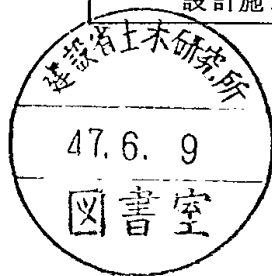


土 研 資 料 - 7 5 4

日本道路公団
関門建設所受託

関門橋
設計施工調査



関門橋設計施工調査 報告書

昭和 47 年 3 月

建設省土木研究所

緒 言

昭和46年度に日本道路公団関門建設所から委託された関門橋主塔の振動実験と補剛桁に対する風洞模型実験の結果がまとまったので報告する。

昭和47年3月

構造研究室

榎 波 義 幸

振動研究室

飯 田 裕

目 次

1. 昭和46年度に実施した調査	1
2. 関門橋主塔の振動実験	1
2-1. 実験の目的	1
2-2. 実験の方法	1
2-3. 実験結果	5
2-4. 数値計算	6
2-5. 実験結果に対する考察	11
2-6. あとがき	13
3. 関門橋風洞模型実験	14
3-1. まえがき	14
3-2. 模型及び実験条件	14
3-3. 実験結果	14
3-4. 実験結果の考察	15
3-5. あとがき	15

1. 昭和46年度に実施した調査

昭和46年度の関門橋の設計施工調査耐風調査として次の2つの課題が日本道路公団から委託された。

Ⅰ 関門橋主塔の振動実験の実施

Ⅱ 関門橋補剛桁の耐風性の検討

前者についてはその結果が耐風調査のみならず耐震調査にも関係するところから構造研究室と振動研究室が協同で、昭和46年5月10日から4日間にわたり門司側の主塔を対象に実施した。また記録の解析は構造研究室が中心となって行った。後者については日本道路公団より提示された設計案をもとに構造研究室が風洞模型実験を行なった。

以上の調査の詳細な結果については別の機会にゆずり、今回はその概要を報告する。

2. 関門橋主塔の振動実験

2-1. 実験の目的

構造物の長大化、可撓化が進むにしたがい構造物の動特性を考慮した設計が要求されるようになり、長大吊橋の耐風設計、耐震設計や高橋脚橋梁の耐震設計にこのような考え方の設計がとりいれられるようになった。

しかし、このような設計法を確立するためには作用外力の特性や構造物の振動特性を正しく把握する必要があるが、まだ未知のことがらも多く現在おこなわれている動的設計は種々の仮定をおいている。

関門橋の場合も同様であったため主塔の完成を機会にその設計上の仮定の妥当性を確認するために、主塔の振動特性を明らかにするための実験が計画された。

関門橋の主塔にかぎらず構造物の振動特性は固有振動数、振動モード、構造減衰等によって支配される。そこで今回の実験の目的はこれら振動特性を支配する各因子を測定しようとするものである。

2-2. 実験の方法

関門橋の2基の主塔は橋脚の形式、寸法が異なるが今回は現地の工程等もあって門司側の塔がえらばれた。その一般図を図-1に、諸元を図-2に、また橋脚を図-3に示す。門司側の橋脚は図のごとく高さ30mのケーソン基礎であるのに較べ下関側の橋脚は高さ10mの直接基礎である。

実験時の主塔にはケーブル架設用のクレーンが2基塔項に設置されており、その他に塗装用の吊足場が塔項から吊下げられていた。

構造物の振動特性を測定するためには構造物を振動させなければならない。このためにはいろいろな方法があるが振動数が可変な周期外力を加える方法がよく用いられる。今回の実験でも図-4に示すような起振機を使用して周期外力を塔項に加えることとした。

この起振機は特に橋梁の振り振動実験のために試作したもので次のような特徴がある。

(i) 0.2%～10%の広い振動数範囲で加振できる。

(ii) 2台の起振機を連動運転できる。

2台の起振機の距離を2～20mとすることができる。また2台の起振機の起振方向を同相及び逆相にできる。これによって構造物に周期モーメントが加えられ振り加振ができる。

(iii) 運転中に起振機の起振力を変えることができる。起振機は図-5の如く2対の不平衡重錘からなっており、運転中に不平衡重錘の位置が変えられるようになっている。

起振力を最大から零にするために要する時間は10秒以下である。このことによって構造物の自由減衰振動記録がえられるようになる。

この起振機を使用して以下の実験を計画した。

(i) 主塔の橋軸方向の撓み振動の固有振動数、振動モード及び構造減衰の測定

(ii) 主塔の橋軸直角方向の撓み振動の固有振動数、振動モード及び構造減衰の測定

(iii) 主塔の塔軸まわりの振り振動の固有振動数、振動モード及び構造減衰の測定

このうち(i)、(iii)の実験のために起振機は図-6のように塔項に設置した。そして橋軸方向の撓み振動実験のときには2台の起振機で同相に、塔軸まわりの振り振動実験のときには逆相に励振した。

また橋軸直角方向の撓み振動実験では2台の起振機を3.5m間隔で塔項水平材の中間に設置し同相で橋軸直角方向に励振した。

以上のごとく今回の実験では主として起振機を使用して構造物を加振する計画であったがこの加振方法の欠点は低振動数での起振力が小さいことである。図-7はこの起振機の1台あたりの起振力と起振数、振動数及び重錘の開き角の関係を示している。

例えばこの起振機は振動数が10%のときには最大30tonの起振力があるがこの主塔

の最低次の固有振動数の計算値 0.25 % のときには 18 kg の起振力にしかならず、従ってこの程度の起振力では主塔が十分に振動しないのではないかと不安があったため塔項にロケットを設置し、その推力によって塔に振動を与える方法が補助手段として採用された。

主塔の最低次の振動数は橋軸方向の撓み振動であるためロケットによる加振は橋軸方向のみとした。

種々検討の結果推力 2 ton、燃焼時間 1 秒のロケットを 2 基塔項水平材の中間部に設置し同時噴射させることとなった。実験に使用したロケットを図-8 に示す。

さて構造物の振動現象は変位、速度または加速度の 3 つの物理量のいずれかを測定すればよいがここでは加速度計を用いて主塔の応答加速度を測定することとした。一般に野外実験に使用される加速度計は動電型か抵抗線型である。前者は永久磁石の中にバネ支持されたコイルが加速度に比例して振動するときにコイルに生じる起電流から加速度を測定するものであり後者はバネ支持された重錘の加速度に比例した変位を電気抵抗線歪ゲージで測定するものである。これに対して最近新しい形式の加速度計が普及して来た。この加速度計はサーボ型と呼ばれるもので各加速度計との比較を表-1 に示す。このサーボ型の加速度計は駆動部の動きを検出部で検出しサーボ回路によってこの動きに比例した電流を駆動部へ送りこの動きに抵抗する力を生ぜしめみかけ上は駆動部は変位しないようしこのときのフィードバック電流で加速度を検出するものである。

このサーボ型加速度計の性能を表-2 に示す。

今回の実験では 4 台のサーボ型加速度計と 14 台の動電型加速度計を使用し図-9 の如く配置した。なお、サーボ型加速度計は塔項へ設置した。

各加速度計からの信号は中継ケーブルで観測室へ送られここで直流増巾器で増巾して直記式電磁オシログラフ及びデーターレコーダに記録した。

またロケットを使用した実験ではロケットの推力をロードセルで検出し同様に記録した。その概略を図-10 に示す。

次に実験の方法について説明する。

起振機を用いた実験では起振機の起振々動数を徐々にかえそのときの各部の応答加速度を計測して共振点を求めた。そしてこの共振々動数での自由減衰振動を記録した。またロケットを用いた実験ではロケット噴射時の各部の応答加速度を測定した。

表1

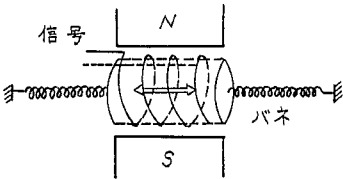
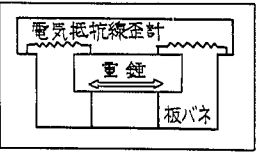
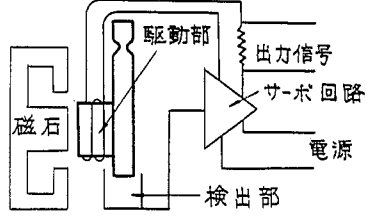
	動電型加速度計	電気抵抗線型加速度計	サーボ型加速度計
測定原理			
測定法	変位法	変位法	零位法
特徴	利点 1. 測定感度が高い 2. 安定性が高い 3. 出力(中継)ケーブルが2芯でよい 欠点 1. 大型で重い 2. 測定振動数範囲が狭い	利点 1. 小型軽量である 2. 低振動数の振動まで測定できる 3. 安い 欠点 1. 精度がよくない 2. 出力(中継)ケーブルが4芯	利点 1. 精度が高い 2. 安定性が高い 3. 低振動数の振動まで測定できる 4. 出力が大きい 5. 小型軽量で丈夫である 6. 出力(中継)ケーブルが2芯でよい 欠点 1. 直流電源を必要とする

表 2 加速度計特性比較

	ENDEVCO 1	ENDEVCO 2	KISTLER 1	KISTLER 2
測定範囲	$\pm 15g$	$\pm 1g$	$\pm 10g$	$\pm 1g$
感 度	$250mV/g$	$1V/g$	$500mV/g (\pm 2\%)$	$5V/g (\pm 2\%)$
出力インピーダンス	$250ohms$	$900ohms$	$2500ohms$	$100ohms$
出力電圧	$3.75V$	$1V$	$\pm 50V$	$\pm 5.0V$
測定周波数	$DC \sim 500\% (\pm 5\%)$	$DC \sim 300\% (\pm 5\%)$	$DC \sim 425\% (\pm 5\%)$	$DC \sim 180\% (\pm 5\%)$
雑 音	$100\mu V (0 \sim 10\%)$	$100\mu V (0 \sim 10\%)$	$5\mu V (0 \sim 1\%)$	} 左に同じ
	$300\mu V (0 \sim 500\%)$	$500\mu V (0 \sim 500\%)$	$1mV (\leq 1M\%)$	
	$600\mu V (500 \sim 10k\%)$	$3mV (300 \sim 10k\%)$	$5mV (\leq 8M\%)$	
電 源 電 圧	$28VDC \pm 5\%$	$28VDC \pm 5\%$	$28VDC \pm 10\%$	
直 線 性	0.03% (読みとり値)	0.01% (読みとり値)	0.05% (フルスケール)	
ヒステリシス	0.001% (フルスケール)	0.001% (フルスケール)	$0.0005g$	
電源変動に伴う零点変化	$50\mu g/V$	$50\mu g/V$	$0.5mV/V$	
電源変動に伴う感度変化	$0.005\%/V$	$0.005\%/V$	$0.05\%/V$	
使用可能な温度範囲	$-54^{\circ}C \sim 93^{\circ}C$	$-42^{\circ}C \sim 85^{\circ}C$	$-65^{\circ}F \sim 185^{\circ}F$	
温度変化に伴う零点変化	$0.0002g/^{\circ}F$	$0.0002g/^{\circ}F$	$0.030g/100^{\circ}F$	
温度変化に伴う感度変化	$0.01\%/^{\circ}F$	$0.01\%/^{\circ}F$	$0.01\%/^{\circ}F$	$0.018\%/^{\circ}F$
横 感 度	$0.002g/g$	$0.002g/g$	$0.002g/g$	$0.002g/g$
寸 法	$2.5\phi \times 4.3h$ cm	$2.8\phi \times 4.6h$ cm		
重 量	$74gr$	$100gr$	$96gr$	$96gr$
耐 加 速 度	$100g$	$100g$	$100g$	$100g$
方 式	サ-ボ	サ-ボ	サ-ボ	サ-ボ

2-3. 実験結果

図11に起振機を用いた振動実験から得られた共振曲線を示す。実験中の加振力は起振機の起振々動数及び重錘の開き角で変化するためこの図では加振力を2tonとして換算した加速度及び変位と振動数の関係をプロットしたものである。

図12には各共振々動数での振動モードを示す。

また図13には各共振々動数での自由減衰振動の各測点における振巾と波数の関係を半対数紙上にプロットしたものであり、この曲線の勾配から構造減衰の対数減衰率を求めた。

ロケットを用いた実験の結果を図14～16に示す。

図14にはロケット推力の時間的变化を、図15にはロケットを噴射したときの塔頂の応答加速度を、また図16にはこの記録から求めた基本振動の振巾と波数の関係を半対数紙上にプロットしたものを示す。

2-4. 数 値 計 算

実験に先立って塔の振動解析を行なった。このような連続体構造物の固有振動数や振動モードは構造減衰の影響を受けるため厳密には振動解析に先立ってその大きさを把握することが要求されるが一般に鋼構造物のようにその大きさが小さい場合には固有振動数や振動モードは構造減衰の影響が小さく無視できる。しかし構造減衰の影響を無視しえたとしても無限自由度の連続体構造物の固有振動数の厳密解を求めることは不可能であり、一般にはその近似解を求める手法がとられている。この近似解法には多くの方法がある。ここでは塔を図-17のように22ヶの格点に重量を集中させ各質点を結ぶ部材は剛性のみを有し質量のない仮想梁で連結させた等価質点系を考えこの等価系について振動方程式をたて振動数を求めた。近似的な固有振動解析法としてはこの他に(i)積分方程式法、(ii)微分方程式法、(iii)エネルギー法導があるがここでは電子計算機の普及にともない一般的となった等価有限質点系におきかえる方法を採用した。

塔の振動はこれを2次元構造物とみるとき橋軸直角方向の振動である面内振動と橋軸方向の曲げ振動及び振り振動の面外振動に分けられる。ここでは後者の運動方程式を求める方法について説明する。構造物に対する絶対座標系をX, Y, Zとし構造物はX, Z平面内にあるものとする(図18)。また部材に関する局部座標系をx, y, zとし、z軸を部材の長軸に、従ってx-z平面はX-Z平面と同一とする。

また質点iの絶対座標を(X_i, Z_i)、部材ijにおいてZ-z軸のなす角度をθ_{ij}とすれば次の式が求まる。

$$\cos \theta_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{l_{ij}}, \quad \sin \theta_{ij} = \frac{X_j - X_i}{l_{ij}}$$

ここに

$$l_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}$$

次にi節点の変位と部材々端の回転角を絶対座標系と局部座標系で次のようにあらわすものとする。

i 絶対座標系

V_i : Y方向の変位

Φ_i : X軸まわりの変位角

Ψ_i : Z軸まわりの変位角

ii 局部座標系

v_i : y方向の変位

α_i : x軸まわりの変位角

β_i : z軸まわりの変位角

またこれら2つの座標軸での変位の間には次の変換関係が成立する。

$$\begin{aligned} v_i &= V_i \\ \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_{in} & -\sin \theta_{in} \\ \sin \theta_{in} & \cos \theta_{in} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_i \\ \Psi_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \Phi_i \\ \Psi_i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_{in} & \sin \theta_{in} \\ -\sin \theta_{in} & \cos \theta_{in} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで変換マトリックスを次のようにあらわす。

$$C_{in} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{in} & -\sin \theta_{in} \\ \sin \theta_{in} & \cos \theta_{in} \end{pmatrix}$$

以上で2つの座標系における変位の関係が明らかとなったので次に部材ijの変形について考えてみる。

上の関係から部材の材端における変位は

$$\begin{aligned} v_i &= V_i, & v_j &= V_j \\ \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix} &= C_{ij} \begin{pmatrix} \Phi_i \\ \Psi_i \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} \alpha_j \\ \beta_j \end{pmatrix} &= C_{ij} \begin{pmatrix} \Phi_j \\ \Psi_j \end{pmatrix} \end{aligned}$$

次に断面力と変位の関係を求めるものとする。ここで仮定している等価質量系では内力にしる外力にしる力は全て格点に作用し部材中間には作用しない。

また部材々端に作用する断面力としてはy軸方向の断面力 Q_y , x軸まわりの曲げモーメント M_x 及びz軸まわりの捩りモーメント T_z だけでこれらの断面力は次のような変位の関係であらわされる。

$$M_{x_{ij}} = o_{ij}\alpha_i - p_{ij}\alpha_i - (o_{ij} + p_{ij}) \frac{v_j - v_i}{l_{ij}}$$

$$M_{x_{ji}} = p_{ij}\alpha_i - q_{ij}\alpha_j - (p_{ij} + q_{ij}) \frac{v_j - v_i}{l_{ij}}$$

$$Q_{y_{ji}} = \frac{o_{ij} + p_{ij}}{l_{ij}} \alpha_i + \frac{p_{ij} + q_{ij}}{l_{ij}} \alpha_j + \frac{o_{ij} + 2p_{ij} + q_{ij}}{l_{ij}^2} (v_j - v_i)$$

$$Q_{y_{ji}} = Q_{y_{ij}}$$

$$T_{z_{ij}} = l_{ij}(\beta_j - \beta_i)$$

$$T_{z_{ji}} = T_{z_{ij}}$$

ここに o_{ij} , p_{ij} , q_{ij} , t_{ij} は部材 ij の剛性をあらわす係数で部材 ij を等断面とすれば次式であらわされる。

$$o_{ij} = \frac{4EI_{ij}}{l_{ij}}, \quad p_{ij} = \frac{2EI_{ij}}{l_{ij}}, \quad q_{ij} = \frac{4EI_{ij}}{l_{ij}}$$

$$o_{ji} = q_{ij}, \quad p_{ji} = p_{ij}, \quad q_{ji} = o_{ij}$$

$$t_{ij} = \frac{GJ_{ij}}{l_{ij}}$$

次に格点 i に作用する合力を絶対座標系で考えると力としては X 軸まわりのモーメント M_{x_i} , Z 軸まわりのモーメント M_{z_i} 及び Y 軸方向の剪断力 O_{y_i} が考えられそれらは次式であらわされる。

$$M_{x_i} = -\sum_j T_{z_{ij}} \sin \theta_{ij} - M_{x_{ij}} \cos \theta_{ij}$$

$$M_{z_i} = -\sum_j T_{z_{ij}} \cos \theta_{ij} - M_{x_{ij}} \sin \theta_{ij}$$

$$Q_{y_i} = -\sum_j \theta_{y_{ij}}$$

これらの式について前にのべた座標変換をおこなえば上の合力は絶対座標系の変位であらわされる。

$$\begin{aligned} M_{x_i} = & \sum (o_{ij} \cos^2 \theta_{ij} + t_{ij} \sin^2 \theta_{ij}) \phi_i + \sum (t_{ij} - o_{ij}) \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \psi_i \\ & + \sum (p_{ij} \cos^2 \theta_{ij} - t_{ij} \sin^2 \theta_{ij}) \phi_j + \sum (-t_{ij} - p_{ij}) \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \psi_i \\ & + \sum (-r_{ij} \cos \theta_{ij}) V_i + \sum r_{ij} \cos \theta_{ij} V_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{z_i} = & \sum (t_{ij} - o_{ij}) \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \phi_i + \sum (o_{ij} \sin^2 \theta_{ij} + t_{ij} \cos^2 \theta_{ij}) \psi_i \\ & + \sum (-t_{ij} - p_{ij}) \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \phi_j + \sum (p_{ij} \sin^2 \theta_{ij} - t_{ij} \cos^2 \theta_{ij}) \psi_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_j r_{ij} \sin \theta_{ij} V_i + \sum_j (-r_{ij} \sin \theta_{ij}) V_j \\
Q y_j = & \sum_j \frac{r_{ij} + s_{ij}}{l_{ij}} V_i - \sum_j \frac{r_{ij} + s_{ij}}{l_{ij}} V_j \\
& + \sum_j (-Y_{ij} \cdot \cos \theta_{ij}) \phi_i + \sum_j (r_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \psi_i \\
& + \sum_j (-s_{ij} \cdot \cos \theta_{ij}) \phi_j + \sum_j (s_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \psi_j
\end{aligned}$$

ここに

$$r_{ij} = \frac{o_{ij} + p_{ij}}{l_{ij}}, \quad s_{ij} = \frac{p_{ij} + q_{ij}}{l_{ij}}$$

これらは次のようにかきあらわすことができ

$$\begin{pmatrix} Mx_1 \\ Mz_1 \\ Oxi \\ \vdots \\ Mx_i \\ Mz_i \\ Oyi \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots\dots\dots \\ \Sigma(Oij \cos \theta_{ij} + tijs \sin^2 \theta_{ij}), \Sigma(pij \cos^2 \theta_{ij} - tijs \sin^2 \theta_{ij}) \dots \\ \dots\dots\dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Psi_1 \\ V_1 \\ \vdots \\ \Phi_i \\ \Psi_i \\ V_i \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$\therefore P = B \cdot V$$

ここに B は剛性マトリックス, V は変位ベクトルである。さてこの式は構造物に作用する力と変位の関係をあらわす釣合方程式である。この式から運動方程式を求めるには D'Alembert の原理により慣性力の符号を反転させ釣合式の外力と等値すればよい。

系の固有円振動数を P , 格点 i の X 軸まわりの重量慣性モーメントを $J\phi_i$, Z 軸まわりの重量慣性モーメントを $J\psi_i$, 重量を W_i とすれば格点 i の慣性力は $-P^2 \frac{J\phi_i}{g} \Phi_i$, $-P^2 \frac{J\psi_i}{g} \Psi_i$, $-P^2 \frac{W_i}{g} V_i$ となりこれらはまとめて次式であらわされる。

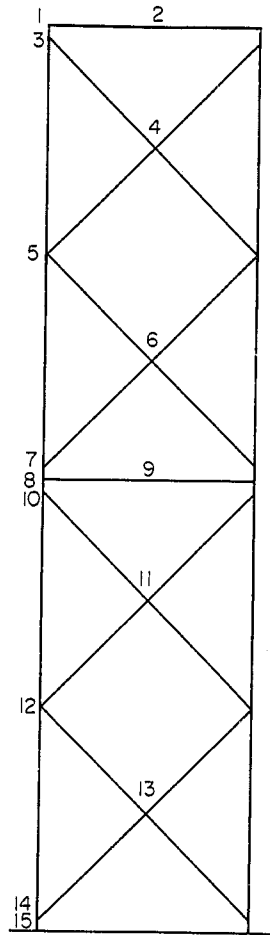
$$-P^2 D \cdot V$$

ここに D は $\frac{J\phi_i}{g}$, $\frac{J\psi_i}{g}$, $\frac{W_i}{g}$ を対角項にもつ対角行列である。次って塔の面外振動の振動数方程式は次のようにならわされる。

$$P^2 D \cdot V = B \cdot V$$

この数値計算結果について以下に示す。なお、数値計算に用いた関門橋主塔の諸元は表 - 3 のとおりである。

表 3



(a) 集中質量		(b) 部材の断面積及び剛性				
格 点	集 中 質 量 (ton)	部 材	断 面 積 cm^2	捩 り 剛 性	曲 げ 剛 性 (橋軸直角)	曲 げ 剛 性 (橋軸)
1	32.2	1~2	2.441	0.865	0.618	0.677
2	117.0	1~3	7.710	1.80	1.728	1.117
3	147.0	3~4	1.030	0.064	0.504	0.048
4	35.3	3~5	8.080	2.00	2.106	1.203
5	209.0	4~5	1.030	0.064	0.504	0.048
6	35.3	5~6	1.030	0.064	0.504	0.048
7	158.0	5~7	8.280	2.37	2.929	1.368
8	73.5	6~7	1.030	0.064	0.504	0.048
9	37.7	7~8	9.180	2.60	3.494	1.464
10	168.0	8~9	2.975	0.368	0.958	0.180
11	40.4	8~10	9.270	2.68	3.66	1.485
12	221.0	10~11	1.140	0.0732	0.059	0.051
13	40.4	10~12	9.500	2.89	4.146	1.503
14	172.0	11~12	1.140	0.0732	0.059	0.051
		12~13	1.140	0.0732	0.059	0.051
		12~14	9.900	3.22	5.051	1.642
		13~14	1.140	0.0732	0.059	0.051
		14~15	10.120	3.42	5.592	1.698

図 19 に各振動方向の主要な振動モードと固有振動数を示す。

なお図中の左には比較のために振動実験から得られた振動モードを最大振巾で正規化したものを示した。また図 20 はモード解析法によって得られたロケット噴射時の塔頂の応答加速度の計算値である。なお、この計算では各振動モードに対応する構造減衰をすべて $\delta=0.01$ としている。

2-5 実験結果に対する考察

起振機を用いた実験結果に対する考察

(i) 固有振動数について

今回の実験では各振動方向とも低次の固有振動数を明確に測定できた。これらの振動数は前節でのべた近似的な解析結果と比較的よい一致を示している。これらの対比を表-4 に示す。

表-4. 関門橋主塔の振動特性

橋軸方向振動			
次 数	振動数 (計算値)	振動数 (実験値)	対数減衰率
1	0.25 %	0.26	$\delta=0.009$
2	1.35	1.40	0.021
3	3.76	3.90	0.036
4	4.57		
5	4.81		
6	7.49	6.9	
橋軸直角方向振動			
次 数	振動数 (計算値)	振動数 (実験値)	対数減衰率
1	1.18 %	1.17 %	$\delta=0.014$
2	3.94	4.10	
3	6.80	6.20	
振 り 振 動			
次 数	振動数 (計算値)	振動数 (実験値)	対数減衰率
1	0.74 %	0.75	$\delta=0.011$
2	2.16	2.29	0.076
3	4.75	4.61	0.023

表からみて橋軸方向の撓み振動の3, 4次に相当する振動数が実験ではえられていない。しかし、例えばこの第3次の振動モードの計算値は図-21に示すとおりで部材共振と考えてよく、卓越振巾のあらわれるヶ所に加速度計が配置されていなかったため実験では明らかにできなかったものと思われる。

(ii) 振動モードについても

振巾モードについても固有振動数と同様に今回の実験で低次のものについて測定できた。そしてこれらの振動モードは近似的な解析結果と比較的よい一致を示している。

(iii) 構造減衰について

今回の実験で得られた各振動方向の構造減衰の各測定の平均を表-4にあわして記した。橋軸直角方向の撓み振動の2次及び3次の振動モードでの値が記入していないのはあまりにも構造減衰が大きいため自由減衰振動からは求めることが出来なかったためである。

これらの結果をみると各振動方向毎に異なった特性を示している。例えば橋軸方向の撓み振動では次数が大きくなると共に構造減衰が大きくなっている。ところが振り振動では2次モードでの構造減衰が非常に大きく、橋軸直角方向の撓み振動では2次及び3次モードの構造減衰が極端に大きくなっている。

この実験で得られた構造減衰は

(i)鋼製塔 (ii)橋脚 (iii)塔頂クレーン 等の構造減衰が加算されておるものと思われる、各部分の寄与を定量的に把することは困難であり、今後の解析結果にまたねばならぬところも多い。しかし実験時の状態から考えて基本振動数近傍では(iii)の影響は小さいものと思われる。

ロケットを用いた実験結果に対する考察

(i) ロケットの推力について

今回の実験でロケットの燃焼時間及び複数ロケットの燃焼の同時性については予定どおりの性能が得られたが推力については予定をかなり上まわる結果となり、2回の実験結果を比較してみてもその偏差は5%に達しており十分な精度とはいいがたい。

(ii) 塔頂の加振による塔頂の加速度応答は高次振動の減衰が早くほぼ基本振動の自由減衰振動がえられた。この実験から求まった基本振動の振動数及び構造減衰は起振機加振によって得られた実験結果とよく一致する。

次に塔頂の応答加速度の計算値との比較については現在今回の実験で得られた構造減衰を
衰を用いて計算できるように計算プログラムを改造中でその結果については次の機会
に報告する。

以上の実験結果をとりまとめると次のように 満されよう。

- (i) 主塔の固有振動数及び振動モードは各振動方向とも低次のものについては近似的な
数値計算によって十分な精度で推定できる。
- (ii) 主塔の各振動方向の基本振動モードにおける構造減衰は対数減衰 で $0.01 \sim 0.015$
程度である。

2-6 あ と が き

本実験に際して日本道路公団関門橋架橋工事々務所の大橋所長を始めとする各位の御協
力をいただいたことに深く感謝いたします。

なお、本実験は以下の諸氏が担当した。

振動研究室	辻	勝	成
	若	林	進
	木	本	正 則
構造研究室	石	川	泉
	河	野	良 次

3. 関門橋風洞模型実験

3-1. ま え が き

昭和42年に始められた関門橋の風洞模型実験も実施設計が完了するに及んでいよいよ最後の検証実験を迎えることとなった。

関門橋の耐風設計の経過についてはすでに何回にも分けて報告して来たが最終的には中路形式の補剛トラス吊橋案が採用されることとなり昭和43年度にはこの計画にそった設計案の風洞実験が行なわれたがその結果は必ずしもよい結果ではなかったためこの設計案に手直しを加えられ実施断面が決定された。以下にその実験結果について報告する。

3-2. 模型及び実験条件

実験に用いた模型を図-22に示す。またこの模型の形状を一部変更して実験を追加したがその模型の形状及びその実験条件の一部を図-23に示す。なお、模型KK-F-71 11, 12は迎角が $+3^\circ$ についてのみ実験している。

今回の実験で採用した相似則は前回までと同じである。実験条件を表-5に示す。

表5 実験条件

	原 型	模型の所要値	模型の採用値
縮 尺		1 : 77.64	1 : 77.64
重 量	247t/m/bridge	6556g/model	6647g/model
極慣性モーメント	2430t・m ² /m	1070gcm ² /model	1058gcm ² /model
撓み振動数	0219c/s		2.19c/s
振り振動数	0403c/s		3.87c/s
構 造 減 衰			
備 考			

3-3. 実 験 結 果

実験結果の全ての整理が終了していないため今回はその一部を報告する。まず図-24に各模型の風速と振巾の関係を示す。

なお、発現した不安定振動は全て振りフラッターである。

3-4. 実験結果の考察

風洞模型実験で得られた発振風速と迎角の関係を図-25に示す。図中に破線で示したのは「本州四国連絡橋，耐風設計基準（1972）」で自励振動の発現を限定する限界風速である。

また図25-1は原型の振り振動数を中央径間1/2点の断面諸元をもとに計算した値を使用して換算したものであり，図25-2は同じく振り振動数を中央径間の平均的断面について計算したものを値を用いて換算してある。

各振動数の計算根拠を以下に示す。

	中央径間1/2点の補剛桁断面	中央径間補剛桁の平均断面
弦材断面積	$A_u = 0.0400 \text{ m}^2$ $A_l = 0.0380 \text{ m}^2$	$A_u = 0.0376 \text{ m}^2$ $A_l = 0.0366 \text{ m}^2$
斜材断面積	$A_j = 0.0169 \text{ m}^2$	$A_j = 0.0183 \text{ m}^2$
横構断面積	$A_h = 0.0162 \text{ m}^2$	$A_h = 0.0246 \text{ m}^2$
振り剛性係数	$K = 2.397 \text{ m}^2$	$K = 3.537 \text{ m}^2$
振り振動数	$f_\alpha = 0.403\%$	$f_\alpha = 0.44\%$

これらの実験結果から

- (i) 原型（KK-F-71 10）の発振風速は正の迎角で限界風速を下まわる。
- (ii) 原型に公共添加物（電らん管）が設置されると発振風速は多少増加する（迎角が $+3^\circ$ において）。但し給水管等の影響については実験が行なわれていない。
- (iii) 模型の回転中心が変化すると発振風速は変れる。
- (iv) 原型の耐風性については更に実験を行ない真の最終断面について検討しなければならないが KK-F-71 10 程度であれば設計風速の算定の際に考えた安全率とを考えあわせるとほぼ満足できるものと思われる。

3-5 あとがき

風洞実験が予定よりおくれたため今回はその概略を報告するにとどめ詳細な結果については次の機会にゆずるものとする。

なお，この実験は構造研究室 石川泉，河野良次 両技官が担当した。

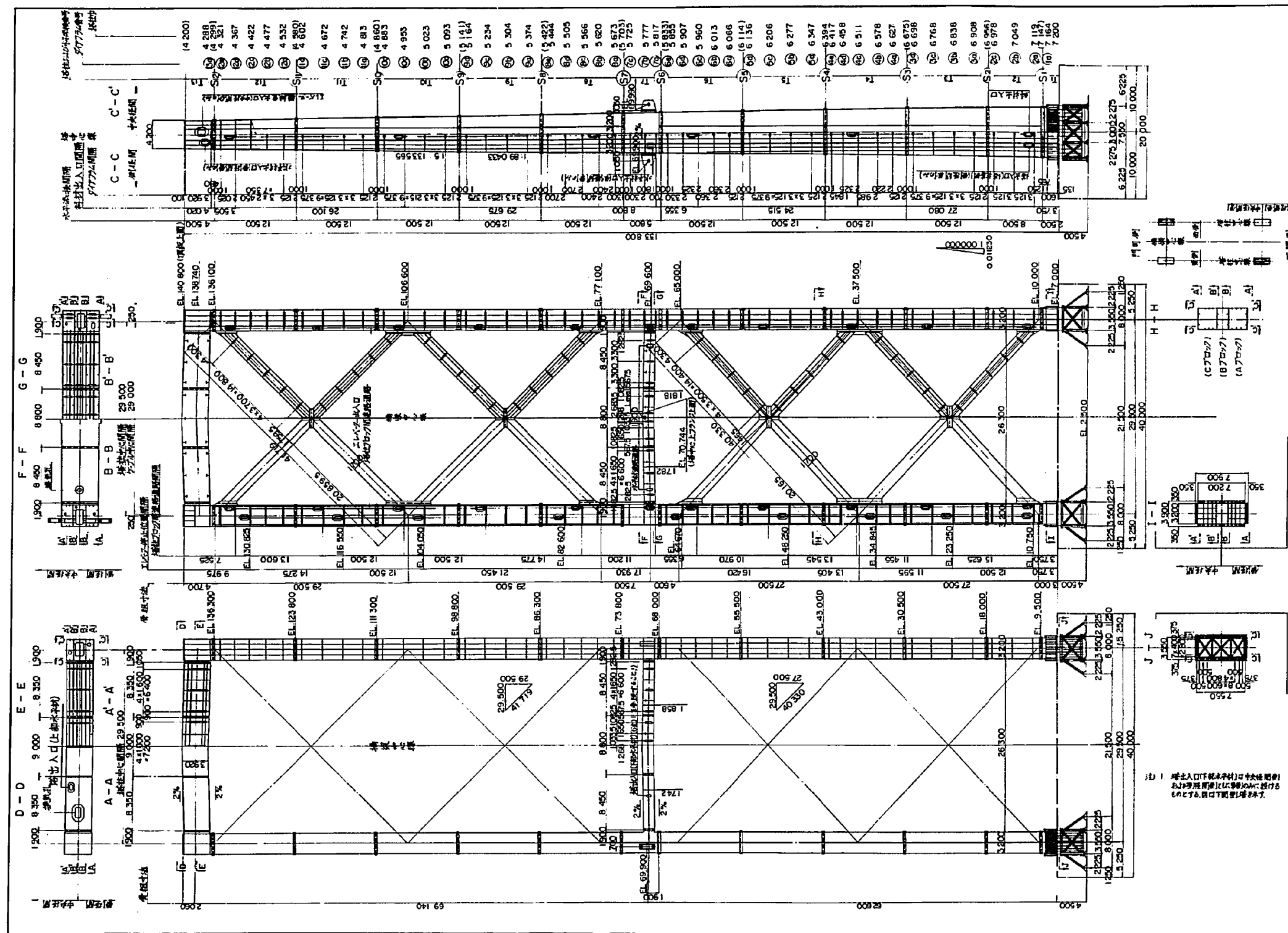
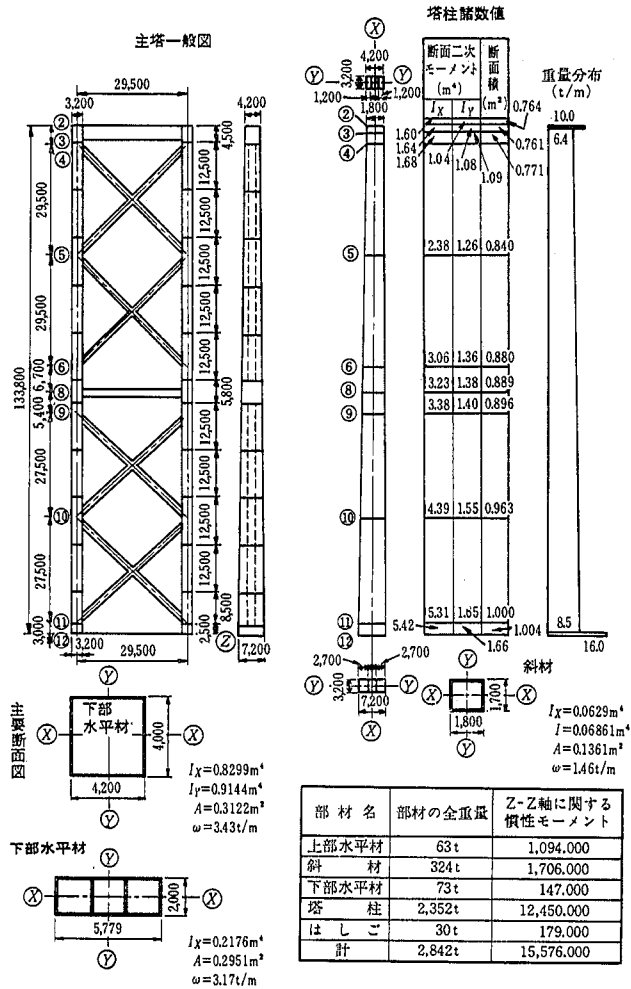
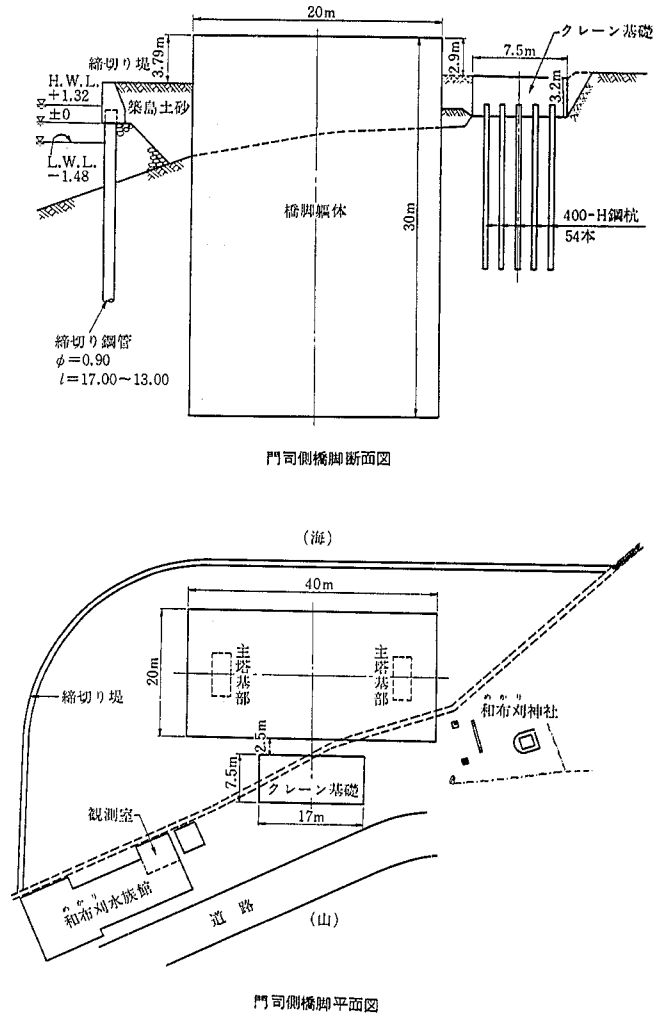


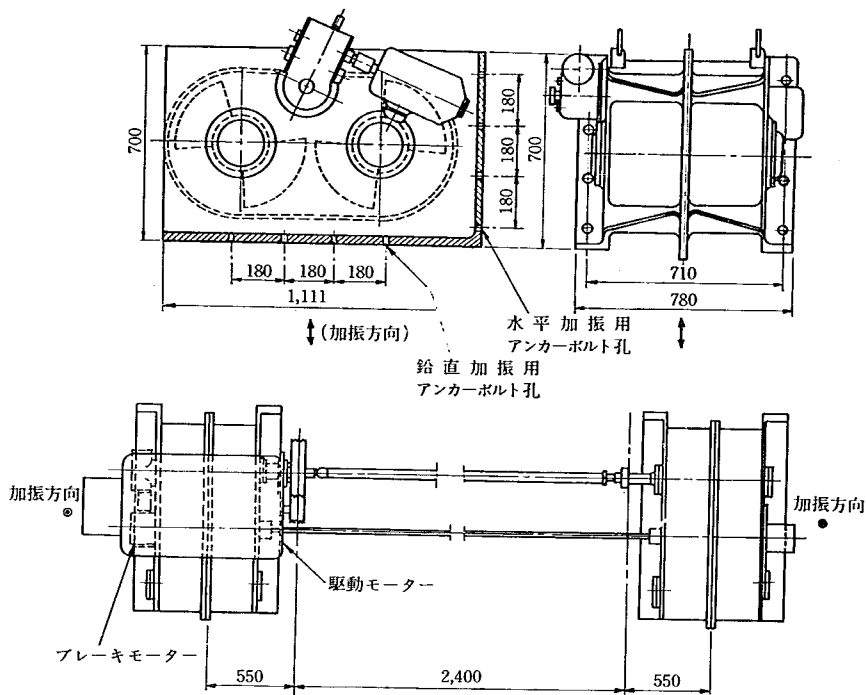
図-1 関門橋主塔基本図



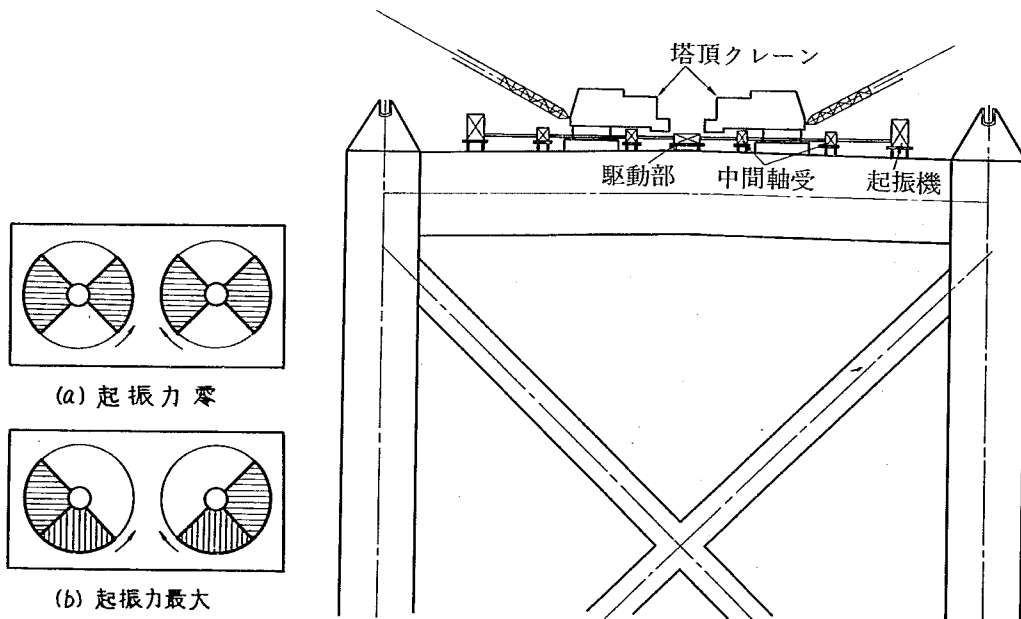
圖一-2 閘門橋主塔諸元圖



圖一-3 閘門橋橋脚一般圖



図一4 起振機一般図



図一5 起振機原理図

図一6 起振機配置図

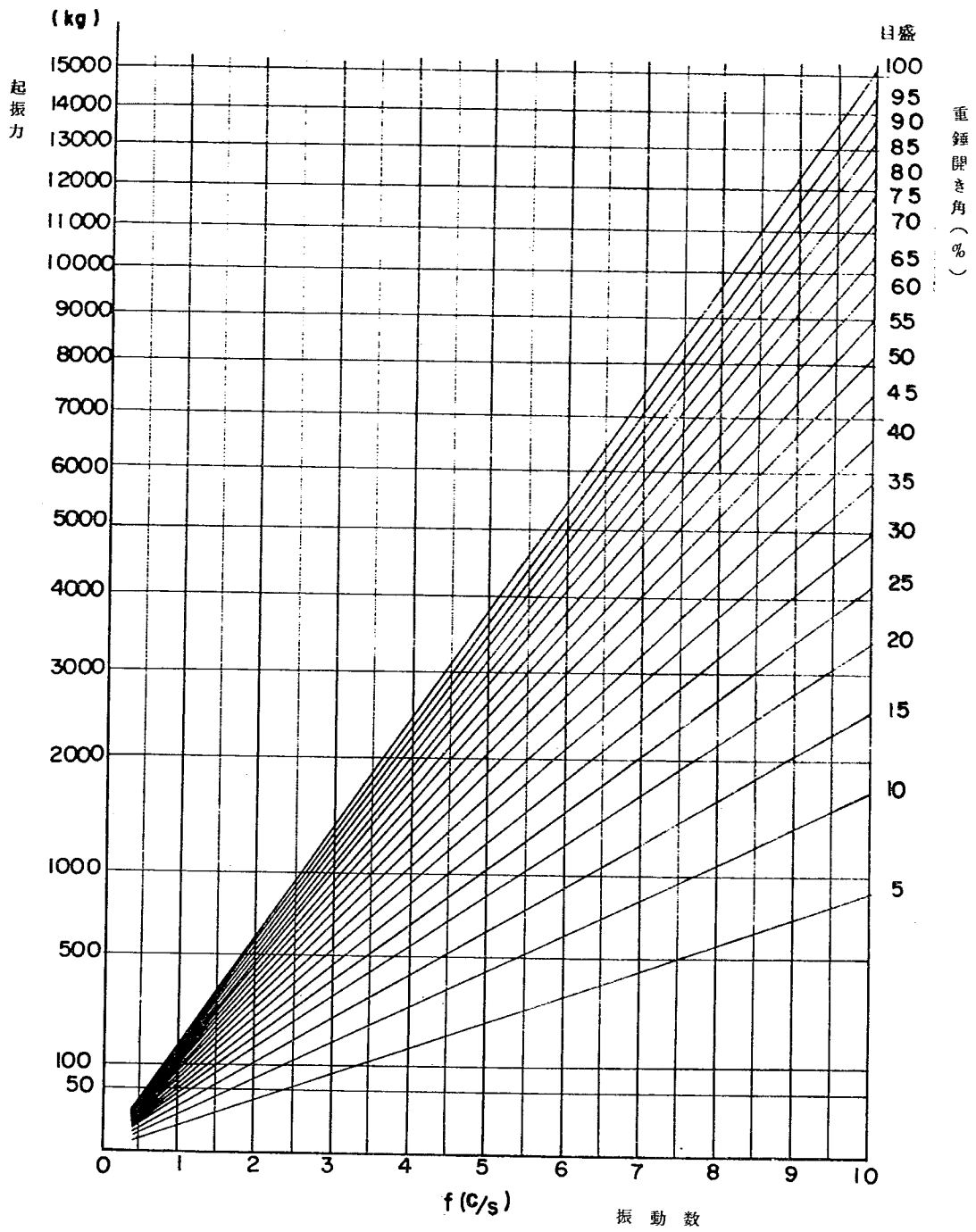
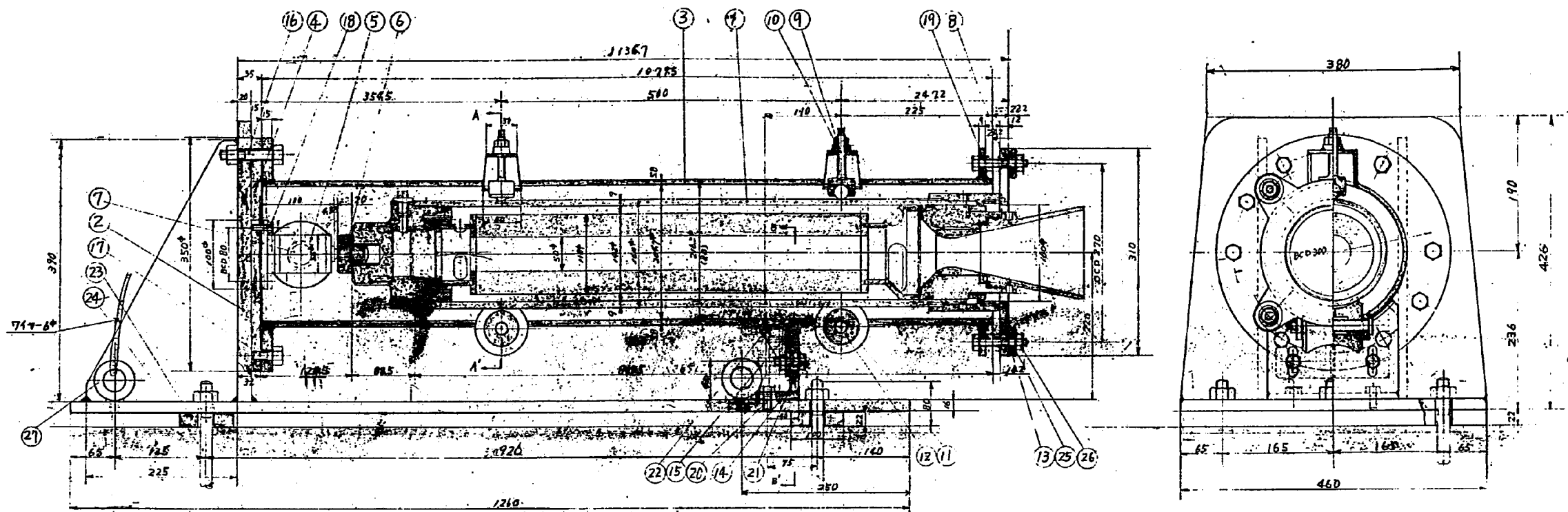
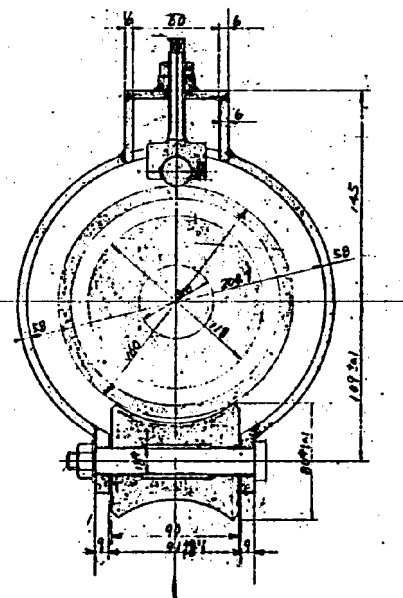


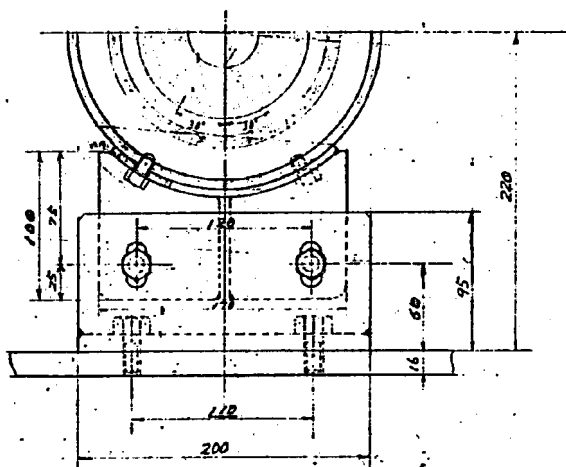
図-7 実橋起振機起振力図 (1 台の場合)



A-A' 視 $s=1/2$



B-B' 視 $s=1/2$

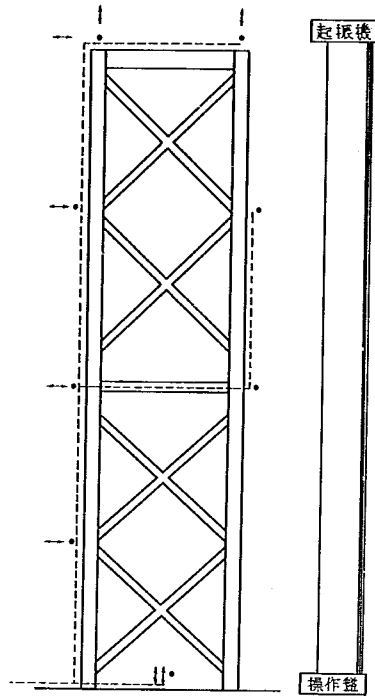


注 重量 + 225 (組立検査合格)
重量は取付板 + 225%、引角は黄色、エッジは白色

製作数 2組

品番	品名	単位	数量	備注
27	ナット	個	5541	4 市販品
26	ワッシャー	個	5500	4
25	厚板	枚	5500	4
24	固定板	枚	5500	4
23	引角	枚	5500	4
22	ナット	個	5500	4
21	ワッシャー	個	5500	4
20	厚板	枚	5500	4
19	固定板	枚	5500	4
18	引角	枚	5500	4
17	ナット	個	5541	4
16	ワッシャー	個	5500	4
15	厚板	枚	5500	4
14	固定板	枚	5500	4
13	引角	枚	5500	4
12	ナット	個	5500	4
11	ワッシャー	個	5500	4
10	厚板	枚	5500	4
9	固定板	枚	5500	4
8	引角	枚	5500	4
7	ナット	個	5541	4
6	ワッシャー	個	5500	4
5	厚板	枚	5500	4
4	固定板	枚	5500	4
3	引角	枚	5500	4
2	ナット	個	5500	4
1	ワッシャー	個	5500	4

図-8 ロケットエンジン一般図



- 橋軸方向水平動換振器
- 橋軸直角方向水平動換振器
- ↑ 上下動換振器

図-9 計測器配置図

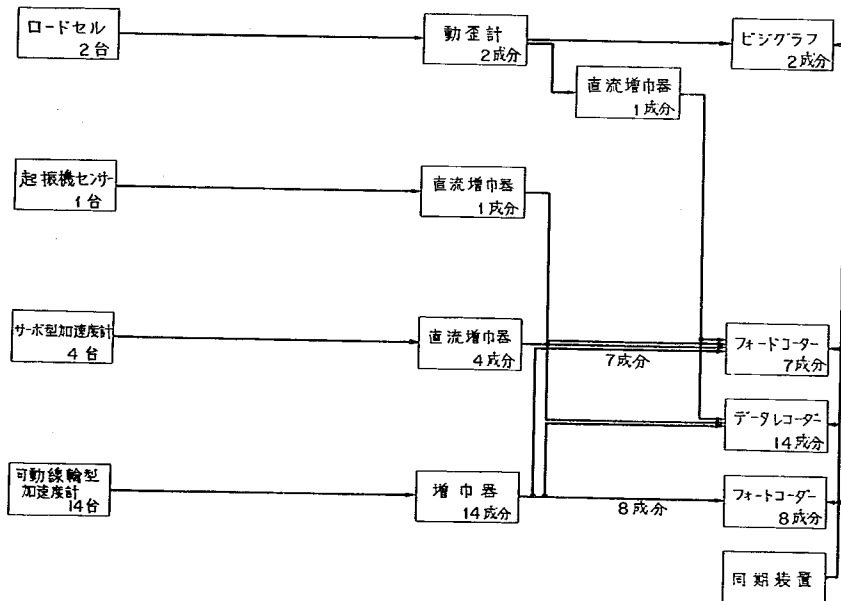


図-10 計測ブロック図

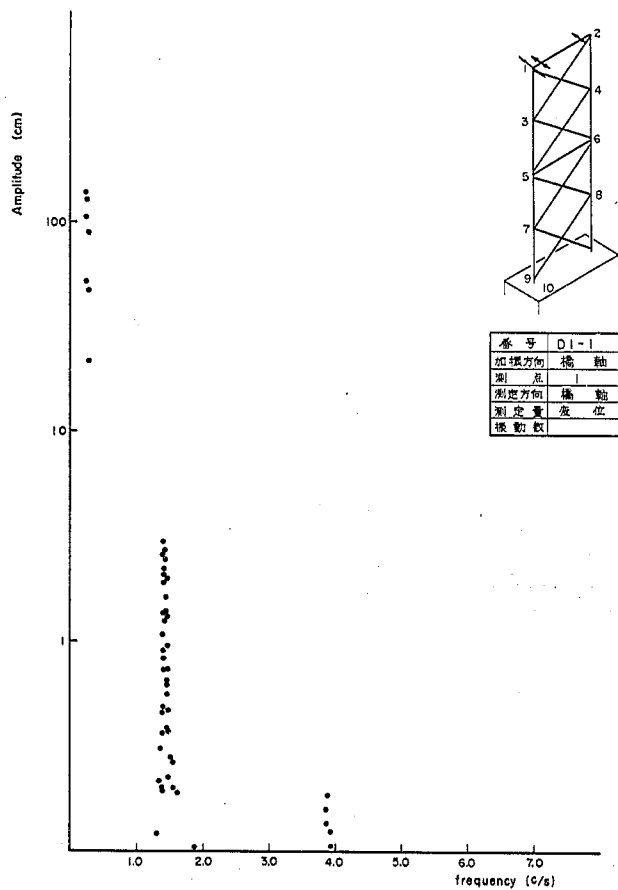


図-11-1 橋軸方向の共振曲線

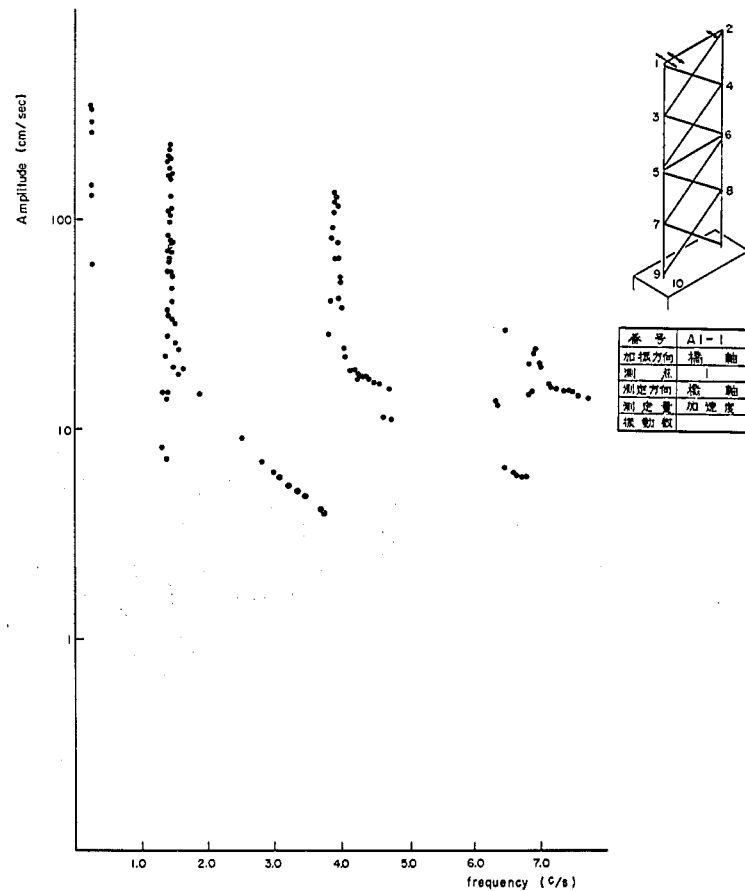


図-11-2 橋軸方向の共振曲線

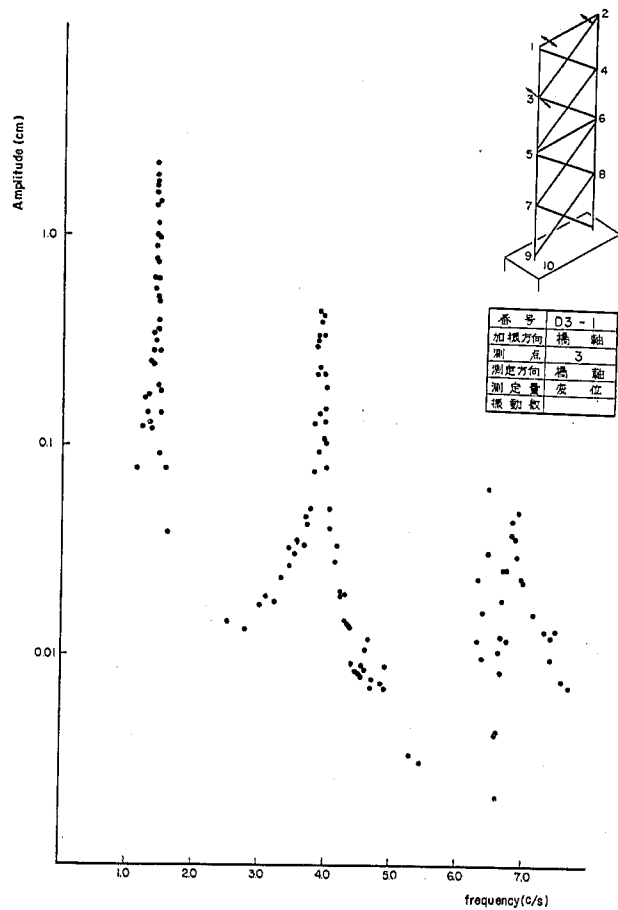


図-11-3 橋軸方向の共振曲線

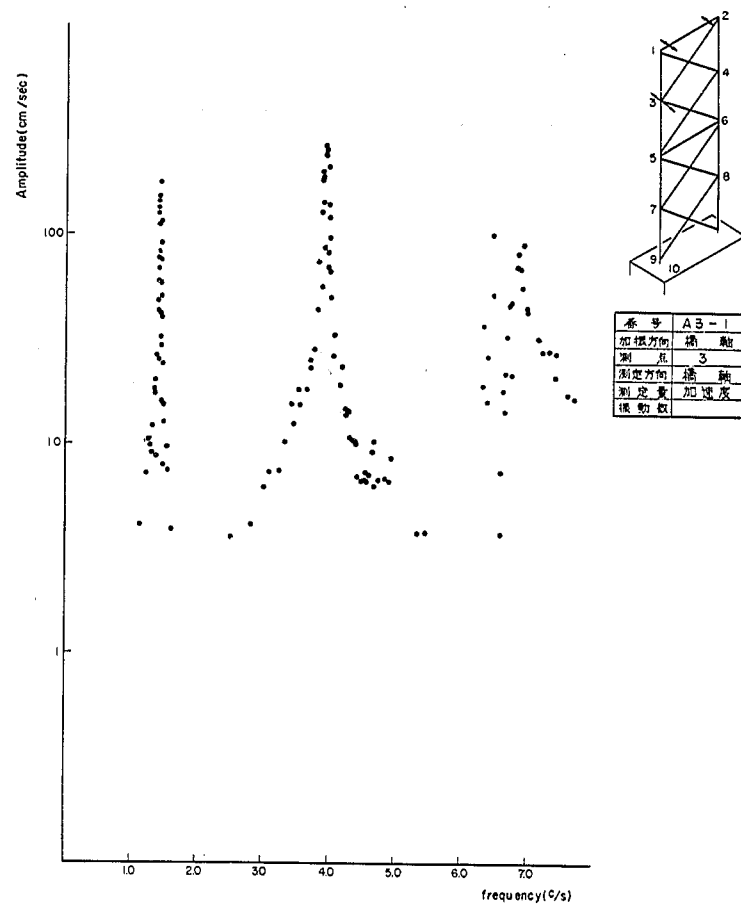


図-11-4 橋軸方向の共振曲線

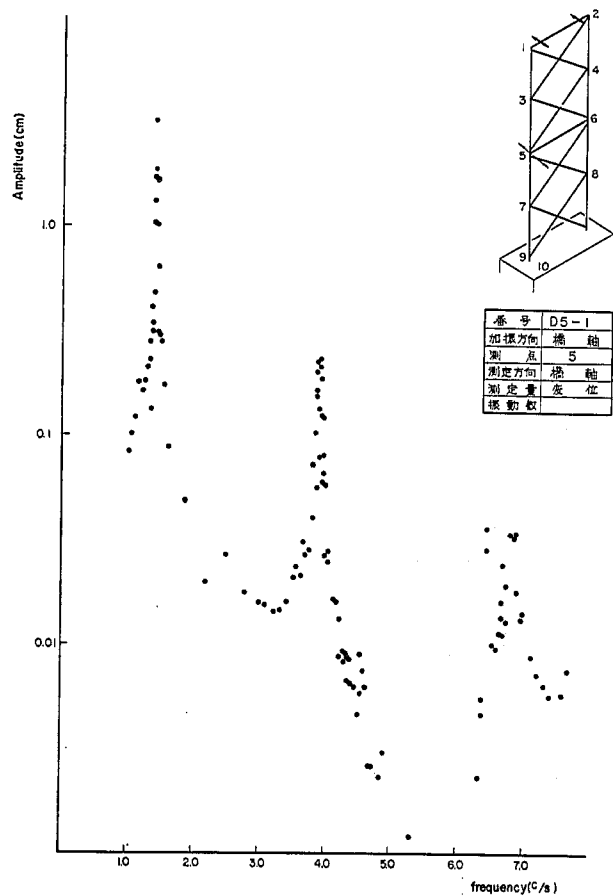


図-11-5 橋軸方向の共振曲線

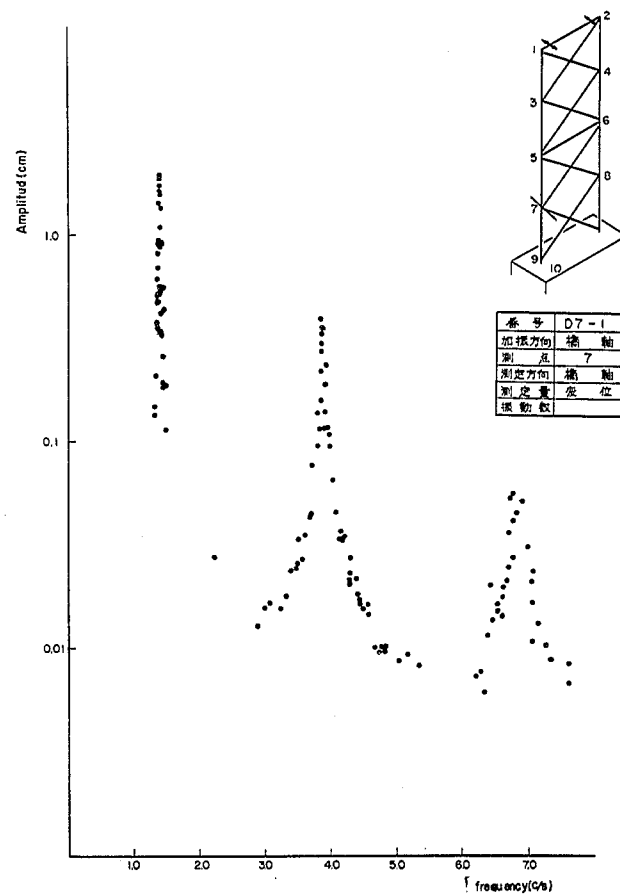


図-11-6 橋軸方向の共振曲線

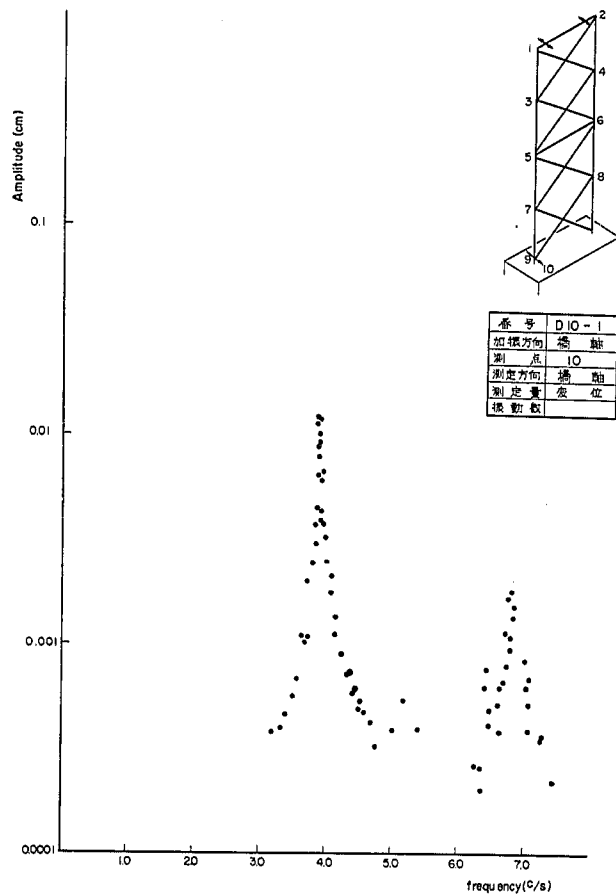


図-11-7 橋軸方向の共振曲線

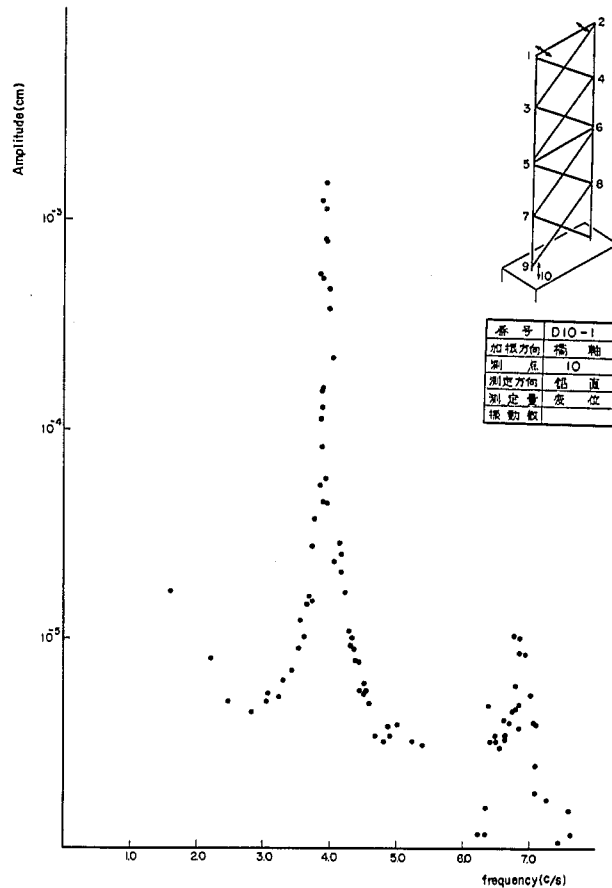


図-11-8 橋軸方向の共振曲線

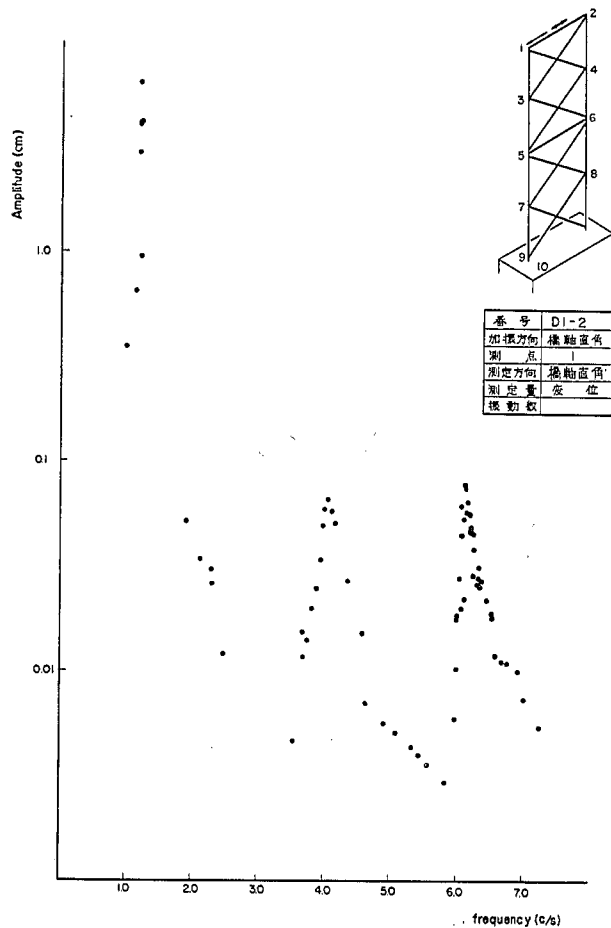


図-11-9 橋軸直角方向振動の共振曲線

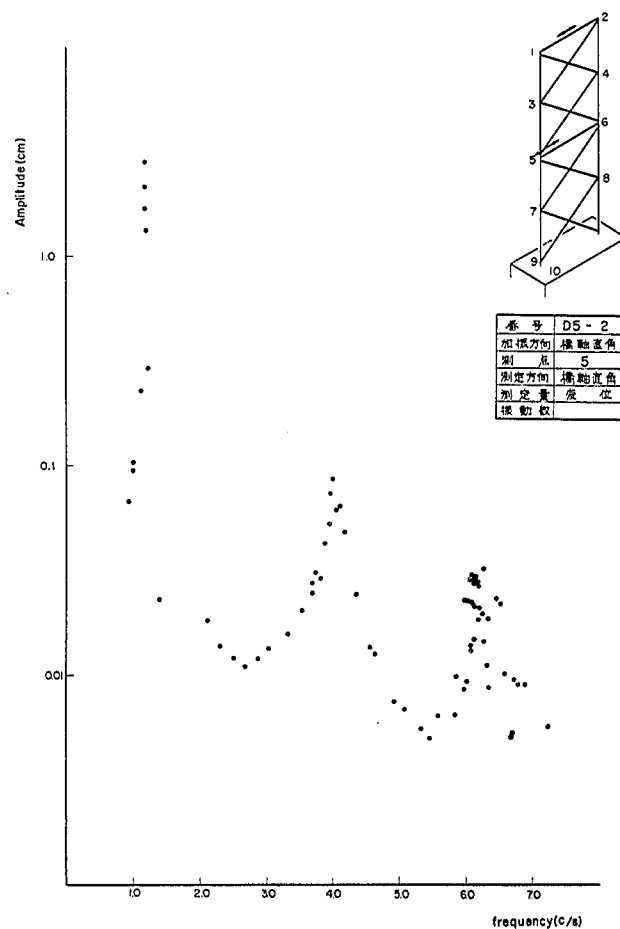


図-11-10 橋軸直角方向振動の共振曲線

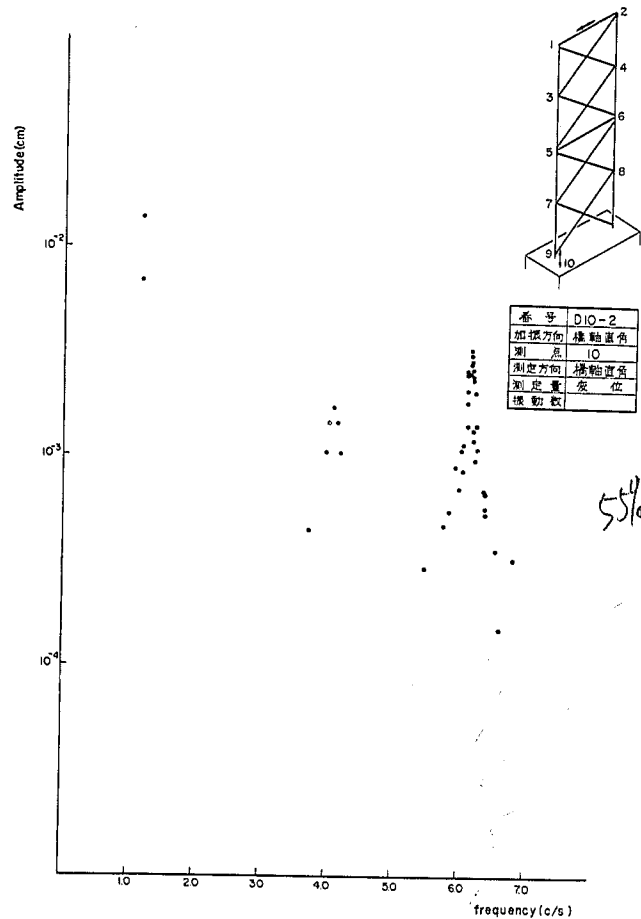


図-11-11 橋軸直角方向振動の共振曲線

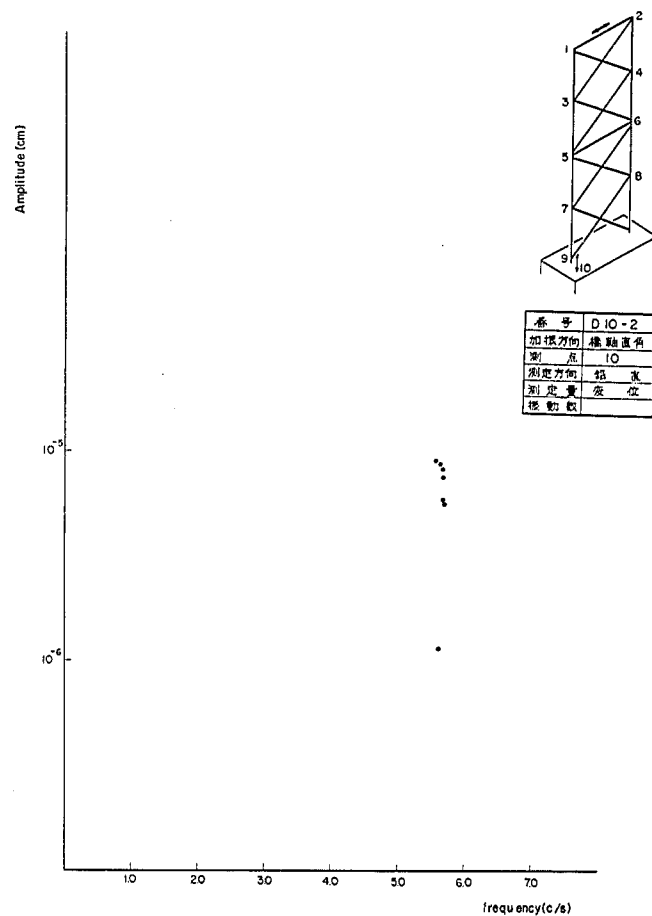


図-11-12 橋軸直角方向振動の共振曲線

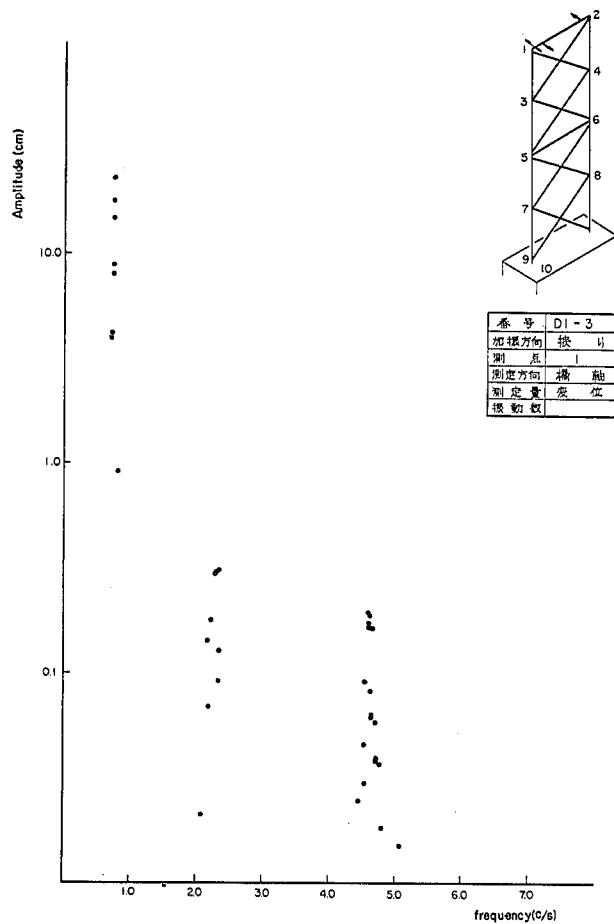


図-11-13 振り振動の共振曲線

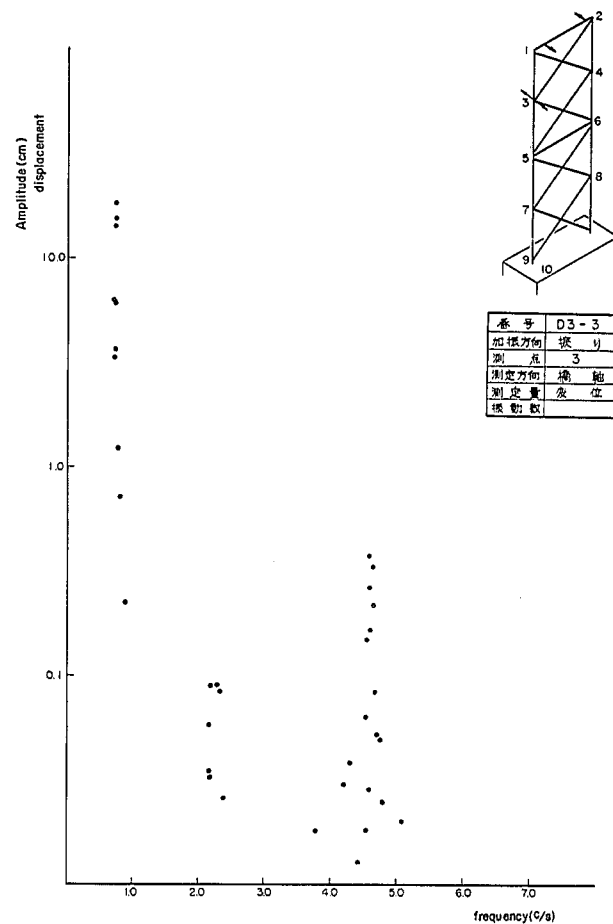


図-11-14 振り振動の共振曲線

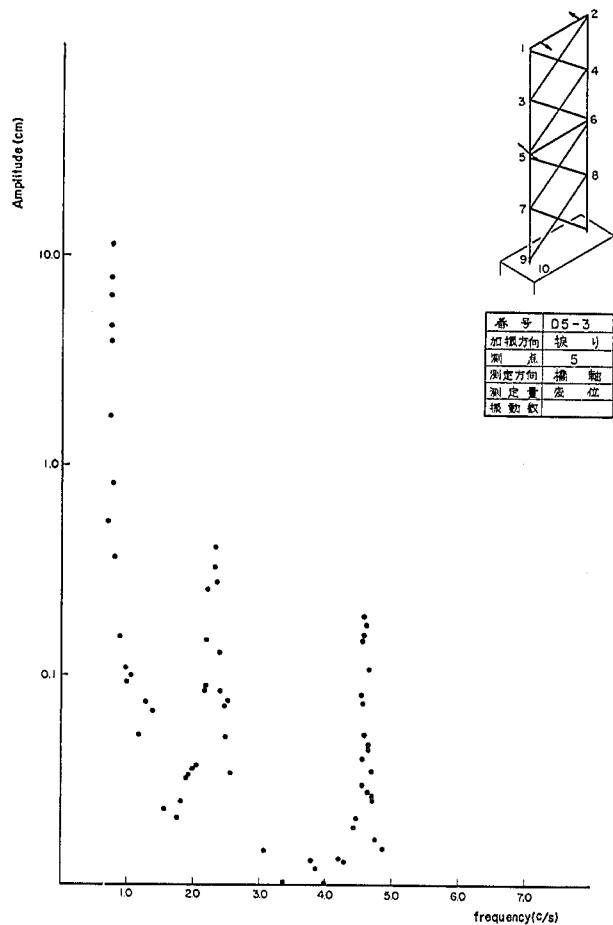


図-11-15 振り振動の共振曲線

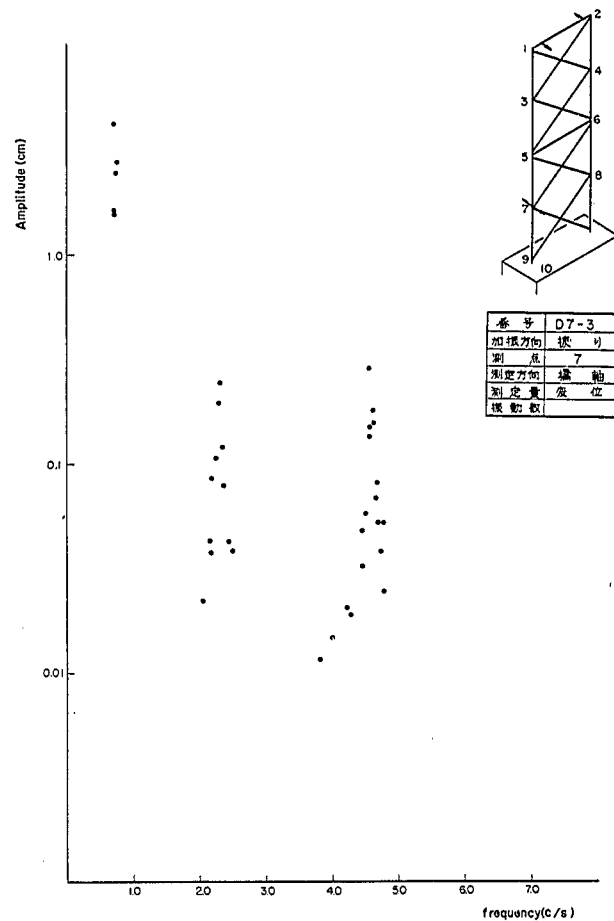
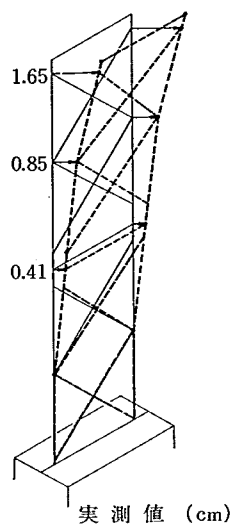
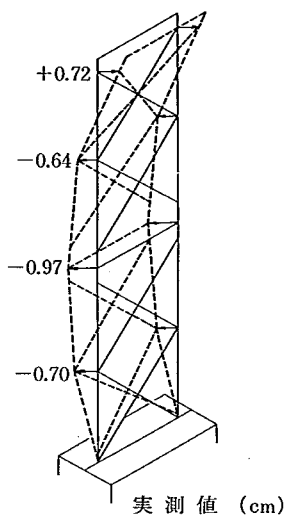


図-11-16 振り振動の共振曲線



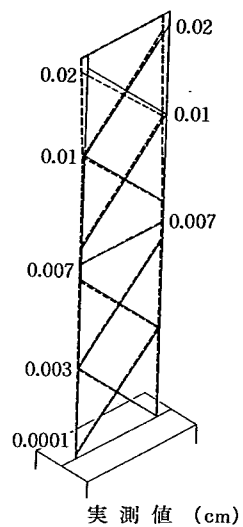
振動方向 橋軸
振動数 0.26%

(a)



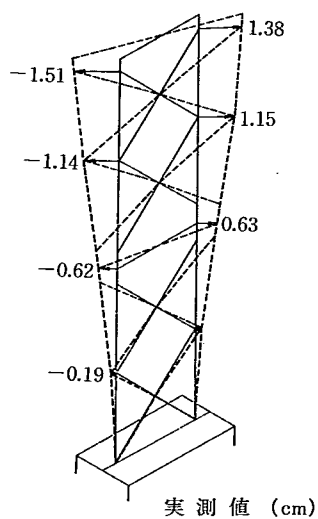
振動方向 橋軸
振動数 1.40%

(b)



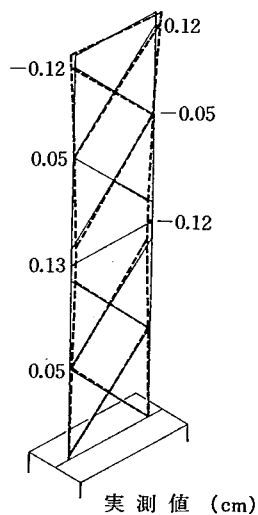
振動方向 橋軸直角
振動数 1.17%

(c)



振動方向 振り
振動数 0.75%

(d)



振動方向 振り
振動数 2.29%

(e)

図-12 振動モード

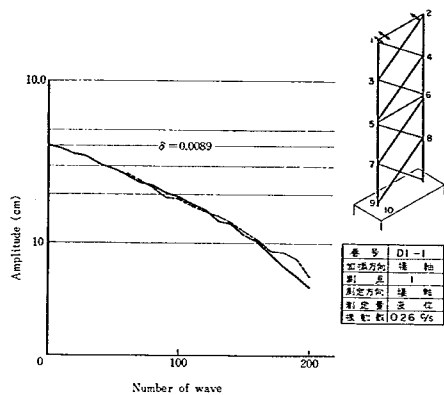


図-13-1 橋軸方向振中の波数振巾曲線

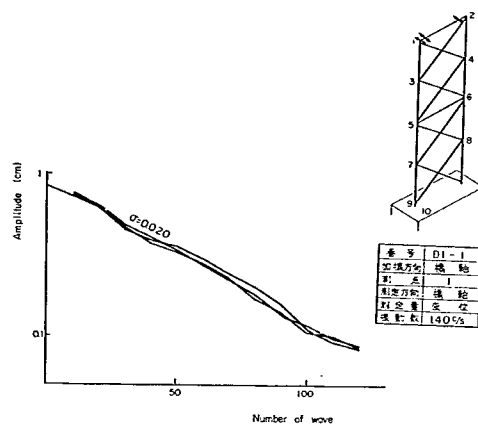


図-13-2 橋軸方向振中の波数振巾曲線

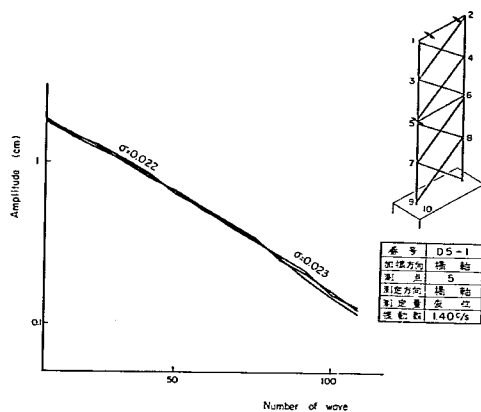


図-13-3 橋軸方向振中の波数振巾曲線

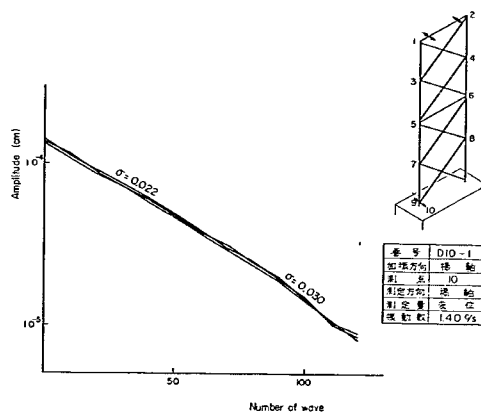
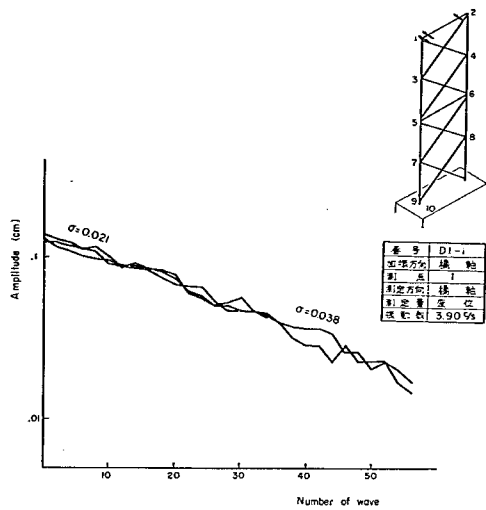
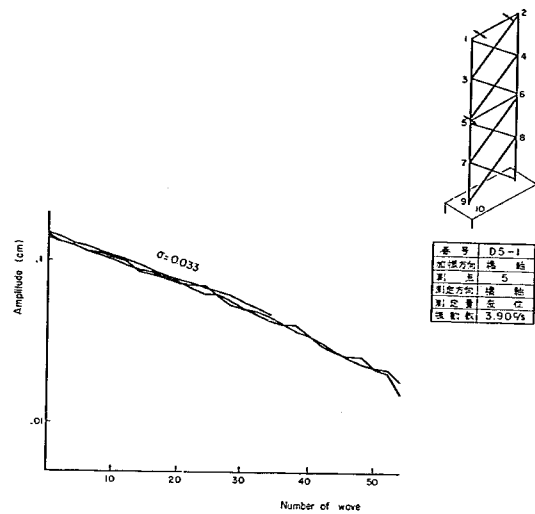


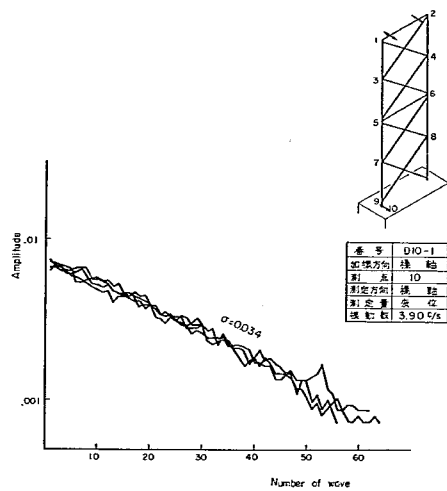
図-13-4 橋軸方向振中の波数振巾曲線



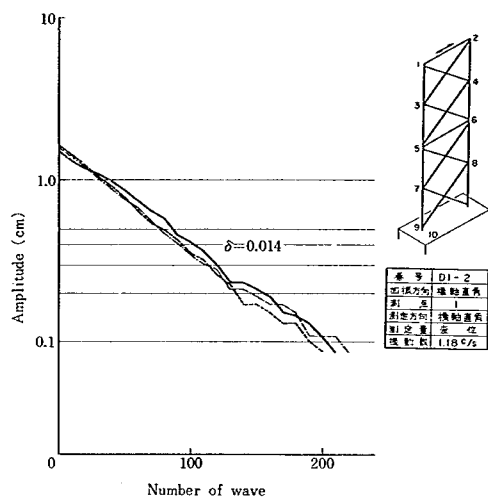
図一 1 3 - 5 橋軸方向振巾の波数振巾曲線



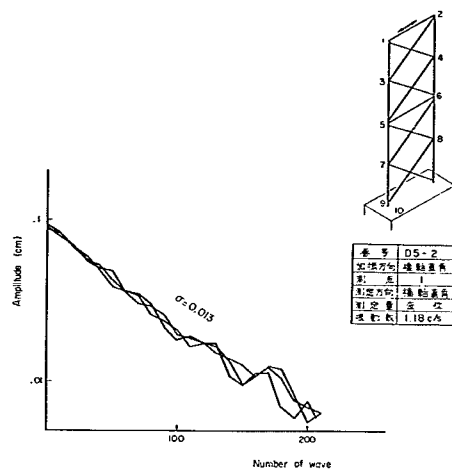
図一 1 3 - 6 橋軸方向振巾の波数振巾曲線



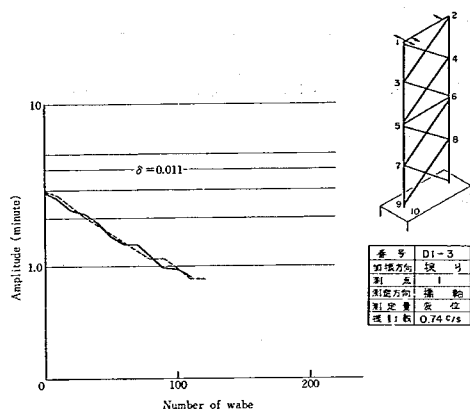
図一 1 3 - 7 橋軸方向振巾の波数振巾曲線



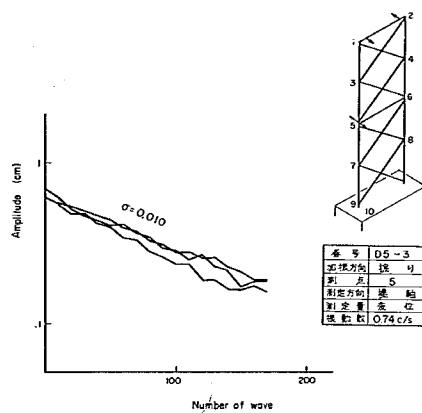
図一 13-8 橋軸直角方向振動の波数振巾曲線



図一 13-9 橋軸直角方向振動の波数振巾曲線



図一 13-10 橋軸直角方向振動の波数振巾曲線



図一 13-11 捩り振動の波数振巾曲線

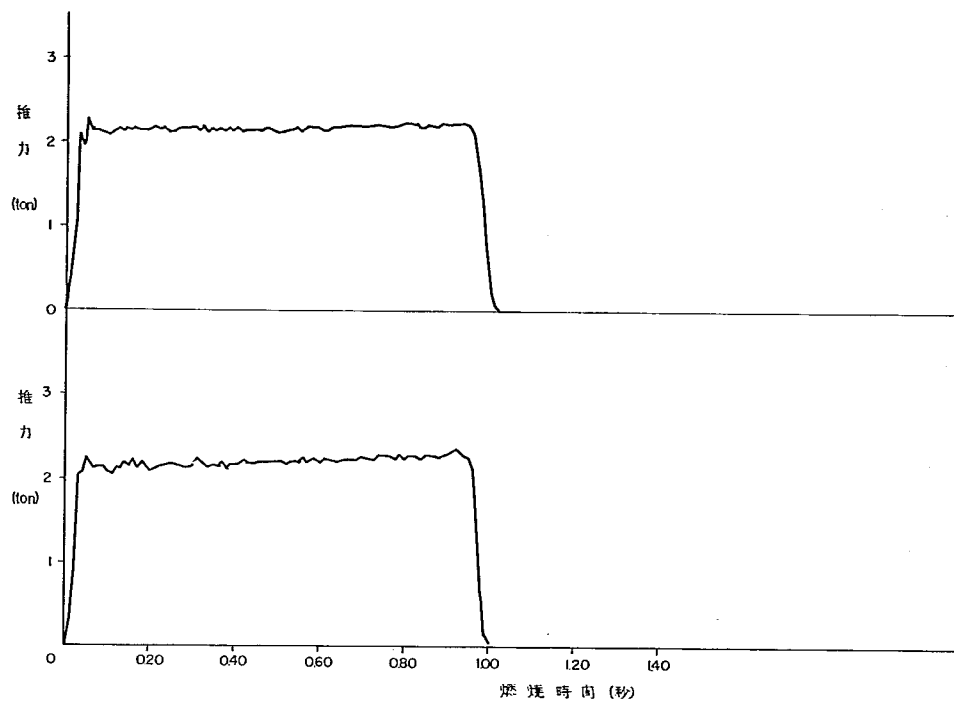
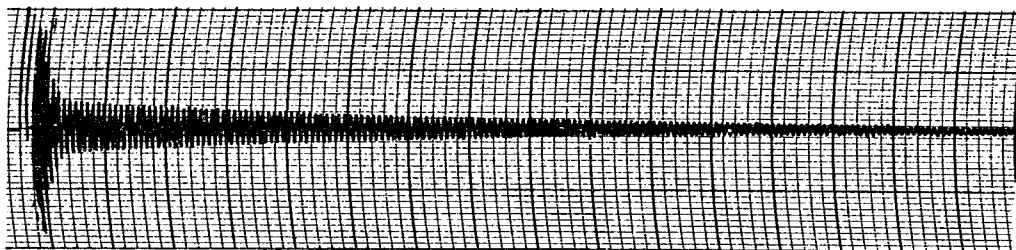
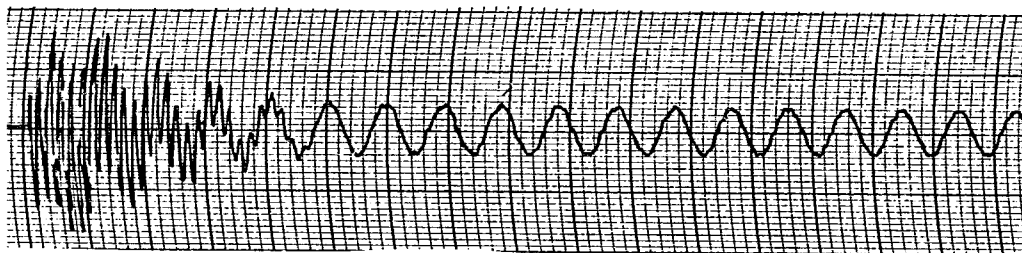


図-14 ロケット推力



(a)



(b)

図-15 塔堤の応答加速度

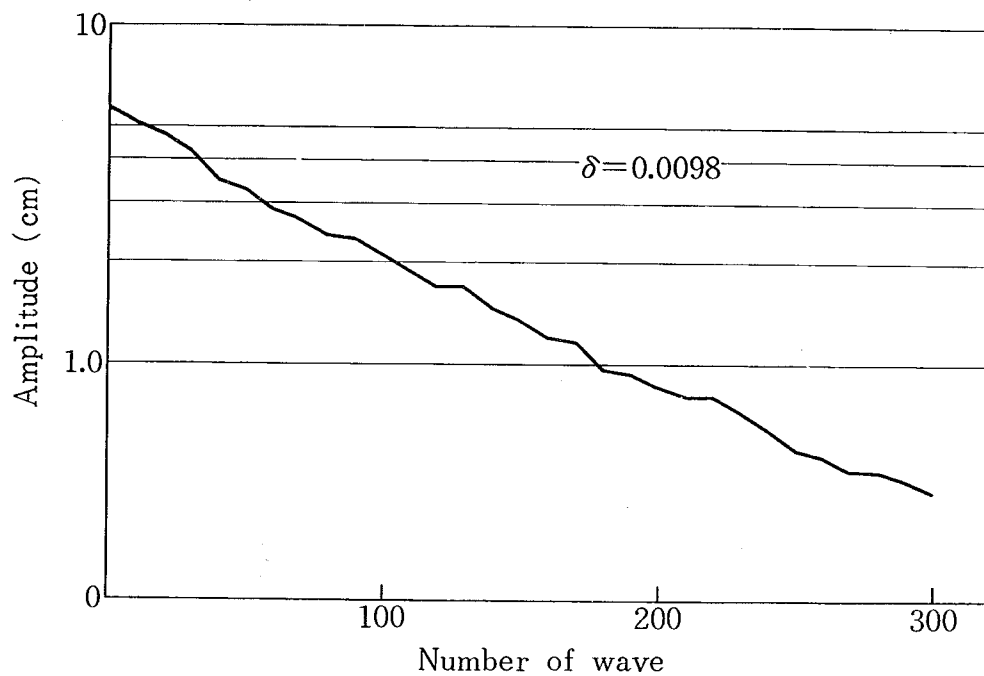


図-16 振巾波数曲線

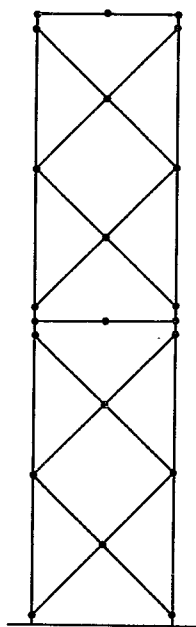
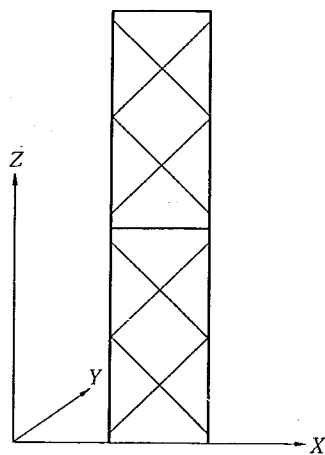
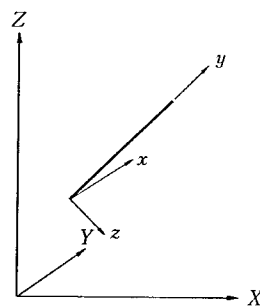


図-17 等価モデル

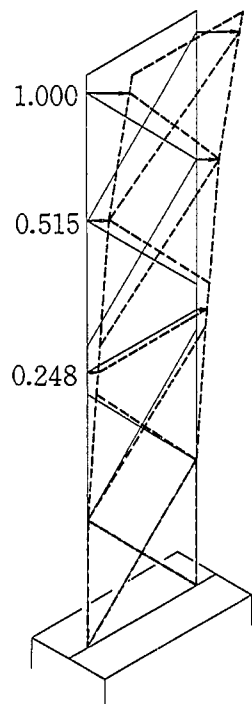


(a)

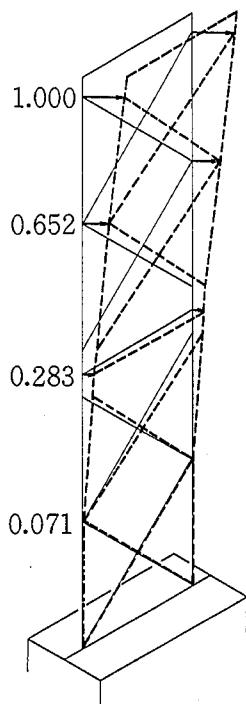


(b)

図-18 座標

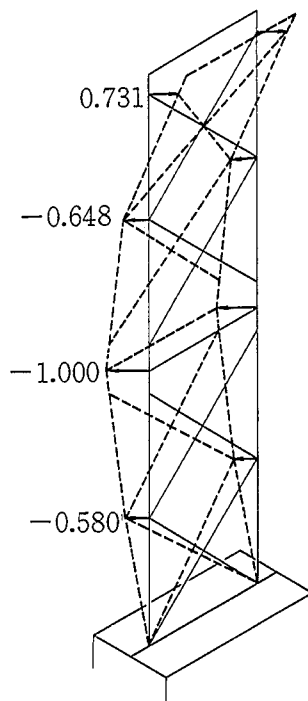


実測値
振動方向 橋 軸
振動数 0.26%

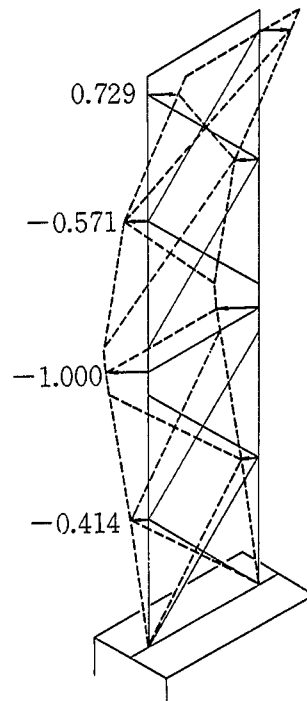


計算値
同 左
0.25%

図-19-1 振動数及び振動モード

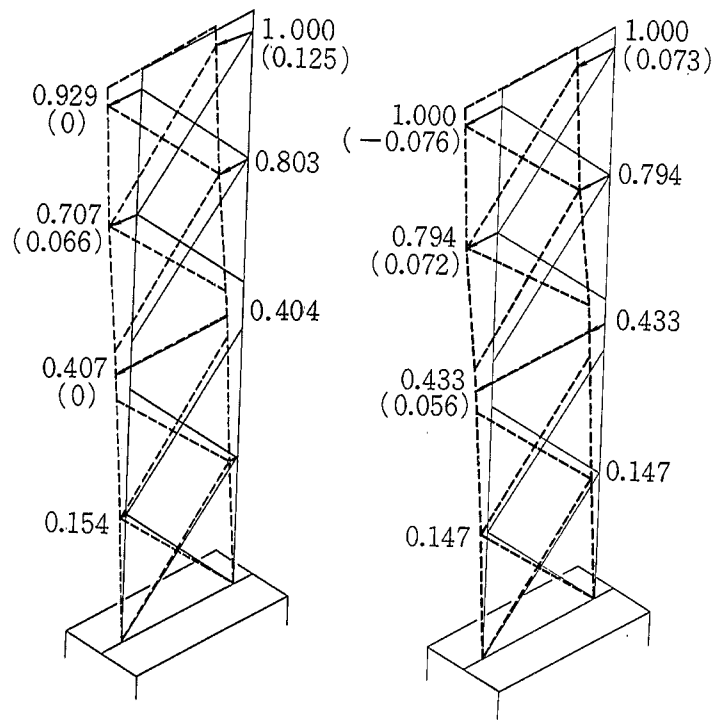


実測値
振動方向 橋 軸
振動数 1.40%



計算値
同 左
1.35%

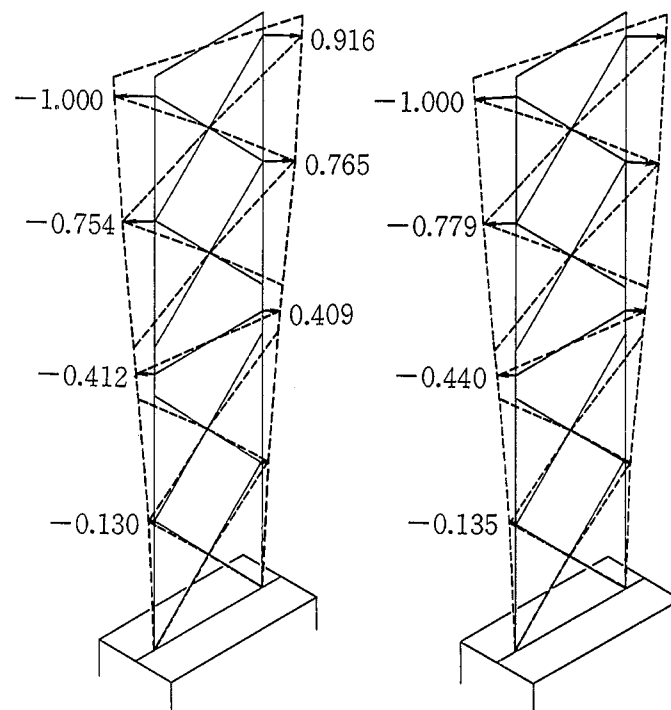
図-19-2 振動数及び振動モード



計測値
振動方向 橋軸直角
振動数 1.17%

計算値
同 左
振動数 1.18%

図-19-3 振動数及び振動モード



計測値
振動方向 振り
振動数 0.75%

計算値
同 左
振動数 0.74%

図-19-4 振動数及び振動モード

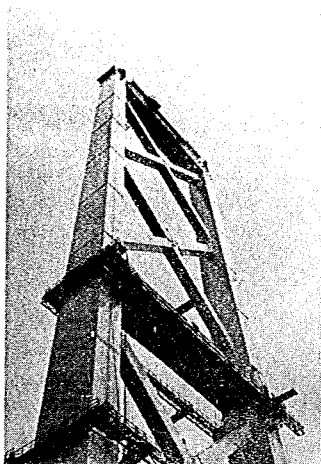


写真 1 主 塔

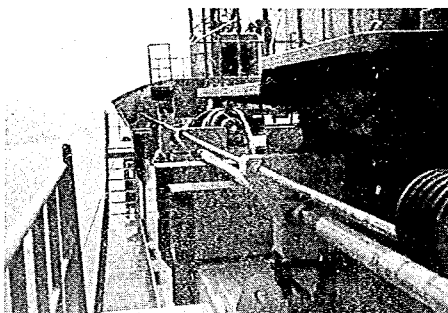


写真 2 橋軸方向加振のための起振機

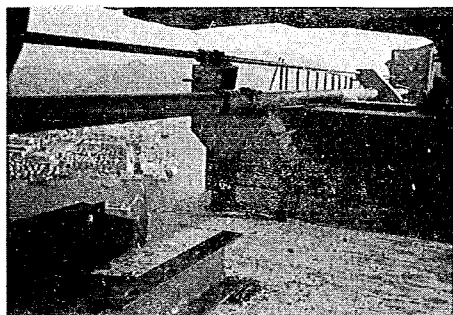


写真 3 橋軸方向加振のための起振機

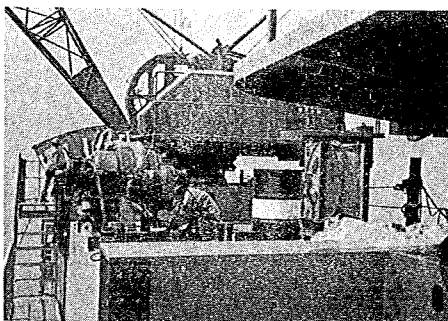


写真 4 橋軸直角方向励振のための起振機

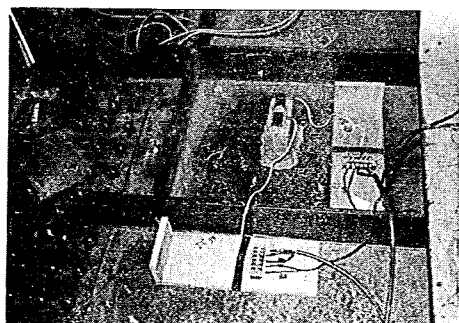


写真 5 サーボ型加速度計

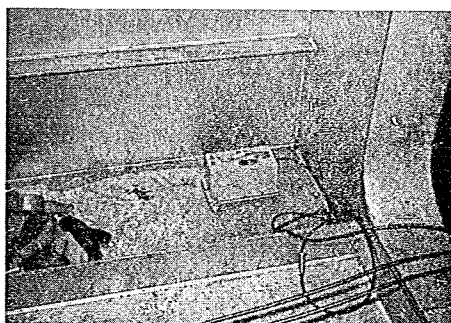


写真 6 動電型加速度計

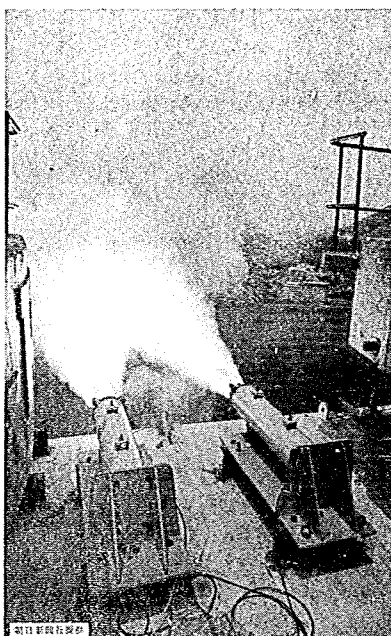
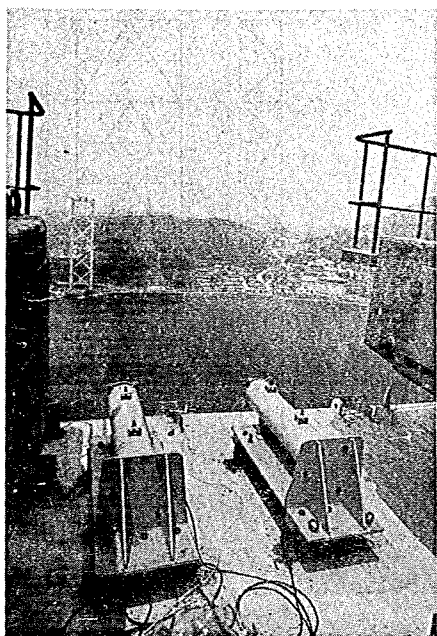


写真7 塔堤に設置されたロケット 写真8 ロケット噴射塔堤に設置されたロケット

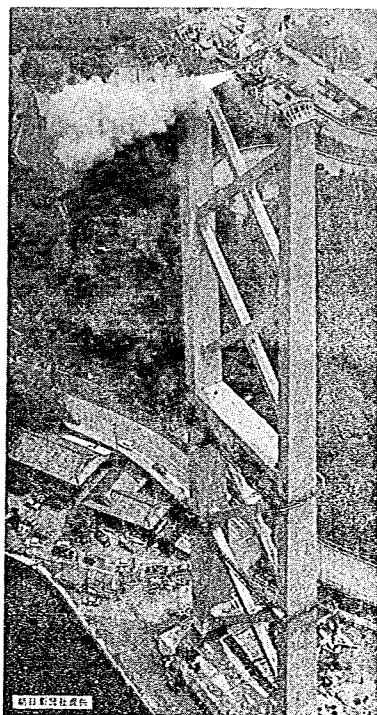
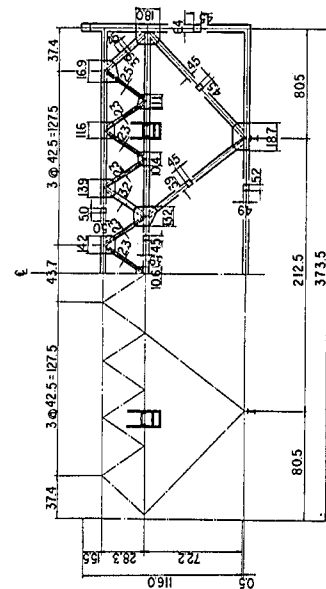
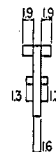
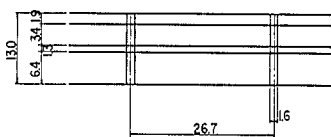
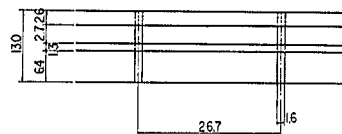


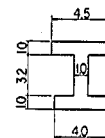
写真9 ロケットによる実験



中央分離帶



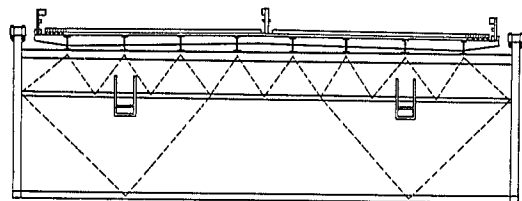
検査車ルール



- (注) 1. 構型の補強箇所構造は係員の指示に従うこと。
2. 不詳な事項は係員の指示を仰ぐこと。

图-22-2 模 型

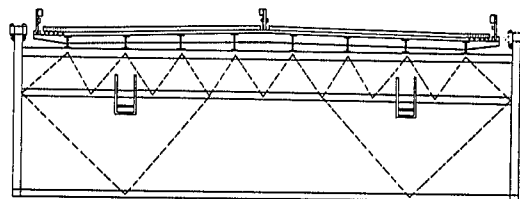
KK-F-71-10



$$T.C = S.C + 1.30^m$$

$$\delta_s = 0.05$$

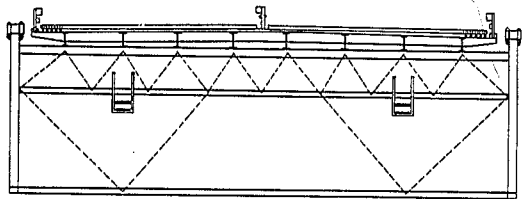
KK-F-71-20



$$T.C = S.C + 2.85^m$$

$$\delta_s = 0.05$$

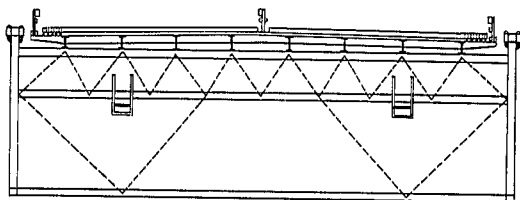
KK-F-71-11



$$T.C = S.C + 1.30^m$$

$$\delta_s = 0.05$$

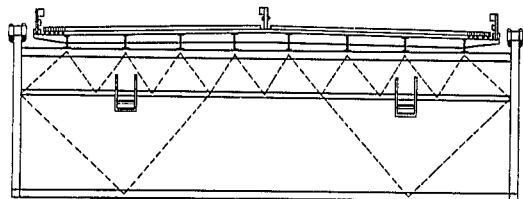
KK-F-71-21



$$T.C = S.C + 2.85^m$$

$$\delta_s = 0.03$$

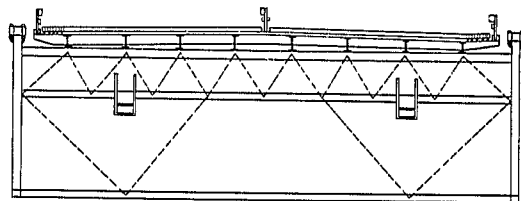
KK-F-71-12



$$T.C = S.C + 1.30^m$$

$$\delta_s = 0.05$$

KK-F-71-30



$$T.C = S.C + 2.08$$

$$\delta_s = 0.05$$

图-23 模 型

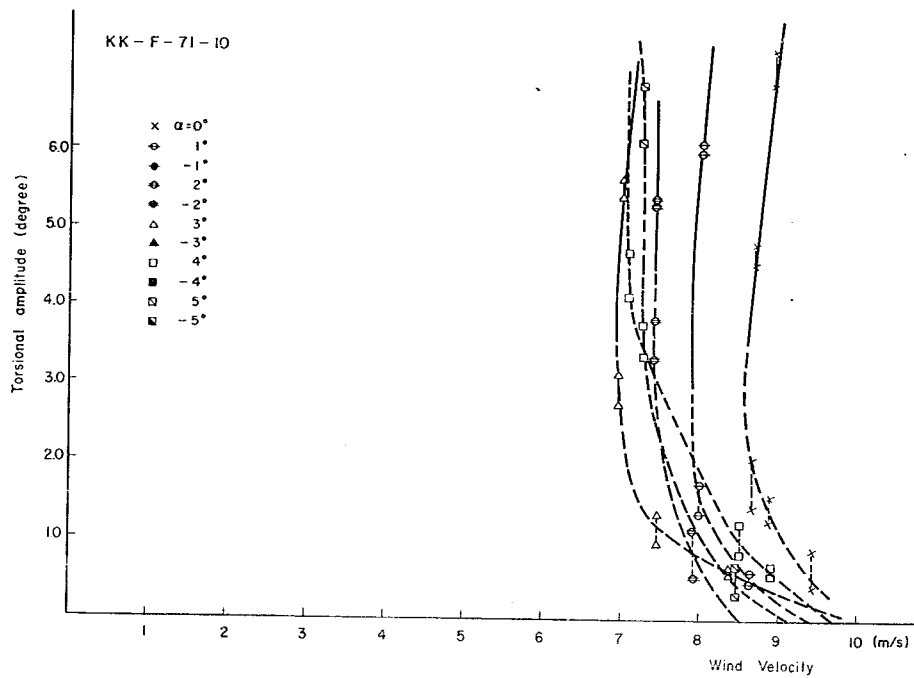


図-24-1 実験結果

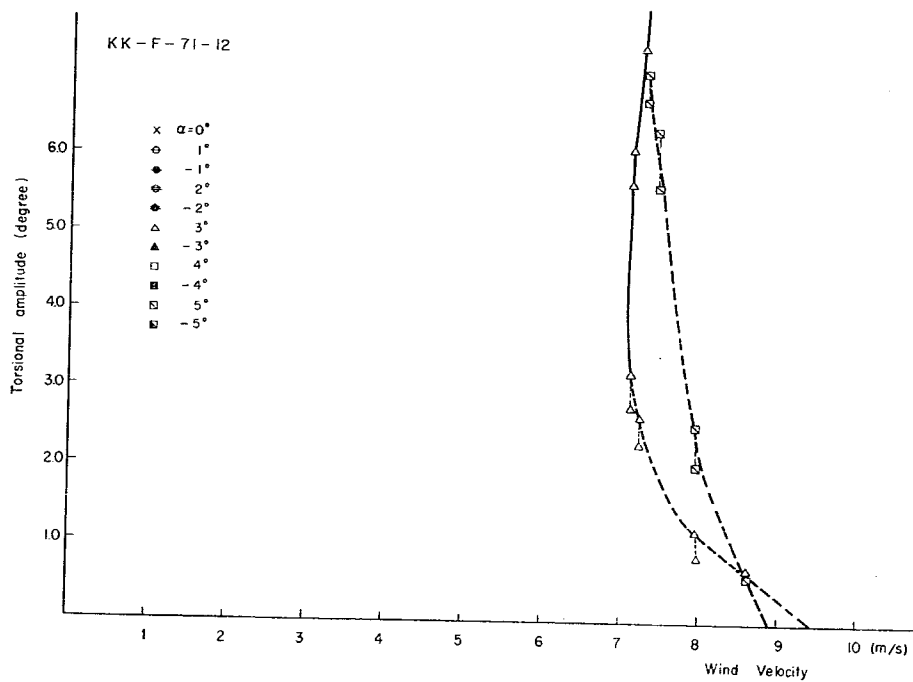


図-24-2 実験結果

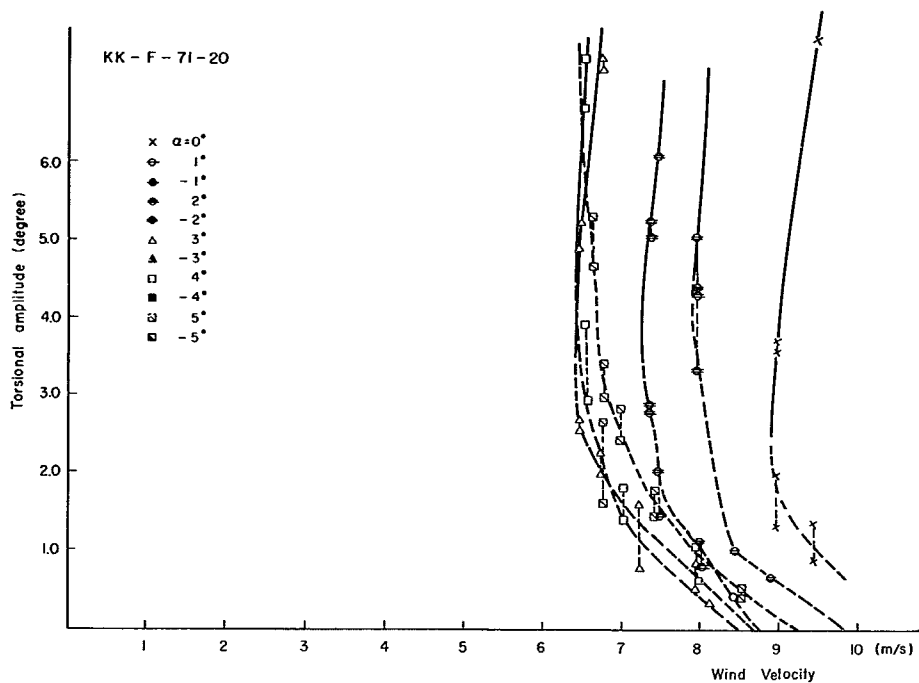


図-24-3 実験結果

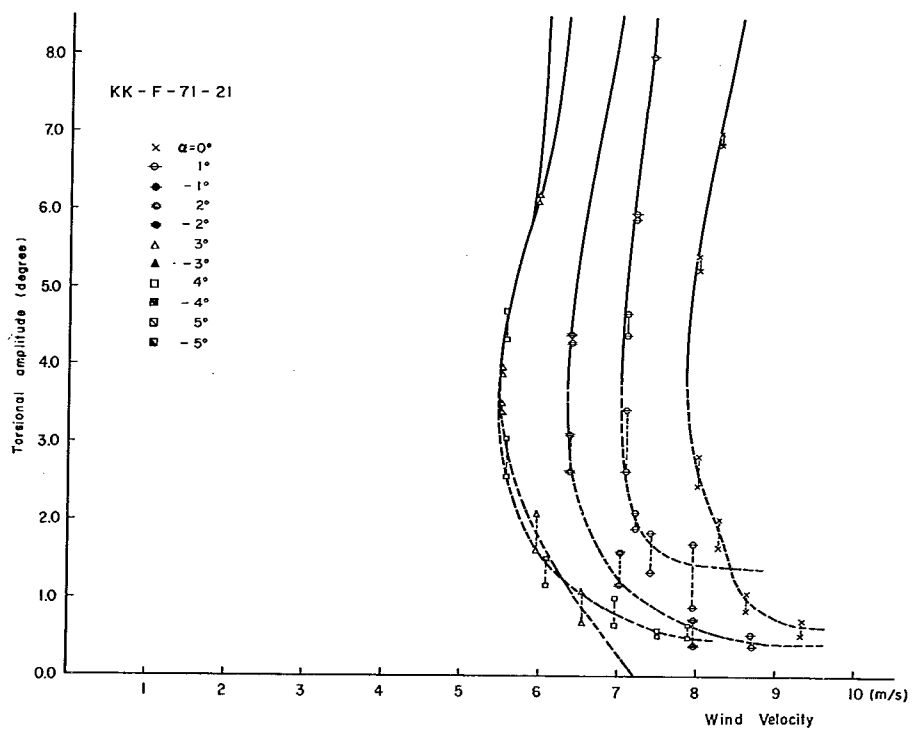


図-24-4 実験結果

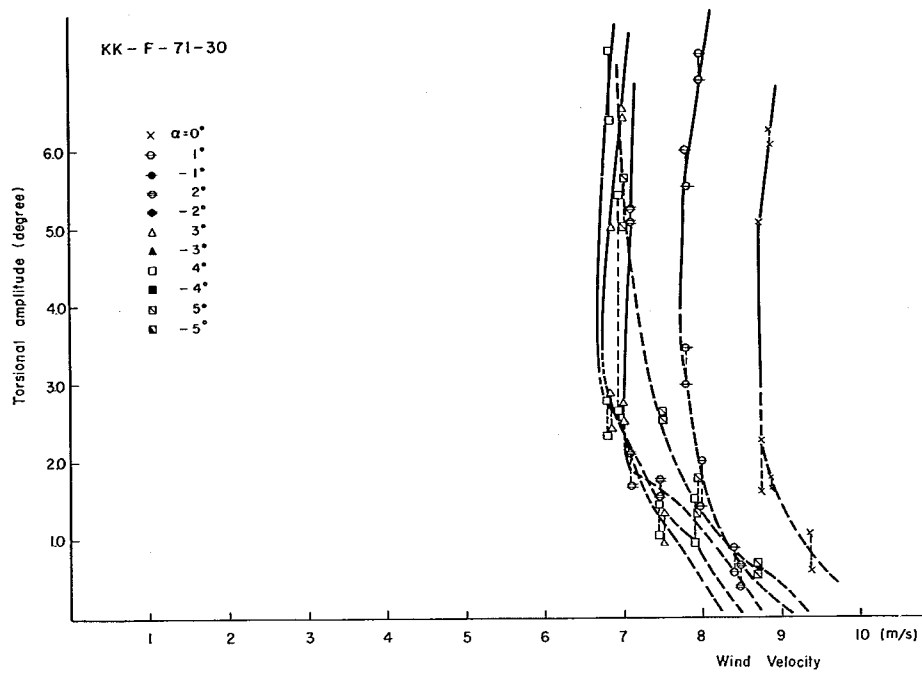
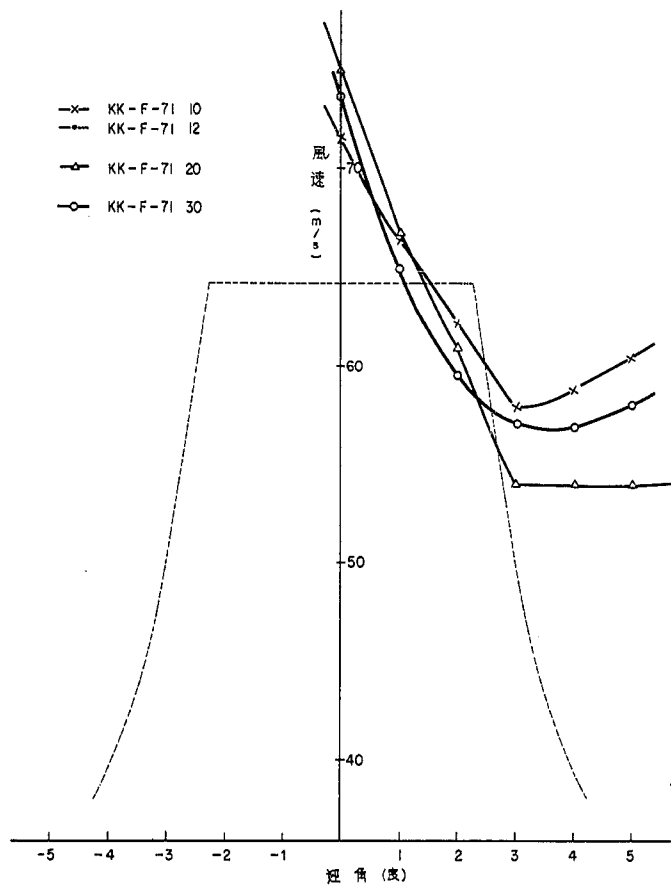
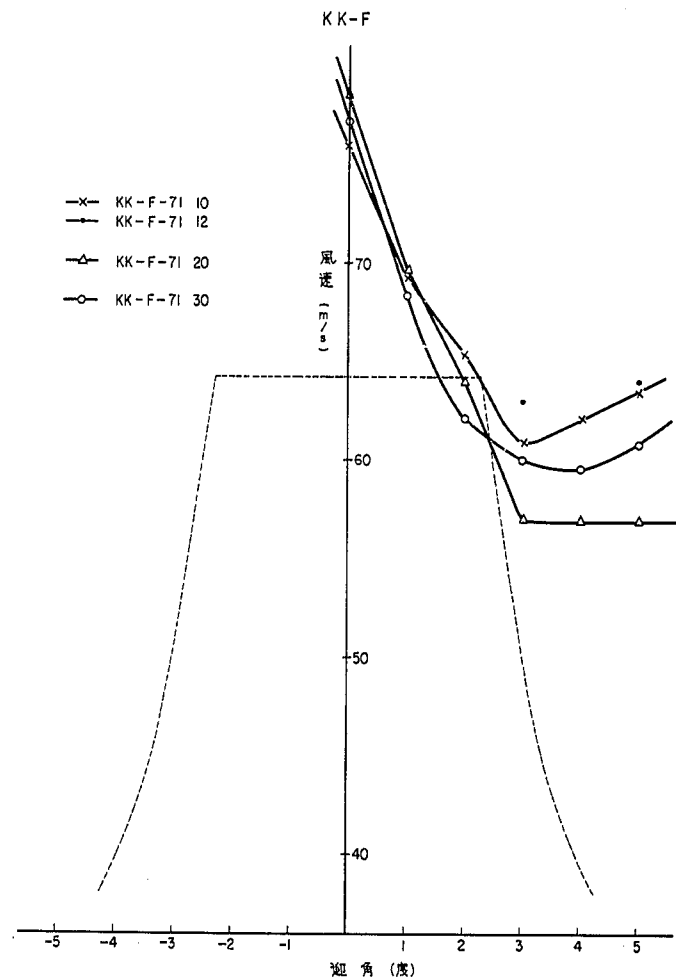


圖-24-5 實驗結果



图—24—6 实验结果



图—24—7 实验结果