

關東地方建設局依頼研究

I S S N 0386—5878

土 研 資 料 第1649号

土 木 研 究 所 資 料

一般国道51号成田橋動的載荷試験報告書

昭和56年 2 月

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室

Copyright © 55年度 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 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

まえがき

成田橋は、一般国道51号が千葉県成田市内において一級河川根本名川と交差する位置に、建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所が架設した橋長178.9mの橋梁であり、支間長97.3mの単弦ローゼ橋とPCポステン桁橋4連とで構成されている。

単弦ローゼ橋は、単一箱桁もしくは格子桁を、中央分離帯上に配置した1本のアーチリブにより補剛した型式である。このような型式を有する本格的な道路橋としては、我が国では2橋を数えるのみであり、世界にも例の少ない橋梁型式といえよう。

当研究室は建設省関東地方建設局からの依頼により、本橋の動的載荷試験を供用開始直前に実施したが、その結果本橋の動特性（固有振動数、固有振動モード、および構造減衰の大きさ）に関する貴重な資料を得ることができたので、ここにそれらの成果をとりまとめて報告する。

なお、今回の動的載荷試験の実施および報告書のとりまとめにあたり、多くの方々の援助と協力を受けた。計画の当初より格別な御尽力をいただいた建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所の諸氏、実験の実施と資料の解析に御助力いただいた新日本技研株式会社および日本鋼管株式会社の諸氏に深く感謝いたします。

昭和56年2月

建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室

室長 山本 邦夫

研究員 桂 樹正隆

技官 江本 勝

技官 湯沢 聡

目 次

まえがき

第1章	動的載荷試験の目的	1
1.1	成田橋の概要	1
1.2	動的載荷試験の目的	1
第2章	試験計画	3
2.1	励振方法	3
2.2	測定項目および試験方法	4
2.3	計測方法	4
第3章	試験結果	8
3.1	記録の整理方法	8
3.2	固有振動数	8
3.3	固有振動モード	9
3.4	構造減衰の大きさ	9
第4章	固有振動数および固有振動モードの数値解析	65
4.1	5本主桁モデル	65
4.2	3本主桁モデル	72
4.3	平面モデル	72
第5章	考察	81
5.1	動的載荷試験結果について	81
5.2	構造モデルの妥当性について	82
第6章	他のアーチ系橋梁との比較	84
6.1	泉大津大橋	84
6.2	一般のアーチ橋について	84
第7章	結論	85

第1章 動的載荷試験の目的

1.1 成田橋の概要

成田橋は単弦ローゼ橋とPCポステン桁橋4連とで構成される橋梁であるが、今回の動的載荷試験の対象としたのは単弦ローゼ橋である。その一般図を図-1.1、1.2に示し、本橋の主要事項を以下に紹介する。

事業主体	：	建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所
道路規格	：	第3種第1級
設計速度	：	80km/h
車線数	：	4車線
幅員	：	車道部 0.5+2@3.5+0.25+3.75+0.25+2@3.5+0.5 m 歩道部 2.50m×2
橋格	：	1等橋 (TL-20)
路面線形	：	R=1200 (1部クロソイド含む)
橋長	：	98.8m (支間長97.3m)
斜角	：	河川との交角 約35° 橋梁 直橋
上部工	：	単弦ローゼ橋
下部工	：	RC逆T式橋脚 RC場所打杭 (ベント工法)

1.2 動的載荷試験の目的

まえがきにも述べたように、本橋は世界に例の少ない橋梁型式である。したがって、本橋を安全かつ合理的なものとするために、その設計段階において種々の検討が実施されているが、本橋の解析にあたって設定した幾つかの仮定や使用したモデルの妥当性を検討するため、本橋の設計業務では模型桁を用いた載荷試験も合わせて実施されているが、竣工後の実橋に対してその構造特性を把握し、設計で期待した通りの特性を有するかどうかを確認することが特に重要となろう。

本試験は、本橋の動特性を明確にすることによってその安全性を検証するとともに、今後同型式橋梁の設計を実施するにあたって、その基礎資料を提供することを目的として実施したものである。なお、静的な構造特性を把握するための静的載荷試験が当研究所の橋梁研究室の担当で実施されたことを付記しておく。

第2章 試験計画

2.1 励振方法

橋梁の動的な特性を把握する試験では、なんらかの方法により構造物を加振する必要がある。これまでに用いられている方法には、

- i) 起振機による正弦加振
- ii) ロケット噴射による衝撃的加振
- iii) 一般交通車両、あるいは自然風によるランダム加振

等がある。

今回の試験では、大きさが既知な一定周期の加振力が得られる i) の方法を用いることとした。使用した起振機は、当研究室所属の15ton 2連式起振機である。

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としての周期力を得るものであり、その起振力（1台当り）は次式で与えられる。

$$F = \frac{W \cdot r}{g} \cdot (2\pi f)^2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{45}{100} \cdot x\right)^\circ \dots\dots\dots (2.1)$$

F : 起振力 (kg)

g : 重力加速度 (=9.8m/sec²)

W : 不均衡重錘の重量
r : 回転半径

} W · r = 37.5kg · m

f : 加振周波数 (1/sec)

x : 起振力調整目盛の値 (0 ~ 100の間で連続可変)

この起振機は以下に記す特徴を有している。

- i) 2連式であり、2台共全く同じ性能を備えているため、両者をシャフトを介して連結することにより、同一回転数、同一起振力で同位相あるいは逆位相での励振が可能である。したがって、2台を橋軸から等しい距離に据え付け、同位相加振により鉛直たわみ振動を、また逆位相加振によりねじれ振動を発生させることができる。
- ii) 起振機運転中に起振力を最大から零の範囲で任意に選択できるため、適切な加振力を得ることができる。
- iii) 任意の振動数で運転中に起振力を最大から零まで約10秒以内に急速に遮断できるので、構造物に自由減衰振動を発生させることができる。

本試験では起振機を図-2.1、2.2に示すように、橋軸方向には支間のほぼ中央もしくは1/4地点（吊材位置との関係で正確な1/2点、1/4点ではない）に、なおかつ横断方向には橋梁の中心線より両側に6.105mの位置に設置し、それぞれの位置でたわみ加振およびねじれ加振を行った。したがって、起振機

の運転は次の4種類に区別される。

- i) ½点たわみ加振
- ii) ½点ねじれ加振
- iii) ¼点たわみ加振
- iv) ¼点ねじれ加振

2.2 測定項目および試験方法

動的載荷試験の測定項目は次の3項目である。

- i) 固有振動数
- ii) 固有振動モード
- iii) 構造減衰の大きさ

起振機の振動数を変化させて構造物を加振した場合、その応答量が極大値を示す振動数として共振振動数が求められる。この振動数は、起振機の重量(約5 ton)が構造物の重量(鋼重のみで約1,100 ton)に比して無視できるほど小さいため、構造物の固有振動数と考えて差しつかえない。また、共振振動数で振動中の構造物各部の応答量を連ねて図化することにより固有振動モードが得られる。さらに、共振振動数で振動中に起振力を急速に遮断し、その後に発生する自由減衰振動を観測することにより構造減衰の大きさを求めることができる。

2.3 計測方法

(1) 応答量の計測方法

前述の3項目の測定のためには加振時の橋梁の応答量を計測すればよいこととなる。一般にこのような動的な応答は変位、振動速度、振動加速度で計測されることが多いが、本試験では測器として、

- i) 低振動数領域での応答特性に優れていること、
- ii) 微小振動を正確に測定できること、
- iii) 設置および取り扱いが容易であること、

等の特徴を有する測器としてサーボ型加速度計を用い、橋梁各部の応答量として振動加速度を計測することとした。

(2) 加速度計の配置

橋梁各部の応答量を計測するための加速度計の配置は図-2.3、2.4に示す位置とした。なお、図中の数字は測点番号を表わす。これらの配置は以下の諸点を考慮して決定したものである。

- i) 加速度計は最大24台まで使用可能である。
- ii) 試験中の加速度計の移動は避ける。したがって固有振動モードの把握が1度に行える配置とすることがある。
- iii) 起振機自身から発生する高周波数の振動の影響を極力受けないう、起振機と反対側に多く

配置するのが望ましい。

iv) ねじれ振動の応答値は橋梁中心線から離れる程大きくなり、その計測が容易となる。

v) アーチ部材には鉛直方向および水平方向の振動が発生するので、両方向に加速度計を配置する必要がある。

(3) 記録の収録方法

加速度計からの信号は専用増巾器で増巾され、加速度量に比例した電圧として出力される。この電圧出力は2台のデータレコーダに記録するとともに、同時に再生出力をシンクロスコープおよびペン書きレコーダを用いてモニターすることにより、記録収録の万全を期した。

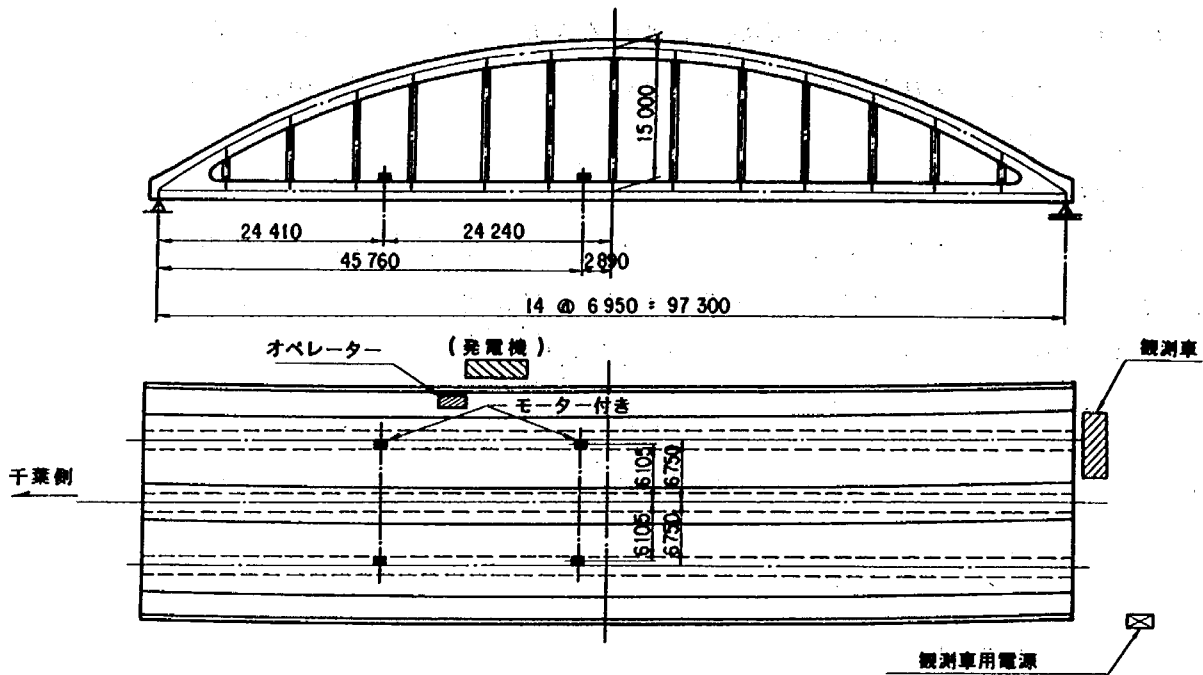


図-2.1 起振機設置位置図

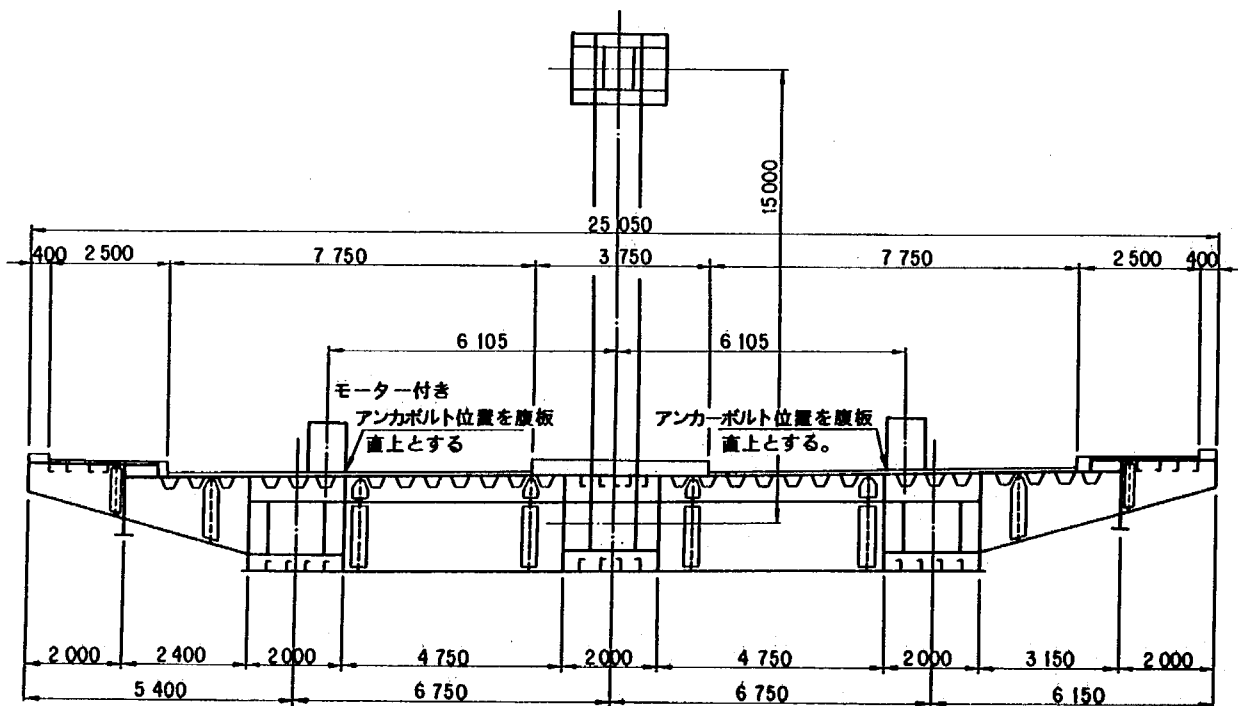


図-2.2 起振機設置位置図

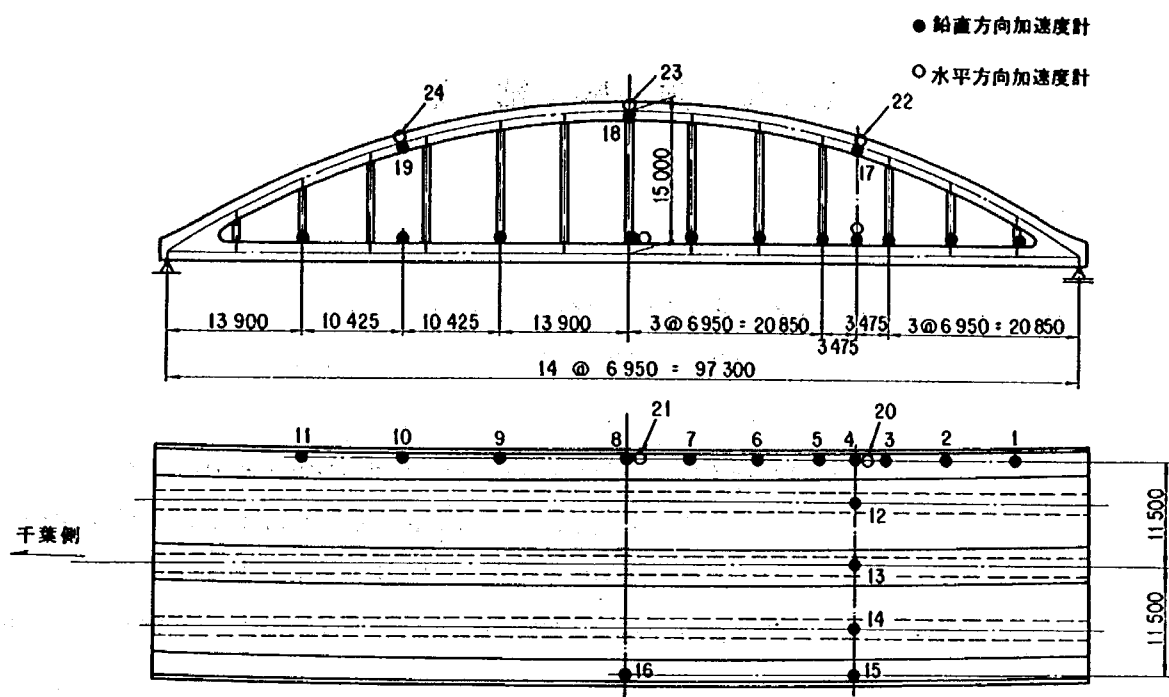


図-2.3 加速度計配置図

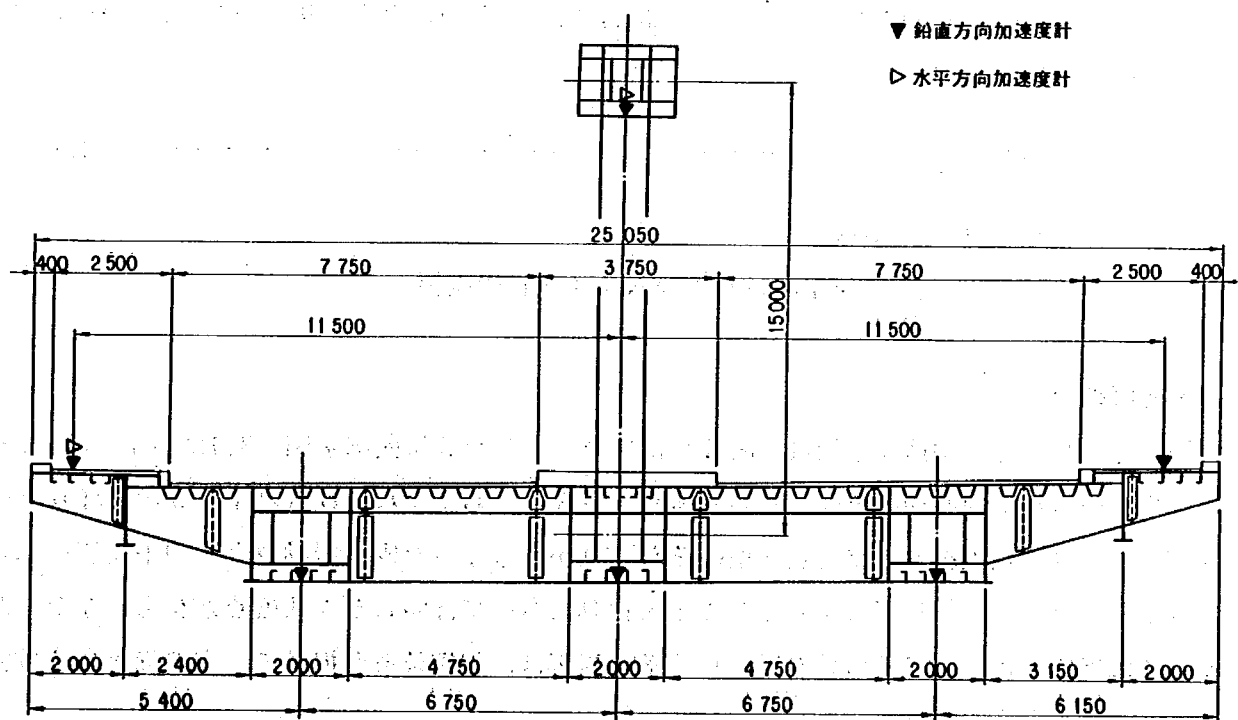


図-2.4 加速度計横断面内配置図

第3章 試験結果

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、

- i) 起振機操作盤上の加振周波数メータの値（公称値）、
- ii) 起振機の重錘の回転をパルス信号として記録したものより読み取る方法、
- iii) 橋梁各部の応答加速度波形より読み取る方法、

があるが、i)の方法のメータの指示値は指示計器の特性のために加振周波数を中心に左右に変動することが実験中に確認されていたので、記録の整理方法としては ii) もしくは iii)の方法を用いた。また、共振点から離れているために応答加速度が微小である場合に、ii)の結果と iii)の結果が大きく異なる場合があった。その原因は、起振機自身の高周波数の振動が伝えられたものと判断して、振動数は ii)による値を用い、応答加速度は零とした。

式(2.1)から明らかなように、起振力は x の値を一定に保つと加振周波数の2乗に比例して大きくなる。一方、共振振動数を求めるためには同一起振力での応答加速度の極大値を必要とする。そこで各加振振動数別に読み取った橋梁の応答加速度を、起振力1 ton 当りの値（単位起振力当りの応答加速度と称する。）に変換して整理した。

構造減衰の大きさは、共振振動数における自由減衰振動波形から次式に基づいて算出される対数減衰率として表わした。

$$\delta = \frac{1}{N} \cdot \log_e \frac{a_1}{a_{N+1}} \dots\dots\dots (3.1)$$

δ : 対数減衰率

a_1, a_{N+1} : 第1波目および $N+1$ 波目の振幅

3.2 固有振動数

単位起振力当りの応答加速度を加振周波数別にプロットした共振曲線を図-3.1に示す。これらの共振曲線より求められた固有振動数は、たわみ振動1～3次、およびねじれ振動1～3次の計6モードである。表-3.1は $\frac{1}{2}$ 点加振および $\frac{1}{4}$ 点加振のそれぞれから求めた固有振動数とその平均値を示したものである。ただし、 $\frac{1}{2}$ 点加振によるたわみ1次振動においては明らかな共振点が得られなかったため、表中には横線を記入してその旨を示した。その原因は、加振位置が振動モードの節となる位置に接近していたためと考えられる。

表-3.1によると、 $\frac{1}{2}$ 点加振および $\frac{1}{4}$ 点加振から得られた固有振動数は良く一致しており、両者の差は最大で約2%である。このことから、試験結果は十分に信頼しうるものであると判断される。

3.3 固有振動モード

固有振動数における橋梁各部の応答量から描いた固有振動モードを図-3.2に示す。固有振動数と同様に、明確な共振点を得られなかった $\frac{1}{2}$ 点加振のたわみ1次モードは図化を省略した。また、ねじれ3次振動では、アーチ部材のモードが起振機運転中と自由減衰振動中とで異なっていたため、起振機の振動の影響がないと考えられる後者のモードを示した。

3.4 構造減衰の大きさ

各固有振動数における各測定点での対数減衰率を表-3.2に示す。振動振幅が小さく対数減衰率の読み取りが不可能なものは横線を記入した。

この結果より、主桁およびアーチ部材ごとに全測点の対数減衰率の平均値を、各固有振動数別に整理したものが表-3.3である。表中には共振曲線から求めた値も記入したが、これについては第5章で詳述する。また、たわみ振動3次の平均値欄に2つの値が示されているが、これは $\frac{1}{2}$ 点加振と $\frac{1}{4}$ 点加振の結果が他のモードに比して大きく異なったために、そのそれぞれについて平均値を算出したものである。

表-3.1 固有振動数一覧表

単位: Hz

	た わ み 振 動			ね じ れ 振 動		
	1/2点加振	1/4点加振	平 均 値	1/2点加振	1/4点加振	平 均 値
1 次	—	1.722	1.722	1.120	1.118	1.119
2 次	1.980	1.996	1.988	2.667	2.648	2.658
3 次	3.898	3.839	3.867	4.569	4.594	4.582

表-3.2(1) 主桁の対数減衰率 (1/2点加振、たわみ振動)

次数		鉛 直 方 向															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	a_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	a_{n+1}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	δ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	a_1	5.0	9.4	13.5	15.3	17.3	19.1	21.3	19.7	16.0	7.8	5.7	16.3	14.6	15.4	16.5	14.6
	a_{n+1}	2.4	4.6	6.7	7.7	8.8	9.5	10.5	10.0	8.0	4.0	2.6	8.0	7.0	7.7	8.0	9.8
	δ	0.041	0.040	0.039	0.038	0.038	0.039	0.039	0.038	0.039	0.037	0.044	0.040	0.041	0.039	0.040	0.022
3	a_1	11.8	16.7	15.0	11.5	—	4.0	13.0	16.0	7.5	11.7	18.2	9.9	6.5	7.9	9.5	11.9
	a_{n+1}	3.2	4.0	3.6	2.8	—	1.0	3.2	3.8	2.5	3.9	5.9	2.9	1.4	1.5	1.6	1.9
	δ	0.163	0.179	0.178	0.177	—	0.173	0.175	0.180	0.137	0.137	0.141	0.153	0.192	0.208	0.223	0.229

表-3.2(2) 主桁の対数減衰率 (1/4点加振、たわみ振動)

次数		鉛 直 方 向															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	a_1	8.0	13.5	16.7	16.4	16.9	12.1	15.1	5.7	16.3	15.5	16.0	17.0	28.3	30.8	32.0	4.3
	a_{n+1}	3.0	5.0	6.1	6.0	6.2	4.2	5.2	2.5	7.5	6.8	6.9	6.6	11.0	11.7	12.0	2.0
	δ	0.054	0.055	0.056	0.056	0.056	0.059	0.059	0.046	0.043	0.046	0.047	0.053	0.052	0.054	0.054	0.043
2	a_1	7.0	12.9	18.9	21.2	23.8	13.4	14.8	13.5	19.0	9.4	6.5	19.2	9.6	10.4	11.0	13.0
	a_{n+1}	3.6	7.0	10.3	11.4	12.9	7.0	8.0	7.1	10.9	5.2	3.8	10.5	5.0	5.4	5.9	6.9
	δ	0.037	0.034	0.034	0.034	0.034	0.036	0.034	0.036	0.031	0.033	0.030	0.034	0.036	0.036	0.035	0.035
3	a_1	10.8	15.5	14.4	11.2	7.0	3.5	12.0	13.5	—	9.5	15.0	10.4	7.0	8.0	10.0	11.6
	a_{n+1}	3.0	4.0	4.0	3.5	2.4	2.0	3.0	3.4	—	2.4	3.7	2.7	1.2	1.5	2.0	2.0
	δ	0.071	0.075	0.071	0.065	0.060	0.047	0.077	0.077	—	0.076	0.078	0.075	0.099	0.093	0.089	0.098

表-3.2(3) 主桁の対数減衰率 (1/2点加振、ねじれ振動)

次数		鉛 直 方 向															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	a_1	4.3	7.8	10.8	12.0	13.7	15.9	17.8	17.3	14.1	8.7	7.0	6.8	—	9.2	15.0	21.3
	a_{N+1}	2.7	4.3	5.9	6.3	6.8	8.0	9.3	9.0	7.7	4.6	3.8	3.5	—	4.8	8.3	11.3
	δ	0.026	0.033	0.034	0.036	0.039	0.038	0.036	0.036	0.034	0.035	0.034	0.037	—	0.036	0.033	0.035
2	a_1	7.7	12.1	15.0	15.0	14.5	11.3	6.6	—	13.8	14.4	14.9	10.3	—	20.6	12.8	—
	a_{N+1}	3.7	5.7	7.0	7.2	6.8	5.9	3.5	—	7.0	7.3	7.4	5.3	—	10.6	5.8	—
	δ	0.041	0.042	0.042	0.041	0.042	0.036	0.035	—	0.038	0.038	0.039	0.037	—	0.037	0.044	—
3	a_1	17.0	11.9	10.9	8.5	7.3	4.6	9.7	11.8	6.7	11.9	13.3	11.1	—	14.6	9.0	12.2
	a_{N+1}	10.2	7.0	6.5	5.1	4.4	2.5	5.7	7.0	3.9	5.2	7.7	7.5	—	8.8	5.3	7.5
	δ	0.028	0.030	0.029	0.028	0.028	0.034	0.030	0.029	0.030	0.046	0.030	0.022	—	0.028	0.029	0.027

表-3.2(4) 主桁の対数減衰率 (1/4点加振、ねじれ振動)

次数		鉛 直 方 向															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	a_1	5.3	9.2	12.2	14.0	15.5	7.3	8.1	7.8	11.2	7.1	13.8	12.2	—	7.2	11.8	15.8
	a_{N+1}	2.9	4.6	6.1	6.8	7.7	3.5	3.9	3.8	5.5	3.8	6.9	5.5	—	3.6	5.7	8.3
	δ	0.034	0.039	0.039	0.040	0.039	0.041	0.041	0.040	0.040	0.035	0.039	0.044	—	0.039	0.040	0.036
2	a_1	8.5	13.5	16.1	16.9	16.9	13.1	7.8	—	15.7	16.4	17.0	12.8	2.2	13.8	24.0	—
	a_{N+1}	4.2	7.0	8.3	8.7	8.6	6.5	4.0	—	8.0	8.3	8.8	6.2	1.6	6.9	12.3	—
	δ	0.039	0.037	0.037	0.037	0.038	0.039	0.037	—	0.038	0.038	0.037	0.040	0.018	0.039	0.037	—
3	a_1	12.8	17.7	16.5	13.0	20.0	9.5	14.5	18.0	18.0	10.8	21.2	17.1	—	10.5	20.6	9.5
	a_{N+1}	6.1	8.0	6.8	5.4	7.8	5.9	6.8	8.0	9.0	5.5	9.9	7.1	—	4.7	8.9	4.6
	δ	0.041	0.044	0.049	0.049	0.052	0.027	0.042	0.045	0.039	0.038	0.042	0.049	—	0.045	0.047	0.040

表-3.2(5) 主桁の水平方向対数減衰率

次 数		水 平 方 向							
		1/2点 たわみ		1/4点 たわみ		1/2点 ねじれ		1/4点 ねじれ	
		20	21	20	21	20	21	20	21
1	a_1	—	—	—	—	3.3	3.7	—	—
	a_{N+1}	—	—	—	—	1.6	1.9	—	—
	δ	—	—	—	—	0.040	0.037	—	—
2	a_1	—	0.8	—	—	2.8	—	4.6	—
	a_{N+1}	—	0.6	—	—	1.5	—	2.5	—
	δ	—	0.016	—	—	0.035	—	0.034	—
3	a_1	—	—	—	—	—	5.1	—	4.8
	a_{N+1}	—	—	—	—	—	2.9	—	2.3
	δ	—	—	—	—	—	0.031	—	0.041

表-3.2(6) アーチリブの対数減衰率 (たわみ振動)

次 数		1/2点 たわみ						1/4点 たわみ					
		鉛 直 方 向			水 平 方 向			鉛 直 方 向			水 平 方 向		
		17	18	19	22	23	24	17	18	19	22	23	24
1	a_1	—	2.6	1.7	—	—	—	30.0	3.7	34.5	—	—	—
	a_{N+1}	—	0.7	0.7	—	—	—	11.8	1.5	13.3	—	—	—
	δ	—	0.164	0.111	—	—	—	0.052	0.050	0.053	—	—	—
2	a_1	14.0	18.1	23.5	4.5	12.0	5.4	9.2	11.8	15.6	2.8	7.2	4.0
	a_{N+1}	7.2	9.0	12.0	3.0	6.2	3.0	5.0	6.1	8.1	1.7	4.2	1.8
	δ	0.037	0.039	0.037	0.023	0.037	0.033	0.034	0.037	0.036	0.028	0.030	0.044
3	a_1	—	9.0	6.6	—	—	—	7.7	9.2	6.9	—	—	—
	a_{N+1}	—	1.7	1.1	—	—	—	1.7	1.4	1.2	—	—	—
	δ	—	0.208	0.224	—	—	—	0.084	0.105	0.097	—	—	—

表-3.2(7) アーチリブの対数減衰率 (ねじれ振動)

次 数		1/2 ね じ れ						1/4 ね じ れ					
		鉛 直 方 向			水 平 方 向			鉛 直 方 向			水 平 方 向		
		17	18	19	22	23	24	17	18	19	22	23	24
1	a_1	—	—	—	14.9	28.4	12.9	—	—	—	10.0	9.8	9.6
	a_{N+1}	—	—	—	7.3	13.2	6.9	—	—	—	5.0	4.7	4.9
	δ	—	—	—	0.040	0.043	0.035	—	—	—	0.039	0.041	0.037
2	a_1	—	—	—	19.8	—	19.8	—	—	—	11.3	—	11.3
	a_{N+1}	—	—	—	9.8	—	10.5	—	—	—	6.0	—	5.9
	δ	—	—	—	0.039	—	0.035	—	—	—	0.035	—	0.036
3	a_1	—	3.7	—	10.6	18.4	6.9	—	3.0	—	—	7.3	13.0
	a_{N+1}	—	1.8	—	5.8	10.0	4.0	—	1.4	—	—	3.5	3.5
	δ	—	0.040	—	0.034	0.034	0.030	—	0.042	—	—	0.042	0.073

表-3.3 対数減衰率一覧表

		1/2 点 加 振		1/4 点 加 振		平 均 値	共 振 曲 線
		主 桁	ア ー チ	主 桁	ア ー チ		
たわみ振動	1次	—	—	0.049	0.052	0.051	0.055
	2次	0.038	0.038	0.034	0.036	0.037	0.032
	3次	0.176	0.216	0.077	0.095	0.196 (0.086)	0.199
ねじれ振動	1次	0.035	0.039	0.039	0.039	0.038	0.028
	2次	0.039	0.037	0.037	0.036	0.037	0.036
	3次	0.030	0.033	0.043	0.058	0.041	0.048

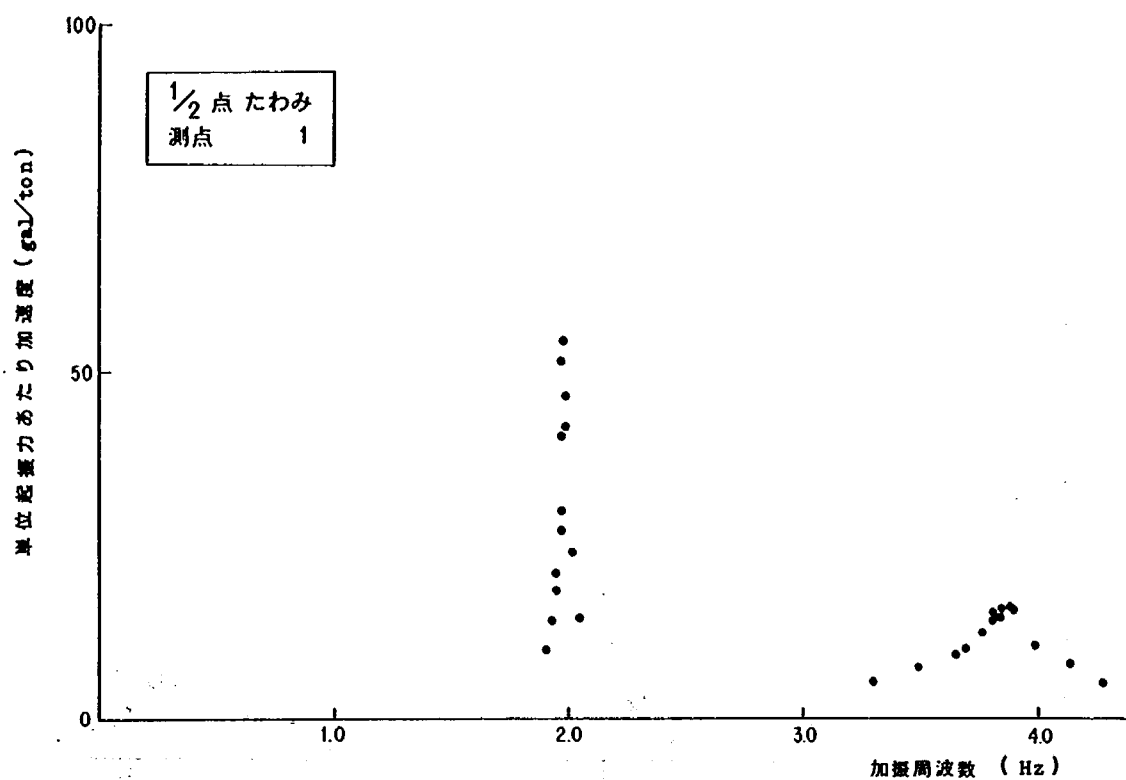


図-3.1(1) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点1)

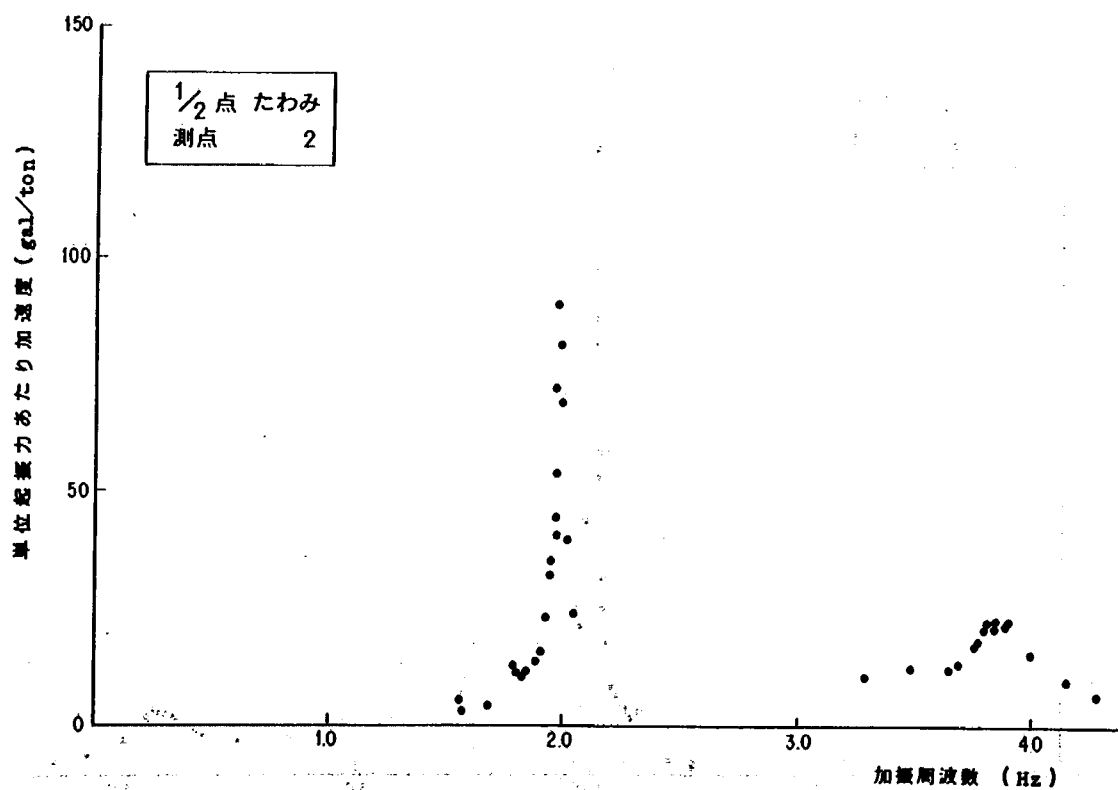


図-3.1(2) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点2)

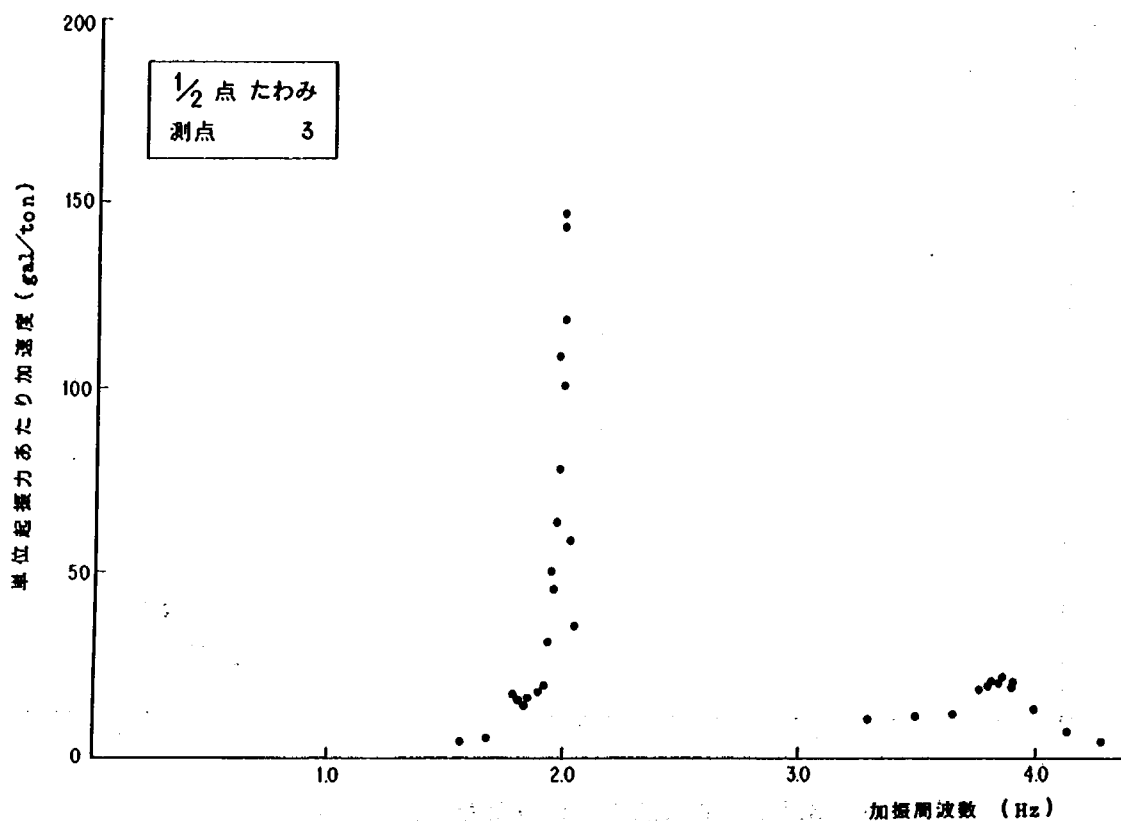


図-3.1(3) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点3)

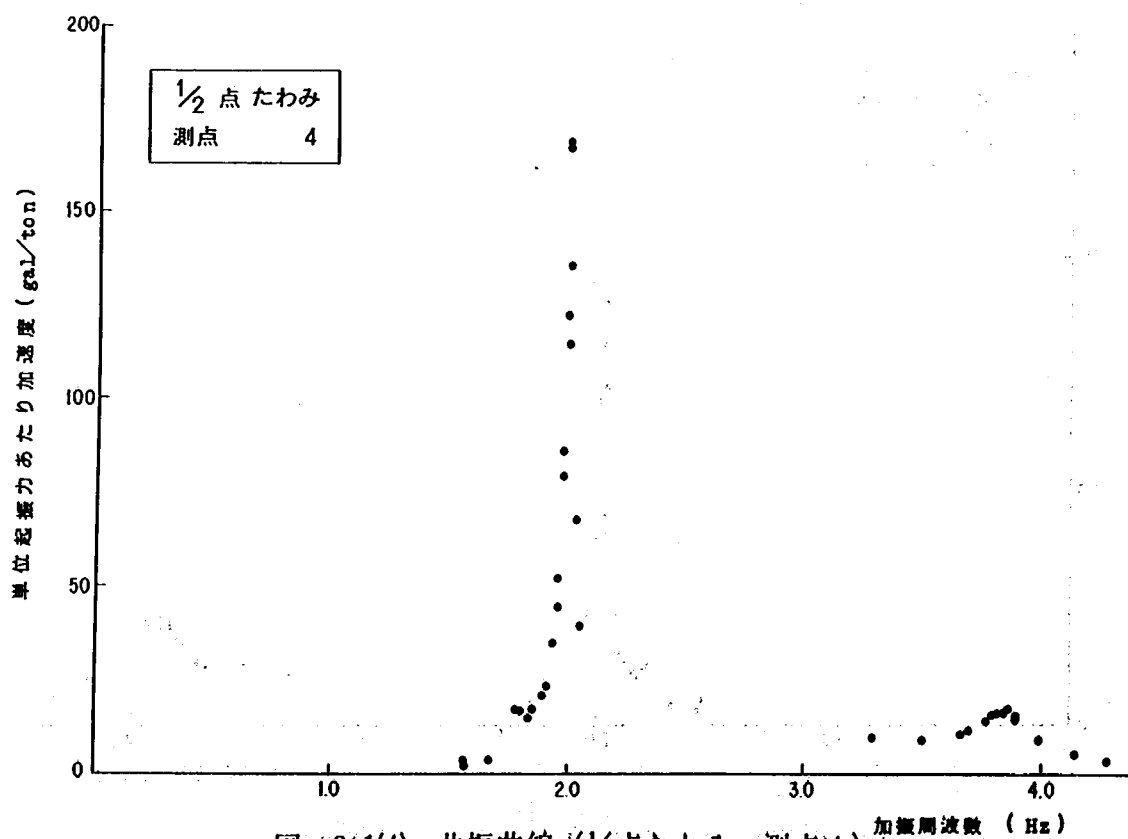


図-3.1(4) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点4)

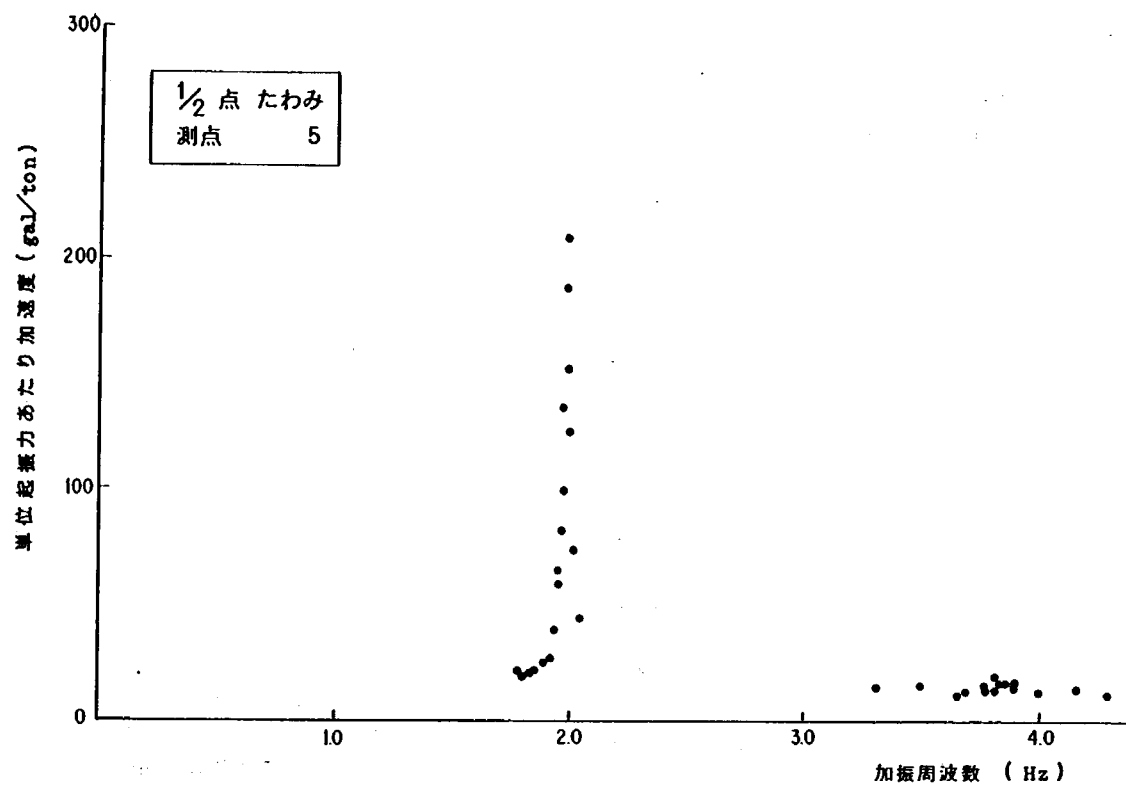


図-3.1(5) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点5)

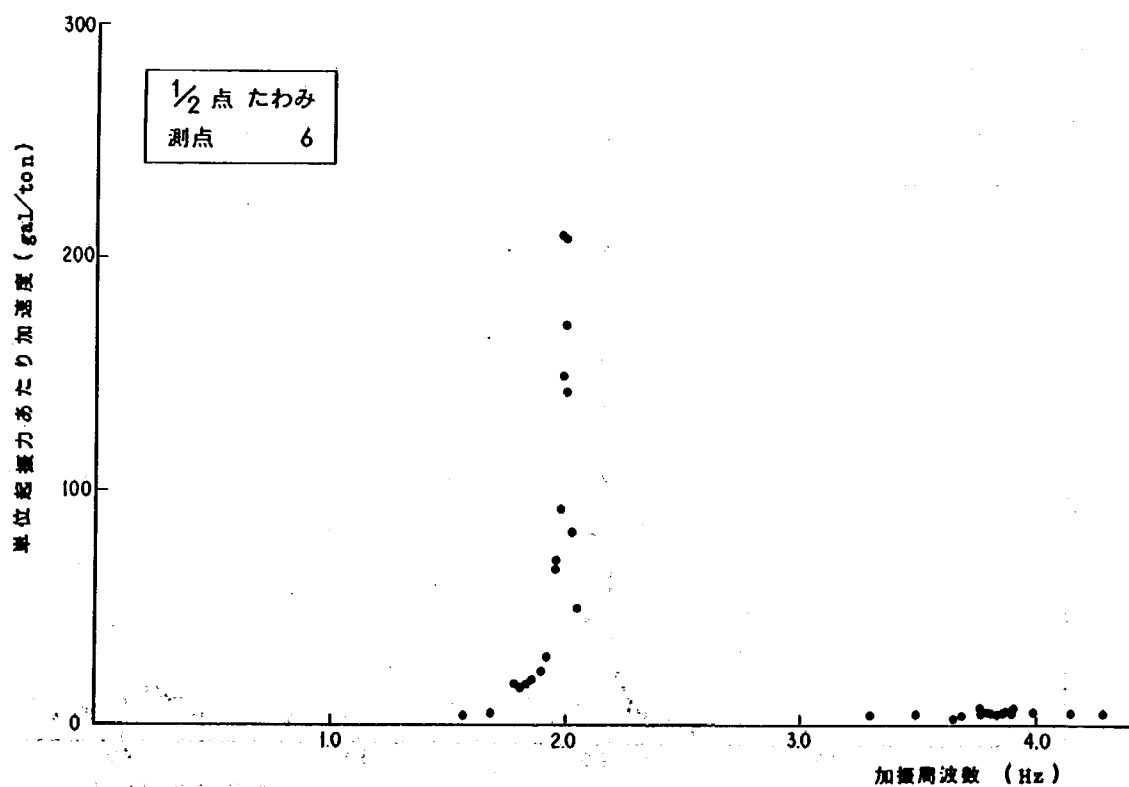


図-3.1(6) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点6)

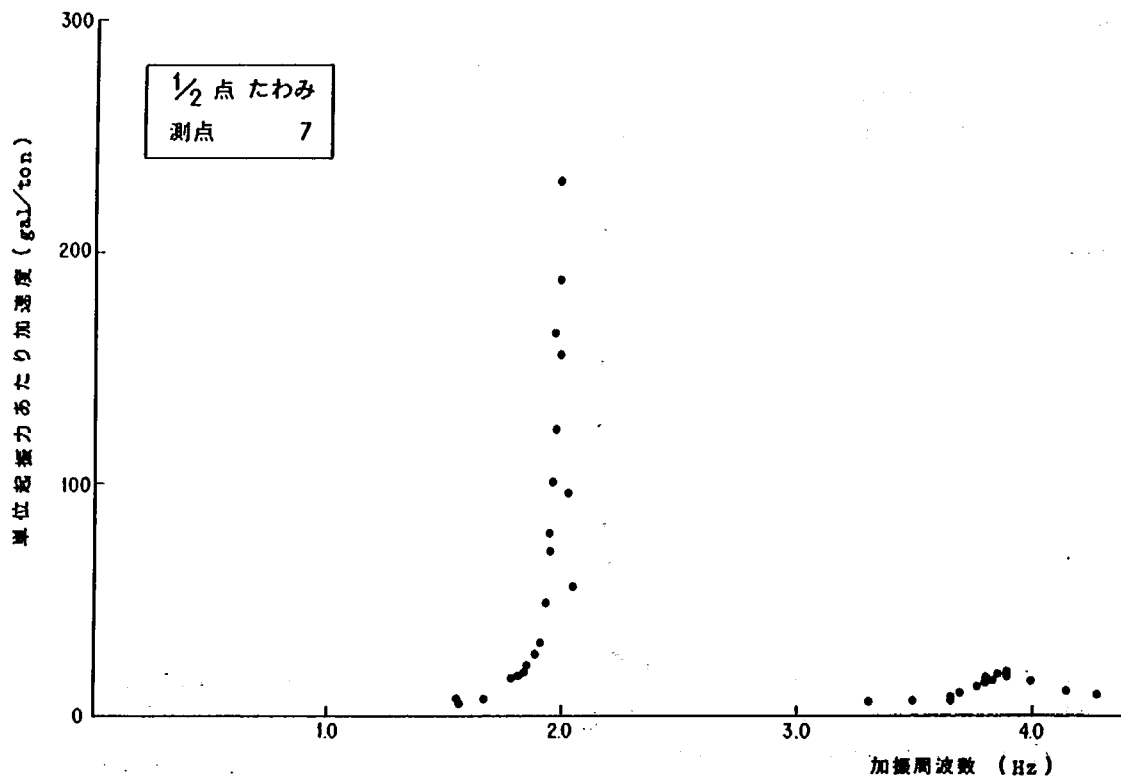


図-3.1(7) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点7)

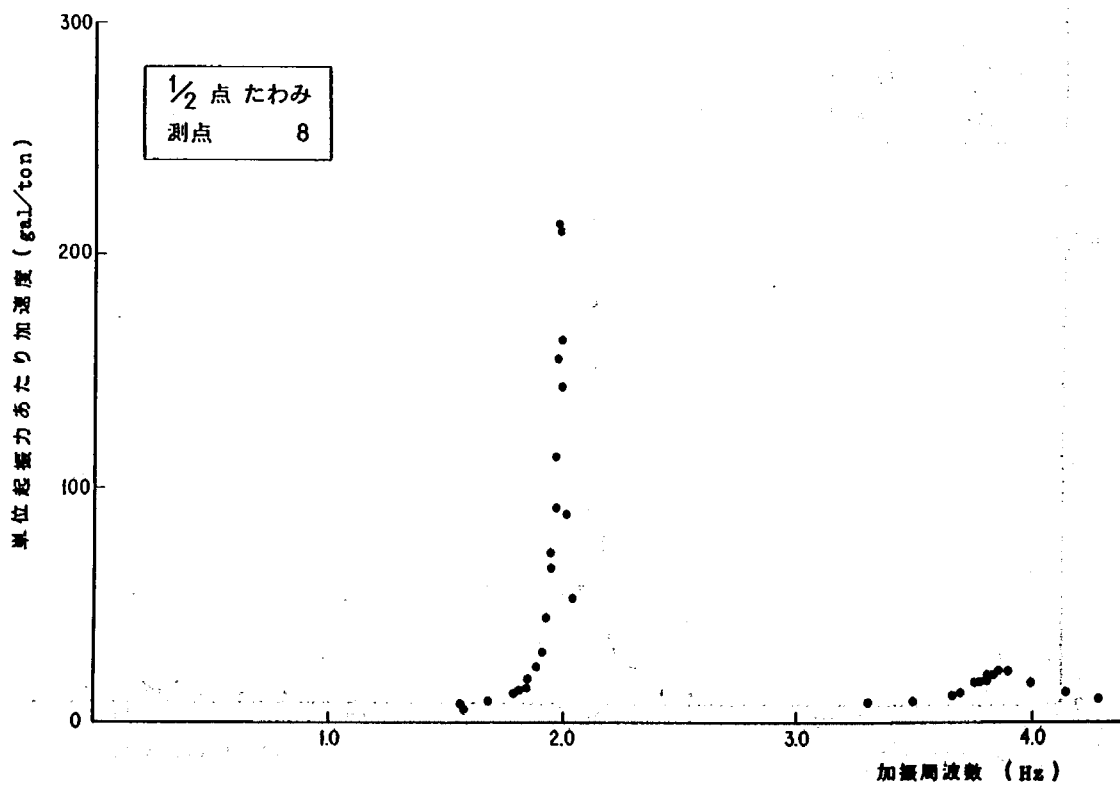


図-3.1(8) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点8)

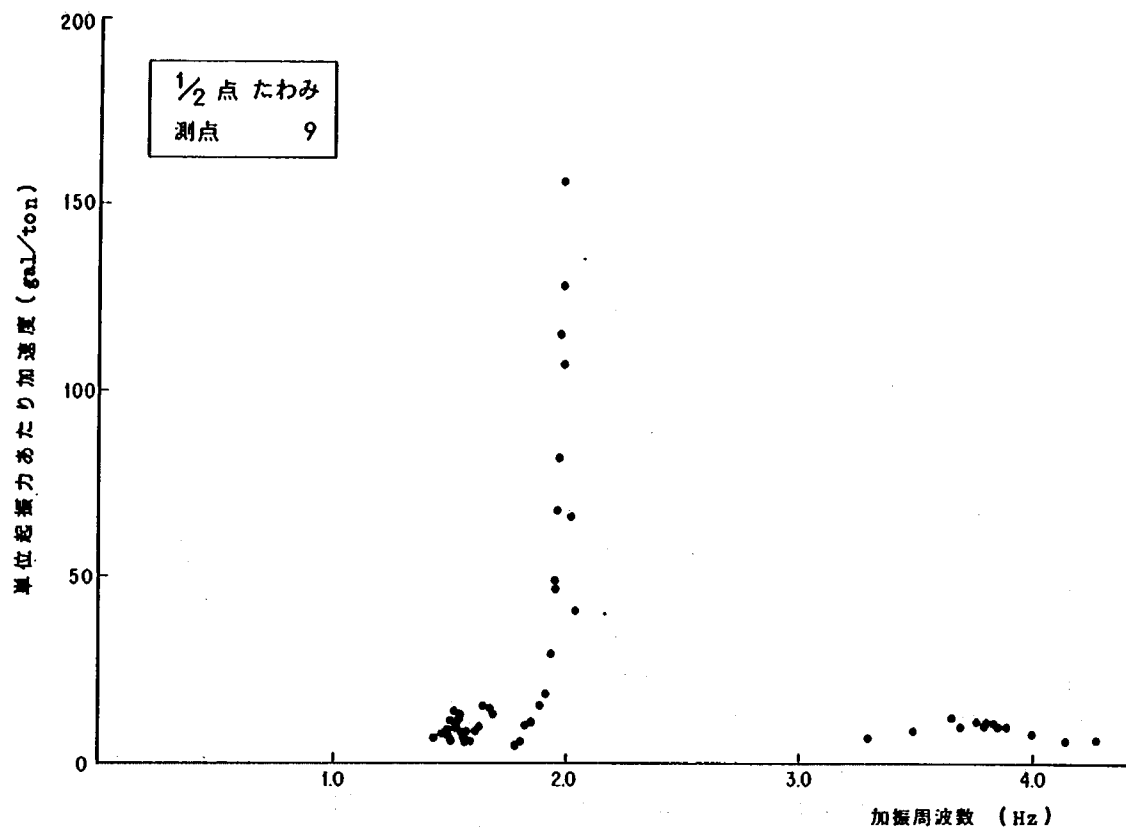


図-3.1(9) 共振曲線 (1/2点たわみ, 測点9)

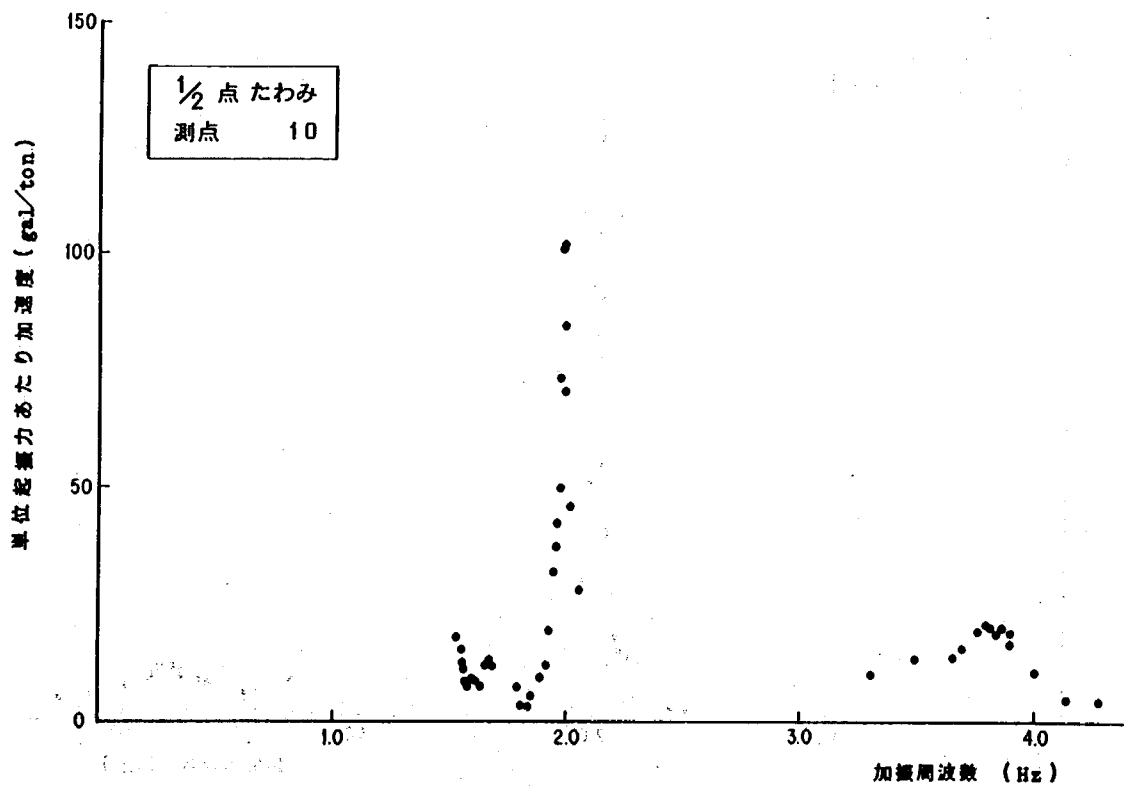


図-3.1(10) 共振曲線 (1/2点たわみ, 測点10)

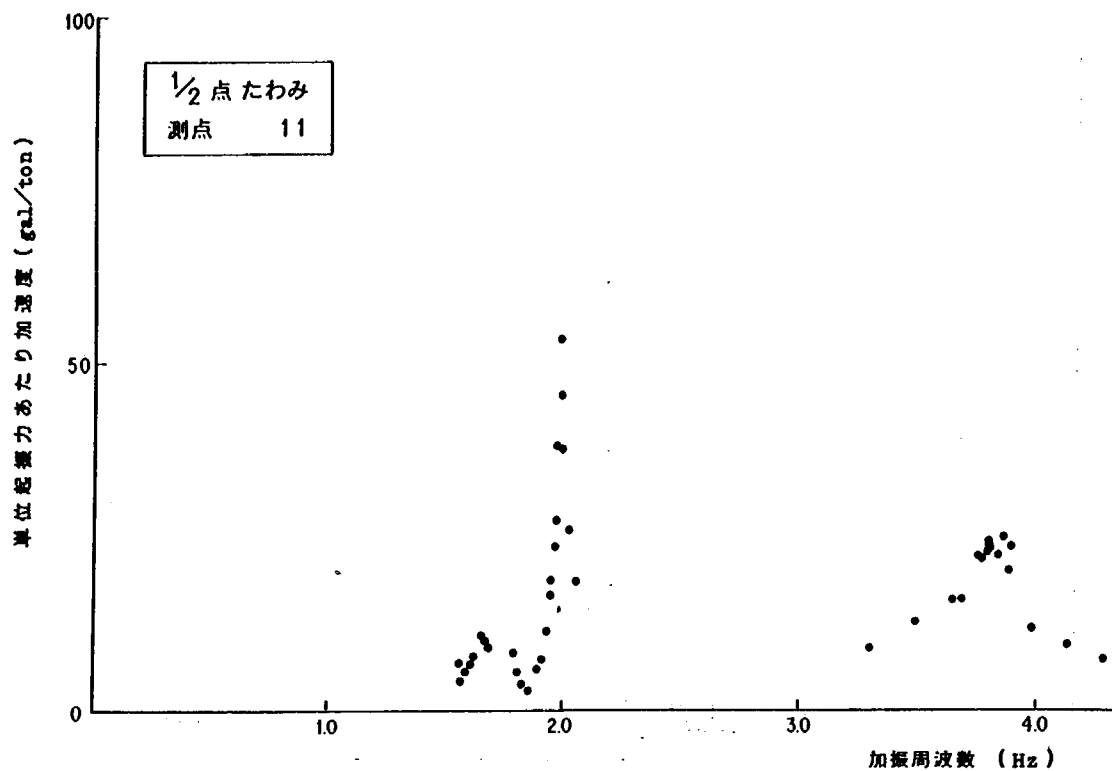


図-3.1(11) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点11)

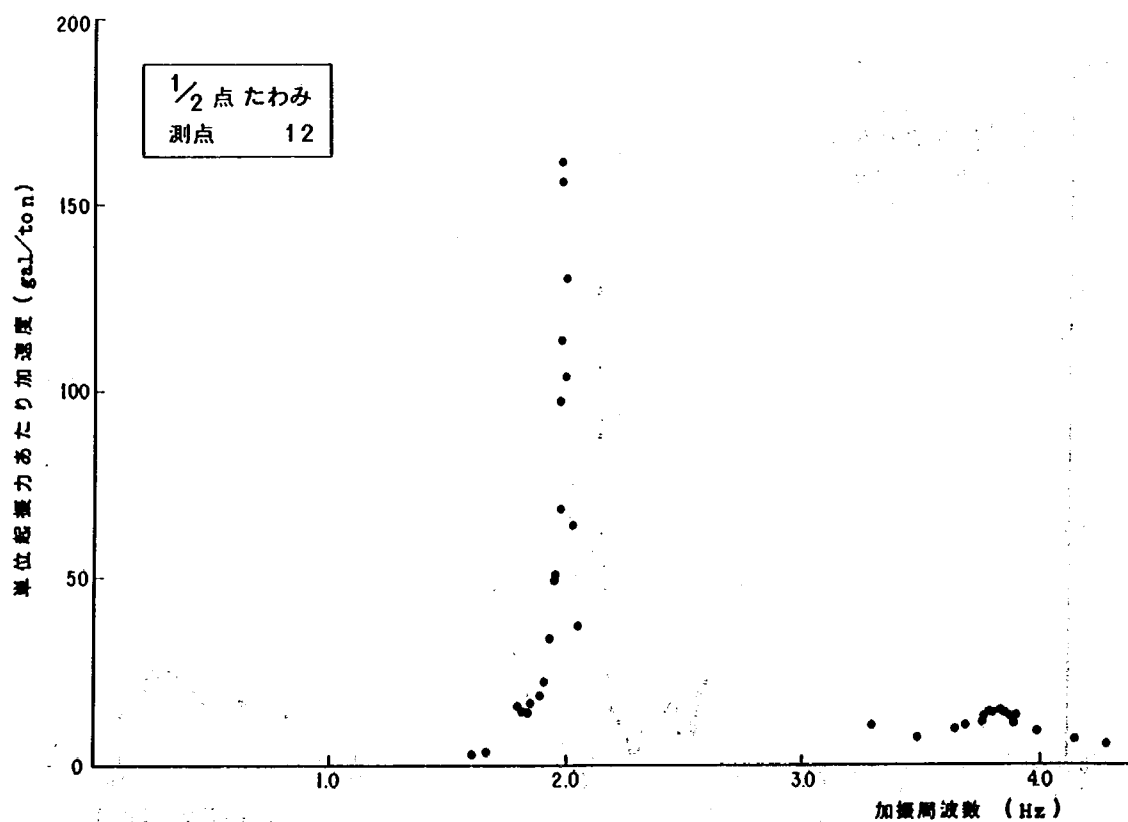


図-3.1(12) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点12)

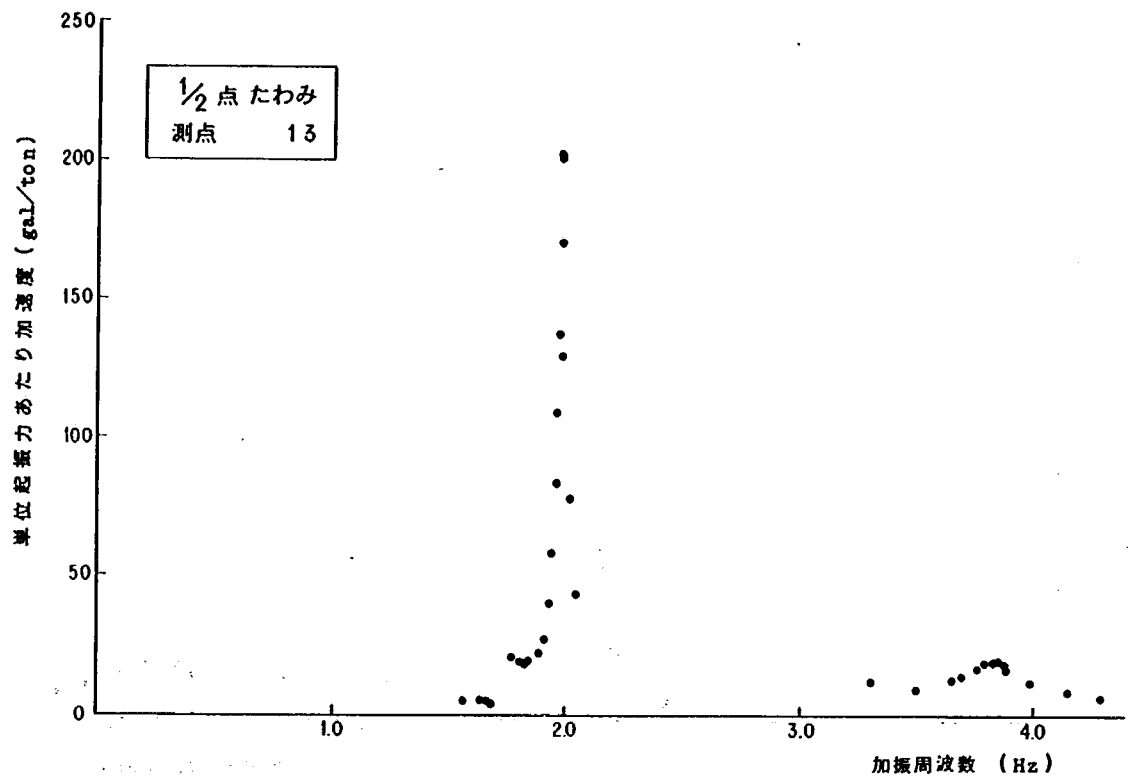


図-3.1(13) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点13)

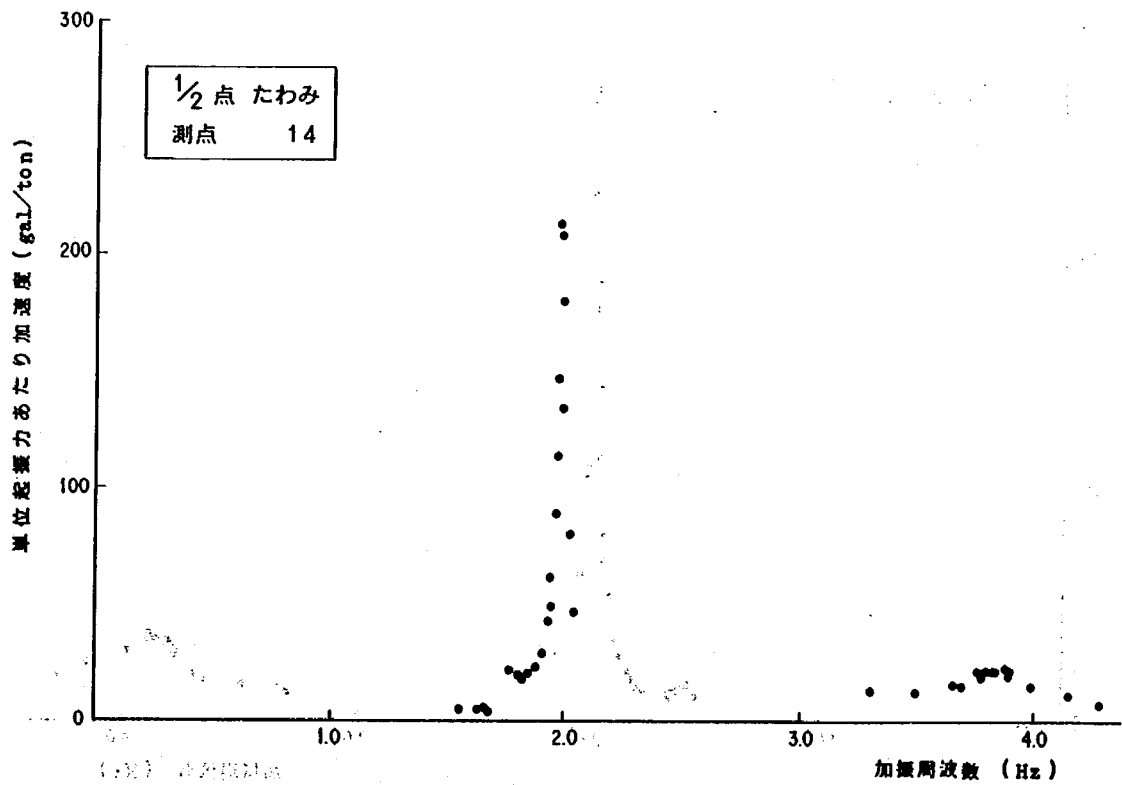


図-3.1(14) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点14)

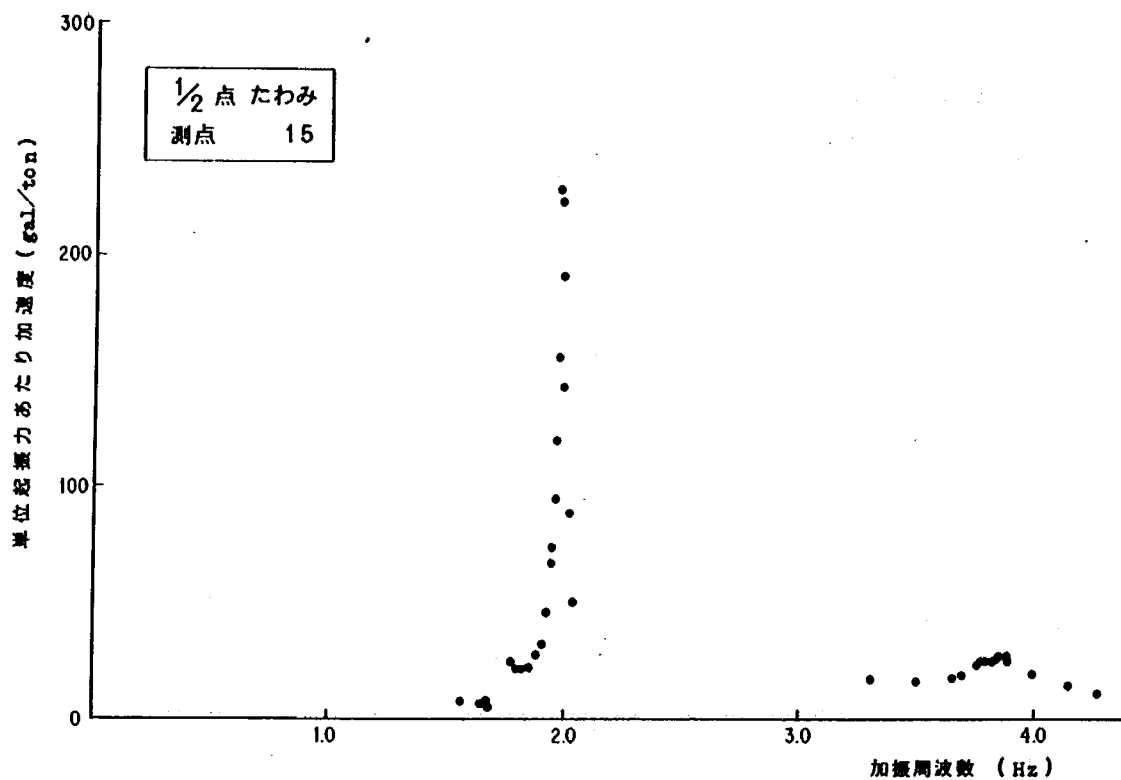


図-3.1(15) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点15)

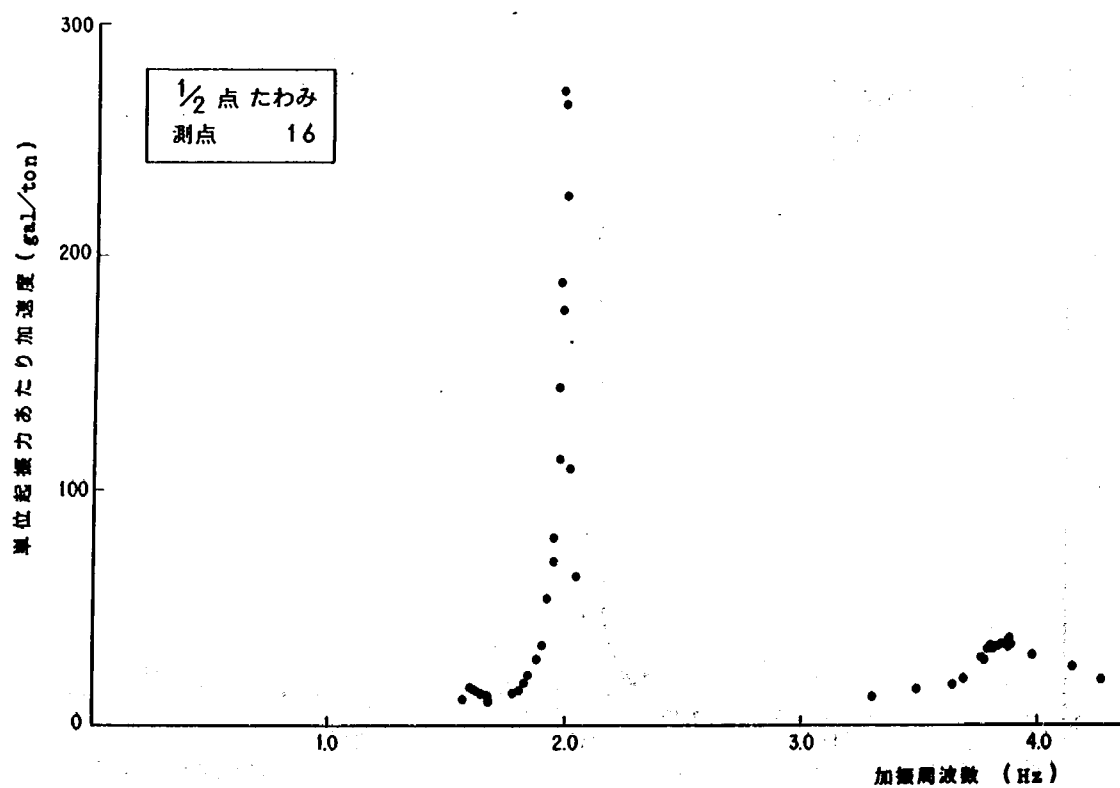


図-3.1(16) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点16)

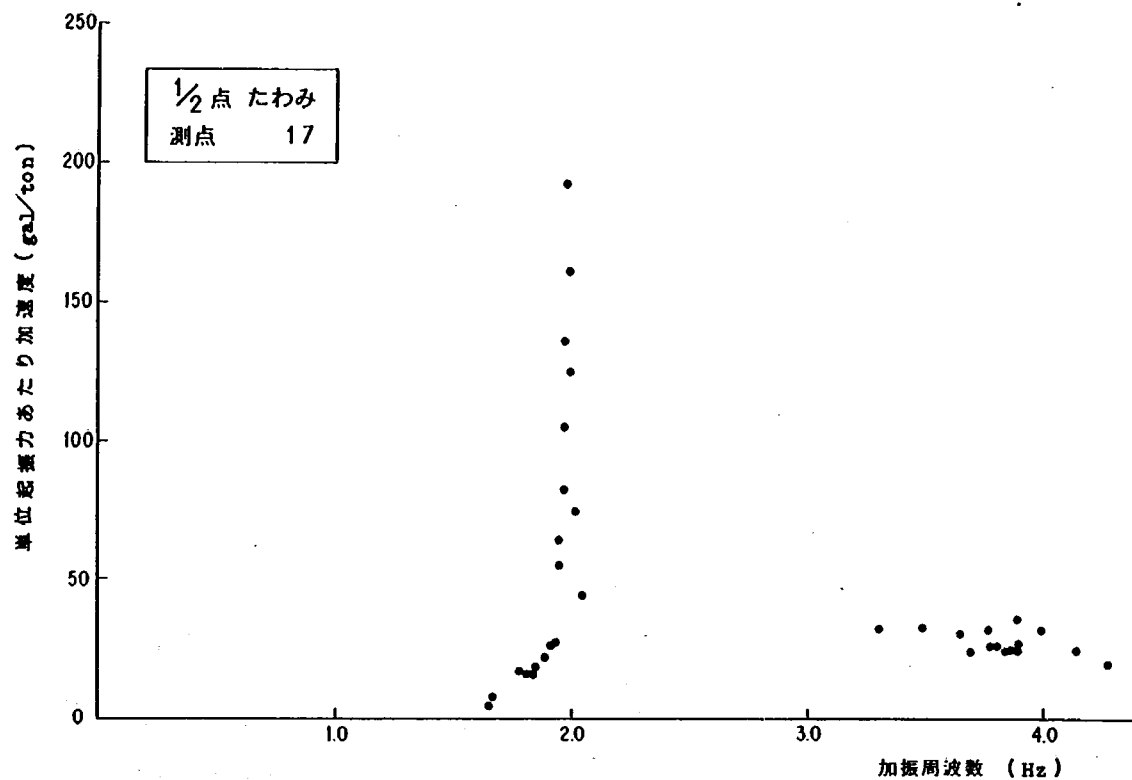


図-3.1(7) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点17)

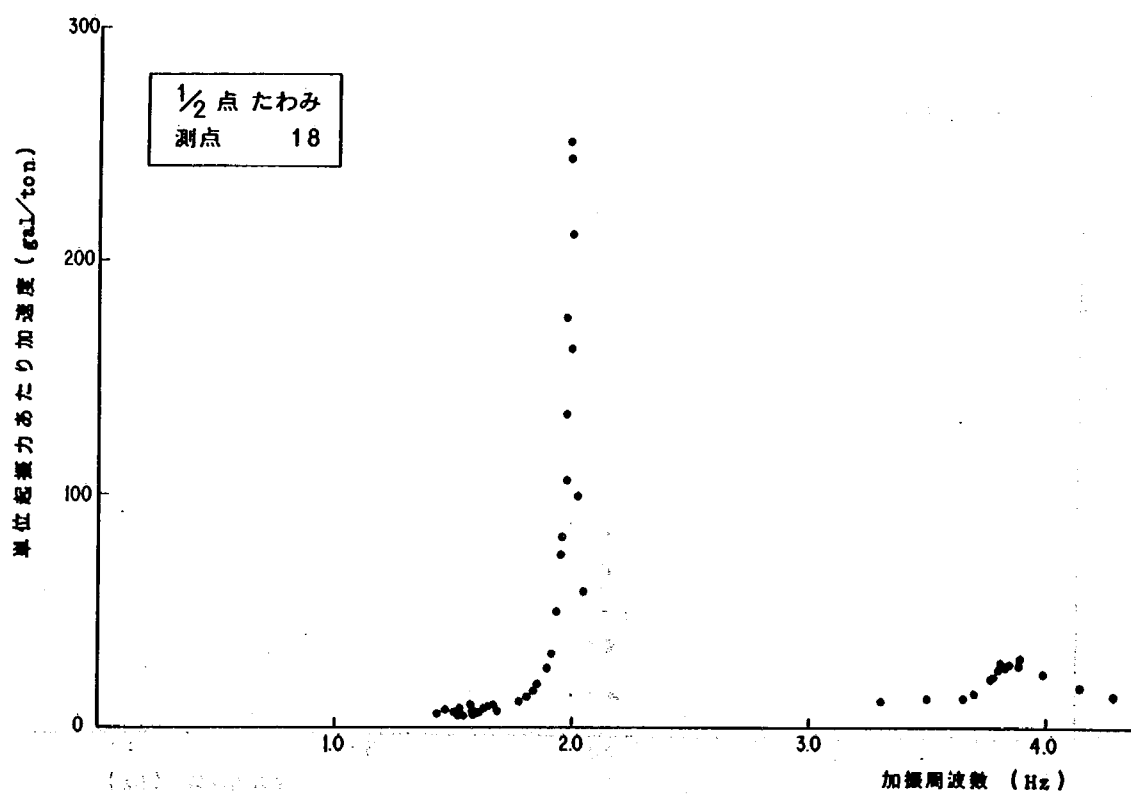


図-3.1(8) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点18)

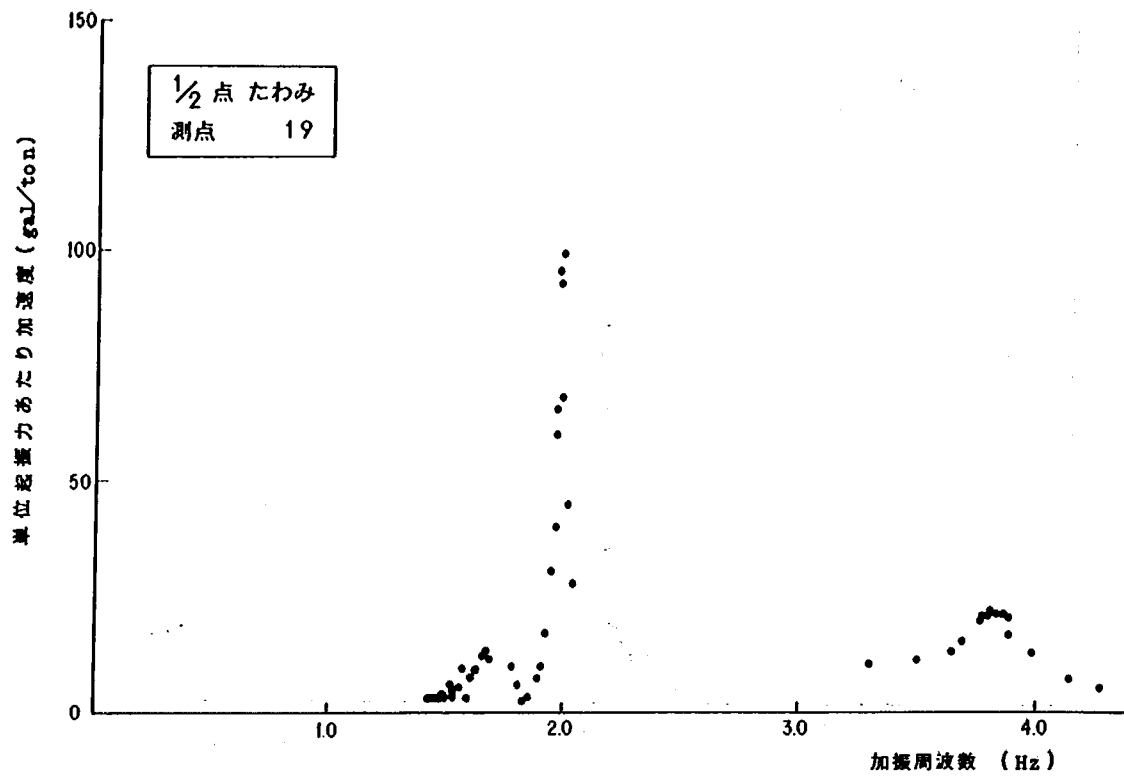


図-3.1(19) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点19)

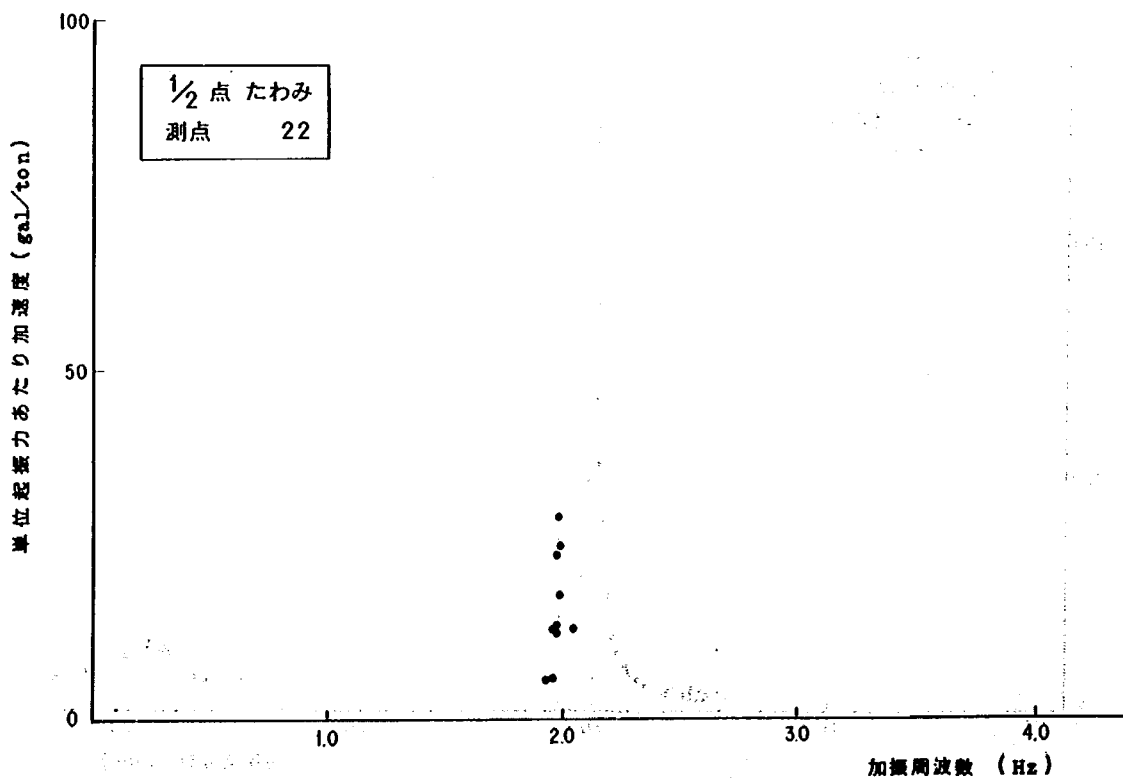


図-3.1(20) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点22)

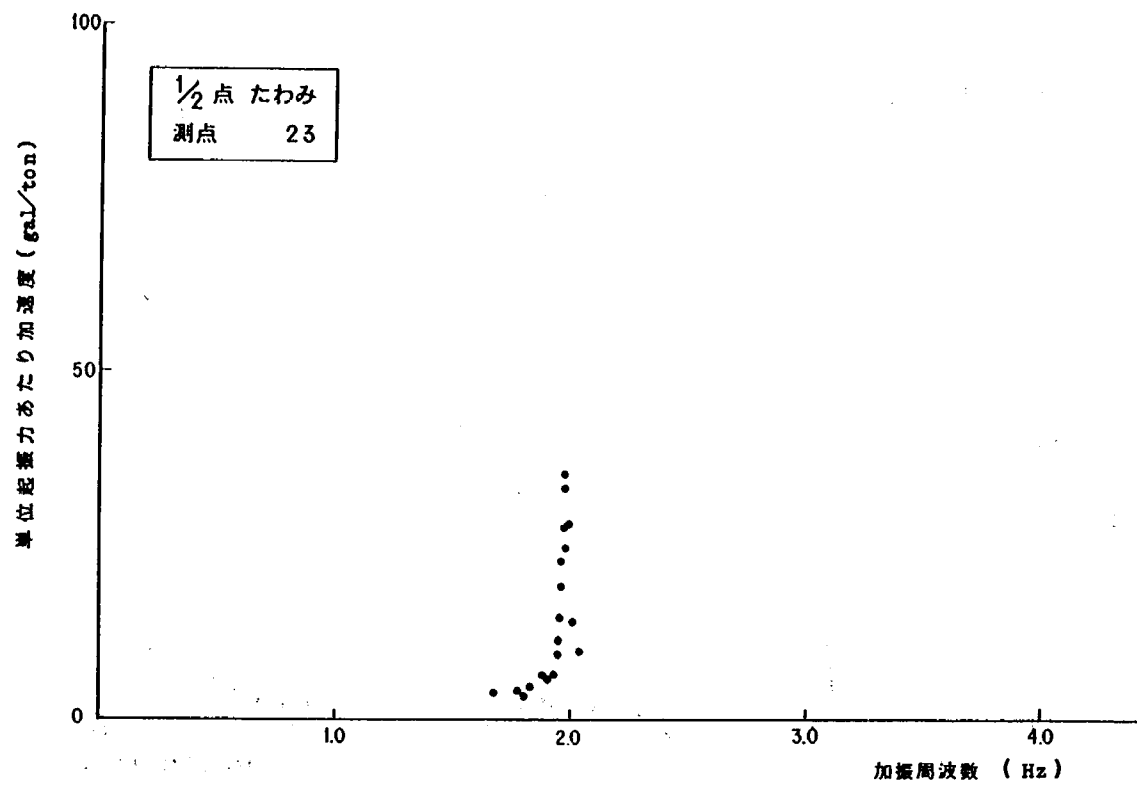


図-3.1(21) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点23)

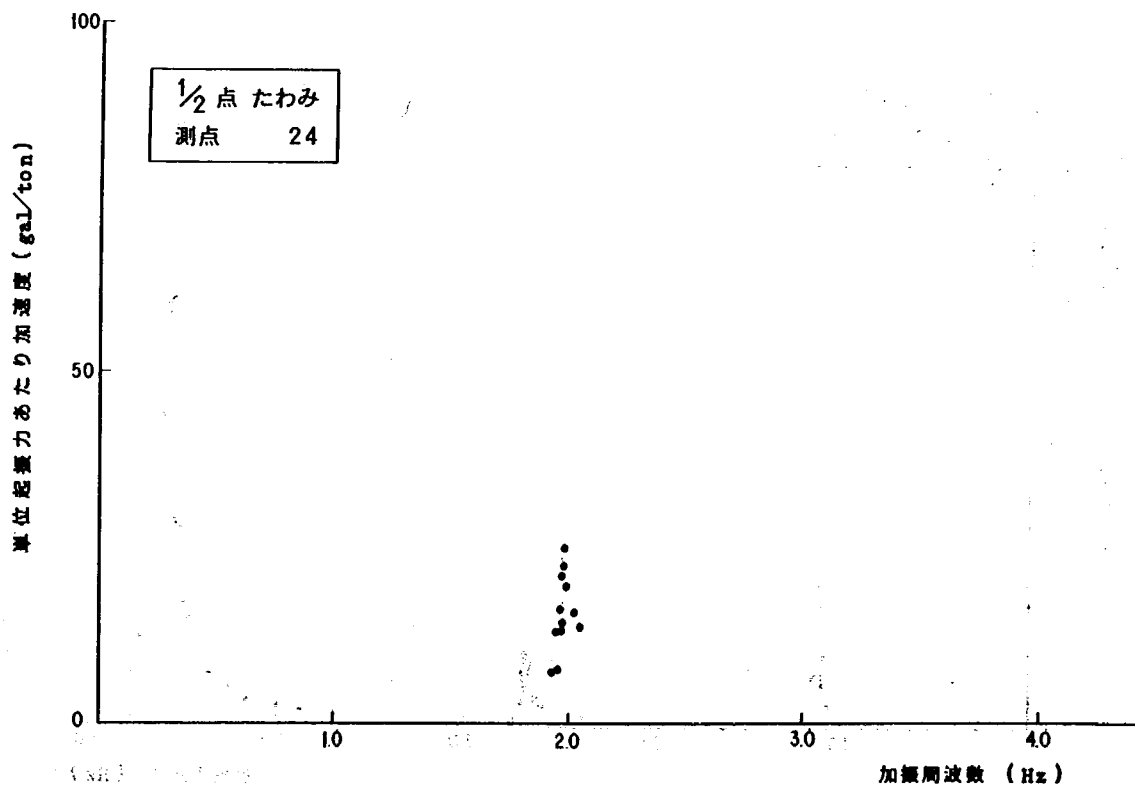


図-3.1(22) 共振曲線 (1/2点たわみ、測点24)

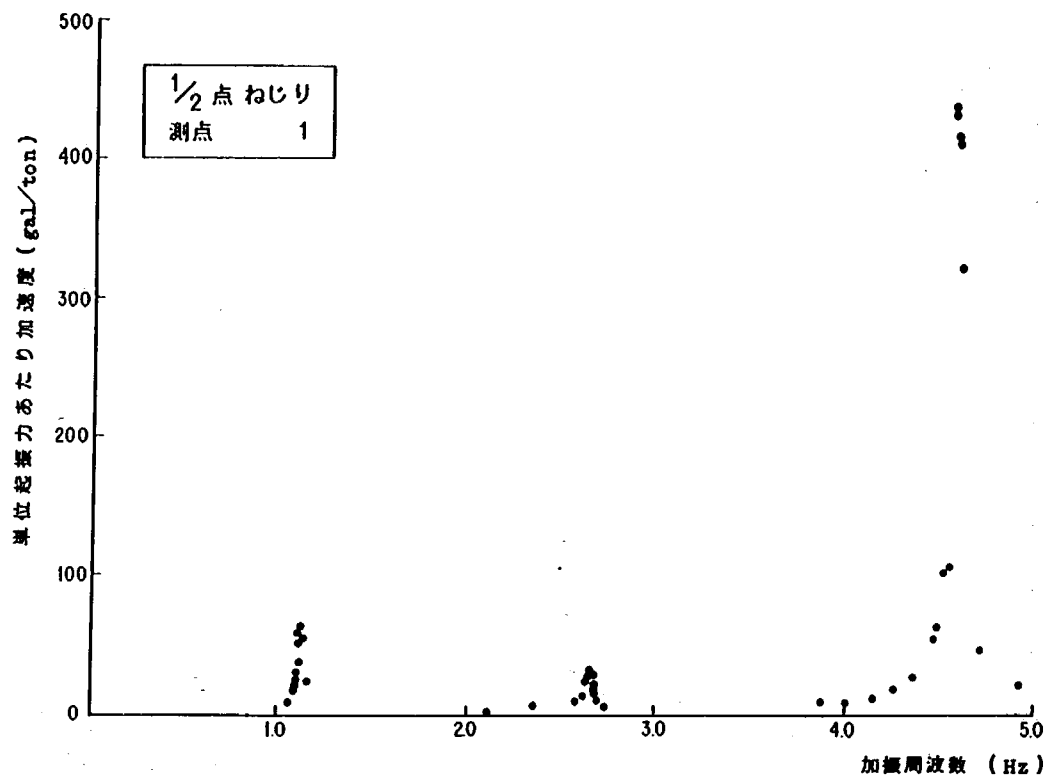


図-3.1(23) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点1)

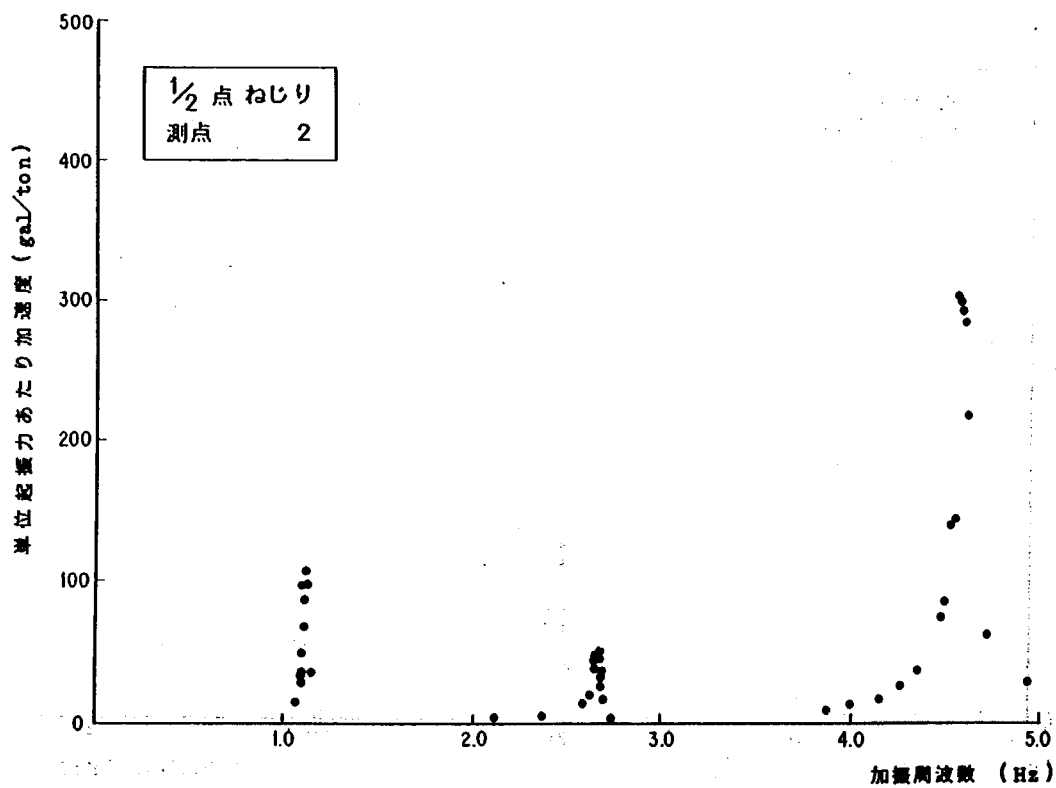


図-3.1(24) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点2)

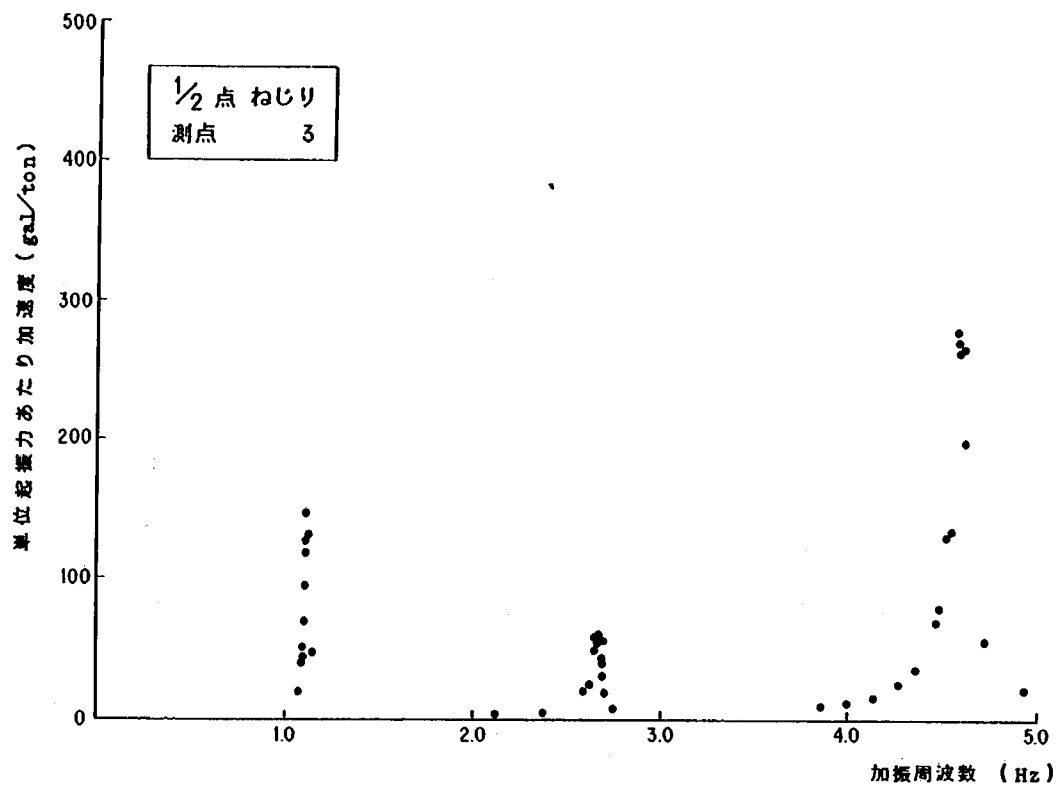


図-3.1(25) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点3)

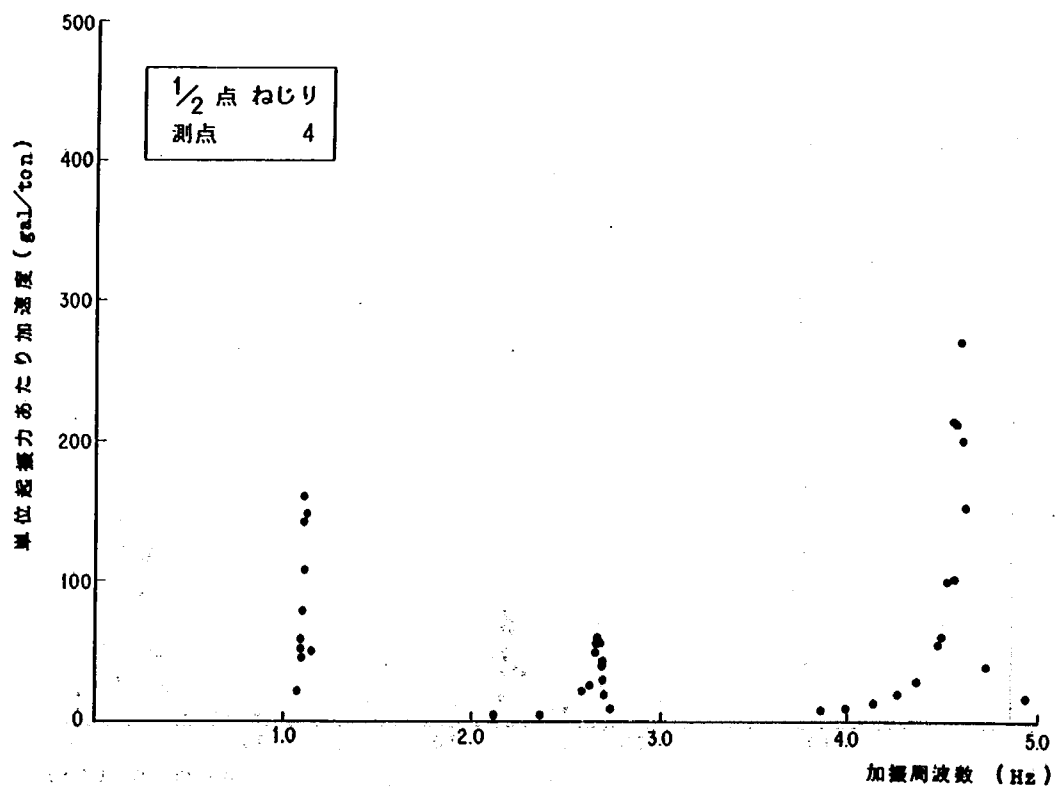


図-3.1(26) 共振曲線 (1/2ねじれ、測点4)

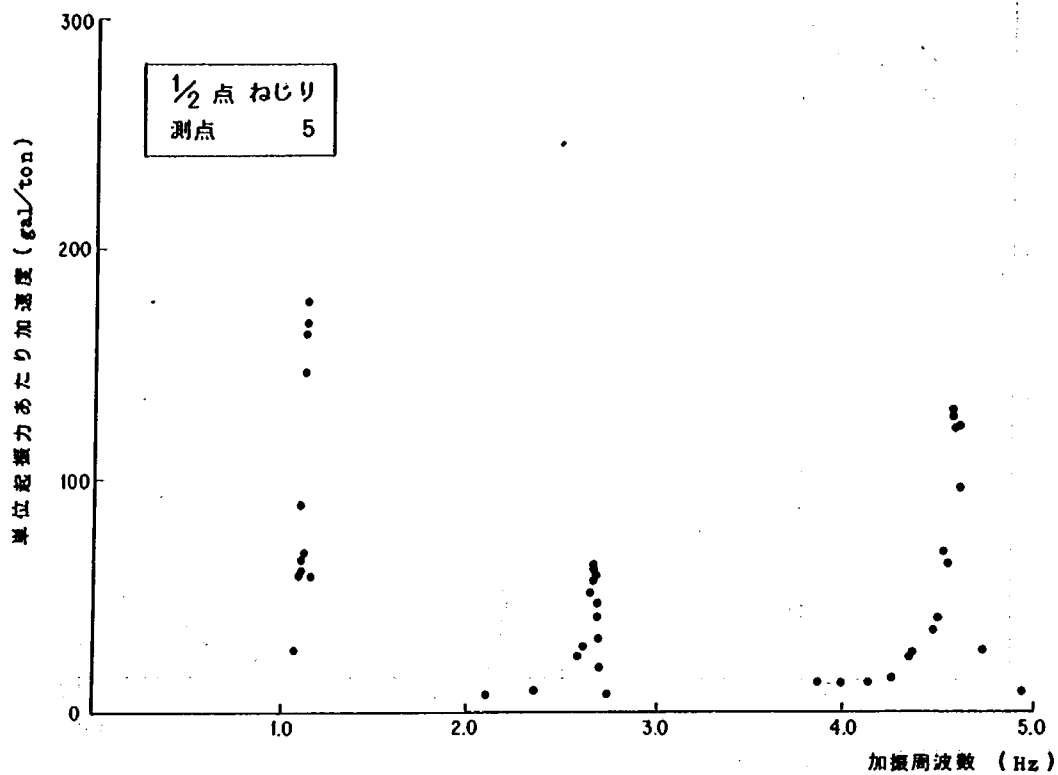


図-3.1(27) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点5)

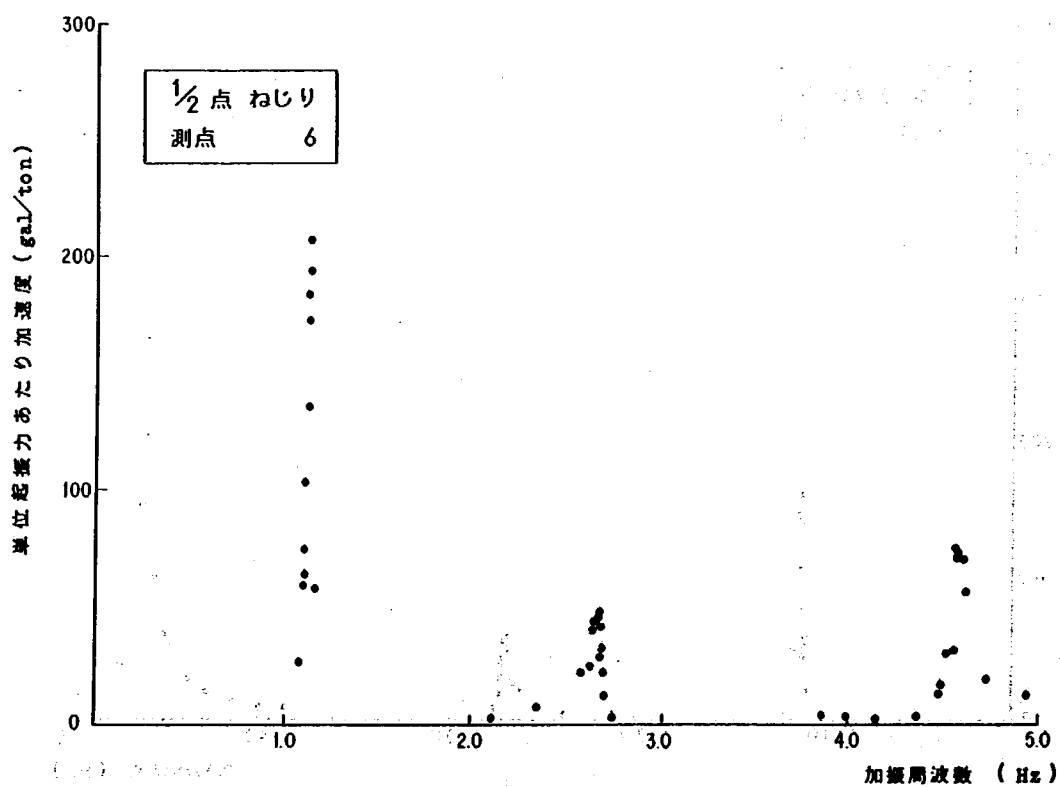


図-3.1(28) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点6)

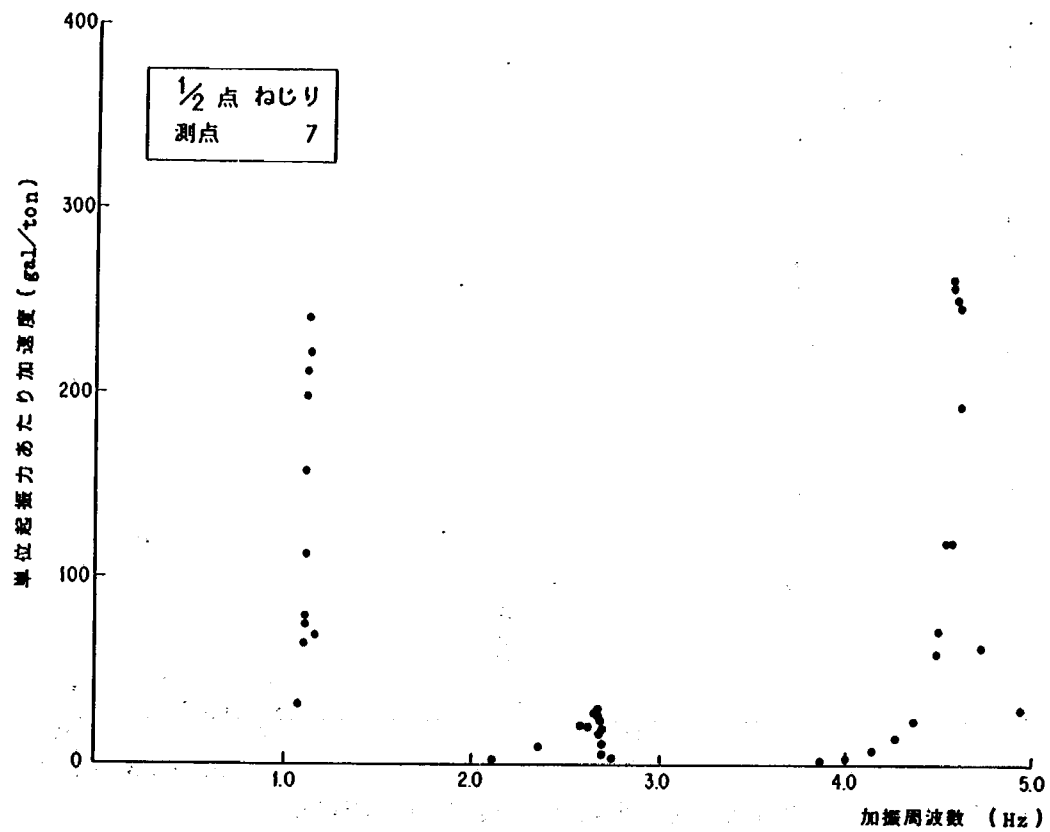


図-3.1(29) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点7)

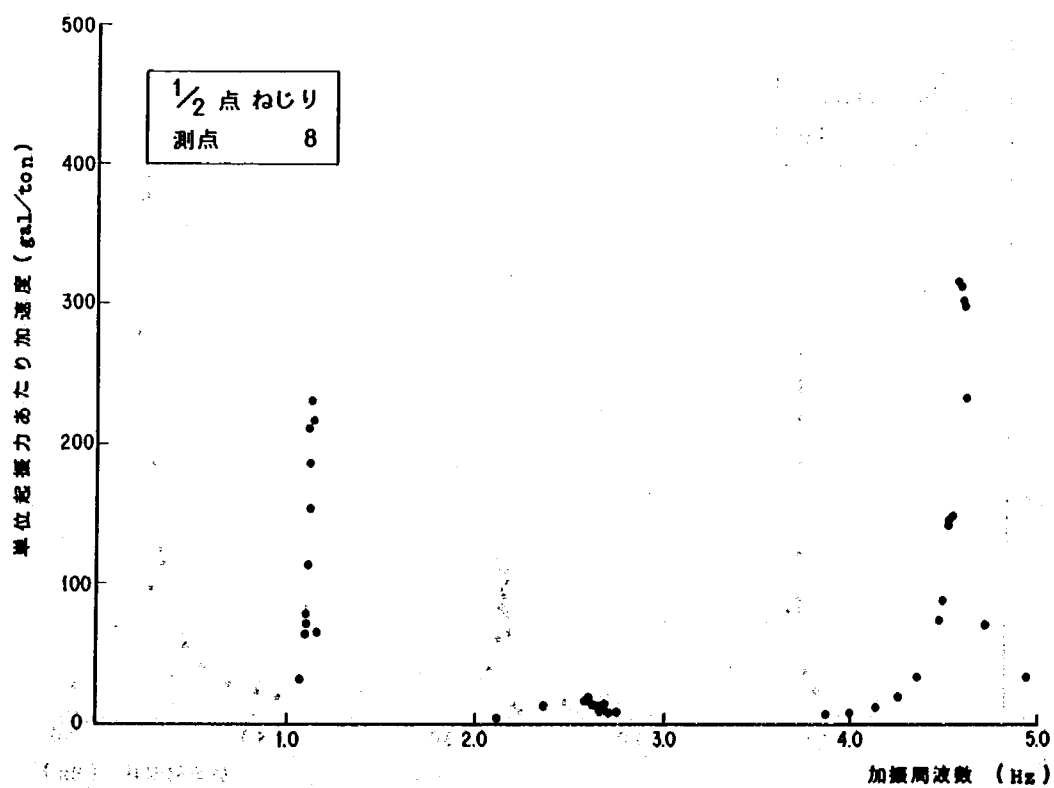


図-3.1(30) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点8)

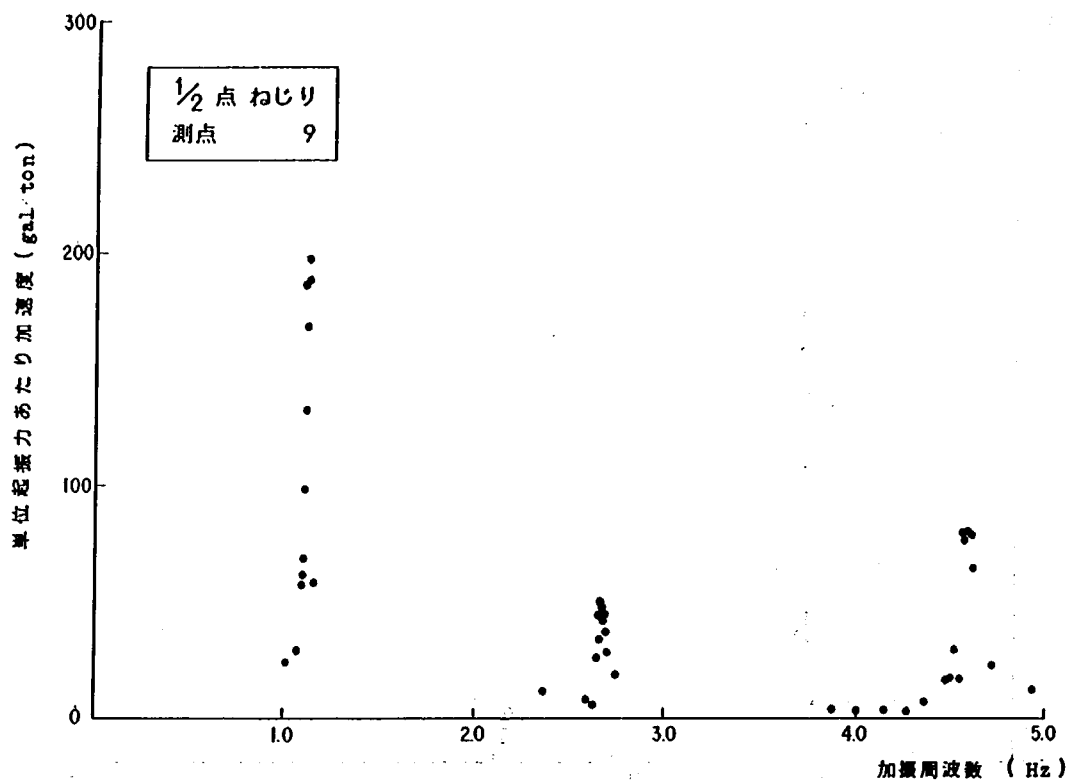


図-3.131) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点9)

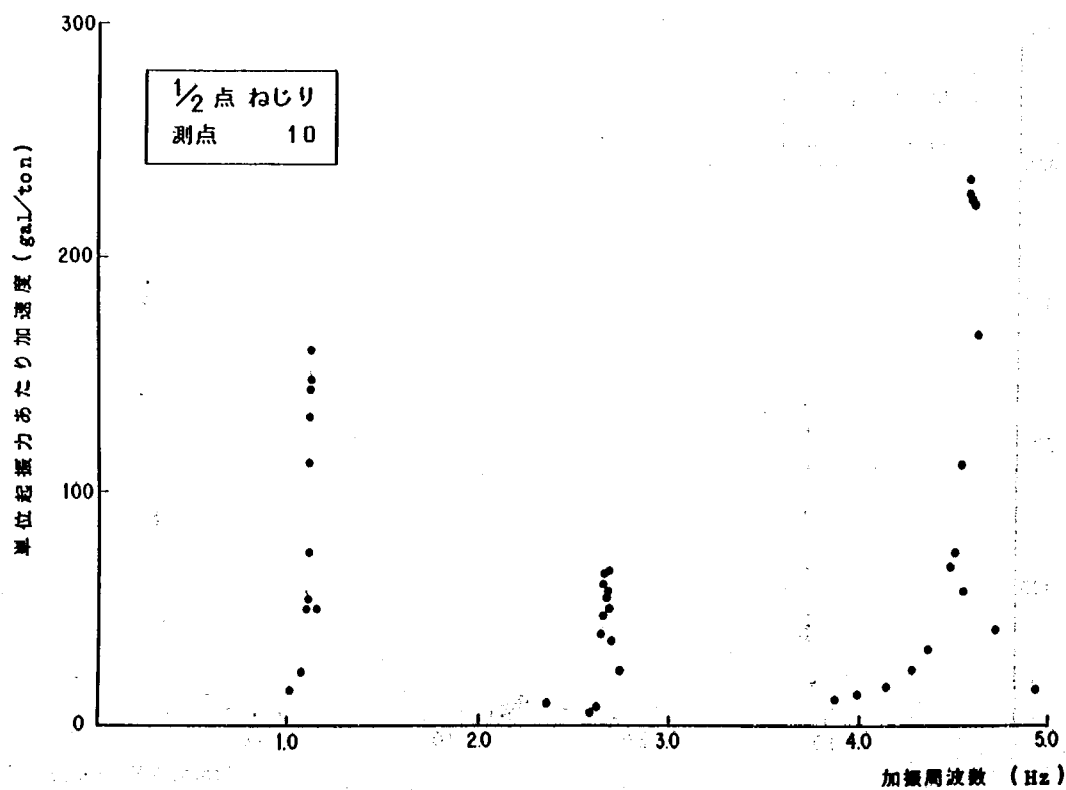


図-3.132) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点10)

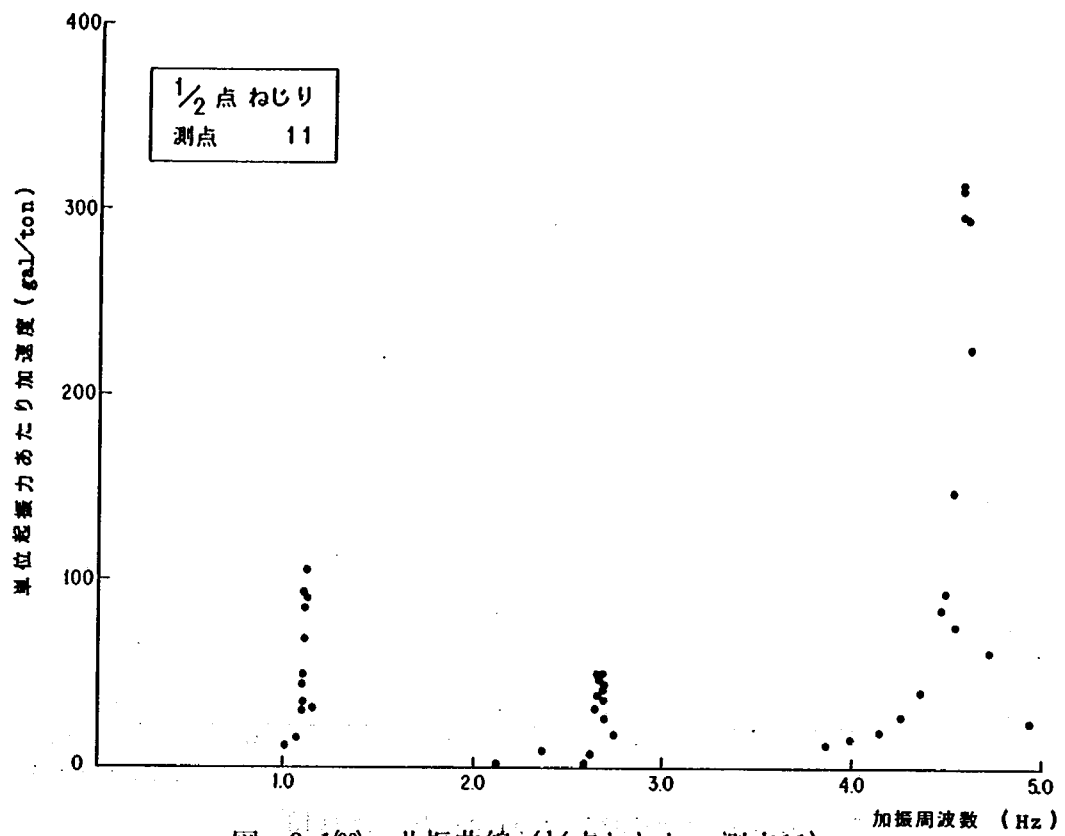


図-3.1(33) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点11)

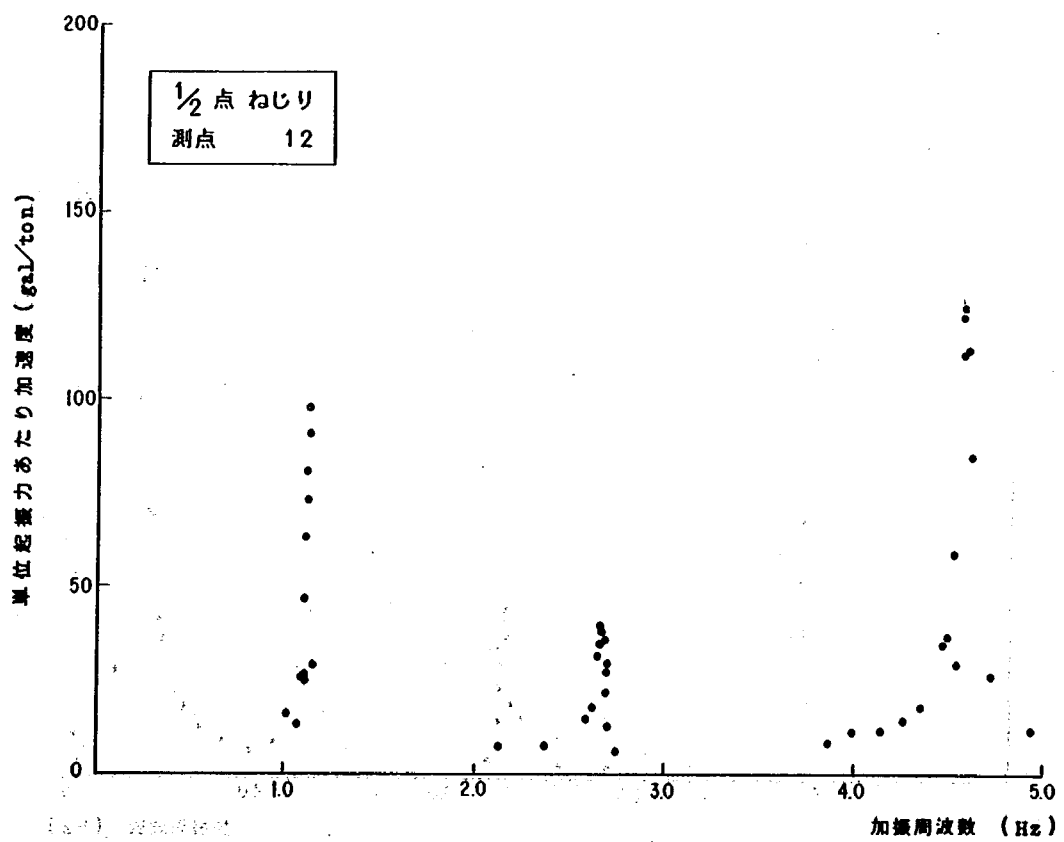


図-3.1(34) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点12)

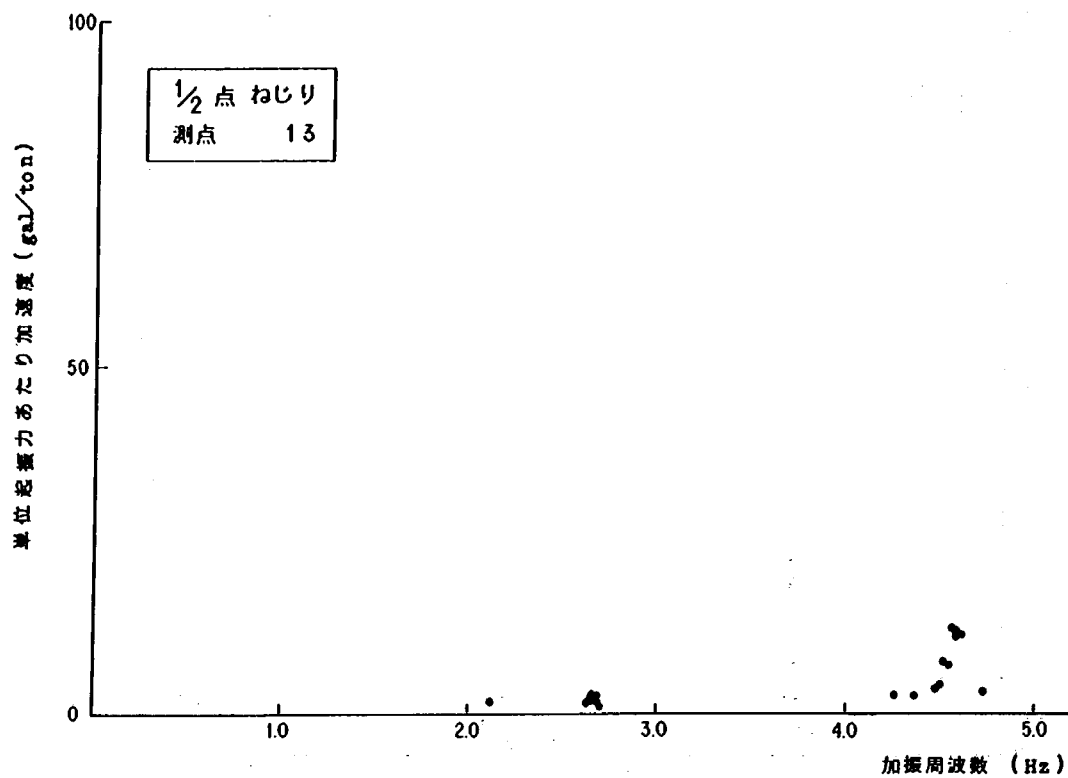


図-3.135 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点13)

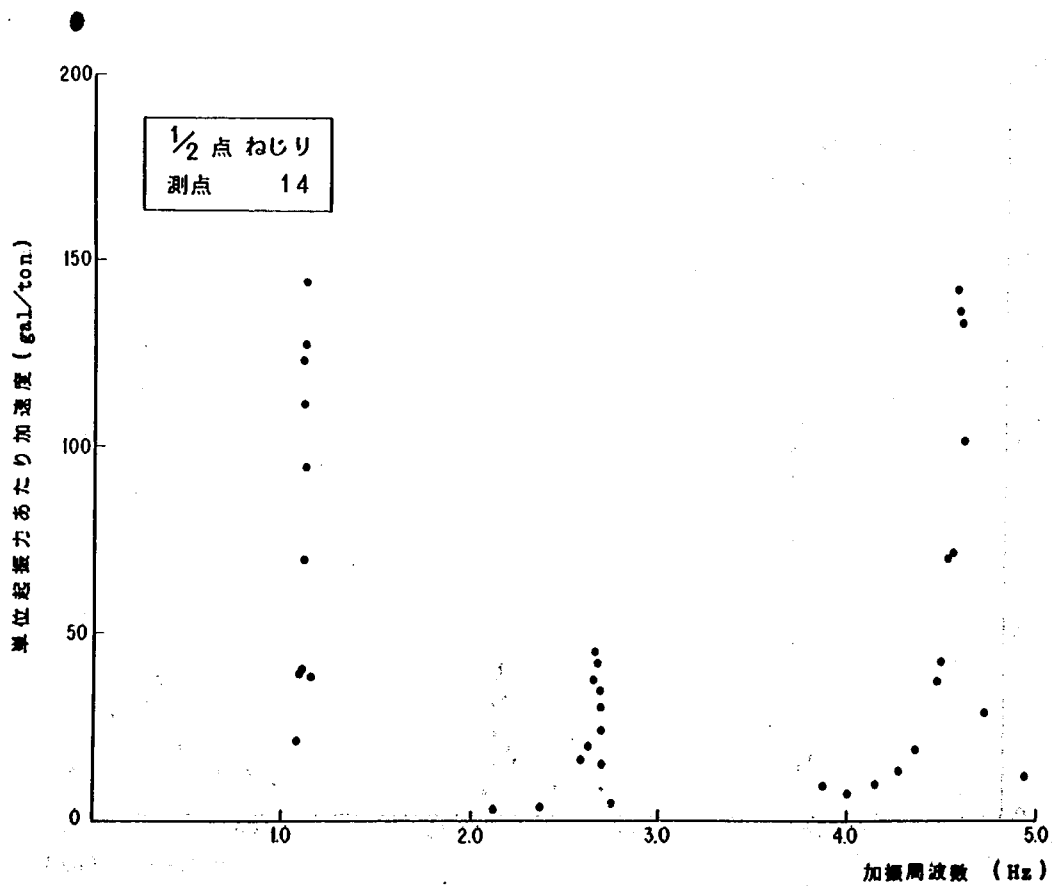


図-3.136 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点14)

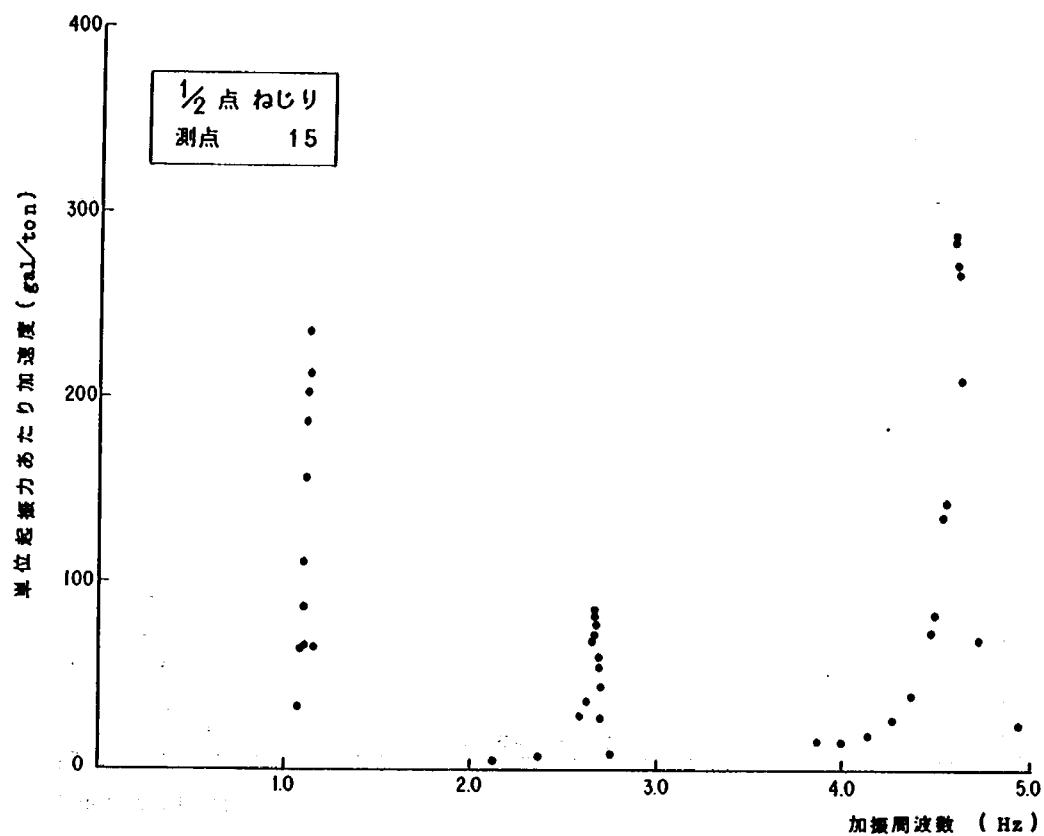


図-3.137 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点15)

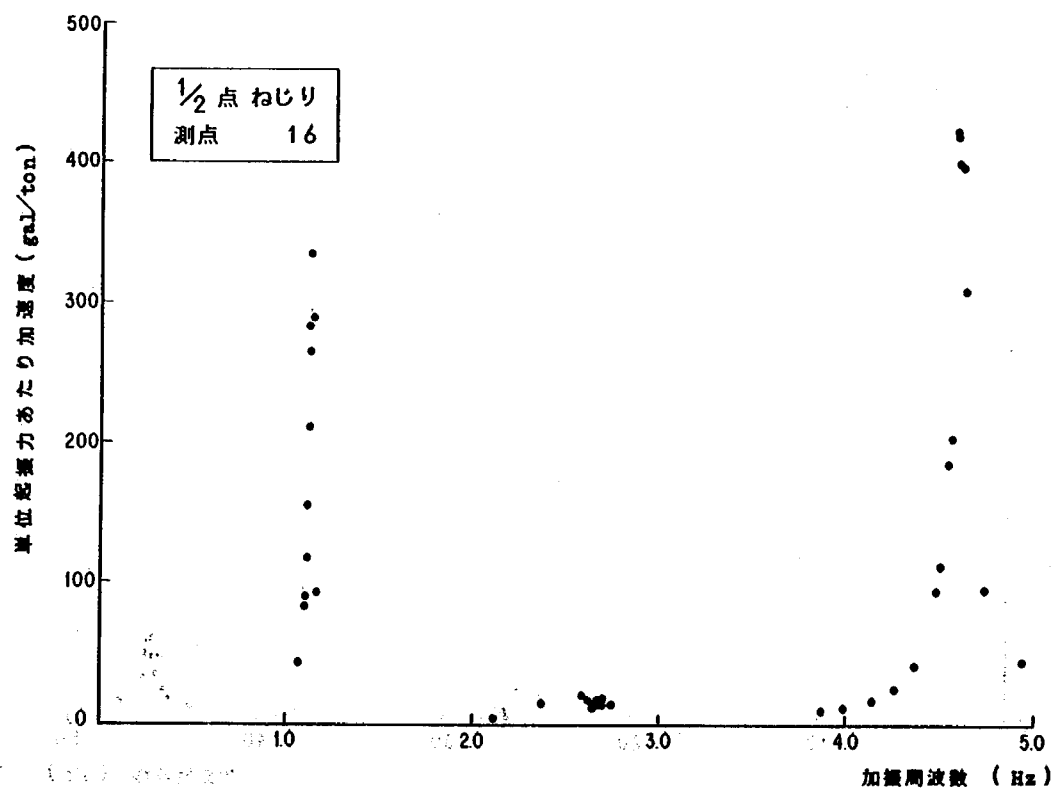


図-3.138 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点16)

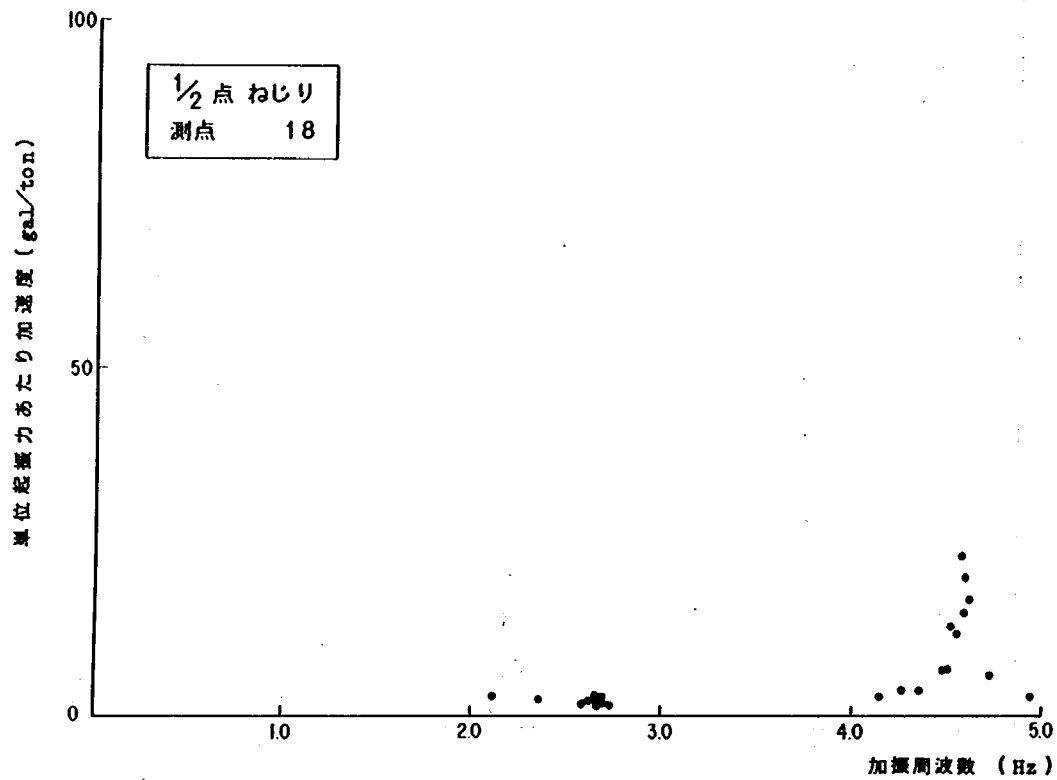


図-3.1(39) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点18)

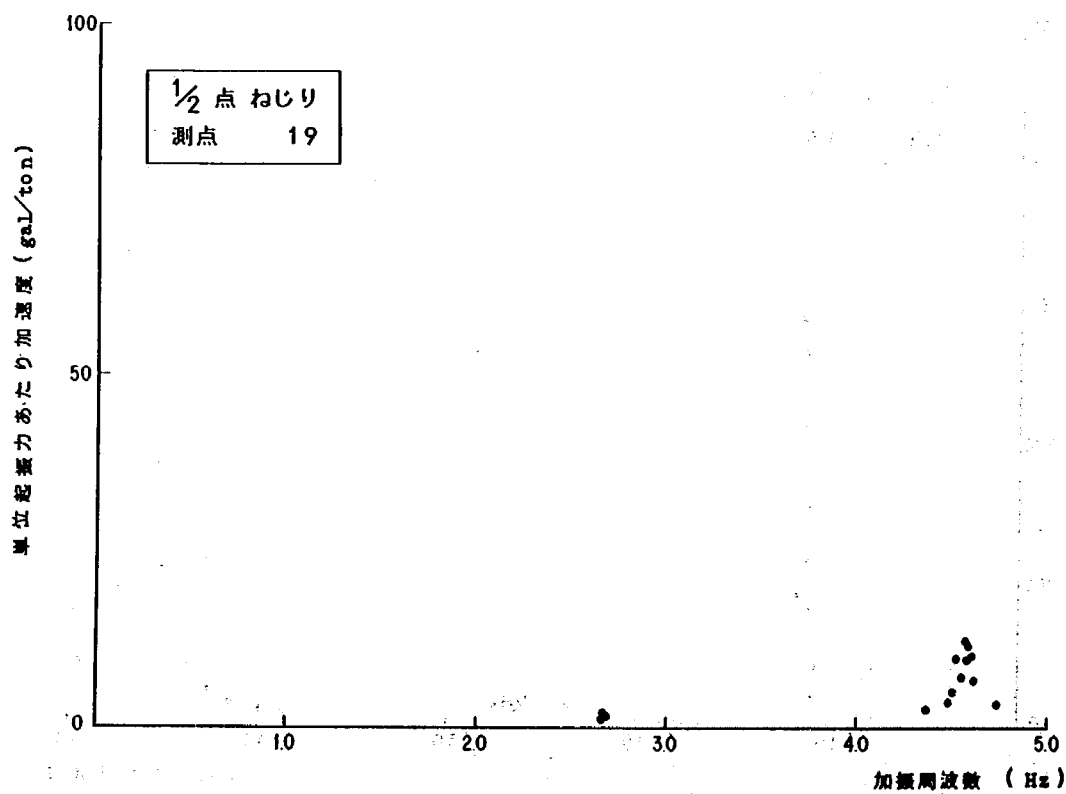


図-3.1(40) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点19)

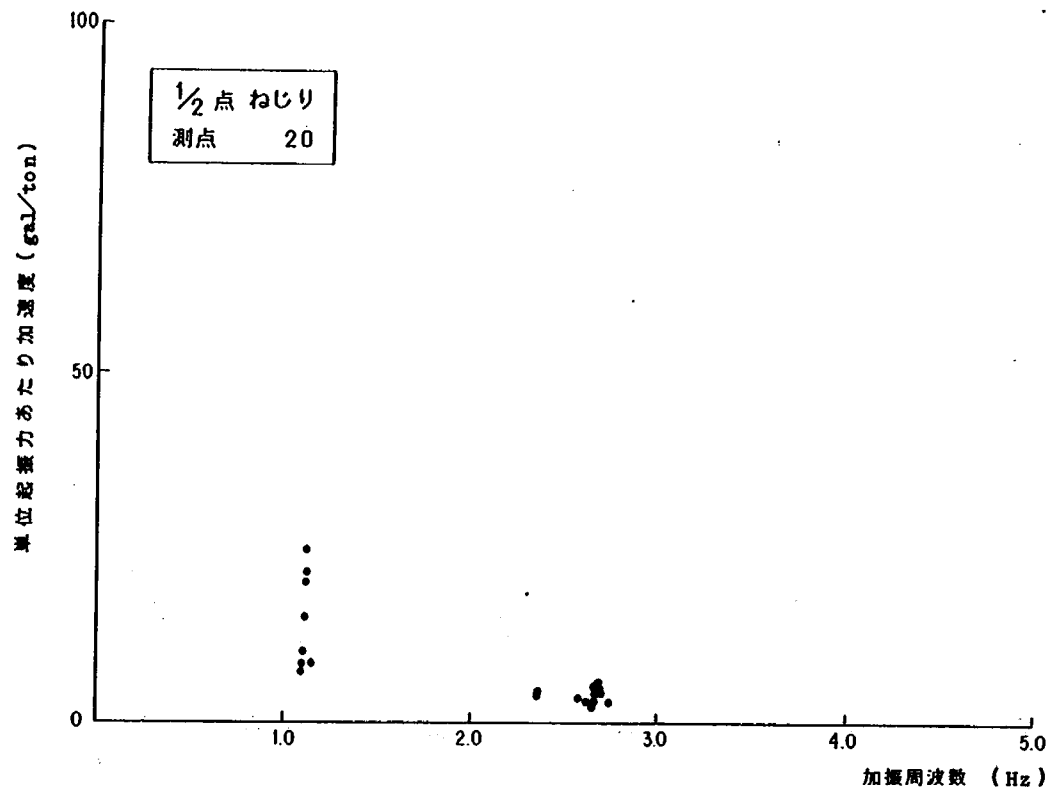


図-3.1(41) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点20)

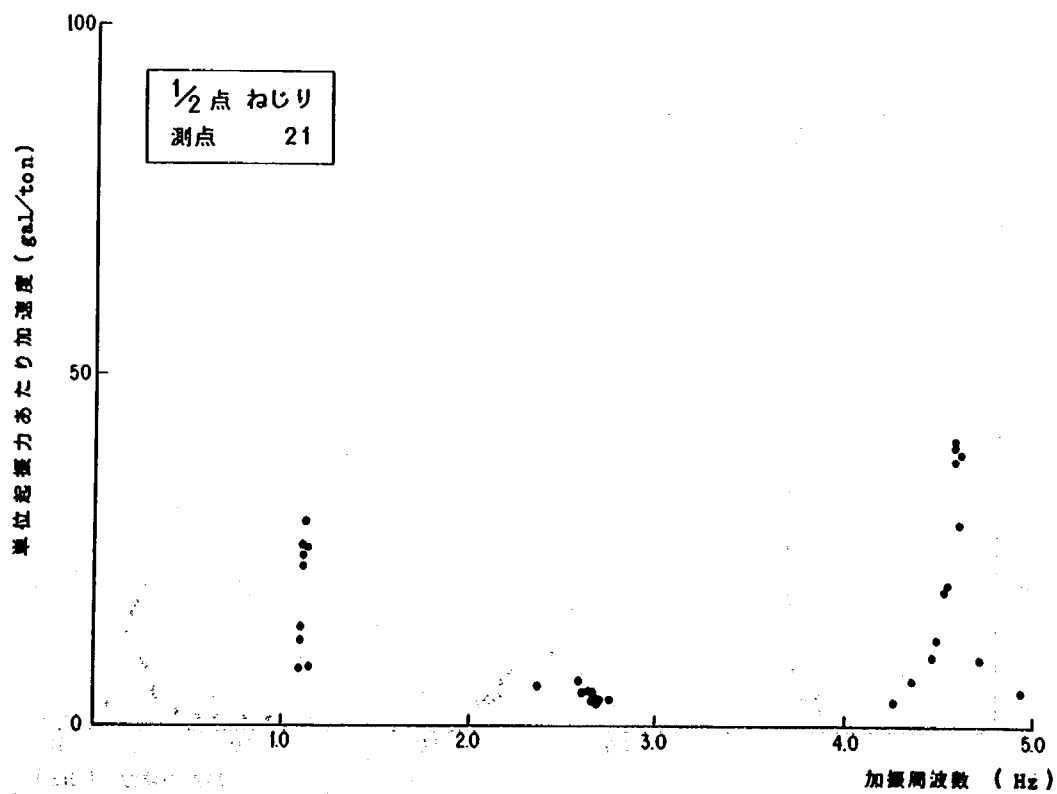


図-3.1(42) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点21)

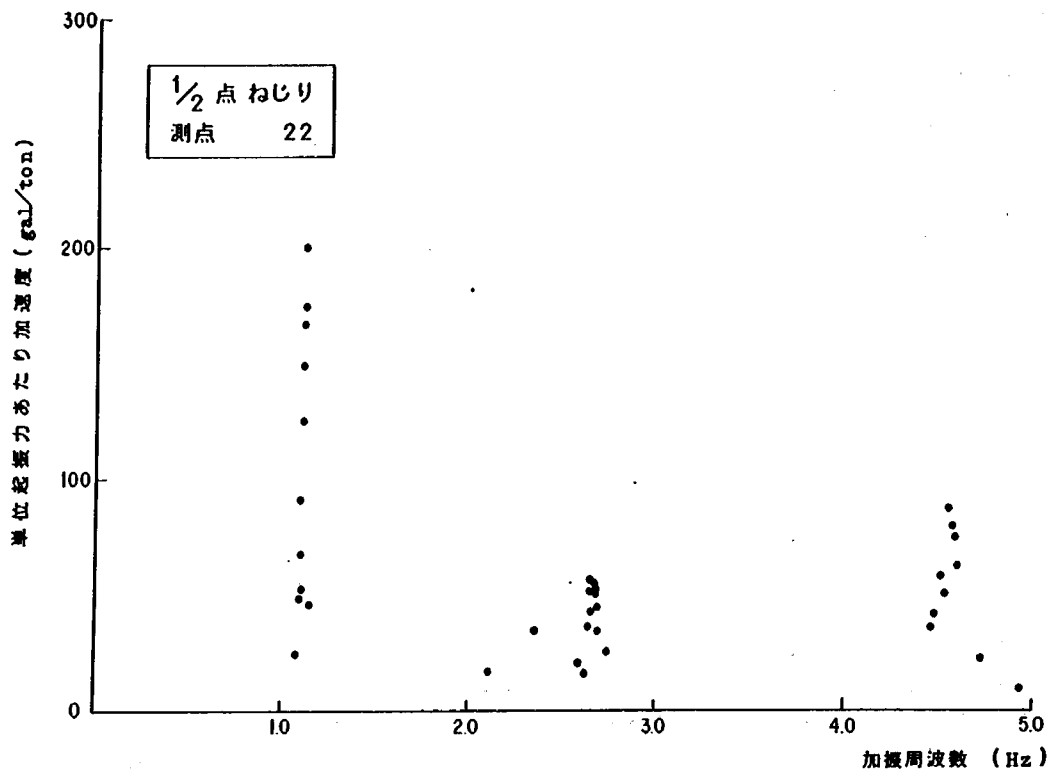


図-3.1(43) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点22)

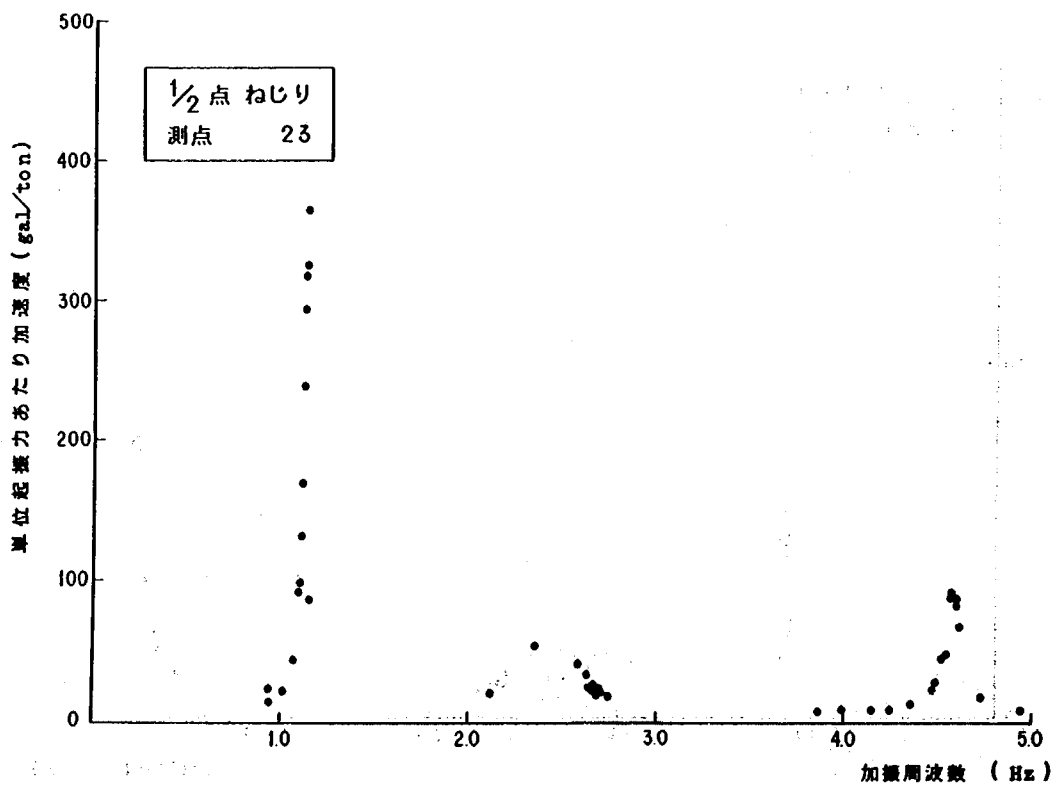


図-3.1(44) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点23)

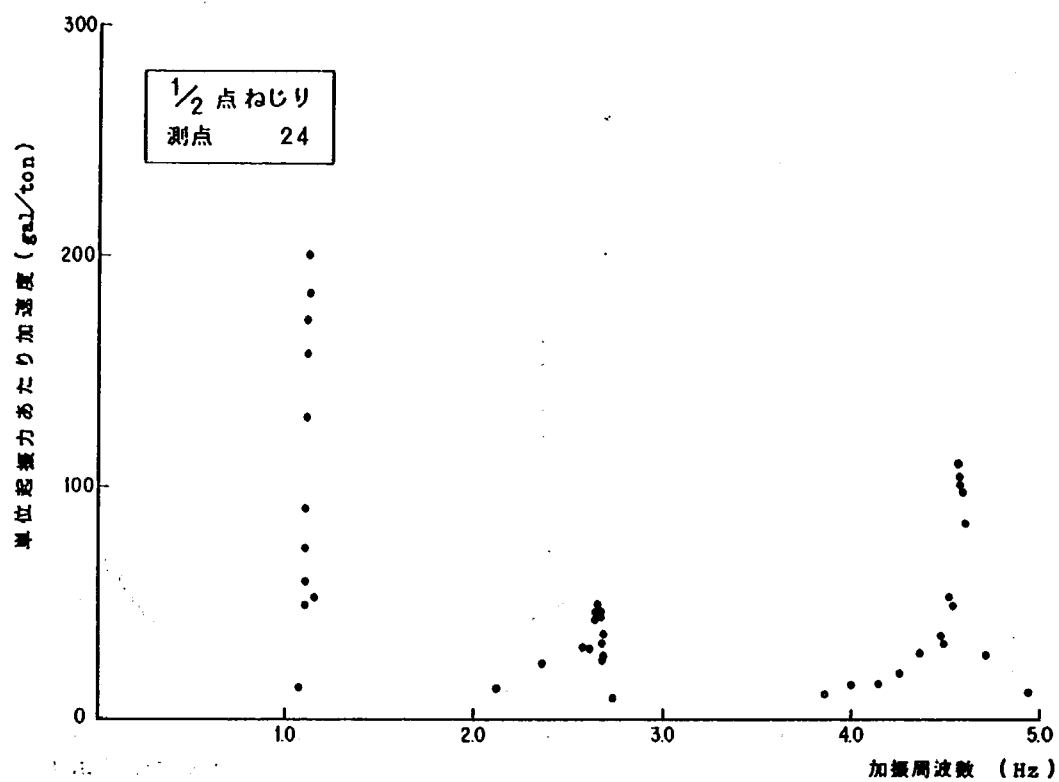


図-3.1(45) 共振曲線 (1/2点ねじれ、測点24)

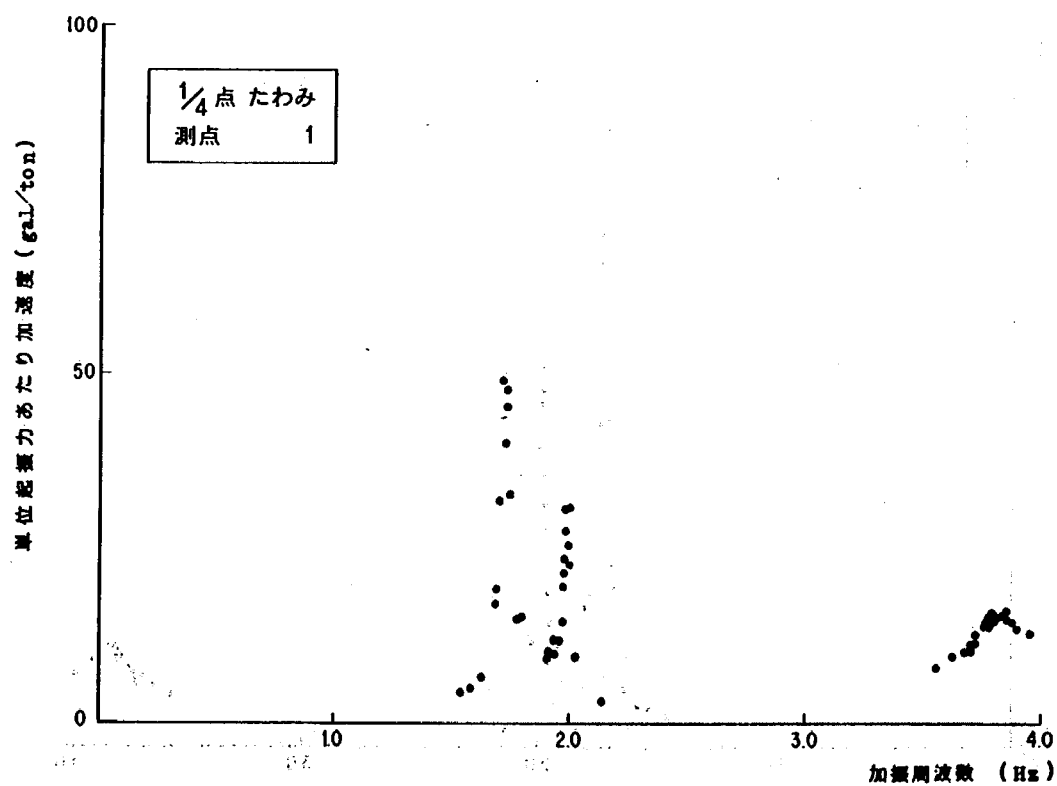


図-3.1(46) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点1)

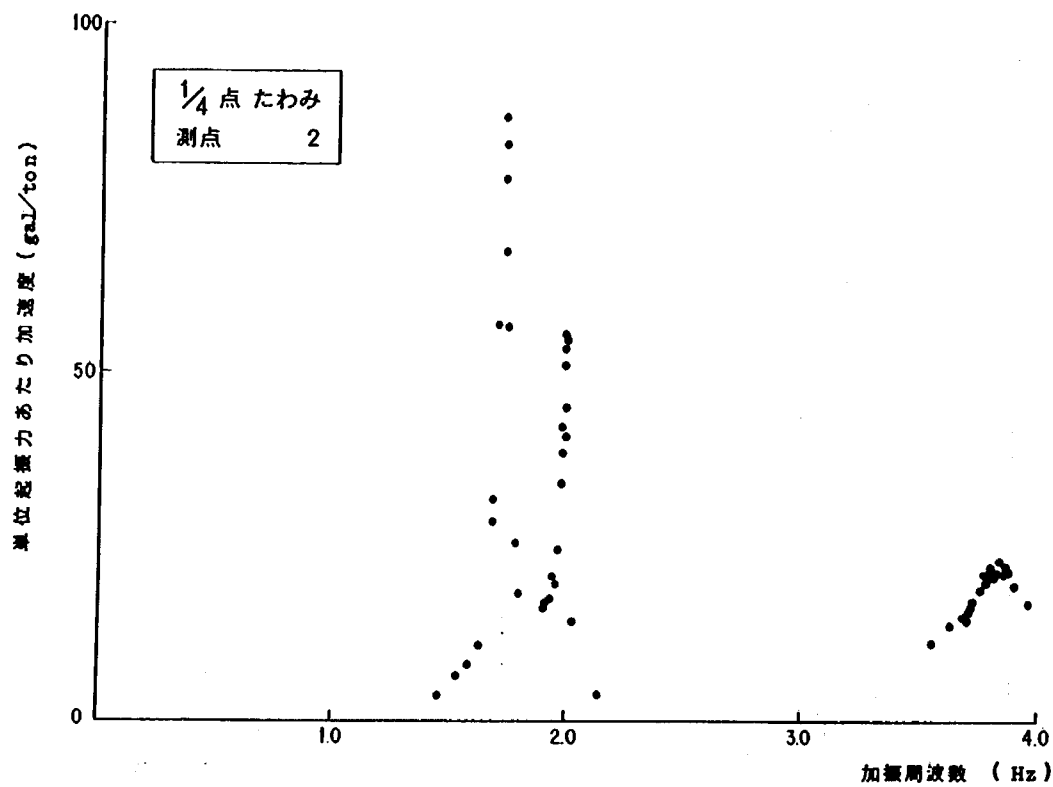


図-3.1(7) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点2)

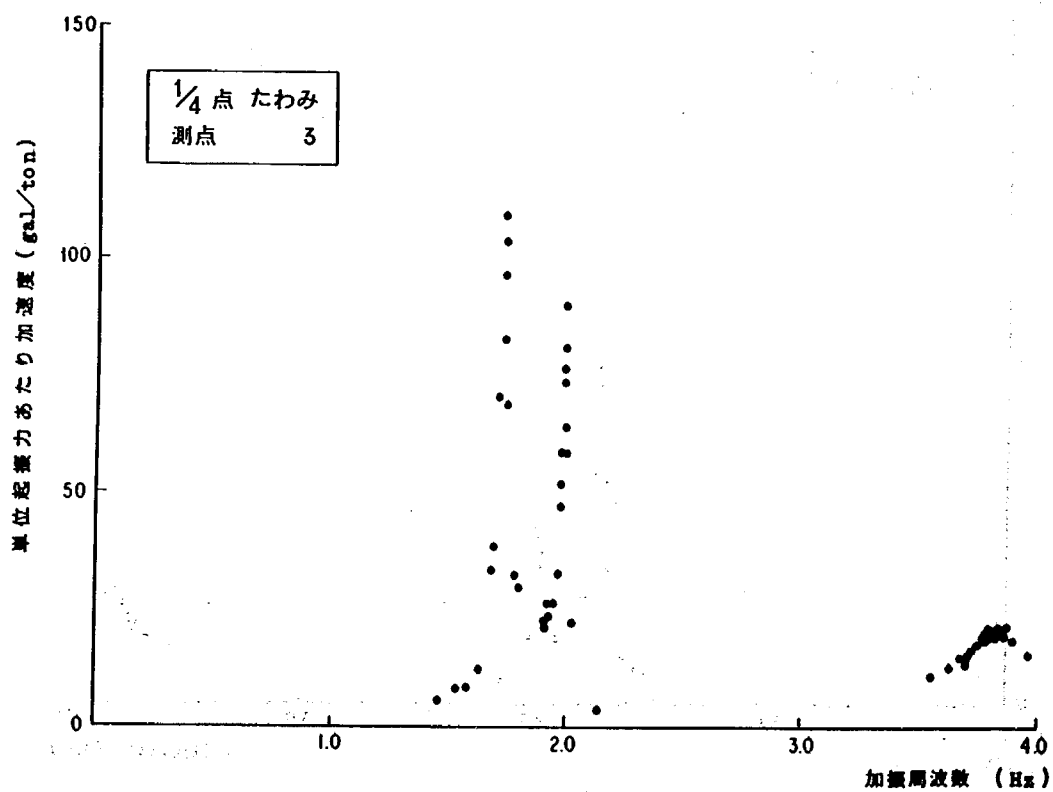


図-3.1(8) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点3)

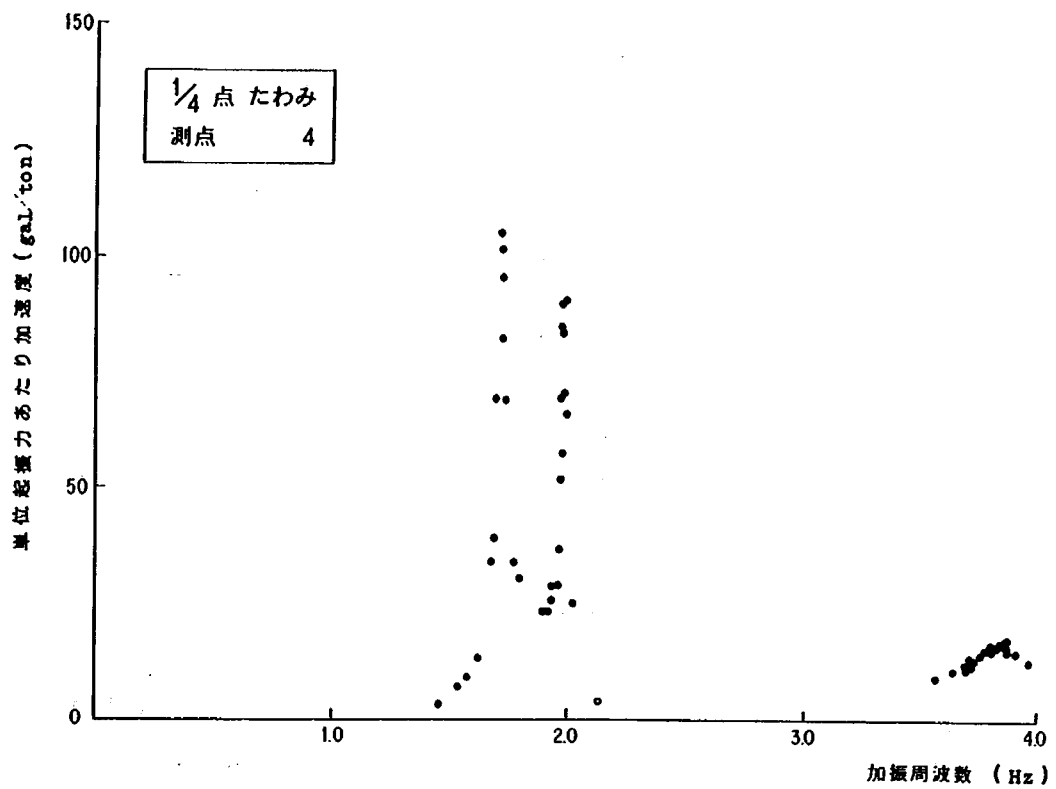


図-3.1(49) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点4)

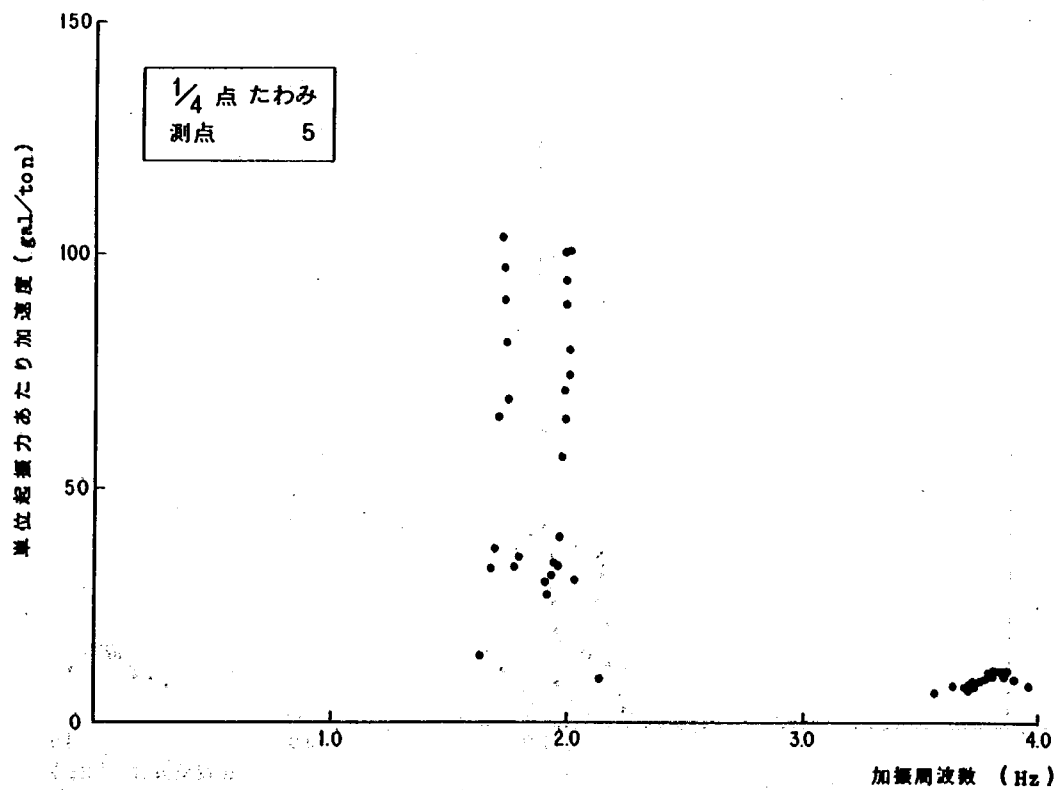


図-3.1(50) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点5)

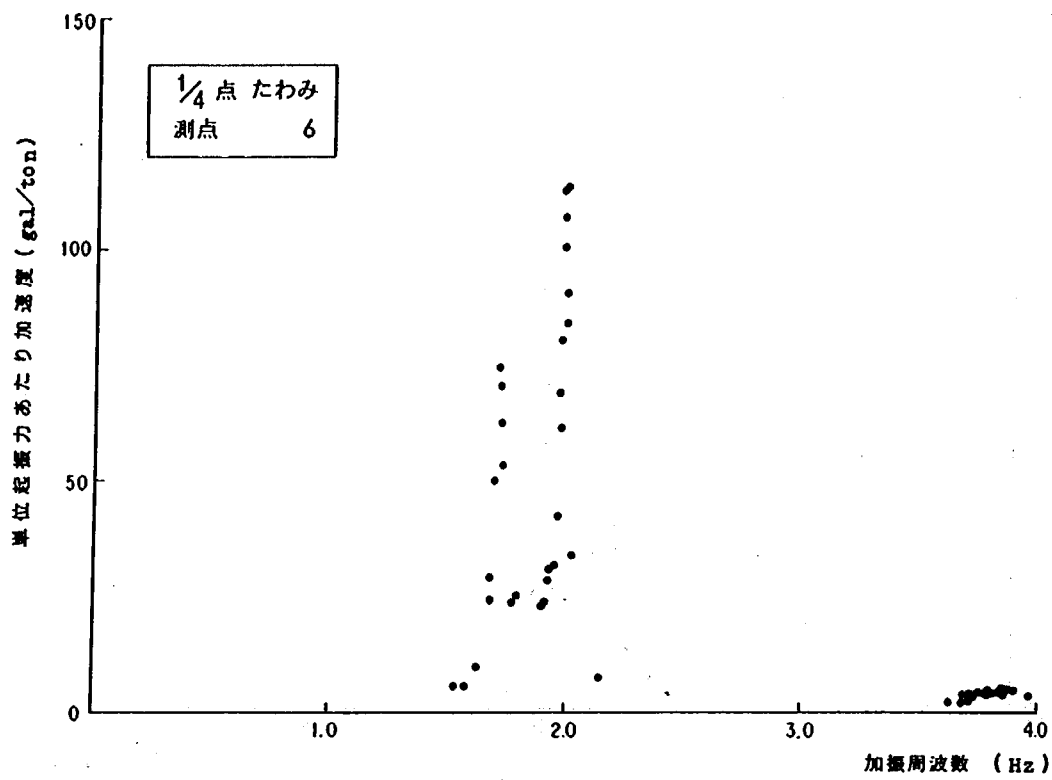


図-3.1(51) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点6)

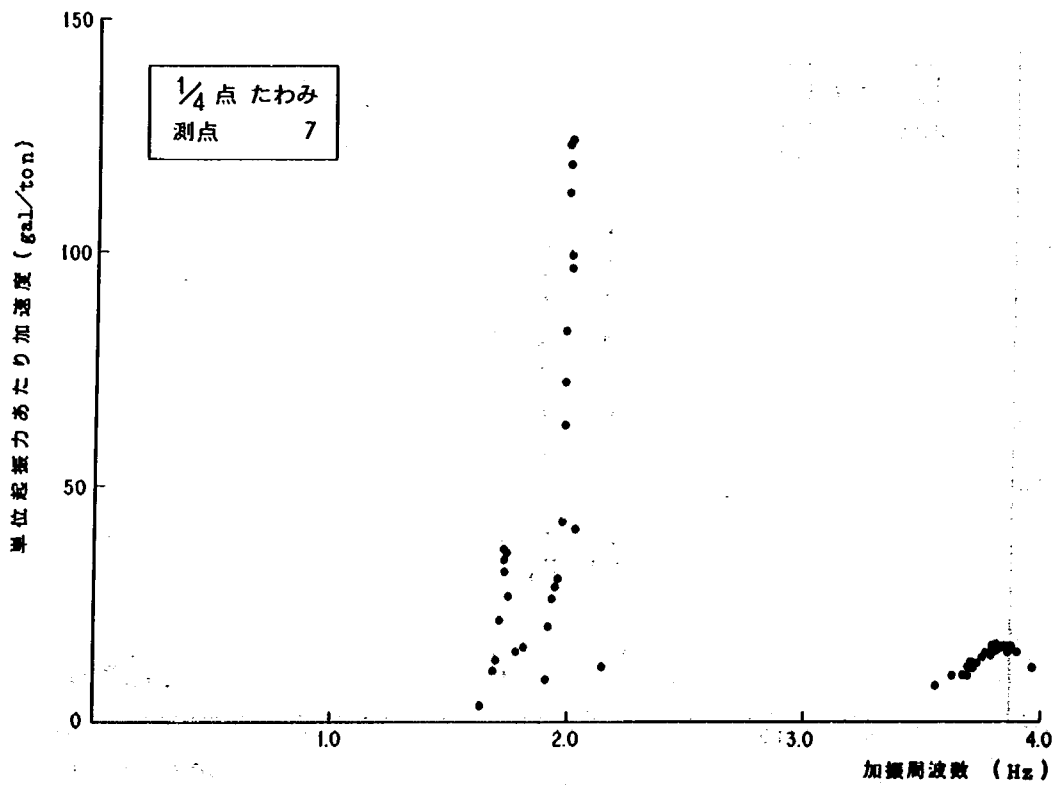


図-3.1(52) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点7)

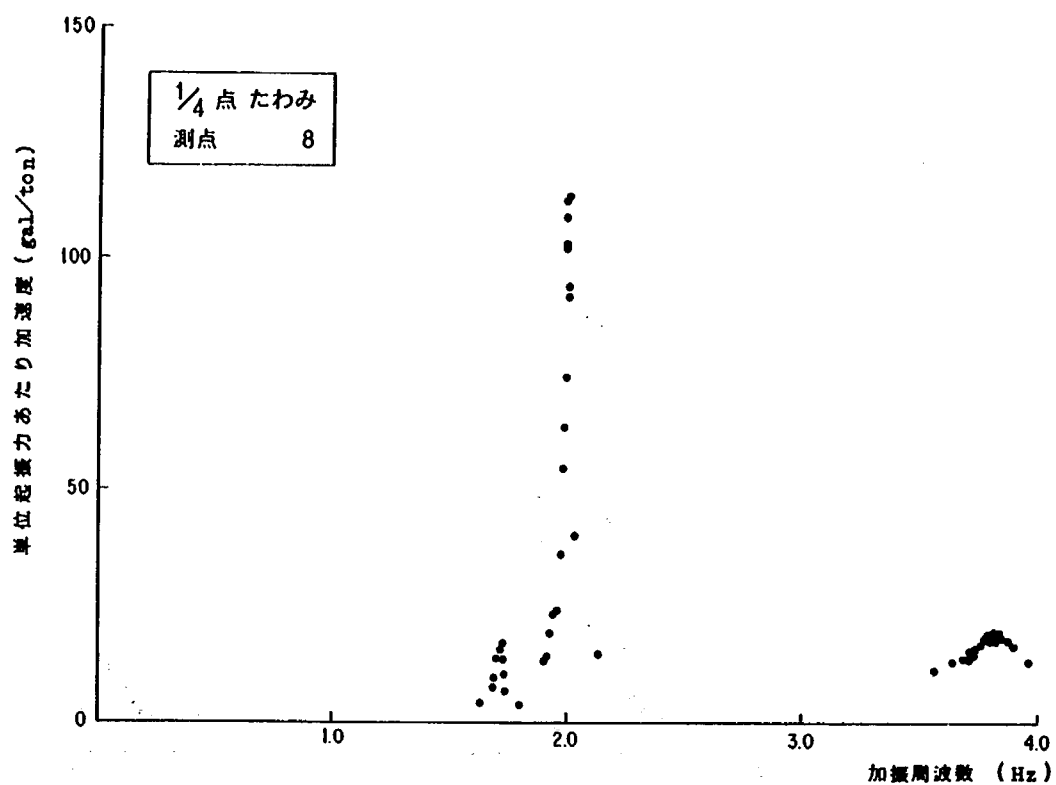


図-3.1(53) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点8)

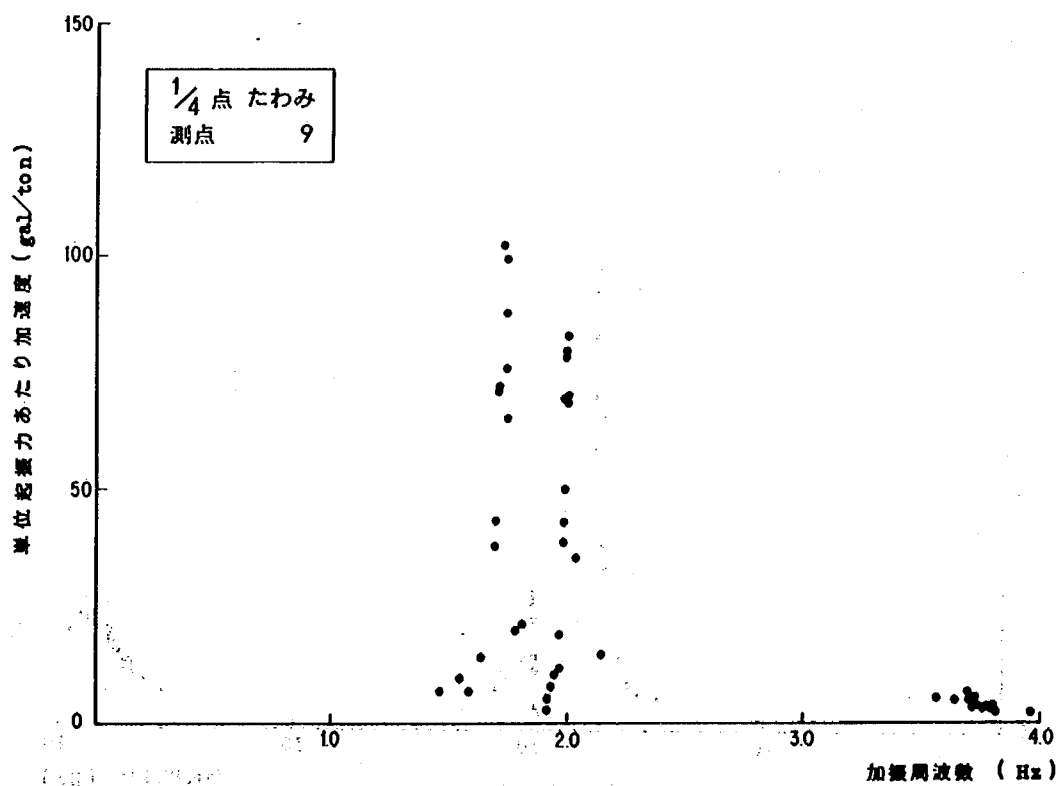


図-3.1(54) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点9)

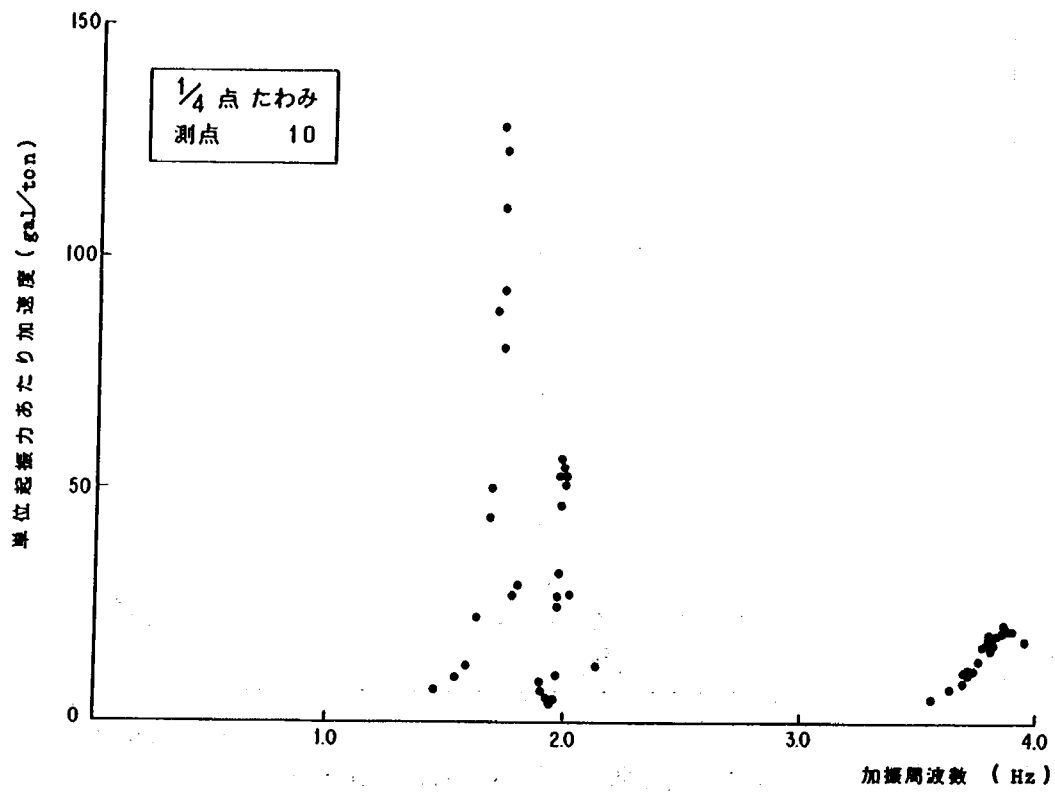


図-3.155 共振曲線 (1/4点たわみ、測点10)

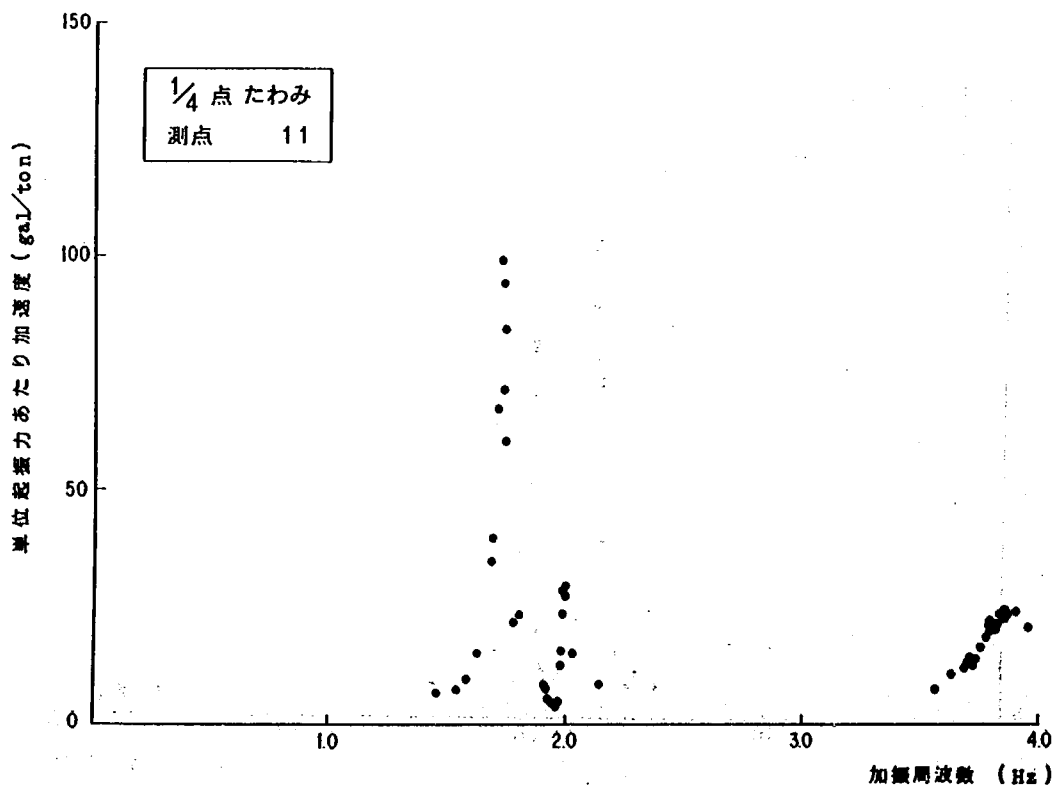


図-3.156 共振曲線 (1/4点たわみ、測点11)

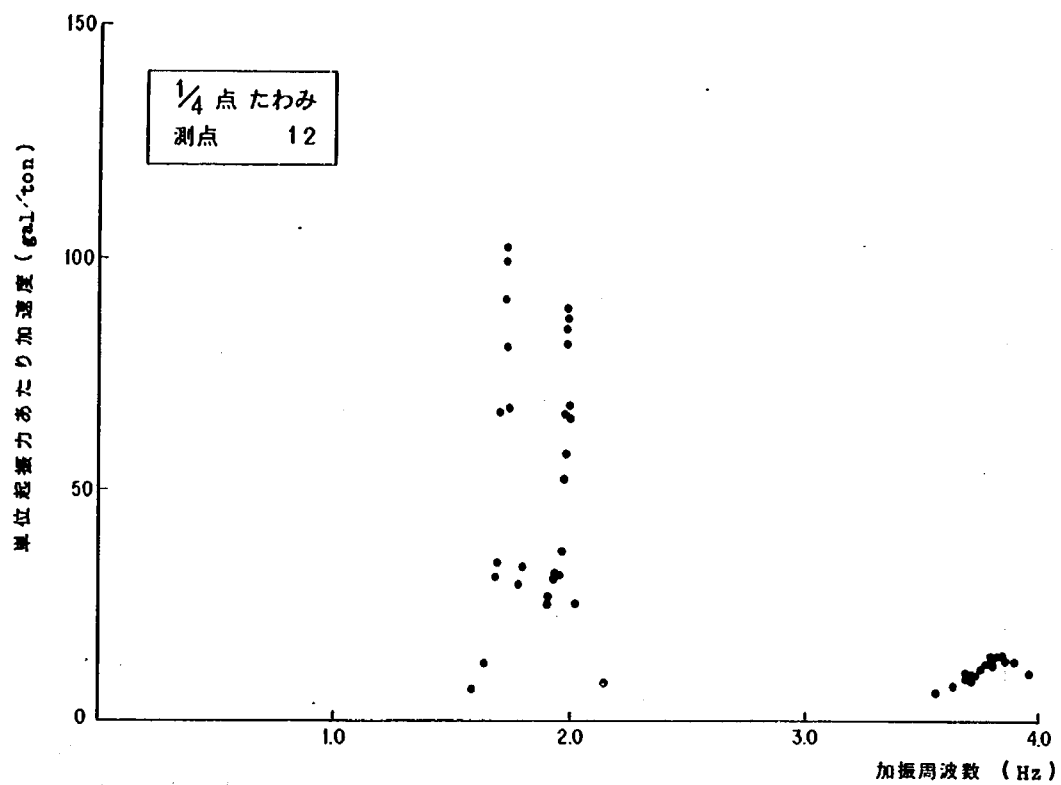


図-3.157 共振曲線 (1/4点たわみ、測点12)

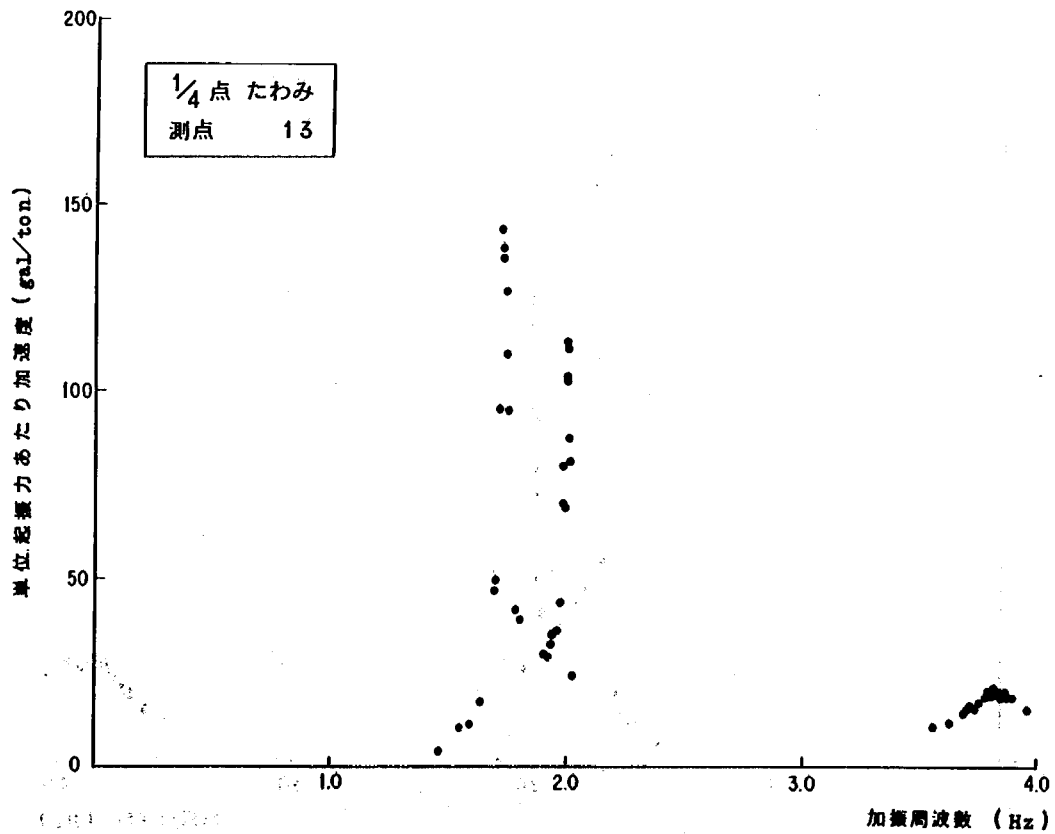


図-3.158 共振曲線 (1/4点たわみ、測点13)

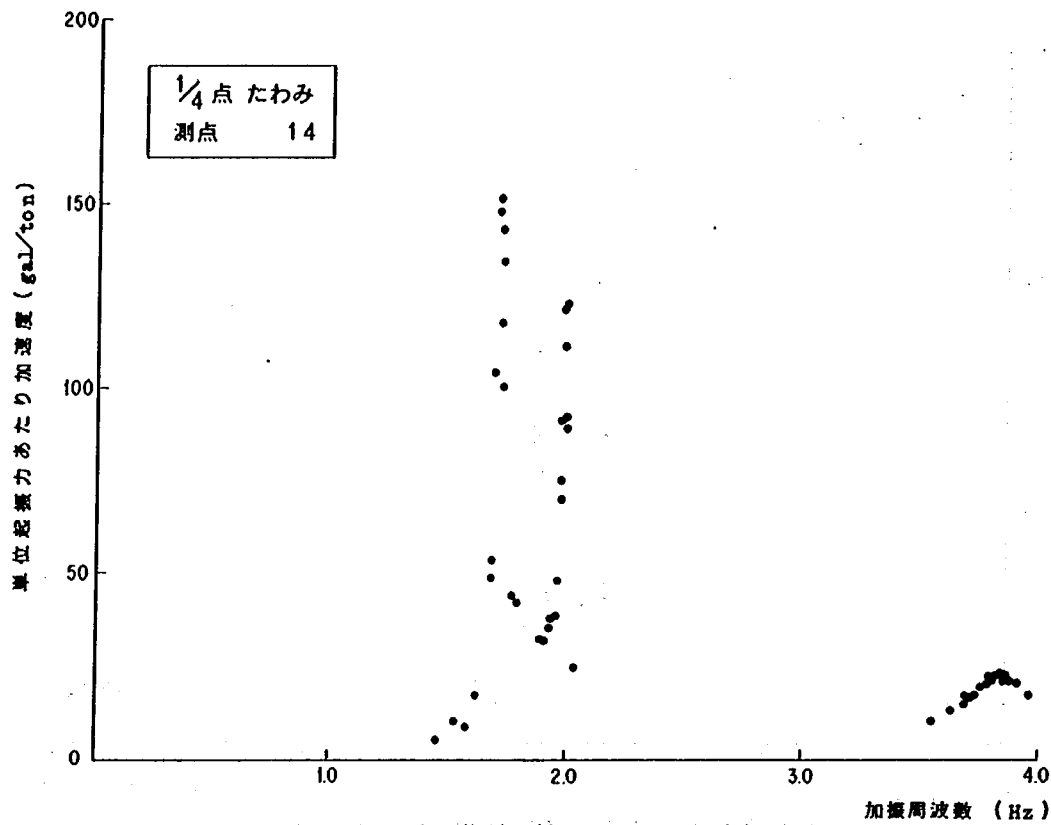


図-3.1(59) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点14)

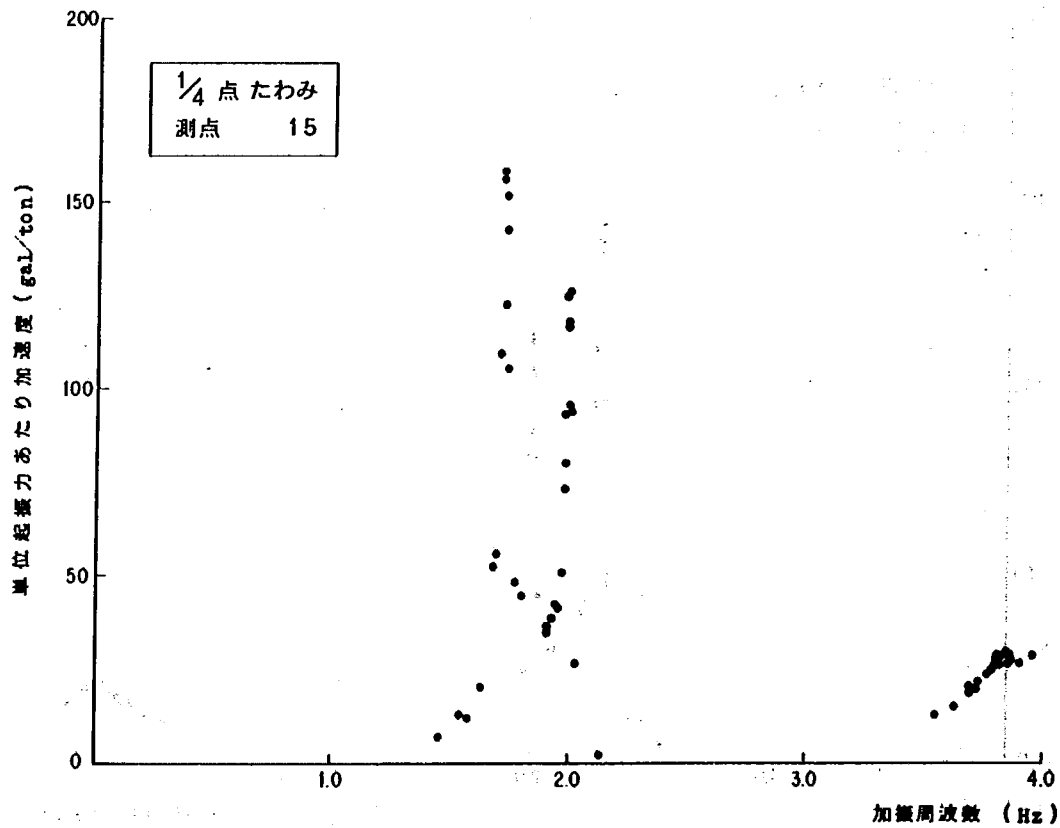


図-3.1(60) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点15)

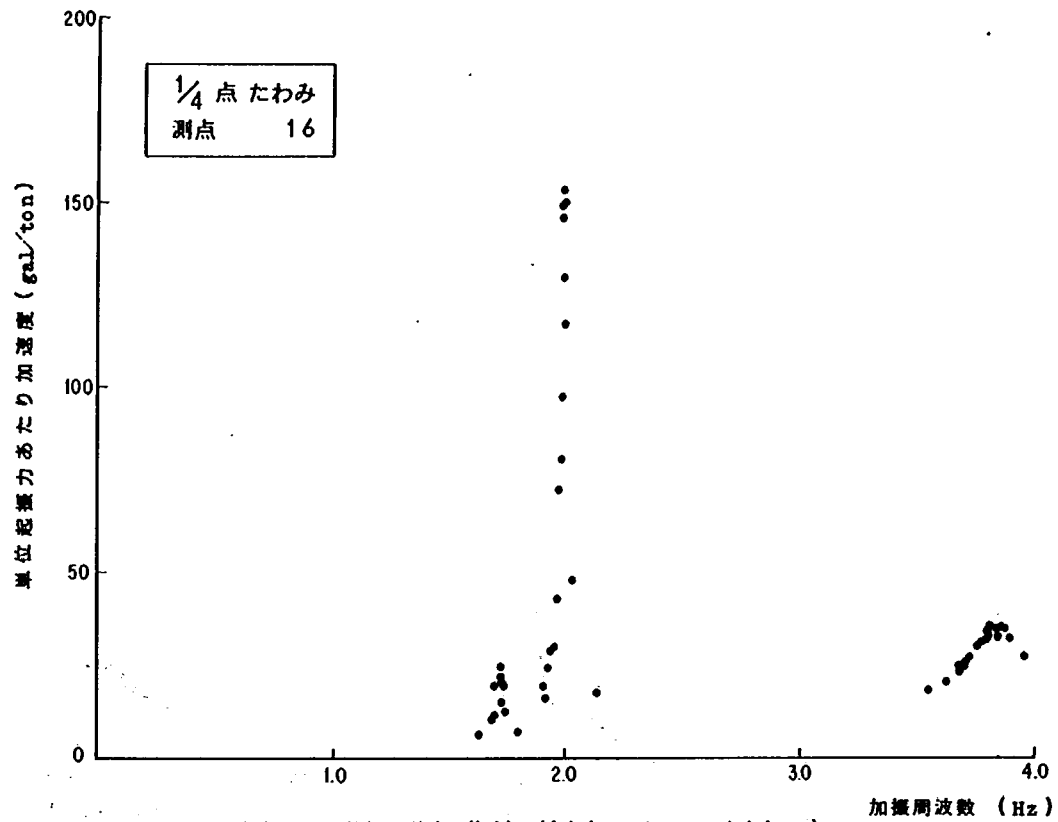


図-3.1(61) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点16)

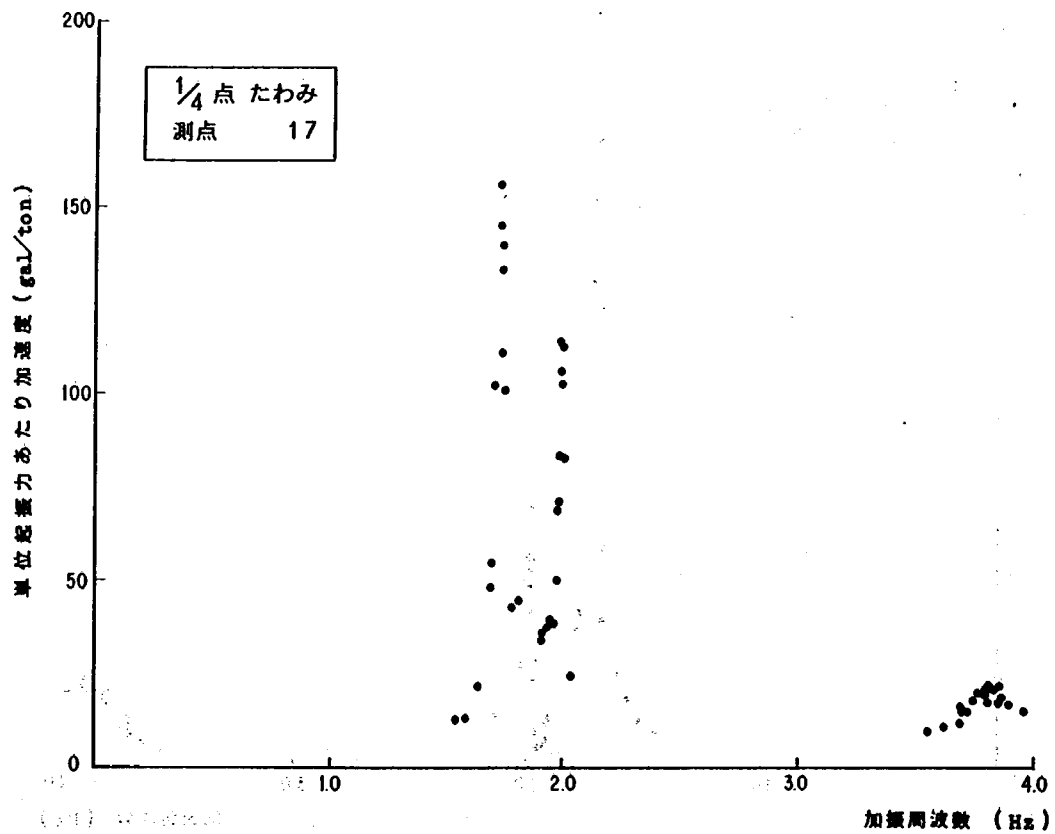


図-3.1(62) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点17)

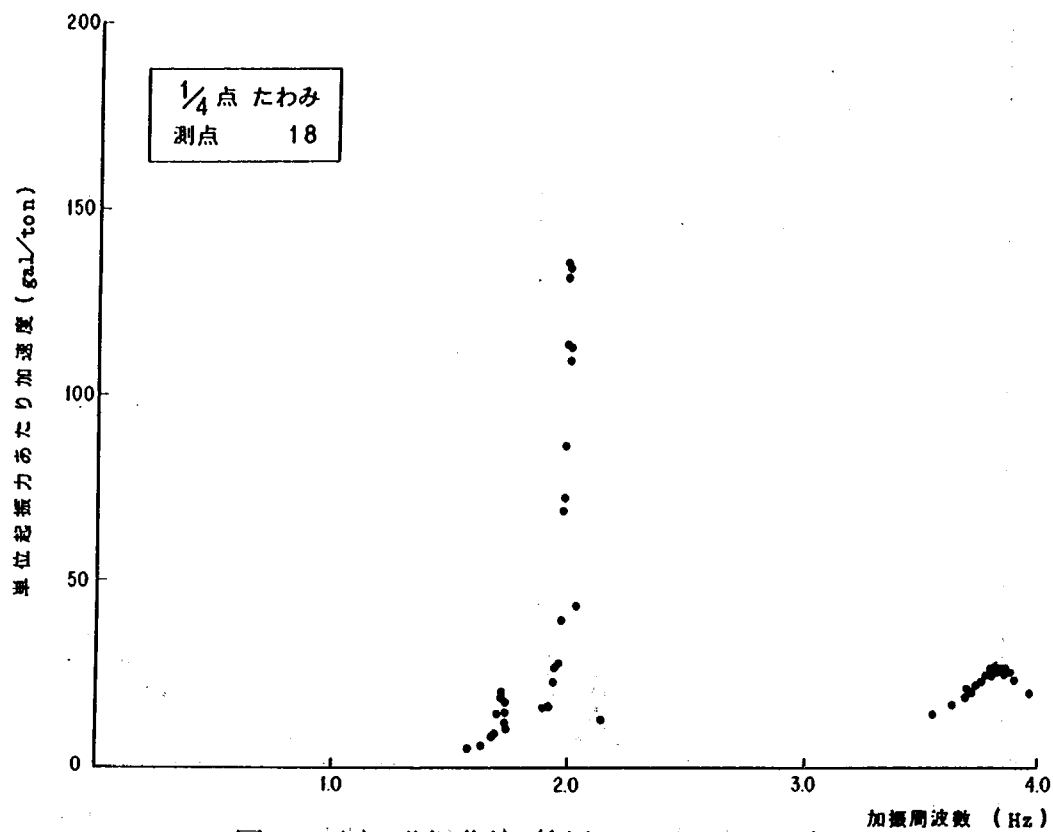


図-3.1(63) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点18)

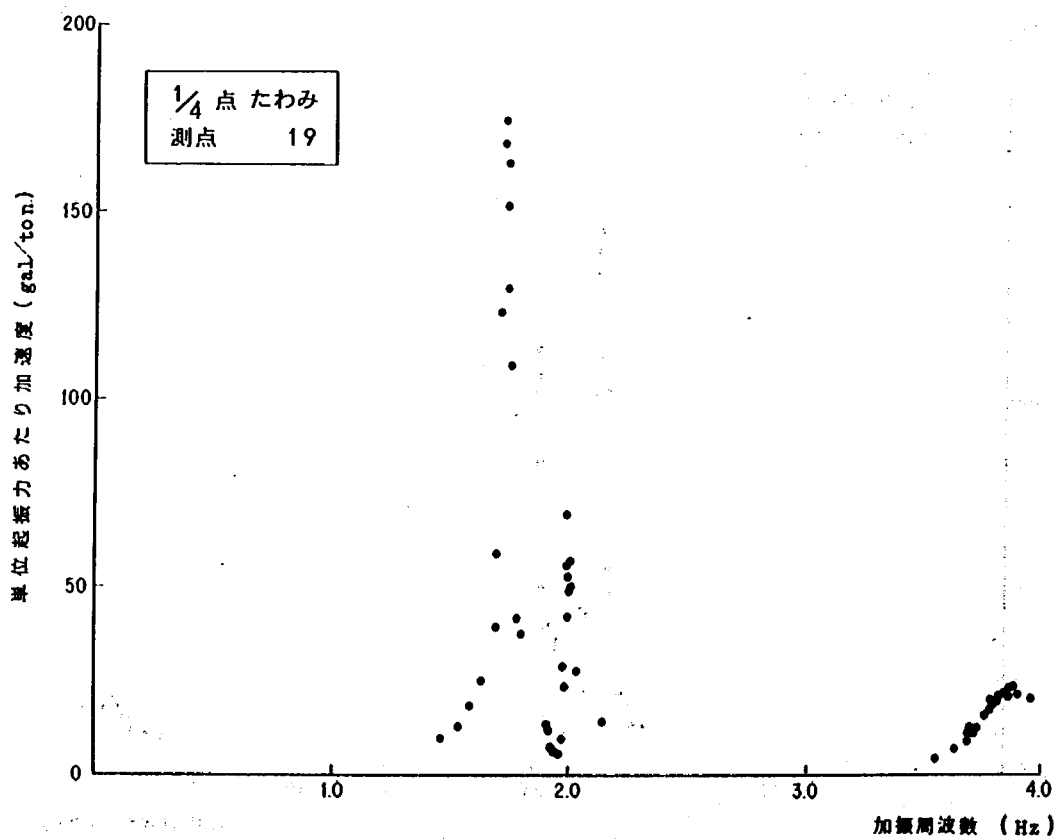


図-3.1(64) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点19)

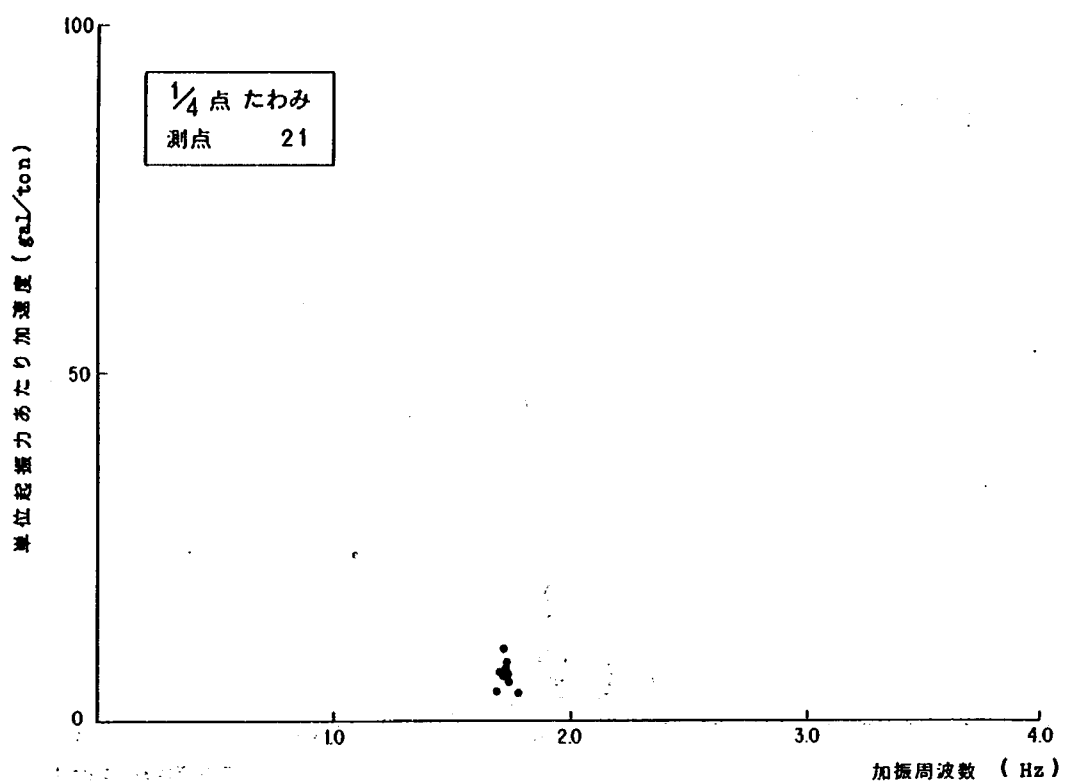


図-3.1(65) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点21)

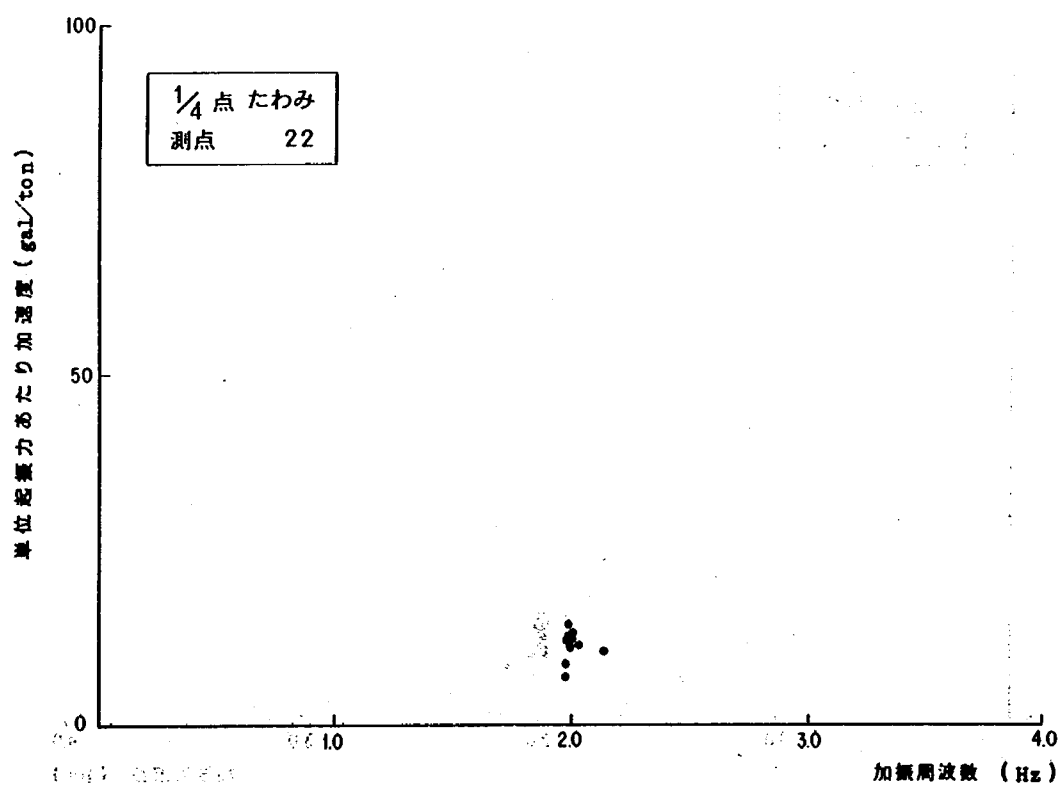


図-3.1(66) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点22)

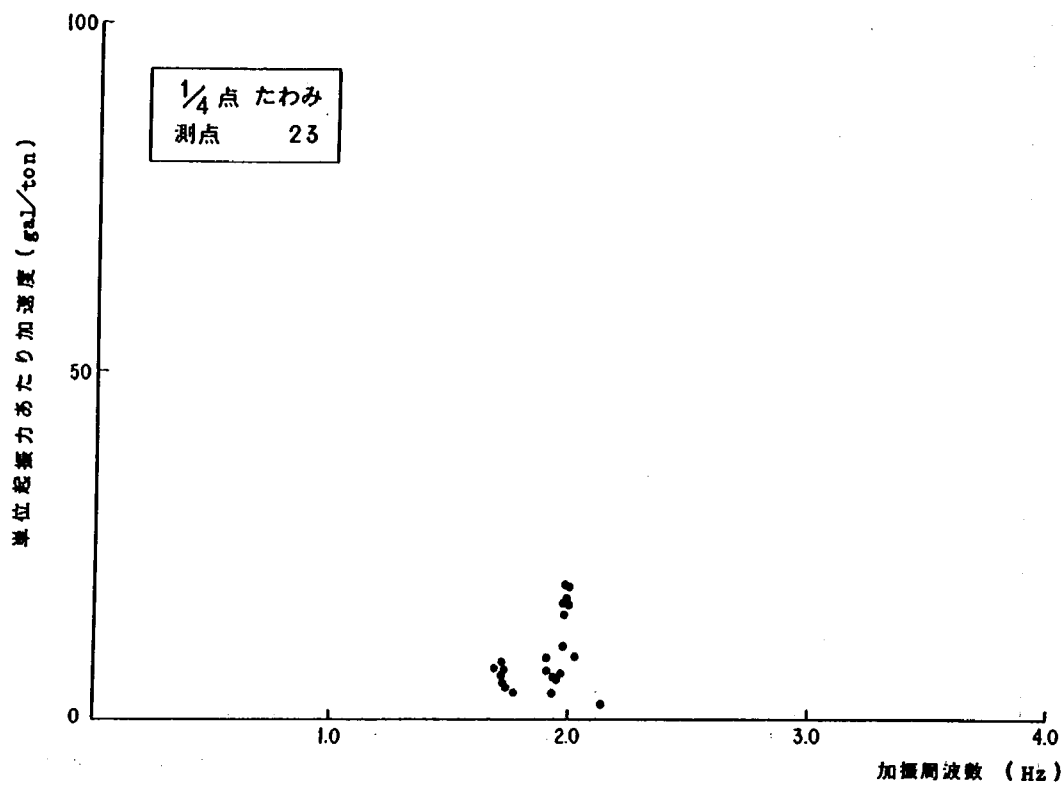


図-3.1(67) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点23)

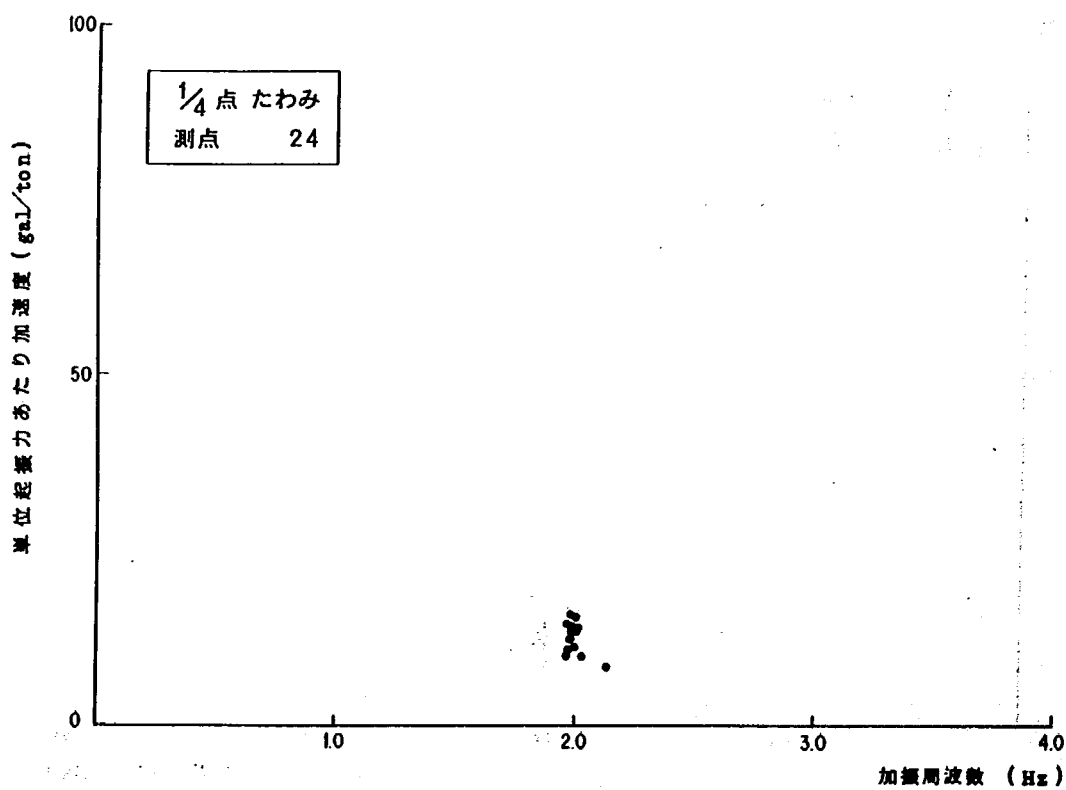


図-3.1(68) 共振曲線 (1/4点たわみ、測点24)

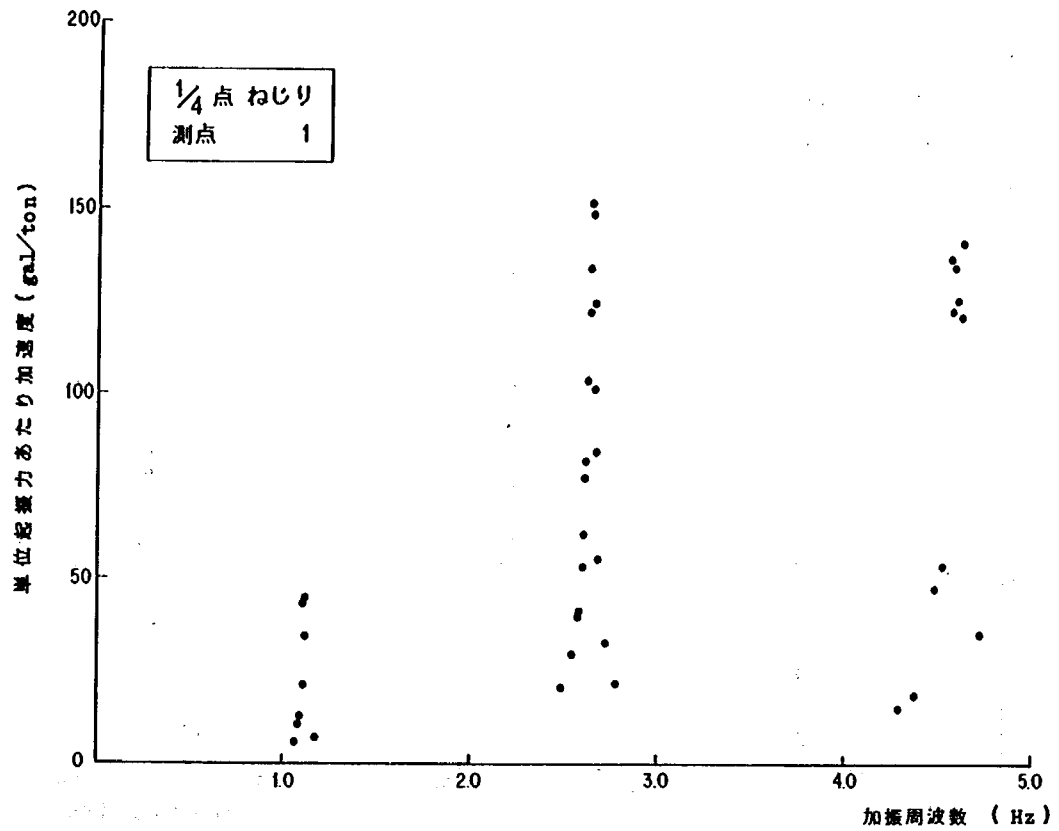


図-3.1(69) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点1)

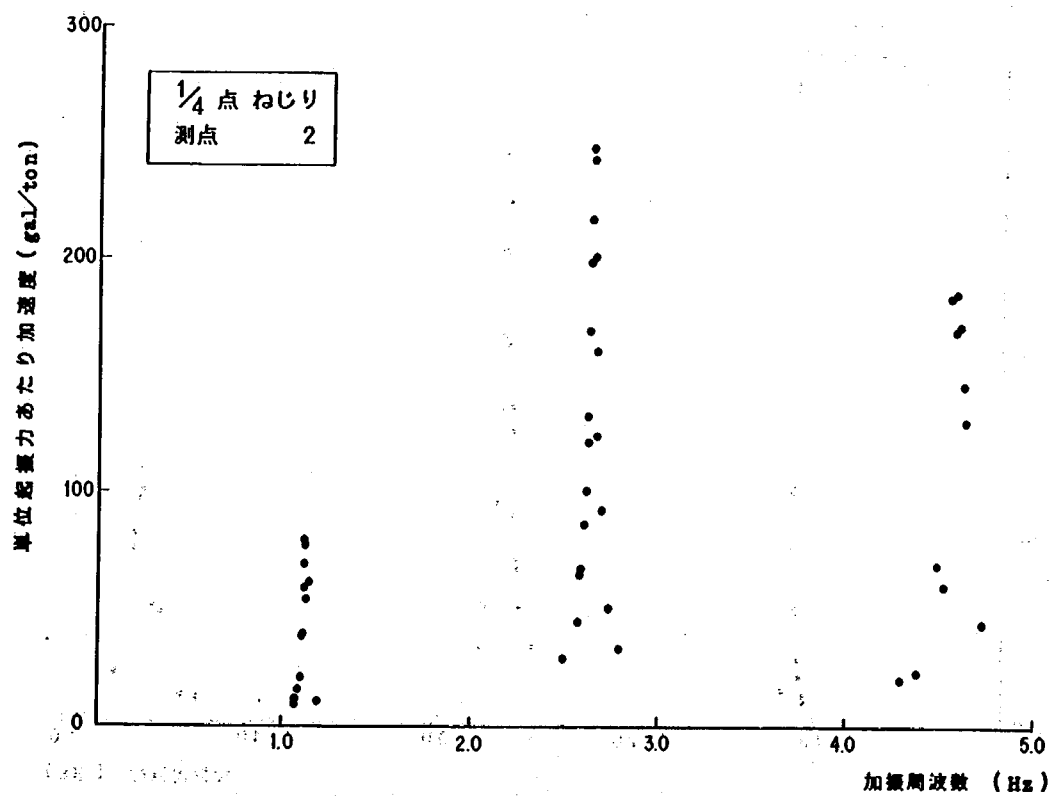


図-3.1(70) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点2)

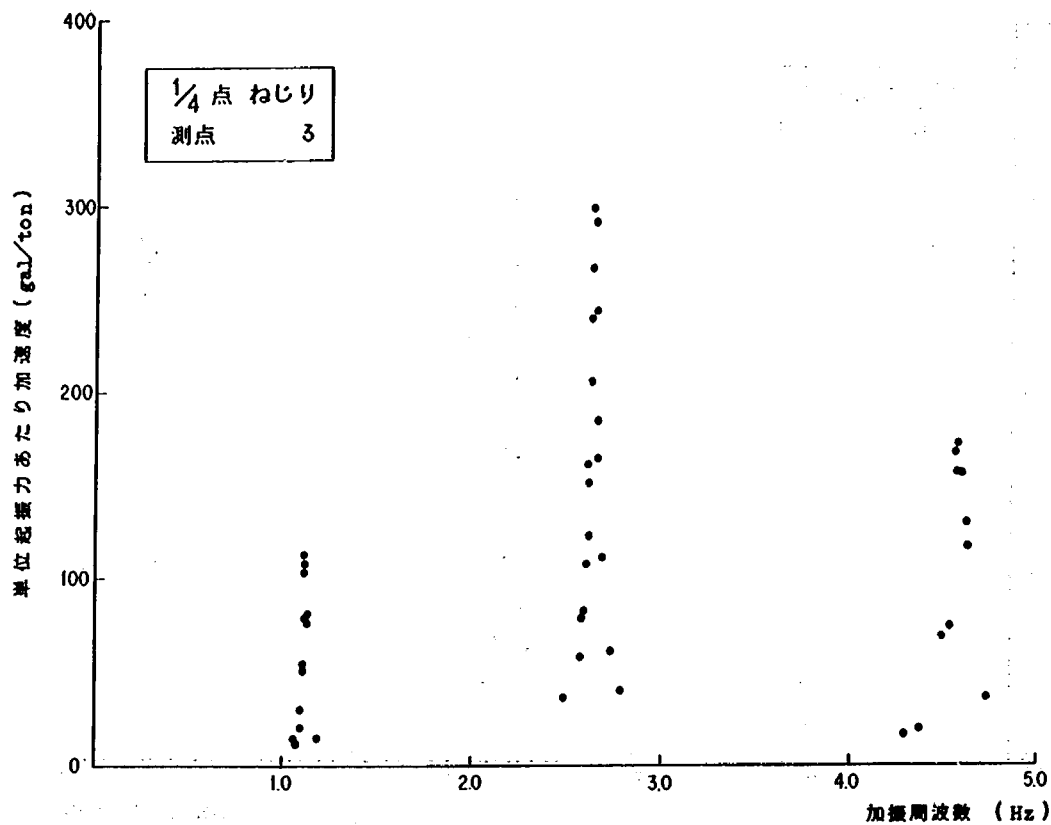


図-3.1(71) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点3)

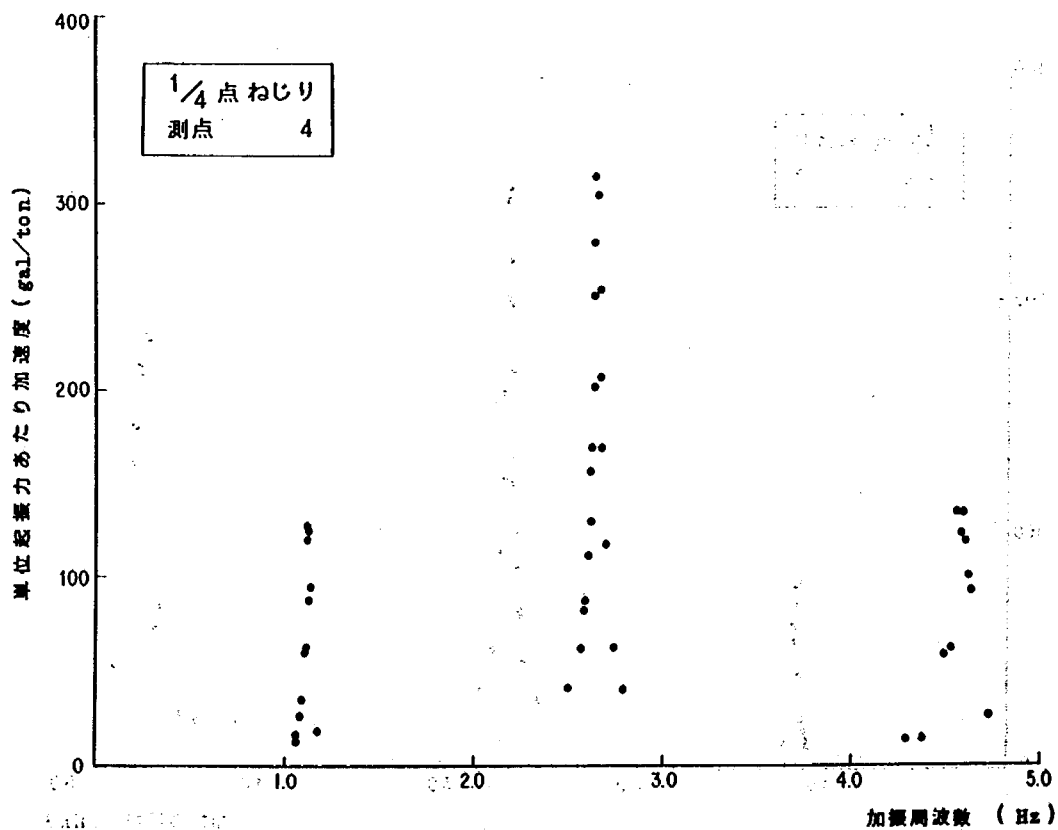


図-3.1(72) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点4)

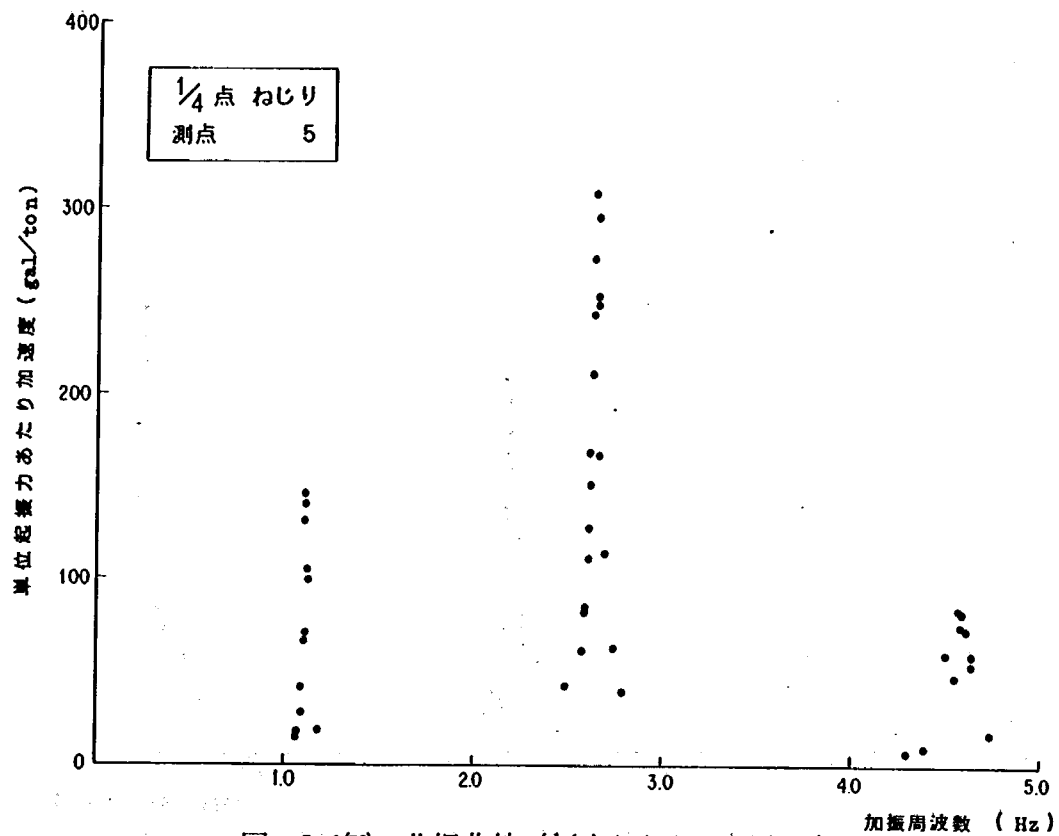


図-3.1(73) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点5)

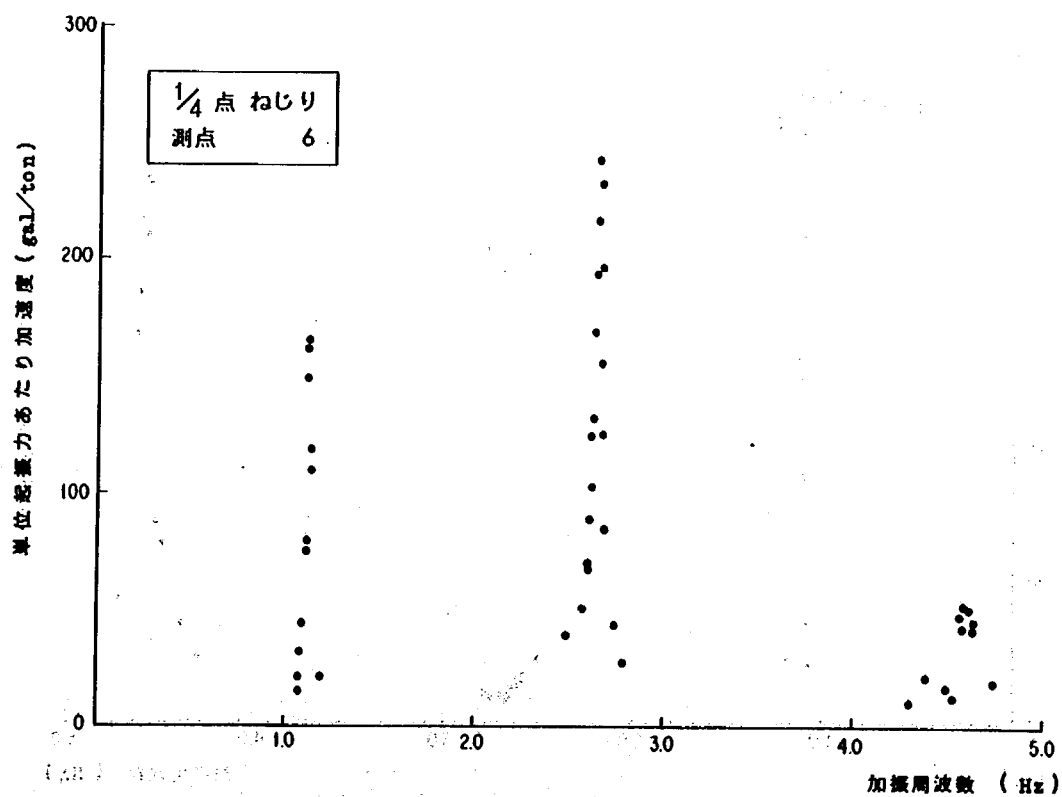


図-3.1(74) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点6)

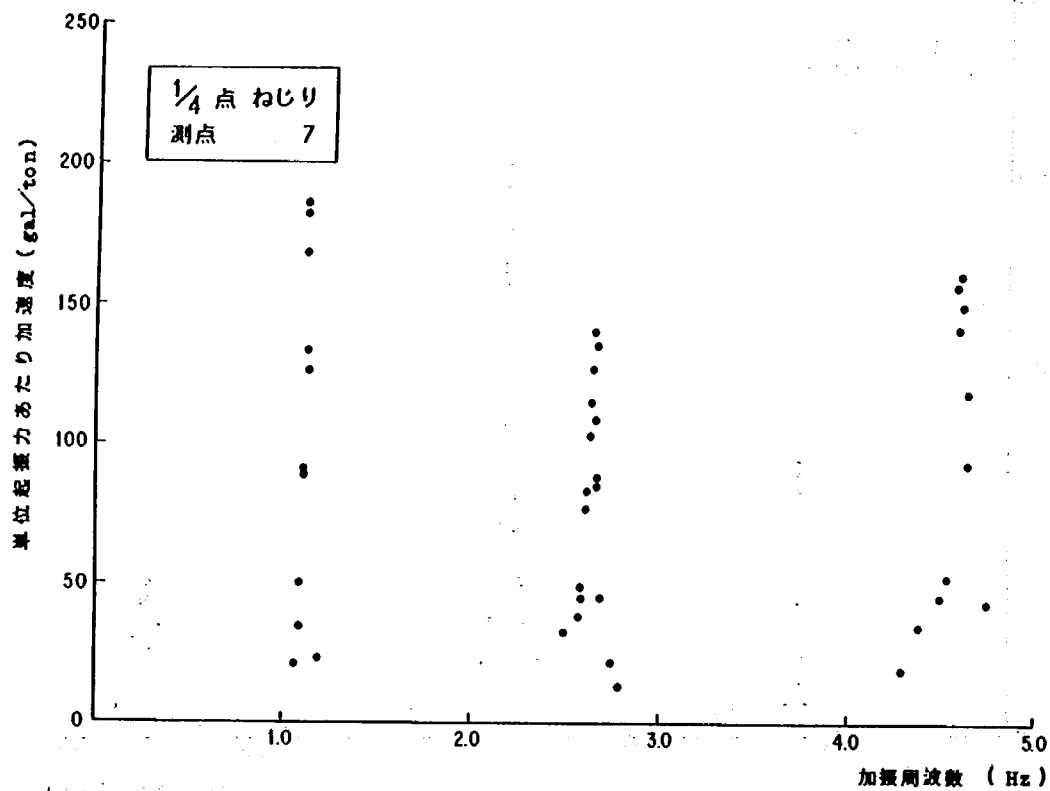


図-3.175 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点7)

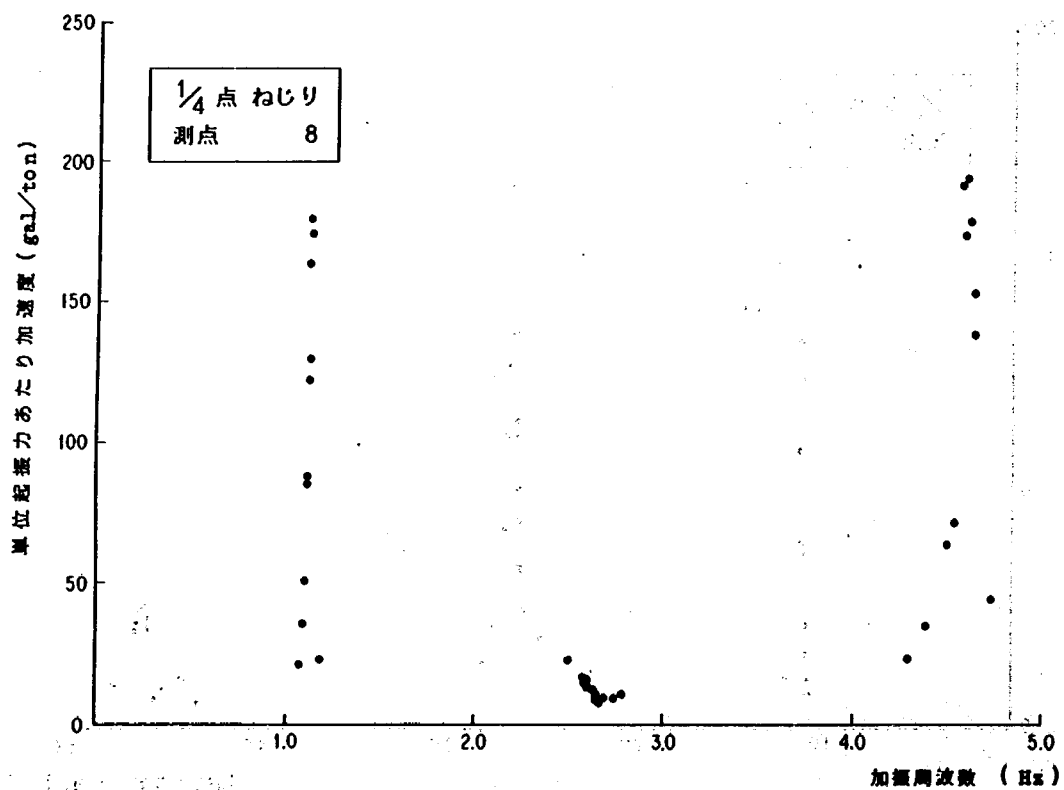


図-3.176 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点8)

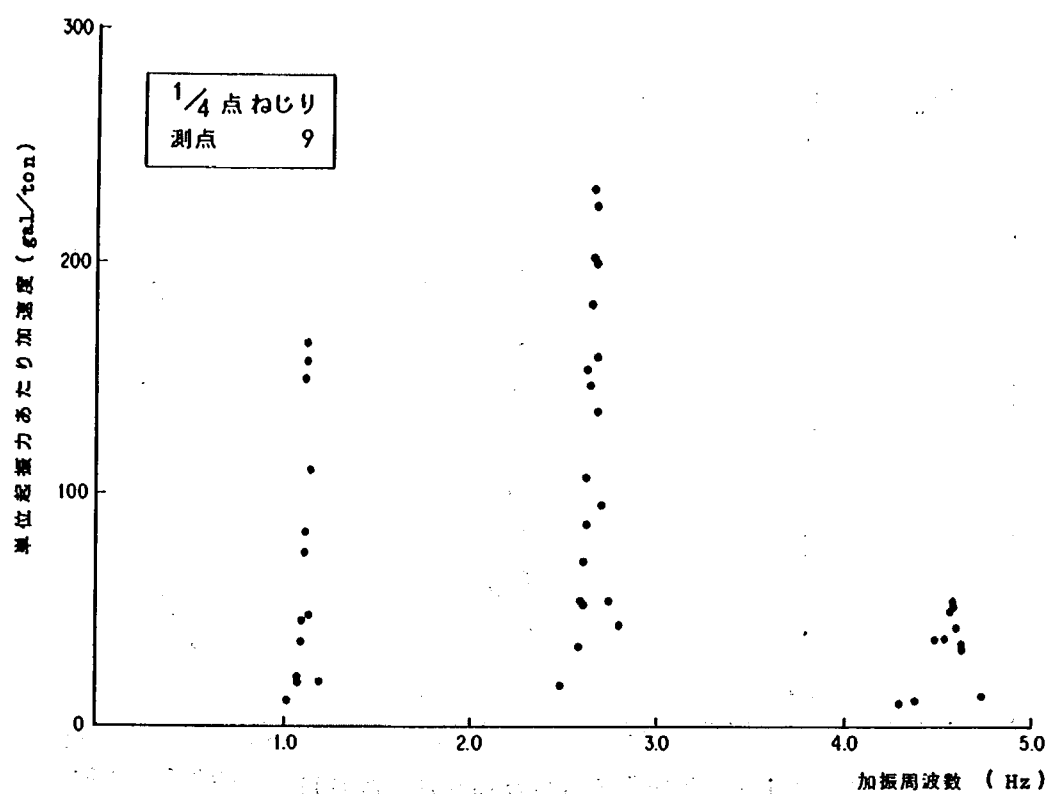


図-3.1(7) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点9)

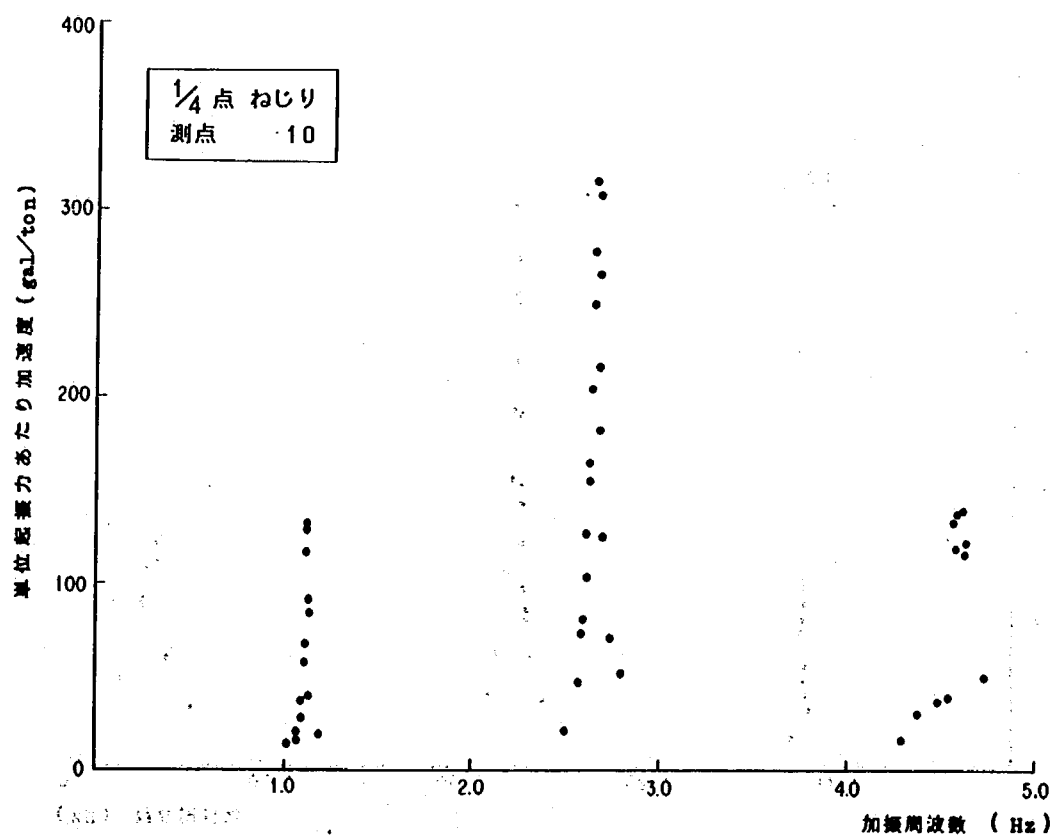


図-3.1(8) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点10)

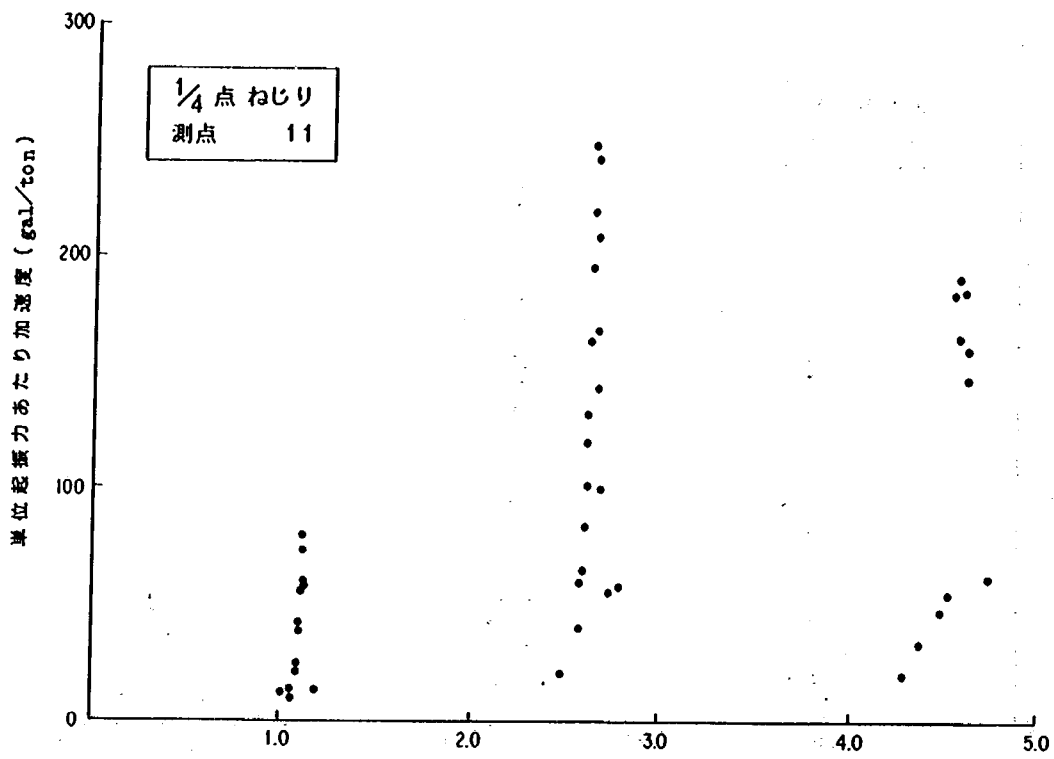


図-3.1(79) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点11) 加振周波数 (Hz)

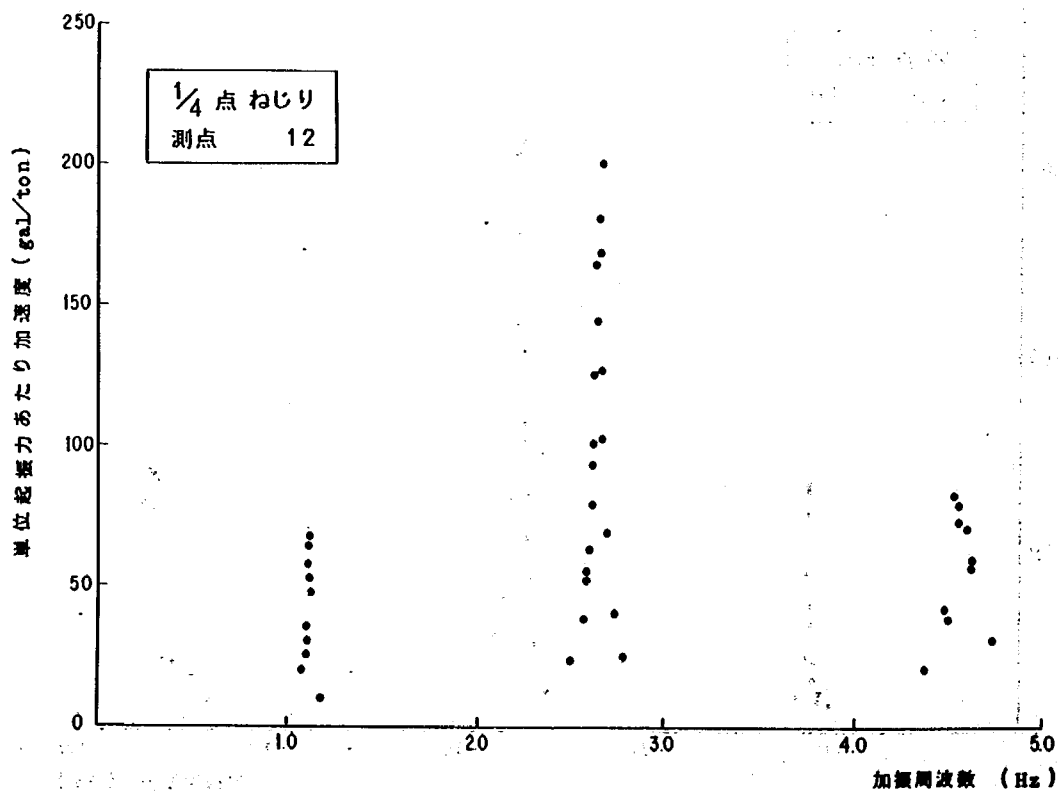


図-3.1(80) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点12)

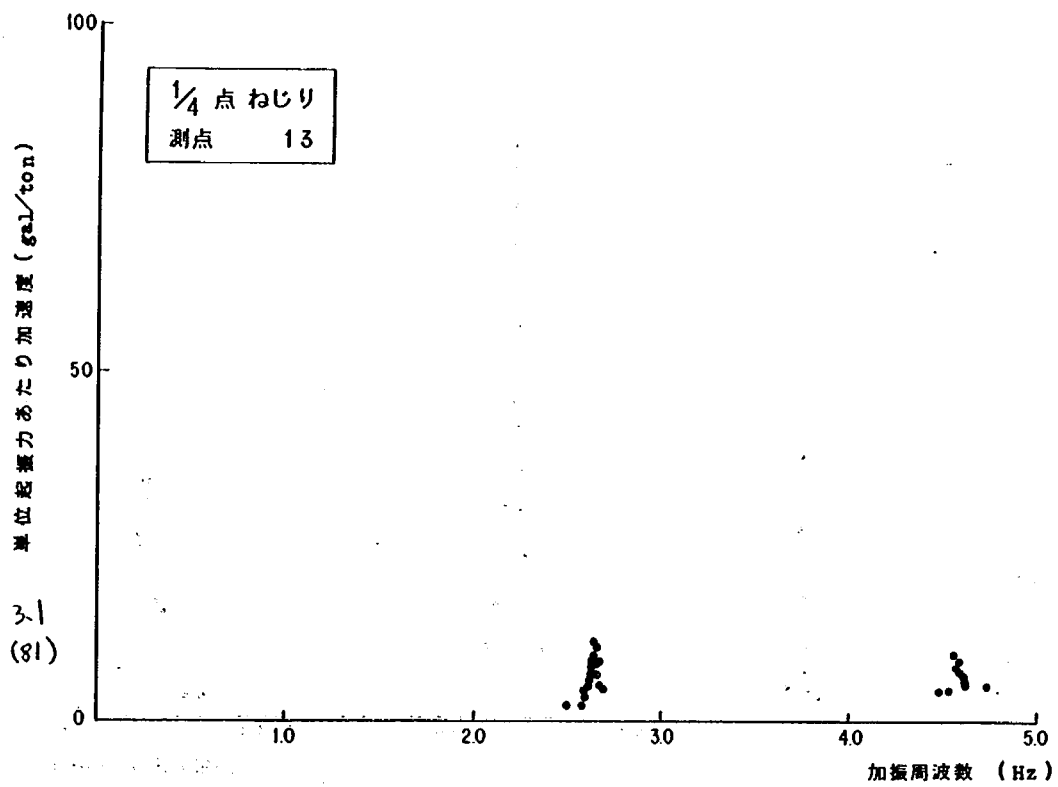


図-3.181 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点13)

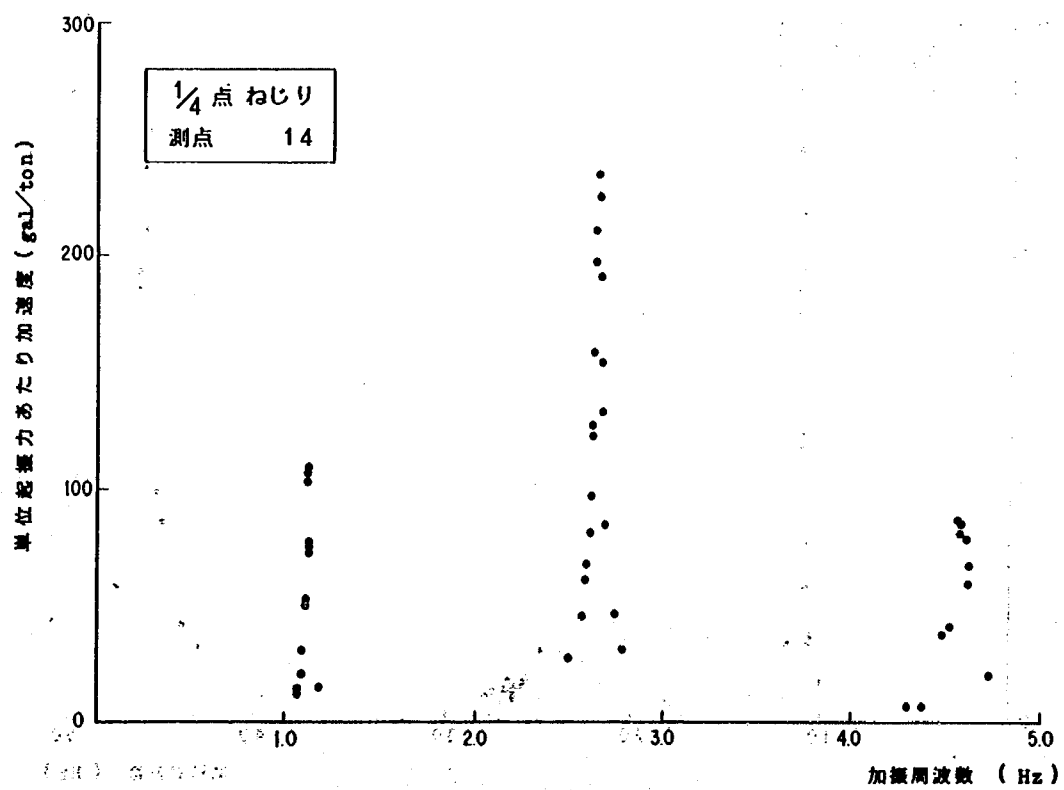


図-3.182 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点14)

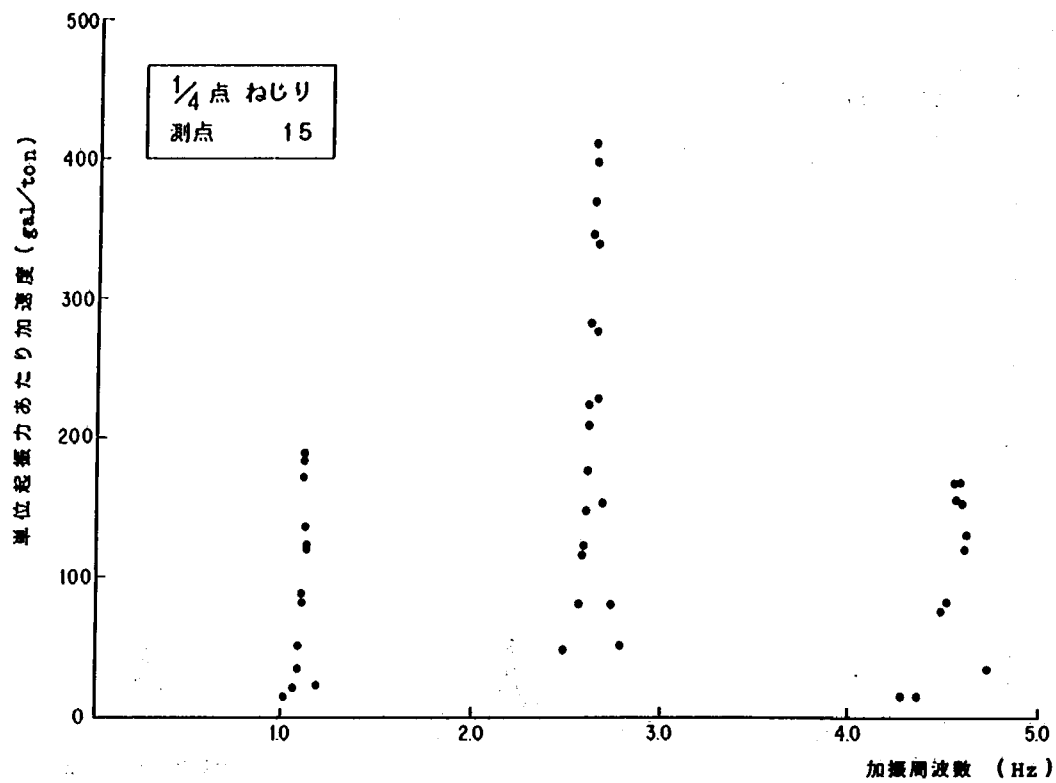


図-3.1(83) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点15)

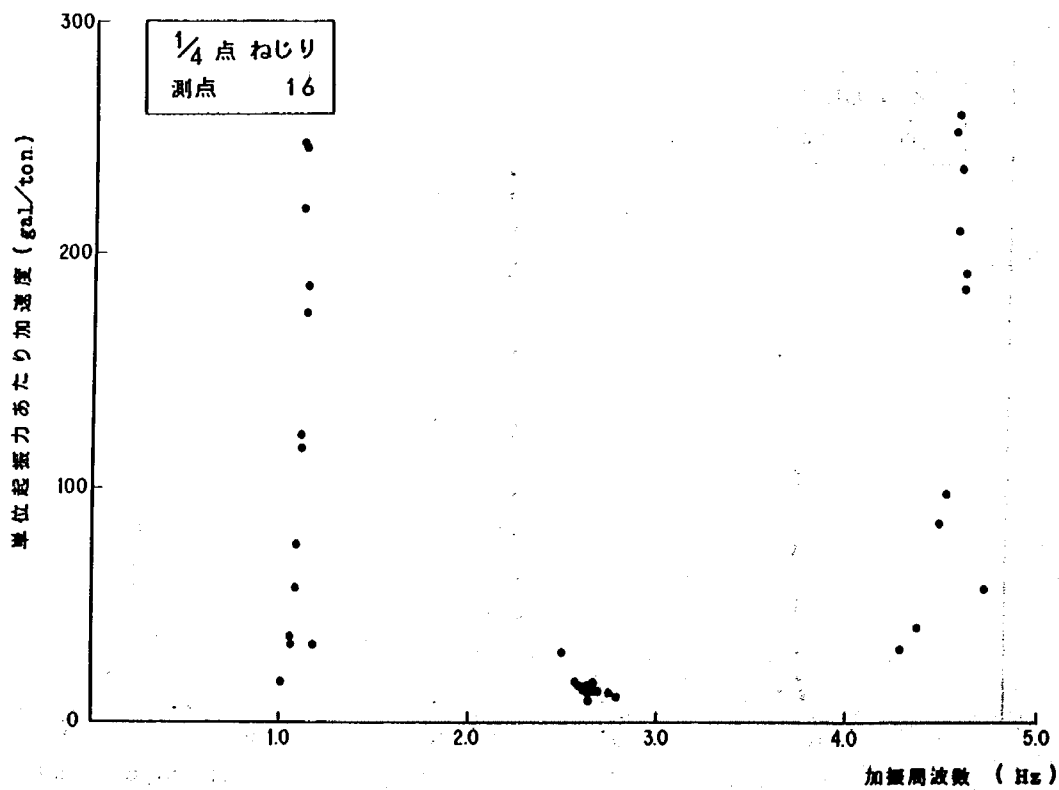


図-3.1(84) 共振曲線 (1/4ねじれ、測点16)

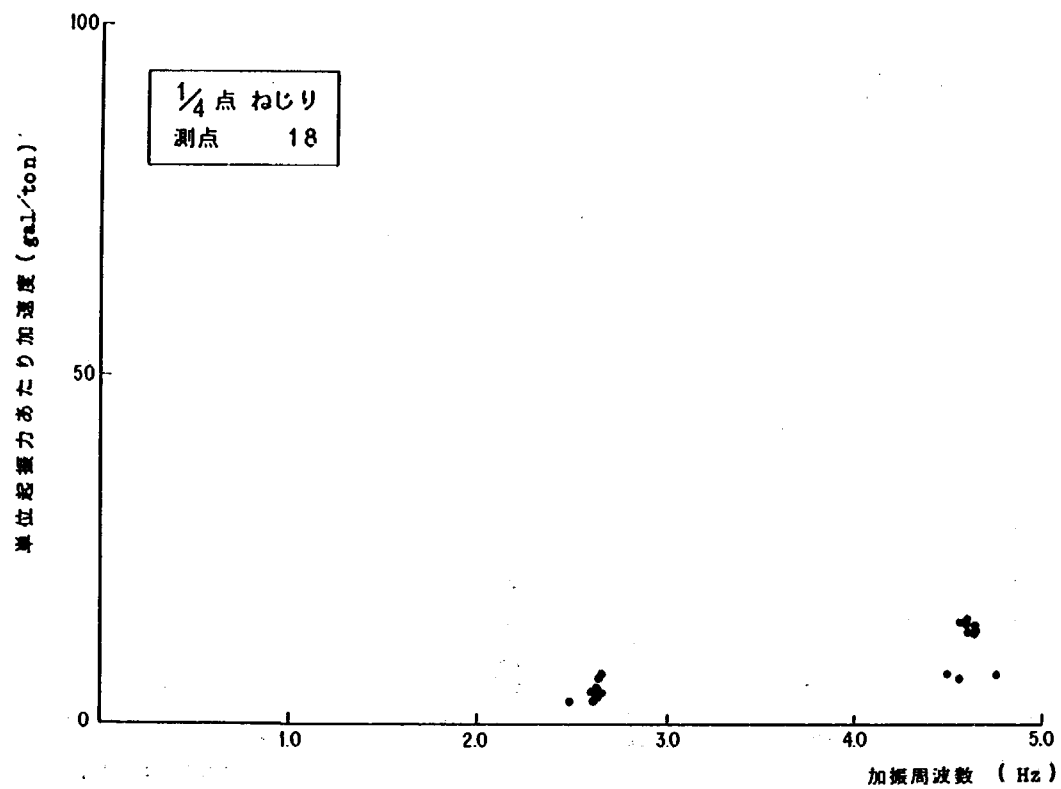


図-3.185 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点18)

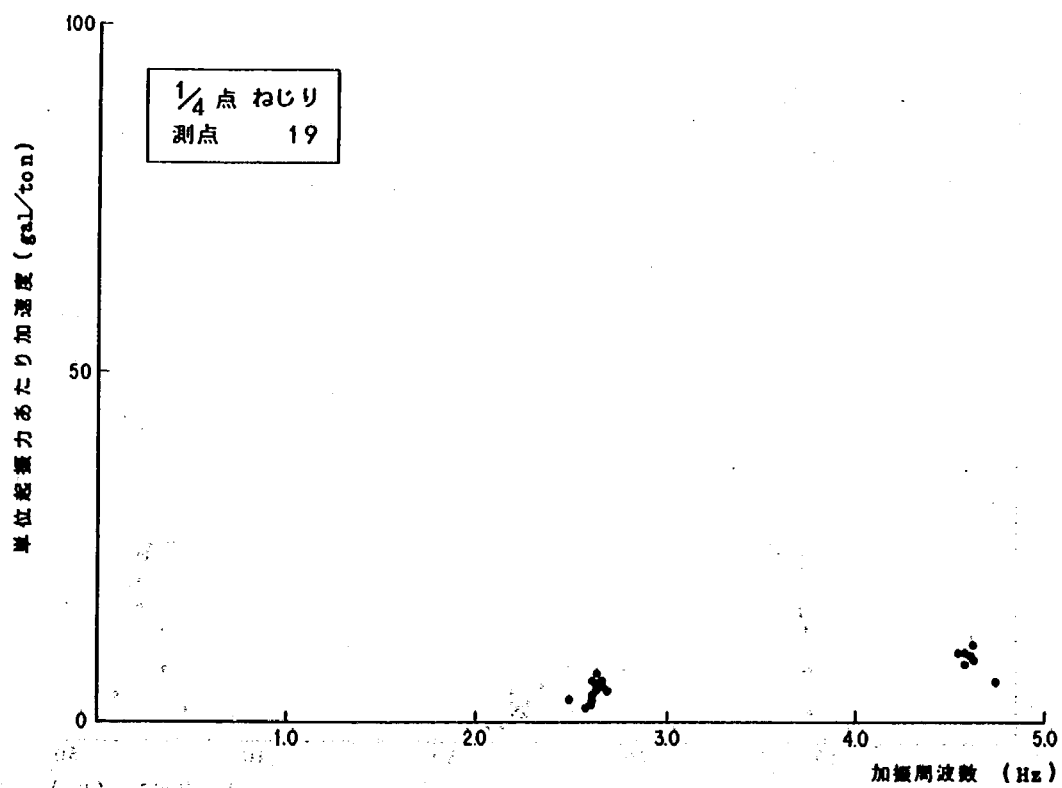


図-3.186 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点19)

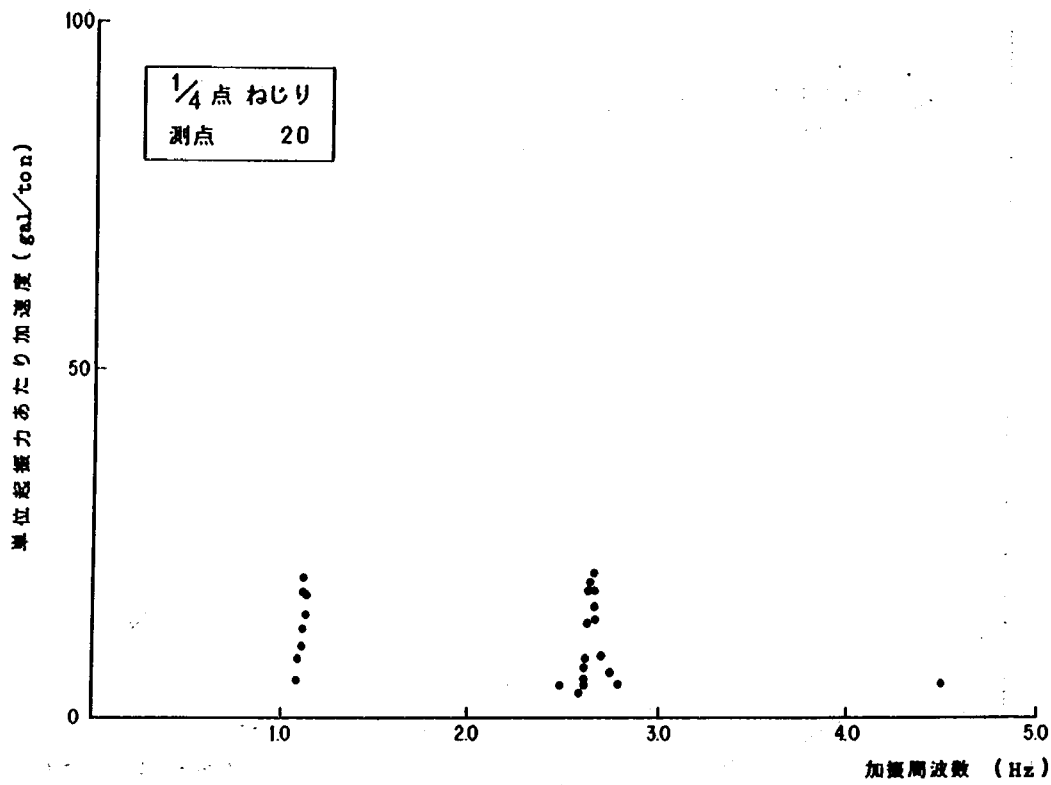


図-3.187 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点20)

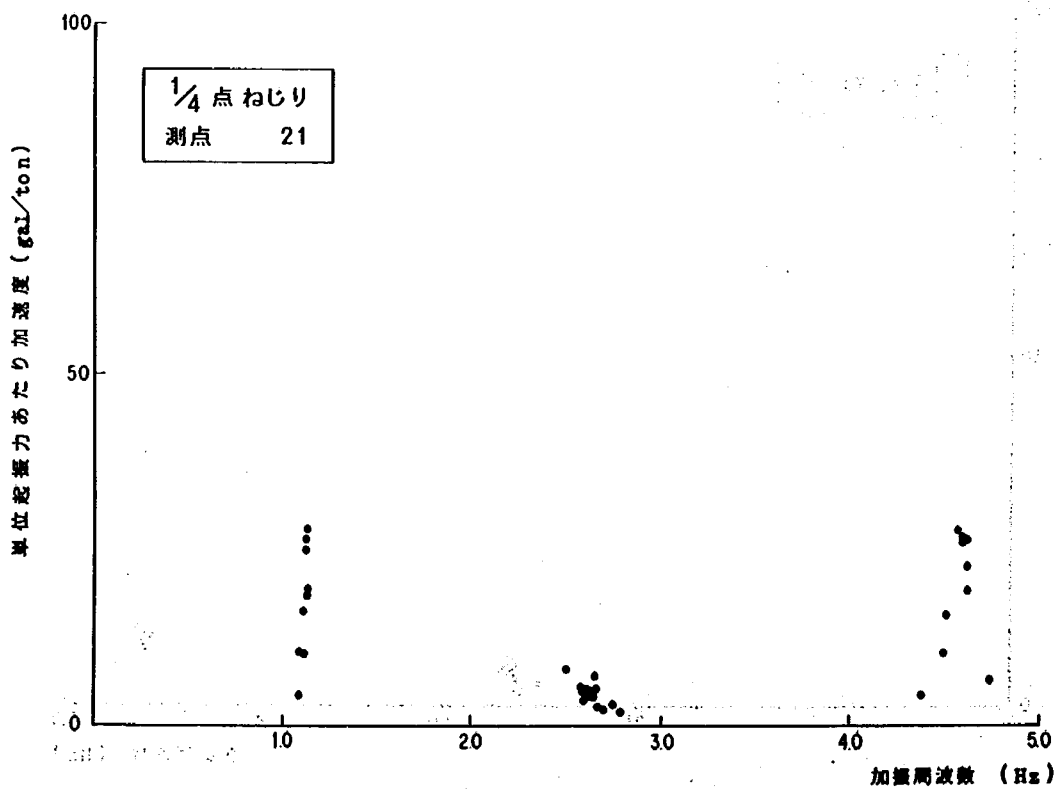


図-3.188 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点21)

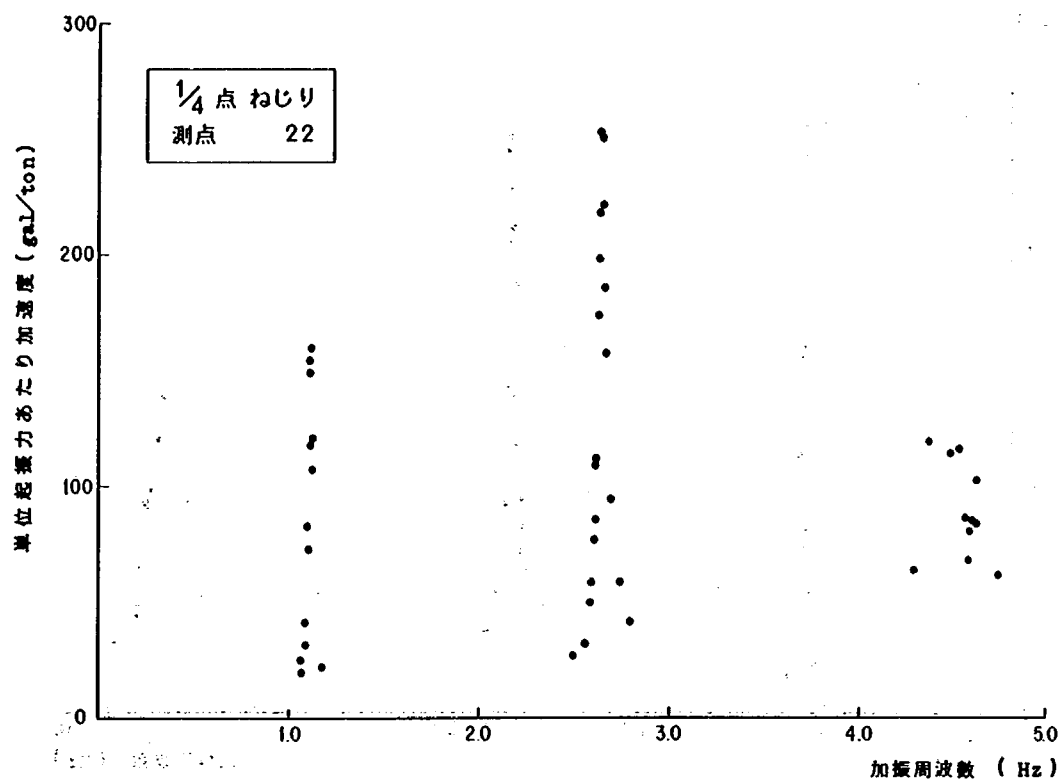


図-3.1(89) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点22)

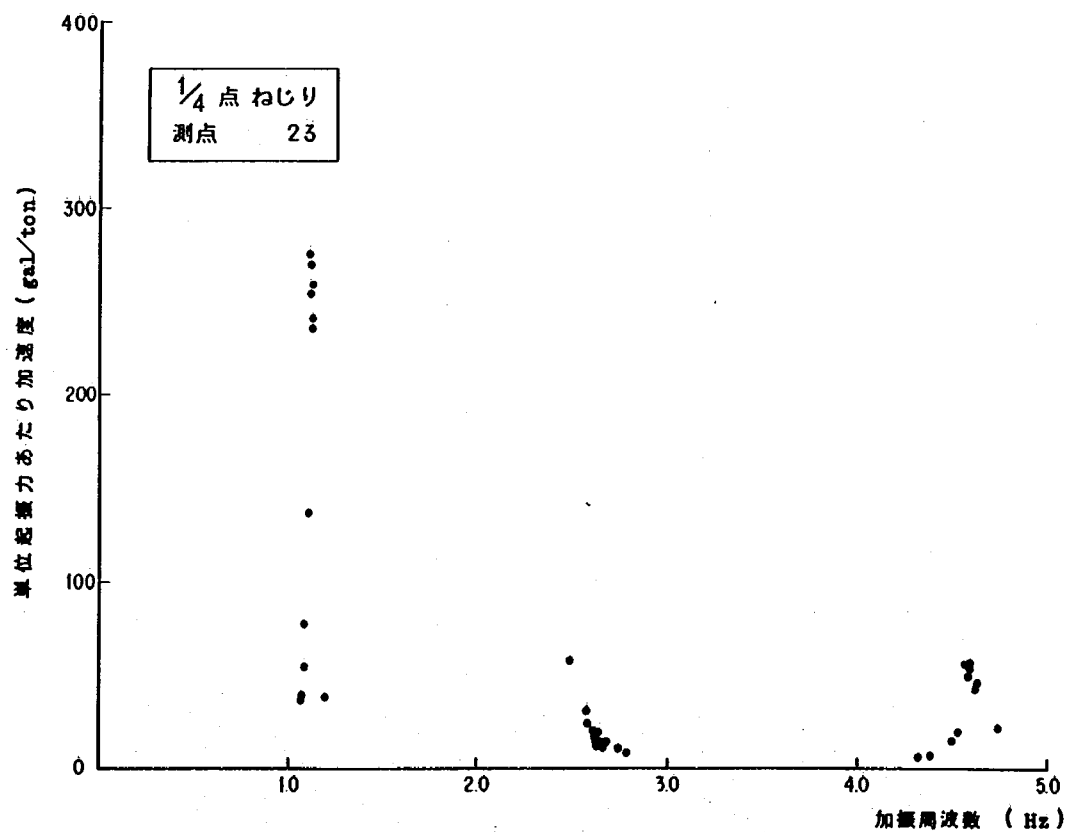


図-3.1(90) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点23)

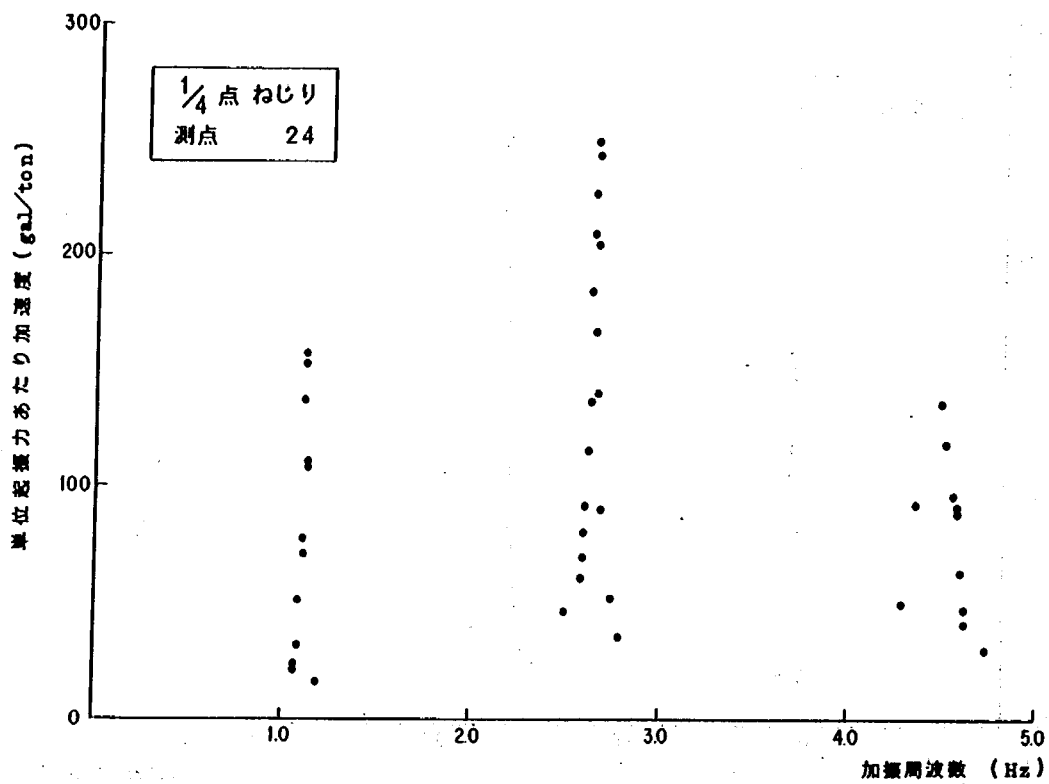


図-3.1(91) 共振曲線 (1/4点ねじれ、測点24)

$\frac{1}{4}$ 点 たわみ 1次モード 1.722 Hz

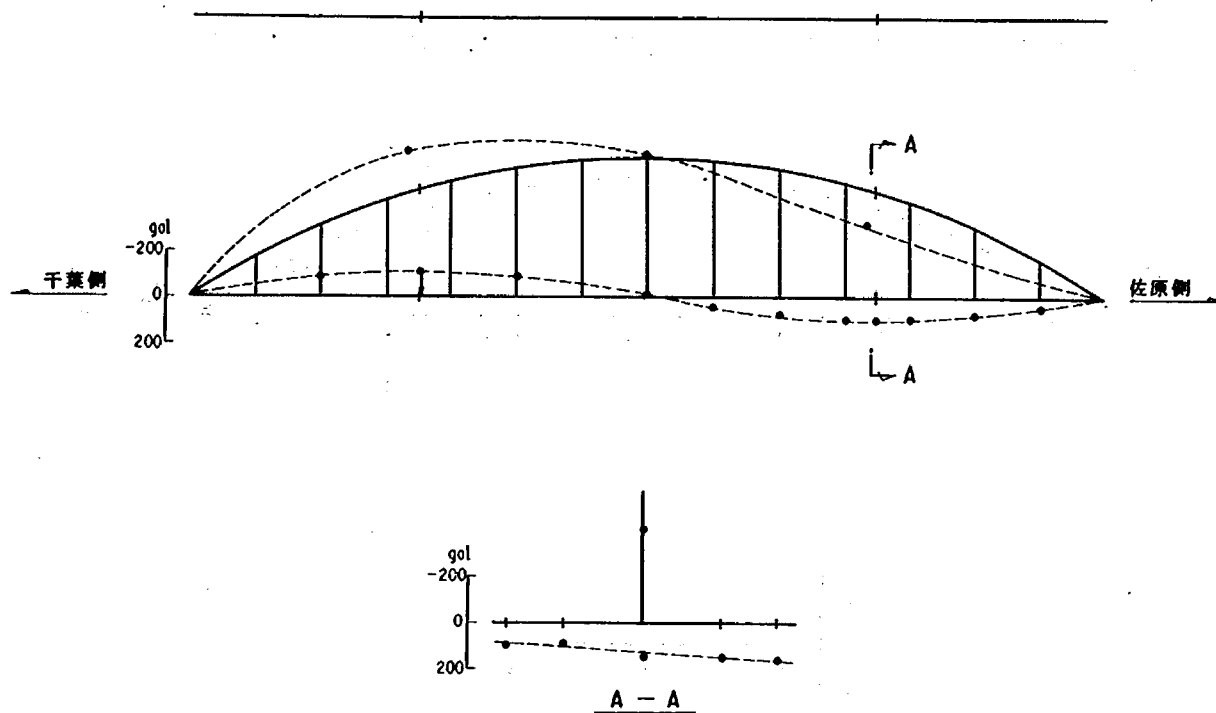


図-3.2(1) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、たわみ1次、1.722Hz)

$\frac{1}{2}$ 点 たわみ 2次モード 1.980 Hz

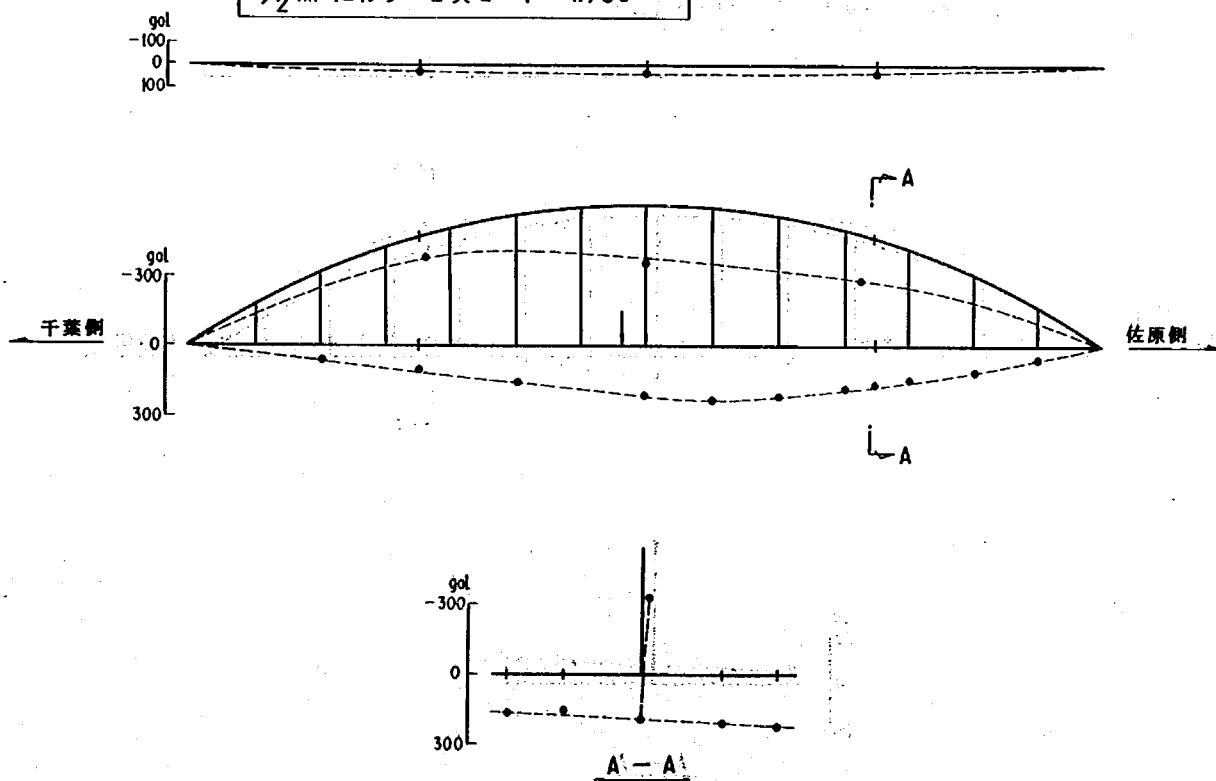


図-3.2(2) 固有振動モード ($\frac{1}{2}$ 点加振、たわみ2次、1.980Hz)

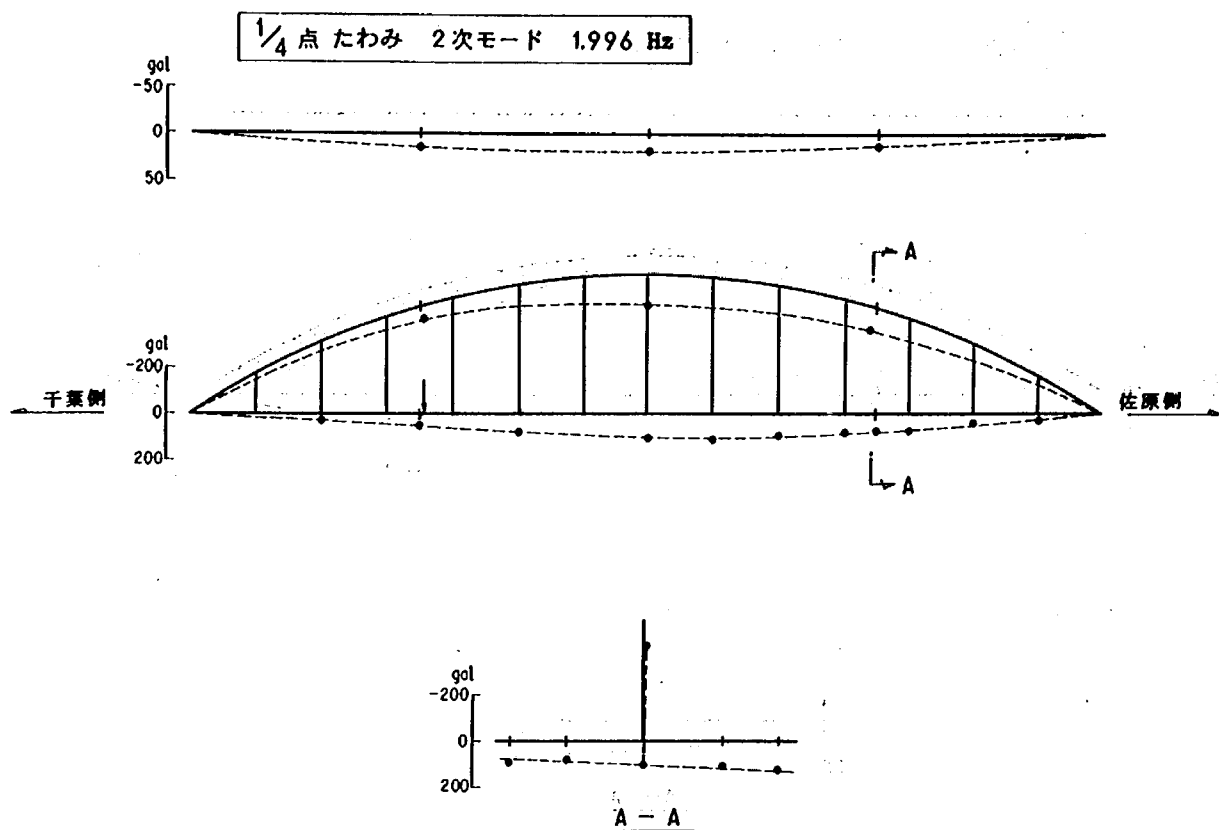


図-3.2(3) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、たわみ 2 次、1.996Hz)

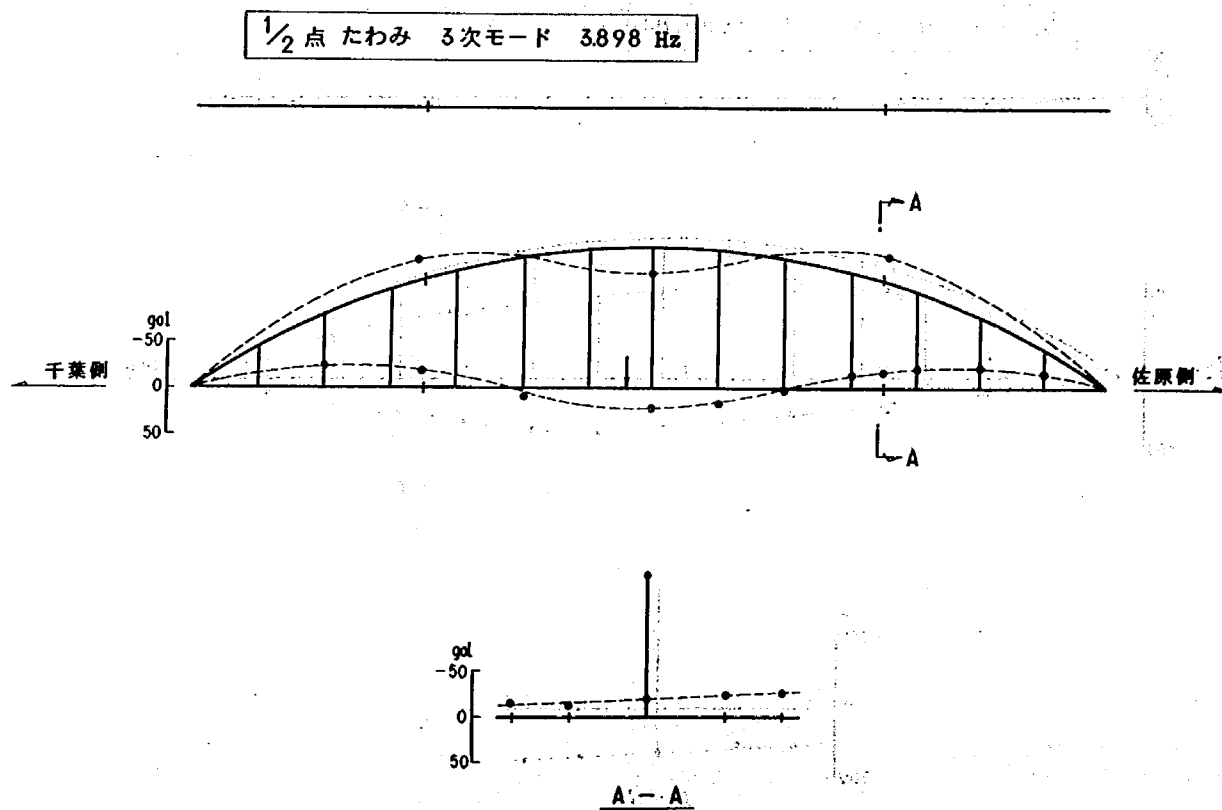


図-3.2(4) 固有振動モード ($\frac{1}{2}$ 点加振、たわみ 3 次、3.898Hz)

$\frac{1}{4}$ 点 たわみ 3 次モード 3.839 Hz

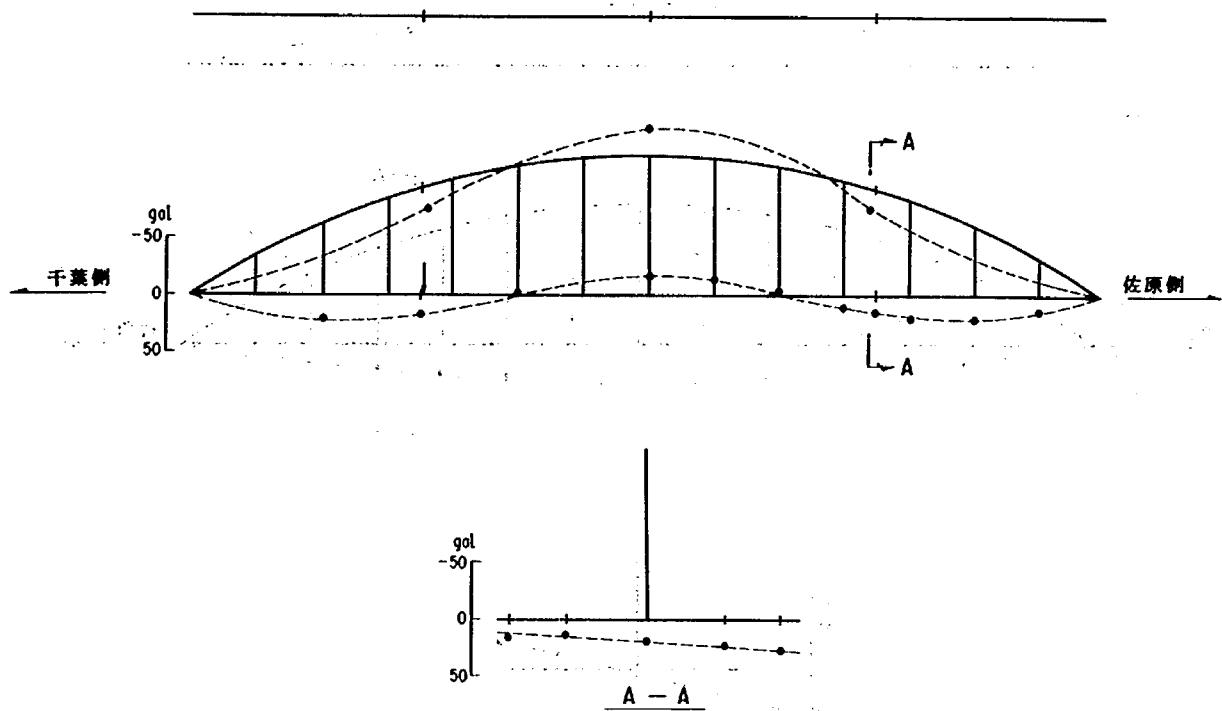


図-3.2(5) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、たわみ 3 次、3.839Hz)

$\frac{1}{2}$ 点 ねじれ 1 次モード 1.120 Hz

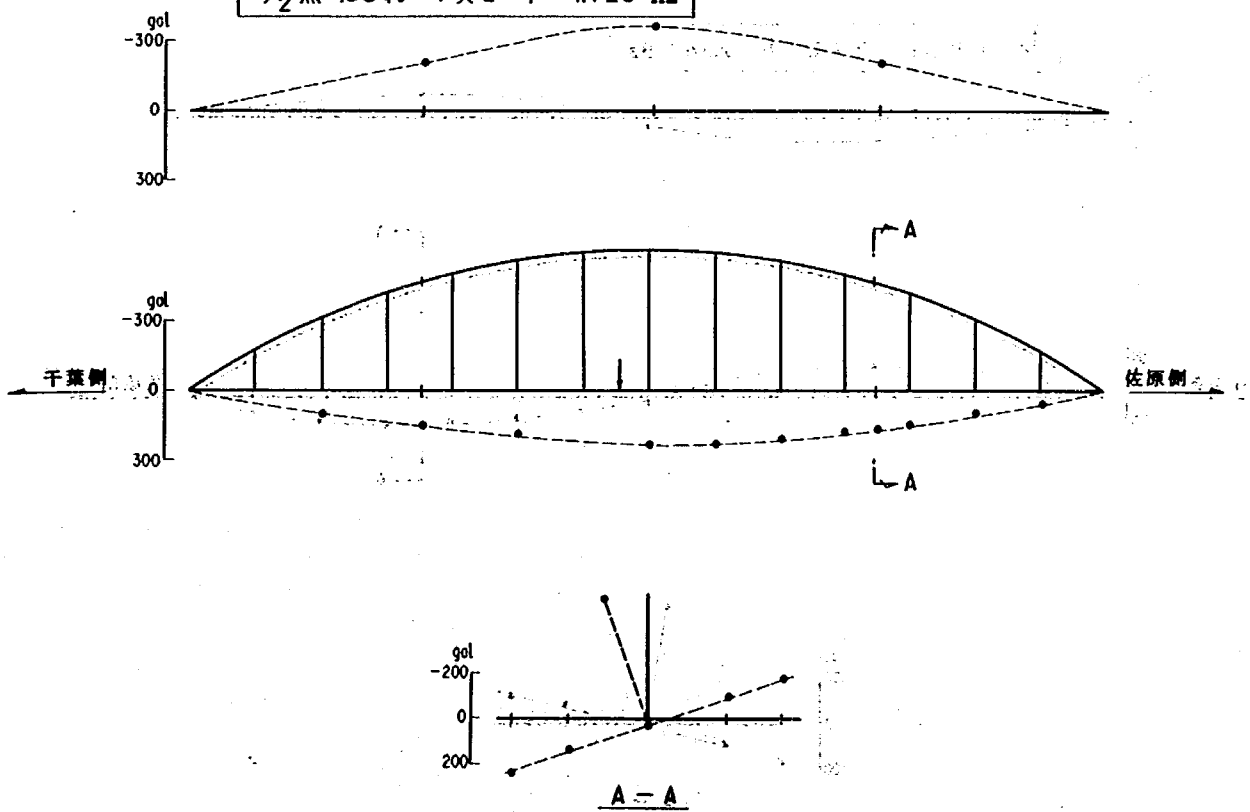


図-3.2(6) 固有振動モード ($\frac{1}{2}$ 点加振、ねじれ 1 次、1.120Hz)

$\frac{1}{4}$ 点ねじれ 1次モード 1.118 Hz

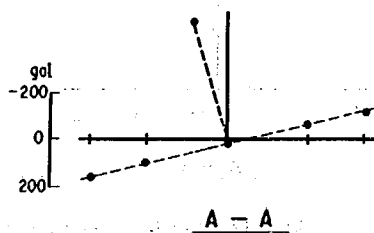
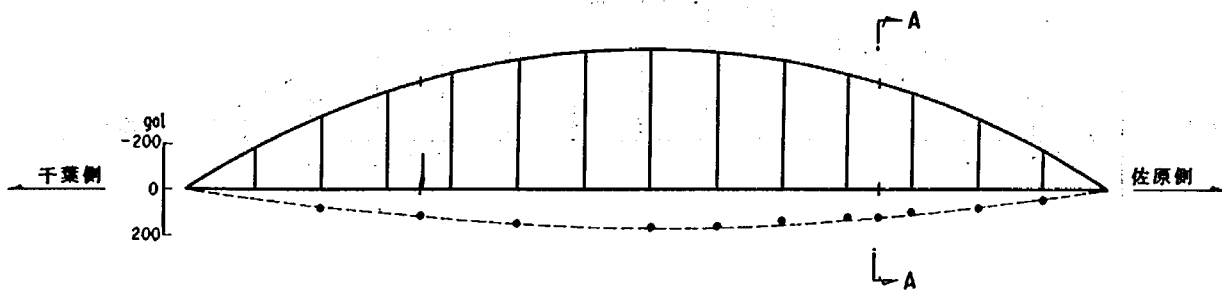
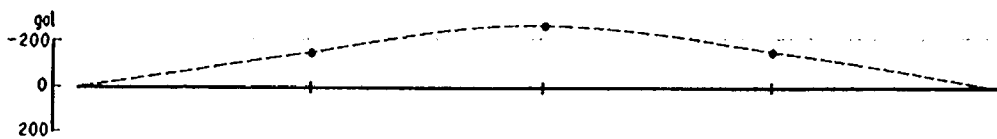


図-3.2(7) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、ねじれ1次、1.118Hz)

$\frac{1}{2}$ 点ねじれ 2次モード 2.667 Hz

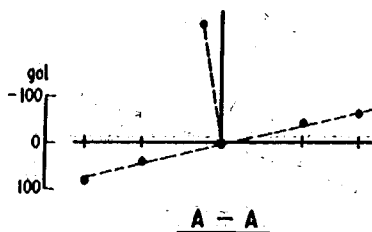
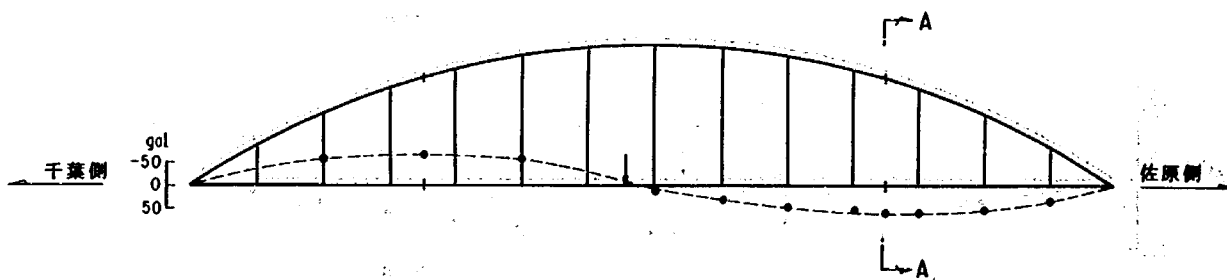
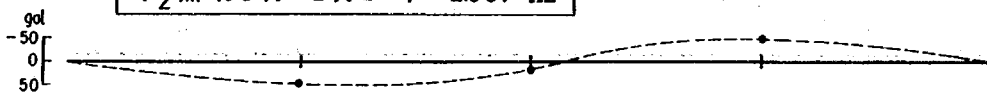


図-3.2(8) 固有振動モード ($\frac{1}{2}$ 点加振、ねじれ2次、2.667Hz)

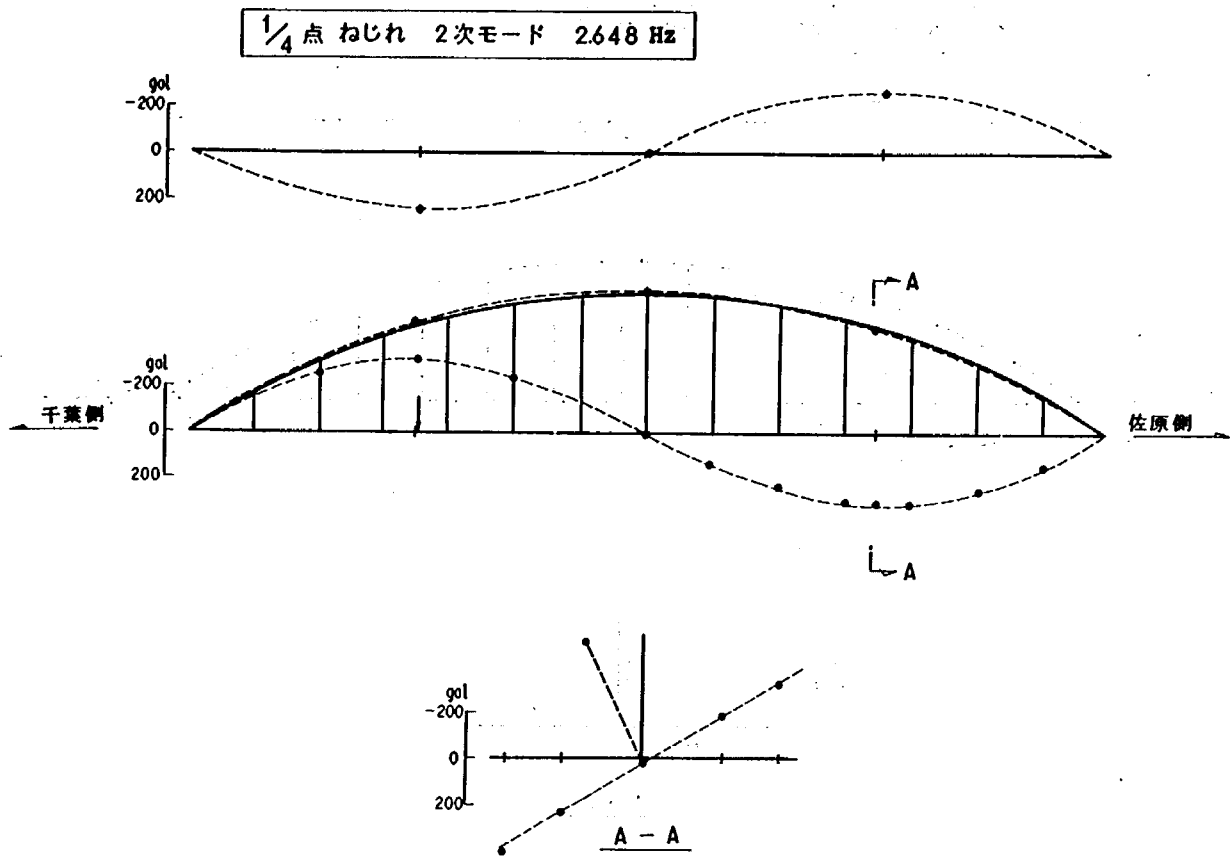


図-3.2(9) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、ねじれ 2次、2.648Hz)

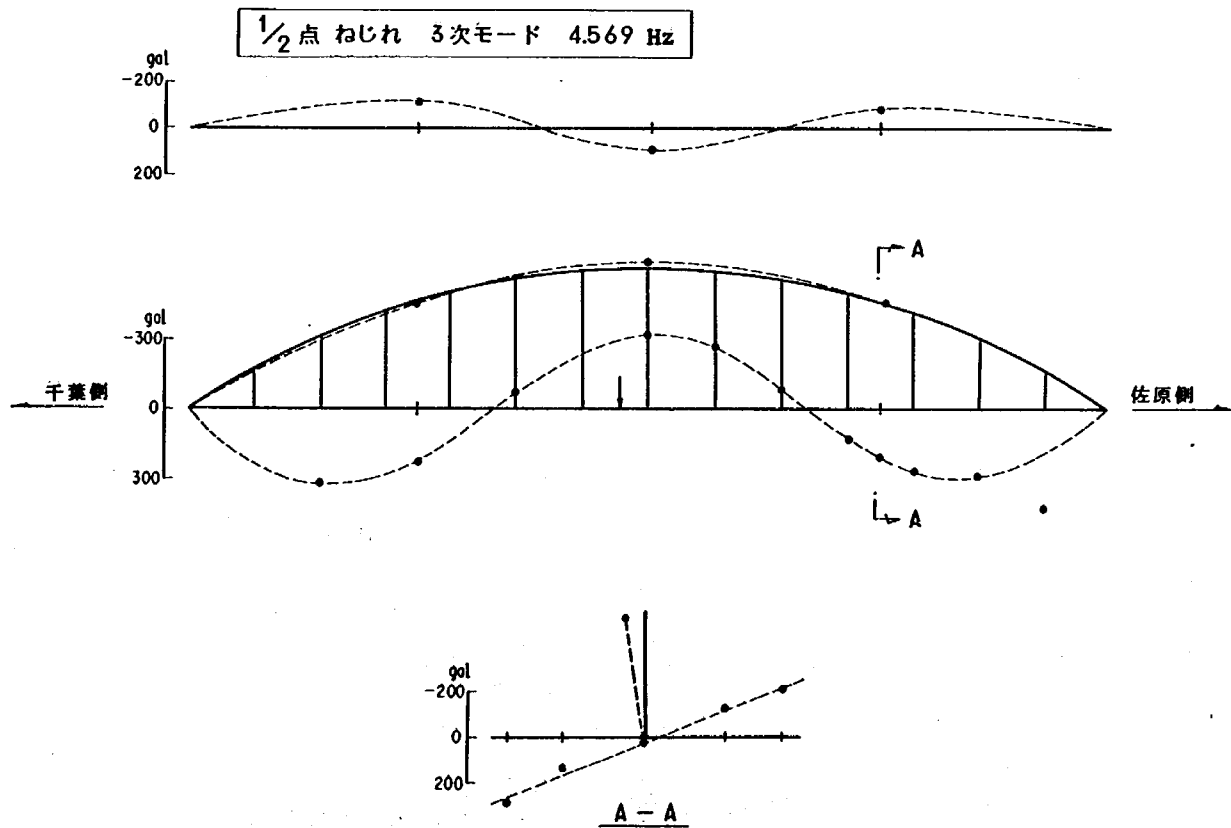


図-3.2(10) 固有振動モード ($\frac{1}{2}$ 点加振、ねじれ 3次、4.569Hz)

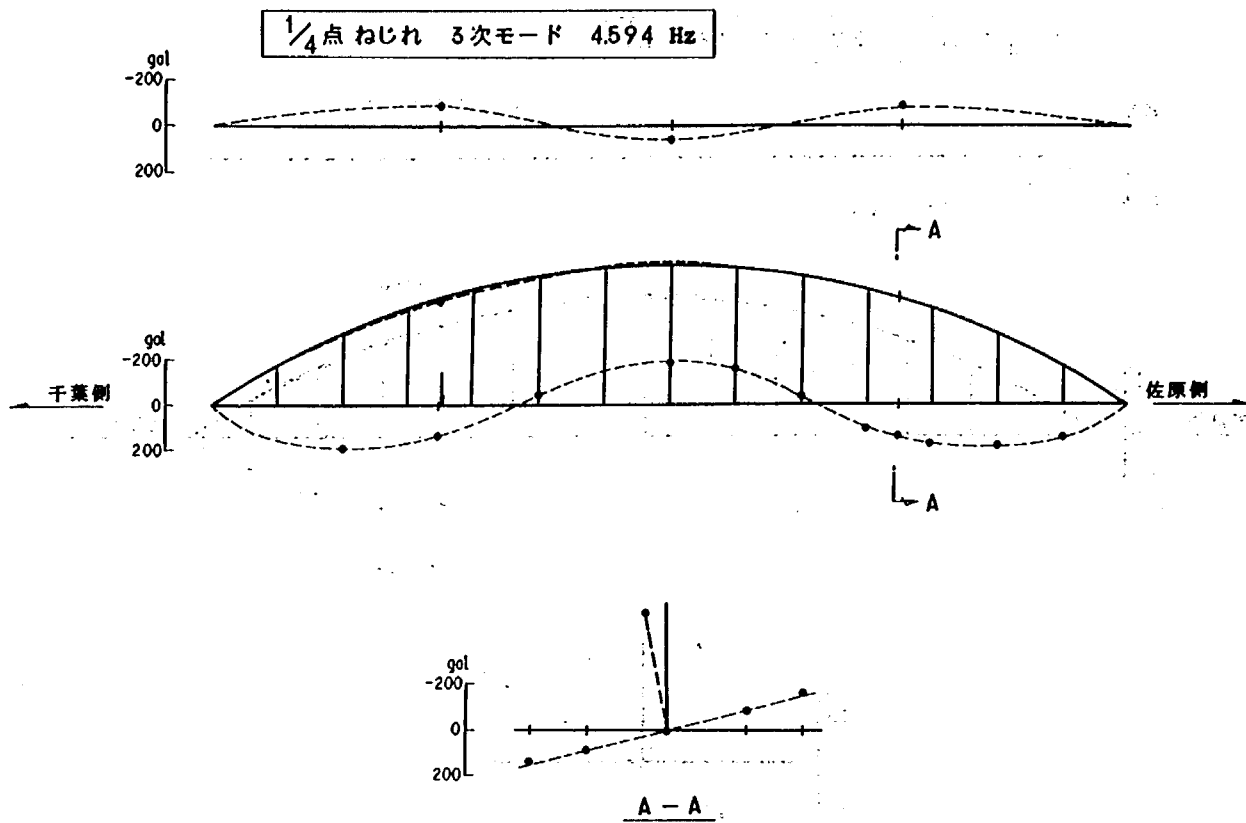


図-3.2(1) 固有振動モード ($\frac{1}{4}$ 点加振、ねじれ3次、4.594Hz)

第4章 固有振動数および固有振動モードの数値解析

ここでは、本橋の断面剛性および死荷重強度（質量）の精算値を用いて固有振動数、固有振動モードの数値解析を行なった。解析に用いたモデルは、本橋設計時の構造解析モデルである5本主桁モデル、およびそれをより単純にした3本主桁モデルと平面モデルである。

4.1 5本主桁モデル

(1) 構造モデル

本橋の構造上の特徴は以下のとおりである。

- i) 桁構造部は、3本の箱形断面の主桁（ G_1 桁、 G_2 桁、 G_3 桁）を鋼床版および各吊材位置に設けた横桁により1体化した構造である。
- ii) 中央の主桁位置に1面のアーチ部材を配置した単弦ローゼ橋である。
- iii) 外側の箱桁からの張り出し量が長いため、歩道部にI断面の縦桁（ G_1 桁、 G_3 桁）を設けている。

このような構造に対する構造モデル設定上の問題点は、鋼床版のモデル化およびアーチ部材より中央の箱桁に導入される水平力の他の箱桁への伝達のされ方の把握にある。

各箱桁を連結する部材には鋼床版と横桁があるが、横桁は箱桁に直角に配置されているため橋軸方向の水平力の伝達にはほとんど寄与せず、鋼床版のせん断変形により力が伝達されるものと考えられる。近年、構造解析プログラムの進歩により、版構造と骨組構造とが合成された構造物の解析も可能となってきたが、いまだ一般化されたものは見当たらない。そこで今回の解析においては、水平力の伝達が鋼床版のせん断変形により行なわれる点に着目して、せん断変形が等しくなる軸力部材に置き換えることによって、橋梁全体を骨組構造物としてモデル化することとした。

設計時の構造解析モデルでは、縦桁を主桁と考え、5本主桁としたモデルにより解析が行なわれている。そこで、ここではこの5本主桁モデルに対して、断面剛性および死荷重強度（質量）の精算値を用いた振動数解析を行なった。

以上の考察から導かれる立体骨組構造を図-4.1に示す。

吊材のアーチ部材との結合条件は面内方向にはピン結合とし、面外方向に対しては固定とした。支点条件に関しては、移動可能方向は図-4.2に示す方向とし、回転はすべての方向に自由とした。また、 G_1 桁、 G_3 桁、およびブラケットは断面2次モーメントのみを考慮した。

以下に鋼床版を骨組部材に置換する際の等価断面積の算出方法を紹介する。

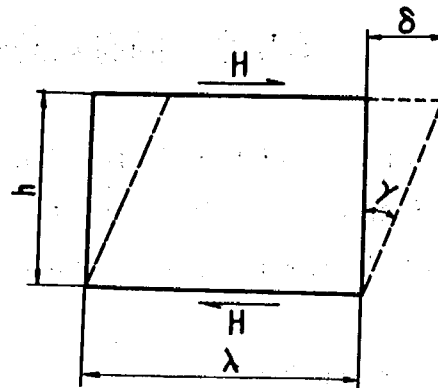
$$\delta = \gamma \cdot h = \frac{\tau}{G} \cdot h$$

$$H = \tau \cdot t_w \cdot \lambda$$

t_w : 鋼床版板厚

G : せん断弾性係数

$$\therefore \delta = \frac{H \cdot h}{G \cdot t_w \cdot \lambda}$$



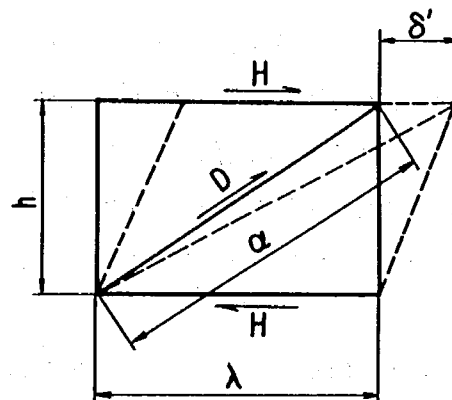
$$\delta' = \frac{H}{E \cdot A_g} \cdot \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \cdot d$$

A_g : 軸力部材断面積

E : ヤング係数

$\delta = \delta'$ より

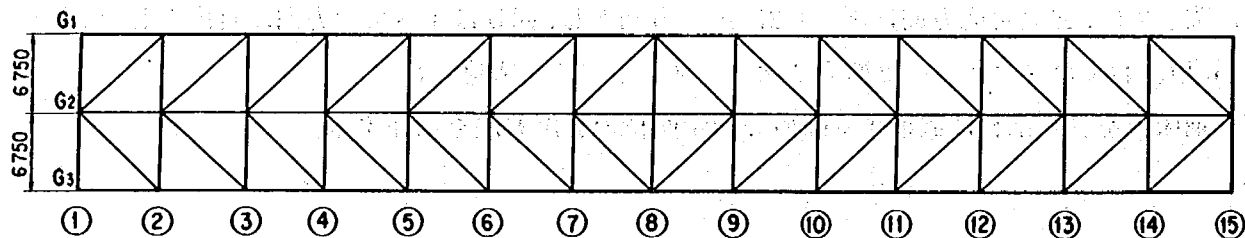
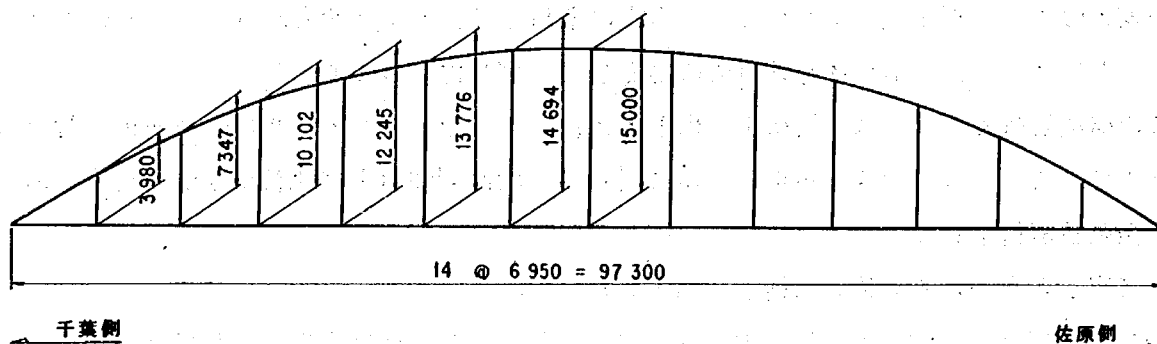
$$A_g = \frac{G \cdot d^3}{E \cdot h \cdot \lambda} \cdot t_w$$



(2) インプットデータ

以下に数値計算に必要な入力データを列記する。

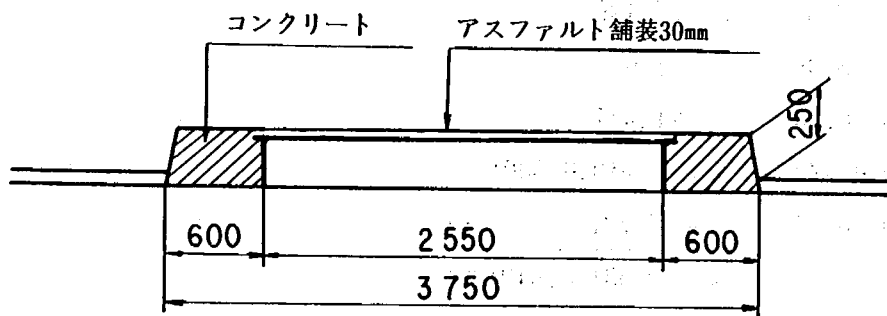
(a) 骨組図



(b) 質量

i) 死荷重強度

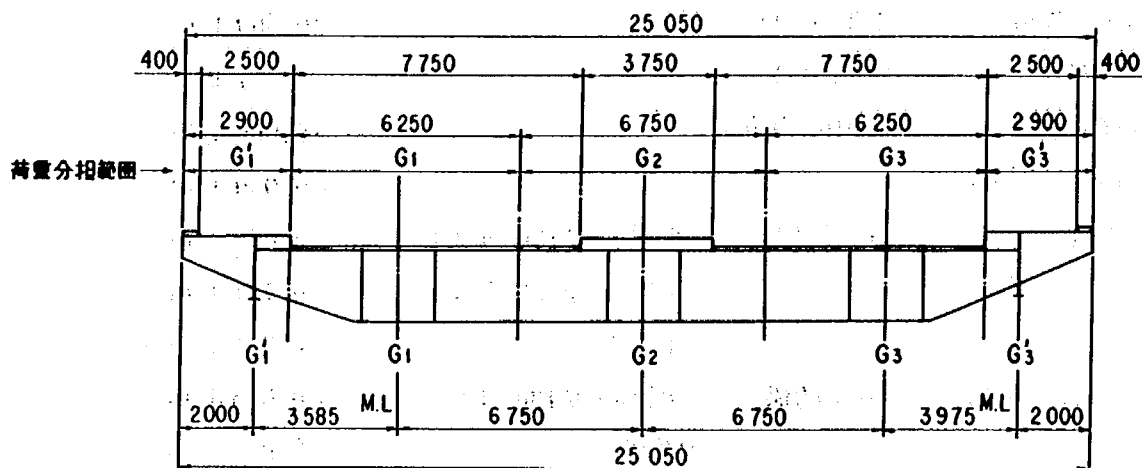
舗装 (車道)	2.3×0.075	$=0.173 \text{ t/m}^2$
舗装 (歩道)	2.3×0.03	$=0.069 \text{ t/m}^2$
境界石	$2.5 \times 0.35 \times 0.275$	$=0.241 \text{ t/m}$
高欄 (歩道)	$0.010 + 0.050$	$=0.060 \text{ t/m}$
防護柵 (車道)		$=0.050 \text{ t/m}$
添加物	G ₁ '桁関係	
	東電(1)($\phi 150$ 4条)	$=0.068 \text{ t/m}$
	東電(2)($\phi 250$ 2条)	$=0.134 \text{ t/m}$
	千葉ガス	$=0.031 \text{ t/m}$
	G ₃ '桁関係	
	東電(3)($\phi 130$ 4条)	$=0.033 \text{ t/m}$
	電々	$=0.039 \text{ t/m}$
中央分離帯		$=0.891 \text{ t/m}$
〈内訳〉		



舗装	$2.3 \times 0.03 \times 2.55$	$=0.176 \text{ t/m}$
コンクリート	$2.5 \times 0.325 \times 0.6 \times 2 \times (6.95 - 1.85) / 6.95$	$=0.715 \text{ t/m}$
吊材部	$2.5 \times 0.325 \times 3.75 \times 1.85$	$=5.637 \text{ t}$

ii) 荷重分担

各桁の死荷重に対する荷重分担は下図のとおりとした。



iii) 各桁に作用する死荷重 (格点荷重)

① G_1 、 G_3 桁

舗装	$0.069 \times 2.50 \times 6.95 = 1.199$
境界石	$0.241 \times 6.95 = 1.675$
高欄	$0.060 \times 6.95 = 0.417$
添加物	$0.233(0.072) \times 6.95 = 1.619(0.500)$
鋼重	$0.679 \times 6.95 = 4.721$
	$\Sigma = 9.631(8.512)$

G_1 桁 : 9.63 ton (4.82 ton)

G_3 桁 : 8.51 ton (4.26 ton) () 内は桁端各点を表わす。

② G_1 、 G_3 桁

舗装	$0.173 \times 6.250 \times 6.95 = 7.515$
鋼重	$2.305(2.395) \times 6.95 = 16.020(16.645)$
	$\Sigma = 23.535(24.160)$

G_1 桁 : 23.54 ton (11.77 ton)

G_3 桁 : 24.16 ton (12.08 ton)

③ G_2 桁

舗装	$0.173 \times 3.0 \times 6.95 = 3.607$
分離帯	$0.891 \times 6.95 (+5.637) = 7.841(13.478)$
防護柵	$0.050 \times 6.95 = 0.348$
鋼重	$2.768 \times 6.95 = 19.236$
	$\Sigma = 31.032(36.669)$

G₂桁 : 36.67 ton (15.52 ton)

iv) アーチリブの軸線長および鋼重

格点	0	1	2	3	4	5	6	7
軸線長	8.062	7.763	7.505	7.292	7.127	7.016	6.959	
鋼重	6.688	12.304	11.871	11.505	11.211	10.996	10.866	10.821

Σ (軸線長) = 103.448 m

Σ (鋼重) = 160.863 ton

単位長当り鋼重 = 1.555 ton/m

v) 吊材の長さおよび鋼重

格点	0	1	2	3	4	5	6	7
長さ	—	3.980	7.347	10.102	12.245	13.776	14.694	15.000
鋼重	—	1.00	1.85	2.54	3.08	3.47	3.70	3.78

Σ (長さ) = 139.288 m

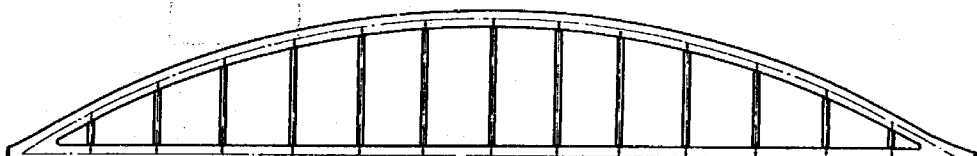
Σ (鋼重) = 35.066 ton

単位長当り鋼重 = 0.252 ton/m

(但し、吊材の自重はアーチリブおよび
G₂桁に½ずつ分担させる)

(c) 剛性

i) 橋梁各部の板厚



		1 - Pl 2550 x 10 (Deck) + 4 - Bulb 200 x 10	
G ₁		1 - Pl 1400 x 9	
		1 - Pl 250 x 12	
		1 - Pl 6775 ~ 7262 x 12 (Deck) + 9 - Trough	
G ₁		2 - Pl 2000 x 10	
	12	1 - Pl 2200 x 16	12
		1 - Pl 6750 x 12 (Deck) + 8 - Trough + 5 - Bulb	
G ₂		2 - Pl 2000 x 10	
	16	1 - Pl 2200 x 14	16
		1 - Pl 7042 ~ 7525 x 12 (Deck) + 10 - Trough	
G ₃		2 - Pl 2000 x 10	
	12	1 - Pl 2200 x 16	12
		1 - Pl 2550 x 10 (Deck) + 4 - Bulb 200 x 10	
G ₃		1 - Pl 1400 x 9	
		1 - Pl 250 x 12	
アーチ		1 - Pl 2100 x 19	
	22	2 - Pl 1500 x 19	22
		1 - Pl 2000 x 19	

* 上段は上フランジ、中段は腹板、下段は下フランジを表わす。

ii) 剛性

① G₁桁

	A(m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	K(m ⁴)
①—②	0.2079	0.1295	0.6235	0.0880
②—③	0.2064	0.1293	〃	〃
③—④	0.2141	0.1465	0.5448	0.0935
④—⑤	0.2131	0.1461	〃	〃
⑤—⑥	0.2124	0.1458	〃	〃
⑥—⑦	0.2118	0.1455	〃	〃
⑦—⑧	〃	〃	〃	〃
⑧—⑨	〃	〃	〃	〃
⑨—⑩	〃	〃	〃	〃
⑩—⑪	0.2124	0.1458	〃	〃
⑪—⑫	0.2131	0.1461	〃	〃
⑫—⑬	0.2141	0.1465	〃	〃
⑬—⑭	0.2064	0.1293	0.6235	0.0880
⑭—⑮	0.2079	0.1295	〃	〃

② G₂桁

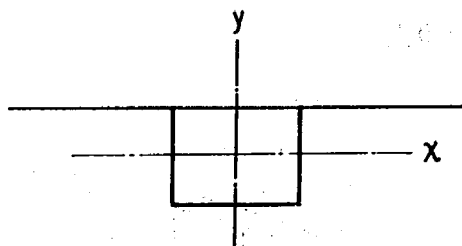
	A(m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	K(m ⁴)
①—②	0.2189	0.1473	0.5658	0.0942
②—③	〃	〃	〃	〃
③—④	〃	〃	〃	〃
④—⑤	〃	〃	〃	〃
⑤—⑥	〃	〃	〃	〃
⑥—⑦	0.2145	0.1387	0.5640	0.0918
⑦—⑧	〃	〃	〃	〃
⑧—⑨	〃	〃	〃	〃
⑨—⑩	〃	〃	〃	〃
⑩—⑪	0.2189	0.1473	0.5658	0.0942
⑪—⑫	〃	〃	〃	〃
⑫—⑬	〃	〃	〃	〃
⑬—⑭	〃	〃	〃	〃
⑭—⑮	〃	〃	〃	〃

A: 断面積

I_x: 面内断面 2 次モーメント

I_y: 面外断面 2 次モーメント

K: 純ねじり定数



③ G₃桁

	A (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	K (m ⁴)
①—②	0.2118	0.1303	0.6229	0.0880
②—③	0.2132	0.1308	〃	〃
③—④	0.2232	0.1492	0.6735	0.0935
④—⑤	0.2241	0.1496	〃	〃
⑤—⑥	0.2248	0.1499	〃	〃
⑥—⑦	0.2253	0.1500	〃	〃
⑦—⑧	〃	〃	〃	〃
⑧—⑨	〃	〃	〃	〃
⑨—⑩	〃	〃	〃	〃
⑩—⑪	0.2248	0.1499	〃	〃
⑪—⑫	0.2241	0.1496	〃	〃
⑫—⑬	0.2232	0.1492	〃	〃
⑬—⑭	0.2132	0.1308	0.6229	0.0880
⑭—⑮	0.2118	0.1303	〃	〃

④アーチリブ

	A (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	K (m ⁴)
①—②	0.1473	0.0628	0.1081	0.0998
②—③	〃	〃	〃	〃
③—④	0.1698	0.0620	0.1035	0.0969
④—⑤	0.1653	0.0611	0.0988	0.0939
⑤—⑥	〃	〃	〃	〃
⑥—⑦	〃	〃	〃	〃
⑦—⑧	〃	〃	〃	〃
⑧—⑨	〃	〃	〃	〃
⑨—⑩	〃	〃	〃	〃
⑩—⑪	〃	〃	〃	〃
⑪—⑫	〃	〃	〃	〃
⑫—⑬	0.1698	0.0620	0.1035	0.0969
⑬—⑭	0.1743	0.0628	0.1081	0.0998
⑭—⑮	〃	〃	〃	〃

⑤ 縦桁 $I_x = 0.0098 \text{ m}^4$

⑥ ブラケット $I_x = 0.0050 \text{ m}^4$

⑦ 横桁

端横桁 $A = 0.0547 \text{ m}^2$ $I_x = 0.0363 \text{ m}^4$

中間横桁 $A = 0.0491 \text{ m}^2$ $I_x = 0.0358 \text{ m}^4$

⑧ 吊材

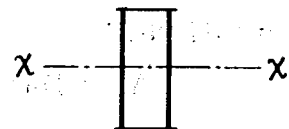
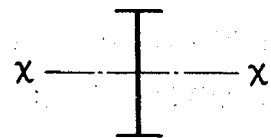
端吊材 $A = 0.0218 \text{ m}^2$ $I_x = 0.0041 \text{ m}^4$

中間吊材 $A = 0.0308 \text{ m}^2$ $I_x = 0.0048 \text{ m}^4$

⑨ 軸力部材 (鋼床版の置換材)

$$A = \frac{G \cdot d^3}{E \cdot h \cdot \lambda} \cdot t_w = 0.084 \text{ m}^2$$

$$\left(\begin{array}{ll} t_w = 12 \text{ mm} & h = 4.75 \text{ m} \\ \lambda = 6.95 \text{ m} & d = 8.42 \text{ m} \end{array} \right)$$



(3) 数値解析結果

15次まで求めた算出結果を表-4.1に示す。これによると、15次までの範囲ではブラケットおよび縦桁の振動が卓越し、構造全体の振動はねじれ1次振動(1.044Hz)だけが得られた。

4.2 3本主桁モデル

前節で述べたように5本主桁モデルでは必要とするモードが得られなかったので、3本の箱桁のみを主桁として取り扱った3本主桁モデルについて検討を行なった。

(1) 構造モデル

構造モデルを図-4.3に示す。縦桁を除く各部材の剛性は5本主桁の場合と同一とし、一方、質量分担は G_1 桁、 G_2 桁が分担していた荷重をそれぞれ G_1 桁および G_3 桁に分担させた。

(2) 数値解析結果

15次までの解析結果を表-4.2に示す。また図-4.4には固有振動モードを実験結果と合わせて示した。

4.3 平面モデル

これまでの計算では、構造物を立体骨組構造としてモデル化したが、ここはより簡便な計算手法として、平面モデルをとりあげる。

(1) たわみ振動

本橋は単弦ローゼ型式であるが、たわみ振動に関しては一般のアーチ系橋梁と同一構造形式と考え、たわみ振動に関する平面モデルとして図-4.5に示すモデルを設定した。

桁構造部の剛性は横桁の剛性を考慮した場合と、横桁を剛と仮定した場合の2ケースについて検討した。

以下に各部材の剛性と格点荷重を示す。

● アーチ部材の剛性

$$\textcircled{1}\sim\textcircled{3} : A=0.1743\text{m}^2 \quad I=0.0628\text{m}^4$$

$$\textcircled{3}\sim\textcircled{4} : A=0.1698\text{m}^2 \quad I=0.0620\text{m}^4$$

$$\textcircled{4}\sim\textcircled{12} : A=0.1653\text{m}^2 \quad I=0.0611\text{m}^4$$

$$\textcircled{12}\sim\textcircled{13} : A=0.1698\text{m}^2 \quad I=0.0620\text{m}^4$$

$$\textcircled{13}\sim\textcircled{15} : A=0.1743\text{m}^2 \quad I=0.0628\text{m}^4$$

● 吊材の剛性

$$\text{端吊材} : A=0.0218\text{m}^2$$

$$\text{中間吊材} : A=0.0308\text{m}^2$$

・主桁の剛性

	横 桁 剛 の 場 合		横桁の剛性考慮	
	A(m ²)	I(m ⁴)	A(m ²)	I(m ⁴)
①—②	0.6386	0.4071	0.6386	0.3870
②—③	0.8385	0.4074	0.6385	0.3872
③—④	0.6562	0.4430	0.6562	0.4200
④—⑤	0.6561	0.4430	0.6561	0.4200
⑤—⑥	0.6561	0.4430	0.6561	0.4199
⑥—⑦	0.6516	0.4342	0.6516	0.4111
⑦—⑧	〃	〃	〃	〃
⑧—⑨	〃	〃	〃	〃
⑨—⑩	〃	〃	〃	〃
⑩—⑪	0.6561	0.4430	0.6561	0.4199
⑪—⑫	0.6561	0.4430	0.6561	0.4200
⑫—⑬	0.6562	0.4430	0.6562	0.4200
⑬—⑭	0.6385	0.4074	0.6385	0.3872
⑭—⑮	0.6386	0.4071	0.6386	0.3870

・格点荷重 (単位: ton)

	主 桁	アーチ
①	55.14	—
②	103.01	12.80
③	103.44	12.80
④	103.78	12.78
⑤	104.05	12.75
⑥	104.25	12.73
⑦	104.36	12.72
⑧	104.40	12.71
⑨	104.36	12.72
⑩	104.25	12.73
⑪	104.05	12.75
⑫	103.78	12.78
⑬	103.44	12.80
⑭	103.01	12.80
⑮	55.14	—

以上の諸量を用いた計算結果を表-4.3に示す。

(2) ねじれ振動

補剛桁のねじれ振動にはアーチ部材はあまり影響しないと考え、図-4.6に示すような3本の主桁と横桁とで構成される格子桁構造をねじれ振動計算モデルとした。

主桁および横桁の剛性と両側の主桁の格点荷重は3本主桁と同じ値とし、また、中央主桁の格点荷重は3本主桁の値にアーチ部材および吊材のものを加えた値とした。

以上の諸量を用いた計算結果を表-4.3に示す。

表-4.1 固有振動数一覧表 (数値解析結果、5本主桁)

次数	振動数(Hz)	モ ド
1	0.973	ブラケットのたわみ振動
2	1.020	"
3	1.044	補剛桁のねじれ振動
4	1.203	側縦桁の水平振動
5	1.233	"
6	1.235	"
7	1.241	"
8	1.257	"
9	1.261	"
10	1.277	"
11	1.284	"
12	1.303	"
13	1.313	"
14	1.337	"
15	1.351	"

表-4.2 固有振動数一覧表 (数値解析結果、3本主桁)

次数	振動数(Hz)	周期(sec)	モ ド
1	1.149	0.870	ねじれ振動 0.5波形
2	1.605	0.623	たわみ振動 1 "
3	1.999	0.500	たわみ振動 0.5 "
4	2.183	0.458	水平振動 0.5 "
5	2.816	0.355	ねじれ振動 1 "
6	2.846	0.351	アーチ水平振動 0.5 "
7	3.693	0.271	たわみ振動 1.5 "
8	4.185	0.239	アーチ水平振動 1 "
9	5.036	0.199	ねじれ振動 1.5 "
10	6.394	0.156	たわみ振動 2 "
11	7.012	0.143	アーチ水平振動 1.5 "
12	7.013	0.143	橋軸方向振動
13	7.177	0.139	水平振動 1 "
14	7.865	0.127	ねじれ振動 2 "
15	10.000	0.100	たわみ振動 2.5 "

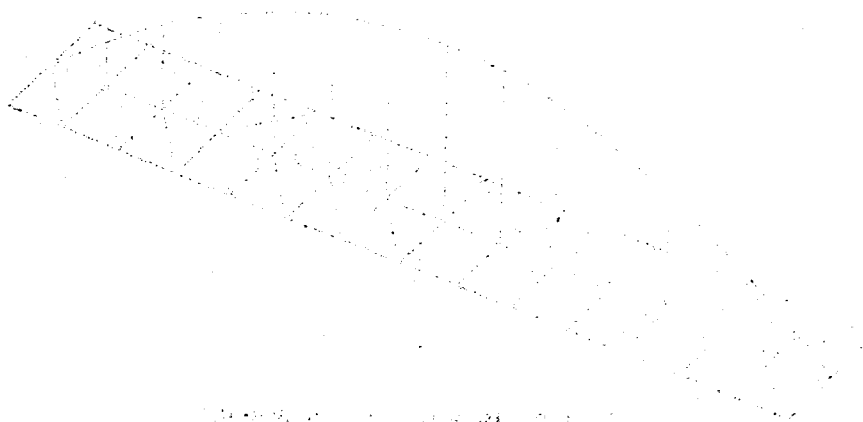
表-4.3 固有振動数一覧表 (数値解析結果、平面モデル)

	た わ み 振 動					ね じ れ 振 動		
	実 験 値	計算値(A)	計算値(B)	実 験 値 計算値(A)	実 験 値 計算値(B)	実 験 値	計 算 値	比 率
1 次	1.722	1.568	1.605	1.098	1.073	1.119	1.193	0.938
2 次	1.988	2.086	2.091	0.953	0.951	2.658	2.751	0.966
3 次	3.867	3.628	3.707	1.066	1.043	4.582	4.898	0.935

計算値 (A) : 横桁の剛性を考慮

(単位 : Hz)

計算値(B) : 横桁を剛と仮定



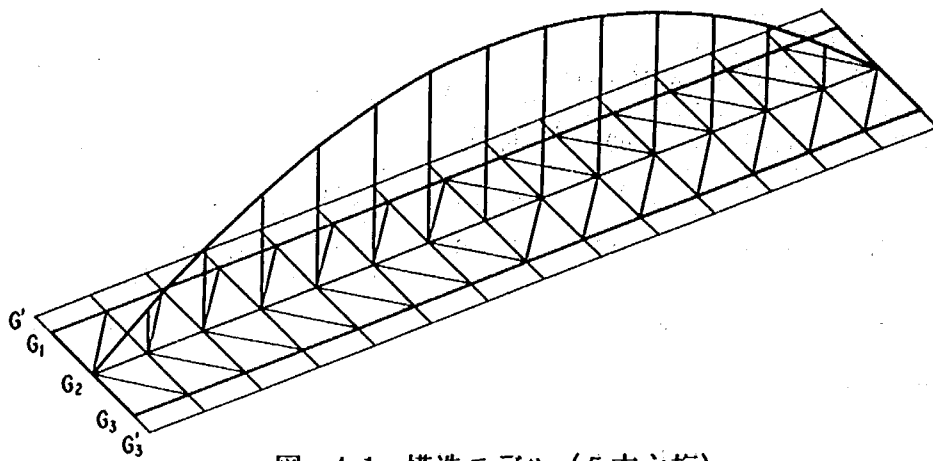


図-4.1 構造モデル (5本主桁)

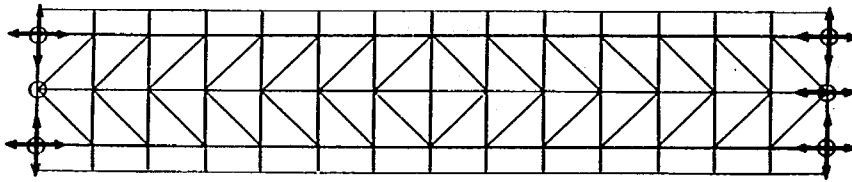


図-4.2 構造モデルの支点条件

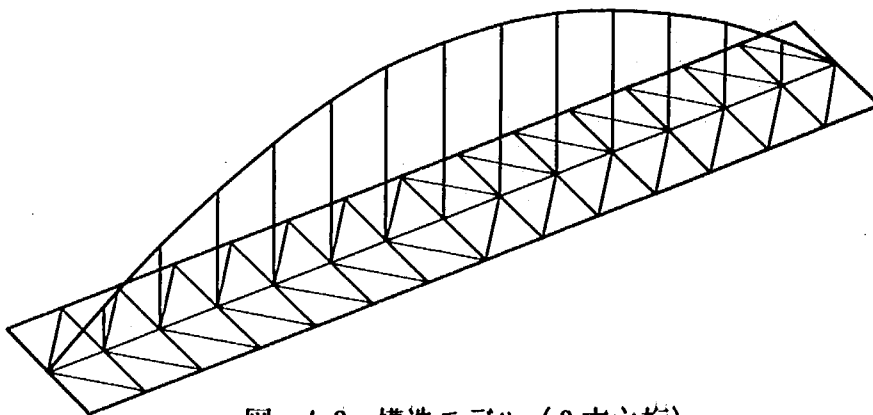


図-4.3 構造モデル (3本主桁)

たわみ 1次モード

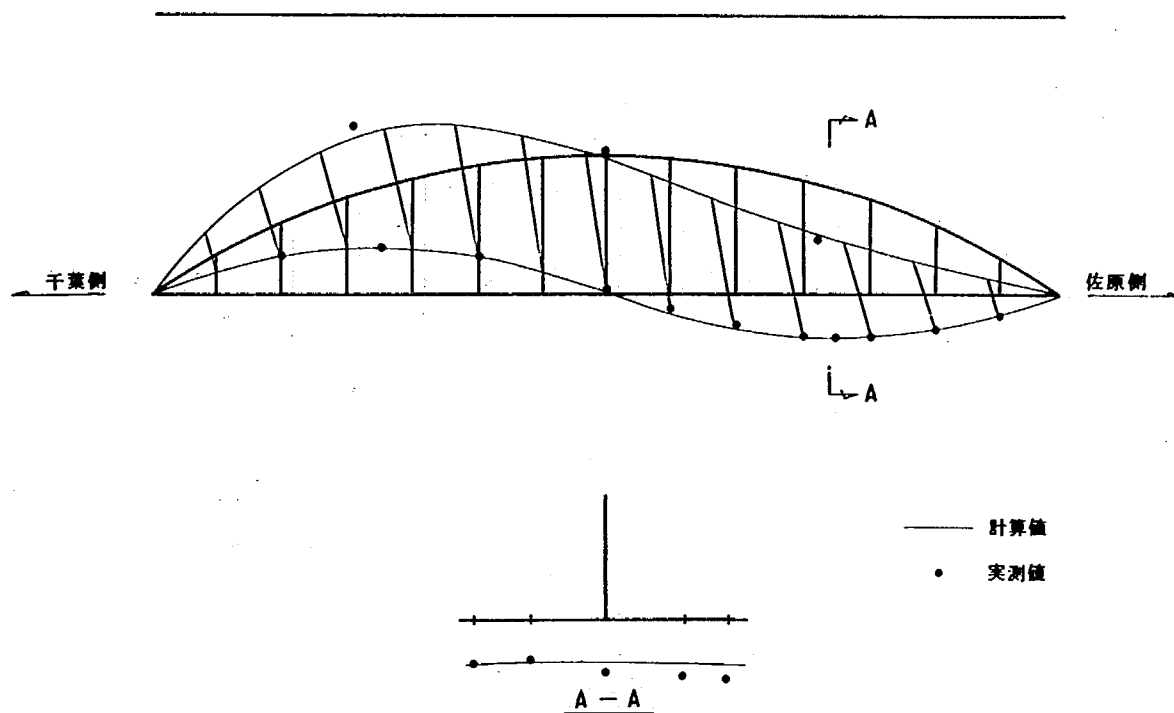


図-4.4(1) 固有振動モード (たわみ 1次振動)

たわみ 2次モード

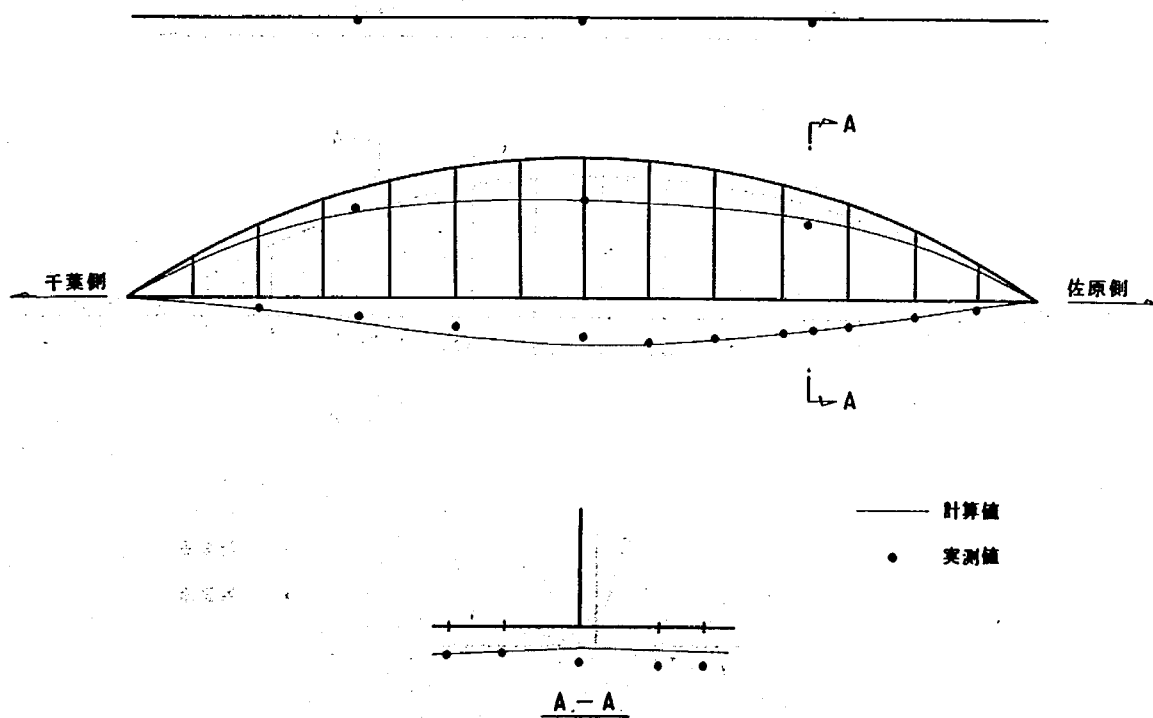


図-4.4(2) 固有振動モード (たわみ 2次振動)

たわみ 3次モード

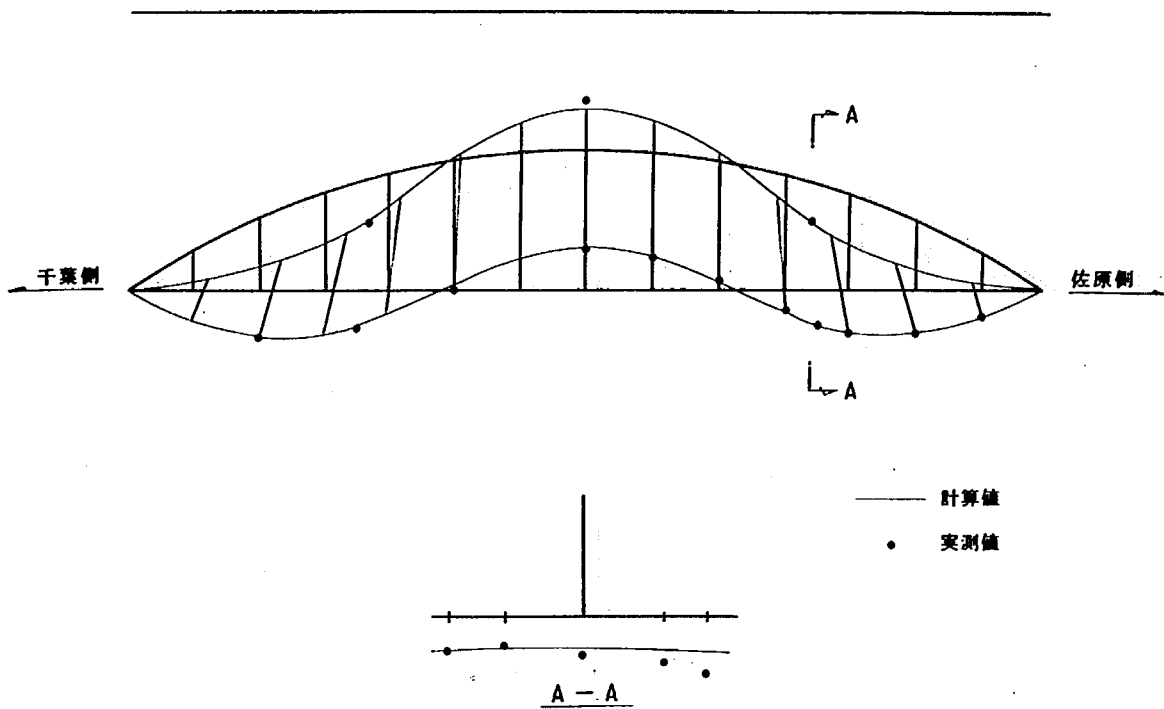


図-4.4(3) 固有振動モード (たわみ 3次振動)

ねじれ 1次モード

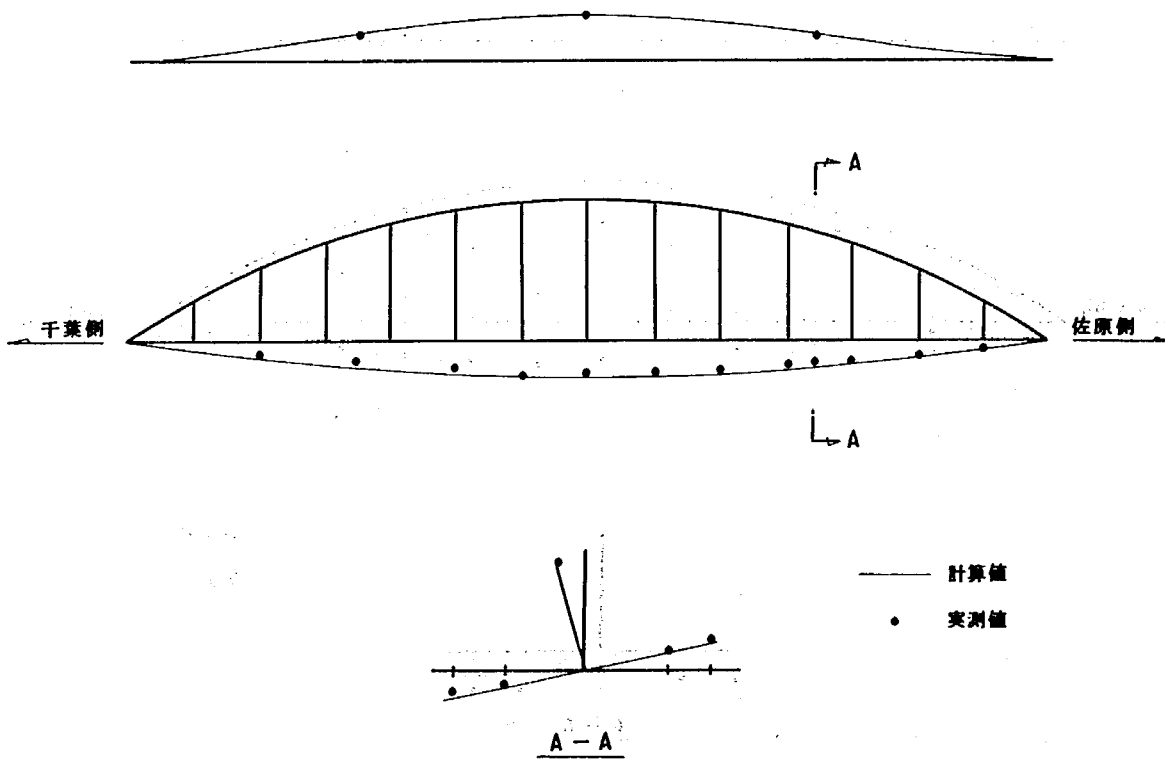


図-4.4(4) 固有振動モード (ねじれ 1次振動)

ねじれ 2 次モード

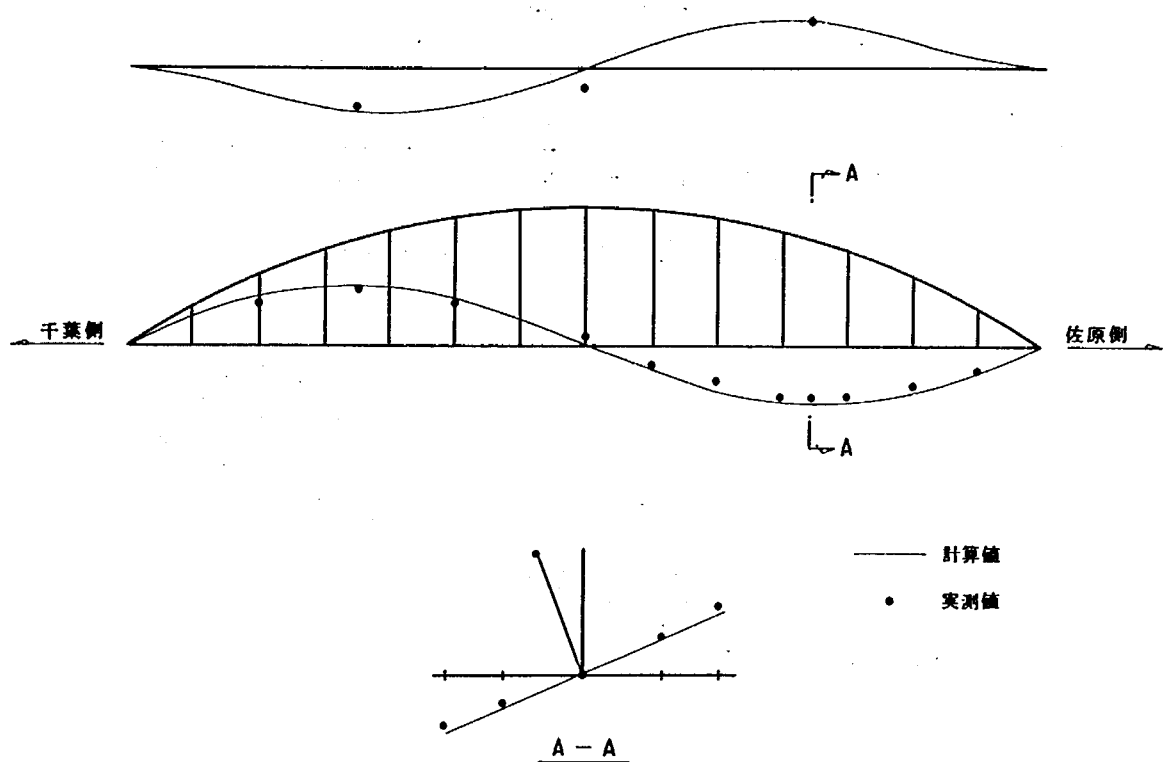


図-4.4(5) 固有振動モード (ねじれ 2 次振動)

ねじれ 3 次モード

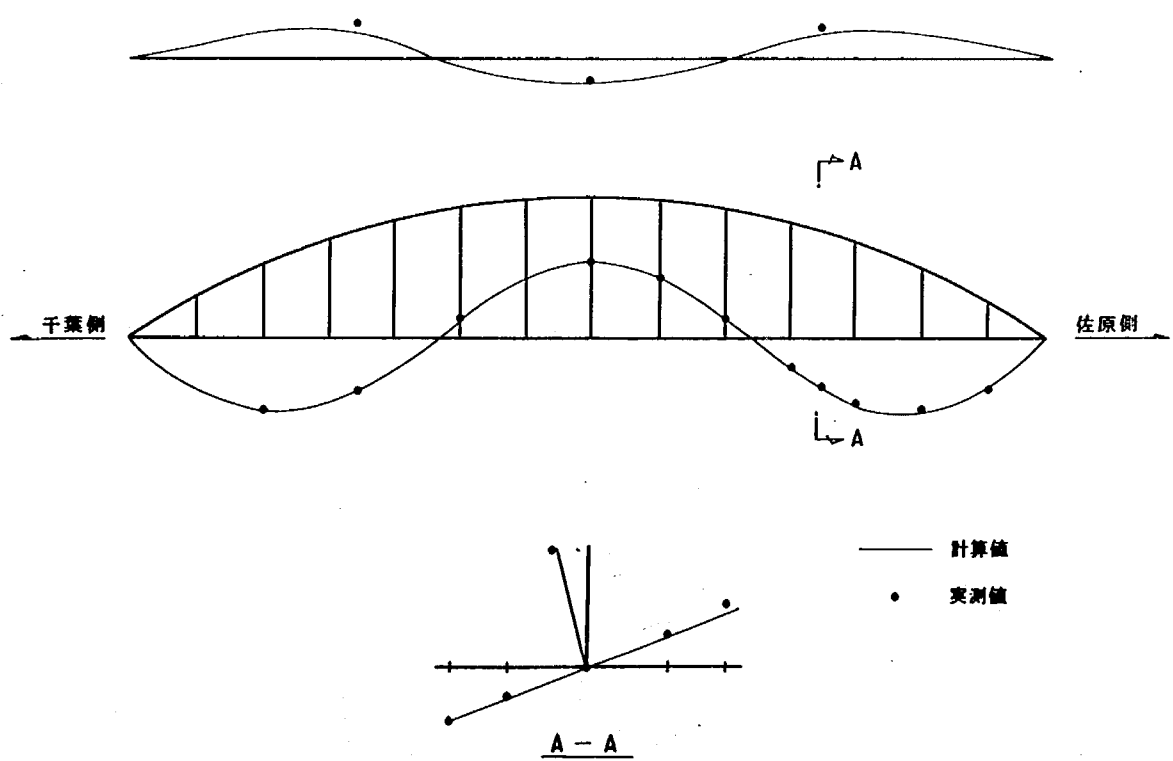


図-4.4(6) 固有振動モード (ねじれ 3 次振動)

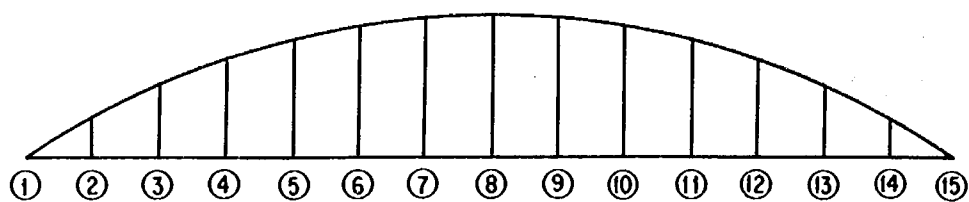


図-4.5 構造モデル (平面モデル、たわみ振動)

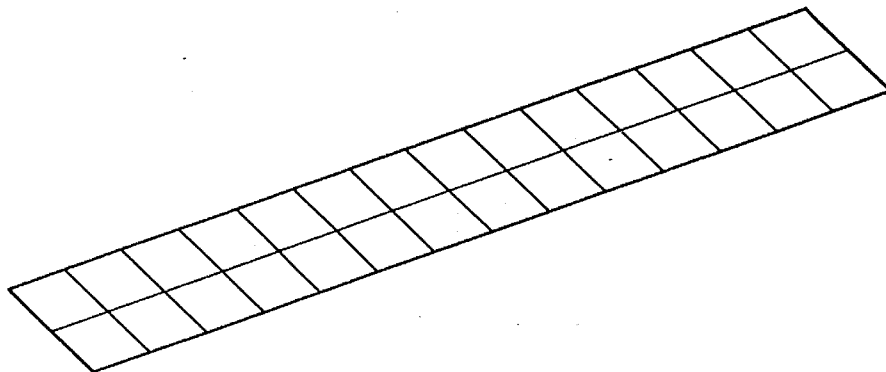


図-4.6 構造モデル (平面モデル、ねじれ振動)

5.1 動的載荷試験結果について

(1) 固有振動数

表-3.1より $\frac{1}{2}$ 点加振時および $\frac{1}{4}$ 点加振時に得られた固有振動数は両者がよく一致しており、本橋の固有振動数は正確に求められたものと判断される。両者は平均値は以下のとおりである。

たわみ1次振動 $f = 1.722\text{Hz}$

ねじれ1次振動 $f = 1.119\text{Hz}$

たわみ2次振動 $f = 1.988\text{Hz}$

ねじれ2次振動 $f = 2.658\text{Hz}$

たわみ3次振動 $f = 3.867\text{Hz}$

ねじれ3次振動 $f = 4.582\text{Hz}$

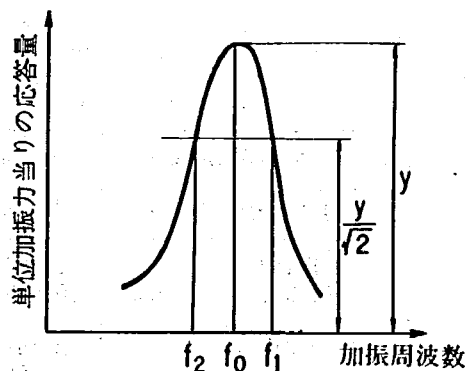
(2) 固有振動モード

固有振動モードについても、図-3.2に示したように $\frac{1}{2}$ 点加振時および $\frac{1}{4}$ 点加振時の結果が比較的良く一致していることから、本試験により正確に求まったと考えられる。

得られたモード図によると、各モードとも橋軸方向および横断面方向に非対称性が見られるが、これは本橋が僅かながらではあるが曲率を有しているため、すなわち構造物が構造中心に対して非対称であるためと考えられる。

(3) 構造減衰の大きさ

第3章では構造減衰の大きさを自由減衰振動波形から対数減衰率として求めた。また、対数減衰率は共振曲線から求めることも可能である。その方法を以下に示す。



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

この方法により共振曲線から求めた対数減衰率も表-3.3に合わせて示した。これより、自由減衰振動波形から求めた対数減衰率と共振曲線から求めた対数減衰率は、たわみ3次振動を除いて良く一致しているといえる。たわみ3次振動においては、 $\frac{1}{2}$ 点加振から得られた値と共振曲線から得られた値とが一致しているのに対し、 $\frac{1}{4}$ 点加振から求めた対数減衰率は、それらの値の半分以下である。

一般に、起振機加振により構造減衰の大きさを測定する場合、共振点から僅かでも離れた周波数で自由減衰振動を発生させると、共振状態よりも減衰が早くなることが知られている。また、構造物の安全性を考える場合には、構造減衰の大きさを小さく評価する方がより安全側となる。そこで、今回

の試験結果としては、 $\frac{1}{2}$ 点加振および $\frac{1}{4}$ 点加振時のそれぞれの自由減衰振動から求めた値および共振曲線から求めた値の3つの値の最小値を本橋の構造減衰の大きさと考えることとする。結果は以下のとおりである。

たわみ1次振動 $\delta=0.051$	ねじれ1次振動 $\delta=0.028$
たわみ2次振動 $\delta=0.032$	ねじれ2次振動 $\delta=0.036$
たわみ3次振動 $\delta=0.086$	ねじれ3次振動 $\delta=0.032$

5.2 構造モデルの妥当性について

一般に長大橋梁における動的载荷試験の目的は、その動特性（固有振動数、固有振動モード、および構造減衰の大きさ）を明らかにすることによって、その耐風設計および耐震設計の妥当性を検証することが多い。しかし、成田橋の場合、支間長が97.3mと比較的短いため風による振動を抑制する意味での耐風設計は実施されておらず、また、耐震設計上の地盤面から下部構造天端までの高さが15m以下であることから、構造物の固有周期を考慮しないいわゆる震度法により耐震設計がなされている。したがって、本橋の場合にはその動特性が設計に反映される項目はなかったといえよう。しかし、設計における構造解析モデルの設定に際しては鋼床版を軸力部材に置換するなど幾つかの仮定に基づくモデル化が行なわれている。

そこで、本節ではこのような構造モデルから求められる固有振動数の計算結果と試験結果との比較を通して、設計段階で用いた構造モデルの妥当性について検討を加えた。固有振動数の計算結果および試験結果（実測値）をまとめると以下のとおりである。

振 動 次 数	た　わ　み　振　動					ね　じ　れ　振　動				
	実測値	計　算　値				実測値	計　算　値			
		立体骨組構造モデル		平　面　モ　デ　ル			実測値	立体骨組構造モデル		平　面 モデル
		3本主桁	5本主桁	横桁剛	横桁柔			3本主桁	5本主桁	
1次	1.722	1.605 (1.073)	—	1.605 (1.073)	1.568 (1.098)	1.119	1.149 (0.973)	1.044 (1.072)	1.193 (0.938)	
2次	1.988	1.999 (0.994)	—	2.091 (0.951)	2.086 (0.953)	2.658	2.816 (0.944)	—	2.751 (0.966)	
3次	3.867	3.693 (1.047)	—	3.707 (1.043)	3.628 (1.066)	4.582	5.036 (0.910)	—	4.898 (0.935)	

*単位：Hz、ただし（ ）内は実測値との比（＝実測値/計算値）

上記目的のためには、設計計算時に使用された構造解析モデルである5本主桁モデルについて検討する必要があるが、前章で述べたように固有振動数の数値計算結果がねじれ1次振動しか得られていないので、ここでは5本主桁と3本主桁の数値計算結果を比較しながら、5本主桁モデルの妥当性を検討する。

3本主桁のたわみ振動数は、1次モードおよび3次モードにおいてそれぞれ約7%および約5%実測値より小さくなっているのに対し、2次モードでは計算値と実測値がよく一致している。この原因は、図-4.3から理解されるように、1次と3次の振動モードにおいては吊材のアーチ面内の曲げ変形がともなっているにも拘らず、モデル化に際してはアーチ面内の吊材のアーチ部材との結合条件をピン結合とすることによって、結果的には吊材の曲げ剛性を無視しているためと考えられる。したがって、吊材の曲げ変形が発生しない2次モードにおいては振動数の計算値と実測値が一致していること、および吊材の曲げ剛性を無視する方法は安全側の考え方であることから、3本主桁の立体骨組構造モデルは、たわみに関しては妥当なものであると考えられる。一方、5本主桁モデルのたわみについては数値計算結果が得られていないので正確な検討は加えられないが、縦桁の追加による橋梁全体の曲げ剛性の増分は下記のように約5%であり、これにともなう振動数の増加は約2%と考えられる。

$$G_1\text{桁} : I_x \approx 0.1379\text{m}^4 \quad (0.1293 \sim 0.1465\text{m}^4) \quad G_2\text{桁} : I_x \approx 0.1430\text{m}^4 \quad (0.1387 \sim 0.1473\text{m}^4)$$

$$G_3\text{桁} : I_x \approx 0.1402\text{m}^4 \quad (0.1303 \sim 0.1500\text{m}^4) \quad \text{縦桁} : I_x = 0.0098\text{m}^4$$

$$\frac{(G_1 + G_2 + G_3 + \text{縦桁})}{(G_1 + G_2 + G_3)} \div \frac{0.4407}{0.4211} \div 1.0465$$

したがって、5本主桁モデルのたわみ振動数は3本主桁モデルの値よりも約2%大きいと推定されるが、その値は1次および3次モードにおいては実測値よりも3~5%程度小さく、2次モードでは逆に約3%大きいものとなる。振動数の計算値が実振動数よりも大きいということは、計算モデルにおける死荷重強度を小さく見積ったか、剛性を過大に評価したか、あるいはその両方が原因と考えられるが、実験誤差、および今回の結果は僅か3%程度の誤差であること等を考慮に入れると、5本主桁の立体骨組モデルも、たわみに関してはほぼ妥当なものと判断される。

3本主桁モデルのねじれ振動数は、3次モードまでの範囲内では常に計算値の方が実測値よりも大きくなっているが、5本主桁モデルのねじれ1次振動数は3本主桁モデルに比して約9%小さく、その結果として実測値よりも約7%小さくなっている。5本主桁モデルは3本主桁モデルに対して、縦桁とブラケットを曲げに対してのみ有効な部材として追加したものであるため、全体のねじれ剛性は両モデルともほぼ等しいと考えられる。したがって、3本主桁モデルの計算値が大きくなった原因は、 G_1 桁および G_2 桁が分担する死荷重を G_1 桁および G_3 桁に分担させたために極慣性モーメントを実際よりも小さく評価したことによると判断される。したがって、実際の荷重分担に近い5本主桁モデルの振動数が実振動数よりも小さいことから、この構造モデルは、ねじれに関しても妥当なものであったといえよう。

また、平面モデルから求められる振動数はすべて10%以内の誤差範囲に入っており、簡便なモデルによってもある程度正確に振動数が得られることが明らかとなった。

第6章 他のアーチ系橋梁との比較

6.1 泉大津大橋

泉大津大橋は、昭和51年7月に大阪府により泉大津市に架設された橋長175m、総幅員34.5mの規模を有し、主桁を単一箱桁構造とした単弦ローゼ型式の橋梁である。この橋梁に対する動的載荷試験は実施されていないが、固有振動数の数値解析は行なわれている(文献1)。その結果は以下のとおりである。

次数	振動数	周 期	モ ー ド
1	0.7387	1.354	鉛直 1 波形
2	0.7963	1.256	水平 0.5 波形
3	1.0155	0.985	鉛直 0.5 波形
4	1.2756	0.784	ねじれ 1 波形
5	1.6549	0.604	鉛直 1.5 波形

成田橋と比較した場合、泉大津大橋の方が規模が大きいにもかかわらず、ねじれ1次振動数が大きいのが注目されるが、成田橋の補剛桁が格子桁であるのに対し、泉大津大橋が単一箱桁であり、ねじれ剛性の違いによるものと考えられる。

6.2 一般のアーチ橋について

文献2)には、多くの橋梁を対象とした車両走行時の振動測定記録から求めた、橋梁の支間長と振動数の関係式として次式が示されている。

- ローゼ桁 逆対称1次振動 $f = 49.1 \cdot L^{-0.779}$
 - ローゼ桁 対称1次振動 $f = 49.3 \cdot L^{-0.705}$
- (ただし、 L : 支間長(m)
 f : 振動数(Hz))

成田橋および泉大津大橋の支間長を上式に代入した結果は以下のとおりである。

振動モード	成田橋(L=97.3m)		泉大津大橋(L=175m)	
	文献2)	実測値	文献2)	文献1)
逆対称1次	1.388	1.119	0.879	0.739
対称1次	1.956	1.988	1.293	1.016

文献1) 川畑、坂田:「泉北連絡橋の計画と設計」橋梁と基礎、1976年7月

文献2) 小堀、梶川:「道路橋(鋼橋)の振動測定法とその特性」道路、1974年7月

第7章 結 論

動的載荷試験およびそれに関連した数値解析により得られた結論を以下にまとめる。

(1) 動的載荷試験により本橋の固有振動数は正確に求められた。最低次の固有振動数は、

たわみ1次振動 $f = 1.722$ (Hz)

ねじれ1次振動 $f = 1.119$ (Hz)

である。

(2) また、本橋の対数減衰率（構造減衰の大きさ）は、3次モードまでの範囲では、たわみ振動で0.032～0.086、ねじれ振動で0.028～0.036程度である。

(3) 本橋の設計時に構造解析モデルとして用いた5本主桁の立体骨組モデルは、ほぼ妥当なものと考えられる。

(4) 3本主桁モデルでは、荷重分担の不適切さのために、ねじれ振動数に大きな誤差が生じる。

(5) 本橋の固有振動数は、たわみ振動については一般のアーチ橋の平面モデルにより、またねじり振動についてはアーチ部材を無視した格子桁の平面モデルにより、10%以内の誤差で推定することが可能である。

一般国道51号成田橋動的載荷試験
報告書

ISSN 0386 - 5878
土木研究所資料第1649号
昭和56年2月 (1981)
山本邦夫, 桂樹正隆

キーワード：単弦ローゼ橋, 固有振動数, 固有振動モード, 構造減衰, 実橋実験

要 旨

本報告書は, 一般国道51号成田橋 (単弦ローゼ橋) にて実施した動的載荷試験およびそれに関連して行った数値解析の結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

40円切手を
はって下さ
い。

305-□□

建設省土木研究所
構造研究室
御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 6

No. 6

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第1649号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

