

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2994号

001

土 木 研 究 所 資 料

札幌大橋(並列橋)の耐風性調査報告書

平成 3 年 3 月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

[Copyright © (1991) 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。」

札幌大橋(並列橋)の耐風性調査報告書

構造研究室 室長 横山 功一

研究員 小路 泰広

関谷 光昭

要 旨

一般国道337号札幌大橋は新たに隣接して橋を架けられ並列橋となるが、これにともない並列橋特有の風による振動が起こることが懸念される。本調査では2次元部分模型および3次元全橋模型を用いた風洞実験を実施し、道路中心間隔をはじめとするパラメータを変化させて耐風性の評価を行った。その結果、並列橋においては下流側の橋桁の過励振およびバフティングによる振動振幅が大きくなる傾向があること、道路中心間隔は今回検討した範囲では、30.2mの場合に設計風速以下で許容振幅を超える振動が発現する可能性があり、15.5mの場合の方が耐風性に優れることなどが明らかとなった。

キーワード：札幌大橋，並列橋，耐風性調査，風洞実験，道路中心間隔，部分模型，全橋模型

ま え が き

札幌大橋は、一般国道337号線道央新道の石狩川横断部に架けられた橋梁であり、3径間連続鋼床版2箱桁橋(90.0m+150.0m+90.0m)と3径間連続鋼床版2主钣桁橋(3@72.3m)3橋の計4橋から構成されている。

札幌大橋は現在2車線であるが、これを4車線に増強するため、現存する橋梁に隣接して新たに橋梁を建設し、並列橋とする事が計画されている。並列橋の場合には風下側の橋桁にしばしば大きな振動が引き起こされるため、並列橋化に際しては、橋桁の耐風性を検討することは非常に重要である。

そこで本調査では、札幌大橋の並列橋について2次元部分模型実験および架橋地点の自然風と相似した乱流中での3次元全橋模型実験を実施し、並列橋における基本的な対風応答特性を把握し、2橋の間隔等について検討を行った。

ここに、その成果をとりまとめて報告する。

平成3年3月

室 長	横 山 功 一
研究員	小 路 泰 広
	関 谷 光 昭

目 次

1. 概 要	1
1.1 札幌大橋の概要と調査の目的	1
1.2 単独橋の耐風性と振動特性	1
1.3 本調査の概要	2
2. 風洞実験による耐風性の検討	10
2.1 2次元部分模型実験(縮尺1/45)	10
2.1.1 実験方法	10
2.1.2 実験条件	13
2.1.3 実験ケース	13
2.1.4 実験結果	15
2.2 3次元全橋模型実験(縮尺1/100)	20
2.2.1 実験方法	20
2.2.2 実験条件	23
2.2.3 全橋模型の特性	24
2.2.4 気流特性	31
2.2.5 実験ケース	31
2.2.6 実験結果	31
2.3 2次元部分模型実験(縮尺1/100)	45
2.3.1 実験方法	45
2.3.2 実験条件	45
2.3.3 気流特性	45
2.3.4 実験ケース	53
2.3.5 実験結果	53
2.4 考 察	54
2.4.1 対風応答の基本的な特性	54
2.4.2 構造減衰の影響	54
2.4.3 気流の影響	54
2.4.4 設計案の耐風性の評価	55
3. まとめ	64
謝 辞	64
参考文献	64
附属資料	65

1. 概 要

1.1 札幌大橋の概要と調査の目的

札幌大橋は、一般国道 337号線道央新道の石狩川横断部に架けられた橋梁であり、3 径間連続鋼床版 2 桁橋 (90.0m + 150.0m + 90.0m) と 3 径間連続鋼床版 2 主桁橋 (3 @ 72.3m) 3 橋の計 4 橋から構成されている。

札幌大橋は現在 2 車線であるが、これを 4 車線に増強するため、現存する橋梁に隣接して新たに橋梁を建設し、並列橋とする事が計画されている。並列橋化にあたり、現計画では 2 橋の道路中心距離は、鉄道の基礎構造物の近接施工基準を考慮し、30.2m とされている (図-1.1, 1.2)。しかし、今後の河川協議の動向によっては河道を安定させる目的で隔壁 (20m) を造らなければならなくなる可能性があり、難工事で工費的にも景観的にも好ましくない。そのため、道路橋の近接施工に関する新規基準による最小離れ値である道路中心距離 15.5m についても検討されている (図-1.3, 1.4)。

札幌大橋の並列橋化に際しては、橋桁の耐風性を検討することは非常に重要である。なぜなら、構造物が複数個近接に配置されることにより、単独の場合の空力特性と大きく異なることが知られており、並列橋の場合には Wake-buffeting あるいは Wake-galloping と呼ばれる現象により、主に風下側の橋桁にしばしば大きな振動が引き起こされるためである⁽¹⁾。2 橋の間隔はこれらの現象が起こるかどうかの特性を決める最も重要な要素であり、間隔の決定にあたって耐風性の検討は必要不可欠である。

1.2 単独橋の耐風性と振動特性

札幌大橋は 3 径間連続鋼床版桁橋部の主径間に 150m の長スパンを有するため、現橋の計画時に耐風性についての検討が行われた⁽²⁾。その成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 設計風速の算定を行い、再現期間 100 年で 37m/s が得られた。
- (2) 架橋地点での風観測データの解析を実施し、乱れ強さは水平方向で 10~12%、鉛直方向で 4~5 % であり、乱れのスケールは水平方向でおよそ 100m 程度であることがわかった。
- (3) 風洞実験を行い、札幌大橋の耐風性について総合的な評価を行った。その結果、架橋地点と相似させた気流中で構造減衰 0.04 の仮定のもとで、渦励振、ギャロッピングともに発現せず、風速の増大とともに振幅も徐々に大きくなる不規則現象であるバフエティングが現れたが、発現振幅は許容振幅をかなり下回るものと予想され、総合的にみて本橋の耐風性は良好であると判断された。

また、札幌大橋の完成直後に、耐風性に大きな影響を与える橋桁の振動特性を調査するため、起振機を用いた実橋振動試験が行われた⁽³⁾。主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 固有振動数は、鉛直 1 次モードでは起振力により異なる値を示し、0.67~0.72Hz であった。鉛直 2 次モードは 1.28Hz、鉛直 3 次モードは 1.69~1.71Hz であった。
- (2) 振動モードについては解析値とよく一致した形状が得られた。
- (3) 構造減衰については、鉛直 1 次では $\delta=0.089 \sim 0.142$ 、鉛直 2 次では $\delta=0.098 \sim 0.102$ 、鉛直 3 次では $\delta=0.074 \sim 0.081$ が得られた。

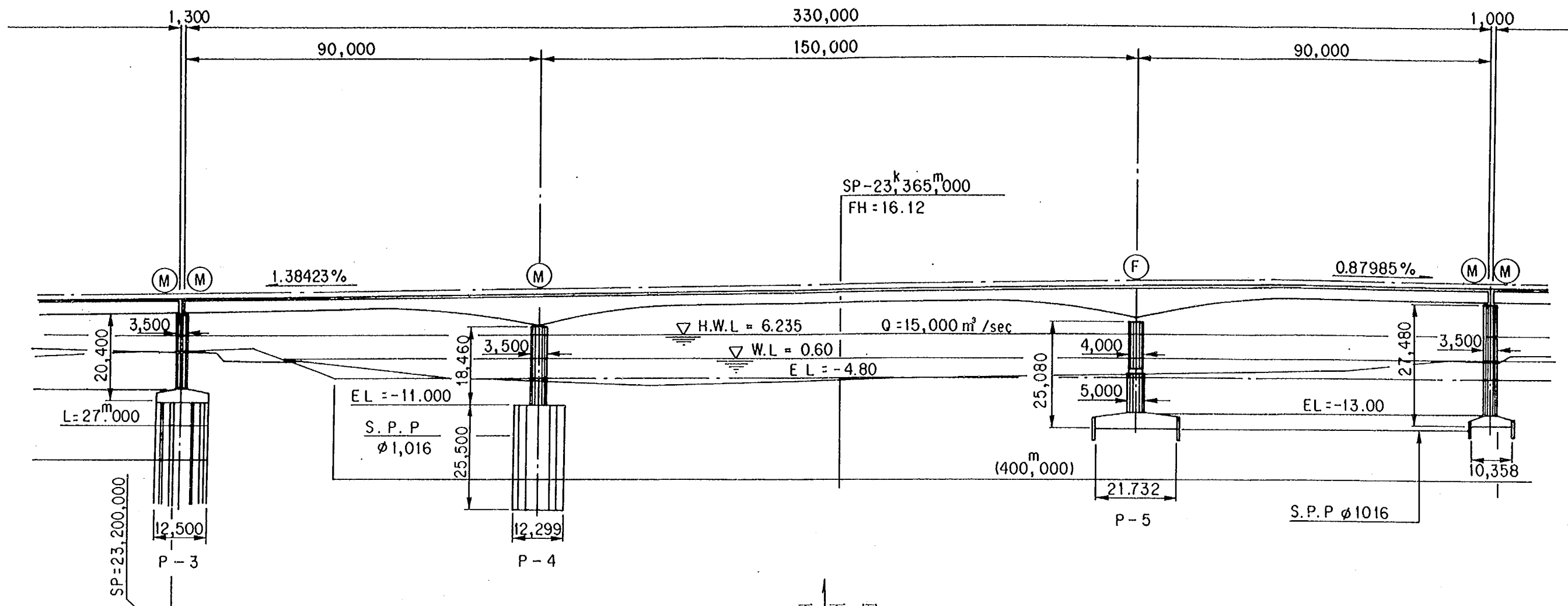
振動実験の結果得られた構造減衰は、風洞実験で仮定した構造減衰0.04よりもかなり大きいため、単独橋の耐風性は十分に良好であるといえる。

1.3 本調査の概要

本調査では、札幌大橋の並列橋について2次元風洞実験および3次元風洞実験を行い、架橋地点の自然風と相似した乱流中での応答を把握するなど、札幌大橋の耐風性について多角的な検討を行った。調査の内容は以下のとおりである。

- (1) 一様流中での2次元風洞実験により、迎角や橋軸方向の断面変化等を考慮した並列橋の設計案断面の基本的な応答特性を求めた。
- (2) 構造減衰が耐風性に与える影響を調査し、実橋に近い値での応答特性より、実橋の耐風性を評価した。
- (3) 2橋に高低差がついた場合の応答特性を求めた。
- (4) 2橋の距離が耐風性に与える影響を調査した。
- (5) 架橋地点に相似させた乱流中での実験より、札幌大橋並列橋の自然風中における実際の挙動について調査した。

側面図



平面図

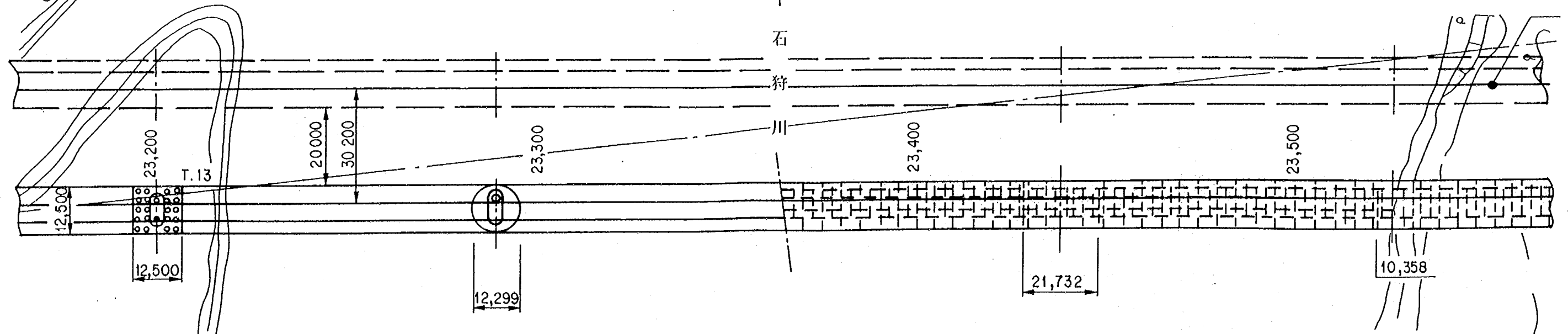


図-1.1 札幌大橋並列橋一般図 (道路中心離れ 30.2m)

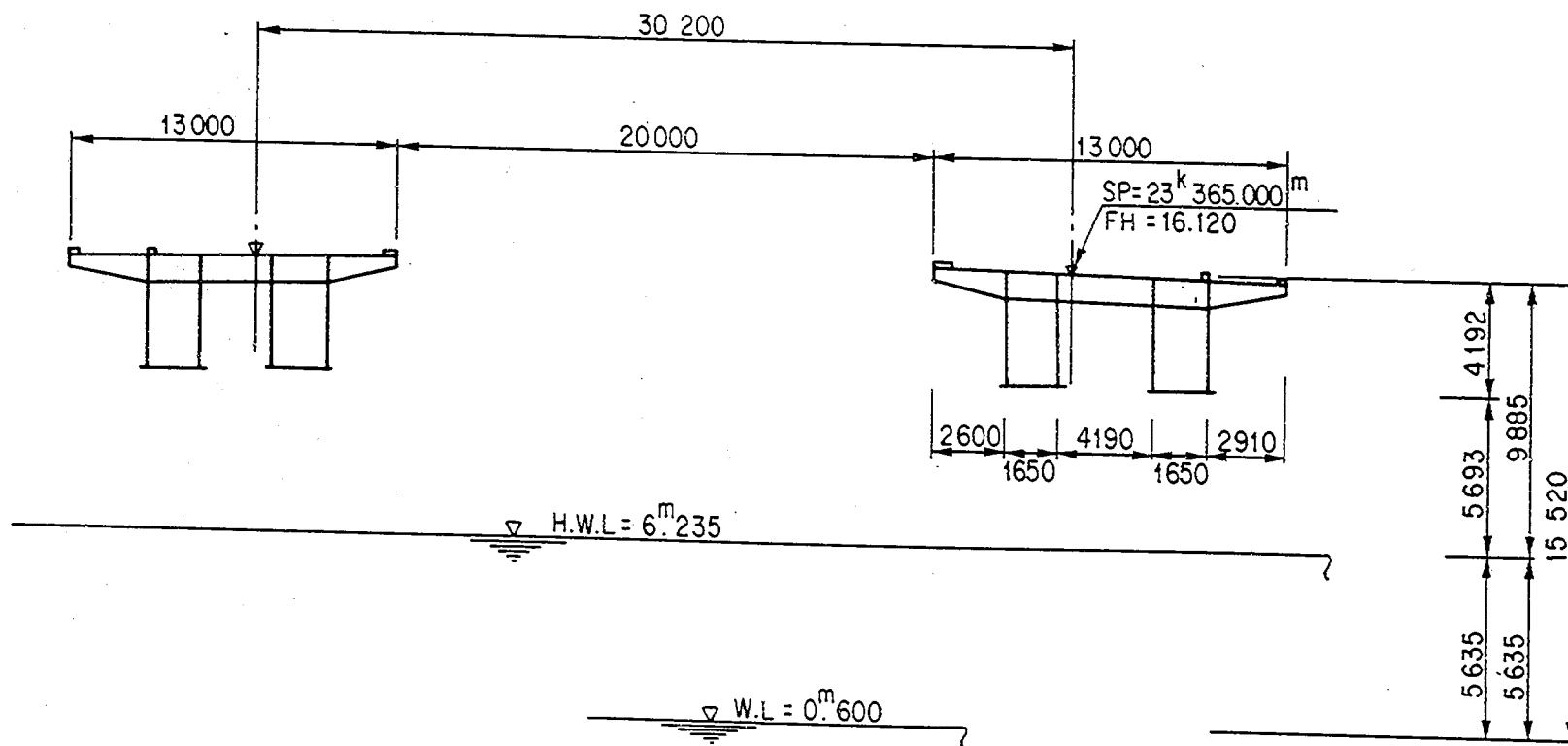


図-1.2 札幌大橋並列橋中央径間中央断面図 (道路中心離れ 30.2m)

[illegible]

平面图

The diagram shows a plan view of a road layout. A horizontal road runs across the top, with a bridge structure indicated by a series of vertical lines. A vertical road crosses the horizontal road. Dimensions are provided for various segments and offsets. Key dimensions include: 12,500 (width of the horizontal road segment), 23,200 (length of the horizontal road segment), 5,300 (width of the bridge structure), 15,500 (width of the bridge structure), 23,300 (length of the horizontal road segment), 23,400 (length of the horizontal road segment), 23,500 (length of the horizontal road segment), 21,732 (width of the bridge structure), and 10,358 (width of the bridge structure). The diagram also shows a vertical road crossing the horizontal road, with a bridge structure indicated by a series of vertical lines. The label '平面图' (Plan View) is centered above the diagram.

- 7 ~ 8 -

正 面 图

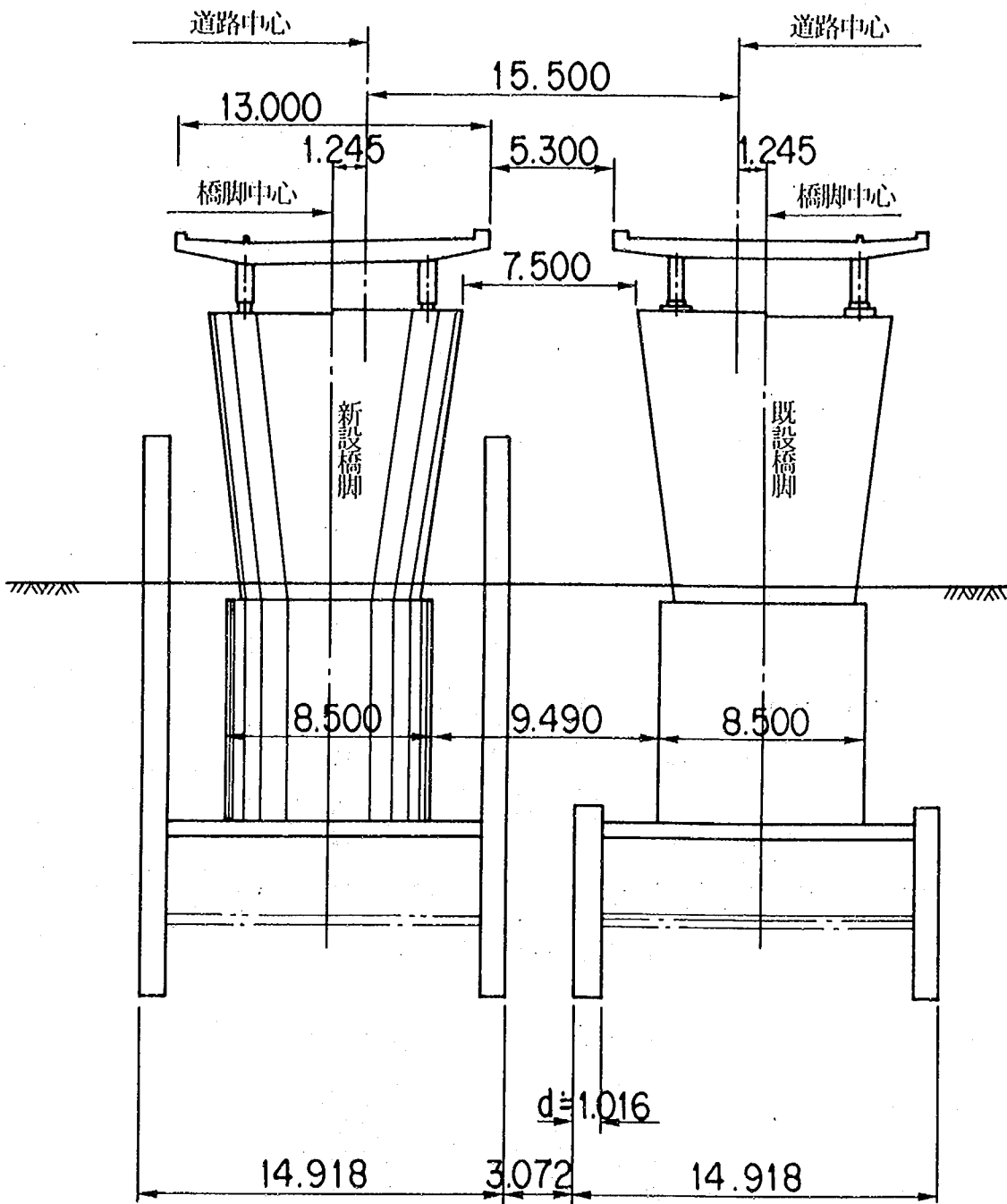


図-1.4 札幌大橋並列橋中央径間断面図 (道路中心離れ 15.5m)

2. 風洞実験による耐風性の検討

2.1 2次元部分模型実験（縮尺1/45）

2.1.1 実験方法

使用した風洞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である。今回の実験では2体の模型を支持するために、風洞の中に並列模型支持装置を設置した。使用した模型は縮尺1/45の2体の2次元剛体模型であり、1橋あたり8本のコイルバネにより支持装置に取り付けた。フラッター風洞の主要諸元を図-2.1および表-2.1に、並列支持装置への模型の取付状況を図-2.2に示す。

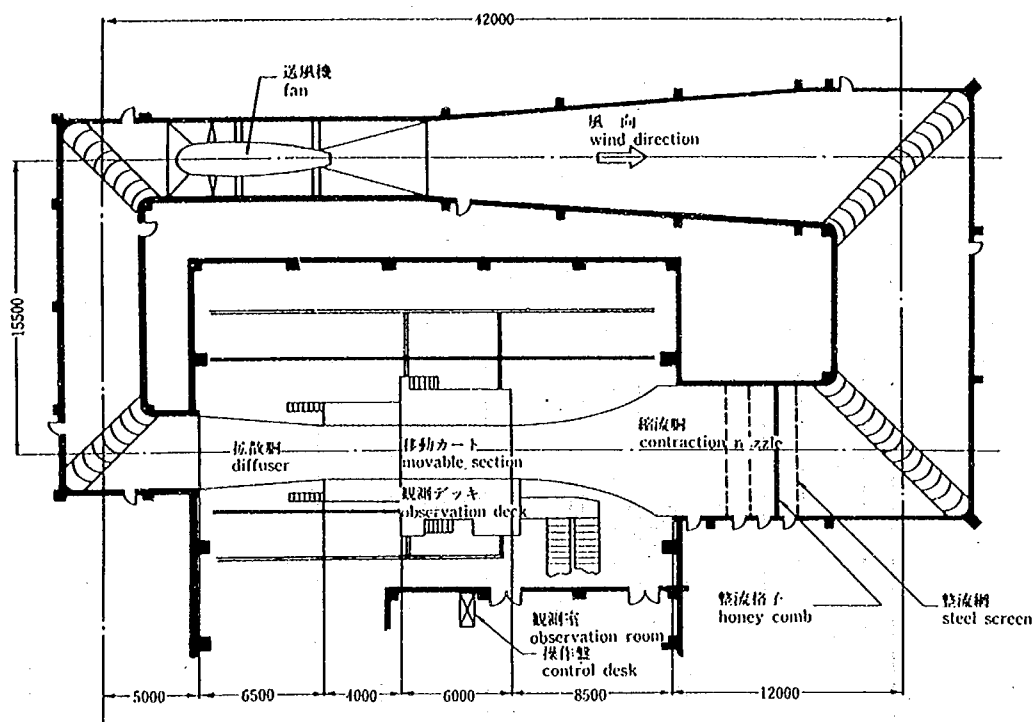


図-2.1 フラッター風洞平面図

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	
規定形 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	242.0m³/sec
	回転数 Rotation	400.0rpm
	容量 Power	250.0kW
気流 Flow	流速 Wind Speed	1.0~25.0m/sec
	乱れ率 Turbulence intensity	0.5%

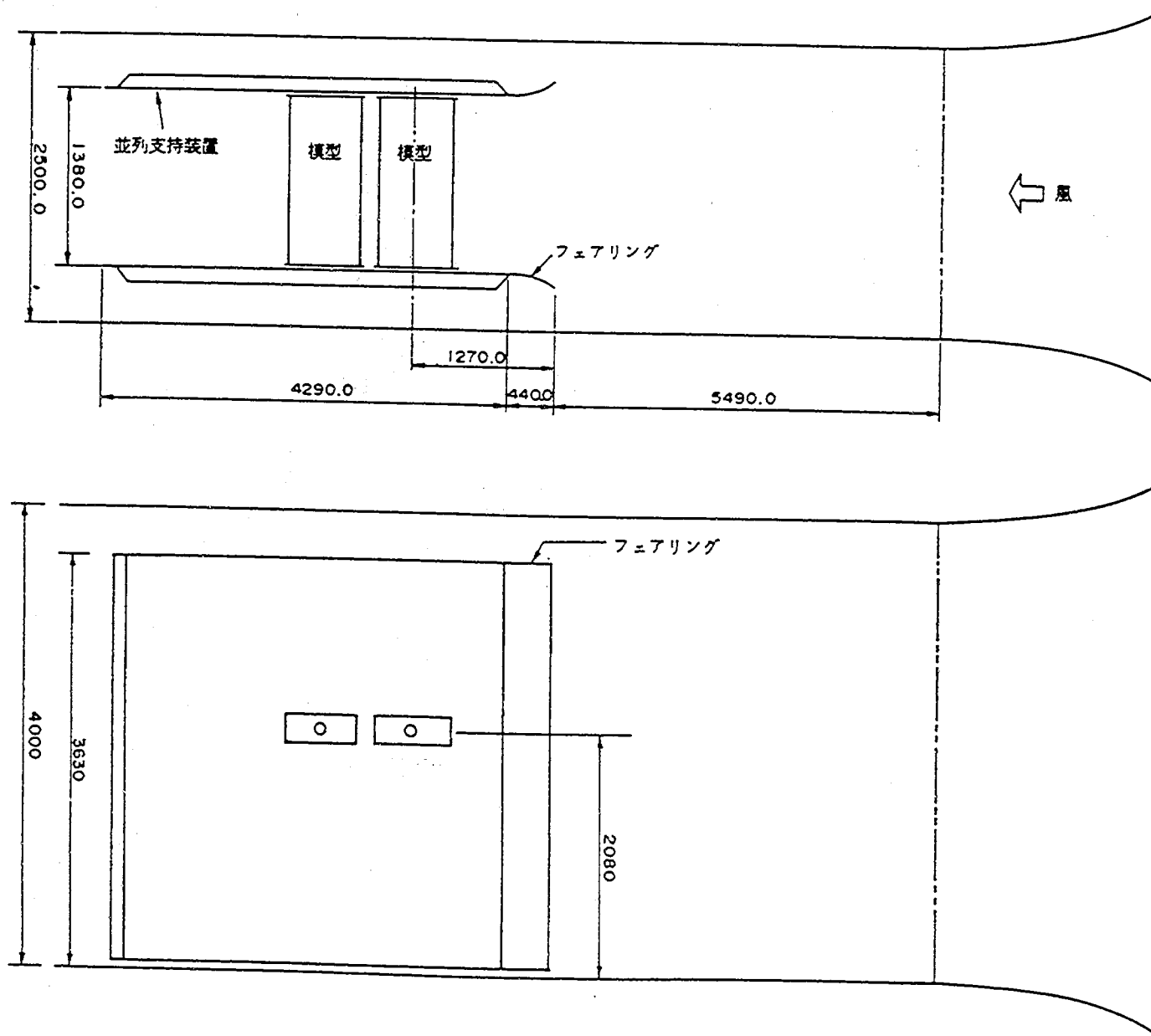
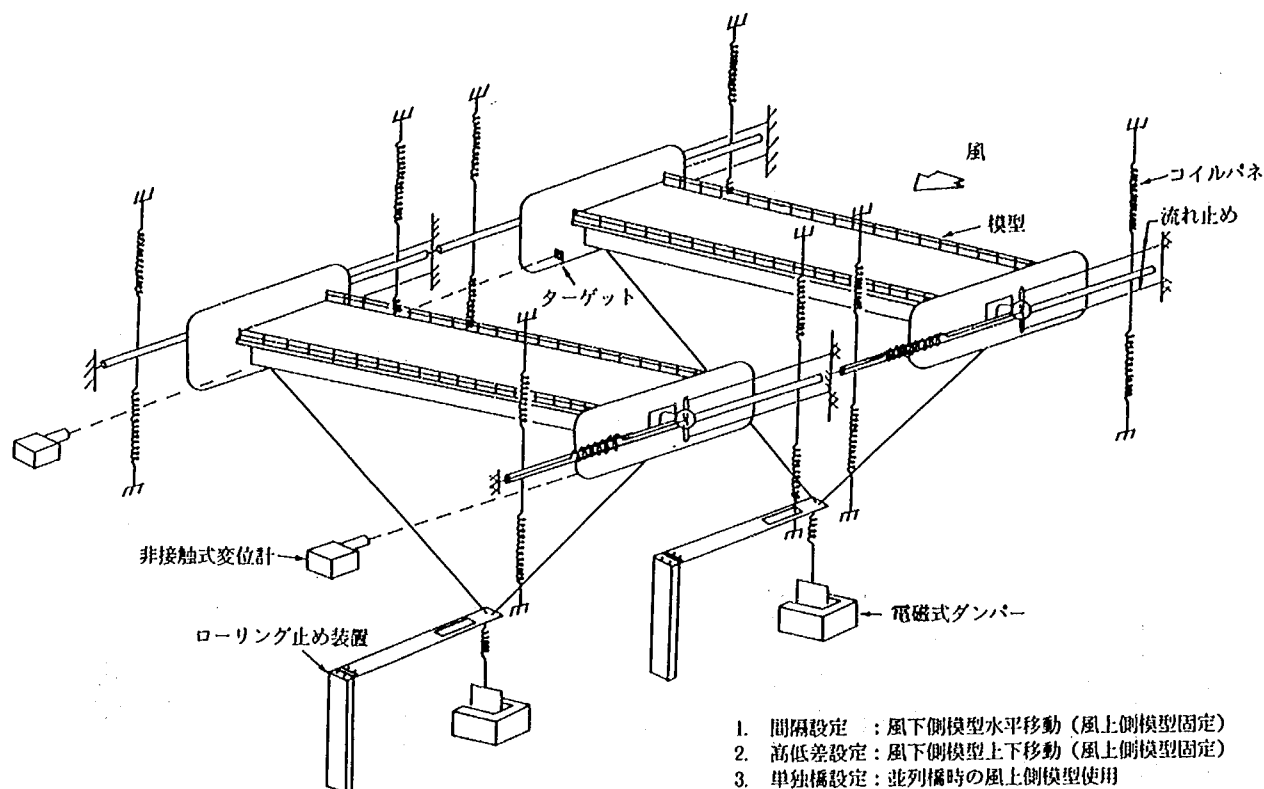


図-2.2 模型設置状況

実験は減衰率、迎角等の条件を変化させて模型を設置し、各ケース毎に風速を変化させ、必要に応じて加振しながら模型の振動を観測した。加振および減衰率の設定は電磁式の加振減衰器の抵抗値と電流を変化させて行った。また実験中この加振減衰器が故障したため、減衰機能のみを持つ電磁ダンパーの電流を変化させて減衰率を設定し、加振は手動で行った。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、データレコーダおよびペンレコーダに記録した。今回実施した実験の概要を図-2.3に示す。



2.1.2 実験条件

今回の実験は鉛直たわみモードのみに着目していることから、相似条件として幾何学的形状および間隔を相似させることの他に、次の3つの無次元量を実橋と模型とで一致させた。

$$M/\rho B^2, \quad V/NB, \quad \delta$$

ここに、M；単位長さあたりの質量 V；風速

ρ ；空気密度

N；固有振動数

B；構造物の代表長さ

δ ；無風時の対数減衰率

ただし、減衰率については振動現象を観察しやすくするためと安全側の検討とするため、実橋で想定される値よりも低めに設定し、必要に応じて実橋に近い値に設定して実験した。なお、減衰率の測定は無次元振幅 0.005で行っている。これらの相似条件より導かれた実験条件を表—2.2、2.3に示す。

表—2.2 2次元部分模型実験条件（縮尺1/45）

項 目	実 橋	所 要 値	実 験 値
縮 尺	—	1/45	1/45
重 量	8.635t/m/Br.	5.800kgf/model	※1 5.787 kgf/model ※2 5.795 kgf/model
支 持 方 法	—	鉛直たわみ1自由度支持	
鉛直たわみ振動数	0.695 Hz	—	表2.3 参照
鉛直たわみ構造減衰	—	0.02	
風 速 倍 率 (実橋/風洞)	—	—	

質量に関する相似条件を満足させるためには、模型を支持した状態で質量を変えながら振動数を測定して全体の振動系としてのバネ定数を求め、所要の質量およびこのバネ定数より所要の固有振動数を計算し、おもりを調整してその固有振動数に一致させた。

2.1.3 実験ケース

本実験は基本的には札幌大橋の並列橋化に際して検討されている2種類の間隔について、それぞれの場合の耐風性を評価し、間隔の決定のための資料とするものである。ただし本実験では、実橋で検討されているケースを実験により検証することは勿論、それ以外に本橋の耐風性をより詳細に把握す

表-2.3 実験条件 (縮尺1/45)

実験 番号	たわみ振動数 (Hz)		たわみ構造減衰		たわみ風速倍率	
	上流側模型	下流側模型	上流側模型	下流側模型	上流側模型	下流側模型
1	4.020	4.014	0.0196	0.0200	7.78	7.79
2	4.016	4.013	0.0398	0.0406	7.79	7.73
3	4.014	4.012	0.0717	0.0703	7.79	7.79
4	4.002	3.992	0.0207	0.0193	7.78	7.83
5	4.000	3.990	0.0405	0.0397	7.82	7.84
6	3.998	3.990	0.0710	0.0700	7.82	7.82
7	4.000	3.998	0.0210	0.0206	7.82	7.82
8	4.000	3.997	0.0400	0.0407	7.82	7.82
9	4.000	3.999	0.0700	0.0696	7.82	7.82
10	4.019	4.019	0.0210	0.0207	7.78	7.82
11	4.017	4.020	0.0195	0.0206	7.78	7.82
12	4.017	4.020	0.0200	0.0195	7.79	7.82
13	4.021	4.023	0.0199	0.0205	7.78	7.77
14	4.003	3.999	0.0199	0.0206	7.81	7.82
15	3.999	4.004	0.0209	0.0207	7.82	7.81
16	4.021	4.029	0.0204	0.0204	7.78	7.86
17	4.020	4.027	0.0404	0.0401	7.78	7.77
18	4.019	4.023	0.0703	0.0710	7.78	7.77
19	4.019	4.023	0.0205	0.0196	7.78	7.77
20	4.021	4.020	0.0199	0.0207	7.78	7.77
21	4.022	4.023	0.0207	0.0208	7.78	7.78
22	4.022	4.023	0.0204	0.0198	7.78	7.78
23	4.022	—	0.0196	—	7.78	—
24	4.022	—	0.0198	—	7.78	—
25	4.024	—	0.0204	—	7.77	—

実験番号1 ↔ 22は並列橋実験

実験番号23 ↔ 25は単独橋実験

るため風による振動現象が起こりやすくすること、また並列橋の対風応答特性を多方面から調査することを目的とする。そのため実験ケースの設定にあたっては、構造減衰 $\delta=0.02$ を基本とし、必要に応じて実橋の持つ構造減衰に近い値を設定して実橋の耐風性を検証することとした。また、間隔についても実橋で検討されている道路中心間隔15.5mと30.2mのほかにも、間隔の影響を調べるため数種の間隔を設定した。その他、本橋が変断面であるため主径間1/2点と1/6点における桁断面を設定し、迎角がついたケースも設定した。また、2橋を高低差をつけて建設した場合のケースも設定した。実験ケースを表-2.4に示し、間隔、高低差、迎角の位置関係の定義を図-2.4に示す。

2.1.4 実験結果

並列橋の対風応答においては、上流側桁と下流側桁が相互に影響を及ぼし合うが、下流側桁が上流側桁の影響を大きく受ける。一様流中での2次元部分模型実験では、全般的に上流側桁は単独橋と同様な振動特性を示し、無次元風速1.5～2.5で渦励振が発現し、高風速でギャロッピングが発現する。下流側桁では無次元風速1.5～2.5で発現する渦励振の振幅が大きくなり、それより高い風速ではバフティングのような不規則な振動が発生する。また、ケースにより無次元風速3～5で限定的なバフティングが発現し、それより高い風速で発散振動に至ると思われるバフティングが発現する。本調査ではこれらの振動現象を渦励振、限定的バフティング、発散的振動の3種に分類して定義する。また、本実験における標準的な振動特性と各振動現象の定義を図-2.5に示す。

風洞実験より得られた各ケースの対風応答結果は表-2.5にまとめた。また、検討項目毎の風速と振幅の関係の重ね合わせ図を付図-1に、すべてのケースの風速と振幅の関係を付図-2にまとめた。結果は以下のとおりとなった。

(1) 桁高の影響 (付図-1.1～1.4)

間隔15.5mの場合と30.2mの場合、および間隔15.5mで迎角が $+3^\circ$ 、 -3° の場合について比較したが、いずれの場合にも桁高4.2mの方が4.7mよりも振幅が小さくなる傾向がある。

(2) 高低差の影響 (付図-1.5)

高低差なしの場合と比較して、高低差が+0.94m(上流側が高い)の場合には、上流側桁は渦励振振幅は大差ないが、ギャロッピング発現風速は無次元風速で1程度低下する。下流側桁は渦励振振幅が約1.5倍に増加し、無次元風速3～4付近で大きな振動が発現し、無次元風速6以上でも大きな振動が発現している。高低差が-0.94mの場合には、高低差なしの場合と大差ない。

(3) 間隔の影響 (付図-1.6)

上流側桁を見ると、渦励振振幅は間隔17.0mと20.0mでやや大きくなっている。ギャロッピングは間隔が大きいほど低風速で発現する。下流側桁を見ると、無次元風速2.0～2.5の渦励振では間隔20.0mのときに最も振幅が大きくなるが、無次元風速3付近で間隔30.2mのときにも大きな振幅になっている。無次元風速が4を超えると、間隔30.2mと25.0mで大きなバフティングが発現する。

(4) 迎角の影響 (付図-1.7～1.8, 1.13)

実験を行ったのは間隔15.5mの場合のみであるが、桁高4.2m、4.7mのいずれの場合でも迎角

表-2.4 2次元部分模型実験ケース (縮尺1/45)

実験 番号	間 隔 (m)	橋 桁 形 状	桁 高 (m)	構 造 減 衰	迎 角 (deg)	気 流		
1	2 橋並列 15.5	設計案 (中央径間1/2点)	4.2	0.02	0	一様流		
2				0.04				
3				0.07				
4		設計案 (中央径間1/6点)	4.7	0.02	+3			
5				0.04				
6				0.07				
7				0.02				
8				0.04				
9				0.07				
10		(中央径間1/2点)	4.2	0.02	高低差 +0.94m			
11					高低差 -0.94m			
12					-3			
13					設計案 (中央径間1/6点)		4.7	0.04
14		設計案 (中央径間1/2点)	4.2	0.02				
15	30.2							
16					14.0		0.02	
17								17.0
18		20.0	0.02					
19	25.0			0.02				
20					設計案 (中央径間1/2点) 歩道側風上		4.2	
21								0.02
22		0.02						
23	0.02							
24			0.02					
25				0.02				

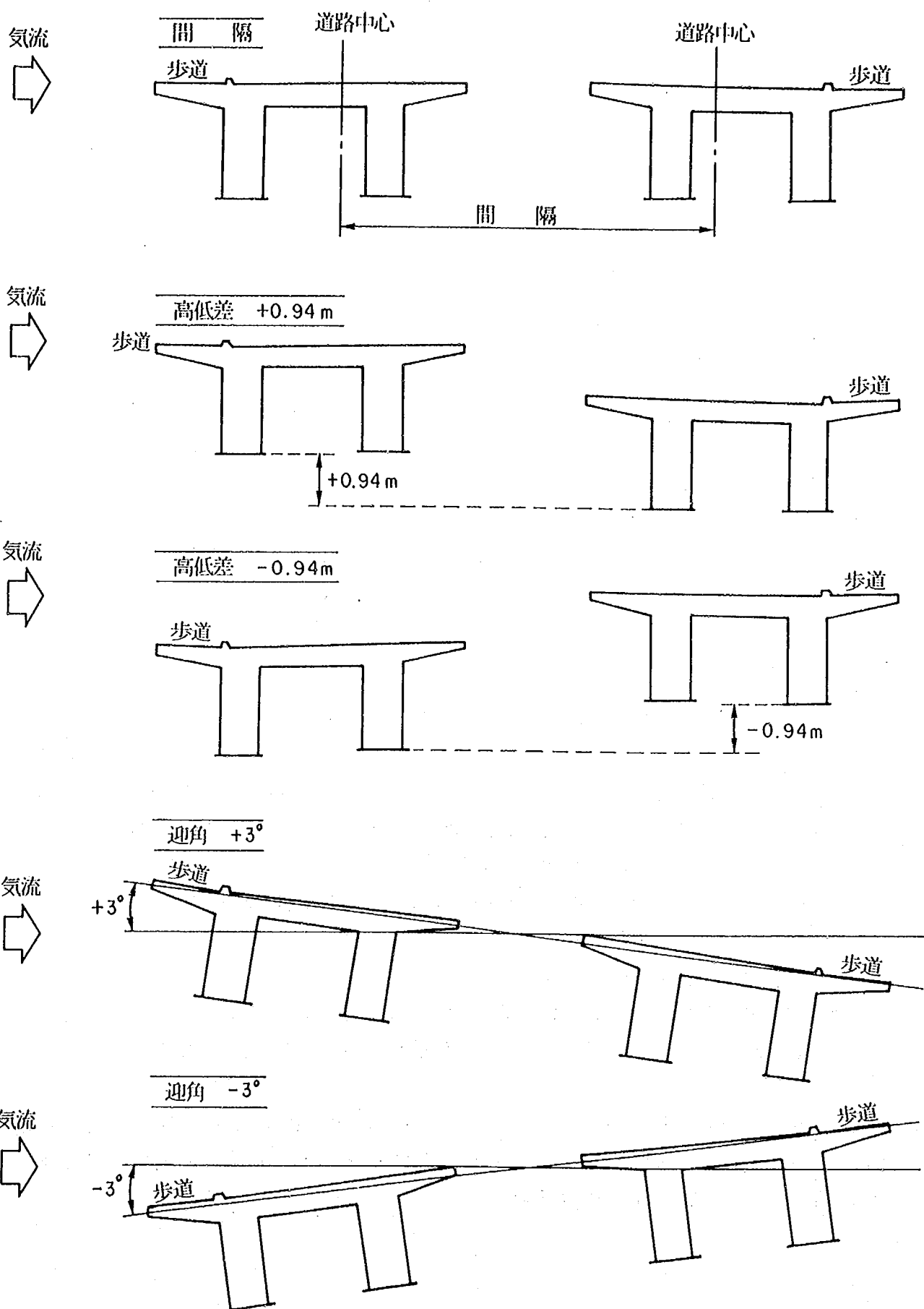


図-2.4 模型設置の定義

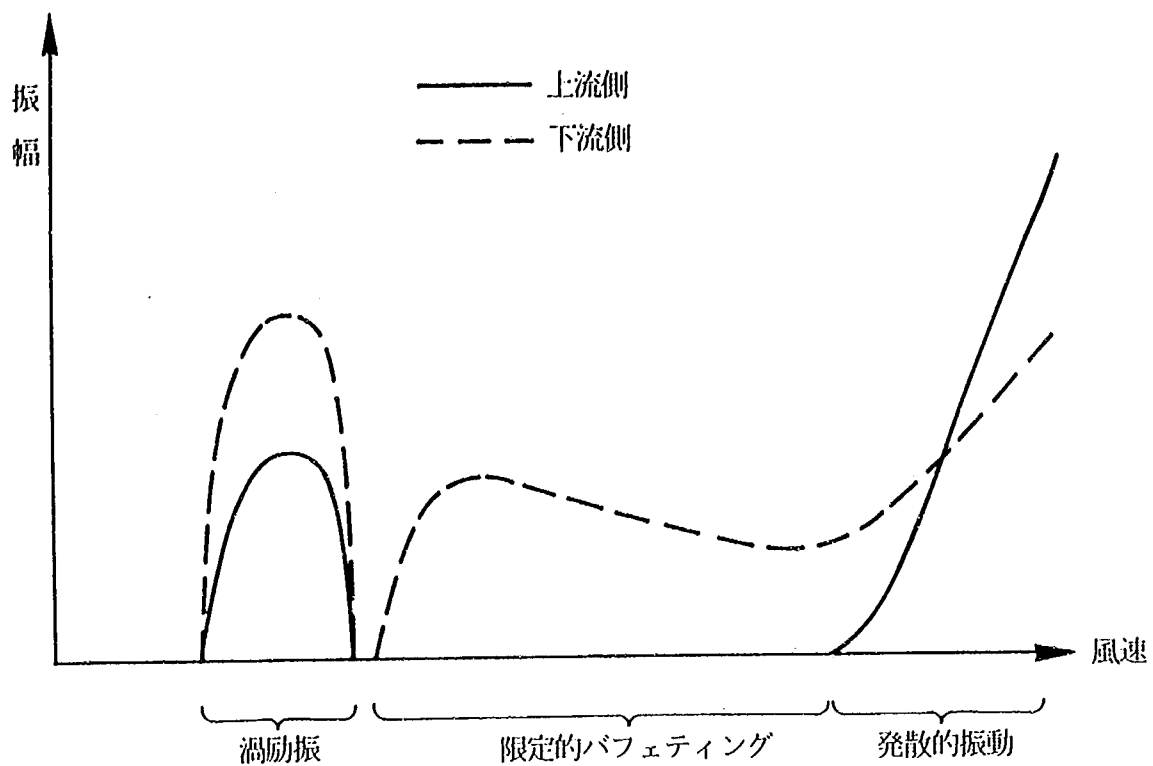


図-2.5 標準的な振動特性と振動現象の定義

+3° のとき、非常に大きな振動が発現する。上流側桁では渦励振振幅が約 1.5 倍になり、ギャロッピング発現風速は 0° のときに無次元風速で約 7 だったのに対して +3° では約 5.5 に低下した。-3° の場合は、渦励振振幅に大きな変化はないものの、ギャロッピングは逆に発現しにくくなっている。下流側桁では、+3° のときに、渦励振振幅がやや大きくなるほか、無次元風速 3～5 で起こる限定的バフティングの振幅が 60cm 以上にも達しており、発散的振動も他の迎角に比べて低い風速で発現する。以上は構造減衰が 0.02 の場合であり、構造減衰を大きくすれば限定的バフティングの振幅は急激に小さくなる。

(5) 構造減衰の影響 (付図-1.9～1.12)

全般的に、構造減衰は渦励振振幅に大きな影響を与え、構造減衰の増加にともなって振幅は急激に小さくなり、減衰 $\delta = 0.07$ で行ったすべてのケースで渦励振は発現しなくなる。

今回の実験では上流側のギャロッピングが実橋風速 37m 以下で発現したケースはなく、渦励振振幅も最大で 30cm 程度と、下流側桁に比べて小さい。したがって札幌大橋並列橋の耐風性は、下流側桁の対風応答によってほぼ決まると言ってよい。

表-2.5 実験結果総括表 (s = 1/45)

実験 番号	間 隔 (m)	桁 高 (m)	迎角等	構 造 減 衰	実験結果 (上段: 上流側, 下段: 下流側)				
					渦動風速域 (最大振幅 [*] 1) (m/s)	限定的バフエーティング (最大振幅 [*] 2) (m/s)	発散の振動 [*] 2 (m/s)		
1	15.5	4.2	0	0.02	14.8~22.5(0.010)	-----	65.0		
2					15.0~22.8(0.022)	-----	70.5		
3				0.04	15.3~21.5(0.005)	-----	66.8		
4					15.3~21.5(0.012)	-----	71.5		
5		4.7		0.07	-----	-----	71.5		
6					-----	-----	-----		
7				0.02	15.3~23.1(0.010)	-----	57.0		
8					15.3~23.1(0.022)	-----	58.5		
9				0.04	15.3~21.0(0.006)	-----	58.3		
10					15.0~21.2(0.014)	-----	60.1		
11	30.2	4.2	+3	0.07	17.6~18.9(0.000)	-----	59.1		
12					17.6~18.9(0.001)	-----	61.7		
13				0.02	15.0~24.1(0.023)	-----	48.0		
14					15.0~24.1(0.052)	36.3(0.058)	47.7(0.014)		
15				0.04	16.6~22.8(0.007)	-----	48.4		
16					16.9~22.8(0.013)	36.3(0.025)	43.8(0.012)		
17		4.7	-3	0.07	-----	-----	50.6		
18					-----	40.4(0.012)	45.3		
19				0.02	15.5~24.4(0.018)	-----	49.2		
20					15.8~25.6(0.030)	32.4(0.047)	47.7(0.016)		
21	14.0	4.2	高低差 +0.94m	0.02	16.1~24.4(0.012)	-----	56.2		
22					16.1~24.4(0.034)	32.6(0.021)	52.9		
23					高低差 -0.94m		15.0~22.3(0.014)	-----	63.4
24							15.0~24.9(0.028)	-----	-----
25		4.7	0	0.02	15.0~25.6(0.012)	-----	-----		
26					15.0~25.4(0.017)	-----	-----		
27				0.04	14.8~24.9(0.013)	-----	-----		
28					14.5~25.6(0.021)	-----	-----		
29				0.07	14.5~23.3(0.009)	-----	42.2		
30					14.8~23.6(0.015)	32.4(0.044)	36.3(0.021)		
31	17.0	4.2	0	0.02	16.3~24.1(0.010)	-----	43.5		
32					16.3~25.6(0.019)	28.5(0.041)	39.9(0.021)		
33				0.04	16.3~22.8(0.004)	-----	44.0		
34					16.3~22.5(0.006)	32.1(0.020)	39.9		
35				0.07	-----	-----	44.3		
36					-----	32.4(0.018)	38.9		
37		20.0	0.02	0.02	14.8~24.1(0.011)	-----	61.1		
38					15.0~24.1(0.020)	-----	63.8		
39				0.04	14.5~23.9(0.014)	-----	57.0		
40					14.5~23.9(0.024)	-----	63.7		
41	25.0	単 独	+3	0.07	16.3~23.8(0.016)	-----	55.7		
42					16.3~24.1(0.041)	-----	58.5		
43				0.02	16.3~27.2(0.008)	-----	45.6		
44					16.3~22.3(0.018)	24.1(0.023)	33.7		
45				0.04	16.3~28.5(0.014)	-----	58.5		
46					16.1~32.6(0.025)	-----	42.0		
47	25.0	単 独	-3	0.07	16.3~27.2(0.007)	-----	-----		
48					-----	-----	-----		

*1: 振幅は無次元振幅 (η/B) で示す。*2: 風速は $\eta/B > 0.01$ となった風速。限定的バフエーティングとつながった場合は極小点の風速と振幅。

2.2 3次元全橋模型実験 (縮尺1/100)

2.2.1 実験方法

実験は建設省土木研究所大気汚染実験施設内の大気汚染風洞を用いて実施した。大気汚染風洞の主要諸元を図-2.6、表-2.6に示す。模型は縮尺が1/100であり、橋軸方向に33個に分割されたセグメントおよびその中に配置した2本のアルミニウム製の剛性棒により構成された弾性全橋模型である。実験に使用した模型を図-2.7~2.8に示す。この模型の間隔、構造減衰等を設定し、各ケース毎に風速を変化させて挙動を測定した。使用した気流は乱れのほとんどない一様気流および模型の上流側に配置したスパイアーおよび人工芝によって発生させた2種の乱流であり、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。模型の挙動は全橋模型の中央径間1/2点、および側径間1/2点の桁端に取り付けた豆電球の変位を光学式変位計により測定し、データレコーダおよびペンレコーダに記録した。

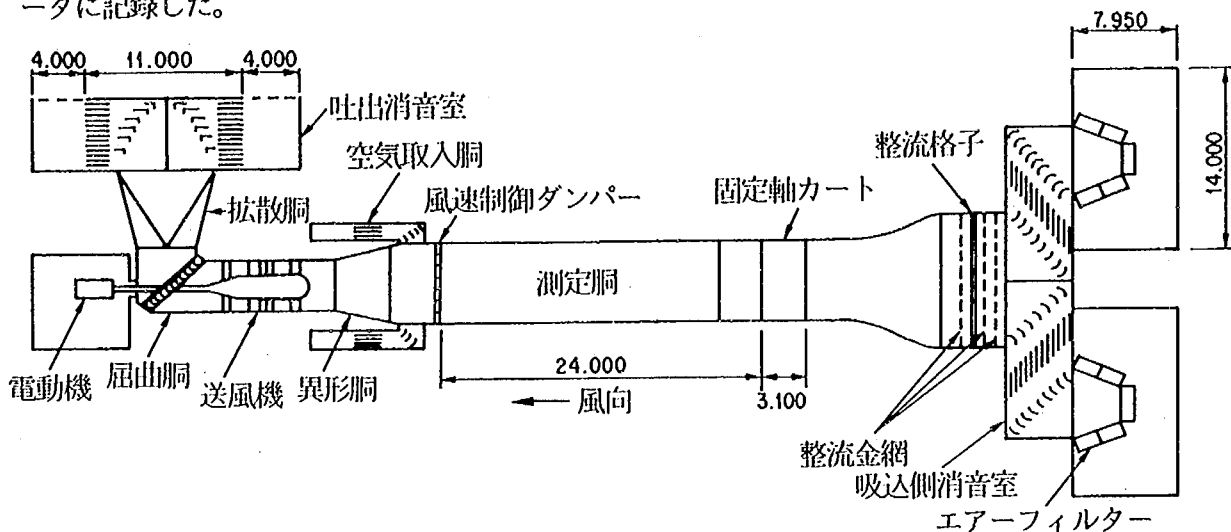
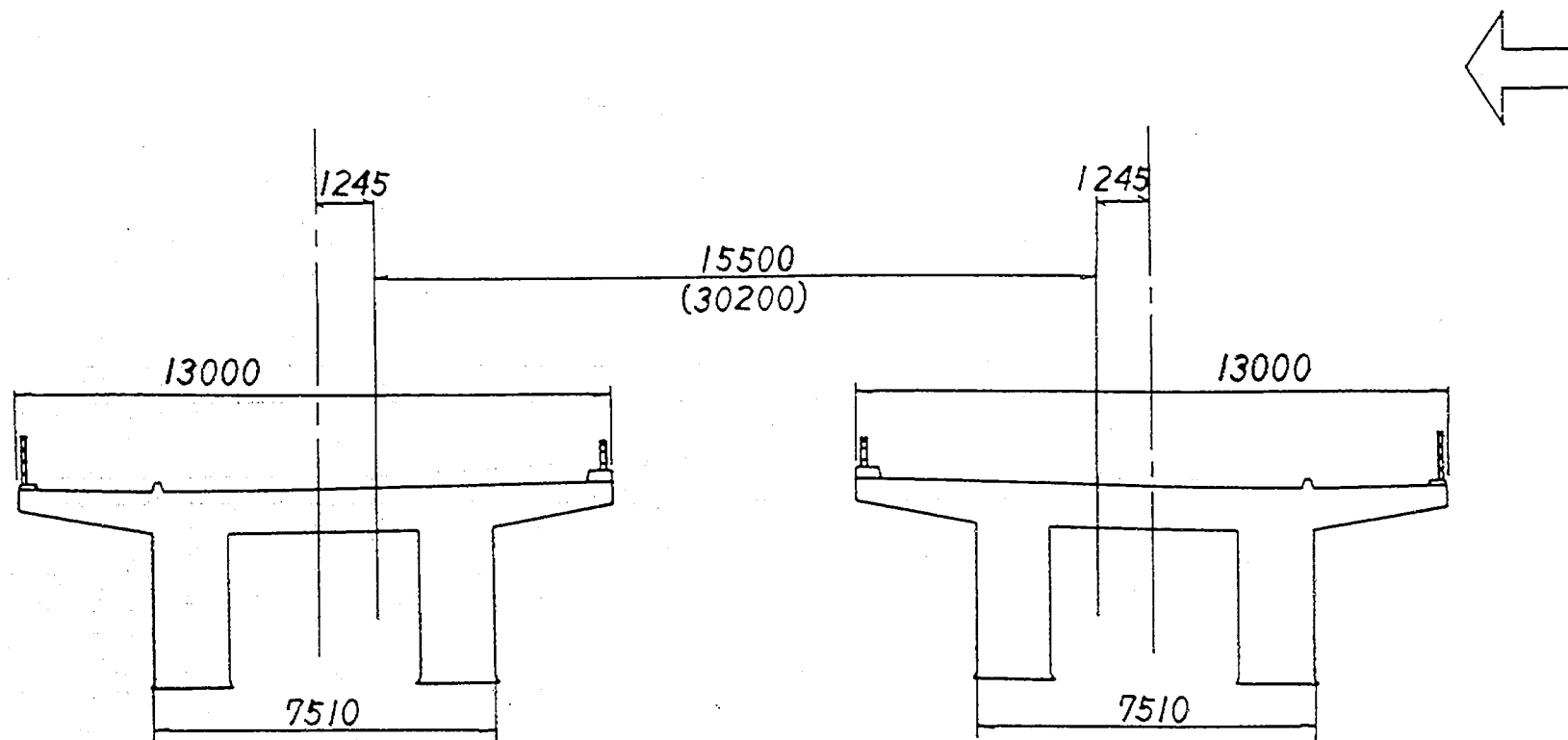


図-2.6 拡散風洞構造図

表-2.6 大気汚染風洞主要諸元

風洞形式	吸込式エッフェル型
測定洞寸法	W: 6 m × H: 3 m × L: 24 m
風速設定範囲	0.2~15 m/s
縮流比	3.89
送風機形式	軸流1段動翼可変ピッチ型 直径 4000 mm
回転数	360 rpm
動翼枚数	10枚 (後置静翼9枚)
風量	27 m³/s
有効全圧	80 mmAq
電動機出力	320 kW
風速分布偏差	±1%以内
風速変動	±2%以内 (外乱風速 5 m/s時)
乱流強度	1%以内
風速制御方式	1. 定速回転 (360 rpm) 空気取入扉開度、風速制御ダンパー開度、動翼開度による制御 2. 回転数制御

図-2.7 札幌大橋全橋模型図(その1)



(寸法は実橋, 単位: mm)

図-2.8 札幌大橋全橋模型図 (その2)

2.2.2 実験条件

一般に3次元全橋模型を用いる風洞実験では、幾何学的形状を相似させることの他に、以下に示す無次元量を一致させる必要がある。

- (1) 慣性パラメータ..... $m/\rho B^2$, $I_m/\rho B^4$
- (2) 弾性パラメータ..... $EA/\rho V^2 B^2$, $EI/\rho V^2 B^4$, $GJ/\rho V^2 B^4$
- (3) 重力パラメータ..... gB/V^2
- (4) 粘性パラメータ..... VB/ν
- (5) 減衰パラメータ..... δ

ここに m ; 単位長さあたりの質量 I_m ; 単位長さあたりの極慣性モーメント

ρ ; 空気密度 B ; 代表長さ E ; ヤング率 I ; 断面2次モーメント

A ; 断面積 V ; 風速 G ; せん断弾性係数 J ; ねじり定数

g ; 重力加速度 ν ; 動粘性係数 δ ; 対数減衰率

しかし、(4)の粘性パラメータについては橋梁のような角状の構造物では流れのはく離点がほぼ固定されているため、レイノルズ数の違いによる影響は少ないと考えられ、一般には粘性パラメータの相似は省略される。

今回の実験では鉛直たわみモードのみに着目しているので、上記パラメータのうちねじれ振動に係する(1)の慣性パラメータの $I_m/\rho B^4$ 、(2)の弾性パラメータの $GJ/\rho V^2 B^4$ は省略してよい。また、橋軸方向に伝わる振動は今回の実験とは無関係であるので $EA/\rho V^2 B^2$ も省略できる。

(2)の弾性パラメータのうち残った $EI/\rho V^2 B^4$ はたわみ振動の剛性に関係したパラメータで、厳密には橋軸方向で異なった値になる。しかし、模型の製作の便宜上剛性を一定とし、振動モードが実橋と模型とで一致すれば、このパラメータは風速パラメータ (V/NB) に置換してもよい。振動モードについては2.2.3に示したように鉛直たわみ振動の一次モードはよい一致を示しており、ここでは弾性パラメータに代えて風速パラメータを用いた。

以上から一致させるべきパラメータは次のようになる。

$$m/\rho B^2, \quad V/NB, \quad gB/V^2, \quad \delta$$

ここに N ; 固有振動数

ただし今回の実験では、前回の単独橋実験の時に製作された模型と、同じ設計で今回新たに製作した模型を用いることとしたため、上記パラメータのうち、重力パラメータ gB/V^2 については十分相似させることはできなかったが、その誤差は1割程度であり、対風応答特性には大きな影響を与えないものと考えた。

質量に関する相似条件を満足させるために、模型の製作段階で橋桁内に重錘を付加することにより所要の質量に一致させ、完成時の模型質量の誤差は1%未満と十分な精度で製作されている。また、減衰に関する相似条件はオイルダンパーを使用し、減衰率を設定することによって満足させた。

2.2.3 全橋模型の構造特性

(1) 全橋模型の概要

前述したように、今回の実験では、前回の単独橋実験の時に製作された模型と、同じ設計で今回新たに製作した模型を用いることとした。

3次元全橋模型では、幾何学的形状の他に重量、固有振動数、構造減衰等の相似条件を満たすよう設計するが、今回用いた模型は、剛性を橋軸方向に一樣な剛性をもつ持つ剛性棒によって調整したため、全ての振動モード形状について相似させるのは困難であり、主として問題となる鉛直たわみ1次モードについてできる限り相似させるよう設計されている。

模型高さについては、前回の実験では高さを変えることにより模型位置で所要の気流特性を得ていたのに対し、今回の実験では地面による効果も考慮し、地面からの高さを実橋と相似させるよう橋脚を製作した。ただし、一樣流中での実験を行う場合、実橋と相似させた高さでは乱れのない気流は得られないため、一樣流が得られる位置に橋桁が位置するよう高さの高い橋脚も製作した。

(2) 振動特性の測定

実験に先立ち、加速度計を模型に取り付け、固有振動数、振動モード、構造減衰率の測定を行った。振動モードの測定は鉛直たわみ1次モードでは中央径間1/2点を、鉛直たわみ2次モードの測定では側径間1/2点をそれぞれ基準測定点と定め、各セグメントにおける加速度を基準測定点での加速度で除したもののから求めた。

表-2.7に固有振動数の測定結果を、表-2.8に構造減衰率の測定結果を示した。振動モードについては、測定点を図-2.9に実橋での計算結果と模型での測定値を図-2.10~2.13に示した。結果は以下のとおりとなった。

- ① 鉛直たわみ1次モードについては、上流側模型（今回製作）と下流側模型（前回製作）のいずれにおいても計算結果と測定値がよく一致していることが判る。
- ② 鉛直たわみ2次モードについては、実橋に対する計算結果に比べ、模型での測定値は中央径間でほぼ1/2程度に小さくなっている。また、上流側模型では側径間の振幅が等しくなく、一方が他方の0.87倍となった。

したがって、鉛直たわみ1次モードの渦励振、バフエティング、ギャロッピングに対しては、振動モードの精度は十分保持されているが、鉛直たわみ2次モードより高次の渦励振については、振動モード形状が実橋と異なることから振幅は実際のものと相違したものになる。

表-2.7 固有振動数測定結果

	固有振動数 (Hz)		
	1 次		2 次
	手 動	加 振 機	
上 流 側	6. 2 3 1 8	6. 2 3 9 3	11. 4 4 2 8
	6. 2 2 8 3	6. 2 3 6 1	11. 4 2 8 6
	6. 2 3 5 3	6. 2 3 6 1	11. 4 2 2 4
	6. 2 2 9 5	6. 2 2 7 4	11. 4 4 5 8
	6. 2 3 5 3	6. 2 3 2 1	11. 4 3 3 8
下 流 側	6. 1 0 6 1	6. 1 0 5 3	11. 0 5 9 9
	6. 1 0 5 3	6. 1 0 8 6	11. 0 9 1 5
	6. 1 0 6 9	6. 1 1 1 1	11. 0 7 0 8
	6. 1 0 7 6	6. 1 1 7 9	11. 0 7 1 4
	6. 1 0 5 3	6. 1 1 2 2	11. 0 7 2 1

表-2.8 構造減衰率測定結果

	構 造 減 衰		
	1 次		2 次
	手 動	加 振 機	
上 流 側	0. 0 1 3 5	0. 0 1 7 5	0. 0 1 8 6
	0. 0 1 4 7	0. 0 1 7 9	0. 0 1 8 1
	0. 0 1 4 3	0. 0 1 8 6	0. 0 1 8 9
	0. 0 1 3 9	0. 0 1 8 1	0. 0 1 8 4
	0. 0 1 4 5	0. 0 1 8 3	0. 0 1 8 4
下 流 側	0. 0 1 5 8	0. 0 1 6 6	0. 0 1 7 2
	0. 0 1 5 2	0. 0 1 6 2	0. 0 1 6 9
	0. 0 1 5 6	0. 0 1 6 5	0. 0 1 7 5
	0. 0 1 5 4	0. 0 1 6 9	0. 0 1 7 2
	0. 0 1 5 7	0. 0 1 6 3	0. 0 1 7 8

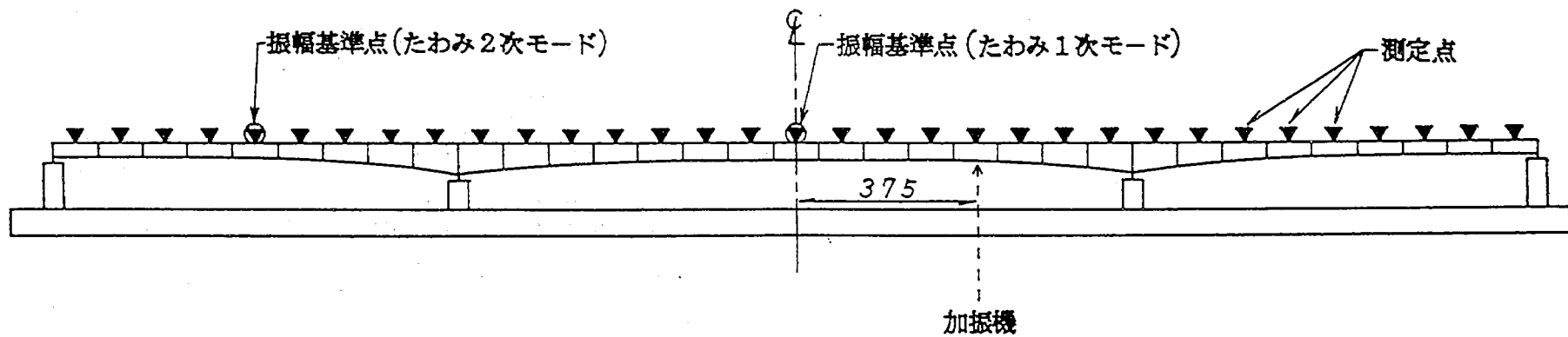


図-2.9 振動モード計測点

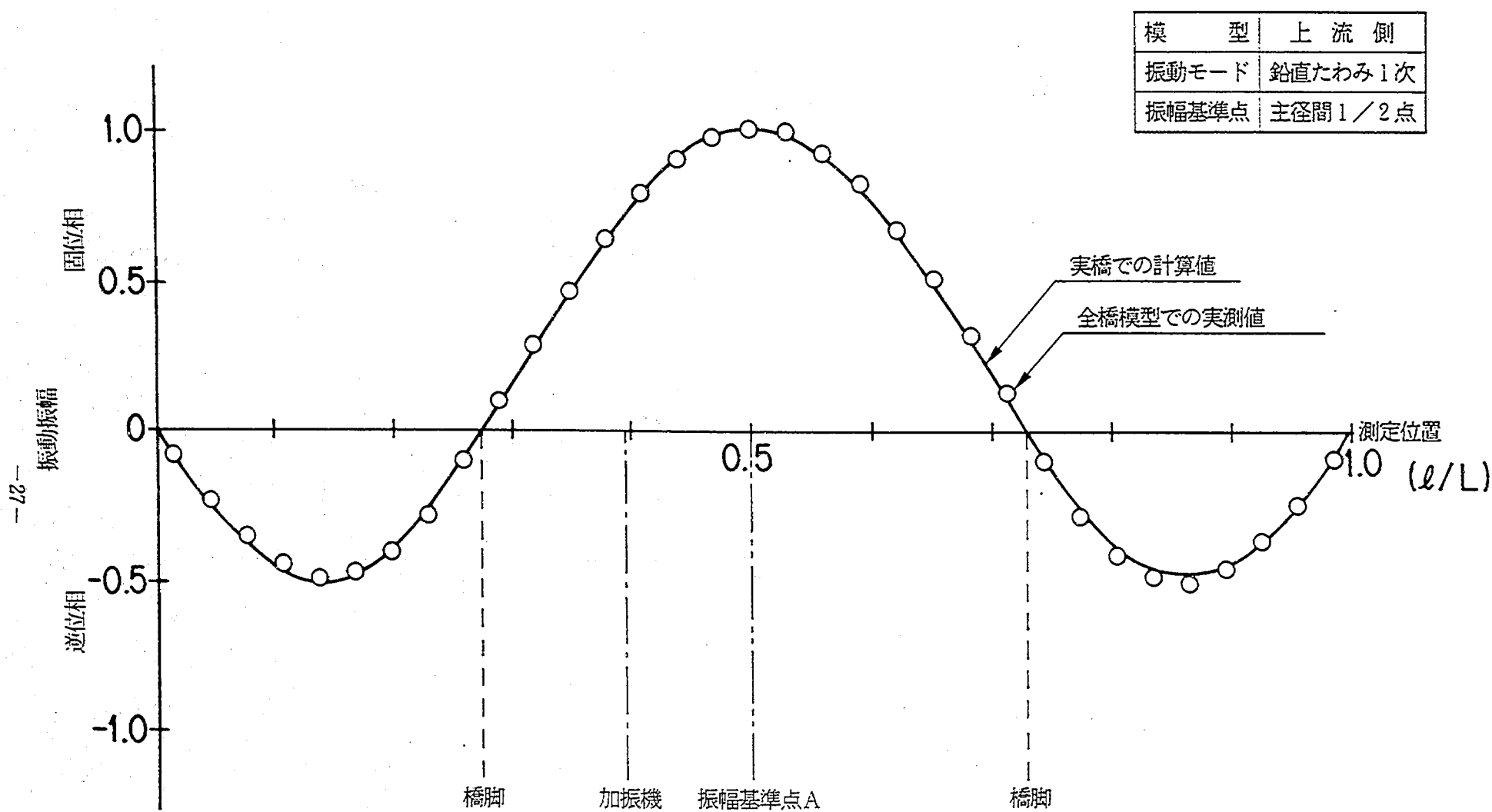


図-2.10 振動モード図 (1次モード)

模 型	上 流 側
振動モード	鉛直たわみ2次
振幅基準点	側径間1/2点

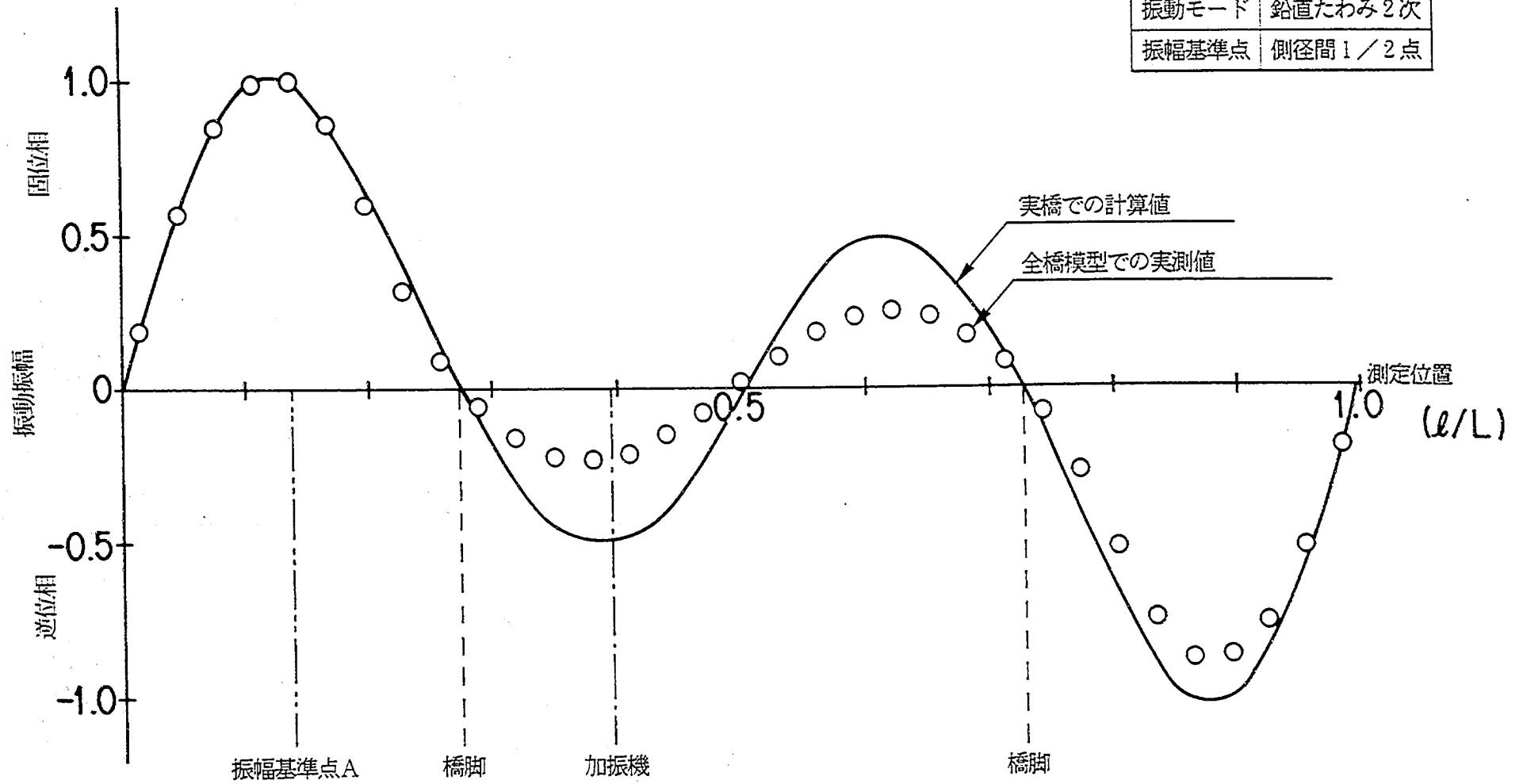


図-2.11 振動モード図 (2次モード)

模 型	下 流 側
振動モード	鉛直たわみ1次
振幅基準点	主径間1/2点

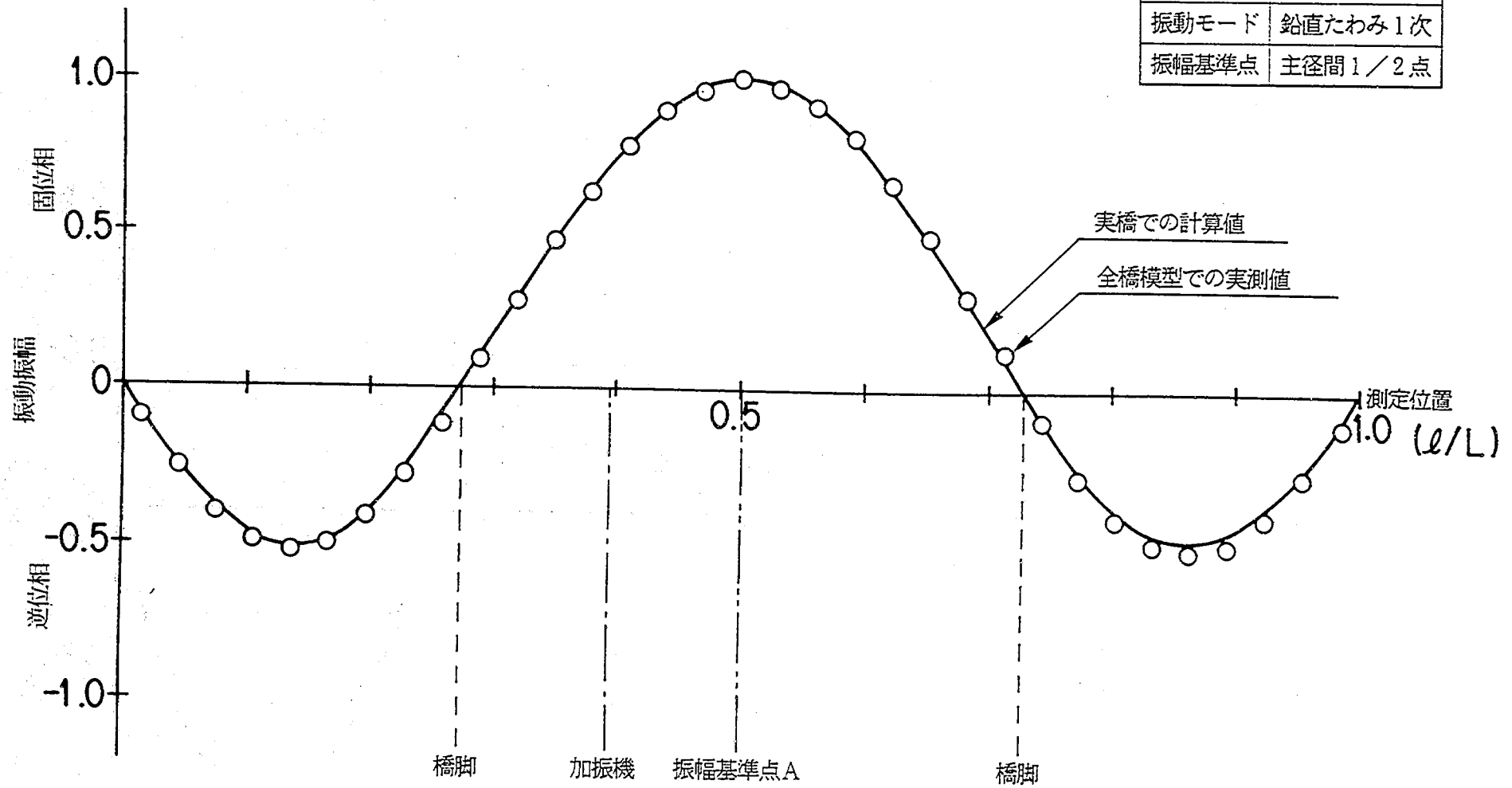


図-2.12 振動モード図 (1次モード)

模 型	下 流 側
振動モード	鉛直たわみ2次
振幅基準点	側径間1/2点

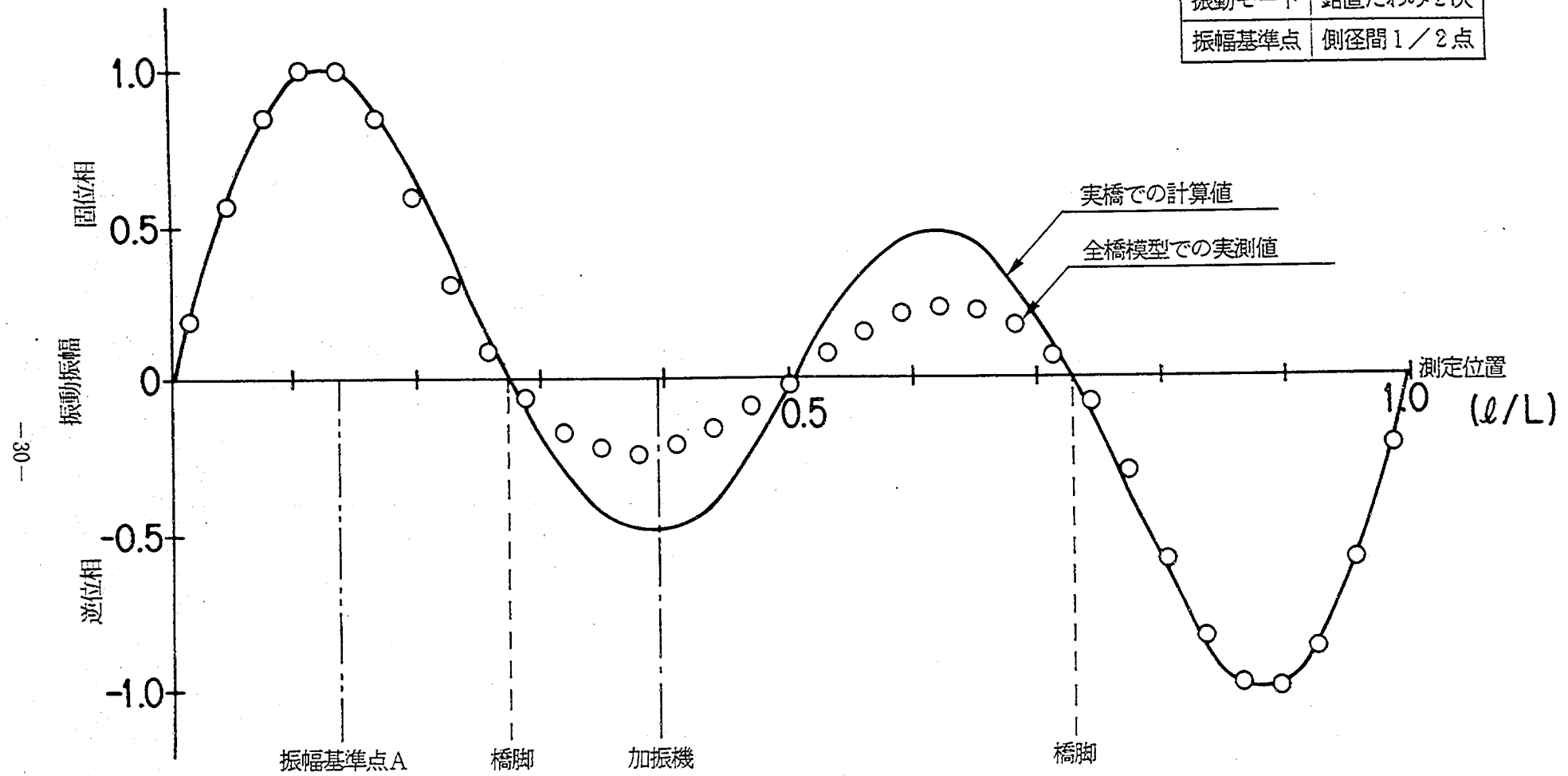


図-2.13 振動モード図 (2次モード)

2.2.4 気流特性

(1) 気流の設定

橋梁の対風応答は、気流中の乱れの存在の有無によって大きく違ってくる。したがってより高い確度で橋梁の耐風性を評価しようとするならば、架橋地点の風の特性和ほぼ相似した乱流を風洞内にて発生させ、その気流中で実験を行うのが望ましい。

乱流の発生方法には、格子を用いる方法、スパイアーを用いる方法、床面にブロック・人工芝といった粗いものを敷設する方法などがある。本実験では2種類の異なった乱流を想定し、過去に行った事例を参考にし、スパイアーを用いる方法およびスパイアーと人工芝を併用する方法を採用することとした。スパイアーおよび人工芝の形状および風洞での敷設方法を図-2.14～2.17に示す。

(2) 気流特性の測定

乱流の特性を架橋地点と相似させるには、乱れ強さ、乱れのスケール、風速のパワースペクトルを相似させる必要がある。そこで、模型実験を実施する前に熱線風速計による気流計測を行い気流特性を把握し、架橋地点の自然風との相似性について検討した。検討結果を以下に示す。

① 乱れ強さ

一般に乱流境界層内では、乱れ強さは高度の増加にともない減少する。今回の実験では、基本的に乱流中の実験では模型設置高度を床から15.5cmとし、一様流中での実験では33cmとした。気流計測測定結果を表-2.9に示す。

② 乱れのスケール

乱れのスケールの測定結果を表-2.10に示す。

③ 風速のパワースペクトル

風洞内に発生させた乱流Ⅰ、ⅡとESDU⁽⁴⁾との比較を図-2.18～2.19に示す。また、架橋地点の実測データとの比較を図-2.20に示す。

2.2.5 実験ケース

実験ケースは間隔、気流、水平偏角、構造減衰を変化させて設定した。今回行った実験ケースを表-2.11に示す。また、表中には模型高さも併せて示してある。

2.2.6 実験結果

3次元実験では、測定した風速範囲のほぼ全域にわたって、振幅はさまざまであるがバフェティング的な不規則振動がみられ、振動現象の種類を明確に分類することは困難であったため、対風応答の評価にあたっては最大振幅を結んだ曲線の形状に着目して行った。

風洞実験の結果得られた各ケースにおける振動特性を表-2.12にまとめた。また、検討項目毎の風速と振幅の関係の重ね合わせ図を付図-3に、全ケースの風速と振幅の関係図を付図-4に示す。以下に結果をまとめる。

(1) 気流の影響

気流を一様流、乱流Ⅰ、乱流Ⅱと変化させて対風応答を計測して比較した結果、以下のとおりとな

スパイアー

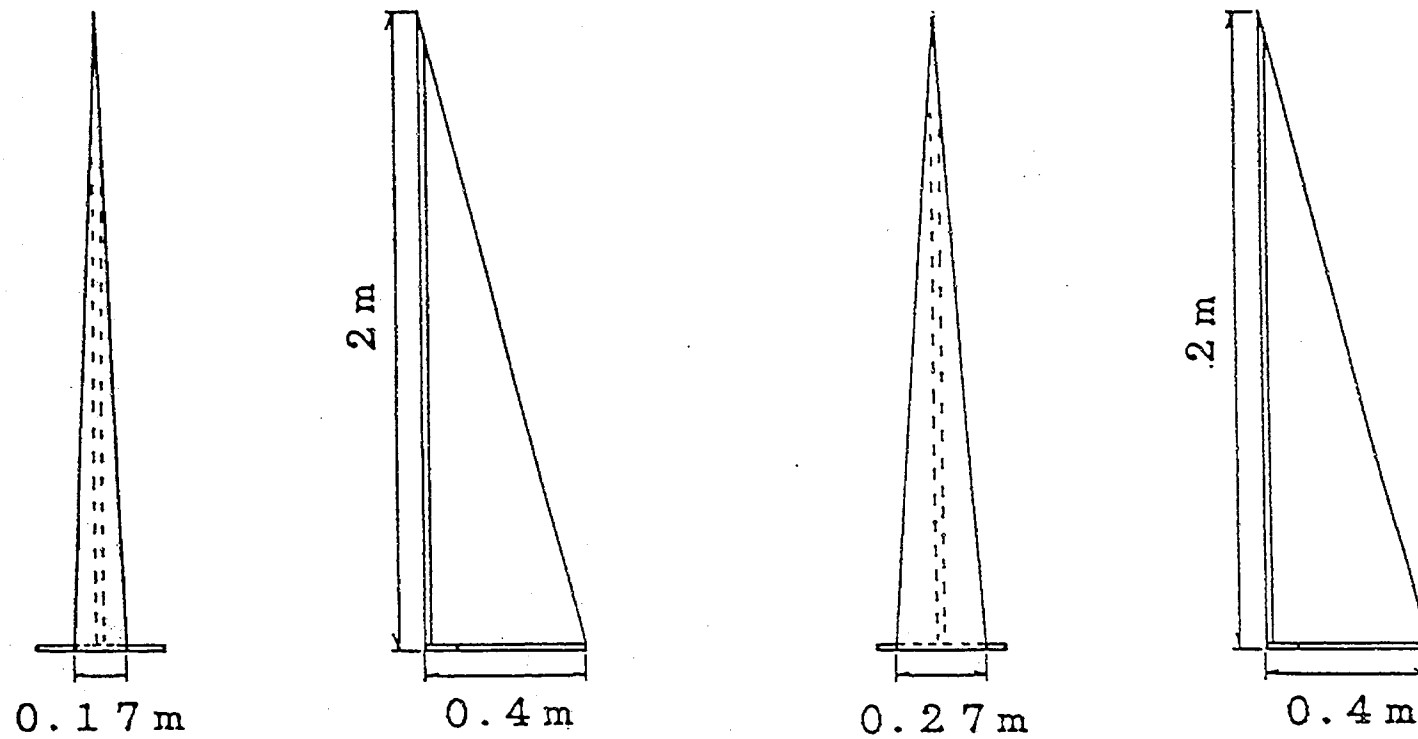


図-2.14 乱流発生装置 (スパイアー)

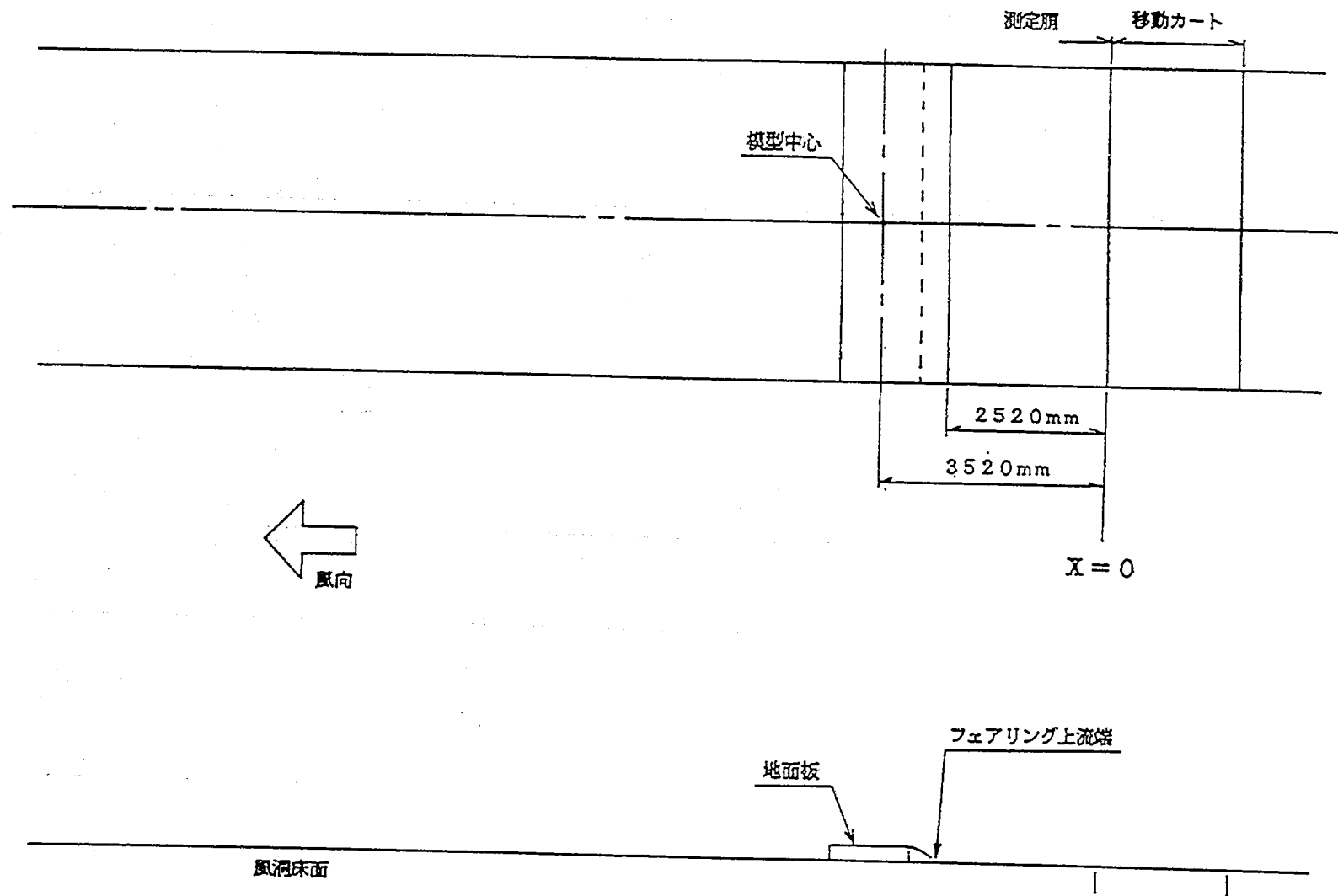


図-2.15 気流計測概要図 (一様流)

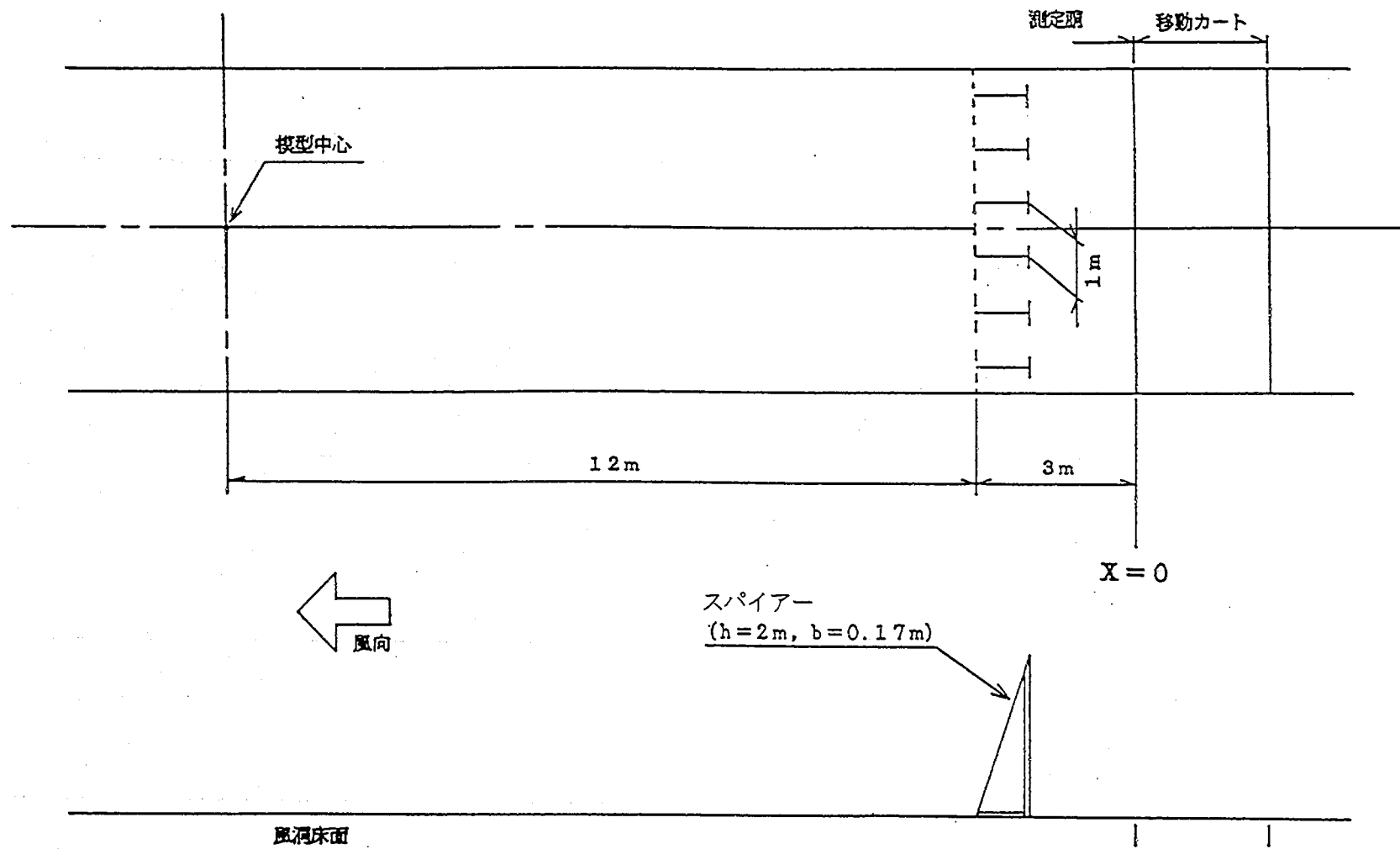


図-2.16 気流計測概要図 (乱流 I)

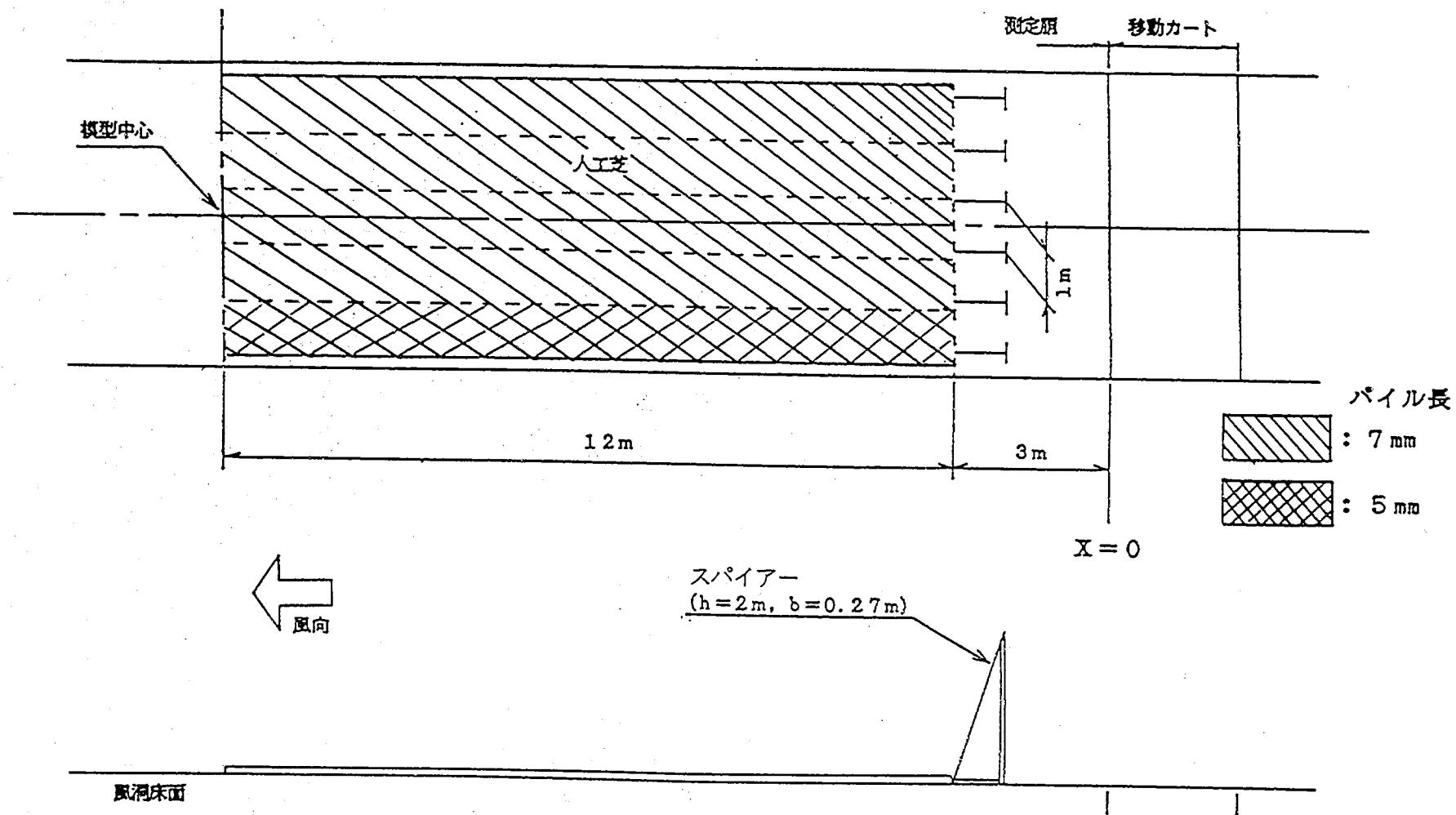


図-2.17 気流計測概要図 (乱流Ⅱ)

表-2.9 気流計測測定結果

気 流	設定風速 (m/s)	測定位置 X = 15000mm, Y = 0 mm, Z = 155mm				べき指数
		成 分	平均風速 (m/s)	乱れ強さ (%)	傾 斜 角 (deg)	
注) 一様流	5	主流方向(u)	4.96	0.30	-0.45	—
		鉛直方向(w)	-0.039	0.30		
乱流 I	5	主流方向(u)	5.00	7.00	-1.74	0.037
		鉛直方向(w)	-0.152	5.30		
乱流 II	5	主流方向(u)	5.10	11.10	-1.31	0.064
		鉛直方向(w)	-0.117	7.30		

表-2.10 気流計測測定結果 (スペクトル, 乱れのスケール)

気流	測 定 位 置			成 分	平均風速 (m/s)	S(0)/ σ^2	乱れのスケール LX(m)
	X (mm)	Z (mm)	Y (mm)				
乱 流 I	15000	155	0	主流方向(u)	5.01	0.351	0.4396
				鉛直方向(w)	-0.26	0.141	0.1766
			375	主流方向(u)	5.06	0.346	0.4377
				鉛直方向(w)	-0.18	0.167	0.2113
			1200	主流方向(u)	4.82	0.358	0.4314
				鉛直方向(w)	-0.12	0.202	0.2434
乱 流 II	15000	155	0	主流方向(u)	5.16	0.516	0.6656
				鉛直方向(w)	-0.23	0.154	0.1987
			375	主流方向(u)	5.11	0.414	0.5289
				鉛直方向(w)	-0.11	0.170	0.2172
			1200	主流方向(u)	5.06	0.469	0.5933
				鉛直方向(w)	-0.18	0.160	0.2024

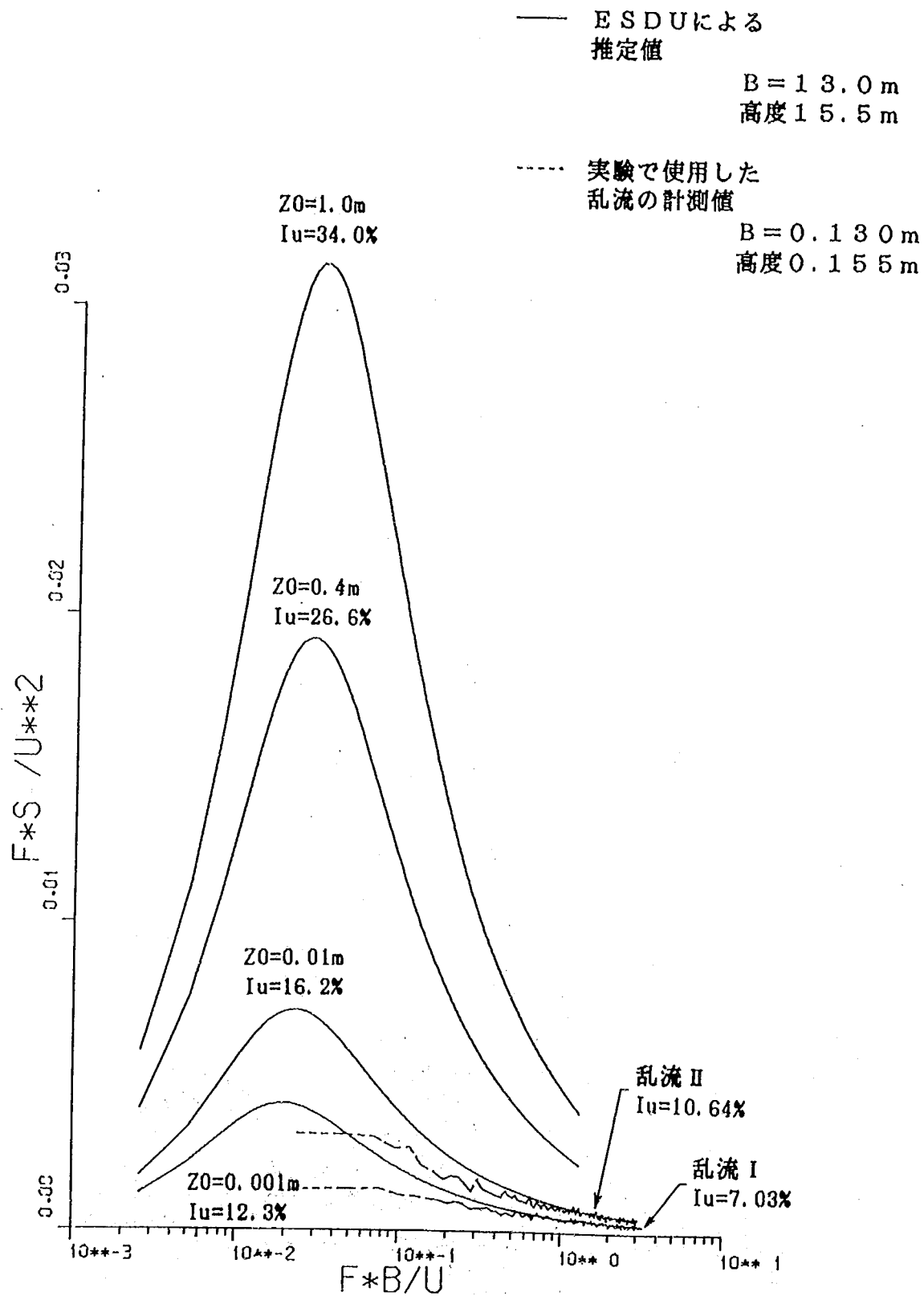


図-2.18 主流方向変動風速と実測データESDUとの比較 (主流方向)

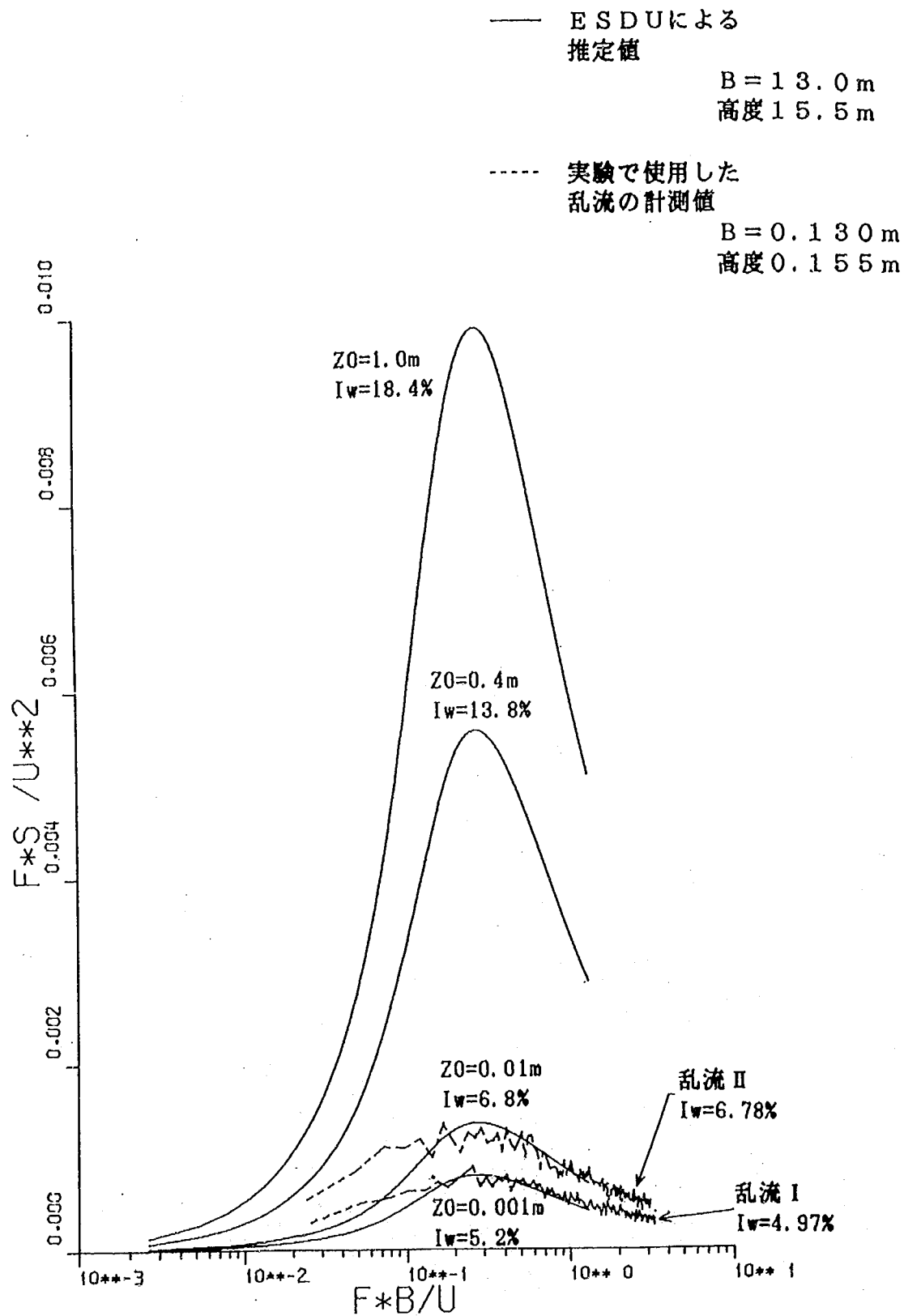


図-2.19 鉛直方向変動風速と実測データ ESDU との比較 (鉛直方向)

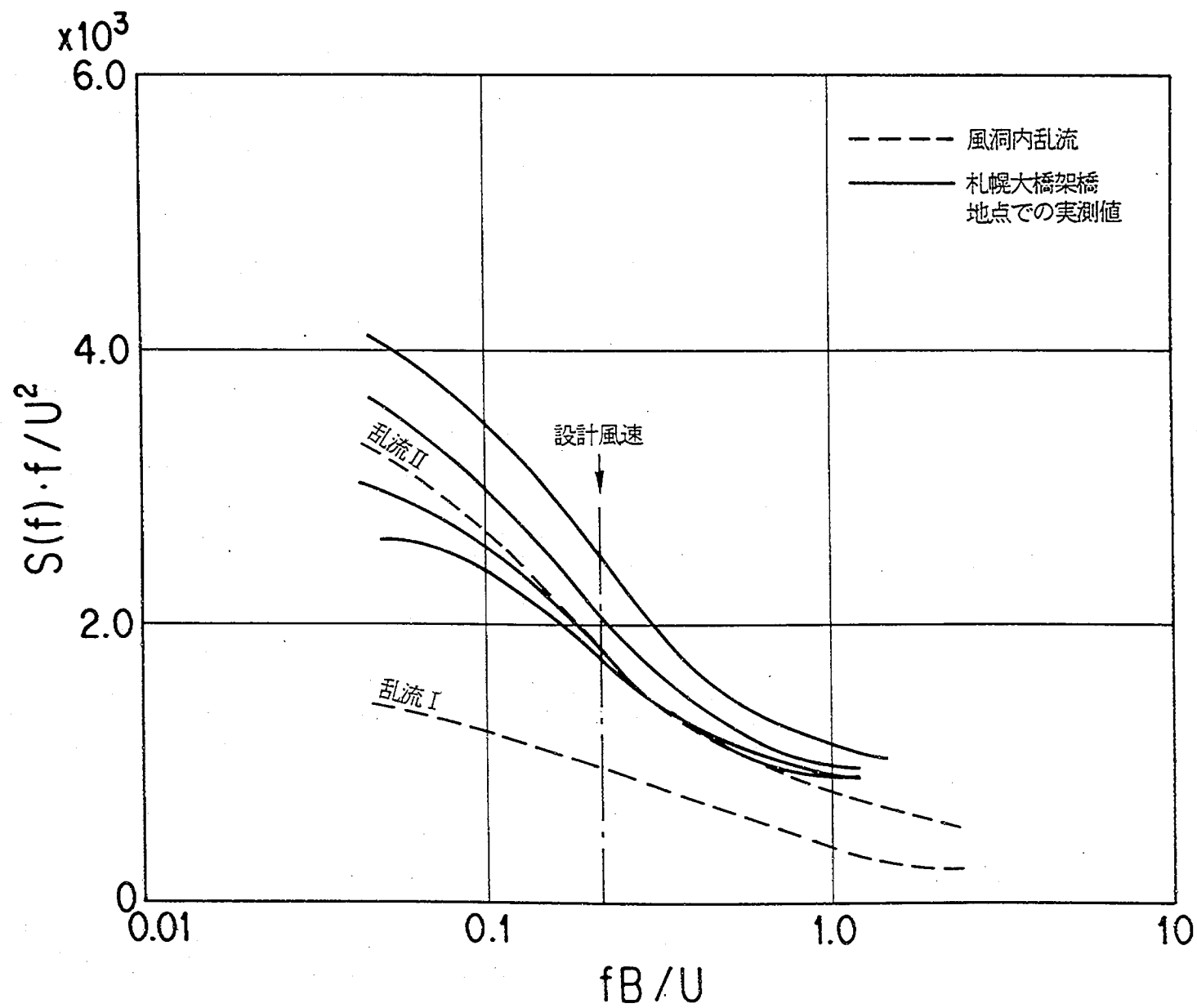


図-2.20 架橋地点と風洞間のパワースペクトルの比較

表-2.11 実験ケース一覧

整理 番 号	間 隔 (m)	気 流	水 平 角 (deg)	構 造 減 衰	模 型 高 さ (mm)	実 験 番 号
1	15.5	一 様 流	0	0.04	330	1
2				0.07		2
3				0.02		3
4			155		1'	
5			330		4	
6		乱 流 I	0	0.04	155	5
7						6
8						乱 流 II
9	30.2	一 様 流	0	0.02	330	9
10				0.04		12
11		乱 流 I		0.02	155	10
12		乱 流 II				11
13	単 独	一 様 流	0	0.02	330	13
14					155	16
15		乱 流 I				14
16		乱 流 II				15

表-2.12 対風応答実験結果 (その1)

整理 番号	間隔 (m)	気 流	水平 偏角	構造 減衰	模型 高さ (mm)	モ ー ド		着目点：主径間1/2点たわみ2次は側径間1/2点)				図 番
								渦 励 振			$\eta/B=0.01$ 以上 発現風速 (m/s)	
								発現風速域 (m/s)	最 大 振 幅			
								発現風速	最大値			
1	15.5	一様流	0	0.02	330	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	付図-4.1
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
						下流側	たわみ1次	24.9~34.8	30.7	0.0085	発現せず	
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
2	15.5	一様流	0	0.04	330	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	付図-4.2
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
3	15.5	一様流	0	0.07	330	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	付図-4.3
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
4	15.5	一様流	0	0.02	155	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	51.8	付図-4.4
							2次	27.1~33.8	31.9	0.0112	62.5	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	46.7	
							2次	発現せず	—	—	61.3	
5	15.5	一様流	15	0.02	330	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	付図-4.5
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	発現せず	
							2次	発現せず	—	—	発現せず	
6	15.5	乱流Ⅰ	0	0.02	155	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	41.1	付図-4.6
							2次	発現せず	—	—	51.2	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	38.0	
							2次	発現せず	—	—	46.4	
7	15.5	乱流Ⅰ	0	0.04	155	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	41.4	付図-4.7
							2次	発現せず	—	—	51.3	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	39.4	
							2次	発現せず	—	—	50.7	
8	15.5	乱流Ⅱ	0	0.02	155	上流側	たわみ1次	発現せず	—	—	35.3	付図-4.8
							2次	発現せず	—	—	52.2	
						下流側	たわみ1次	発現せず	—	—	35.5	
							2次	発現せず	—	—	44.5	

※ 表中の振幅は無次元振幅 (η/B) で示す。

表-2.12 対風応答実験結果 (その2)

整理 番号	間隔 (m)	気 流	水平 偏角	構造 減衰	模型 高さ (mm)	モ ー ド		着目点：主径間1/2点たわみ2次は側径間1/2点)				図 番
								渦 励 振			$\eta/B=0.01$ 以上 発現風速 (m/s)	
								発現風速域 (m/s)	最 大 振 幅			
									発現風速	最 大 値		
9	30.2	一様流	0	0.02	330	上 流 側	たわみ1次	30.4~36.0	32.5	0.0051	59.0	付図-4.9
							2次	発現せず	——	——	64.9	
						下 流 側	たわみ1次	22.9~45.4	32.2	0.0581	22.4	
							2次	39.8~48.9	43.6	0.0412	27.2	
10	30.2	一様流	0	0.04	330	上 流 側	たわみ1次	31.9~43.1	37.4	0.0081	発現せず	付図-4.10
							2次	発現せず	——	——	発現せず	
						下 流 側	たわみ1次	19.7~27.0 27.0~45.4	23.6 39.2	0.0162 0.0270	21.0	
							2次	41.9~48.6	43.6	0.0288	32.2	
11	30.2	乱流Ⅰ	0	0.02	155	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	42.2	付図-4.11
							2次	32.1~43.3	34.4	0.0149	51.9	
						下 流 側	たわみ1次	20.2~35.1	30.4	0.0216	22.0	
							2次	34.9~41.9	36.1	0.0272	29.6	
12	30.2	乱流Ⅱ	0	0.02	155	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	38.1	付図-4.12
							2次	34.3~40.9	38.6	0.0080	55.2	
						下 流 側	たわみ1次	18.1~31.6	26.1	0.0277	21.4	
							2次	32.4~48.1	40.6	0.0200	33.5	
13	単独	一様流	0	0.02	330	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	発現せず	付図-4.13
2次	34.3~41.6	35.3	0.0065	発現せず								
14	単独	一様流	0	0.02	155	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	49.3	付図-4.14
2次	34.6~39.9	35.8	0.0160	59.7								
15	単独	乱流Ⅰ	0	0.02	155	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	41.4	付図-4.15
2次	27.8~39.8	32.1	0.0145	57.9								
16	単独	乱流Ⅱ	0	0.02	155	上 流 側	たわみ1次	発現せず	——	——	43.1	付図-4.16
2次	27.8~42.6	33.8	0.0103	60.3								

※ 表中の振幅は無次元振幅 (η/B) で示す。

った。

① 道路中心間隔15.5m, 構造減衰が $\delta=0.02$ の場合 (付図-3.1)

上流側桁, 下流側桁の両方について, 渦励振はたわみ1次, 2次共に明確な発現はなく, 気流の影響は顕著でなかった。風速が上がるにつれて気流の影響がみられ, 一樣流ではかなりの高風速まで大きな振動は発現しなかった。乱流Iと乱流IIの比較では, 30~50m/s程度の中風速では乱流IIの振幅がやや大きく, それよりも高風速では乱流Iの振幅がやや大きくなったが, 顕著な差はみられなかった。

② 道路中心間隔30.2m, 構造減衰が $\delta=0.02$ の場合 (付図-3.2)

上流側桁について見ると, 一樣流ではたわみ1次の渦励振が発現したが振幅は小さく, たわみ2次の渦励振は発現しなかった。乱流I, 乱流IIではたわみ1次の渦励振は発現せず, たわみ2次の渦励振は乱流I, 乱流IIともに実橋換算風速32~43m/sの風速域で発現し, 最大振幅はそれぞれ19cm, 10cmであった。全体的には一樣流よりも乱流の方が振幅が大きい, 一樣流では高風速でギャロッピングが発現した。

下流側桁について見ると, いずれのケースでも風速30m/sを越えたあたりから大きな振動が発現しはじめ, 特に一樣流では50cmを超える大振幅の渦励振が発現しており, 耐風性は非常に悪い。乱流Iと乱流IIでは顕著な差は見られなかった。

③ 単独橋で構造減衰が $\delta=0.02$ の場合 (付図-3.3)

鉛直たわみ1次の渦励振は, 一樣流, 乱流I, 乱流IIのいずれでも発現しなかった。鉛直たわみ2次の渦励振は, いずれの気流でも実橋風速30~40m/s程度で発現し, 最大振幅は一樣流で8cm, 乱流Iで20cm, 乱流IIで13cmであった。

(2) 構造減衰による影響

① 道路中心間隔15.5m, 気流条件が一樣流の場合 (付図-3.4)

ギャロッピングは上, 下流側とも何れの条件下においても発現しなかった。渦励振は上流側について見ると, たわみ1次の渦励振は見られず, たわみ2次の渦励振は $\delta=0.02, 0.04$ の場合に実橋換算風速23~32m/sの範囲でわずかに見られるものの, $\delta=0.07$ の場合には発現しなかった。

一方, 下流側について見ると, たわみ1次の渦励振は $\delta=0.02$ の場合では実橋換算で25~35m/sの風速域で最大振幅11cmで発現したが, δ が0.04以上の場合には発現しなかった。たわみ2次については, $\delta=0.02$ の場合に30m/s以上の風速域で渦励振らしき振幅の増加が見られるものの, δ が0.04以上の場合には見られなかった。

② 道路中心間隔15.5m, 気流条件が乱流Iの場合 (付図-3.5)

構造減衰による影響は認められなかった。

③ 道路中心間隔30.2m, 気流条件が一樣流の場合 (付図-3.6)

上流側について見ると, $\delta=0.02, 0.04$ のいずれの場合でもたわみ1次の渦励振が発現したが, 振幅は実橋で10cm程度であり, 顕著な差はみられなかった。 $\delta=0.02$ の場合高風速でたわみ1次のギャロッピングが発現したが, δ が0.04の場合には発現しなかった。

下流側ではたわみ1次の渦励振が23~45m/sと広い風速の範囲にわたって生じ, $\delta=0.02$ の場

合、風速32m/sで最大76cm、 $\delta = 0.04$ の場合には風速39m/sで35cmの振幅となった。減衰の増加により振幅は減少するものの、依然大きな振幅の渦励振が生じている。たわみ2次についても、1次と同様であり、減衰の増加により振幅が減少するものの、依然大きな渦励振が生じている。

(3) 道路中心間隔の影響

① 気流条件が一樣流、構造減衰が0.02の場合（付図-3.7）

上流側について見ると、たわみ1次の渦励振は道路中心間隔15.5mの場合には発現しないが、間隔30.2mの場合にはわずかな振幅ではあるが発現した。間隔30.2mの場合には高風速でギャロッピングが発現したが、間隔15.5mの場合には発現しなかった。

下流側については、間隔15.5mの場合には渦励振がたわみ1次、2次ともに発現しなかったが、間隔30.2mの場合にはたわみ1次、2次ともに大きな振幅で発現した。

② 気流条件が一樣流、構造減衰が $\delta = 0.04$ の場合（付図-3.8）

上流側について見ると、たわみ1次の渦励振は道路中心間隔15.5mの場合には発現しなかったのに対し、間隔30.2mの場合には実橋風速32~43m/sで振幅が11cmで発現した。

下流側については、道路中心間隔15.5mの場合には渦励振は発現しなかったのに対し、間隔30.2mの場合には風速域は高いものの、大振幅の渦励振が発現した。

③ 気流条件が乱流Ⅰ、構造減衰が $\delta = 0.02$ の場合（付図-3.9）

上流側について見ると、たわみ1次の渦励振は発現しなかったが、たわみ2次の渦励振は、道路中心間隔15.5mの場合には発現しなかったが、間隔30.2mの場合には32~43m/sの風速域で発現し、振幅は19cmであった。

下流側については、道路中心間隔が15.5mの場合には渦励振は発現しなかったが、間隔30.2mの場合には実橋風速30m以上で30cm前後の渦励振が発現した。

④ 気流条件が乱流Ⅱ、構造減衰が $\delta = 0.02$ の場合（付図-3.10）

上流側については、たわみ1次の渦励振は発現せず、たわみ2次の渦励振は、道路中心間隔30.2mでのみ発現し、風速域が34~41m/s、振幅は10cmであった。しかし全体的に見ると間隔による差は顕著でなかった。

下流側については、間隔が15.5mの場合には渦励振が発現しないが、間隔30.2mの場合にはたわみ1次の渦励振が26m/s付近で36cmの振幅で発現した。また、全体的に道路中心間隔30.2mの方が振動振幅が大きかった。

(4) 水平偏角の影響（付図-3.11）

水平偏角による影響は認められなかった。

(5) 模型高さの影響（付図-3.12）

単独橋で構造減衰 $\delta = 0.02$ 、気流条件が一樣流の場合において、模型高さが15.5cm、33cmにて行った実験結果を対比した。

たわみ1次の渦励振は、いずれの高さでもわずかに発現したが、模型高さが15.5cmの方が振幅は大きかった。たわみ2次の渦励振は、いずれの高さでも発現し、風速域も同じであったが、模型高さ15.5cmの場合に33cmの場合の約2倍の振幅であった。

2.3 2次元部分模型実験（縮尺1／100）

2.3.1 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。模型は1／100の剛体模型であり、長さ40cmとした。模型を支持するために簡易支持装置を風洞内に設置し、6本のコイルバネにより模型を支持装置に取り付けた。

実験は迎角、気流等の条件を実験ケース毎に設定し、風速を変化させながら模型の挙動を測定した。使用した気流は乱れのほとんどない一様流および模型の上流側に配置したスパイアーおよび人工芝によって発生させた2種の乱流であり、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。模型の挙動は光学式変位計により測定し、データレコーダおよびペンレコーダに記録した。今回実施した実験の概要を図－2.21に示す。

2.3.2 実験条件

実験条件は縮尺1／45の実験と同様であり、無次元質量、無次元風速、構造減衰を実橋と模型で一致させた。ただし構造減衰に関しては振動現象を起こりやすくするため小さ目に設定したが、減衰器を取り付けない状態で減衰率が $\delta=0.03$ 程度であったため、減衰を付加しないで実験を行った。相似条件より導かれた実験条件を表－2.13、2.14に示す。

2.3.3 気流特性

(1) 気流の設定

気流は3次元全橋模型実験と同様、一様流および2種の乱流であり、乱流の発生方法についても3次元全橋模型実験と同様、スパイアーを用いる方法およびスパイアーと人工芝を併用する方法を採用した。スパイアーおよび人工芝の形状および風洞での敷設方法を図－2.22～2.24に示す。

(2) 気流の計測

熱線風速計による気流計測を行い気流特性を把握し、架橋地点の自然風との相似性について検討した。検討結果を以下に示す。

実験に先立ち、熱線風速計による気流計測を行い、乱れ強さ、乱れのスケール、風速のパワースペクトルなどの気流特性を把握し、架橋地点の自然風との相似性について検討した。以下に検討結果を示す。

① 乱れ強さおよび乱れのスケール

乱れ強さおよび乱れのスケールの測定結果を表－2.15に示す。主流方向の乱れ強さが架橋地点のものよりも小さいものとなった。

② 風速のパワースペクトル

風洞内に発生させた乱流Ⅰ、ⅡとESDU⁽⁴⁾の比較を図－2.25～2.26に示す。また、架橋地点の実測データとの比較を図－2.27に示す。

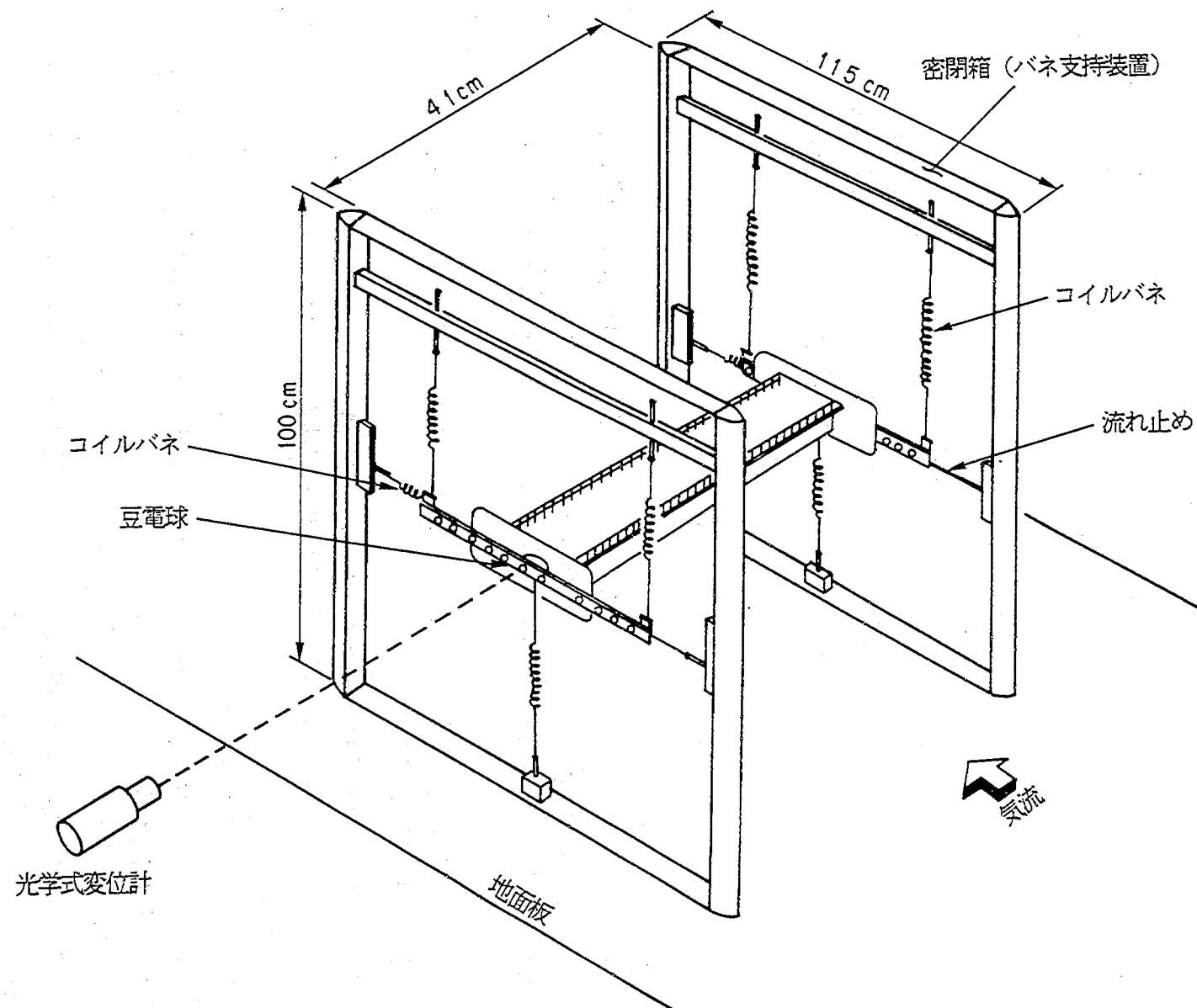


図-2.21 実験の概略図

表-2.13 2次元部分模型実験条件 (縮尺1/100)

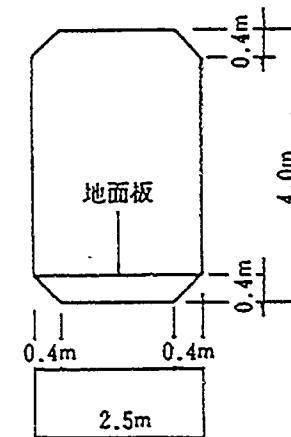
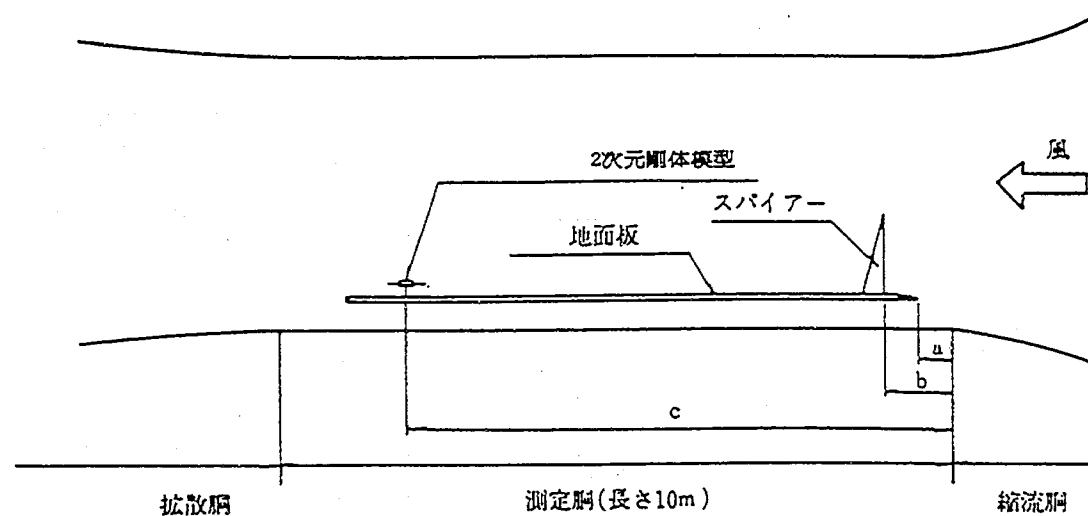
項 目	実 橋	所 要 値	実 験 値
縮 尺	—	1/100	1/100
重 量	8.635t/m/Br	0.345kgf/model	0.344kgf/model
支 持 方 法	—	鉛直たわみ1自由度支持	
鉛直たわみ振動数	0.695 Hz	—	表-2.14参照
鉛直たわみ構造減衰	—	0.02	
風 速 倍 率 (実橋/風洞)	—	—	

表-2.14 実験条件 (縮尺1/100)

実験 番号	振 動 数 (Hz)	たわみ 構造減衰	たわみ 風速倍率
1	8.843	0.0326	7.86
2	8.958	0.0327	7.76
3	8.919	0.0343	7.79
4	8.857	0.0307	7.85
5	8.867	0.0340	7.84

表-2.15 対象乱流一覧

項 目	気 流	
	乱 流 (I)	乱 流 (II)
平均風速(m/s)	5.01	4.86
主流乱れ強さ I_u (%)	4.2	7.7
鉛直乱れ強さ I_w (%)	4.0	7.0
主流乱れのスケール L_{xu} (m)	0.238(23.8)	0.389(38.9)
鉛直乱れのスケール L_{xw} (m)	0.125(12.5)	0.146(14.6)



フラッター風洞立面図

測定胴断面図

	一様気流	境界層乱流 (I), (II), (III)	
		スパイアー高さ 1.2m	スパイアー高さ 1.6m
測定胴上流端から地面板先端までの距離 a	5.7m	0.5m	0.5m
" スパイアーまで距離 b	—	1.0m	0.1m
" 札幌大橋模型までの距離 c	8.0m	8.0m	8.0m

図-2.22 地面板, スパイアー設置状況図

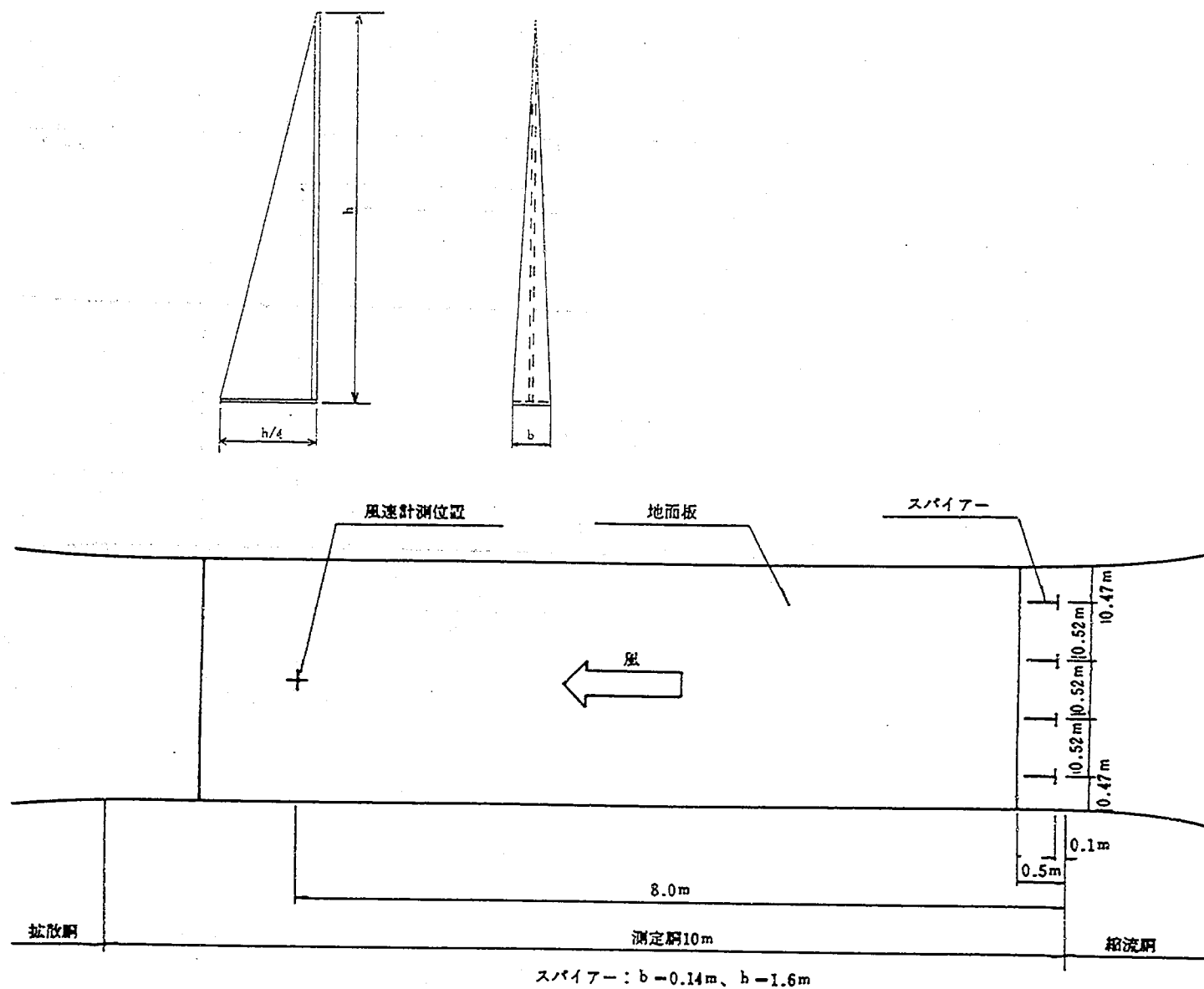


図-2.23 乱流発生装置配置平面図 (乱流I)

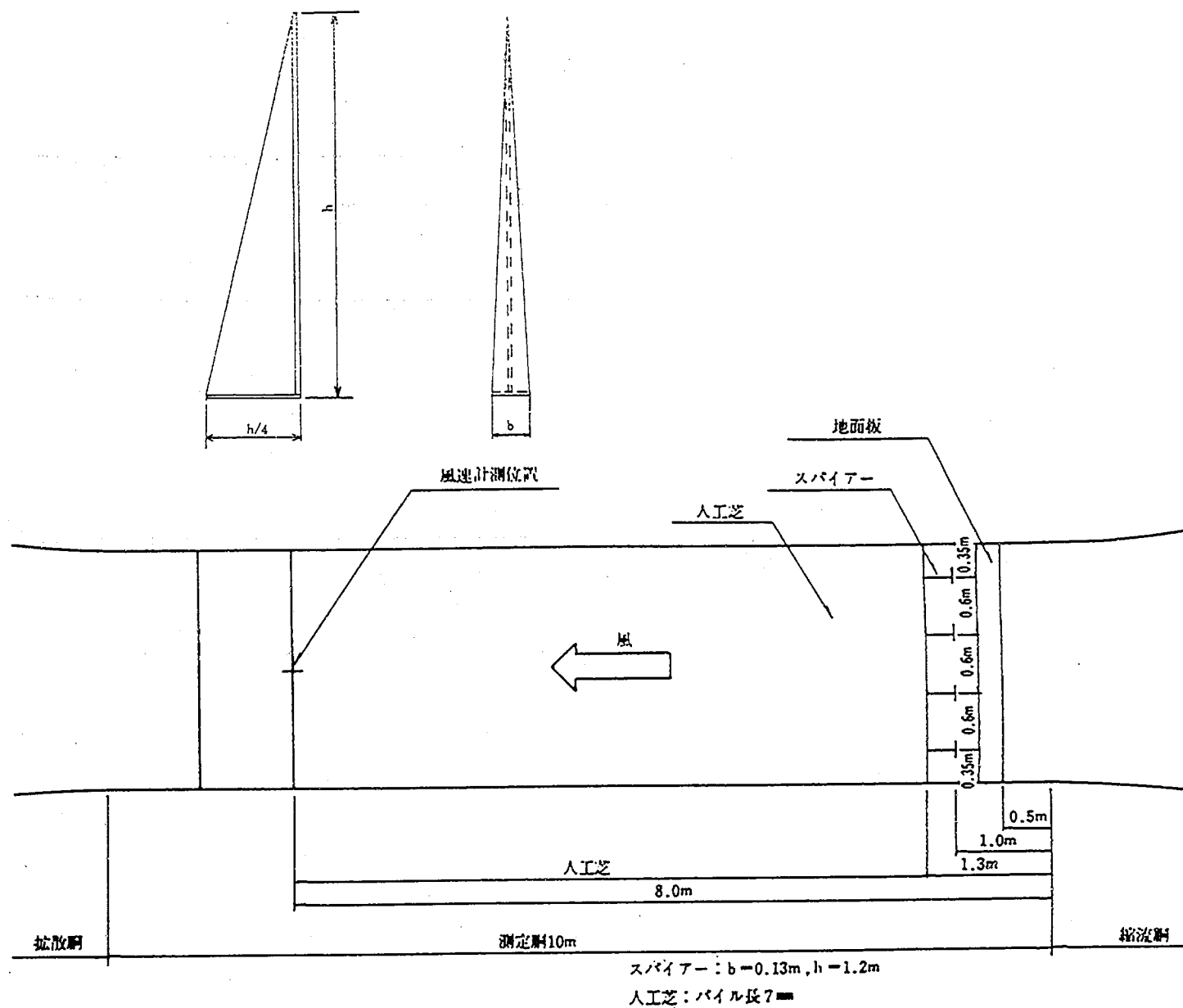


図-2.24 乱流発生装置配置平面図 (乱流Ⅱ)

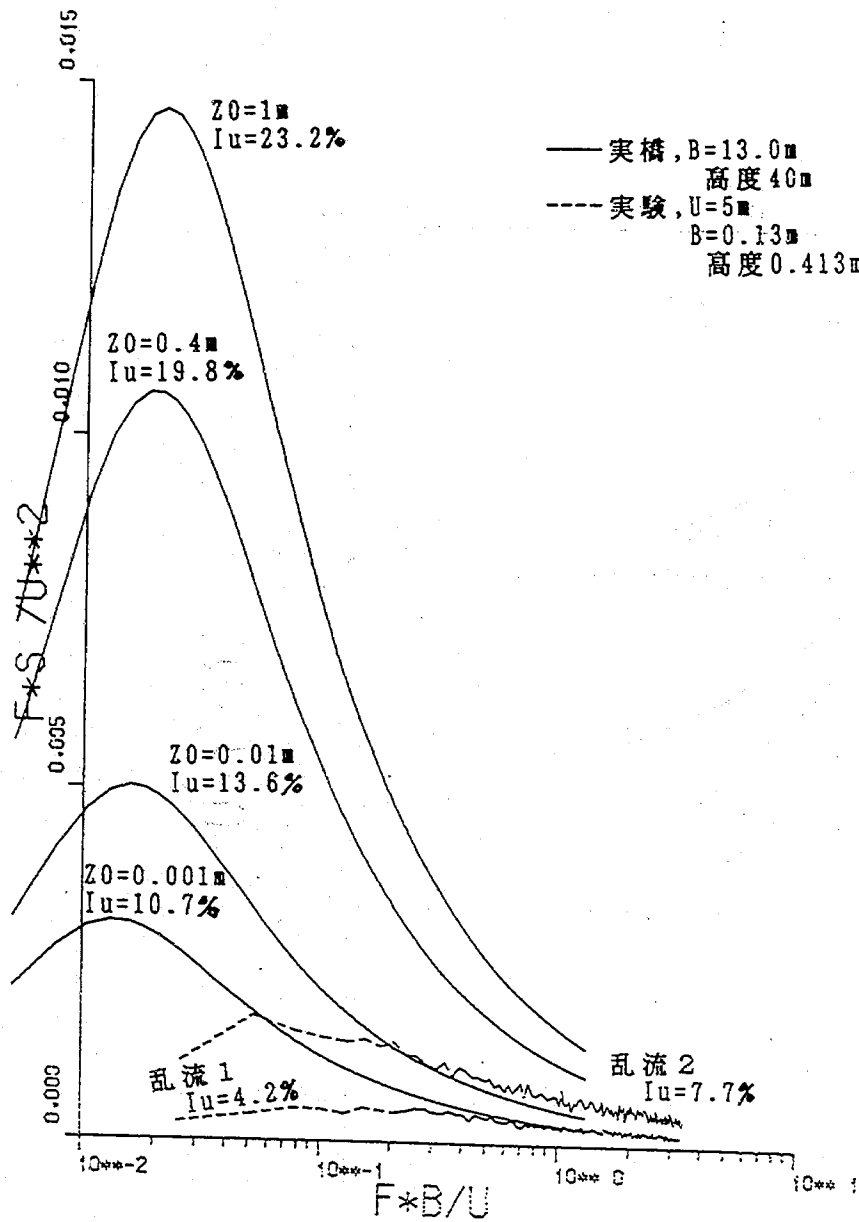


図-2.25 風速のスペクトル (u成分)

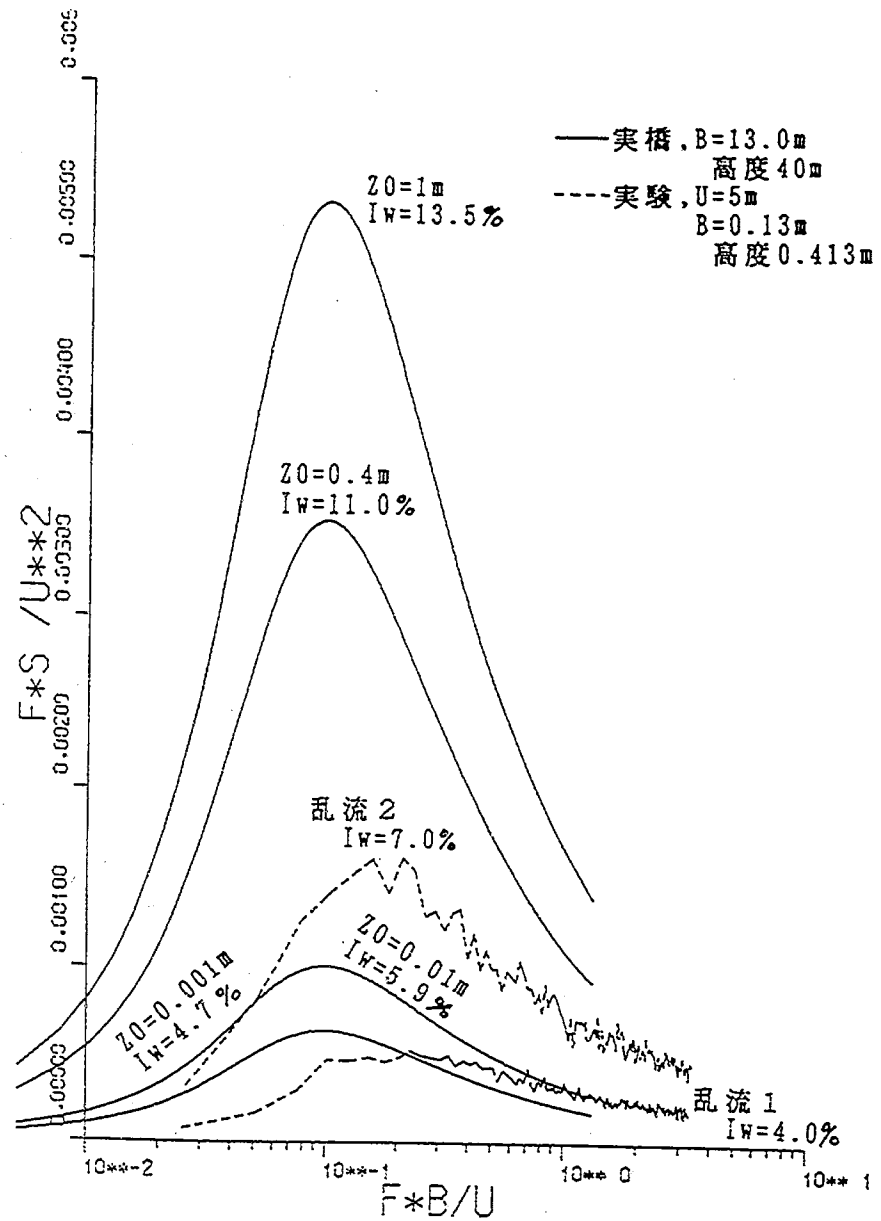


図-2.26 風速のスペクトル (w成分)

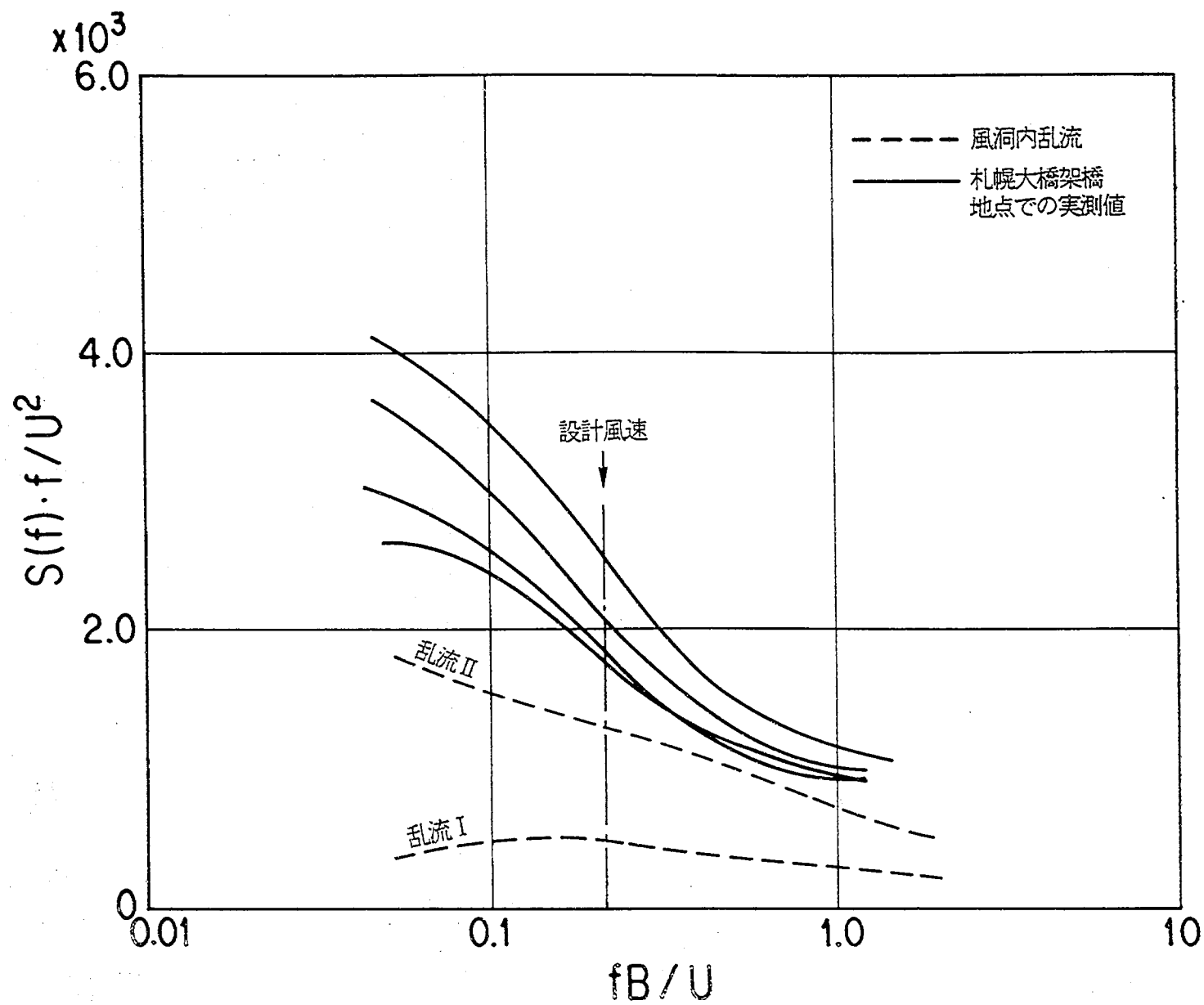


図-2.27 架橋地点と風洞間のパワースペクトルの比較

2.3.4 実験ケース

本実験は、実験条件の影響を調べるために行った。実験は単独橋について行い、模型縮尺の影響を調べるために縮尺1/45の2次元実験と対応するケースを設定し、2次元実験と3次元実験の相違を調べるために3次元全橋模型実験と対応するケースを設定した。変化させたパラメータは迎角および気流であり、対風応答特性の把握が目的のため、構造減衰は小さく設定した。実験ケースを表-2.16に示す。

2.3.5 実験結果

風洞実験より得られた各ケースの対風応答結果を表-2.16にまとめた。結果は、振動特性を渦励振、限定的パフティング、発散的振動の3種に分類して示した。また、参考として検討項目毎の風速と振幅の関係の重ね合わせ図およびすべてのケースの風速と振幅の関係を付図-5にまとめた。

(1) 一様流中における迎角の影響 (付図-5.1)

迎角 0° および $+3^\circ$ においては、渦励振は発現しなかったが、高風速(55m/s, 45m/s)で発散的振動が急激に発現している。

迎角 -3° では渦励振が風速域25~34m/sにおいて最大振幅0.011が発現した。発散振動は高風速(73m/s)で緩やかに発現した。

(2) 気流による影響 (付図-5.2)

一様流と乱流では対風応答に大きな違いがみられ、一様流ではギャロッピング、乱流ではパフティングが発現する。しかし、乱流Iと乱流IIでは振動振幅に大きな差はなかった。

表-2.16 実験結果総括表 ($s = 1/100$)

実験 番号	気 流	迎 角	構 造 減 衰	実験結果（上段：上流側，下段：下流側）		
				渦励振 発現風速域(m/s), (最大振幅* ¹)	限定的パフティング 発現風速(m/s), (最大振幅* ¹)	発散の振動* ² 発現風速(m/s)
1	一様流	0	0.03	—————	—————	54.9
2		+ 3		—————	—————	44.6
3		- 3		24.9~34.2(0.011)	—————	73.1
4	乱流Ⅰ	0		—————	—————	40.2
5	乱流Ⅱ			—————	—————	33.7

*1：振幅は無次元風速 (η/B) で示す。

*2：風速は $\eta/B > 0.01$ となった風速。

2.4 考察

2.4.1 対風応答の基本的な特性

(1) 模型縮尺の影響

1/45および1/100と縮尺を変えた模型を用いた2つの2次元実験の結果を比較すると、渦励振は1/45の実験では発現したものの、構造減衰が大きかったためか1/100の実験では渦励振が発現しなかった。ギャロッピングについては、両実験で迎角の変化による発現性状の違いが非常に良く似た結果が得られた。縮尺以外の実験条件の差異があるため、縮尺の影響を正確に把握することは難しいが、今回の比較の範囲では縮尺による実験結果については有意な差はみられなかった。

(2) 2次元実験と3次元実験の比較

今回の実験結果を概観すると、2次元実験と3次元実験ではその対風応答特性が大きく異なっている。前述したように、2次元実験では発現した振動現象は渦励振、限定的バフエティング、発散的振動の3種に分類した。3次元実験では、測定した風速範囲のほぼ全域にわたって、振幅はさまざまであるがバフエティング的な不規則振動がみられ、振動現象の種類を明確に分類することは困難であったため、対風応答の評価にあたっては最大振幅を結んだ曲線の形状に着目して行った。

2次元実験では模型を1次の振動モードに相似させたバネによる振動系に設定して実験を行うため、それぞれの条件に応じた比較的純粋な対風応答を示すが、実橋の振動特性とはかなり異なると考えられる。これに対して3次元実験では振動モードが1次のみならず2次以上の高次モードとの重ね合わせになり、また乱流中での実験のみならず一様流中でも模型幅が大きい気流の乱れの影響を大きく受けると考えられ、模型自体もセグメント間の隙間や模型化の精度など、実験条件の設定上不利な要因や複雑な要因が多い。したがってこれら2種の実験は、直接同じ土俵で比較するのは適切でなく、2次元実験は基本的な対風応答特性の把握、3次元実験はより実橋に対応した耐風性の把握、と位置づけるのが適切であろう。

2.4.2 構造減衰の影響

一般に構造減衰を大きくすると、振動振幅は小さくなる。2次元実験においては構造減衰の影響は比較的顕著に現れ、特に渦励振に対する影響は大きく、 $\delta=0.07$ で行った全てのケースで渦励振は完全に抑制された。限定的バフエティングに対してもかなりの影響があり、迎角 $+3^\circ$ における限定的バフエティングの振幅が数分の一に減少した。3次元実験においては2次元実験ほどは顕著な影響はみられなかったが、一様流中では渦励振、下流側の限定的バフエティングの振幅、ギャロッピングの発現の抑制効果がみられた。しかし乱流中での実験では構造減衰の影響はあまりみられなかった。

2.4.3 気流の影響

一般に一様流で発現する渦励振やギャロッピングは乱流中では抑制され、一様流で発現しなかったバフエティングが発現するが、今回の実験でも概ねこのような結果となった。ただし乱流Ⅰと乱流Ⅱの比較では、乱流Ⅰの方が振幅が大きくなり、また乱流Ⅰの方が渦励振が発現しやすいなど、乱流Ⅰの方が一様流に近い対風応答を示したが、乱流Ⅰと乱流Ⅱで対風応答に大きな違いはなかった。

2.4.4 設計案の耐風性の評価

(1) 許容振幅との比較による2橋の間隔の評価

前回の単独橋の耐風性調査時に、桁断面の耐風性を照査するため、許容振幅を算定した⁽²⁾。今回も同じ許容振幅を用いて比較を行い、設計案の耐風性を評価する。表-2.17に応答振幅と許容振幅の比較を示す。また、図-2.28~2.43に風速-振幅図での比較を示す。

間隔が15.5mの場合には気流条件、減衰条件によらず上下流側桁は許容振幅を超える振動の発現は予測されず、設計案は安全であると考えられる。これに対し間隔が30.2mの場合には、ここで比較した条件では下流側桁が許容振幅を超える振幅で振動する可能性がある。

ただし、許容振幅に対して大きな振動が起きているのは主に側径間の方であり、前述したように2次の振動モードは実橋と異なるため、以上の評価は絶対的なものといえず、あくまでも2種の間隔の設計案の比較での評価であることに注意する必要がある。

表-2.17 設計風速以下の最大振幅と許容振幅の比較

実橋振幅 (単位: cm)

間 隔 (m)	氣 流	構 造 減 衰	上 流 側 桁		下 流 側 桁	
			主径間中央	側径間中央	主径間中央	側径間中央
15.5	一樣流	0.02	1.4	3.7	11.1	6.7
		0.04	1.1	2.3	7.0	5.0
	乱流Ⅰ	0.02	12.0	6.5	11.2	8.2
	乱流Ⅱ		13.5	6.7	13.8	8.2
30.2	一樣流		6.5	3.3	75.2	31.1
		0.04	10.4	4.8	52.0	22.3
	乱流Ⅰ	0.02	10.4	19.5	27.9	35.3
	乱流Ⅱ		13.0	10.0	36.0	22.3

許 容 振 幅	初通過破壊	59.2	34.2	59.2	34.2
	疲 勞 破 壊	53.3	19.5	53.3	19.5

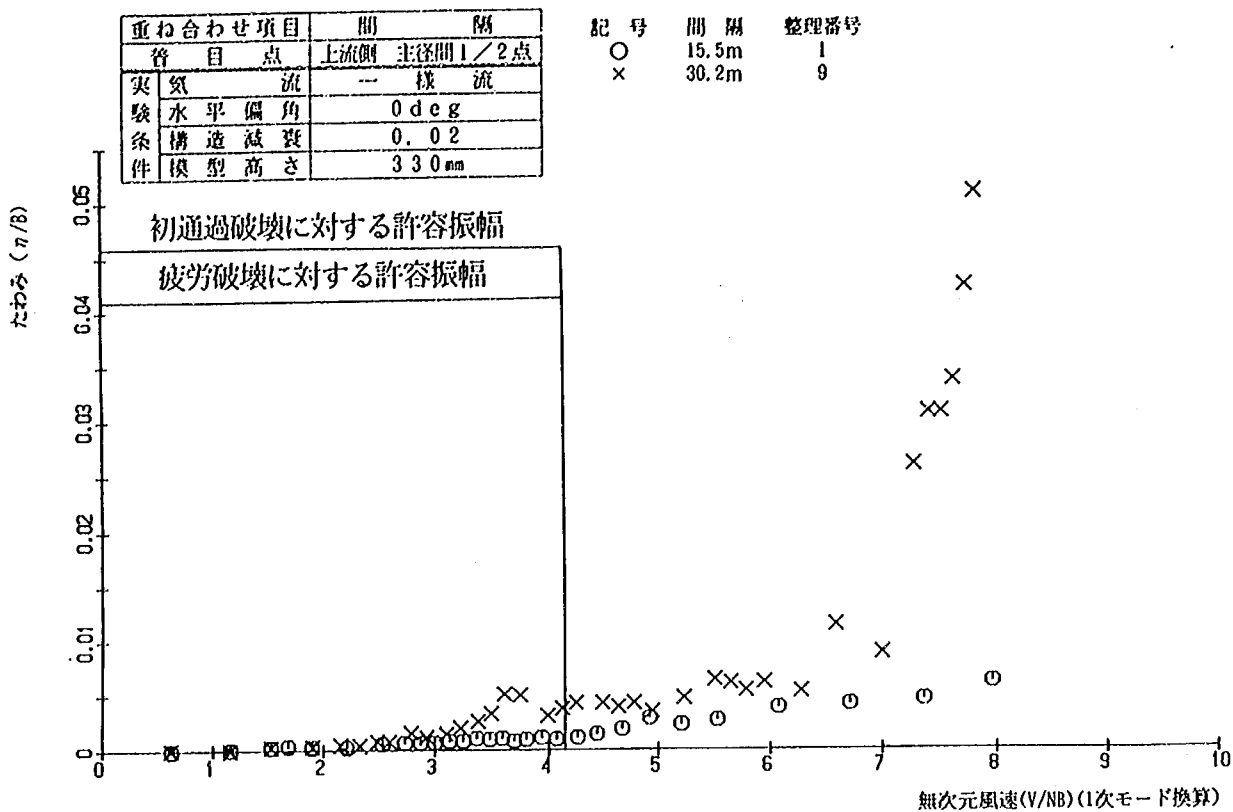


図-2.28 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

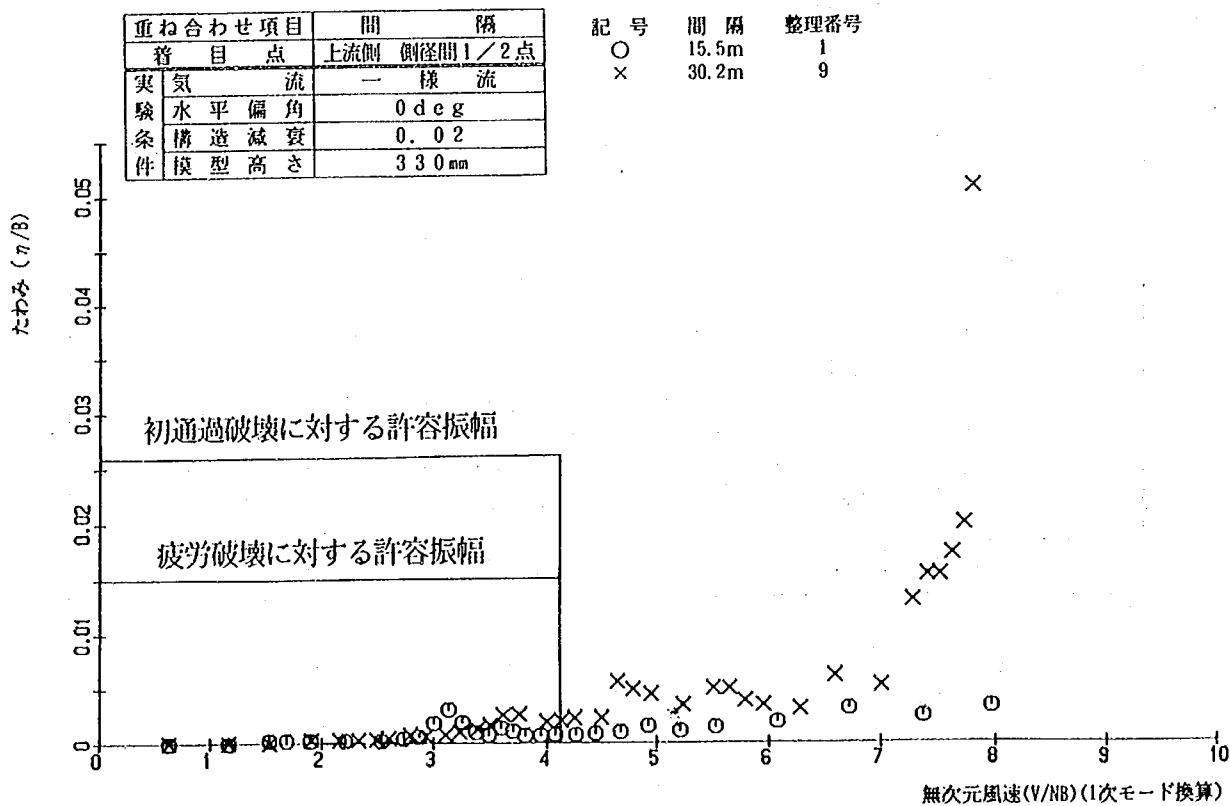


図-2.29 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

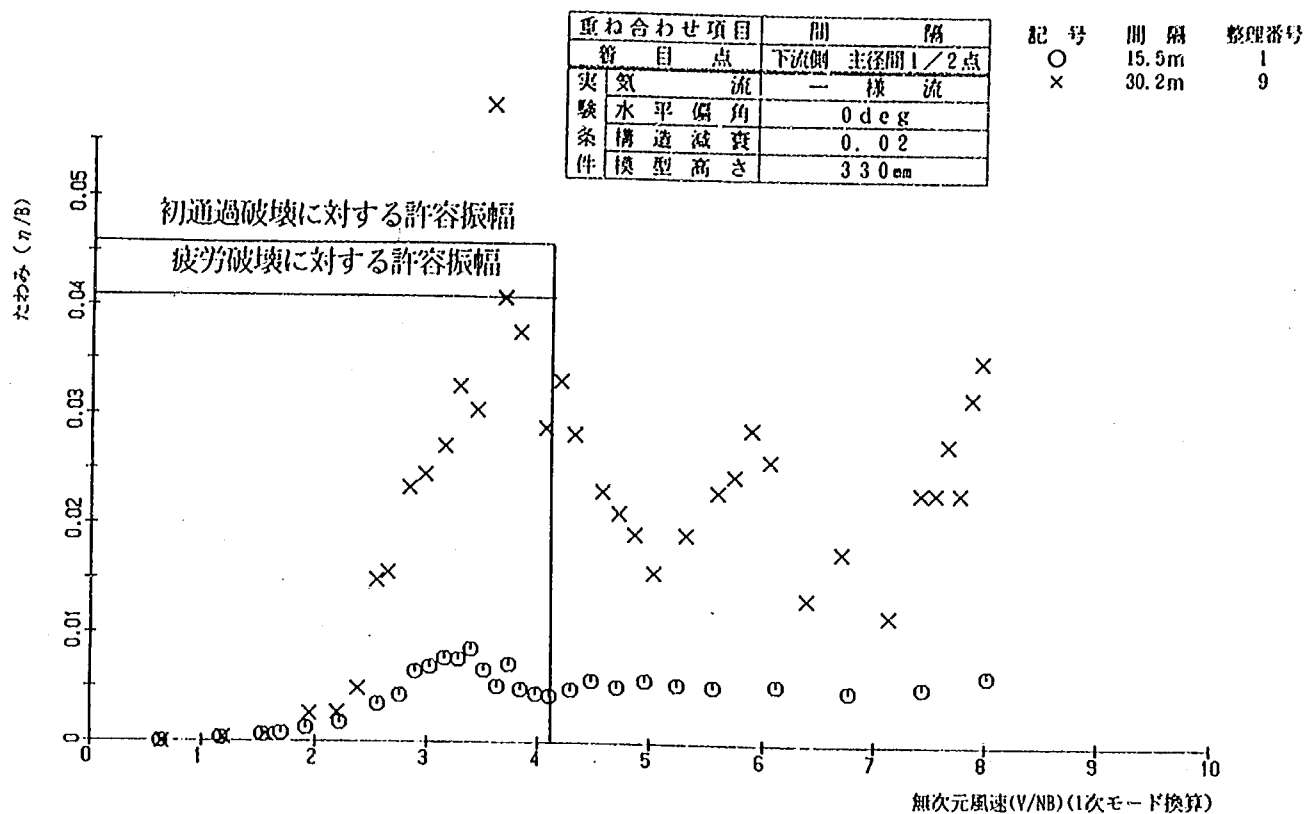


図-2.30 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

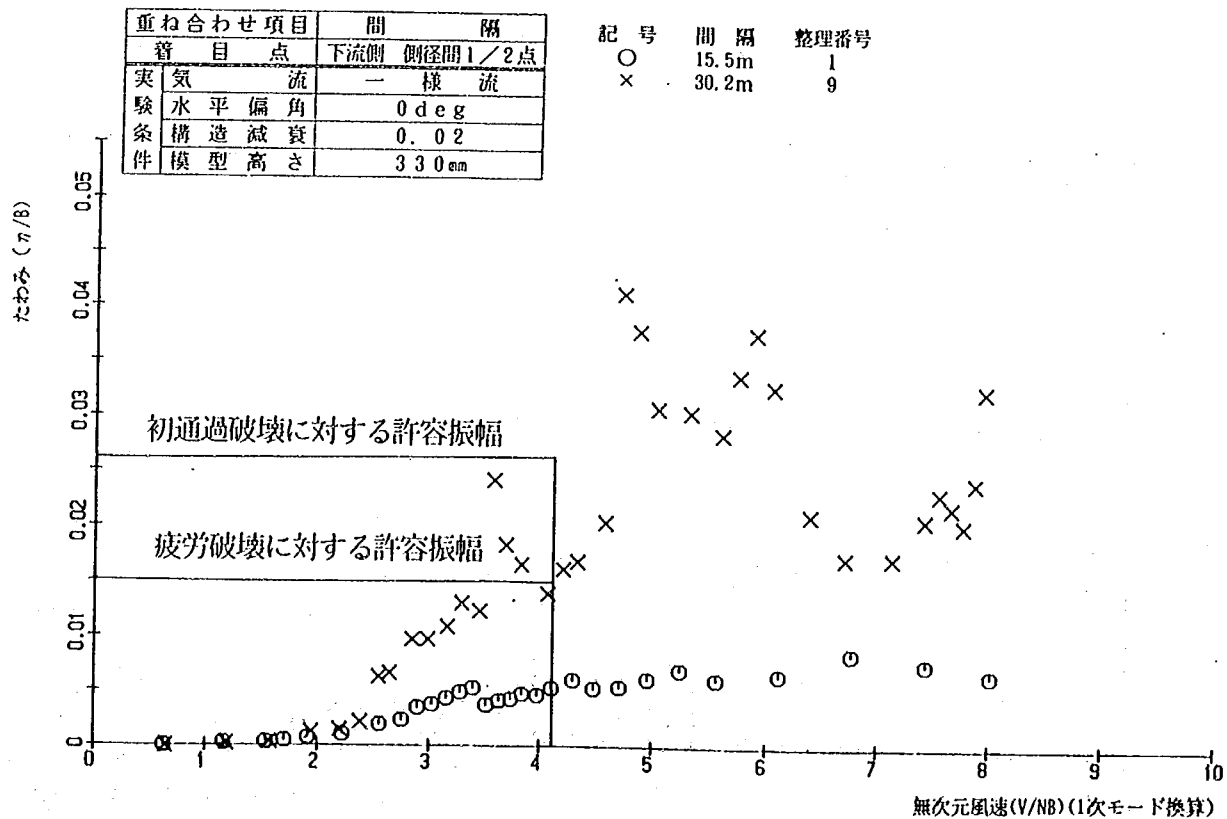


図-2.31 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

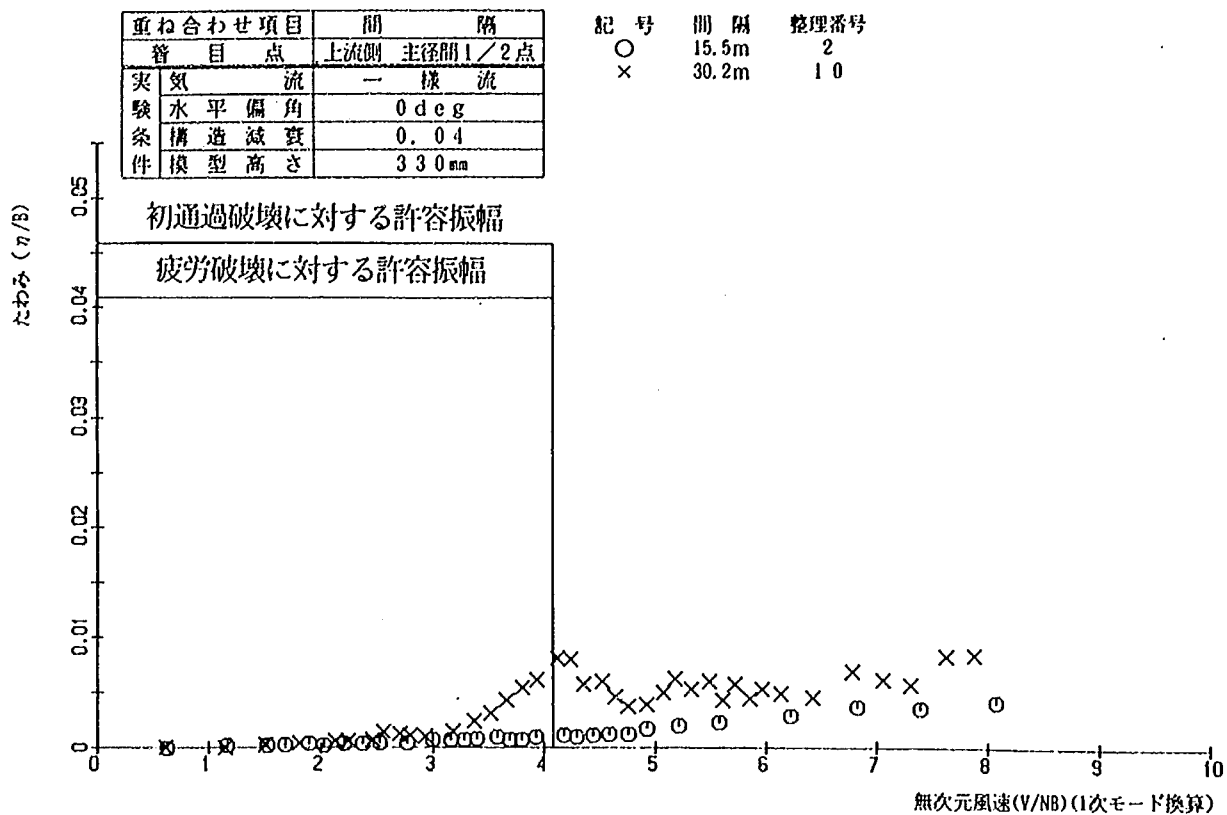


図-2.32 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

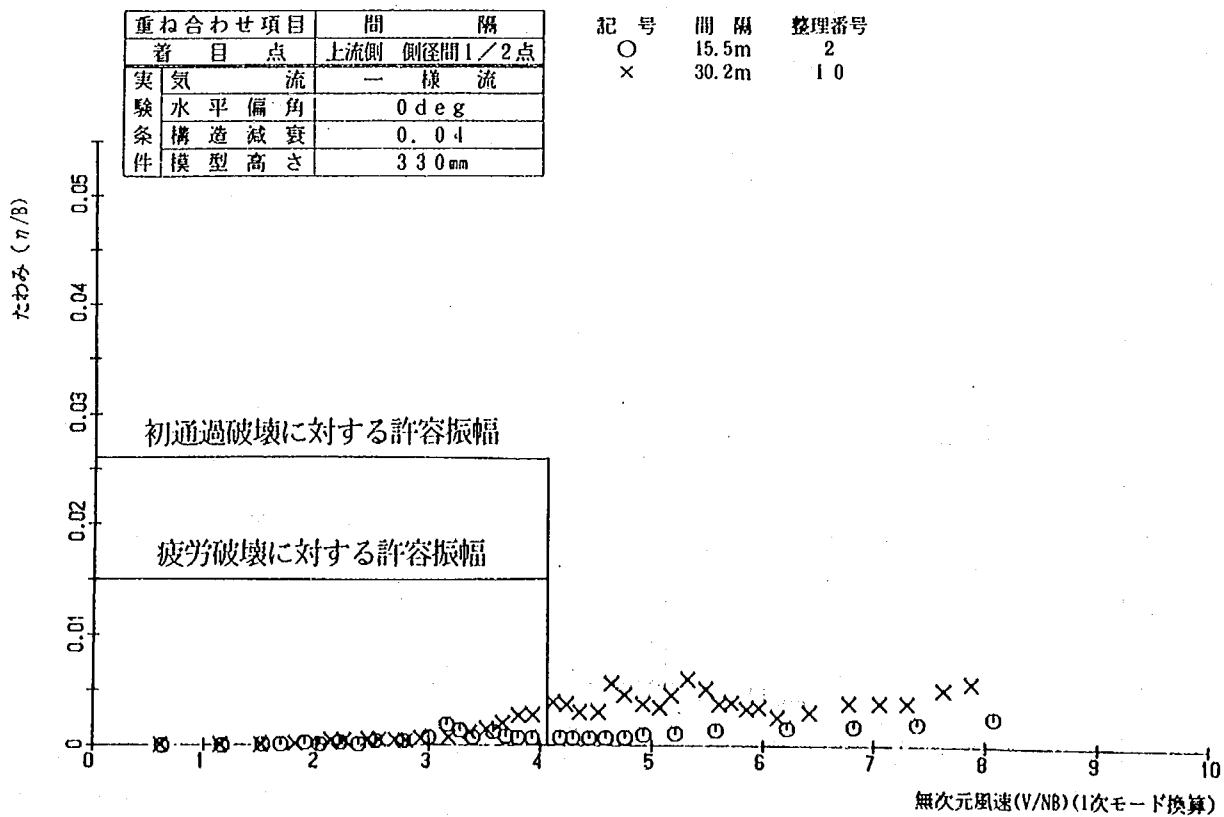


図-2.33 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

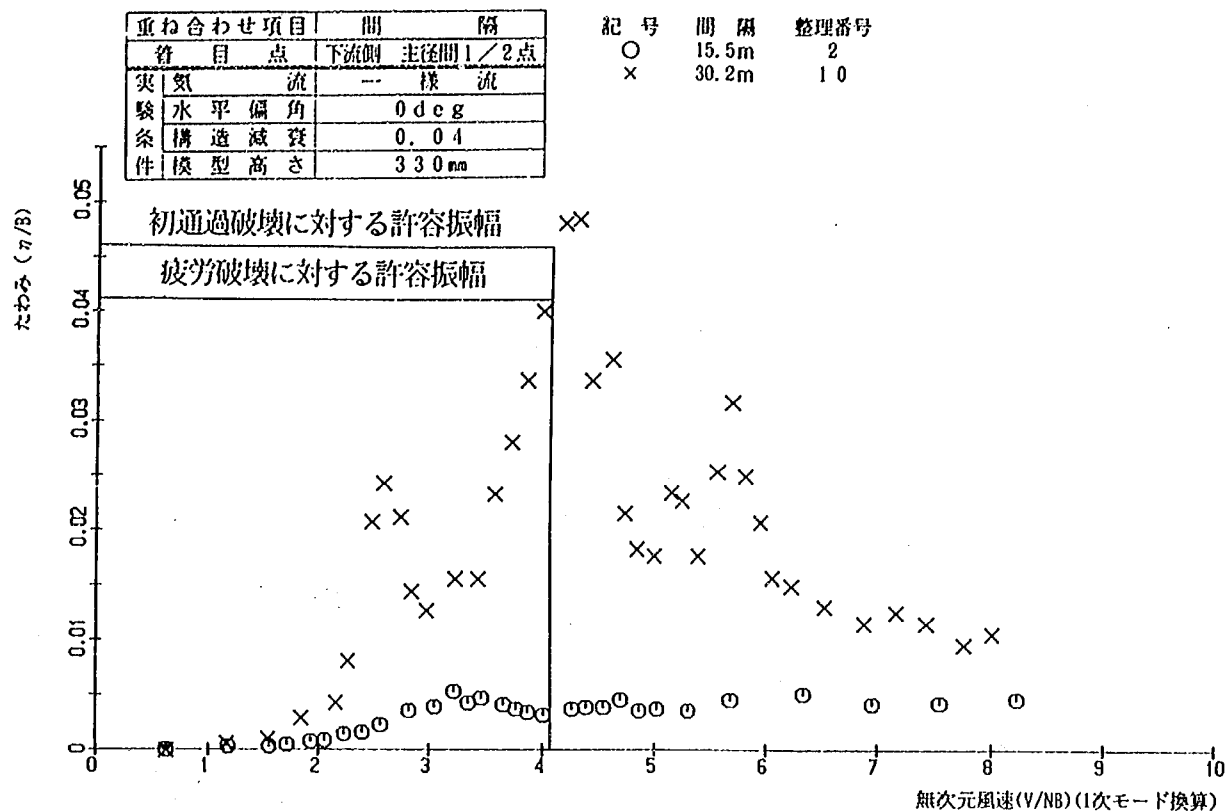


図-2.34 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

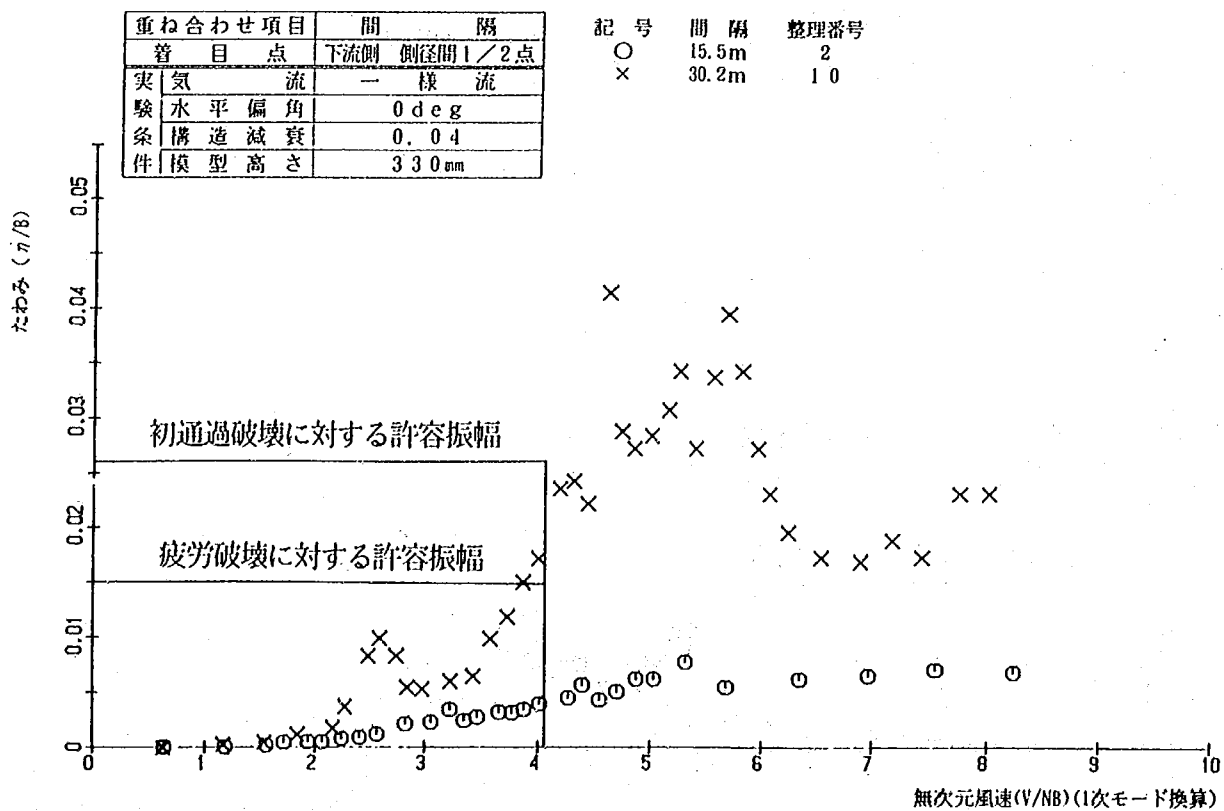


図-2.35 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

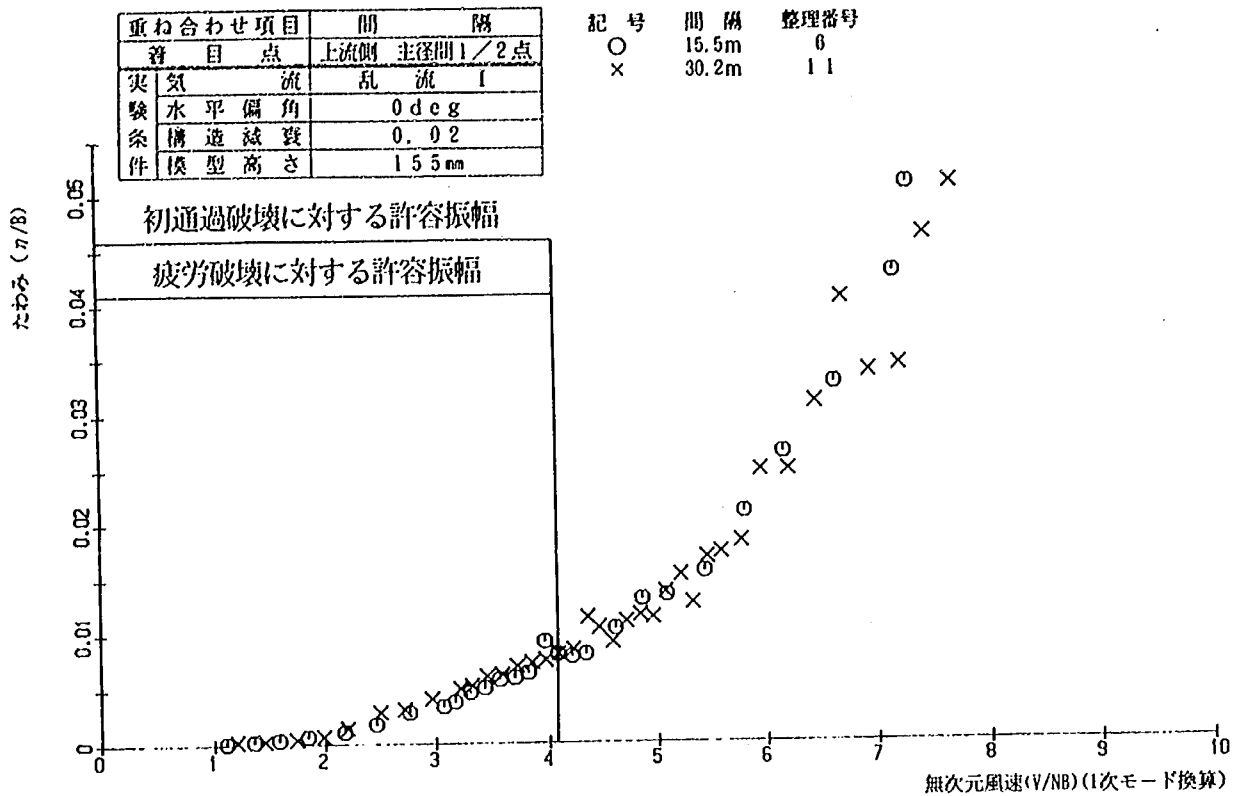


図-2.36 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

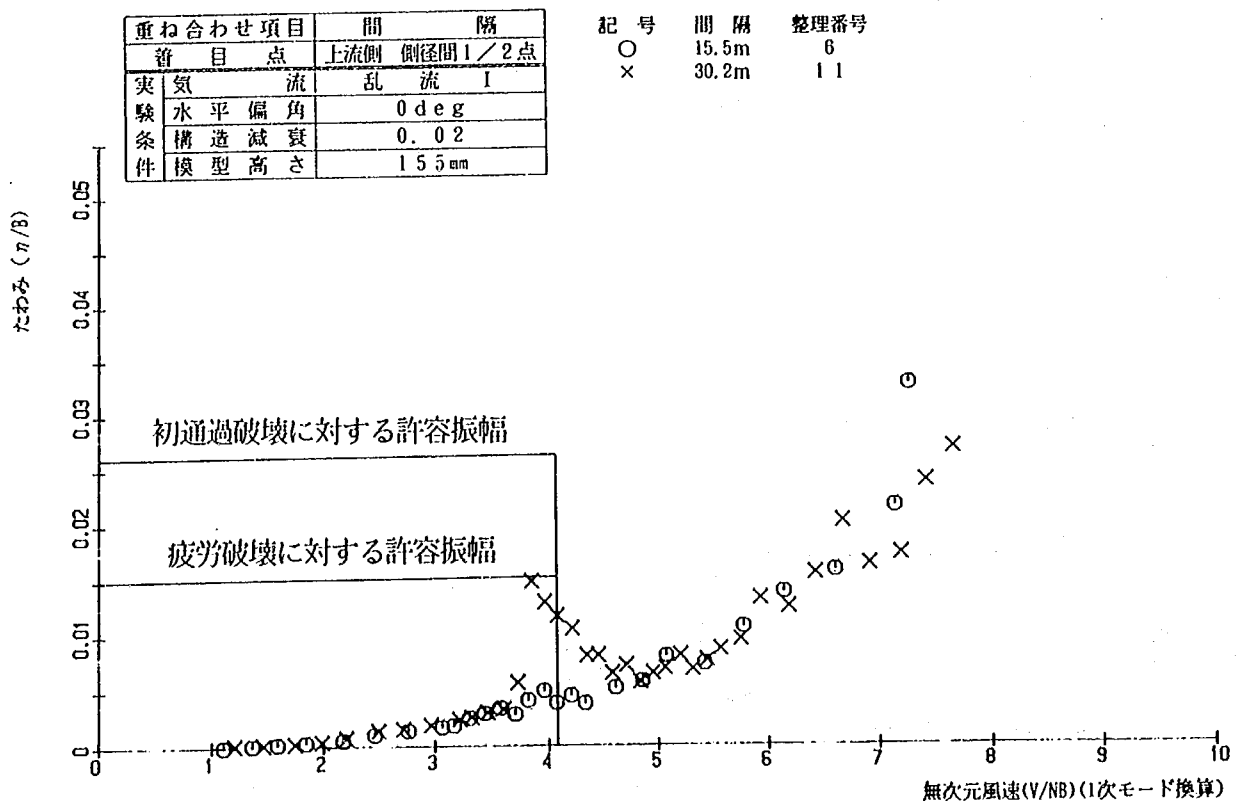


図-2.37 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

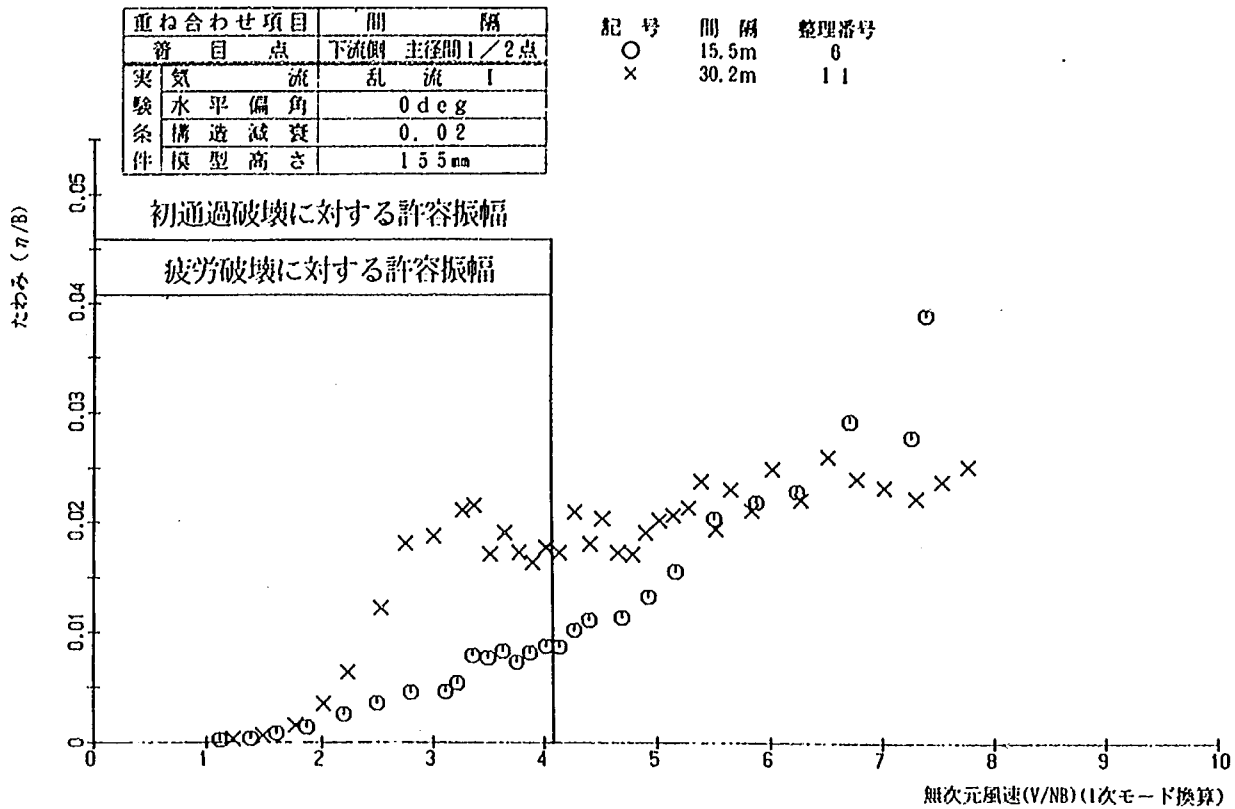


図-2.38 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

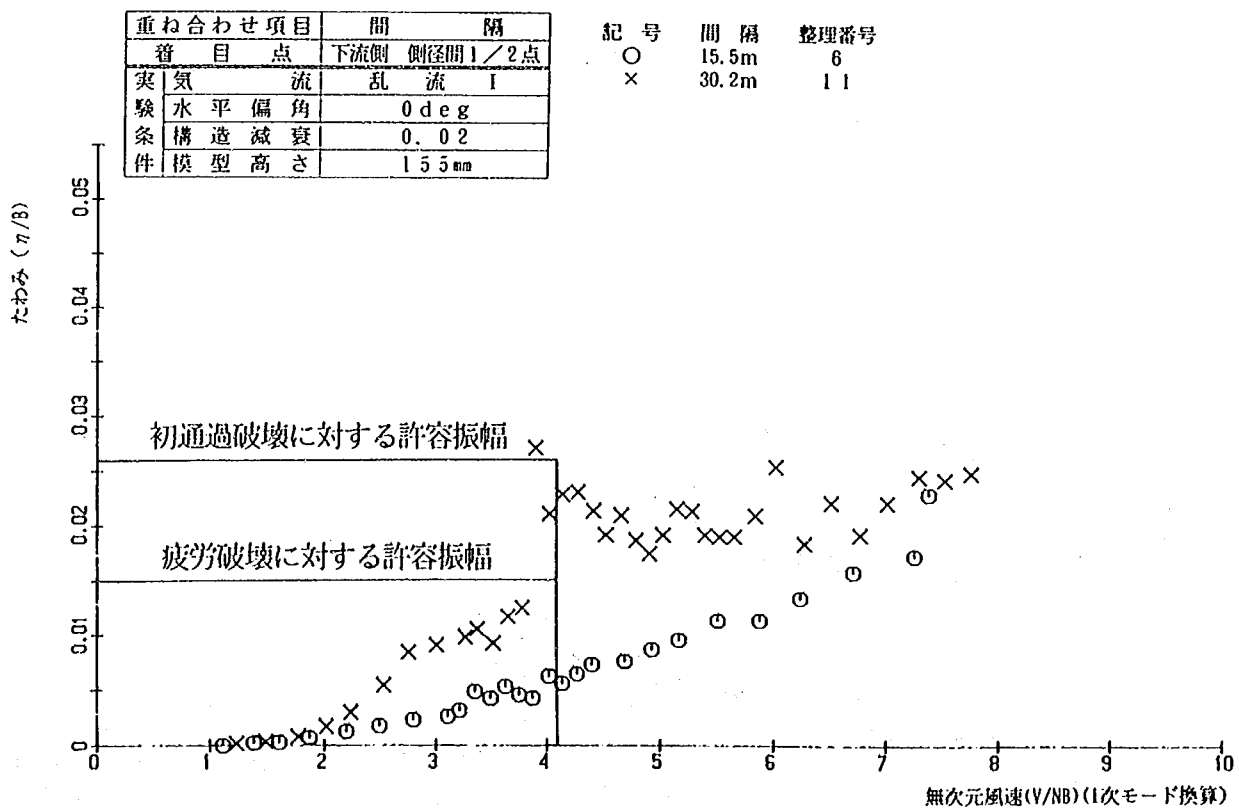


図-2.39 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

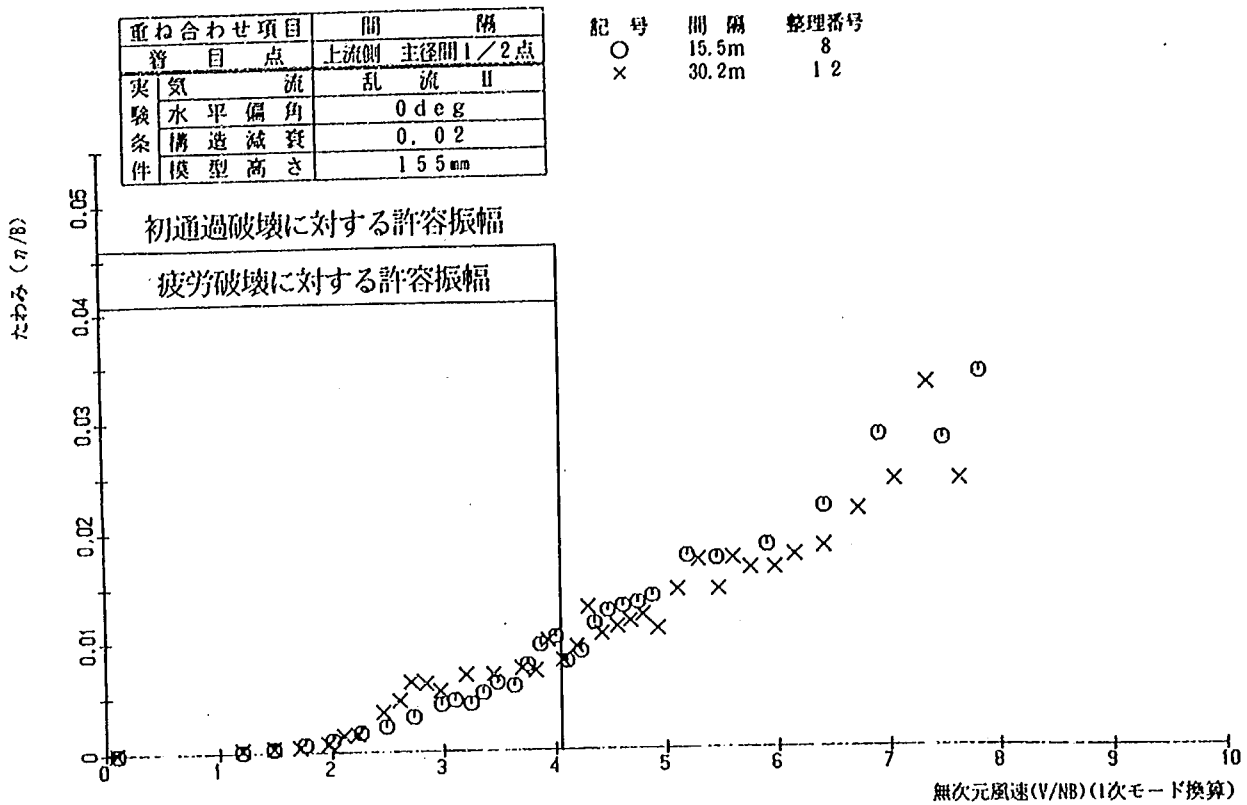


図-2.40 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

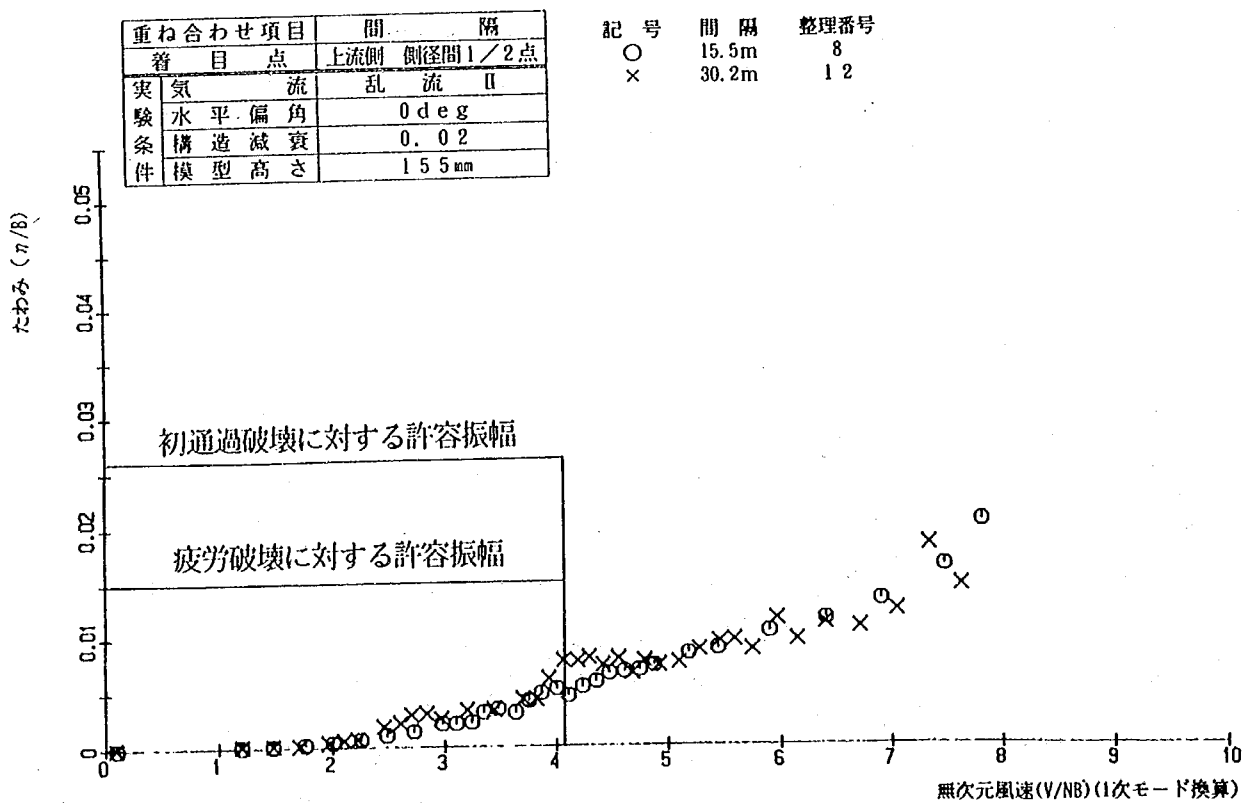


図-2.41 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

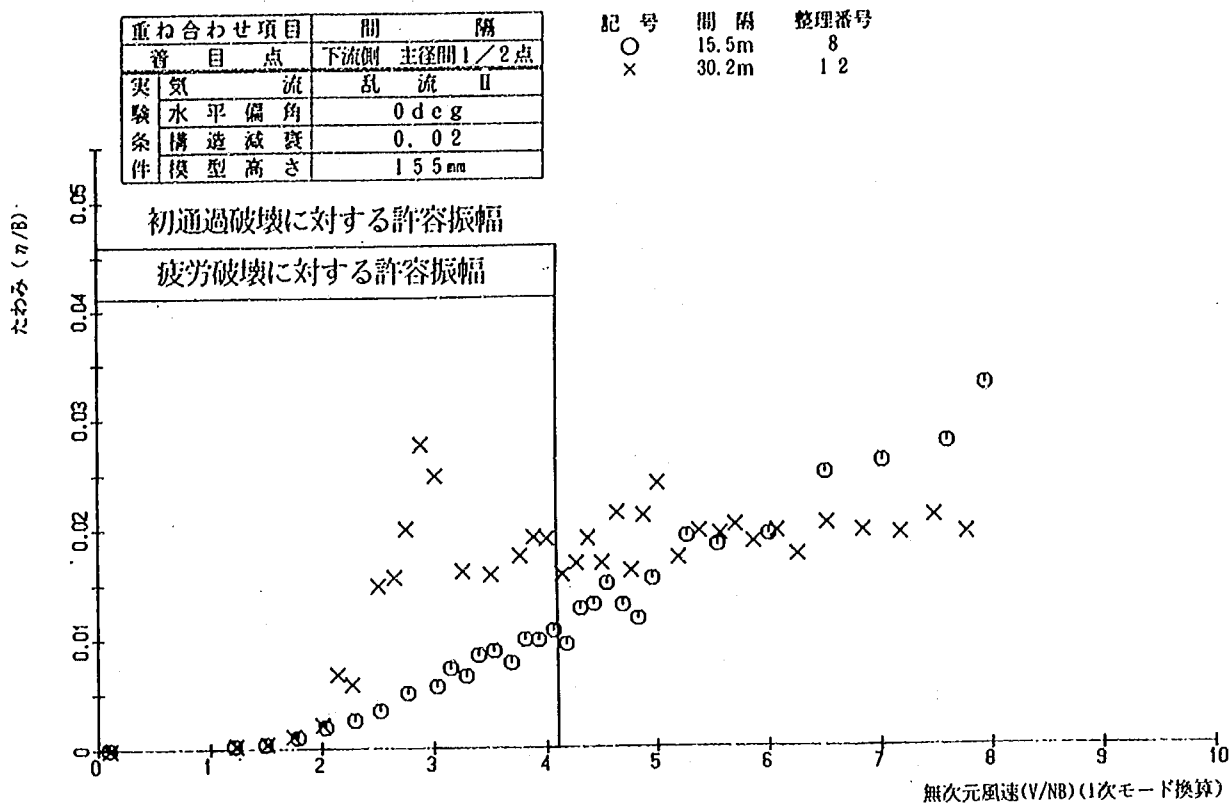


図-2.42 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

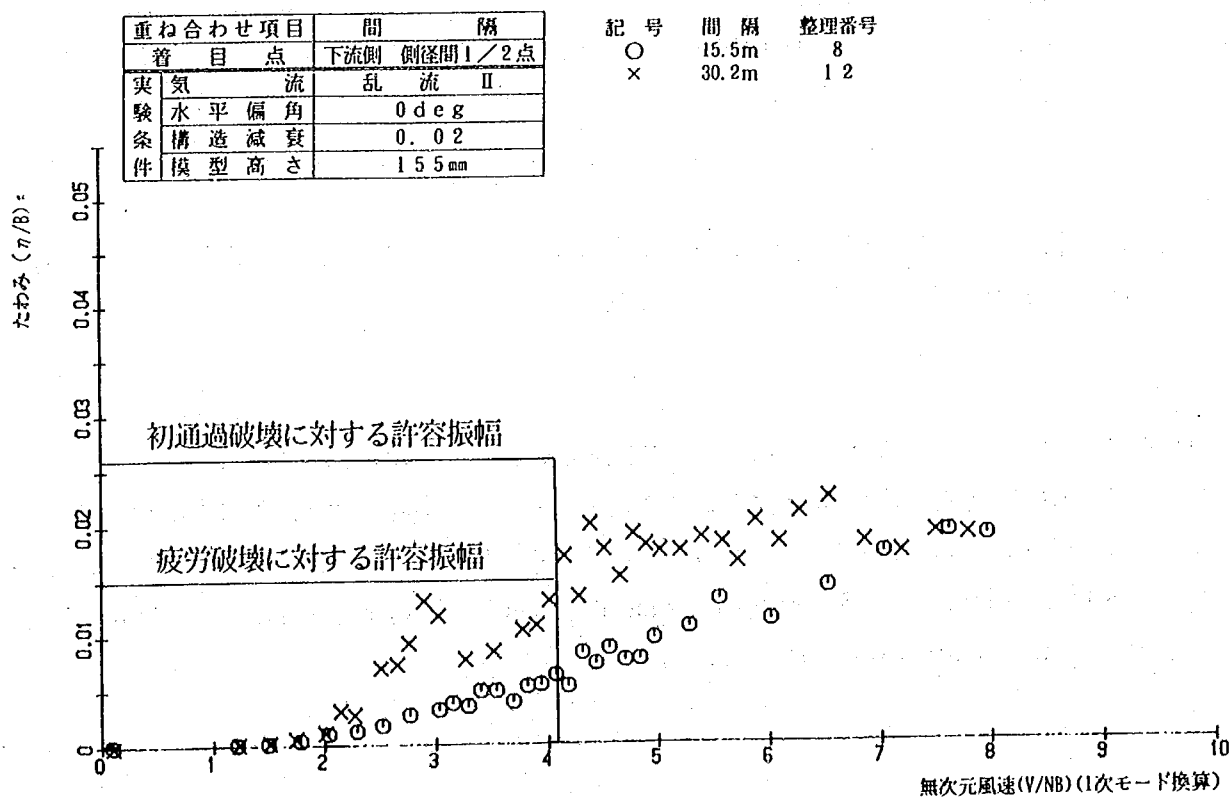


図-2.43 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)

3. まとめ

本調査により札幌大橋の並列橋の耐風性について得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 並列橋特有の風による振動現象を2次元風洞実験、3次元風洞実験により調査した。その結果、並列橋では風下側の橋桁において渦励振の振幅が大きくなり、また渦励振と発散振動の中間領域で振幅の限定的な不規則振動が起こることがあることが分かった。
- (2) 2次元風洞実験によって以下のことが判明した。
 - a) 2橋に高低差がついた場合、高低差が+0.94m（上流側が高い）のときに、主に風下側の橋桁の耐風性が悪化する。また、間隔15.5mにおいて迎角をつけた実験を行ったが、 $+3^{\circ}$ のときに耐風性が非常に悪化した。気流の方向も含めて2橋の位置関係が空力的干渉の程度に敏感に影響することが分かった。
 - b) 2橋の間隔の影響を、道路中心間隔を14.0mから30.2mまで変化させて調べた結果、間隔の小さい方が耐風性が優れていた。この結果は当初の予想と異なるものであり、2橋の間隔が近いほど空力的な干渉が大きくなるわけではなく、2橋の距離を大きくすれば空力的干渉が減少して耐風性が向上するという一般に予想しがちな結果とは異なる結果になる可能性があることが分かった。このような性質は橋桁の高さや形状によって異なると考えられ、札幌大橋の場合は比較的桁高が大きく鈍い形状のため、2橋の距離が大きい場合に大きな振動が起きたものと考えられる。
- (3) 3次元風洞実験によって以下のことが判明した。

道路中心間隔30.2mのときに下流側の桁に大きな振動が生じた。この振動は乱流中よりも一様流中で振動が大きくなり、構造減衰の増加による振動抑制効果はほとんど見られなかった。
- (4) 許容振幅との比較により並列橋の耐風性を評価した。その結果、道路中心間隔30.2mでは15.5mに比べて耐風性に劣ることが判った。

謝 辞

本調査を行うにあたり、北海道開発局開発土木研究所、北海道開発局札幌新道建設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) 白土博道；複数構造物の空気力学的挙動に関する研究、京都大学学位論文、昭和63年8月
- (2) 横山、中神、神崎；札幌大橋耐風性調査報告書、土木研究所資料第2293号、昭和61年1月
- (3) 桜田、小玉、本名；札幌大橋の耐風安定性について、開発土木研究所月報No. 429、1989年2月
- (4) E S D U ; Engineering Science Data, Wind Engineering, Volume 1, Wind and Turbulence Data, Engineering Science Data Unit Ltd., 1982

付 属 資 料

付図－ 1 2 次元 (1 / 45) 重ね合わせ

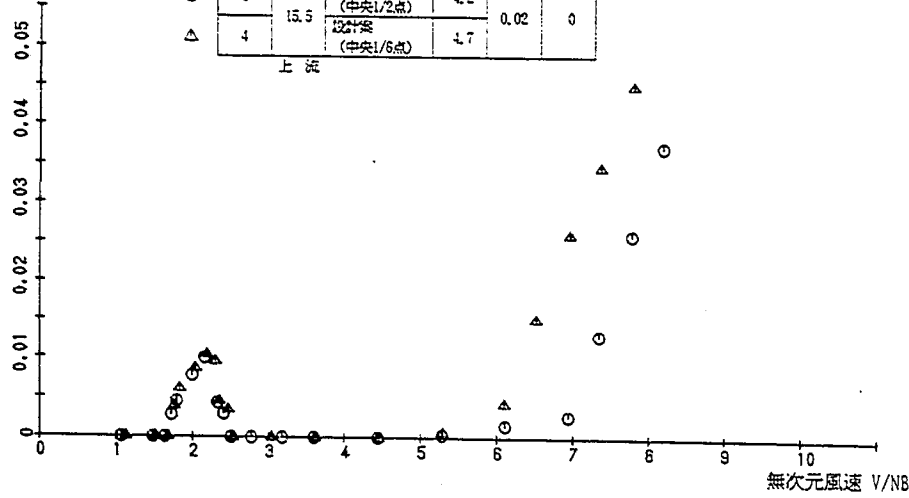
付図－ 2 2 次元 (1 / 45) 風速－振幅図

付図－ 3 3 次元 (1 / 100) 重ね合わせ

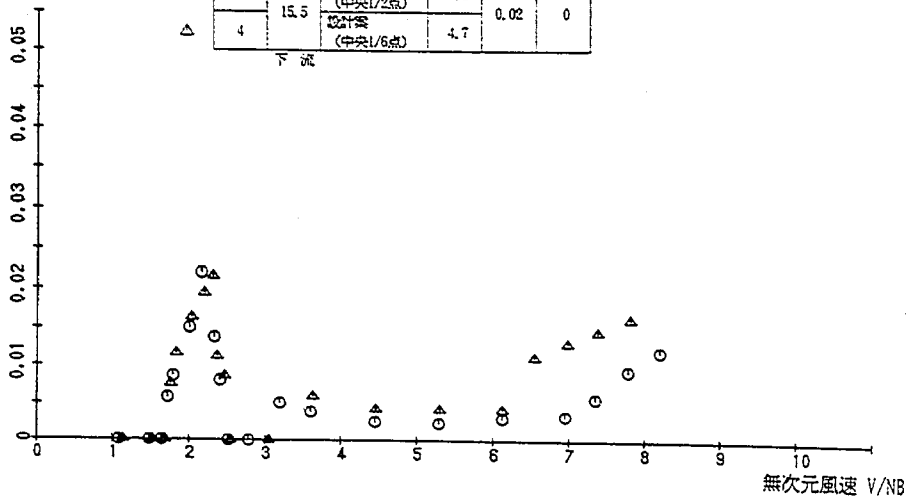
付図－ 4 3 次元 (1 / 100) 風速－振幅図

付図－ 5 2 次元 (1 / 100)

たわみ η/B

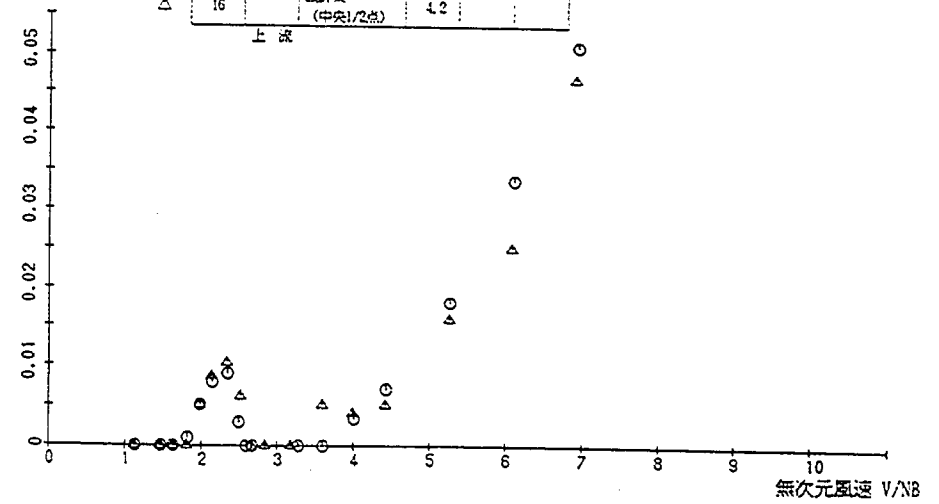


たわみ η/B

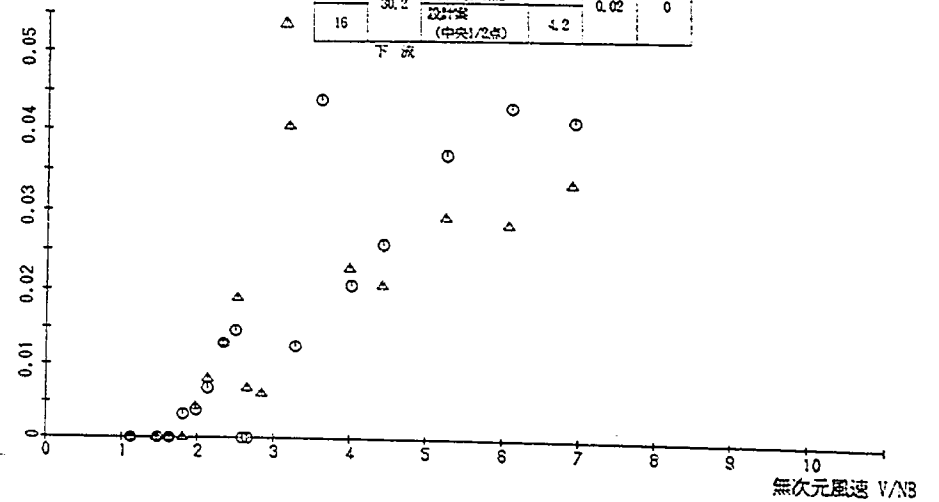


付図-1.1 桁高の影響 (間隔15.5m, 迎角 0° の場合)

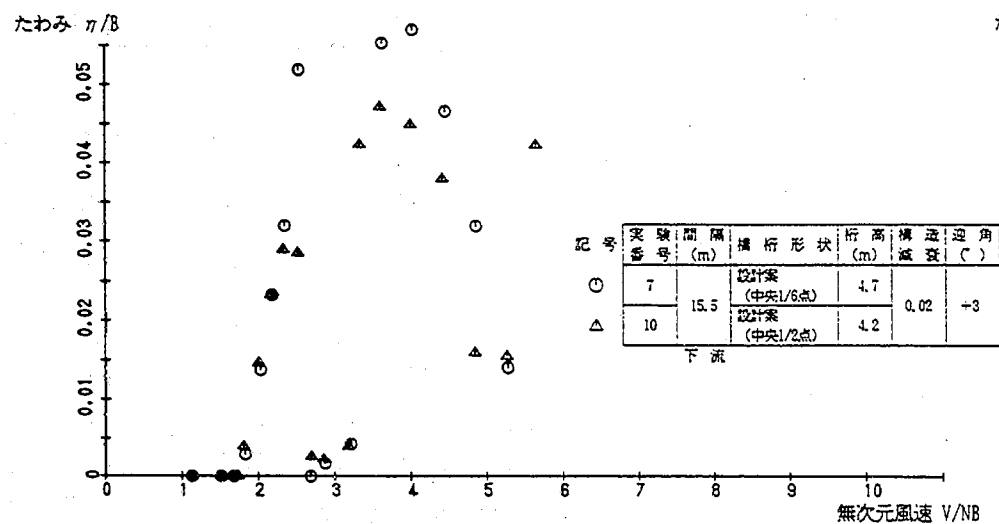
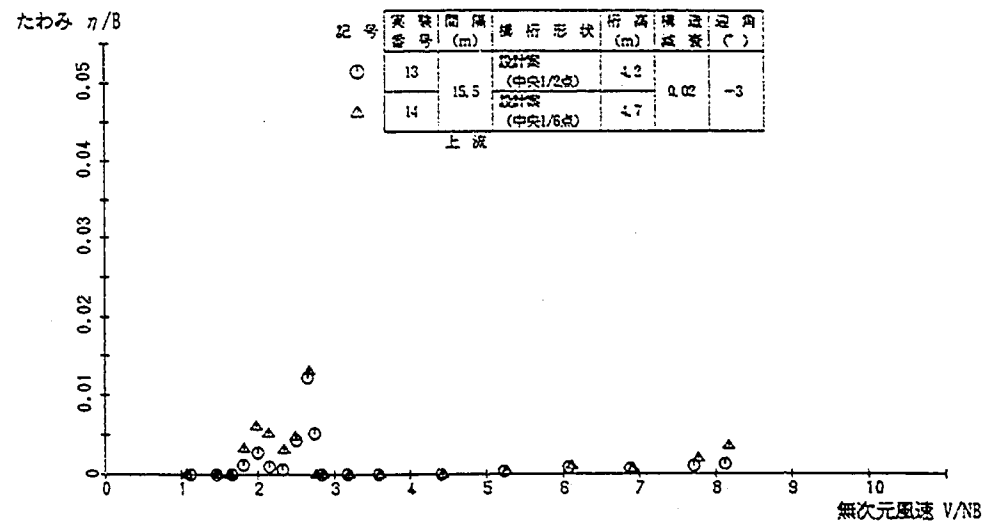
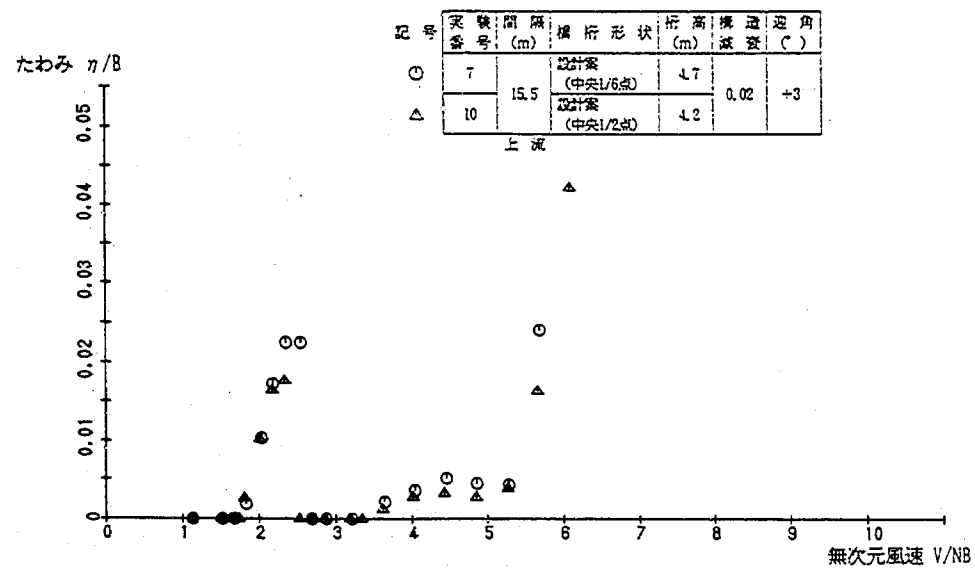
たわみ η/B



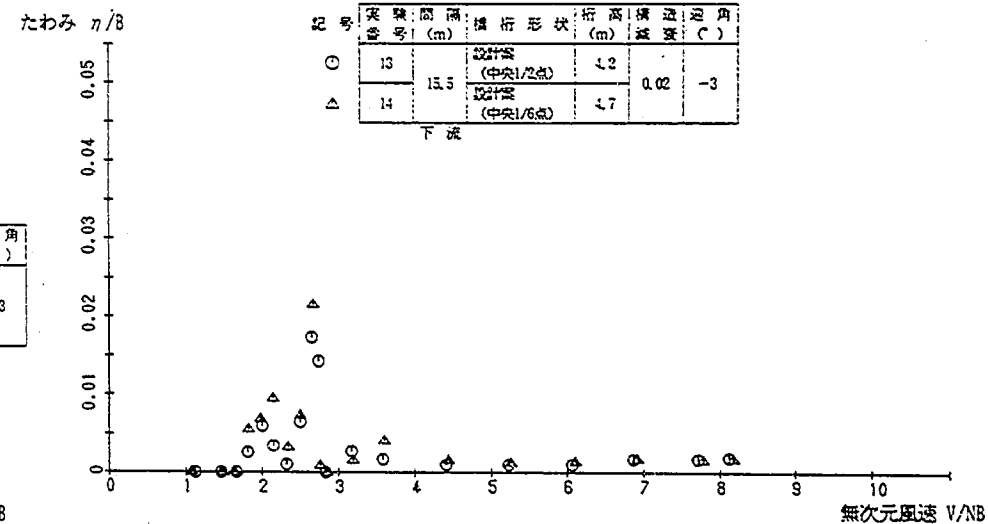
たわみ η/B



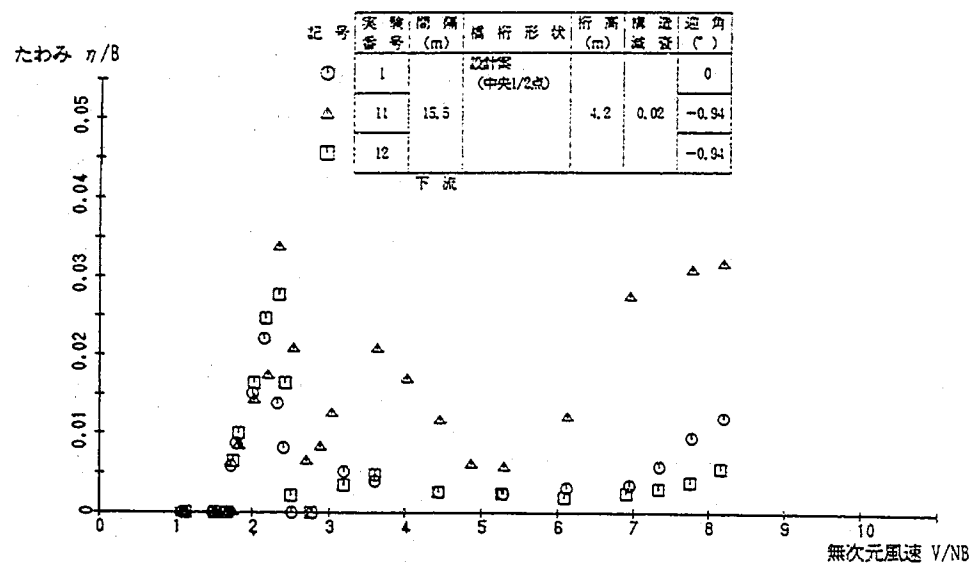
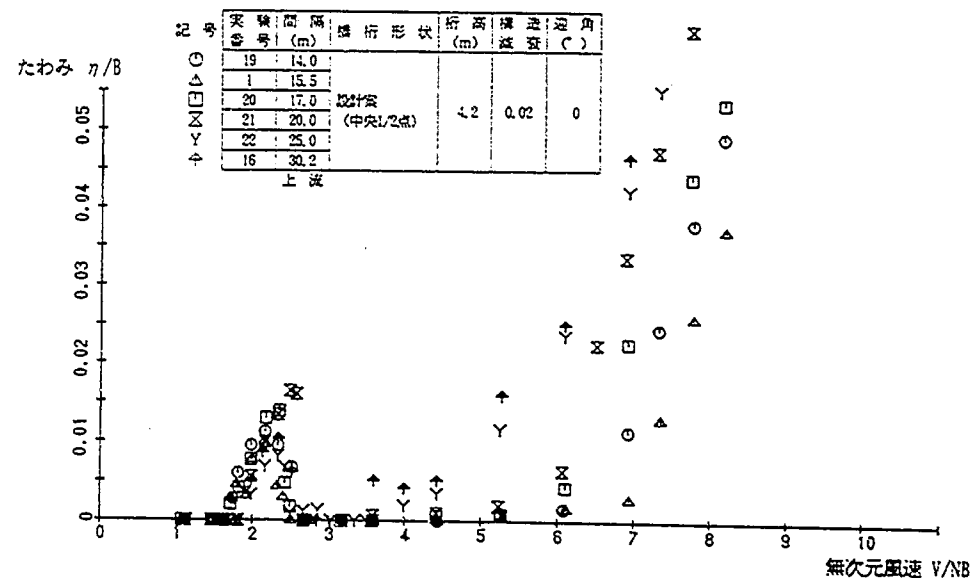
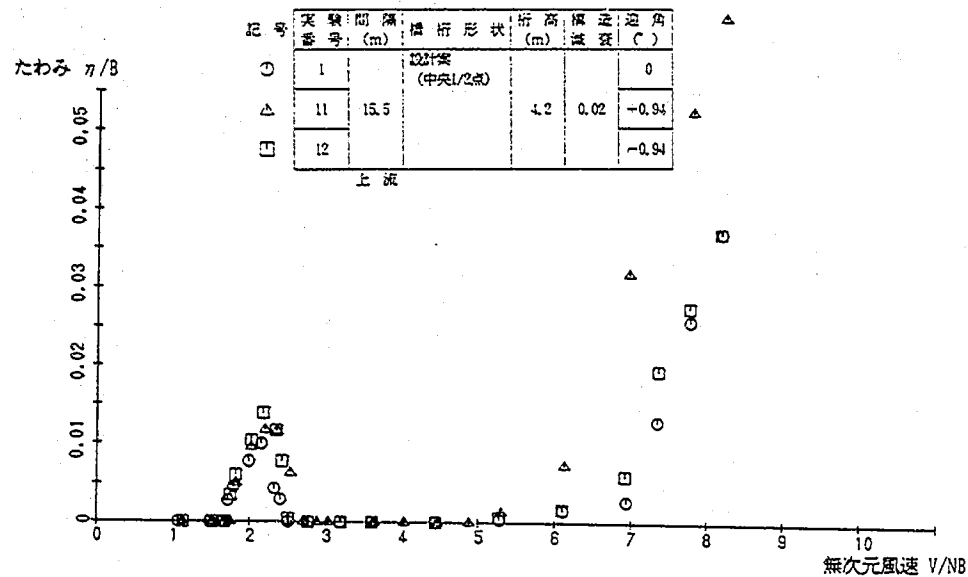
付図-1.2 桁高の影響 (間隔30.2m, 迎角 0° の場合)



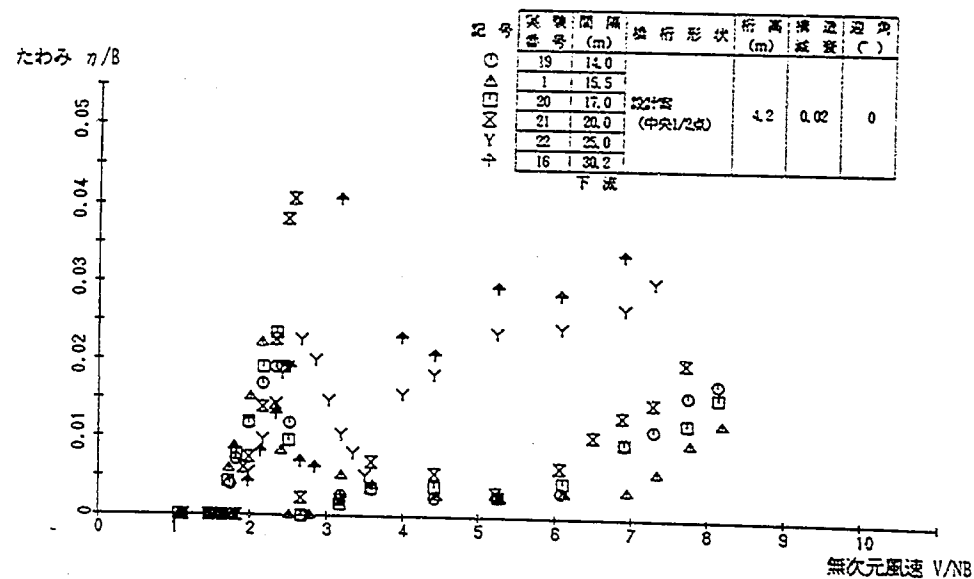
付図-1.3 桁高の影響 (間隔15.5m, 迎角+3° の場合)



付図-1.4 桁高の影響 (間隔15.5m, 迎角-3° の場合)

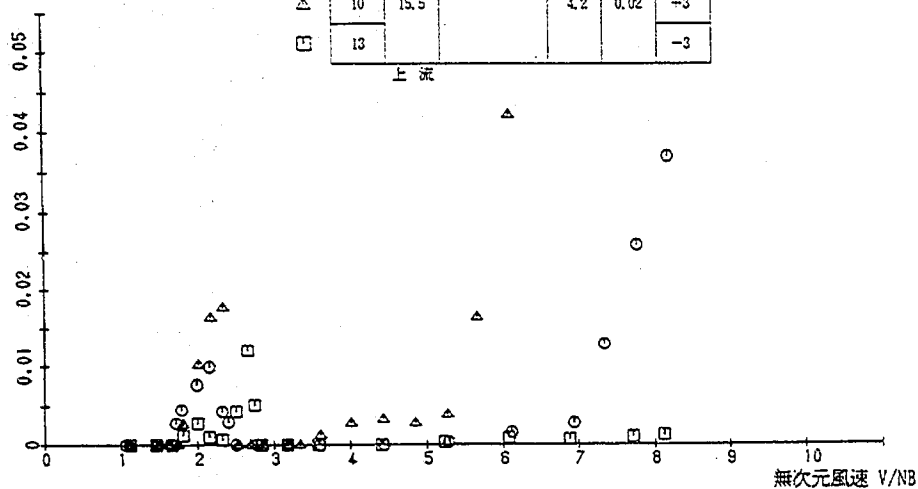


付図-1.5 高低差の影響

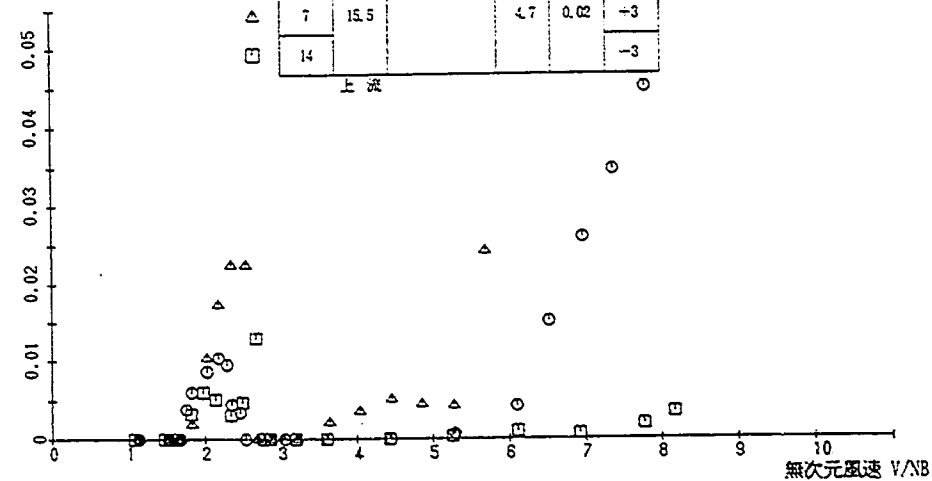


付図-1.6 模型間隔の影響

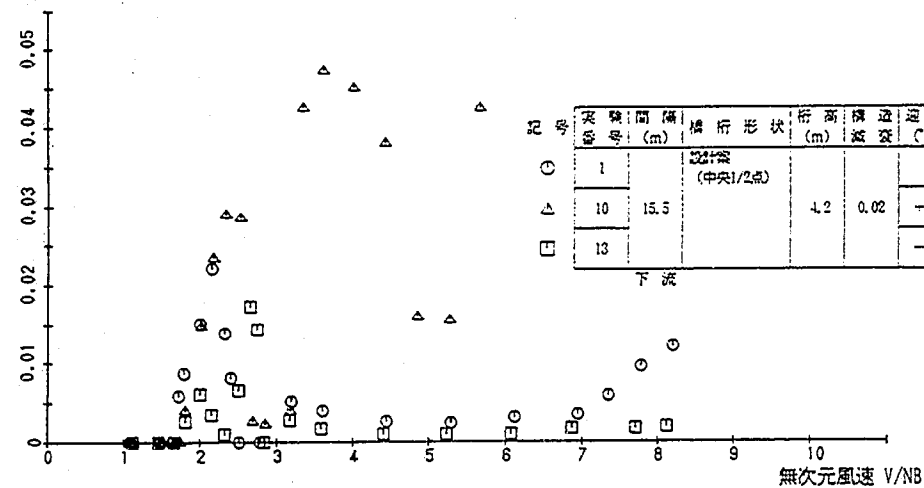
たわみ η/B



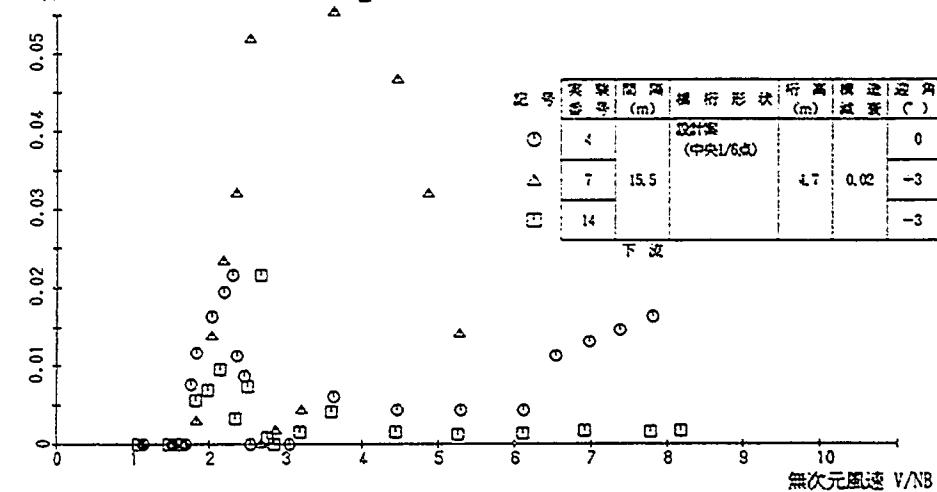
たわみ η/B



たわみ η/B



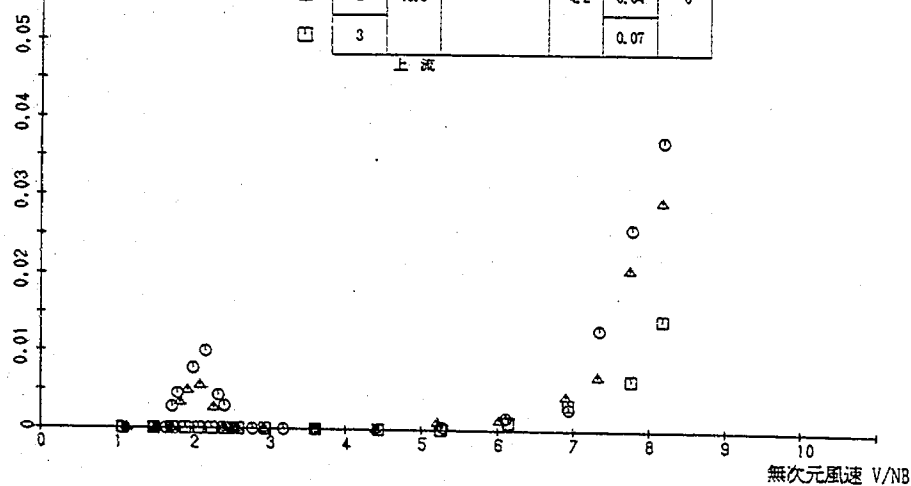
たわみ η/B



付図-1.7 迎角の影響

付図-1.8 迎角の影響

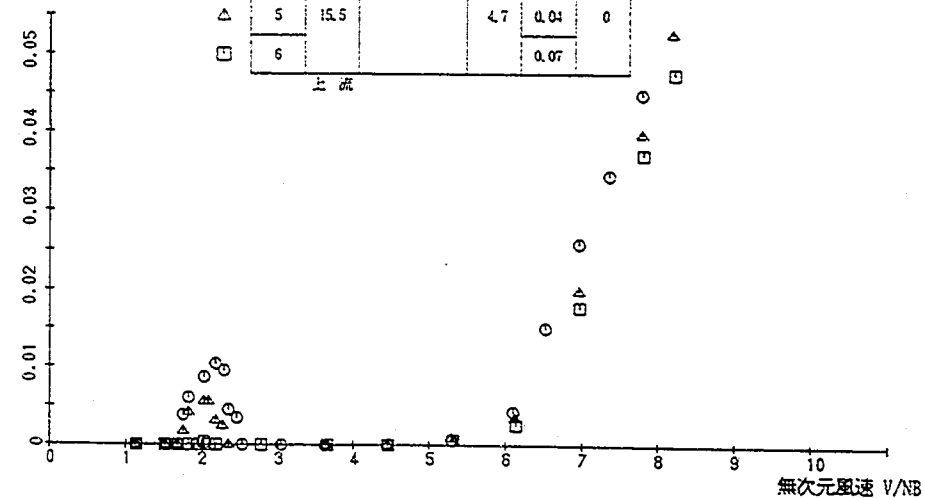
たわみ η/B



記号	実験番号	間隔 (m)	橋桁形状	桁高 (m)	構造減衰 (°)	迎角 (°)
○	1	15.5	設計案 (中央1/2点)	4.2	0.02	0
△	2				0.04	
□	3				0.07	

上流

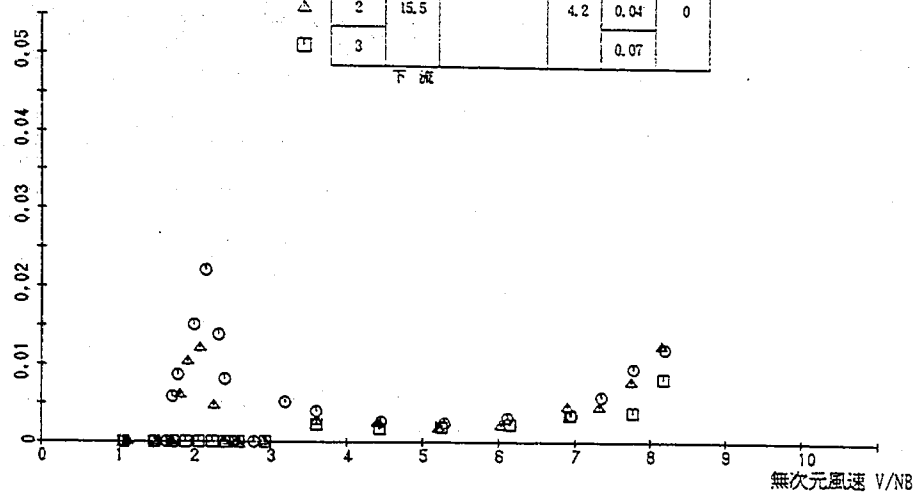
たわみ η/B



記号	実験番号	間隔 (m)	橋桁形状	桁高 (m)	構造減衰 (°)	迎角 (°)
○	4	15.5	設計案 (中央1/6点)	4.7	0.02	0
△	5				0.04	
□	6				0.07	

上流

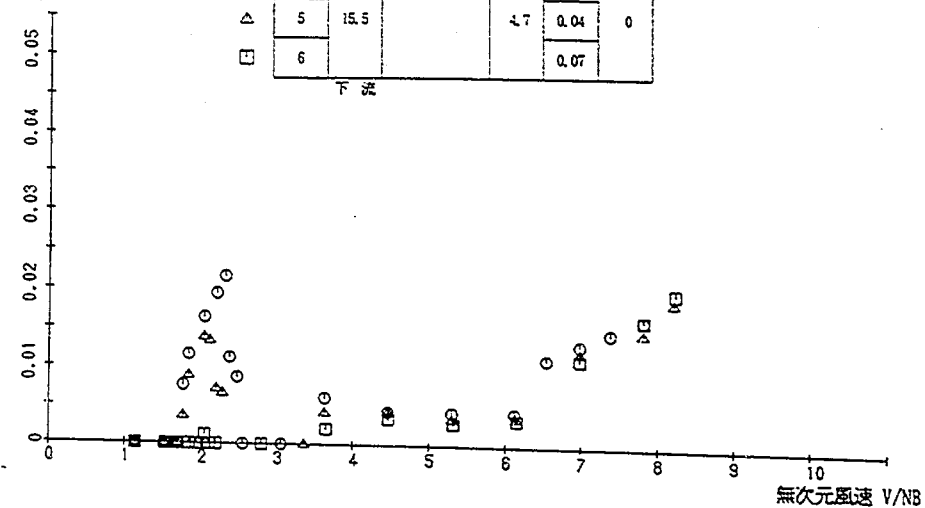
たわみ η/B



記号	実験番号	間隔 (m)	橋桁形状	桁高 (m)	構造減衰 (°)	迎角 (°)
○	1	15.5	設計案 (中央1/2点)	4.2	0.02	0
△	2				0.04	
□	3				0.07	

下流

たわみ η/B

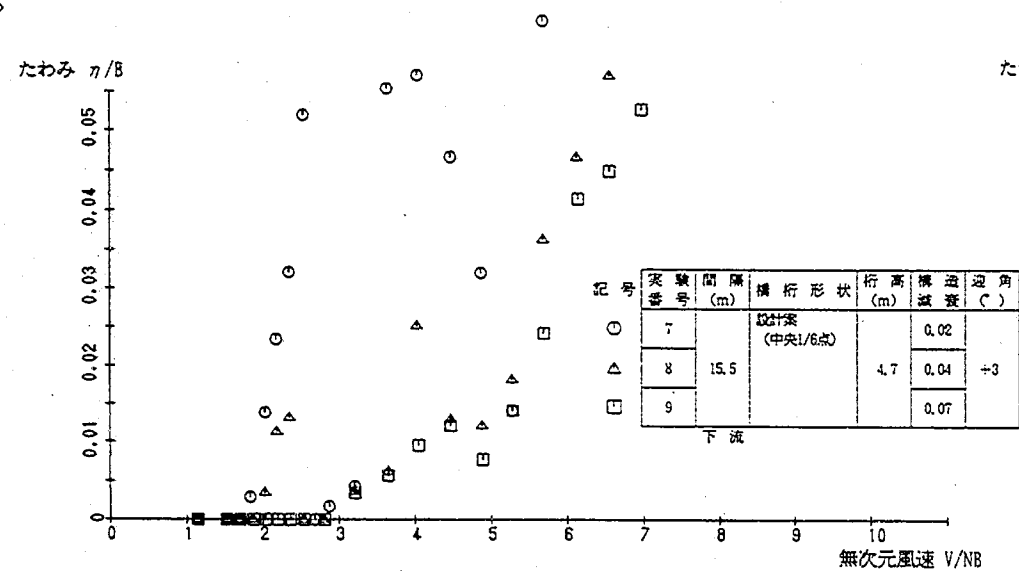
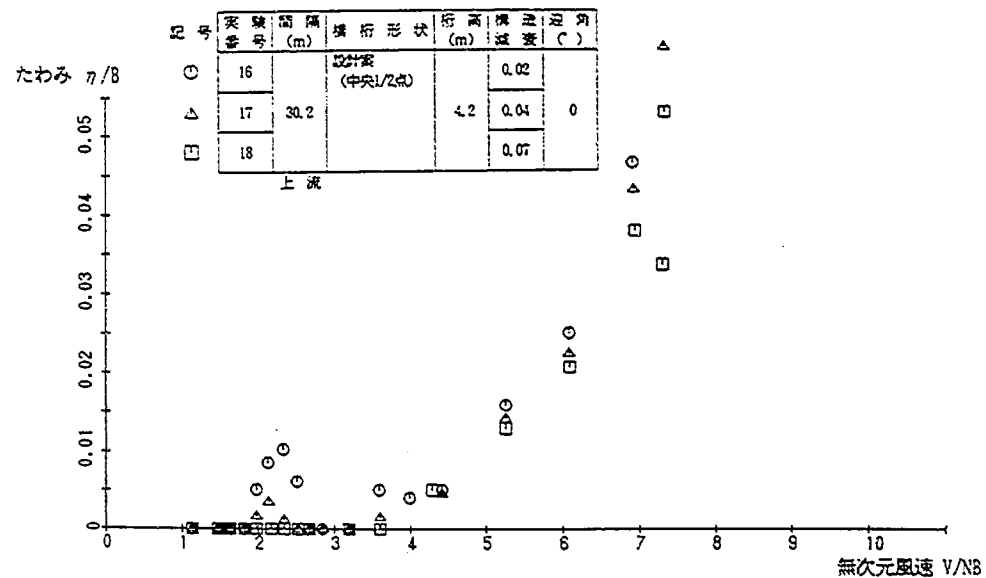
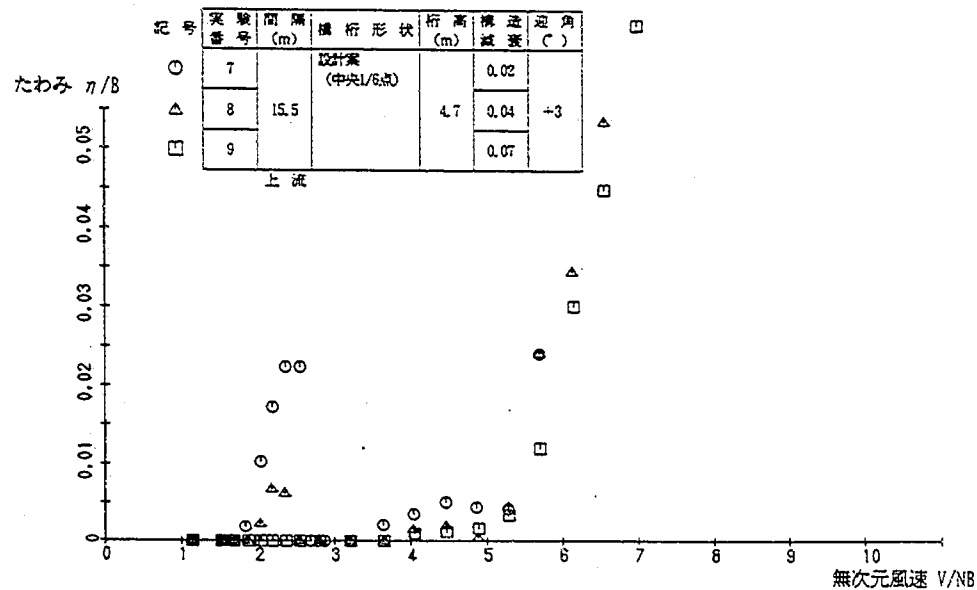


記号	実験番号	間隔 (m)	橋桁形状	桁高 (m)	構造減衰 (°)	迎角 (°)
○	4	15.5	設計案 (中央1/6点)	4.7	0.02	0
△	5				0.04	
□	6				0.07	

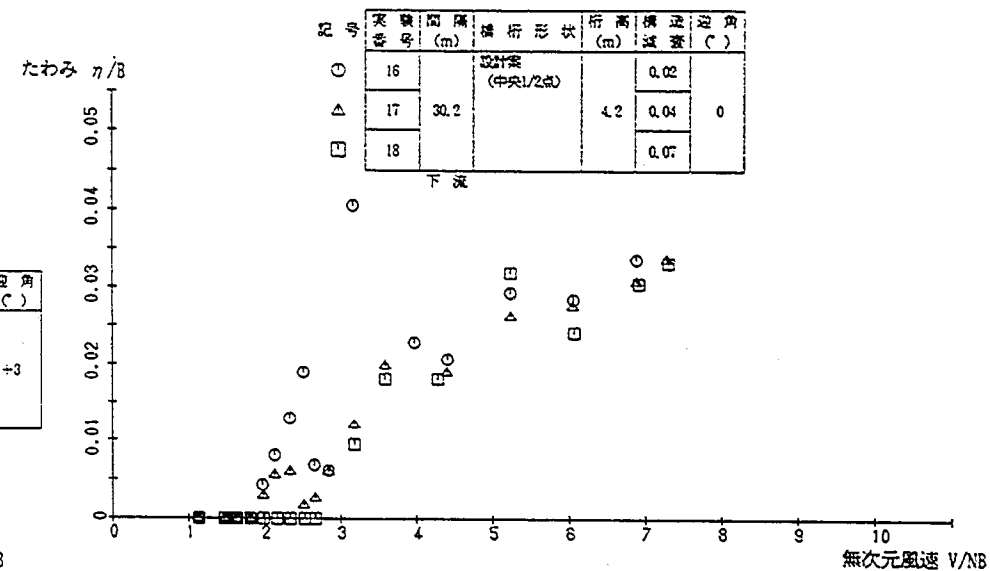
下流

付図-1.9 減衰の影響

付図-1.10 減衰の影響



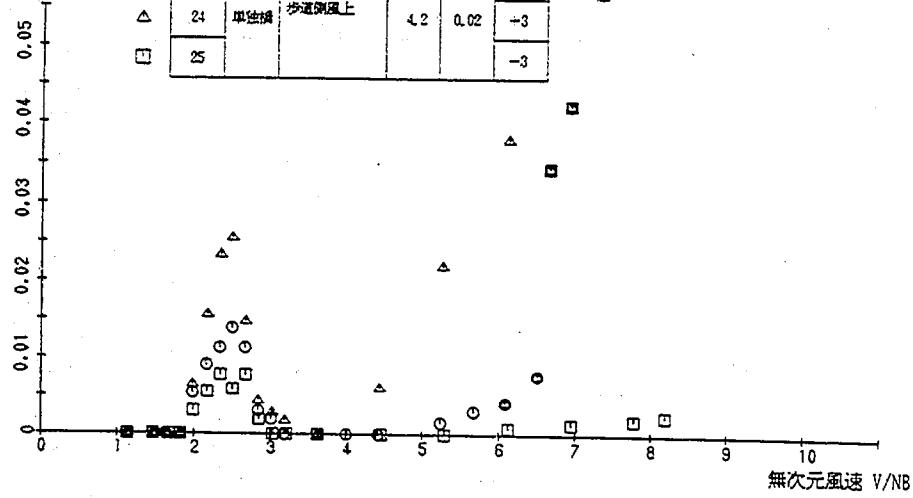
付図-1.11 減衰の影響



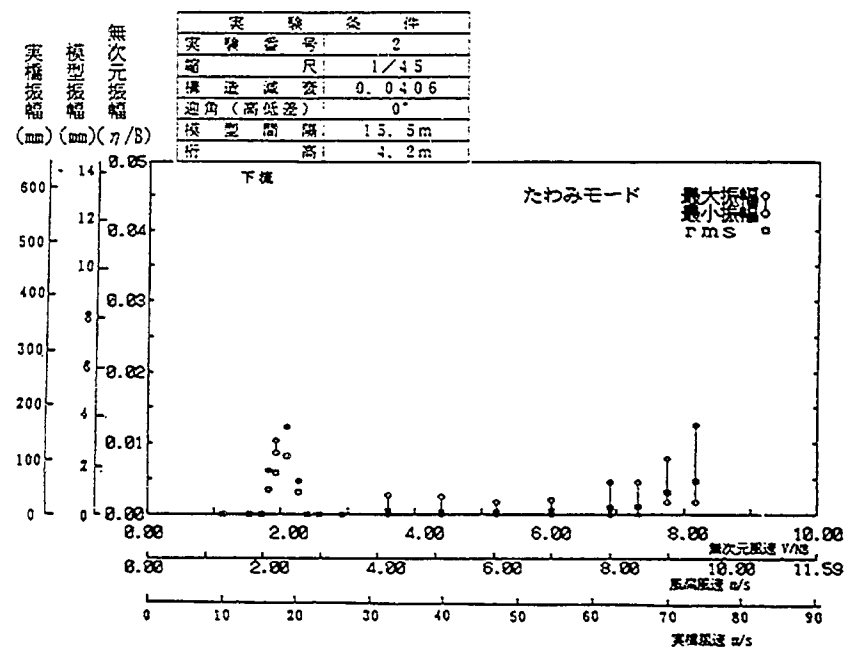
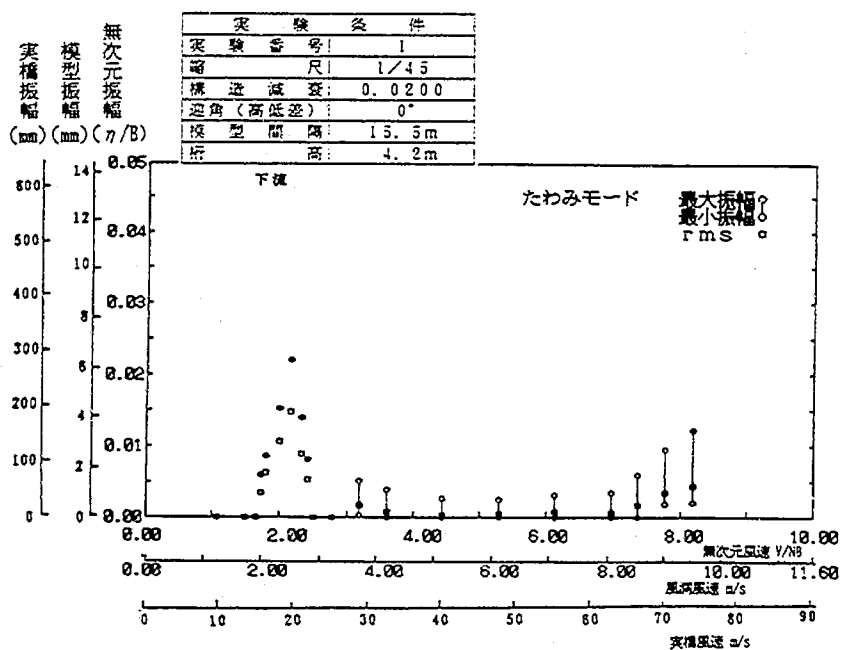
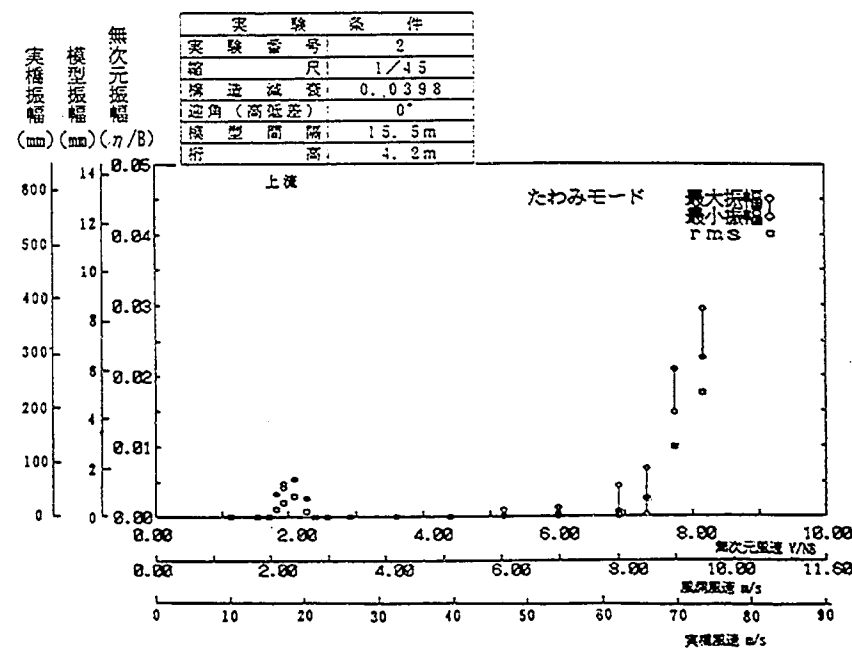
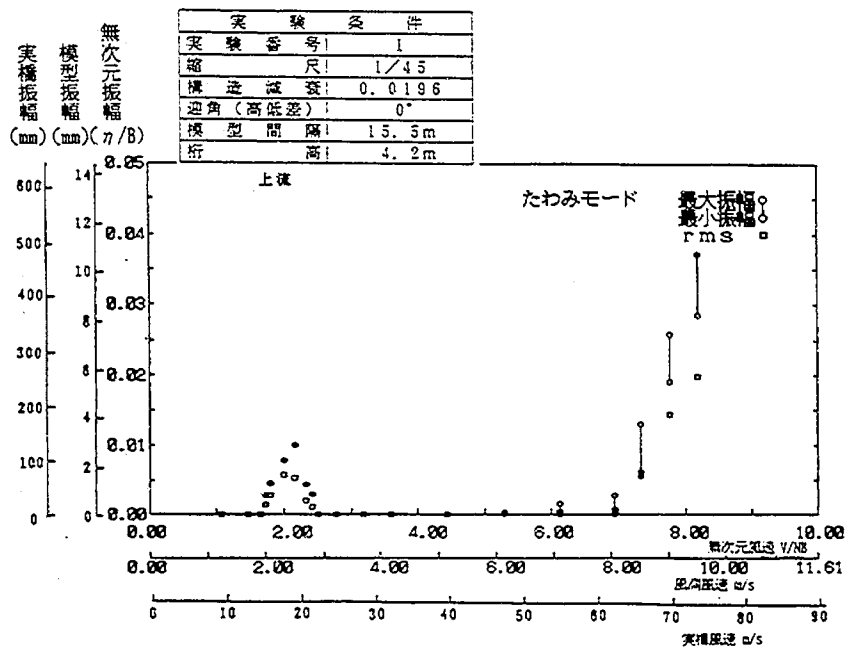
付図-1.12 減衰の影響

記号	実験番号	間隔 (m)	構形形状	桁高 (m)	薄板厚 (mm)	迎角 (°)
○	23		設計案 (中央1/2点)			0
△	24	単独橋	歩道側風上	4.2	0.02	+3
□	25					-3

たわみ η/B

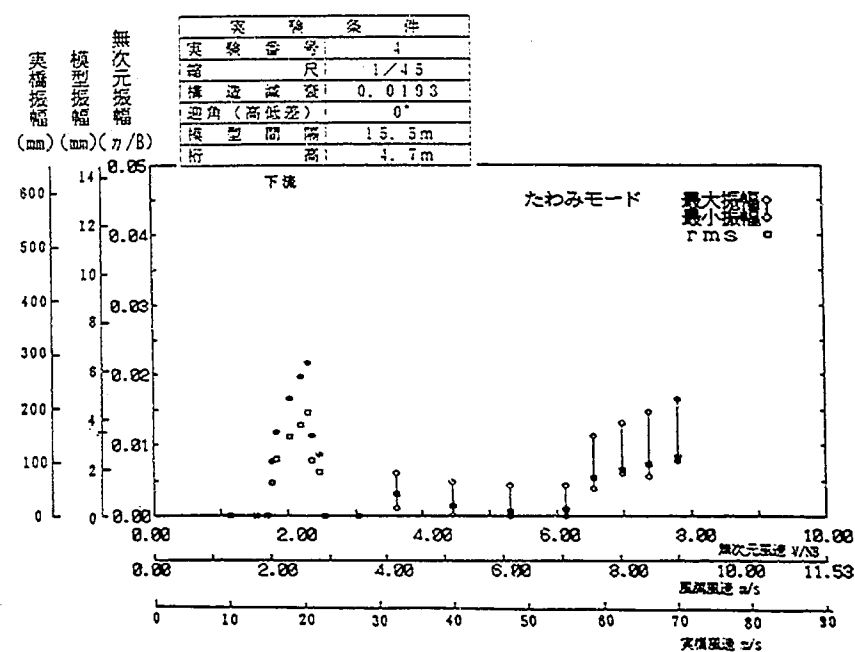
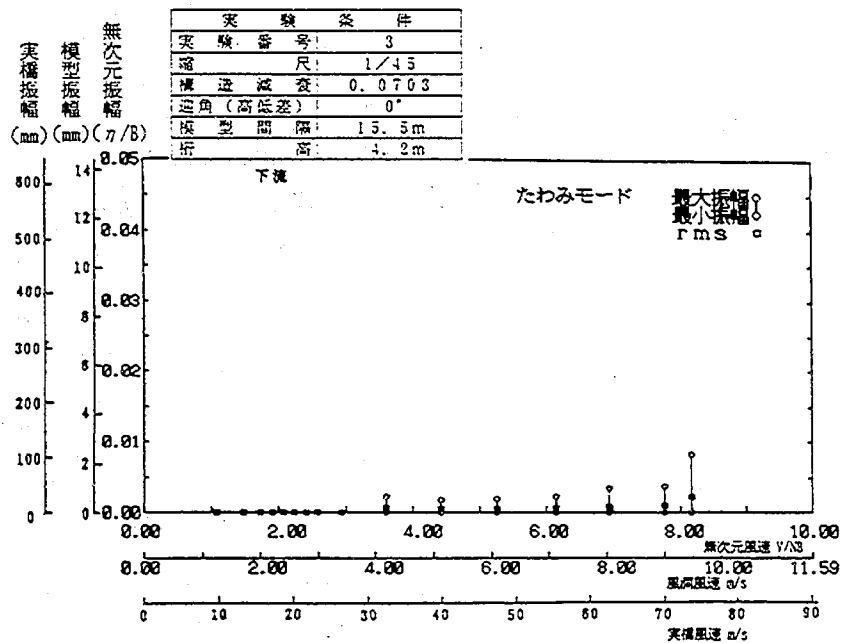
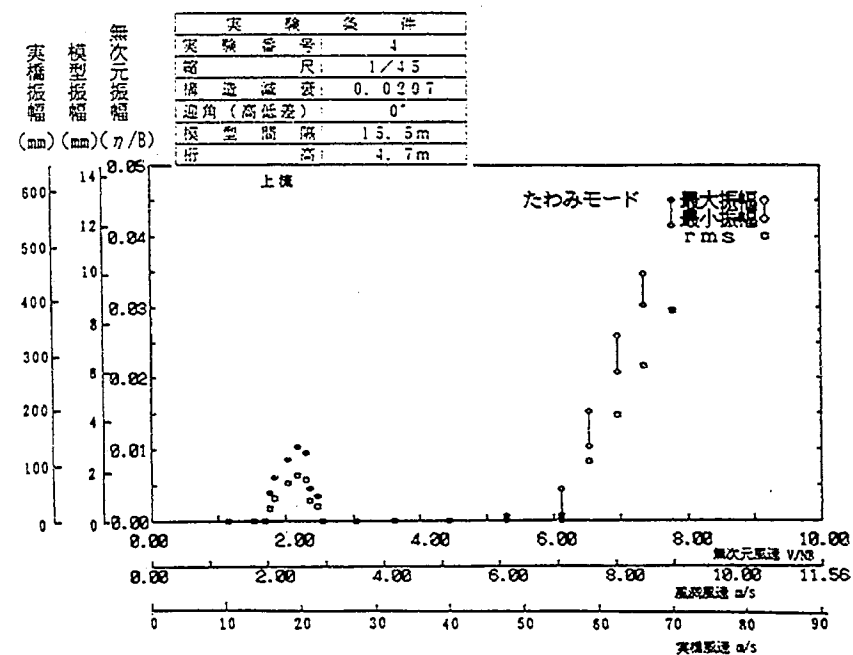
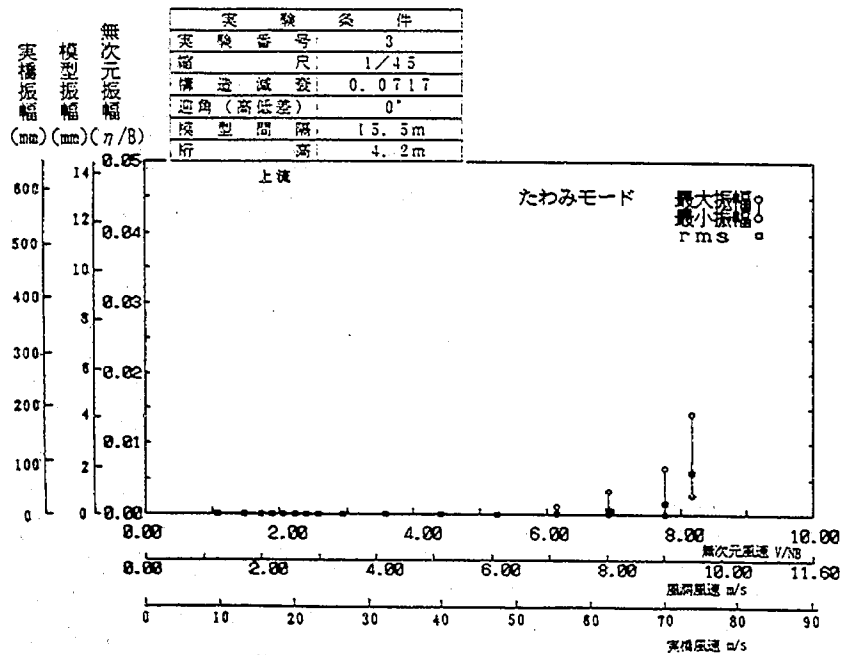


付図-1.13 迎角の影響



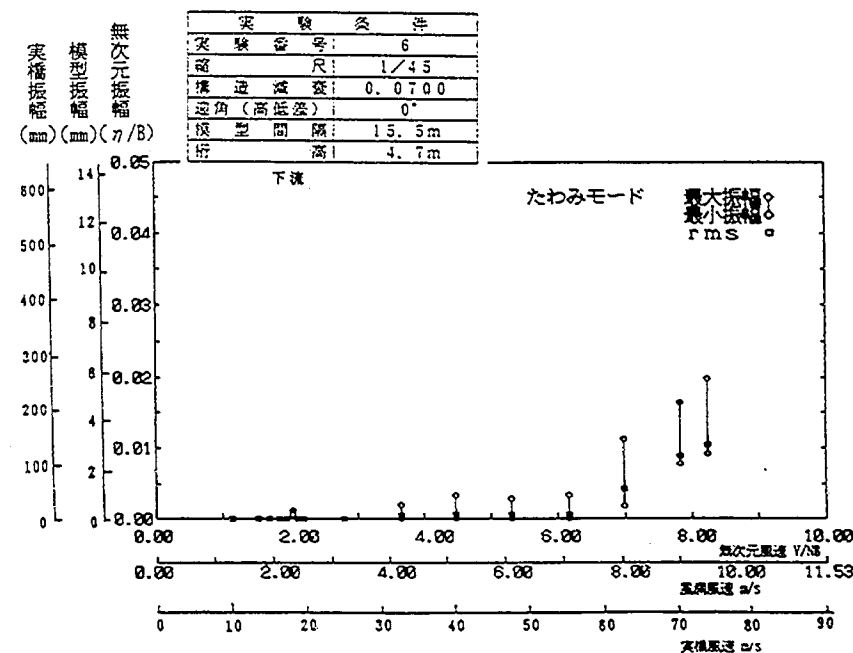
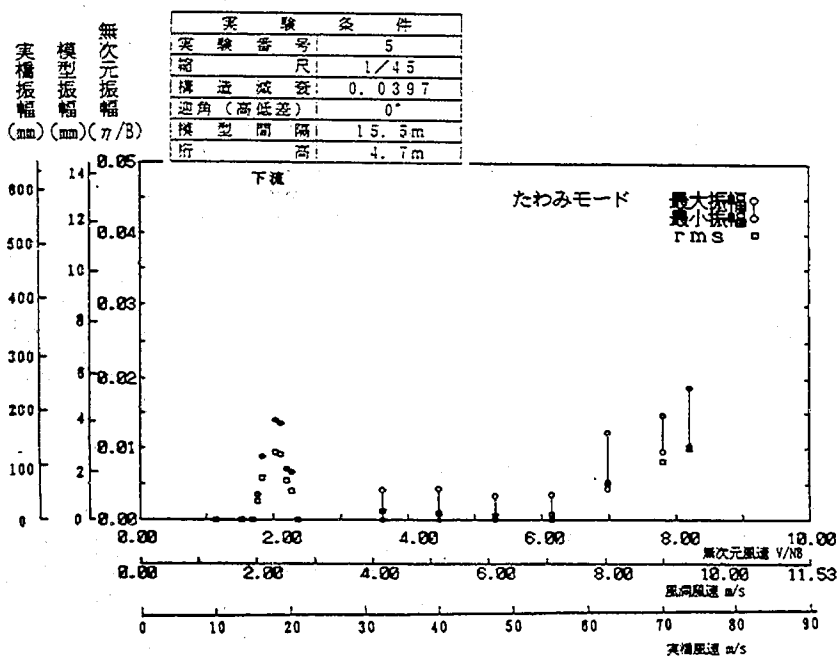
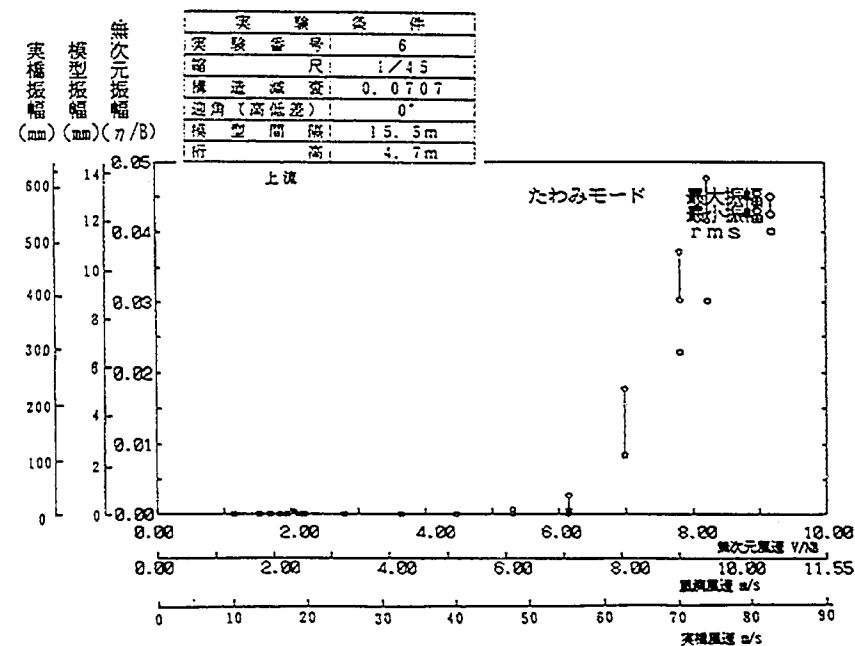
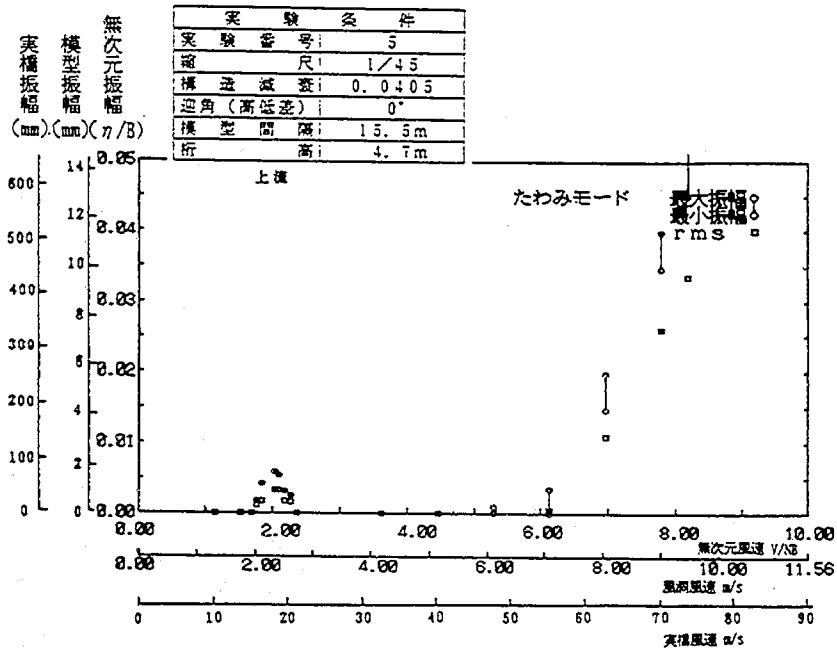
付図-2.1 風速-振幅曲線

付図-2.2 風速-振幅曲線



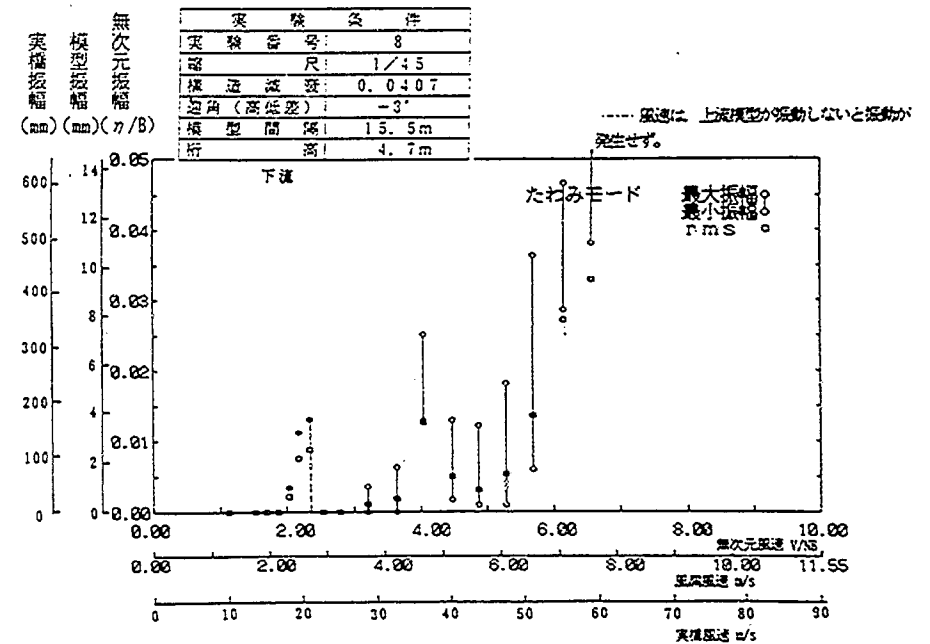
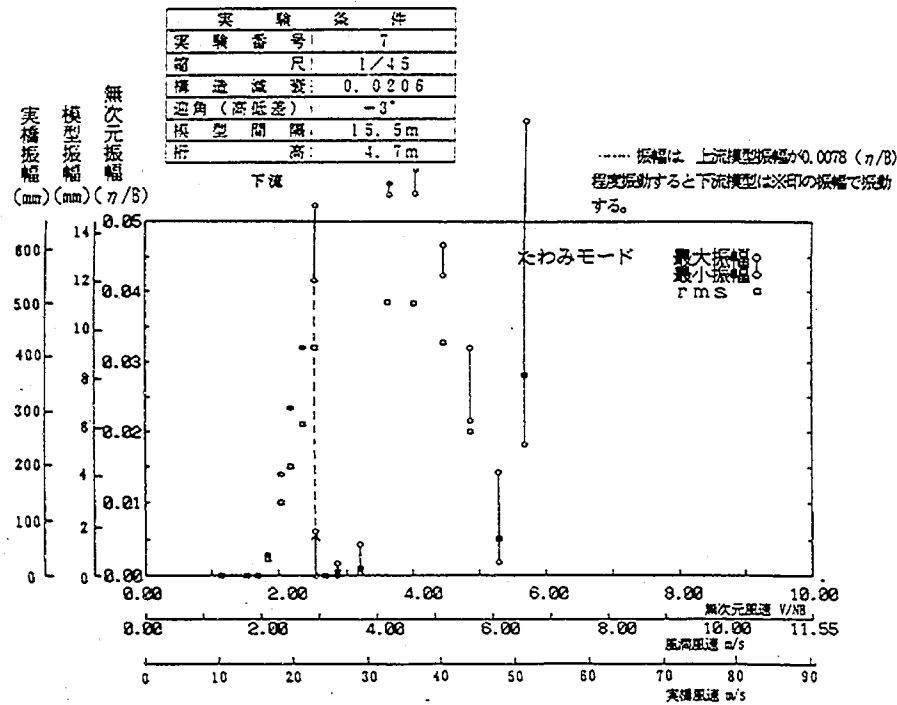
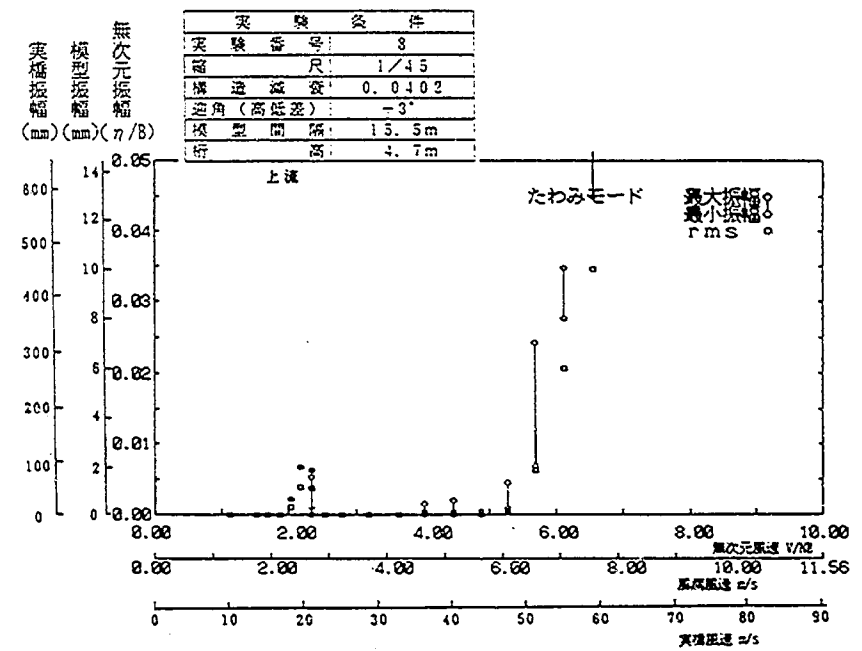
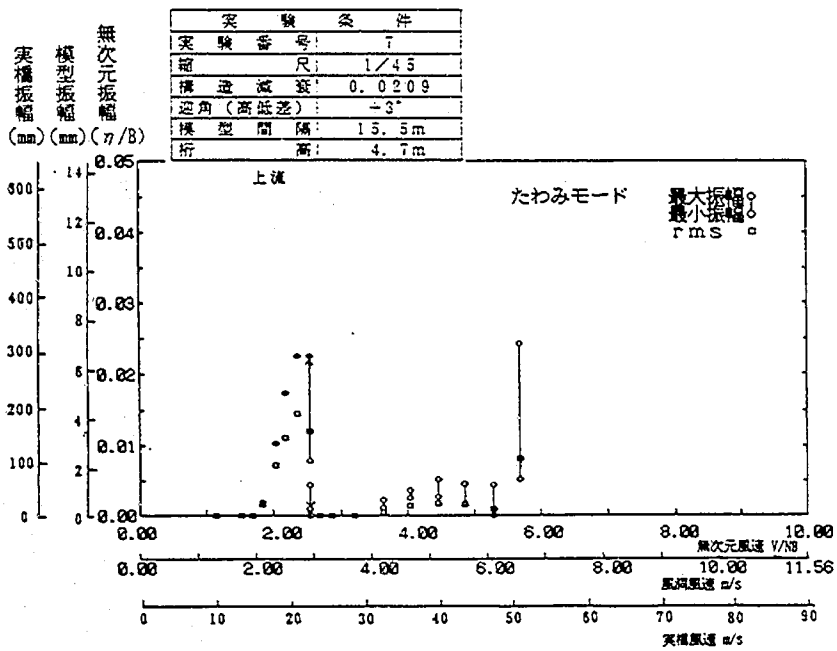
付図-2.3 風速-振幅曲線

付図-2.4 風速-振幅曲線



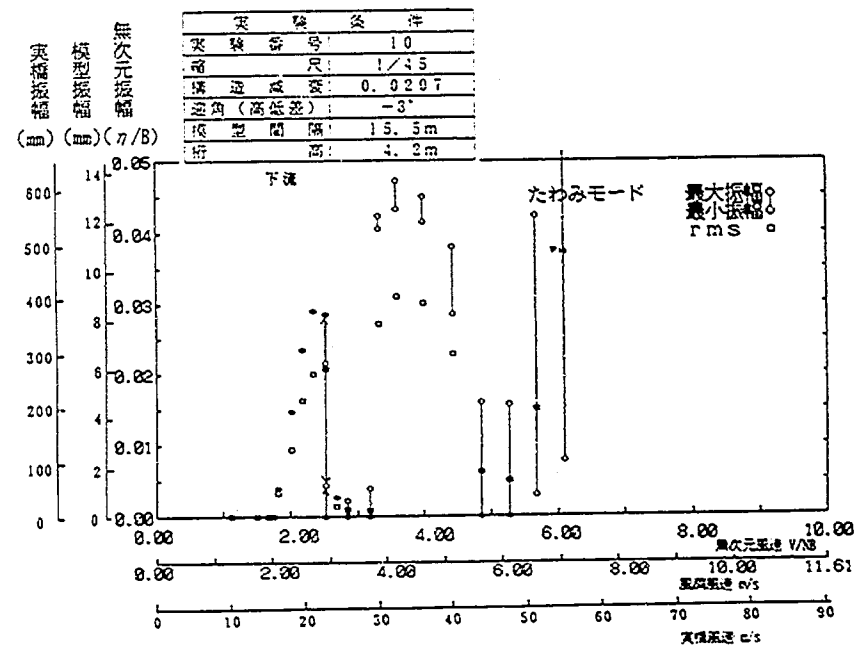
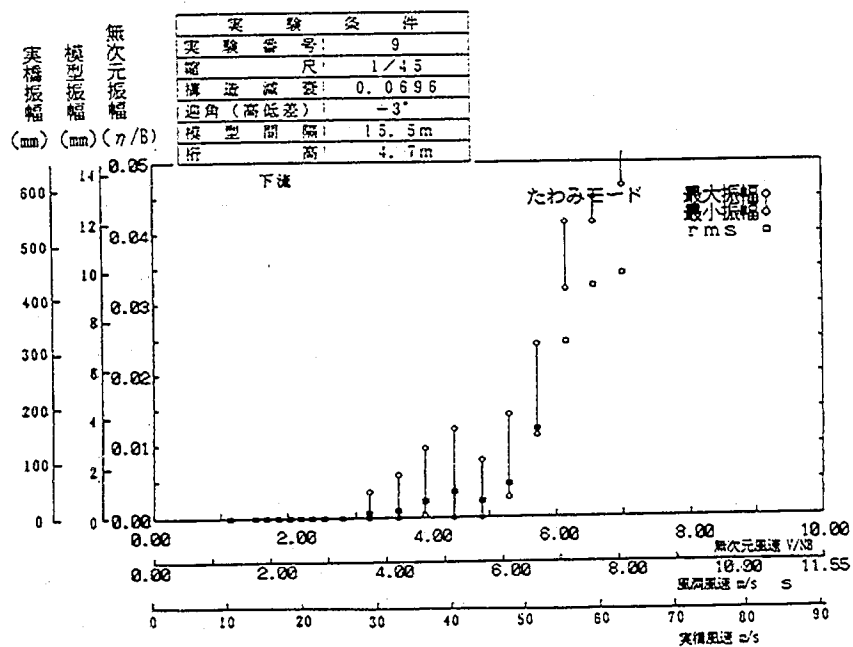
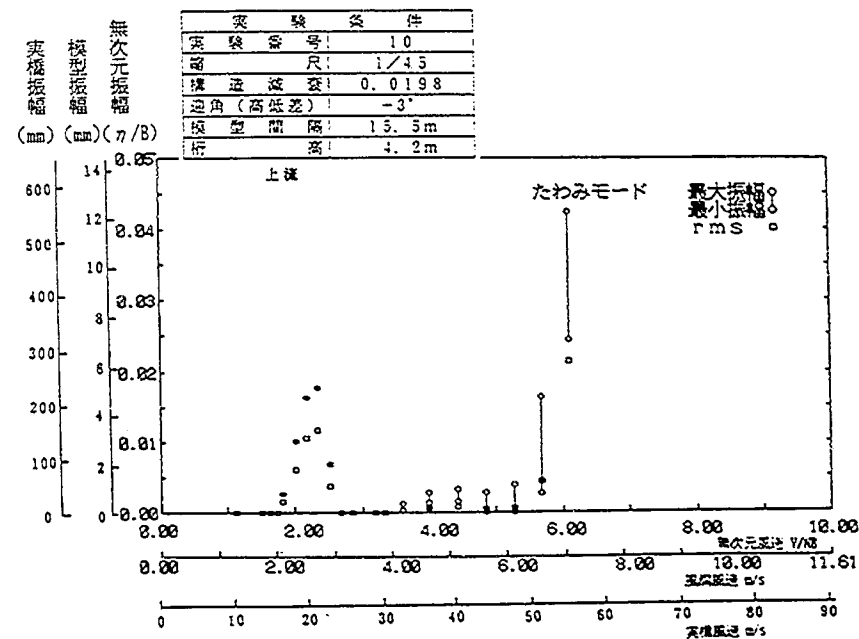
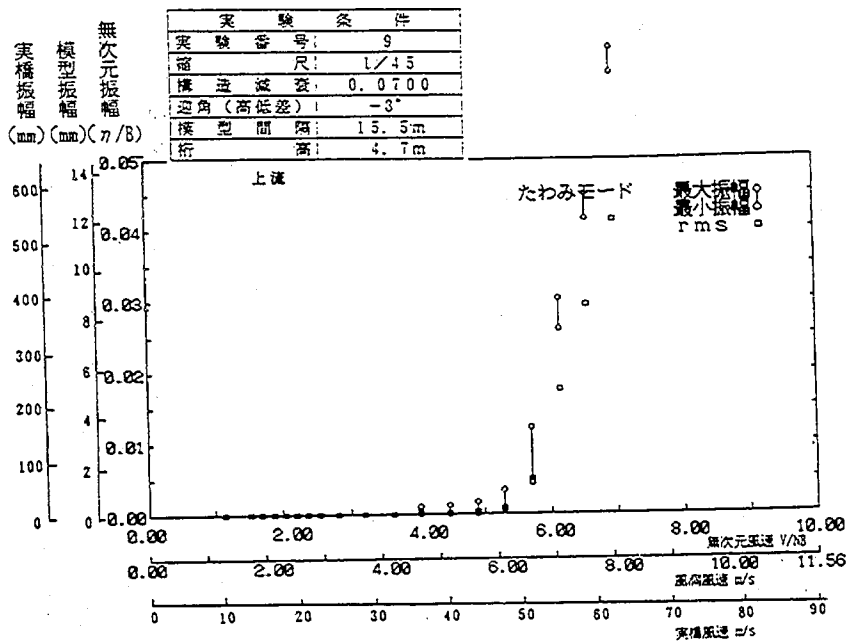
付図-2.5 風速-振幅曲線

付図-2.6 風速-振幅曲線



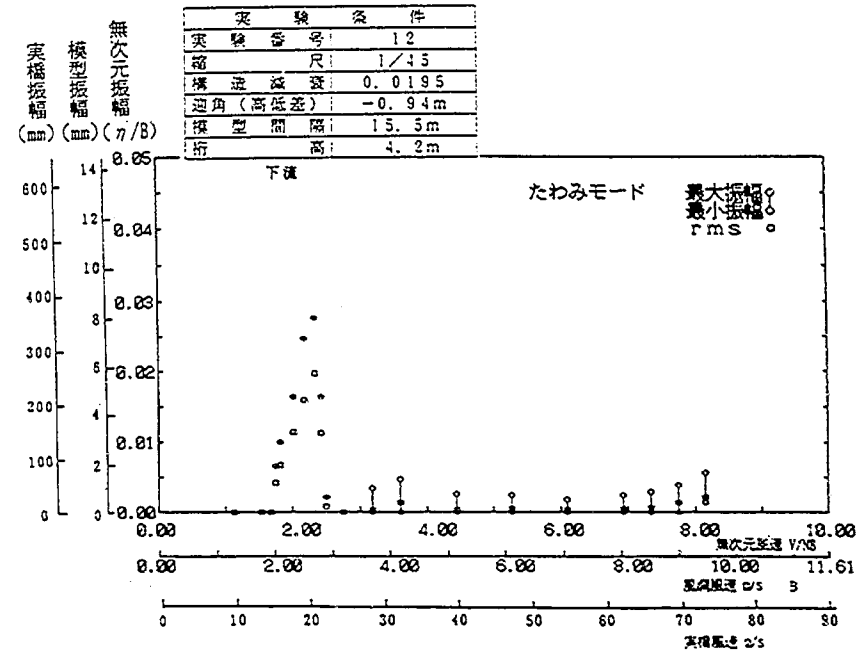
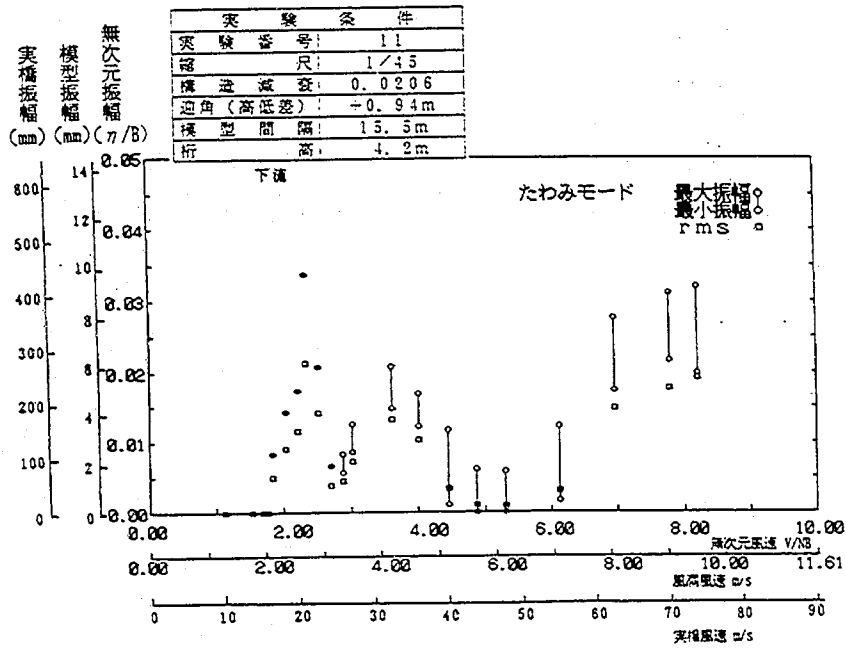
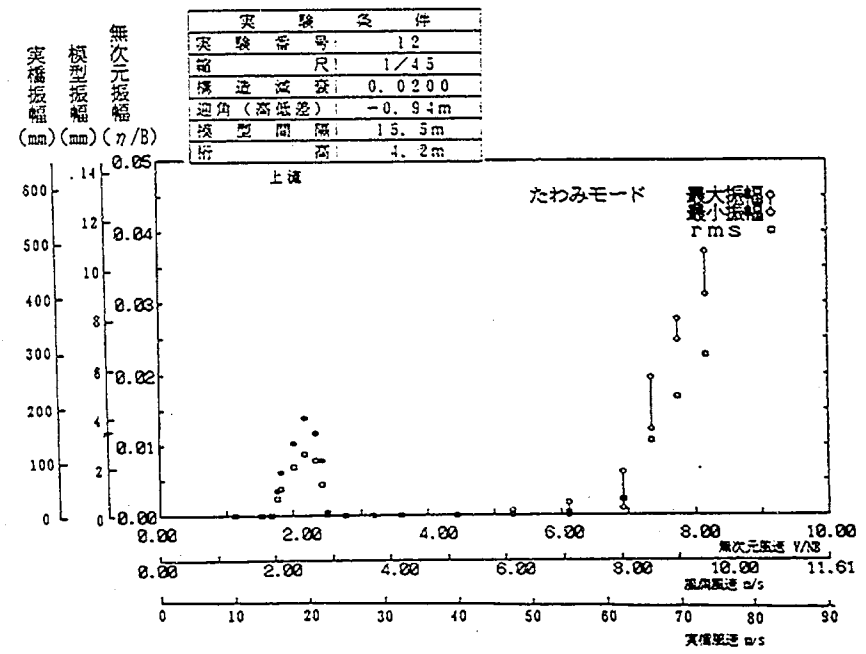
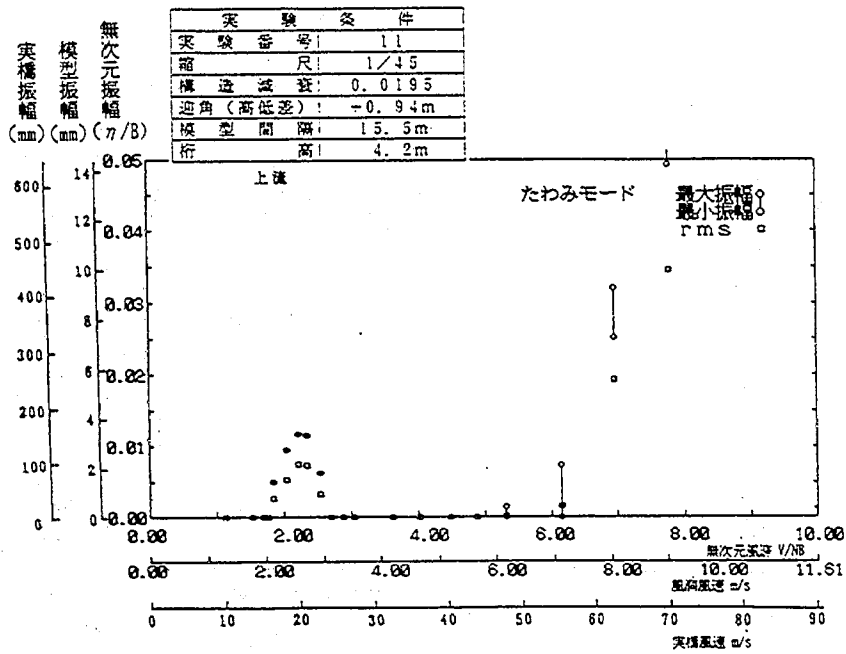
付図-2.7 風速-振幅曲線

付図-2.8 風速-振幅曲線



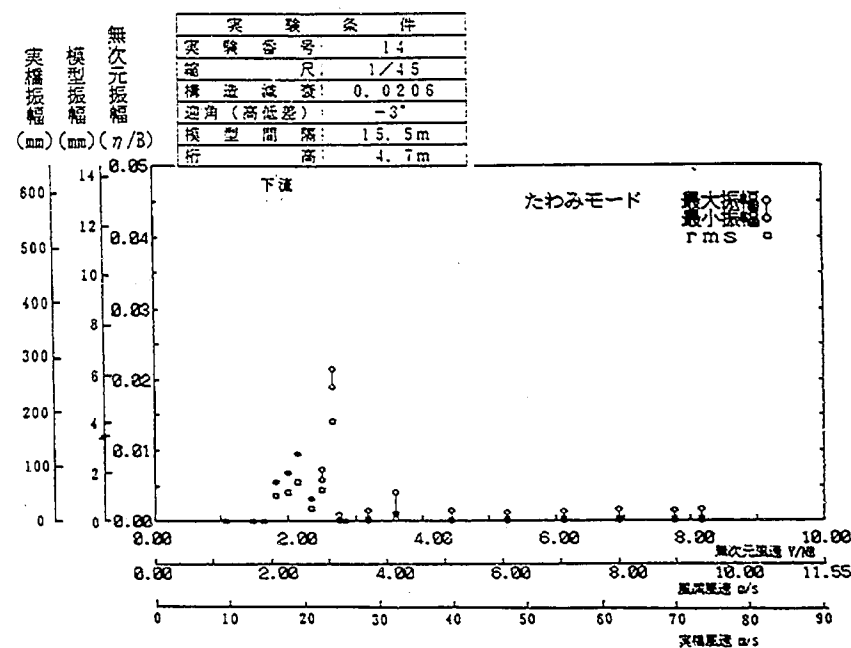
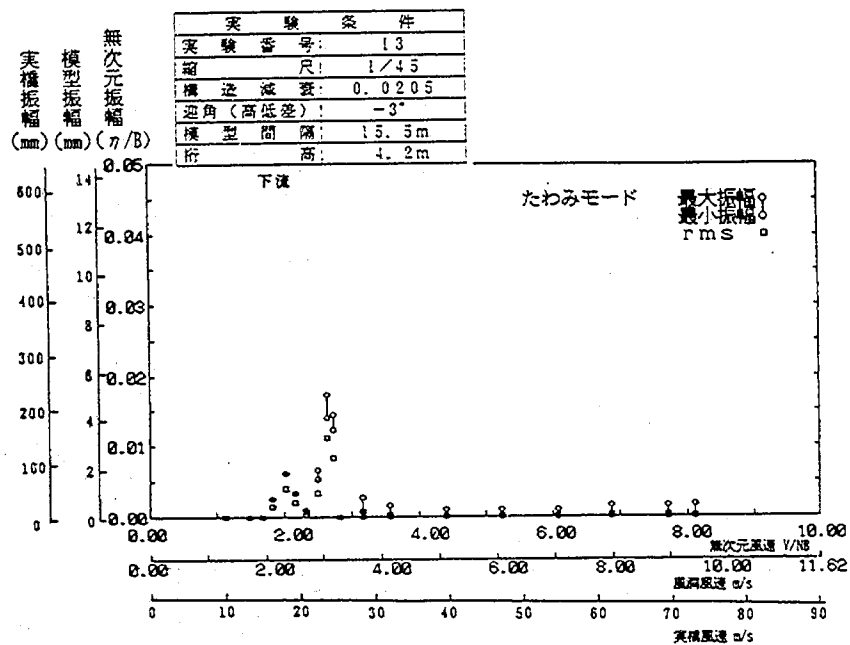
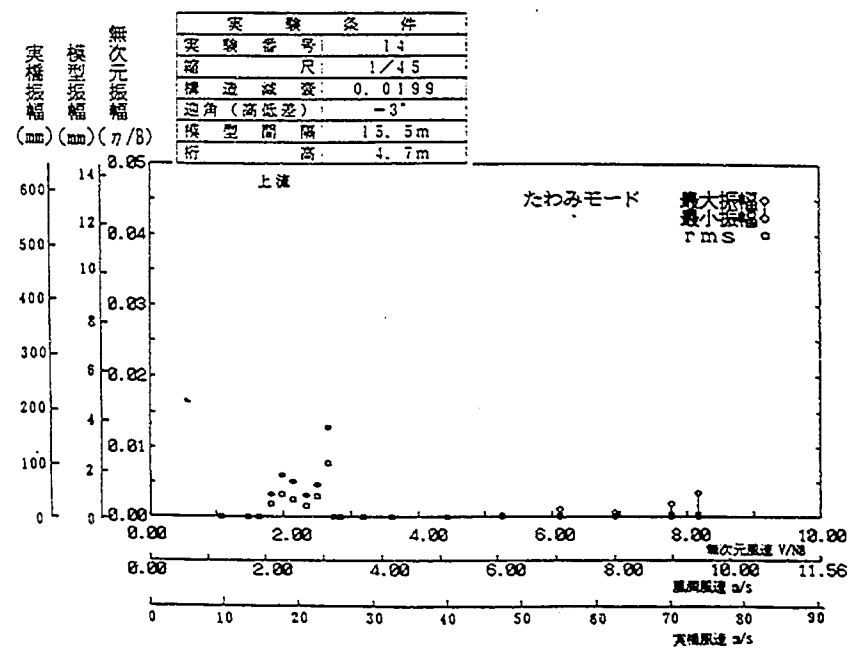
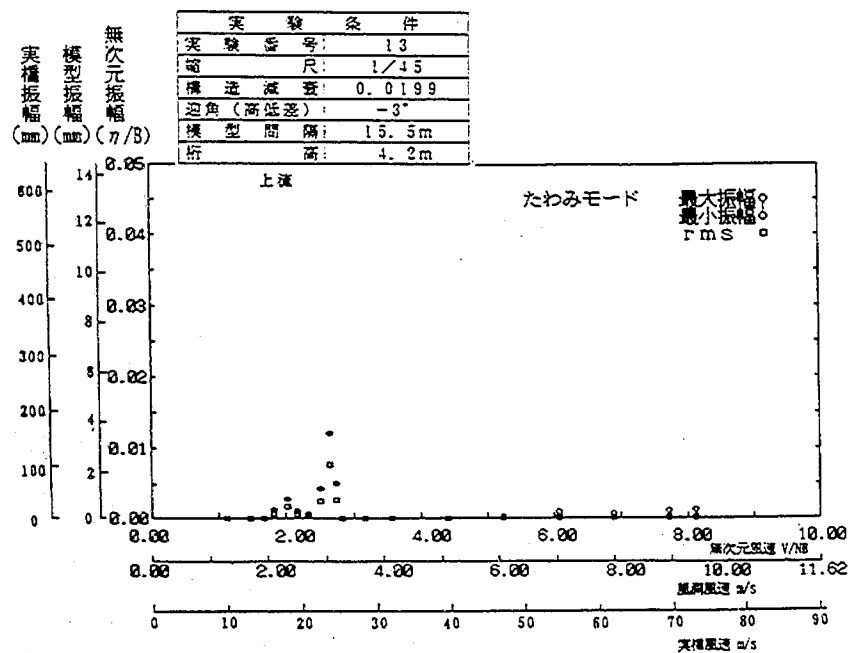
付図-2.9 風速-振幅曲線

付図-2.10 風速-振幅曲線



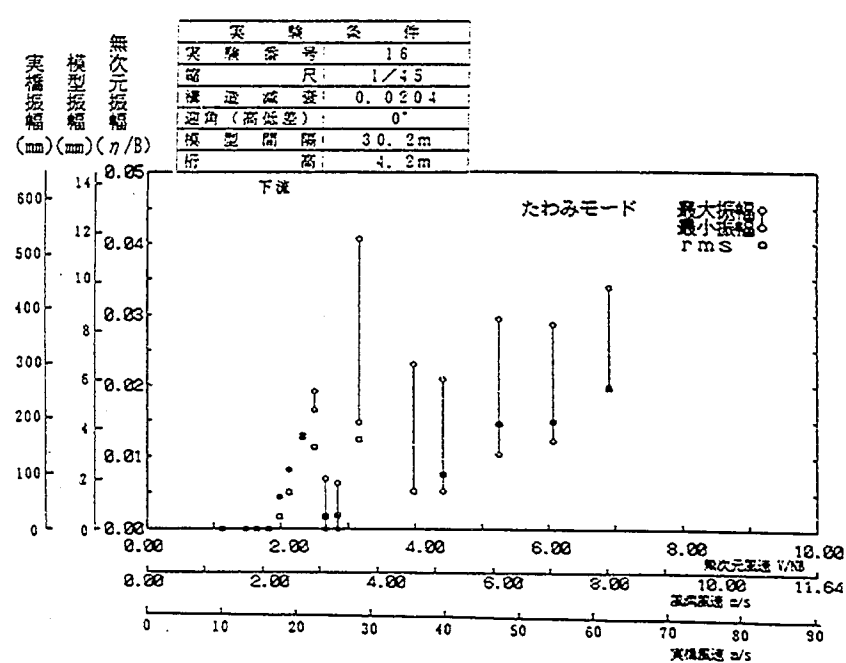
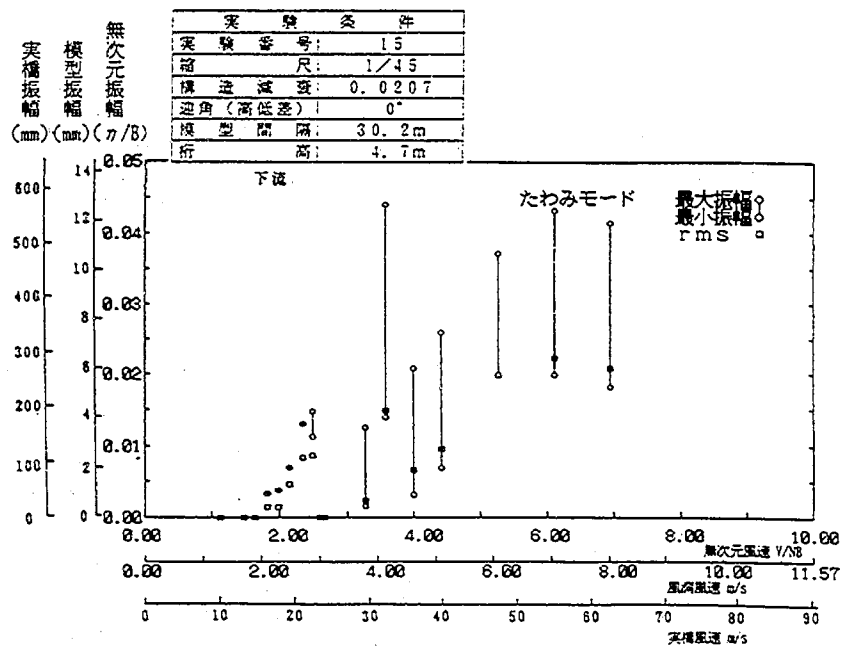
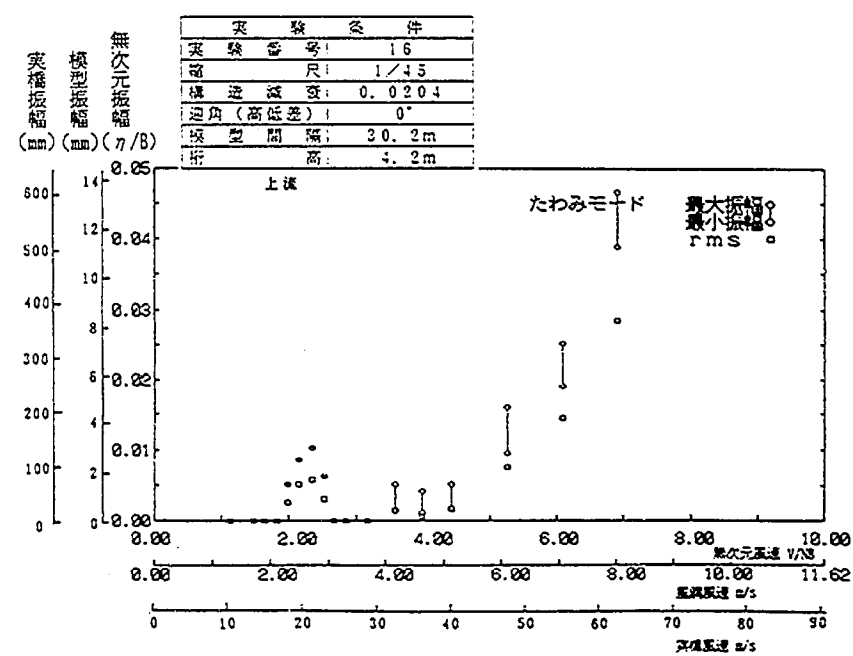
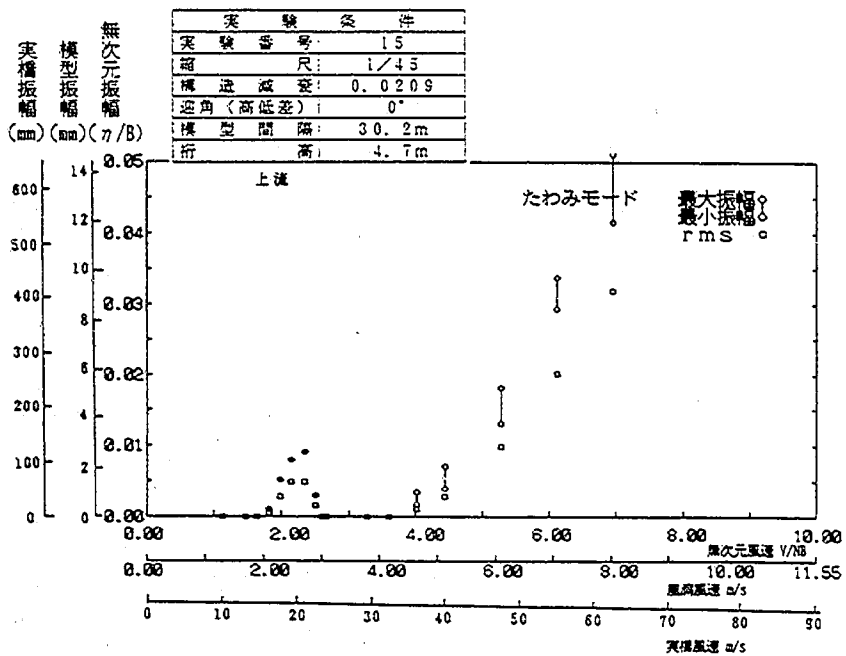
付図-2.11 風速-振幅曲線

付図-2.12 風速-振幅曲線



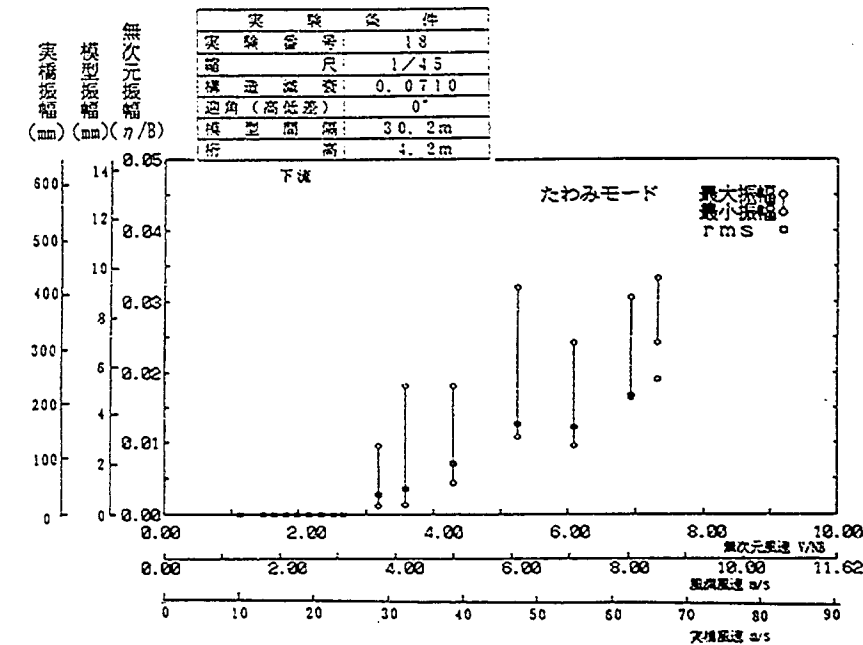
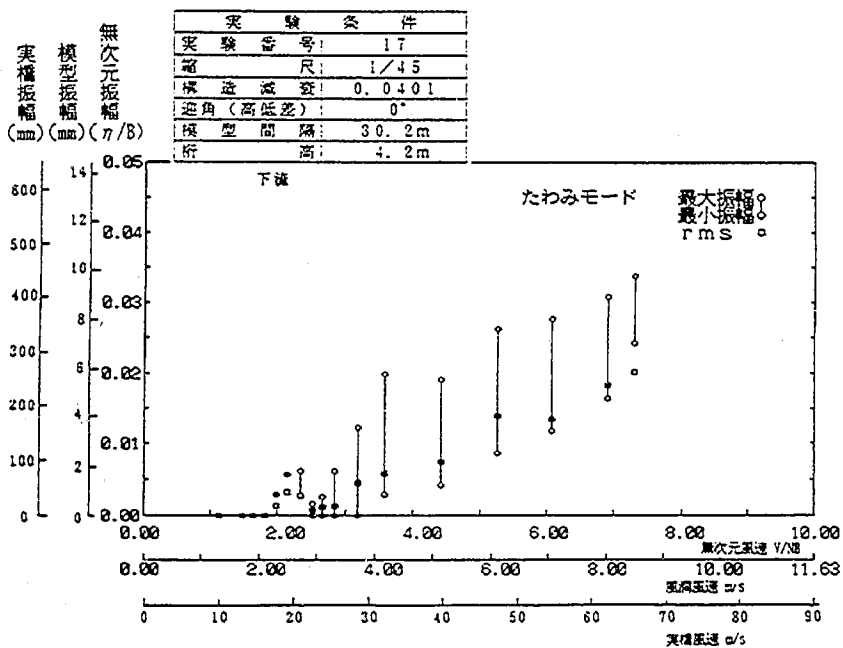
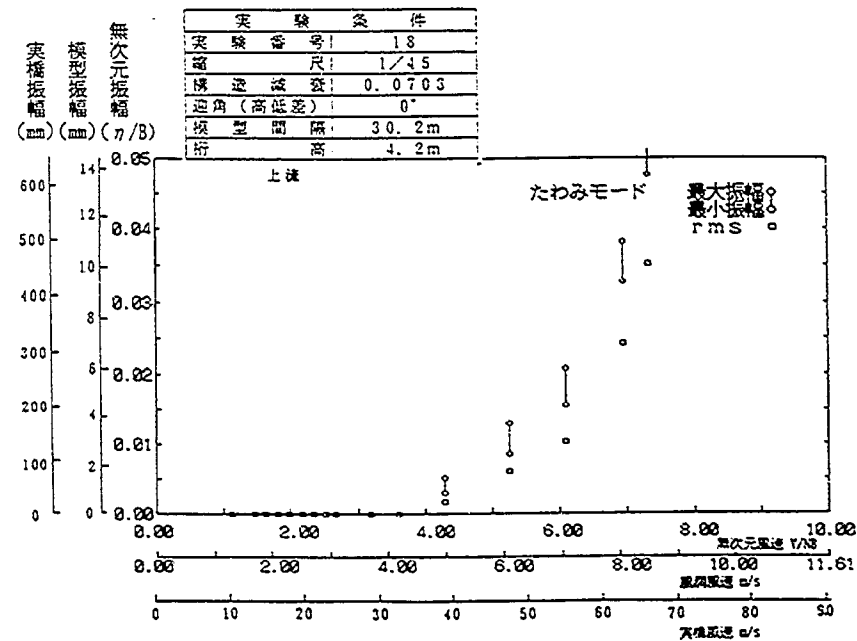
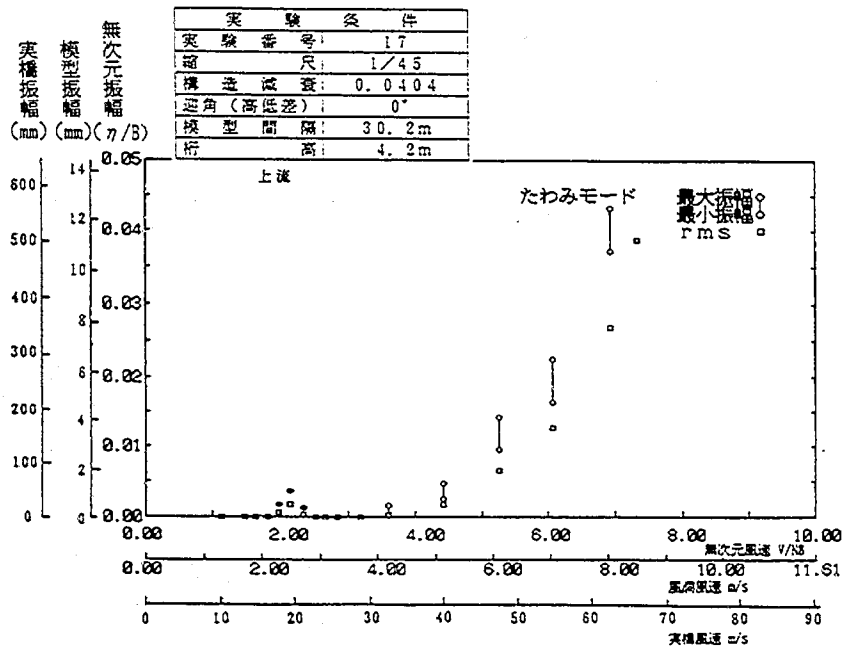
付図-2.13 風速-振幅曲線

付図-2.14 風速-振幅曲線



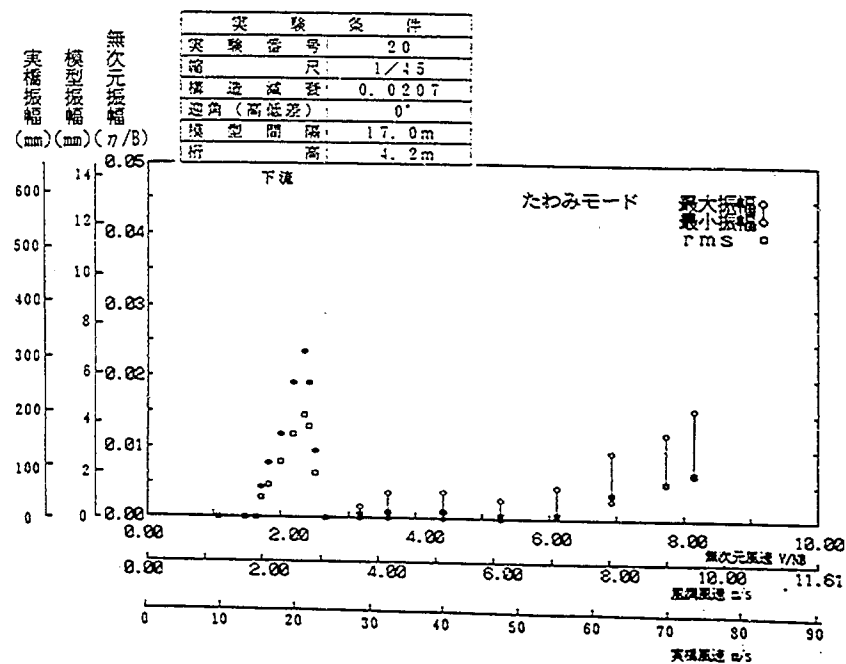
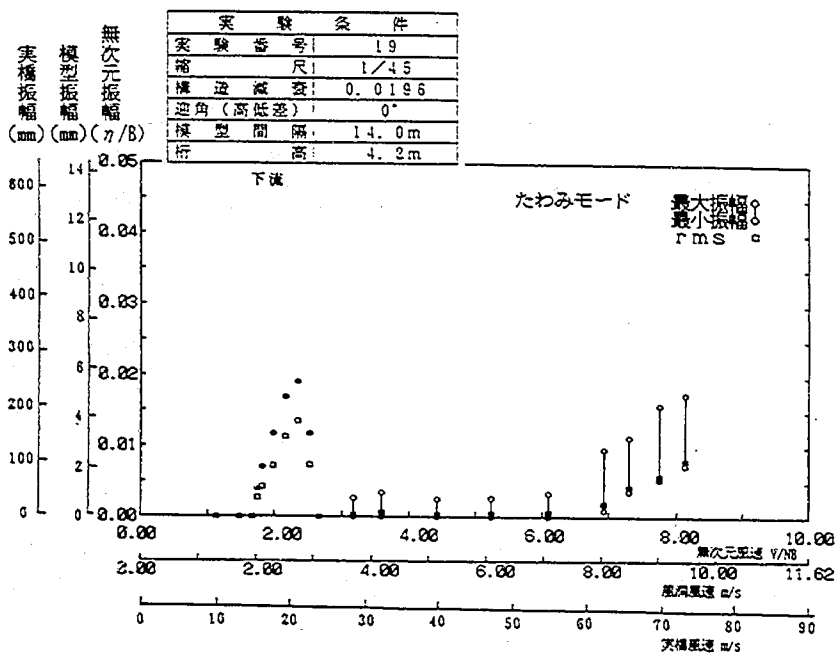
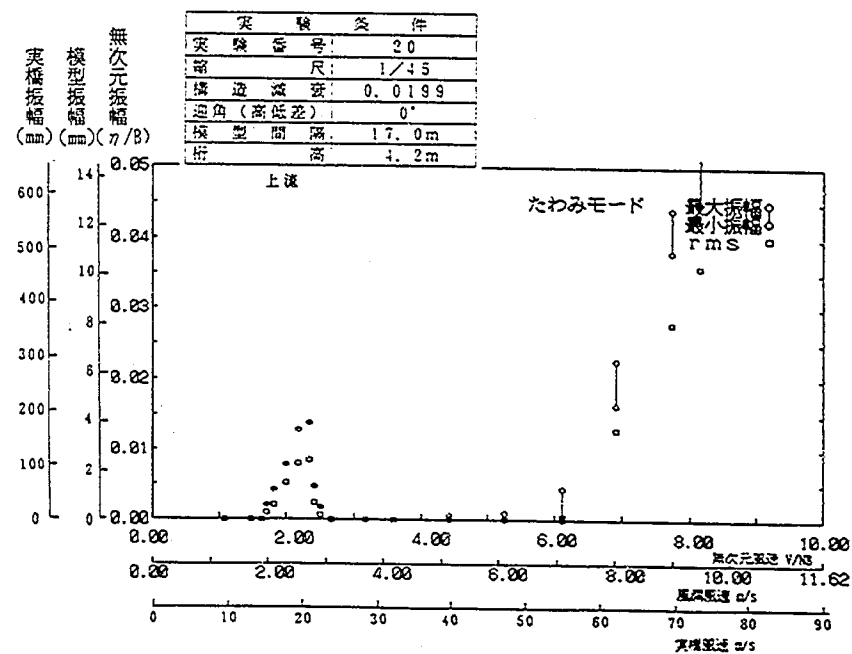
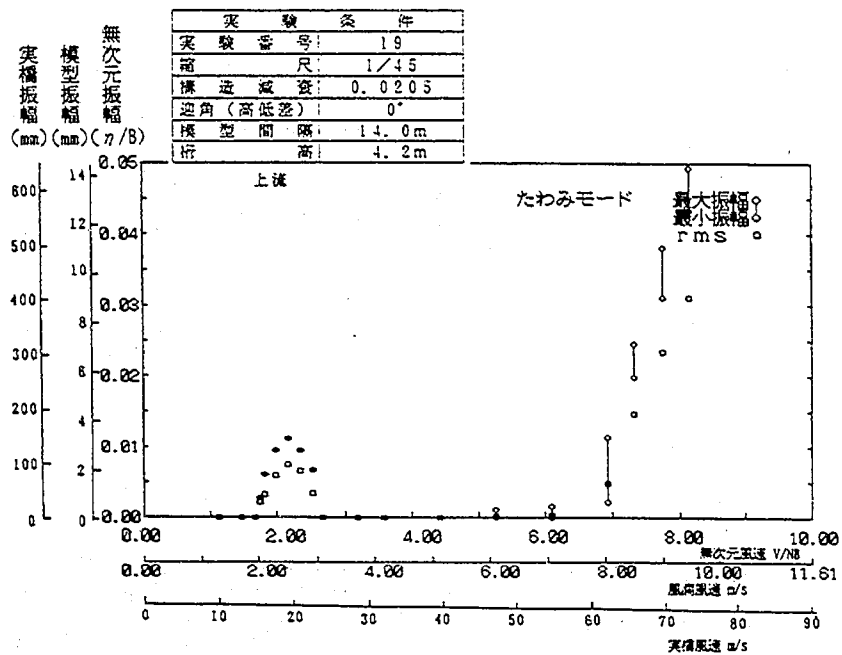
付図-2.15 風速-振幅曲線

付図-2.16 風速-振幅曲線



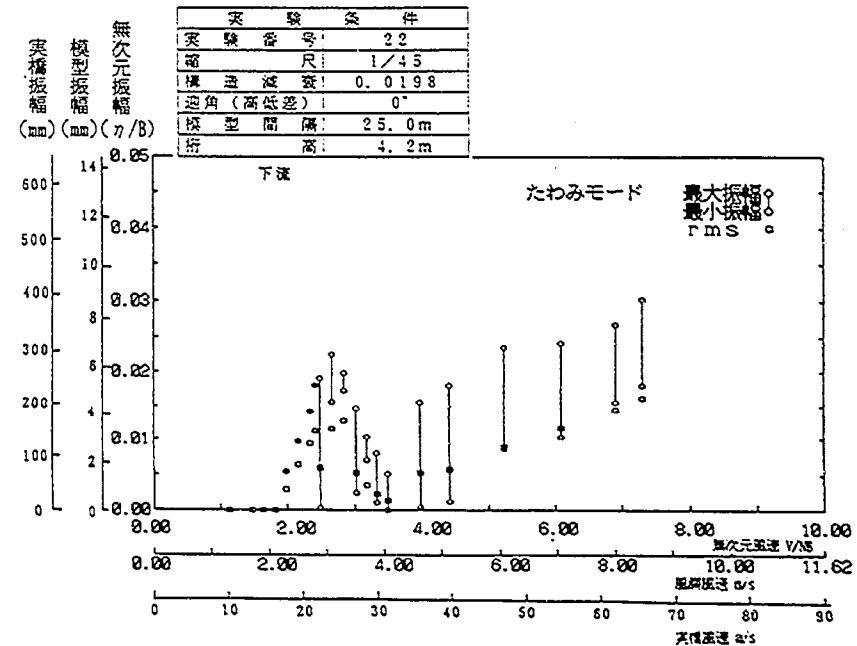
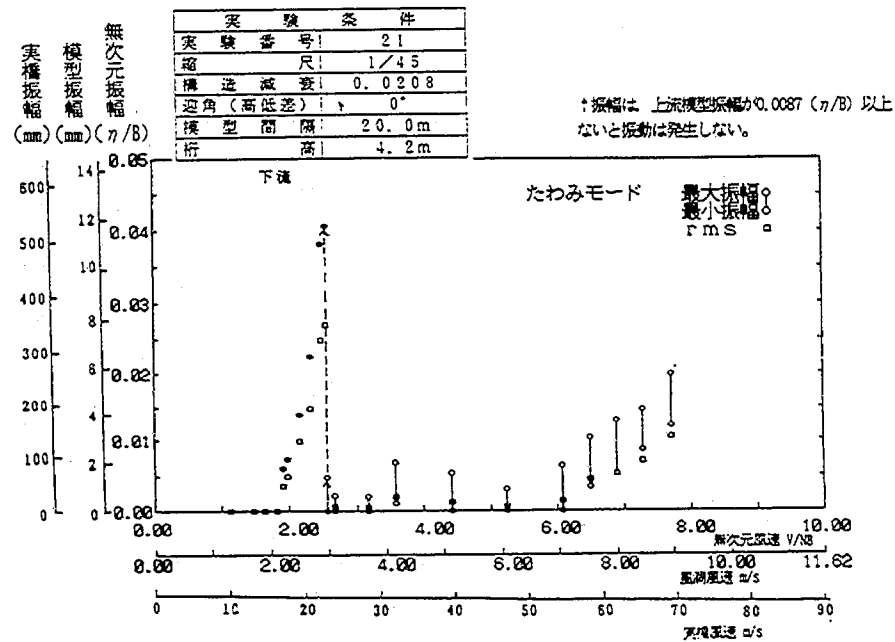
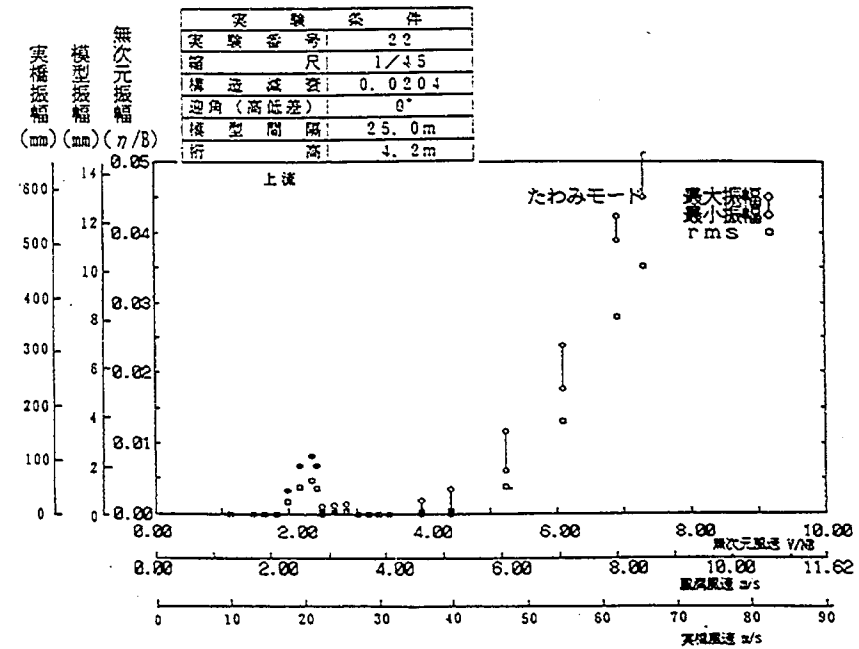
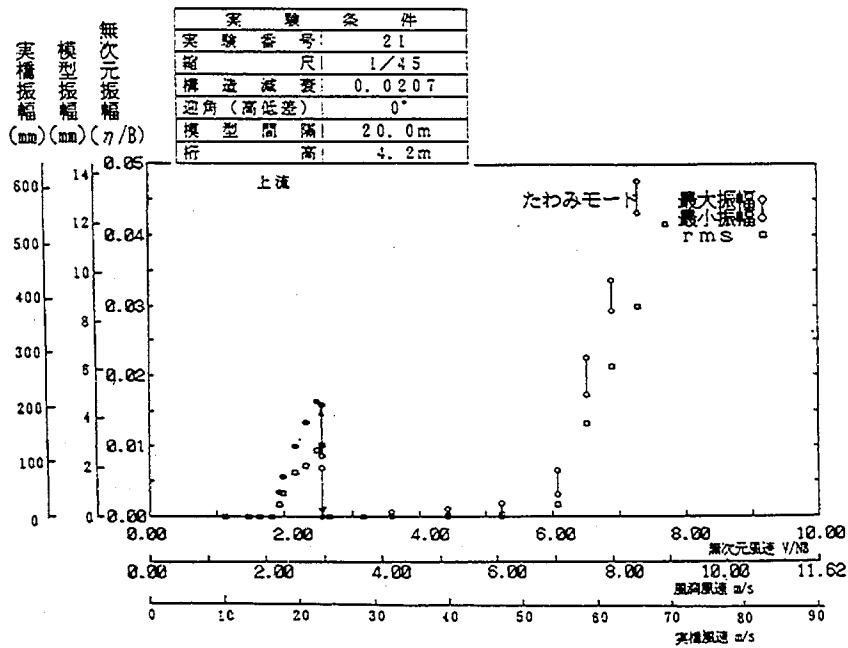
付図-2.17 風速-振幅曲線

付図-2.18 風速-振幅曲線



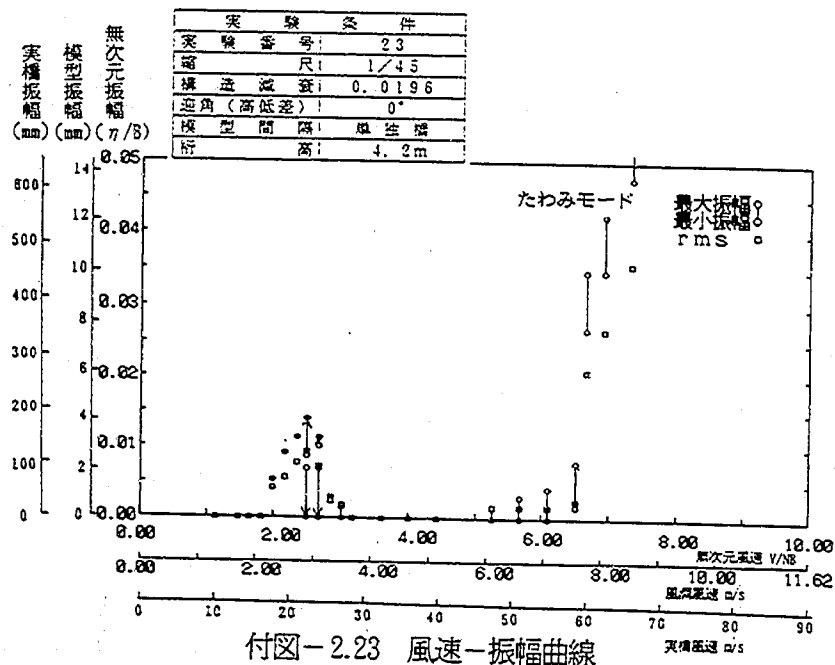
付図-2.19 風速-振幅曲線

付図-2.20 風速-振幅曲線

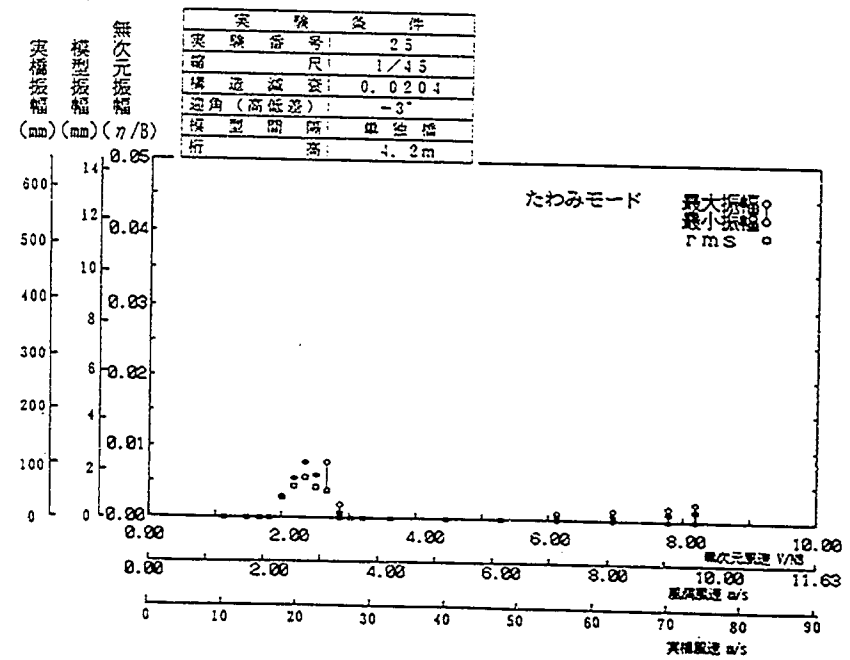


付図-2.21 風速-振幅曲線

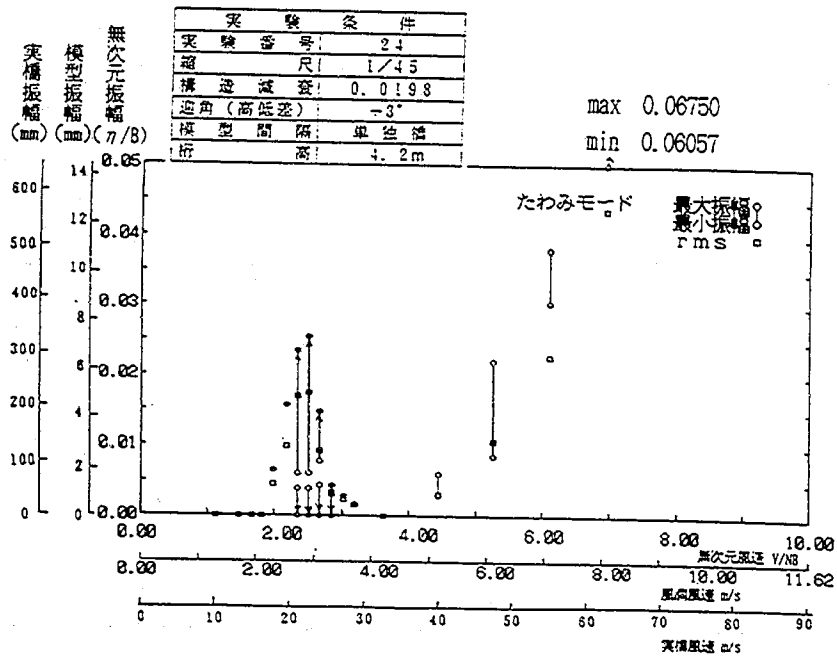
付図-2.22 風速-振幅曲線



付図-2.23 風速-振幅曲線



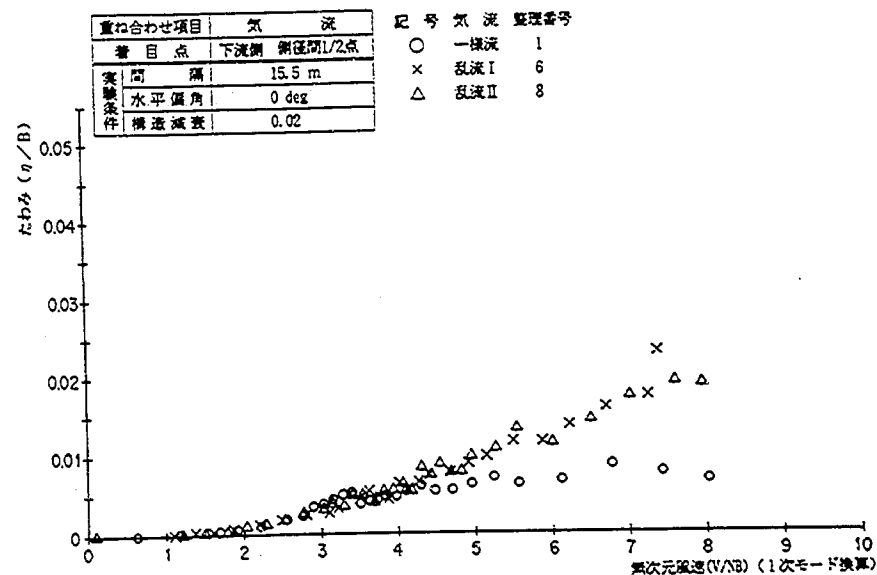
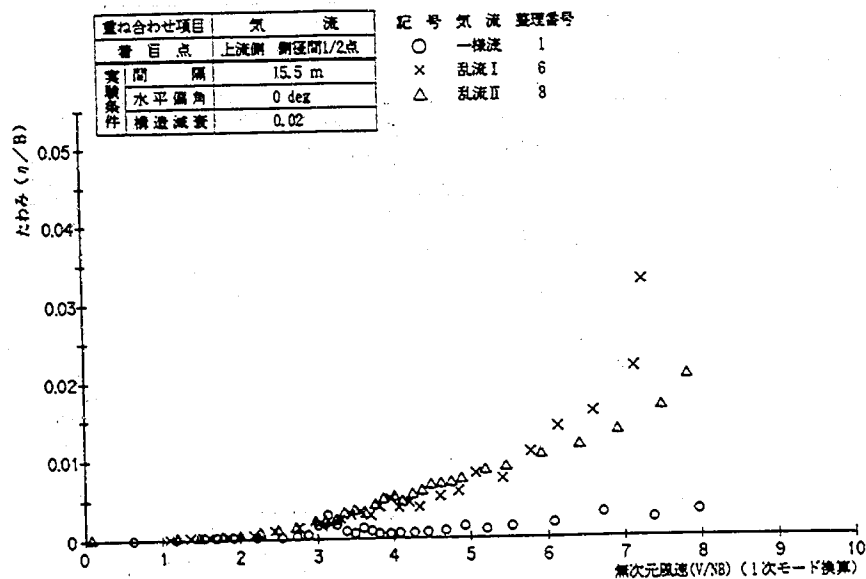
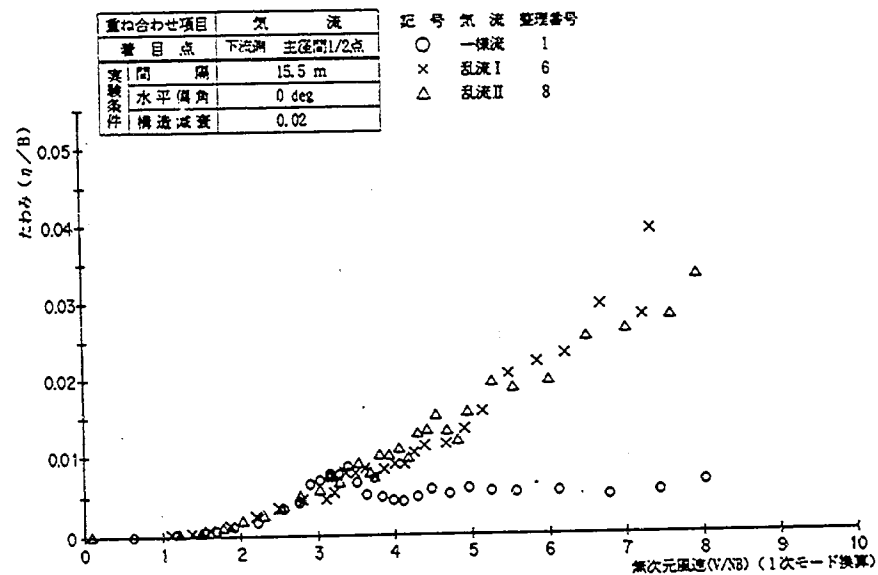
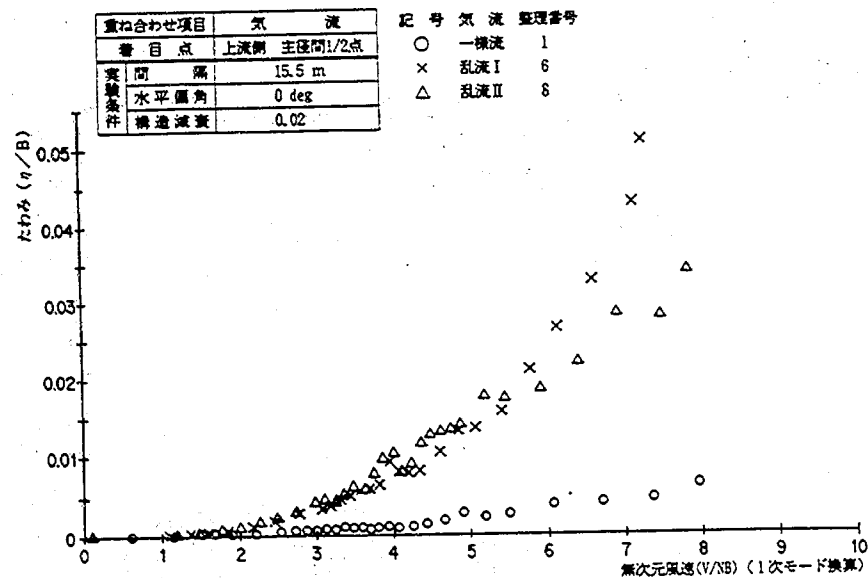
付図-2.25 風速-振幅曲線



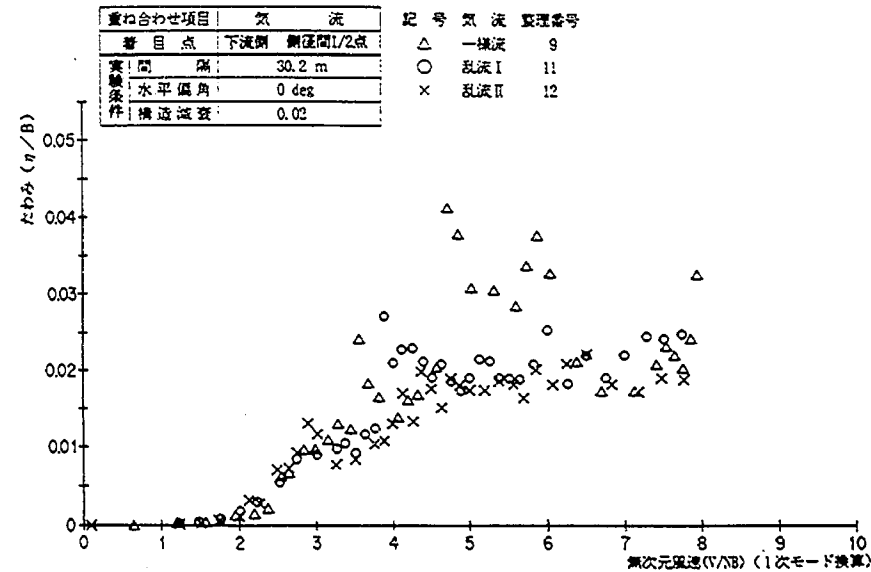
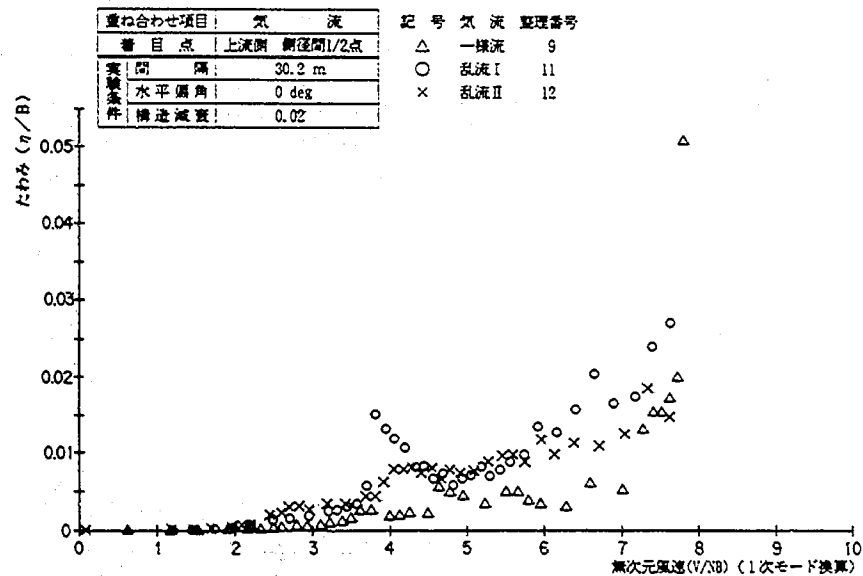
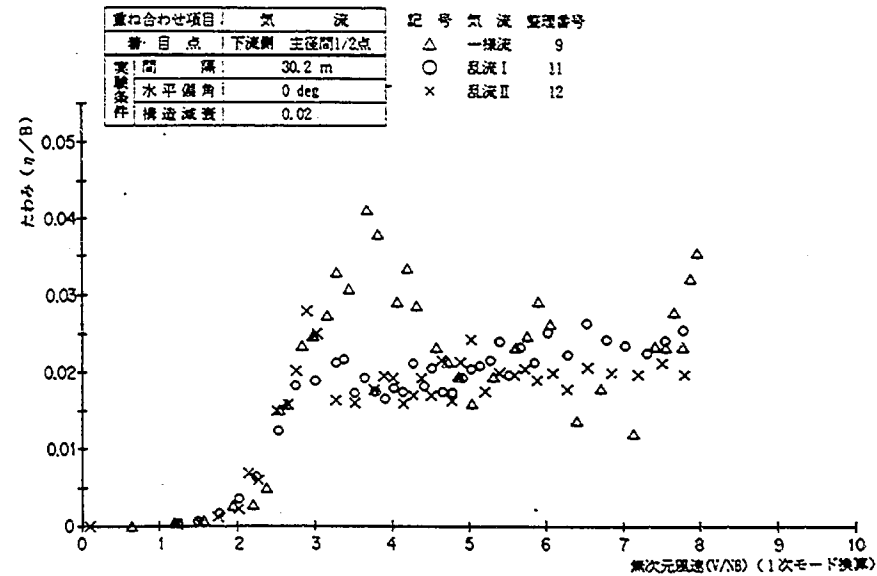
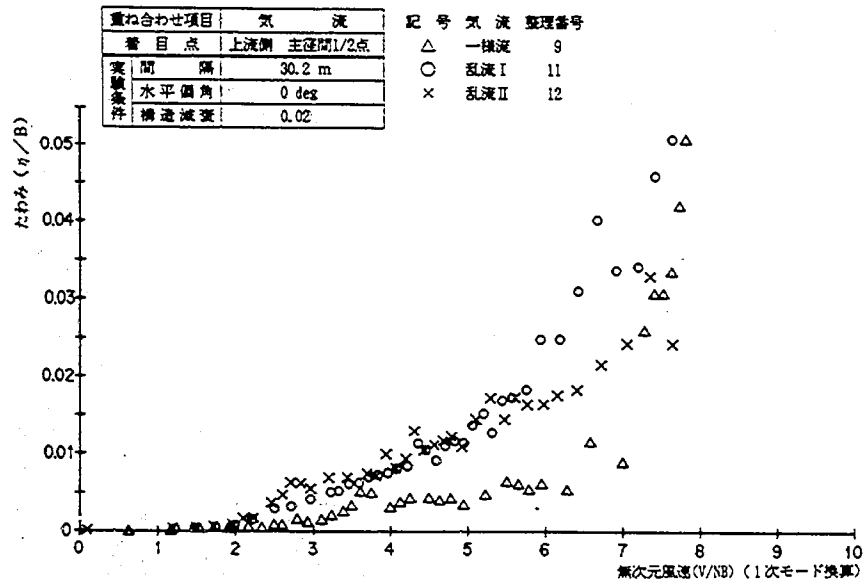
付図-2.24 風速-振幅曲線

付表-1 重ね合わせケース一覧

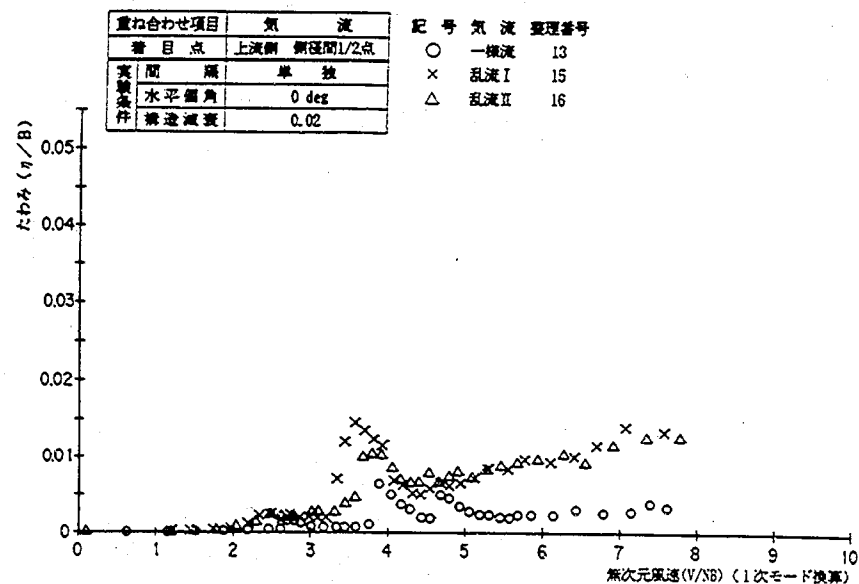
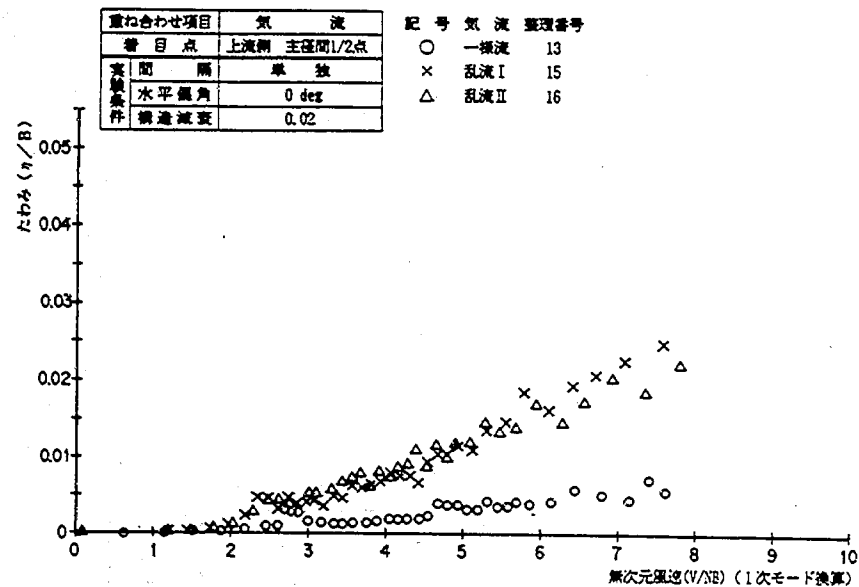
項 目	間 隔 (m)	気 流	水偏 (deg)	平 角	構 造 衰	模高 (mm)	型 式	実 験 号	図 番
気 流	15.5	一樣流	0	0.02	330	155	1	付図-3.1	
		乱流 I					6		
		乱流 II					8		
	30.2	一樣流	0	0.02	330	155	9	付図-3.2	
		乱流 I					1 1		
		乱流 II					1 2		
	単 独	一樣流	0	0.02	330	155	1 3	付図-3.3	
		乱流 I					1 5		
		乱流 II					1 6		
構 造 衰	15.5	一樣流	0	0.02	330	1	付図-3.4		
				0.04		2			
				0.07		3			
	15.5	乱流 I	0	0.02	155	6	付図-3.5		
				0.04		7			
	30.2	一樣流	0	0.02	330	9	付図-3.6		
0.04	1 0								
間 隔	15.5	一樣流	0	0.02	330	1	付図-3.7		
	30.2					9			
	15.5	一樣流	0	0.04	330	2	付図-3.8		
	30.2					1 0			
	15.5	乱流 I	0	0.02	155	6	付図-3.9		
	30.2					1 1			
	15.5	乱流 II	0	0.02	155	8	付図-3.10		
	30.2					1 2			
水 偏	15.5	一樣流	0	0.02	330	1	付図-3.11		
平 角	1 5	5							
模 高	単 独	一樣流	0	0.02	330	1 3	付図-3.12		
					155	1 4			
二 次 元 模 及 三 模	単 独	一樣流	0	0.0326	—	5 1	付図-3.13		
				0.0201	155	1 4			
				0.0205	330	1 3			
	単 独	乱流 I	0	0.0307	—	5 4	付図-3.14		
				0.0199	155	1 5			
	単 独	乱流 II	0	0.0340	—	5 5	付図-3.15		
0.0202				155	1 6				



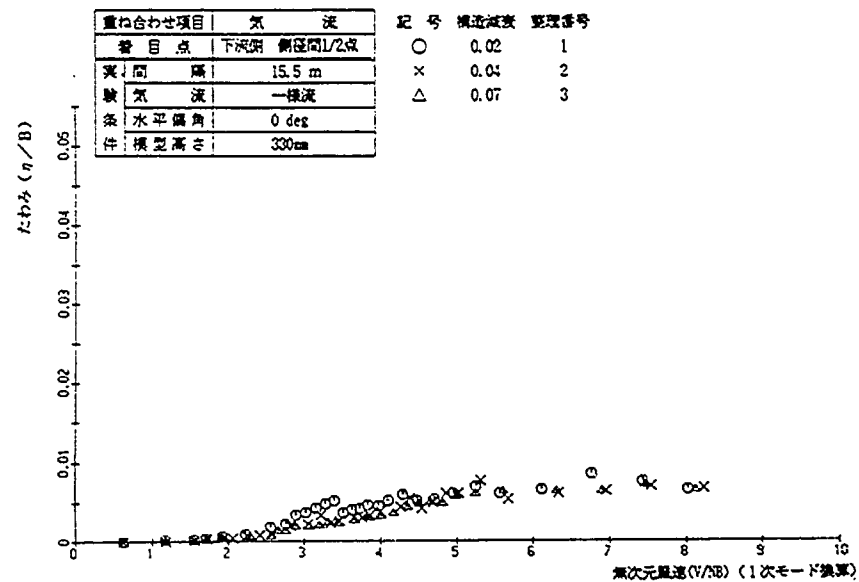
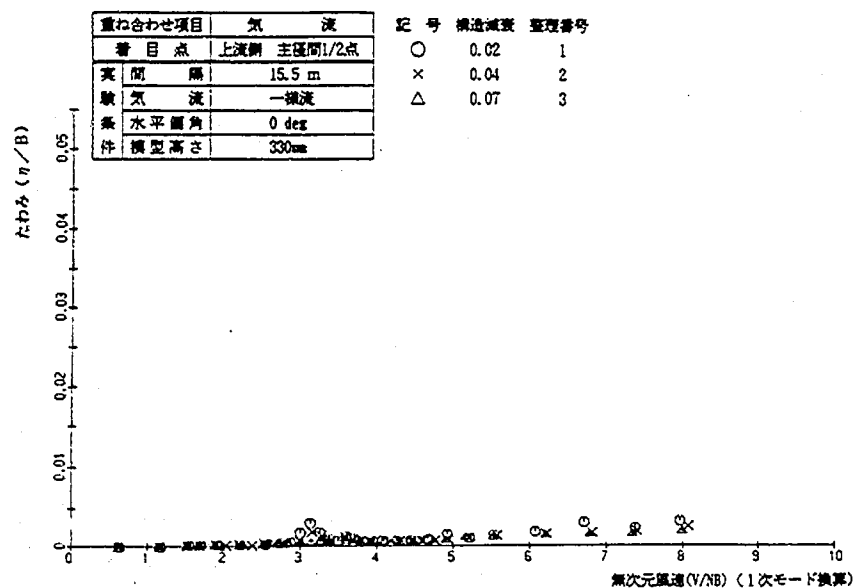
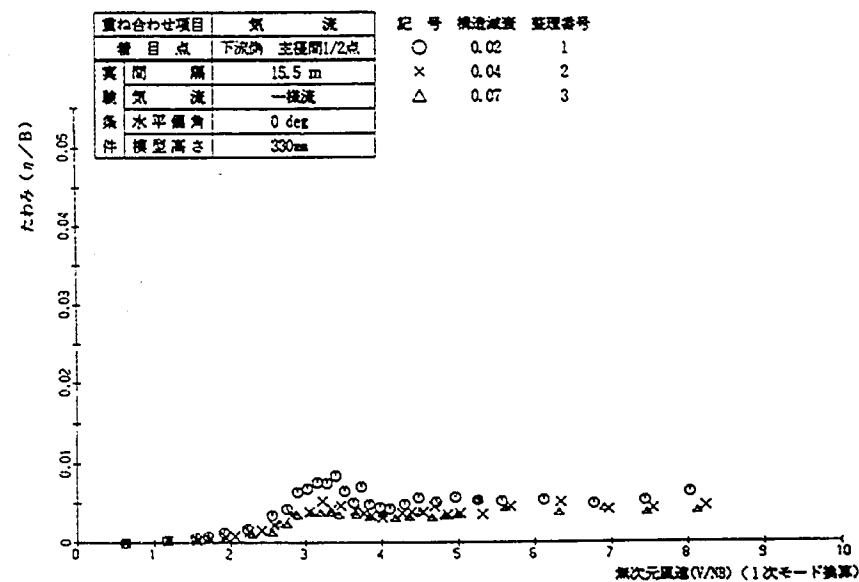
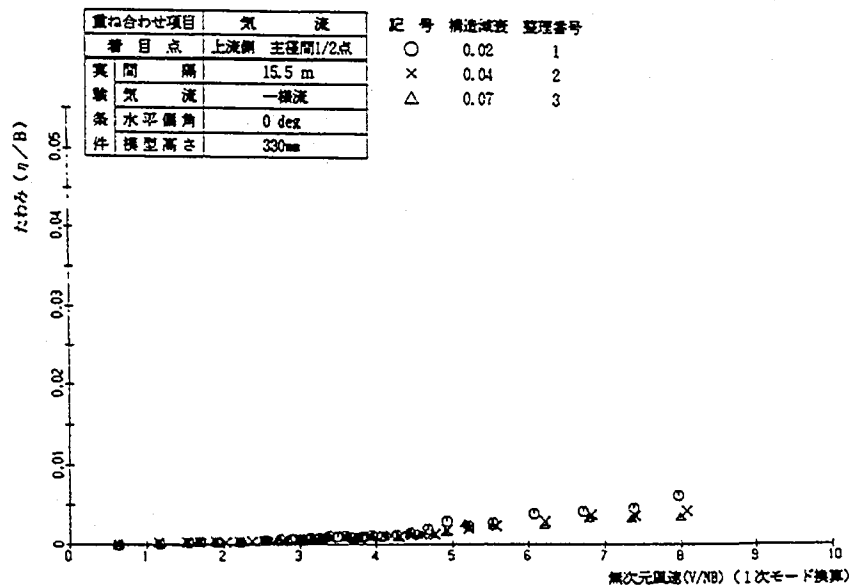
付図-3.1 風速-振幅曲線 (気流の違いによる重ね合わせ)



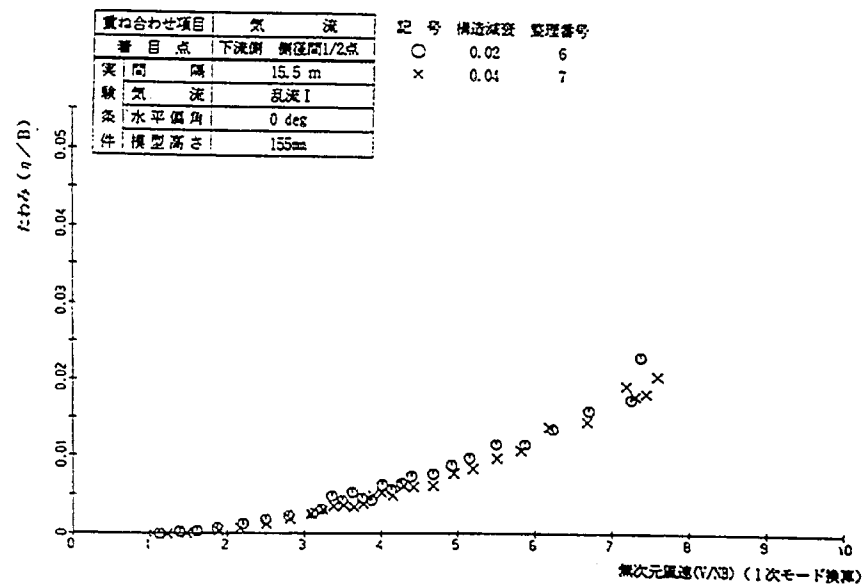
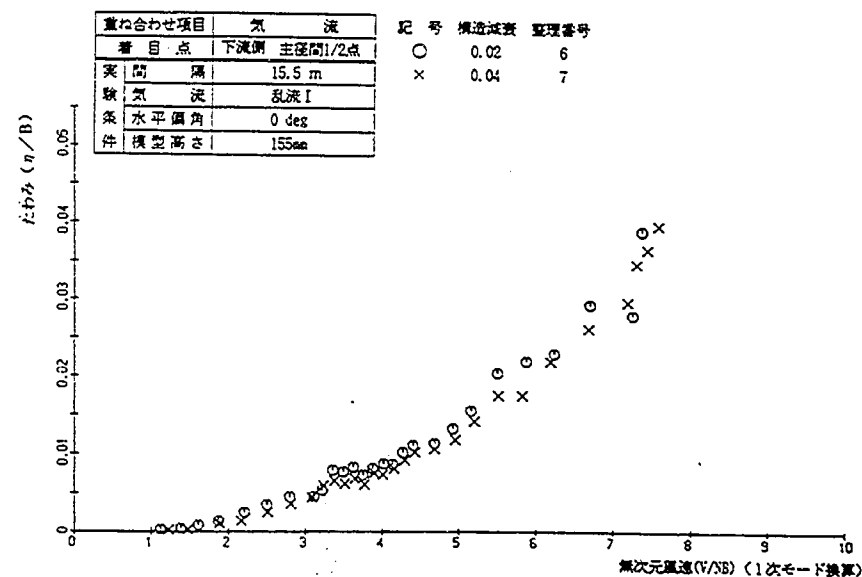
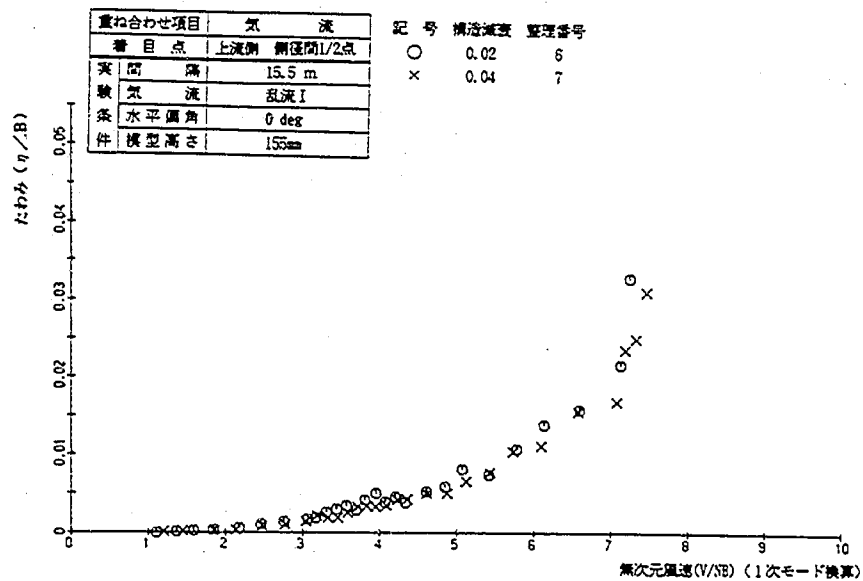
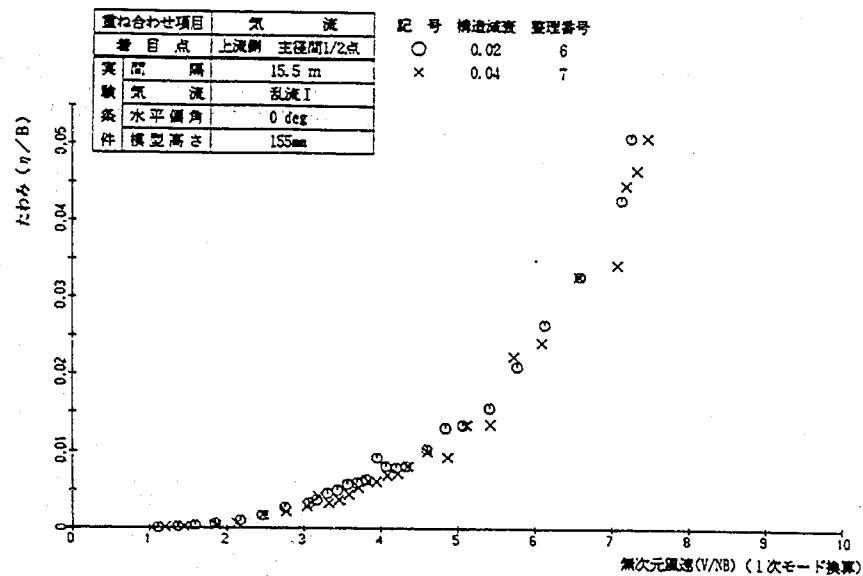
付図-3.2 風速-振幅曲線 (気流の違いによる重ね合わせ)



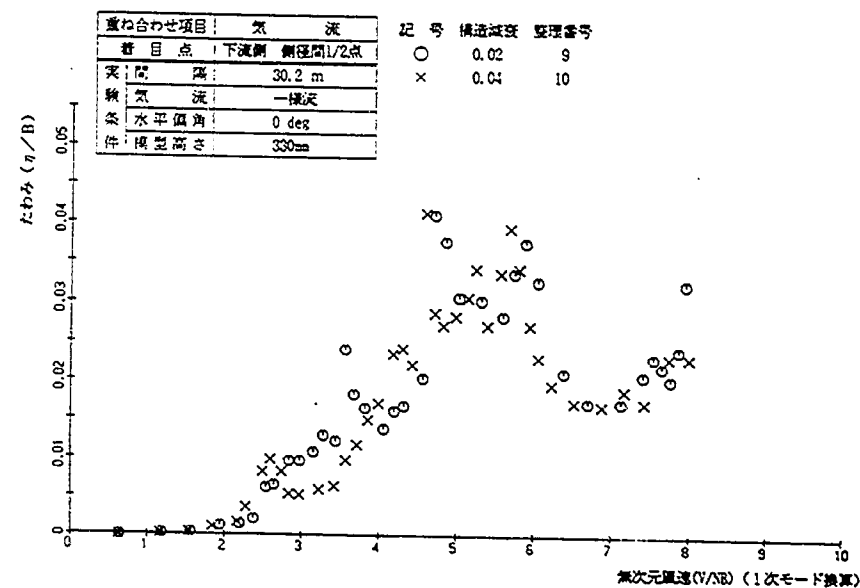
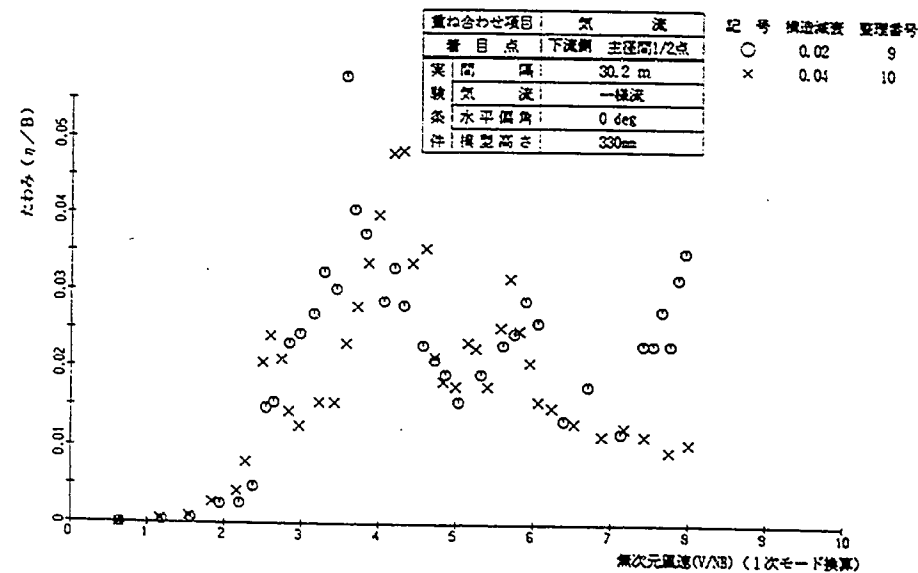
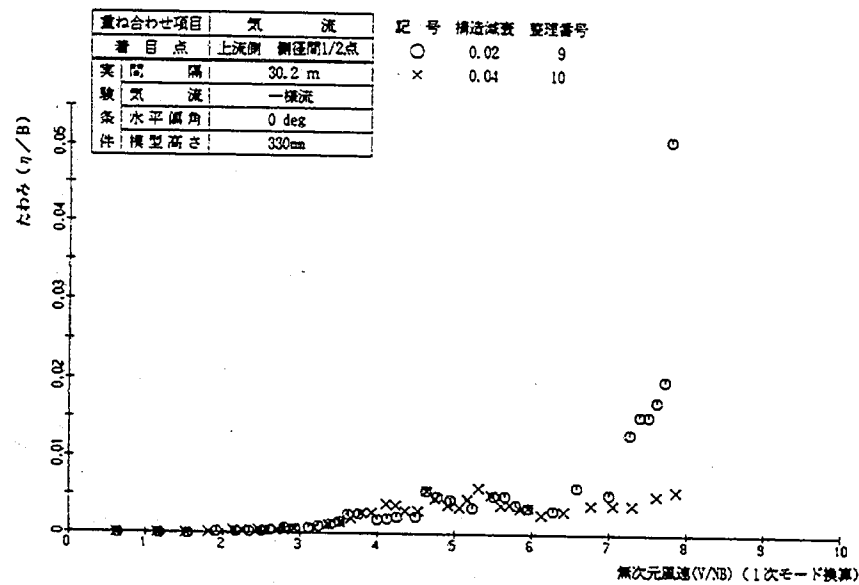
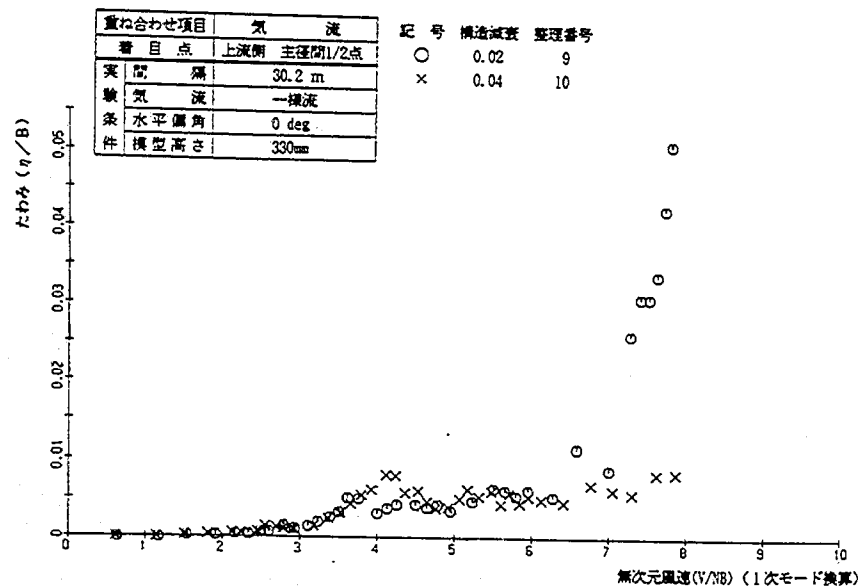
付図-3.3 風速-振幅曲線 (気流の違いによる重ね合わせ)



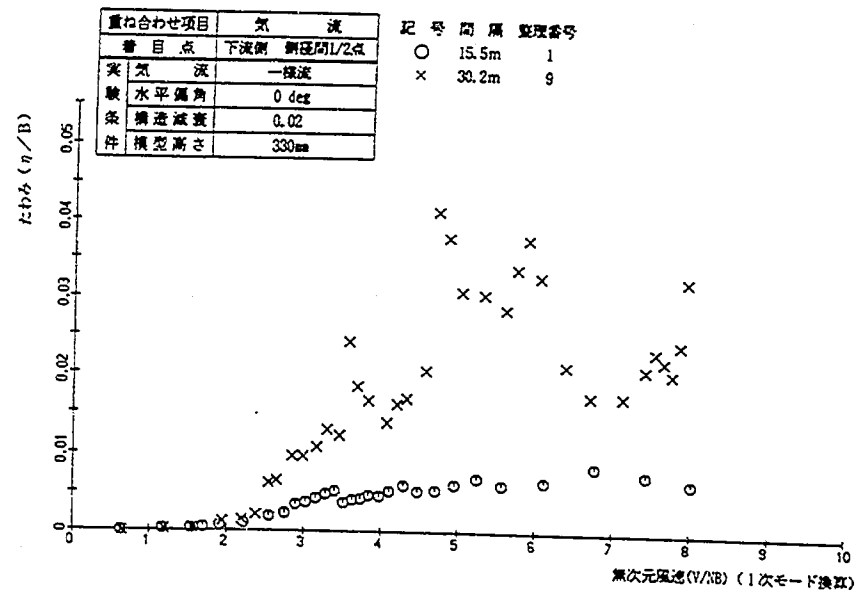
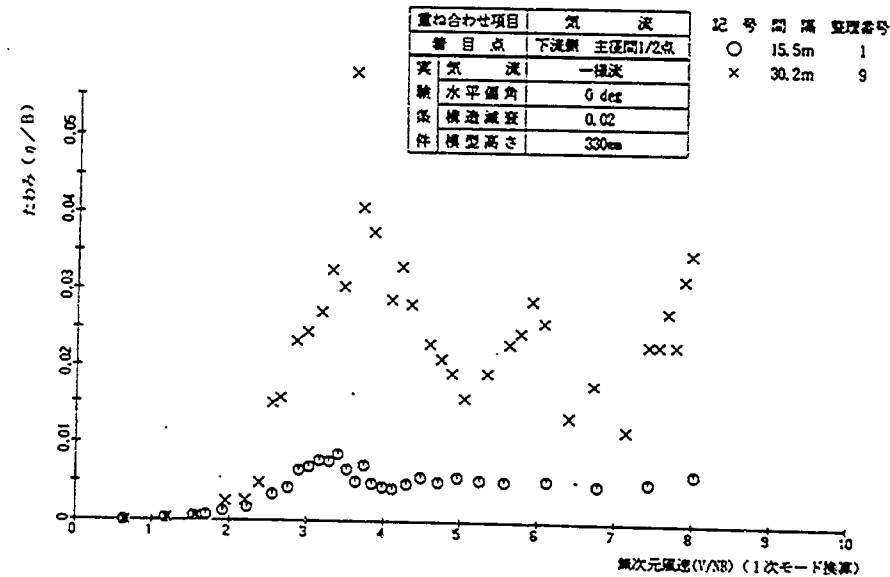
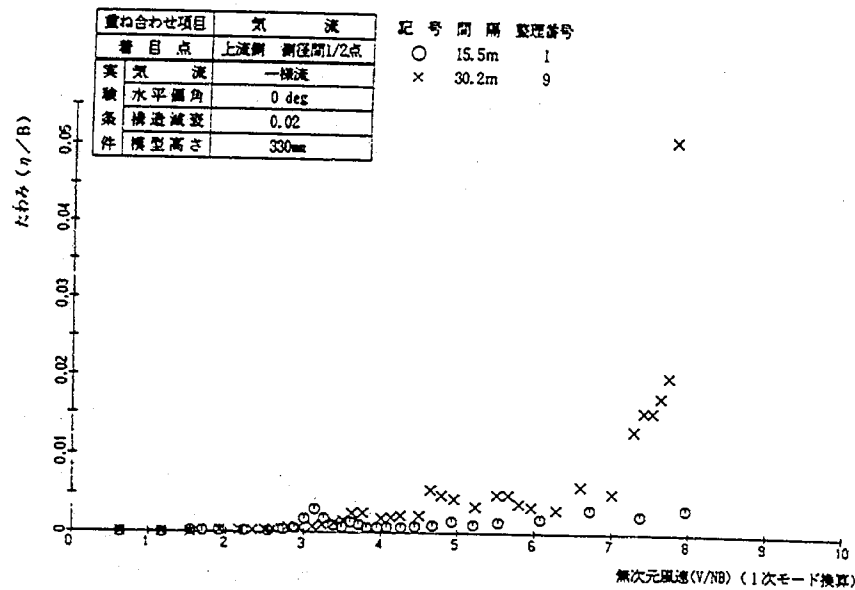
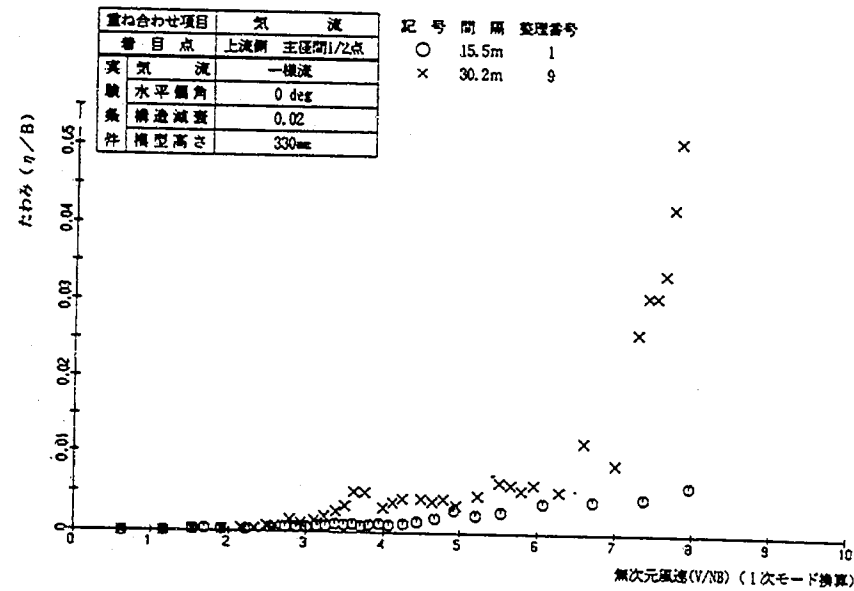
付図-3.4 風速-振幅曲線 (構造減衰の違いによる重ね合わせ)



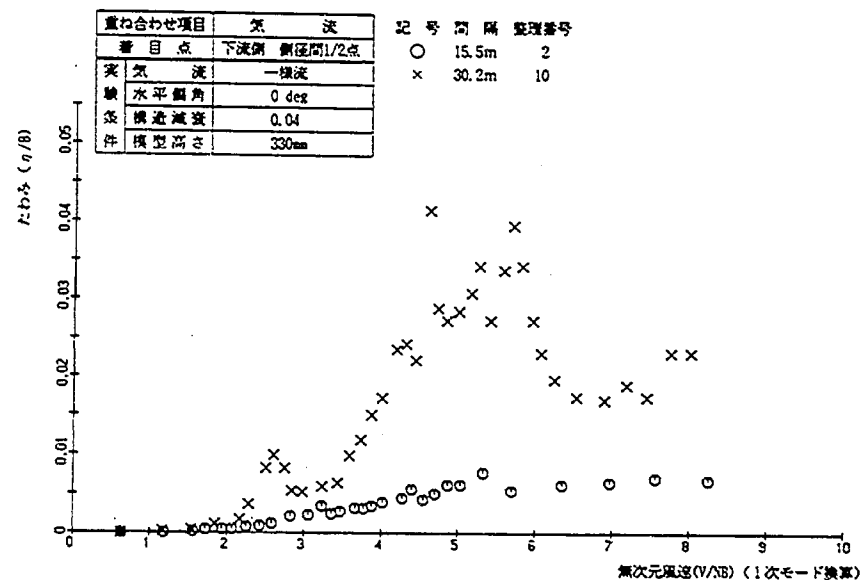
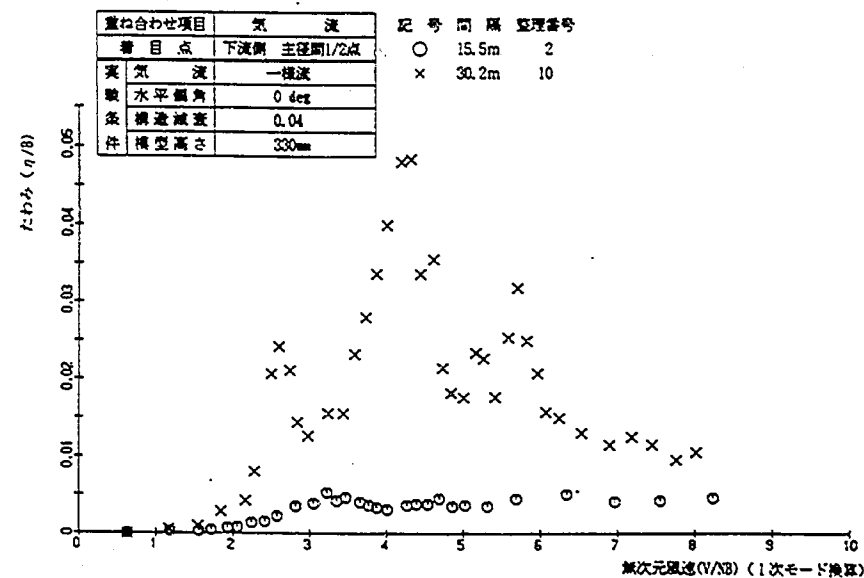
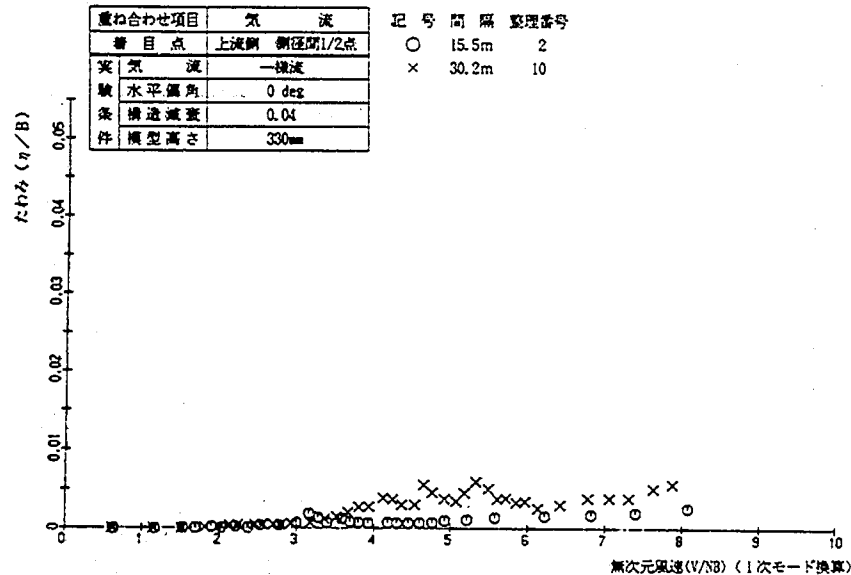
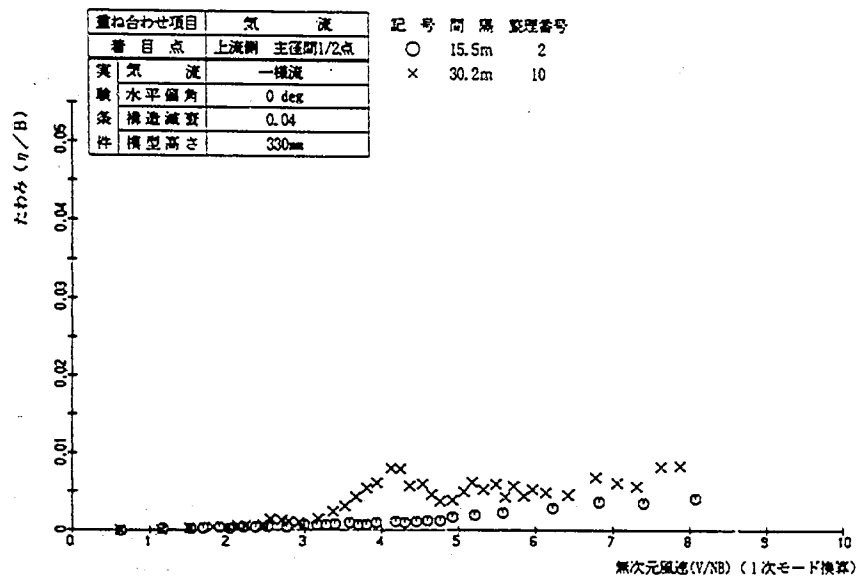
付図-3.5 風速-振幅曲線 (構造減衰の違いによる重ね合わせ)



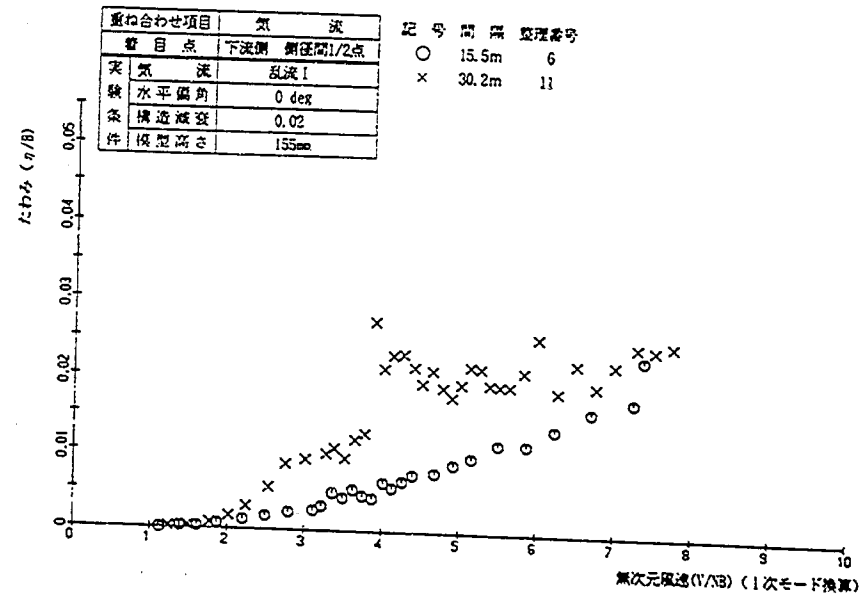
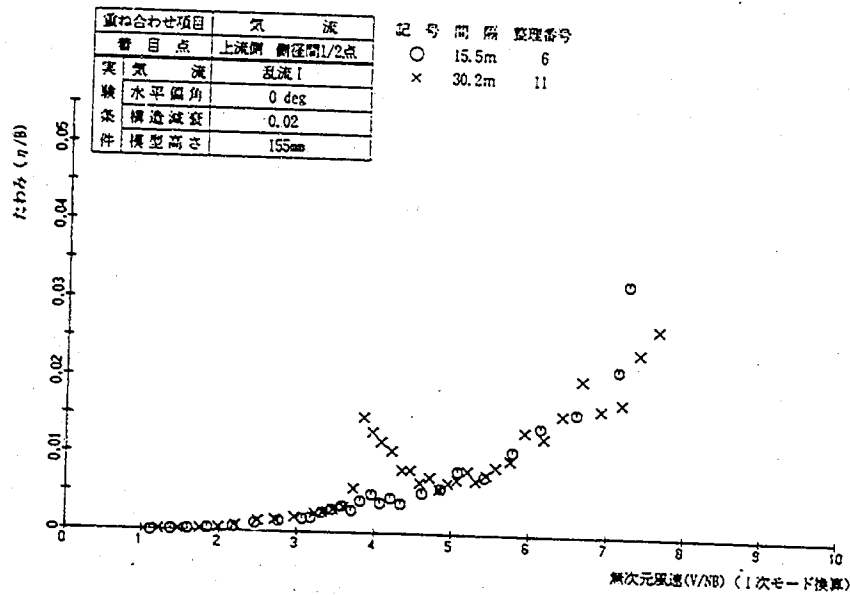
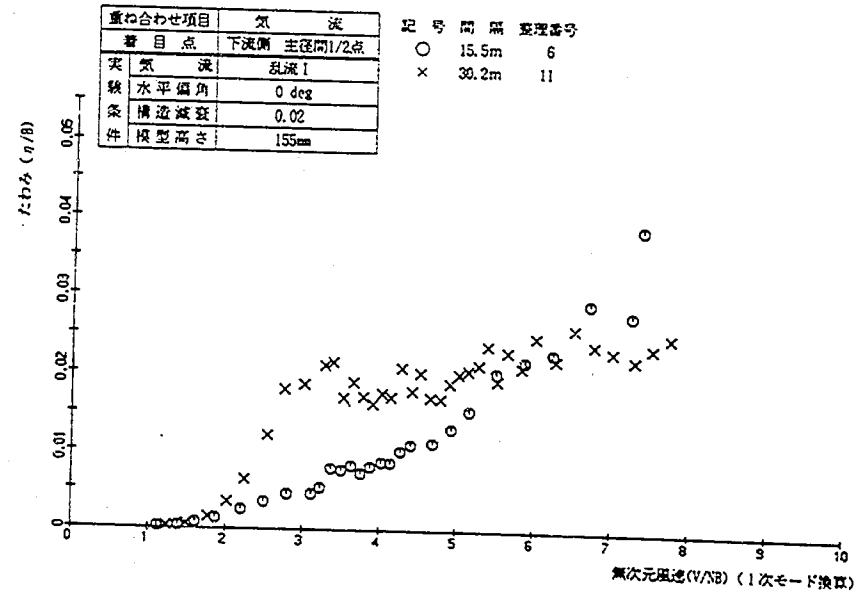
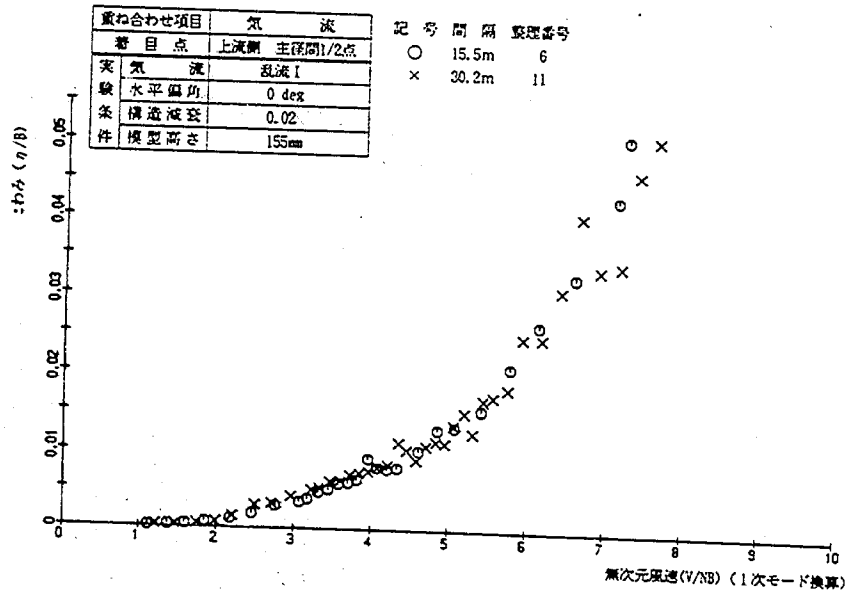
付図-3.6 風速-振幅曲線 (構造減衰の違いによる重ね合わせ)



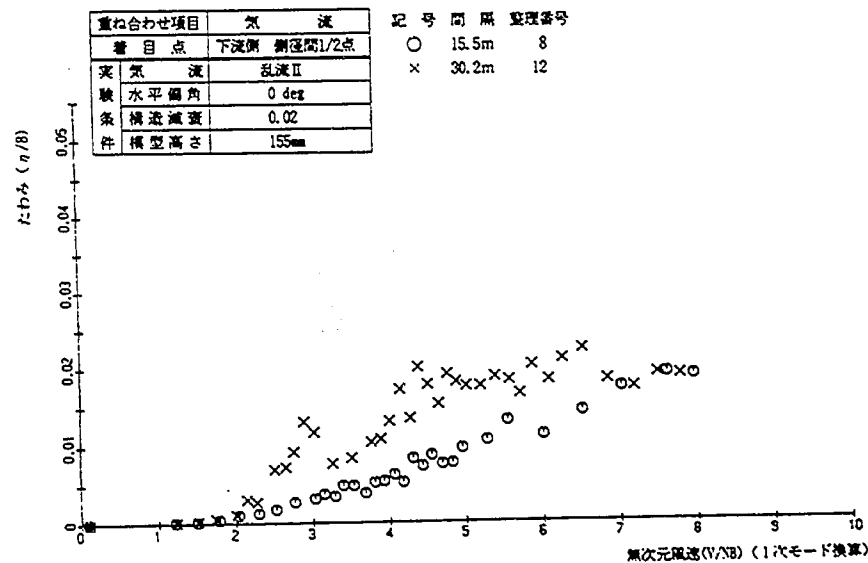
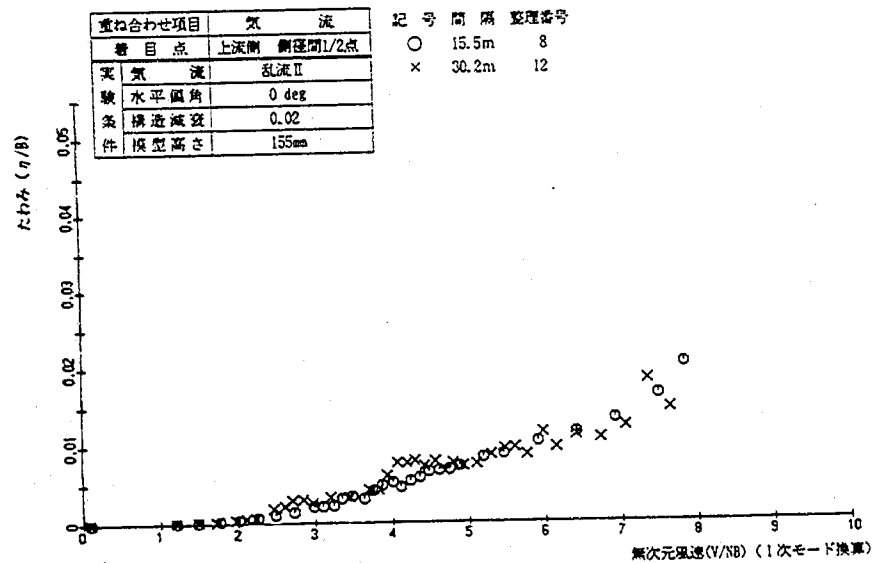
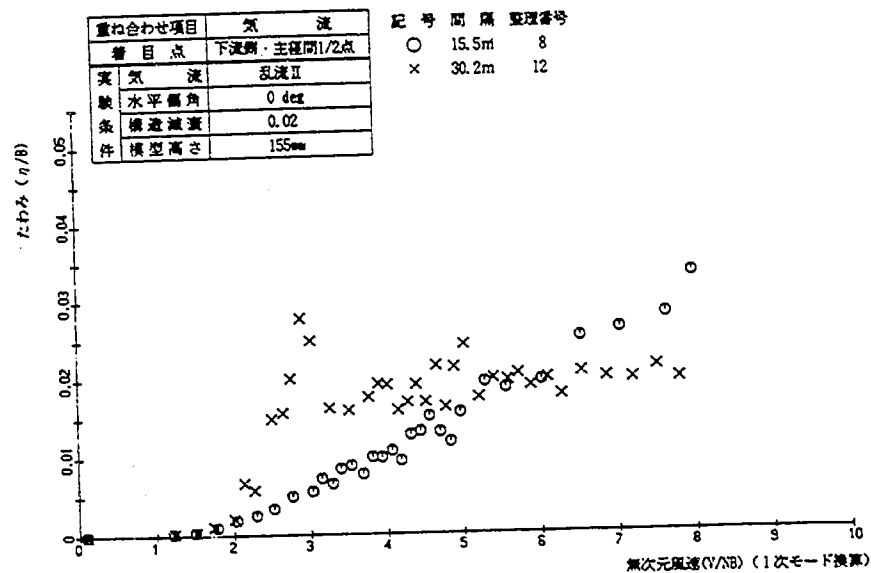
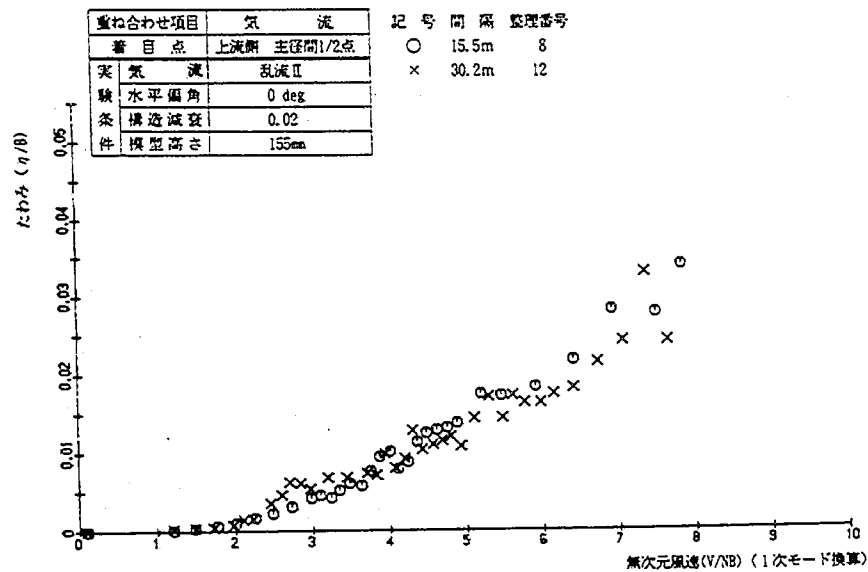
付図-3.7 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)



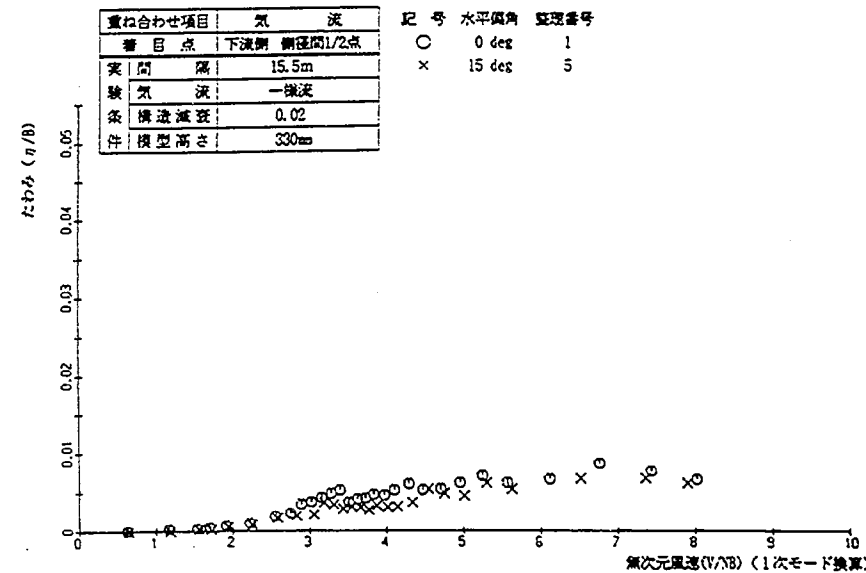
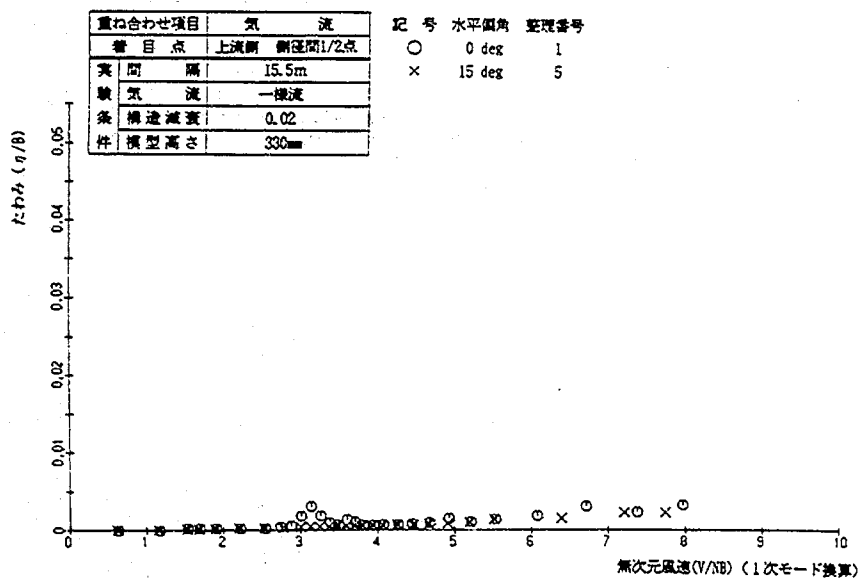
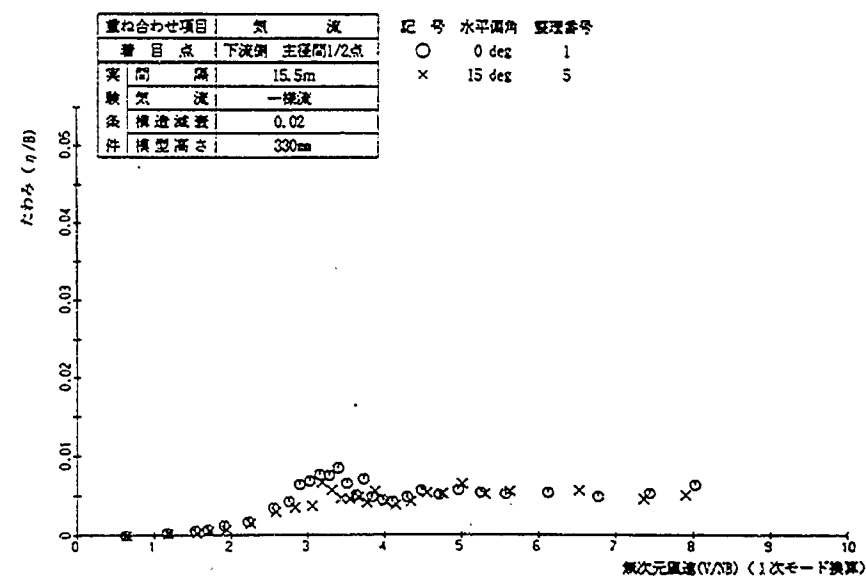
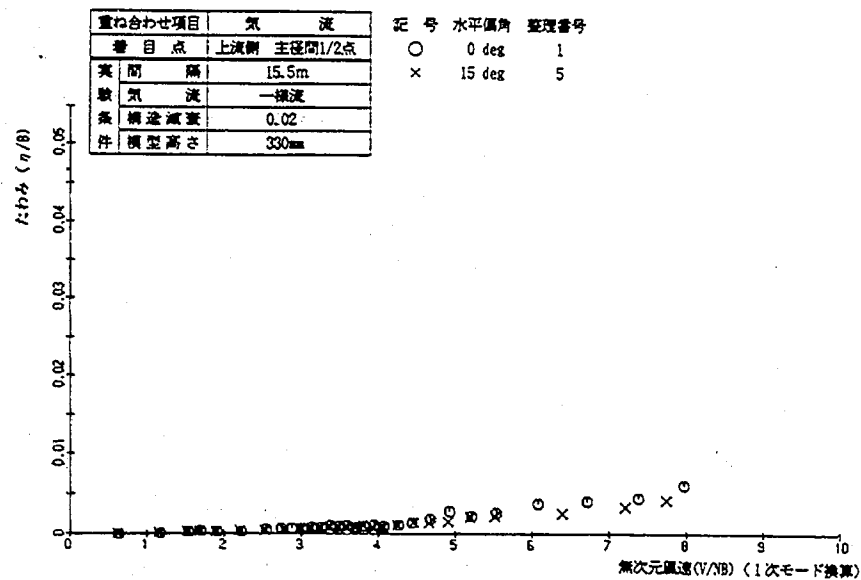
付図-3.8 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)



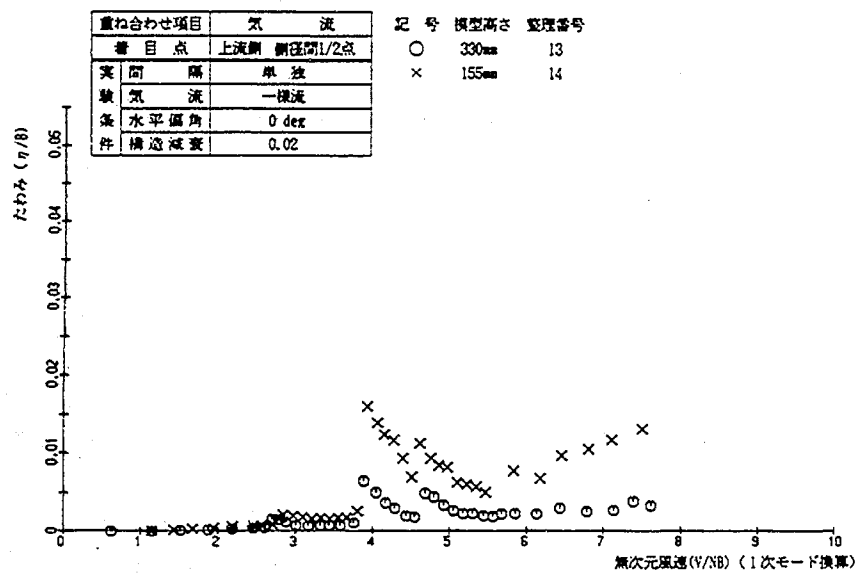
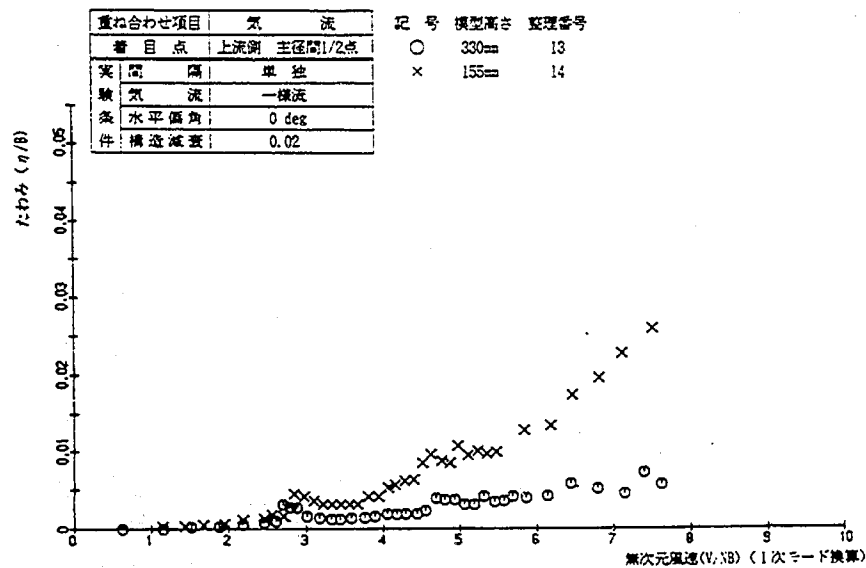
付図-3.9 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)



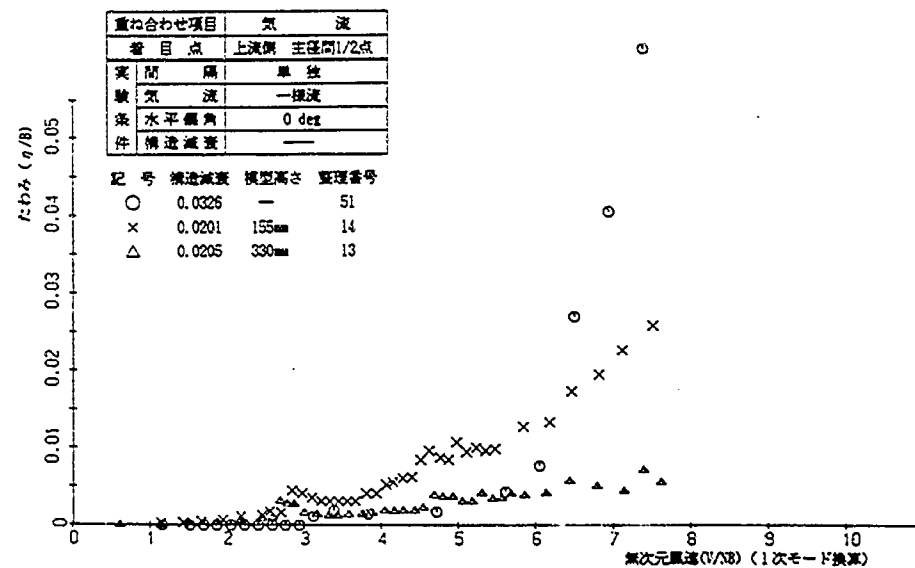
付図-3.10 風速-振幅曲線 (間隔の違いによる重ね合わせ)



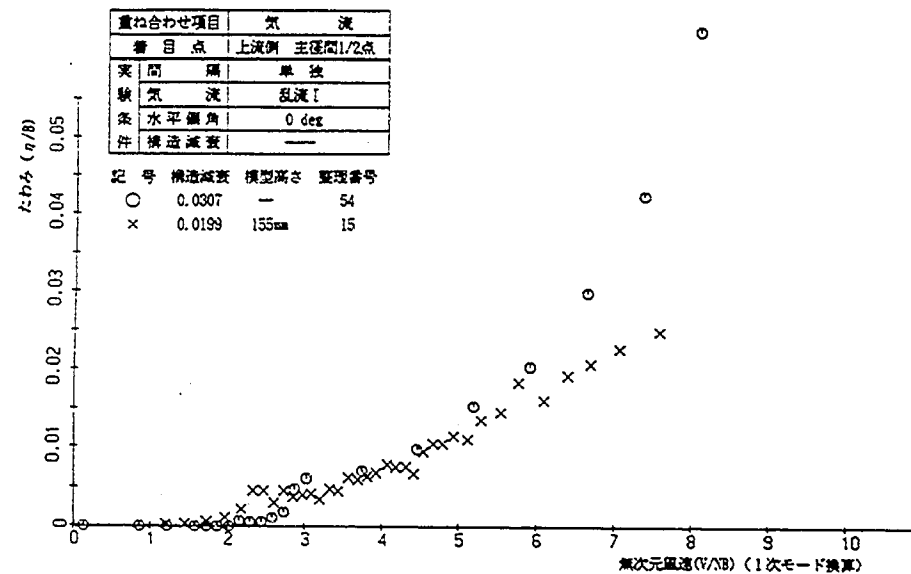
付図-3.11 風速-振幅曲線 (水平偏角の違いによる重ね合わせ)



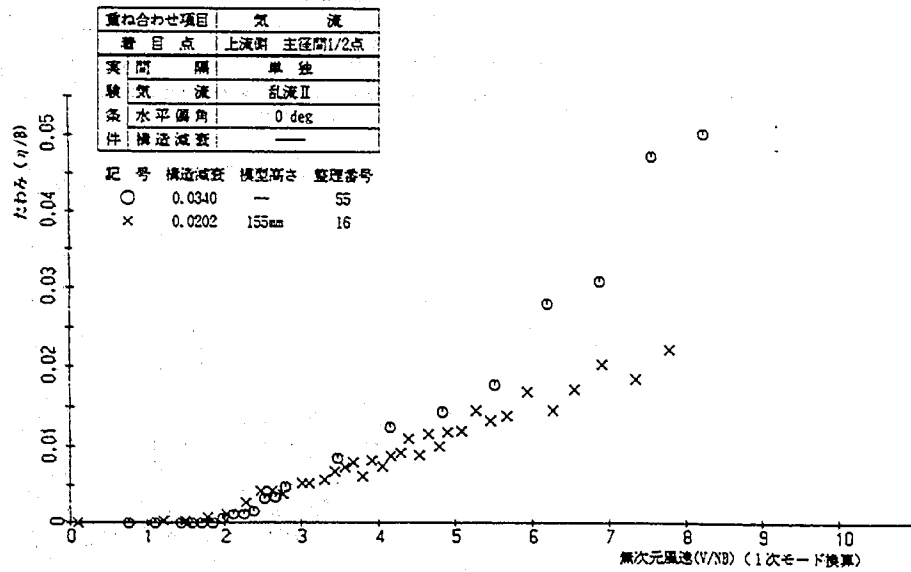
付図-3.12 風速-振幅曲線 (模型高さの違いによる重ね合わせ)



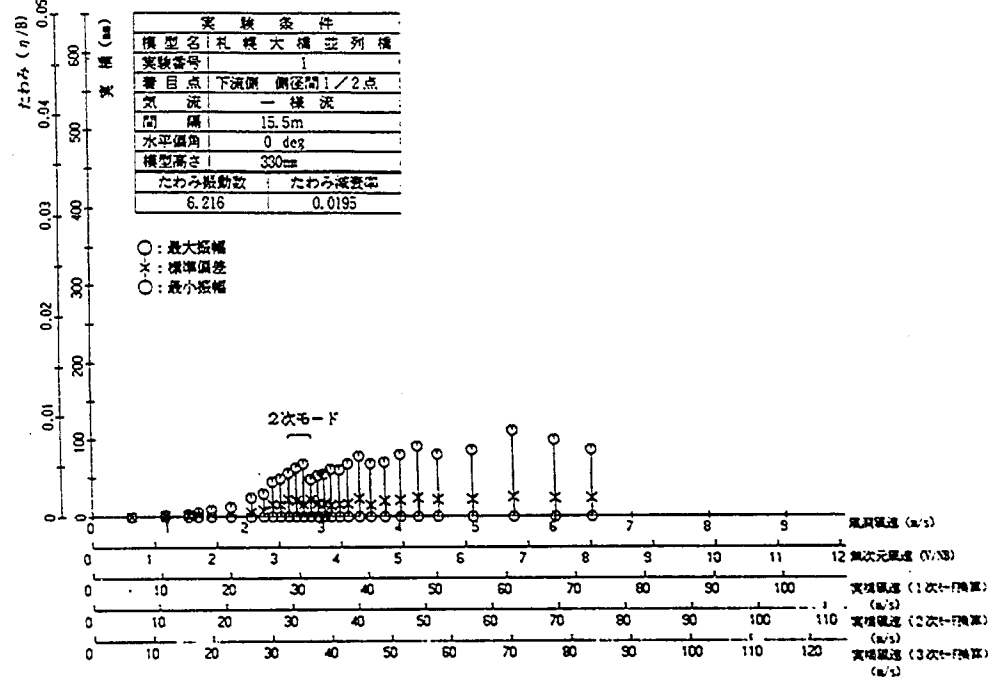
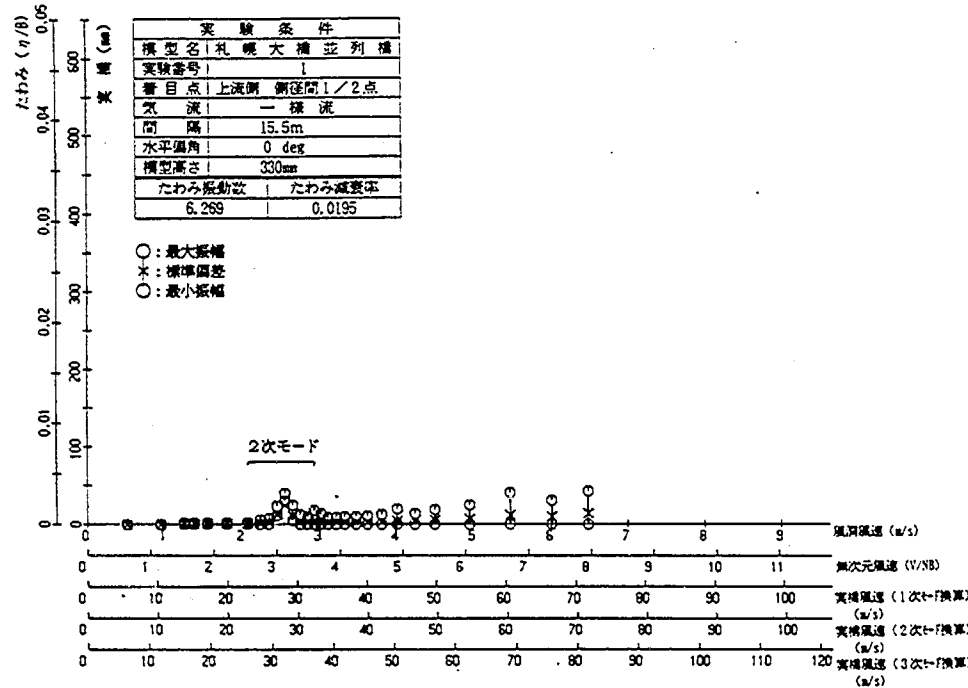
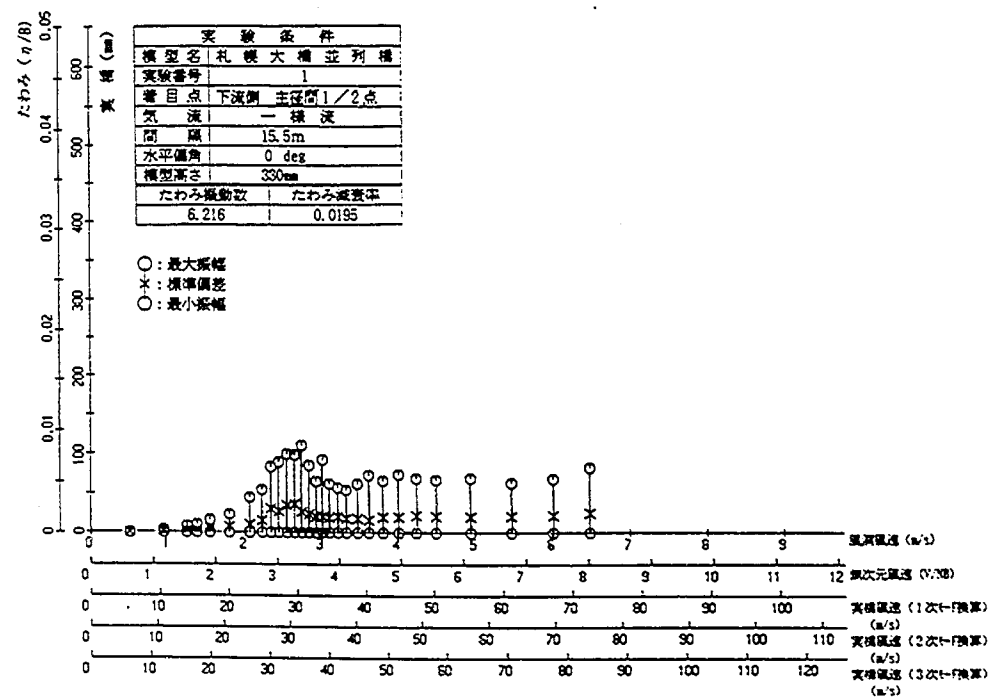
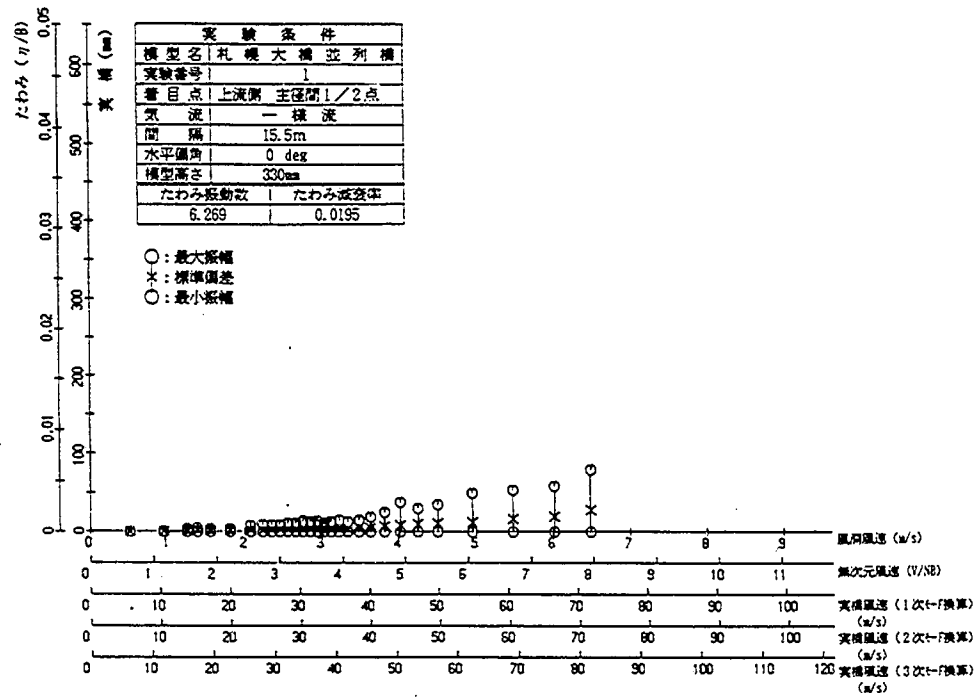
付図-3.13 風速-振幅曲線 (2次元模型と3次元模型の重ね合わせ)



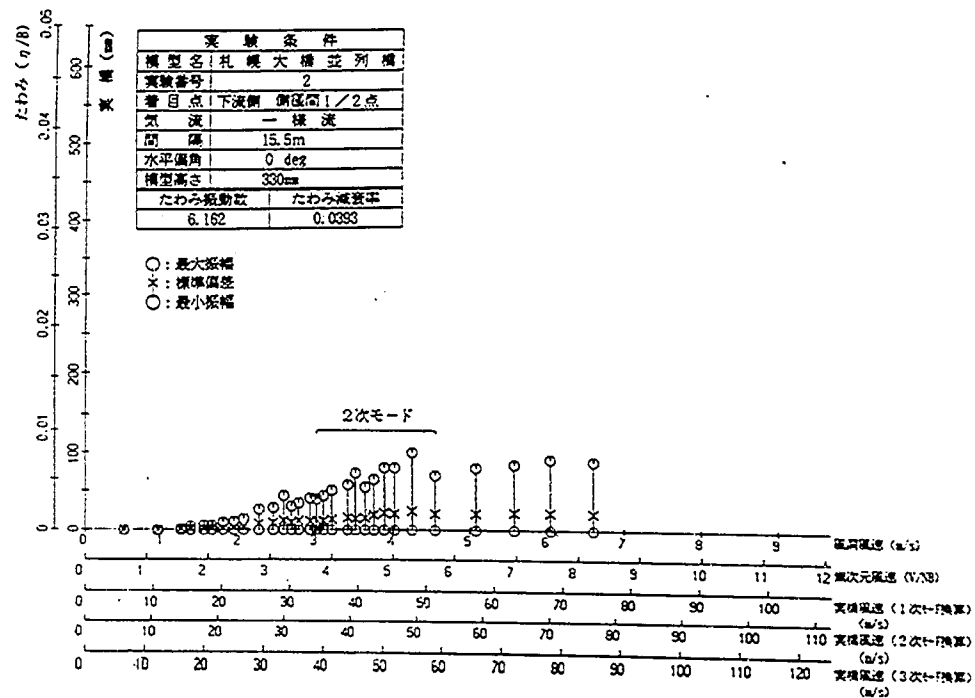
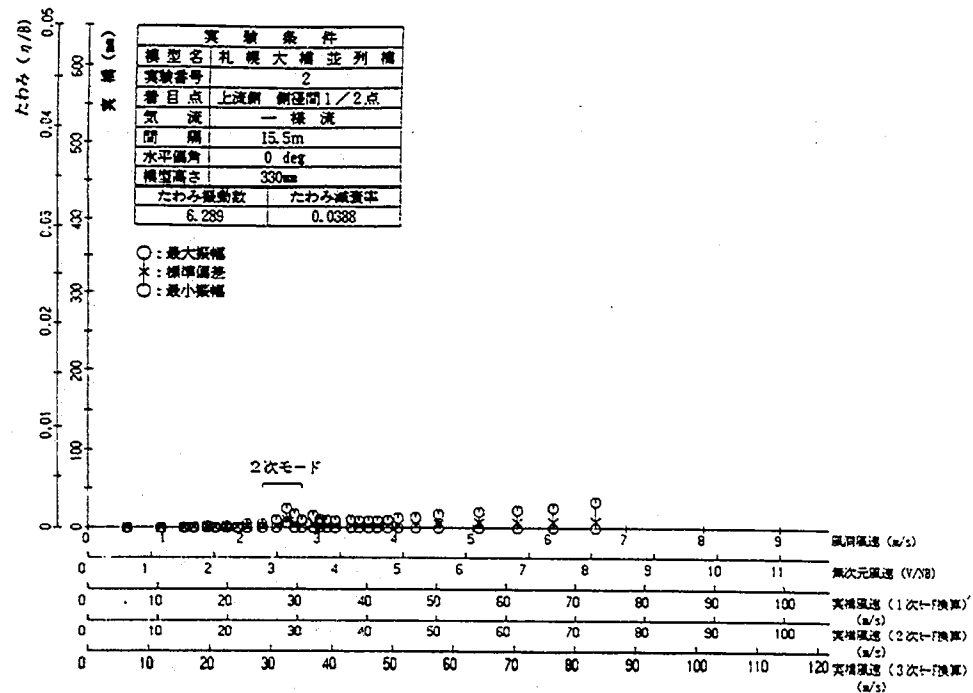
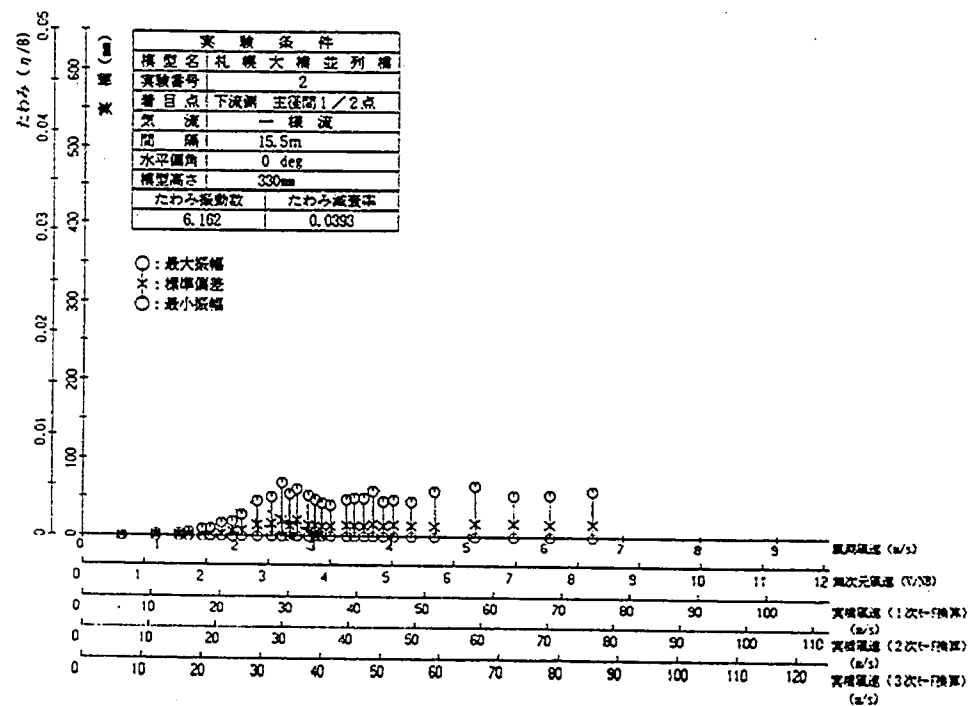
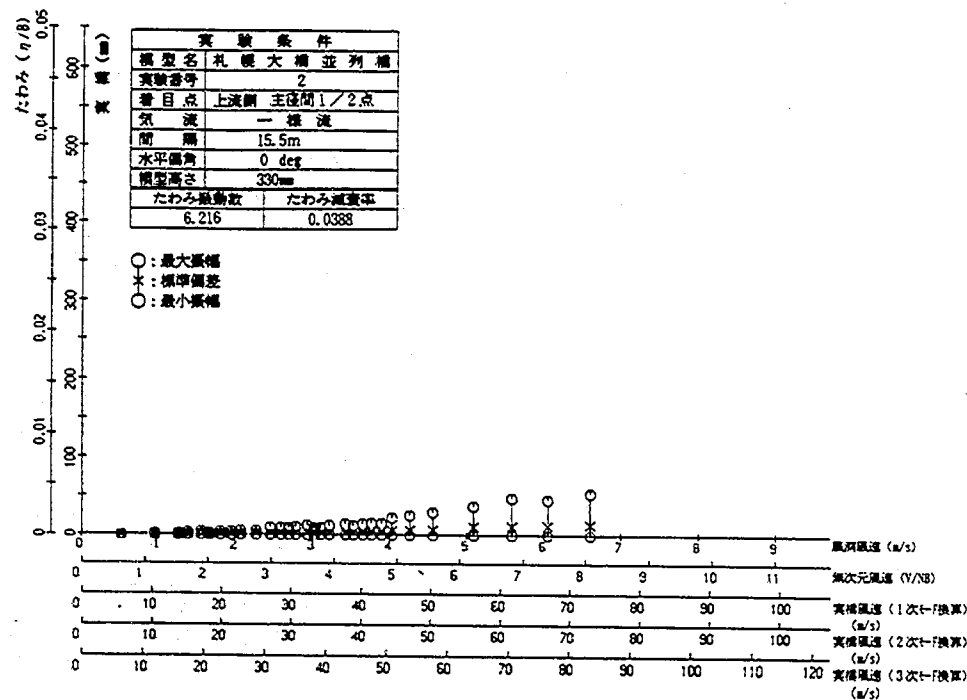
付図-3.14 風速-振幅曲線 (2次元模型と3次元模型の重ね合わせ)



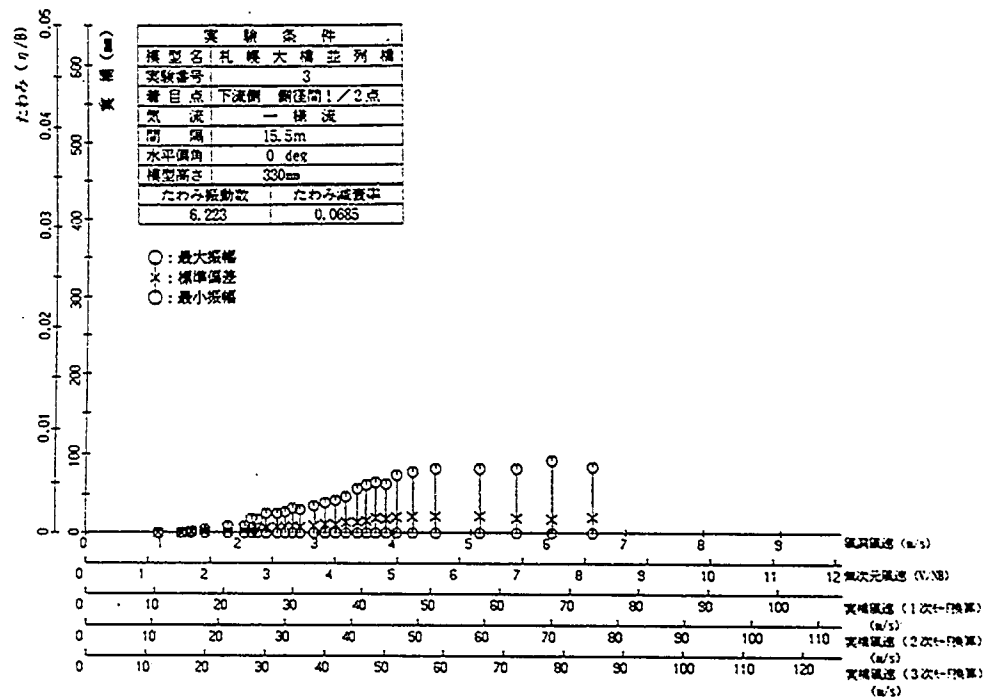
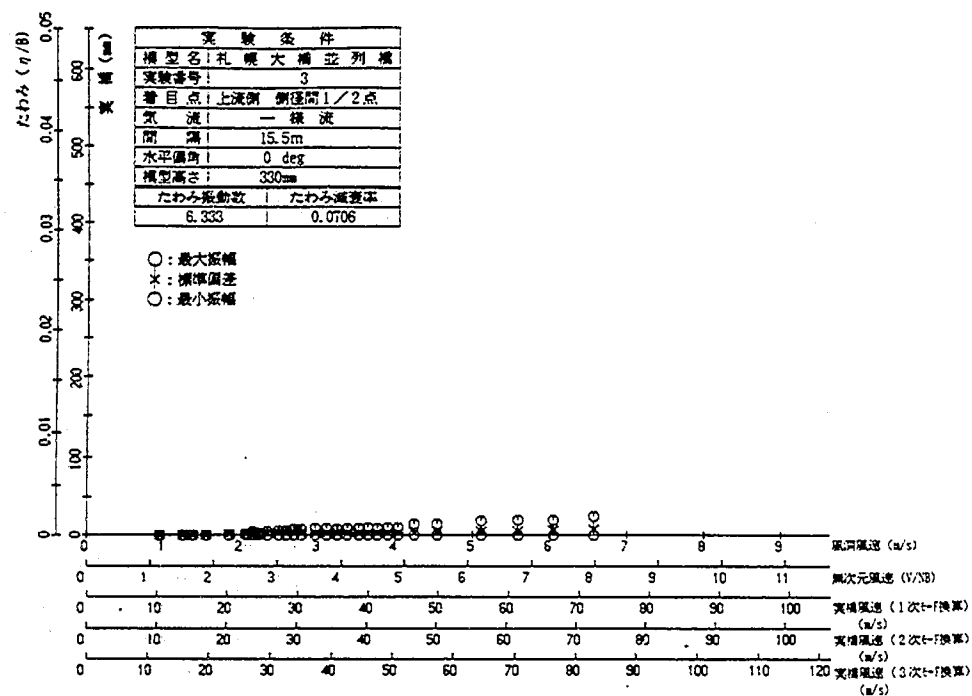
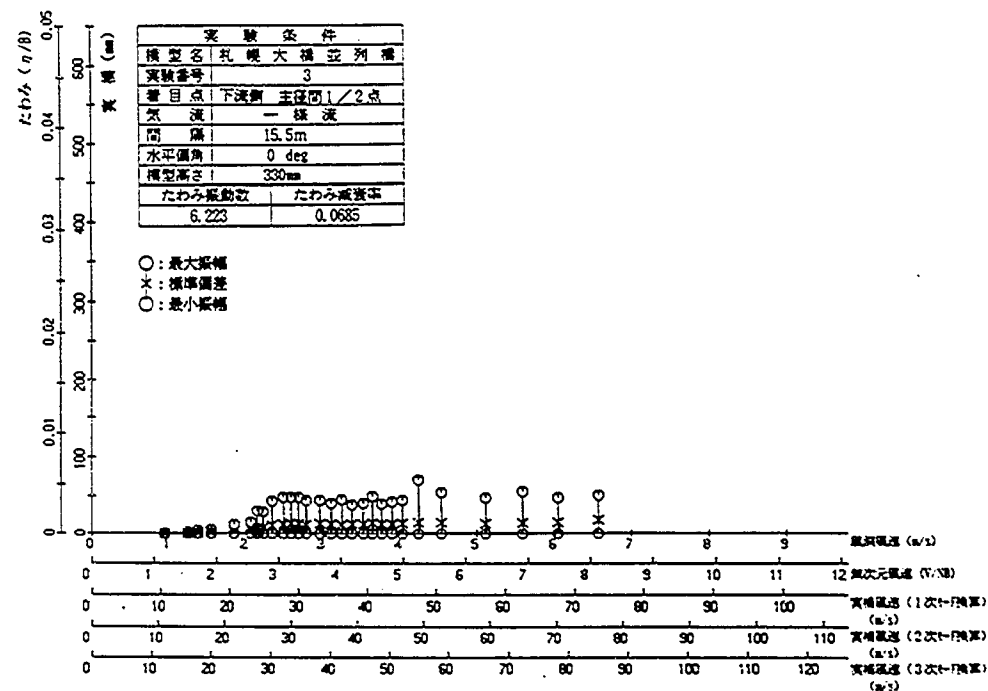
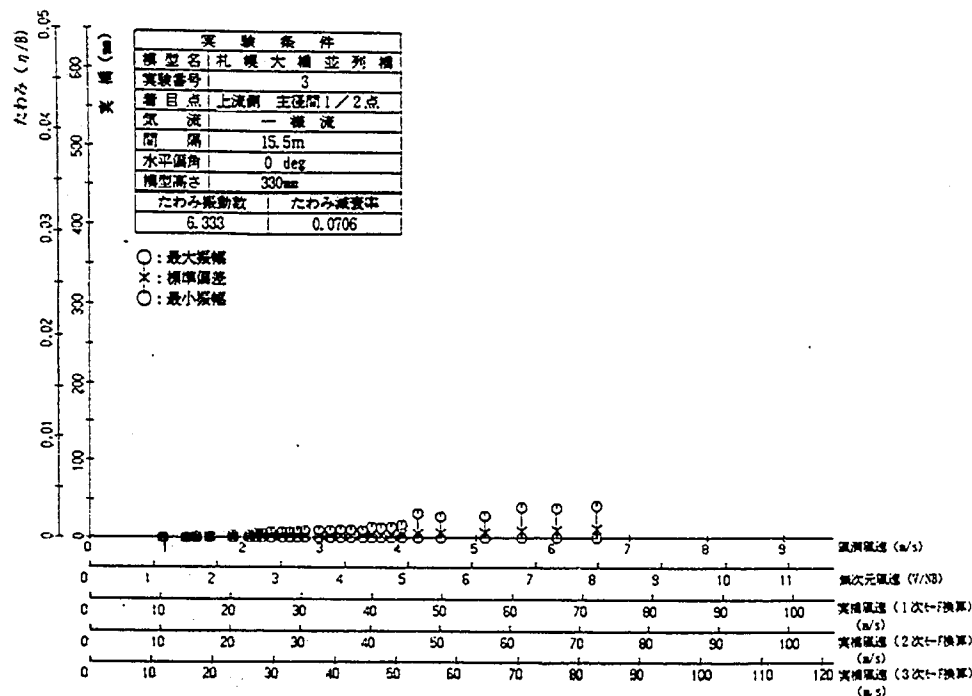
付図-3.15 風速-振幅曲線 (2次元模型と3次元模型の重ね合わせ)



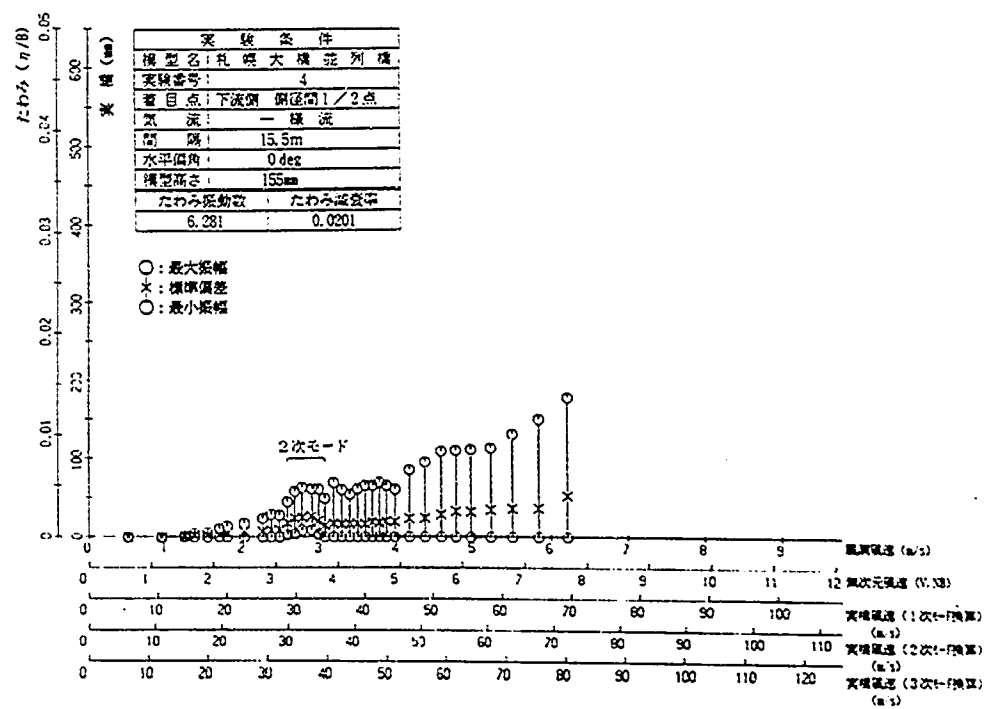
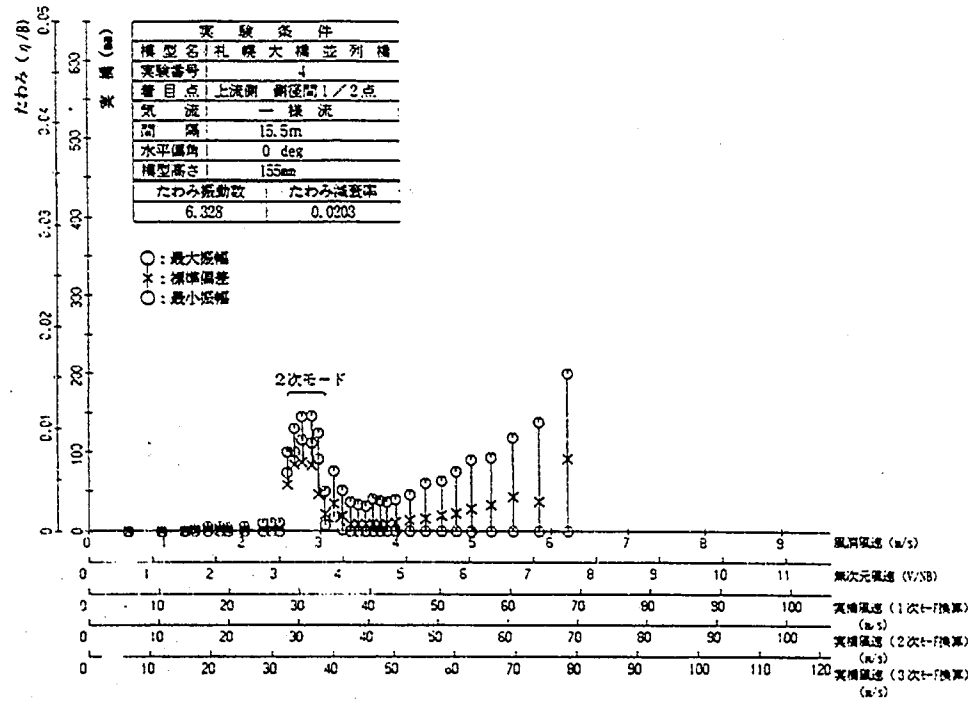
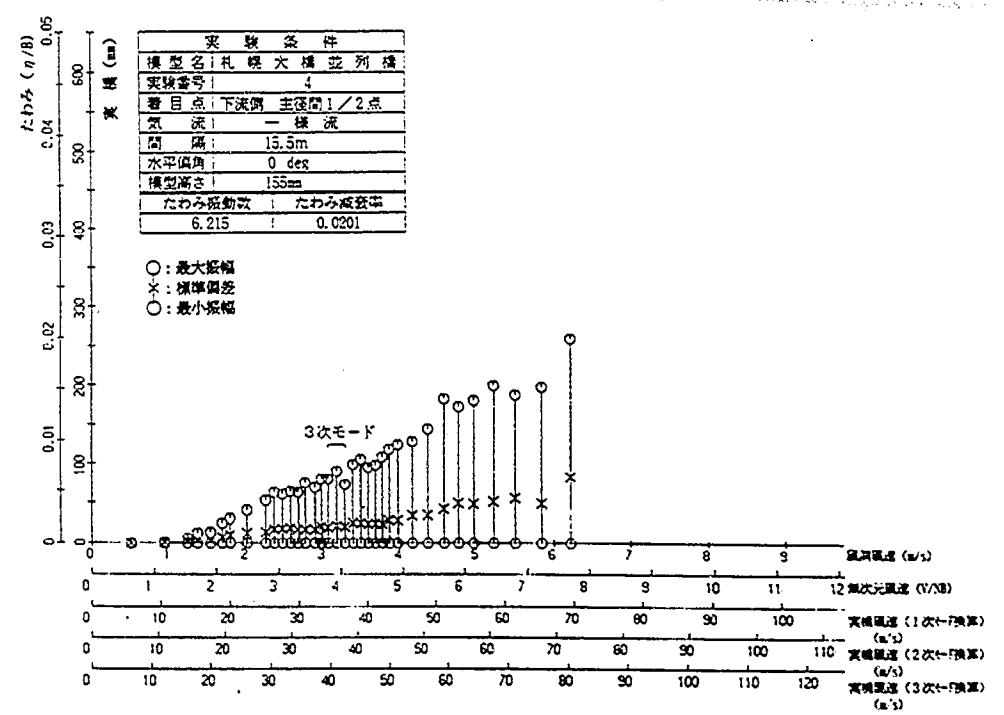
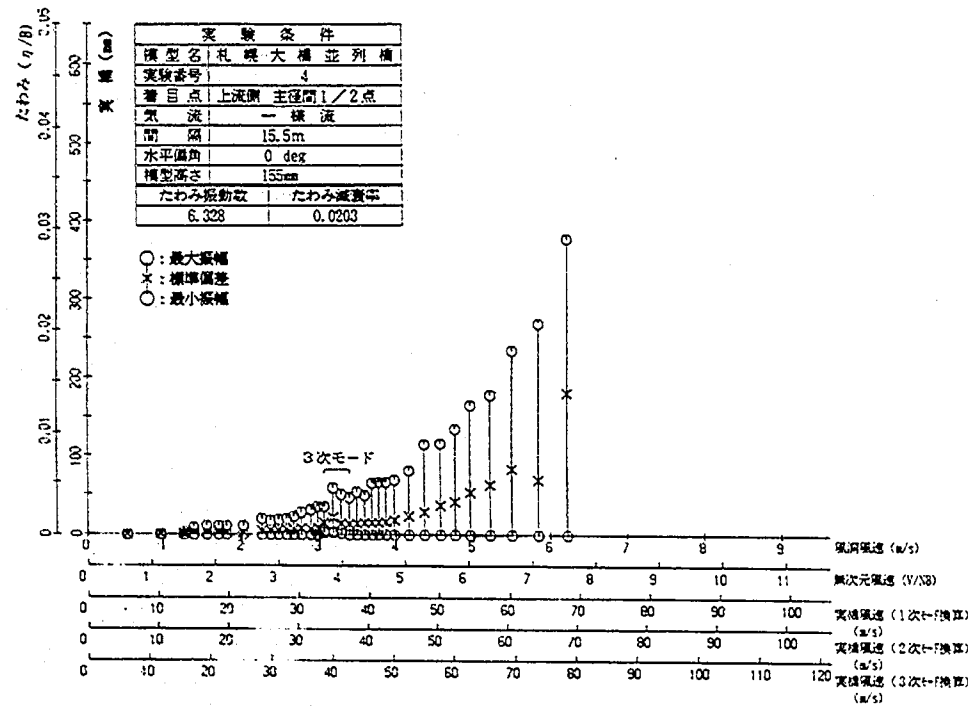
付図-4.1 風速-振幅曲線



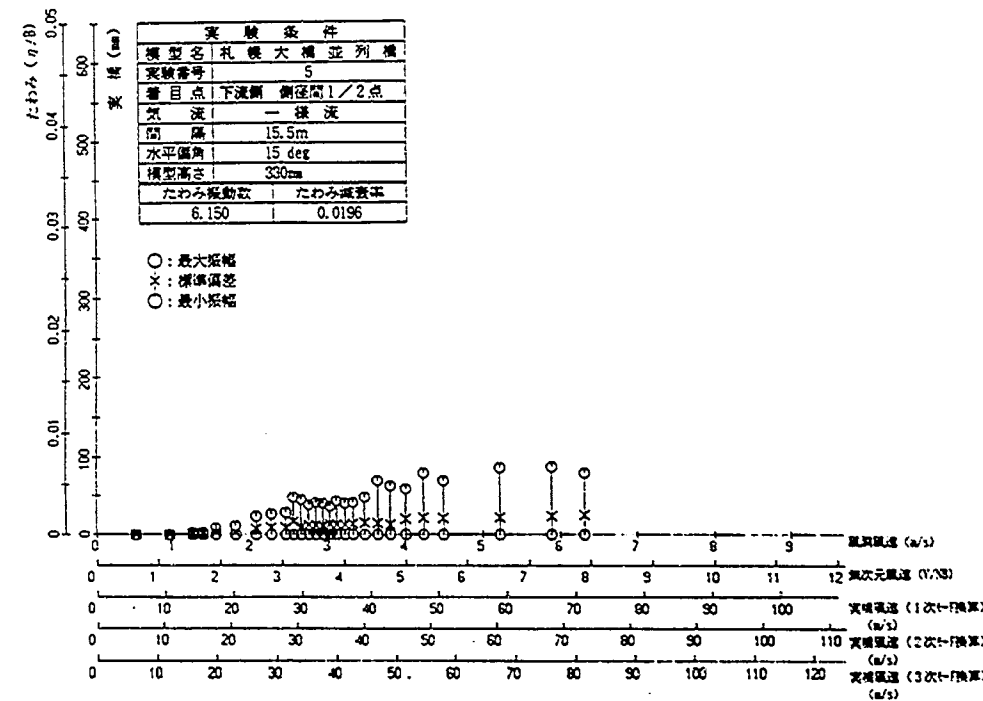
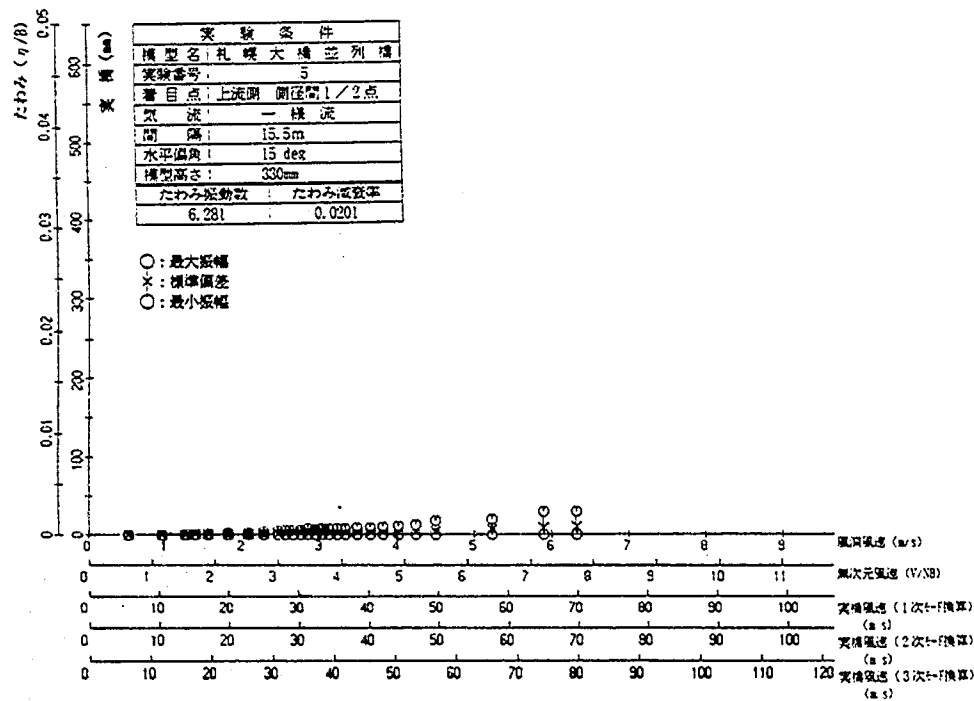
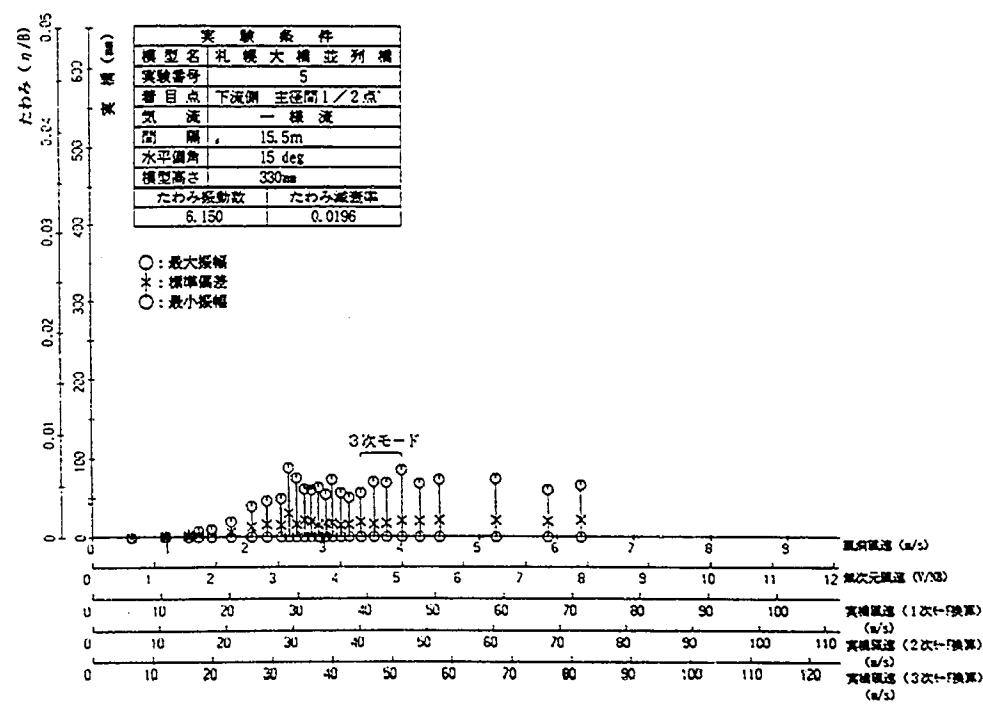
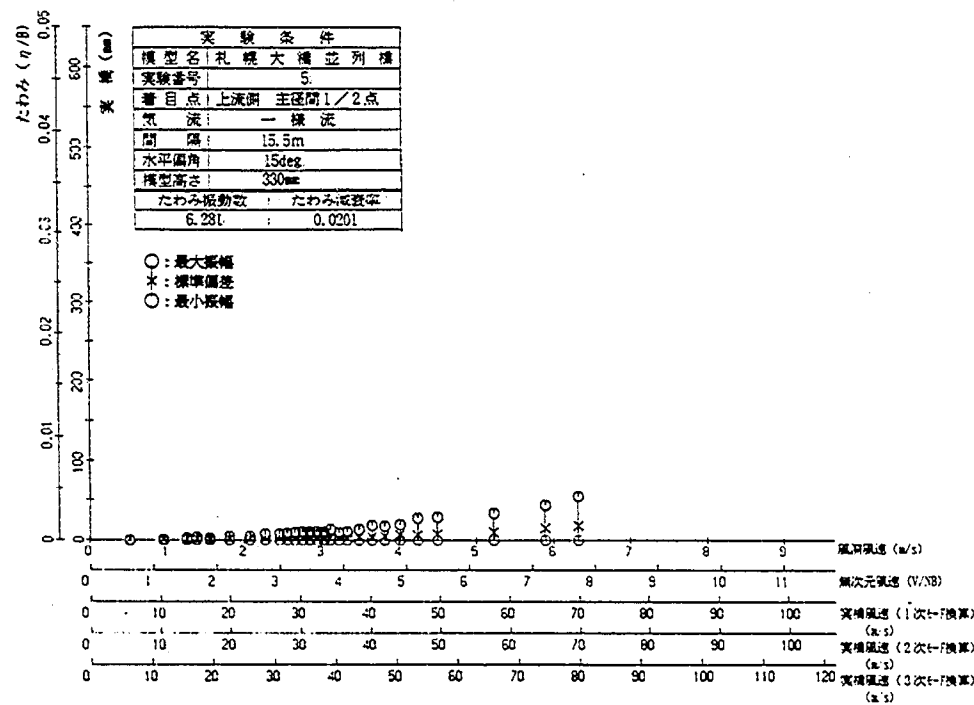
付図-4.2 風速-振幅曲線



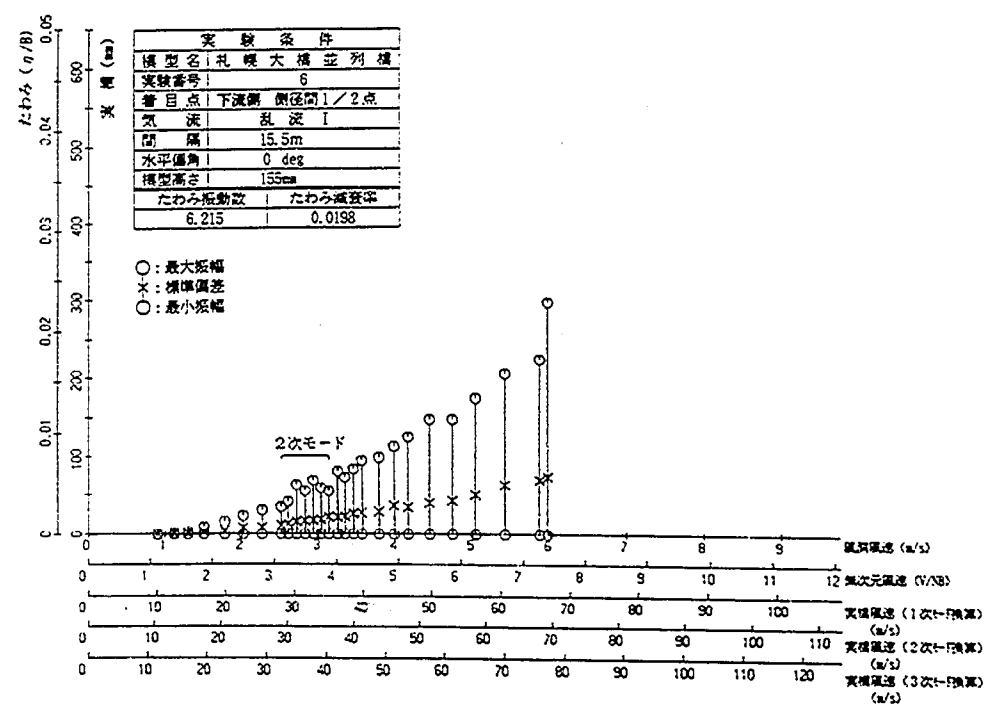
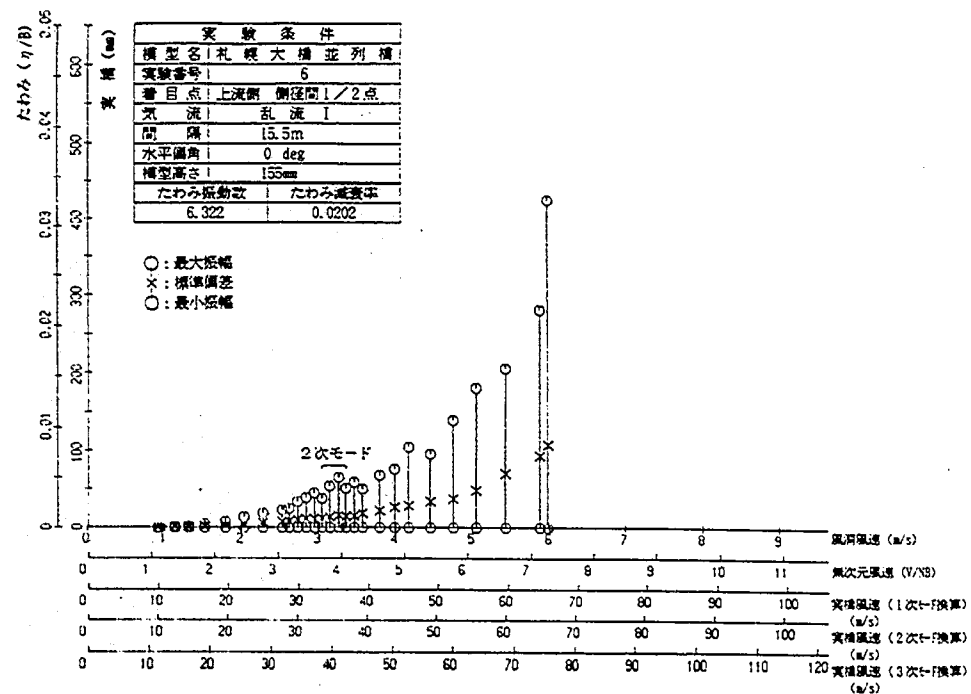
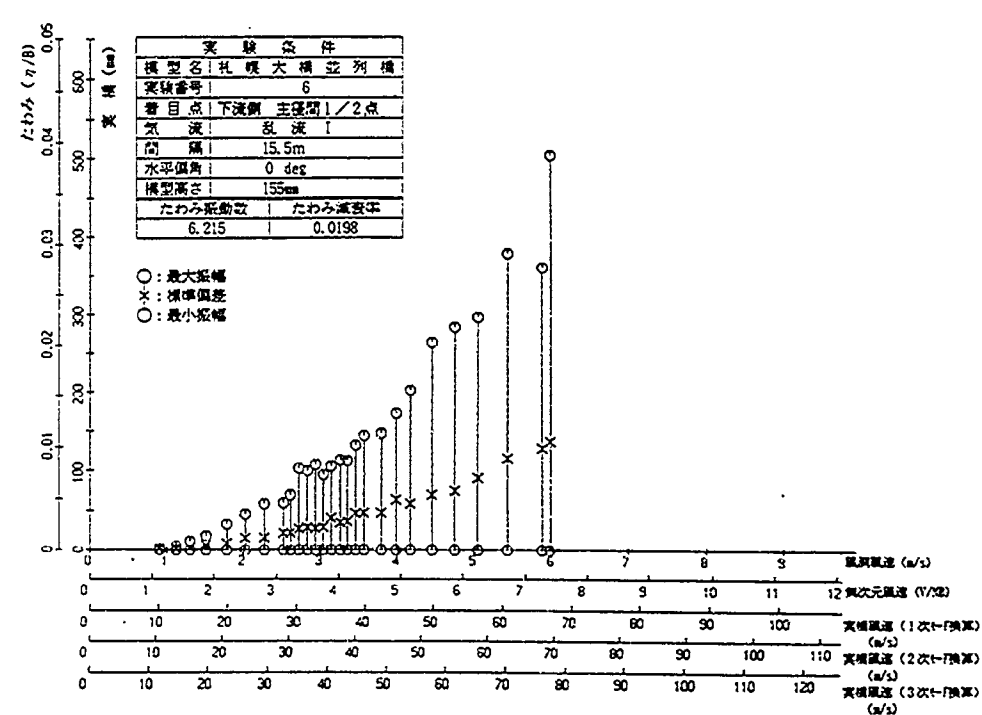
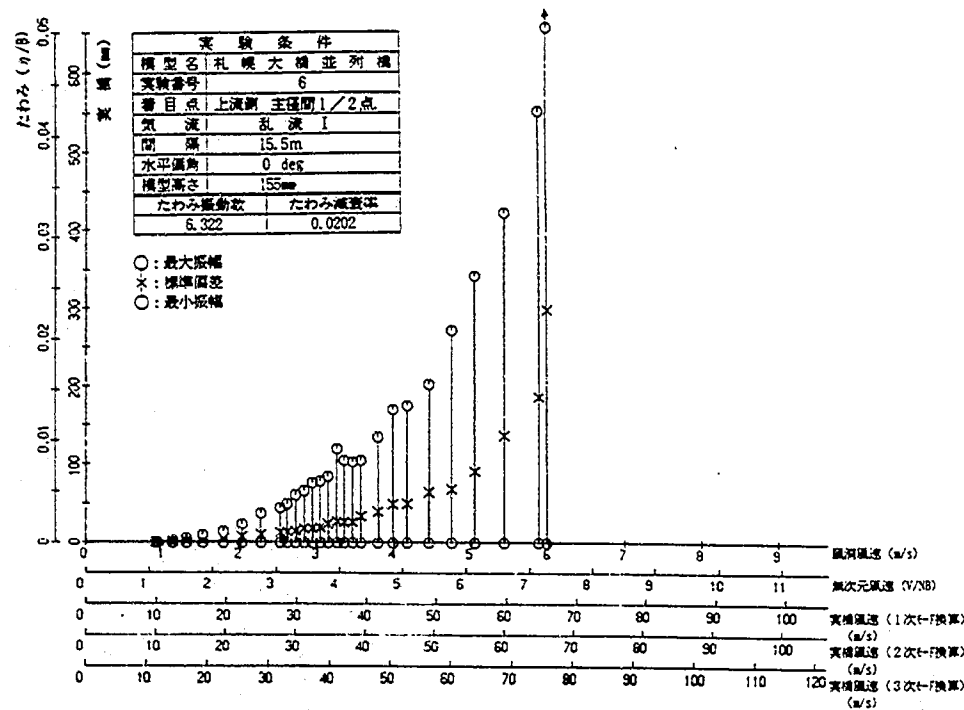
付図-4.3 風速-振幅曲線



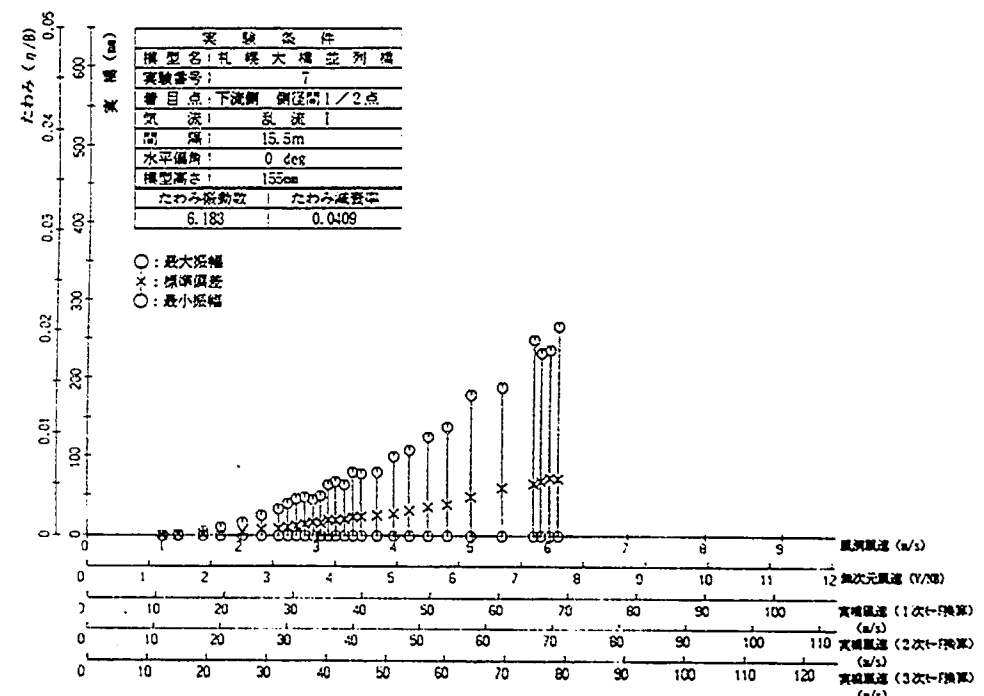
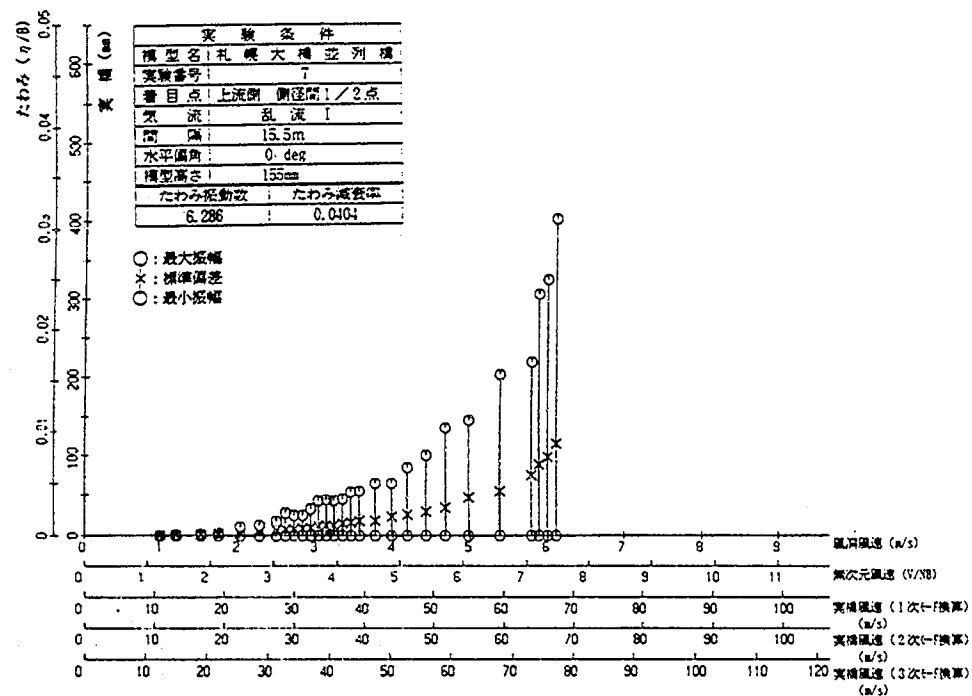
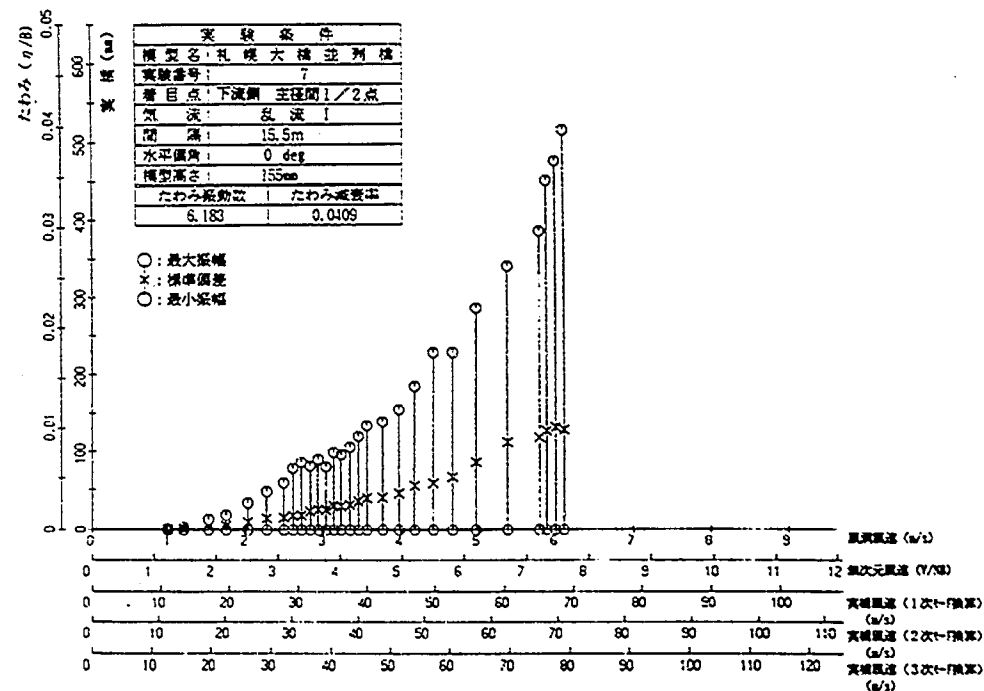
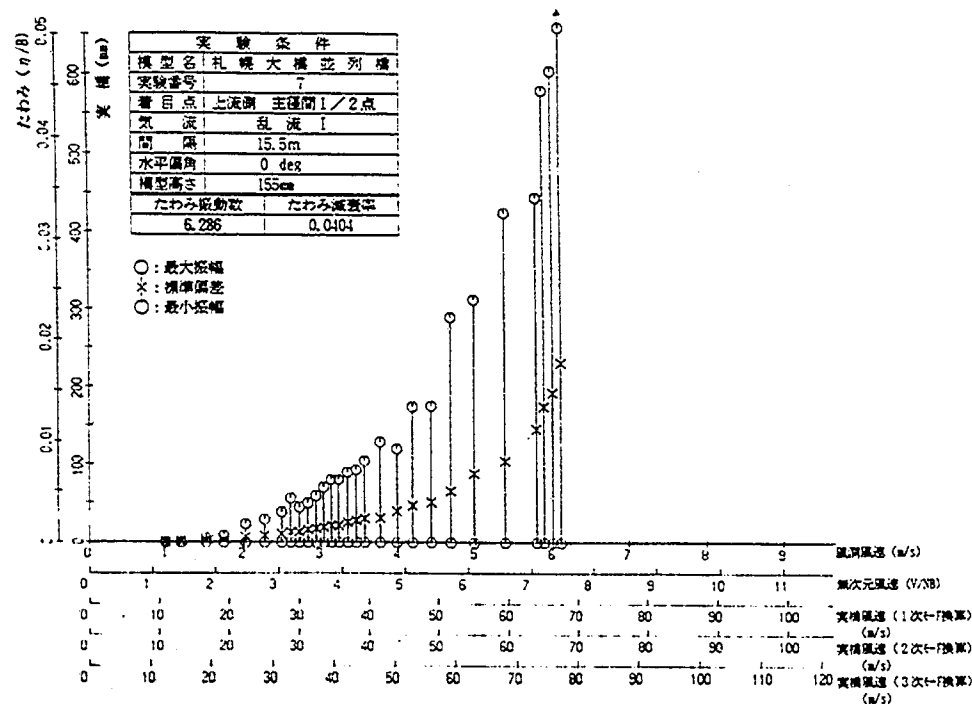
付図-4.4 風速-振幅曲線



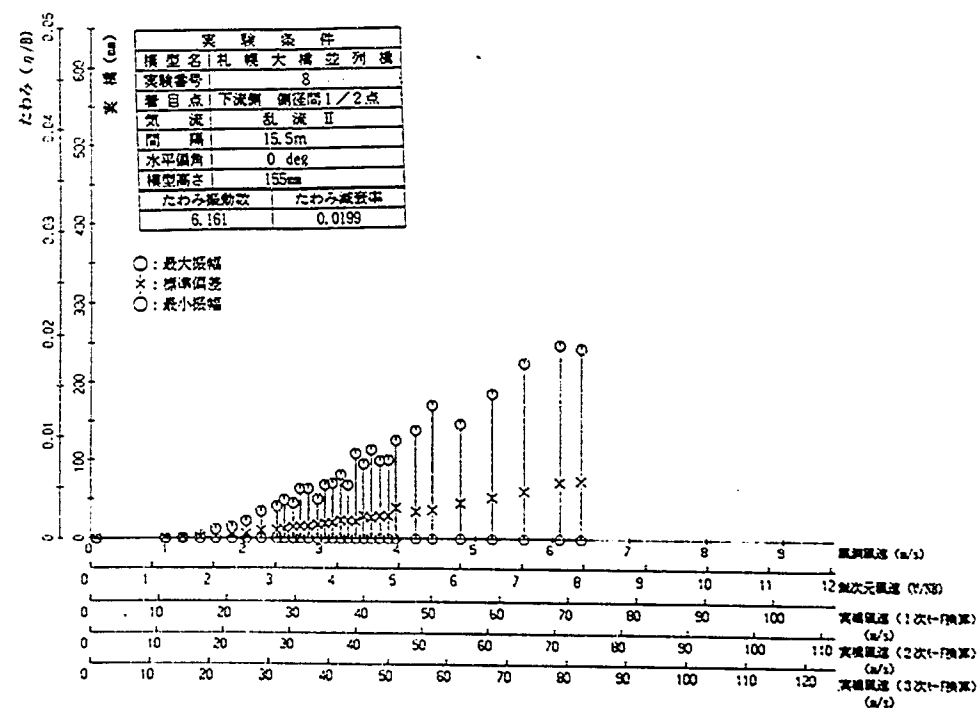
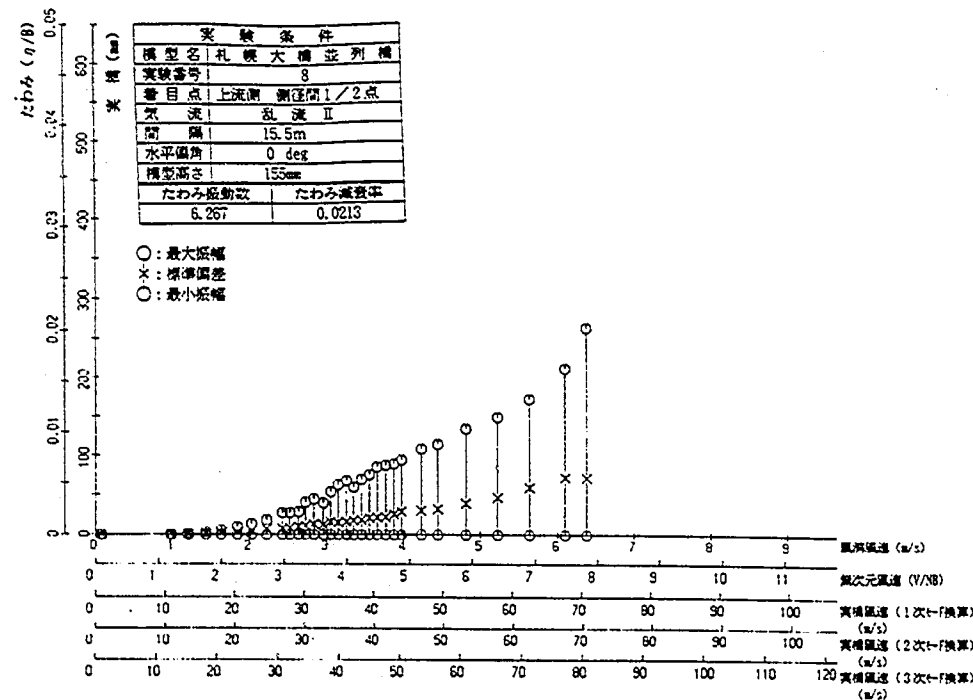
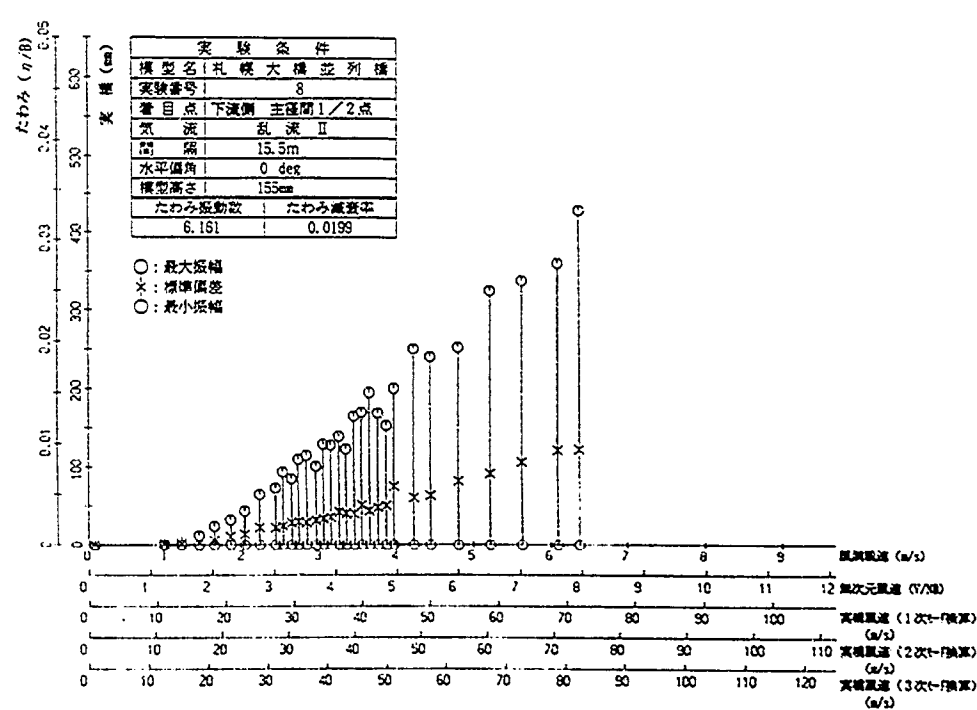
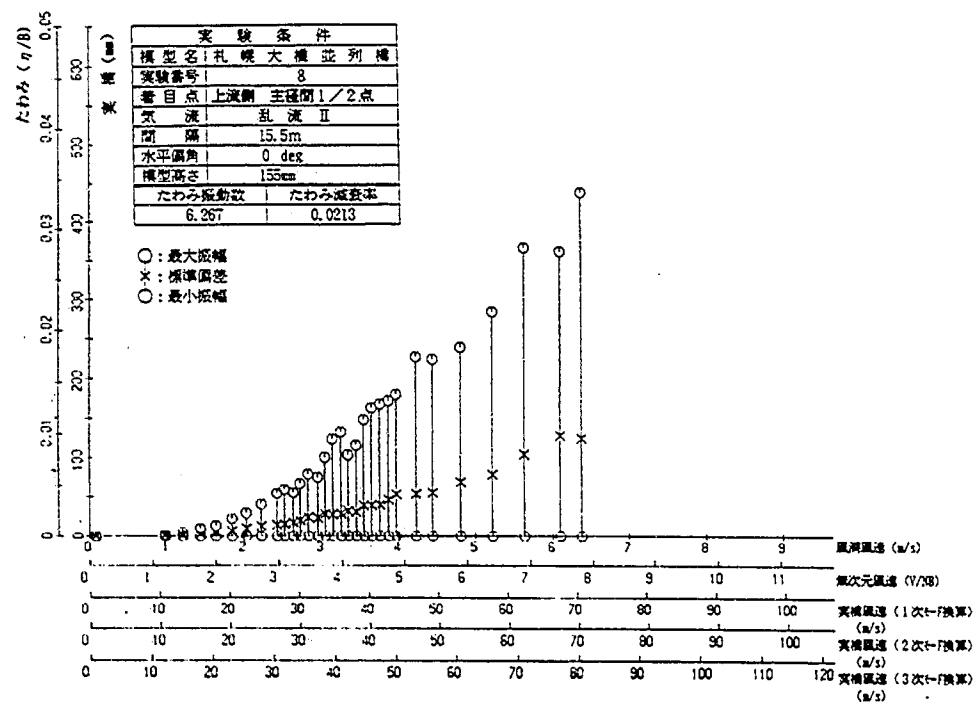
付図-4.5 風速-振幅曲線



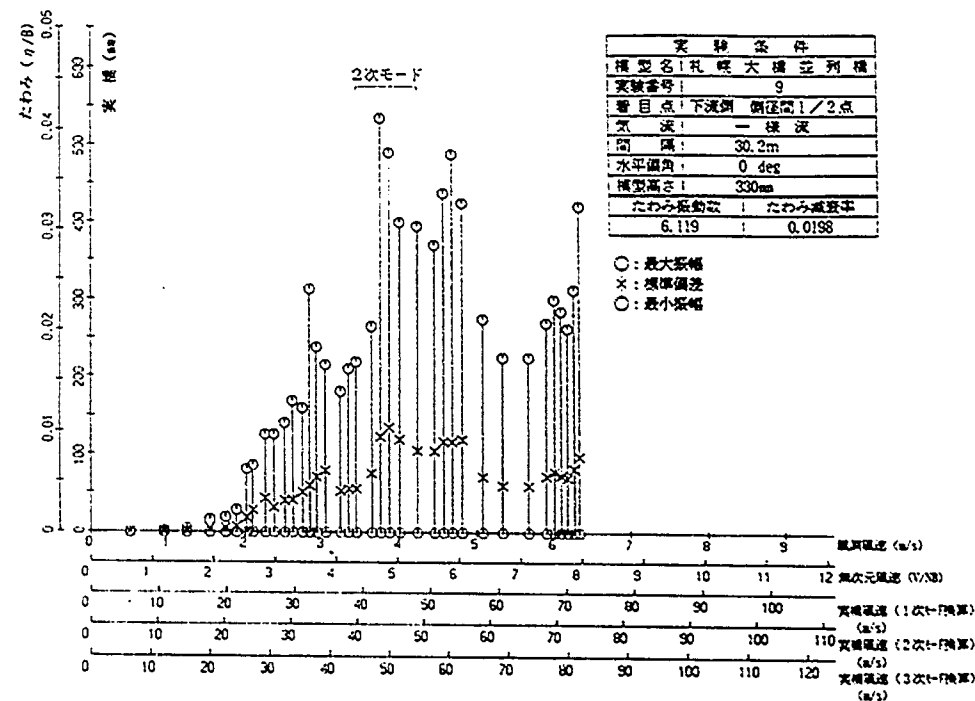
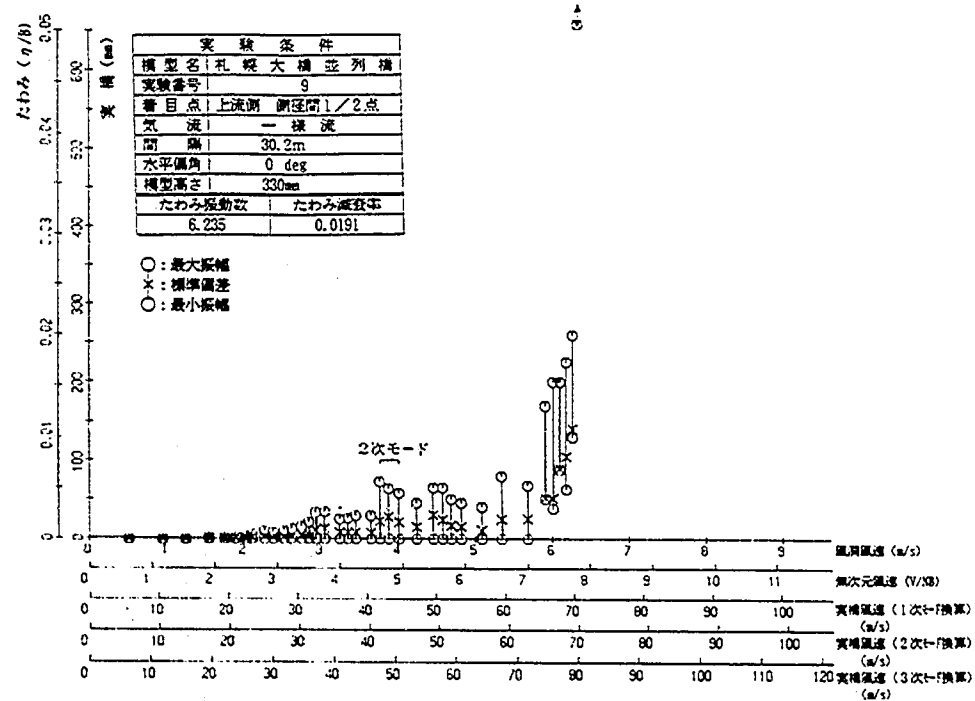
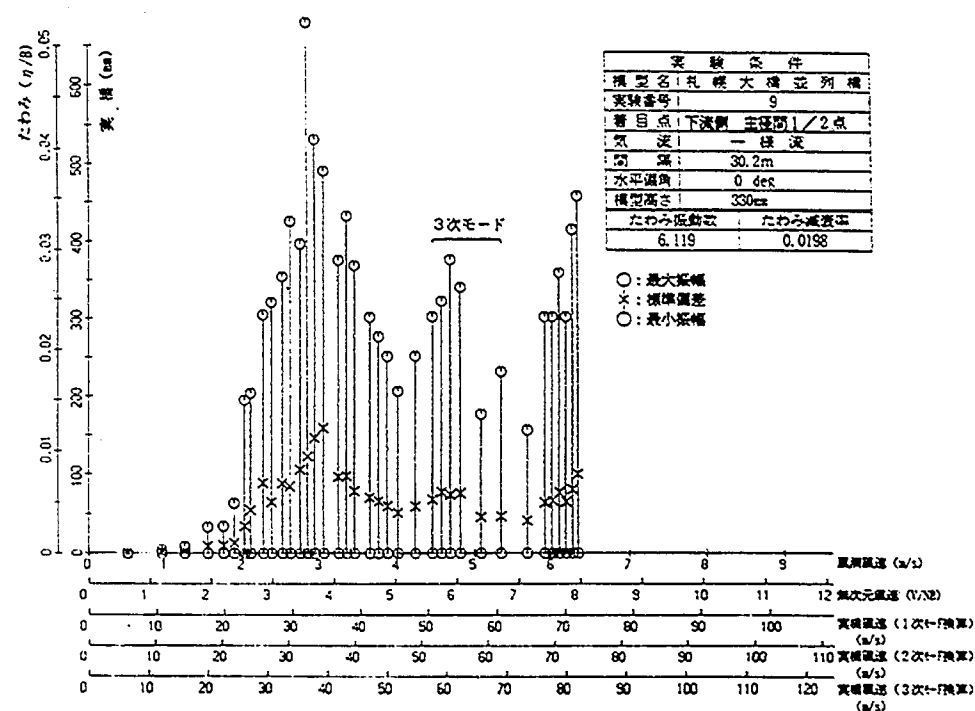
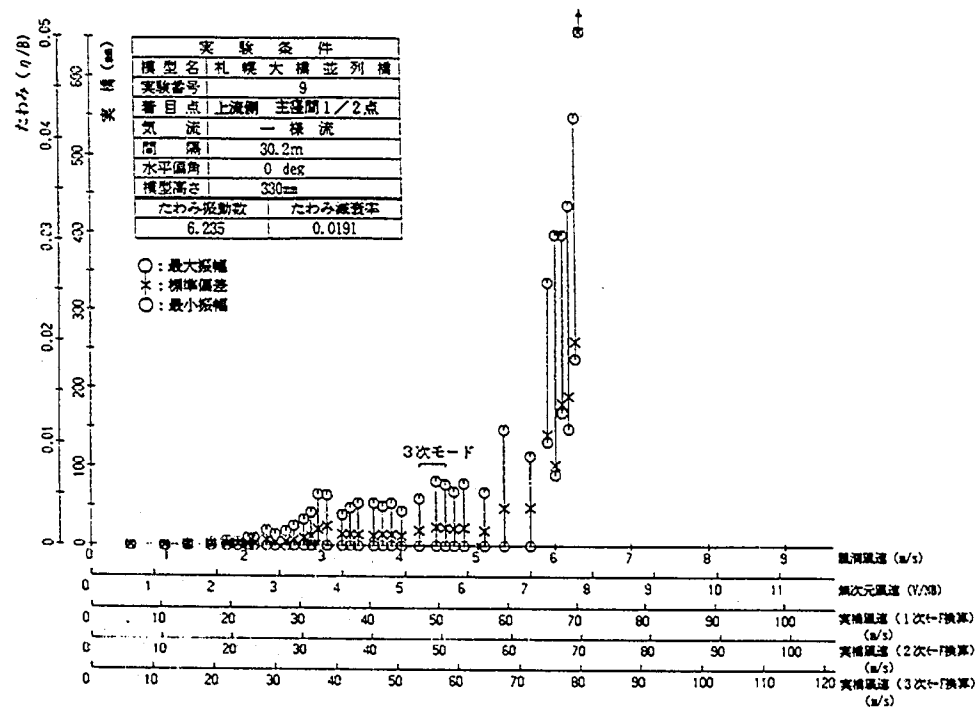
付図-4.6 風速-振幅曲線



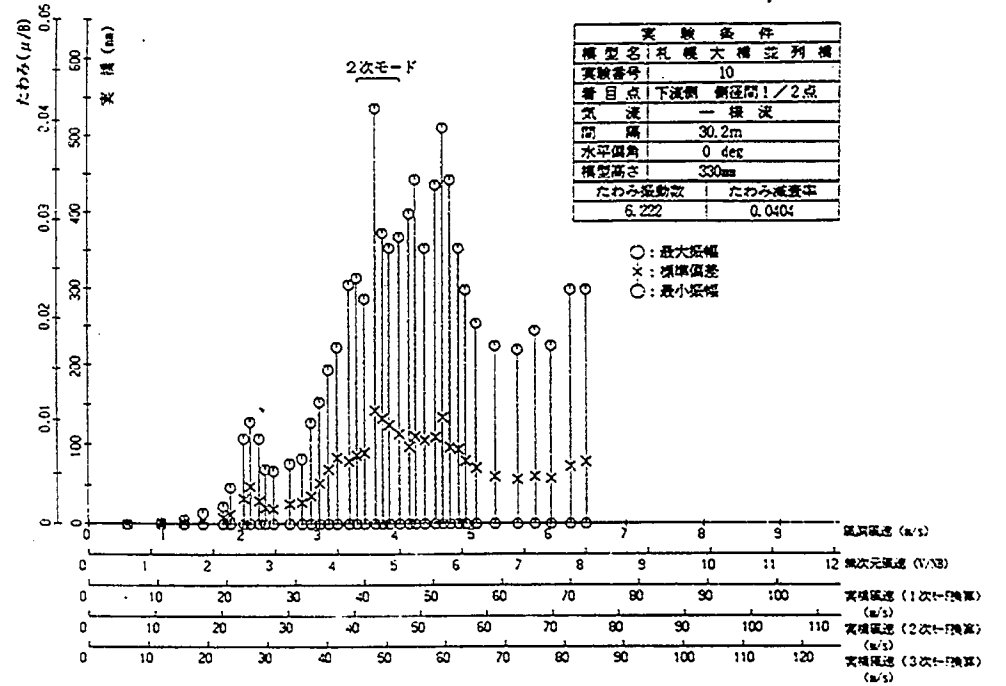
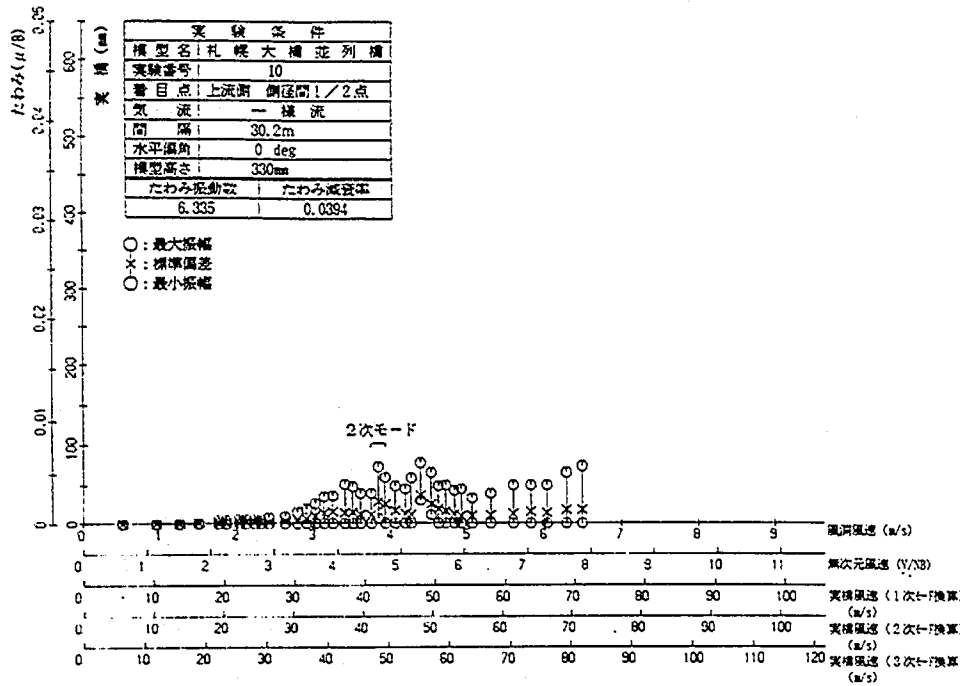
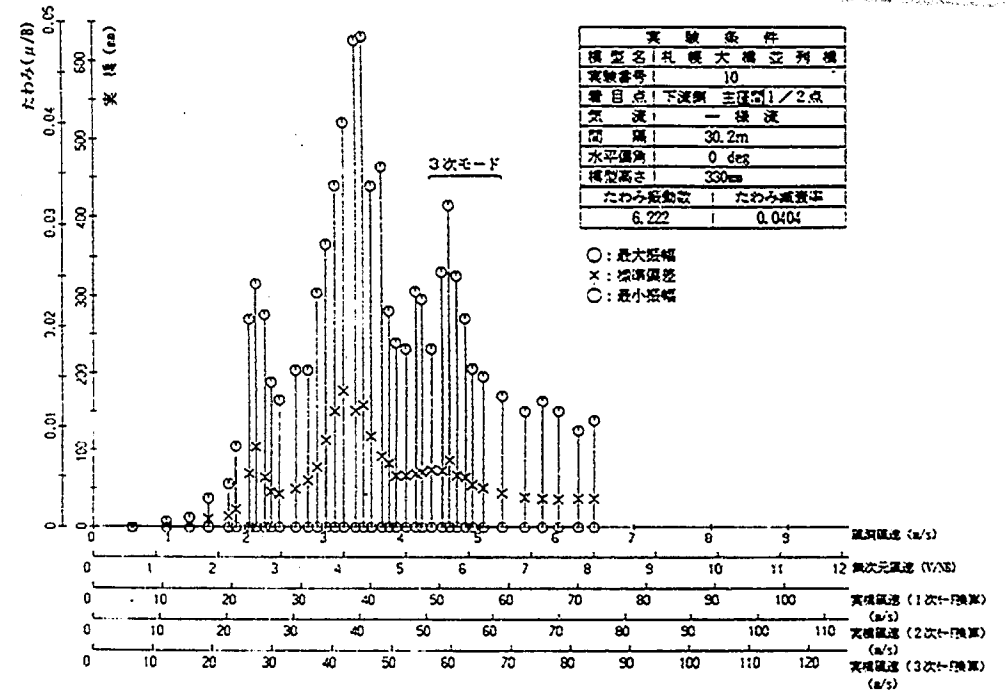
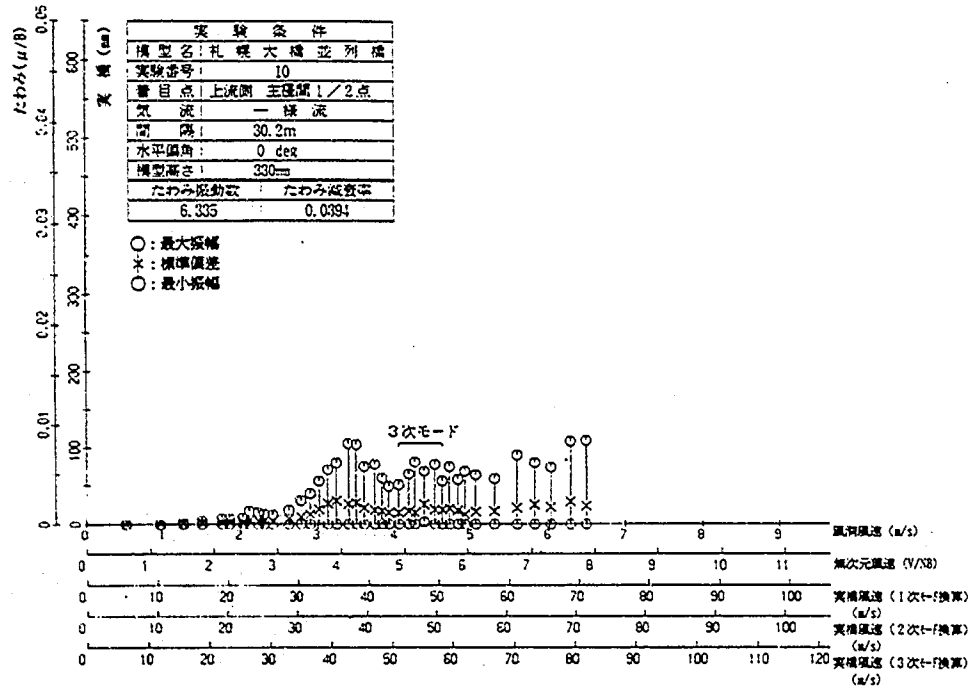
付図-4.7 風速-振幅曲線



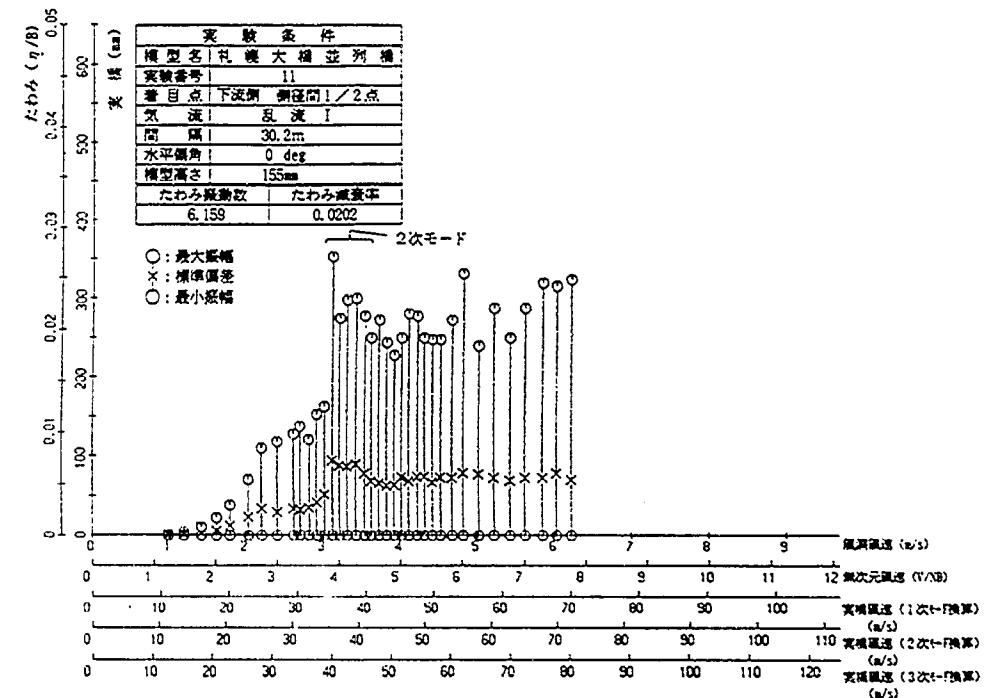
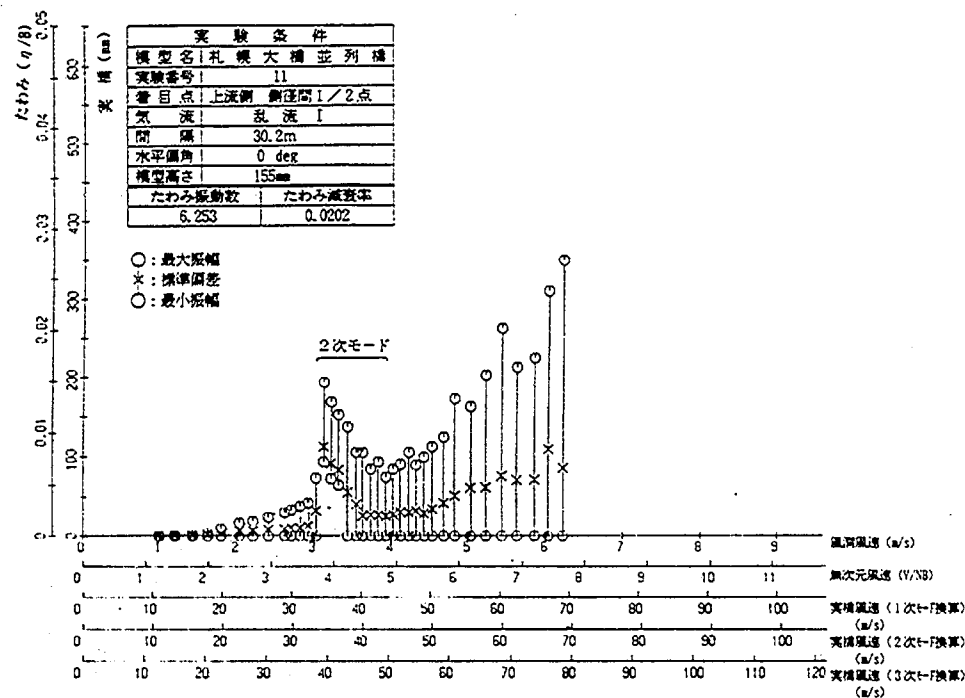
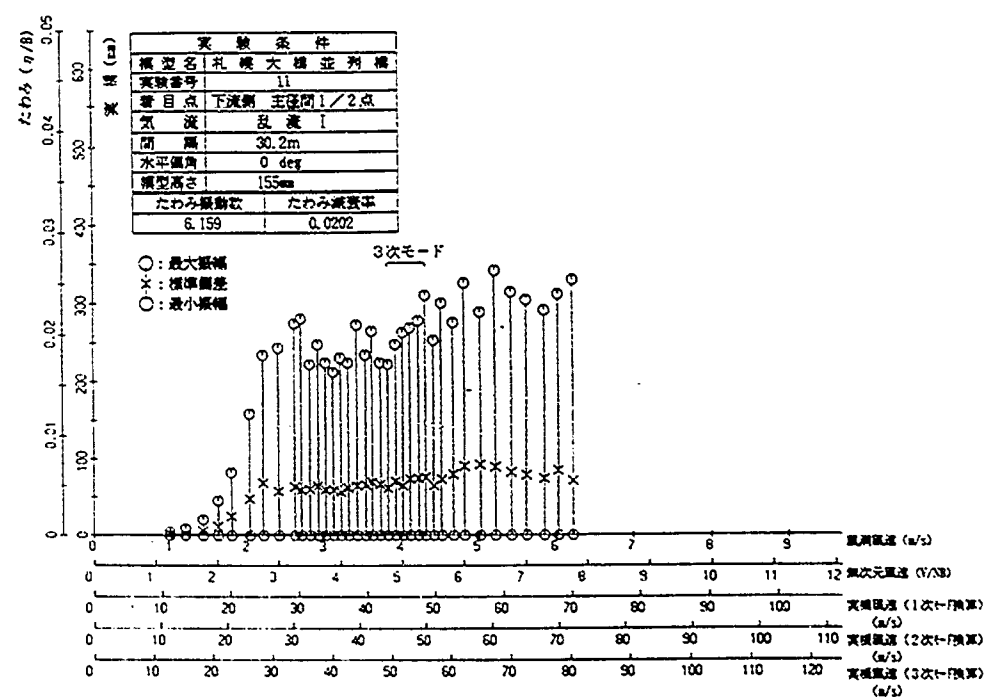
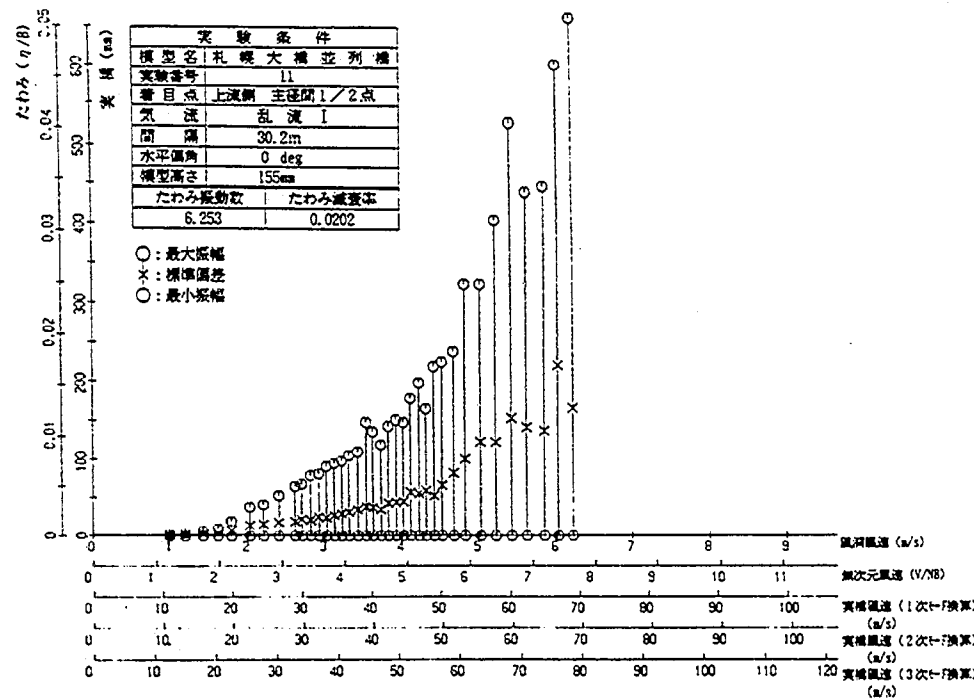
付図-4.8 風速-振幅曲線



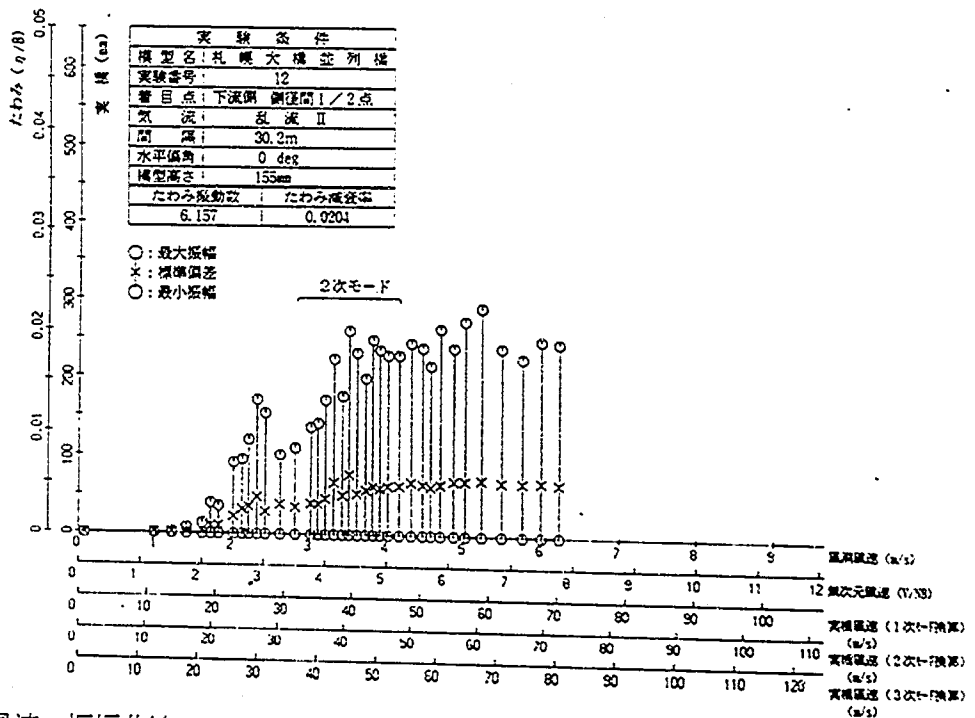
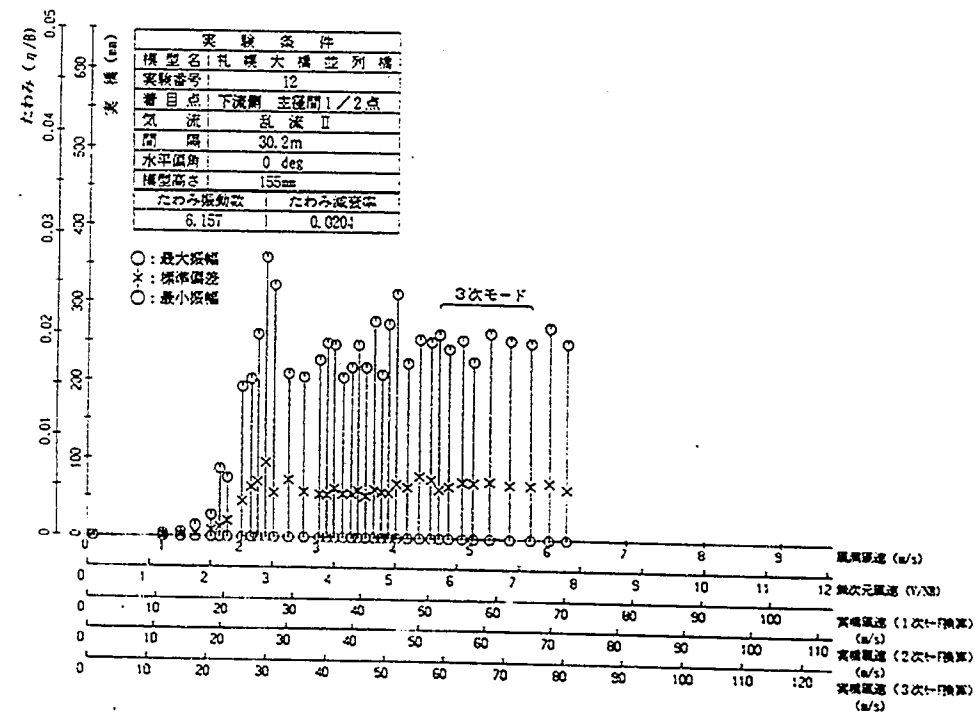
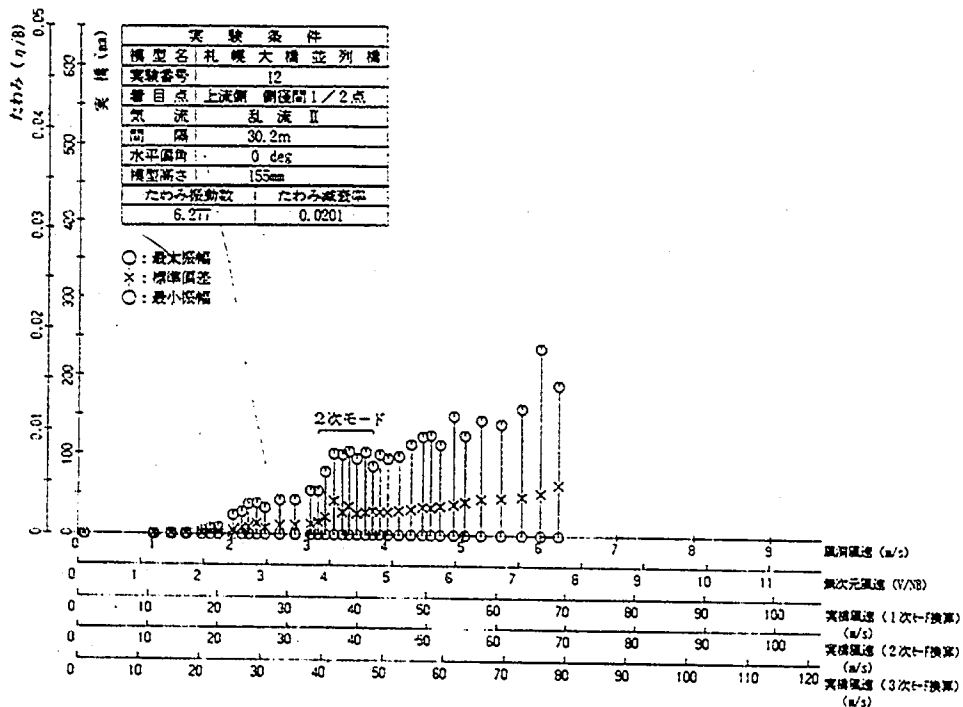
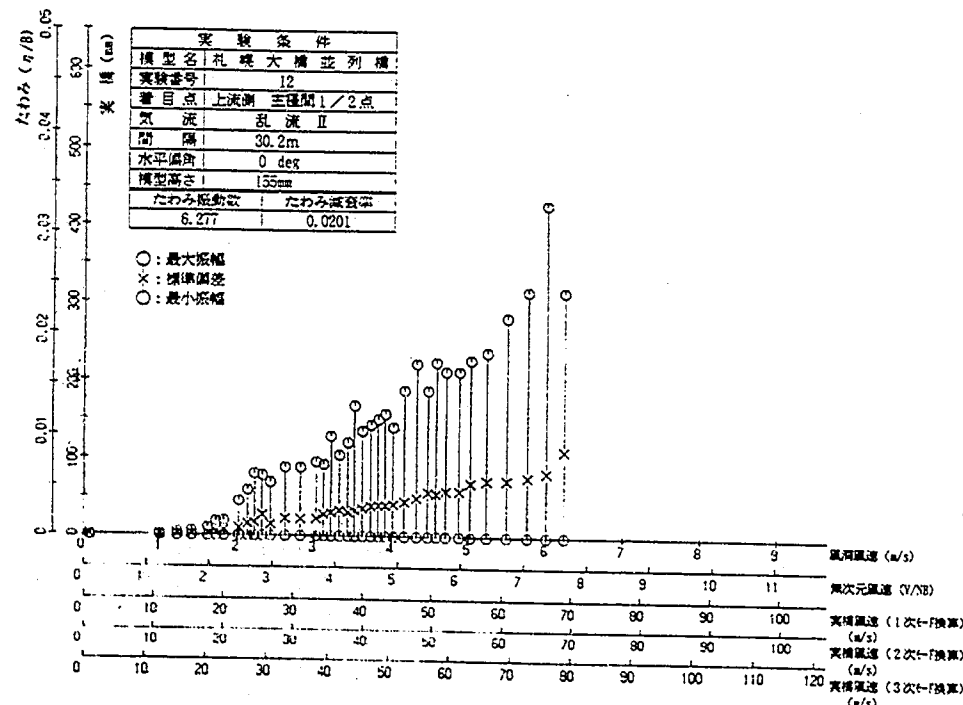
付図-4.9 風速-振幅曲線



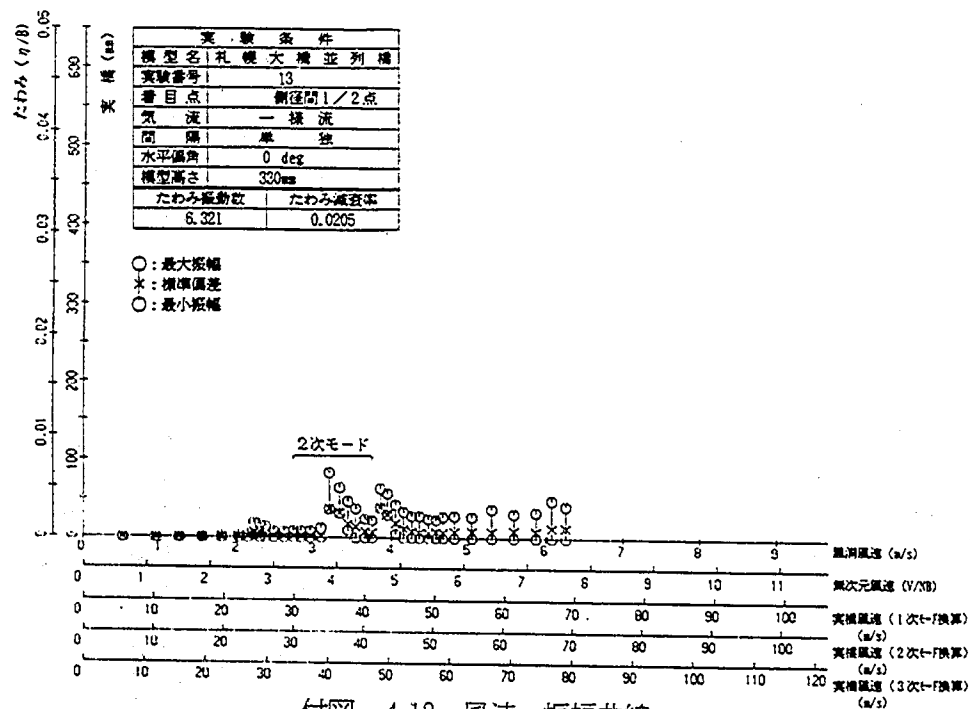
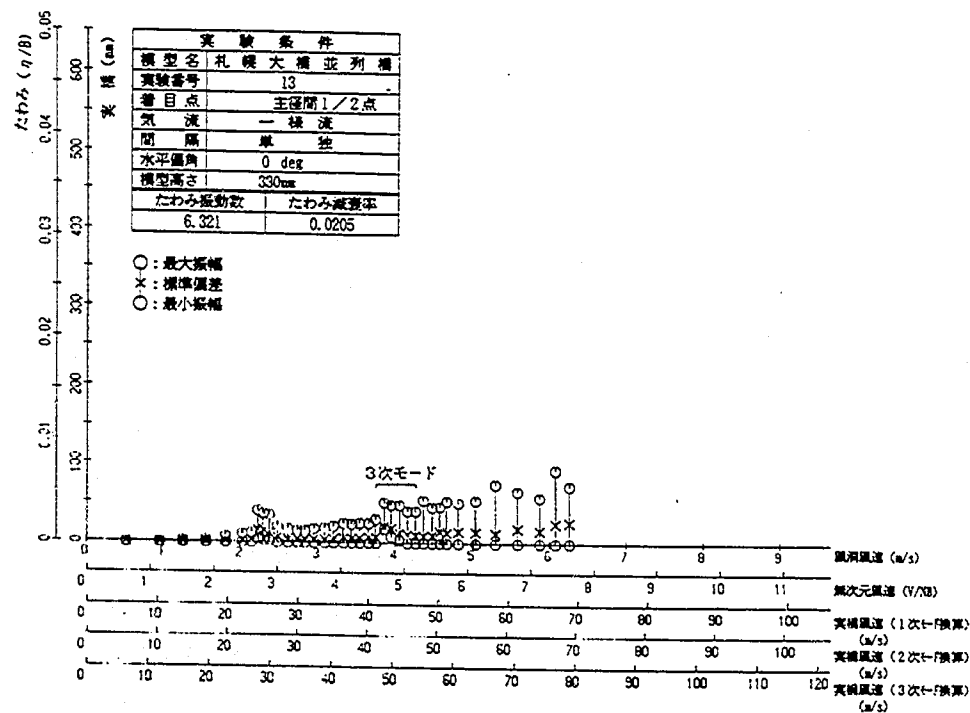
付図-4.10 風速-振幅曲線



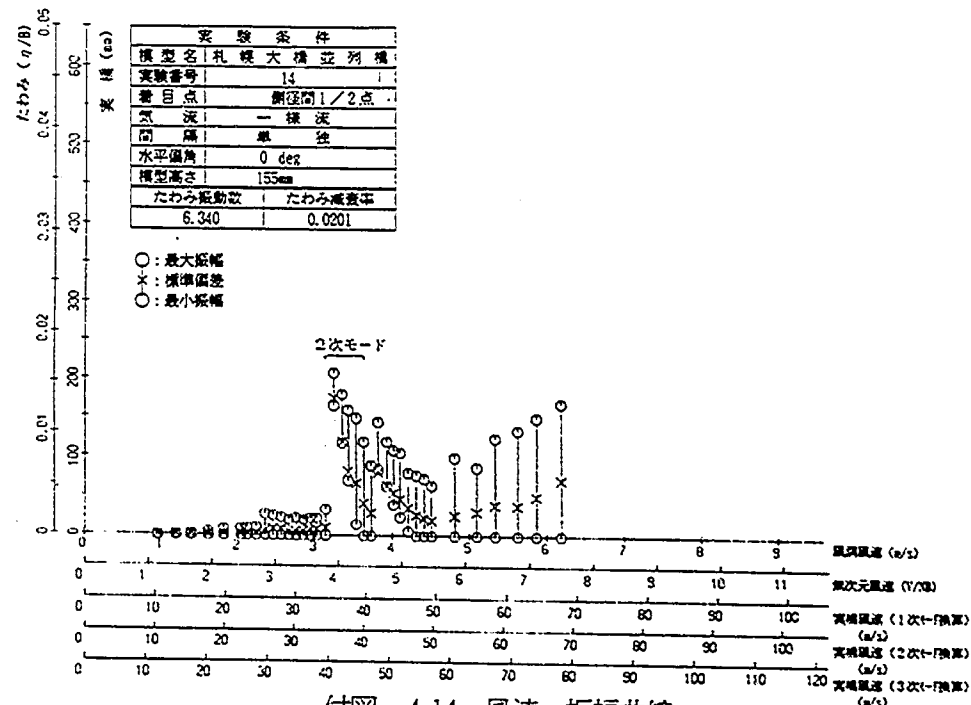
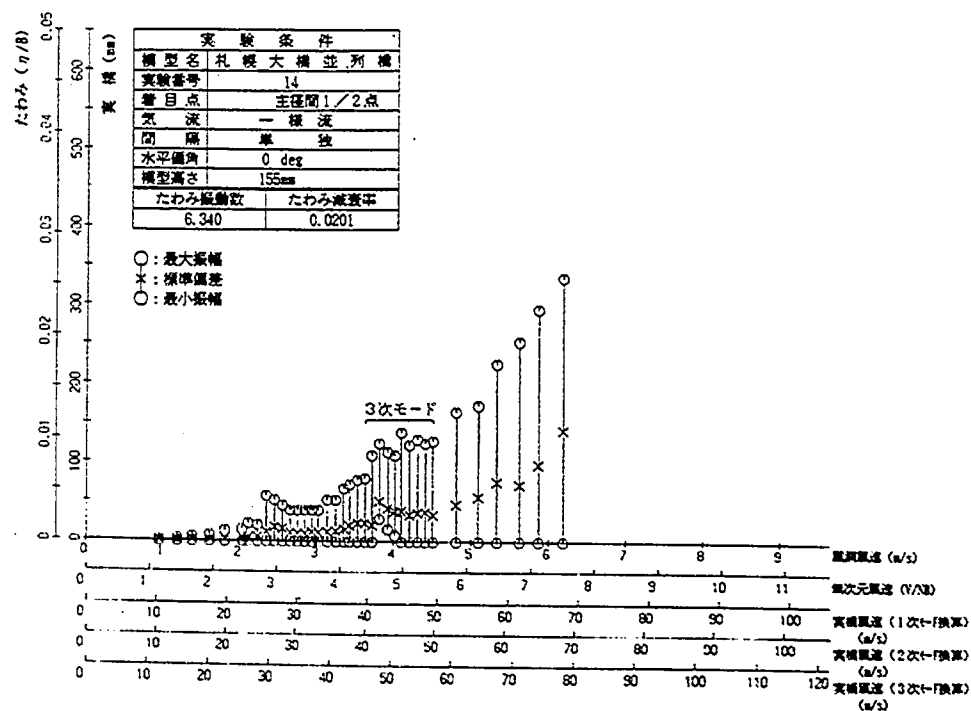
付図-4.11 風速-振幅曲線



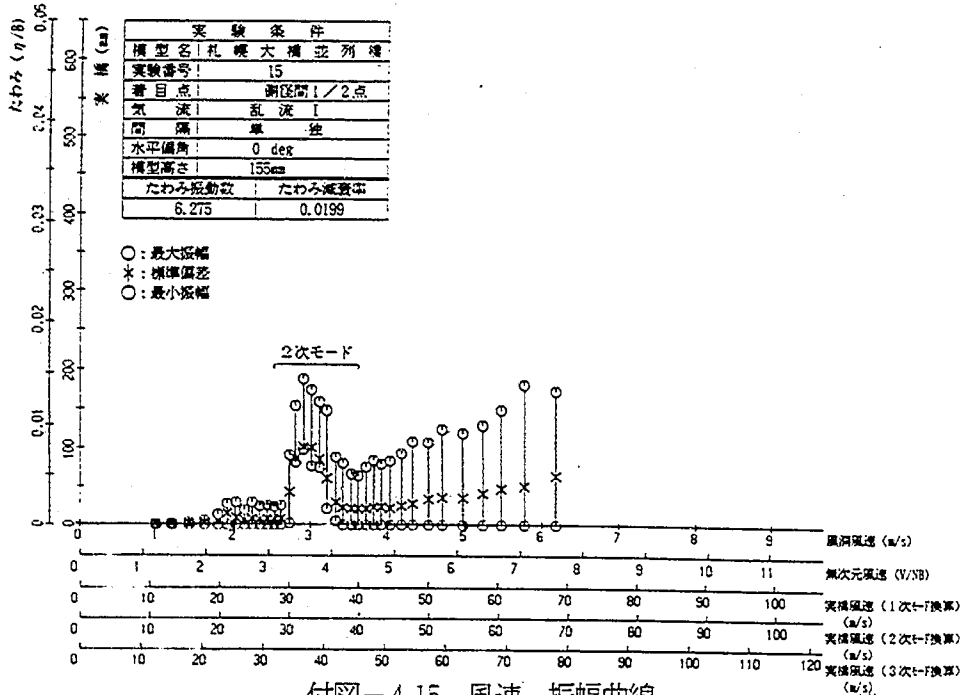
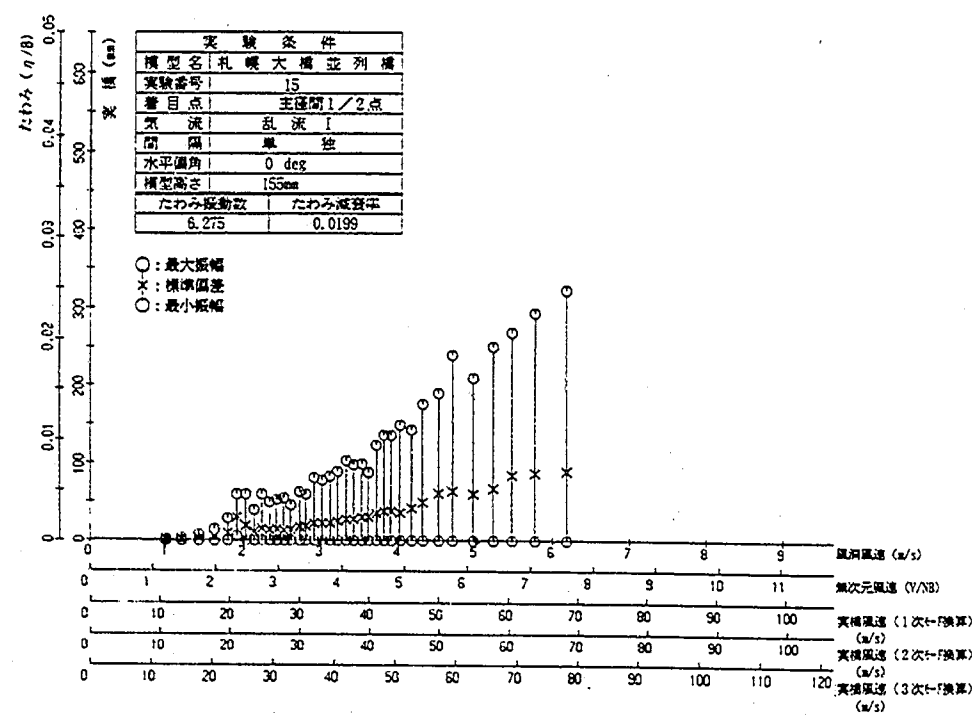
付図-4.12 風速-振幅曲線



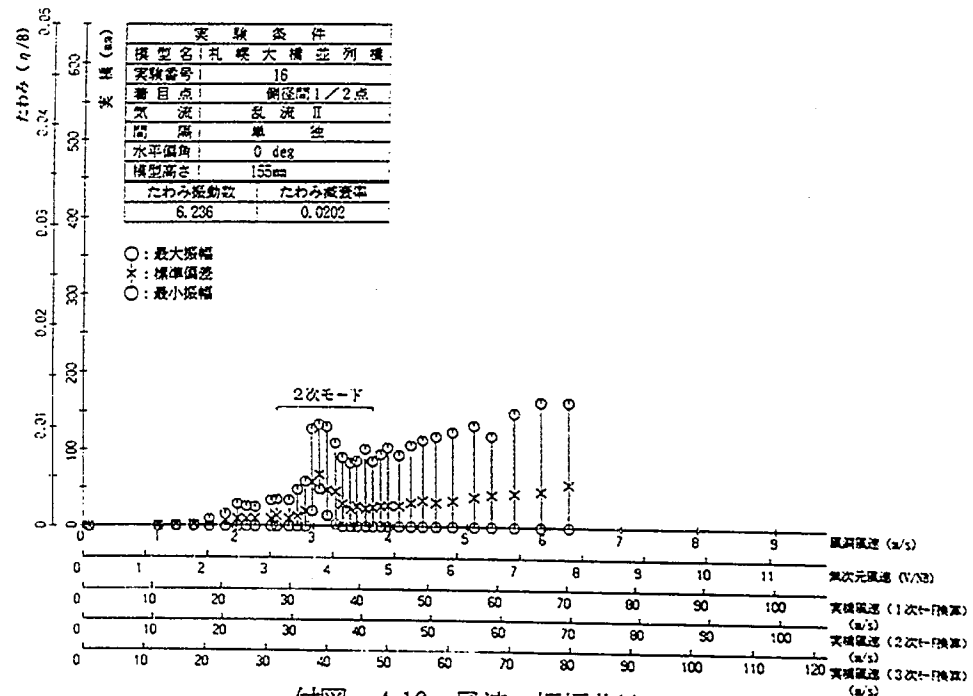
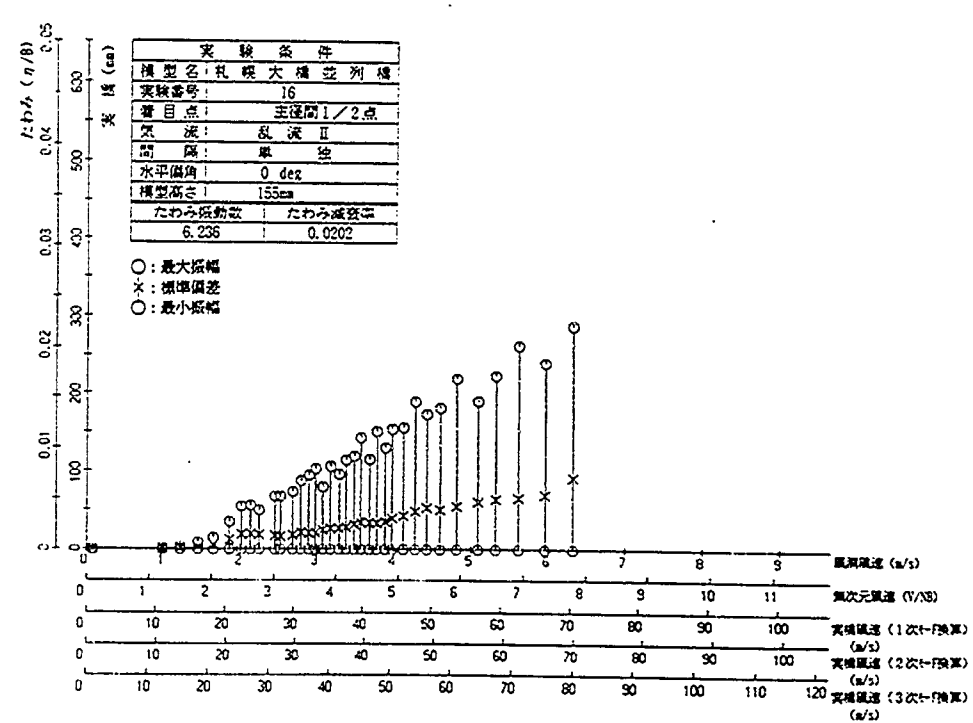
付図-4.13 風速-振幅曲線



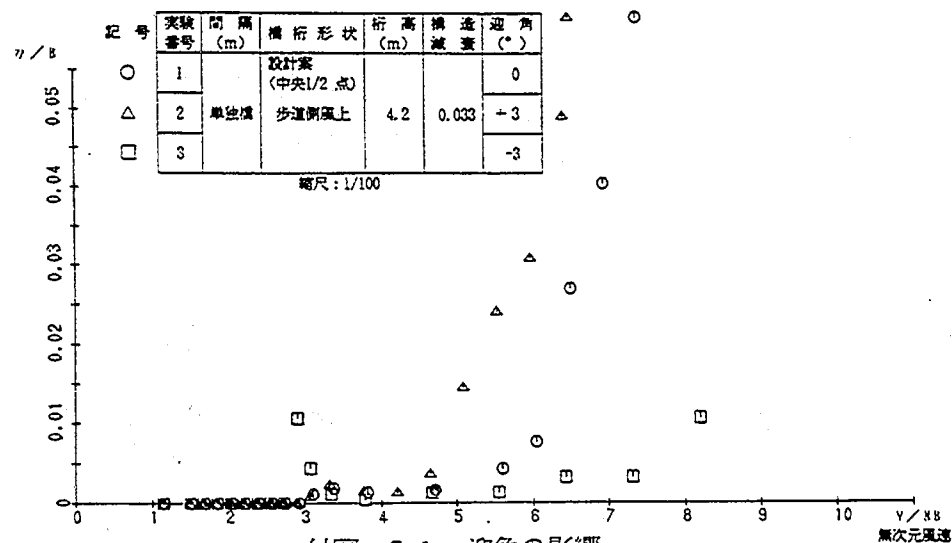
付図-4.14 風速-振幅曲線



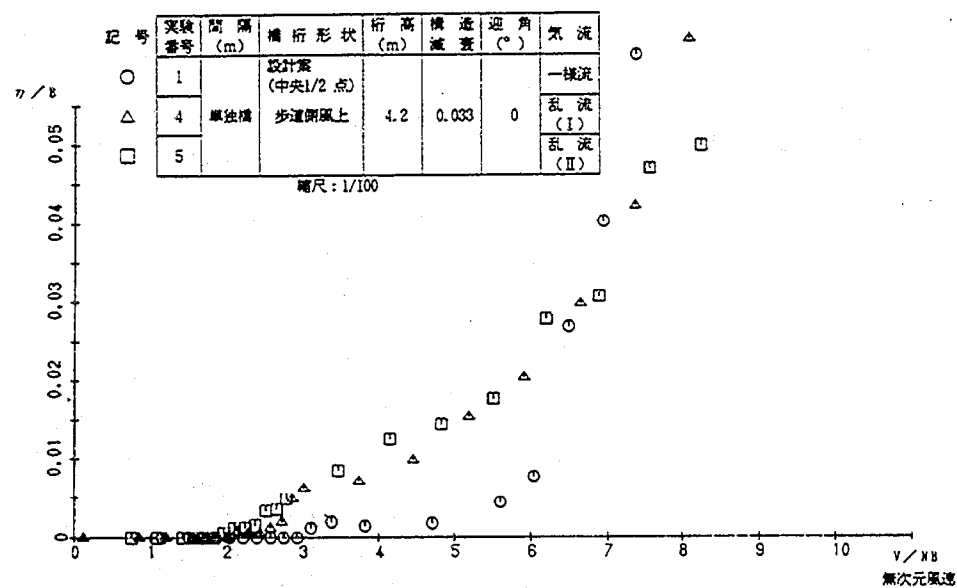
付図-4.15 風速-振幅曲線



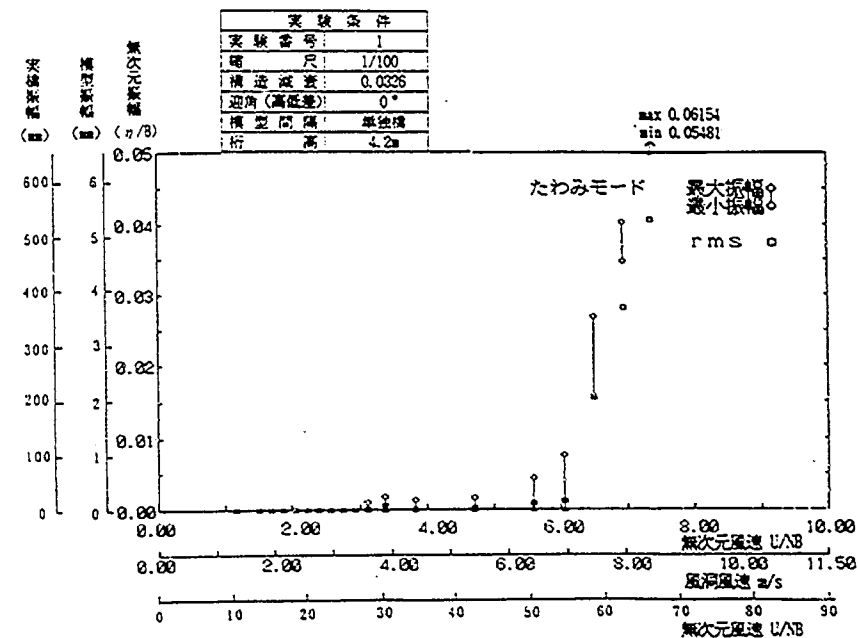
付図-4.16 風速-振幅曲線



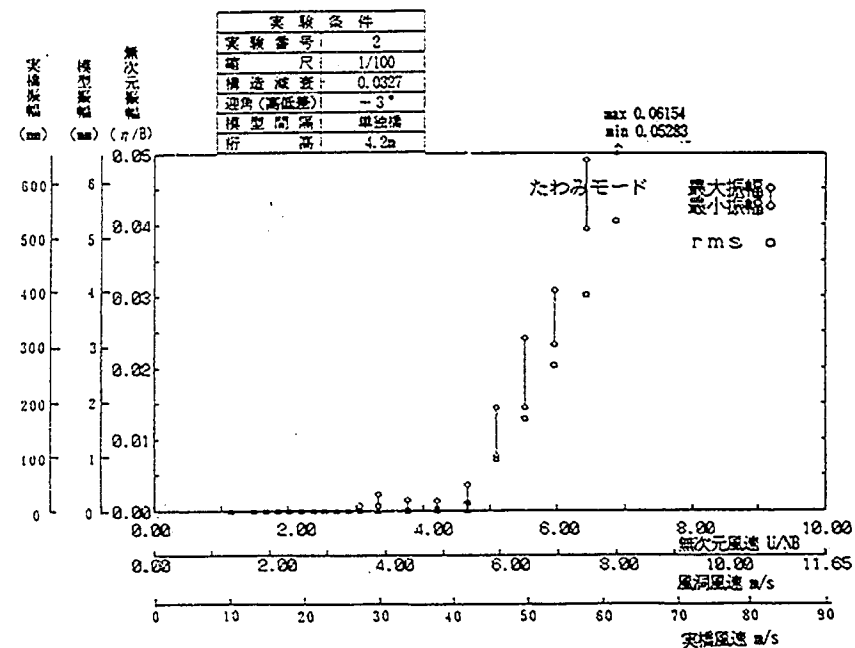
付図-5.1 迎角の影響



付図-5.2 気流による影響



付図-5.3 風速-振幅曲線



付図-5.4 風速-振幅曲線

札幌大橋（並列橋）の耐風性
調査報告書

I S S N 0386 - 5878
土木研究所資料第 2994 号
平成 3 年 3 月 (1991)
横山功一, 小路泰広, 関谷光昭

要 旨

一般国道337号札幌大橋は新たに隣接して橋を架けられ並列橋となるが、これにともない並列橋特有の風による振動が起ることが懸念される。本調査では2次元部分模型および3次元全橋模型を用いた風洞実験を実施し、道路中心間隔をはじめとするパラメータを変化させて耐風性の評価を行った。その結果、並列橋においては下流側の橋桁の渦励振およびバフエーディングによる振動振幅が大きくなる傾向があること、道路中心間隔は今回検討した範囲では、30.2mの場合に設計風速以下で許容振幅を超える振動が発現する可能性があり、15.5mの場合の方が耐風性に優れることなどが明らかとなった。

キーワード：札幌大橋，並列橋，耐風性調査，風洞実験，道路中心間隔，部分模型，全橋模型

郵便はがき

3 0 5 - □ □

41円切手
を
は
っ
て
下
さ
い。

建設省土木研究所
構造研究室 御中

茨城県つくば市旭一番地

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2994号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

