



本州・四国連絡橋の耐風安定性 に関する調査報告書

昭和45年 3 月

建設省土木研究所構造研究室

ま え が き

本州四国連絡道路橋に関する調査は従来から建設省が行なつて来たが本年度から日本道路公団がこれを担当することとなった。これに伴ない構造研究室は日本道路公団から本四連絡橋の耐風性に関する調査の一部を依頼された。衆知の如く吊橋は強風下における性状が他の橋梁と著しく異なり架設に先立って耐風性に関する時別の配慮が要求される。今年度は本四連絡橋吊構造部の風洞模型実験を中心に調査を行なつて来たがその結果がまとまつたので報告する。

昭和45年3月

構造研究室長 大久保 忠 良

研究員 榎 波 義 幸

倉 繁 巖

目 次

まえがき

§ 1 調査の目的と方法	1
1-1 調査の目的	1
1-2 調査の方法	2
1-2-1 まえがき	2
1-2-2 風 洞	3
1-2-3 模 型	6
1-2-4 風洞模型実験における相似則	10
1-2-5 実験装置及び手法	13
実験結果とその考察!	14

§ 1 調査の目的と方法

1-1 調査の目的

吊橋は横方向の剛性が小さく、風の影響を受けやすい構造物であるため、従来より風荷重に対する安全性に関しては十分な注意が払われて来たが、1940年当時世界第三位の長大吊橋であった Tacoma Narrows 橋が完成後半年も経ずしてわずか 19 m/s の風ではげしい振動を惹起し落橋した事故は長大吊橋の設計において静的設計の外に空力不安定現象についての検討が不可欠であることを認識させ、以後の長大吊橋の設計に大きな影響を与えた。昭和34年に本州と四国を結ぶ連絡橋の調査が開始されて以来、長大吊橋の設計及び施工上の問題点についての検討が続けられて来た。そして昭和40年には上部工の設計のうち耐風設計の重要性に鑑み新たに主として長大吊橋を対象とした耐風設計指針が立案された。現行の設計基準や示方書が単位面積または単位橋長当りの風圧力の大きさと作用面積のとり方だけを規定して風荷重を与えているのに対して、この「本州四国連絡橋・耐風設計指針」では設計風速及び空気力係数の求め方を規定し、これから風荷重を求めるよう指示しており、また動的安定性に対する限界風速を定め、その検討の必要性を明記している。すなわち以下の諸点にこの設計指針の特徴があると云えよう。

- (1) 構造物の耐風年数を考慮した再現期間における風速の期待値に基ずき設計風速を求めるよう規定している。
- (2) 構造物の位置（高度）、規模に応じた設計風速の求め方を与えた。
- (3) 構造物の風荷重算出の基本となる空気力係数を風洞実験より求めるよう規定している。
- (4) 吊橋の風による弾性不安定現象及び自励振動に対する限界風速の基準を定めている。
- (5) 吊橋の動的安定性に対する解析を風洞実験その他の方法で行なうよう規定している。

このうち特に重要なのは不安定現象に対する検討である。このうち空力弾性的不安定現象に対しては「指針」その限界風速が設計風速の1.7倍を超えることを要求している。また動的不安定現象に対してはその限界風速が設計風速の1.2倍以上であるこ

と規定してある。

このうち空力弾性的不安定現象は振り剛性の小さい充腹構造で補剛された吊橋において特に注意する必要がある。後者の動的不安定現象には、1. 構造物の下流側にできる渦による風琴振動 2. 気流の乱れによる不規則振動 3. 撓みの自励振動である跳躍振動 4. 振りの自励振動である振りフラッター 5. 撓み振動と振り振動が連成した自励振動である曲げ振りフラッター等がある。このうち風の乱れによる不規則振動は外力たる自然風の乱れの性質がほとんど解明されていないこと、及びこの振動が強制振動であって自励的な要素がないこと等から現在は設計に考慮されていないが将来設計時の安定率を低下するようなときにはこの振動に対する検討も必要となって来るであろう。また風琴振動及び跳躍振動は箱桁及び充腹桁補剛の吊橋では充分注意する必要があるがトラス補剛吊橋においては発現の可能性はほとんどない。結局本四連絡橋において計画されているトラス補剛吊橋で注意しなければならない不安定振動は振りフラッターと曲げ振りフラッターである。

トラス補剛吊橋のフラッター特性については今までも多くの研究がなされてきた。トラス補剛吊橋の吊構造部は非常に複雑な形状でフラッター特性に影響を与える要因を把握することは非常に困難である。我々も今までに本四連絡橋調査の一環としての耐風調査で各設計案に対して風洞実験を実施して来たがこの実験も各設計断面の空力安定性の検証が主目的で形状と空力特性の関係を明らかにするためのきめの細かい系統的な実験は行なっていない。

そこで今年度はトラス補剛吊橋の吊構造部の形状的な要因と空力特性の関係を調べるべく、建設省の設計案を例にとり、上弦材と床版との相対位置が耐風性に与える影響を調べてみた。

1-2 調査の方法

1-2-1 まえがき

吊橋は従来から風荷重に対して弱点を有しているため耐風設計についてはとりわけ研究が進められて来た。特に Tacoma 橋の落橋は吊橋の空力不安現象の解明に多くの研究者をかりたてたが未解決の問題は非常に多い。現在のところ吊橋の空力不安定現象に関する理論が確立されていないため結局「本四連絡橋耐風設計指

針」は風洞模型実験による動的安定性の検証を長大吊橋の設計に義務づけている。吊橋の風洞模型実験にも多くの手法があるが土木研究所では施設の制約等もあって部分模型のパネ支持実験によって本四連絡橋の空力不安定現象の確認を行なって来たが今回もこの方法をそのまま採用した。

1-2-2 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。

この風洞は特に橋梁試験用に作られたものであり低風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-2〕で覆い、更に模型の取付及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。

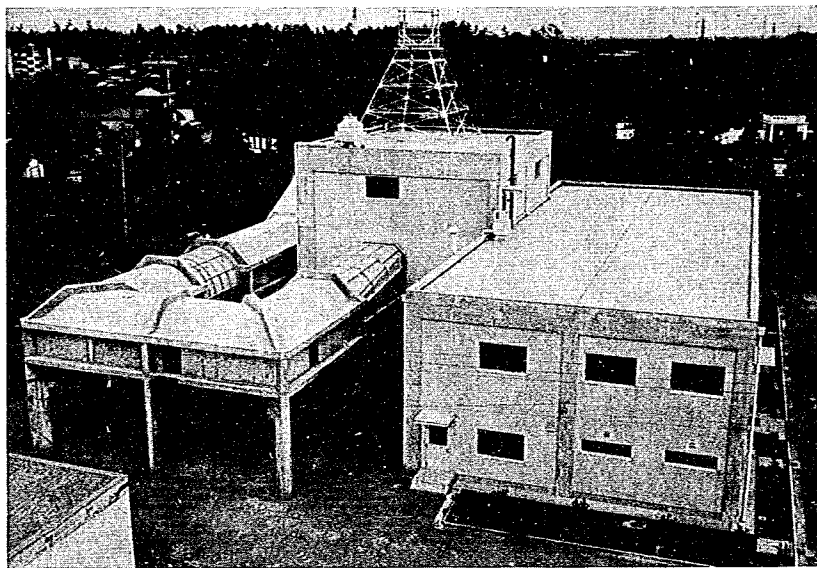
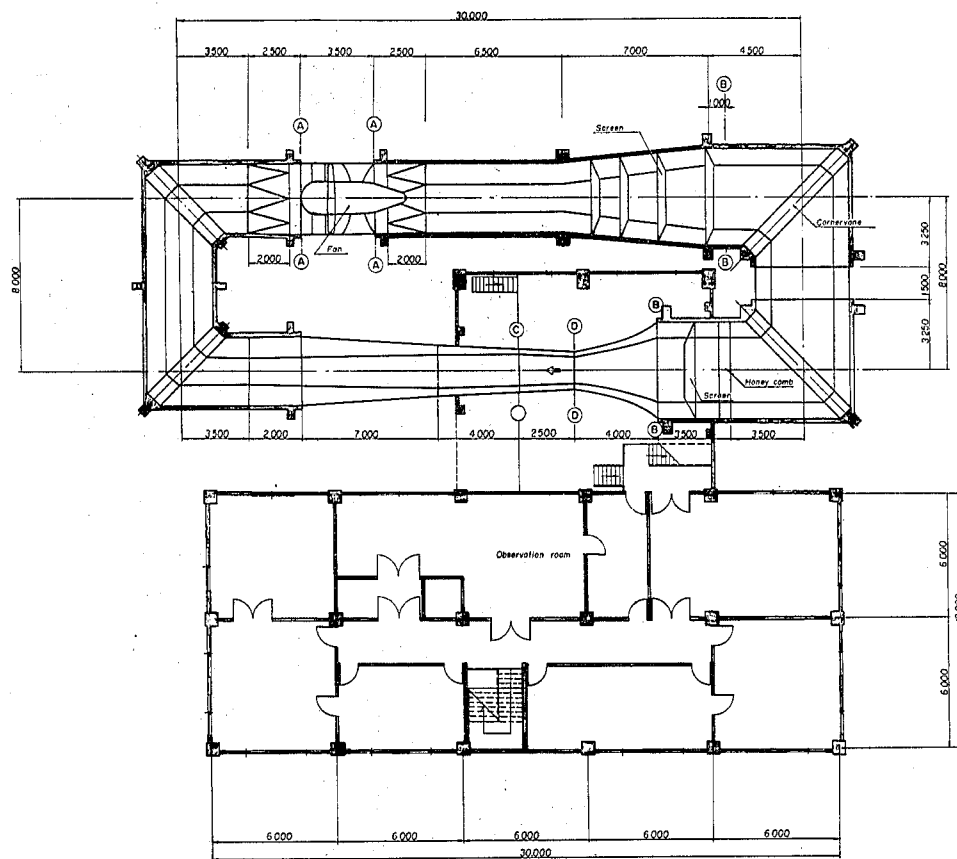


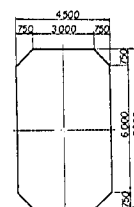
写真 - 1



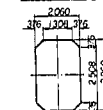
Section A-A



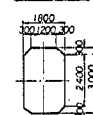
Section B-B



Section C-C



Section D-D



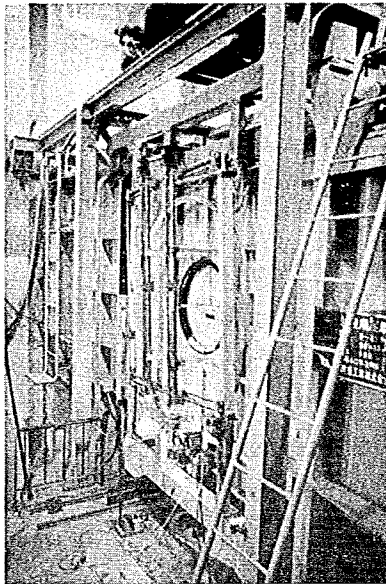


写真 - 2

この風洞の風の特徴は土研所報に詳しく報告されてい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少の迎角をもち、また空間的風速分布も一様ではなく、かつ時間的にも変動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より危険な場合と考えられるので実験結果は安定側の値を示していると云えよう。以下風洞の概要を記す。

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 $3000 \times 1800 \text{ mm}$ （角切辺長 300 mm ）

測定部 2000 mm

風 路 76000 mm

絞り比：1 : 6.25

送風機：直径 3300 mm

出力 100 kW

風 速：最大 20 m/s （開放時）

最大 21 m/s （閉鎖時）

吊橋の風洞模型実験は吊橋全体を縮尺相似した全橋模型実験と吊構造部の二次元性に着目してその一部を縮尺相似した部分模型実験に大別できるがこの風洞は後者を対象として設計されている。

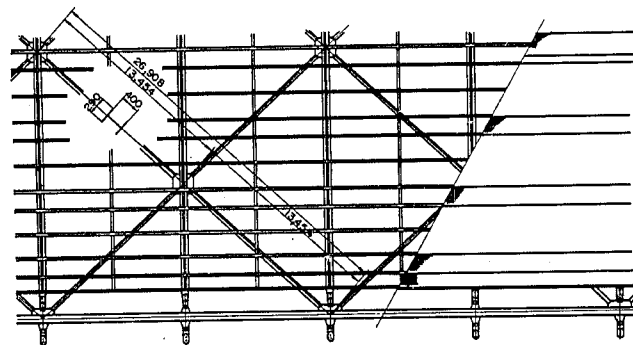
1-2-3 模 型

今回の実験では建設省の本州四国連絡道路調査事務所が試算した設計案($\ell = 1500$)のうち桁高が16 mのものを選んだ。またこれに組合わせる床版としては open grating 5 条を有するマキノ型及びタマゴ型の床版を用いた。図-3, 3-1にタコマ型床版を有する模型を図-3-2にマキノ型床版の模型を示す。実験はこれらの模型を基本として主構に対する床版の位置がその空力特性に与える影響を調べるため床版の位置を正常な上路型式の位置から5 mm(実橋で0.5 m) 10 mm(実橋で1 m) 及び15 mm(実橋で1.5 m) 下げて実験した。また床版の形状についてはマキノ型、タコマ型とも開床の場合と閉床の場合について実験した。

模型の名称は、HS-3G-69 100Y00 なる記号をあてはめているが、これは、

- HS : 本州四国連絡橋
- 3G : 3径間の概略設計
- 69 : 模型の製作手法
- 100 : 縮 尺
- Y : タコマ型床版, Zのときはマキノ型床版
- 0 : 開床, 1の場合は閉床
- 0 : 上路, 1~3が中路型で1が5 mm, 2が10 mm, 3が15 mm 下がったもの。

構造物の風洞模型実験を行なうためには実橋の質量及び質量分布, 固有振動数が判明していなければならないがこの実験では後に行なう予定の実験との関係で桁高12 mの場合の数値を使用した。桁高12 mの振動特性を表1に示す。



- 7 -

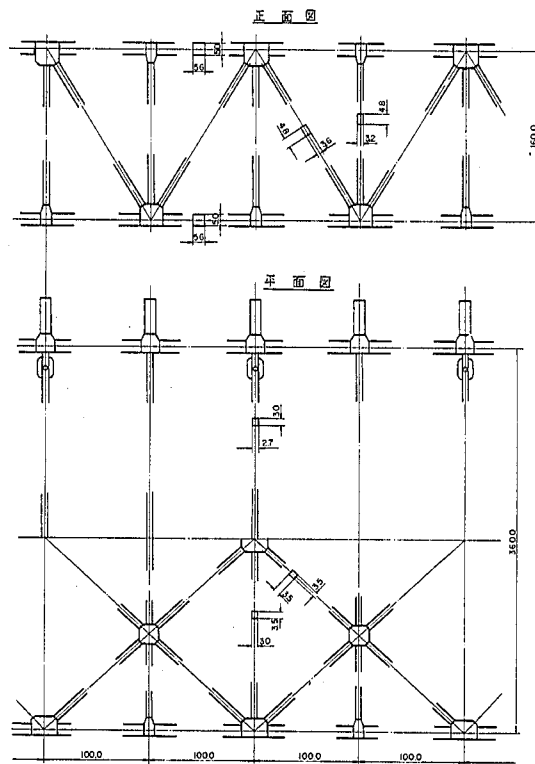
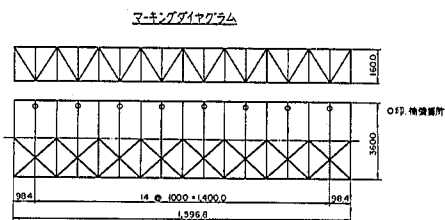
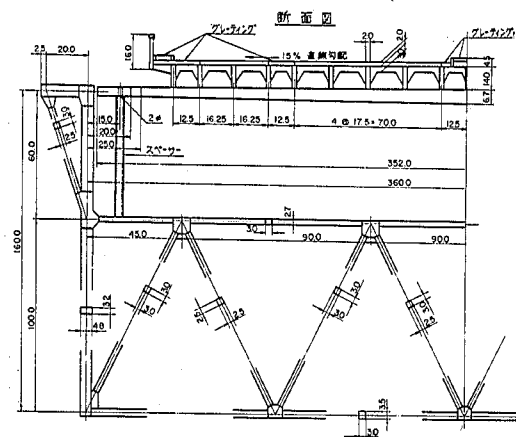


図-3 本州・四国連絡橋補剛トラス 16M案

表-1 本・四連絡橋 (L=1500) 振動特性

主 径 間 長	1 5 0 0.0 m
側 径 間 長	7 5 0.0 m
主 径 間 垂 距	1 5 0.0 m
死 荷 重	1 5.8 t/m / cable
補剛桁断面 2 次 モーメント (鉛直)	3.0 5 5 m ⁴ / cable
“ (水平)	2 7.5 0 m ⁴ / bridge
ケーブル断面積	0.6 5 7 m ² / cable
桁 高	1 2.0 m
主 構 間 隔	3 6.0 m
対称 1 次 撓み振動周期	1 4.2 sec
対称 1 次 振れ振動周期	7.2 sec

1-2-4 風洞模型実験における相似則

今年度行った風洞実験は昨年度と方法的になんら変わるところがない。従って実験は三分力試験による空力係数の測定とバネ支持模型実験による共振風速の測定である。これらの模型実験に適用される相似則は三分力試験では実橋吊構造部と模型との間に幾可的に相似であることだけだがバネ支持模型実験の場合には、更に次のような3つの相似条件を満足する必要がある。

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

ii 風速パラメーター $\frac{V}{N\theta B}$, $\frac{V}{Hz B}$

iii 構造減衰を表わす定数 δz , $\delta\theta$

但し

B : 代表長

$I\theta$: 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 及び θ はそれぞれ撓み振動, 振り振動を表わす。

V : 風 速

δ : 構造減衰, 添字は N の場合と同じ。

これらの相似則は二次元振動翼に対するフラッター方程式から求めることができる。

非圧縮流中の二次元翼のフラッター方程式は

$$\{\mu[1-(\omega_b/\omega)^2(1+ig_b)]+A_{bb}\}\{(h/b)+[\mu X_\alpha+A_{b\alpha}]\}\alpha=0$$

$$\{\mu X_\alpha+A_{b\alpha}\}(h/b)+\{\mu r_\alpha^2[1-(\omega_\alpha/\omega)^2(1+ig_\alpha)]+A_{\alpha\alpha}\}=0$$

ここに ω_b, ω_α : 上下振動及び振り振動の円振動数

ω : フラッター振動数

h : 上下振動の変位

α : 振り振動数の変位

g_b, g_α : 上下振動数及び振り振動の構造減衰の大きさを示す無次元パラメーター

b : 弦 長

X_α : 単位翼巾の翼の $X = ba$ 点まわりの静的モーメント $S_\alpha = \int (X-ba) dm$
から定義される無次元量 $X_\alpha = S_\alpha / mb$

r_α : 単位翼巾の翼の $X = ba$ の点まわりの慣性モーメント $I_\alpha = \int (X-ba)^2 dm$
から定義される無次元量 $r_\alpha = \sqrt{I_\alpha / mb^2}$

$A_{bb}, A_{b\alpha}, A_{\alpha b}, A_{\alpha\alpha}$: 空気力をあらわす無次元量

μ : 質量をあらわす無次元量 $\mu = m / G \cdot \rho \cdot b^2$

吊橋においては弾性中心は断面の中心線にくることから

$$a = 0 \quad \therefore X_\alpha = 0$$

また振動は調和振動と仮定すれば

$$h = h_0 e^{i\alpha t}, \quad \alpha = \alpha_0 e^{i\omega t + \phi}$$

とおける。従って式は

$$\begin{bmatrix} \mu \left(1 - \left(\frac{\omega_h}{\omega_a} \right)^2 \left(\frac{\omega_a}{\omega} \right)^2 (1 + i g_h) \right) + A_{hh}, A_{ah} \\ A_{ha}, \mu r_a^2 \left(1 - \left(\frac{\omega_a}{\omega} \right)^2 (1 + i g_a) \right) + A_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{h_0}{b\alpha_0} \\ e^{i\phi} \end{bmatrix} = 0$$

この中に含まれる無次元パラメーターは

$$\frac{h_0}{b\alpha_0}, \phi, \frac{\omega b}{U}, \frac{\omega}{\omega_a}, \mu, \frac{\omega_h}{\omega_a}, r_a, g_h, g_a, A_{hh}, A_{ha}, A_{ah}, A_{aa}$$

このうち幾可学的相似条件以外に模型がそなえておくべき相似条件としては次の5ケの無次元量が実橋と模型で一致していなければならない。

$$\mu, \frac{\omega_h}{\omega_a}, r_a, g_h, g_a$$

次に実験時の風洞風速に対してもその無次元量が実橋のそれと等しくならない。

$$\frac{UT}{b} \quad T: \text{時間}$$

従って上記の6ケの無次元量を整理すれば次のようになる。

$$\frac{m}{\rho b^2}, \frac{I\alpha}{\rho b^4}, \frac{U}{b\omega_h}, \frac{U}{b\omega_a}, g_h, g_a$$

これは先に記した6ケのパラメーターと同じものである。

さて我々が満足すべき相似条件のうち

(i)の慣性パラメーターについてはバネ支持された模型に適当に附加重錘をつけてあわせている。

(ii)の風速パラメーターについては模型を支持しているバネのバネ定数と間隔を適当に定めて相似条件を満足するようにしている。

(iii)の構造減衰に関する相似則については実橋の値そのものが確定したものではないためここでは撓み振動、振り振動とも $\delta = 0.04 \sim 0.05$ として附加減衰器を用いて満足するようにした。この減衰器は加振器としても使用できるようになっており模型に初期撓乱を与えることができる。

上記の相似則から要求される模型の諸元及び実験に採用した値を表一2に示す。

表 一 2 実 験 条 件

	原 型	現 論 値	採 用 値
縮 尺		1 : 100	1 : 100
重 量	3159 t/m/bridge	5.05 Kg/model	5.06 Kg/model
極慣性モーメント	665 t · m ² /m	1.06 Kg · cm · sec ² /model	0.97 Kg · cm · sec ² /model
撓 み 振 動 数	0.07 c/s		166 c/s
戻 り 振 動 数	0.14 c/s		363 c/s
振 動 数 比	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 2.2
構 造 減 衰			0.04

1-2-5 実験装置及び手法

この実験は振りフラッター及び曲げと振りの連成フラッター現象を対象とした実験であるためこれに対応して模型は回転振動及び上下振動とそれらの連成が可能なように片側で上下4本、両側で8本のバネで懸架され風向方向には移動しないようピアノ線で拘束している。(写真-3) また模型及びその懸架装置の可動部は出来るだけ軽くつくられており、質量に関する相似が容易になるよう配慮されている。また構造減衰に関する相似のために可動部の摩擦は出来るだけ小さくなるよう工夫されている。さて前節で導き出された3つの相似条件は次のようにして満足させている。まず質量及び質量分布に関する相似則は支持具に附加重錘をつけ、振動数に関する相似は模型を吊っているバネの強度とバネの間隔をかえることにより、構造減衰は模型に電磁ダンパーをとりつけ所定の値になるよう調節している。なお、電磁ダンパーはスイッチの切替えにより加振器としても使えるため模型の初期振動の

ためにも使用している。また振動変位はビデオアナライザーと呼ばれる光学式の無接触変位計を用いて模型に外乱を与えないようにしている。実験は原型を幾可学的力学的に相似させた模型に対して風速と迎角を変えて行なわれるがこのうち風洞風は常に水平にしか吹かないため模型をかたむけて風洞風に対する迎角を所定の値に設定している。模型実験の手順を図-4に示す。

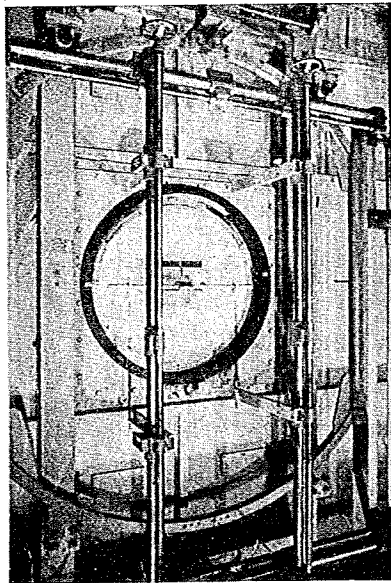


写真 - 3

実験結果とその考察

実験結果を図5、及び図6に示す。図からみても明らかな如く今回の実験に使用した模型のあるものはその空力性状が非常に複雑で模型に作用する空気が模型の振巾に大きく影響している。従って模型実験の結果を一枚の図にまとめることは非常に困難なのでここでは一次的な整理のみを記載しておく。

この結果から次のことが云えよう。

1. いずれの型式の床版の場合にも閉床は開床に比べ著しく不安定性を増す。また閉床時の空力特性は比較的平板のそれに似かよって曲げ振りフラッター的な要素を含んでいるがその限界風速は同じ質量、質量分布、振動数及び構造減衰を有する平板のそれと較べて著しく低い。

2. 開床の場合は空力特性が非常に複雑で振巾に対して空気が非線型で限界風速の定義が困難であるが微小振巾での限界風速は平板のそれよりよい。
 3. 床版に対する上弦材の遮蔽は閉床の場合はあまり影響しないが開床の場合には影響がある。そしてある程度床版を下げることは空力特性を向上させる。
 4. タコマ型とマキノ型の床版による空力特性の差はタコマ型床版が小迎角の不安定なのに対してマキノ型の床版は正の大迎角で不安定である。
- また図 7. 8 に三分力試験の結果を示す。

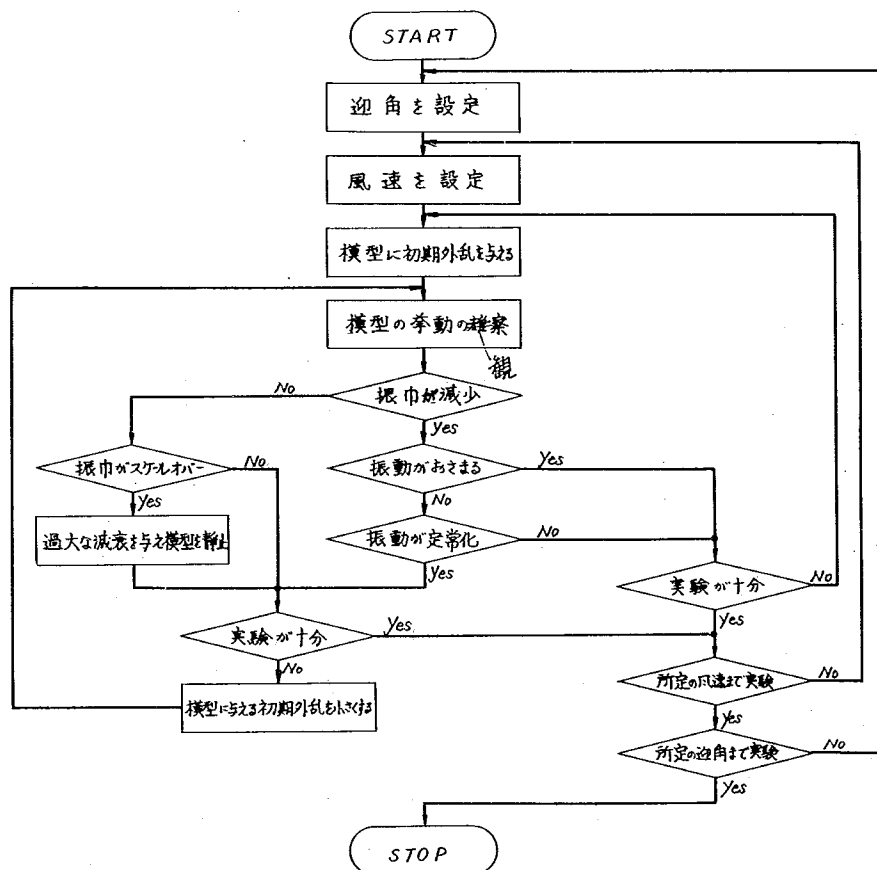


図 4 実験の手順

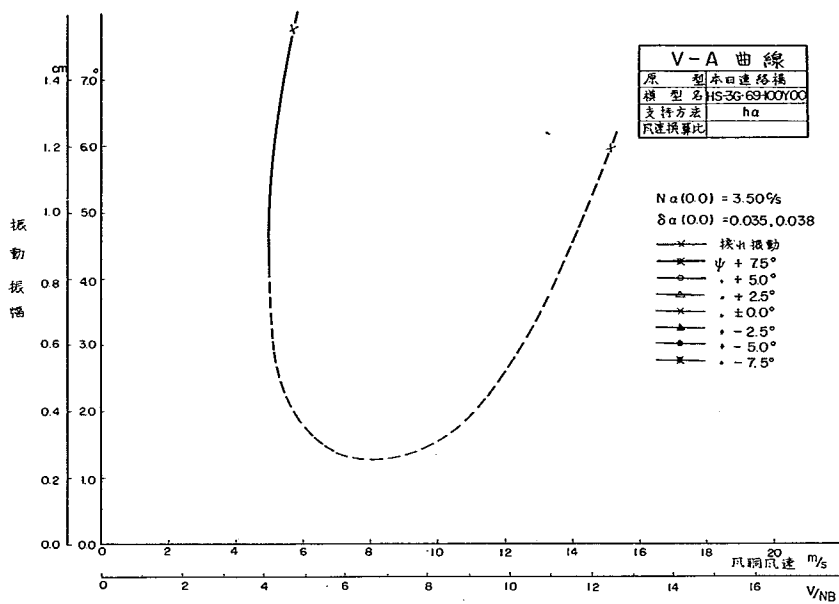


図5-1

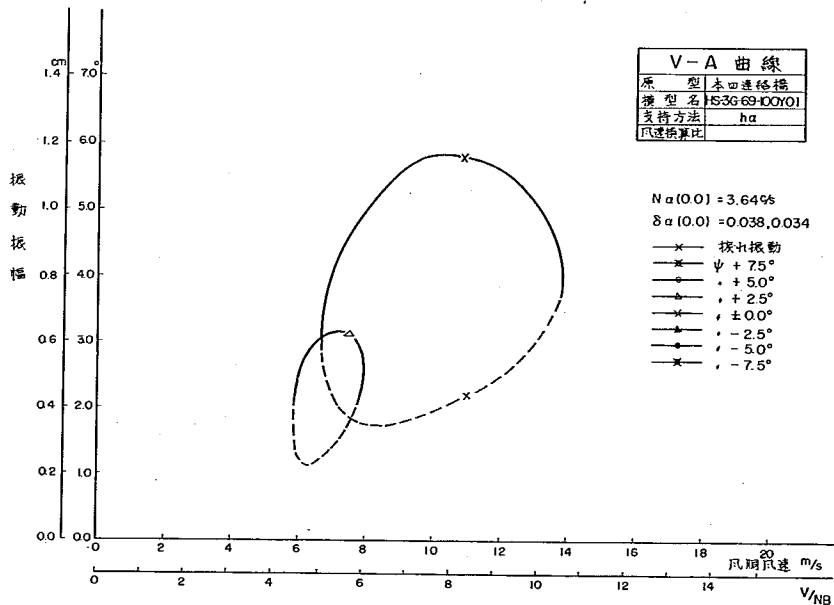


図5-2

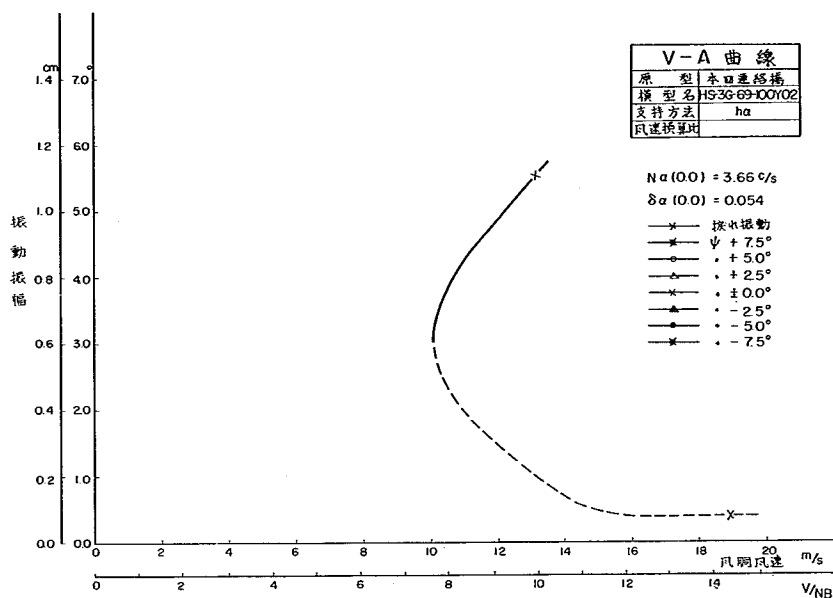


圖 5-3

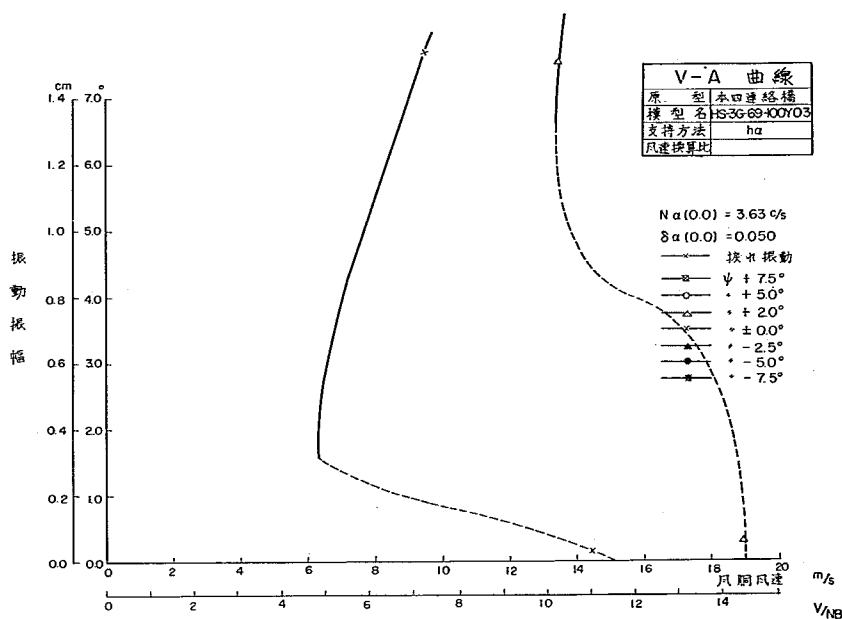


圖 5-4

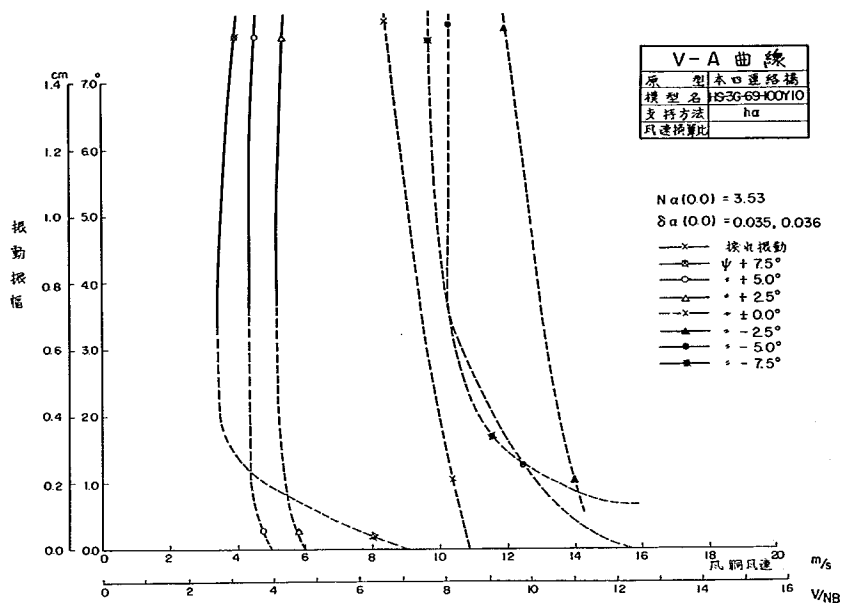


図 5-5

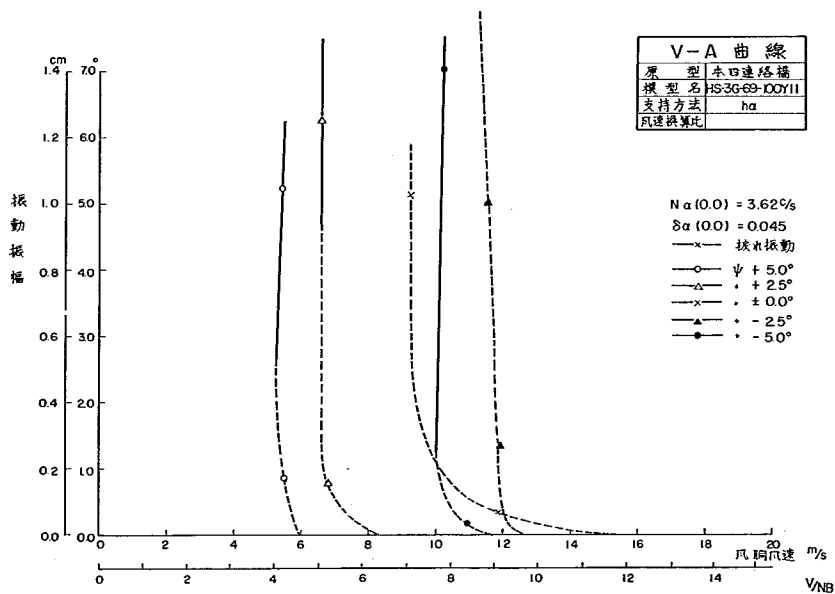


図 5-6

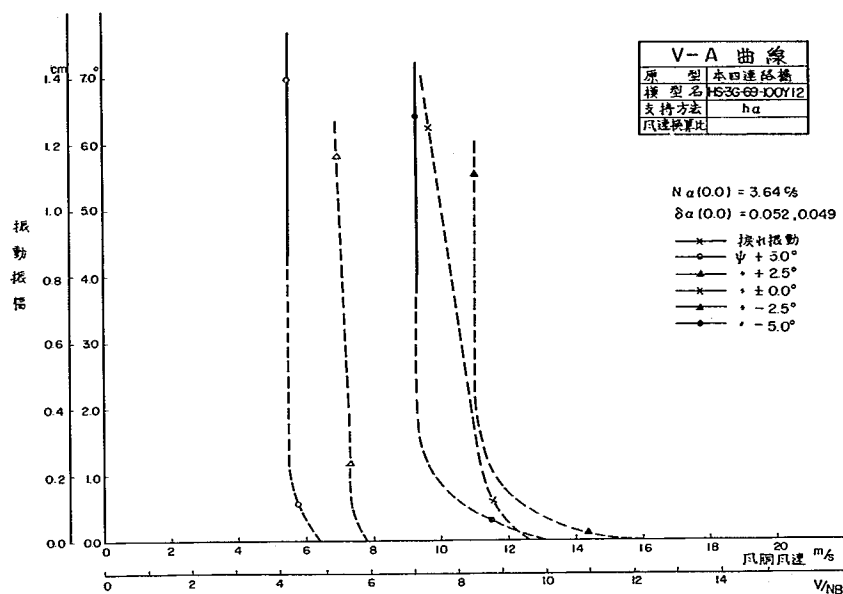


图 5-7

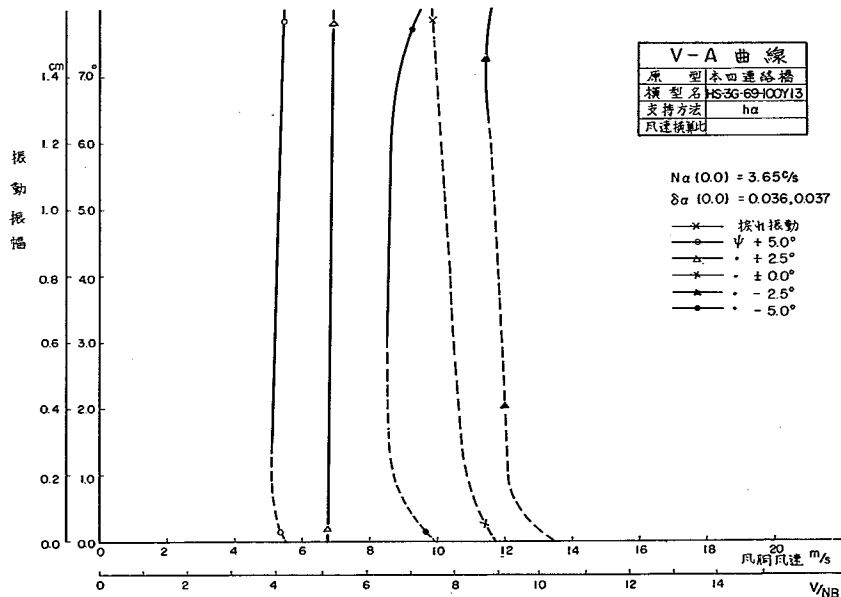


图 5-8

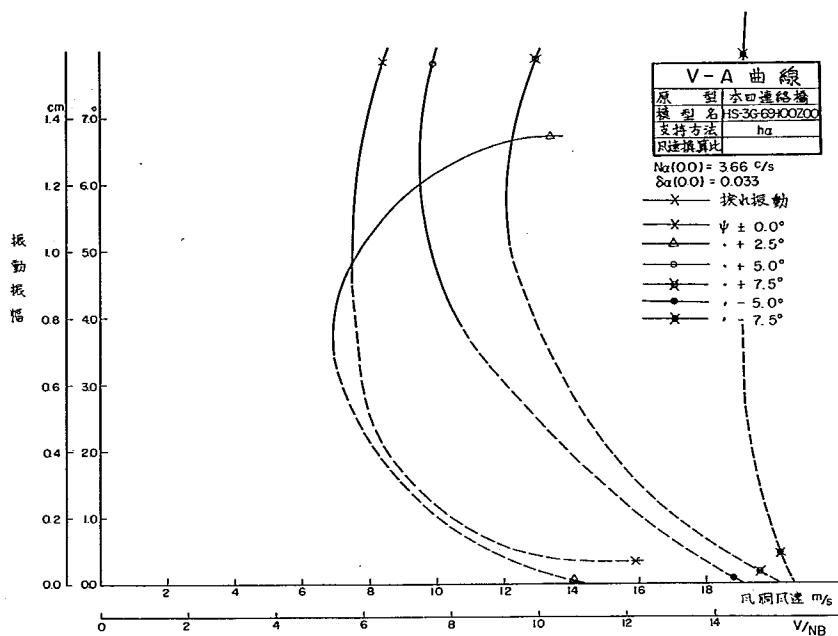


図 6-1

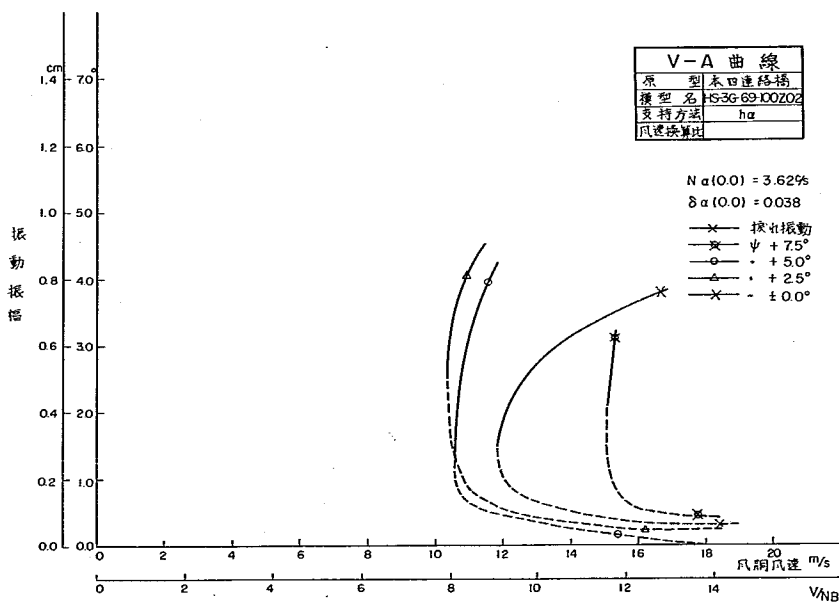


図 6-2

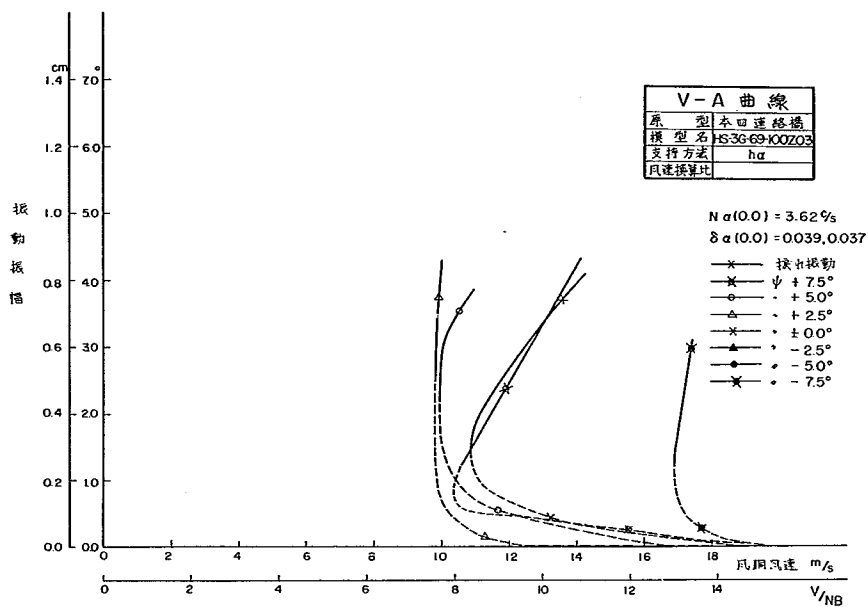


図 6-3

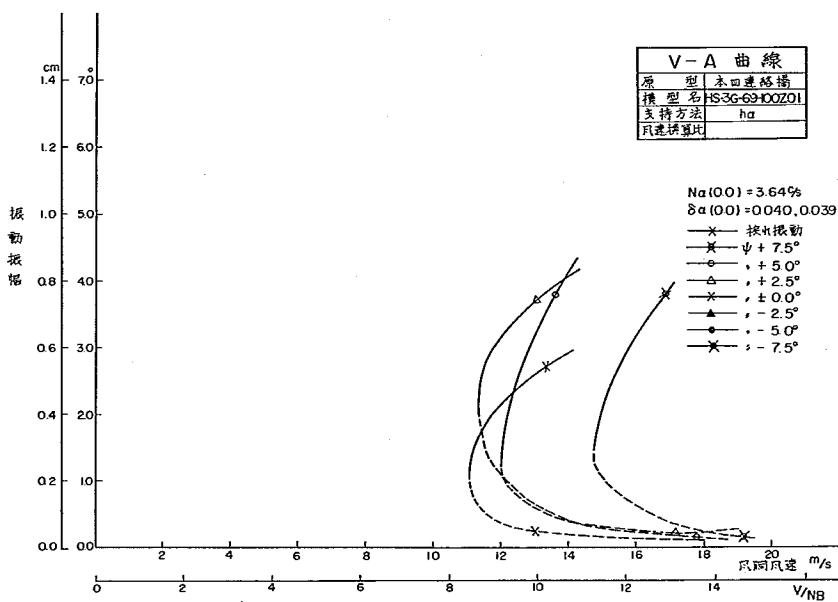


図 6-4

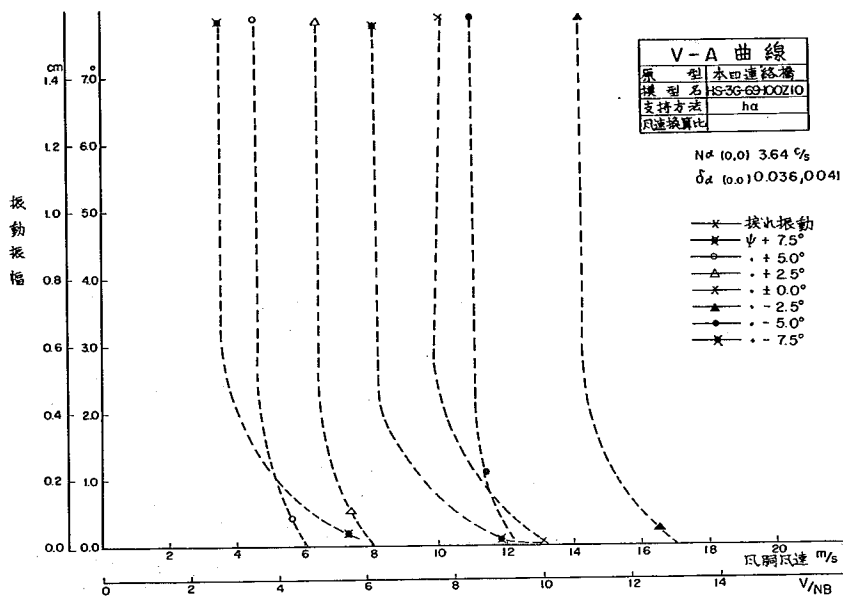


圖 6—5

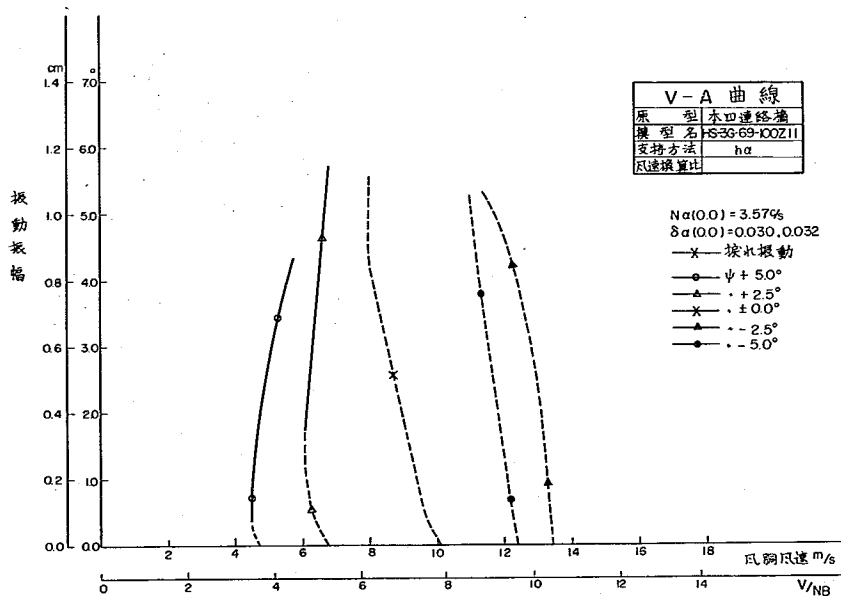


圖 6—6

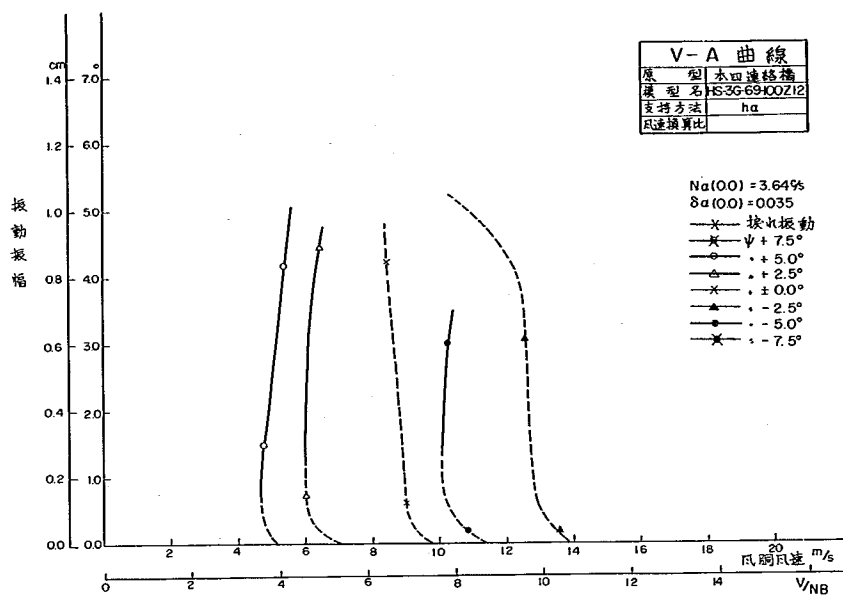


圖 6-7

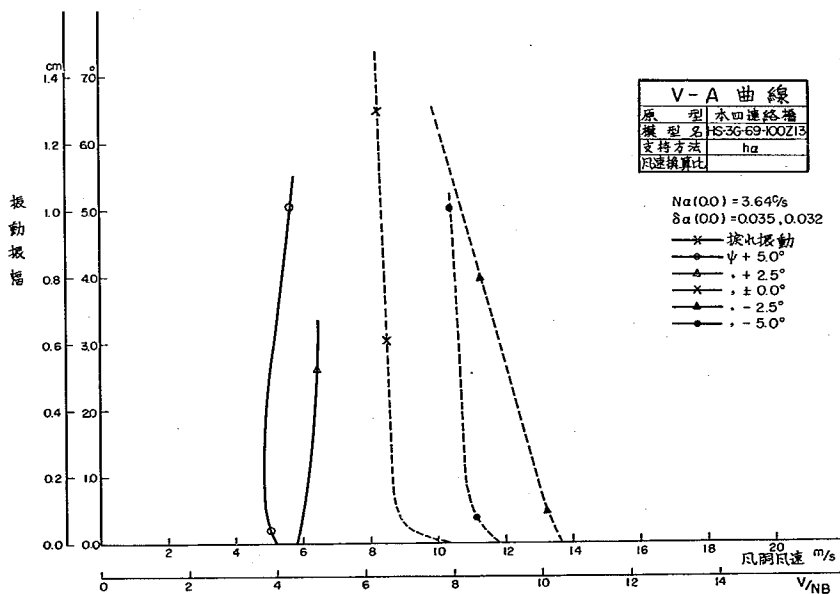


圖 6-8

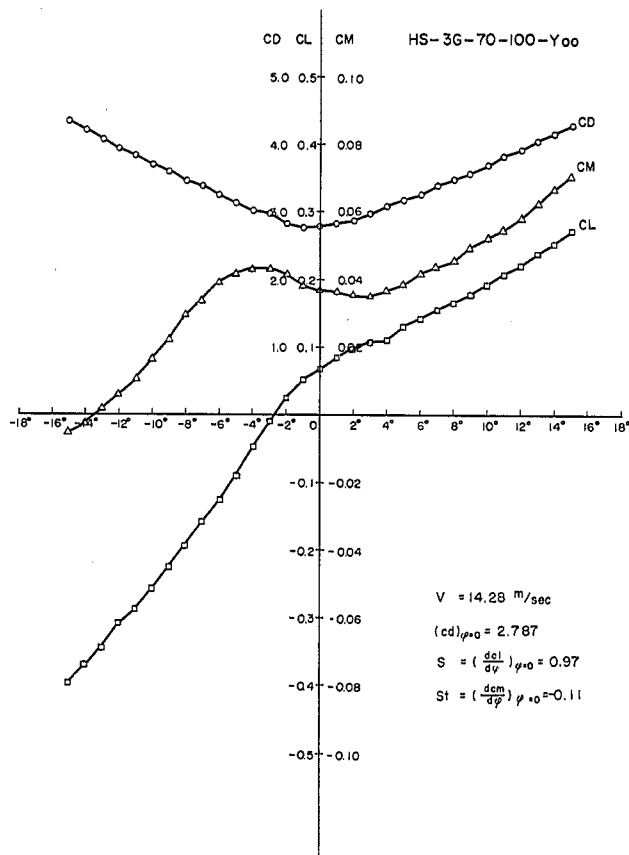


图 7-2

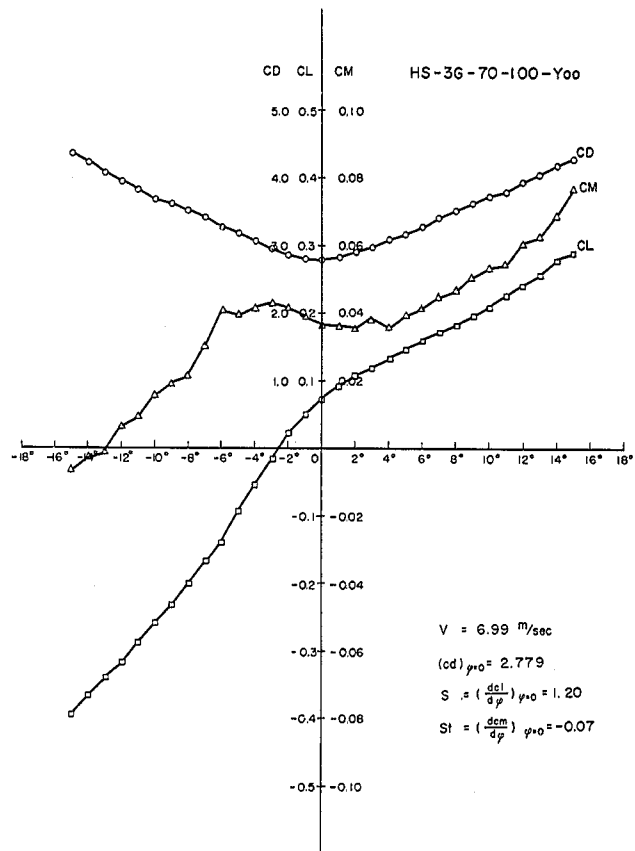


图 7-1

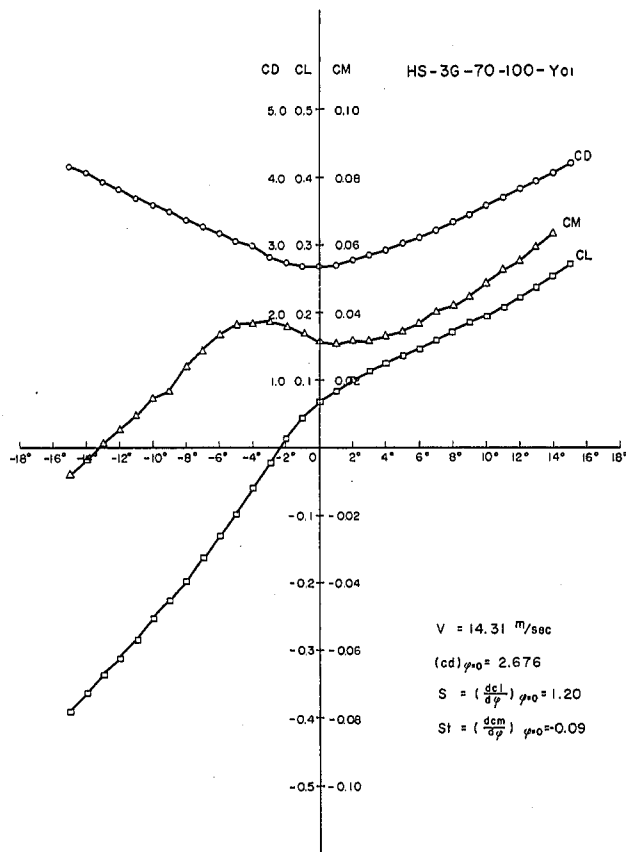


图 7-4

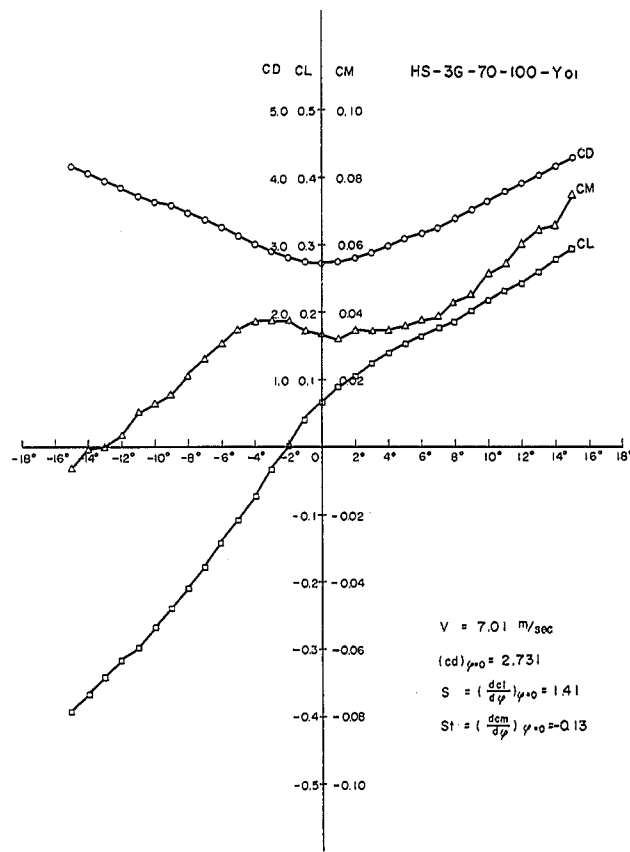


图 7-3

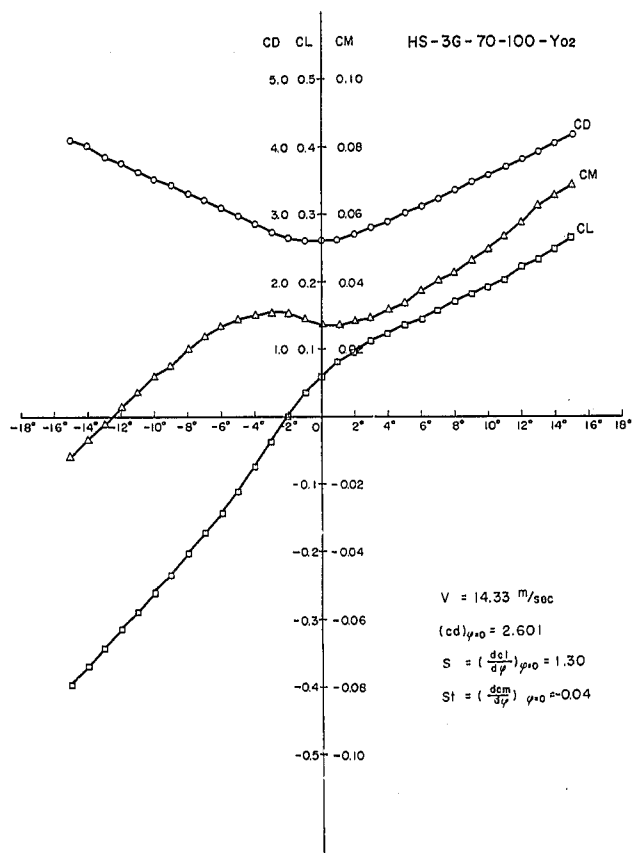


图 7-6

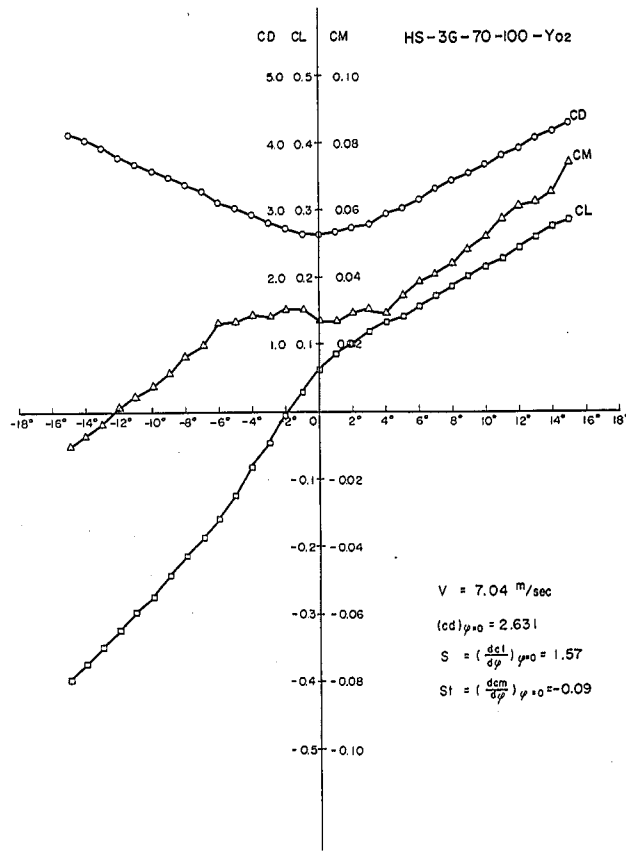


图 7-5

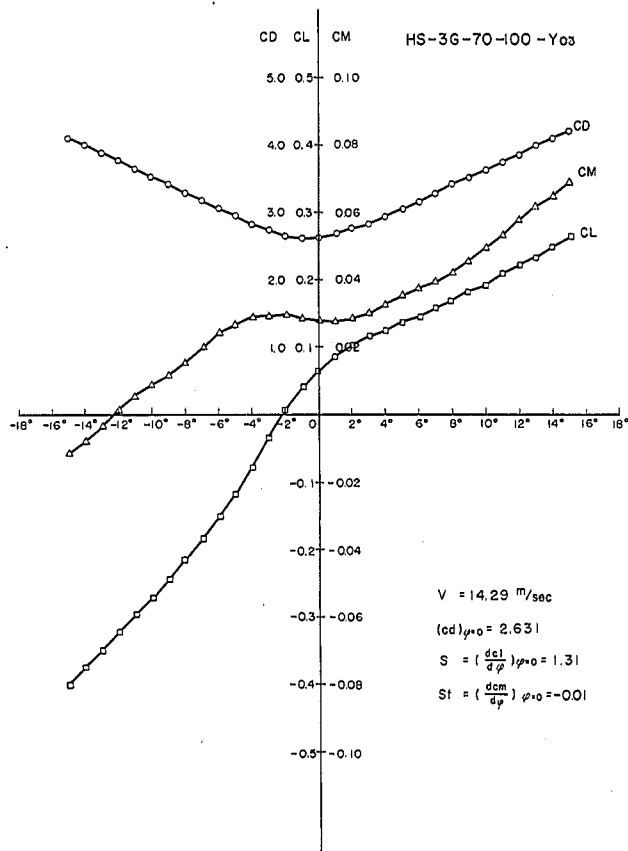


图 7-8

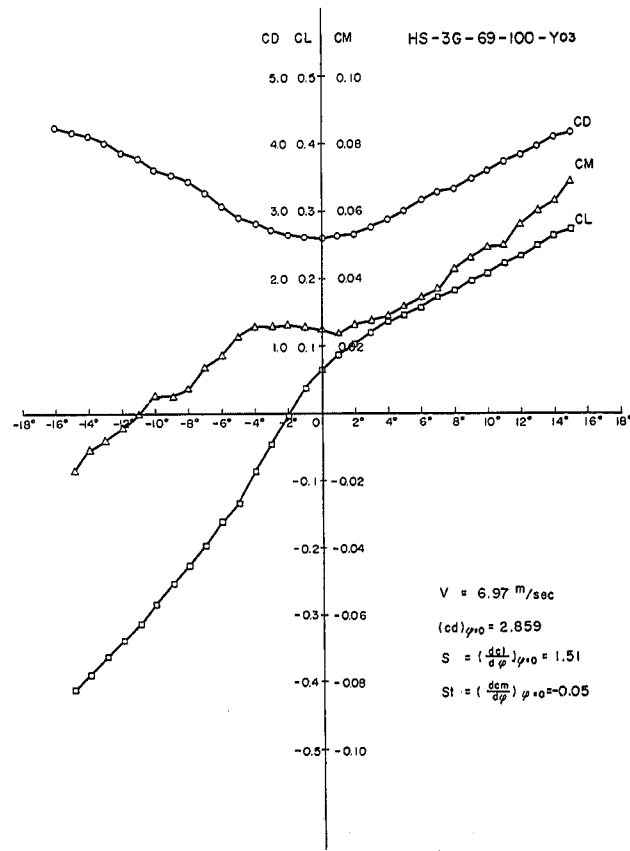


图 7-7

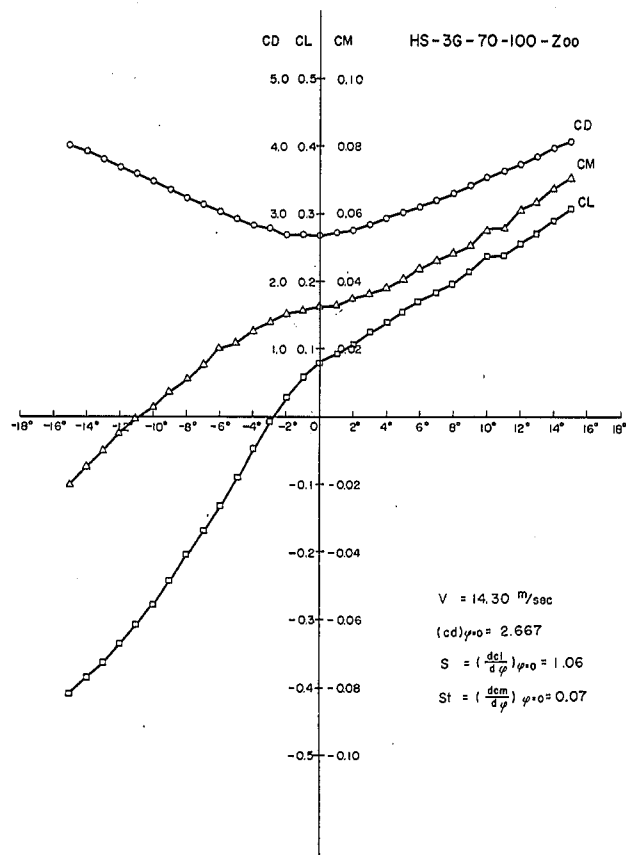


图 8-2

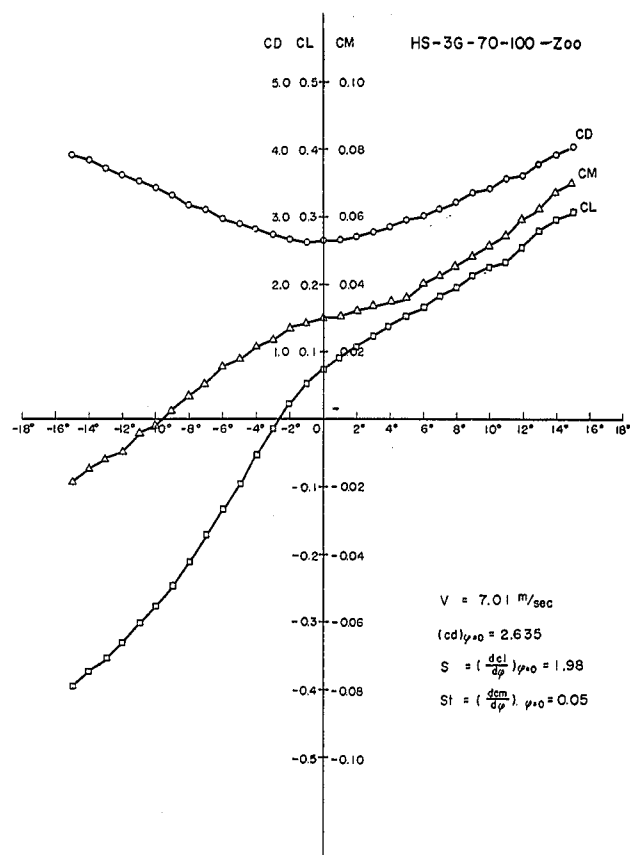


图 8-1

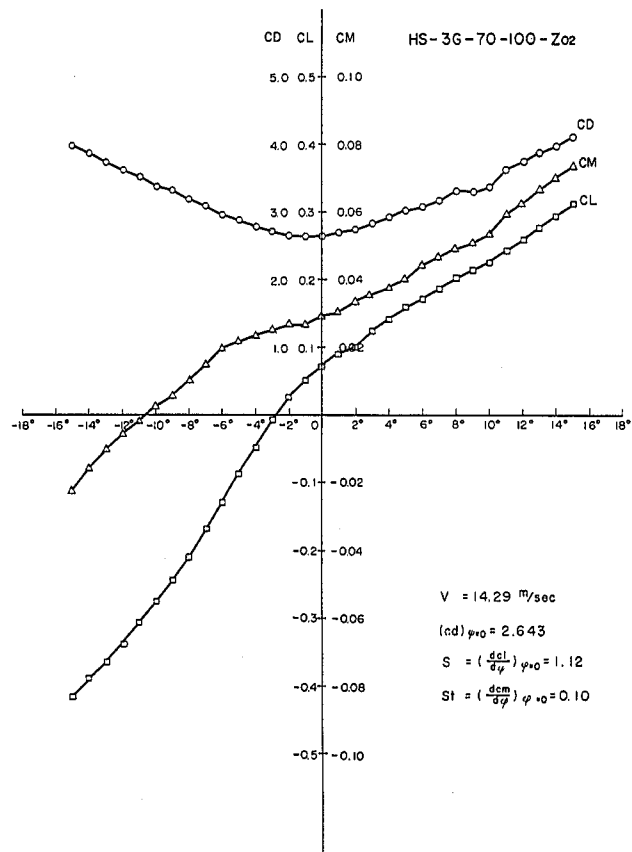


图 8-4

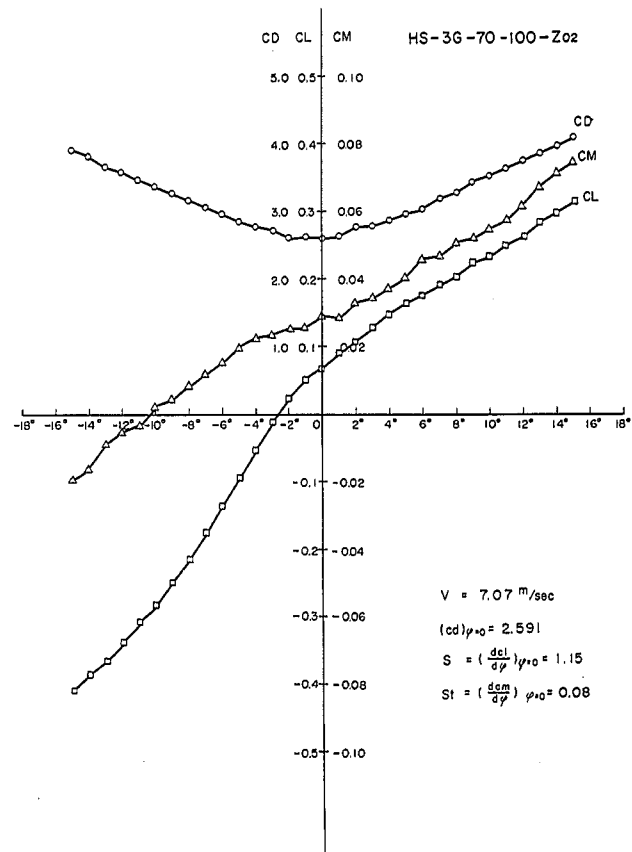


图 8-3

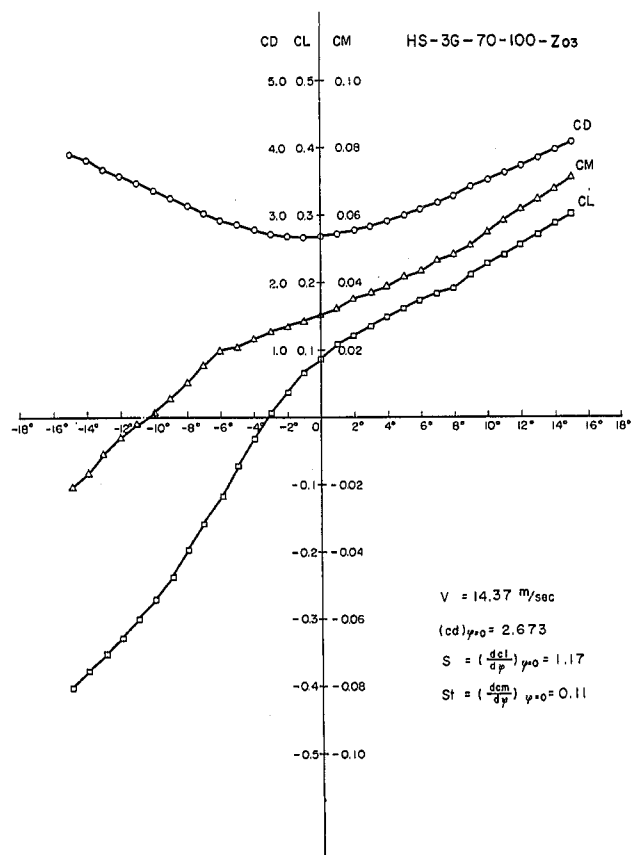


图 8-6

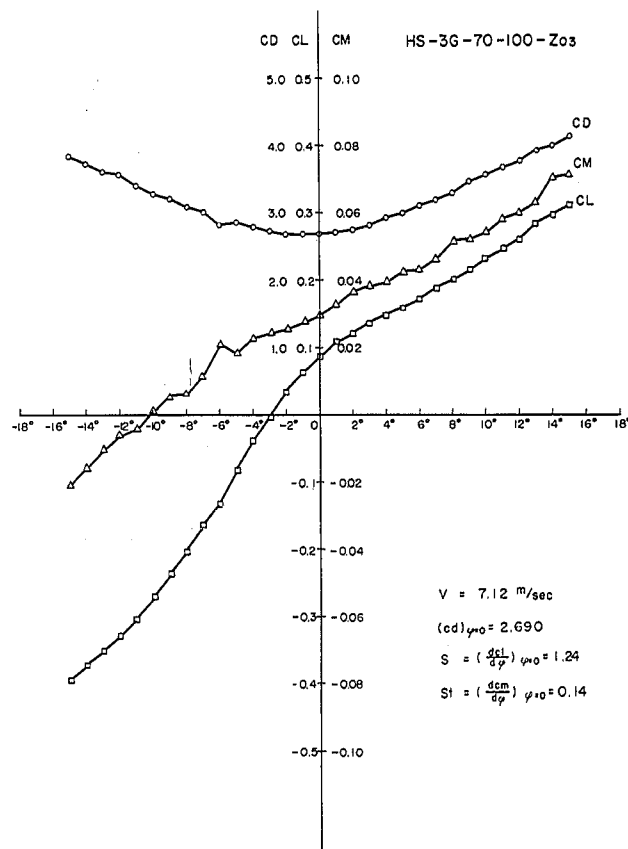


图 8-5

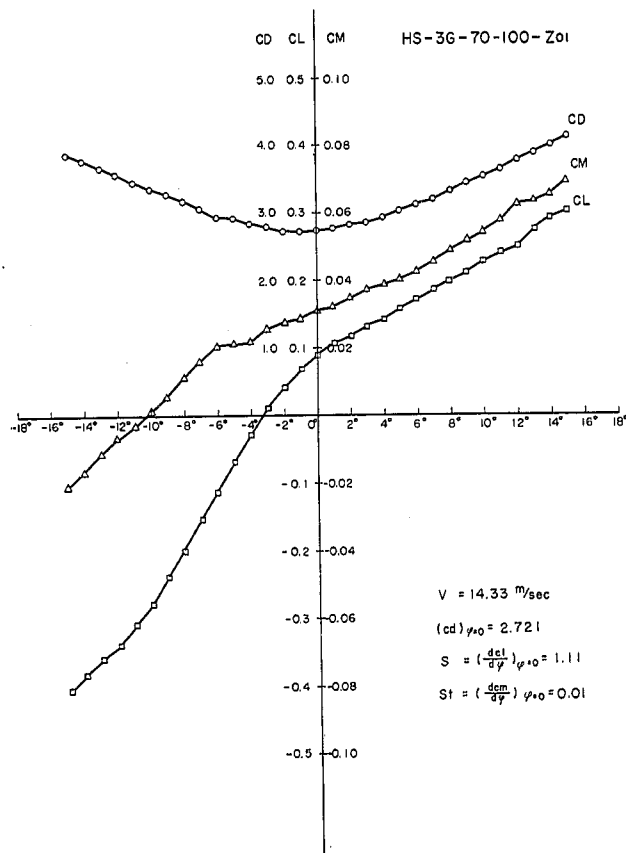


图 8-8

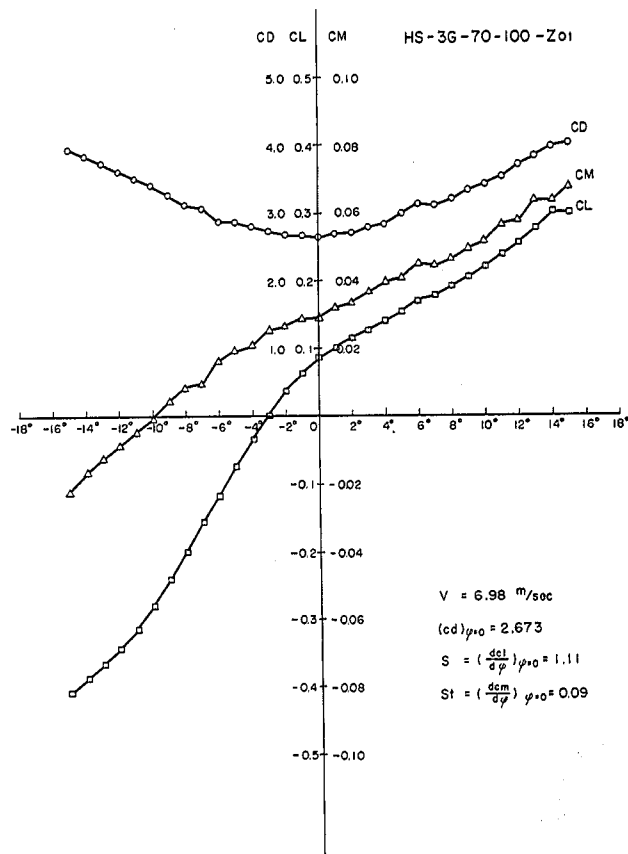


图 8-7