

土 木 研 究 所 資 料

名港中央大橋の耐風性調査報告書

平成元年 1 月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1988) 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、複写は、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。

名港中央大橋の耐風性調査報告書

構造研究室 室長 横山 功一
研究員 日下部 毅 明
東久保 正 徳

要 旨

愛知県名古屋市に計画中の3径間連続鋼斜張橋である名港中央大橋の設計基本案を対象とし、バネ支持実験およびタウト模型実験を行い、耐風性を調査した。その結果、本設計案は発散振動に対して十分安全であること、一様流中で発現する渦励振はわずかな乱れによって大幅に低減されること、そしてガスト応答に関して今後の確な安全性を十分に考慮した安全性の確認をする必要があることが判明し、結論としては本断面を詳細設計の基本とする点に根本的な問題はないことが明かになった。

キーワード：鋼斜張橋、乱流、部分模型実験、タウト模型実験、三分力試験、耐風性調査

目 次

1. 概 要	1
1.1 名港中央大橋の概要	1
1.2 調査の概要	1
2. 風洞実験による耐風性の検討	5
2.1 二次元部分模型実験	5
2.1.1 実験方法	5
2.1.2 実験条件	6
2.1.3 実験ケースおよび実験結果	6
2.2 タウト模型実験	13
2.2.1 実験方法	13
2.2.2 実験条件	13
2.2.3 乱流の発生	13
2.2.4 実験ケースおよび実験結果	15
2.3 考 察	22
2.3.1 桁断面の基本的な特性	22
2.3.2 構造減衰の影響	22
2.3.3 偏角の影響	22
2.3.4 乱流の影響	22
2.3.5 バネ支持実験とタウト模型実験の比較	22
2.3.6 総合評価と今後の設計の方向	23
3. ま と め	29
謝 辞	30
参考文献	30
《参考資料》	
1. 三分力試験	33
2. 名港東大橋の耐風性	37

1. 概 要

1.1 名港中央大橋の概要

名港中央大橋は、名古屋環状2号線（国道302号）・伊勢湾岸道路の海上部の1部として計画された橋梁であり、名古屋港横断部の中央に位置する。橋梁形式としては6車線を供用する3径間連続鋼斜張橋（290 + 590 + 290 m）が計画されている。名港中央大橋は中央支間590 mを有する長大斜張橋であり、その中央支間長は完成したものと及び工事中のものを合せて世界最長の斜張橋となる。本橋の架設地点の位置図を図-1.1に、一般図を図-1.2に、本橋の周辺航空写真を写真-1.1にそれぞれ示す。

本橋のような長大支間を有する斜張橋は、その構造特性から設計・建設にあたり風に対する安定性について十分な検討が必要である。昭和63年度、土木研究所構造研究室では日本道路公団より、本橋の設計基本案に関する耐風性調査の依頼を受け、2種類の風洞実験を行った。実験の成果を取りまとめここに報告する。

1.2 調査の概要

実験は詳細設計が行われる前の段階の基礎的な断面を対象とする。したがって実験の目的は耐風性の優れた最終的な断面を提案することではなく、詳細設計のための出発点として、おおまかな耐風性を把握しておくものとなる。このような目的から、本調査における実験手法としては、耐風性評価のための最も基礎的な情報が得られるバネ支持実験が適しているものと考え、まずは標準的な方法でこれを行った。

また、近年、耐風性の評価においては、より実際の評価をするために自然風の影響を考慮することが重視されている。これは自然風の変動特性によって①渦励振やギャロッピングといった特定の固有振動モードで揺れる規則的な振動が起りにくくなる、②逆にガスト応答のような不規則振動が起り易くなる、という一般的な傾向があるためである。この乱れによって対風応答特性がどれだけ影響を受けるかは、断面形状や構造特性によって異なり、自然風を考慮した風洞実験によらないと推定が困難である。そこで本橋については乱流中での対風応答特性を把握して的確な耐風設計が可能となることを目指して、クウト模型実験を行いバネ支持実験の結果と合わせて、名港中央大橋の基本断面の耐風性を調査した。図-1.3にそれぞれの実験の役割をまとめる。

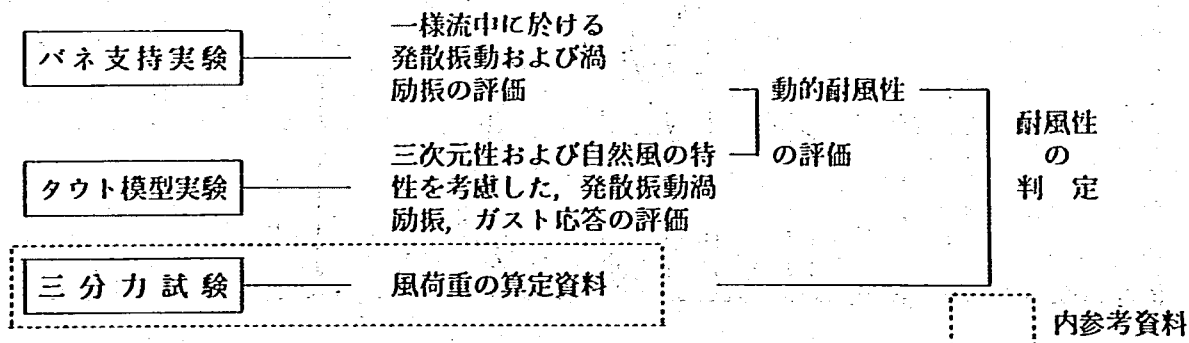


図-1.3 各実験の役割

名古屋港周辺路線図

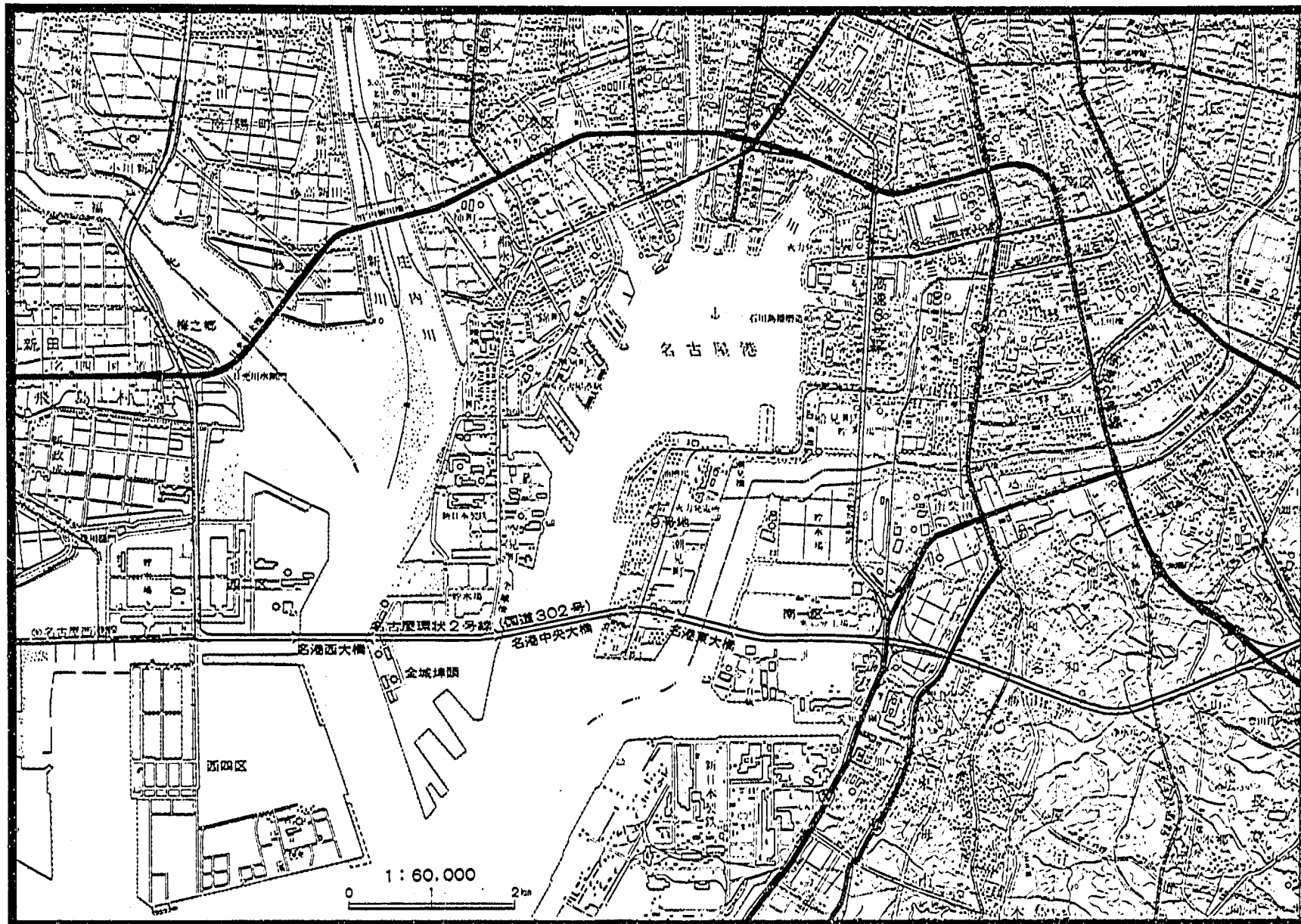
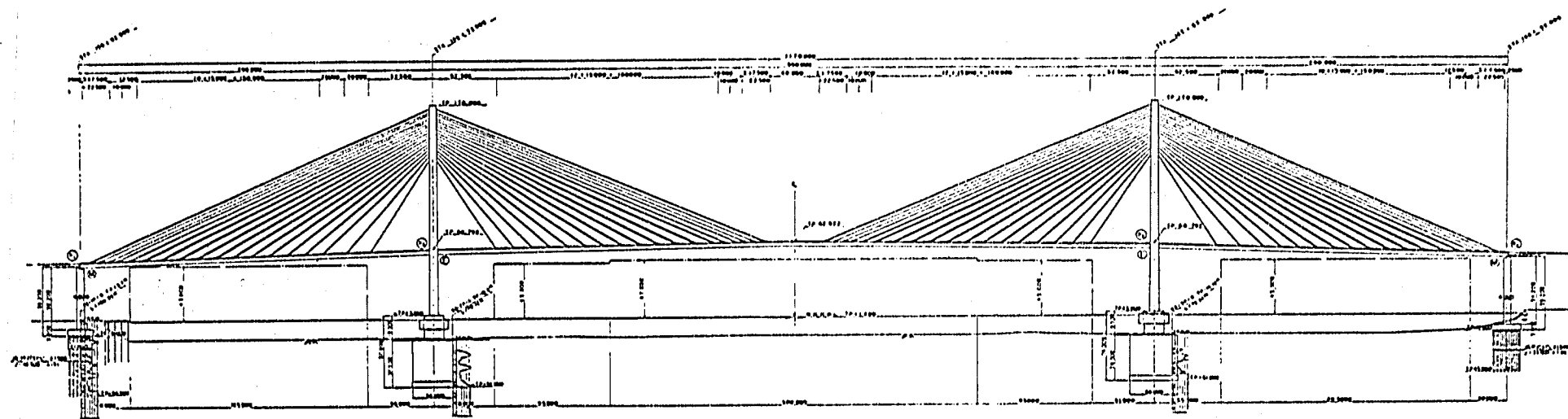
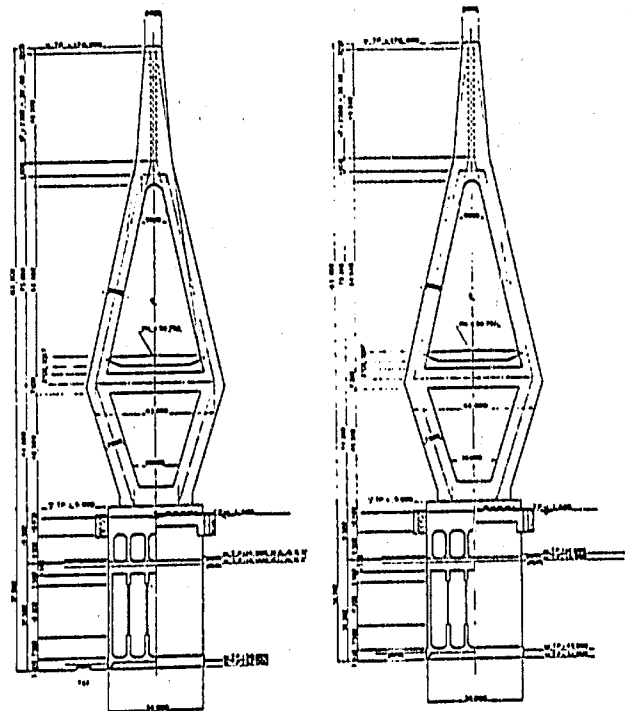


図-1.1 名港中央大橋位置図

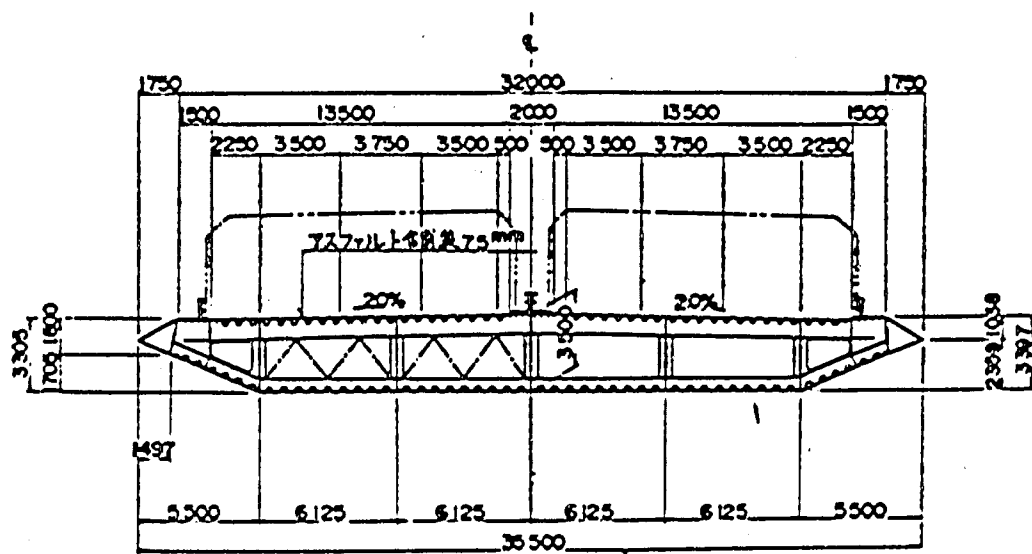


P2 剖面

P3 剖面



塔正面图



桁断面图

图-1.2 名港中央大桥一般图



写真-1.1 名港中央大橋架設地点

2. 風洞実験による耐風性の検討

2.1 二次元部分模型実験

2.1.1 実験方法

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用いて実施した。フラッター風洞の主要諸元を図-2.1および表-2.1に示す。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、通常は一様気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。模型は縮尺1/50とし、8本のコイルバネにより風洞内に支持し、風速および迎角を変化させて設定し、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なった。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クレコードおよびペン書きレコードに記録した。振幅はペン書きレコードの記録紙上に記録された振動振幅を読み取ることによって求めた。今回実施したバネ支持実験の手法の概要を図-2.2に、模型を図-2.3に示す。

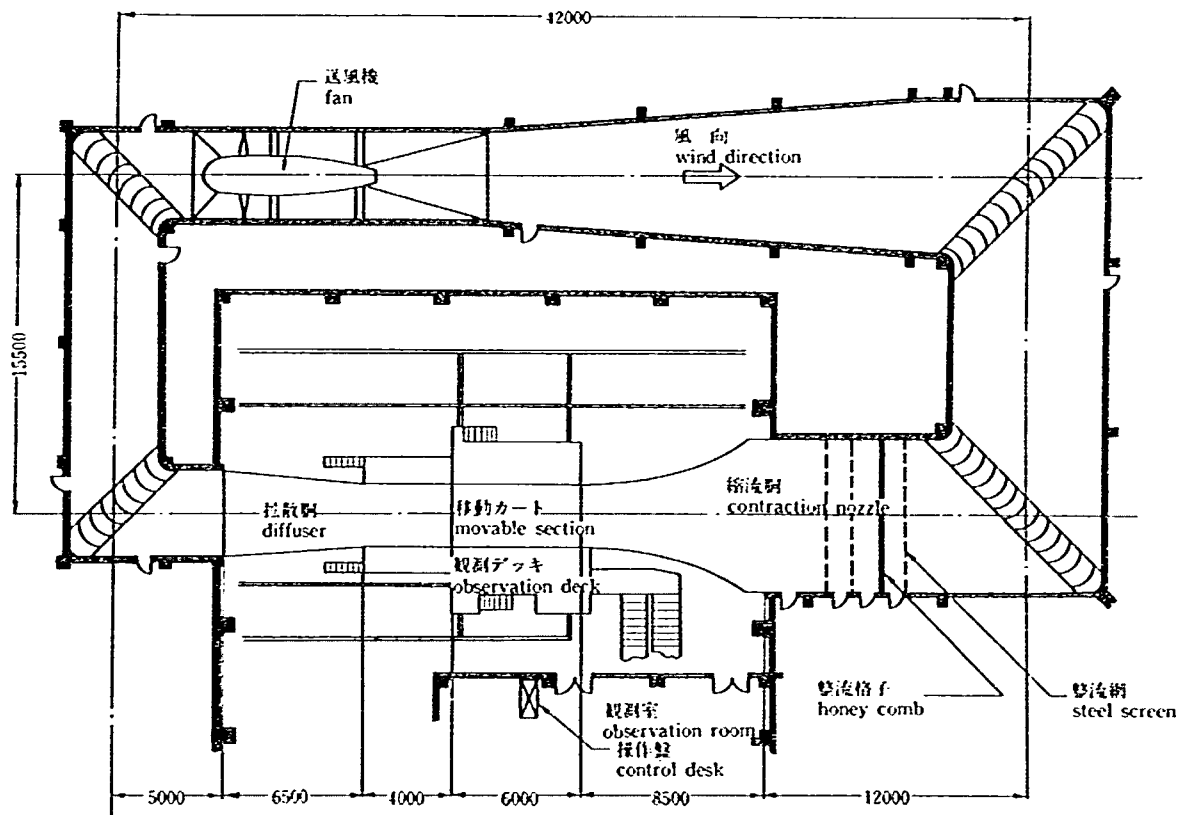


図-2.1 フラッター風洞平面図

2.1.2 実験条件

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とで一致させた。

$$m/\rho B^3, V/N_\eta B, \delta_\eta, I/\rho B^4, V/N_\theta B, \delta_\theta$$

ここに、 m ；単位長さ当りの質量 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 ；極慣性モーメント

添え字 η, θ ；それぞれ鉛直たわみ振動、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に示す。実験では、質量および極慣性モーメント調整は次の手順によっている。まず模型を支持し、加振減衰機を取り付けた状態で全体の振動系としてのバネ定数を、付加質量を変化させて動的な試験により求める。次にこのバネ定数を用いて所要の質量あるいは極慣性モーメントにおける固有振動数を計算し、重錘を調整してその固有振動数に一致させることにより、質量あるいは極慣性モーメントを所要値に合わせる。

ところで、通常の実験においては、連成フラッターを正しく評価できるように、バネ間隔を変えて実橋のたわみの振動数とねじれの振動数との比を合わせる。しかし名港中央大橋ではこの比がかなり大きいためこれを満足することはできなかった。一般に振動数比の大きな橋梁では連成フラッターは発生しないため、振動数比が高い本橋に関しては、これをあわせることはあまり重要ではない。また実験を行った振動数比は、実橋の4.341よりは小さいものの、2.240と十分に大きな値となっているため、実橋で発現しないはずの連成フラッターが実験で発生する可能性も低い。したがって連成フラッターに関連して振動数比が合わなかったことは問題としないと考えた。ただし、フラッターの発現振幅そのものの振動数比の影響をある程度受けるといわれ¹⁾フラッターが生じた場合には別途の検討は必要となる。ここでは必要な場合に別途検討を行うこととして、振動数比は低いままで実験を実施することとした。一方、減衰率に関する相似条件を満足させるためには電磁ダンパーを用い、その電気抵抗値を変化させて所要の減衰率（本橋の構造減衰は $\delta_\eta = \delta_\theta = 0.02$ と設定）に調整した。

2.1.3 実験ケースおよび実験結果

これまで述べたように、今回の実験は標準的な手法で対風応答特性を捉えることが目的であるため、実験ケースとしては、基本的なパラメータである迎角を変化させるものとした。実験ケースおよび実験結果の総括を表-2.3に示し、図-2.4に迎角-発振風速図に実験結果をまとめる。付図-1には主な実験ケースの風速～振幅図（V-A図）を示した。

以下に検討すべき現象に関する結果をまとめる。

(1) 渦励振

渦励振はたわみでは全ての迎角で、ねじれは-3°および5°を除く全ての迎角で発現した。最も頻度が高いと考えられる迎角0°においては、たわみの渦励振振幅が風速6 m/sで18cm程度、ねじれ振

幅が風速 32 m/s で約 1° となった。

(2) 発散振動

実験を行った風速の範囲内では発散振動はたわみに関してもねじれに関しても発現しなかった。

表-2.1 フラッター風洞主要諸元

風 洞 名	フラッター風洞	
Wind Tunnel	Low Speed Wind Tunnel-A	
風洞形式	ゲッチンゲン型	
Type	Göttingen Type	
測定 節 Test Section	幅 Width	2,500mm
	高 Height	4,000mm
	長 Length	10,000mm
風路全長		
Total Path Length	115m	
送 風 機 Fan	動翼直径 Diameter	4,000mm
	有効全圧 Pressure Rise	40.0mmAq
	風 量 Wind Volume	242.0m ³ /sec
	回 転 数 Rotation	400.0rpm
気 流 風 速 Flow	容 量 Power	250.0KW
	Wind Speed	1.0~25.0m/sec
	乱れ率 Turbulence Intensity	0.5%

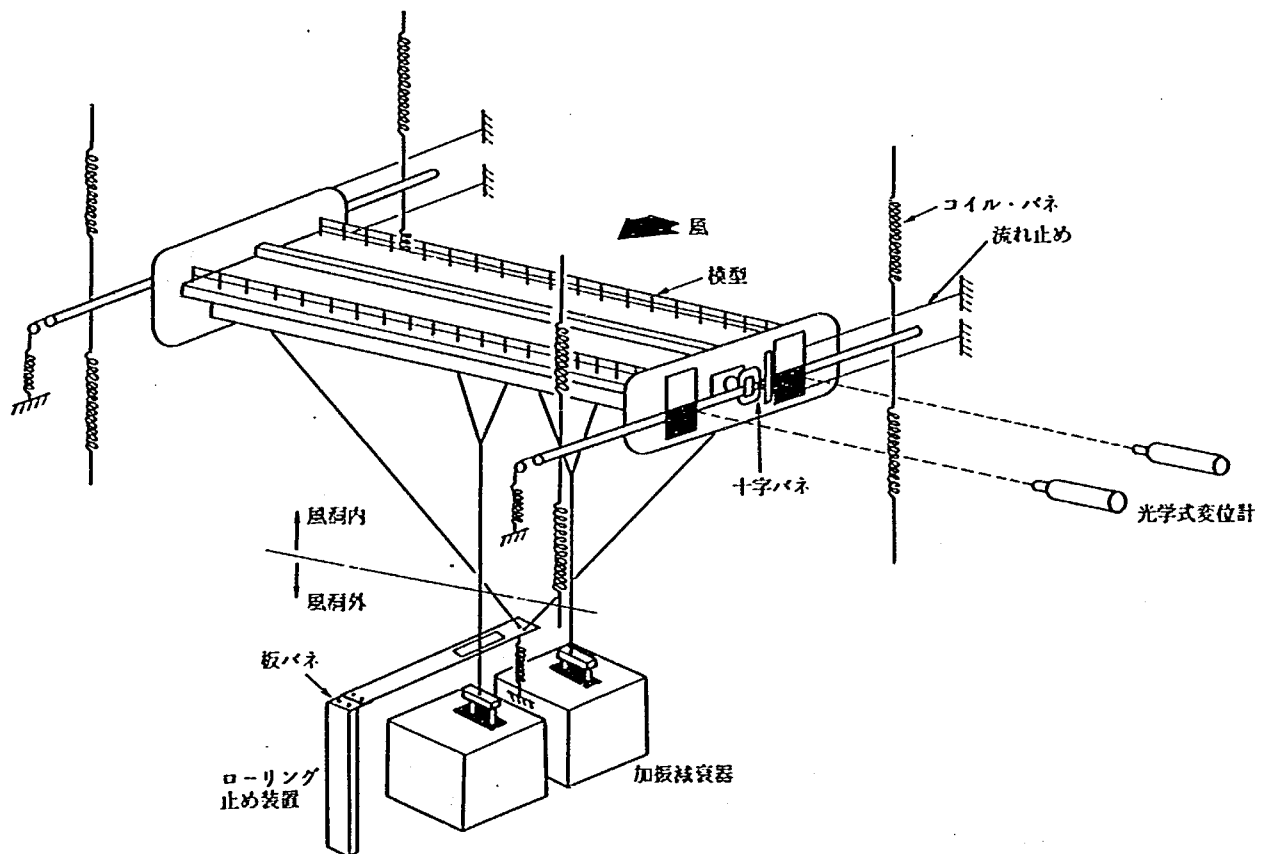
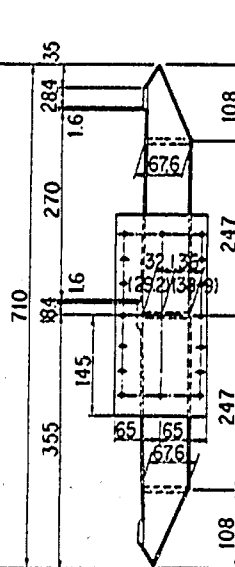
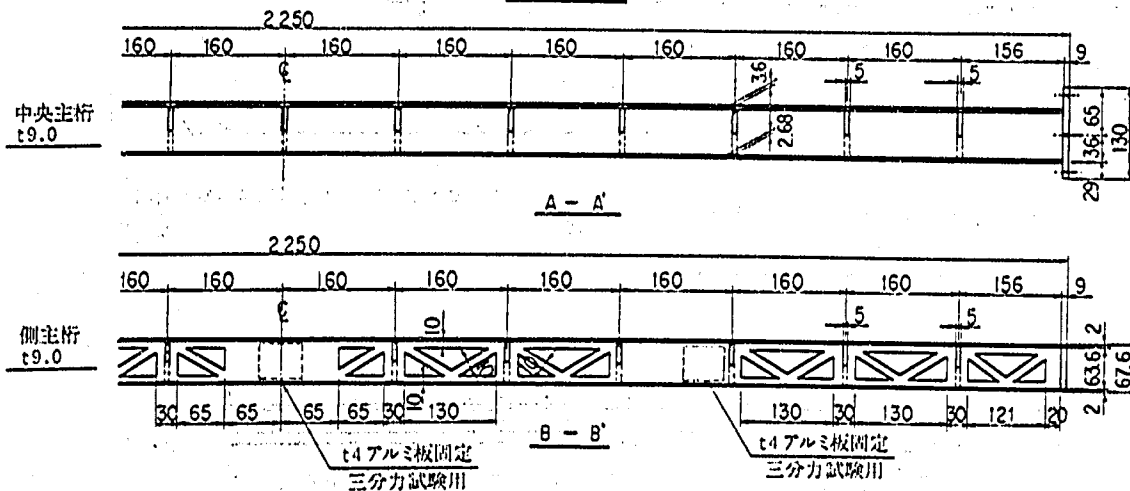
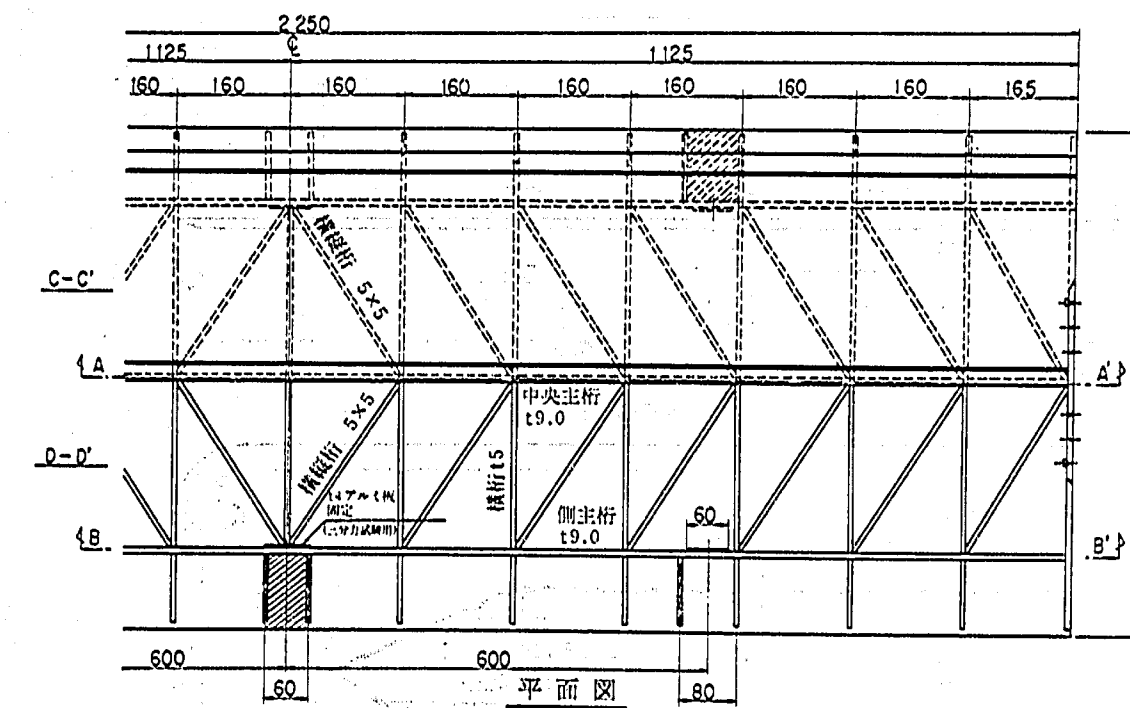
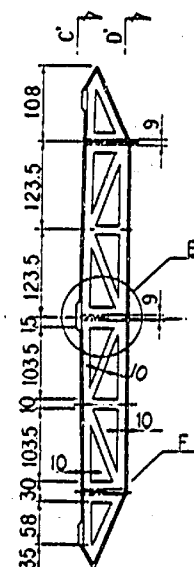


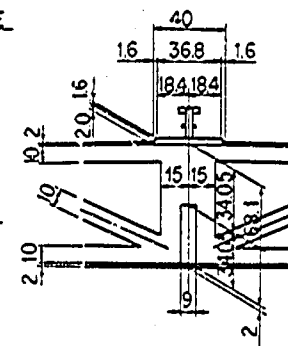
図-2.2 バネ支持実験方法の概要



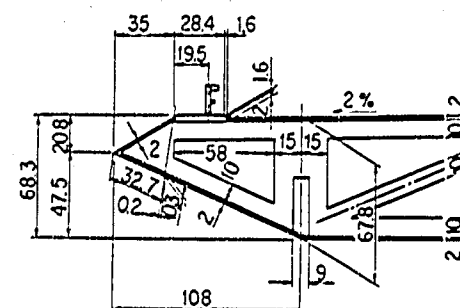
側面図



断面图



E 詳細図



F 詳細図

特記

1. 本体の材料は桧とする。
2. 中央主桁、側主桁及び横桁材は3枚複層板とする。
3. 三分力試験用フック取付金具取付時は、下部板材(斜線部)を着脱式にする。

通常実験と三分力試験用
に各2枚製作

図-2.3.1 名港中央大橋模型図(その1)

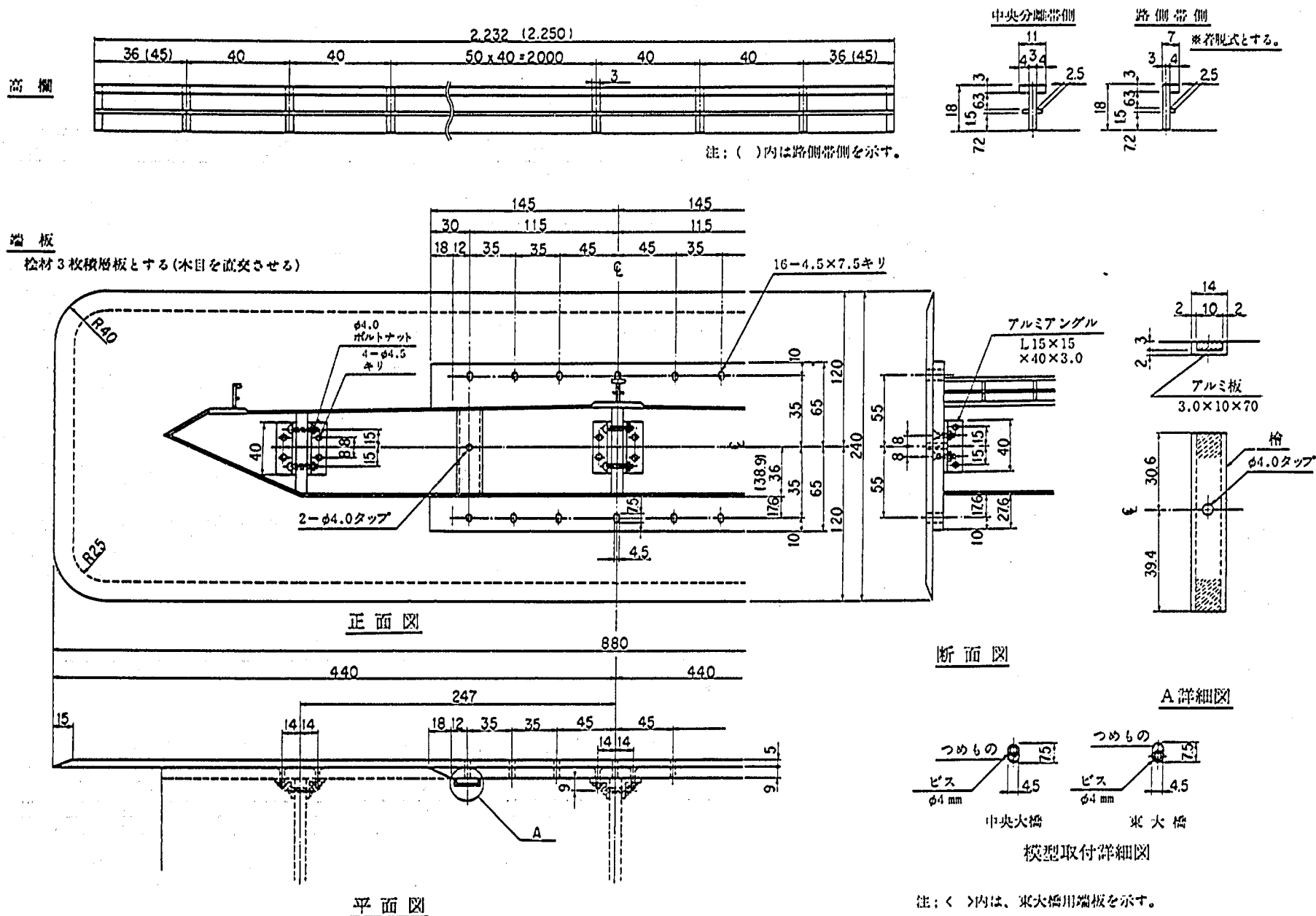


図 - 2. 3. 2 名港中央大橋模型図 (その 2)

表-2.2 実験条件 (名港中央大橋)

	実 橋	模 型
縮 尺	—	1/50
重 量	28.11 t/m	25.30 kg/model
極 慣 性 モ ー メ ン ト	302.4 tms ² /m	0.1089 kg ms ² /model
振 動 数		
たわみ1次 (逆対称)	0.179 Hz	1.713 Hz
ねじれ1次 (対 称)	0.777	3.838
振 動 数 比	1/4.341	1/2.240
桁 幅 (B)	35,500 mm	710 mm
桁 高 (D)	3,500 mm	70 mm

注：振動数比以外の模型値は相似則から求められる所要値に一致している。

表-2.3 実験ケース及び結果

実験番号	迎角 (°)	構造減衰	渦 励 振 特 性		発散振動発現風速	
			上段：発現風速 (m/s) 下段：最大振幅 (cm, °)		た わ み	ね じ れ
			た わ み	ね じ れ		
1	-7	0.02	発現せず	16.5 ~ 48.6 0.100	発現せず	発現せず
2	-5		3.1 ~ 4.6 2.8	発現せず		
3	-3		4.3 ~ 5.7 3.5	発現せず		
4	-1		2.6 ~ 7.0 12.1	24.2 ~ 51.9 0.313		
5	0		4.5 ~ 6.9 17.3	24.7 ~ 47.0 0.875		
6	+1		3.4 ~ 7.3 16.9	22.8 ~ 50.8 0.720		
7	+3		4.3 ~ 7.3 19.4	23.1 ~ 69.4 0.833		
8	+5		4.0 ~ 6.6 11.1	25.9 ~ 47.1 0.854		
9	+7		4.6 ~ 6.3 14.6	28.1 ~ 42.8 1.333		

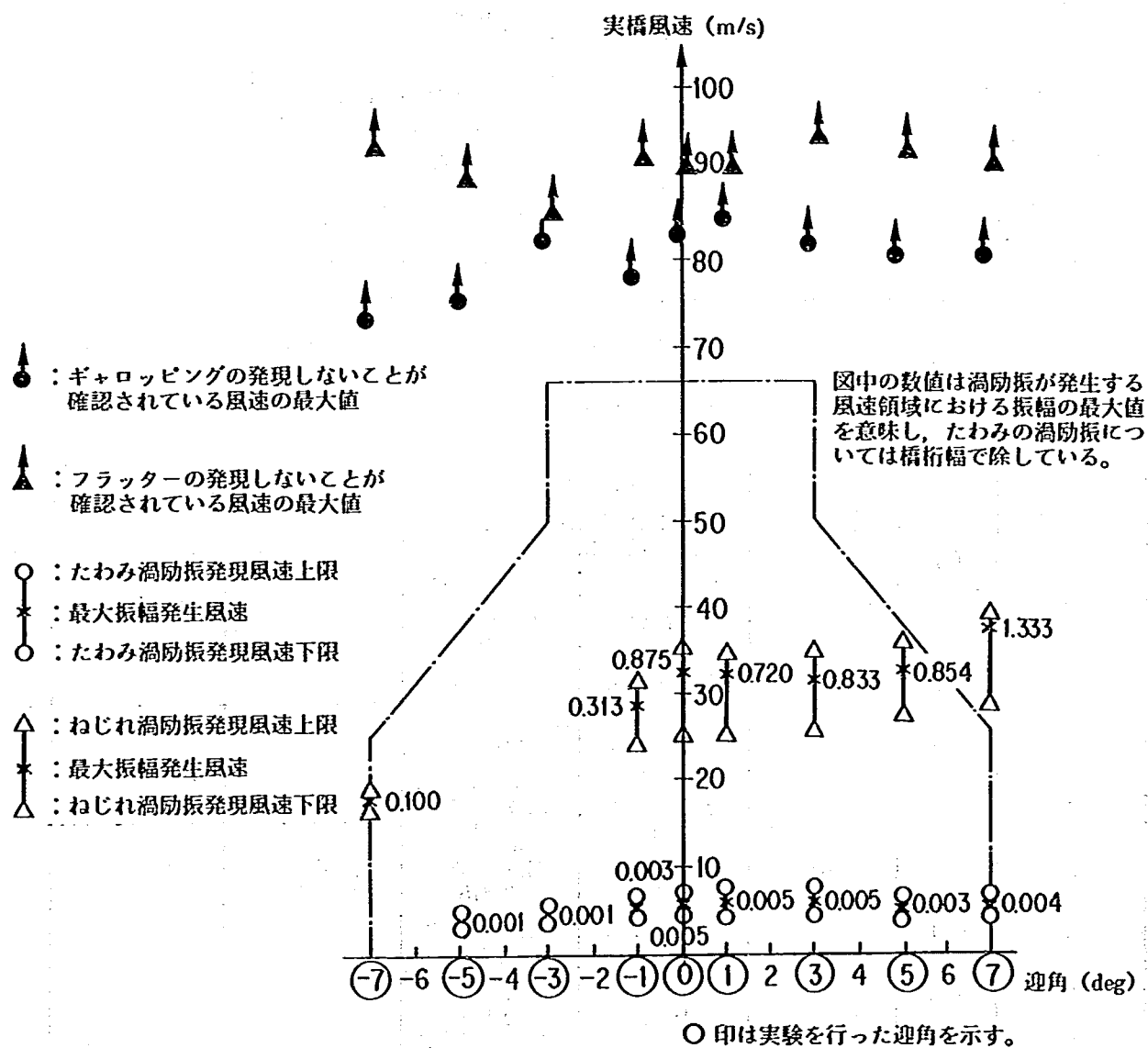


図-2.4 迎角-発振風速関連図

2.2 タウト模型実験

2.2.1 実験方法

実験に使用した風洞はバネ支持実験と同じフラッター風洞である。模型は縮尺1/300とし、2本のピアノ線および1本の剛性棒で支持し必要な剛性を与えている。実験では風速、水平偏角および気流の特性等を変化させて設定し、各設定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および架設地点の自然風の特性を考慮した2種類の乱流である。風速は熱線風速計を用いて気流解析し、対風挙動の測定時にはあらかじめ熱線風速計で求めた平均風速と送風機の回転数の関係をもとに設定した。模型の挙動は模型に取り付けた二つの豆電球をターゲットとし、2台の光学式変位計により測定し、この出力の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取ることによって求めた。今回実施したタウト模型実験の手法の概要を図-2.5に示し、模型を図-2.6にそれぞれ示す。

2.2.2 実験条件

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とで一致させた。なおこの相似則はバネ支持実験のそれと同じであり、以下に示すものとなる。

$$m/\rho B^3, V/N_s B, \delta_s, I/\rho B^4, V/N_\theta B, \delta_\theta$$

ここに、 m ；単位長さ当りの質量

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 ；極慣性モーメント

添え字 η, θ ：それぞれ鉛直たわみ振動、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-2.4に示す。実橋の振動数比はかなり高く、模型の制約から調整することが出来なかった。従って風速倍率はたわみ振動とねじれ振動では異なるものとなった。また極慣性モーメントについても、所要値と実測値が模型の制限から幾分小さめとなったが、許容できる範囲と考えた。

2.2.3 乱流の発生

(1) 気流選定の方針

乱流の選定においては名港西大橋において実施されている風観測の資料を用いた²⁾。現地観測によると、名港西大橋における乱れ強さの分布およびパワースペクトル密度関数（以降 PSD と略）は、それぞれ図-2.7、8のようになる。今回の検討において、自然風の設定の方針は、渦励振の評価においては小さめの乱れ強さの気流を用い、ガスト応答の評価においては大きめの乱れ強さの気流を用いることとした。これは乱れ強さが大きいほど渦励振は低減され、ガスト応答振幅は増大することから、安全側の評価となるように配慮したものである。こうして気流としては、表-2.5のような目標を設定し、既存の実験で用いた気流の中からこれに近いものを選び、模型支間中央位置で気流解析を

行い、目的に適した特性を有することを確認することとした。

(2) 気流解析結果

表-2.6に今回の気流の特性を、図-2.9にPSDを示す。この結果より乱流Ⅰについては乱れ強さについても、PSDに関してもほぼ目標に近い気流が得られたものと考えられる。乱流Ⅱに関しては I_u がやや小さめとなったが I_w およびPSDはかなり良い一致が得られている。乱流Ⅱはガスト応答を照査するための気流であり、ガスト応答に関しては I_w が重要であるので、乱流Ⅱに関しても目的に合った気流と考えられる。

表-2.4 実験条件

	実 橋	模 型 所 要 値	模 型 実 測 値
縮 尺	—	1/300	—
重 量	28.11 t/m	3.12 g/cm	3.09 g/cm
極慣性モーメント	302.4 tms ² /m	0.0373 kg ms ² /model	0.0326 kg ms ² /model
振 動 数 た わ み 1 次 ね じ れ 1 次	0.179 Hz 0.777	—	6.19 ~ 6.94 Hz 13.76 ~ 15.02
振 動 数 比	1/4.341	1/4.341	1/2.05 ~ 1/2.38
桁 幅 (B)	35,500 mm	118.3 mm	118.3 mm
桁 高 (D)	3,500 mm	11.7 mm	11.7 mm

表-2.5 目標とした乱流

	I_u	I_w	P S D
乱流Ⅰ	5 %	3 %	z_0 : 0.001 相当
乱流Ⅱ	15 %	8 %	z_0 : 0.4 相当

表-2.6 実験に用いた乱流

	I_u	I_w	P S D
乱流Ⅰ	5.4 %	4.7 %	$u : z_0 = 0.001$ 相当 $w : 0.01$ "
乱流Ⅱ	11.5 %	9.6 %	$u : z_0 = 0.4$ 弱相当 0.4 相当

2.2.4 実験ケースおよび実験結果

実験は、水平偏角、構造減衰および気流の種類を変化させて行った。実験結果の総括を表-2.7に示す。さらに、主な実験ケースの風速～振幅図（V-A図）を付図-2に示す。実験ケースの中で№6および7は、タウト模型の剛性棒の支点を取り去り、構造減衰を小さくしたものであり、模型の剛性は他の実験ケースよりも小さくなっている。以下に検討すべき現象に関する結果をまとめる。

(1) 渦励振

渦励振はたわみ振動が発現した。しかしねじれ振動では、構造減衰のかなり低い実験ケースでのみ発現した。発現風速はたわみが約6～9 m/s、ねじれが20 m/sあるいは30 m/sで、振幅はたわみが最大で47 cm、ねじれが0.84°であった。渦励振発現風速域はかなり狭い。

乱流中ではたわみの渦励振は発現しなかった。ねじれについても、乱流Ⅰの場合に $\delta = 0.007$ のケース（№6）以外では渦励振は発現していない。ケース№6は剛性棒の端部の拘束を排除したもので、曲げ剛性およびねじれ剛性は他の実験よりも小さい。しかし、実験ケース№1では構造減衰 $\delta = 0.009$ であり、乱流の影響を評価するためには、 $\delta = 0.016$ である実験ケース№4よりも№6の実験ケースのほうが適当であると考えた。

(2) 発散振動

発散振動はたわみ、ねじれ振動ともに発現しなかった。

(3) ガスト応答

乱流中ではガスト応答が発現した。ガスト応答の振幅は乱れ強さが大きいほど大きくなった。乱流Ⅱ、風速55 m/sにおいて、その振幅はたわみ、ねじれそれぞれ最大で163 cm、0.85°、標準偏差で44 cm、0.20°であった。

表- 2.7 実験ケース及び結果

実験 番号	気流	構 造 減 衰	水平 偏角 (°)	渦 励 振 特 性		ガス応答振幅 (at 風速55m/s)	
				上段：発現風速 (m/s) 下段：最大振幅 (cm, °)		上段：最大振幅 下段：RMS	
				たわみ	ねじれ	たわみ (cm)	ねじれ (°)
1	一 様 流	0.019 0.009	0	8.1 45	20.4 0.84	—	—
2		0.033 0.013	20	8.1 7	発現せず		
3		0.025 0.023	0	7.3 32	発現せず		
4	乱 流 I	0.031 0.016	0	6.3 4	発現せず	95 25	0.35 0.10
5		0.029 0.011	20	6.3 4	発現せず	94 34	0.35 0.15
6		0.024 0.007	0	6.5 5	31.5 0.3	92 26	0.30 0.15
7		0.040 0.043	0	発現せず	発現せず	140 34	0.25 0.10
8		0.030 0.015	0	発現せず	発現せず	163 44	0.85 0.20
9		0.027 0.012	10	発現せず	発現せず	153 53	0.60 0.20
10		0.028 0.010	20	発現せず	発現せず	144 55	0.65 0.25

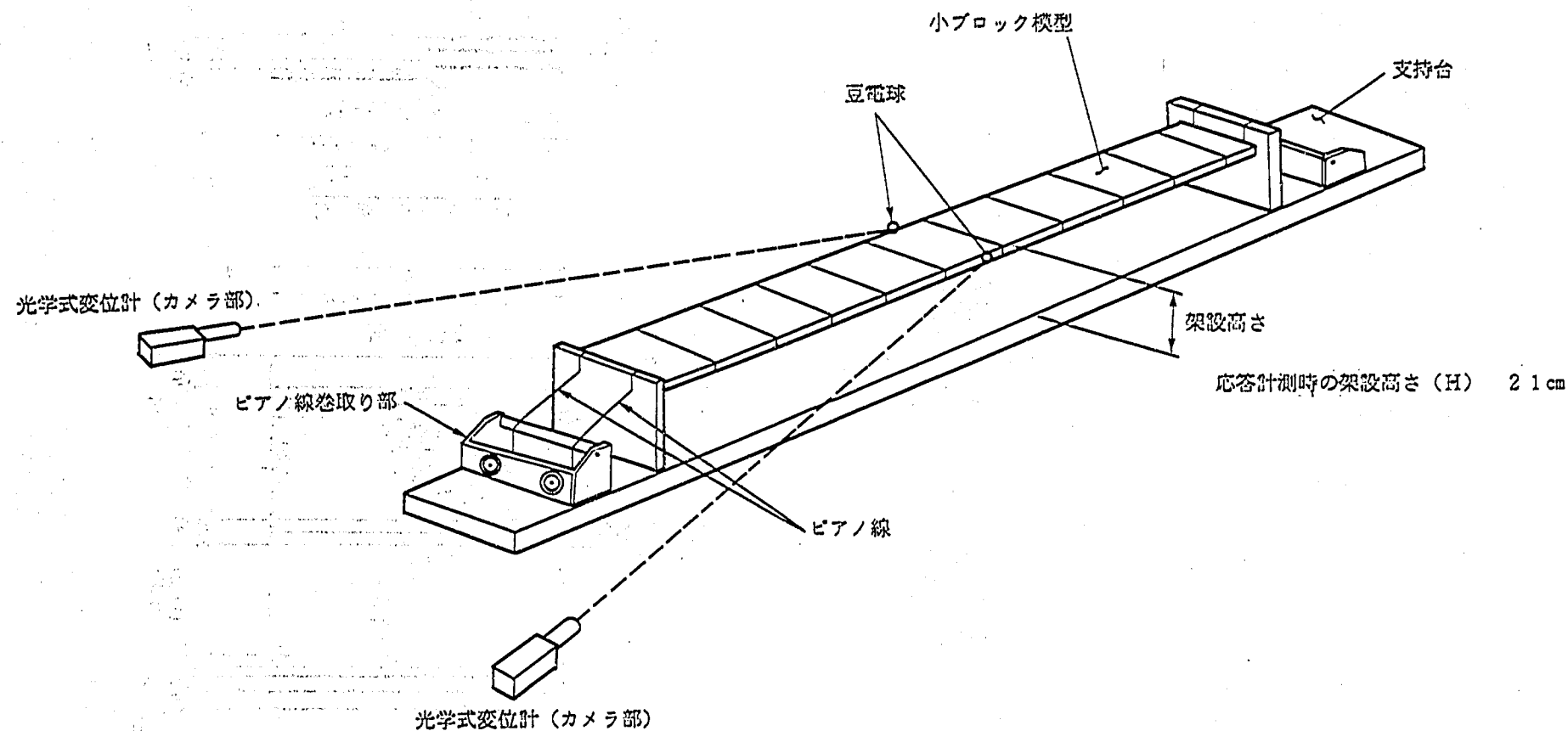


図-2.5 タウト模型実験概要図

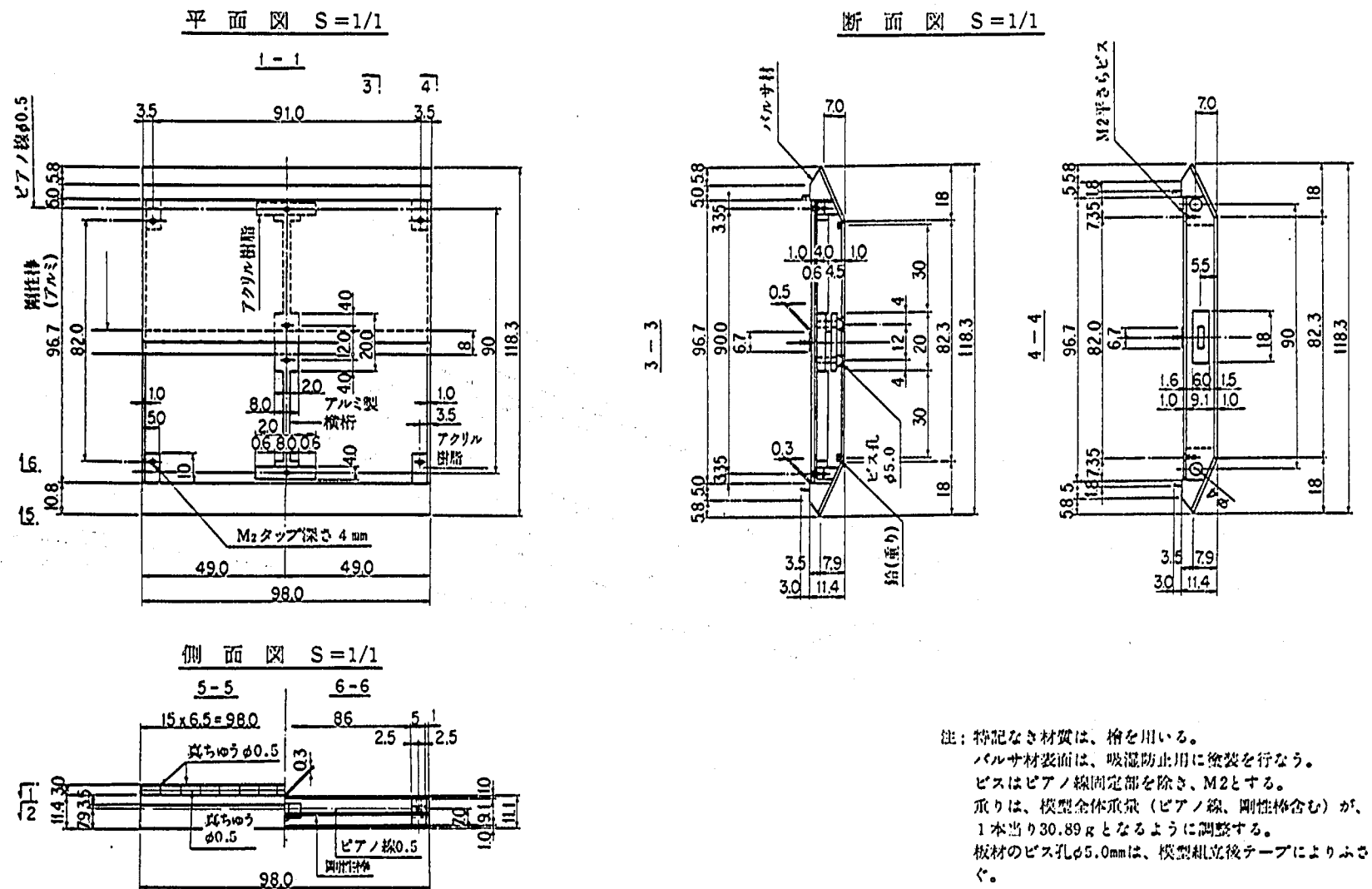
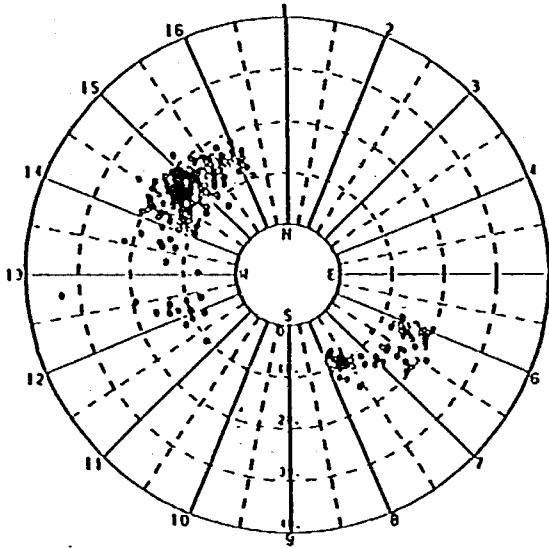


図-2.6.2 名港中央大橋タウト模型図(その2)

風向-乱れ強さ $I_u(1/2)$ (%)



風向-乱れ強さ $I_w(1/2)$ (%)

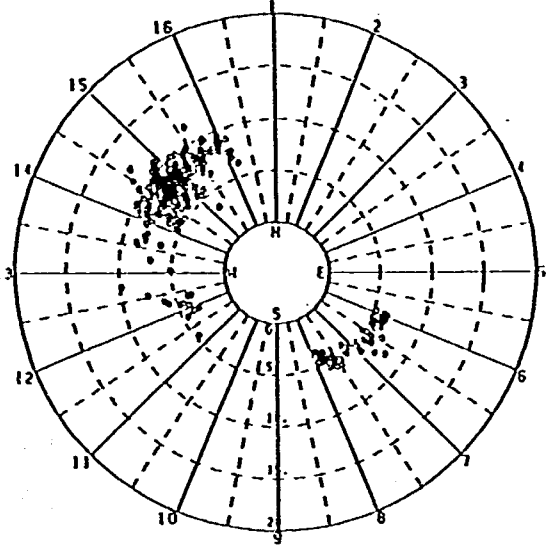
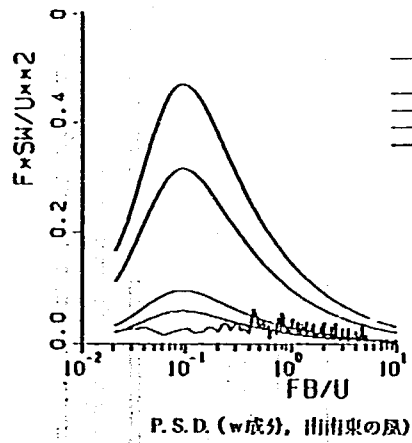
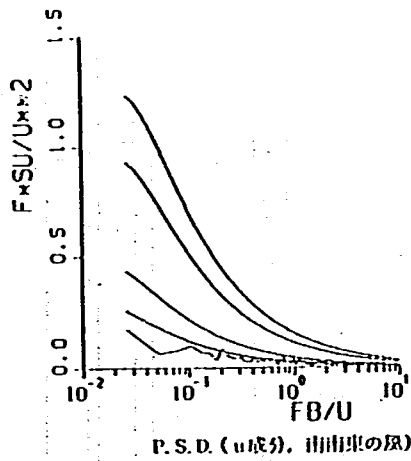
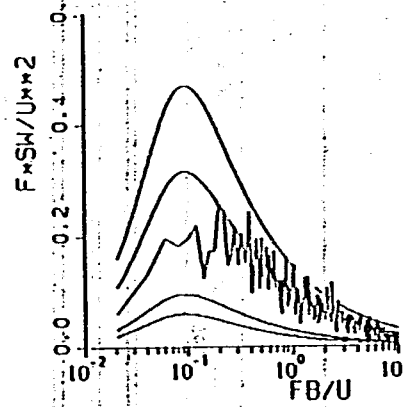
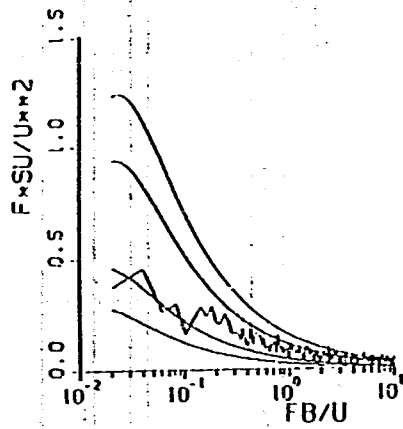


図-2.7 名港西大橋における乱れ強さ



(a) 海からの風



(b) 内陸からの風

図-2.8 パワースペクトル密度関数

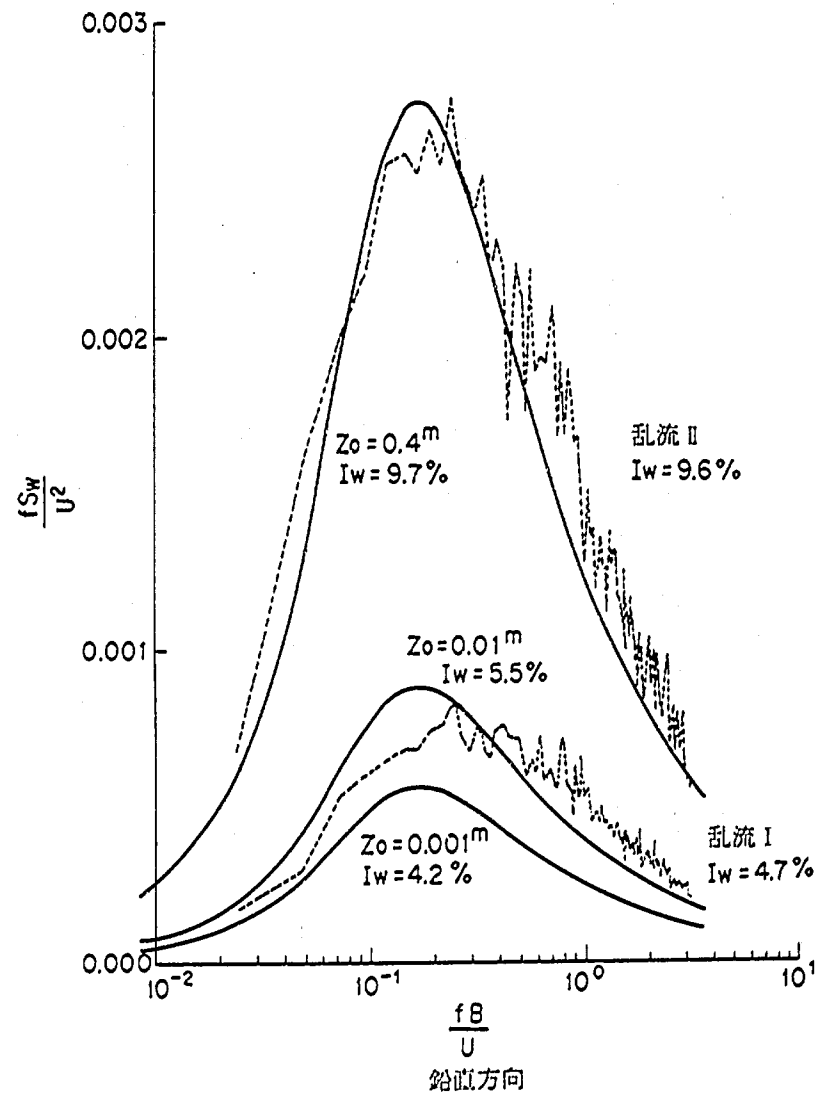
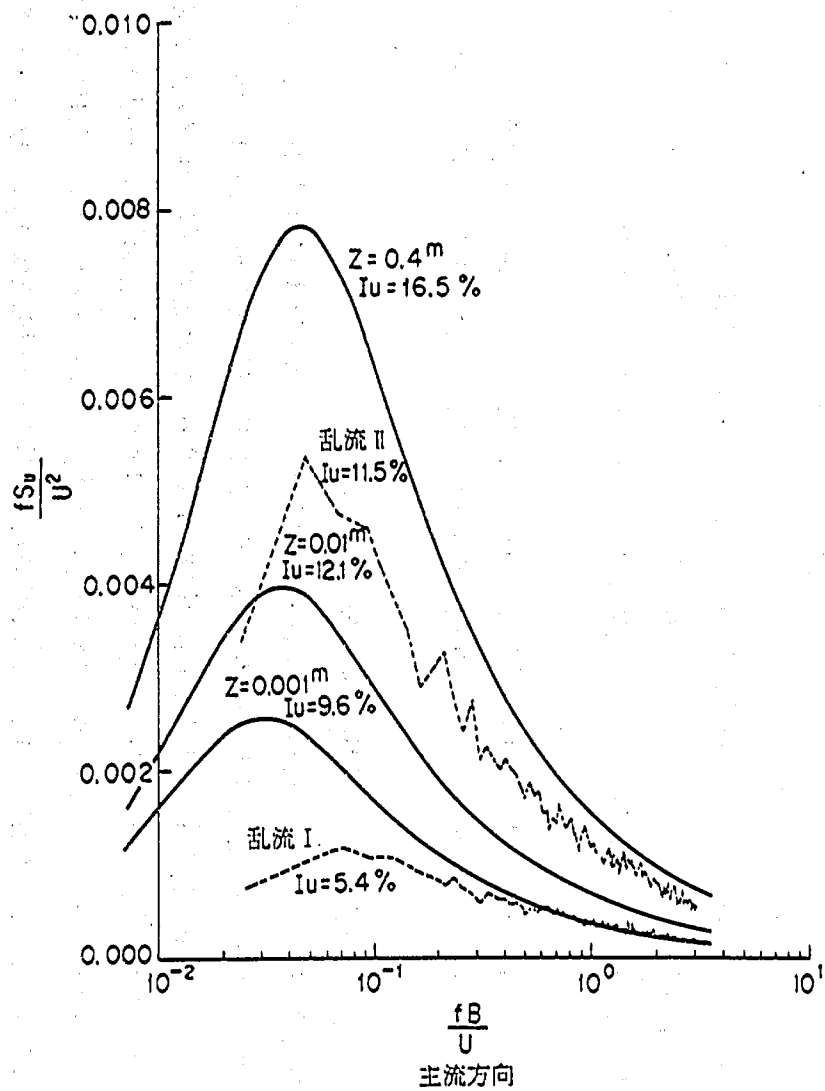


図-2.9 実験に用いた気流のパワースペクトル密度関数

2.3 考 察

ここではバネ支持実験およびタウト模型実験の両方の結果から名港中央大橋の基本断面の耐風性を評価する。なお、タウト模型実験では所要の実験条件を満たすことのできないケースがあった。したがって、タウト模型実験の結果の考察においては実験条件の影響を考慮しなければならない。これについては、検討項目ごとに必要に応じて考慮することとした。

2.3.1 桁断面の基本的な特性

図-2.10に迎角と渦励振振幅の関係を示す。このように 0° の迎角で最大振幅に近い振動が発生する。したがって、架設地点で一樣流に近い風が吹くならば、本橋は渦励振が発現しやすいと言える。

2.3.2 構造減衰の影響

構造減衰の影響をたわみ振動に関し図-2.11に示す。渦励振に関しては、たわみで振幅が低減した。一方ねじれでは表-2.7より消滅することがわかる。ガスト応答に関しては有意な差は見られない。

2.3.3 偏角の影響

水平偏角の影響を図-2.12に示す。渦励振に関しては水平偏角が 0° の場合に最も振幅が大きくなることがわかる。一方ガスト応答に関しては、表-5によると乱流Ⅰで水平偏角が 20° の場合の方が 0° の場合よりも大きくなっているケースが見られるが、乱流Ⅱでは 0° で最も大きい。しかし、図-2.12.2によるとこういった傾向は必ずしも有意なものとは捉えられず、水平偏角が 0° の場合を考えて本橋の耐風性の評価を行っても実際的な問題は発生しないと考えられる。

2.3.4 乱流の影響

自然風を考慮した実験のために、乱流を2種類用意したが、先に述べたように乱流Ⅰはおもに渦励振の評価のために、乱流Ⅱはガスト応答の評価のために用意された。

図-2.13のV-A図の対比図に、自然風の影響を示す。たわみ振動に関しては、主流方向の乱れ強さが5.4%の乱流Ⅰによって渦励振の発現が見られなくなり、ガスト応答が見られるようになる。ガスト応答に関しては乱れの大きい乱流Ⅱ（主流方向乱れ強さ11.5%）の場合の方が乱流Ⅰの場合よりも大きくなる。

一方、ねじれ振動に関しては一樣流中で発現していた渦励振が乱流Ⅰでも発現しているが、振幅は一樣流中の 0.8° に対し、 0.3° と小さくなっている。ガスト応答も乱れ強さが大きくなるに従って大きくなる。

2.3.5 バネ支持実験とタウト模型実験の比較

バネ支持実験では図-2.4の迎角-発振風速図に示すように、発散振動は発現しなかった。渦励振は、迎角 0° においてたわみの渦励振が風速6 m/sで18 cm程度、ねじれが風速32 m/sで約 1° 発現した。

この結果と一樣流中におけるタウト模型実験の結果を比較する。まず発散振動についてはバネ支持実験と同様に発現しなかった。次にたわみ渦励振の発現風速はタウト模型実験のほうがやや大きめであるが、おおよそ一致している。振幅はタウト模型実験がバネ支持実験の2倍となった。これは振動モードの影響によるものであり、実橋の振幅として評価する場合にはタウト模型実験の結果の方がより参考に

なると考えられる。

一方ねじれモードの渦励振に関しては、最大振幅の発現風速がやや異なり、20 m/sであったが、この風速はバネ支持実験における渦励振の発現風速域の下限付近である。なお、振幅は 0.8° であり、これはバネ支持実験の結果とほぼ同じであるが、構造減衰が0.009とかなり小さいため、振幅の比較はできない。

2.3.6 総合評価と今後の設計の方向

(1) 渦励振

たわみ渦励振は、一様流中ではかなり大きな振幅で発現した。一方、自然風の影響を考慮した場合、この振動はわずか5.4%の乱れ強さを有する乱流で消滅した。またねじれの渦励振は構造減衰が極めて小さい実験ケースのみで発現し、5.4%の乱れによって大幅に低減された。これらのことから、本橋の現設計断面は自然風によって振動が起こりにくくなる断面であると考えられる。

(2) ガスト応答

ガスト応答については、その評価方法が確立していないが、少なくとも低風速での使用性と高風速での初通過破壊については考察が必要となる。低風速においては風速20 m/sを考慮すべき上限値とすれば、たわみ振幅は最大17cm、平均的には9cm程度となる。これは加速度にして最大でも20 gal程度であることを意味し、使用性からはそれほど問題は無いと考えられる。一方、高風速においては、55 m/sの風速を照査風速とすれば、たわみ振幅は最大で163cmにも達し平均では44cm、ねじれでは最大で 0.85° で平均で 0.20° であった。参考として活荷重による主桁変位を求めると、たわみは144cm、ねじれは 0.374° である。したがって、最大振幅に関しては活荷重による変形量を越える振幅が発生する恐れもあり、高風速時の気流の特性の考察を含め、妥当な安全性レベルを考慮した上で応力的な照査を行う必要がある。

(3) 総合評価と今後の方向

以上のように、名港中央大橋については発散振動に対して十分安全であることが確かめられた。また渦励振に関しても、自然風の影響によって渦励振はかなり抑えられると予想され、現断面を基本としても良いと考えられる。ガスト応答に関しては、かなり大きな振動が高風速時に発現し、問題の全てが解決したとは言えないが、これはむしろ断面形状のためと言うよりは、振動数がかかなり低いことに起因すると考えられる。これらより、現断面を今後の設計のための基本断面とすることは妥当であると考えられる。

ただし渦励振の振幅は、ばね支持実験ではかなり大きな渦励振が発現しており、タウト模型実験がかなり高い風速倍率で行われたことを考慮すると、渦励振が自然風の影響で完全に消滅すると断定するのはやや危険である。特に渦励振の発現の様相は検査車レールのような微小な部材によって大きく変わることがあり、詳細な設計を進めるにともない、その設計案の耐風性も今回の実験結果と異なったものとなって行く可能性がある。したがって今後は、渦励振の振幅低減効果やガスト応答の発現といった、乱流の効果に配慮しつつ、一様流中でもより対風応答特性に優れた断面が得られる方向に設

計を進め、風洞実験によって耐風対策、例えばフラップの効果も併せて検討して行くことが望ましい。

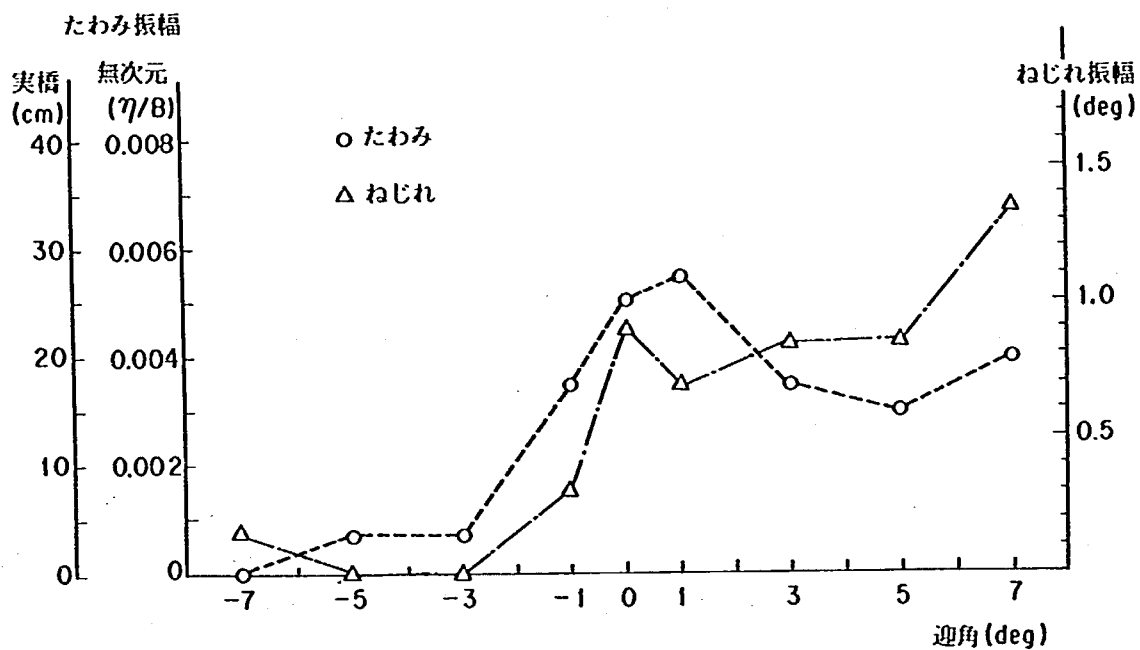
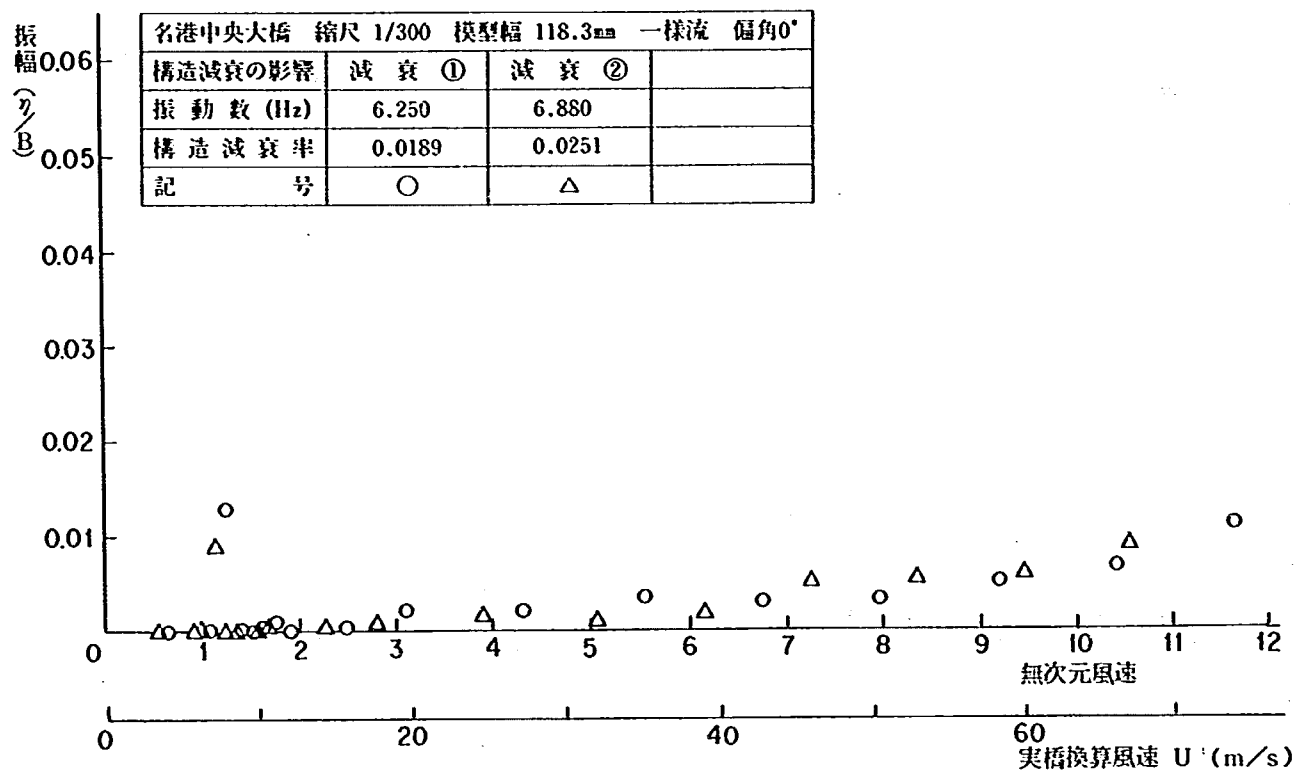
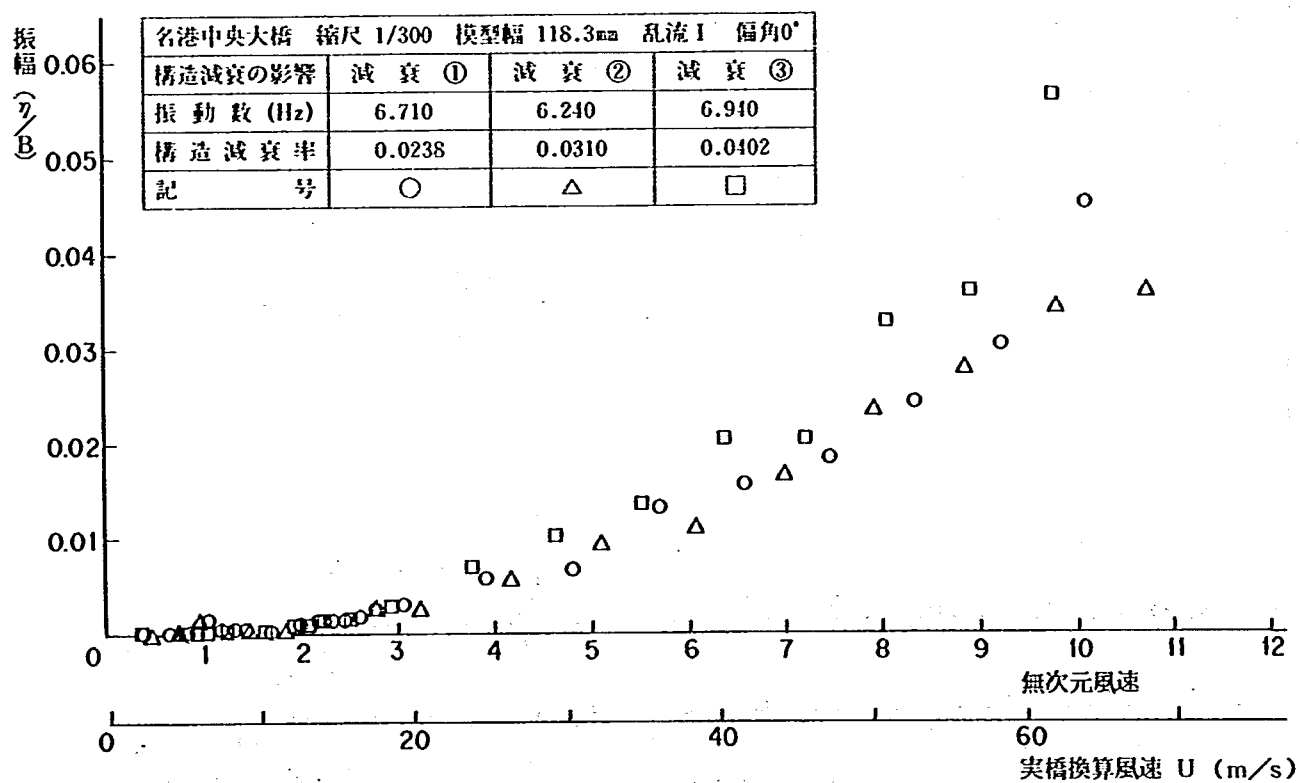


図- 2.10 迎角一渦励振振幅関係図 (名港中央大橋)



(a) 一様流



(b) 乱流 I

図-2.11 構造減衰の影響

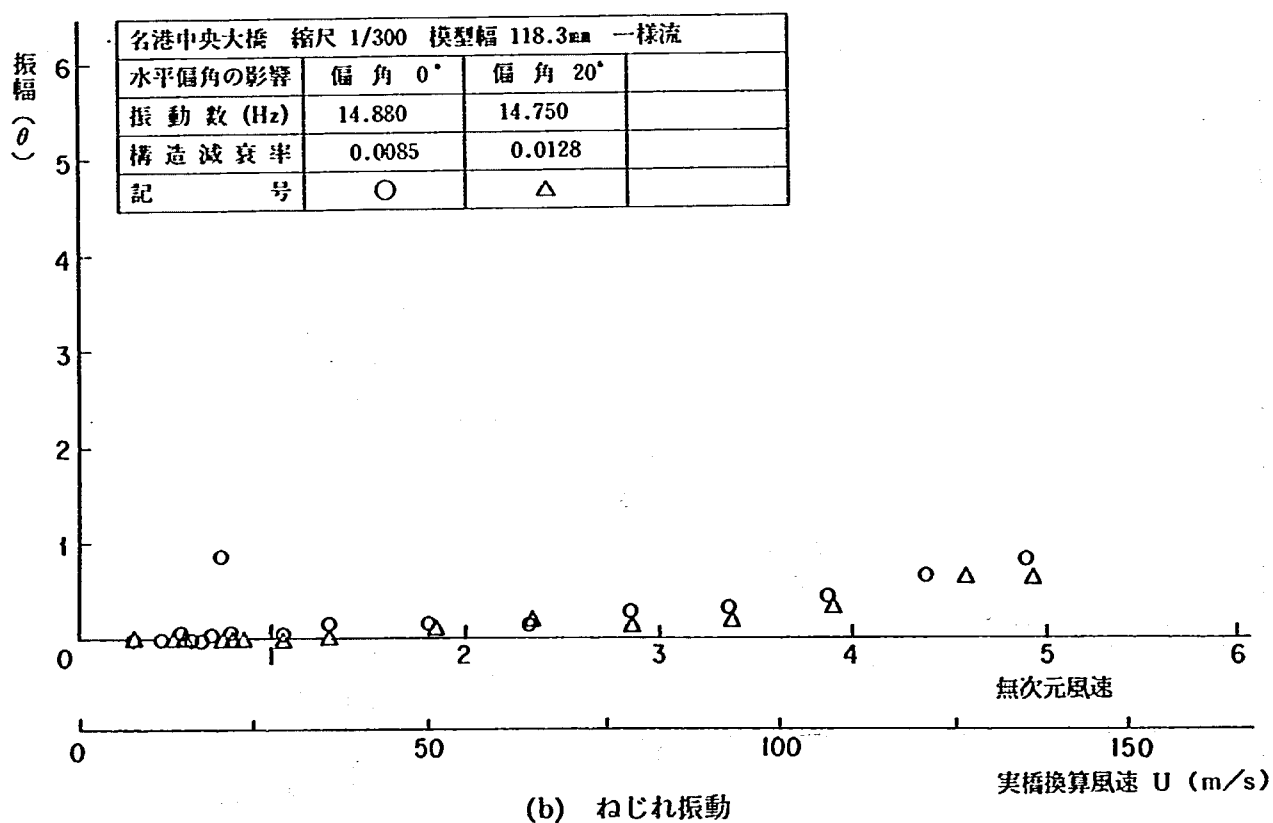
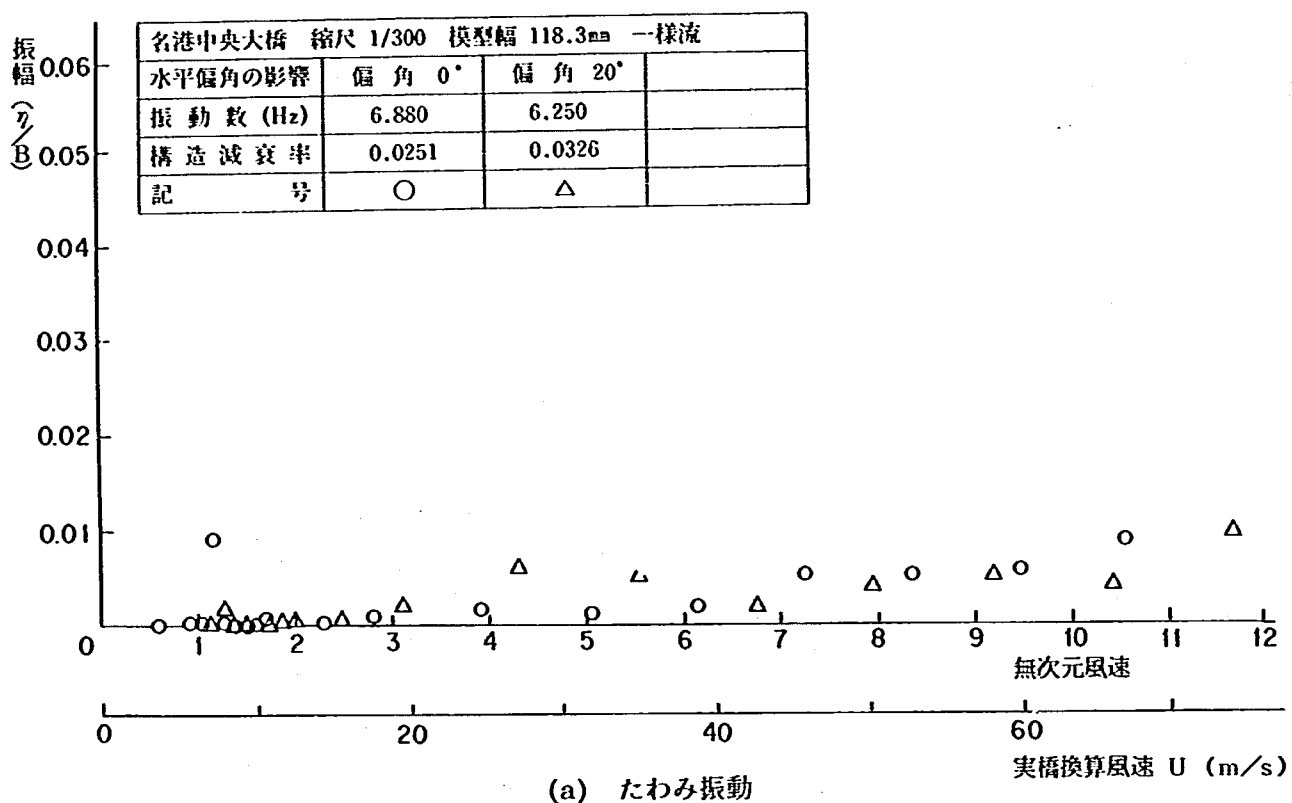


図-2.12.1 水平偏角の影響 (一様流)

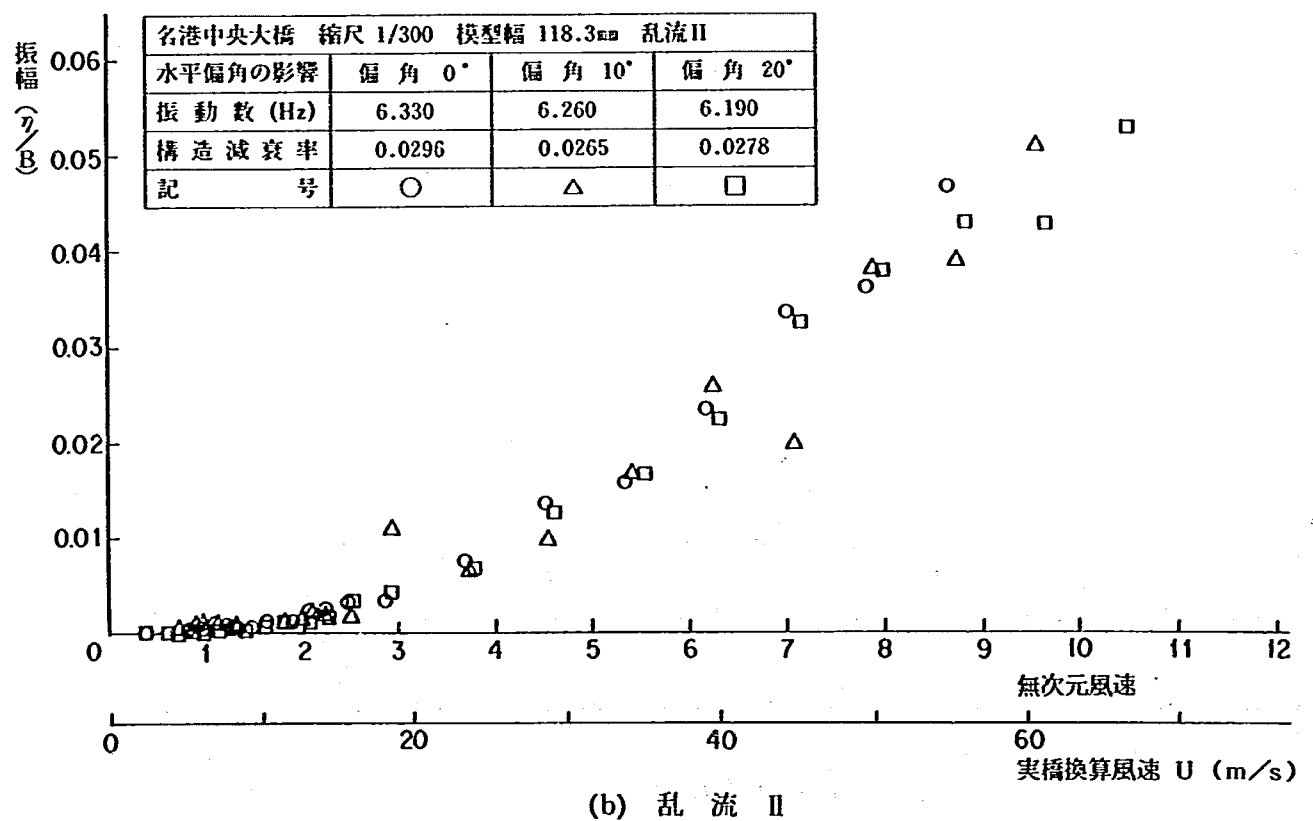
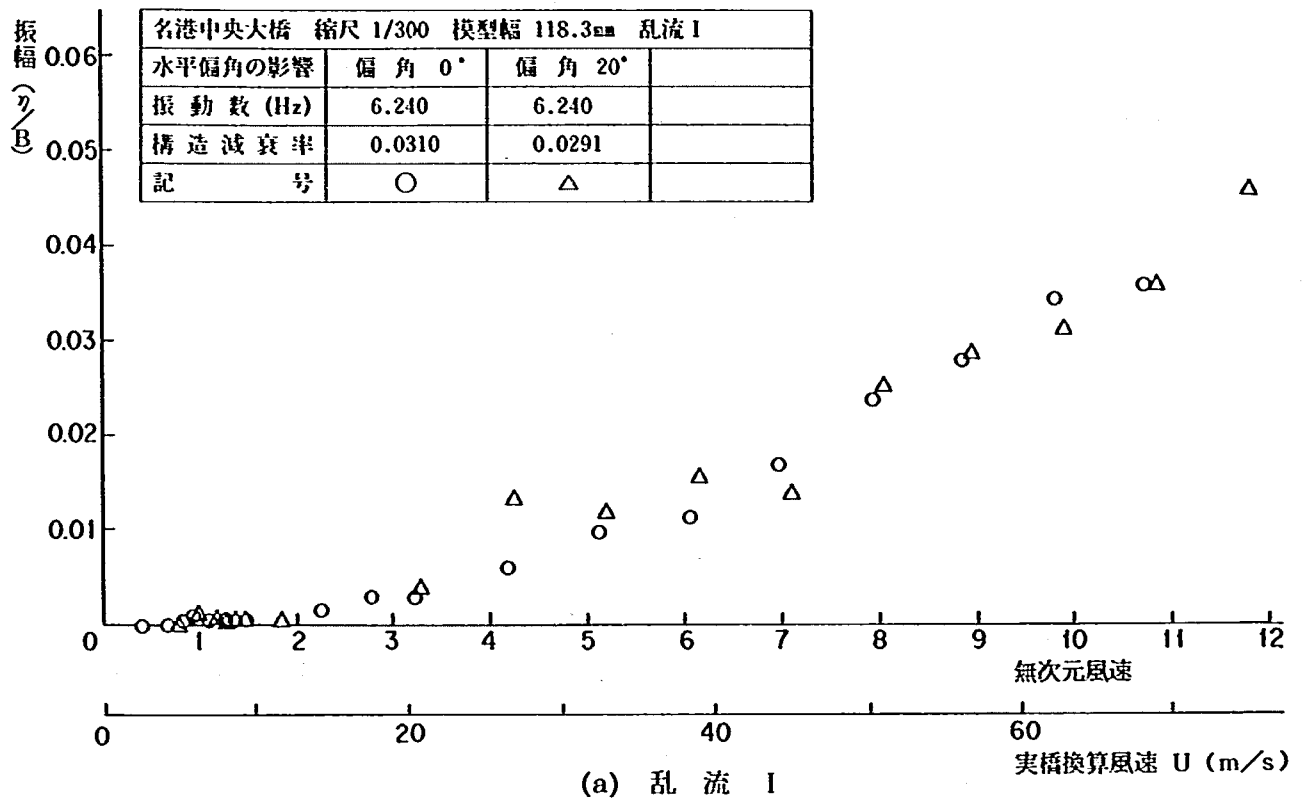


図-2.12.2 水平偏角の影響 (乱流, たわみ)

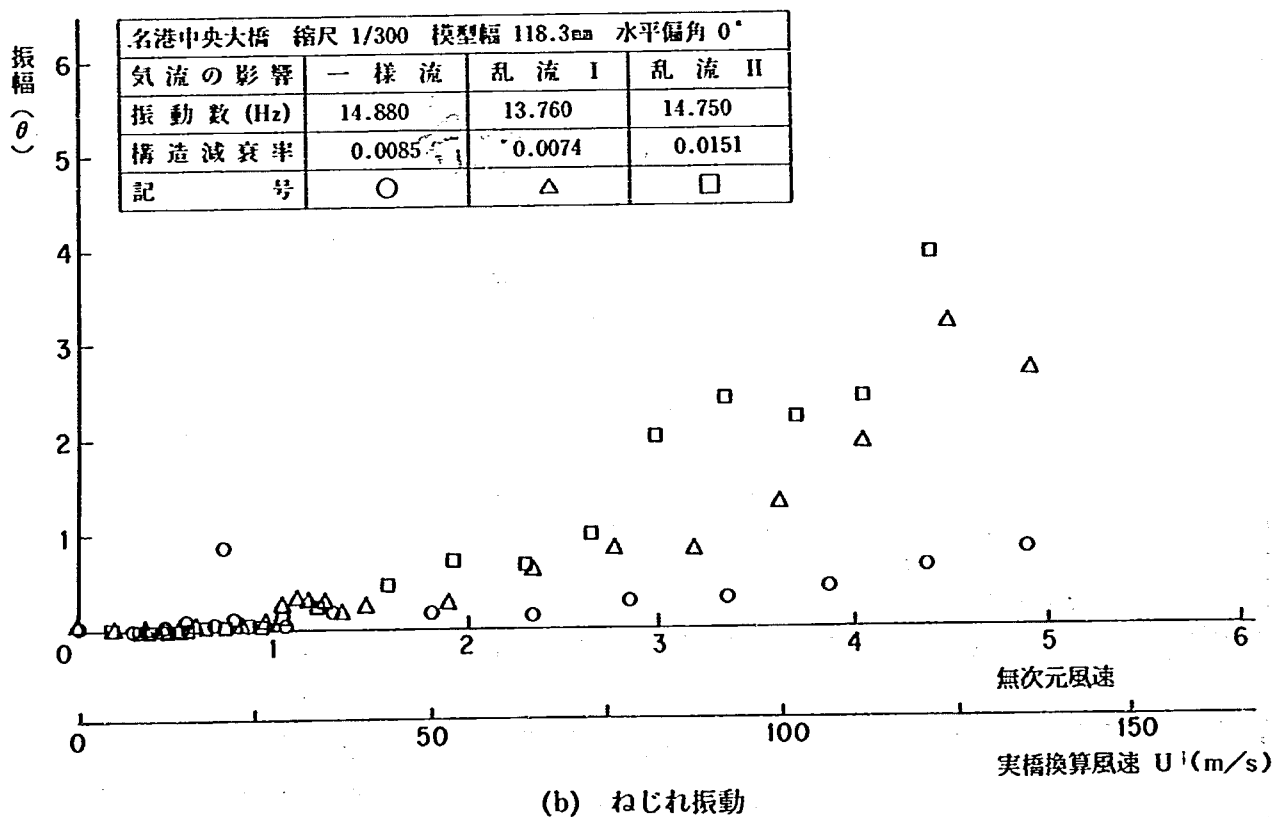
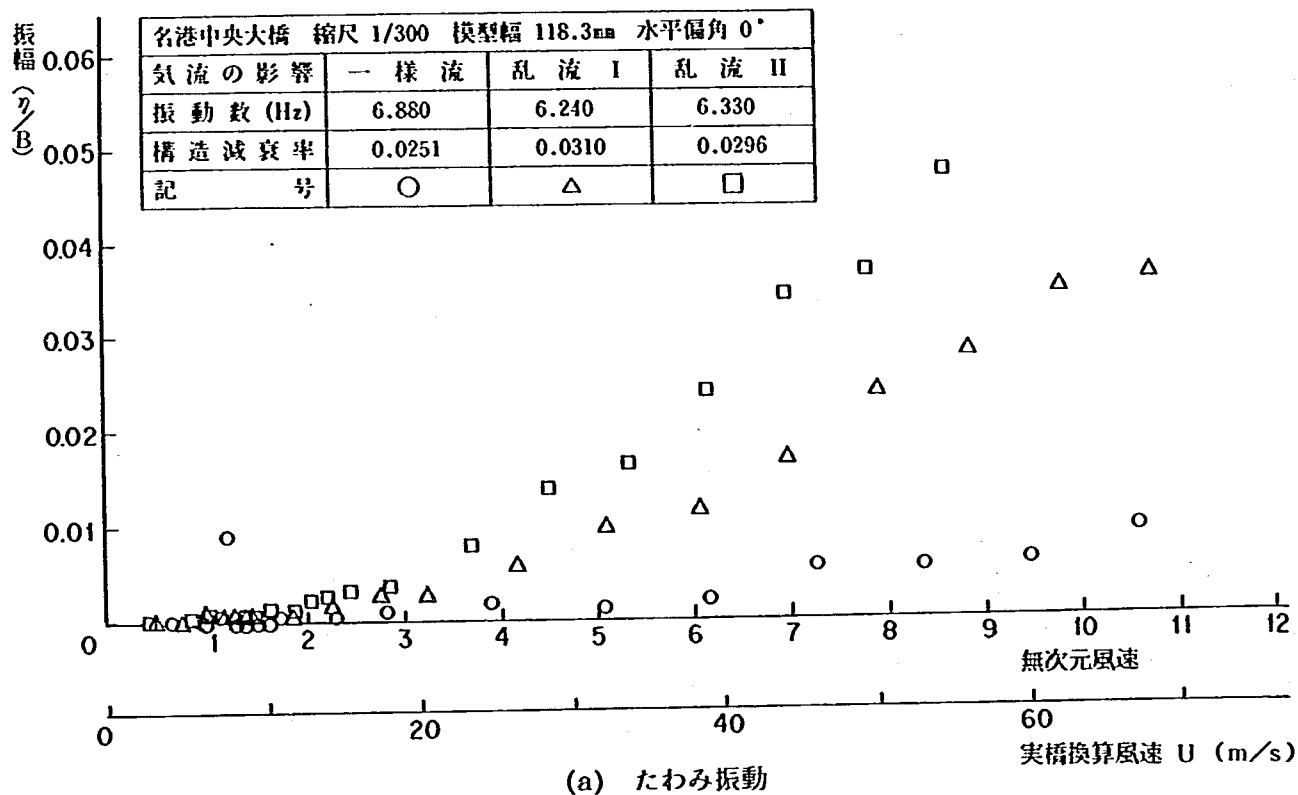


図-2.13 気流の影響

3. ま と め

本調査によって名港中央大橋の耐風性について判明した成果をまとめると以下のとおりである。

(1) 一様流中のバネ支持実験の成果

- a) 主に 0° および吹上の風によってたわみ、ねじれともにかなり大きな渦励振が発現する。
- b) たわみの渦励振は風速 6 m/s 程度でかなり低いため頻度も高い。
- c) 発散振動はたわみねじれともに実験した風速の範囲では発現しない。

(2) 一様流中のタウト模型実験の成果

- a) バネ支持実験以上の振幅のたわみの渦励振が発現した。しかし、ねじれの渦励振は減衰の小さなケースでしか発現しなかった。
- b) 発散振動はたわみ、ねじれともに実験した風速の範囲では発現しない。

(3) 乱流中のタウト模型実験の成果

- a) 一様流中で発現したたわみの渦励振は 5.4 % の乱流中で完全に消滅した。またねじれの渦励振も 30 % 程度に低減された。
- b) 乱流中でのガスト応答の最大振幅は風速 55 m/s において活荷重変位を越える。

(4) バネ支持実験の結果とタウト模型実験の結果から、現断面について耐風性を評価した結果以下の結論となった。

- a) 本設計案は発散振動に対して十分安全である。
- b) 渦励振は乱流の効果で発現し難いと考えられる。ただし一様流中の振幅が大きかったため、より対風応答特性に優れた断面が得られる方向に詳細設計が進むように配慮する。また必要がある場合には、風洞実験によってフラップ等の効果も併せて検討していくことが望ましい。
- c) ガスト応答はかなり振幅が大きかったため、安全性レベルのバランスを十分に考慮し応力的な安全性を確認する必要がある。
- d) 今後も耐風性への配慮は重要であるが、本断面を詳細設計の基本とする点に根本的な問題はない。

謝 辞

本調査を実施するにあたり、日本道路公団本社、日本道路公団名古屋建設局および日本道路公団伊勢湾岸道路工事事務所の関係各位から多大な協力を得たことを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

1. 建設省土木研究所；白鳥大橋の耐風性調査報告書（その2）；構造研究室資料第7号，昭和59年3月
2. 建設省土木研究所；名港西大橋長期観測データの解析報告書（Ⅱ-1987）；土木研究所資料№2431，昭和62年2月

参 考 資 料

1. 三分力試験
2. 名港東大橋の耐風性

1. 三分力試験

試験は建設省土木研究所耐風工学実験施設のフラッター風洞を使用し、「本州四国連絡橋風洞試験要領（1980）」に従いピアノ線支持方式で実施した。三分力実験の概要を図一参 1.1 に空気力を図一参 1.2 に、空気力係数を次式でそれぞれ定義する。

$$C_D = D / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_n \right)$$

$$C_L = L / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 B \right)$$

$$C_M = M / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \right)$$

ここに、 C_D ：抗力係数、 C_L ：揚力係数、 C_M ：空力モーメント係数、 D ：抗力、 L ：揚力、 M ：空力モーメント、 ρ ：空気密度、 U ：風速、 A_n ：投影面積、 B ：模型幅員

実験結果より空気力係数を算出する際には、ピアノ線に作用する空気力の修正を試みた。修正の概念図を図一参 1.3 に示す。ピアノ線抗力を動圧で除した抵抗面積 A_P は、

$$A_P = 0.01536 \text{ (m}^2\text{)}$$

となり、補正後の抗力係数 C_D' はこの A_P および模型の投影面積 A_n を用いて

$$C_D' = C_D - A_P / A_n$$

となる。

ギャロッピング、パフエッティングおよびダイバージェンスなどの現象には空気力係数の値よりもむしろ迎角の変化に対する空気力係数の変化の割合が密接に関係する。このうち迎角の変化に対する揚力係数の変化の割合を揚力傾斜 ($dC_L/d\alpha$) と、迎角の変化に対する空力モーメント係数係数の変化の割合を空力モーメント傾斜 ($dC_M/d\alpha$) を求め、各空気力を表一参 1.1 に、各空気力と各傾斜を図一参 1.4 に示す。

試験結果より求められた抗力係数 (C_D) $\alpha=0$ から設計断面の風荷重 W を次式に従い算出した。

ρ ：空気密度 (0.125 kgs²/m⁴)

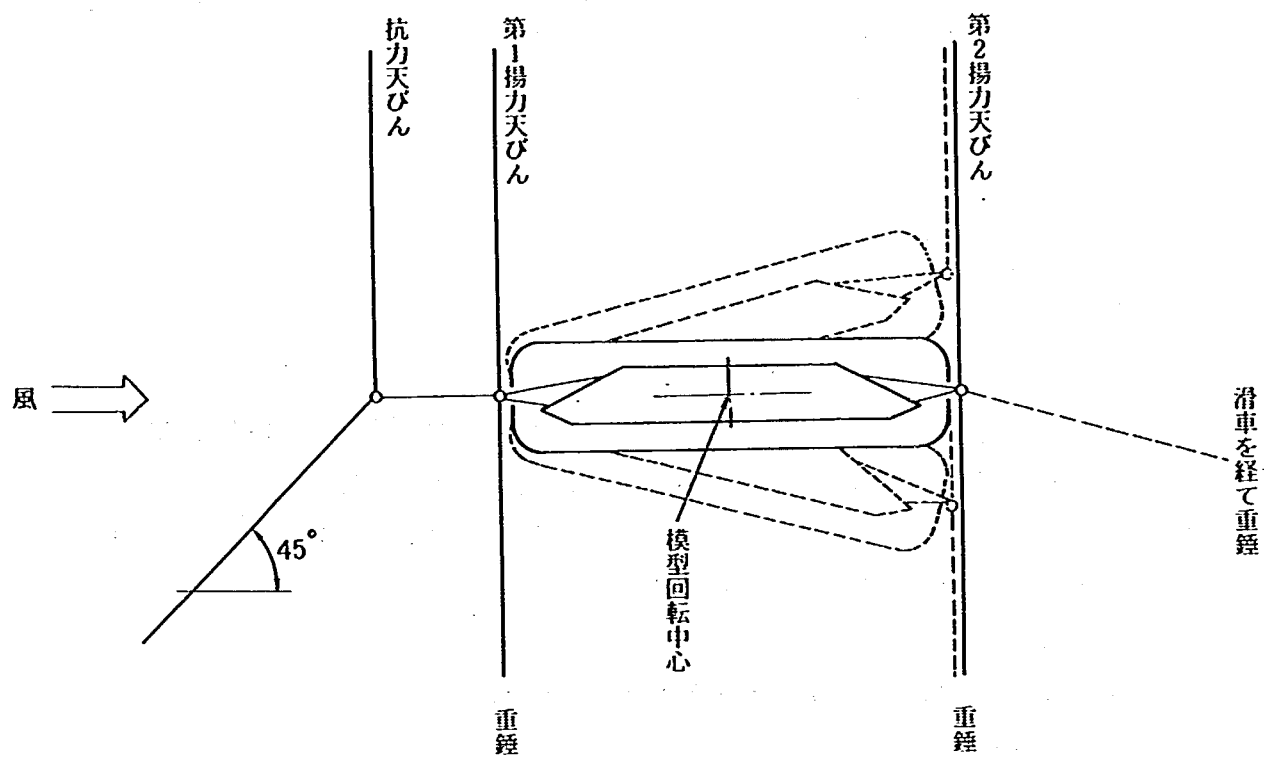
$$W = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D$$

V ：設計風速 (中央大橋：55.4 m/s, 東大橋：54.1 m/s)

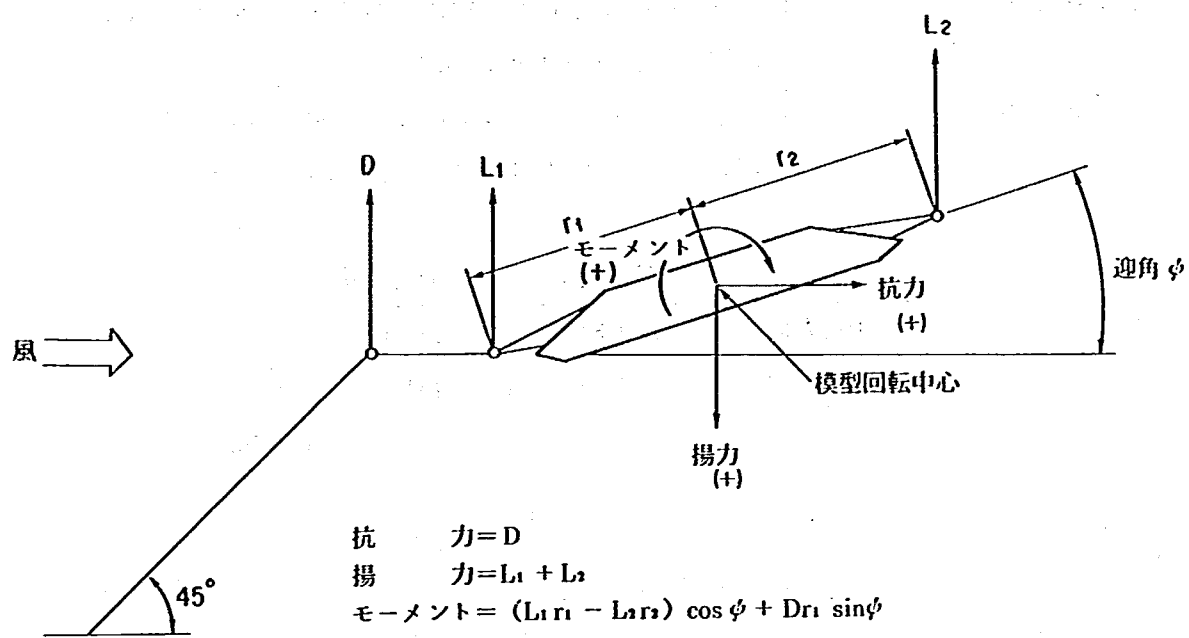
C_D ：抗力係数 (設計値：1.30, 実験値：0.7176)

	設計風荷重	計算風荷重
名港中央大橋	249.37	137.65
名港東大橋	237.80	131.27

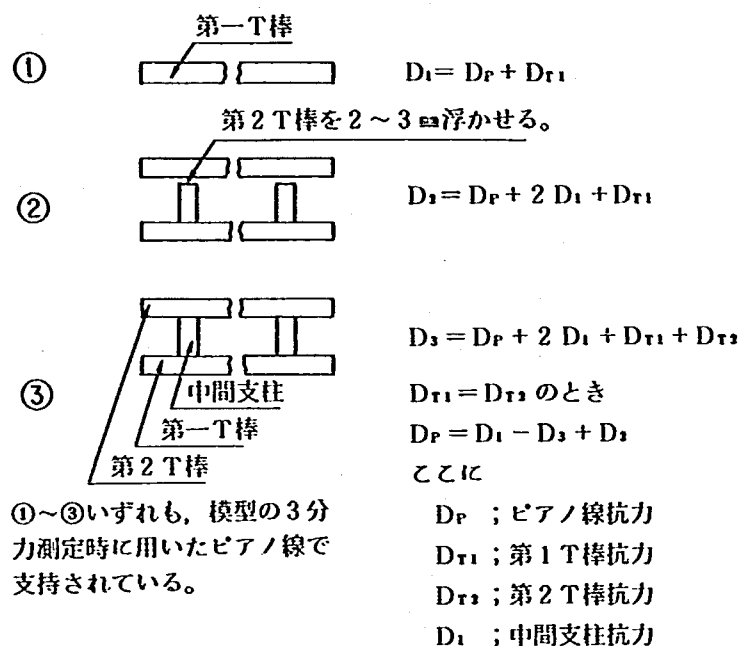
(kg/m²)



図一参 1.1 三分力実験の概要



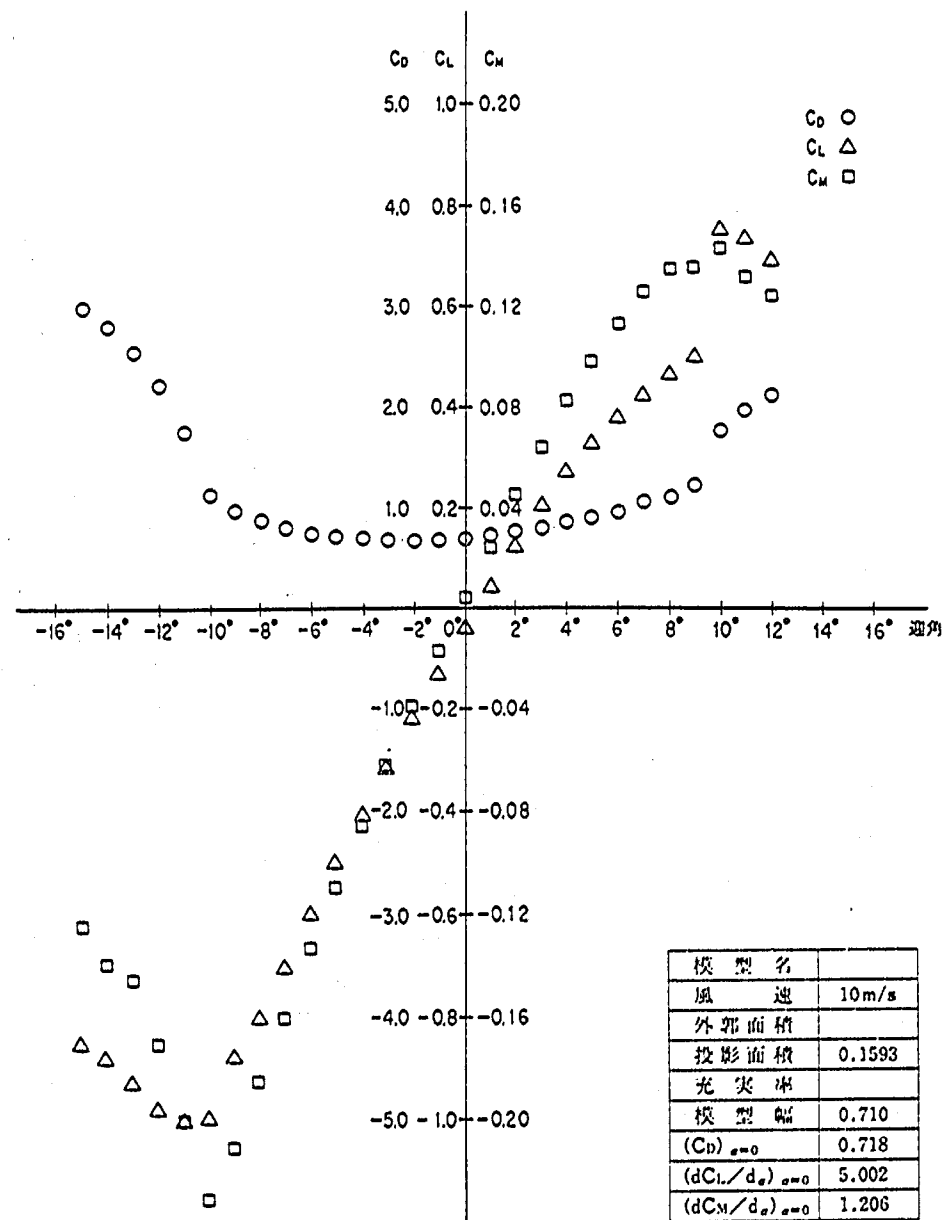
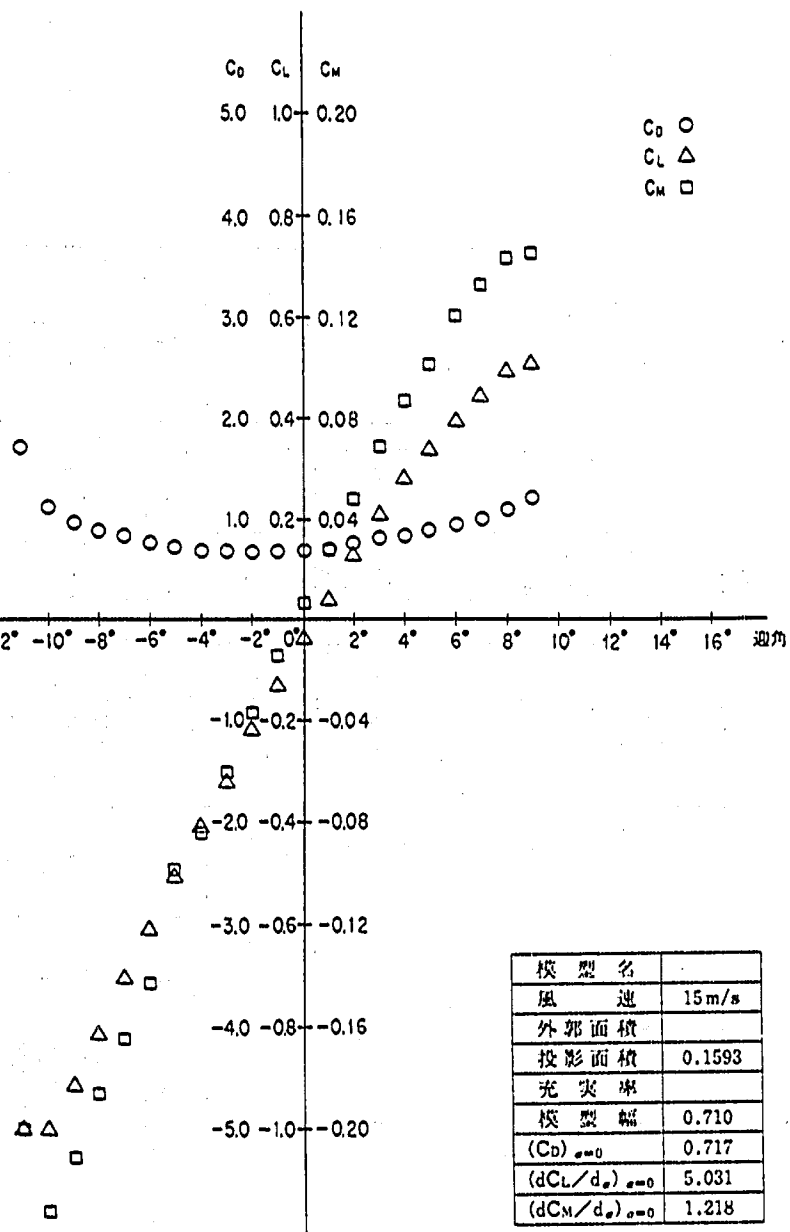
図一参 1.2 三分力実験の空気力



図一参 1.3 ピアノ線に作用する抗力の測定

表一参 1.1 三分力係数 (名港中央大橋)

迎角 (deg)	風速 10 m/s			風速 15 m/s		
	抗力 C_D	揚力 C_L	モーメント C_M	抗力 C_D	揚力 C_L	モーメント C_M
15						
14						
13						
12	2.1020	0.6856	0.1248			
11	1.9550	0.7365	0.1320			
10	1.7705	0.7535	0.1430			
9	1.2391	0.5903	0.1355	1.2144	0.5116	0.1444
8	1.1173	0.4695	0.1343	1.1035	0.4835	0.1427
7	1.0375	0.4323	0.1259	1.0165	0.4427	0.1329
6	0.9618	0.3843	0.1129	0.9559	0.3967	0.1200
5	0.9060	0.3365	0.0983	0.9001	0.3411	0.1037
4	0.8514	0.2746	0.0815	0.8517	0.2825	0.0864
3	0.8070	0.2052	0.0641	0.8266	0.2115	0.0682
2	0.7727	0.1280	0.0453	0.7854	0.1311	0.0484
1	0.7423	0.0471	0.0251	0.7328	0.0484	0.0281
0	0.7182	-0.0388	0.0044	0.7170	-0.0375	0.0072
-1	0.7076	-0.1275	-0.0170	0.7061	-0.1272	-0.0144
-2	0.7048	-0.2174	-0.0388	0.7008	-0.2182	-0.0367
-3	0.7077	-0.3099	-0.0619	0.7047	-0.3133	-0.0603
-4	0.7184	-0.4019	-0.0850	0.7130	-0.4062	-0.0839
-5	0.7469	-0.4973	-0.1095	0.7376	-0.5041	-0.1089
-6	0.7825	-0.5939	-0.1338	0.7740	-0.6025	-0.1338
-7	0.8384	-0.7006	-0.1609	0.8276	-0.7037	-0.1646
-8	0.8971	-0.7993	-0.1859	0.8839	-0.8121	-0.1861
-9	0.9823	-0.9042	-0.2119	0.9691	-0.9156	-0.2111
-10	1.1325	-1.0036	-0.2325	1.1082	-1.0123	-0.2329
-11	1.7799	-1.0294	-0.2072	1.7135	-1.0346	-0.2094
-12	2.2221	-0.9804	-0.1707			
-13	2.5496	-0.9328	-0.1457			
-14	2.7835	-0.8819	-0.1299			
-15	2.9955	-0.8537	-0.1243			



圖一參 1.4 三分力曲線 (名港中央大橋)

2. 名港東大橋の耐風性

2.1 概 要

名港東大橋（145 + 410 + 145 m）は名港中央大橋と連続して建設される斜張橋であり、現段階では名港中央大橋と同一断面が設計の基本断面とされている。そこで昭和63年度、名港中央大橋の風洞実験と併せて名港東大橋に関してバネ支持実験を行い、名港中央大橋と同様の目的で現断面の耐風性を評価した。

2.2 実験方法および実験条件

実験方法および相似条件は、名港中央大橋のバネ支持実験とまったく同じである。実験条件を表-参 2.1 に示す。ここでも名港中央大橋と同様にたわみ振動とねじれ振動の振動数比は満たすことができなかった。

2.3 名港東大橋に関する風洞実験

2.3.1 名港東大橋に関する実験ケースおよび実験結果

実験は迎角、構造減衰を変化させて行った。実験ケースおよび実験結果の総括表を表-参 2.2 に示す。さらに主な実験ケースの風速～振幅図（V-A図）を図-参 2.1 に示す。

2.3.2 名港東大橋の耐風性の考察

名港東大橋の構造減衰が0.02の実験を図-参 2.2の迎角-発振風速図にまとめた。名港東大橋は実験を行ったあらゆる迎角に対して発散振動が発現しなかった。したがって名港東大橋は、発散振動に関して十分な安全性を有するものと考えられる。これに対し、渦励振はほとんどの迎角で、たわみ、ねじれともに発現した。渦励振の迎角と振幅の関係を図-参 2.3 に示す。渦励振振幅は最も注目すべき迎角0°において、たわみが風速12 m/s で約18cm、ねじれが風速45 m/s において1.5°の振幅で発現した。

一方、構造減衰の影響は図-参 2.4 に示すようになった。構造減衰が設計値（ $\delta = 0.02$ ）よりもかなり高くなった場合でも振動は発現している。

2.4 名港東大橋の耐風性の評価

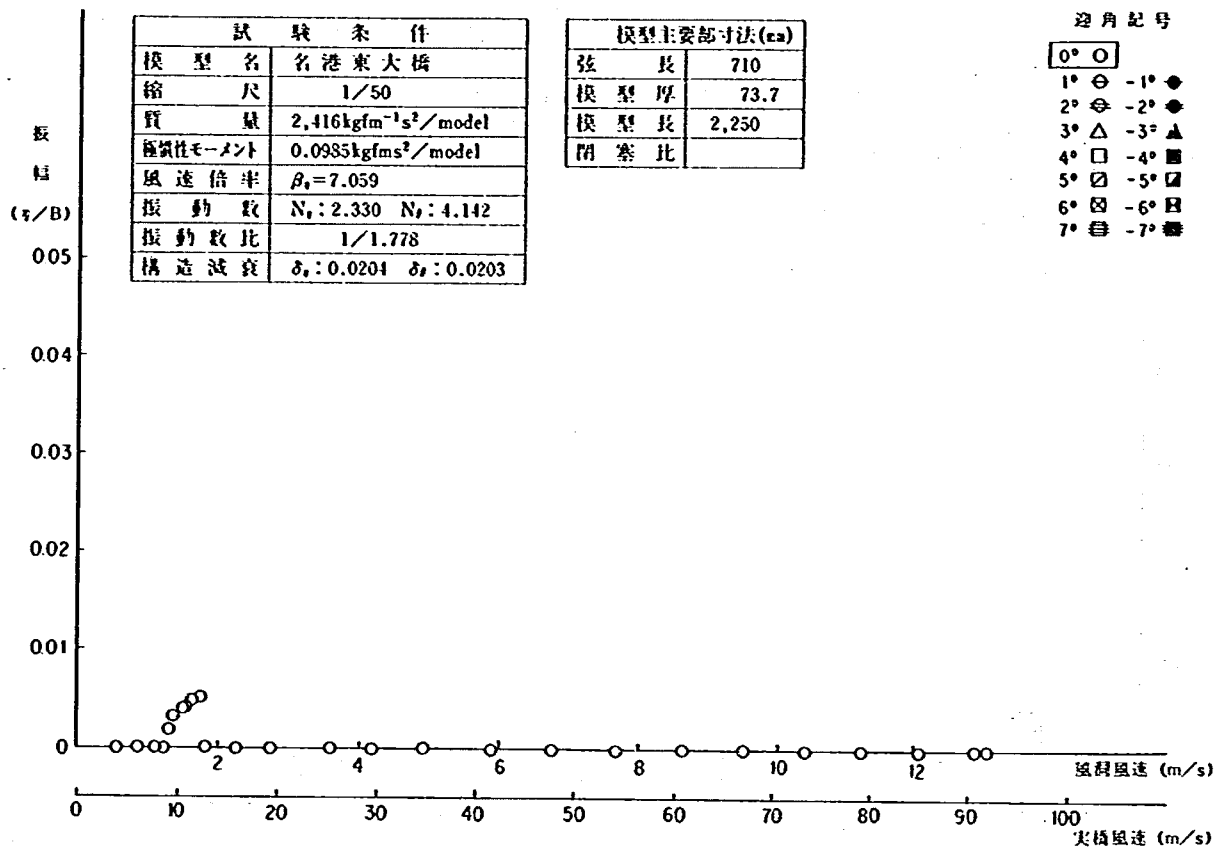
名港東大橋の対風応答特性は、概ね名港中央大橋のそれと相似であるが、振動数が名港中央大橋よりも高いために、耐風性は名港中央大橋よりも優れていると考えられる。名港東大橋を対象としたタウト模型実験は実施していないが、乱流によって渦励振が抑えられる傾向は同様であり、振動数が高くスパンが短いだけガスト応答に対しても有利と考えられ、名港中央大橋と同様に現断面を基本断面として今後の検討をすすめることに問題は特にないと判断される。

表一参 2.1 実験条件 (名港東大橋)

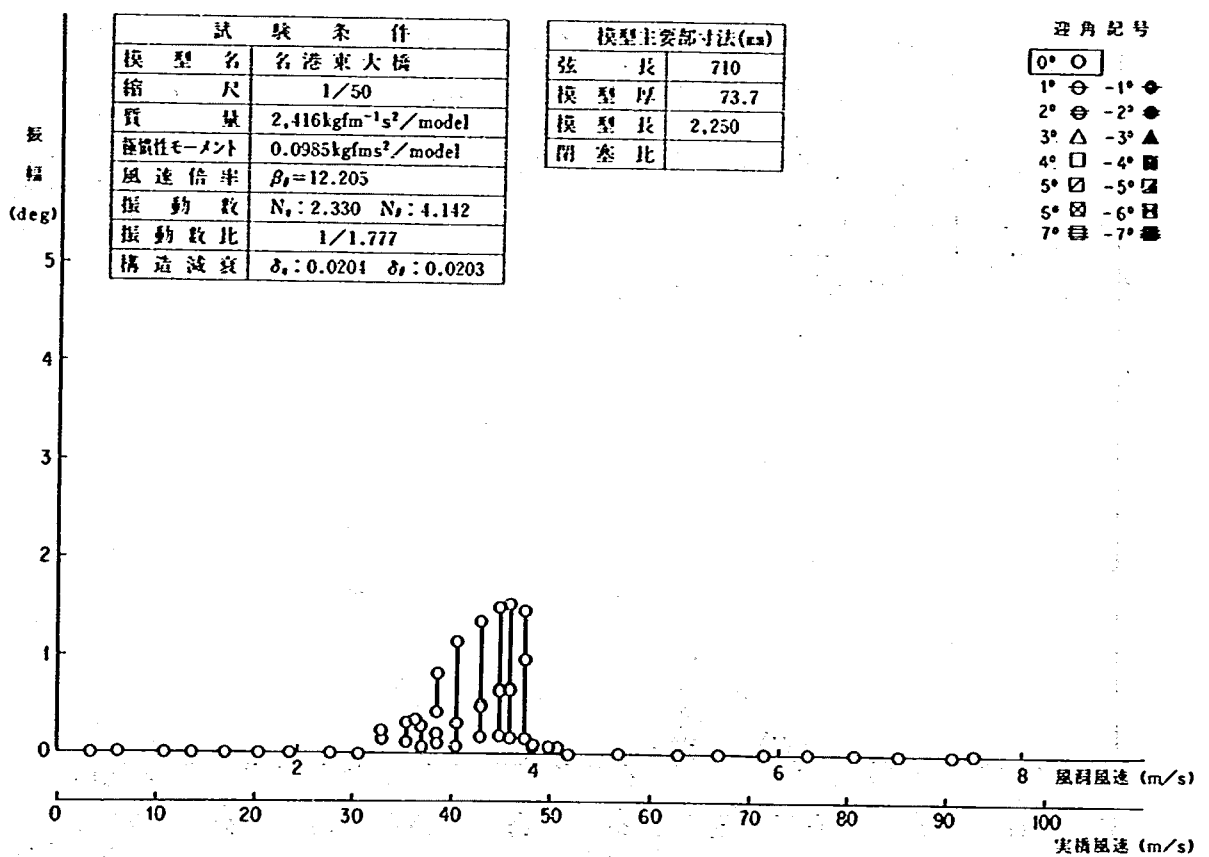
	実 橋	模 型
縮 尺	—	1/50
重 量	26.31 t/m	23.68 kg/model
極 慣 性 モ ー メ ン ト	273.6 tms ² /m	0.0938 kg ms ² /model
振 動 数		
たわみ1次 (逆対称)	0.329 Hz	2.330 Hz
ねじれ1次 (対 称)	1.011	4.142
振 動 数 比	1/3.073	1/1.778
桁 幅 (B)	35,500 mm	710 mm
桁 高 (D)	3,500 mm	70 mm

表一参 2.2 実験ケース及び結果 (名港東大橋)

実験番号	迎角 (°)	構造減衰	渦 励 振 特 性		発散振動発現風速	
			上段：発現風速 (m/s) 下段：最大振幅 (cm, °)		た わ み	ね じ れ
			た わ み	ね じ れ		
1	-7	0.02	発現せず	発現せず	発現せず	発現せず
2	-5		7.1 ~ 8.5 6.1	発現せず		
3	-3		8.5 ~ 10.3 4.4	27.4 ~ 48.6 0.175		
4	0		9.0 ~ 13.2 18.0	30.9 ~ 51.9 1.52		
5	+3		9.1 ~ 13.4 16.6	32.5 ~ 47.0 0.975		
6	+5		7.5 ~ 13.9 12.4	32.9 ~ 50.8 1.158		
7	+7		8.5 ~ 14.3 34.8	33.7 ~ 69.4 3.125		
8	0	0.03	7.7 ~ 12.3 9.2	30.4 ~ 47.1 0.242		
9		0.04	7.7 ~ 11.9 5.5	31.7 ~ 42.8 0.213		

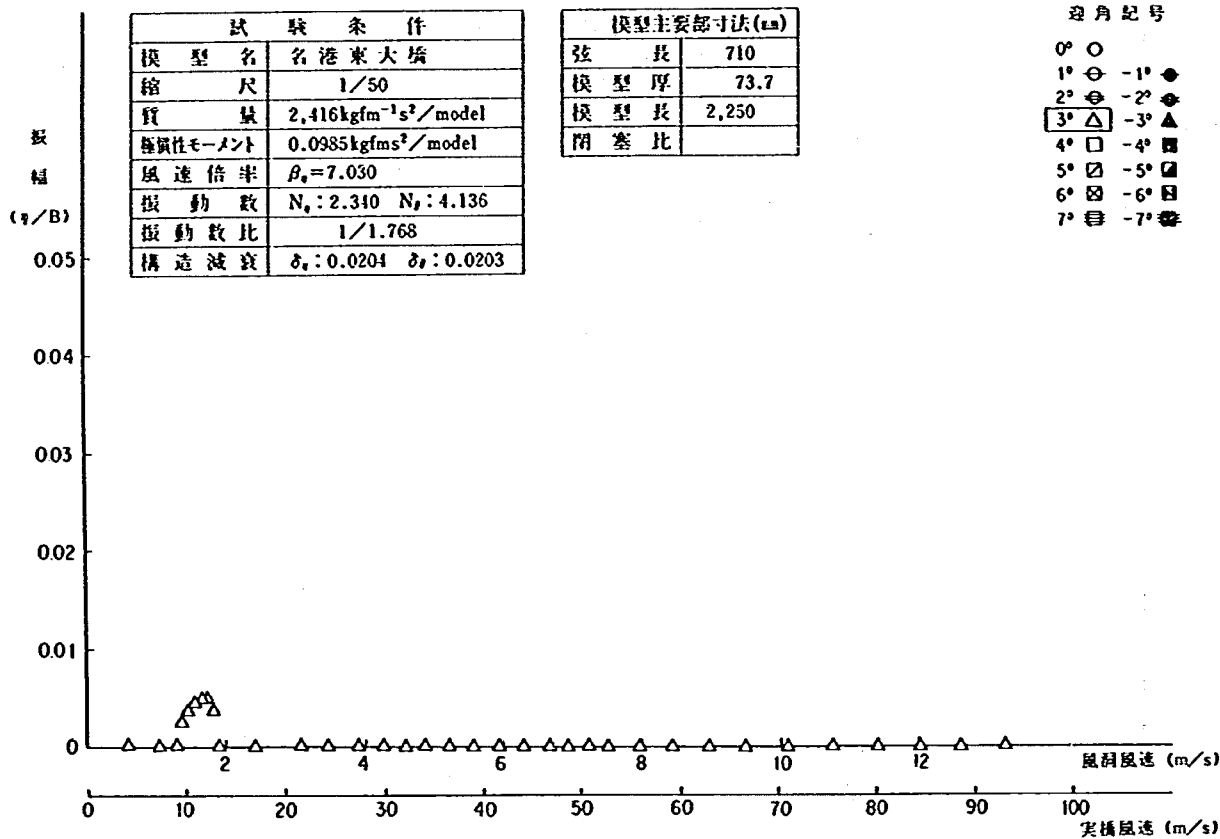


(a) たわみ振動

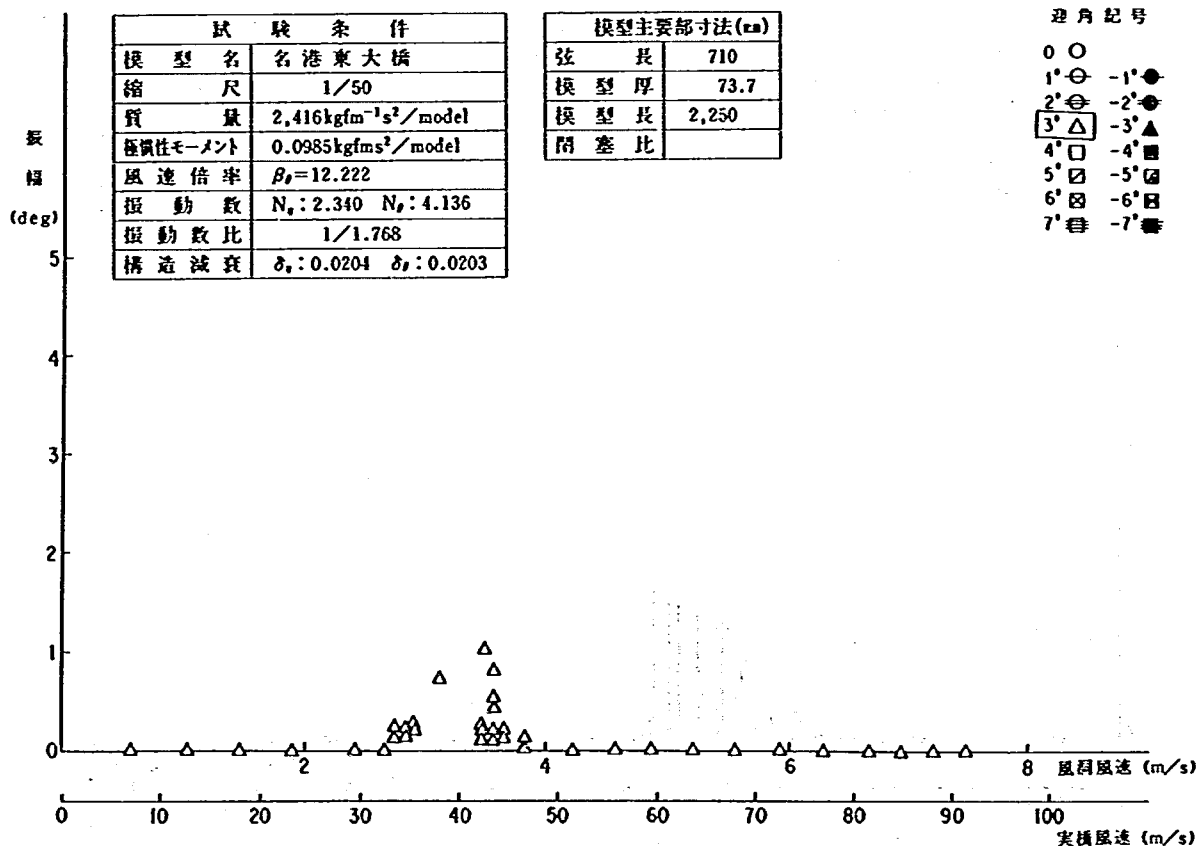


(b) ねじれ振動

図一参 2.1.1 風速—振幅図 ($\alpha=0^\circ$)

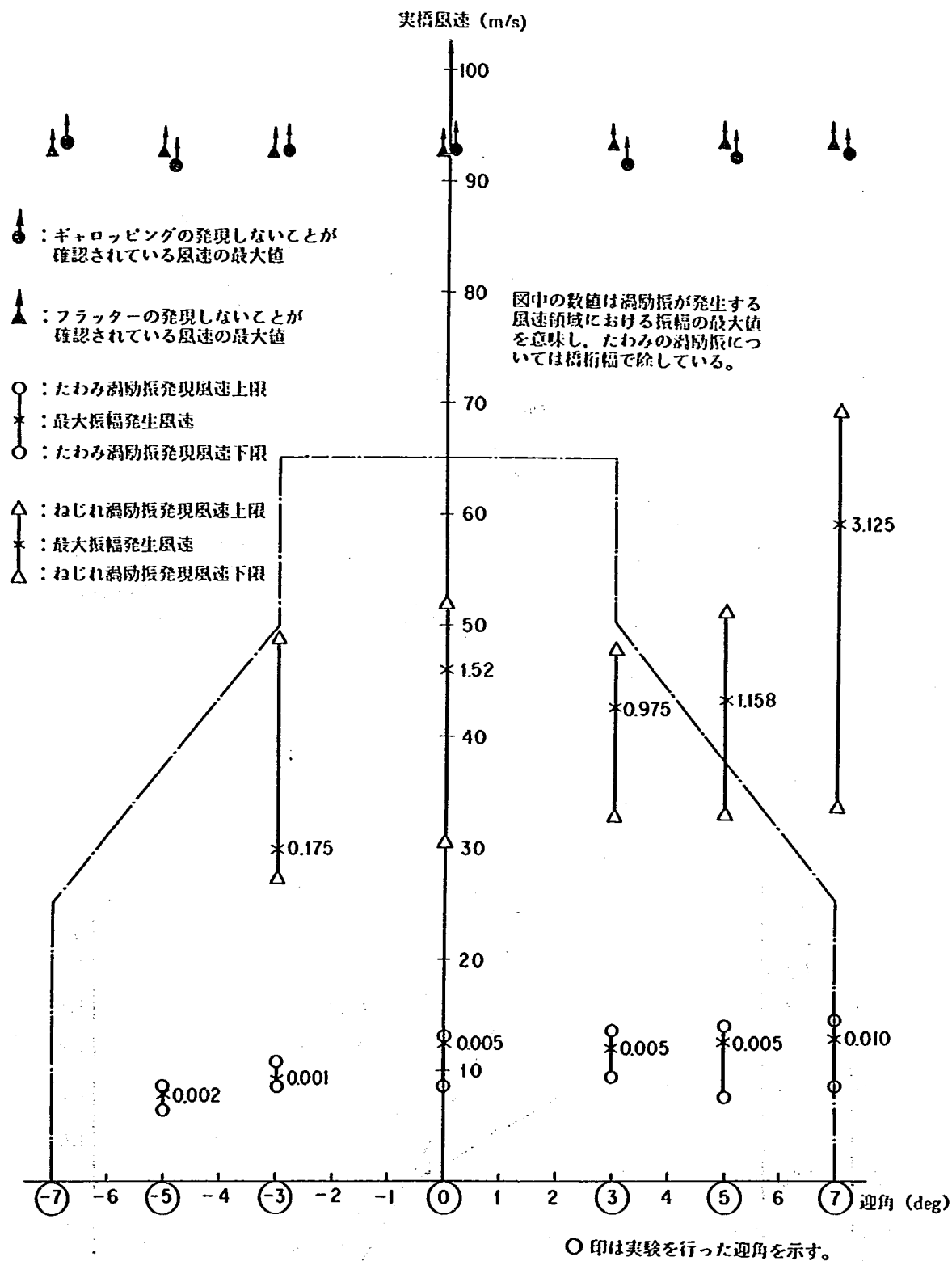


(a) たわみ振動

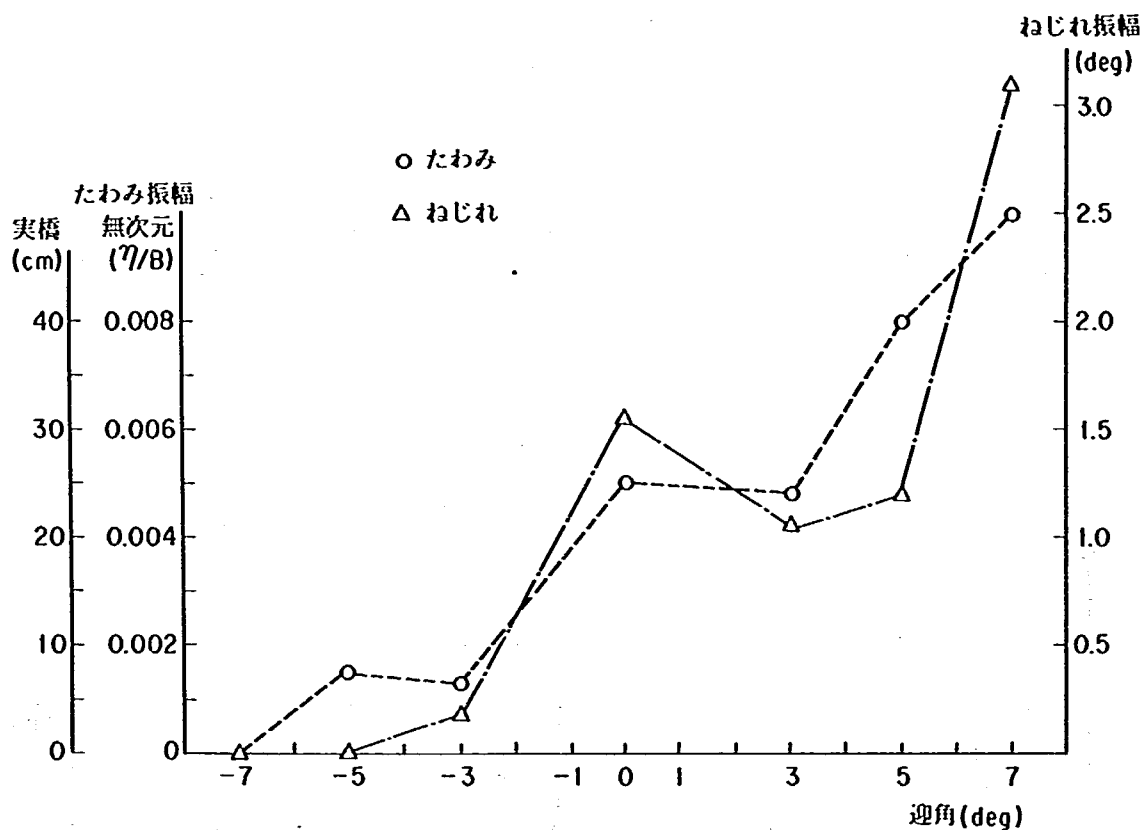


(b) ねじれ振動

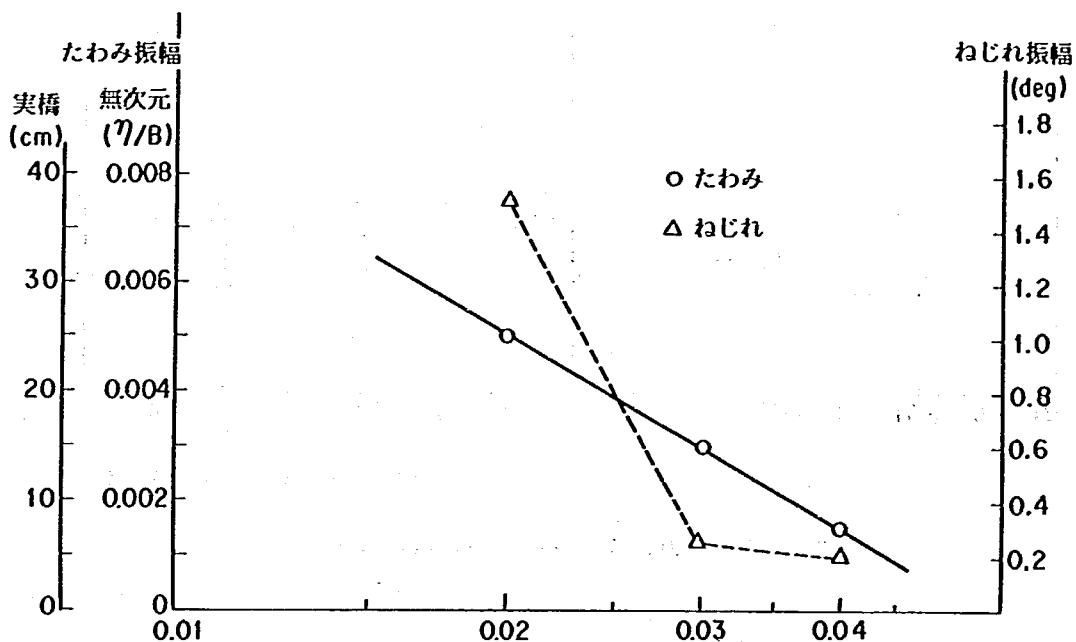
図一参 2.1.2 風速—振幅図 ($\alpha = 3^\circ$)



図一参 2.2 迎角-発振風速関係図 (名港東大橋)



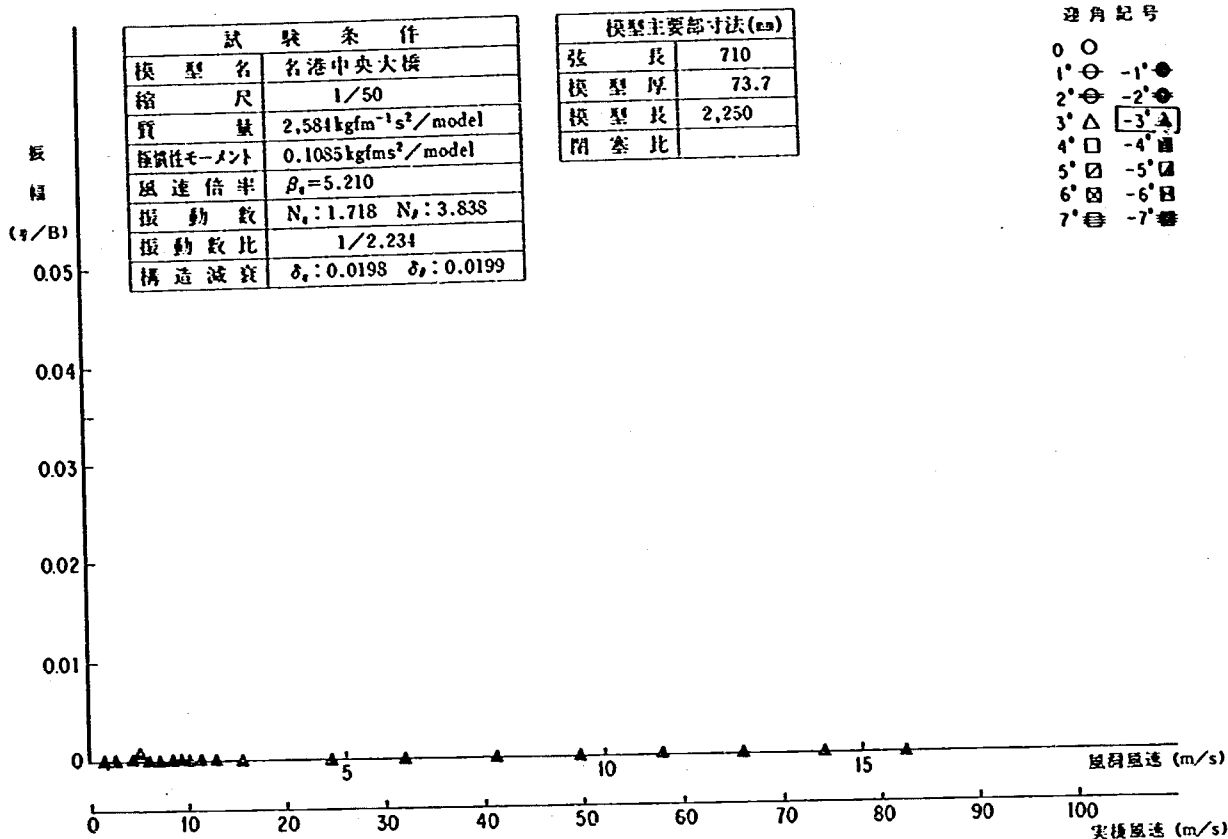
図一参 2.3 迎角一渦励振振幅関係図 (名港東大橋)



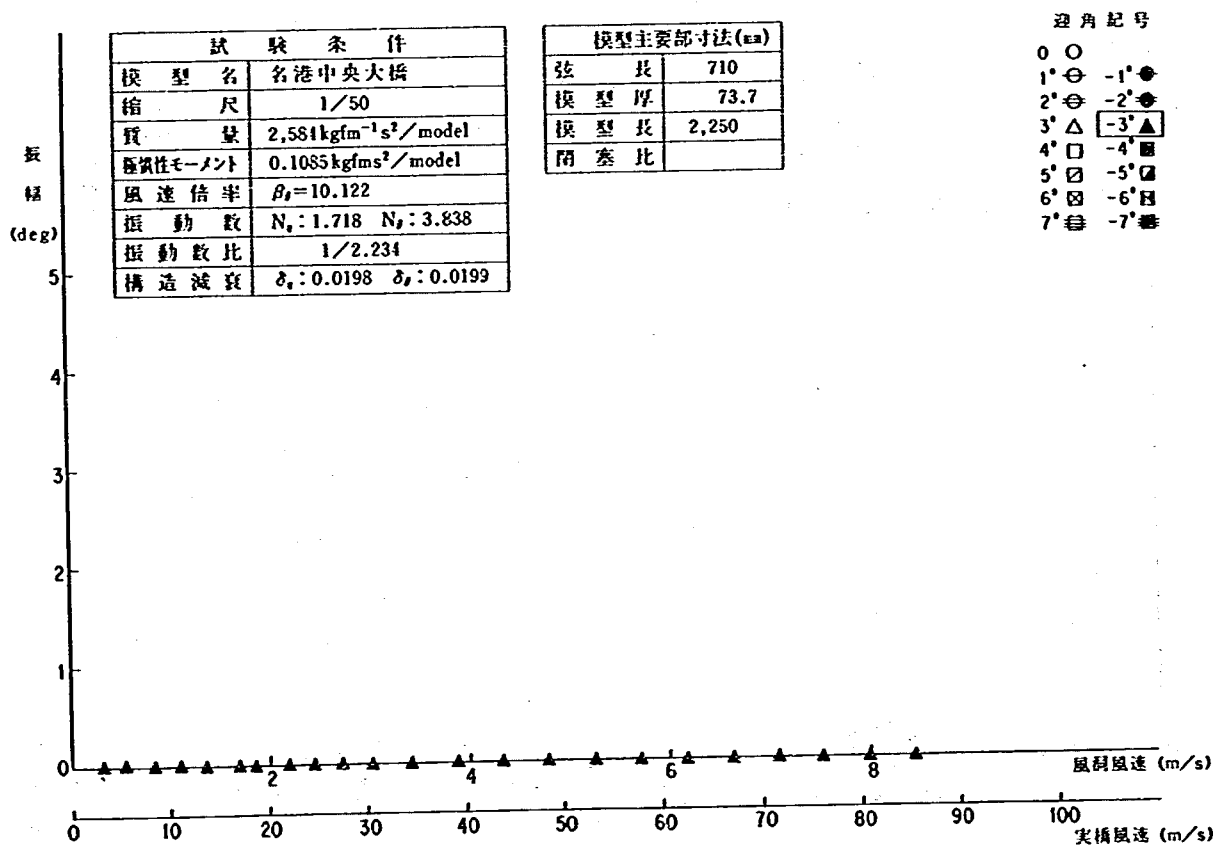
図一参 2.4 構造減衰一渦励振振幅関係図 (名港東大橋)

付 属 資 料

1. 付図－1 バネ支持実験結果 ($V-A$ 図)
2. 付図－2 タウト模型実験結果 ($V-A$ 図)

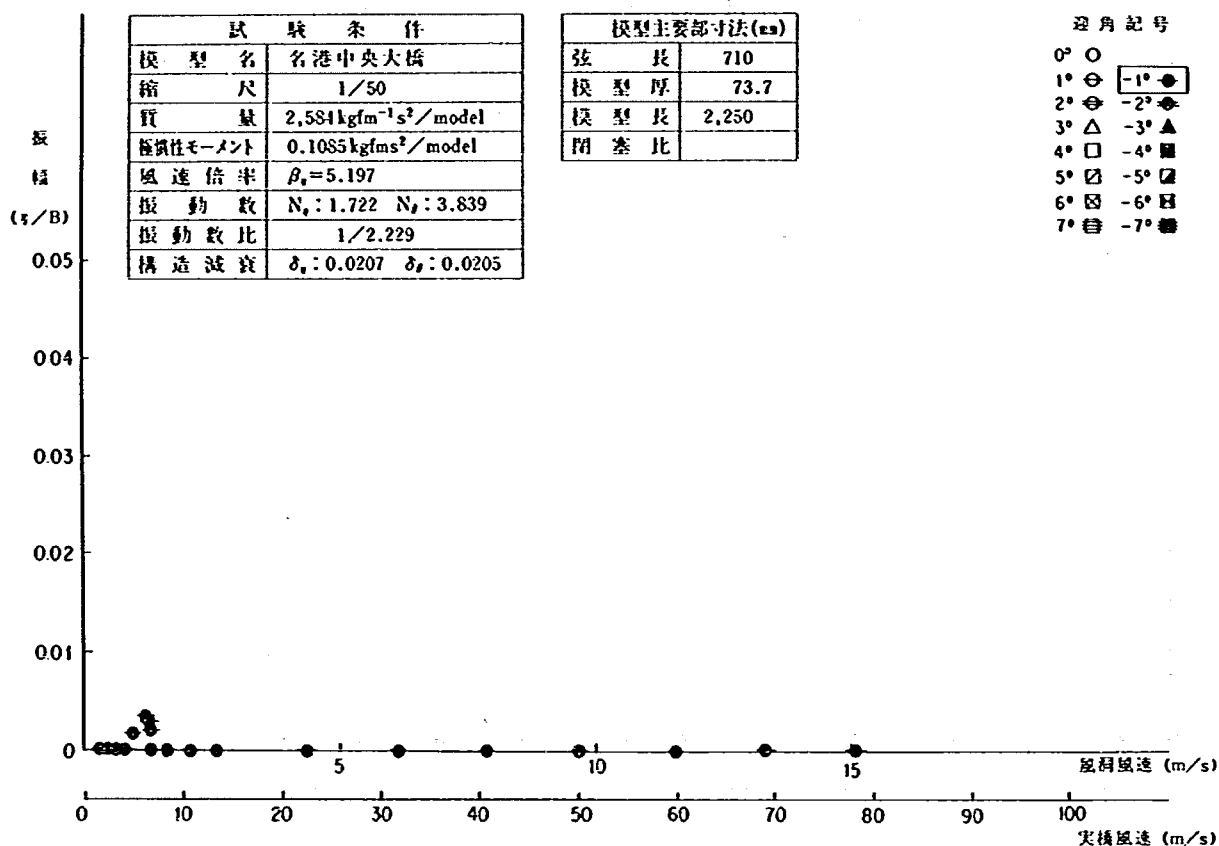


(a) たわみ振動

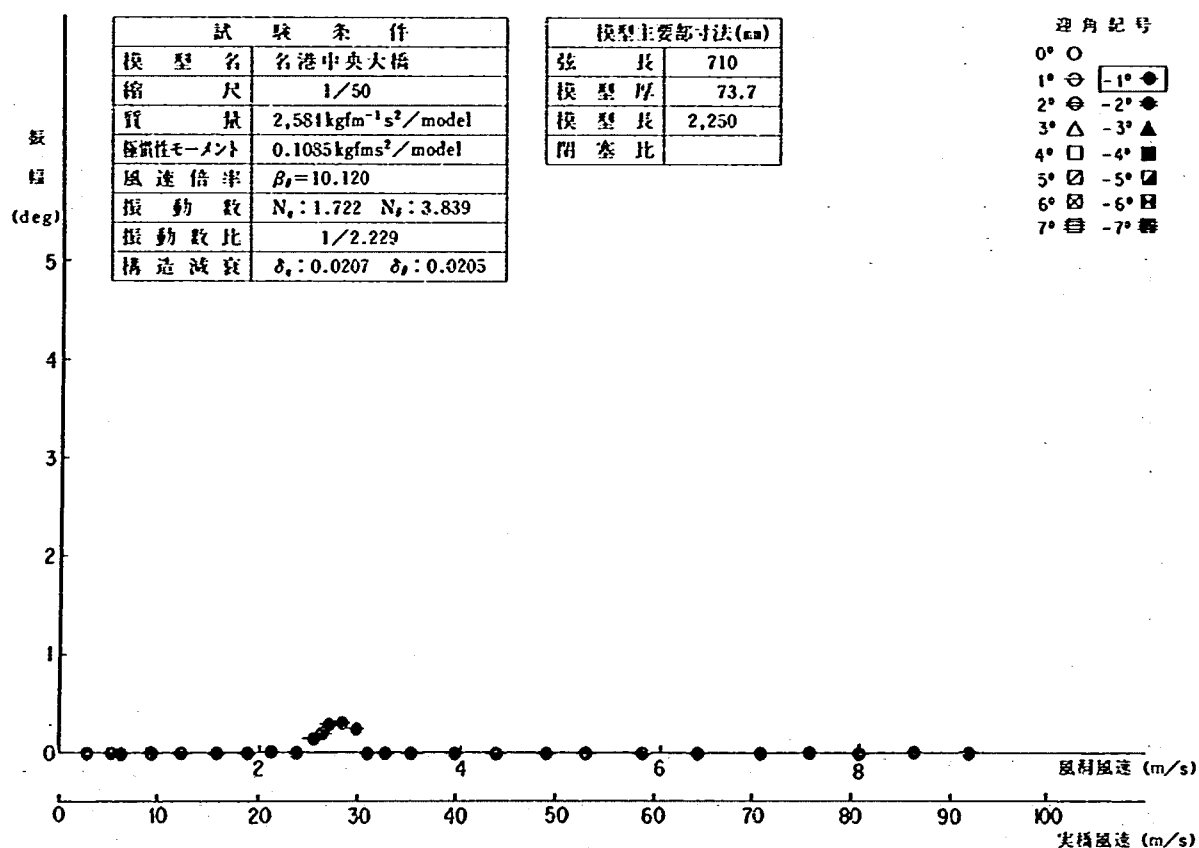


(b) ねじれ振動

付図-1.1 風速-振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = -3^\circ$)

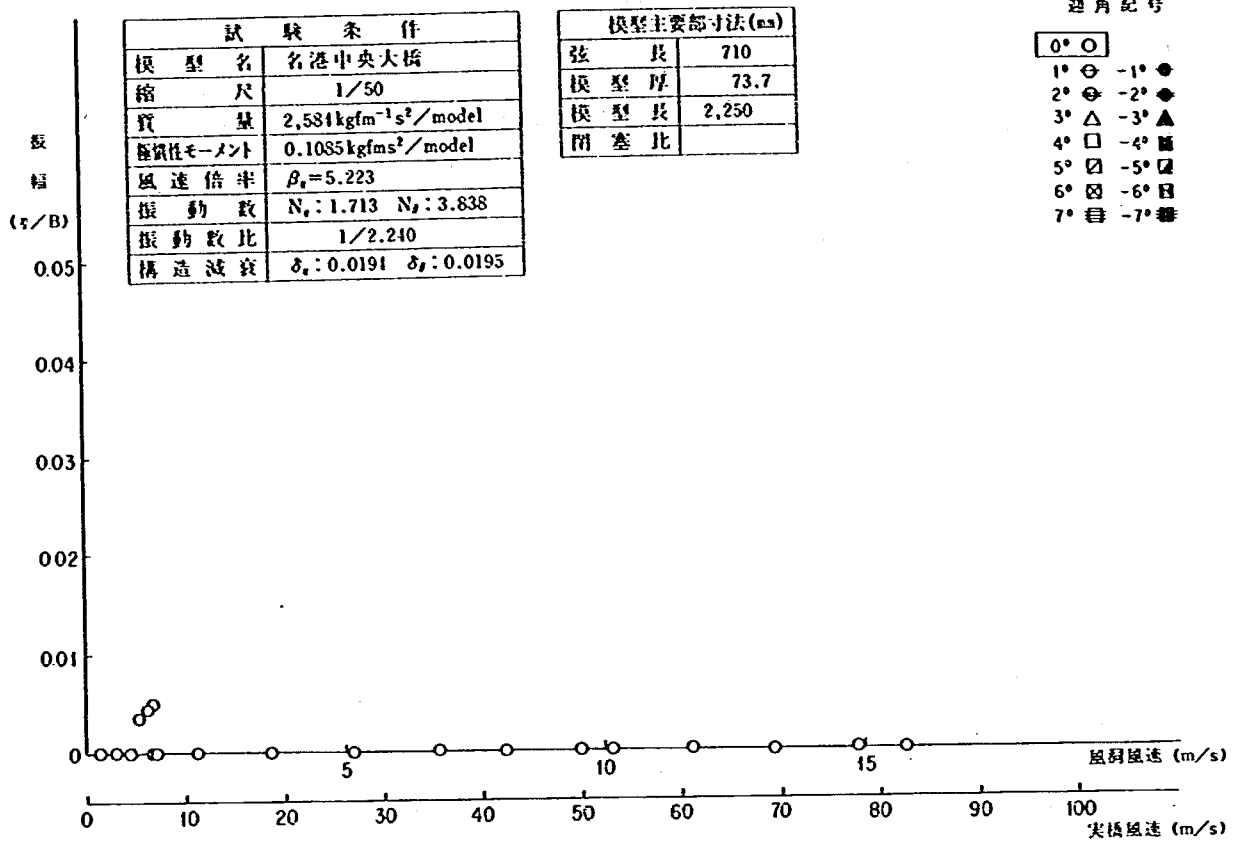


(a) たわみ振動

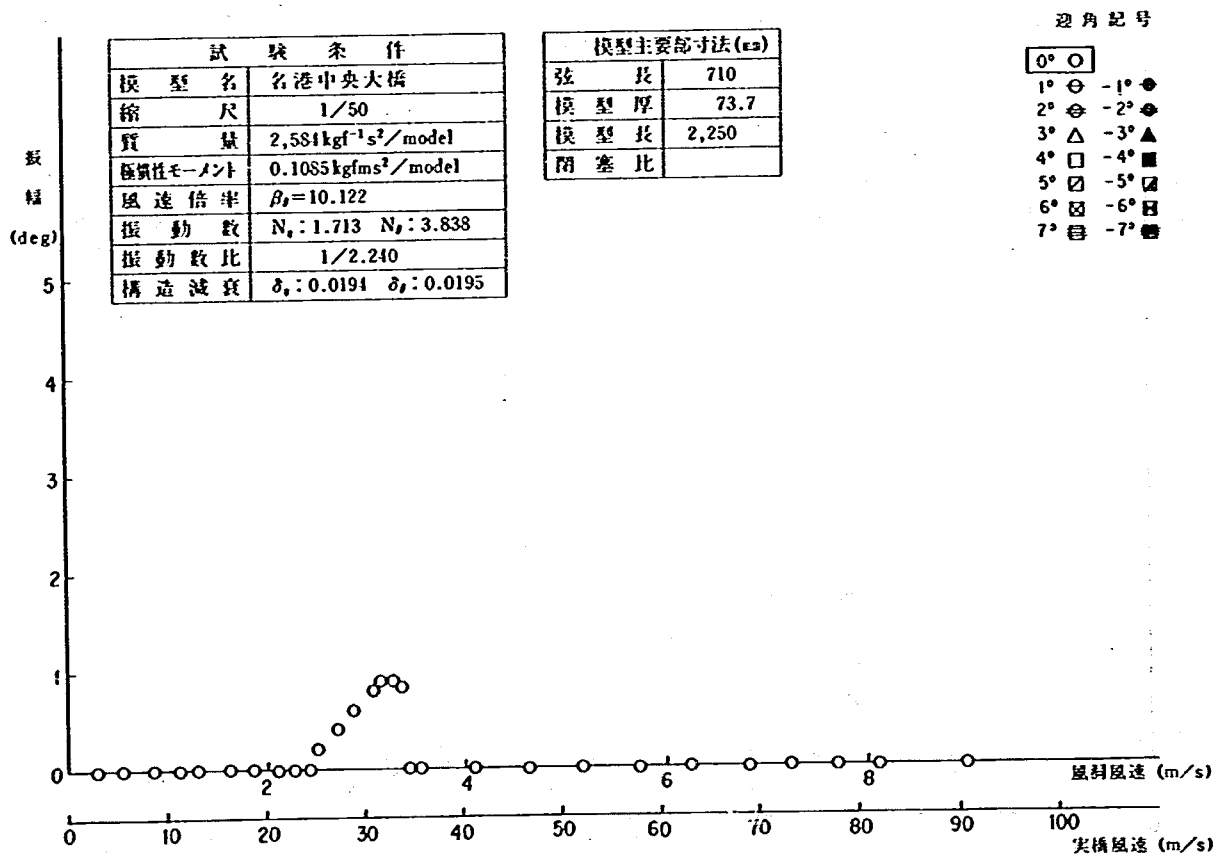


(b) ねじれ振動

付図-1.2 風速-振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = -1^\circ$)

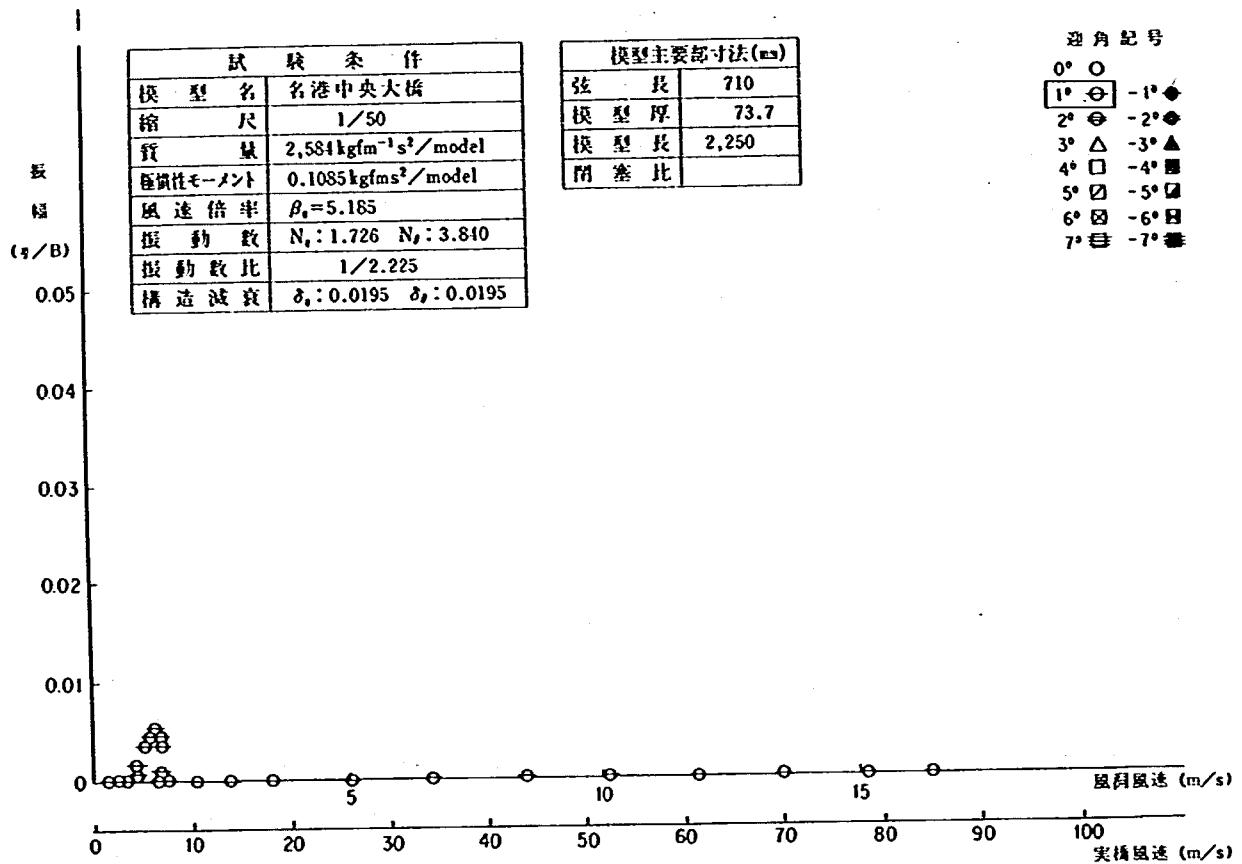


(a) たわみ振動

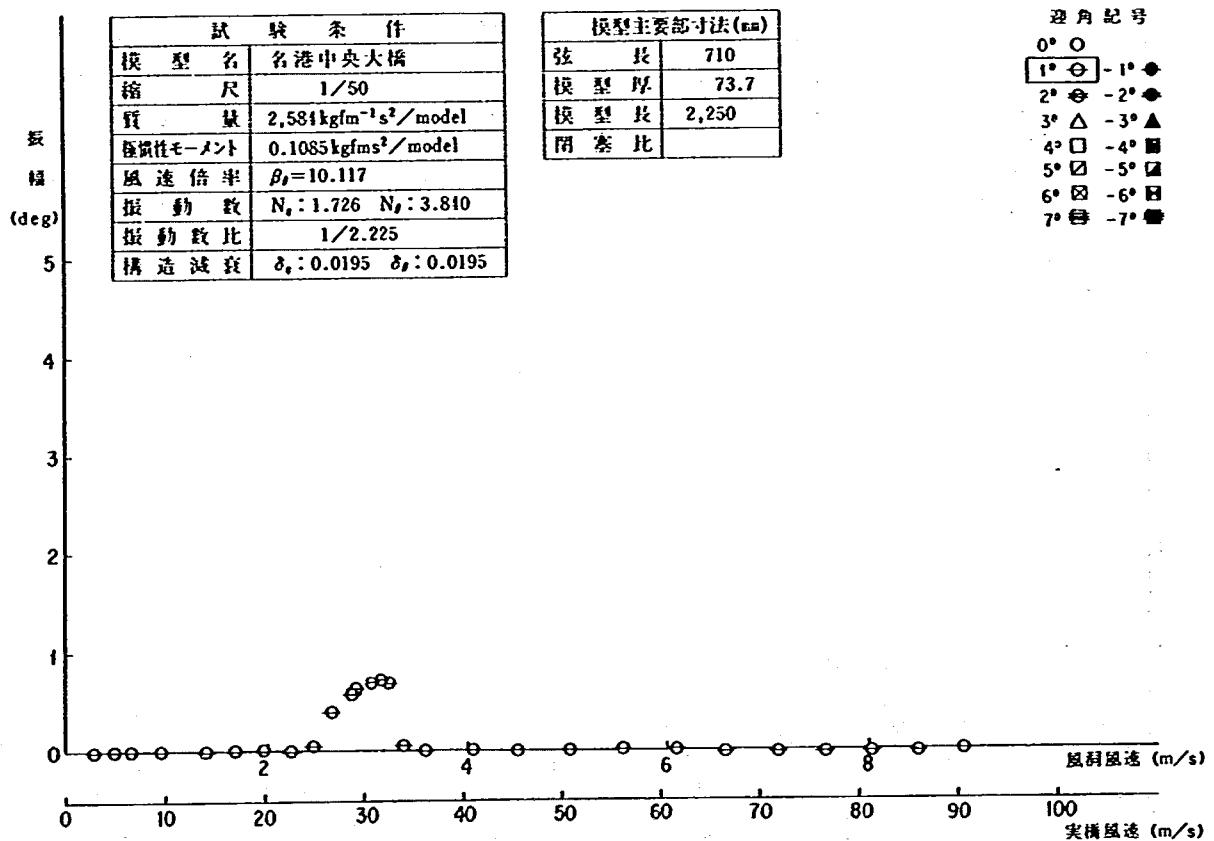


(b) ねじれ振動

付図-1.3 風速-振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = 0^\circ$)

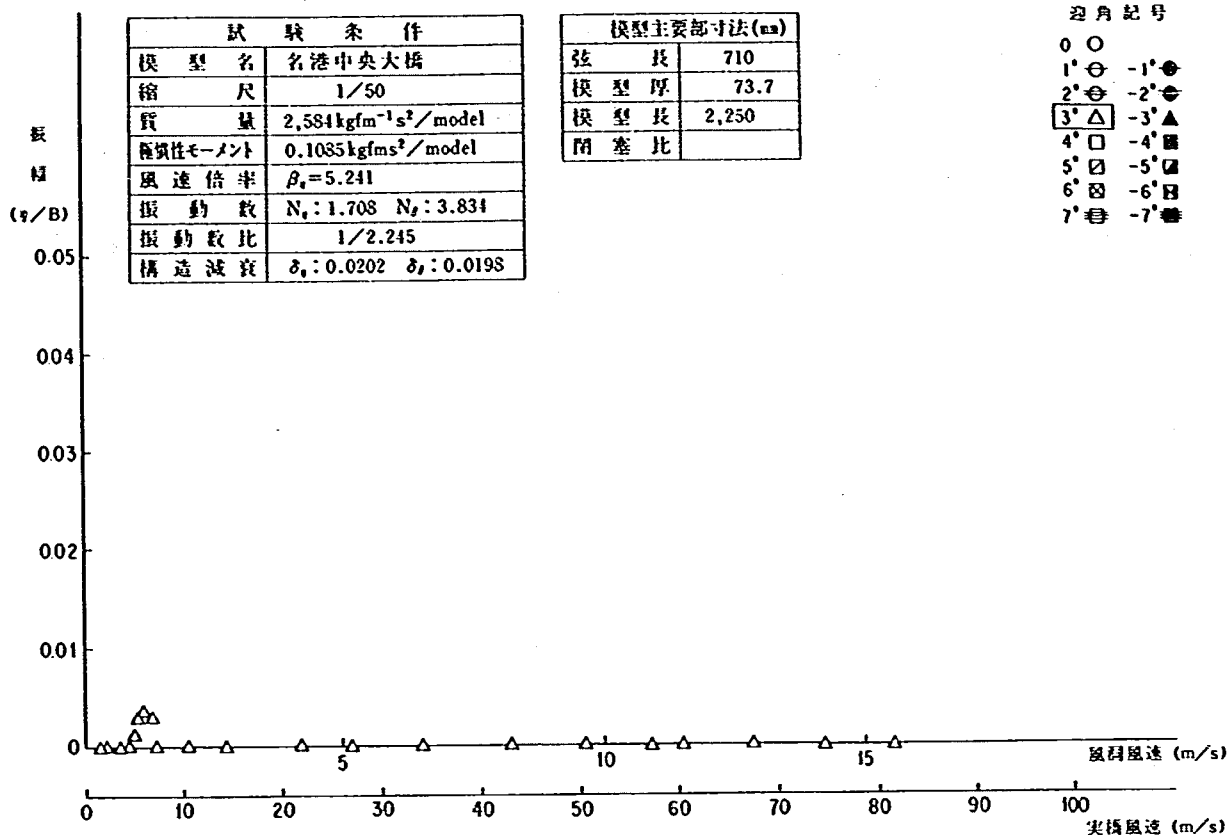


(a) たわみ振動

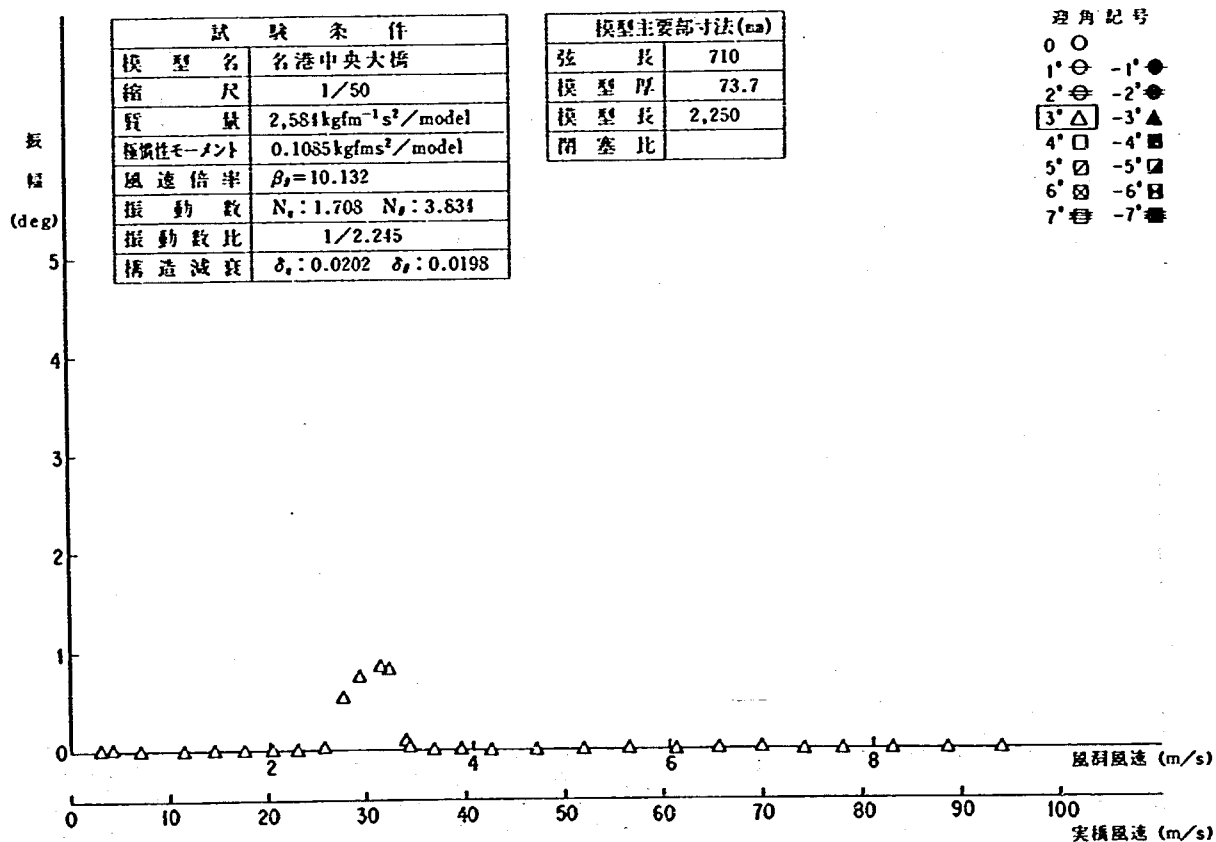


(b) ねじれ振動

付図—1.4 風速—振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = 1^\circ$)

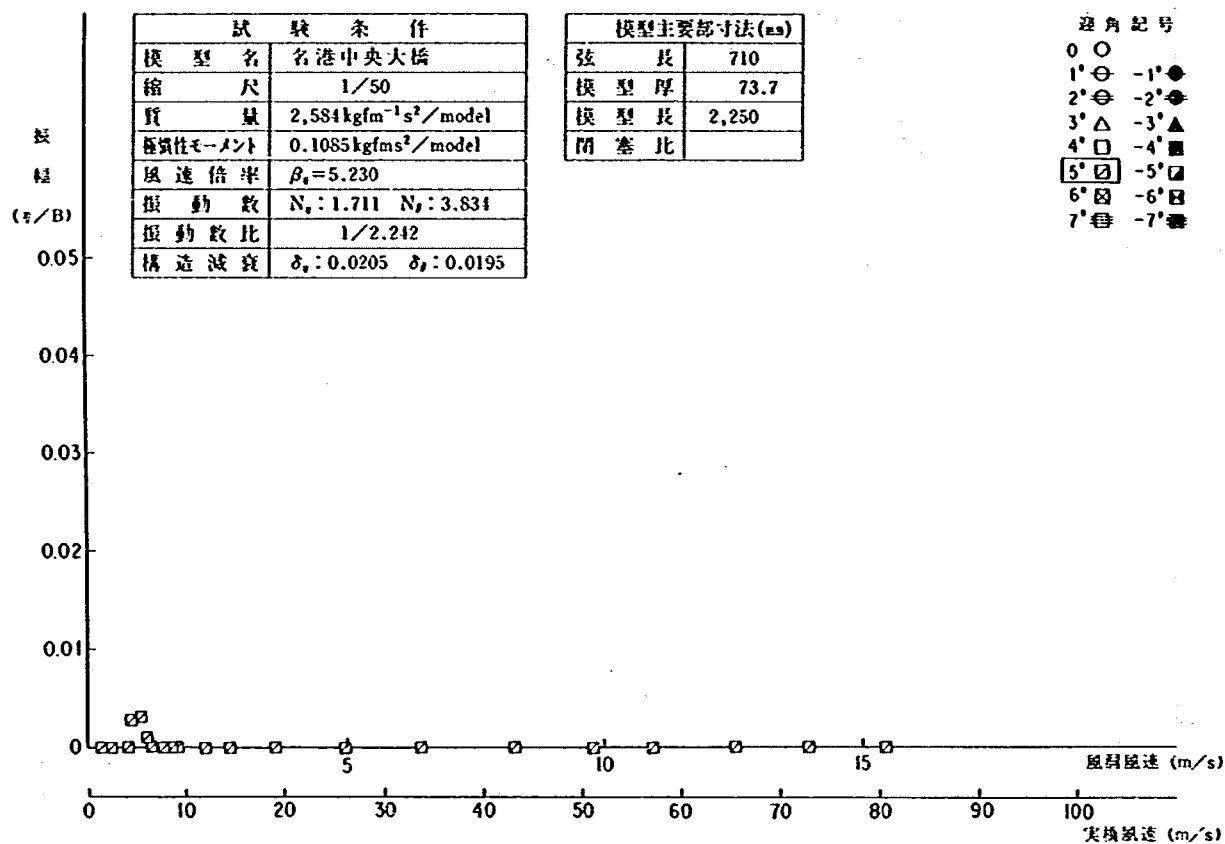


(a) たわみ振動

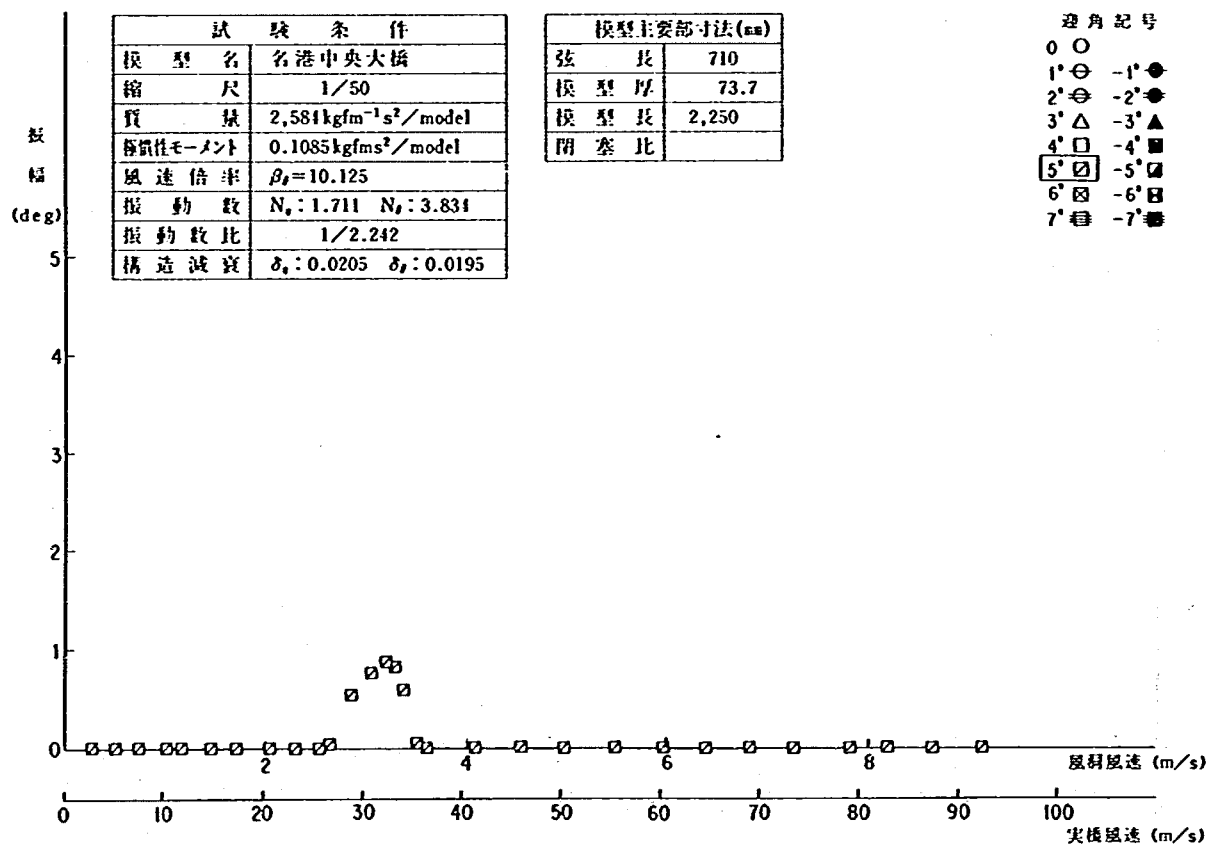


(b) ねじれ振動

付図-1.5 風速-振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = 3^\circ$)

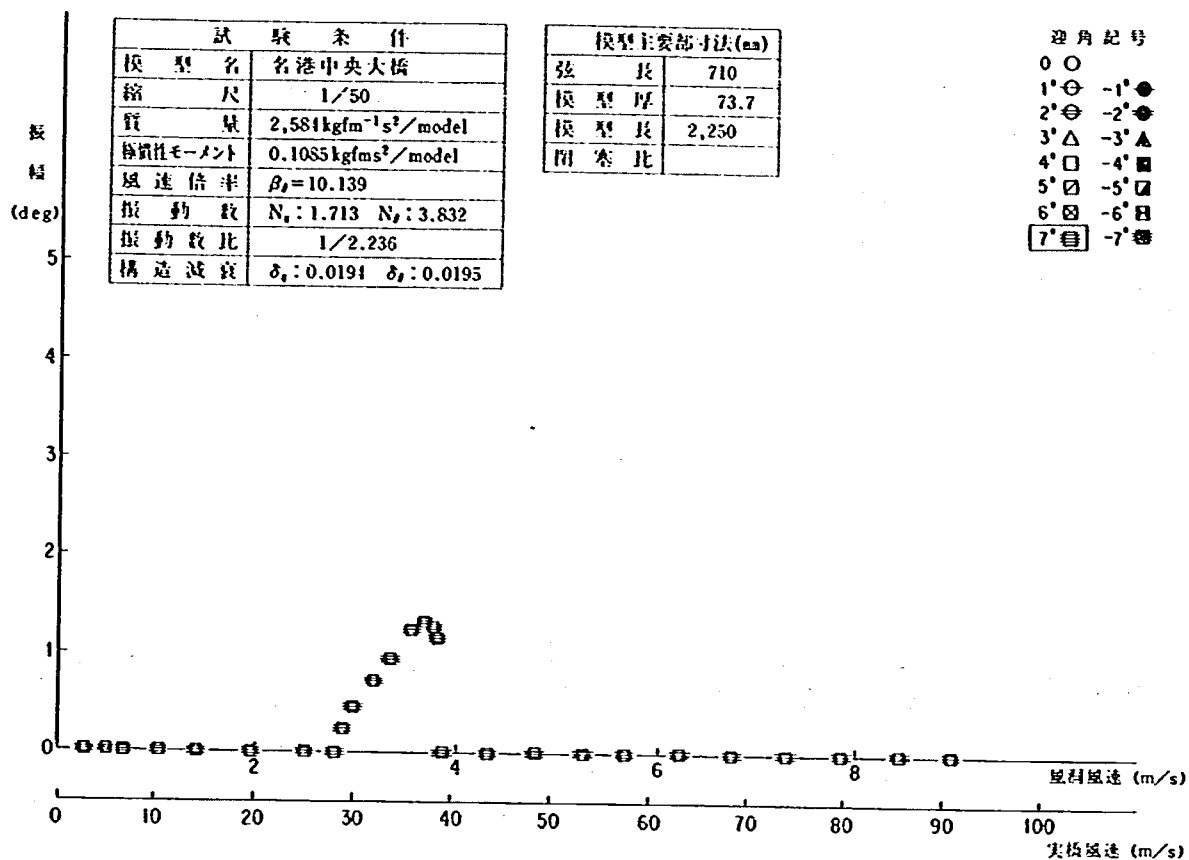


(a) たわみ振動

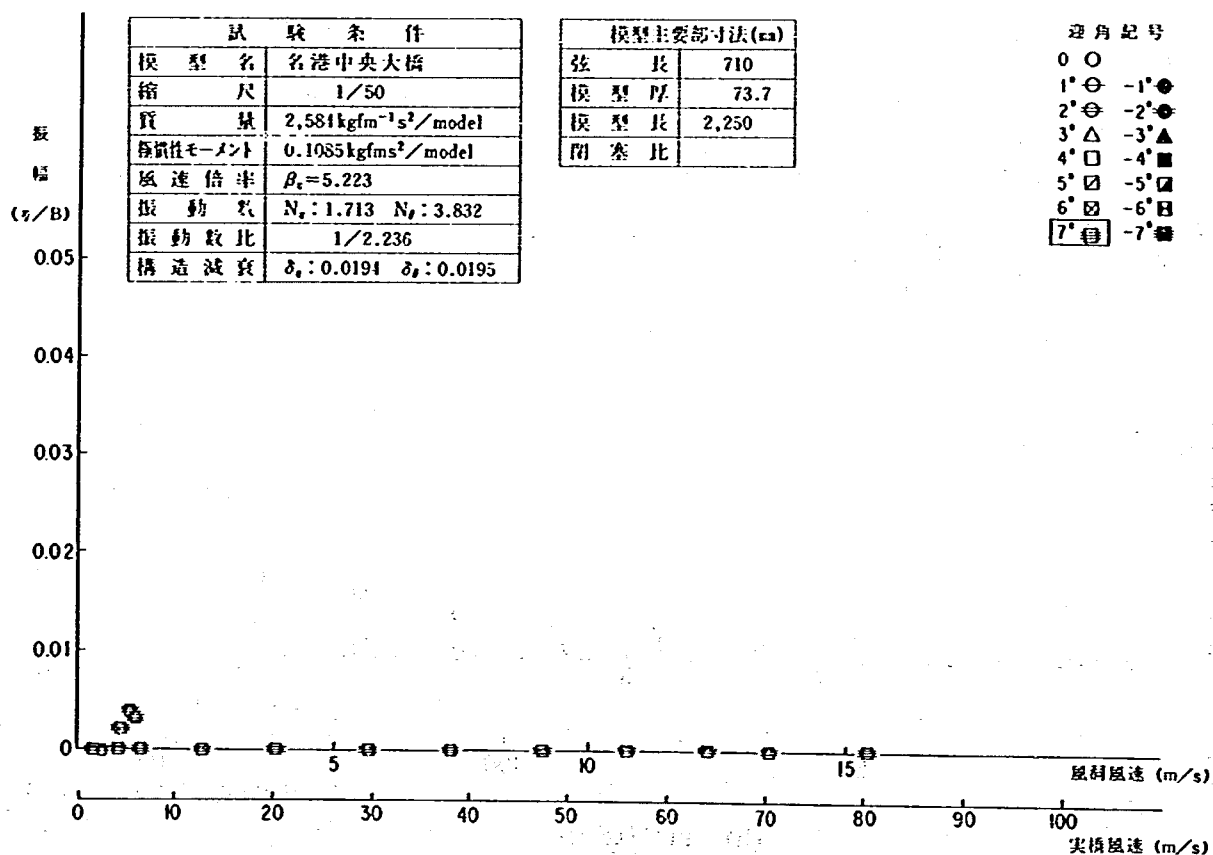


(b) ねじれ振動

付図-1.6 風速-振幅図 (名港中央大橋, $\alpha = 5^\circ$)

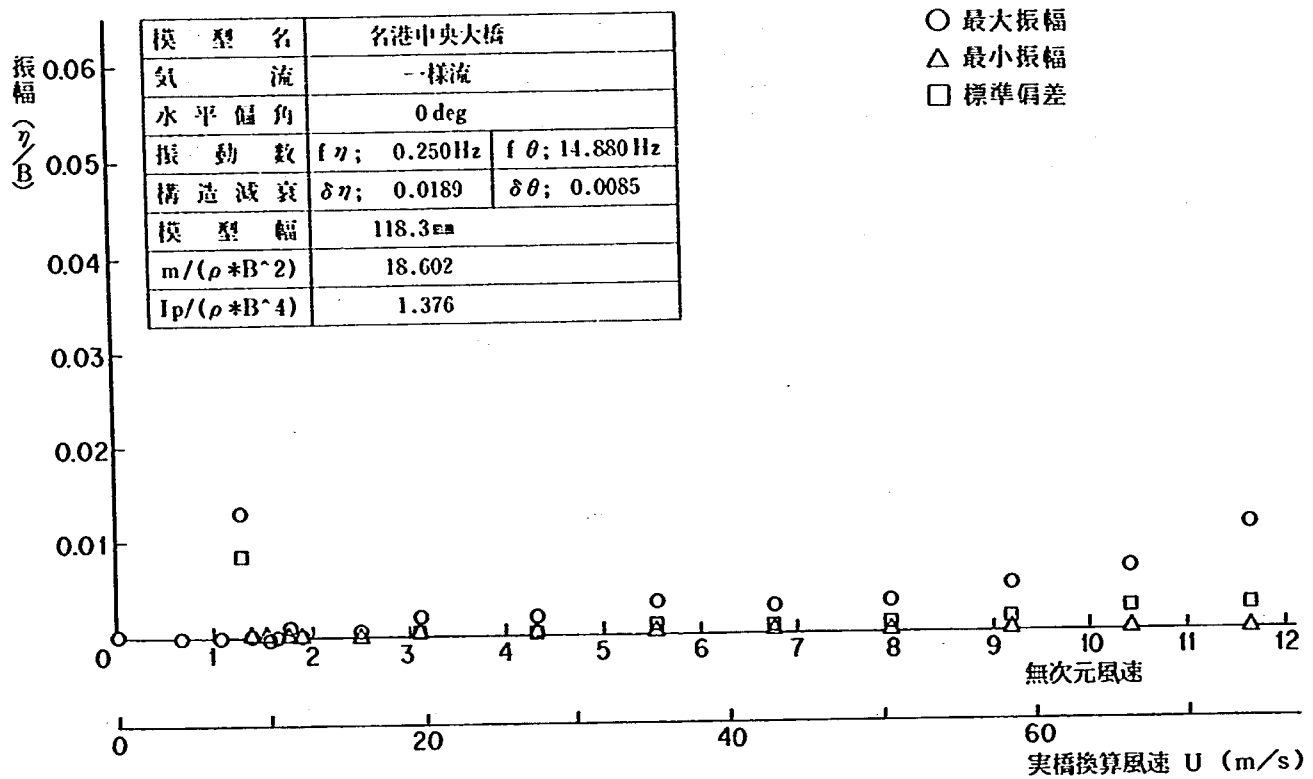


(a) たわみ振動

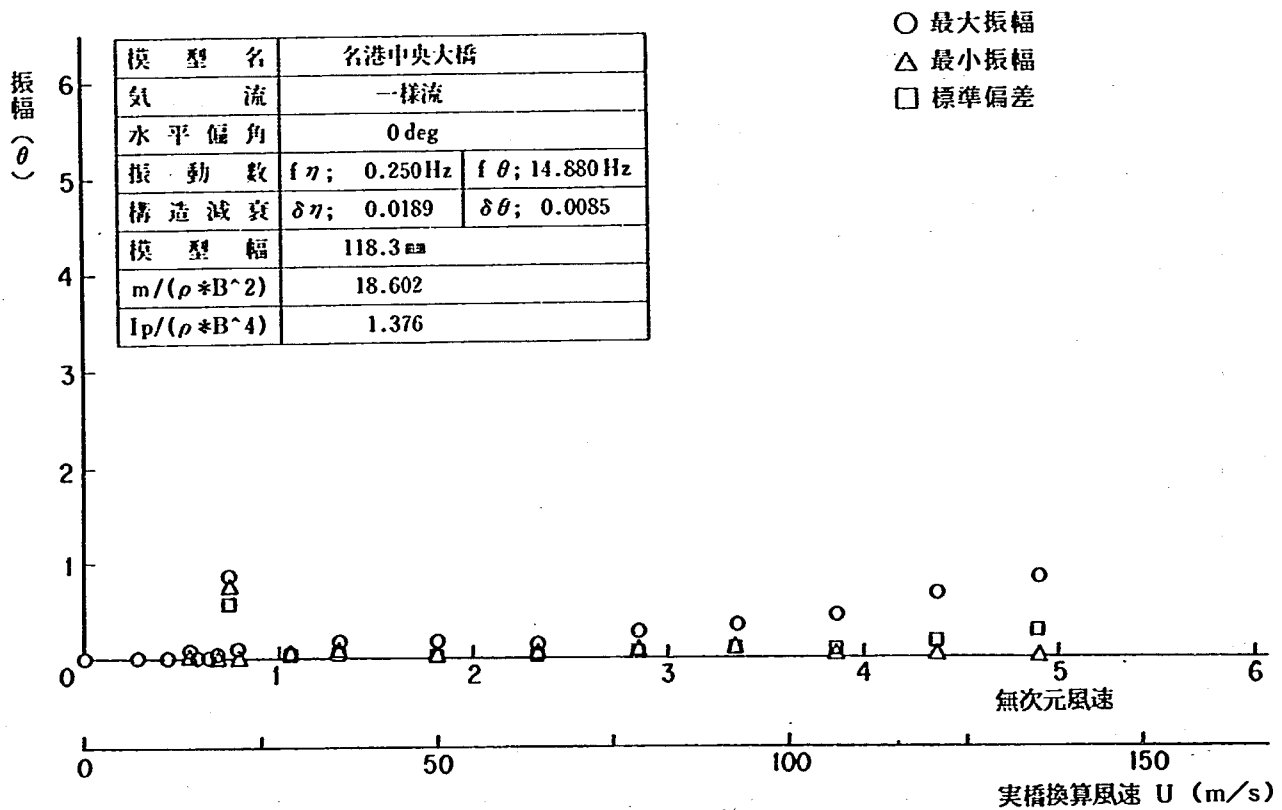


(b) ねじれ振動

付図-1.7 風速-振幅図(名港中央大橋, $\alpha = 7^\circ$)

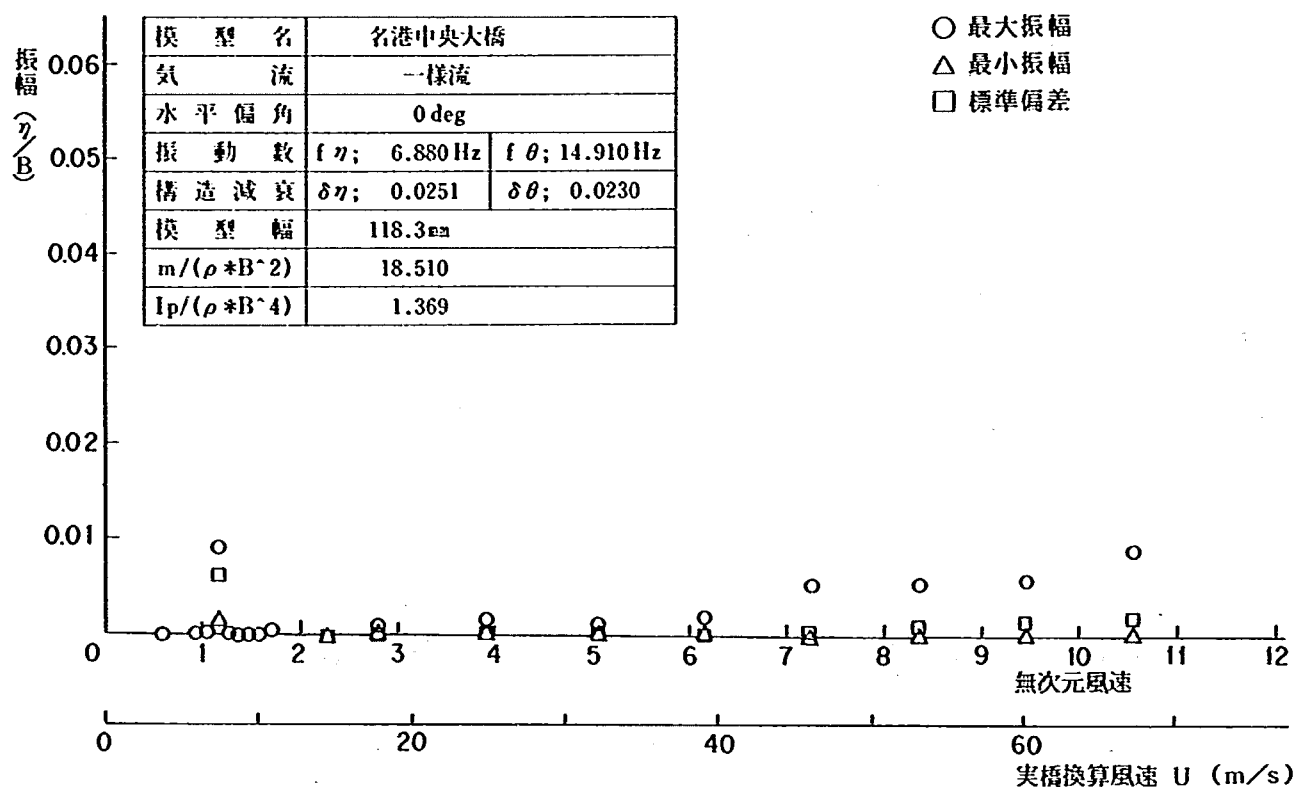


(a) たわみ振動

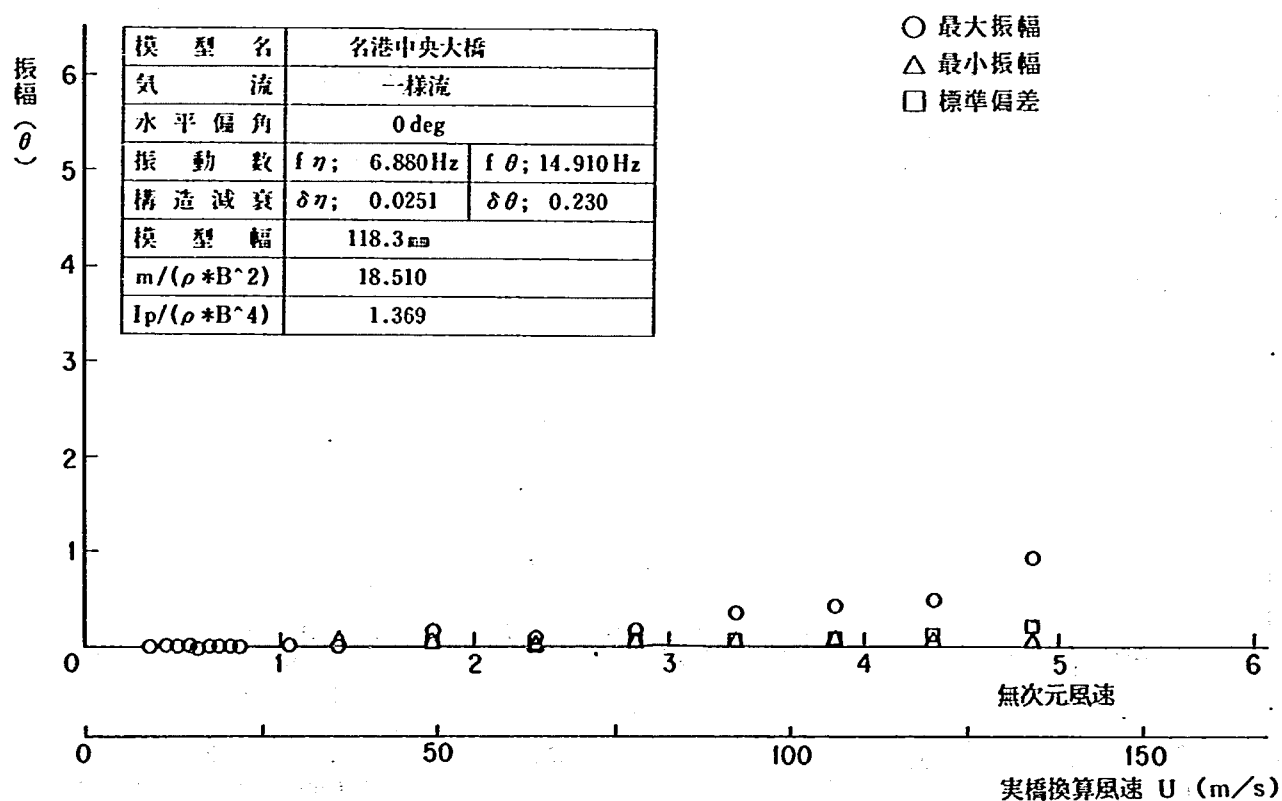


(b) ねじれ振動

付図-2.1 風速-振幅図 (一様流, 偏角 0°)

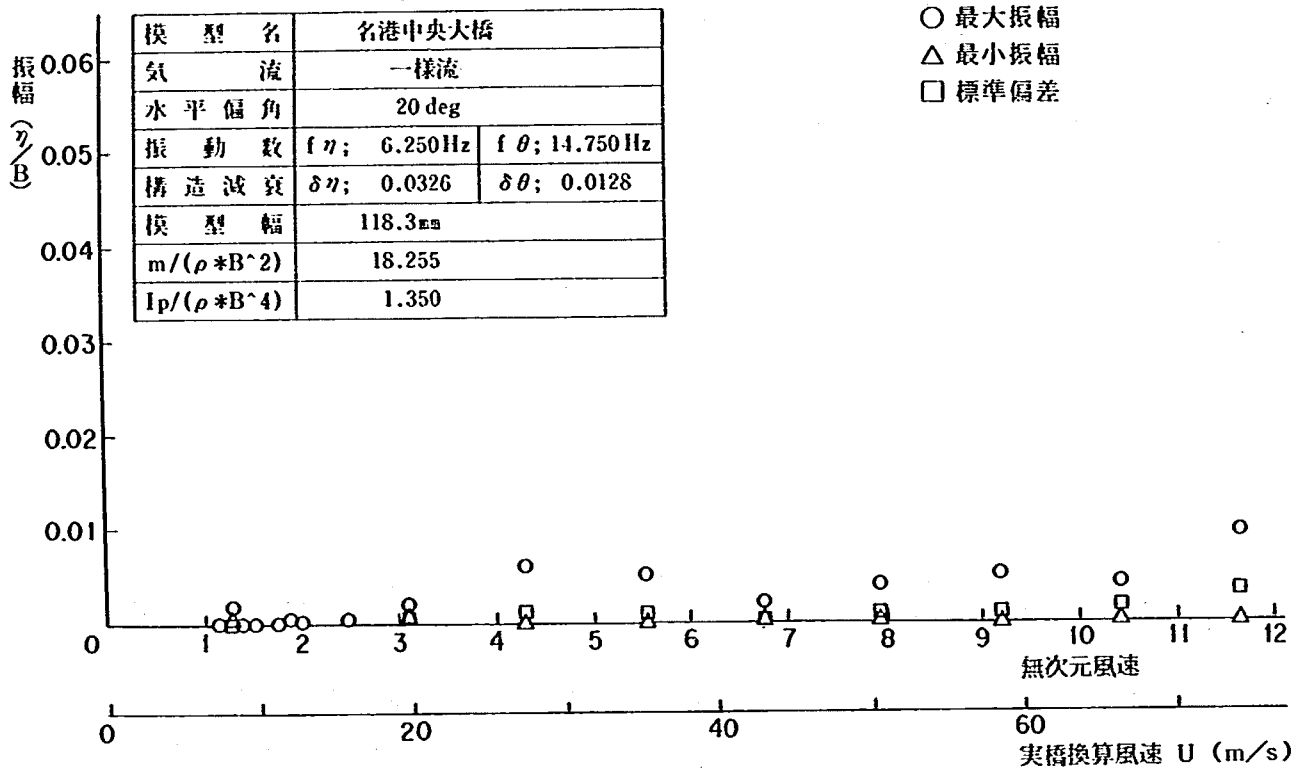


(a) たわみ振動

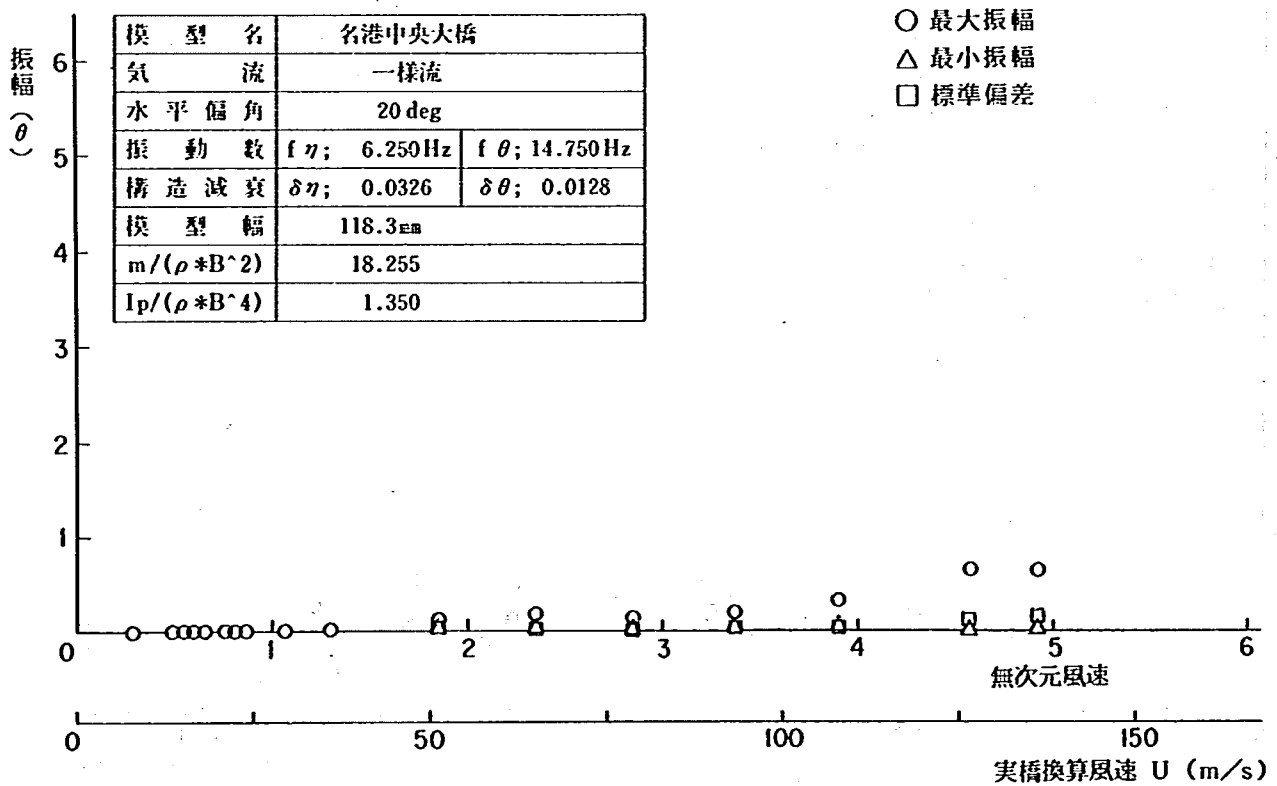


(b) ねじれ振動

付図-2.2 風速-振幅図(一様流, 偏角 0°)

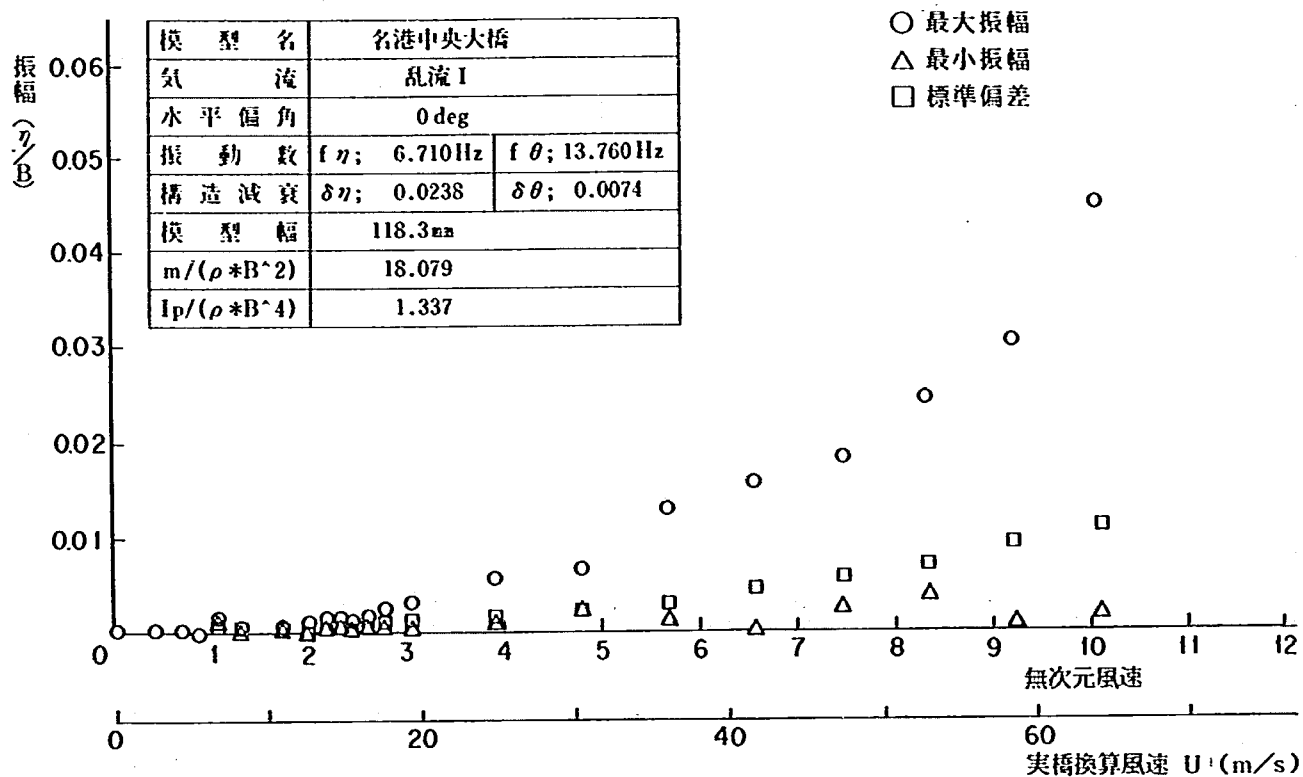


(a) たわみ振動

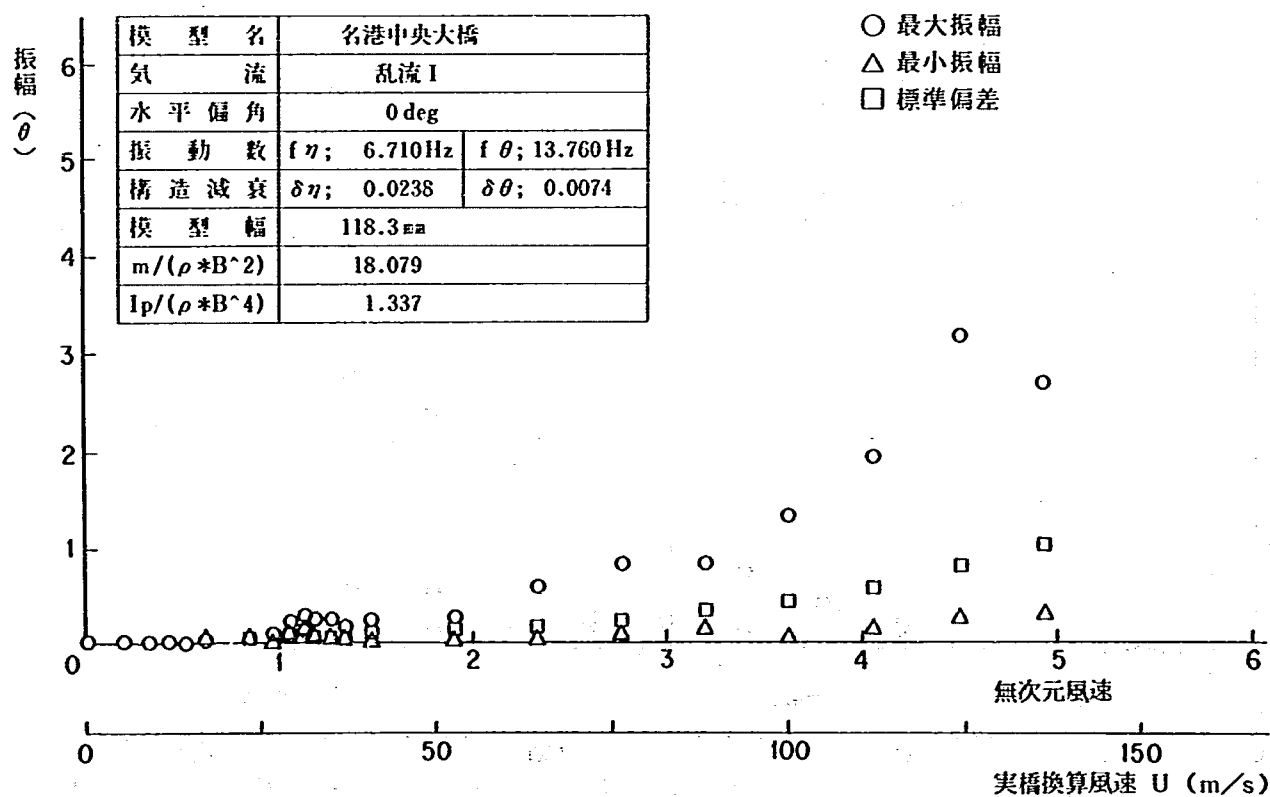


(b) ねじれ振動

付図-2.3 風速-振幅図(一様流, 偏角 20°)

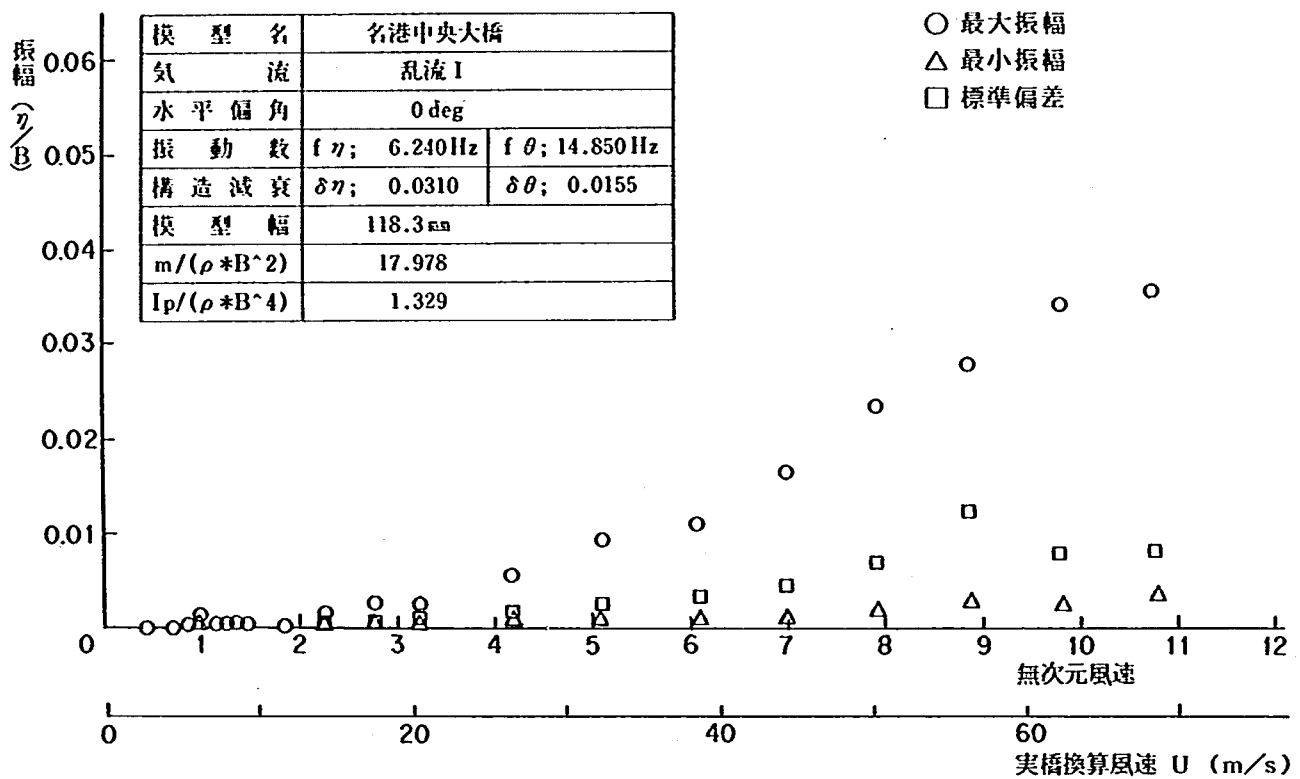


(a) たわみ振動

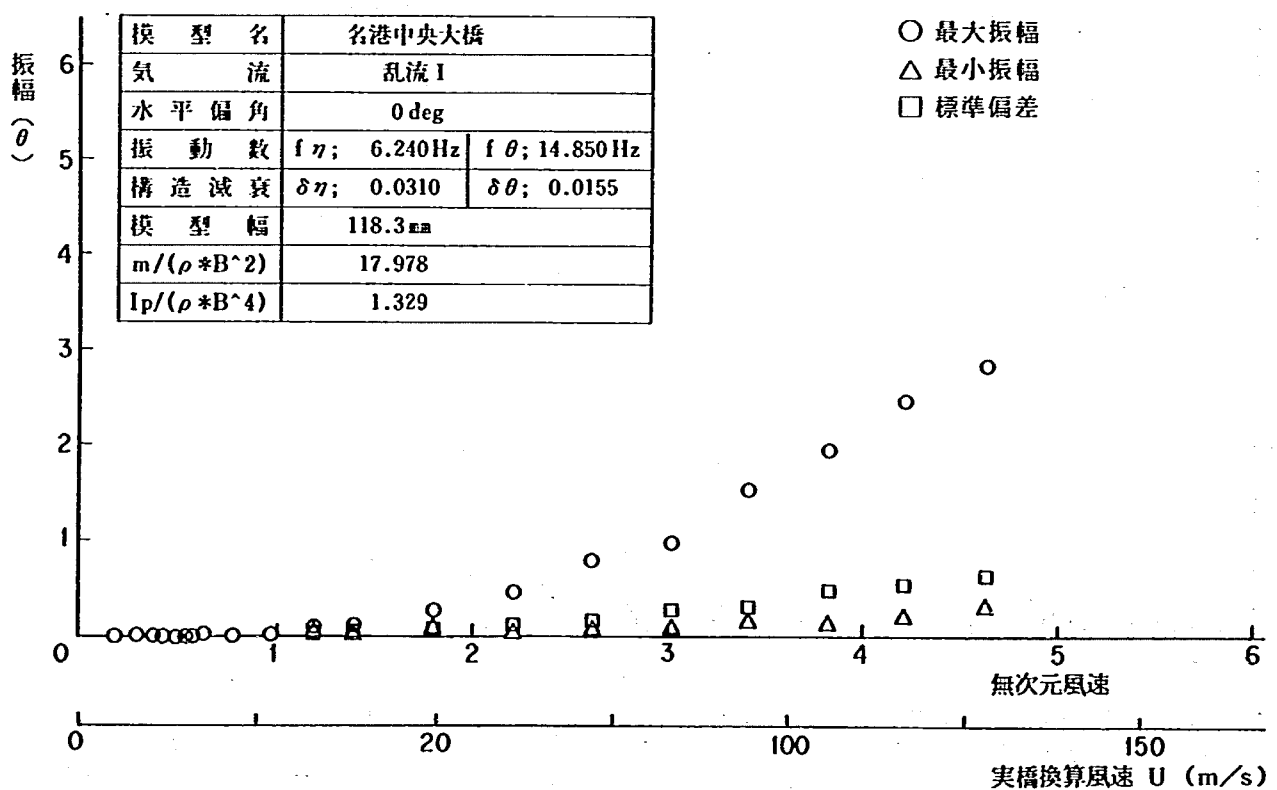


(b) ねじれ振動

付図-2.4 風速-振幅図 (乱流 I, 偏角 0°)

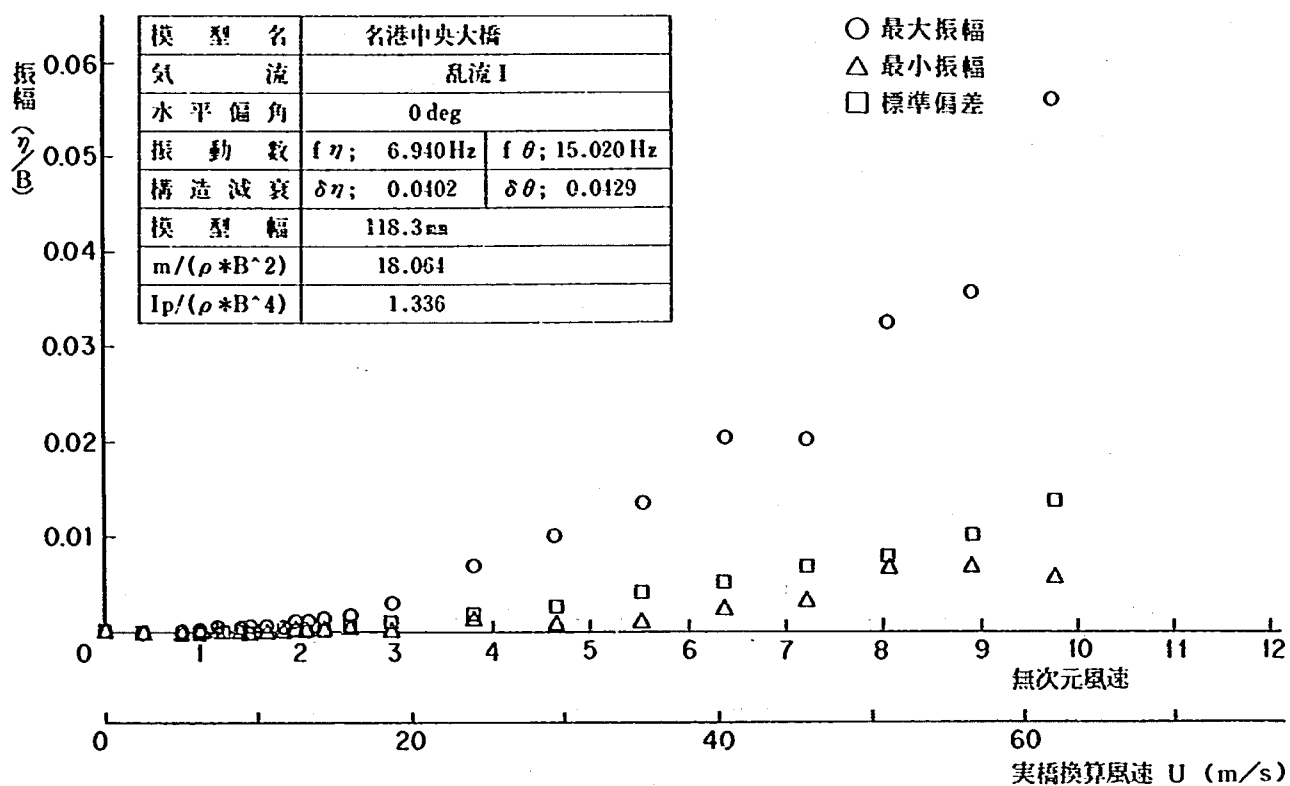


(a) たわみ振動

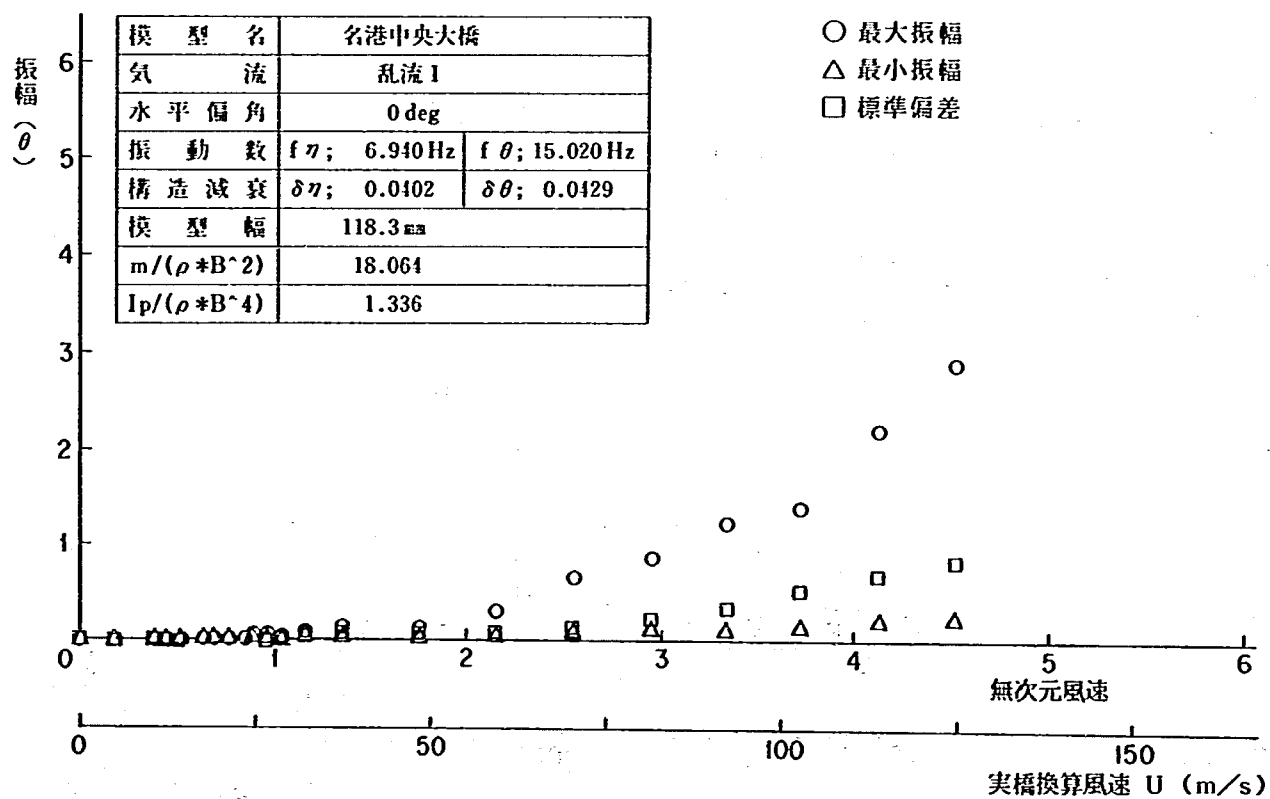


(b) ねじれ振動

付図-2.5 風速-振幅図 (乱流 I, 偏角 0°)

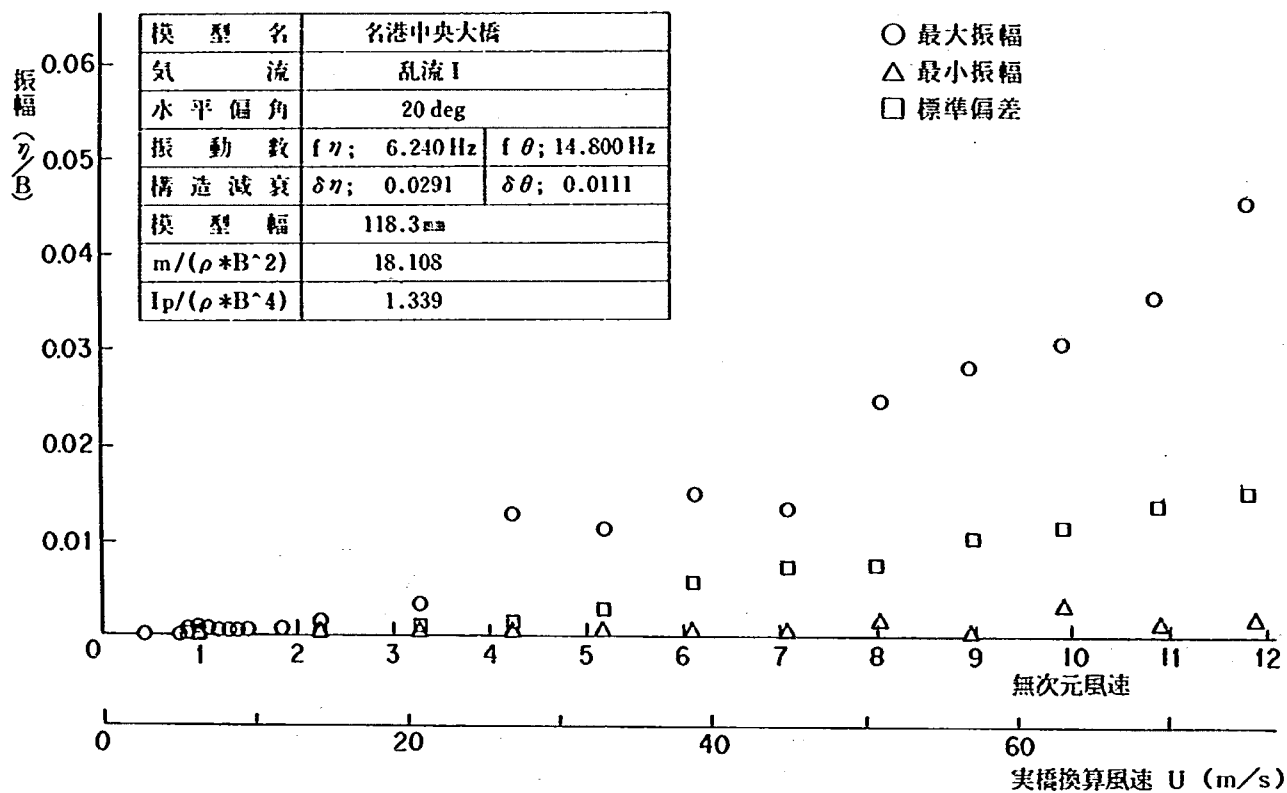


(a) たわみ振動

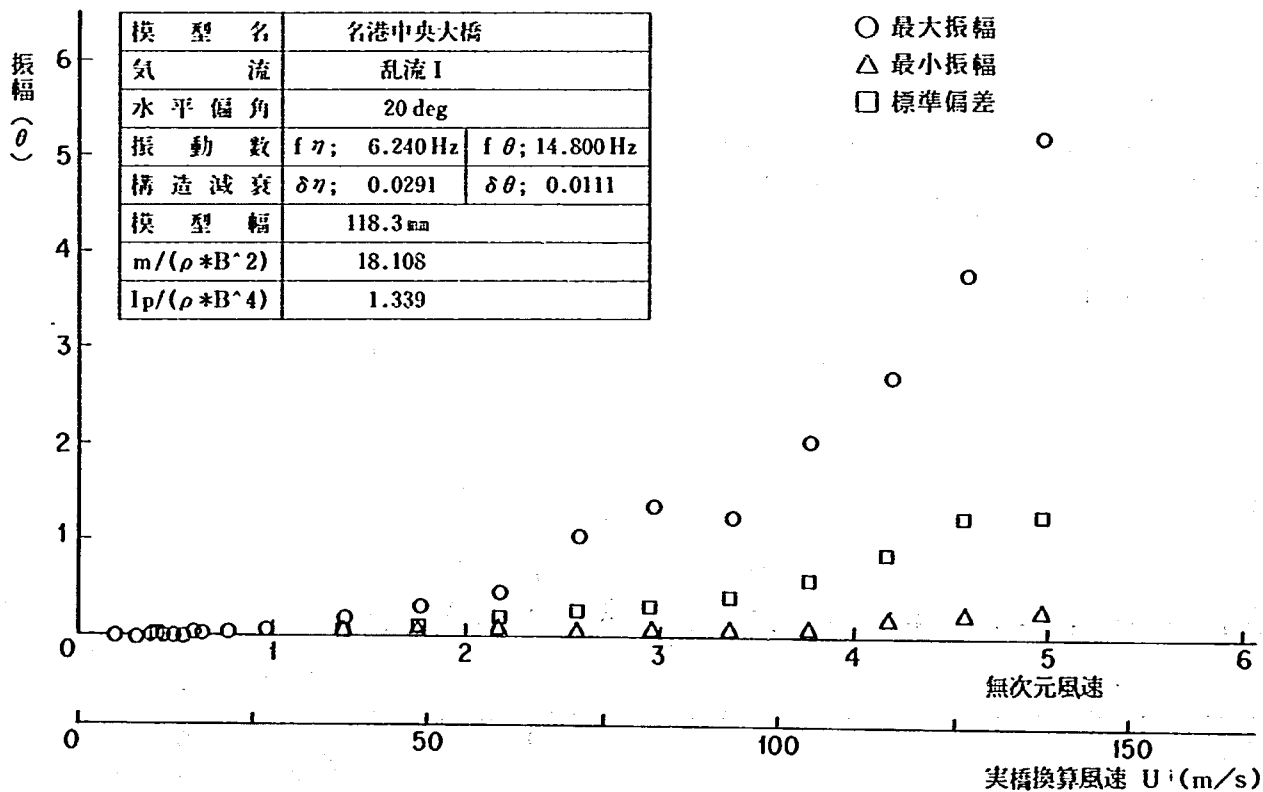


(b) ねじれ振動

付図—2.6 風速—振幅図 (乱流 I, 偏角 0°)

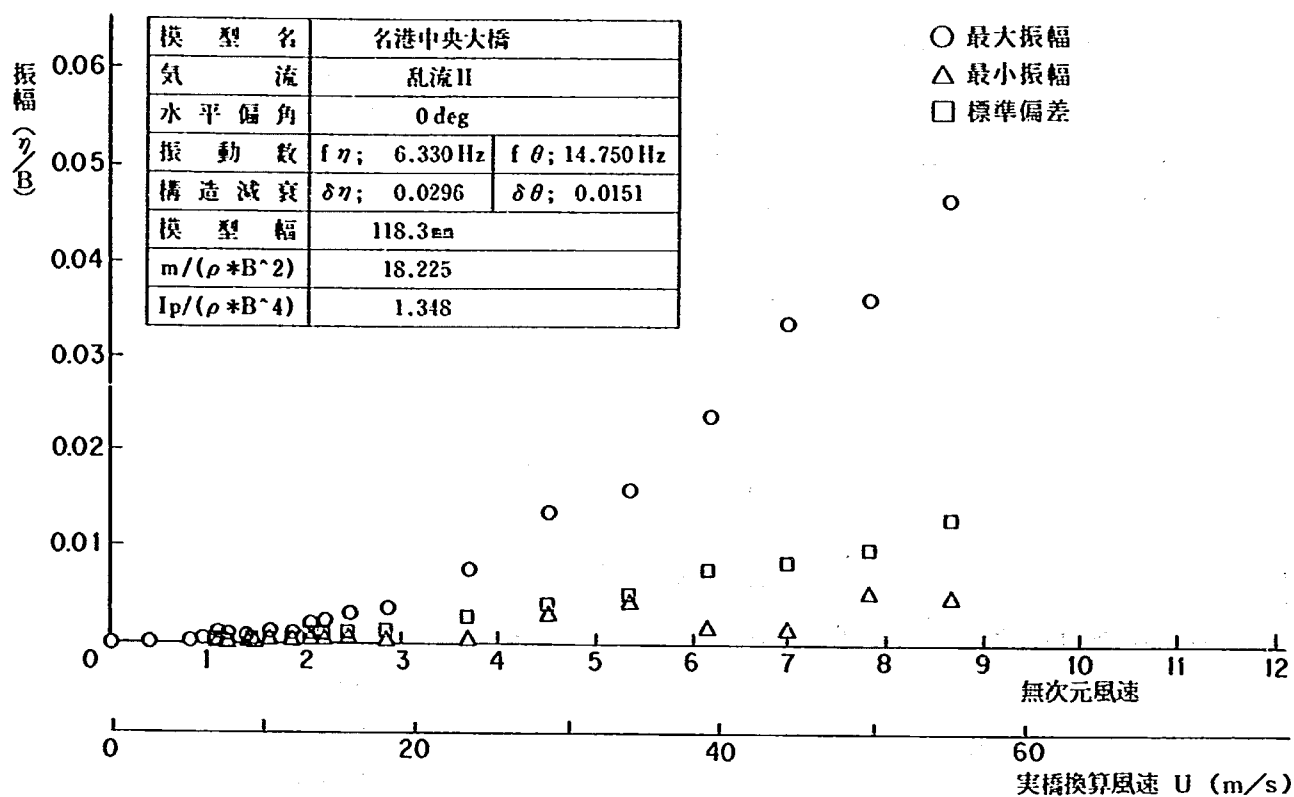


(a) たわみ振動

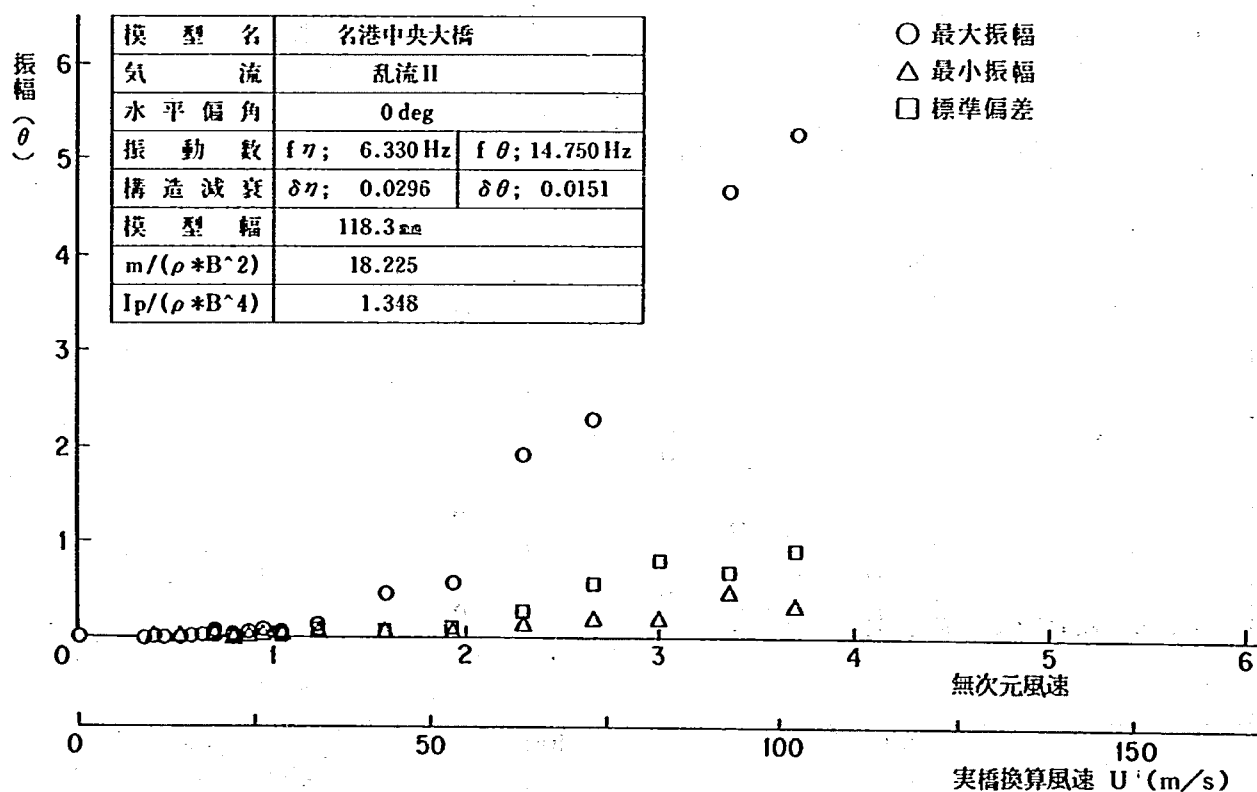


(b) ねじれ振動

付図-2.7 風速-振幅図 (乱流 I, 偏角 20°)

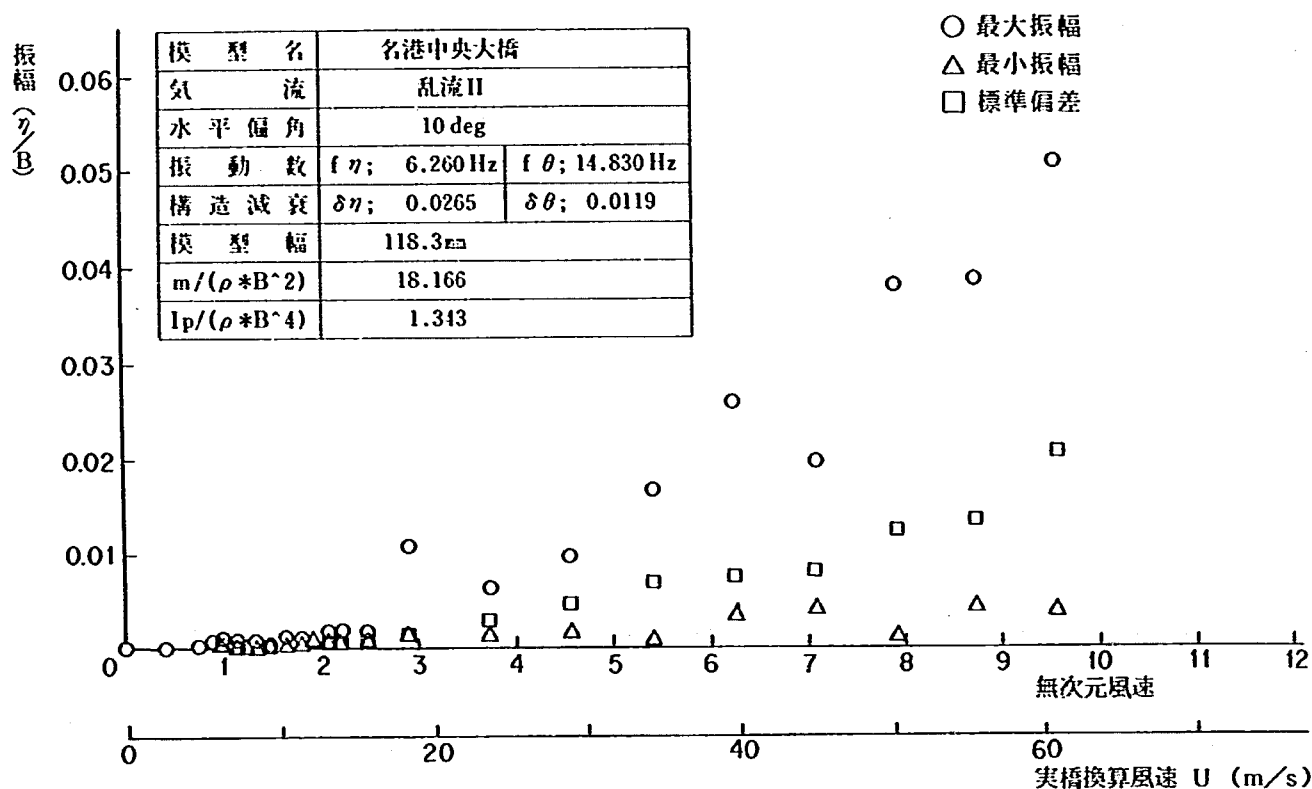


(a) たわみ振動

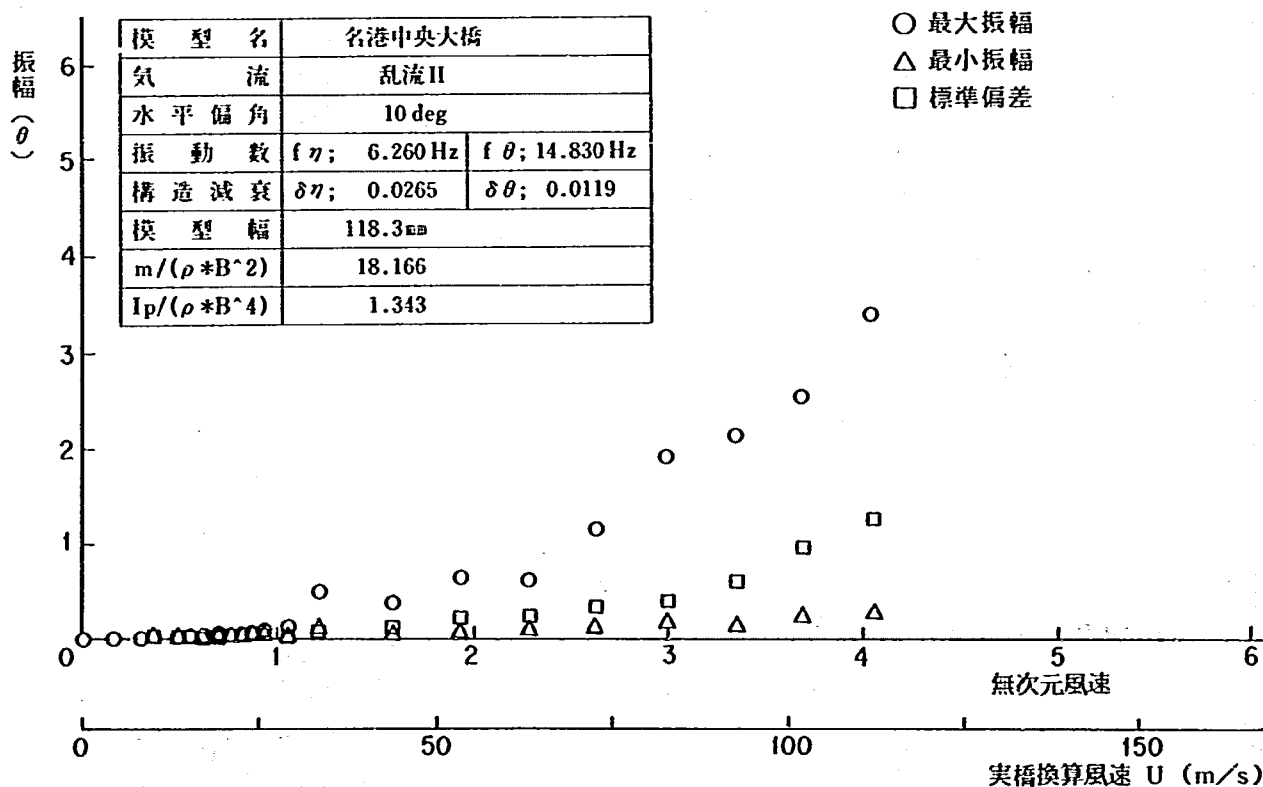


(b) ねじれ振動

付図-2.8 風速-振幅図 (乱流Ⅱ, 偏角 0°)

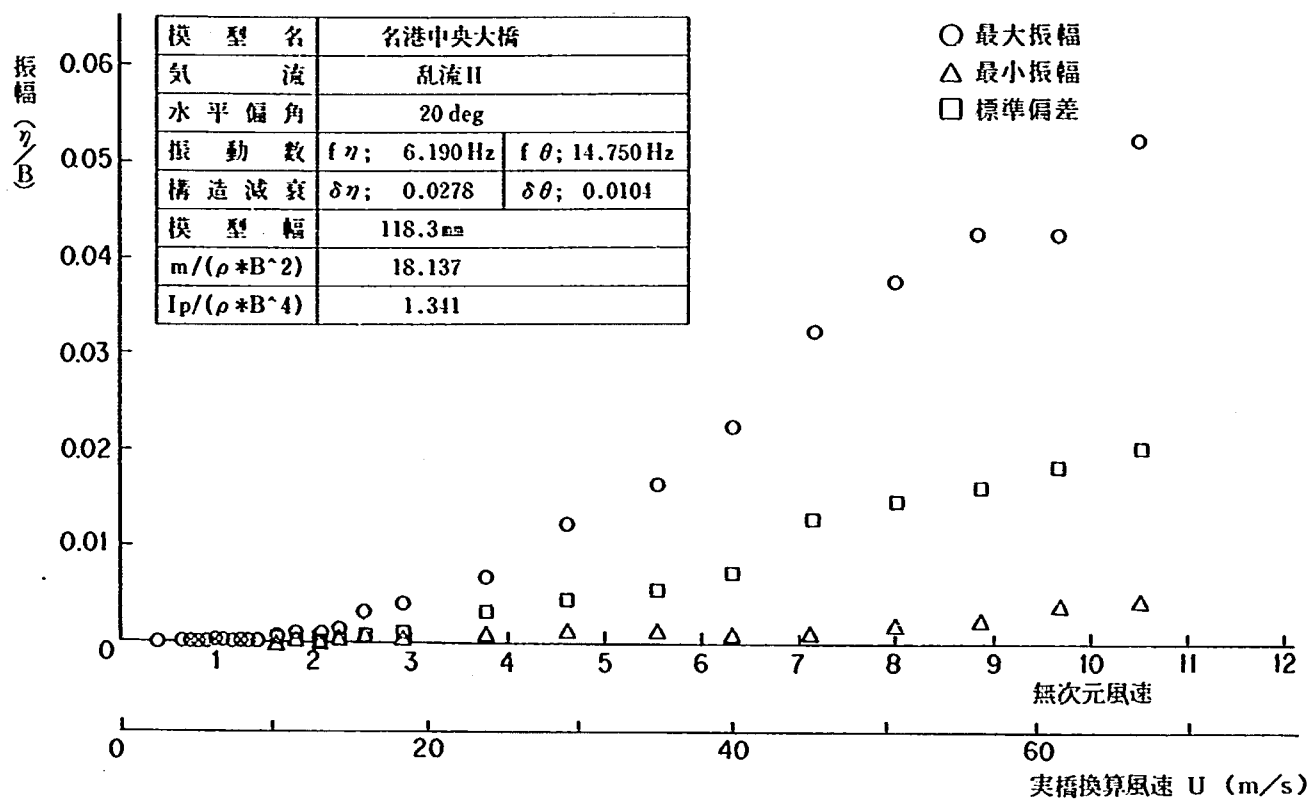


(a) たわみ振動

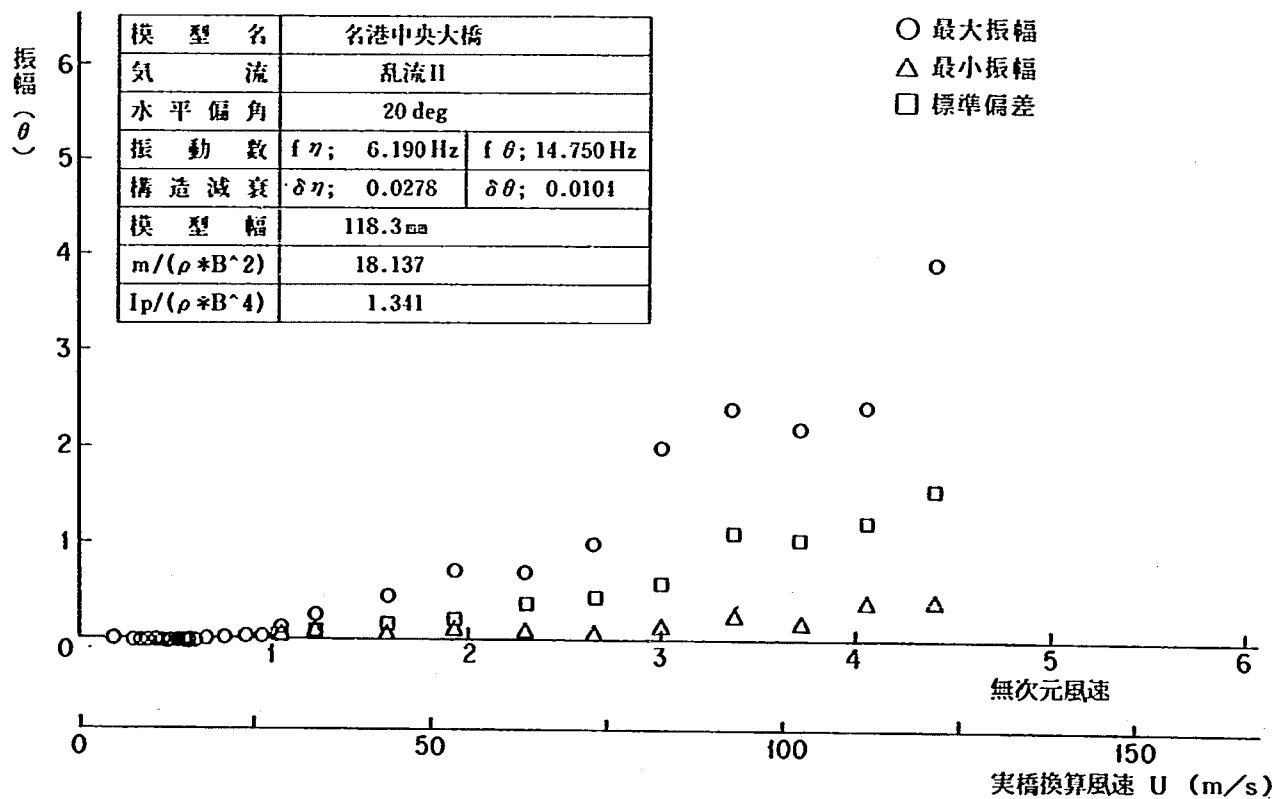


(b) ねじれ振動

付図—2.9 風速—振幅図 (乱流II, 偏角 10°)



(a) たわみ振動



(b) ねじれ振動

付図-2.10 風速-振幅図(乱流II, 偏角 20°)

名港中央大橋の耐風性
調査報告書

ISSN 0386-5878

土研資料第2719号

平成元年1月(1989)

横山 功一・日下部 毅 明
東久保 正 徳

要 旨

愛知県名古屋市に計画中の3径間連続鋼斜張橋である名港中央大橋の設計基本案を対象とし、パネ支持実験およびタウト模型実験を行い、耐風性を調査した。その結果、本設計案は発散振動に対して十分安全であること、一様流中で発現する渦励振はわずかな乱れによって大幅に低減されること、そしてガスト応答に関して今後の確な安全性を十分に考慮した安全性の確認をする必要があることが判明し、結論としては本断面を詳細設計の基本とする点に根本的な問題は無いことが明かになった。

キーワード：鋼斜張橋，乱流，部分模型実験，タウト模型実験，三分力試験，耐風性調査

郵便はがき

四十円切手
をはって
さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研所

構造研究室御中

No. 2

No. 2

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第2719号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印