

土 木 研 究 所 資 料

日守大橋振動実験報告書

昭和60年9月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © 1985 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted,
nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

日守大橋振動実験報告書

構造研究室	室長	横山 功一
	研究員	中神 陽一
		神 嵩一夫
		藤 城 隆
		永 原 隆
		福 田 誠

要 旨

伊豆中央道日守大橋において箱桁橋の構造特性を調査する目的で、超振機実験ならびに自然風による不規則振動の計測を行った。その結果、固有振動数、固有振動モードが求まり、構造減衰が対数減衰率で0.07以上であることが判明した。また、支承や橋脚の動きを計測し、桁の振動特性に与える影響について考察した。

本報告は、これらの成果をとりまとめたものである。

キーワード：箱桁橋、超振機実験、構造減衰、日守大橋

まえがき

箱桁橋は中規模の支間長に多く用いられる橋梁型式であり、特にねじれ剛性が高いことから曲線橋に実績が多い。通常、中小規模の橋梁で風荷重・風による振動が問題になる事はまれであるが、最近では200mを超えるような長スパンの箱桁橋も建設されるようになってきており、耐風性についての検討が望まれるようになった。

橋梁の耐風性を評価する場合、風洞実験等を通じて得られる空力的な特性に加え、構造減衰・固有振動数といった構造的な特性も重要な因子となる。特に構造減衰は数値解析によって算定することは現段階では不可能であり、実物を対象とした振動実験に頼らざるをえないのが現状である。箱桁橋の耐風性についての調査は始まってからそれほど時間を経ておらず、風洞実験データと同様に振動実験データもまだ十分であるとは言えない。

このような事情から、箱桁橋の実橋での振動実験を行い、構造特性を把握することを計画した。実験の対象としたのは、静岡県道路公社伊豆中央道日守大橋の三径間連続鋼箱桁橋部で最大スパンは119.2mである。実験は起振機を用いた加振実験と自然風による桁の不規則振動の計測から構成されており、固有振動数、固有振動モード、構造減衰、支承の移動量等について解析を実施した。

本報告は、この振動実験で得られた成果をとりまとめたものである。

昭和60年9月

目 次

1. 振動実験の概要	1
1.1 振動実験の目的	1
1.2 日守大橋の概要	1
2. 振動実験計画	5
2.1 起振方法	5
2.2 実験項目	7
2.3 計測方法	7
2.4 実験ケース	9
2.5 実験工程	9
3. 実験結果	10
3.1 記録の整理方法	10
3.2 実験結果の解析	10
4. 固有振動数と固有振動モードの数値解析	16
4.1 解析モデル	16
4.2 解析条件	16
4.3 解析結果	16
5. 考 察	19
5.1 固有振動数	19
5.2 固有振動モード	19
5.3 構造減衰	20
5.4 桁、橋脚および支承の減衰性状の比較	21
5.5 支承部の移動量	22
5.6 支承のころがり摩擦の構造減衰に対する寄与率	25
6. ま と め	29
謝 辞	30
参考文献	30
付属資料	33

1. 振 動 実 験 の 概 要

1.1 振動実験の目的

橋梁の耐風性を判断するには、桁断面の空力的特性に加えて、固有振動数・構造減衰といった振動特性を把握しておく必要がある。固有振動数については数値解析によって、ある程度精度の良いデータを得ることが可能であるが、構造減衰については影響要因が多く、かつ複雑であるため、各要因の影響度を定量化し数値解析を行うのは困難である。したがって実際の橋梁を何らかの方法で加振し直接的に測定するのが最も正確かつ着実な方法であると言える。

耐風設計を行うに当たっては通常、このようにして蓄積されたデータを本にして妥当な構造減衰値を設定している。斜張橋、吊橋のように以前から強風に対する安全性について検討された橋種では、実橋での振動実験も数多く実施されておりデータの蓄積も進んでいるが、箱桁橋は、近年になって漸く長スパン化の傾向を顕わしてきた橋種であるだけに、耐風性が検討されるようになってまだ日が浅く、振動特性データは十分に得られていない。

本実験は、このような事情から箱桁橋の実橋での振動実験を行い、箱桁橋の振動特性データを収集することを目的としている。

1.2 日守大橋の概要

振動実験の対象とした箱桁橋は、静岡県道路公社伊豆中央道が函南町において狩野川を横断する地点に建設された日守大橋である。日守大橋は、3径間連続鋼床版箱桁(88.3m+119.2m+88.5m)と単純非合成鋼箱桁(51.7m)から構成されており、今回の振動実験は3径間連続箱桁の部分において実施した。本橋の架設位置を図-1.1、一般図を図-1.2、全景を写真-1.1に示す。本橋の主たる諸元を以下にまとめる。

事業主体 ; 静岡県道路公社
有料道路名 ; 伊豆中央道
所在地 ; 静岡県田方郡函南町肥田～日守地内
完成年度 ; 昭和59年
形式 ; 単純非合成鋼箱桁, 3径間連続鋼床版箱桁
橋 格 ; 1 等 橋
橋 長 ; 347.7 m (50.1 + 88.3 + 119.2 + 88.5 m)
幅員構成 ; 歩道部 2.5 m + 車道部 8.0 m
舗 装 ; 歩道 アスファルト舗装 6.0 cm
 車道 " 7.0 cm
床 版 ; 歩道 鉄筋コンクリート床版 14.0 cm
 車道 鋼 床 版
使用鋼材 ; SMA 50 W, SMA 41 W (耐候性鋼材)

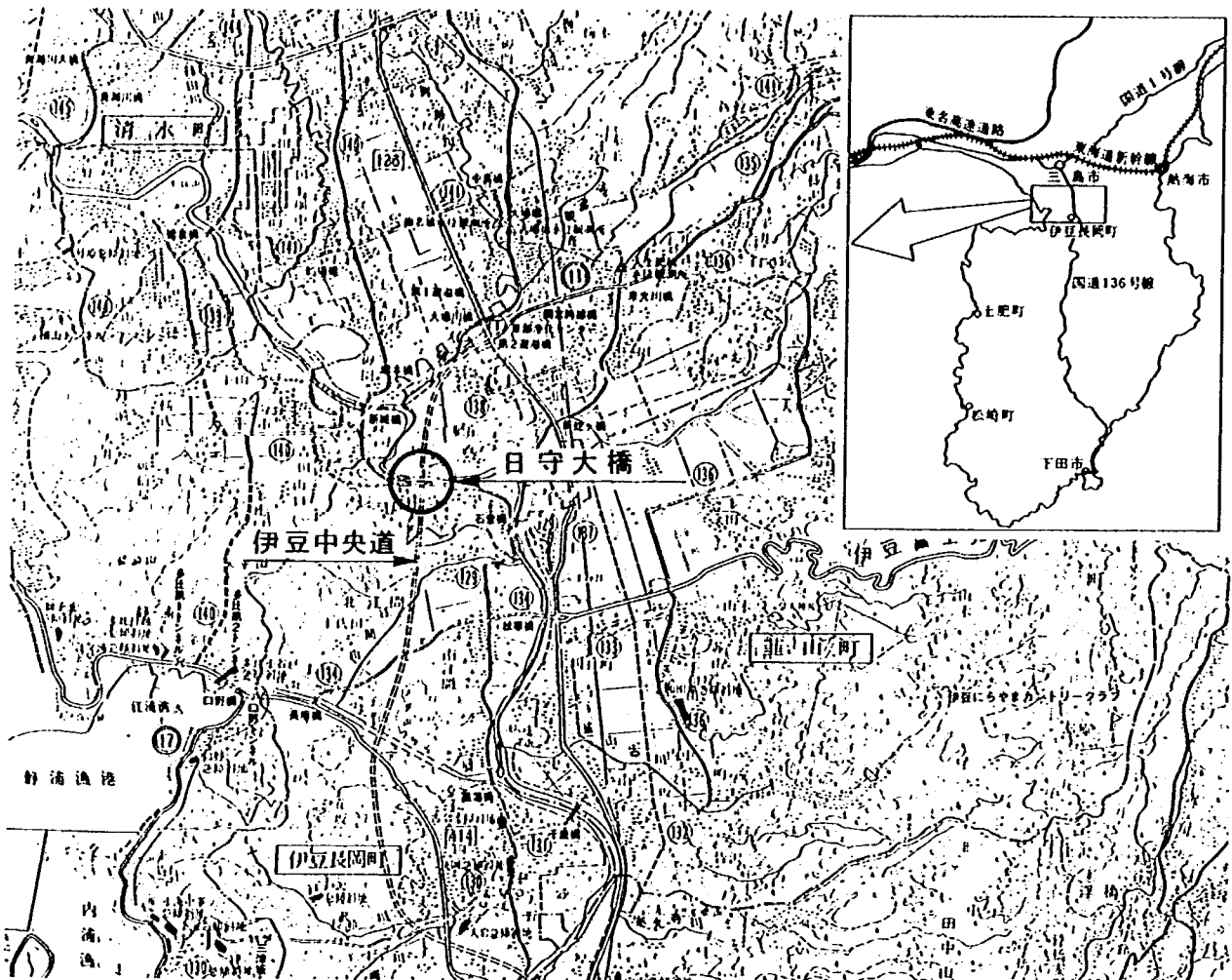


图-1.1 架橋位置図

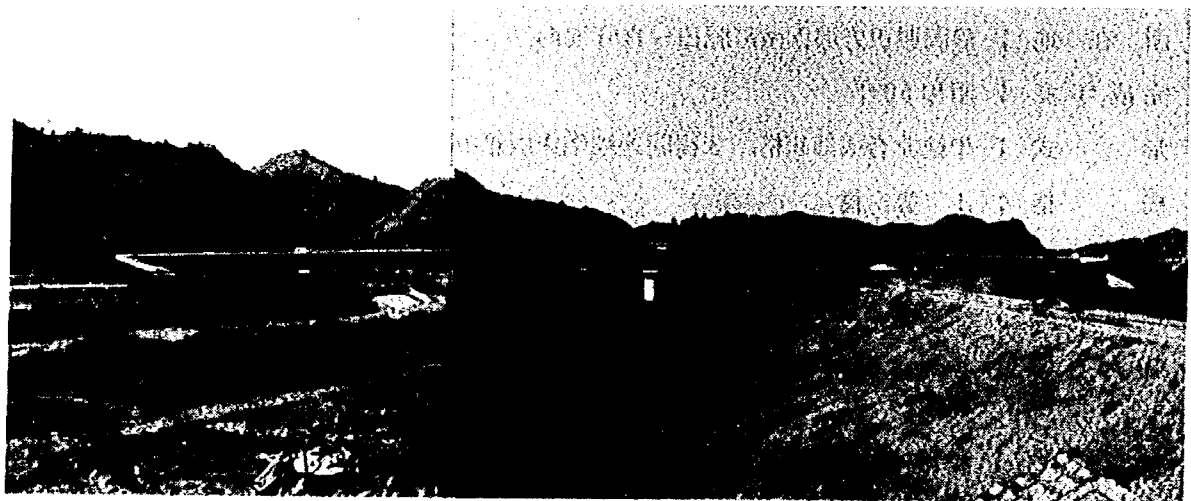
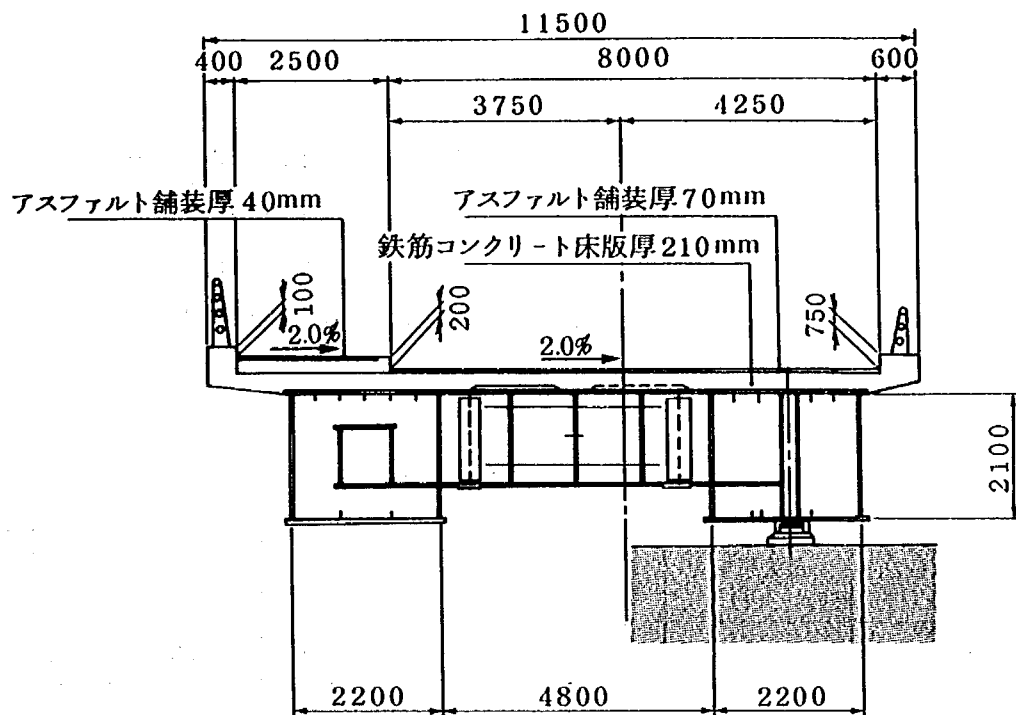


写真-1.1 日守大橋全景

Ⓐ1～Ⓐ1 上部工標準断面図



Ⓐ1～Ⓐ2 上部工標準断面図

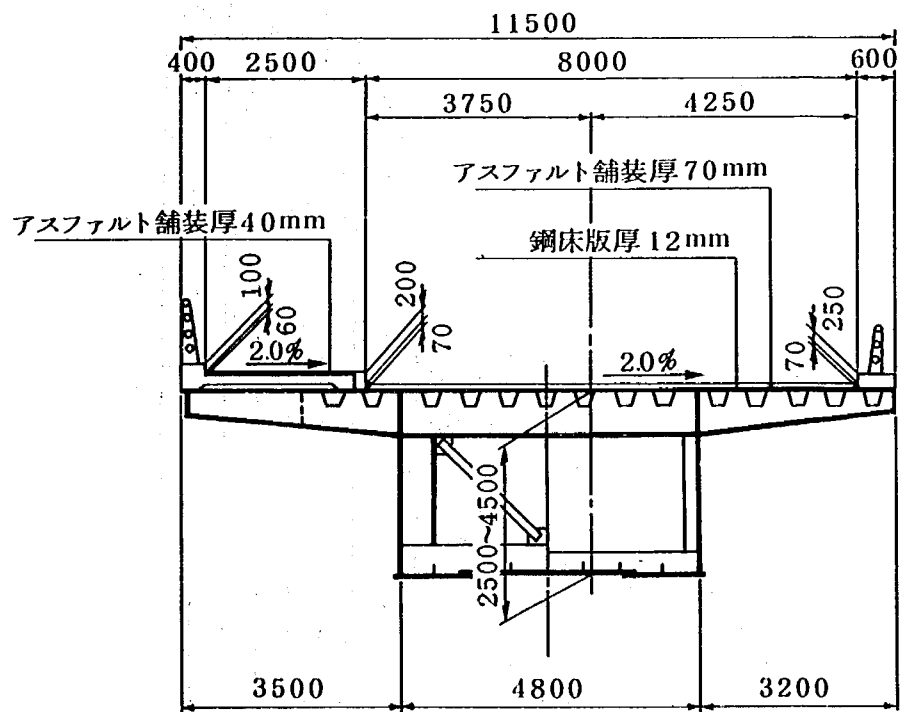


図- 1.2.2 日守大橋一般図 (その2)

2. 振 動 実 験 計 画

2.1 起振方法

1) 使用起振機

加振には、当研究所所有の15ton 2連式起振機を用いた。この起振機は、2個の不均衡重錘を逆方向に回転させることにより遠心力を鉛直一方向の加振力に変換する方式であり、2台の同性能の起振機がシャフトを介して連絡されており、位相を変えることによって、鉛直たわみ振動ばかりでなく、ねじれ振動も発生させることができる。当起振機の仕様を表-2.1に起振力図を図-2.1に示す。また、起振機の設置状況を写真-2.1に示す。

表-2.1 15ton 2連式起振機仕様

最大起振力 (Hz)	最大起振力 (t)	振動数 f での 最大起振力 (t)	使用モータ	寸 法 (m)
0.5~10.0	15.0	$0.15 f^2$	AS-40 HP	$0.78 \times 1.10 \times 0.70$

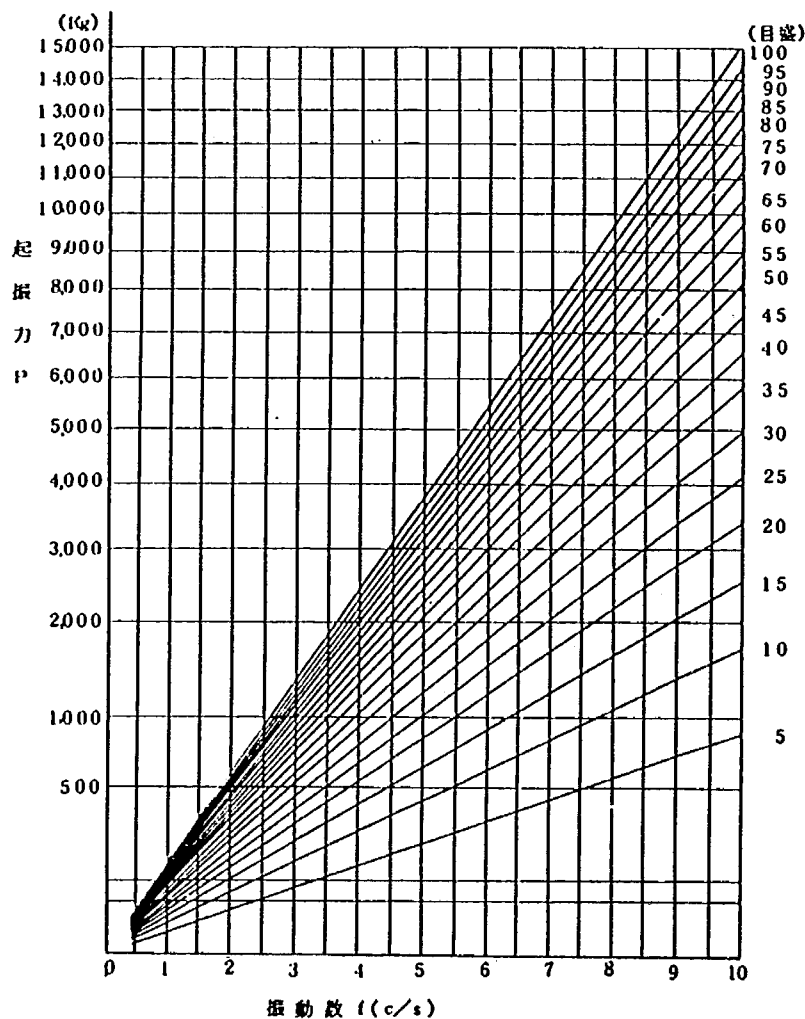


図-2.1 起振力図

2) 起振機設置位置

本実験では起振機を図-2.2に示すように主径間(119.2 m)の1/2点および1/4点に設置することとした。横断方向には、幅員中心と2台の起振機の中心とが一致するように設置した。

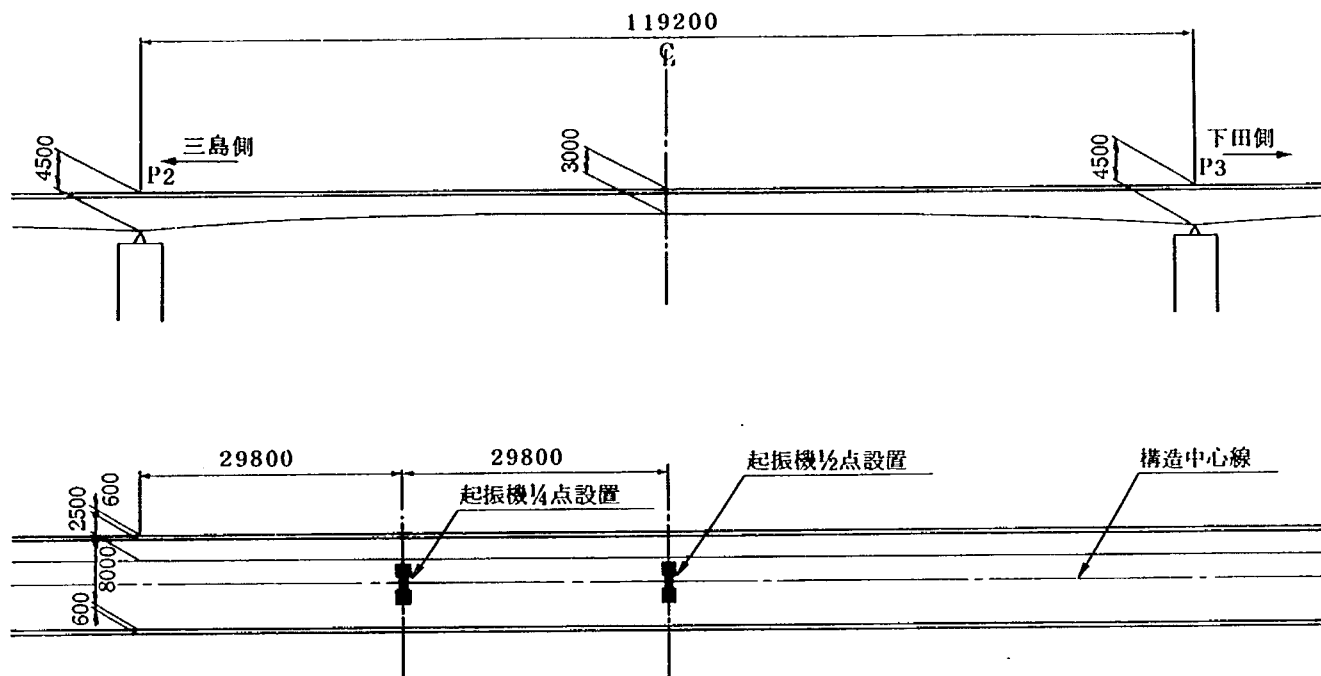


図-2.2 起振機設置図

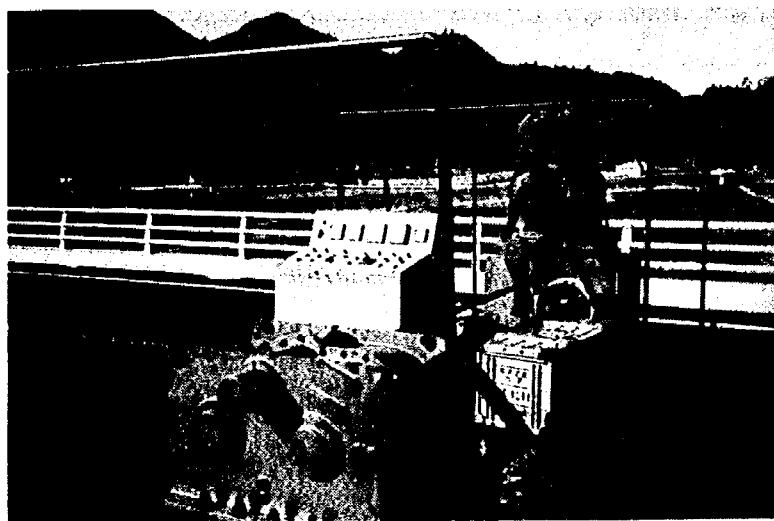


写真-2.1 起振機設置状況

2.2 実験項目

本実験における実験項目は以下の4項目である。

- i) 固有振動数
- ii) 固有振動モード
- iii) 構造減衰
- iv) 支承部の移動量（回転量）

2.3 計測方法

使用した測器（センサー）は、サーボ型加速度計と非接触型変位計で、サーボ型加速度計は、桁、橋脚天端等の橋梁各部の振動加速度を計測し、非接触変位計は、橋台、橋脚と桁の相対的な変位量を計測し、支承の移動量（回転量）を求めることとした。

橋面上のサーボ型加速度計の配置を図-2.3に示す。基本的な設置箇所は、中央径間 $\frac{1}{2}$ 点、 $\frac{3}{8}$ 点、 $\frac{1}{4}$ 点、 $\frac{1}{8}$ 点と側径間 $\frac{1}{2}$ 点、 $\frac{1}{4}$ 点である。ねじれ振動も計測するために、中央径間 $\frac{1}{2}$ 点、三島側側径間 $\frac{1}{2}$ 点には、加速度計を二台準備し、幅員両端に一台ずつ設置することとした。他の測定箇所では鉛直たわみ振動にのみ着目することとし、幅員中央に一台の加速度計を設置した。また、配線の都合上、計測システムが観測車（P2地点に配置）、観測小屋（P3地点に配置）に二分されたため、両システムの同期をとる目的で、中央径間 $\frac{1}{2}$ 点には両システム二台ずつ計四台の加速度計を設置した。

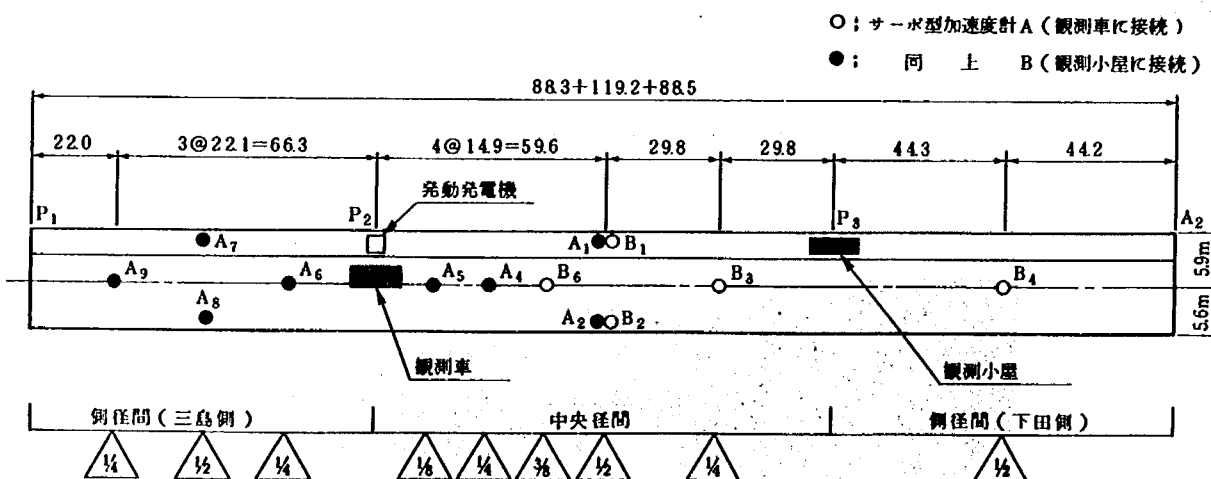


図-2.3 橋面上のサーボ型加速度計の配置

橋脚天端のサーボ型加速度計および非接触変位計の配置を図-2.4に示す。サーボ型加速度計は、ピン支承によって桁と連結されている橋脚P2、P3の天端における橋軸方向水平加速度を求めるために配置した。また非接触変位計は、P1、P2、P3、A2の支承の回転角とローラ支承であるA2支水の水中移動量を求める目的で配置した。支承の回転角は、桁の鉛直変位量と変位計～支承中心間距離Lとの関係から求められる。今回の実験における変位計～支承中心間距離Lは表-2.2に示したとおりである。

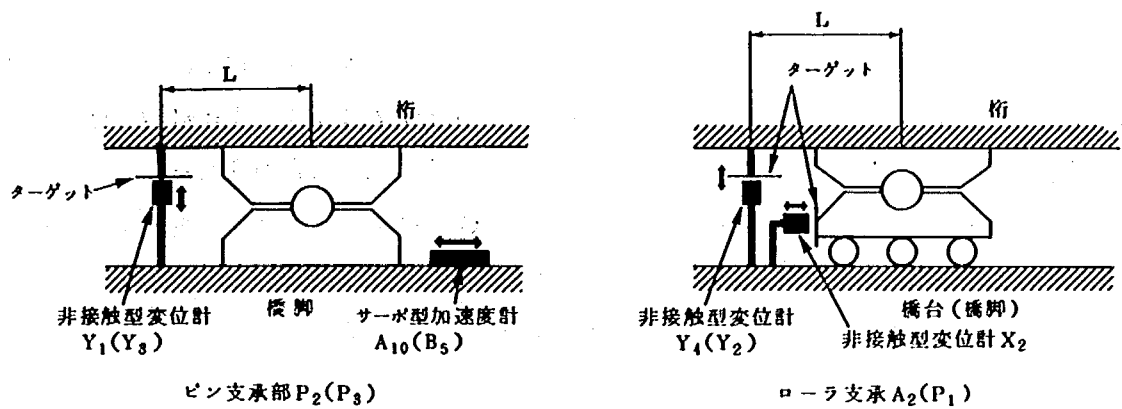


図-2.4 支承部のサーボ型加速度計と非接触型変位計の配置

表-2.2 変位計～支承中心距離 L

変位計	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
L (m)	2.00	0.90	2.00	0.70

サーボ型加速度計と非接触型変位計によって得られたデータは2ヶ所の計測ステーションに集められる。2つの計測ステーションは図-2.3に示したように観測車（計測ステーションA）と観測小屋（計測ステーションB）である。計測システムを図-2.5に示す。データは、ペン書きオシログラフとシンクロスコープでモニターすると同時にデータレコーダに収録した。

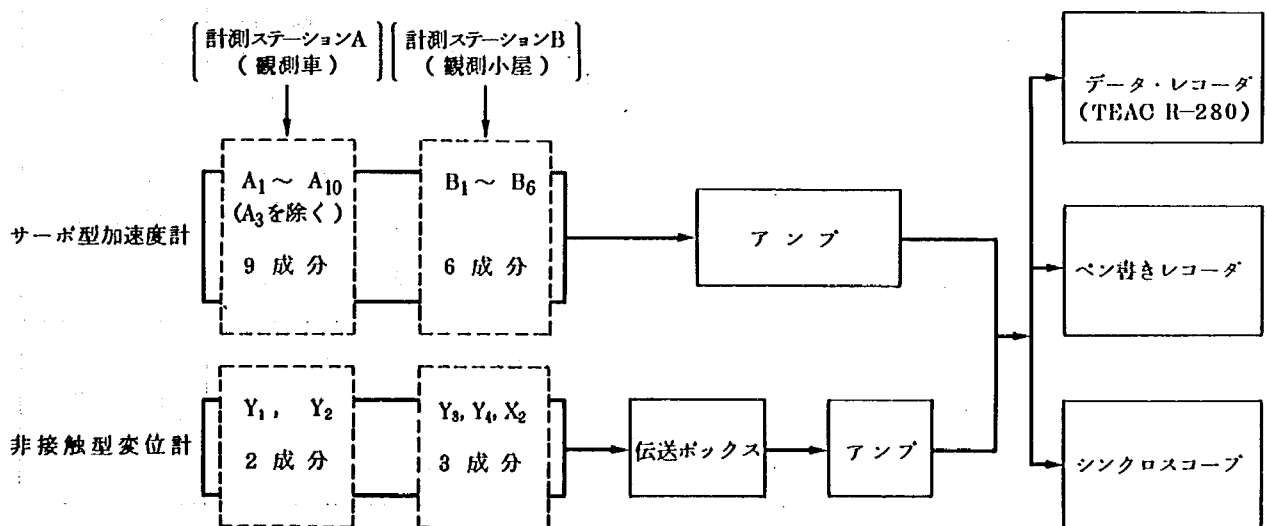


図-2.5 計測システム

2.4 実験ケース

実験は、起振機を中央径間の $\frac{1}{2}$ 点に設置した状態から始めた。このケースでは鉛直たわみ1次および3次の振動モードを対象とした計測を行った後、位相を変えてねじれ1次モードの計測を行った。さらに中央径間 $\frac{1}{4}$ 点に起振機を移動させ、鉛直たわみ2次モードを対象とした計測を行った。

各ケースでは、低周波数から高周波数に至るまでを粗く試験した後、対象とする振動モードの共振振動数付近を細かな振動数刻みで計測し、共振振動数における自由減衰試験を行った。

起振機を停止した状態で、自然風による橋桁の不規則振動を計測した。

2.5 実験工程

日 付	午 前	午 後	天 候
1 2月18日 (月)	実験機器 積み込み	移動(筑波→日守大橋) 計測器位置出し	曇 り
2 2月19日 (火)	実験機器セッティング	起振機試験 計測器試験	雨
3 2月20日 (水)	鉛直たわみ1次モード測定	鉛直たわみ3次モード測定	曇 り (強風)
4 2月21日 (木)	ねじれ1次モード測定	自然風による不 規則振動測定 起振機移動	曇 り (強風)
5 2月22日 (金)	自然風による不 規則振動測定	鉛直たわみ2次モード測定 実験機器片付け	曇 り (強風)
6 2月23日 (土)	実験機器 積み込み	移動(日守大橋→筑波)	曇 り

3. 実験結果

3.1 記録の整理方法

起振機による加振時の振動数の読み取り方には、起振機操作盤上の加振周波数を読み取る方法、起振機の重錘の回転に伴うパルス信号から読み取る方法、応答加速度波形から読み取る方法等が考えられるが、今回の実験では、サーボ型加速度計から得られる応答加速度波形の振動数を読み取る方法を採用した。

起振力は、起振力調節目盛を一定に保てば、加振振動数の二乗に比例する。共振振動数を求めたり、スペクトル図から構造減衰を求める場合には同一起振力での応答加速度が必要とされるから共振曲線を求める場合は、読み取った橋梁の応答加速度を起振力 1 ton 当りの値に変換して整理した。

構造減衰の大きさは、全て対数減衰率として表わすこととした。

$$\delta = 2\pi h = \frac{1}{N} \cdot \ln \frac{a_1}{a_{N+1}}$$

ここに、 δ ; 対数減衰率、 h ; 減衰定数、 N ; 波数、 a_1, a_{N+1} ; 第 1 波および第 $N+1$ 波の振幅

3.2 実験結果の解析

起振機実験によって求めた主な測定点での共振曲線を付図-1.1~付図-1.15に、共振振動数における自由減衰波形を付図-2.1~付図-2.15に示す。

自然風による橋桁の不規則振動から解析した振動加速度のパワースペクトルを付図-3-1~付図-3-4に示す。解析は 10 ms 間隔で A/D 変換をした 30,000 個のデータ (300 秒分) を用いて行った。対象とした測定点は中央径間 1/2 点、側径間 1/2 点である。計測時には最大風速 20 m/s 以上と推定される強風が吹いており、卓越周波数での応答は最大 7 gal 程度であった。測定された桁の応答波形の一部を付図-4に示す。

以下、各測定項目に対する解析について述べる。

1) 固有振動数

起振機実験による加速度応答スペクトルと自然風による不規則振動から得られた加速度応答スペクトルの共振点から固有振動数を求め表-3.1に示す。起振機設置点が振動の節となるような振動モードは現れないので、鉛直たわみ 1 次、3 次、ねじれ 1 次の固有振動数は 1/2 点加振によって、鉛直たわみ 2 次、4 次の固有振動数は 1/4 点加振によって求められる。

表-3.1によると、起振機実験によって求められた固有振動数と自然風による不規則振動によって求められた固有振動数は良く一致しており、両者の差は最大でも 2% 程度であるので、本実験で求められた値は十分な精度を有するものと考えられる。

2) 固有振動モード

各振動モードにおける各測定点の同時刻応答を連ねることによってモード形状を求めた。起振機実験

により求められた振動モード形状を図-3.1に示す。

3) 構造減衰

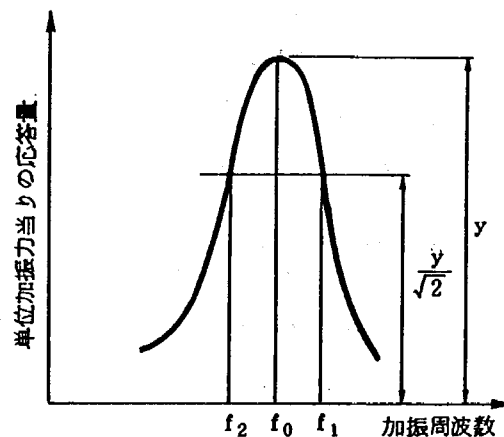
共振振動数で加振した後、起振機を急停止させることによって得られる自由減衰波形から構造減衰を求め表-3.2に示す。付図-2に自由振動波形の振幅と波数の関係を示したが、縦軸が対数軸となっているので、このグラフ上で振幅と波数の関係が直線になっていれば、対数減衰率は一定となる。そこで、対数減衰率が一定となる区間の最初と最後の振幅から構造減衰を求めるものとした。

構造減衰は上記のように自由減衰波形から直接求める方法の他に、共振曲線から求めることも可能である。右図のような共振曲線において、構造減衰は以下の式によって算定できる。

$$\delta = 2\pi h = 2\pi \frac{f_1 - f_2}{2f_0}$$

ここに、 δ ; 対数減衰率

h ; 減衰定数

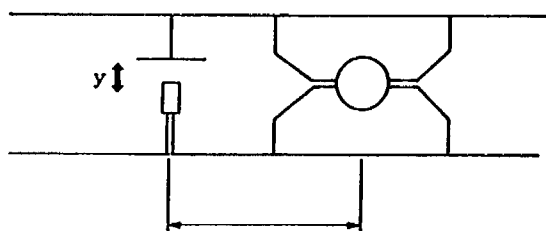


起振機実験によって得られた共振曲線から以上の方法で求められた構造減衰を表-3.3に示す。また自然風による不規則振動の共振曲線から同様に求められた構造減衰を表-3.4に示す。

4) 支承部の移動量

橋桁の共振曲線を求める際、支承部に取り付けられた変位計によって支承移動量の共振曲線も同時に得ることができる。支承移動量の共振曲線を付図-5.1～付図-5.5に示す。

P_1, P_2, P_3, A_2 各橋脚の支承回転量は、下図のように変位計の鉛直変位 y 、変位計と支承中心の距離を L とすると、以下の式によって表わされる。起振力 1 ton 当りの支承回転量を表-3.5に示す。



$$\theta = \tan^{-1} y/L$$

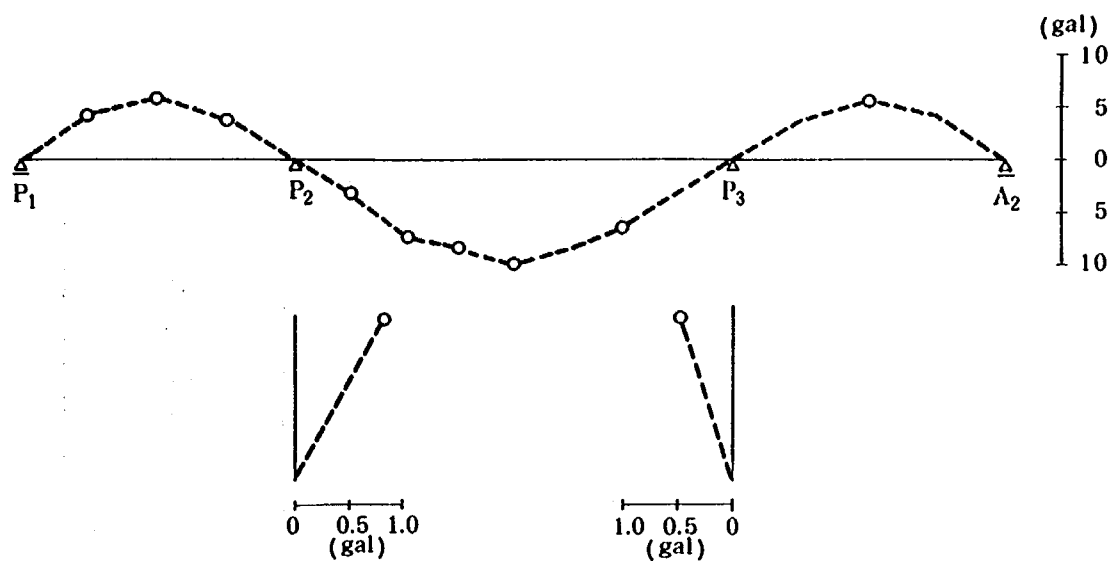


図- 3. 1. 1 鉛直たわみ 1 次モード

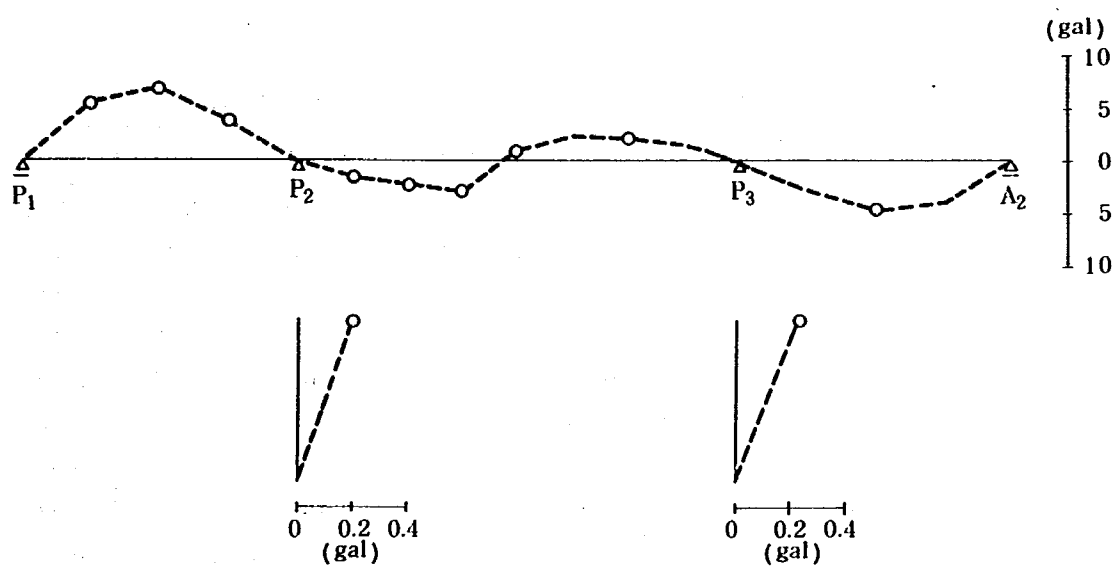


図- 3. 1. 2 鉛直たわみ 2 次モード

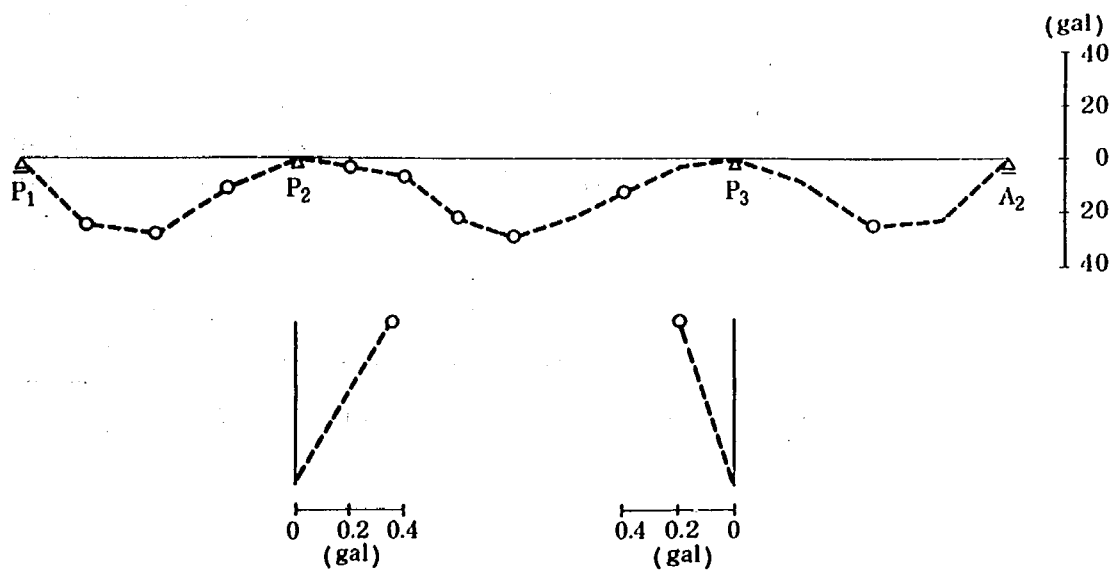


図- 3. 1. 3 鉛直たわみ 3 次モード

表- 3.1 固有振動数

振動モード	起振機加振		自然風による 不規則振動 (Hz)
	½点加振 (Hz)	¼点加振 (Hz)	
鉛直たわみ1次	0.85	—	0.85
” 2次	—	1.26	1.28
” 3次	1.62	—	1.60
” 4次	—	2.78	2.87
ねじれ 1次	3.89	—	判読不可

表- 3.2 自由減衰波形による構造減衰 (対数減衰率)

振動モード	着目点	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
鉛直たわみ 1次	A-1	0.077	0.094	0.109	0.099	0.072	0.092
	A-2	0.103	0.097	0.121	0.098	0.103	0.104
	B-1	0.121	0.123	0.117	0.107	0.129	0.119
	B-2	0.112	0.117	0.114	0.104	0.110	0.111
	平均	0.103	0.108	0.115	0.102	0.105	0.107
鉛直たわみ 2次	A-4	0.038*	0.025*	0.068	0.045*	0.051*	0.068
	B-4	0.074	0.066*	0.075	0.084	0.094*	0.078
	A-7	0.074	0.086*	0.061	0.081	0.091*	0.072
	A-8	0.073	0.080*	0.078	0.084	0.079*	0.078
	平均	0.074	—	0.071	0.083	—	0.074
鉛直たわみ 3次	A-1	0.119	0.074	0.079	0.073	0.080	0.085
	A-2	0.075	0.076	0.081	0.077	0.076	0.077
	B-1	0.085	0.083	0.086	0.082	0.091	0.085
	B-2	0.073	0.086	0.081	0.082	0.087	0.082
	平均	0.088	0.080	0.087	0.079	0.084	0.082
ねじれ 1次	A-1	0.087	0.088	0.088	0.092	0.086	0.088
	A-2	0.082	0.082	0.076	0.081	0.085	0.081
	A-7	0.120	0.111	0.110	0.125	0.109*	0.117
	A-8	0.095	0.081	0.081	0.092	0.088	0.087
	平均	0.096	0.091	0.089	0.098	0.092	0.093

* ; 強風により自由減衰波形が乱れたものであり, 平均値算出には除外した。

表-3.3 起振機実験による共振曲線から算定された構造減衰

測定点 \ 振動モード	鉛直たわみ 1 次	鉛直たわみ 2 次	鉛直たわみ 3 次	ねじれ 1 次
A 1	0.103*	—	0.109*	0.059*
A 2	0.118*	—	0.093*	0.066*
B 1	0.118*	—	0.078*	0.076*
B 2	0.103*	—	0.110*	0.072*
B 6	0.120	—	0.071	0.066
A 4	0.120	0.163	0.097	0.056
B 3	0.135	0.100	0.087	—
A 5	0.163	—	0.095	0.092
A 7	0.105	0.124*	0.102	0.113
A 8	0.084	0.138*	0.066	0.079
B 4	0.108	0.100*	0.096	0.072
A 6	0.150	0.126	0.087	0.072
A 9	0.117	0.105	0.102	0.098
A 10	0.114	—	0.078	0.139
B 5	0.112	0.153	0.083	0.131
主測定点の平均	0.111 (A ₁ , A ₂ , B ₁ , B ₂)	0.121 (A ₇ , A ₈ , B ₄)	0.098 (A ₁ , A ₂ , B ₁ , B ₂)	0.068 (A ₁ , A ₂ , B ₁ , B ₂)
全測定点の平均	0.118	0.126	0.090	0.085

* 振幅が最大となる測定点

表-3.4 自然風による不規則振動の共振曲線から算定された構造減衰

データ No	測定点	鉛直たわみ 1 次	鉛直たわみ 2 次	鉛直たわみ 3 次	ねじれ 1 次
1 (300 sec)	A ₁	0.090	—	0.049	—
	A ₇	0.080	0.056	0.044	—
2 (300 sec)	A ₁	0.080	—	0.043	—
	A ₇	0.084	0.070	0.049	—
平 均		0.084	0.063	0.046	—

表-3.5 共振時における支承回転量

支承名 \ 振動モード	鉛直たわみ 1 次	鉛直たわみ 2 次	鉛直たわみ 3 次
	$\times 10^{-8} \text{ rad/ton}$	$\times 10^{-8} \text{ rad/ton}$	$\times 10^{-8} \text{ rad/ton}$
P ₁	0.52	0.12	0.32
P ₂	0.41	0.09	0.05
P ₃	0.44	0.09	0.03
A ₂	1.31	0.45	1.07

4. 固有振動数と固有振動モードの数値解析

4.1 解析モデル

本橋は、耐震上の配慮から P_2 、 P_3 両橋脚がピン支承で桁と連結されているため、桁の振動と同時に両橋脚にも振動が伝播することが予想される。そこで、図-4.1のような上部工・橋脚モデルを想定し、固有振動数、固有振動モードを計算した。このモデルでは桁と橋脚がピン結合され、橋脚の質量、剛性が考慮されており、橋脚側面の地盤バネを橋脚底面の水平バネに、杭基礎からの反力は橋脚底面の回転バネに置換している。

4.2 解析条件

解析条件を表-4.1に示す。本解析では鉛直たわみモードのみを対象としたので、必要となる解析条件は断面二次モーメント、質量、杭頭バネ定数、地盤バネ定数である。

4.3 解析結果

図-4.2に本解析によって求めた固有振動数と固有振動モード形状を示す。ただし橋脚の振動モードは桁と比較し、微小であったため図には示していない。

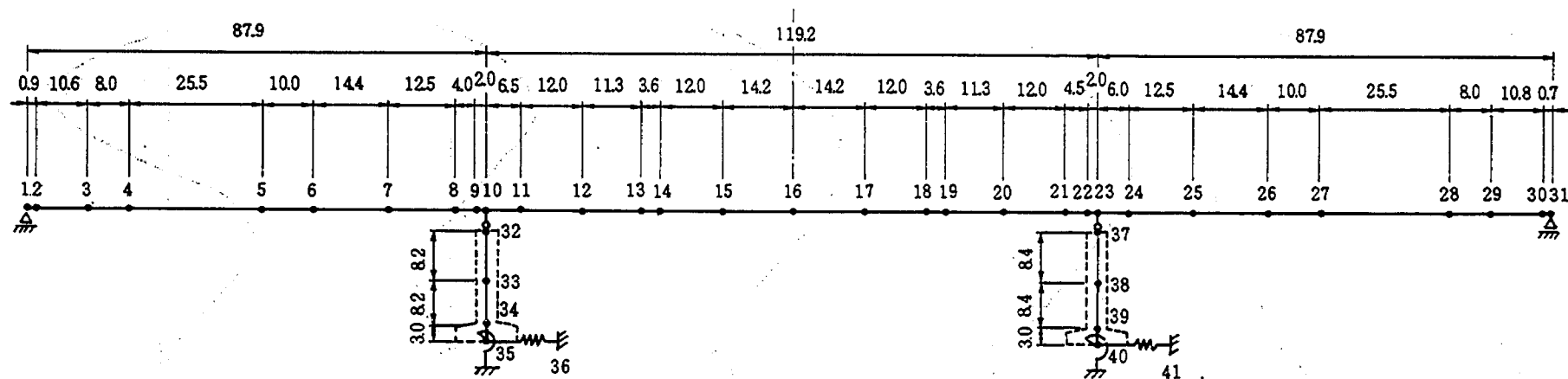


表-4.1 数值解析条件

部材	格点	断面積 A (mm ²)	断面2次モーメント I (mm ⁴)	桁重量 (t/m)	部材	格点	断面積 A (mm ²)	断面2次モーメント I (mm ⁴)	桁重量 (t/m)
①	1-2	0.3077	0.3776	6.283	②①	21-22	0.5435	2.2135	6.283
②	2-3	"	"	"	②②	22-23	"	"	"
③	3-4	0.3386	0.4747	"	②③	23-24	"	"	"
④	4-5	0.3697	0.5967	"	②④	24-25	0.4555	1.6086	"
⑤	5-6	0.3435	0.6148	"	②⑤	25-26	0.3980	1.1003	"
⑥	6-7	0.3980	1.1003	"	②⑥	26-27	0.3435	0.6148	"
⑦	7-8	0.4555	1.6086	"	②⑦	27-28	0.3697	0.5967	"
⑧	8-9	0.5435	2.2135	"	②⑧	28-29	0.3386	0.4747	"
⑨	9-10	"	"	"	②⑨	29-30	0.3077	0.3776	"
⑩	10-11	"	"	"	③⑩	30-31	"	"	"
⑪	11-12	0.4541	1.5713	"	③⑪	31-32	剛 体		剛 体
⑫	12-13	0.3971	1.0777	"	③⑫	32-33	19.63	30.68	
⑬	13-14	"	"	"	③⑬	33-34	"	"	
⑭	14-15	0.3448	0.6380	"	③⑭	34-35	144.0	1728.0	
⑮	15-16	0.3695	0.6828	"	③⑮	35-36	杭 頭 バ ネ		杭頭ばね (次頁参照)
⑯	16-17	"	"	"	③⑯	36-37	剛 体		剛 体
⑰	17-18	0.3448	0.6380	"	③⑰	37-38	19.63	30.68	
⑱	18-19	0.3971	1.0777	"	③⑱	38-39	"	"	
⑲	19-20	"	"	"	③⑲	39-40	144.0	1728.0	
⑳	20-21	0.4541	1.5713	"	④⑰	40-41	杭 頭 バ ネ		杭頭ばね (次頁参照)

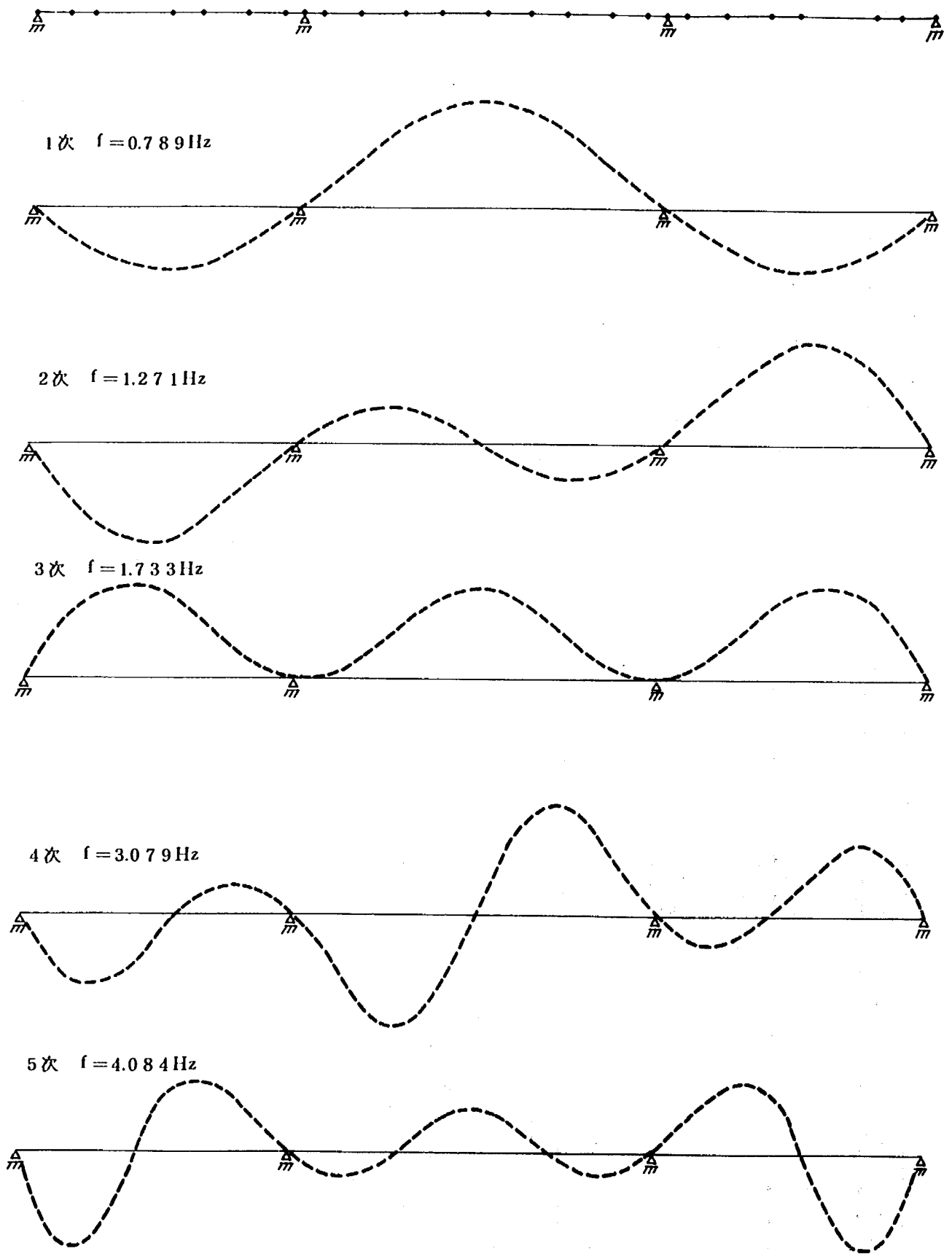


図-4.2 固有振動数および固有振動モード

5. 考 察

5.1 固有振動数

表－5.1 に起振機による加振実験と自然風による不規則振動計測から求められた固有振動数の測定値と4章で用いた数値解析と経験式から求められた固有振動数の推定値を示した。経験式は鉛直たわみ1次モードの固有振動数を推定する際によく用いられるもので以下の式で表わされるものである。

$$f = 100 / \ell$$

ここに、 f ；鉛直たわみ1次の固有振動数、 ℓ ；最大スパン長

表－5.1によると起振機加振と自然風による不規則振動から求められた固有振動数の測定値は、着目したモード全てにおいてよく一致しており、両者の差はたかだか3%程度である。ただし、ねじれモードの振動は自然風によって橋体に励起された振動からは抽出できなかった。数値解析による推定値は計算上、歩道側RC床版や舗装等の剛性を考慮しないことから、一般に実測値を下回るものとされている。今回の解析でも確かに鉛直たわみ1次モードについては実測値を約8%ほど下回っており、この傾向が確認されたが、高次のモードについては逆に数値計算結果が実測値を上回っている。このような現象が生じた理由は明らかではないが、今後、数値解析を行う場合、桁断面剛性、重量の仮定法について再検討が必要であると考えられる。経験式については実測値とよく一致した。

表－5.1 各算定法による固有振動数

算定法 振動モード	起振機加振	自然風による 不規則振動	数値解析	経験式
鉛直たわみ1次	0.85	0.85	0.79	0.84
” 2次	1.26	1.28	1.27	—
” 3次	1.62	1.60	1.73	—
” 4次	2.78	2.87	3.08	—
ねじれ 1次	3.89	—	—	—

(単位；Hz)

5.2 固有振動モード

図－5.1 に数値解析と起振機実験によって求められた固有振動モード形状を示す。測定点によっては数値解析結果とややずれがあるものも存在するが、概ね両手法による固有振動形状は一致しており、本橋の固有振動モードは、ほぼ正確に求められたものと考えられる。

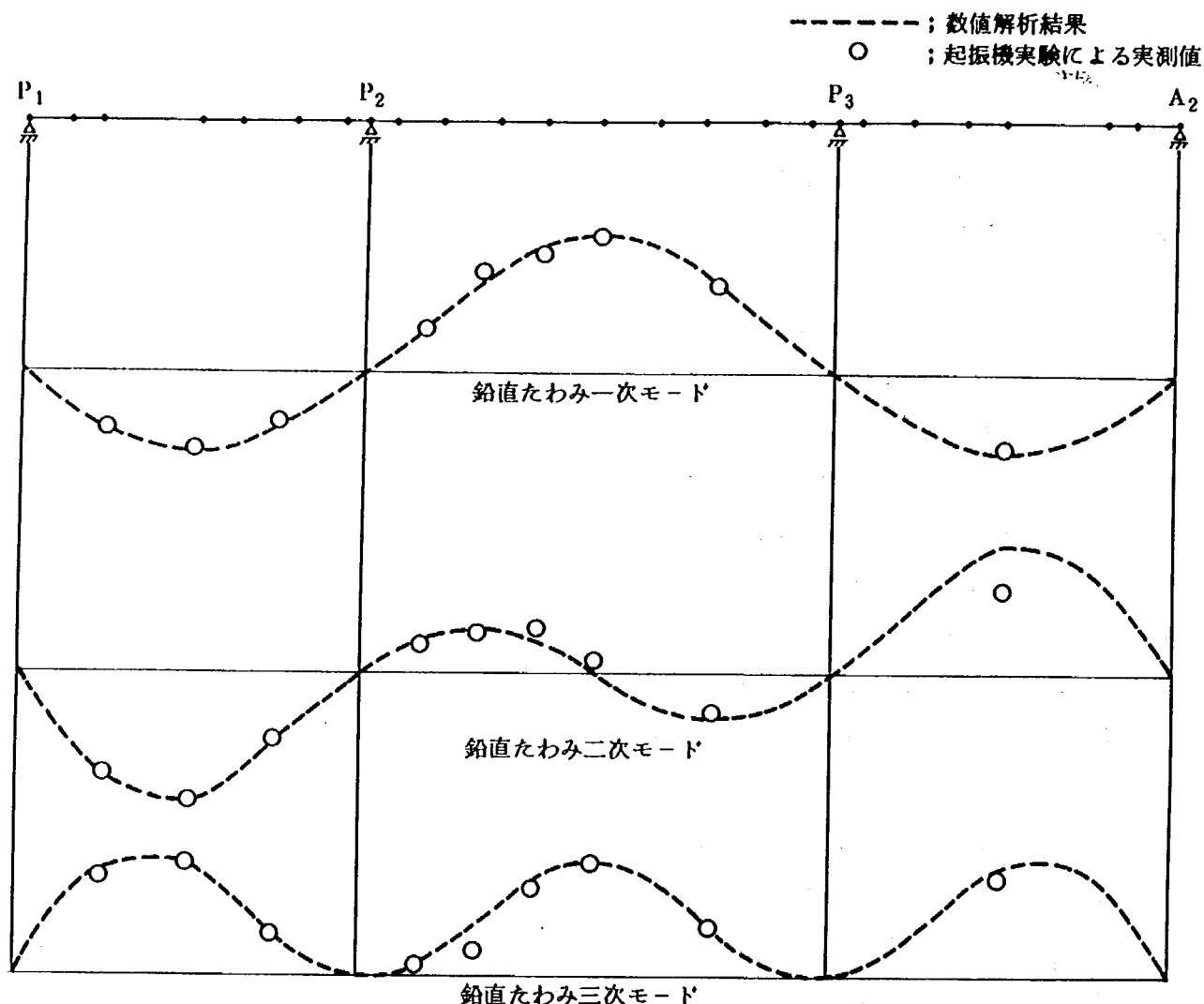


図- 5.1 数値解析と実測による固有振動モード形状

5.3 構造減衰

表- 5.2 に起振機実験による自由減衰波形および共振曲線から求められた構造減衰と自然風による不規則振動の共振曲線から求められた構造減衰を示す。この表から以下のことが言える。

- (1) 起振機による加振後の自由減衰波形から求められた構造減衰値と共振曲線から求められた構造減衰値を比較すると、両手法によって求められた構造減衰は、鉛直たわみ 1 次モードについては、よく一致し、対数減衰率で 0.1 程度となり、鉛直たわみ 2 次、3 次モード、ねじれ 1 次モードについては、やや違いがあるものの、対数減衰率で 0.07~0.10 であると判断できる。鉛直たわみ 2 次モードについては両手法の結果に開きがみられる。この原因については、鉛直たわみ 2 次モードの測定中、20 m/s 近い強風が吹き続けたため測定精度の確保が難しかったことが指摘できる。自由減衰波形によって求める手法では、風の弱まった時を選び実験を行い、また風の影響によって自由減衰波形

に乱れが生じたものは実験結果から除外したので、測定精度はかなり保持されているものと見なせる。これに対し共振曲線を求める場合は、ある一定期間中、定常加振しなければならない事情から風による影響を受け易く、振幅のピーク値を得るのは困難であり測定された構造減衰は真の値よりも大きくなりがちである。したがって鉛直たわみ 2 次モードの構造減衰は、対数減衰率 0.07～0.08 であると判断するのが妥当であると考えられる。以上起振機を用いた二つの手法から得られた結果から、本橋の構造減衰は 0.07～0.1 程度であると推定される。

- (2) 自然風による不規則振動加速度のパワースペクトルから算定された構造減衰は、鉛直たわみ 1 次モードで 0.08～0.09、鉛直たわみ 2 次モードで 0.05～0.07、鉛直たわみ 3 次モードで 0.04～0.05 となる。起振機実験によって求められた構造減衰値と比較すると、若干小さな値となっている。

表－5.2 各算定法による構造減衰の比較

算定法 振動モード	起 振 機 実 験		自然風による不規則 振動の共振曲線による
	自由減衰波形による	共振曲線による	
鉛直たわみ 1 次	0.107	0.111	0.084
〃 2 次	0.074	0.121	0.063
〃 3 次	0.082	0.098	0.046
ねじれ 1 次	0.093	0.068	—

5.4 桁、橋脚および支承の減衰性状の比較

中央径間 1/2 点、橋脚天端および支承の鉛直たわみ 1 次モードにおける自由減衰性状を図－5.2 に示す。図中の A1, X2, Y1, A10 はそれぞれ主径間 1/2 点の鉛直加速度, A_2 橋台支承の水平移動量, P_2 橋脚支承の回転量, P_2 橋脚天端の水平加速度を計測するセンサーを表わしており、図に示された曲線は、これらのセンサーから得られた変位の振幅を波数毎にプロットしたものである。

図中には、対数減衰率 0.05, 0.1, 0.2 の減衰性状を表わす曲線も示した。5.3 によれば、本橋の鉛直たわみ 1 次モードにおける構造減衰はおよそ 0.1 である。図－5.2 でも全ての測定点に対数減衰率 0.1 であることを示しており、支承や橋脚の振動が振幅の小さい範囲まで桁の振動によく追従していることが判る。

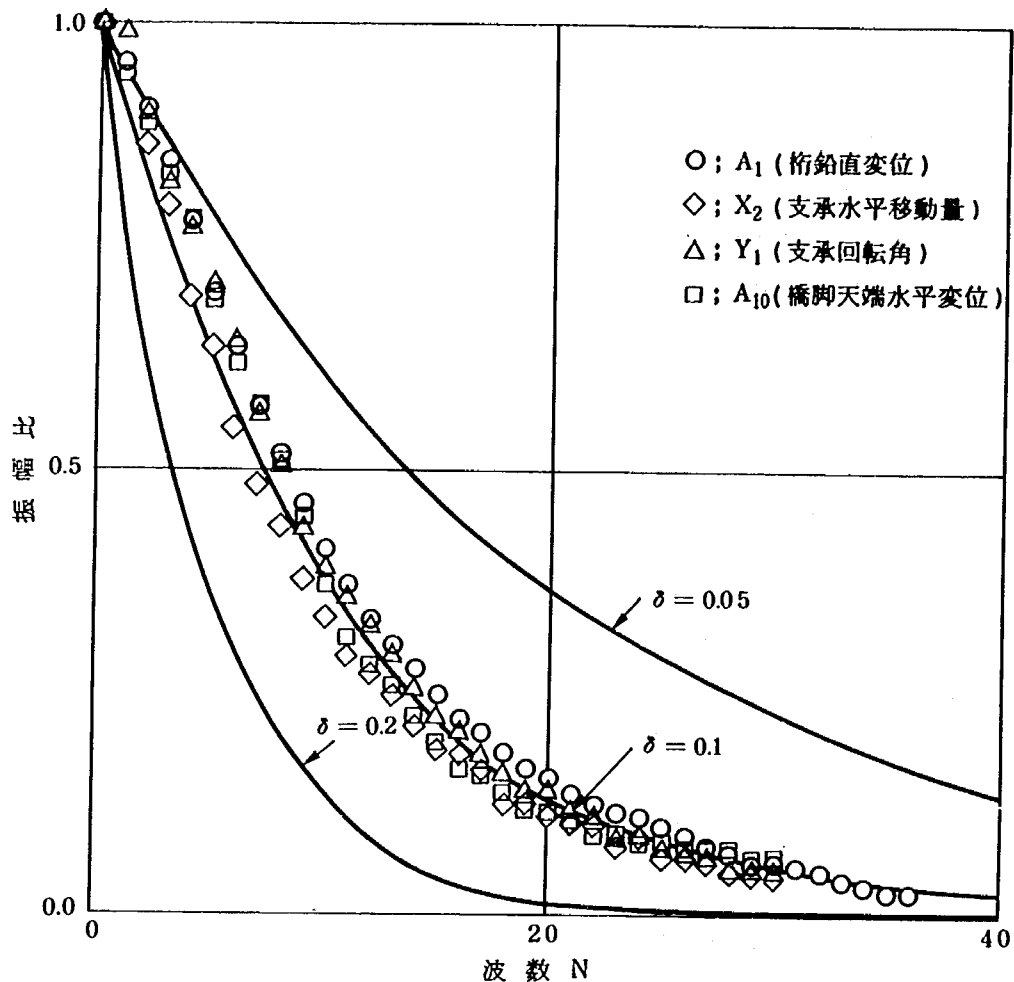


図- 5.2 桁，橋脚および支承の減衰性状の比較

5.5 支承部の移動量

(1) 支承回転量

支承回転量の実測値と桁の変位量と振動モード形状からの推定値を図- 5.3 に示す。支承の回転量は実測値が一様に推定値を上回っている。 P_2 , P_3 橋脚の中間支承での支承回転量は，比較的よく推定値と一致しているが， P_1 橋脚， A_2 橋台の端支承での支承回転量は推定値を大幅に上回っており特に A_2 橋台の支承においてその傾向が著しい。他の箱桁橋で同様に支承回転量を測定した例⁽¹⁾でも端支承の回転量は計算値より約 5 割程度大きいと報告されている。このような傾向が表われる原因については P_2 , P_3 橋脚の中間支承だけがピン支承であり， P_1 橋脚， A_2 橋台の端支承はローラ支承であることからピン支承とローラ支承の回転運動性の違い等が考えられるが，現段階ではよく判らない。

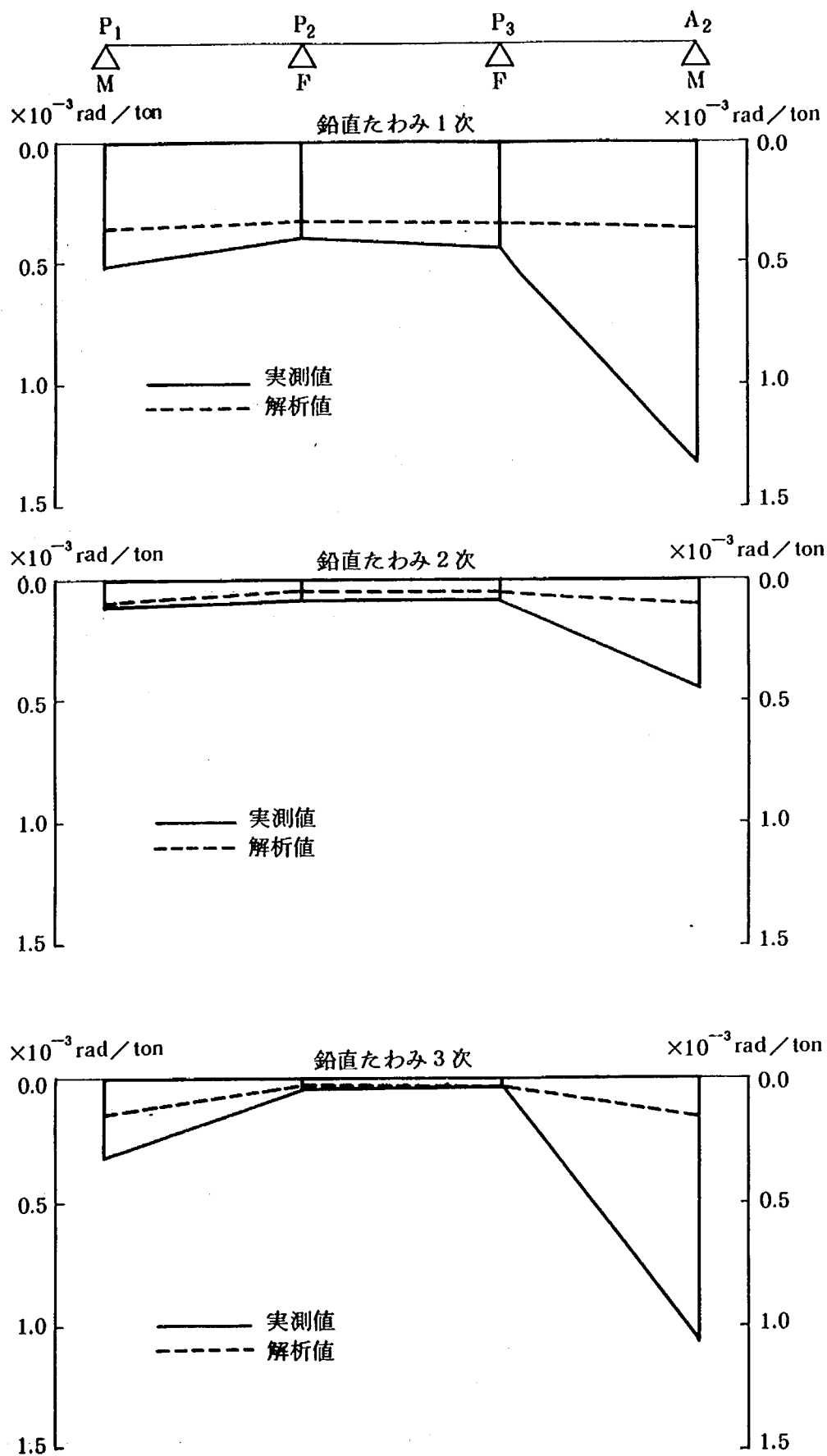


図-5.3 各橋脚支承回転量の実測値と解析値

(2) 支承水平移動量

A₂ 橋台に支承の水平移動量を計測するための変位計を設けた。振動に伴う桁の変形から求められる支承水平移動量の推定値と、変位計から直接的に得られる測定値との比較を以下に行う。

支承の水平移動をもたらす要因としては、桁が鉛直方向に振動する際に水平長が減少することと、桁端が傾くことにより桁下の支承部分に橋軸方向の変位が現われることがあげられる。右図のように水平長の減少による変位を y_1 、桁端の傾きによる変位を y_2 とし、桁の振動モード形状を正弦波によって近似すると、桁の長さ自体は変わらないから y_1 は以下のように求められる。

$$\begin{aligned}\ell &= \int_0^{\ell'} \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx \\ &= \int_0^{\ell'} \sqrt{1 + \left(\frac{a_0 \pi}{\ell'} \cos \frac{\pi x}{\ell'}\right)^2} dx \\ &\doteq \int_0^{\ell'} \left(1 + \frac{a_0^2 \pi^2}{2\ell'^2} \cos^2 \frac{\pi x}{\ell'}\right) dx \\ &= \ell' + \frac{a_0^2 \pi^2}{4\ell'}\end{aligned}$$

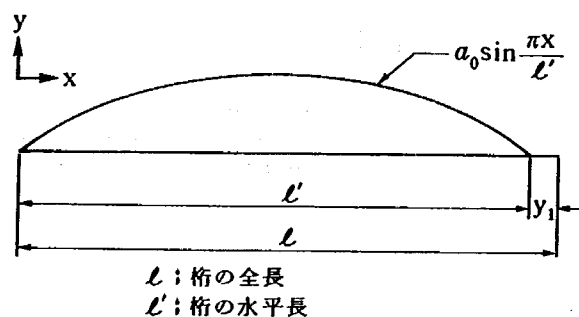
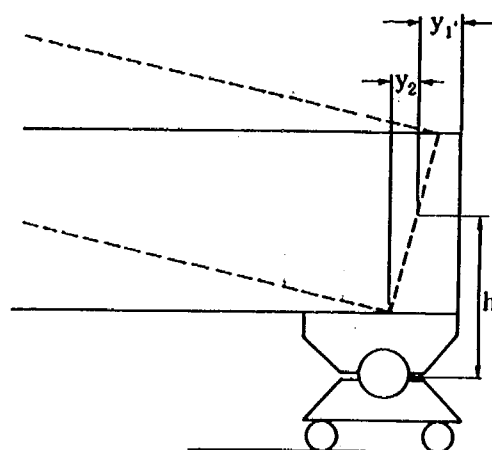
$$\text{両辺に } \ell' \text{ を掛けて} \quad \ell'^2 - \ell\ell' + \frac{a_0^2 \pi^2}{4} = 0$$

$$\begin{aligned}\text{よって} \quad \ell' &= \frac{1}{2} \left(\ell + \ell \sqrt{1 - \left(\frac{a_0 \pi}{\ell}\right)^2} \right) \\ &\doteq \ell - \frac{a_0^2 \pi^2}{4\ell}\end{aligned}$$

$$\text{したがって} \quad y_1 = \ell - \ell' = \frac{a_0^2 \pi^2}{4\ell} \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、桁の傾きによる変位 y_2 は以下の式により近似的に求められる。

$$\begin{aligned}y_2 &= h \cdot \frac{d(a_0 \sin \frac{\pi x}{\ell})}{dx} \bigg|_{x=0} \\ &= \frac{a_0 \pi}{\ell} \cdot h \quad \dots\dots\dots (2)\end{aligned}$$



y_1 と y_2 を比較するために y_1/y_2 を求めると、

$$\begin{aligned} y_1/y_2 &= \frac{a_0^2 \pi^2}{4L} \bigg/ \frac{a_0 \pi}{L} \cdot h \\ &= a_0 \pi / 4h \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

a_0 は桁中央での最大変位置で、 h は回転中心とピン支承中心との距離である。仮に $a_0 = 1 \text{ cm}$ 、 $h = 150 \text{ cm}$ とすれば $y_1/y_2 \div 1/190$ となる。したがって支承水平移動量は、桁端の傾きによる変位 y_2 が支配的であることが判る。

付図-5 から鉛直たわみ 1 次モードの共振振動数で加振した場合、起振力 1 ton 当り 0.83 mm の水平変位が支承に発生することが判る。また付図-1.11 から側径間中央部では起振力 1 ton 当り 26 gal、変位に直して 9.0 mm の振動が発生する。式(2)から y_2 を計算すると、

$$y_2 = \frac{0.90 \times \pi \times 150}{8830} = 0.048 \text{ cm} = 0.48 \text{ mm}$$

支承の水平移動量の実測値 0.83 mm と比較すると、やや小さめな値である。しかし桁端断面の回転中心の位置を路面付近まで上げ、 h を 250 cm 、すなわち路面下 30 cm に回転中心があるとすれば、 y_2 は 0.80 mm となりほぼ実測値と一致する。回転中心の位置は今回の実験で求めることはできず h の真値は判らないがオーダー的に見て、桁の変形によって支承部に予想される水平移動はスムーズに行われたものと考えられる。

5.6 支承のころがり摩擦の構造減衰に対する寄与率

桁の振動に伴い支承は、回転運動や水平方向への滑動を行う。これらの運動において、ピンまたはローラーと桁もしくは橋脚との間にくろがり摩擦が発生する。ころがり摩擦をクーロン摩擦と仮定し、支承部で発生するころがり摩擦によるエネルギー消失が構造減衰に与える影響について以下に考察する。

支承に作用する鉛直荷重を R 、摩擦係数 f とすれば摩擦力 F は次式で示される。

$$F = R \cdot f \quad \dots\dots\dots (4)$$

振動 1 サイクルの間に発生する相対的移動量すなわち“ころがり”距離を t とすると、1 サイクルの間に消失するエネルギー ΔW は次式のようになる。

$$\Delta W = F \cdot t \quad \dots\dots\dots (5)$$

支承の振動にともなう運動には回転方向と水平方向がある。これら2方向の運動によるころがり距離を比較する。

5.5(2)で述べたように水平方向の滑動が生じるのは、主に桁の振動に伴う桁端の傾きである。したがって水平方向におけるころがり距離を t_1 とすると式(2)より、

$$t_1 = 4y_2 = \frac{4a_0\pi h}{\ell} \dots\dots\dots (6)$$

また右図のように桁が θ だけ回転した場合のころがり距離を t_2 とすると、

$$t_2 = 4r\theta = \frac{4a_0\pi r}{\ell} \dots\dots\dots (7)$$

$$(\therefore \theta = d(a_0 \sin \frac{\pi}{\ell} x) / dx \Big|_{x=0})$$

$$t_1 / t_2 = h / r$$

h は回転中心とピン支承中心との距離、 r は支承のピンまたはローラの半径であるので、 h は r の10倍以上のオーダーになる。したがって t_2 は t_1 に比べ無視し得ると考えられるので、ここでは水平方向の滑動すなわちローラ支承の水平移動のみに着目するものとする。

桁の鉛直たわみ1次モードの振動モード形状を正弦波で近似し、次式で表わされるものとする。

$$\eta_i = a_i \sin \frac{\pi x}{\ell_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 3; \text{側径間} \\ i = 2; \text{中央径間} \end{array} \right. \dots\dots\dots (8)$$

振動している桁に蓄えられる全体のポテンシャル・エネルギーの最大値は、

$$W = \frac{EI_i}{2} \int_0^{\ell_i} \eta_i^2 dx = \sum_{i=1}^3 \frac{\pi^4 EI_i}{4\ell_i^3} a_i^2 \dots\dots\dots (9)$$

対数減衰率 δ は、次式で表わされる。⁽²⁾

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots (10)$$

したがって、

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{2} \frac{R \cdot f}{\sum_{i=1}^3 \frac{\pi^4 EI_i}{4\ell_i^3} a_i^2} \\ &= \frac{2R \cdot f \cdot t}{\pi^4 \sum_{i=1}^3 \frac{EI_i}{\ell_i^3} a_i^2} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

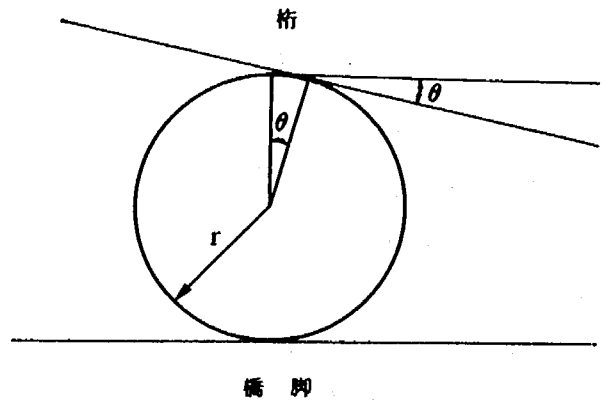


表-5.3に必要とされる諸元を示す。これらの諸元を式(11)に代入し、 δ と f （ころがり摩擦係数）、 a （振動振幅）との関係を求め、図-5.4に示す。図-5.4には本橋の他に門崎高架橋三径間箱桁（本四公団）での測定結果も示してある。

表-5.3 諸 元 一 覧

	$i=1$	$i=2$	$i=3$	備 考
L	88.30 m	119.20 m	88.50 m	
EI	$2.586 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$			桁全体の平均値を採用
a	0.93 cm	1.64 cm	0.93 cm	鉛直たわみ1次モードの単位起振力当りの振幅
R	987.2 t			死荷重による P_1 , A_2 支承の支点反力
t	0.208 cm			鉛直たわみ1次モードの単位起振力当りのころがり距離

支承のころがり摩擦による減衰をクーロン減衰とすれば、支承のころがり摩擦による構造減衰は振幅に反比例する。仮に $f=0.001$ と仮定すると、支承のころがり摩擦によって生じる減衰は、実験における最大振幅において約0.029となり、全体の構造減衰0.11の約25%を占めることになる。

付図-2によると鉛直たわみ1次の構造減衰は、起振機停止直後の最大振幅の $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{6}$ の振幅に至るまではほぼ一定である。図-5.4によれば日守大橋では振幅が1mmになった時点で支承のころがり摩擦による構造減衰が0.1を超えることになる。振幅がさらに減少すると支承のころがり摩擦による構造減衰は急激に増加する。したがって $f=0.001$ とすれば、振幅1mm程度で振動が急停止しなくてはならないが、そのような現象は生じなかった。門崎高架橋の例においても $f=0.001$ の場合、実験時の最大振幅においてころがり摩擦による構造減衰は、既に、全体の構造減衰の90%近くを占めている。ころがり摩擦による構造減衰は、振幅の減少に伴い、更に増加する傾向にある。

以上の事実から、支承のころがり摩擦をクーロン摩擦と考えると、ころがり摩擦係数を0.001以下であると考えざるを得ない。しかし、道路橋支承便覧⁽³⁾では、大きめの値であるとしながらも $f=0.05$ を採用しており、今回仮定した $f=0.001$ の50倍となっている、ころがり摩擦係数が0.001であるということとは、重力の $1/1000$ の力によって物体が動き続ける程、摩擦が小さいことを意味し、支承の製作精度上、このように小さいころがり摩擦係数を想定するのは難しいと考えられる。したがって支承のころがり摩擦をクーロン摩擦と仮定することには無理があると思われる。仮にかなり小さなころがり摩擦が実現されていたとしても、振幅が大きくなるに従い、ころがり摩擦による構造減衰は、微小なものとなり、耐風性の評価には関係しないことになる。

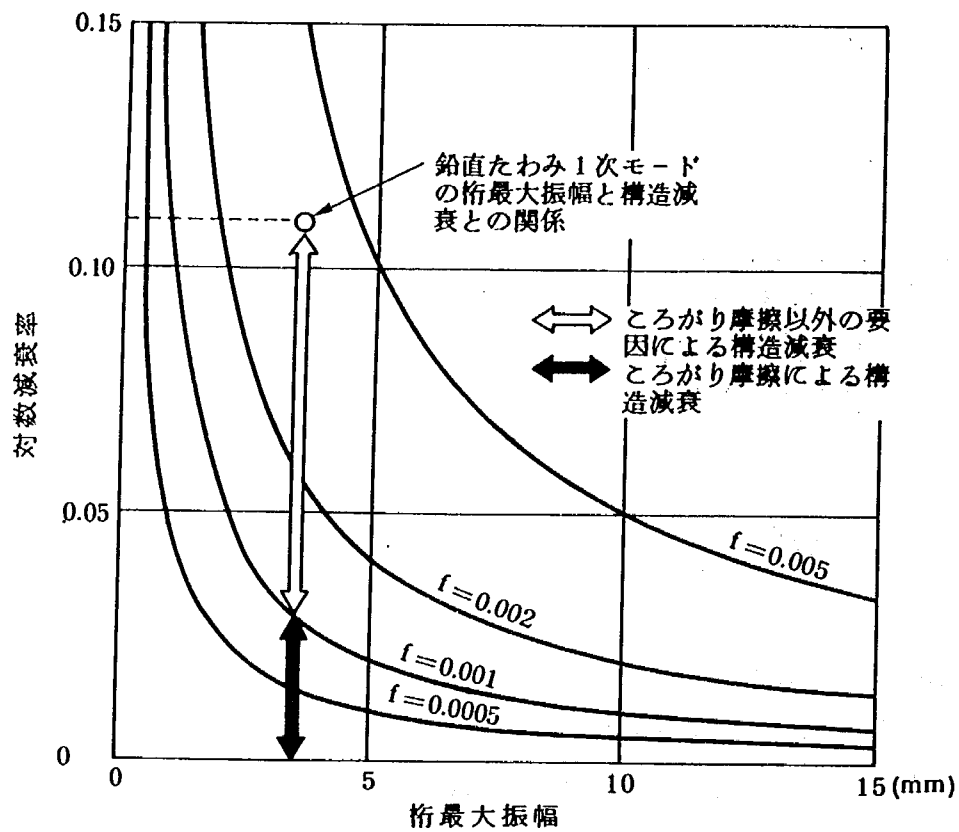


図-5.4.1 ところがり摩擦の構造減衰に対する寄与 (日守大橋)

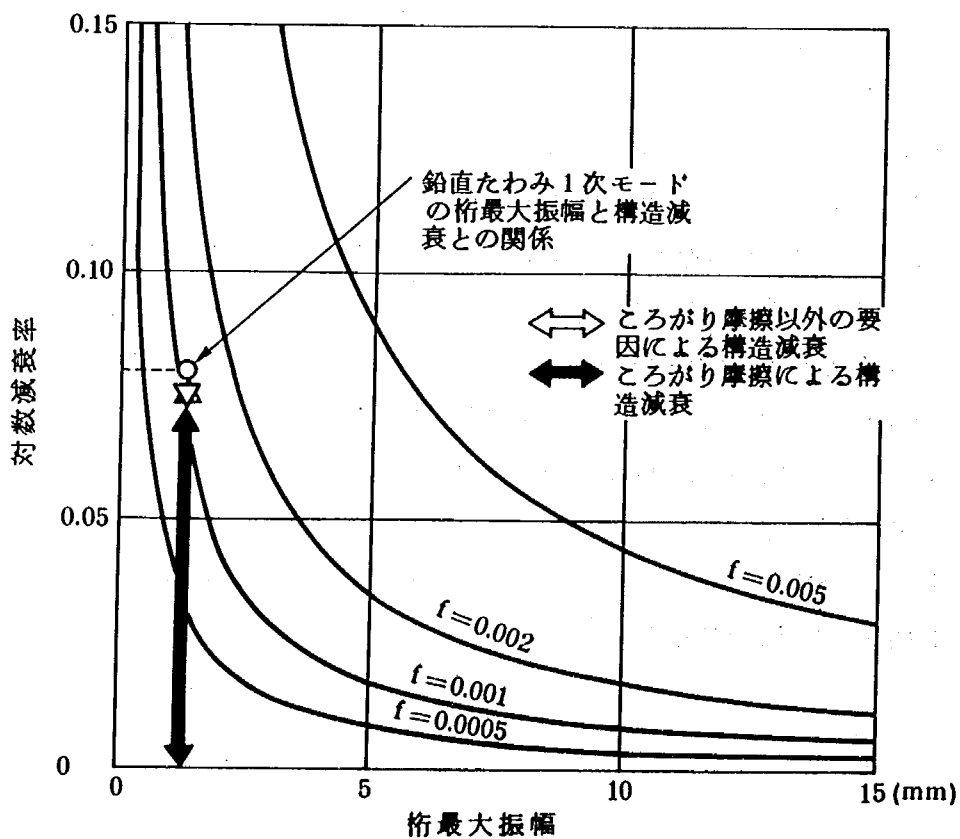


図-5.4.2 ところがり摩擦の構造減衰に対する寄与 (門崎高架橋三径間)

6. ま と め

昭和60年2月に行った伊豆中央道日守大橋の振動実験結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 固有振動数については、起振機実験と自然風による不規則振動計測の両手法の測定値がよく一致した。数値解析によって求められた推定値は、鉛直たわみ1次モードでは測定値を約8%ほど下回り、逆に高次のモードについては測定値をやや上回る値が得られ、桁断面剛性、重量等の仮定法について再度見直す必要があると判断された。経験式については測定値とよく一致した。
- (2) 固有振動モードについては、起振機実験、数値解析結果が鉛直たわみ1次～3次モードに対しよく一致した。
- (3) 起振後の自由減衰波形から算定した構造減衰は、鉛直たわみ1次～3次、ねじれ1次の計4モードにおいて、およそ0.07～0.10であった。起振機実験による共振曲線から算定した構造減衰も鉛直たわみ2次モードを除き、自由減衰波形から求めた構造減衰と比較的よく一致した。自然風による不規則振動加速度のパワースペクトルから算定された構造減衰は全てのモードにおいて起振機実験による測定値よりやや小さい値となった。
- (4) 桁、橋脚および支承の減衰性状は、ほぼ一様であり、それぞれの対数減衰率はほぼ等しい。
- (5) 支承回転量は、 P_2 、 P_3 橋脚の中間支承では推定値と比較的よく一致するが、 P_1 橋脚、 A_2 橋台の端支承では測定値が推定値を大巾に上回った。
- (6) A_2 橋台支承の水平移動量は、推定値とおよそ一致した値が得られ、桁の振動に伴う支承の水平方向の動きはスムーズであると考えられる。
- (7) ローラ支承のころがり摩擦による逸散エネルギーによる減衰が、桁全体の減衰に対する寄与率は2割以下であると考えられる。

謝 辞

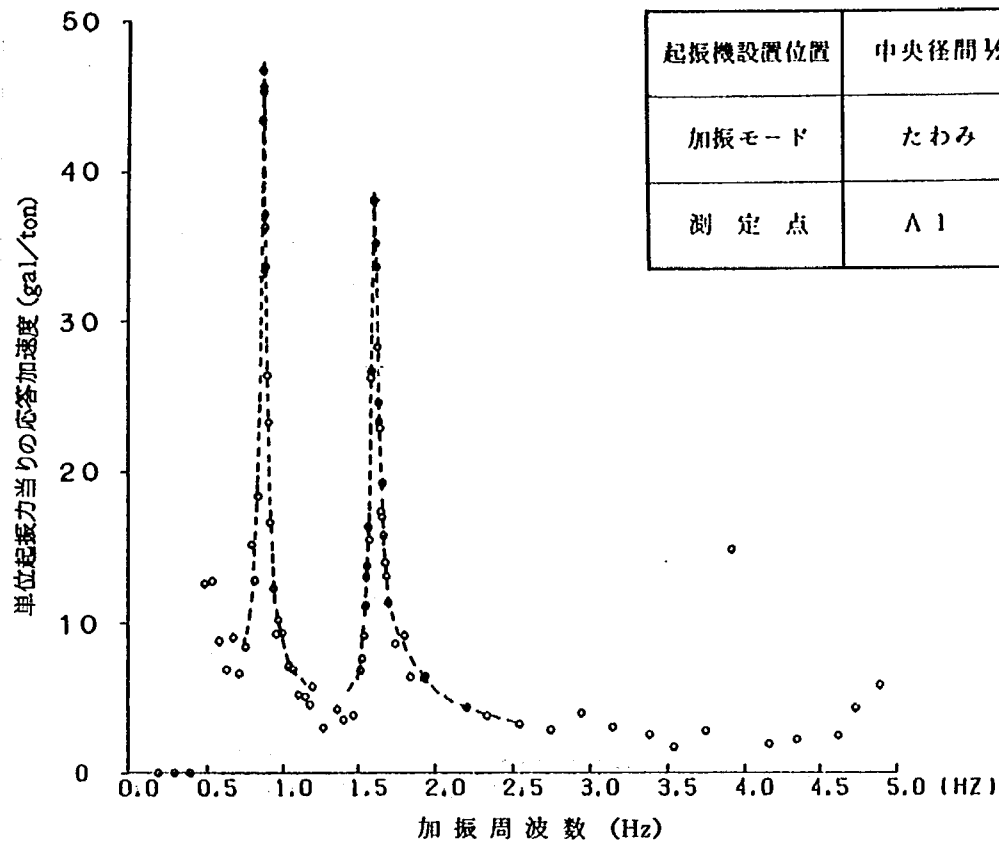
本実験を行うにあたり、静岡県土木部道路建設課、静岡県道路公社、静岡県道路公社伊豆中央道建設事務所の関係各位から多大な協力を得たことを記し、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

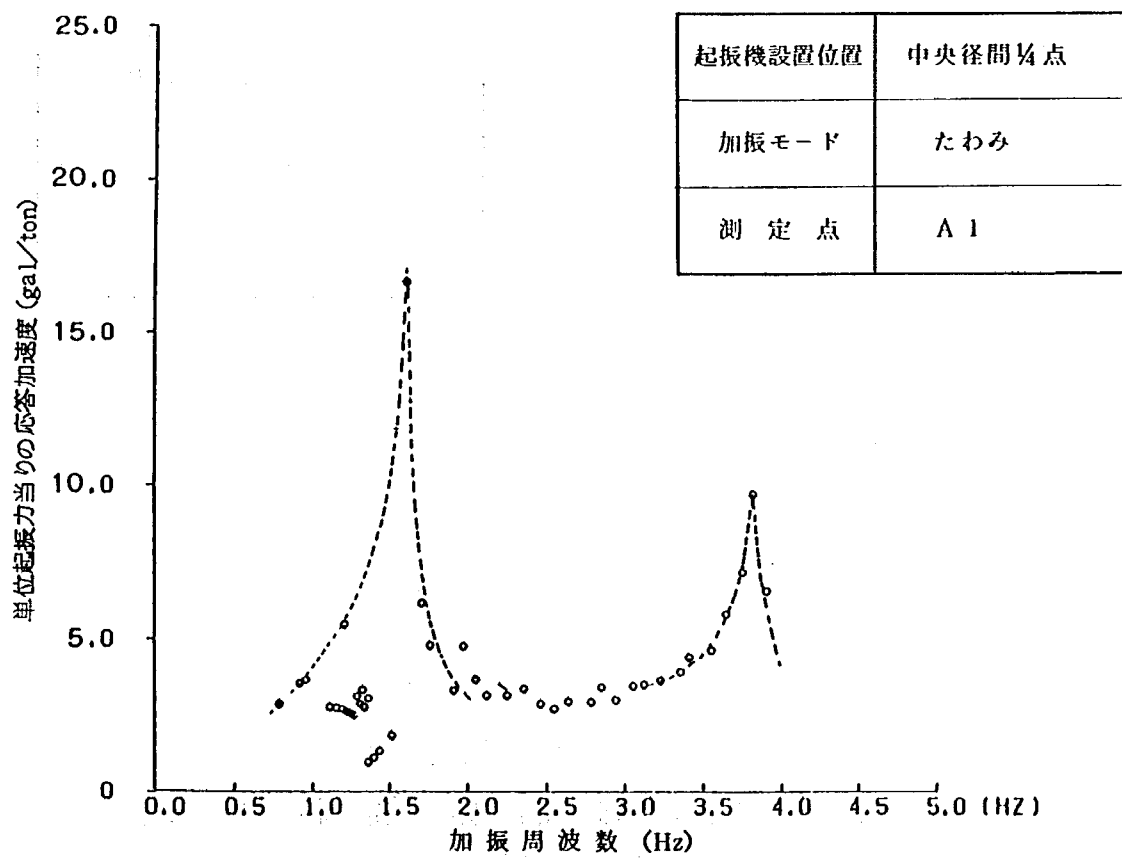
- (1) 藤沢，大橋，藤本； 連続箱桁橋の振動実験時の支承の挙動について
第39回土木学会年次学術講演集Ⅰ－260
- (2) アメリカ合衆国商務省道路局； 吊橋の振動解析 P 163
- (3) 日本道路協会； 道路橋支承別覧 P 40

付 属 資 料

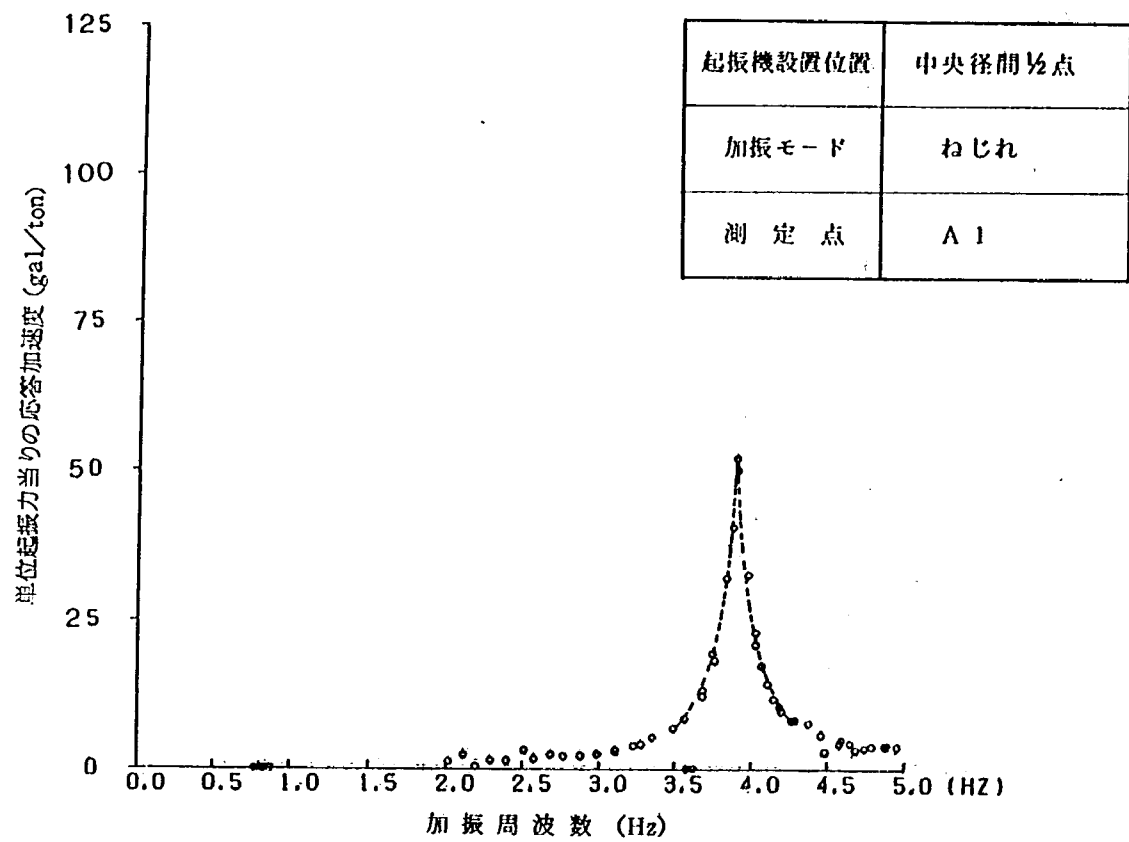
付図-1	起振機加振による共振曲線	31
付図-2	自由減衰波形	54
付図-3	自然風による不規則振動のパワースペクトル	74
付図-4	自然風による桁の応答加速度波形	76
付図-5	起振機加振による支承移動量の共振曲線	77



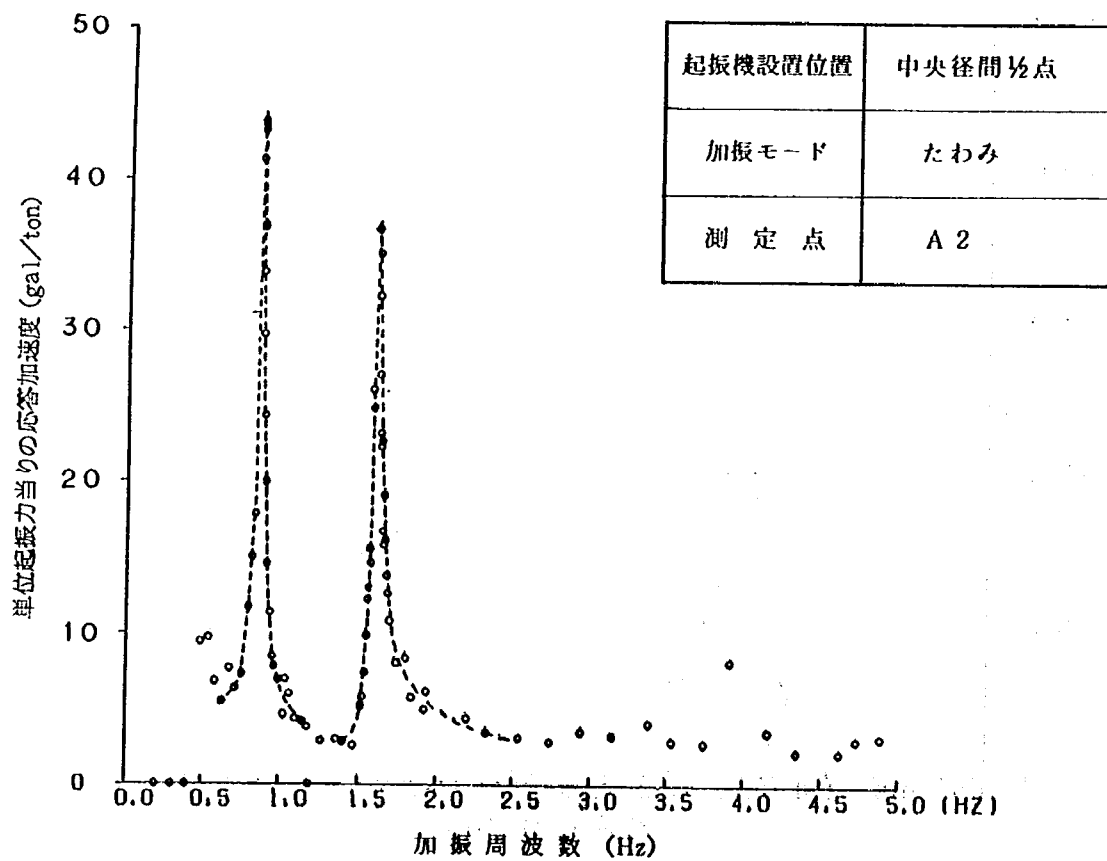
付図- 1. 1. 1 起振機加振による共振曲線



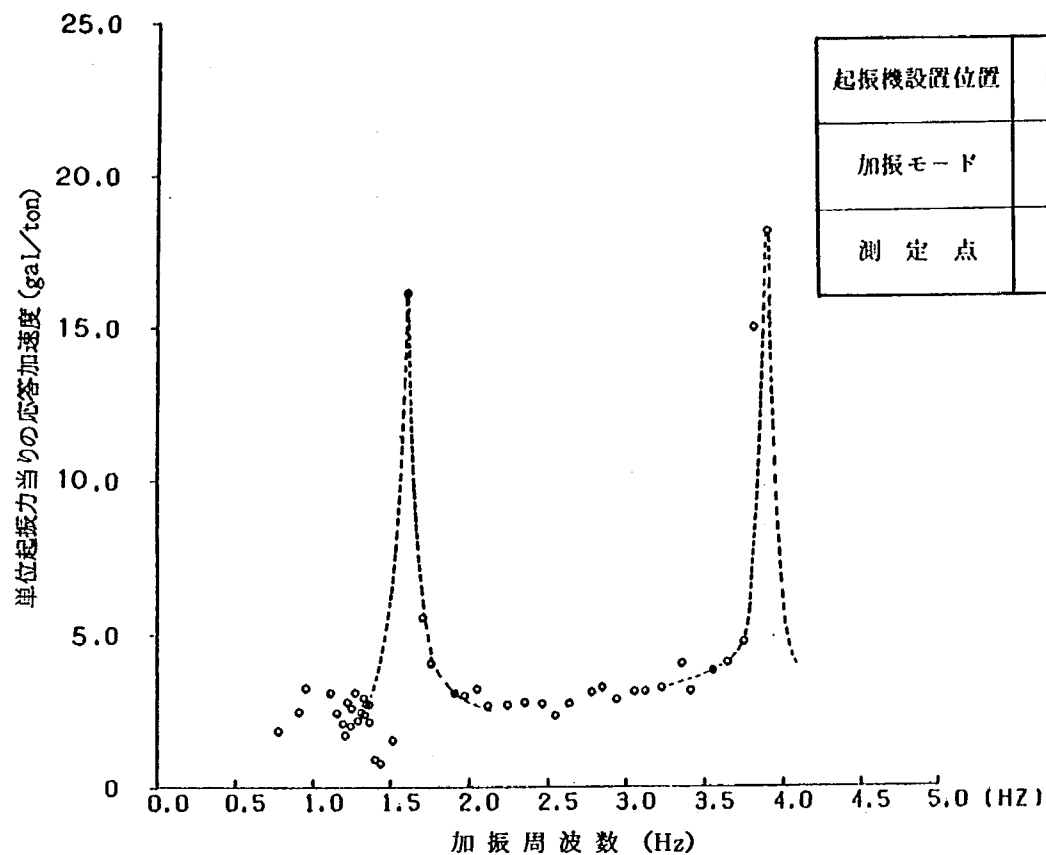
付図- 1. 1. 2 起振機加振による共振曲線



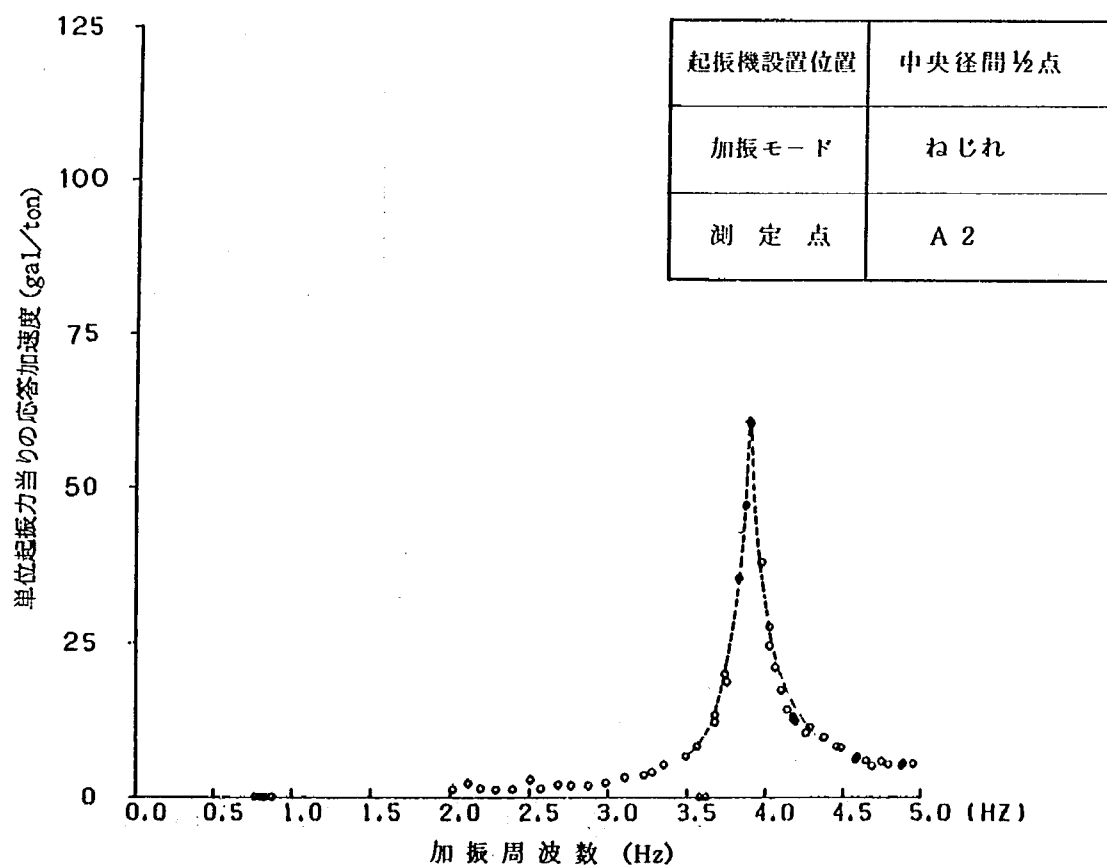
付図－ 1. 1. 3 起振機加振による共振曲線



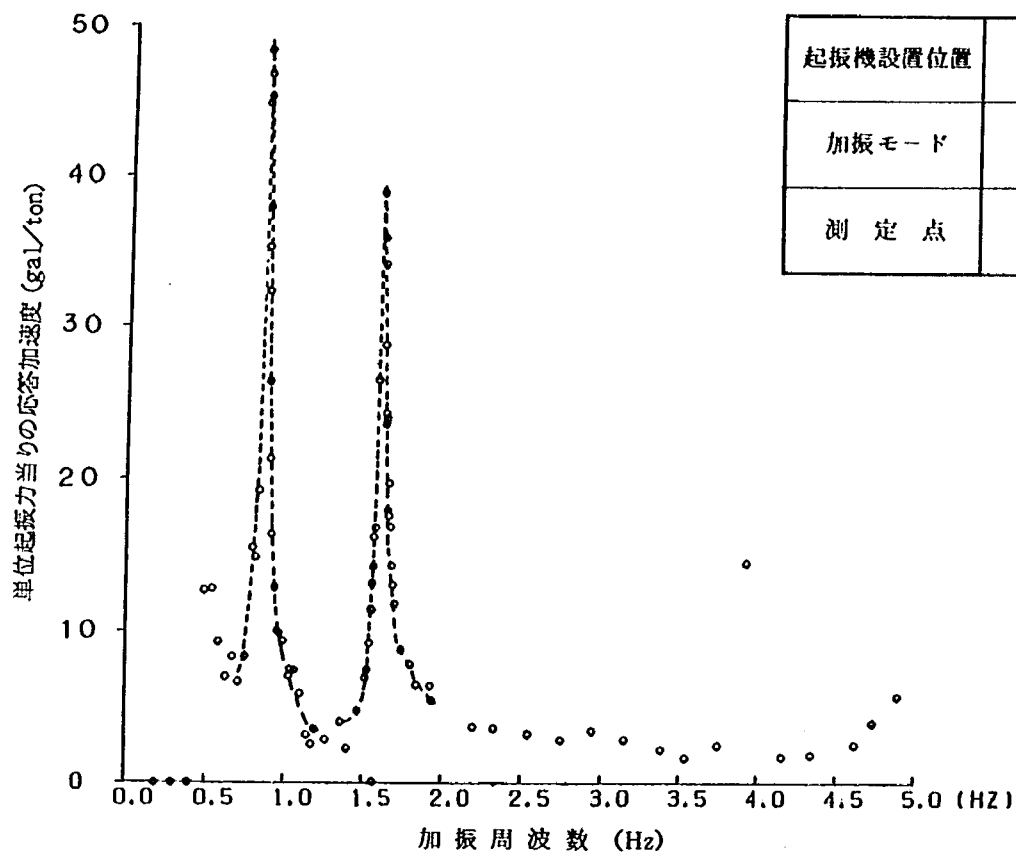
付図－ 1. 2. 1 起振機加振による共振曲線



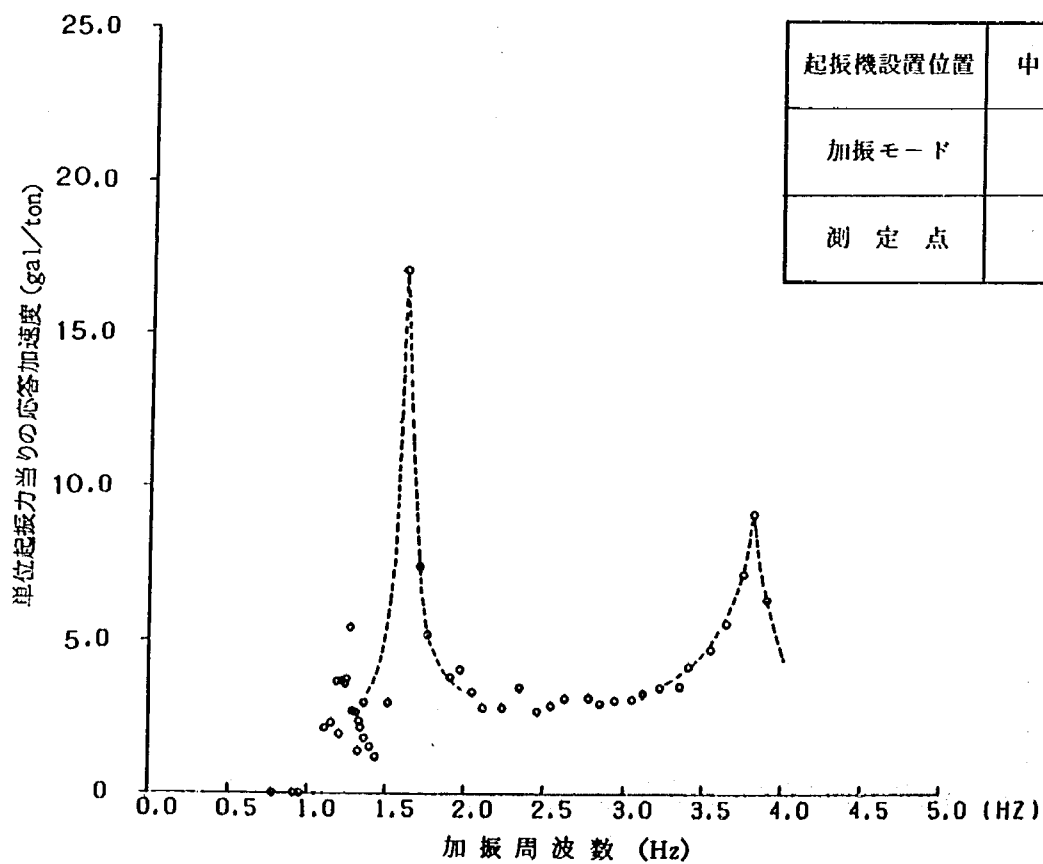
付図-1.2.2 起振機加振による共振曲線



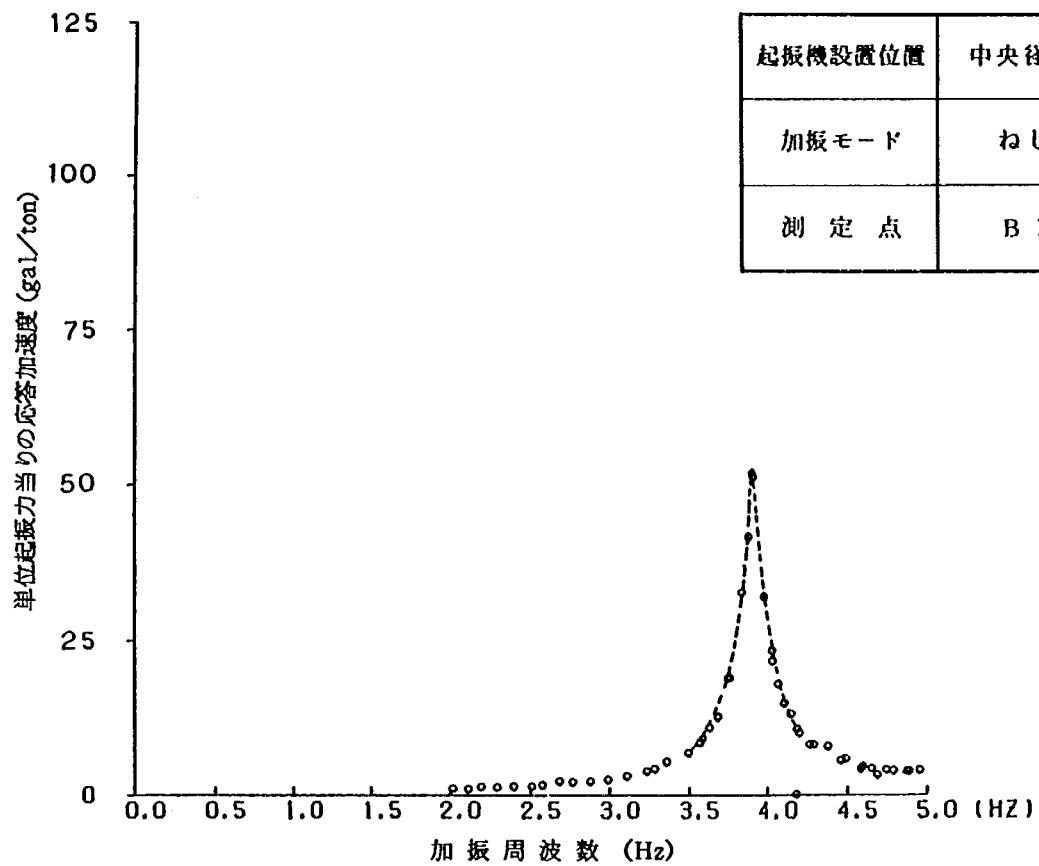
付図-1.2.3 起振機加振による共振曲線



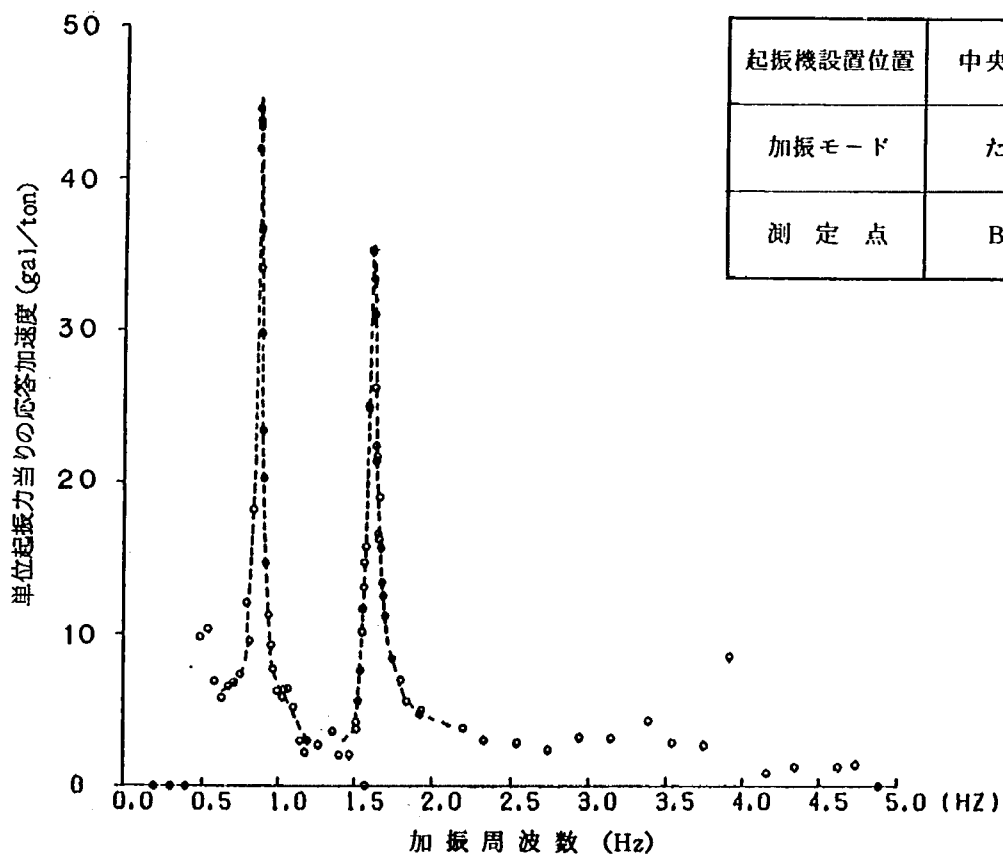
付図－ 1. 3. 1 起振機加振による共振曲線



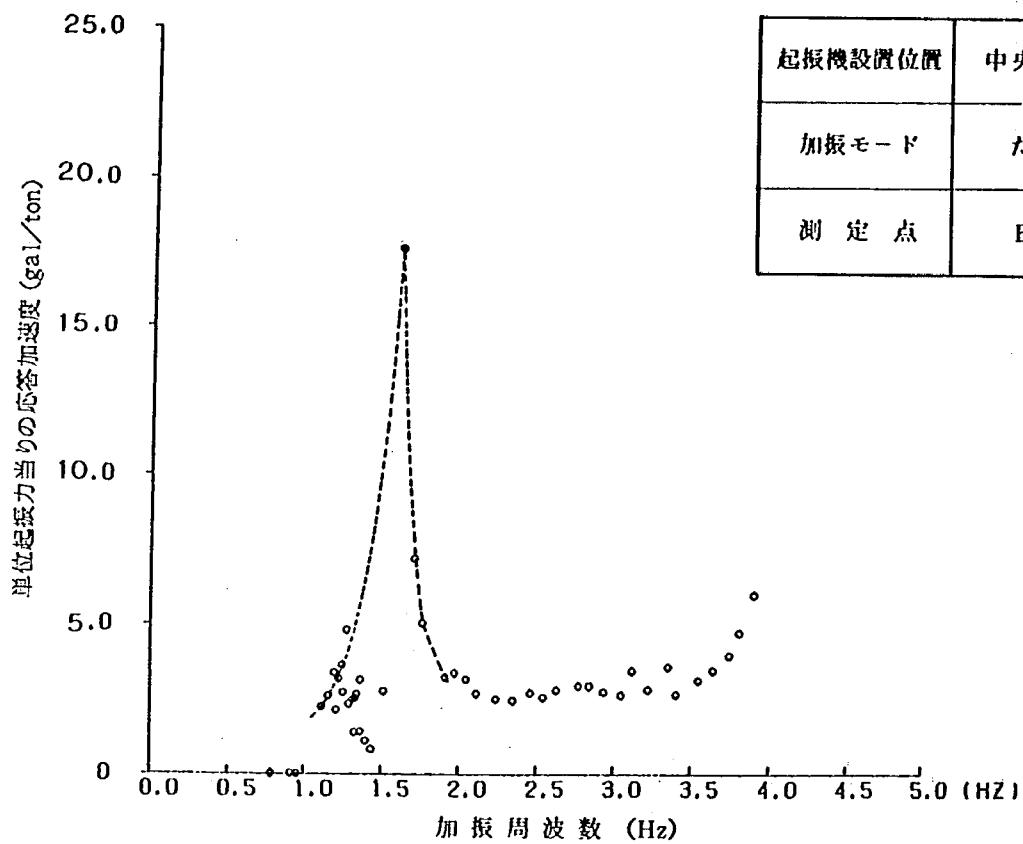
付図－ 1. 3. 2 起振機加振による共振曲線



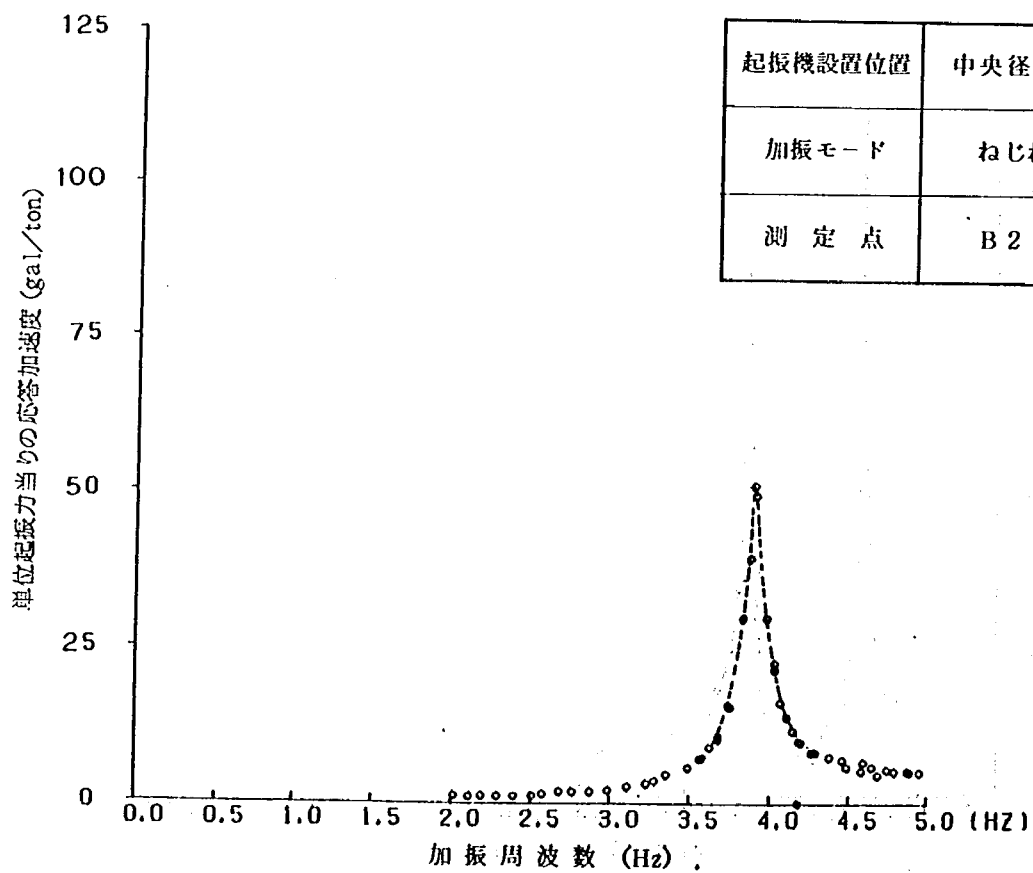
付図- 1. 3. 3 起振機加振による共振曲線



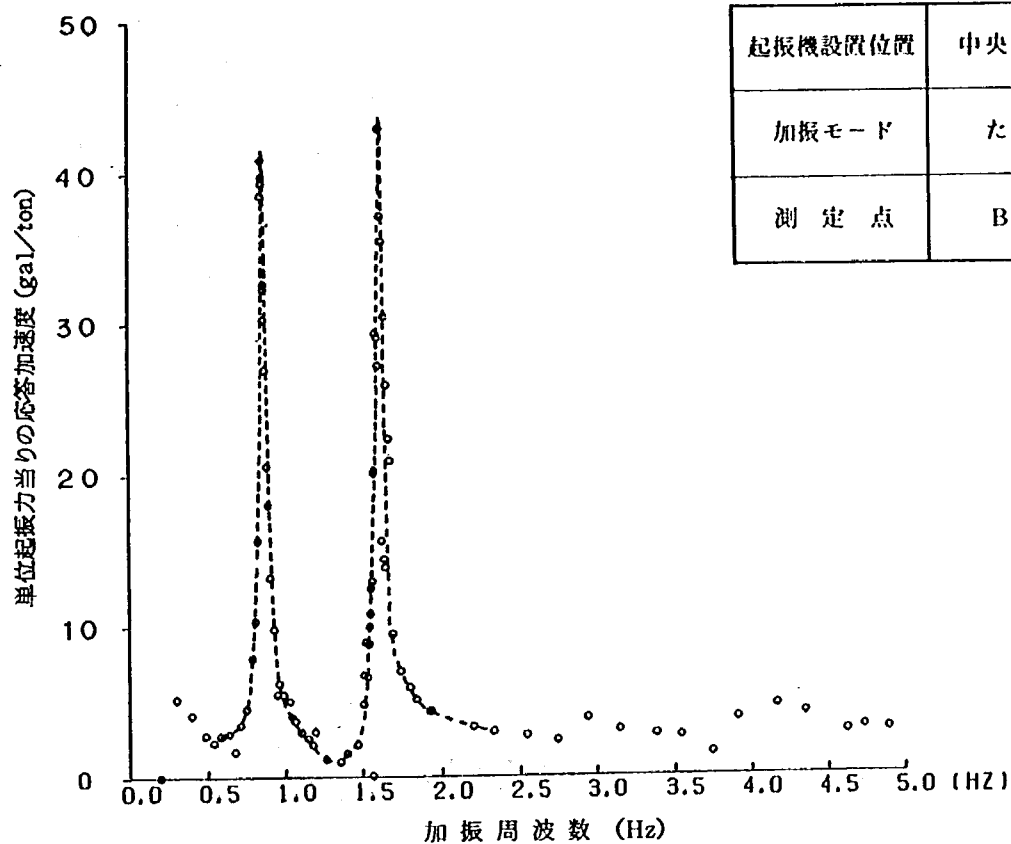
付図- 1. 4. 1 起振機加振による共振曲線



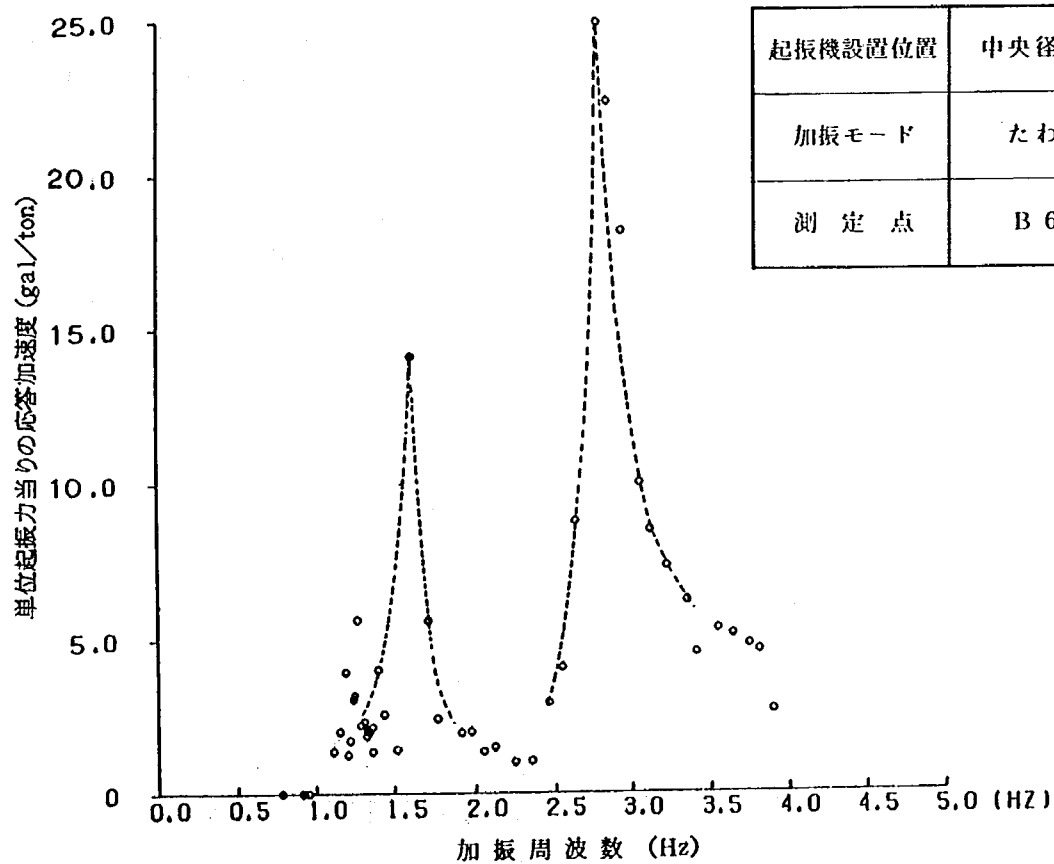
付図－ 1. 4. 2 起振機加振による共振曲線



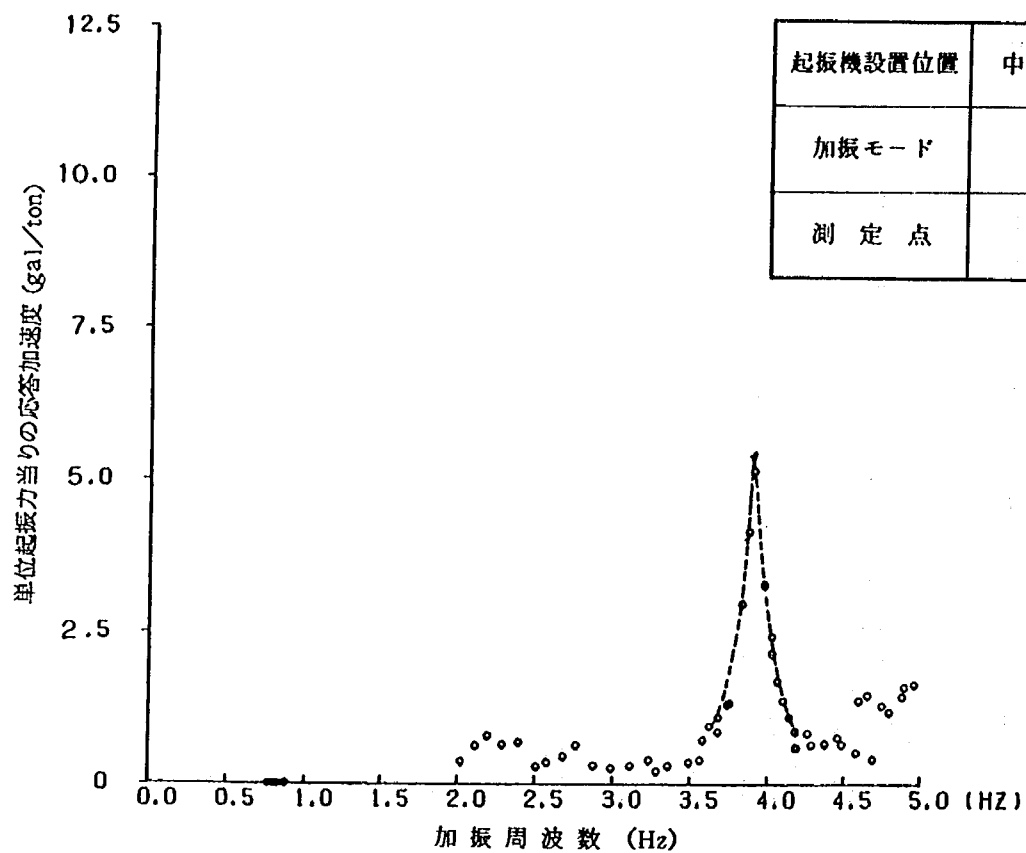
付図－ 1. 4. 3 起振機加振による共振曲線



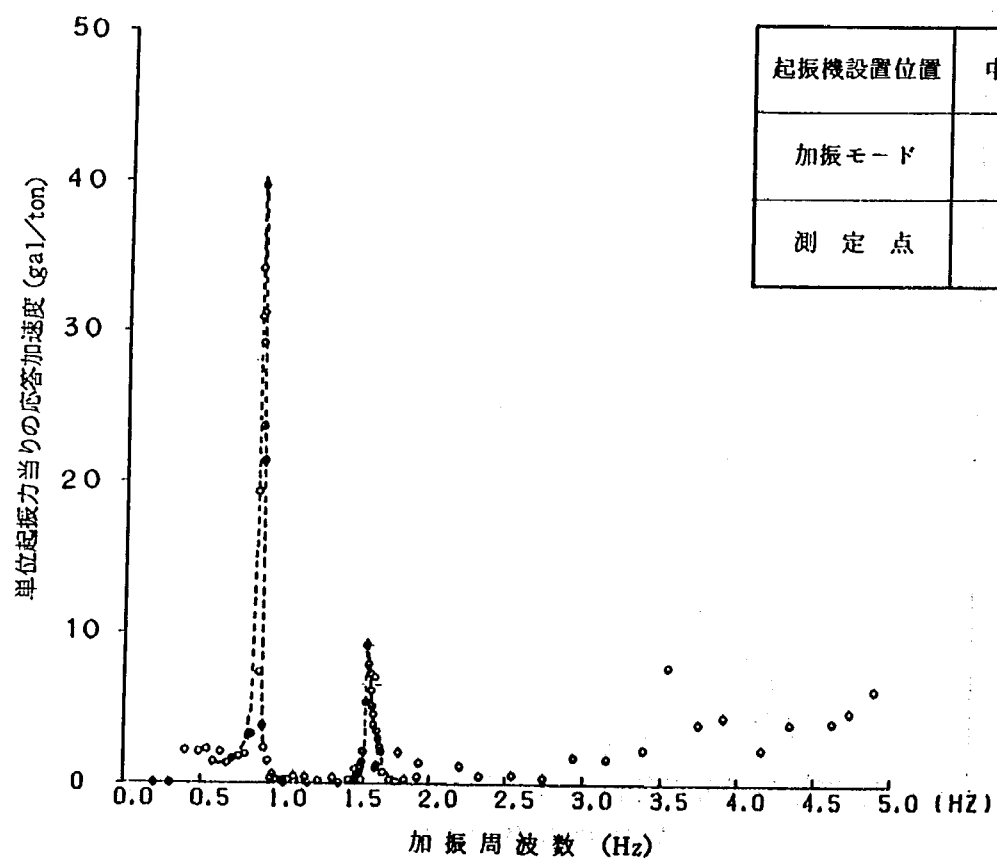
付図- 1. 5. 1 起振機加振による共振曲線



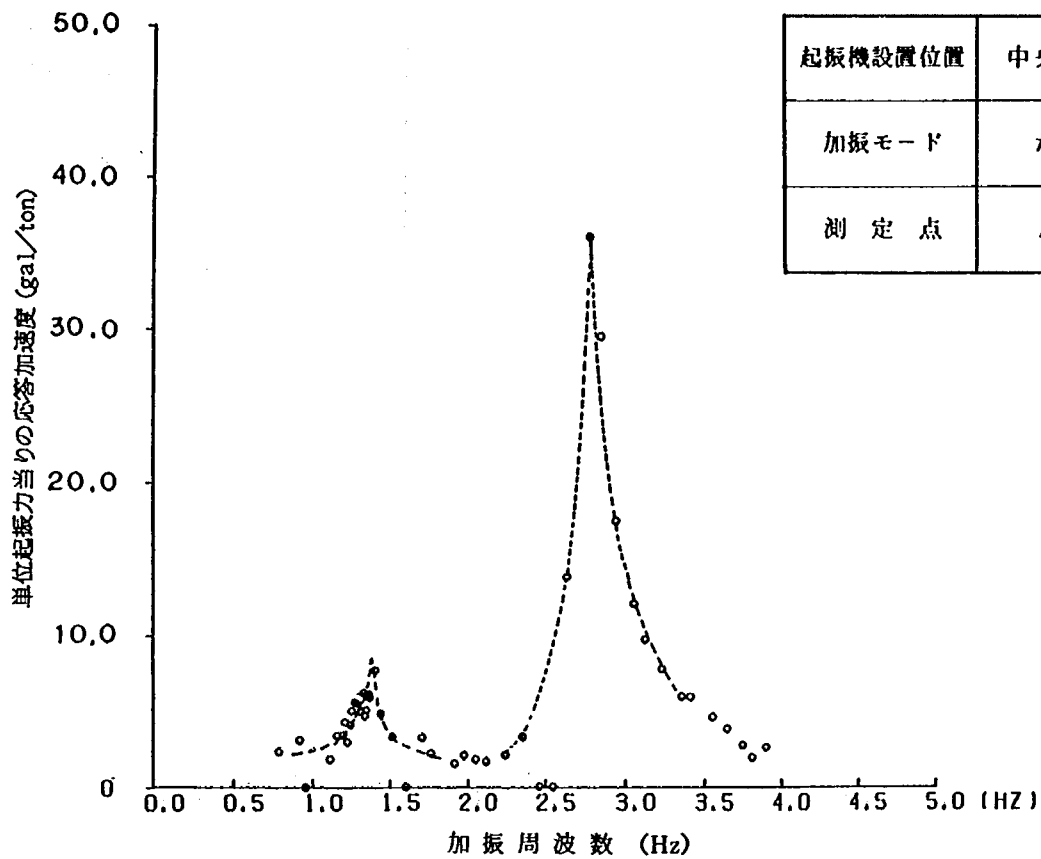
付図- 1. 5. 2 起振機加振による共振曲線



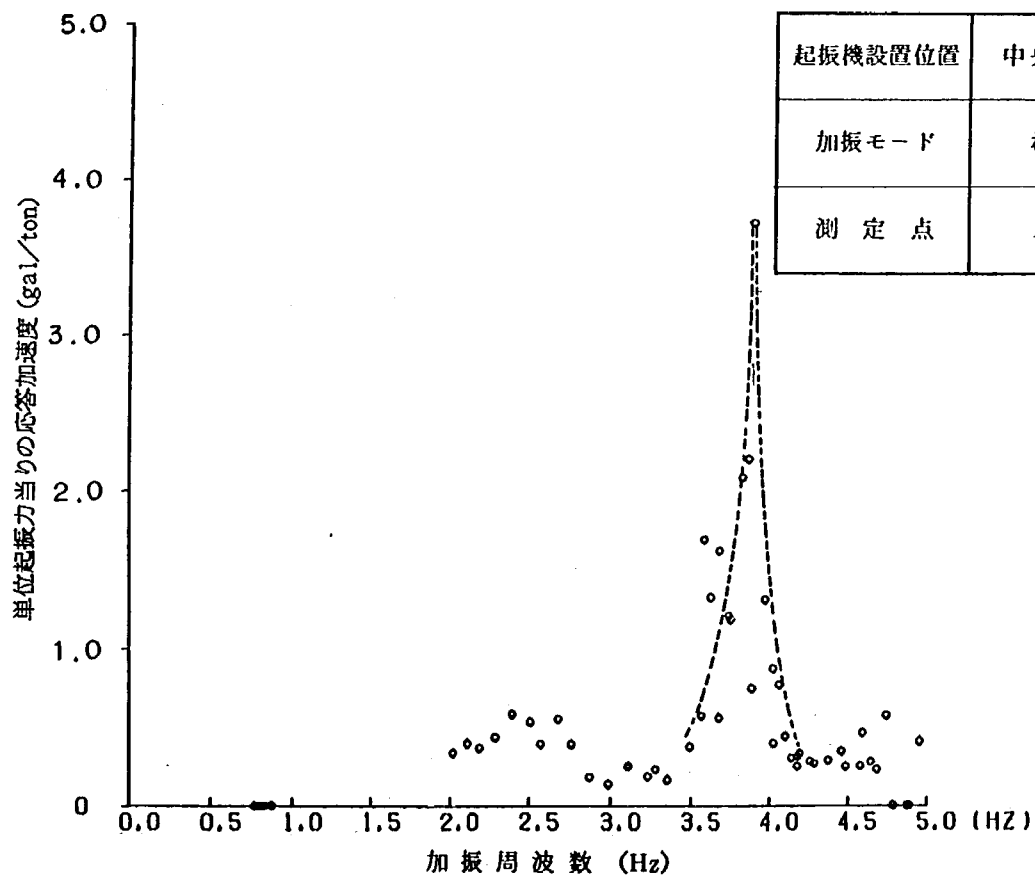
付図- 1.5.3 起振機加振による共振曲線



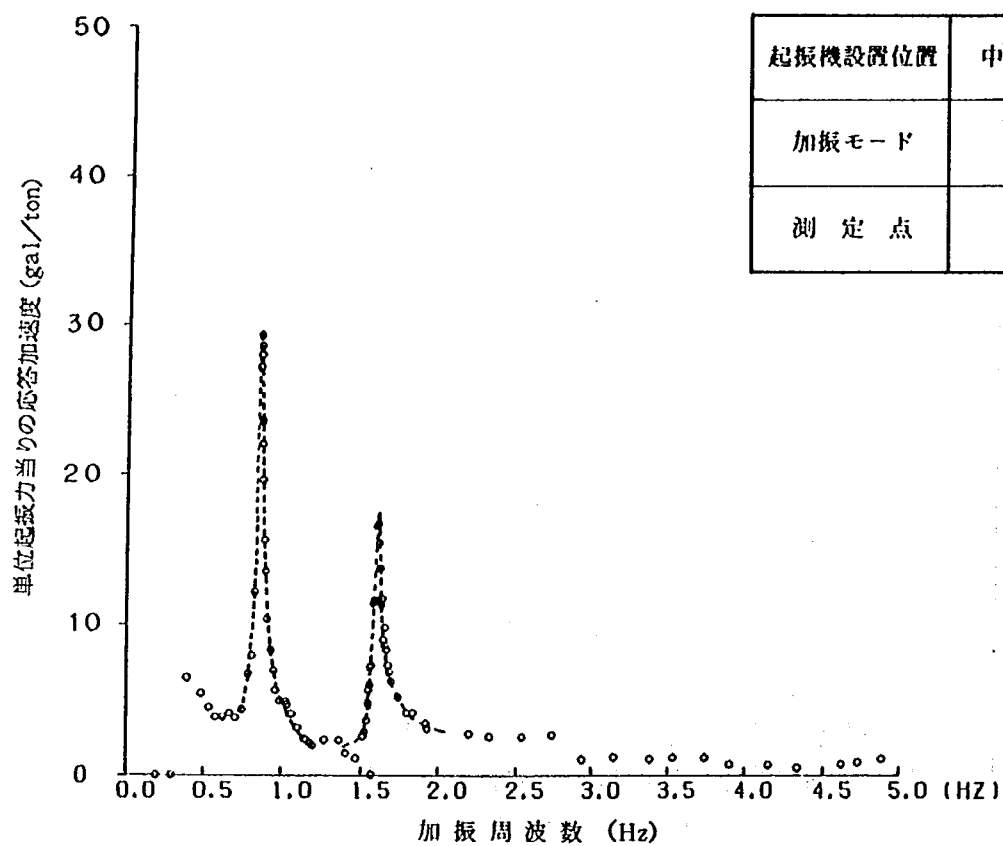
付図- 1.6.1 起振機加振による共振曲線



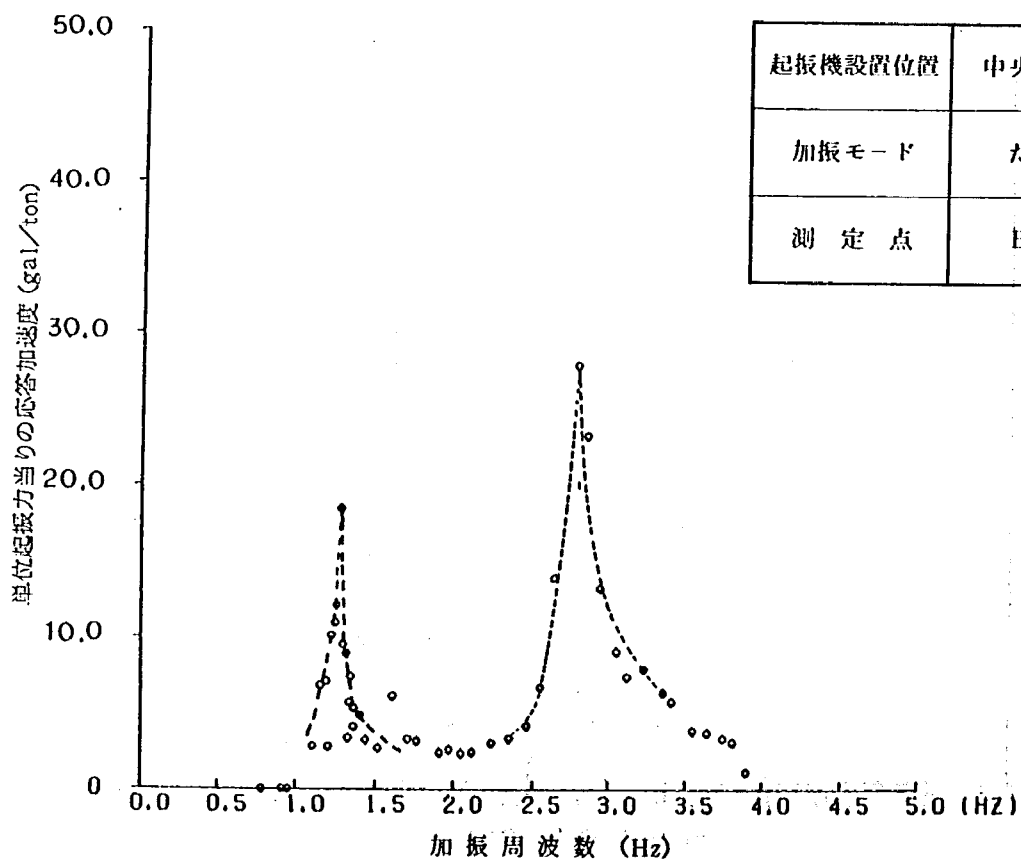
付図－ 1. 6. 2 起振機加振による共振曲線



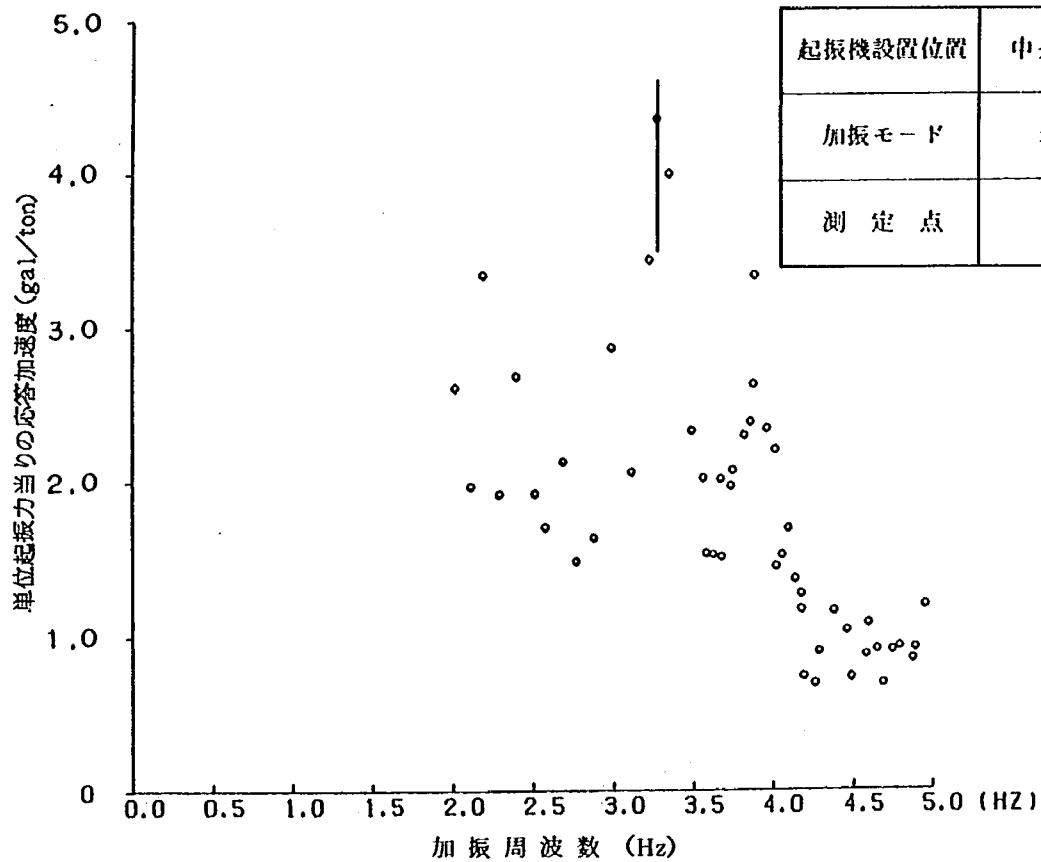
付図－ 1. 6. 3 起振機加振による共振曲線



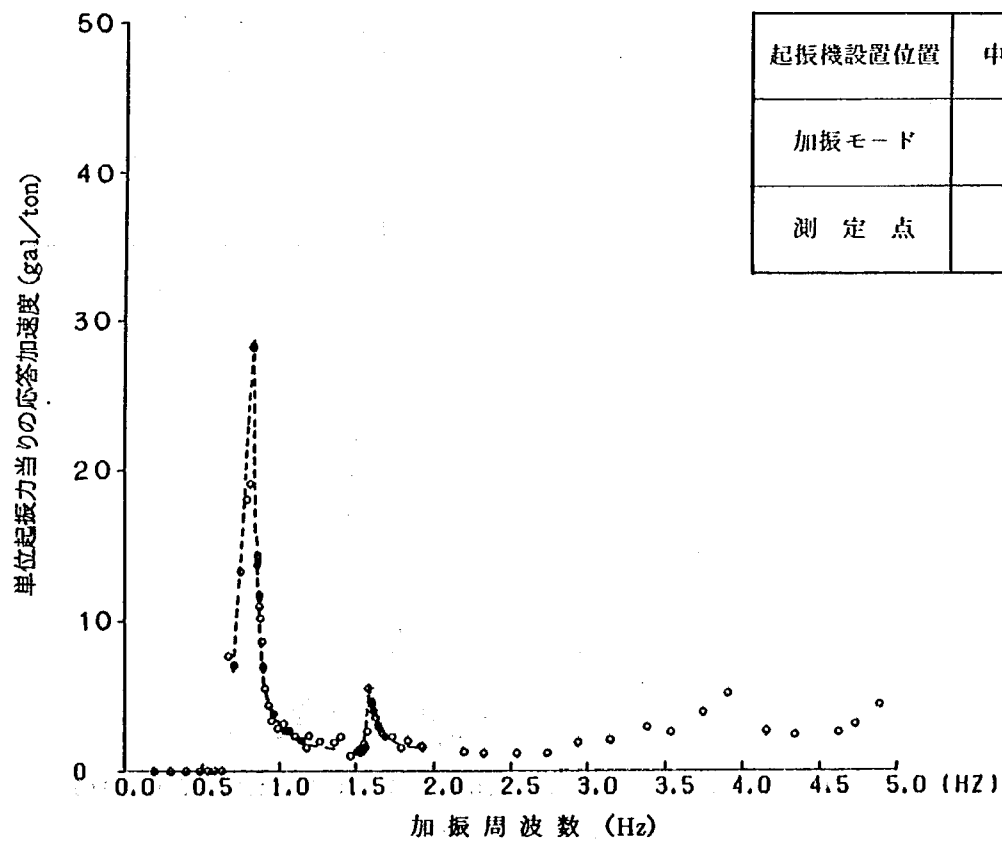
付図- 1. 7. 1 起振機加振による共振曲線



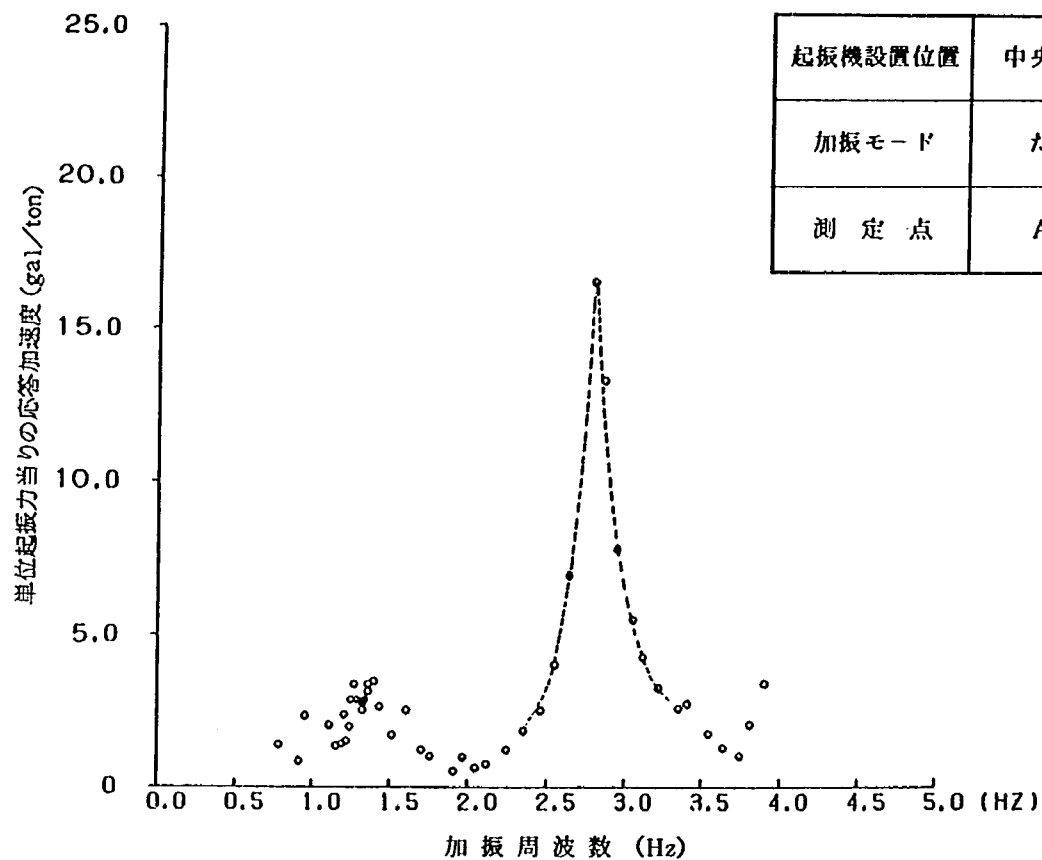
付図- 1. 7. 2 起振機加振による共振曲線



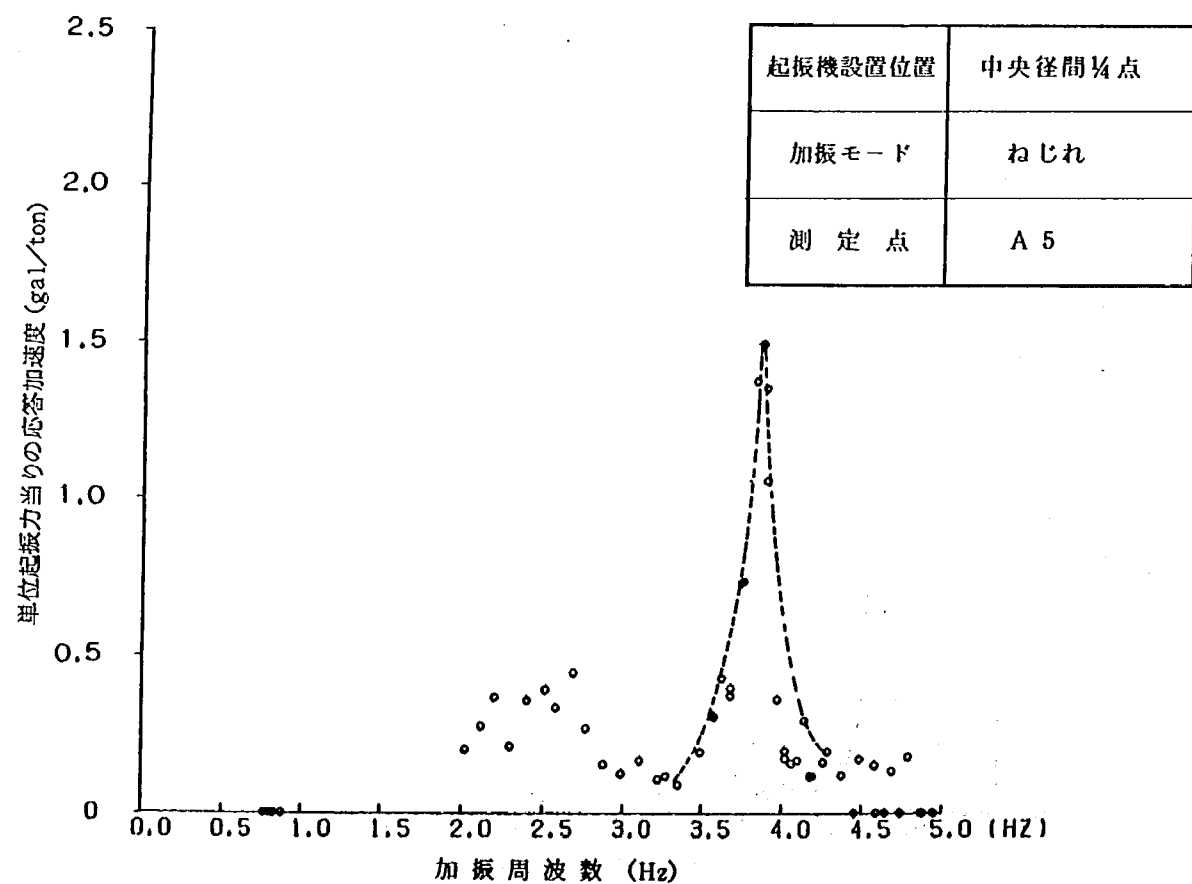
付図- 1.7.3 起振機加振による共振曲線



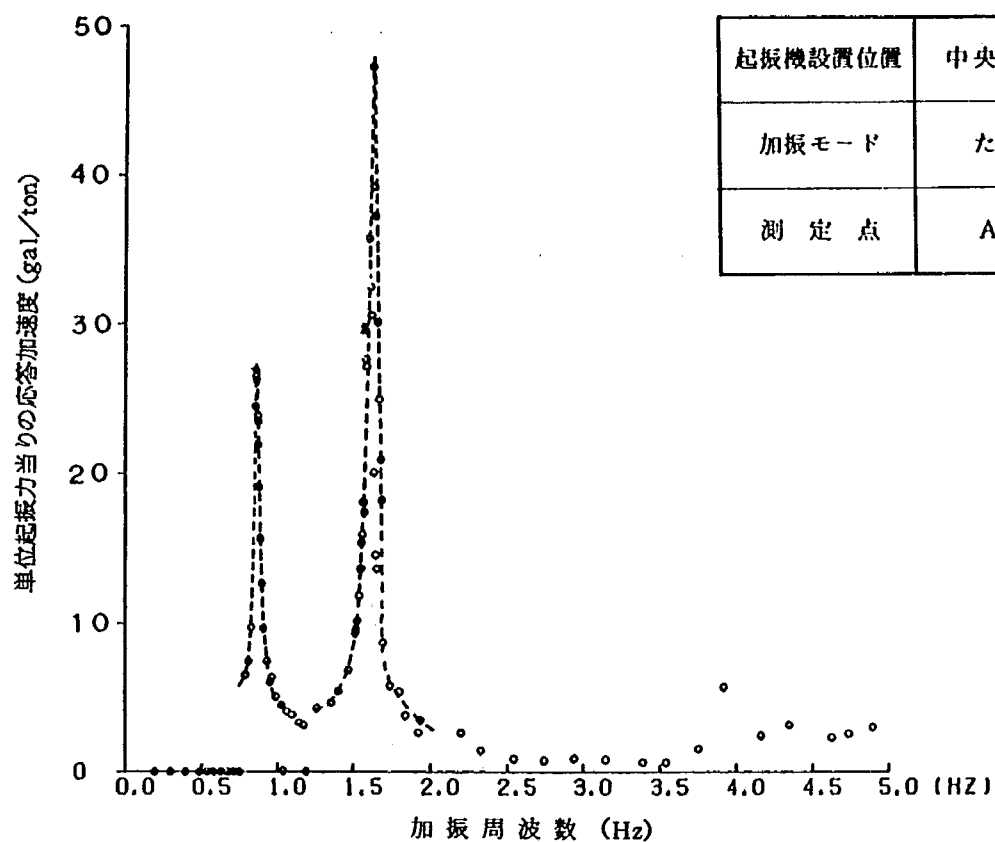
付図- 1.8.1 起振機加振による共振曲線



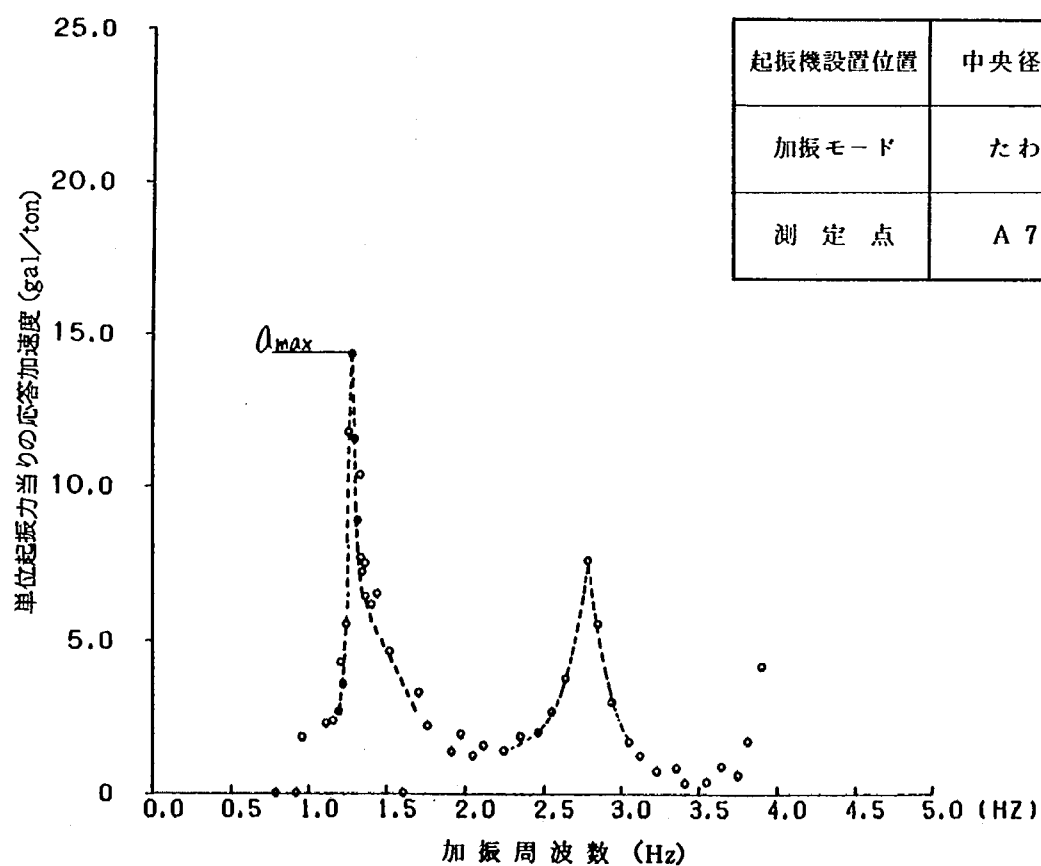
付図－1.8.2 起振機加振による共振曲線



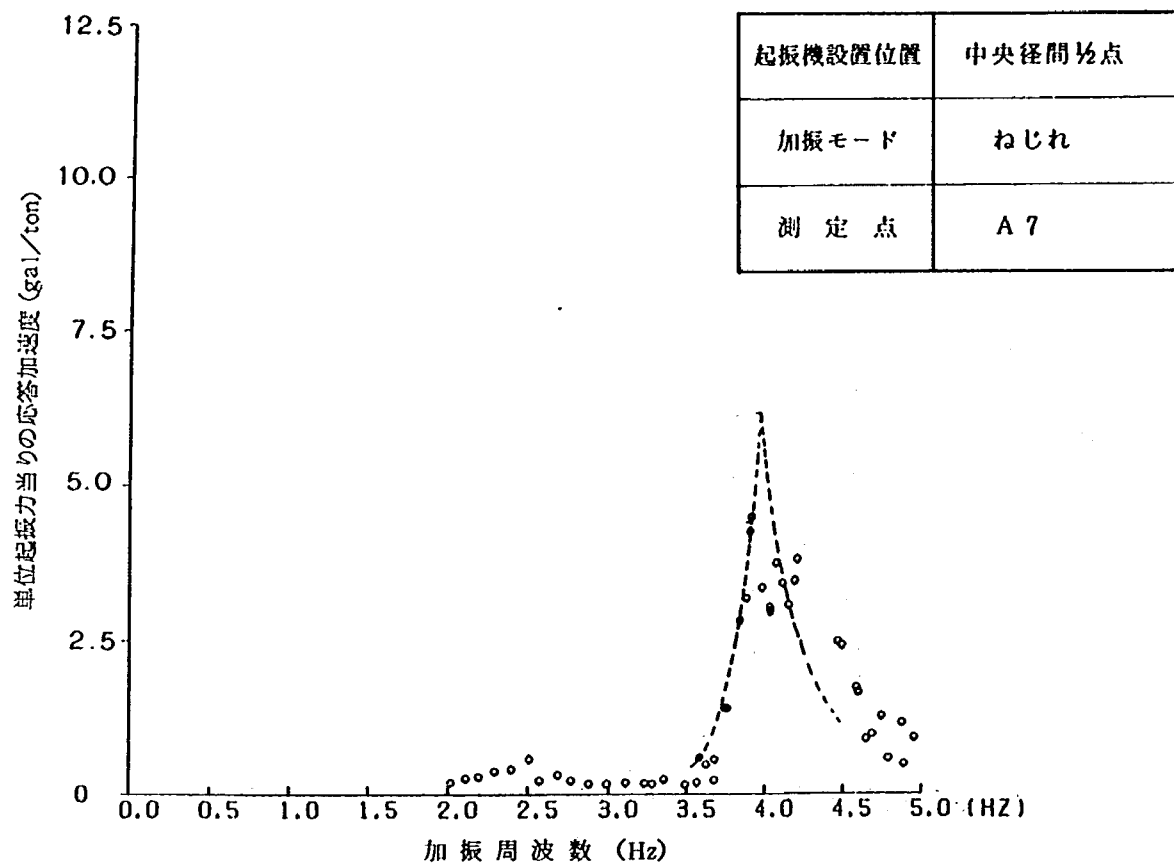
付図－1.8.3 起振機加振による共振曲線



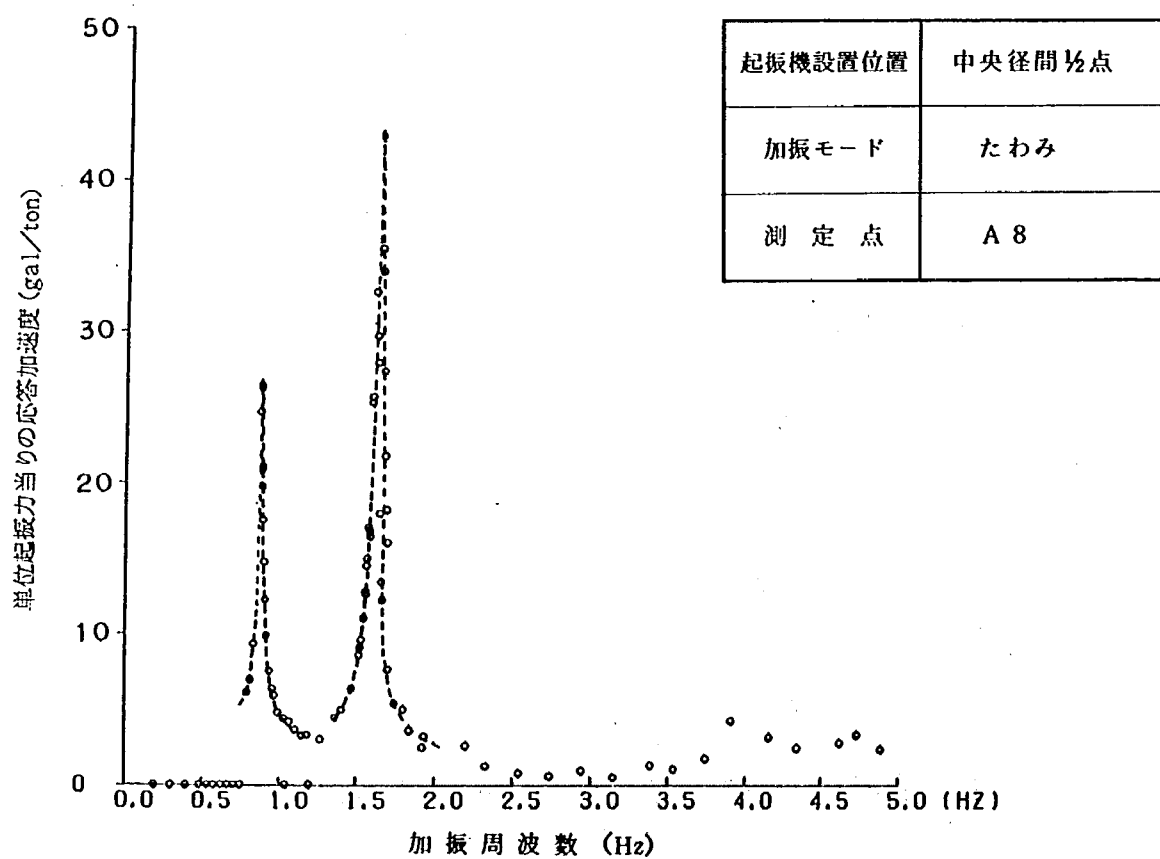
付図－1.9.1 起振機加振による共振曲線



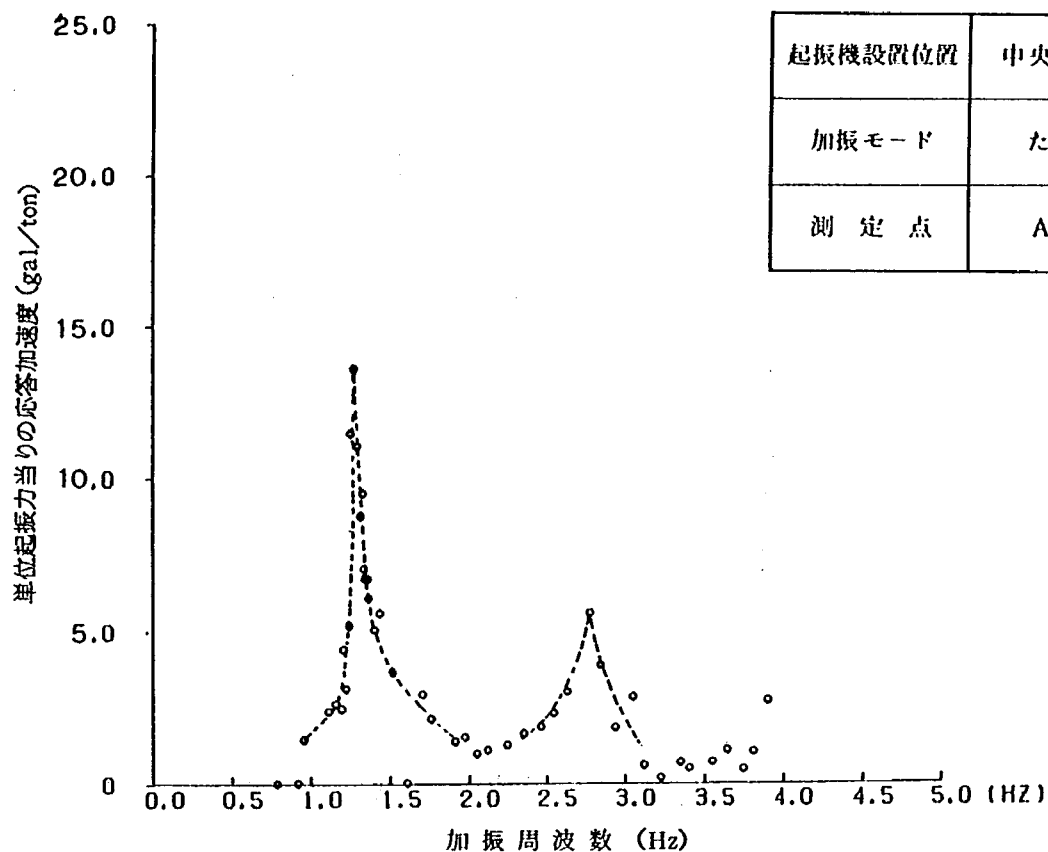
付図－1.9.2 起振機加振による共振曲線



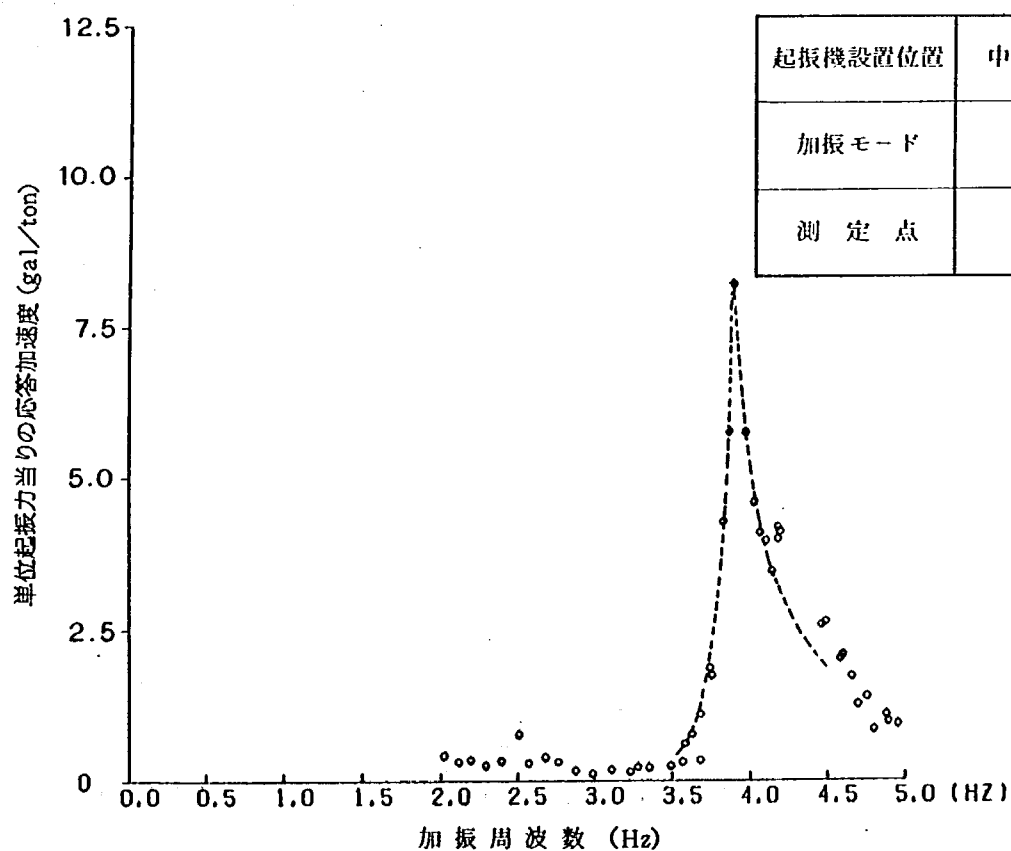
付図－ 1. 9. 3 起振機加振による共振曲線



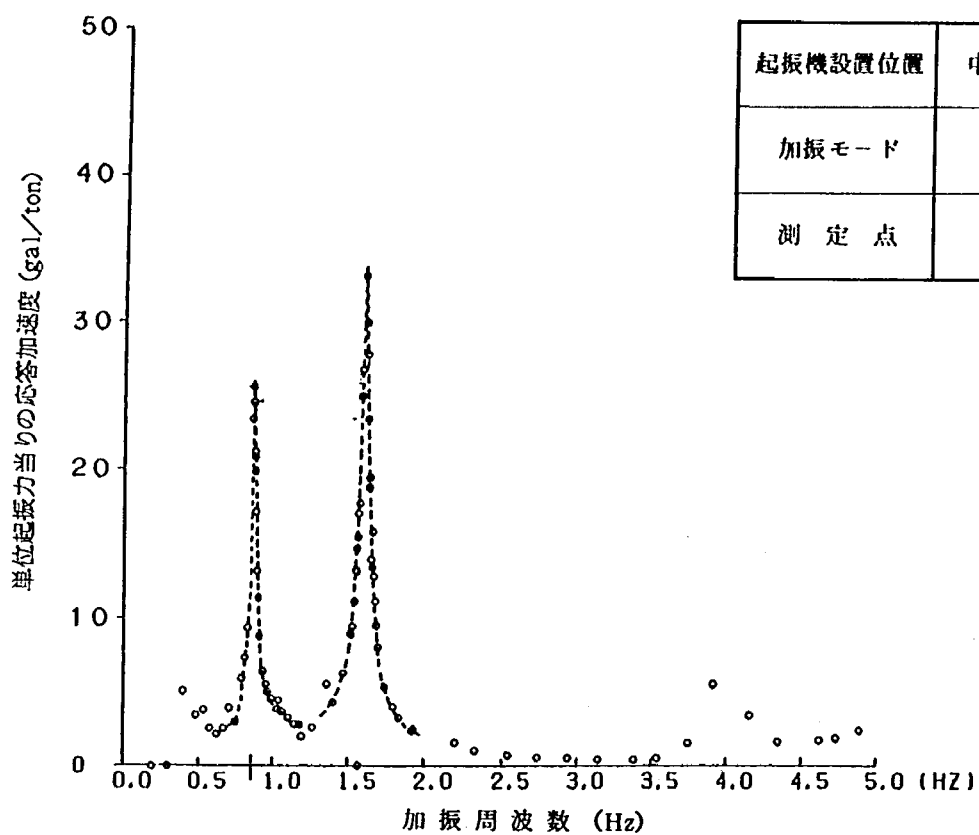
付図－ 1. 10. 1 起振機加振による共振曲線



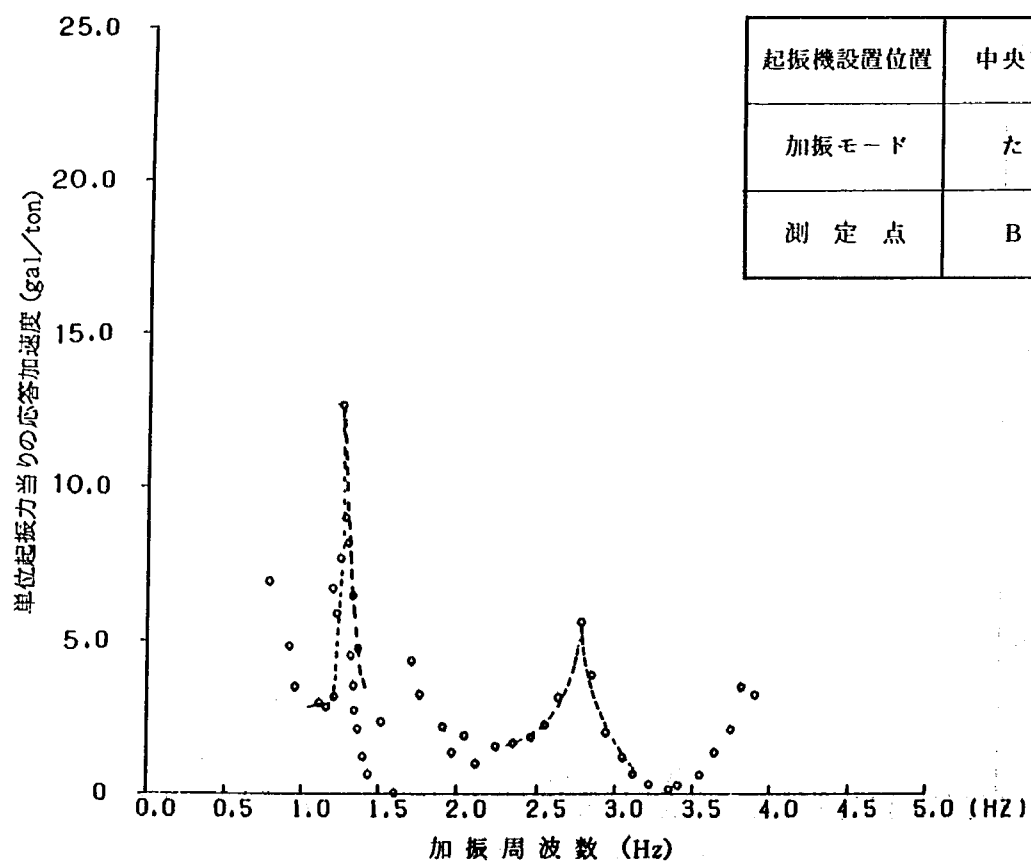
付図－ 1.10.2 起振機加振による共振曲線



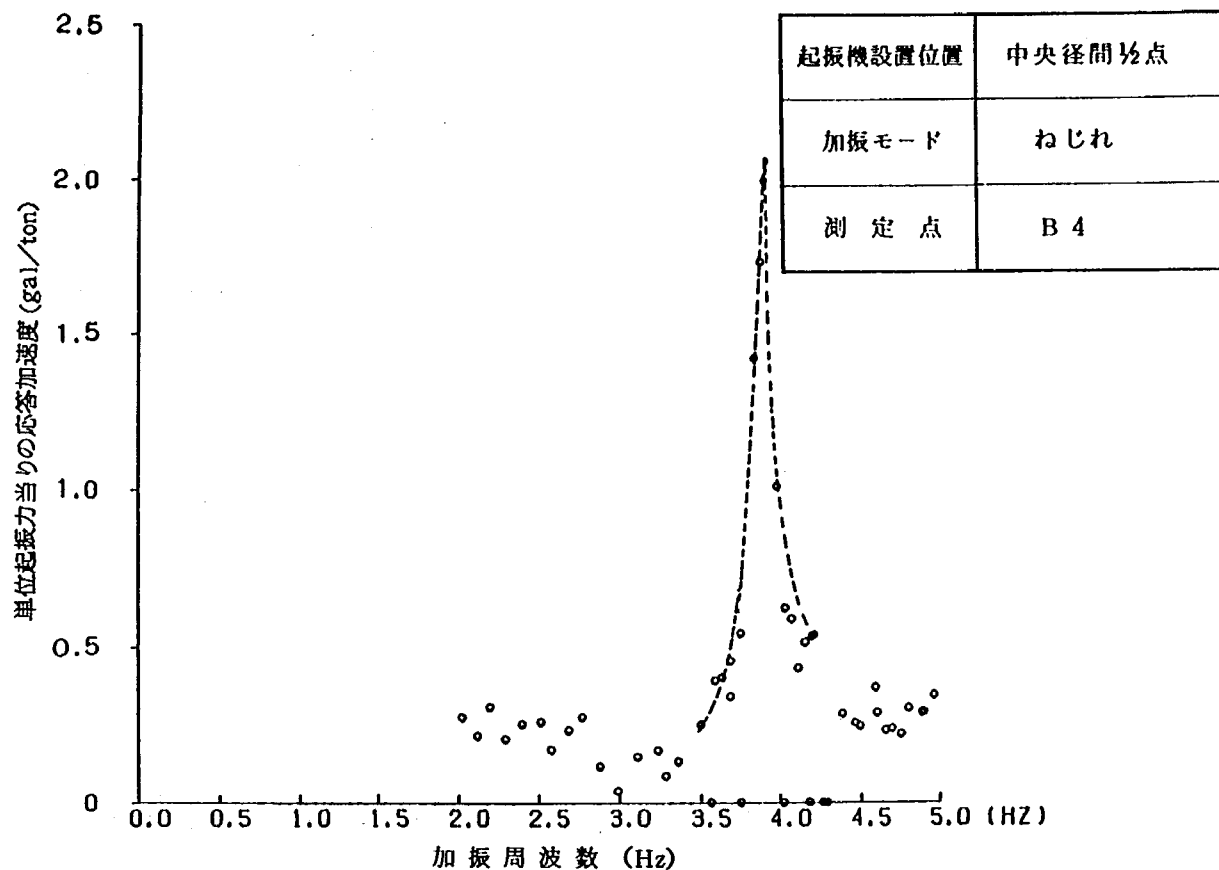
付図－ 1.10.3 起振機加振による共振曲線



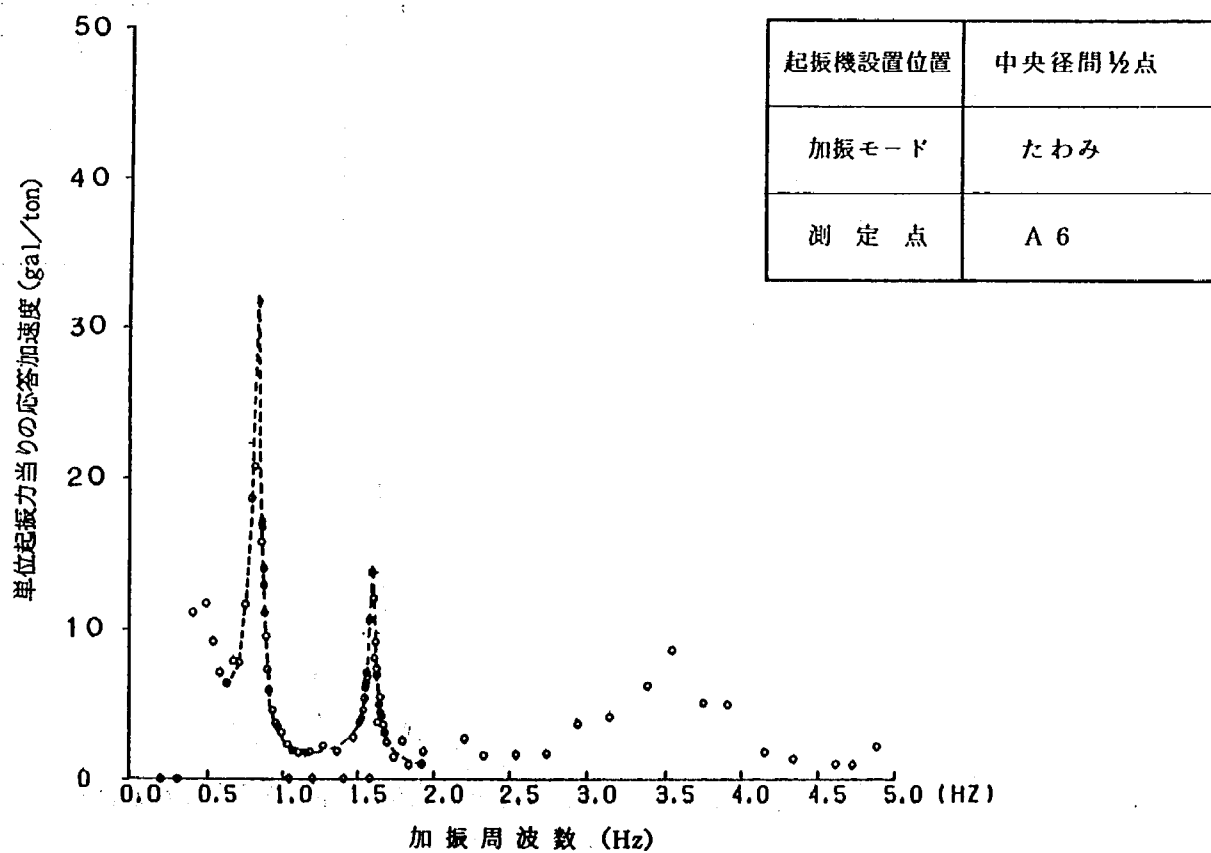
付図－1.11.1 起振機加振による共振曲線



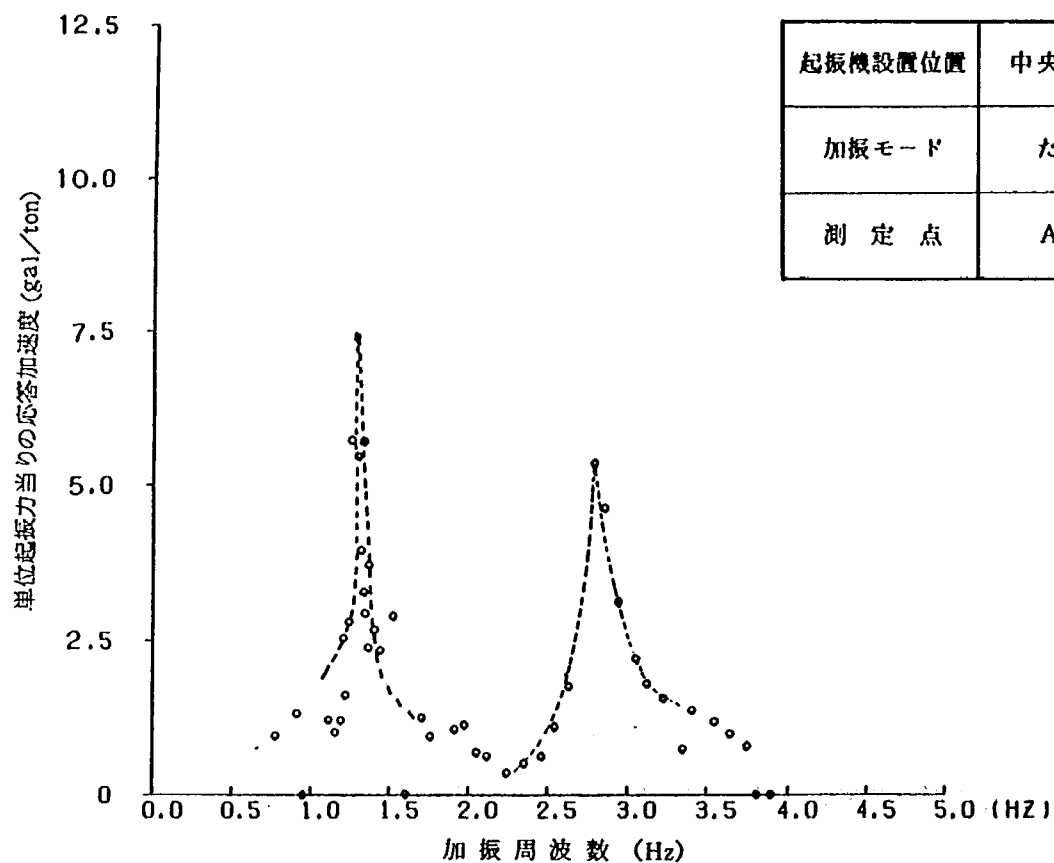
付図－1.11.2 起振機加振による共振曲線



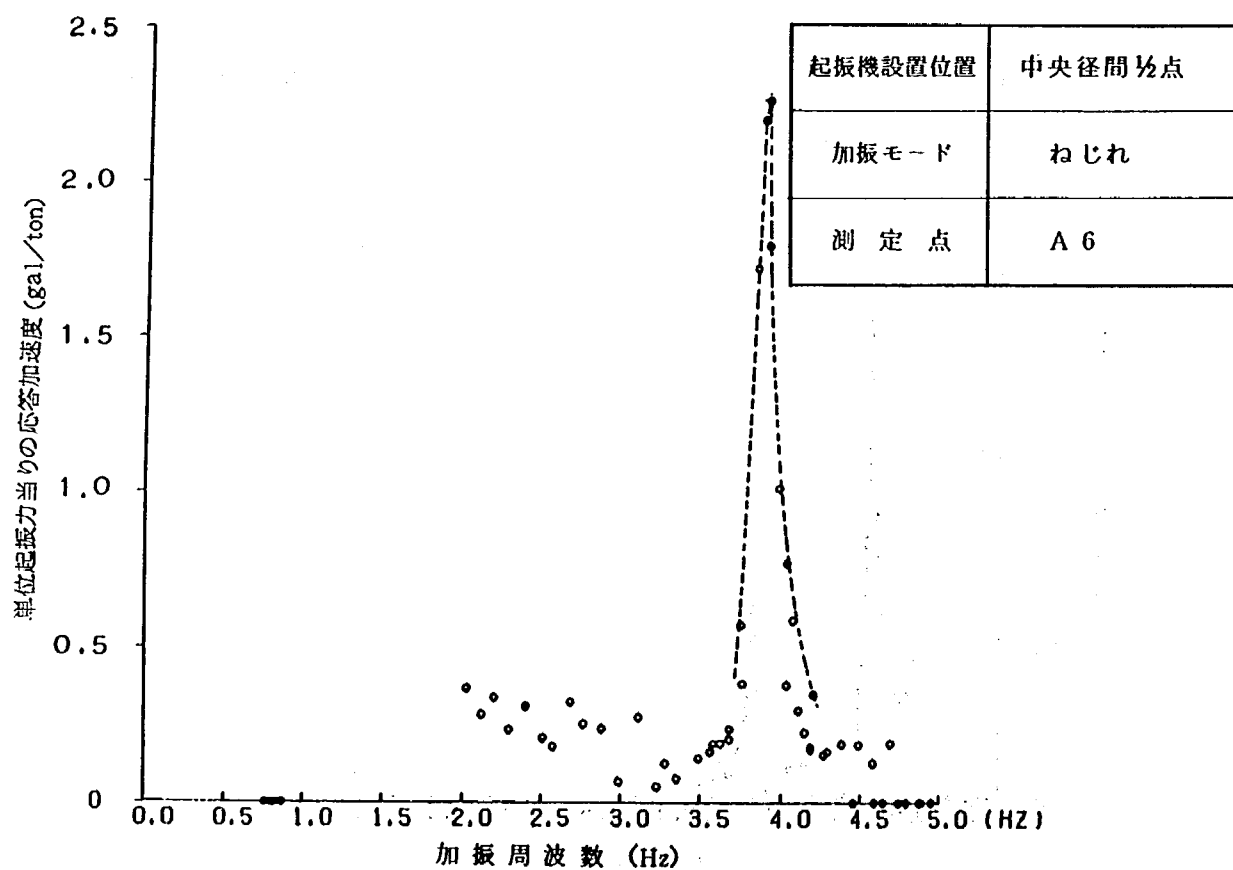
付図- 1.11.3 起振機加振による共振曲線



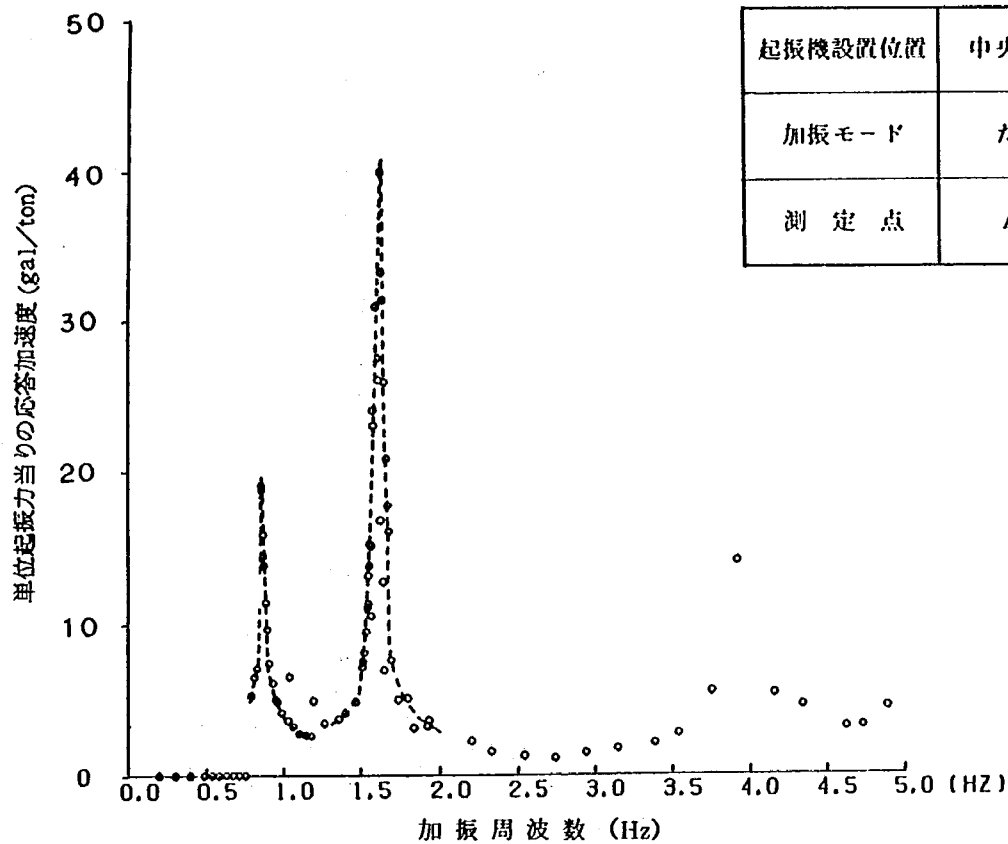
付図- 1.12.1 起振機加振による共振曲線



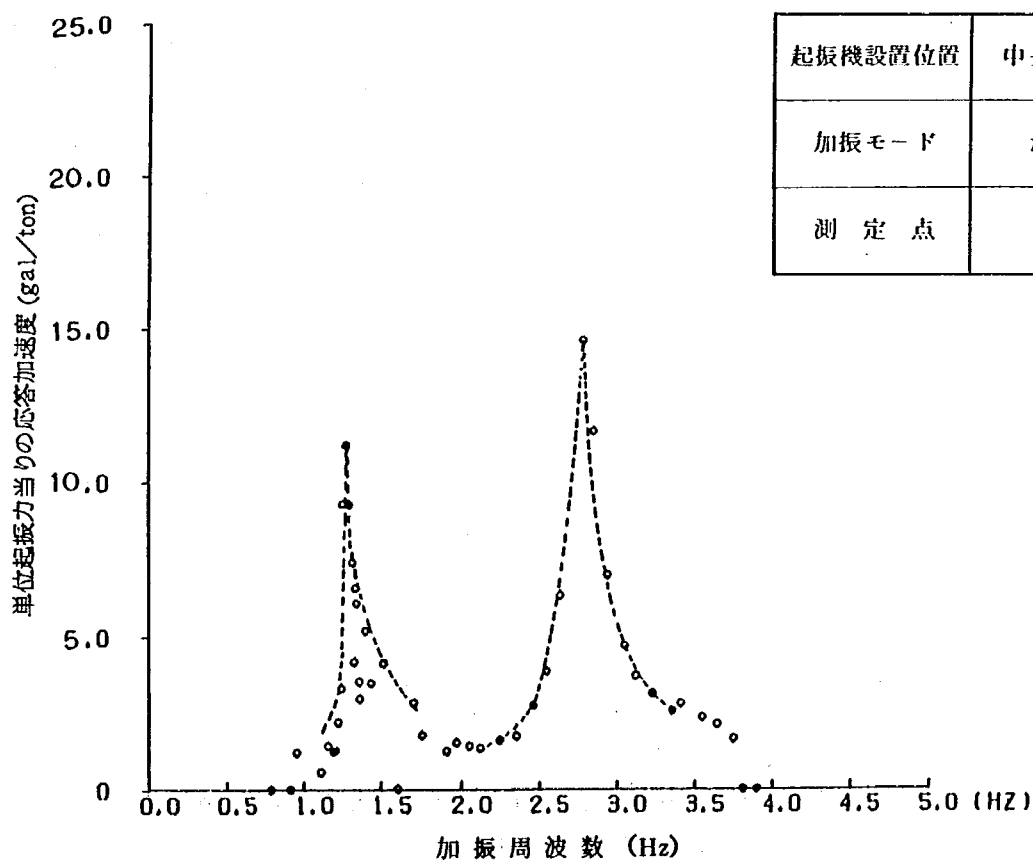
付図- 1.12.2 起振機加振による共振曲線



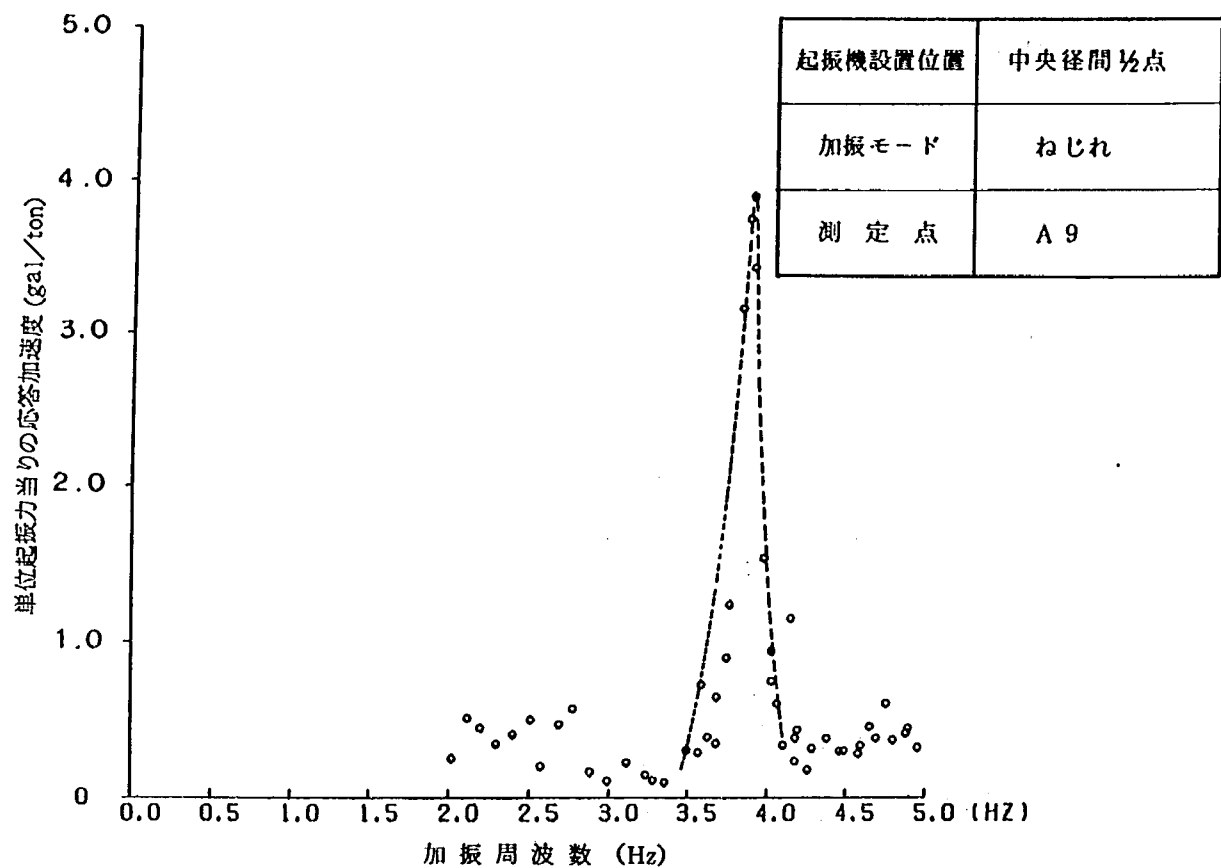
付図- 1.12.3 起振機加振による共振曲線



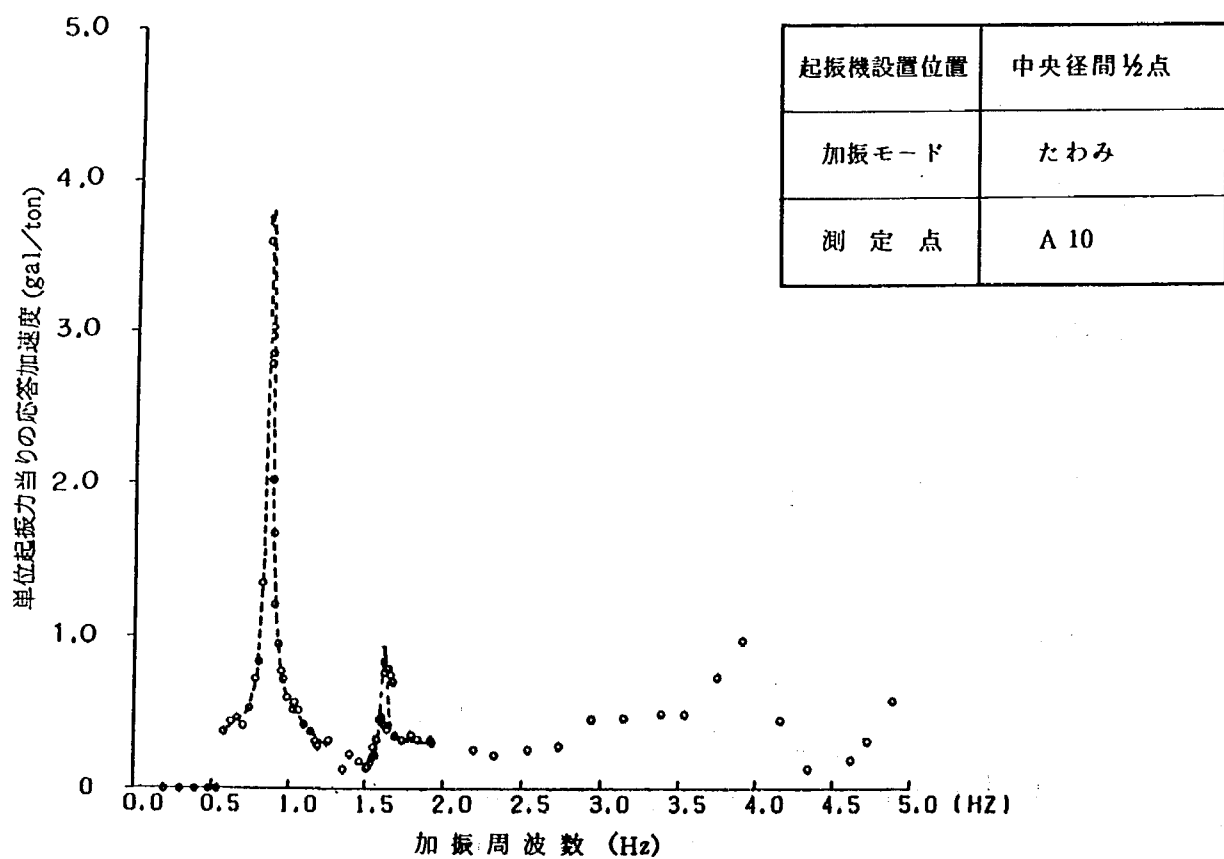
付図－1.13.1 起振機加振による共振曲線



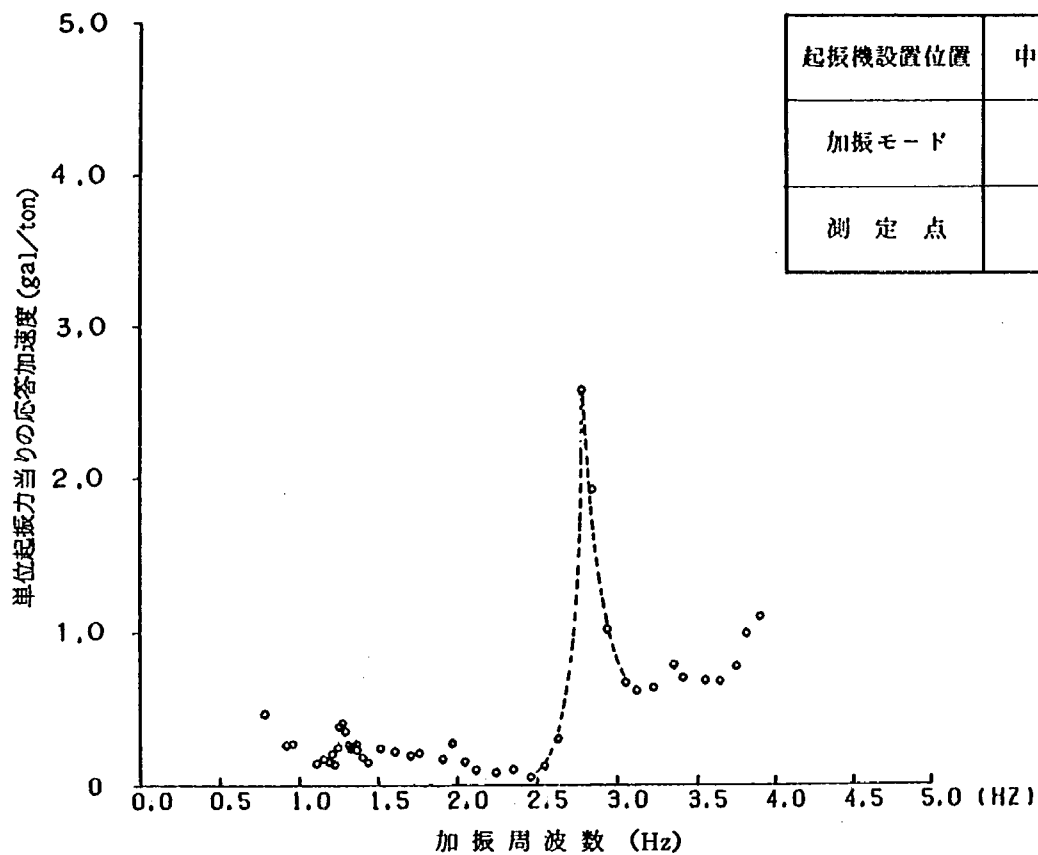
付図－1.13.2 起振機加振による共振曲線



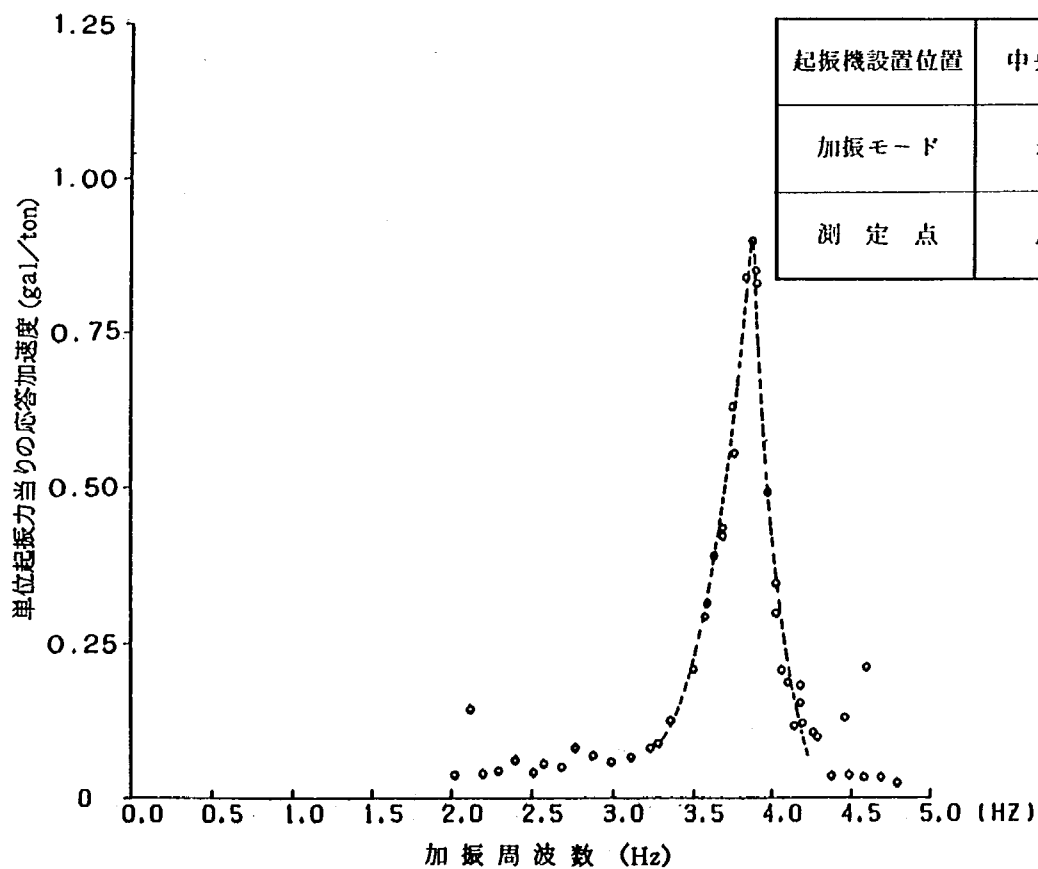
付図－ 1.13.3 起振機加振による共振曲線



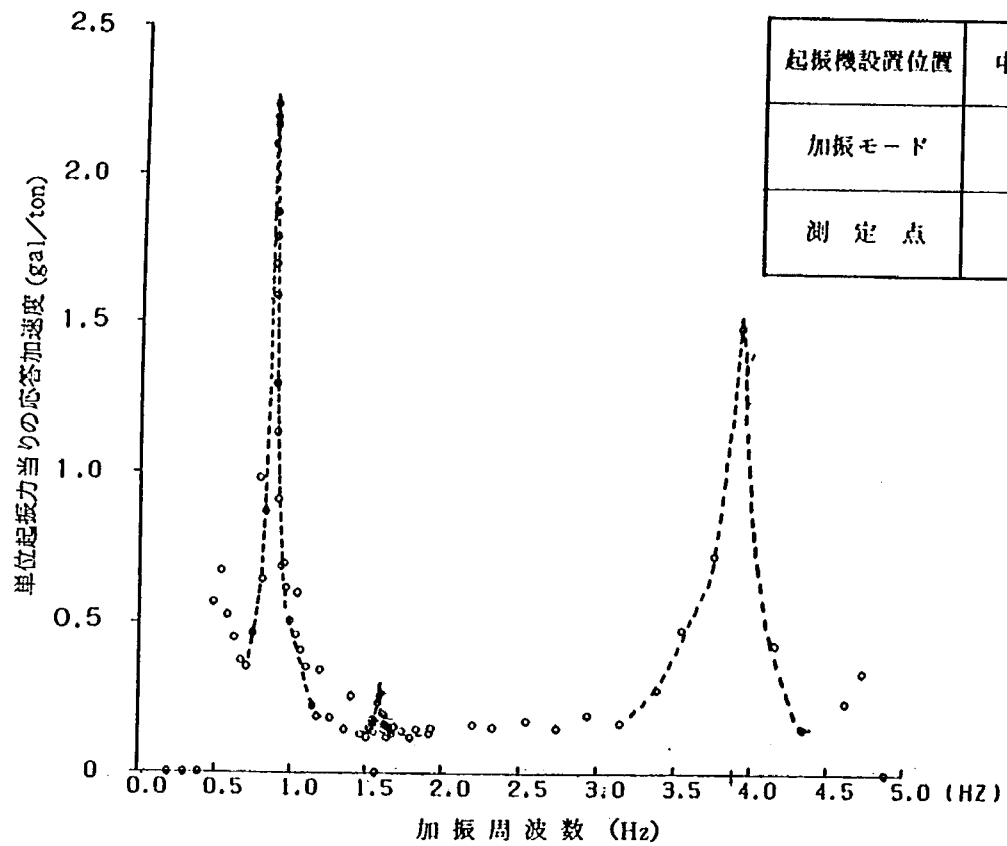
付図－ 1.14.1 起振機加振による共振曲線



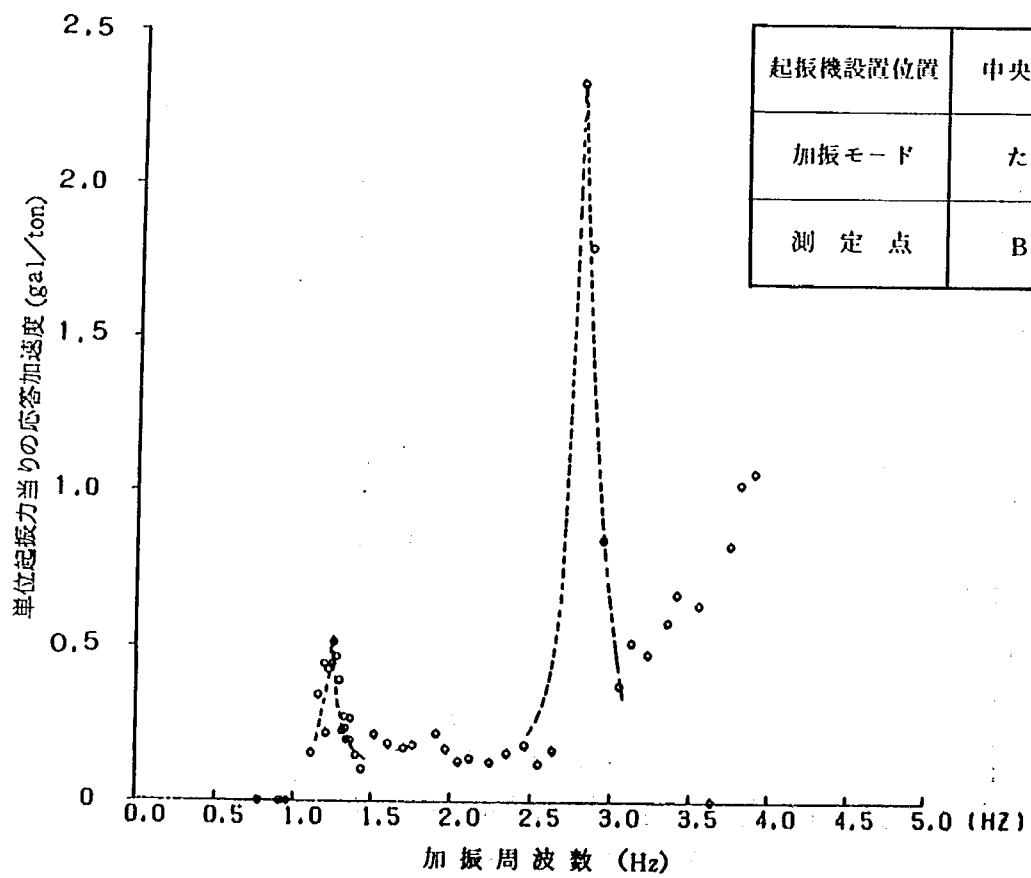
付図- 1.14.2 起振機加振による共振曲線



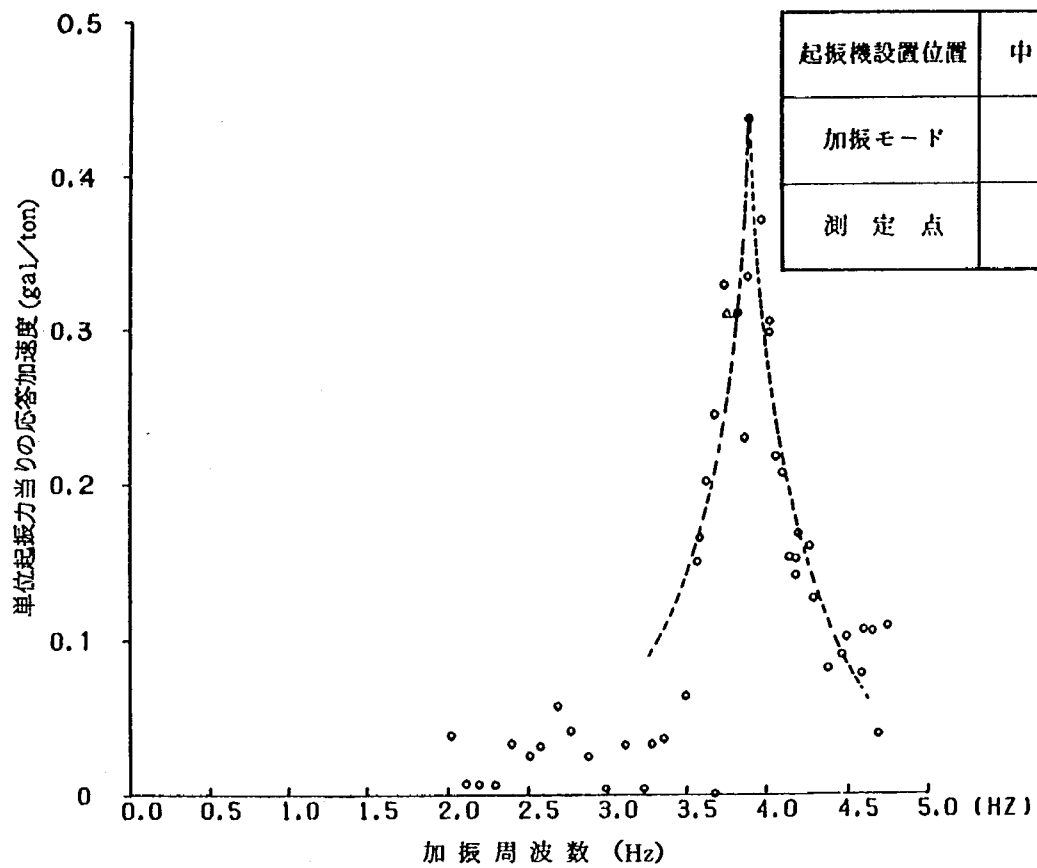
付図- 1.14.3 起振機加振による共振曲線



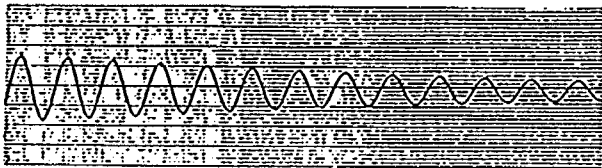
付図-1.15.1 起振機加振による共振曲線



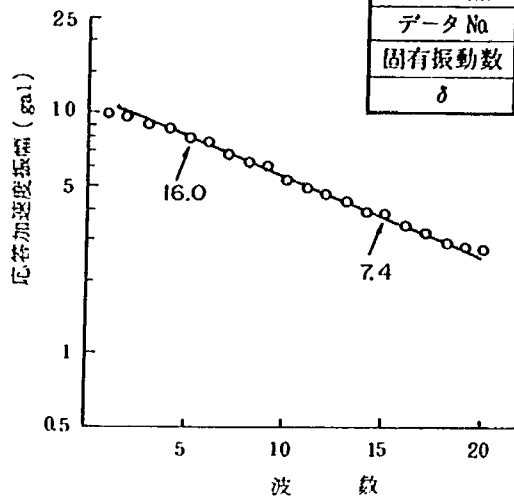
付図-1.15.2 起振機加振による共振曲線



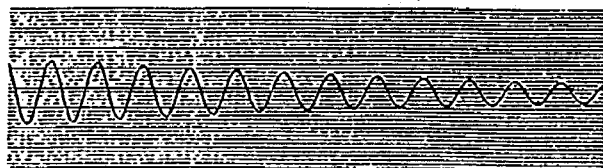
付図－ 1.15.3 起振機加振による共振曲線



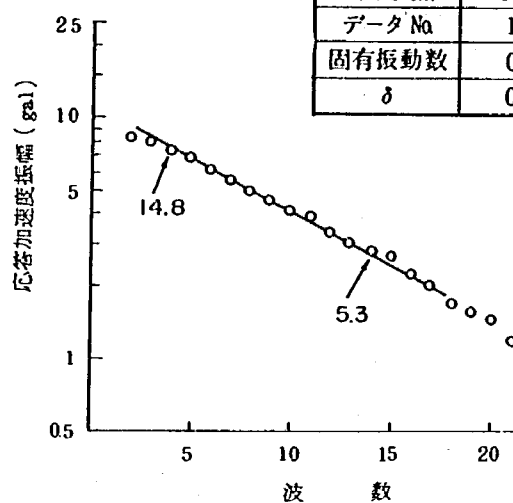
振動モード	たわみ1次
測定点	A 1
データ No	1
固有振動数	0.85
δ	0.077



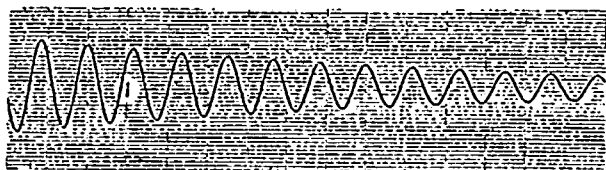
付図- 2. 1. 1 自由減衰波形



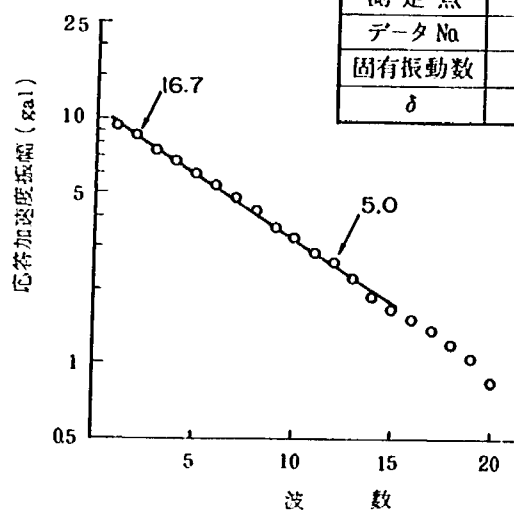
振動モード	たわみ1次
測定点	A 2
データ No	1
固有振動数	0.85
δ	0.103



付図- 2. 1. 2 自由減衰波形



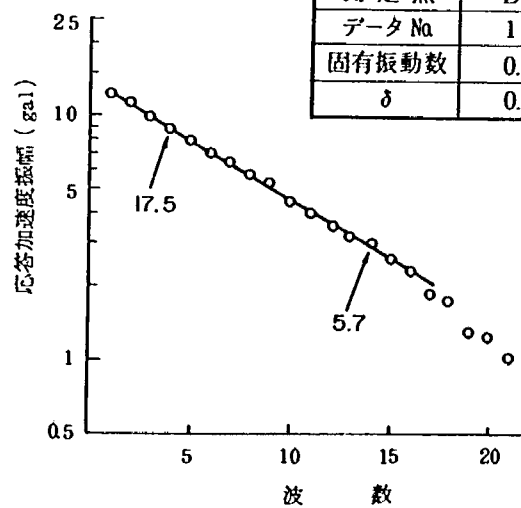
振動モード	たわみ1次
測定点	B 1
データ No	1
固有振動数	0.85
δ	0.121



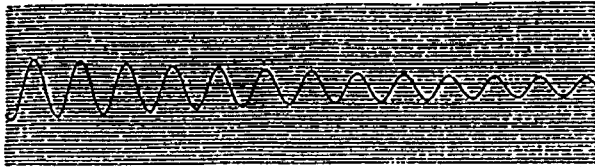
付図- 2. 1. 3 自由減衰波形



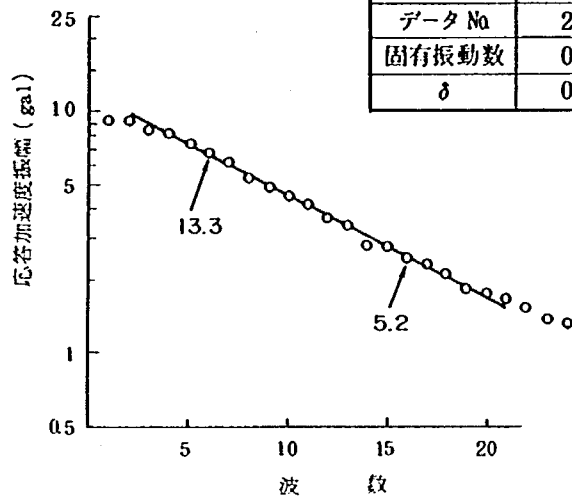
振動モード	たわみ1次
測定点	B 2
データ No	1
固有振動数	0.85
δ	0.112



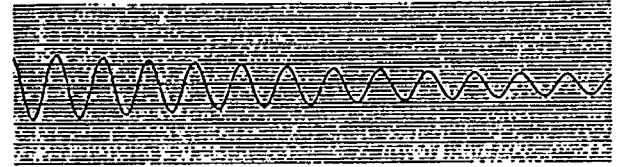
付図- 2. 1. 4 自由減衰波形



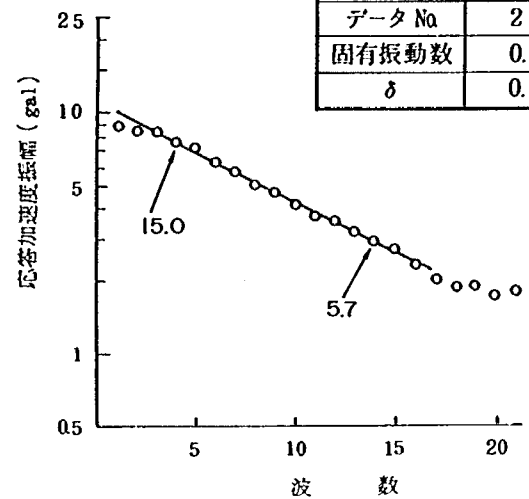
振動モード	たわみ1次
測定点	A 1
データ No	2
固有振動数	0.85
δ	0.094



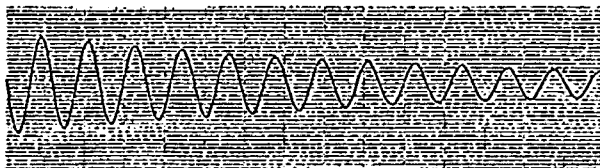
付図- 2.1.5 自由減衰波形



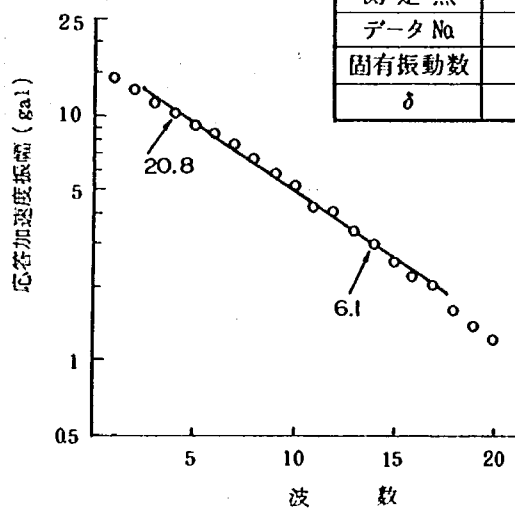
振動モード	たわみ1次
測定点	A 2
データ No	2
固有振動数	0.85
δ	0.097



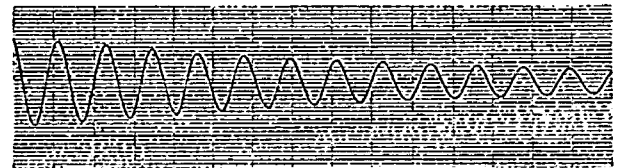
付図- 2.1.6 自由減衰波形



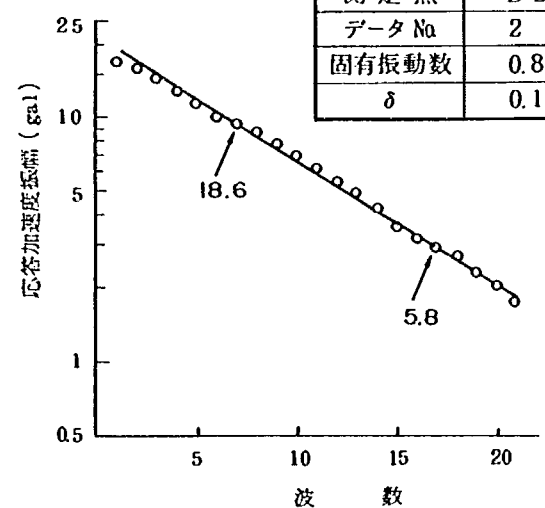
振動モード	たわみ1次
測定点	B 1
データ No	2
固有振動数	0.85
δ	0.123



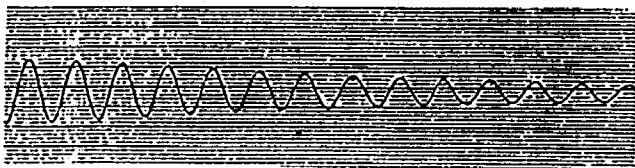
付図- 2.1.7 自由減衰波形



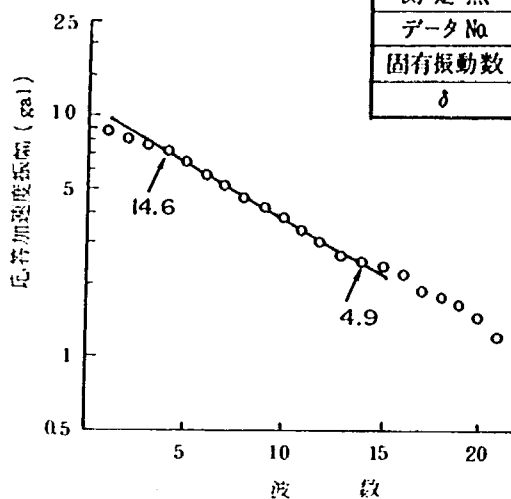
振動モード	たわみ1次
測定点	B 2
データ No	2
固有振動数	0.85
δ	0.117



付図- 2.1.8 自由減衰波形



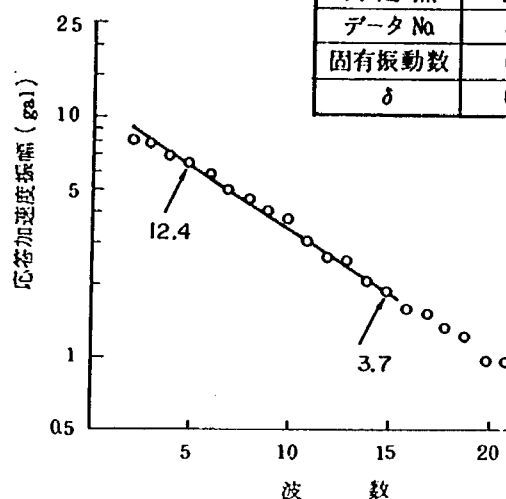
振動モード	たわみ1次
測定点	A 1
データ No	3
固有振動数	0.85
δ	0.109



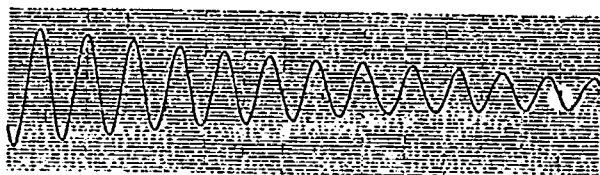
付図- 2. 1. 9 自由減衰波形



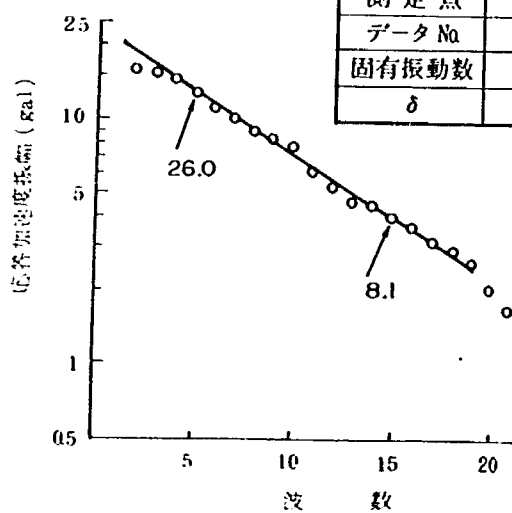
振動モード	たわみ1次
測定点	A 2
データ No	3
固有振動数	0.85
δ	0.121



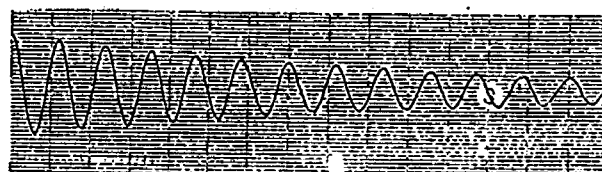
付図- 2. 1. 10 自由減衰波形



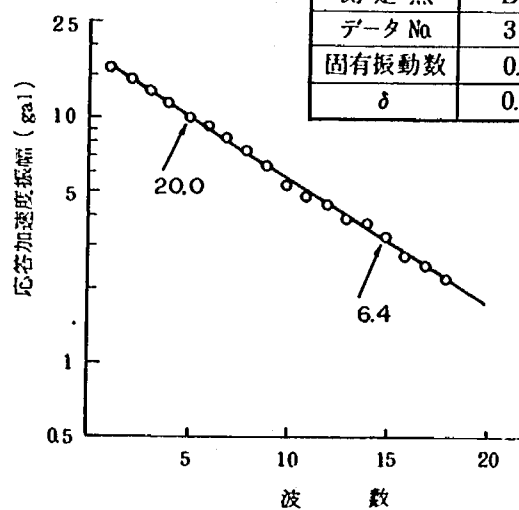
振動モード	たわみ1次
測定点	B 1
データ No	3
固有振動数	0.85
δ	0.117



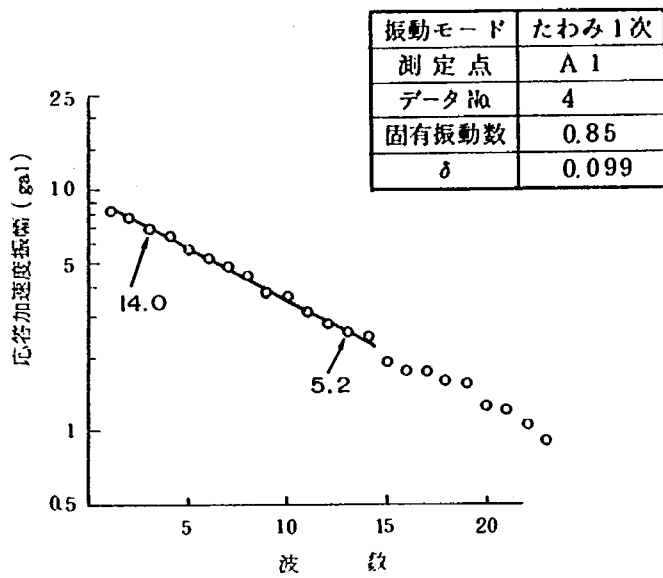
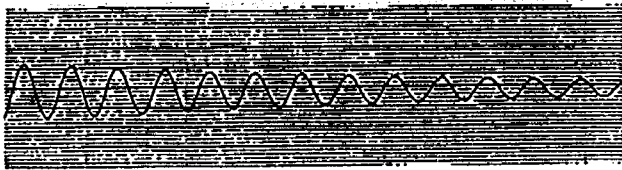
付図- 2. 1. 11 自由減衰波形



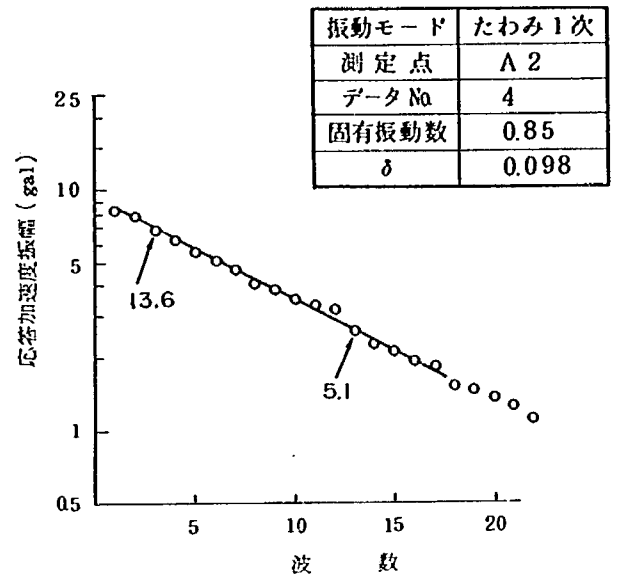
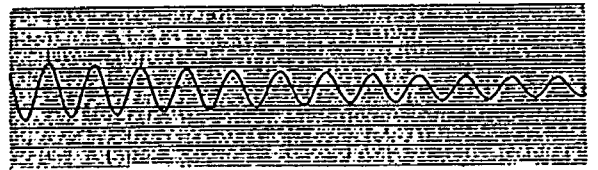
振動モード	たわみ1次
測定点	B 2
データ No	3
固有振動数	0.85
δ	0.114



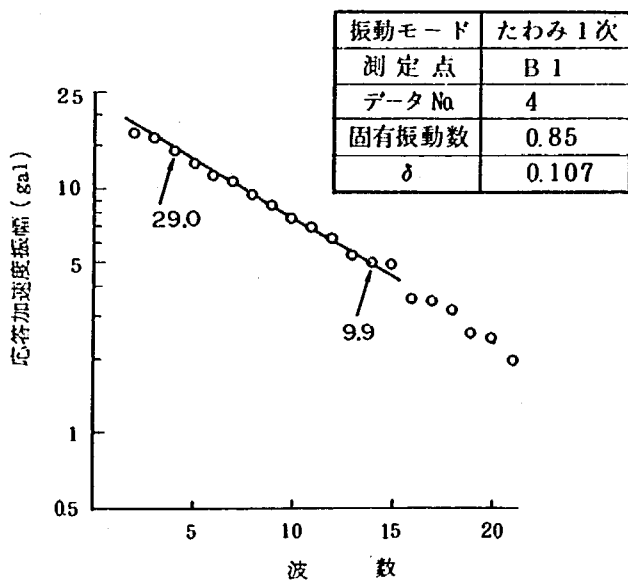
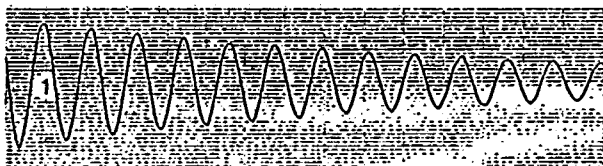
付図- 2. 1. 12 自由減衰波形



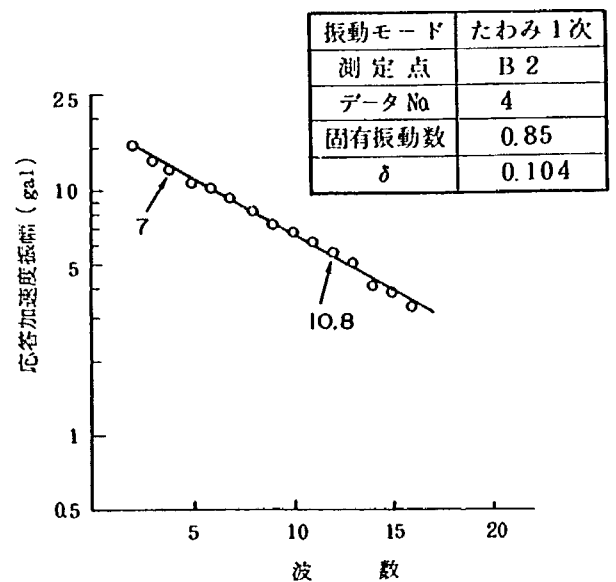
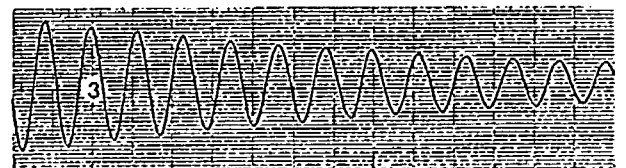
付図- 2. 1.13 自由減衰波形



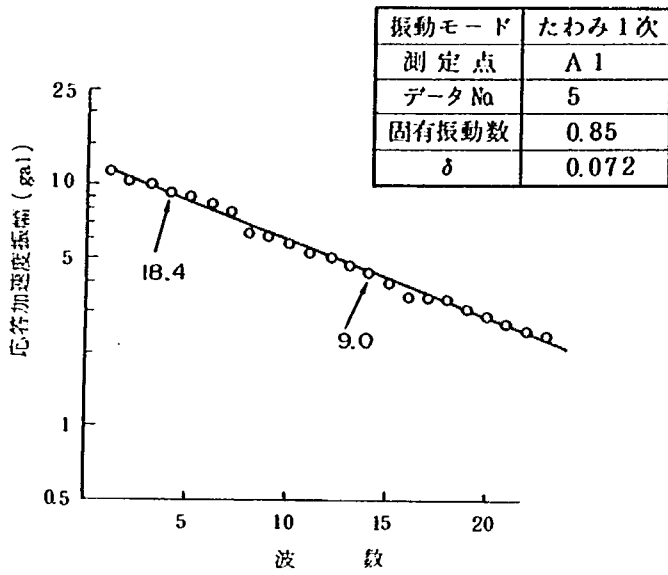
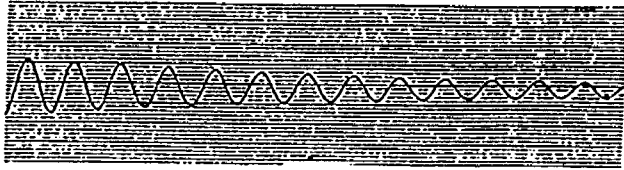
付図- 2. 1.14 自由減衰波形



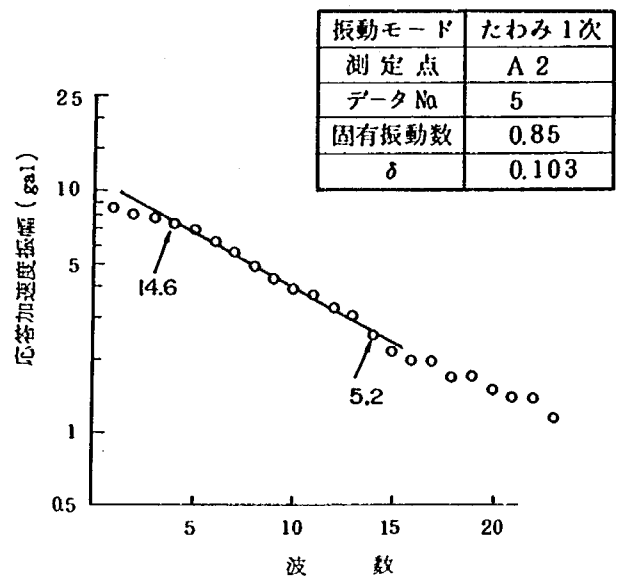
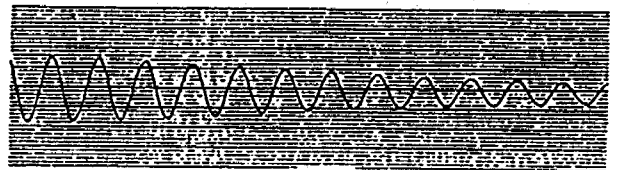
付図- 2. 1.15 自由減衰波形



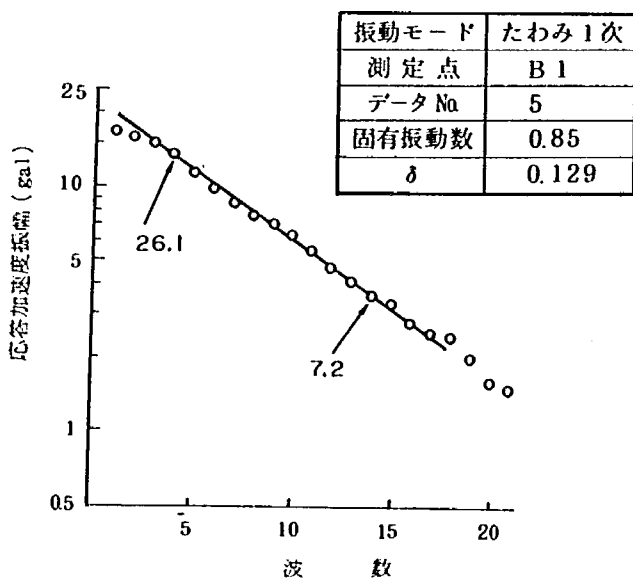
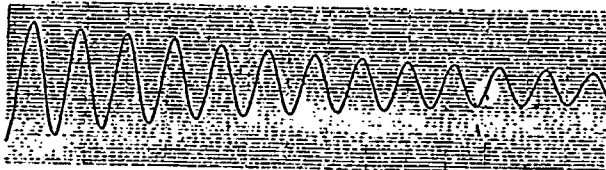
付図- 2. 1.16 自由減衰波形



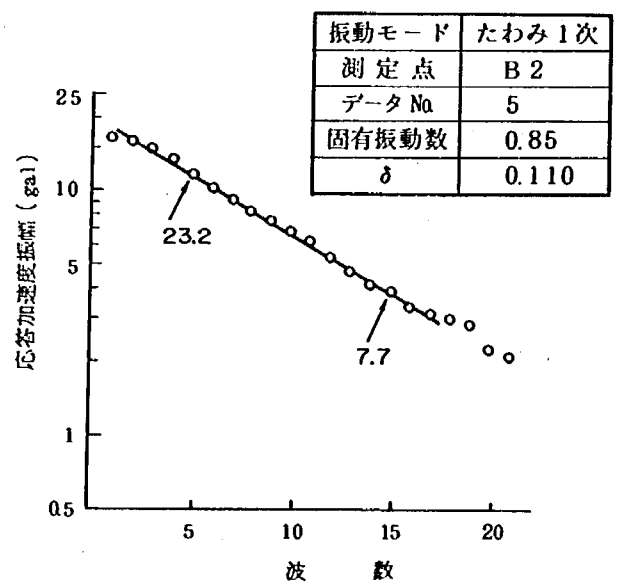
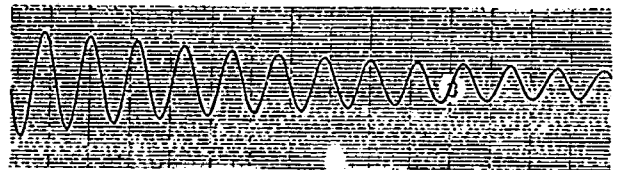
付図- 2. 1.17 自由減衰波形



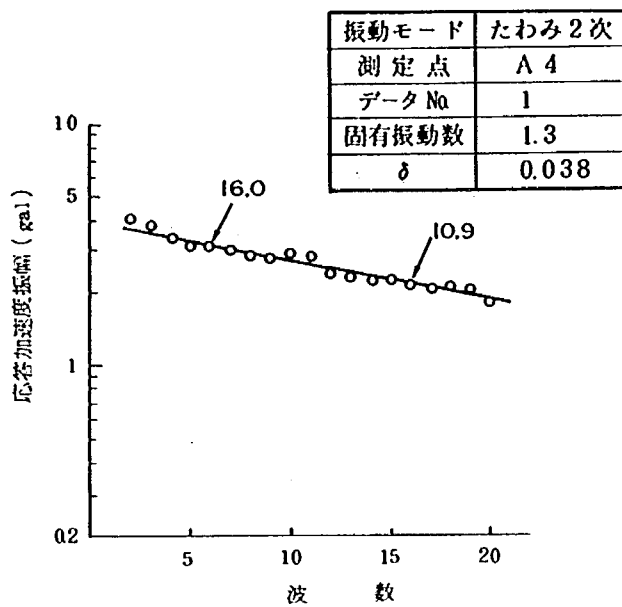
付図- 2. 1.18 自由減衰波形



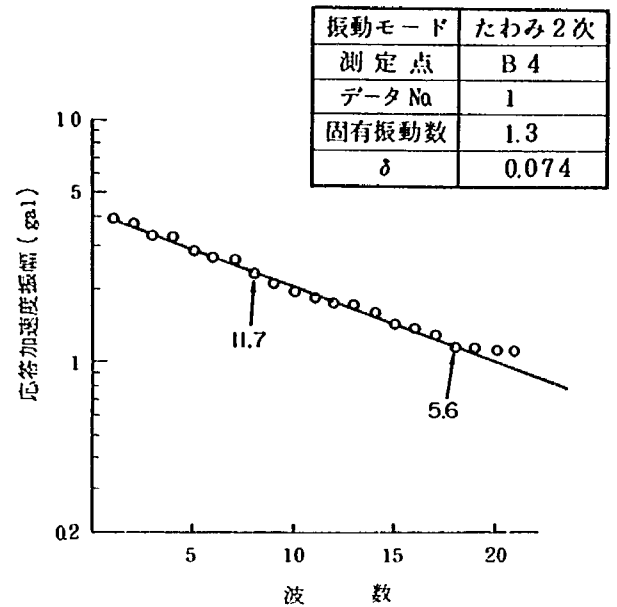
付図- 2. 1.19 自由減衰波形



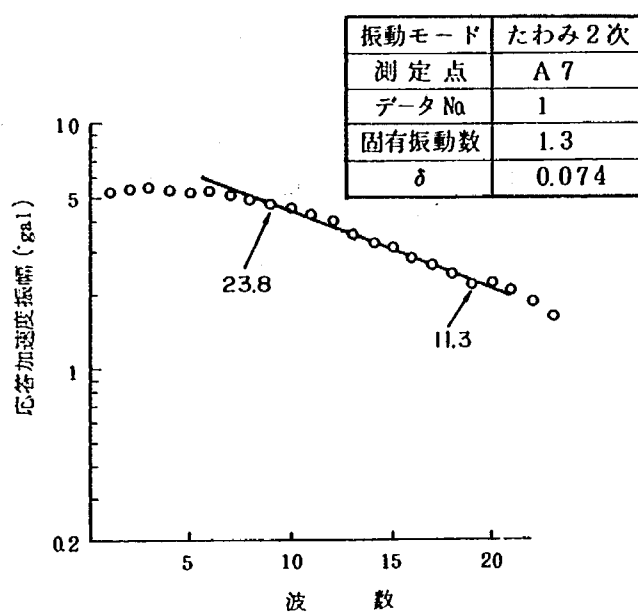
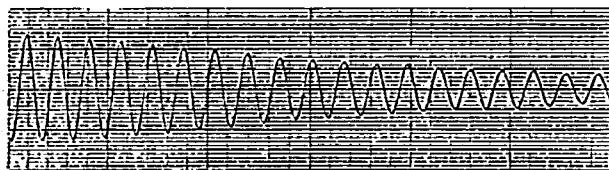
付図- 2. 1.20 自由減衰波形



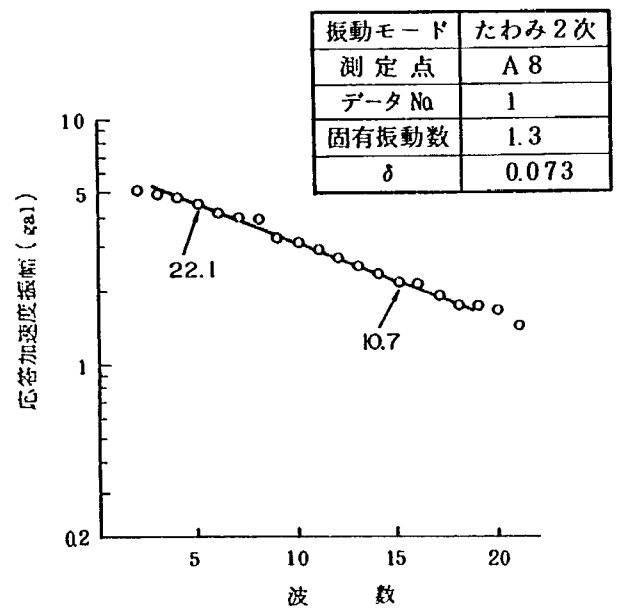
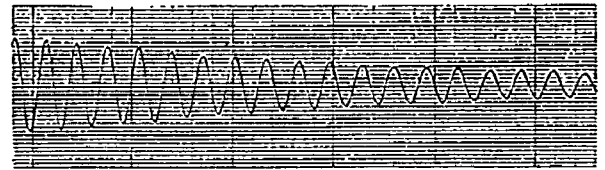
付図- 2. 2. 1 自由減衰波形



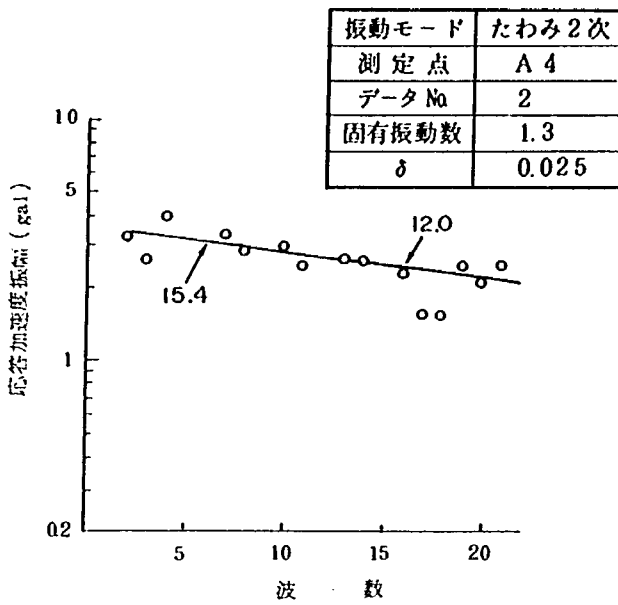
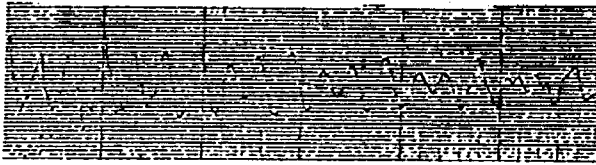
付図- 2. 2. 2 自由減衰波形



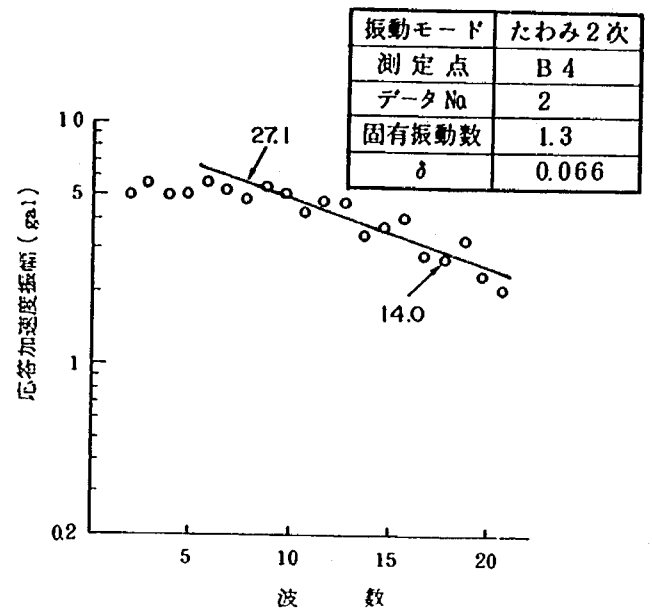
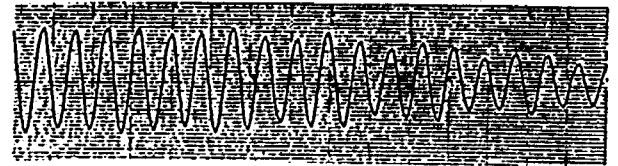
付図- 2. 2. 3 自由減衰波形



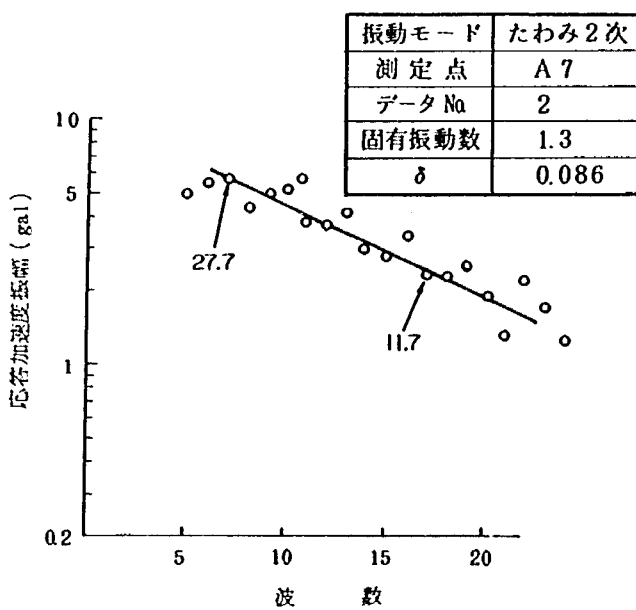
付図- 2. 2. 4 自由減衰波形



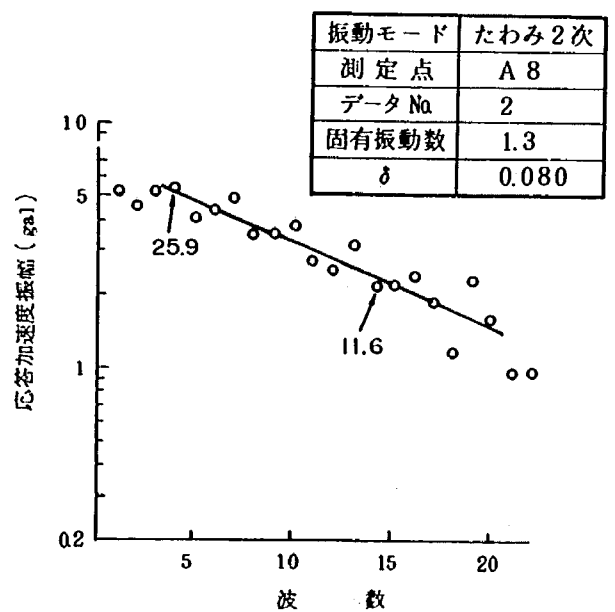
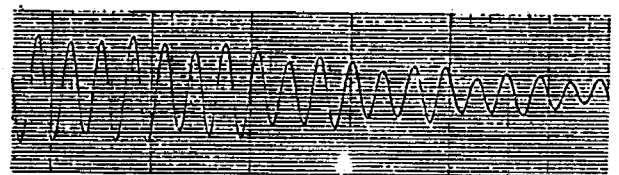
付図- 2. 2. 5 自由減衰波形



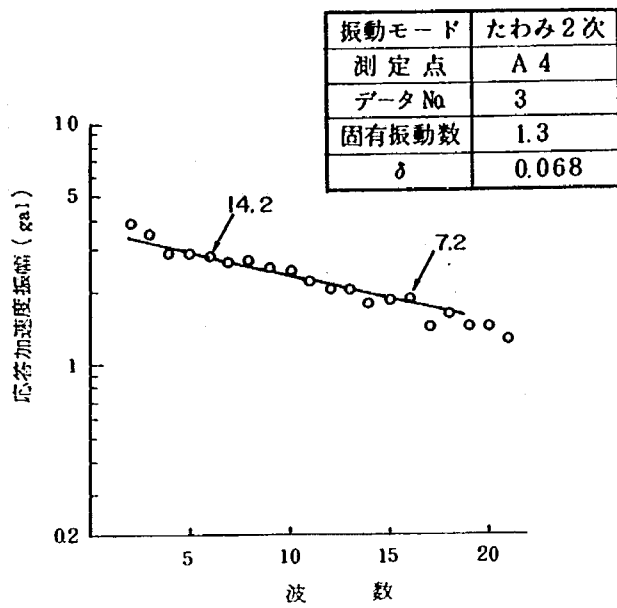
付図- 2. 2. 6 自由減衰波形



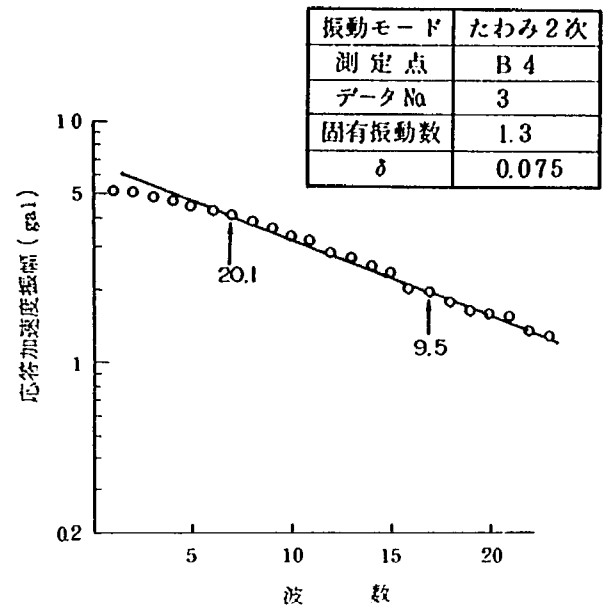
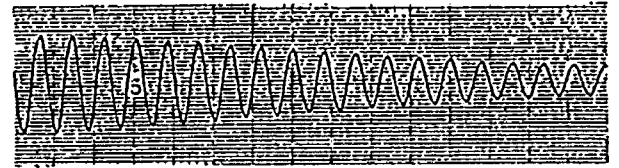
付図- 2. 2. 7 自由減衰波形



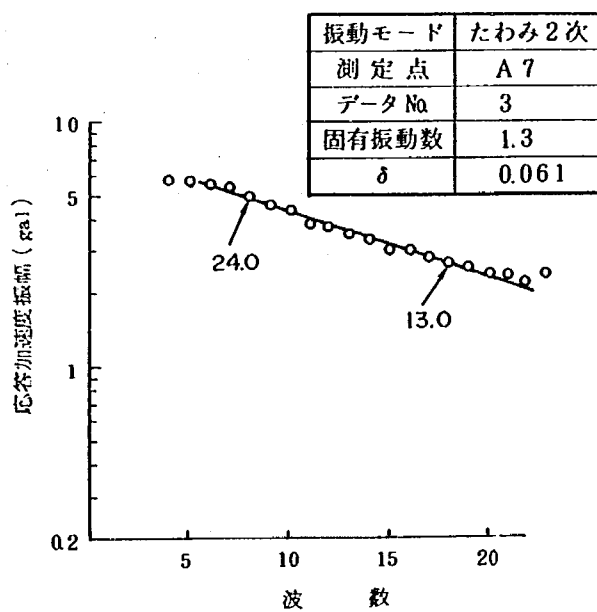
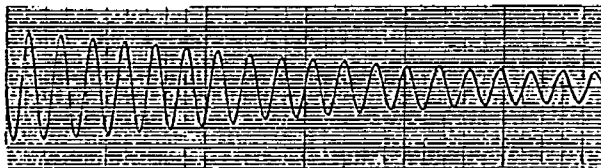
付図- 2. 2. 8 自由減衰波形



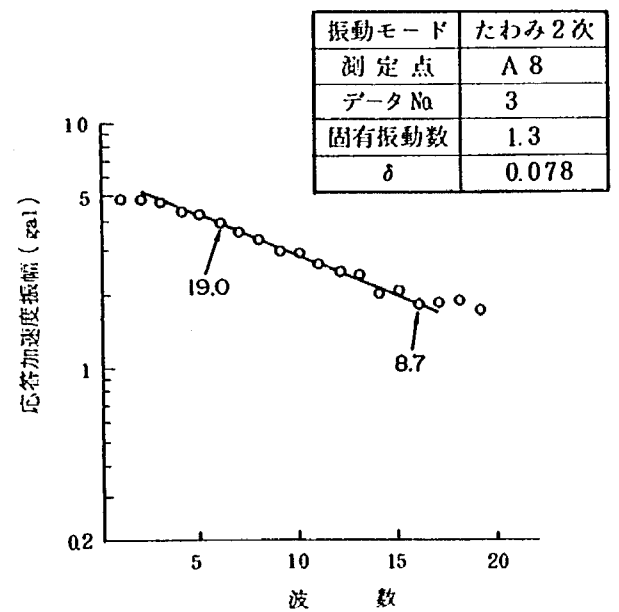
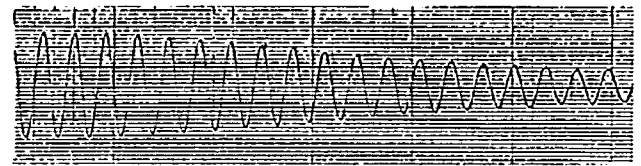
付図- 2. 2. 9 自由減衰波形



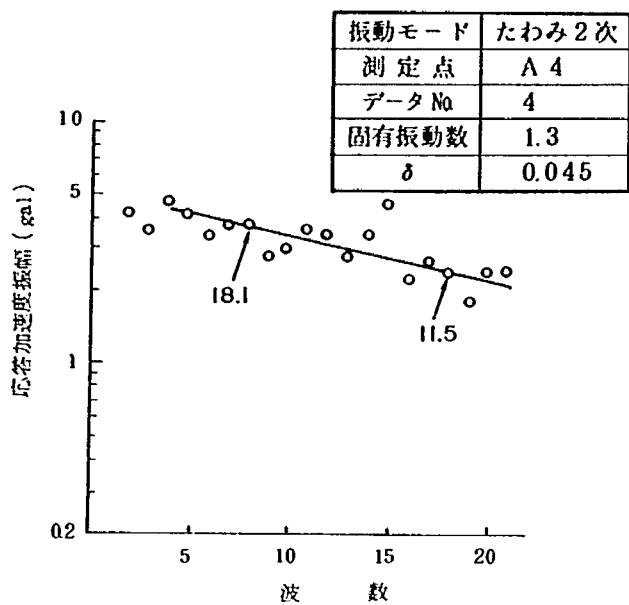
付図- 2. 2. 10 自由減衰波形



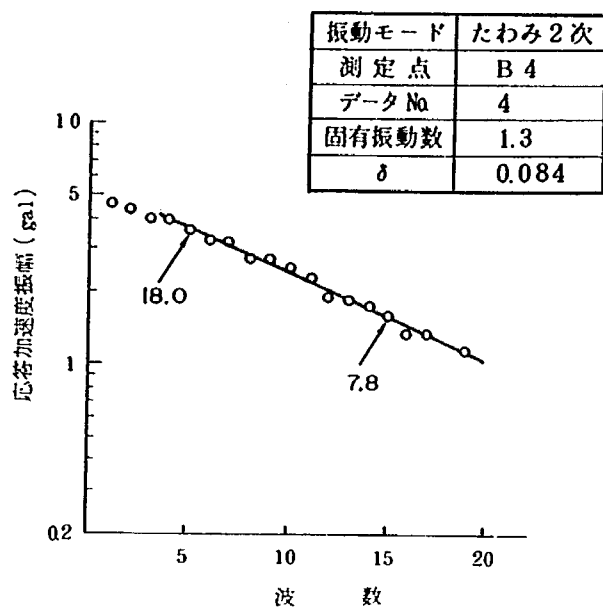
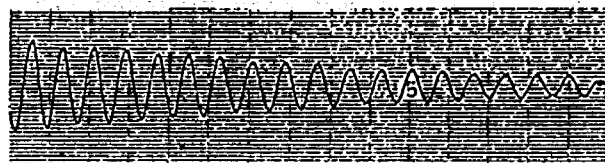
付図- 2. 2. 11 自由減衰波形



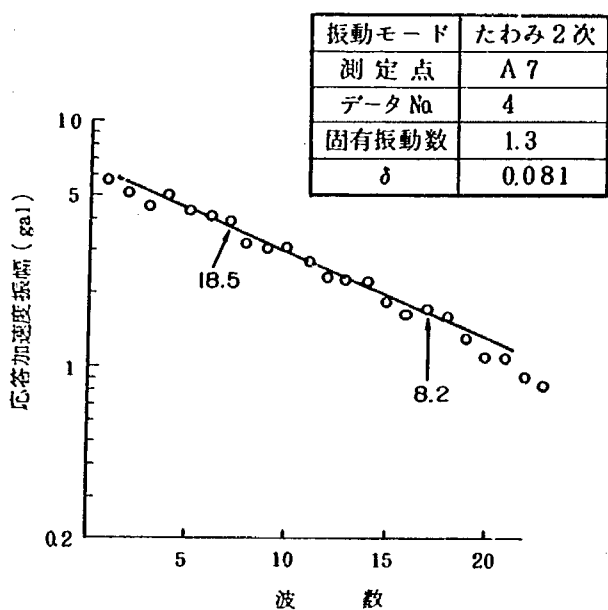
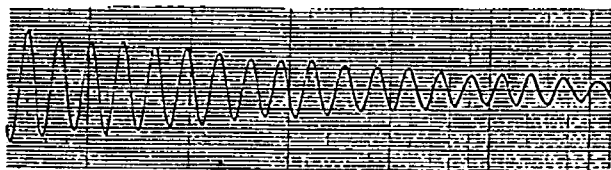
付図- 2. 2. 12 自由減衰波形



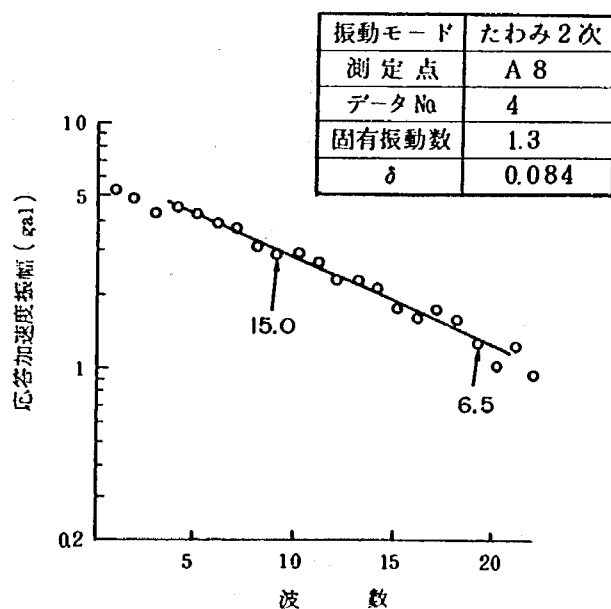
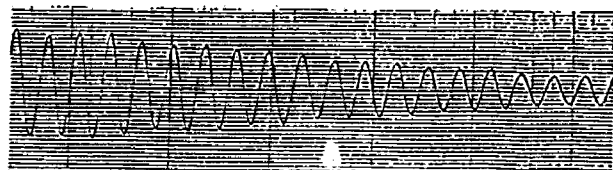
付図- 2.2.13 自由減衰波形



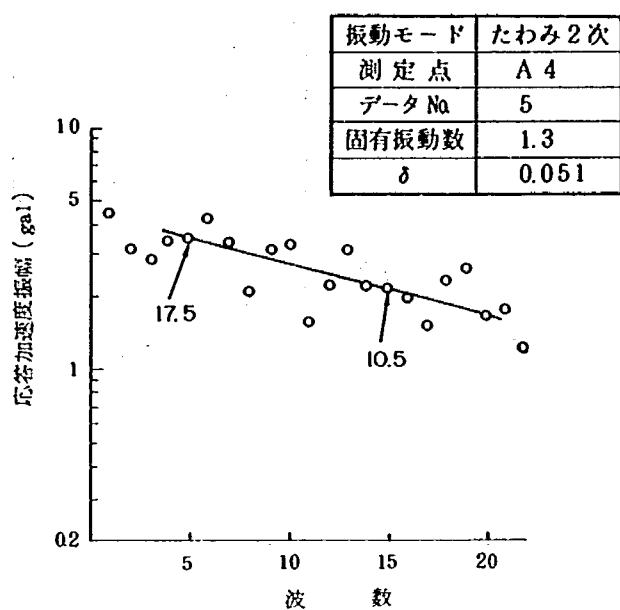
付図- 2.2.14 自由減衰波形



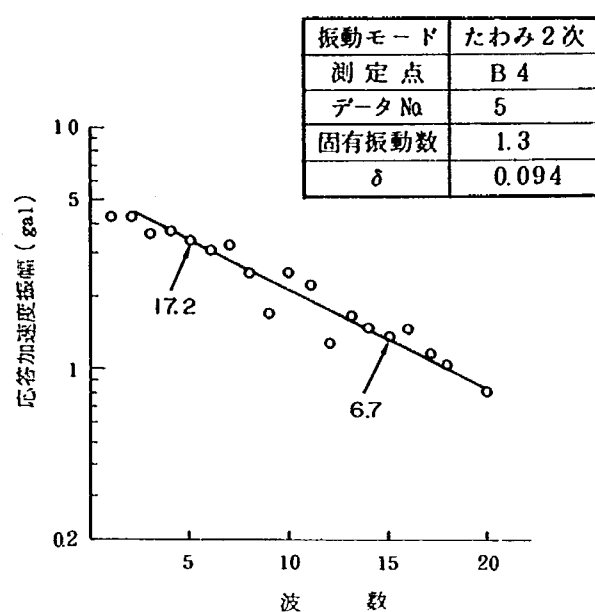
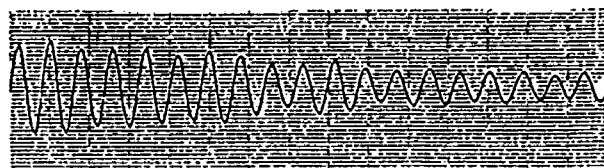
付図- 2.2.15 自由減衰波形



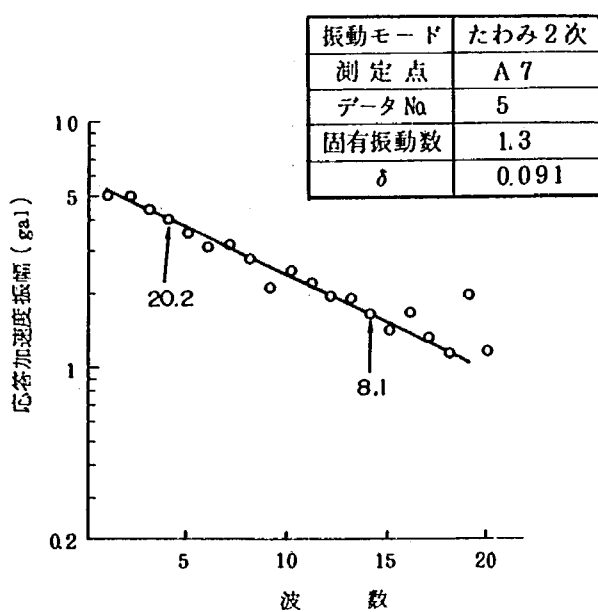
付図- 2.2.16 自由減衰波形



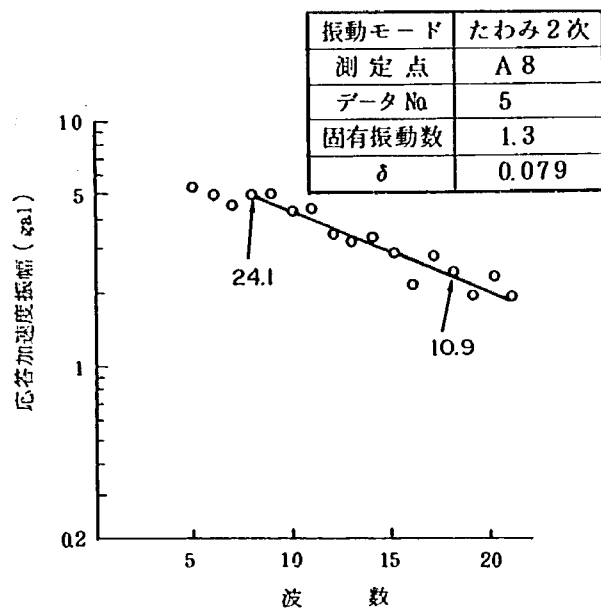
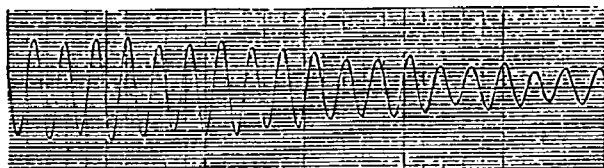
付図- 2. 2.17 自由減衰波形



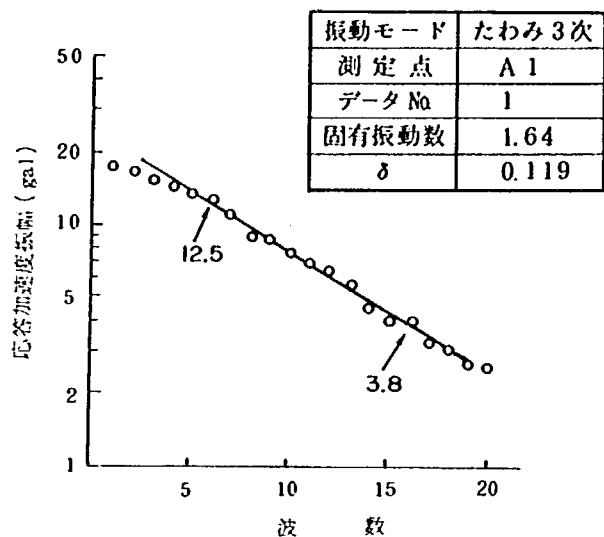
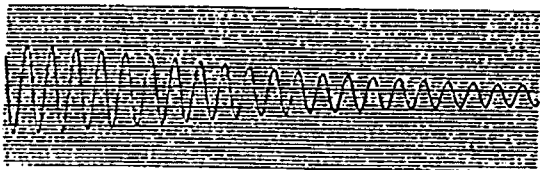
付図- 2. 2.18 自由減衰波形



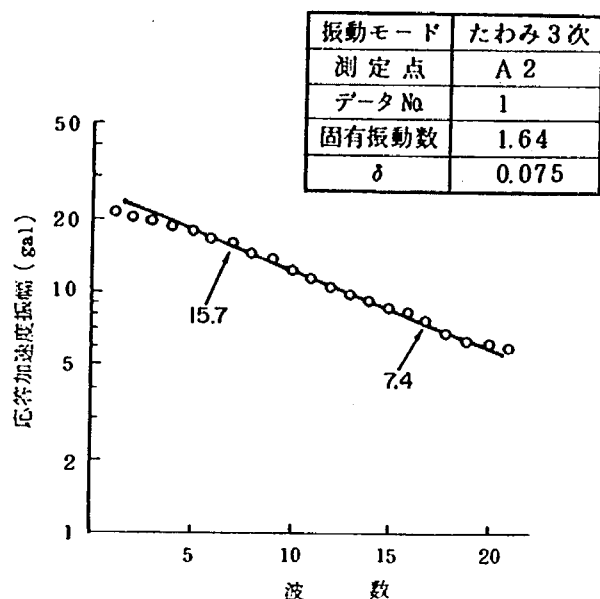
付図- 2. 2.19 自由減衰波形



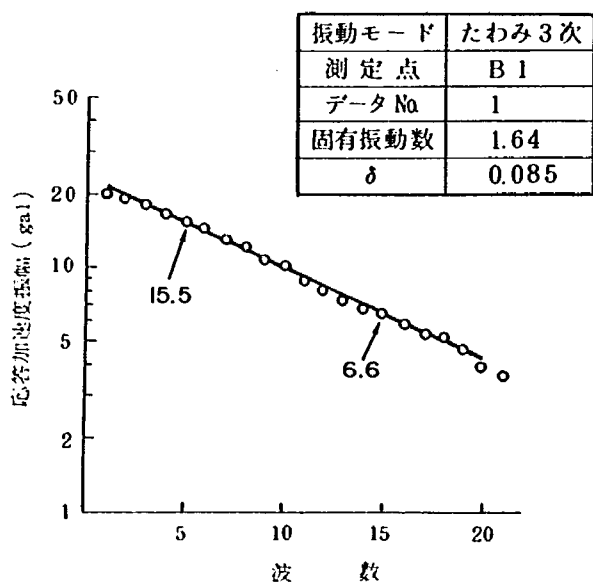
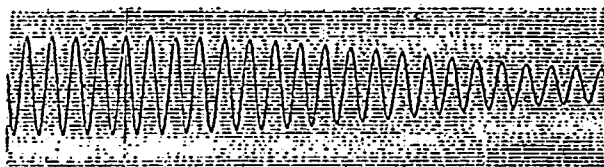
付図- 2. 2.20 自由減衰波形



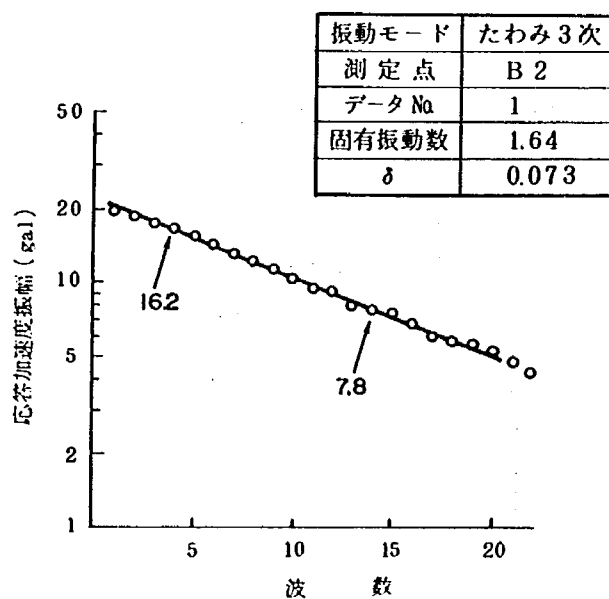
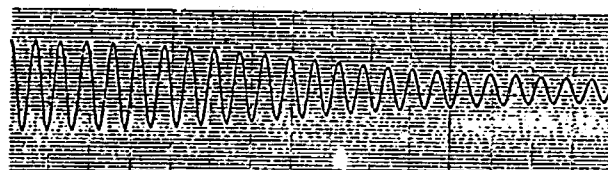
付図-2.3.1 自由減衰波形



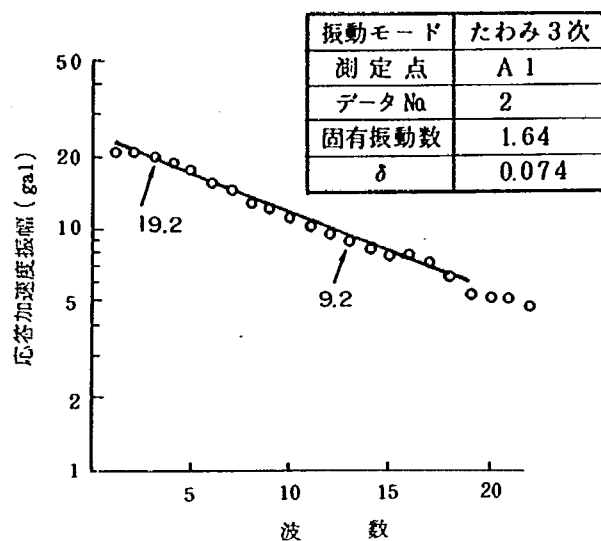
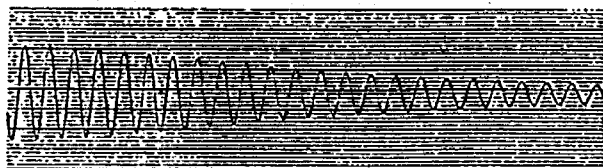
付図-2.3.2 自由減衰波形



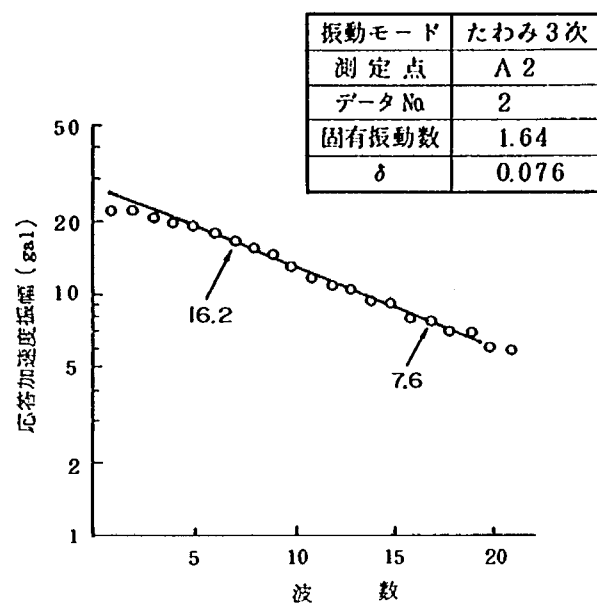
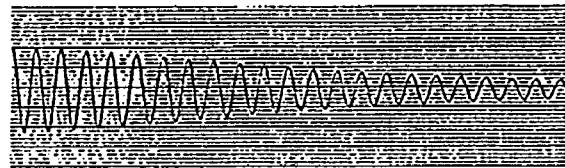
付図-2.3.3 自由減衰波形



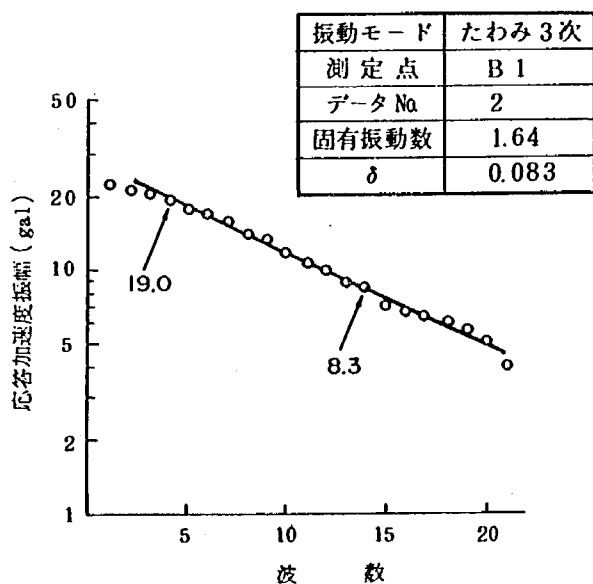
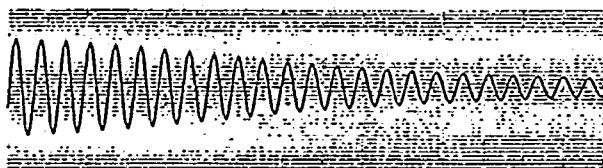
付図-2.3.4 自由減衰波形



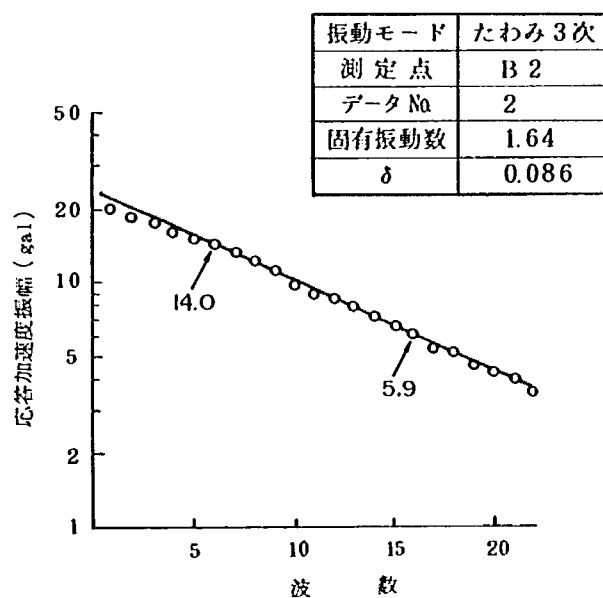
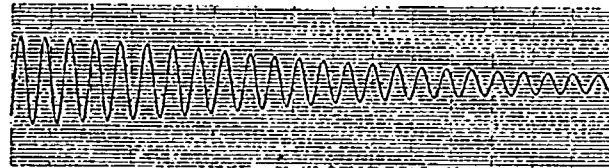
付図- 2.3.5 自由減衰波形



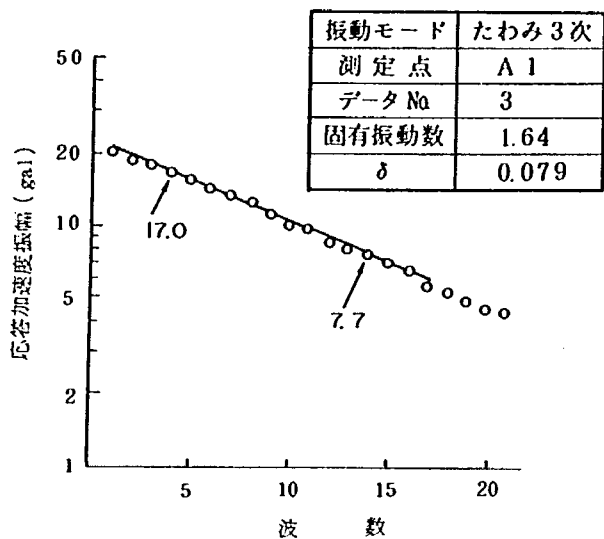
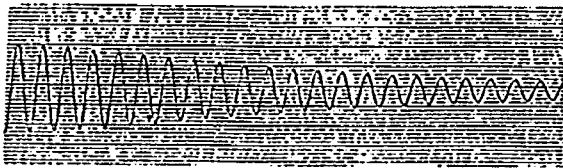
付図- 2.3.6 自由減衰波形



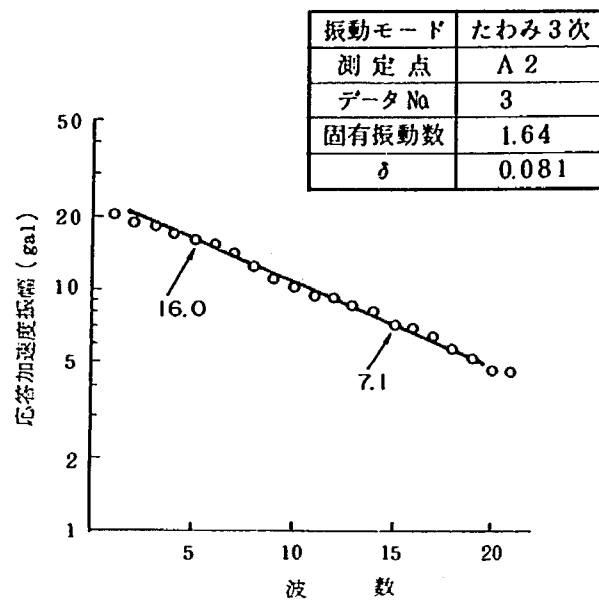
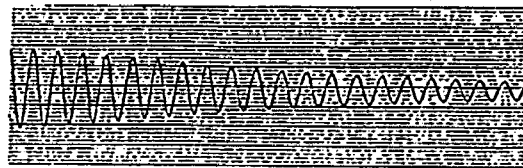
付図- 2.3.7 自由減衰波形



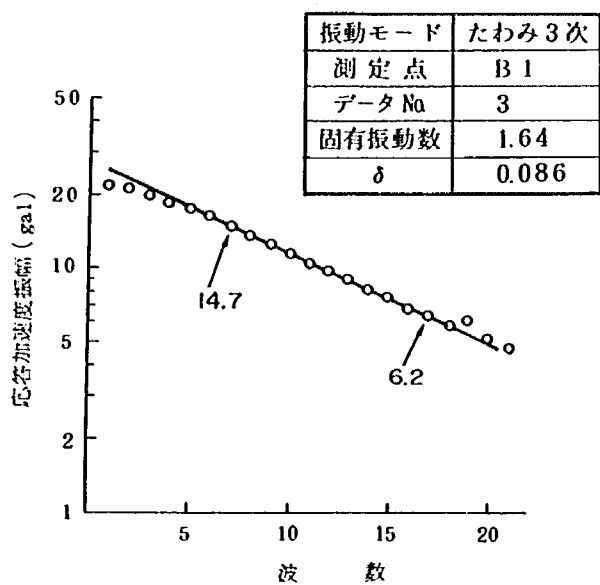
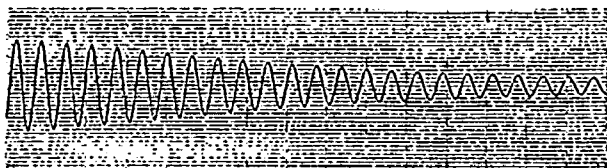
付図- 2.3.8 自由減衰波形



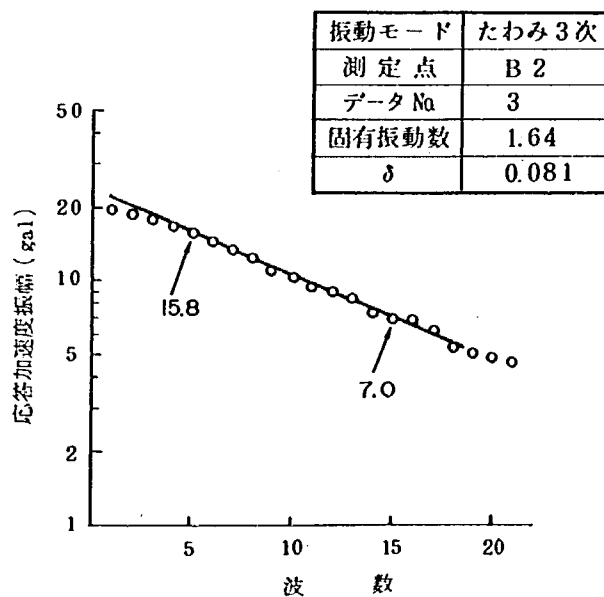
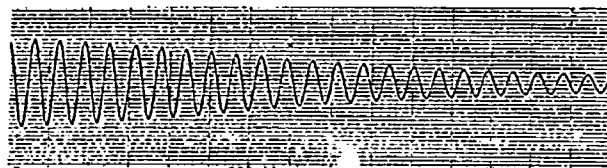
付図- 2. 3. 9 自由減衰波形



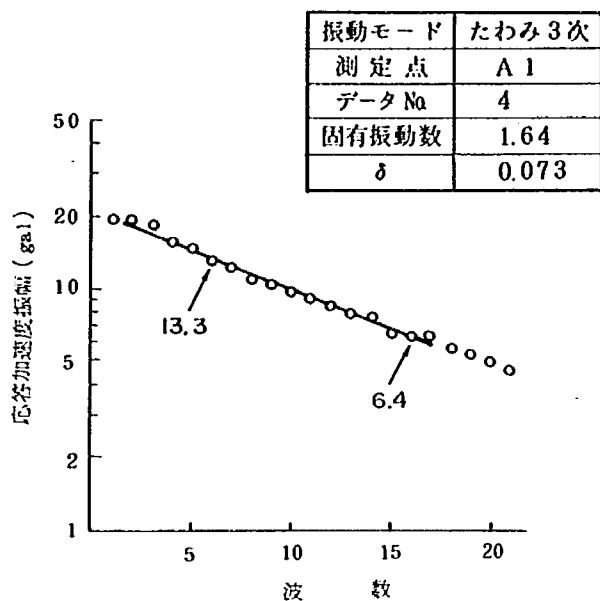
付図- 2. 3. 10 自由減衰波形



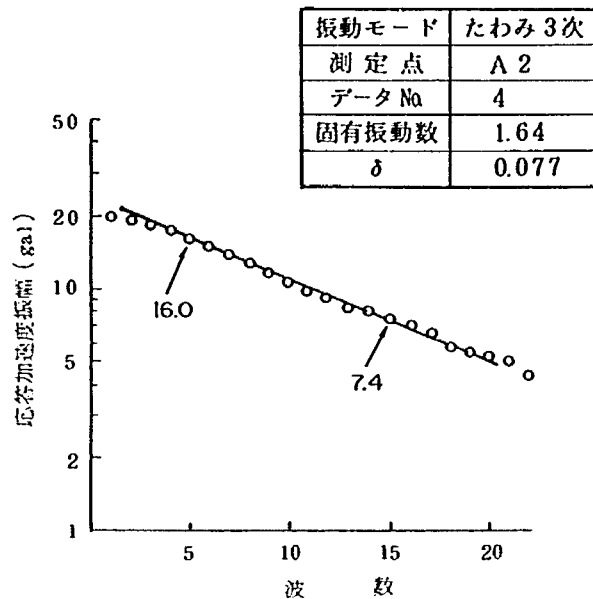
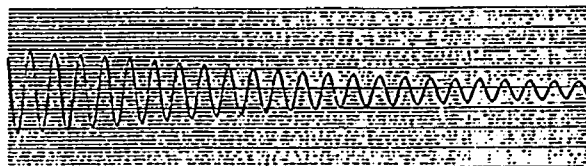
付図- 2. 3. 11 自由減衰波形



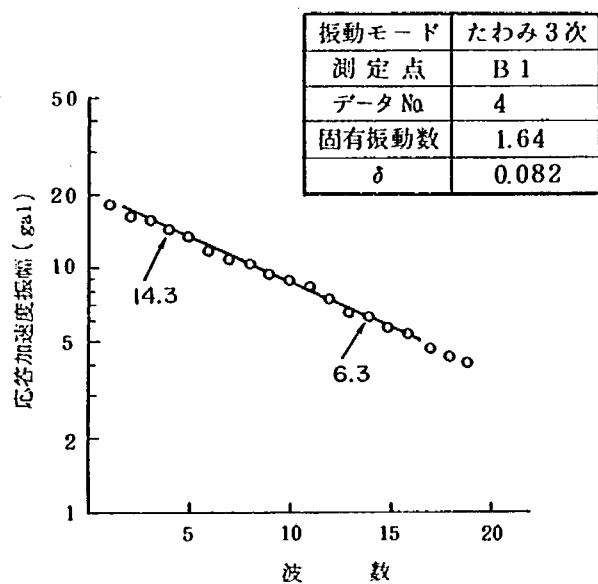
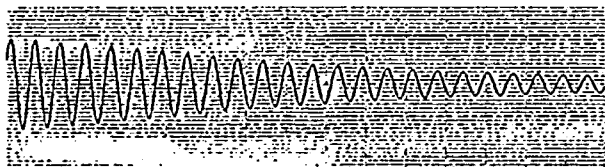
付図- 2. 3. 12 自由減衰波形



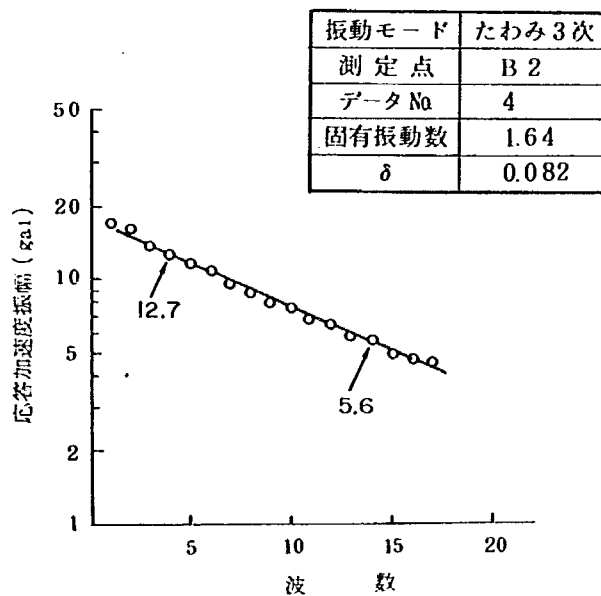
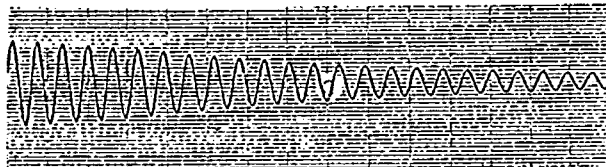
付図- 2. 3.13 自由減衰波形



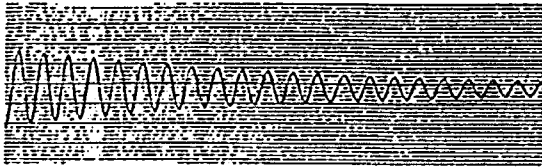
付図- 2. 3.14 自由減衰波形



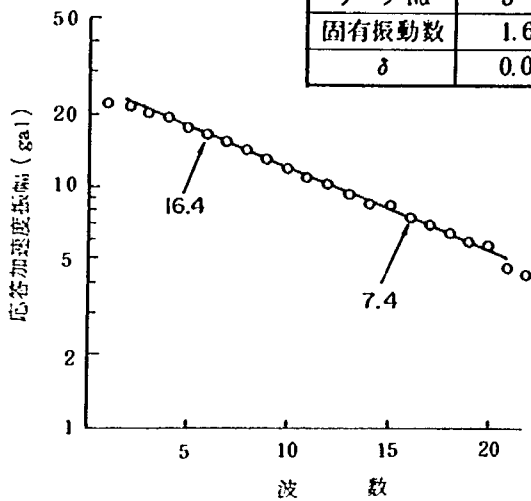
付図- 2. 3.15 自由減衰波形



付図- 2. 3.16 自由減衰波形



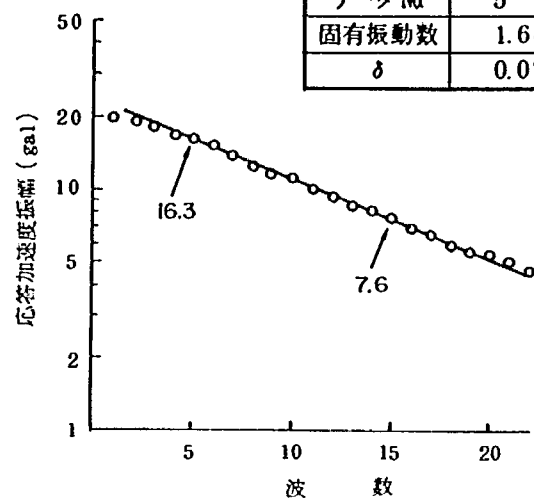
振動モード	たわみ3次
測定点	A 1
データ No	5
固有振動数	1.64
δ	0.080



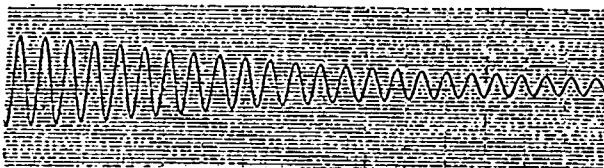
付図- 2. 3.17 自由減衰波形



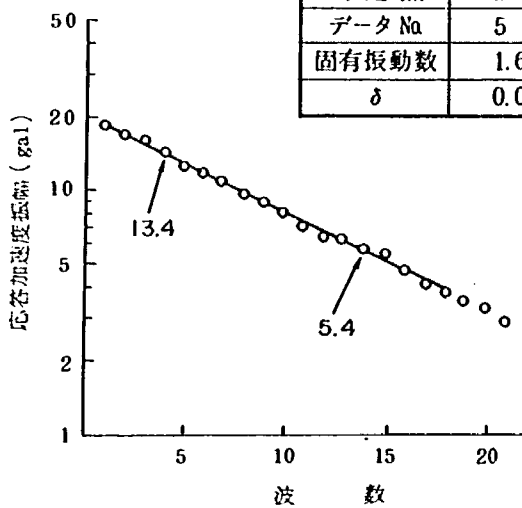
振動モード	たわみ3次
測定点	A 2
データ No	5
固有振動数	1.64
δ	0.076



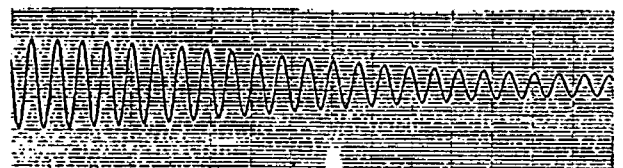
付図- 2. 3.18 自由減衰波形



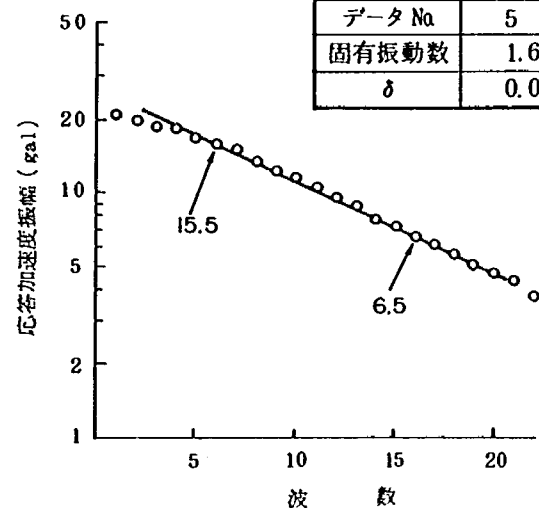
振動モード	たわみ3次
測定点	B 1
データ No	5
固有振動数	1.64
δ	0.091



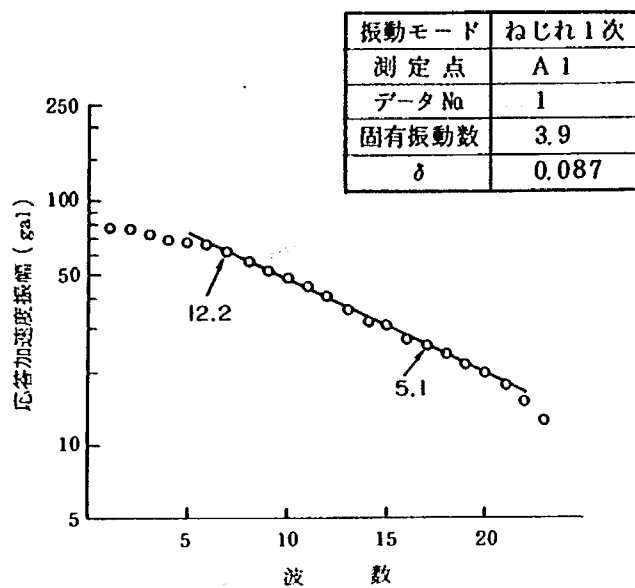
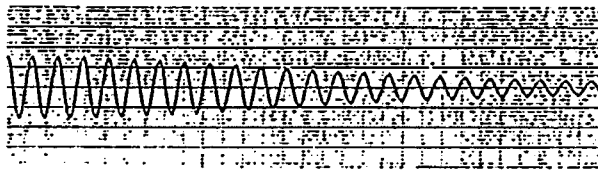
付図- 2. 3.19 自由減衰波形



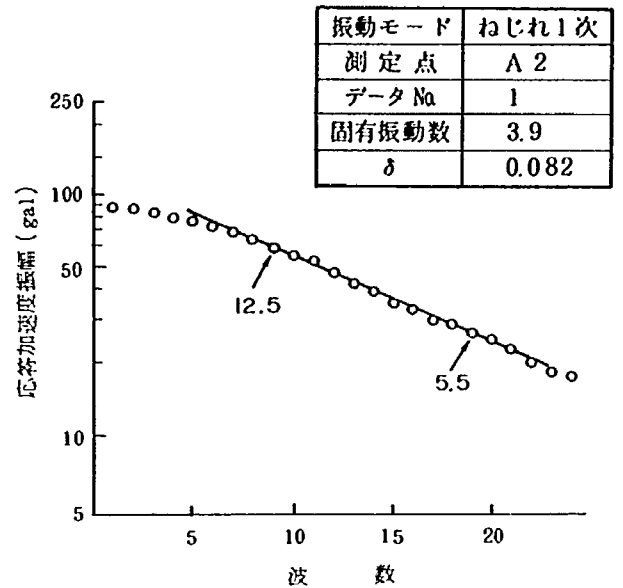
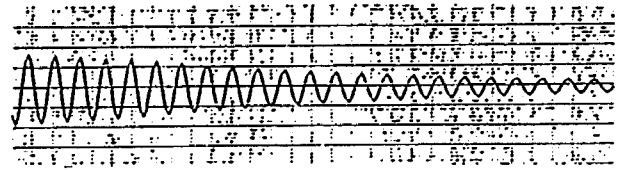
振動モード	たわみ3次
測定点	B 2
データ No	5
固有振動数	1.64
δ	0.087



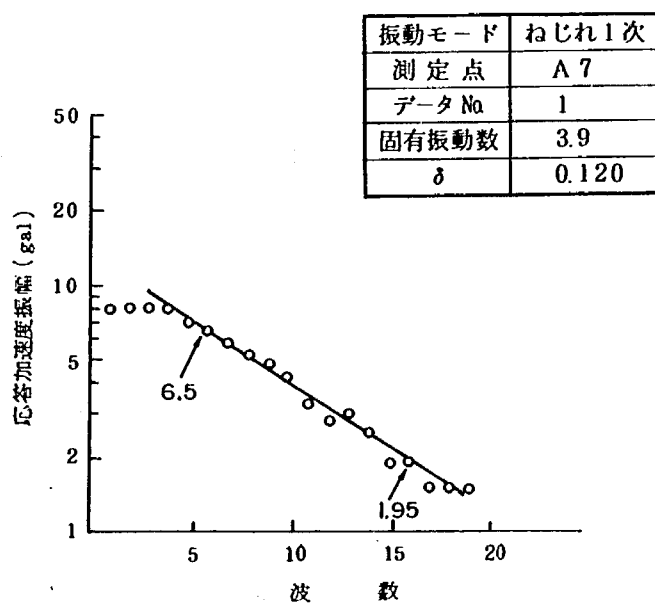
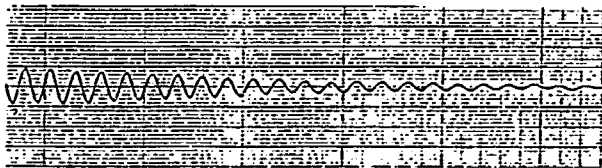
付図- 2. 3.20 自由減衰波形



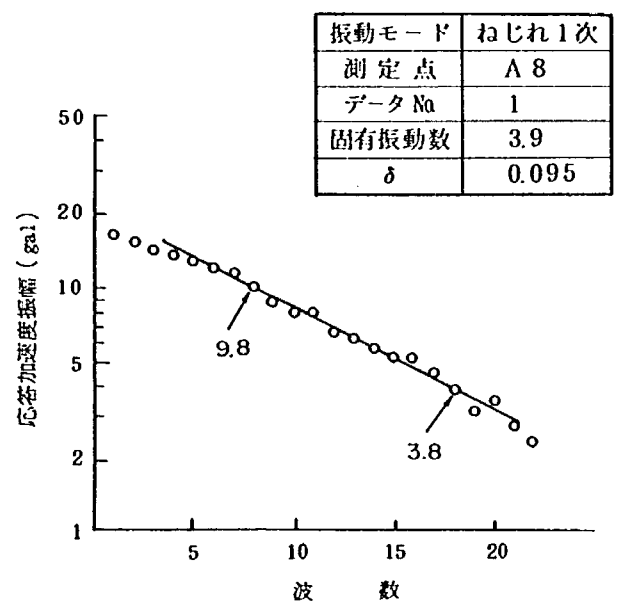
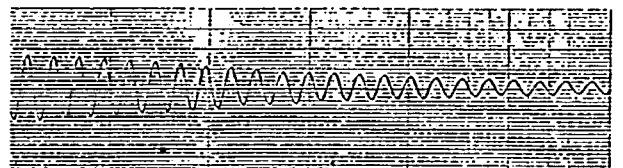
付図- 2. 4. 1 自由減衰波形



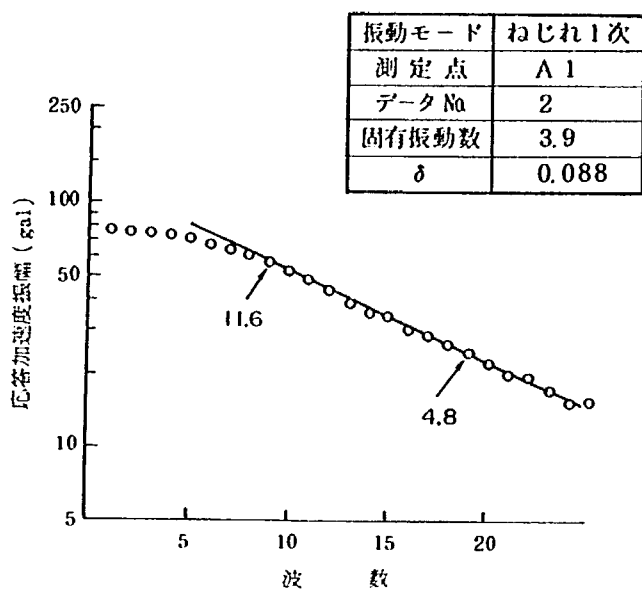
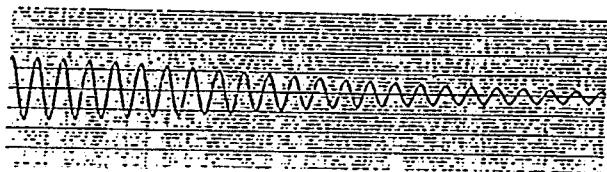
付図- 2. 4. 2 自由減衰波形



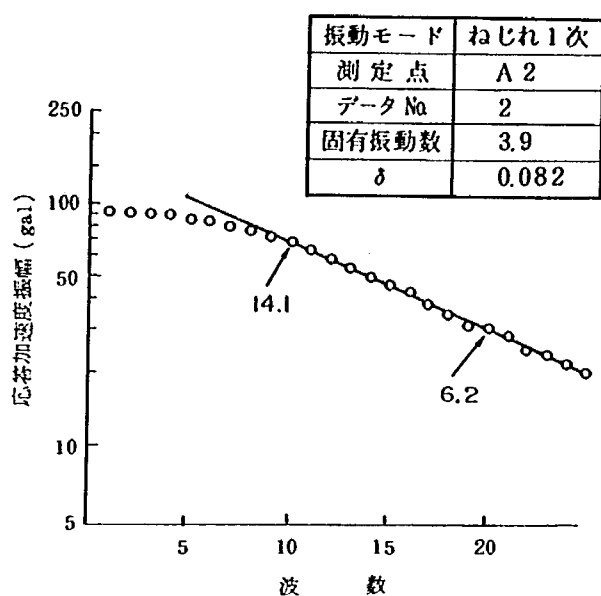
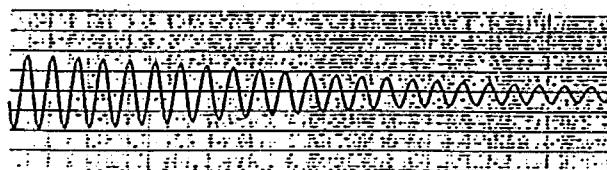
付図- 2. 4. 3 自由減衰波形



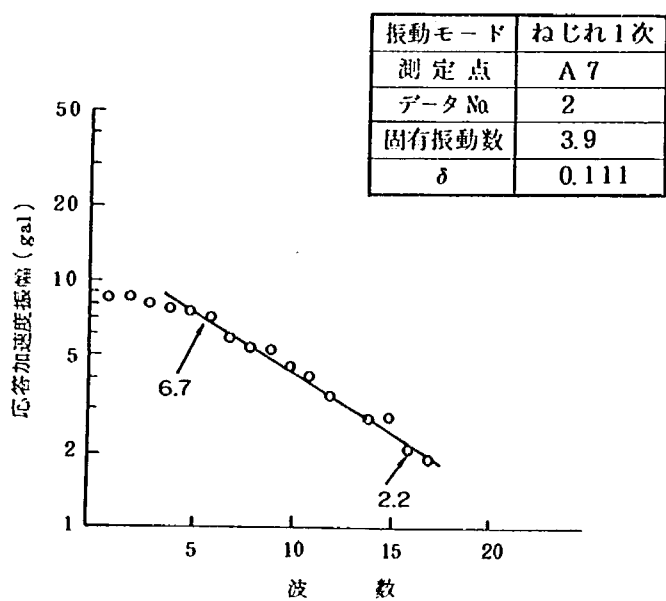
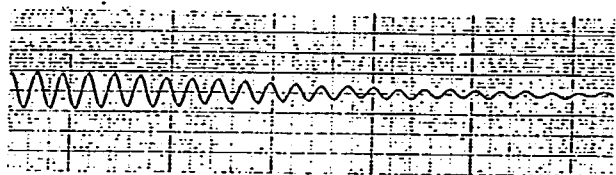
付図- 2. 4. 4 自由減衰波形



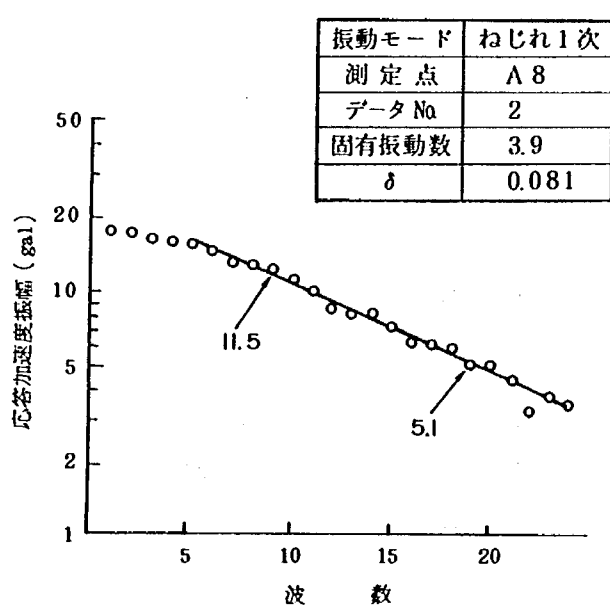
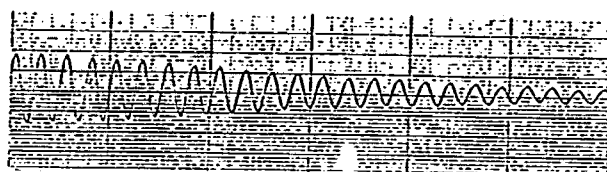
付図- 2. 4. 5 自由減衰波形



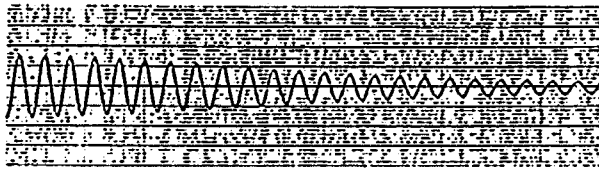
付図- 2. 4. 6 自由減衰波形



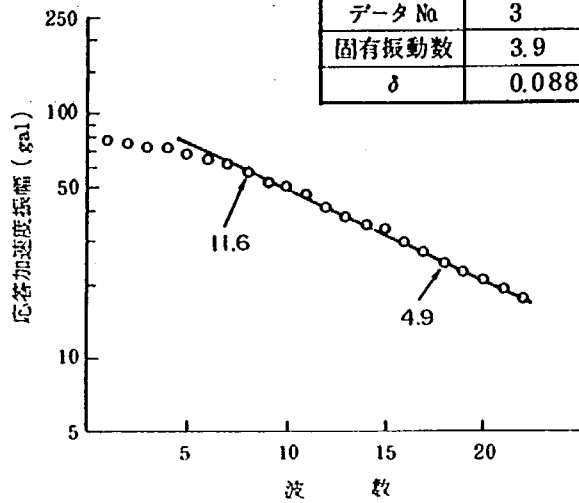
付図- 2. 4. 7 自由減衰波形



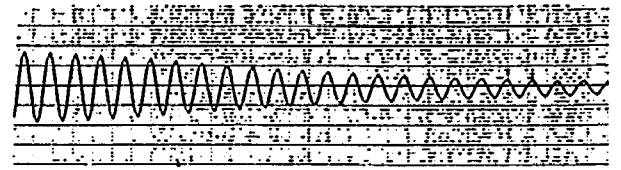
付図- 2. 4. 8 自由減衰波形



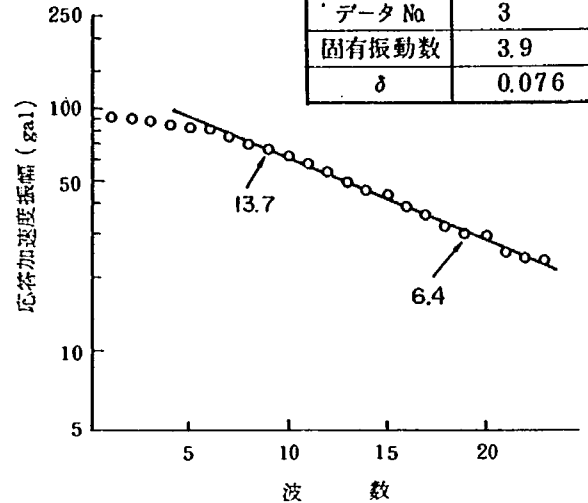
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 1
データ No	3
固有振動数	3.9
δ	0.088



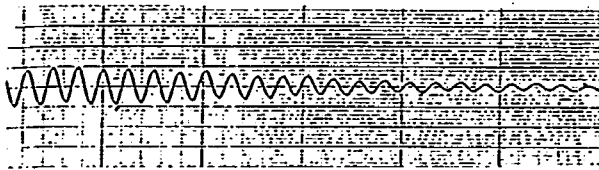
付図- 2. 4. 9 自由減衰波形



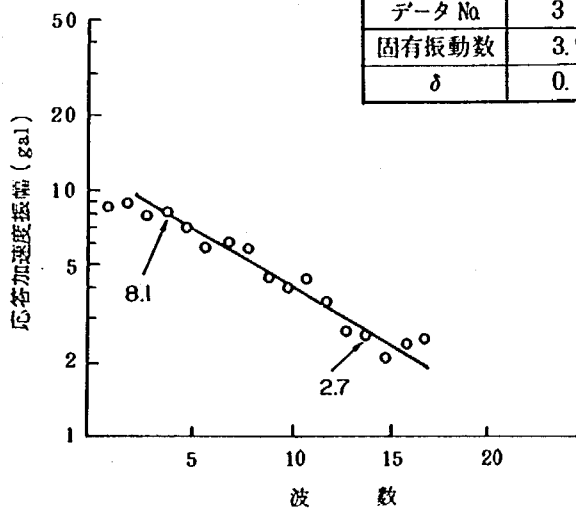
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 2
データ No	3
固有振動数	3.9
δ	0.076



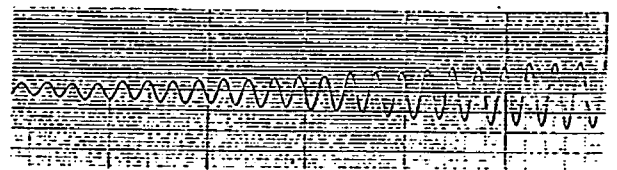
付図- 2. 4. 10 自由減衰波形



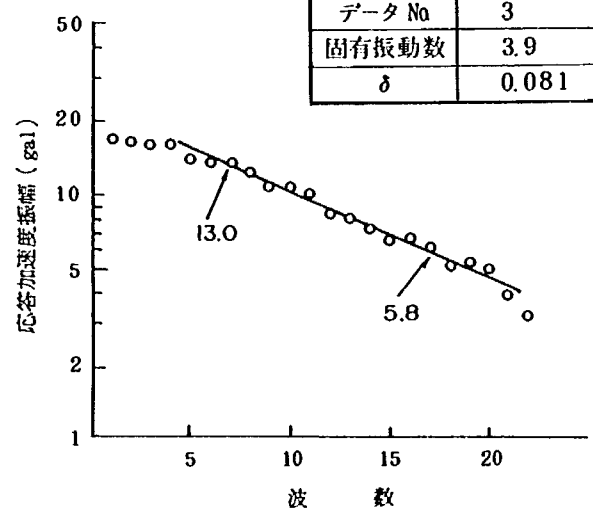
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 7
データ No	3
固有振動数	3.9
δ	0.110



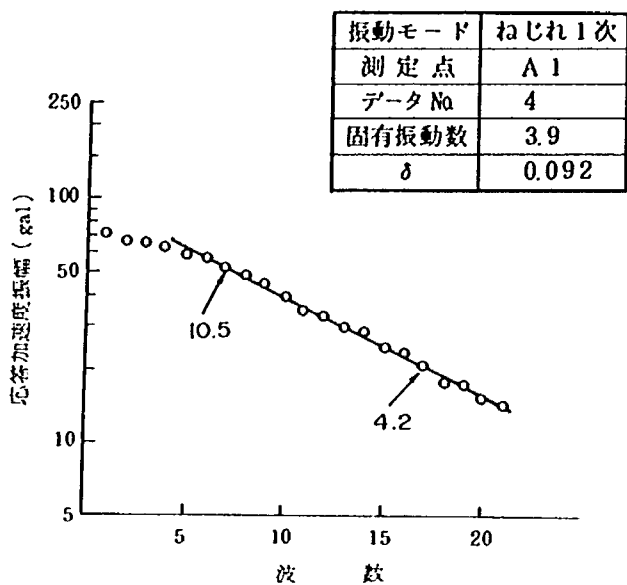
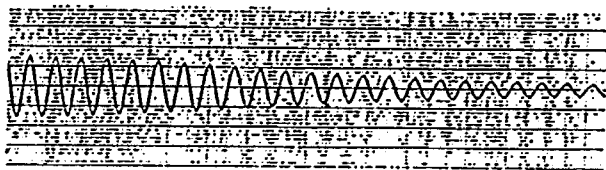
付図- 2. 4. 11 自由減衰波形



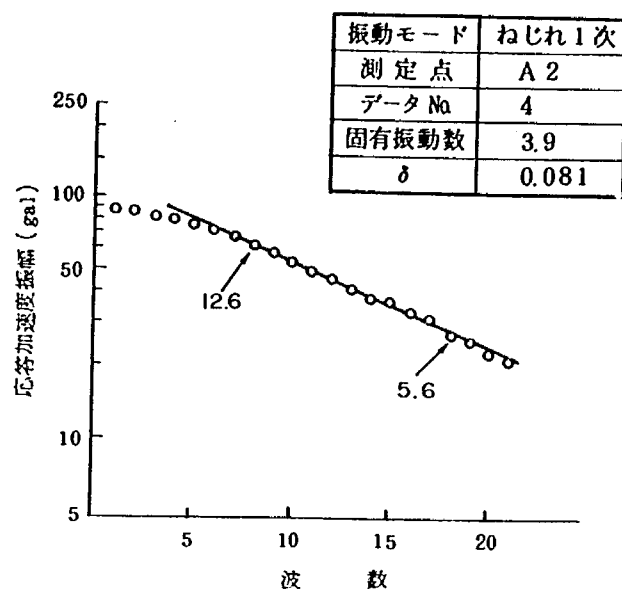
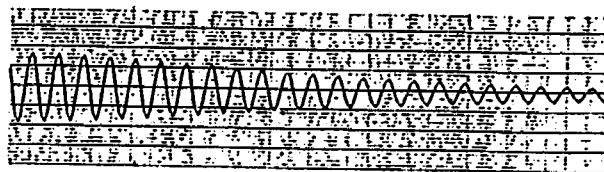
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 8
データ No	3
固有振動数	3.9
δ	0.081



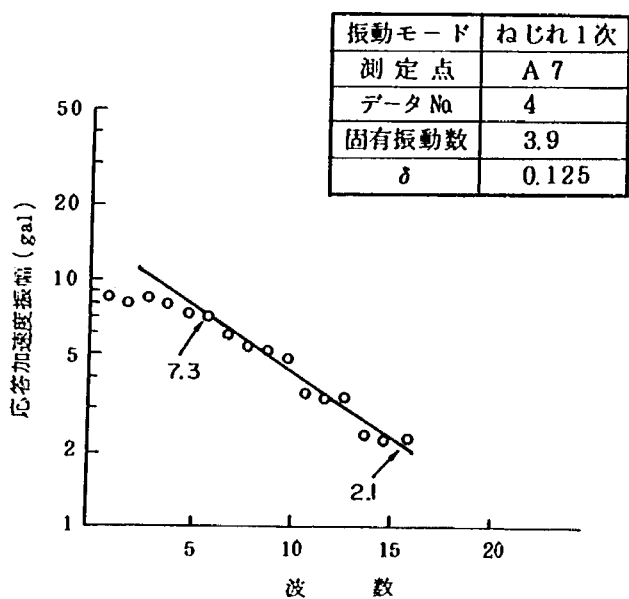
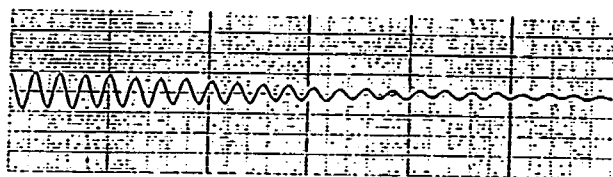
付図- 2. 4. 12 自由減衰波形



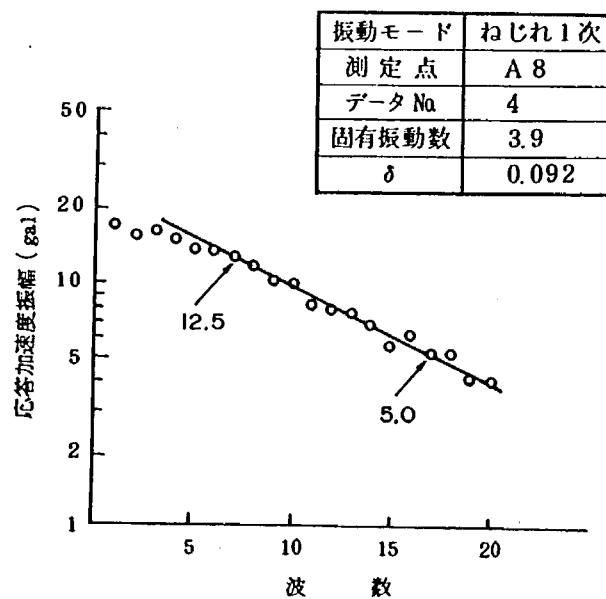
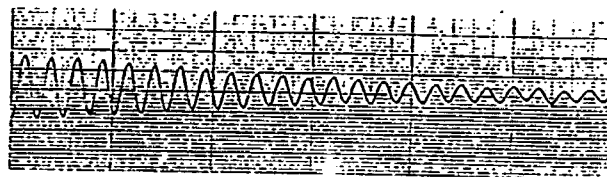
付図- 2. 4.13 自由減衰波形



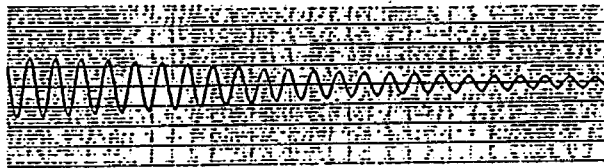
付図- 2. 4.14 自由減衰波形



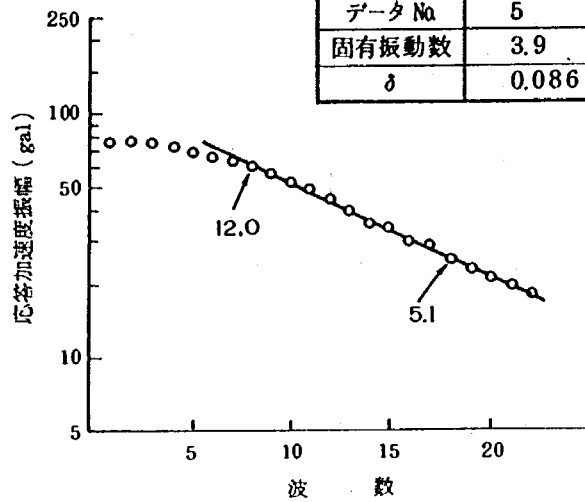
付図- 2. 4.15 自由減衰波形



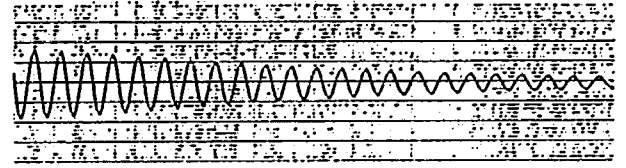
付図- 2. 4.16 自由減衰波形



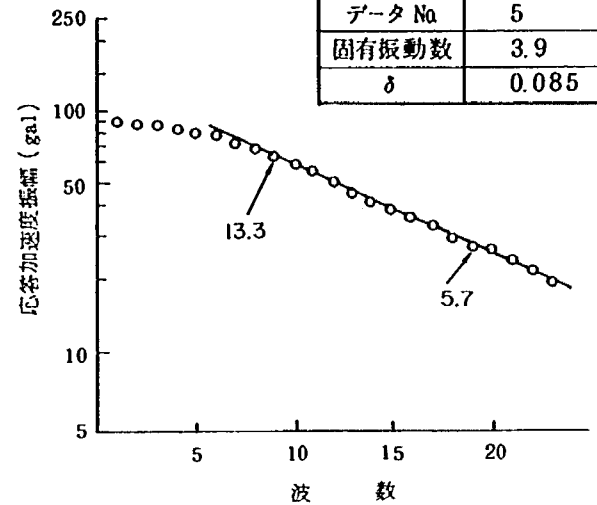
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 1
データ No	5
固有振動数	3.9
δ	0.086



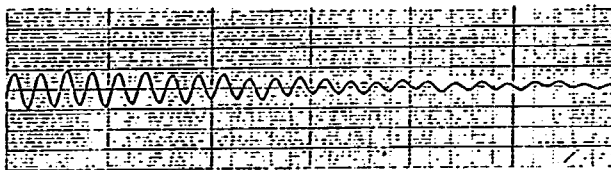
付図- 2. 4. 17 自由減衰波形



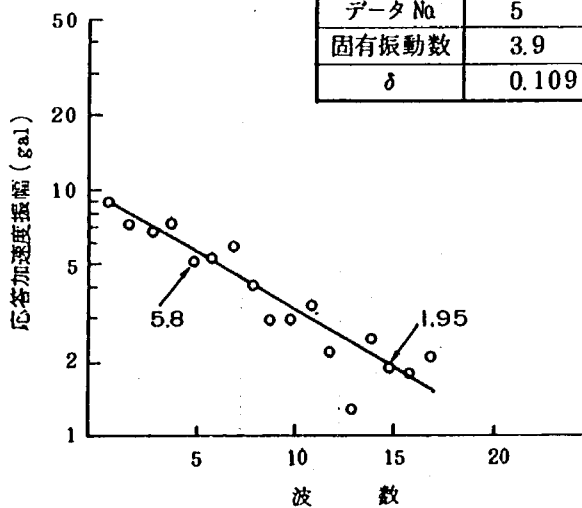
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 2
データ No	5
固有振動数	3.9
δ	0.085



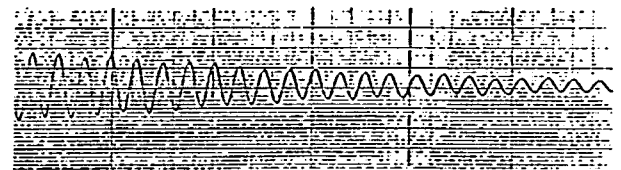
付図- 2. 4. 18 自由減衰波形



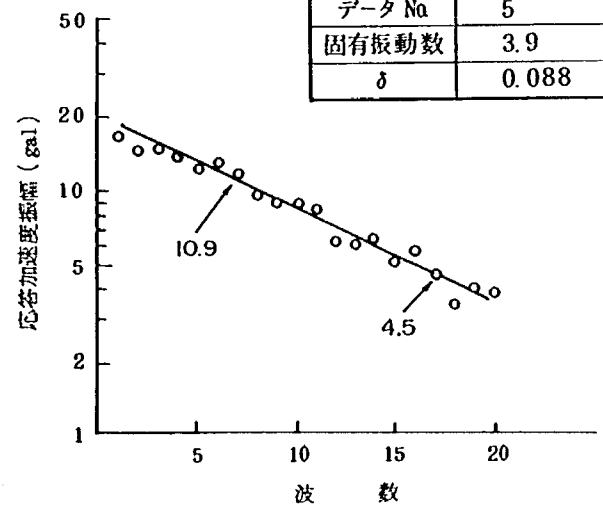
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 7
データ No	5
固有振動数	3.9
δ	0.109



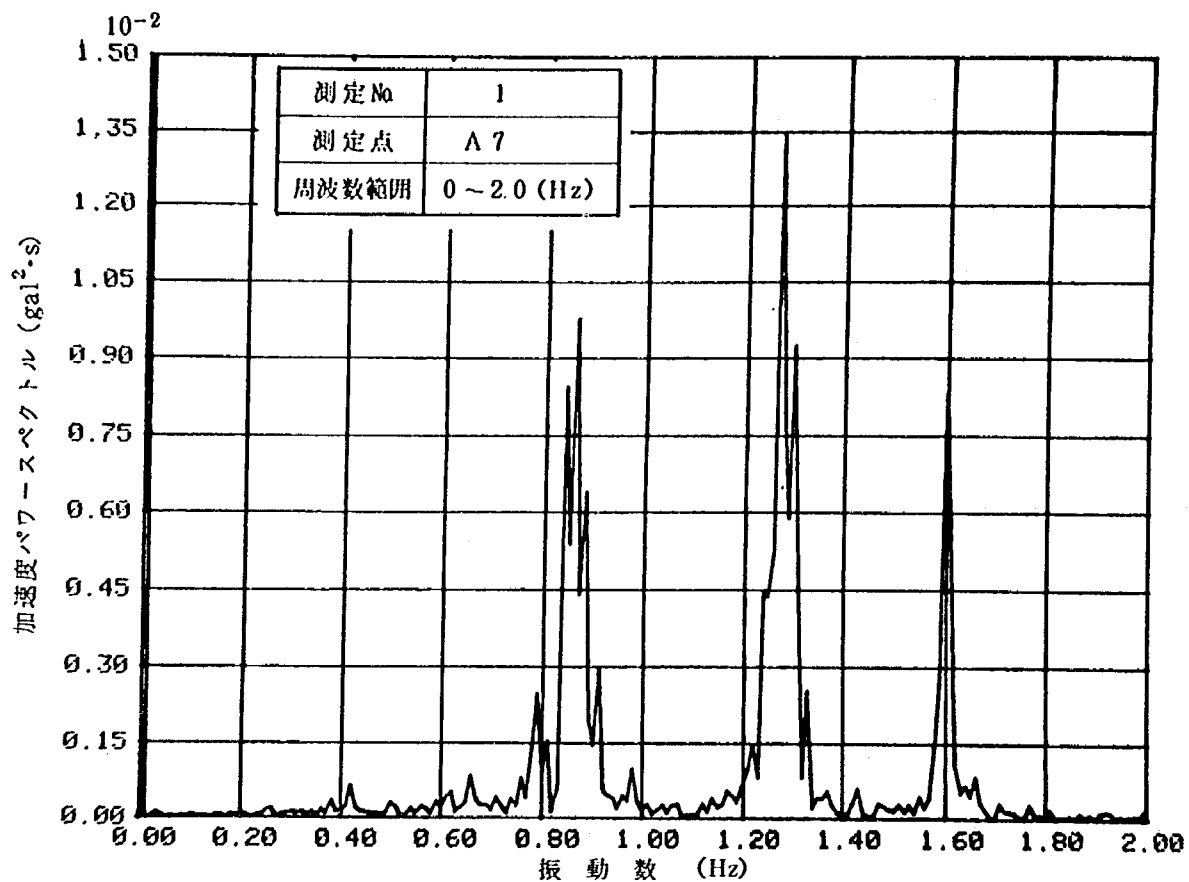
付図- 2. 4. 19 自由減衰波形



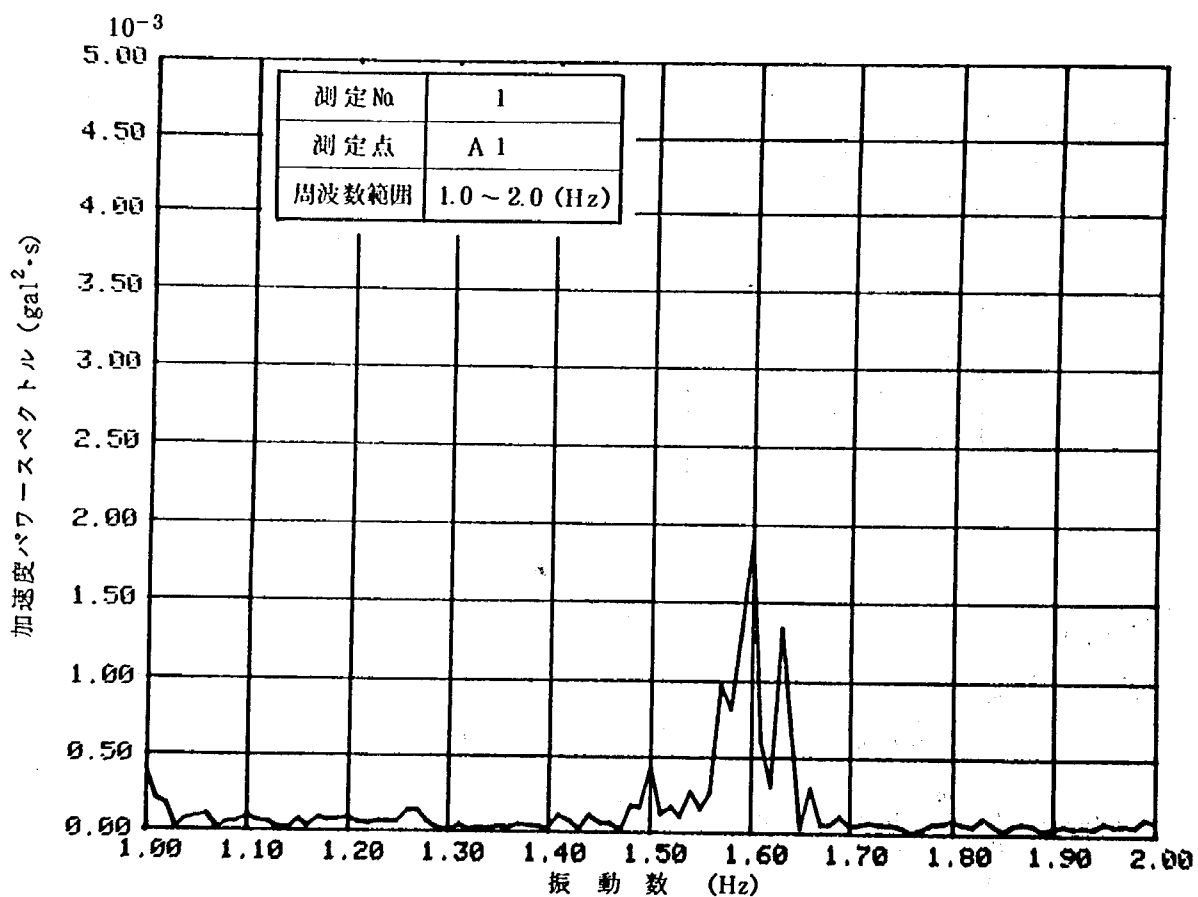
振動モード	ねじれ1次
測定点	A 8
データ No	5
固有振動数	3.9
δ	0.088



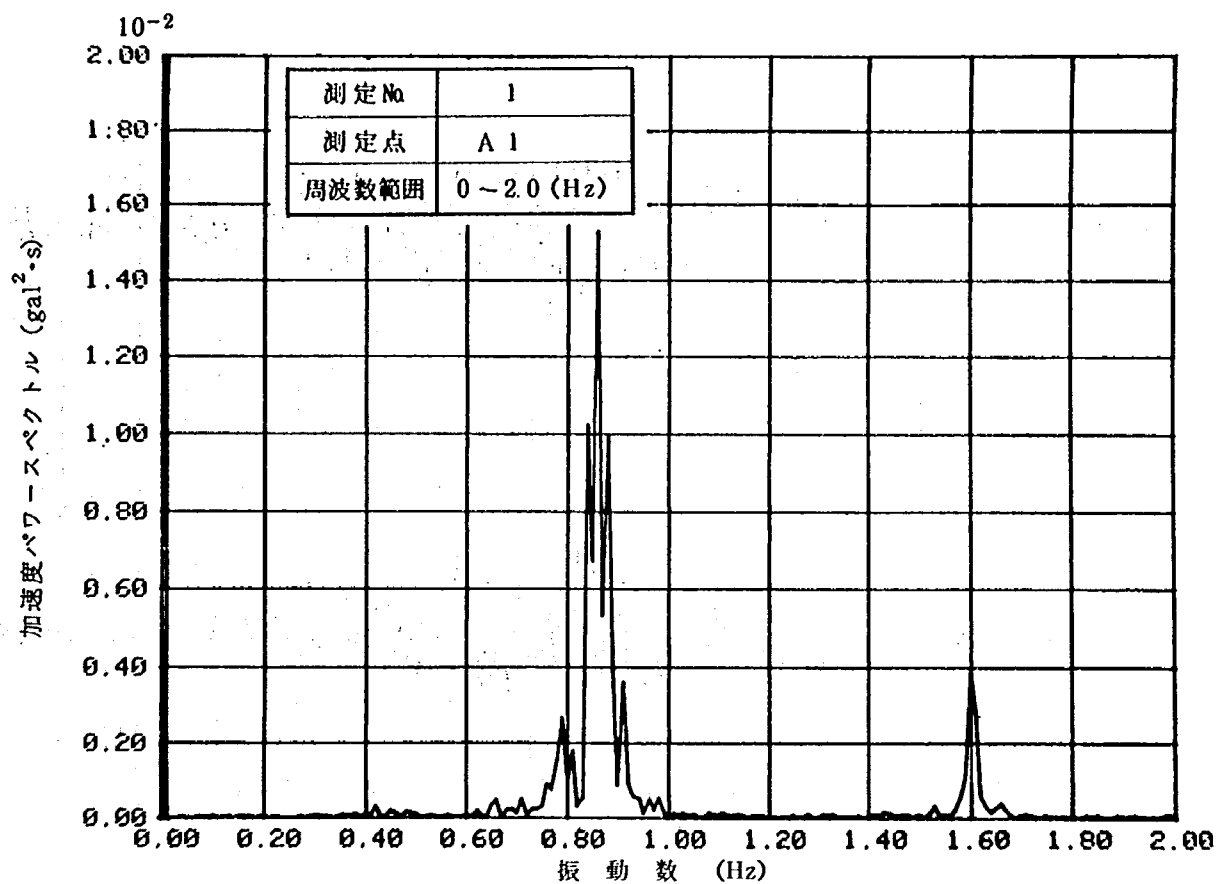
付図- 2. 4. 20 自由減衰波形



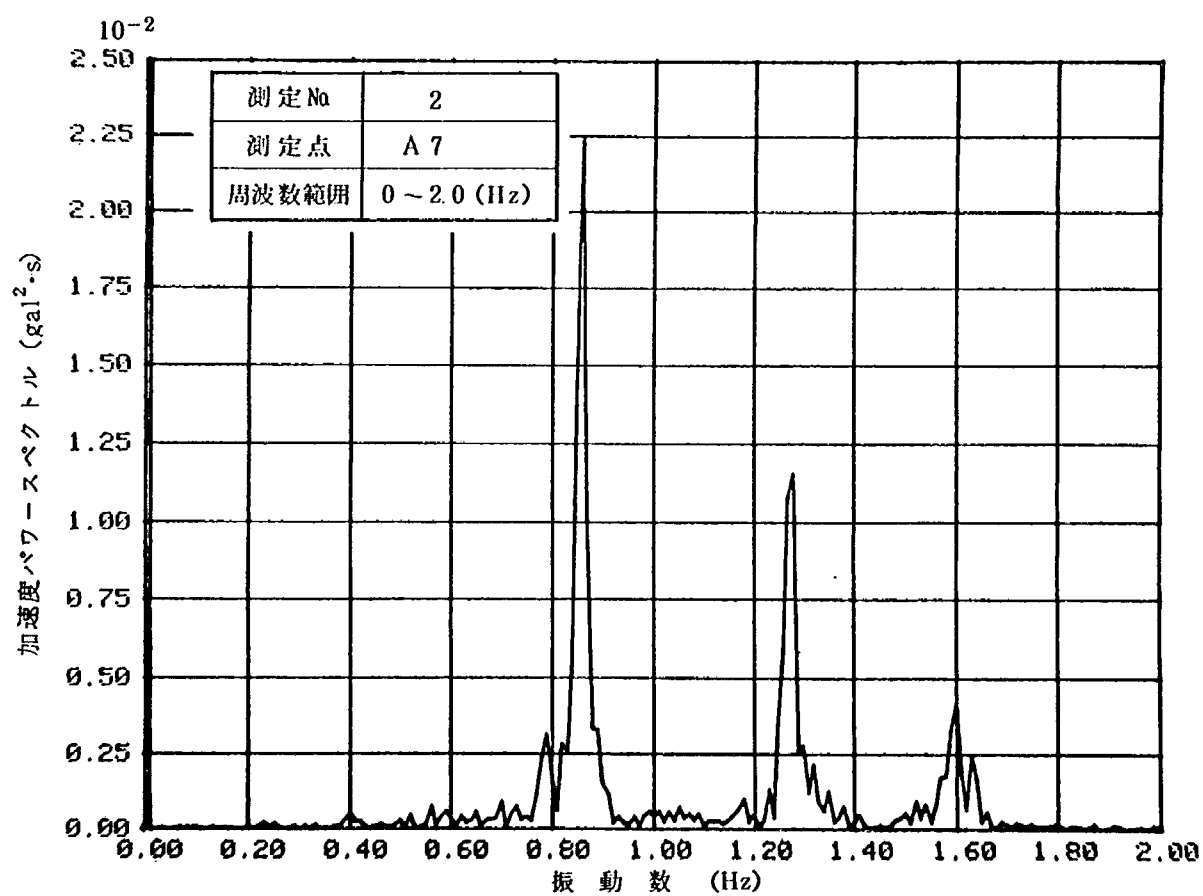
付図- 3. 1 自然風による不規則振動のパワースペクトル



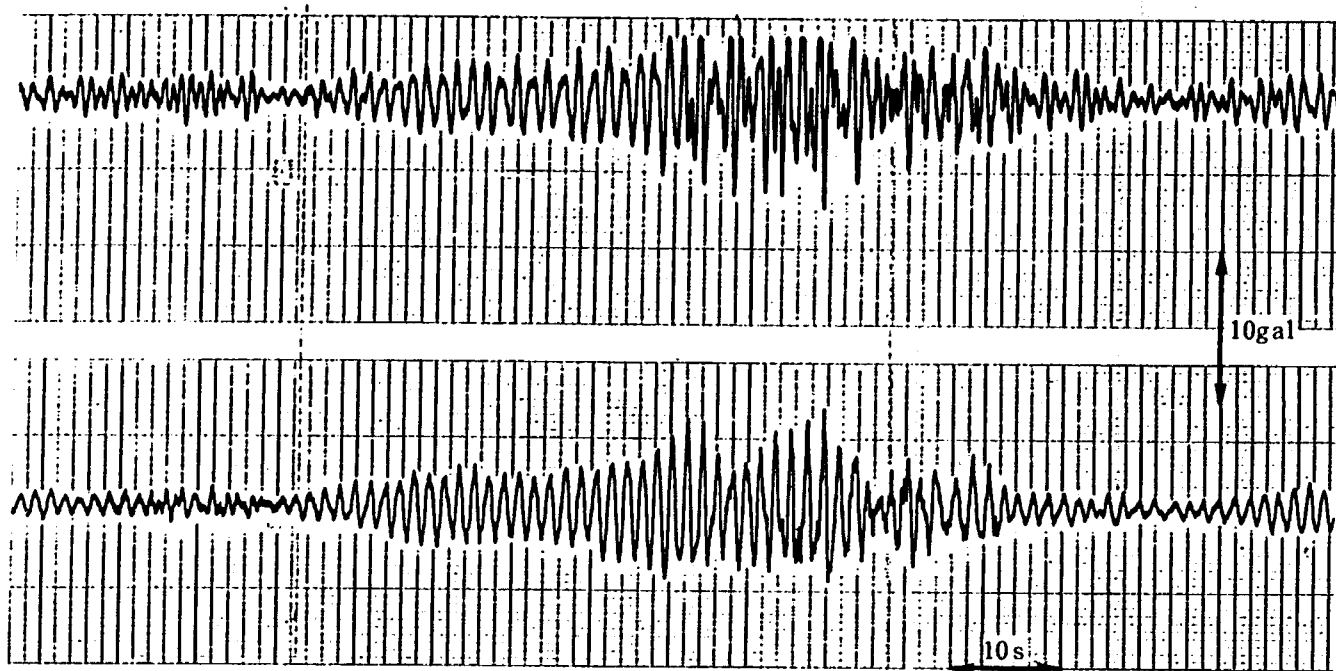
付図- 3. 2 自然風による不規則振動のパワースペクトル



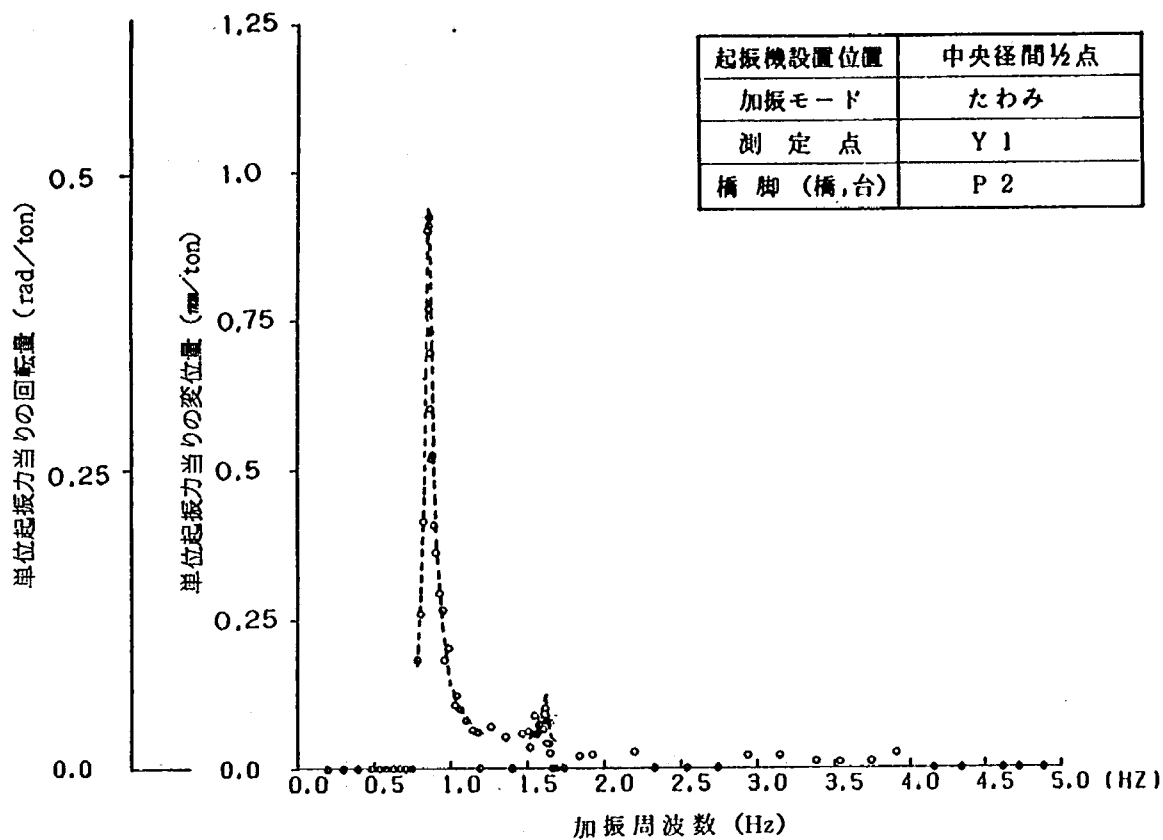
付図-3.3 自然風による不規則振動のパワースペクトル



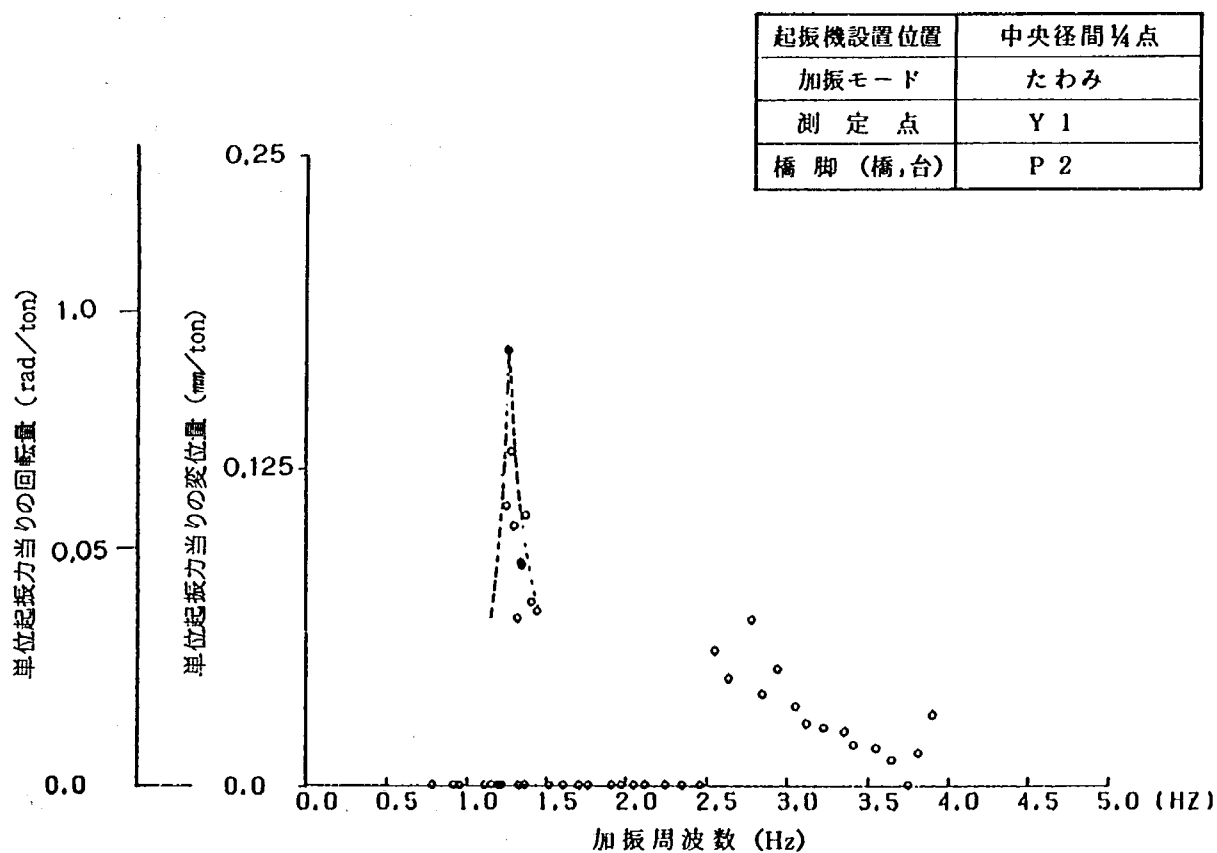
付図-3.4 自然風による不規則振動のパワースペクトル



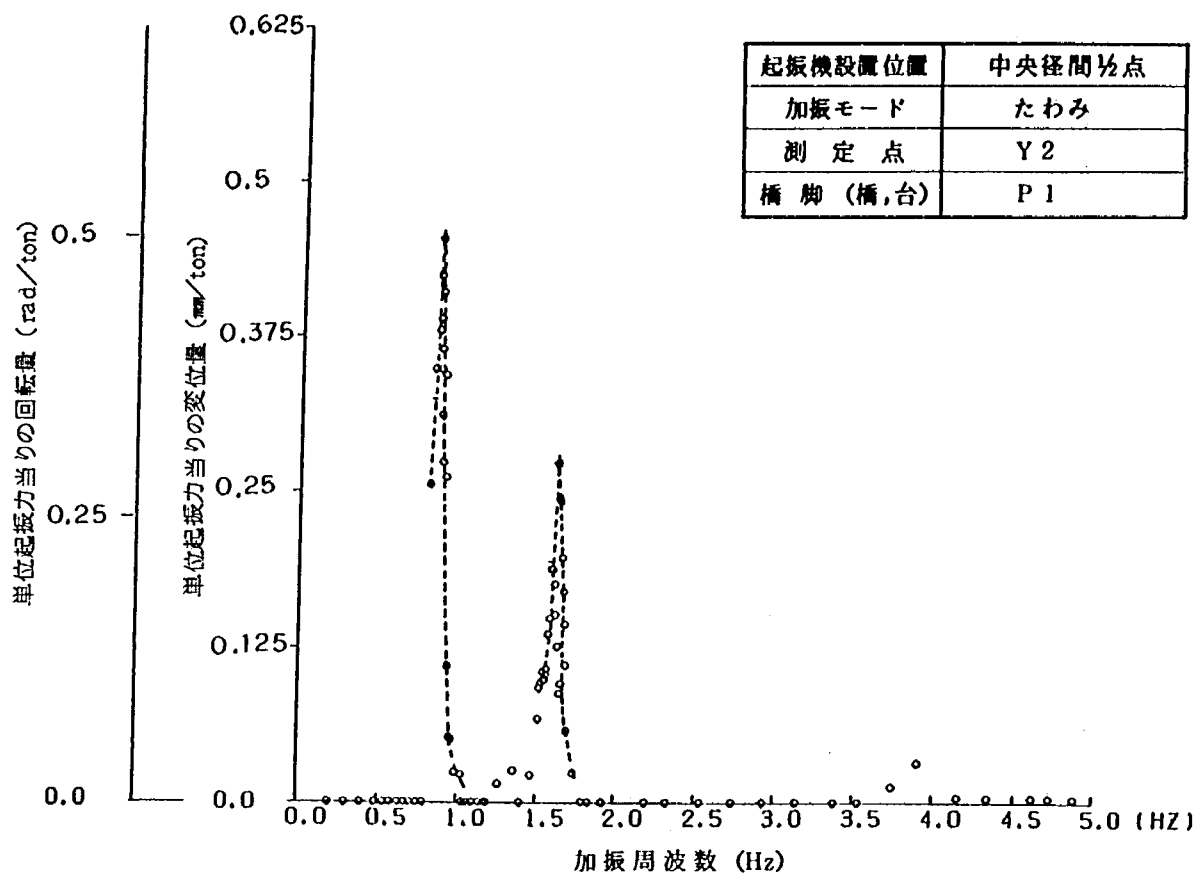
付図－４ 自然風による桁の応答加速度波形



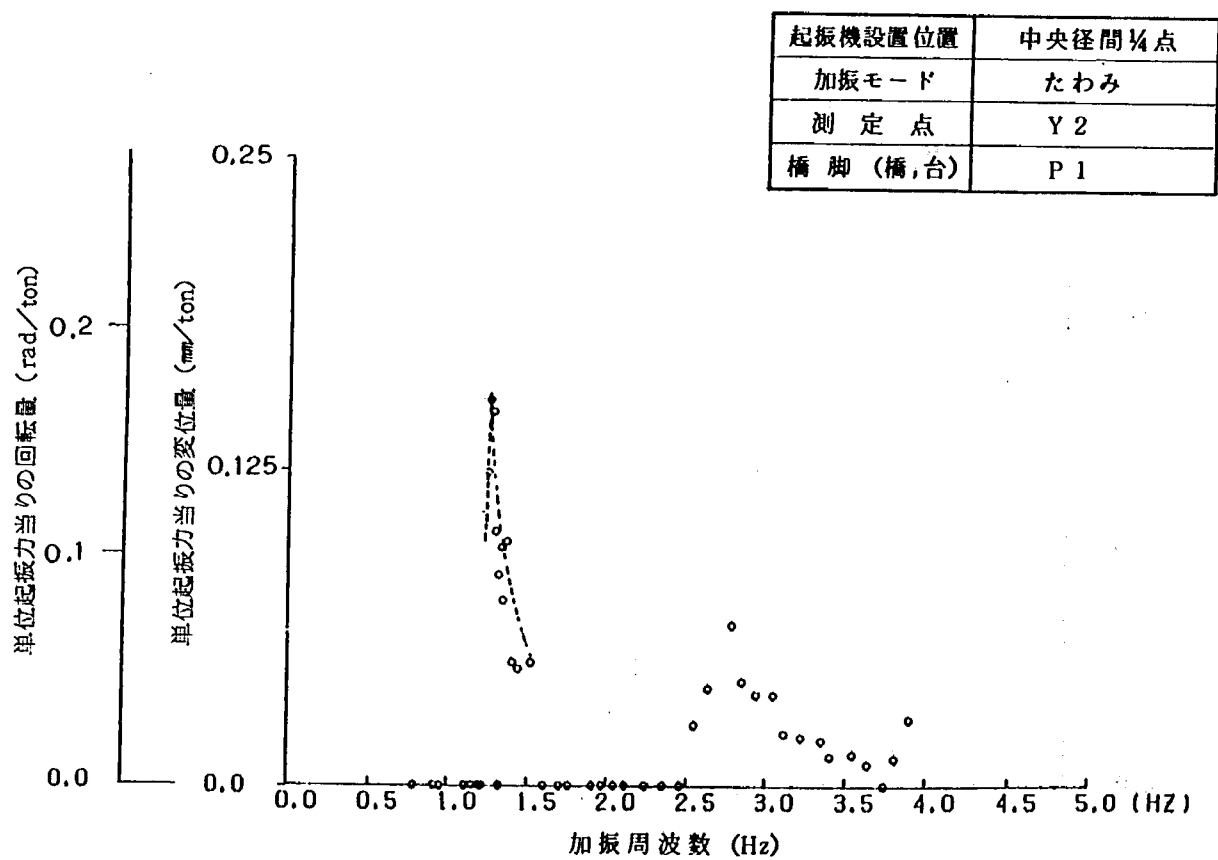
付図-5.1.1 起振機加振による支承移動量の共振曲線



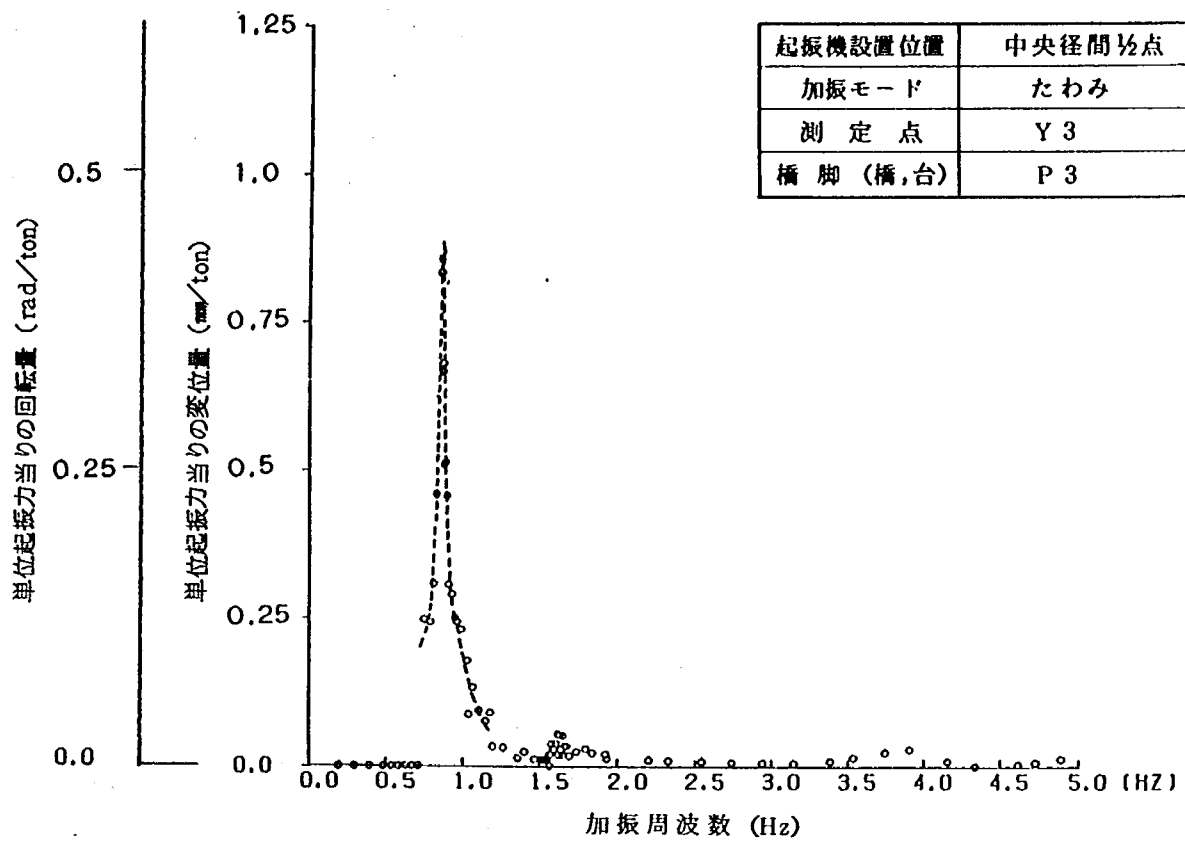
付図-5.1.2 起振機加振による支承移動量の共振曲線



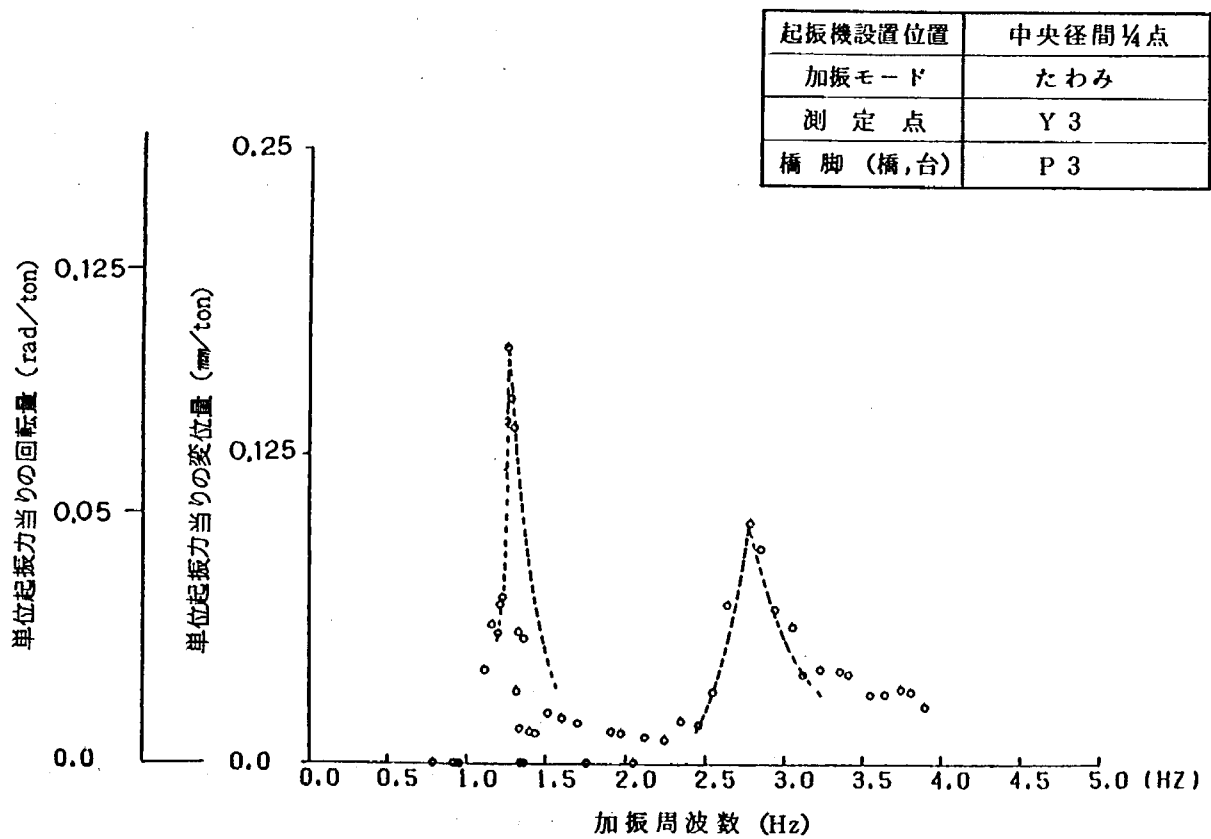
付図- 5. 2. 1 起振機加振による支承移動量の共振曲線



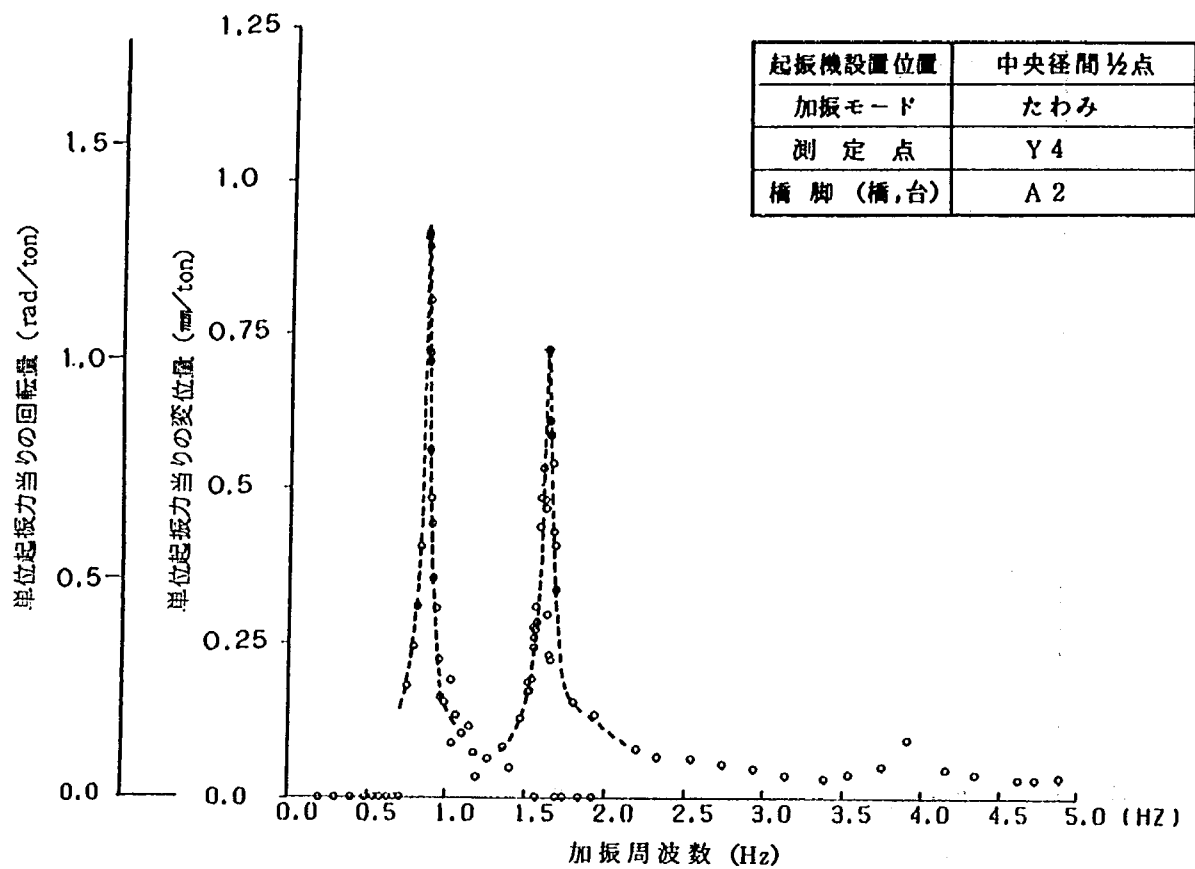
付図- 5. 2. 2 起振機加振による支承移動量の共振曲線



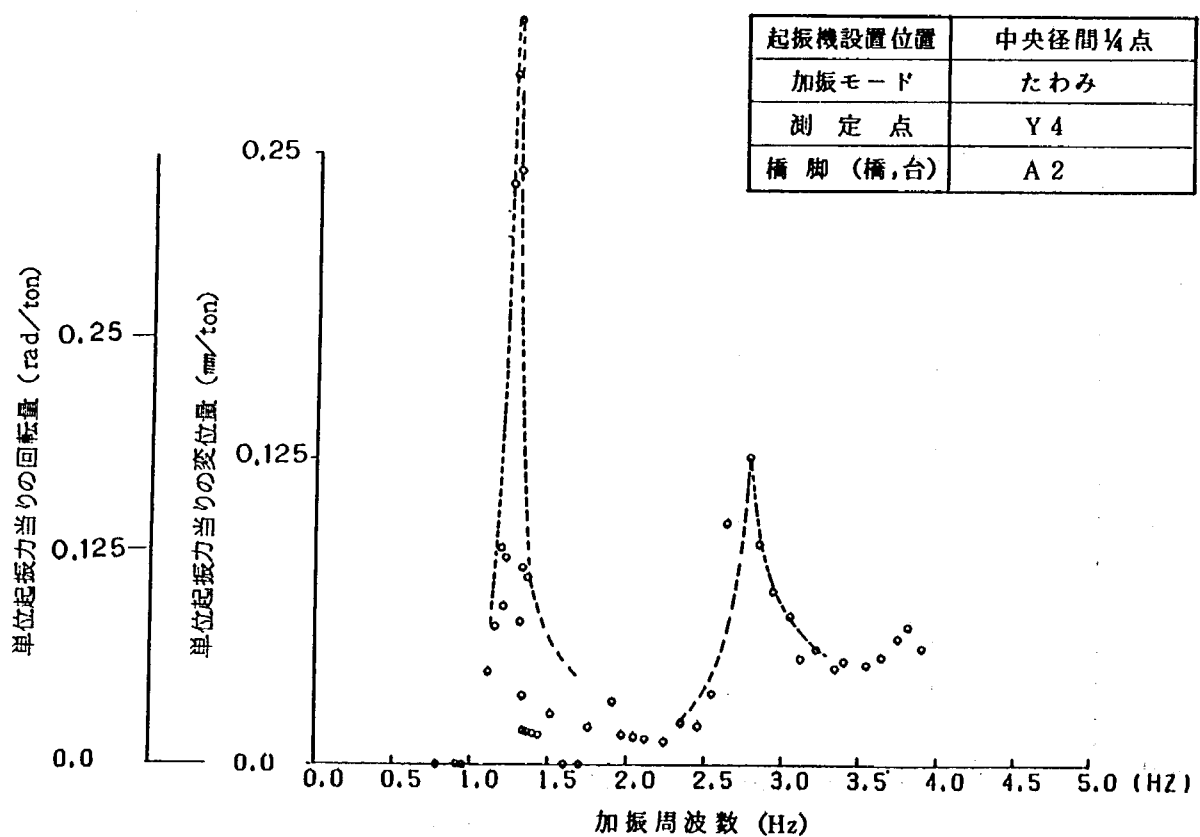
付図-5.3.1 起振機加振による支承移動量の共振曲線



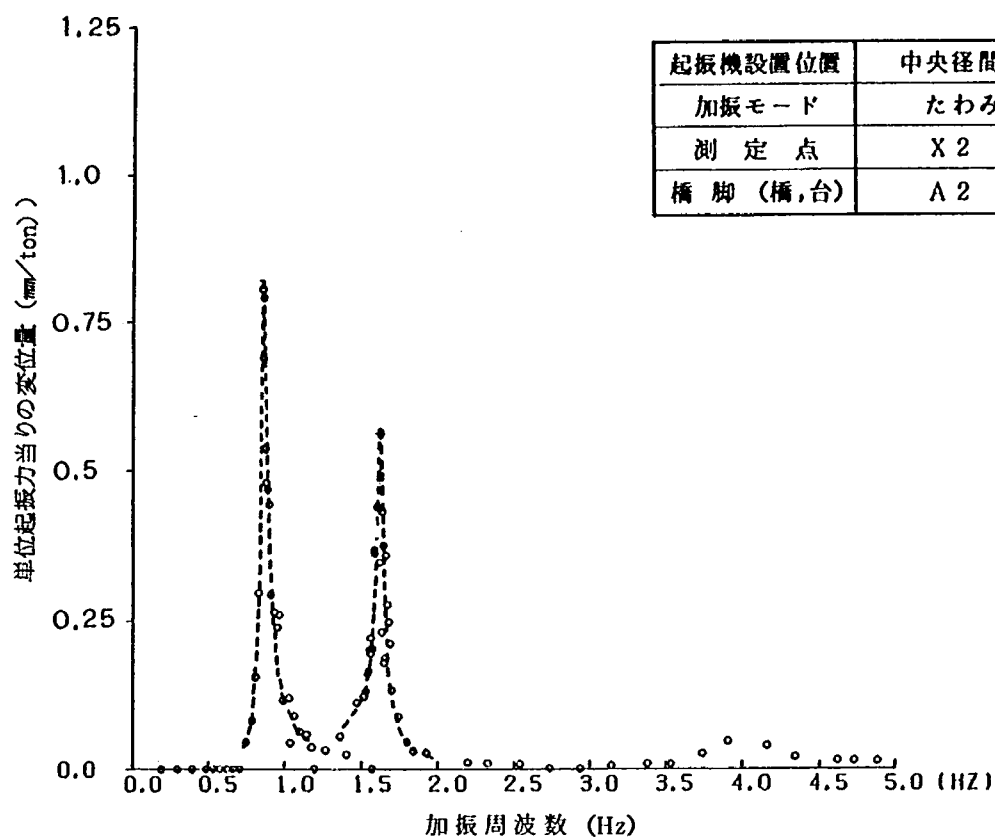
付図-5.3.2 起振機加振による支承移動量の共振曲線



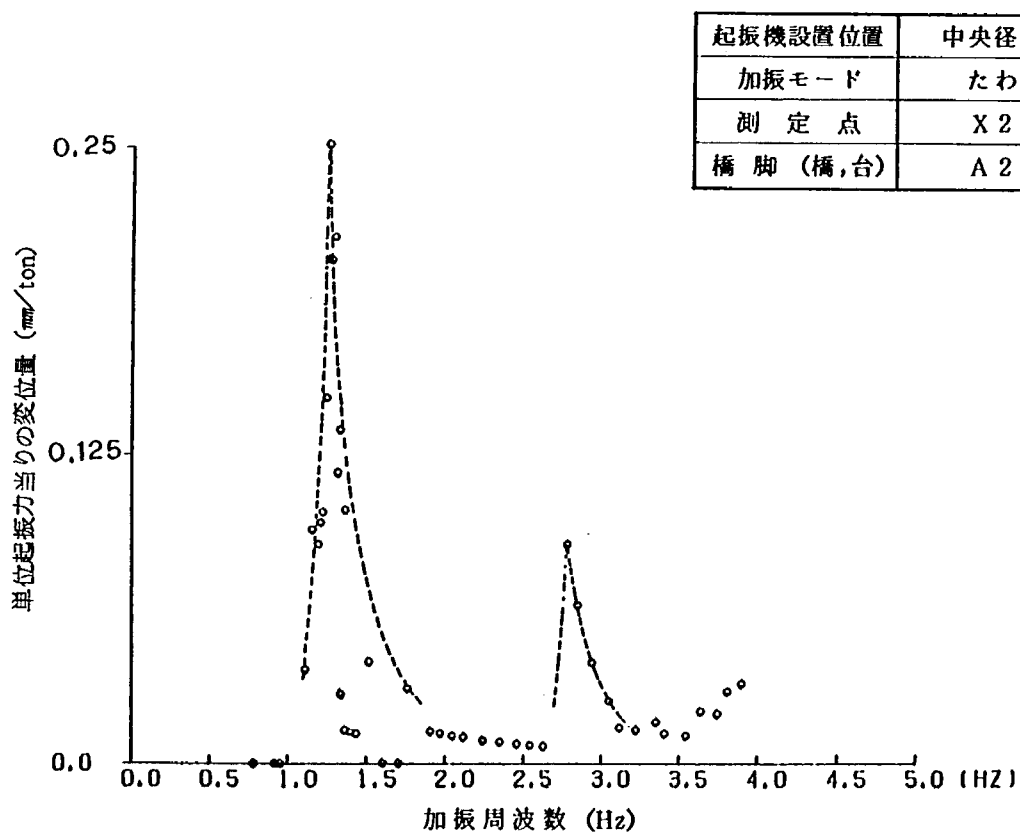
付図- 5. 4. 1 起振機加振による支承移動量の共振曲線



付図- 5. 4. 2 起振機加振による支承移動量の共振曲線



付図- 5. 5. 1 起振機加振による支承移動量の共振曲線



付図- 5. 5. 2 起振機加振による支承移動量の共振曲線

日守大橋振動実験報告書

ISSN 0386-5878
土研資料第2251号
昭和60年9月(1985)
建設省土木研究所

要 旨 伊豆中央道日守大橋において箱桁橋の構造特性の調査する目的で、起振機実験ならびに自然風による不規則振動の計測を行った。その結果、固有振動、固有振動モードが求まり、構造減衰が対数減衰率で0.07以上であることが判明した。また、支承や橋脚の動きを計測し、桁の振動特性に与える影響について考察した。

キーワード：箱桁橋，起振機実験，構造減衰



郵便はがき

四
十
円
切
手
を
は
い。
さ

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

構造研究室 御中

No. 4

No. 4

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2251 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印