

高速7号線723工区

上部構造模型風洞実験
報告書

昭和43年3月

土木研究所構造研究室

まえがき

昭和42年10月、首都高速道路公団より高速7号線723工区に計画されている斜張橋の風洞模型実験を依頼されたがその結果が明らかになったのでここに報告する。

昭和43年3月

土木研究所

構造研究室

室長 大久保忠良

研究員 榎波義幸

目 次

§ 1. 実験の目的および内容	1
§ 2. 風洞および風洞模型	4
§ 3. 三分力の測定	9
天秤, 測定方法, 実験結果	
§ 4. バネ支持模型実験	14
実験方法, 実験装置, 実験結果	
§ 5. 実験結果と検討と考察	54
§ 6. 結 び	66

§1 実験の目的および内容

1-1 実験の目的および内容

長大吊橋の設計に際して耐風安定性についての検討が不可欠の条件であるとされてきたが、最近すぐれた構造材料の開発、新しい構造型式の採用等とあいまって橋梁は長大化、軽量化の途をたどっており、これに伴って吊橋以外にもかなり可撓性に富む橋梁がみうけられ、耐風安定性の問題は長大吊橋に限られるものではなくってきた。例えば斜張橋はその stress member が鋼床版桁と斜張索であることから明らかなように力学的には桁橋と吊橋の中間に位置するものであって一般の桁橋に比較してかなり柔軟な構造になっており、従来は問題にされなかった空力不安定現象に対する検討も必要となってきた。また実際に斜張橋が風によって振動することは外国でも報告されており、我国でも確認されている。

首都高速道路公団が高速7号線723工区に予定している荒川大橋は、斜張橋として計画されているが、土木研究所構造研究室ではこの荒川大橋上部工の耐風安定性の検証のための風洞模型実験を首都高速道路公団から依頼された。

吊橋の耐風設計に際して検討すべき点は次の3つとされている。

- i 静的風荷重に対する強度設計
- ii 風荷重による補剛桁の横座屈現象に対する検討
- iii 風による補剛桁の自励振動に対する検討

斜張橋の耐風設計においては(i)は桁橋に対する風荷重と全く同じ取扱いが可能であり、また(iii)についてその発現の可能性は小さく結局耐風設計として特に考慮すべき問題は(ii)の自励振動である。

この吊橋における耐風安定性の問題の解明のために今までに多くの研究がなされて来たが現時点では自励振動に対する安定性を理論的に判定出来るまでには至っておらず、もっぱら風洞模型実験による検証以外に方法がないとされている。したがって、今回首都高速道路公団から依頼された荒川大橋の風洞実験も自励振動の発現の有無を実験的に確かめることを主目的としている。この目的のために今回は以下の実験を行なった。

1. 原設計断面およびその変更断面の風洞模型について抗力、揚力、空力モーメントの測定
2. パネ支持模型実験による原設計断面およびその変更断面の風洞模型の風に対する挙動と、自励振動の限界風速の測定

なおこれらの実験方法の詳細については後で説明する。

1-2 荒川大橋の諸元

荒川大橋の概要を以下に示す(図-1)

橋	格	一等橋
型	式	三径間連続鋼床板斜張橋
橋	長	281.2 m

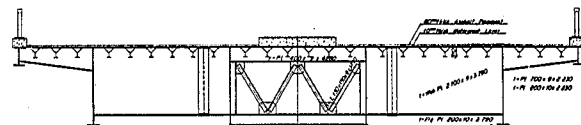
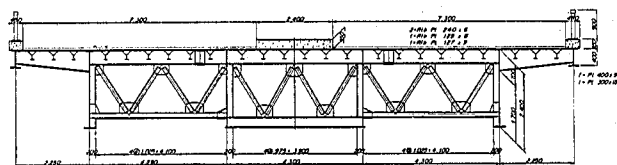


図 1 荒川大橋

中央径間長	160.0 m
側径間長	60.6 m
橋 巾	17.9 m
ケーブル取付間隔	27.5 m
下側ケーブル取付高	12.0 m
上側ケーブル取付高	24.0 m (ケーブル断面積 0.021 m ²)
桁 高	2.4 m
断面2次モーメント	0.4141 m ⁴
振 れ 剛 性	$7.321 \times 10^{13} / \text{g} \cdot \text{cm}^2$
重 量	10.51 t/m

§2 風洞および風洞模型

2-1 風 洞

今回の実験に使用した風洞は建設省土木研究所の橋梁試験用風洞であってその形状は図-1および写真-1に示すように横回流型単回路風洞、いわゆる Göttingen 型風洞で吹出口寸法は $1.8\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ である。〔写真-2〕

この風洞は特に橋梁試験用に作られたものであり低速領域での実験に便利のように設計されている。また、この風洞はほとんど吊橋吊構造部の耐風安定性を調べる部分模型実験に使用しているため2次元風洞としての性能を考慮して測定部を閉鎖装置〔写真-3〕で覆い、更に模型の取付および境界層の発達や気流の模型に対するまわり込みを防ぐため閉鎖装置の内壁の内側に高さ2 m、長さ1.5 mの隔壁をとりつけ使用模型の長さを1600 mmとしている（図-3）。この風洞の風速特性については土木研究所報告に詳しく報告されているとおりであるが、速度分布もほとんど一様でまた時間的変動も非常に小さく優れた特性を有している。しかしながら実際の構造物に作用する風は多小の迎角をもち、また空間的風速分布も一様ではなく、かつ時間的にも変化しており、当然風洞風の中におかれた模型と自然風にさらされる実橋では作用する風の条件が異なる訳であるが、一般に乱れた風に較べて定常な風は構造物をより低い風速で発振させることが知られているので実験結果は安全側の値を示していると云えよう。以下に風洞の概要を記す。

形 式：水平単回路回流式風洞（開放・閉鎖併用可能）

寸 法：吹出口 $3,000 \times 1,800\text{ mm}$ （角切辺長 300 mm）

測定部 2,000 mm

風 路 76,000 mm

絞り比：1 : 6.25

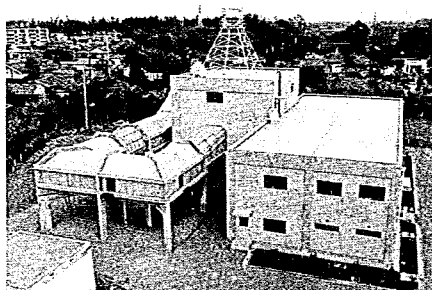


写真1 全 景

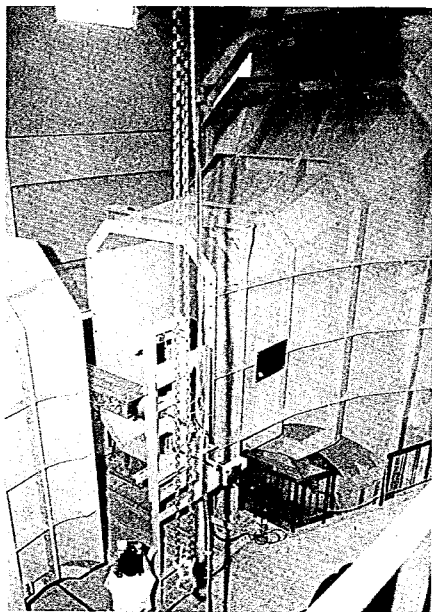


写真2 開放型測定部

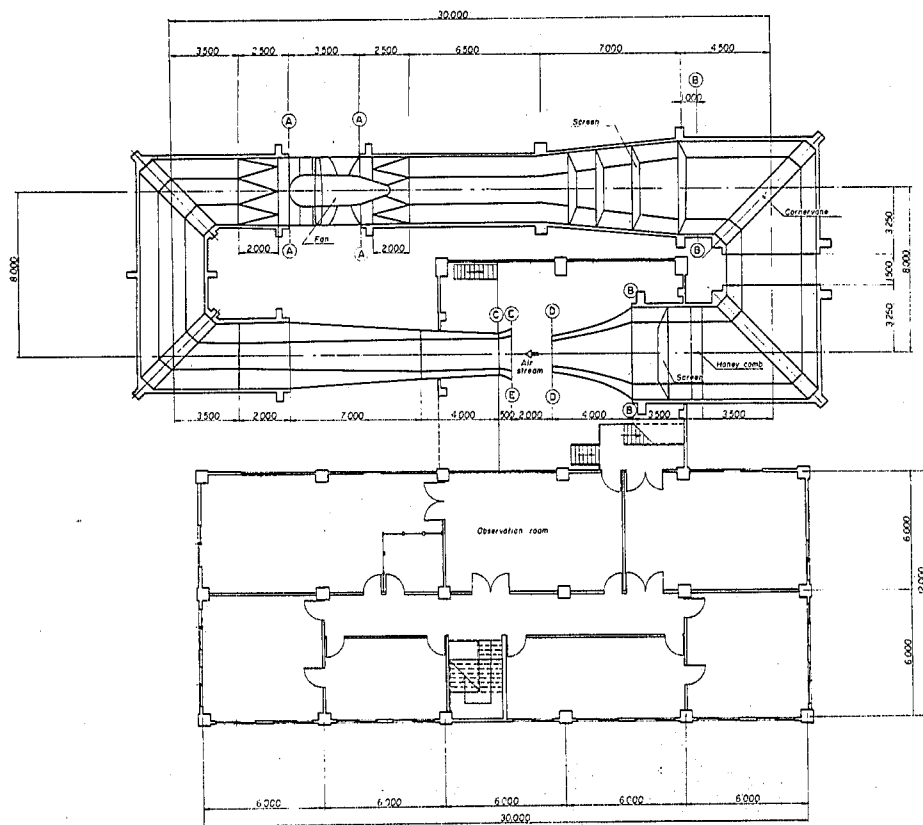
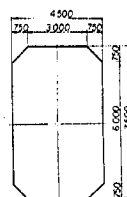


图 2

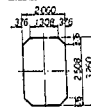
Section A-A



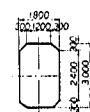
Section B-B



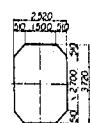
Section C-C



Section D-D



Section E-E



送風機：直径 3,300 mm

出力 100 kW

風 速：最大 20 m/s（開放時）

最大 21 m/s（閉鎖時）

2-2 風 洞 模 型

風洞模型は幾何学的形状が実橋と相似でなければなら
ないことから出来るだけ大きく作ることが望ましいが一
方風洞の大きさその他の制約を受けておのずから最大寸
法は定まる。まず風洞の測定部の大きさは隔壁内側間隔
で 1,620 mm なので模型の長さは 1,600 mm〔端板を含
めて 1,610 mm〕とした。また模型の中は風路の閉塞効
果および部分模型実験における 2 次元性を保つために必
要とされている縦横比（＝全長／巾）等から考えて 500
mm 程度以下におさえることが望ましいので今回は模型
縮尺を 40 分の 1 とした。原設計に対する模型の概略寸
法を図-4 に示す。

この模型の場合縦横比が 3.68 となり 2 次元模型実験用
模型としてはいくらか小さいことも考えられるが測定部
が閉鎖型であり更に内側に隔壁をもうけ、また模型に端
板をつけて気流の廻り込みによる三次元効果を防いでい
るので模型に作用する空気力はほぼ 2 次元的であると考
えてよいであろう。今回の実験のために使用した模型は
全て三分力測定とバネ支持模型実験とに共用したため、
模型は単に桁の形状寸法を忠実にうつしかえるだけでな
く、バネ支持模型実験の際に相似側から要求される重量、
回転慣性モーメントを満足させるため出来るだけ軽く作
り不足分を模型の支持装置および附加重錘で調節出来る
ようにしなければならなかった。そのため模型材料とし
ては主として木材（桧およびバルサ）を用いその他成形
の困難なところにはアクリル系樹脂および針金を用いた。

次に実験に用いた模型の断面を図の 5 以下に示す。

なお、写真 4 以下は模型である。

模型 No5 は原型の外側を覆って台形箱桁としたもので
ある。

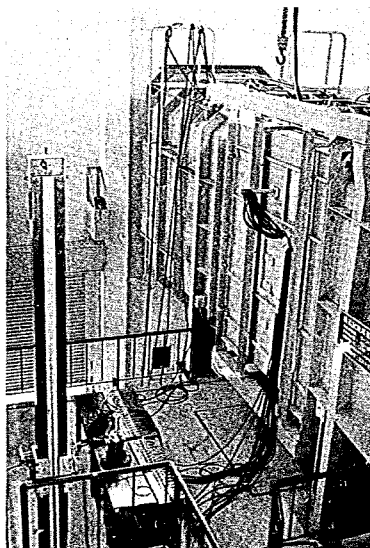


写真 3 閉鎖型測定部

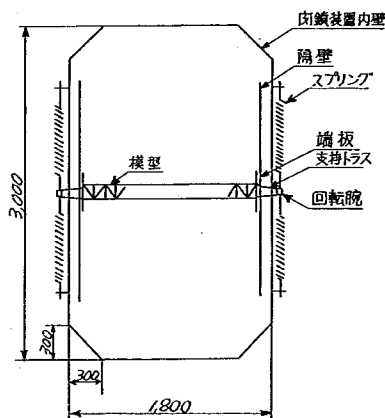


図 3 風洞測定部



写真4 模型SK-SB-67 40 A



写真5 模型SK-SB-67 40 A



写真6 模型SK-SB-67 40A1



写真7 模型SK-SB-67 40B

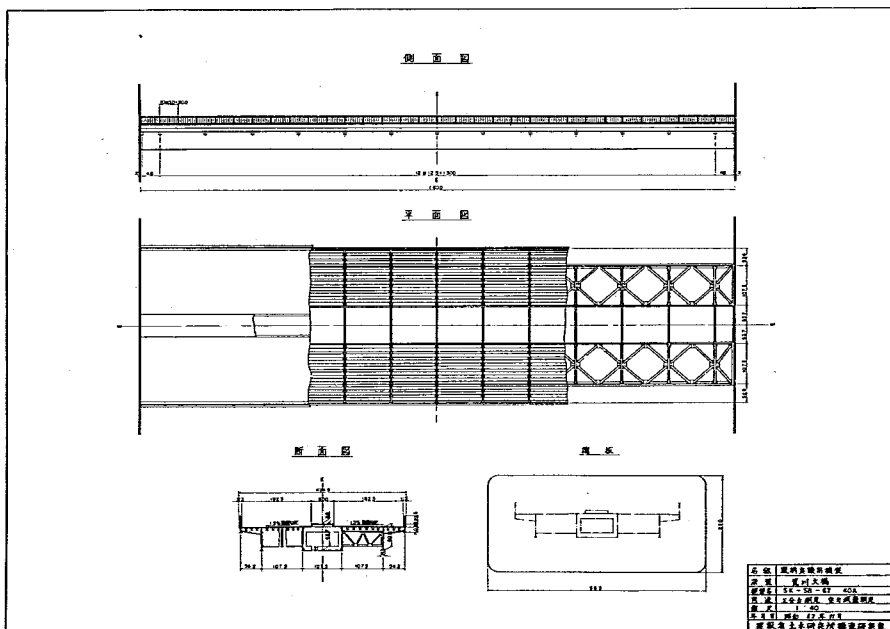


図 4

模型 No2 は原型の主桁と箱桁の間にカバープレートをはり一箱桁補剛構造としたものである。

模型 No3 は原型の高欄を紙で覆ったもので、高欄をコンクリートで作った場合の影響を調べた。

模型 No4 は原型の地覆の高さを半分にしたもので、地覆高の効果を調べた。

なお模型で採用したような断面を用いればそれらの重量および剛性は原設計のそれより当然変化するはずで、模型実験においてもこの点を考慮して実験条件を定めるべきであるが種々の都合により今回の実験では幾何学的な形状は変っても力学的特性は原設計のそれと同じとしている点を附記しておく。

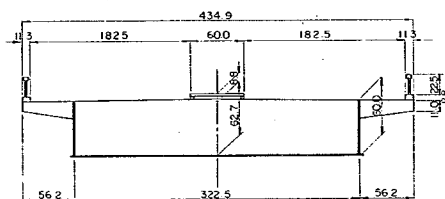


図 5 模型SK-SB-67 40A1

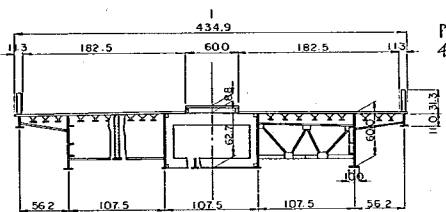


図 6 模型SK-SB-67 40A2

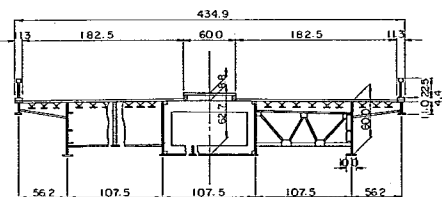


図 7 模型SK-SB-67 40A3

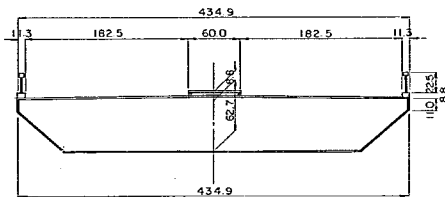


図 8 模型SK-SB-67 40B

§3 三分力の測定

3-1 ま え が き

流体中におかれた静止物体には図-9に示すように、流れ方向の抗力、流れに直角方向の揚力およびこれらの合力の物体の弾性中心に関するいわゆる空力モーメントの3つの力が作用する。これらは三分力と呼ばれているがこれら三分力と物体の迎角の間には物体の形状により種々な特性を示す。この関係を明らかにすることが物体の空力特性を判断するための重要な指針となり更には、ここで測定される抗力がいわゆる風荷重を与える。

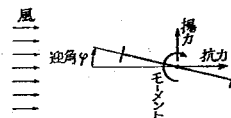


図 9

3-2 測定方法

模型の三分力は三分力天秤を用いて測定した。三分力天秤は抗力天秤、第一揚力天秤、第二揚力天秤からなっているが、この三台の天秤に模型を図-10に示すようにピアノ線で吊す。模型の下に取り付けた重錘 $W_1 \sim W_4$ は気流中で模型の動揺を防ぐためのもので気流の外におかれている。

このように支持された模型に風が作用した面の空気力は図-11からも明らかにように抗力 D は力 H と釣合うことから、抗力天秤で測定された力 H がそのまま抗力の大きさを示す。また揚力 L は力 F_1 および F_2 と釣合うから第一天秤および第二揚力天秤で測定される力の和であらわされる。同様にして空力モーメント M は H 、 F_1 、 F_2 と模型の弾性中心から各力までの距離との積であらわされる。

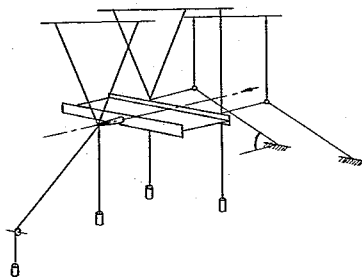


図 10 模型の天秤取付方法

これら三分力と迎角の関係を調べる為には風洞風が常に水平にしか吹かないので模型を傾けて測定しなければならないが、模型の迎角は第二揚力天秤を上下することにより変えることが出来る。またこのようにして測定された抗力の中には模型の抗力だけではなく、模型を吊しているピアノ線の抗力も含まれているので、実際にはピアノ線だけの抗力を測定して値を修正する必要がある。

なお今回用いた天秤(写真8~9)は差動トランスを検出器とした零位法が採用されておりその特性の概略は以下のとおりである。

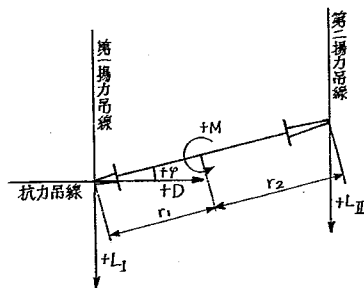


図 11

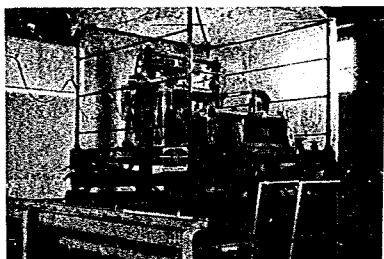


写真 8 天 秤

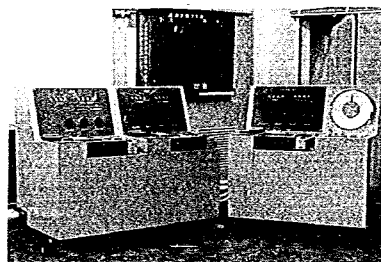


写真 9

	抗力天秤	第一揚力・第二揚力天秤
秤 量	50 kg	50 kg
測定範囲	25 kg	± 25 kg
感 度	1 g	1 g
分銅速隔加 除 範囲	0 ~ 24 kg (1 kg と び)	0 ~ ± 24 kg (1 kg と び)
	0 ~ 900 g (100 g と び)	0 ~ ± 900 g (100 g と び)
自動平衡	25 kg	± 25 kg
指示範囲	± 5 kg	± 5 kg
	± 1 kg	± 1 kg
	± 0.1 kg	± 0.1 kg
同上精度	フルスケールの 1/100	フルスケールの 1/100

3-3 風速の測定

実験時の風洞風速の測定は、風洞の測定部前縁におかれたピトー静圧管（写真-10）に作用する動圧をベッツ型マノメーター（写真-11）で測定し計算で求めた。即ち、ピトー管に作用する動圧が水柱で h mm とすれば風速は次式で与えられる。

$$V = \sqrt{\frac{2h}{\rho}} \quad (m/s)$$

但し ρ は空気密度で大気圧を H ，気流温度を $t^{\circ}C$ ，空気中の水蒸気圧を α とすれば次式であらわされている。

$$\rho = 0.13186 \times \frac{273}{273 + t} \times \frac{H - 0.3782\alpha}{760} \quad \frac{kg \cdot sec^2}{m^4} \quad \text{但し, } H: mm \text{ Hg}$$

しかし α の影響は小さいので実際には相対湿度を 80 % として空気密度を計算している。

実験では H を水銀晴雨計で、 t を熱電対型温度計で測定した。

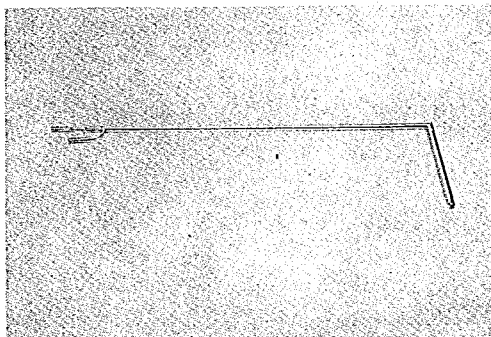


写真 11

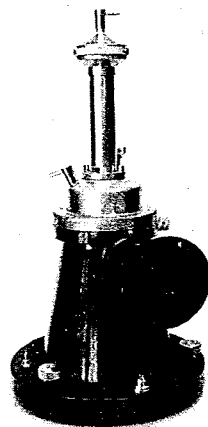


写真 12

3-4 三分力係数の計算

1. 抗 力 係 数

D_0 をある迎角における無風時の読みとり値、 D_1 を通風時の読みとり値、 D_S を同じ風速での吊線の抗力値とすれば模型の抗力は

$$D = D_1 - D_0 - D_S$$

抗力係数は

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A \cdot \ell}$$

但し A : 模型の単位長当りの曝露面積

ℓ : 模型長

2. 揚 力 係 数

L_{10} , L_{20} をそれぞれある迎角での第一揚力天秤、第二揚力天秤の無風時の読みとり値、 L_{11} , L_{12} を通風時の読みとり値とすれば模型に作用する揚力は

$$L = (L_{11} - L_{10}) + (L_{12} - L_{20})$$

揚力係数は

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

但し B : 橋巾

3. 空力モーメント係数

模型の弾性中心まわりのモーメントは図-11からも明らかなように次式で与えられる。

$$M = (L_{11} - L_{10}) r_1 \cos \varphi - (L_{21} - L_{20}) r_2 \cos \varphi + D r_1 \sin \varphi$$

空力モーメント係数は

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot B^2 \cdot \ell}$$

3-5 実験結果

実験は $+15^\circ \sim -15^\circ$ の迎角に対して行なった。測定結果から計算して求めた三分力係数と迎角の関係を図-12 以下に示す。

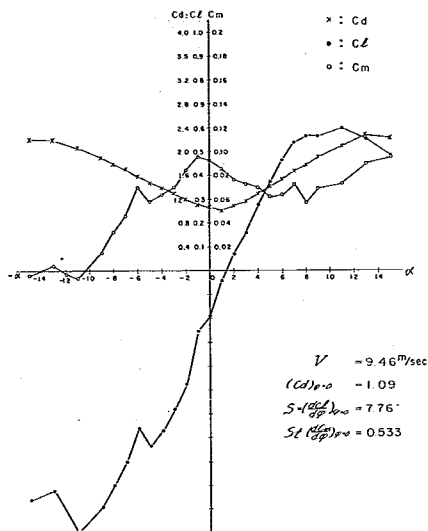


図 12

SK-SB-67 40 A 三分力係数

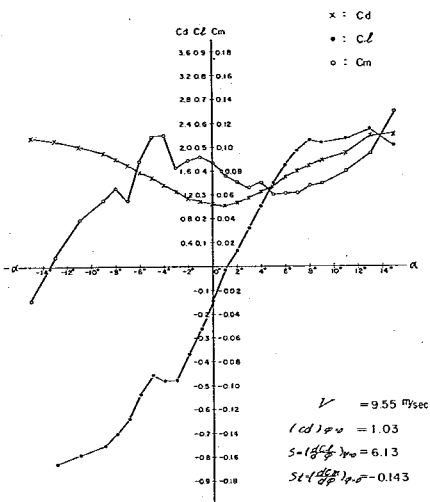


図 13

SK-SB-67 40 A1 三分力係数

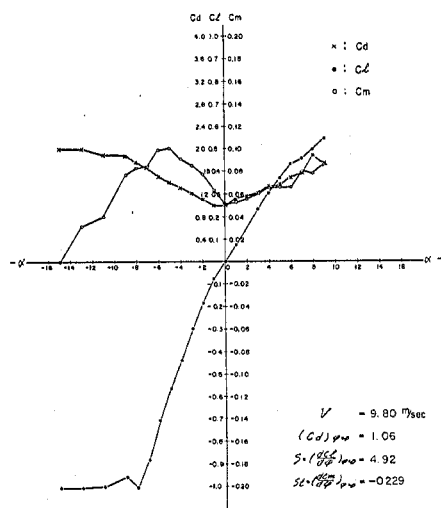


图 14
SK-SB-6r 40 A2 三分力曲线

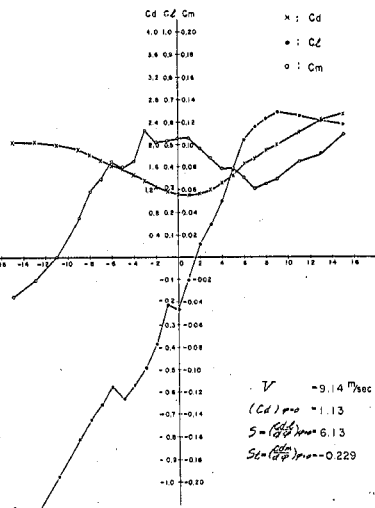


图 15
SK-SB-67 40 A3 三分力曲线

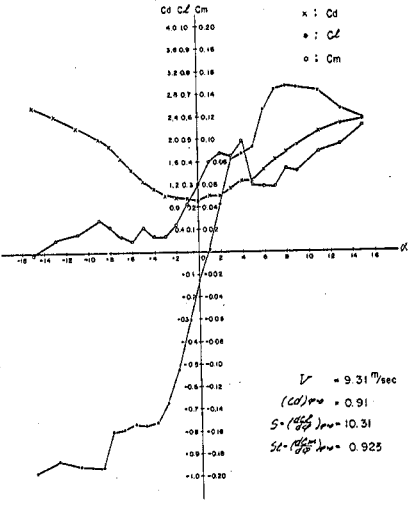


图 16
SK-SB-67 40 B 三分力曲线

§4 バネ支持模型実験

4-1 ま え が き

ここで云うバネ支持模型実験とは補剛桁の一部の剛体模型をスプリングで吊して風洞測定部に設置し、風的作用をうけたときの模型の挙動を観察する実験である。気流中におかれた構造物は風速が低い間は擾乱が与えられてもその振動は時間とともに減衰してしまうのが普通であるが、風速が増大すると構造物の空力的特性と関連して空気力の作用が負減衰効果をおよぼし、与えられた擾乱による振動がそのまま持続したり、時には振巾が増大し発散したりすることがある。

このような風の中での構造物の振動性状を調べるには今のところ風洞模型実験以外に方法がないことはすでに説明したとおりであるが、この風洞実験の方法に2通りある。一つは全橋模型実験と呼ばれるもので実橋全体を慣性と弾性力および構造外形が相似するよう作った模型についての実験である。

この場合、模型実験の精度を上げるためには模型縮尺に制限が加えられるから模型はかなり大がかりなものになる。したがって実験用の風洞も非常に大がかりなものになり普通の風洞では実験が出来ない。また、模型が大きくなることによりその製作や模型の挙動の測定も面倒になる。

このように全橋模型実験では特殊な風洞を必要とする他に実験に多くの時間と費用がかかるためこれに代って行なわれるのがバネ支持模型実験である。バネ支持模型実験は全橋模型実験に比較して模型の弾性変形その他の点で実橋との相似条件を満足していない等の欠点を有してはいるが、実験の簡単なことおよび次に述べる理由により耐風安定性を十分に検証できること等から現在一般に行なわれている方法である。即ちバネ支持模型と全橋模型の比較実験はWashington 大学、英国国立物理研究所で実施されたが、その結果によればバネ支持模型実験の結果は全橋模型実験の結果とよく一致しており、バネ支持模型実験から十分原型の不安定振動に対する安全性が確認出来ると報告されているので今回はこの実験法によった。

4-2 相 似 則

模型実験は原型と模型の物理的・力学的現象が共通の方程式を満足するように模型の諸量を定め、模型に起った現象から実物において起るべき現象を推論しようとするものである。バネ支持模型実験の目的とするところは原型の風の中での挙動を調べ、その自励振動の限界風速を求めることである。このために必要な模型が原型に対して相似すべき物理量は次元解析によって以下の如く定められる。

$$\text{I 慣性パラメーター} \quad \frac{I\theta}{\rho B^4}, \quad \frac{I_z}{\rho B^2}$$

$$\text{II 風速パラメーター} \quad \frac{V}{N\theta B}, \quad \frac{V}{N_z B}$$

$$\text{III 構造減衰を表わす定数} \quad \delta_z, \delta\theta$$

但し

B : 代表長

I_0 : 吊構造部の回転中心について計算した極慣性モーメント, ケーブルの寄与を含む。

I_z : 吊材・ケーブルを含む吊構造部の質量

N : 振動数, 添字 z および θ はそれぞれ撓み振動, 捩れ振動を表わす

V : 風速

δ : 構造減衰, 添字は N の場合と同じ

これより $N\theta/N_z$ が実物と模型で等しくなければならぬこと, 模型を軽く作る必要のあることが了解されよう。また V/NB はスプリング強度により相似させる。模型の重量および極慣性モーメントは縮尺が定まれば一義的に定まる。模型の振動数は原型の振動数および原型において検証すべき風速と実験風速からその上限が与えられるからこれらを満足するようなスプリングを選ばねばならない。構造減衰については今のところ原型の構造減衰がはっきりしないことおよび模型の構造減衰を調節する減衰器が出来上っていないこと等のため模型の振動系の構造減衰を出来るだけ小さくして安全側の実験を行なうよう心がけた。

4-3 実験装置

模型をスプリングで懸垂するにあたり, 留意しなければならない要点は,

- (i) 気流に吹き流されることなく模型が上下振動および回転振動を独立または連成して行ないうること。
- (ii) 模型に初期迎角をつけて傾斜支持出来ること。
- (iii) 上下および回転の振動成分を独立に検出できること。
- (iv) 迎角, 風圧により系の減衰性が変らないこと。
- (v) 支持機構が構造的にも空力的にも模型の振動に悪影響を与えないこと。

などである。以下に測定装置の概略を説明する。

(a) 模型支持装置

模型両端には気流特性を良くするための端板を取りつける。模型は端板の外側に附した軽合金製の取付枠を介して回転腕と連結している。回転腕は上下より所要のパネ定数のコイルスプリング 8 本 (両側) により支持されている。撓み振動数はパネのパネ定数により, 回転振動数はスプリングの間隔により決まる。模型が気流により吹き流されることを防止するため回転腕中心には横変位防止用ピアノ線を取りつけてある。更に, 初期迎角を与えるためこれらの機構は回転フレームに取り付けられており風洞測定部中心のまわりに回転して模型に $-15^\circ \sim +15^\circ$ 任意の初期迎角が与えられる。

(b) 検出器

模型の振動の測定には可変インダクタンス型の加速度計を用いこの出力を電氣的に 2 階積分して変位におしペンオシログラフに記録した。なお加速度計は模型の上下振動が別々にとり出せるように配置した。

4-4 実験方法および実験条件

実験は任意の風速に対する模型の振動特性を調べるため, 模型の種類, 迎角, 振動の自由度をかえて行ない, 模型に対して外部から撓乱を与えてその後の模型の振動の挙動を調べた。迎角は本来は構造物に作用する風の作

用方向の水平面となす角度をさすものであるが、風洞風は常に水平にしか吹かないのでここでは模型を傾けて迎角の影響を調べた。また橋の気流中での不安定振動としては、鉛直撓み振動、捩れ振動およびその連成振動の3つが考えられるので模型実験においても模型の振動の自由度を上下振動(h-mount)、回転振動(a-mount)およびその連成振動(ha-mount)の3通りに変えて実験を行なった。

今回の風洞実験の実験条件をかかげると次のようになる(表-1)。

表1 実験条件

	原型	理論値	模型 No.1 SK-SB-67 40A	模型 No.2 SK-SB-67 40A ₁	模型 No.3 SK-SB-67 40A ₂	模型 No.4 SK-SB-67 40A ₃	模型 No.5 SK-SB-67 40B
重量	10.51 t/m ² /bribe	10.510 g/model	10,680 g/model	10,250 g/model	10,250 g/model	10,390 g/model	10,680 g/model
極慣性 モーメント	260 t·m ² /m	1,660 g·cm ² sec ² /model	1,623 g·cm ² sec ² /model	1,597 g·cm ² sec ² /model	1,531 g·cm ² sec ² /model	1,531 g·cm ² sec ² /model	1,531 g·cm ² sec ² /model
撓み振動数	0.647 c/s		1.43 c/s	1.46 c/s	1.46 c/s	1.45 c/s	1.43 c/s
捩れ振動数	1.663 c/s		3.75 c/s	3.78 c/s	3.86 c/s	3.86 c/s	3.86 c/s
振動数比	1:2.57		1:2.62	1:2.58	1:2.64	1:2.65	1:2.69
風速換算比			(V _p /V _m) _θ =17.75 (V _p /V _m) _z =18.05	(V _p /V _m) _θ =17.60 (V _p /V _m) _z =17.69	(V _p /V _m) _θ =17.23 (V _p /V _m) _z =17.69	(V _p /V _m) _θ =17.23 (V _p /V _m) _z =17.80	(V _p /V _m) _θ =17.23 (V _p /V _m) _z =18.05
バネ強度			880 g	880 g	880 g	880 g	880 g
バネ間隔			32.0 cm	32.0 cm	32.0 cm	32.0 cm	32.0 cm
支持方法			hα, α	hα, α, h	hα	hα	hα, α, h
迎角			0, ±3, ±6, ±9	0, ±2, ±4, ±6, ±9 0, ±5(h mount)	0, ±2, ±4, ±6, ±9	0, ±2, ±4, ±6, ±9	0, ±2, ±4, ±6, ±9 0, ±5(h mount)
風速零での 構造減衰							
備考			原設計案				

4-5 実験結果

実験の結果を以下に示すがまず図の表わし方について説明する。

i V-δ 曲線

例えば、図19-1は実験風速と模型の減衰の関係を示したもので零風速における縦軸の値が模型の構造減衰を示している。減衰は次式で定義される対数減衰率で表してある(図-17)。

$$\delta = \log_e \frac{A_N}{A_N + 1}$$

一般に対数減衰率δは振動振幅によって異なるのでここでは片振り1°(または片振り2mm)のときのδを計算した。δ>0のときは時間と共に振幅が減少することを意味し模型に撓乱が与えられても振動がおさまるが、δ<0のときには模型に片振り近傍で1°以下の撓乱が与えられても振幅は増大して片振り1°(または片振り2mm)を越えて発達することを意味している。

ii V-A-δ 曲線

V-δ曲線が模型の振幅を1°(または2mm)と限定したデーターであるのに対して図19-2に示すV-A-

δ 曲線は実験風速と模型の振動振幅および減衰の関係を
示したもので図中で対数減衰率が負の部分は不安定領域
を示し、この領域で擾乱が与えられると振動は対数減衰
率が零になるまで成長するのに対して、対数減衰率が正
の場合は安定領域を意味し、もしこの領域まで擾乱が与
えられても振動は対数減衰率が零になる振幅になるまで
減衰することを意味している（図-18）。ここでは実験
結果の一部を示す。

III V-A 曲線

図19-3がこの例であり、風速と模型の最終振幅の関
係を示すものであって、 $V-A-\delta$ 曲線の対数減衰率 δ
= 0 の線である。

4-5-1 模型 No1 (SK-SB-67 40A) の特性

原設計案を模型化した SK-SB-67 40A の実験結果を
紹介する。h α -mount の場合の実験結果を図19に、
 α -mount の場合の実験結果を図20に示す。この模

型実験で観測された振動現象は主として回転振動であるが、この振動は2つの異なった挙動を示している。1つ
は比較的低風速で発振するが、振動は有限振幅の定常振動で風速を増加させるとやがて振動がおさまってしまう
いわゆる限定振動と呼ばれるものであり、他の1つは一旦発振すると風速の増加と共に振幅が増大して破壊に至
るいわゆる発散振動と呼ばれるものである。この模型の場合、限定振動は主として負迎角のときにあらわれ、-
9°では最大振幅が片振幅で3.5°に達している。したがって、この振幅より小さい範囲では $V-A-\delta$ 曲線からも
明らかに負減衰となるが、その対数減衰率の絶対値は比較的小さく、構造物の減衰能の大きさによって多
分に影響を受け、構造物の構造減衰が模型のそれに比べて大きければ、この種の振動は出現しないとも考えられ
る。発散振動は主として正の迎角のときにあらわれ、迎角が大きくなるほど発振風速は低くなっている。なお本
模型実験では迎角が5°以上のとき比較的低風速（約1.3 m/s）で上下振動が観測されたが、この振動は非常に
狭い風速範囲でしか起らず、図化するに十分なデータが得られていないのでここでは現象の観測されたことだ
けを報告しておく。

4-5-2 模型 No2 (SK-SB-67 40A1) の特性

模型No2は原設計案の主桁と箱桁の間を覆って単箱桁構造としたものの模型であって、その実験結果を図-21、
22、23に示す。この模型の場合も傾向的には模型No1と同じ特性を持っているが限定振動の出現する迎角が小
さくなり且つその振幅も減少していること等から空力的にはSK-SB-67 40Aよりも秀れていると云えよう。ま
た、この模型ではh-mountの実験を迎角0°、±5°について行なったが、その結果+5°において限定振動が観測
された。この場合も負減衰領域での対数減衰率の絶対値が非常に小さく、構造物の減衰能が大きくなればこの振
動は出現しないものと予想される。

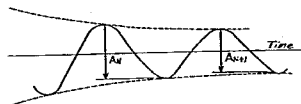


図17 減衰曲線

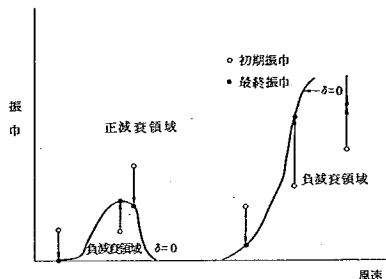


図18

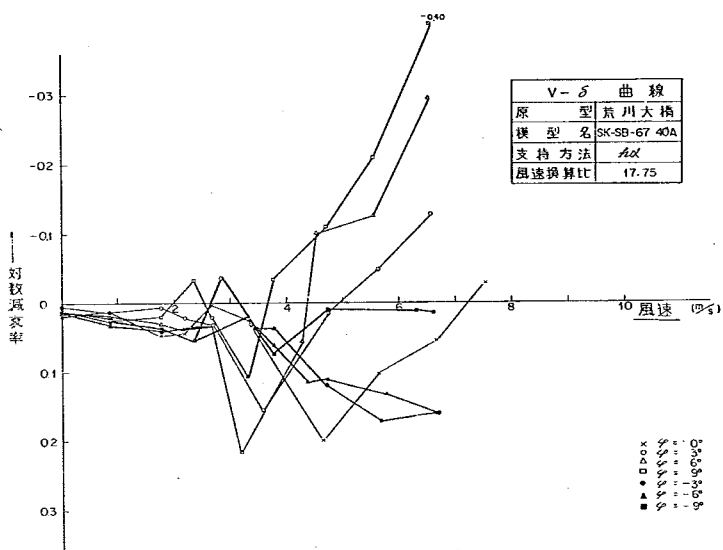


图 19.1

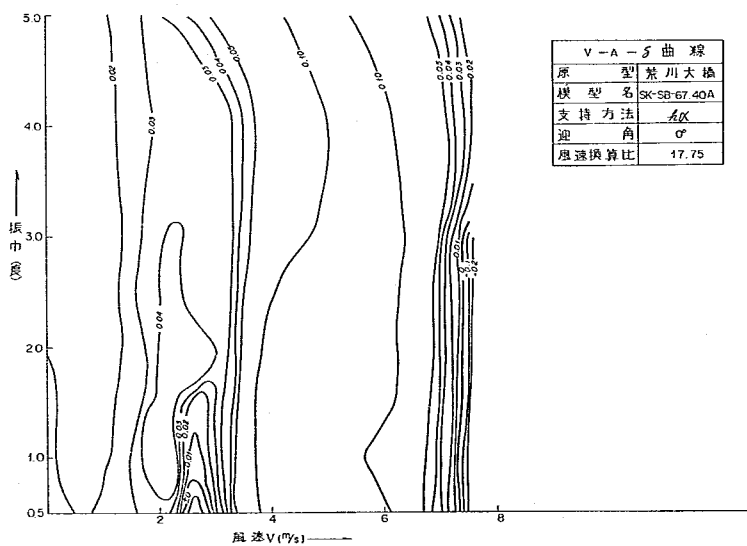


图 19.2.1

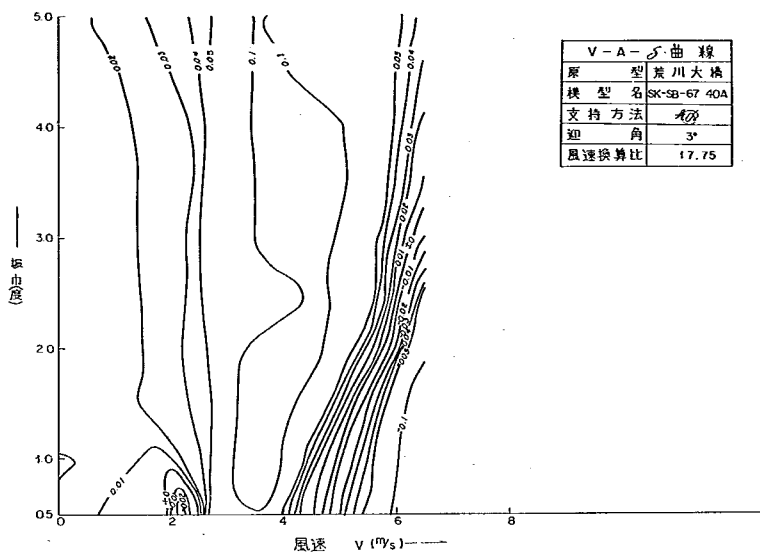


図 19.2.2

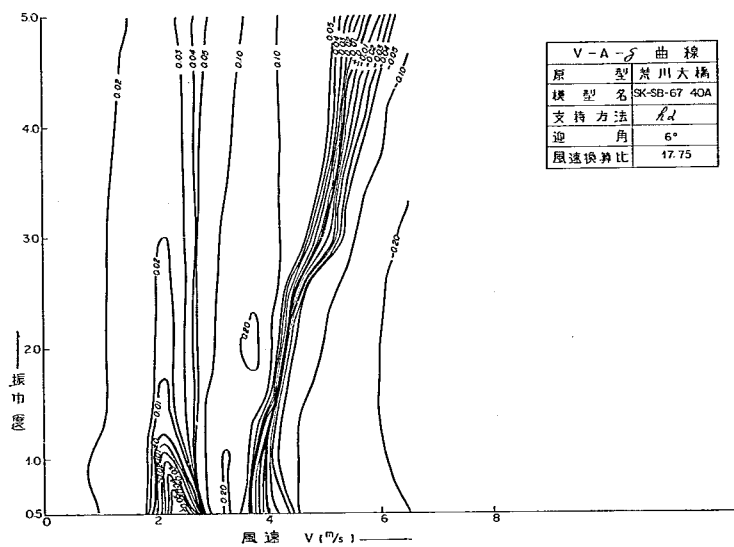


図 19.2.3

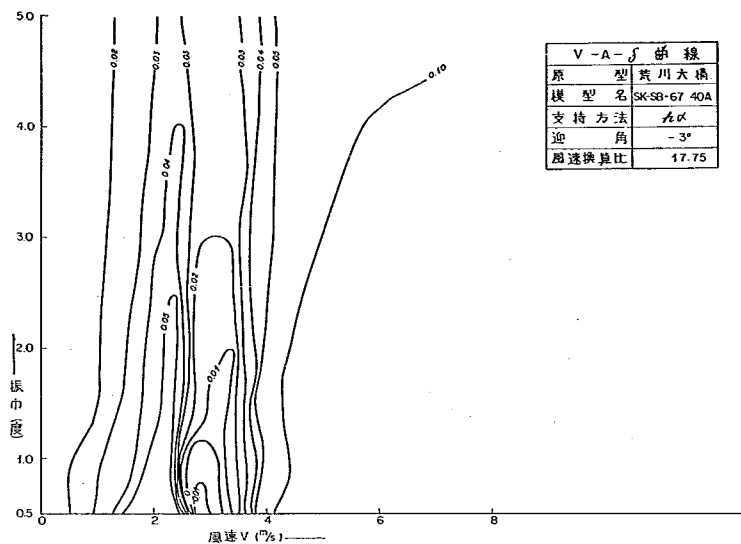


图 19.2.4

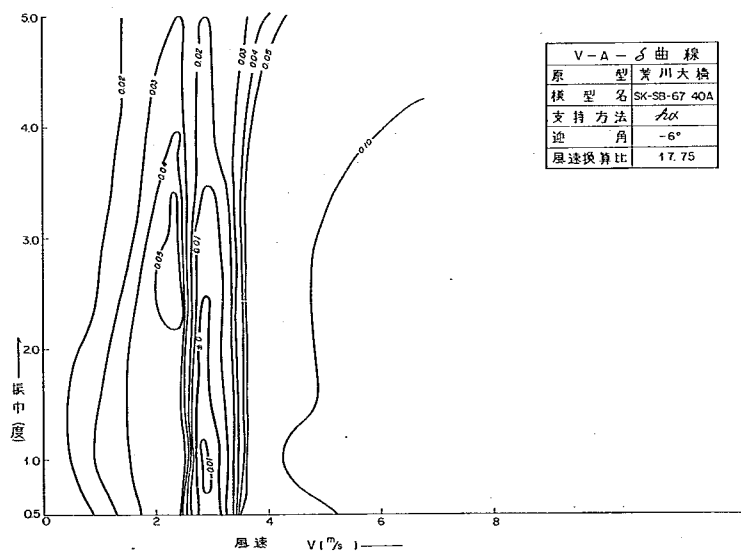


图 19.2.5

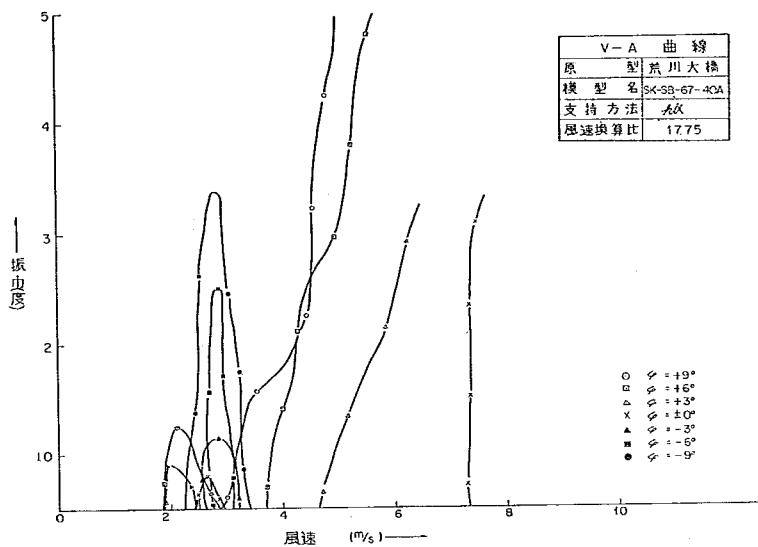


图 19.3

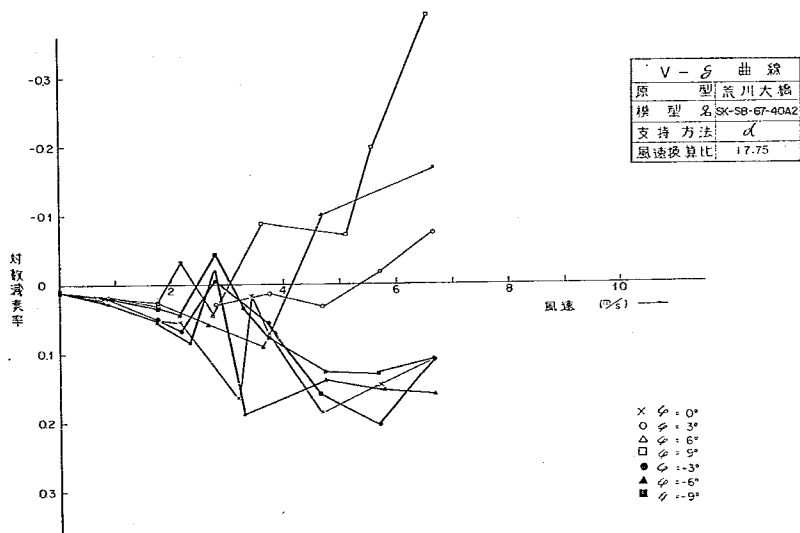


图 20.1

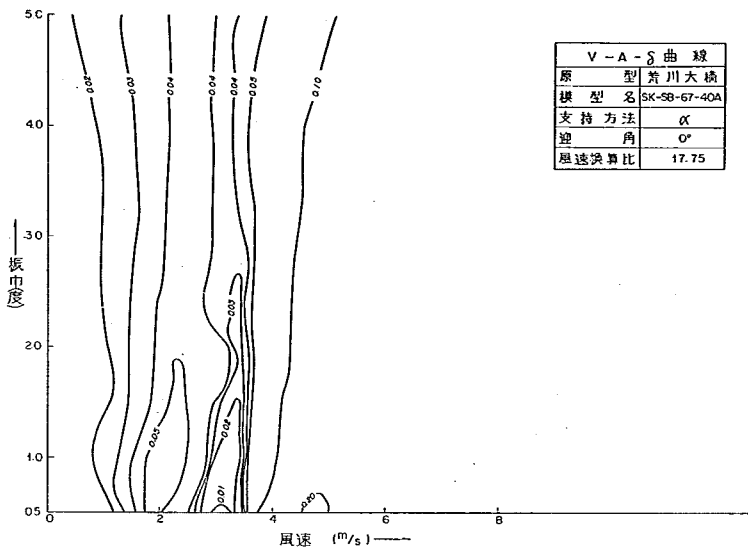


図 20.2.1

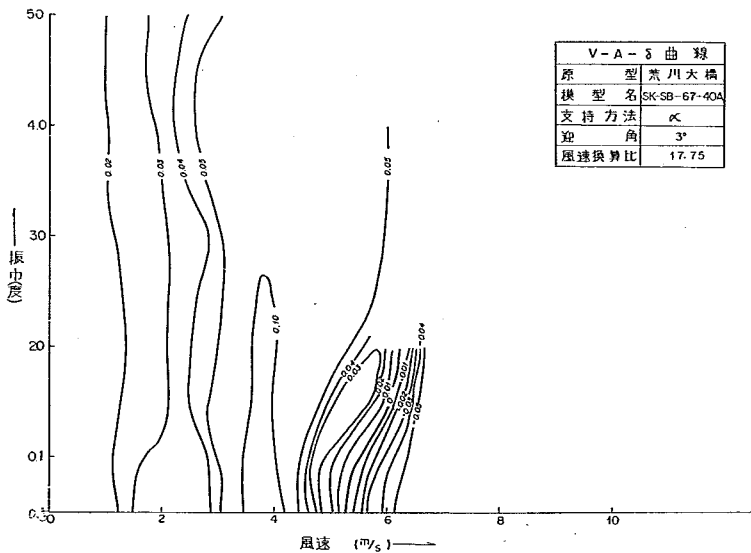


図 20.2.2

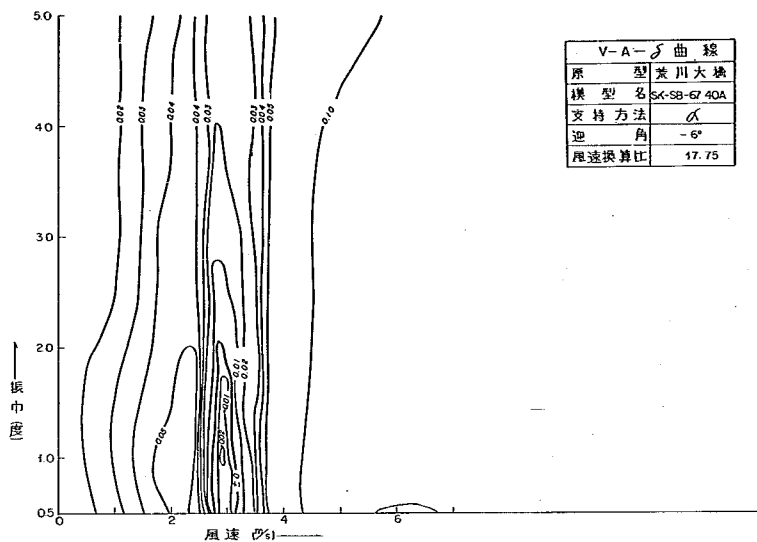


図 20.2.5

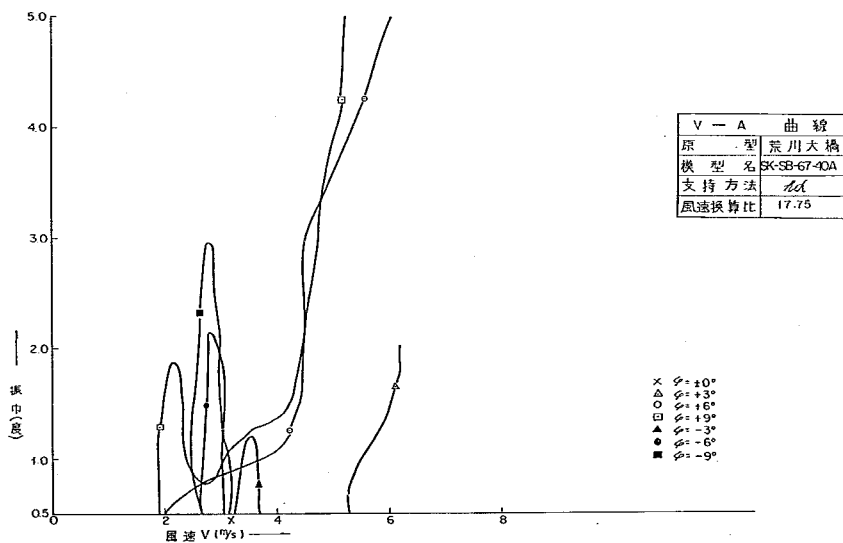


図 20.3

4-5-3 模型No3 (SK-SB-67 40A2)の特性

模型No3は原設計案における高欄をコンクリートで作った場合の性状を調べるために模型No1の高欄を紙で覆ったもので実験はha-mount についてのみ行ない、その結果は図-24に示してある。観測された模型の挙動は模型No1の場合とよく似ているが、限定振動の負減衰領域での対数減衰率の絶対値が大きくなっていることや、発散振動の発振風速が多小下っていること等から高欄の遮風効果を大きくすることは耐風性を悪くすることになる。

4-5-4 模型No4 (SK-SB-67 40A3)の特性

模型No4は原設計案の地覆の高さを減らすことにより耐風性がどのように変わるかを調べるために模型No1の地覆の高さを半分にしたもので、実験はha-mount についてのみ行ない、その結果を図-25に示してある。この場合も模型の挙動は模型No1のそれとよく似ているが、限定振動の振巾が小さくなっていることおよび発散振動の発振風速が大きくなっているから耐風性の向上に地覆の高さが影響することが明らかである。

4-5-5 模型No5 (SK-SB-67 40B)の特性

SK-SB-67 40Bは原設計案に外接する逆台形箱桁であってその実験結果を図26, 27, 28に示す。

この模型の挙動も傾向的には模型No1とよく似ているが、低風速で起る限定振動が模型No1~4では主として負の迎角で起るのに対してこの場合には正迎角で出現することおよびその減衰領域での対数減衰率の絶対値がかなり大きく構造物の減衰能が模型のそれより大きくても小さい振巾の振動があらわれると予想されること等からこの断面が原設計案より改善されたとは考えられない。

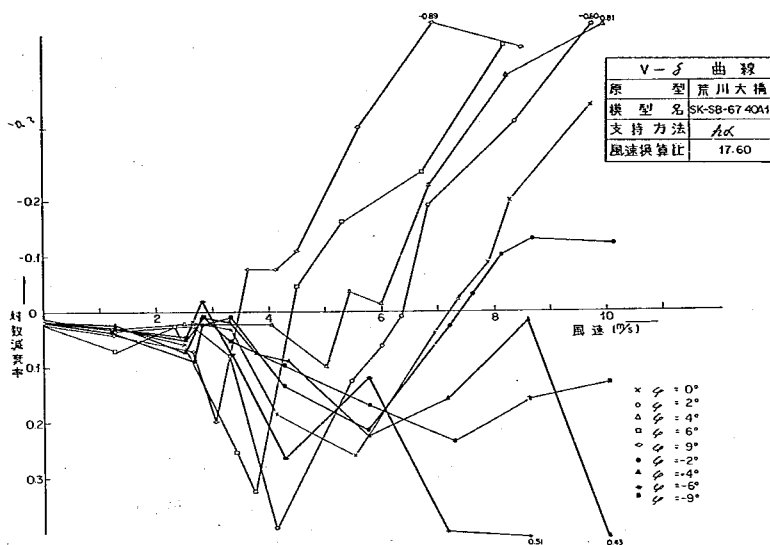


图 21.1

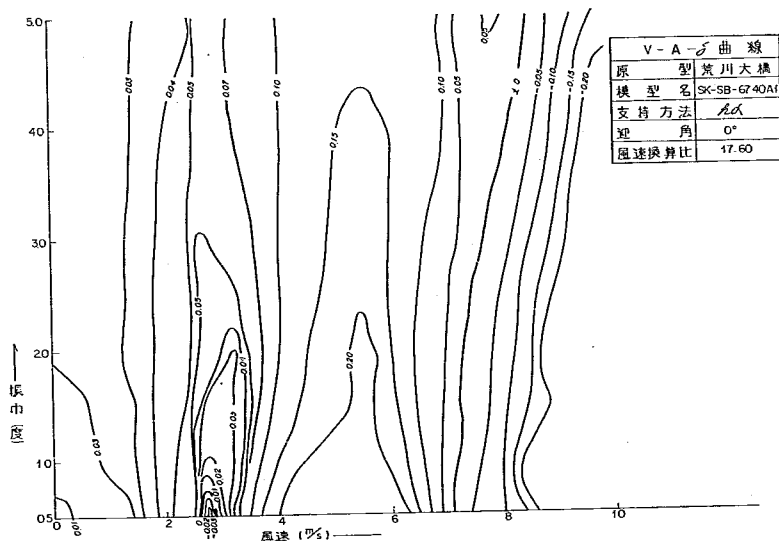


图 21.2.1

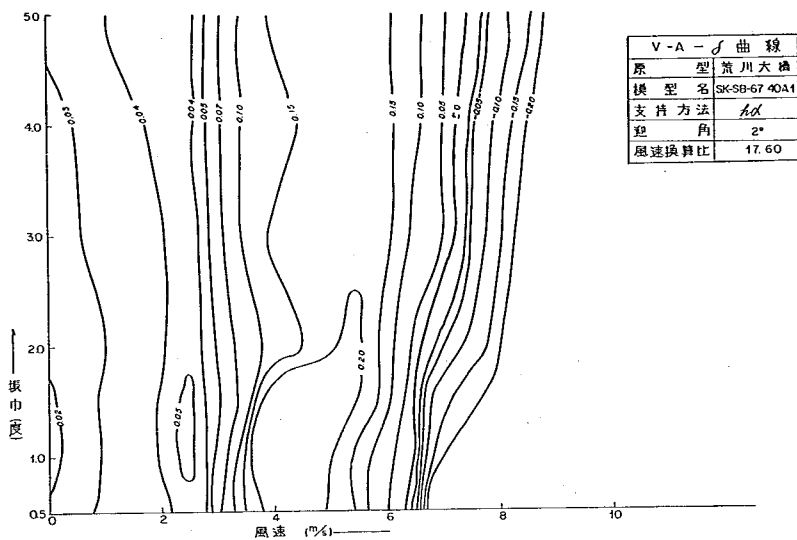


図 21.2.2

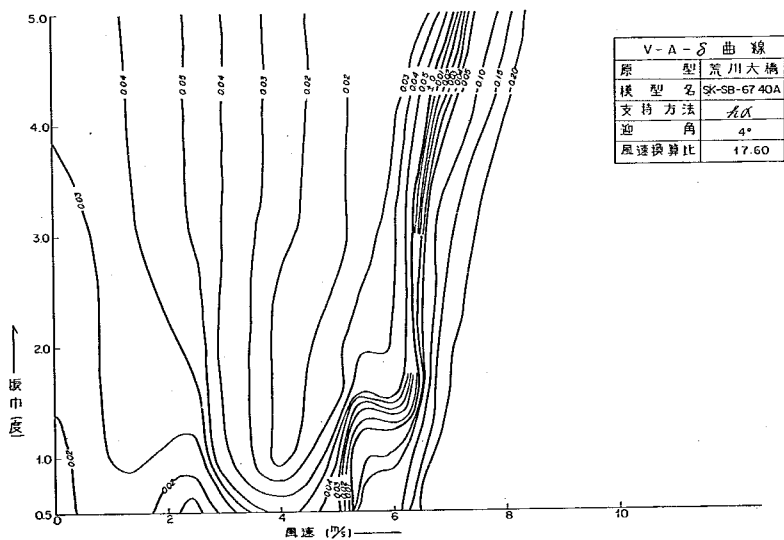


図 21.2.3

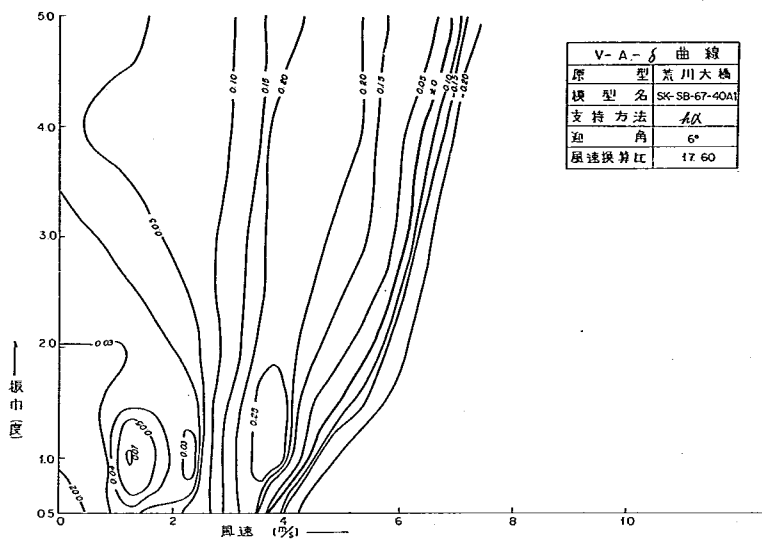


図 21.2.4

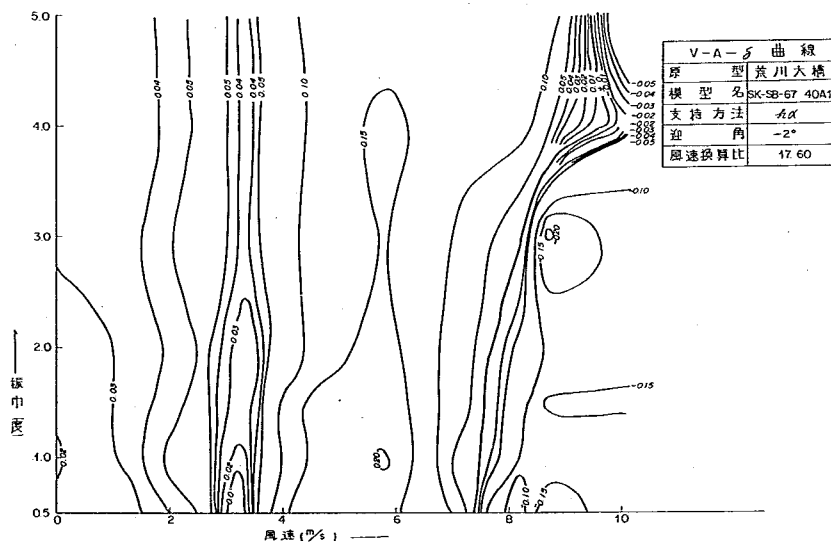


図 21.2.5

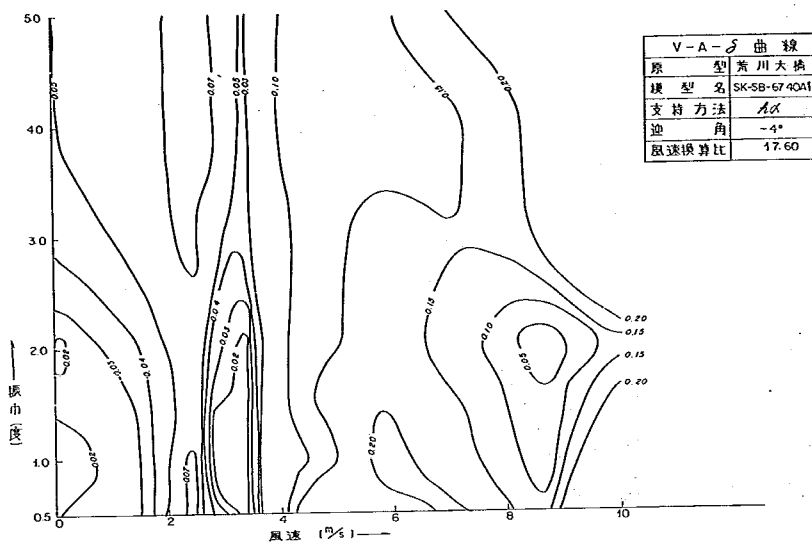


图 21.2.6

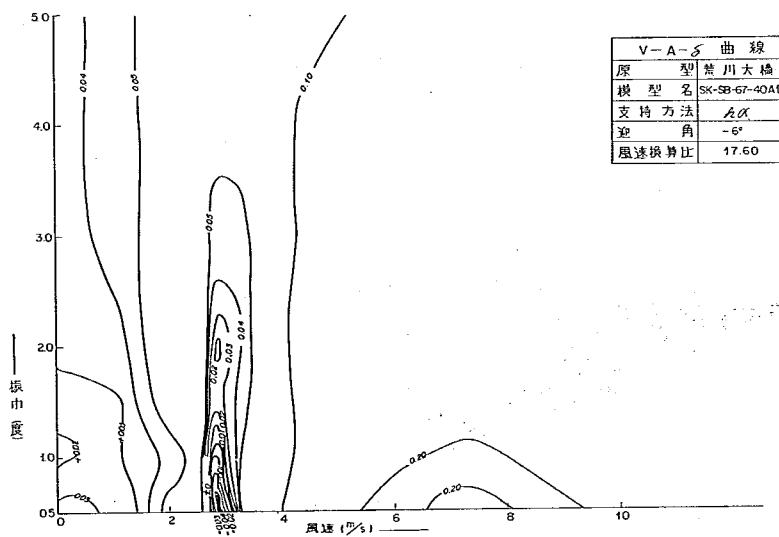


图 21.2.7

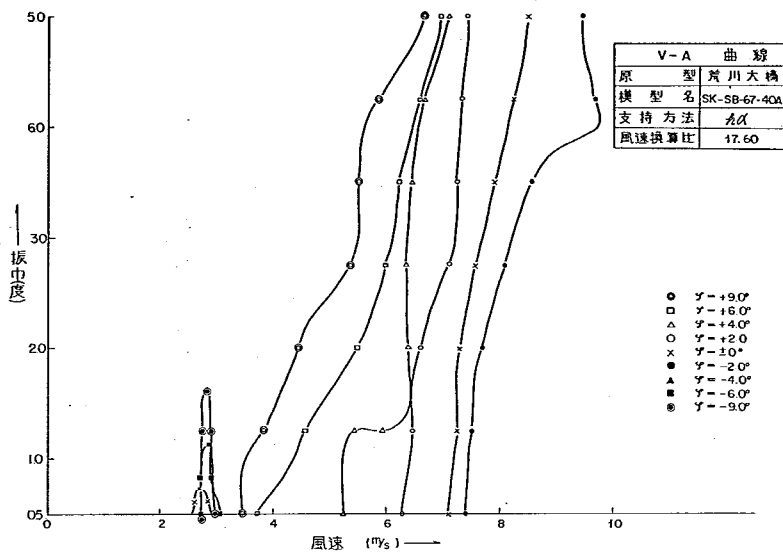


図 21.3

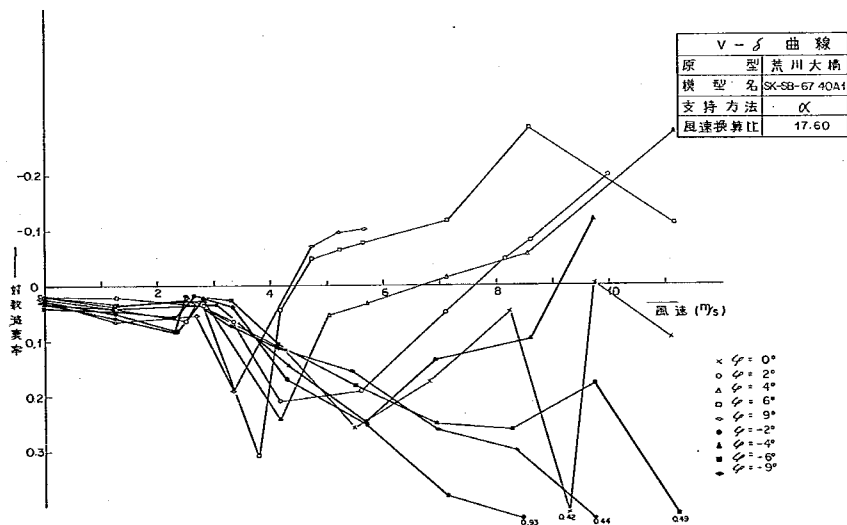


図 22.1

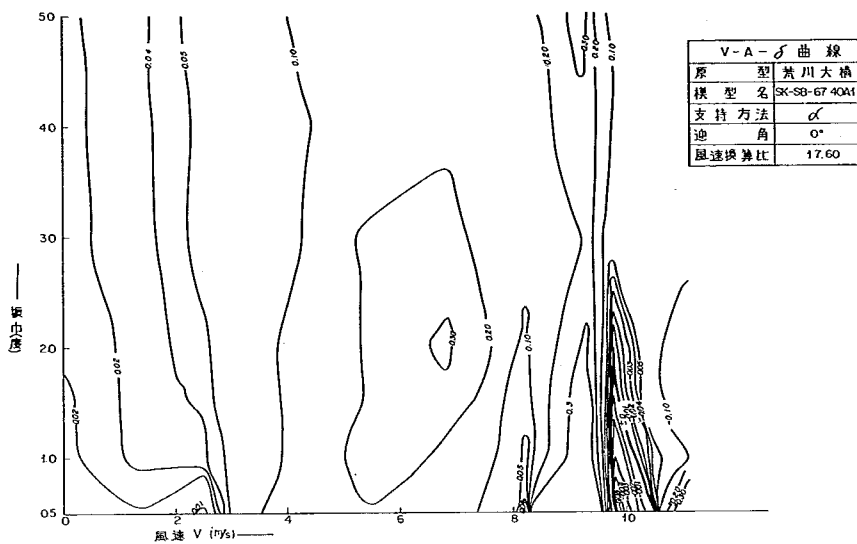


図 22.2.1

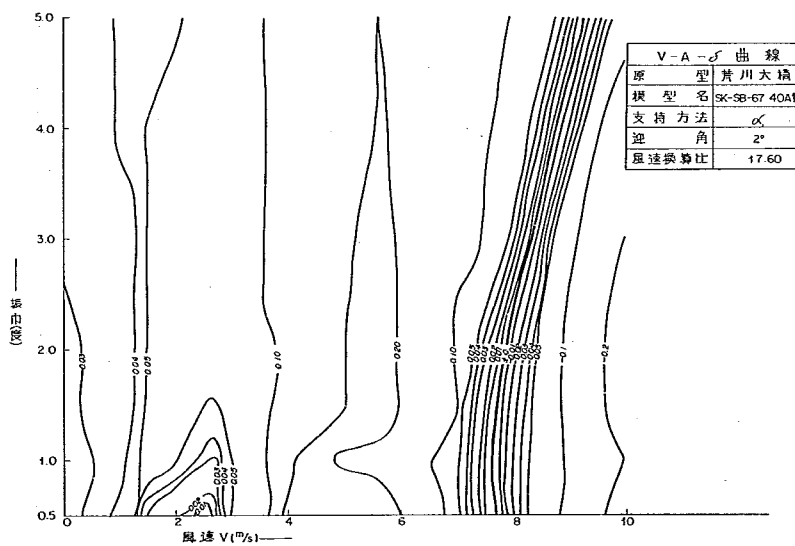


図 22.2.2

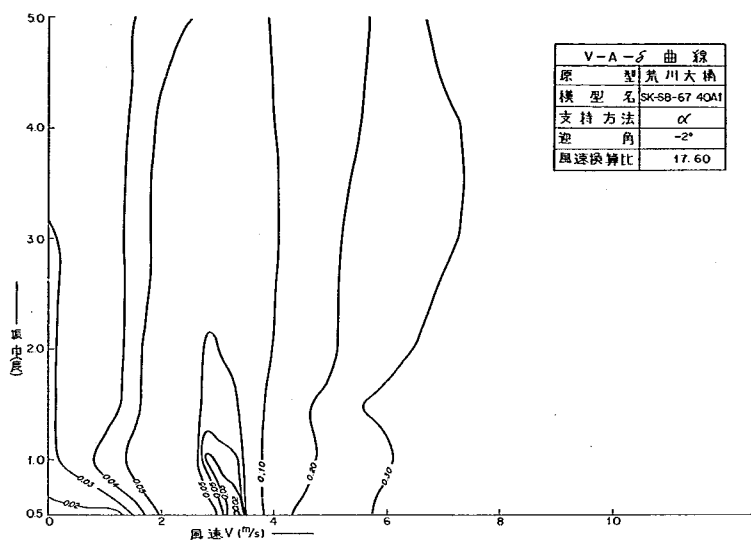


图 22.2.5

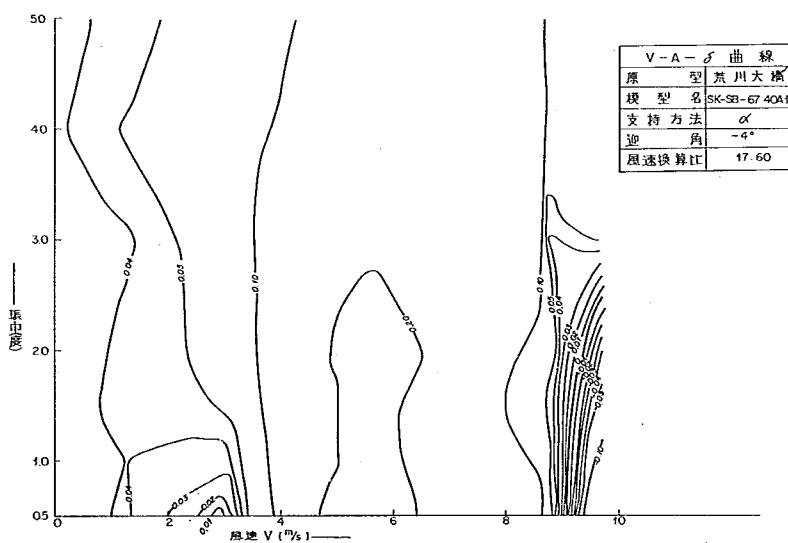


图 22.2.6

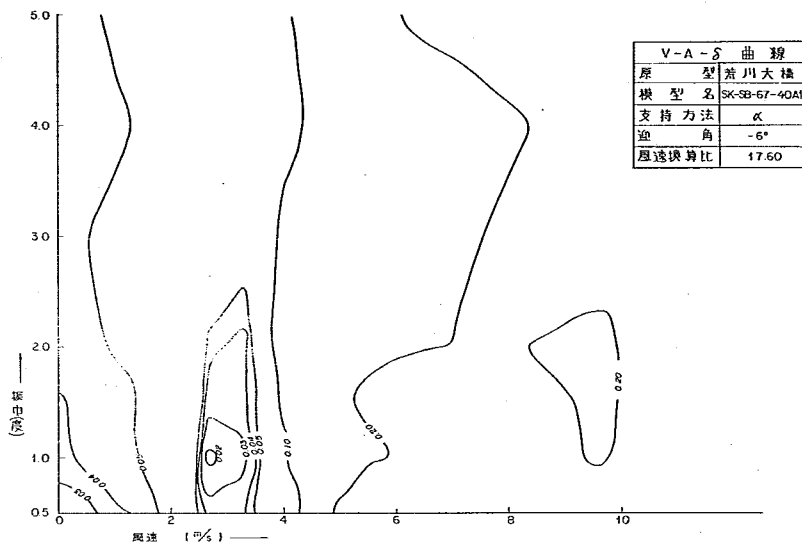


圖 22.2.7

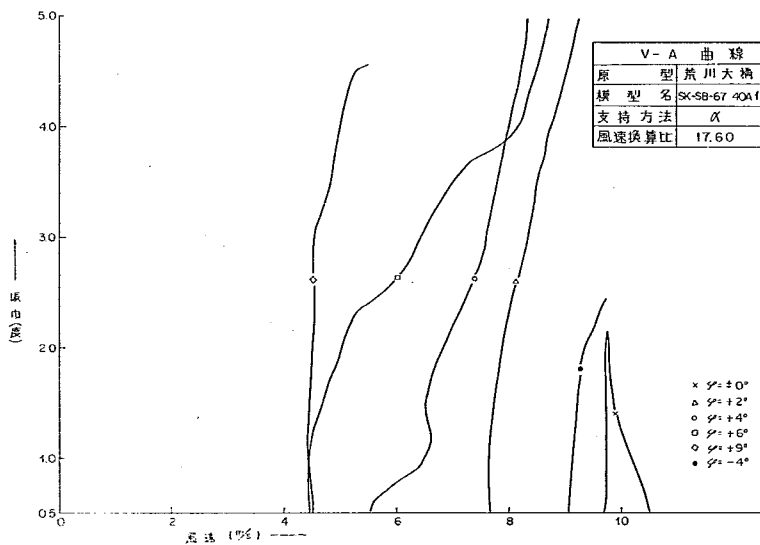


圖 22.3

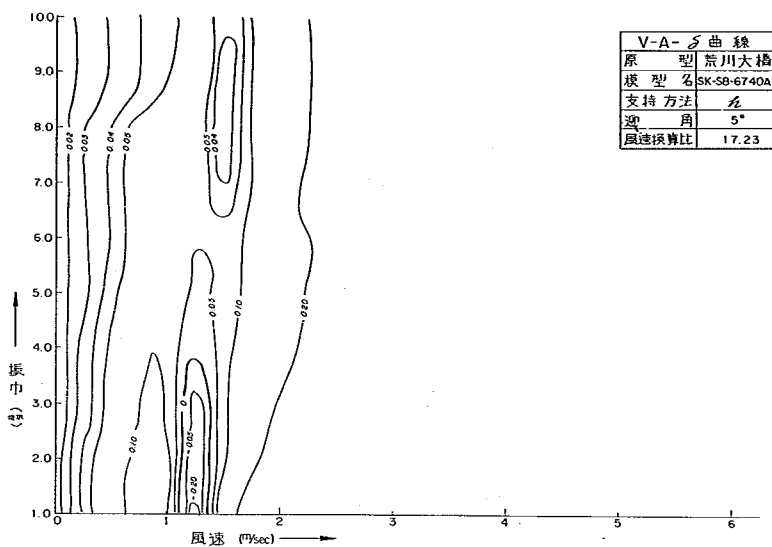


図 23

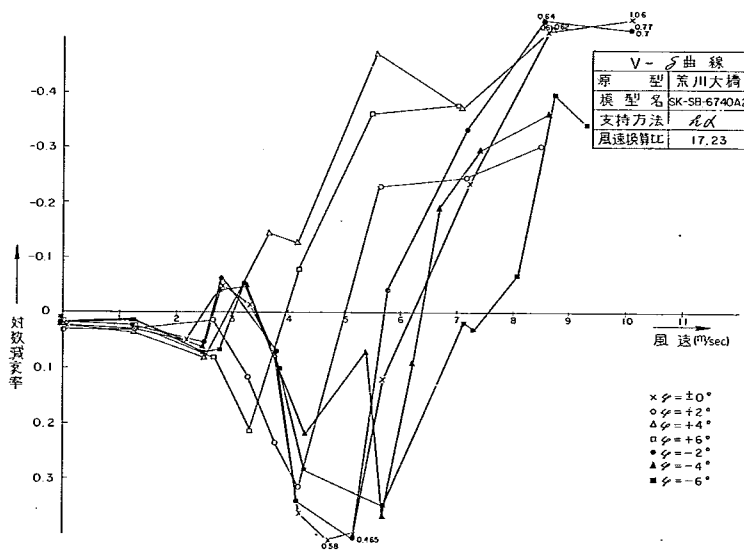


図 24.1

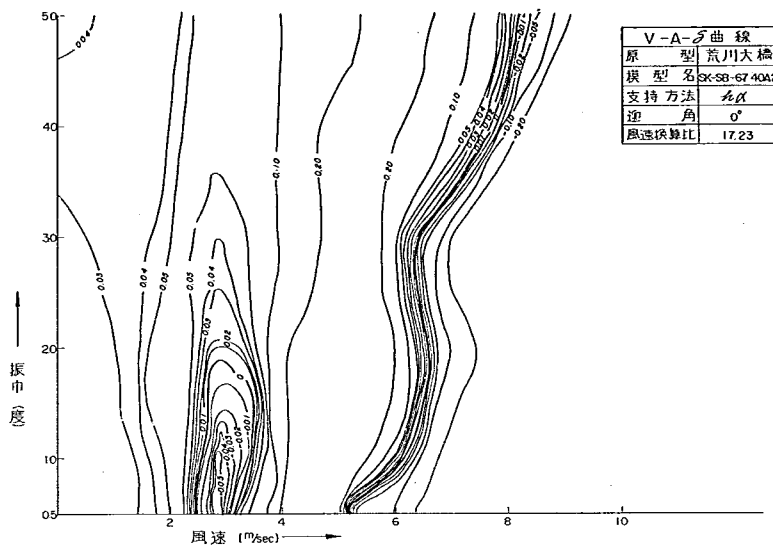


図 24.2.1

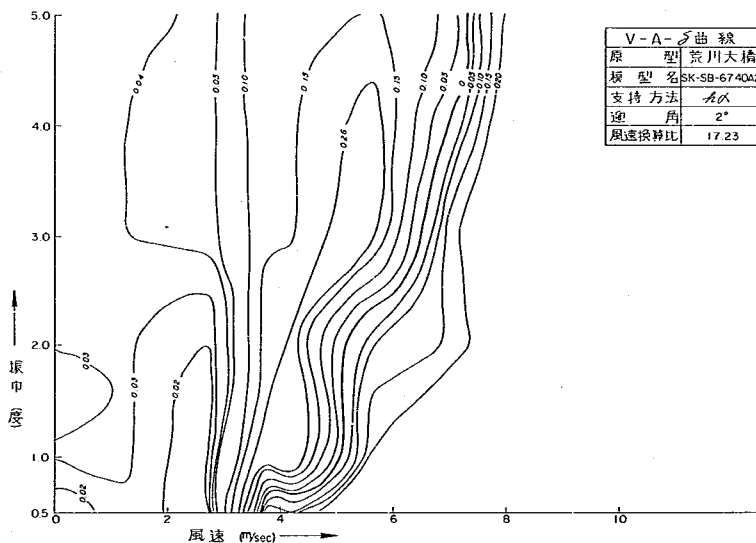
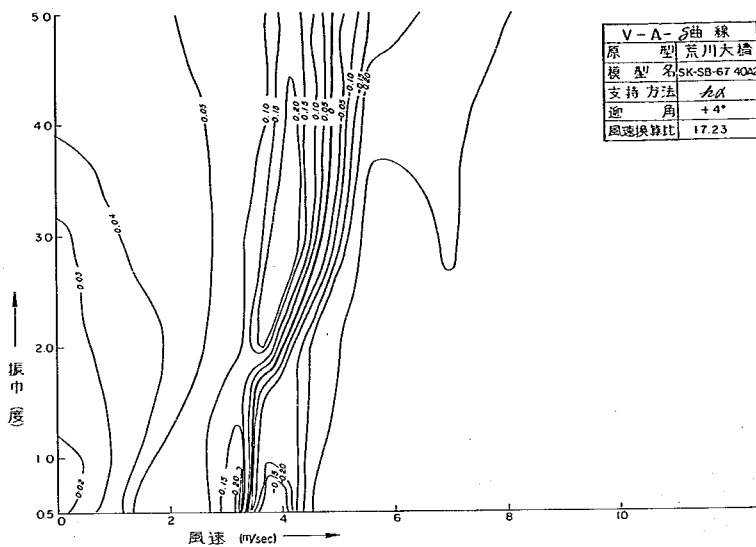


図 24.2.2



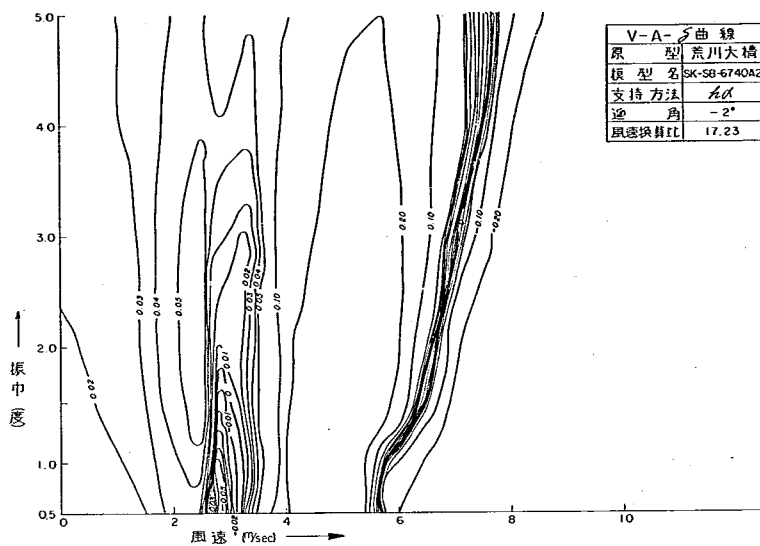


図 24.2.5

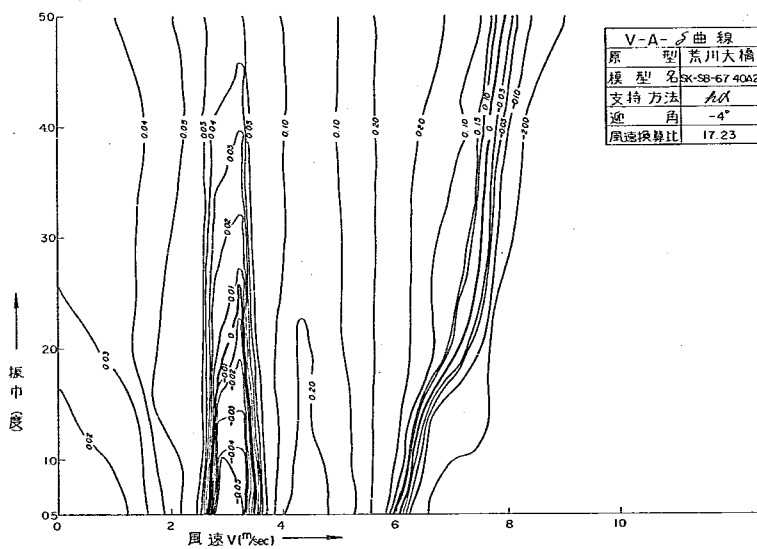


図 24.2.6

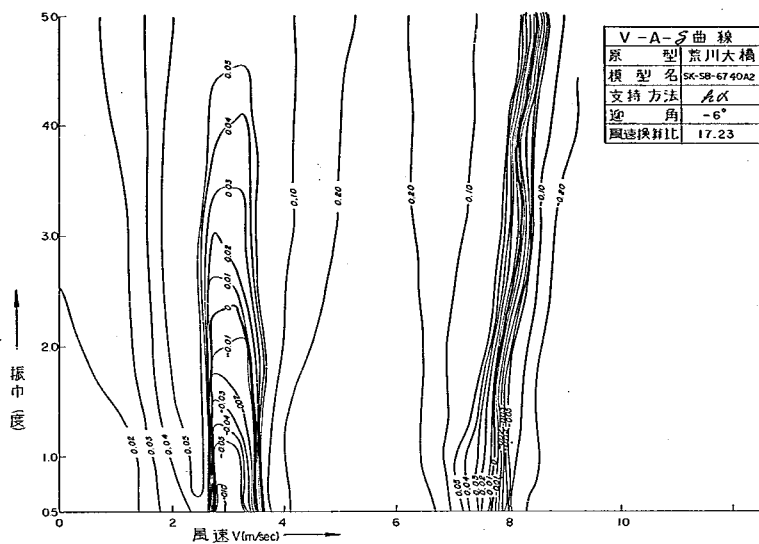


図 24.2.7

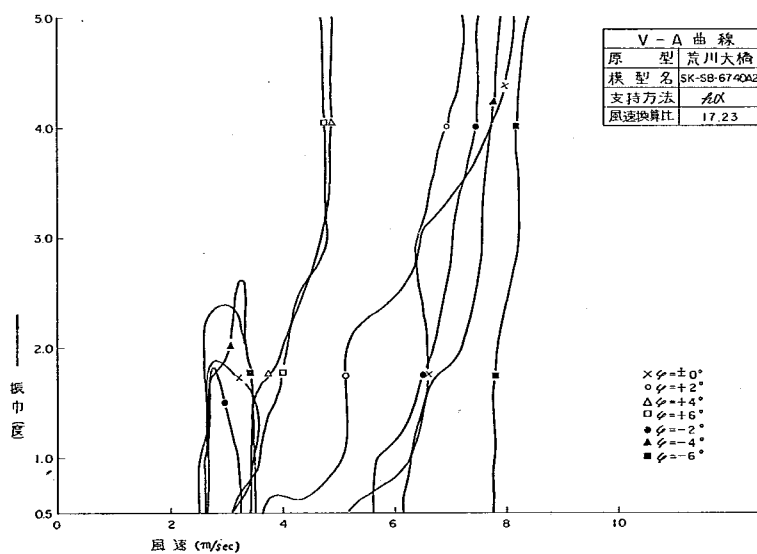


図 24.3

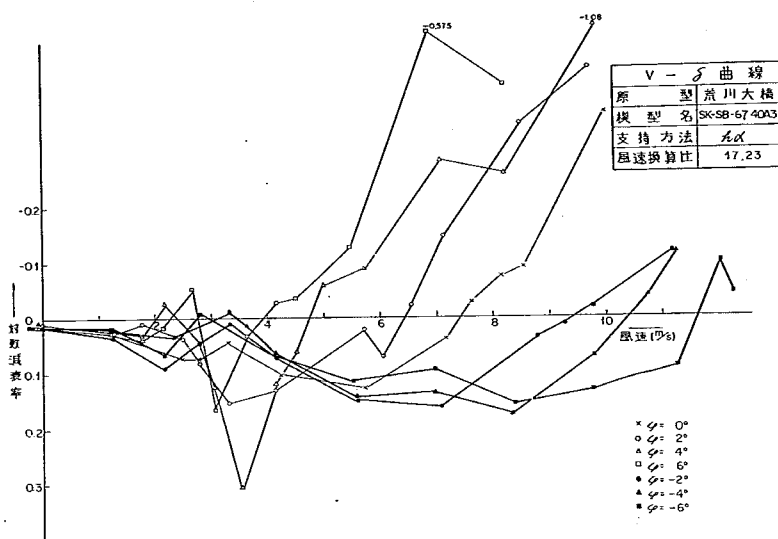


图 25.1

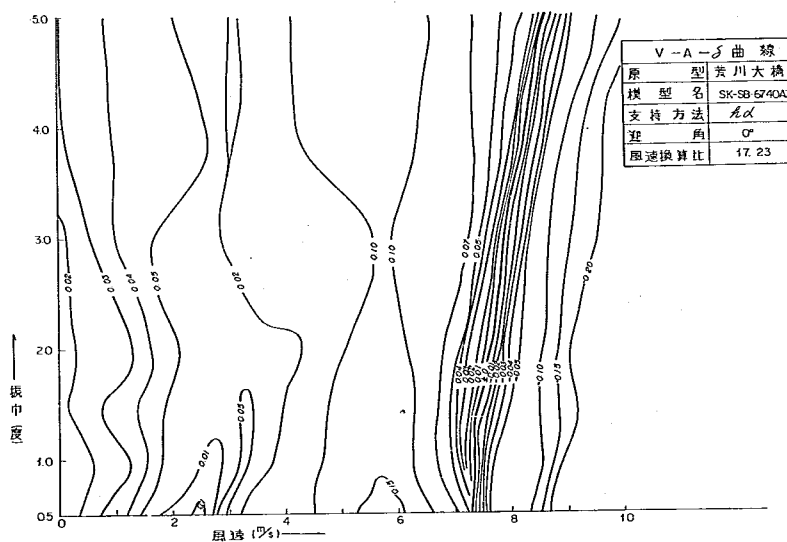


图 25.2.1

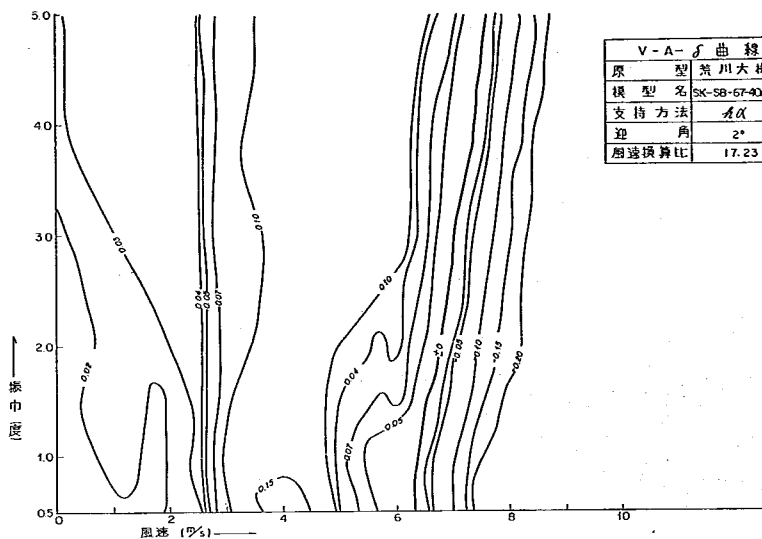


図 25.2.2

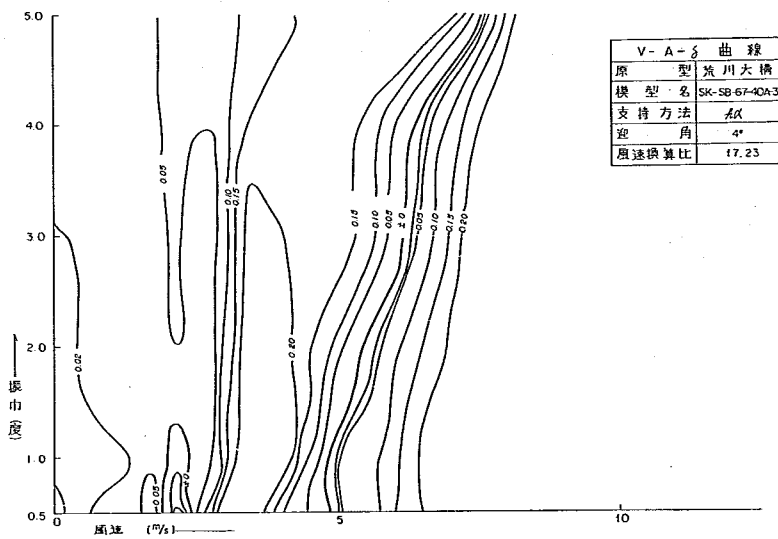


図 25.2.3

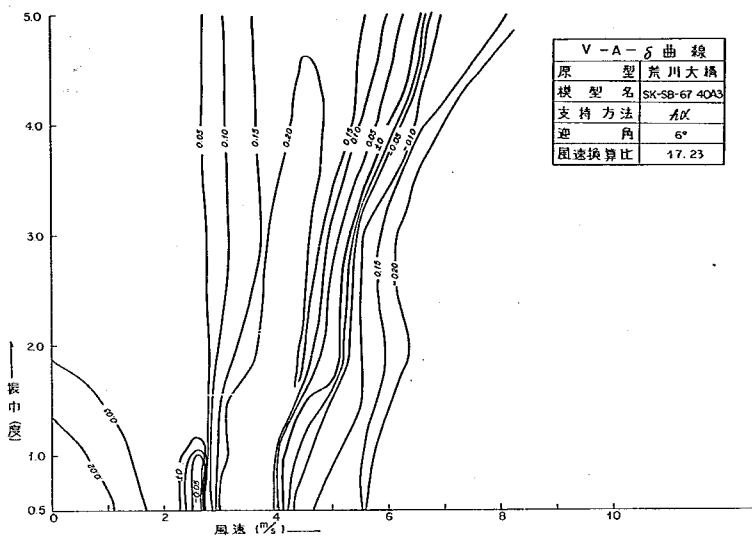


図 25.2.4

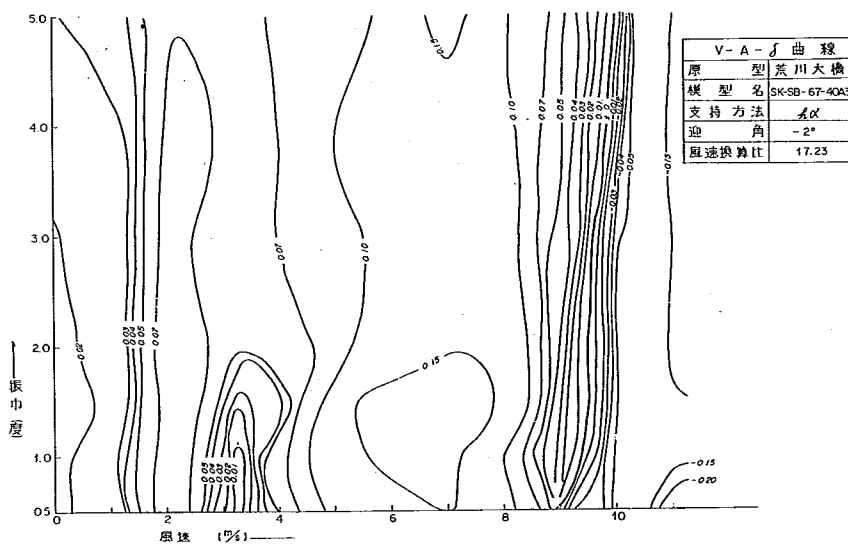


図 25.2.5

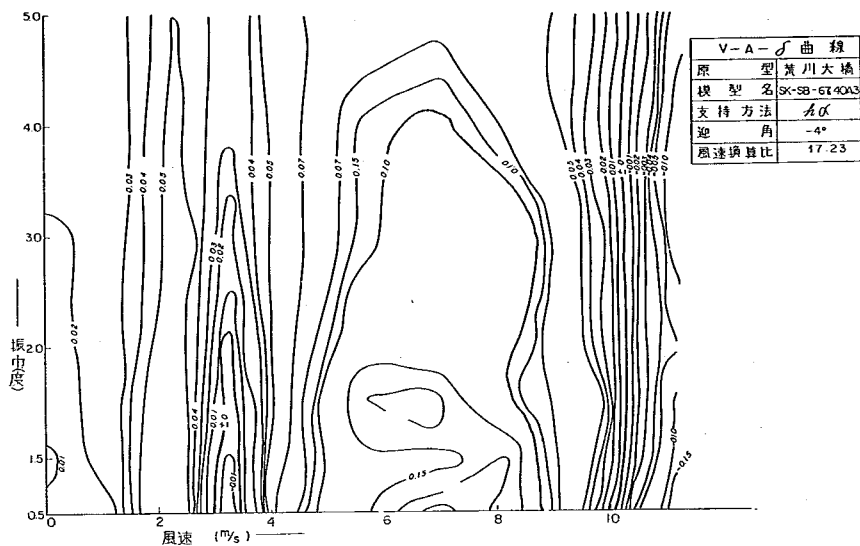


図 25.2.6

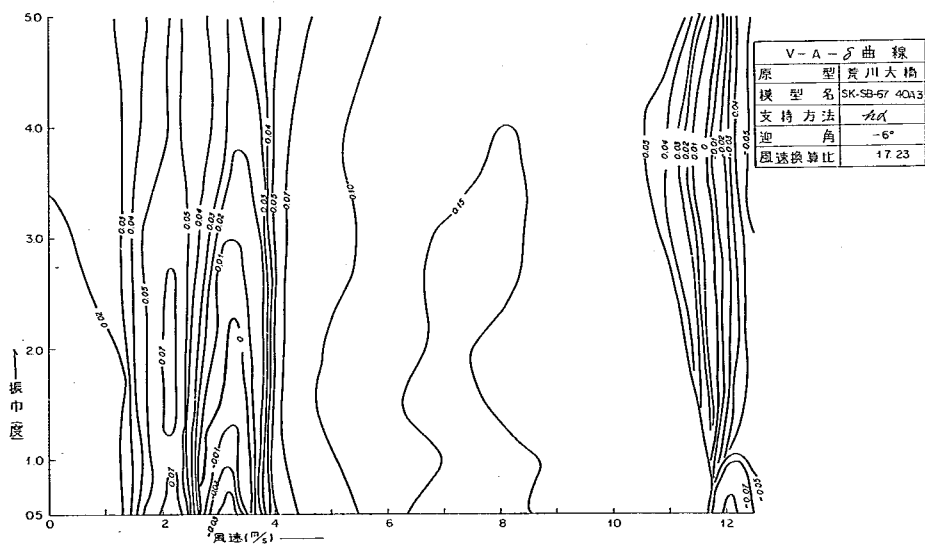


図 25.2.7

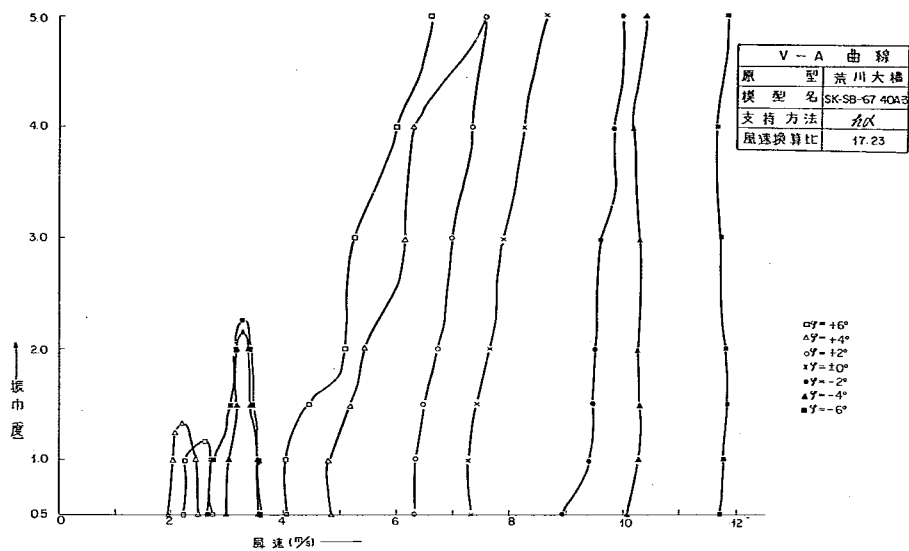


図 25.3

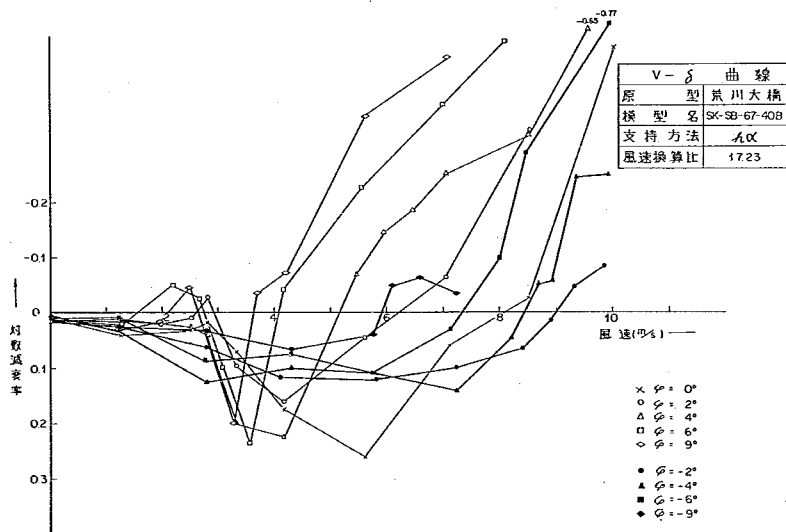
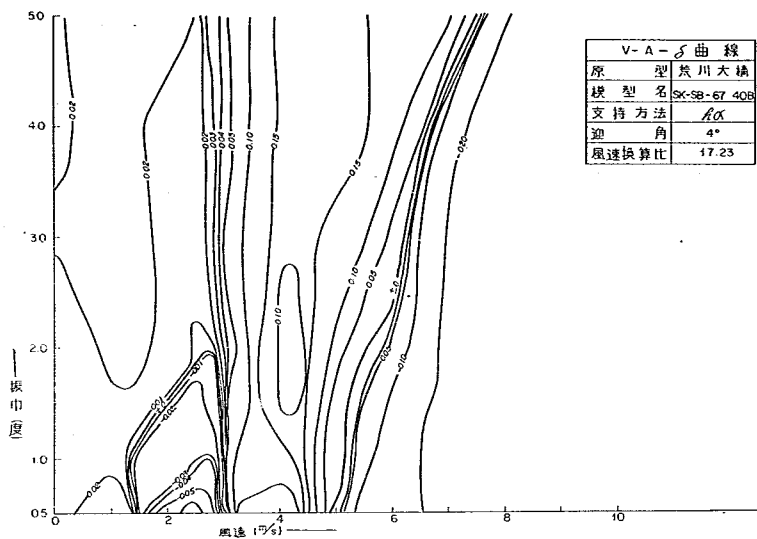
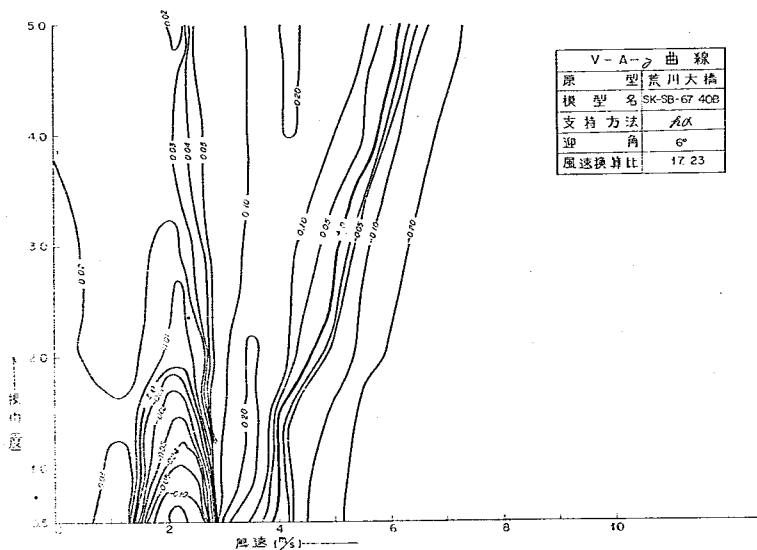


図 26.1



V-A- δ 曲線	
原 型	荒川大橋
模 型 名	SK-SB-67 40B
支 持 方 法	AA
迎 角	4°
風速換算比	17.23

図 26.2.3



V-A- δ 曲線	
原 型	荒川大橋
模 型 名	SK-SB-67 40B
支 持 方 法	AA
迎 角	6°
風速換算比	17.23

図 26.2.4

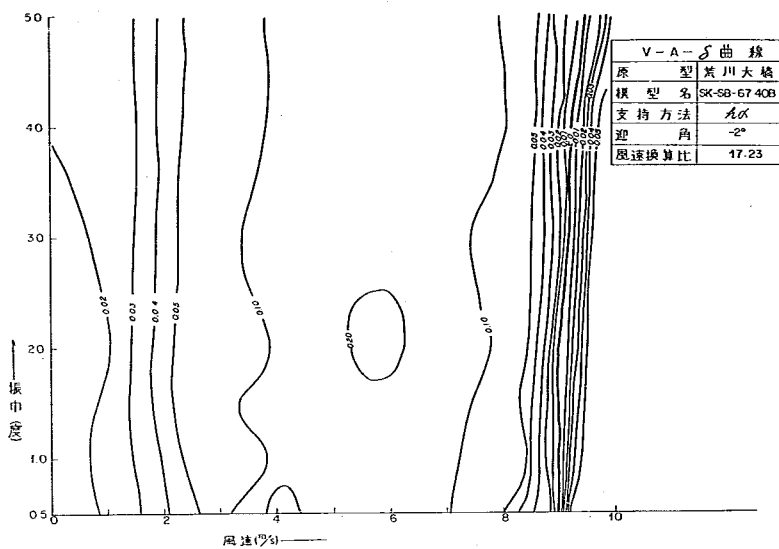


图 26.2.5

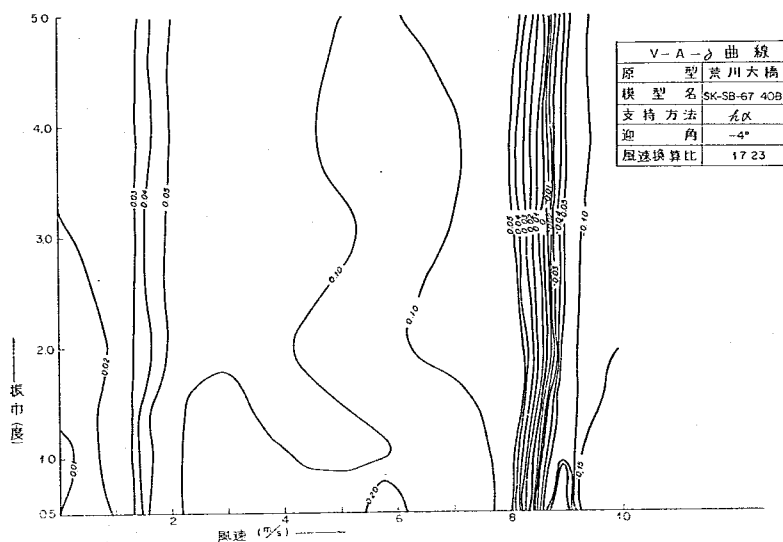


图 26.2.6

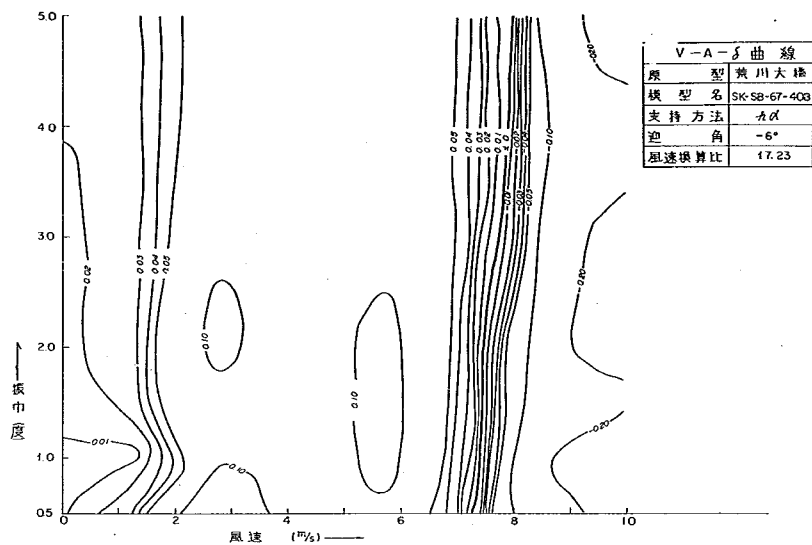


図 26.2.7

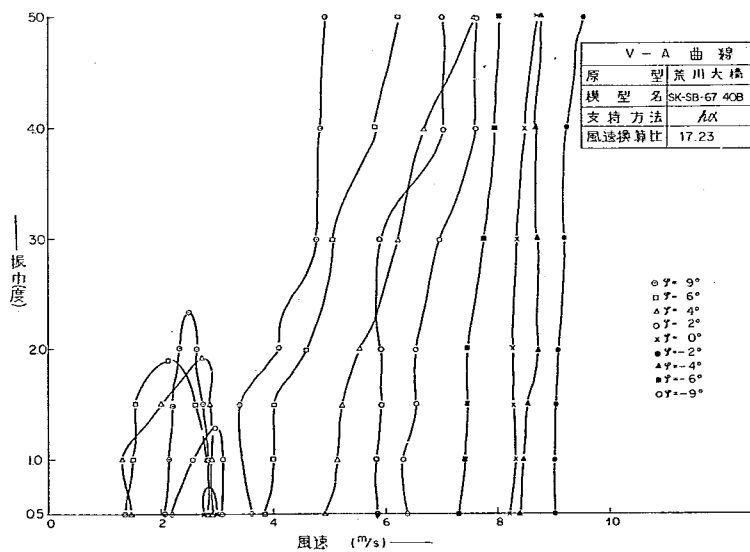
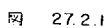


図 26.3



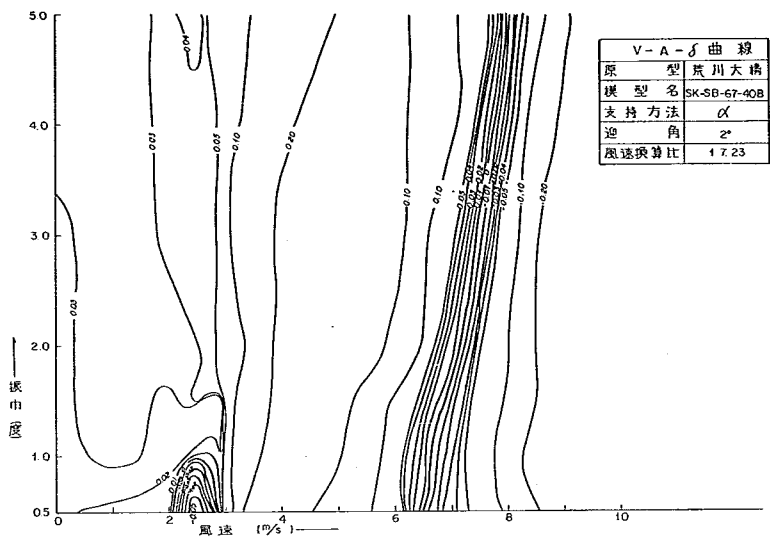


図 27.2.2

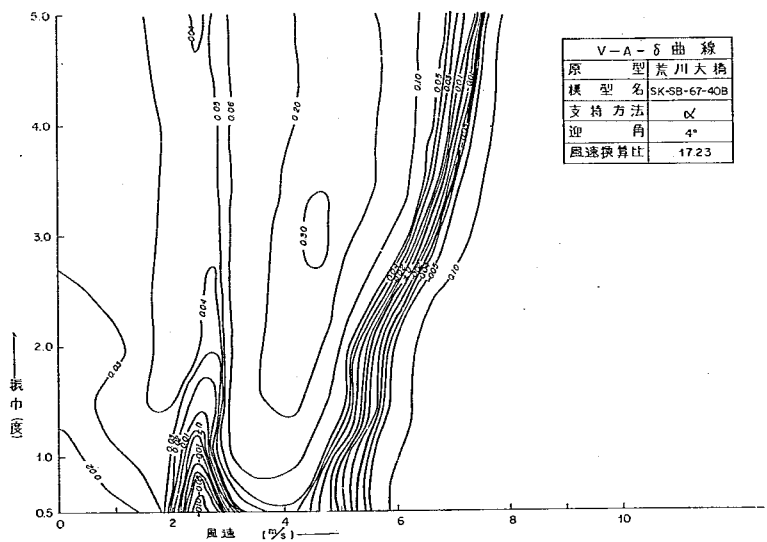


図 27.2.3

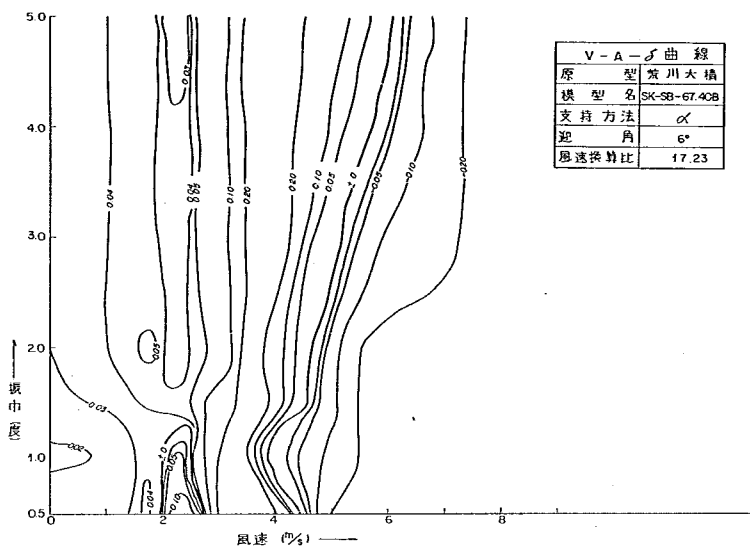


図 27.2.4

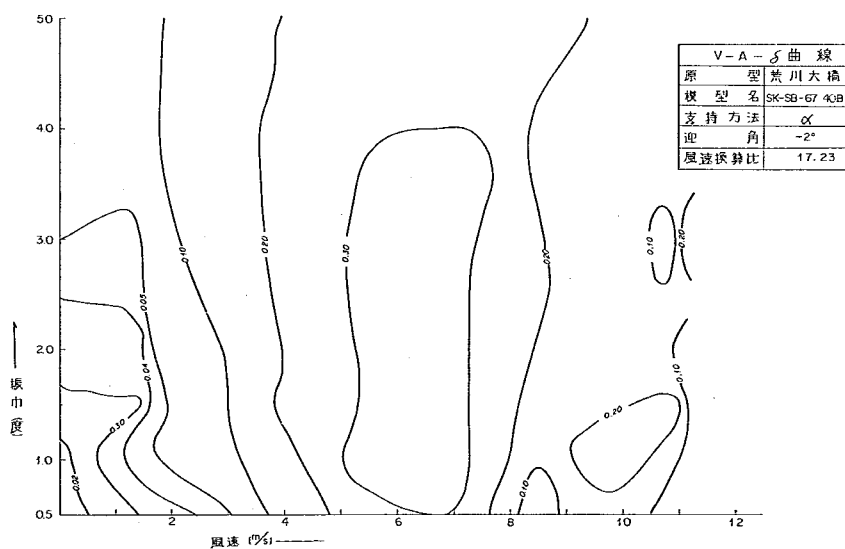


図 27.2.5

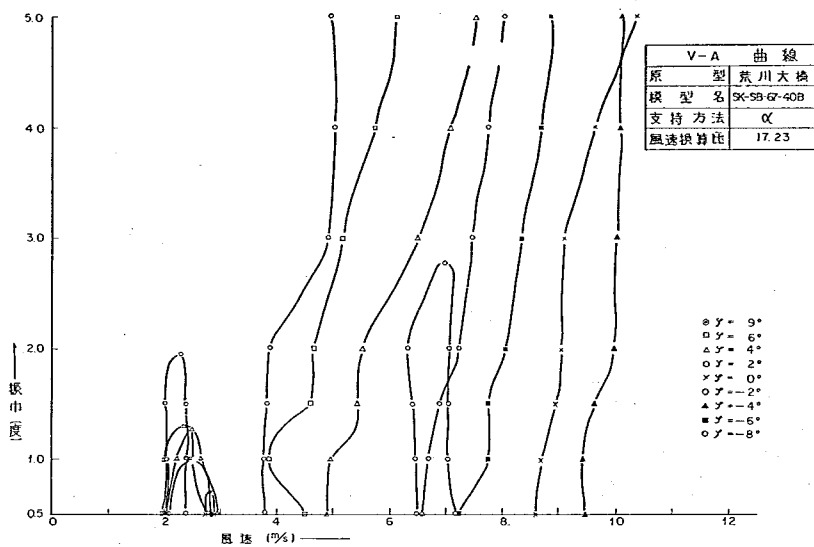


図 27.3

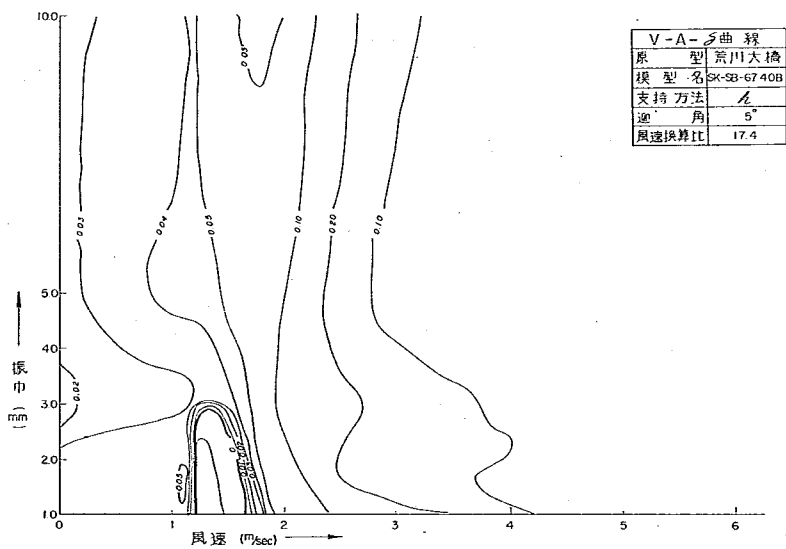


図 28

§5 実験結果の検討と考察

5-1 実験結果の実橋への換算

模型実験で発振風速が求まれば相似関係

$$(V/NB)_p = (V/NB)_m$$

から直ちに実橋に換算することが出来る。その結果を表-2に、また迎角と実橋の発振風速の関係を図-29に示す。但し表中のR.Cは限定振動 (Restricted Oscillation), C.Oは発散振動 (Catastrophic Oscillation) の略である。唯ここで計算された値がそのまま実橋の自励振動の限界風速とはならない。なぜなら今回の実験においては構造減衰についての相似係が満足されておらず、模型の構造減衰を出来るだけ小さくして安全側の実験を行っており、模型の発振風速は実際よりも低くなっている。

表2 発 振 風 速

模 型 名	支持 方法	迎角	振 動 数		模型での発振風速		実橋での発振風速		振巾の種類	備 考					
			上下振動 f _z	回転振動 f _θ	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速							
SK-SB-67 40A	hα	0		4.71	m/s 2.4	—	m/s 42.6	—	R.O.	最大振巾 θ _{max} =0.8°					
				7.3	7.3	129.0	129.0	C.O.							
		3		3.68	1.9	—	33.6	—	R.O.		θ _{max} =0.9°				
				4.6	4.9	81.6	87.0	C.O.							
		6		3.40	1.9	1.9	33.6	33.6	R.O.			θ _{max} =1.25°			
				3.6	3.75	63.9	66.5	C.O.							
		9		3.73	—	—	—	—	R.O.				θ _{max} =1.15°		
				2.85	3.15	50.6	56.0	C.O.							
		-3		4.02	2.5	2.5	44.4	44.4	R.O.					θ _{max} =2.5°	
				>6.5	>6.5	>115	>115	C.O.							
		-6		3.65	2.6	2.6	46.1	46.1	R.O.						θ _{max} =3.4°
				>6.5	>6.5	>115	>115	C.O.							
	-9		3.70	2.25	2.3	40.0	40.8	R.O.	θ _{max} =1.85°						
			>6.5	>6.5	>115	>115	C.O.								
	0		3.90	—	—	—	—	R.O.		θ _{max} =0.95°					
			>6.5	>6.5	>115	>115	C.O.								
	3		3.72	—	—	—	—	R.O.			θ _{max} =2.1°				
			5.3	5.5	94.2	97.6	C.O.								
	6		3.77	—	—	—	—	R.O.				θ _{max} =2.95°			
			2.2	3.9	39.0	69.2	C.O.								
	9		3.72	1.9	1.9	33.7	33.7	R.O.					θ _{max} =0.75°		
			2.5*	3.0	44.4*	53.2	C.O.								
	-3		3.66	3.2	3.3	56.8	56.8	R.O.						θ _{max} =0.75°	
			>6.5	>6.5	>115	>115	C.O.								
	-6		3.66	2.75	2.75	48.8	48.8	R.O.	θ _{max} =0.75°						
			76.5	76.5	>115	>115	C.O.								
	-9		3.72	2.5	2.5	44.4	44.4	R.O.		θ _{max} =0.75°					
			76.5	76.5	>115	>115	C.O.								
SK-SH-67 40A1	hα	0		3.78	2.6	—	45.8	—			R.O.				θ _{max} =0.75°
				7.1	7.25	125	127.5	C.O.							

模 型 名	支持 方法	迎角	振 動 数		模型での発振風速		実橋での発振風速		振巾の種類	備 考
			上下振動 f_z	回転振動 f_θ	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速		
SK-SB-67 40A1	ha	2		3.71	m/s	m/s	m/s	m/s	R.O	$\theta_{max}=1.1^\circ$ $\delta_{max}=1.6^\circ$
					6.3	6.4	111	112.5	C.O	
				3.73	—	—	—	—	R.O	
					5.25	6.0	92.5	105	C.O	
				3.70	—	—	—	—	R.O	
					3.75	4.6	66.0	81.0	C.O	
				3.66	—	—	—	—	R.O	
					3.4	3.5	59.9	61.6	C.O	
				3.66	—	—	—	—	R.O	
					7.4	7.5	130	132.0	C.O	
				3.68	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				3.75	2.75	2.75	48.5	48.5	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				3.78	2.75	2.75	48.5	48.5	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
			α	3.88	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				3.84	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	7.0	>123	>123	C.O	
				3.83	—	—	—	—	R.O	
					5.5	6.5	96.8	114	C.O	
				3.83	—	—	—	—	R.O	
					4.5	4.5	79.0	79.0	C.O	
				3.81	—	—	—	—	R.O	
					4.5	4.5	79.0	79.0	C.O	
				3.81	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				2.66	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				3.79	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				3.62	—	—	—	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
			h	—	—	—	—	—	R.O	
				1.46	>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
					—	—	—	—	R.O	
				1.44	>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
				1.48	1.2	—	21	—	R.O	
					>7.0	>7.0	>123	>123	C.O	
										(出)h=2mm(の発振風速) fmax=3mm
SK-SB-67 40A2	ha	0		3.86	2.5	2.55	43.0	43.9	R.O	$\theta_{max}=1.75^\circ$
					5.1	6.3	87.8	108.5	C.O	
				3.89	—	—	—	—	R.O	
					3.6	5.1	62.0	87.9	C.O	
				3.91	—	—	—	—	R.O	
					3.5	3.5	60.3	60.3	C.O	
				3.87	—	—	—	—	R.O	$\theta_{max}=1.75^\circ$ $\theta_{max}=2.6^\circ$
					3.2	3.5	55.1	60.7	C.O	
				3.95	—	—	—	—	R.O	
					3.94	2.7	46.5	46.5	C.O	
					5.6	5.6	96.5	96.5	R.O	
				3.85	2.7	2.7	46.5	46.5	C.O	
					6.0	6.3	103.4	108.5	C.O	

模 型 名	支持 方法	迎角	振 動 数		模型での発振風速		実橋での発振風速		振巾の種類	備 考
			上下振動 f_z	回転振動 f_θ	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速	振巾0.5°を 越える風速	振巾1°を越 える風速		
SK-SB-67 40A2	ha	-6		3.87	m/s 2.7 7.8	m/s 2.7 7.8	m/s 46.5 134.4	m/s 46.5 134.4	R.O C.O	$\theta_{max}=2.3^\circ$
		-9		3.90						
SK-SB-67 40A3	ha	0		3.89	-	-	-	-	R.O C.O	$\theta_{max}=1.3^\circ$
		2		3.98	>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
		4		3.98	6.3 1.95	6.3 2.05	109 33.6	109 35.4	R.O C.O	
		6		4.00	4.8 2.2	4.8 2.2	82.9 38.0	82.9 38.0	R.O C.O	
		-2		4.00	4.1	4.1	70.7	70.7	R.O C.O	$\theta_{max}=1.15^\circ$
		-4		4.00	>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
		-6		4.00	3.0	3.05	51.7	52.5	R.O C.O	$\theta_{max}=2.15^\circ$
					>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	$\theta_{max}=2.25^\circ$
					2.7	2.75	46.5	47.4	R.O C.O	
					>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
SK-SB-67 40B	ha	0		3.86	2.8	-	48.3	-	R.O C.O	$\theta_{max}=1.3^\circ$
		2		3.90	>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
		4		3.88	2.2	2.6	38	44.8	R.O C.O	
		6		3.91	6.3	6.3	108.5	108.5	R.O C.O	
		9		3.85	1.5	1.3	25.8	22.4	R.O C.O	$\theta_{max}=1.9^\circ$
		-2		3.90	4.9	5.1	84.5	88.0	R.O C.O	
		-4		3.89	1.4	1.5	24.2	25.8	R.O C.O	$\theta_{max}=1.9^\circ$
		-6		3.87	3.8	4.0	65.5	69.0	R.O C.O	
		-9		3.80	2.1	2.1	36.2	36.2	R.O C.O	$\theta_{max}=2.35^\circ$
					3.6	3.4	62.0	58.6	R.O C.O	
					>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
					>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
	a	0		3.89	5.9	5.9	101.6	101.6	R.O C.O	$\theta_{max}=0.7^\circ$
		2		3.80	2.75	2.75	47.4	47.4	R.O C.O	
		4		3.83	>7.0	>7.0	>7.0	>7.0	R.O C.O	
		6		3.80	2.1	2.5	36.2	43.2	R.O C.O	
		9		3.77	6.6	6.7	114.0	115.0	R.O C.O	$\theta_{max}=1.25$
		-2		3.75	2.1	2.2	36.2	38.0	R.O C.O	
		-4		3.67	4.9	4.9	84.5	84.5	R.O C.O	$\theta_{max}=1.25$
		-6		3.82	2.0	2.0	34.5	34.5	R.O C.O	
		-9		3.85	4.5	3.7	77.7	63.8	R.O C.O	
					2.0	2.0	34.5	34.5	R.O C.O	
					3.8	3.8	65.5	65.5	R.O C.O	
					>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
	h	0	1.46		6.5	6.4	>121	>121	R.O C.O	$\theta_{max}=3.9^\circ$ ($\theta_{max}=2mm$ での発振風速)
		5	1.48		>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
		-5	1.44		>7.0	>7.0	>121	>121	R.O C.O	
					1.1	-	19.0	-	R.O C.O	

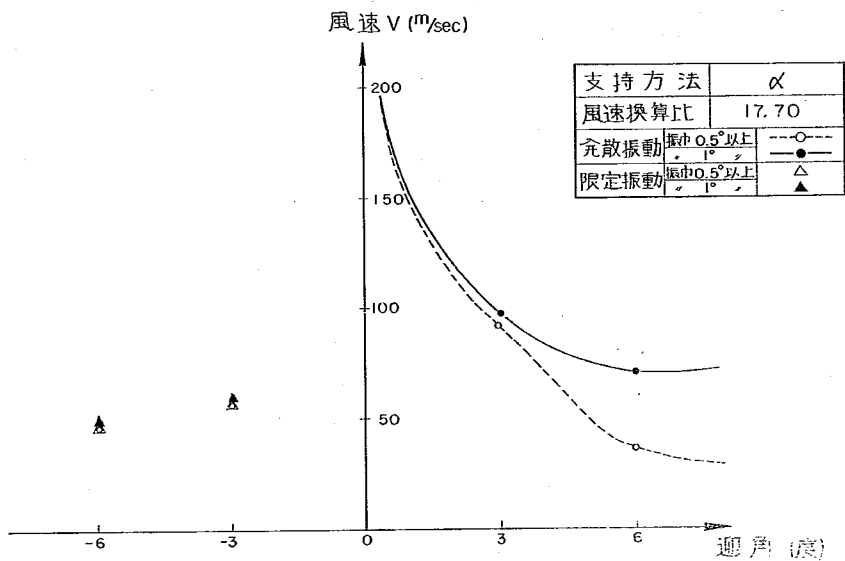
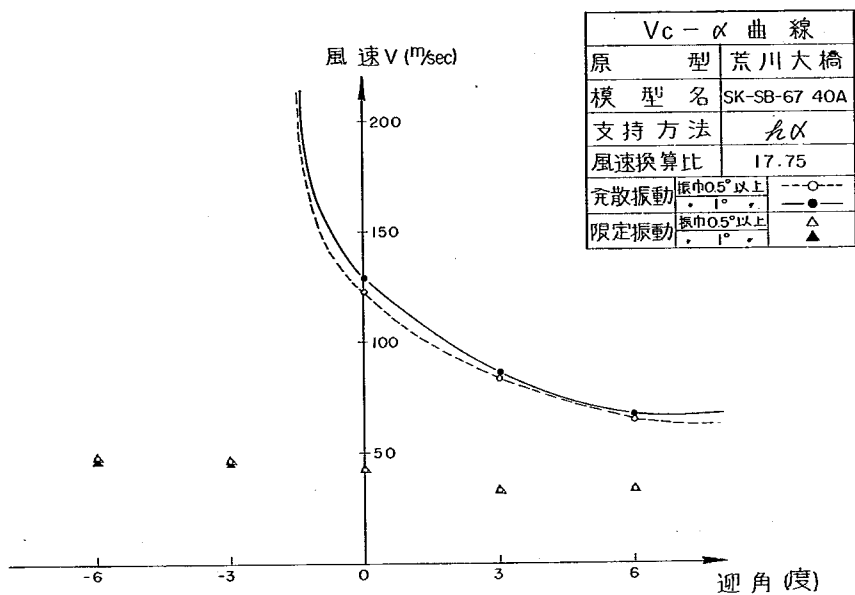


図 29.1

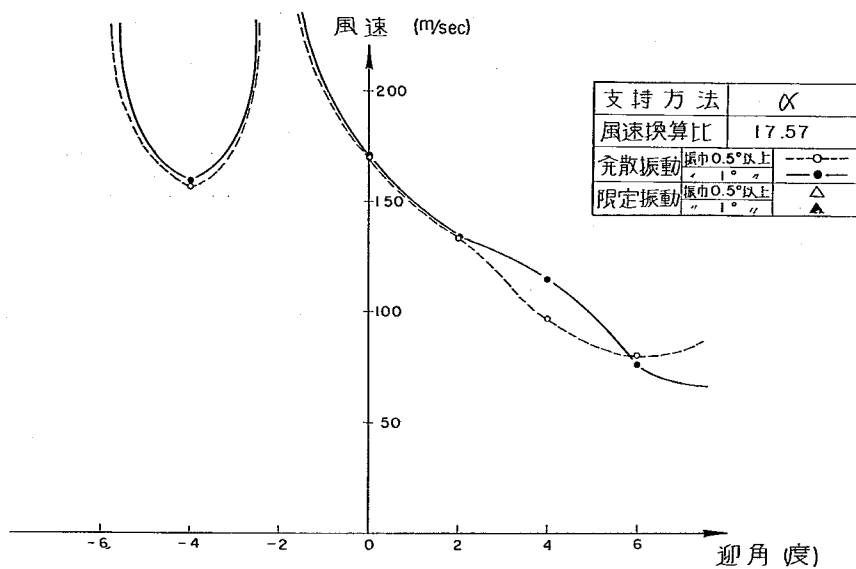
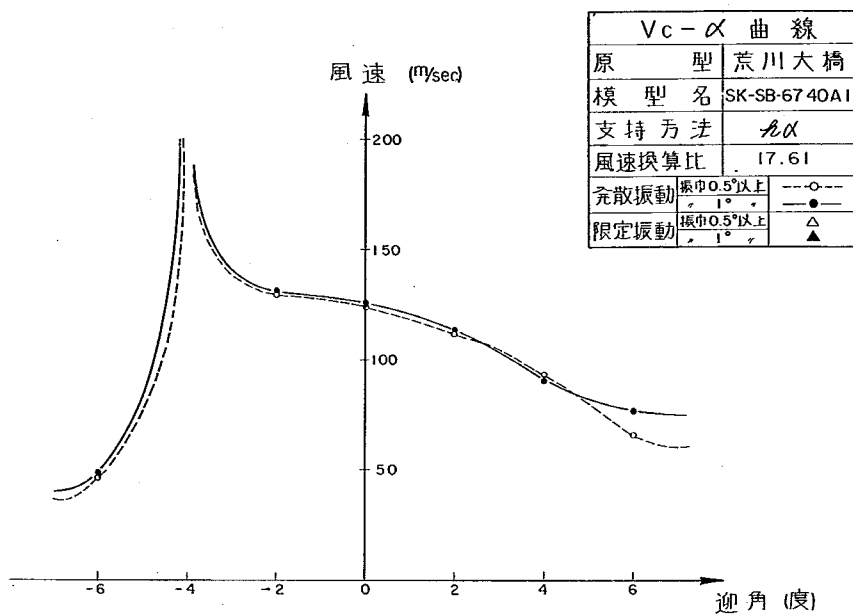


図 29.2

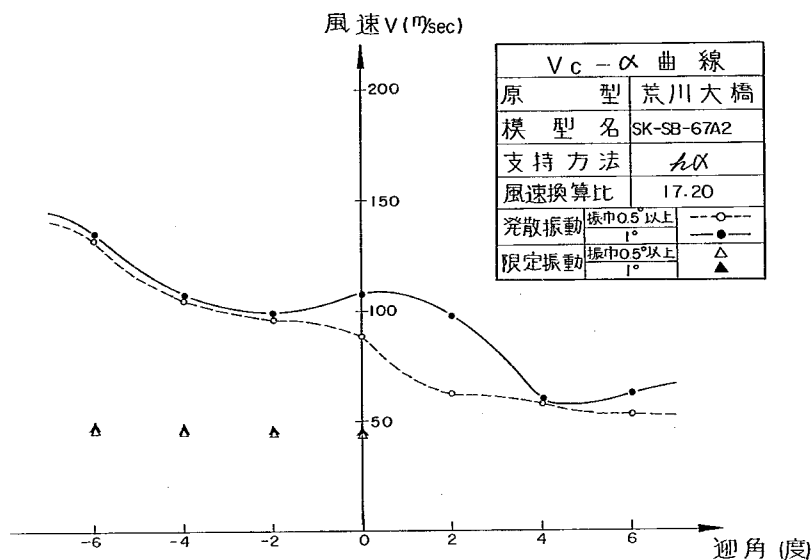


図 29.3

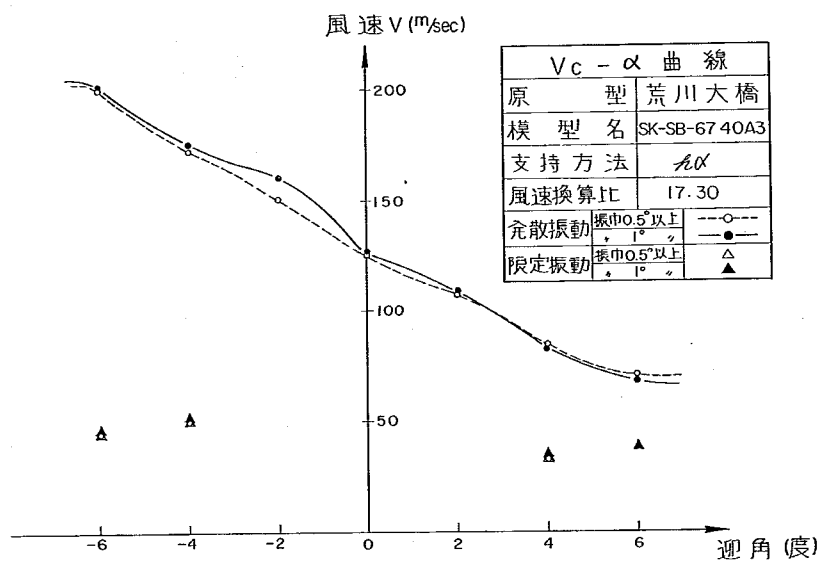


図 29.4

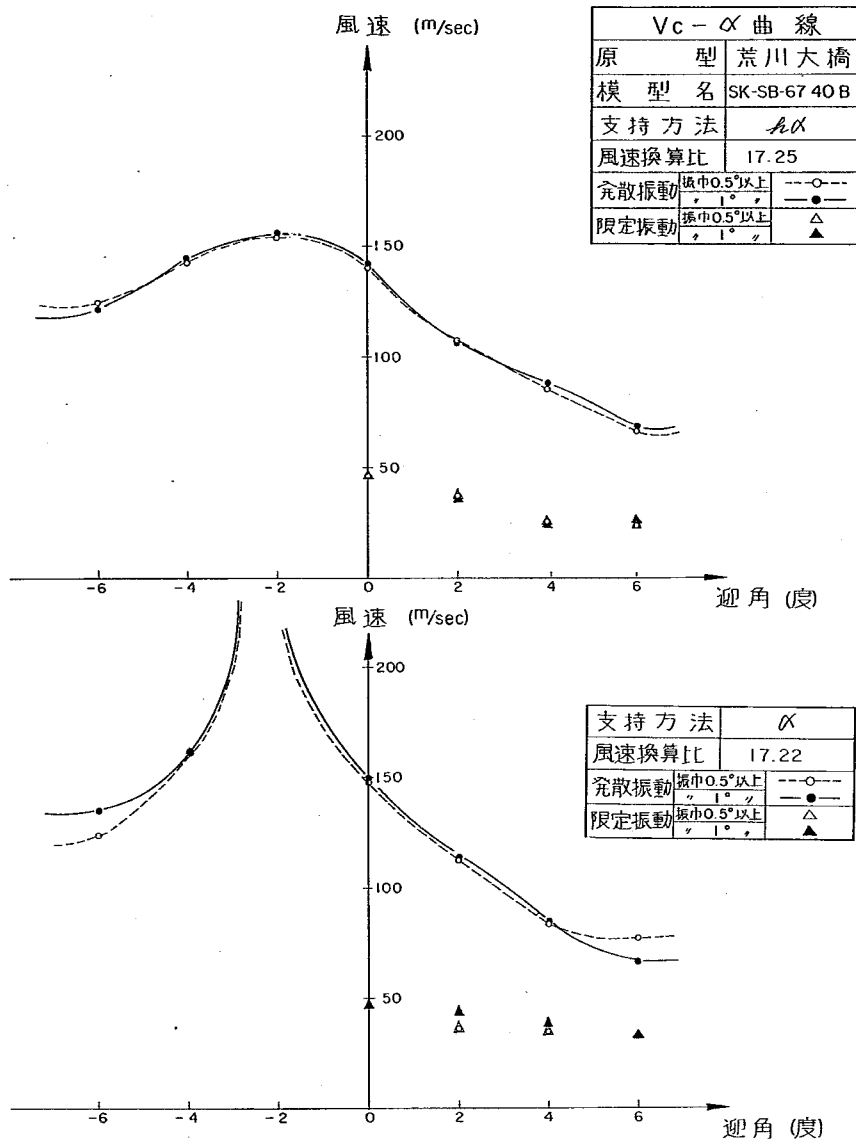


図 29.5

この点に関しては以下で考察する。

5-2 構造減衰と発振風速

風の中で構造物が自励振動を起すのは気流から構造物に与えられるエネルギーが構造物の内部で消費しうるエネルギー量を越えるためでしたがって構造物の減衰能が大きければある程度自励振動の出現をおさえることが出来る。もし、気流の作用による空力減衰と構造物の構造減衰の重ねあわせが可能であればたとえ模型の構造減衰が相似則から要求される値を満足していなくても $V-A-\delta$ 曲線から簡単に実橋の限界風速は計算出来る。例えば、実橋の構造減衰が対数減衰率で 0.05 であるのに対して模型のそれが 0.02 であったとする。

この場合、構造減衰が 0.05 の模型の発振風速は、構造減衰が 0.02 の模型実験で得られた $V-A-\delta$ 曲線上の $\delta = 0.03$ の曲線と与えられる。即ち、構造減衰が 0.05 の模型は $\delta = 0.05$ までの空力減衰を消費出来るからである。この考え方によれば荒川大橋の構造減衰を $\delta = 0.045$ とした場合の模型の発振風速は図-30 のようになる。但しここでは模型の初期減衰を振巾に無関係 $\delta = 0.015$ としている。

このような考え方は未だその妥当性が完全に確認されてはいないが模型と実橋の構造減衰に関する相似関係の差をうめる一手段であろう。

5-3 実橋の空力安定性

5体の風洞実験の結果、最も良好なものはSK-SB-67 40A1とSK-SB-67 40A3であるがSK-SB-67 40Aもそれほど不安定ではない。荒川大橋の設計も本州四国連絡橋耐風設計指針に準ずるものとすれば、耐風設計の際に考慮すべき迎角は設計風速が 50 m/s を越える場合には $\pm 5^\circ$ まで、 50 m/s 以下の場合には $\pm 10^\circ$ までとなる。荒川大橋の設計風荷重は 55 m/s の風速を想定しており、したがって前記の指針によれば $\pm 5^\circ$ 以内の迎角に対して設計風速の 1.2 倍である 66 m/s までの風速で危険な振動が出現しなければよい。危険な振動の範囲をどこにおくかは問題のあるところである片振巾が 5.0° を越える場合を危険な振動とすれば原設計案は十分な安定性を有することになる。また走行性等を考慮して片振巾 1° を越える振動を問題にすれば原設計案は $\pm 6^\circ$ 、および -3° で限定振動がこの制限を越えることになる。これに対してSK-SB-67 40A1はこの範囲でも十分安定である。したがって設計条件をどう定めるかで変わるが一般に次のことが云えよう。

1. 危険な振動を片振巾 5° 以上の振動と考えて $40 \sim 50 \text{ m/s}$ で出現する振巾 3° 以下の振動を許容するとすれば原設計を採用してよい。
2. 指針に規定された風速 66 m/s 以下で出現する振動の振巾を 1° 以下にする場合には模型 No.2 の断面に変更した方がよい。

以上の結論は実橋の構造減衰を $\delta = 0.02$ 程度とした場合であって実際に実橋が有すると考えられる構造減衰 $\delta = 0.04$ の場合には原設計断面であっても風速 $40 \sim 50 \text{ m/s}$ の限定振動の振巾はかなり減少するものと予想される。なお、以上の結論の中で正迎角での上下振動についてふれなかったが、その理由はこの振動は非常にゆるやかに成長するもので実橋の減衰能によって減少するか消滅するものと判断したからである。

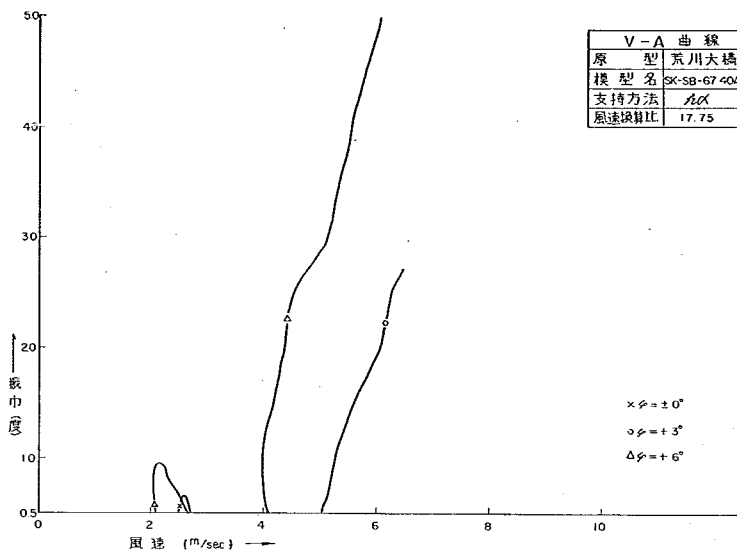


図 30.1

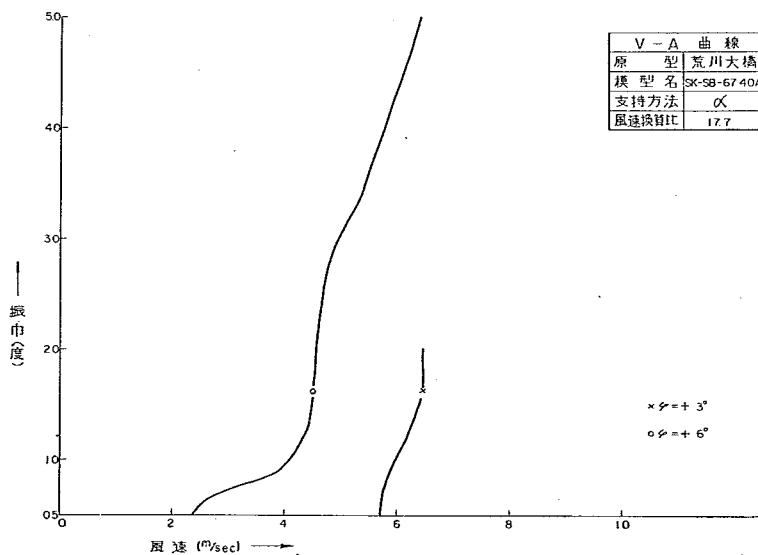


図 30.2

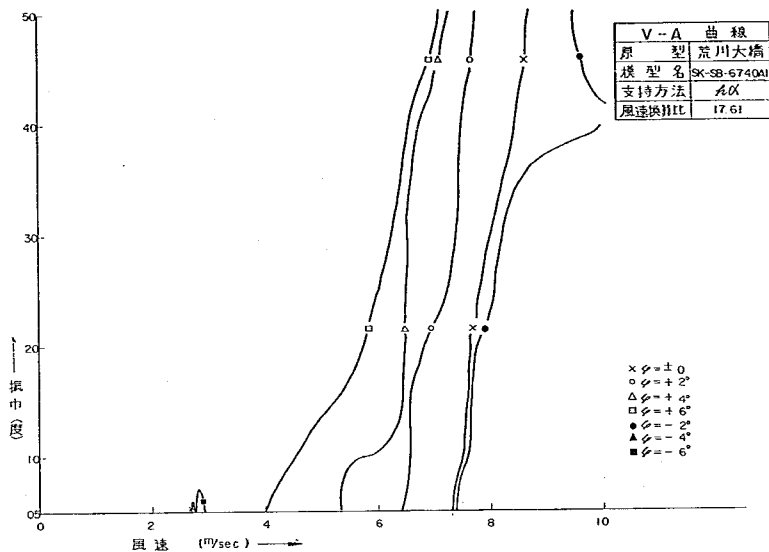


図 30.3

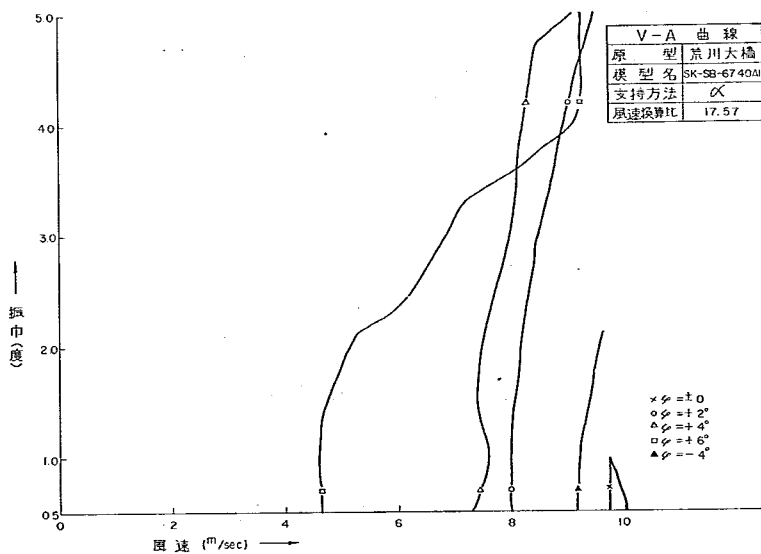


図 30.4

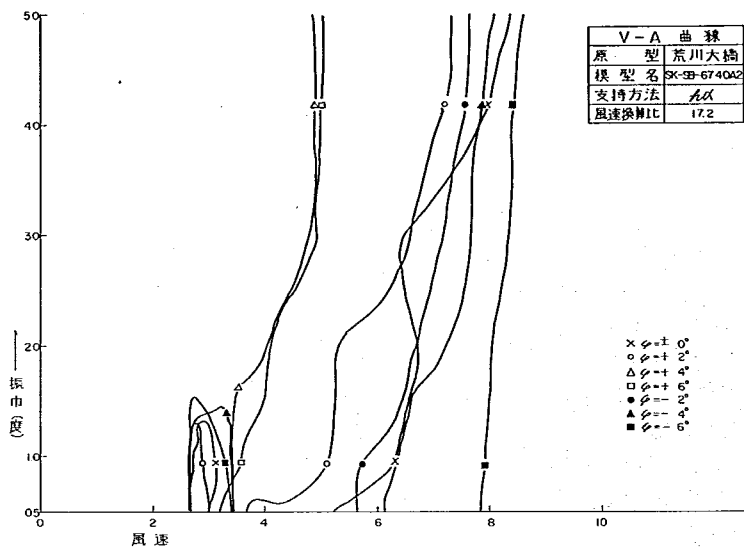


图 30.5

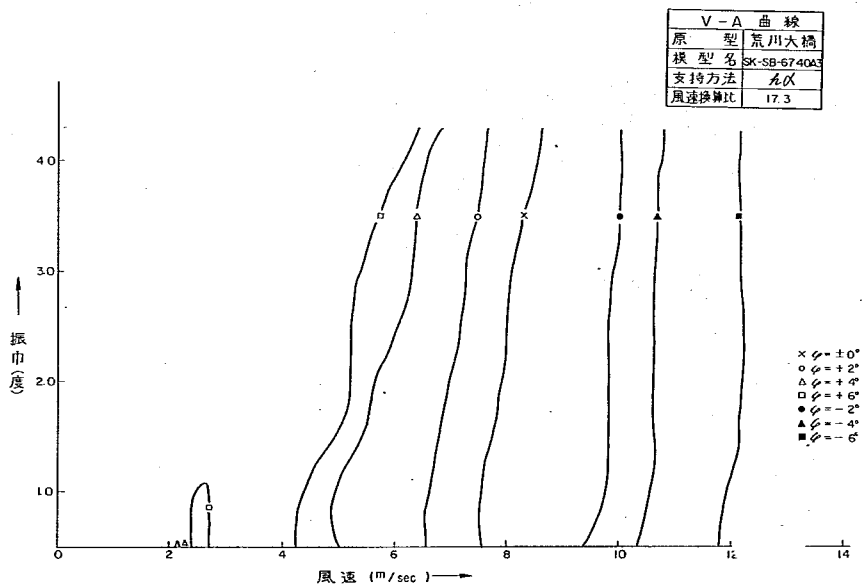


图 30.6