

# 基礎周辺地盤の振動分布に関する研究 (その1)

中 川 恭 次  
 渡 辺 清 治  
 角 田 智 彦  
 安 井 讓  
 寺 村 彰  
 瀬 尾 和 大

## 概 要

本研究は基礎—地盤連成系の動作解析に当たって重要と思われる基礎周辺地盤の動的特性を解明するために、粘性土上の根入れのない円型基礎を用いて加振実験を行なったものである。実験に当たっては、主として基礎底面における反力分布と基礎周辺地盤の地中における加速度分布の計測に重点をおいた。その結果、基礎底面の反力分布は剛板分布を示すことがわかった。また実験で得られた共振振動数、地盤ばね定数を理論値と合わせるためには基礎質量の1.5~3倍の土の付加質量を考えねばならず、基礎周辺地盤の振動分布からも相当量の土が基礎とともに振動していることがわかった。また基礎周辺の地表については基礎の振動によって発生する表面波の問題として今後取り扱うこととした。

## 1. まえがき

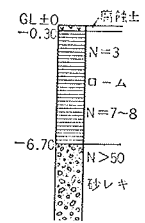
地盤と建物の相互作用の問題を解明するためにはまず建物の周辺地盤の動的特性を明らかにする必要がある。本研究は建物基礎のモデルとして最も簡単な円型基礎を用い、起振機により基礎を周期的に加振した場合について基礎の周辺地盤の振動性状を実験的に明らかにしようとしたものである。

既往の研究としては、波動伝播の理論を用いて地盤を連続な弾性体と想定してその動的な特性を解明しようとする一連の理論的な研究がある<sup>1)</sup>。これらの研究は均質等方な半無限弾性地盤上の自重を考慮しない基礎に動的な強制力が作用する場合の垂直振動、水平振動および回転振動に対して基礎の応答を表わす解を誘導し、その解を用いて半無限弾性地盤上の機械基礎の応答、さらに半無限弾性地盤上の基礎の任意の地動に対する応答を求めようとするものである<sup>2)</sup>。一方これらの波動伝播の弾性理論を用いた弾性地盤上の基礎の応答と地盤上に置かれた模型基礎を起振機で加振して実験的に得られた基礎の応答との比較研究<sup>3)</sup>も行なわれているが、それらの実験的研究の多くは地表面上の基礎の応答のみに着目している場合が多い。地盤を数学的なモデルに抽象するために必要な諸定数すなわち地盤のせん断剛性、ポアソン比、地盤の質量等のあいまいさを考えるとき、基礎自身の応答を含め、基礎周辺地盤の地中での挙動をも実験的に把握し既往の理論との対応性を検討する必要があると思われる。

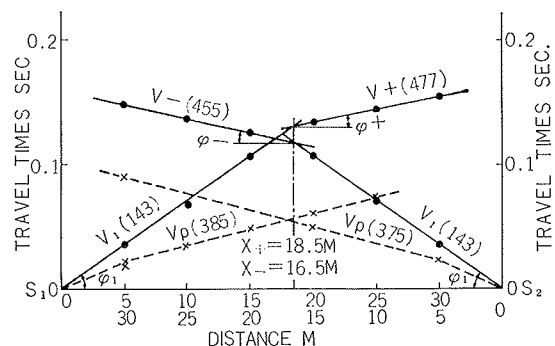
本研究では主として、基礎底面における反力分布および基礎周辺地盤の地中加速度分布の計測を行ない、その結果を用いて基礎と地盤の連成系の動的な特性を検討しようとしたものである。

## 2. 地盤の構成と諸定数

先に行なったボーリング調査、土質試験の結果より次のことがわかっている。実験の対象とした地盤は図—1に示すような表層の軟らかい単一表層地盤である。地盤密度は表層が $1.2\text{g/cm}^3$ 、下層が $2.1\text{g/cm}^3$ である。また地下水位はGL—10m以下である。一方屈折法による弾性波試験(板叩き)を行なった結果図—2に示すような走時曲線を得た。これより波動の伝播速度を求めると、S波は表層で $143\text{m/sec.}$ 、下層



図—1 地盤柱状図



図—2 S波およびP波の走時曲線

では466m/sec., P波は表層で 380m/sec. である。

### 3. 測点の分布

計測に用いた測点の配置を図-3, 4に示す。系の座標は起振機の水平加振方向をX, Xに直角な水平方向をY, 深さ方向をZ軸とする。円型基礎はRCで、半径 1.2m, 高さ 0.85m, 重量は 9.2 ton とし、地表の腐蝕土を除いて設置した。なお基礎の設置に先立って地中加速度計と基礎底面土圧計の設置を行なった。

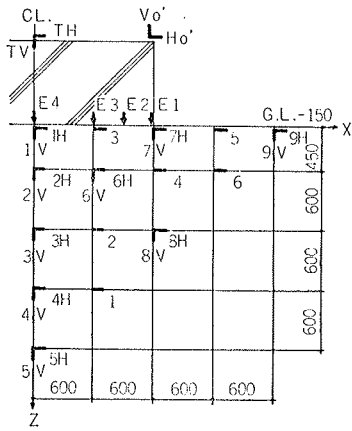


図-3 XZ 断面の測点配置

地中加速度計はワイヤーストレインゲージ型 2成分または 1成分を塩化ビニールのカプセルに納め防水密閉したものを XZ 面内に基礎半径の $1/2$ のメッシュ状に分布させた。カプセルの密度は  $1.16 \text{ g/cm}^3$  で地盤密度に近く、土との付着もよい。土圧計はひずみゲージ型を使用し、基礎底面 X 軸上に 6 点を分布させた。変位計は基礎上両端と地表 X, Y 方向測線上の基礎端から 1.2m 間隔にいずれも水平 X 方向と上下方向の 2成分を配置した。

### 4. 基礎および周辺地盤の共振曲線

偏心質量回転型起振機を上下および水平に加振したときのこの系の振動性状を基礎底面の反力分布, 基礎の振動性状, 基礎周辺地表および地中の振動分布から検討してみた。ただし上下, 水平とも偏心モーメント

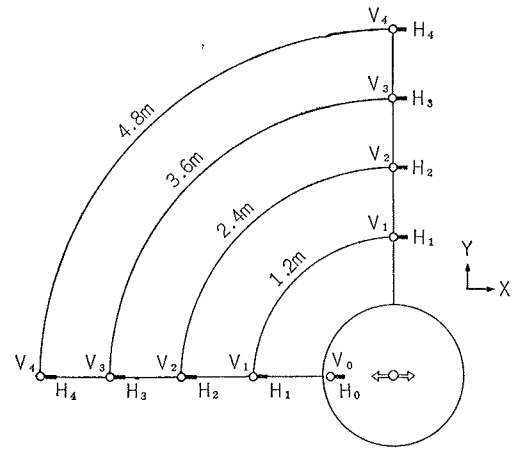


図-4 基礎上および地表の測点配置

Mor を  $0.73 \text{ kgm}$  とし (一部で  $1.28 \text{ kgm}$  を用いた)  $5 \sim 20 \text{ Hz}$  の周波数領域で加振を行なった。基礎底面反力から得た共振曲線を図-5~7に示す。上下加振時のおよその共振振動数は  $15 \text{ Hz}$ , 水平加振時は Mor が  $0.73 \text{ kgm}$  のとき  $8 \text{ Hz}$  と  $17 \text{ Hz}$ ,  $1.28 \text{ kgm}$  のとき  $7.9 \text{ Hz}$  と  $16.2 \text{ Hz}$  である。基礎の変位共振曲線からも図-8, 9に示すように同様の共振振動数を得た。

次に地表面 X, Y 測線上の変位共振曲線を図-10~14に示す。水平加振時では X 測線の高振動数のピークが Y 測線に比しはるかに大きい。

次に Mor が  $0.73 \text{ kgm}$  のときの地中の加速度共振曲線を図-15~19に示す。上下加振では基礎底面外周の 7V が最も大きい, わずか下方の 8V では急激に振幅が減少している。このように上下動では基礎外周部分が局部的に大きな振動をするが, その影響範囲はきわめて狭いようである。図-16で深さ方向のピークの変化をみればしだいにピークが消滅してゆく様子がよくわかる。一般に基礎下の各測点は同一深さのもの傾向がよく似ている。また地表 X 方向では基礎から離

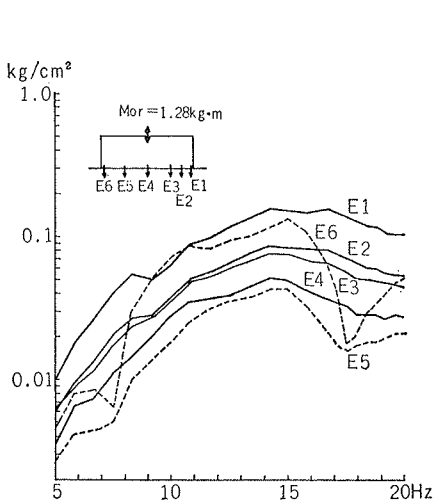


図-5 基礎底面反力共振曲線

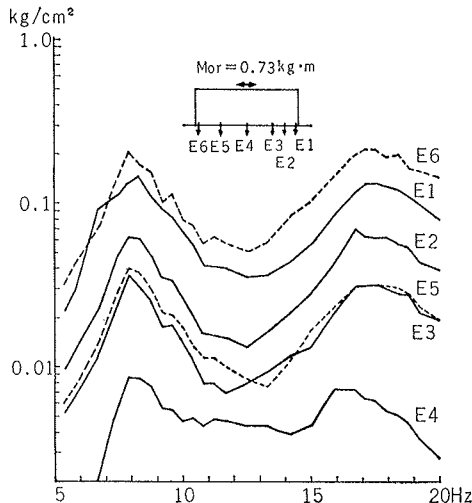


図-6 基礎底面反力共振曲線

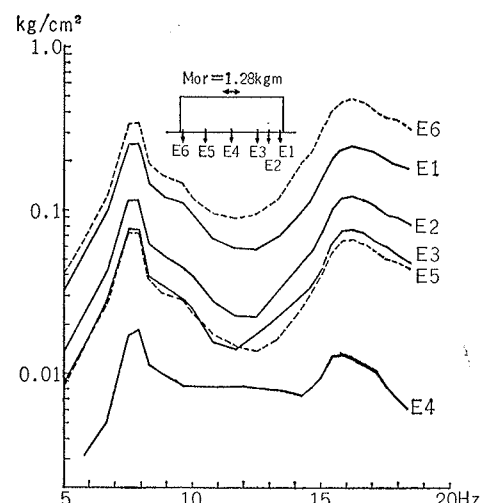


図-7 基礎底面反力共振曲線

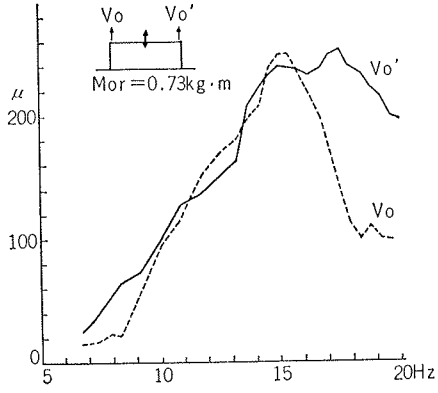


図-8 上下加振時における基礎変位共振曲線

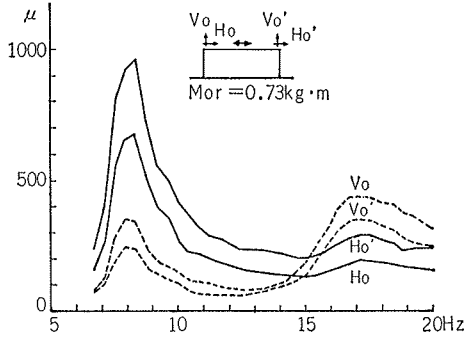


図-9 水平加振時における基礎変位共振曲線

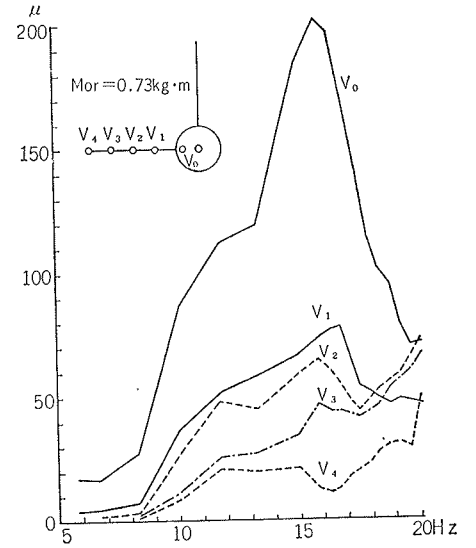


図-10 地表の変位共振曲線

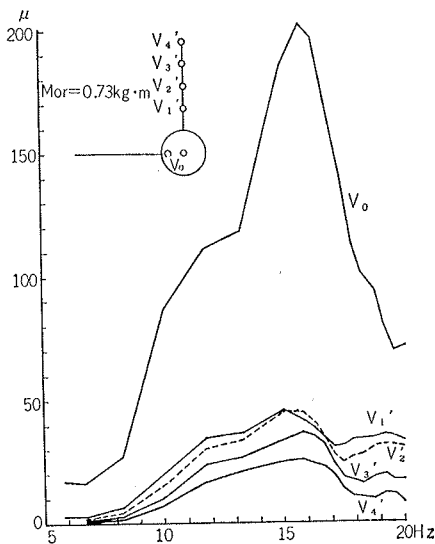


図-11 地表の変位共振曲線

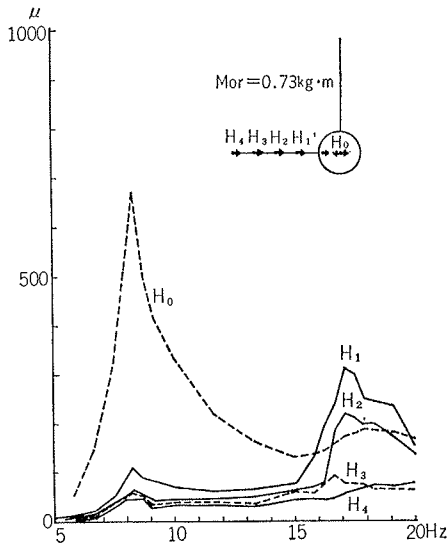


図-12 地表の変位共振曲線

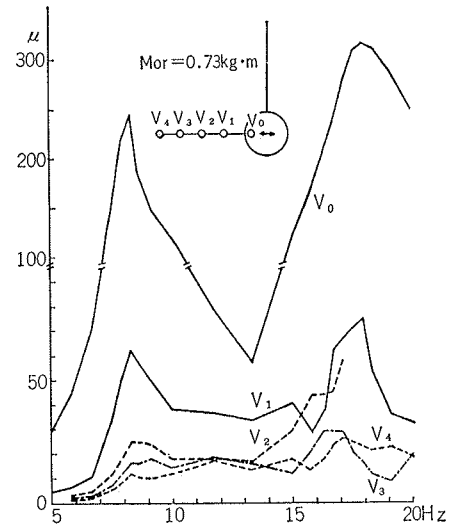


図-13 地表の変位共振曲線

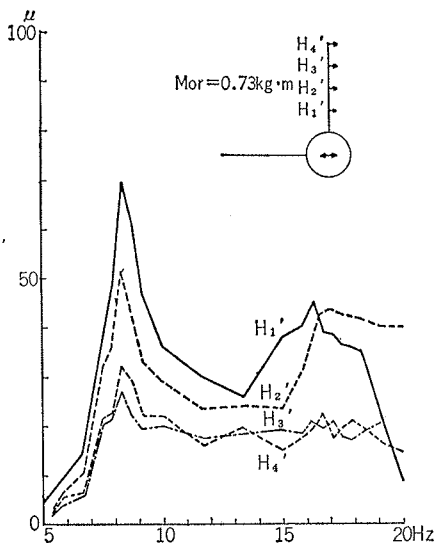


図-14 地表の変位共振曲線

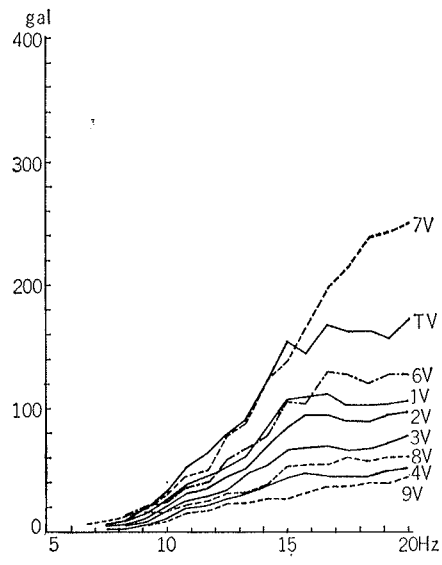


図-15 地中加速度共振曲線

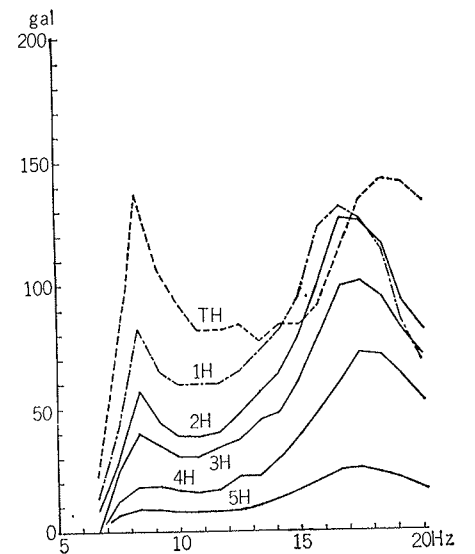
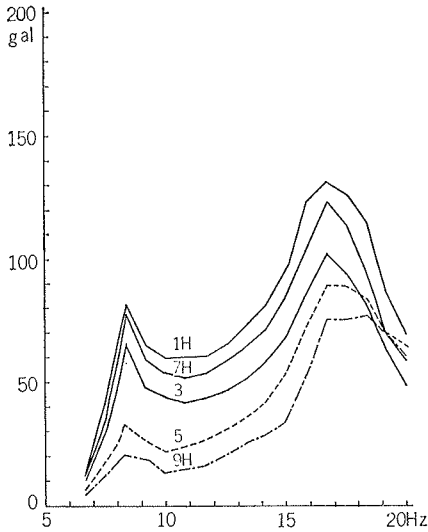
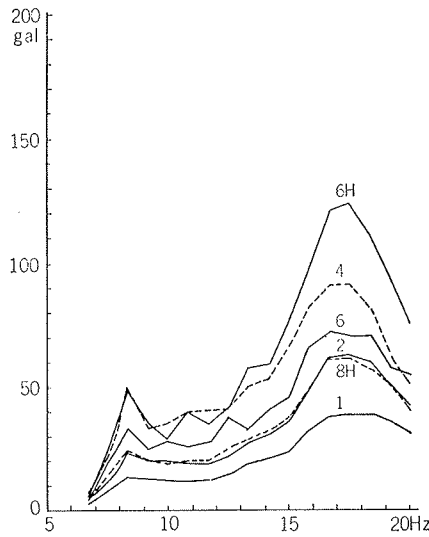


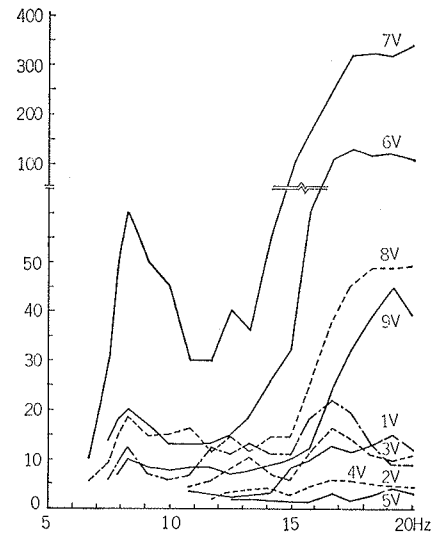
図-16 地中加速度共振曲線



図一七 地中加速度共振曲線



図一八 地中加速度共振曲線

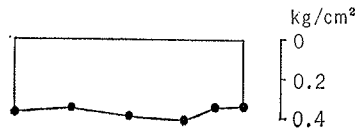
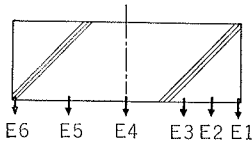


図一九 地中加速度共振曲線

れると急激に振幅が小さくなる傾向がみられる。

### 5. 基盤底面の反力分布

基礎の自重載荷時と基礎を持ち上げた無載荷時との基礎底面反力の差を読み取った結果、図一20のごとく、



図一20 静的反力分布

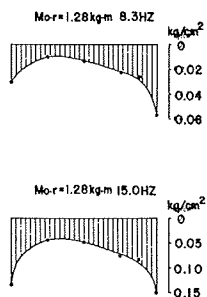
基礎底面の静的反力分布は均等分布であることがわかった。

ただしこの計測はすべての加振実験の後に行なったため、基礎自重を底面積で除した  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  の約2倍の値になっている。

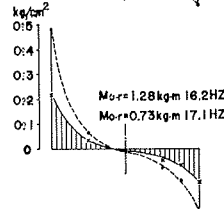
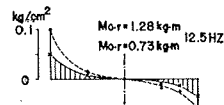
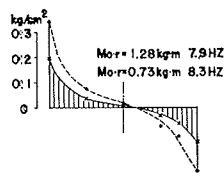
あるいは剛板分布であったのが、繰り返し加振されたために外周部分が局部降伏を起し、反力が低下して均等分布になったとも考えられる。

上下加振時の反力分布は図一5の共振曲線から、8.3Hzと15Hz(共振点)について図一21のように描ける。これは基礎の自重が

かかった静止時を反力0として基礎を上下加振したときの反力の増分に相当する



図一21 上下加振時反力分布



図一22 水平加振時反力分布

ものである。E6の反力は不安定で、9~16Hzでは図のような剛板分布を示すが、他の周波数領域では基礎が偏心しているようである。水平加振時の基礎端反力が最大となる時刻で同様の反力分布を描けば図一22のごとくやはり剛板分布となる。いずれの場合も水平加振時の回転動の影響は大きいと思われる。

### 6. 地盤のばね定数と付加質量

地盤を上下、水平方向のばねに置換して、地盤の見かけの動的ばね定数を上下振動、ロッキング振動につ

いて基礎上的変位の実測値から求めた結果と<sup>4)</sup>、

	DYNAMIC CAL. EXP.	STATIC RIGID BASE	
		UNIFORM	
$K_v, 10^4 \text{ TON/M}$	0.836	2.06	1.62
$K_h, 10^4 \text{ TON/M}$	0.303	1.52	1.19
$K_r, 10^4 \text{ TON/M}$	0.404	1.98	1.55

表一

VIRTUAL MASS TON-SEC²/M

	DYNAMIC CAL. EXP.	TAJIMI RIGID BASE	
		UNIFORM	
VERTICAL	1.383	0.344	0.144
SLIDING (ROCKING)	2.751	0.079	0.033

表二

静的ばね定数と実験から得られた共振振動数を用いて付加質量を求めれば表二のごとくである。参考までに田治見氏の式<sup>5)</sup>で計算した値も同時に示した。

この付加質量となる土の形状を基礎と同断面の土柱とすれば、その深さは上下動のとき2.5m、ロッキングのとき約5mとなり、下に凸な半球とすれば、その半径は上下動のとき1.75m、ロッキングのとき2.2mとなる。田治見式から得られた付加質量は基礎の質量と比べるとはるかに小さい。

### 7. 地盤の減衰効果

波動が地中を伝播するときの地中における内部粘性減衰は逸散減衰に比べて無視できるものと考えられ、

FRACTION OF CRITICAL DAMPING

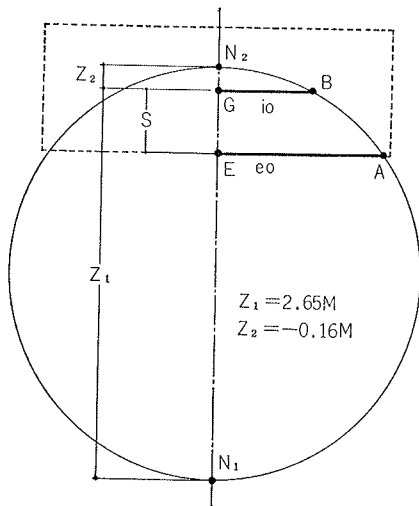
	EXP. RESONANCE C. DISP. REC.	YAMA-HARA PRESSREC	T. A. J. RIGID BASE	IMI UNIFORM
hv	0.13 ~0.15	0.18 ~0.20	1.01	0.417
hh	0.06 ~0.09	0.08 ~0.115	0.291	0.318
ho	0.115 ~0.125	0.09 ~0.105	0.570	—

表一3

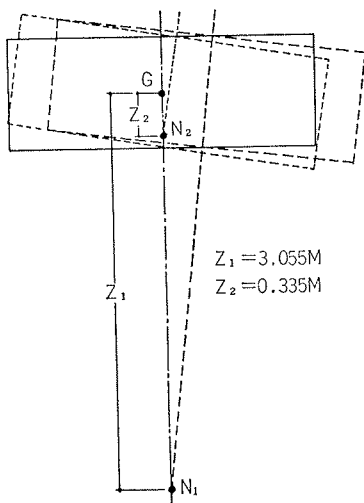
地盤を半無限弾性体とする弾性理論解の中で逸散減衰を考慮すること、地盤を質点系モデルに置換する際の粘性減衰とは等価なものと考えられている<sup>6)</sup>。本研究で対象とした地盤で、基礎の変位および底面反力の共振曲線から得た減衰定数と、山原、田治見氏等の波動の逸散から求めた減衰定数を表一3に示す。

### 8. 基礎および周辺地盤の振動モード

#### 8.1. 基礎の振動モード



図一23 ロッキング中心の図式解法



図一24 基礎のロッキング振動モード

図一23は静的地盤ばね定数を用いて、図式解法によりロッキング中心を求めたものである。その結果、図のような1次、2次のロッキング中心が求められた。しかし、実験で得られた基礎の変位記録からロッキング中心を求めると、図一24に示すように、2次に

相当するロッキング中心が重心より下方に求められる。このことから基礎とともに動く土の質量を基礎の下に付加し、系全体の重心を下方に移動させることによってこの現象の説明ができるのではないと思われる。

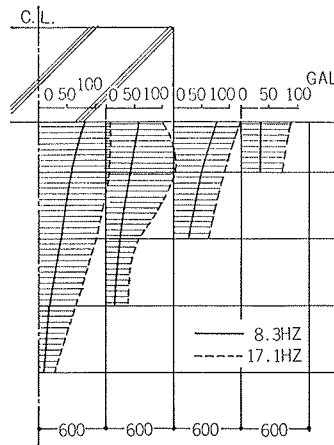
#### 8.2. 基礎周辺地表の振動分布

基礎周辺への波動伝播については通常、2次的に発生する表面波が主体となる。基礎と一体となって動く地盤という見かたからすれば、図一4に示したような測点ではすでに領域外になってしまうような、ごく近傍だけが問題になるのではないと思われる。

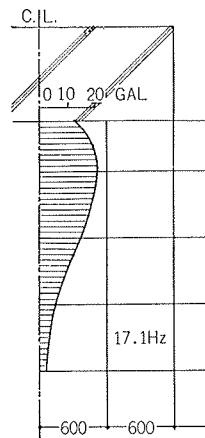
#### 8.3. 基礎周辺地中の振動モード

前述の地中加速度の共振曲線に基づいて地中の振動モードを描いたのが図一25~27である。ただし図一25では、起振力において17.1Hzのモードは8.3Hzのモードの約4倍に相当するから、実際には8.3Hzのモードが地中に及ぼす影響は大きいと考えてよい。

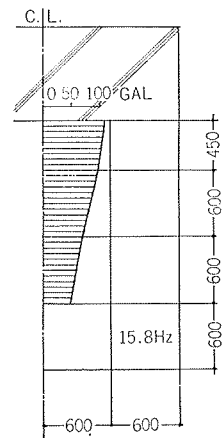
図一26の水平加振時の上下成分のモードは基礎の回転が大きいため、基礎底面中央の振幅が逆に小さくなっている。この傾向は基礎底面反力分布図一22の傾向と一致している。



図一25 水平加振時振動モード(水平成分)



図一26 (水平)



図一27 (上下)

水平、上下加振時振動モード(上下成分)

## 9. まとめ

以上、実験の現象面を主体にして種々の問題をみてきた。いままでの結果をまとめると、

- 1) 粘土質地盤では基礎底面の反力分布として剛板分布を用いるのが妥当である。
- 2) 実験で得られた共振振動数、弾性波速度より算出した地盤のばね定数を理論的に関連づけるためには基礎質量の 1.5～3 倍の土の付加質量を考慮しなければならない。
- 3) 基礎周辺地盤の振動分布からも、相当量の土が基礎とともに振動していることが明らかである。
- 4) 基礎周辺の地表については、付加質量という概念よりは、基礎の振動によって発生する表面波の問題として考えたほうがよい。

これらの実験結果からただちに定性的な結論を下すことは困難であり、現在本実験を資料として半無限弾性地盤における理論解析を進めているところである。また、局所的な土の動的挙動を調べるより詳細な実験の必要性が痛感され、これについても今後検討を進めてゆく予定である。最後に、研究の進め方について助言を賜った小堀研究室の鈴木有、日下部馨の両氏に厚く謝意を表す。また、実験と結果の整理に助力してくれた、泉定一、金子勝二、内田守男、輪干雅子の諸氏に厚く謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木 有  
長方形基礎の Dynamical Ground Compliance  
(その 2)  
京大防災研究所年報第10号A (昭42.3)
- 2) 小堀鐸二, 南井良一郎, 井上 豊, 鎌田輝男  
Ground Compliance を考慮した構造物の地震応答  
(第3報) 同上
- 3) 志賀敏男, 渋谷純一, 竹内洋一郎  
基礎地盤の動的特性に関する実験的研究  
日本建築学会学術講演梗概集 (昭44.8)
- 4) 中川恭次  
建物並に模型基礎の振動実験から求めた地盤係数  
日本建築会論文報告集 (昭36.10)
- 5) 田治見宏  
建築構造学大系 地震工学 (彰国社)  
建築振動学 (コロナ社)
- 6) 山原 浩  
弾性地盤上における基礎および構造物の振動  
(その 1)  
清水建設研究所報第 6 号 (1965.10)