

土 木 研 究 所 資 料

三郷インターチェンジ下部工(PT-24U)
加振振動実験

昭和59年10月

建設省土木研究所
地震防災部・振動研究室

Copyright © 1984 fiscal year 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ってはならない。

三郷インターチェンジ下部工(PT-24U) 加振振動実験

振動研究室 前 室 長 荒 川 直 士*

前主任研究員 川 島 一 彦**

研 究 員 田 村 敬 一

相 沢 興

高 橋 和 之

要旨 三郷インターチェンジ下部工(PT-24U)加振振動実験

三郷インターチェンジは、常磐自動車道、首都高速道路および外郭環状道路の交差点部に建設中のインターチェンジである。当該地点は地震時に液状化の可能性の高い軟質沖積地盤地帯である。三郷インターチェンジの耐震性に関しては、動的解析を含め、種々の検討が実施されているが、こうした解析面からの検討を補強し、同インターチェンジの耐震性を確認するために下部構造と地盤との相互作用に重点を置いた加振実験を実施した。加振実験による主要な検討項目は次のとおりである。

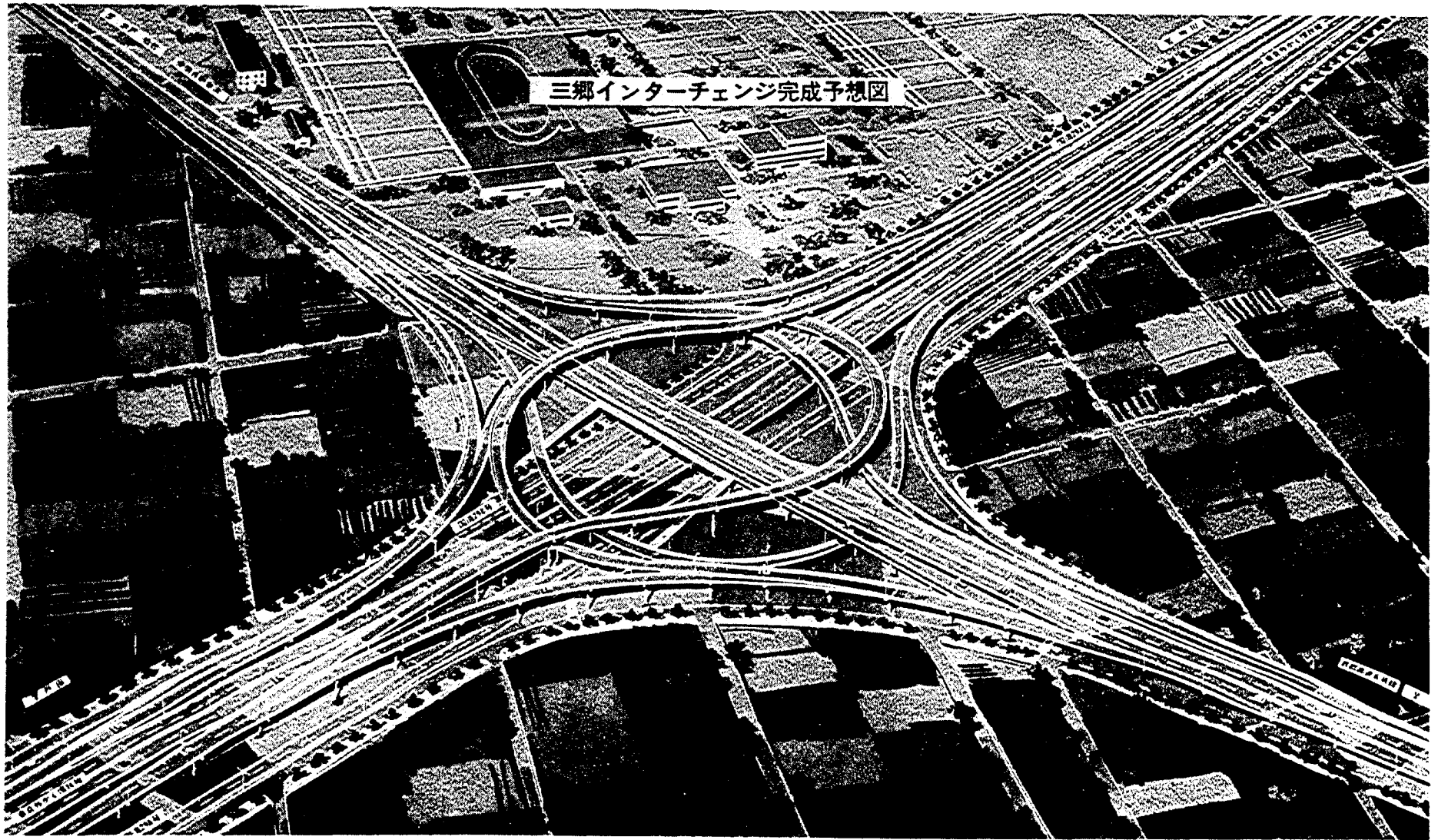
- 1) フーチング側面の土被りが橋脚の振動特性に与える影響の検討。
- 2) 動的解析に仮定した下部構造に与える地盤ばねの妥当性の検討。
- 3) 動的な地盤ばねと静的な地盤ばねの相違の検討。

本資料は、上記加振実験結果の概要をとりまとめたものである。

キーワード：加振振動実験、動的相互作用、耐震設計

* 現 日本道路公団 東京第一建設局建設第二部 調査役

** 現 建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室 室 長



三郷インターチェンジ完成予想図

ま え が き

三郷インターチェンジは、常盤自動車道、首都高速道路足立三郷線および外郭環状道路（国道298号）の交差部に建設省北首都国道工事事務所が建設中のインターチェンジである。同インターチェンジは、地震時に液状化の可能性の高い軟質沖積地盤上に建設された大規模な曲線橋を含む高架橋で構成されている。

三郷インターチェンジの耐震性に関しては、動的解析を含め種々の検討が実施されているが、こうした解析面からの検討を補強し、同インターチェンジの耐震性を確認するために下部構造と地盤との相互作用に重点を置いた加振実験を実施した。

本報告は、上記加振実験結果の概要をとりまとめたものである。なお、本実験は、関東地方建設局北首都国道工事事務所の依頼で昭和57年度および58年度の2箇年にわたり、土木研究所地震防災部振動研究室が地方建設局依頼調査（三郷インターチェンジにおける調査試験）として実施したものである。

目 次

まえがき

1. 概 説	1
1.1 実験対象橋脚の概要	1
1.2 実験の目的	1
2. 実験方法	7
2.1 実験に使用した起振機	7
2.2 実験ケース	7
2.3 計測システム	8
3. 実験結果	11
3.1 共振曲線および固有振動数	11
3.2 ばね定数および減衰定数	13
3.3 フーチング単位水平変位振幅当たりの回転角	14
3.4 フーチング — 杭系の振動モード	15
3.5 動的解析に用いられた下部構造の地盤ばね定数の検討	17
3.6 動的ばね定数と静的ばね定数の比較	18
4. 結 論	44
謝 辞	45
参 考 文 献	46
付 属 資 料	47
1. データ処理方法の概要	49
2. 1自由度系の共振曲線	55
3. フーチング天端計測点の共振曲線	63
4. $1/\sqrt{2}$ 法による減衰定数の算定	105
5. 動的ばね定数および減衰定数の検討	109
6. フーチング各部の水平変位およびフーチングの回転角の共振曲線	145
7. 地中部有効質量の算出方法	167

1. 概 説

1.1 実験対象橋脚の概要

三郷インターチェンジは、常磐自動車道、首都高速道路足立三郷線、および外郭環状道路（国道298号）の交差部となるインターチェンジである。加振実験の対象とした橋脚はPT-24Uであり、その位置は図1.1に示すとおりである。PT-24Uの概略の寸法を示すと、図1.2のようになる。なお、同図中には後述する計器の配置も合わせて示してある。

当該地点は、江戸川と中川にはさまれた低湿地帯にあり、周辺地盤の土質条件は、図1.3に示すとおりである。すなわち、東京層の上に約40mの軟質な沖積粘土層が堆積し、さらに地表面付近の5～10mには緩い砂層が分布している。また、地下水位は高く、ほぼ地表面位置となっている。なお、本地点周辺では過去の地震により液状化したとの記録もあり、インターチェンジの耐震性を検討する上で、地盤の液状化が重要な課題となっている。

1.2 実験の目的

本実験の主要な目的は、以下のとおりである。

- 1) フーチング側面の土被りが橋脚の振動特性に与える影響について検討する。
- 2) 動的解析に仮定した下部構造に与える地盤ばねの妥当性を確認する。
- 3) 動的な地盤ばねと静的な地盤ばねの相違について検討する。

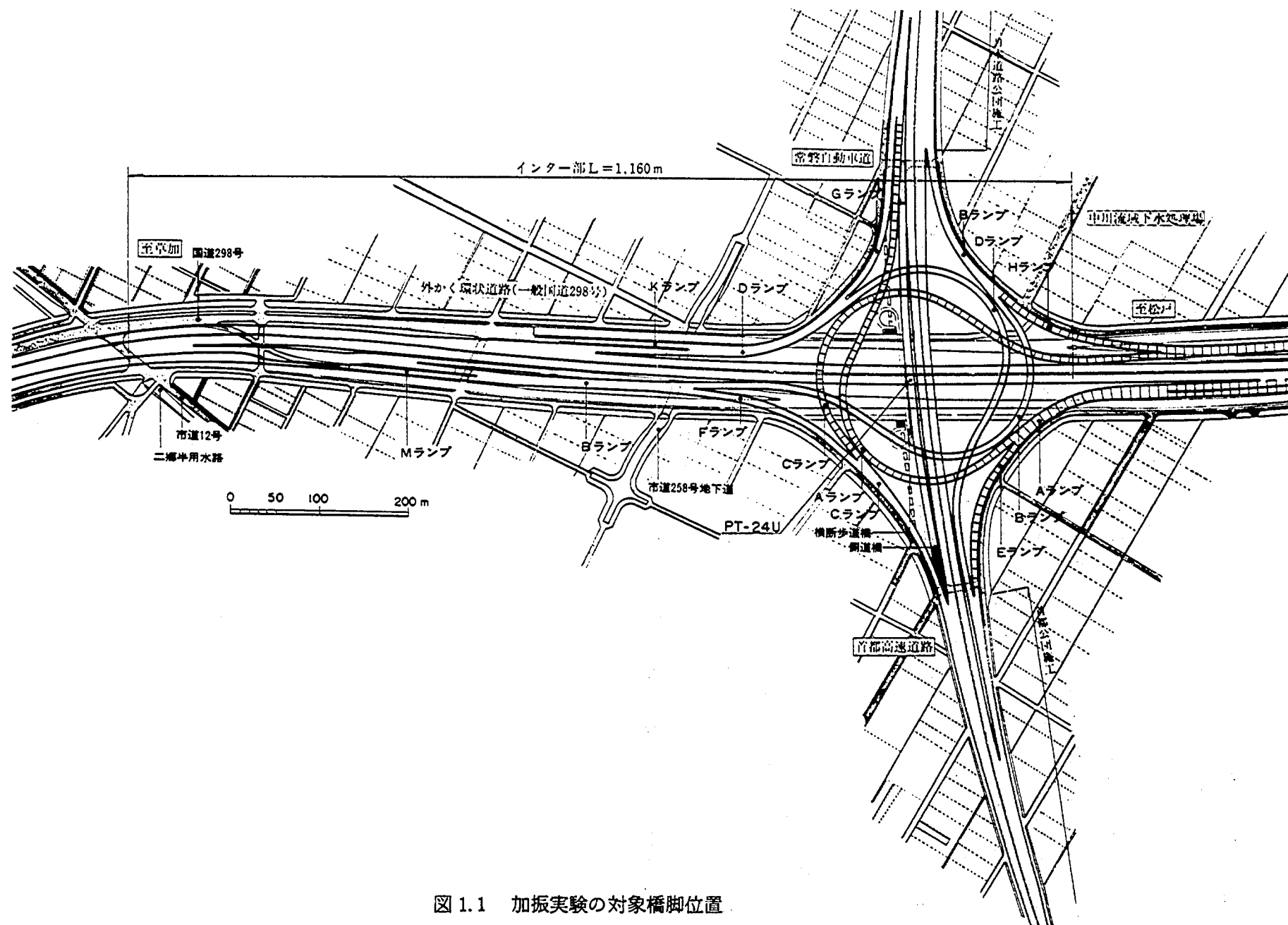
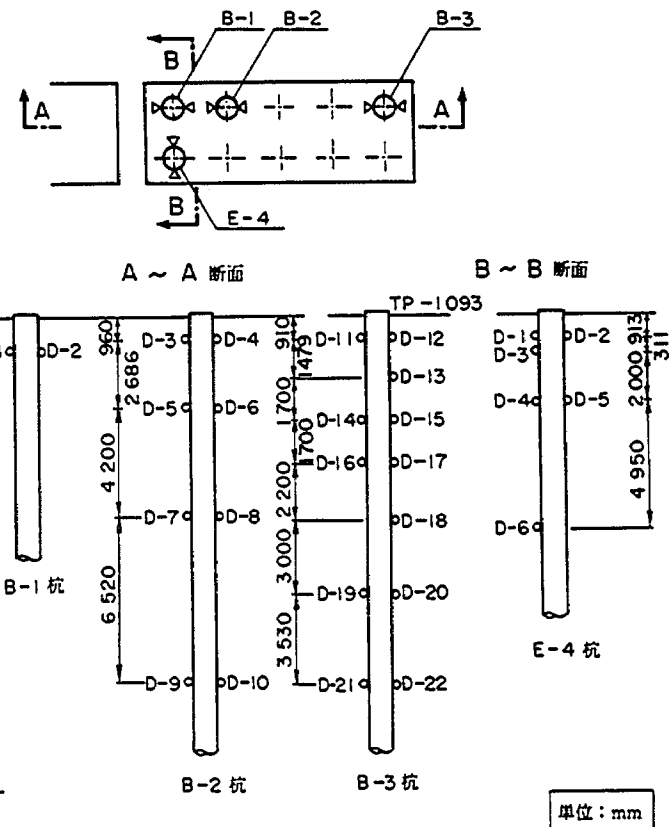
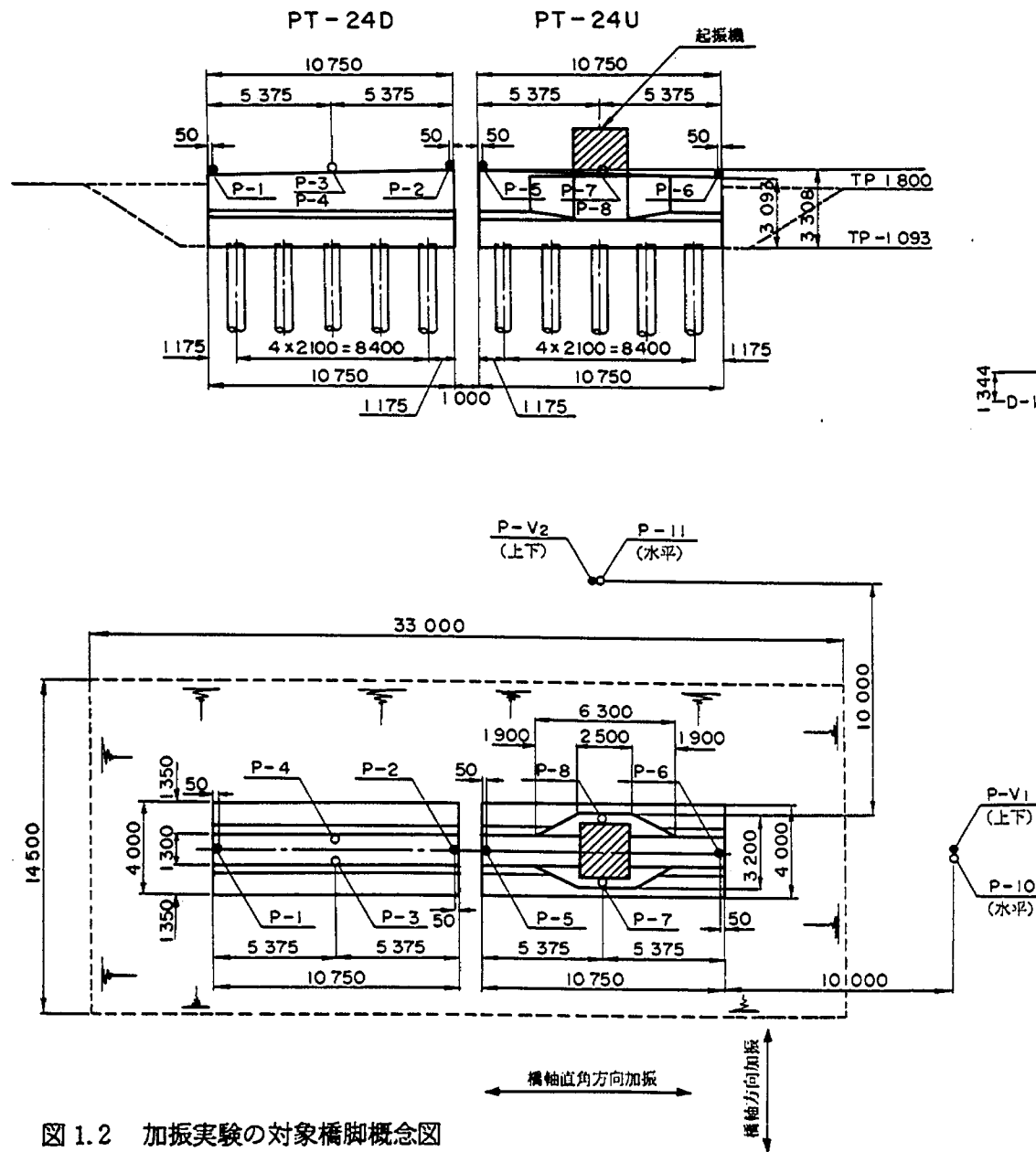


図 1.1 加振実験の対象橋脚位置



橋軸直角方向加振の場合

P-1~P-8のうち○は水平成分、●は上下成分の計測に用いる。
P-10、P-11は水平成分の計測に用いる。P-9としてP-V₁を
上下成分の計測に用いる。

ひずみ計はB-1杭、B-2杭、B-3杭のものを使用する。

橋軸方向加振の場合

P-1 ~ P-8 の

P-10、P-11は水平成分の計測に用いる。P-9としてP-V₂を上下成分の計測に用いる。

ひずみ計はE-4 杭のものを使用する。

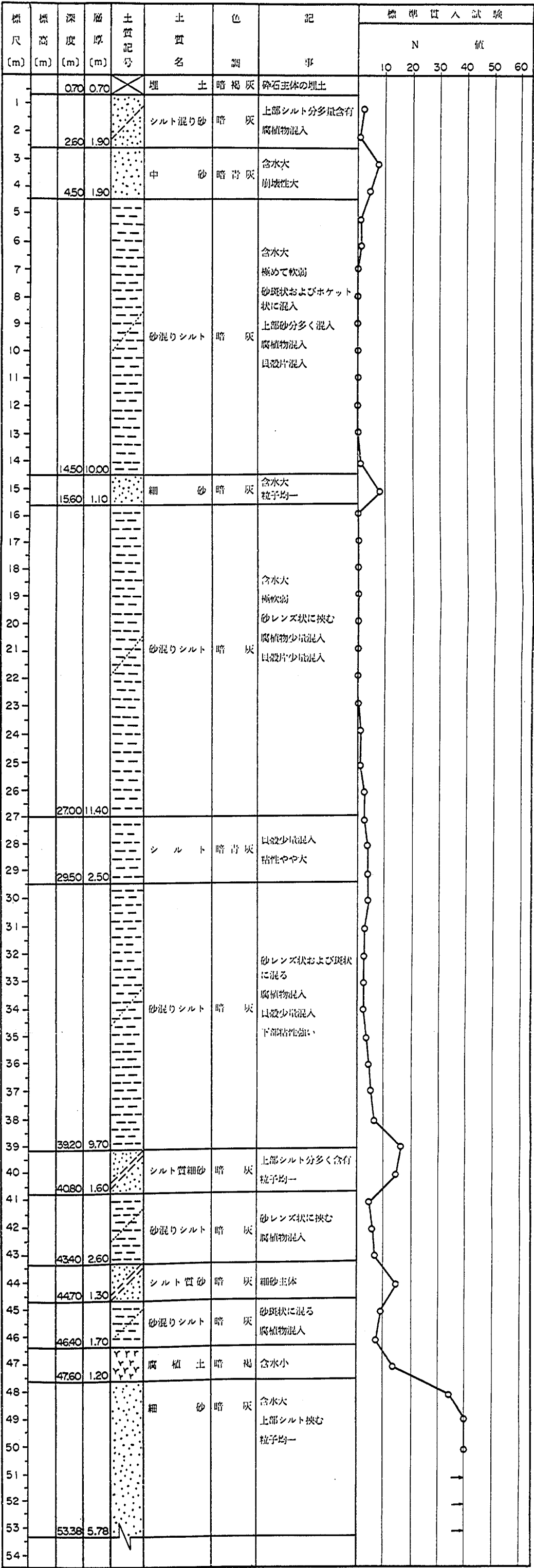


図 1.3 周辺地盤の土質柱状図

2. 実験方法

2.1 実験に使用した起振機

加振実験に使用した起振機は、日本道路公団試験所所有の50 ton 起振機(VE-50)であり、その主要な仕様は表 2.1 に示すとおりである。同起振機は、重錘を取り付けたり(以下、重錘有りの場合と呼ぶ)、取り外したり(以下、重錘無しの場合と呼ぶ)することにより偏心モーメントを2とおりに大きく変化させることができる。また、重錘の開き角度を変化させることにより加振力を連続的に変化させることも可能である。加振力 F (kg)と振動数 f (Hz)の関係は、次式で示される。

$$F = \frac{WR}{g} (2\pi f)^2 \cos \theta \quad (2.1)$$

ここで、

WR : 偏心モーメント

重錘無しの場合 $WR = 16388$ (kg cm), 重錘有りの場合 $WR = 38239$ (kg cm)

θ : 重錘の開き角度 (図 2.1 参照)

$$23.75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

g : 重力加速度 (= 980 (cm/sec²))

本実験では、重錘無しの場合および有りの場合の両者について、それぞれ、重錘の開き角度を50°および83°に設定した。その場合の加振振動数範囲および加振力は、表 2.2 および図 2.2 に示すとおりである。ただし、表 2.2 および図 2.2 はあくまでも実験当初の設定値であり、実際の加振力はこれとは多少異なっている。

2.2 実験ケース

フーチング周辺はフーチング完成後埋戻しをするが、この際、埋戻しをすることにより橋脚の固有振動数および減衰定数は大きな影響を受けると考えられる。このため、フーチング側面の土被りが橋脚の振動特性に及ぼす影響を検討することを目的に、フーチング周辺土を埋戻しした後の状態以外に、これを埋戻す前の状態についても加振実験を行うこととした。ここで、埋戻し前の加振実験時におけるフーチング周辺土の範囲は、図 1.2 の破線に示したとおりである。なお、周辺土を埋戻した状態での加振実験は埋戻し後8日目に行った。また、加振方向は橋軸直角方向および橋軸方向の2方向とした。

実験ケースの一覧を示すと、表 2.3 のようになる。ここで、実験ケース A-2, A-4, D-3 および D-6 は橋脚の振動特性を概略的に把握するために補足的に実施したものである。これ以外の実験ケースは、実験 A, B, C, D とともに加振力の小さい方から順番に表 2.2 に示したケース 1~4 に対応している。

なお、表 2.3 に示した加振力の値は表 2.2 に示した設定値と多少異なっているが、これは重錘の開き角度が設定値どおりに制御できなかったためである。実際の実験に用いた加振力の算出方法は付属資料 1 に示す。

2.3 計測システム

計測システムの概要は、図 2.3 に示すとおりである。すなわち、加速度の計測においては、フーチングと同時に周辺地盤の振動状況を計測するため、フーチングに直交する周辺地盤上の 2 箇所にサーボ型加速度計を設置した。記録はデジタルデータレコーダに収録するとともに、バックアップの意味でアナログデータレコーダにも収録した。さらに、アナログデータレコーダに収録したデータの一部は、モニターのため電磁オシログラフにも記録した。杭体のひずみの測定も基本的には、加速度の場合と同様である。なお、加速度およびひずみの位相特性を変化させないために、いずれの計測に対してもアンプおよびデータレコーダにフィルター処理は加えていない。各レコーダ間の時刻の同期をとるために、起振機のパルス信号を共通に入力している。

表 2.1 加振実験に使用した起振機の主要仕様

構造部分	項 目	仕 様
起振機本体	偏心モーメント	0~35,000 kg cm (重錘有り) 連続可変 0~15,000 kg cm (重錘無し)
	振 動 数	0.2 Hz~8 Hz (重錘有り) 0.2 Hz~15 Hz (重錘無し)
	偏心重錘の開き角度	23.75°~90°
	最大起振力	50,000 kg
	振動方向	水平一成分
	起振力作用点高さ	65.7 cm
	重錘重量	37.0 kg
	機械寸法	214 cm×214 cm×高さ 180 cm
	機械重量	6.8 ton
電 動 機	出 力	30 kW
	定格電圧	200 V (三相交流)
	電源周波数	50 Hz, 60 Hz
	出力回転数	120~1200 rpm (50 Hz 電源) 150~1500 rpm (60 Hz 電源)
	重 量	830 kg

表 2.2 設定加振振動数および加振力

ケ ー ス	重 錘 の 有 無	重錘の開き 角度 (度)	加振振動数 範囲 f (Hz)	加 振 力 F (ton)
1	無 し	83	2.0~10.0	$F=0.080 f^2$
2	有 り	83	1.0~8.0	$F=0.188 f^2$
3	無 し	50	0.5~8.0	$F=0.424 f^2$
4	有 り	50	0.5~5.0	$F=0.990 f^2$

表 2.3 実験ケースの一覧

周辺土の条件	加振方向	実験ケース名	加振振動数範囲 f (Hz)	加振力 F (ton)
埋戻し前	橋軸直角方向	A-1	2.0 ~ 10.0	$F = 0.052 f^2$
		A-2	2.0 ~ 13.5	$F = 0.092 f^2$
		A-3	1.0 ~ 8.0	$F = 0.135 f^2$
		A-4	1.0 ~ 8.0	$F = 0.371 f^2$
		A-5	0.5 ~ 8.0	$F = 0.422 f^2$
		A-6	0.5 ~ 5.0	$F = 0.983 f^2$
	橋軸方向	B-1	2.0 ~ 10.0	$F = 0.055 f^2$
		B-2	1.0 ~ 8.0	$F = 0.130 f^2$
		B-3	0.5 ~ 7.0	$F = 0.419 f^2$
		B-4	0.5 ~ 4.0	$F = 0.982 f^2$
埋戻し後	橋軸直角方向	C-1	2.0 ~ 12.0	$F = 0.059 f^2$
		C-2	1.0 ~ 8.0	$F = 0.132 f^2$
		C-3	0.2 ~ 7.0	$F = 0.420 f^2$
		C-4	0.5 ~ 5.0	$F = 0.975 f^2$
	橋軸方向	D-1	2.0 ~ 13.0	$F = 0.066 f^2$
		D-2	1.0 ~ 8.0	$F = 0.142 f^2$
		D-3	2.0 ~ 8.0	$F = 0.336 f^2$
		D-4	0.5 ~ 8.0	$F = 0.415 f^2$
		D-5	0.5 ~ 5.0	$F = 0.977 f^2$
		D-6	2.0 ~ 8.0	$F = 10$

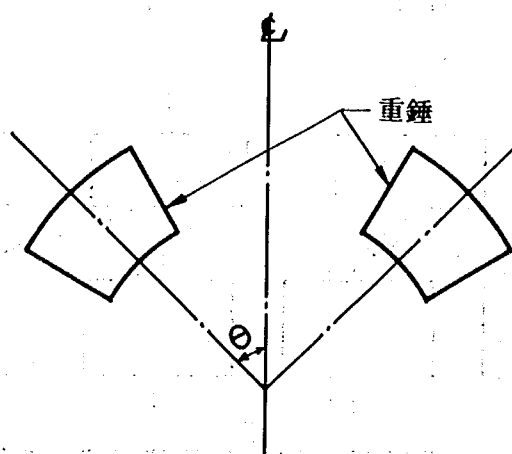


図 2.1 重錘の開き角度

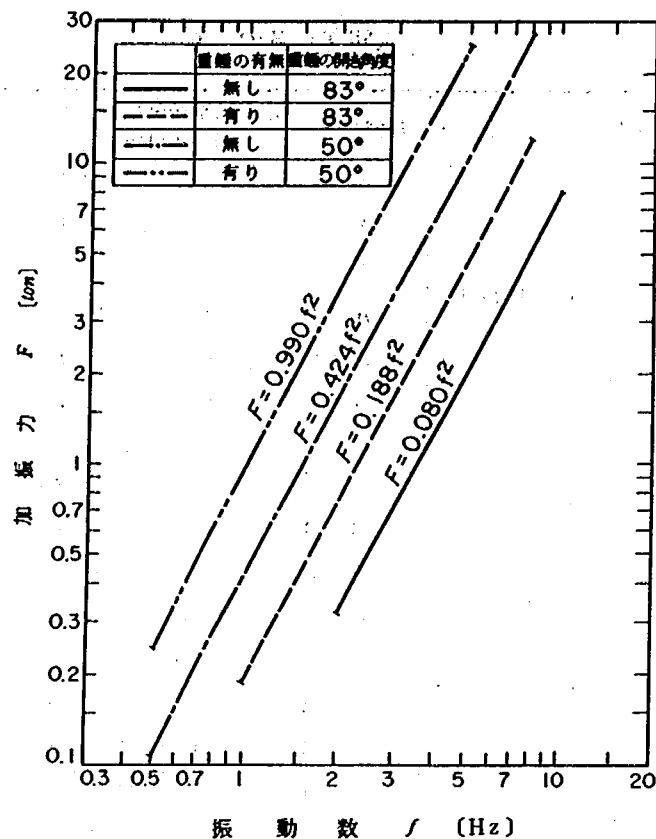


図 2.2 加振実験で設定した(目標とした)振動数と加振力の関係

サーボ型加速度計 抗ひずみ計 起振機パルスセンサー
 横軸直角方向加振時: (P-1~P-11: 11成分) (D-1~D-22: 22成分)
 横軸方向加振時: (P-1~P-11: 11成分) (D-1~D-6: 6成分)

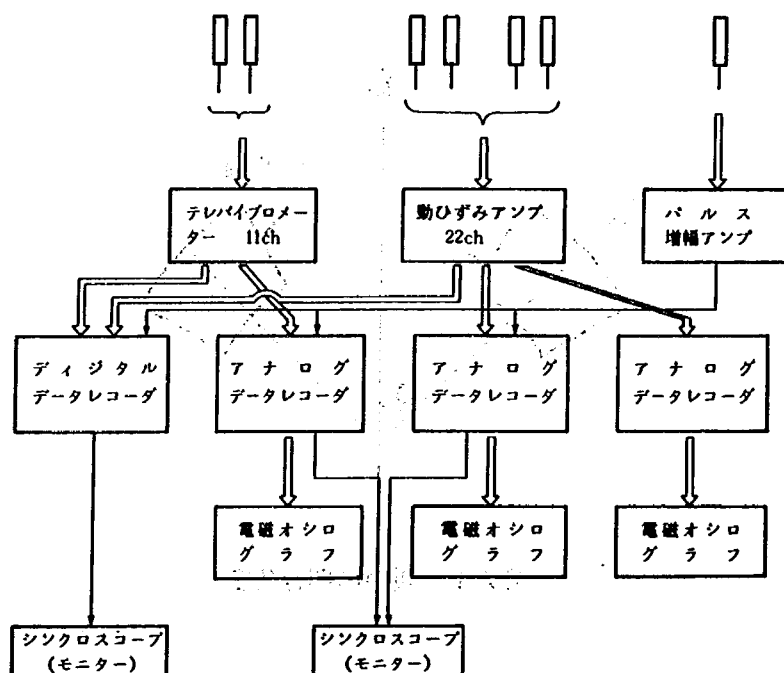


図 2.3 計測システムの概要

3. 実験結果

3.1 共振曲線および固有振動数

加振振動実験の結果は、単位加振力当りの加速度応答、単位加振力当りの変位応答および加振力（起振機の加振パルスを基準にとった）に対する各部の応答の位相遅れの形で整理した。各部の共振曲線を全て示すと膨大な量となるので、ここではフーチング上の4箇所（P-5点、P-6点、P-7点およびP-8点、位置については図1.2参照）の結果のみを示すこととする。

図3.1および図3.2は埋戻し前における、それぞれ、橋軸直角方向および橋軸方向加振の場合の単位加振力当りの共振曲線を示したものである。ここで、加振力はともに $F=0.424\text{ t}$ に対応する実験ケース（橋軸直角方向加振の場合には実験ケースA-5、橋軸方向加振の場合には実験ケースB-3）を示している。これより、共振曲線の全体的な特徴に関しては、以下の事項が指摘される。

- (i) 図3.1の(a)および(b)は、橋軸直角方向に加振した場合の、それぞれ、フーチング上の橋軸直角方向の最外縁に相当するP-5点およびP-6点の上下成分の共振曲線を示したものである。P-5点とP-6点の共振曲線は全体としてはよく一致しているが、細部において多少異なるのは、橋脚が中立軸を中心とする完全な対称振動をしていないためと考えられる。単位加振力当りの加速度振幅は振動数4.5Hz付近でピークとなっており、また、位相遅れもこの付近で 90° 近くになっているため、この付近を共振振動数と考えることができる。なお、単位加振力当りの加速度共振曲線では、4Hz付近にも小さいピークを見ることができる。
 - (ii) 図3.1の(c)および(d)は、橋軸直角方向に加振した場合の、それぞれ、フーチング上において橋軸中央線上に位置するP-7点およびP-8点における水平成分（橋軸直角方向）の共振曲線を示したものである。加振方向と一致しているため、単位加振力当りの加速度振幅および変位振幅は、ともに、上述の図3.1(a)および(b)の場合よりも4倍程度大きい。P-7点およびP-8点における共振曲線の間には、はっきりした違いは認められない。単位加振力当りの加速度振幅は振動数が4～5.5Hz程度の範囲でピークを有しており、この範囲に1次の共振振動数が存在すると考えられる。
 - (iii) 図3.2の(a)および(b)は、橋軸方向に加振した場合の、それぞれ、フーチング上における橋軸直角方向の最外縁に相当するP-5点およびP-6点の水平成分（橋軸方向）の共振曲線を示したものである。図3.1の(c)および(d)と比較すると、単位加振力当りの加速度振幅および変位振幅は2倍程度になっており、橋脚は橋軸直角方向よりも橋軸方向により振動しやすいことを示している。単位加振力当りの加速度振幅は、振動数4.5Hz付近に明瞭なピークを有しており、この付近が橋軸方向に加振した場合の共振振動数と考えられる。
 - (iv) 図3.2の(c)および(d)は、橋軸方向に加振した場合の、それぞれ、フーチング上において橋軸中央線上に位置するP-7点およびP-8点の上下成分の共振曲線を示したものである。単位加振力当りの加速度振幅および変位振幅は、上述の図3.2(a)および(b)に示した水平成分の1/5程度と小さい。単位加振力当りの加速度振幅は振動数4.5Hz付近に明瞭なピークを持っている。
- 次に、図3.3および図3.4は埋戻し後における、それぞれ、橋軸直角方向および橋軸方向加振の場合

の共振曲線を示したものである。ここで加振力は、上述した埋戻し前の場合と同様に、 $F = 0.424 f^2$ に対応する実験ケース（橋軸直角方向加振の場合には実験ケース C-3，橋軸方向加振の場合には実験ケース D-4）を示している。これより，共振曲線の全体的な特徴に関しては，以下の事項が指摘される。

(i) 図 3.3 の(a)および(b)は，橋軸直角方向に加振した場合の，それぞれ，フーチング上の P-5 点および P-6 点における上下成分の共振曲線を示したものである。これによれば，単位加振力当りの加速度振幅は，振動数が 7 Hz 以下の範囲では振動数の増加に伴い，おおむね単調に増加しており，前述した図 3.1 の(a)および(b)のように明瞭な共振曲線のピークは認められない。また，加振力に対する位相遅れは，振動数が 2 Hz 以下の範囲ではばらつきが大きい，2 Hz 以上の領域では $0 \sim 45^\circ$ 程度の範囲で変動しており， 90° には達していない。

(ii) 図 3.3 の(c)および(d)は，橋軸直角方向に加振した場合の，それぞれ，フーチング上の P-7 点および P-8 点における水平成分（橋軸直角方向）の共振曲線を示したものである。これによれば，単位加振力当りの加速度振幅は，上述した上下成分の場合と同様，振動数の増加とともにおおむね単調に増加し，明瞭な応答のピークは認められない。ただし，加振力に対する位相遅れは振動数 5 ～ 5.5 Hz 付近で 90° となっており，この付近が固有振動数であることを示している。5 ～ 5.5 Hz 付近に固有振動数が存在するにもかかわらず，共振曲線に明瞭な応答のピークが生じないのは，橋脚の減衰定数がきわめて大きいためであると考えられる。

(iii) 図 3.4 の(a)および(b)は，橋軸方向に加振した場合の，それぞれ，フーチング上の P-5 点および P-6 点における水平成分（橋軸方向）の共振曲線を示したものである。共振曲線には明瞭なピークは認められないが，6 Hz 付近においてわずかな応答のピークが現われている。また，加振力に対する位相遅れも振動数によるばらつきが大きい，5.5 ～ 6 Hz 付近において 90° 程度となっていることから，この付近が橋軸方向の固有振動数ではないかと考えられる。

(iv) 図 3.4 の(c)および(d)は，橋軸方向に加振した場合の，それぞれ，フーチング上の P-7 点および P-8 点における上下成分の共振曲線を示したものである。単位加振力当りの加速度振幅および変位振幅には，明瞭な応答のピークは現われていない。

次に強制振動実験の結果得られたフーチング-杭系の応答を 1 自由度の振動系とみなし，橋脚の固有振動数を求めるためには，次のような方法が考えられる（付属資料 2 参照）。

- (i) 位相遅れが 90° となる振動数。
- (ii) 加速度共振曲線の共振振動数（共振曲線が極大値をとる振動数）を f_a^p ，減衰定数を h とすれば，固有振動数 f_0 は次式で与えられる。

$$f_0 = \sqrt{1 - 2h^2} f_a^p \quad (3.1)$$

式 (3.1) によれば， h が $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ より十分小さければ $f_0 \approx f_a^p$ となり，共振曲線が極大となる振動数を固有振動数と考えることができる。ただし， h が $1/\sqrt{2}$ より十分小さくない場合は，共振振動数は固有振動数よりも高い方へずれることとなる。また， $h \geq 1/\sqrt{2}$ の場合には，共振曲線は極大値をとらない（付図 2.3 参照）。

(iii) 変位共振曲線の共振振動数を f_d^p とすれば、固有振動数 f_0 は次式で与えられる。

$$f_0 = f_d^p / \sqrt{1 - 2h^2} \quad (3.2)$$

したがって、(ii)と同様に、 h が $1/\sqrt{2}$ より十分小さければ、共振曲線が極大となる振動数を固有振動数と見なすことができる。

このようにして位相曲線から求めた固有振動数、加速度共振曲線および変位共振曲線の両者から求めた共振振動数を示すと、表3.1のようになる。ここで、図3.1～3.4に示したように、フーチング上のP-7点およびP-8点、また、P-5点およびP-6点における共振曲線および位相曲線は、それぞれ、相互によく一致しているため、橋軸直角方向に加振した場合にはP-7点もしくはP-8点、また、橋軸方向に加振した場合にはP-5点もしくはP-6点のデータを用いている。表3.1より、周辺土および加振方向の条件が同一でも、加振力の大きさによって固有振動数の値は大きく異なることがわかる。そこで、橋脚の固有振動数が加振力（固有振動数時、表3.1参照）およびフーチング天端の変位振幅（固有振動数時）によってどのように変化するかを示すと、それぞれ、図3.5および図3.6のようになる。図3.5および図3.6より、データに多少のばらつきは見られるが、橋脚の固有振動数と加振力およびフーチング天端の変位振幅の間には、次のような関係が認められる。

(i) 加振力が大きくなると、いずれの場合も固有振動数は減少する。たとえば、埋戻し前の橋軸直角方向加振の場合では、加振力が2 ton の場合には固有振動数は5.1 Hz であるのに対し、加振力が15 ton になると固有振動数は3.8 Hz となり、25%程度も減少している。なお、加振力が増加した場合の固有振動数の減少の度合いは、埋戻し前の方が埋戻し後よりも大きい。また、橋軸直角方向と橋軸方向で比較すると、ごくわずかではあるが、前者の方が後者よりも加振力の増加に伴う固有振動数の減少の度合いは大きい。

(ii) フーチング天端の変位振幅が大きくなると、いずれの場合も固有振動数は減少する。全体的な特徴は上記(i)と同様である。なお、図3.5および図3.6において、一部のデータで固有振動数が非常に高く求められている。これは、実験ケースC-1およびD-1のデータであるが、これらの実験ケースでは、付図3.3(1)および付図3.4(1)に示すように位相曲線から位相遅れが 90° となる振動数をはっきり定められなかったことが原因であると考えられる。

3.2 ばね定数および減衰定数

フーチングー杭系の運動を1自由度系の振動とみなせば、ばね定数 k は固有振動数 f_0 およびフーチングの質量 m (=26.16 [ton sec²/m])から、次式により求めることができる。

$$k = (2\pi f_0)^2 m \quad (3.3)$$

ここで質量 m としては、フーチングの質量以外にも杭、さらには杭と同じように振動する杭間の地盤の質量が考えられるが、ここではこれらを考慮しないものとする。なお、これらを考慮する場合には、ばね定数 k は m に比例して大きくなることになる。また、減衰定数 h は、 $1/\sqrt{2}$ 法(付属資料4参照)を

用いて、図 3.7 に示すように変位共振曲線の共振振動数 f_d^p および共振曲線の極大値の $1/\sqrt{2}$ の値に相当する振動数範囲 Δf から次のように求められる。

$$h = \frac{\Delta f}{2f_d^p} \quad (3.4)$$

式 (3.3) および (3.4) から求めた各実験ケースのばね定数および減衰定数を示すと、表 3.2 のようになる。ただし、フーチング周辺土埋戻し後の場合は共振曲線のピークが現われていないので、 $1/\sqrt{2}$ 法では減衰定数を求めることができない。しかしながら、変位共振曲線に応答のピークが現われず、振動数の増加とともに変位振幅がほぼ単調に減少している点から、減衰定数は 0.7 程度以上はあると考えることができる。

このようにして求めたばね定数および減衰定数がフーチング天端の変位振幅（固有振動数時、表 3.1 参照）によってどのように変化するかを示すと、それぞれ、図 3.8 および図 3.9 のようになる。図 3.8 および図 3.9 より、多少のばらつきは見られるが、固有振動数で振動している際のフーチング天端の変位振幅とばね定数および減衰定数との関係は以下ようになる。

(i) ばね定数は、フーチング天端の変位振幅が大きくなるに従い減少する。たとえば、埋戻し前の橋軸直角方向加振の場合では、変位振幅が 0.06mm の場合にはばね定数は 2.7×10^4 ton/m であるのに対し、変位振幅が 1 mm になるとばね定数は 1.5×10^4 ton/m となり、44% も減少する。なお、変位振幅が増大した場合のばね定数の減少の割合は、埋戻し前の方が埋戻し後よりも大きい。

(ii) 周辺土を埋戻しした場合のばね定数は、周辺土を埋戻しする前のばね定数に比較して 25~30% 程度増加している。

(iii) 減衰定数（周辺土埋戻し前）は、フーチング天端の変位振幅が大きくなるに従って減少する。

(iii) については、従来の実験等による結果^{1)~3)}から見ると、反対の傾向のように思われるため、以下これについて検討することとする。図 3.10 は加振力により共振曲線の形状がどのように変化するかを示したものである。これによれば、共振振動数付近の共振曲線の形状は、加振力が大きくなるほど鋭いピークを示すようになり、減衰定数が小さくなっていることがわかる。この理由は、はっきりしないが、埋戻し前の状態では、フーチング下面は地盤と完全には接触していないため、フーチングは杭で支えられた状態にある。このため、加振力が大きくなると杭表面と周辺地盤の間に間隙が生じ、逸散減衰の低下により減衰が小さくなるのではないかと考えられる。

いま、表 3.2 に示した減衰定数を用いて、式 (3.1) および (3.2) により、加速度共振振動数 f_a^p および変位共振振動数 f_d^p から固有振動数 f_0 を求めると、表 3.3 のようになる。これによれば、式 (3.1) および (3.2) から求めた固有振動数は前述した位相曲線から求めた固有振動数とおおむね一致している。

3.3 フーチング単位水平変位振幅当りの回転角

加振実験におけるフーチングの運動は並進運動だけではなく、回転運動も伴っている。そこで、以下に示す方法でフーチングの回転角と水平変位振幅の比較を行った。

いま、図 3.11 に示すようにフーチングの鉛直変位振幅を A_v 、フーチング中心から上下方向加振度計までの距離を L とすれば、フーチングの回転角 θ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \frac{A_v}{L} \\ &\approx \frac{A_v}{L}\end{aligned}\quad (3.5)$$

したがって、フーチングの水平変位振幅を A_h とすれば、単位の水平変位振幅に対する回転角 θ/A_h は次のようになる。

$$\frac{\theta}{A_h} = \frac{1}{L} \frac{A_v}{A_h} \quad (3.6)$$

ここで、橋軸直角方向加振の場合には、 A_v として図 3.11 に示す P-5 点および P-6 点の変位振幅の平均値を、また、 A_h として P-7 点および P-8 点の変位振幅の平均値をそれぞれ用いる。また、橋軸方向加振の場合には、 A_v および A_h として、それぞれ、P-7 点と P-8 点の平均値および P-5 点と P-6 点の平均値を用いる。式 (3.5) の中の L は、図 3.11 に示すように、橋軸直角方向加振および橋軸方向加振の場合に対して、それぞれ、5.32 m および 1.55 m となる。水平変位振幅 1 mm 当りの回転角を示すと、図 3.12 のようになる。図 3.12 より、以下の事項が指摘される。

- (i) 振動数が 2 Hz 程度以下では、図 3.12(a)(b)(c)(d) いずれの場合も θ/A_h は非常に大きく求められている。しかしながら、振動数の小さい範囲では加振力は小さく、このため測定される加速度振幅も小さい。したがって、測定にわずかな誤差が生じて θ/A_h は大きく影響されることになる。
- (ii) 埋戻し前には振動数が 2 Hz 程度以上かつ 6 Hz 程度以下では θ/A_h は振動数によってあまり変わらず、橋軸直角方向加振では 4×10^{-5} rad/mm、橋軸方向加振では 13×10^{-5} rad/mm 程度の値をとる。したがって、橋軸方向加振の場合には、橋軸直角方向加振の場合に比較して 3 倍程度 θ/A_h が大きいことがわかる。なお、振動数が 6 Hz 程度以上 (10 Hz 程度まで) では、 θ/A_h は両方向とも振動数の増加に伴いおおむね単調に増加する。
- (iii) 埋戻し後の橋軸直角方向加振の場合には、振動数が、2 Hz 程度以上かつ 6 Hz 程度までの範囲では θ/A_h は 6×10^{-5} rad/mm 程度の値をとる。6 Hz 程度以上では、振動数の増加とともに θ/A_h は増加する。これに対して、埋戻し後の橋軸方向加振の場合には、 θ/A_h は 2 Hz 付近で最小値 (13×10^{-5} rad/mm 程度) をとり、その後は振動数の増加とともに θ/A_h は増加する。ただし、全体的には埋戻し前の場合と同様に、橋軸方向に加振した場合の θ/A_h は、橋軸直角方向に加振した場合の θ/A_h に比較し 2 ~ 3 倍になっている。
- (iv) 上記(i)~(iii)の特徴は、加振力の大きさにより、顕著な変化を示さない。
- (v) 同一方向に対する θ/A_h の値を埋戻し前と埋戻し後で比較すると、顕著な違いは認められない。

3.4 フーチングー杭系の振動モード

強制振動実験時のフーチングー杭系の振動モードをフーチングについては変位により、また、杭につ

いては、曲げモーメントにより、それぞれ、検討することとした。ここで、振動モードは加振時系列の1周期を8分割し、その各々の時刻における応答から近似的に求めることとした。なお、検討に用いた実験ケースはA-5, B-3, C-3, D-4 (表2.3参照)の計4ケースである。フーチングの天端変位、下端変位および杭の曲げモーメントの算出方法は、次のとおりである。

1) フーチング天端の変位

いま、図3.13に示すように、フーチング天端の端部の計測点における水平変位 $x_1(t)$ および $x_2(t)$ を次のように表す。

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) \quad (3.7)$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega t - \varphi_2) \quad (3.8)$$

ここで、

A_1, A_2 : 計測点1, 2における水平変位振幅 (mm)

φ_1, φ_2 : 計測点1, 2における加振力に対する位相遅れ (rad)

フーチング天端の変位 $x_u(t)$ は、 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ の平均とする。

$$\begin{aligned} x_u(t) &= \frac{x_1(t) + x_2(t)}{2} \\ &= \frac{A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t - \varphi_2)}{2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

ここで、橋軸直角方向加振の場合には、 $x_1(t)$ としてP-7点の変位を、また、 $x_2(t)$ としてP-8点の変位を、それぞれ、用いる。また、橋軸方向加振の場合には、 $x_1(t)$ としてP-5点の変位を、 $x_2(t)$ としてP-6点の変位を、それぞれ、用いる。

2) フーチング下端の変位

図3.13に示すように、フーチング天端の端部の計測点における鉛直変位 $x_3(t)$ および $x_4(t)$ を次のように表す。

$$x_3(t) = A_3 \cos(\omega t - \varphi_3) \quad (3.10)$$

$$x_4(t) = A_4 \cos(\omega t - \varphi_4) \quad (3.11)$$

ここで、

A_3, A_4 : 計測点3, 4における鉛直変位振幅 (mm)

φ_3, φ_4 : 計測点3, 4における加振力に対する位相遅れ (rad)

フーチングの高さを $h (= 3.2 \text{ (m)})$ 、計測点間の距離を L とすれば、フーチング下端の水平変位 $x_e(t)$ は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} x_e(t) &= x_u(t) - h \tan \theta \\ &= x_u(t) - \frac{h}{L} \{ x_3(t) - x_4(t) \} \\ &= x_u(t) - \frac{h}{L} \{ A_3 \cos(\omega t - \varphi_3) - A_4 \cos(\omega t - \varphi_4) \} \end{aligned} \quad (3.12)$$

ここで、橋軸直角方向加振の場合には $x_3(t)$ としてP-5点の変位を、 $x_4(t)$ としてP-6点の変位を、それぞれ、用いる。また、橋軸方向加振の場合には、 $x_3(t)$ としてP-7点の変位を、 $x_4(t)$ としてP-8点の変位を、それぞれ、用いる。

3) 杭の曲げモーメント

図3.14に示すように、杭の外周上のひずみの計測点におけるひずみ $\epsilon_1(t)$ および $\epsilon_2(t)$ を次のように表す。

$$\epsilon_1(t) = E_1 \cos(\omega t - \varphi_1^e) \quad (3.13)$$

$$\epsilon_2(t) = E_2 \cos(\omega t - \varphi_2^e) \quad (3.14)$$

ここで、

E_1, E_2 : 計測点1, 2におけるひずみ振幅

φ_1^e, φ_2^e : 計測点1, 2における加振力に対する位相遅れ (rad)

杭のヤング率を $E (= 2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)})$ 、杭の断面2次モーメントを $I (= 8513.8 \text{ (cm}^4\text{)})$ とすれば、杭の曲げモーメント $M(t)$ は次式で表される。

$$M(t) = EI \frac{E_1 \cos(\omega t - \varphi_1^e) - E_2 \cos(\omega t - \varphi_2^e)}{2} \quad (3.15)$$

加振時系列の1周期を8分割した各時刻において、式(3.9)、(3.12)および(3.15)で求められるフーチング天端の変位および杭の曲げモーメントを示すと、図3.15～3.18のようになる。

次に、B-3杭の曲げモーメントの分布形状について、静的載荷実験と加振実験の結果を比較すると、図3.19のようになる。ここで、静的載荷実験では、周辺土の埋戻し前に橋軸直角方向に載荷されている。したがって、加振実験についてもこれと同じ条件の実験ケースA-5を比較することとし、振動数は固有振動数に近い3.81 Hz (図3.15(2)参照)とした。また、曲げモーメントの分布形状は、静的載荷実験、加振実験ともに杭頭曲げモーメントを1.0とした場合の結果である。図3.19より加振実験の曲げモーメントは加振力が最大となる時刻より90°程度遅れて最大となるが、その際の曲げモーメント分布は静的載荷実験による分布とよく一致していることがわかる。

3.5 動的解析に用いられた下部構造の地盤ばね定数の検討

三郷インターチェンジ高架橋の主要部の耐震性は動的解析により検討されているが、この際に用いられた下部構造に与える地盤ばねの妥当性を上記振動実験結果を基本に検討する。ただし、PT-24 U橋脚に対する動的解析は実施されていないが、動的解析においては下部構造に与える地盤ばねを以下のよう定めている。

いま、図3.20に示すような突出長のない頭部固定杭では、杭1本当たりの杭頭ばね定数 K' (kg/cm) は次式で与えられる。

$$K' = 4EI\beta^3 \quad (3.16)$$

ここで、

$$\beta = \sqrt{\frac{k_{HD}}{4EI}} \quad (1/\text{cm})$$

E : 杭のヤング率 ($= 2.1 \times 10^6$ [kg/cm²])

I : 杭の断面2次モーメント ($= 184 \times 10^3$ [cm⁴])

k_H : 地盤反力係数 [kg/cm³]

D : 杭径 ($= 81.3$ [cm])

したがって、群杭効果を考慮しないものとすれば、下部構造フーチング底面におけるばね定数 K [kg/cm] は次式で与えられる。

$$K = n \times K' \quad (3.17)$$

ここで、 $n (=10)$ は杭本数である。ただし、式 (3.16) は地盤反力係数 k_H が深さ方向に一様であると仮定した場合の杭頭ばね定数を与える式であるが、実際には、 k_H は深さ方向に一様ではない。このため、動的解析においては、フーチング底面から第1不動点までの k_H を平均した値を用いてばね定数 K を求めている。いま、図 3.20 よりフーチング底面から第1不動点までの層厚で重み付けした k_H の平均値 $\bar{k}_H$ を求めると次のようになる。

$$\bar{k}_H = 0.48 \text{ [kg/cm}^3\text{]} \quad (3.18)$$

これより、式 (3.17) の K を求めると次のようになる。

$$K = 1.74 \times 10^4 \text{ [ton/m]} \quad (3.19)$$

一方、今回の振動実験から求めたばね定数 K (埋戻し前、橋軸直角方向) は、図 3.8 に示したとおりである。変位振幅が大きくなるとともにばね定数は減少するが、変位振幅が 1 mm 程度の場合を考えるとばね定数 K は 1.5×10^4 ton/m 程度となり、上記の結果とよく一致している。したがって、式 (3.17) により推定したばね定数は、振動実験結果と大きな違いはないということができよう。

3.6 動的ばね定数と静的ばね定数の比較

今回の起振機振動実験とは別に実施された PT-24 U 橋脚の静的載荷試験結果 (埋戻し前、橋軸直角方向) によれば、水平荷重とフーチング水平変位の関係およびフーチング下面のばね定数とフーチング水平変位の関係は、それぞれ、図 3.21 および図 3.22 のように求められている。これによれば、フーチング下面のばね定数 K はフーチングの水平変位 δ によって非常に大きく異なる。たとえば、 $\delta = 1$ [mm] の時には $K = 4 \times 10^4$ [ton/m] 程度であるのに対し、 $\delta = 10$ [mm] の時には $K = 1.5 \times 10^4$ [ton/m] と 1/2 以下に低下する。このようなフーチング水平変位によるばね定数の大きな変化は、下部構造周辺の地盤の非線形性による所が大きいと考えられている。ただし、フーチングの変位の小さい範囲では静的載荷実験における測定精度の面からどこまでが信頼できる結果とみなし得るかにに関して検討が必要とされる。

また、PT-24 U 橋脚の単杭荷試験結果をもとに杭頭固定の条件で求めた単杭の杭頭ばね定数は、変位が 10 mm の場合には 0.68×10^4 ton/m 程度の値となる。フーチングの変位振幅が 10 mm の場合のフーチング下面の静的ばね定数は、上述したように 1.5×10^4 ton/m 程度であるから、これを杭 1 本当りのばね定数に直すと 0.15×10^4 ton/m となり、単杭載荷試験から求められる値の 1/4 となる。単杭の杭頭ばね定数を杭本数倍した値がフーチング下面のばね定数よりも大きくなる理由としては、群杭効果が

考えられるが、これだけで4倍の違いを説明するには無理があるように考えられる。これについては、実験条件をもとに静的載荷試験結果の妥当性について今後詳細に検討を加えることが必要とされよう。

一方、振動実験より求めたばね定数（埋戻し前、橋軸直角方向）は図3.8に示したとおりであり、フーティングの変位振幅が大きくなるとともに減少するが、変位振幅が約1mmで 1.5×10^4 ton/m程度である。これは上述した静的載荷試験より求められた $\delta = 1$ (mm)の場合のばね定数 $K = 4 \times 10^4$ (ton/m)に比較して約1/2.5となっている。このような差が生じる原因については、現段階ではよくわからないが、上述したように微小変位領域の静的載荷試験の精度、群杭と単杭によるばね定数が約4倍異なることから示されるように実験条件の違い等を考慮し、今後検討が必要とされる。

表 3.1 共振振動数および固有振動数の一覧

周辺土の 条 件	加 振 方 向	実験ケー ス 名	加 振 力 F (ton)	共振振動数 f^p (Hz)		固有振動数 f_0 (Hz)	固有振動数 時変位振幅 (mm)
				加速度振幅か ら求めた場合	変位振幅か ら求めた場合		
埋 戻 し 前	橋 軸 直 角 向	A-1	$F = 0.052 f^2$	5.7	4.6	5.1	0.063
		A-2	$F = 0.092 f^2$	5.1	4.1	4.8	0.115
		A-3	$F = 0.135 f^2$	5.1	4.1, 4.9	4.9	0.156
		A-4	$F = 0.371 f^2$	5.0	4.1	4.3	0.427
		A-5	$F = 0.422 f^2$	4.3	3.8	3.9	0.372
		A-6	$F = 0.983 f^2$	3.8	3.8	3.8	1.030
	橋 軸 方 向	B-1	$F = 0.055 f^2$	4.9	4.8	4.8	0.139
		B-2	$F = 0.130 f^2$	4.8	4.5	4.8	0.348
		B-3	$F = 0.419 f^2$	4.6	3.5, 4.4	4.4	0.821
		B-4	$F = 0.982 f^2$	—	3.6	4.1	1.622
埋 戻 し 後	橋 軸 直 角 向	C-1	$F = 0.059 f^2$	5.5	5.2, 8.3	6.9	0.029
		C-2	$F = 0.132 f^2$	5.2, 6.8	5.2	5.4	0.050
		C-3	$F = 0.420 f^2$	5.7, 6.5	5.7	5.1	0.186
		C-4	$F = 0.975 f^2$	—	4.5	4.9	0.479
	橋 軸 方 向	D-1	$F = 0.066 f^2$	8.9	6.7	7.8	0.059
		D-2	$F = 0.142 f^2$	5.5, 7.0	—	5.7	0.085
		D-3	$F = 0.336 f^2$	5.2	4.9	5.4	0.239
		D-4	$F = 0.415 f^2$	5.2, 6.2	4.7	5.5	0.338
		D-5	$F = 0.977 f^2$	—	4.5	5.4	—
		D-6	$F = 10$	5.4	4.7	5.4	0.254

注) — は応答のピークが明瞭ではなく、共振振動数を求められないことを示す。

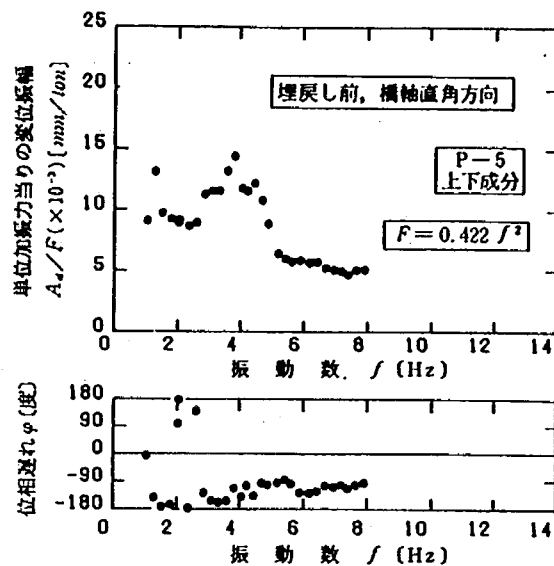
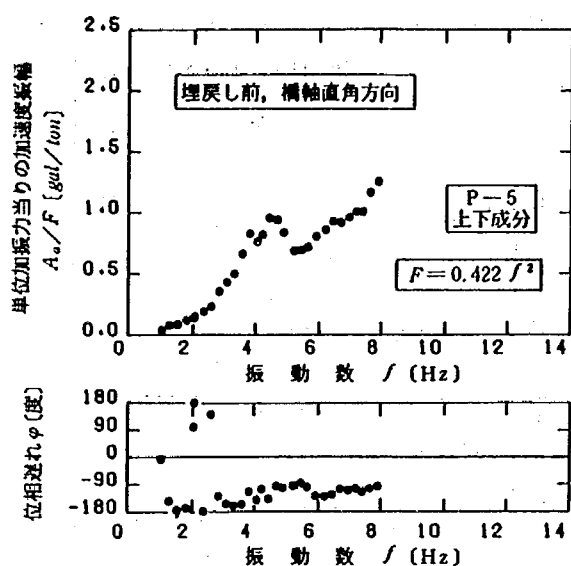
表 3.2 ばね定数および減衰定数の一覧

周辺土の条件	加振方向	実験ケース名	加振力 F (ton)	固有振動数 f_0 (Hz)	ばね定数 k ($\times 10^4$) (ton/m)	減衰定数 h
埋戻し前	橋軸直角方向	A-1	$F = 0.052 f^2$	5.1	2.69	0.391
		A-2	$F = 0.092 f^2$	4.8	2.38	0.335
		A-3	$F = 0.135 f^2$	4.9	2.48	0.291
		A-4	$F = 0.371 f^2$	4.3	1.91	0.268
		A-5	$F = 0.422 f^2$	3.9	1.57	0.257
		A-6	$F = 0.983 f^2$	3.8	1.49	0.132
	橋軸方向	B-1	$F = 0.055 f^2$	4.8	2.38	0.219
		B-2	$F = 0.130 f^2$	4.8	2.38	0.189
		B-3	$F = 0.419 f^2$	4.4	2.00	0.128
		B-4	$F = 0.982 f^2$	4.1	1.74	—
埋戻し後	橋軸直角方向	C-1	$F = 0.059 f^2$	6.9	4.92	—
		C-2	$F = 0.132 f^2$	5.4	3.01	—
		C-3	$F = 0.420 f^2$	5.1	2.69	—
		C-4	$F = 0.975 f^2$	4.9	2.48	—
	橋軸方向	D-1	$F = 0.066 f^2$	7.8	6.28	—
		D-2	$F = 0.142 f^2$	5.7	3.36	—
		D-3	$F = 0.336 f^2$	5.4	3.01	—
		D-4	$F = 0.415 f^2$	5.5	3.12	—
		D-5	$F = 0.977 f^2$	5.4	3.01	—
		D-6	$F = 10$	5.4	3.01	—

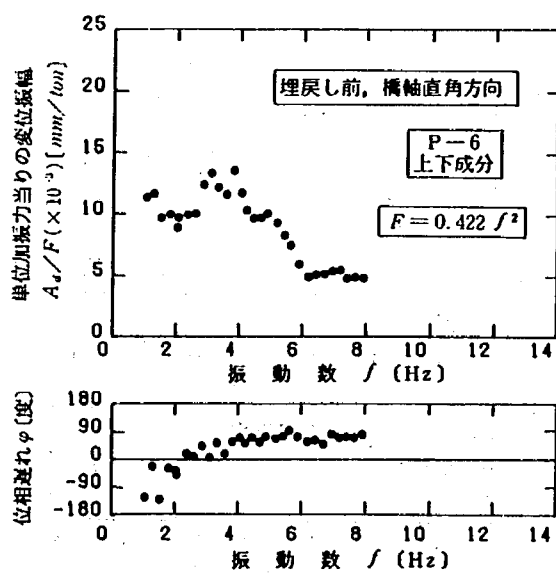
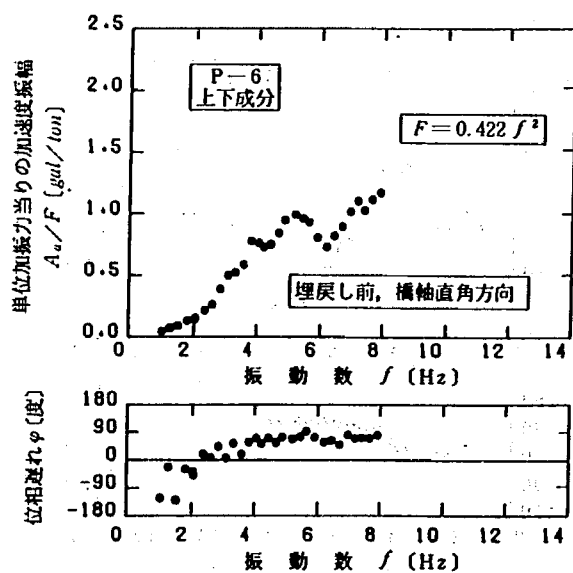
注) — は $1/\sqrt{2}$ 法により減衰定数を求められないことを示す。

表 3.3 減衰定数および共振振動数から求めた固有振動数

周辺土の条件	加振方向	実験ケース名	減衰定数	加速度共振曲線から求めた場合		変位共振曲線から求めた場合		位相曲線から求めた固有振動数 f_0 (Hz)
				加速度共振振動数 f_a^p (Hz)	固有振動数 f_0 (Hz)	変位共振振動数 f_a^p (Hz)	固有振動数 f_0 (Hz)	
埋戻し前	橋軸直角方向	A-1	0.391	5.7	4.7	4.6	5.5	5.1
		A-2	0.335	5.1	4.6	4.1	4.7	4.8
		A-3	0.291	5.1	4.6	4.1, 4.9	4.5, 5.4	4.9
		A-4	0.268	5.0	4.6	4.1	4.4	4.3
		A-5	0.257	4.3	4.0	3.8	4.1	3.9
		A-6	0.132	3.8	3.7	3.8	3.9	3.8
	橋軸方向	B-1	0.219	4.9	4.7	4.8	5.0	4.8
		B-2	0.189	4.8	4.6	4.5	4.7	4.8
		B-3	0.128	4.6	4.5	3.5, 4.4	3.6, 4.5	4.4

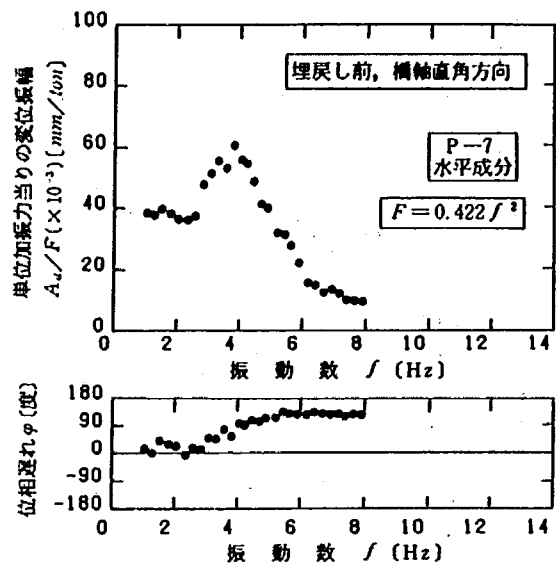
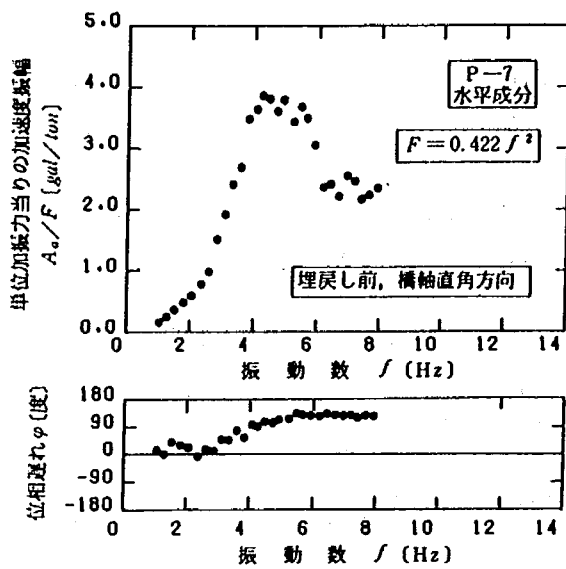


(a) P-5 点 (上下成分)

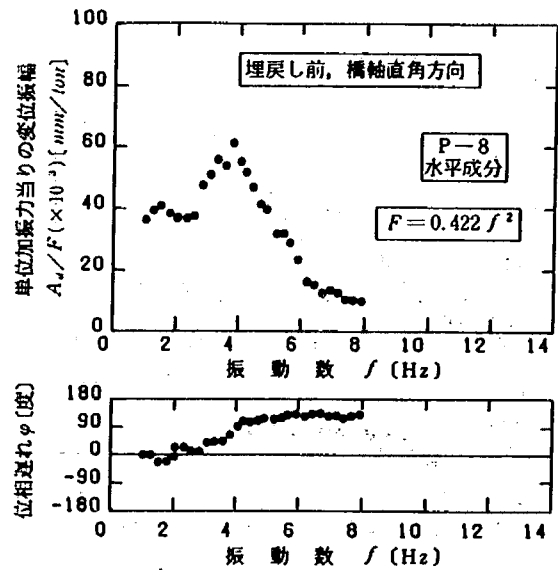
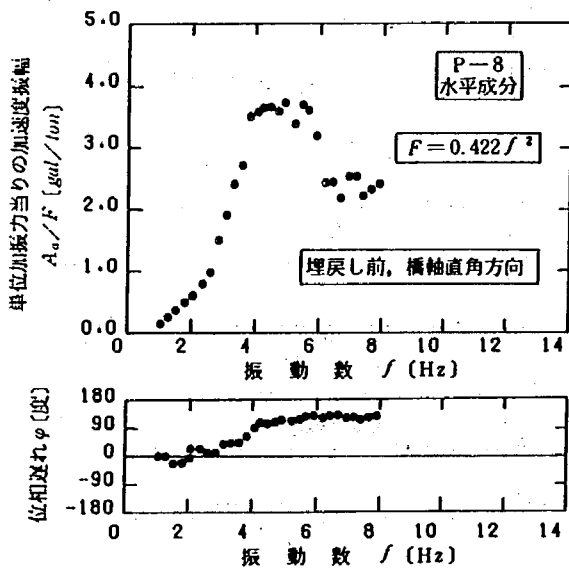


(b) P-6 点 (上下成分)

図 3.1(1) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース A-5, $F=0.422 f^2$)

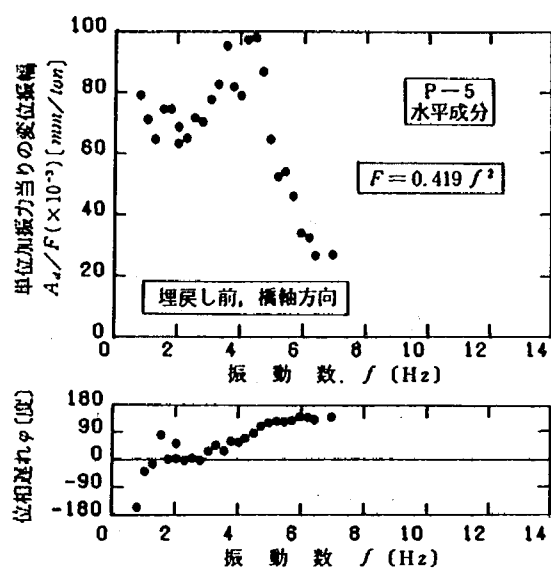
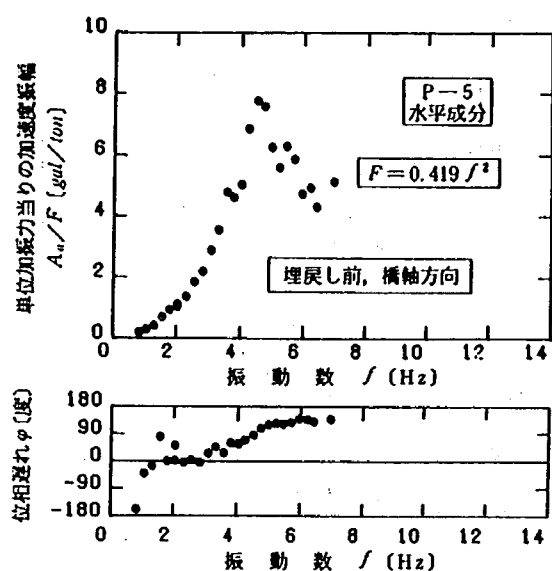


(c) P-7点 (水平成分)

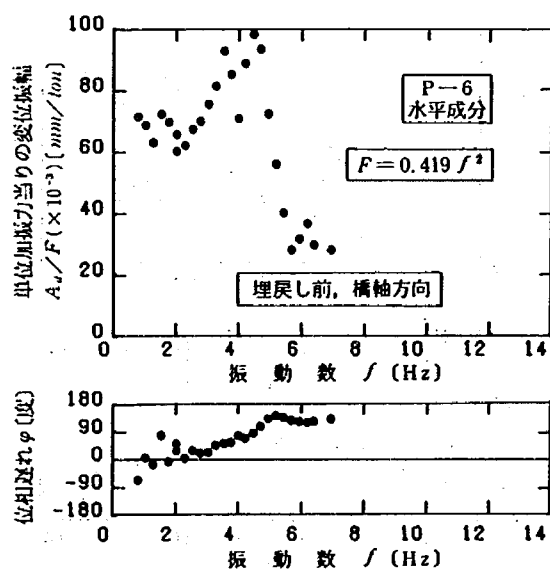
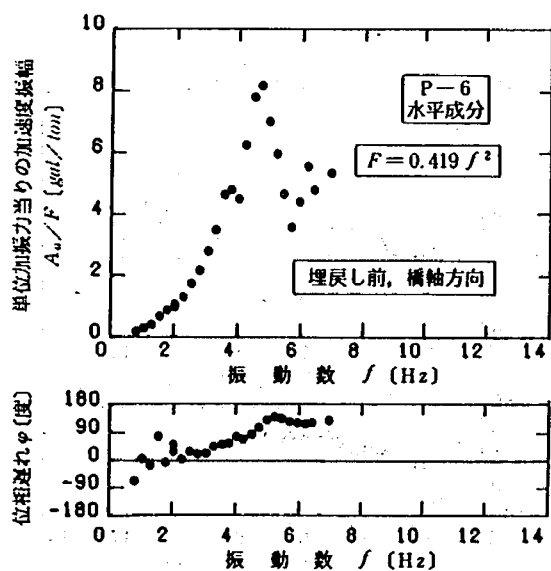


(d) P-8点 (水平成分)

図 3.1 (2) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース A-5, $F = 0.422 f^2$)



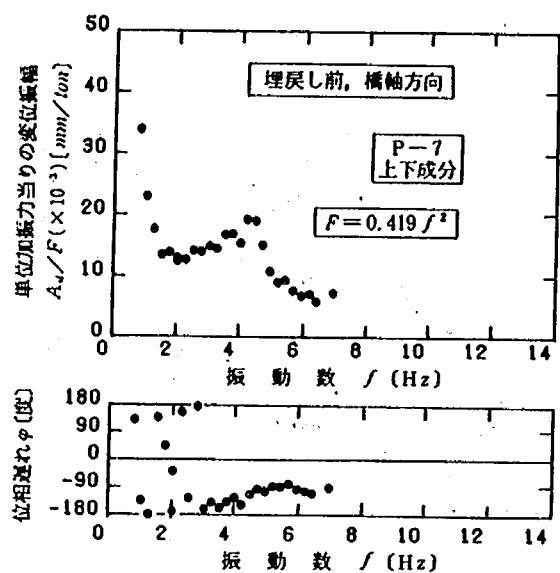
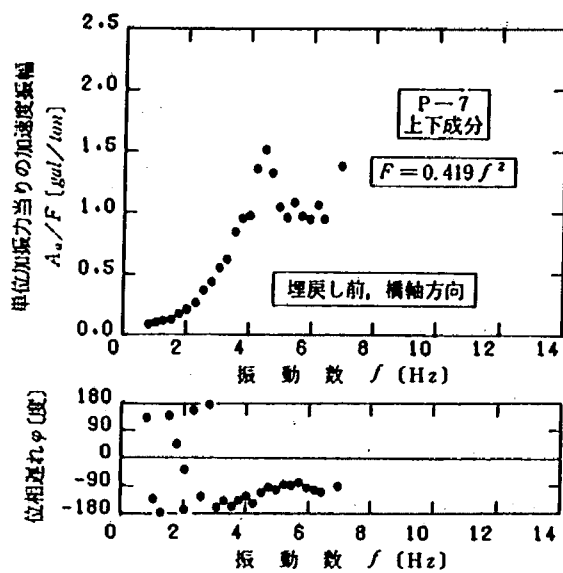
(a) P-5 点 (水平成分)



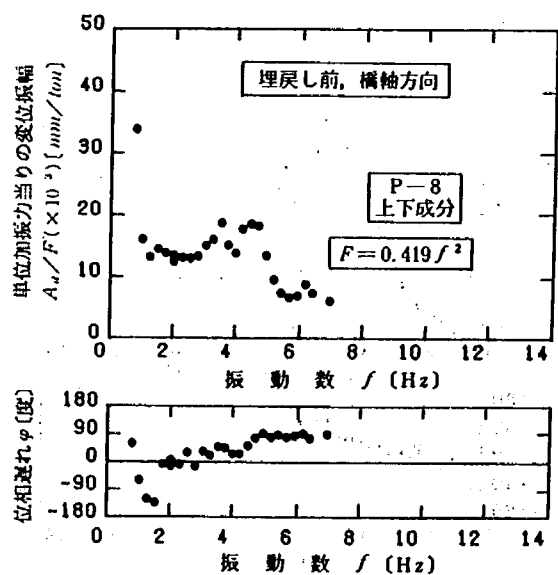
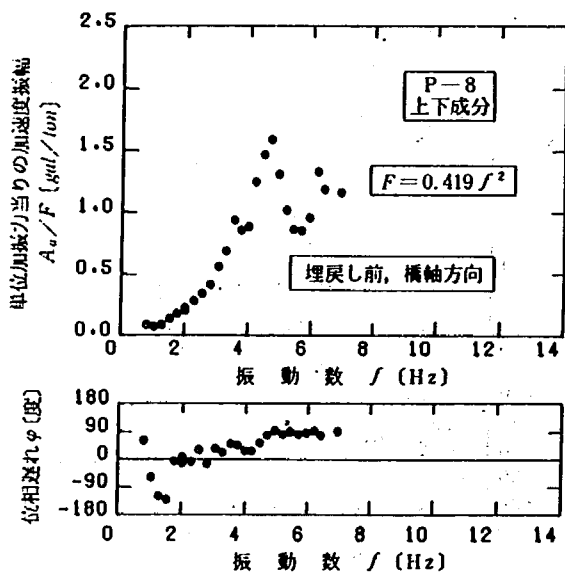
(b) P-6 点 (水平成分)

図 3.2 (1) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例

(実験ケース B-3, $F = 0.419 f^2$)

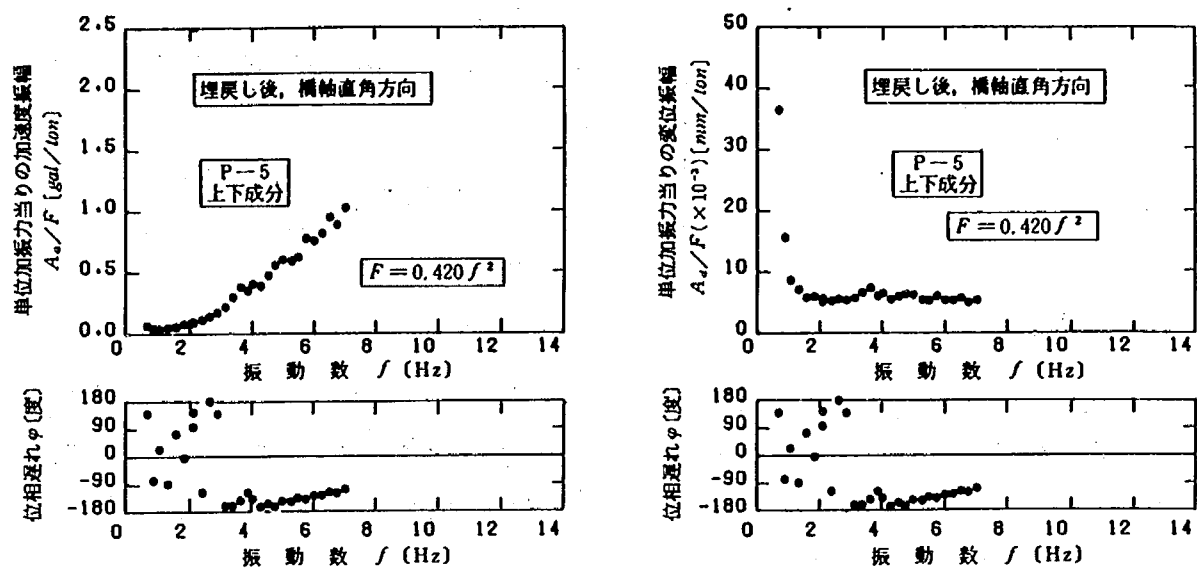


(c) P-7点 (上下成分)

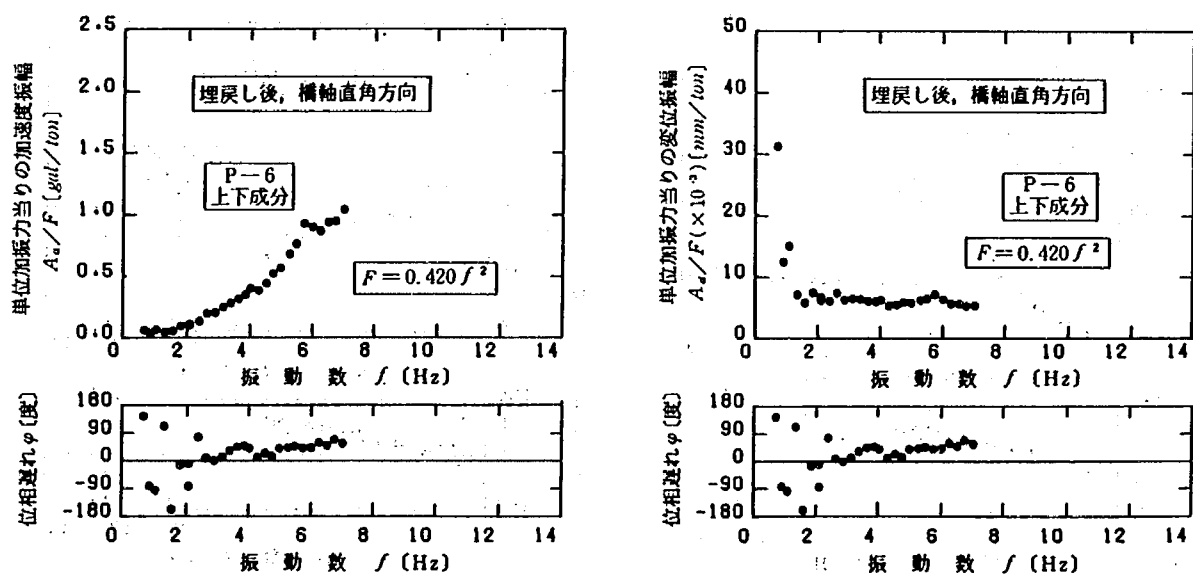


(d) P-8点 (上下成分)

図 3.2 (2) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース B-3, $F = 0.419 f^2$)

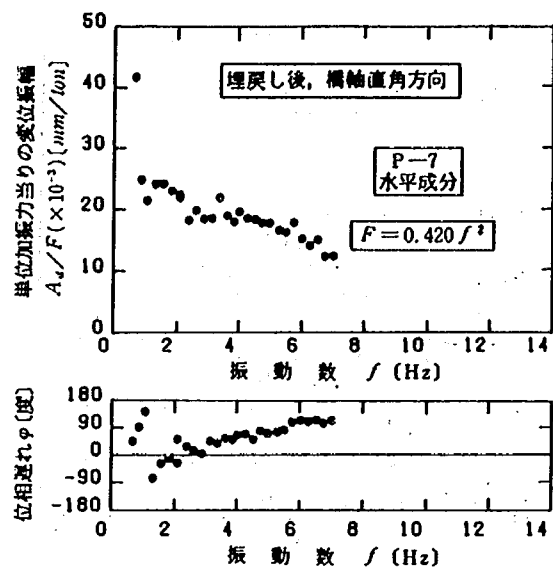
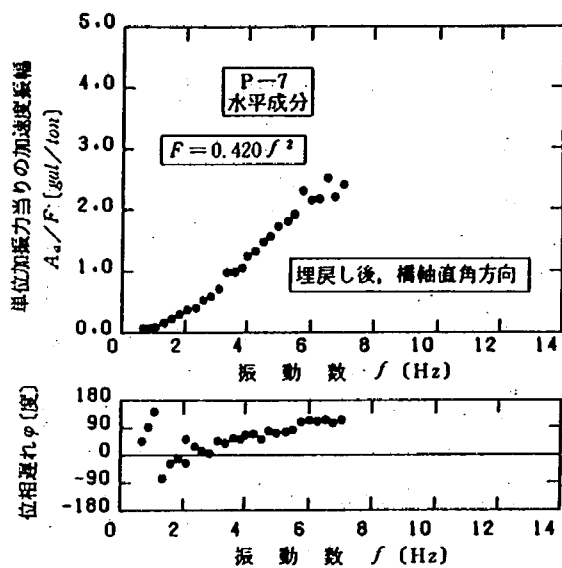


(a) P-5 点 (上下成分)

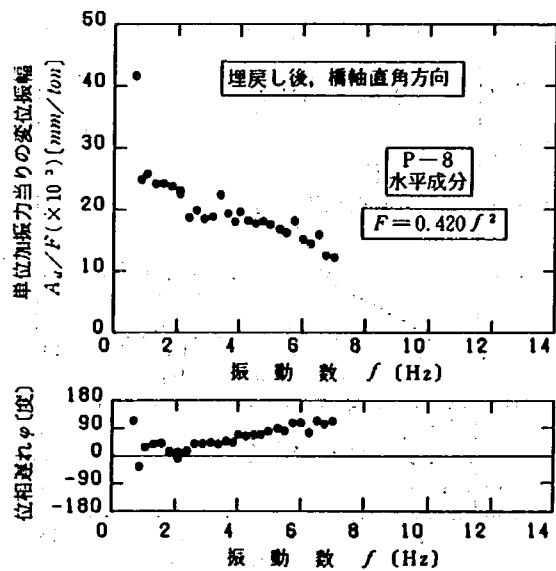
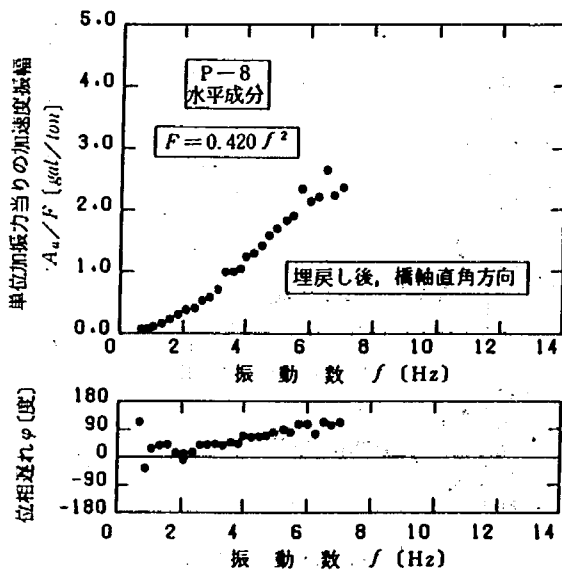


(b) P-6 点 (上下成分)

図 3.3 (1) 埋戻し後、橋軸直角方向のフォーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)

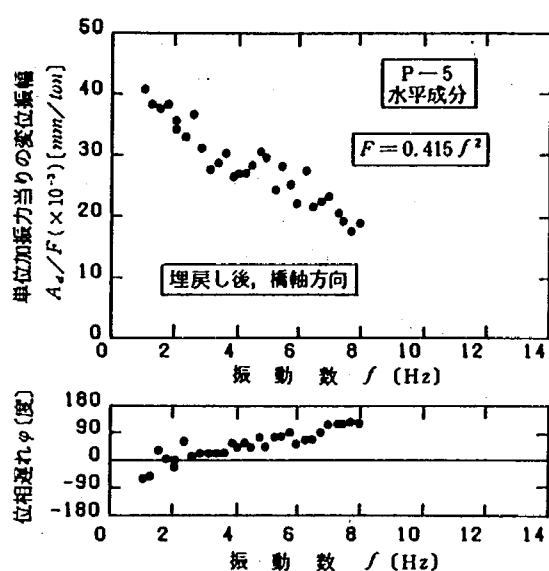
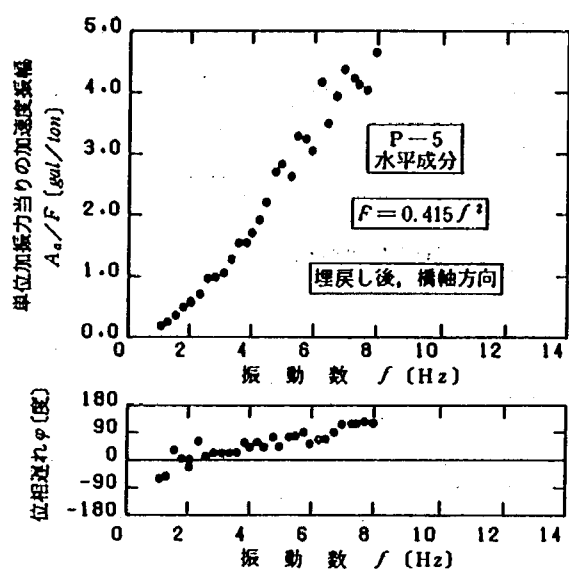


(c) P-7点 (水平成分)

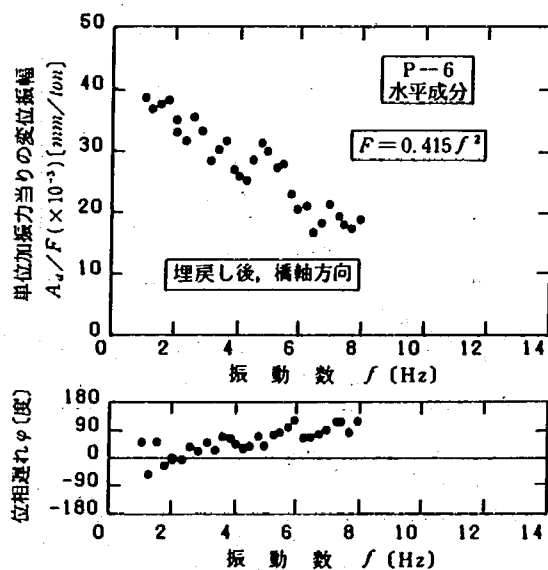
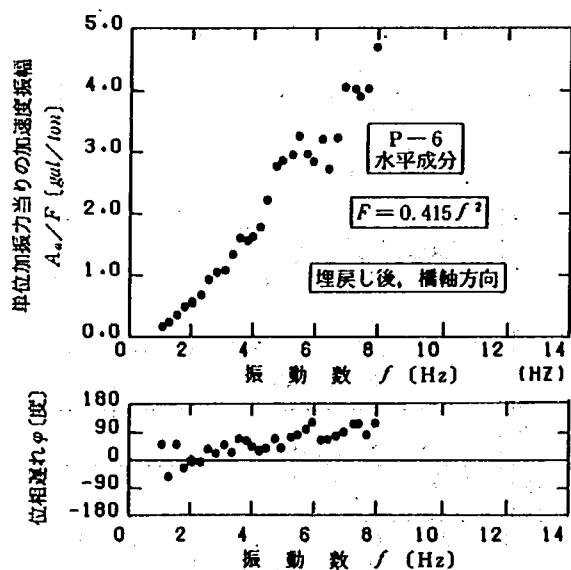


(d) P-8点 (水平成分)

図 3.3 (2) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)

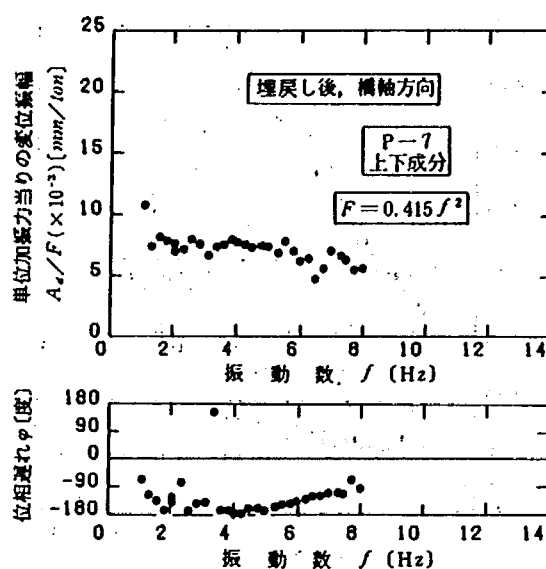
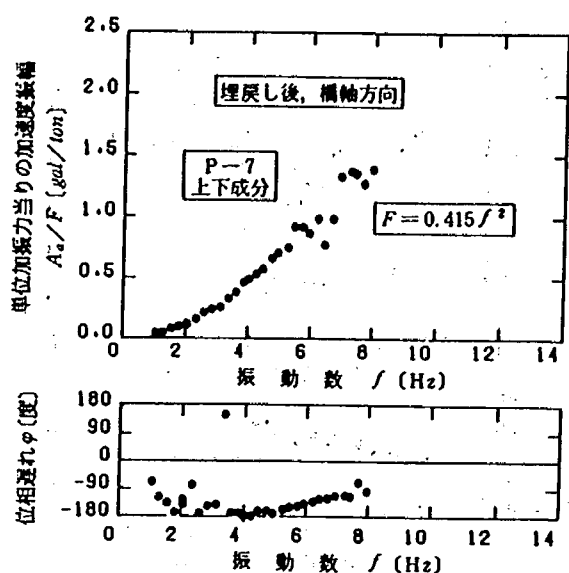


(a) P-5 点 (水平成分)

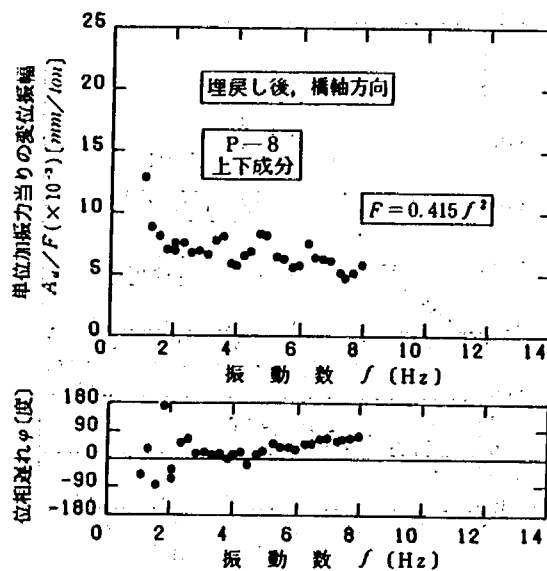
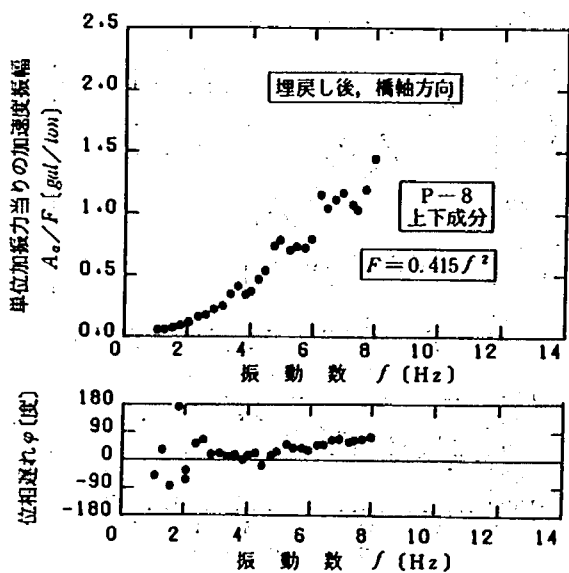


(b) P-6 点 (水平成分)

図 3.4(1) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース D-4; $F = 0.415 f^2$)



(c) P-7点 (上下成分)



(d) P-8点 (上下成分)

図 3.4 (2) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線の例
(実験ケース D-4; $F = 0.415 f^2$)

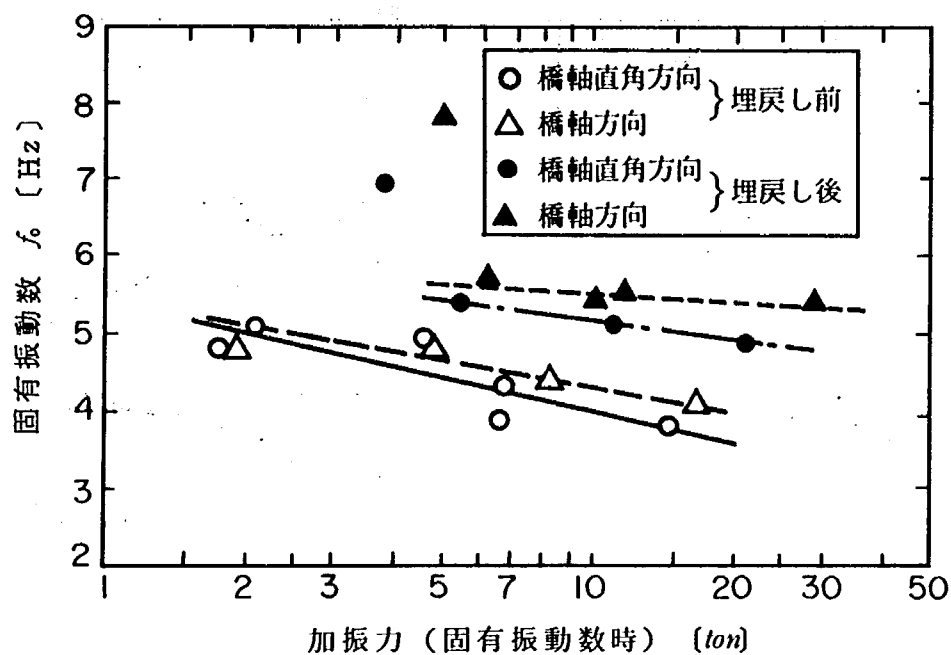


図 3.5 固有振動数と加振力（固有振動数時）の関係

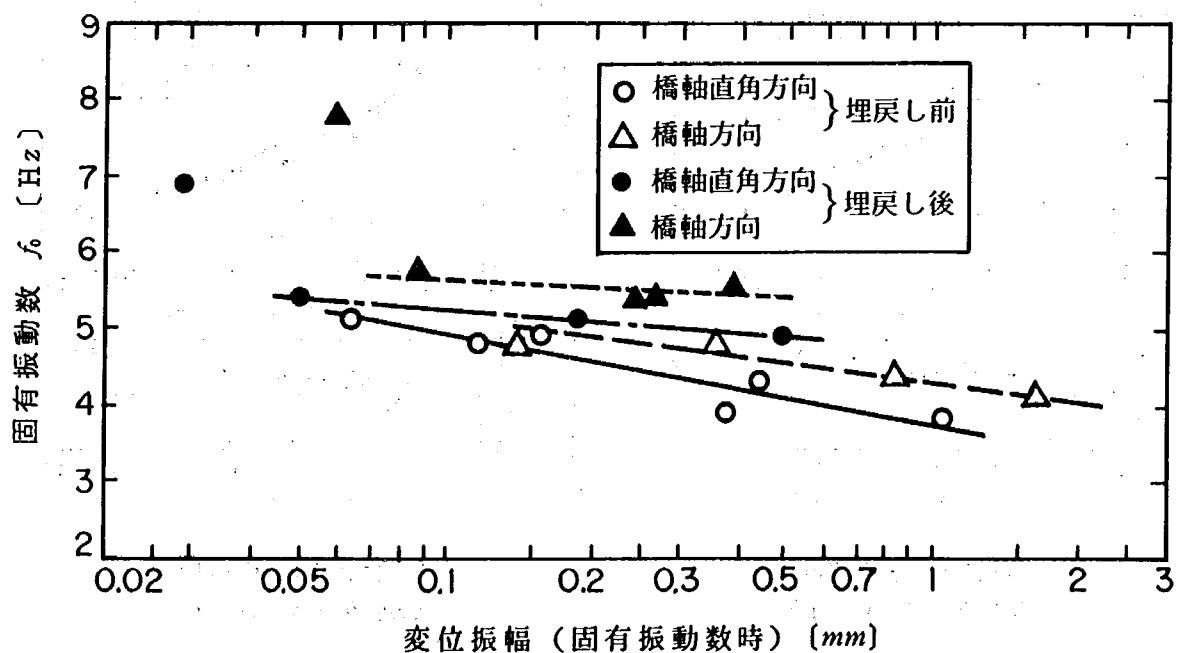
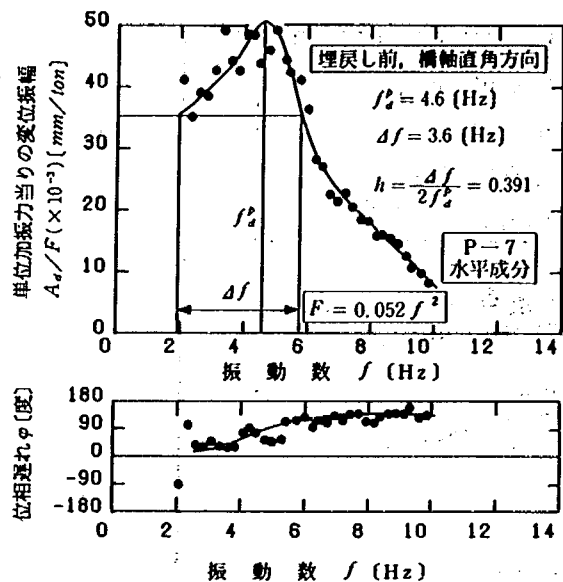
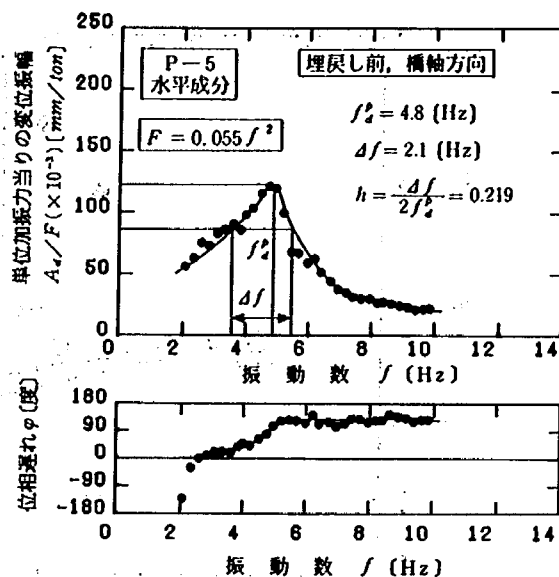


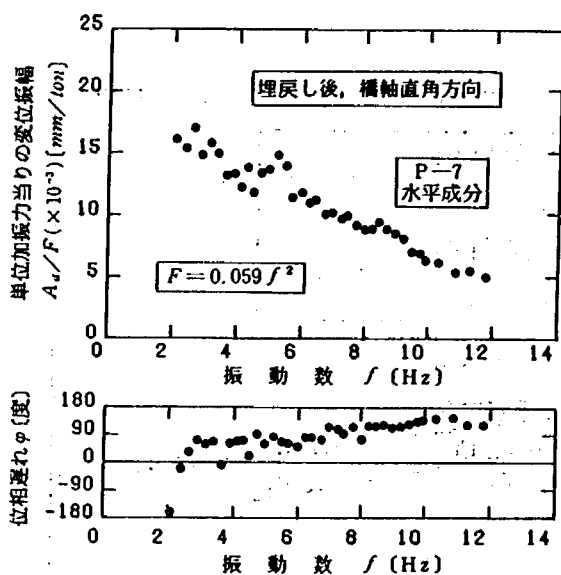
図 3.6 固有振動数と変位振幅（固有振動数時）の関係



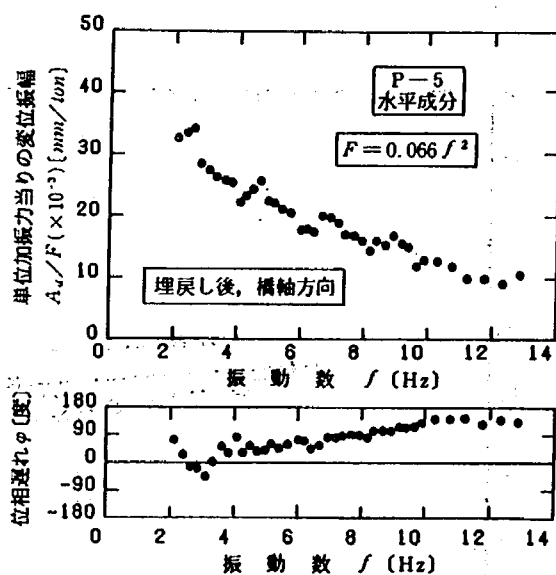
(a) 埋戻し前、橋軸直角方向
(実験ケース A-1)



(b) 埋戻し前、橋軸方向
(実験ケース B-1)



(c) 埋戻し後、橋軸直角方向
(実験ケース C-1)



(d) 埋戻し後、橋軸方向
(実験ケース D-1)

図 3.7 $1/\sqrt{2}$ 法による減衰定数の算定

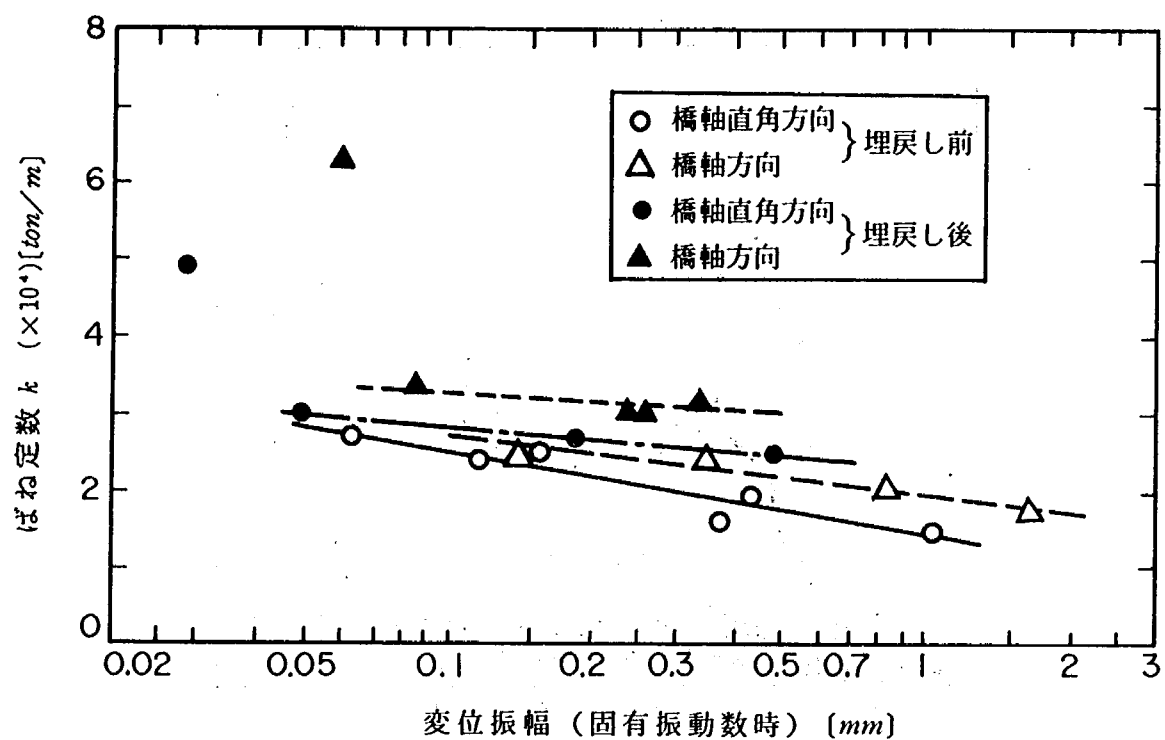


図 3.8 ばね定数と変位振幅 (固有振動数時) の関係

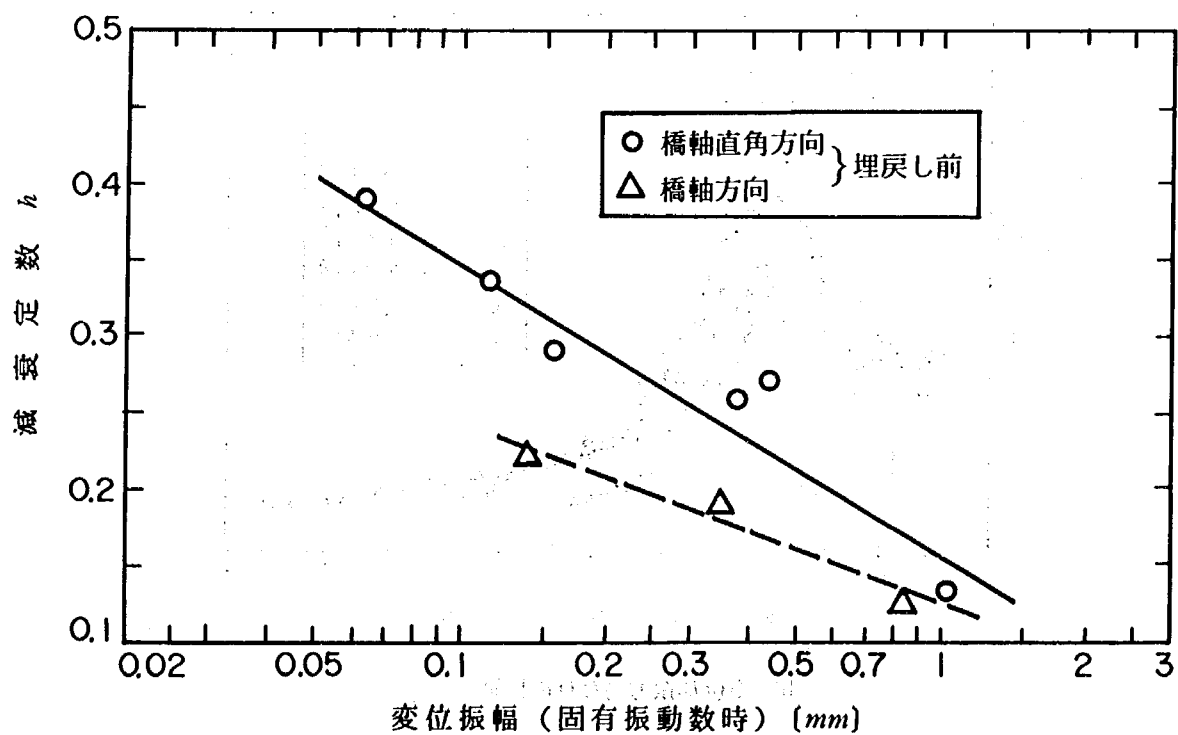
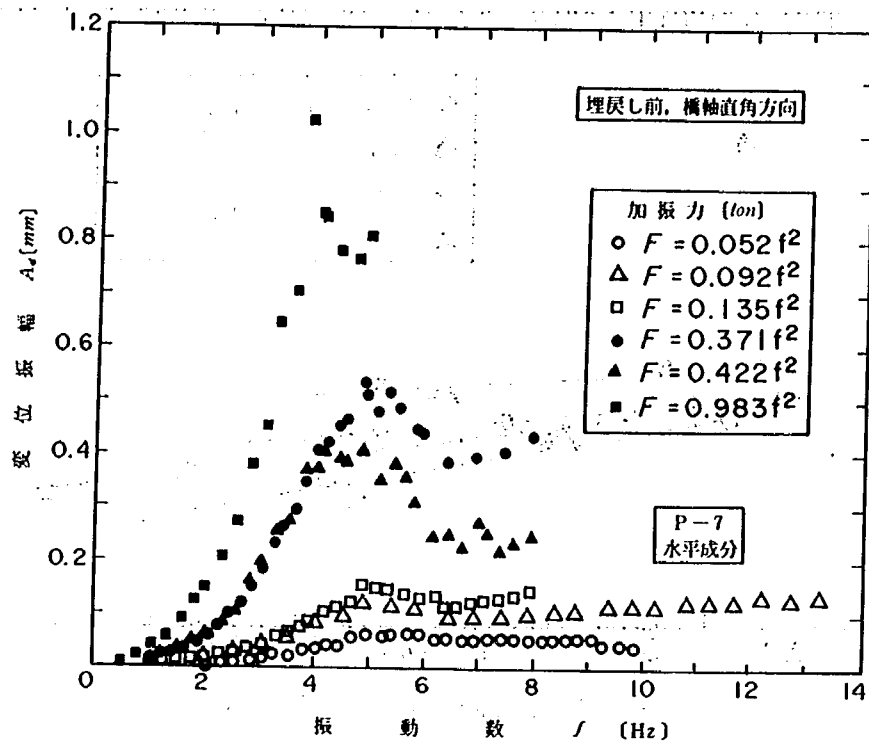
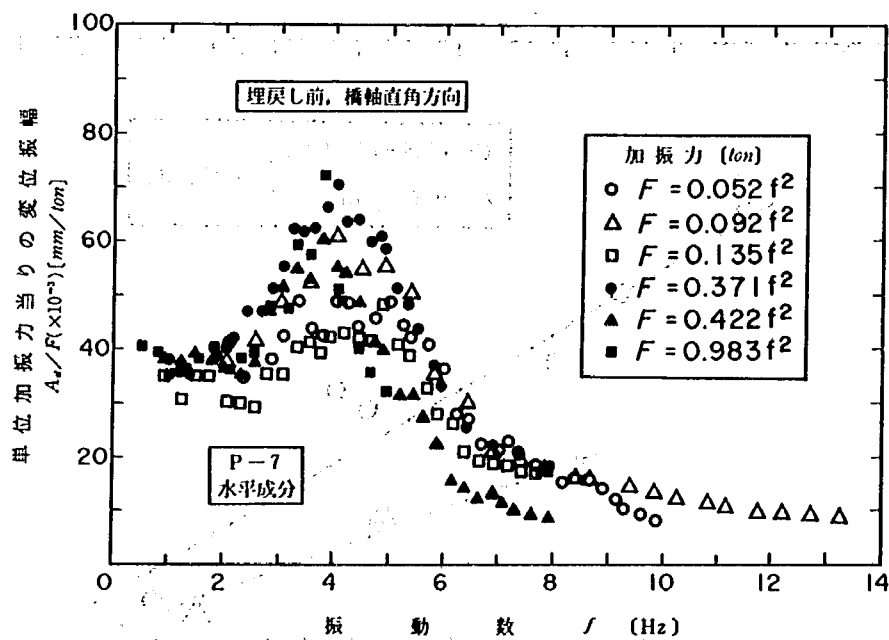


図 3.9 減衰定数と変位振幅 (固有振動数時) の関係

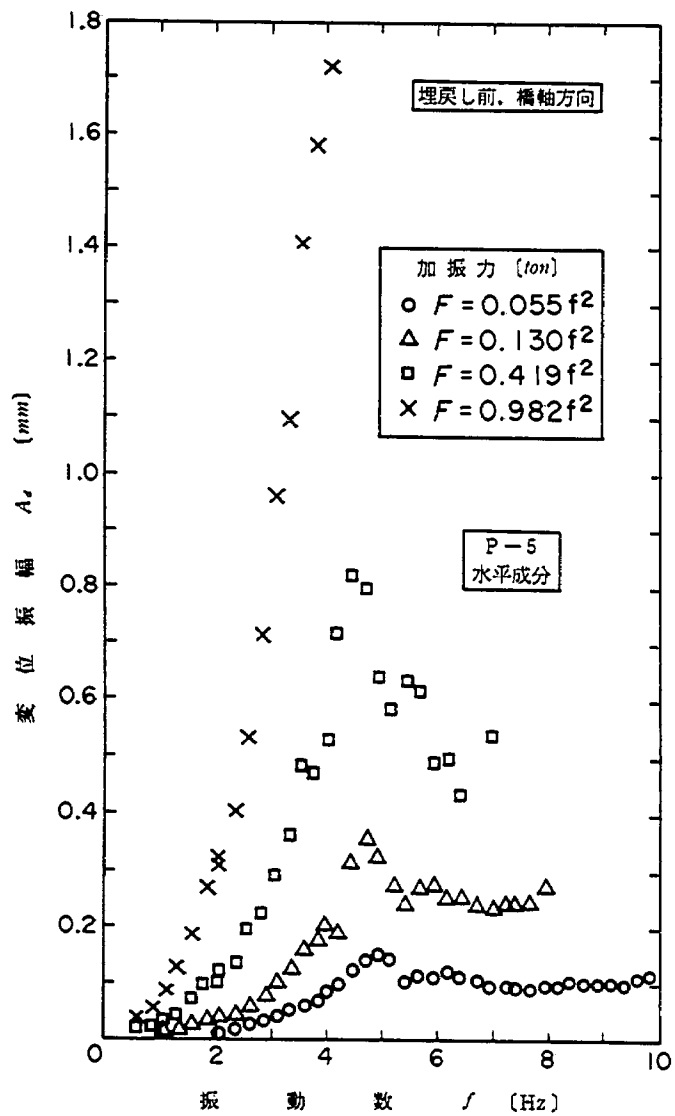


(a) 実測値

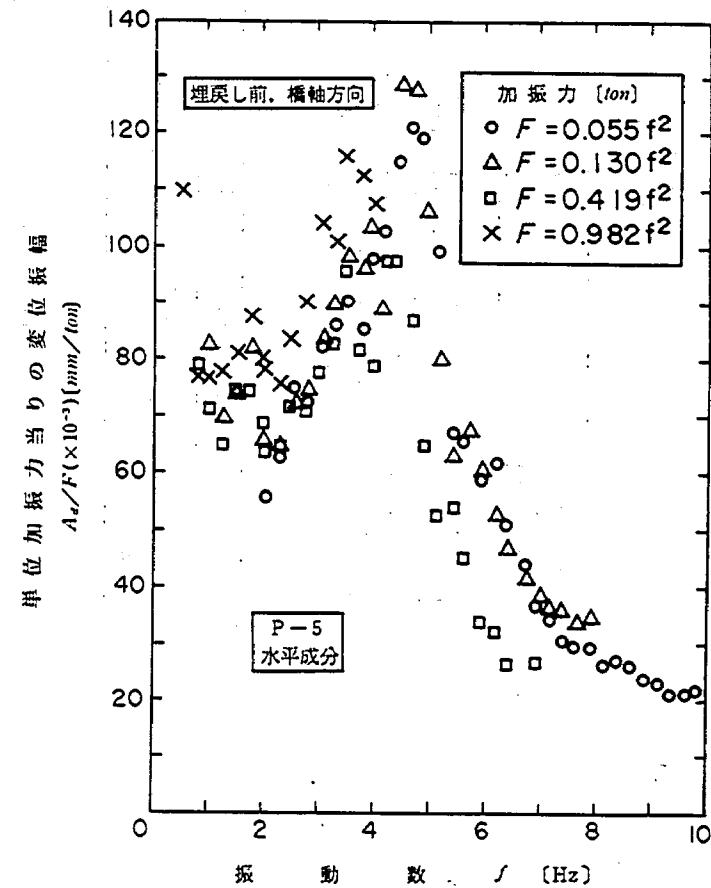


(b) 単位加振力当たりに換算

図 3.10(1) 加振力による共振曲線の形状の変化 (埋戻し前, 橋軸直角方向)



(a) 実測値



(b) 単位加振力あたりに換算

図 3.10(2) 加振力による共振曲線の形状の変化 (埋戻し前, 橋軸方向)

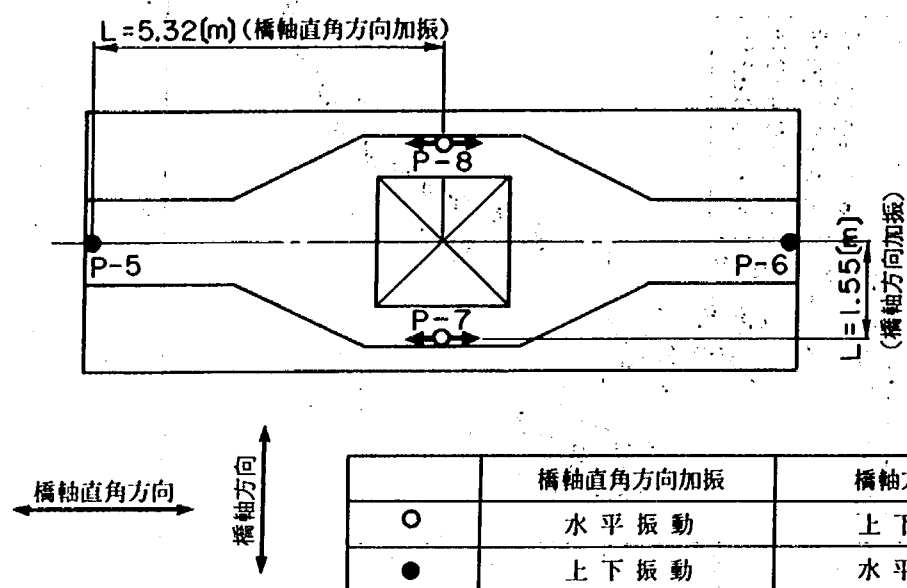
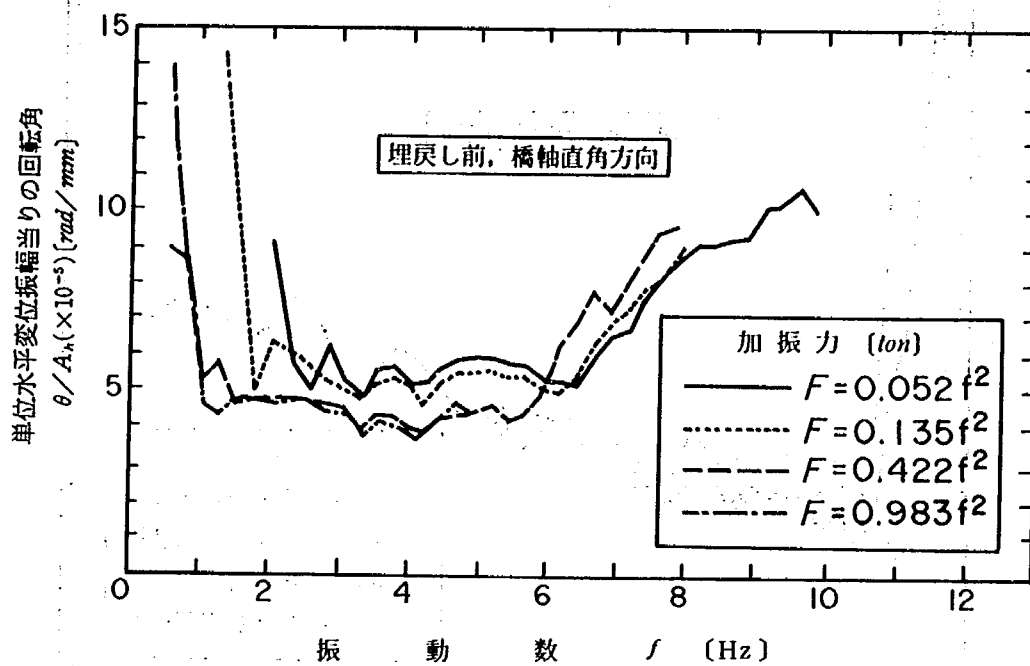
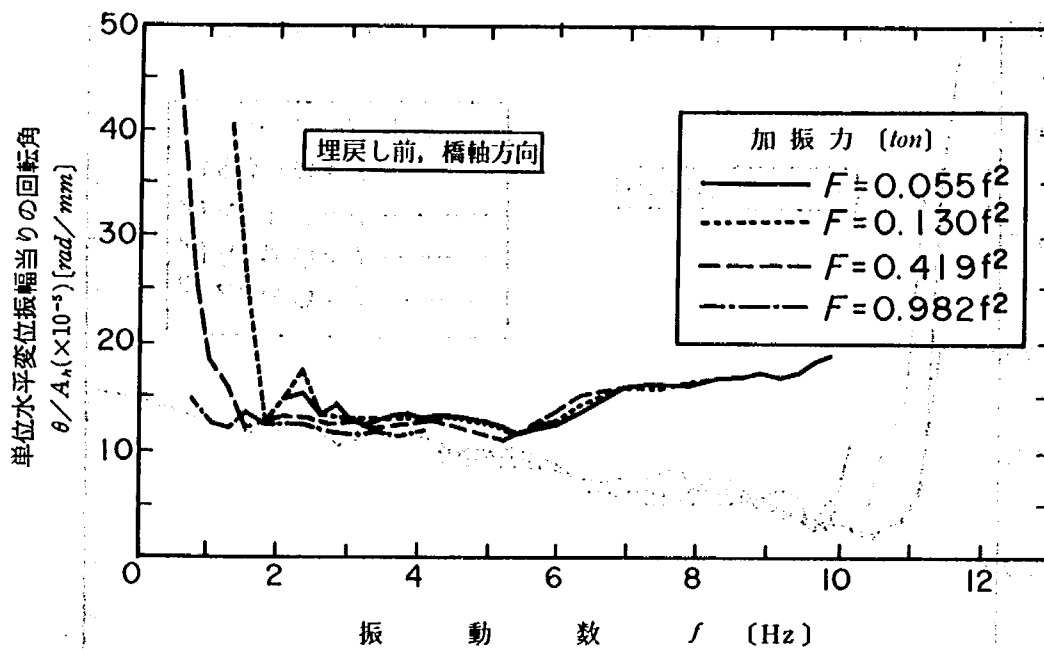


図 3.11 解析に使用した加速度計の位置



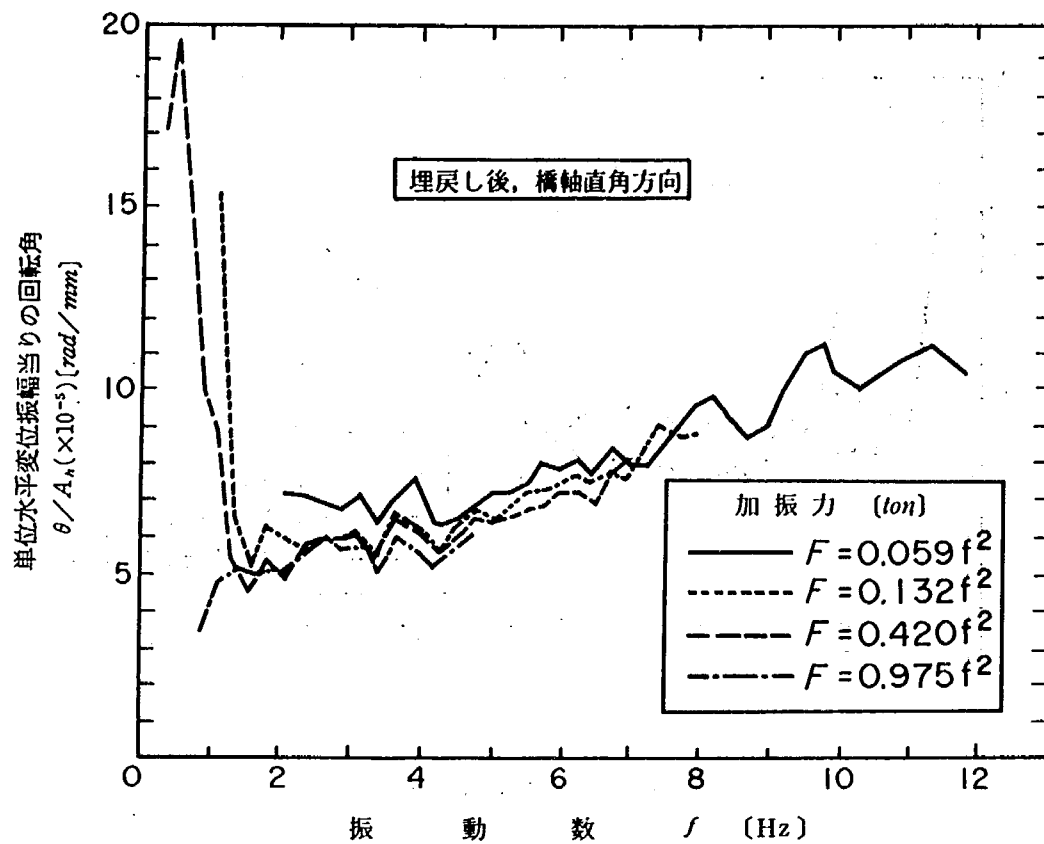
(a) 埋戻し前, 橋軸直角方向



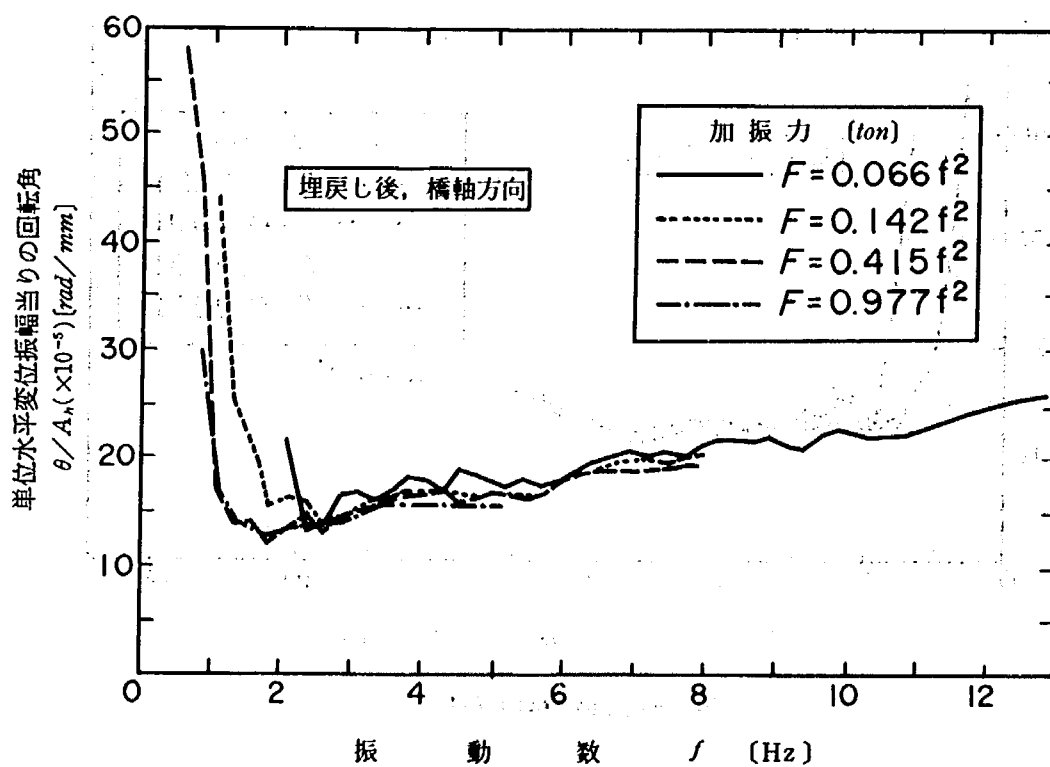
(b) 埋戻し前, 橋軸方向

図 3.12(1) 単位水平変位振幅当りの回転角

向島川(9)の建設費削減と本島(1)の建設費削減



(c) 埋戻し後, 橋軸直角方向



(d) 埋戻し後, 橋軸方向

図 3.12(2) 単位水平変位振幅当りの回転角

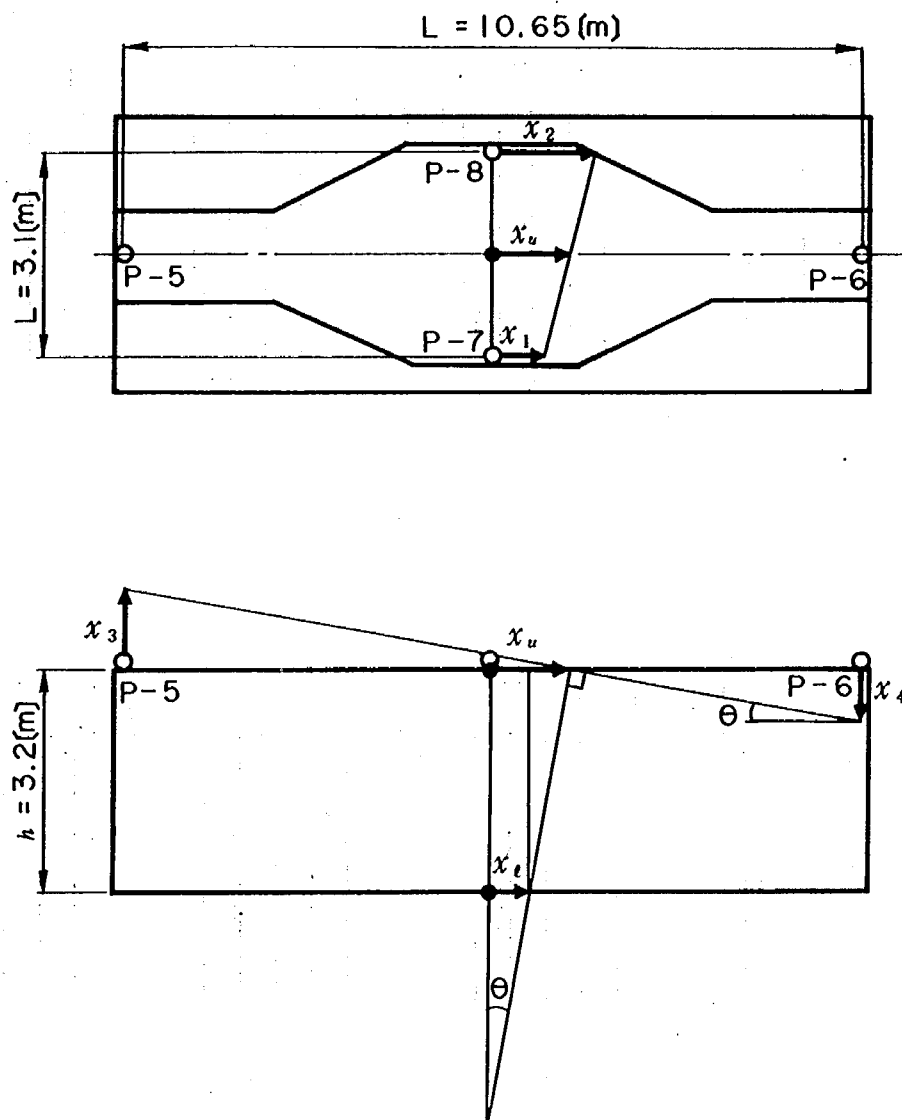


図 3.13 フーチング天端および下端の変位の算出方法

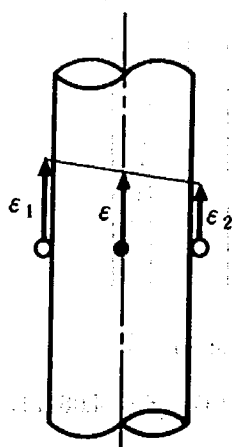


図 3.14 杭のひずみの算出方法

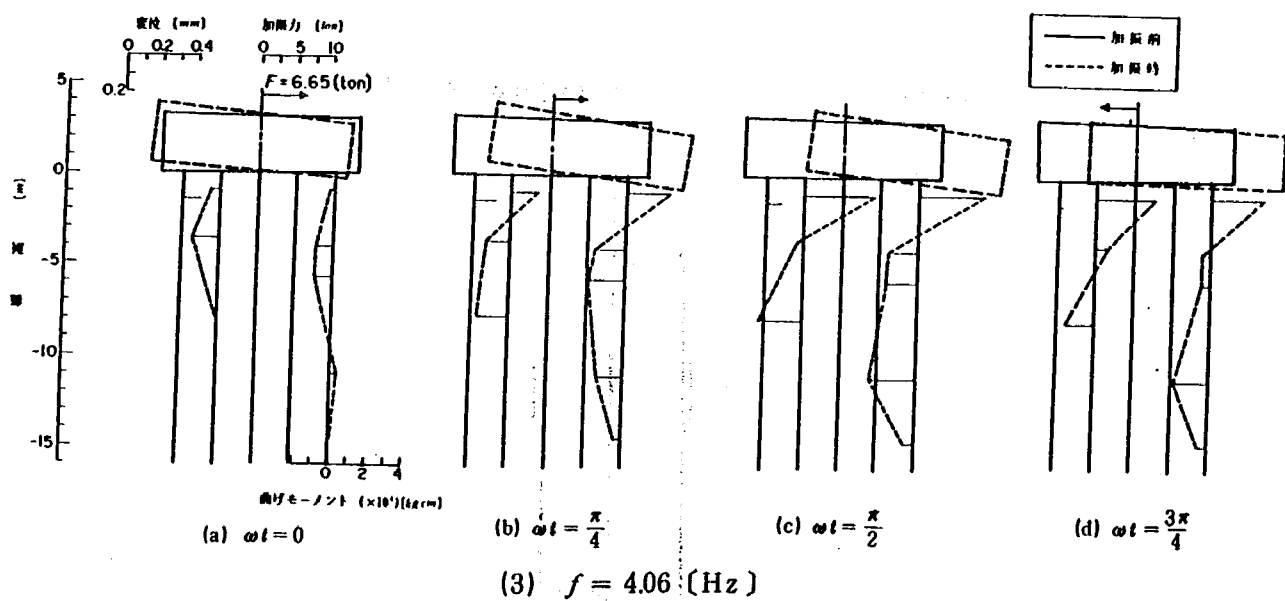
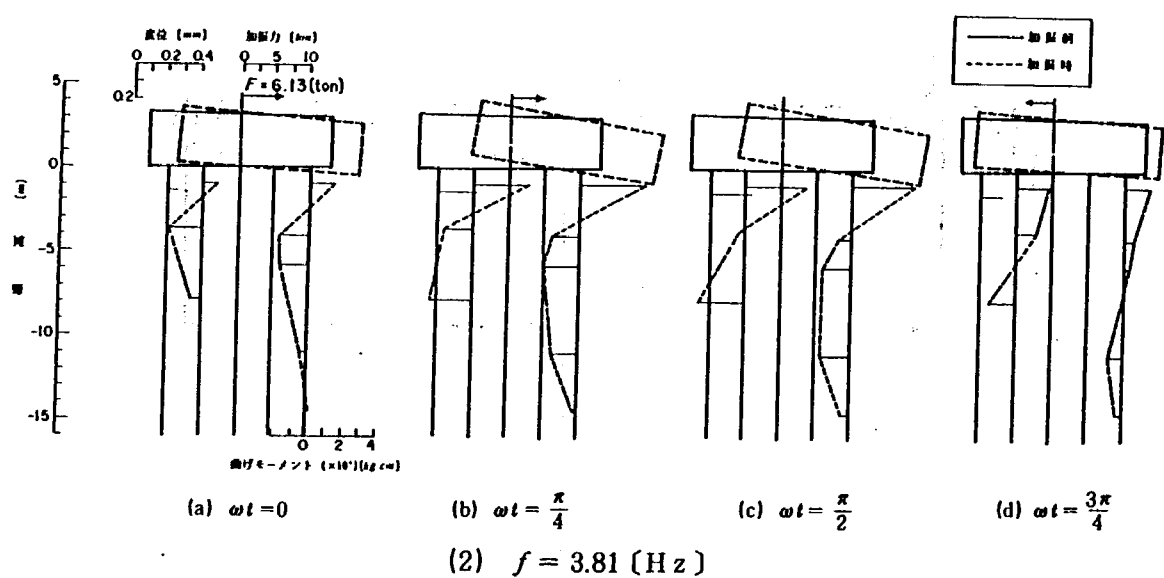
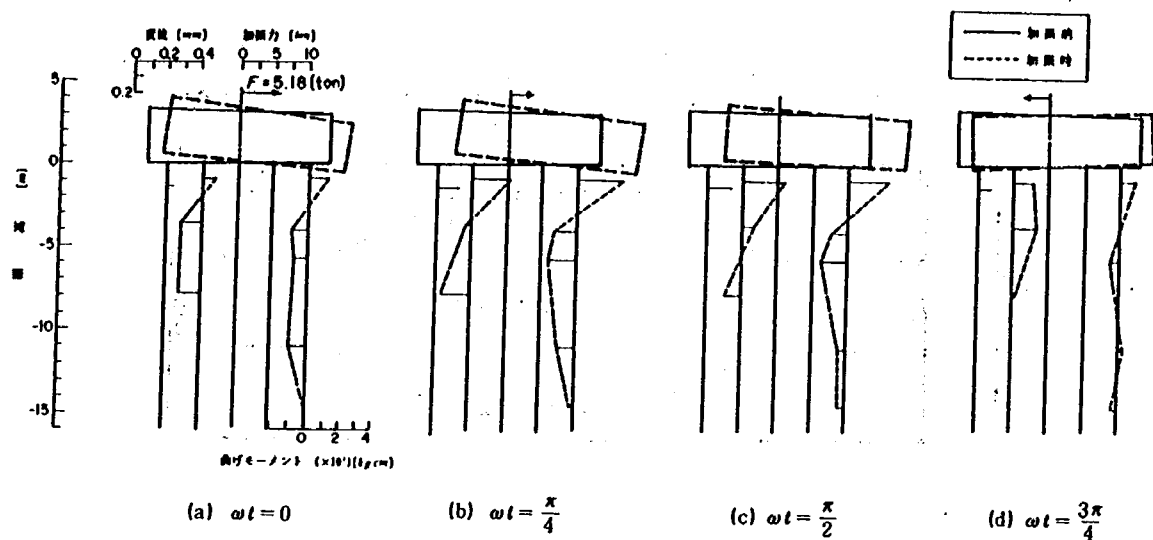


図 3.15 埋戻し前，橋軸直角方向加振時のフーチングの変位および杭の曲げモーメント
(実験ケース A-5)

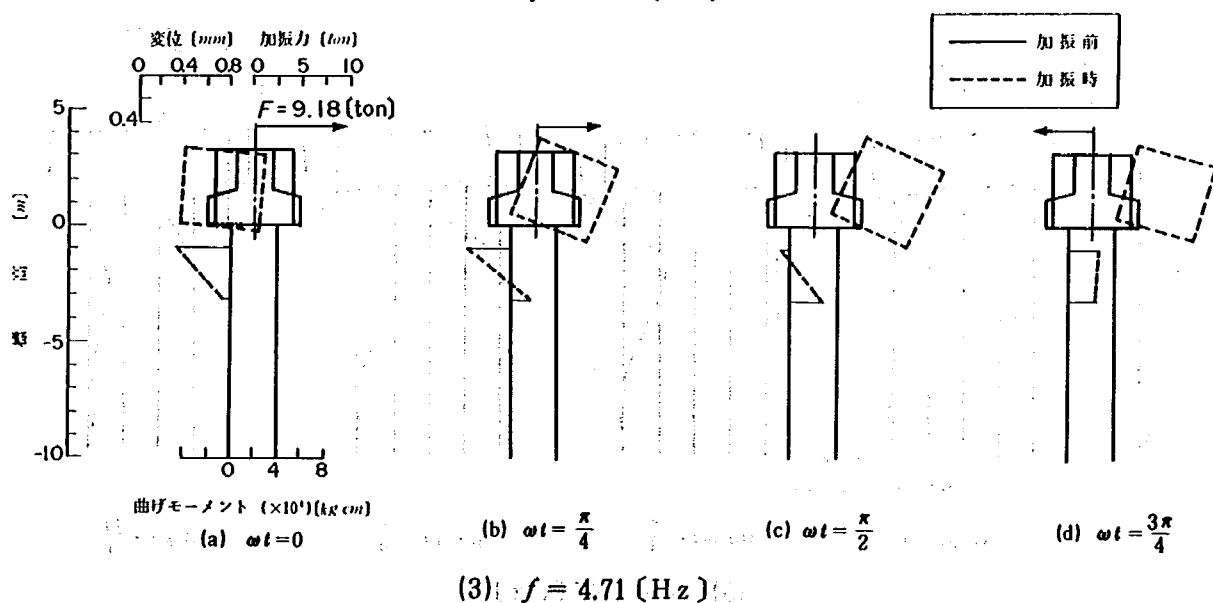
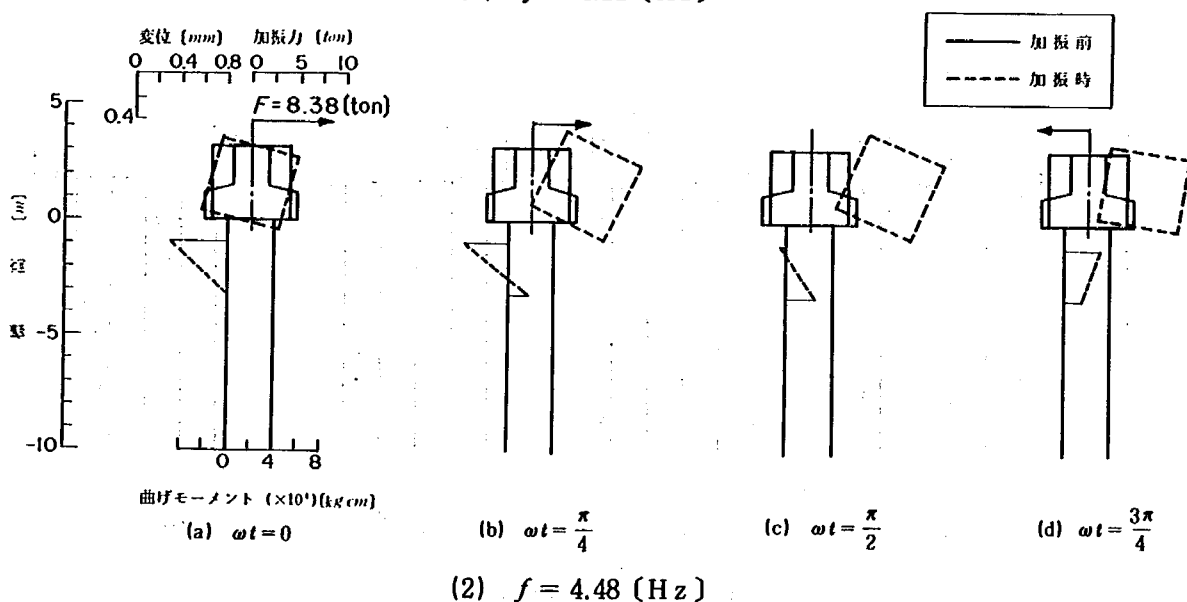
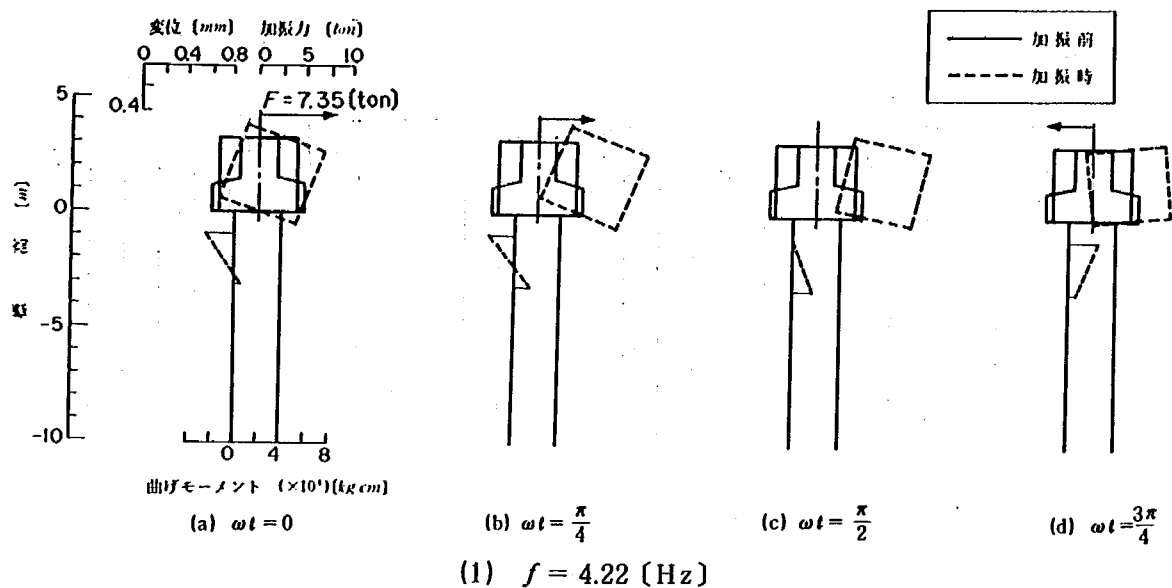
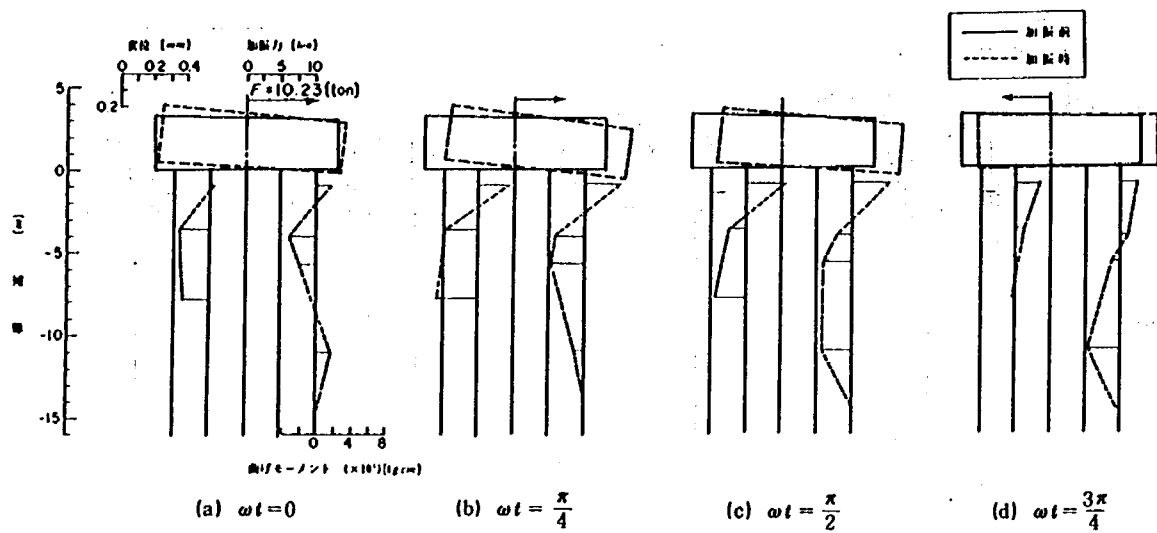
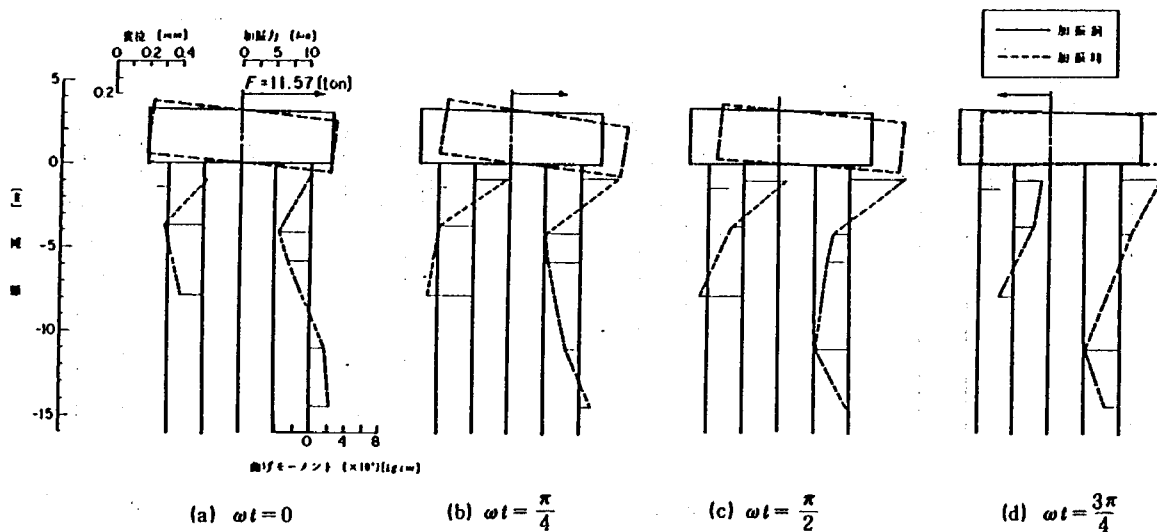


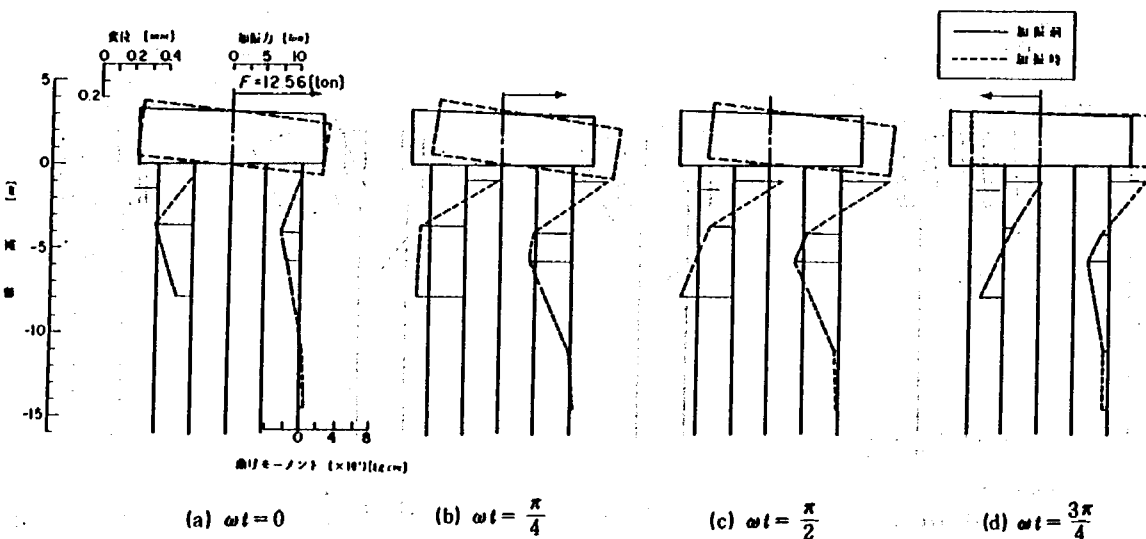
図 3.16 埋戻し前、橋軸方向加振時のフーチングの変位および杭の曲げモーメント
(実験ケース B-3)



(1) $f = 4.96 \text{ (Hz)}$



(2) $f = 5.26 \text{ (Hz)}$



(3) $f = 5.47 \text{ (Hz)}$

図 3.17 埋戻し後、橋軸直角方向加振時のフーチングの変位および杭の曲げモーメント
(実験ケース C-3)

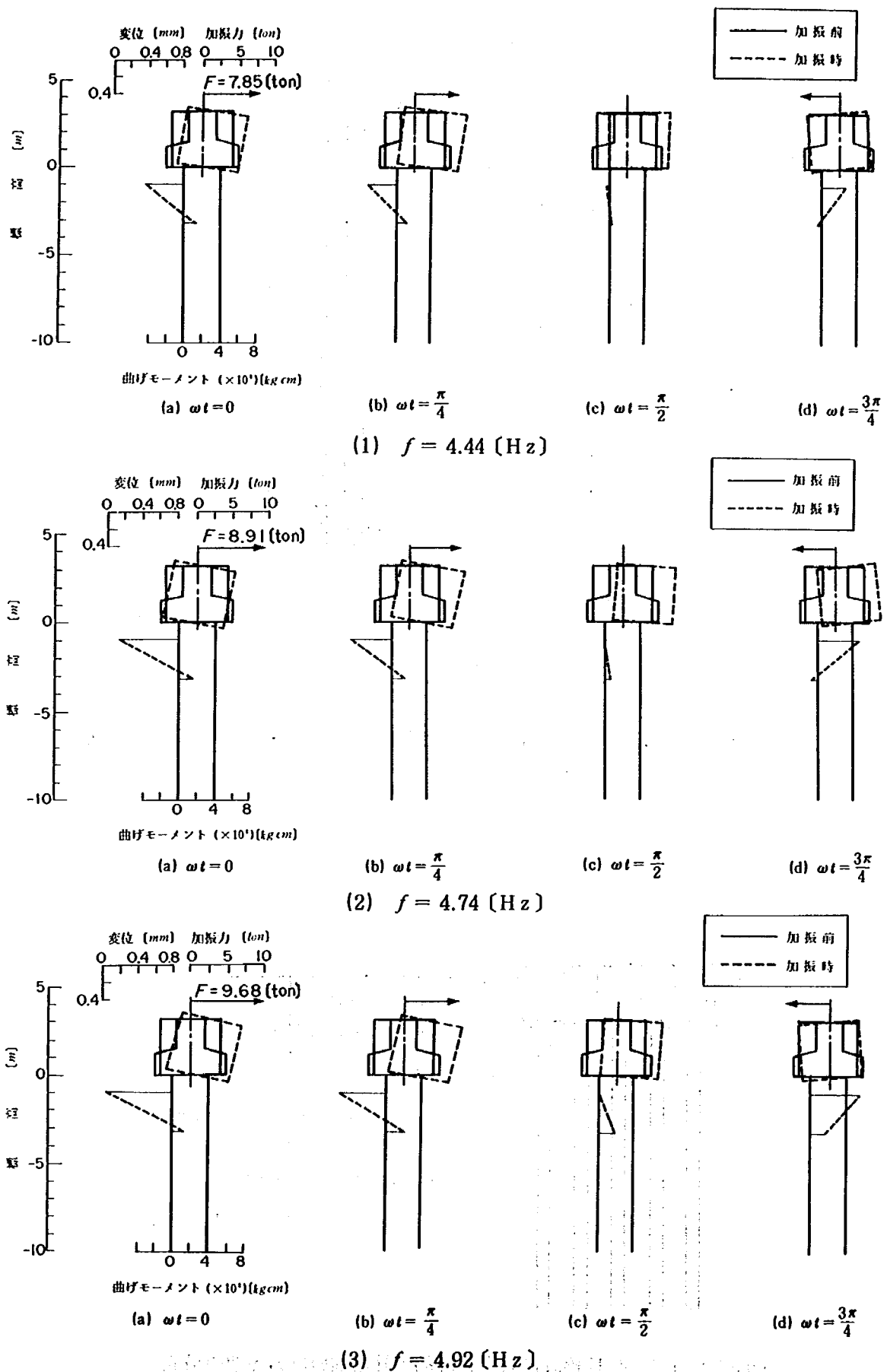


図 3.18 埋戻し後、橋軸方向加振時のフーチングの変位および杭の曲げモーメント
(実験ケース D-4)

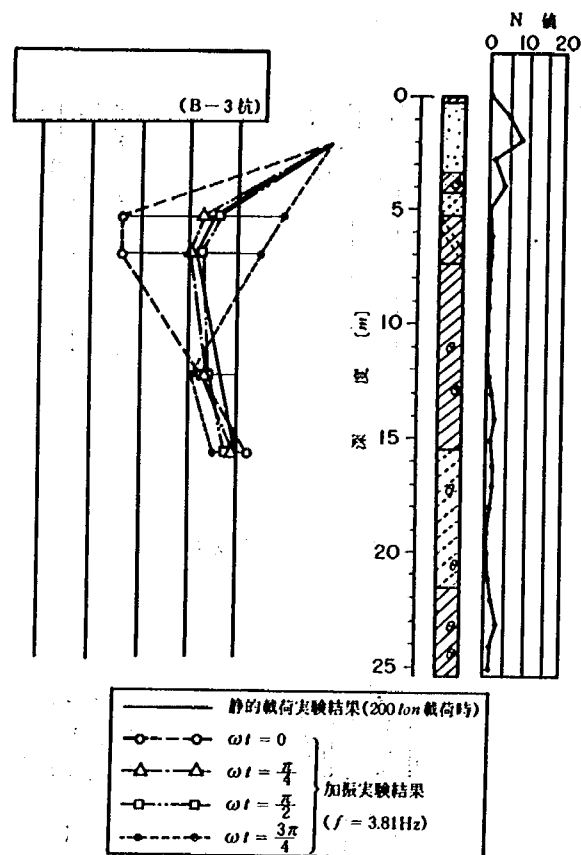


図 3.19 静的載荷実験と加振実験により杭に生じる曲げモーメントの分布の比較

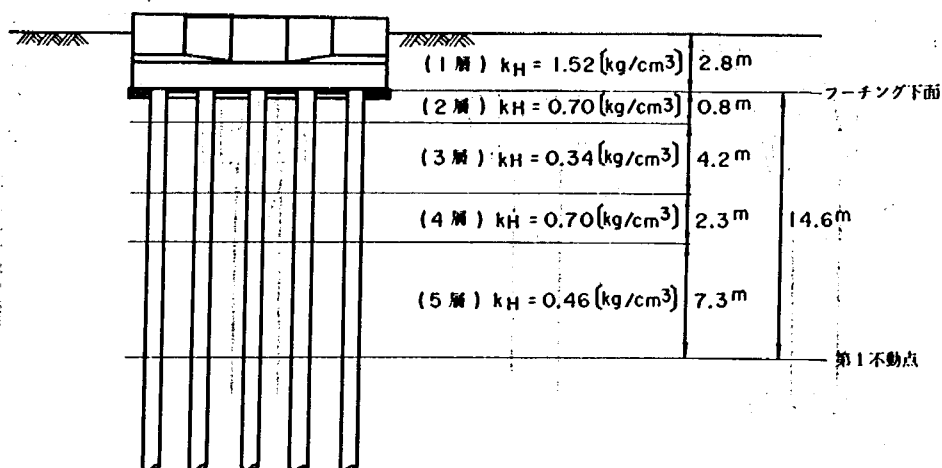


図 3.20 PT-24U 橋脚に対する静的設計用地般反力係数の分布

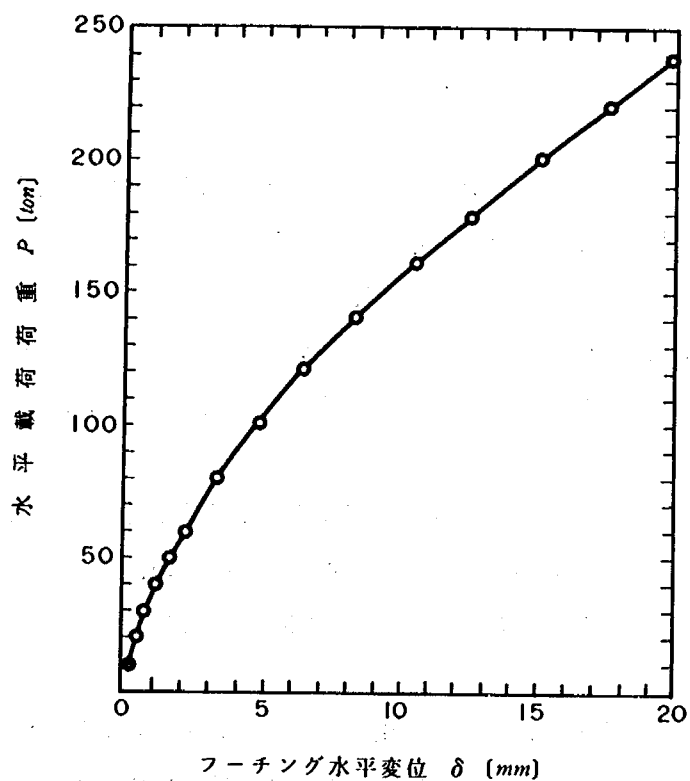


図 3.21 静的載荷試験による水平載荷荷重とフーチング水平変位の関係 (PT-24 U)

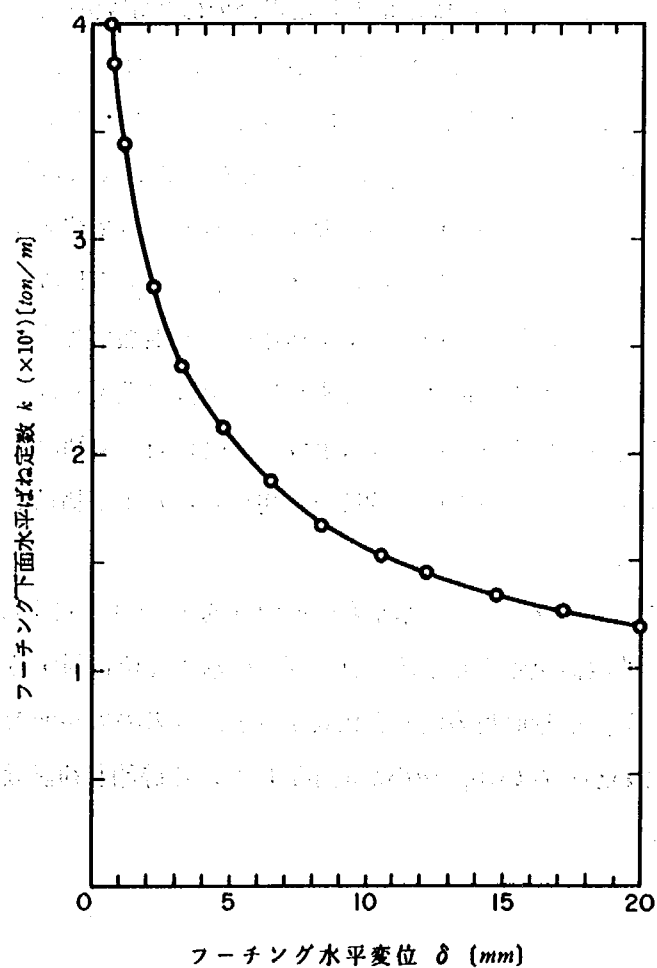


図 3.22 静的載荷試験によるフーチング下面のばね定数とフーチング水平変位の関係 (PT-24 U)

4. 結 論

大型起振機を用いた三郷インターチェンジPT-24 U橋脚の加振振動実験を周辺土の埋戻し前および埋戻し後の2条件で行った。本実験から得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 周辺土の埋戻しは橋脚の振動特性に以下の点で極めて大きな影響を与える。
 - a) 埋戻し後のばね定数は、埋戻し前のばね定数に比較して25~30%程度増加する。
 - b) 埋戻し前の減衰定数は、加振変位振幅によって変化するが、0.15~0.35程度であるのに対し、埋戻し後には0.7程度以上と大きく増加する。
 - c) 上記a)およびb)より、埋戻し後の橋脚の固有振動数は埋戻し前の橋脚の固有振動数よりも13%程度高くなるが、一方、減衰定数が大きく増大する。このため、フーチング頂部を強制加振して求めた埋戻し後の共振曲線には埋戻し前のような明瞭な応答のピークが現われず、また、応答値も小さい。
- 2) ばね定数はフーチングの変位振幅によって変化し、フーチングの変位振幅が大きくなるに従って減少する。たとえば、埋戻し前の橋軸直角方向加振の場合には、変位振幅が0.06 mmの場合にはばね定数は 2.7×10^4 ton/mであるのに対し、変位振幅が1 mmになるとばね定数は 1.5×10^4 ton/mとなり、44%も減少する。なお、変位振幅が増大した場合のばね定数の減少の度合いは埋戻し前の方が埋戻し後よりも大きい。また、ばね定数の変位振幅依存性に伴って、フーチングの固有振動数もフーチングの変位振幅によって変化し、フーチングの変位振幅が大きくなるにつれて小さくなる。
- 3) 周辺土埋戻し前の減衰定数は、フーチング天端の変位振幅が大きくなる程減少する。この原因ははっきりしないが、フーチング天端の変位振幅が大きくなるとともに杭表面と周辺地盤の間に間隙が生じ、このため、逸散減衰の低下が生じるためではないかと考えられる。
- 4) 三郷インターチェンジの動的解析において、下部構造周辺の地盤ばねを求めたと同じ手法によりPT-24 U橋脚に対するフーチング下面における水平ばね定数(埋戻し前、橋軸直角方向)を求めた結果は、今回の加振実験から得られた水平ばね定数(埋戻し前、橋軸直角方向)とよく一致している。これより、三郷インターチェンジの動的解析に用いられた下部構造周辺の地盤ばねは一応妥当な値であると推定される。
- 5) 加振実験から求め得る最大のフーチング水平変位振幅(約1 mm)に対する水平ばね定数(埋戻し前、橋軸直角方向)を静的載荷試験より求められた同一の水平変位に対するフーチング下面における水平ばね定数(埋戻し前、橋軸直角方向)と比較すると、後者の方が前者よりも2.5倍程度大きい。この原因ははっきりわからないが、微小変位領域における静的載荷試験の精度等の面から、今後検討が必要とされる。

謝 辞

本調査の実施に際しては、北首都国道工事事務所の皆様の全面的な御協力を賜りました。ここに記して、厚くお礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 栗林栄一, 岩崎敏男: 橋梁の耐震設計に関する研究(Ⅳ) — 橋梁の振動減衰に関する実測結果 —, 土木研究所報告, 第139号の2, 昭和45年5月
- 2) 日本道路公団試験所: 橋梁振動実験及び振動解析報告書, 試験所技術資料, 第603号, 昭和54年3月
- 3) 建設省土木研究所: 根入れのある円筒基礎の加振実験, 土木研究所資料, 第1735号, 昭和56年3月
- 4) 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 昭和40年

付 属 資 料 1

デ ー タ 処 理 方 法 の 概 要

廣東省

廣東省

1. データ処理方法の概要

1.1 加振力の算出方法

本実験で使用した起振機には、2個の偏心質量が、それぞれ、ある点を通過する際にパルス信号を発生する機構が組込まれている。そこで、付図 1.1 に示すように、データのサンプリング間隔を Δt ($= 0.0025$ [秒])、加振力の 1 周期内で発生する 2 個の偏心質量のパルス間のデータ数を N_1 、同一の偏心質量のパルス 1 周期間に含まれるデータ数を N_2 とすれば、加振振動数 f_0 および偏心質量の開き角 θ_0 は、それぞれ、式 (付 1.1) および (付 1.2) のように表される。

$$f_0 = \frac{1}{N_2 \Delta t} \quad (\text{付 1.1})$$

$$\theta_0 = \pi \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{付 1.2})$$

式 (付 1.1) および (付 1.2) を用いて、振動数 f_0 の時の加振力振幅 $F_0(f_0)$ は次のように表される。

$$F_0(f_0) = \frac{WR}{g} (2\pi f_0) \cos \theta_0 \quad (\text{付 1.3})$$

ここで、 WR は式 (2.1) に示した偏心モーメントである。また、記録の先頭から、加振力の最初の極大値までのデータ数を N_s とすれば、振動数 f_0 の時の位相 $\delta_0(f_0)$ は次の式で求められる。

$$\delta_0(f_0) = 2\pi f_0 N_s \Delta t \quad (\text{付 1.4})$$

1.2 応答値の算出方法

測定された応答値のノイズ等を除去するために、次のような数値フィルター処理を施した。

いま、測定された応答値の時系列を $x(t)$ とすれば、そのフーリエ変換 $S(f)$ は次式で定義される。

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (\text{付 1.5})$$

加振振動数を f_0 として、上式に振動数バンド幅 Δf のフィルターをかけるものとすれば、フィルター処理後の応答値の時系列 $X(t)$ は次のように求められる。

$$X(t) = \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} S(f) e^{i2\pi f t} df \quad (\text{付 1.6})$$

ただし、ここで、 Δf は 0.2 Hz とした。

次に、応答値の振幅および位相は以下のように求めた。

式 (付 1.6) より、 $X(t)$ のフーリエ変換 $S_1(f)$ は次のように求められる。

$$S_1(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (\text{付 1.7})$$

上式より、 $f_0 - \Delta f \leq f \leq f_0 + \Delta f$ なる振動数成分の実効値 $\sigma(f_0)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \{\sigma(f_0)\}^2 &= \sum_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} |S_1(f)|^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{t=0}^T X(t) \end{aligned} \quad (\text{付 1.8})$$

ここで、 T は応答値の継続時間である。式(付 1.8)より加振振動数 f_0 の時の応答値の振幅 $A_1(f_0)$ は次のように表される。

$$A_1(f_0) = \sqrt{2} \sigma(f_0) \quad (\text{付 1.9})$$

また、付図 1.2 に示すように、応答値の先頭から最初の極大値までの時間を t_1 とすれば、加振振動数 f_0 の時の応答値の位相 $\delta_1(f_0)$ は次式で求められる。

$$\delta_1(f_0) = 2\pi f_0 t_1 \quad (\text{付 1.10})$$

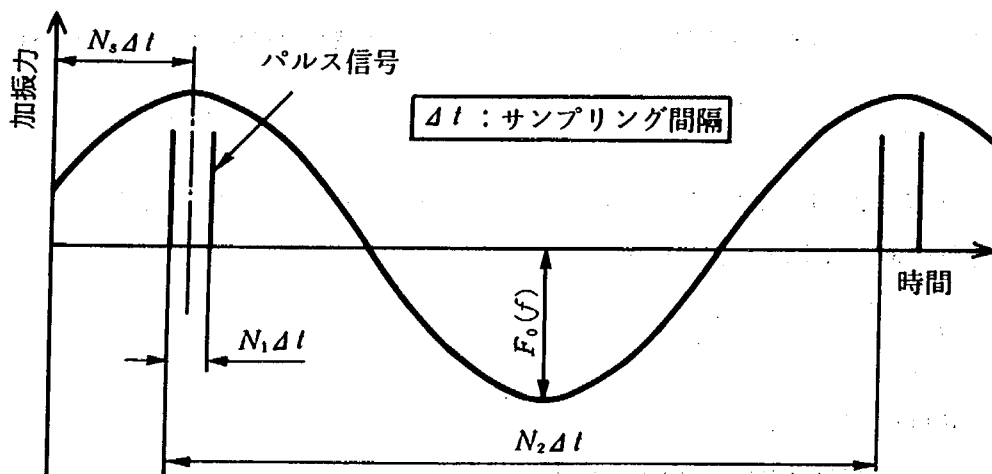
1.3 単位加振力当りの共振曲線および位相曲線

式(付 1.3)および(付 1.9)より、加振振動数 f の時の単位加振力当りの応答値の振幅 $H(f)$ は次のように求められる。

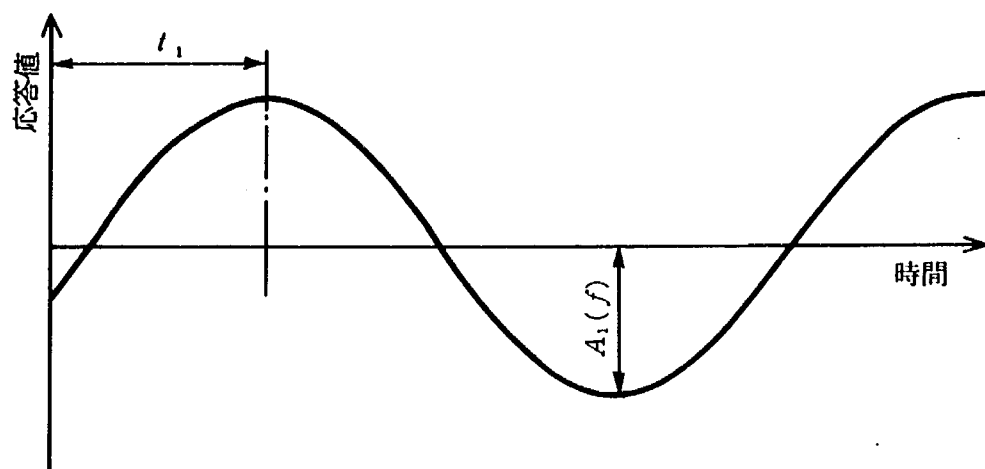
$$H(f) = \frac{A_1(f)}{F_0(f)} \quad (\text{付 1.11})$$

また、式(付 1.4)および(付 1.10)より、加振力に対する応答値の位相遅れ $\varphi(f)$ は次式で表される。

$$\varphi(f) = \delta_1(f) - \delta_0(f) \quad (\text{付 1.12})$$



付図 1.1 加振力波形



付図 1.2 応答波形

付 属 資 料 2

1 自由度系の共振曲線

文 庫 資 料 目 録

経世通考の系図附録

2. 1 自由度系の共振曲線⁴⁾

いま、付図 2.1 に示すような質量 m 、ばね定数 k 、減衰定数 c の 1 自由度系に外力 F が作用するとすれば、その運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (\text{付 2.1})$$

ここで、 x は質点の変位である。また、起振機の偏心質量を M 、回転半径を R とすれば、円振動数 ω の時の加振力 F は次式で示される。

$$F = MR\omega^2 \cos \omega t \quad (\text{付 2.2})$$

式 (付 2.2) を式 (付 2.1) に代入すれば、次のようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = MR\omega^2 \cos \omega t \quad (\text{付 2.3})$$

$k/m = \omega_0^2$ 、 $c/m = 2h\omega_0$ とおいて、式 (付 2.3) を整理すれば、次のようになる。

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{M}{m} R \omega^2 \cos \omega t \quad (\text{付 2.4})$$

ここで、 ω_0 および h は、それぞれ、固有円振動数および減衰定数である。式 (付 2.4) の特解は、応答の変位振幅を A 、また、位相遅れを φ として、次式で与えられる。

$$x = A \cos (\omega t - \varphi) \quad (\text{付 2.5})$$

式 (付 2.5) を式 (付 2.4) に代入して、整理すると次のようになる。

$$\{A(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \varphi + 2Ah\omega_0\omega \sin \varphi - \frac{M}{m} R \omega^2\} \cos \omega t + \{A(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \varphi - 2Ah\omega_0\omega \cos \varphi\} \times \sin \omega t = 0 \quad (\text{付 2.6})$$

上式の $\cos \omega t$ および $\sin \omega t$ の係数をともに 0 と置けば、次のようになる。

$$\{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \varphi + 2h\omega_0\omega \sin \varphi\} A = \frac{M}{m} R \omega^2 \quad (\text{付 2.7})$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \varphi - 2h\omega_0\omega \cos \varphi = 0 \quad (\text{付 2.8})$$

式 (付 2.8) より、

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1} \frac{2h\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \\ &= \tan^{-1} \frac{2h \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \end{aligned} \quad (\text{付 2.9})$$

上式より、減衰定数 h によらず、 $\varphi = 90^\circ$ の時に、加振力の円振動数 ω が固有円振動数 ω_0 に等しいことがわかる。減衰定数 h をパラメータとして、式 (付 2.9) で表される位相曲線を示すと、付図 2.2 のようになる。

また、式 (付 2.7) より、

$$\begin{aligned} A &= \frac{MR\omega^2}{m} \frac{1}{\cos \varphi} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2h\omega_0\omega \tan \varphi} \\ &= \frac{MR\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{m} \frac{1}{\cos \varphi} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2h \frac{\omega}{\omega_0} \tan \varphi} \end{aligned} \quad (\text{付 2.10})$$

式 (付 2.9) を式 (付 2.10) に代入すれば、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{MR(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{m} \frac{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2} \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + \frac{4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \\
 &= \frac{MR(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{m} \frac{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}}{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2} \\
 &= \frac{MR}{m} \frac{(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad (\text{付 2.11})
 \end{aligned}$$

式 (付 2.11) を式 (付 2.5) に代入すれば、運動方程式 (付 2.4) の解 x は次のように表される。

$$x = \frac{MR}{m} \frac{(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{付 2.12})$$

ただし、上式中の φ は式 (付 2.9) で与えられる。式 (付 2.12) より、単位加振力当りの変位振幅 A_d は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 A_d &= \frac{MR}{m} \frac{(\frac{\omega}{\omega_0})^2}{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \frac{1}{MR\omega^2} \quad (\text{付 2.13}) \\
 &= \frac{1}{m\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}}
 \end{aligned}$$

A_d が極値をとる ω の値は、次のように求められる。 $\omega/\omega_0 = u$ とおけば、式 (付 2.13) は次のようになる。

$$A_d = \frac{1}{m\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2u^2}} \quad (\text{付 2.14})$$

上式より、

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_d}{du} &= \frac{-1}{2m\omega_0^2} \frac{4u^3 + 8h^2u - 4u}{\{(1-u^2)^2 + 4h^2u^2\}^{\frac{3}{2}}} \\
 &= \frac{-2}{m\omega_0^2} \frac{u(u^2 + 2h^2 - 1)}{\{(1-u^2)^2 + 4h^2u^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{付 2.15})
 \end{aligned}$$

式(付2.15)からわかるように、 $h < 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ であれば、 $u = \sqrt{1-2h^2}$ のときに、 A_d は極大となる。すなわち、単位加振力当りの変位共振曲線が極大値を示す円振動数 ω_d^p は次式で与えられる。

$$\omega_d^p = \sqrt{1-2h^2} \omega_0 \quad (\text{付 2.16})$$

また、単位加振力当りの変位振幅の極大値 A_d^p は次のように表される。

$$\begin{aligned} A_d^p &= \frac{1}{m \omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\{1-(1-2h^2)\}^2 + 4h^2(1-2h^2)}} \\ &= \frac{1}{m \omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{4h^4 + 4h^2(1-2h^2)}} \\ &= \frac{1}{m \omega_0^2} \frac{1}{2h\sqrt{1-h^2}} \end{aligned} \quad (\text{付 2.17})$$

式(付2.16)より、 h が $1/\sqrt{2}$ より十分小さければ、 $\omega_d^p \approx \omega_0$ であることがわかる。また、式(付2.15)からわかるように、 $h \geq 1/\sqrt{2}$ であれば、 A_d は単調減少し、極値を示さない。単位加振力当りの変位共振曲線の例を示すと、付図2.3のようになる。

次に、単位加振力当りの加速度振幅 A_a は、式(付2.13)より次のように求められる。

$$\begin{aligned} A_a &= \omega^2 A_d \\ &= \frac{1}{m} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\{1-(\frac{\omega}{\omega_0})^2\}^2 + 4h^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \end{aligned} \quad (\text{付 2.18})$$

A_a が極値をとる ω の値は、 A_d の場合と同様に求められる。すなわち、 $\omega/\omega_0 = u$ とおけば、式(付2.18)は次のようになる。

$$A_a = \frac{1}{m} \frac{u^2}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2}} \quad (\text{付 2.19})$$

上式より、

$$\begin{aligned} \frac{dA_a}{du} &= \frac{1}{m} \frac{2u\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2} - u^2 \frac{4u^3 + 8h^2 u - 4u}{2\sqrt{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2}}}{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2} \\ &= \frac{2}{m} \frac{u\{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2\} - u^2(u^3 + 2h^2 u - u)}{\{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2\}^{\frac{3}{2}}} \\ &= \frac{2}{m} \frac{u\{(2h^2 - 1)u^2 + 1\}}{\{(1-u^2)^2 + 4h^2 u^2\}^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (\text{付 2.20})$$

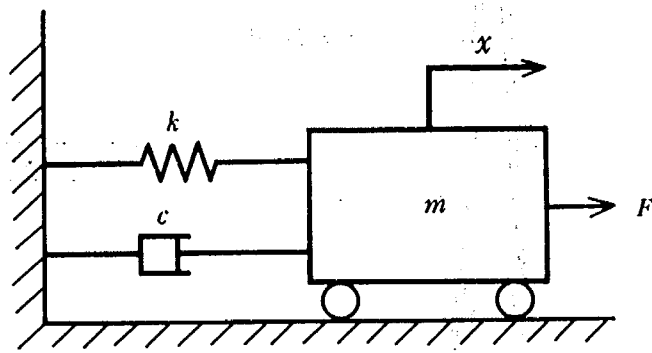
式(付2.20)からわかるように、 $h < 1/\sqrt{2}$ であれば、 $u = 1/\sqrt{1-2h^2}$ の時に、 A_a は極大となる。すなわち、単位加振力当りの加速度共振曲線が極大値を示す円振動数 ω_a^p は次式で与えられる。

$$\omega_a^p = \frac{1}{\sqrt{1-2h^2}} \omega_0 \quad (\text{付 2.21})$$

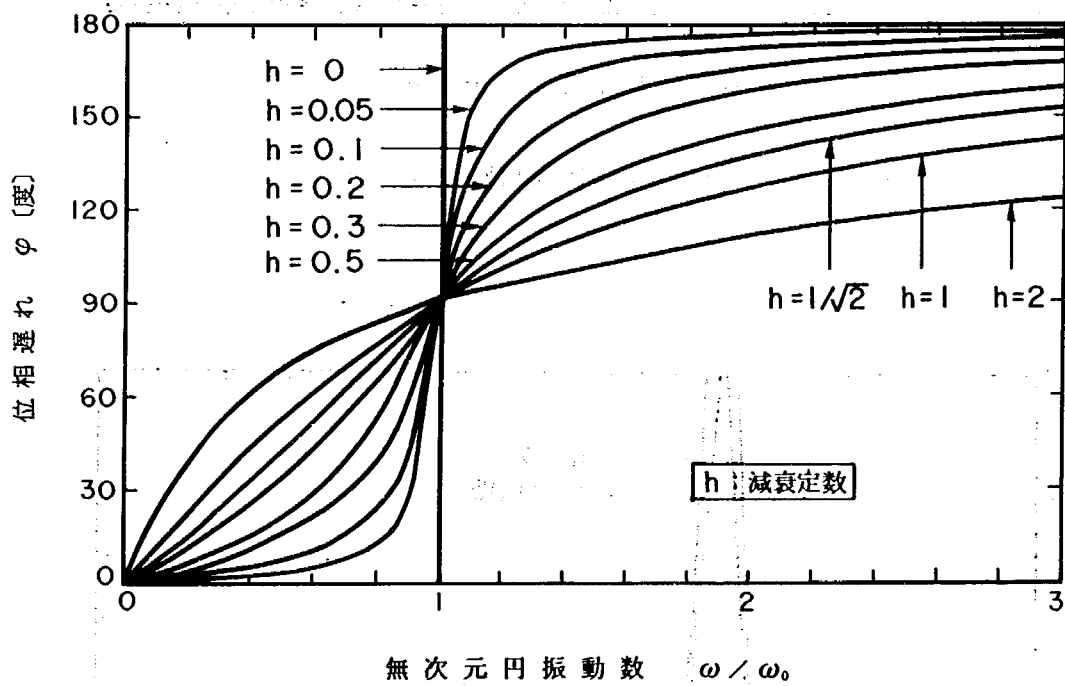
また、単位加振力当りの加速度振幅の極大値 A_a^p は次のように表される。

$$\begin{aligned} A_a^p &= \frac{1}{m} \frac{\frac{1}{1-2h^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{1-2h^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{1}{1-2h^2}}} \\ &= \frac{1}{m} \frac{1}{\sqrt{(1-2h^2-1)^2 + 4h^2(1-2h^2)}} \\ &= \frac{1}{m} \frac{1}{\sqrt{4h^4 + 4h^2(1-2h^2)}} \\ &= \frac{1}{m} \frac{1}{2h\sqrt{1-h^2}} \quad (\text{付 2.22}) \end{aligned}$$

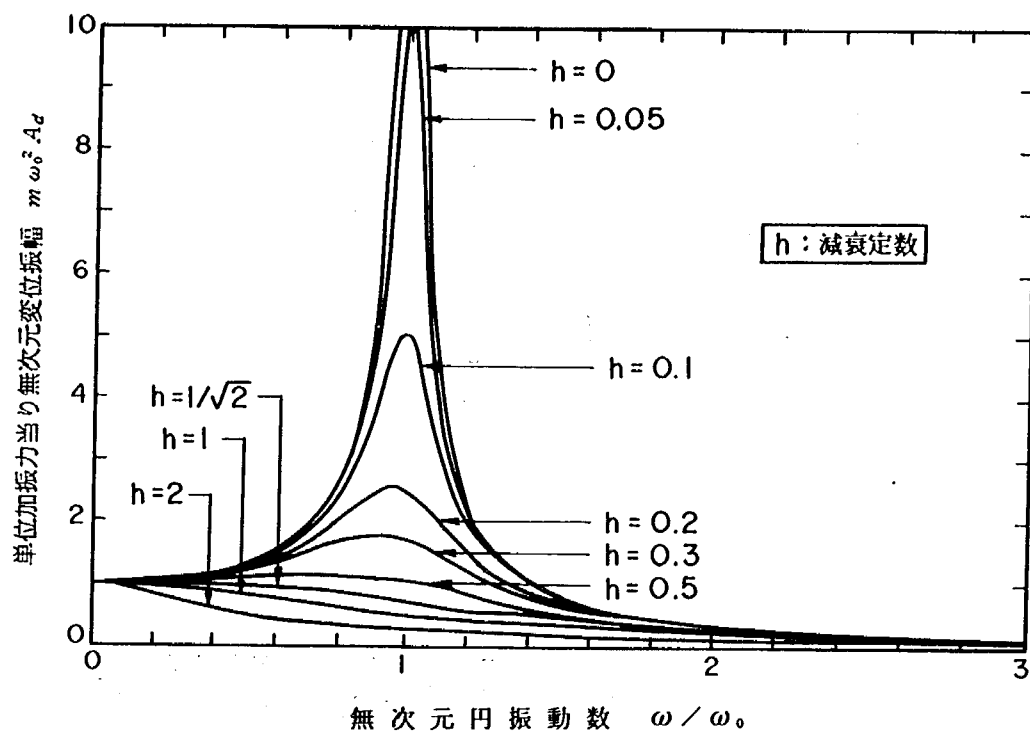
変位共振曲線の場合と同様に、式 (付 2.21) より、 h が $1/\sqrt{2}$ より十分小さければ、 $\omega_a^p \approx \omega_0$ であることがわかる。また、式 (付 2.20) より、 $h \geq 1/\sqrt{2}$ であれば、 A_a は単調増加し、極値を示さないことがわかる。単位加振力当りの加速度共振曲線の例を示すと、付図 2.4 のようになる。



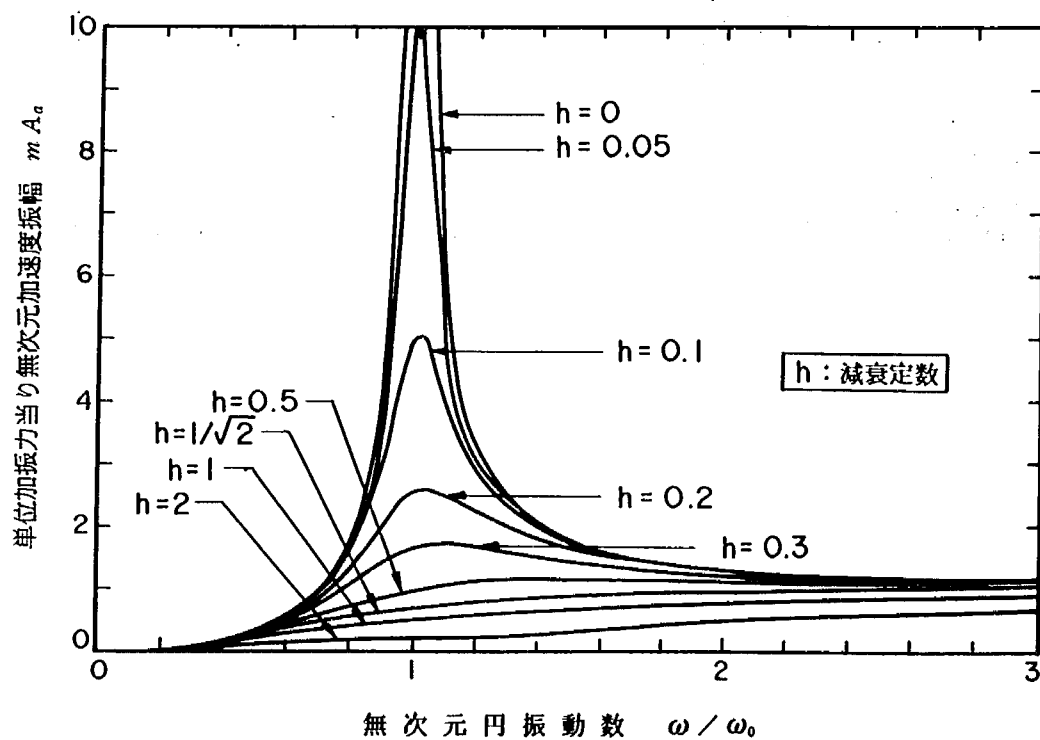
付図 2.1 1 自由度系のモデル



付図 2.2 位相曲線の例



付図 2.3 単位加振力当りの変位共振曲線の例



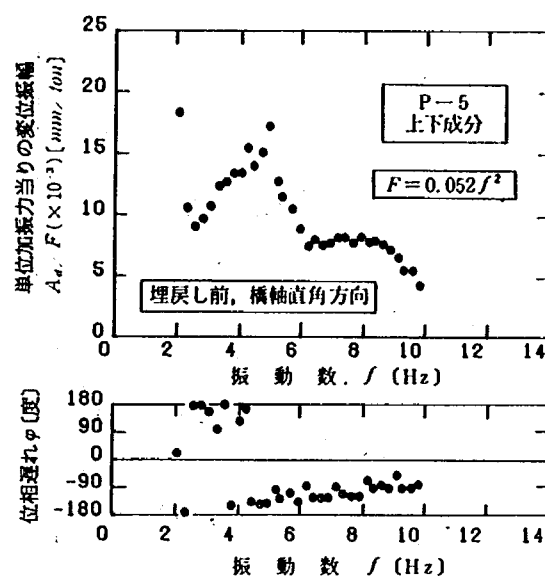
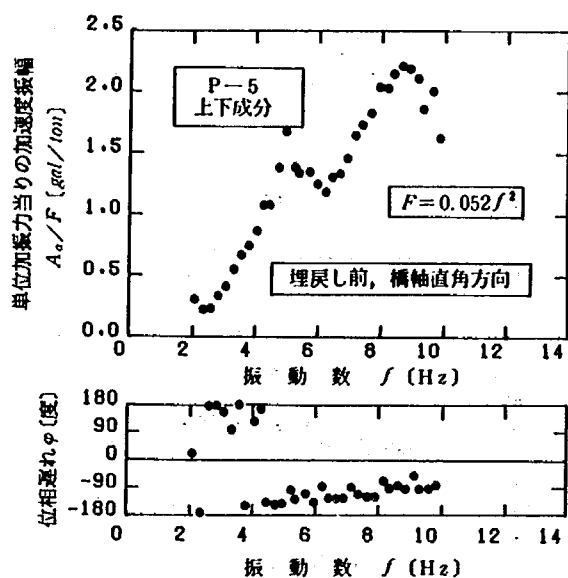
付図 2.4 単位加振力当りの加速度共振曲線の例

付 属 資 料 3

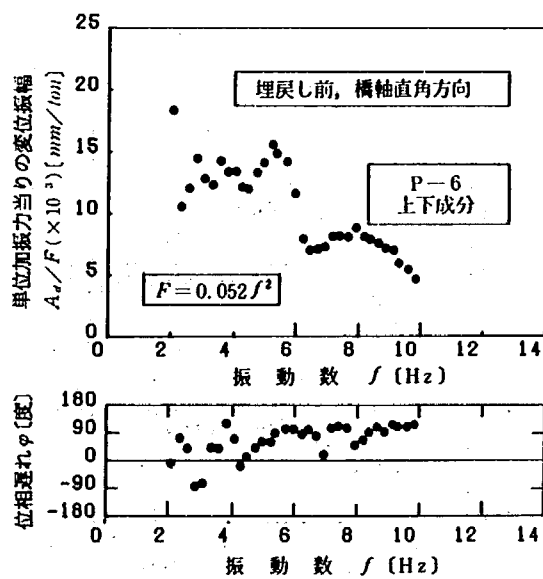
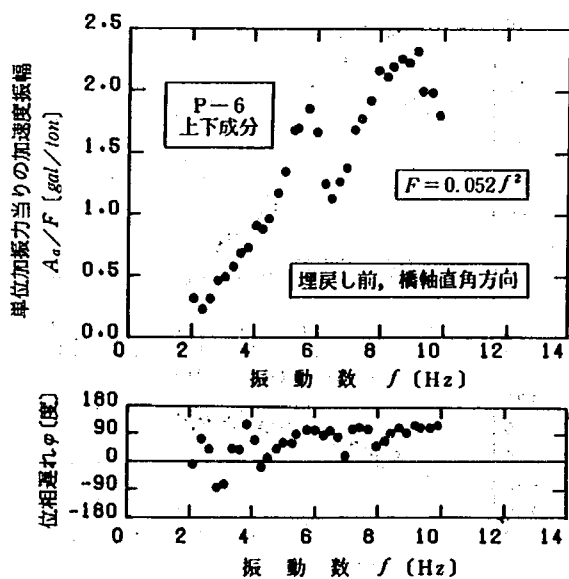
フーチング天端計測点の共振曲線

6. 符号说明

煤田地质部地质研究所编《地质部地质研究所编》

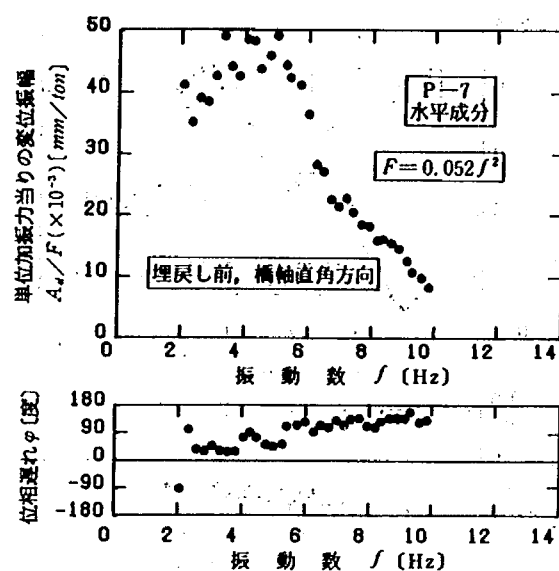
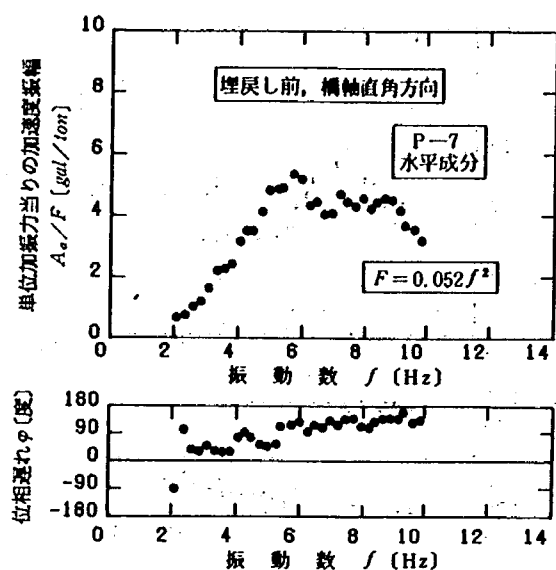


(a) P-5 点 (上下成分)

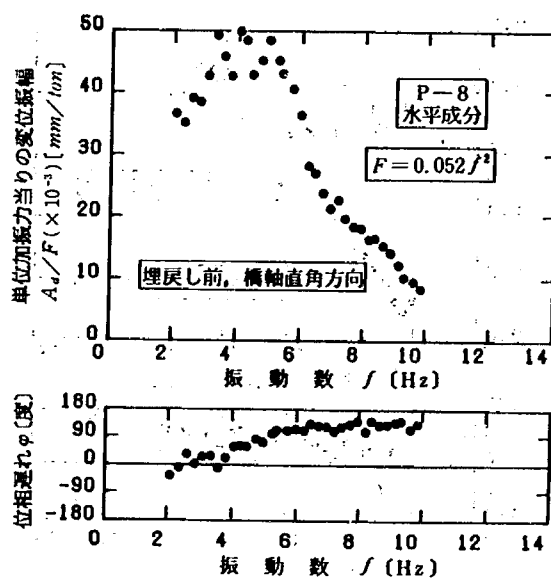
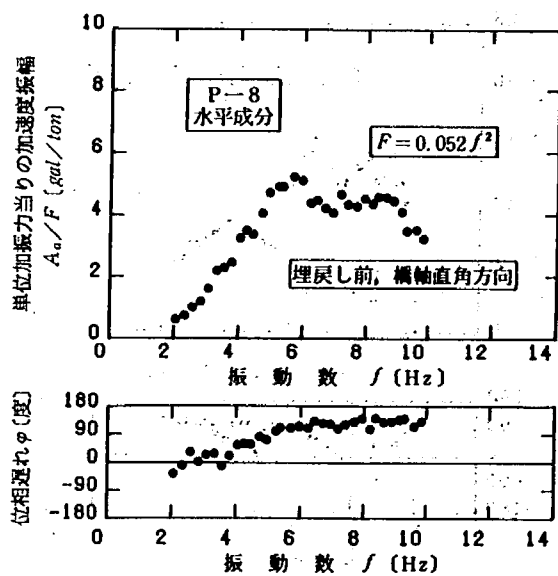


(b) P-6 点 (上下成分)

付図 3.1(1) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-1, $F=0.052f^2$)

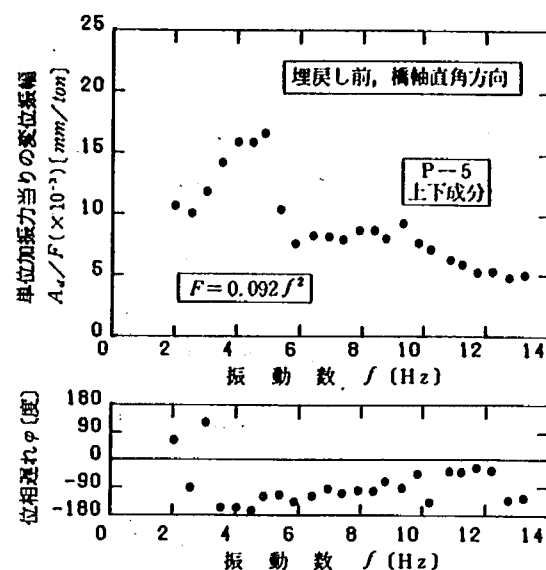
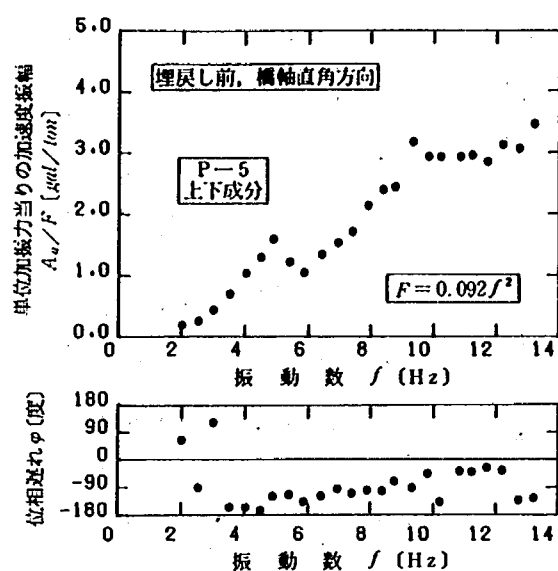


(c) P-7点 (水平成分)

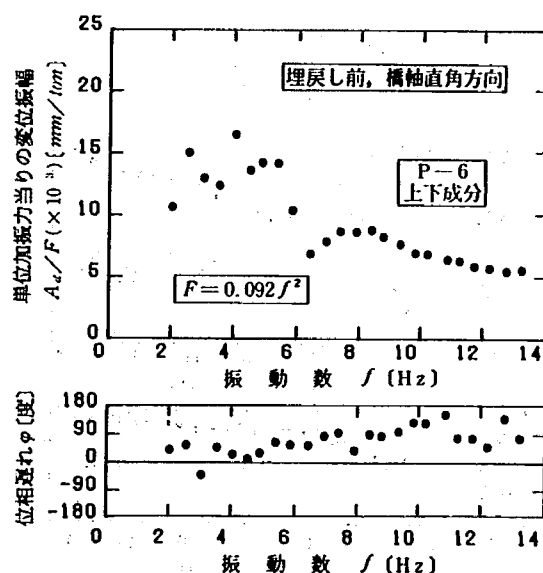
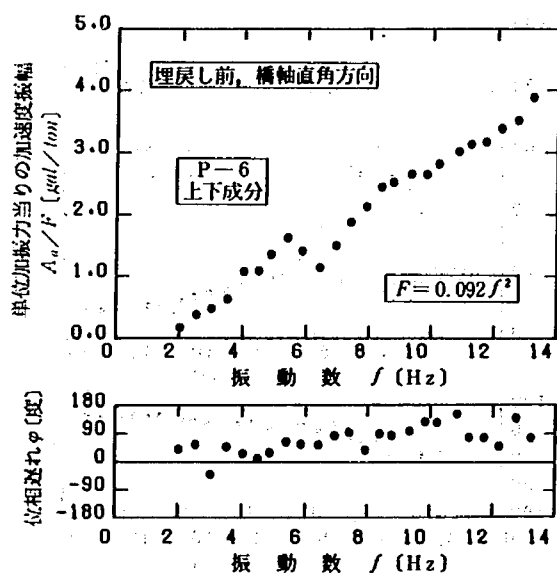


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.1 (2) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-1, $F=0.052f^2$)

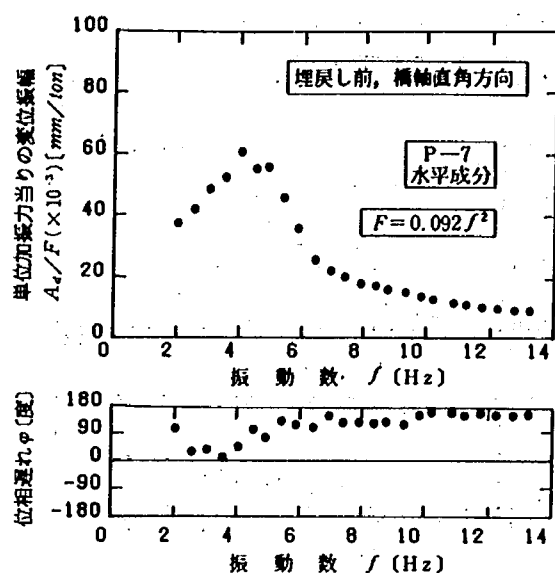
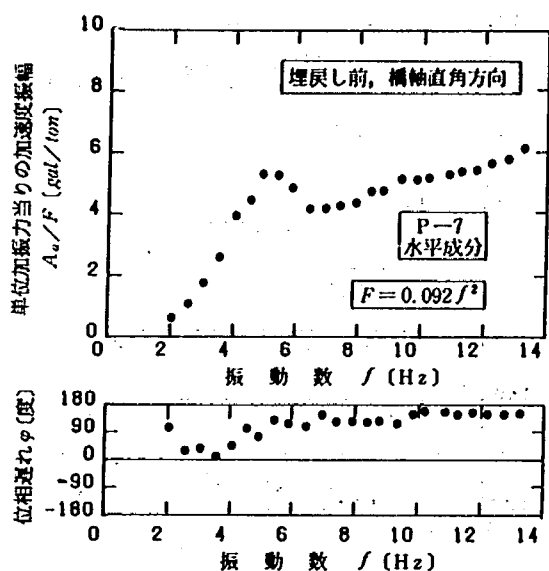


(a) P-5 点 (上下成分)

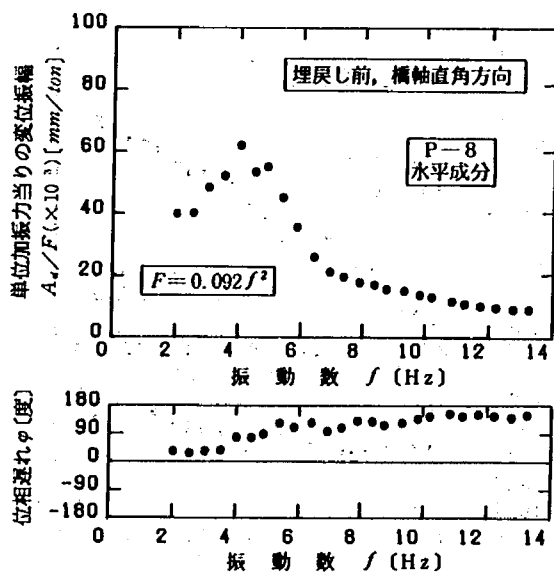
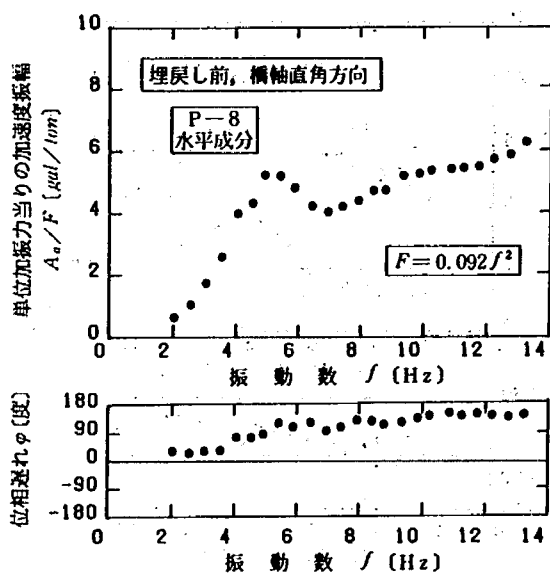


(b) P-6 点 (上下成分)

付図 3.1 (3) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-2, $F = 0.092 f^2$)

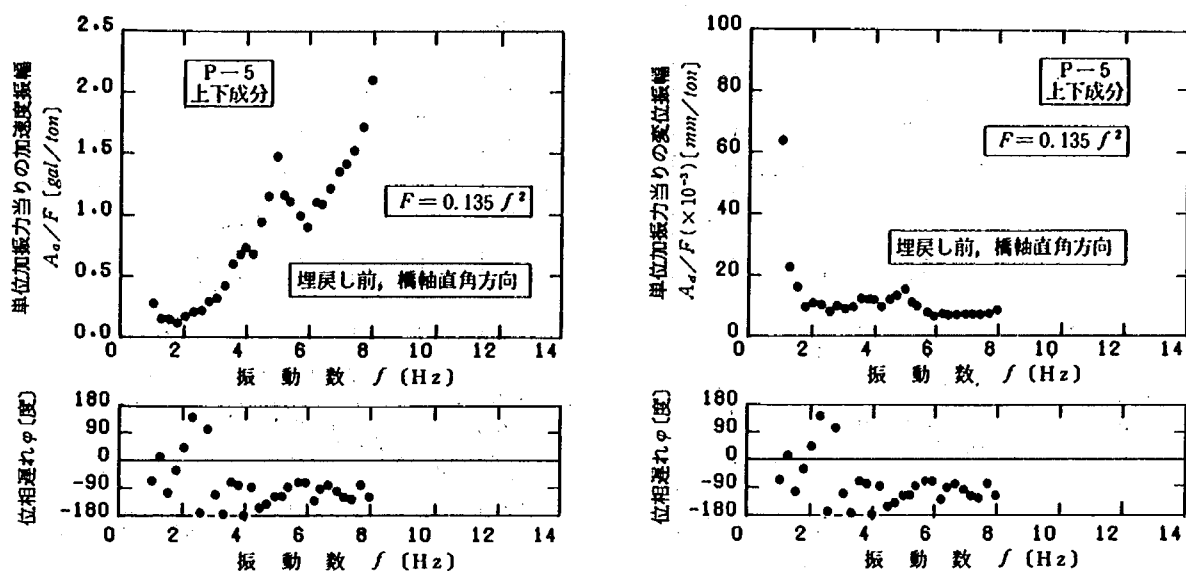


(c) P-7 点 (水平成分)

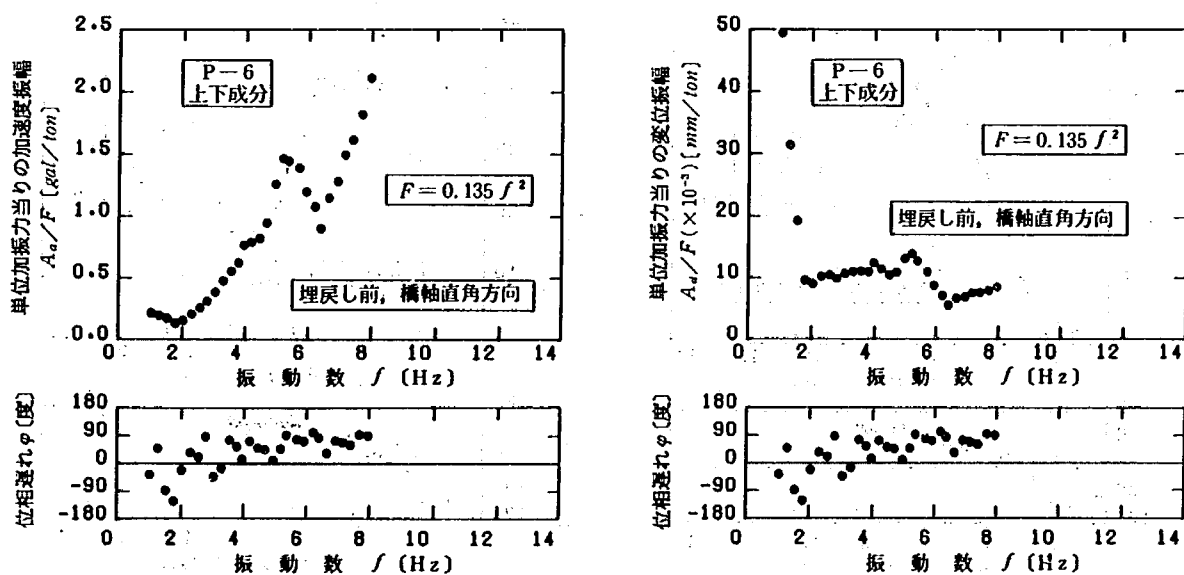


(d) P-8 点 (水平成分)

付図 3.1 (4) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-2, $F=0.092f^2$)

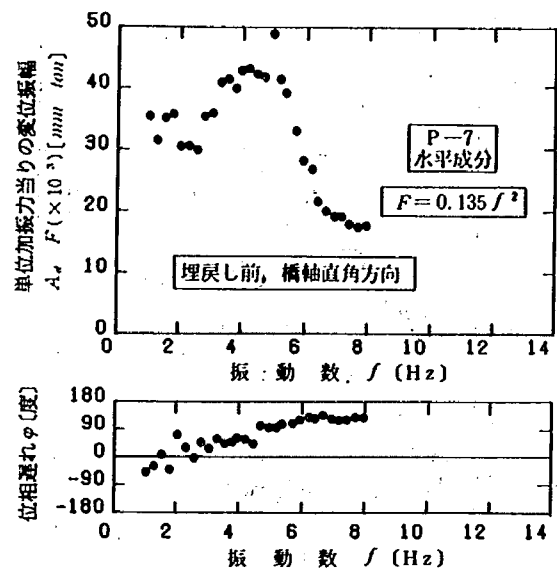
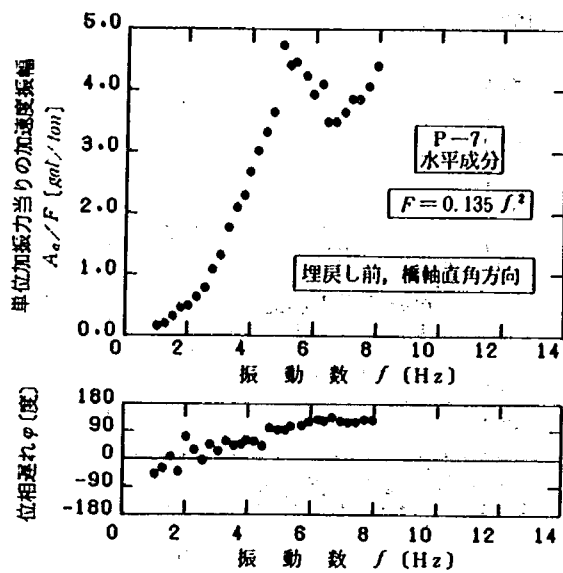


(a) P-5 点 (上下成分)

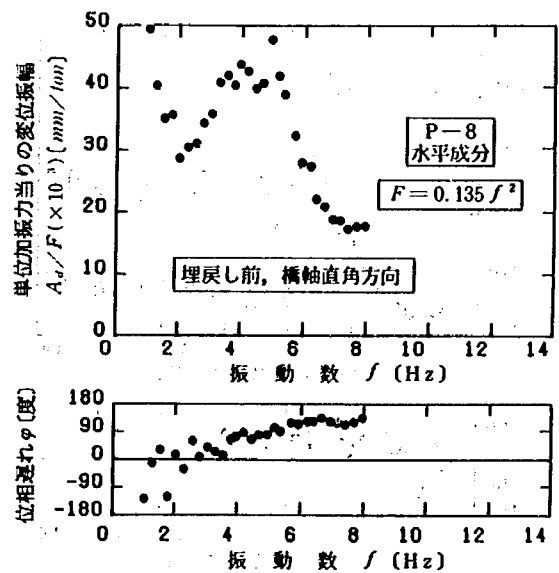
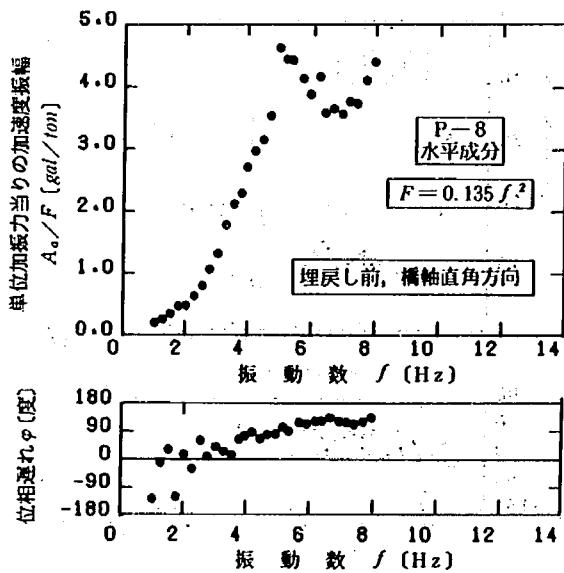


(b) P-6 点 (上下成分)

付図 3.1 (5) 埋戻し前、橋軸直角方向のブーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-3, $F = 0.135 f^2$)

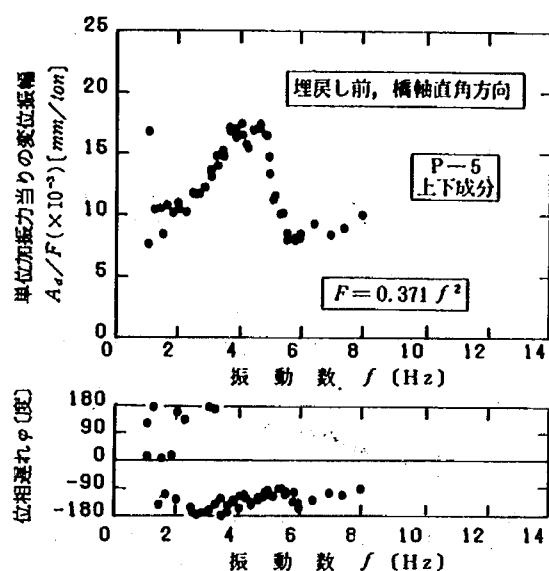
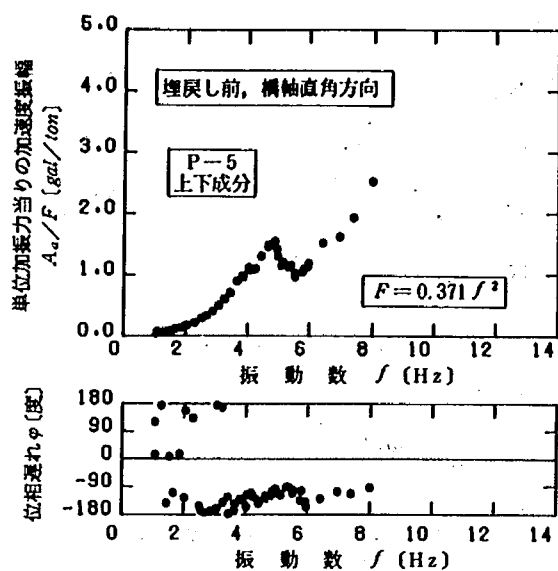


(c) P-7点 (水平成分)

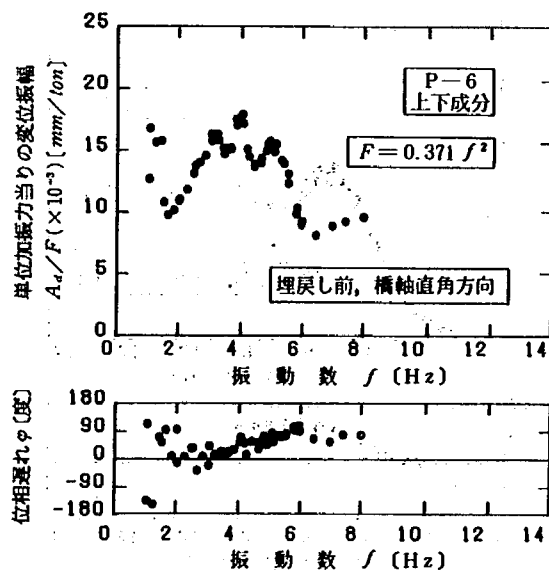
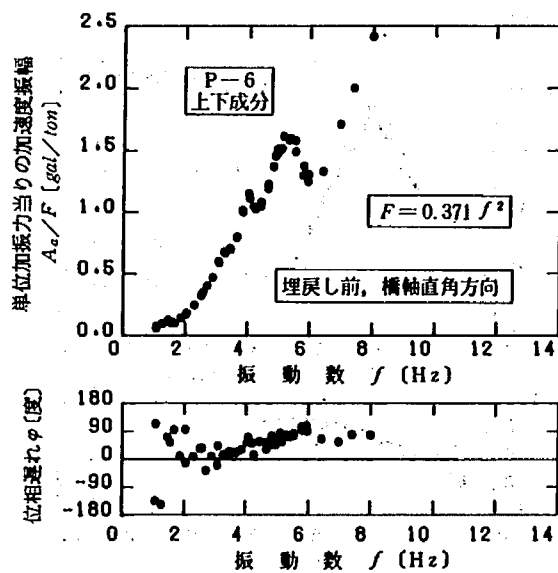


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.1 (6). 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース: A-3, $F = 0.135 f^2$)

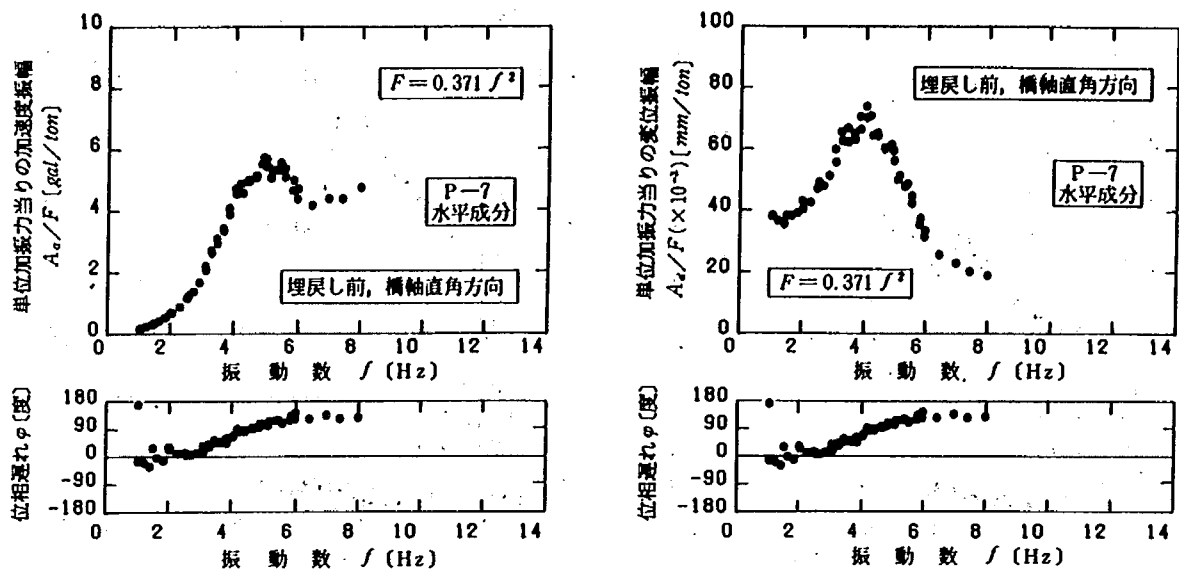


(a) P-5点 (上下成分)

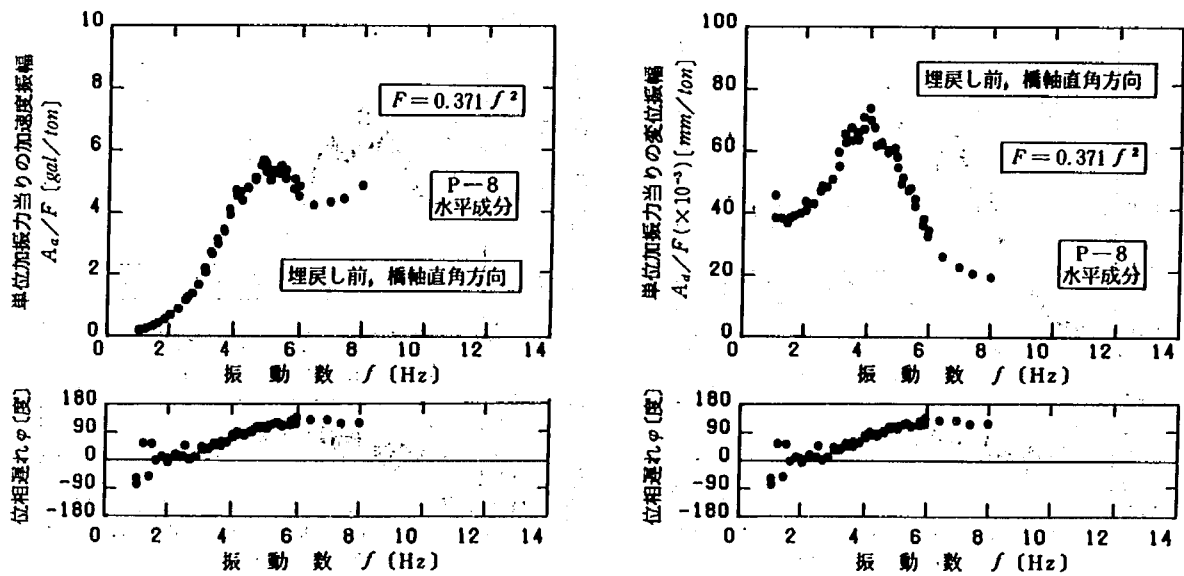


(b) P-6点 (上下成分)

付図 3.1 (7) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-4, $F = 0.371 f^2$)

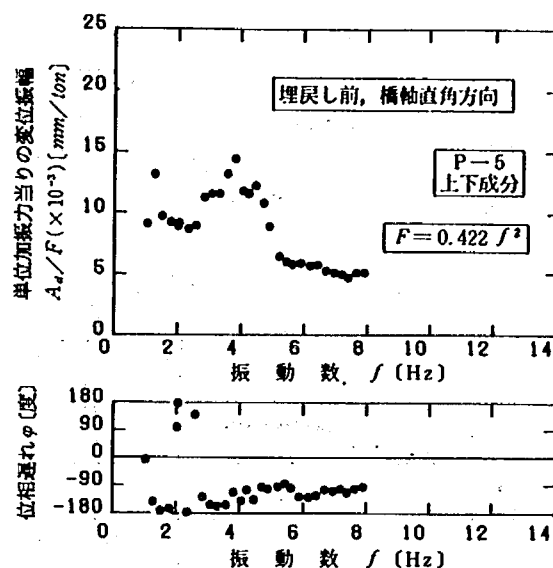
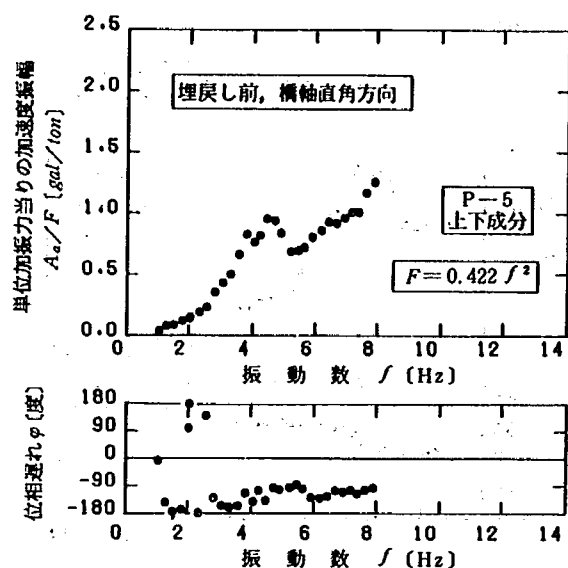


(c) P-7 点 (水平成分)

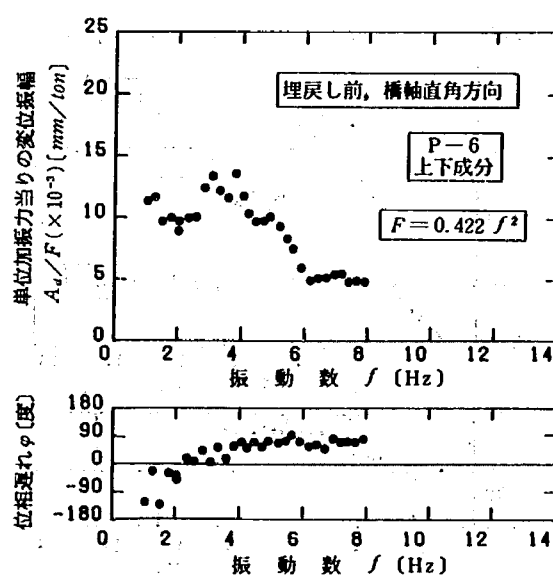
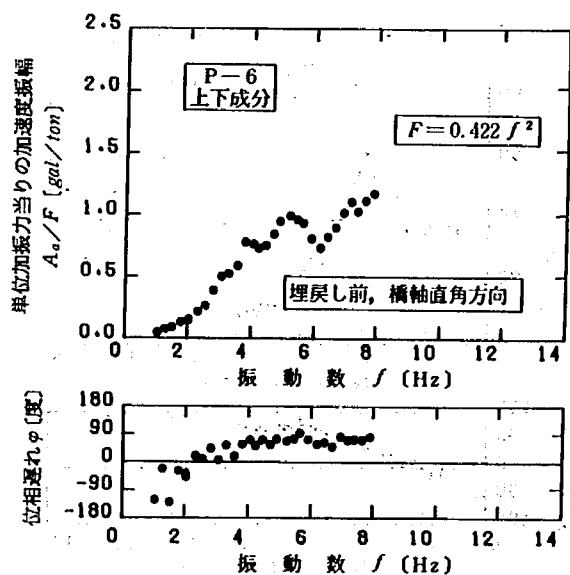


(d) P-8 点 (水平成分)

付図 3.1 (8) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-4, $F = 0.371 f^2$)

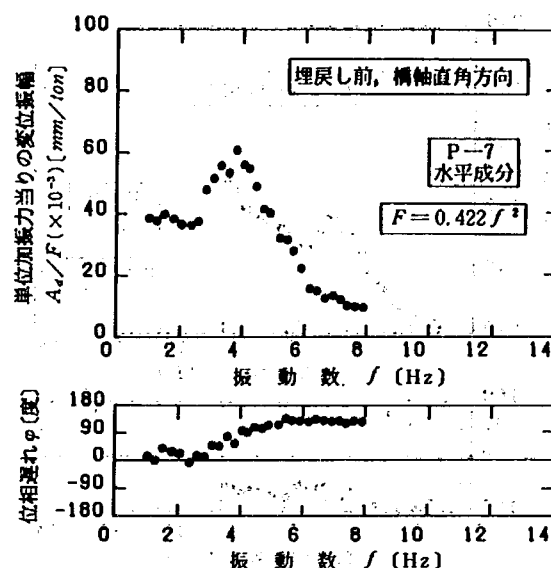
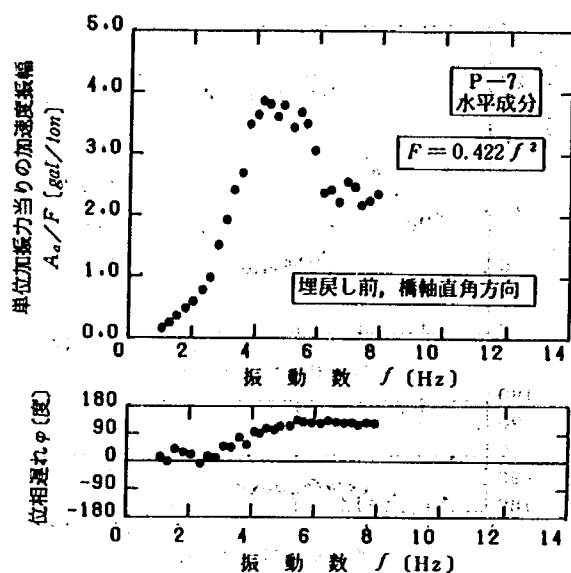


(a) P-5点 (上下成分)

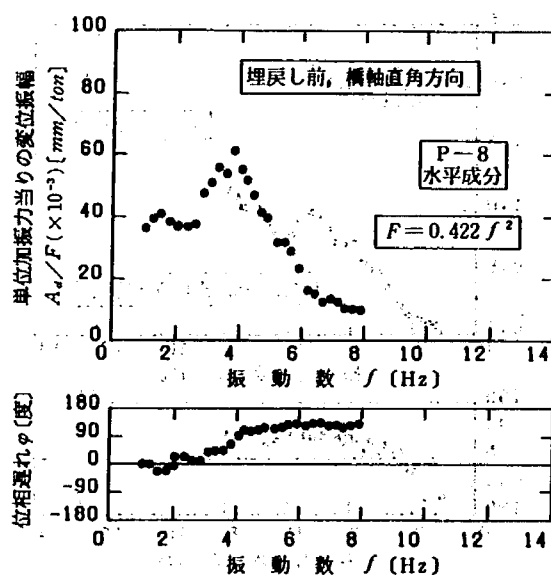
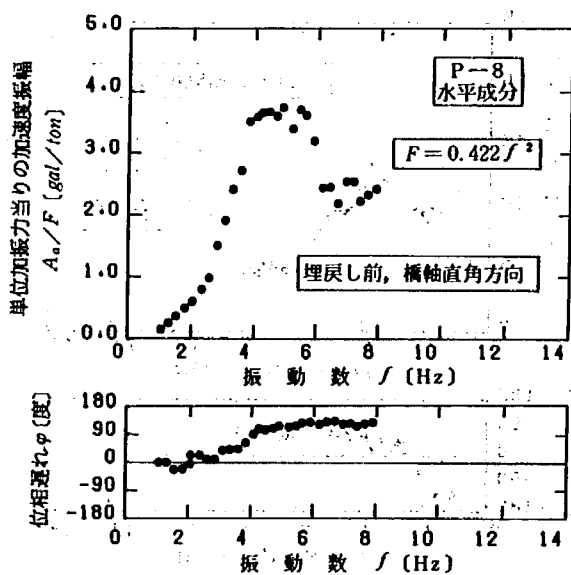


(b) P-6点 (上下成分)

付図3.1(9) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフォーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース: A-5, $F = 0.422 f^2$)

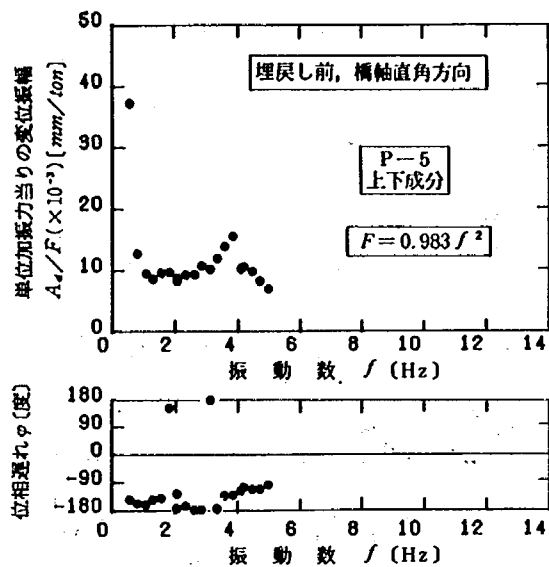
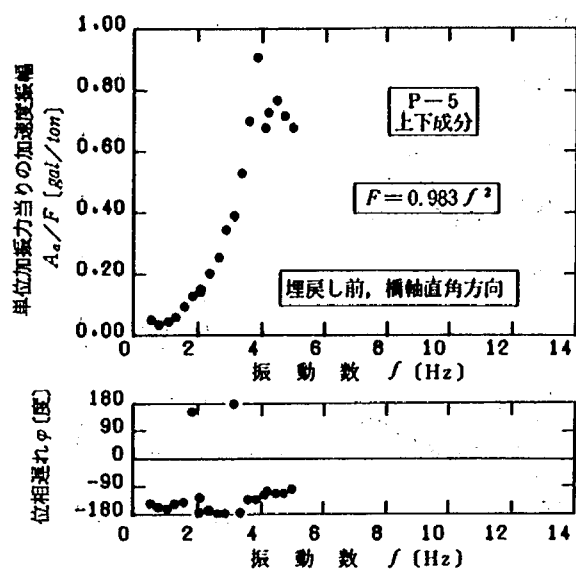


(c) P-7点 (水平成分)

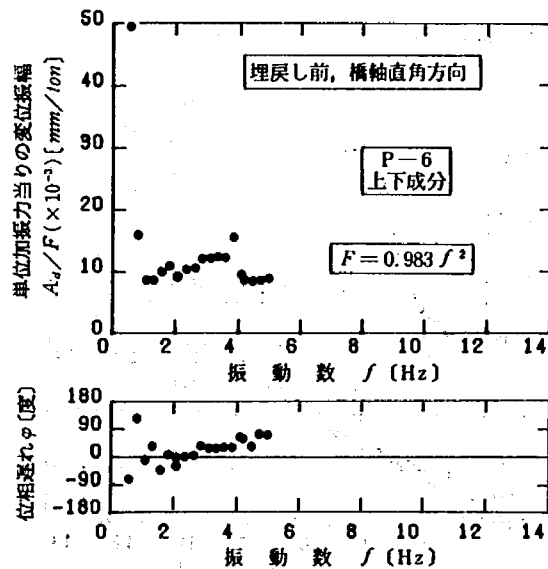
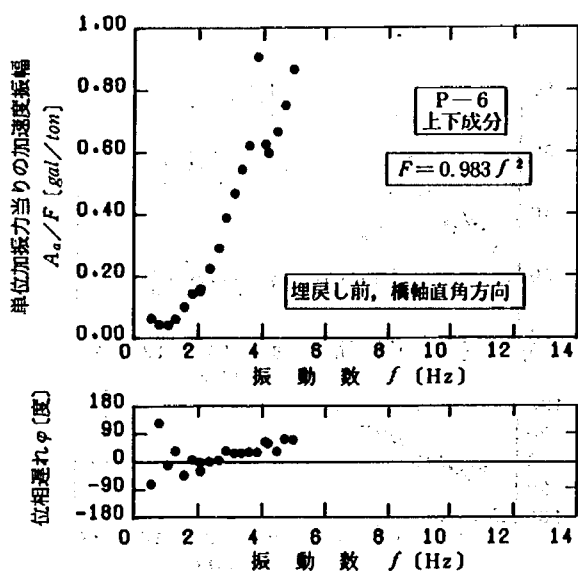


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.1 (d) 埋戻し前、橋軸直角方向のワーキング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-5, $F=0.422 f^2$)

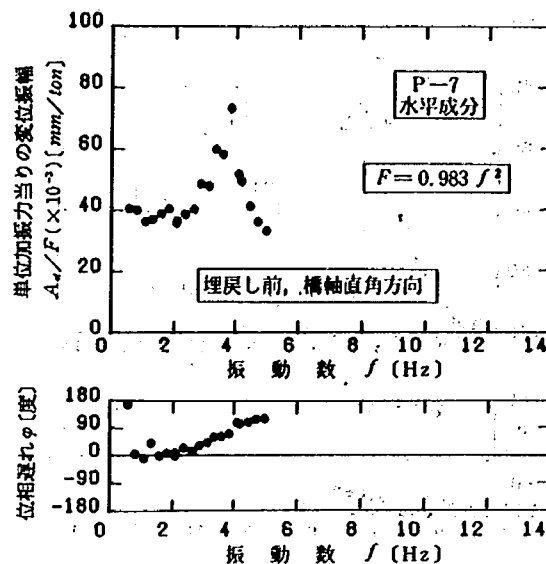
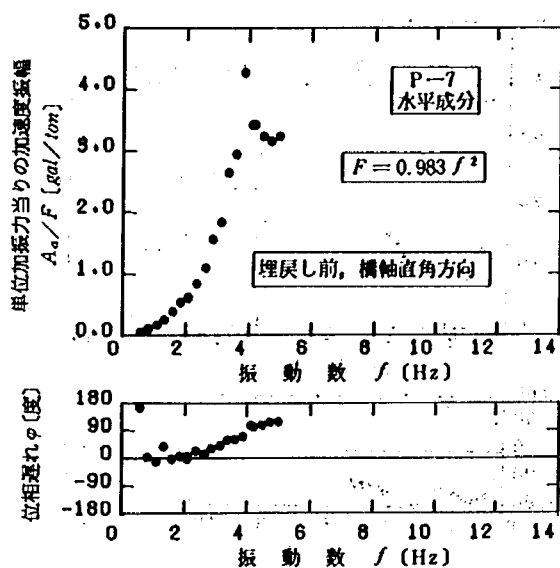


(a) P-5点 (上下成分)

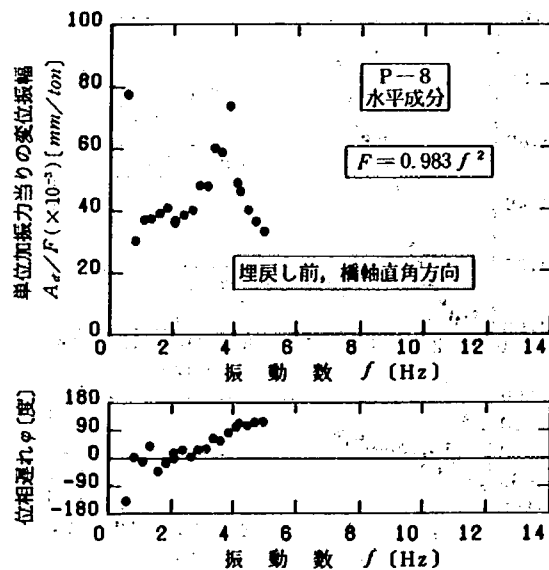
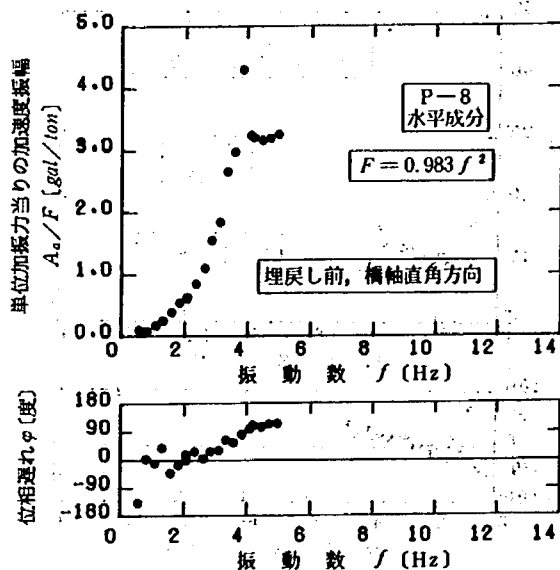


(b) P-6点 (上下成分)

付図 3.1 (11) 埋戻し前、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-6; $F = 0.983 f^2$)

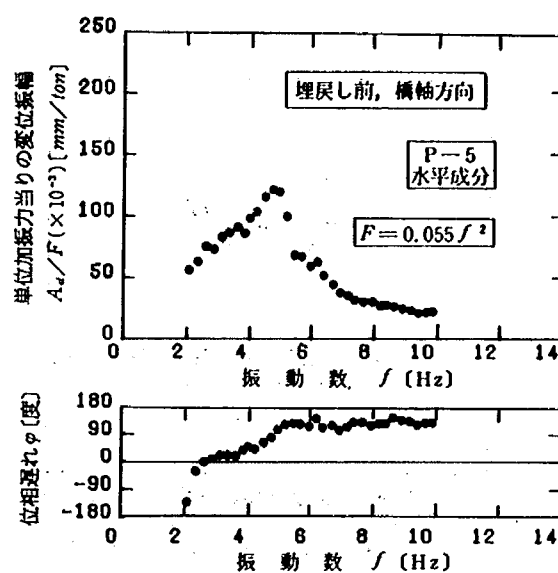
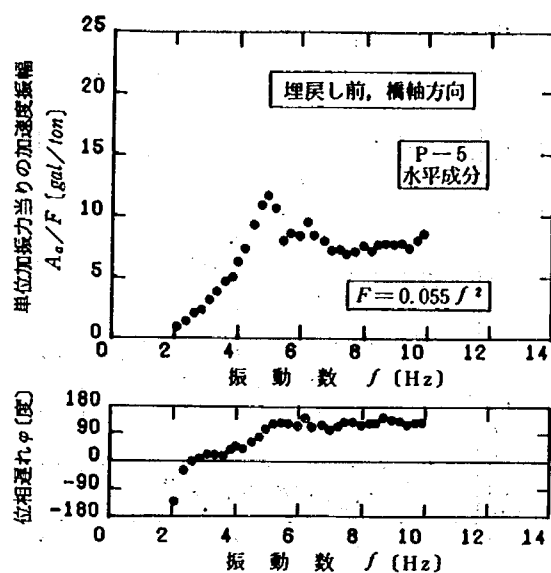


(c) P-7点 (水平成分)

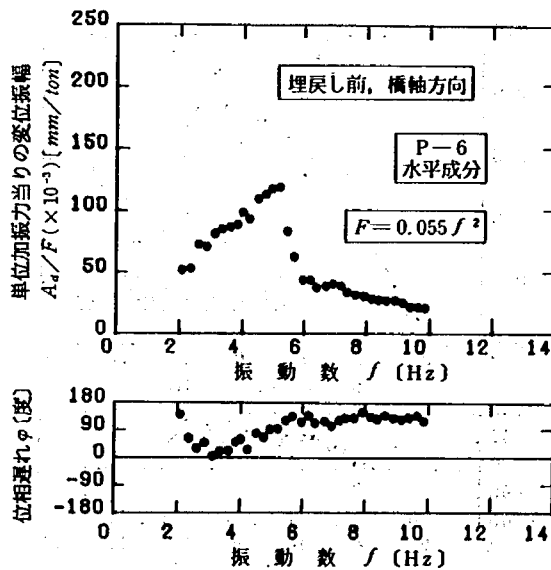
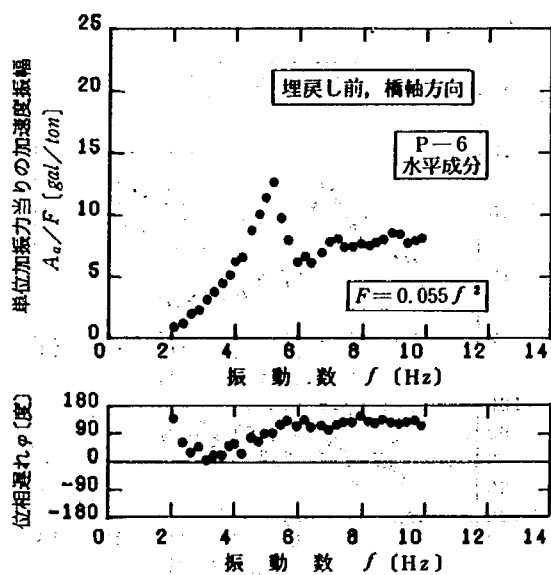


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.1(12) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース A-6, $F = 0.983 f^2$)

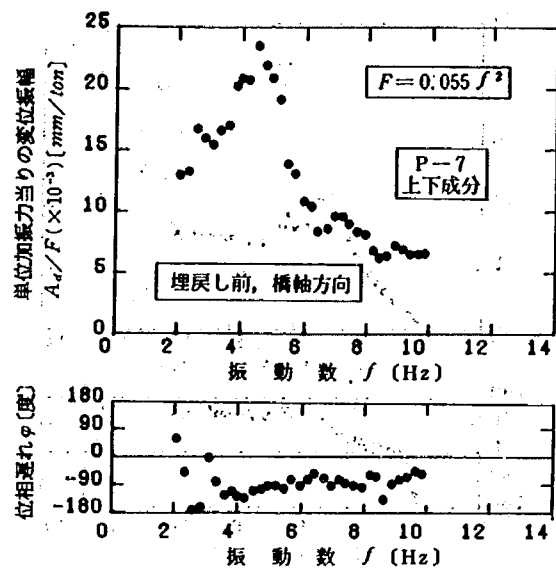
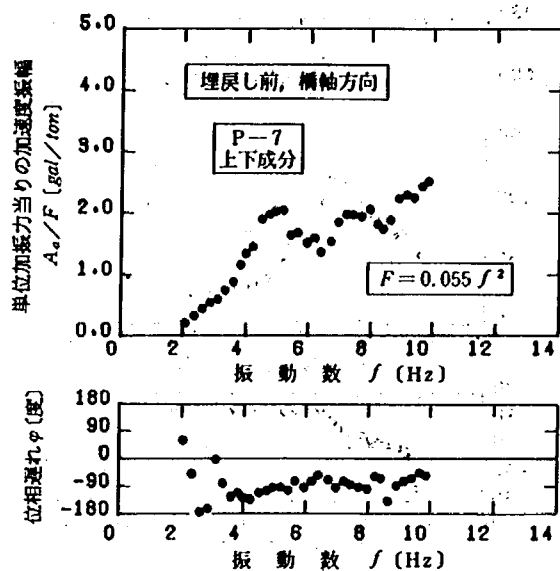


(a) P-5点 (水平成分)

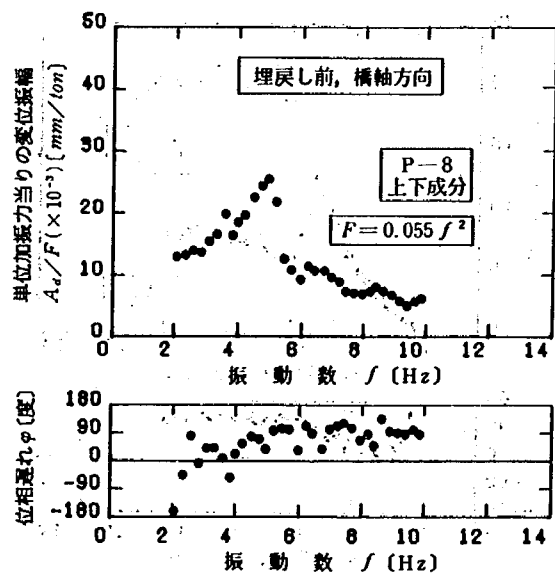
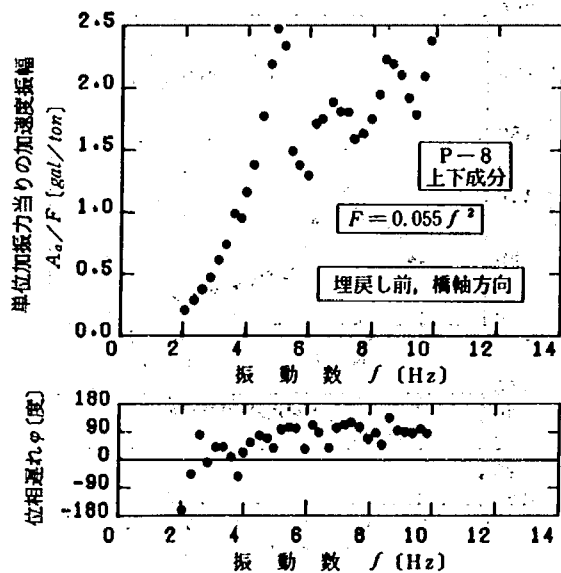


(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.2(1) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-1, $F = 0.055 f^2$)

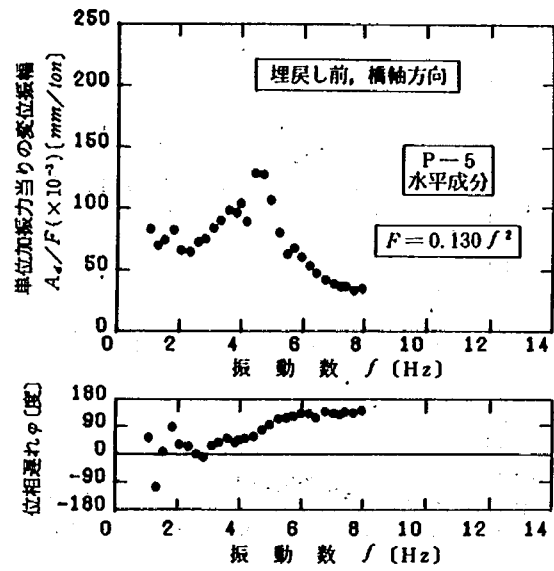
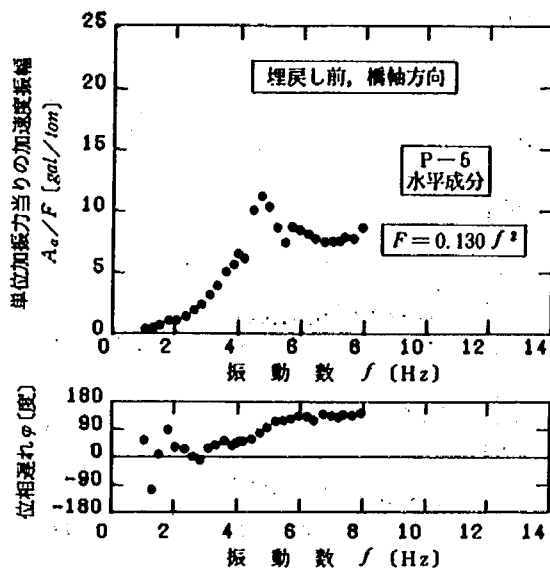


(c) P-7点 (上下成分)

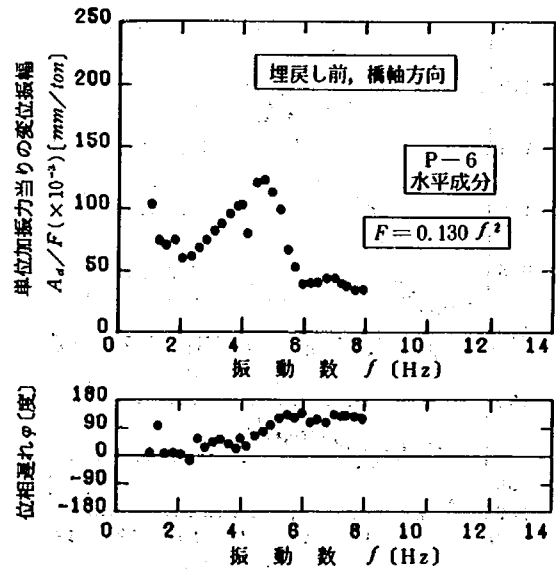
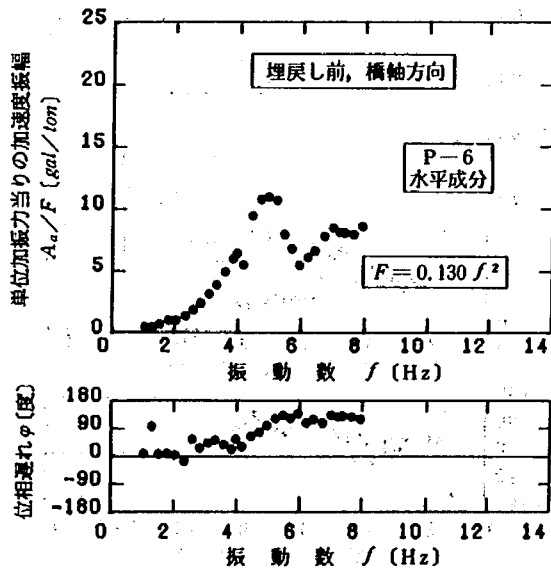


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.2(2) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-1, $F = 0.055 f^2$)

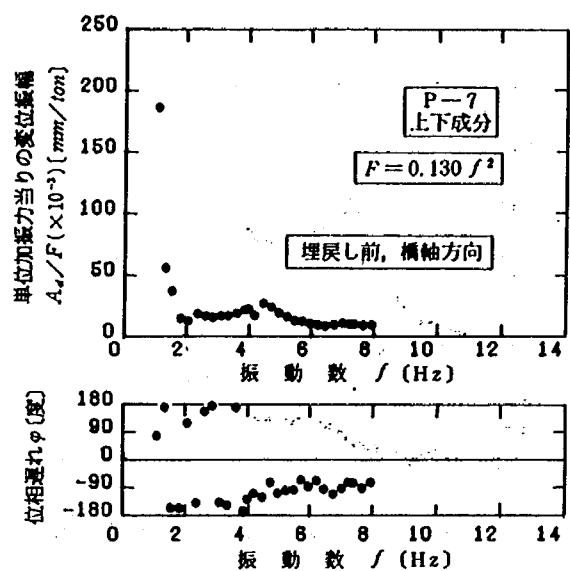
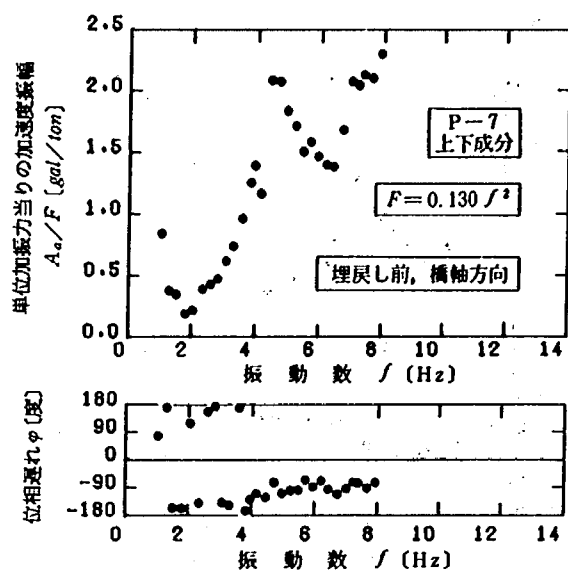


(a) P-5 点 (水平成分)

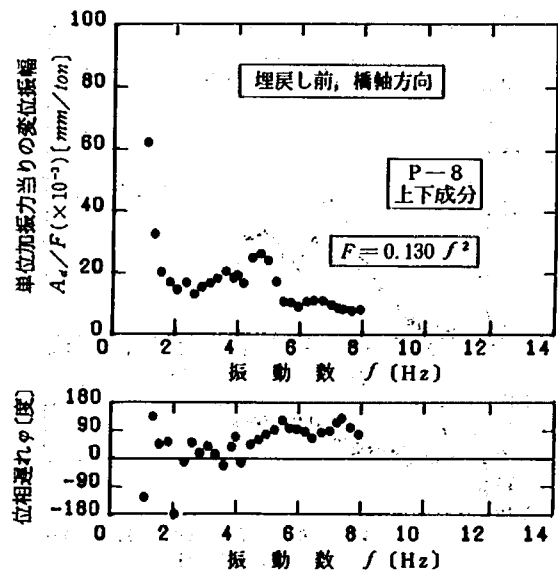
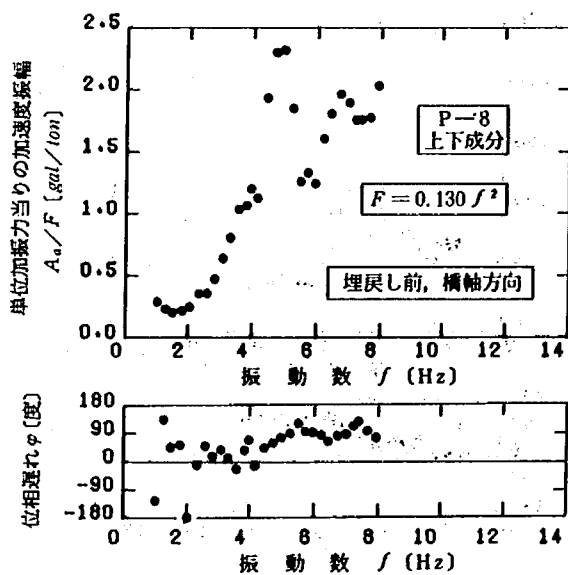


(b) P-6 点 (水平成分)

付図 3.2 (3) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-2, $F = 0.130 f^2$)

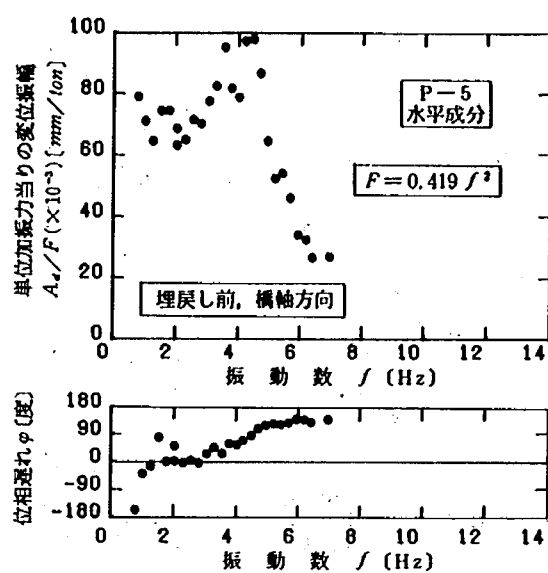
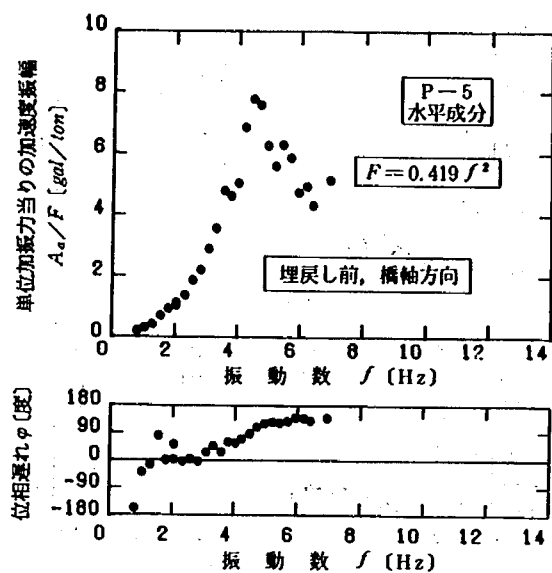


(c) P-7点 (上下成分)

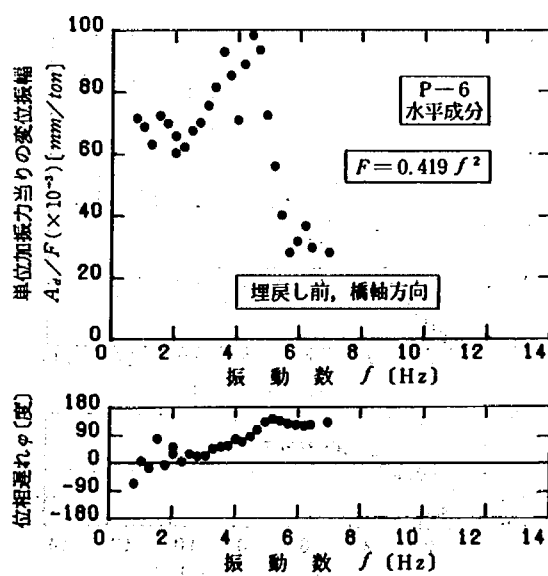
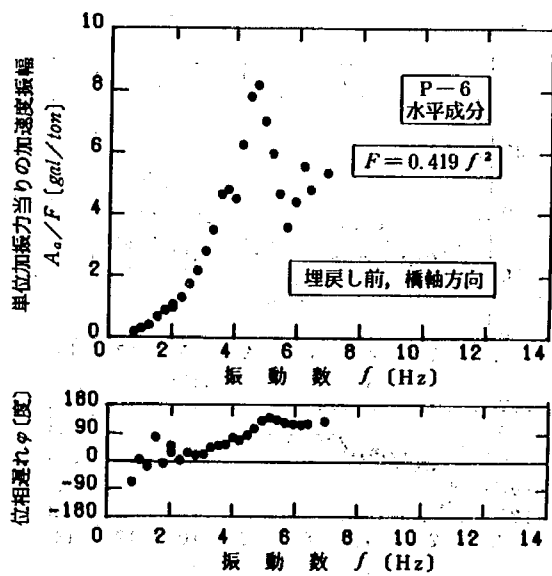


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.2 (4) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-2, $F=0.130 f^2$)

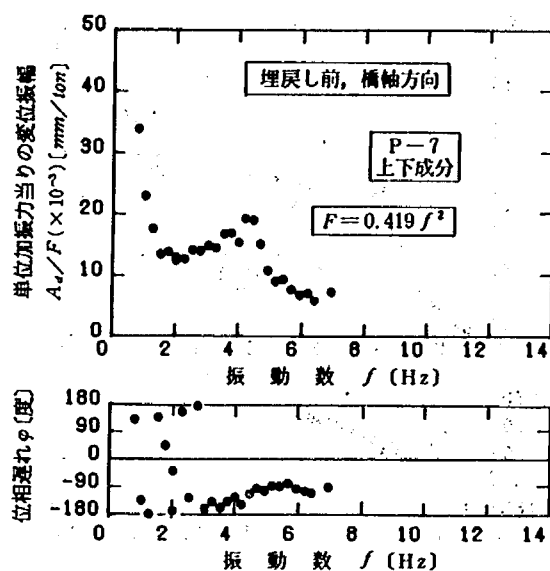
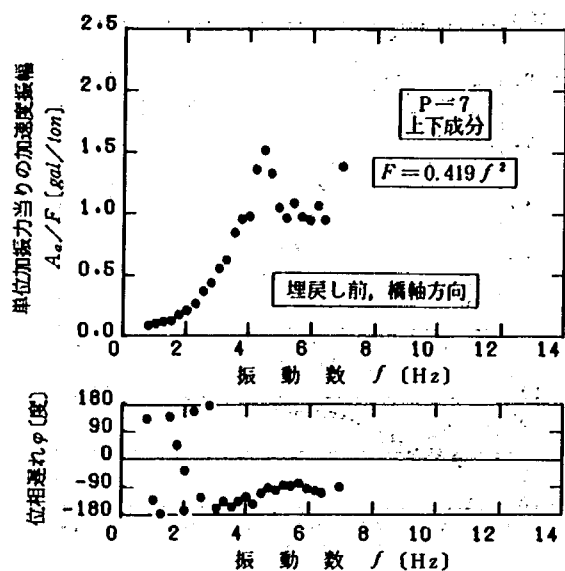


(a) P-5点 (水平成分)

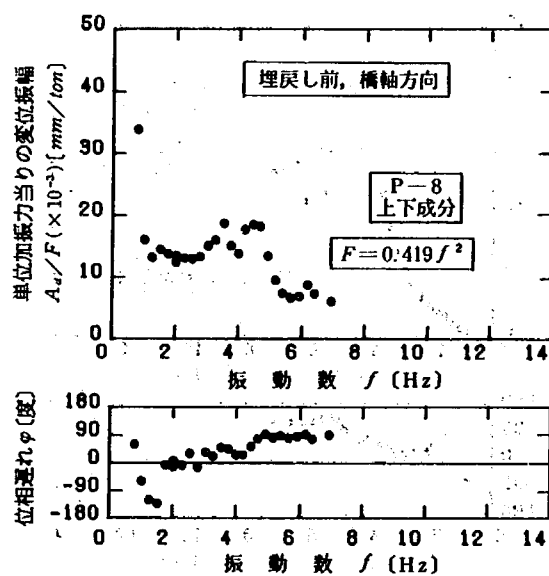
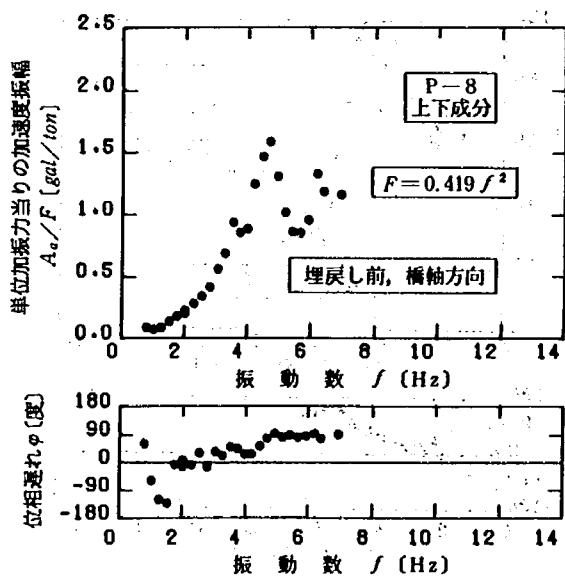


(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.2 (5) 埋戻し前、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-3, $F = 0.419 f^2$)



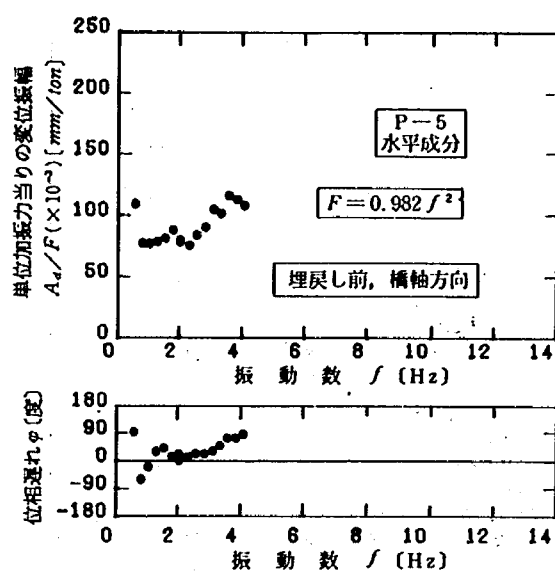
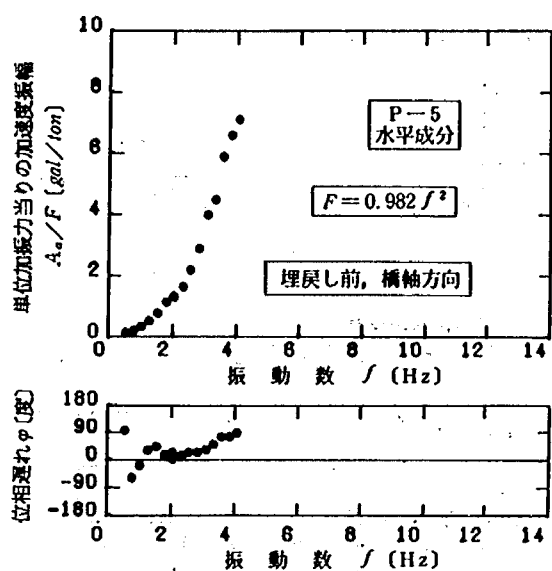
(c) P-7点 (上下成分)



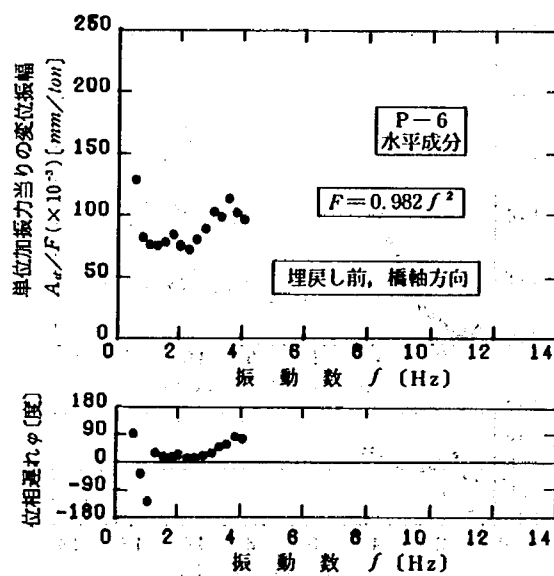
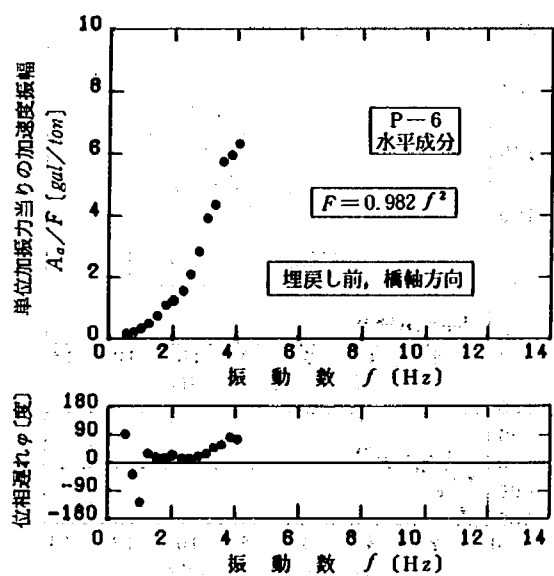
(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.2 (6) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース B-3, $F=0.419 f^2$)



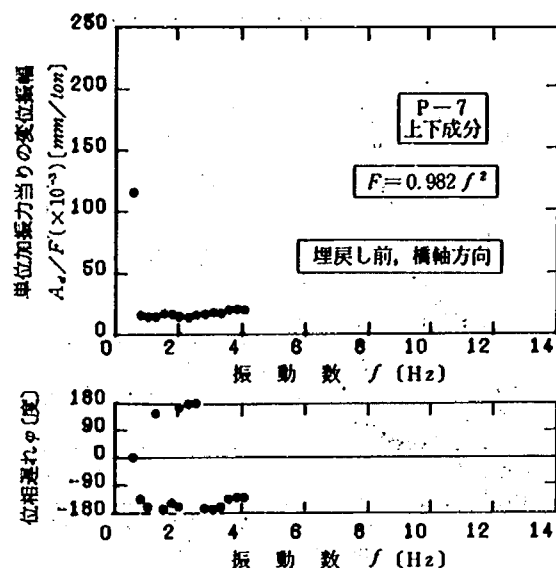
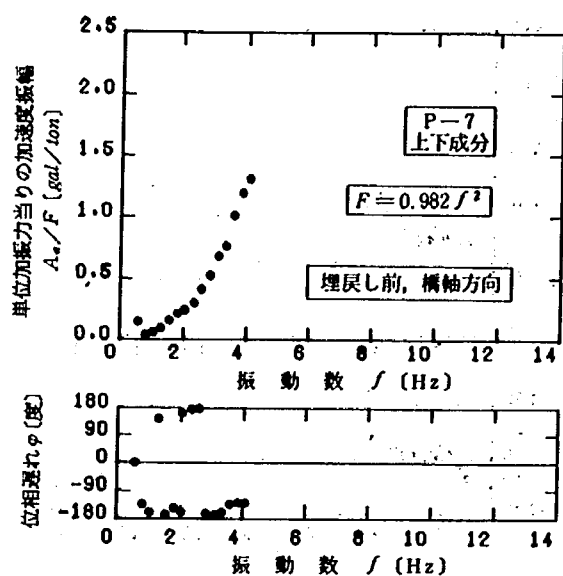
(a) P-5 点 (水平成分)



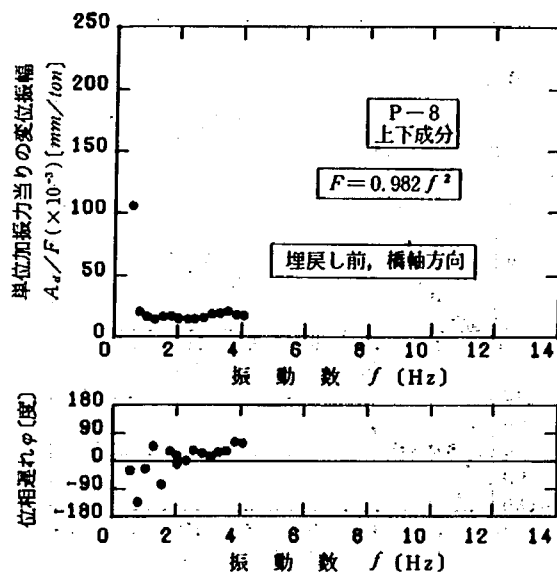
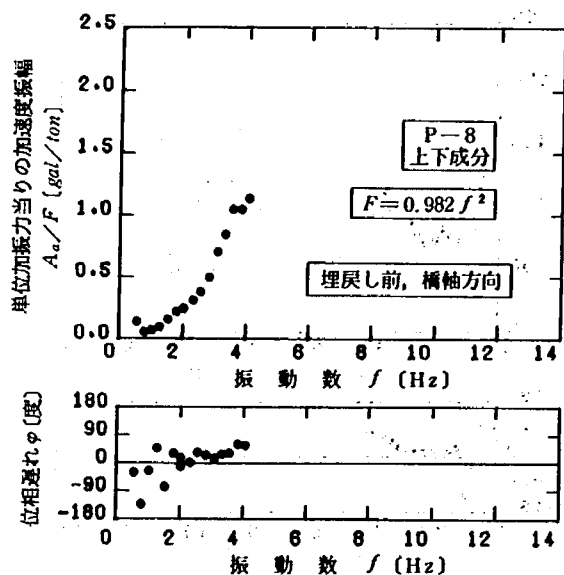
(b) P-6 点 (水平成分)

付図 3.3(7) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース B-4, $F = 0.982 f^2$)

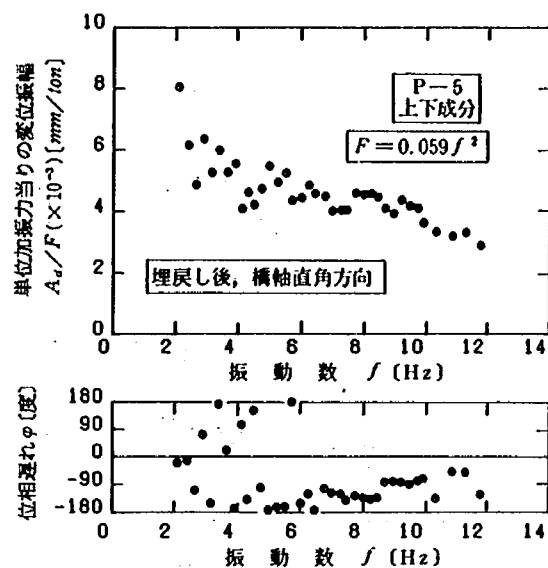
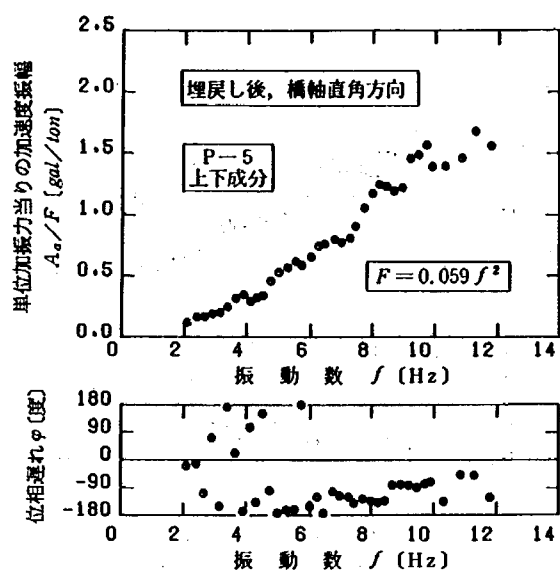


(c) P-7 (上下成分)

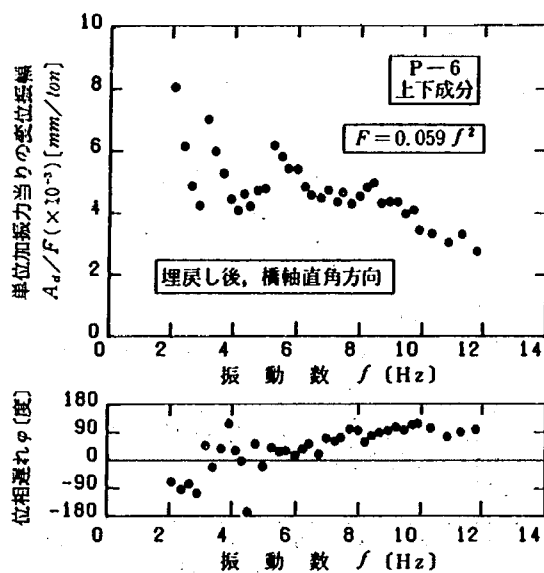
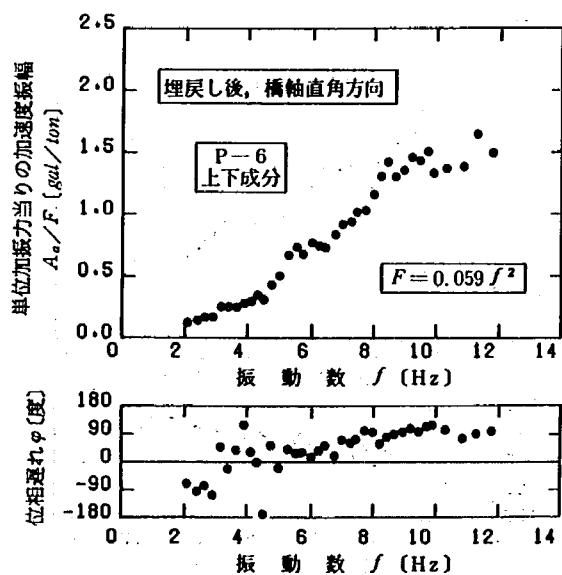


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.2 (8) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース B-4, $F=0.982 f^2$)

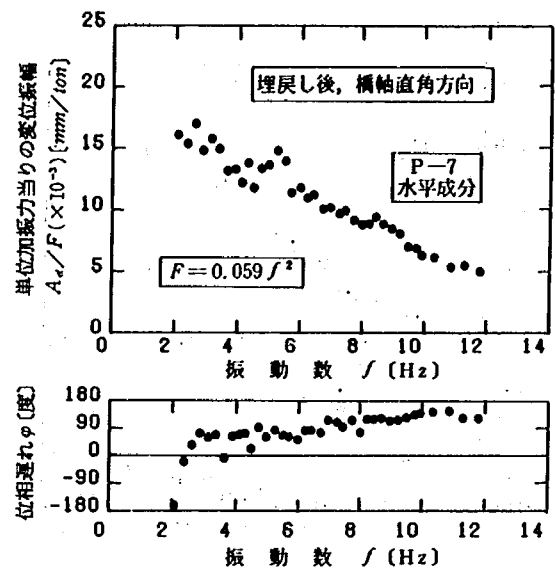
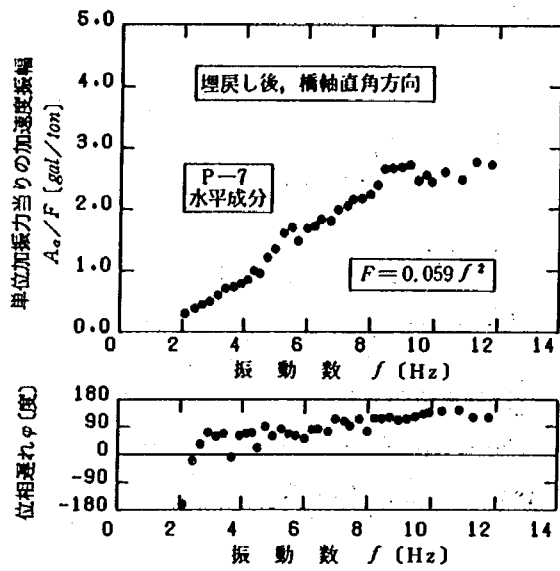


(a) P-5 点 (上下成分)

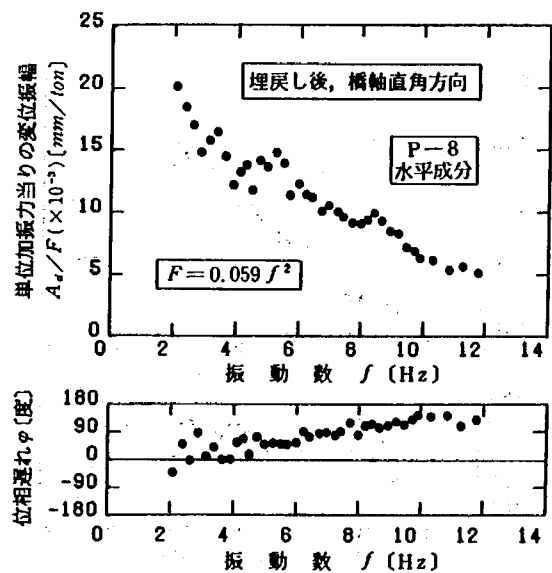
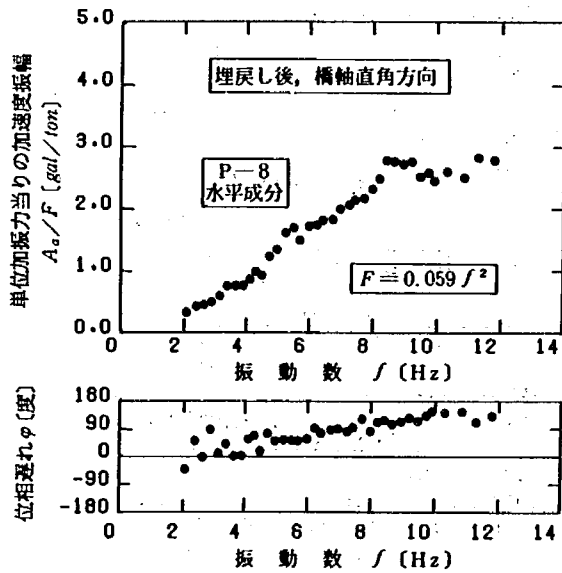


(b) P-6 点 (上下成分)

付図 3.3 (1) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-1, $F = 0.059 f^2$)

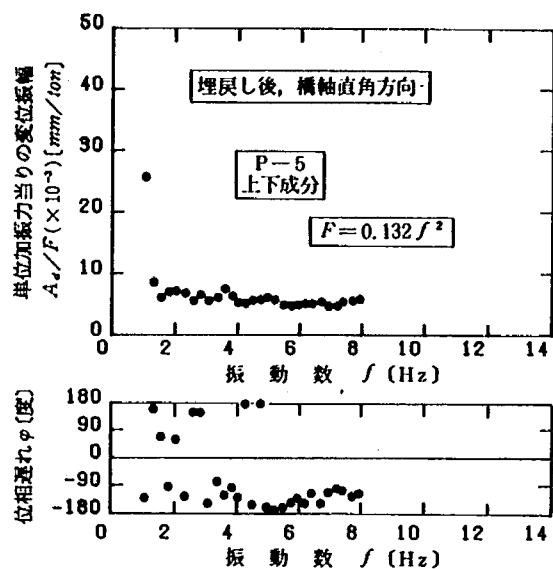
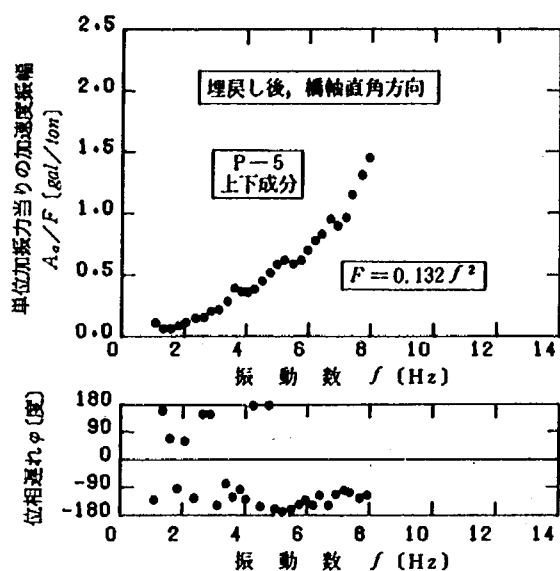


(c) P-7点 (水平成分)

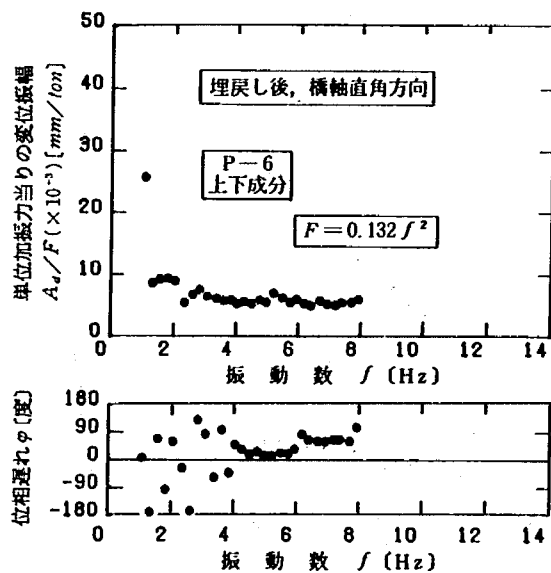
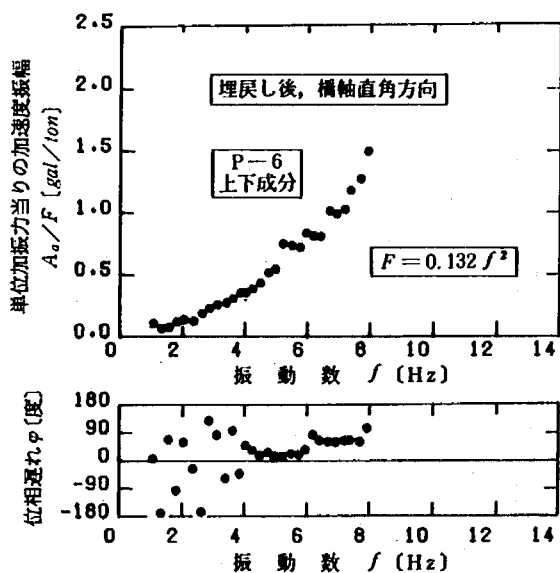


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.3 (2) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-1, $F = 0.059 f^2$)

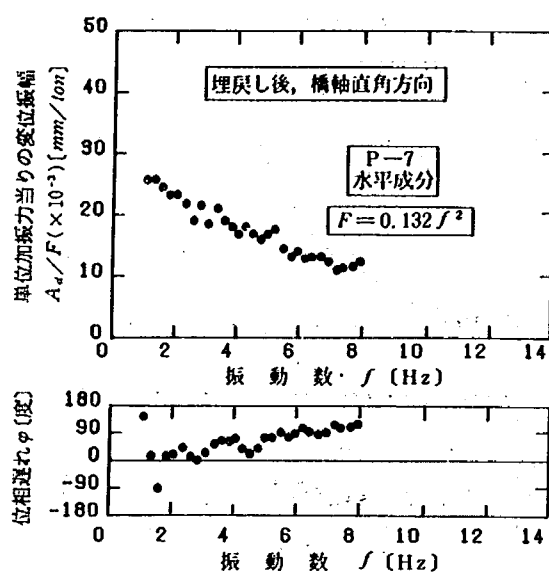
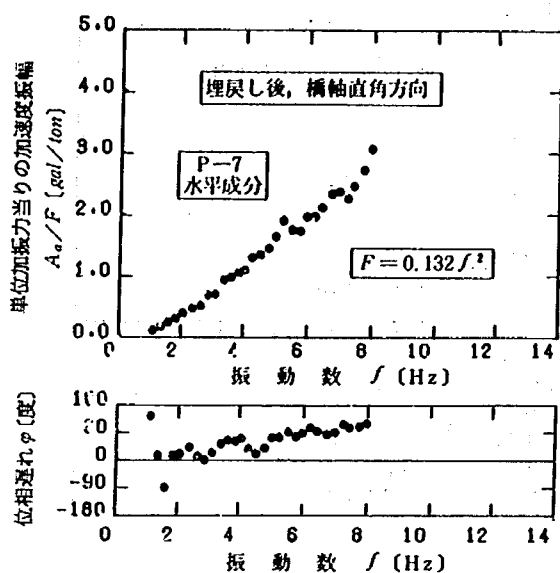


(a) P-5点 (上下成分)

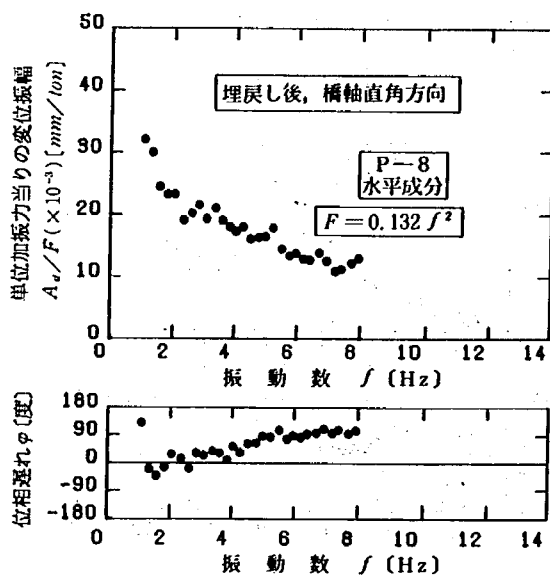
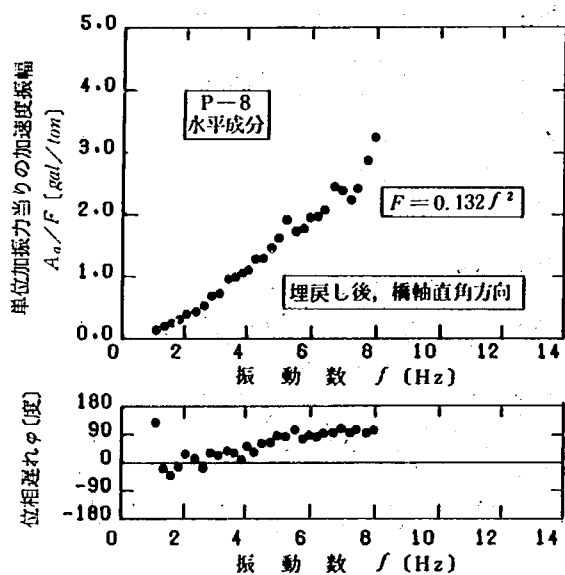


(b) P-6点 (上下成分)

付図 3.3 (3) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-2, $F = 0.132 f^2$)

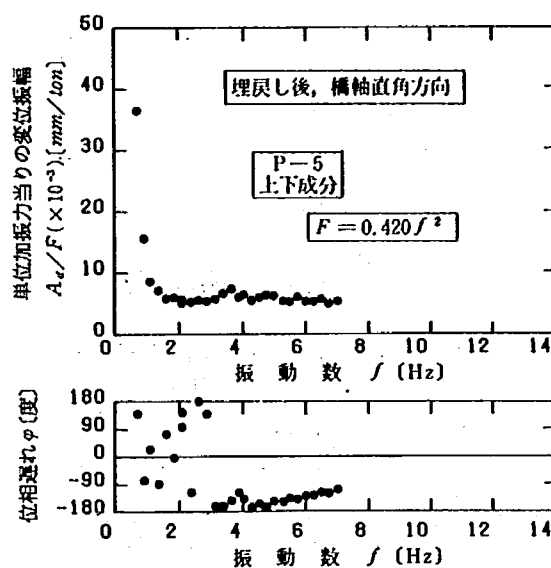
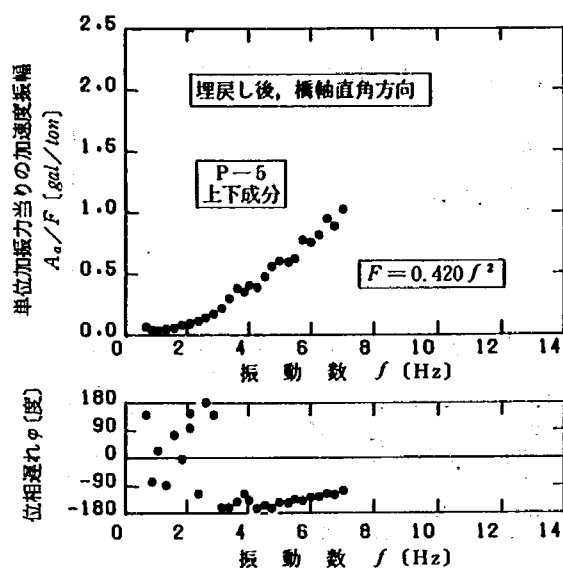


(c) P-7点 (水平成分)

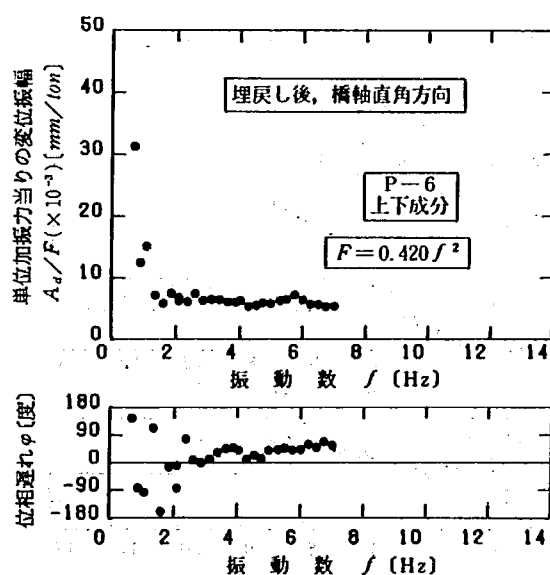
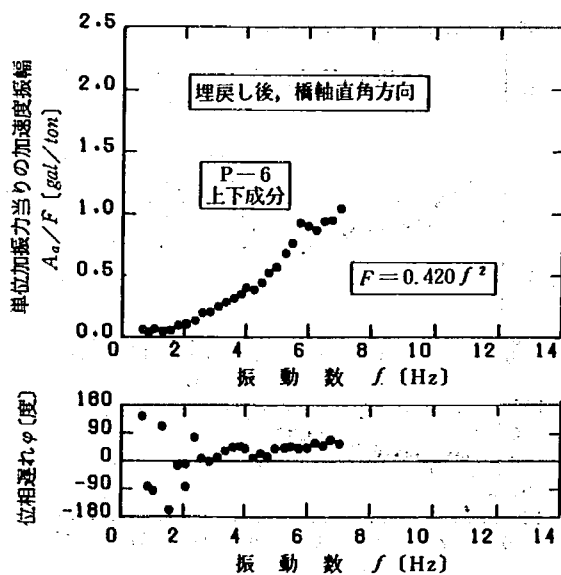


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.3 (4) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-2, $F = 0.132 f^2$)

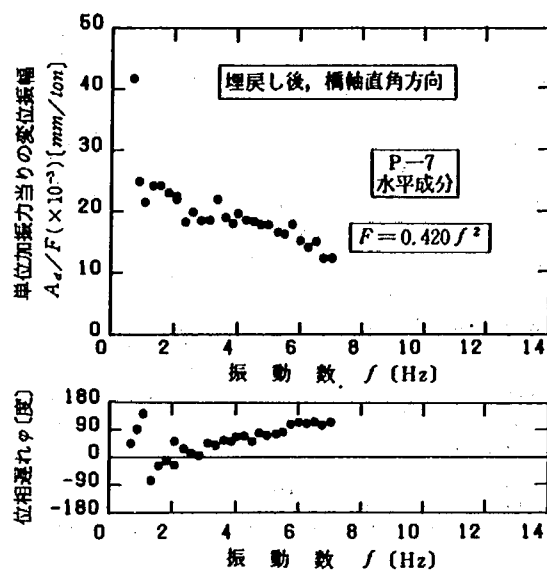
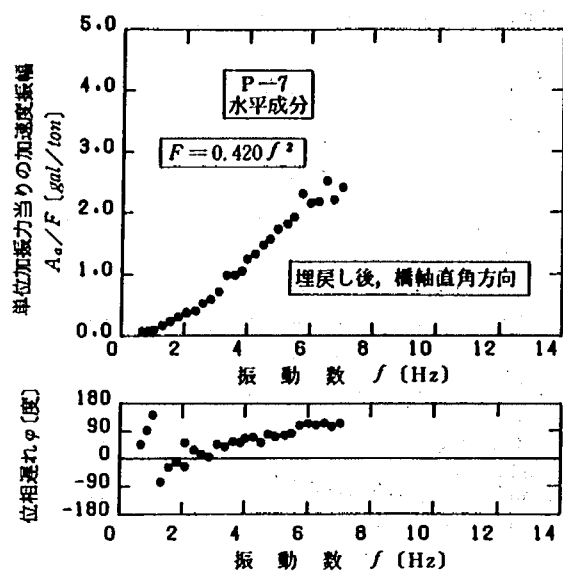


(a) P-5点 (上下成分)

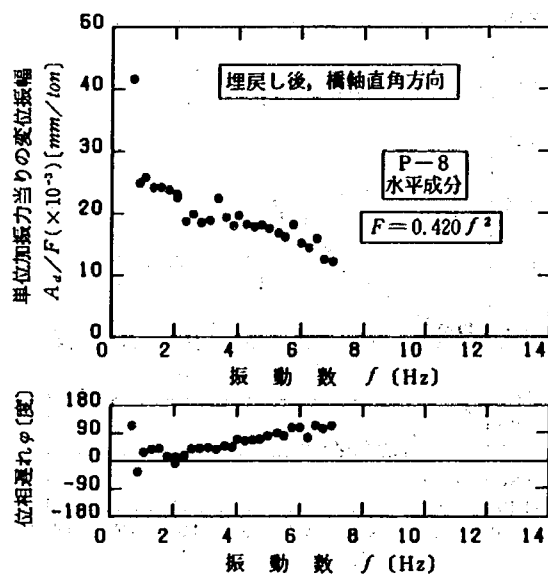
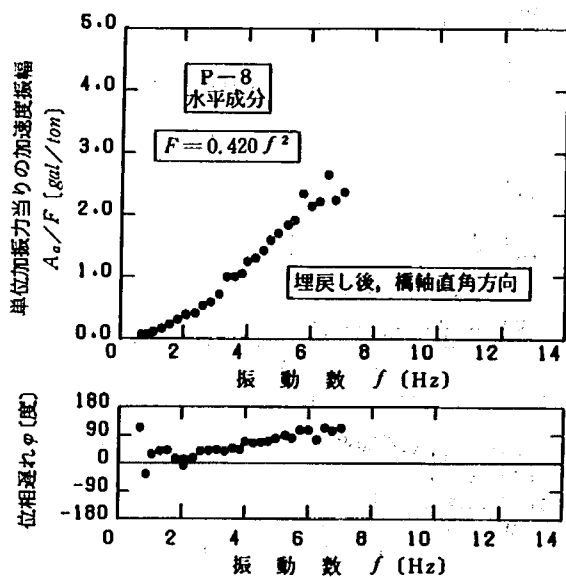


(b) P-6点 (上下成分)

付図 3.3(5) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)

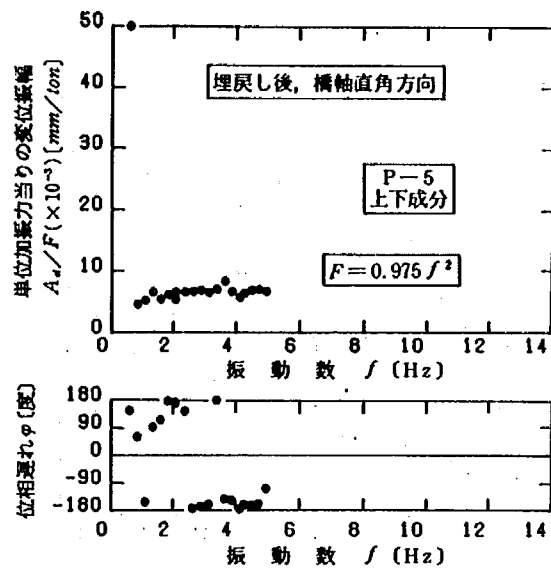
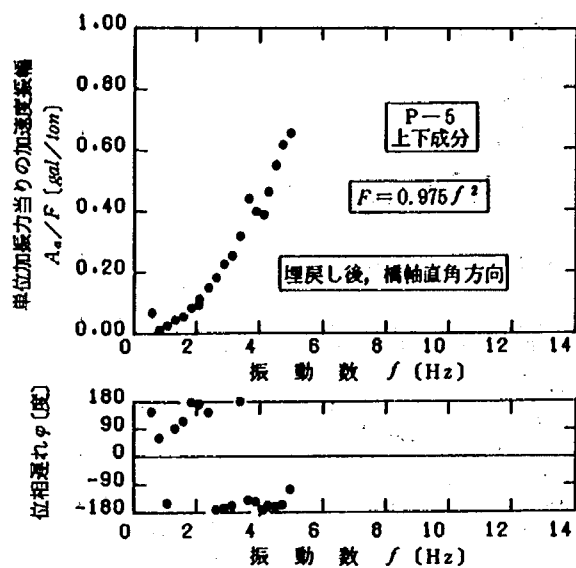


(c) P-7 点 (水平成分)

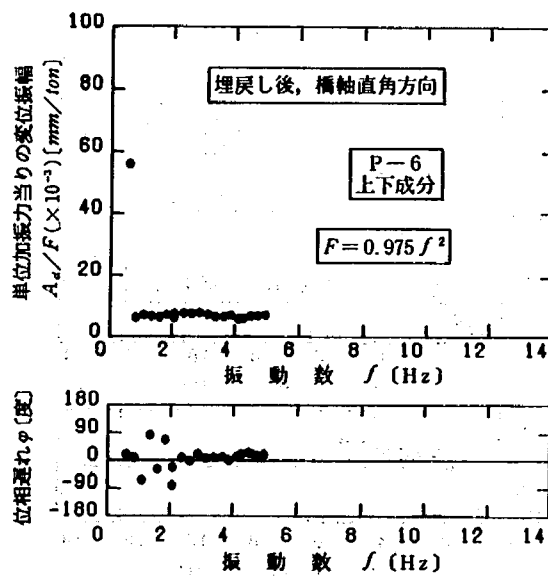
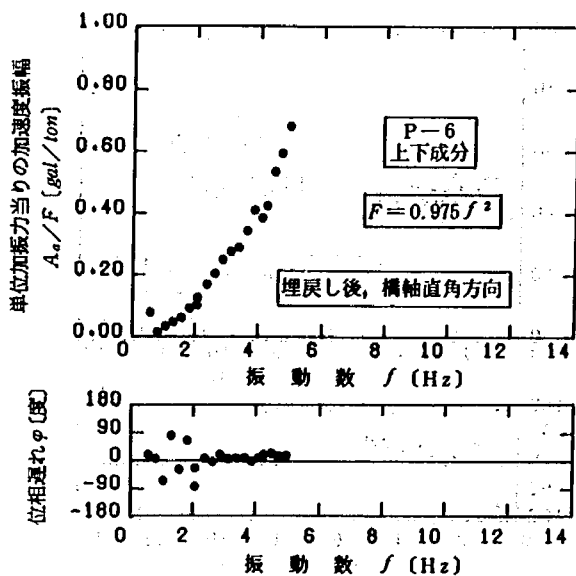


(d) P-8 点 (水平成分)

付図 3.3 (6) 埋戻し後, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)



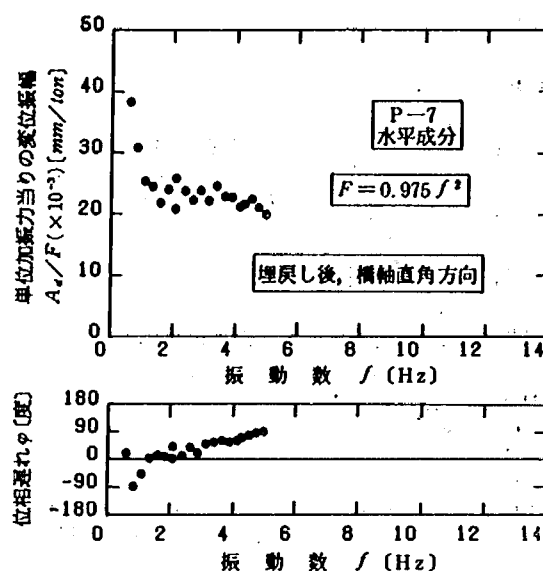
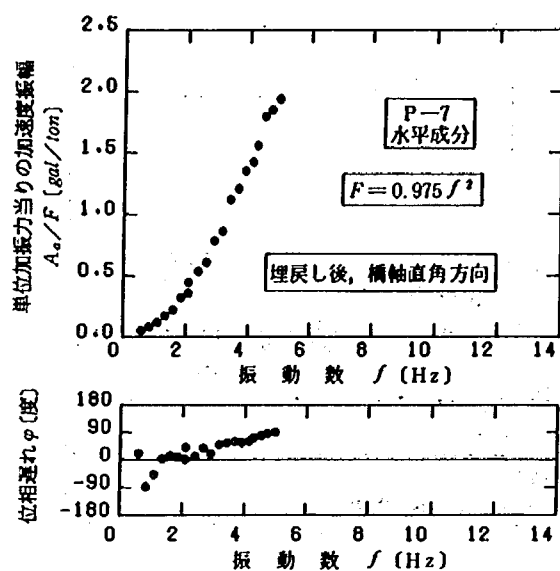
(a) P-6点 (上下成分)



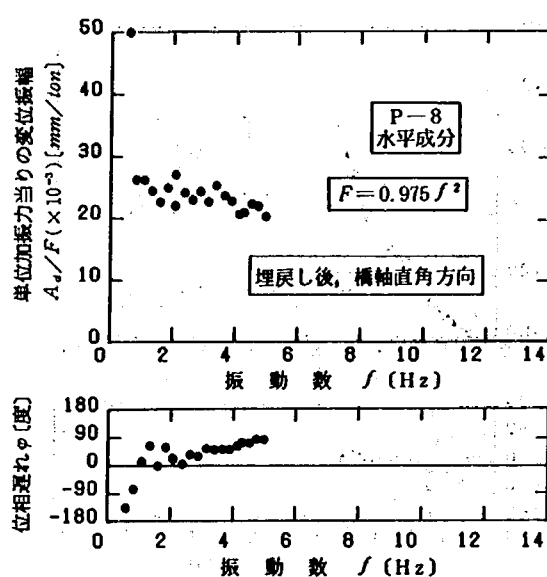
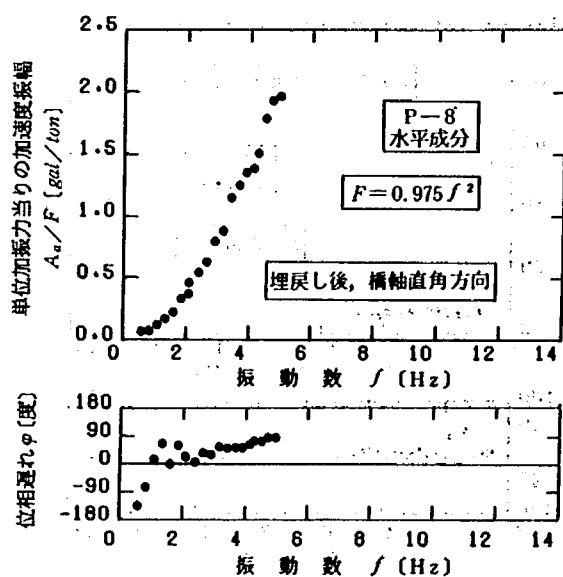
(b) P-6点 (上下成分)

付図 3.3 (7) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース C-4, $F = 0.975 f^2$)

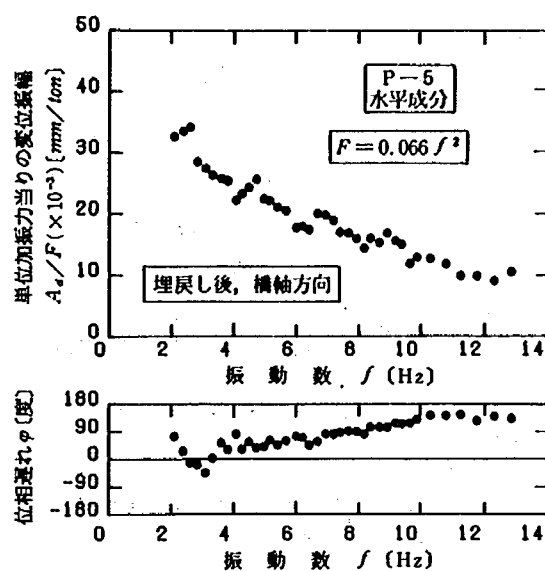
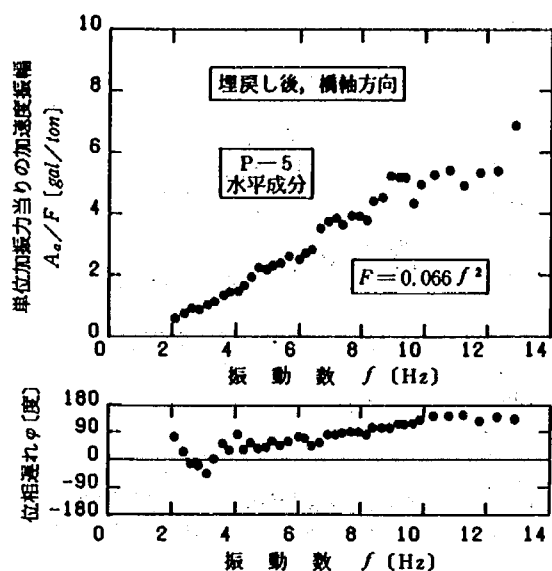


(c) P-7点 (水平成分)

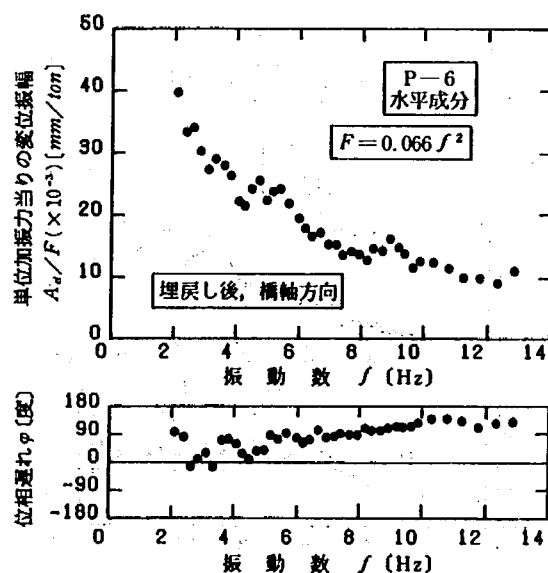
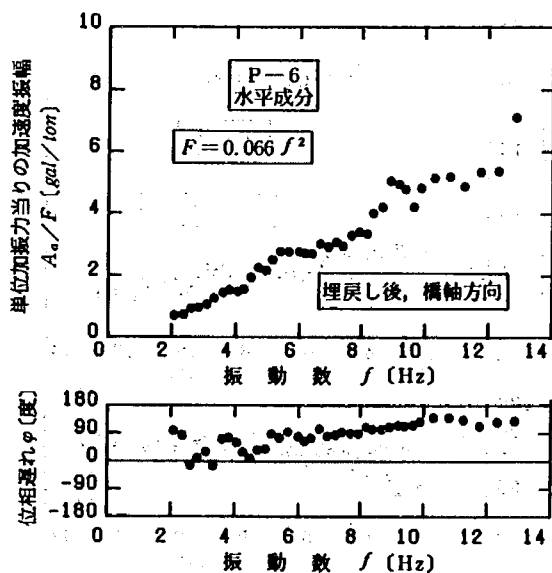


(d) P-8点 (水平成分)

付図 3.3 (8) 埋戻し後, 橋軸直角方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース C-4, $F=0.975 f^2$)

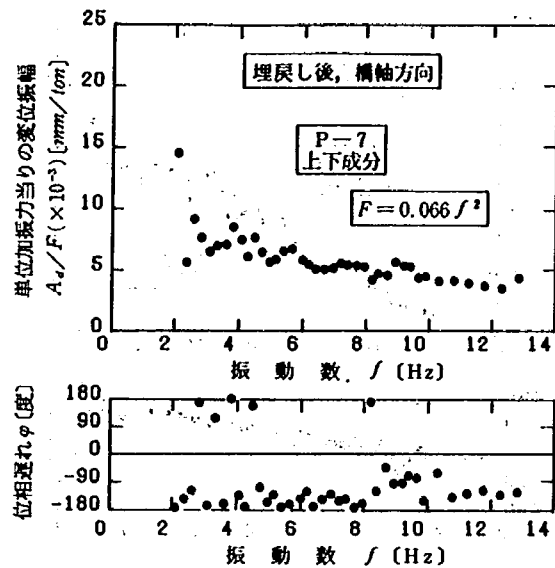
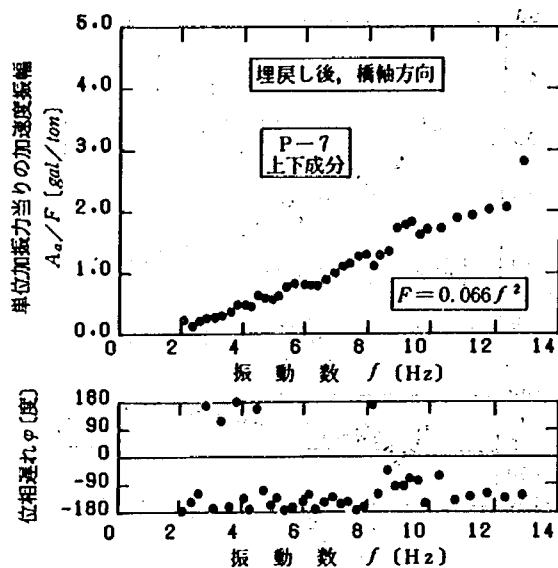


(a) P-5点 (水平成分)

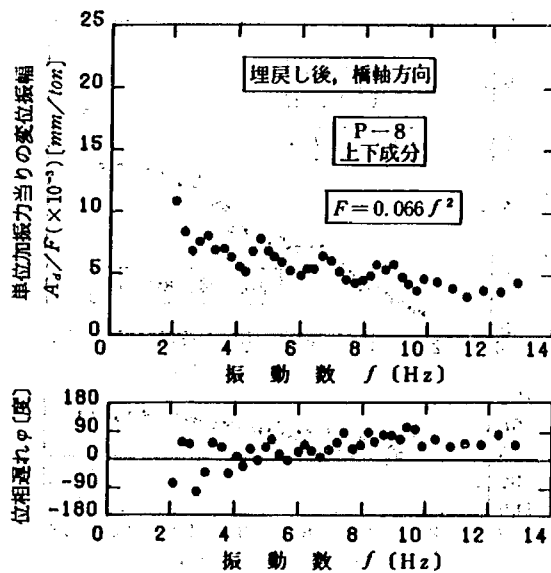
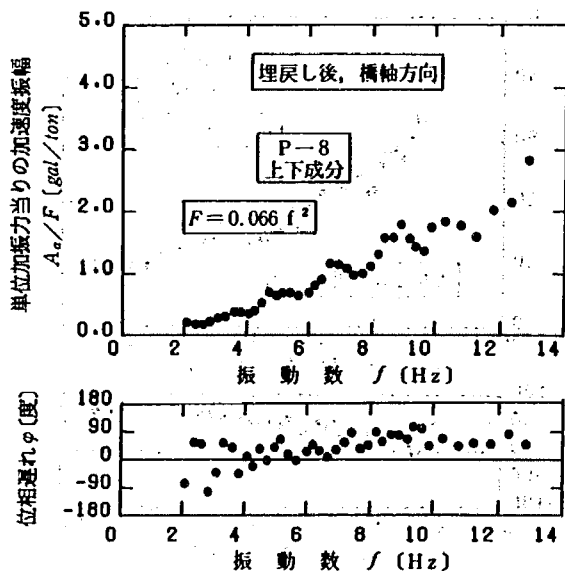


(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4(1) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-1, $F=0.066 f^2$)

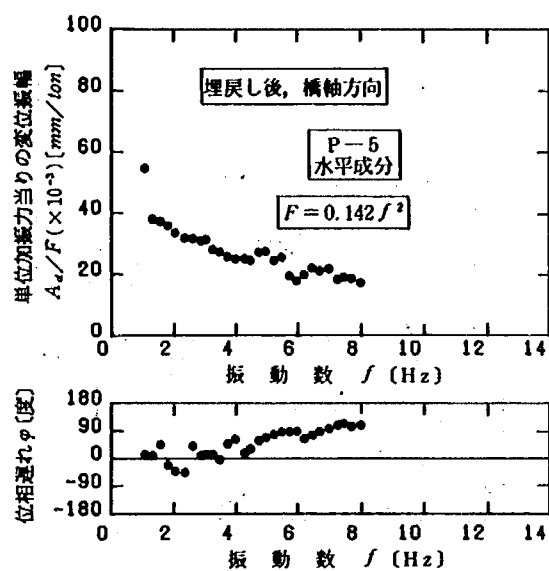
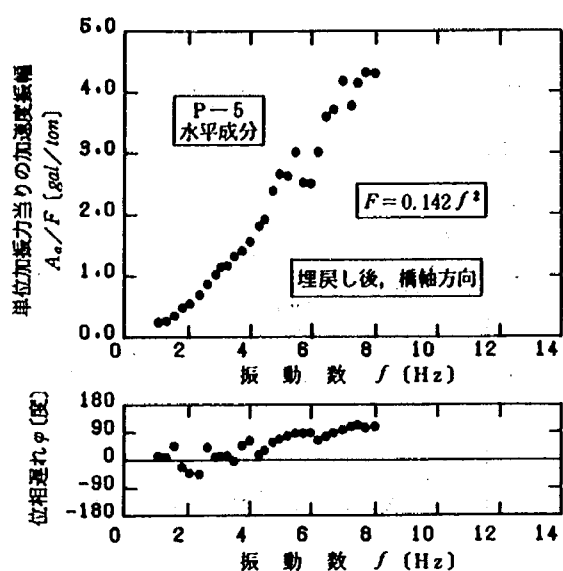


(c) P-7点 (上下成分)

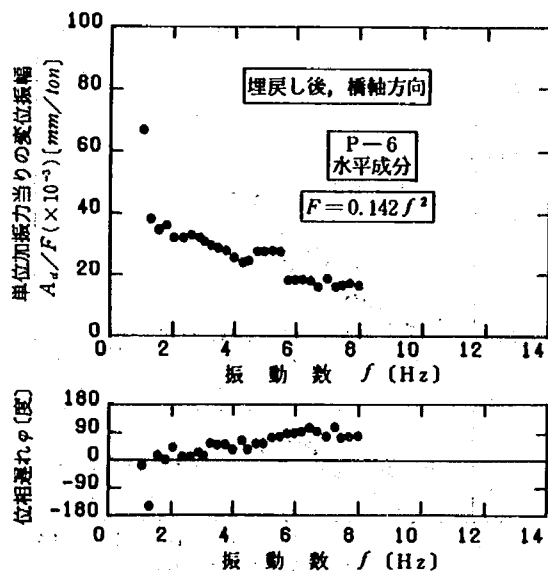
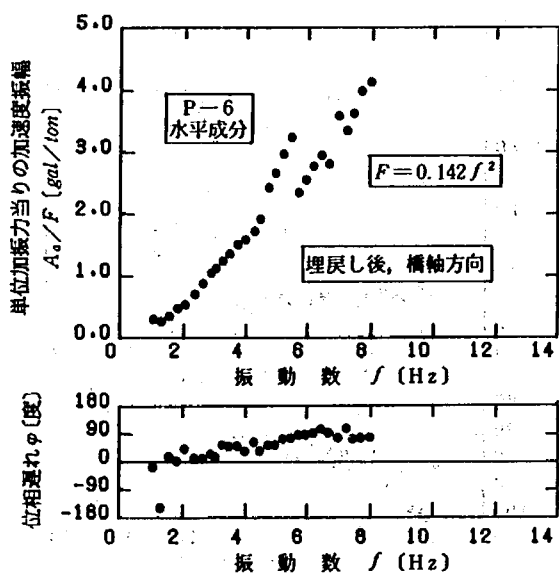


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.4(2) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-1, $F = 0.066 f^2$)

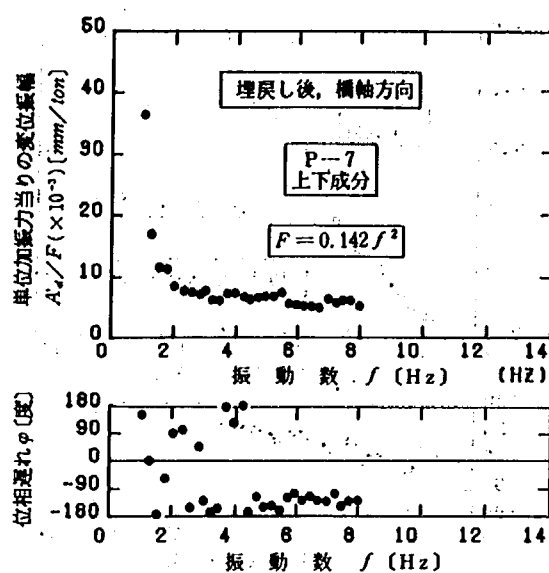
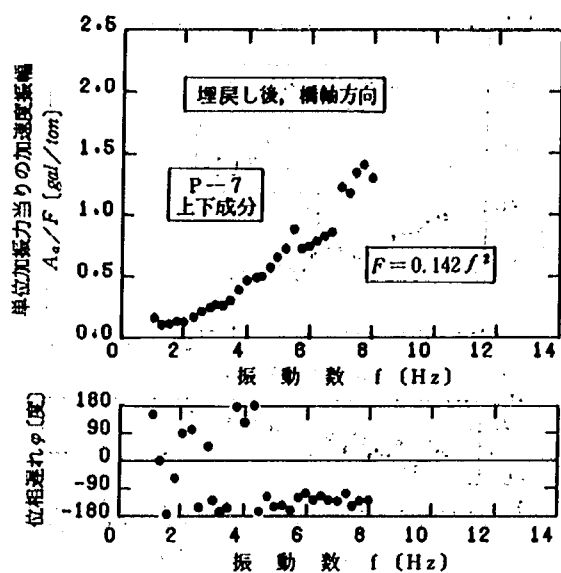


(a) P-5点 (水平成分)

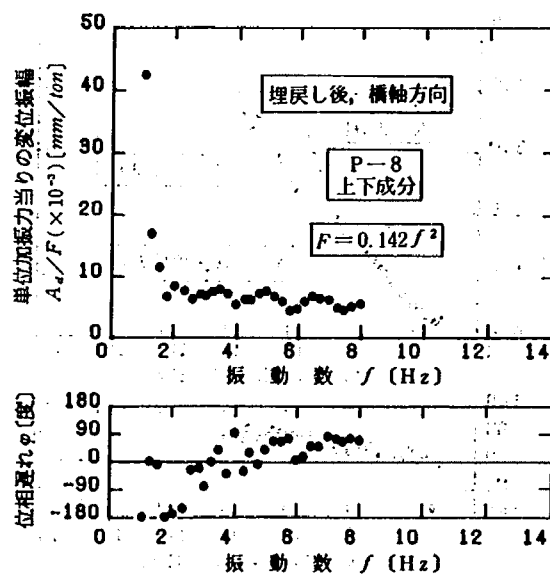
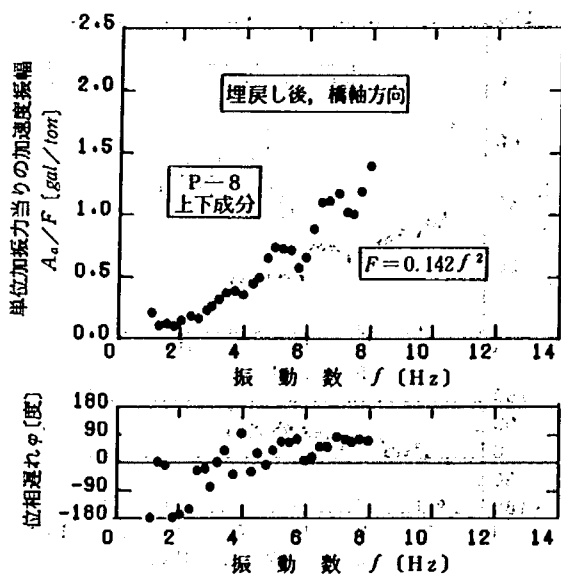


(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4(3) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-2, $F=0.142 f^2$)



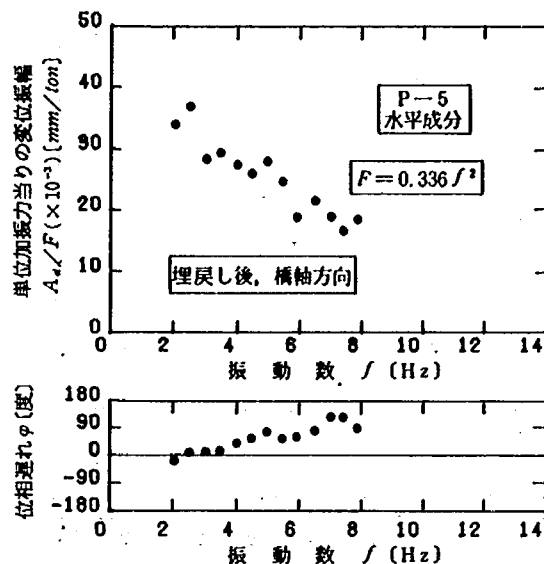
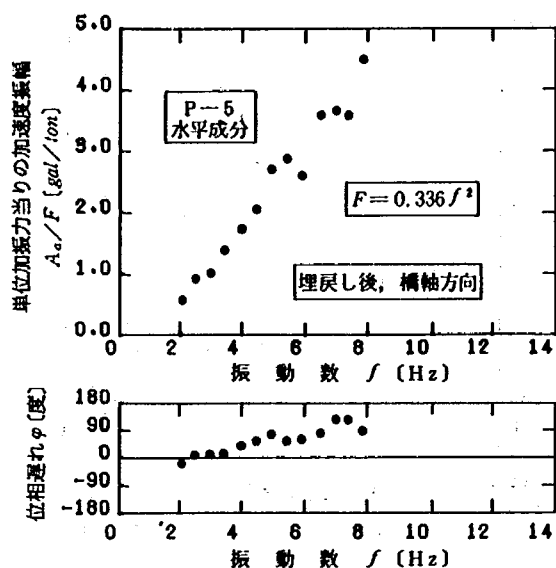
(c) P-7点 (上下成分)



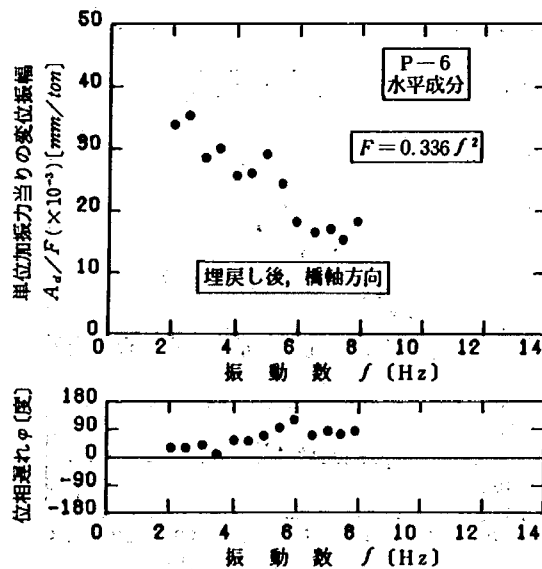
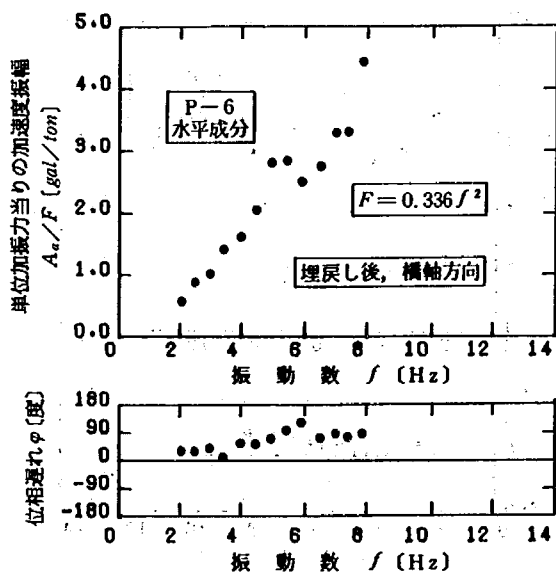
(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.4(4) 埋戻し後、橋軸方向のウーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース D-2, $F = 0.142 f^2$)



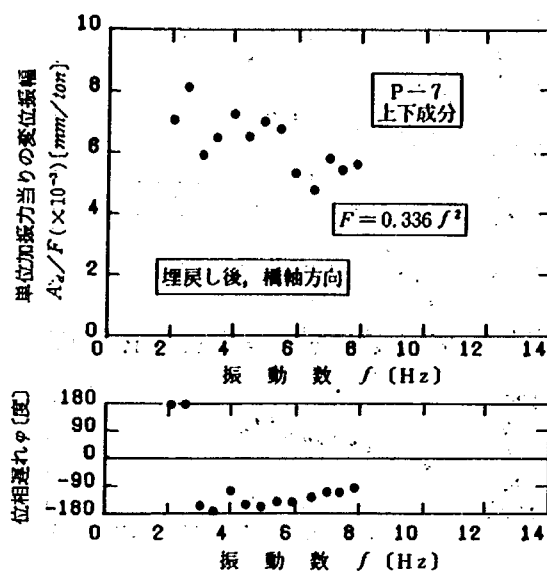
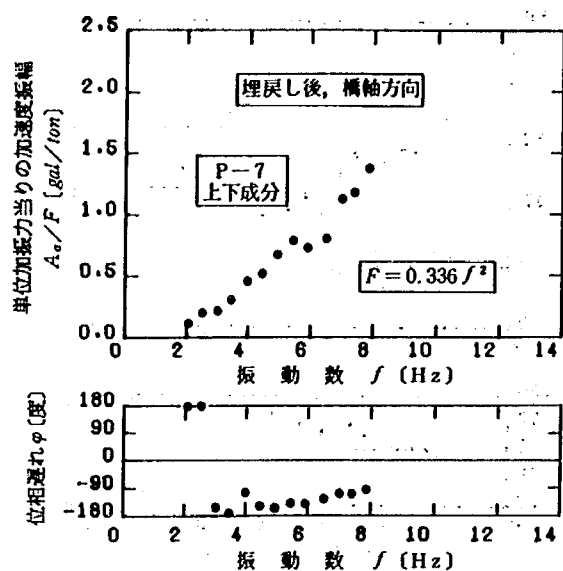
(a) P-5点 (水平成分)



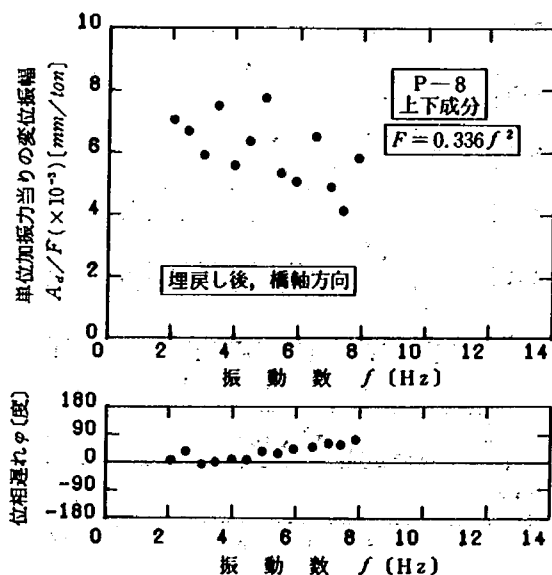
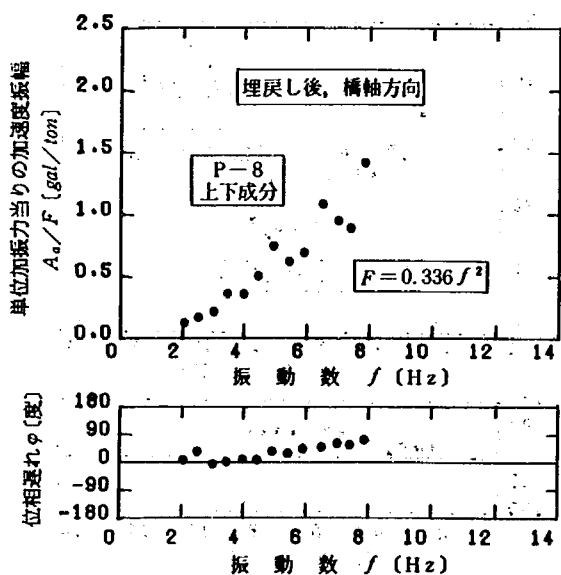
(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4 (5) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース D-3, $F = 0.336 f^2$)

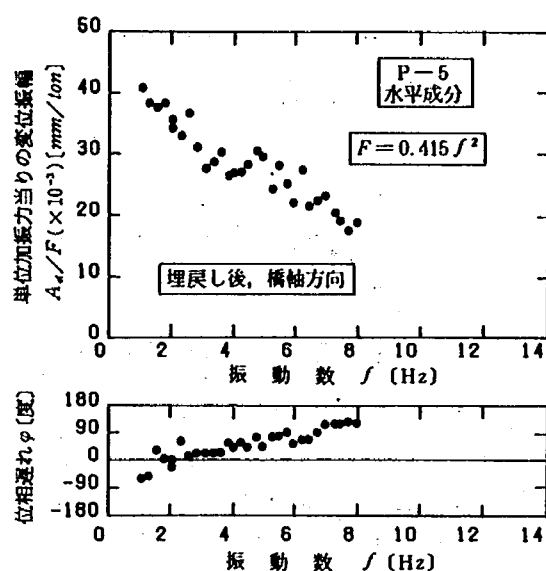
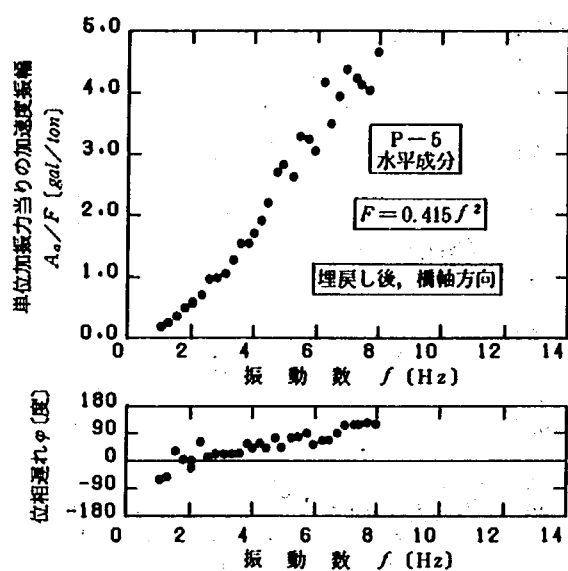


(c) P-7点 (上下成分)

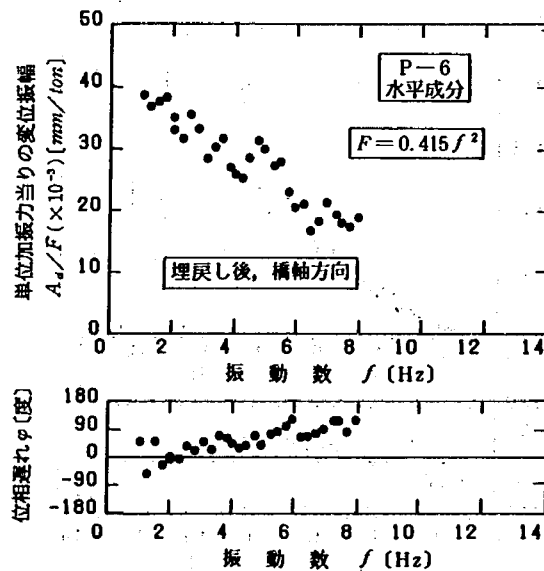
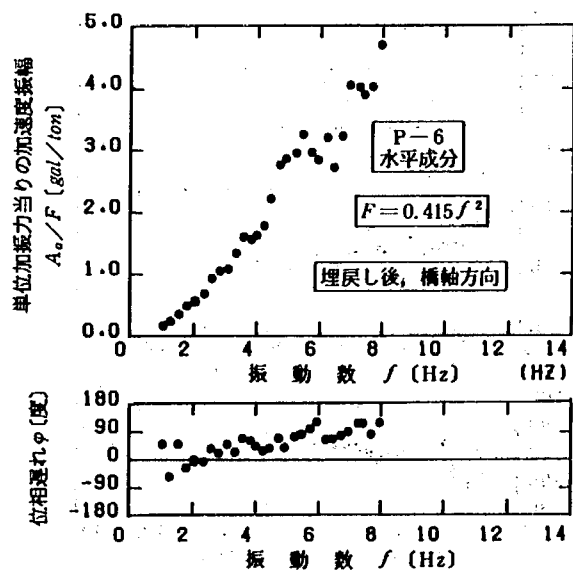


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.4 (6) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-3; $F = 0.336 f^2$)



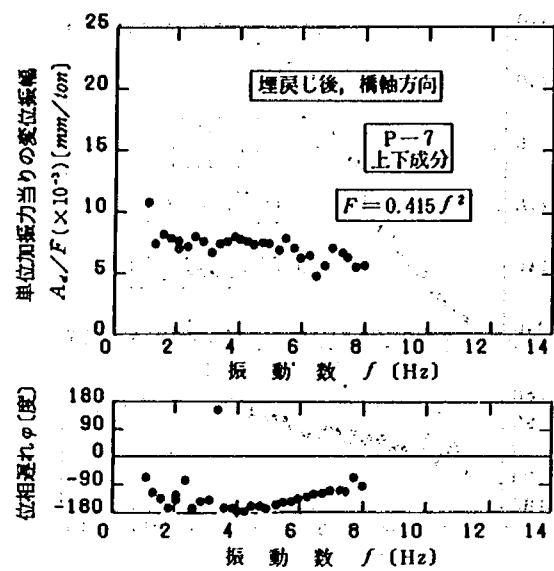
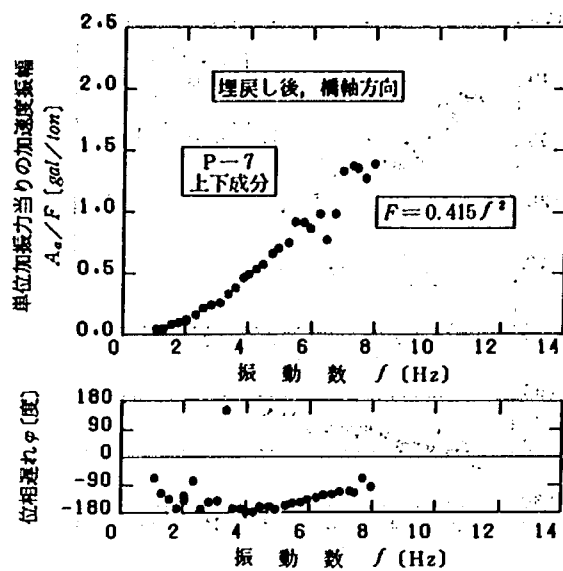
(a) P-5点 (水平成分)



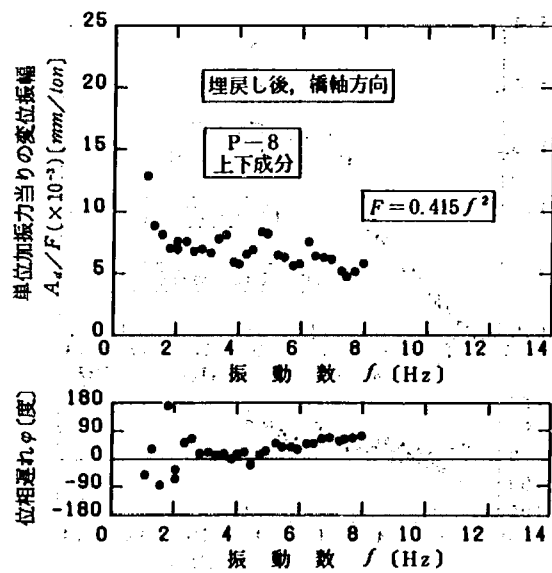
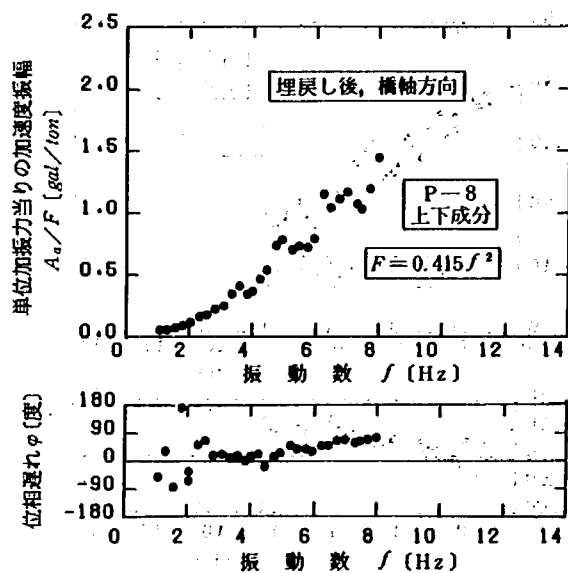
(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4(7) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース: D-4, $F=0.415f^2$)

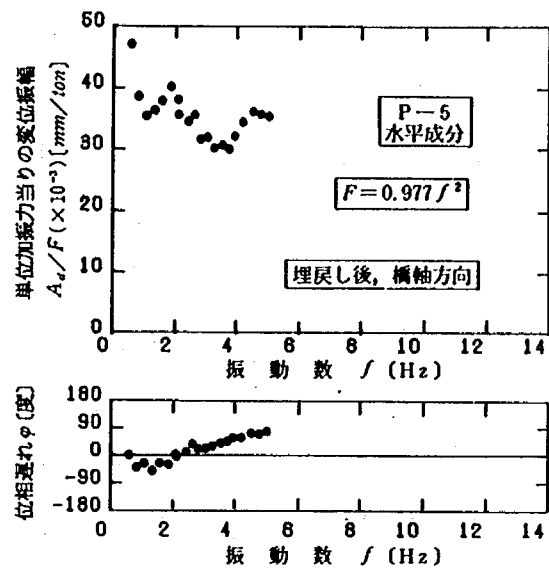
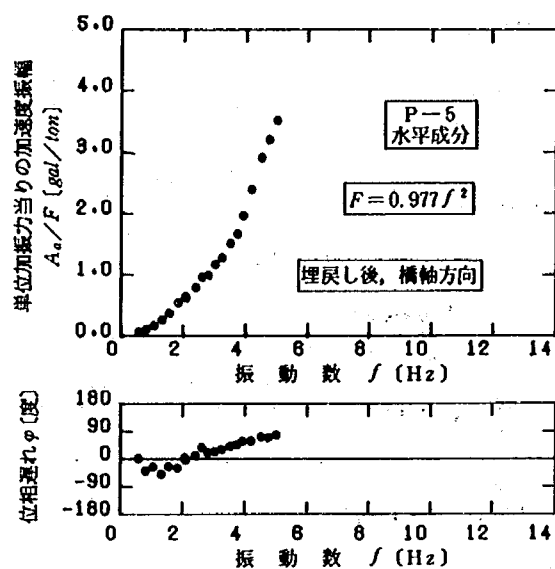


(c) P-7点 (上下成分)

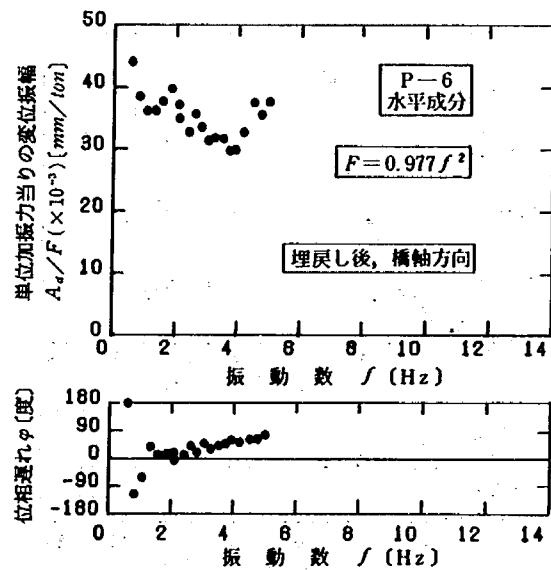
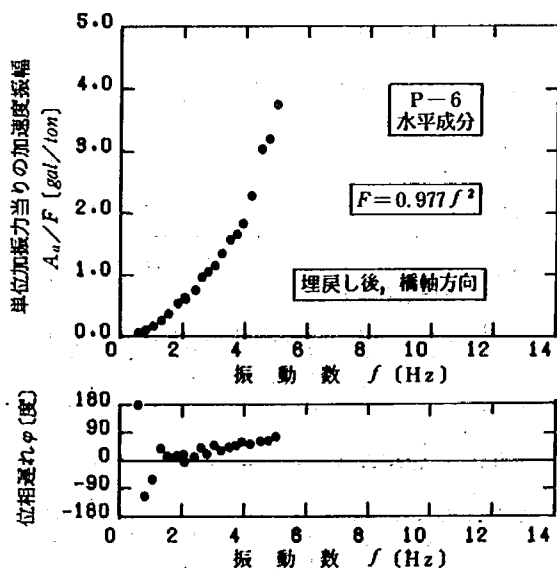


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.4 (8) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-4, $F = 0.415 f^2$)



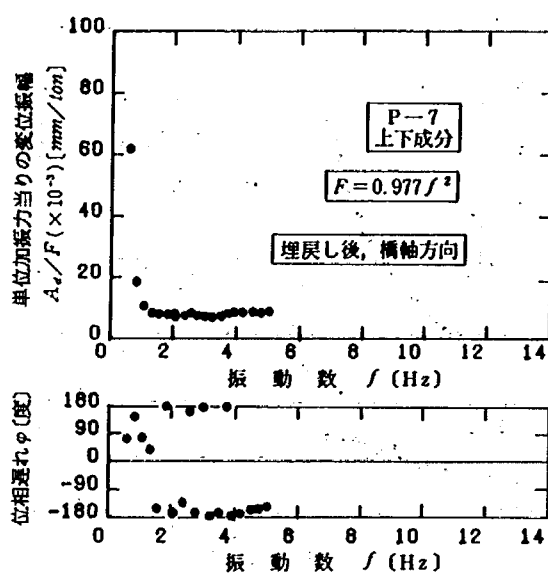
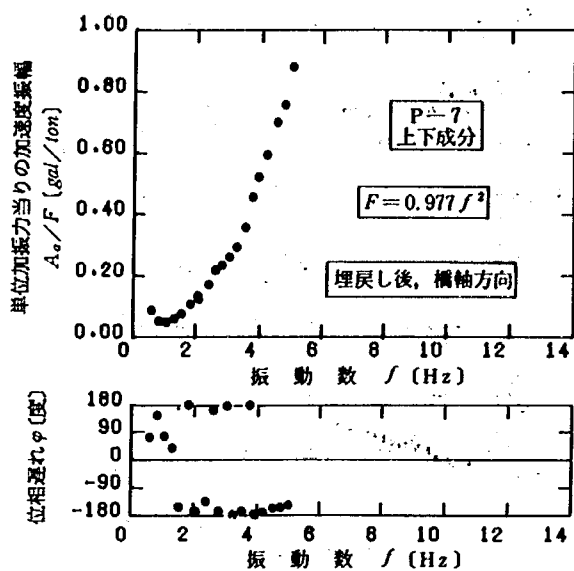
(a) P-5点 (水平成分)



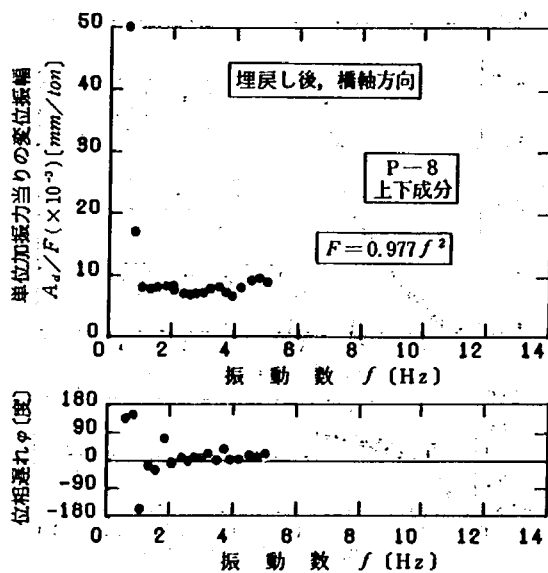
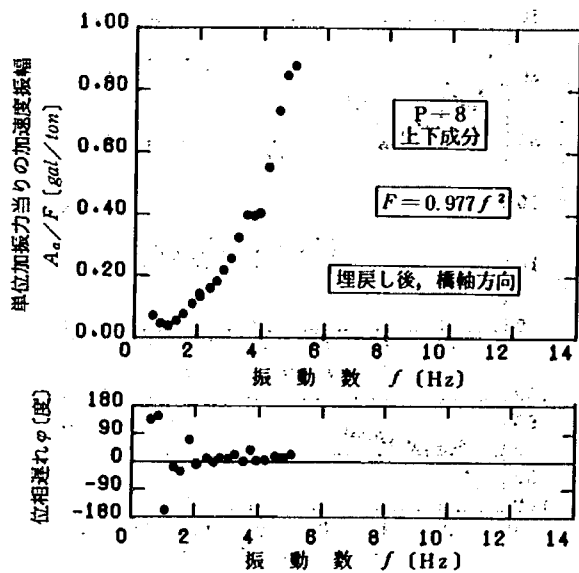
(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4 (9) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線

(実験ケース D-5, $F=0.977f^2$)

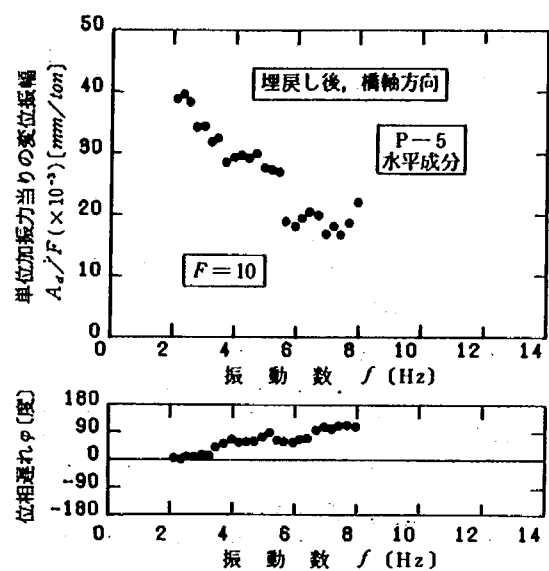
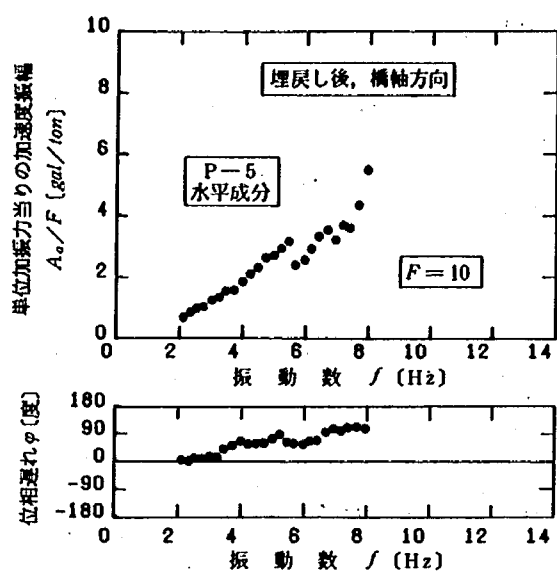


(c) P-7 (上下成分)

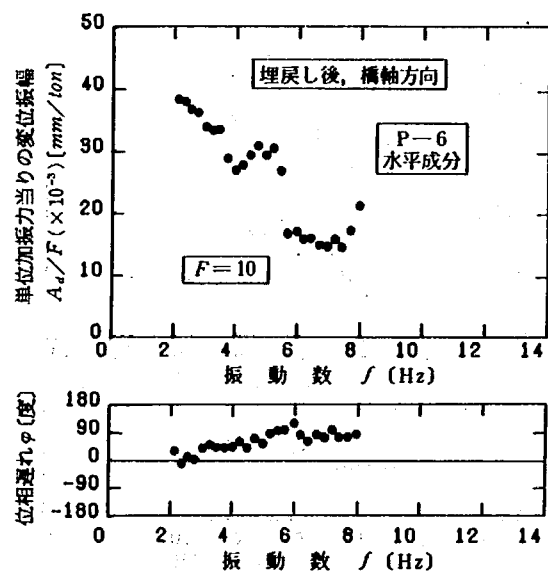
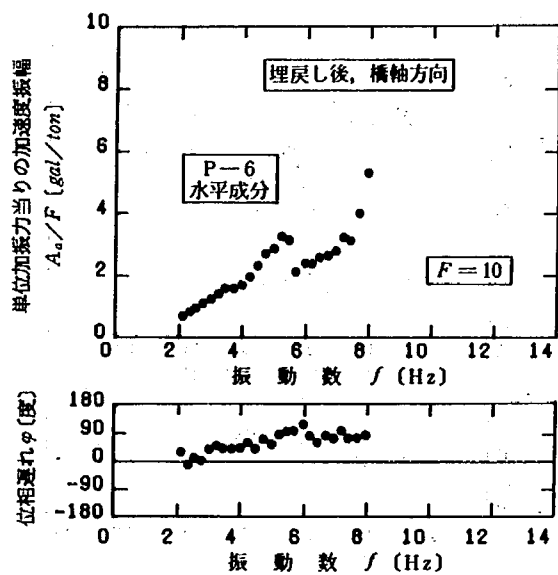


(d) P-8点 (上下成分)

付図 3.4 (10) 埋戻し後、橋軸方向のワーチング天端計測点の共振曲線
(実験ゲース D=5, $F = 0.977 f^2$)

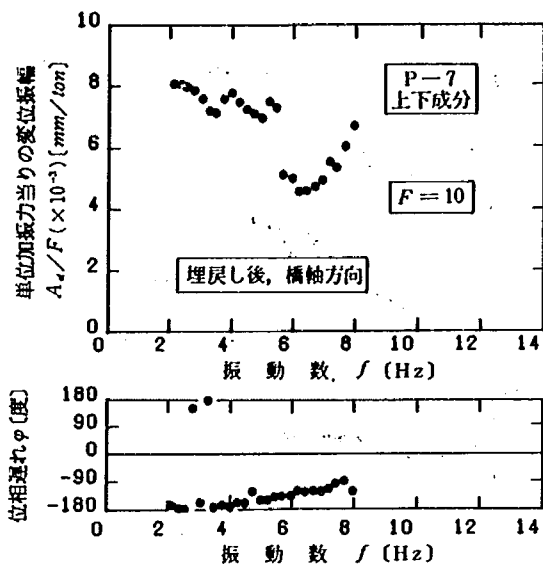
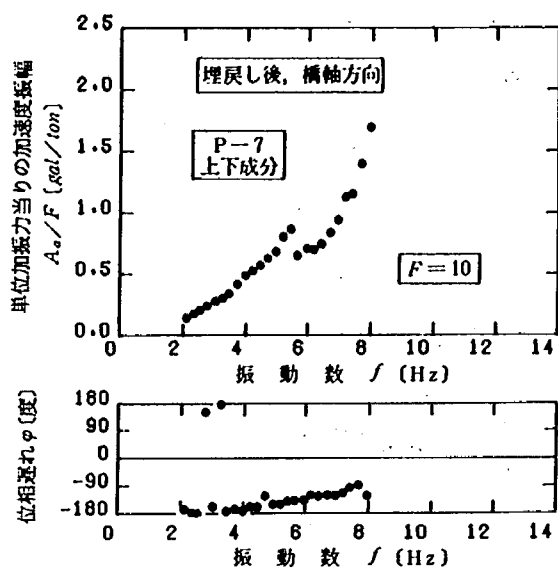


(a) P-5点 (水平成分)

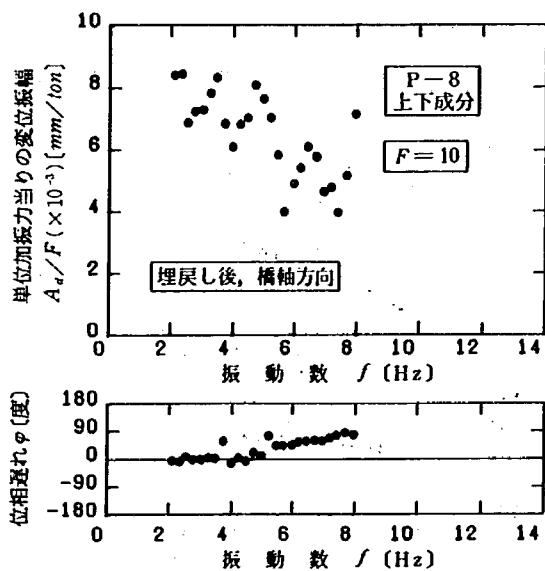
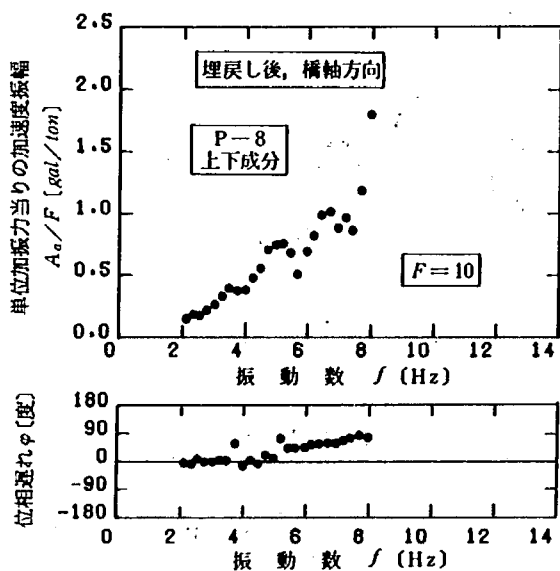


(b) P-6点 (水平成分)

付図 3.4 (II) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線)
(実験ケース D-6, $F=10$)



(c) P-7 点 (上下成分)



(d) P-8 点 (上下成分)

付図 3.4 (12) 埋戻し後, 橋軸方向のフーチング天端計測点の共振曲線
(実験ケース D-6, $F=10$)

付 属 資 料 4

$1/\sqrt{2}$ 法による減衰定数の算定

作 品 集 覧

秋の紅葉と冬の雪

4. $1/\sqrt{2}$ 法による減衰定数の算定

付図 4.1 に示すように、単位加振力当りの変位共振曲線の共振円振動数を ω_p 、共振変位振幅を A_p とする。また、 A_p の $1/\sqrt{2}$ の振幅を示す円振動数を ω_1 および ω_2 として、 $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ とする。ここで、 h が $1/\sqrt{2}$ より十分に小さいとすれば、 ω_p は固有円振動数 ω_0 にほぼ等しく、また、 ω_1 および ω_2 は近似的に次のように表される。

$$\begin{aligned}\omega_1 &\approx \omega_p - \frac{\Delta\omega}{2} \\ &\approx \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}\end{aligned}\quad (\text{付 4.1})$$

$$\begin{aligned}\omega_2 &\approx \omega_p + \frac{\Delta\omega}{2} \\ &\approx \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}\end{aligned}\quad (\text{付 4.2})$$

したがって、

$$\begin{aligned}1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 &= 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 \\ &\approx 1 - \left(1 - \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) \\ &= \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\end{aligned}\quad (\text{付 4.3})$$

式 (付 4.3) を式 (付 2.13) に代入して、 $\omega_1 \approx \omega_0$ とすれば、円振動数 ω_1 の時の変位振幅 $A_p/\sqrt{2}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\frac{A_p}{\sqrt{2}} &\approx \frac{1}{m\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2}} \\ &\approx \frac{1}{m\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2}}\end{aligned}\quad (\text{付 4.4})$$

また、上式の関係は円振動数 ω_2 の時にも同様に成り立つ。

一方、式 (付 2.13) に $\omega = \omega_p \approx \omega_0$ を代入すれば、共振振幅 A_p は次のように表される。

$$A_p \approx \frac{1}{m\omega_0^2} \frac{1}{2h}\quad (\text{付 4.5})$$

式 (付 4.5) を式 (付 4.4) に代入して、

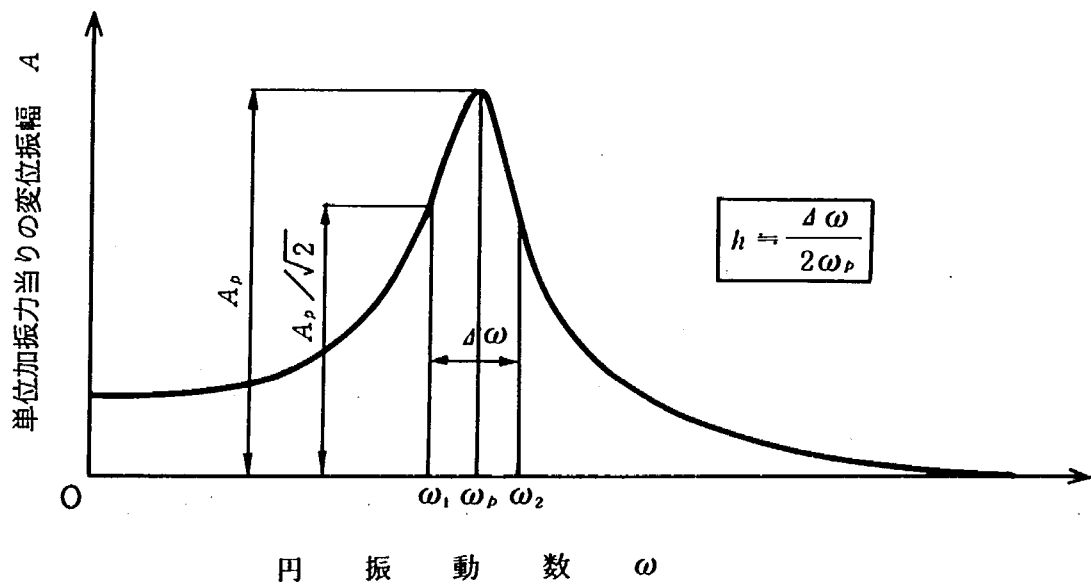
$$\frac{1}{2\sqrt{2}h} \approx \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2}}\quad (\text{付 4.6})$$

上式を変形すると、次のようになる。

$$8h^2 \approx \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + 4h^2 \quad (\text{付 4.7})$$

したがって、式（付 4.7）より減衰定数 h は次のように求められる。

$$\begin{aligned} h &\approx \frac{\Delta\omega}{2\omega_0} \\ &\approx \frac{\Delta\omega}{2\omega_p} \end{aligned} \quad (\text{付 4.8})$$



付図 4.1 $1/\sqrt{2}$ 法による減衰定数の算出

付 属 資 料 5

動的ばね定数および減衰定数の検討

0. 0. 0. 0. 0.

1980年1月1日

2. *How do you think the world will be in 20 years?*

5. 動的ばね定数および減衰定数の検討

5.1 フーチング重心位置および杭頭位置における共振曲線

3.4節ではフーチングの並進と回転を分離しなかったが、ここではフーチングの並進と回転を分離したうえでフーチング重心位置および杭頭位置における共振曲線を求めることとする。

1) フーチング天端の水平変位およびフーチングの回転角

いま、付図 5.1 に示すように、フーチング天端の端部の計測点における水平変位を $x_1(t) = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1)$ および $x_2(t) = A_2 \cos(\omega t - \varphi_2)$ とすれば、フーチング天端の中央点の水平変位 $x_u(t)$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} x_u(t) &= \frac{x_1(t) + x_2(t)}{2} \\ &= \frac{A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t - \varphi_2)}{2} \end{aligned} \quad (\text{付 5.1})$$

また、 $x_u(t)$ の変位振幅を A_u 、位相遅れを φ_u とすれば、 $x_u(t)$ は次のように表される。

$$x_u(t) = A_u \cos(\omega t - \varphi_u) \quad (\text{付 5.2})$$

式 (付 5.1) および式 (付 5.2) を等置すると、次のようになる。

$$A_u \cos(\omega t - \varphi_u) = \frac{A_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t - \varphi_2)}{2} \quad (\text{付 5.3})$$

上式を整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \{A_u \cos \varphi_u - \frac{1}{2}(A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2)\} \cos \omega t + \{A_u \sin \varphi_u - \frac{1}{2}(A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2)\} \times \\ \sin \omega t = 0 \end{aligned} \quad (\text{付 5.4})$$

式 (付 5.4) の $\cos \omega t$ および $\sin \omega t$ の係数をともに 0 と置けば、次のようになる。

$$A_u \cos \varphi_u = \frac{1}{2}(A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2) \quad (\text{付 5.5})$$

$$A_u \sin \varphi_u = \frac{1}{2}(A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) \quad (\text{付 5.6})$$

式 (付 5.5) および (付 5.6) より、 A_u および φ_u は次のように求められる。

$$\begin{aligned} A_u &= \frac{1}{2} \sqrt{(A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2)^2 + (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2)^2} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2)} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \end{aligned} \quad (\text{付 5.7})$$

$$\varphi_u = \tan^{-1} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad (\text{付 5.8})$$

次に、フーチングの回転角 $\theta(t)$ は、付図 5.1 に示す距離 L だけ離れたフーチング端部の 2 計測点にお

ける上下変位 $x_3(t) = A_3 \cos(\omega t - \varphi_3)$ および $x_4(t) = A_4 \cos(\omega t - \varphi_4)$ より次のように求められる。

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \frac{x_3(t) - x_4(t)}{L} \\ &= \frac{A_3 \cos(\omega t - \varphi_3) - A_4 \cos(\omega t - \varphi_4)}{L}\end{aligned}\quad (\text{付 5.9})$$

ここで、 $\theta(t)$ の回転振幅を A_θ 、位相遅れを φ_θ とすれば、 $\theta(t)$ は次のように表される。

$$\theta(t) = A_\theta \cos(\omega t - \varphi_\theta) \quad (\text{付 5.10})$$

上述したフーチング天端の水平変位の場合と同様に、式(付 5.9)および(付 5.10)より A_θ および φ_θ は次のように求められる。

$$A_\theta = \frac{1}{L} \sqrt{A_3^2 + A_4^2 - 2A_3A_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4)} \quad (\text{付 5.11})$$

$$\varphi_\theta = \tan^{-1} \frac{A_3 \sin \varphi_3 - A_4 \sin \varphi_4}{A_3 \cos \varphi_3 - A_4 \cos \varphi_4} \quad (\text{付 5.12})$$

なお、 L は橋軸直角方向で 10.65 m、橋軸方向で 3.1 m である。

2) フーチング重心位置および杭頭位置における共振曲線

付図 5.2 に示すように、フーチング重心の水平変位 $x_G(t)$ はフーチング天端の中央点の水平変位 $x_u(t)$ およびフーチングの回転角 $\theta(t)$ より次式のように表される。

$$\begin{aligned}x_G(t) &= x_u(t) - H_1 \sin \theta(t) \\ &\approx x_u(t) - H_1 \theta(t) \\ &= A_u \cos(\omega t - \varphi_u) - H_1 A_\theta \cos(\omega t - \varphi_\theta)\end{aligned}\quad (\text{付 5.13})$$

ここで、 H_1 はフーチング天端から重心までの距離 (= 1.9 (m)) である。また、 $x_G(t)$ の変位振幅を A_G 、位相遅れを φ_G とすれば、 x_G は次のように表される。

$$x_G(t) = A_G \cos(\omega t - \varphi_G) \quad (\text{付 5.14})$$

1) で述べたフーチング天端の水平変位の場合と同様に、式(付 5.13) および(付 5.14) より A_G および φ_G は次のように求められる。

$$A_G = \sqrt{A_u^2 + H_1^2 A_\theta^2 - 2A_u H_1 A_\theta \cos(\varphi_u - \varphi_\theta)} \quad (\text{付 5.15})$$

$$\varphi_G = \tan^{-1} \frac{A_u \sin \varphi_u - H_1 A_\theta \sin \varphi_\theta}{A_u \cos \varphi_u - H_1 A_\theta \cos \varphi_\theta} \quad (\text{付 5.16})$$

フーチング重心の変位と同様に、杭頭の水平変位を $x_p = A_p \cos(\omega t - \varphi_p)$ とすれば、 A_p および φ_p は次のように求められる。

$$A_p = \sqrt{A_u^2 + H_2^2 A_\theta^2 - 2A_u H_2 A_\theta \cos(\varphi_u - \varphi_\theta)} \quad (\text{付 5.17})$$

$$\varphi_p = \tan^{-1} \frac{A_u \sin \varphi_u - H_2 A_\theta \sin \varphi_\theta}{A_u \cos \varphi_u - H_2 A_\theta \cos \varphi_\theta} \quad (\text{付 5.18})$$

式 (付 5.7), (付 5.8), (付 5.15), (付 5.16), (付 5.17), (付 5.18), (付 5.11) および (付 5.12) よりフーチング天端, フーチング重心位置および杭頭位置における水平変位とフーチングの回転角の共振曲線および位相曲線の例を示すと, 付図 5.3 ~ 5.6 のようになる。ただし, ここでは表 2.2 に示した設定加振力 $F = 0.424 f^2$ に対応する実験ケース A-5, B-3, C-3 および D-4 の結果のみを示す

(全実験ケースの結果は付属資料 6 に示す)。加振力 1 ton 当りの最大回転角は, 周辺土埋戻し前, 橋軸直角方向加振で 3×10^{-6} rad, 埋戻し前, 橋軸方向加振で 20×10^{-6} rad, 埋戻し後, 橋軸直角方向加振で 1.5×10^{-6} rad および埋戻し後, 橋軸方向加振で 6×10^{-6} rad 程度であり, いずれの場合においても非常に小さい。また, フーチング重心位置および杭頭位置における共振曲線はフーチング天端における共振曲線に類似している。以上より, フーチングの振動は 1 自由度系の水平振動で近似してもよいと考えられる。

5.2 動的ばね定数および減衰定数の算出方法

前節で示したように, フーチングの運動を 1 自由度系の水平振動とみなすと, 外力を F とすれば, その運動方程式はフーチング重心の水平変位 x_G を用いて次のように表される。

$$m \ddot{x}_G + c \dot{x}_G + k x_G = F \quad (\text{付 5.19})$$

ここで, m, c および k は, それぞれ, 質量, 減衰係数およびばね定数である。ただし, c および k は振動数に依存するものとする。また, x_G の複素振幅および位相遅れを, それぞれ, A_G および φ_G とし, F の複素振幅を F_0 とすれば, x_G および F は次のように表される。

$$x_G = A_G e^{i(\omega t - \varphi_G)} \quad (\text{付 5.20})$$

$$F = F_0 e^{i\omega t} \quad (\text{付 5.21})$$

ここで, ω は外力の円振動数である。式 (付 5.20) および (付 5.21) を式 (付 5.19) に代入すると, 次のようになる。

$$-\omega^2 m A_G e^{i(\omega t - \varphi_G)} + i\omega c A_G e^{i(\omega t - \varphi_G)} + k A_G e^{i(\omega t - \varphi_G)} = F_0 e^{i\omega t} \quad (\text{付 5.22})$$

式 (付 5.22) を整理すると, 次のようになる。

$$-\omega^2 m A_G + i\omega c A_G + k A_G = F_0 e^{i\varphi_G} \quad (\text{付 5.23})$$

上式を実部と虚部に分けて整理すると, 次式のようなになる。

$$\{(-\omega^2 m + k) A_G - F_0 \cos \varphi_G\} + i(\omega c A_G - F_0 \sin \varphi_G) = 0 \quad (\text{付 5.24})$$

式 (付 5.24) の実部および虚部の係数をともに 0 と置けば, 次のようになる。

$$(-\omega^2 m + k) A_G - F_0 \cos \varphi_G = 0 \quad (\text{付 5.25})$$

$$\omega c A_G - F_0 \sin \varphi_G = 0 \quad (\text{付 5.26})$$

式 (付 5.25) より, ばね定数 k は次のように求められる。

$$k = \omega^2 m + \frac{F_0}{A_G} \cos \varphi_G \quad (\text{付 5.27})$$

式 (付 5.26) より、減衰係数 c は次のように表される。

$$c = \frac{F_0}{\omega A_G} \sin \varphi_G \quad (\text{付 5.28})$$

また、減衰定数 h は次式で求められる。

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (\text{付 5.29})$$

ここで、 k および c は、それぞれ、式 (付 5.27) および (付 5.28) で与えられる。

5.3 地盤部有効質量の検討

フーチング—杭系が振動する際には、フーチング直下の地盤には杭と一体となって運動する部分があると考えられるが、現状ではどの範囲の地盤が杭と一体となって運動するかを定めることは難しい。そこで、次節以降の解析においては、地盤の質量をまったく考慮しない場合と杭に囲まれた範囲の地盤の質量をすべて考慮する場合の両者の場合について、動的ばね定数および減衰定数の変位振幅および振動数依存性を検討することとする。

地盤の質量をまったく考慮しない場合は、式 (付 5.19) の m はフーチング躯体質量 (= 26.2 (ton sec²/m)) である。また、杭に囲まれた範囲の地盤の質量をすべて考慮する場合には有効質量は $m = 41.4$ (ton sec²/m) (算出方法は付属資料 7 参照) となる。なお、この場合の有効質量の重心の位置は杭頭位置とする。

5.4 動的ばね定数および減衰定数の変位振幅依存性

フーチング躯体質量のみを有効質量と考える場合および杭に囲まれた範囲の地盤の質量も有効質量とする場合について、実験ケースごとにばね定数と加振振動数の関係を示すと、付図 5.7 のようになる。同様に、実験ケースごとに減衰定数と加振振動数の関係を示すと、付図 5.8 のようになる。付図 5.7 より、振動数ごとにばね定数と杭頭変位振幅の関係を求めると、付図 5.9 に示すようになる。なお、参考のために付図 5.9(1)には静的載荷試験によるばね定数と変位振幅の関係も示している。付図 5.9 よりフーチング躯体質量のみを有効質量とする場合には、ばね定数は変位振幅が大きくなると減少すること、また、振動数が高いほどばね定数は小さいことがわかる。この傾向は、静的ばね定数を振動数 0 の時のばね定数と考えれば、静的ばね定数についても当てはまる。また、杭に囲まれた範囲の地盤の質量も有効質量とする場合にも、ばね定数は変位振幅が大きくなると減少することがわかる。ただし、変位振幅が小さい範囲では振動数が高いほどばね定数は大きく、静的ばね定数を振動数 0 の時のばね定数とみなすと、矛盾が生じることになる。

次に、付図 5.8 より振動数ごとに減衰定数と杭頭変位振幅の関係を求めると、付図 5.10 に示すように

なる。付図 5.10 からわかるように、フーチング躯体質量のみを有効質量とする場合および杭に囲まれた範囲の地盤の質量も有効質量とする場合のどちらについても、データはかなりばらついているが、大局的に見れば、減衰定数は変位振幅が大きくなると増加する傾向が認められる。

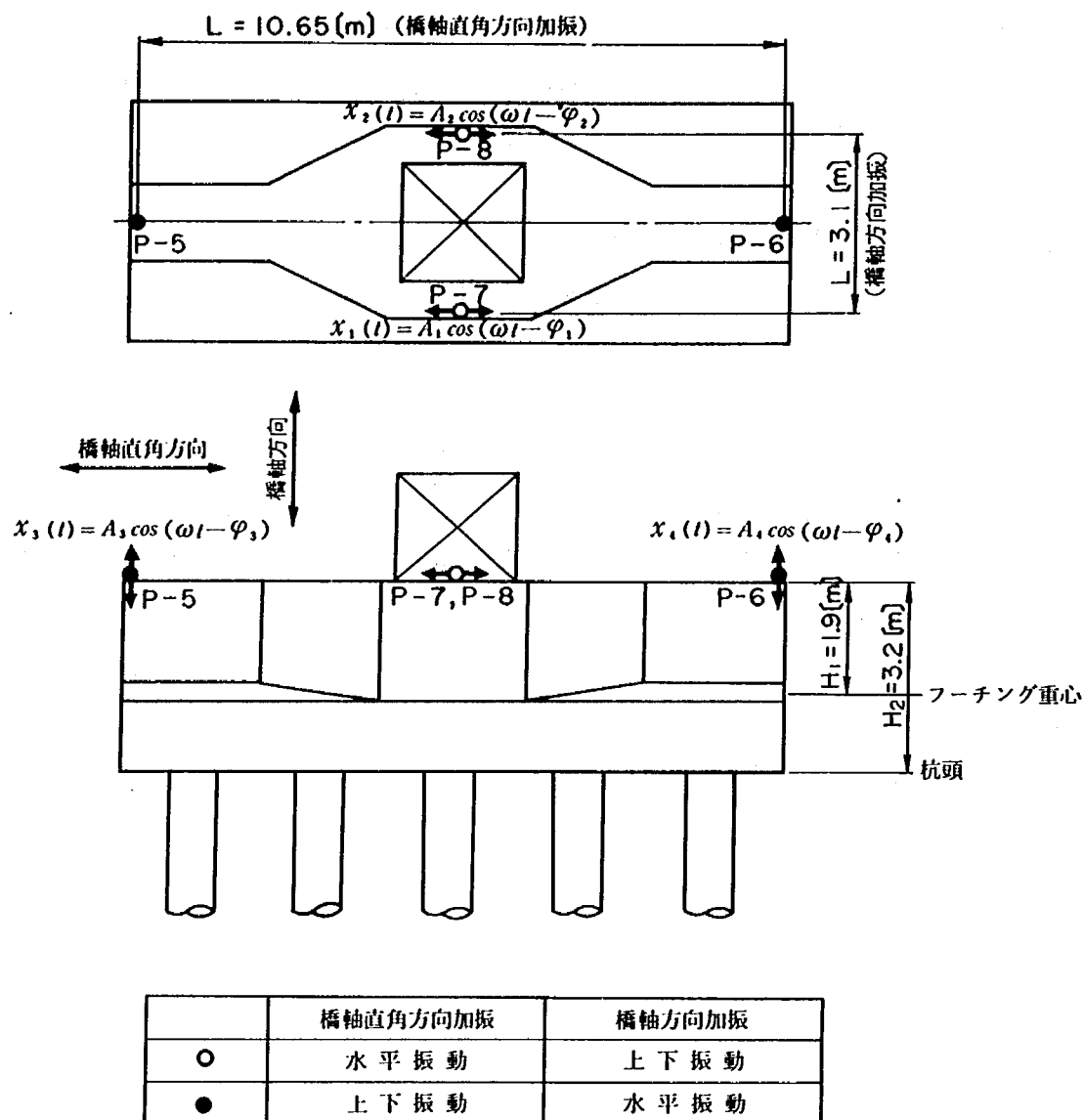
5.5 動的ばね定数および減衰定数の振動数依存性

付図 5.9 より変位振幅ごとにばね定数と加振振動数の関係を求めると、付図 5.11 に示すようになる。なお、付図 5.9(1)の場合と同様に、付図 5.11(1)には参考のために静的載荷試験の結果も合わせて示している。付図 5.11 より、フーチング躯体質量のみを有効質量とする場合には、ばね定数は一般に振動数が高くなると減少する傾向があることがわかる。また、静的ばね定数を振動数 0 の時のばね定数として動的ばね定数と比較すると、静的ばね定数は上述の傾向の延長上にあると考えられる。杭に囲まれた範囲の地盤の質量も有効質量とする場合には、ばね定数と振動数の間には一定の傾向は認められない。

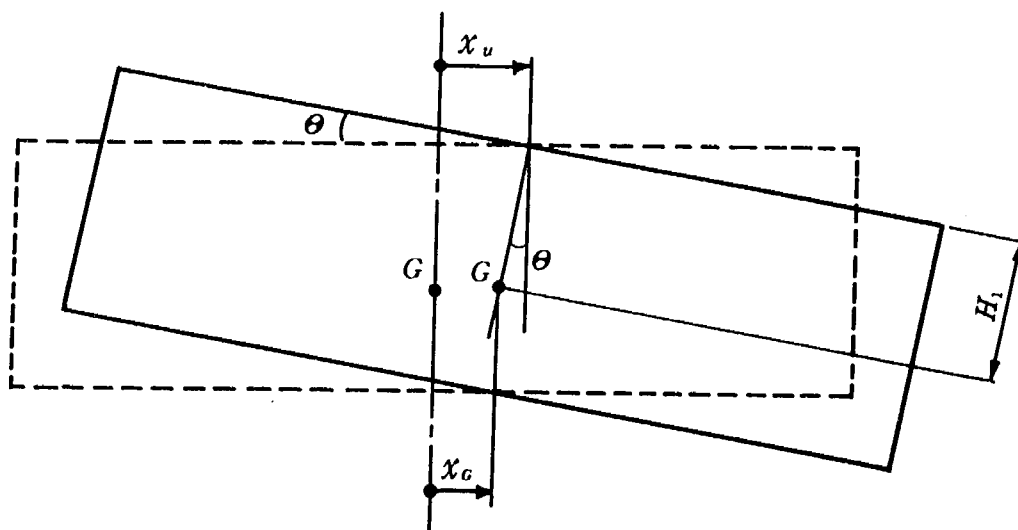
次に、付図 5.10 より変位振幅ごとに減衰定数と加振振動数の関係を求めると、付図 5.12 に示すようになる。付図 5.12 より、フーチング躯体質量のみを有効質量とする場合には、一般に振動数が高くなると減衰定数は増加することがわかる。ただし、この関係は変位振幅が 0.5mm 以下の場合について求められたものである。また、杭に囲まれた範囲の地盤の質量も有効質量とする場合についても同様の傾向が認められる。



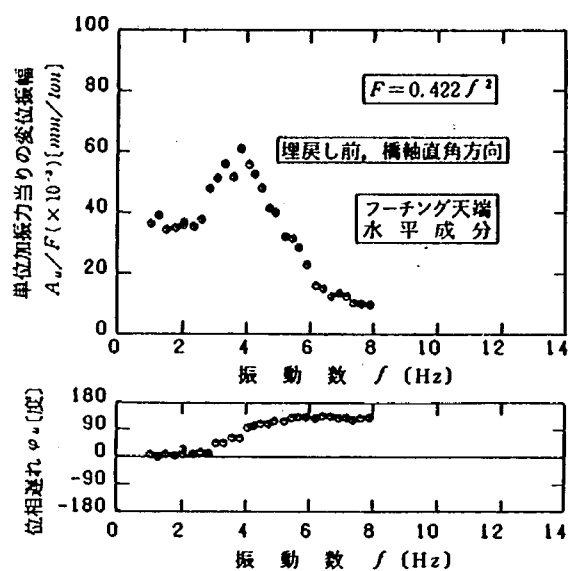
図 5.11 ばね定数と振動数の関係 (付図 5.9(1) の場合)



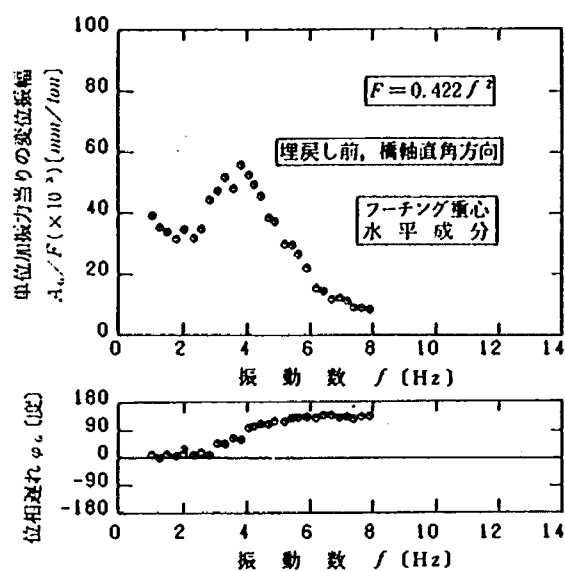
付図 5.1 解析に使用した加速度計の位置



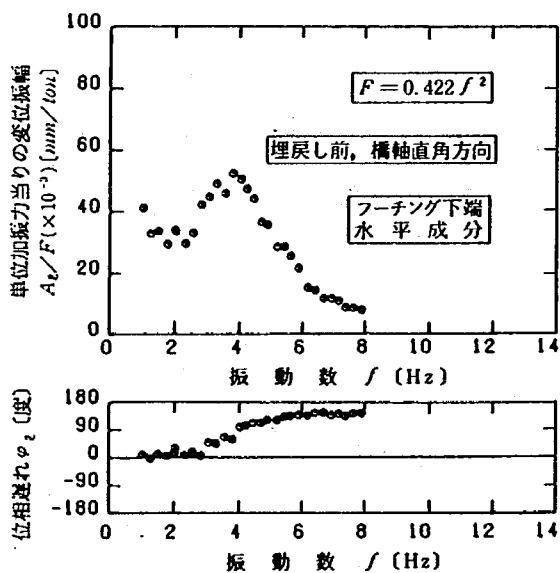
付図 5.2 フーチング重心の水平変位の算出方法



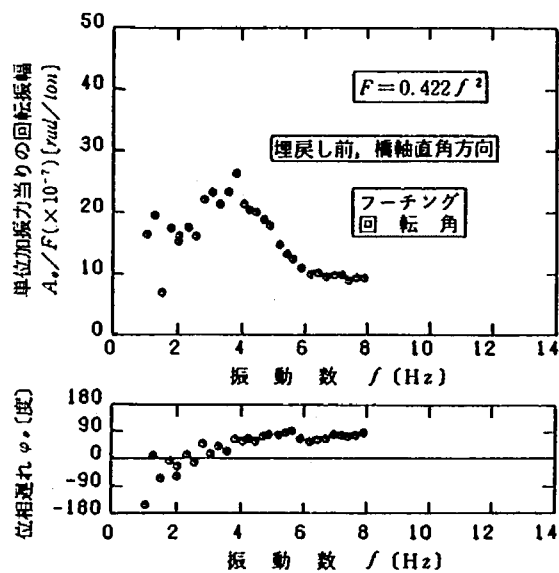
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

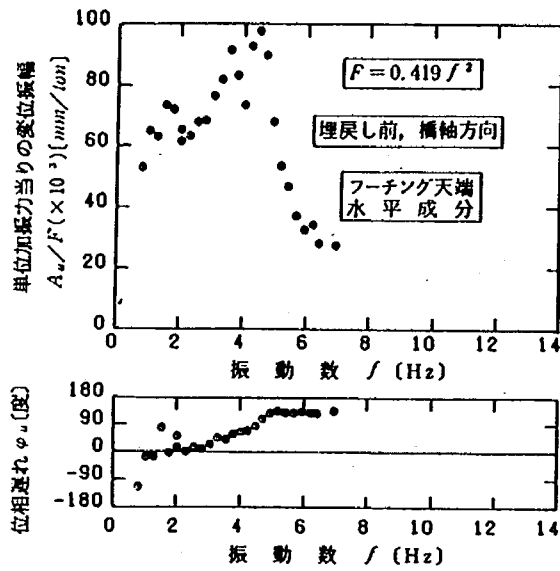


(c) フーチング下端の水平変位

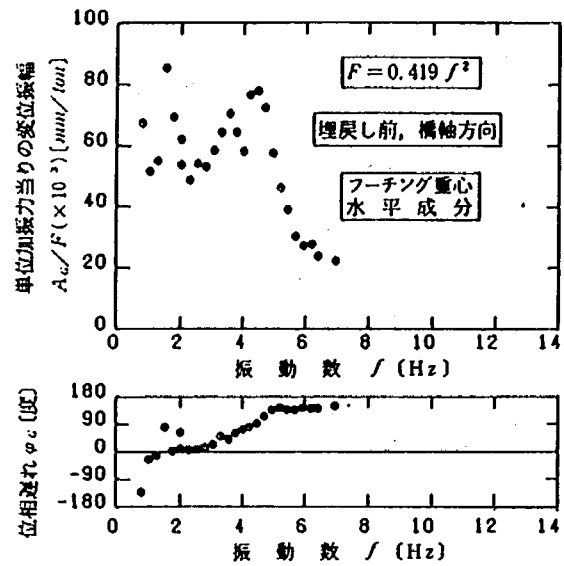


(d) フーチングの回転角

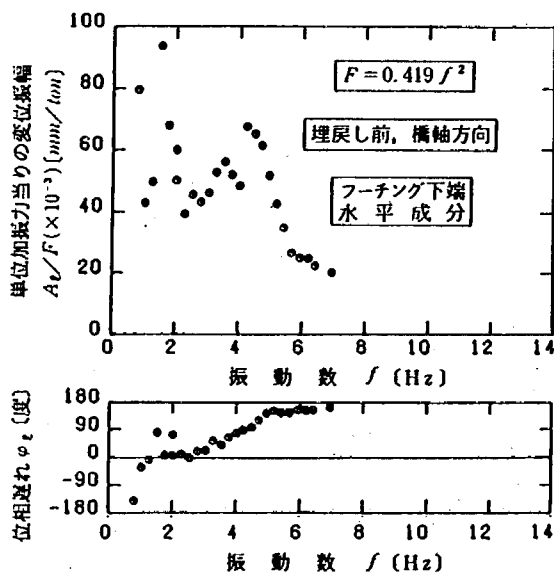
付図 5.3 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位およびフーチングの回転角の共振曲線の例 (実験ケース A-5, $F = 0.422 f^2$)



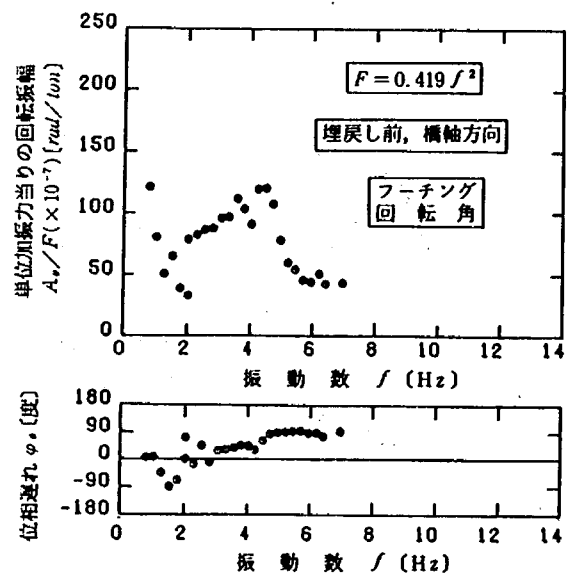
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

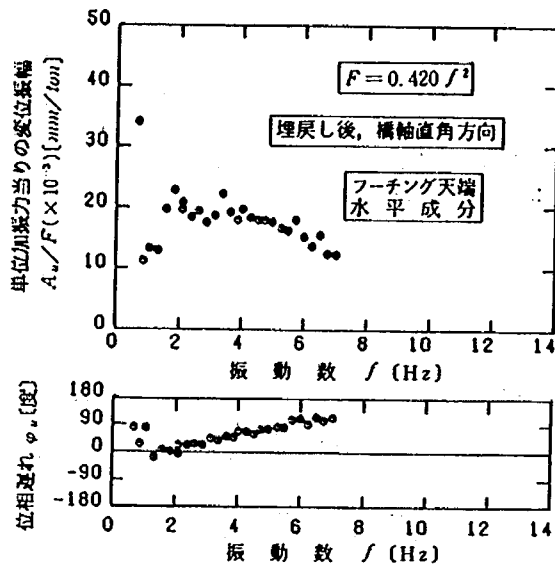


(c) フーチング下端の水平変位

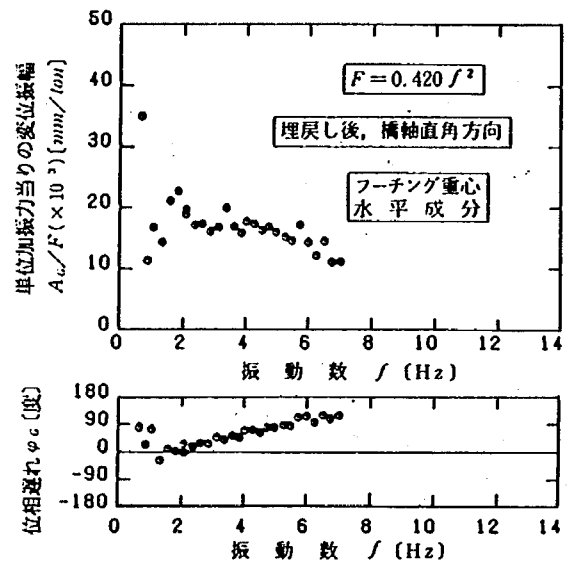


(d) フーチングの回転角

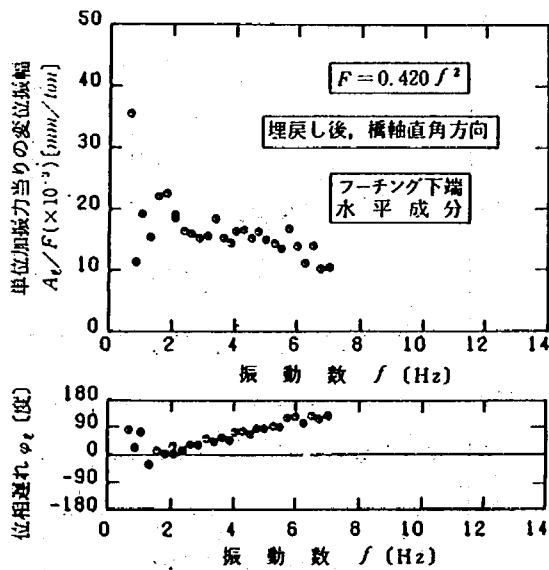
付図 5. 4 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング各部の水平変位およびフーチングの回転角の共振曲線の例 (実験ケース B-3, $F = 0.419 f^2$)



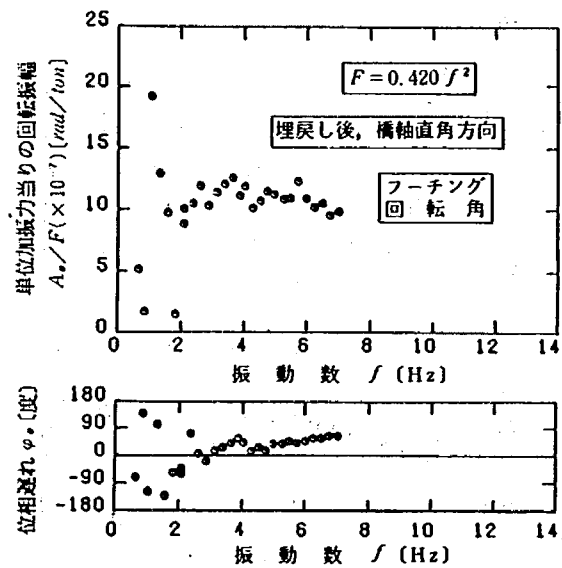
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

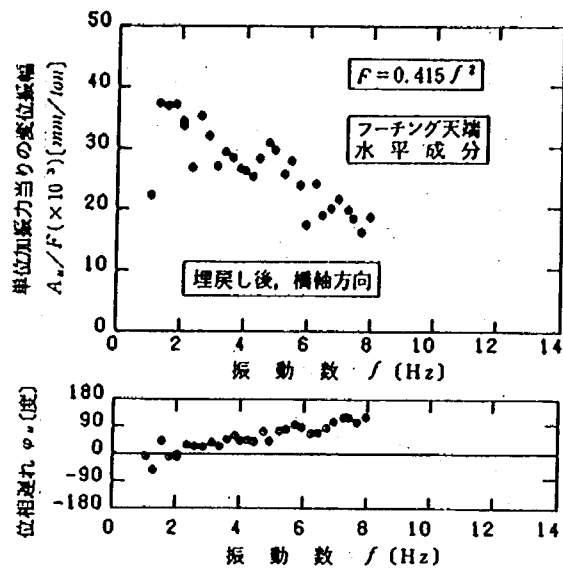


(c) フーチング下端の水平変位

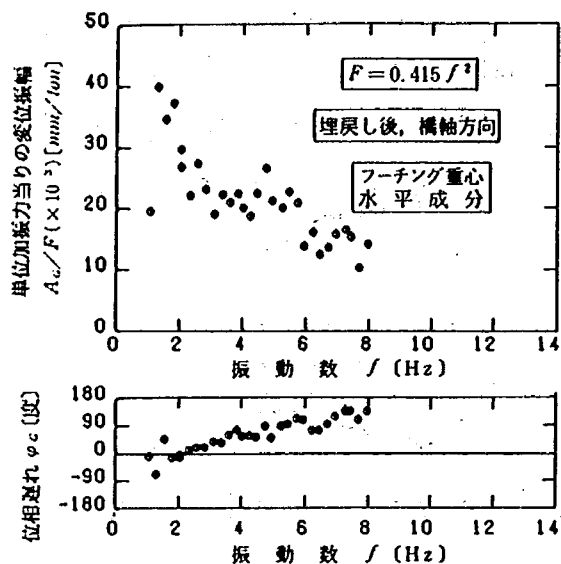


(d) フーチングの回転角

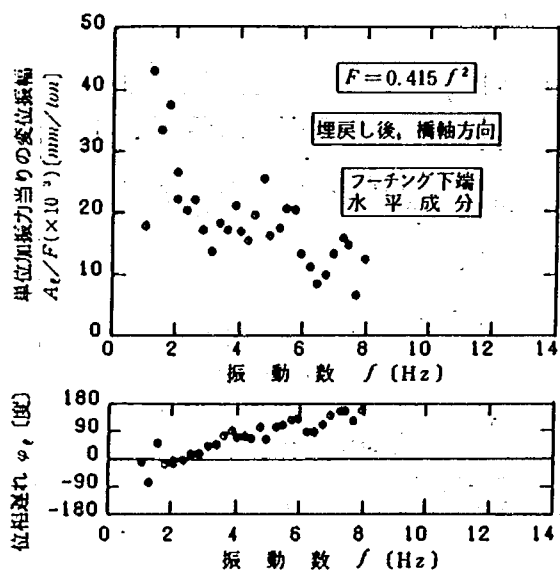
付図 5.5 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位およびフーチングの回転角の共振曲線の例 (実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)



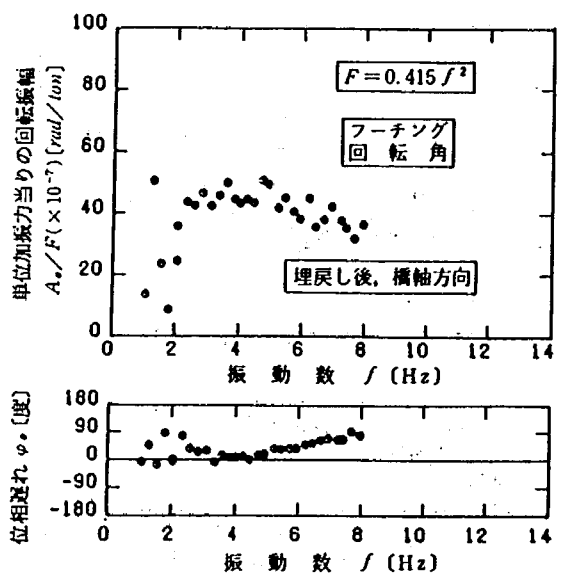
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

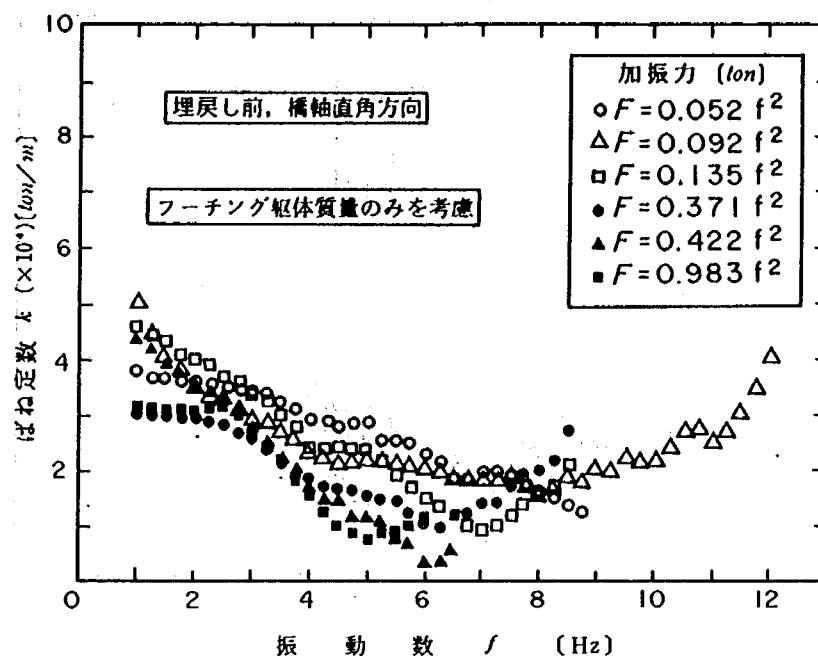


(c) フーチング下端の水平変位

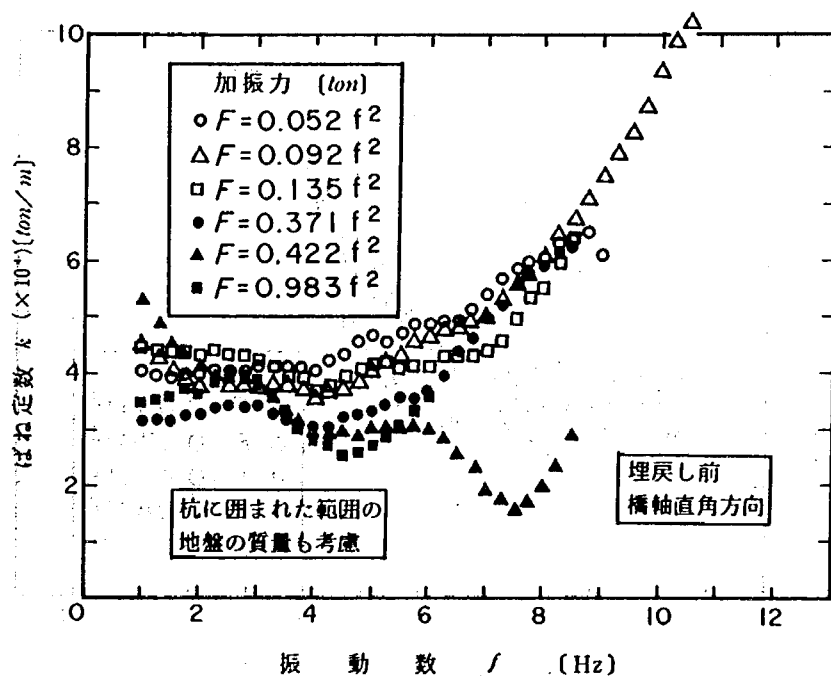


(d) フーチングの回転角

付図 5.6 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位およびフーチングの回転角の共振曲線の例 (実験ケース D-4, $F = 0.415 f^2$)

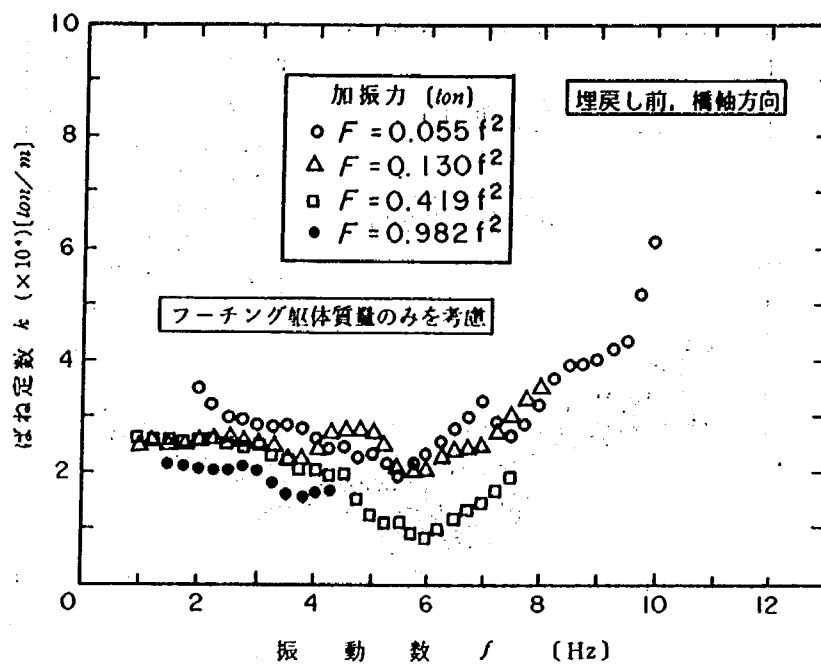


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

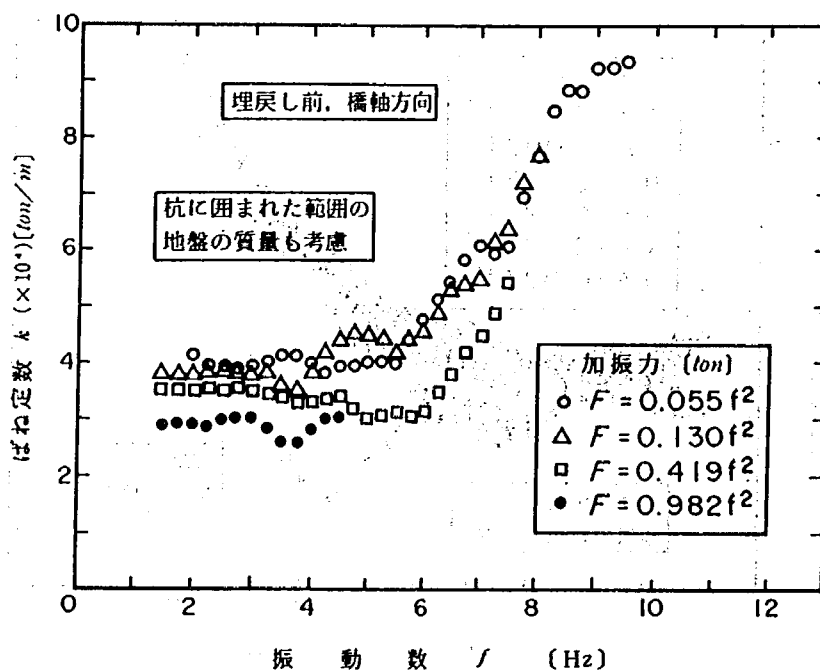


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.7 (1) 加振力ごとのばね定数と振動数の関係 (埋戻し前、橋軸直角方向)

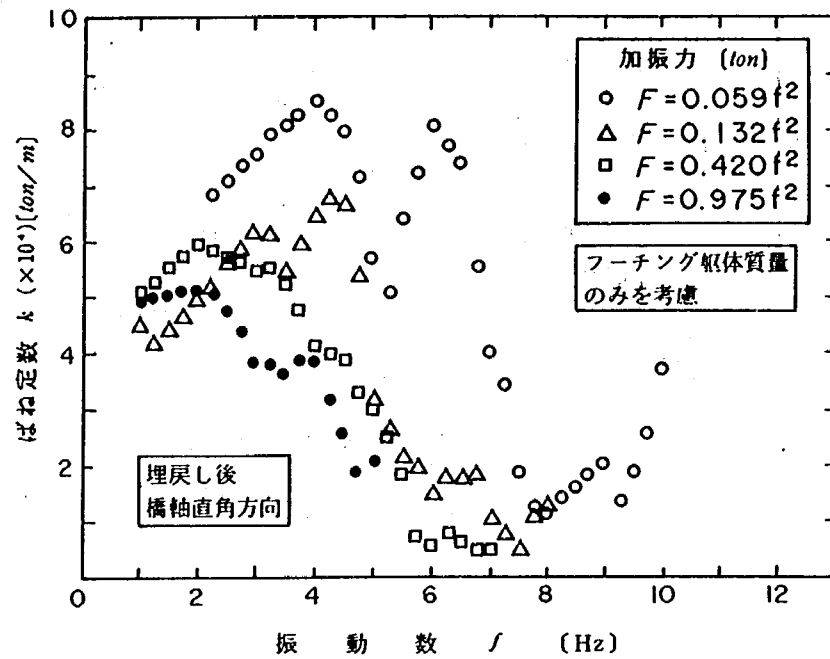


(a) フーチングの躯体質量のみを考慮する場合

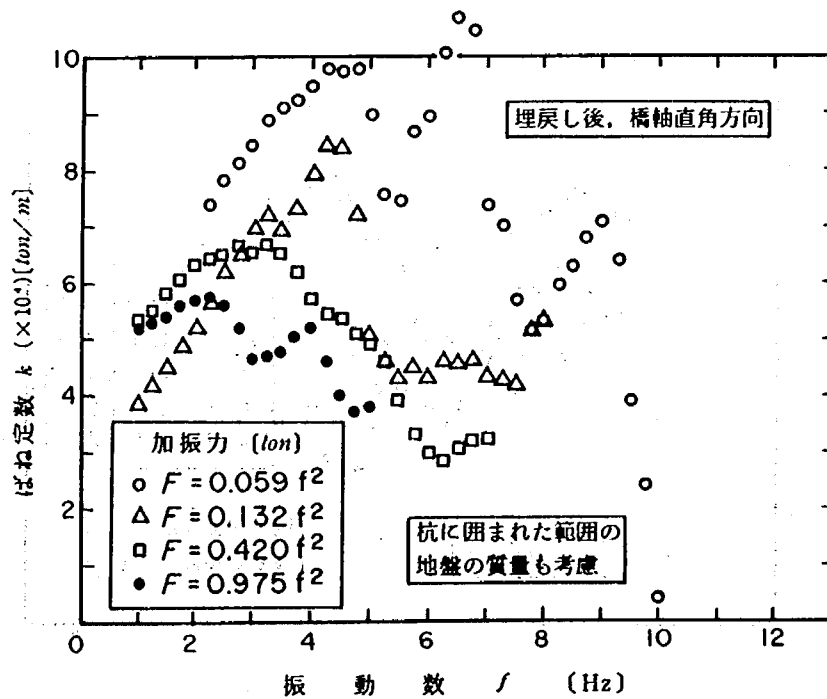


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.7(2) 加振力ごとのばね定数と振動数の関係 (埋戻し前, 橋軸方向)

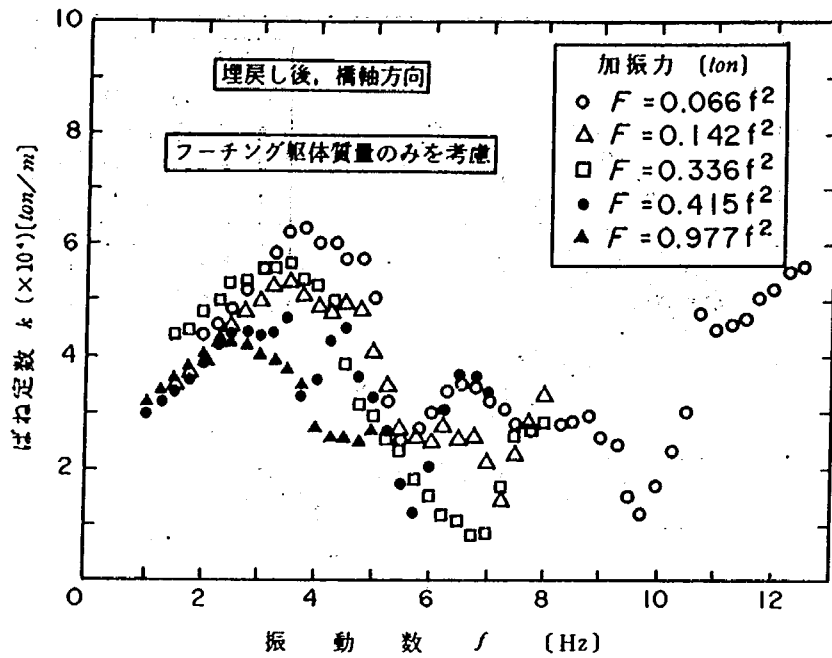


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

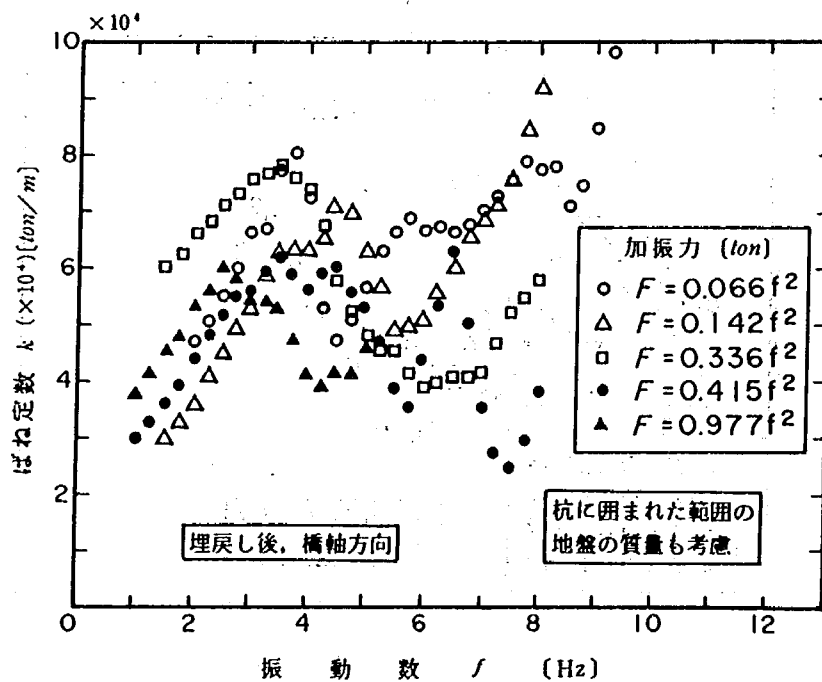


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.7.(3) 加振力ごとのばね定数と加振数の関係 (埋戻し後、橋軸直角方向)

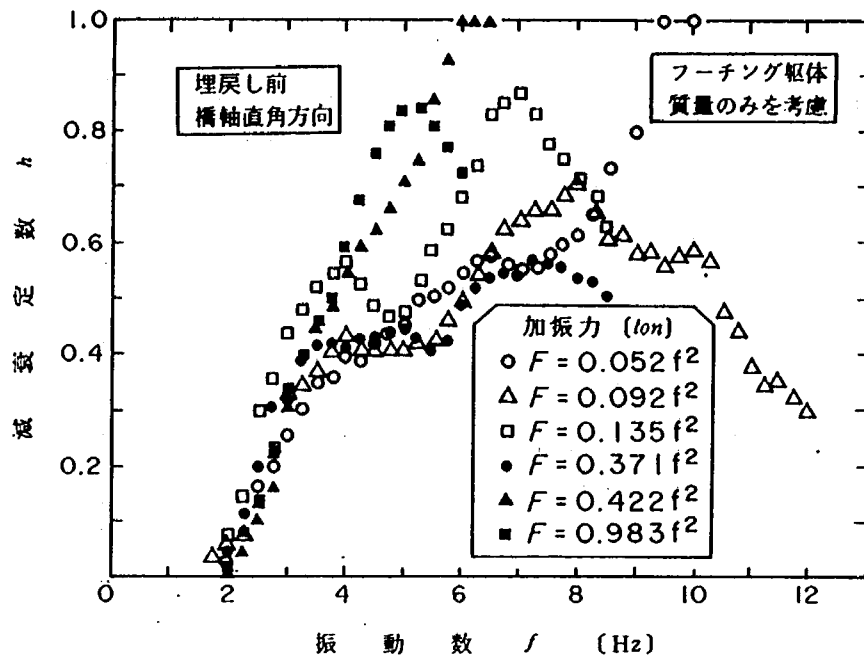


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

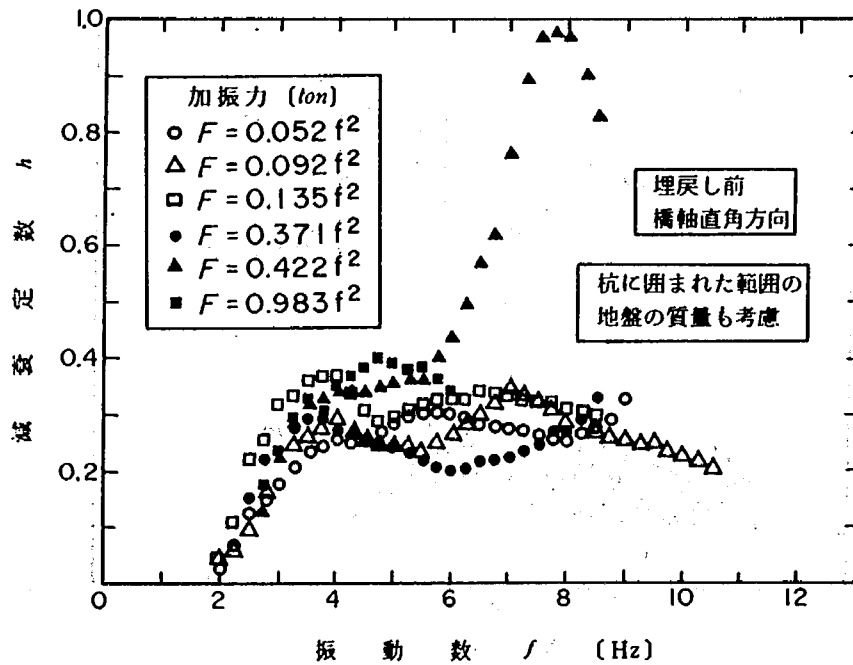


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.7 (4) 加振力ごとのばね定数と振動数の関係 (埋戻し後、橋軸方向)

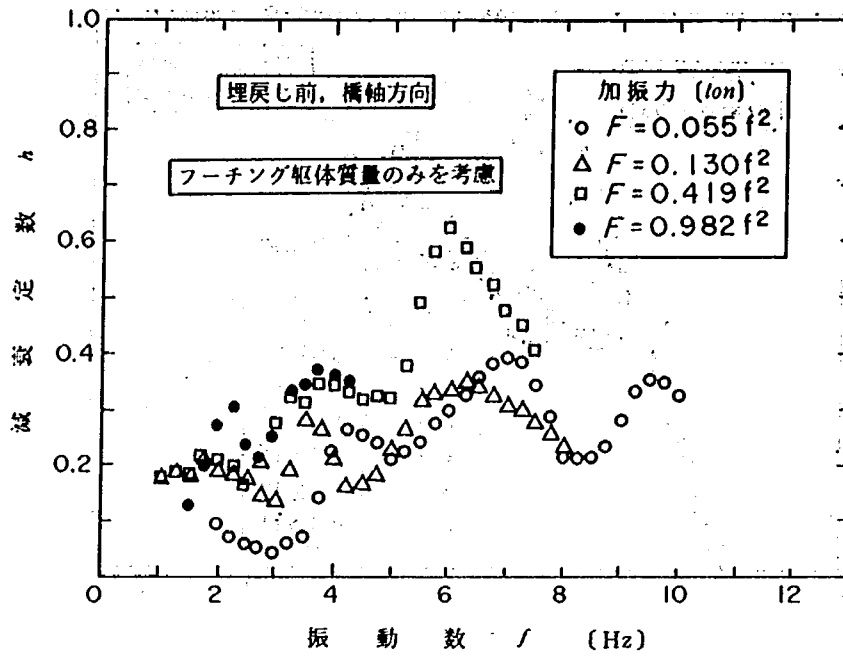


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

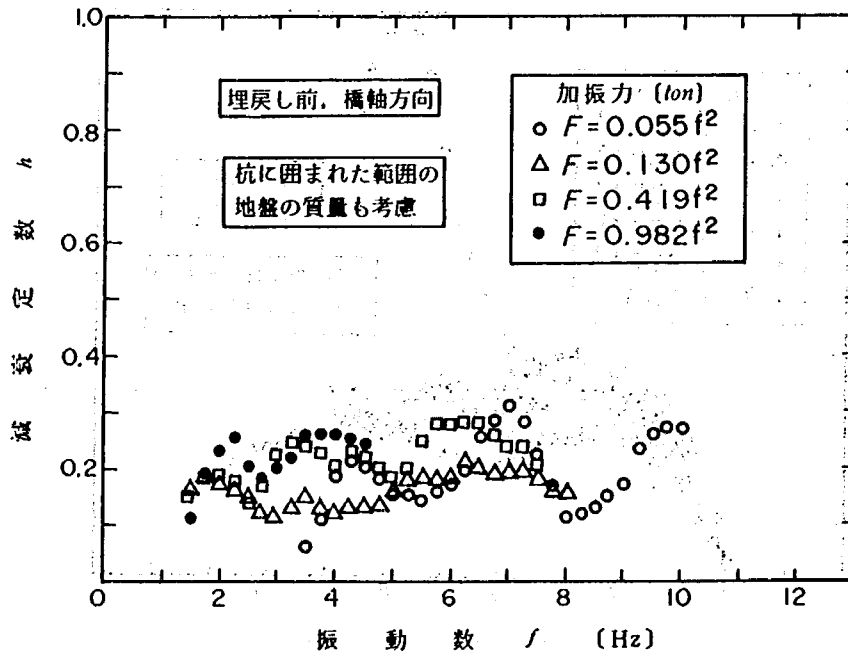


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.8(1) 加振力ごとの減衰定数と振動数の関係 (埋戻し前, 橋軸直角方向)

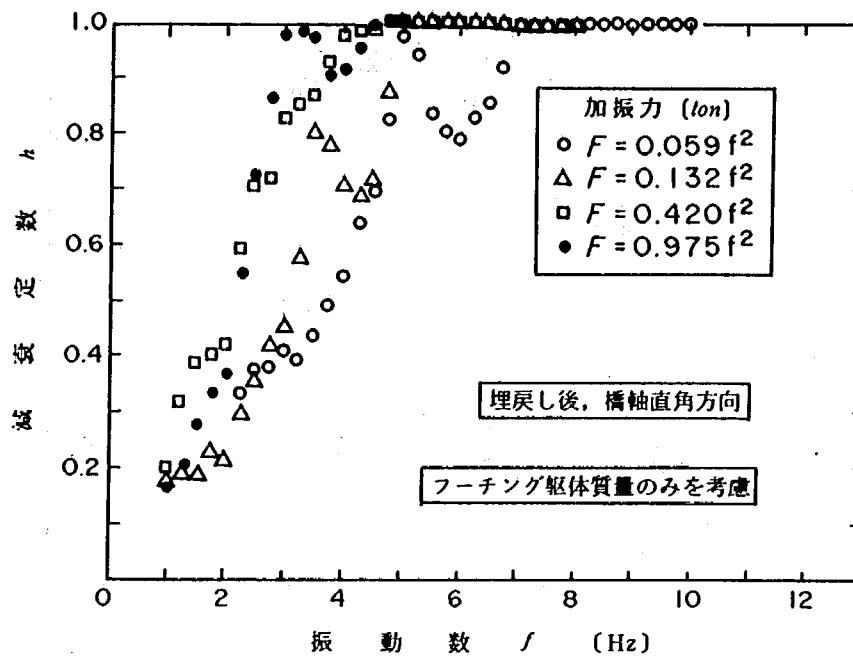


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

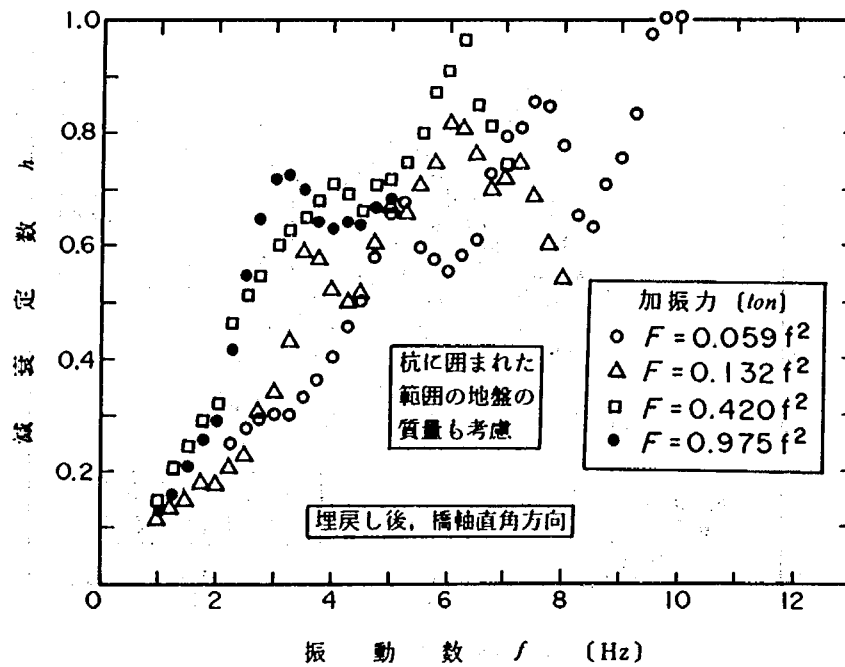


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.8 (2) 加振力ごとの減衰定数と振動数の関係 (埋戻し前, 橋軸方向)

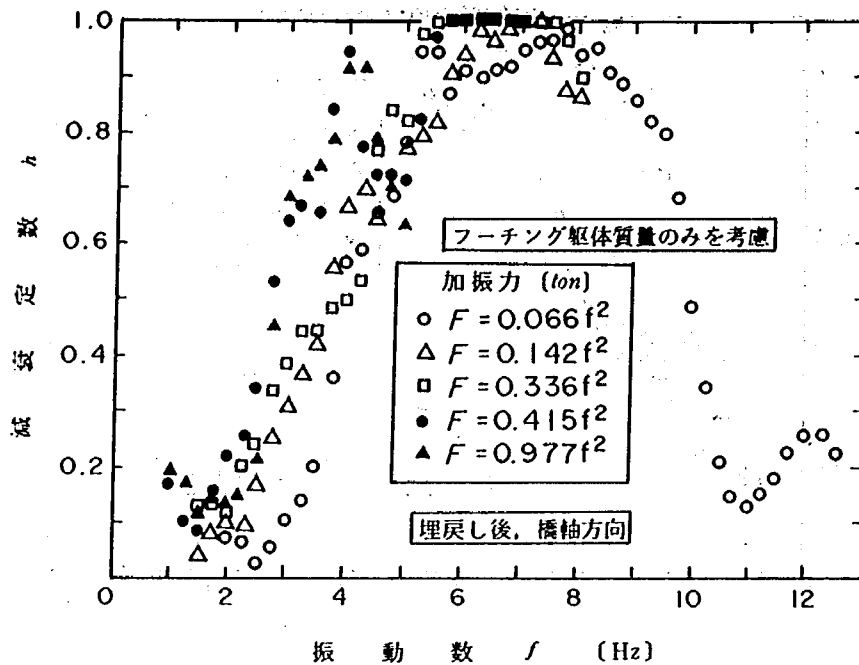


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

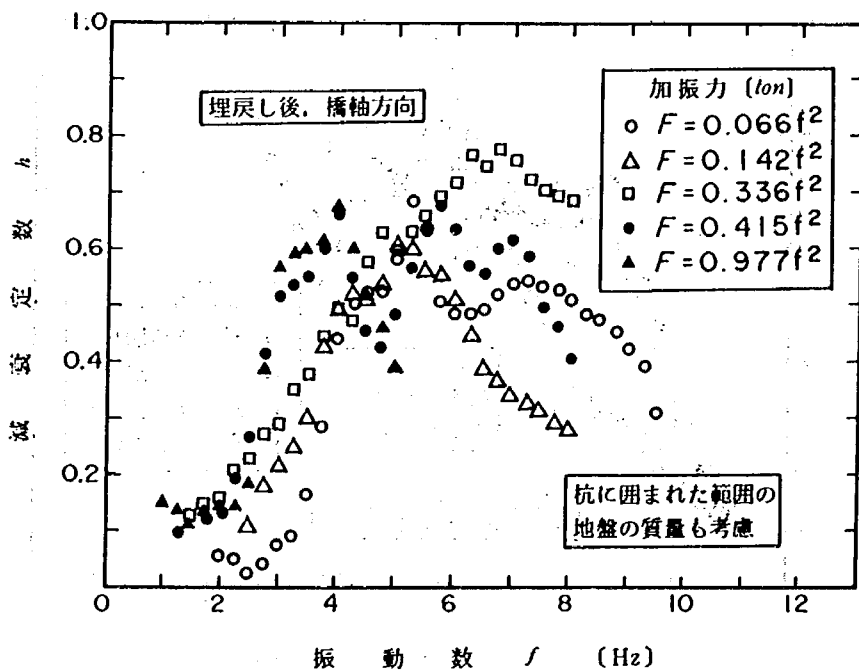


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.8(3) 加振力ごとの減衰定数と振動数の関係 (埋戻し後, 橋軸直角方向)

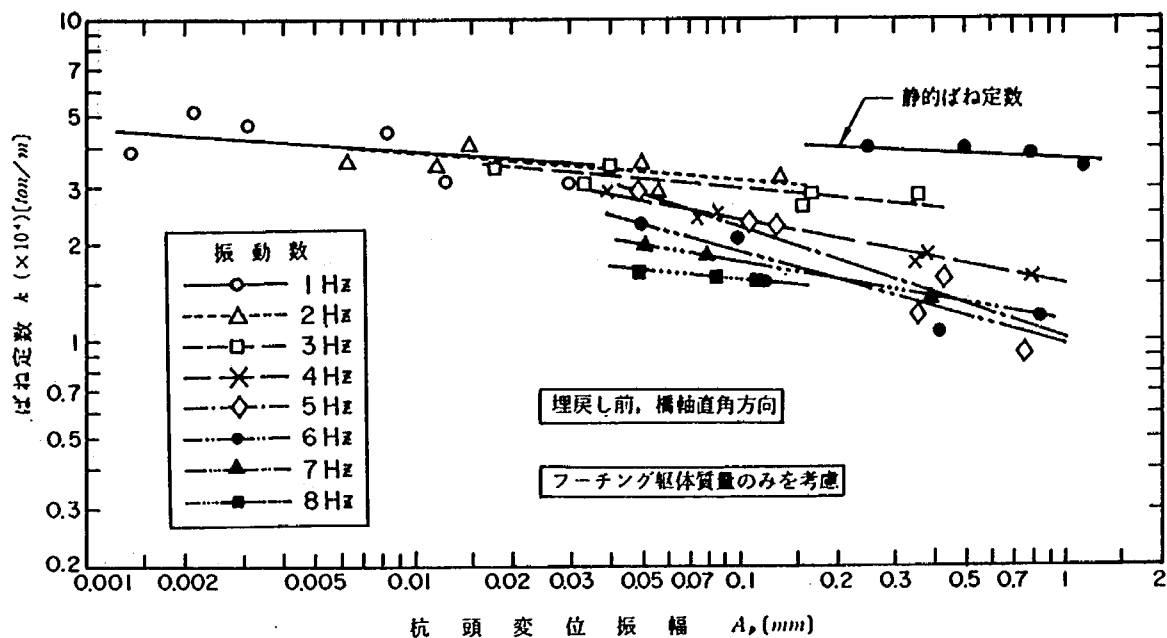


(a) フーチング躯体質量のみを考慮した場合

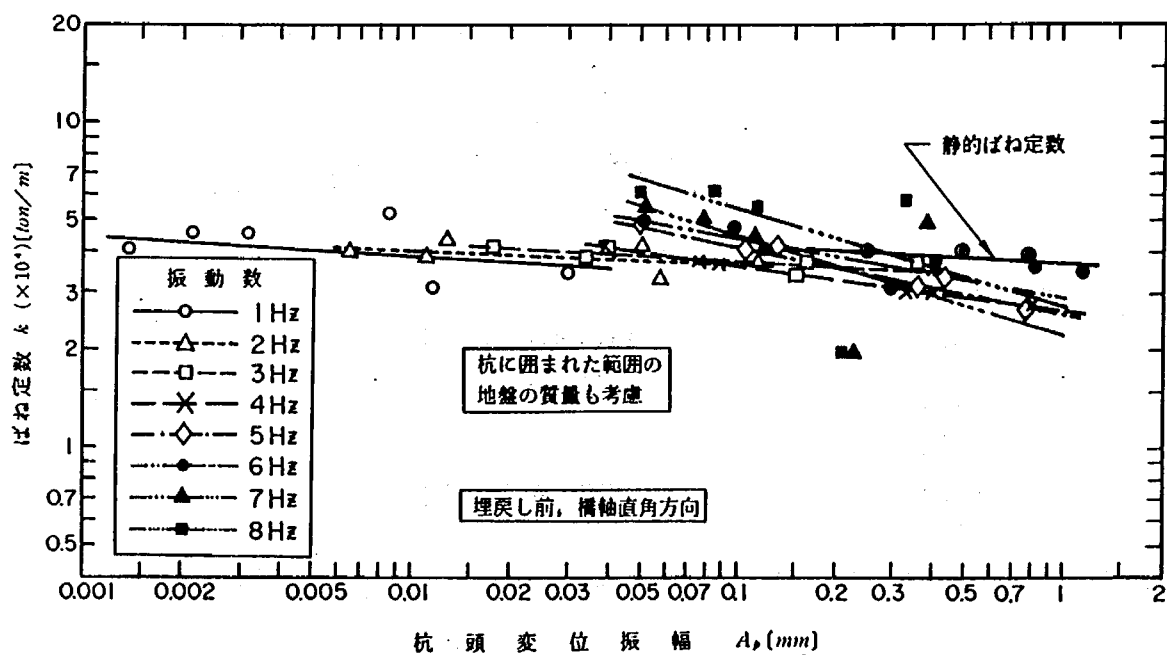


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.8 (4) 加振力ごとの減衰定数と振動数の関係 (埋戻し後、橋軸方向)

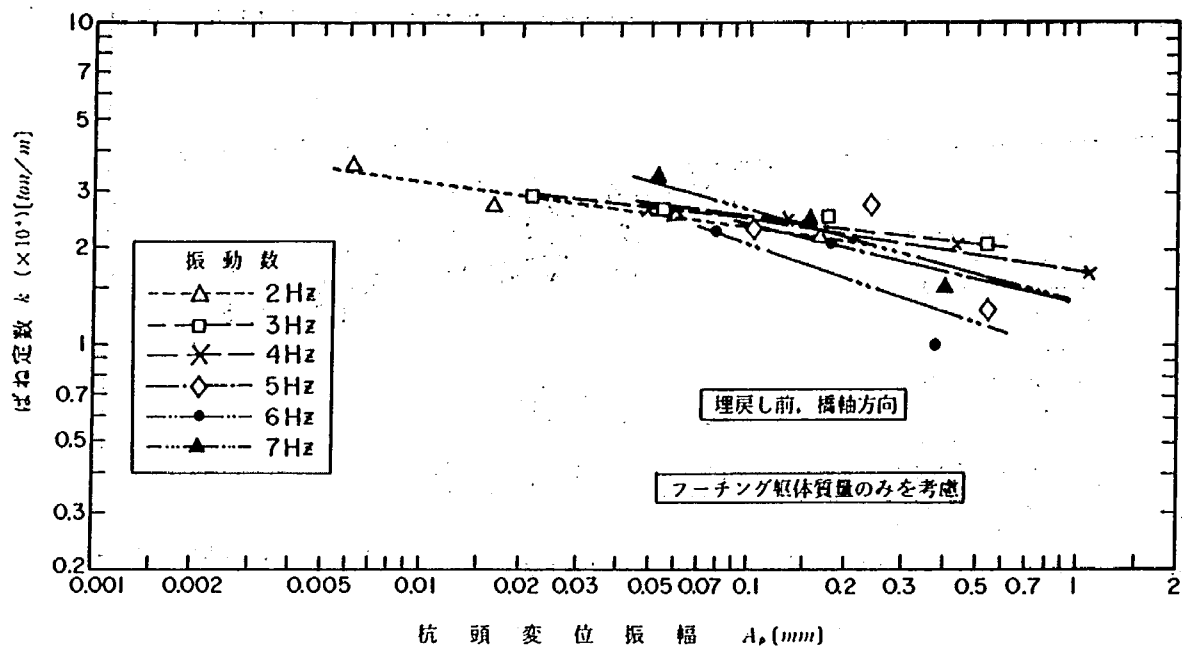


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

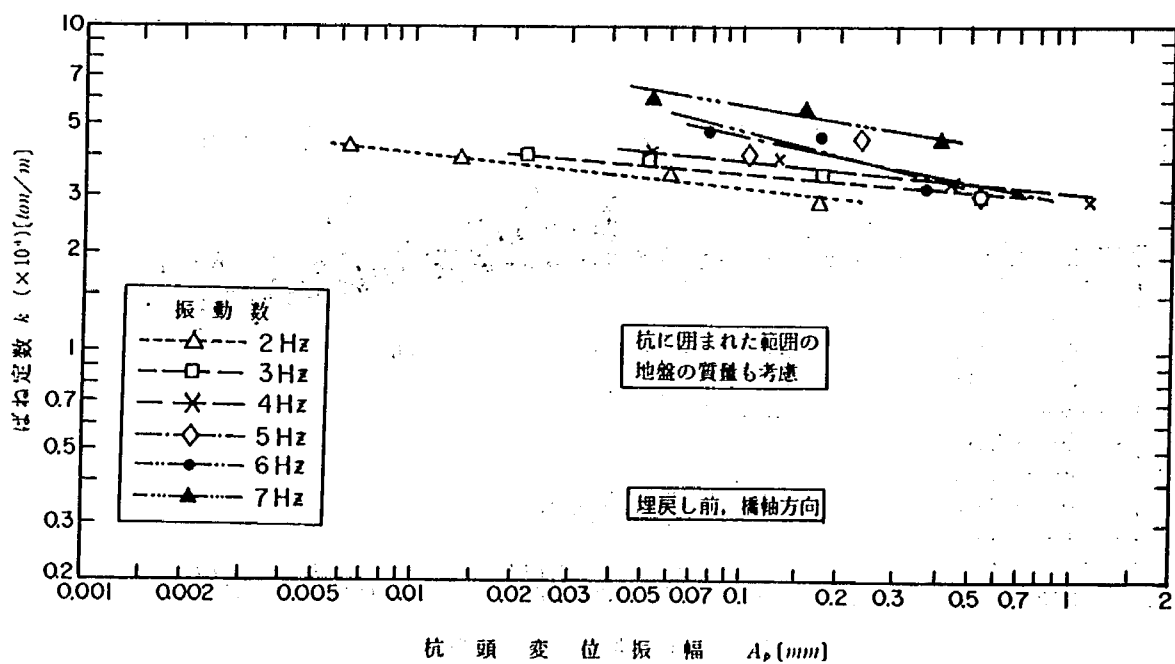


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.9 (1) ばね定数の変位振幅依存性 (埋戻し前, 橋軸直角方向)

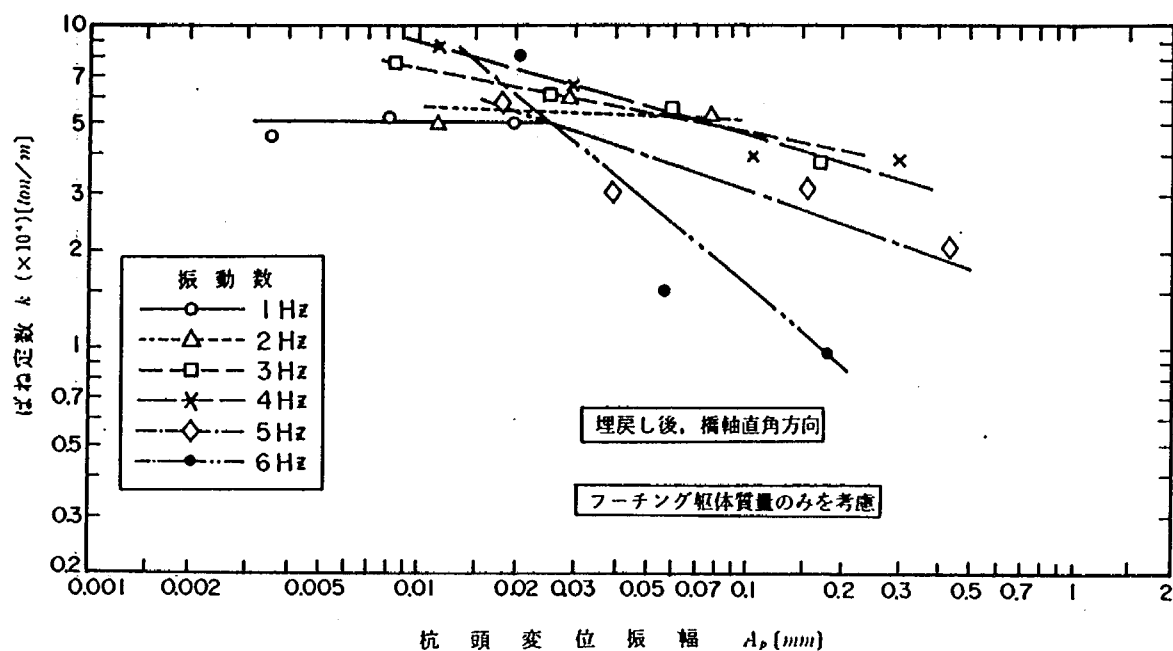


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

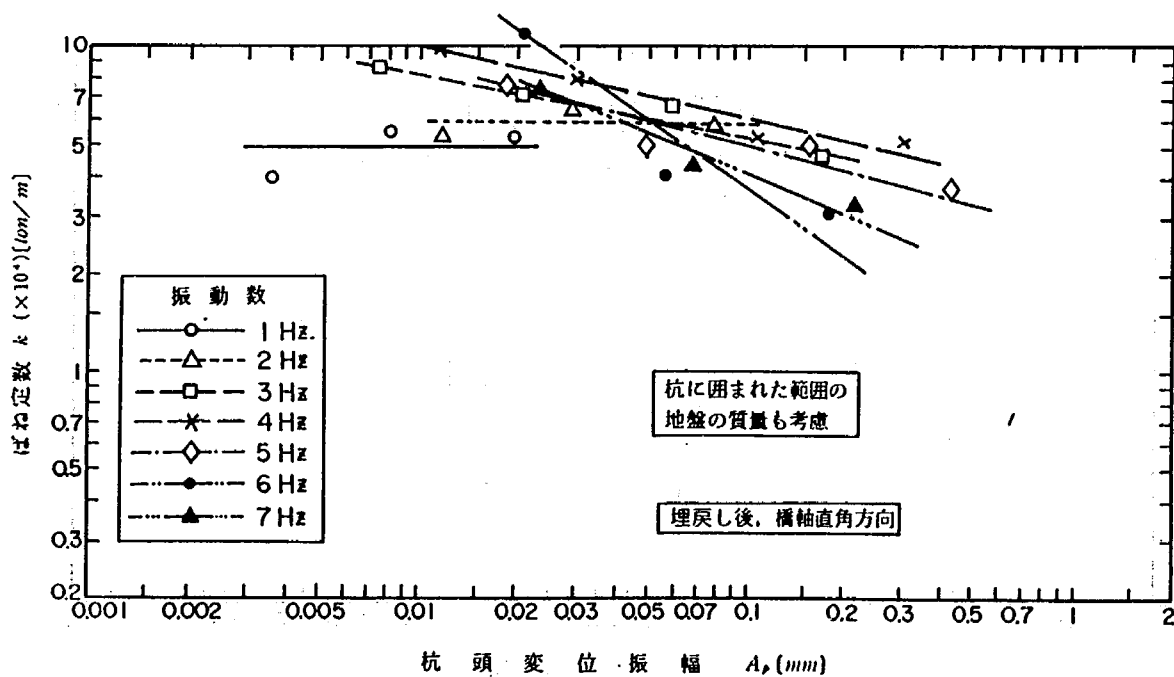


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.9 (2) ばね定数の変位振幅依存性 (埋戻し前、橋軸方向)

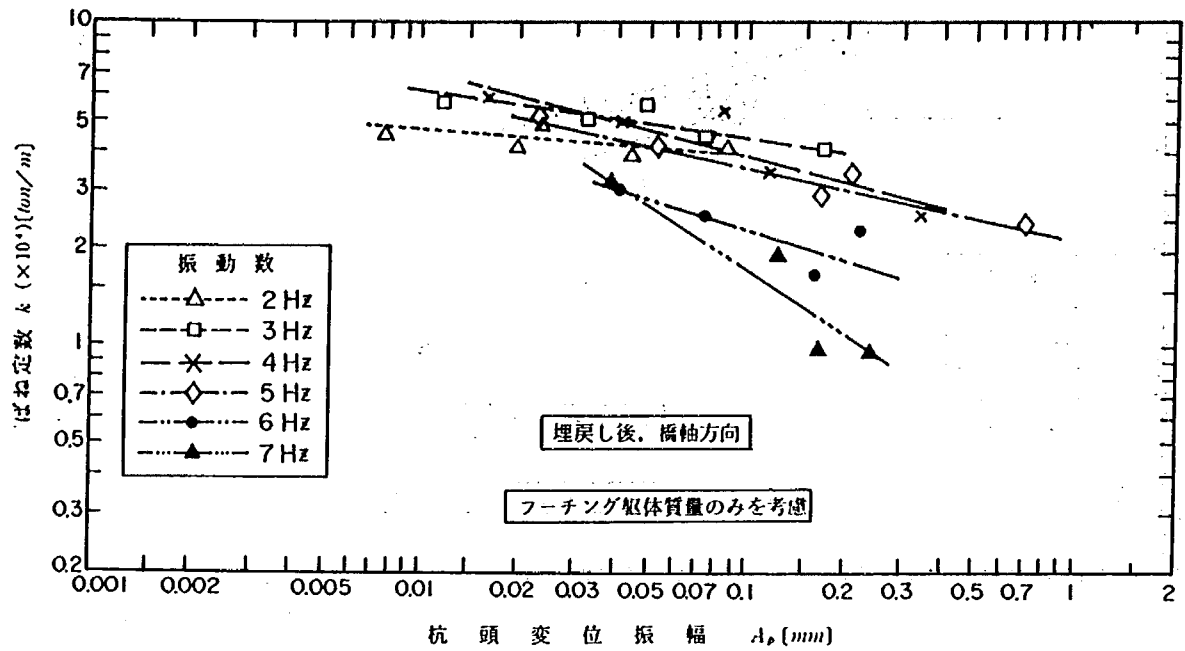


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

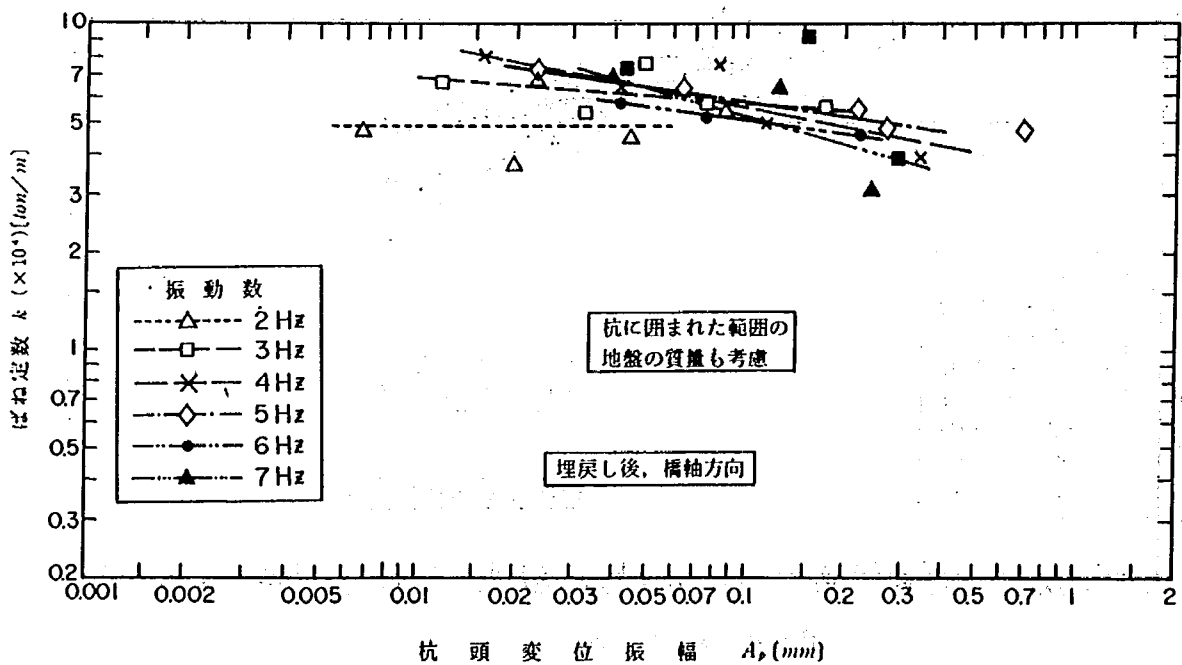


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.9 (3) ばね定数の変位振幅依存性 (埋戻し後、橋軸直角方向)

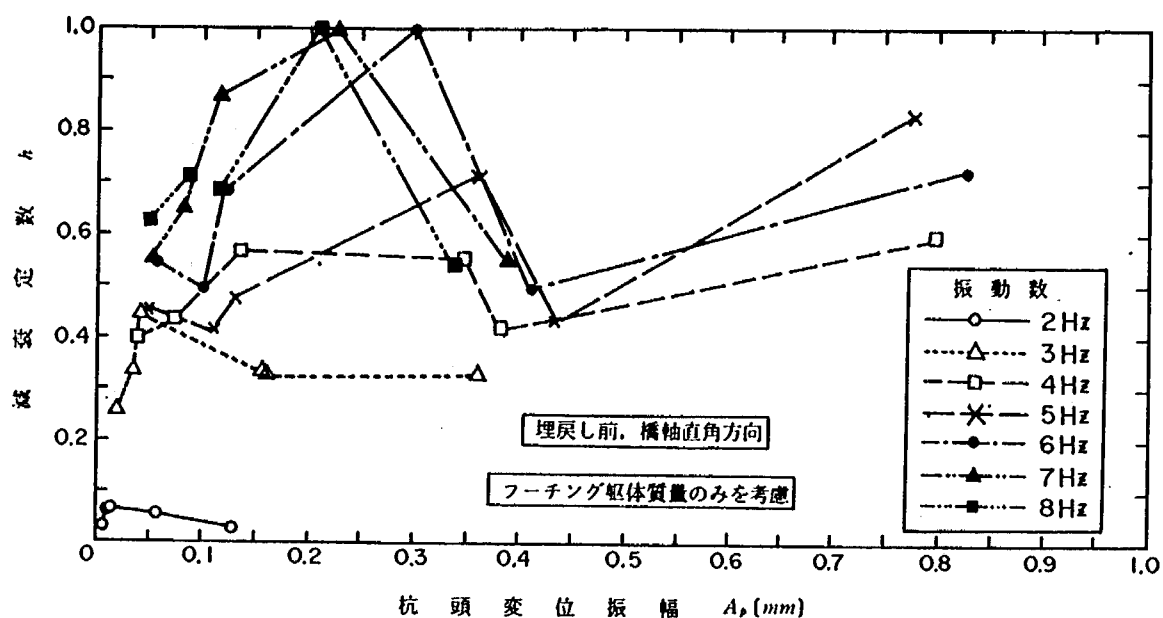


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

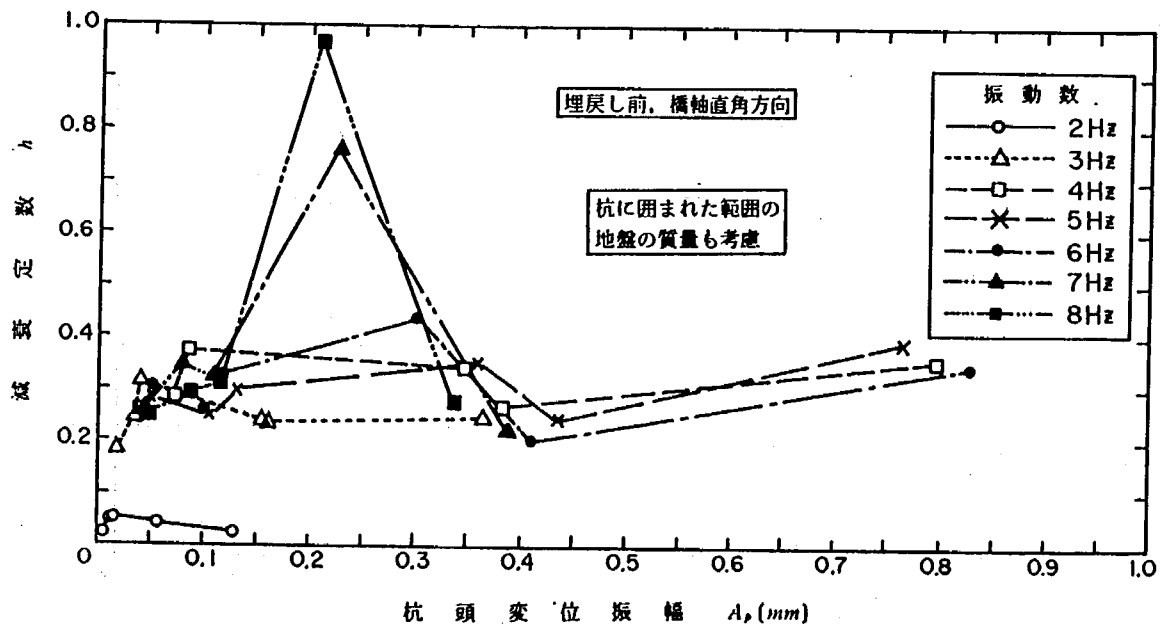


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.9 (4) ばね定数の変位振幅依存性 (埋戻し後、橋軸方向)

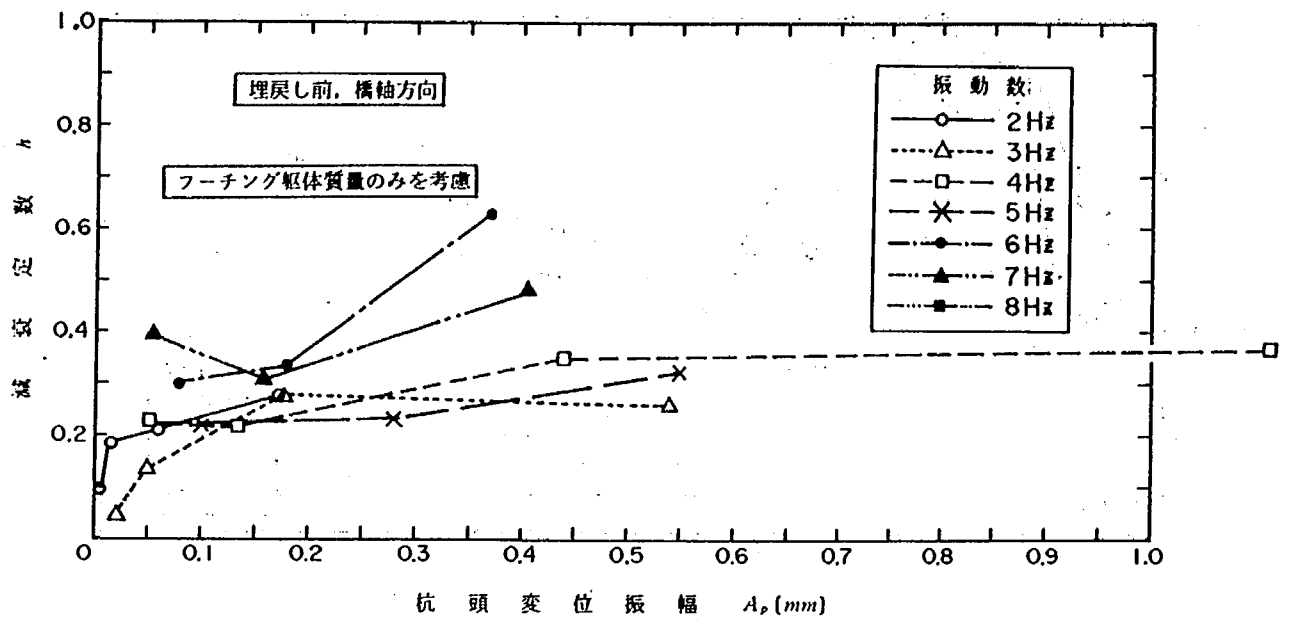


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

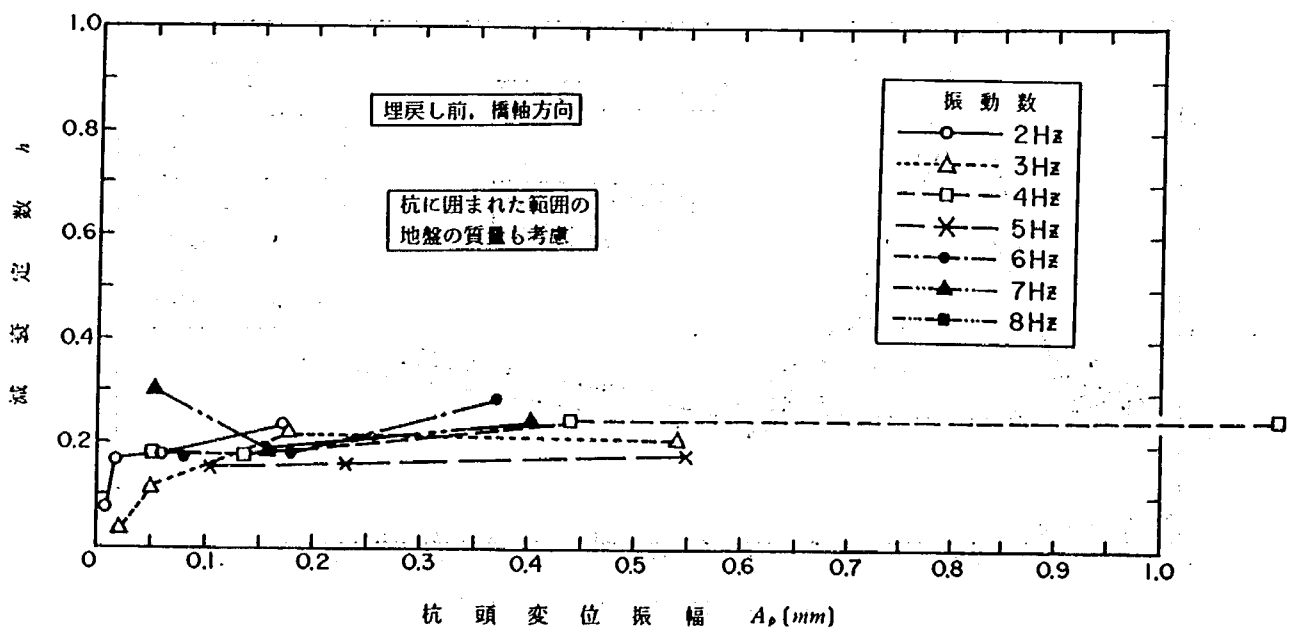


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.10(1) 減衰定数の変位振幅依存性 (埋戻し前、橋軸直角方向)

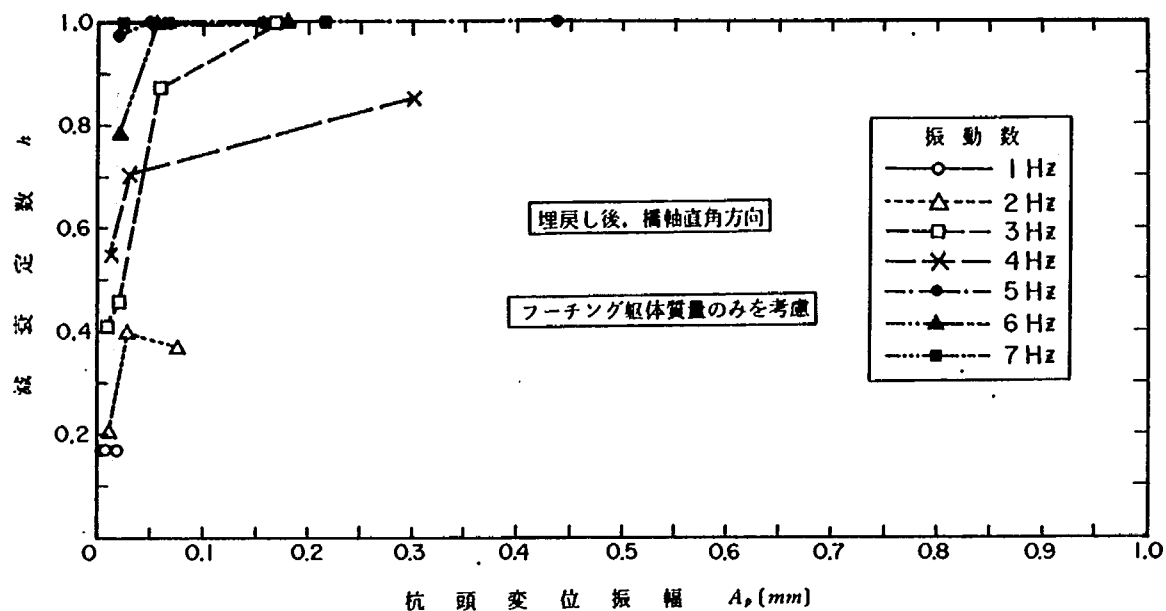


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

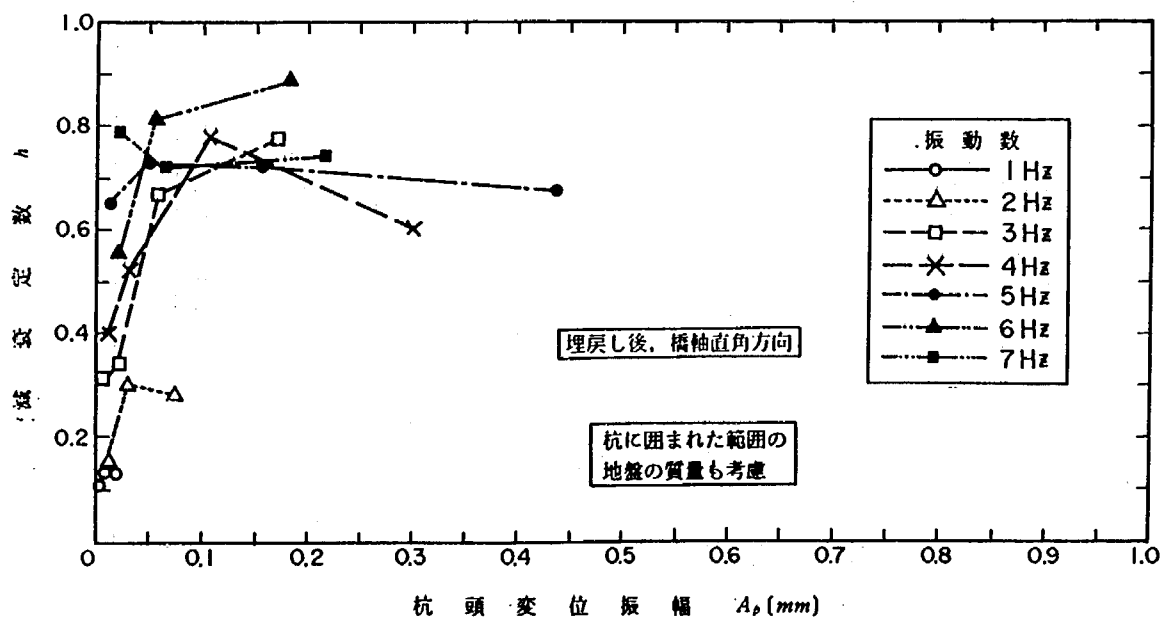


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.10(2) 減衰定数の変位振幅依存性 (埋戻し前, 橋軸方向)

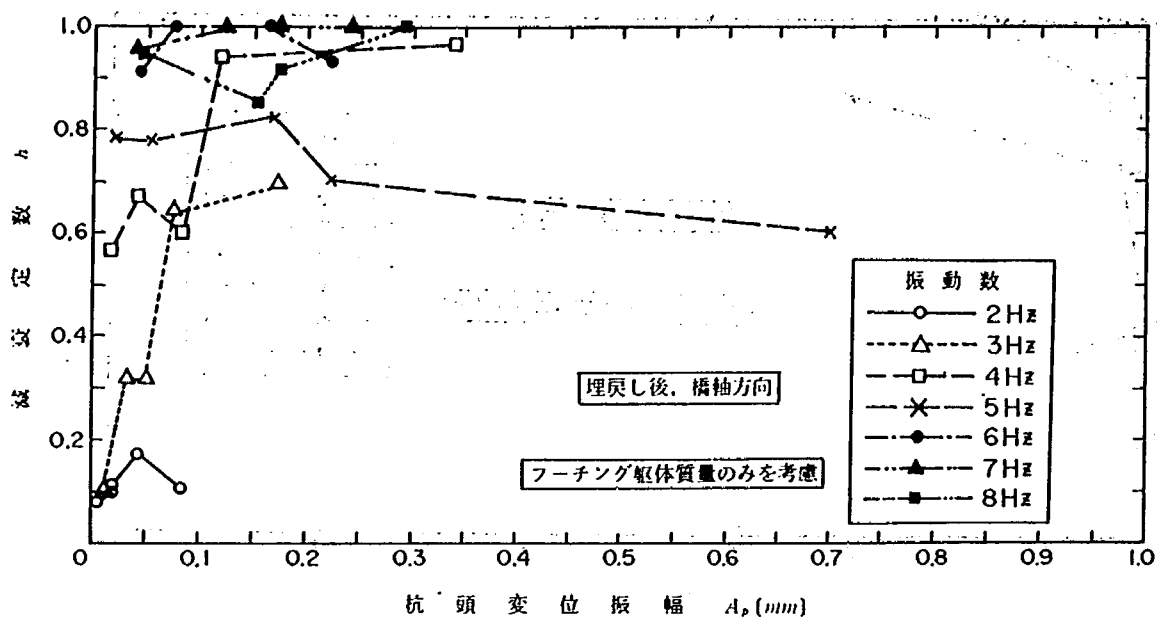


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

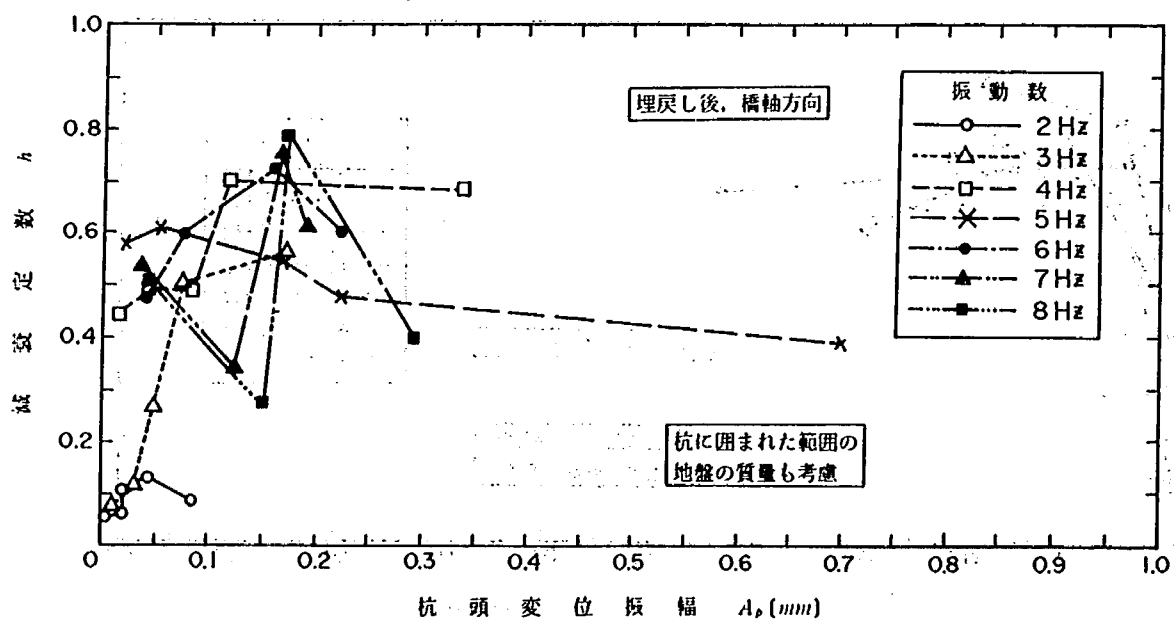


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.10(3) 減衰定数の変位振幅依存性 (埋戻し後、橋軸直角方向)

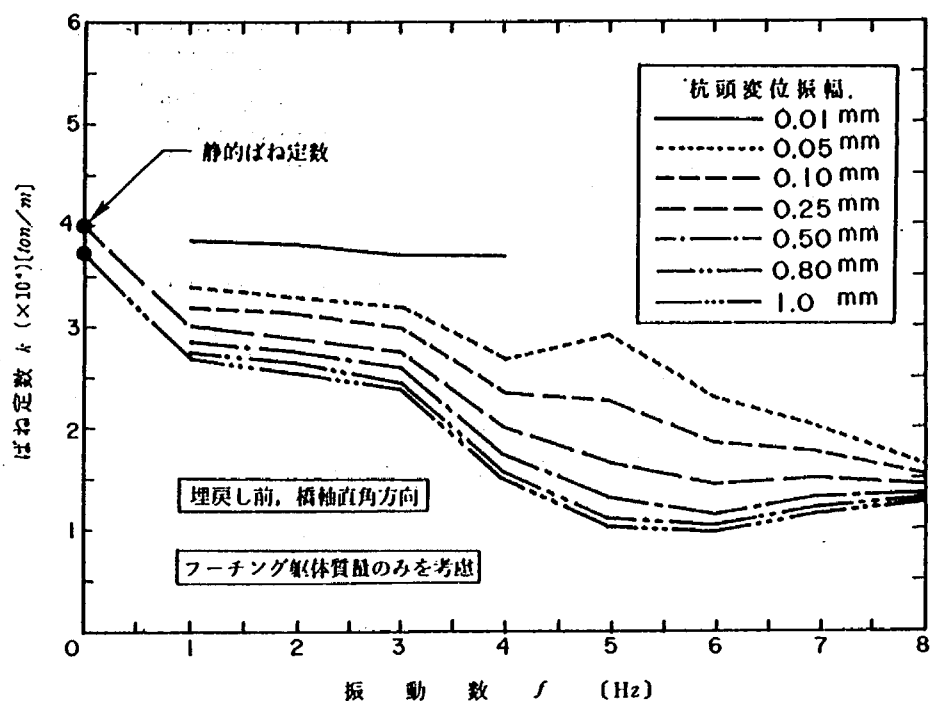


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

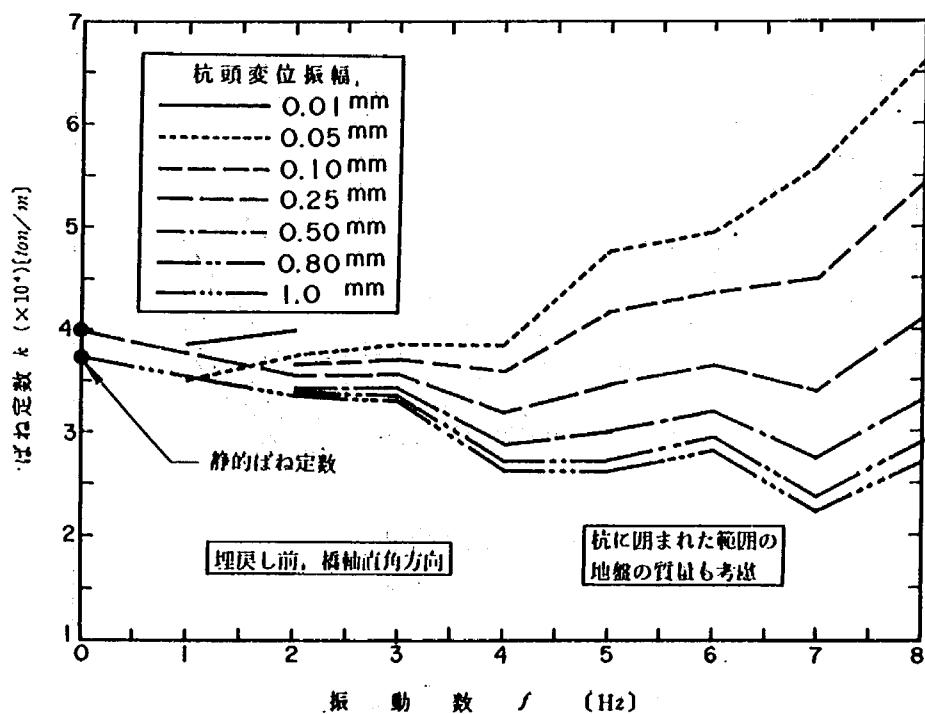


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.10(4) 減衰定数の変位振幅依存性 (埋戻し後、橋軸方向)

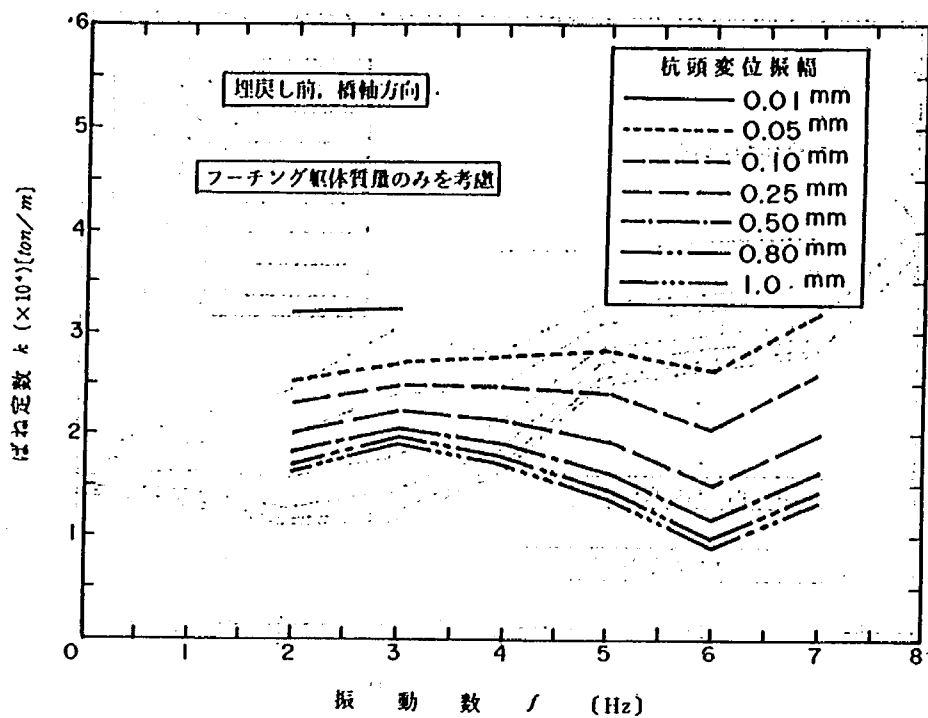


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

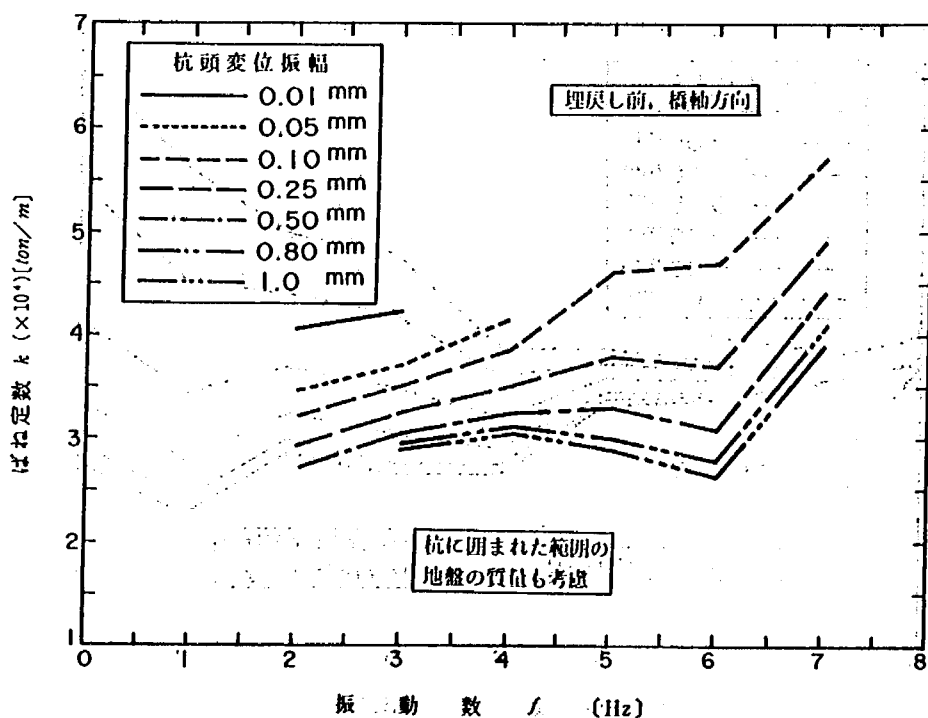


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.11(1) ばね定数の振動数依存性 (埋戻し前, 橋軸直角方向)

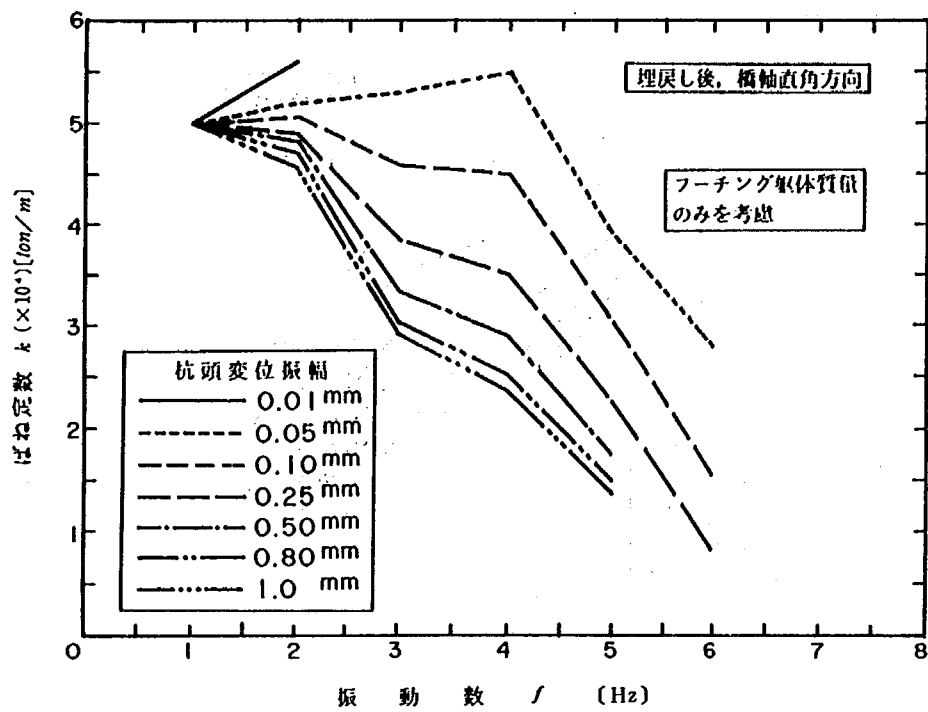


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

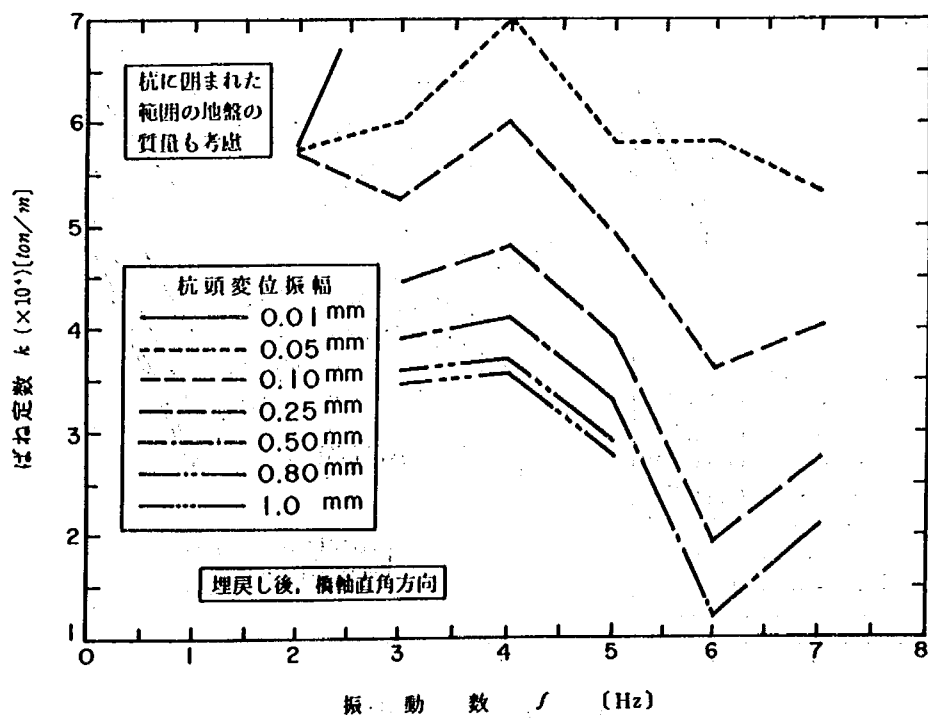


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.11(2) ばね定数の振動数依存性 (埋戻し前, 橋軸方向)

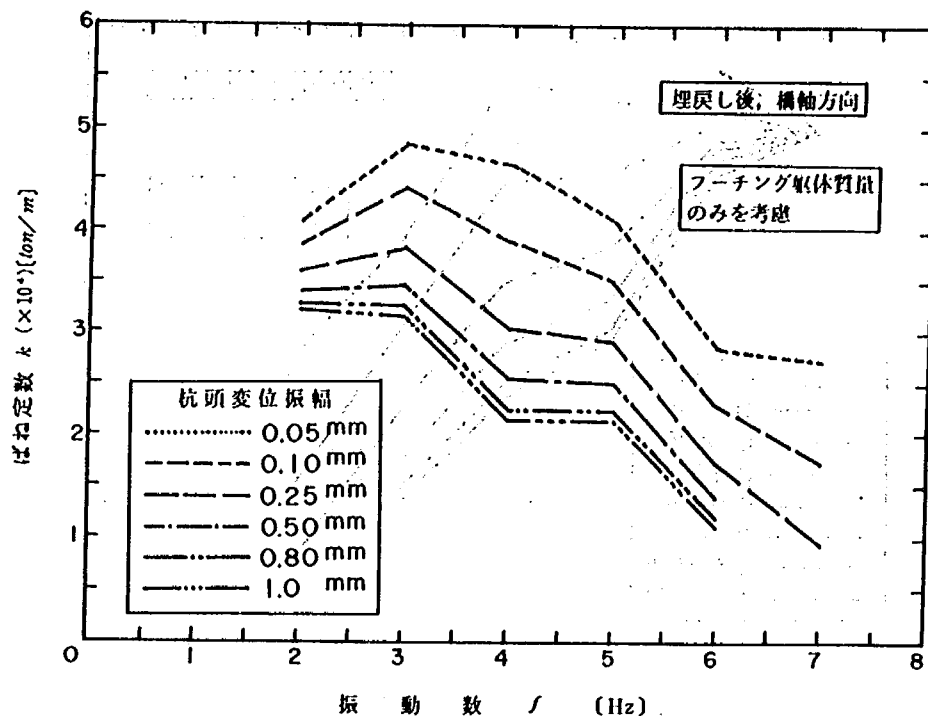


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

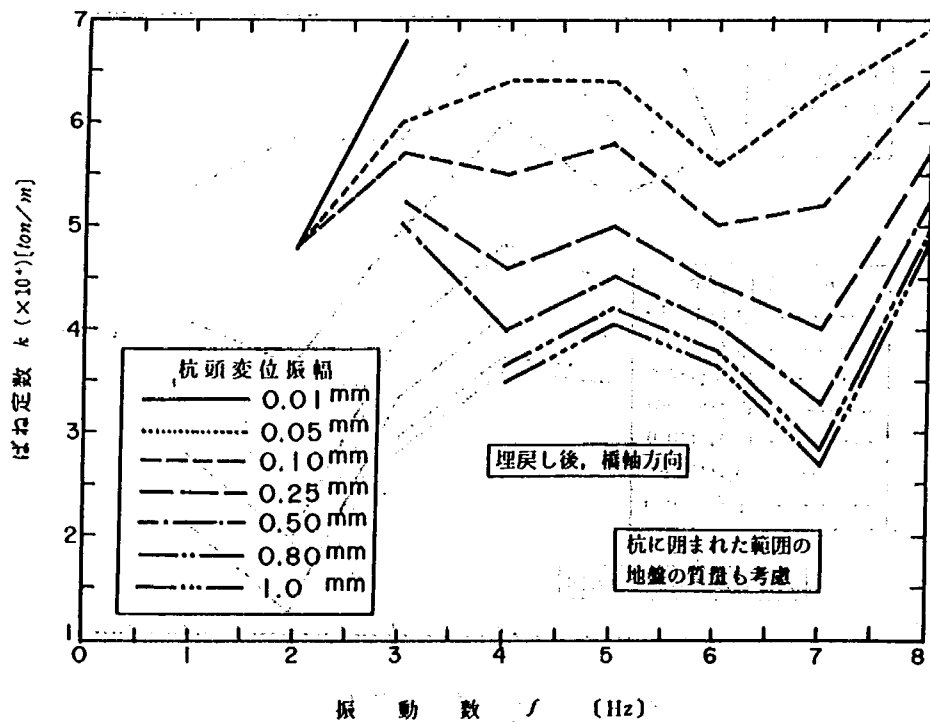


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.11(3) ばね定数の振動数依存性 (埋戻し後、橋軸直角方向)

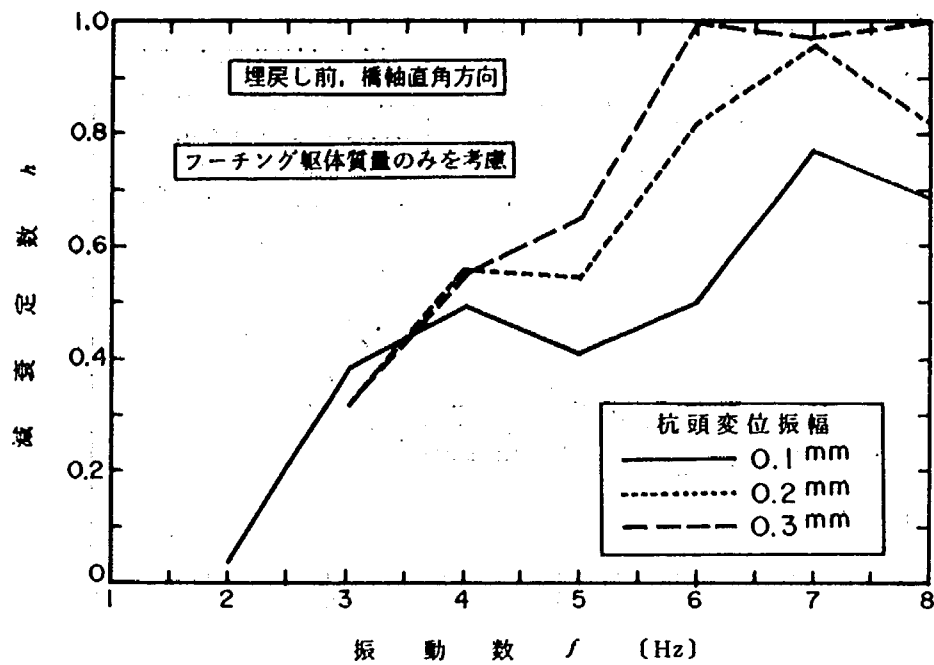


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

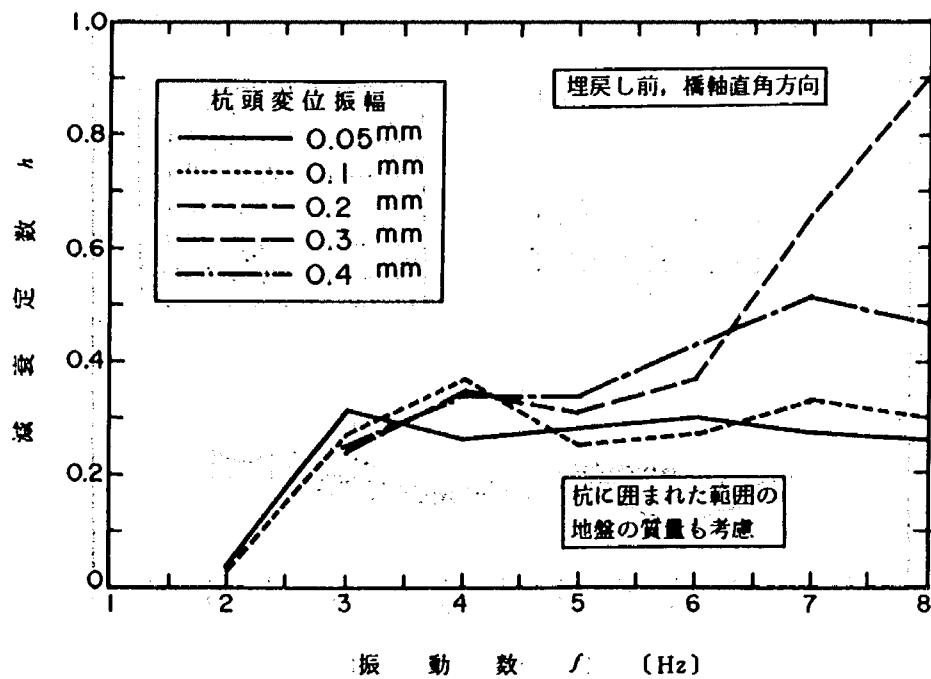


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.11(4) ばね定数の振動数依存性 (埋戻し後、橋軸方向)

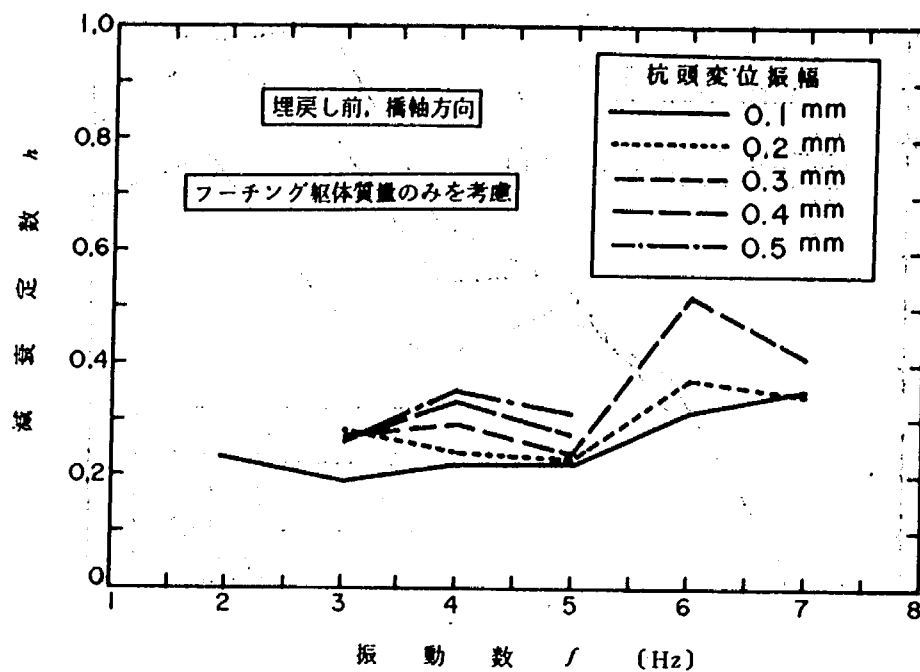


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

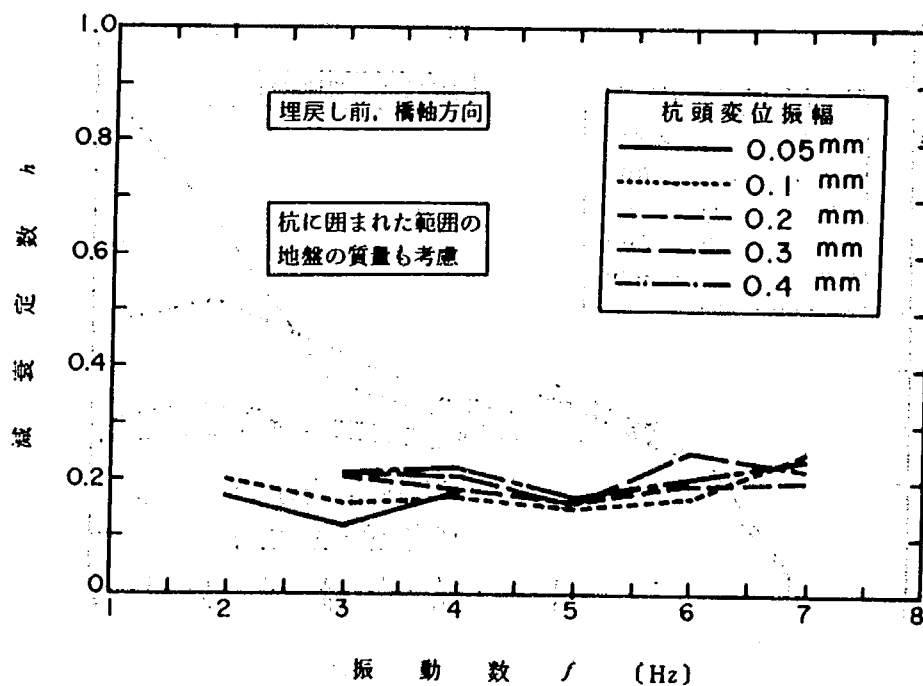


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.12(1) 減衰定数の振動数依存性 (埋戻し前、橋軸直角方向)

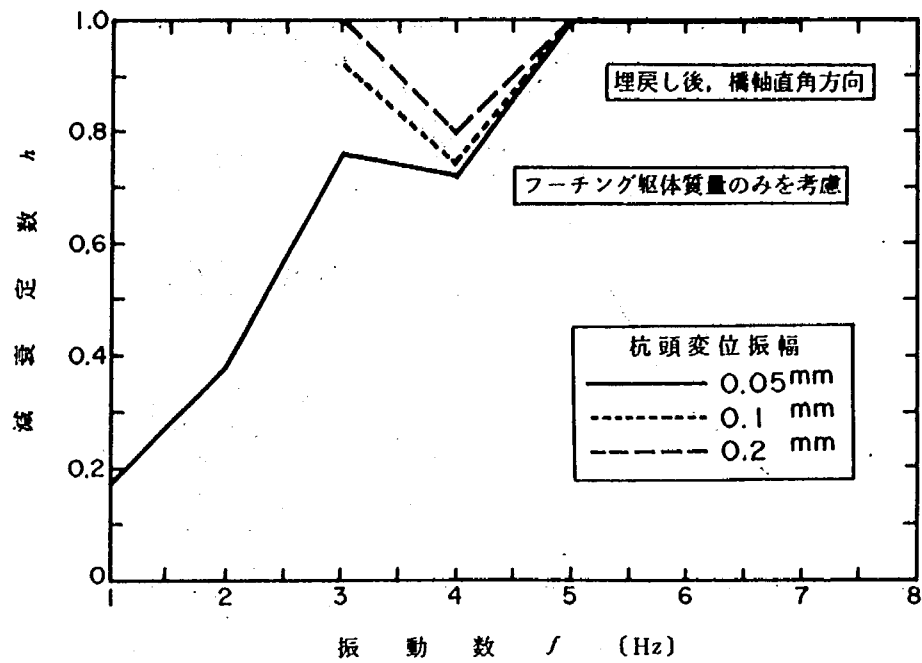


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

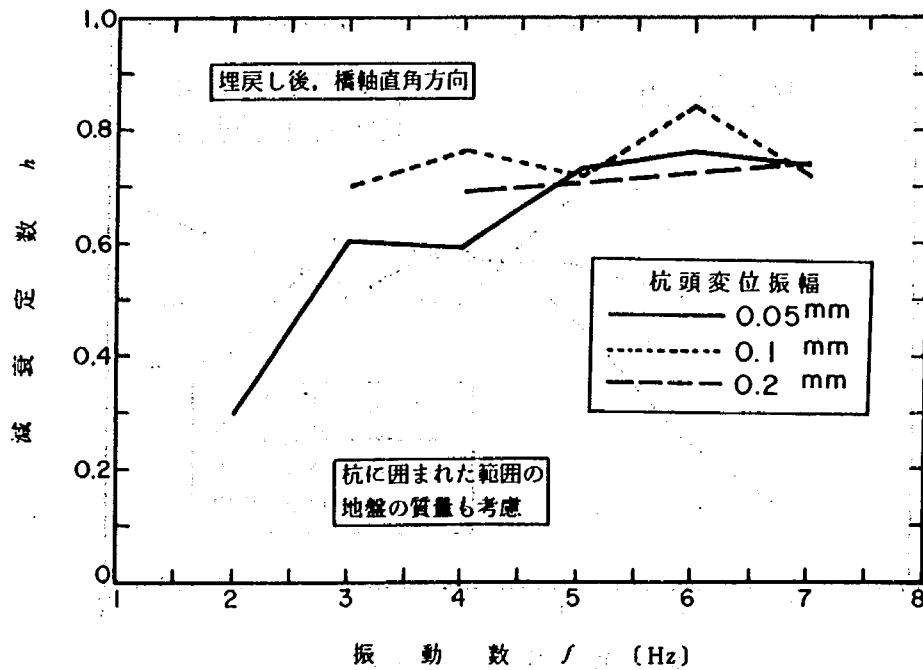


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.12(2) 減衰定数の振動数依存性 (埋戻し前、橋軸方向)

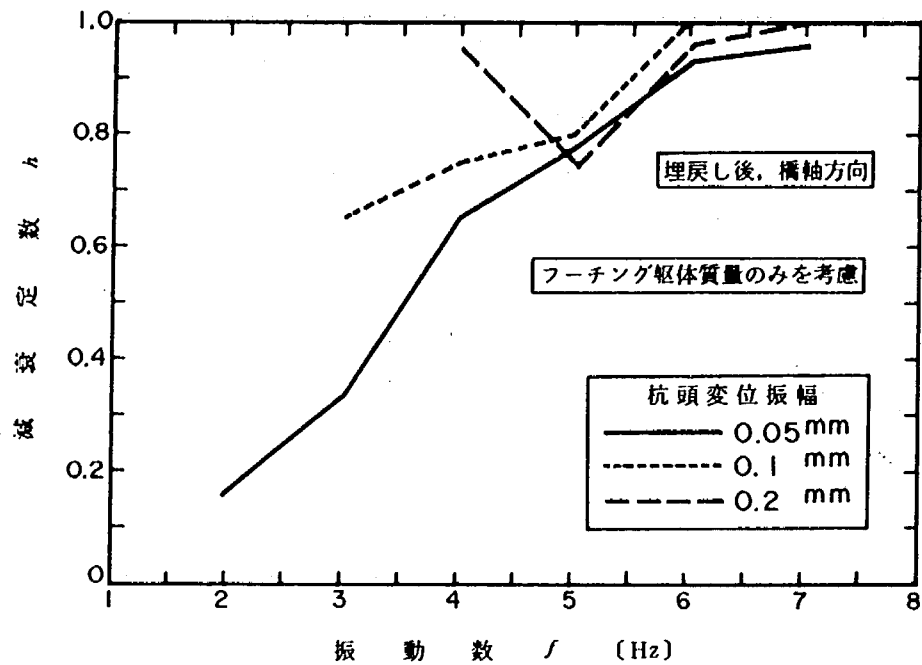


(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合

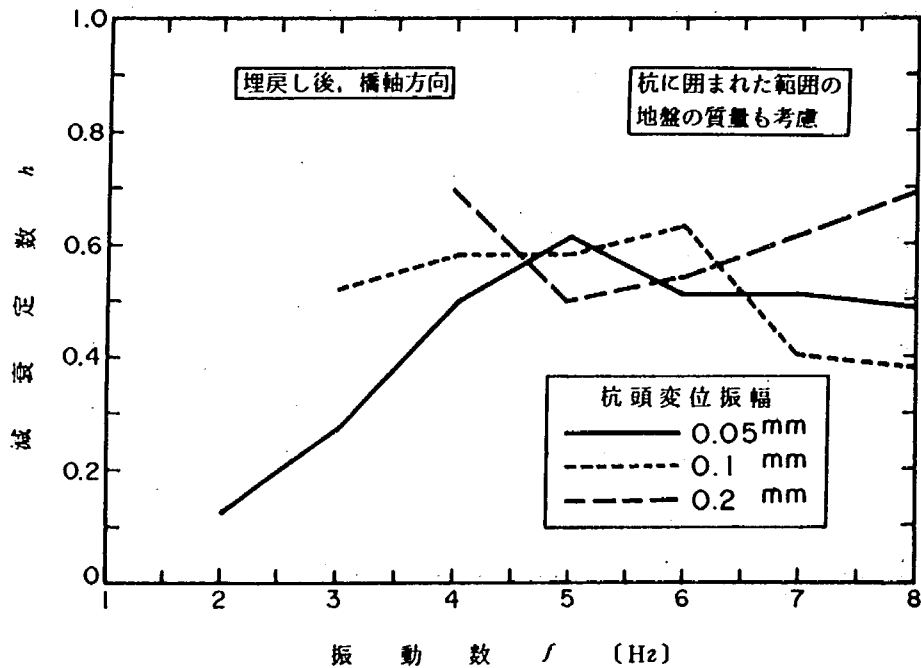


(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.12(3) 減衰定数の振動数依存性 (埋戻し後、橋軸直角方向)



(a) フーチング躯体質量のみを考慮する場合



(b) 杭に囲まれた範囲の地盤の質量も考慮する場合

付図 5.12(4) 減衰定数の振動数依存性 (埋戻し後、橋軸方向)

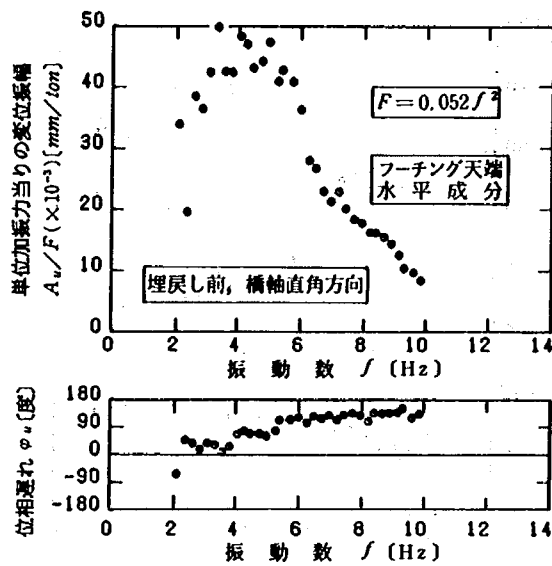
付 属 資 料 6

フーチング各部の水平変位および
フーチングの回転角の共振曲線

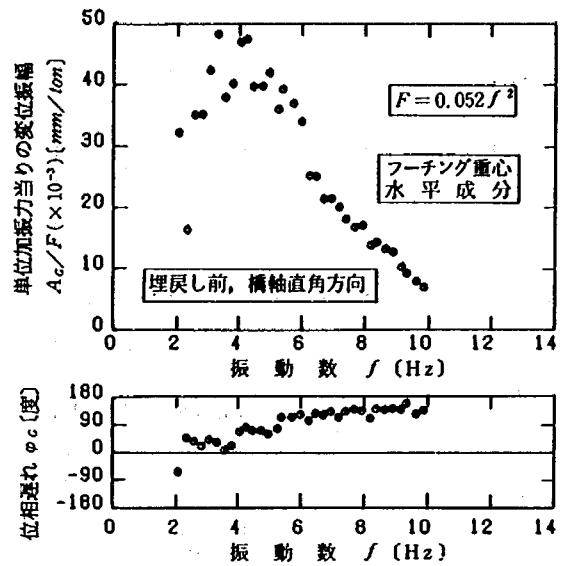
市松直樹

詩人、小説家、評論家、文壇関係者

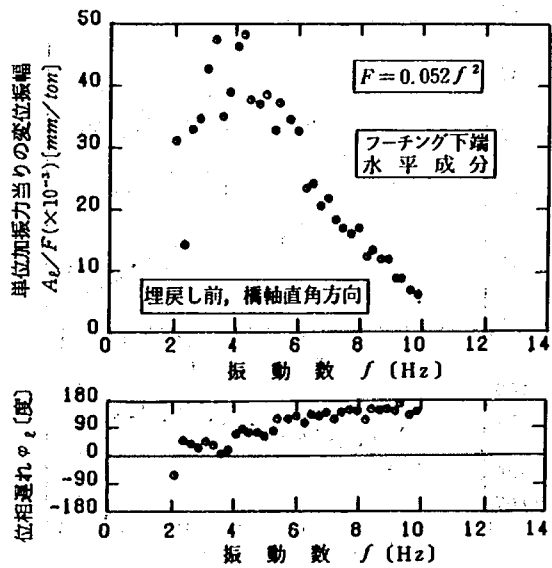
昭和10年、東京府立第一高等学校卒業



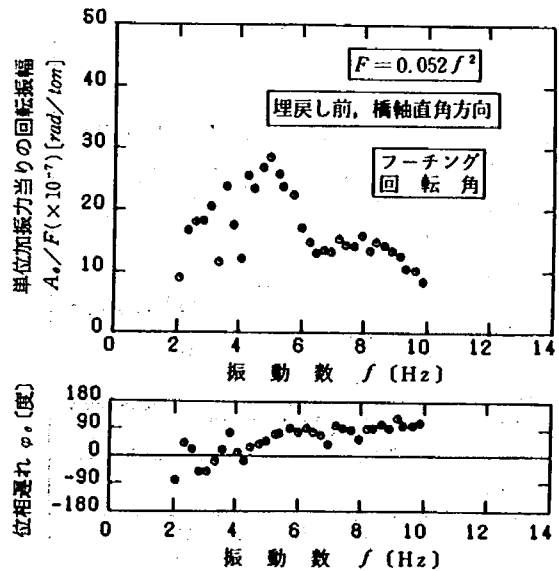
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

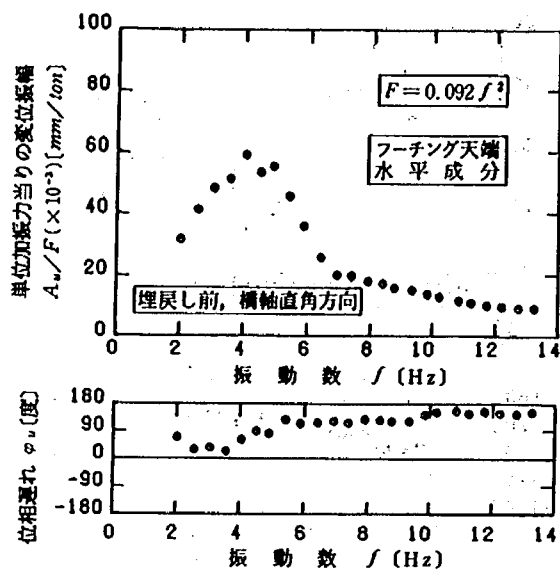


(c) フーチング下端の水平変位

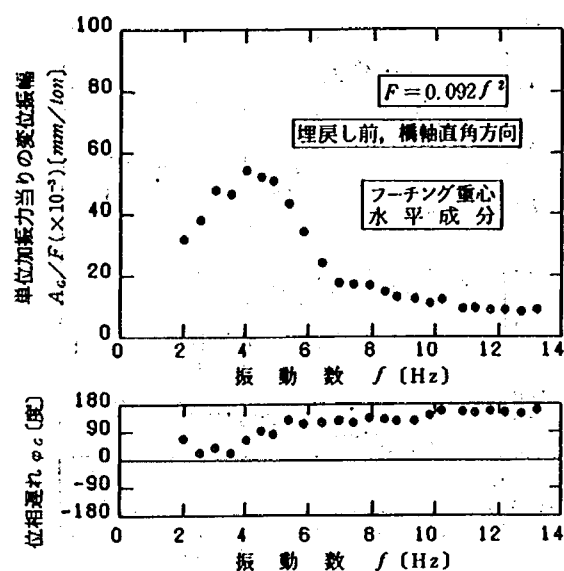


(d) フーチングの回転角

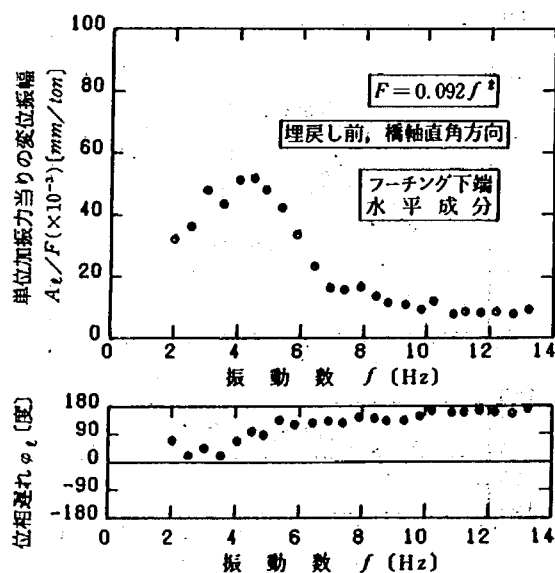
付図 6.1 (1) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-1, $F = 0.052 f^2$)



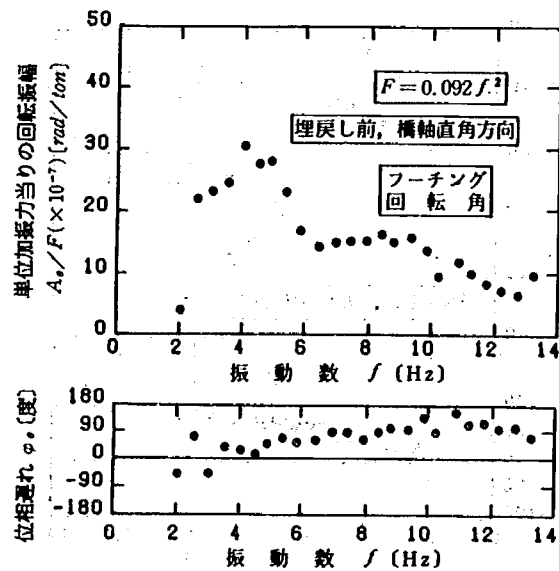
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

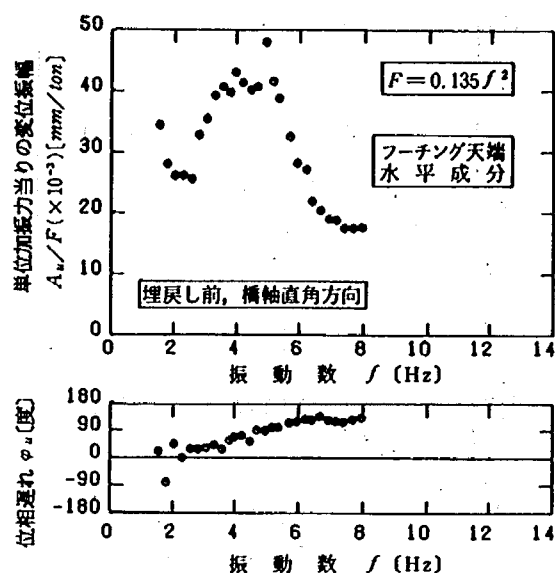


(c) フーチング下端の水平変位

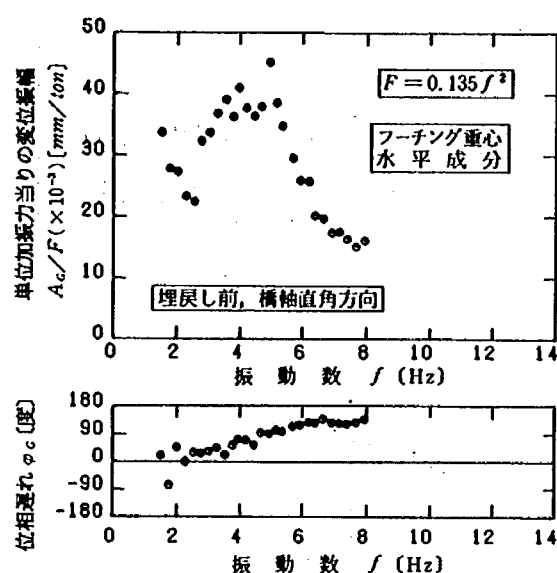


(d) フーチングの回転角

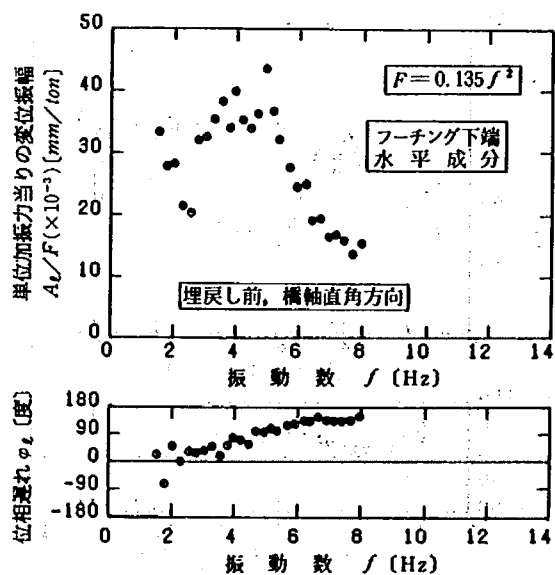
付図 6.1 (2) 埋戻し前、橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-2, $F = 0.092 f^2$)



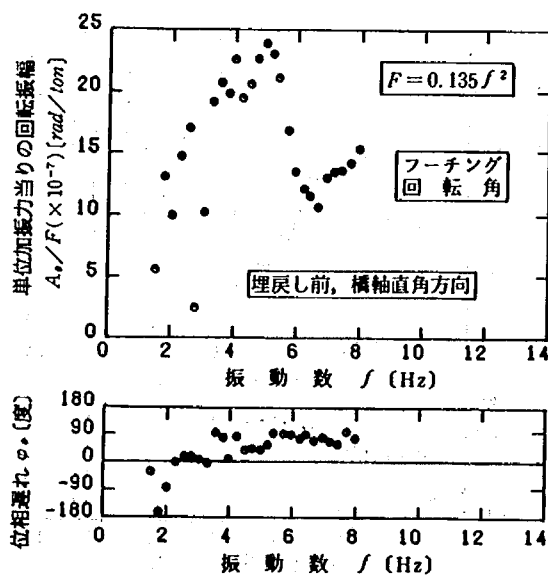
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

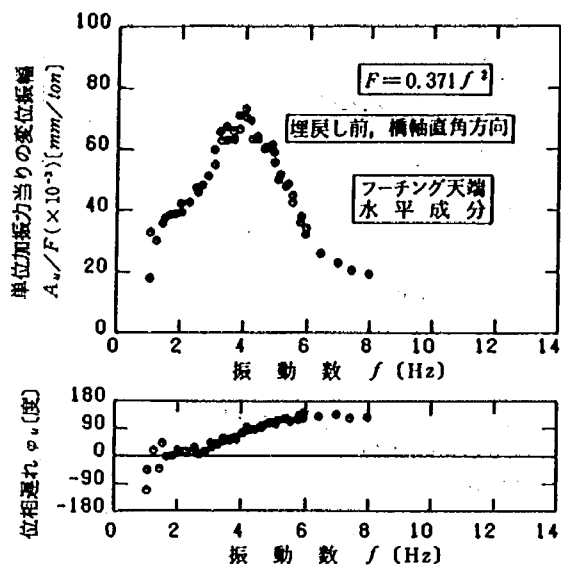


(c) フーチング下端の水平変位

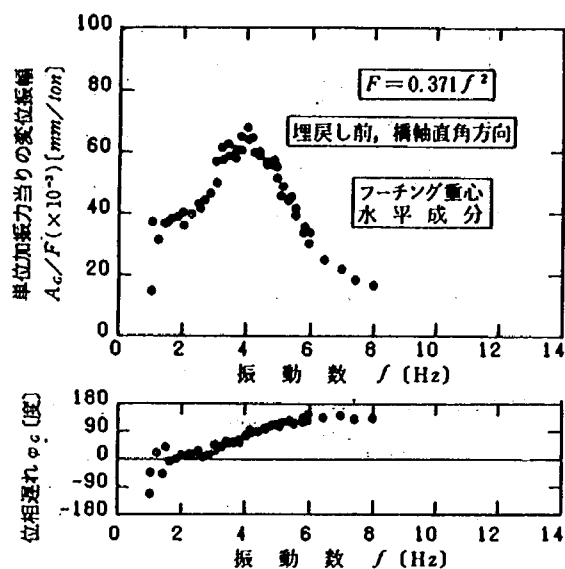


(d) フーチングの回転角

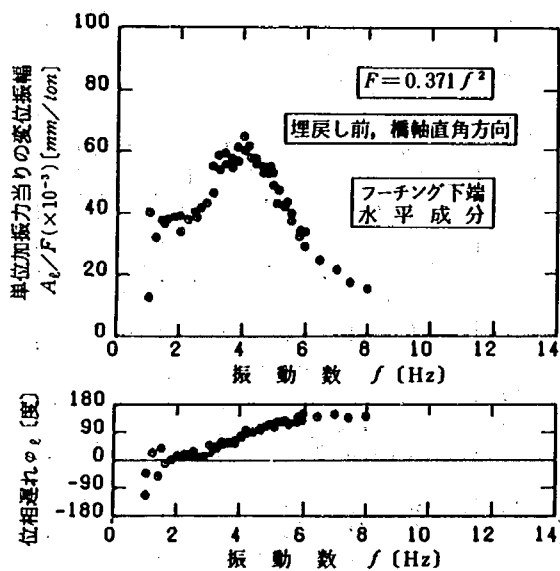
付図 6.1 (3) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-3, $F = 0.135 f^2$)



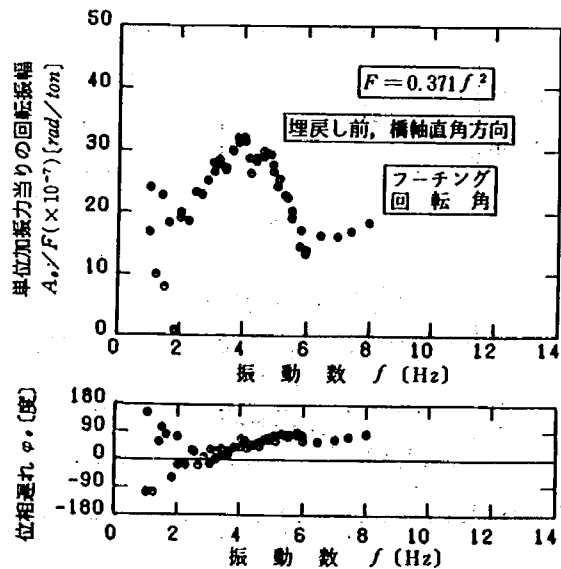
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

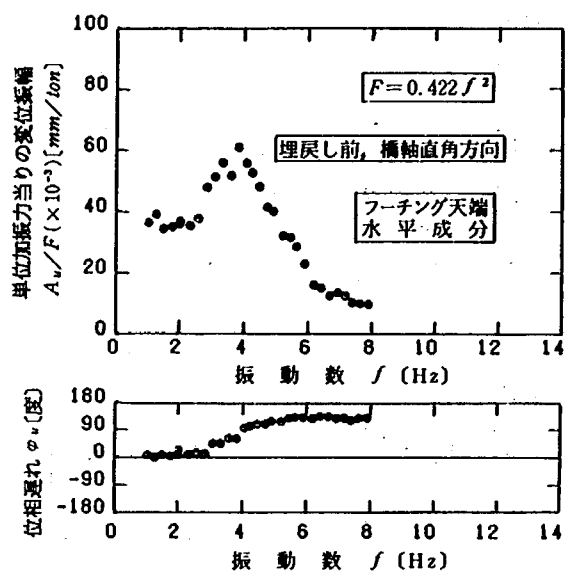


(c) フーチング下端の水平変位

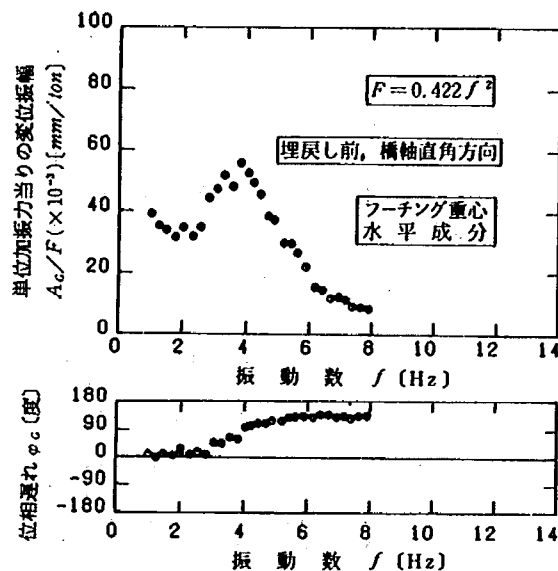


(d) フーチングの回転角

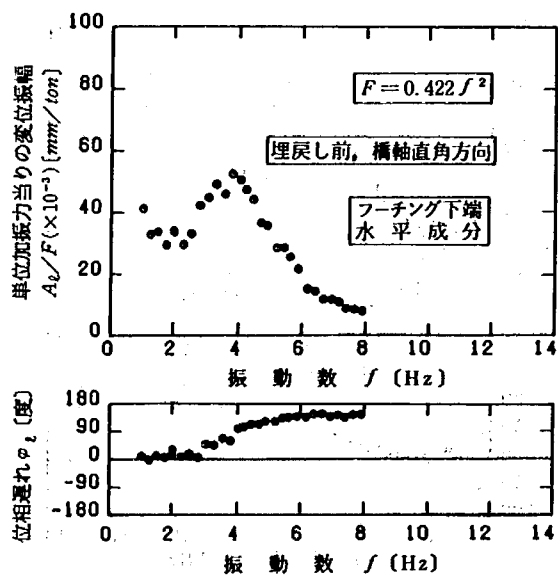
付図 6.1 (4) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-4, $F=0.371 f^2$)



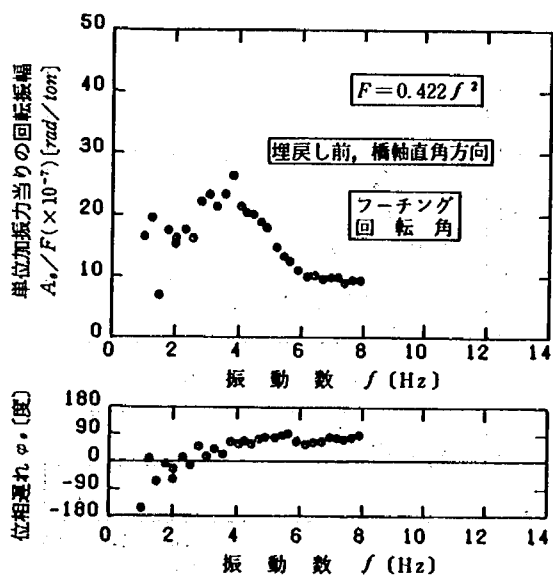
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

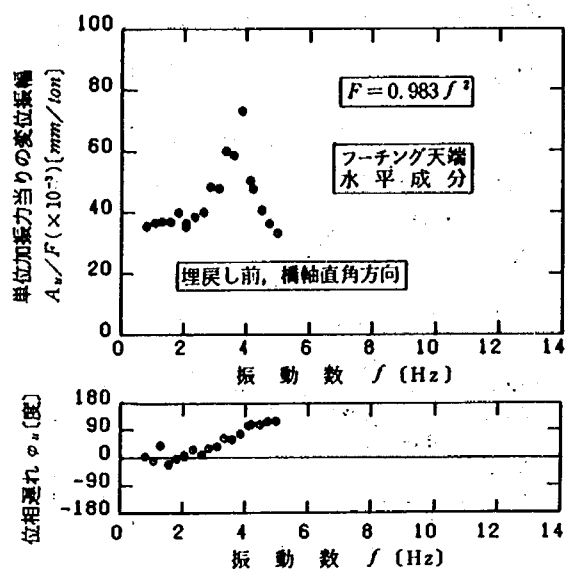


(c) フーチング下端の水平変位

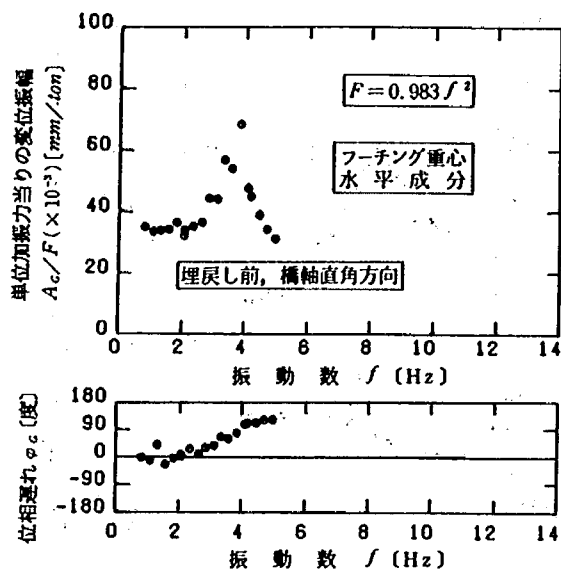


(d) フーチングの回転角

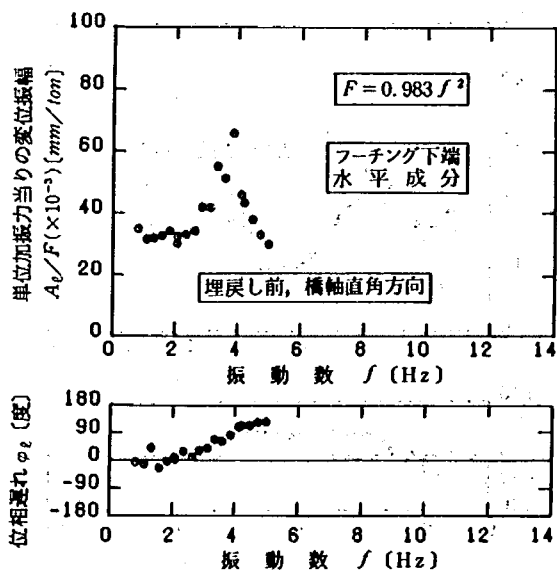
付図 6.1 (5) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-5, $F=0.422 f^2$)



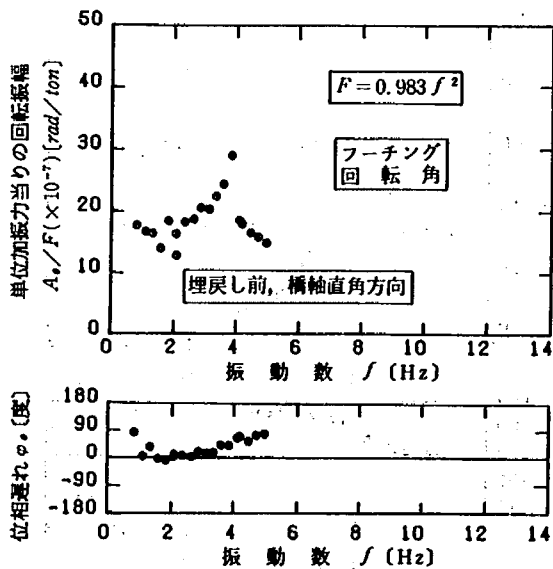
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

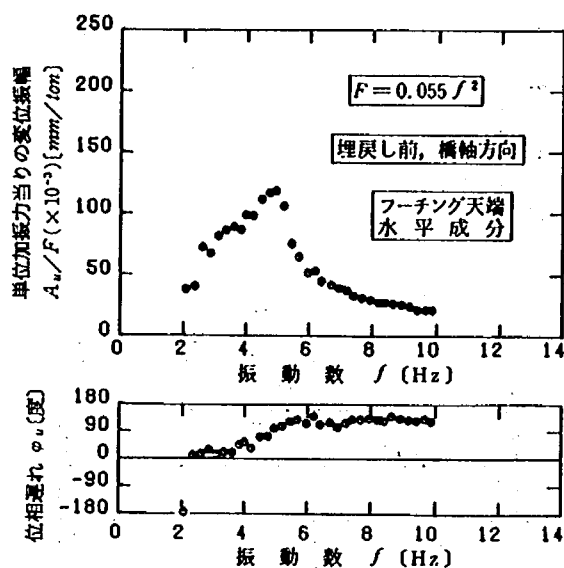


(c) フーチング下端の水平変位

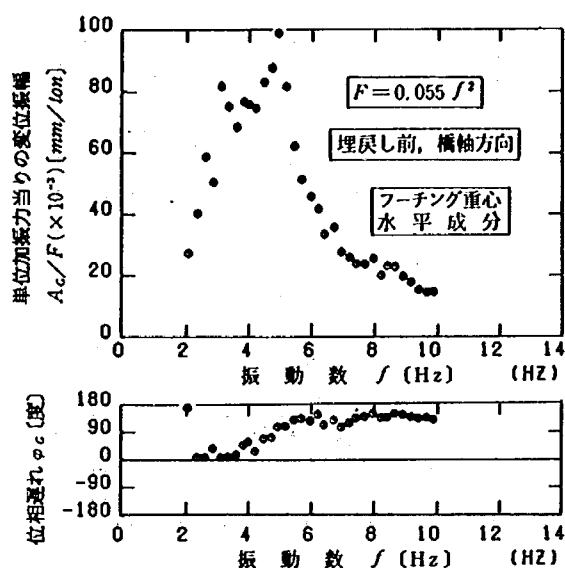


(d) フーチングの回転角

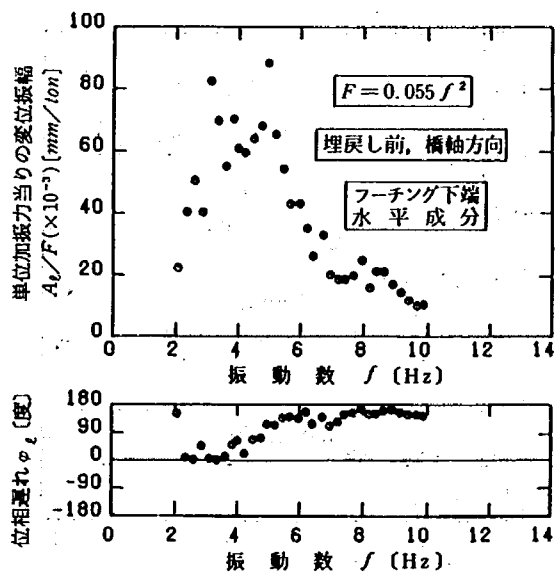
付図 6.1 (6) 埋戻し前, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース A-6, $F = 0.983 f^2$)



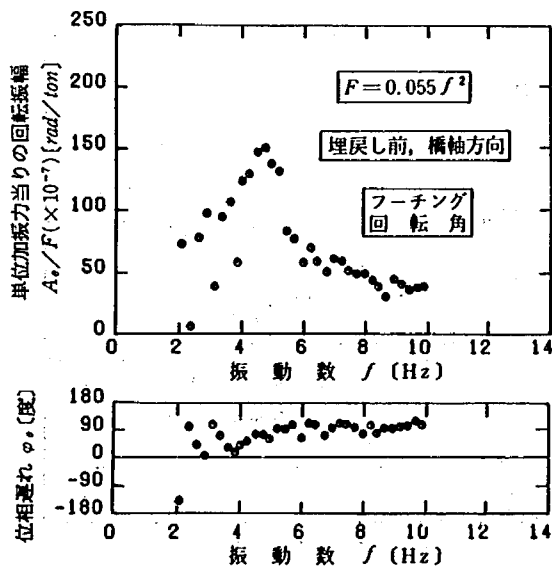
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

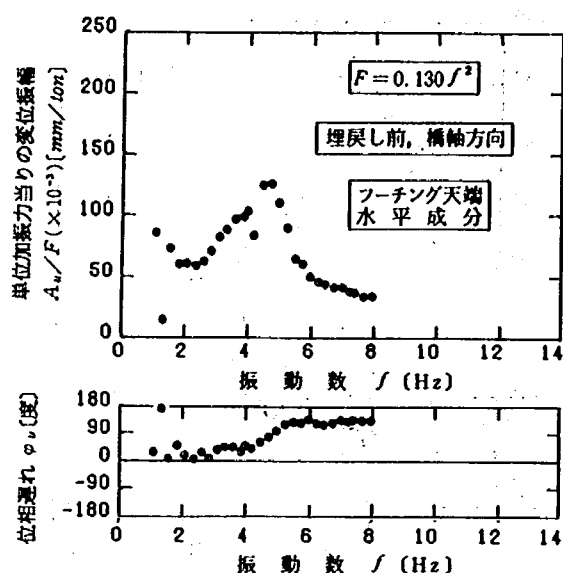


(c) フーチング下端の水平変位

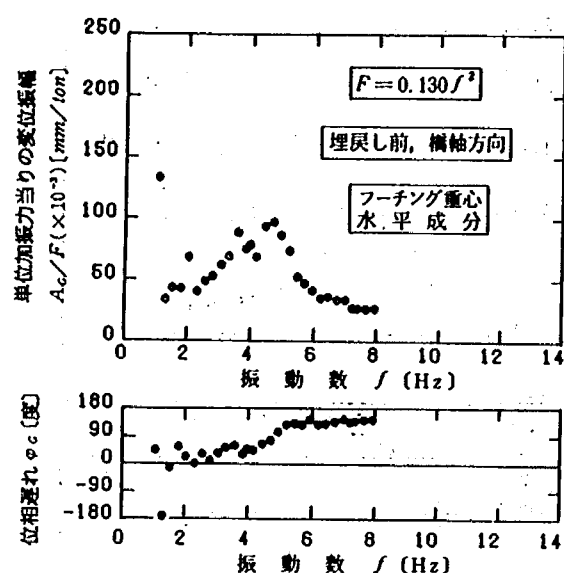


(d) フーチングの回転角

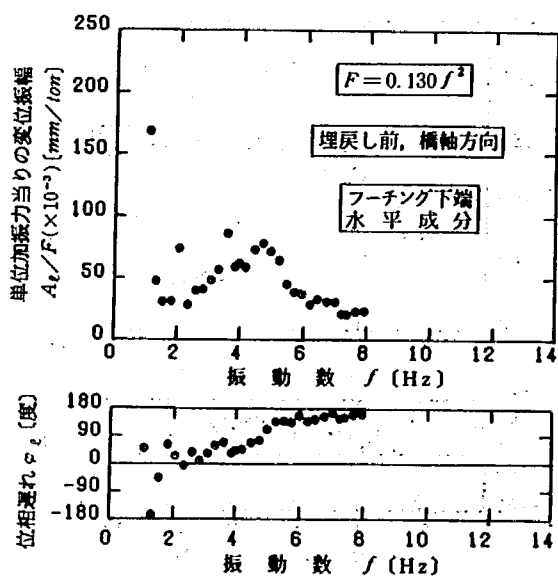
付図 6.2(1) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース B-1, $F = 0.055 f^2$)



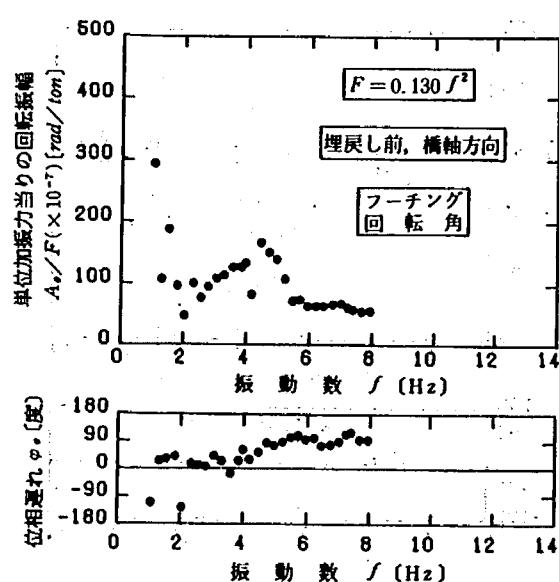
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

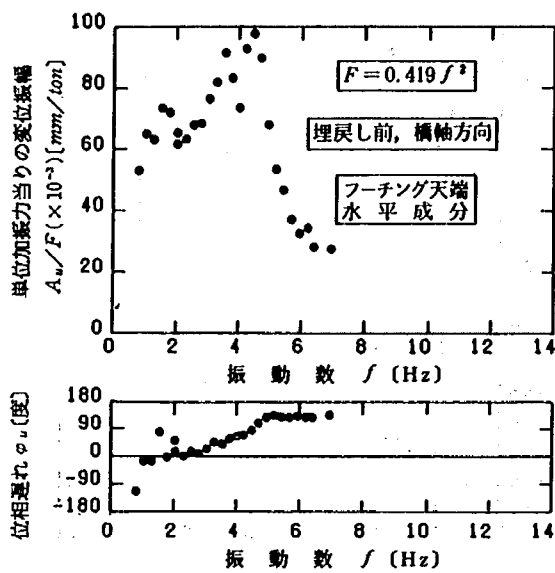


(c) フーチング下端の水平変位

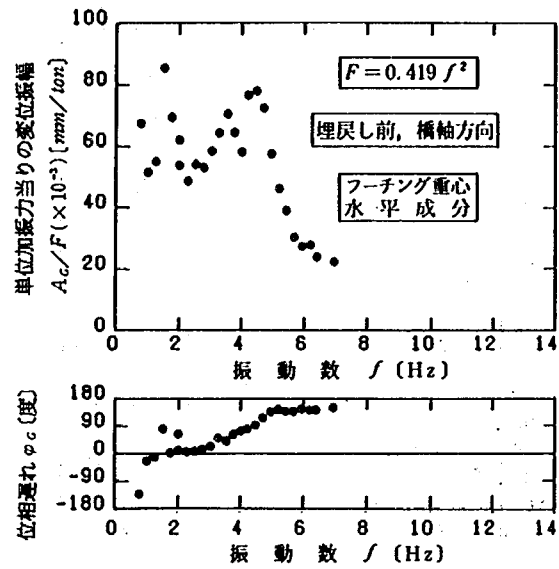


(d) フーチングの回転角

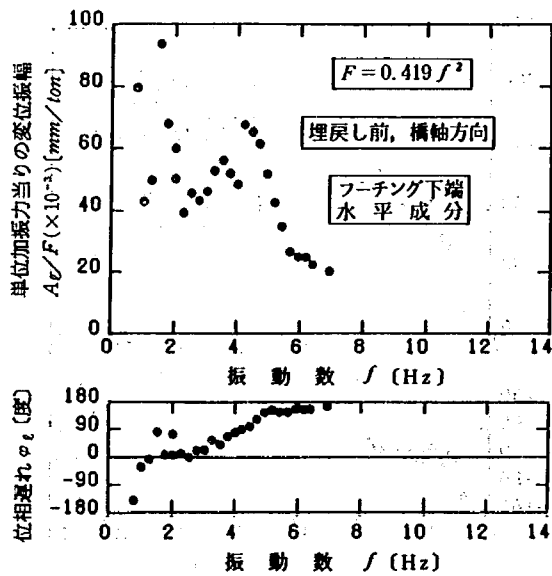
付図 6.2 (2) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
 (実験ケース B-2, $F=0.130 f^2$)



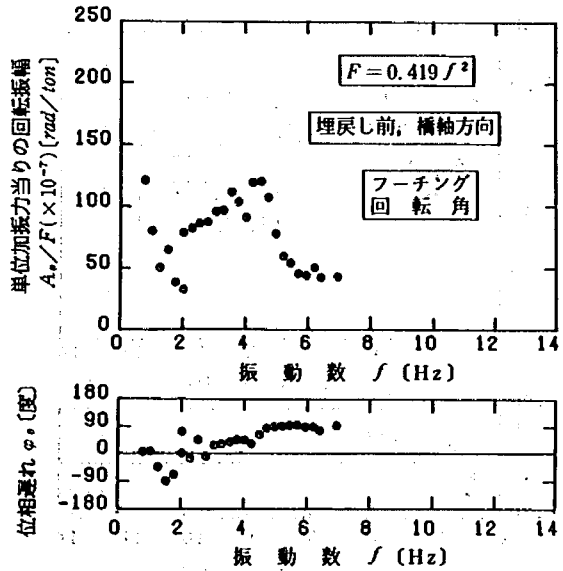
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

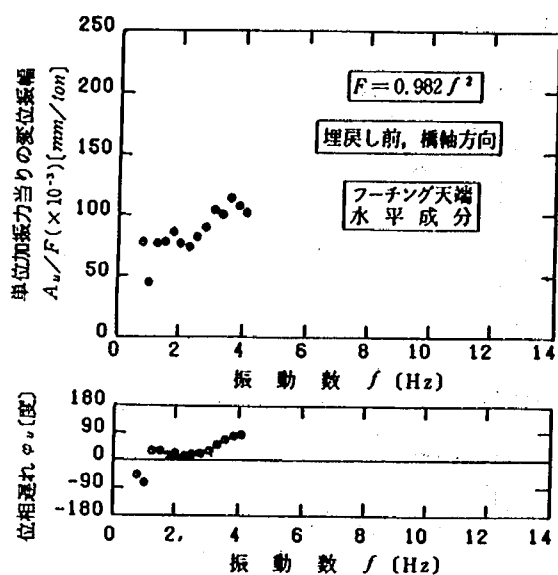


(c) フーチング下端の水平変位

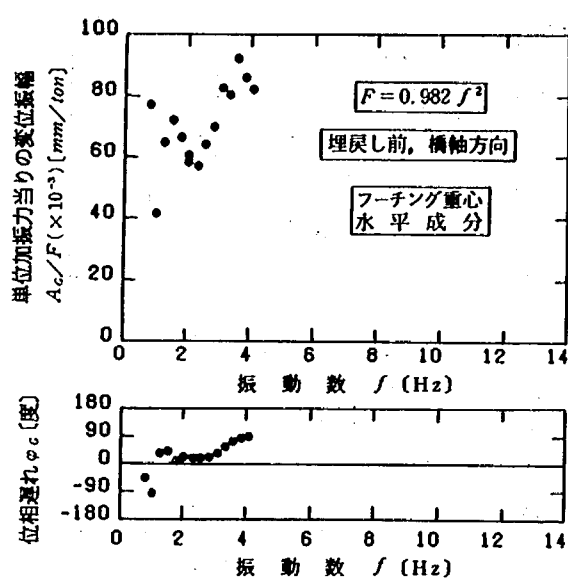


(d) フーチングの回転角

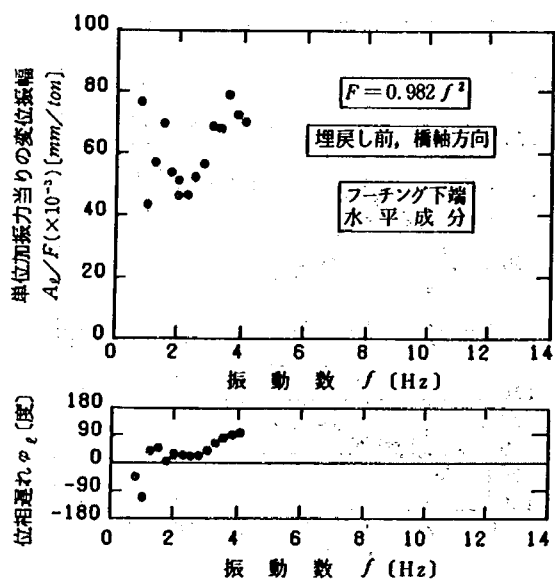
付図 6.2 (3) 埋戻し前, 橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース B-3, $F = 0.419 f^2$)



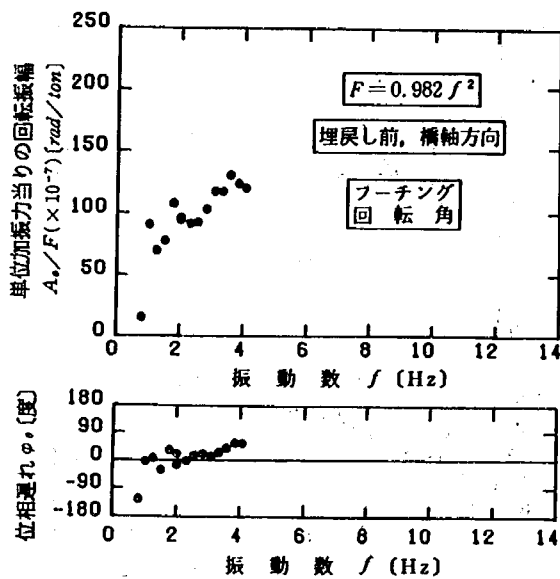
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

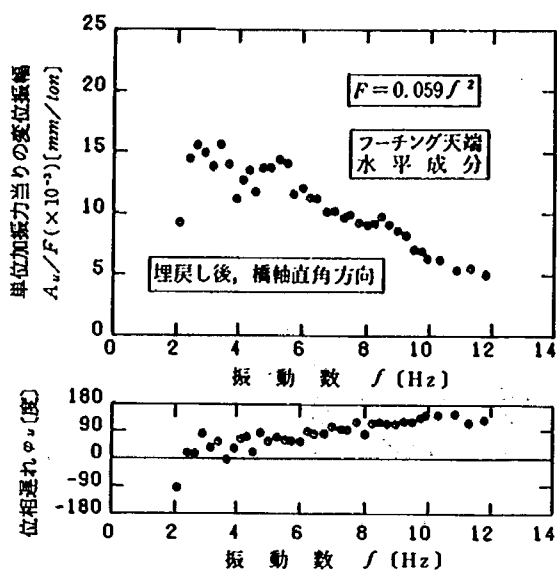


(c) フーチング下端の水平変位

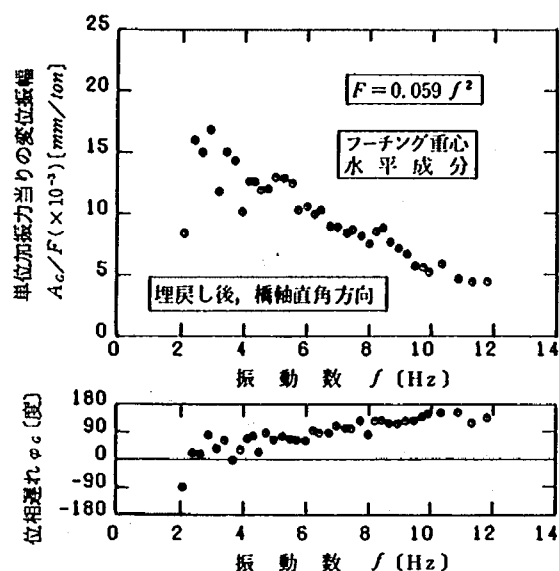


(d) フーチングの回転角

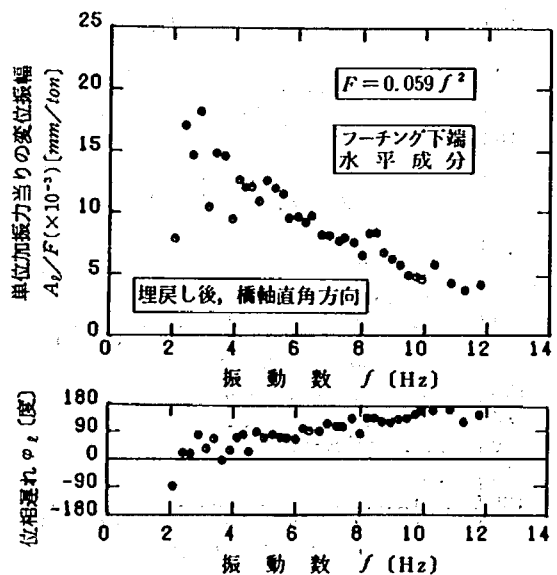
付図 6.2(4) 埋戻し前、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース B-4, $F = 0.982 f^2$)



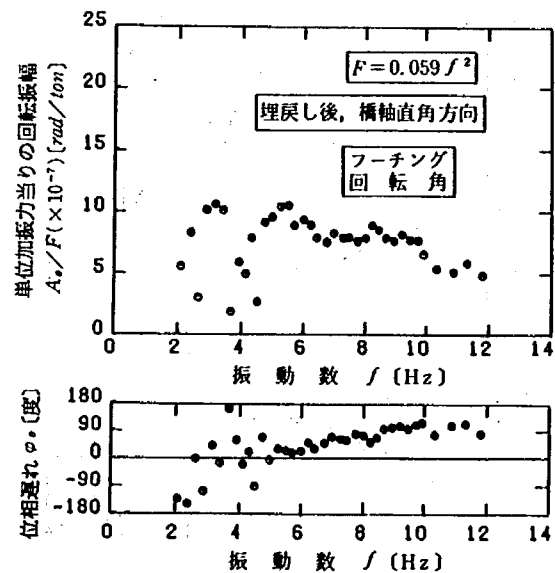
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

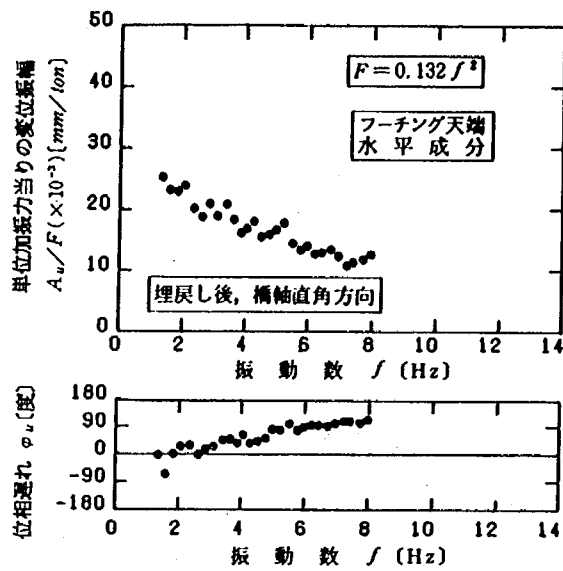


(c) フーチング下端の水平変位

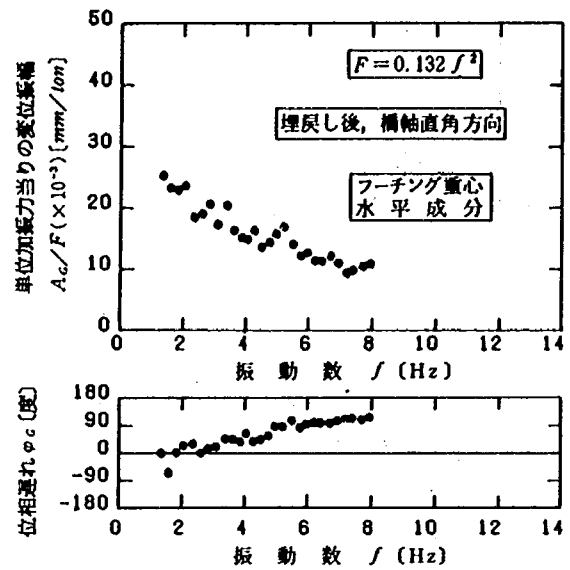


(d) フーチングの回転角

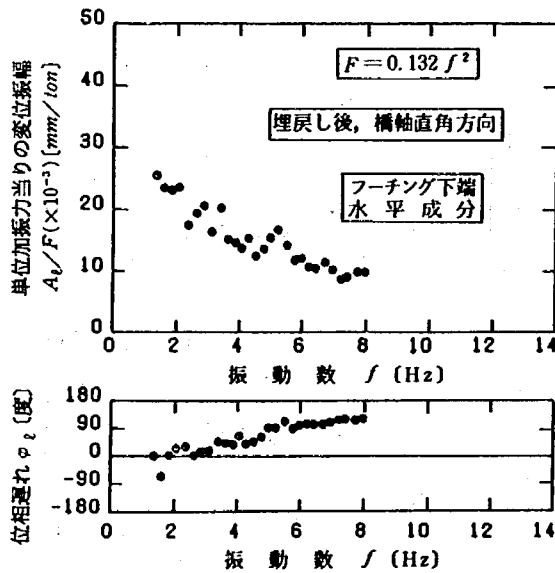
付図 6.3 (1) 埋戻し後, 橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース C-1, $F = 0.059 f^2$)



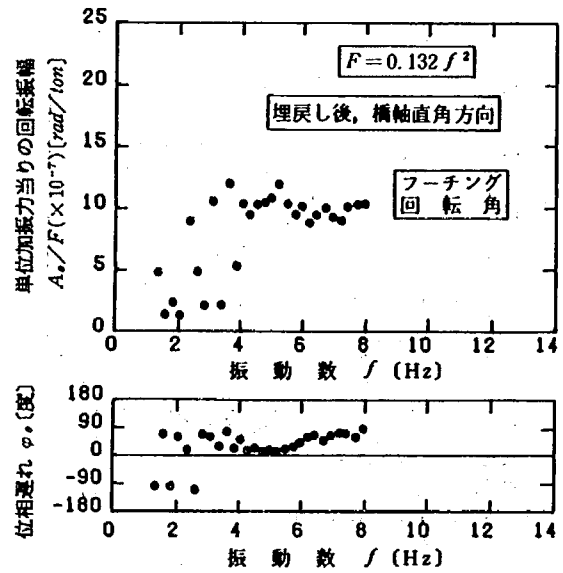
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

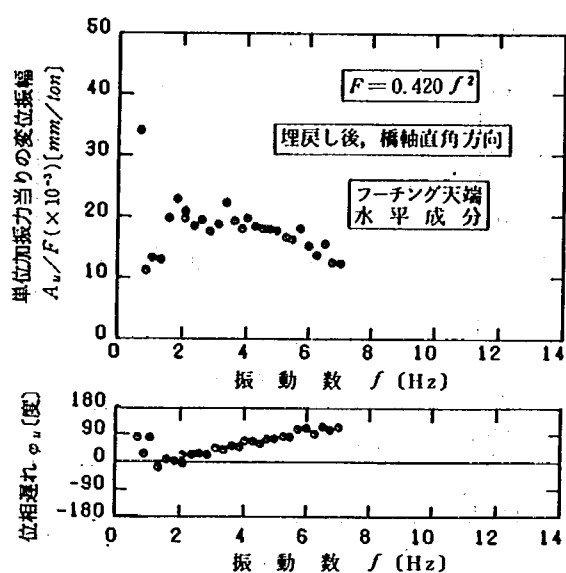


(c) フーチング下端の水平変位

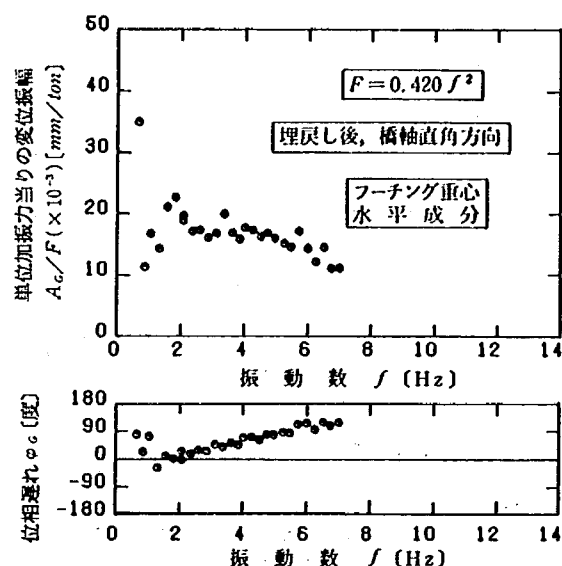


(d) フーチングの回転角

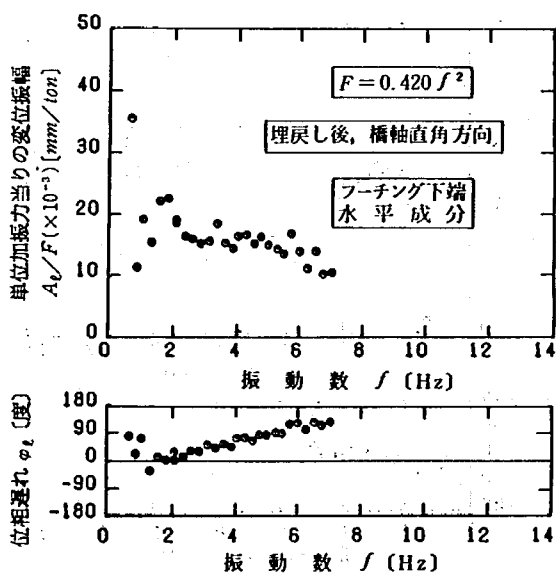
付図 6.3 (2) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
 (実験ケース C-2, $F=0.132 f^2$)



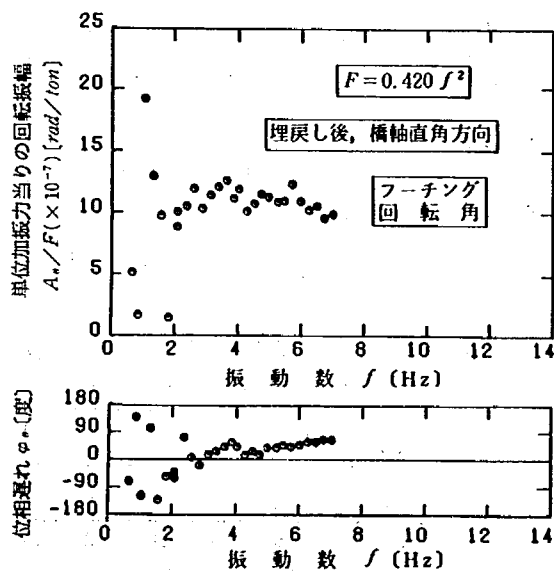
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

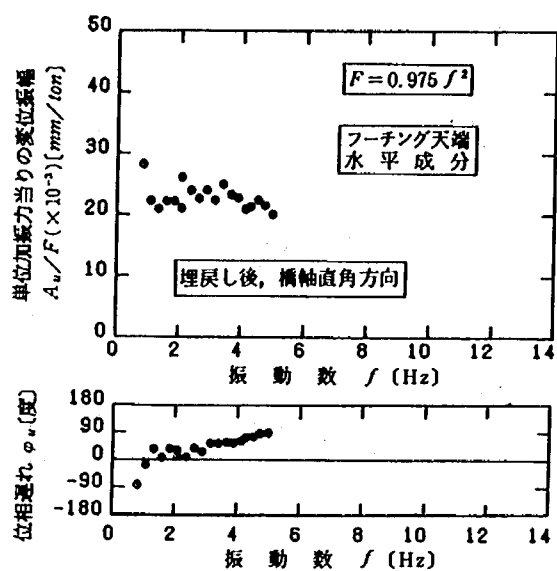


(c) フーチング下端の水平変位

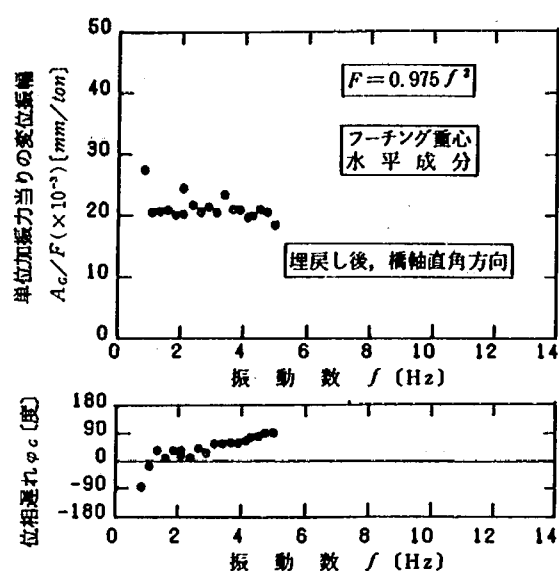


(d) フーチングの回転角

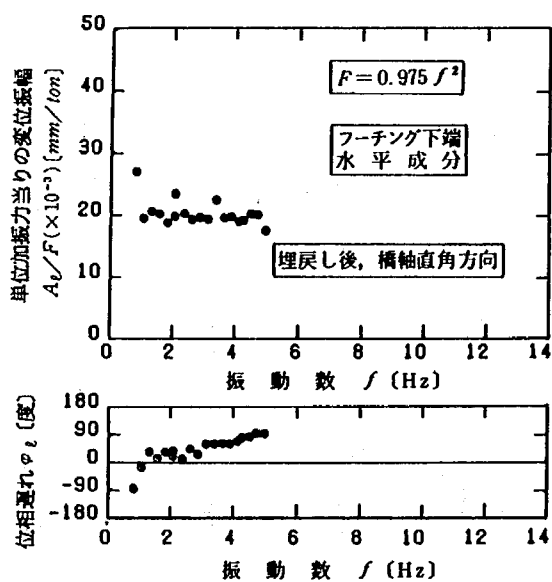
付図 6.3 (3) 埋戻し後、橋軸直角方向のフーチン各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース C-3, $F = 0.420 f^2$)



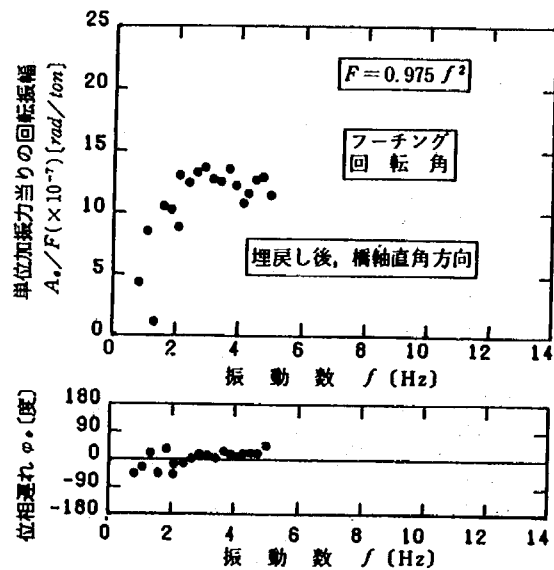
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

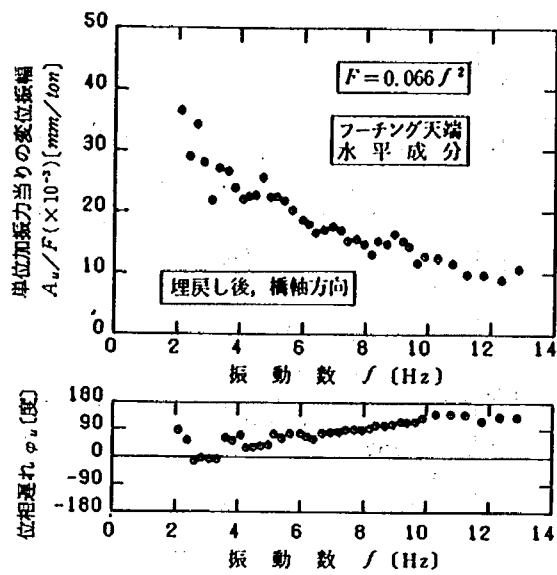


(c) フーチング下端の水平変位

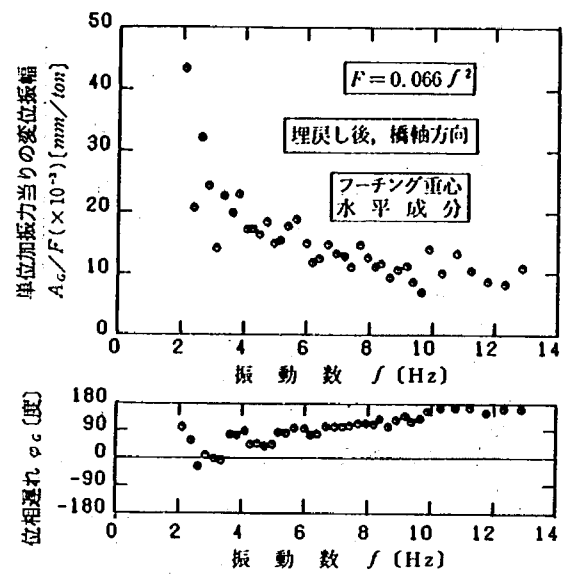


(d) フーチングの回転角

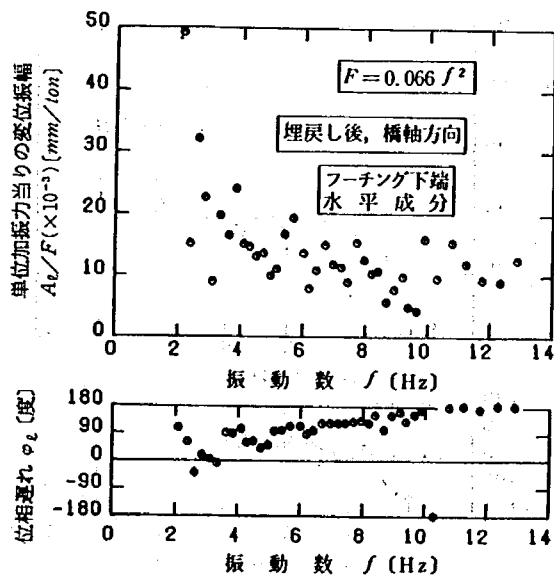
付図 6.3 (4) 埋戻し前、橋軸直角方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース C-4, $F = 0.975 f^2$)



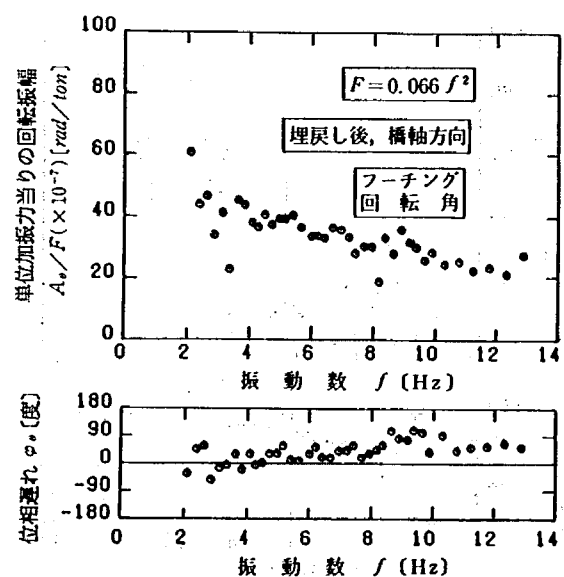
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位



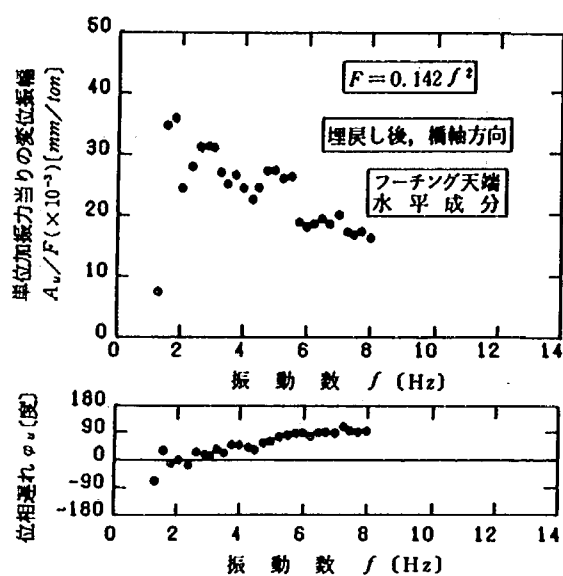
(c) フーチング下端の水平変位



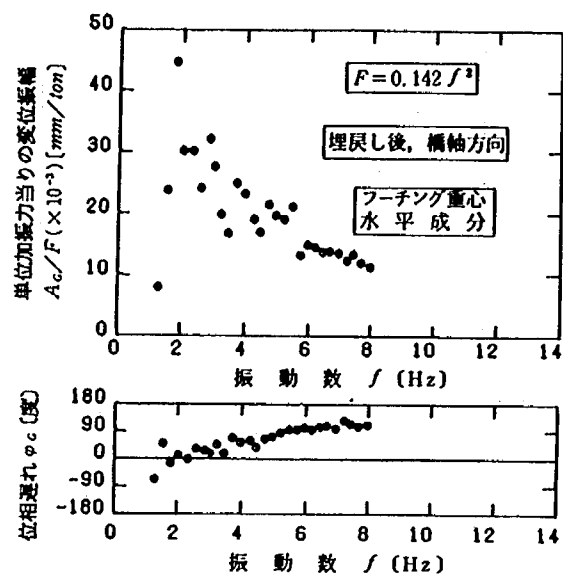
(d) フーチングの回転角

付図 6.4 (1) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線

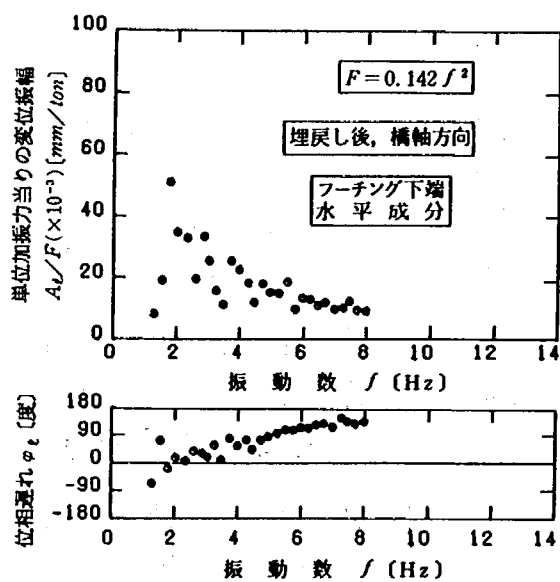
(実験ケース D-1, $F=0.066 f^2$)



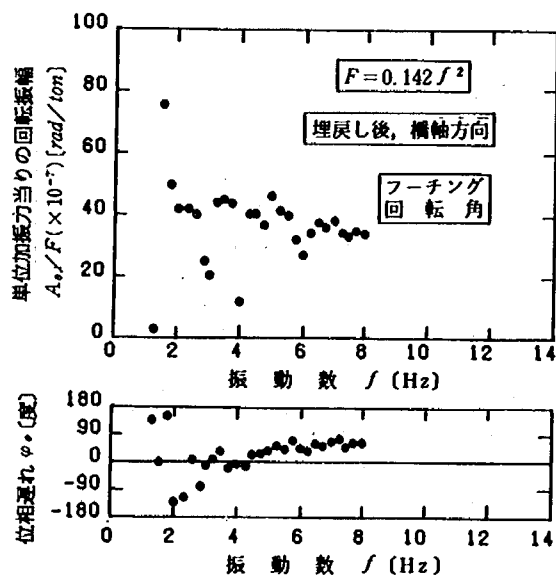
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

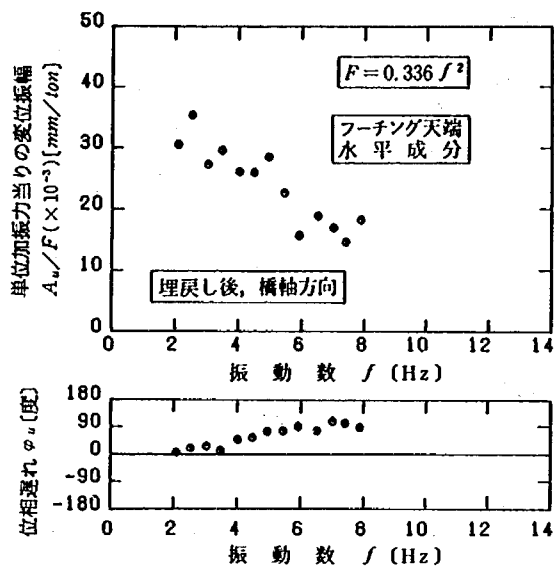


(c) フーチング下端の水平変位

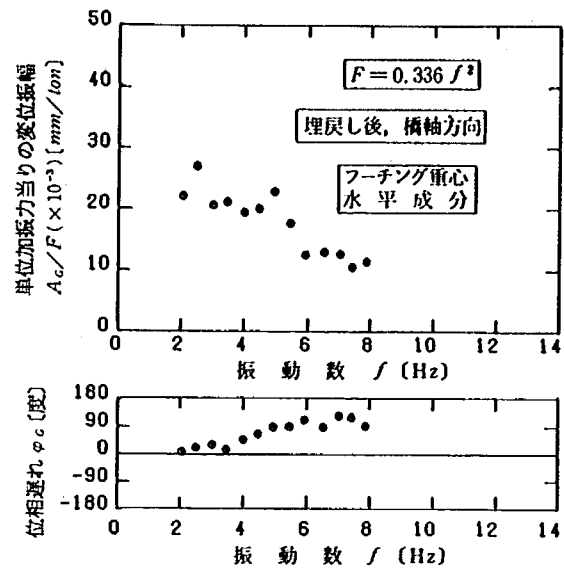


(d) フーチングの回転角

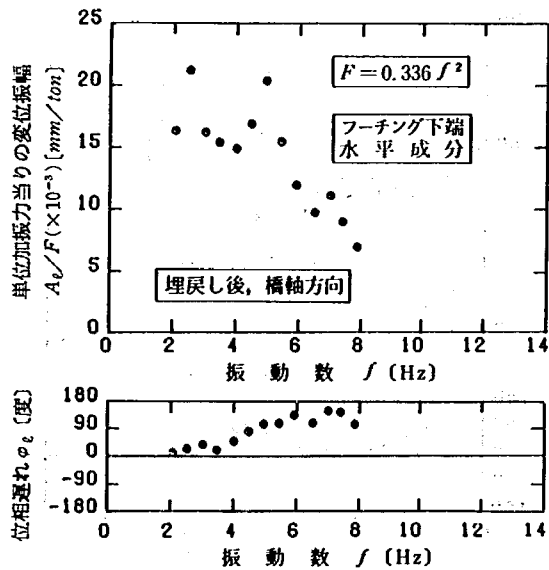
付図 6.4 (2) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース D-2, $F = 0.142 f^2$)



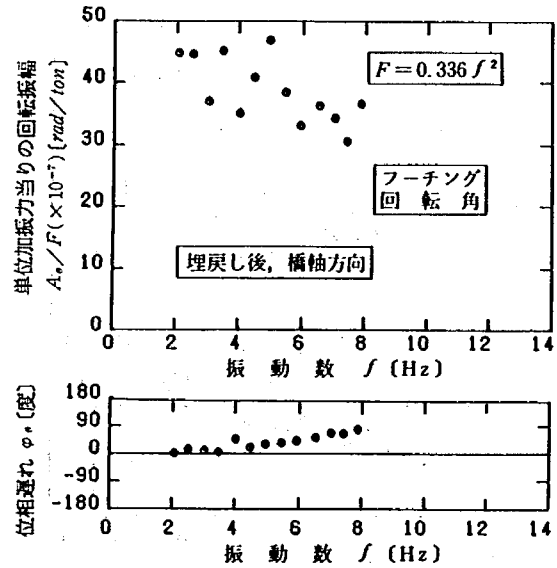
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

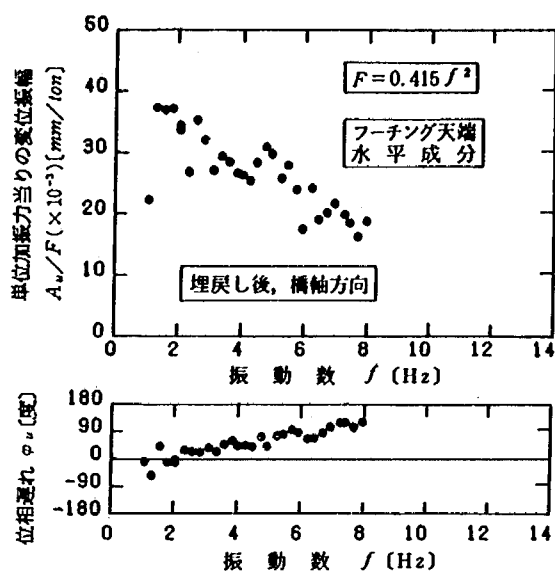


(c) フーチング下端の水平変位

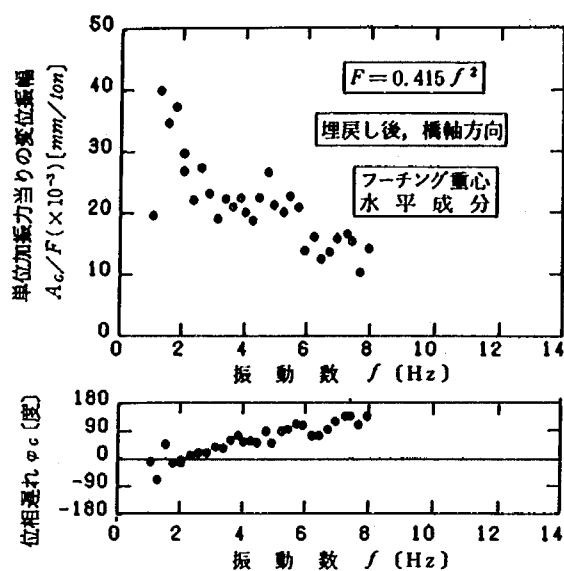


(d) フーチングの回転角

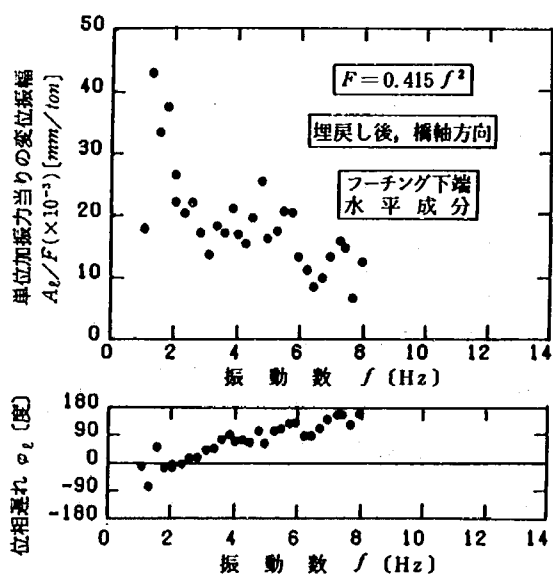
付図 6.4 (3) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース D-3, $F = 0.336 f^2$)



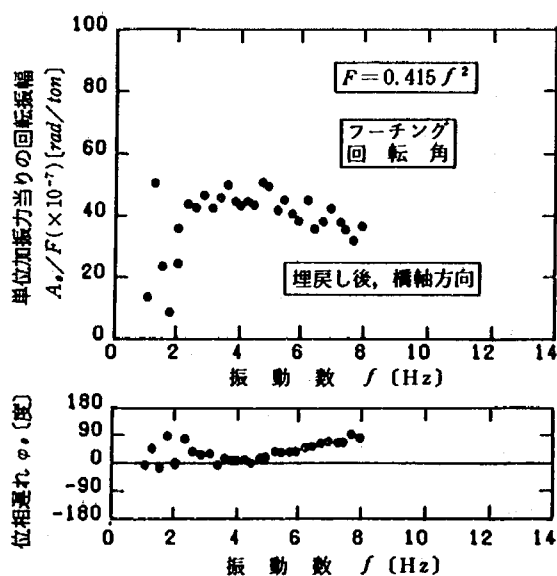
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位

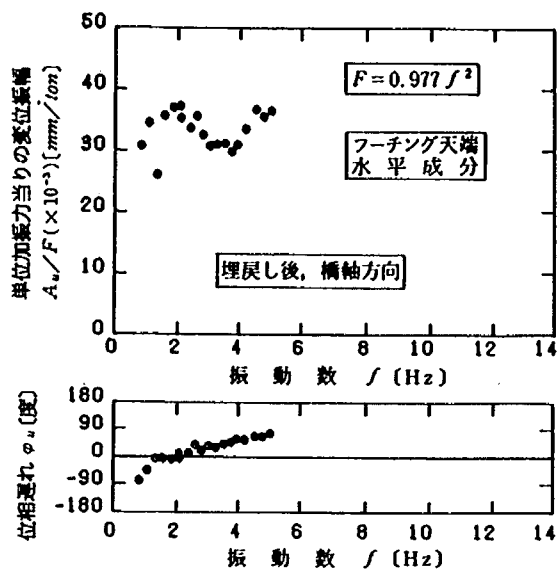


(c) フーチング下端の水平変位

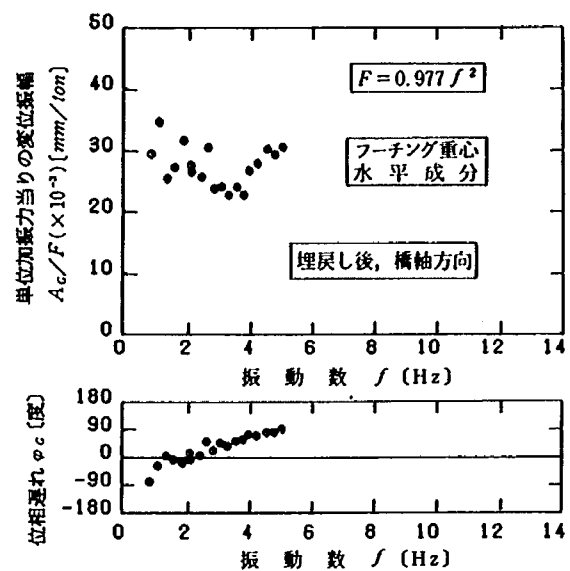


(d) フーチングの回転角

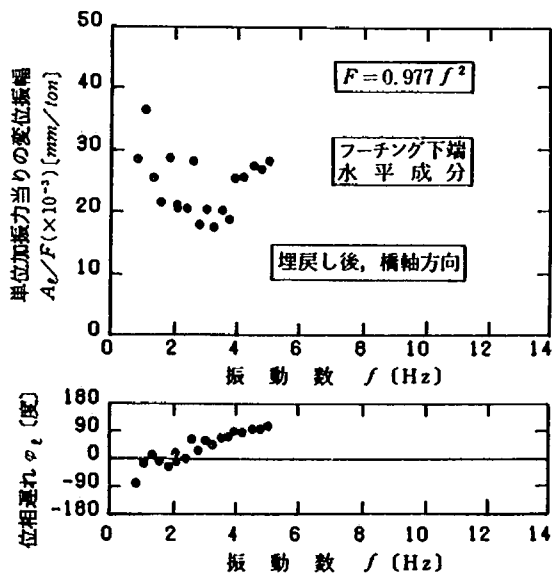
付図 6.4 (4) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース D-4, $F = 0.415 f^2$)



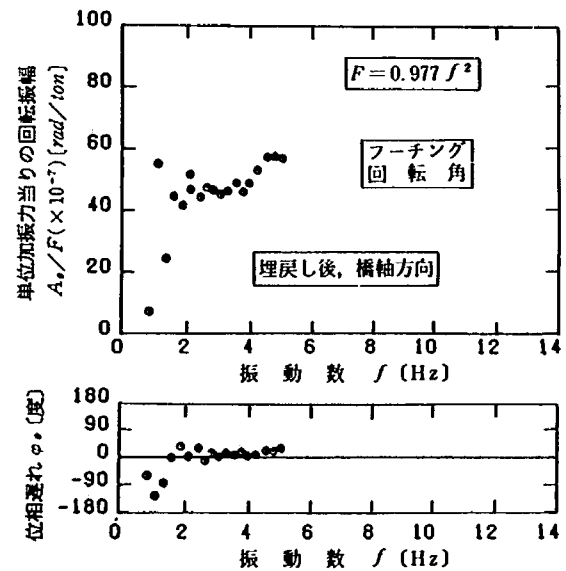
(a) フーチング天端の水平変位



(b) フーチング重心の水平変位



(c) フーチング下端の水平変位



(d) フーチングの回転角

付図 6.4 (5) 埋戻し後、橋軸方向のフーチング各部の水平変位および回転角の共振曲線
(実験ケース D-5, $F = 0.977 f^2$)

付 属 資 料 7

地中部有効質量の算出方法

【 特 許 証 明 書 】

特許出願の審理終了後

7. 地中部有効質量の算出方法

付図 7.1 に示す杭で囲まれた範囲の地盤が杭と一体となって運動すると仮定する。次に、付図 7.2 に示すように、加振時の地盤の変形モードは杭頭に水平力が作用した時の静的な杭の変形モードに等しいと仮定する。したがって、杭のヤング率を E 、断面 2 次モーメントを I 、単位長さ当りの地盤のばね定数を K とすれば、地中部の変位 y は次の支配方程式に従う。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -Ky \quad (\text{付 7.1})$$

また、境界条件は次のとおりである。

$$y|_{x=0} = y_0 \quad (\text{付 7.2})$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (\text{付 7.3})$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} y = 0 \quad (\text{付 7.4})$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{dy}{dx} = 0 \quad (\text{付 7.5})$$

ここで、式 (付 7.2) 中の y_0 は杭頭の変位であり、 y_0 はフーチングの運動に従って時間的に変化するものとする。また、 $K/EI = 4\beta^4$ とおけば、式 (付 7.1) は次のように変形される。

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = -4\beta^4 y \quad (\text{付 7.6})$$

式 (付 7.6) の一般解は次式で与えられる。

$$y = e^{-\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) \quad (\text{付 7.7})$$

式 (付 7.4) および (付 7.5) より、上式中の c_3 および c_4 はともに 0 となる。したがって、式 (付 7.7) は次のようになる。

$$y = e^{-\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) \quad (\text{付 7.8})$$

式 (付 7.8) より、

$$\frac{dy}{dx} = -\beta e^{-\beta x} \{ (c_1 - c_2) \cos \beta x + (c_1 + c_2) \sin \beta x \} \quad (\text{付 7.9})$$

式 (付 7.8) および (付 7.9) を、それぞれ式 (付 7.2) および (付 7.3) に代入すれば、次のようになる。

$$c_1 = y_0 \quad (\text{付 7.10})$$

$$c_1 - c_2 = 0 \quad (\text{付 7.11})$$

式 (付 7.10) および (付 7.11) より、次のように c_2 が求められる。

$$c_2 = y_0 \quad (\text{付 7.12})$$

式 (付 7.10) および (付 7.12) を式 (付 7.8) に代入すれば、地中部の変位 y は次のように表される。

$$y = y_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (\text{付 7.13})$$

次に、付図 7.1 に示した範囲の地盤の単位長さ当りの質量を m とすれば、深さ ℓ までの地中部の運動エネルギー E は次式で表される。

$$E = \int_0^{\ell} \frac{1}{2} m \dot{y}^2 dx \quad (\text{付 7.14})$$

また、地中部有効質量を M_e とすれば、杭頭変位で代表される運動エネルギー E_0 は次のように表される。

$$E_0 = \frac{1}{2} M_e \dot{y}_0^2 \quad (\text{付 7.15})$$

式 (付 7.14) および (付 7.15) を等置すれば、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} M_e \dot{y}_0^2 &= \int_0^{\ell} \frac{1}{2} m \dot{y}^2 dx \\ &= \frac{1}{2} m \dot{y}_0^2 \int_0^{\ell} e^{-2\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)^2 dx \end{aligned} \quad (\text{付 7.16})$$

上式より、 M_e は次のように求められる。

$$\begin{aligned} M_e &= m \int_0^{\ell} e^{-2\beta x} (1 + \sin 2\beta x) dx \\ &= m \left[-\frac{e^{-2\beta x}}{2\beta} \left(1 + \frac{\sin 2\beta x + \cos 2\beta x}{2} \right) \right]_0^{\ell} \\ &= \frac{m}{2\beta} \left\{ \frac{3}{2} - e^{-2\beta \ell} \left(1 + \frac{\sin 2\beta \ell + \cos 2\beta \ell}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{付 7.17})$$

いま、第 1 不動点 (式 (付 7.13) において $y = 0$ となる最小の深さ) $\ell = 3\pi/4\beta$ までの質量を有効とすれば、式 (付 7.17) より M_e は次のように求められる。

$$\begin{aligned} M_e &= \frac{m}{2\beta} \left\{ \frac{3}{2} - e^{-\frac{3}{2}\pi} \left(1 + \frac{-1}{2} \right) \right\} \\ &= \frac{m}{4\beta} (3 - e^{-\frac{3}{2}\pi}) \\ &\approx \frac{3m}{4\beta} \end{aligned} \quad (\text{付 7.18})$$

ここで、 β は次のように求められる。

いま、杭頭に作用する水平力を P とすれば、式 (付 7.13) より P は次のように表される。

$$\begin{aligned} P &= EI \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=0} \\ &= EI \cdot 4\beta^3 y_0 e^{-\beta x} \cos \beta x \Big|_{x=0} \\ &= 4EI\beta^3 y_0 \end{aligned} \quad (\text{付 7.19})$$

したがって、杭 1 本当りのばね定数 k は次式で表される。

$$k = \frac{P}{y_0}$$

$$= 4 EI \beta^3 \quad (\text{付 7.20})$$

上式より、 β は次のように求められる。

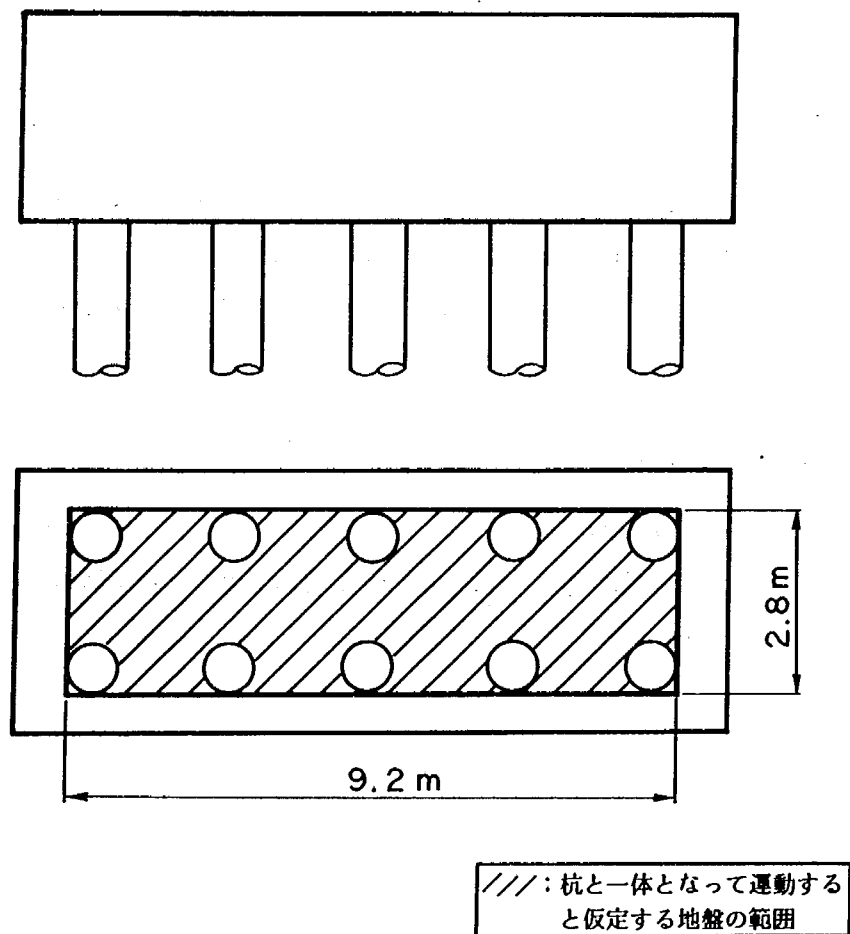
$$\beta = \sqrt[3]{\frac{k}{4EI}} \quad (\text{付 7.21})$$

式 (付 7.21) に、 $k = 2.5 \times 10^4$ [kg/cm], $E = 2.1 \times 10^6$ [kg/cm²] および $I = 2.33 \times 10^5$ [cm⁴] を代入すれば、 $\beta = 2.34 \times 10^{-3}$ (1/cm) $= 2.34 \times 10^{-1}$ (1/m) となる。

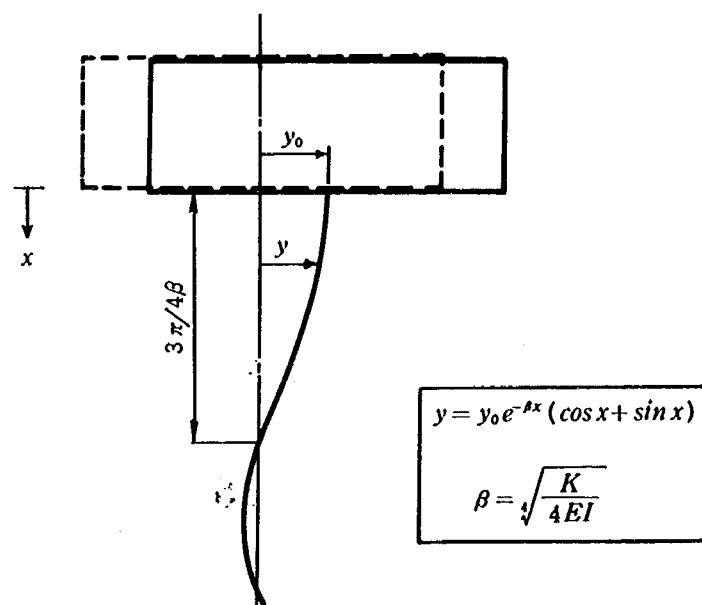
また、 $m = 4.73$ (ton sec²/m/m) である。したがって、式 (付 7.18) より M_e は次のように求められる。

$$\begin{aligned} M_e &= \frac{3 \times 4.73}{4 \times 2.34 \times 10^{-1}} \\ &= 15.2 \text{ (ton sec}^2/\text{m)} \end{aligned} \quad (\text{付 7.22})$$

ここで、フーチング躯体の質量は 26.2 (ton sec²/m) であるので、系全体の有効質量は、 $15.2 + 26.2 = 41.4$ (ton sec²/m) となる。



付図 7.1 杭と一体となって運動すると仮定する地盤の範囲



付図 7.2 地盤の変形モード

三郷インターチェンジ下部工
(PT-24U)加振振動実験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第2145号
昭和59年10月(1984年)

土彦一興之
直一敬和
川島村沢橋
荒川田相高

キーワード 加振振動実験, 動的相互作用, 耐震設計

要 旨

本資料は, 三郷インターチェンジ下部工(PT-24U)加振実験結果をもとに, 橋脚の振動特性, 動的解析に仮定した地盤ばねの妥当性, 動的な地盤ばねと静的な地盤ばねの相違, 等について検討した結果をとりまとめたものである。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

40円切手
を貼って
下さい

建設省土木研究所

振動研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No.185

No. 185

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2145 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2145 号
三郷インターチェンジ下部工 (PT-24U)
加振振動実験

