



土木研究所資料

第753号

橋梁吊材の耐風設計法(I)

昭和47年3月

建設省土木研究所

構造橋梁部 構造研究室

目

次

序	1
1. 要 旨	2
2. 橋梁吊材の実態調査	4
3. 風 洞 実 験	7
(I) 定常空気力の測定	7
(II) フラッター実験	8
(III) 後流渦の測定	10
4. 解 析 理 論	11
(I) 準 定 常 法	11
(II) 非定常空気力	13
5. 実際設計への適用	15
6. 設計計算例	18
7. ま と め	22
参考文献	23
写真 1 ～ 7	
表 1 ～ 6	
図 1 ～ 27	
付録 1 ～ 2	

序

現在のところ橋梁吊材の耐風設計法に関する研究・報告は極めて少なく、実施設計の際に、多くの場合、その検討が、ないがしろにされているのが実情である。本報告は系統的な設計法を確立する為の第一の着手である。従って、報告末尾の設計計算法は、あくまでも暫定的な方法であり、より良い設計法が現場設計者から開発されることを望むものである。

ここに、我国におけるランガー橋の実態調査を実施し、資料を提供して戴いた建設省道路局、ならびに、この調査に協力を戴いた地方建設局、各都道府県庁の関係者に対し、心より感謝の意を表する次第である。

昭和47年3月

構造研究室長 成 田 信 之

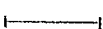
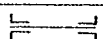
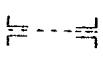
同 研究員 横 江 稔

1 要 旨

近年、橋梁吊材が風によって破損した例、あるいは、過激な振動をする事例が数件報告^{1), 2), 3), 4)}されている。破損状況は、吊材端部継手部のリベット孔周辺、あるいは、継手がセツト溶接部における亀裂、または、破断である。

吊材断面としては、H、および、O-断面が一般的であるが、逆ランガー桁の支柱としては、剛性を必要とするので□-断面を用いることが多く、この場合は、一般的には

表-1 吊材断面（実橋調査に基づく）

断 面	橋 梁 数	備 考
	23	
	7	
	23	穴あきウェブ、あるいは、ブレース ンブした腹材
パイプ	11	
ロッド	8	ニユールセン橋
ボックス	19	逆ランガー桁の支柱

耐風性の検討は不必要と考えられる。O-断面については、高層煙突、送信用アンテナ等の高層構造物の断面として、従来より用いられており、耐風性に関する研究成果は比較的多い。O-断面吊材において風による振動現象は低風速において渦励振、中へ高風速で *Buffeting* 振動と考えられ、この観点に基づき振動抑制措置を講じて効果をあげている^{1), 2)}。

一方、H-断面吊材は、従来、アングルとフレートをリベット止めした組合せ部材であったが³⁾、最近では溶接組立てによる簡明な構造を採用しており、また、端部の現場継手部に H.T. Bolt を用いる等、構造減衰能が著しく低下していることが考えられる。さらに、穴あきウェブを用いて風圧を下げる配慮をする等が最近の特徴である。実橋調査によれば、H-断面吊材の $F/g \cdot \eta / \text{web}$ 高（以下 H/B とする）は、 $0.5 < H/B < 1.1$ の範囲に分散しており、他方、この範囲の H/B 比に対する空力学的研究成果は皆無に近い。

H-断面吊材の耐風設計法の確立に必要な事項としては、

1. 各断面比における風による振動特性
2. 吊材の構造特性(構造減衰率, 質量, 振動数)が風による振動に及ぼす効果
3. 継手部の設計法, および, 合理的な継手構造,

であり, さらに, H-断面に形状的な修正を加えて適正断面を選定する等の継続研究が必要である。

本報告では第一段階として, 上記 1, 2 項に主眼をおき, 我国における橋梁吊材の実態を報告し, H-断面吊材の *Typical* な三種の模型に対しておこなった風洞実験結果を示し, これに多少の考察を加え, 実施設計へ適用する場合の一方法を示した。

2. 橋梁吊材の実態調査

我国におけるランガー橋梁 141 橋のうち、充腹ウエブをもち、全溶接されたH-断面吊材を有する 73 橋について、吊材の耐風性におよぼす構造特性について調査をおこなった。

a) 断面比 (図-1) ; $H/B = 0.5 \sim 1.3$ に分布し、0.7 がピークで全体の 35%、 $0.5 < H/B < 1.1$ が 87% を占める。

b) 部材の重量 (図-2) ; 部材断面積は $50 \sim 70 \text{ (cm}^2\text{)}$ の範囲が 53% を占め、これを重量に換算すると、 $40 \sim 55 \text{ (kg/m)}$ である。

c) ウェブ高 (図-3) ; $15 \sim 48 \text{ (cm)}$ に散在しており、 $20 \sim 30 \text{ (cm)}$ の領域が比較的多く、45% を占める。

d) フランジ巾 (図-4) ; アーチ・ライズとの相関を示し、 $20 \sim 25 \text{ (cm)}$ の範囲で 45% である。

e) 振動数 (図-5) ; 曲げ一次振動数の理論値を次式を用いて求めた。

$$\text{両端ピン} \quad f = \frac{\pi}{2l^2} \cdot \sqrt{\frac{EIg}{AR}} \cdot \sqrt{1 + \frac{Pl^2}{EI\pi^2}}$$

$$\text{両端固定} \quad f = \frac{4.73^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\frac{EIg}{AR}} \cdot \sqrt{1 + \frac{Pl^2}{EI\pi^2}}$$

ここで、 l ; 部材長、 EI ; 曲げ剛性、 g ; 重力加速度、 AR ; 単位長さあたりの重量、 P ; 死荷重張力

この場合、 P として全長の 20%、 l としてライズの 90% の仮定を一律に設けている。実測された振動数は $f(\text{ピン})$ と $f(\text{固定})$ の中間値をとり、継手部の固定度に関連している。

f) 構造減衰 ; 実測データが少ないうえに、諸部継手部の状態が敏感に依存すると考

表-2 実橋の振動実験（観測）結果

橋 名	スパン	(1)内部材長 ライス	吊 材 断 面	断面積	曲 げ - 次 振 動 数			対 数 減衰率	そ の 他
					理 論 値		実測値		
					ピ ン	固 定			
向島大橋	118.0 ^m	18.0	2-P.170.8	48.3	2.15	4.88	3.35	0.008	破断後、ウェッブを縫き、リブ を追加して補強
		(17.12)	1-P.352.6						
		(14.48)	"						
辰下橋	65.2	11.0	2-P.210.9	49.8	5.27	11.96	7.7	0.029 5 0.032	吊材フランジを補剛釘の垂直ス テフナーに緊結
		1-P.150.8							
		"							
西徳大橋	150.0	21.5	1-Pipe	67.6	2.25	4.02	3.42	0.0098 5 0.011	トラスド、ランガー桁 リブを追加して補強
		(19.75)	318.5 ^φ 4.9						
		"							
Zdakov橋 (CSSR)	330.0	42.5	1-Pipe	381	1.48	3.36	1.56	0.007 5 0.014	逆ランガー桁 振動振巾の抑制措置として、パ イプ内に砕石を挿入
	+2026.0	(41.48)	1000 ^φ 12						
	"								

えられるが、表-2を参考とすれば、 $\delta = 0.01 \sim 0.04$ 程度を規定するのが妥当であろう。

その他、鋼道橋構設計示方書（昭.39.6）40条の細長比 200 を越える場合が数例あった。

3. 風 洞 実 験

実験に使用した風洞は、建設省土木研究所、構造研究室 非定常空気力風洞であり、その概略を示せば表-3の通りである。

表-3 非定常空気力風洞

型 式	室内環流式風洞
測定部(高×中×長)	2000×1000×3000
風 路 長	21.7m
縮 流 比	7.81 : 1
測定部風速	1~25 m/s
送風機形式	後置静翼型/紙軸流式
“ 風 量	48 m ³ /s
“ 有効全圧	80 mm Ag
電動機形式	超分巻
制御方式	直接式
附属施設	三分力天秤、フラッター実験装置 非定常空気力測定装置

実験用模型は実橋吊桁断面より Typical な断面として、 $H/B = 0.5, 0.75, 1.0$ (以下、 $H50, H75, H100$ と呼ぶ) を選定した。模型諸元を図-6に示す。また、風洞実験項目は各々の断面に対して、

- (I) 定常空気力の測定
- (II) フラッター実験
- (III) 後流渦発生周波数の測定

の三種であり、測定計器、測定状況を、写真1)、~7) に示す。

(I) 定常空気力の測定

ヒラミット型三分力天秤により静的三分力を計測した、迎角変化は、一般的には

+15° ~ -15° を測定範囲としたが、特に H75 については、高迎角に対する揚力を確認する為に、0° ~ 90° まで測定した。各断面に対する三分力係数（風軸）を図-7、H75 の高迎角における揚力係数（部材軸）を図-8 に示す。

Galloping 振動発現の可能性に対する Den Hartog の判定式は、

$$\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D < 0$$

であり、これを適用すれば H50, H75 において Galloping 振動が予想される。また、H75 の C_L -曲線図によれば、 $\alpha \cong 12^\circ$ で急変し、 $\alpha = 40^\circ \sim 90^\circ$ においては $C_L \cong 2.0$ のほぼ同一値をもち、これは腹板を流向とした I-型断面の C_D -値に対する既存の報告に一致している。

(II) フラッター実験

実験装置は模型支持部、ダンピング付加装置（加振器付き）、変位検出装置よりなり、また、フラッター実験と同時に必要に応じて、熱線風速計により後流の変動風速を測定した。計測ブロック図を図-9 に示す。ダンピングの付加装置には電磁ダンパーを用い、従って、振動模型の構造減衰を適宜に調整することが可能である。模型の支持は、タワミ振動の一自由度のみを許すようバネ支持した。この点については、予め二自由度支持による予備実験をおこない、回転振動の発現が極めて微量であるか、あるいは、発生しないことを確認しており、既存の研究によっても予測された。

曲げ一自由度フラッターの相似測としては、次式が妥当であるとされている。

$$\textcircled{1} \frac{m}{\rho B^2} \cdot \delta_n, \quad \textcircled{2} \frac{V}{N_n B}$$

実橋吊材の Typical な断面に基づき、相似パラメーターを算定すれば、 $m = 5.0$ 、 $B = 0.25$ 、 $\delta_n = 0.01 \sim 0.04$ が平均的であるとして、 $\frac{m}{\rho B^2} \delta_n = 4.4 \sim 25.6$ となり、この領域を実験範囲の目安とした。

a) H50

三分力曲線より予測されたように、Galloping 振動が発生し、定常振動時の振動数は必ず固有振動数に一致した。代表的な実験結果について、定常振動 $\longleftrightarrow$ 換算風速曲線を図-10 に示す。この図より、三種のパターンがあることが知られる。

$\frac{m}{\rho B^2} \cdot \delta_n$ が低い場合（くさ）には、定常振動の立上りが急激であり、 $5 < \frac{m}{\rho B^2} \delta_n < 10$

においては不安定な *limit cycle* から、静止位置より発散する振動へと移行し、 $10 < \frac{m}{\rho B^2} \delta$ では、定常振巾の直上りが緩慢であると同時に、共振換算風速が高くなっている。

H50 のストローハル数は微速するように、平均値として 0.15 が得られており、これより逆算すると共振換算風速 $(\frac{V}{NB})_{res} \cong 4.3$ となるが、この近傍の風速において顕著な定常振動は観測されていない。従って、実験時に完全な共振風速に設定し得えなかったとしても、H50 における渦力は極めて弱いと考えられる。

$$(\frac{V}{NB})_{cr} \leftrightarrow \frac{m}{\rho B^2} \delta \text{ 曲線を図-11 に示す。}$$

b) H75

低風速において渦励振とみられる限定振動、高風速で *Galloping* 振動が出現した。限定振動の最大振巾は $\frac{V}{NB} \cong 7.5$ で得ており、これを仮に共振風速としてストローハル数を逆算すると $S_h = 0.10$ となり、振動振巾 20 へ 30 mm をフランジ巾に加えて補正すると $S_h \cong 0.12$ となる。限定振動領域の振動数は総えず固有振動数に一致し、従って、単純な強制振動とは言えないが、便宜的に強制振動とみなして動的揚力係数 $(C_L)_{dyn.}$ を求めると表-4 の通りであり、約 0.4 が推定

表-4 H75 動的揚力係数; $(C_L)_d$

No.	$(\text{kg sec}^2/\text{m})$ m	(cm/sec) Nh	δ_h	$1/\varepsilon$	$\frac{m}{\rho B^2} \cdot \delta_h$	共振 振巾 (mm)	$(C_L)_d$
1	1.066	200	0.055	57.1	11.5	15.8	0.40
2	1.087	198	0.075	41.9	16.3	10.4	0.40
3	1.066	200	0.104	30.2	22.1	7.3	0.43

される。高風速における *Galloping* 振動は $\frac{m}{\rho B^2} \delta_h$ が大きい場合、低い定常振巾が緩慢に続き、 $10 < \frac{m}{\rho B^2} \delta_h < 15$ 程度で静止位置からの発散振動が出現している。定常振巾 $\leftrightarrow$ 換算風速曲線を図-12、フロッター実験時の後流渦発生周波数の結果を図-13 に示す。この場合、模型振動数と渦発生周波数の間に 2% 程度の差異が認められるが、これは、後流渦周波数の測定に用いた実時間自己相関計の分解能に因ると考えられる。 $(\frac{V}{NB})_{cr} \leftrightarrow \frac{m}{\rho B^2} \delta_h$ 曲線を図-11 に

示す。

c) H/100

低風速において渦励振が現われた。微小な振動域市発生から共振々動への経過をみると、振動数が風速の増加にほぼ比例しており、これを図-14に示す。振動数の増加勾配よりストローハル数を求めると0.135であり、この S_r 数を用いて $(\frac{V}{NB})_{res.}$ を求めると7.40となるが、実測結果では $(\frac{V}{NB})_{res} = 7.8$ となり共振風速のズレがみられる。

共振風速を越えると気流の乱れが激しく、正確な垂直変位のみの計測が困難であったが、*Buffeting* 現象の傾向はうかがわれ、中風速で相当大きな振巾が現われた。代表的な振巾 $\leftrightarrow$ 換算風速曲線を図-15に示す。また、共振振巾より求めた動的揚力係数を表-5に示す。H/100に対しては、 $(C_L)_{dyn.}$ として1.15が推定される。

表-5 H/100 動的揚力係数; $(C_L)_d$

No.	$(kg \cdot sec^2/m)$ m	(γ/sec) N_h	δ_h	$1/\varepsilon$	$\frac{m}{(B^2 \cdot \delta_h)}$	共振 振巾 (mm)	$(C_L)_d$
1	1.132	1.94	0.125	25.1	28.3	18.5	1.16
2	0.903	2.17	0.168	18.7	30.0	18.0	1.15
3	0.620	2.63	0.213	14.7	26.4	22.0	1.15
4	0.445	1.51	0.306	10.3	27.2	29.0	1.44

(III) 後流渦の測定

静止模型の風下に熱線フローを装置し、後流渦の発生周波数を計測し、各断面に対するストローハル数を求めた。レコーダーに集録されたアナログデータをA-D変換し、このデジタルデータをTukeyの方法を用いて、パワー・スペクトルを計算した。スムージングはハニングを用いた。H/50に対するパワー・スペクトルを図-16へ18に示す。風速が上昇するに従って裾が広がる傾向がうかがわれる。

ストローハル数は R_e 数効果がある。図-19に、 $S_r \leftrightarrow R_e$ 曲線に示す。また、パワー・スペクトル計算に用いた計算プログラム・リストを付録12に集録する。使用した機種はFACOM 270-20/30である。

4. 解析理論

Galloping 振動の解析理論としては準定常法が有力な手法と考えられており、この分野では G. V. Parkinson, M. Navak の研究が著名であり、特に、正方形断面部材に対しては、Galloping の発振風速、振巾 $\longleftrightarrow$ 風速曲線の理論値が実験結果と良く適合することが確認されている。^{7), 8), 9)} しかし、この種の理論では後流渦の影響が全く考慮されておらず、従って、適用される風速領域は $V \gg \frac{N \cdot H}{S_t}$ と考えられる。

一方、ある断面の非定常空気が知れると、構造特性（構造減衰、質量、振動数）に依らず、Galloping の発振風速を見出すことができる。本報告では自由振動法に基¹⁰⁾づき、フラッター実験で得た振動曲線を用いて非定常空気を求め、これによってフラッター実験結果を検討した。

また、H/100 に現われた Buffeting, および、H/75, H/100 に生じた渦励振が単純な強制振動と異なる点については本報告では触れない。

(I) 準定常法

理論の説明は、例えば、7), 8), 9) に詳しいが、概略を示せば次のようである、横振動している部材に対し直角な流れは、部材断面との間に相対迎角をもつ、これを $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y}}{V} \right)$ とすると、定常空気力曲線の迎角に相当する。この定常空気力 $\longleftrightarrow$ 迎角曲線を $\sum \left(\frac{\dot{y}}{V} \right)^i$ 項で展開し、これを質量・バネ・ダッシュポット系における自由振動が振動方程式の非線形減衰項として導入する。この非線形方程式は数値積分によるか、あるいは、振巾の時間変化が緩慢であれば、Krylov-Bogolubov の近似法で解くことができる。

a) 空気力係数

図-20 を参照として、空気力係数を次のように定義する。

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot H \cdot l \cdot V_{rel}^2$$

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot H \cdot l \cdot V_{rel}^2$$

$$C_{Fy} = -(C_L + C_D \cdot \tan \alpha) \cdot \sec \alpha \quad \text{とすれば、}$$

$$F_y = C_{Fy} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot H \cdot l \cdot V_{rel}^2$$

H-断面に対する C_F - 曲線を図-21に示す。H. Förching の研究成果¹²⁾ 同時に掲載してある。

C_F - 曲線を $\frac{y}{V}$ のべき級数に展開する。この場合、H-断面に対しては、 C_F - 曲線の逆対称性、および、曲率変化の良否を考慮し次式で展開する。

$$C_{Fy} = A_1 \cdot \left(\frac{y}{V}\right) + A_3 \cdot \left(\frac{y}{V}\right)^3 + A_5 \cdot \left(\frac{y}{V}\right)^5 + A_7 \cdot \left(\frac{y}{V}\right)^7$$

H-断面に対する係数 $A_1, \sim, A_7$ を表-6に示す。

表-6 空気力係数; $A_1, \sim, A_7$

	A_1	A_3	A_5	A_7
H50	4.71	-339	40900	336000
H75	2.29	-316	19200	-241000
H100	-1.08	292	-11200	115000

b) 振動方程式、および、その解法

$$m\ddot{y} + r\dot{y} - F_y + ky = 0$$

Krylov-Bogolubov のオノ近似によれば、 $y = \cos(\omega t + \Phi)$ とおくと、

$$\dot{a} = \frac{1}{2\pi\omega} \int_0^{2\pi} f(-aw \cdot \sin \gamma) \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma$$

$$\dot{\Phi} = \frac{1}{2\pi\omega a} \int_0^{2\pi} f(-aw \cdot \sin \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma$$

$$\text{ここで } f(y) = r\dot{y} - F_y$$

となり、オノ近似では $\Phi \equiv 0$ が成立し、また、 $\dot{a}$ を展開すれば次のようである。

$$\dot{a} = \frac{1}{2\pi\omega} \cdot \left\{ -2aw \cdot \left(\beta\omega - \frac{\pi}{H} \cdot VA_1 \right) \pi + \frac{2\pi}{H} \cdot V^2 \left\{ A_3 \left(\frac{aw}{V} \right)^3 \cdot \frac{3}{8} \pi + A_5 \left(\frac{aw}{V} \right)^5 \cdot \frac{5}{8} \pi + A_7 \left(\frac{aw}{V} \right)^7 \cdot \frac{35}{64} \pi \right\} \right\}$$

$$\text{ここで } n = \frac{PH^2\ell}{4m}$$

c) 発振風速

$$\beta \omega - \frac{n}{H} \cdot V \cdot A_1 < 0, \text{つまり, } V > V_0 = \frac{\beta \omega H}{n A_1}$$

d) 定常振巾

定常振動の条件は $da/dt = 0$ であり、これに $\bar{U} = V/(WH)$, $\bar{a} = a/H$ なる変数変換をおこなうと、振巾方程式として次式を得る。

$$\frac{35}{64} A_7 \cdot \bar{U}^6 \cdot \bar{a}^6 + \frac{5}{8} A_5 \cdot \bar{U}^4 \cdot \bar{a}^4 + \frac{3}{4} A_3 \cdot \bar{U}^2 \cdot \bar{a}^2 + \frac{\beta}{n \bar{U}} - A_1 = 0$$

e) 一般化した応答曲線

g) によれば、断面の空気力係数 $A_1, \dots, A_7$ が決まれば、風速-振巾曲線は質量、減衰、振動数、および、部材寸法に依らず、一般化することができる。

$$\bar{a} \cdot \frac{n}{\beta} = \bar{U} \cdot f(A_1, A_3, A_5, A_7, \bar{U})$$

Galloping が発現する H50, H75 に対して、表-5 の空気力係数を用いて計算した、一般化した応答曲線を図-22, 23 に示す。

f) 考 察

準定常理論より得た定常振巾 $\leftrightarrow$ 風速の理論曲線は全ての実験結果と一致しなかった。図-24 に $\frac{m}{\rho B^2} \delta_h$ が大きく、発振が押えられた実験ケースについて、理論曲線と比較して示す。g) における正方形断面の例をみると、 $m = 0.00046$, $\beta = 0.0015, 0.0062, 0.0077$ であり、本報告のまとめ方に従い整理すると、 $4 < \frac{m}{\rho B^2} \delta < 18$ となり今回の実験範囲に一致している。

計算プログラムを付録-2 に集録する。

機種は TOSBAC 3400 である。

(II) 非定常空気力

模型が気流中で一自由度曲げ振動をしている場合に、振動振巾が微小であり、振動数が曲げ固有振動数に一致すれば、空気力は速度位相成分のみとなり、振動方程式は次のように近似できる。¹⁰⁾

$$\ddot{h} + 2 \zeta_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h = H_1 \cdot \dot{h}$$

ここで、 ζ_h ; 曲げ振動の減衰定数

ω_h : 曲げ固有振動数

一方、ある風速に対して減衰振動

$$\ddot{h} + 2\gamma_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h = 0$$

を得ると、

$$2 \cdot \omega_h \cdot \gamma_h = 2 \cdot \omega_h (L_h - \gamma_h)$$

$$\text{つまり } H_1 = 2 \omega_h (L_h - \gamma_h)$$

として空気力係数 H_1 が得られる。 γ_h については、減衰曲線より対数減衰率 δ_h を求め、次式より変換する。

$$\gamma_h^2 = \frac{1}{1 + 4(\pi/\delta_h)^2}$$

Galloping 振動が発現した H50, H75 について、代表的なフラッター実験から求めた空気力係数 H_1 を無次元化して図-25に示す。この場合、無次元化は次式に依っている。

$$H_1^* = \frac{H_1}{C B^2 \omega} m$$

また、実験データからの対数減衰率の読み取りは、倍振巾 $1/\delta^m$ の位置でおこなった。減衰率の振巾特性についての一例を図-26に示す。また、 H_1^* 曲線より、Galloping の限界風速を求めたものを図-27に示す。

5. 実際設計への適用

H-断面における、風による振動特性を総括すると、

H 50 ----- Galloping

H 75 ----- Galloping, および、渦励振

H 100 ----- 渦励振, および、Buffeting

が卓越し、一方、5) 12) によれば、H 30, H 40 に対して、Galloping が発生するとされており、また、11) によれば、H 108 に対して、渦励振、および Buffeting が起つたと報告されている。これらは、今回の実験結果の傾向と完全に合致しており、従って、実際設計の立場では次のような検討をすれば安全側となる。

1. $\sim$ H 50 ----- Galloping に対する検討
2. H 50 $< \sim$ H 100 ----- Galloping, および、渦励振 " .
3. H 100 $< \sim$ ----- 渦励振, および、Buffeting " .

A) Galloping

図-11 を用いると、 $\frac{m}{C_B^2} \cdot S$ が定まれば Galloping に対する限界風速の推定がつく。

B) 渦励振

橋梁吊材の振動数、断面長、ストローハル数を考えれば、この種の振動の発生は必然的であり、従って、部材の破壊を招かぬように振動振幅を抑制せねばならない。

共振時における部材中央の振動振幅、曲げモーメント、および、継手部に固定度を考慮した場合の固定端モーメントは次式のようなものである。この場合、振動波形として、両端ヒンジの一次の振動モードを仮定して

$$v(x) = v\left(\frac{l}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$$

を用い、さらに、境界条件を両端固定に置き換え上式の $v\left(\frac{l}{2}\right)$ のタワミを得るように固定端モーメントを算出した。

i). 部材中央の振動振幅、および、曲げモーメント

$$v\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{P_c}{P_c + P_d} \times v_0\left(\frac{l}{2}\right)$$

ただし、

$$v_0\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{res}^2 \cdot B \cdot (C_L)_{dyn} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{4}{\pi m \omega^2}$$

$$M\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{res}^2 \cdot B \cdot (C_L)_{dyn} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{4\pi}{m \ell^2 \omega^2} \cdot EI$$

ii) 固定端モーメント

$$M_0 = 32 \times v\left(\frac{\ell}{2}\right) \times \frac{EI}{\ell^2}$$

ここで、 $v\left(\frac{\ell}{2}\right)$; 部材中央点の振動振幅

$M\left(\frac{\ell}{2}\right)$; 部材中央点の曲げモーメント

M_0 ; 固定端モーメント

P_c ; Euler の座屈荷重 $\left(= \frac{\pi^2 EI}{\ell^2}\right)$

V_{res} ; 共振風速 $(f \cdot H / S_L)$

$(C_L)_{dyn}$; 動的揚力係数

$1/\varepsilon$; 倍率係数 $(= \pi/\delta)$

EI ; 曲げ剛性

ストローハル数 S_L は各断面比に対して、図-19 より求め、これより共振風速 V_{res} が定まる。動的揚力係数については、 $H/100$ で 1.15、 $H/75$ で 0.40 を得ており、他の断面比の場合は、これらより推定する。共振倍率 $1/\varepsilon$ については前述したようなデータが結果に近く、対数減衰率を $\delta \cong 0.02 \sim 0.04$ と見積もれば、 $1/\varepsilon \cong 150 \sim 80$ が予想される。また、格点の応力測定の結果によれば、端部の支持条件は、ほぼ、固定端に近い応力の発生があったとされているので、端部の応力照査には固定端モーメントによって検討する必要がある。さらに、過去の事故例の大半が高サイクルの疲労破壊であった可能性が濃厚であり、従って部材の許容応力には疲労を考慮する必要がある。しかし、現行の鋼道橋橋示方書にはこの種の規定がなく、従って、例えば、鋼道橋橋示方書解説に準拠すれば、継手部においては疲労を考慮した許容応力は次式のようなものである。

材質 SS41, SM50・53

$$\sigma_a = \frac{1530}{1-0.7R} \quad (H. T. Bolt)$$

$$\sigma_{T2} = \frac{1275}{1-0.7k} \quad (\text{Rivet})$$

$$\text{ここで } k = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

部材中央については、現在のところ H-断面梁に対する曲げ圧縮許容応力度の規定は国内、外と見あたらぬ。

作用力直角方向の剛性がより強いので、横割屈座屈でチェックすることは不合理であり、軸力場での振動部材に対して Euler の全体座屈を検討することも適当でない。

従って、暫定的に容示 37 系における I-断面梁のフランジの局部座屈に対する規定を準拠して用いると（応力分布は異なる）

$$H \leq 24t$$

ここで、

$$H : \text{Flg} \cdot \text{巾}$$

$$t : \text{ " } \text{ 厚}$$

となる。

以上の検討により、Over Stress し断面構成が困難な場合には、断面の修正が必要であるが、振動振巾が $(C_L)_{dyn}/S.m$ に比例することを考えるならば、

- イ) 構造減衰率を上げる。
- ロ) 部材を重くする。
- ハ) 動的揚力係数を下げる。

以上三種の改善方法が考えられる。

格点構造では、従来、吊材ウェスは断面を考慮せず、従って、主構に Joint してない。このことが、継手部の剛性を損い局部的に過大な応力を与える要因となつていふと考えられる。この点からすれば、吊材ウェスを主桁フランジに継ぐことが得策であるが、他方、主桁フランジに不測の応力を与えることとなり、その点では好ましくない。従って、主桁に悪影響を与えぬような Joint の方法を見出す必要があり、図-28 にその一例を示す。

6. 設計々算例

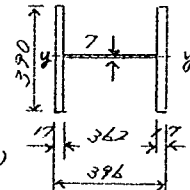
その [1]

本例に使用するランガー糸軸力は、下記の設計条件に基づき概算したものであり、部材長が長く、作用軸力が大きい比較的断面構成が困難な場合を例にとった。この場合、細長比の規定を満足する為に、かなり大きな F/g 、巾を必要とし、 $H/B \cong 1.0$ となり、従って、溶接板に対する検討のみをおこなった。軸力を算出した過程の計算は省略する。

a) 設計条件

橋	格	;	一等橋
橋	長	;	140m
スパン	長	;	16 @ 8700 = 139.200
巾	員	;	7m
吊材長 (理論長)	;		20.725
ランガー糸の引張軸力	;		$P_d = 32.494$
			$E_{eff} = 13.06$
			$P = 46.00$

b) 中間部断面決定

	A_g	I_y	
2-Pl. 390 x 17	132.6	16800	$H/B = 0.98$ 
1-Pl. 362 x 7	25.34		
	157.9	16800	

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{16800}{157.9}} = 10.3 \text{ (cm)}$$

$$l/r_y = 2025/10.3 = 197 < 200$$

c) 振動数 (両端固定)

$$f_{fix} = \frac{4.73^2}{2 \times 3.14 \times 20.25^2} \cdot \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6 \times 16800 \times 980}{0.00785 \times 157.9}} \cdot \sqrt{\frac{32940 \times 20.25^2}{2.1 \times 10^6 \times 16800 \times 3.14^2}}$$

$$= 5.40 \text{ (1/sec)}$$

d) 共振風速

振動数は両端固定の場合の90%, ストロークハル数

$S_z = 0.15$ と仮定する。

$$V_{res.} = \frac{f \cdot H}{S_z} = \frac{5.40 \times 0.9 \times 0.39}{0.15} = 12.6 \text{ (m/sec)}$$

e) 部材中央の振動根巾, および, 曲げモーメント

$\delta = 0.03 \sim 0.04$ を想定して $1/\varepsilon = 90$ とし, $(C_L)_{dyn} = 1.2$ を用いる。

$$U_0(\frac{L}{2}) = \frac{1}{2} \times 0.125 \times 12.6^2 \times 0.396 \times 1.2 \times 90 \times \frac{4}{3.14 \times 12.6 \times 30.5^2} = 0.0462 \text{ (m)}$$

$$v(\frac{L}{2}) = \frac{84.83}{84.83 + 32.94} \times 0.0462 = 0.033 \text{ (m)}$$

$$M(\frac{L}{2}) = \frac{1}{2} \times 0.125 \times 12.6^2 \times 0.396 \times 1.2 \times 90 \times \frac{4 \times 3.14}{20.25^2 \times 30.5^2 \times 12.6} \times 2.1 \times 1.68 \times 10^4 = 3910 \text{ (kg.m)}$$

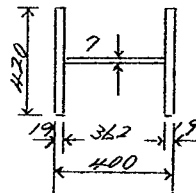
f) 固定端モーメント

$$M_0 = 32 \times 0.033 \times \frac{2.1 \times 1.68 \times 10^4}{20.25^2} = 9090 \text{ (kg.m)}$$

g) 端部補強断面

		A_g	A_n
2-P1.	420 × 19	159.6	121.6
1-P1.	362 × 7	25.34	18.34
		184.9	139.9

$$W = \frac{1.9 \times 42^2}{3} = 1117 \text{ (cm}^3\text{)}$$



応力度

$$\text{ランガ一乗 } \sigma_H = \frac{46000}{139.9} = 329 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

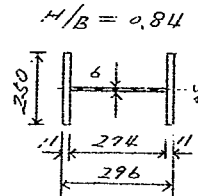
$$\text{風荷重 } \sigma = \frac{90900}{1117} = 814 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

ランガー系の引張軸力 : $P_d = 17.3$

$$\frac{P_{Li} = 11.4}{P = 28.7}$$

b) 中間部断面決定

	A_g	I_y
2-Pl. 250×11	55.0	2860
1-Pl. 274×6	16.44	
	71.4	2860



$$r_y = \sqrt{\frac{2860}{71.4}} = 6.3 \text{ (cm)}$$

$$l/r_y = 1.215/6.3 = 19.3 < 200$$

c) 振動数(両端固定)

$$f_{fix} = \frac{4.73^2}{2 \times 3.14 \times 1215^2} \cdot \sqrt{\frac{21 \times 10^6 \times 2860 \times 980}{0.00785 \times 71.4}} \cdot \sqrt{1 + \frac{17300 \times 1215^2}{21 \times 10^6 \times 2860 \times 3.14^2}}$$

$$= 9.28 \text{ (cy/sec)}$$

d) Galloping に対する検討

$$\frac{\pi}{\rho B^2} \cdot \delta_h = \frac{5.72}{0.125 \times 0.3^2} \times 0.035 = 18$$

図-11 によると、 $(\frac{V}{NB})_{cr} \approx 30$ であり、従って、

$$V_{cr} = 30 \times 9.28 \times 0.9 \times 0.3 = 75.2 \text{ (m/sec)}$$

e) 共振風速

$$St = 0.13, \quad f = f_{fix} \times 0.9 \quad \text{とする}$$

$$V_{res.} = \frac{f \cdot H}{St} = \frac{9.28 \times 0.9 \times 0.25}{0.13} = 16.1 \text{ (m/sec)}$$

f) 部材中央の振動振幅, および、曲げモーメント

$$v_0\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{2} \times 0.125 \times 16.1^2 \times 0.3 \times 0.65 \times 90 \times \frac{4}{3.14 \times 5.72 \times 52.5^2}$$

$$= 0.0229^{(m)}$$

$$v\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{40.1}{40.1 + 17.3} \times 0.0229 = 0.016^{(m)}$$

$$M\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{2} \times 0.125 \times 16.1^2 \times 0.3 \times 0.65 \times 90 \times \frac{4 \times 3.14}{5.72 \times 12.15^2 \times 52.5^2} \times 2.1 \times 0.286 \times 10^6 = 918 \text{ (kg}\cdot\text{m)}$$

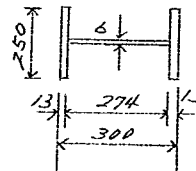
g) 固定端モーメント

$$M_0 = 32 \times 0.016 \times \frac{2.1 \times 10^6 \times 2860 \times 10^{-8}}{12.15^2} = 2080 \text{ (kg}\cdot\text{m)}$$

h) 端部荷重断面

		A_g	A_n
2-P.L.	250×13	65.0	52.0
1-P.L.	274×6	16.44	11.94
		81.4	63.9

$$W = \frac{1.3 \times 25^2}{3} = 271 \text{ (cm}^3\text{)}$$



応力度

ランガー系 $\sigma_N = \frac{28700}{63.9} = 449 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

風荷重 $\sigma = \frac{208000}{271} = 768 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$$\sigma_{max} = 1217 \text{ (kg/cm}^2\text{)} < 1293 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{min} = -319 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

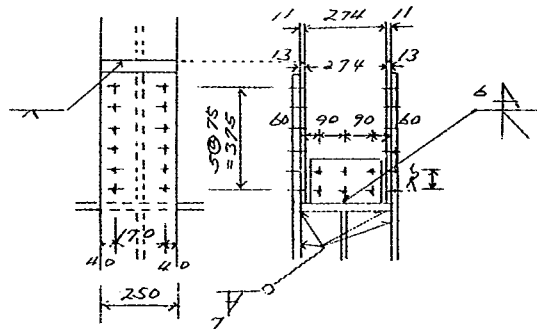
$$R = -\frac{319}{1217} = -0.262$$

$$\sigma_{tu} = \frac{1530}{1 + 0.7 \times 0.262} = 1293 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

i) 継手の設計

$$\Sigma y^2 = 1730^{(cm^2)}, \quad P_r = 3870 \times 8.5 / 12.5 = 2632^{(kg)}$$

$$\frac{208000}{1730} \times 8.5 + \frac{28700}{24} = 2218^{(kg)} < 2632^{(kg)}$$



24 - H.T. Bolt
M22 (F9T)

6 - H.T. Bolt
M22 (F9T)

7. ま と め

H型断面吊材の耐風性について、本報告の成果、および、未解明の点を列記すれば次のようである。

1) 本報告の成果

1. 断面比によって異なる、風による振動特性を把握したこと。
2. 構造特性が振動特性に及ぼす効果
具体的には、
3. *Galloping* の発振風速と構造特性の関係
4. 渦励振の場合の動的揚力係数

2) 未解明の点

1. *Buffeting* の振動振巾
2. 実橋吊材の減衰能
3. 設計風速の決め方
4. 合理的な格架構造
5. 疲労を考慮した設計法

参考文献

1. 山口, 白木, 梅村, 田中 :

カルマン渦による橋梁部材の振動とその防止策,

三菱重工業報, Vol. 7, No. 7.

2. M. Novak :

Über windverregte Verschwingungen der Ständer der
Bogenbrücke über die Moldau.

DER STAHLBAU, Heft 11, 1968.

3. T. Okubo, N. Harita :

Wind Induced Oscillation of Bridge Members.

3rd Joint Meeting, U.S.-Japan Panel on Wind
and Seismic Effects, Tokyo, May 1971.

4. 成田 ;

風による橋梁部材の振動.

橋梁と基礎, Vol. 5, No. 9, 1971.

5. 田中, 伊藤 ;

充腹構造物の自励振動における空気力の特性.

土木学会論文報告集, 第168号, 1969, 8

6. R. A. Frazer, C. Scruton ;

A SUMMARISED ACCOUNT OF THE SEVERN BRIDGE
AERODYNAMIC INVESTIGATION.

NPL/Aero/222

- 7 G. V. Parkinson ;

Aeroelastic Galloping in one Degree of Freedom.

Int. Conf. of W.E. B. S (1-st), Paper 23, 4, 1963, NPL.

8. G. V. Parkinson, N. P. H. Brooks :

On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders.

Trans. of the ASME, 6, 1961.

9. M. Novak :

Aeroelastic Galloping of Prismatic Bodies.
Proceedings of ASCE, EM1, 2, 1969.

10. R. H. Scanlan, A. Sabzevari :

Suspension Bridge Flutter Revisited.
ASCE Structural Engineering Conference, May
8-12, 1967.

11. 田崎 深田, 田中, 湯治 :

ランガー桁におけるH型吊材の風による振動の防止.
土木技術, 25巻, 5号.

12. H. Försching :

Aeroclastisch instabile Widerstandsprofile.
Ingenieur - Archiv, 40 Band, 1971, 568~80.

13. 平井 :

鋼橋 III

技報堂, P.224~P.251, 1967.

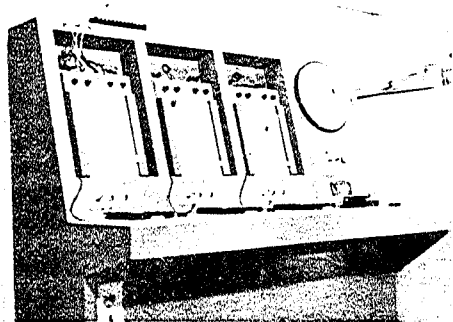


写真-1 三分力天棒

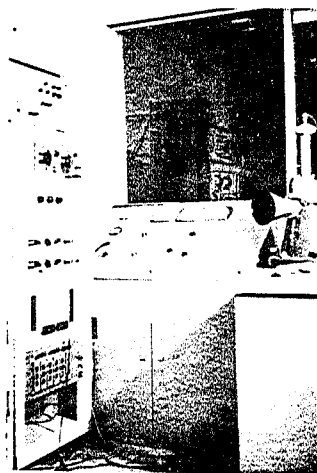


写真-2 風制操作盤、電磁ダレバ、変位計、
フラッター支持装置

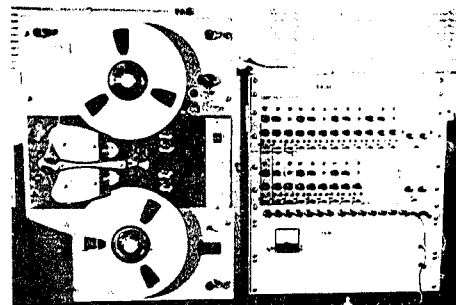


写真-5 テープレコーダー

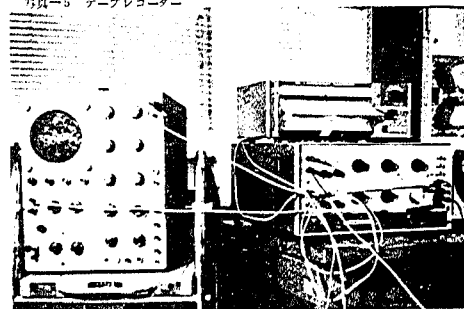


写真-6 未知間自己相関計(右下)

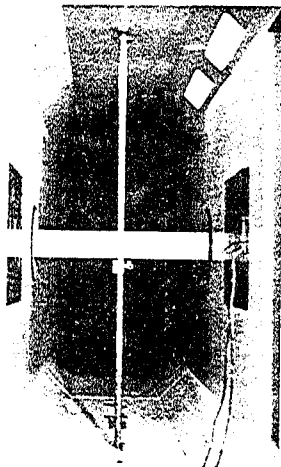


写真-3 フラッター実験機型支持装置

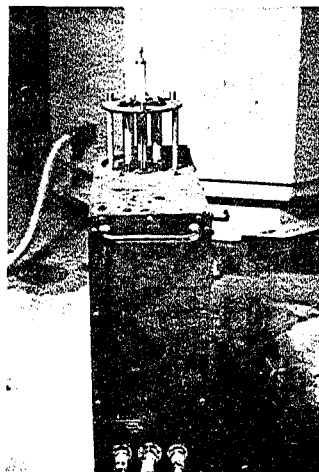


写真-4 電磁ダレバ

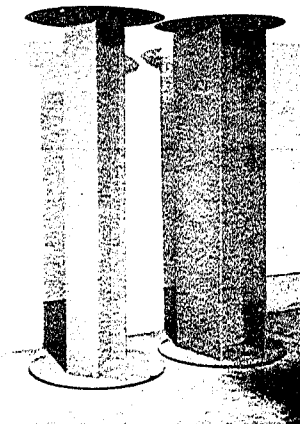


写真-7 風洞実験用機型

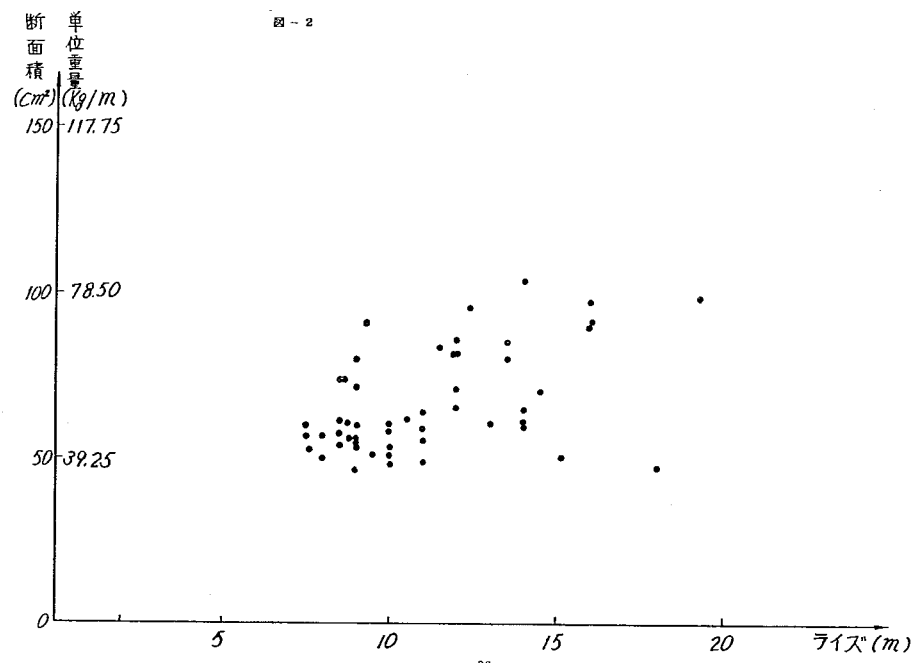
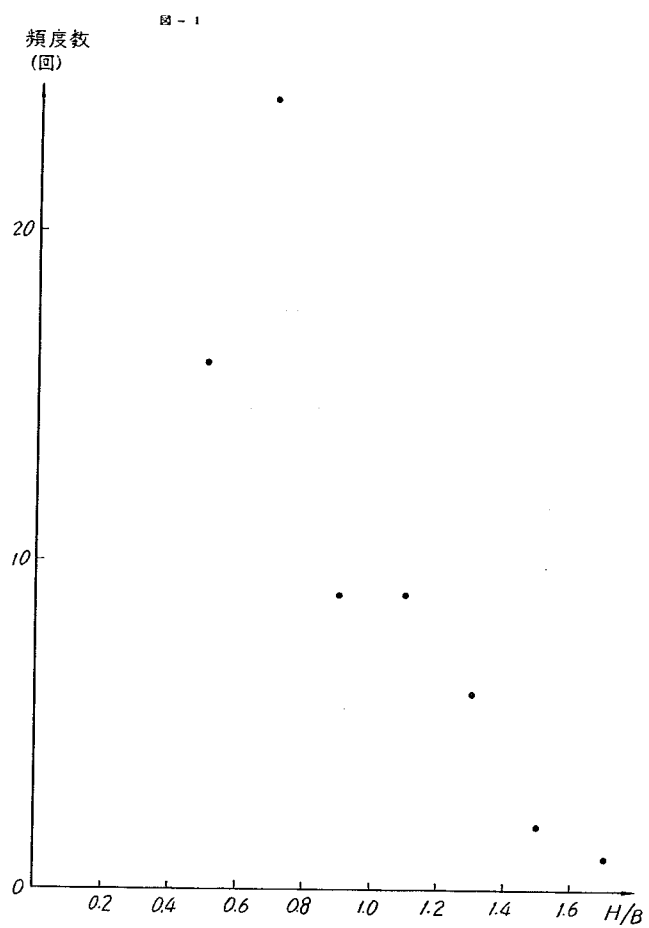


図 - 3

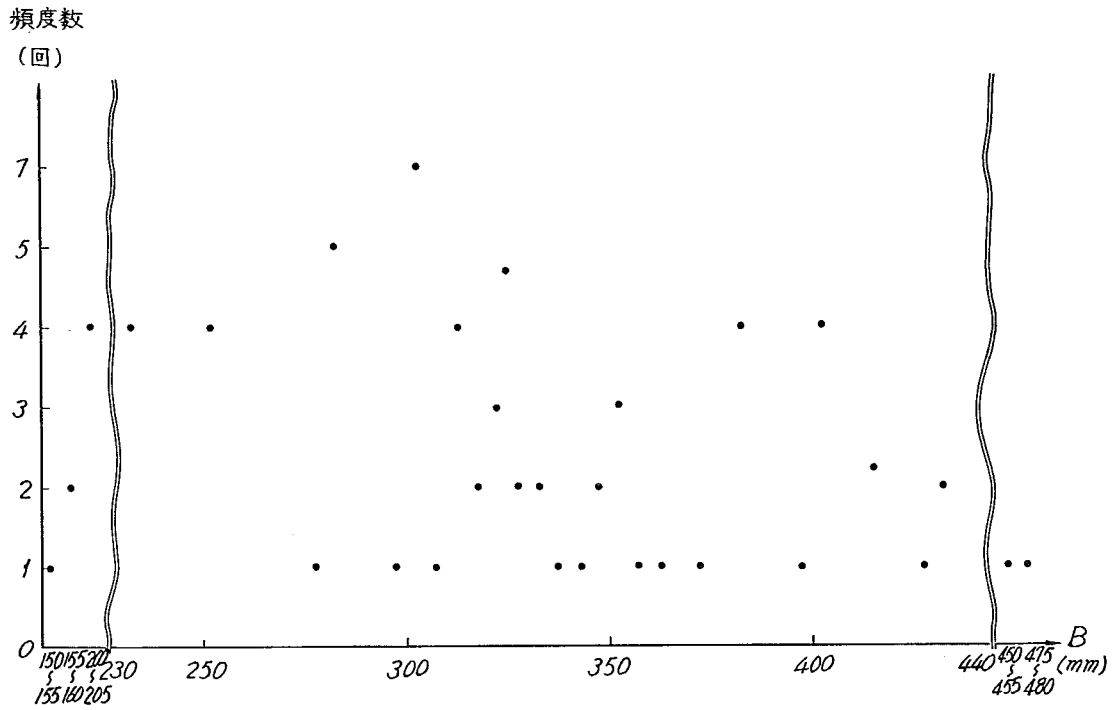


図 - 4

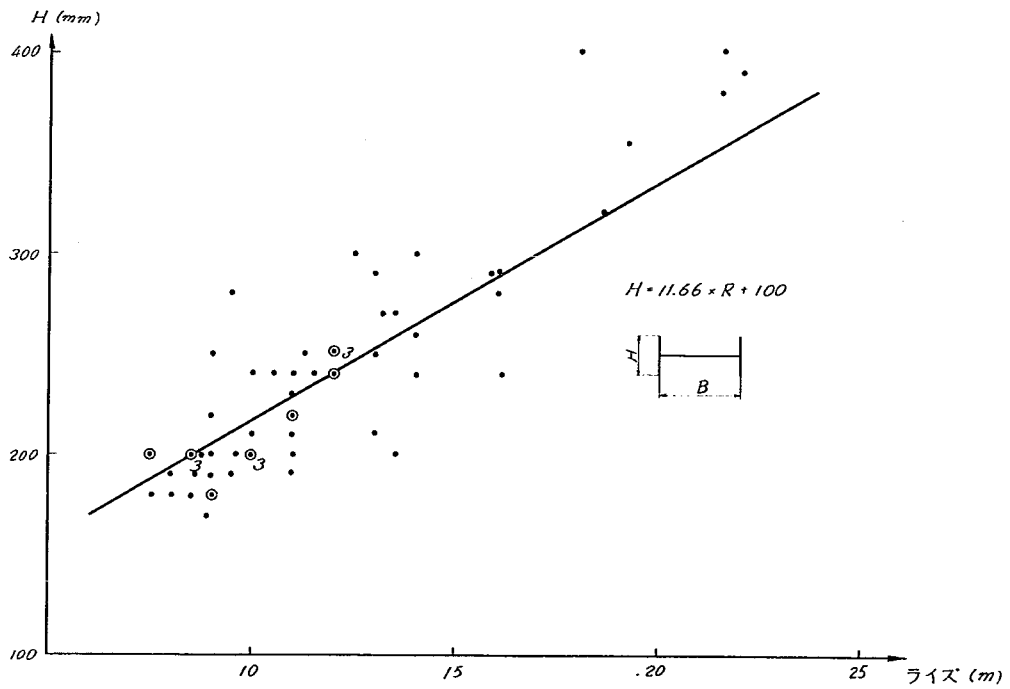


図 - 5

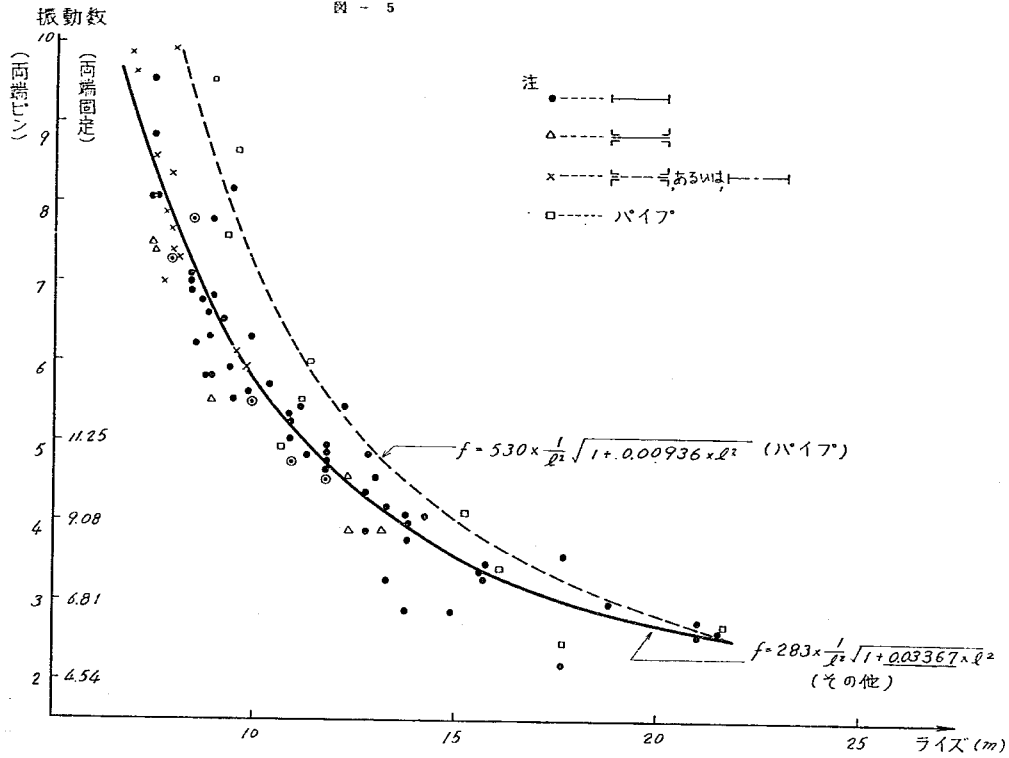


図 - 6

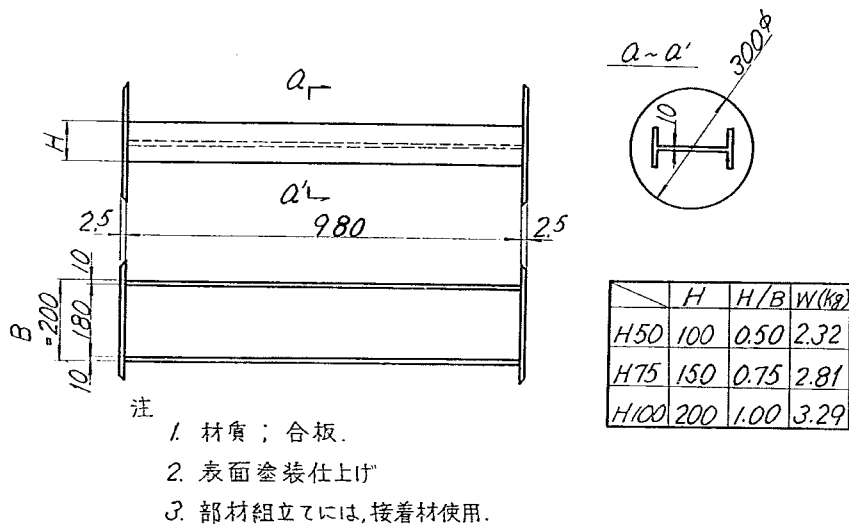


图 - 7

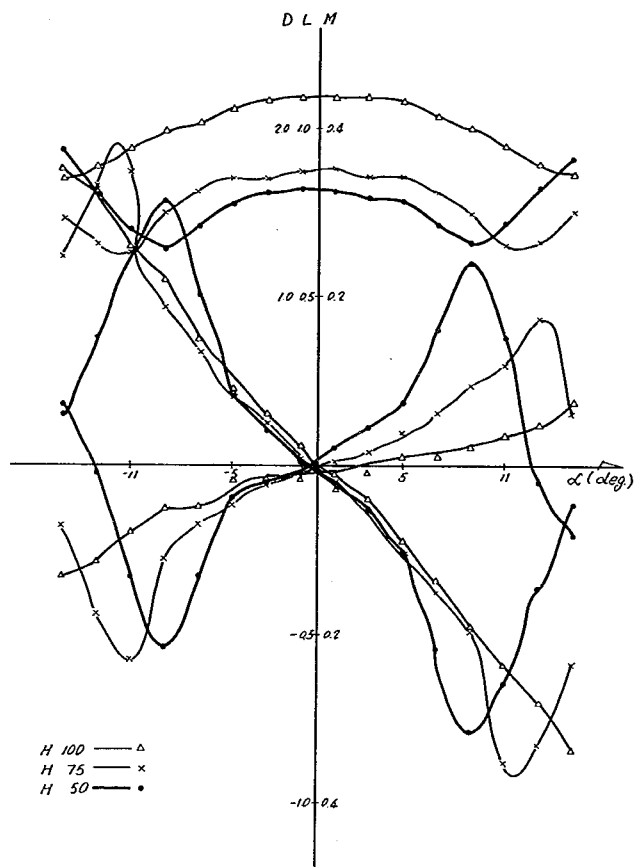


图 - 8

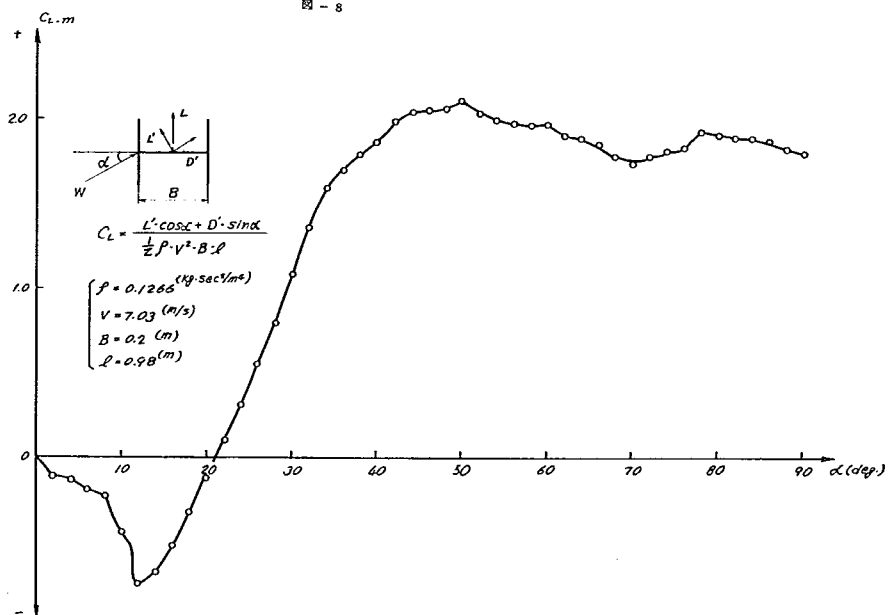


図 - 9

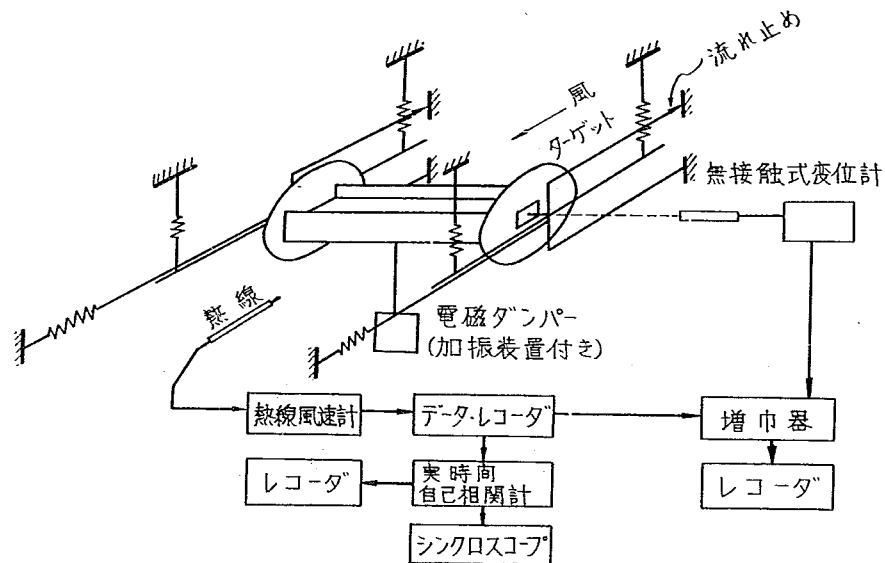
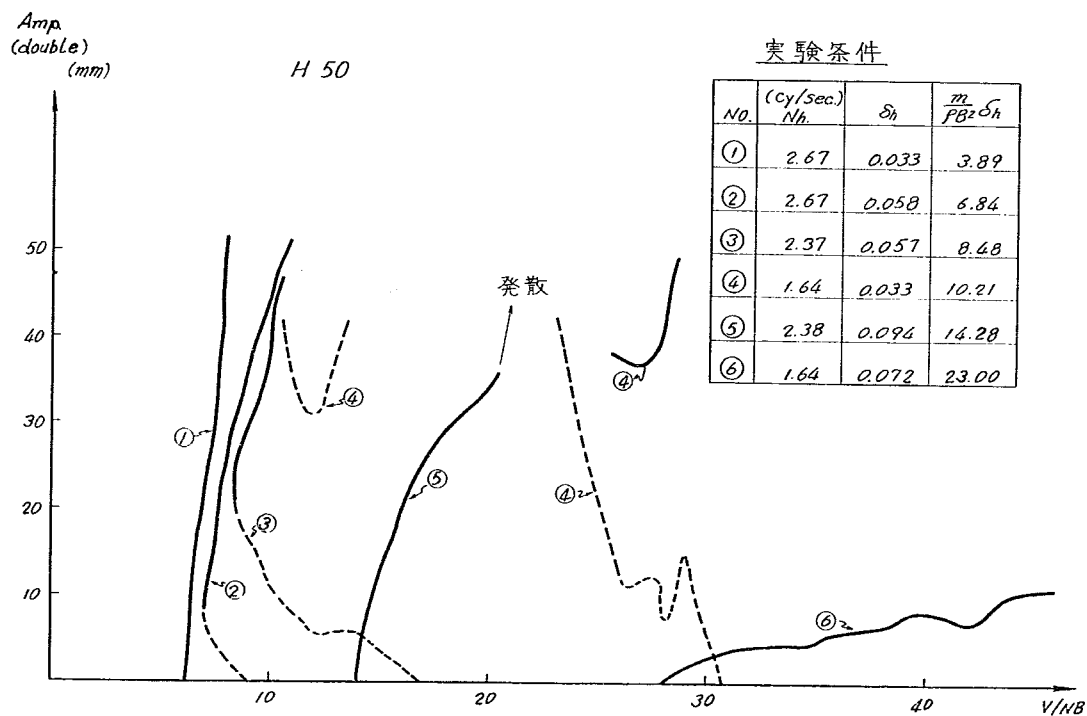


図 - 10



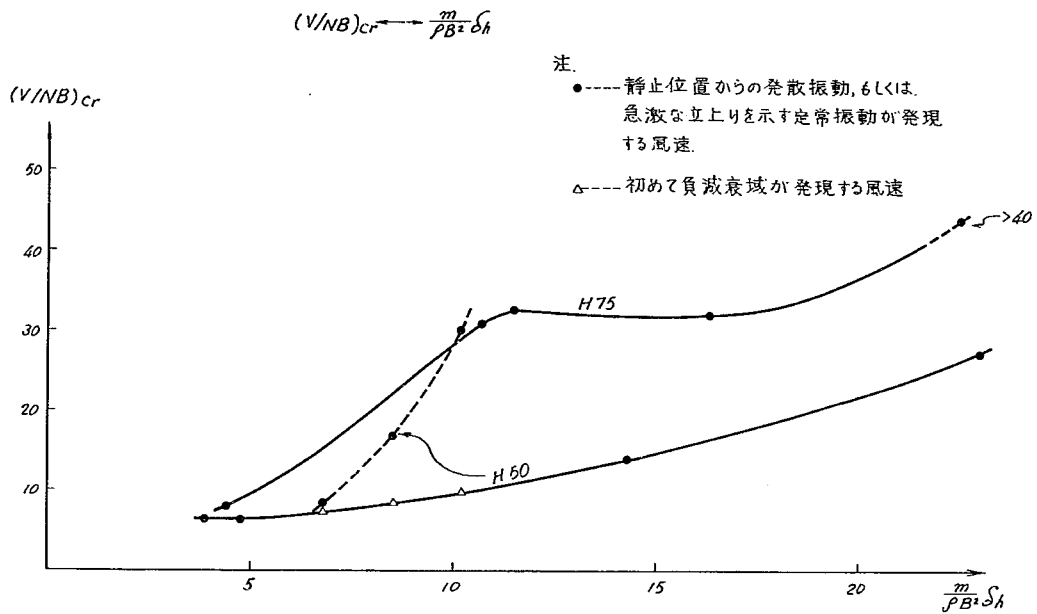


図 - 12

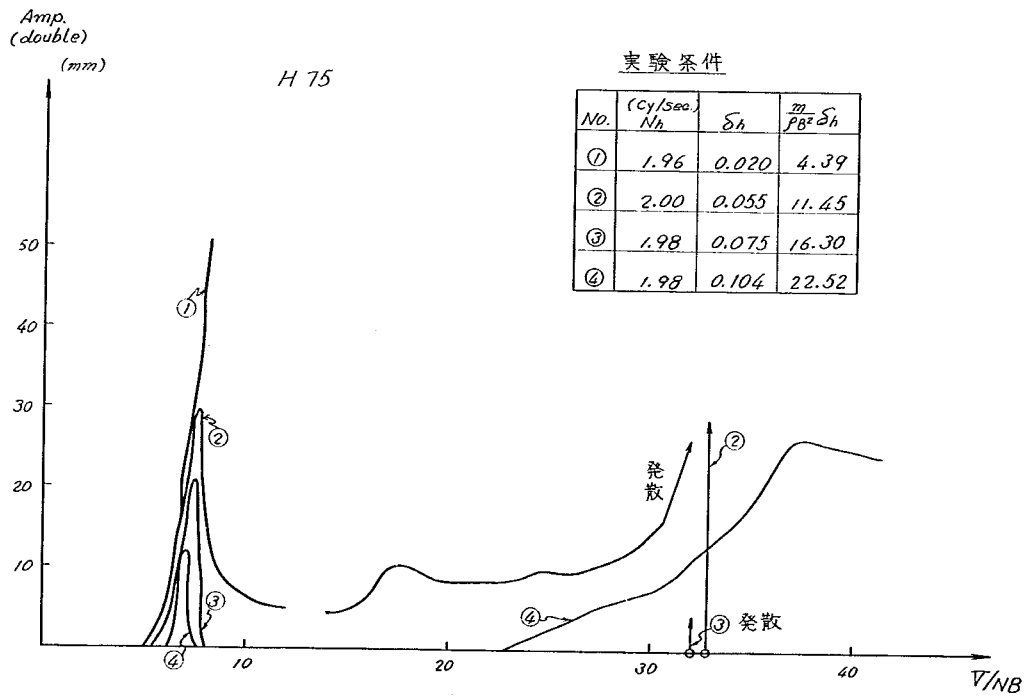


图 - 13

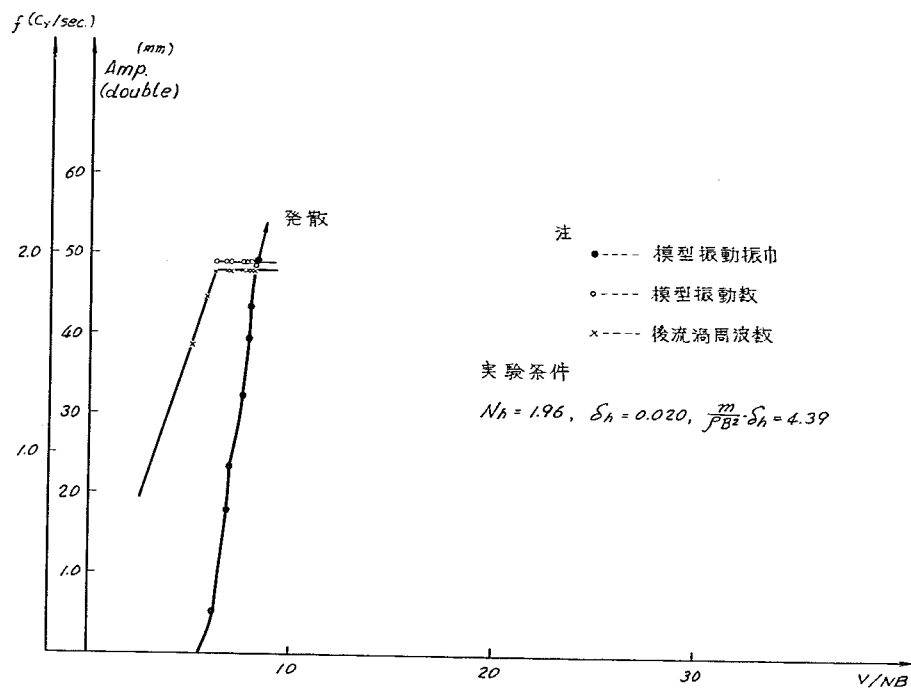
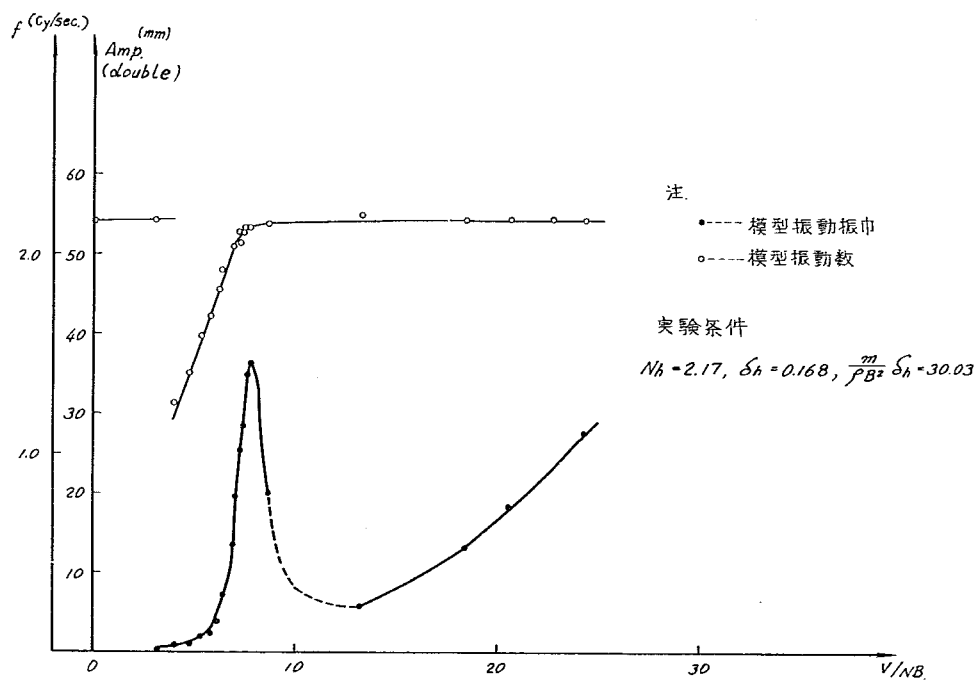
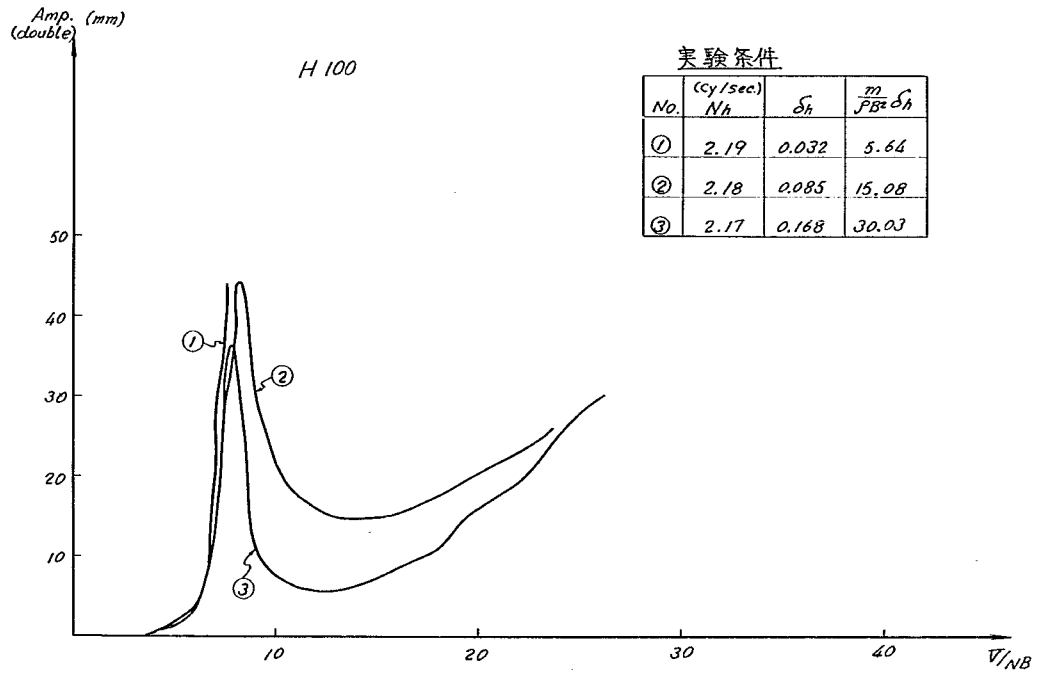


图 - 14





f	Cf	V	P
freq.	Auto-Cor.	Power-Spe.	Hanning
0.000	.00000E 05	-.24661E 03	.68677E 03 *
0.419	-.08225E 05	-.16202E 04	.11292E 04 *
0.839	-.55541E 05	-.15191E 04	.18337E 04 *
1.259	-.45634E 05	-.26743E 04	.17491E 04 *
1.678	-.29650E 05	-.12459E 03	.15337E 04 *
2.097	-.17163E 05	-.32093E 04	.15364E 04 *
2.517	-.69642E 04	-.39751E 03	.17190E 04 *
2.936	-.75190E 04	-.44617E 04	.19257E 04 *
3.356	-.16230E 05	-.82321E 03	.19232E 04 *
3.775	-.27650E 05	-.48773E 04	.14448E 04 *
4.195	-.37626E 05	-.31523E 04	.44046E 04 *
4.614	-.39157E 05	-.19044E 05	.16769E 05 *
5.034	-.41212E 05	-.32136E 05	.21207E 05 *
5.453	-.43855E 05	-.15102E 04	.10675E 05 *
5.872	-.37113E 05	-.75429E 04	.39304E 04 *
6.292	-.32732E 05	-.87396E 03	.19757E 04 *
6.711	-.29054E 05	-.21077E 04	.76457E 03 *
7.131	-.19276E 05	-.28310E 03	.91772E 03 *
7.550	-.11107E 05	-.21294E 04	.11513E 04 *
7.970	-.11076E 04	-.62946E 03	.11781E 04 *
8.389	-.11805E 05	-.12242E 04	.10458E 04 *
8.809	-.17903E 05	-.90526E 03	.99589E 03 *
9.228	-.26071E 05	-.84885E 03	.80852E 03 *
9.648	-.35513E 05	-.63111E 03	.86879E 03 *
10.067	-.37029E 05	-.13641E 04	.10611E 04 *
10.487	-.38305E 05	-.88525E 03	.10649E 04 *
10.906	-.41219E 05	-.11251E 04	.78074E 03 *
11.326	-.33038E 05	-.12203E 02	.49643E 03 *
11.745	-.28000E 05	-.88505E 03	.45155E 03 *
12.164	-.21128E 05	-.48278E 02	.41248E 03 *
12.584	-.01571E 04	-.66830E 03	.42744E 03 *
13.003	-.42939E 04	-.32486E 03	.45944E 03 *
13.423	-.52895E 04	-.51975E 03	.40028E 03 *
13.842	-.18204E 05	-.23677E 03	.42764E 03 *
14.262	-.21793E 05	-.71725E 03	.50441E 03 *
14.681	-.29095E 05	-.34638E 03	.46404E 03 *
15.101	-.34398E 05	-.44616E 03	.44226E 03 *
15.520	-.35600E 05	-.53034E 03	.57447E 03 *
15.940	-.34677E 05	-.79105E 03	.57170E 03 *
16.359	-.35768E 05	-.17434E 03	.36078E 03 *
16.779	-.29681E 05	-.30340E 03	.36202E 03 *
17.198	-.25191E 05	-.66694E 03	.54095E 03 *
17.617	-.16455E 05	-.52651E 03	.49835E 03 *
18.037	-.79444E 04	-.27345E 03	.39592E 03 *
18.456	-.11042E 04	-.51027E 03	.43674E 03 *
18.876	-.74435E 04	-.49296E 03	.47709E 03 *
19.295	-.18170E 05	-.49215E 03	.42194E 03 *
19.715	-.21400E 05	-.25048E 03	.37853E 03 *
20.134	-.27996E 05	-.52101E 03	.60222E 03 *
20.554	-.33096E 05	-.31635E 03	.37352E 03 *
20.973	-.31507E 05	-.34025E 03	.25598E 03 *
21.393	-.30195E 05	-.26852E 02	.15270E 03 *
21.812	-.28543E 05	-.21675E 03	.14175E 03 *
22.232	-.20139E 05	-.10664E 03	.19097E 03 *
22.651	-.18285E 05	-.33366E 03	.23317E 03 *
23.070	-.11650E 05	-.15833E 03	.24369E 03 *
23.490	-.17922E 04	-.32423E 03	.22520E 03 *
23.909	-.23126E 04	-.24012E 02	.25413E 03 *

$T=3.61$

$\sigma=1.82$

☒ - 17

r	Cr	V	P
freq.	Auto-Cor.	Power-Spe.	Hanning
0.000	.11315E 06	-.21572E 03	.72278E 03
0.419	.68345E 05	.16613E 04	.12902E 04
0.839	.40405E 05	.20509E 04	.22110E 04
1.258	.15144E 05	.30750E 04	.23196E 04
1.678	-.11657E 05	.10744E 04	.16464E 04
2.097	-.26942E 05	.13619E 04	.11748E 04
2.517	-.41997E 05	.90090E 03	.11750E 04
2.936	-.45736E 05	.15362E 04	.12101E 04
3.356	-.35634E 05	.86700E 03	.11442E 04
3.775	-.17545E 05	.13047E 04	.92835E 03
4.195	.70938E 03	.23303E 03	.85714E 03
4.614	.22248E 05	.16558E 04	.10153E 04
5.034	.37525E 05	.51655E 03	.97478E 03
5.453	.44642E 05	.12102E 04	.92892E 03
5.872	.43030E 05	.77869E 03	.10046E 04
6.292	.31908E 05	.12515E 04	.83928E 03
6.711	.13655E 05	.75449E 02	.97629E 03
7.131	-.18812E 04	.25028E 04	.16640E 04
7.550	-.21658E 05	.15750E 04	.22484E 04
7.970	-.33220E 05	.33406E 04	.24710E 04
8.389	-.35780E 05	.16279E 04	.57691E 04
8.809	-.33030E 05	.16560E 05	.12218E 05
9.228	-.21689E 05	.14175E 05	.13649E 05
9.648	-.51391E 04	.97840E 04	.11565E 05
10.067	.81130E 04	.12564E 05	.93561E 04
10.487	.20545E 05	.25076E 04	.50459E 04
10.906	.28970E 05	.26017E 04	.20145E 04
11.326	.28924E 05	.34675E 03	.11910E 04
11.745	.25633E 05	.14686E 04	.10000E 04
12.164	.13981E 05	.71612E 03	.10052E 04
12.584	.85506E 03	.11198E 04	.79478E 03
13.003	-.12682E 05	.22532E 03	.70844E 03
13.423	-.21944E 05	.12673E 04	.88578E 03
13.842	-.25193E 05	.78526E 03	.83709E 03
14.262	-.24543E 05	.51055E 03	.56587E 03
14.681	-.17995E 05	.45711E 03	.46874E 03
15.101	-.95047E 04	.45019E 03	.51376E 03
15.520	.15024E 04	.69757E 03	.69272E 03
15.940	.87220E 04	.92555E 03	.79393E 03
16.359	.16722E 05	.62707E 03	.64794E 03
16.779	.19237E 05	.41206E 03	.45212E 03
17.198	.14392E 05	.35730E 03	.48955E 03
17.617	.92607E 04	.83153E 03	.71579E 03
18.037	.15671E 04	.84078E 03	.72335E 03
18.456	-.82119E 04	.38030E 03	.50496E 03
18.876	-.11068E 05	.41848E 03	.49618E 03
19.295	-.14643E 05	.76744E 03	.52356E 03
19.715	-.16265E 05	.14089E 03	.43931E 03
20.134	-.12122E 05	.70801E 03	.44271E 03
20.554	-.84612E 04	.21393E 02	.39428E 03
20.973	-.47927E 04	.44173E 03	.50509E 03
21.393	.20416E 04	.92397E 03	.68047E 03
21.812	.58215E 04	.43273E 03	.59259E 03
22.232	.81416E 04	.58095E 03	.56666E 03
22.651	.72509E 04	.67202E 03	.56521E 03
23.070	.62582E 04	.33674E 03	.42814E 03
23.490	.37248E 04	.36804E 03	.36188E 03
23.909	.42204E 03	.37520E 03	.38574E 03

T=2.05 ~1/6
S=1.15

1004.	Auto-Cor.	Power-S	Running
0.000	.11732E 06	.42807E 03	.46876E 03
0.419	.42768E 05	.50945E 03	.70210E 03
0.837	.81248E 04	.13614E 04	.97687E 03
1.255	.36841E 05	.67518E 03	.10002E 04
1.673	.13902E 05	.12890E 04	.13337E 04
2.091	.09435E 04	.20815E 04	.17764E 04
2.517	.23301E 05	.16533E 04	.17738E 04
2.935	.42821E 05	.17073E 04	.12912E 04
3.355	.34658E 05	.97004E 02	.78042E 03
3.775	.61218E 04	.12204E 04	.90174E 03
4.195	.23803E 05	.10692E 04	.11347E 04
4.614	.31367E 05	.11799E 04	.99442E 03
5.034	.19200E 05	.54876E 03	.79493E 03
5.453	.68101E 04	.90232E 03	.69676E 03
5.872	.27531E 05	.43363E 03	.60677E 03
6.292	.22512E 05	.65750E 03	.54159E 03
6.711	.29108E 04	.41773E 03	.49736E 03
7.131	.18138E 05	.49649E 03	.34797E 03
7.550	.27311E 05	.13319E 02	.33375E 03
7.970	.18405E 05	.87619E 03	.54842E 03
8.389	.11120E 04	.46015E 03	.58780E 03
8.807	.16872E 05	.55470E 03	.45957E 03
9.228	.21201E 05	.26874E 03	.36238E 03
9.649	.53274E 04	.35733E 03	.43493E 03
10.067	.11144E 05	.75634E 03	.63043E 03
10.487	.22627E 05	.65170E 03	.62115E 03
10.906	.17955E 05	.42437E 03	.60887E 03
11.325	.12747E 04	.93406E 03	.63635E 03
11.745	.13470E 05	.25242E 03	.68983E 03
12.164	.13424E 05	.13204E 04	.90293E 03
12.584	.87725E 04	.71841E 03	.99597E 03
13.003	.60498E 04	.12266E 04	.11302E 04
13.423	.16657E 05	.13491E 04	.13427E 04
13.842	.12909E 05	.14458E 04	.11849E 04
14.262	.55755E 04	.49893E 03	.11146E 04
14.681	.40161E 04	.20145E 04	.15119E 04
15.101	.10639E 05	.15199E 04	.18733E 04
15.520	.49290E 04	.24377E 04	.20825E 04
15.940	.21244E 03	.19309E 04	.31281E 04
16.359	.76977E 04	.62107E 04	.51954E 04
16.779	.10628E 05	.64293E 04	.85891E 04
17.199	.62182E 04	.15287E 05	.10742E 05
17.617	.98184E 03	.59635E 04	.77293E 04
18.037	.52740E 04	.37027E 04	.52426E 04
18.456	.66622E 04	.76014E 04	.53332E 04
18.876	.23169E 04	.26671E 04	.38035E 04
19.295	.61508E 03	.22782E 04	.18016E 04
19.715	.18506E 04	.17337E 02	.92311E 03
20.134	.77901E 04	.14489E 04	.86634E 03
20.554	.21814E 04	.58494E 03	.97937E 03
20.973	.50643E 04	.12997E 04	.95626E 03
21.393	.73475E 04	.64268E 03	.86082E 03
21.812	.65910E 04	.85921E 03	.83257E 03
22.232	.99584E 03	.96917E 03	.94114E 03
22.651	.27233E 04	.96645E 03	.78331E 03
23.070	.47444E 04	.22077E 03	.63742E 03
23.490	.58990E 04	.10029E 04	.60489E 03
23.909	.15364E 04	.13449E 03	.54121E 03
24.328	.77413E 04	.72340E 03	.53225E 03

$T = 16.02 \text{ } ^{\circ}\text{M} / \text{ } ^{\circ}\text{C}$
 $\alpha = 1.07$

图-19

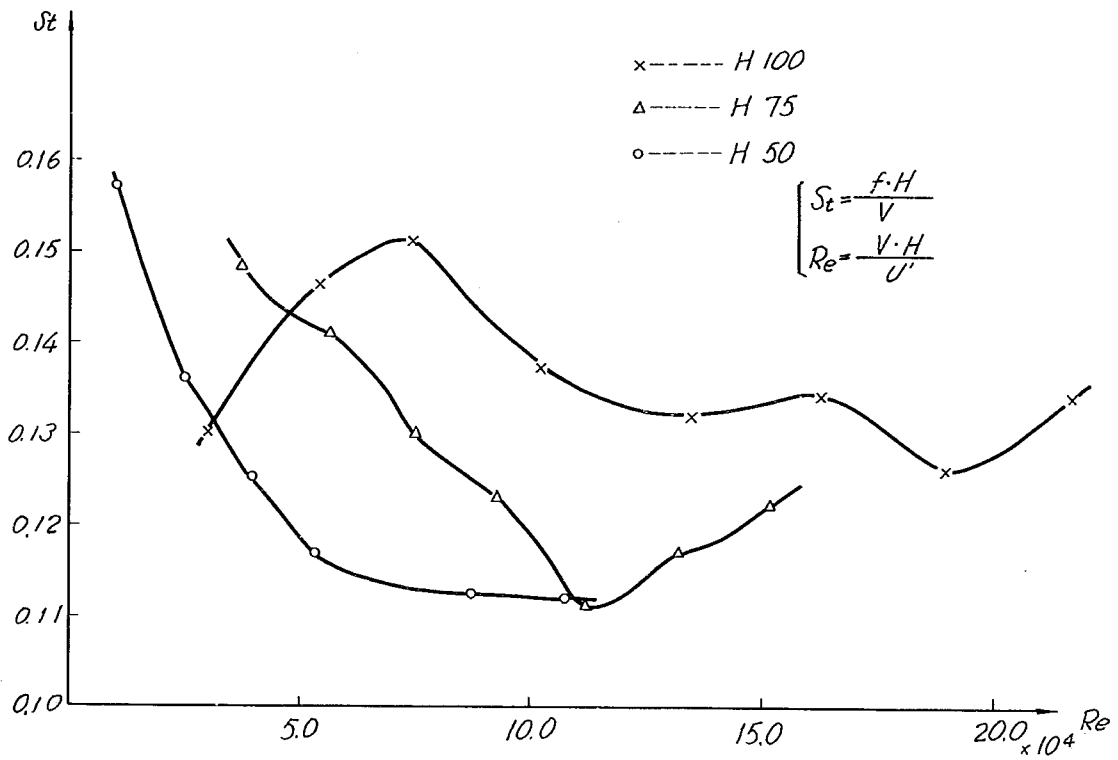


图-20

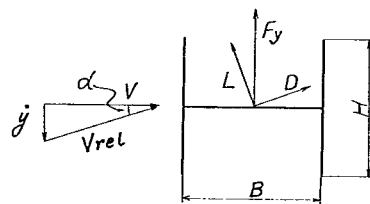


图-21

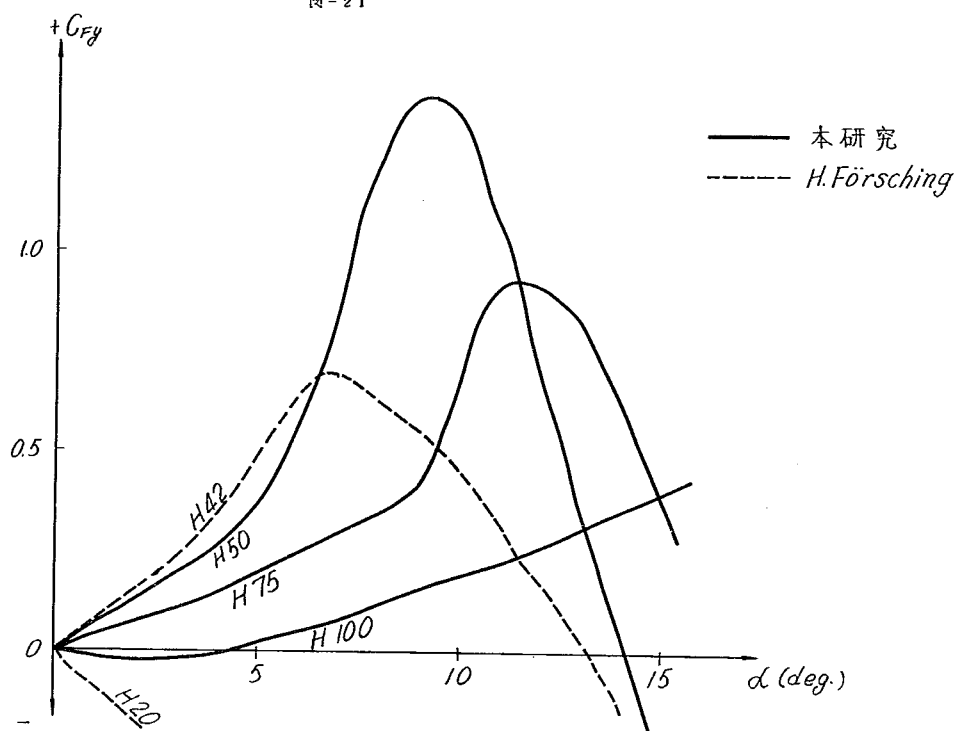
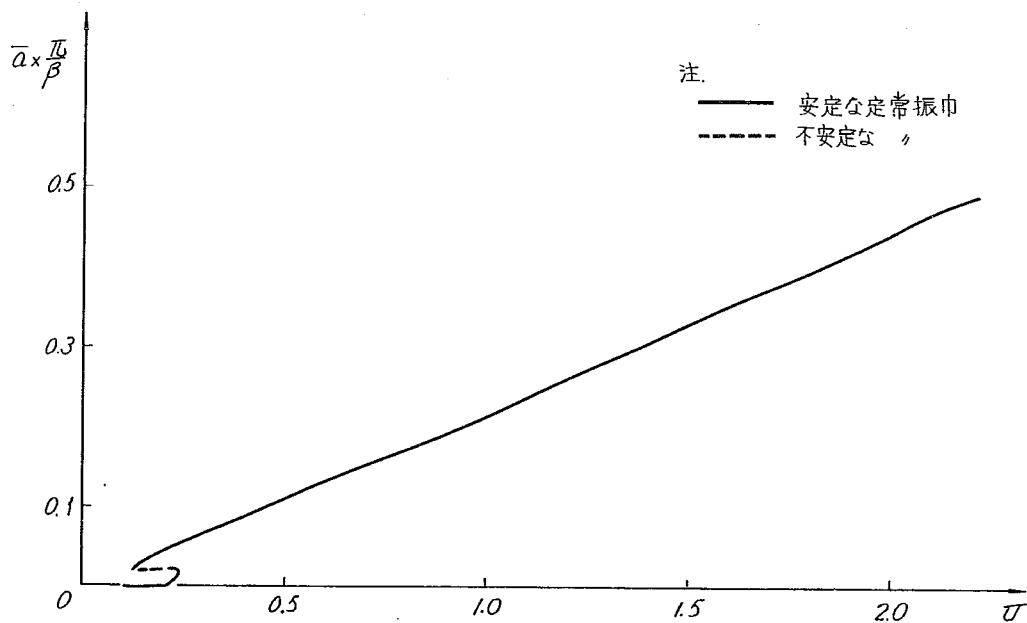


图-22



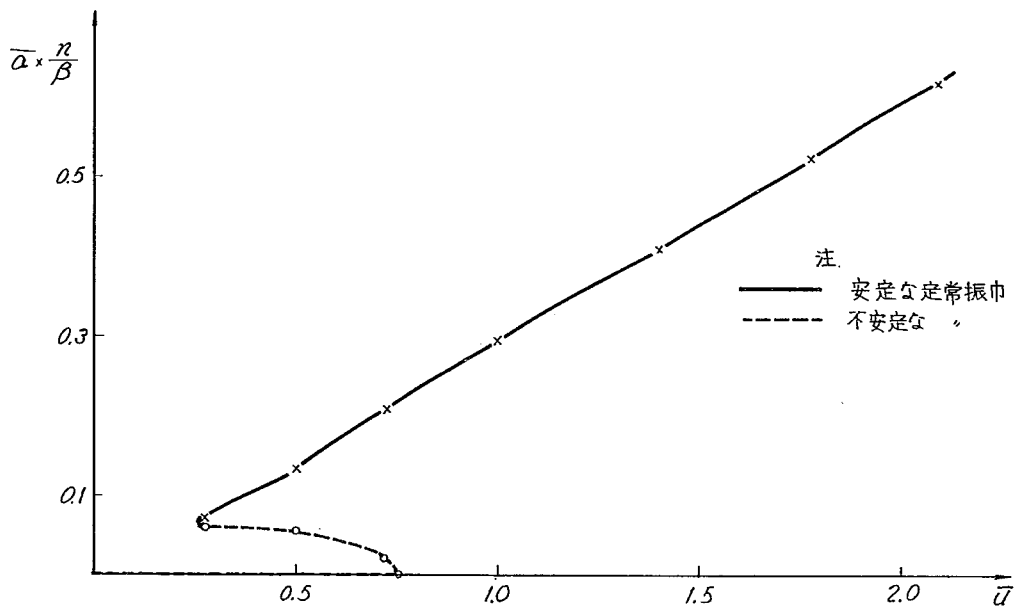


図 - 2 4

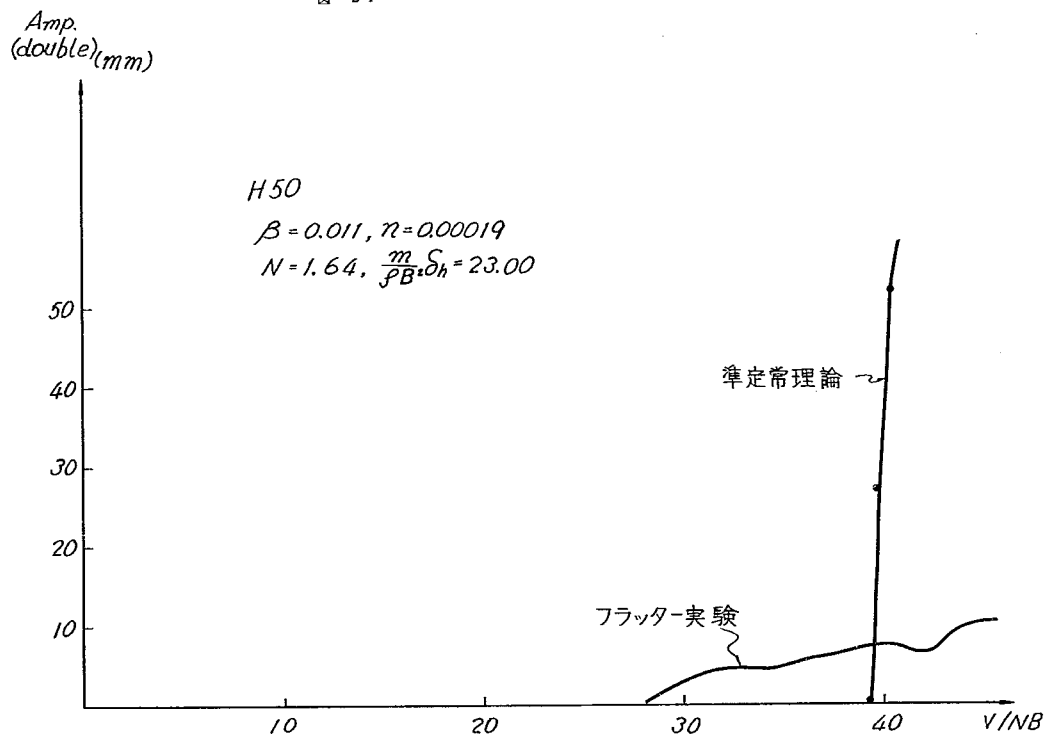


图 - 2 5

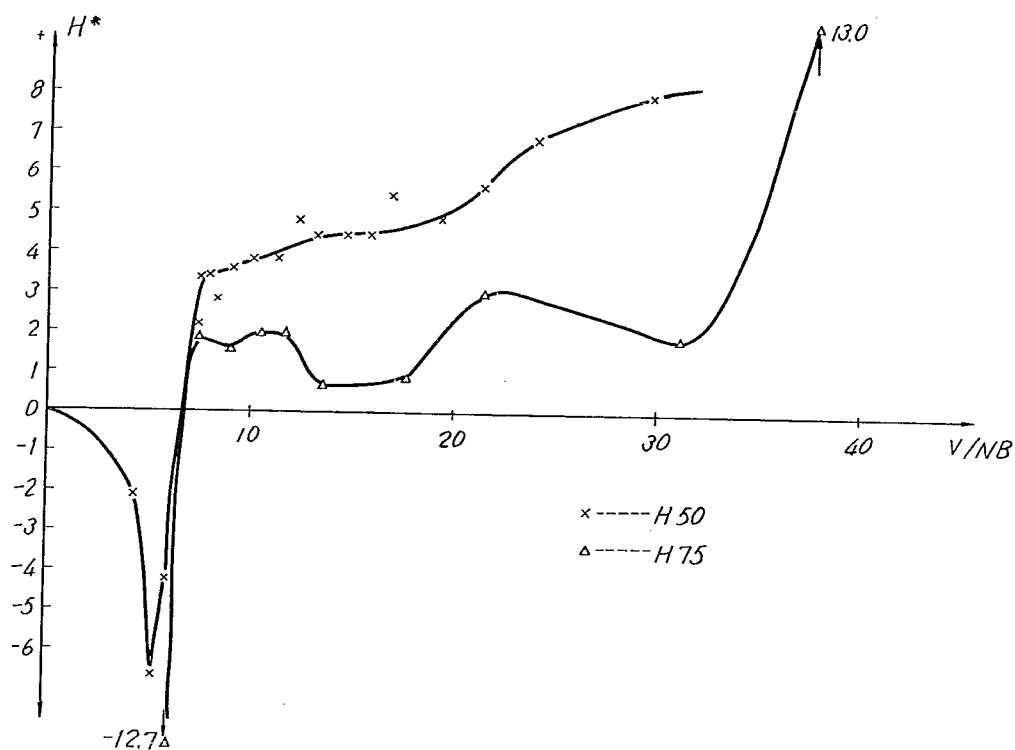


图 - 2 6

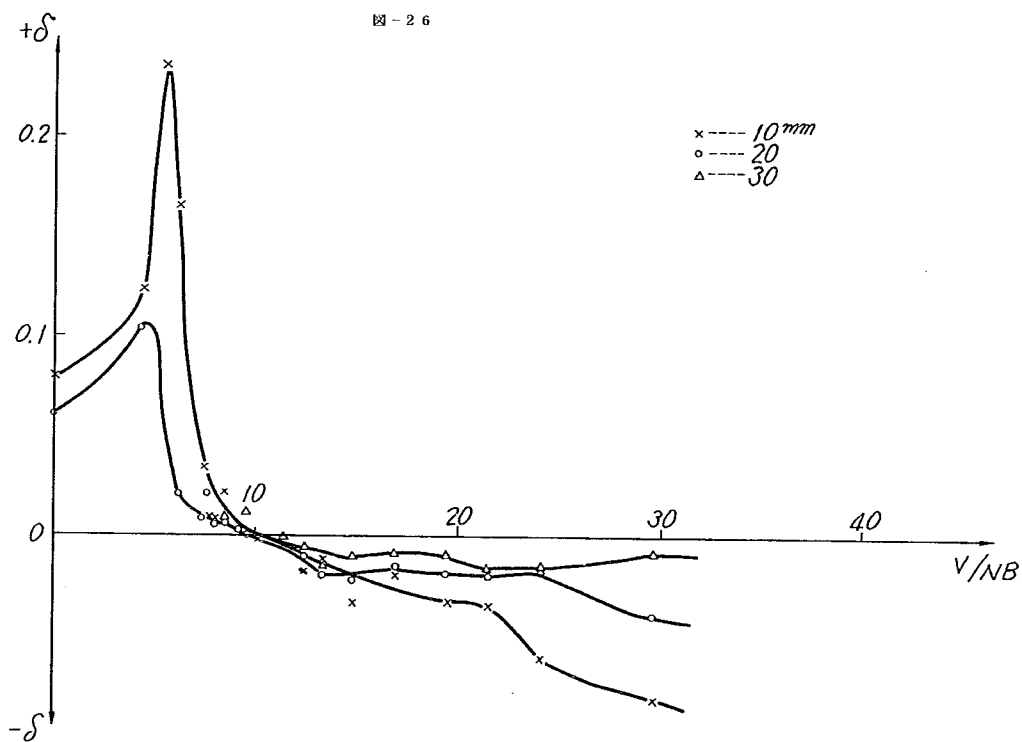


図-27

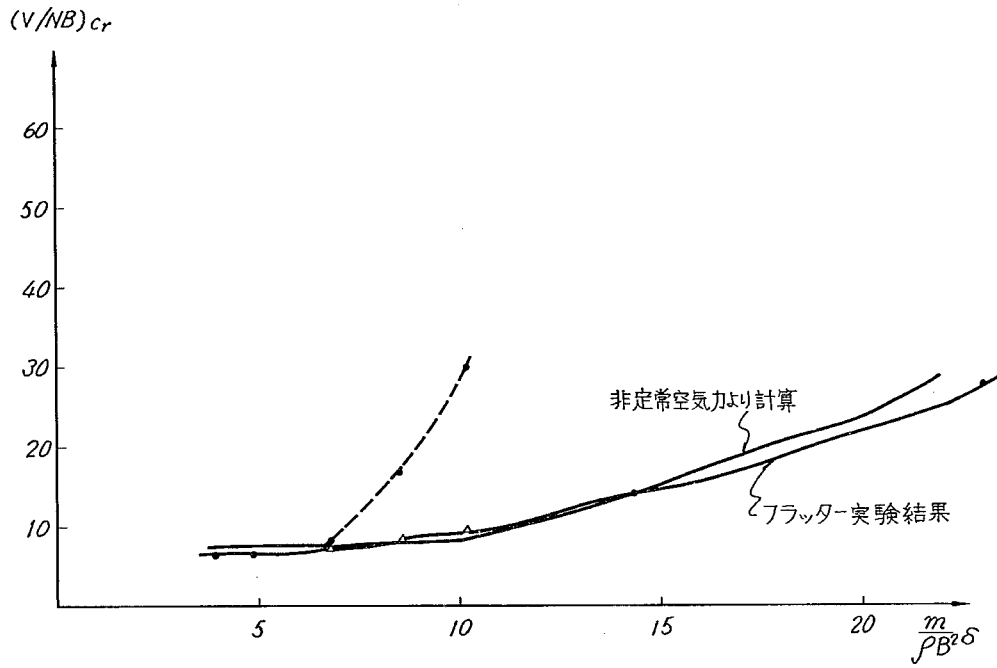
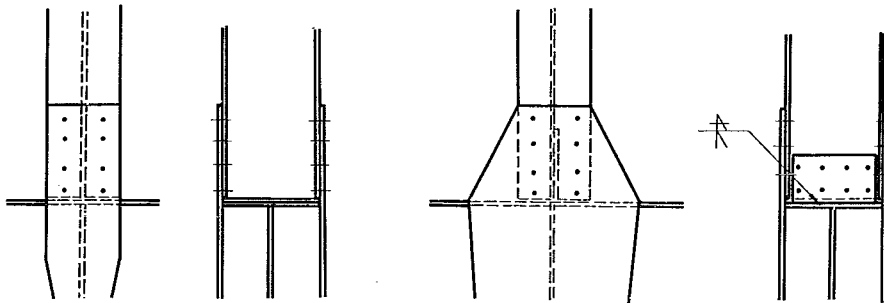


図-28



/JOB J10
/EXC FTC

PAGE=350, ID=K0Z0-M, Y

```

C      COMMENT MAIN PROGRAM
1      DIMENSION C(13), T(7), COEF(7,8), TITLE(10)
2      TAN(X)=SIN(X)/COS(X)
3      G=9.8
4      PAI=3.14159
5      ROU=0.125
6      READ(5,104) N
7      DO 105 I=1,13
8          C(I)=0.
9          DO 106 I=1,7
10             T(I)=0.
11             WRITE(6,107) N
12             NC=0
13         112 CONTINUE
14             NC=NC+1
15             READ(5,108) ALPH, CLIFT, CDRA
16             P=TAN(PAI/180.*ALPH)
17             CFY=-(CLIFT+CDRA*P)/COS(PAI/180.*ALPH)
18             WRITE(6,109) NC, ALPH, CLIFT, CDRA, P, CFY
19             DO 110 I=1,7
20                 C(I)=P**2*I+C(I)
21         110 CONTINUE
22             DO 111 I=1,4
23                 T(I)=CFY*P**2*I-1)+T(I)
24                 IF(NC.NE.N) GO TO 112
25                 NI=0
26                 DO 113 I=1,4
27                     NI=NI+1
28                     DO 114 J=1,4
29                         NJ=NI+J-1
30                         COEF(J,I)=C(NJ)
31                         IF(I.EQ.2.OR.I.EQ.4) COEF(J,I)=-COEF(J,I)
32         114 CONTINUE
33         113 CONTINUE
34             DO 135 I=1,4
35                 COEF(I,5)=T(I)
36                 CALL SWEEP(COEF,4,5)
37                 C(1)=COEF(1,5)
38                 C(3)=COEF(2,5)
39                 C(5)=COEF(3,5)
40                 C(7)=COEF(4,5)
41                 WRITE(6,116) (C(I), I=1,7,2)
42                 DO 1505 I=1,16
43                     ALPH=I-1
44                     P=TAN(PAI/180.*ALPH)
45                     CFY=C(1)*P-C(3)*P**3+C(5)*P**5-C(7)*P**7
46                     WRITE(6,1166) ALPH, P, CFY
47         1505 CONTINUE
48         1166 FORMAT(1H ,3F9.5,/)
49             A=C(1)+10.0*C(5)*(40.0*C(5)**2/(189.0*C(7))
50             -C(3))/(35.*C(7))
             B=SQRT(4.*(20.*C(5)**2/(63.*C(7))-C(3)**3

```

```

51      1/(35,*C(7)))
52      READ(5,104) NCASE
53      DO 140 NT=1,NCASE
54      READ(5,100) (TITLE(I),I=1,10)
55      WRITE(6,101) (TITLE(I),I=1,10)
56      READ(5,102) WEI,DEC,SC,H,CL
57      XMAS=WEI/G
58      BETA=DEC/SQRT(4.*PAI**2+DEC**2)
59      OMEG=SQRT(SC/XMAS)
60      SN=ROU*H**2*CL/(4.*XMAS)
61      WRITE(6,103) WEI,DEC,SC,XMAS,BETA,SN,OMEG,CL,H
62      UO=BETA/(SN*C(1))
63      U1=BETA/(SN*(A+B))
64      U2=BETA/(SN*(A-B))
65      VO=UO*OMEG*H
66      V1=U1*OMEG*H
67      V2=U2*OMEG*H
68      UBO=1./C(1)
69      UB1=1./(A+B)
70      UB2=1./(A-B)
71      WRITE(6,1177) A,B
72      1177 FORMAT(1H ,2HA=,E13.6,2HB=,E13.6,/)
73      WRITE(6,117) VO,UO,URO,V1,U1,UB1,V2,U2,UB2
74      VMAX=50.0
75      VSP=0.2
76      NREP=VMAX/VSP+1.
77      WRITE(6,150)
78      150 FORMAT(1H1,3X,18HVELOCITY-AMPLITUDE,/,4X,3HNI.,2X,8H V ,2X,
79      *8H V/NB ,2X,
80      18H U ,2X,8H UB ,2X,8H SAR ,2X,8H SA ,2X,
81      2,8H NHANTE )
82      DO 119 K=1,NREP
83      IF(K,EQ,1) GO TO 120
84      V=V+VSP
85      U=V/(OMEG*H)
86      UB=U*SN/BETA
87      GO TO 121
88      120 V=0.0
89      U=0.0
90      UB=0.0
91      121 CALL SINPKU (K,C,A,B,U,SAB,OMEG,BETA,SN,U1,U2,H,V,UB)
92      119 CONTINUE
93      100 FORMAT(10A4)
94      101 FORMAT(1H1,10A4)
95      102 FORMAT(5F10.5)
96      103 FORMAT(1H ,2X,15HHEIGHT ,=,F10.5,2X,16H(KG
97      1/,3X,16HLDG.DECREMENT =,F10.5,2X,16H(DIMENSIONLESS ),
98      2 /,3X,16HSPRING CONSTANT=,F10.5,2X,16H(KG/M ),
99      3 /,3X,16HMAS =,F10.5,2X,16H(KG,SEC**2/M ),
100      4 /,3X,16HBETA =,F10.5,2X,16H(DIMENSIONLESS ),
101      5 /,3X,16HNN =,F10.5,2X,16H(DIMENSIONLESS ),
102      6 /,3X,16HOMEGA =,F10.5,2X,16H(RAD/SEC ),
103      7 /,3X,16HLENGTH =,F10.5,2X,16H(M ),
104      8 /,3X,16HH =,F10.5,2X,16H(M ) )
105      104 FORMAT(13)

```

```

94      108 FORMAT(3F8.5)
95      109 FORMAT(1H ,5X,T3,2X,F6.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5 )
96      107 FORMAT(1H ,3X,15HDATA NUMBER  =,I3,/,5X,3HMO.,2X,
          18H ALPH ,2X,8H CL ,2X,8H CD ,2X,8H P ,
          2 2X,8H CFY )
97      116 FORMAT(1H ,3X,30H COEFCIENT OF EXTERNAL FORCE ,
          1/,5X,3HA1=,E13.6,/,5X,3HA3=,E13.6,/,5X,3HA5=,E13.6,
          2/,5X,3HA7=,E13.6)
98      117 FORMAT(1H ,27X,5HV ,2X,10H U ,2X,10H UB ,/,
          1 22H STARTING VELOCITY ,E13.6,2X,E13.6,2X,E13.6,
          2 /, 20H HYSTERESIS VELOCITY,2H 1,E13.6,2X,E13.6,2X,E13.6,
          3 /,20X,2H 2,E13.6,2X,E13.6,2X,E13.6 )
99      118 FORMAT(2F8.5)
100     140 CONTINUE
101     STOP
102     END

```

```

****      END OF JOB STEP          FORT          ****
****      TERMINATION CODE          000          ****
****      CPU TIME          000003353 MSEC      ****
****      I/O TIME          000007176 MSEC      ****

```

/EXC FTC

```

1      SUBROUTINE SINPKU(K,C,A,B,U,SAB,OMEG,BETA,SN,U1,U2,H,V,UB)
2      DIMENSION C(13),SKK(3),SKK(3)
3      VNB=31.416*V/OMEG
4      X=A-BETA/(SN*U)
5      CRIT1=B
6      CRIT2=-B
7      IF(X.GT.CRIT1.OR.X.LT.CRIT2) GO TO 10
8      GANM=ATAN(SQRT((B/X)**2-1.))
9      IF(X.LT.0.00000000) GANM=GANM+3.14159
10     PR=20.*C(5)**2/(63.*C(7))
11     PR=PR-C(3)
12     PR=PR/(35.*C(7))
13     TE1=SQRT(PR)
14     TE2=C(5)/(21.*C(7))
15     SKK(1)=TE2+COS(GANM/3.0)*TE1
16     SKK(2)=TE2-COS(GANM/3.0+1.0471)*TE1
17     SKK(3)=TE2-COS(GANM/3.0-1.0471)*TE1
18     IF(SKK(1).LT.0.00000000) SKK(1)=0.0
19     IF(SKK(2).LT.0.00000000) SKK(2)=0.0
20     IF(SKK(3).LT.0.00000000) SKK(3)=0.0
21     SK(1)=2.8284*SQRT(SKK(1))
22     SK(2)=2.8284*SQRT(SKK(2))
23     SK(3)=2.8284*SQRT(SKK(3))
24     DO 11 J=1,3
25     SAB=SK(J)*U
26     CALL HANTE(OMEG,BETA,SN,U,C,SAB,NHANTE)
27     SA=SAB*H
28     IF(J.NE.2) GO TO 12
29     WRITE(6,14) K,V,VNB,U,UB,SAB,SA,NHANTE
30     GO TO 11
31 12  WRITE(6,20) SAB,SA,NHANTE
32 11  CONTINUE
33     GO TO 13
34 10  PR=SQRT(X**2-B**2)
35     PRR1=X+PR
36     PRR2=X-PR
37     IF(PRR1.LT.0.) TE1=-1.*(-PRR1)**(1./3.)
38     IF(PRR1.GT.0.) TE1=PRR1**(1./3.)
39     IF(PRR2.LT.0.) TE2=-1.*(-PRR2)**(1./3.)
40     IF(PRR2.GT.0.) TE2=PRR2**(1./3.)
41     PR=TE1+TE2
42     PR=(4./(35.*C(7)))*(1./3.)*PR
43     PPR=PR+4.*C(5)/(21.*C(7))
44     IF(PPR.LT.0.00000000) PPR=0.0
45     PR=SQRT(PPR)
46     SAB=1.41421*U*PR
47     CALL HANTE(OMEG,BETA,SN,U,C,SAB,NHANTE)
48     SA=SAB*H
49     WRITE(6,14) K,V,VNB,U,UB,SAB,SA,NHANTE
50 13  CONTINUE
51 14  FORMAT(1H ,2X,I3,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,
      12X,F8.5,2X,I3)
52 20  FORMAT(1H ,47X,F8.5,2X,F8.5,2X,I3)

```

53
54RETURN
END

***	END OF JOB STEP	FORT	***
***	TERMINATION CODE	000	***
***	CPU TIME	000002153 MSEC	***
***	I/O TIME	000005466 MSEC	***

/EXC FTC

```

1      SUBROUTINE HANTE(OMEG,BETA,SN,U,C,SAB,NHANTE)
2      DIMENSION C(13)
3      T1=-OMEG**2*(BETA-SN*U*C(1))
4      T2=9.*C(3)/(4.*U)
5      T3=25.*C(5)*SAB**2/(8.*U**3)
6      T4=245.*C(7)*SAB**4/(64.*U**5)
7      T=SN*OMEG**2*SAB**2
8      DK0=T1-T*(T2-T3+T4)
9      IF(DK0,LT,0.0) GO TO 10
10     NHANTE=0
11     GO TO 11
12     10 NHANTE=1
13     11 CONTINUE
14     RETURN
15     END

```

```

****      END OF JOB STEP      FORT      ****
****      TERMINATION CODE      000      ****
****      CPU TIME      000001404 MSEC      ****
****      I/O TIME      000004159 MSEC      ****

```

/EXC FTC

```

1      SURROUTINE SNEEP(A,M,N)
2      DIMENSION A(7,8)
      C      LINEAR EQUATIONS
      C      M EQUATIONS -- N-M DIFFRENT RIGHT-HAND MEMBERS
3      DO 50 I=1,M
4      50 WRITE(6,100) (A(I,J),J=1,N)
5      100 FORMAT(E15.5,/)
6      DO 10 K=1,M
7      W=A(K,K)
8      K1=K+1
9      DO 20 J=K1,N
10     20 A(K,J)=A(K,J)/W
11     DO 30 I=1,M
12     IF(I,EQ,K) GO TO 30
13     W=A(I,K)
14     DO 40 J=K1,N
15     40 A(I,J)=A(I,J)-W*A(K,J)
16     30 CONTINUE
17     10 CONTINUE
18     RETURN
19     END

```

```

      ****      END OF JOB STEP      FORT      ****
      ****      TERMINATION CODE      000      ****
      ****      CPU TIME      000001331 MSEC      ****
      ****      I/O TIME      000004067 MSEC      ****

```

```

begin
  integer DP, SCN, OFI, FCF, I2, N, K, K1, J, I0, I01, M, M1, M2, CI, DATA, NC, KK;
  real XSUM, XMEAN, COEF, F, VSUM, T1PD, PAI, MAX;
  READ(N, T1PD, M);
  OUT3(6, '156' Power Spectra (Turkey's Method)'/, 10B, 'N=', 62D, '/', 9B, 'dt=', 22D, 5D, '/', 10B, 'M=', 62D, 'N, T1PD, M);
  CRLF(2);
  PAI=3.1415926536;
  M1=M-1;
  M2=M-2;
  CI=0;

  DATA=KK=1;
begin
  array X(1:N), AUTC, V, P(1:M);
  integer array P1(1:M);
  procedure Hensai;
  begin
    XSUM=0;
    for K=1 step 1 until N do
      XSUM=XSUM+X(K);
      XMEAN=XSUM/FLOAT(N);

    for K=1 step 1 until N do
      X(K)=X(K)-XMEAN;
    end;
    Procedure Cr;
    begin
      for K=1 step 1 until M do
        begin
          K1=K-1;
          NC=N-K1;
          COEF=1/FLOAT(NC);

          XSUM=0;
          for J=1 step 1 until NC do
            XSUM=XSUM+X(J)*X(J+K1);
            AUTC(K)=COEF*XSUM;
          end;
        end;
    end;
    Procedure CosTra;
    begin
      for K=1 step 1 until M do
        begin
          VSUM=0;
          K1=K-1;
          for I0=1 step 1 until M2 do
            begin
              I01=I0+1;
              VSUM=VSUM+AUTC(I01)*COS(I0*K1*PAI/M1);
            end;
            V(K)=AUTC(1)+AUTC(M)*COS(K1*PAI)+2*VSUM*T1PD;
          end;
        end;
      end;

```

- 10-

- 20-

- 30-

- 40-

Procedure SpDen;

```
begin
  for K:=1 step 1 until M do
  begin
    K1:=K-1;
    K2:=K+1;
    if K=1 then P(1)=0.5*(V(1)+V(2));
    if K=M then P(M)=0.5*(V(M1)+V(M));
    if K>1 ^ K<M then P(K)=0.25*(V(K2)+V(K1))+0.5*V(K);
  end;
```

- 60-

end;

Procedure PLOT;

```
begin
  MAX:=P(1);
  for K:=2 step 1 until M do
  if MAX<P(K) then MAX:=P(K);
  for K=1 step 1 until M do
  P1(K)=(P(K)/MAX)*60;
end;
```

START:

- 70-

HEAD: OPNKDK(DD,SCN,OF1,EOF);

KDK:

```
if EOF=1 then go to END;
if SCN=1 then go to HEAD;
if ARS(DD)<500 then begin CT=0;KK=1; go to HEAD; end;
if CT=1 then go to HEAD;
```

KDK:

```
X(KK)=DD;
KK=KK+1;
```

- 80-

if KK<M then go to HEAD;

CT=KK=1;

DATA=DATA+1;

Hensd;

Cr;

Costra;

SpDen;

PLOT;

OUTO(6,'14R'F 'Cr V P'/');

OUTO(6,'12R'freq. Auto-Cor. Power-Spe. Hanning'/');

- 90-

for K:=1 step 1 until M do

begin

if K=1 then begin F=0; go to LL; end;

F=(K-1)/(2*TIPD*M1);

LL:

```
OUT4(6,'10R,32D,3D,' ',-.5D,-2D,' ',-.5D,-2D,' ',-.5D,-2D',F,AUTC(K),V(K),P(K)); SPACE(P1(K)); OUTO(6,'*');
CRLF(1);
```

end;

EJECT;

go to HEAD;

- 100-

```
END:
  CR LF(3);
end;
end;
```

土研資料第753号

昭 45.3 (1972)

成田 信之，横江 稔

キーワード

橋梁吊材，ギャロッピング，渦励振

要 旨

要 旨 橋梁吊材の風による振動および破損の実態を報告し、H-断面吊材の三種の模型に対し風洞実験を行ない、この結果から実施設計に適用する場合の一方法を示した。



郵便はがき

十円切手をはって下さい

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 2 & 8 & 0 \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline \end{array}$$

建設省土木研究所
構造研究室
御中

千葉県千葉市穴川四丁目十二番五二号

No. **67**

No. **67**

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第753号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

○