

土木研究所資料

第1735号

根入れのある円筒基礎の加振実験

昭和 56 年 3 月

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室

Copyright © 1981 fiscal year by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor transl and 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。

ま え が き

基礎～地盤系の動的相互作用は、構造物の動的特性を把握し、耐震設計を適切に行う上で重要な課題の1つである。従来、構造物の耐震設計は、主として構造物の側から行われてきたが、地中に埋設された構造物や半地下、半地中方式の構造物の耐震設計では、周辺地盤の特性を考慮することが重要となる。このうち、地中に埋設された構造物については、地盤の振動をもととした応答変位法による耐震設計法が確立されているが、根入れのある基礎等の半地下、半地中方式の構造物に対しては、まだ適当な耐震設計法が提案されていない。ケーソン橋脚の強震記録の解析から、地盤中に深く根入れされた基礎は、周辺地盤の振動を受けて振動することが報告されており、このような基礎形式に対しても将来、応答変位法の適用が可能と考えられる。

本報告は以上の観点から、根入れのある円筒基礎の加振実験を通して、半地下、半地上方式の基礎の動特性に関する定量的データを採取することを目的に実施した円筒形基礎の加振実験結果をとりまとめたものである。なお、本実験では、基礎から地盤中に伝えられた波動の伝播特性に関する検討も行っているが、これは別途とりまとめる予定としている。なお、本実験に係る土質実験は、もと振動研究室吉田精一技官に実施していただいた。ここに記して厚くお礼申し上げる次第である。

昭和56年3月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

室 長 岩 崎 敏 男

主任研究員 川 島 一 彦

高 木 義 和

相 沢 興

建設技研 後 藤 和 満

目 次

ま え が き

1. 概 説	1
2. 実 験 内 容	2
2-1 実 験 場 所	2
2-2 円筒基礎模型	2
2-3 起 振 機	2
2-4 地 盤 条 件	2
2-5 実 験 ケ ー ス	2
2-6 計測体制およびデータ処理	3
3. 実 験 結 果	4
3-1 水平方向の加振実験	4
3-2 鉛直方向の加振実験	5
4. 実験結果の考察	6
4-1 円筒基礎頂部の振動振幅からみた水平加振と上下加振の違い	6
4-2 水平加振実験結果の並進成分と回転成分の分離	6
4-3 1 自由度の振動理論に基づく減衰定数の振動数依存性	7
5. ま と め	9
参 考 文 献	10
付 属 資 料 加振実験結果一覧	11

1. 概 説

基礎～地盤系の動的相互作用は、構造物の動的特性を把握し、耐震設計を適切に行う上で、重要な課題の1つである。この分野の研究は比較的古くから行なわれ、今日までに多くの研究が行なわれてきているが、基本的な条件のもとでの解析が多く、実用上の観点から必要な情報を得るためには今後多くの研究を必要としている。理論的な面からの研究としては、弾性波動理論に立脚したものが多く、すなわち、1936年に Reissner が半無限弾性体上の円形基礎の上下方向の動的解を提案して以来、水平運動および回転運動に対する理論解が、基礎底面下の接地圧分布を放物線分布、均等分布、剛体分布等に仮定し、次々と提案されている。また、1950年代の後半に入って、円形基礎から矩形基礎へと発展し、この段階で半無限弾性体上の基礎の振動に対する理論は一応の完成の域に達している。これら一連の研究においては、地盤を均一な弾性体として理想化し、基礎体の動的な変位は、振動数に依存する“変位関数”を用いて表示されている。また、“変位関数”は一般に複雑な形をしているため振動数範囲を限定し、共振点及び応答倍率に着目した近似解析法も提案されている。

一方、土木の分野においては、実際の基礎は一般に地盤中に根入れされているが、根入れのある基礎の振動特性に関する理論的研究は現在までの所少ない。過去に提案された根入れのある円形剛体基礎に関しては、原田が整理しており、これを引用すると表-1のようになる。⁴⁾これによれば、1960年代後半から、この種の理論解析が行われるようになり、基礎～地盤系の動的相互作用の問題として、弾性波動論および有限要素法を用いた解析が行われている。これらは、最終的には振動数に依存する“変位関数”を求める問題に帰着されるが、これは、地盤が基礎を支持するバネと減衰に置き換えて扱うことができるとするならば、バネおよび減衰の振動数依存性を調べる問題と等価である。理論解析が限定されている現状では、実験的にこれらを検討し、適切な情報を引き出すことが必要とされる。

従来も起振機を用いた加振実験が数多く行われてきているが、これらは共振曲線からの減衰定数、基礎体と一緒に動く地盤の付加質量、地盤反力係数等に着目して実施されたものであり、ここで必要とするような、ばね定数および減衰定数の振動数依存性を検討するためのものではない。

本実験は以上の観点から、根入れのある円筒基礎の加振実験を通して、半地上、半地下方式の基礎の動特性に関する定量的データを採取するために実施したものである。

2. 実験内容

2-1 実験場所

実験は、建設省土木研究所構内のA地区強震観測場（北ループ内）で行った。観測場では、図2-1に示すように1辺100mの十文字状の配置で、地表および地中に加速度型換振器が設置されている。測線の交わる中央付近に円筒基礎を設置した。

実験を実施したのは、昭和56年3月の2週間である。写真2-1～2-3は実験中の風景を示したものである。

2-2 円筒基礎模型

円筒基礎模型は、図2-2に示す様に、外径2.0m、内径1.0m、高さ2.0m（重量約12ton）であり、根入れ深さは1.5mである。加振実験はこの円筒基礎の上面に直接起振機を設置した場合（以下、A試験と呼ぶ）と、この上に外径2.0m、内径1.0m、高さ1.0mの上載マス（重量約6ton）を剛結し、その上面に起振機を設置した場合（以下、B試験と呼ぶ）の2ケースに対して行った。円形基礎模型の諸元を表2-1に示す。

2-3 起振機

3軸型の偏心質量回転型起振機を用いた。偏心質量は設定角度で調整できるが、振動数領域で一定加振力を保つのは精度的にむづかしいと判断し、設定角度を固定して、一定加振モーメントで実験を行った。起振機の主要な仕様および性能を表2-2および図2-3にそれぞれ示す。

起振力と各部の応答との位相差を検出するため、起振機の発生パルスを基準値として計測した。起振機には写真2-4の半円形の板が回転軸に固定されており、センサーがこれより、矩形パルス信号を生じるように設計されている。振動数はデジタルにより、1/100Hzまで表示される。操作中に振動数が多少変動することがあったが、これは±2/100Hz程度以内であった。

2-4 地盤条件

A地区強震観測場における土質柱状図を図2-4に示す。地表付近は関東ロームが2m程度堆積しており、円筒基礎模型はこのローム層中に設置されている。ローム層を円筒基礎底面位置でサンプリングし、各種の土質試験を実施した。図2-5は一軸圧縮試験の結果を、また、表2-3はローム層の物理試験結果をそれぞれ示したものである。また、共振法土質試験および動的ねじり試験により得られる土のせん断弾性係数および減衰定数の歪依存性（ $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ ）を図2-6および図2-7に示す。

2-5 実験ケース

実験では、上載マスの無いAシリーズおよび上載マスの有るBシリーズのそれぞれに対して鉛直方向加振、および、水平方向加振を行った。加振力は偏心質量設定角度を10度とした

場合と20度とした場合の2種類とし、それぞれ一定の偏心モーメントにより加振した。ここで偏心質量設定角を10度および20度とした場合の偏心モーメントは、それぞれ、 $50.1\text{ kg}\cdot\text{cm}$ および $97.8\text{ kg}\cdot\text{cm}$ である。

実験ケースの一覧を表2-4に示す。

2-6 計測体制およびデータ処理

計測体制およびA, B実験時の加速度計の配置を図2-8に示す。加速度計の個数は合計10個であり、これによる10chの記録とこれに起振機のパルス信号を加えた11chをデータレコーダーに収録した。収録記録は12ビットのAD変換器によりディジタル変換したのち、記録の振巾および位相差を読み取った。また、位相については、アナログ位相計よりデータレコーダーの収録記録から起振機のパルス信号を基準として各点の応答加速度の位相を検出した。

3. 実験結果

3-1 水平方向の加振実験

(1) 共振曲線および位相曲線

基礎頂部 (TOP) および基礎底部 (BASE) の水平変位成分 (加速度および振動数から変位を計算により求めた) に着目し、A 試験および B 試験に対する変位振巾および位相の共振曲線をそれぞれ図 3-1 および図 3-2 に示す。これらは偏心モーメント一定とした場合の変位の共振曲線であるが、縦軸の値を別にすれば、加振力一定とした場合の加速度の共振曲線と考えてもよい。

図 3-1, 3-2 には、偏心モーメントを $50.1 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ とした場合と、 $97.8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ とした場合の両者の結果が示されているが、これらを相互に比較すると、この程度の加振力レベルでは加振力を 2 倍としても、振幅特性、位相特性とも著しい変化は示さないことがわかる。

頂部の共振曲線をみると、1 次の共振点が顕著なピークをもっていることがわかる。1 次の共振点は、A 試験では 12.5 Hz (AH10) および 12.0 Hz (AH20) であるが、これに上載マスを載せた B 試験では 8.5 Hz (BH10) および 8.0 Hz (BH20) と低くなっている。1 次共振点付近のピークの鋭さは A 試験より B 試験の方が著しい。

一方、底部の振幅特性をみると、1 次共振点のピークは、頂部に比較してなめらかであり、また、A, B 試験ともに 20 Hz 付近には 2 次共振点と考えられるピークが認められる。1 次と 2 次の共振点を比較すると、前者の方が後者よりもはるかに鋭いことが分かる。

位相特性は、1 次共振点付近で大きく変化し、それより高次の振動数領域においても変化し続ける。加振力に対する頂部と底部の位相特性を比較すると、両者は 1 次共振点付近まではおおむね同じであるが、これよりさらに高次の振動数になると底部の方が頂部よりも加振力との間により大きい位相を持つため、両者は次第にはなれてくる。 20 Hz 以上の振動数領域で頂部と底部の位相差を求めてみると、A 試験では 100 度程度、B 試験では 160 度程度となっている。

(2) 振動モード

本円筒基礎は剛体と考えてもよい。そこで、頂部と底部の 1 周期分の調和振動変位を 8 分割し、両所の振巾を直線で結んで基礎モデルのモード図を求めた。図 3-3 は、B 試験 (BH10) に対する 8 Hz , 14 Hz , 24 Hz の加振実験時のモード図を示したものである。

たとえば、 8 Hz で加振した場合の円筒基礎の動きをみると、頂部と底面はおおむね同位相で振動し、回転運動の中心は底面より下方にあることが分かる。これに対して、 24 Hz の場合の動きは、頂部と底部が逆位相に近くなり、回転運動の中心は底面より上方にあることが分かる。このようにして、他の加振振動数に対する結果もまとめて、振動モードを示す

と表 3-1 のようになる。これによれば、基礎体の振動モードが加振振動数に応じて段階的に変化していく様子がわかる。いま、頂部の振幅が十方向と一方向のそれぞれの最大値をとる時の振動モードから回転運動の中心位置を求めると図 3-4 のようになる。これによれば、例えば、AH10 試験の場合には、図 3-1 に示したように 1 次および 2 次の固有振動数はそれぞれ 12.5Hz および約 20Hz である。したがって、回転中心は、1 次振動数を過ぎ、15 Hz 程度までは、底面下 0.7 ~ 0.8 m 程度にある。一方、15Hz から 2 次固有振動数の約 20Hz までの間では、回転中心は急激に上方に移動し、22Hz 程度以後では、回転中心は底面よりやや上方の位置に固定される。以下では、回転中心が底面下から下にある場合を下心ローリング、底面より上方にある場合を上方ローリングと呼ぶことにする。

3-2 鉛直方向の加振実験

鉛直加振実験による A 試験および B 試験の共振曲線および位相曲線をそれぞれ図 3-5, 3-6 に示す。A 試験での 1 次共振点は 17 Hz (AV10, AV20) であるが、上載マスを載せた B 試験では 15 Hz (BV10, BV20) と低くなる。また、1 次共振点での振幅特性のピークは、A, B 試験ともに図 3-1, 3-2 に示した水平加振実験の場合よりも緩くなっている。一方、位相曲線は 1 次共振点近傍での変化が大きい、これよりも高い振動数領域においても変化しつ

ける。

なお、基礎体の頂部と底面の鉛直方向の振幅および位相特性は、ほとんど同じであり、計測値の精度を確認することができた。鉛直加振時の水平方向の振幅は、鉛直方向の振幅に比べ、いずれの測定においても 15 % 程度以下であり、上下方向加振という条件に合致していると考えることができる。

4. 実験結果の考察

4-1 円筒基礎頂部の振動振幅から見た水平加振と上下加振の違い

円筒基礎頂部の振動振幅（加振方向の振幅）を水平加振した場合と上下加振した場合で比較すると、図4-1（A試験）および図4-2（B試験）のようになる。これにより、円筒基礎頂部はロッキングを伴い水平方向に対しては大きく振動するのに対し、上下方向には振動しにくいことがわかる。

4-2 水平方向加振実験結果の並進成分と回転成分の分離

水平方向の加振実験で求めた頂部と底面の振幅および位相特性をもとに、剛体基礎と仮定して重心位置の並進成分および回転成分を以下のように求めた。

いま、図4-3に示すように基礎頂部および底面での水平方向変位を次のように表わすと、

$$\begin{aligned} U_T(t) &= U_T \sin(\omega t + \epsilon_T) \\ U_B(t) &= U_B \sin(\omega t + \epsilon_B) \end{aligned} \quad (4-1)$$

ここで、

$U_T(t), U_B(t)$: 基礎頂部および底面での水平方向応答変位

U_T, U_B : 基礎頂部および底面での水平方向応答変位振幅

ω : 加振振動数

ϵ_T, ϵ_B : 加振力に対する頂部および底面の応答の位相

重心での並進変位 $U_G(t)$ および回転角 $\phi_G(t)$ は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} U_G &= \frac{1}{AL} \{ L_2 U_T \sin(\omega t + \epsilon_T) + L_1 U_B \sin(\omega t + \epsilon_B) \} \\ \phi_G &= \frac{1}{AL} \{ U_T \sin(\omega t + \epsilon_T) - U_B \sin(\omega t + \epsilon_B) \} \end{aligned} \quad (4-2)$$

これを整理すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} U_G &= U \sin(\omega t + \epsilon_U) \\ \phi_G &= \phi \sin(\omega t + \epsilon_\phi) \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{AL} \sqrt{(L_2 U_T \cos \epsilon_T + L_1 U_B \cos \epsilon_B)^2 + (L_2 U_T \sin \epsilon_T + L_1 U_B \sin \epsilon_B)^2} \\ \epsilon_U &= \tan^{-1} \left(\frac{L_2 U_T \sin \epsilon_T + L_1 U_B \sin \epsilon_B}{L_2 U_T \cos \epsilon_T + L_1 U_B \cos \epsilon_B} \right) \\ \phi &= \frac{1}{AL} \sqrt{(U_T \cos \epsilon_T - U_B \cos \epsilon_B)^2 + (U_T \sin \epsilon_T - U_B \sin \epsilon_B)^2} \\ \epsilon_\phi &= \tan^{-1} \left(\frac{U_T \sin \epsilon_T - U_B \sin \epsilon_B}{U_T \cos \epsilon_T - U_B \cos \epsilon_B} \right) \end{aligned}$$

式(4-3)より、重心点における並進および回転成分の振幅、位相を求めると、図4-4(A試験)および図4-5(B試験)のようになる。

図4-4, 4-5によれば、実験A, Bのいずれの場合にも、並進成分は1次の共振点においては大きなピークを示すのに対し、2次共振点においてはほとんどピークを生じていない。これに対しては、回転成分の場合には、1次共振点ほどではないが、2次共振点においても明瞭なピークを示すことがわかる。また、この傾向はA試験において著しい。

また、並進に対する位相 ϵ_U と回転に対する位相 ϵ_ϕ を比較すると、1次共振点付近までは $\epsilon_U \simeq \epsilon_\phi$ となっているのに対し、1次共振点以後では $\epsilon_U > \epsilon_\phi$ となっている。

次に、基礎頂部における水平振幅 U_T に対する並進および回転の成分の寄与率を求めた結果が図4-6である。これによれば、下心ローリングの状態では並進成分の方が回転成分よりも大きい。上心ローリングの状態になると回転成分が卓越してくるのがわかる。また、A試験とB試験を比較すると、A試験の方が並進成分が大きく、上載マスを載せ基礎高の高いB試験の方が回転成分が卓越していることがわかる。

4-3 1自由度の振動理論に基づく減衰定数の振動数依存性

いま、円筒基礎の重心の水平並進変位 U を1自由度の振動方程式により表現すると次のようになる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F_0 e^{i\omega t} \quad (4-4)$$

ただし、ここで、 C および K は振動数 ω に依存するものとする。式(4-4)の定常解は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{F_0}{\sqrt{(K - \omega^2 M)^2 + (\omega C)^2}} e^{i\omega t} = U_P e^{i\omega t} \\ \epsilon &= \tan^{-1} \left(\frac{\omega C}{K - \omega^2 M} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

式(4-4)に変位解 $U = U_P e^{i\omega t}$ を代入し、各項を示すと次の通りとなる。

$$\underbrace{-\omega^2 M \cdot U_P e^{i\omega t}}_{(\text{慣性力})} + \underbrace{i\omega C \cdot U_P e^{i\omega t}}_{(\text{減衰力})} + \underbrace{K \cdot U_P e^{i\omega t}}_{(\text{復元力})} = \underbrace{F_0 e^{i\omega t}}_{(\text{外力})} \quad (4-6)$$

これを複素平面上で考察してみると(図4-7参照)、復元力は変位と同じ位相をもち、減衰力はそれより位相が 90° 進み、慣性力は変位に対して逆位相となる事が分かる。

いま、ばね定数 K および減衰 C が振動数により変化すると考えると未知数は2つである。一方、測定上では水平並進変位振幅 U および位相 ϵ を各振動数について求めているので、次式のようにバネと減衰を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} K(\omega) &= \omega^2 M + \frac{F_0}{U} \cos \epsilon \\ \omega C(\omega) &= \frac{F_0}{U} \sin \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

また、減衰定数は次式で与えられる。

$$h = \frac{C(\omega)}{2\sqrt{MK}(\omega)} \quad (4-8)$$

式(4-8)は重心の水平並進運動に対する減衰定数であるが、上下動および重心まわりの回転動に対しても式(4-4)と同様の運動方程式を立て、式(4-8)と同じように減衰定数を求めることができる。いま、これにより上下動、水平動、回転動のそれぞれに対して個別に減衰定数を求めた結果を図4-8(A試験)および図4-9(B試験)に示す。同図には比較のため、共振曲線より $\sqrt{2}$ 法によって求めた減衰定数も示した。ここで $\sqrt{2}$ 法の結果は、1次共振点(下心ローリング)に対する減衰定数を示している。

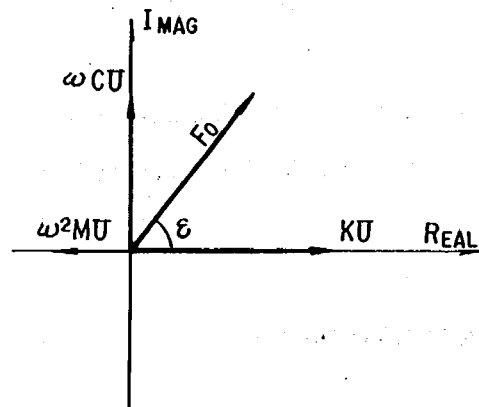


図4-7 座標軸と力の向き

5. ま と め

根入れのある円筒基礎の加振実験を行い、振幅特性と位相特性の両者を計測することにより円筒基礎の振動挙動を検討した。本試験により次の結果を得た。

- 1) 水平方向の加振により、基礎は動揺振動を生じ、1次の共振および2次の共振が観測された。上載マスの無いA試験では約12.5 Hz、上載マスの有るB試験では約8.5 Hzがそれぞれ1次共振振動数であり、両者の共振曲線には上載マスの影響が明瞭に認められた。
- 2) 水平方向に加振した場合に、1次共振点より2次共振点に移行する様子を基礎頂部と底面における振幅と位相をもとに振動モード図により検討した。この結果、1次共振点付近では頂部と底面がほぼ同位相で振動し基礎の回転中心（ローリング中心）は基礎底面より下方にあったが、2次共振点側に移行するに連れてローリング中心は上方に上がり、2次共振付近ではローリング中心は基礎体内に移る。すなわち、回転中心の位置に着目すると、剛体基礎の振動は、1次および2次の共振振動数をはさんで、（下心ローリング）～遷移領域～（上心ローリング）と段階的に変化する。
- 3) 水平方向に加振した場合の基礎体の運動を重心位置の並進運動と回転運動に分解すると、1次共振点付近では並進運動が、また、2次共振点付近では回転運動が卓越する。2次共振点では並進はほとんど無視できる程度にピークが小さいのに対して、1次共振点における回転のピークは無視し得ない。
- 4) 鉛直方向に加振した場合には1次の共振が観測された。共振振動数はA試験では17 Hz、B試験で15 Hz程度であったが、ともに、水平方向に加振した場合に比較して共振ピークは顕著でなく、また、振幅のレベルも小さい。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：明石海峡大橋の耐震設計に関する調査研究報告書，土木学会明石海峡大橋耐震設計小委員会，昭和53年
- 2) 建設省：新耐震設計法（案），土木研究所資料，第1185号，昭和52年
- 3) 土岐憲三，小松昭雄：井筒基礎の地震応答解析に関する研究，土木学会論文報告集，第281号，昭和54年
- 4) Harada, T., Kubo, K. and Katayama, T.: Dynamic Soil - Structure Interaction Analysis by Continuum Formulation Method, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1981
- 5) 岩崎敏男，川島一彦，高木義和：強震記録を用いた道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答解析，土木学会論文報告集，第293号，昭和55年

付 属 資 料 加振実験結果一覧

(a) A H 1 0 試験

振 動 数	頂 部 水 平			底 部 水 平			頂 部 回 転		
	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相
Hz	gal	cm	Deg	gal	cm	Deg	gal	cm	Deg
6	3.3	0.0023	43	1.1	0.0008	37	1.2	0.0008	213
8	11.9	0.0047	59	4.0	0.0016	66	3.8	0.0015	245
9	22.3	0.0070	70	7.4	0.0023	86	6.9	0.0022	257
10	38.5	0.0097	87	13.8	0.0035	101	12.7	0.0032	272
11	68.1	0.0142	109	24.3	0.0051	125	22.4	0.0047	284
11.5	97.0	0.0186	124	34.8	0.0067	142	31.7	0.0061	300
12	137.5	0.0242	137	47.8	0.0084	162	41.0	0.0072	319
12.5	163.8	0.0266	160	59.2	0.0096	189	48.5	0.0079	341
13	175.5	0.0263	179	64.4	0.0096	211	51.7	0.0077	360
13.5	183.0	0.0254	195	67.8	0.0094	229	53.7	0.0075	360
14	183.0	0.0236	208	69.1	0.0089	244	53.4	0.0069	364
15	176.5	0.0199	227	70.3	0.0079	269	51.5	0.0058	380
16	171.5	0.0170	238	72.4	0.0072	286	53.1	0.0053	387
18	185.1	0.0143	256	89.4	0.0069	321	66.7	0.0051	399
20	226.0	0.0143	274	119.2	0.0075	355	107.9	0.0068	424
22	269.1	0.0141	297	124.9	0.0065	380	143.0	0.0075	443
24	317.5	0.0140	318	114.7	0.0050	408	170.6	0.0075	470
28	397.1	0.0128	354	75.1	0.0024	446	189.0	0.0061	507
32	530.5	0.0131	380	96.0	0.0024	483	238.0	0.0059	550
36	699.4	0.0137		121.4	0.0024		295.4	0.0058	

(b) BH10 試験

振動数	頂 部 水 平			底 部 水 平			頂 部 回 転		
	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相
Hz	gal	cm	度	gal	cm	度	gal	cm	度
6	9.7	0.0068	55	1.7	0.0012	65	3.9	0.0027	
7	27.1	0.0140	66	5.0	0.0026	78	7.0	0.0036	237
8	101.3	0.0401	129	22.0	0.0087	140	27.0	0.0107	297
85	118.3	0.0415	172	25.4	0.0089	180	27.7	0.0097	338
9	105.6	0.0330	180	23.2	0.0073	196	24.1	0.0075	361
10	89.9	0.0228	197	21.0	0.0053	236	20.7	0.0052	383
11	77.3	0.0162	217	21.5	0.0045	244	19.4	0.0041	393
12	78.2	0.0137	229	23.6	0.0041	259	19.3	0.0034	404
13	79.4	0.0119	237	27.4	0.0041	273	19.2	0.0029	407
14	83.2	0.0107	243	33.0	0.0042	289	20.3	0.0026	413
15	90.0	0.0101	249	39.5	0.0044	304	22.7	0.0026	417
16	99.6	0.0098	256	47.8	0.0047	319	27.7	0.0027	418
17	123.3	0.0108	257	58.6	0.0051	338	34.1	0.0030	423
18	136.4	0.0105	259	69.6	0.0054	357	42.0	0.0032	432
19	153.5	0.0107	267	78.1	0.0055	378	51.9	0.0036	444
20	176.5	0.0112	211	86.5	0.0055	398	61.7	0.0039	456
21	195.5	0.0112	287	90.8	0.0052	416	69.0	0.0040	468
22	211.8	0.0111	296	92.8	0.0049	433	74.6	0.0039	479
23	224.6	0.0107	306	92.9	0.0044	448	79.2	0.0038	489
24	239.1	0.0105	314	93.5	0.0041	461	83.5	0.0037	497
26	267.1	0.0100	333	93.3	0.0035	481	89.1	0.0033	513
28	307.2	0.0099	350	102.8	0.0033	499	98.1	0.0032	529
32	404.8	0.0100	385	153.6	0.0038	532	133.4	0.0033	540

(c) A H 2 0 試驗

振動數	頂 部 水 平			底 部 水 平			頂 部 回 轉		
	加速度	變 位	位 相	加速度	變 位	位 相	加速度	變 位	位 相
Hz	gal	cm	rad	gal	cm	rad	gal	cm	rad
6	6.5	0.0045	43	2.2	0.0015	47	2.3	0.0016	223
8	25.6	0.0101	60	8.2	0.0032	74	8.0	0.0032	245
9	48.1	0.0150	75	16.9	0.0053	86	15.8	0.0049	262
10	87.8	0.0222	96	31.0	0.0078	112	28.5	0.0072	273
10.5	134.0	0.0308	100	44.7	0.0703	125	41.6	0.0096	284
11	179.4	0.0375	115	59.5	0.0125	141	54.2	0.0113	301
11.5	251.3	0.0481	139	92.9	0.0178	168	75.6	0.0145	325
12	313.5	0.0551	169	118.5	0.0208	189	91.9	0.0162	351
12.5	308.3	0.0500	188	123.4	0.0200	210	92.0	0.0149	360
13	317.3	0.0475	203	128.9	0.0193	227	99.8	0.0150	
13.5	308.3	0.0428	214	129.0	0.0179	241	96.4	0.0134	
14	304.7	0.0394	223	132.5	0.0171	253	95.4	0.0123	
15	292.6	0.0329	237	139.1	0.0157	273	98.5	0.0111	378
16	294.0	0.0291	245	150.5	0.0149	289	101.2	0.0100	381
18	344.0	0.0265	261	184.3	0.0142	329	153.7	0.0118	397
20	456.1	0.0289	294	216.2	0.0137	360	224.8	0.0142	425
22	572.7	0.0300	320	198.5	0.0104	393	276.4	0.0145	455
24	626.6	0.0275	360	163.9	0.0072	425	305.7	0.0134	478
26	672.5	0.0252	363	131.9	0.0049	435	315.7	0.0118	494
28	733.0	0.0204	394	149.8	0.0048	444	351.9	0.0114	512

(d) BH20 試験

振動数	頂 部 水 平			底 部 水 平			頂 部 回 転		
	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相	加速度	変 位	位 相
Hz	gal	cm	rad	gal	cm	rad	gal	cm	rad
6	21.6	0.0152	53	3.6	0.0025	60	5.6	0.0039	
7	87.3	0.0451	80	16.9	0.0087	92	23.6	0.0122	255
8	191.4	0.0757		39.4	0.0156		46.1	0.0182	353
8.5	161.6	0.0567		35.6	0.0125	201	37.7	0.0132	371
9	148.7	0.0465	191	33.7	0.0105	214	34.6	0.0108	381
10	137.4	0.0348	207	32.6	0.0083	235	31.8	0.0081	392
11	136.4	0.0285	217	35.4	0.0074	250	30.8	0.0064	401
12	142.7	0.0251	225	40.3	0.0071	262	31.0	0.0055	407
13	149.2	0.0224	232	49.9	0.0075	277	32.4	0.0049	413
14	157.4	0.0203	238	61.8	0.0080	294	35.8	0.0046	417
15	173.2	0.0195	243	76.5	0.0086	309	41.7	0.0047	418
16	195.3	0.0193	249	93.6	0.0092	327	51.7	0.0051	417
17	225.0	0.0197	255	126.0	0.0110	341	67.5	0.0059	425
18	260.6	0.0201	262	147.7	0.0114	362	86.6	0.0067	436
19	291.9	0.0204	272	161.0	0.0113	383	104.0	0.0073	450
20	330.2	0.0209	282	176.1	0.0111	403	131.5	0.0083	457
21	361.0	0.0207	292	172.9	0.0099	422	141.1	0.0081	464
22	389.3	0.0204	302	174.0	0.0091	436	150.0	0.0078	473
23	421.1	0.0202	311	178.5	0.0085	449	156.4	0.0075	484
24	456.5	0.0201	321	177.7	0.0078	460	162.4	0.0071	493
26	517.3	0.0194	337	181.3	0.0068	479	179.1	0.0067	508
28	593.9	0.0192	354	220.0	0.0071	499	197.0	0.0064	527

(e) A U 1 0 試驗

振 動 數	頂 部 鉛 直			底 部 鉛 直			直 近 地 盤		
	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相
Hz	gal	cm	度	gal	cm	度	gal	cm	度
6	1.74	0.0012		1.63	0.0011		8.40	0.0059	
8	3.62	0.0014	234	3.48	0.0014	234	7.53	0.003	
10	6.59	0.0017	264	6.31	0.0016	264	9.76	0.0025	
12	14.8	0.0026	282	14.1	0.0025	279	16.7	0.0029	207
14	33.4	0.0043	306	34.6	0.0045	310	34.7	0.0045	245
15	50.2	0.0056	332	49.7	0.0056	335	48.4	0.0054	264
16	66.0	0.0065	357	65.2	0.0064	361	55.4	0.0055	283
17	79.0	0.0069	380	78.2	0.0069	384	71.9	0.0063	304
18	86.6	0.0067	400	86.1	0.0066	396	81.6	0.0063	325
19	97.2	0.0068	416	96.2	0.0067	424	91.6	0.0064	339
20	97.4	0.0062	433	96.4	0.0061	443	105.9	0.0067	357
22	101.7	0.0053	450	100.7	0.0053	450	130.3	0.0068	378
24	117.5	0.0052	457	117.5	0.0052	464	157.6	0.0069	384
26	129.9	0.0049	471	127.2	0.0048	477	202.3	0.0076	408
28	145.9	0.0047	491	143.8	0.0046	495	213.0	0.0069	426
32	178.1	0.0044	521	176.5	0.0044	532	284.2	0.007	450
36	219.2	0.0043	564	218.1	0.0042	579	281.4	0.0055	487

(f) B V 1 0 試驗

振 動 數	頂 部 鉛 直			底 部 鉛 直			直 近 地 盤		
	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相
Hz	gal	cm	度	gal	cm	度	gal	cm	度
6	1.34	0.0009	209	1.34	0.0009		1.48	0.0010	
8	3.12	0.0012	259	2.91	0.0012	259	3.01	0.0012	
10	6.80	0.0017	262	6.62	0.0017	263	6.00	0.0015	
11	10.1	0.0021	270	9.65	0.0020	270	8.18	0.0017	
12	16.9	0.0030	275	16.3	0.0029	273	14.1	0.0025	285
13	27.2	0.0041	285	26.4	0.0040	288	21.9	0.0033	293
14	42.7	0.0055	314	41.7	0.0054	318	36.2	0.0047	325
15	53.9	0.0061	349	52.9	0.0060	351	48.6	0.0055	367
16	60.6	0.0060	376	59.7	0.0059	378	58.1	0.0057	395
17	63.5	0.0056	395	62.7	0.0055	398	61.1	0.0054	418
18	65.6	0.0051	412	64.7	0.0050	416	62.3	0.0048	441
19	68.5	0.0048	427	68.0	0.0048	432	64.2	0.0045	457
20	69.9	0.0044	439	69.8	0.0044	446	68.9	0.0044	471
22	72.0	0.0038	461	72.8	0.0038	467	71.5	0.0037	498
24	76.2	0.0033	481	77.9	0.0034	487	81.3	0.0036	522
28	105.5	0.0034	508	106.3	0.0034	514	123.8	0.0040	570
32	125.0	0.0031	542	132.5	0.0033	552	160.0	0.0040	604
36	155.2		584	162.9	0.0032	598	249.9	0.0048	647

(g) A U 2 0 試驗

振 動 數	頂 部 鉛 直			底 部 鉛 直			直 近 地 盤		
	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相	加 速 度	變 位	位 相
Hz	gal	cm	度	gal	cm	度	gal	cm	度
6	2.48	0.0017	218	2.85	0.0017	213	7.15	0.005	122
8	5.58	0.0022	287	5.43	0.0021	238	9.22	0.0036	143
10	12.2	0.0031	267	11.4	0.0029	263	15.1	0.0038	154
12	28.9	0.0051	282	28.4	0.005	280	24.9	0.0044	213
14	71.3	0.0092	310	69.9	0.009	315	61.8	0.008	245
15	107.9	0.0121	338	101.4	0.0114	342	92.6	0.0104	271
16	141.7	0.0140	362	137.0	0.0135	362	139.7	0.0138	293
165	151.9	0.0141	373	149.8		376	143.3		298
17	164.4	0.0144	383	160.6	0.0141	389	163.8	0.0143	303
175	170.5	0.0141	394	166.3		398	170.3		314
18	179.2	0.0138	403	174.5	0.0134	408	184.1	0.0142	324
185	181.8	0.0135	410	180.4		416	193.7		331
19	192.7	0.0135	419	191.1	0.0134	426	205.2	0.0144	339
20	190.7	0.0121	439	187.3	0.0119	442	212.5	0.0134	357
21	193.8	0.0111	444	188.7	0.0108	450	219.1	0.0126	365
22	202.8	0.0106		199.4	0.0104		236.2	0.0124	376
24	216.7	0.0095	455	214.2	0.0094	461	283.5	0.0125	390
26	245.2	0.0092	475	243.5	0.0091	476	380.2	0.0142	420
28	275.2	0.0089	493	274.0	0.0088	498	392.8	0.0127	432

(h) BV 20 試驗

振動數	頂 部 鉛 直			底 部 鉛 直			直 近 地 盤		
	加速度	變 位	位 相	加速度	變 位	位 相	加速度	變 位	位 相
Hz	gal	cm	度	gal	cm	度	gal	cm	度
6	1.80	0.0013	219	1.77	0.0012	225	1.88	0.0013	
8	4.65	0.0018	254	4.47	0.0018	255	4.00	0.0016	
10	11.7	0.0030		10.9	0.0028	264	9.56	0.0024	
11	18.8	0.0039		18.2	0.0038	273	14.7	0.0031	
12	31.4	0.0055	279.5	30.4	0.0053	283	24.7	0.0043	275
13	52.3	0.0078	288	50.8	0.0076	292	42.6	0.0064	298
14	85.9	0.0111	320	83.6	0.0108	323	73.8	0.0095	332
15	115.7	0.0130	354	113.2	0.0127	351	98.3	0.0111	369
16	126.9	0.0125	376	123.5	0.0122	377	123.7	0.0122	401
17	132.3	0.0116	393	128.2	0.0111	397	125.4	0.0110	417
18	136.5	0.0105	409	134.7	0.0104	414	126.8	0.0098	438
19	139.7	0.0098	423	139.3	0.0098	429	130.8	0.0092	452
20	141.0	0.0089	435	139.1	0.0088	446	130.7	0.0083	467
22	149.8	0.0078	457	146.9	0.0077	463	148.2	0.0078	494
24	156.8	0.0069	477	162.3	0.0071	482	166.7	0.0073	518
26	176.3	0.0066	494	181.4	0.0068	499	217.2	0.0081	539
28	196.4	0.0063	511	202.5	0.0065	518	231.7	0.0075	567

表 1 - 1 根入れのある円形剛体基礎の動的剛性に関する既往の研究
(原田 (1 9 8 1) による)

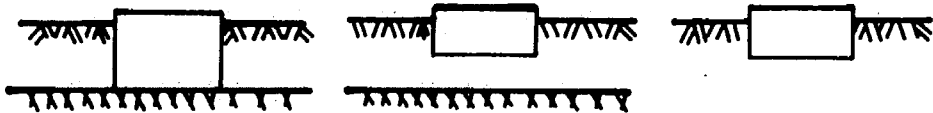
Surrounding Soil Mathematical Model		Layered Medium with a Hard Base Layer			Half-Space Medium
		Vibrational Effect of Surface Layer			
		Considered		Not Considered	
		Case I*	Case II**	Case I and II	
CFM	One DOF	Tajimi (1969) Goto, et al. ('71)	C	Novak, et al. (1972, 1973)	Novak, et al. (1972, 1973)
	Two DOF	Harada, et al. (1978)	B	Novak, et al. (1972)	Novak, et al. (1972)
FEM	One DOF	D	E		Lysmer, et al. (1969)
	Two DOF	F	Kausel, et al. (1975)		Urlich, et al. (1972)
NOTE	 * Foundation Bottom on Stiffer underlying Layer ** Foundation Bottom within Surface Stratum Embedded in Half-Space One DOF = One Degree of Freedom System (Rocking, Swaying, Vertical, or Torsional Vibration) Two DOF = Two Degrees of Freedom System (Coupled Swaying and Rocking Vibration) Categories B to F are those for which no previous study is available.				

表 2 - 1 円形基礎模型の諸元

		A 試 験	B 試 験
円形基礎重量		12 t	18 t
起振機重量		980 Kg $\approx$ 1 t	
重心まわりの回転慣性モーメント	円形基礎	71.2 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²	184 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²
	起振機分	5.9 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²	10 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²
	合 計	77.1 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²	194 t $\cdot$ cm $\cdot$ sec ²

注) 1) 重心位置は、底板の重量を無視して、高さの1/2点とした。

2) 重量は、コンクリート単位体積重量を2.5 t/m³として求めた。

表 2 - 2 起振機の主要諸元

項 目	性 能 諸 元
形式および数量	EX-250DL型
加振方式	3不平衡重錘・水平3軸同期反転方式
加振方向	垂直または水平方向
加振モーメント	1～250 kg $\cdot$ cm (運転中連続可変, 電氣的遠隔制御)
最大加振力	3000 kg (17 Hz以上において)
加振力波形	正弦波
振 動 数	第1速 1～20 Hz 各速の切替えはVベルトの掛替えによる手動操作。 第2速 2～40 Hz (各速範囲内において連続可変, 電氣的遠隔制御)
振動数制御精度	各速の最大振動数に対して $\pm 1\%$ 以下, ただし下記の条件の電氣的整定時における値 電源電圧 $\pm 10\%$ 負荷変動 10～100% 温度変動 $-10 \sim +10^\circ\text{C}$ 電源周波数 $\pm 5\%$
軸受および潤滑	コロガリ軸受, 密封強制給油潤滑
寸 法	約幅1020 $\times$ 奥行950 $\times$ 高さ $\begin{pmatrix} 930 \\ 600 \end{pmatrix}$ mm以下 (電動機含む場合)
重 量	約680 kg (操作盤, 電動機含まず)

表 2-3 強震観測所試料（関東ローマ）土質調査試験結果

		サンプリング 1	サンプリング 2
比 重		2.662	2.650
粒度 分布 コン シス テ ン シー	砂 (%)	4	2
	シルト (%)	76	76
	粘土 (%)	20	22
	液性限界 (%)	159	140
	塑性限界 (%)	107	107
	塑性指数 (%)	52	33
自然含水比 (%)		123.6	122.1
一軸強度 q_u		0.87 Kg/cm^2	
変形係数 E_{50}		285 Kg/cm^2	

表 2-4 加振実験ケース

ケース	加振方向	上載質量	偏心質量角	偏心モーメント	試験名称
1	水平	無し (A試験)	10度	$50.1 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$	AH10
2	上下				AV10
3	水平	有り (B試験)	20度	$97.8 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$	BH10
4	上下				BV10
5	水平	無し (A試験)	10度	$50.1 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$	AH20
6	上下				AV20
7	水平	有り (B試験)	20度	$97.8 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$	BH20
8	上下				BV20

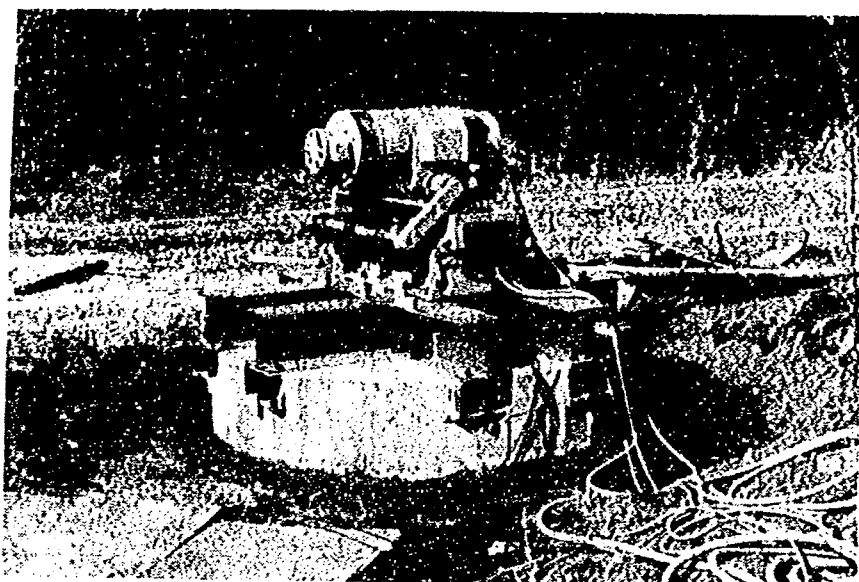


写真 2 - 1 A 試験実験風景

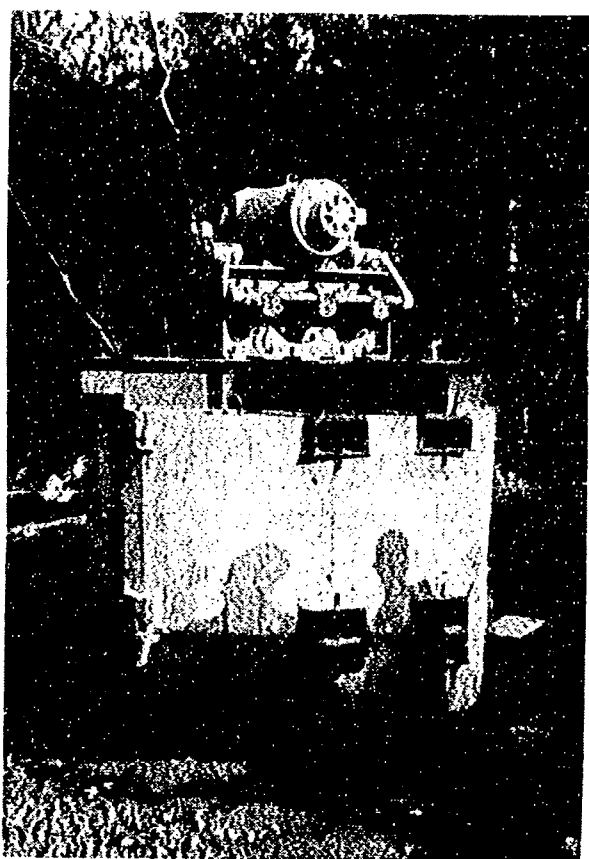


写真 2 - 2 B 試験実験風景

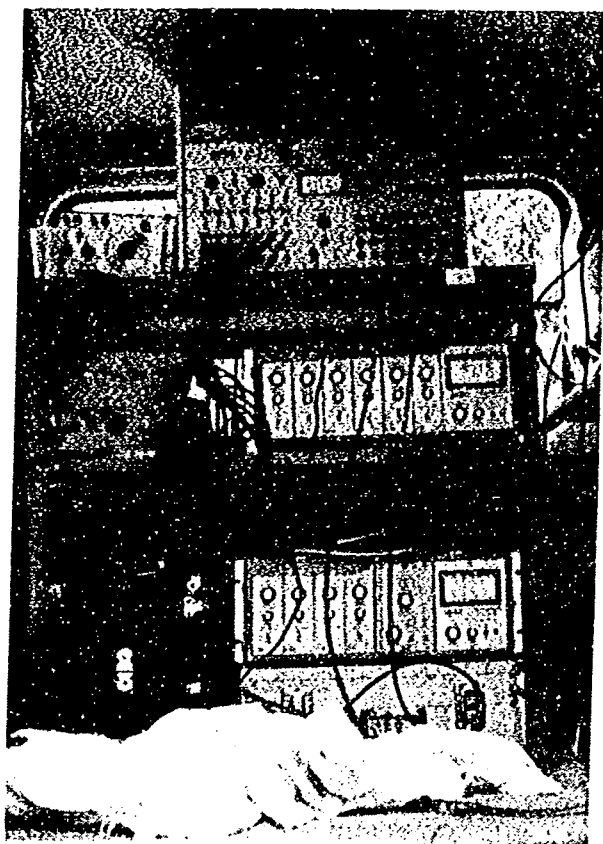


写真 2 - 3 計測車内部

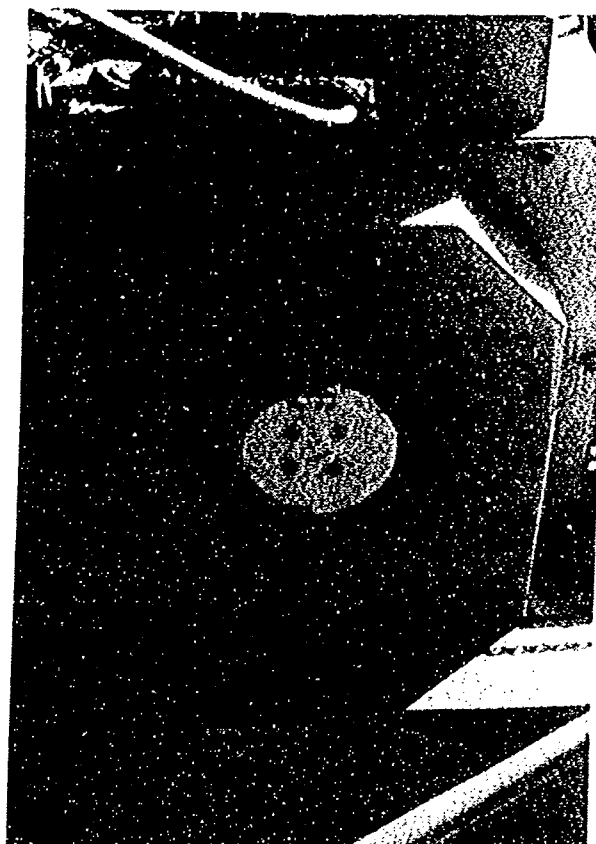


写真 2 - 4 起振機の回転軸

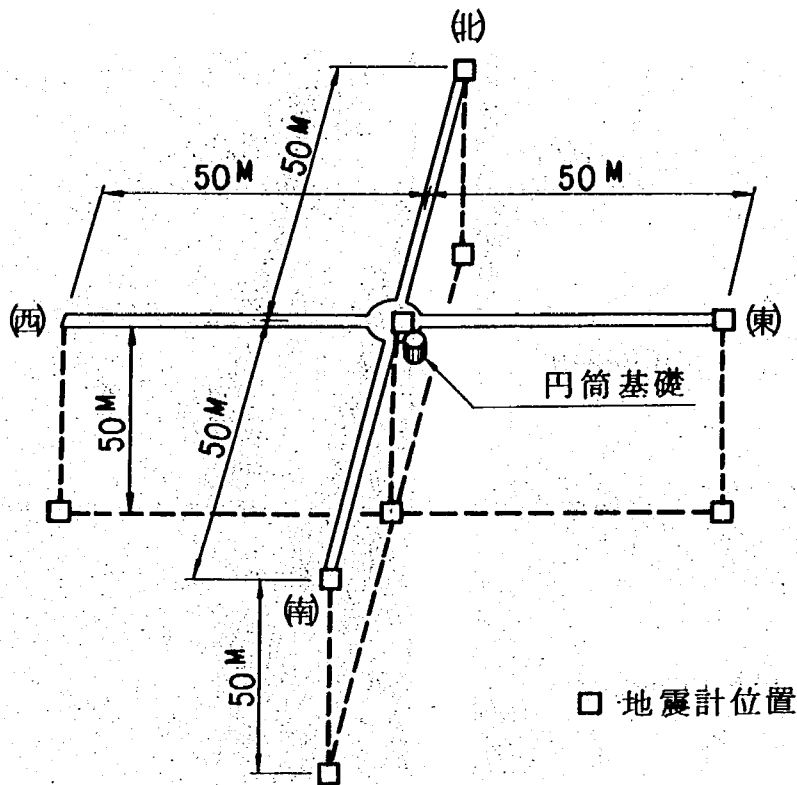


図 2-1 実験場（土木研究所構内 A 地区強震観測場）

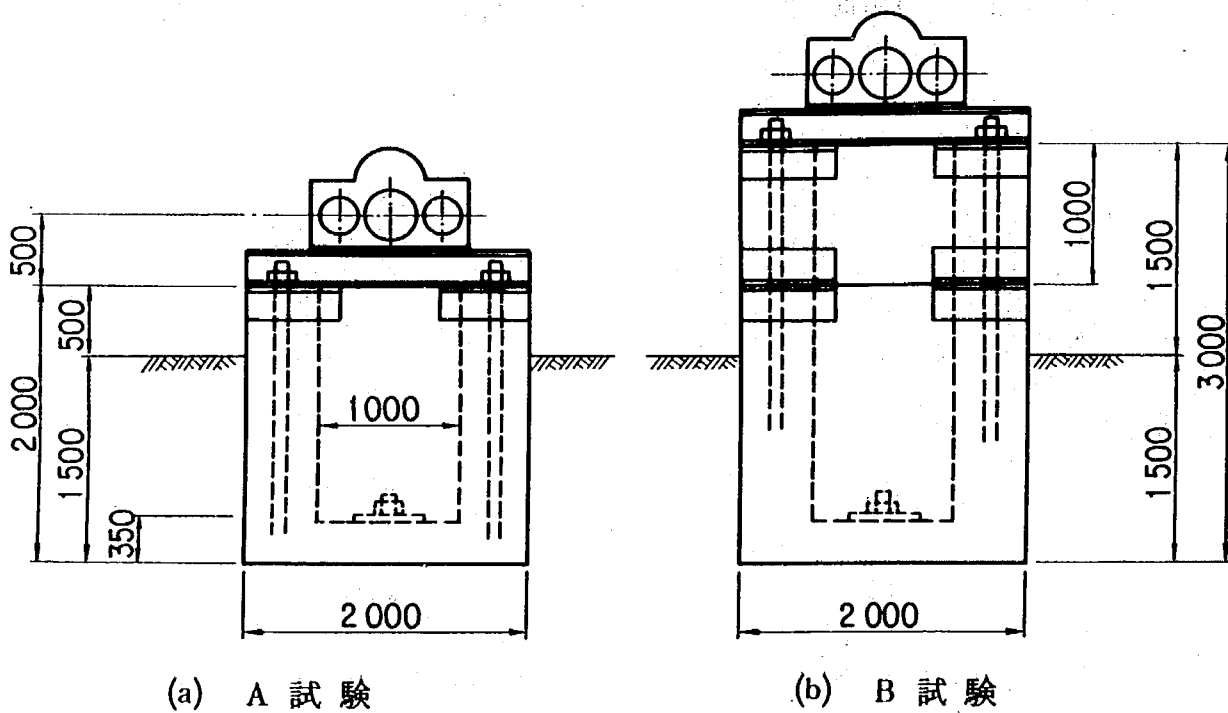


図 2-2 実験に用いた円筒形模型基準

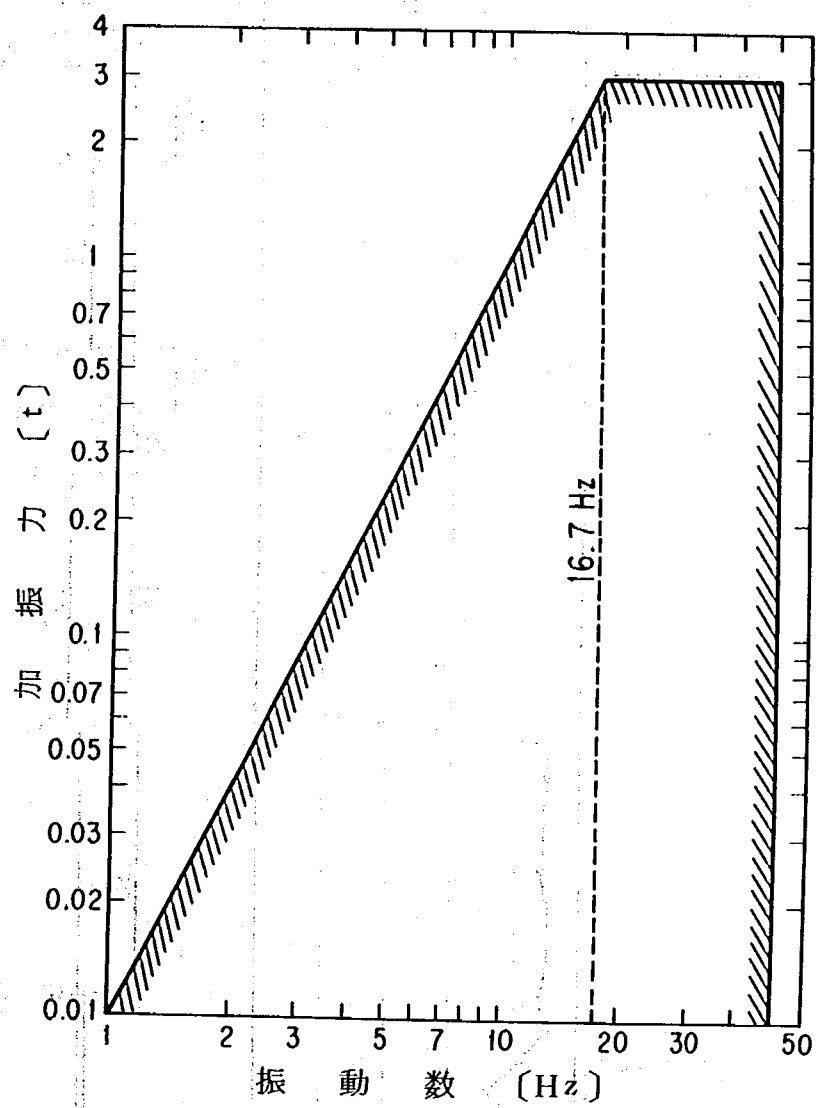


図 2 - 3

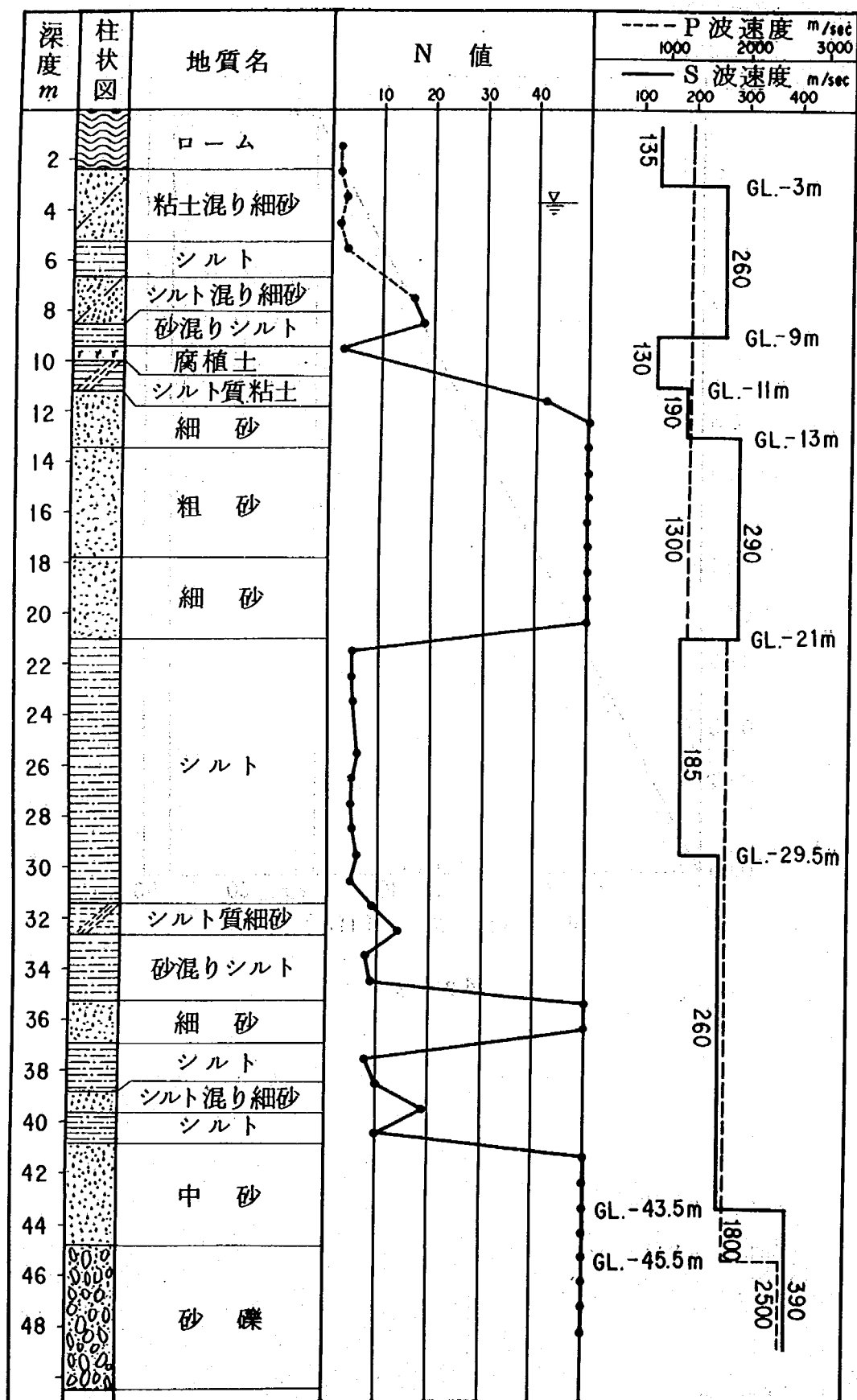
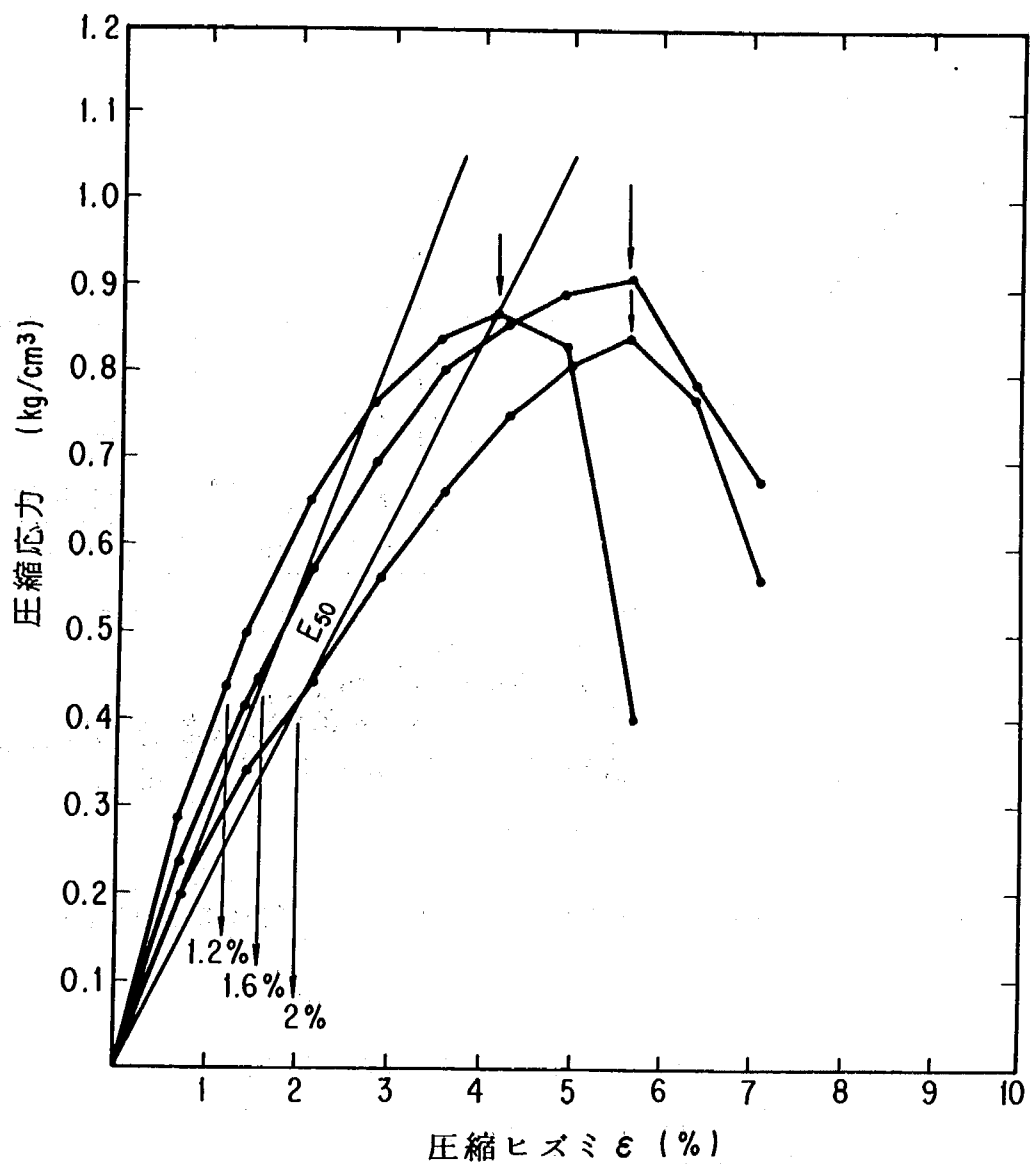


図 2-4 A 地区強震観測場の地盤条件



供試体 No	試料の 状態	供試体寸法(cm)		単位体積 重 r (g/cm³)	含 水 比 w (%)	間グキ比 e	飽 和 度 Sr (%)	圧縮強さ qu (kg/cm²)	破壊時のヒズミ ε (%)	変形係数 E ₅₀ (kg/cm²)
		高 さ	直 径							
①	良 好	7.050	3.585	1.333	112.2	2.88	103.0	0.841	5.6	21.0
②	"	7.010	3.531	1.318	112.4	2.73	108.9	0.903	5.6	28.2
③	"	7.130	3.478	1.318	111.7	2.64	104.0	0.869	4.2	36.2

土粒子の比重 $G_s = 2.645$

図 2-5 模型基礎を支持する関東ロームの一軸圧縮試験結果

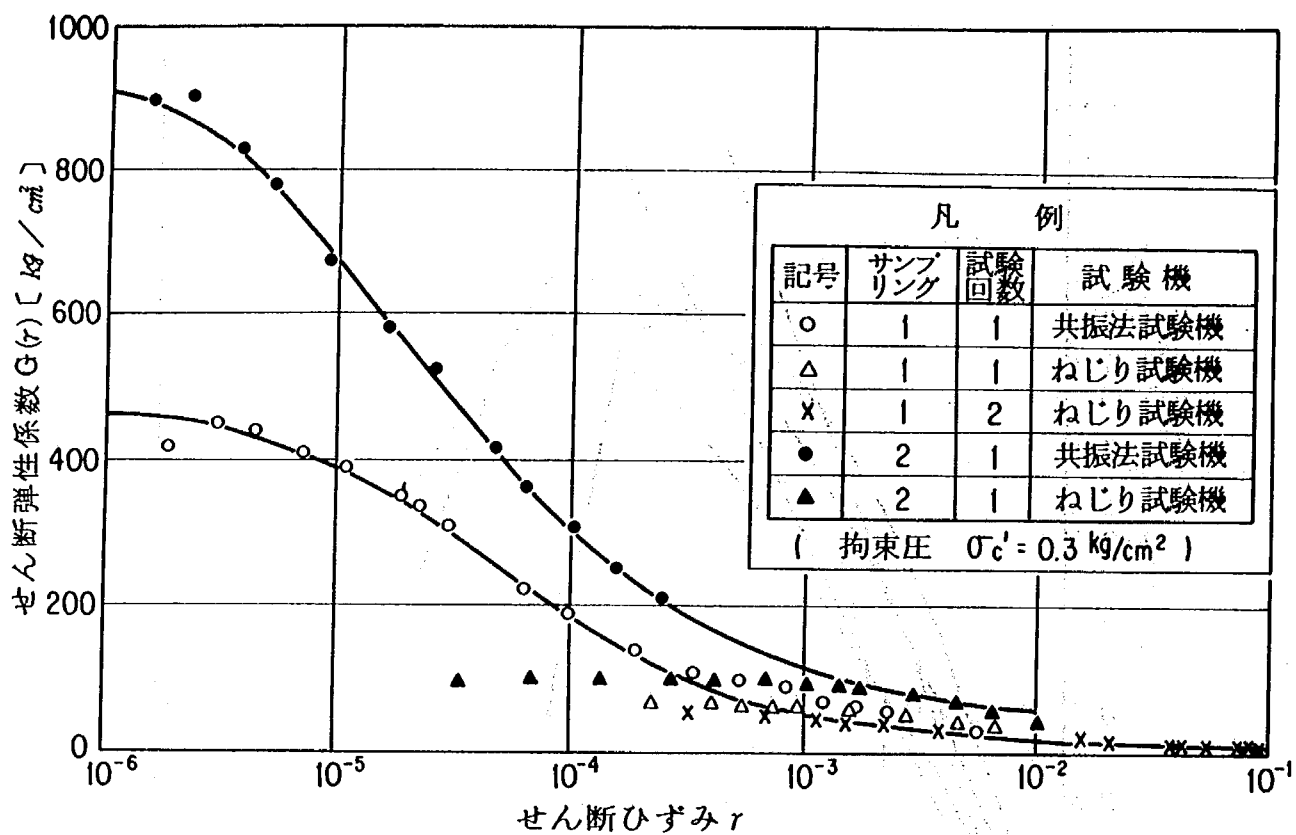


図 2-6 模型基礎を支持する関東ロームのせん断弾枚係数のひずみ依存性

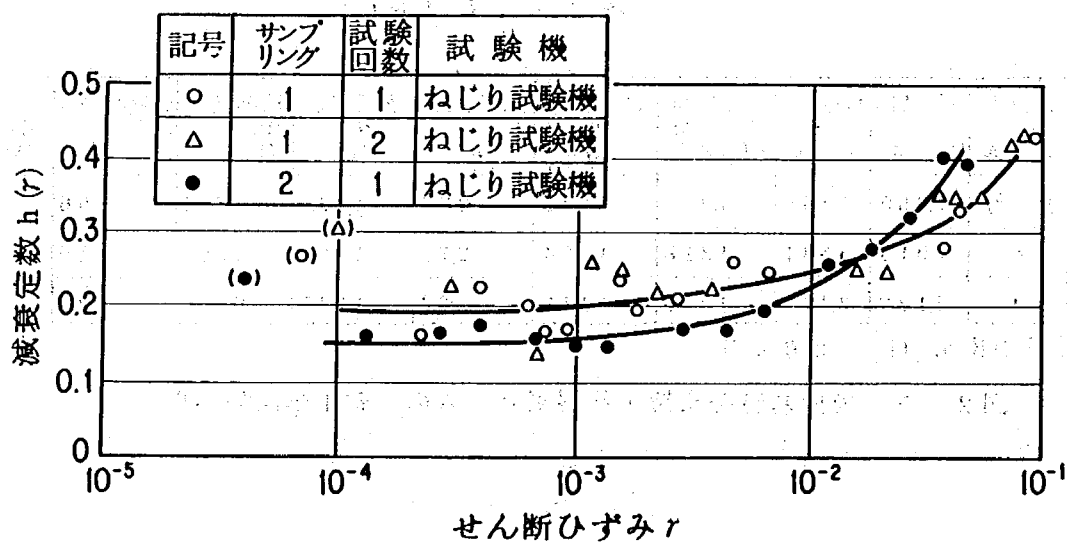
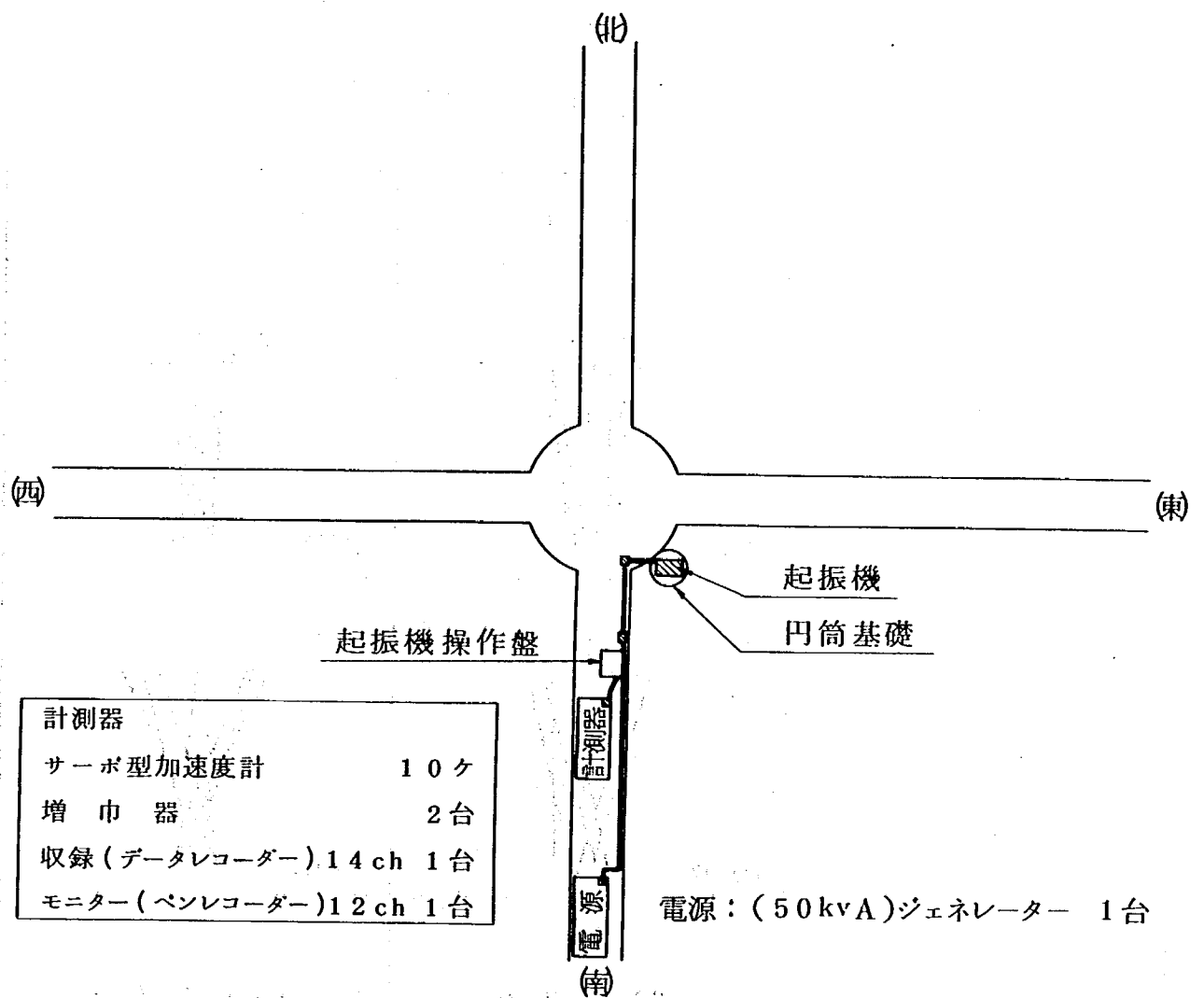
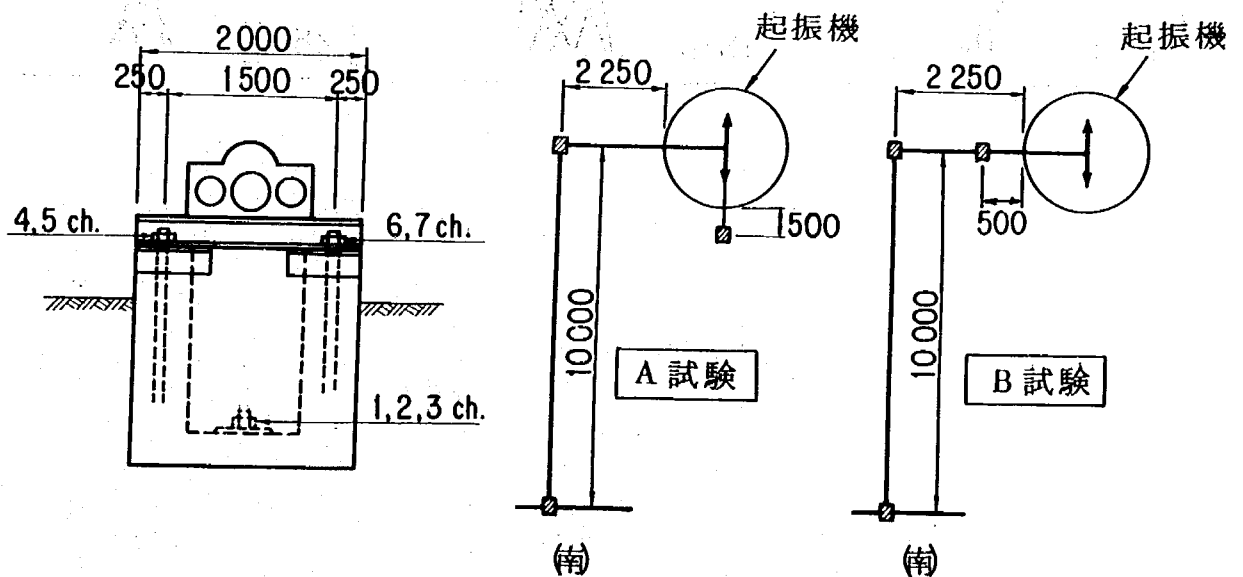


図 2-7 模型基礎を支持する関東ロームの減衰定数のひずみ依存性



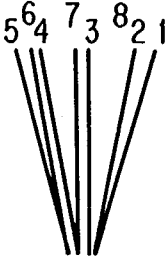
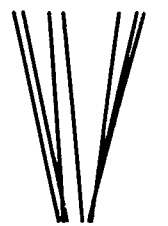
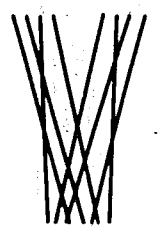
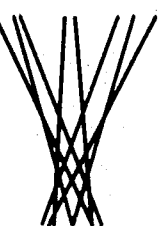
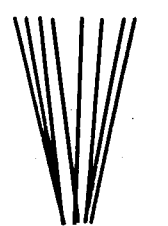
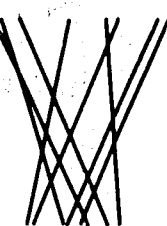
(a) 主要実験機器の配置

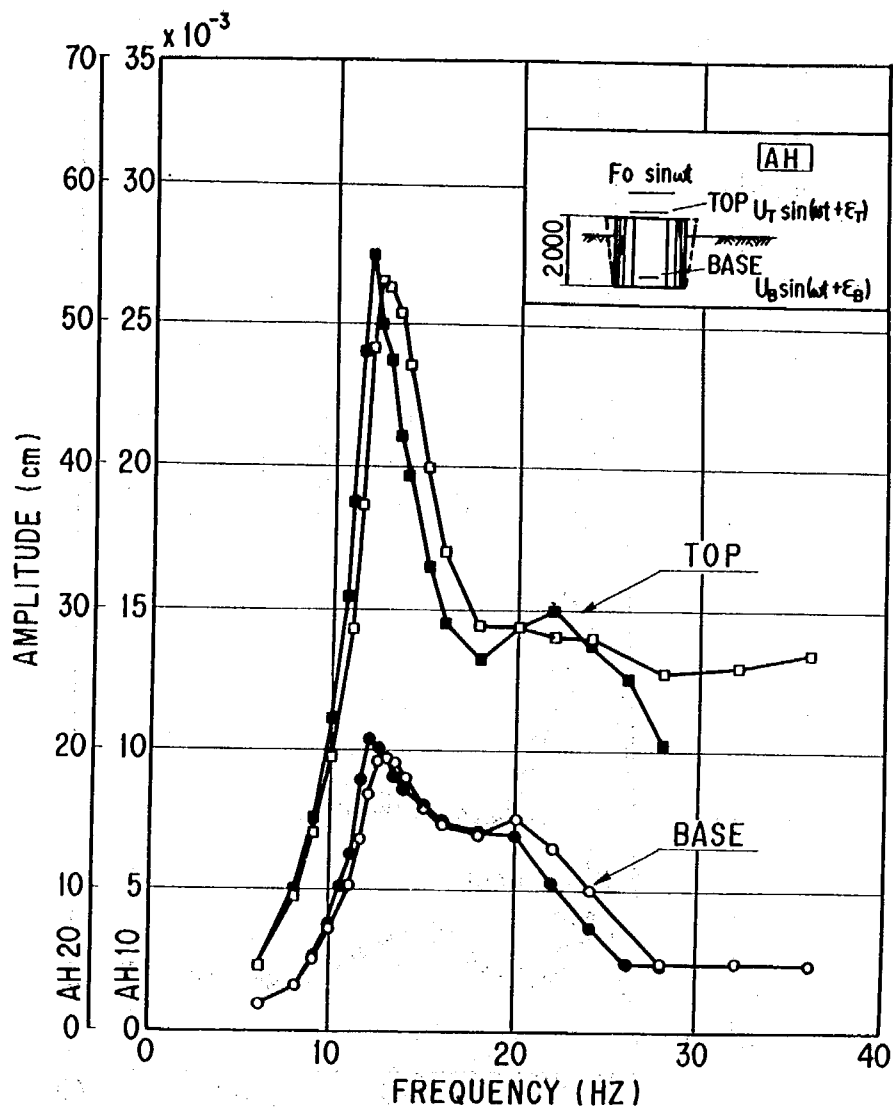


(b) 起振機と加速度計設置位置

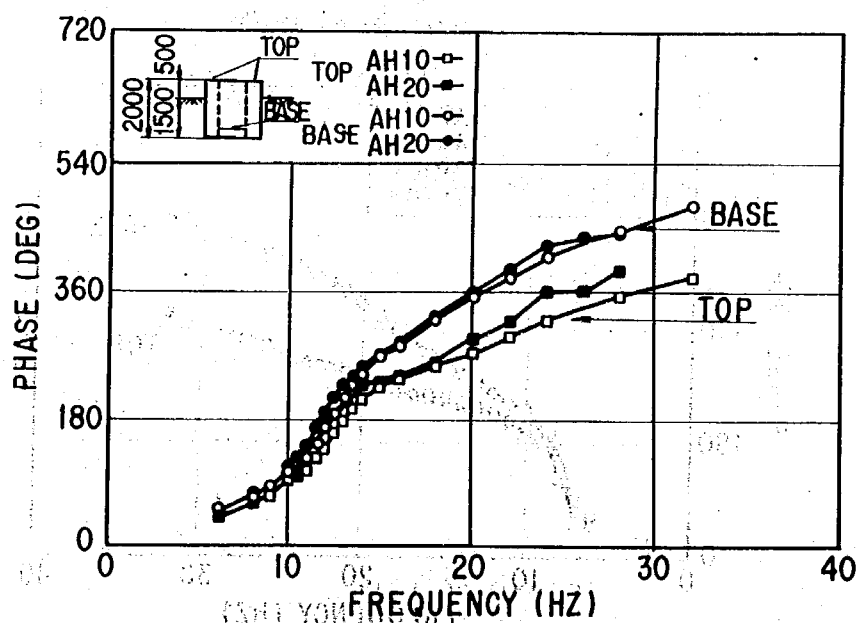
図 2-8 実験時の計測体制

表 3-1 振動数による振動モードの変化

下心ローリング	遷移領域	上心ローリング
8 Hz 	14 Hz 	20 Hz 
9 Hz 	16 Hz 	24 Hz 
10 Hz 	18 Hz 	28 Hz 

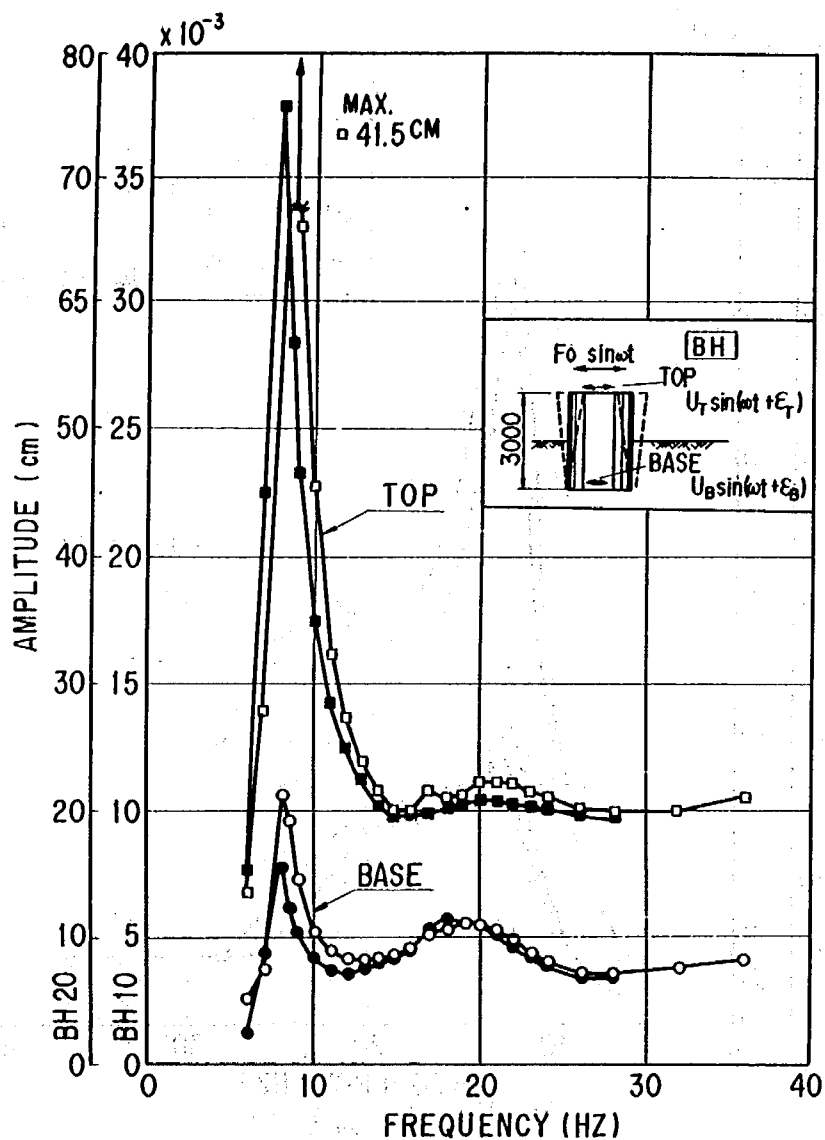


(a) 振幅特性

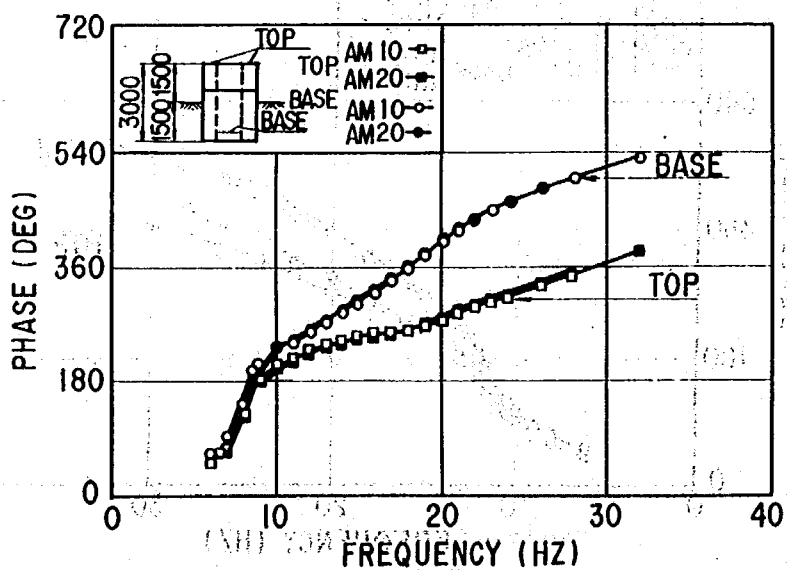


(b) 位相特性

図3-1 A試験の共振曲線（水平加振）



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図 3-2 B 試験の共振曲線 (水平加振)

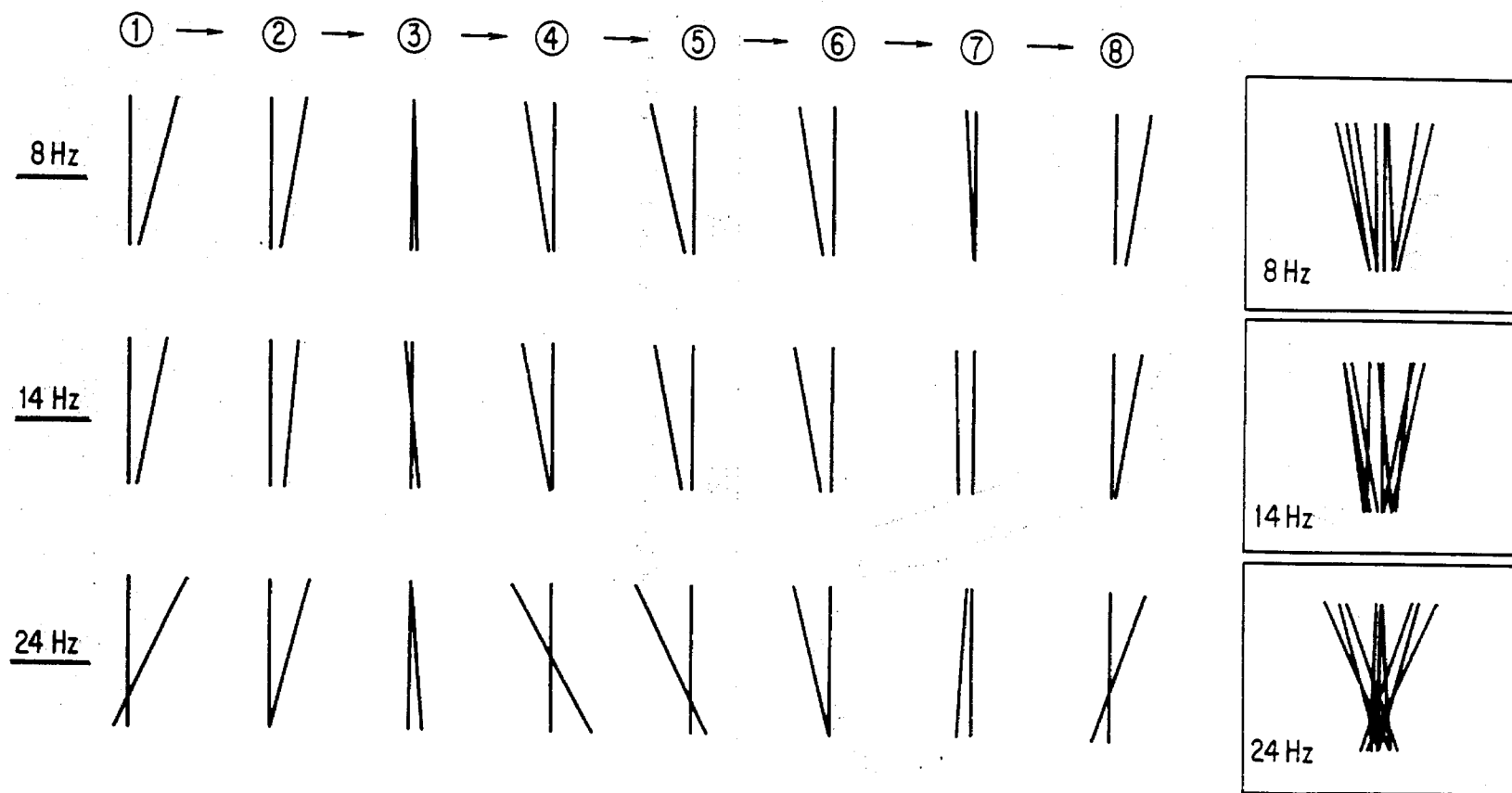


図 3-3 円筒基礎の振動モード (BH10)

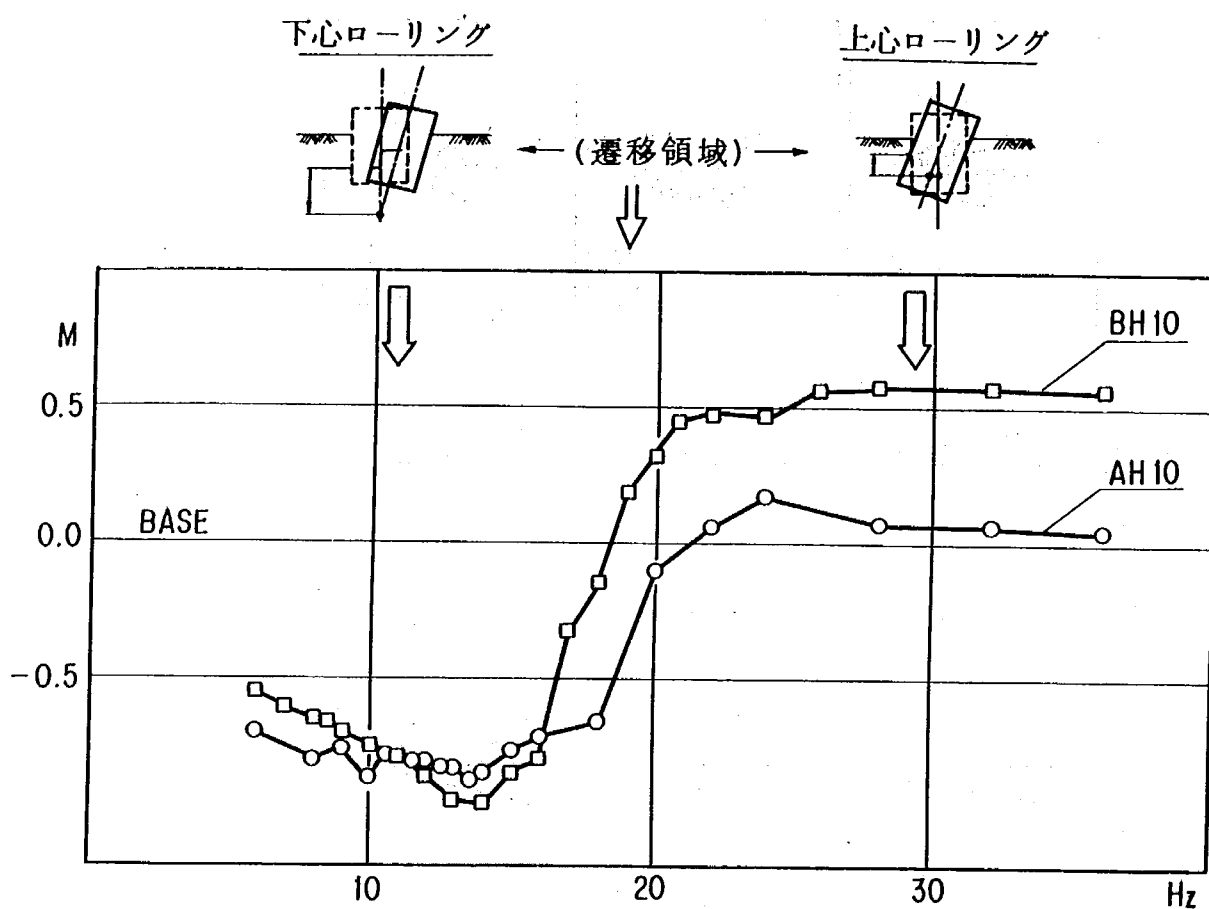
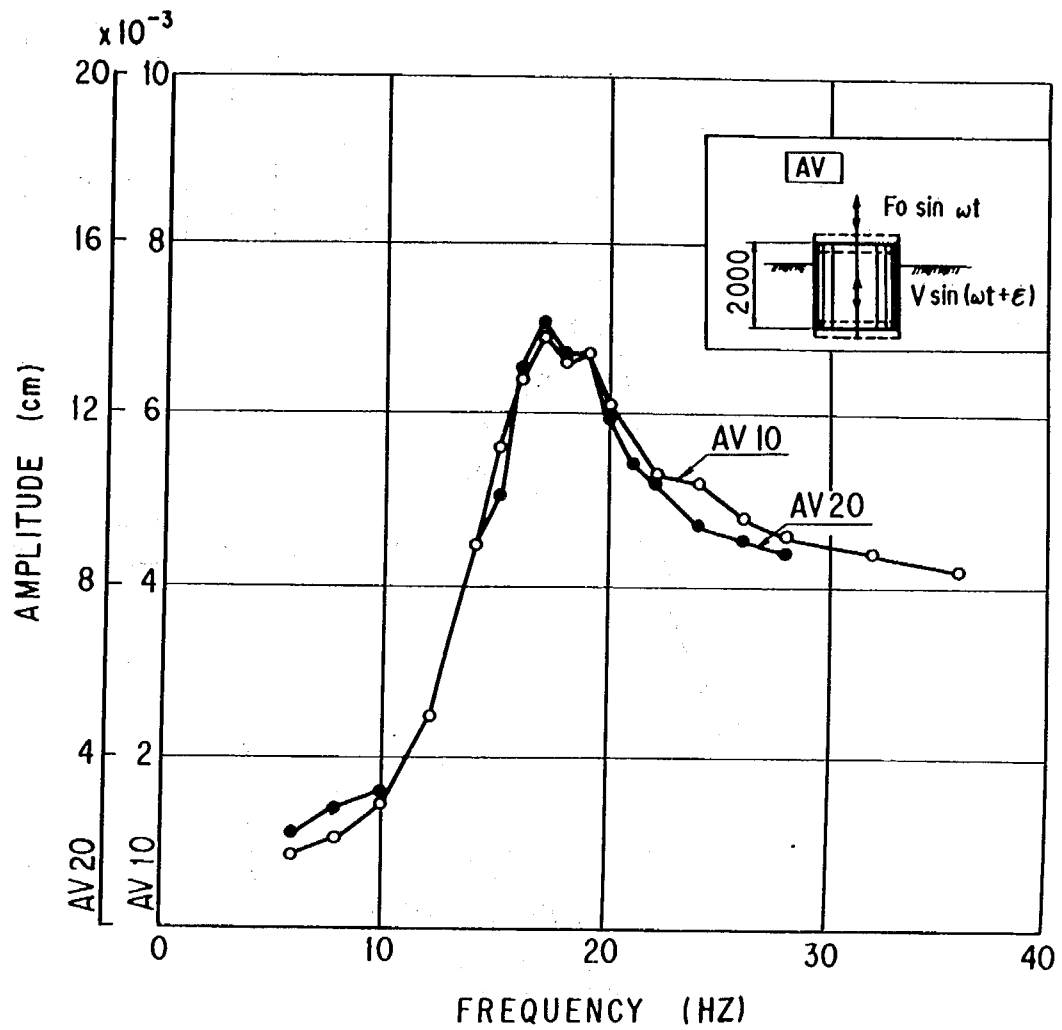
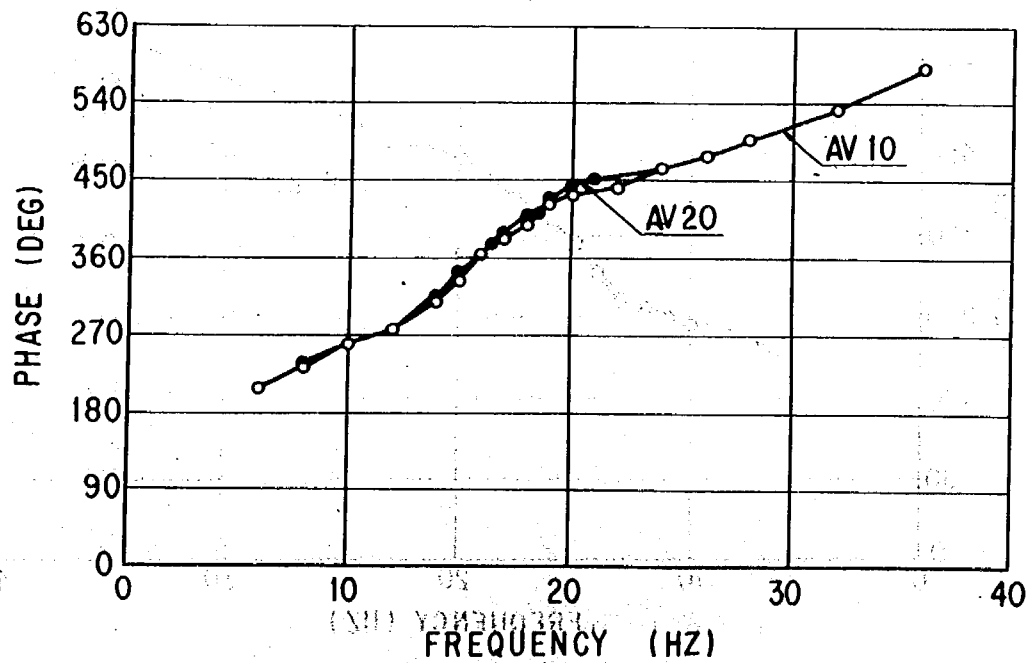


図 3-4 回転中心位置の加振振動数による変化 (AH10 試験および BH10 試験)

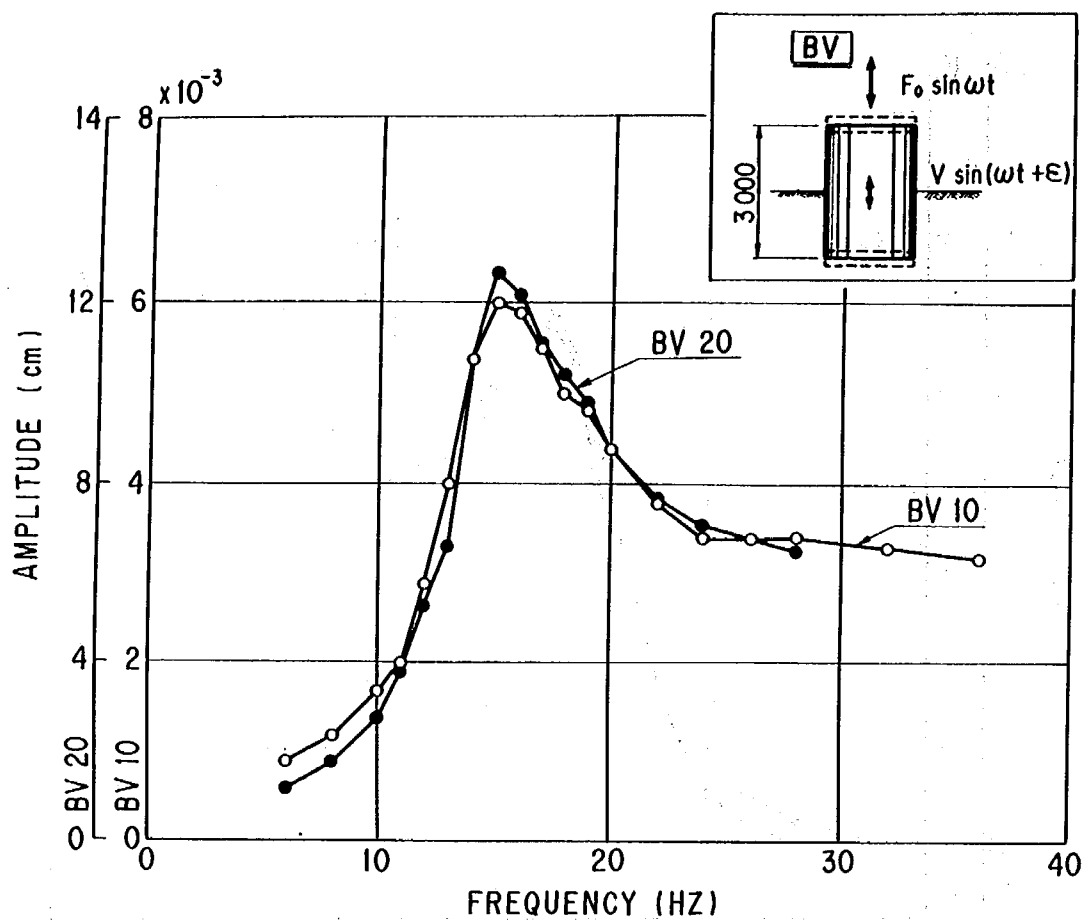


(a) 振幅特性

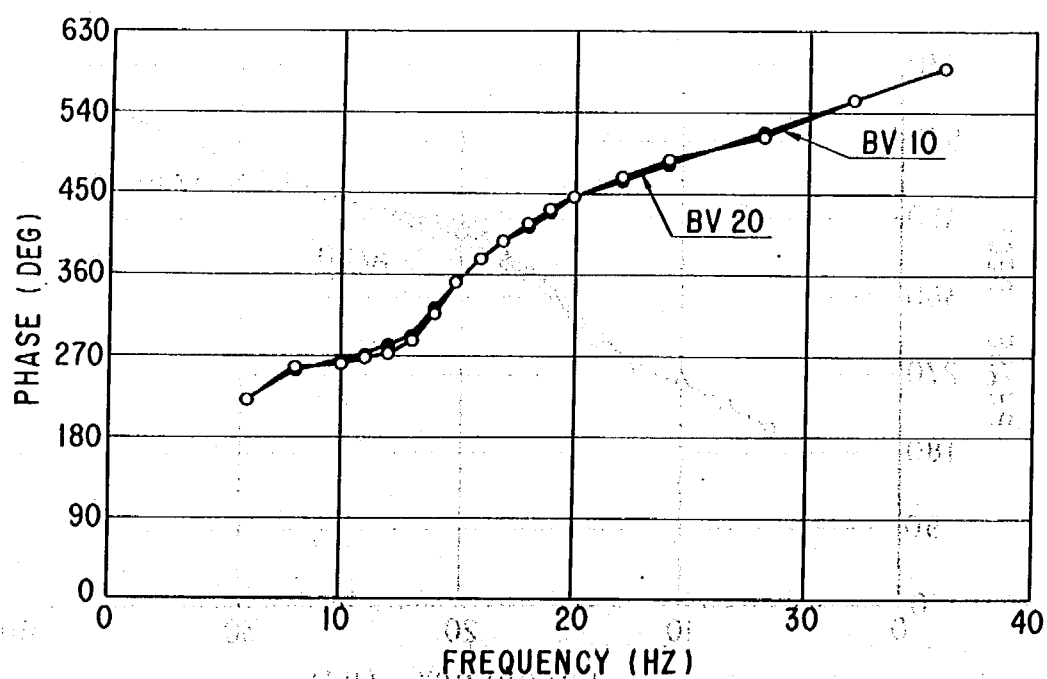


(b) 位相特性

図 3-5 A 試験の共振曲線 (上下加振)



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図3-6 B試験の共振曲線(上下加振)

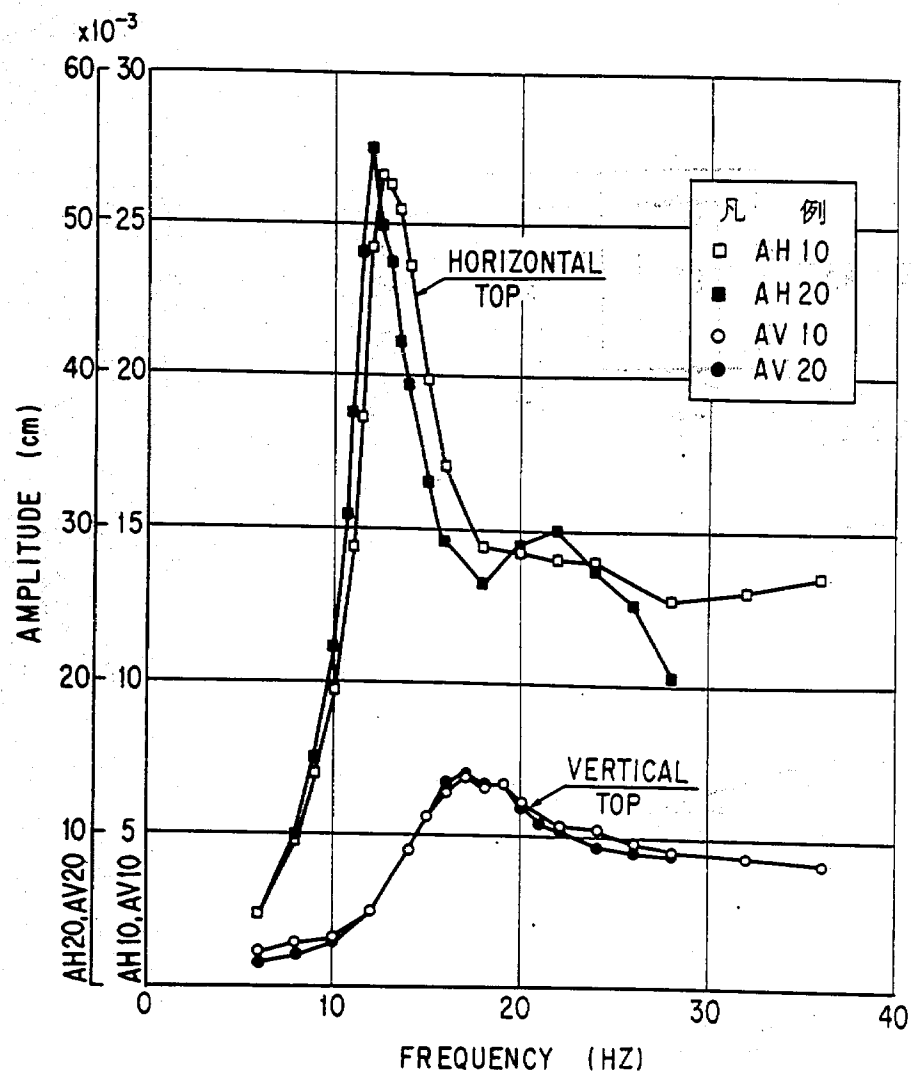


図 4-1 水平方向に加振した場合と上下方向に加振した場合の加振方向の基礎頂部変位の違い (A 試験)

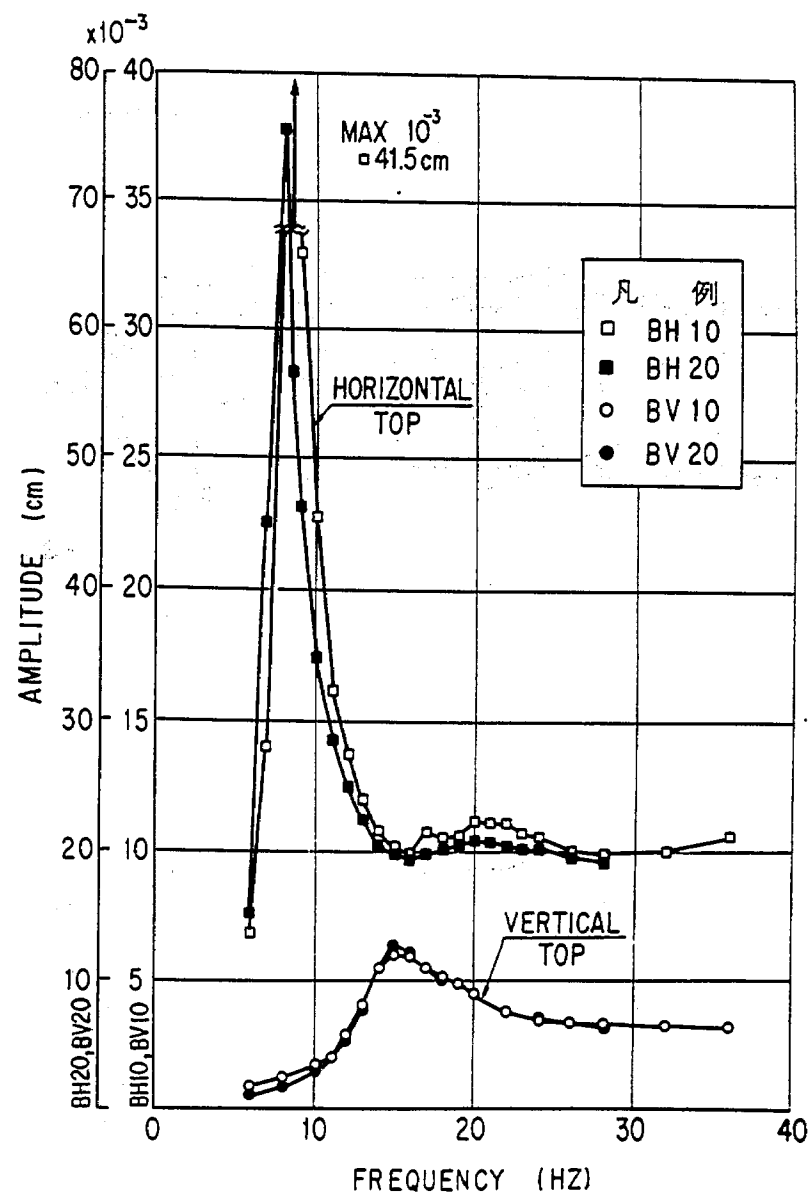


図 4-2 水平方向に加振した場合と上下方向に加振した場合の加振方向の基礎頂部変位の違い (B 試験)

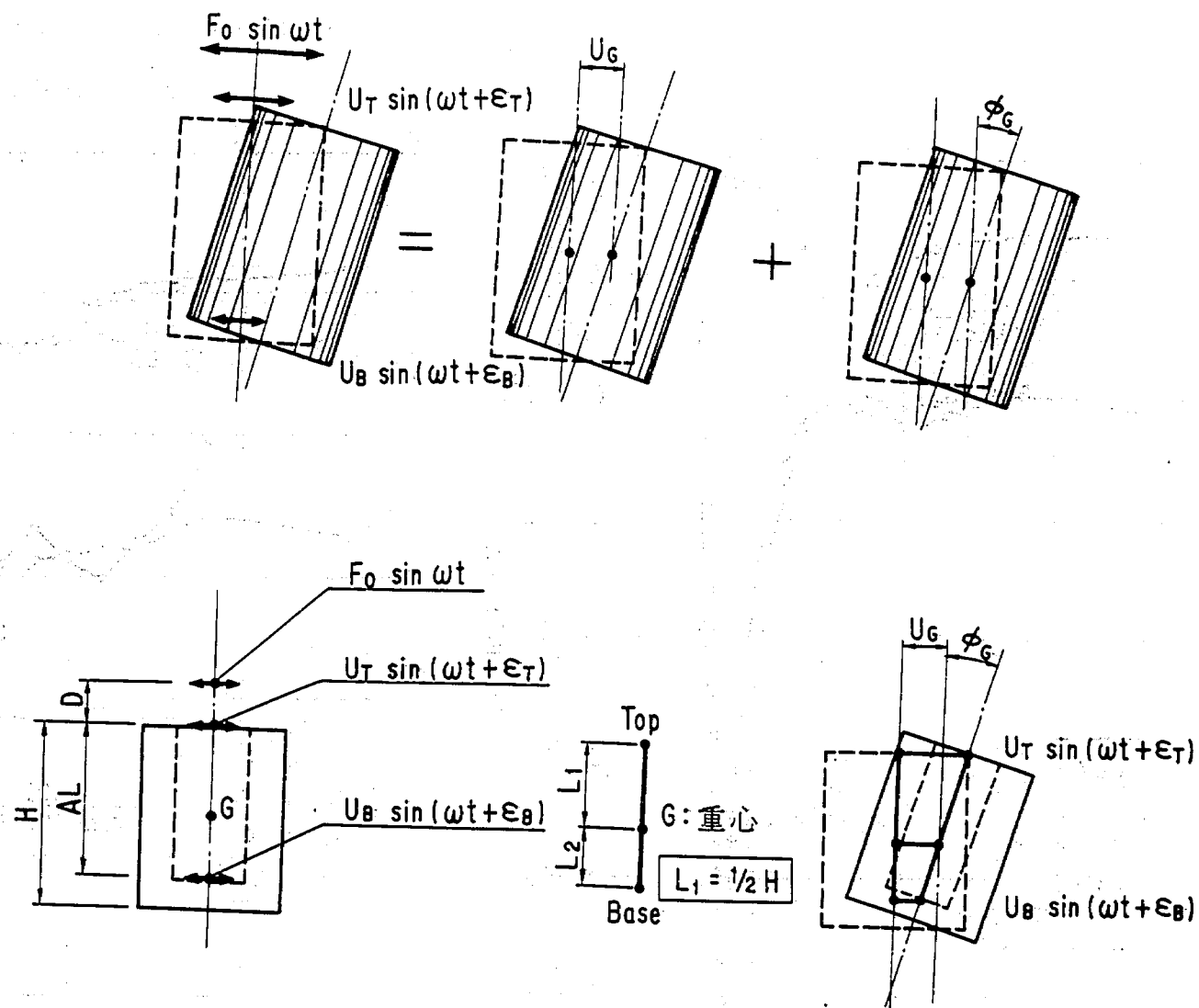
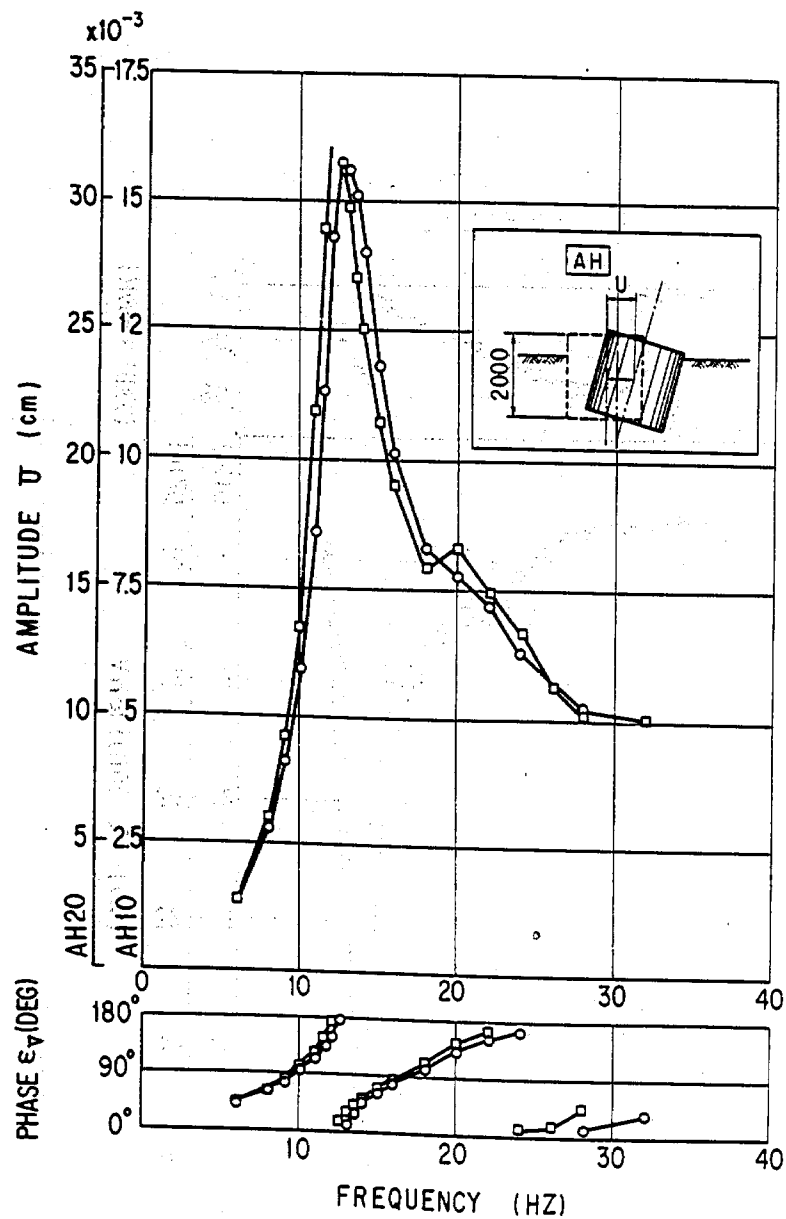
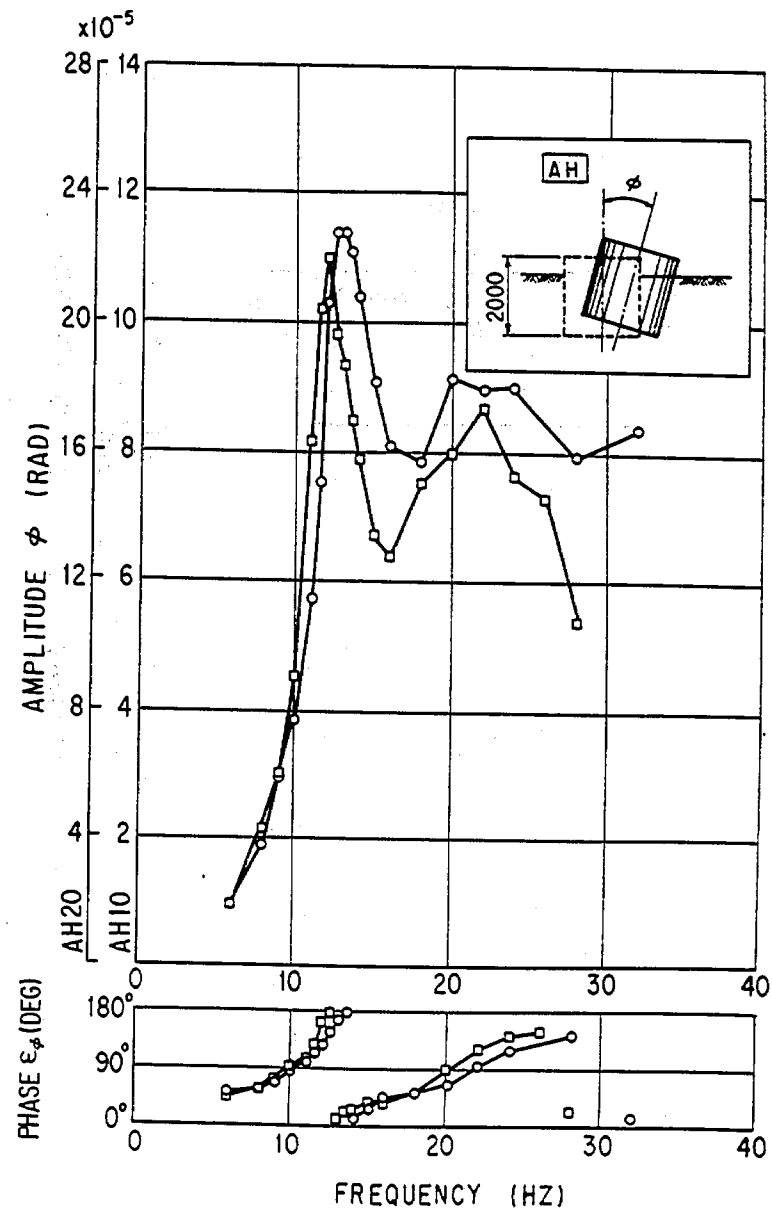


図 4-3 基礎模型の振動モード

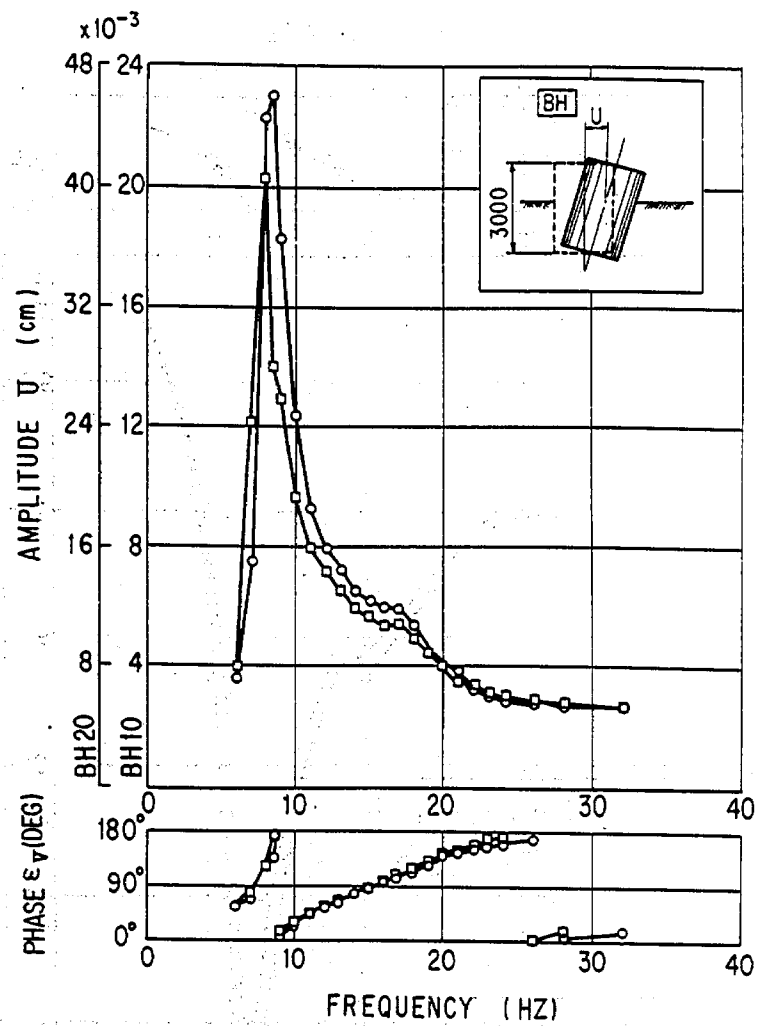


(a) 並進成分の振幅および位相 (U, ϵ_U)

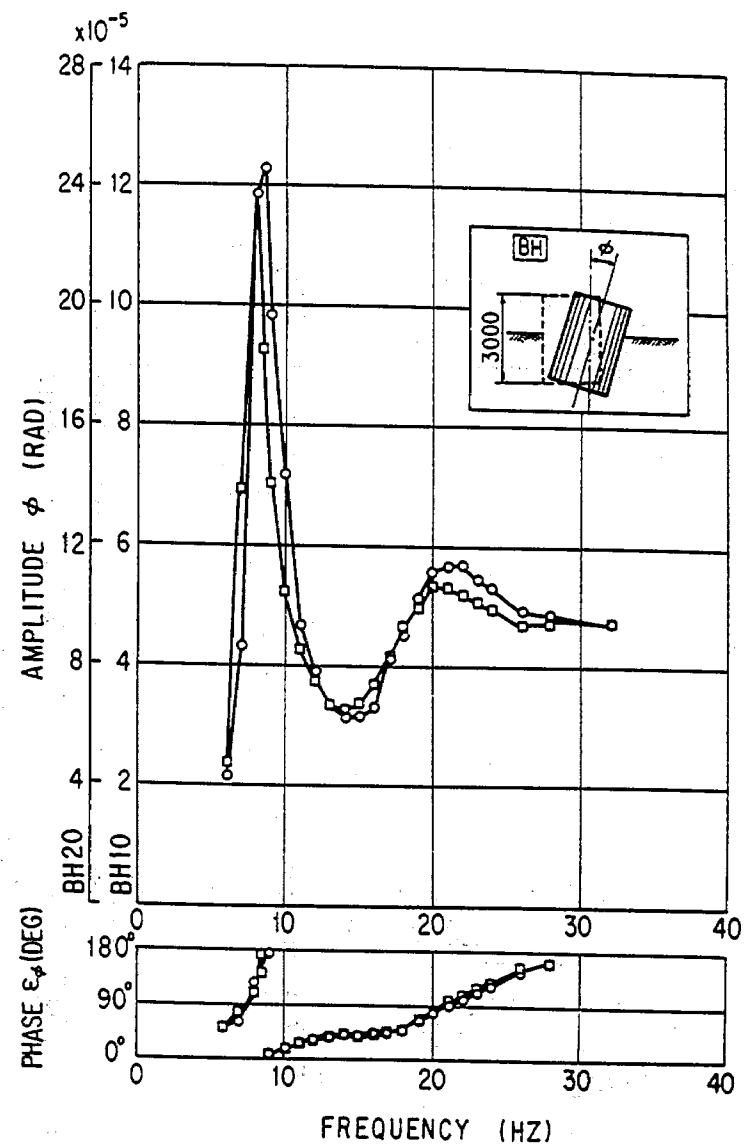


(b) 回転成分の振幅および位相 (ϕ, ϵ_ϕ)

図 4-4 重心点における並進, 回転成分 (A 試験)



(a) 並進成分の振幅および位相 (U, ϵ_U)



(b) 回転成分の振幅および位相 (ϕ, ϵ_ϕ)

図 4-5 重心点における並進, 回転成分 (B 試験)

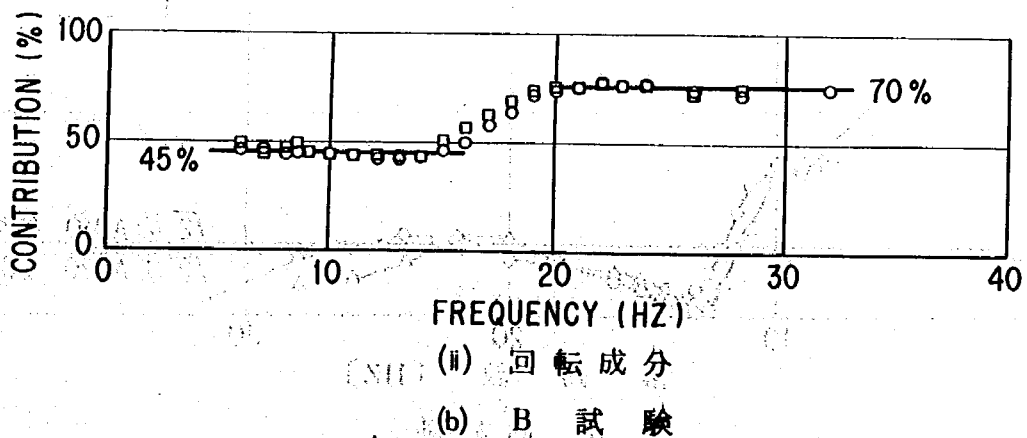
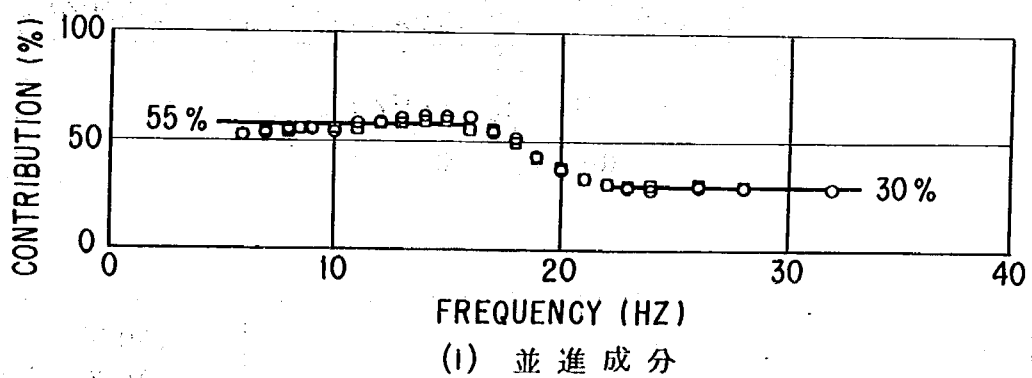
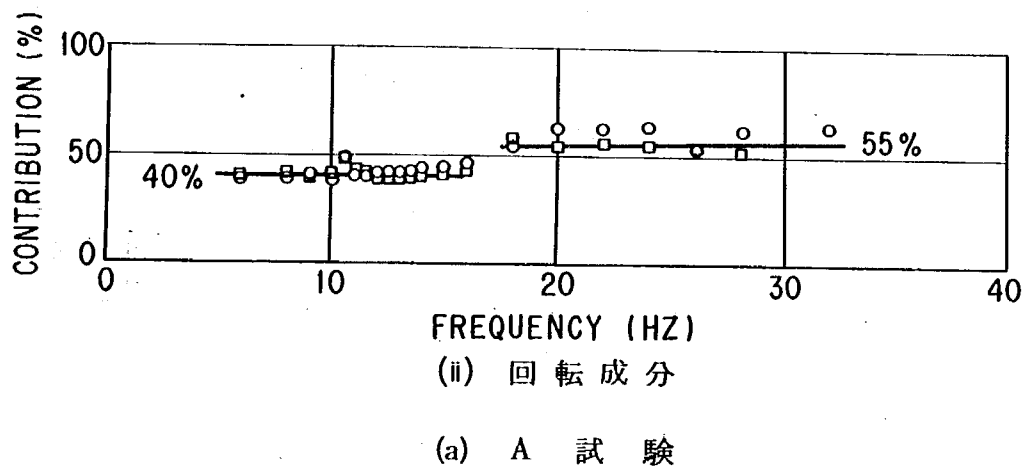
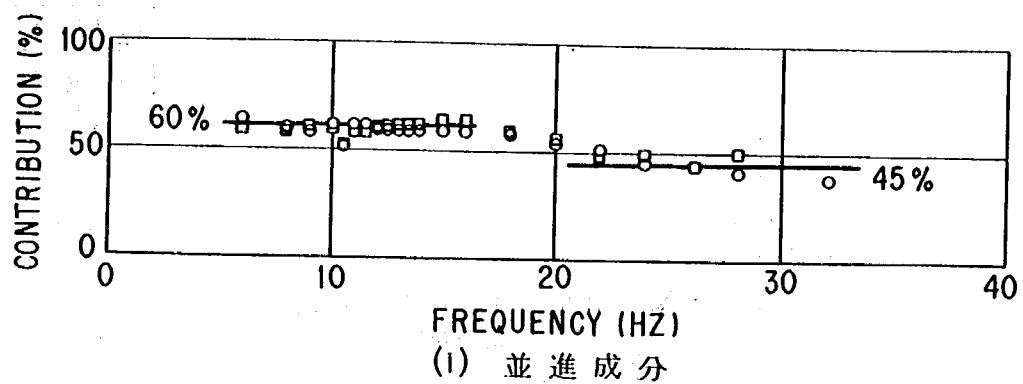
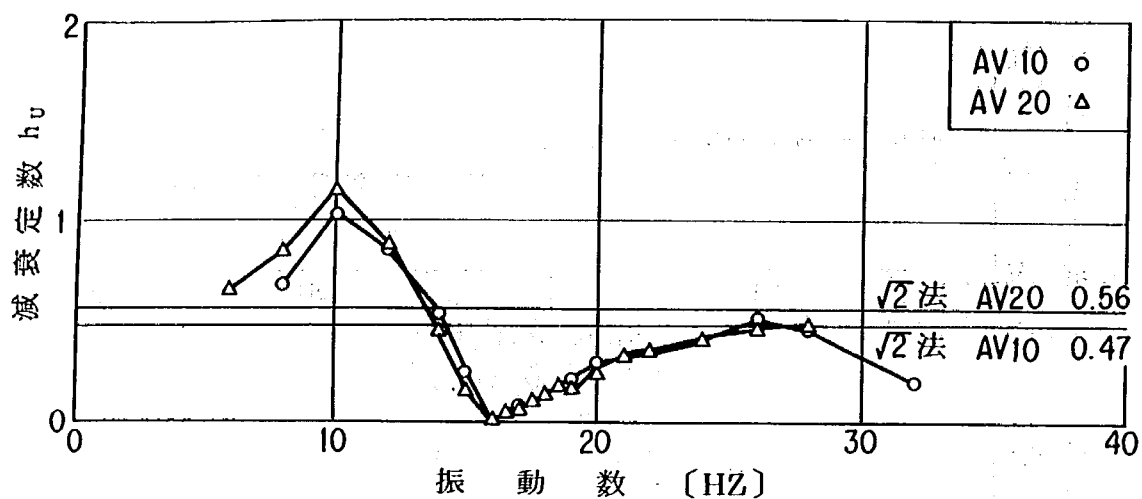
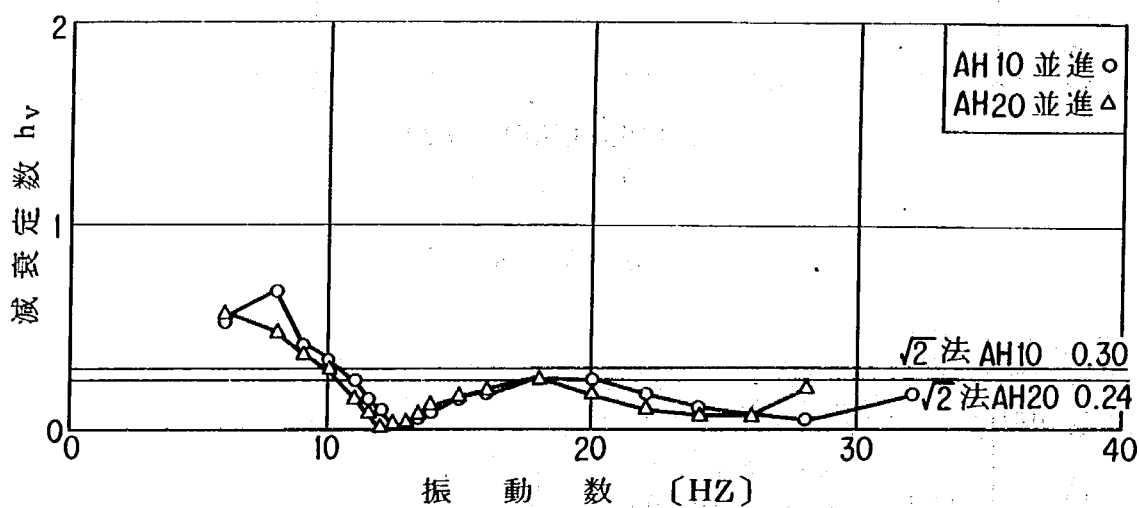


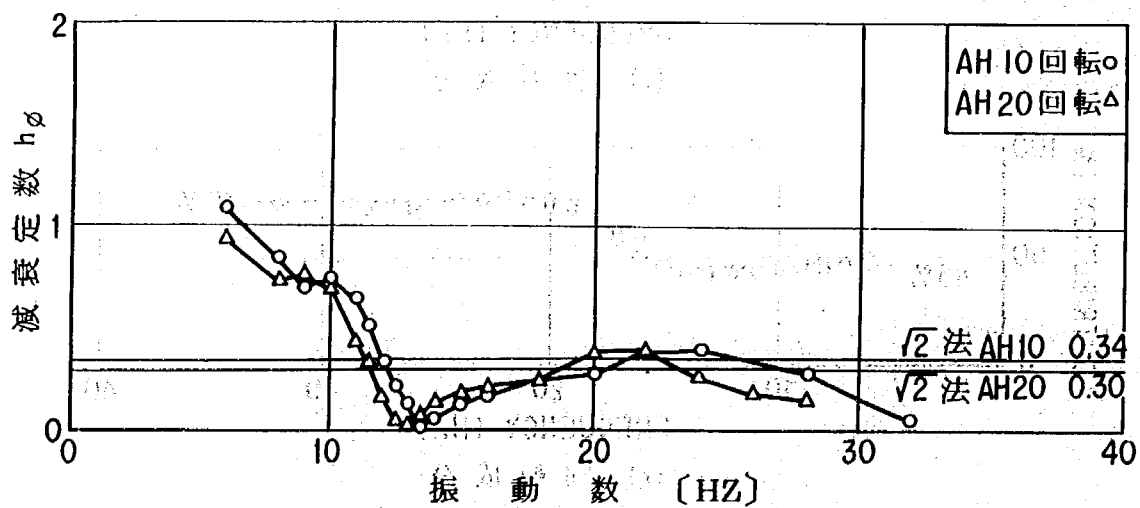
図 4-6 基礎頂部における水平振幅に及ぼす並進および回転成分の寄与率



(a) 上下動

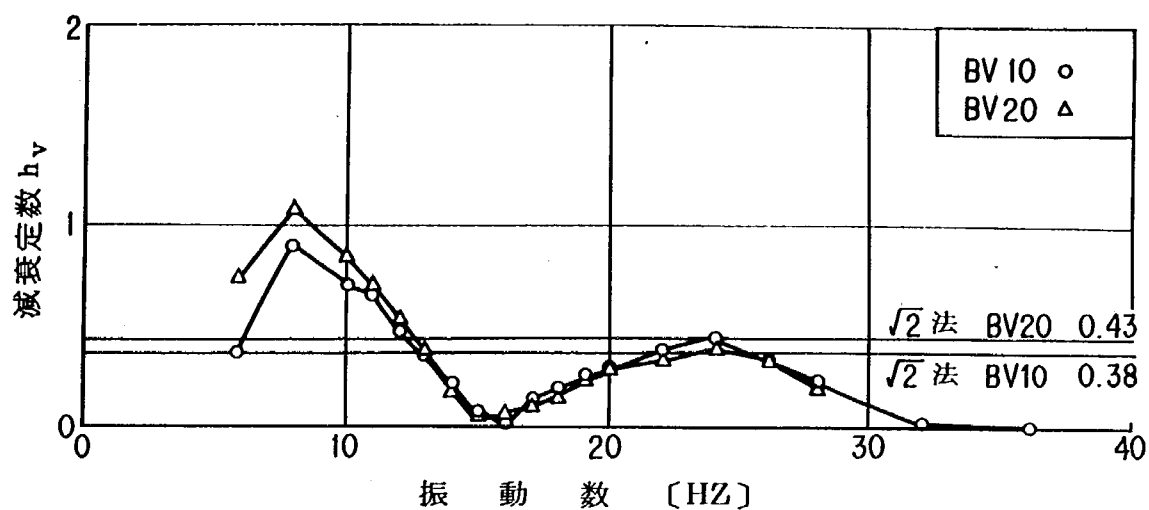


(b) 水平動

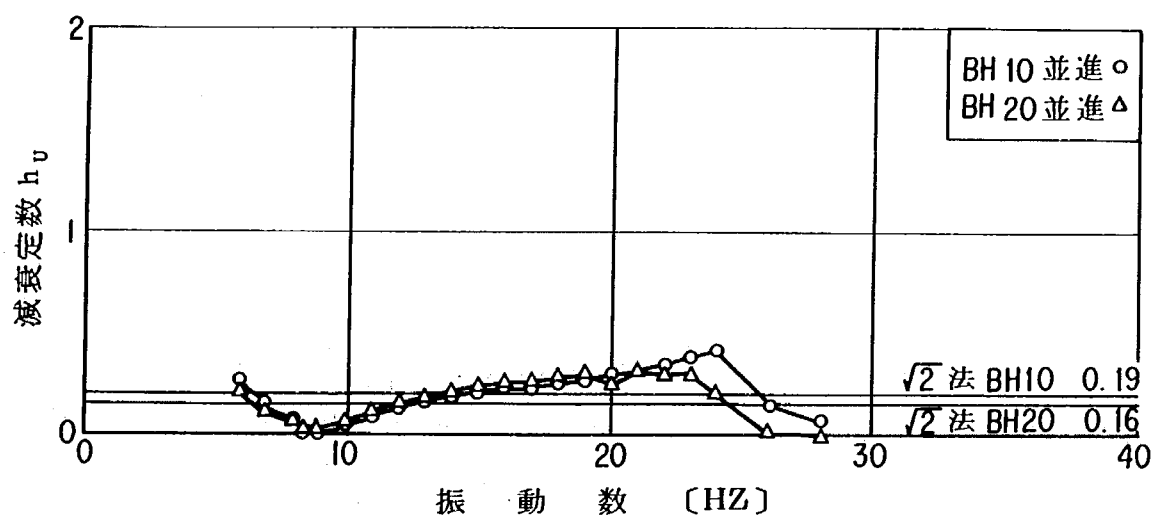


(c) 回転動

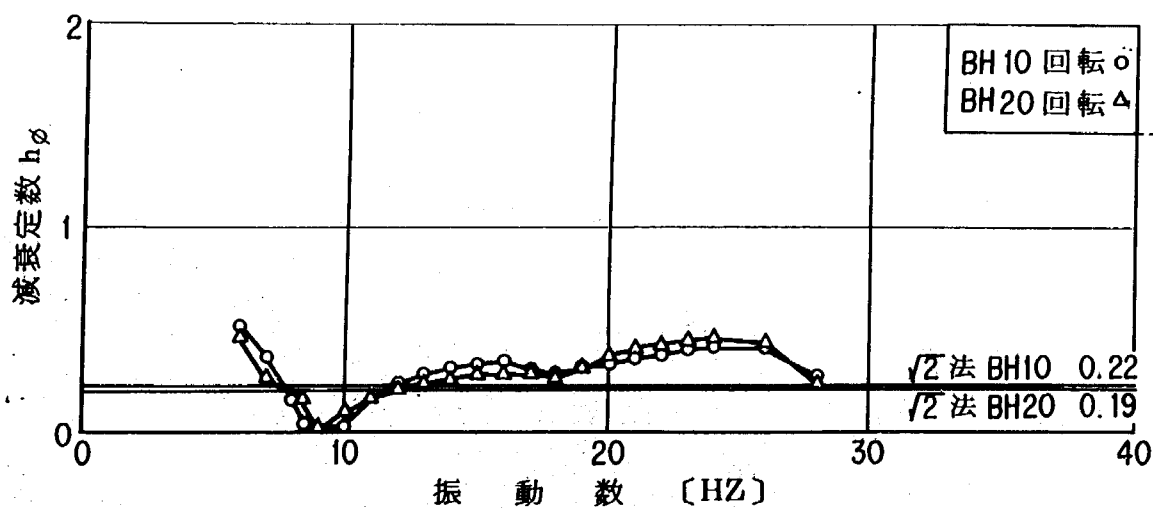
図 4-8 重心の上下動, 水平動および回転動に対する減衰定数 (A 試験)



(a) 上下動



(b) 水平動



(c) 回転動

図 4-9 重心の上下動，水平動および回転動 に対する減衰定数 (B 試験)

根入れのある円筒基礎の加振実験

土研資料 第 1735 号
昭 56 年 3 月 (1981)

キーワード 加振実験 動的相互作用, 耐震設計法 地震防災部
振動研究室

要 旨 基礎～地盤系の動的相互作用は、構造物の動的特性を把握し、耐震設計を適切に行う上で重要な課題の 1 つである。地中に埋設された構造物については、地盤の振動をもととした応答変位法による耐震設計法が確立されているが、根入れのある基礎等の半地下、半地中方式の構造物に対しては、まだ適当な耐震設計法が提案されていない。本報告は以上の観点から、根入れのある円筒基礎の加振実験を通して、半地下、半地上方式の基礎の動特性に関する定量的データを採取することを目的に実施した円筒計基礎の加振実験結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい。

地震防災部振動研究室 御中

建設省土木研究所

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 61

No. 61

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第1735号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

