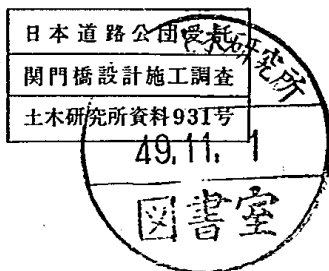


ST-12  
ST.Section



# 関門橋振動試験 報告書

昭和49年3月

建設省土木研究所  
構造橋梁部構造研究室

関門橋振動試験報告書

土木研究所資料第931号

昭和49年3(1974)

成田信之,

キーワード SUSPENSION BRIDGE, VIBRATION, FIELD TEST

要 旨

昭和48年9月25日から29日にかけて行った我国最大東洋一の長大吊橋である関門橋の振動試験をまとめたものである。内容は、大別して起振機、走行車両(ダンプトラック)および風による試験からなっている。



ま え が き

関門橋は昨年 1 1 月 1 4 日に開通式を迎え、本州・九州を結ぶ幹線道路として供用開始された。関係者の御努力に対して衷心より敬意を表する次第であります。

さて、本橋に関する調査研究業務は日本道路公団より「関門橋設計施工調査」の課題の下に土木研究所に委託され、下部構造、上部構造、耐風性、耐震性等についてそれぞれ関連の研究室が分担し実施して来た。そしてそれらの成果は既刊の「関門橋設計施工調査報告書」にとりまとめられている。構造研究室では主として、耐風性に関する調査を担当したが、その成果等は資料(1)~(13)に詳述されている。

本報告書は開通式の直前に実施された振動特性試験の結果をとりまとめたものである。試験は油圧サーボ起振機により本橋を励振し、共振々動数、共振モード、振動減衰を計測する振動試験、重量車輛による走行試験に大別される。また、試験の前半には風による振動も観測されたので、その結果についても紹介されている。最後に、本橋の強風・地震に対する応答を観測するために設置された長期観測システムの概要も紹介されている。

なお、本試験に先立って応力試験（静的載荷試験）も実施され別途報告されたことを付言しておく。

昭和 4 9 年 3 月

構造研究室長

成 田 信 之

# 目 次

## まえがき

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. 序 論 .....                 | 1  |
| 1.1 振動試験の目的 .....            | 1  |
| 1.2 関門橋上部工の概要 .....          | 2  |
| 2. 試験計画 .....                | 6  |
| 2.1 起振機による励振試験 .....         | 6  |
| 2.1.1 測定項目 .....             | 6  |
| 2.1.2 載荷方法 .....             | 6  |
| 2.1.3 計測方法 .....             | 11 |
| 2.2 車輛走行試験 .....             | 11 |
| 2.2.1 測定項目, 載荷方法, 計測方法 ..... | 11 |
| 3. 試験結果 .....                | 13 |
| 3.1 総 括 .....                | 13 |
| 3.2 共振々動数について .....          | 16 |
| 3.3 共振モードについて .....          | 16 |
| 3.4 構造減衰について .....           | 30 |
| 3.5 走行車輛応答について .....         | 36 |
| 3.6 風による振動について .....         | 64 |
| 4. 試験結果の考察 .....             | 71 |
| 4.1 上部構造の剛性について .....        | 71 |
| 4.2 上部構造の振動減衰について .....      | 75 |
| 4.3 既往の風洞実験結果との関係 .....      | 77 |
| 5. 結 論 .....                 | 78 |
| あ と が き .....                | 79 |
| 参 考 文 献 .....                | 80 |

## 写 真

関門橋の長期観測システム

# 図 目

| 図          | 名 称                            |    |
|------------|--------------------------------|----|
| 1          | 関門橋位置図 .....                   | 2  |
| 2          | 関門橋一般図 .....                   | 3  |
| 3          | 起振機一般図 .....                   | 9  |
| 4          | 起振機原理図 .....                   | 10 |
| 5          | 計測ダイアグラム .....                 | 12 |
| 6          | 測点の表示法・測器とりつけ位置図 .....         | 14 |
| 7-1~7-8    | 共振曲線 .....                     | 17 |
| 8-1~8-5    | 共振モード .....                    | 25 |
| 9-1~9-3    | 波数-振幅曲線 .....                  | 33 |
| 10-1~10-4  | 走行試験応答記録 .....                 | 37 |
| 11-1~11-5  | 車速と振動加速度の r. m. s. 値 .....     | 45 |
| 12-1~12-16 | 走行車輛による応答スペクトル .....           | 48 |
| 13         | 風による応答記録 .....                 | 65 |
| 14-1~14-4  | 風による応答スペクトル .....              | 67 |
| 15         | 断面二次モーメントと鉛直たわみ固有振動数 .....     | 72 |
| 16         | 死荷重と鉛直たわみ固有振動数 .....           | 73 |
| 17         | 補剛トラス高, 極慣性モーメントと捩れ固有振動数 ..... | 74 |
| 18         | 共振々動数と構造減衰 .....               | 76 |
| 19         | 迎角と限界風速 .....                  | 77 |
| 付-1        | 長期観測装置配置図 .....                | 85 |
| 付-2        | 長期観測装置系統図 .....                | 86 |

## 写 真 一 覧 表

|     |                                                                 |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 写真1 | 関門橋全景 .....                                                     | 81 |
| 写真2 | 起振機（油圧源，起振機本体，制御装置） .....                                       | 81 |
| 写真3 | 起振機本体（可動部重量 2 TON） .....                                        | 81 |
| 写真4 | 起振機制御装置 .....                                                   | 82 |
| 写真5 | 油圧源 .....                                                       | 82 |
| 写真6 | 加速度換振機（サーボ型，Endevco 社製） .....                                   | 82 |
| 写真7 | 計測機器（上段DCアンプ，下段左データレコーダ，<br>下段右DCキャンセラー，フィルター，電源） .....         | 83 |
| 写真8 | 計測機器（右側手前相関計類，右側奥電磁オシログラフ） .....                                | 83 |
| 写真9 | 計測機器（左よりシグナルコンディショナー，シンクロスコープ，<br>DCアンプ，電磁オシログラフ，データレコーダ） ..... | 83 |

## 表 目 次

| 表       | 名 称                        |    |
|---------|----------------------------|----|
| 1       | 関門橋基本諸元表 .....             | 5  |
| 2       | 固有振動数 .....                | 7  |
| 3       | 起振機主要諸元 .....              | 8  |
| 4       | 振動試験工程表 .....              | 13 |
| 5       | 測点と計測内容 .....              | 15 |
| 6-1~6-2 | 共振々動数と構造減衰 .....           | 31 |
| 7       | 車速と振動加速度の r. m. s. 値 ..... | 36 |
| 8       | 風洞実験資料 .....               | 77 |
| 付表 - 1  | 長期観測計器特性表 .....            | 84 |

## 1. 序 論

### 1.1 振動試験の目的

関門橋は我が国最大東洋一の支間長を有する6車線の道路吊橋である。若戸大橋が竣功してから数えて12年目の快挙である。

現在、長崎県では九州本島と平戸島間に支間長460mの平戸大島が建設中であり、また、本州四国連絡橋も近々着工される運びであり、我が国の長大吊橋建設の技術も世界的なレベルにまで向上したわけである。

さて、関門橋については、日本道路公団では架橋に当り多くの試験・実験・解析による事前調査に基づく詳細な設計と慎重な施工を実施してこの難工事を無事に完成させたが、その完成時を利用して静的載荷試験および動的加振実験を実施した。

云うまでもなく、橋梁設計は想定された荷重に対して構造物がその耐用期間を通じてその機能を十分に発揮できるよう考慮して行なわれるが、その際には幾つかの仮定が含まれるのが当然であろう。今回の動的加振試験では、本橋の共振々動数、共振モード、構造減衰などの資料が求められたが、これらはいづれも設計に関連して行なわれた試験・実験において重要な役割りを果たした事項である。特に耐風設計の見地からは、これらの項目の重要性は認識される。

また、本橋は我が国最大の吊橋であり、その外力に対する応答、例えば暴風時の挙動などを知ることが、本橋の維持・管理の面のみならず、将来の同種の長大吊橋の設計のために重要なことである。このような目的のため、本橋には暴風時・強震時の本橋の挙動を把握するための大規模な長期観測システムが設置されている。

このような事情から本実験の目的として、つぎの諸事項が採り上げられた。

- (1) 本橋の振動特性（共振々動数、共振モード、構造減衰）を実験的に求め、設計の妥当性を検証すること。
- (2) 重車輛の走行による吊構造部の応答特性を検討すること。
- (3) 長期観測システムによる対風・対震応答の記録およびその解析に必要な資料を収集すること。

これらの目的を達成するため、具体的には次の実験が計画された。

- (1) 中央支間1/4点または1/2点に設置した起振機によって励振した際の吊構造部のたわみ、または、ねじれ振動を橋梁各部に展開した加速度換振器により検出し、共振々動数、共振モード、構造減衰を求めること。
- (2) 重量貨物自動車が行った際の吊構造部の応答を測定し、車輛台数、走行速度の影響を求

めること。

- (3) 上記実験に際して、長期観測システムによる記録の収集も同時に行ない、観測システムの作動の確認を行なうこと。

この種の大規模吊橋に関する振動実験の例は内外で極めて少なく、貴重な資料を提供するものと期待された。

## 1.2 関門橋上部工の概要

関門橋は図-1に見られるように関門海峡を越えて下関市みもす川町と北九州市門司区を結ぶ我が国最大の橋梁である。3径間2ヒンジトラス補剛吊橋である本橋は、次の特色を有している。

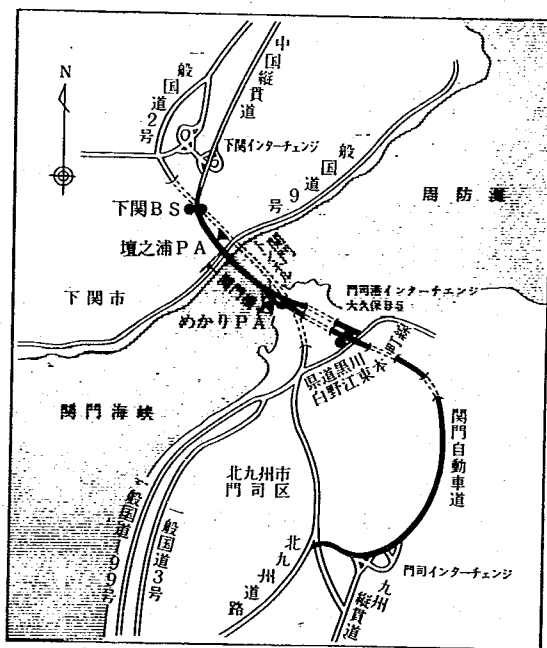


図-1 関門橋位置図

- (1) 主ケーブルにはプレファブストランドが用いられた。
- (2) 軽量コンクリートを用いた鋼格子床版を採用することにより、仕上り精度の向上、工期の短縮を計った。
- (3) 数次にわたる風洞実験を実施して得られた吊橋構造部断面を採用した。その特徴は補剛トラス上弦材の高度と路面高がほぼ同一面にあることである。

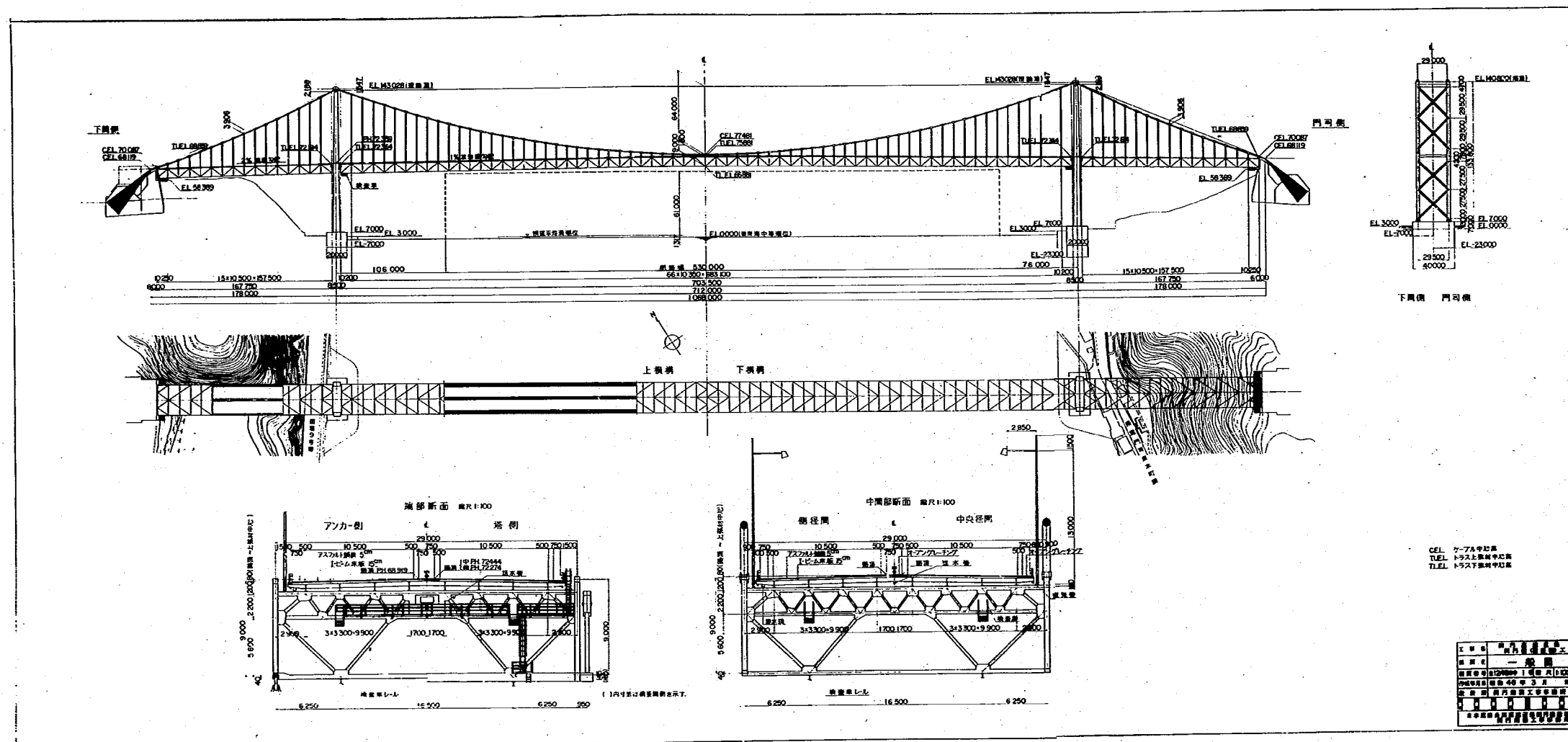


図-2 関門橋一般図

(4) 地形の制約から、側径間長が中央径間長に比して短い。

本橋の構造一般図を図-2に、また、基本諸元を表-1に示す。それらによると、本橋は中央径間長712m、両側径間長178m、吊橋部全長1,068m、主塔高は134mである。道路車線数は上下各3車線、補剛トラスは高さ9m、主構間隔は29m、これを支える主ケーブルは直径66.7cmで平行線ケーブルを採用している。

表-1 関門橋基本諸元表

| 区 分               | 単 位                         | 中央径間              | 側径間    |
|-------------------|-----------------------------|-------------------|--------|
| 径 間 長             | m                           | 712.0             | 178.0  |
| 支 間 長             | m                           | 703.5             | 167.75 |
| 垂 距               | m                           | 64.0              | 39.06  |
| 補剛トラス高            | m                           | 9.0               |        |
| トラス間隔(ケーブル間隔)     | m                           | 29.0              |        |
| 補剛トラスパネル長         | m                           | 10.35             |        |
| 上下横構パネル長          | m                           | 20.7              |        |
| 死荷重(全体)           | t/m/br.                     | 24.172            | 25.946 |
| "(ケーブル)           | t/m/br.                     | 4.378             |        |
| 断面積(ケーブル)         | m <sup>2</sup> /br.         | 0.559             |        |
| "(弦材)             | m <sup>2</sup>              | 0.0380            | 0.0320 |
| "(斜材)             | m <sup>2</sup>              | 0.0185            |        |
| "(上下横構)           | m <sup>2</sup>              | 0.0232            |        |
| ケーブルヤング率          | t/m <sup>2</sup>            | $2.0 \times 10^7$ |        |
| 補剛トラス断面2次モーメント    | m <sup>4</sup>              | 2.916             |        |
| 極慣性モーメント(ケーブルを含む) | t·m·sec <sup>2</sup> /m/br. | 276.60            |        |

後にも述べるように、本橋には本格的な長期観測システムが設置されており、地震・強風に対する本橋の応答は全自動的に観測され、記録される。また、このシステムによるモニターは管理事務所においても表示され、交通制御の資料を提供している。

## 2. 試験計画

試験は起振機による励振試験および重量車輛による走行試験に大別される。これらは当初より計画されたものであったが、励振試験の前半においてかなり強い風雨に見舞われたため、励振試験が行なえず、風に対する応答が計測された。以下に各試験における載荷方法、測定項目、計測方法等について説明する。

### 2.1 起振機による励振試験

#### 2.1.1 測定項目

この試験では上部構造の動的特性を求めることに主眼が置かれた。すなわち、固有振動数、固有モード、構造減衰の計測である。耐風設計の面からは、鉛直たわみおよび振れの低次振動が重要であり、低次振動を中心に可能な限り高次振動まで計測範囲を拡げるよう計画した。

#### 2.1.2 載荷方法

動的特性を求めるためには、何らかの手段を用いて対象構造物を励振する必要がある。そのため、従来は起振機、ロケットなどの特別な手段を用いて励振した。若戸大橋における回転式起振機の使用<sup>(14)</sup>、ノルウェーの A. Selberg によるロケットによる吊橋の加振実験<sup>(15)</sup>などはその例である。一方、これらの人為的な手段によらず、一般交通あるいは風による構造物のランダム応答を観測し、最近の進んだ電子計算機を駆使して統計処理により動的特性を求めようとする試みも行なわれている。米国の Newport 橋などで行なわれた Ambient Vibration Survey (AVS 法)<sup>(16)</sup>などはその例である。

前者は制御された加振力が得られる利点がある反面、低振動数領域において大出力の起振装置を製作するには経費が嵩むという欠点がある。これに対して、後者は簡易な方法ではあるが、データ処理手法による結果の相違が大きく、特に構造減衰の計測のためには不十分であると思われる。

今回の試験計画立案に際して AVS 法による予備試験を本橋を含めて数橋について実施したが、十分満足のゆく結果は得られなかった<sup>(17)</sup>。そこで、起振機による加振を行なうものと決定した。

鉛直方向に正弦的に変動する加振力を発生させる起振機の原理としては 1 組の不均衡重錘を水平軸のまわりに逆方向に回転させる方式、重錘を上下に運動させる方式などが考えられるが、前者は低周波領域で安定した出力を得るためには、重力加速度の影響を除去するために、高級な電動機の制御機構あるいは大容量のフライホイール（はずみ車）を必要とする。そこで、今回の試験では周波数の厳密な制御、重力に抗した重錘の正弦運動の確保などを実現するために、油圧サ

表 - 2 固有振動数

| 振動モード     | 対称性 | 次数 | 計算値    |         | 注1.<br>80%共振時間(sec)<br>加速度(gal) | 実測値    |         | 実測周波数<br>計算周波数 | 備考                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|-----|----|--------|---------|---------------------------------|--------|---------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |     |    | 周波数(%) | 周期(sec) |                                 | 周波数(%) | 周期(sec) |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 鉛直たわみ     | 対称  | 1  | 0.200  | 5.00    | $\frac{273}{2.9}$               | 0.212  | 4.72    | 1.06           | 注1.<br>対称モード、逆対称モードに対して、それぞれ $\frac{1}{2}$ 点、 $\frac{1}{4}$ 点にFKgまたはMKg・mの鉛直力または偶力を作用させた時に80%共振振幅に到達するのに要する時間およびその時の加速度を示す。その際系の構造減衰は $\delta = 0.03$ と仮定し、また、Fは片側起振機の重錘を2 tonとし、振幅は0.15 Hzで50cm、1.0 Hzで5 cmとし、その間の周波数に対応する振幅は直線的に変化するものと仮定した。<br>また、Mは $M = F(\text{ton}) \times 29(m)$ とした。 |
|           |     | 2  | 0.270  | 3.70    |                                 | 0.298  | 3.36    | 1.10           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |     | 3  | 0.429  | 2.33    |                                 | —      | —       | —              |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |     | 4  | 0.528  | 1.89    |                                 | 0.570  | 1.75    | 1.08           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |     | 5  | 0.914  | 1.09    |                                 | 0.918  | 1.09    | 1.00           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           | 逆対称 | 1  | 0.152  | 6.58    | $\frac{364}{1.9}$               | 0.180  | 5.56    | 1.18           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |     | 2  | 0.375  | 2.67    |                                 | —      | —       | —              |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           |     | 3  | 0.705  | 1.42    |                                 | 0.740  | 1.35    | 1.05           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 注2.<br>振れ | 対称  | 1  | 0.384  | 2.60    | $\frac{138}{2.5}$               | 0.387  | 2.58    | 1.01           | 注2.<br>Bleichの方法による、トラス高は7.8 mと仮定して算出。                                                                                                                                                                                                                                                        |
|           |     | 2  | 0.766  | 1.31    |                                 | 0.717  | 1.39    | 0.94           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|           | 逆対称 | 1  | 0.492  | 2.03    | $\frac{123}{2.0}$               | 0.472  | 2.12    | 0.96           |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

ーボ機構を有する重錘上下式による大型起振機を試作し用いることとした。

起振機の規模および性能を定めるために以下に述べる検討を行なった。すなわち、試験では耐風性に関連する低次振動に主眼をおいて、固有振動数を鉛直たわみ、ねじれ共最低次より 1.0 Hz までの範囲に含まれるものを Bleich の方法により求め、最低次モードに対応する共振試験を実施した際の応答振幅を計算より求めた。その際、着力点是对称振動については中央径間  $\frac{1}{2}$  点、逆対称振動に対しては中央径間  $\frac{1}{4}$  点とし、加振力は鉛直たわみ振動に対しては 2 ton、振れ振動に対しては  $2 \times 29 \text{ ton} \cdot \text{m}$  とし、構造減衰は安全側を考慮して  $\delta = 0.03$  と仮定した。また、一方、低周波数での試験故、共振の 80% の振幅に到達するに要する時間を求めて、試験計画立案の参考資料とした（表 - 2 参照）。

起振機の規模は、入手し得るピストンの最大ストロークを 1.0 m と決め、また油圧源容量から、懸架する重錘の最大値は 2.00 ton とした。試験に用いた油圧サーボ機構を有する起振機の一般図、原理図および主要諸元を図 - 3、図 - 4 および表 - 3 に掲げる。

表 - 3 関門橋起振機主要諸元

|         |                                                     |                        |
|---------|-----------------------------------------------------|------------------------|
| 起振機     | 油圧シリンダによる重錘                                         | 横行方式(2基のシリンダによる相互駆動方式) |
| 周期      | 0.15 Hz ~ 1 Hz                                      |                        |
| ストローク   | 1 m ~ 0.1 m                                         |                        |
| 周期設定    | 超低周波函数発生器(NF回路設計ブロック製FG-121)による                     |                        |
| ストローク設定 | 超低周波函数発生器およびデジタルボルトメータによる                           |                        |
| 発生波型    | 正弦波                                                 |                        |
| 駆動方式    | 油圧によるサーボ駆動方式                                        |                        |
| 重錘重量    | 最大2,000Kg(50Kg重錘40枚)但しシリンダ1基当り                      |                        |
| ストローク検出 | ポテンシオメータによる                                         |                        |
| 油圧ユニット  |                                                     |                        |
| 油圧ポンプ   | 定容量型ベーンポンプ単段式 250.1F-28 × 2台                        |                        |
|         | 吐出し量 142ℓ/min × 2, 但し70Kg/cm <sup>2</sup> , 60Hzのとき |                        |
| 使用油容量   | MOBIL DTE OIL 11GHT 900ℓ                            |                        |
| 駆動ヒートル  | 22KW 6P × 2台                                        |                        |
| 油圧シリンダ  | 内径100mm, 推力5,500Kgおよび4,390Kg(ロッド側)                  |                        |
| 標準使用油圧  | 70Kg/cm <sup>2</sup>                                |                        |
| オイルクーラー | ラジエータ型                                              |                        |
| 配管材料    | ユニット筐体内配管細目ナシ高圧用配管鋼管                                |                        |
|         | その他 高圧シンフレックスチューブ                                   |                        |

圖 - 3 起振機一般圖

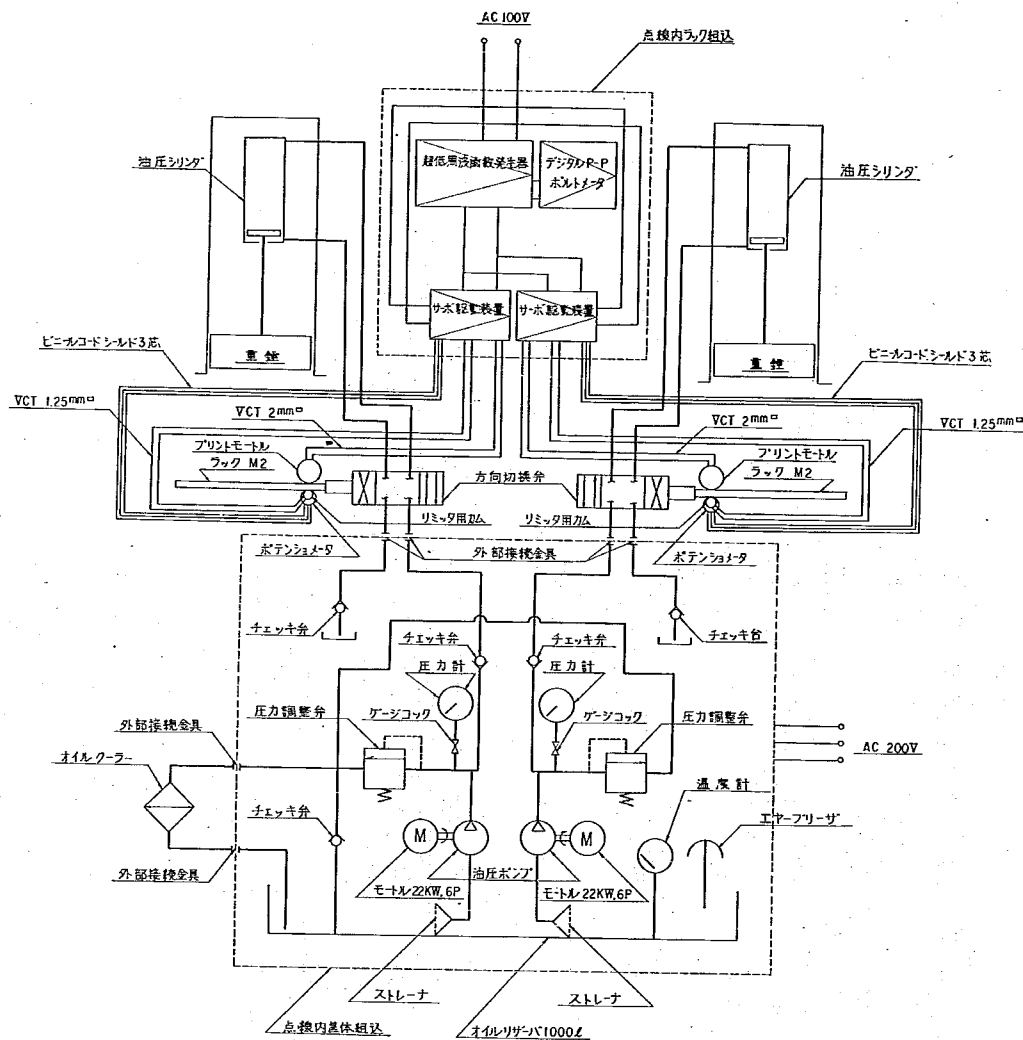


図 - 4 起振機原理図

### 2.1.3 計測方法

上述のように起振機による励振により得られる吊構造部の振動は微小であり、これを正確に記録するためには計測装置に十分な精度が要求される。予備的な計算では得られる振動加速度はたかだか数 gal 程度と予想されたため、換振器としては現状では最も精度が高いとされているサーボ型加速度計を用いることとした。また、低周波濾波器（バターワース型、遮断周波数 5 および 10 Hz）を挿入し、雑音成分を除いた。記録は無現像オシログラフでモニターすると同時にデータレコーダに収録した。本橋の規模が大きいので、信号の無線送信も考慮されたが、雑音の除去に不安があり見送られた。そこで、記録はすべてキャプタイヤコードで記録器（下関側主塔部および中央径間門司側 4 点）まで導かれた。また、記録の同期をとるため、両記録器間には同期信号を記録した。

計測ダイアグラムを図 - 5 に示す。各試験における計測方法は次の通りである。

#### (i) 共振試験

予備試験においては起振機の周波数を除々に変化させながら、共振点と思われる大略の周波数を求める。そして、本試験においては求められた共振点を含む狭い周波数領域で加振々動数を変えて正確な共振曲線を求める方法をとった。

#### (ii) 共振モード試験

上記の共振試験で求められた共振々動数で加振を続けながら、橋面上を加速度換振器をトラバースさせ、共振モードを求めた。その際、1 台の換振器は記録の正規化の信号とするために固定した。

#### (iii) 構造減衰試験

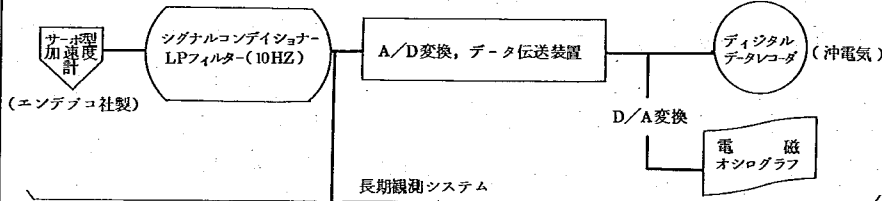
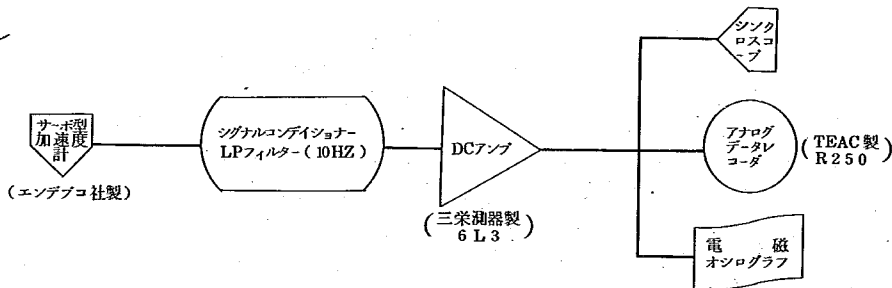
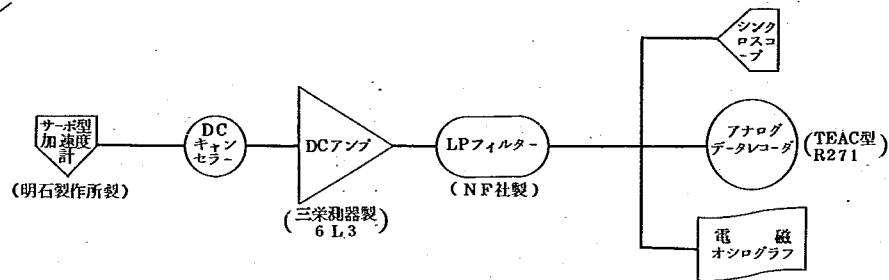
共振状態で起振機を急速停止させ、発生する自由振動の記録より対数減衰率を求めた。

## 2.2 車輦走行試験

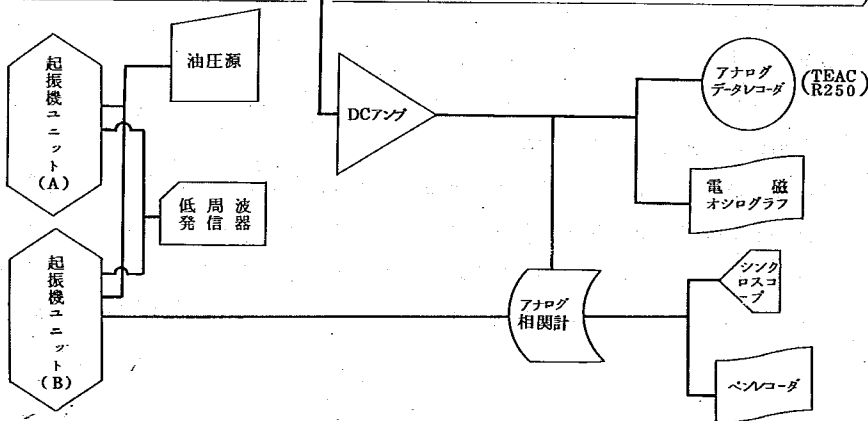
### 2.2.1 測定項目、載荷方法、計測方法

重量約 20 ton のダンブトラック 2 台又は 4 台を下りの内側車線または上下の内側車線に走行させ、吊構造部各位置での応答を記録した。また、走行速度は 40, 50, 60, 70 km/hr の 4 段階とした。走行方向は下関より門司に向けて走行するものとした。また、吊橋各点の走行通過時のマーカーを同時記録し、正確な速度の算出の参考資料とした。計測は起振機試験と同様の計測方法を用いた。

計測ステーション A (試験車・門司側地点)



計測ステーション B (下関側主塔)



下関北管理事務所

注: 各記録器には同期信号を同時記録

図-5 計測ダイアグラム

### 3. 試験結果

#### 3.1 総括

試験は表-4に示したように昭和48年9月25日から29日までの5日間にわたって行なわれた。試験の第2日は風雨に見舞われ出鼻を挫かれたが、無事に全工程を終了し、一応所期の目的を達成することが出来た。

表-4 関門橋振動試験工程一覧

|              | 起振機による加振試験                        | 車 輛 走 行 試 験                            | 備 考                                                                  |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 9月<br>23日(日) |                                   |                                        | 資材搬入                                                                 |
| 24日(月)       | 起振機搬入組立工事<br>(下関側1/4点)            |                                        |                                                                      |
| 25日(火)       | 計測器展開, 実験準備                       |                                        |                                                                      |
| 26日(水)       | 強風のため本実験中止                        |                                        | 強風による応答観測資料を収集                                                       |
| 27日(木)       | 下関側1/4点載荷による鉛直<br>たわみ振れ試験実施       |                                        | 夜間に起振機を1/4点より<br>1/2に移動                                              |
| 28日(金)       | 中央径間1/2点載荷による<br>鉛直たわみ試験実施        |                                        |                                                                      |
| 29日(土)       | 中央径間1/2点載荷による振れ<br>試験を実施<br>起振機撤去 | 重量車輛(約20 ton)2台<br>または4台による走行試験を<br>実施 | 起振機試験は2:00 p. mまで<br>に完了し, 起振機を撤去<br>走行試験は4:00 p. mより<br>6:00 p. mまで |
| 30日(日)       |                                   |                                        | 後片付け, 資材搬出                                                           |

以下に各試験で得られた資料を紹介するが、ここでは測点の表示方法と加速度換振器の取り付け位置を説明しておく。測点は図-6に示すように下関側よりハンガー位置に沿って通し番号を付し、更に、東側(E)と西側(W)に分けるものとする。現場試験に用いた長期観測用の換振器には、記号Lを付し、現場試験用の臨時の換振器と区別する。したがって、換振器の取り付け位

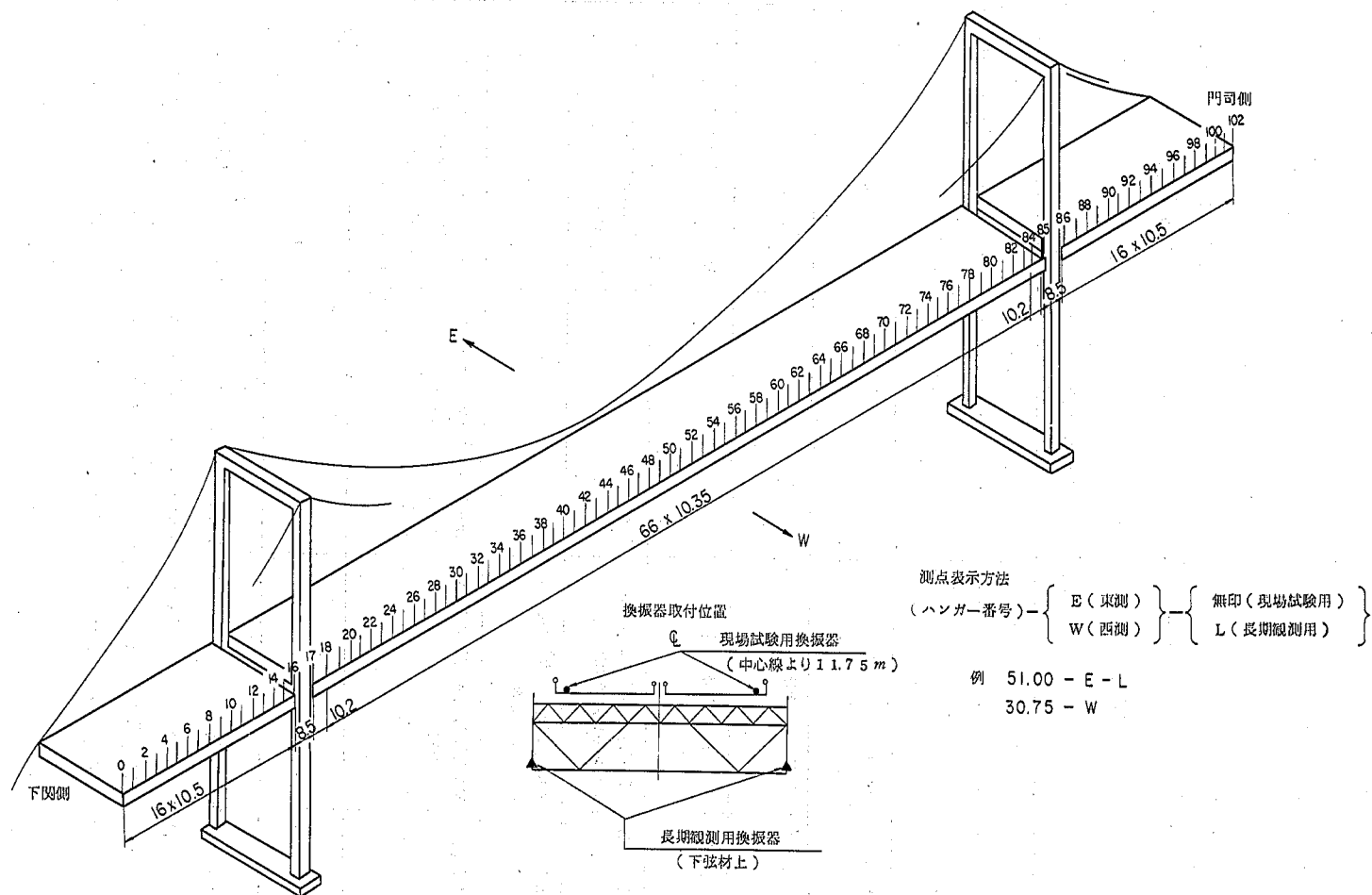


図-6 測点の表示法・測器とりつけ位置図

表 - 5 測定点と計測内容

| 測 点     | 鉛直たわみ振動 (Hz) |       |       |       |       |       | 振れ振動 (Hz) |       |       | 走行試験 | 風による<br>振 動 | 備 考                                                                                      |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | 0.212        | 0.298 | 0.570 | 0.918 | 0.180 | 0.740 | 0.387     | 0.717 | 0.472 |      |             |                                                                                          |
| 8-E     | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           | (注)<br>○ 起振機(1/2点設置)により顕著な振動を観測<br>× 起振機(1/2点設置)により顕著な振動を観測<br>△ 走行試験時測定点<br>▽ 風による振動測定点 |
| 12-E    | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 35-W-L  | ×            | ○×    | ×     | ×     | ○     |       | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 51-E    | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 51-E-L  | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 51-W    | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ○×    | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 51-W-L  | ×            | ○×    | ×     | ×     |       |       | ×         | ○×    | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 52-E    |              |       |       |       |       |       | ×         | ×     |       |      |             |                                                                                          |
| 54-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 55.25-E | ×            | ○     | ×     | ×     | ○     | ○     | ×         | ×     |       | △    | ▽           |                                                                                          |
| 55.25-W |              |       |       |       |       |       |           |       |       | △    |             |                                                                                          |
| 57-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 58.5-E  | ×            |       | ×     | ×     | ○     | ○     | ×         | ×     | ○     |      |             |                                                                                          |
| 59.5-E  |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      | ▽           |                                                                                          |
| 61.5-E  |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 63.75-E | ×            | ○×    | ×     | ×     | ○     | ○     | ×         | ×     | ○     |      | ▽           |                                                                                          |
| 64.75-E |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 66-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 68-E    | ×            | ○×    | ×     | ×     | ○     | ○     | ×         | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 68-W    |              | ○     |       |       | ○     | ○     |           |       | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 72.25-E | ×            | ○×    | ×     | ×     | ○     | ○     | ×         | ×     | ○     |      | ▽           |                                                                                          |
| 73-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 76.5-E  |              | ○×    | ×     | ×     | ○     | ○     |           | ×     | ○     | △    | ▽           |                                                                                          |
| 76.5-W  |              |       |       |       |       |       |           |       |       | △    |             |                                                                                          |
| 78-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 80.75-E |              | ×     | ×     | ×     |       |       |           | ×     |       |      |             |                                                                                          |
| 83-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 92-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       |      |             |                                                                                          |
| 93-E    | ×            | ×     | ×     | ×     |       |       |           | ×     |       |      |             |                                                                                          |
| 94-E    |              |       |       |       |       |       |           |       |       | △    | ▽           |                                                                                          |

置，種別は次のように表示される。

#### 表示方法

ハンガー番号 - {  $\begin{matrix} \text{E (東側)} \\ \text{W (西側)} \end{matrix} \} - \{ \begin{matrix} \text{無印 (現場試験用)} \\ \text{L (長期観測用)} \end{matrix} \}$

例えば，51.00-E-L は中央径間 $\frac{1}{2}$ 点東側に取り付けられた長期観測用換振器を表わし，また，34.00-W は中央径間下関側 $\frac{1}{4}$ 点の西側にとりつけた現場試験用換振器を表わす。各測器の取り付け位置は，図-6にも見られるように長期観測用については下弦材上，現場試験用は外側グレーティングの直近内側（中心線より11.75m離れた位置）に取りつけられた。得られた資料の概略を表-5にとりまとめておく。

### 3.2 共振々動数について

主要点で得られた共振曲線を図-7に示す。共振曲線の正規化は起振機の出力を1台当り150Kgに統一して行なったものである。その際共振点の違いは無視した。得られた共振々動数は表-2に見られるように鉛直たわみ振動6ヶ，捩れ振動3ヶの合計9ヶであった。勿論測定位置による共振々動数に相異はないが，対称2次鉛直たわみ振動では，その共振々動数が0.298Hzと0.295Hzの何れかを決め難かったが，後に述べる構造減衰値をみると，0.298Hzの場合の減衰値の方が安定しており，この値が正しいものと判断される。

鉛直たわみ振動対称3次および逆対称2次に対応する共振々動数は，今回の試験では励起できなかったが，その理由は明確ではない。

実測値を計算値と比較すると鉛直たわみ振動の場合，いづれも実測値の方が計算値より大きく，その差は低次程大きいようである。また，捩れ振動では対称1次振動はトラス高を7.8mと仮定した計算値に殆んど等しい。しかしながら，高次振動では4~6%低い。なお，計算値は表-1の諸元により鉛直たわみ振動，捩れ振動のいづれ共センタースティの効果は無視した膜理論により算出したものである。

### 3.3 共振モードについて

共振々動数を求め得た9ヶの固有振動数に対応する共振モードを図-8に掲げる。図中の○印および△印の振幅は長期観測計器により得られたもので，捩れ振動については腕の長さを補正して記入してある。また，実線は理論値を表わす。これらによると吊構造部の共振モードの形状はほぼ理論値に近いものと判断される。

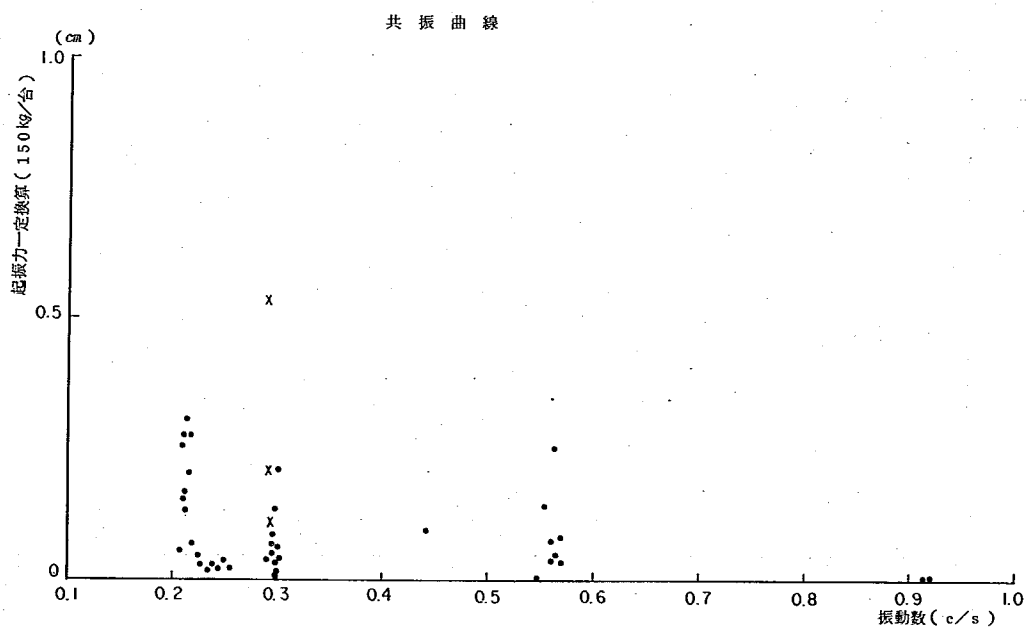
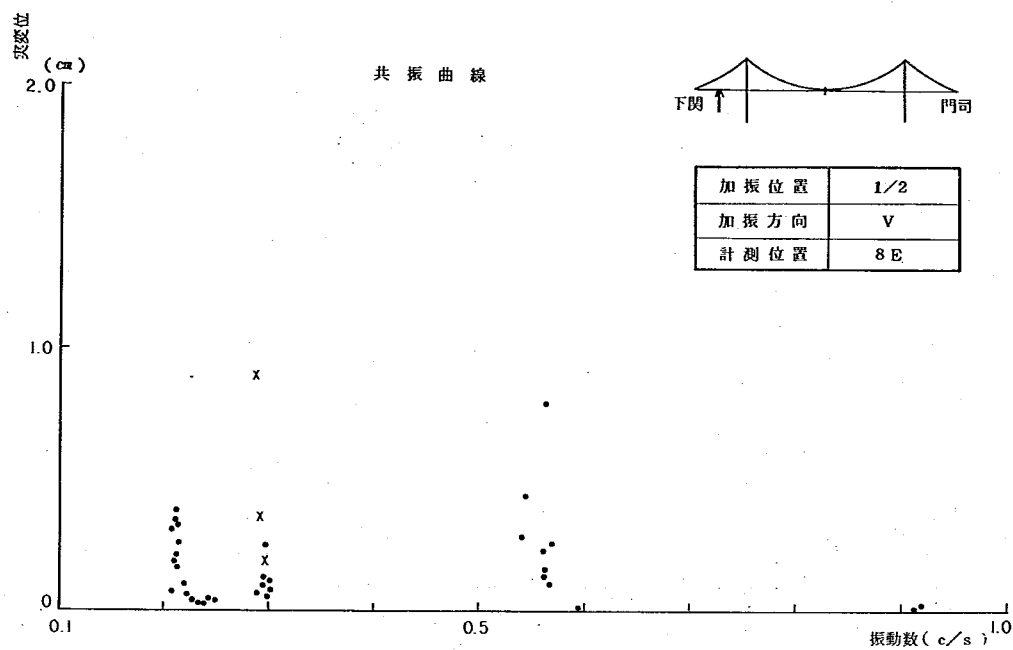


図 7 - 1 共振曲線

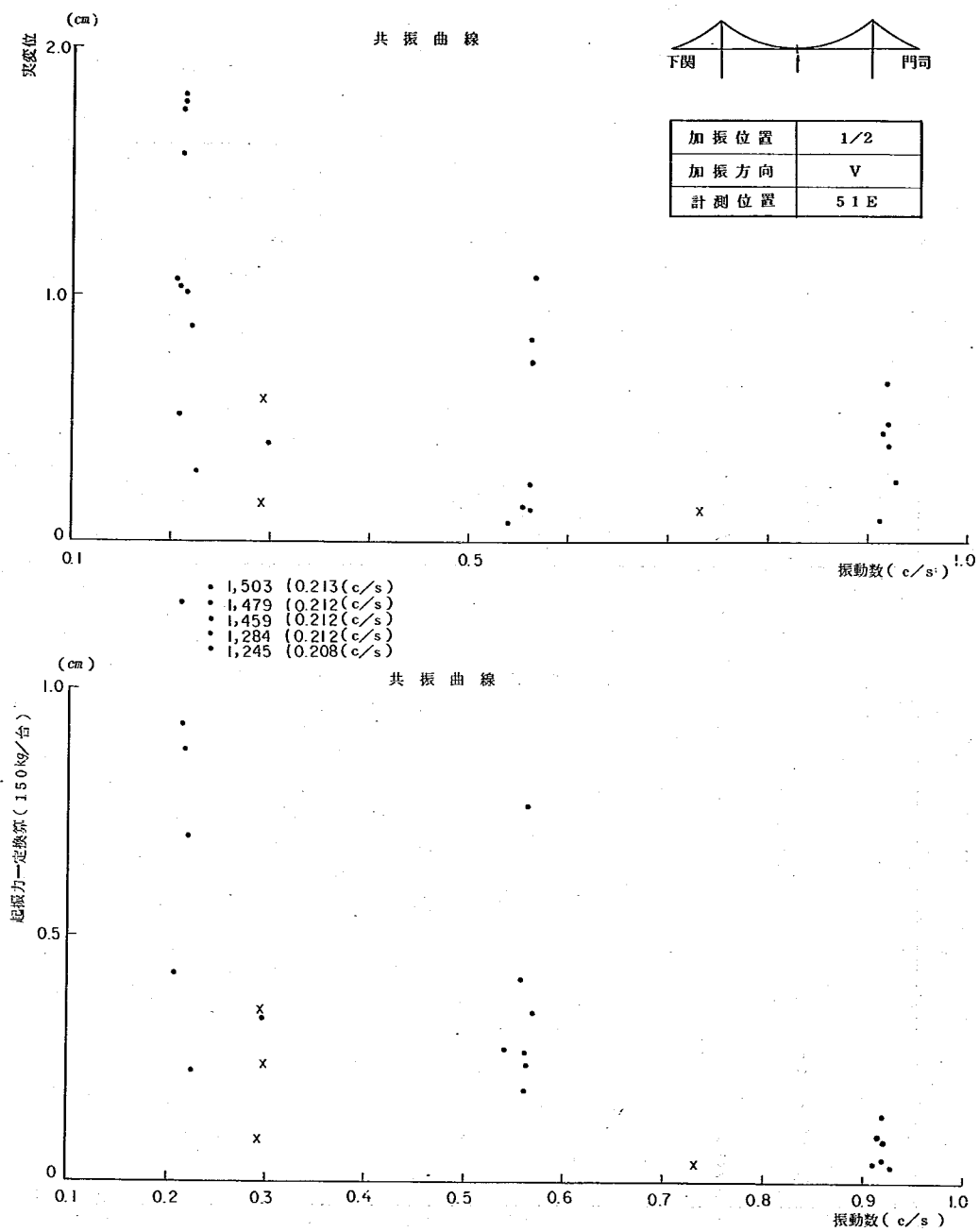


圖 7 - 2 共振曲線

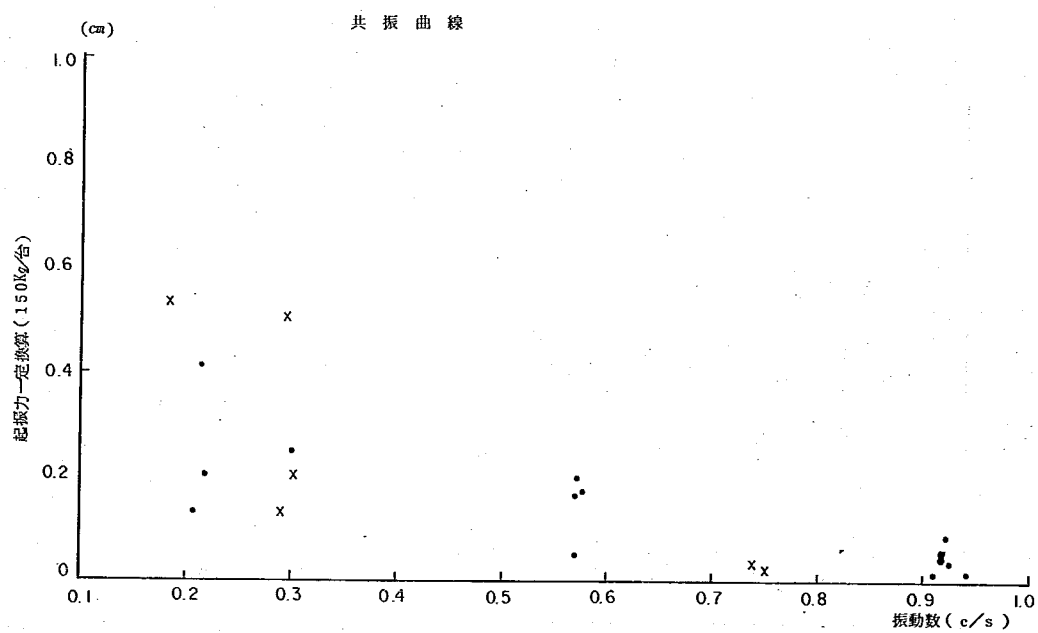
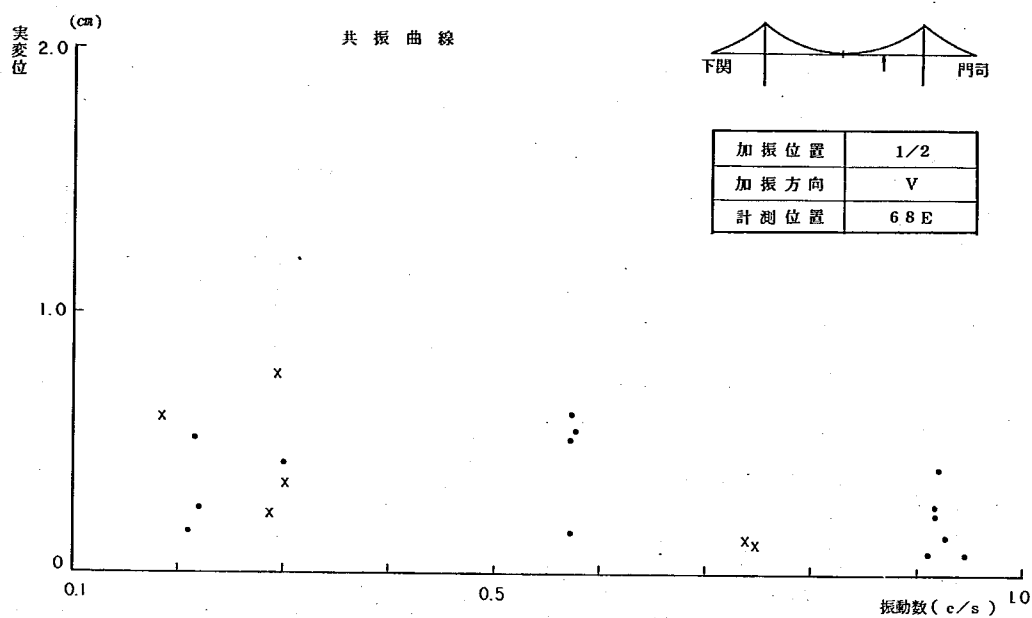


図 7 - 3 共振曲線

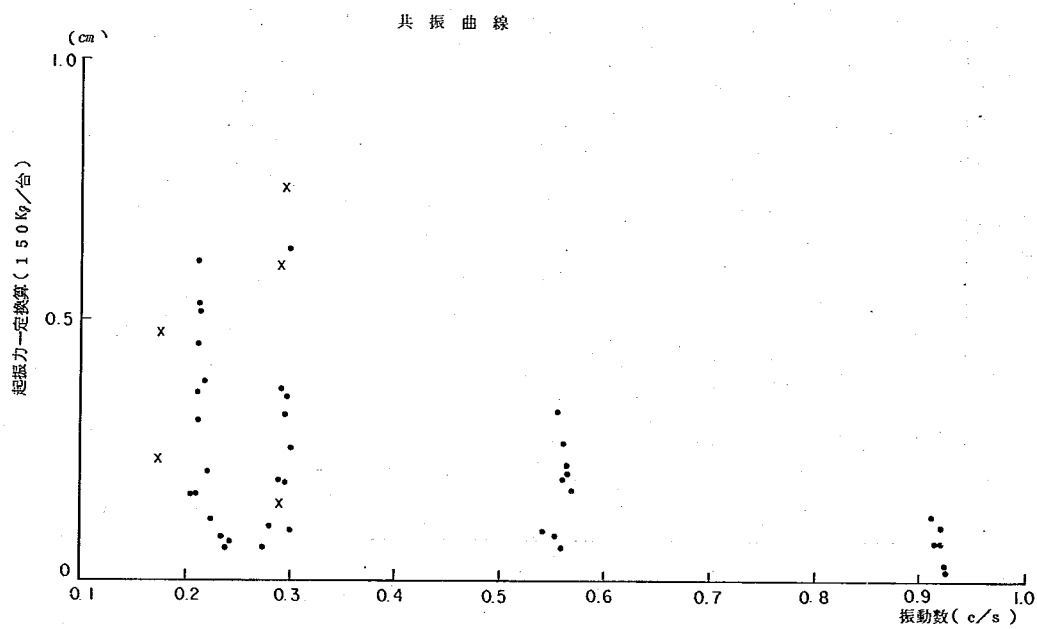
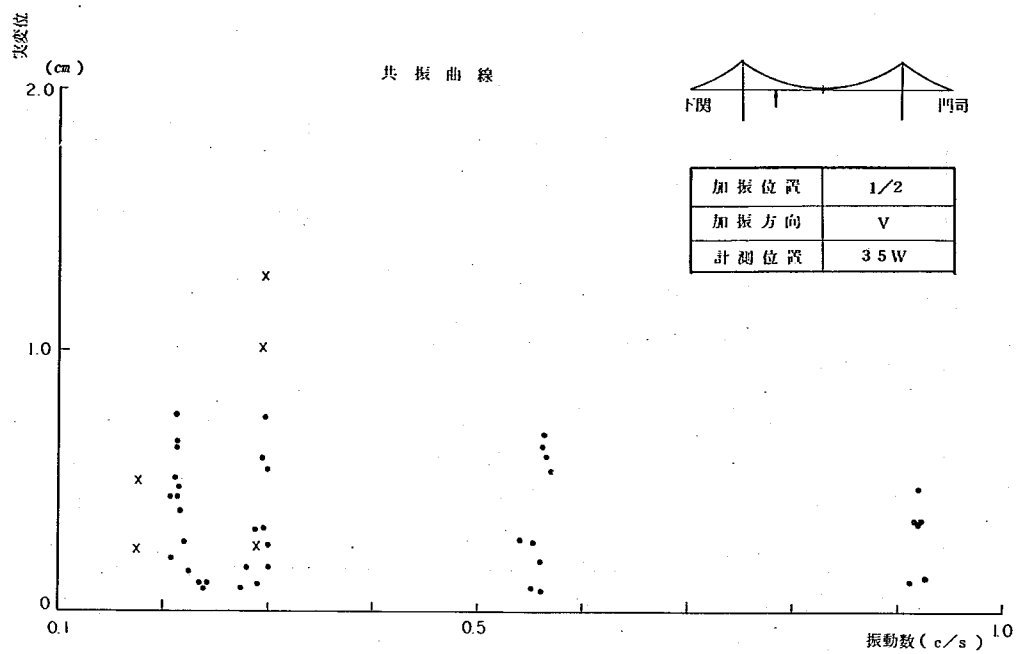


図 7 - 4 共振曲線

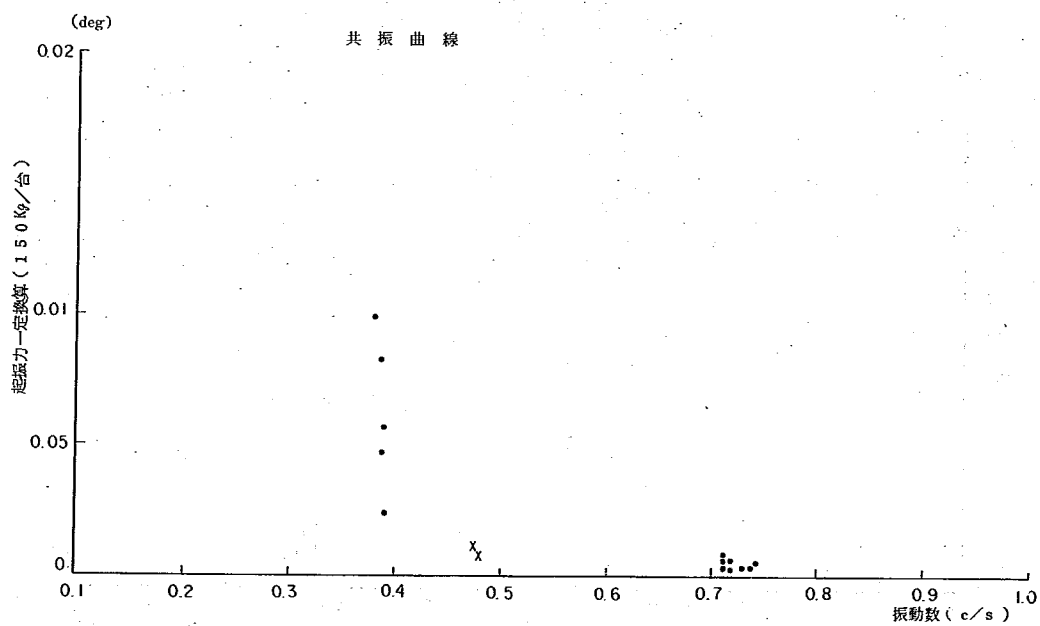
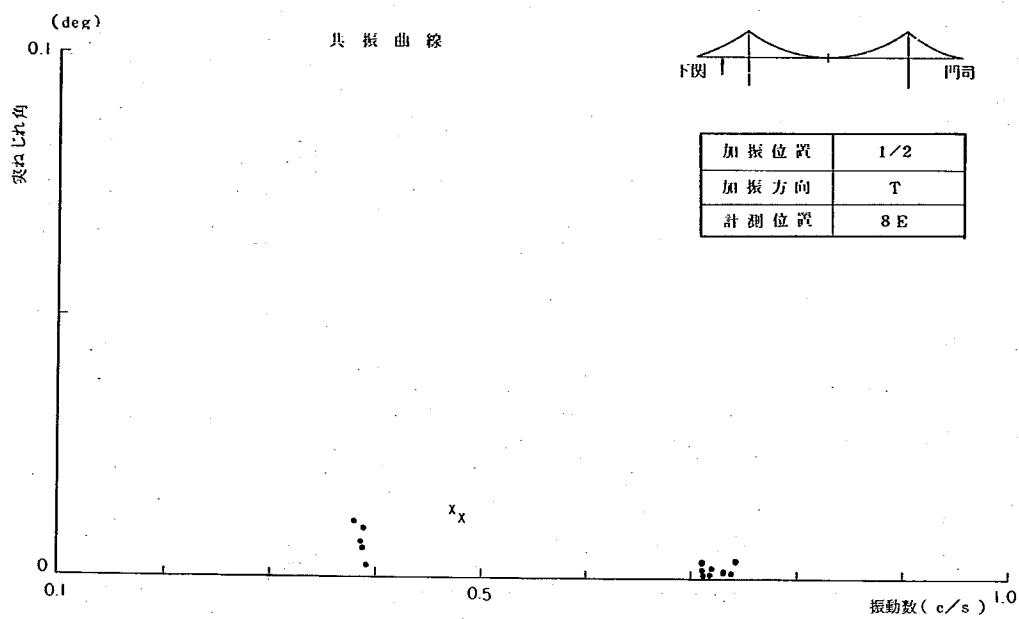


図 7-5 共振曲線

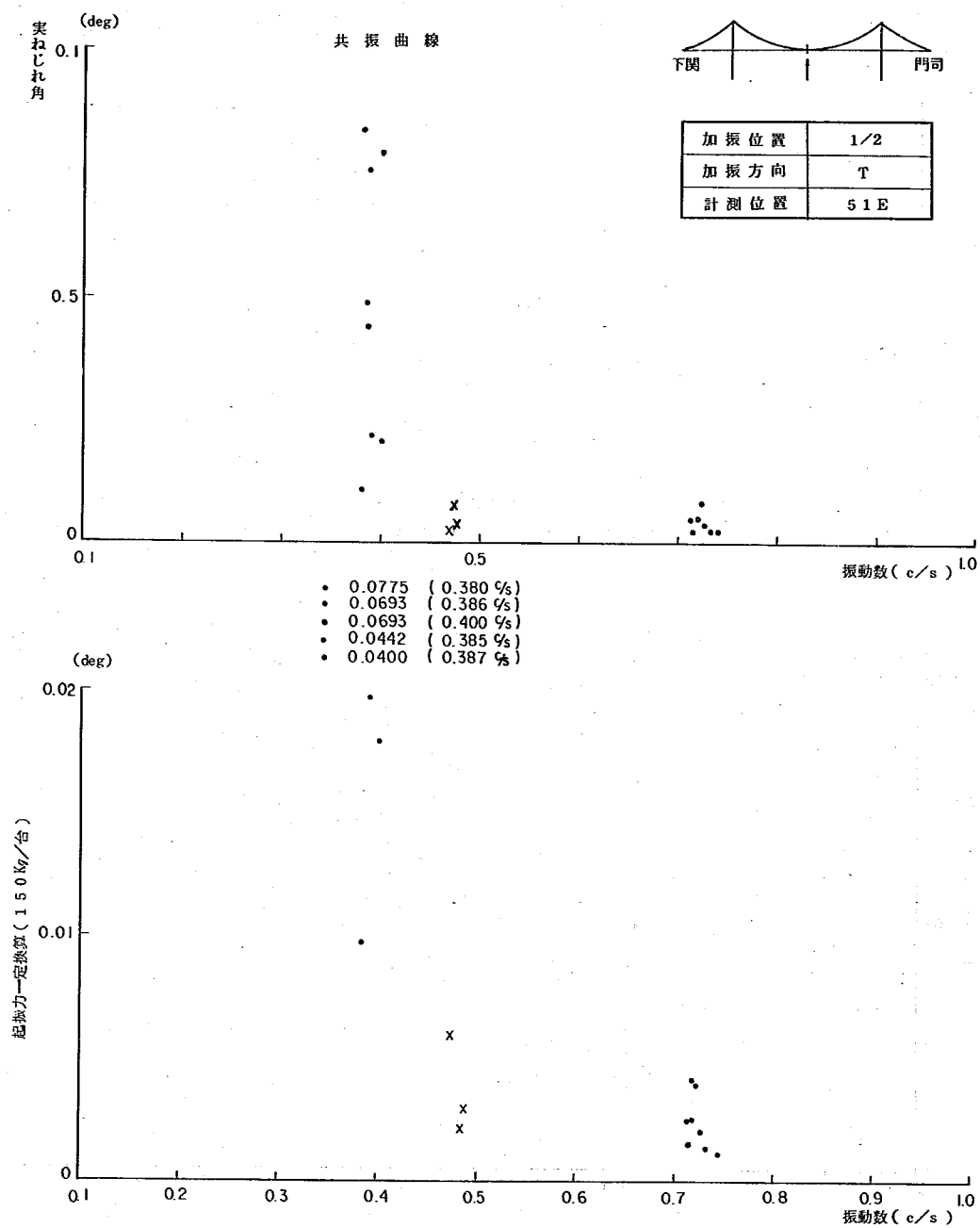


図 7 - 6 共振曲線

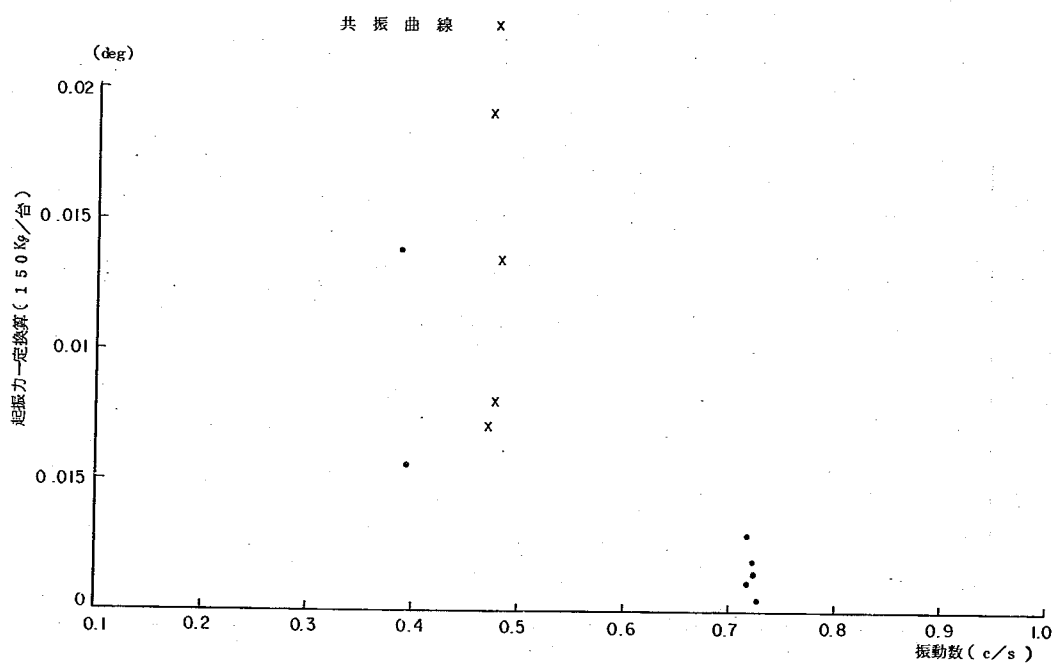
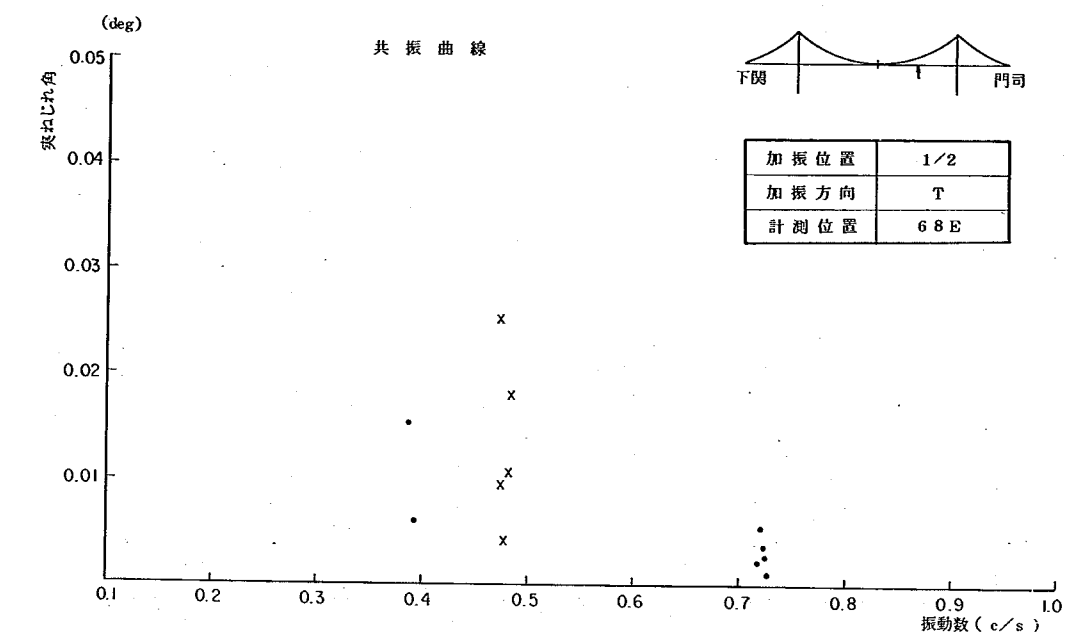


図7-7 共振曲線

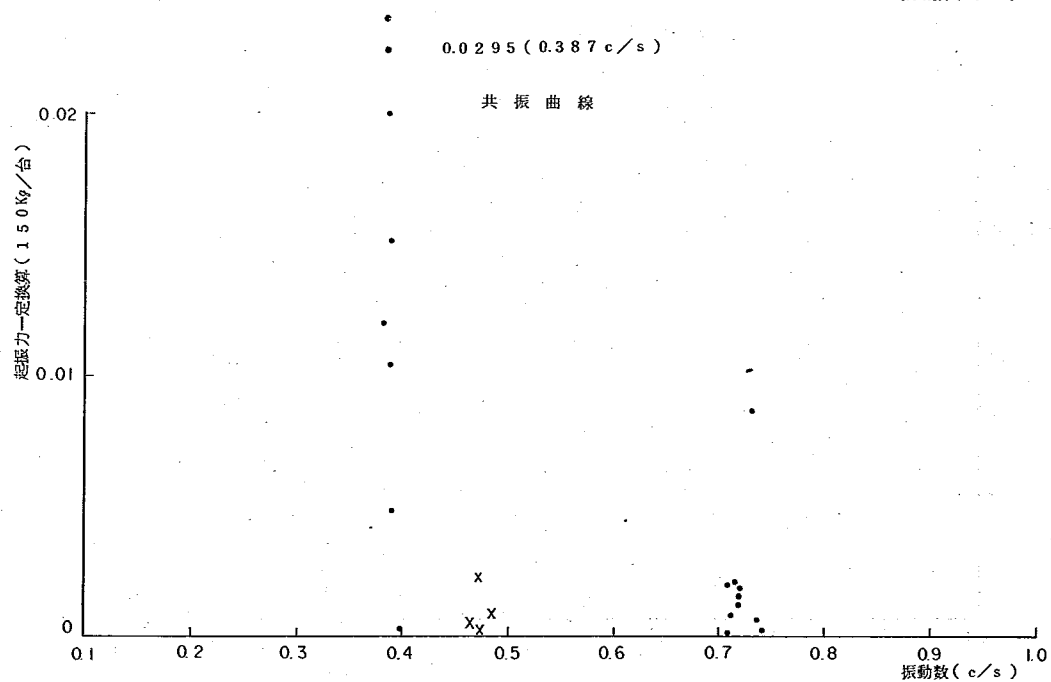
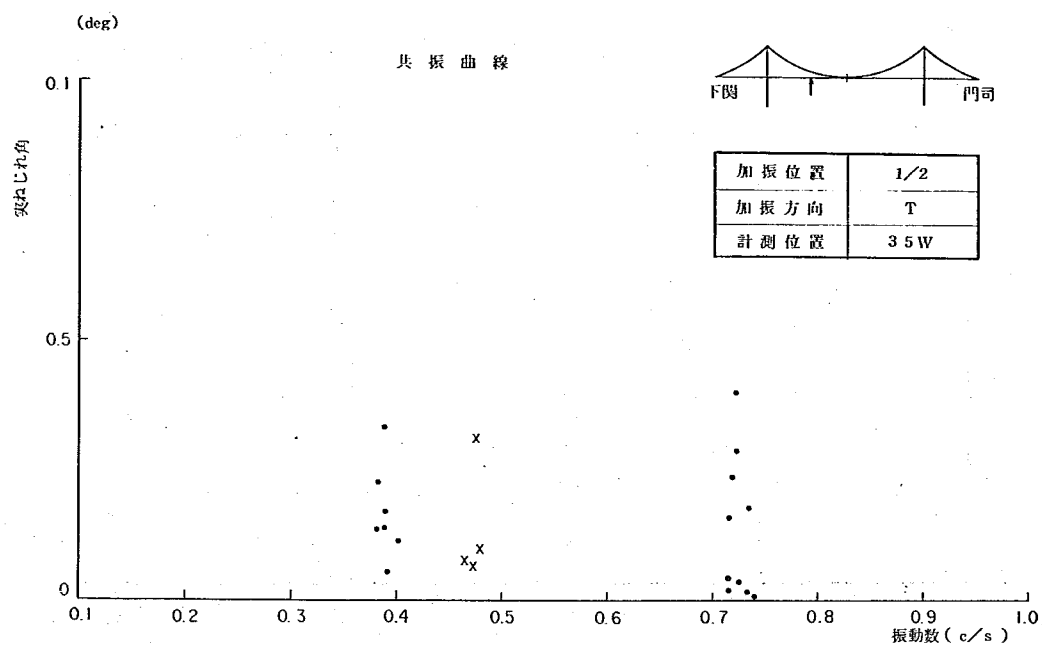


図7-8 共振曲線

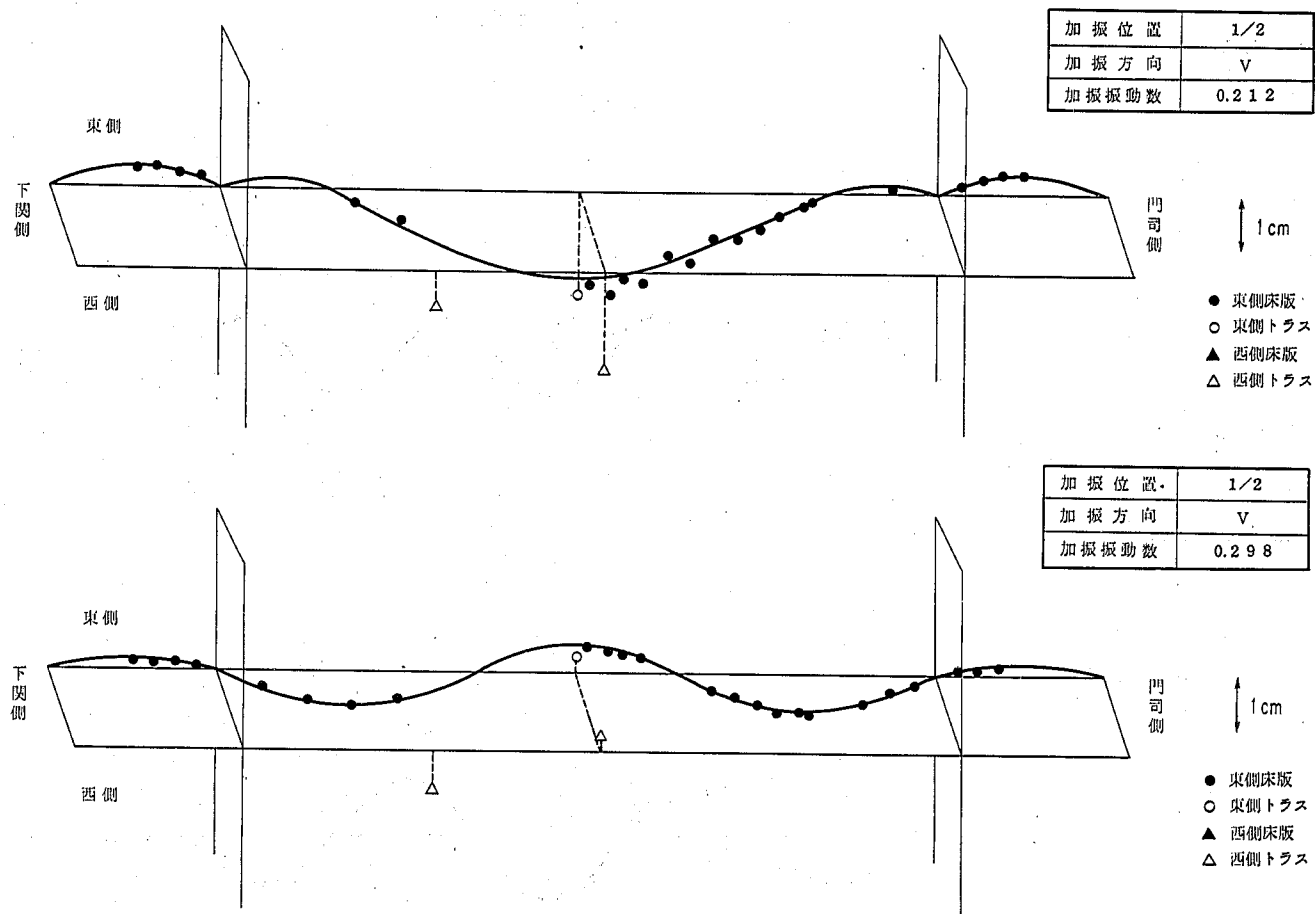


図8-1 共振モード

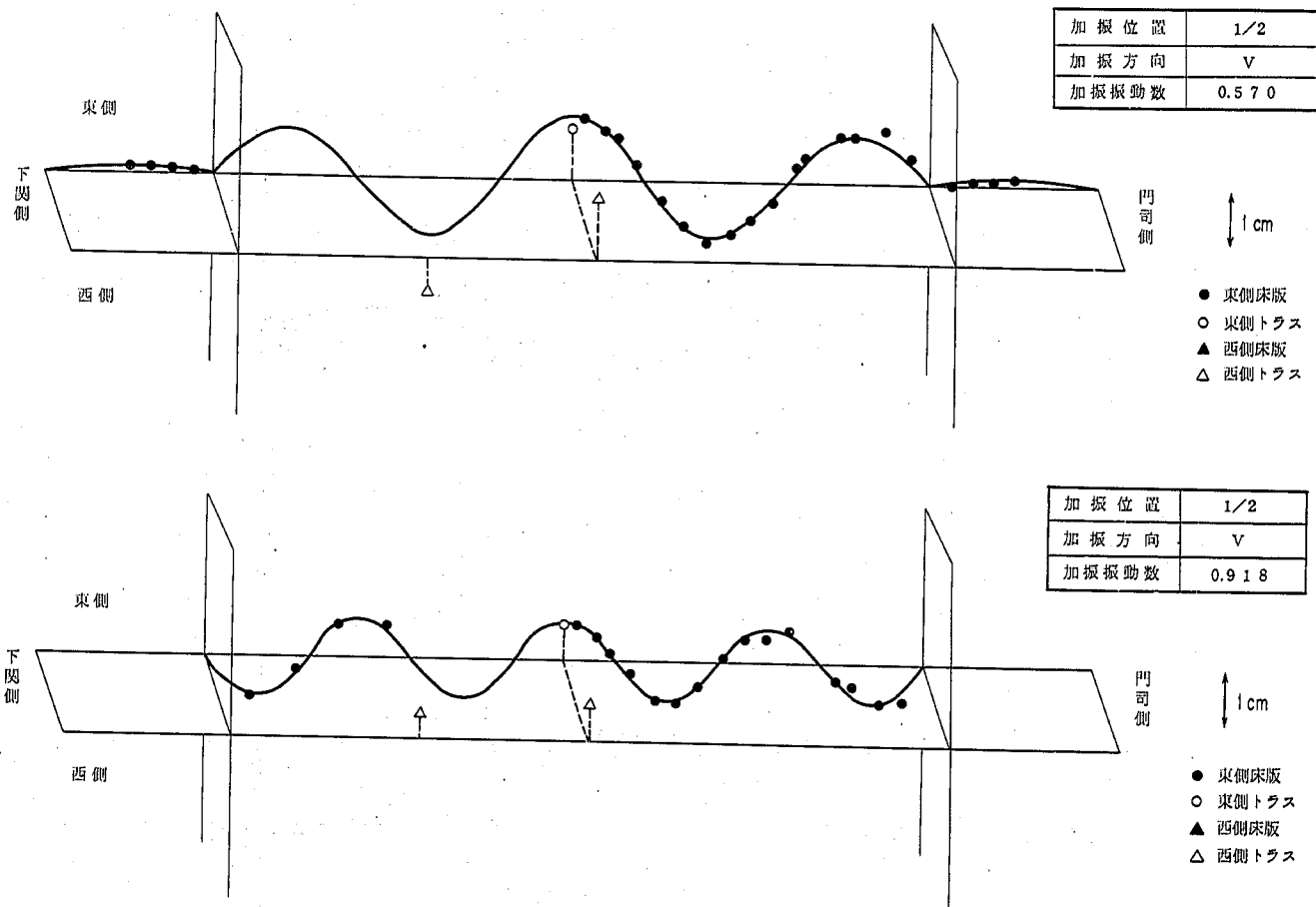


図8-2 共振モード

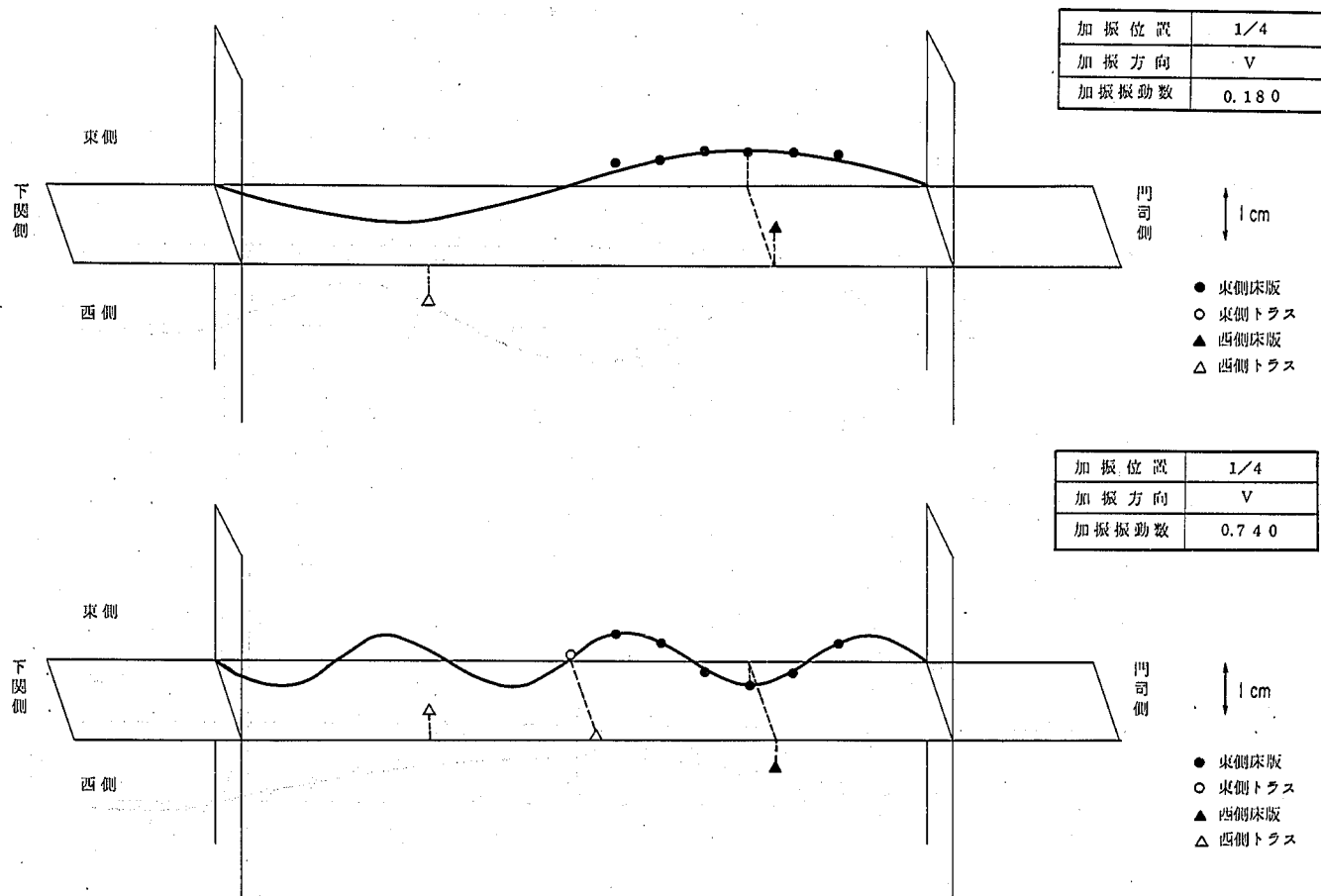


図 8 - 3 共 振 モ ー ド

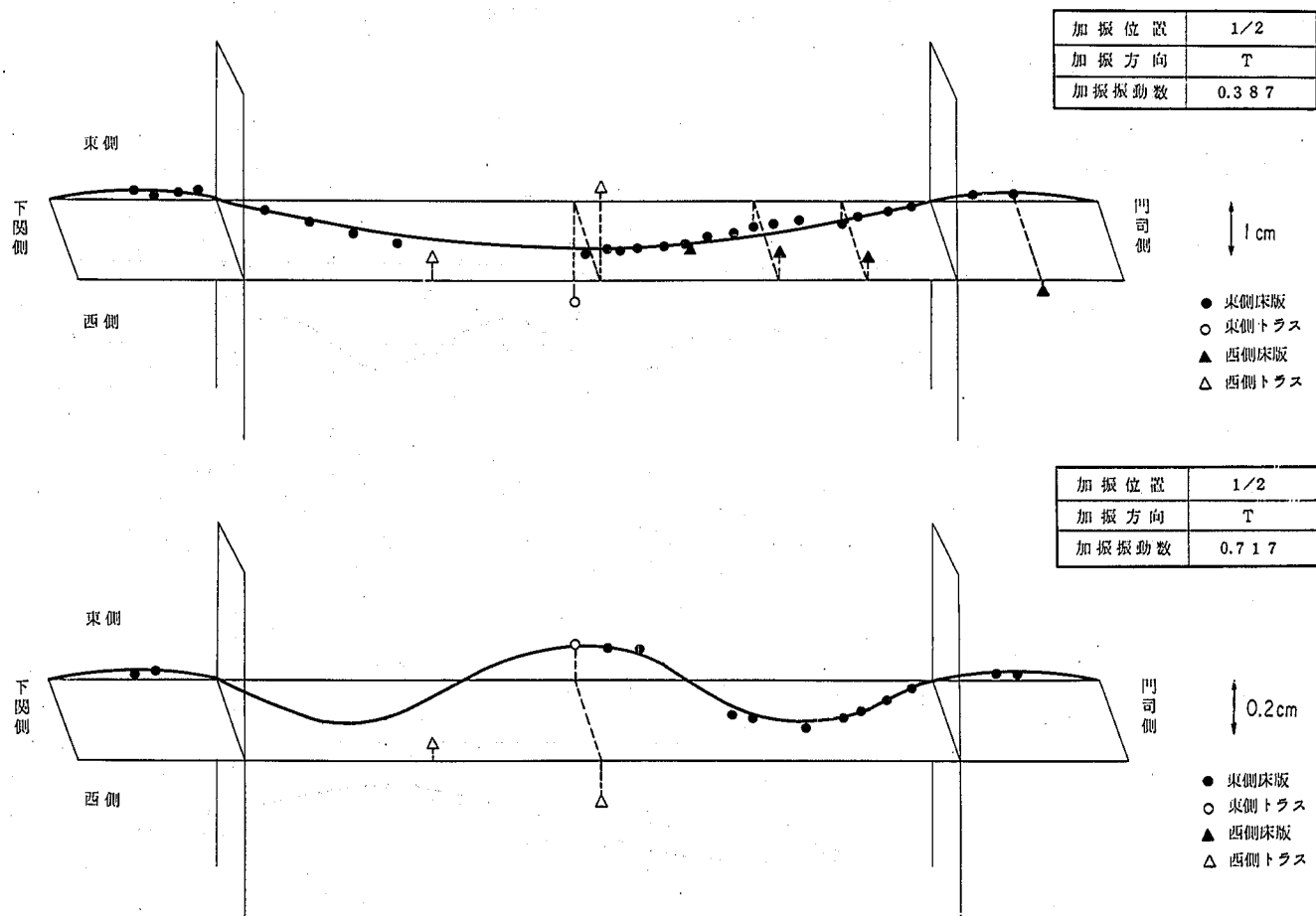


図 8 - 4 共 振 モ ー ド

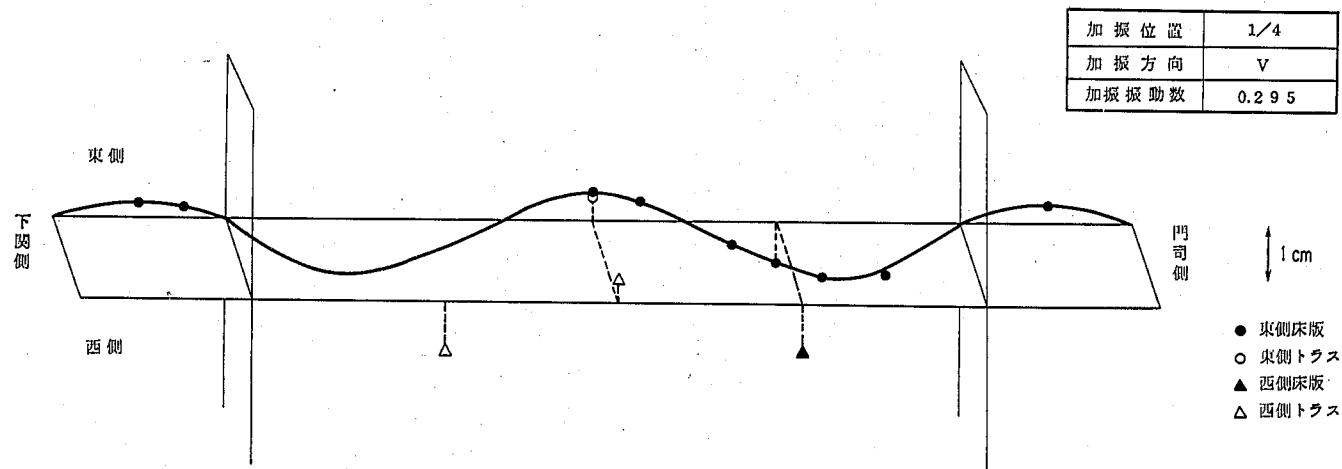
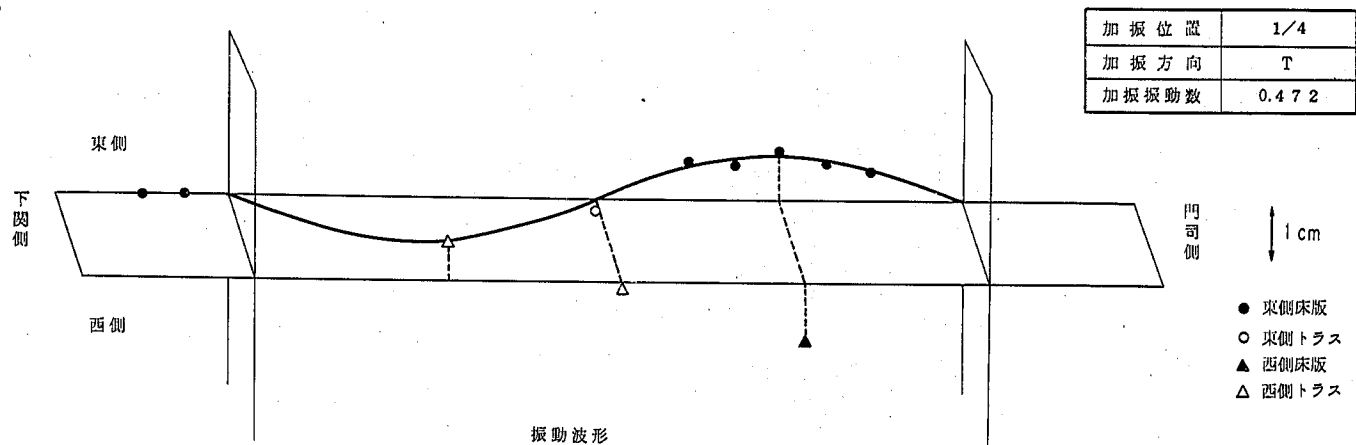


図 8 - 5 共 振 モ ー ド

### 3.4 構造減衰について

構造減衰を共振曲線またはスペクトル曲線より求める方法は、吊橋のように構造減衰値が極端に小さい場合には誤差が大きいので、本試験では共振状態において起振機を急速停止させて後生ずる自由振動波形の記録より求めた。構造減衰は対数減衰率で表示するものとした。すなわち、対数減衰率  $\delta$  は

$$\delta = \log_e \frac{a_n}{a_{n+1}}$$

で定義される。ここに  $a_n, a_{n+1}$  は第  $n$  番目と第  $n+1$  番目の加速度振幅を表わす。

起振機停止直後の初期振幅（加速度振幅とそれより得られた変位振幅）と対数減衰率の関係を、各共振々動数についてとりまとめたものが表-6である。それによると各振動形とも最低次振動の構造減衰が最も大きく、次数の増加と共に絶対値は小さくなり、しかもバラツキは小さくなるように見受けられる。図-9は振動振幅の減少と構造減衰の関係すなわち、構造減衰の振幅依存性を見るためにプロットした例であるが、この程度の振幅の場合には顕著な特性は見られず、構造減衰は振幅に関係なく、ほぼ一定と見なし得るようである。

表-6-1 共振々動数と構造減衰

|                       | 次<br>数           | 振<br>動<br>数 | 8 E              |                      |                      | 12 E                         |                       |                      | 35 W                         |                              |                              | 51 W                                 |                      |                      | 51 E                         |                      |                      | 51 E                         |       |      | 52 E     |                      |                      | 55.25 E                    |                      |                              |                              |                                      |
|-----------------------|------------------|-------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|-------|------|----------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
|                       |                  |             | 初期振巾             |                      | 対数                   | 初期振巾                         |                       | 対数                   | 初期振巾                         |                              | 対数                           | 初期振巾                                 |                      | 対数                   | 初期振巾                         |                      | 対数                   | 初期振巾                         |       | 対数   | 初期振巾     |                      | 対数                   | 初期振巾                       |                      | 対数                           |                              |                                      |
|                       |                  |             | gal              | cm                   | 減衰率                  | gal                          | cm                    | 減衰率                  | gal                          | cm                           | 減衰率                          | gal                                  | cm                   | 減衰率                  | gal                          | cm                   | 減衰率                  | gal                          | cm    | 減衰率  | gal      | cm                   | 減衰率                  | gal                        | cm                   | 減衰率                          |                              |                                      |
|                       |                  |             |                  |                      |                      |                              |                       |                      |                              |                              |                              |                                      |                      |                      |                              |                      |                      |                              |       |      |          |                      |                      |                            |                      |                              |                              |                                      |
| 九<br>わ<br>か<br>振<br>動 | 対<br>称           | 1           | %<br>0.212       | 0.63<br>0.57<br>0.65 | 0.36<br>0.32<br>0.37 | 0.0280<br>0.0370<br>0.0337   | 0.98<br>1.0<br>0.90   | 0.55<br>0.56<br>0.51 | 0.0359<br>0.0347<br>0.0372   | 2.7<br>2.8<br>2.5            | 1.52<br>1.58<br>1.41         | 0.0287<br>0.0322<br>0.0146           | 6.3<br>6.5<br>6.0    | 3.55<br>3.66<br>3.38 | 0.0326<br>0.0323<br>0.0350   | 6.1<br>6.3<br>5.5    | 3.44<br>3.55<br>3.01 | 0.0313<br>0.0320<br>0.0237   |       |      |          | 6.4<br>6.4<br>6.0    | 3.61<br>3.61<br>3.38 | 0.0317<br>0.0326<br>0.0317 | 6.4<br>6.5<br>6.3    | 3.61<br>3.66<br>3.55         | 0.0328<br>0.0330<br>0.0332   |                                      |
|                       |                  | 2           | 0.298<br>(0.295) | 1.1<br>1.3<br>(1.7)  | 0.31<br>0.37<br>0.49 | 0.0198<br>0.0229<br>(0.0290) | 0.98<br>0.91<br>(1.3) | 0.28<br>0.26<br>0.38 | 0.0231<br>0.0218<br>(0.0297) | 3.6<br>3.1<br>(6.4)          | 0.86<br>0.88<br>1.86         | 0.0131<br>0.0147<br>(0.0273)         | 1.9<br>2.2<br>(3.2)  | 0.54<br>0.63<br>0.93 | 0.0170<br>0.0148<br>(0.0258) | 1.5<br>2.2<br>(3.3)  | 0.43<br>0.63<br>0.96 | 0.0211<br>0.0273<br>(0.0257) | (3.8) | 1.11 | (0.0327) | 2.9<br>3.1<br>3.1    | 0.82<br>0.88<br>0.88 | 0.0177<br>0.0176<br>0.0179 | 2.1<br>2.3<br>2.3    | 0.60<br>0.66<br>0.66         | 0.0167<br>0.0167<br>0.0172   |                                      |
|                       |                  | 3           | 0.570            | 1.9<br>1.7<br>1.5    | 0.15<br>0.13<br>0.12 | 0.0089<br>0.0084<br>0.0082   | 1.2<br>1.2<br>2.1     | 0.09<br>0.09<br>0.16 | 0.0077<br>0.0082<br>0.0107   | 7.7<br>7.8<br>7.2            | 0.60<br>0.61<br>0.56         | 0.0103<br>0.0108<br>0.0078           | 12.0<br>12.3<br>12.1 | 0.94<br>0.96<br>0.94 | 0.0084<br>0.0092<br>0.0098   | 11.7<br>11.9<br>11.3 | 0.91<br>0.93<br>0.88 | 0.0078<br>0.0087<br>0.0079   |       |      |          | 28.2<br>26.7<br>24.1 | 2.20<br>2.08<br>1.88 | 0.0091<br>0.0094<br>0.0090 | 16.9<br>14.6<br>17.0 | 1.32<br>1.14<br>1.33         | 0.0091<br>0.0085<br>0.0105   |                                      |
|                       |                  | 4           | 0.918            | 1.5<br>1.9<br>1.7    | 0.05<br>0.06<br>0.05 | 0.0110<br>0.0065<br>0.0068   | 1.1<br>1.4<br>1.5     | 0.03<br>0.04<br>0.05 | 0.0102<br>0.0066<br>0.0091   | 11.5<br>18.4<br>38.0         | 0.35<br>0.55<br>1.14         | 0.0090<br>0.0090<br>0.0086           | 24.5<br>41.7<br>42.1 | 0.74<br>1.25<br>1.27 | 0.0088<br>0.0093<br>0.0082   | 25.8<br>38.7<br>42.1 | 0.78<br>1.16<br>1.27 | 0.0098<br>0.0086<br>0.0084   |       |      |          | 43.5<br>44.0<br>43.4 | 1.31<br>1.32<br>1.30 | 0.0084<br>0.0094<br>0.0085 | 9.8<br>0.29          | 0.0082                       |                              |                                      |
|                       | 逆<br>対<br>称      | 1           | 0.180            |                      |                      |                              |                       |                      |                              | 1.2<br>1.1                   | 0.94<br>0.86                 | 0.0389<br>0.0385                     |                      |                      |                              |                      |                      |                              |       |      |          |                      |                      |                            |                      | 0.63<br>18.0<br>19.1<br>20.0 | 0.49<br>0.83<br>0.88<br>0.93 | 0.0555<br>0.0113<br>0.0119<br>0.0106 |
|                       |                  | 3           | 0.740            |                      |                      |                              |                       |                      |                              | 21.4<br>22.6<br>21.6<br>23.3 | 0.99<br>1.05<br>1.00<br>1.08 | 0.0135<br>0.0126<br>0.0129<br>0.0118 | 2.4                  | 0.11                 | 0.0203                       | 3.4                  | 0.16                 | 0.0233                       |       |      |          |                      |                      |                            |                      |                              |                              |                                      |
|                       |                  | 1           | 0.387            | 2.4<br>2.1<br>2.1    | 0.41<br>0.36<br>0.36 | 0.0155<br>0.0141<br>0.1633   | 19.5<br>18.6<br>19.5  | 3.30<br>3.15<br>3.30 | 0.0124<br>0.0141<br>0.0137   | 2.8<br>2.4<br>2.8            | 0.47<br>0.41<br>0.47         | 0.0141<br>0.0133<br>0.0142           | 10.1<br>9.2<br>9.5   | 1.71<br>1.56<br>1.61 | 0.0123<br>0.0122<br>0.0124   | 11.7<br>10.1<br>10.3 | 1.98<br>1.71<br>1.74 | 0.0127<br>0.0125<br>0.0122   |       |      |          | 10.8<br>9.4<br>8.2   | 1.83<br>1.59<br>1.39 | 0.0129<br>0.0085<br>0.0132 | 10.1<br>9.3<br>8.1   | 1.71<br>1.57<br>1.37         | 0.0123<br>0.0123<br>0.0121   |                                      |
|                       |                  | 2           | 0.717            | 5.4                  | 0.27                 | 0.0095                       |                       |                      |                              | 1.5<br>2.1<br>2.3            | 0.07<br>0.10<br>0.11         | 0.0149<br>0.0116<br>0.0083           | 6.5<br>9.6<br>6.0    | 0.32<br>0.47<br>0.30 | 0.0159<br>0.0163<br>0.0186   | 4.0<br>4.6<br>7.4    | 0.05<br>0.23<br>0.36 | 0.0135<br>0.0133<br>0.0144   |       |      |          | 3.1                  | 0.15                 | 0.0140                     | 2.1                  | 0.10                         | 0.0111                       |                                      |
|                       | 逆<br>動<br>対<br>称 | 1           | 0.472            | 0.46                 | 0.05                 | 0.0174                       |                       |                      |                              | 11.6<br>12.9                 | 1.32<br>1.47                 | 0.0162<br>0.0176                     | 2.5<br>3.1           | 0.28<br>0.35         | 0.0219<br>0.0252             | 2.3<br>2.7           | 0.26<br>0.31         | 0.0144<br>0.0175             |       |      |          |                      |                      |                            |                      |                              |                              |                                      |

表-6-2 共振々動数と構造減衰

|                            | 次振動数  | 59.5E            |       |        | 63.75E |        |        | 68E      |        |        | 68W      |        |        | 72.25E   |       |        | 76.5E    |       |        | 80.75E   |      |        | 93E    |       |        | 平均値<br>(上段)<br>標準偏差<br>(下段) |          |
|----------------------------|-------|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|------|--------|--------|-------|--------|-----------------------------|----------|
|                            |       | 初期振巾             |       | 対数減衰率  | 初期振巾   |        | 対数減衰率  | 初期振巾     |        | 対数減衰率  | 初期振巾     |        | 対数減衰率  | 初期振巾     |       | 対数減衰率  | 初期振巾     |       | 対数減衰率  | 初期振巾     |      | 対数減衰率  | 初期振巾   |       | 対数減衰率  |                             |          |
|                            |       | gal              | cm    |        | gal    | cm     |        | gal      | cm     |        | gal      | cm     |        | gal      | cm    |        | gal      | cm    |        | gal      | cm   |        | gal    | cm    |        |                             | gal      |
| 九<br>力<br>称<br>小<br>振<br>動 | 対称    | 1                | 0.212 | 3.2    | 1.80   | 0.0315 | 3.5    | 1.97     | 0.0270 | 2.0    | 1.13     | 0.0217 |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       | 0.0313 |                             |          |
|                            |       |                  |       | 3.1    | 1.75   | 0.0333 | 3.5    | 1.97     | 0.0330 | 2.0    | 1.13     | 0.0291 |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       |        | 0.0047                      |          |
|                            |       |                  |       | 3.2    | 1.80   | 0.0326 | 3.4    | 1.92     | 0.0306 | 2.4    | 1.35     | 0.0372 |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       |        |                             |          |
|                            | 2     | 0.298<br>(0.295) |       |        |        | 2.3    | 0.66   | 0.0167   | 4.4    | 1.26   | 0.0178   | (6.0)  | 1.75   | (0.0361) | 5.1   | 1.35   | 0.0173   | 4.3   | 1.23   | 0.0178   | 2.8  | 0.80   | 0.0187 | 1.3   | 0.37   | 0.0174                      | 0.0180   |
|                            |       |                  |       |        |        | 2.5    | 0.72   | 0.0176   | 4.0    | 1.14   | 0.0156   | (6.6)  | 1.92   | (0.0335) | 4.9   | 1.40   | 0.0151   | 3.4   | 0.97   | 0.0165   | 2.4  | 0.68   | 0.0159 | 1.2   | 0.34   | 0.0163                      | 0.0033   |
|                            |       |                  |       |        |        | 2.3    | 0.66   | 0.0162   | 4.1    | 1.17   | 0.0164   |        |        |          | 4.7   | 1.34   | 0.0154   | 3.3   | 0.94   | 0.0166   | 2.7  | 0.97   | 0.0179 | (2.0) | 0.58   | (0.0270)                    | (0.0268) |
|                            | 3     | 0.570            |       |        |        | (2.5)  | 0.73   | (0.0224) | (4.6)  | 1.34   | (0.0234) |        |        |          | (6.8) | 1.98   | (0.0248) | (5.8) | 1.69   | (0.0240) |      |        |        | (1.8) | 0.52   | (0.0324)                    | (0.0029) |
|                            |       |                  |       |        |        | (3.2)  | 0.93   | (0.0253) | (6.5)  | 1.89   | (0.0290) |        |        |          | (7.7) | 2.24   | (0.0274) | (6.8) | 1.98   | (0.0243) |      |        |        |       |        |                             |          |
|                            |       |                  | 9.2   | 0.72   | 0.0091 | 25.1   | 1.96   | 0.0087   | 18.0   | 1.40   | 0.0088   |        |        |          | 6.3   | 0.49   | 0.0083   | 22.2  | 1.73   | 0.0085   | 26.7 | 2.08   | 0.0098 | 3.0   | 0.23   | 0.0091                      | 0.0090   |
|                            | 4     | 0.918            | 8.8   | 0.69   | 0.0095 | 21.0   | 1.64   | 0.0081   | 17.6   | 1.37   | 0.0095   |        |        |          | 5.4   | 0.42   | 0.0078   | 23.0  | 1.79   | 0.0091   | 26.4 | 2.06   | 0.0098 | 2.9   | 0.23   | 0.0089                      |          |
|                            |       |                  | 7.4   | 0.58   | 0.0086 | 25.3   | 1.97   | 0.0104   | 15.6   | 1.22   | 0.0089   |        |        |          | 6.3   | 0.49   | 0.0101   | 21.7  | 1.69   | 0.0113   | 22.7 | 1.77   | 0.0106 | 2.7   | 0.21   | 0.0098                      | 0.0009   |
|                            |       |                  | 43.1  | 1.30   | 0.0082 | 27.2   | 0.82   | 0.0088   | 30.4   | 0.91   | 0.0086   |        |        |          | 39.0  | 1.17   | 0.0088   | 14.2  | 0.43   | 0.0089   | 46.2 | 1.39   | 0.0088 |       |        |                             | 0.0087   |
| 逆対称                        | 1     | 0.180            | 44.1  | 1.33   | 0.0094 | 27.6   | 0.83   | 0.0091   | 30.4   | 0.91   | 0.0092   |        |        |          | 39.0  | 1.17   | 0.0093   | 13.5  | 0.41   | 0.0086   | 46.0 | 1.38   | 0.0093 |       |        |                             |          |
|                            |       |                  | 43.1  | 1.30   | 0.0085 | 26.8   | 0.81   | 0.0081   | 30.4   | 0.91   | 0.0085   |        |        |          | 38.6  | 1.14   | 0.0084   | 14.7  | 0.44   | 0.0083   | 47.7 | 1.43   | 0.0086 |       |        |                             | 0.0009   |
|                            |       |                  | 14    | 1.09   | 0.0401 | 1.3    | 1.02   | 0.0490   | 1.3    | 1.02   | 0.0512   | 1.4    | 1.09   | 0.0620   | 1.2   | 0.94   | 0.0543   | 0.88  | 0.69   | 0.0621   |      |        |        |       |        |                             | 0.0501   |
| 2                          | 0.740 |                  |       |        |        |        |        |          |        |        |          |        |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       | 0.0093 |                             |          |
|                            |       | 13.4             | 0.62  | 0.0117 | 5.9    | 0.27   | 0.0109 | 16.7     | 0.77   | 0.0115 | 18.4     | 0.85   | 0.0113 | 8.3      | 0.38  | 0.0120 | 13.1     | 0.61  | 0.0113 |          |      |        |        |       |        | 0.0125                      |          |
|                            |       | 14.4             | 0.67  | 0.0125 | 6.3    | 0.29   | 0.0124 | 17.7     | 0.82   | 0.0121 | 20.4     | 0.94   | 0.0115 | 8.7      | 0.40  | 0.0127 | 13.5     | 0.62  | 0.0109 |          |      |        |        |       |        | 0.0026                      |          |
| 3                          | 0.387 | 21.5             | 0.99  | 0.0127 | 7.5    | 0.35   | 0.0118 | 18.7     | 0.87   | 0.0111 | 20.0     | 0.93   | 0.0124 | 9.5      | 0.44  | 0.0116 | 13.7     | 0.63  | 0.0114 |          |      |        |        |       |        |                             |          |
|                            |       |                  |       |        |        |        |        |          |        |        | 21.0     | 0.97   | 0.0111 |          |       |        | 14.1     | 0.65  | 0.0103 |          |      |        |        |       |        |                             |          |
|                            |       | 9.4              | 1.59  | 0.0132 | 7.4    | 1.25   | 0.0124 | 6.0      | 1.01   | 0.0132 |          |        |        | 3.6      | 0.61  | 0.0126 | 4.0      | 0.68  | 0.0121 | 20.6     | 3.48 | 0.0138 | 1.8    | 0.30  | 0.0089 | 0.0129                      |          |
| 逆対称                        | 1     | 0.472            | 6.5   | 1.10   | 0.0124 | 6.8    | 1.15   | 0.0121   | 5.4    | 0.91   | 0.0127   |        |        |          | 3.2   | 0.54   | 0.0126   | 3.4   | 0.58   | 0.0126   | 16.8 | 2.84   | 0.0155 |       |        |                             | 0.0014   |
|                            |       |                  | 7.4   | 1.25   | 0.0127 | 6.2    | 1.05   | 0.0133   | 4.6    | 0.78   | 0.0123   |        |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       |        |                             |          |
|                            |       |                  | 1.0   | 0.05   | 0.0115 |        |        |          | 1.7    | 0.08   | 0.0091   |        |        |          | 3.7   | 0.18   | 0.0124   | 5.6   | 0.28   | 0.0094   | 3.1  | 0.15   | 0.0106 |       |        |                             | 0.0126   |
| 2                          | 0.717 |                  |       |        |        |        |        |          |        |        |          |        |        |          |       |        |          |       |        |          |      |        |        |       | 0.0029 |                             |          |
|                            |       | 10.8             | 1.23  | 0.0128 | 10.9   | 1.24   | 0.0145 | 14.4     | 1.64   | 0.0135 | 15.8     | 1.80   | 0.0142 | 11.6     | 1.32  | 0.0150 | 10.5     | 1.19  | 0.0153 |          |      |        |        |       |        | 0.0162                      |          |
|                            |       | 12.1             | 1.38  | 0.0137 | 12.4   | 1.41   | 0.0164 | 16.4     | 1.86   | 0.0159 | 16.4     | 1.86   | 0.0151 | 12.2     | 1.39  | 0.0155 | 9.7      | 1.10  | 0.0154 |          |      |        |        |       |        | 0.0030                      |          |

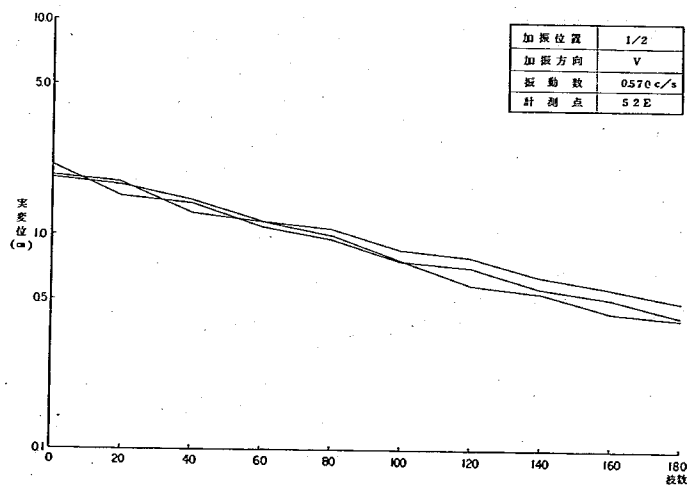
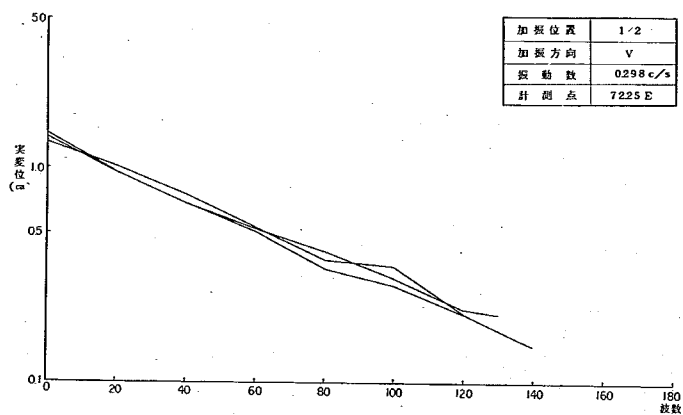
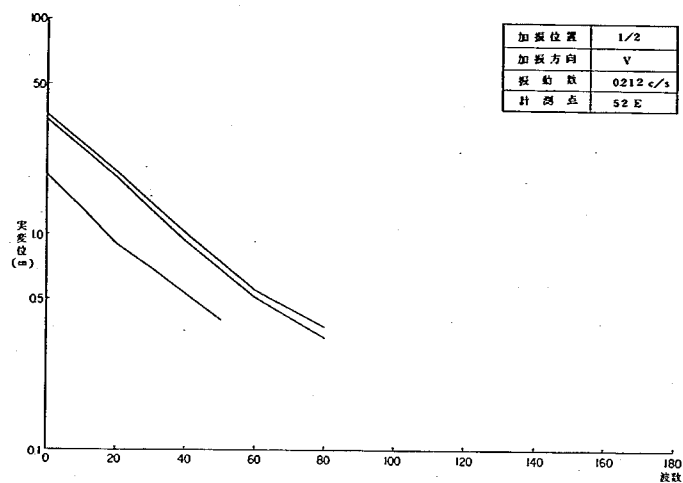


図 9 - 1 波数 - 振幅曲線

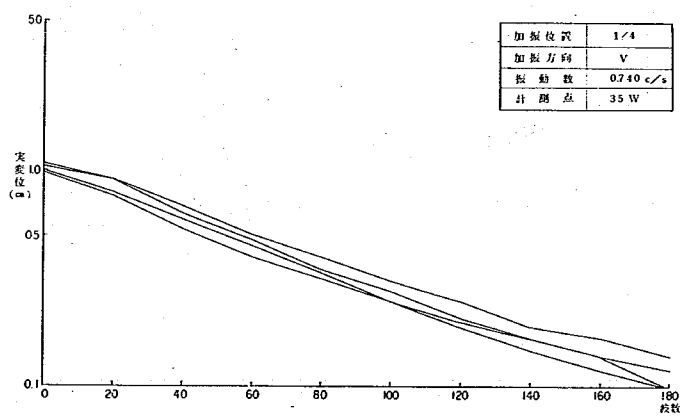
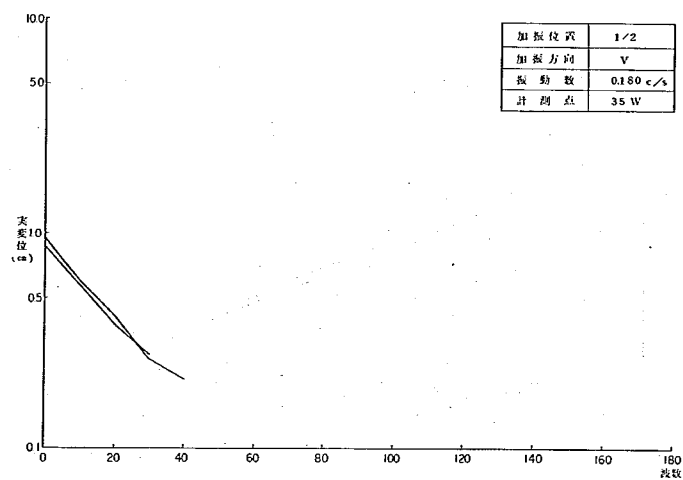
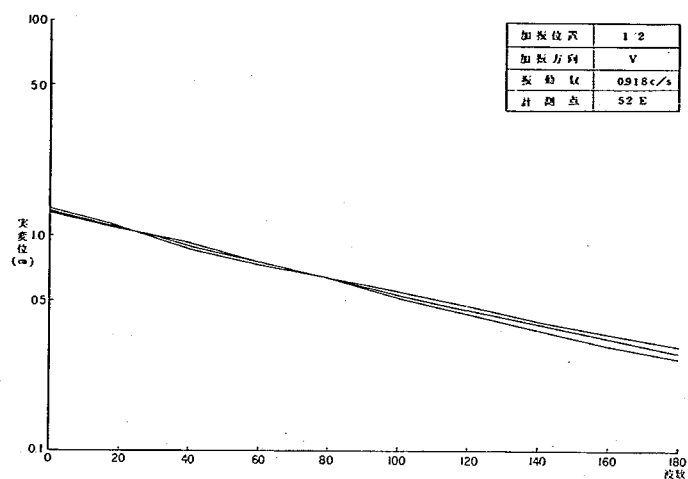


図 9 - 2 波数 - 振幅曲線

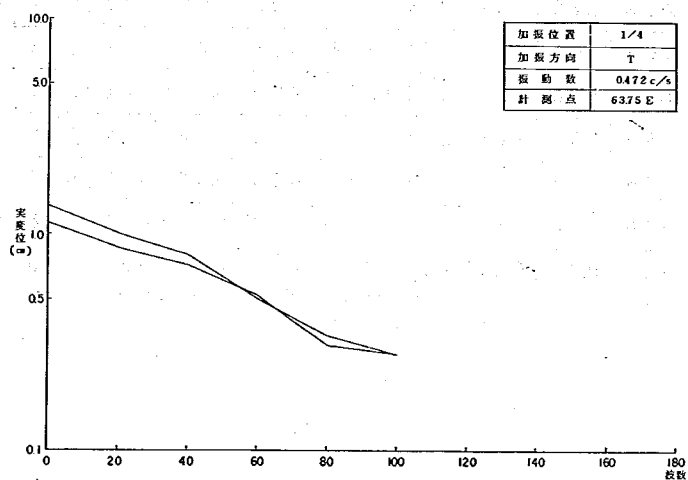
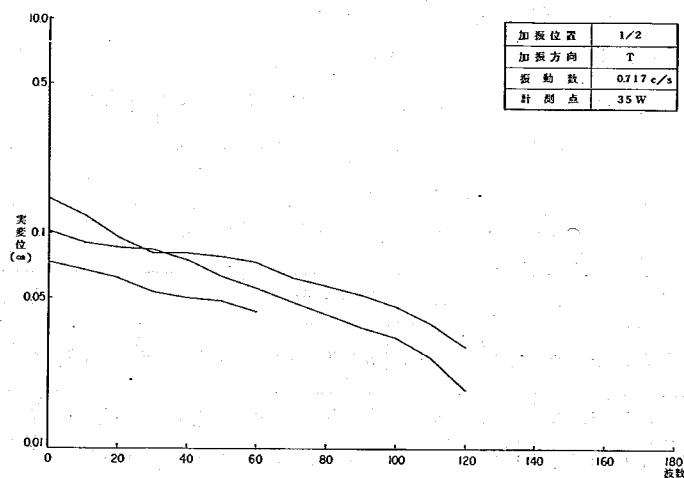
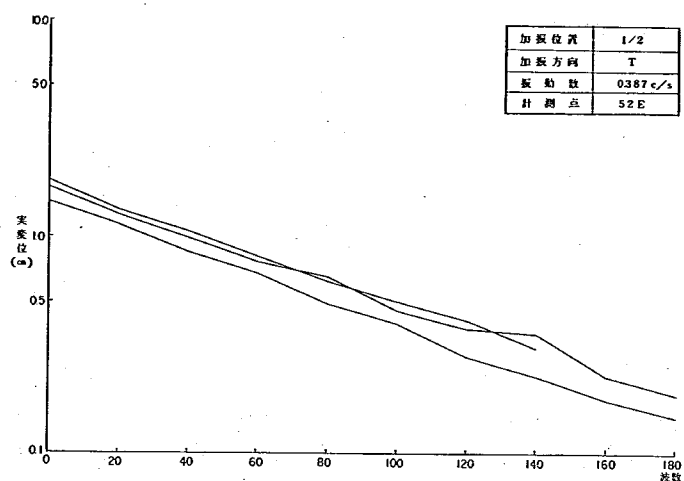


図 9 - 3 波数 - 振幅曲線

### 3.5 走行車輛応答について

車輛の走行により吊構造部にどの程度の振動が励振されるかを知るため、ダンプトラックを 40, 50, 60, 70km/hr の 4 種類の速度で走行させた時の応答を測定した。トラックの台数は 2 台, 4 台の並進走行の 2 種とした。前者については下り内側 2 車線を, また後者については上下車線の内側各 2 車線を走行させた。進行方向は何れも下関側より門司側に向うものとした。

図-10 は代表的な測定点で得られた振動記録である。これによると側径間に載荷した場合の中央径間に与える影響は極めて小さいことが判る。また, 図-11 は, トラックの台数, 走行速度と発生加速度の自乗平均値 (r. m. s. 値) の関係を示したものであり, たかだか 4 gal 程度である。また, 発生加速度は速度により漸次増加し, 70km/hr 付近で最大となりそれ以後はわずかながら減少する傾向が見られる。台数の増加の加速度応答に対する影響は各速度とも 4 台並進走行は 2 台並進走行の場合の 1.5 ~ 2.0 倍増である。

次に図-12 には応答記録より求めた加速度のパワースペクトルを示す。それによると応答のスペクトルの最大値は周波数 3 Hz 前後に表われ, その傾向は走行車輛の台数, 速度によって変化しないことが判る。なお, スペクトル計算は Blackman-Tukey の方法によった。

表-7 車速と振動加速度の r. m. s. 値 (gal)

| 車 数              | 4 台並進 (上下各 2 台) |      |      |      |      |      |      | 2 台並進 (下り) |      |      |      |
|------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|
| 測点<br>車速 (km/hr) | 37.9            | 38.0 | 38.3 | 48.1 | 56.2 | 68.4 | 74.1 | 38.8       | 48.8 | 57.6 | 67.7 |
| 51.00-E          | 1.32            | 1.32 | 1.32 | 2.00 | 2.13 | 2.56 | 2.10 | 0.90       | 1.49 | 1.35 | 2.49 |
| 51.00-W          | 1.30            | 1.31 | 1.41 | 2.05 | 2.22 | 2.62 | 2.20 | 0.95       | 1.63 | 1.61 | 2.39 |
| 55.25-E          | 2.12            | 2.12 | 2.31 | 2.83 | 3.09 | 3.28 | 3.22 | 1.83       | 2.14 | 1.88 | 3.23 |
| 55.25-W          | 2.09            | 2.08 | 2.31 | 2.71 | 2.98 | 3.45 | 3.35 | 1.81       | 2.12 | 1.95 | 3.25 |
| 68.00-E          | 1.94            | 1.99 | 2.28 | 3.13 | 3.04 | 3.84 | 3.03 | 1.51       | 2.32 | 2.08 | 2.95 |
| 68.00-W          | 1.50            | 1.52 | 1.66 | 2.28 | 2.31 | 3.02 | 2.36 | 1.18       | 1.58 | 1.52 | 2.32 |
| 76.50-E          | 0.38            | 0.38 | 0.41 | 0.48 | 0.53 | 0.65 | 0.52 | 0.30       | 0.38 | 0.34 | 0.58 |
| 76.50-W          | 0.43            | 0.43 | 0.48 | 0.61 | 0.61 | 0.75 | 0.65 | 0.35       | 0.48 | 0.42 | 0.64 |
| 94.00-E          | 0.26            | 0.26 | 0.27 | 0.32 | 0.50 | 0.40 | 0.23 | 0.21       | 0.29 | 0.40 | 0.34 |

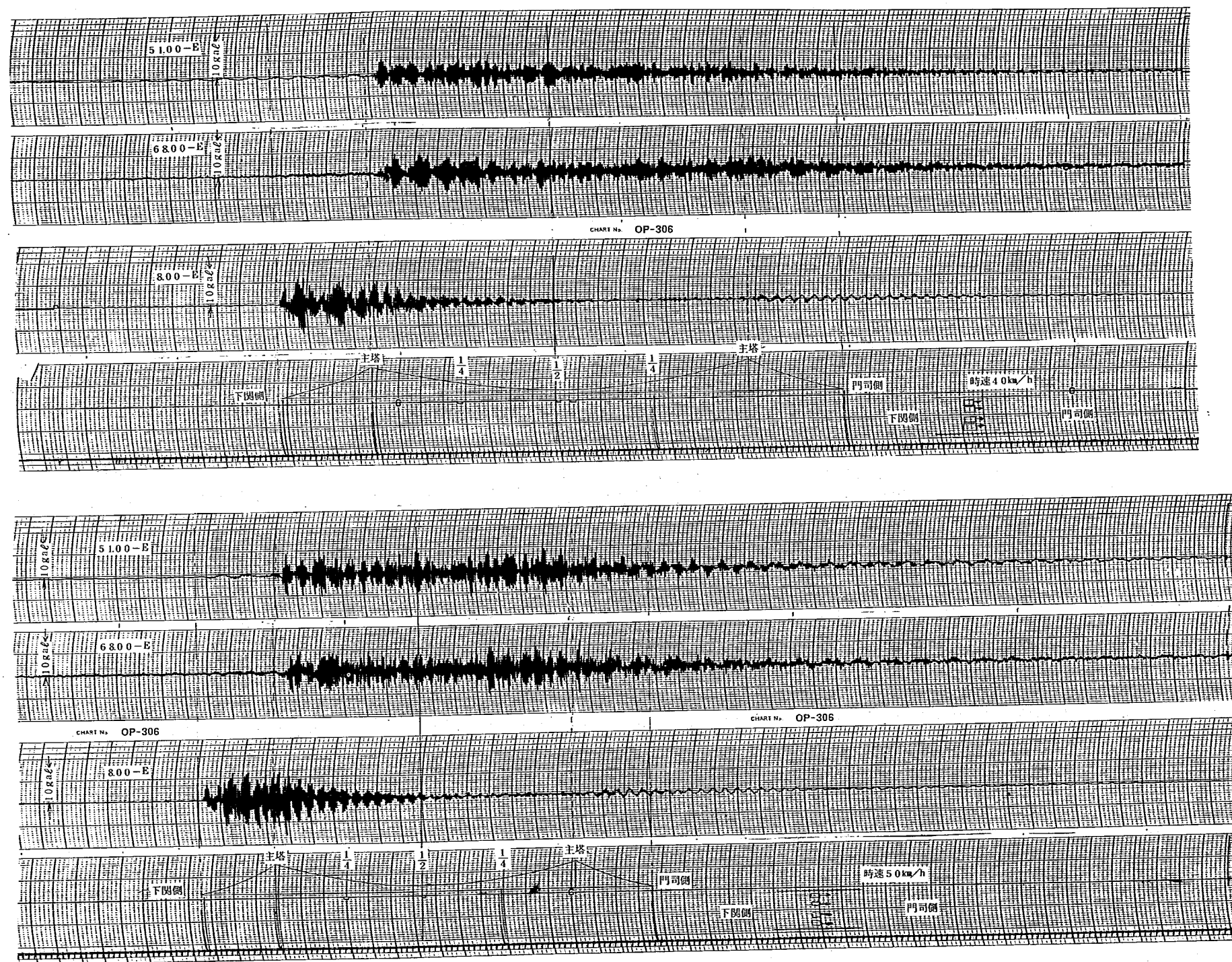


圖 10-1 走行試験応答記録

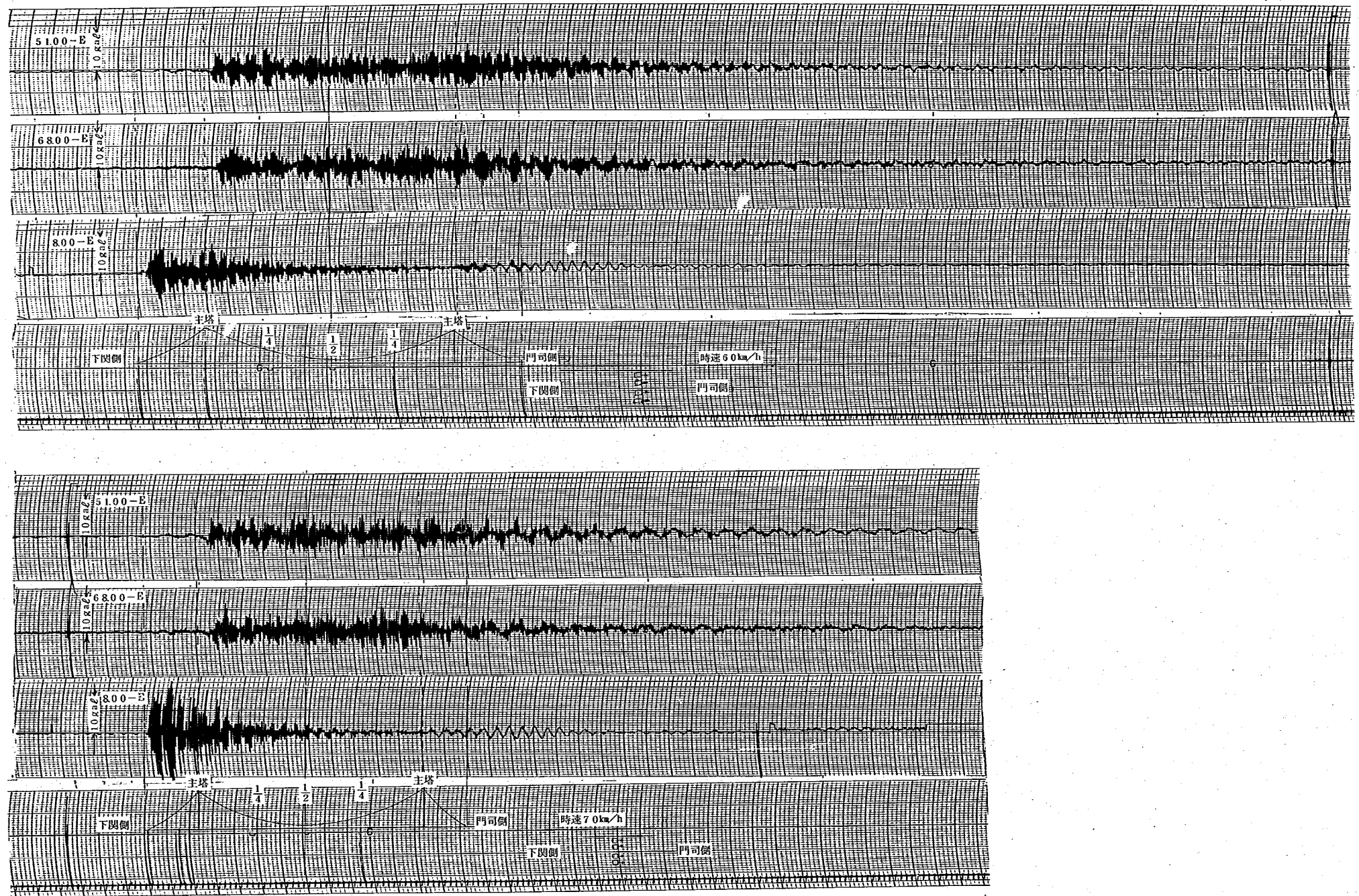


図 10 - 2 走行試験応答記録

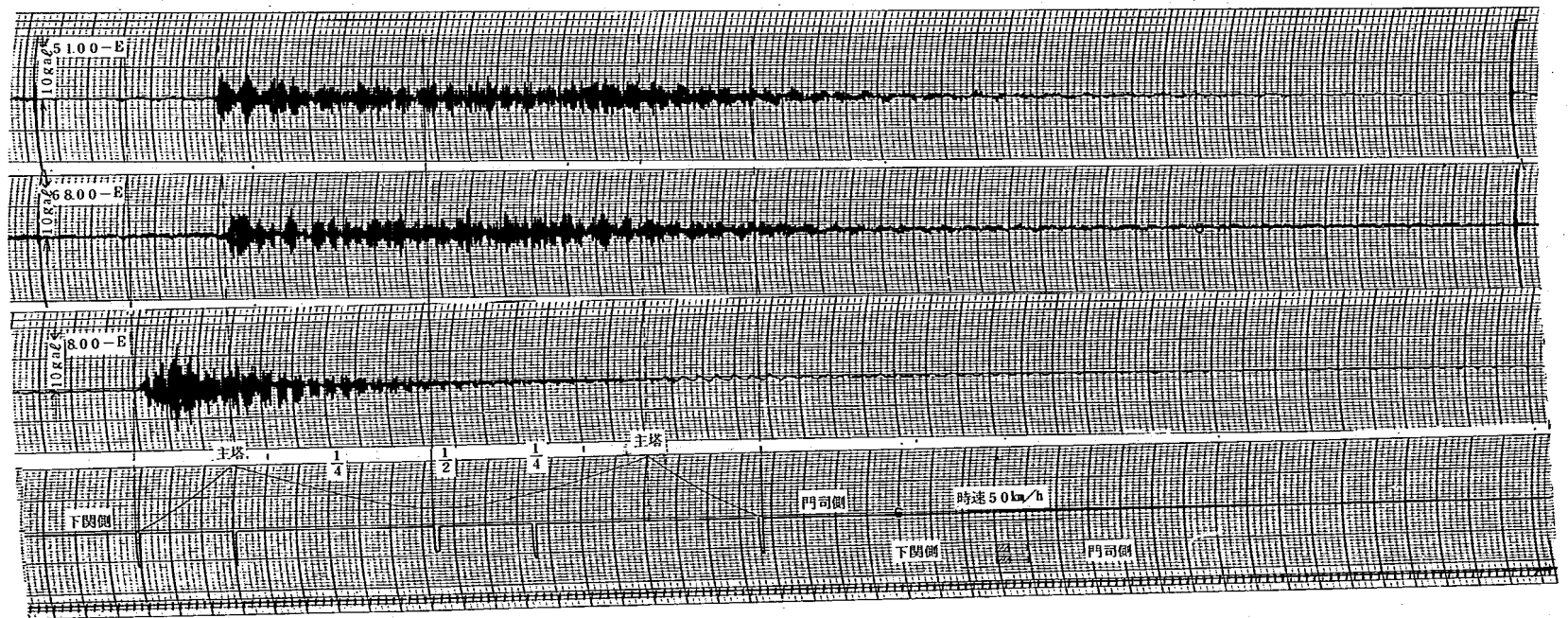
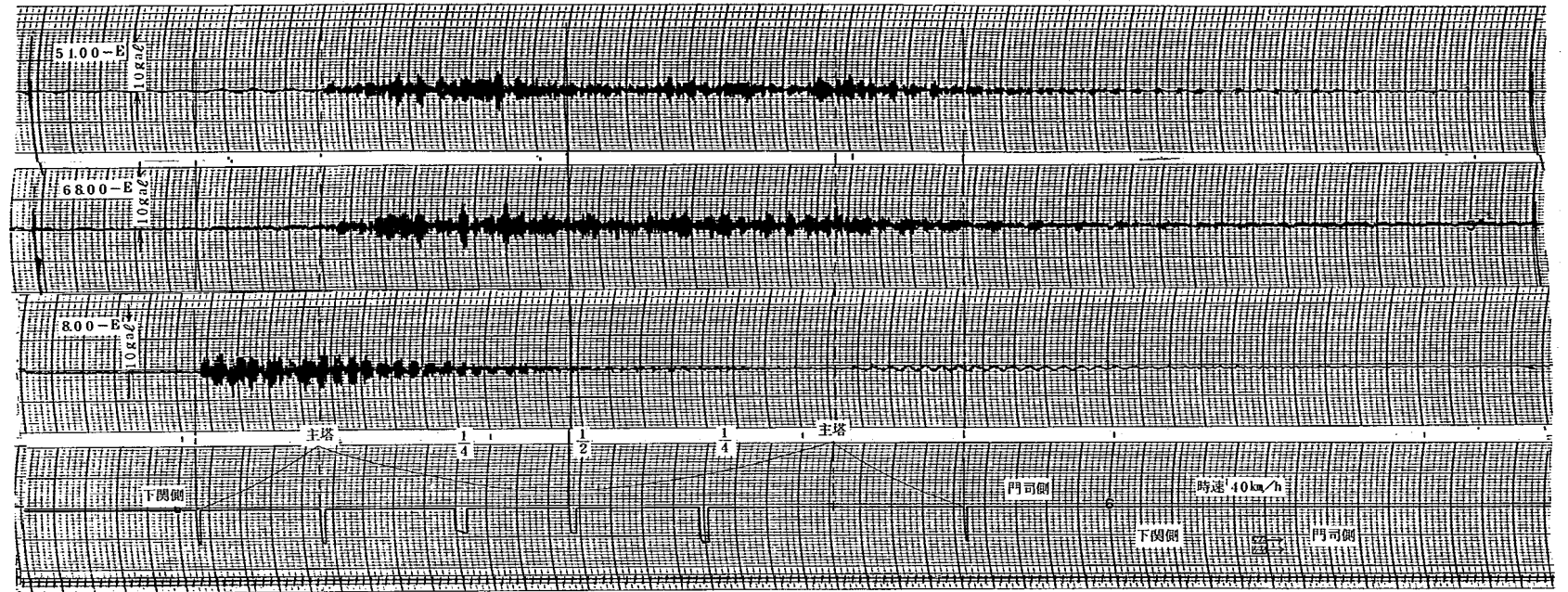


図 10-3 走行試験応答記録

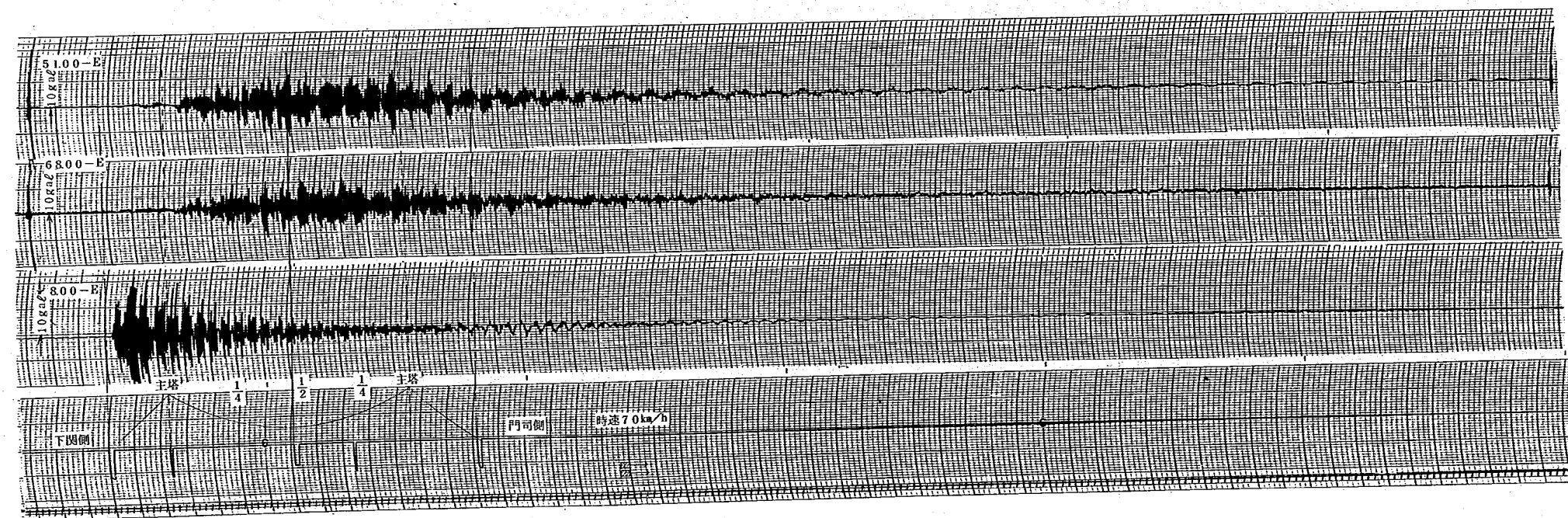
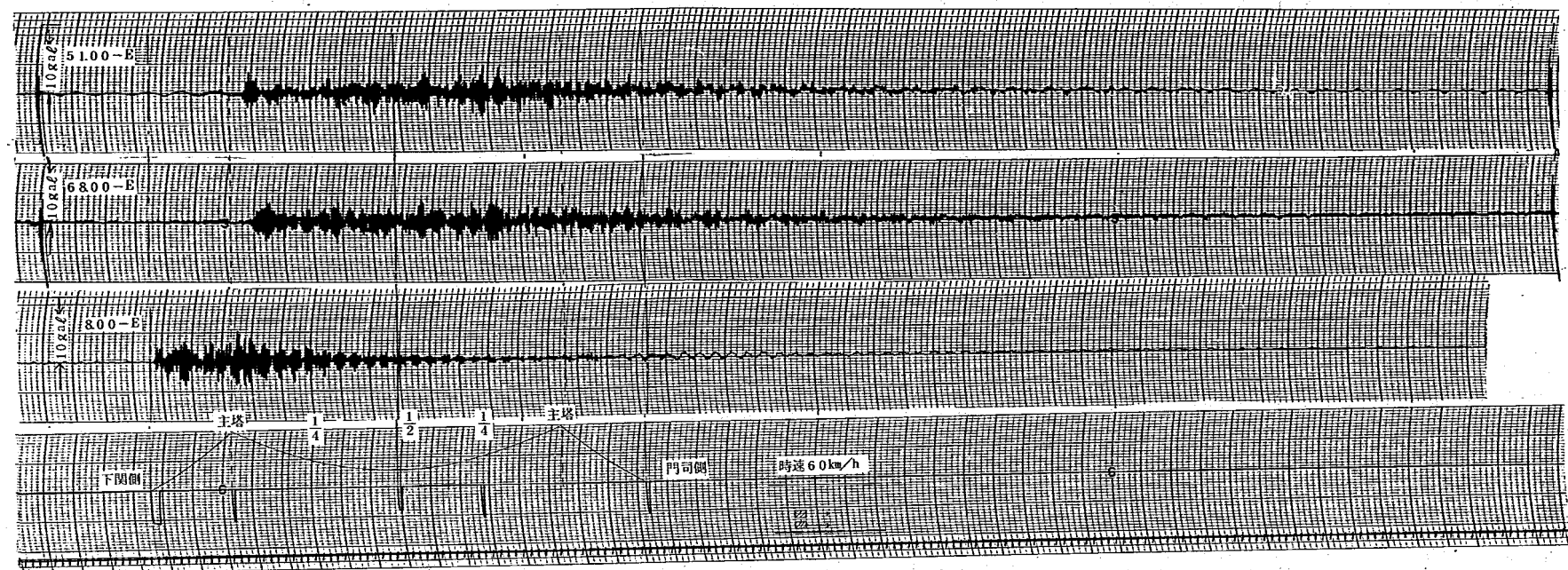


図 10-4 走行試験応答記録

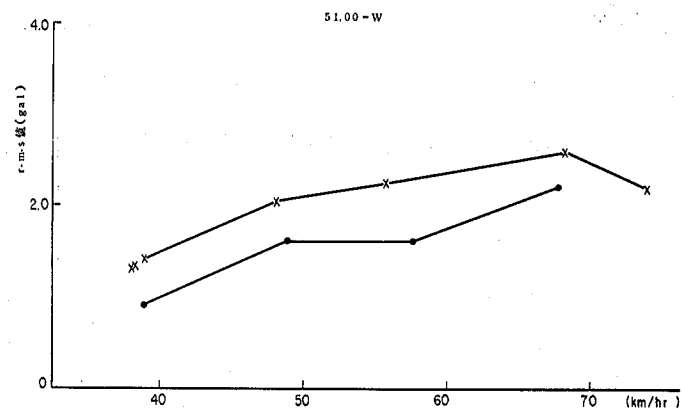
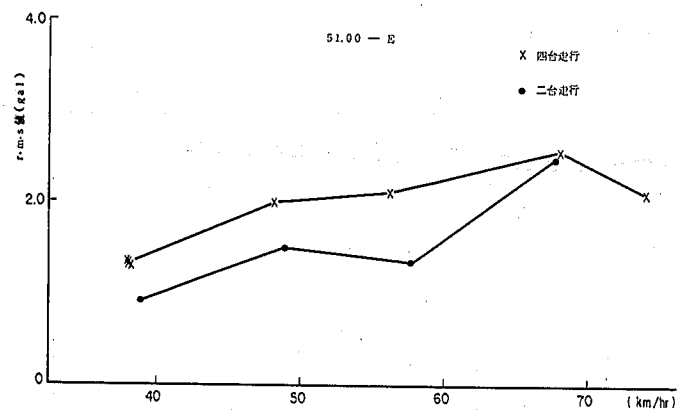


図 1 1 - 1 車速と振動加速度の r. m. s. 値

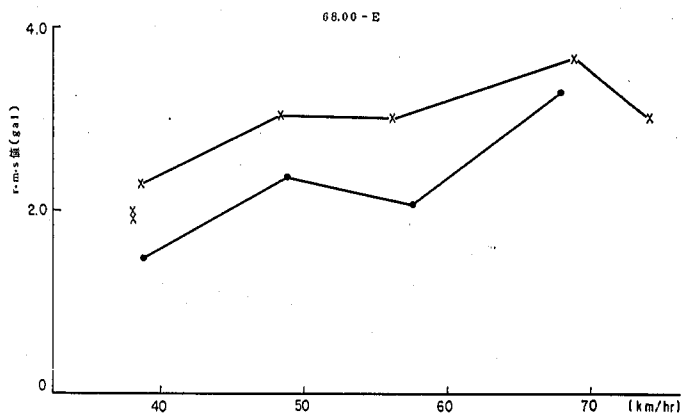
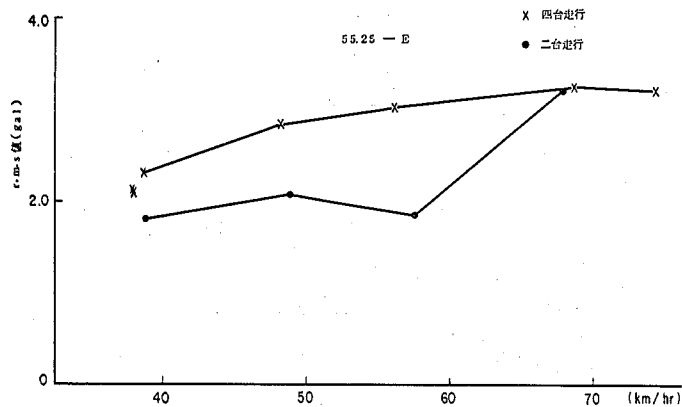


図 1 1 - 2 車速と振動加速度の r. m. s. 値

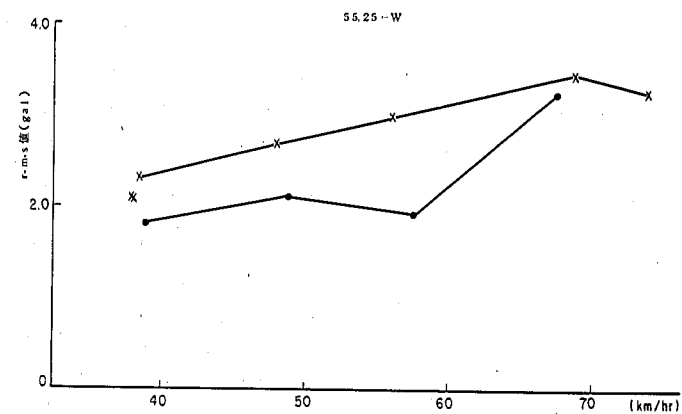
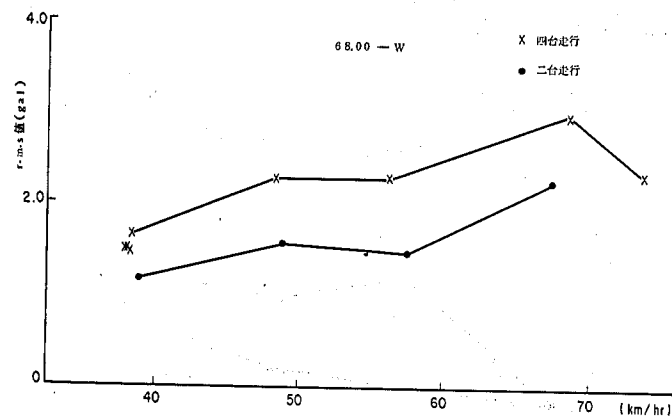


図 11 - 3 車速と振動加速度の r. m. s. 値

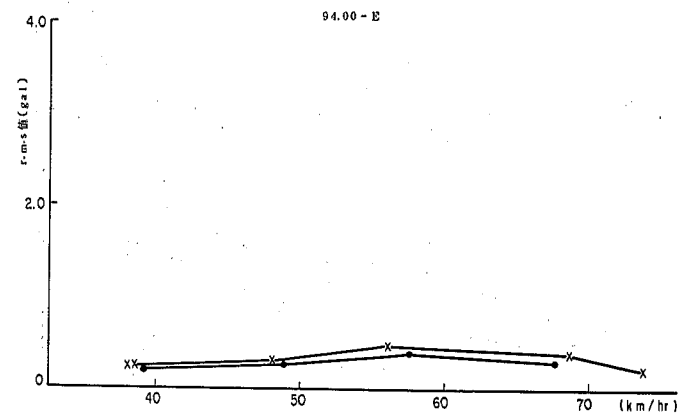
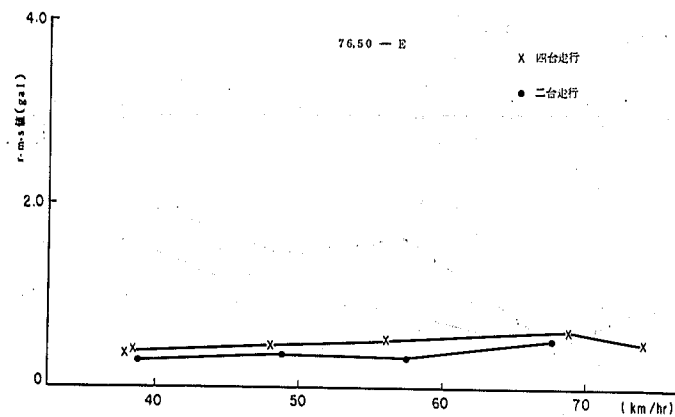


図 11 - 4 車速と振動加速度の r. m. s. 値

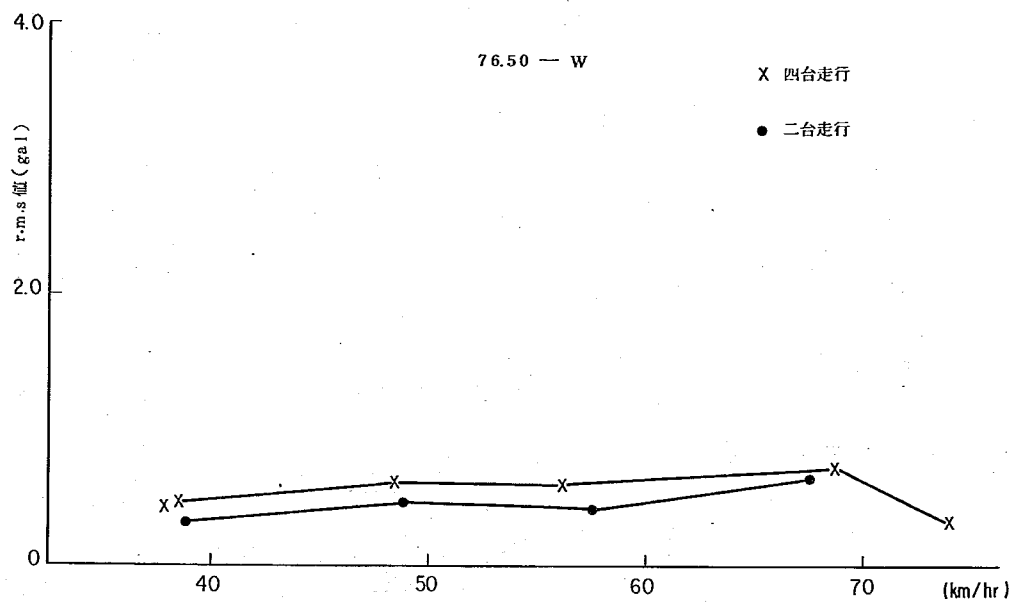


図 1 1 - 5 車速と振動加速度の r. m. s. 値

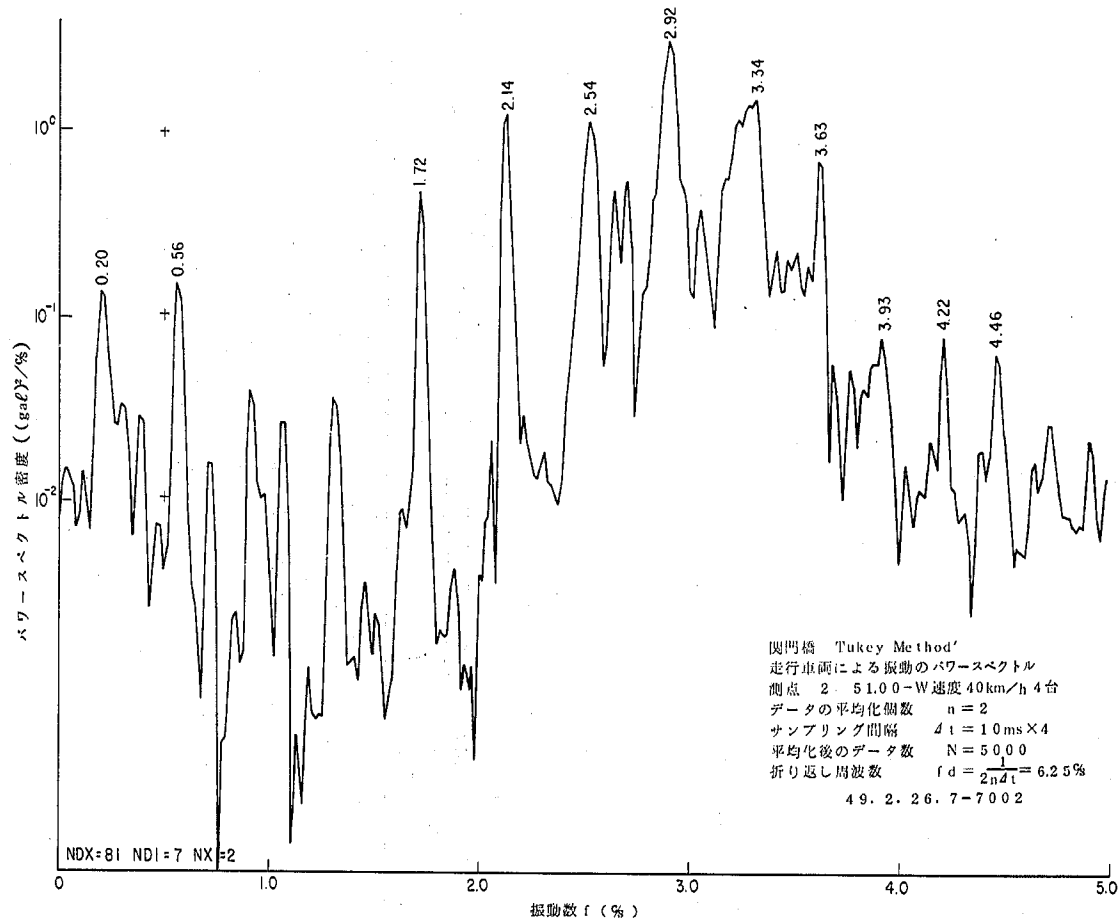


図12-1 走行車両による応答スペクトル

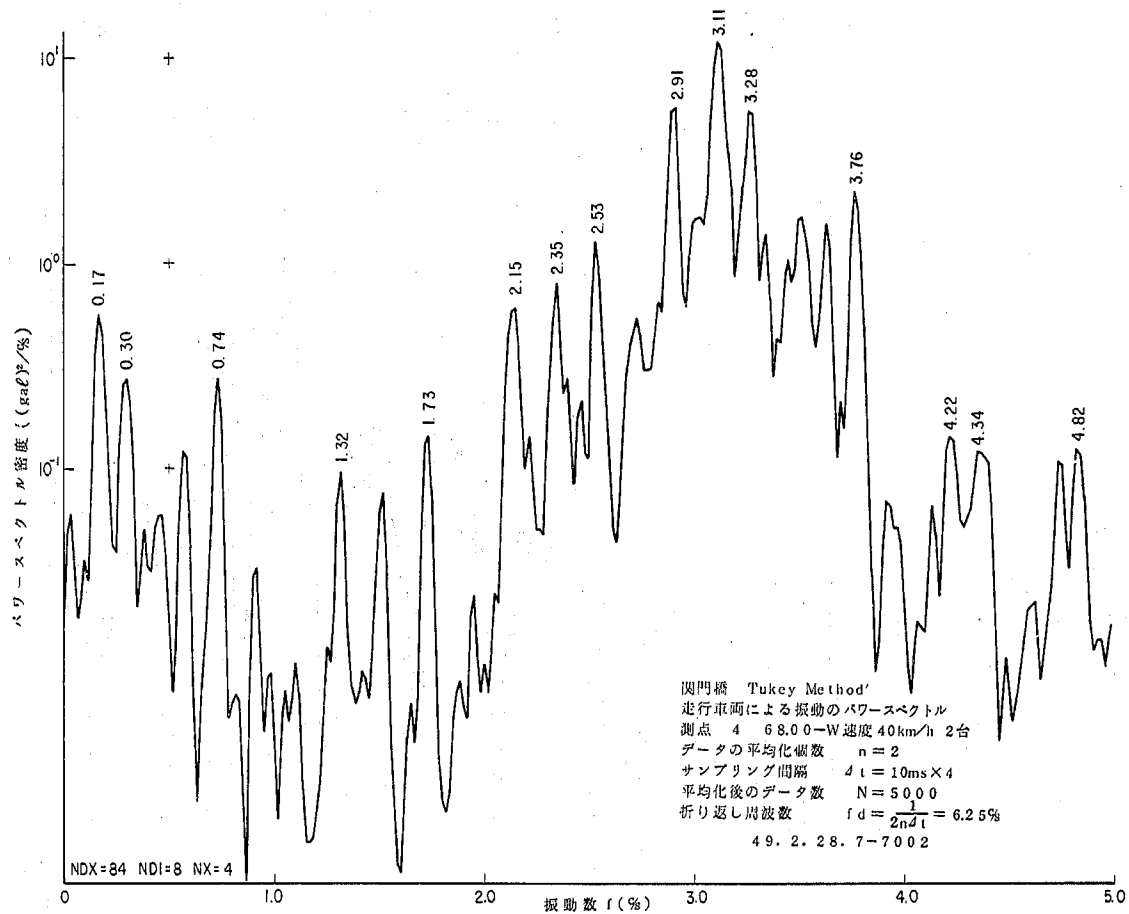


図12-2 走行車輛による応答スペクトル

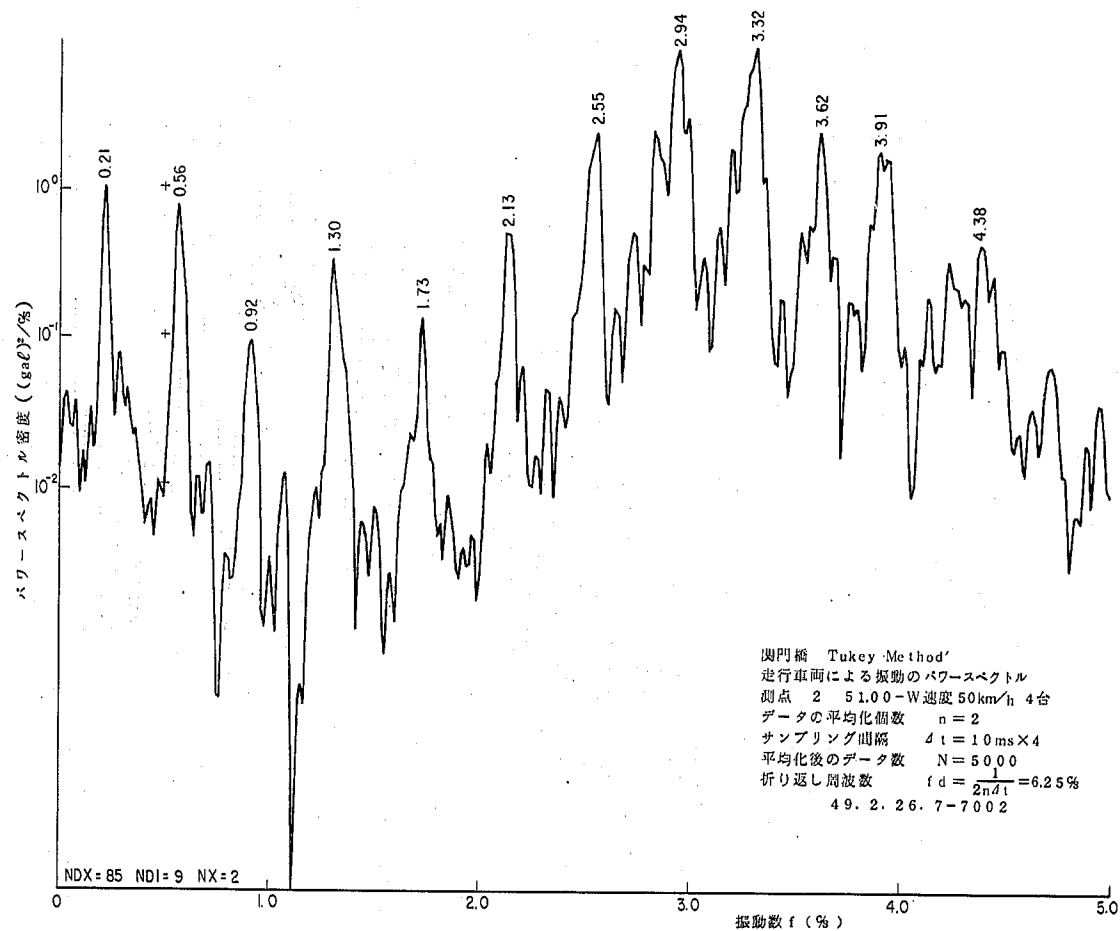


図 1 2 - 3 走行車輛による応答スペクトル

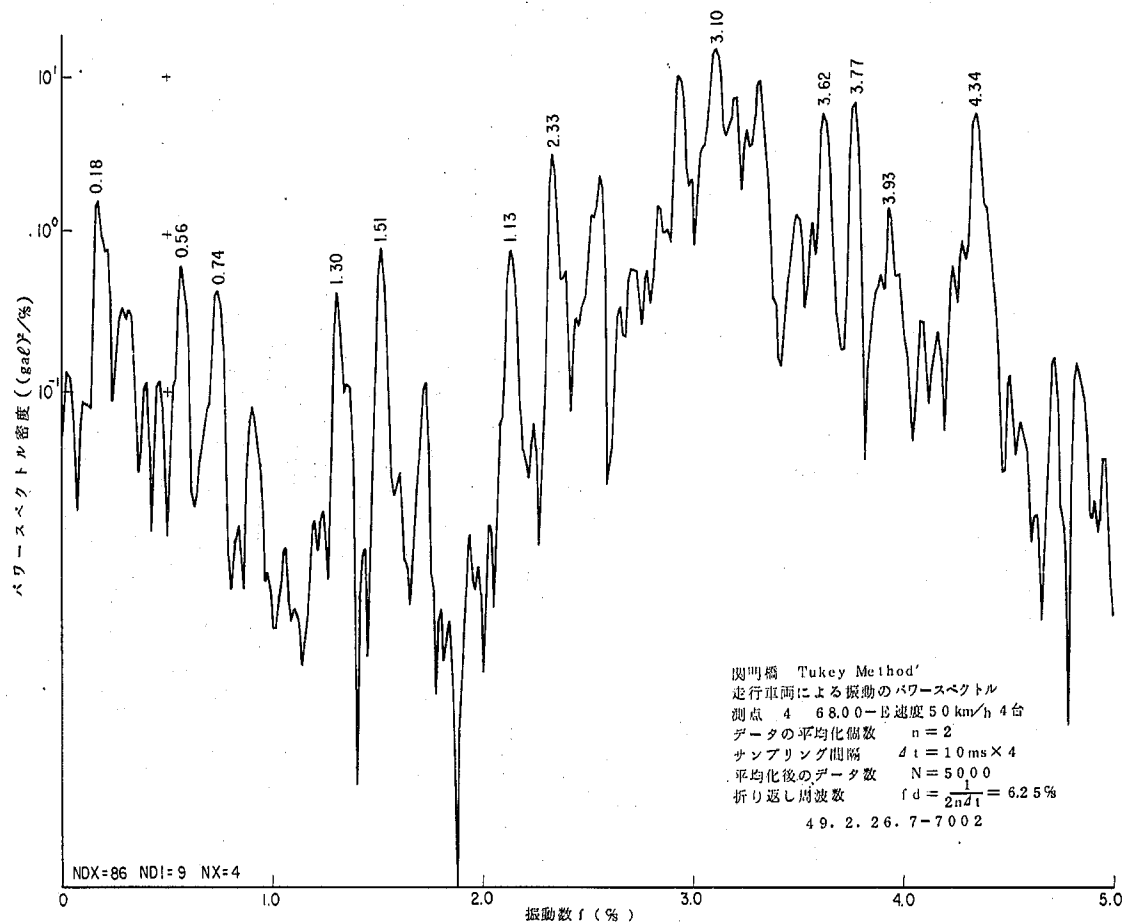


図 12-4 走行車輛による応答スペクトル

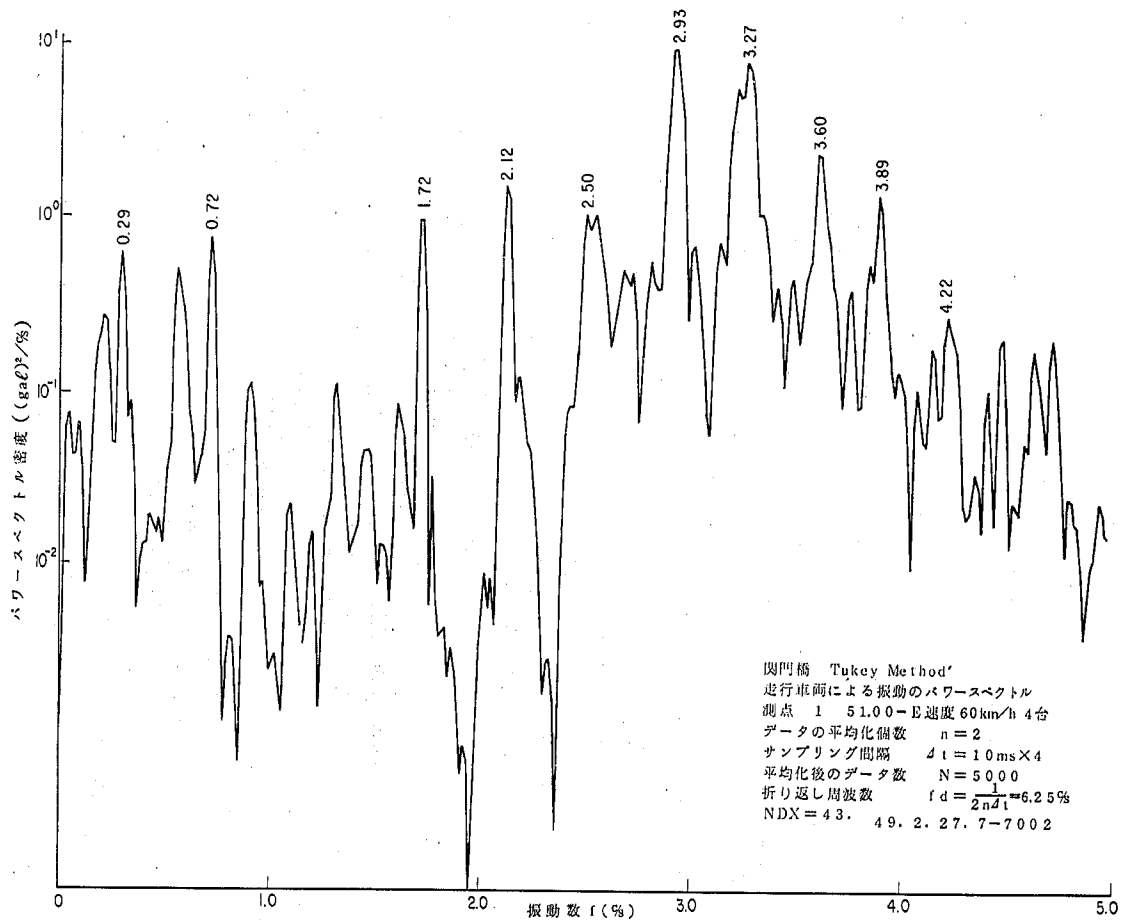


図 12-5 走行車輛による応答スペクトル

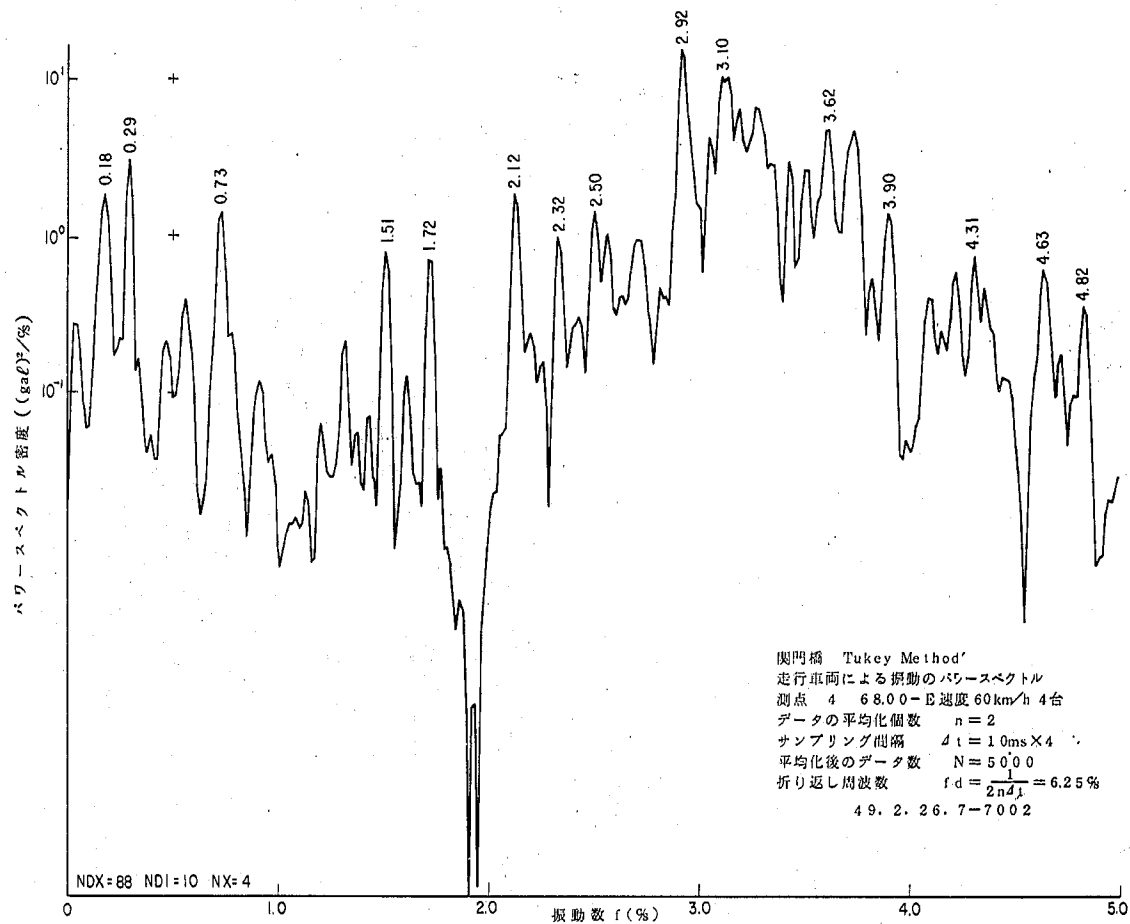


図 12-6 走行車両による応答スペクトル

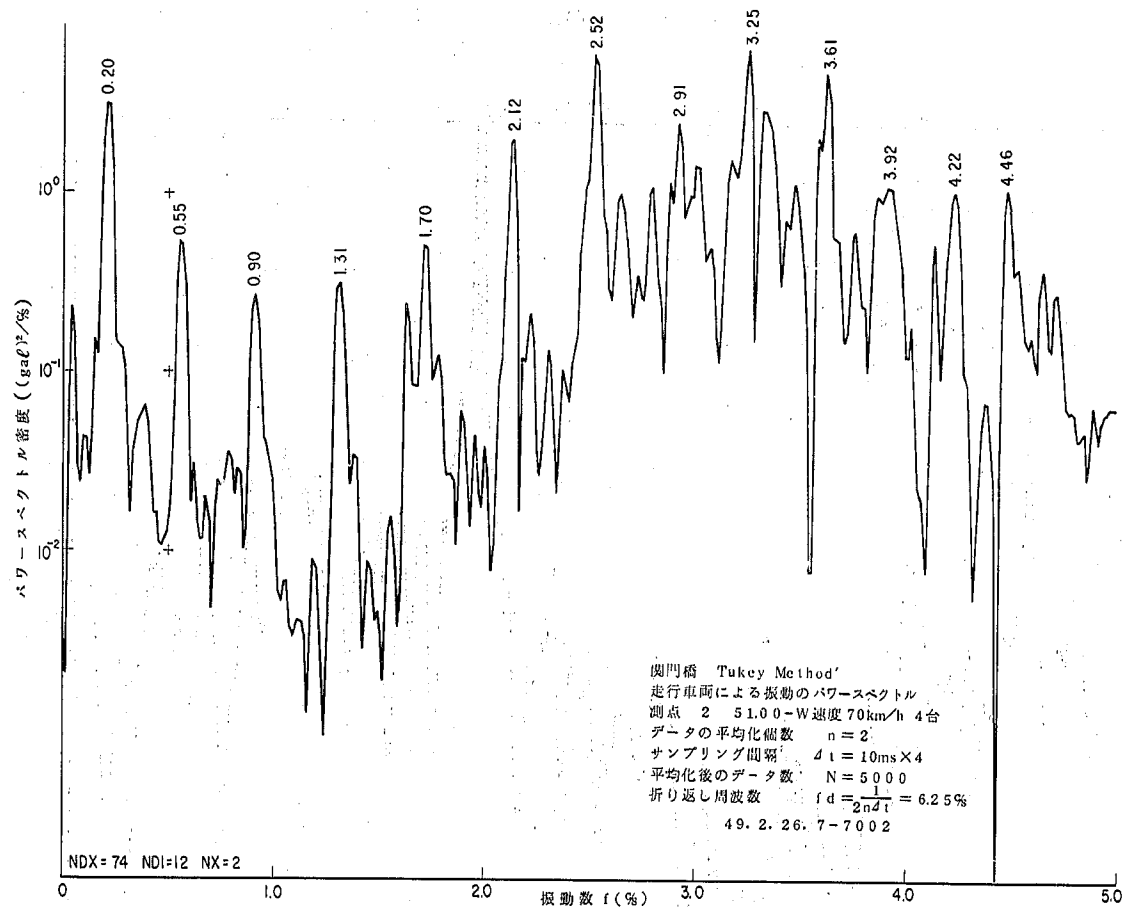


図 12-7 走行車輛による応答スペクトル

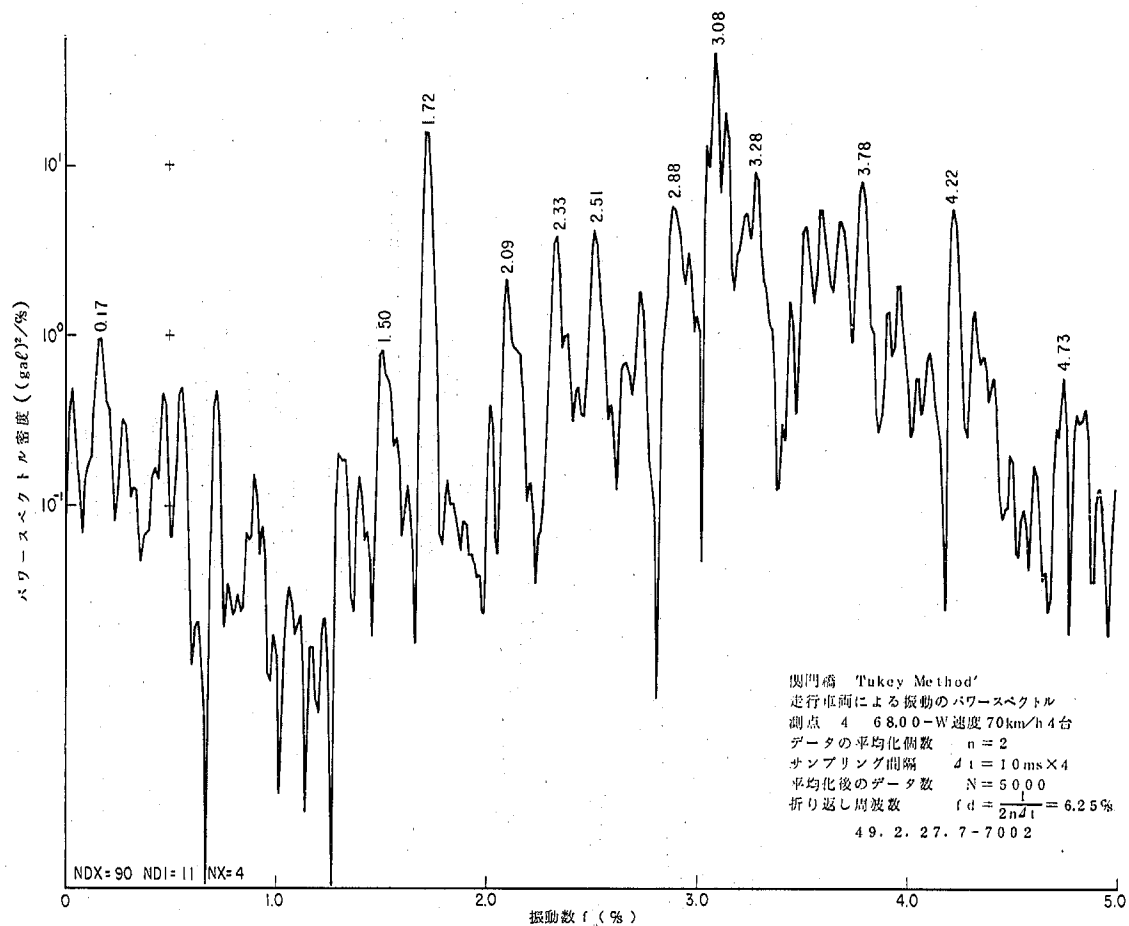


図 12-8 走行車輛による応答スペクトル

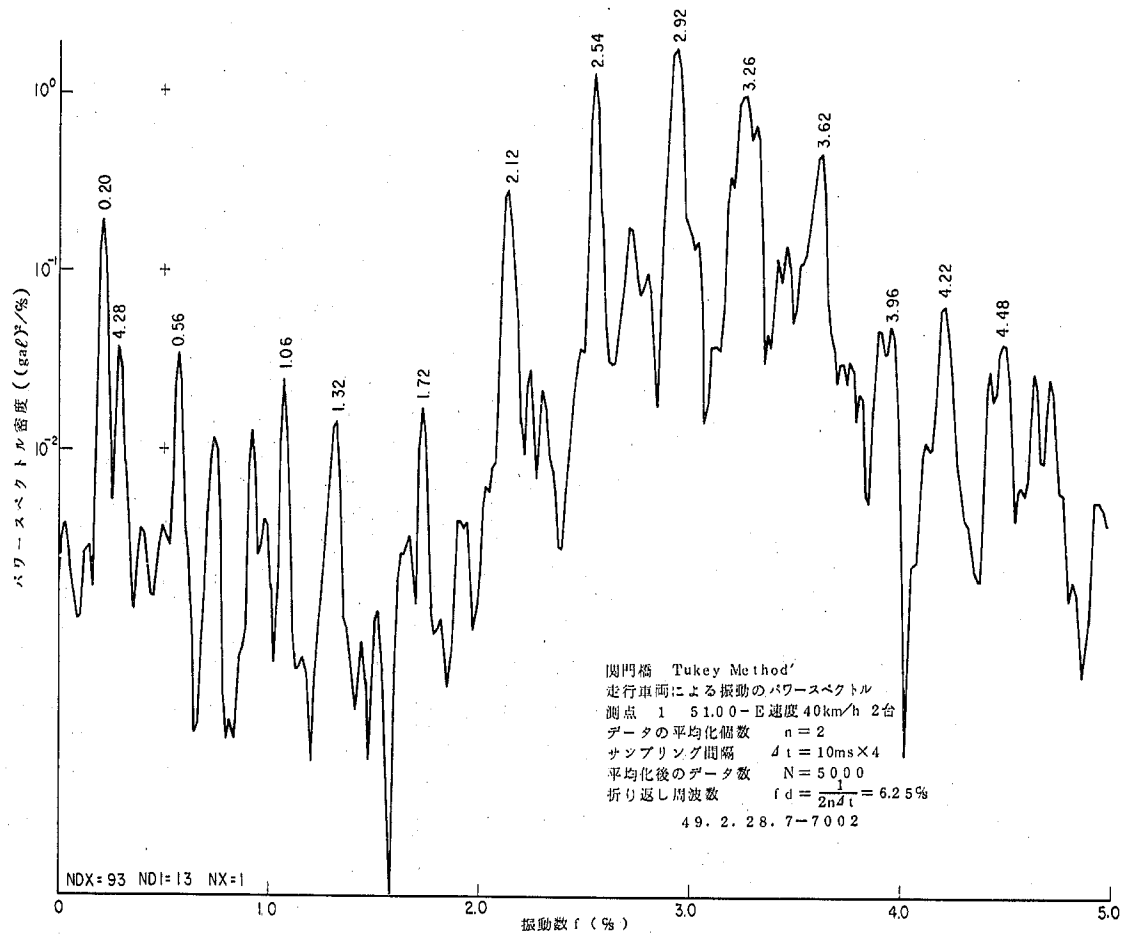


図 12-9 走行車輛による応答スペクトル

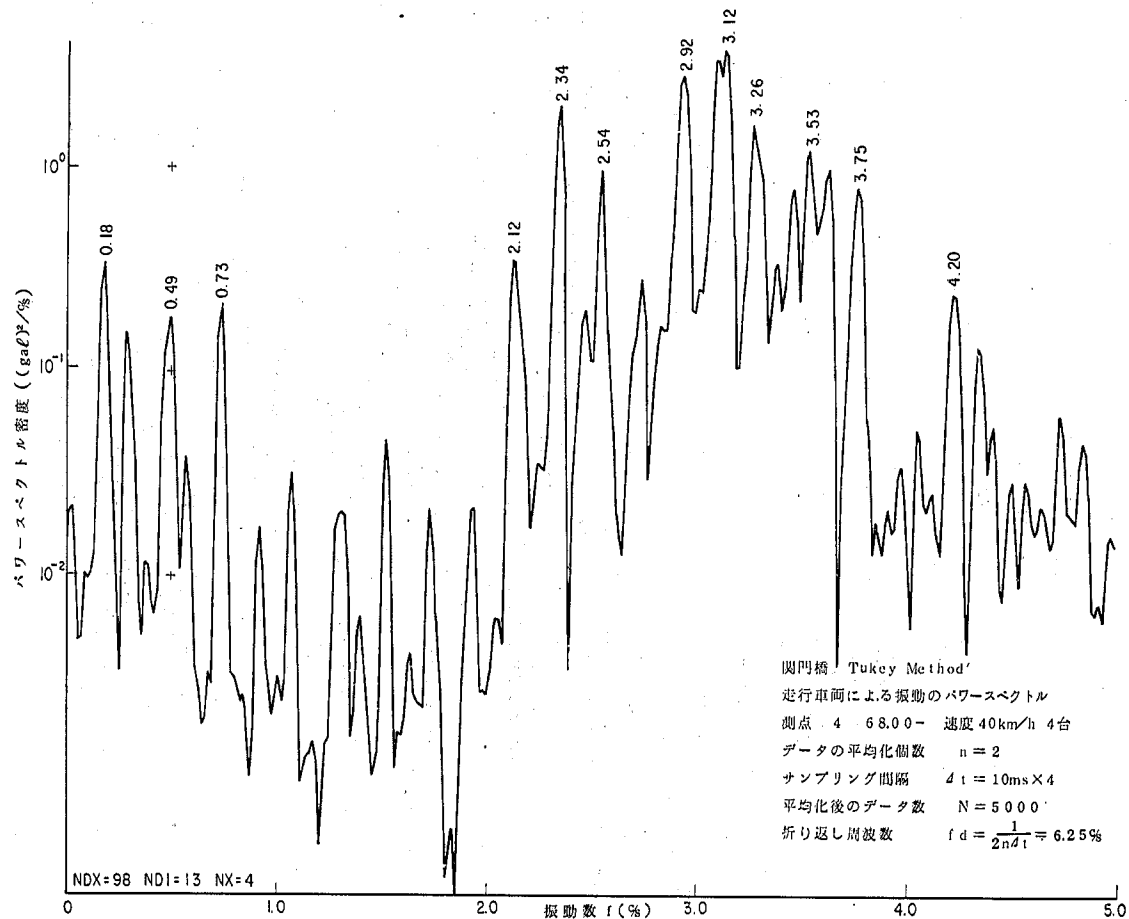


図 12 - 10 走行車輛による応答スペクトル

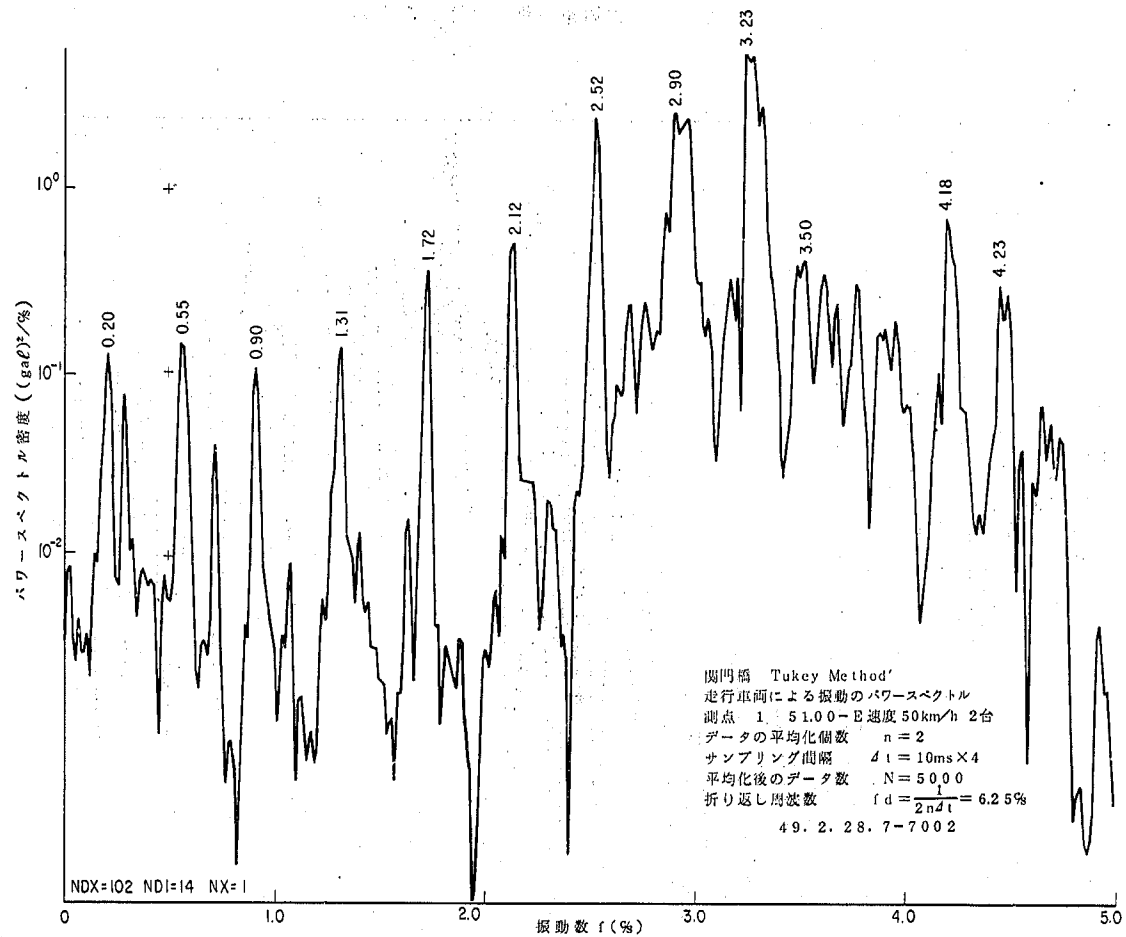


図 12-11 走行車両による応答スペクトル

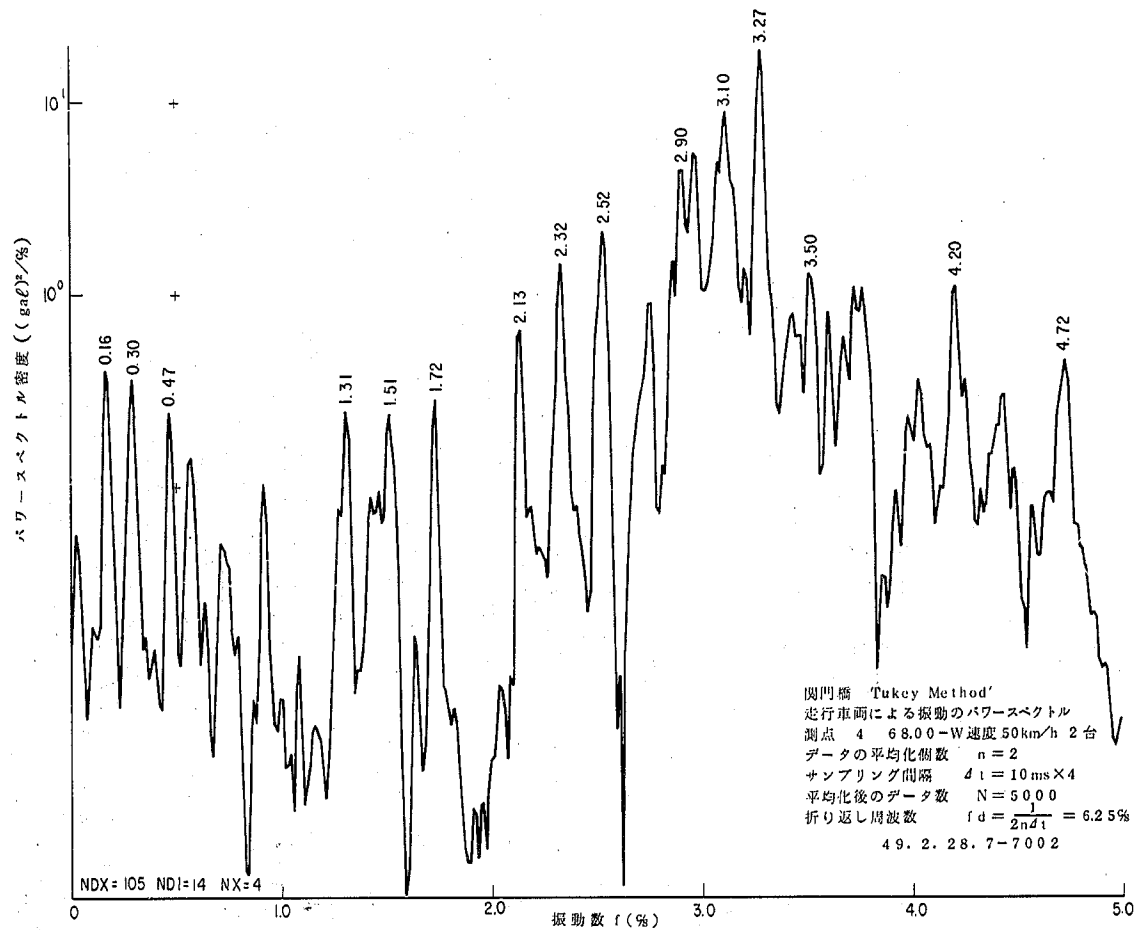


図 1 2 - 1 2 走行車輛による応答スペクトル

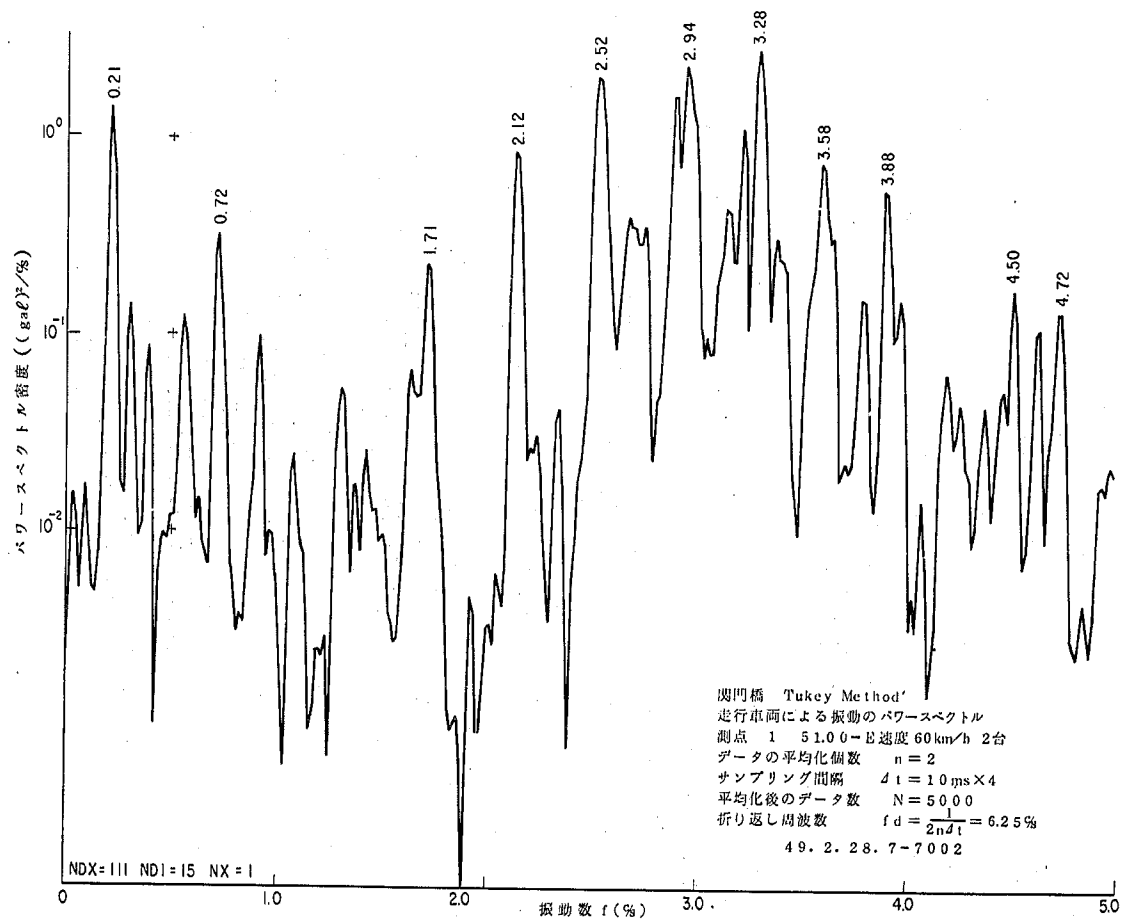


図12-13 走行車両による応答スペクトル

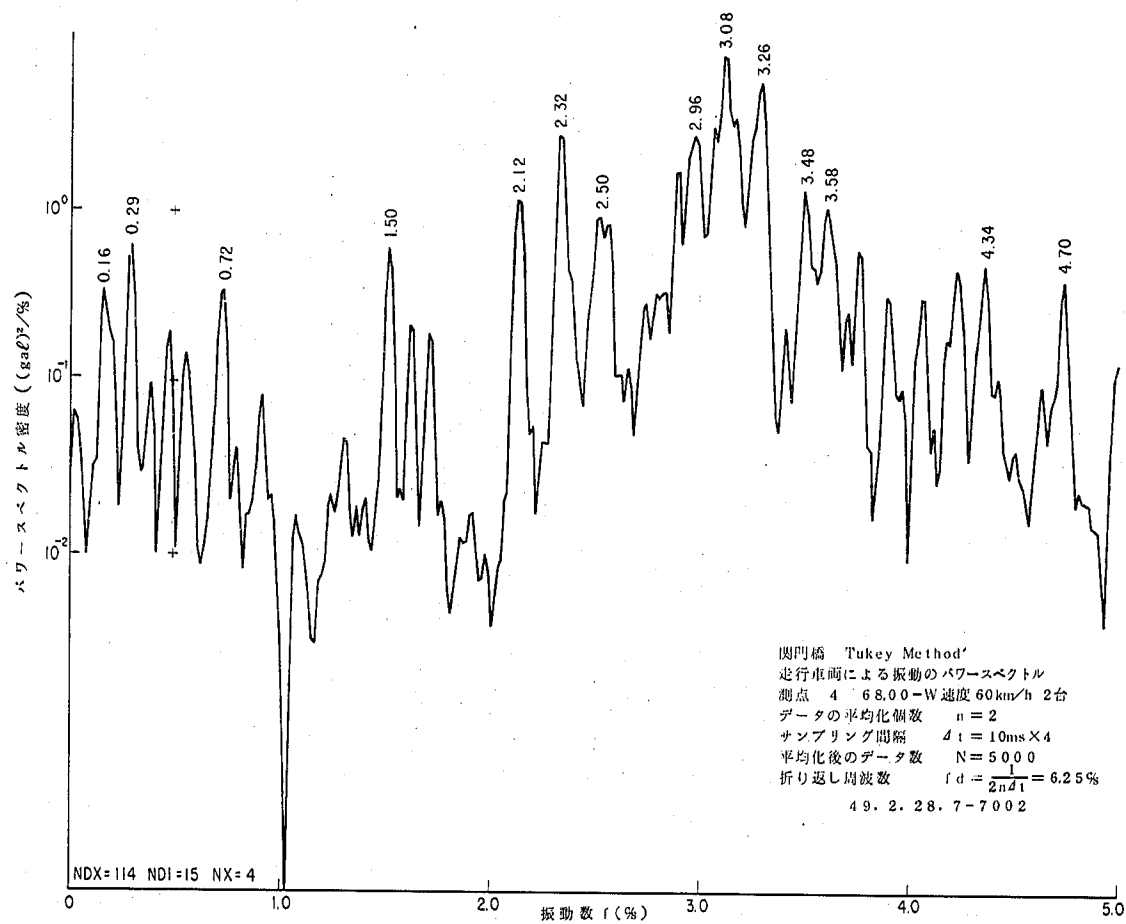


図12-14 走行車両による応答スペクトル

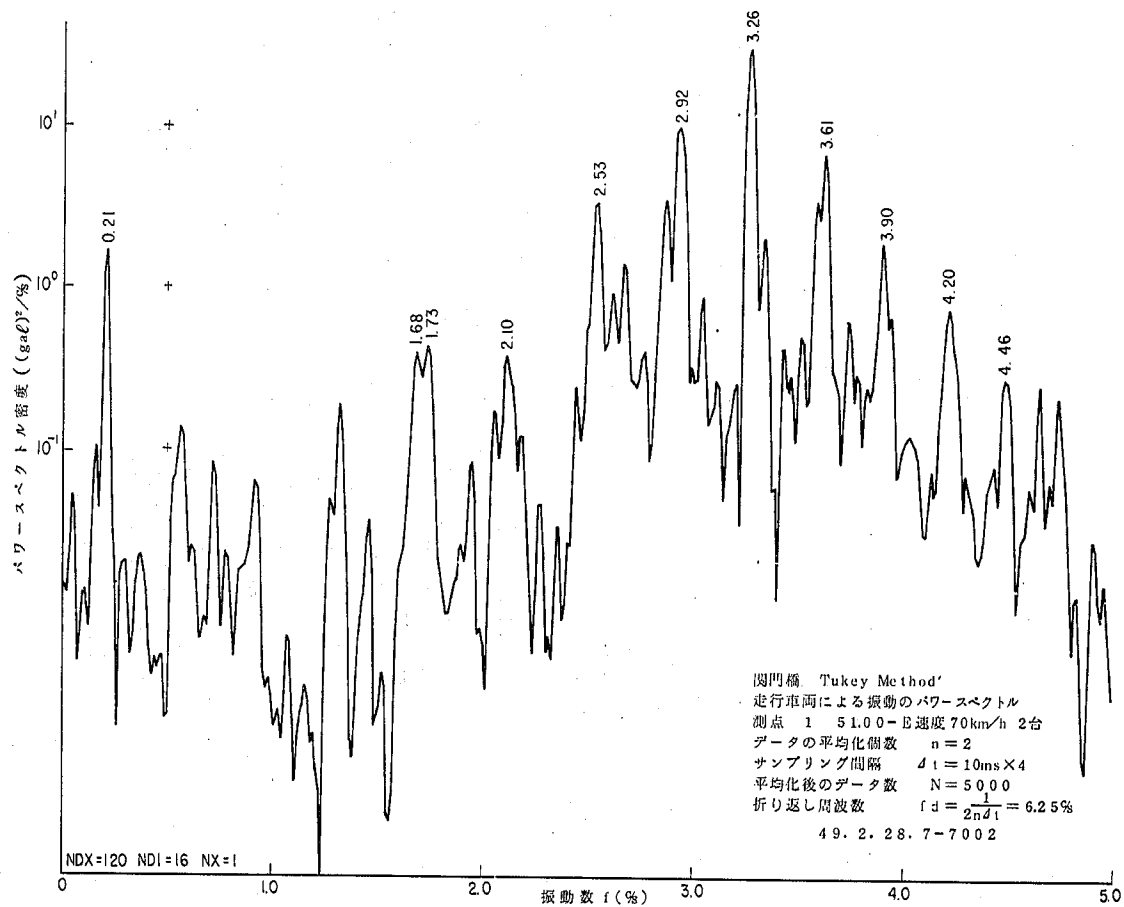


図 12-15 走行車輛による応答スペクトル

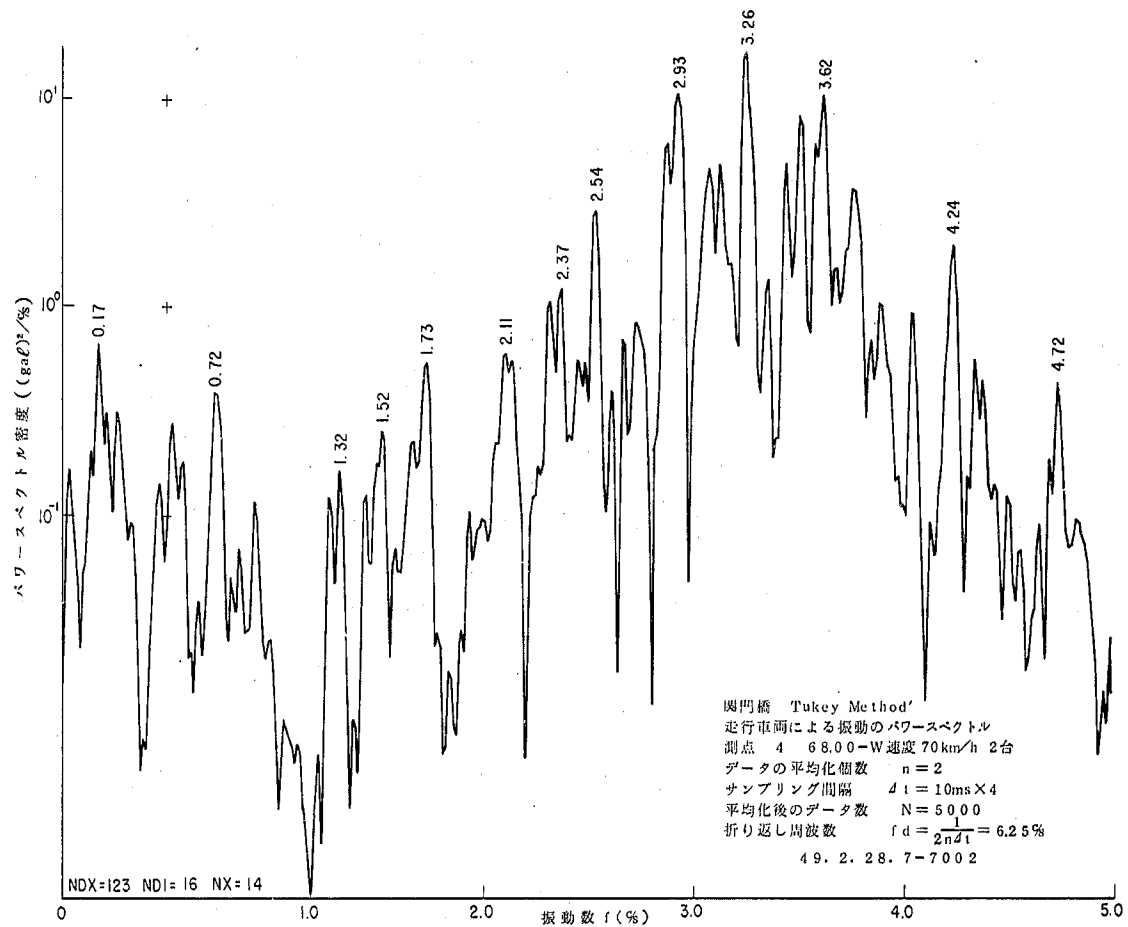


図 12-16 走行車輛による応答スペクトル

### 3.6 風による振動について

試験の当初思わぬ風雨に見舞われたため、起振機による加振試験は中止せざるを得なかった。  
そこで、表-5に示した測器の配置に従って風による本橋の応答を観測した。

観測は風速  $8 \sim 10 \text{ m/sec}$  程度の時に記録時間約30分ごとに3回計測した。

計測した記録の一例を図-13に示す。記録の整理は土木研究所のデータ処理システムを用い、Blackman-Tukeyの方法によって加速度パワースペクトルを算出した。代表的な計算結果を図-14に示す。

風による振動の計測は長期観測システムによっても行なわれたが、その結果の整理は未だ完了していない。



図 13 風による応答記録

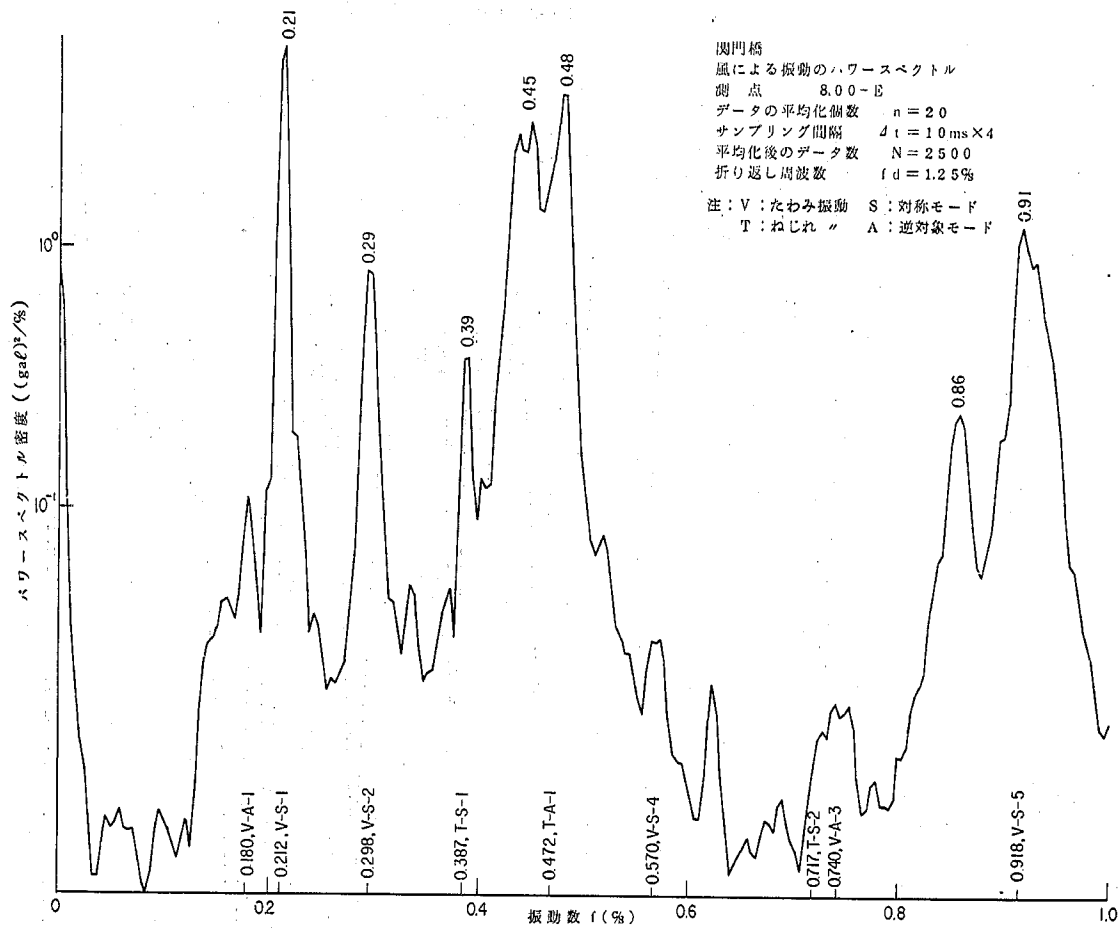


図 14-1 風による応答スペクトル

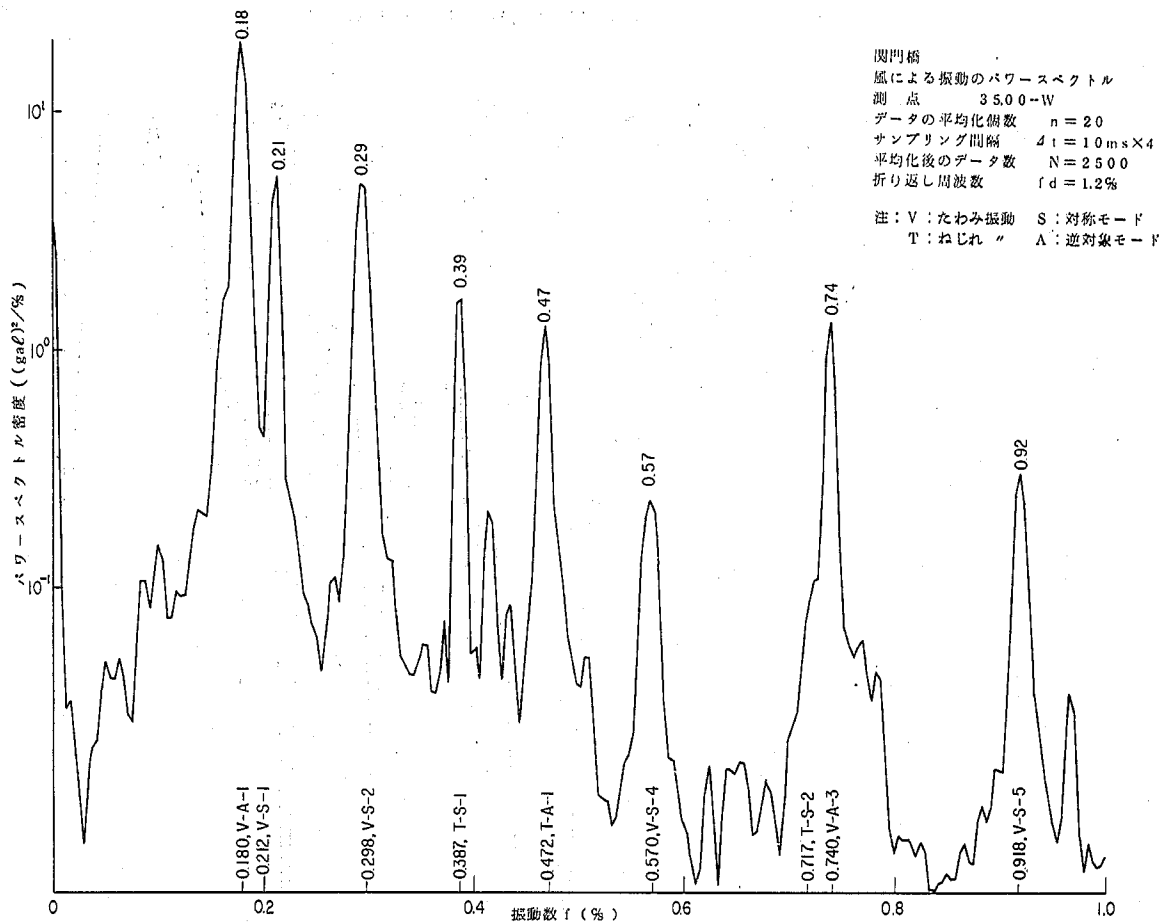


図 14-2 風による応答スペクトル

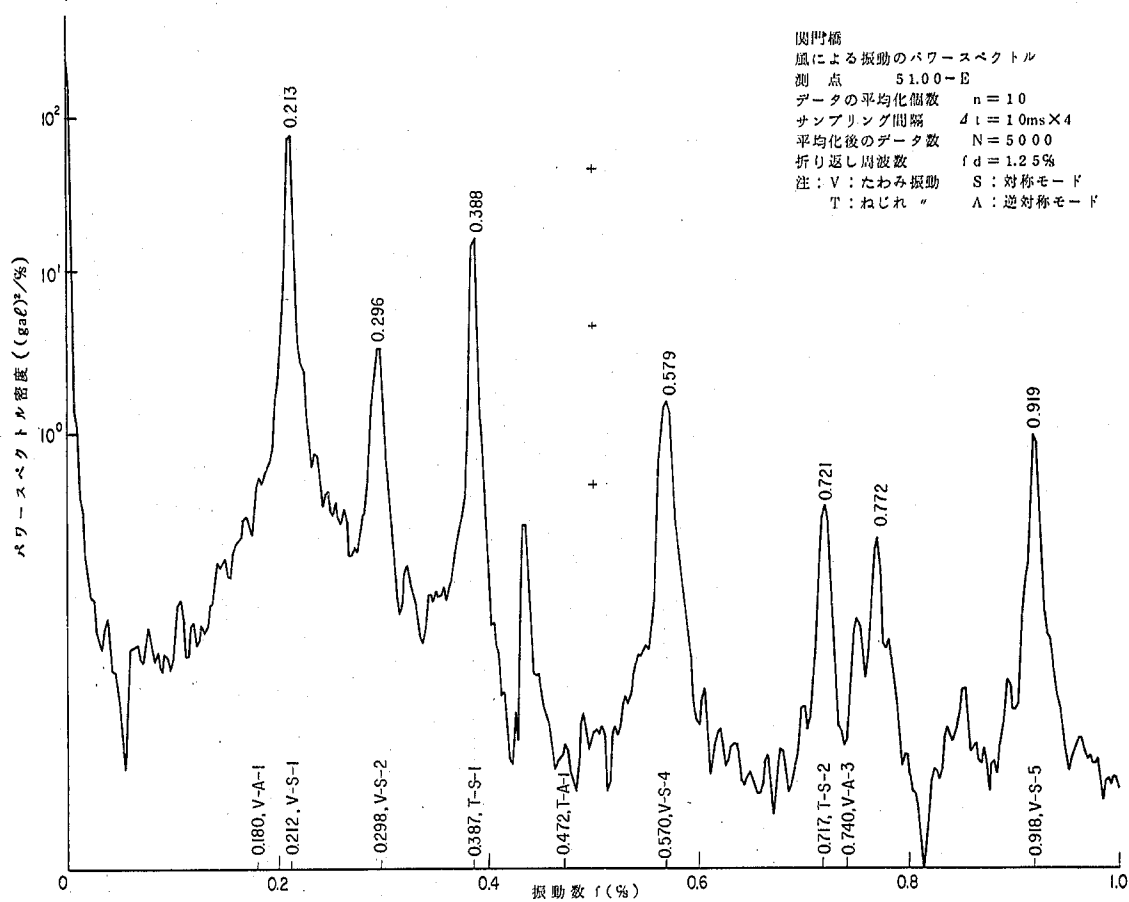


図 14-3 風による応答スペクトル

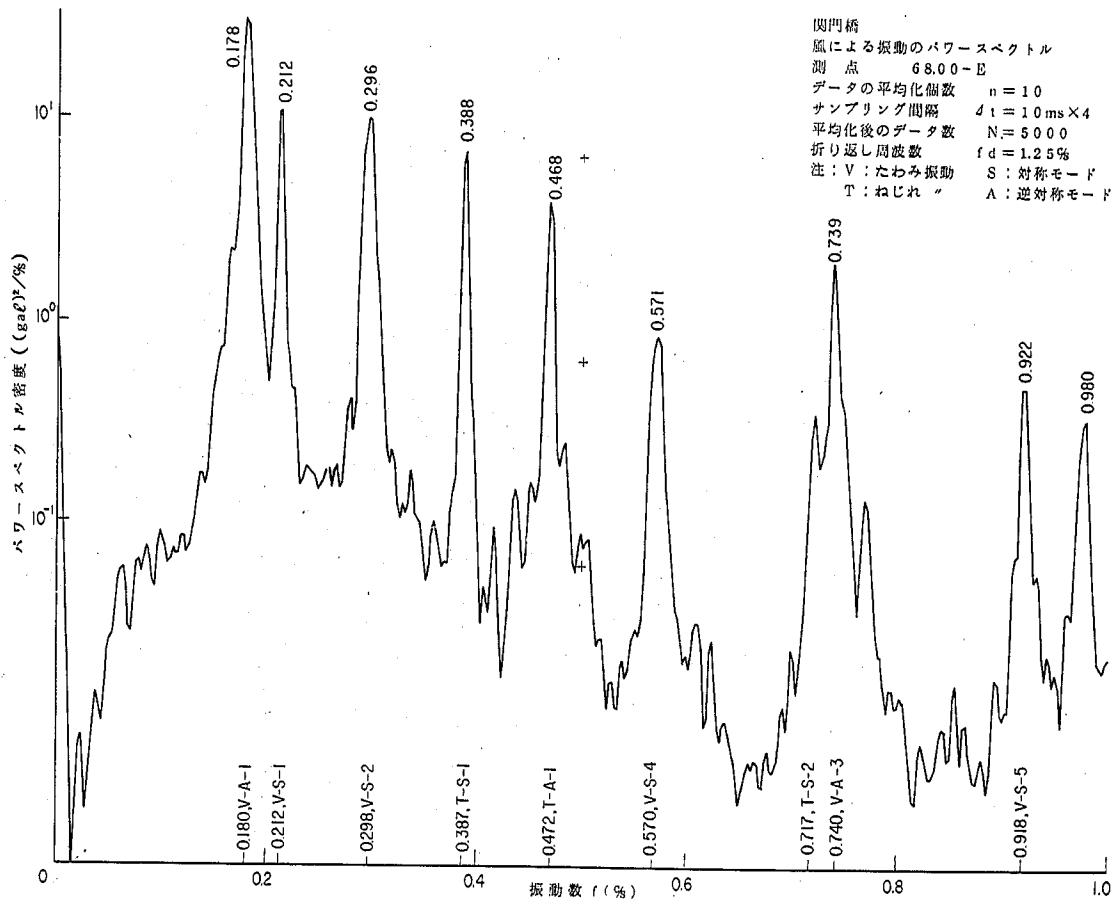


図 14-4 風による応答スペクトル

## 4. 試験結果の考察

### 4.1 上部構造の剛性について

#### 4.1.1 鉛直たわみ剛性

実測の鉛直たわみ振動数は、表-2に示したように、いずれも計算値よりも大きく、その差は逆対称1次振動を除き、いずれも10%以下である。逆対称振動においてはセンタースティにより中央点の補剛トラスとケーブルの相対振動が拘束されるため振動数は増加するが、今回の計算にはその効果は考慮されていない。それ故、逆対称1次振動では約18%の増加となっている。しかし、同じ逆対称振動ではあっても高次振動ではその効果は小さくなり、従って、逆対称3次振動では5%の増加に止まっている。

図-15、16には吊構造部のたわみ剛性、死荷重が固有振動数に及ぼす影響を示した。計算はBleichの方法に従いが、また基本諸元は表-1の値を採用した。同様な計算はケーブルの伸び剛性の効果についても実施したが、その影響度は小さいため、結果の紹介は省略した。そこで、固有振動数に対する鉛直たわみ剛性および死荷重の影響の度合いを検討するため、図-15、16を用い、それらの影響が独立に作用するものとして最適値を求めてみると鉛直たわみ剛性は、ほぼ計算値通り、また、死荷重は約7%程度計算値よりも小さく評価されることが判った。しかし用いた振動解析法自体にも仮定を含むものであるため、上記の検討も推算の域を出ず、今後更に検討する必要がある。

#### 4.1.2 振れ剛性について

本橋の吊構造部の構成は、図-2に見られるように、床トラスの上弦材は補剛トラスの上弦材より1.2m下がった位置にとりつけられている。それ故、補剛トラスの振れ剛性における有効高さは9.0mよりも小さいことが予想される。更に吊構造部が振れ振動する際にどの点を中心にして回転するかが重要となる。図-17は、これらの関係を調べるため作成したもので補剛トラスの高さ、極慣性モーメントと振れ固有振動数の関係を示す。計算はBleichの方法に従った。それによると、鉛直たわみ振動の場合と同様に計算の仮定を考慮すると軽々に結論することは困難ではあるが、対称1次振動では、トラス高7.8m、回転中心3.9mにほぼ等しいが、振動次数が高くなるに従い、漸次有効高さは減じていくように見える。ただ、最低次振動についてののみ考えるならば、回転中心を重心位置(下弦材より7.642m)に仮定することは振れ固有振動数を過大評価することになるようである。なお、この点については次項以降で触れることとする。

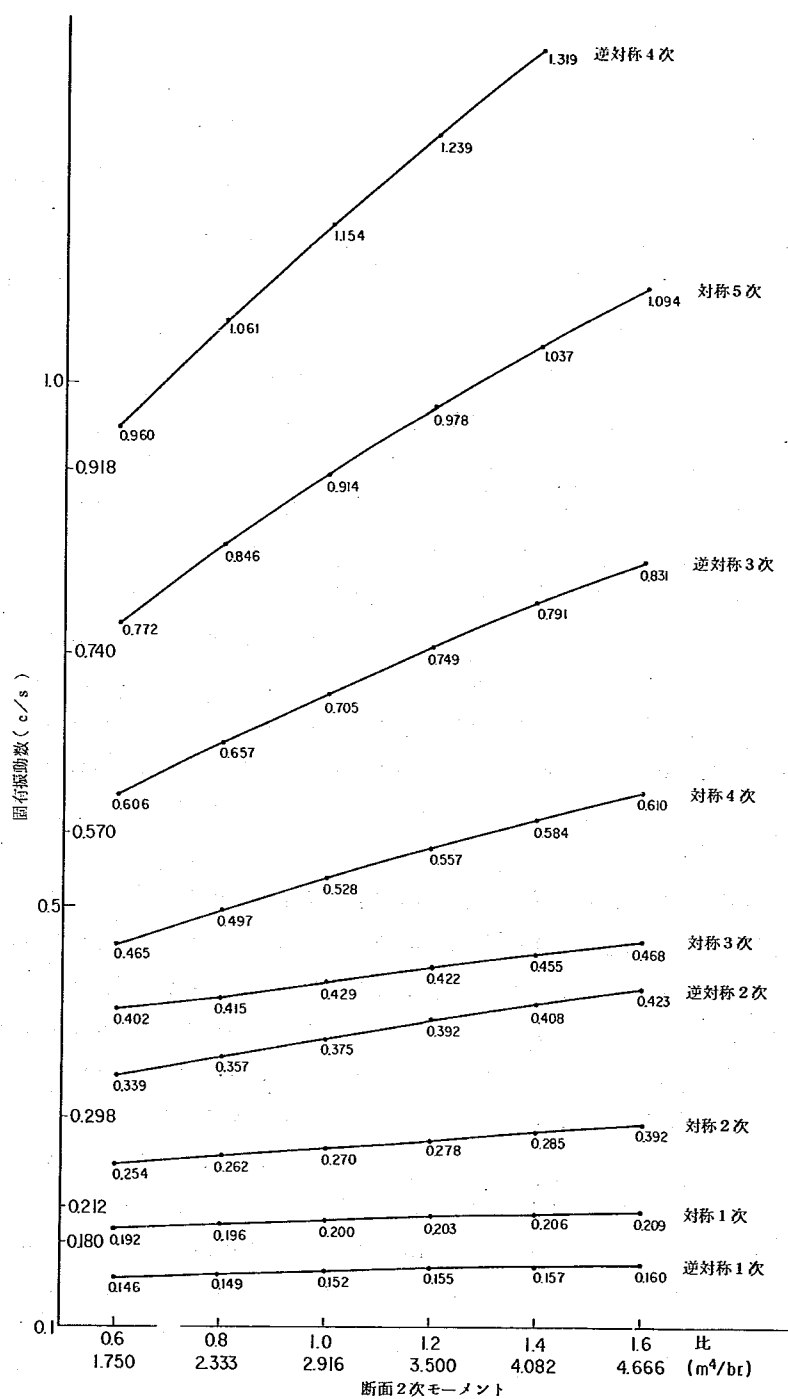


図-15 断面2次モーメントと鉛直たわみ固有振動数

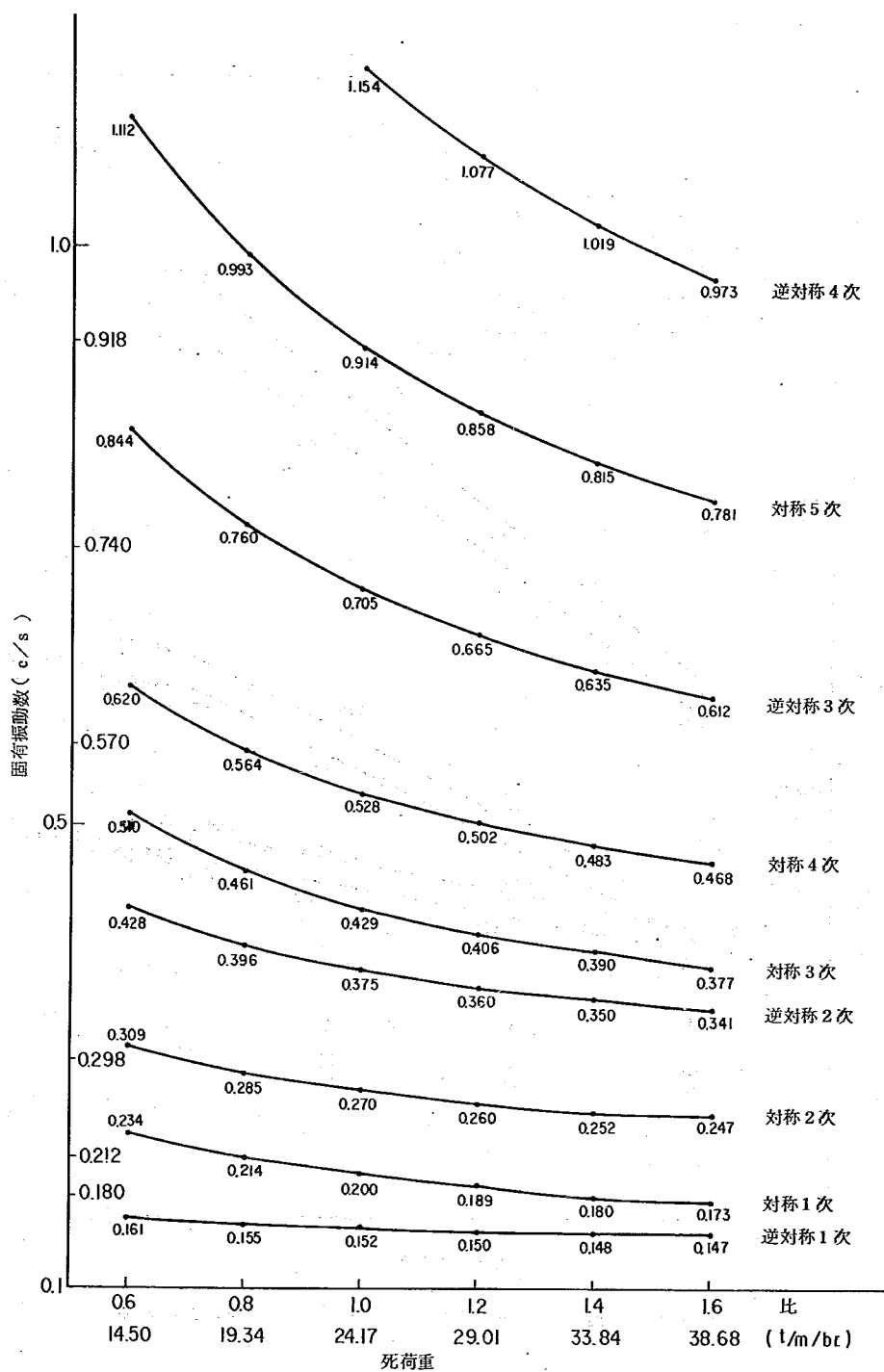


図 - 1 6 死荷重と鉛直たわみ固有振動数

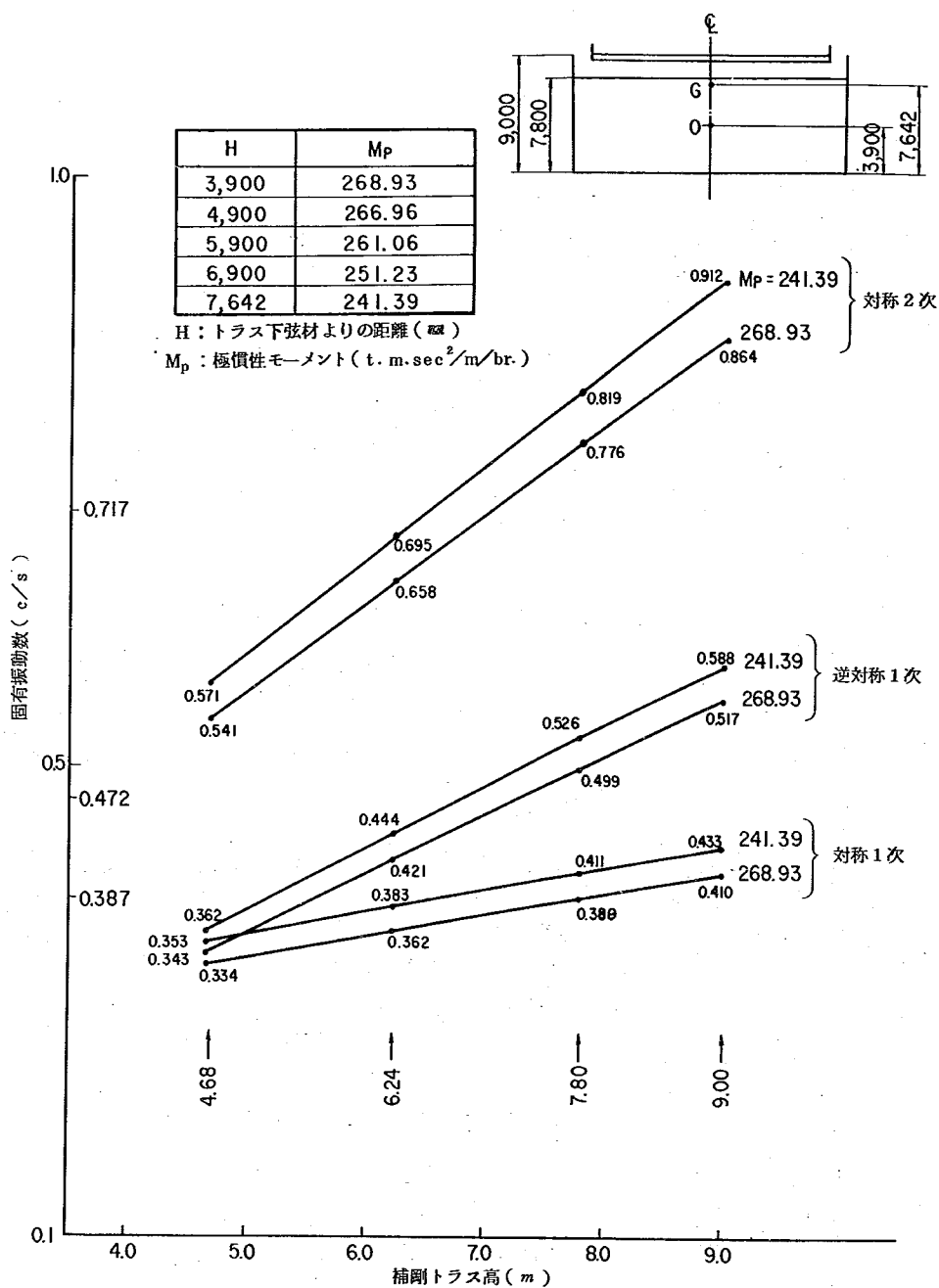


図 - 17 補剛トラス高, 極慣性モーメントと振れ固有振動数

## 4.2 上部構造の振動減衰について

自由振動の記録から求めた構造減衰（対数減衰率  $\delta$  表示）と共振々動数の関係を図-18に図示する。一般的な傾向として鉛直たわみ振動の構造減衰は振動数の増加と共に  $0.010 \sim 0.012$  付近に漸近すると共に資料のバラツキも少なくなる。また、捩れ振動の場合は  $0.012 \sim 0.016$  の範囲に集中していることが判る。これらの数値は、何れも従来考えられて来たものより可成り小さく注意する必要がある。

構造減衰は構造系の応力状態により大きく変動し、応力の増加と共に大きくなるものと予想される。したがって、今回の試験で求められた構造減衰は、応力が小さい範囲での問題に適用されるべきであろう。例えば、小振幅の風琴振動、走行車輛による振動、などには、この程度の減衰値を考慮すべきであろう。しかし、フラッター時など大振幅振動に対しては今後更に検討する必要がある。

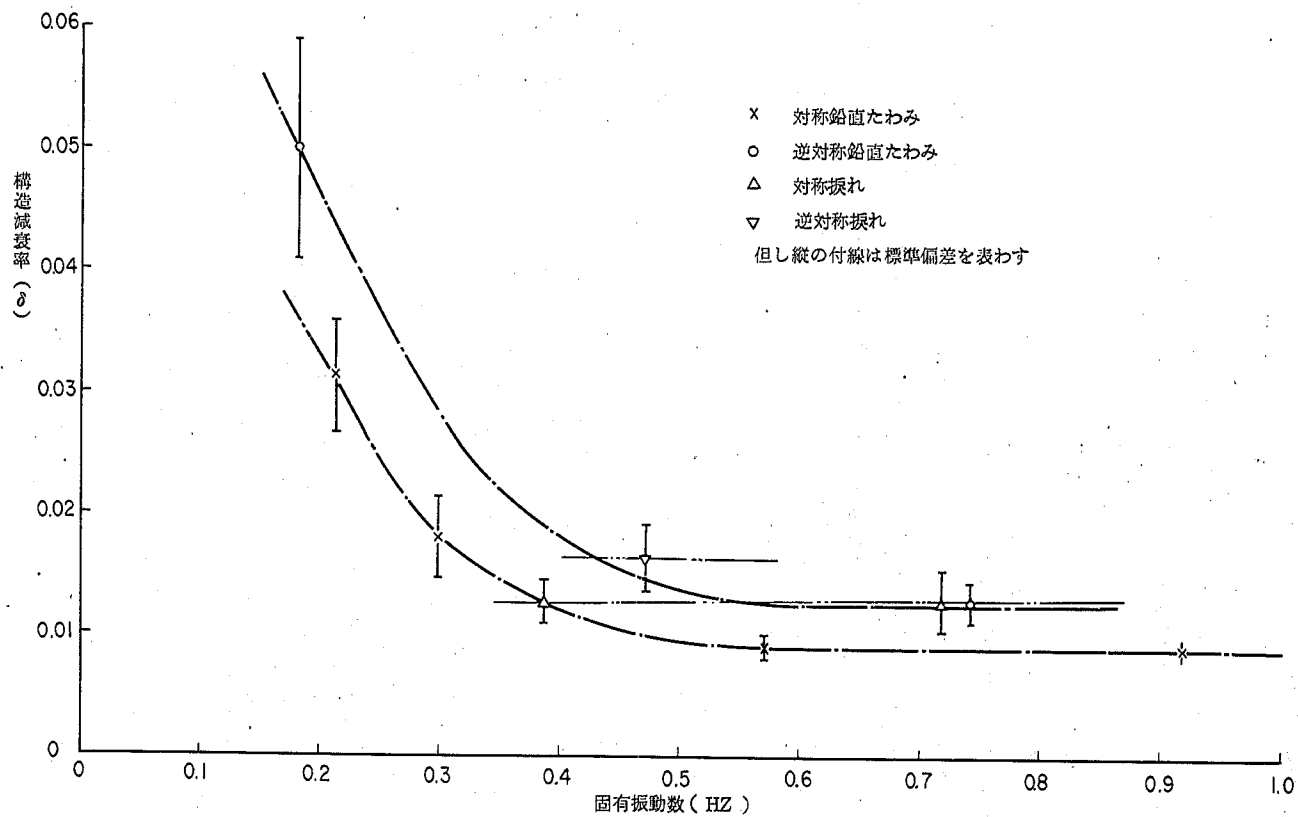


図 - 1 8 共振々動数と構造減衰

### 4.3 既往の風洞実験結果との関係

すでに述べたように本橋の耐風性については、当研究室において数次の風洞実験が繰り返され、その断面が決められた。最終案についてその結果を再録すると以下の通りである。

まず、最終設計案は表-8に示した動的特性を有するものが採用された。これについて同表に示した4種の模型について実験が実施され、図-19の結果を得た。いうまでもなく、限界風速

表-8 風洞実験資料

| 模 型 | 特 徴・条 件                      | 項 目         | 原 型                       | 実 験 値                               |
|-----|------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| A   | 最終設計案、但し回転中心は下弦材より1.3 mの位置   | 重 量         | $t/m/br$<br>24.7          | Kg<br>6,647                         |
| B   | A模型に電機管をとりつけたもの              | 慣性モーメント     | $t \cdot m^2/m/br$<br>243 | Kg · cm · sec <sup>2</sup><br>1,058 |
| C   | 最終設計案、但し回転中心は下弦材より2.83 m上の位置 | 鉛直たわみ振動数(%) | 0.219                     | 2.19                                |
|     |                              | 振れ振動数(%)    | 0.403                     | 3.84                                |
| D   | 最終設計案、但し回転中心は下弦材より2.08 m上の位置 | 縮 尺 率       | —                         | 1 : 75                              |
|     |                              | 構 造 減 衰     | —                         | 0.045                               |

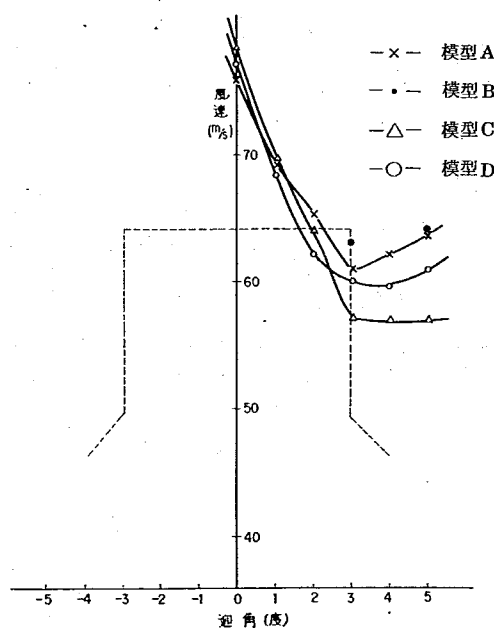


図-19 迎角と限界風速

には構造物の振れ振動数が最も重要な役割りをするが、実験に用いた振れ固有振動数は中央径間補剛桁の平均断面積を用い、振れの回転中心は吊構造部の重心と補剛桁のせん断中心の中間点として算出した。これに対して今回の実験により求めた実測値は、4%程度小さく、回転中心を補剛桁の中央点(3.9 m)に仮定した計算値にはほぼ等しく、従って、風洞実験の結果のみより判断すれば限界風速もそれに応じて4%低くなると考えられる。

また、構造減衰は実測値が風洞実験に用いた値に比べて可成り小さいが、微小振動の範囲で得られたものであるため、実測値を用いて限界風速を修正することは妥当ではないと思われる。

## 5. 結 論

今回の振動実験より得られた結論は、次のように要約される。

### (1) 固有振動数について

鉛直たわみ振動数は対称モードで4種、逆対称モードで2種得られたが、実測値は何れも計算値よりも大きい。その原因は用いた振動解析方法に従うならば、死荷重を7%程度小さく評価されたことにあると考えられる。

振れ振動数は対称モードで2種、逆対称モードで1種計測されたが、対称1次モードは補剛トラスの有効高を7.8 mとし、吊構造部の回転中心をトラスの中心に仮定して求めた計算値にほぼ等しい。しかし、高次振動では実測値は計算値に比べて4~6%程度小さく、トラスの有効高は更に減少するように見受けられる。

### (2) 共振モードについて

共振モードはほぼ計算値に等しい。

### (3) 構造減衰について

加振々幅は高々40 gal程度であったが、その範囲では、振幅による相異は顕著ではないが、振動モードによる差違は明らかに認められる。そして、鉛直たわみ振動は次数に応じて減少するが、振れ振動ではほぼ一定値を示す。

(4) 振動試験の加振手段として油圧サーボ機構を有する起振機を用いることは加振々動数の制御、重力加速度の影響の消去などの面から有力であった。今後もこの方法によらなければ、長大橋梁の構造特性特に構造減衰の測定は困難となろう。

(5) 走行車輛による上部構造の応答加速度は4 gal程度であり、約70 km/hrの速度において最大値となる。

(6) 風による振動記録より求めた応答加速度のピークを与える周波数は振動試験により求めた固有振動数と完全に一致する。ただし、応答レベルの解析は今後の作業によらねばならない。

(7) 長期観測システムによる上部構造の振動観測は正常に作動することが確認された。ただし資料の解析は今後の作業によらねばならない。

## あ と が き

以上で関門橋に関する振動試験の報告を終える。今回の振動試験は対象構造物が従来経験したことのない大規模なものであり、しかも再試験が全く不可能である、振動出力が極めて小さい等々困難な条件が重なった。それにもかかわらずこの大型試験を無事に完了できたのは多くの方々の御援助と御協力のお蔭である。まず、本橋の調査試験の段階よりお世話になった関門高速道路建設所、関門橋架橋事務所の担当者の方々に心からお礼を申し上げる次第である。また、従来にない大型油圧サーボ起振機の製作に当られた三友機械㈱の諸氏に感謝の意を表する。

なお、本試験の計画立案・試験実施・資料整理は当研究室の下記の諸君が担当したことを付記しておく。

|       |                   |
|-------|-------------------|
| 研 究 員 | 池 村 雅 司           |
| 同     | 横 山 功 一           |
| 技 官   | 宮 沢 宏             |
| 同     | 石 川 泉             |
| 同     | 山 田 恒 雄           |
| 同     | 水 口 辰 夫           |
| 同     | 河 野 良 次           |
| 同     | 野 村 一 夫           |
| 研 修 員 | 伊 藤 壮 一（日本鋼管株式会社） |

## 参 考 文 献

- (1) 関門吊橋の設計風速, 昭和43年2月22日, 建設省土木研究所構造研究室
- (2) 第二関門道路調査・気象調査, 昭和42年3月, 気象庁, 建設省
- (3) 関門海峡の気流に関する風洞実験, 昭和42年11月, 気象研究所
- (4) 関門海峡の気流について(同上追捕), 気象研究所
- (5) 第二関門道路気象調査, 昭和43年3月, 日本道路公団福岡支社, 日本気象協会福岡本部
- (6) 第二関門道路気象調査(その2), 昭和43年3月, 気象庁, 建設省
- (7) 第二関門道路橋耐風調査報告書, 昭和43年3月, 建設省土木研究所構造研究室
- (8) 関門橋の耐風性に関する調査(トラス補剛吊橋)報告書,  
昭和44年3月, 建設省土木研究所構造研究室
- (9) 関門橋の耐風性に関する調査(箱桁補剛吊橋-I),  
昭和44年3月, 建設省土木研究所構造研究室
- (10) 関門吊橋主塔の耐風性に関する実験報告,  
昭和44年5月, 建設省土木研究所構造研究室
- (11) 関門橋架設構造物の耐風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
- (12) 関門橋設計施工調査報告書,  
昭和47年3月, 建設省土木研究所構造研究室
- (13) 関門橋設計施工調査最終報告書, 昭和48年3月, 建設省土木研究所
- (14) 若戸大橋応力試験報告書(動的載荷試験), 昭和38年3月, 建設省土木研究所
- (15) Aerodynamic stability and related aspects of suspension bridges,  
1966, International symposium on suspension bridges, Arne Selberg 他
- (16) McIamore, V. R., Hart, G. C. and Stubbs, I. R. : Ambient Vibration  
Survey of two suspension bridges, Proc. ASCE Vol. 97, ST10,  
p 2567 - 2584 ('71. 10)
- (17) 成田・池村, 走行車輛による道路橋の振動特性の推定,  
第26回建設省技術研究会報告, 昭和47年9月

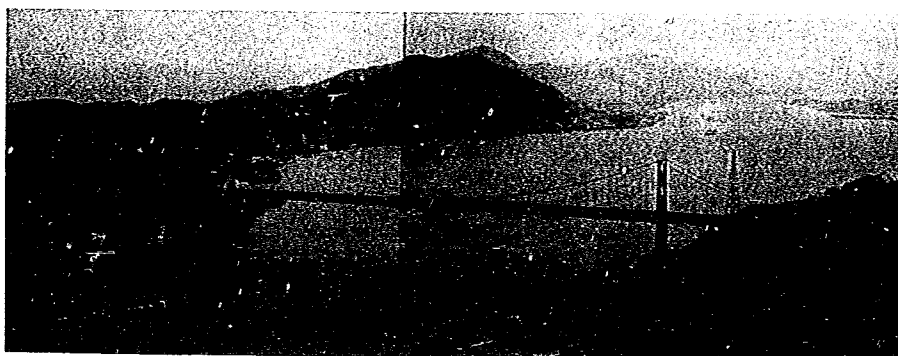


写真1 関門橋全景



写真2 起振機（油圧源，起振機本体，制御装置）



写真3 起振機本体（可動部重量 2 TON）

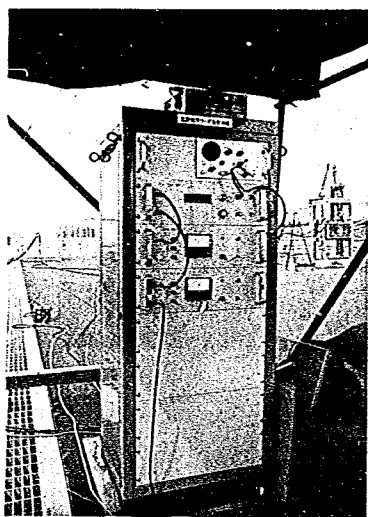


写真 4 起振機制御装置

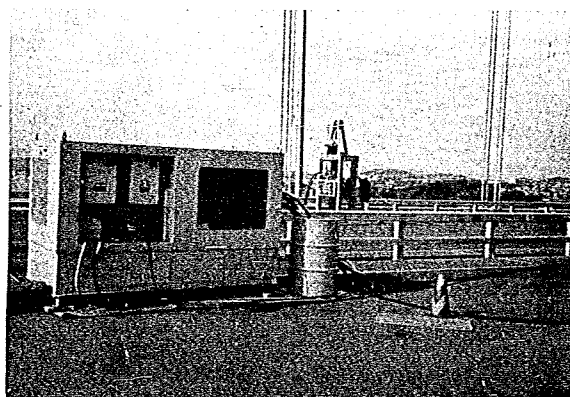


写真 5 油圧源

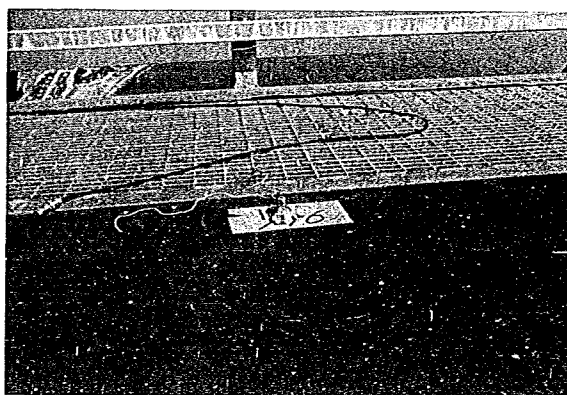


写真 6 加速度換振機（サーボ型，Endevco 社製）

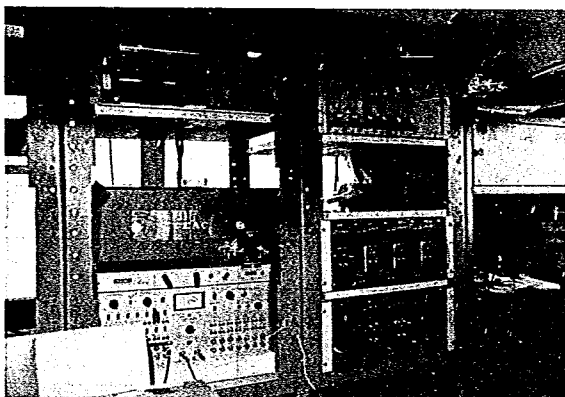


写真7 計測機器（上段DCアンプ，下段左データレコーダ，  
下段右DC キャンセラー，フィルター，電源）

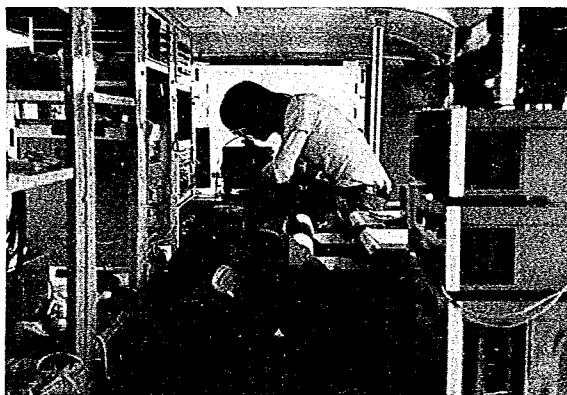


写真8 計測機器（右側手前相関計類，右側奥電磁オシログラフ）

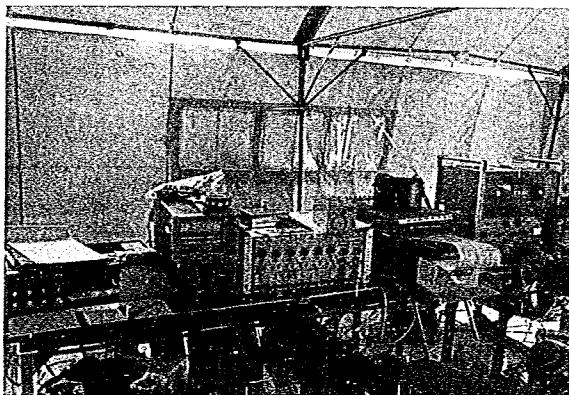


写真9 計測機器（左よりシグナルコンディショナー，シンクロスコープ，  
DCアンプ，電磁オシログラフ，データレコーダ）

付表-1 観測項目, 観測計器, 観測範囲等

| 観測項目 | 測定場所 | 最大測定範囲                                         | 観測計器                                                         | 数量 | 成分数               |    | 毎秒当り<br>A/D変換<br>サンプリング<br>回数 |
|------|------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|-------------------|----|-------------------------------|
|      |      |                                                |                                                              |    | 1台<br>当り          | 合計 |                               |
| 加速度  | 岩盤   | $\pm 500 \text{ Gal}$                          | 地中地震計                                                        | 3台 | 3                 | 9  | 100                           |
|      | 橋台   | $\pm 500 \text{ Gal}$                          | 電磁式加速度計                                                      | 4台 | 1                 | 4  | 50                            |
|      | 橋脚   | $\pm 500 \text{ Gal}$                          |                                                              | 8台 | 1                 | 8  |                               |
|      | 塔    | $\pm 500 \text{ Gal}$                          |                                                              | 4台 | 1                 | 4  |                               |
|      | 補剛桁  | $\pm 200 \text{ Gal}$                          | サーボ型加速度計                                                     | 6台 | 1                 | 6  | 25                            |
| 変位   | 補剛桁  | 水平 $\pm 2 \text{ m}$<br>上下 $\pm 2 \text{ m}$   | 1) ターゲット<br>2) ターゲット制御器<br>3) X-Yアナライザ<br>4) X-Yアナライザ<br>制御器 | 1式 | 3                 | 3  | 25                            |
|      |      | 橋軸方向 $\pm 25 \text{ cm}$                       | 橋軸方向変位計測装置 <sup>(1)</sup>                                    | 1式 | 1                 | 1  | 25                            |
| 風速   | 補剛桁上 | 水平 $60 \text{ m/sec}$<br>上下 $10 \text{ m/sec}$ | 超音波風速計                                                       | 1式 | 3                 | 3  | 25                            |
|      |      | 水平 $60 \text{ m/sec}$<br>$540^\circ$           | 風向風速計                                                        | 3  | 2<br>(風向)<br>(風速) | 6  | 25                            |
| 風速   | 下関側  | 水平 $60 \text{ m/sec}$                          | 風向風速計                                                        | 1  | 2                 | 2  | 25                            |
| 風向   | 塔頂   | $540^\circ$                                    |                                                              |    |                   |    |                               |

注1) 橋軸方向変位計測装置は超音波風速計3成分のいずれか1成分と切換えて観測される。

付-1 観測機器配置図

付-2 システム系統図

