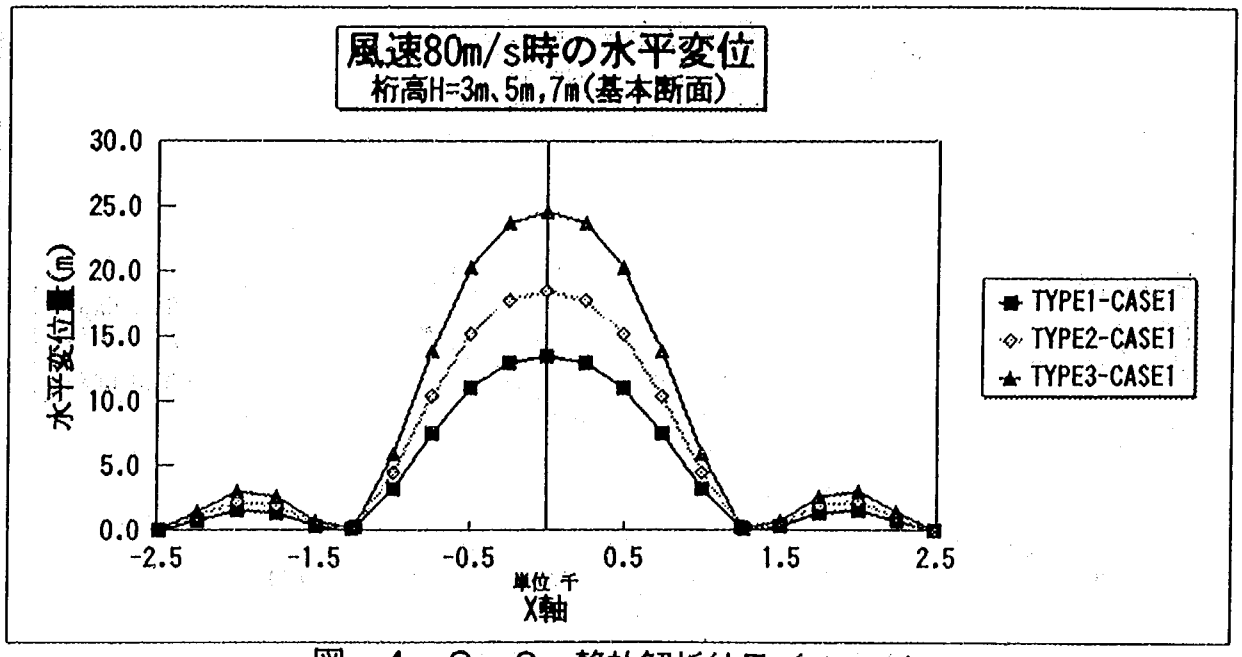
図－４・３・３　静的解析結果（その２）



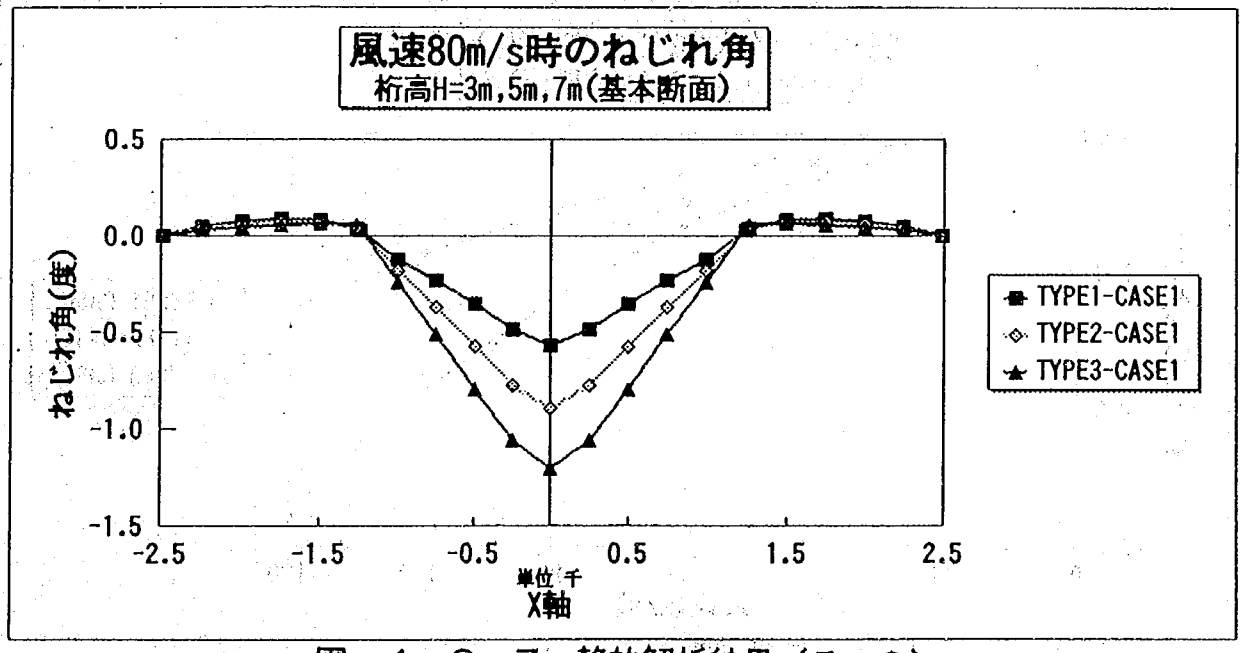
図－４・３・４　静的解析結果（その３）



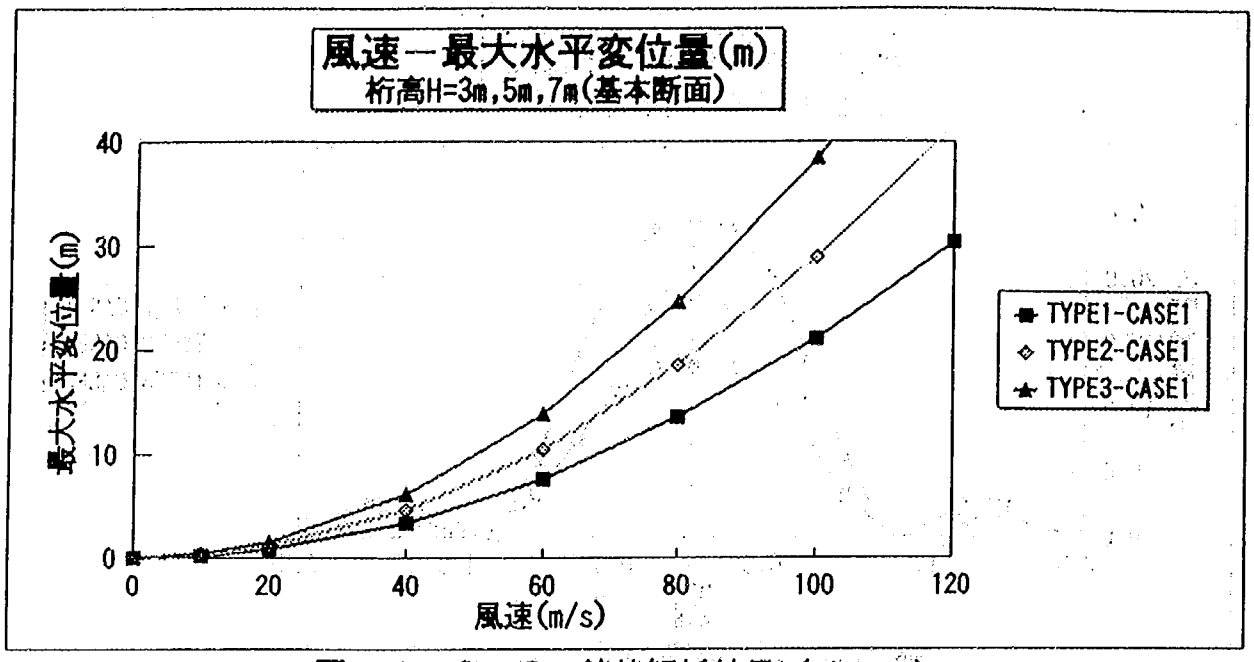
図－４・３・５　静的解析結果（その４）



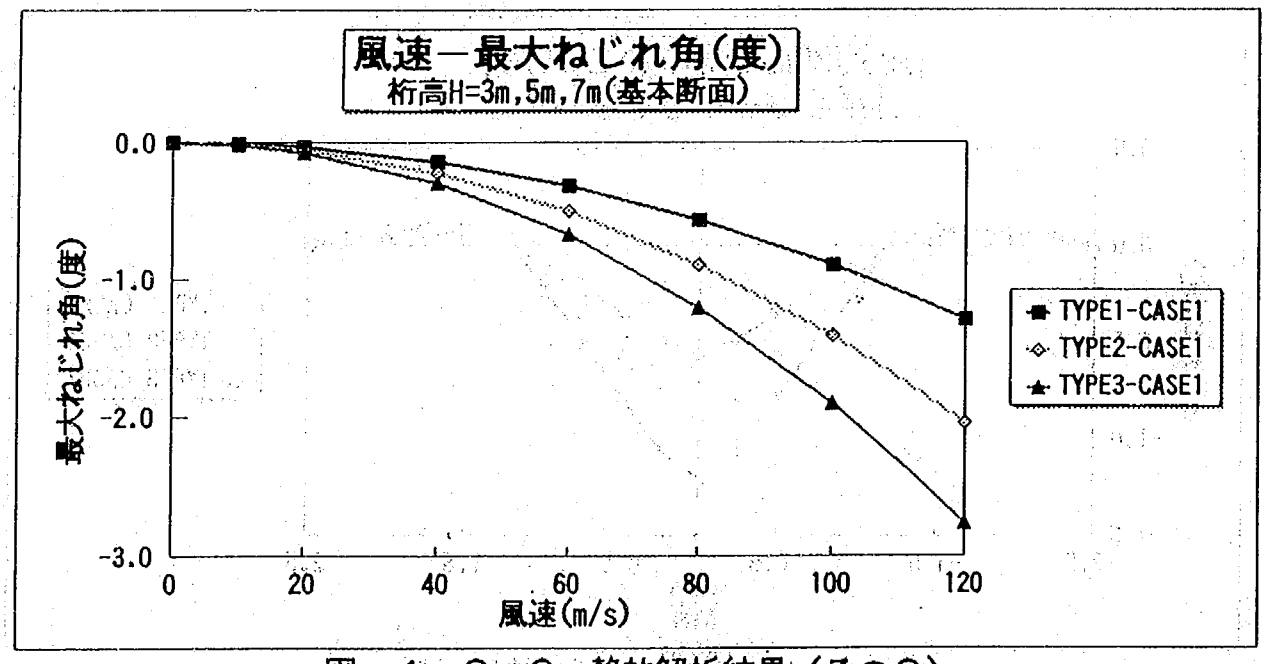
図－４・３・６　静的解析結果（その５）



図－４・３・７　静的解析結果（その６）



図－４・３・８　静的解析結果（その７）



図－４・３・９　静的解析結果（その８）

（２）フラッター解析結果

１）フラッター発現風速

多自由度フラッター解析結果の一覧を表－４・３・１と表－４・３・２に示す。

①Theodorsen空気力を使用した解析値

図－４・３・１０で多自由度フラッター解析のTheodorsen空気力を用いたフラッター発現風速とSelberg式でのフラッター発現風速との比較を示しているが、等価質量・極慣性モーメントを使用したSelberg式の発現風速と解析値がほとんどのケースで非常によく似ており、断面が平板に近い状態での各ケーブルシステムの発現風速は、固有値解析を行った段階で、ほぼ推定できることが分る。

②非定常空気力実験値を使用した解析値

図－４・３・１１で多自由度フラッター解析の非定常空気力実験値を用いたフラッター発現風速を示している。

・基本システム

基本システムについては、実験空気力の範囲内で解析は行われている。実験値を使用した場合は、発現風速が50m/s程上昇し、空力部材を取り付けた２箱断面の耐風性の良好さが判断できる。この時の耐風対策を施した２箱断面にしたことによるフラッター発現風速の上昇率は、平板の多自由度フラッター解析値34m/sから考えると図－４・３・１４で示されるように約2.4倍の効果を示している。

・ステイケーブルシステム

ステイケーブルシステムについては、実験空気力を使用した場合、ケーブル重量を軽減したときに限り大きく耐風性が向上した。固有値解析結果では、単位質量・極慣性モーメントを用いたSelberg式による判定で、ケーブル重量を軽減した場合は上昇を示したが、等価質量・極慣性モーメントを用いた場合は下降の傾向を示した。実験値を用いた場合は、静的ねじれ角度の影響がでるため、モードと空気力係数の組み合わせにより、今回の解析時にのみ大きく有効に働いた可能性が多分にあるが、ステイケーブルシステムではTheodorsen空気力係数を用いた場合、僅かであるが発現風速が上昇していることから、このケーブルシステムで基本断面より、発現風速が大きく低下することはないと考えられる。

ステイケーブルシステムは経済性と施工性を考えた場合、他のシステムより効果的であるが、耐風性を確保するための有効的なケーブルシステムであるとは断定できないが、活用性は考えられる。

・モノケーブルシステム

モノケーブルケーブルシステムについては、他のフラッター発現時の振動数に比べて、極端に低い次数の振動数で発散振動を起こし、発現風速は100m/sを超えている事が特徴的である。また、空気力の値が実験値の範囲を超えているため、解析値には問題が残っている。

・クロスハンガーシステム

クロスハンガーシステムについては、モノケーブルシステムと逆に極端に高い次数の振動数で発散振動を生じているため、発現風速は非常に高い値となっている。X型と／型ではX型の方が多少フラッター発現風速が小さくなっているが、モノケーブルシステムと同様に空気力の値が実験値の範囲を超えているため、解析結果は正しく評価をされていない。

非定常空気力実験値を用いた解析では実験値の範囲が限られており、モノケーブルシステムとクロスハンガーシステムについては解析誤差は大きくなると考えられるが、使用することにより耐風性は十分に満足できると考えられ、ステイケーブルに関しては詳細な設計を得た上での解析を行わないと耐風性に効果的な結果となるかどうかは判断しにくい。

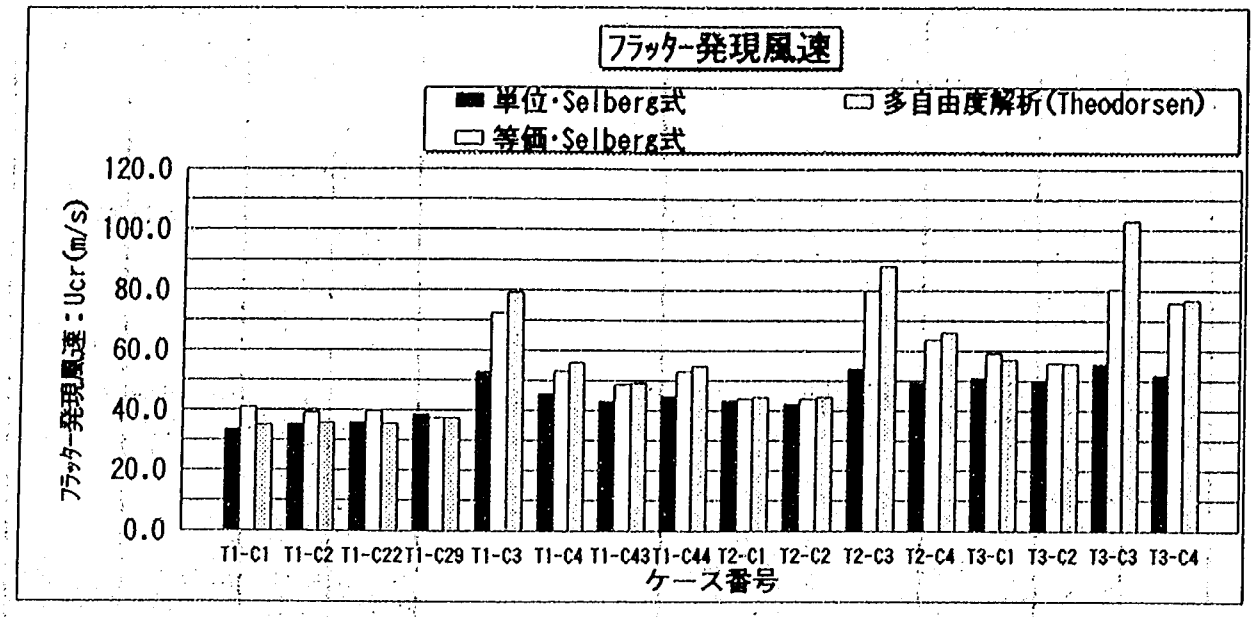
表－４・３・１　多自由度フラッター解析結果－１

桁　種　類			桁高＝３ｍ 単位質量： 4356 kg•sec2/m		単位極慣性： 1470000 kg•m•sec2/m					
ケース			TYPE-1, CASE-1	TYPE-1, CASE-2	TYPE-1, CASE-22	TYPE-1, CASE-29	TYPE-1, CASE-3	TYPE-1, CASE-4	TYPE-1, CASE-43	TYPE-1, CASE-44
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ			基本ケース	ステイケーブル	ステイケーブル	CASE-22と同じ	モノケーブル	クロスハンガー	クロスハンガー	クロスハンガー
条　件				L/4, A=1倍	L/12, A=1倍	ｹｰﾌﾞﾙ重量減少		X型, I≠0	片側片引き, I=0	X型, I=0
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0558	0.0579	0.0562	0.0569	0.0557	0.0558	0.0558	0.0558
		ねじれ対称1次	0.0978	0.1025	0.1024	0.1149	0.1383	0.1220	0.1170	0.1210
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性		33.54	35.32	35.74	38.59	52.85	45.30	42.94	44.83
	等価質量・等価極慣性		40.81	39.08	39.59	37.45	72.25	53.09	48.71	53.03
ﾌﾗｯﾀｰ解析	Theodorsen	Ucr(m/s)	34.94	35.65	35.53	37.41	79.11	55.74	49.04	54.68
		振動数f	0.082	0.083	0.083	0.091	0.134	0.091	0.091	0.091
		k＝ｆＢ／Ｕ	0.119	0.118	0.118	0.123	0.086	0.083	0.094	0.084
		静的ねじれ角	-0.115	0.146	-0.112	-0.121	-2.403	-0.365	-0.283	-0.363
	実験空気力	Ucr(m/s)	85.49	-----	89.40	128.86	131.18	-----	183.43	152.96
		振動数f	0.096	-----	0.097	0.144	0.138	-----	0.142	0.155
		k＝ｆＢ／Ｕ	0.057	-----	0.055	0.056	0.053	-----	0.039	0.051
		静的ねじれ角	-0.659	-----	-0.680	-1.414	-6.703	-----	-4.231	-2.945
		着目次数	6	-----	7	11	2	-----	18	18

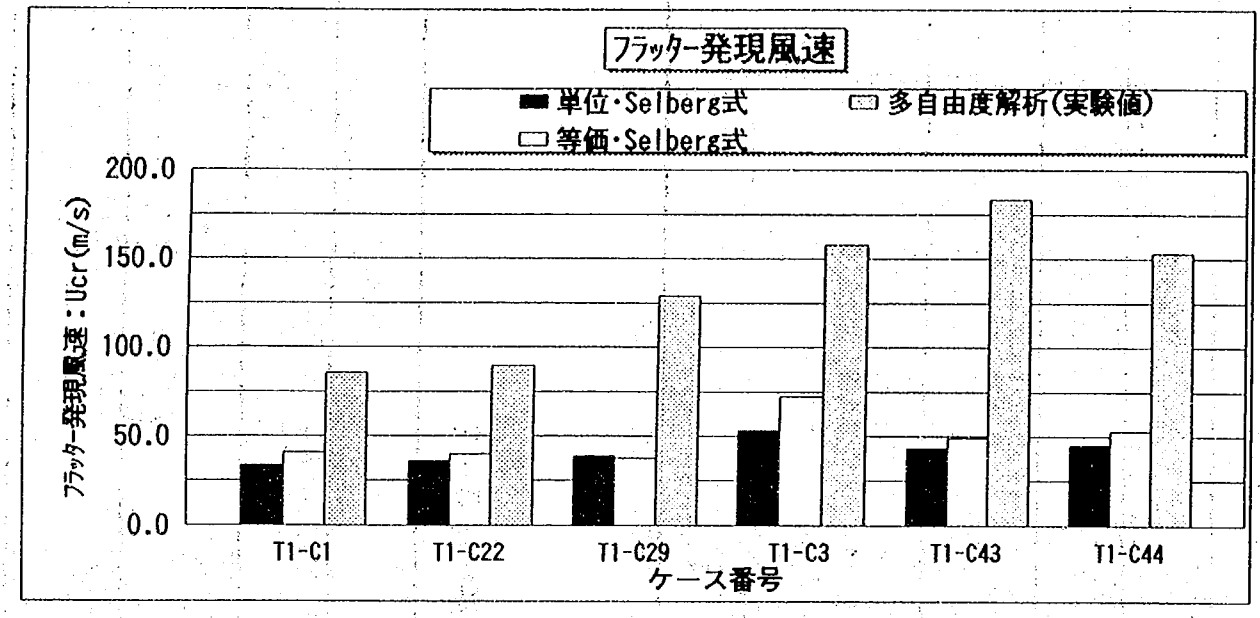
＊実験空気力の有効適用範囲　k＝０．０５３～０．２０５　　迎角　±　3度

表－４・３・２　多自由度フラッター解析結果－２

桁　種　類			桁高＝５ｍ 単位質量： 4356 kg•sec2/m		単位極慣性： 1522000 kg•m•sec2/m		桁高＝７ｍ 単位質量： 4356 kg•sec2/m		単位極慣性： 1554000 kg•m•sec2/m	
ケース			TYPE-2, CASE-1	TYPE-2, CASE-2	TYPE-2, CASE-3	TYPE-2, CASE-4	TYPE-3, CASE-1	TYPE-3, CASE-2	TYPE-3, CASE-3	TYPE-3, CASE-4
ｹｰﾌﾞﾙｼｽﾃﾑ			基本ケース	ステイケーブル	モノケーブル	クロスハンガー	基本ケース	ステイケーブル	モノケーブル	クロスハンガー
条　件				L/4, A=1倍		X型, I≠0		L/4, A=1倍		X型, I≠0
固有値解析	固有振動数	たわみ対称1次	0.0559	0.0579	0.0558	0.0559	0.0560	0.0581	0.0559	0.0560
		ねじれ対称1次	0.1168	0.1158	0.1395	0.1291	0.1327	0.1316	0.1423	0.1345
Selberg Ucr	単位質量・単位極慣性		43.19	42.24	53.85	49.01	50.93	49.99	55.40	51.77
	等価質量・等価極慣性		43.91	43.99	79.96	63.62	59.16	55.92	80.27	75.35
ﾌﾗｯﾀｰ解析	Theodorsen	Ucr(m/s)	44.39	44.43	87.99	66.01	56.90	55.60	102.88	76.66
		振動数f	0.092	0.091	0.139	0.097	0.099	0.097	0.142	0.116
		k＝ｆＢ／Ｕ	0.105	0.103	0.080	0.074	0.088	0.088	0.121	0.076
		静的ねじれ角	-0.284	0.216	-3.851	-0.854	-0.617	0.312	-6.339	-1.611

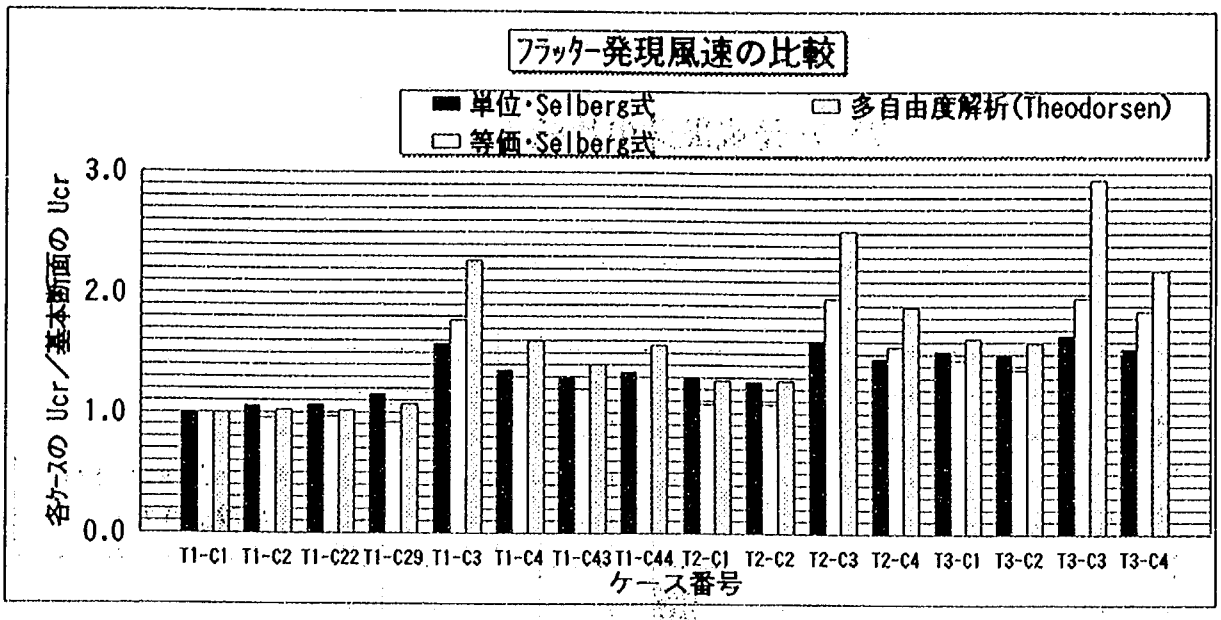


図－４・３・１０　フラッター発現風速（Theodorsen空気力）

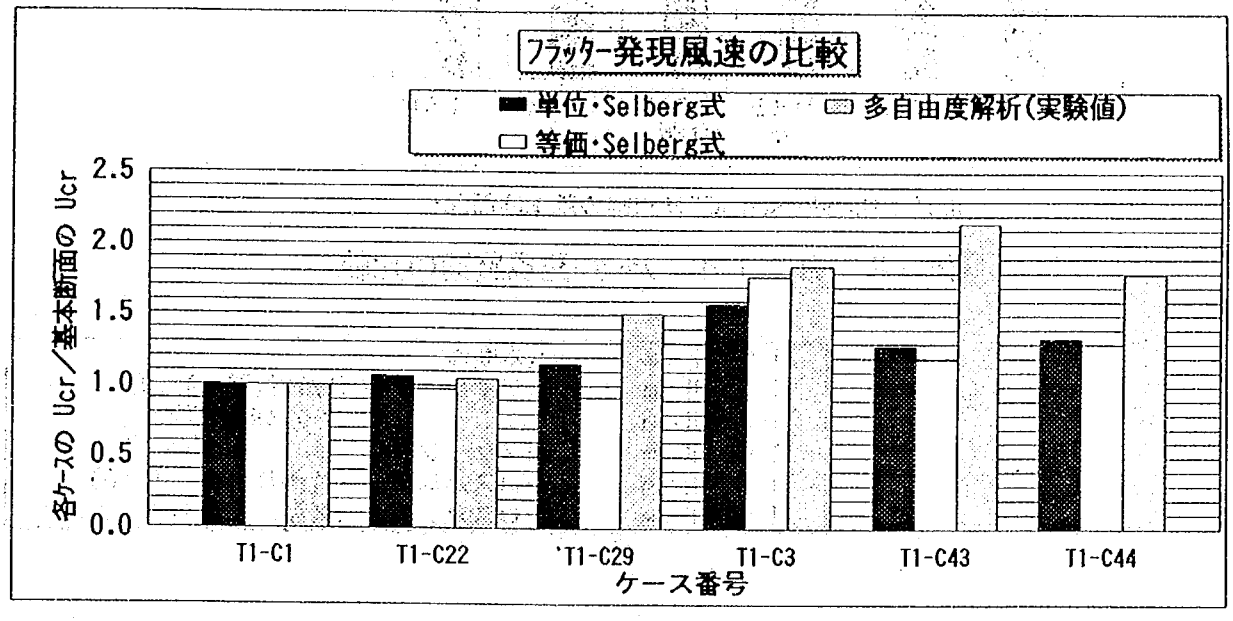


図－４・３・１１　フラッター発現風速（実験空気力）

T1-C1 :H=3m	基本断面
T1-C2 :H=3m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T1-C3 :H=3m	モノケーブル
T1-C4 :H=3m	クロスハンガー（X型，I≠0）
T1-C22:H=3m	ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）
T1-C29:H=3m	〃　ケーブル重量軽減
T1-C43:H=3m	クロスハンガー（片側片引き，I＝0）
T1-C44:H=3m	クロスハンガー（X型，I＝0）
T2-C1 :H=5m	基本断面
T2-C2 :H=5m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T2-C2 :H=5m	モノケーブル
T2-C4 :H=5m	クロスハンガー（X型，I≠0）
T3-C1 :H=3m	基本断面
T3-C2 :H=3m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T3-C3 :H=3m	モノケーブル
T3-C4 :H=3m	クロスハンガー（X型，I≠0）

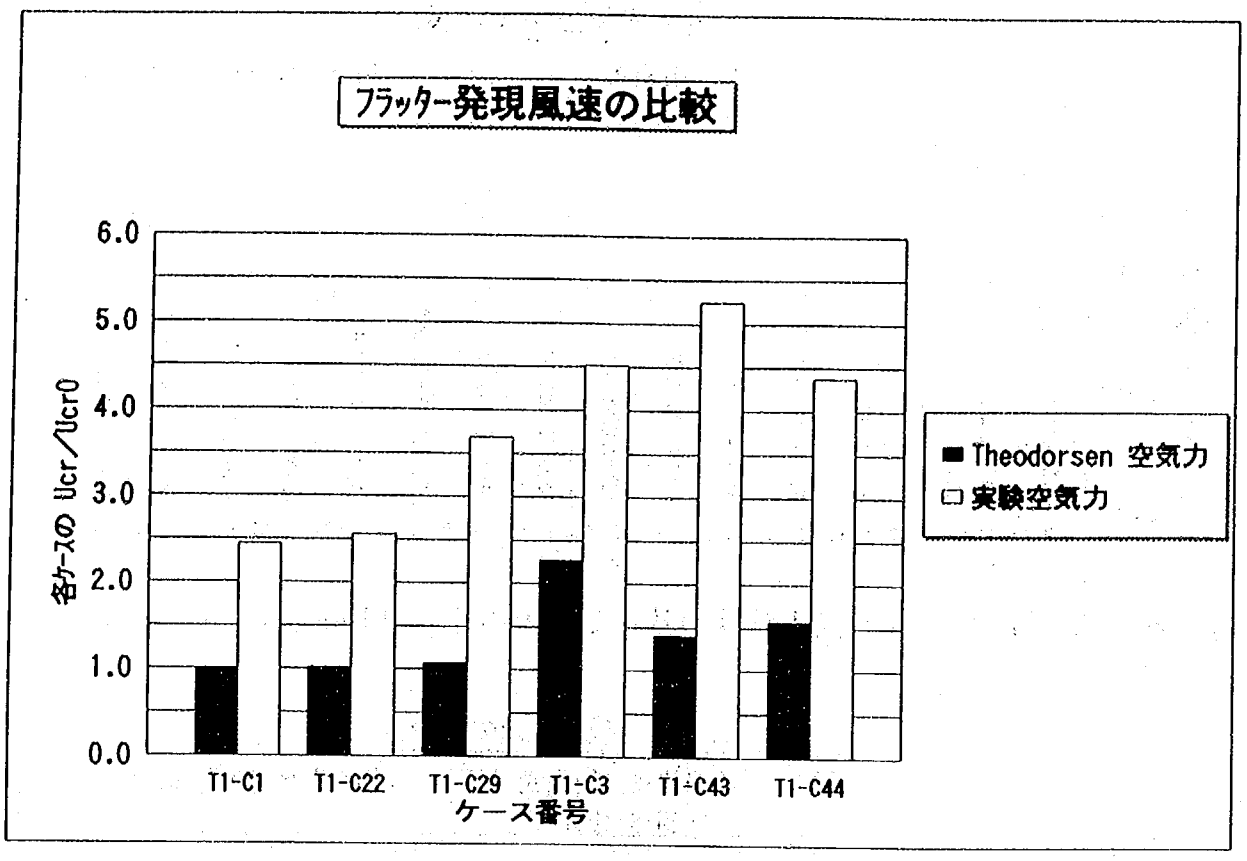


図－４・３・１２　ﾌﾗｯﾀｰ発現風速の基本断面との比較（Theodorsen空気力）



図－４・３・１３　ﾌﾗｯﾀｰ発現風速の基本断面との比較（実験空気力）

T1-C1 :H=3m	基本断面
T1-C2 :H=3m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T1-C3 :H=3m	モノケーブル
T1-C4 :H=3m	クロスハンガー（X型，I≠0）
T1-C22:H=3m	ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）
T1-C29:H=3m	〃　ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減
T1-C43:H=3m	クロスハンガー（片側片引き，I＝0）
T1-C44:H=3m	クロスハンガー（X型，I＝0）
T2-C1 :H=5m	基本断面
T2-C2 :H=5m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T2-C2 :H=5m	モノケーブル
T2-C4 :H=5m	クロスハンガー（X型，I≠0）
T3-C1 :H=3m	基本断面
T3-C2 :H=3m	ステイケーブル（L/4位置，A=1倍）
T3-C3 :H=3m	モノケーブル
T3-C4 :H=3m	クロスハンガー（X型，I≠0）



Ucr0：THeodorsen AEF使用時の基本断面Ucr

図－４・３・１４　フラッター発現風速の比較

T1-C1 :H=3m	基本断面
T1-C22:H=3m	ステイケーブル（L/12位置，A=1倍）
T1-C29:H=3m	〃　　ケーブル重量軽減
T1-C3 :H=3m	モノケーブル
T1-C43:H=3m	クロスハンガー（片側片引き，I＝0）
T1-C44:H=3m	クロスハンガー（X型，I＝0）

2）U－δ図

①Theodorsen空気力を使用した解析値

Theodorsen空気力を使用した多自由度フラッター解析のU－δ図を、振動数に着目しないで、図－４・３・１５、図－４・３・１７、図－４・３・１８に示す。

基本断面とステイケーブルでは、減衰が減少を始める風速も減衰が減少する勾配も、ほぼ一定となっている。モノケーブルシステムでは、基本断面より最大減衰が大きくなりかつ減衰の減少勾配が小さくなることでフラッター発現風速を上昇させている。特に、減衰が減少時にモードの影響で振動数が変化することが図より分かる。これは、吊橋では水平時のたわみにねじれのモードも連成するが、モノケーブルシステムではこの度合いが大きいため、ねじれ１次の振動数以外の水平たわみモードが大きく影響していると考えられる。クロスハンガーシステムでは、最大減衰発生時の風速が上昇するが、減衰減少の勾配は基本断面と大きな差はない。これは、クロスハンガーシステムの静的な性質が基本断面とほとんど同じで、ねじれの振動数のみを上昇させているからだと考えられる。

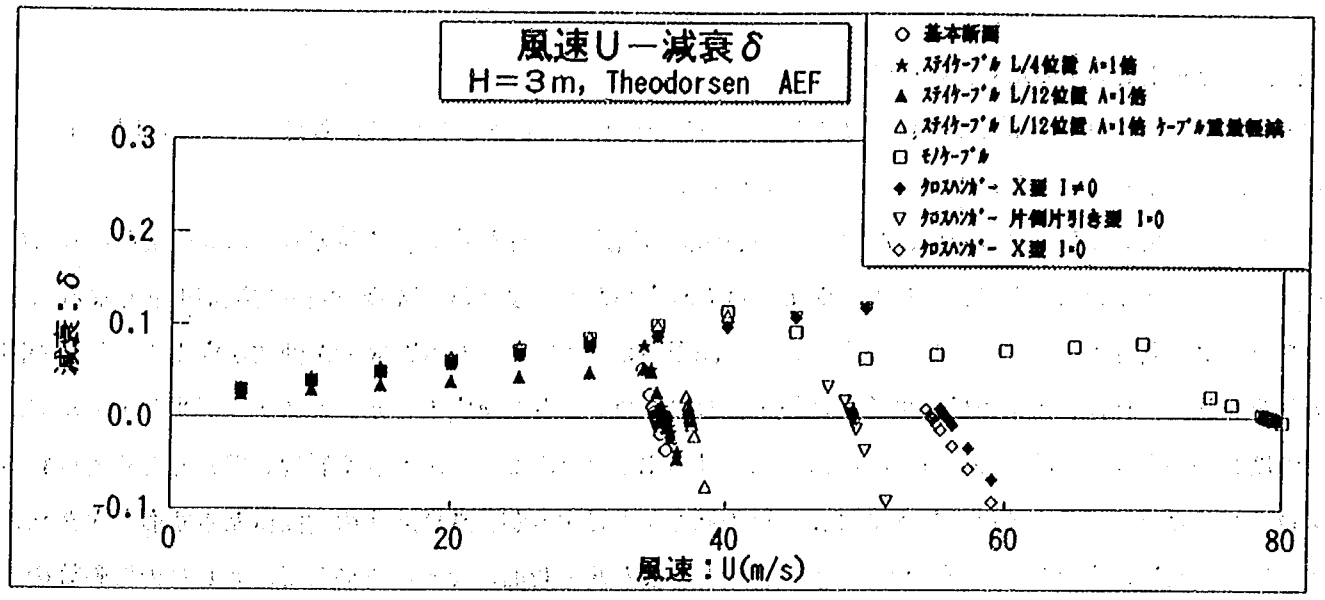
②非定常空気力実験値を使用した解析値

実験空気力を使用した解析には、各ケースともフラッター発現時のモード次数を着目し、U－δ図を描かせている。図－４・３・１６を見ると、各ケーブルシステムとも減衰の変化に相違が生じていることが分る。

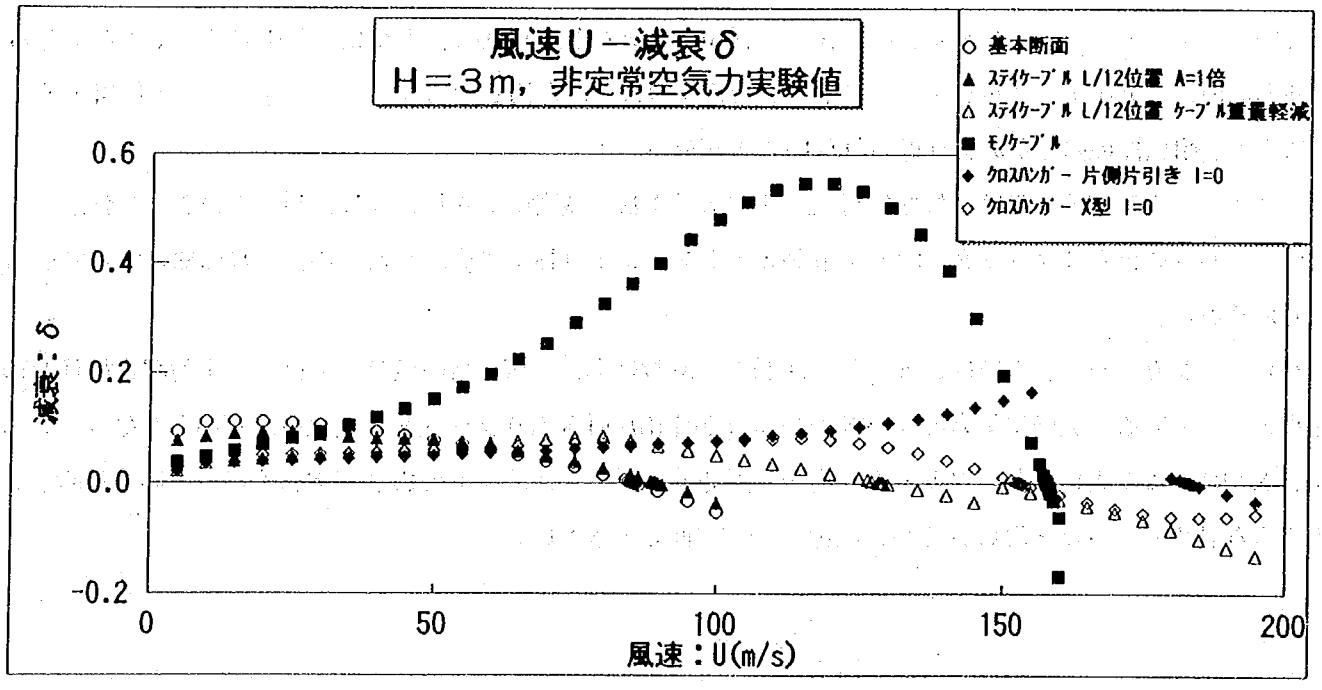
基本断面とステイケーブルシステムでは減衰の変化はほとんど同じであり、ステイケーブルを使用することにより、耐風性の向上があまり得られないことが分る。

モノケーブルシステムではかなりの高風速まで着目次数の減衰は上昇し、発散に到っている。これは、モノケーブルシステムのフラッター時の次数が他のシステムより極端に低いためこのような曲線となっていると考えられる。

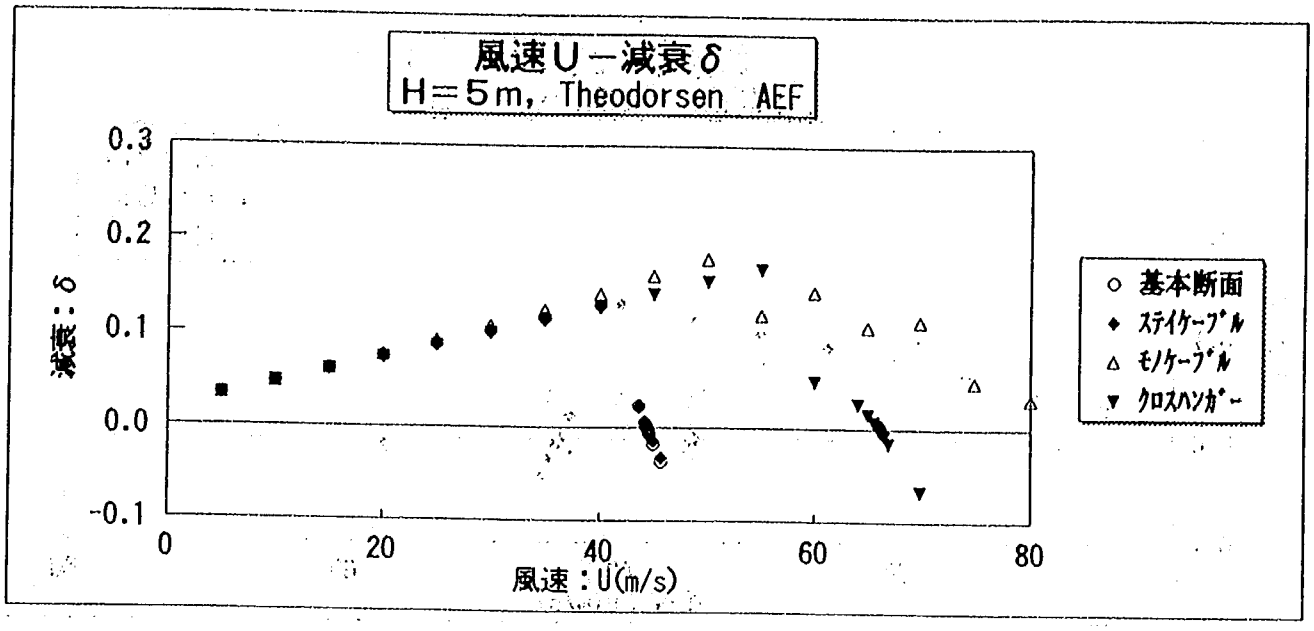
クロスハンガーシステムでは、着目した次数で、減数は小さい値で高い風速までほぼ一定勾配となり負の減衰となっている。実験空気力では、X型のほうが片側片引きよりフラッター発現風速が小さくなっているが、X型にすることにより、フラッター発現次数近くのケーブルモードの影響が大きくなっているため、このような結果となったと思われるが、原因は明確に断定できない。



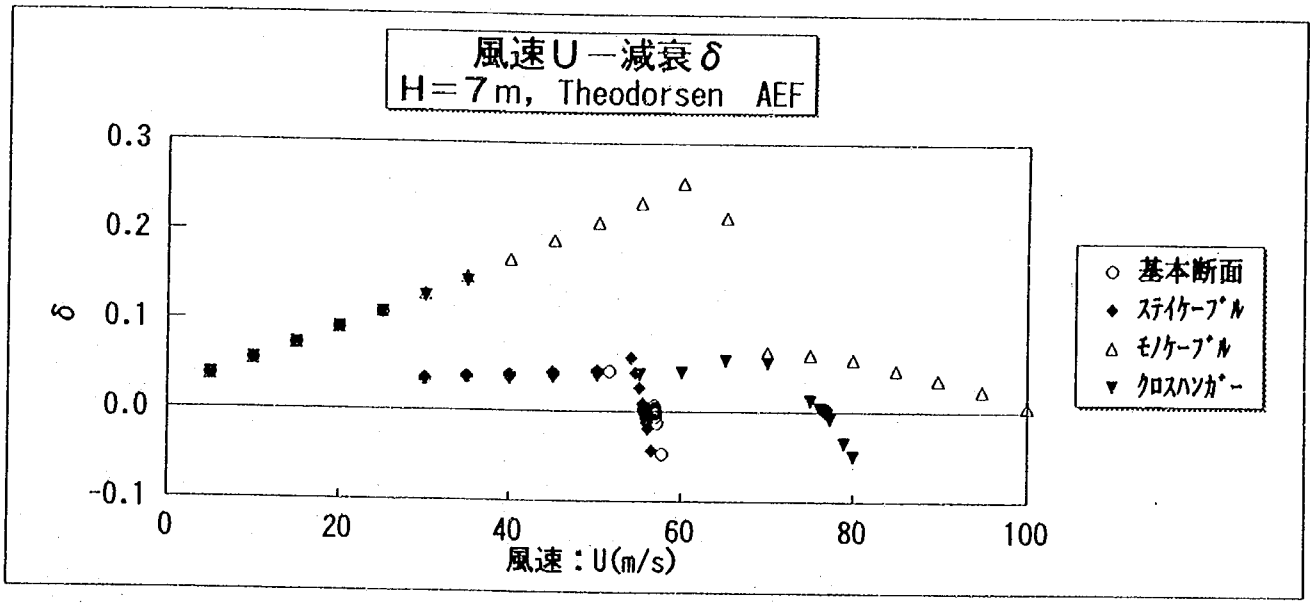
図－４・３・１５　桁高＝3m　Theodorsen空気力使用時のU－δ図



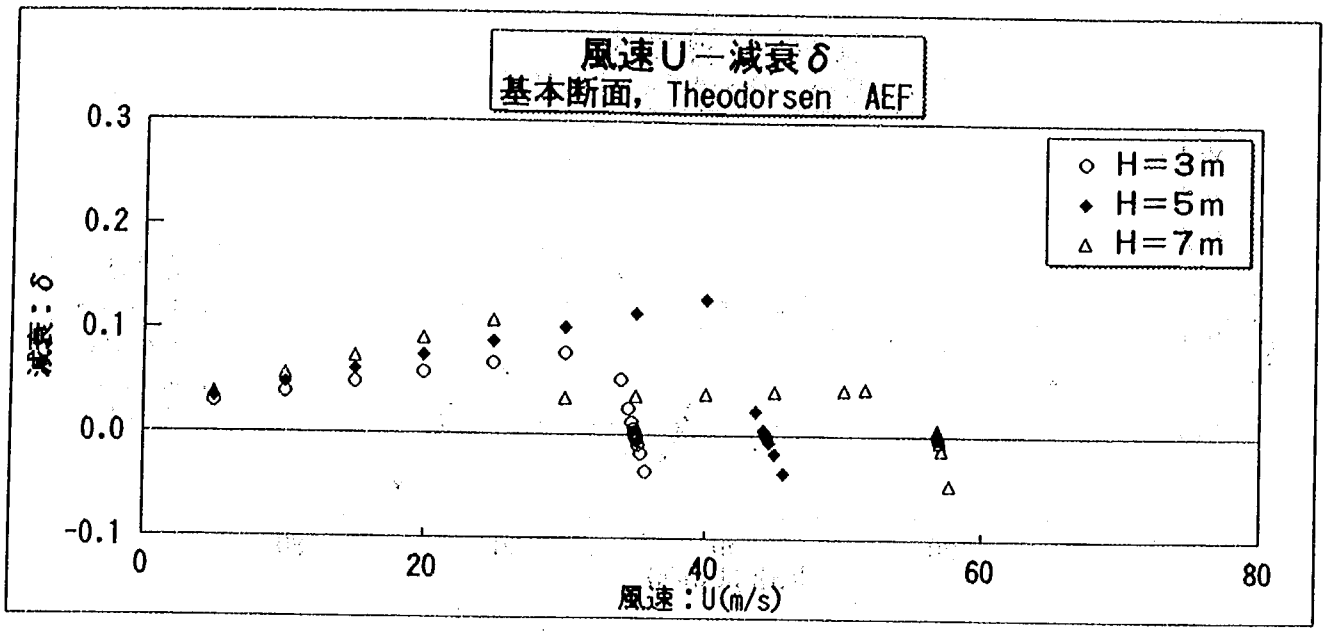
図－４・３・１６　桁高＝3m　実験空気力使用時のU－δ図



図－４・３・１７　桁高＝5m　Theodorsen空気力使用時のU－δ図



図－４・３・１８　桁高＝7m　Theodorsen空気力使用時のU－δ図



図－４・３・１９　基本断面の桁高別Theodorsen空気力使用時のＵ－δ図

3）フラッター発現時のモード図

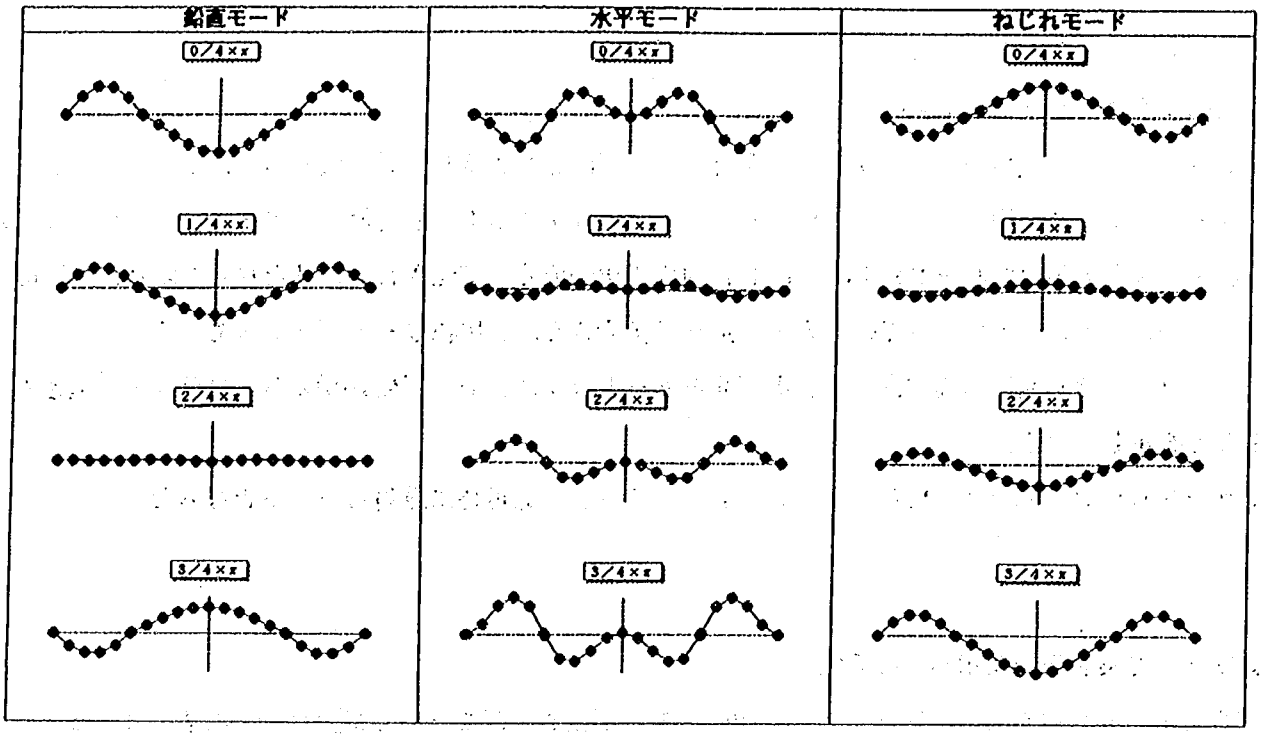
①Theodorsen空気力を使用した解析値

Theodorsenの空気力を用いたフラッター発現時のモード図をおよびモードの成分について表－４・３・３～表－４・３・１８及び図－４・３・２０～図－４・３・５１に示す。桁高3mと5mのモノケーブルシステムを除き各ケースとも鉛直たわみ対称１次とねじれ対称１次の成分に支配された形状となっており、位相のズレやケーブルシステムで拘束されている箇所の形状は多少違うが、単純なモードとなっている。また、同一空気力ではフラッター発現風速が高いほど影響するモードは増え、モード数が増えるとフラッター風速が上昇することを示している。

モノケーブルシステムでは、桁高3mと5mの場合、フラッター発現時に逆対称モードとなった。

②非定常空気力実験値を使用した解析値

非定常空気力実験値を用いたフラッター発現時のモード図およびモードの成分について表－４・３・１９～表－４・３・２４及び図－４・３・５２～図－４・３・６３に示す。モノケーブルシステムでは発現時の振動数が小さいことでも分るようにたわみの連成が大きく、クロスハンガーシステムはモード形状が高次のモードで支配されており、形状は複雑な結果となった。

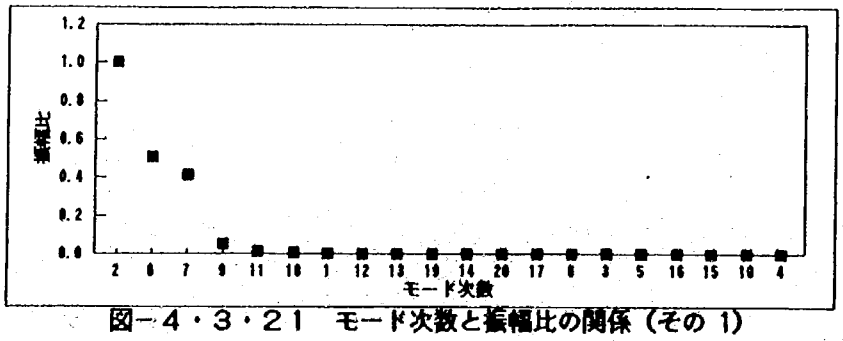


図－４・３・２０　フラッター発現時のモード図（その 1）
TYPE-1,CASE-1：桁高＝3m，基本断面
Theodorsen空気力

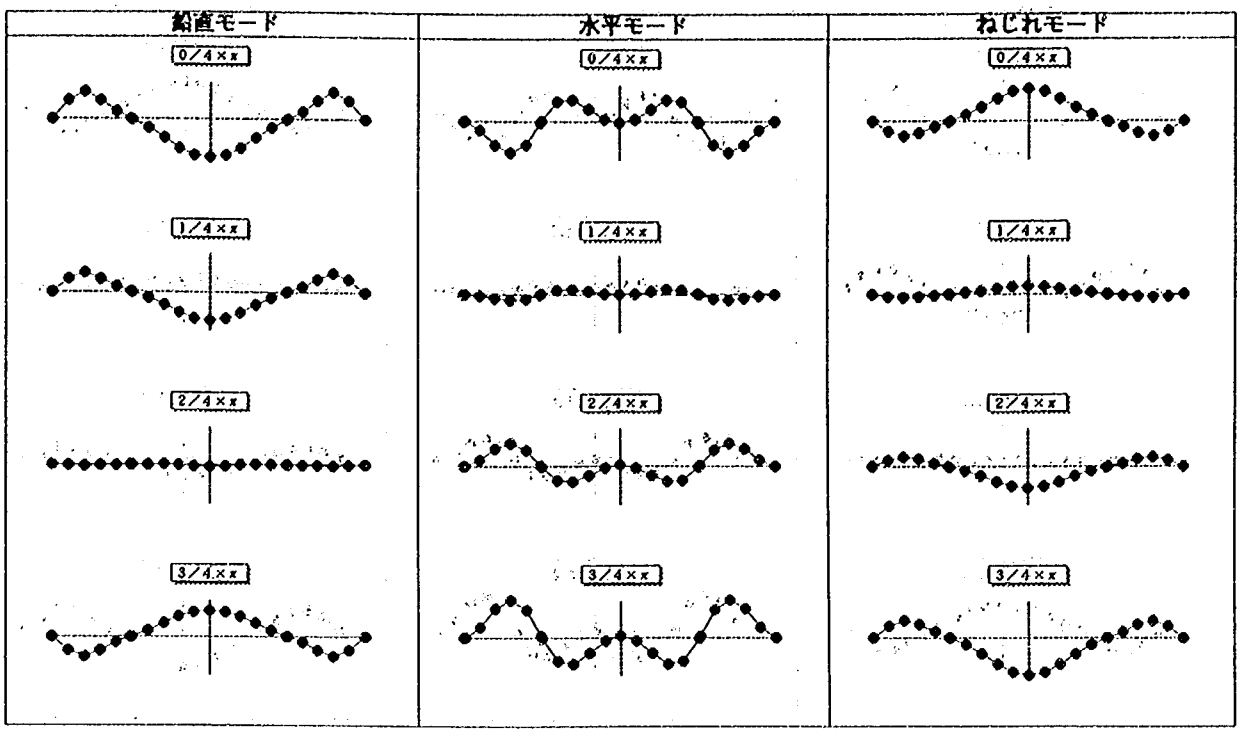
フラッター発現風速	：U＝	34.943 m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.082 Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.119
静的ねじれ角	：α＝	-0.115 度

表－４・３・３　モードの成分寄与率（その 1）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0558	鉛直たわみ対称１次
6	5.1E-01	146.29	0.0978	ねじれ対称１次
7	4.1E-01	-33.14	0.1017	ねじれ対称２次
9	5.2E-02	-43.60	0.1029	鉛直たわみ対称２次
11	1.5E-02	147.57	0.1340	水平たわみ対称２次
18	8.0E-03	146.63	0.1405	鉛直たわみ対称３次
1	4.0E-03	147.74	0.0387	水平たわみ対称１次
12	3.1E-05	158.68	0.1364	ケーブル
13	2.6E-05	161.12	0.1364	ケーブル
19	2.2E-05	152.11	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
14	2.2E-05	-17.98	0.1367	ケーブル
20	6.3E-06	-17.45	0.1437	水平たわみ逆対称３次
17	5.5E-06	-12.44	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
8	2.8E-06	145.58	0.1026	水平たわみ逆対称２次
3	1.8E-06	62.02	0.0718	鉛直たわみ逆対称１次
5	1.8E-06	90.80	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
16	5.9E-07	146.75	0.1381	ケーブル
15	5.6E-07	153.22	0.1369	ねじれ逆対称２次
10	3.9E-07	-169.96	0.1269	ねじれ逆対称１次
4	8.8E-08	36.43	0.0797	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・２１　モード次数と振幅比の関係（その 1）



図－４・３・２２　フラッター発現時のモード図（その 2）

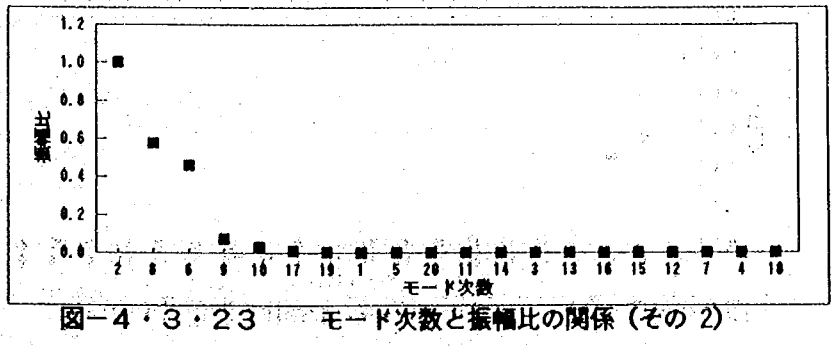
TYPE-1,CASE-2：桁高＝3m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/4,A=1倍

Theodorsen空気力

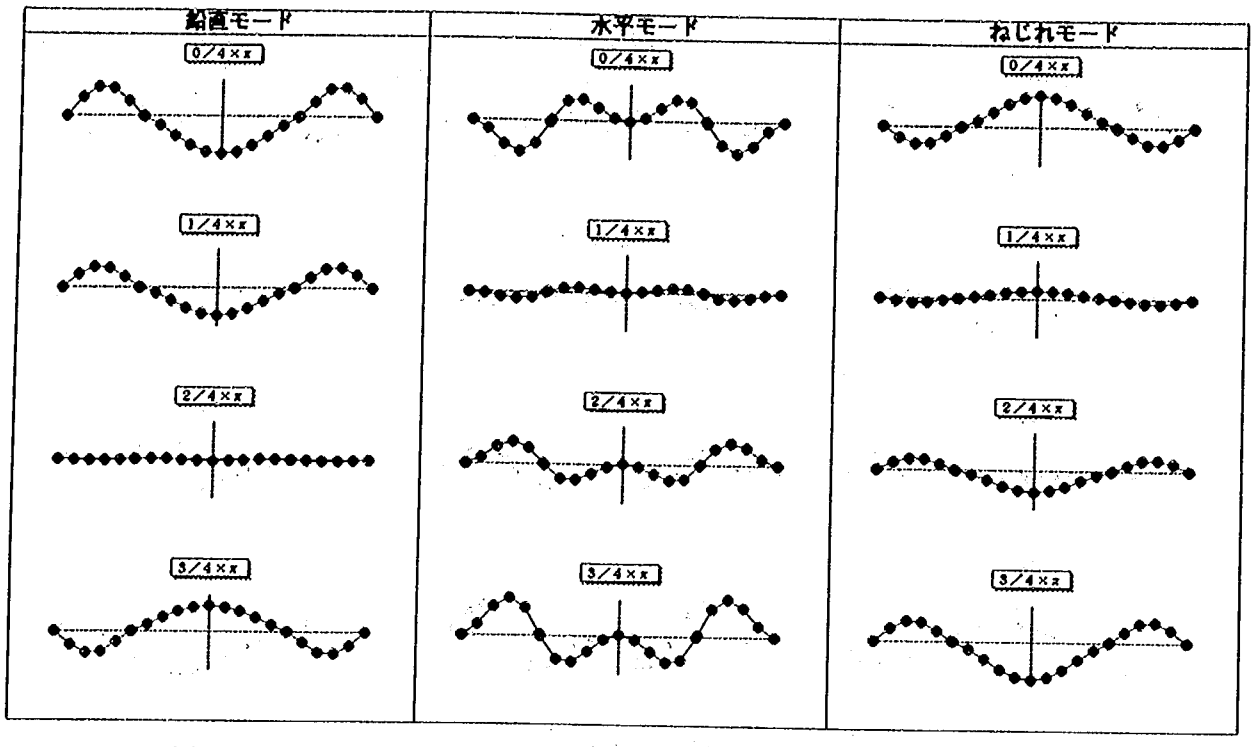
フラッター発現風速	：U＝	35.651	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.083	Hz
換算振動数（f B／U）	：k＝	0.118	
静的ねじれ角	：α＝	0.146	度

表－４・３・４　モードの寄与率（その 2）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0579	鉛直たわみ対称１次
8	5.8E-01	-33.29	0.1025	ねじれ対称１次
6	4.6E-01	145.72	0.0970	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
9	7.2E-02	-30.51	0.1159	鉛直たわみ対称２次
10	2.9E-02	-33.27	0.1268	水平たわみ対称３次
17	9.3E-03	-30.58	0.1350	水平たわみ対称４次
19	1.6E-03	139.49	0.1486	水平たわみ対称５次
1	3.2E-04	-26.08	0.0388	水平たわみ対称１次
5	1.7E-04	-42.61	0.0949	鉛直たわみ逆対称２次
20	9.6E-05	147.10	0.1487	鉛直たわみ逆対称３次
11	1.8E-05	142.94	0.1298	ケーブル
14	1.7E-05	146.44	0.1311	ケーブル
3	1.6E-05	114.40	0.0778	鉛直たわみ逆対称１次
13	1.5E-05	-36.88	0.1300	ケーブル
16	1.5E-05	149.89	0.1334	ケーブル
15	2.5E-06	156.63	0.1319	ケーブル
12	2.4E-06	-48.00	0.1300	ケーブル
7	2.2E-06	148.09	0.1023	水平たわみ逆対称２次
4	1.2E-06	56.58	0.0786	水平たわみ逆対称１次
18	4.1E-07	-81.87	0.1372	ねじれ逆対称１次



図－４・３・２３　モード次数と振幅比の関係（その 2）

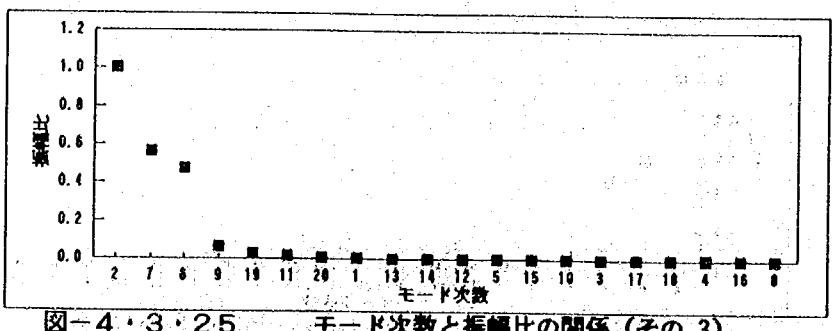


図－４・３・２４　フラッター発現時のモード図（その 3）
TYPE-1,CASE-22：桁高＝3m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/12,A=1倍
Theodorsen空気力

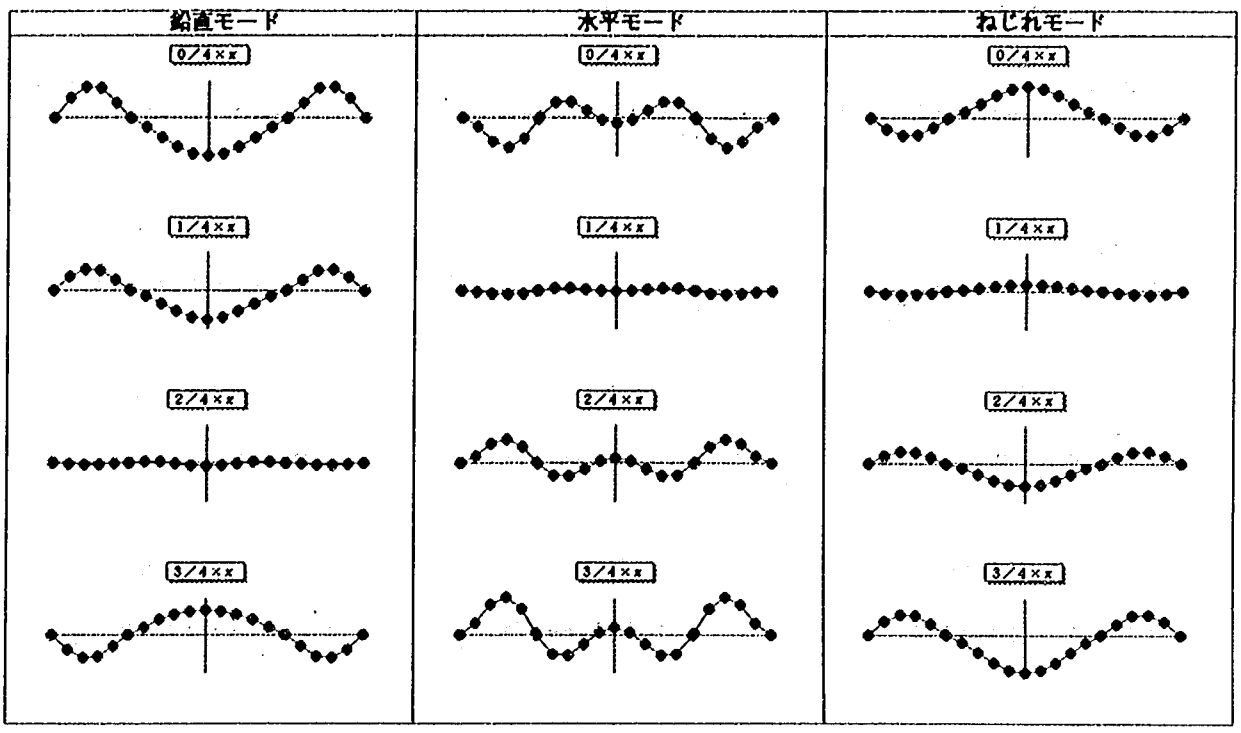
フラッター発現風速	：U＝	35.531	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.083	Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）	：k＝	0.118	
静的ねじれ角	：α＝	-0.112	度

表－４・３・５　モードの成分寄与率（その 3）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0562	鉛直たわみ対称１次
7	5.6E-01	146.96	0.1024	ねじれ対称１次
6	4.7E-01	146.32	0.0985	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
9	6.1E-02	139.93	0.1066	鉛直たわみ対称２次
19	2.8E-02	152.22	0.1452	鉛直たわみ対称３次
11	1.6E-02	-32.54	0.1337	水平たわみ対称３次
20	7.6E-03	-26.03	0.1453	水平たわみ対称４次
1	3.4E-03	147.84	0.0387	水平たわみ対称１次
13	4.7E-05	150.21	0.1361	ケーブル
14	3.2E-05	151.06	0.1363	ケーブル
12	6.6E-06	171.01	0.1361	ケーブル
5	6.0E-06	-15.47	0.0839	鉛直たわみ逆対称２次
15	4.1E-06	146.22	0.1378	ケーブル
10	3.3E-06	149.64	0.1316	ねじれ逆対称１次
3	2.9E-06	-151.55	0.0731	鉛直たわみ逆対称１次
17	2.9E-06	-31.42	0.1438	水平たわみ逆対称３次
18	2.3E-06	147.18	0.1445	ねじれ逆対称３次
4	2.0E-06	-118.40	0.0798	水平たわみ逆対称１次
16	1.9E-06	143.75	0.1405	ねじれ逆対称２次
8	3.3E-07	-48.81	0.1026	水平たわみ逆対称２次



図－４・３・２５　モード次数と振幅比の関係（その 3）



図－４・３・２６　フラッター発現時のモード図（その 4）

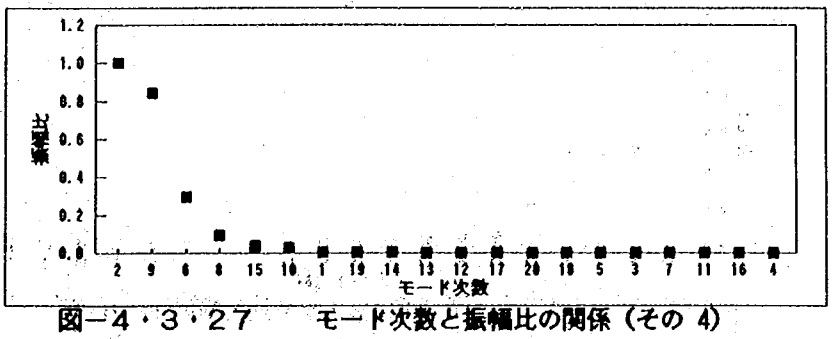
TYPE-1,CASE-29：桁高＝3m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/12,A=1倍

Theodorsen空気力　　ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減

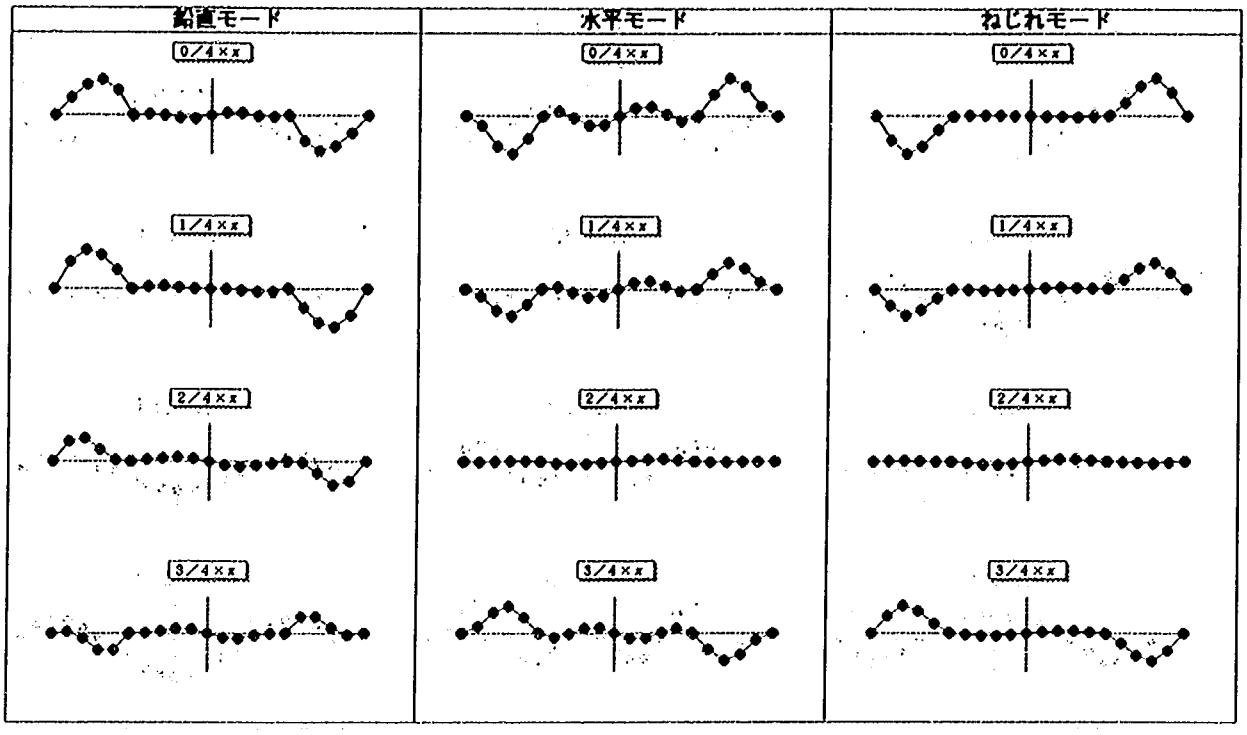
フラッター発現風速	：U＝	37.413	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.091	Hz
換算振動数（ｆＢ／U）	：k＝	0.123	
静的ねじれ角	：α＝	-0.121	度

表－４・３・６　モードの寄与率（その 4）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0569	鉛直たわみ対称１次
9	8.4E-01	-35.08	0.1149	ねじれ対称１次
6	3.0E-01	142.71	0.1027	水平たわみ対称２次
8	9.5E-02	-50.42	0.1081	鉛直たわみ対称２次
15	3.6E-02	149.80	0.1545	鉛直たわみ対称４次
10	2.8E-02	-33.80	0.1432	水平たわみ対称３次
1	4.2E-03	147.95	0.0397	水平たわみ対称１次
19	2.4E-03	7.40	0.1703	ケーブル
14	2.1E-03	-57.30	0.1496	鉛直たわみ対称３次
13	4.7E-04	-56.40	0.1496	鉛直たわみ逆対称４次
12	3.5E-05	141.70	0.1488	鉛直たわみ逆対称３次
17	1.4E-05	-42.97	0.1702	ケーブル
20	5.5E-06	148.94	0.1704	ケーブル
18	3.5E-06	-143.86	0.1702	ケーブル
5	2.2E-06	78.34	0.0878	鉛直たわみ逆対称２次
3	2.1E-06	31.67	0.0735	鉛直たわみ逆対称１次
7	1.8E-06	-38.64	0.1075	水平たわみ逆対称２次
11	8.2E-07	137.15	0.1485	ねじれ逆対称１次
16	5.3E-07	-53.23	0.1625	ねじれ逆対称２次
4	8.1E-08	-109.15	0.0807	水平たわみ逆対称１次



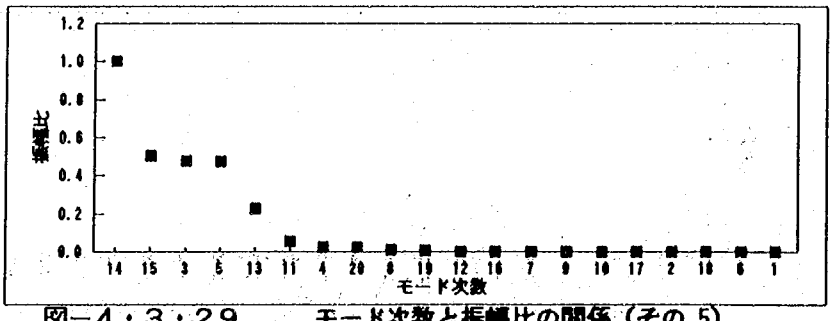
図－４・３・２７　モード次数と振幅比の関係（その 4）



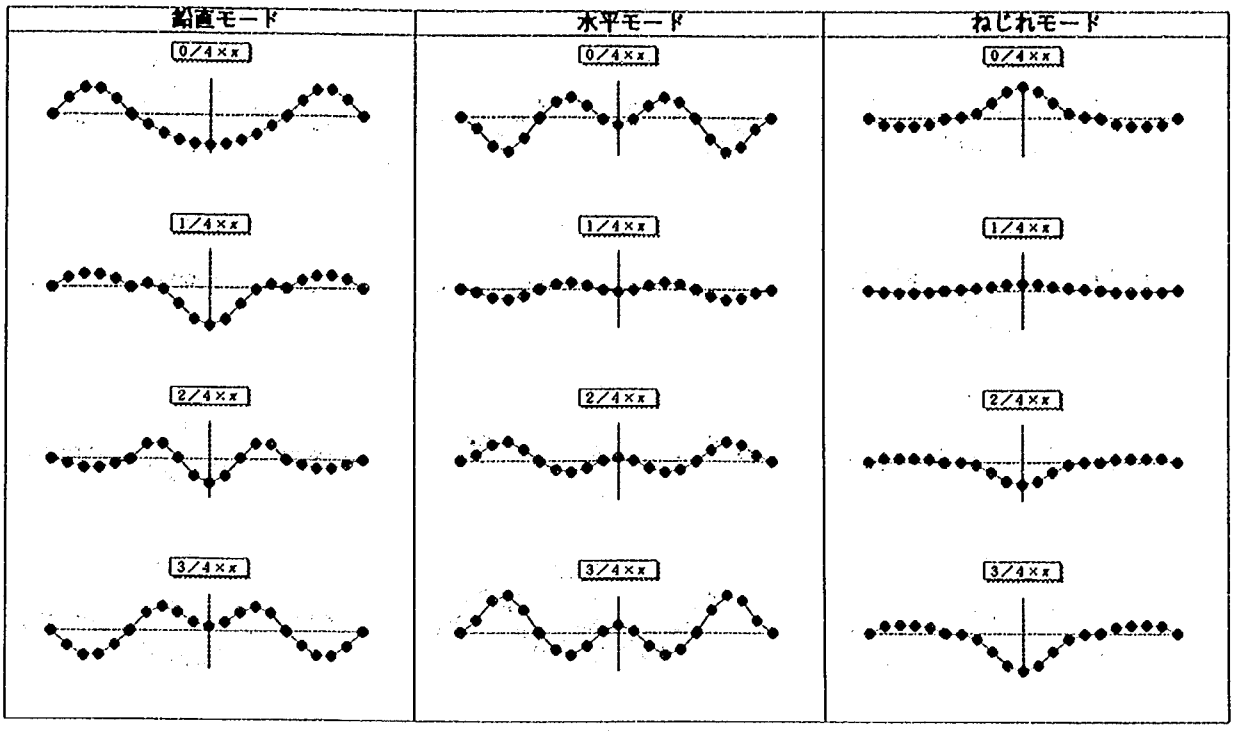
図－４・３・２８　フラッター発現時のモード図（その 5）
TYPE-1,CASE3：桁高＝3m，ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ
Theodorsen空気力
フラッター発現風速　：U＝　79.110 m/s
フラッター発現時の振動数：f＝　0.134 Hz
換算振動数（fB／U）　：k＝　0.086
静的ねじれ角　：α＝　-2.403 度

表－４・３・７　モードの成分寄与率（その 5）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
14	1.0E+00	0.00	0.1438	ねじれ逆対称１次
15	5.0E-01	-13.36	0.1444	ねじれ逆対称２次
3	4.8E-01	-157.89	0.0717	鉛直たわみ逆対称１次
5	4.8E-01	-145.49	0.0814	鉛直たわみ逆対称２次
13	2.2E-01	-58.99	0.1403	鉛直たわみ逆対称４次
11	5.1E-02	-93.30	0.1384	鉛直たわみ逆対称３次
4	2.5E-02	-2.66	0.0806	水平たわみ逆対称１次
20	2.2E-02	-3.20	0.2069	鉛直たわみ逆対称６次
8	9.9E-03	158.65	0.1047	水平たわみ逆対称２次
19	7.8E-03	-50.08	0.2047	鉛直たわみ逆対称５次
12	8.7E-04	119.75	0.1394	鉛直たわみ対称３次
16	3.6E-04	-2.48	0.1446	鉛直たわみ対称４次
7	1.5E-04	-81.98	0.1027	鉛直たわみ対称２次
9	1.3E-04	74.77	0.1365	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
10	9.0E-05	19.25	0.1383	ねじれ対称１次
17	6.7E-05	1.41	0.1509	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
2	6.3E-05	-138.03	0.0557	鉛直たわみ対称１次
18	1.7E-05	-150.03	0.1731	鉛直たわみ対称５次
6	4.4E-06	-95.98	0.1018	水平たわみ対称２次
1	1.1E-06	-15.74	0.0394	水平たわみ対称１次



図－４・３・２９　モード次数と振幅比の関係（その 5）



図－４・３・３０　フラッター発現時のモード図（その 6）

TYPE-1,CASE-4：桁高＝3m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型，Ｉ≠０）

Theodorsen空気力

フラッター発現風速　：U＝　55.735 m/s

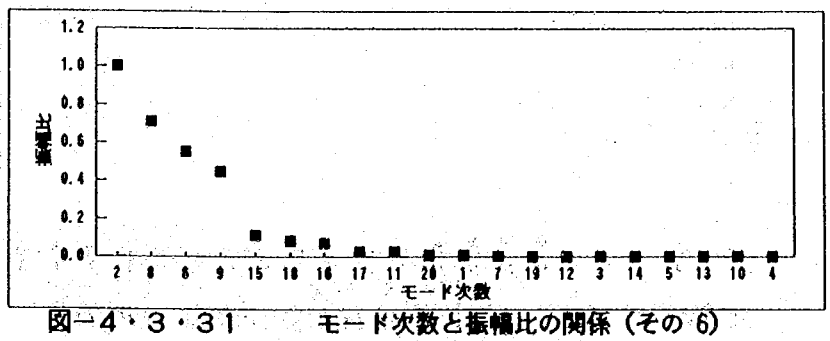
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.091 Hz

換算振動数（ｆＢ／U）　：ｋ＝　0.083

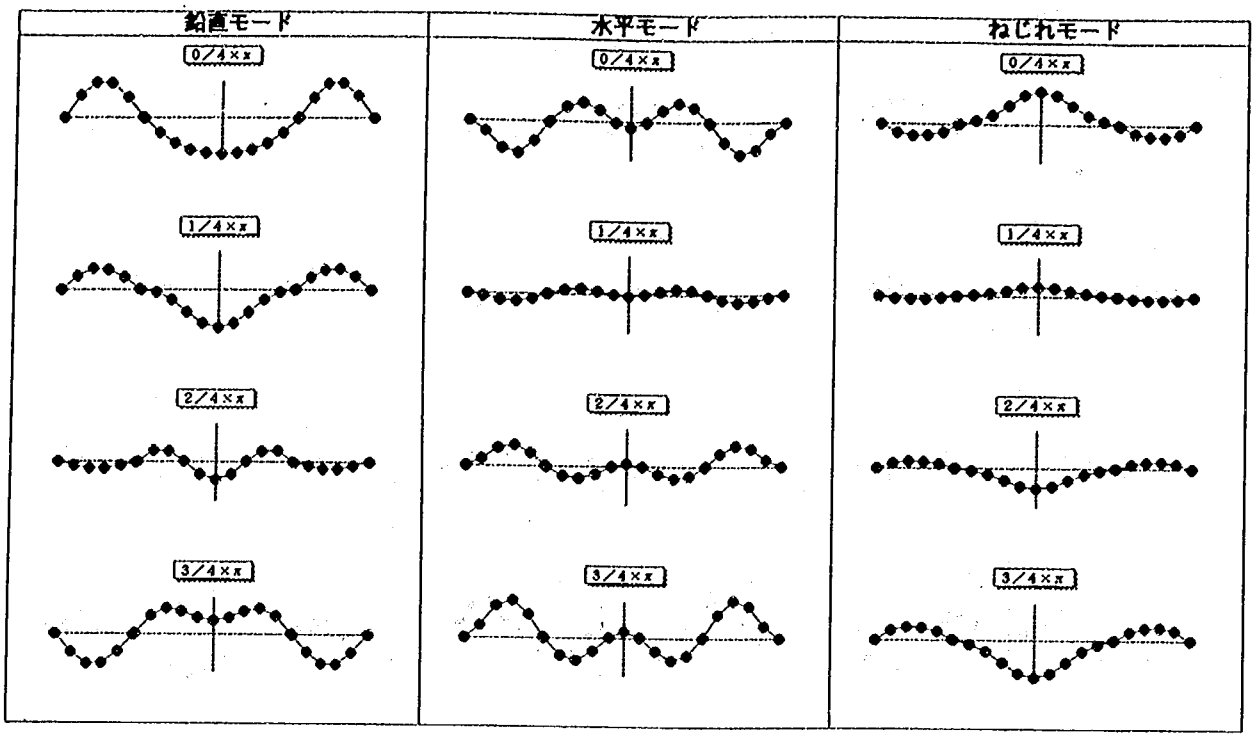
静的ねじれ角　：α＝　-0.365 度

表－４・３・８　モードの成分寄与率（その 6）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0558	鉛直たわみ対称１次
8	7.1E-01	100.27	0.1029	鉛直たわみ対称２次
6	5.5E-01	148.45	0.0992	水平たわみ対称２次
9	4.5E-01	149.46	0.1220	ねじれ対称１次
15	1.1E-01	139.64	0.1421	水平たわみ対称３次
18	8.2E-02	-58.06	0.1624	ねじれ対称３次
16	7.0E-02	-45.63	0.1453	鉛直たわみ対称４次
17	2.7E-02	88.31	0.1567	水平たわみ対称４次
11	2.6E-02	129.89	0.1405	鉛直たわみ対称３次
20	7.5E-03	-152.06	0.1696	ケーブル
1	7.2E-03	163.12	0.0387	水平たわみ対称１次
7	2.6E-03	100.33	0.1026	水平たわみ逆対称２次
19	1.8E-04	13.67	0.1695	ケーブル
12	1.5E-04	132.69	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
3	8.6E-05	-1.35	0.0719	鉛直たわみ逆対称１次
14	7.0E-05	-34.98	0.1419	ねじれ逆対称２次
5	4.3E-05	-0.90	0.0818	鉛直たわみ逆対称２次
13	2.7E-05	-39.97	0.1415	ねじれ逆対称１次
10	1.4E-05	71.20	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
4	1.0E-05	162.65	0.0806	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・３１　モード次数と振幅比の関係（その 6）

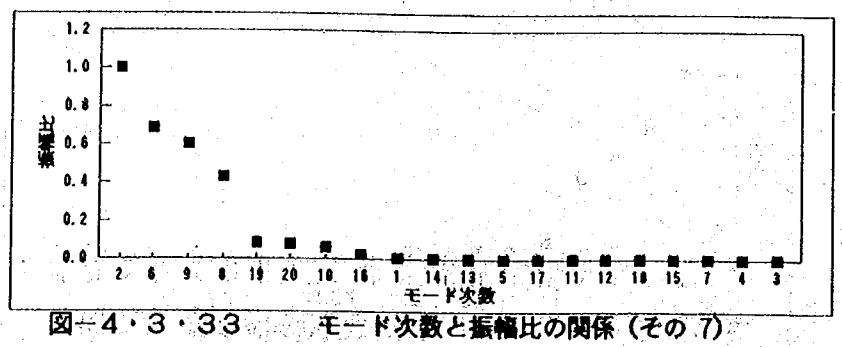


図－４・３・３２　フラッター発現時のモード図（その 7）
TYPE-1,CASE-43：桁高＝3m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（片側片引き，Ｉ＝０）
Theodorsen空気力

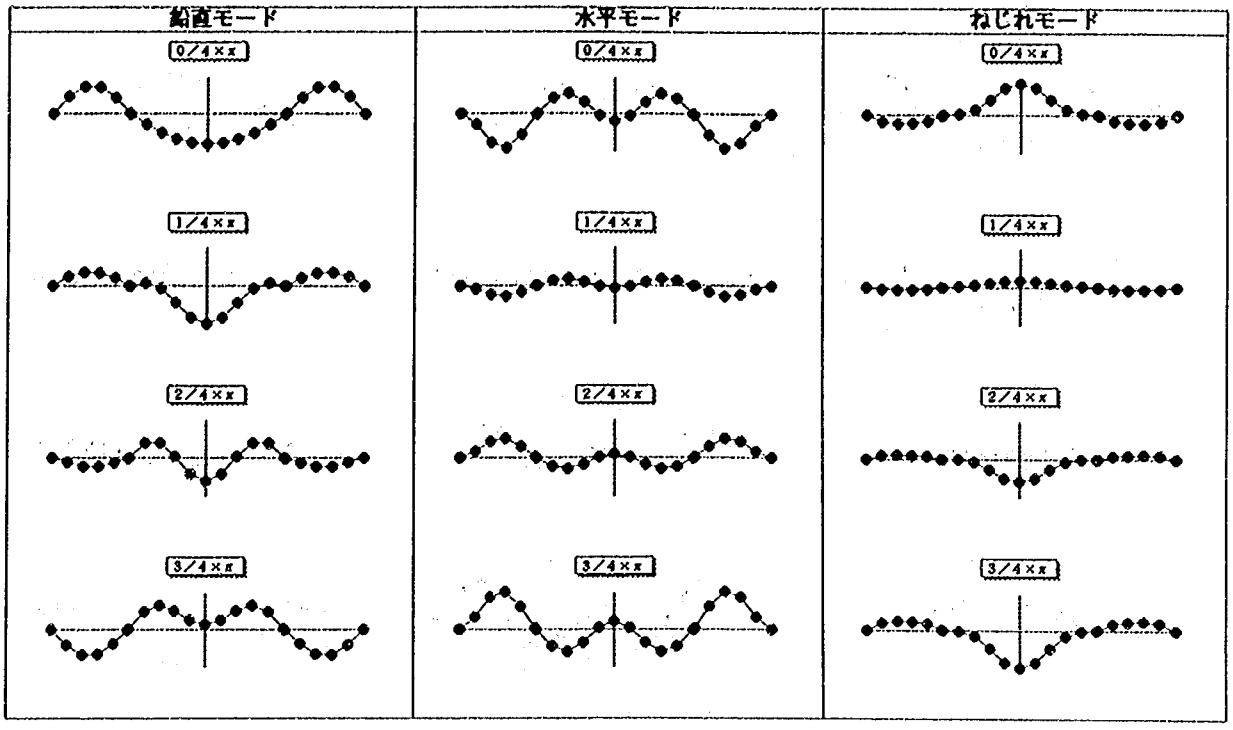
フラッター発現風速	：U＝	49.039	m/s
フラッター発現時の振動数	：ｆ＝	0.091	Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）	：ｋ＝	0.094	
静的ねじれ角	：α＝	-0.283	度

表－４・３・９　モードの成分寄与率（その 7）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0558	鉛直たわみ対称１次
6	6.9E-01	146.84	0.0989	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
9	6.0E-01	-29.95	0.1170	ねじれ対称１次
8	4.3E-01	114.50	0.1029	鉛直たわみ対称２次
19	8.3E-02	-40.75	0.1448	水平たわみ対称４次
20	7.5E-02	-36.39	0.1453	鉛直たわみ対称４次
10	6.1E-02	149.83	0.1352	水平たわみ対称３次
16	2.4E-02	139.80	0.1405	鉛直たわみ対称３次
1	7.0E-03	156.36	0.0387	水平たわみ対称１次
14	1.8E-03	107.01	0.1392	ケーブル
13	8.4E-05	-33.85	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
5	8.0E-05	42.72	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
17	6.6E-05	148.98	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
11	3.5E-05	150.92	0.1353	ねじれ逆対称１次
12	1.5E-05	-25.34	0.1365	ねじれ逆対称２次
18	1.1E-05	154.13	0.1415	水平たわみ逆対称４次
15	1.1E-05	161.15	0.1404	水平たわみ逆対称３次
7	9.7E-06	135.24	0.1026	水平たわみ逆対称２次
4	3.3E-07	129.93	0.0803	水平たわみ逆対称１次
3	2.5E-07	72.50	0.0718	鉛直たわみ逆対称１次



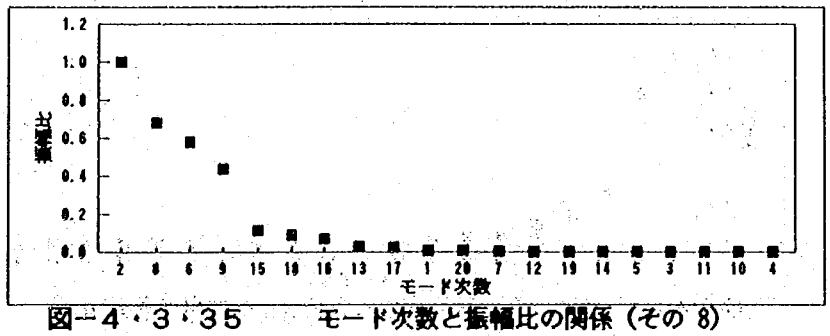
図－４・３・３３　モード次数と振幅比の関係（その 7）



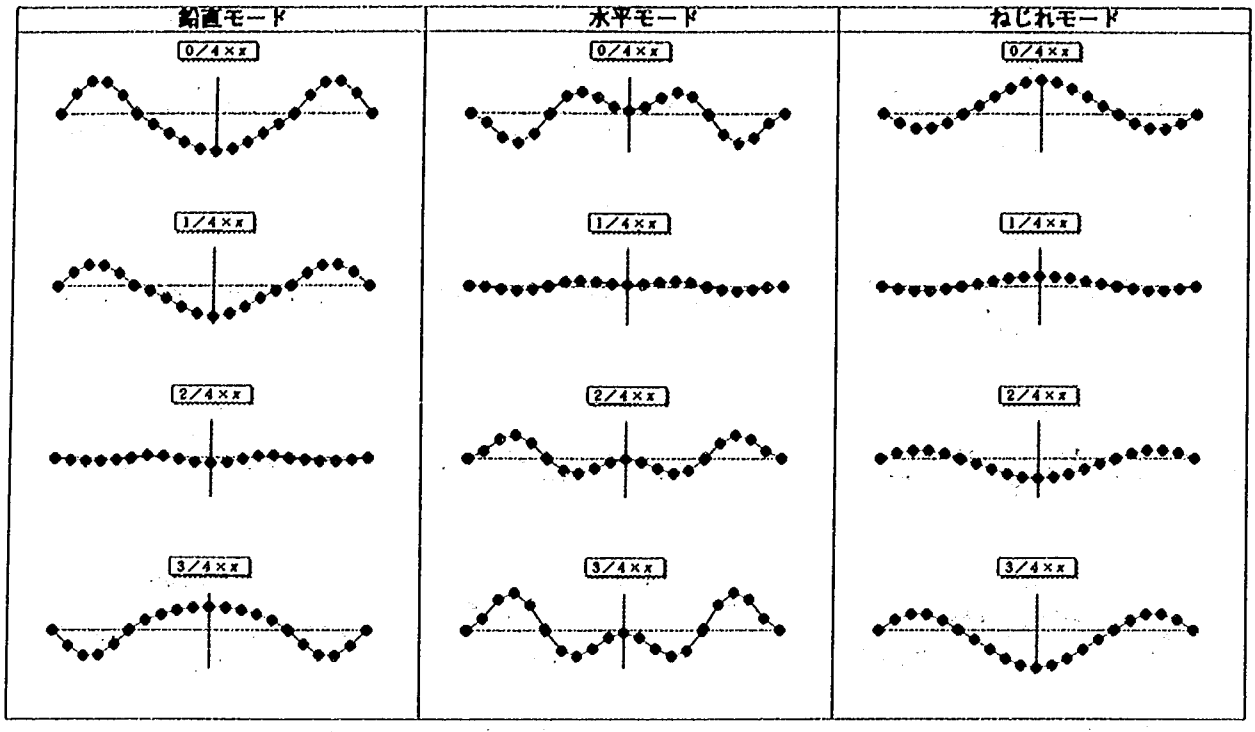
図－４・３・３４　フラッター発現時のモード図（その 8）
TYPE-1;CASE-44：桁高＝3m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型，Ｉ＝０）
Theodorsen空気力
フラッター発現風速　：U＝　54.679 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.091 Hz
換算振動数（ｆＢ／U）　：k＝　0.084
静的ねじれ角　：α＝　-0.363 度

表－４・３・１０　モードの成分寄与率（その 8）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0558	鉛直たわみ対称１次
8	6.8E-01	-78.31	0.1029	鉛直たわみ対称２次
6	5.8E-01	148.52	0.0990	水平たわみ対称２次
9	4.4E-01	-30.31	0.1210	ねじれ対称１次
15	1.1E-01	139.55	0.1419	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
18	9.1E-02	123.55	0.1615	ねじれ逆対称２次
16	6.8E-02	135.15	0.1452	鉛直たわみ対称４次
13	2.6E-02	130.70	0.1405	鉛直たわみ対称３次
17	2.3E-02	84.00	0.1553	水平たわみ対称４次
1	7.5E-03	162.57	0.0387	水平たわみ対称１次
20	7.4E-03	-149.90	0.1691	ケーブル
7	2.6E-03	-78.27	0.1026	水平たわみ逆対称２次
12	2.5E-04	-40.53	0.1401	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む）
19	2.5E-04	-158.29	0.1690	ケーブル
14	1.2E-04	131.80	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
5	6.5E-05	-156.94	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
3	5.8E-05	-3.33	0.0719	鉛直たわみ逆対称１次
11	4.1E-05	-37.73	0.1397	ねじれ逆対称１次
10	8.8E-06	-131.39	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
4	7.6E-06	162.22	0.0804	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・３５　モード次数と振幅比の関係（その 8）

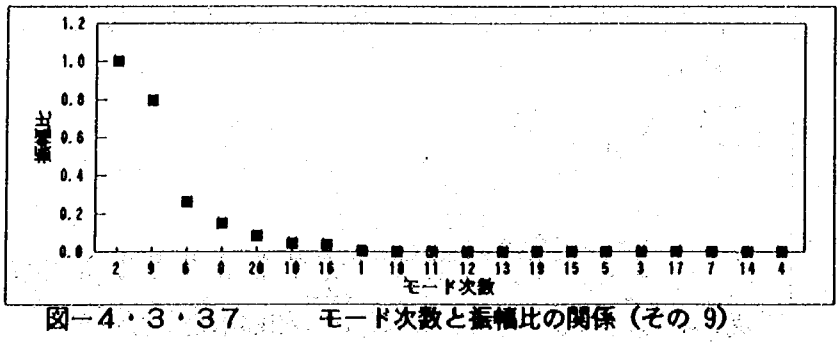


図－４・３・３６　フラッター発現時のモード図（その 9）
TYPE-2,CASE-1：桁高＝5m，基本断面
Theodorsen空気力

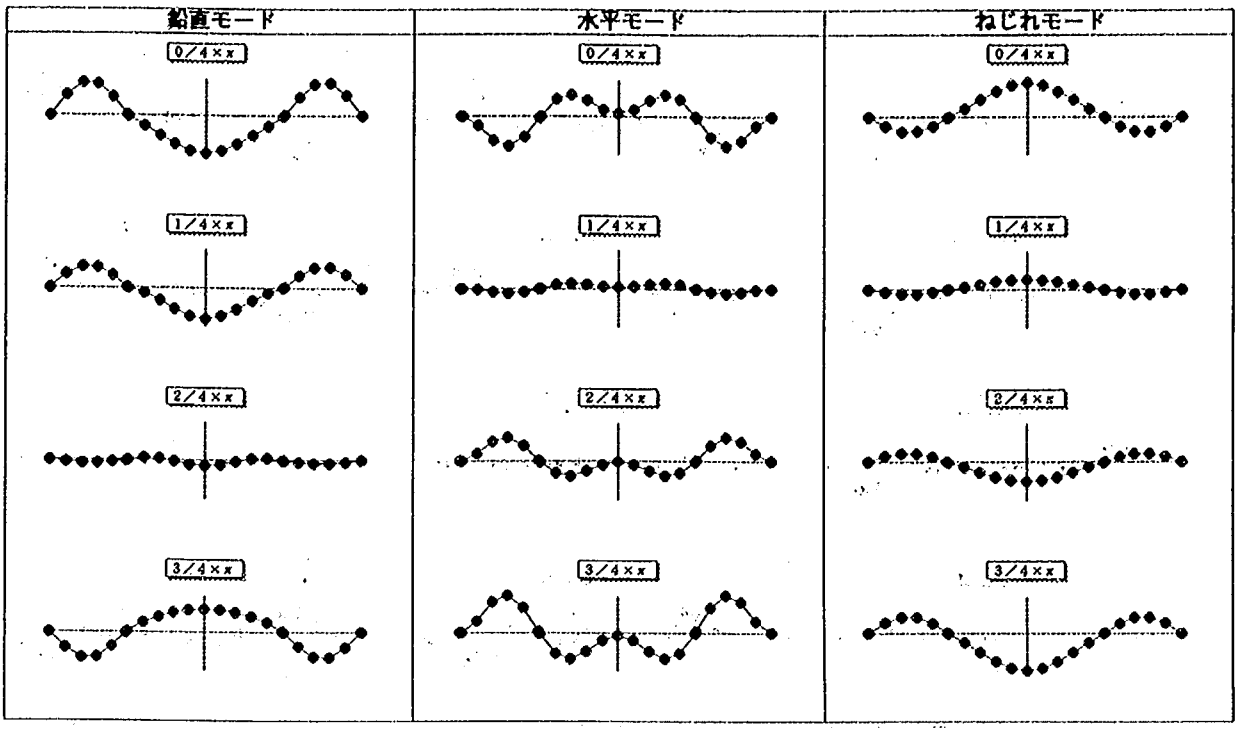
フラッター発現風速	：U＝	44.385	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.092	Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.105	
静的ねじれ角	：α＝	-0.284	度

表－４・３・１１　モードの成分寄与率（その 9）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0559	鉛直たわみ対称１次
9	7.9E-01	150.05	0.1168	ねじれ対称１次
6	2.6E-01	143.63	0.0999	水平たわみ対称２次
8	1.5E-01	-60.28	0.1034	鉛直たわみ対称２次
20	8.4E-02	148.55	0.1456	鉛直たわみ対称４次
10	4.4E-02	150.21	0.1344	水平たわみ対称３次
16	3.6E-02	145.75	0.1419	鉛直たわみ対称３次
1	2.7E-03	135.48	0.0388	水平たわみ対称１次
18	2.4E-04	145.78	0.1429	鉛直たわみ逆対称４次
11	1.6E-04	-30.44	0.1364	ケーブル
12	8.2E-05	149.24	0.1364	ケーブル
13	6.5E-05	-30.64	0.1367	ケーブル
19	2.9E-05	-26.48	0.1444	ケーブル
15	1.4E-05	-27.36	0.1401	鉛直たわみ逆対称３次
5	1.4E-05	-160.00	0.0821	鉛直たわみ逆対称２次
3	1.2E-05	-156.86	0.0719	鉛直たわみ逆対称１次
17	9.1E-06	-25.43	0.1429	水平たわみ逆対称３次
7	1.8E-06	132.19	0.1029	水平たわみ逆対称２次
14	1.5E-06	-27.91	0.1381	ケーブル
4	3.5E-07	78.97	0.0800	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・３７　モード次数と振幅比の関係（その 9）

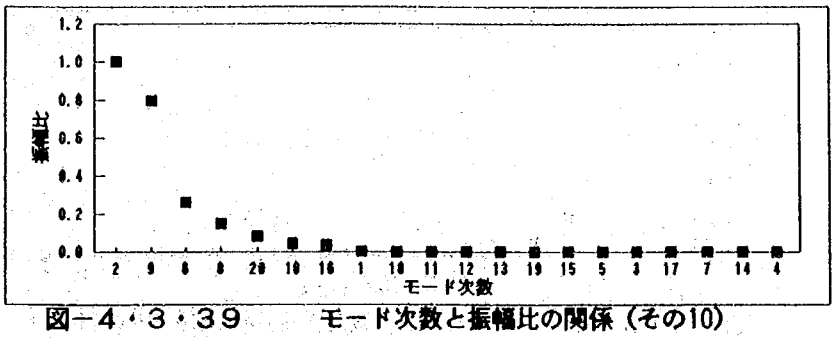


図－４・３・３８　フラッター発現時のモード図（その10）
TYPE-2,CASE-2：桁高＝5m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/4,A=1倍
Theodorsen空気力

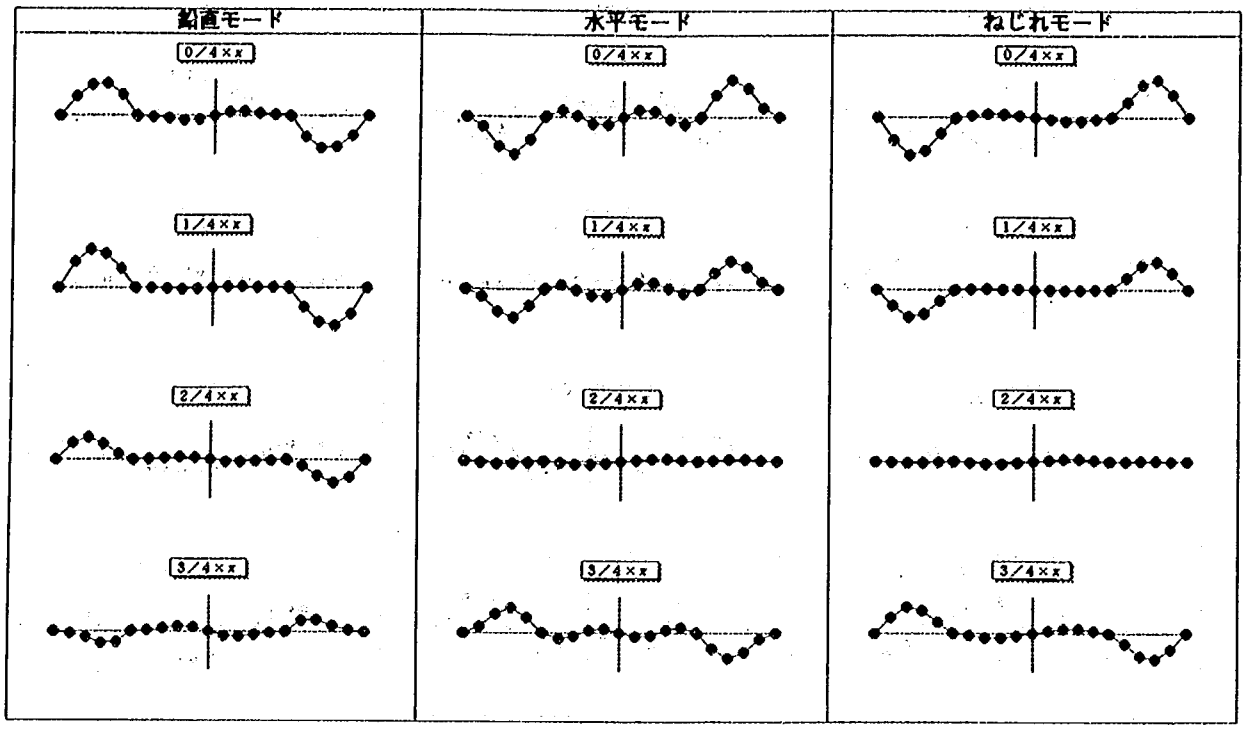
フラッター発現風速	：U＝	44.432	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.091	Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.103	
静的ねじれ角	：α＝	-0.216	度

表－４・３・１２　モードの成分寄与率（その10）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0559	鉛直たわみ対称１次
9	7.9E-01	150.05	0.1168	ねじれ対称１次
6	2.6E-01	143.63	0.0999	水平たわみ対称２次
8	1.5E-01	-60.28	0.1034	鉛直たわみ対称２次
20	8.4E-02	148.55	0.1456	鉛直たわみ対称４次
10	4.4E-02	150.21	0.1344	水平たわみ対称３次
16	3.6E-02	145.76	0.1419	鉛直たわみ対称３次
1	2.7E-03	135.48	0.0388	水平たわみ対称１次
18	2.4E-04	145.78	0.1429	鉛直たわみ逆対称４次
11	1.6E-04	-30.44	0.1364	ケーブル
12	8.2E-05	149.24	0.1364	ケーブル
13	6.5E-05	-30.64	0.1367	ケーブル
19	2.9E-05	-26.48	0.1444	ケーブル
15	1.4E-05	-27.36	0.1401	鉛直たわみ逆対称３次
5	1.4E-05	-160.00	0.0821	鉛直たわみ逆対称２次
3	1.2E-05	-156.86	0.0719	鉛直たわみ逆対称１次
17	9.1E-06	-25.43	0.1429	水平たわみ逆対称３次
7	1.8E-06	132.19	0.1029	水平たわみ逆対称２次
14	1.5E-06	-27.91	0.1381	ケーブル
4	3.5E-07	78.97	0.0800	水平たわみ逆対称１次



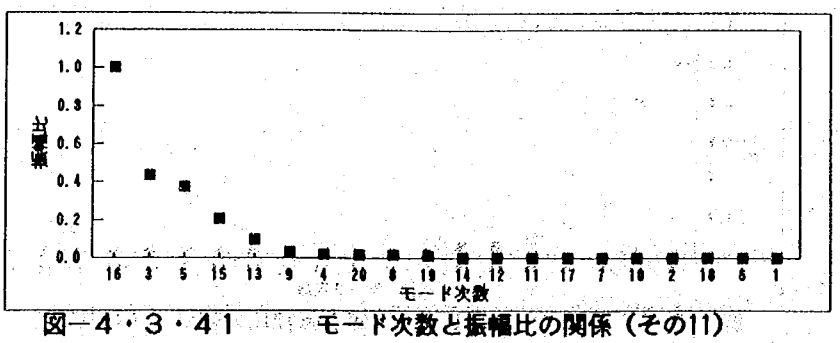
図－４・３・３９　モード次数と振幅比の関係（その10）



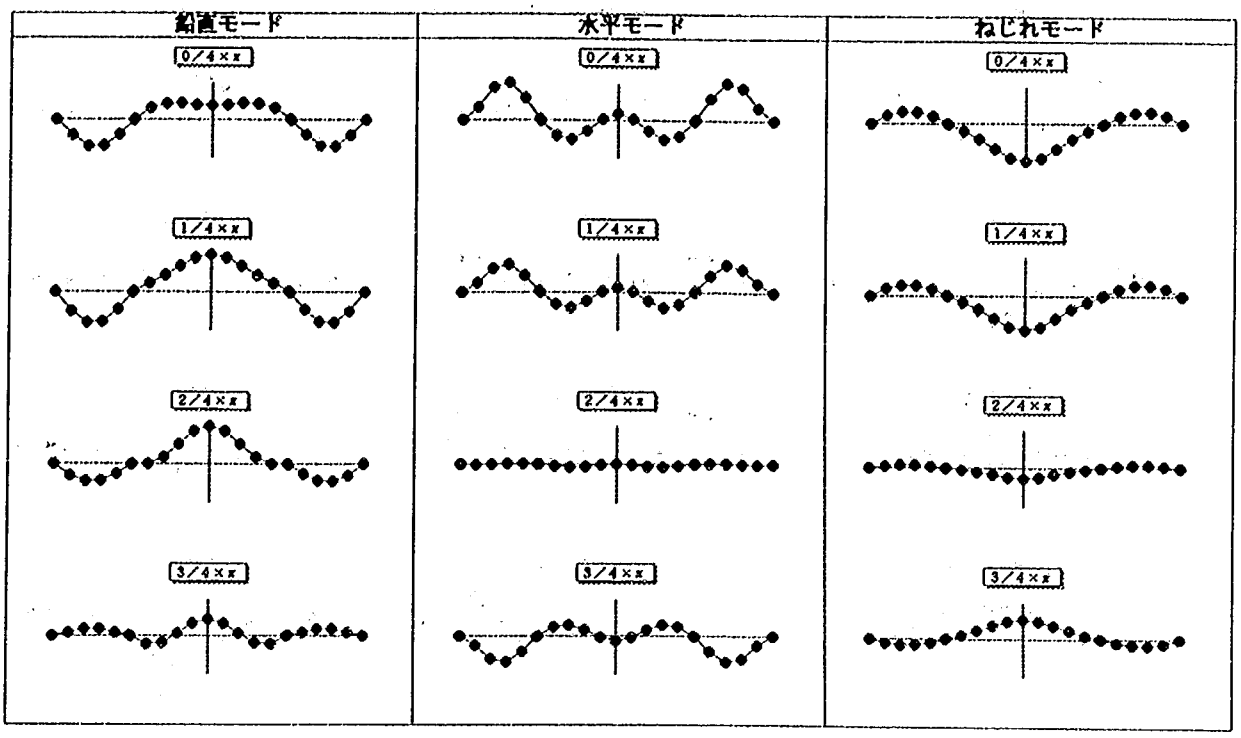
図－４・３・４０　フラッター発現時のモード図（その11）
TYPE-2,CASE-3：桁高＝5m，ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ
Theodorsen空気力
フラッター発現風速　：U＝　87.992 m/s
フラッター発現時の振動数：f＝　0.139 Hz
換算振動数（fB／U）　：k＝　0.080
静的ねじれ角　：α＝　-3.851 度

表－４・３・１３　モードの成分寄与率（その11）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
16	1.0E+00	0.00	0.1490	水平たわみ逆対称４次
3	4.3E-01	-153.85	0.0718	鉛直たわみ逆対称１次
5	3.7E-01	-142.41	0.0818	鉛直たわみ逆対称２次
15	2.0E-01	25.34	0.1482	水平たわみ逆対称３次
13	9.6E-02	114.21	0.1421	鉛直たわみ逆対称４次
9	3.2E-02	-96.61	0.1393	鉛直たわみ逆対称３次
4	2.0E-02	-0.95	0.0813	水平たわみ逆対称１次
20	1.6E-02	1.67	0.2117	鉛直たわみ逆対称６次
8	1.6E-02	129.31	0.1054	水平たわみ逆対称２次
19	1.1E-02	-27.81	0.2081	鉛直たわみ逆対称５次
14	2.7E-04	152.06	0.1450	鉛直たわみ対称４次
12	2.1E-04	104.10	0.1407	鉛直たわみ対称３次
11	1.4E-04	-11.13	0.1402	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
17	1.4E-04	7.74	0.1553	水平たわみ対称４次
7	6.5E-05	63.22	0.1032	鉛直たわみ対称２次
10	6.5E-05	-152.25	0.1395	ねじれ対称１次
2	1.3E-05	-68.04	0.0558	鉛直たわみ対称１次
18	5.7E-06	138.15	0.1755	鉛直たわみ対称５次
6	5.6E-06	29.98	0.1027	水平たわみ対称２次
1	8.6E-07	-159.29	0.0397	水平たわみ対称１次



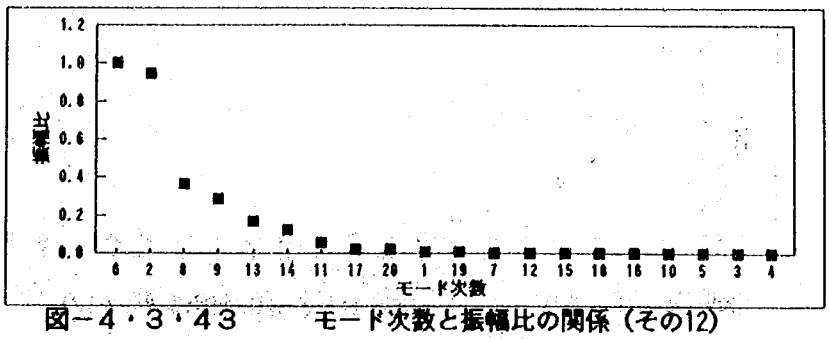
図－４・３・４１　モード次数と振幅比の関係（その11）



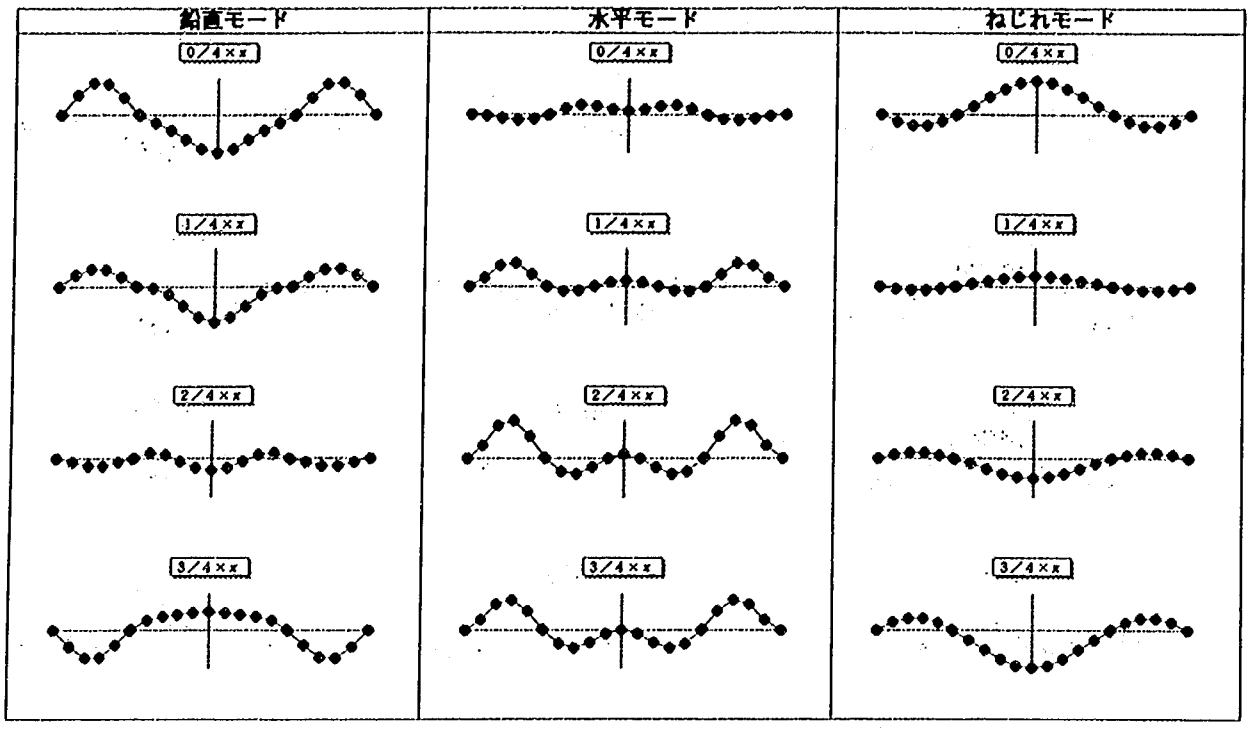
図－４・３・４２　フラッター発現時のモード図（その12）
TYPE-2,CASE-4：桁高＝5m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型，Ｉ≠０）
Theodorsen空気力
フラッター発現風速　：U＝　66.066 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.097 Hz
換算振動数（ｆＢ／U）　：k＝　0.074
静的ねじれ角　：α＝　-0.854 度

表－４・３・１４　モードの成分寄与率（その12）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
6	1.0E+00	0.00	0.1001	水平たわみ対称２次
2	9.4E-01	-133.06	0.0559	鉛直たわみ対称１次
8	3.7E-01	-41.14	0.1034	鉛直たわみ対称２次
9	2.8E-01	-157.66	0.1291	ねじれ対称１次
13	1.7E-01	-161.03	0.1442	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
14	1.2E-01	177.70	0.1456	鉛直たわみ対称４次
11	5.7E-02	-6.22	0.1419	鉛直たわみ対称３次
17	2.1E-02	135.95	0.1601	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
20	2.0E-02	-163.69	0.1744	ケーブル
1	5.7E-03	5.58	0.0388	水平たわみ対称１次
19	5.6E-03	-64.44	0.1705	ケーブル
7	7.5E-04	-41.22	0.1031	水平たわみ逆対称２次
12	3.1E-04	0.38	0.1429	鉛直たわみ逆対称４次
15	2.2E-04	17.36	0.1475	水平たわみ逆対称３次
18	2.2E-04	-82.80	0.1704	ケーブル
16	1.3E-04	17.48	0.1479	ねじれ逆対称１次
10	1.1E-04	-1.88	0.1402	鉛直たわみ逆対称３次
5	4.0E-05	-79.77	0.0822	鉛直たわみ逆対称２次
3	2.5E-05	-105.85	0.0720	鉛直たわみ逆対称１次
4	2.8E-06	71.50	0.0813	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・４３　モード次数と振幅比の関係（その12）

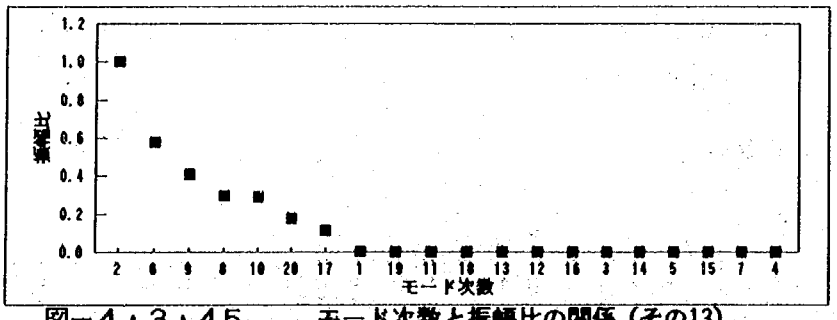


図－４・３・４４　　フラッター発現時のモード図（その13）
TYPE-3,CASE-1：桁高＝7m，基本断面
Theodorsen空気力

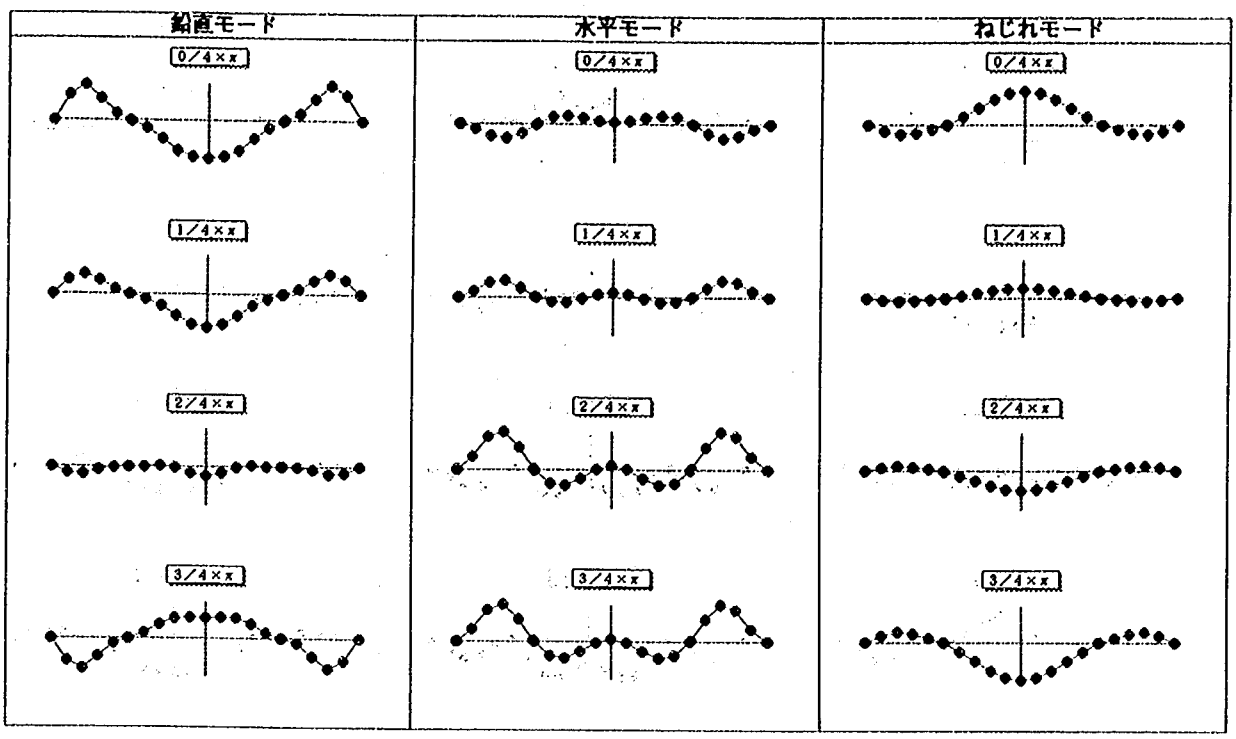
フラッター発現風速	：U＝	56.899	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.099	Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.088	
静的ねじれ角	：α＝	-0.617	度

表－４・３・１５　モードの成分寄与率（その13）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0560	鉛直たわみ対称１次
6	5.8E-01	102.06	0.1005	水平たわみ対称２次
9	4.1E-01	152.25	0.1327	ねじれ対称１次
8	3.0E-01	92.67	0.1041	鉛直たわみ対称２次
10	2.9E-01	152.45	0.1359	ねじれ対称２次
20	1.8E-01	139.76	0.1462	鉛直たわみ対称４次
17	1.1E-01	-42.42	0.1437	鉛直たわみ対称３次
1	2.8E-03	79.13	0.0388	水平たわみ対称１次
19	3.8E-04	139.71	0.1454	鉛直たわみ逆対称４次
11	1.1E-04	172.07	0.1364	ケーブル
18	1.1E-04	-26.42	0.1446	水平たわみ逆対称４次
13	1.0E-04	-46.30	0.1367	ケーブル
12	6.1E-05	113.30	0.1364	ケーブル
16	3.9E-05	154.83	0.1432	水平たわみ逆対称３次
3	1.5E-05	10.41	0.0721	鉛直たわみ逆対称１次
14	1.2E-05	152.13	0.1381	ケーブル
5	1.2E-05	2.04	0.0826	鉛直たわみ逆対称２次
15	7.1E-06	169.27	0.1416	鉛直たわみ逆対称３次
7	4.8E-06	78.48	0.1034	水平たわみ逆対称２次
4	2.2E-06	70.39	0.0804	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・４５　　モード次数と振幅比の関係（その13）



図－４・３・４６　フラッター発現時のモード図（その14）

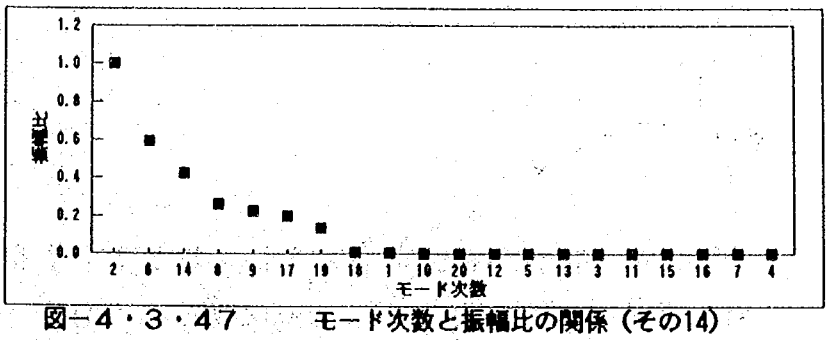
TYPE-3,CASE-2：桁高＝7m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/4,A=1倍

Theodorsen空気力

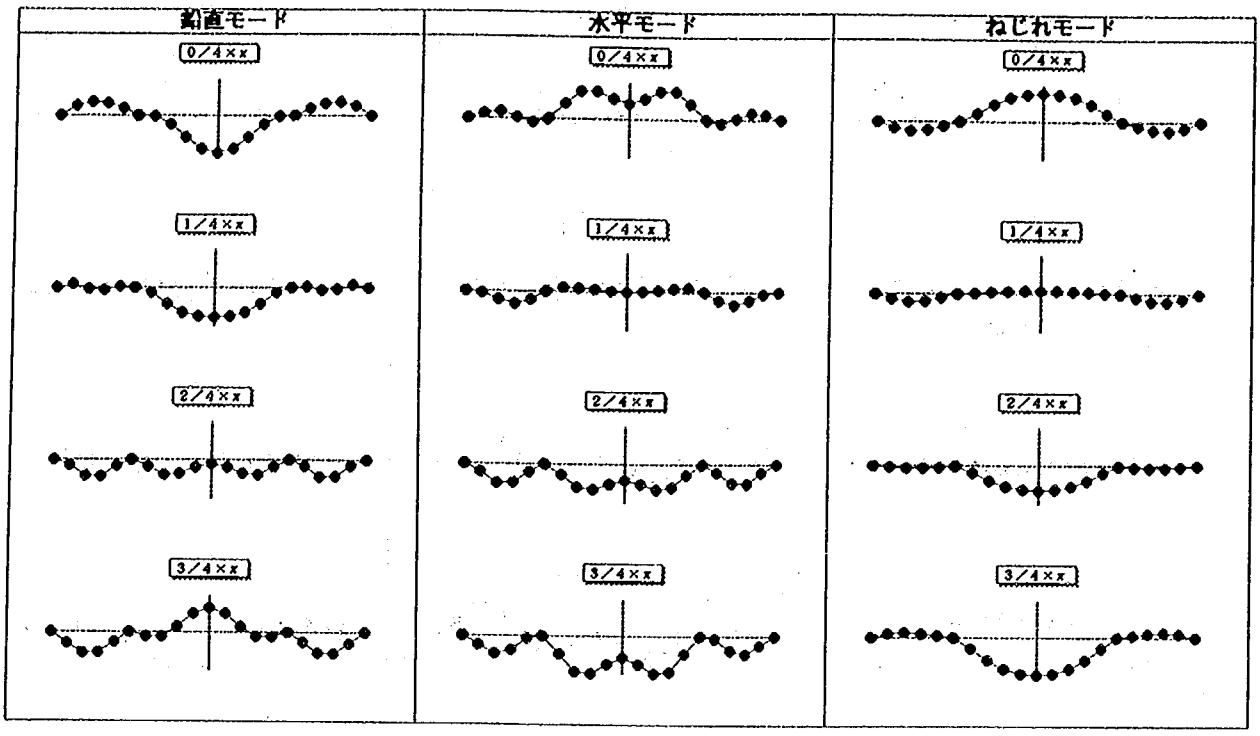
フラッター発現風速	：U＝	55.601	m/s
フラッター発現時の振動数	：ｆ＝	0.097	Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）	：ｋ＝	0.088	
静的ねじれ角	：α＝	0.312	度

表－４・３・１６　モードの成分寄与率（その14）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0581	鉛直たわみ対称１次
6	5.9E-01	112.73	0.0993	水平たわみ対称２次
14	4.3E-01	152.49	0.1316	ねじれ対称１次
8	2.6E-01	-55.54	0.1162	鉛直たわみ対称２次
9	2.3E-01	-28.23	0.1265	水平たわみ対称３次
17	2.0E-01	152.12	0.1364	水平たわみ対称４次
19	1.4E-01	146.28	0.1507	鉛直たわみ対称３次
18	7.1E-03	-8.40	0.1493	水平たわみ対称５次
1	4.1E-03	0.00	0.0389	水平たわみ対称１次
10	4.1E-04	152.92	0.1298	ケーブル
20	3.8E-04	-37.31	0.1527	鉛直たわみ逆対称３次
12	1.8E-04	-29.27	0.1300	ケーブル
5	8.7E-05	119.23	0.0969	鉛直たわみ逆対称２次
13	6.9E-05	152.20	0.1311	ケーブル
3	1.2E-05	52.00	0.0781	鉛直たわみ逆対称１次
11	8.2E-06	175.33	0.1300	ケーブル
15	7.8E-06	-24.02	0.1327	水平たわみ逆対称３次
16	5.4E-06	156.11	0.1339	水平たわみ逆対称４次
7	4.8E-06	-166.26	0.1032	水平たわみ逆対称２次
4	1.0E-06	39.02	0.0793	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・４７　モード次数と振幅比の関係（その14）

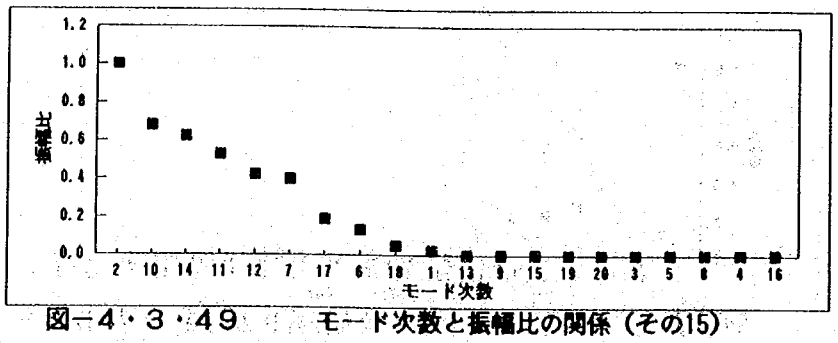


図－４・３・４８　フラッター発現時のモード図（その15）
TYPE-3,CASE-3：桁高＝7m，ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ
Theodorsen空気力

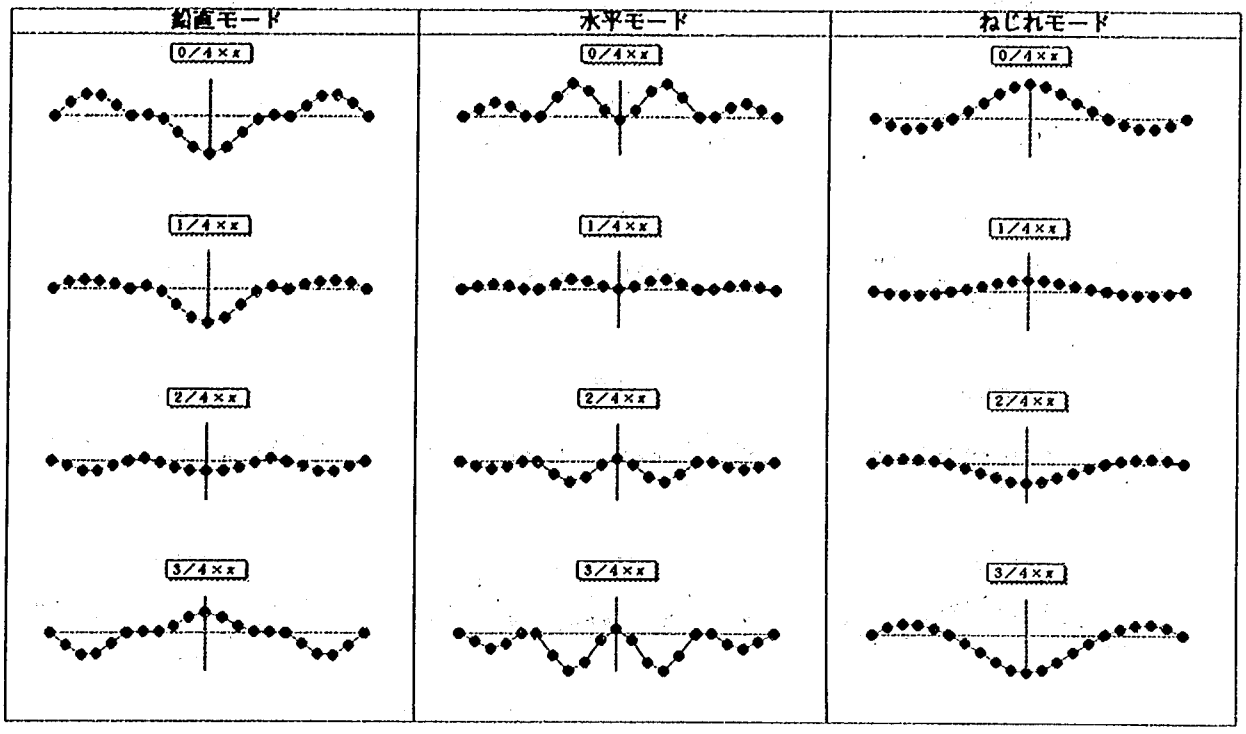
フラッター発現風速	：U＝	102.881	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.121	Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.059	
静的ねじれ角	：α＝	-6.339	度

表－４・３・１７　モードの成分寄与率（その15）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0559	鉛直たわみ対称１次
10	6.8E-01	132.20	0.1423	ねじれ対称１次
14	6.2E-01	-99.53	0.1457	鉛直たわみ対称４次
11	5.3E-01	79.37	0.1425	鉛直たわみ対称３次
12	4.2E-01	154.87	0.1433	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
7	4.0E-01	5.95	0.1039	鉛直たわみ対称２次
17	1.9E-01	10.48	0.1603	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
6	1.3E-01	-23.91	0.1038	水平たわみ対称２次
18	5.1E-02	93.53	0.1788	鉛直たわみ対称５次
1	2.2E-02	143.24	0.0400	水平たわみ対称１次
13	1.1E-03	-98.24	0.1446	鉛直たわみ逆対称４次
9	5.7E-04	-60.35	0.1408	鉛直たわみ逆対称３次
15	2.5E-04	85.46	0.1526	ねじれ逆対称１次
19	1.7E-04	-64.27	0.2130	鉛直たわみ逆対称５次
20	1.4E-04	158.80	0.2185	鉛直たわみ逆対称６次
3	6.3E-05	-92.94	0.0720	鉛直たわみ逆対称１次
5	4.6E-05	-163.16	0.0823	鉛直たわみ逆対称２次
8	4.4E-05	174.21	0.1063	水平たわみ逆対称２次
4	6.8E-06	43.24	0.0820	水平たわみ逆対称１次
16	4.5E-06	108.70	0.1548	ねじれ逆対称２次



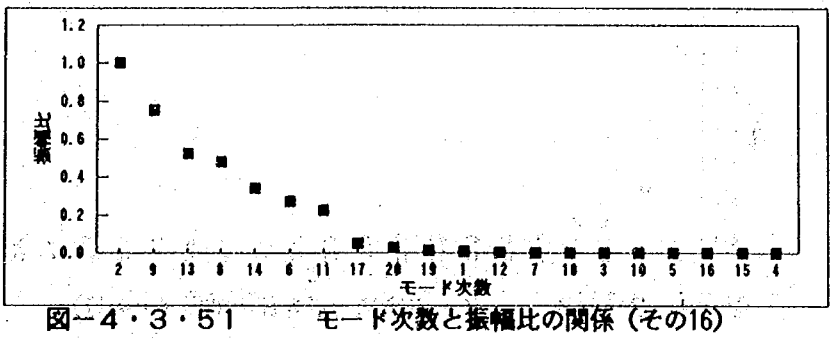
図－４・３・４９　モード次数と振幅比の関係（その15）



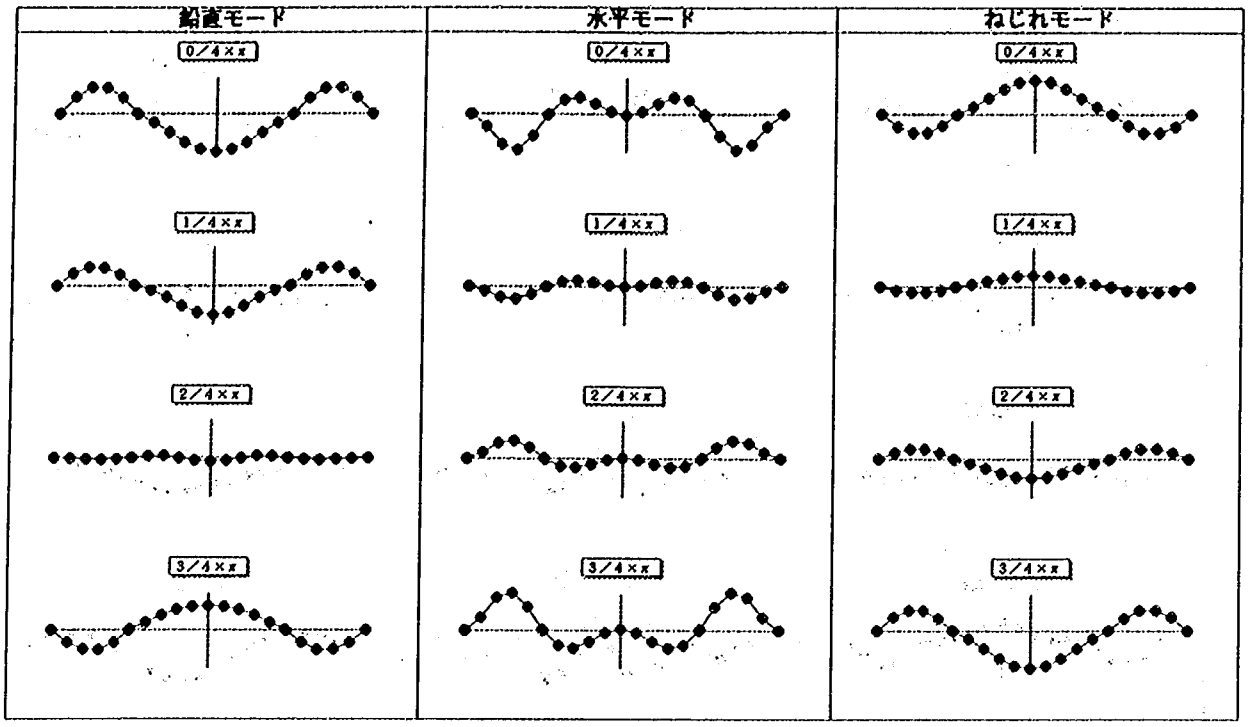
図－４・３・５０　フラッター発現時のモード図（その16）
TYPE-3,CASE-4：桁高＝7m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型，Ｉ≠０）
Theodorsen空気力
フラッター発現風速　：Ｕ＝　76.656 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.116 Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）　：ｋ＝　0.076
静的ねじれ角　：α＝　-1.611 度

表－４・３・１８　モードの成分寄与率（その16）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0560	鉛直たわみ対称１次
9	7.5E-01	152.80	0.1345	ねじれ対称１次
13	5.2E-01	151.11	0.1461	ねじれ対称２次
8	4.8E-01	41.71	0.1041	鉛直たわみ対称２次
14	3.4E-01	-58.56	0.1462	鉛直たわみ対称４次
6	2.7E-01	-18.35	0.1011	水平たわみ対称２次
11	2.2E-01	-62.53	0.1437	鉛直たわみ対称３次
17	4.9E-02	-109.08	0.1643	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
20	2.7E-02	139.64	0.1750	ケーブル
19	1.2E-02	101.58	0.1710	ケーブル
1	7.4E-03	112.15	0.0389	水平たわみ対称１次
12	2.7E-03	118.64	0.1454	鉛直たわみ逆対称４次
7	5.1E-04	41.42	0.1037	水平たわみ逆対称２次
18	1.6E-04	107.48	0.1710	ケーブル
3	6.7E-05	158.36	0.0721	鉛直たわみ逆対称１次
10	4.1E-05	-61.90	0.1416	鉛直たわみ逆対称３次
5	3.7E-05	-179.64	0.0827	鉛直たわみ逆対称２次
16	2.2E-05	129.25	0.1545	ねじれ逆対称１次
15	1.7E-05	-166.27	0.1536	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む）
4	5.0E-06	-32.95	0.0821	水平たわみ逆対称１次



図－４・３・５１　モード次数と振幅比の関係（その16）

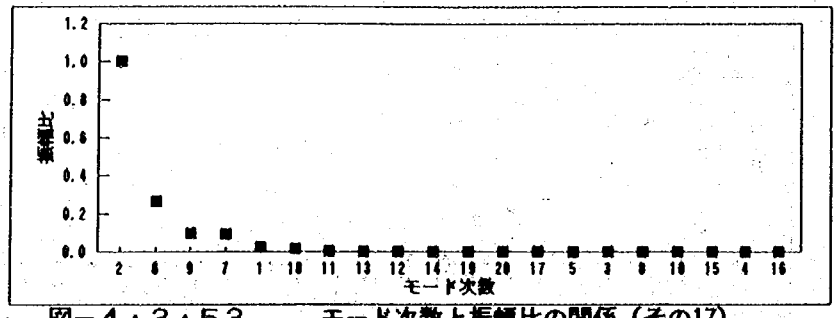


図－４・３・５２　フラッター発現時のモード図（その17）
TYPE-1,CASE-1：桁高＝3m，基本断面
実験空気力

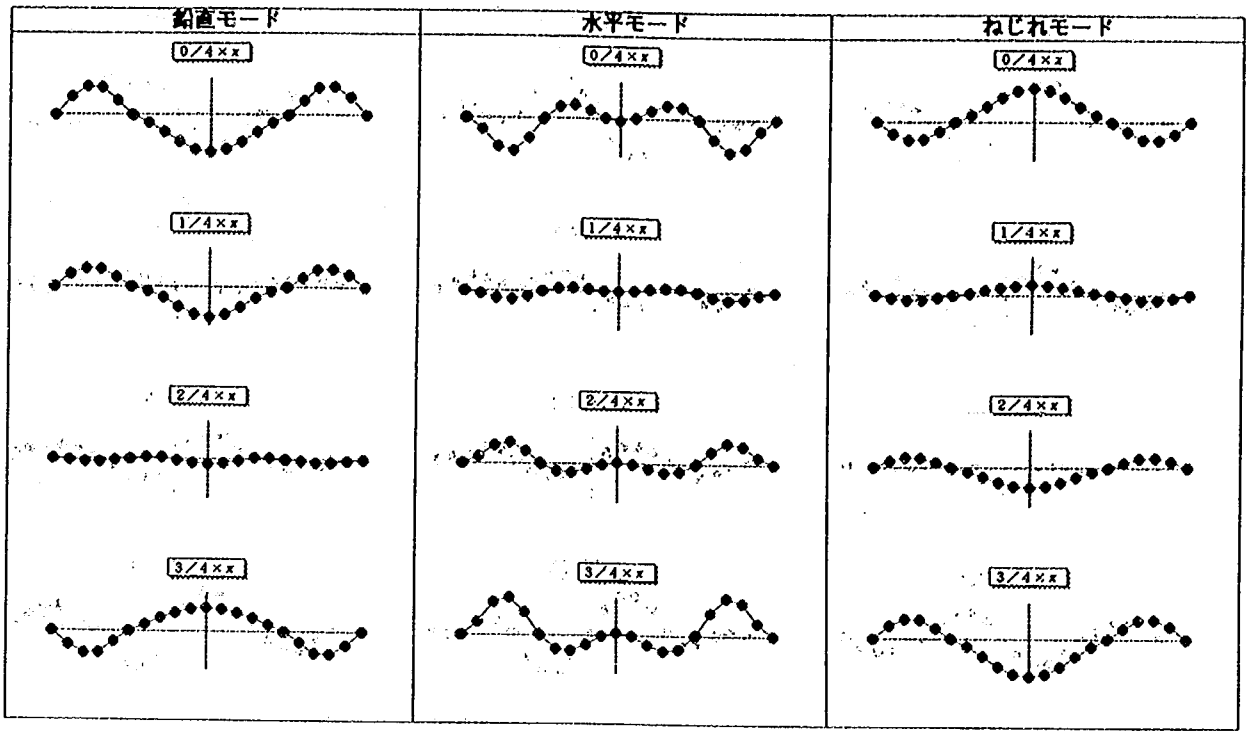
フラッター発現風速	：U＝	85.488	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.096	Hz
換算振動数（fB／U）	：k＝	0.057	
静的ねじれ角	：α＝	-0.659	度

表－４・３・１９　モードの成分寄与率（その17）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0558	鉛直たわみ対称１次
6	2.6E-01	151.58	0.0978	ねじれ対称１次
9	9.5E-02	-91.25	0.1029	鉛直たわみ対称２次
7	9.4E-02	-30.75	0.1017	ねじれ対称２次
1	2.2E-02	-23.46	0.0387	水平たわみ対称１次
18	1.8E-02	128.00	0.1405	鉛直たわみ対称３次
11	1.6E-03	95.23	0.1340	水平たわみ対称２次
13	6.8E-05	150.48	0.1364	ケーブル
12	6.8E-05	150.26	0.1364	ケーブル
14	6.0E-05	-29.41	0.1367	ケーブル
19	3.4E-05	138.42	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
20	1.3E-05	-26.76	0.1437	水平たわみ逆対称３次
17	1.2E-05	-30.14	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
5	6.9E-06	53.13	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
3	6.1E-06	40.90	0.0718	鉛直たわみ逆対称１次
8	3.2E-06	118.42	0.1026	水平たわみ逆対称２次
10	6.0E-07	157.57	0.1269	ねじれ逆対称１次
15	5.7E-07	150.82	0.1369	ねじれ逆対称２次
4	3.0E-07	-145.71	0.0797	水平たわみ逆対称１次
16	7.6E-08	12.65	0.1381	ケーブル



図－４・３・５３　モード次数と振幅比の関係（その17）

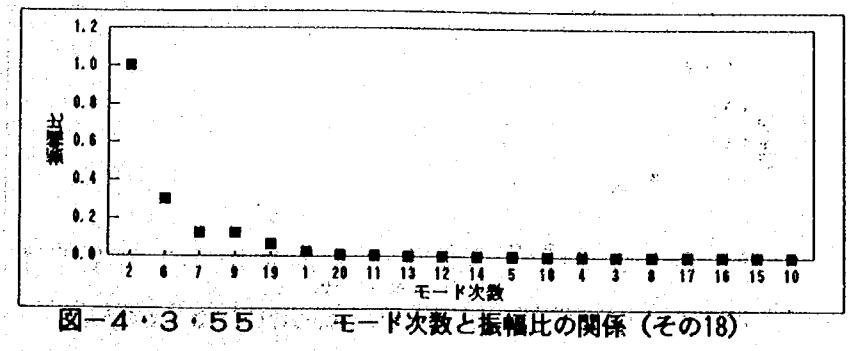


図－４・３・５４　フラッター発現時のモード図（その18）
TYPE-1,CASE-22：桁高＝3m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/12,A=1倍
実験空気力

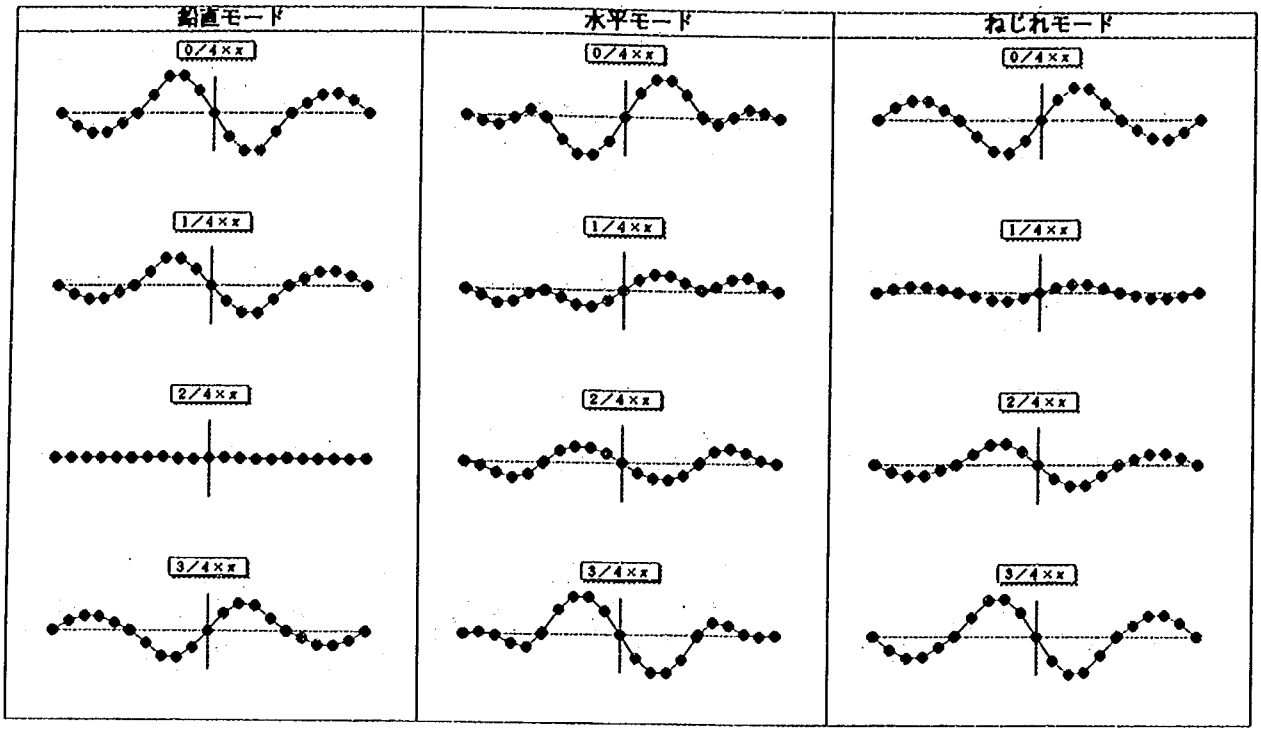
フラッター発現風速	：U＝	89.396	m/s
フラッター発現時の振動数	：f＝	0.097	Hz
換算振動数（ｆＢ／U）	：k＝	0.055	
静的ねじれ角	：α＝	-0.680	度

表－４・３・２０　モードの成分寄与率（その18）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0562	鉛直たわみ対称１次
6	3.0E-01	148.40	0.0985	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）
7	1.2E-01	152.69	0.1024	ねじれ対称１次
9	1.2E-01	94.63	0.1066	鉛直たわみ対称２次
19	6.1E-02	133.22	0.1452	鉛直たわみ対称３次
1	2.2E-02	-26.85	0.0387	水平たわみ対称１次
20	5.8E-03	-13.52	0.1453	水平たわみ対称４次
11	2.3E-03	-136.09	0.1337	水平たわみ対称３次
13	5.9E-05	132.69	0.1361	ケーブル
12	5.9E-05	135.78	0.1361	ケーブル
14	5.0E-05	133.42	0.1363	ケーブル
5	9.8E-06	-84.58	0.0839	鉛直たわみ逆対称２次
18	4.4E-06	136.73	0.1445	ねじれ逆対称３次
4	3.6E-06	46.61	0.0798	水平たわみ逆対称１次
3	2.6E-06	166.11	0.0731	鉛直たわみ逆対称１次
8	2.0E-06	-62.25	0.1026	水平たわみ逆対称２次
17	1.1E-06	-76.53	0.1438	水平たわみ逆対称３次
16	9.5E-07	-33.46	0.1405	ねじれ逆対称２次
15	8.3E-07	-3.49	0.1378	ケーブル
10	4.8E-07	-36.62	0.1316	ねじれ逆対称１次



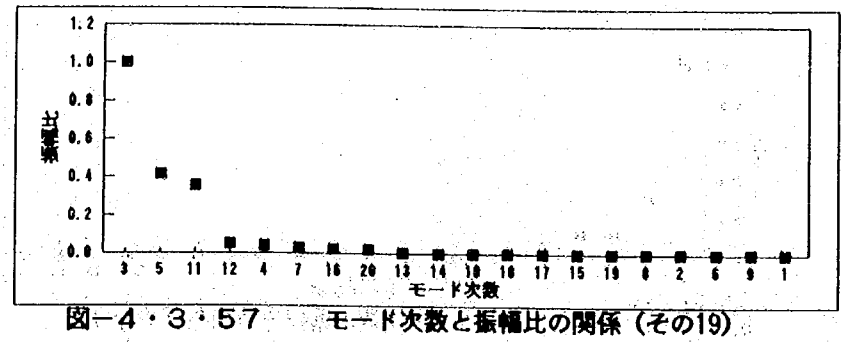
図－４・３・５５　モード次数と振幅比の関係（その18）



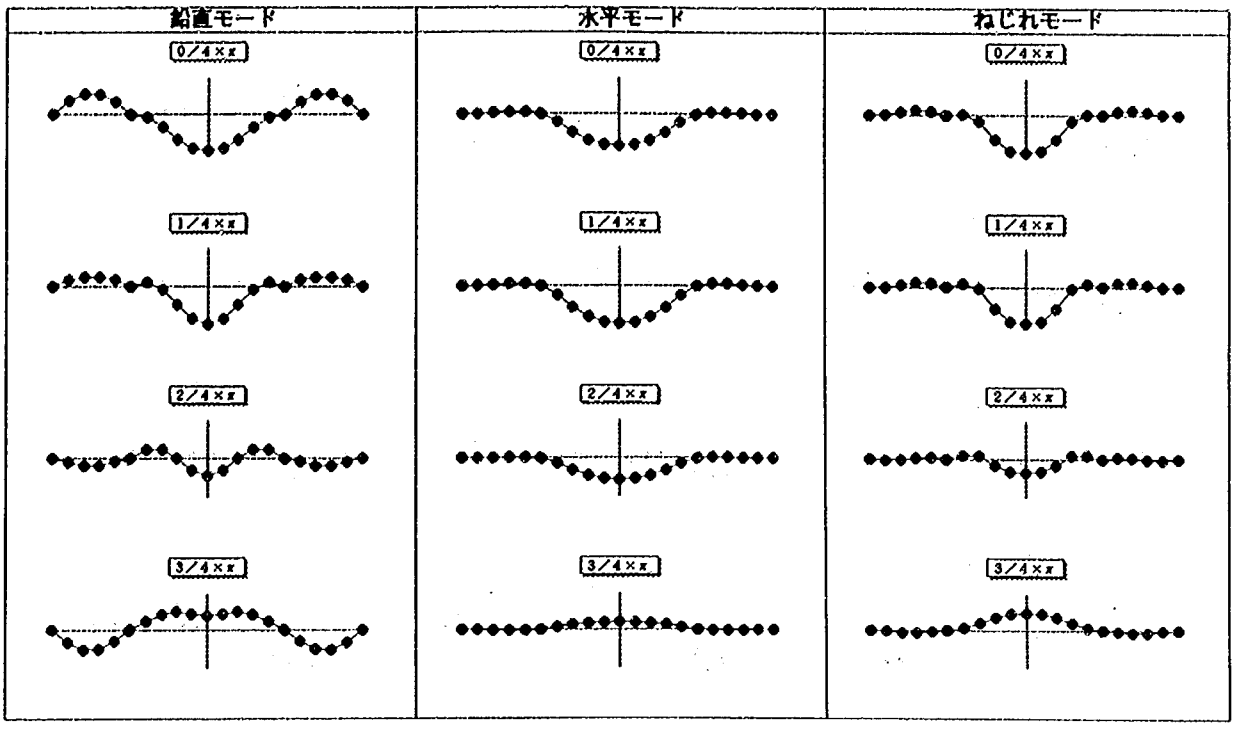
図－４・３・５６　フラッター発現時のモード図（その19）
TYPE-1,CASE-29：桁高＝3m，ｽﾃｲｹｰﾌﾞﾙ L/12,A=1倍
実験空気力　　ｹｰﾌﾞﾙ重量軽減
フラッター発現風速　：U＝　128.862 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.144 Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）：ｋ＝　0.056
静的ねじれ角　：α＝　-1.414 度

表－４・３・２１　モードの寄与率（その19）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
3	1.0E+00	0.00	0.0735	鉛直たわみ逆対称１次
5	4.2E-01	-178.26	0.0878	鉛直たわみ逆対称２次
11	3.5E-01	-32.19	0.1485	ねじれ逆対称１次
12	5.1E-02	-132.33	0.1488	鉛直たわみ逆対称３次
4	4.0E-02	153.46	0.0807	水平たわみ逆対称１次
7	2.9E-02	-158.90	0.1075	水平たわみ逆対称２次
16	2.4E-02	172.89	0.1625	ねじれ逆対称２次
20	2.1E-02	-8.08	0.1704	ケーブル
13	3.7E-03	-70.06	0.1496	鉛直たわみ逆対称４次
14	6.9E-04	141.76	0.1496	鉛直たわみ対称３次
10	2.0E-05	36.59	0.1432	水平たわみ対称３次
18	1.6E-05	176.39	0.1702	ケーブル
17	1.5E-05	-2.32	0.1702	ケーブル
15	1.4E-05	107.17	0.1545	鉛直たわみ対称４次
19	1.0E-05	-30.72	0.1703	ケーブル
8	6.0E-06	59.12	0.1081	鉛直たわみ対称２次
2	3.3E-06	70.39	0.0569	鉛直たわみ対称１次
6	6.9E-07	166.59	0.1027	水平たわみ対称２次
9	3.4E-07	-163.18	0.1149	ねじれ対称１次
1	1.4E-07	3.81	0.0397	水平たわみ対称１次



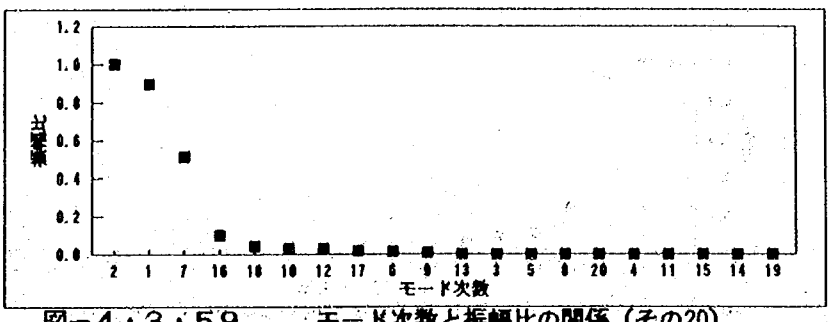
図－４・３・５７　モード次数と振幅比の関係（その19）



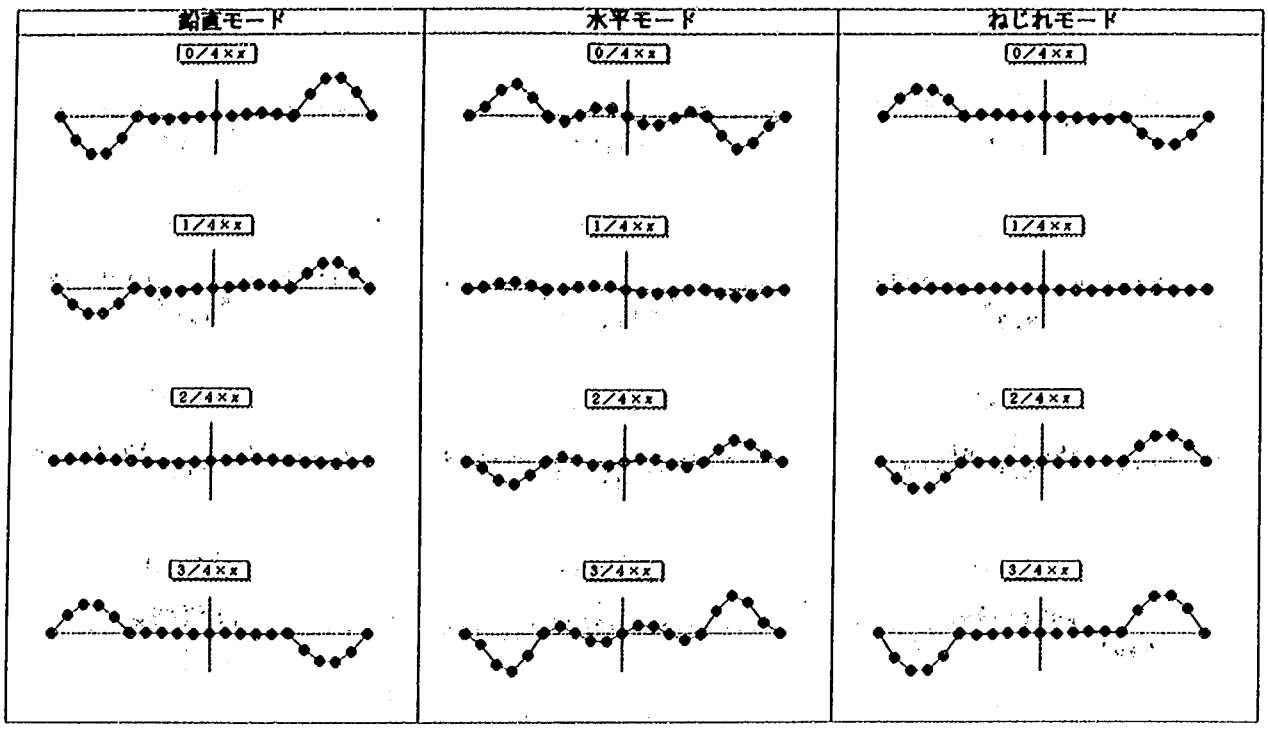
図－４・３・５８　フラッター発現時のモード図（その20）
TYPE-1,CASE-3；桁高＝3m，ﾓﾉｹｰﾌﾞﾙ
実験空気力
フラッター発現風速　：U＝　157.793 m/s
フラッター発現時の振動数：f＝　0.056 Hz
換算振動数（fB／U）　：k＝　0.018
静的ねじれ角　：α＝　-9.506 度

表－４・３・２２　モードの成分寄与率（その20）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
2	1.0E+00	0.00	0.0557	鉛直たわみ対称１次
1	8.9E-01	-145.35	0.0394	水平たわみ対称１次
7	5.1E-01	-108.15	0.1027	鉛直たわみ対称２次
16	9.9E-02	-112.88	0.1446	鉛直たわみ対称４次
18	4.4E-02	142.08	0.1731	鉛直たわみ対称５次
10	3.1E-02	-42.84	0.1383	ねじれ対称１次
12	3.0E-02	-98.55	0.1394	鉛直たわみ対称３次
17	1.7E-02	-133.34	0.1509	水平たわみ対称４次（ねじれ含む）
6	1.4E-02	-72.82	0.1018	水平たわみ対称２次
9	7.2E-03	46.41	0.1365	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
13	1.9E-04	166.58	0.1403	鉛直たわみ逆対称４次
3	1.7E-04	174.94	0.0717	鉛直たわみ逆対称１次
5	1.1E-04	149.74	0.0814	鉛直たわみ逆対称２次
8	8.4E-05	-49.60	0.1047	水平たわみ逆対称２次
20	7.7E-05	-22.68	0.2069	鉛直たわみ逆対称６次
4	7.5E-05	128.08	0.0806	水平たわみ逆対称１次
11	7.5E-05	136.89	0.1384	鉛直たわみ逆対称３次
15	7.0E-05	55.88	0.1444	ねじれ逆対称２次
14	6.0E-05	-46.43	0.1438	ねじれ逆対称１次
19	4.2E-05	-44.47	0.2047	鉛直たわみ逆対称５次



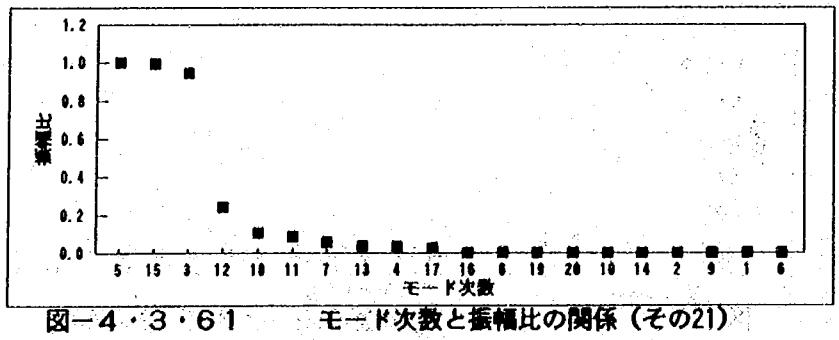
図－４・３・５９　モード次数と振幅比の関係（その20）



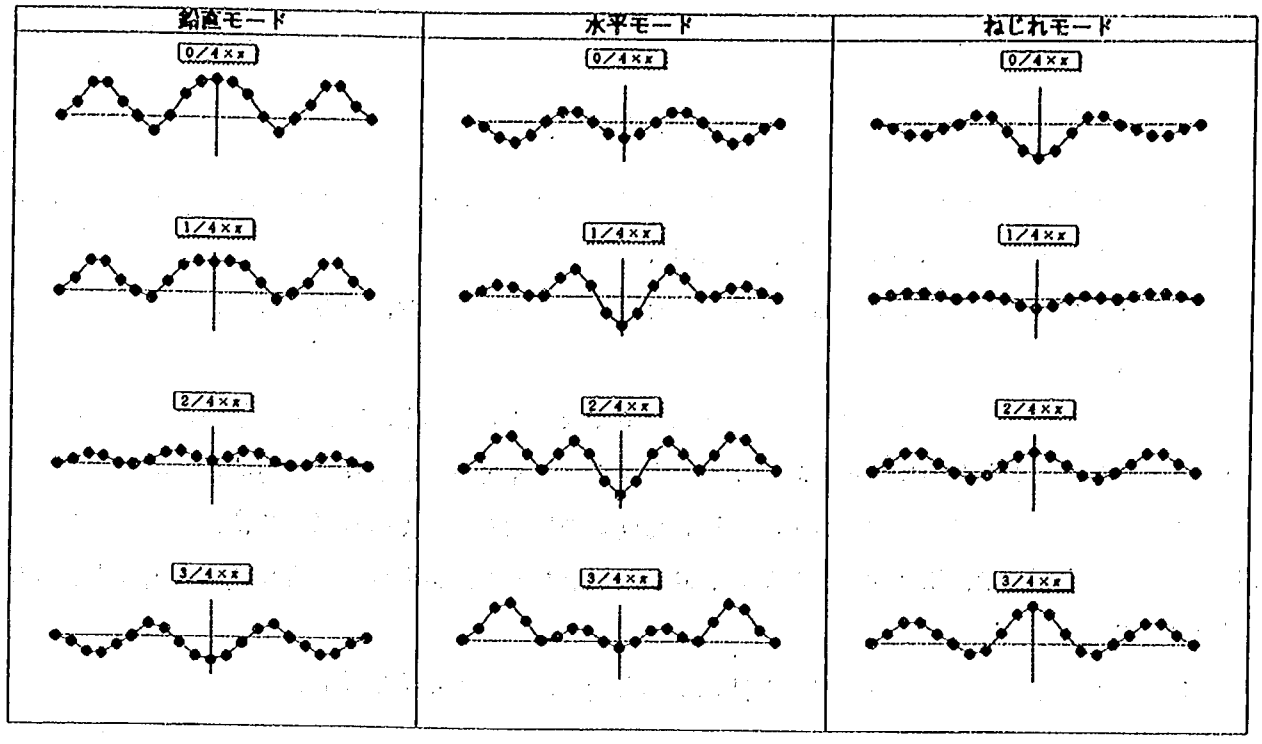
図－４・３・６０　フラッター発現時のモード図（その21）
TYPE-1,CASE-43：桁高＝3m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（片側片引き，Ｉ＝０）
実験空気力
フラッター発現風速　：Ｕ＝　183.432 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.142 Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）：ｋ＝　0.039
静的ねじれ角　：α＝　-4.231 度

表－４・３・２３　モードの成分寄与率（その21）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
5	1.0E+00	0.00	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
15	9.9E-01	152.48	0.1404	水平たわみ逆対称３次
3	9.5E-01	-6.60	0.0718	鉛直たわみ逆対称１次
12	2.4E-01	-92.67	0.1365	ねじれ逆対称２次
18	1.1E-01	-40.48	0.1415	水平たわみ逆対称４次
11	8.5E-02	-108.40	0.1353	ねじれ逆対称１次
7	5.8E-02	-69.00	0.1026	水平たわみ逆対称２次
13	3.7E-02	179.50	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
4	3.3E-02	80.15	0.0803	水平たわみ逆対称１次
17	2.6E-02	-124.59	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
16	6.0E-04	33.34	0.1405	鉛直たわみ対称３次
8	5.2E-04	-12.69	0.1029	鉛直たわみ対称２次
19	4.5E-04	-44.18	0.1448	水平たわみ対称４次
20	3.4E-04	-126.39	0.1453	鉛直たわみ対称４次
10	2.6E-04	-147.35	0.1352	水平たわみ対称３次
14	2.5E-04	-99.23	0.1392	ケーブル
2	1.3E-04	-1.59	0.0558	鉛直たわみ対称１次
9	5.2E-05	124.77	0.1170	ねじれ対称１次
1	4.7E-05	-15.31	0.0387	水平たわみ対称１次
6	2.8E-05	-46.98	0.0989	水平たわみ対称２次（ねじれ含む）



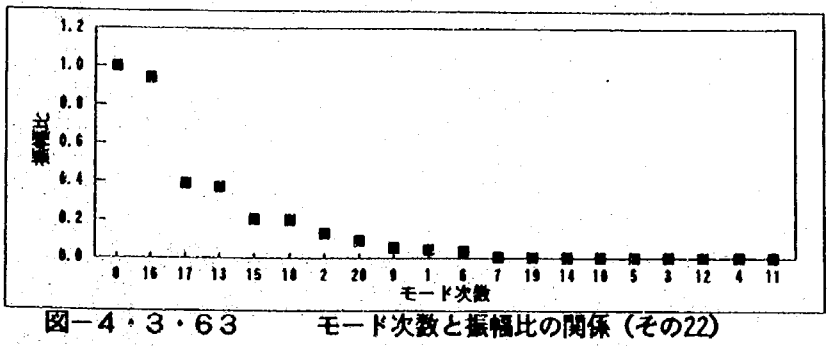
図－４・３・６１　モード次数と振幅比の関係（その21）



図－４・３・６２　フラッター発現時のモード図（その22）
TYPE-1,CASE-44：桁高＝3m，ｸﾛｽﾊﾝｶﾞｰ（X型，Ｉ＝０）
実験空気力
フラッター発現風速　：Ｕ＝　152.964 m/s
フラッター発現時の振動数：ｆ＝　0.155 Hz
換算振動数（ｆＢ／Ｕ）：ｋ＝　0.051
静的ねじれ角　：α＝　-2.945 度

表－４・３・２４　モードの成分寄与率（その22）

次数	振幅比	位相差度	振動数(HZ)	振動モード
8	1.0E+00	0.00	0.1029	鉛直たわみ対称２次
16	9.4E-01	-154.45	0.1452	鉛直たわみ対称４次
17	3.9E-01	-68.07	0.1553	水平たわみ対称４次
13	3.7E-01	-163.28	0.1405	鉛直たわみ対称３次
15	2.0E-01	11.28	0.1419	水平たわみ対称３次（ねじれ含む）
18	2.0E-01	-35.46	0.1615	ねじれ逆対称２次
2	1.3E-01	-127.37	0.0558	鉛直たわみ対称１次
20	8.9E-02	-178.34	0.1691	ケーブル
9	5.4E-02	-19.18	0.1210	ねじれ対称１次
1	4.4E-02	-173.76	0.0387	水平たわみ対称１次
6	3.5E-02	146.14	0.0990	水平たわみ対称２次
7	3.7E-03	-0.59	0.1026	水平たわみ逆対称２次
19	2.6E-03	-173.51	0.1690	ケーブル
14	1.4E-03	-142.88	0.1411	鉛直たわみ逆対称４次
10	1.2E-03	-88.99	0.1392	鉛直たわみ逆対称３次
5	6.7E-04	-100.41	0.0817	鉛直たわみ逆対称２次
3	5.4E-04	75.65	0.0719	鉛直たわみ逆対称１次
12	4.1E-04	-159.00	0.1401	水平たわみ逆対称３次（ねじれ含む）
4	1.2E-04	71.44	0.0804	水平たわみ逆対称１次
11	1.0E-04	115.37	0.1397	ねじれ逆対称１次



図－４・３・６３　モード次数と振幅比の関係（その22）

4．4　まとめ

フラッター解析の結果より、以下の事項が明らかとなった。

・平板空気力を用いた多自由度フラッター解析結果は、ケーブルシステムの形式に関わらず、等価質量・極慣性モーメントを使用したSelbergの式と概ね等しい。

・耐風対策部材を設置した2箱桁断面を有する超長大橋のフラッター特性が良好なことが、フラッター解析から確認された。

・ステイケーブルシステム自体がフラッター発現風速を向上させる効果は僅かであるが、ケーブルの重量が軽減するとすれば、ねじれの振動数が高くなり、フラッター発現風速が上昇する可能性がある。

・モノケーブルシステムでは、ねじれ1次の固有振動数の増加および等価質量・極慣性モーメントの増加によりフラッター発現風速は増加する。ただし、静的なねじれ変形が他のシステムに比べて大きくなるため、注意が必要である。

・クロスハンガーシステムがフラッター特性向上に有効であることが確認された。

5．まとめ

耐風性に優れた超長大橋の提案を目的として、桁の空力特性およびケーブルシステムを用いた構造系の構造特性の観点から実験的検討および解析的検討を実施した。

本研究の主要な成果は以下のとおりである。

①桁の空力特性

・偏平箱桁の中央部に開口部を設けた場合、フラッター特性が向上する。開口幅が大きければ大きいほどフタッター特性は向上する。

・フェアリングは、上下対称形を桁外端部に設置した場合にフラッター特性が良好となる。

・中央開口部の中央に、センターバリアを設置すると、フラッター特性が向上する。

・桁外端に、ガイドベーンを設置するとフラッター特性が向上する。設置高さにより効果は変化する。

・桁下面に桁上のガードレールと同形状の耐風対策部材を設置することにより、負の迎角におけるフラッター発現風速が高まる。

②ケーブルシステム

・モノケーブルシステムにより、フラッター発現風速は上昇するが、静的なねじれ変形が大きくなる。

・クロスハンガーシステムにより、フラッター発現風速は上昇する。

今後はさらに、以下の課題について調査・研究を進めて行く必要がある。

①今回提案した技術は、空気力計測およびフラッター解析に基づきその耐風性が確認されている。明石海峡大橋の大型風洞施設による3次元全橋模型風洞試験結果では、フラッター、ガスト応答などに関し新たな知見が得られた。このように、既往の規模を越える超長大橋では、従来の知識では予想し得ない現象が生じる可能性があるので、大型風洞施設による全橋模型風洞試験を行い、耐風性向上技術の有効性を確認しておく必要がある。

②今回提案した技術を具体化し、更に改良し、より耐風性の良い、より経済性を追求した超長大橋を追求していく必要がある。

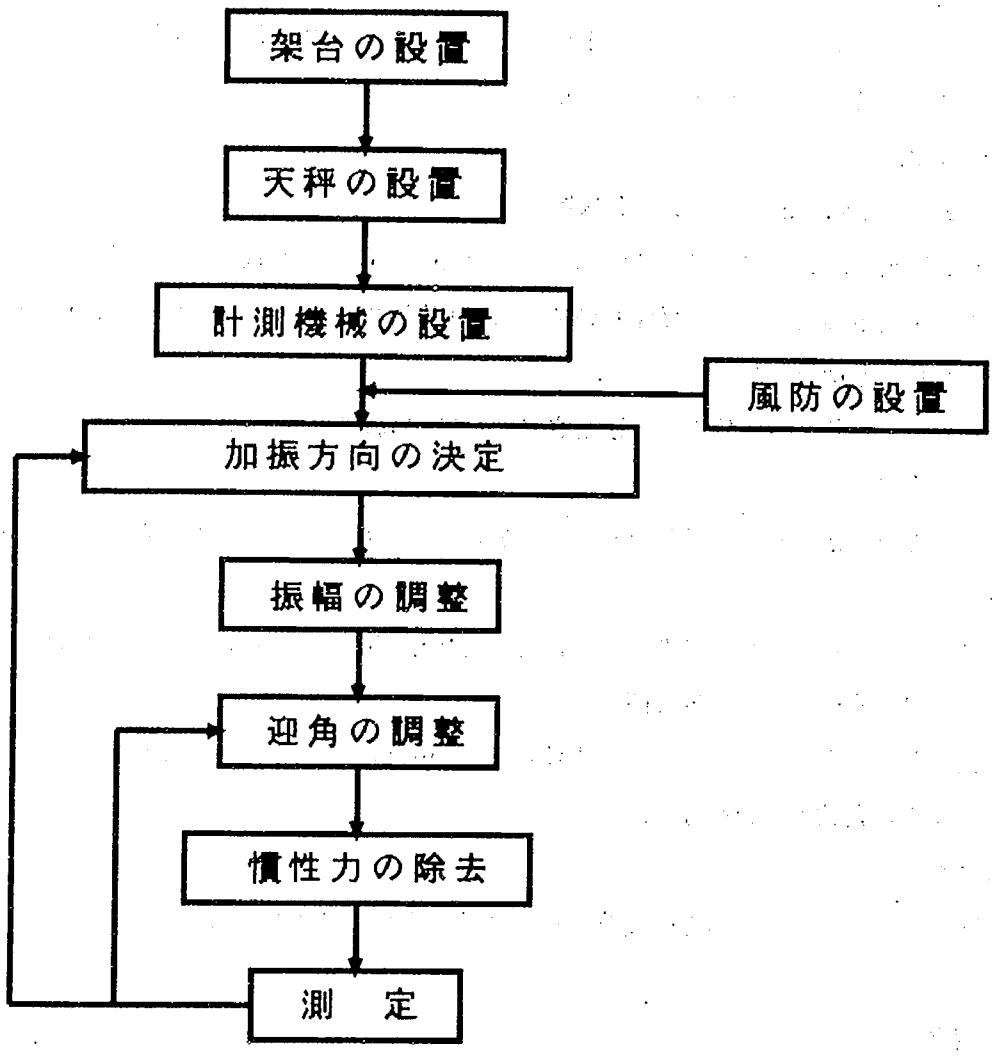
③超長大橋では、比較的強風でも橋の上の道路を車輌が安全に走行出来るようにすることが要求されることが考えられる。このような条件のもとで、なおかつ橋全体として耐風性および経済性が確保可能な構造の追求も重要であろう。

④アクティブコントロールなど、今までにないような新しい形式の吊橋の検討も継続して進めていく必要がある。

付録－１　非定常空気力の計測方法及び計算方法

1．1　非定常空気力計測のフロー

下図にフローを示す。風防の設置は最初に行わず、無風時の測定が終わった後に設置することが望ましい。一方向の測定を終えた後は、風防のパネルを除去し、加振方向を変え慣性力の微調整を行う。



付一図－1・1　非定常空気力計測のフロー

１．２　要旨

（１）模型長さ

模型長さは端板ををを含めて850㎜～860㎜とした。

（２）器具の設置、天秤の設置

架台を所定の位置に水平に固定し、天秤を乗せる。この時、天秤の上部で水準器により水平度を確認した。また、観測側と反観測側の天秤の高さを一定にした。

（３）計測機械の設置

付ー図ー１・２・１と付ー図ー１・２・２参照

計測器は加振制御装置，動ひずみアンプ(6ch)，フィルター(7ch)，加減算機，(6ch→3ch)，ＡＤ変換機(DASBOX)，パソコンを使用した。また、慣性力の調整に4ch以上のオシロスコープ、加振成分と空気力の安定を見るためにFFTｱﾅﾗｲｻﾞｰも使用した。

配線は、フィルターを各々の成分ごとに通過させた後に加減算機に接続した。

（４）加振方向の決定

加振方向は慣性力の調整を考え、回転加振→鉛直加振→水平加振の順番で行った。（慣性力の現象データ確認量が多いため）。

加振方向の決定はストッパーを全て設置した後で、各加振用のアームを取り付け、最後に不必要なストッパーを除去した（付ー図ー１・２・３参照）。

加振設備が整ったら、手で最初にモーターをゆっくり回転し、異常がなければ0.2Hz程度から徐々に周波数を上げていき、固有振動数の確認を行った。

（５）振幅の調整

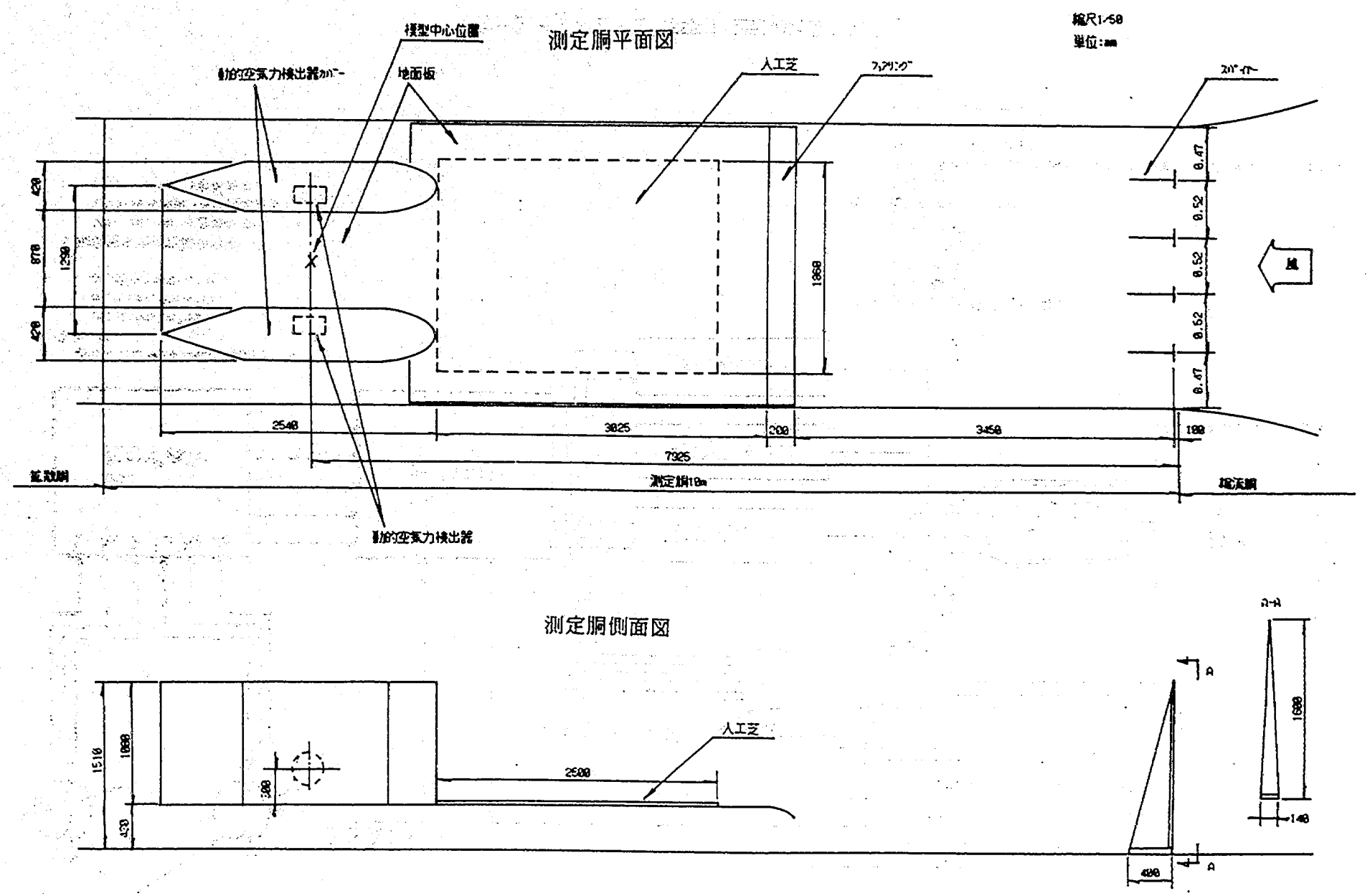
振幅の調整は、モータードラム部の支持点を変えることにより調整を行った（付ー図ー１・２・３図参照）。

（６）迎角の調整

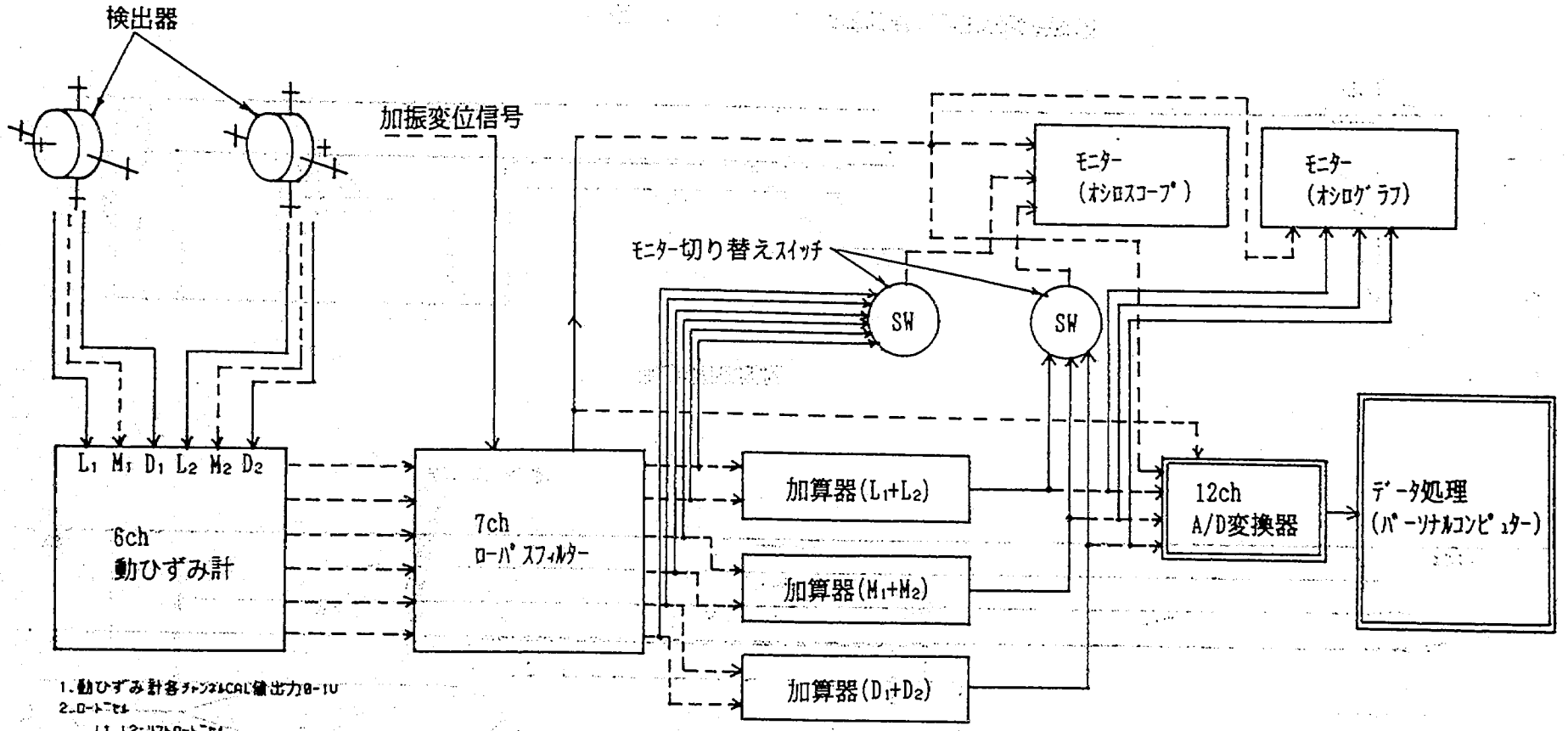
迎角の調整は、天秤裏にあるねじを4本ずつゆるめ、迎角調整用のねじを回転させることにより調整した。

（７）慣性力の除去

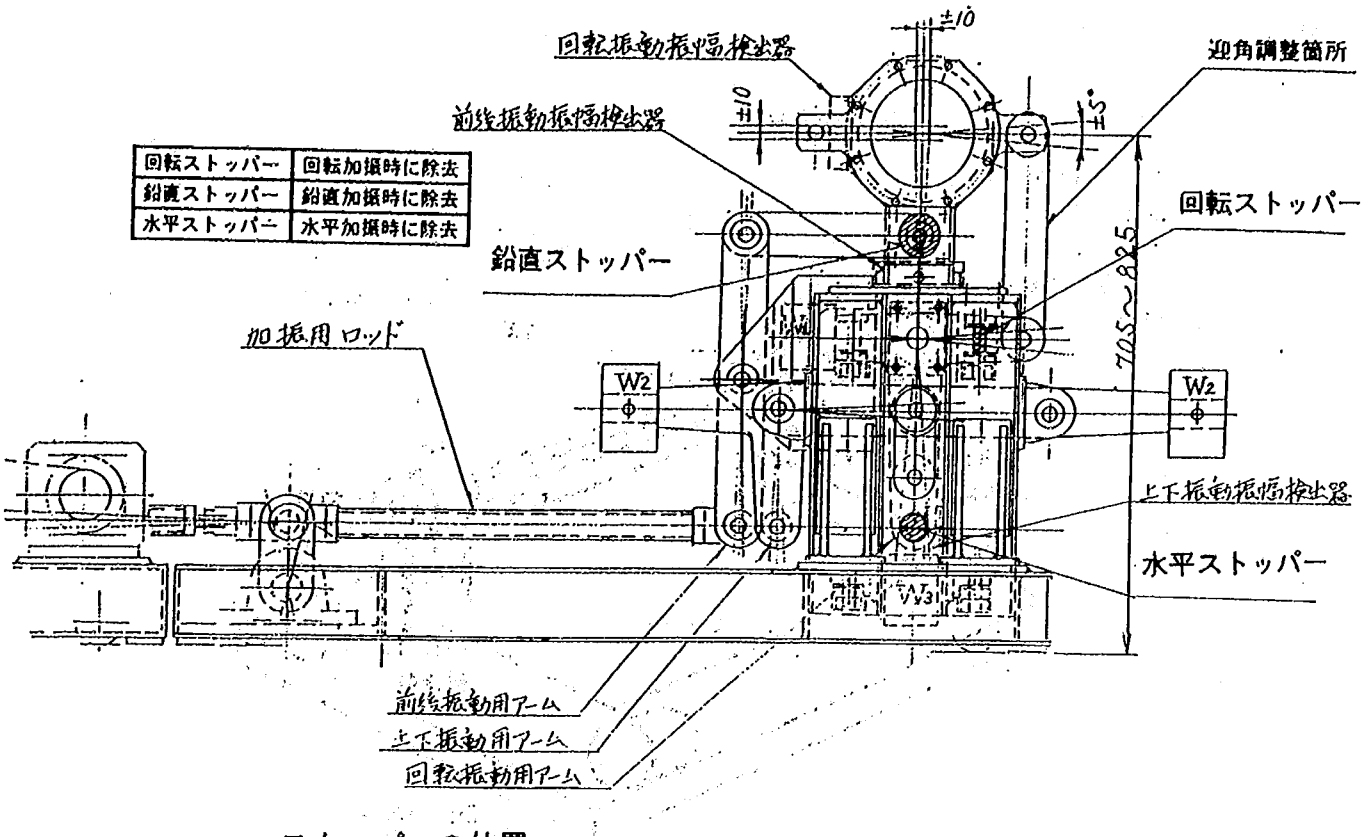
慣性力の除去は天秤外に着いている10位置の分銅により行った。調整できる分銅はもっとも外側に着いている10位置であり、内側についている分銅は天秤のバランスを取っている。慣性力の除去方法は後で詳細に記述する。



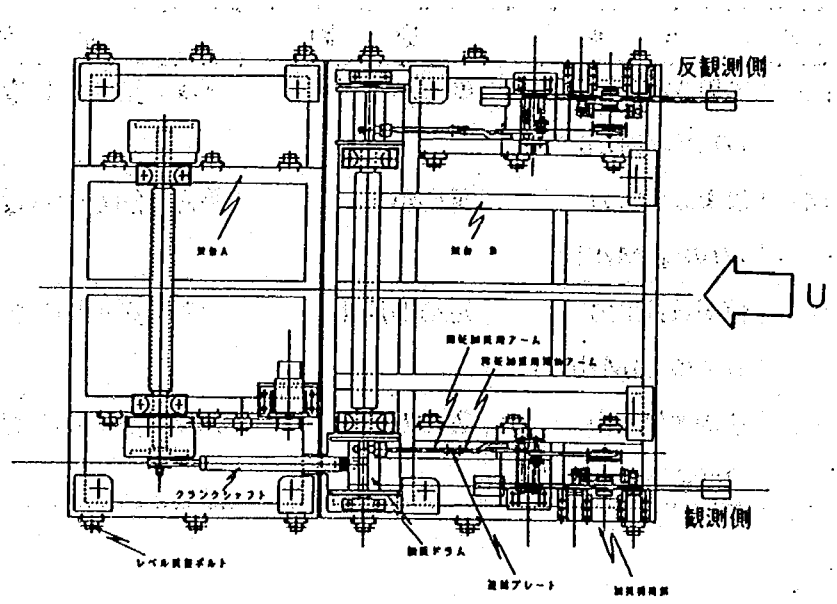
付一図 -1・2・1　非定常空気力計測実験概略図

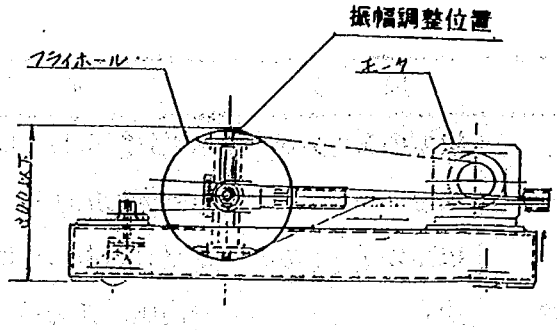


付一図－１・２・２　非定常空気力計測システム



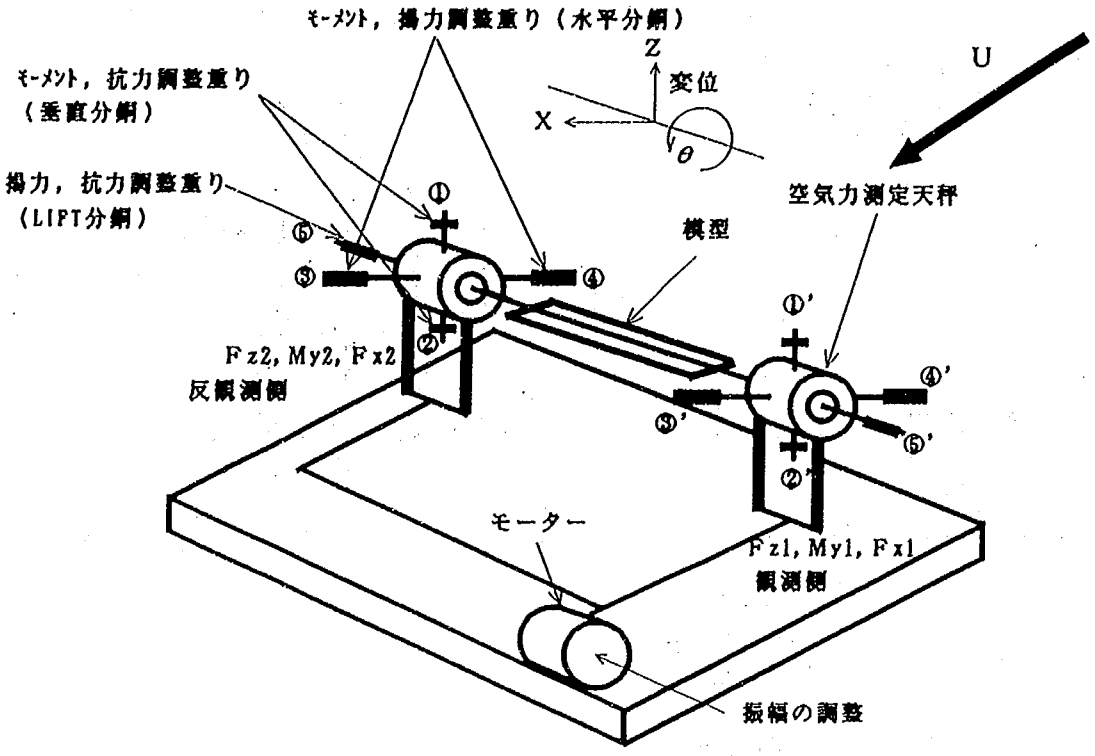
ストッパーの位置





付一図－１・２・３　非定常空気力測定器

慣性力の除去方法



回転加振（0.2Hz加振）

ｹｰｽ	出力	波　形	原　因	処　置
1	My	等周波数出力 +θの時+My出力	重心が上	垂直分銅を同じ量だけ上
2	My	等周波数出力 +θの時-My出力	重心が下	垂直分銅を同じ量だけ下
3	My	倍周波数出力 θ=0の時+My出力	重心が風下	水平分銅を同じ量だけ風下
4	My	倍周波数出力 θ=0の時-My出力	重心が風上	水平分銅を同じ量だけ風上

回転加振（1Hz以上の加振）

ｹｰｽ	出力	波　形	原　因	処　置
5	My	等周波数出力 +θの時+My出力	模型の慣性力が 大きい	水平分銅もしくは、垂直分銅 を外側に広げる
6	My	等周波数出力 +θの時-My出力	模型の慣性力が 小さい	水平分銅もしくは、垂直分銅 を内側に狭める

鉛直加振（0.2Hz加振）

ケース	出力	波　形	原　因	処　置
7	Fz	等周波数出力 +Zの時+Fz出力	模型の慣性力が 大きい	LIFT分銅を外
8	Fz	等周波数出力 +Zの時-Fz出力	模型の慣性力が 小さい	LIFT分銅を内
9	My	倍周波数出力 +Zの時-My出力	重心が風下	水平分銅を同じ量だけ風下
10	My	倍周波数出力 +Zの時+My出力	重心が風上	水分銅を同じ量だけ風上

鉛直加振（1Hz以上の加振）

ケース	出力	波　形	原　因	処　置
11	Fz	等周波数出力 +Zの時+Fz出力	模型の慣性力が 大きい	LIFT分銅を外
12	Fz	等周波数出力 +Zの時-Fz出力	模型の慣性力が 小さい	LIFT分銅を内
13	My	倍周波数出力 +Zの時-My出力	重心が風下	水平分銅を同じ量だけ風下
14	My	倍周波数出力 +Zの時+My出力	重心が風上	水平分銅を同じ量だけ風上

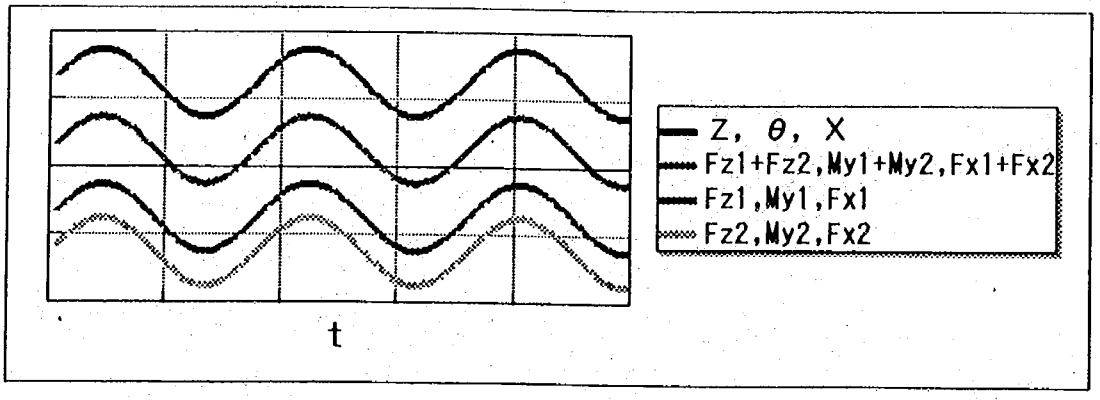
水平加振（0.2Hz加振）

ケース	出力	波　形	原　因	処　置
１５	FX	等周波数出力 +Xの時+FX出力	模型の慣性力が 大きい	LIFT分銅を外
１６	FX	等周波数出力 +Xの時-FX出力	模型の慣性力が 小さい	LIFT分銅を内
１７	My	倍周波数出力 +Xの時+My出力	重心が上	水平分銅を同じ量だけ上
１８	My	倍周波数出力 +Xの時-My出力	重心が下	水平分銅を同じ量だけ下

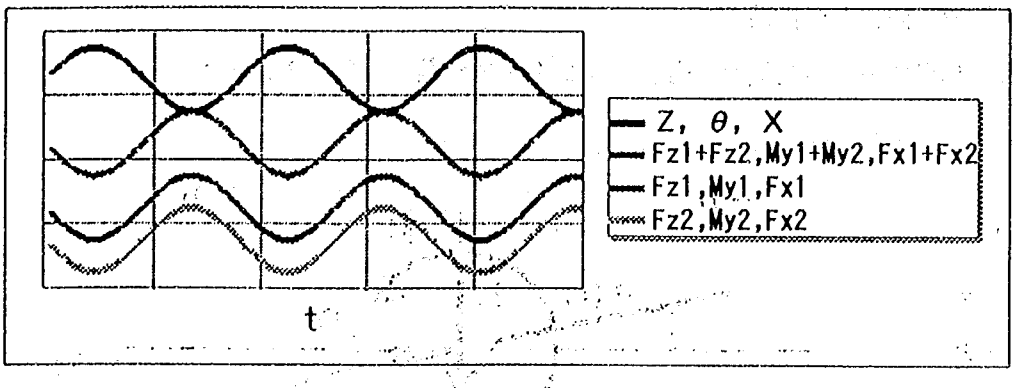
水平加振（1.0Hz加振）

ケース	出力	波　形	原　因	処　置
１９	FX	等周波数出力 +Xの時+FX出力	模型の慣性力が 大きい	LIFT分銅を外
２０	FX	等周波数出力 +Xの時-FX出力	模型の慣性力が 小さい	LIFT分銅を内
２１	My	倍周波数出力 +Xの時+My出力	重心が上	水平分銅を同じ量だけ上
２２	My	倍周波数出力 +Xの時-My出力	重心が下	水平分銅を同じ量だけ下

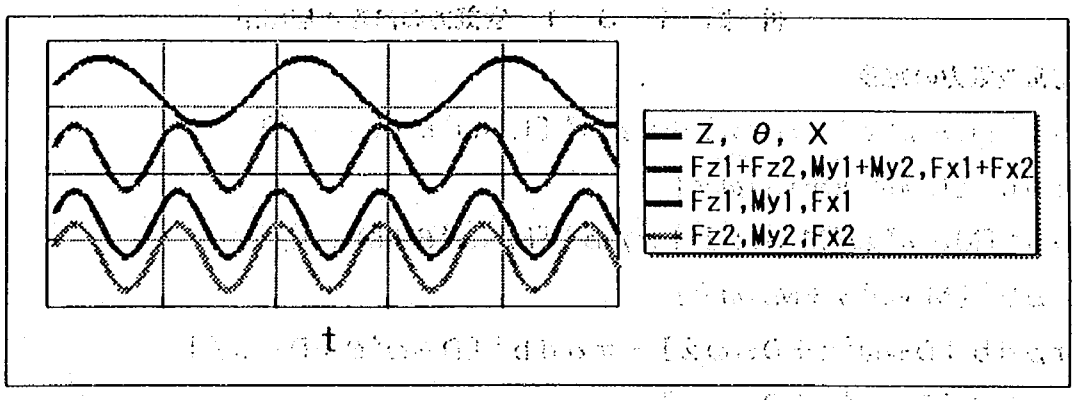
・ケース１，５，７，１１，１５，１９



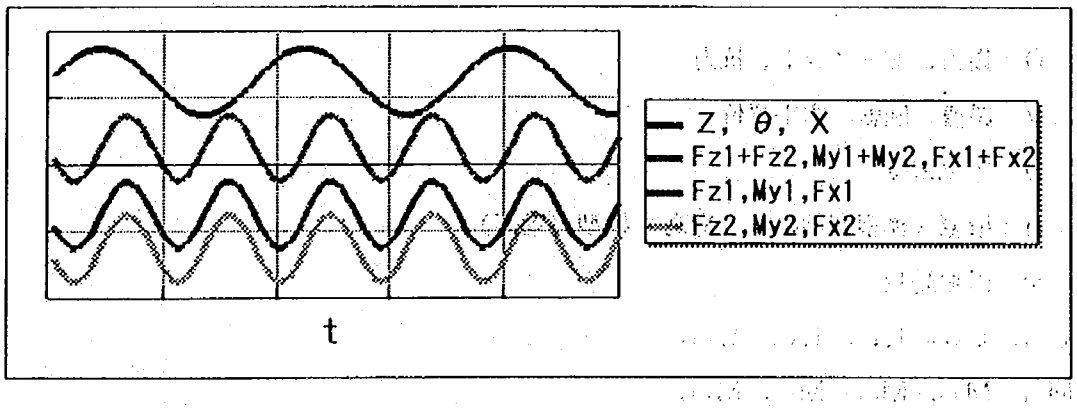
・ケース2，6，8，12，16，20



・ケース3，10，14，17，21



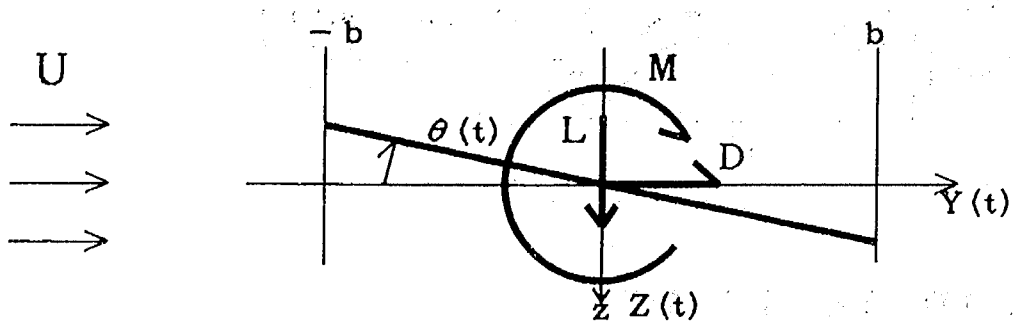
・ケース4，9，13，18，22



1．3　非定常空気力係数の算出

（1）非定常空気力の向きと座標系

非定常空気力の算出に用いる空気力の向きと座標系を付一図1・3・1に示す。



付一図－1・3・1　空気力の向きと座標系

（2）非定常空気力の定義

$$L=\pi\rho b^2\left[L_{zR}\omega^2 z+L_{zI}\omega\dot{z}\right]+\pi\rho b^3\left[L_{\theta R}\omega^2\theta+L_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]+\pi\rho b^2\left[L_{yR}\omega^2 y+L_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

$$M=\pi\rho b^3\left[M_{zR}\omega^2 z+M_{zI}\omega\dot{z}\right]+\pi\rho b^4\left[M_{\theta R}\omega^2\theta+M_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]+\pi\rho b^3\left[M_{yR}\omega^2 y+M_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

$$D=-\pi\rho d b\left[D_{zR}\omega^2 z+D_{zI}\omega\dot{z}\right]-\pi\rho d b^2\left[D_{\theta R}\omega^2\theta+D_{\theta I}\omega\dot{\theta}\right]-\pi\rho b d\left[D_{yR}\omega^2 y+D_{yI}\omega\dot{y}\right]$$

----------①

ここで、

L，M，D：揚力、モーメント、抗力

z，θ，y：鉛直、回転、水平変位

ρ：空気密度

b，d：桁幅（模型有効幅）、桁高（模型有効高）

ω：円振動数

L_{zR}，L_{zI}，$L_{\theta R}$，$L_{\theta I}$，L_{yR}，L_{yI}，

M_{zR}，M_{zI}，$M_{\theta R}$，$M_{\theta I}$，M_{yR}，M_{yI}，

D_{zR}，D_{zI}，$D_{\theta R}$，$D_{\theta I}$，D_{yR}，D_{yI}

：非定常空気力係数（断面形状により決まる固有の係数）

添字z：鉛直（上下）加振時　　R：実部

θ：モーメント（回転）加振時　　I：虚部

y：抗力（水平）加振時

（3）算出方法

模型の加振は上下、回転、水平に別々に行い、各ケースで力の三成分を計測する。よってz、θ、yごとに処理することとなる。非定常空気力の定義より1方向加振、1成分の力を対象とすると、一般的に下式となる。

$f = Ax + B\dot{x}$　　f：空気力　x：変位　A，B：係数

よってf，xのデータから係数A，Bを求めることとなる。

実測された変位をx(t)、空気力をf(t)とする。各々の複素フーリエ変換をX(ω)、F(ω)とする。

複素フーリエ変換

変位　x(t)　⟶　X(ω)

空気力　f(t)　⟶　F(ω)

フーリエ変換の定義より

$$\begin{cases} x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \longleftrightarrow X(\omega) = \dfrac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \\ f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \longleftrightarrow F(\omega) = \dfrac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \end{cases} \quad \text{----------②}$$

変位x(t)と空気力f(t)のクロススペクトル$C_{xf}(\omega)$は

$$C_{xf}(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{2\pi}{T} X^*(\omega) F(\omega) \qquad *\text{は共役複素数}$$

$$= E\left[\frac{2\pi}{T} X^*(\omega) F(\omega)\right] \rightarrow \frac{2\pi}{T} X^*(\omega) F(\omega)$$

Eはデータ処理上の問題なので除去して考える。　----------③

③式の両辺に、計算の便宜上

$\dfrac{X(\omega)}{|X(\omega)|^2}$　を乗じる。

$$\frac{C_{xf}(\omega) X(\omega)}{|X(\omega)|^2} = \frac{2\pi}{T} \frac{X(\omega) X^*(\omega)}{|X(\omega)|^2} F(\omega)$$

$$= \frac{2\pi}{T} F(\omega) \qquad \text{----------④}$$

④式より、空気力の複素フーリエ変換は下式のようになる。

$$F(\omega) = \frac{T}{2\pi} \frac{C_{xf}(\omega) X(\omega)}{|X(\omega)|^2} \qquad \text{----------⑤}$$

⑤式を②式（左下）に代入

$$f(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{T}{2\pi}\frac{C_{xf}(\omega)X(\omega)}{|X(\omega)|^2}e^{i\omega t}d\omega\ (\rightarrow実数)\qquad\text{----------⑥}$$

ここで、模型の加振は振動数ω_0の正弦波形であることから、ω_0成分のみに着目し、f(t)について考える。⑥式で$-\infty\sim\infty$の周波数を積分しているため、右辺の$C_{xf}(\omega)X(\omega)e^{i\omega t}$は各々複素数だが、積分結果は実数となる。一方、1つの振動成分（ω_0）だけを取り出すと右辺は複素数であるが、その虚数部はf(t)だけを評価する時点では意味を持たず、⑦式のようになる。また、虚数部は位相遅れ等を表現していることになる。

$$f(t)|_{\omega_0}=\mathrm{Real}\left[\frac{T}{2\pi}\frac{C_{xf}(\omega_0)X(\omega_0)}{|X(\omega_0)|^2}e^{i\omega_0 t}\right]\qquad\text{----------⑦}$$

上記の考え方より、⑦のω_0に着目した時の実数部を計算する。以下簡略化のため
複素数部分のみを抽出し、変形する。→ $C_{xf}(\omega_0)X(\omega_0)e^{i\omega_0 t}$

$$\begin{aligned}C_{xf}(\omega_0)X(\omega_0)e^{i\omega_0 t}&=\{K(\omega_0)-iQ(\omega_0)\}|X(\omega_0)|e^{i\theta(\omega_0)}e^{i\omega_0 t}\\&=\{K(\omega_0)-iQ(\omega_0)\}|X(\omega_0)|e^{i(\theta(\omega_0)+\omega_0 t)}\\&=\{K(\omega_0)-iQ(\omega_0)\}|X(\omega_0)|\\&\quad\times[\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}+i\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}]\\&=|X(\omega_0)|[\{K(\omega_0)\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}+Q(\omega_0)\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}\}\\&\quad+i\{K(\omega_0)\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}-Q(\omega_0)\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}\}]\end{aligned}\qquad\text{----------⑧}$$

ここで、$K(\omega_0)$, $Q(\omega_0)$：ｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙの実部(ｺｽﾍﾟｸﾄﾙ), 虚部(ｸｵﾄﾞｽﾍﾟｸﾄﾙ)

$\theta(\omega_0)$：変位データの位相遅れ（ω_0成分）

⑧式の実数部（下線部）を⑦式の分子に戻す。

$$f(t)|_{\omega_0}=\frac{T}{2\pi}\frac{1}{|X(\omega_0)|^2}|X(\omega_0)|\{K(\omega_0)\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}+Q(\omega_0)\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}\}$$

$$f(t)|_{\omega_0}=\frac{T}{2\pi}\frac{1}{|X(\omega_0)|^2}\{K(\omega_0)|X(\omega_0)|\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}+YQ(\omega_0)|X(\omega_0)|\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}\}\qquad\text{----------⑨}$$

ここで、②式を利用し、積分結果は実数になることを考えるとω0成分の変位は下式のように表される。

$$x(t)|_{\omega_0} = \mathrm{Real}\{|X(\omega_0)|e^{i(\theta(\omega_0)+\omega_0 t)}\} \quad \cdots\cdots ⑩$$

$$= |X(\omega_0)|\cos\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\}$$

また、⑩式を微分すると下式のようになる。

$$x'(t)|_{\omega_0} = -|X(\omega_0)|\sin\{\theta(\omega_0)+\omega_0 t\} \quad \cdots\cdots ⑪$$

また、変位x(t)のパワースペクトル$S_{xx}(\omega)$は

$$S_{xx}(\omega) = \frac{2\pi}{T}|X(\omega)|^2 \quad \cdots\cdots ⑫$$

⑨に⑩, ⑪, ⑫を代入すると

$$f(t)|_{\omega_0} = \frac{1}{S_{xx}(\omega_0)}\left[K(\omega_0)x(t)|_{\omega_0} - \frac{Q(\omega_0)}{\omega_0}x'(t)|_{\omega_0}\right] \quad \cdots\cdots ⑬$$

空気力の測定で加振方向を限定された時、変位は独立して考えることができ、①式は下式のようになる。

・揚力加振時

$$L_z = \pi\rho b^2[L_{zR}\omega^2 z + L_{zI}\omega\dot{z}]$$

$$M_z = \pi\rho b^3[M_{zR}\omega^2 z + M_{zI}\omega\dot{z}]$$

$$D_z = -\pi\rho d b[D_{zR}\omega^2 z + D_{zI}\omega\dot{z}]$$

・モーメント加振時

$$L_\theta = \pi\rho b^3[L_{\theta R}\omega^2\theta + L_{\theta I}\omega\dot{\theta}] \quad \cdots\cdots ①'$$

$$M_\theta = \pi\rho b^4[M_{\theta R}\omega^2\theta + M_{\theta I}\omega\dot{\theta}]$$

$$D_\theta = -\pi\rho d b^2[D_{\theta R}\omega^2\theta + D_{\theta I}\omega\dot{\theta}]$$

・抗力加振時

$$L_z = \pi\rho b^2[L_{yR}\omega^2 y + L_{yI}\omega\dot{y}]$$

$$M_y = \pi\rho b^3[M_{yR}\omega^2 y + M_{yI}\omega\dot{y}]$$

$$D_y = -\pi\rho b d[D_{yR}\omega^2 y + D_{yI}\omega\dot{y}]$$

よって、①'式と⑬式を比較すると必要な係数は

$$\frac{K(\omega_0)}{S_{xx}(\omega_0)} \qquad \frac{Q(\omega_0)}{\omega_0 S_{xx}(\omega_0)}$$

から算出できることがわかる。

∴非定常空気力係数は以下の式で算出できる。

$$\begin{cases} L_{zR}=\dfrac{K_{zL}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} & L_{zI}=\dfrac{-Q_{zL}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} \\ L_{\theta R}=\dfrac{K_{\theta L}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} & L_{\theta I}=\dfrac{-Q_{\theta L}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} \\ L_{yR}=\dfrac{K_{yL}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} & L_{yI}=\dfrac{-Q_{yL}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{zR}=\dfrac{K_{zM}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} & M_{zI}=\dfrac{-Q_{zM}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} \\ M_{\theta R}=\dfrac{K_{\theta M}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^4} & M_{\theta I}=\dfrac{-Q_{\theta M}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^4} \\ M_{yR}=\dfrac{K_{yM}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} & M_{yI}=\dfrac{-Q_{yM}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} D_{zR}=\dfrac{K_{zD}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} & D_{zI}=\dfrac{-Q_{zD}(\omega_n)}{S_{zz}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} \\ D_{\theta R}=\dfrac{K_{\theta D}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} & D_{\theta I}=\dfrac{-Q_{\theta D}(\omega_n)}{S_{\theta\theta}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} \\ D_{yR}=\dfrac{K_{yD}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} & D_{yI}=\dfrac{-Q_{yD}(\omega_n)}{S_{yy}(\omega_n)}\dfrac{1}{\omega_n^2\pi\rho b^2} \end{cases}$$

ここで、
- K_{ab}：a方向加振時、a方向変位、b成分空気力のｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙC_{ab}の実部
- Q_{ab}：〃　〃　〃　〃　虚部
- S_{aa}：a　方向加振時、a　方向変位ﾊﾟﾜｰｽﾍﾟｸﾄﾙ

$$(S_{aa}=K_{aa}-iQ_{aa})$$

1．4　解析上の留意点

（1）解析プログラム

非定常空気力解析のFORTRANプログラムリストを次ページ以降に示す。

非定常空気力解析プログラムは、汎用解析プログラムの出力結果（X(t)，L(t)，M(t)，D(t)）より、構造研究室で使用されているﾊﾟﾜｰｽﾍﾟｸﾄﾙ，ｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙの算出プログラムを改良している。

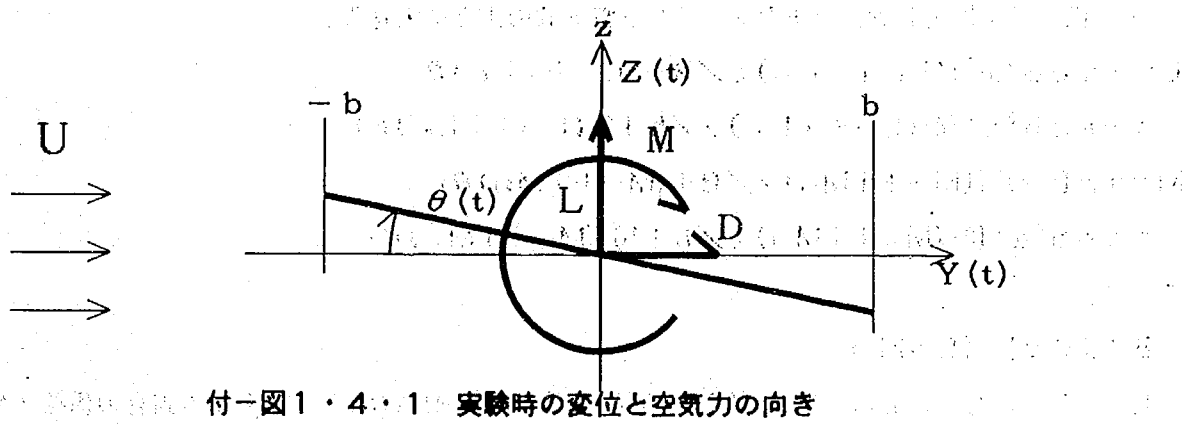
非定常空気力の算出時のプログラム上の留意点を以下に示す。

①非定常空気力の算出よりｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙはC_{xf}は$X^{*}f$と定義しているがｸﾛｽｽﾍﾟｸﾄﾙの算出プログラム上ではXf^{*}と定義しているので虚数部の符号は逆転する。

②非定常空気力の算出より｛K(ω)－Q(ω)｝と定義したがFORTRAN上では｛K(ω)＋Q(ω)｝で定義しているため虚数部の符号が逆転する。

（2）力の方向の向き

付－図－1・4・1に実験時の変位と空気力の向きを示す。非定常空気力係数の定義によって、異なるので注意を要する。



付－図1・4・1　実験時の変位と空気力の向き

1．5　二自由度の非定常空気力係数理論値

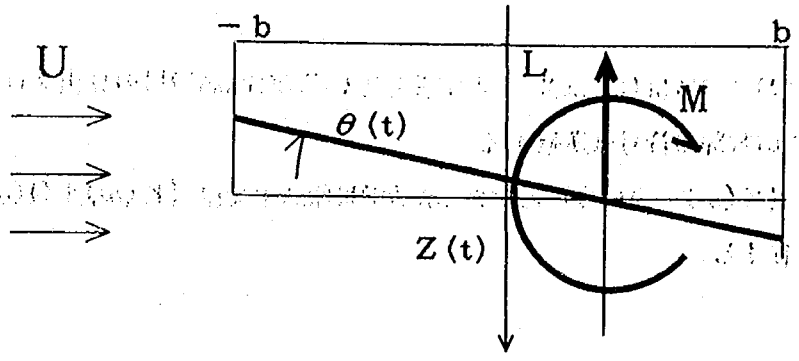
（1）二箱断面の非定常空気力係数

次に示す仮定により、既知の理論を用いて、2自由度における二箱断面の非定常空気力係数の推定を行う。

・橋桁全体に作用する非定常空気力係数は、各箱桁に作用する非定常空気力の合計と考える。

・各箱桁には非定常空気力が独立して作用し、他の箱桁の影響を受けないものとする。

ただし、上記仮定では、風上側にある箱桁の後流の影響を無視している。



付一図－1・5・1　二自由度平板の振動

一般に図に示す揚力Lおよび空力モーメントを下式のように表せる。

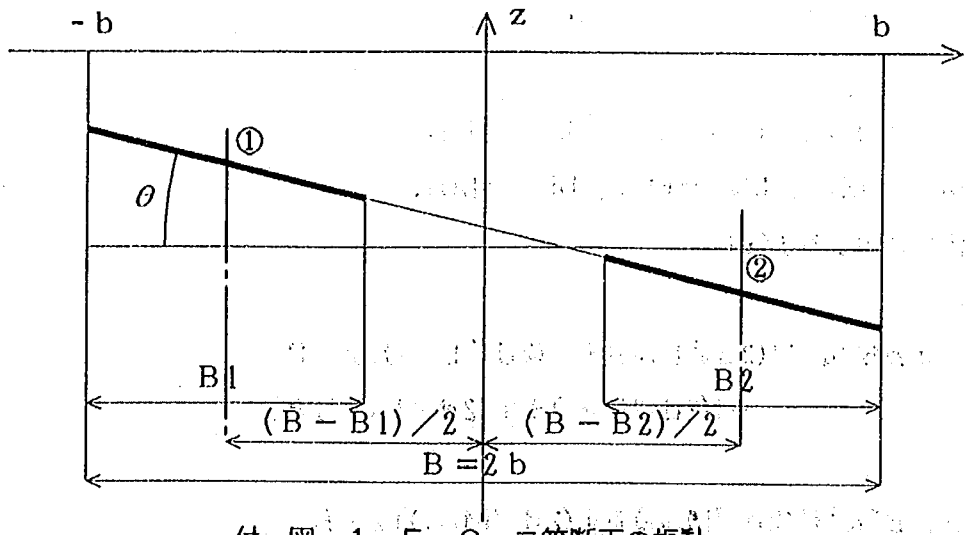
$$L=-\pi\rho B^3\omega^2\{(L_{zR}+iL_{zI})z/B+(L_{\theta R}+iL_{\theta I})\theta\}$$
$$=-\pi\rho b^3\omega^2\{4\cdot(L_{zR}+iL_{zI})z/b+8\cdot(L_{\theta R}+iL_{\theta I})\theta\}$$
$$M=\pi\rho B^4\omega^2\{(M_{zR}+iM_{zI})z/B+(M_{\theta R}+iM_{\theta I})\theta\}$$
$$=\pi\rho b^4\omega^2\{8\cdot(M_{zR}+iM_{zI})z/b+16\cdot(M_{\theta R}+iM_{\theta I})\theta\}$$

ここに、

B：桁の全幅（B＝2b）

L_{zR}, L_{zI}, $L_{\theta R}$, $L_{\theta I}$, M_{zR}, M_{zI}, $M_{\theta R}$, $M_{\theta I}$：断面形状によって決まる固有の係数（非定常空気力係数）

上式を用い二箱断面の非定常空気力係数を算出する。



付一図－１・５・２　二箱断面の振動

一般に橋桁の弾性中心（回転中心）は、桁の重心とせん断中心の1/2として考えている。左右上下対称の断面においては、弾性中心は断面の中心として考えることができ、図に示す二箱橋桁の断面中心の変位をそれぞれ$z_①$，$z_②$，$\phi_①$，$\phi_②$とする。

$d_①=B_①/B$，$d_②=B_②/B$とおくと各変位は

$$z_①=z+B\cdot\theta\cdot(1-d_①)/2 \qquad \theta_①=\theta_②=\theta$$

$$z_②=z-B\cdot\theta\cdot(1-d_②)/2$$

①，②各断面に作用する空気力は以下の式で表される。

$$L_①=-\pi\rho B_①^3\omega^2[(L_{zR①}+iL_{zI①})z_①/B_①+(L_{\theta R①}+iL_{\theta I①})\theta_①]$$

$$=-\pi\rho B_①^3\omega^2[(L_{zR①}+iL_{zI①})\{z+B(1-d_①)\theta/2\}/B_①+(L_{\theta R①}+iL_{\theta I①})\theta_①]$$

$$=-\pi\rho B_①^3\omega^2[d_①^2(L_{zR①}+iL_{zI①})z/B+d_①^3(L_{\theta R①}+iL_{\theta I①})\theta+d_①^2(1-d_①)(L_{zR①}+iL_{zI①})\theta/2]$$

$$L_②=-\pi\rho B_②^3\omega^2[d_②^2(L_{zR②}+iL_{zI②})z/B+d_②^3(L_{\theta R②}+iL_{\theta I②})\theta-d_②^2(1-d_②)(L_{zR②}+iL_{zI②})\theta/2]$$

$$M_①=-\pi\rho B_①^4\omega^2[(M_{zR①}+iM_{zI①})z_①/B_①+(M_{\theta R①}+iM_{\theta I①})\theta_①]$$

$$=-\pi\rho B_①^4\omega^2[(M_{zR①}+iM_{zI①})\{z+B(1-d_①)\theta/2\}/B_①+(M_{\theta R①}+iM_{\theta I①})\theta_①]$$

$$=-\pi\rho B_①^3\omega^2[d_①^3(M_{zR①}+iM_{zI①})z/B+\{d_①^4(M_{\theta R①}+iM_{\theta I①})\theta+d_①^3(1-d_①)(M_{zR①}+iM_{zI①})\theta/2]$$

$$M_②=-\pi\rho B_②^3\omega^2[d_②^3(M_{zR②}+iM_{zI②})z/B+\{d_②^4(M_{\theta R②}+iM_{\theta I②})\theta-d_②^3(1-d_②)(M_{zR②}+iM_{zI②})\theta/2]$$

断面①，②は桁幅が同じ時、等しい空気力係数であると考えて、以下のように仮定する。

$d_{①}=d_{②}$

$L_{zR①}=L_{zR②}$，$L_{zI①}=L_{zI②}$，$L_{\theta R①}=L_{\theta R②}$，$L_{\theta I①}=L_{\theta I②}$

$M_{zR①}=M_{zR②}$，$M_{zI①}=M_{zI②}$，$M_{\theta R①}=M_{\theta R②}$，$M_{\theta I①}=M_{\theta I②}$

よって、橋桁全体に作用する空気力は

$$L=L_{①}+L_{②}=-\pi\rho B^{3}\omega^{2}[\{(2d_{①}^{2}L_{zR①})+i\,(2d_{①}^{2}L_{zI①})\}z/B+\{(2d_{①}^{3}L_{\theta R①})+i\,(2d_{①}^{3}L_{\theta I①})\}\theta]$$

$$M=M_{①}+M_{②}=\pi\rho B^{4}\omega^{2}\{[(2d_{①}^{3}M_{zR①})+i\,(2d_{①}^{3}M_{zI①})]z/B+[(2d_{①}^{4}M_{\theta R①}+d_{①}^{2}(1-d_{①})^{2}L_{zR①}/2)+i\,(2d_{①}^{4}M_{\theta I①}+d_{①}^{2}(1-d_{①})^{2}L_{zI①}/2)]\theta\}$$

以上により、二箱断面の非定常空気力係数は次のように与えられる。

$$L_{zR}=2d_{①}^{2}L_{zR①}$$
$$L_{zI}=2d_{①}^{2}L_{zI①}$$
$$L_{\theta R}=2d_{①}^{3}L_{\theta R①}$$
$$L_{\theta I}=2d_{①}^{3}L_{\theta I②}$$
$$M_{zR}=2d_{①}^{3}M_{zR①}$$
$$M_{zI}=2d_{①}^{3}M_{zI①}$$
$$M_{\theta R}=2d_{①}^{4}M_{\theta R①}+d_{①}^{2}(1-d_{①})^{2}L_{zR①}/2$$
$$M_{\theta I}=2d_{①}^{4}M_{\theta I①}+d_{①}^{2}(1-d_{①})^{2}L_{zI①}/2$$

なおこのとき、換算振動数kは

$$k=\frac{\omega B}{2U}=\frac{\omega B_{①}}{2d_{①}U}=\frac{k_{①}}{d_{①}}$$

であるから、$k_{①}=d_{①}k$となる。したがって、上式において非定常空気力係数はそれぞれ、

L_{**}，M_{**}：換算振動数kの時の非定常空気力係数

$L_{**①}$，$M_{**①}$：換算振動数$k_{①}$の時の非定常空気力係数

（２）Theodorsenの空気力係数

以下に付付一図－１・５・１より得られるTheodorsenの空気力係数を示す。

$L_{zR}=〔2.0\times G(k)/k〕/4$

$L_{zI}=〔-2.0\times F(k)/k〕/4$

$L_{\theta R}=〔-2.0\times F(k)/k^2+G(k)/k〕/8$

$L_{\theta I}=〔-2.0\times G(k)/k^2-(1.0+F(k))/k〕/8$

$M_{zR}=〔-G(k)/k〕/8$

$M_{zI}=〔F(k)/k〕/8$

$M_{\theta R}=〔F(k)/k^2-G(k)/2.0/k〕/16$

$M_{\theta I}=〔G(k)/k^2-(F(k)-1.0)/2.0/k〕/16$

このとき、

$$F(k)=\frac{J_1(J_1+Y_0)+Y_1(Y_1-J_0)}{(J_1+Y_0)^2+(Y_1-J_0)^2}$$

$$G(k)=-\frac{Y_0Y_1+J_0J_{01}}{(J_1+Y_0)^2+(Y_1-J_0)^2}$$

J_ν ：ν次の第一種ベッセル関数

Y_ν ：ν次の第二種ベッセル関数

k ：換算振動数

となる。

超長大橋の耐風安定性に関する調査研究報告書

ＩＳＳＮ　0386－5878
土木研究所資料第3429号
平成８年３月

構造研究室室長　佐藤　弘史
主任研究員　荻原　勝也
松藤　洋照

要　旨

スパンが2000mを超える超長大橋梁の設計においては、耐風安定性の確保することが最重要課題の一つである。そこで本報告書では、中央開口部を有する二箱桁断面に着目して、その空気力特性の改善を目的としたバネ支持模型実験を実施するとともに、有効な対策を実施した断面については、三分力試験、非定常空気力計測を行い、多自由度フラッター解析を行った。

キーワード：超長大橋梁，バネ支持模型実験、三分力試験、非定常空気力試験、多自由度フラッター解析

郵便はがき

〒305－□□

五十円切手をはって下さい

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　御中

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3429号　　部

上記のとおり受領しました。

所　属（住所）

氏　名　　印

土木研究所資料第3429号

超長大橋の耐風安定性に関する
調査研究報告書