

# 模型建物基礎の振動実験と解析

那 須 信 治 ・ 竹 内 盛 雄 ・ 古 藤 田 喜 久 雄 ・ 風 間 了  
早 稲 田 大 学

## Vibration Tests and Analysis for the Model Foundation

By

Nobuji Nasu, Morio Takeuchi, Kikuo Kotoda and Satoru Kazama

Waseda University, Tokyo

### Abstract

The interaction between the ground and structure should not be overlooked when we consider the vibrational characteristics of the structure at the time of earthquake.

The study which will be reported was made of the forced and free vibrations of model 1) isolated foundation, 2) combined system of foundation and single-story building, and 3) two isolated foundations joined by connection-beam, for the purpose of evaluation of the spring and damping constant of the ground, and of finding out a convenient method of this evaluation. The model foundation was made of concrete and laid on the ground of Kanto loam, and the model building was made of steel.

### 目 次

- |  |  |
|--|--|
| 1. 目的  | 8.1.2 理論解析法  |
| 2. 実験位置                                      | 8.2 連結基礎(2FL+BG, 2FL+B)                              |
| 3. 地盤  | 8.2.1 実験解析法  |
| 4. 模型  | 8.2.2 理論解析法  |
| 4.1 独立正方形基礎(FL, FM, FS)                      | 9. 実験結果およびその考察                                       |
| 4.2 建物模型(追加実験)(Bn)                           | 9.1 独立基礎(FL, FM, FS), 建物(Bn)<br>および連成系(FL+Bn, FM+Bn) |
| 4.3 建物-基礎連成系(追加実験)(FL +<br>Bn, FM+Bn)        | 9.1.1 固有値  |
| 4.4 2つの独立基礎をつなぎ梁でつないだ基<br>礎(2FL+BG, 2FL+B)   | 9.1.2 地盤のバネ定数  |
| 5. 起振機および測定計器                                | 9.1.3 土の付加質量および付加慣性モーメ<br>ント                         |
| 5.1 起振機                                      | 9.1.4 地盤のせん断弾性係数とせん断歪度                               |
| 5.2 測定計器                                     | 9.1.5 地盤の減衰  |
| 6. 測定位置                                      | 9.1.6 独立基礎および連成系に関する結果                               |
| 6.1 独立基礎(FL, FM, FS)および連成系<br>(FL+Bn, FM+Bn) | 9.2 連結基礎(2FL+BG, 2FL+B)                              |
| 6.2 連結基礎(2FL+BG, 2FL+B)                      | 9.2.1 実験結果   |
| 7. 実験方法                                      | 9.2.2 理論解析結果   |
| 8. 解析方法                                      | 9.2.3 連結基礎に関する結果                                     |
| 8.1 独立基礎(FL, FM, FS)および連成系<br>(FL+Bn, FM+Bn) | 10. 結 論  |
| 8.1.1 実験解析法                                  | 1. 目 的   |

建物の振動性状を論ずる場合、地盤の影響を無視することは出来ない。この地盤の建物振動への

影響には、主として1) 基礎部の水平動(スウェー)および回転運動(ロッキング)2) 表層地盤(主として軟弱層)の変形が考えられる。また、動的解析においては、1), 2)のことを地盤状況に即して十分考慮する必要がある。

1)のスウェーおよびロッキング振動に関して、当研究所が従来から行ってきた数多くの実在建物の振動実験結果をみると、高層およびS造の比較的柔構造以外の建物では、建物振動の全変位に対するスウェーおよびロッキング変位のしめる割り合いは大きく、振動性状に与える地盤の影響を無視出来ない。また、従来の理論解析は主として円形基礎についてであり、実在建物の基礎に近い

形状の場合の理論解析および実験は、ほとんど行われていないのが現状である。

2)の表層地盤の建物への影響については、建物-地盤の連成振動系として種々の解析が行なわれているが、なほ種々の問題を含んでおり、今後各種地盤での建物-地盤系について地震観測が望ましい。

本研究においては、上記の1)に関する建物基礎部分の、特にバネ定数、減衰定数に主眼をおき、関東ローム層上にコンクリート製の模型基礎を作製し、振動実験ならびに理論解析を行ない、今後建物の耐震設計上に重要な基礎部分のモデル化の問題について検討を行なうものである。

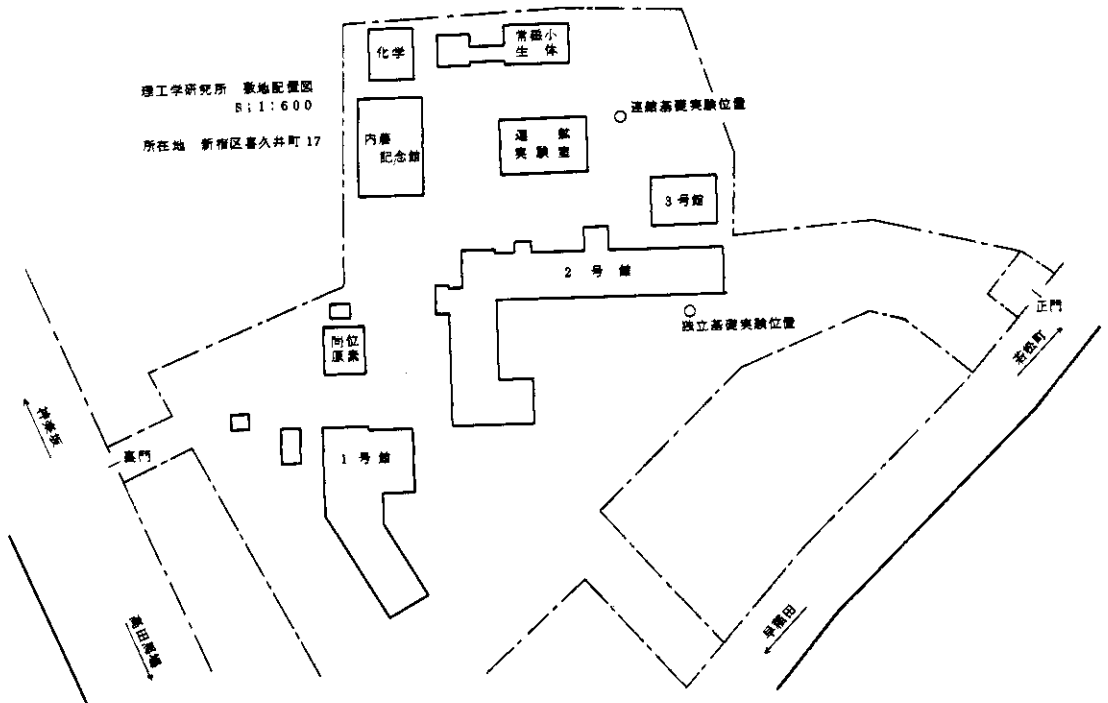


図-1 実験位置

2. 実験位置(図-1)

早稲田大学理工学研究所, 東京都新宿区喜久井町17

3. 地盤(図-2)

地下0.5~6mまで関東ロームで、N値は4~

5である。なお、理論解析に必要な土の諸定数を求めるために、土質試験および板たつき法による弾性波速度試験を行なった。それらの結果を表-1に示した。

4. 模型(図-3)

模型基礎は地下約60cmの関東ローム層上に直

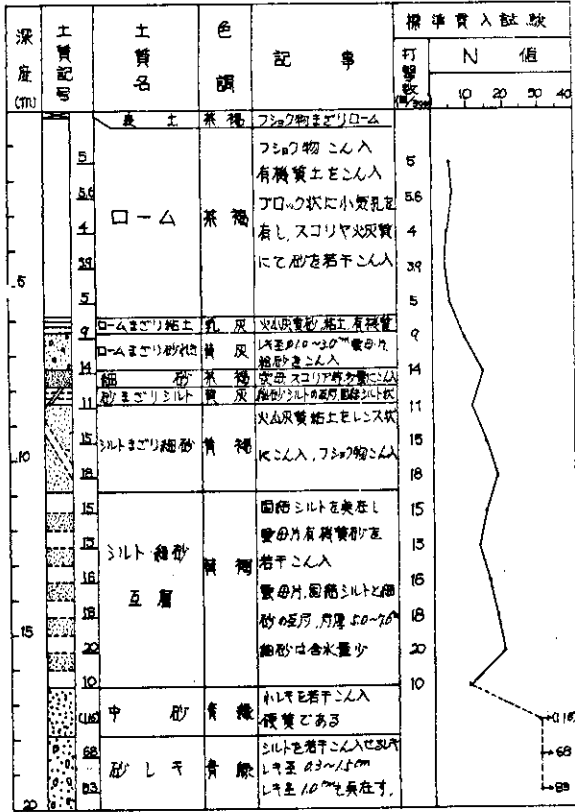


図-2 土質柱状図

表-1 土質試験および弾性波試験結果

単位体積重量 $\gamma$	1.15 $g/cm^3$
P波伝播速度 $V_p$	220 $m/sec$
S波伝播速度 $V_s$	110 $m/sec$
ポアソン比 $\nu$	0.33
せん断弾性係数 $G$	142 $kg/cm^2$

接コンクリートを打設して作られたものである。

4.1 独立正方形基礎 (FL, FM, FS)

実験は FL, FM, FS の 3 種類について行な

った。

4.2 建物模型 (追加実験) (Bn)

模型は一層鋼製模型であり、基礎版 (FL, FM) との連成において相互の影響を十分ならしめるように、質量、バネ定数を決定した。また、固有周期の変化は荷重版 (重量) の枚数 (1~8) の加減によっている。なお、建物模型の記号は Bn を用い、この場合 n は荷重版枚数である。

4.3 建物一基礎連成系 (追加実験) (FL+Bn, FM+Bn)

模型は、前記の基礎版 (FL, FM) と建物 (Bn) を連成させたものであり、この場合の記号は FL+Bn および FM+Bn である。

4.4 連結基礎 (2FL+BG, 2FL+B)

この基礎は前記の独立正方形基礎 (FL) と同一底面積をもつ 2 つの基礎をつなぎ梁でつないだ基礎である。なお、実験に際して、つなぎ梁が土に接している場合を 2FL+BG、つなぎ梁の下面が土に接着していない場合を 2FL+B とする。

5. 起振機および測定計器

5.1 起振機:

V-120 メカニカルバイブレーター  
(早坂機械製作所)

可変偏心モーメント 0~120  $kg \cdot cm$

可変振動数 0~25 Hz

5.2 測定計器

i) 変位測定:

a. 換振器 水平動 MTKH-1C  
上下動 MTKV-1C

(保坂振動計器製作所)

b. 増巾器 6LI-PDY

(積分回路内蔵)

(三栄測器)

c. 記録器 レクタグラフ

8S-11-2-A

(三栄測器)

4S-11-2-A

(三栄測器)

データレコーダー

R-200

(TEAC)

ii) 土圧測定:

a. 土圧計 BE-5KD (5  $kg/cm^2$ )

(共和電業)

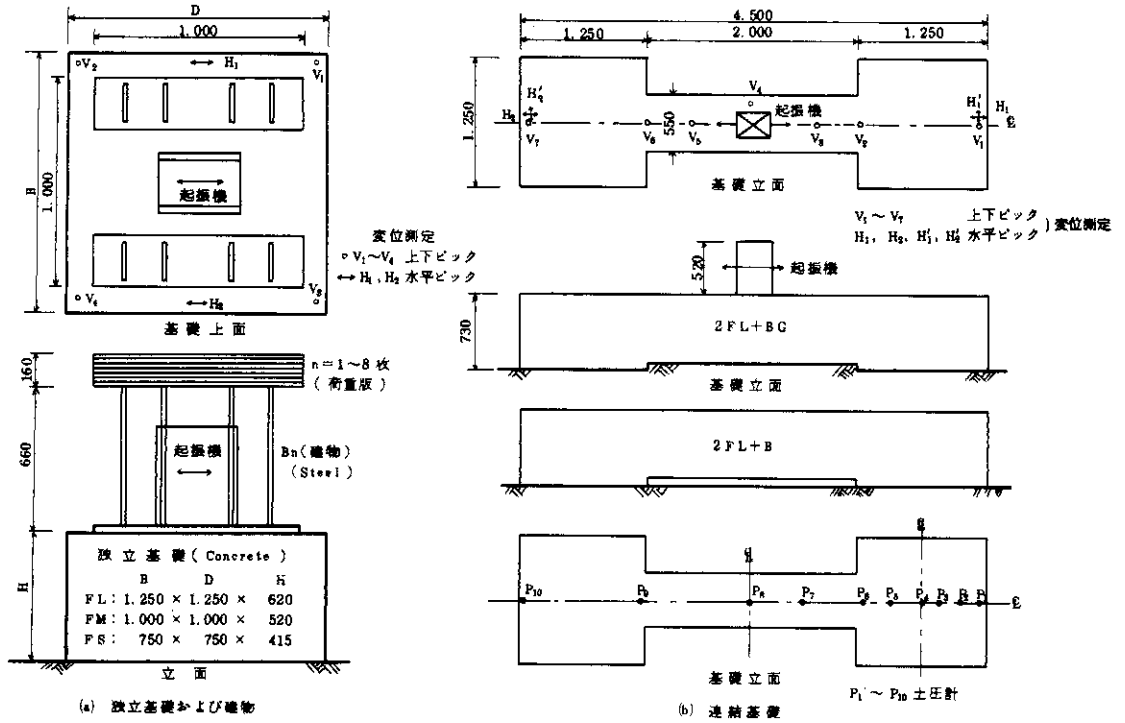


図-3 模型図および測定位置

- b. 動歪測定器 DPM-E型  
(共和電業)
- c. 記録器 レクテグラフ  
8S-11-2-A  
4S-11-2-A  
(三栄測器)  
データレコーダー  
R-200  
(TEAC)

## 6. 測定位置

### 6.1 独立基礎 (FL, FM, FS) および連成系 (FL+Bn, FM+Bn)

図-3(a)に示す位置で水平および上下動変位を測定し、上下動から基礎の回転角を求めている。

### 6.2 連結基礎 (2FL+BG, 2FL+B)

図13(b)に示すように、水平および上下動変位と、接地圧の測定(10点)を行なっている。

## 7. 実験方法

起振機による強制振動実験においては、各模型の基礎版に対して起振機の偏心モーメントを種々変化させた。また、自由振動実験も同時に行なっている。

なお、建物模型については自由振動実験のみを行なっている。

## 8. 解析方法

### 8.1 独立基礎 (FL, FM, FS) および連成系 (FL+Bn, FM+Bn)

解析は模形を図-4の如くモデルして行なった。なお、解析に用いた記号は下記の通りである。

- $M_0$  : 基礎の質量 ( $kg \cdot sec^2/cm$ )  
 $J_0$  : 基礎の重心回りの回転慣性モーメント ( $kg \cdot cm \cdot sec^2$ )  
 $m_e$  : 起振機の偏心質量 ( $kg \cdot sec^2/cm$ )  
 $r$  : 起振機の偏心距離 (cm)

- $\omega$  : 起振機の角振動数 ( $H_z$ )
- $g$  : 重力加速度 ( $cm/sec^2$ )
- $m_e \cdot g \cdot r$  : 起振機の偏心モーメント ( $kg \cdot cm$ )
- $m_e \cdot r \cdot \omega^2 \cdot e^{i\omega t}$  : 起振力 ( $kg$ )
- $K_H, K_V, K_R$  : 地盤の水平, 上下および回転バネ定数, 単位はそれぞれ ( $kg/cm$ ), ( $kg/cm$ ), ( $kg \cdot cm/radian$ )
- $C_H, C_V, C_R$  : 地盤の水平, 上下および回転減衰係数, 単位はそれぞれ ( $kg \cdot sec/cm$ ), ( $kg \cdot sec/cm$ ) ( $kg \cdot cm \cdot sec/radian$ )
- $2a, b$  : 基礎の一辺の長さ ( $cm$ ) および高さ ( $cm$ )
- $d_0$  : 基礎の重心高さ ( $cm$ )
- $d_H, d'$  : 基礎の重心から上面までの高さ ( $cm$ ) および加振点までの高さ ( $cm$ )
- $U_H, U_0, U_S$  : 基礎の上面, 重心および底面の水平変位 ( $cm$ )
- $\bar{U}_H, \bar{U}_0, \bar{U}_S$  : 共振点における  $U_H, U_0, U_S$  のそれぞれの最大変位 ( $cm$ )
- $\theta$  : 基礎の回転角 ( $radian$ )
- $\Theta$  : 共振点における  $\theta$  の最大回転角 ( $radian$ )
- $U_R$  : 回転角による基礎上面の水平変位,  $U_R = \theta \cdot b$  ( $cm$ )
- $Z_G, Z_F$  : 回転中心から基礎の重心および加振位置までの距離 ( $cm$ )
- $M_I$  : 建物の質量 ( $kg \cdot sec^2/cm$ )
- $J_I$  : 建物の重心回りの回転慣性モーメント ( $kg \cdot cm \cdot sec^2$ )
- $K_I, C_I$  : 建物のバネ定数 ( $kg/cm$ ) および減衰係数 ( $kg \cdot sec/cm$ )
- $d_1$  : 基礎と建物の重心間距離 ( $cm$ )
- $U_1$  : 建物の変位 ( $cm$ )

$J_1=M_1=C_1=K_1=0$  の場合である。

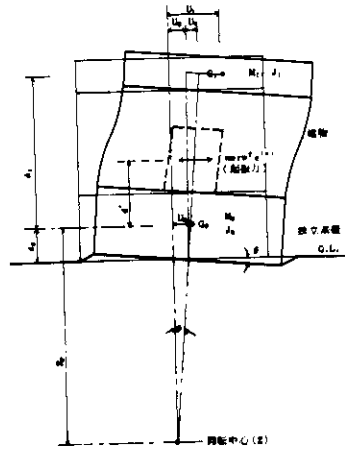


図-4 独立基礎, 連成系解析モデル

### 8.1.1 実験解析法

#### (a) 減衰定数 ( $h$ )<sup>1)</sup>

計算は下記の3方法を用いた。

- i) 自由振動波形より, 対数減衰率を用いる。
- ii) 共振曲線より,  $1/\sqrt{2}$  法を用いる。
- iii) 起振力と最大振巾の関係を用いる。

iii)の解析方法としては, 回転中心Z点(図-4)について, 系を1自由度系に置換し, (8.1.2)式の方程式をたてる。この式より減衰定数を求めると(8.1.3)式となる(基礎版のみの場合)。

$$J_z \ddot{\theta} + C_z \dot{\theta} + K_z \theta = m_e \cdot r \cdot \omega^2 \cdot e^{i\omega t} \cdot Z_F \quad (8.1.2)$$

ここで,

$$J_z = M_0 Z_G^2 + J_0, \quad C_z = C_H + C_V (Z_G - d_0)^2, \\ K_z = K_R + K_H (Z_G - d_0)^2, \\ h = m_e \cdot r \cdot Z_F / (2 \cdot J_z \cdot \theta_{max}) \quad (8.1.3)$$

(b) 実験より求めた減衰定数 ( $h$ ) より, 地盤の減衰係数  $C_H$  (水平) と  $C_R$  (回転) の分離(基礎のみの場合)

一般に実験から求められる減衰は系全体の値であり, 個々(水平動, 回転動)の減衰を分離して求めることは非常に困難である。このため, 下記の計算方法により, 実験から得られた減衰定数 ( $h$ : 水平および回転動の連成系の値) から地盤の水平および回転動の減衰係数 ( $C_H, C_R$ ) を分離する。

(8.1.1)式の第2,3式の共振点における解を(8.1.4)式とおくと, (8.1.1)式は(8.1.5)

図-4の運動方程式は(8.1.1)式となる。

$$\left. \begin{aligned} & M_1 \ddot{U}_1 + C_1 (\dot{U}_1 - \dot{U}_0 - \dot{\theta} d_1) + K_1 (U_1 - U_0 - \theta d) = 0 \\ & M_0 \ddot{U}_0 + M_0 \ddot{U}_0 + C_H (\dot{U}_0 - \dot{\theta} d_0) + K_H (U_0 - \theta d_0) = m_e r \omega^2 e^{i\omega t} \\ & (J_1 + J_0) \ddot{\theta} + M_1 \ddot{U}_1 (d_1 + d_0) + M_0 \ddot{U}_0 d_0 + C_R \dot{\theta} + K_R \theta = m_e r \omega^2 e^{i\omega t} (d' + d_0) \end{aligned} \right\} (8.1.1)$$

なお, 基礎のみの場合は(8.1.1)式において,

式となる。

$$U_0 = \bar{U}_0 e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})}, \quad \theta = \Theta e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (8.1.4)$$

$$\left. \begin{aligned} & \{-M_0 \omega^2 \bar{U}_0 + K_R (\bar{U}_0 - \Theta d_0)\} + i\omega \\ & \cdot \{C_R (\bar{U}_0 - \Theta d_0) - m_0 r \omega^2\} = 0 \\ & \{-J_0 \omega^2 \Theta + K_R \Theta - K_R (\bar{U}_0 - \Theta d_0) \\ & d_0\} + i\omega \{C_R \Theta - C_R (\bar{U}_0 - \Theta d_0) \\ & - m_0 r \omega^2 d'\} = 0 \end{aligned} \right\} (8.1.5)$$

(8.1.5) 式において虚数部から,  $C_R, C_R$  を (8.1.6) 式のように分離して求めることが出来る。

$$\begin{aligned} C_R &= m_0 r \omega / (\bar{U}_0 - \Theta d_0) \\ C_R &= \{C_R (\bar{U}_0 - \Theta d_0) d_0 \\ &- m_0 r \omega d'\} / \Theta \end{aligned} \quad (8.1.6)$$

(c) 地盤のバネ定数

i) 上下バネ定数 ( $K_V$ )

上下動の場合は, 系を1質点系1自由度と考えられるため, 共振点 ( $\omega = \omega_0$ ) から (8.1.7) 式のように上下バネ定数を求めることが出来る。

$$K_V = M_0 \omega_0^2 \quad (8.1.7)$$

ii) 水平および回転バネ定数 ( $K_H, K_R$ )

(8.1.5) 式の実数項から,  $K_H, K_R$  を (8.1.8) 式のように分離して求めることが出来る。

$$\begin{aligned} K_H &= M_0 \bar{U}_0 \omega^2 / U_0 \\ K_R &= \omega^2 (J_0 + M_0 \bar{U}_0 d_0 / \Theta) \end{aligned} \quad (8.1.8)$$

(d) 土の付加質量および付加慣性モーメント ( $M_f, J_f$ )

(c)の地盤のバネ定数を実験値より求める場合は土の付加質量, 付加慣性モーメントは無視している。また, 実際に実験値より特に土の付加慣性モーメントを求める場合, その取扱い方に形状等の問題が現われてくる。このため, 今回の計算においては, 土のみかけの付加質量およびこれによる付加慣性モーメントの関連性を無視して, 以下の如く各独立に求めた。

付加質量の値は地盤の水平バネ定数を理論値 (接地圧分布を剛版分布とした場合) として基礎底面の釣合いより, また付加慣性モーメントは回転バネ定数を理論値 (剛版分布) として基礎底面のモーメントの釣合いより (8.1.5) (8.1.8) 式により求めた。

i) 土の付加質量 ( $M_f$ )

(8.1.8) 式の第1式において,  $M_0$  の項を ( $M_0 + M_f$ ) とし,  $M_f$  を求める。

$$M_f = K_R \cdot U_0 / (U_0 \cdot \omega^2) - M_0 \quad (8.1.9)$$

ここで,  $K_R$ : 理論値 (剛版分布)

ii) 土の付加慣性モーメント ( $J_f$ )

(8.1.8) 式の第2式において  $J_0$  の項を ( $J_0 + J_f$ ) とし  $J_f$  を求める。

$$J_f = K_R / \omega^2 - M_0 \bar{U}_0 d_0 / \Theta - J_0 \quad (8.1.10)$$

ここで,  $K$ : 理論値 (剛版分布)

(e) 地盤のひずみ

基礎底面が  $y = U_0 \cdot \sin(\omega t)$  で振動している場合, 地中を平面波が (8.1.11) 式のように伝ばんとすると仮定すれば, 地盤のせん断歪み度 ( $\tau_z$ ) は (8.1.12) 式で与えられる。

$$y_z = U_0 \cdot \sin \omega (t - Z/V_s) \quad (8.1.11)$$

$$\tau_z = \partial y_z / \partial z = - (U_0 \cdot \omega / V_s) \cdot$$

$$\cos \omega \cdot (t - Z/V_s) \quad (8.1.12)$$

ここで,  $Z$ : 地表面から深さ,  $V_s$ : せん断波速度 (8.1.12) 式より基礎底面 ( $Z=0$ ) の土の最大せん断歪み度は (8.1.13) 式となる。

$$\tau_{\max} = U_0 \cdot \omega / V_s \quad (8.1.13)$$

### 8.1.2 理論解析法

解析にあたって, 模型を図-4のようにモデル化した。

(a) 地盤のバネ定数および減衰係数

地盤を等方等質の半無限完全弾性体とし, その上の円形基礎に対する実用解が, 山原氏および Lysmer<sup>5)</sup> により求められており, これらの式を表-2にそれぞれ示した。なお厳密解はバネ定数および減衰係数の関係が複素関数の形で与えられ, また, これらの値は振動数の変化に伴ない変化するため, 実用計算においては非常に複雑になる。

また, 正方形基礎を等価円基礎に置換する場合<sup>3)</sup> は, 田治見氏の円形基礎と長方形基礎による解を比較して求めた (8.1.14) 式の値を解析に使用した。

$$a_e = \sqrt{S/\pi} = 0.55 S \quad (8.1.14)$$

ここで,  $a_e$ : 等価半径,  $S$ : 正方形基礎の底面積

(b) 固有値

(8.1.1) 式において右辺を0とおき, 解を (8.1.15) 式とする。

$$U_1 = \bar{U}_1 e^{\lambda t}, \quad U_0 = \bar{U}_0 e^{\lambda t}, \quad \theta = \Theta e^{\lambda t} \quad (8.1.15)$$

(8.1.15) 式を (8.1.1) 式に代入し  $\bar{U}_1, \bar{U}_0, \Theta$  を消去すると  $\lambda$  の6次方程式となり, この方程式を Bairstow 法により複素数の形で解を求め, 固有値を求めた。

8.2 連結基礎 (2FL+BG, 2FL+B)

8.2.1 実験解析法

実験値から、地盤の減衰定数およびバネ定数を求める方法は独立基礎の場合 (8.1.1) と全く同様である。

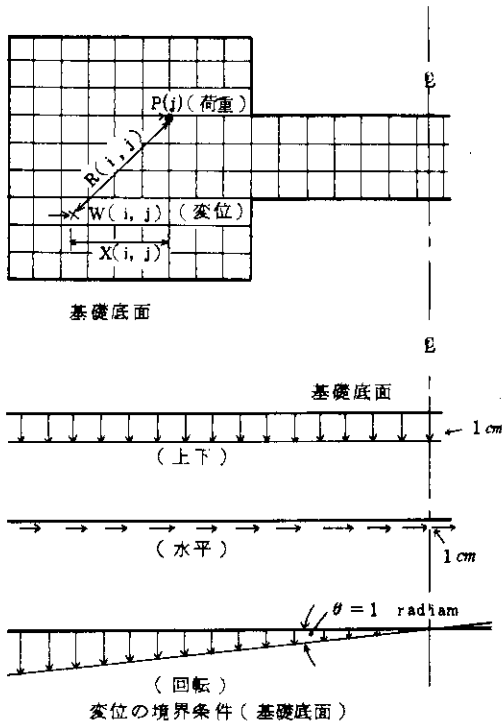


図-5 分割法によるバネ定数の計算法

8.2.2 理論解析法

(a) 地盤のバネ定数

(a-1) 2FL+BG (分割法)

一般に地盤のバネ定数は接地圧分布を仮定して求めているが、この種の異形基礎の場合接地圧分布を推定することは困難である。このため下記の方法により計算を行なった。なお、この方法を分割法と呼ぶ。

図-5の如く基礎を格子状に分割し、各交点に集中荷重  $P(j)$  を加え、各要素の中心の変位  $\omega(i, j)$  を求める。この  $P(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) による各要素の中心変位で境界条件を合わせバネ定数を求める。

交点  $j$  に  $P(j)$  を加えたときの  $i$  点の変位は垂直方向の場合は (8.2.1) 式の、水平方向の場合は

(8.2.2) 式の Bousinesq-Curruti の解<sup>2)</sup> で与えられる。

$$\omega(i, j)_v = P(j)_v (1-\nu) / 2\pi G \cdot R(i, j) \quad (8.2.1)$$

$$\omega(i, j)_H = P(j)_H \{ (1-\nu) + \nu \cdot X^2(i, j) / R^2(i, j) \} / 2\pi G \cdot R(i, j) \quad (8.2.2)$$

ここで、 $P(j)_v$ ,  $P(j)_H$  :  $j$  点の垂直および水平方向の荷重

$\omega(i, j)_v$ ,  $\omega(i, j)_H$  :  $j$  点の  $P(j)_v$ ,  $P(j)_H$  によるそれぞれの垂直および水平方向の変位

$R(i, j)$ ,  $X(i, j)$  :  $j$  点から  $i$  点までの距離および  $x$  方向の距離

$\nu \cdot G$  : ポアソン比およびせん断弾性係数

$j$ ) 上下バネ定数 ( $K_v$ )

(8.2.1) 式から  $i$  点の  $P_j v$  ( $j = 1, \dots, N$ ) による変位 ( $\omega(i)_v$ ) は (8.2.3) 式となる。

$$\omega(i)_v = \sum \omega(i, j)_v \quad (8.2.3)$$

ここで、変位の境界条件として、図-5の如く (8.2.4) 式を与えると、(8.2.3) 式は  $P(j)$  に関する1次連立方程式、(8.2.5) 式となり、これを解くことにより上下のバネ定数は (8.2.6) 式として求まる。

$$\omega(i)_v = 1.0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8.2.4)$$

$$\{A\} \{P(j)\} = \{B\} \quad (8.2.5)$$

ここで、 $\{A\}$  :  $R(i, j)$ ,  $\mu$ ,  $G$  による係数マトリックス

$\{B\}$  : 境界条件による定数ベクトル

ii) 上下バネ定数  $K_v = \sum P(j)_v$  (8.2.6)

水平バネ定数 ( $K_H$ )

上下バネ定数の計算方法と全く同じである。変位の境界条件は図-5のように (4.2.7) 式で与えられ、バネ定数は (8.2.8) 式により求まる。

$$\omega(i)_H = 1.0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (8.2.7)$$

$$K_H = \sum P(j)_H \quad (8.2.8)$$

iii) 回転バネ定数 ( $K_R$ )

計算方法は上下の場合と同じであり、変位の境界条件 (図-5) として (8.2.9) 式を与えることにより、回転のバネ定数は (8.2.10) 式で求まる。

$$\omega(i)_x = \theta X(j) \quad (\theta = 1 \text{ radian}) \quad (8.2.9)$$

$$K_R = \sum P(j) \cdot X(j) \quad (8.2.10)$$

ここで、 $\omega(i)_x$  :  $i$  点での変位

$X(j)$  : 回転中心から  $P(j)$  までの  $x$  方向の距離

(a-2) 2FL+B

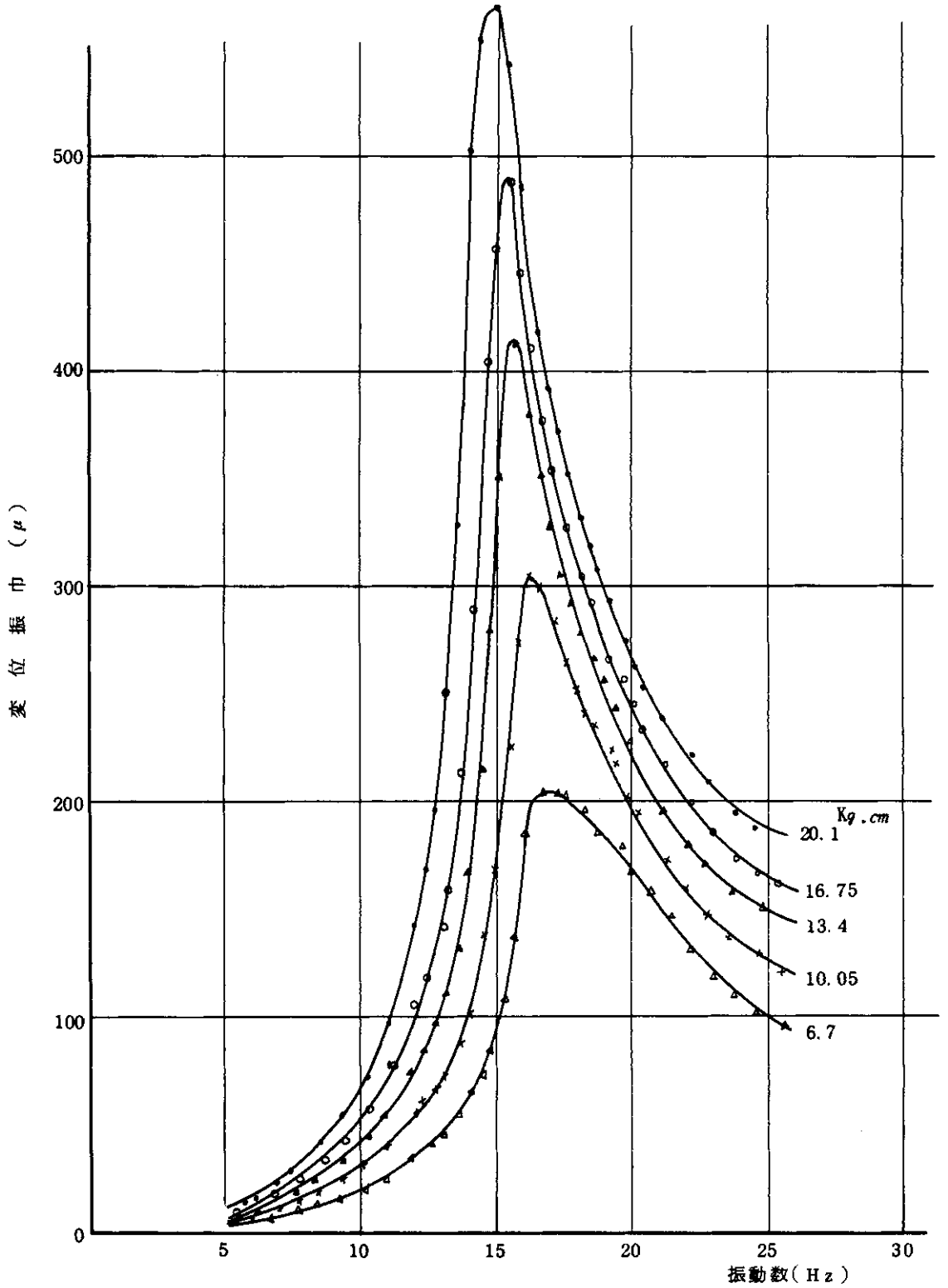


図-6 水平動共振曲線 (FL)



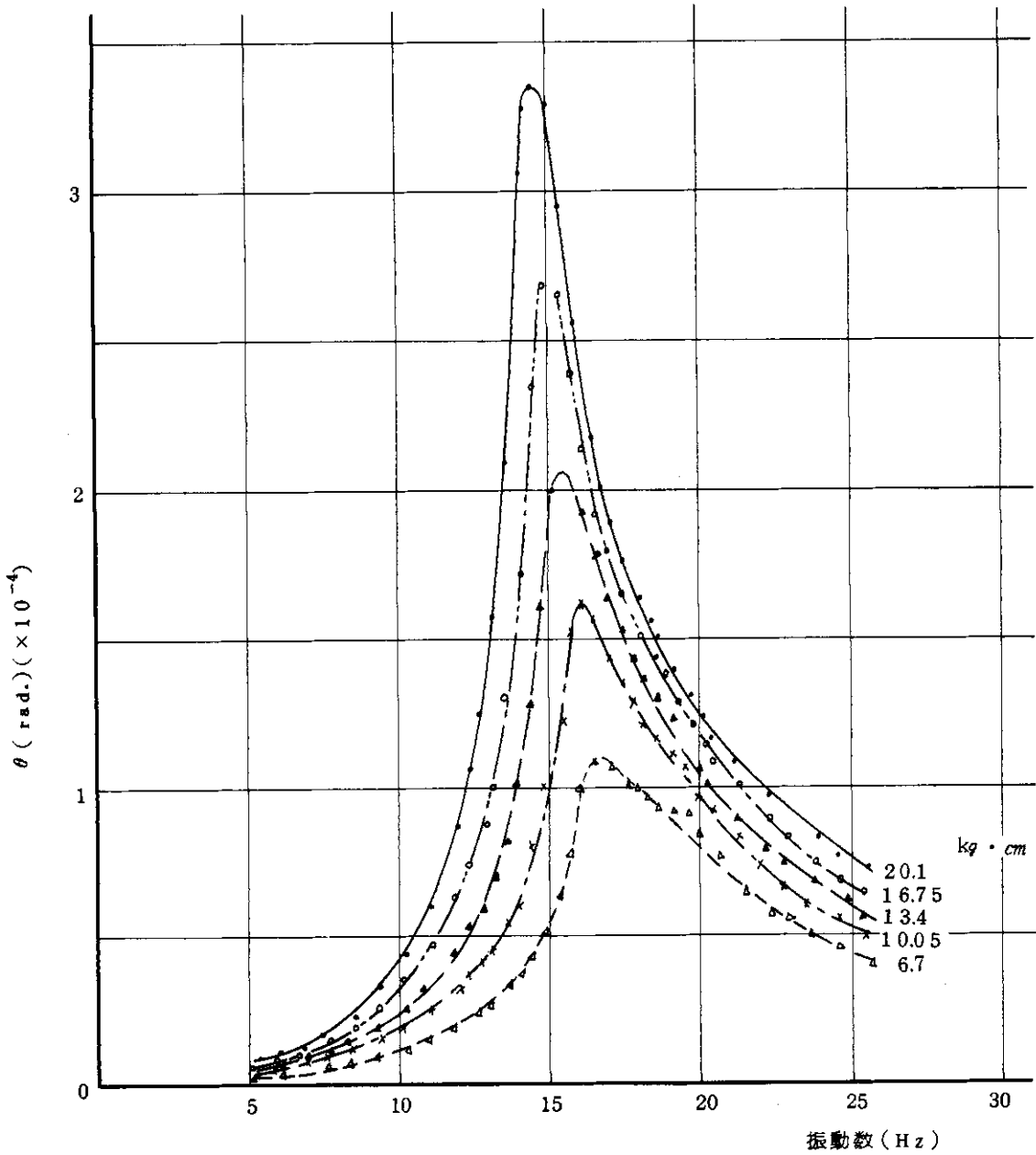


図-7 回転動共振曲線 (FL)

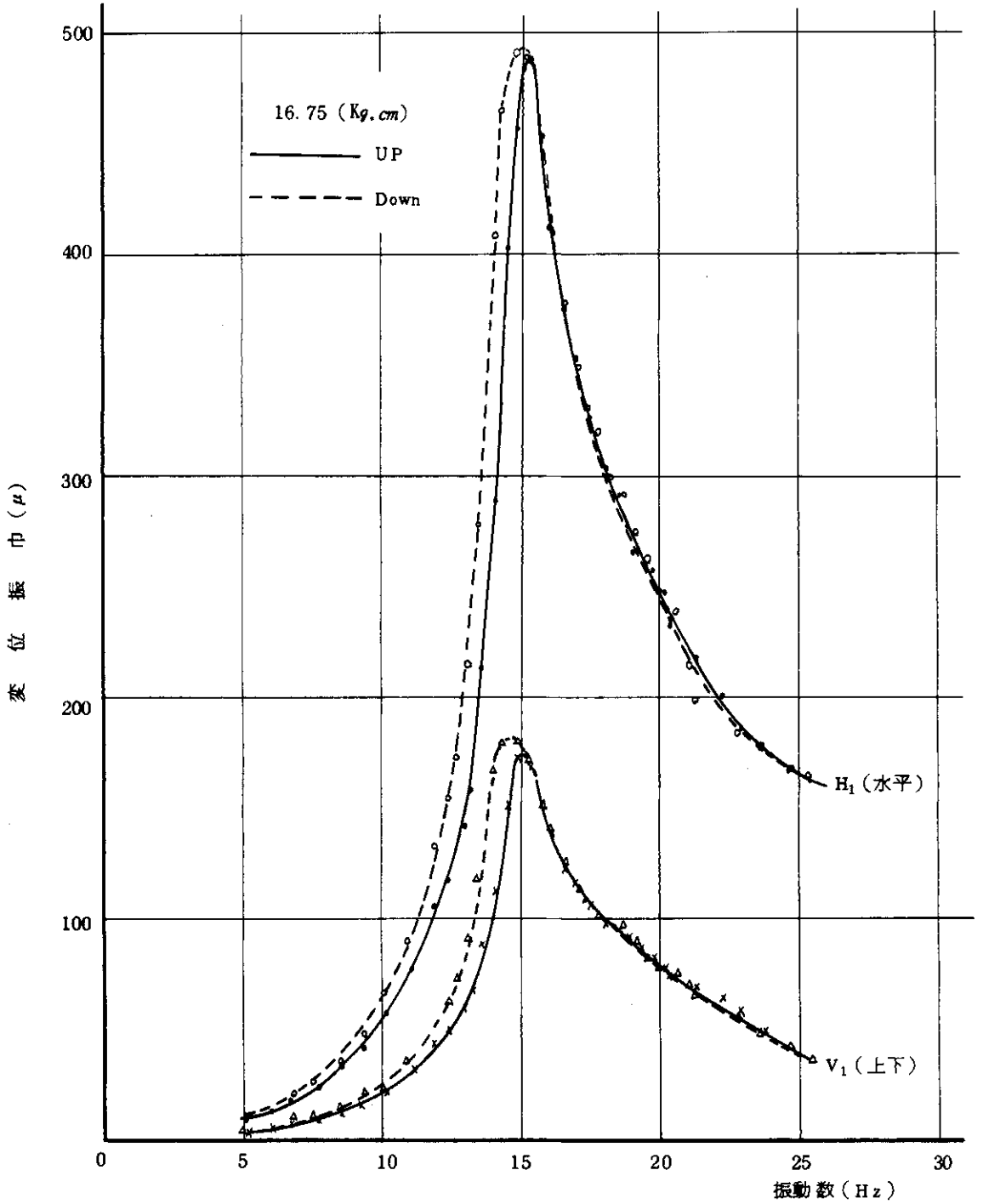


図-8 共振曲線 (FL)

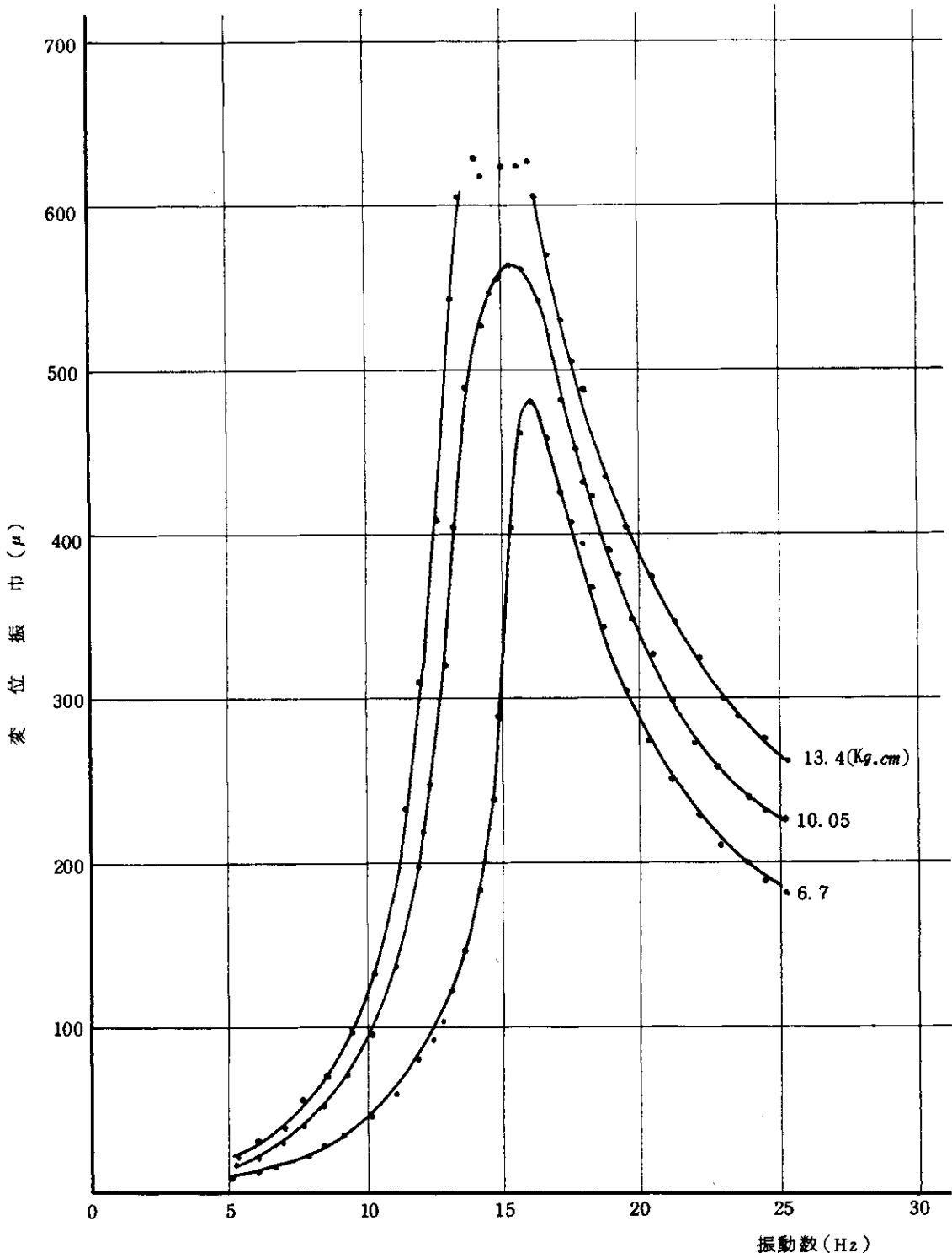


図-9 水平動共振曲線 (FM)

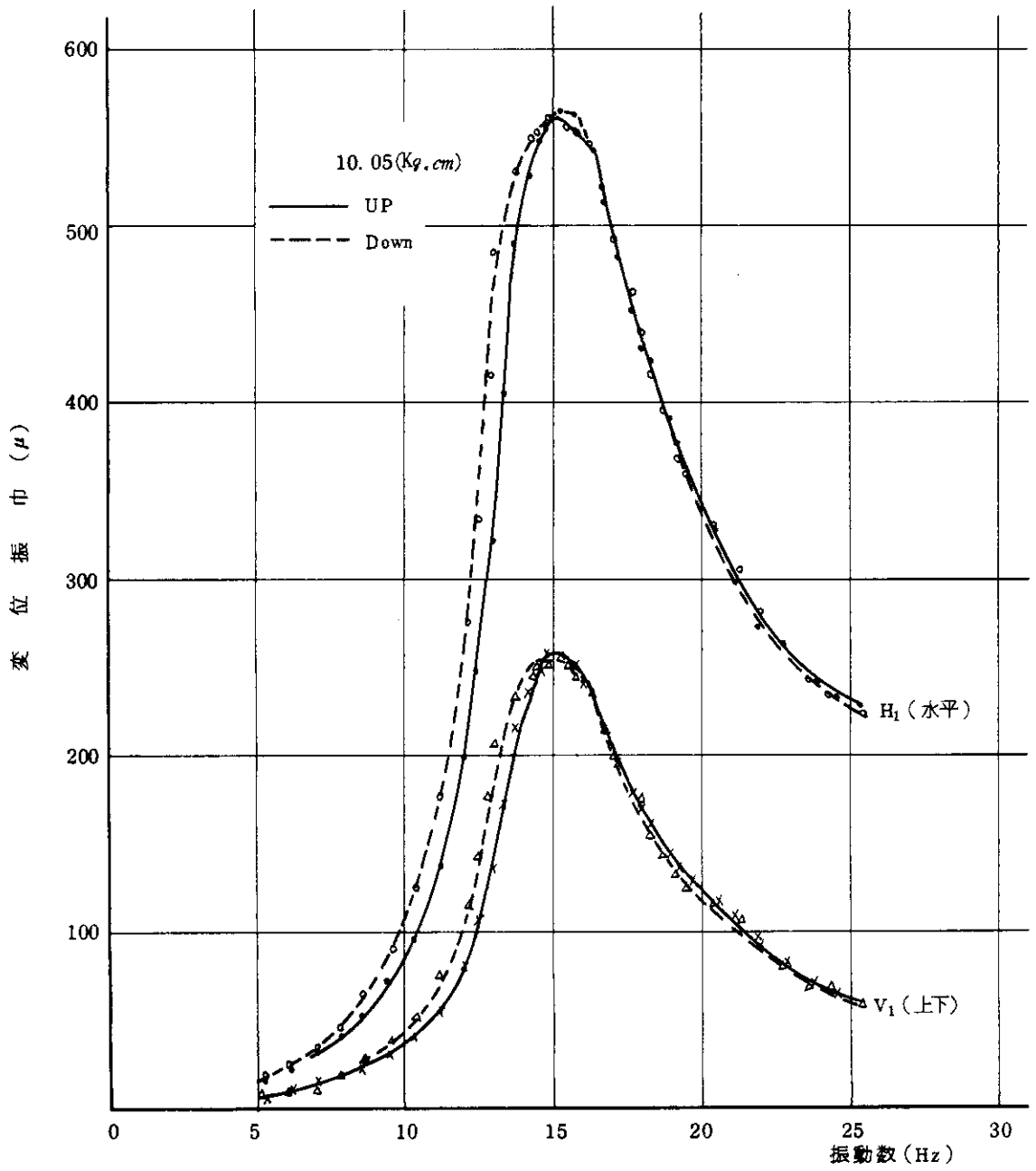


図-10 共振曲線 (FM)

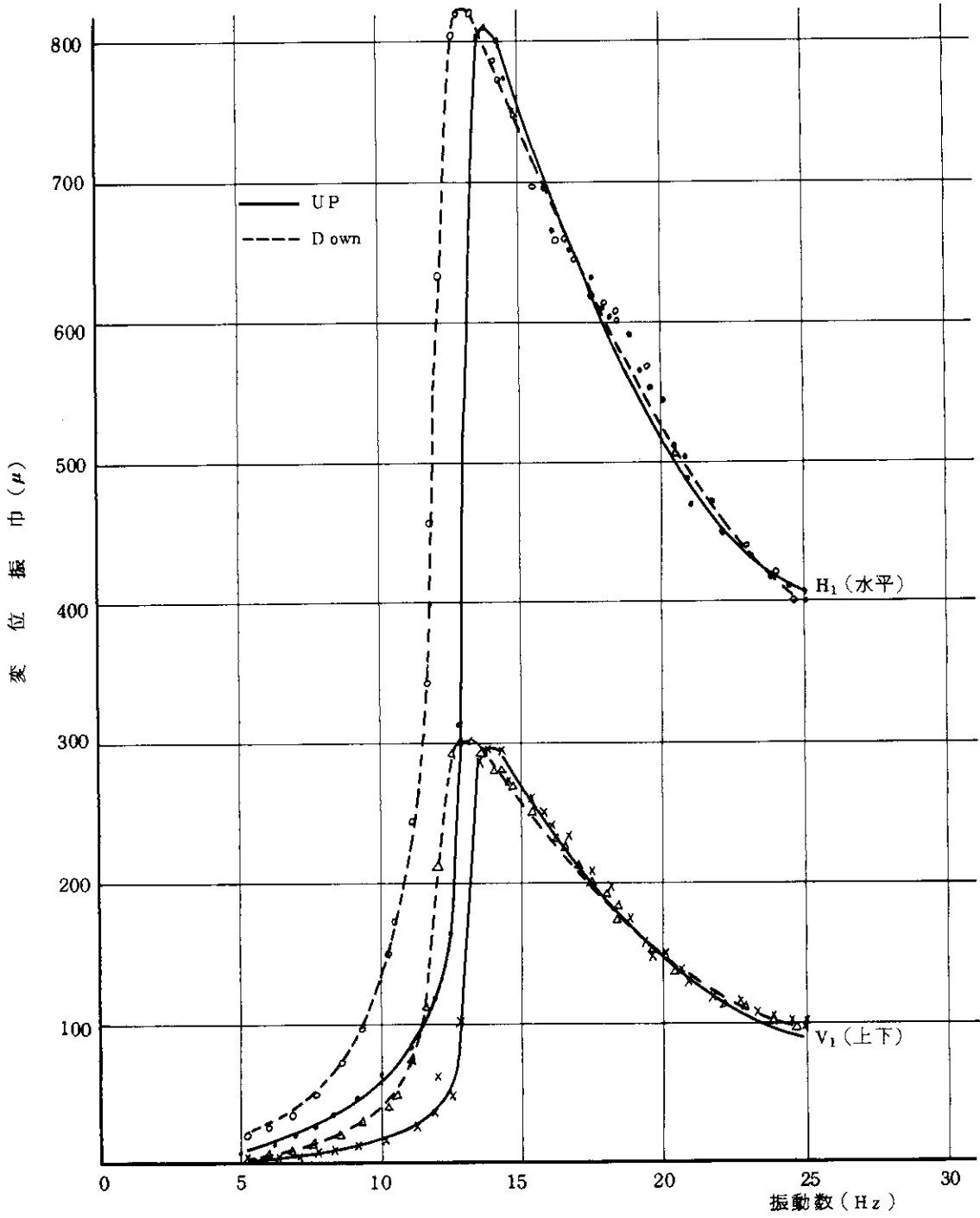


図-11 共振曲線 (FS)

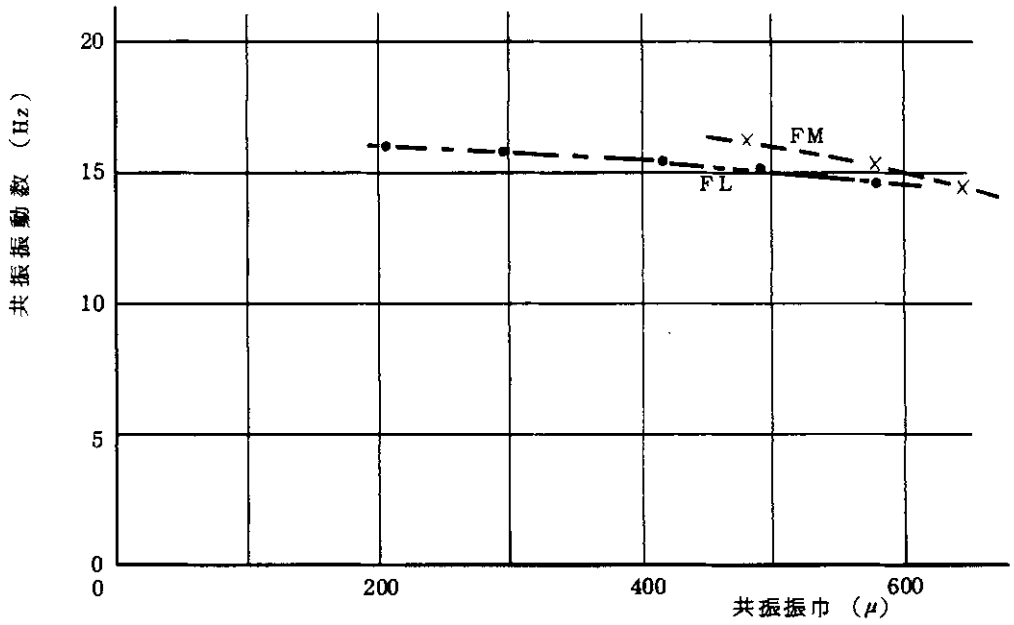


図-12 共振振巾と共振振動数の関係

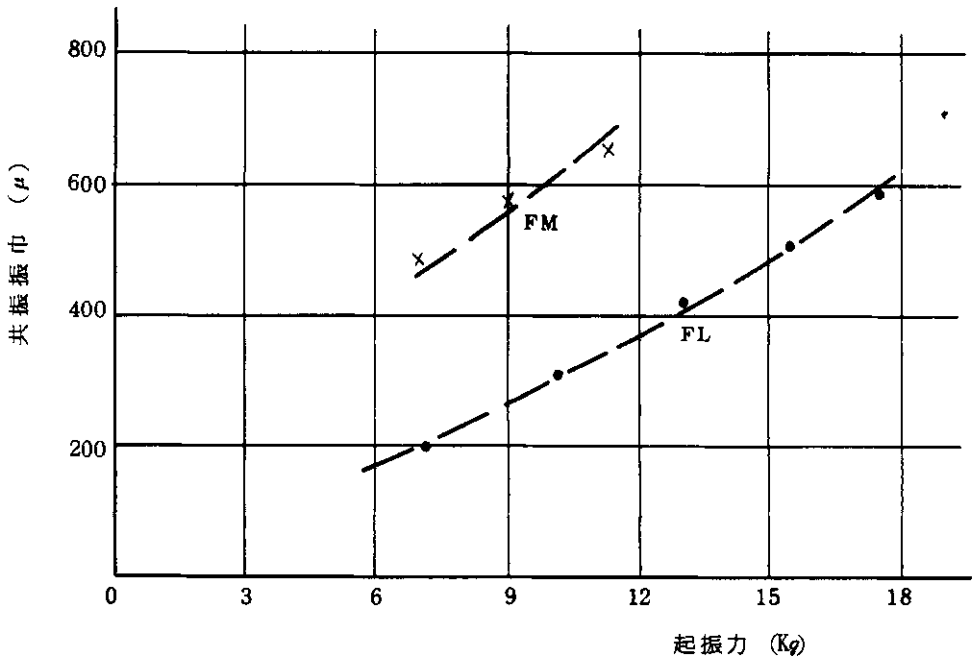


図-13 起振力と共振振巾の関係

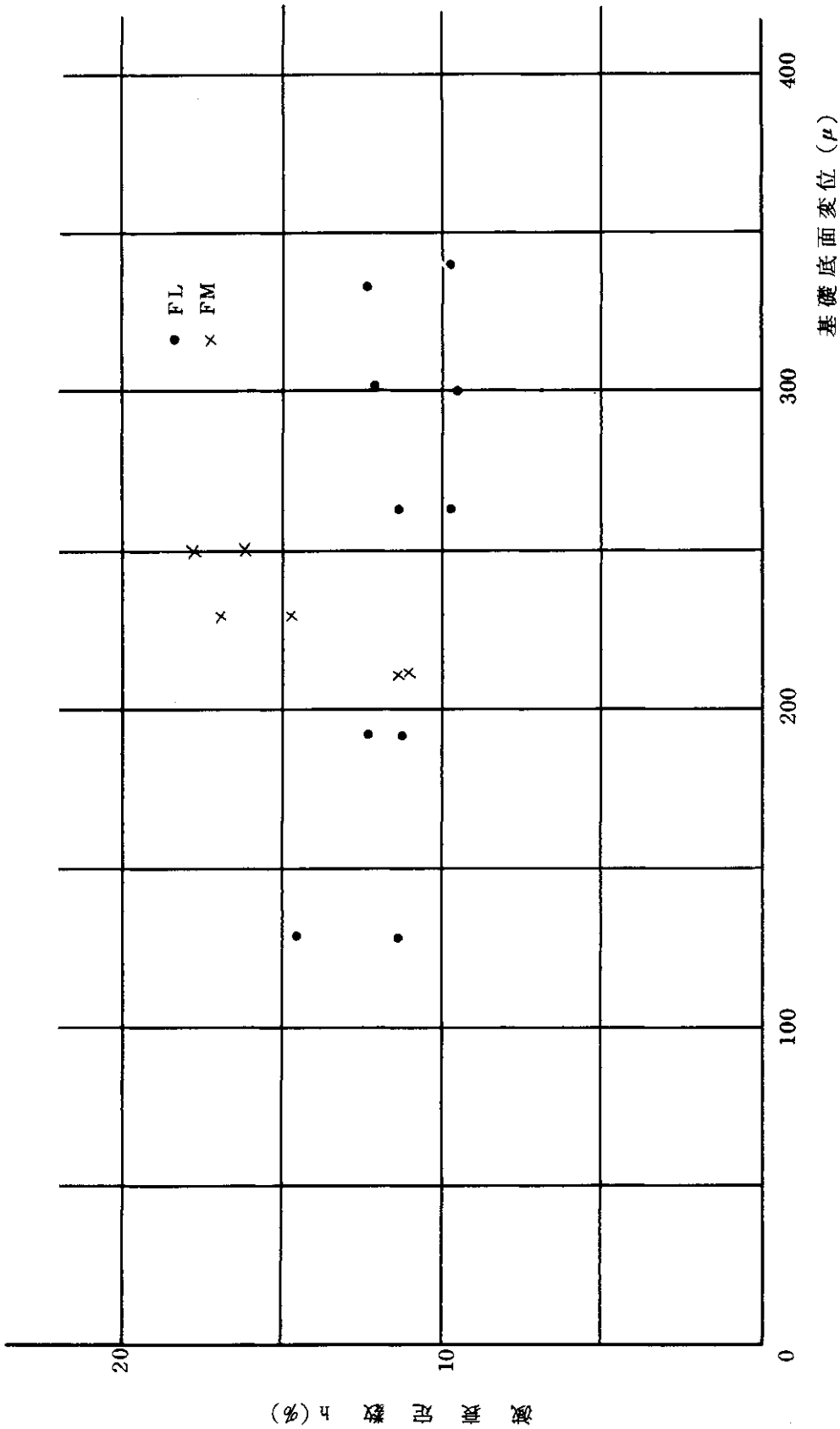
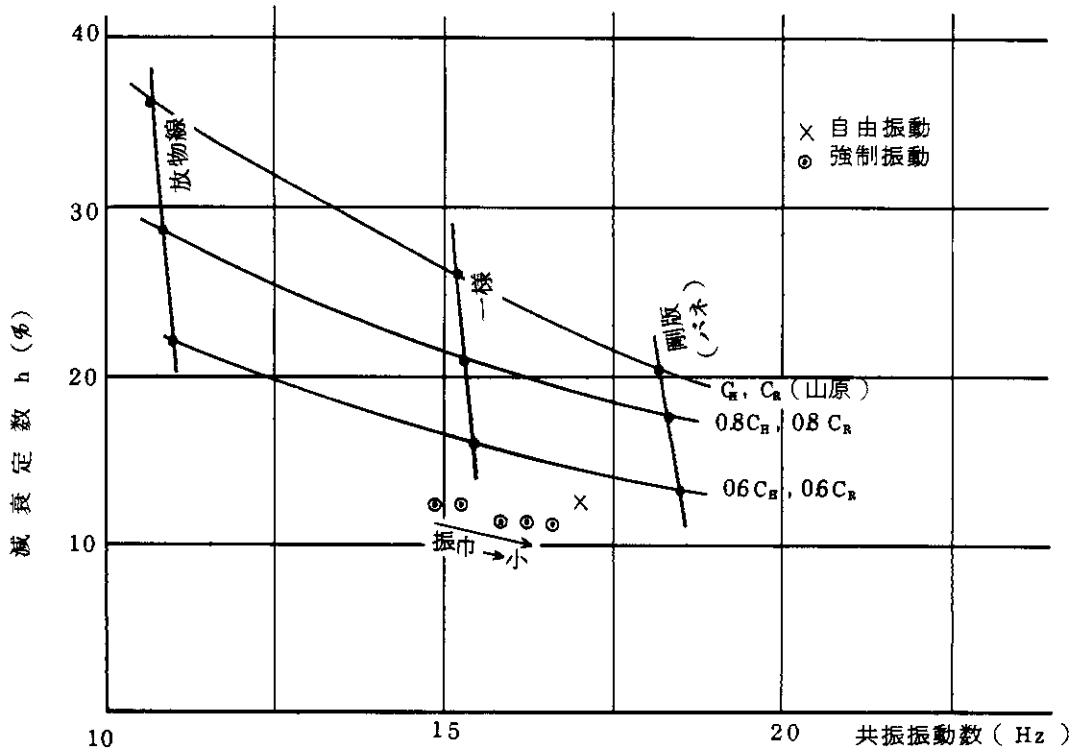
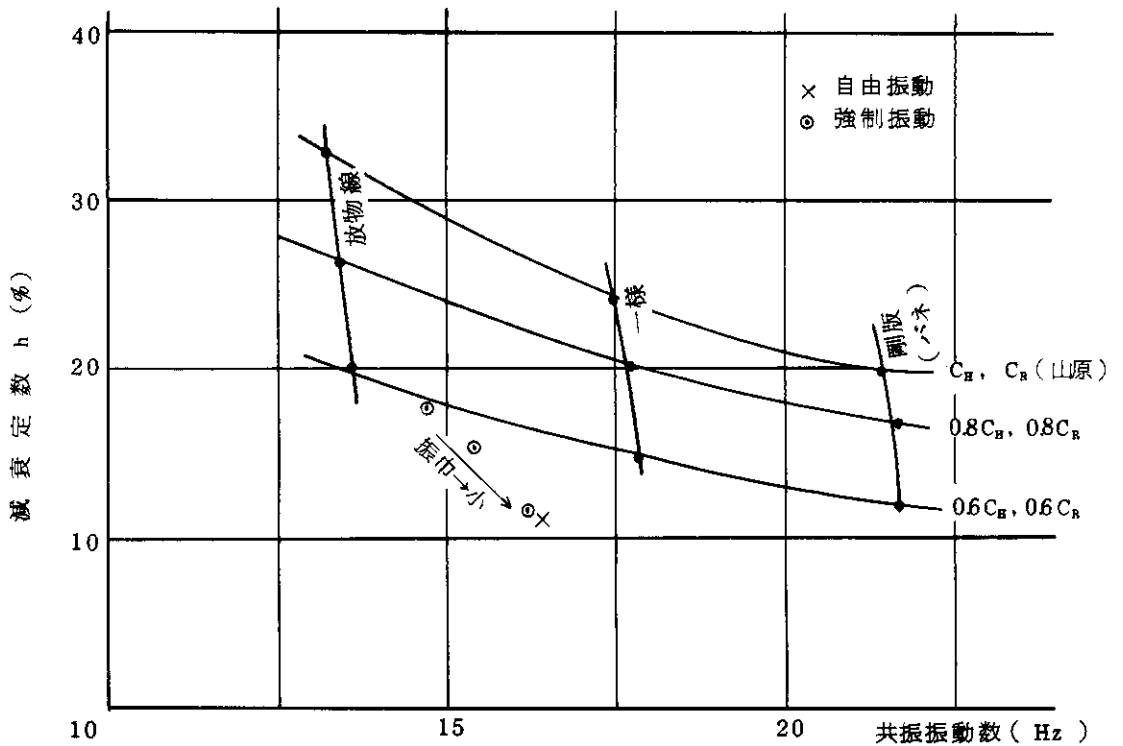


図-14 共振時の基礎底面変位と減衰定数



(a) FL



(b) FM

図-15 実験値と理論値の比較



この基礎はつなぎ梁が土に接しておらず、二つの基礎の間隔がかなりある故に、二つの基礎の相互の影響が小さいものと思われる。このため(8.2.11)、(8.2.12)式の如く独立基礎の値を用いてバネ定数を算定した。

$$\text{水平バネ定数 } K_H = 2 \cdot K_H' \quad (8.2.11)$$

$$\text{回転バネ定数 } K_R = 2 \{ K_R' + K_V' \cdot (\ell/2)^2 \} \quad (8.2.12)$$

ここで、 $K_H'$ 、 $K_V'$ 、 $K_R'$ ：独立基礎(FL)の水平、上下および回転バネ定数

$\ell$ ：二つの基礎中心間距離

(b) 地盤の減衰係数

2FL+BGの基礎はつなぎ梁が土に接しているために求めることが出来ないが、2FL+Gに関してはバネ定数の算定方法と同様にして略算的に下記の方法により求めた。

$$\text{水平減衰係数 } C_H = 2 C_H' \quad (8.1.13)$$

$$\text{回転減衰係数 } C_R = 2 \{ C_R' + C_V' \cdot (\ell/2)^2 \} \quad (8.1.14)$$

ここで、 $C_H'$ 、 $C_V'$ 、 $C_R'$ ：独立基礎の水平、上下および回転の減衰係数

$\ell$ ：二つの基礎中心間距離

(c) 固有値

計算方法は8.1.2の独立基礎の場合と全く同じである。

9. 実験結果およびその考察

9.1 独立基礎(FL, FM, FS), 建物(Bn)

および連成系(FL+Bn, FM+Bn), (図-3)。

9.1.1 固有値

(a) 独立基礎(FL, FM, FS)

共振曲線をFLの場合は図-6,7,8に、FMの場合は図-9,10に、またFSの場合は図-11に示した。共振振動数は起振力(又は共振振巾)が大きくなるに従って減少し、地盤の性状(弾性係数等)が線形でないことが認められる。また、自由振動より求めた固有振動数は強制振動実験の場合の振巾が小さい場合の値に一致する。

また、共振振巾と共振振動数の関係を図-12に、起振力と共振振巾の関係を図-13に示したが、この関係図からも地盤が非線型性を示していることが判かる。

図-14に共振時の基礎底面変位と減衰定数の関係を示したが、いずれの場合とも減衰定数は10~15%になり、共振変位振巾にあまり左右されていない。

図-15(a)にFLの場合の、図-15(b)にFMの場合の共振振動数と減衰定数の関係を実験値と計算値を対比して示した。共振振動数についてみると、実験値は振巾が小さくなるにつれてFLの場合は接地圧分布が剛版分布とした場合の理論値に、FMの場合は一様分布とした場合の理論値に近づく。また、実験から求めた減衰定数は理論値の約1/2程度となり、理論値の減衰係数を約40%低減した場合の計算値と一致する。

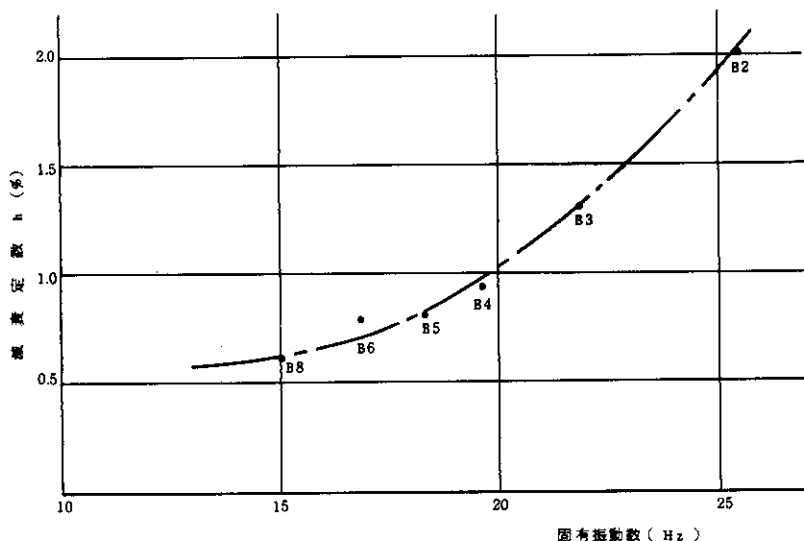


図-16 基礎固定の建物の実験結果

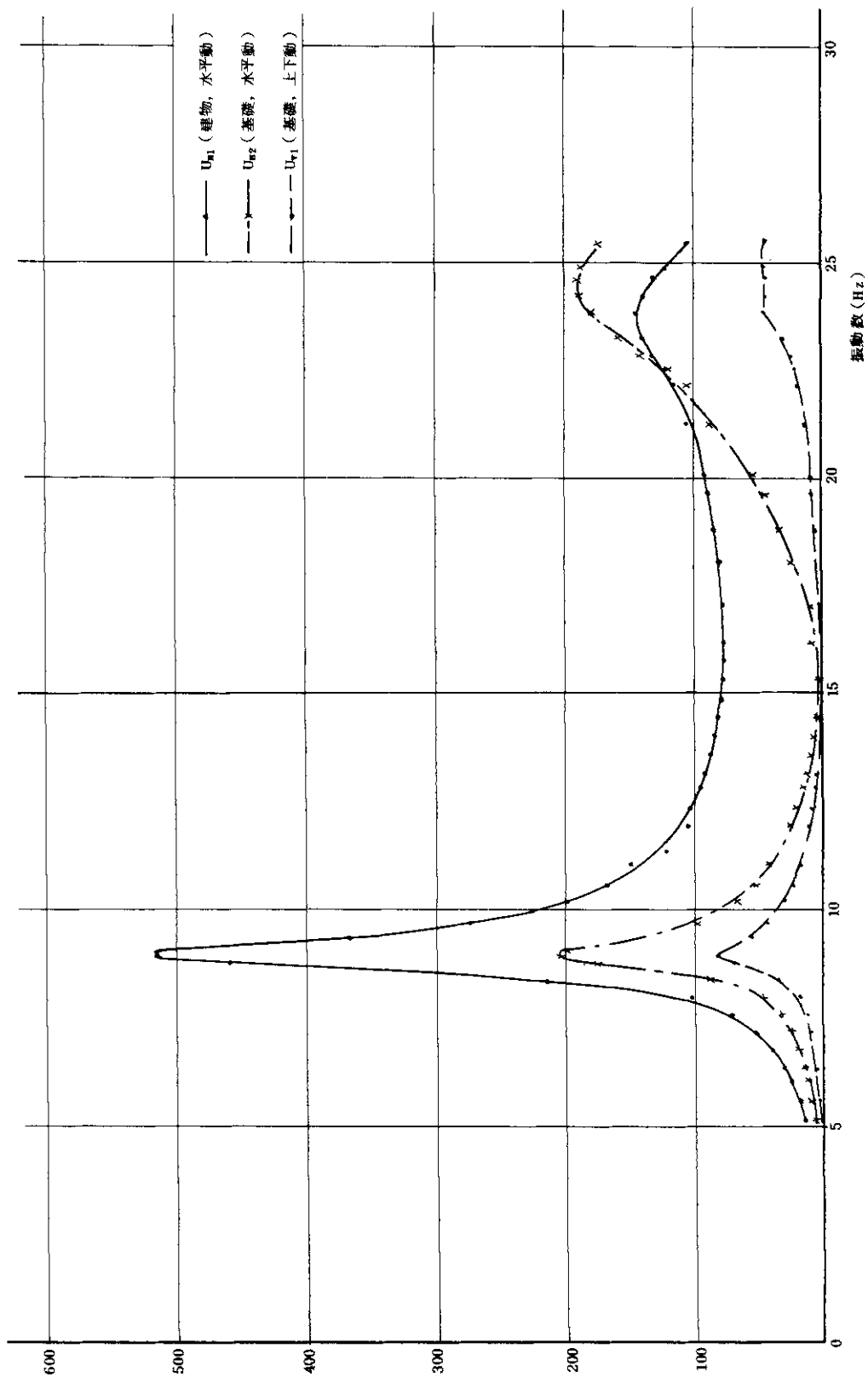


図-17 共振曲線 (FL+F8), 偏心目盛0.25 (6.37 kg·cm)

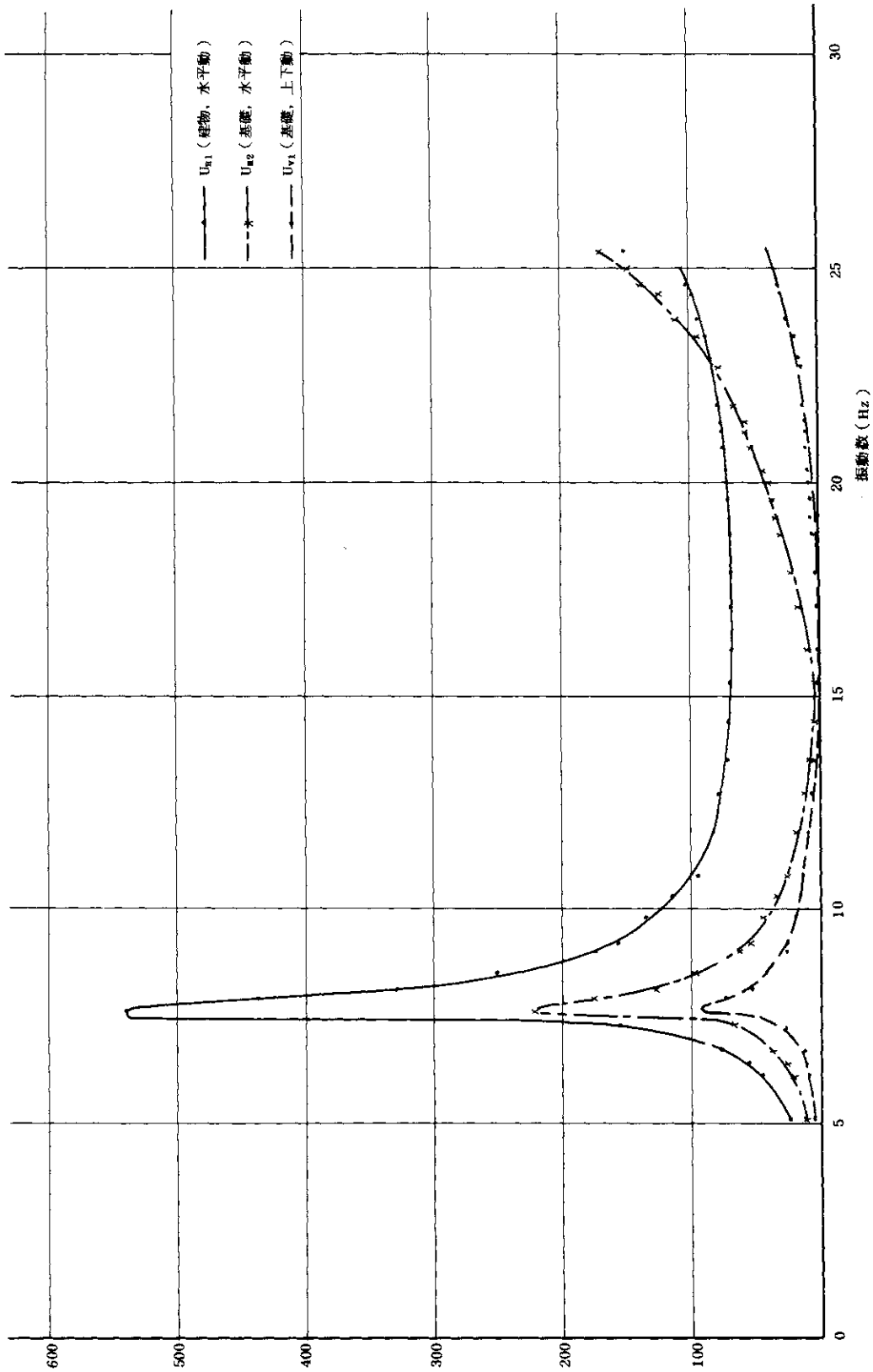


図-18 共振曲線 (FM+B8), 偏心目盛0.15 (5.35 kg·cm)

(b) 建 物 ( B n )

基礎固定で行なった自由振動実験結果を減衰定数と固有振動数の関係で図-16に示した。減衰定数は建物が鋼製であるため基礎版のみの場合に比して小さく、約0.6~2.0%程度である。なお、固有振動数の計算を行なうと実験値とよく一致している。

(c) 建物と基礎の連成系 ( FL+Bn, FM+Bn )

FL+Bnの共振曲線を図-17に、FM+Bnの場合を図-18に示した。FM+Bnの場合2次共振が得られている。この共振曲線(FL+Bn)より得られた固有振動数と減衰の関係を基礎(FL)および基礎固定の建物(Bn)の実験結果と対比して図-19に示した。また、同図に建物屋上における全変位に対する(Rocking+Sway)の割合を示したが、これからも判かる如く、特に連成系の減衰性は基礎の水平移動および回転、すなわちRockingおよびSway(%)に大きく左右することが判る。

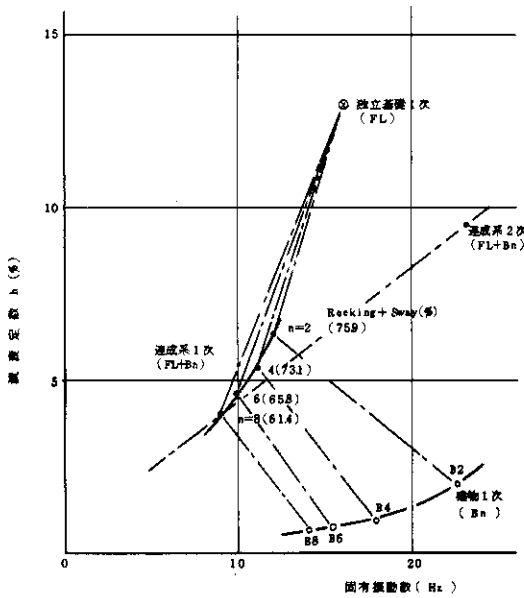


図-19 FL, BnおよびFL+Bnの関連性(実験値)

なお2次の減衰は、今回の実験においては、固有振動数に比例している。

固有振動数と減衰定数に関して実験値と理論値の対比をBL+Bnの場合は図-20(a)に、FM+Bn

の場合は図-20(b)に、FM+Bnの場合は図-20(b)に示した基礎(FL, FM)の場合と同様に、固有振動数に関しては、実験値と理論値とほぼ一致するのに対して、理論から求めた減衰定数は実験値よりかなり大きな値となる。このため基礎(FL, FM)の場合と同様に減衰係数を低減して求めてみると、理論値の減衰係数(表-2)を約4割低減した場合の計算値が実験値とほぼ一致し、基礎のみの場合と同様に傾向的によく一致する。

FL+Bnの実験および理論から求めたモードを図-21に示したが、1次および2次とも両者はかなりよく一致している。

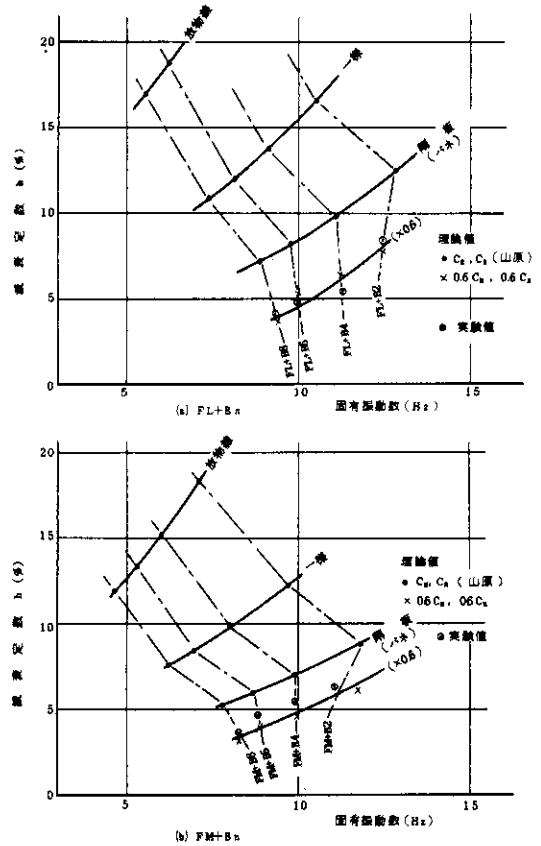


図-20 実験値と理論値の比較

9.1.2 地盤のパネ定数

共振時の固有振動数とモードから、土の付加質量を無視して求めたみかけのパネ定数(8.1.8式)

表-2 パネ定数 減衰係数の理論式

パネ定数			減衰係数				
接地圧分布	$K_V$	$K_H$	$K_R$		$C_V$	$C_H$	$C_R$
剛版	$\frac{4a \cdot \rho v_s^2}{1-\nu}$	$\frac{8a \cdot \rho v_s^2}{2-\nu}$	$\frac{8a \cdot \rho v_s^2}{3(1-\nu)}$	山原	$\pi a \cdot v_p$	$\pi a \cdot v_s$	$\frac{\pi a \cdot \rho v_p}{4}$
一様	$\frac{\pi a \cdot \rho v_s^2}{1-\nu}$	$\frac{2\pi a \cdot \rho v_s^2}{2-\nu}$	$\frac{\pi a \cdot \rho v_s^2}{2(1-\nu)}$	Hall	—	$\frac{184(1-\nu)a \cdot \rho v_s}{7-8\nu}$	$\frac{0.8a \cdot \rho v_s}{(1-\nu)(1+BR)}$
放物線	$\frac{3\pi a \cdot \rho v_s^2}{4(1-\nu)}$	$\frac{3\pi a \cdot \rho v_s^2}{2(2-\nu)}$	$\frac{\pi a \cdot \rho v_s^2}{4(1-\nu)}$	$BR = \frac{3(1-\nu)J}{8\rho a \cdot s^5}$			J: Inertia Moment

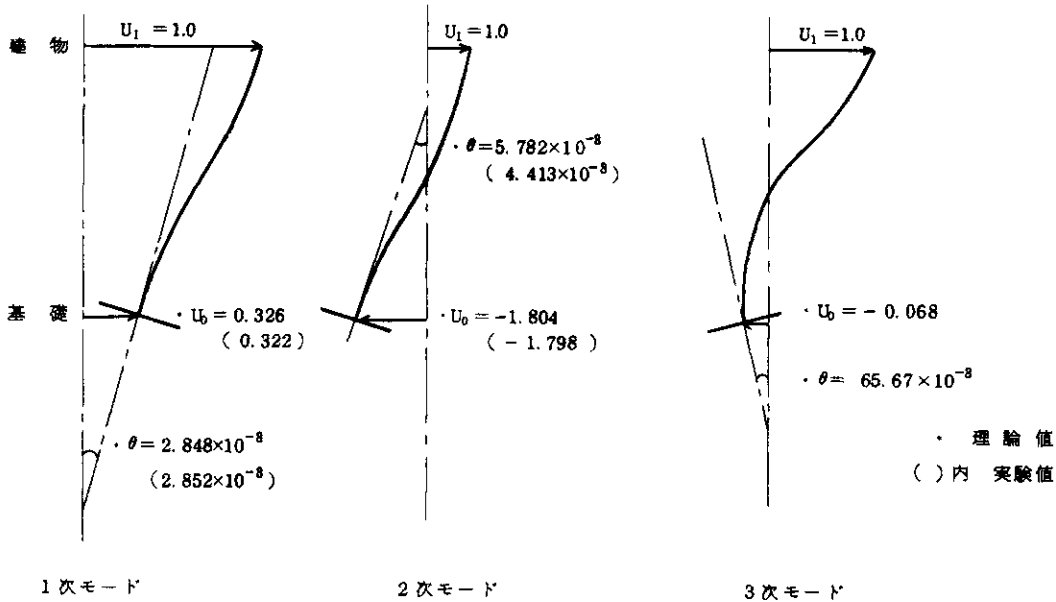


図-21 FL+B8の振動モード

と共振変位振巾の関係を、水平パネ定数の場合を図-22(a)、回転パネ定数の場合を図-22(b)に示した。

水平パネ定数についてみると、基礎(FL, FM, FS)のみの場合、共振振巾が大きくなるに従ってパネ定数は小さくなり、共振振巾が小さい場合にはFLは理論値の剛版分布の値に、FMは一様分布の値に、FSの場合は放物線分布の値に近づく。

また連成系の場合のパネ定数(図-22(a))も基礎のみの場合とほぼ一致している。これらの結果より、地盤の水平パネ定数は基礎と建物を連

成系とした影響はほとんど現われないことが判明した。

回転パネ定数(図-22(b))については、基礎のみの場合は水平パネ定数と同様な傾向を示しているのに対して、連成系(基礎と建物)の場合は、共振振巾を考慮しても、上部構造、すなわち基礎底面の接地圧(基礎の単位底面積当りの重量)の影響を大きく受け、FL+B8の値はFL+B2の値の約1.5倍となり、また理論的に考えられる最大のパネ定数(剛版分布)よりも大きくなる。

以上の結果から、土の付加質量を無視して実験から求めたパネ定数は、振巾が大きくなるほど小

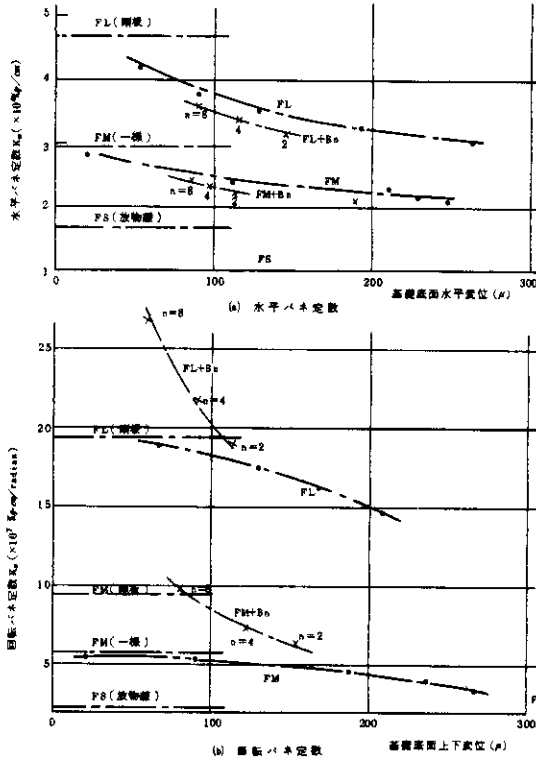


図-22 バネ定数

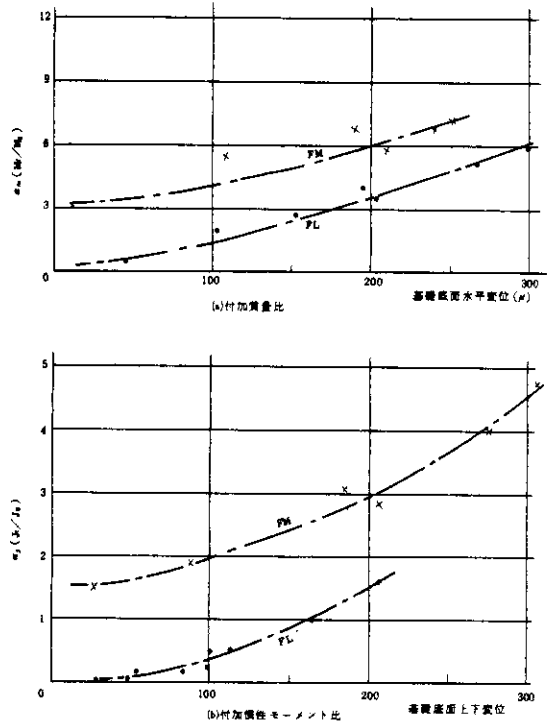


図-23 土の付加質量および付加慣性モーメント比

さくなり、ある程度基礎底面積が大きくなると剛版分布の理論に近づく。また特に、回転バネ定数は基礎底面の接地圧の影響を大きく受けることが判明した。

### 9.1.3 土の付加質量 ( $M_f$ ) および付加慣性モーメント ( $J_f$ )

8.1.1の(d)において述べた方法により求めた  $\alpha_m$  (土の付加質量/基礎の質量) と  $\alpha_j$  (土の付加慣性モーメント/基礎の慣性モーメント) をそれぞれ図-23に示した。

$\alpha_m, \alpha_j$  も基礎底面の振巾が大きくなるに従って大きくなり、また基礎底面積が小さいFMの場合の値 ( $\alpha_m, \alpha_j$ ) はFLの値に比して大きい。FLの場合、共振振巾が小さな範囲では土の付加質量および付加慣性モーメントは9.1.2のバネ定

数の計算からも判かる如くほぼ0となる。

以上の如く、土の付加質量を取り扱う場合、地盤のバネ定数をいかに取り扱うかにより大きく左右される。また、付加質量と付加モーメントの関連性をいかに結びつけるか等の多くの問題があるため、今後更に検討をする必要がある。

### 9.1.4 地盤のせん断弾性係数とせん断歪度

共振振巾の増加に伴う地盤のバネ定数の低下現象を地盤のせん断剛性の低下として求めた結果が図-24(a)である。なお、この場合バネ定数はFLは接地圧分布が剛版分布と、FMは一様分布とした。バネ定数から求めたせん断弾性係数 ( $G$ ) は、振巾が小さな範囲ではS波の速度から求めた  $G (1.42 \text{ kg/cm}^2)$  の値とほぼ一致する。また振巾が  $300 \mu$  程度になると  $G$  の値はS波から求め

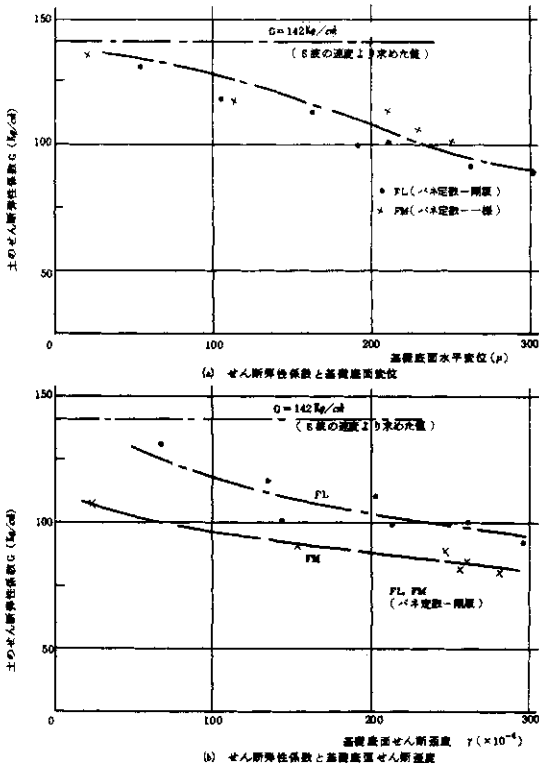


図-24 土のせん断弾性係数

た値の約2/3に低下する。

また、土のせん断弾性係数(G)と基礎底面の土のせん断歪度との関係を図-24(b)に示したが、歪度 $10^{-6}$ 程度の場合、Gの値はS波の速度から求めたの約2/3となり、H・B・Seed(1969)<sup>6)</sup>などの実験結果とほぼ同様な傾向を示している。

### 9.1.5 地盤の減衰

9.1.1に述べた如く、理論から求めた減衰定数は実験から求めた値に比して大きくなる。このため、実験より求めた減衰定数(h)から、地盤の水平( $C_H$ )および回転( $C_R$ )の減衰係数を分離(8.1.16式)して求め一考察を行なった。

FLの解析結果を図-25(a)に、FMの場合を図-25(b)に示したが、実験値(h)から求めた

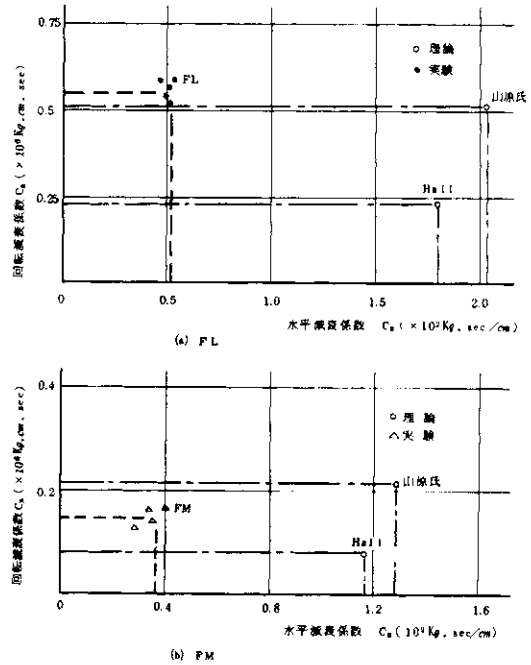


図-25 水平と回転の減衰係数の関係

回転の減衰係数( $C_R$ )に山原氏の近似値(表-2)とほぼ一致し、Hall値(表-2)より大きくなっている。これに対して、水平の減衰係数( $C_H$ )は両氏の近似値の約1/3となる。これらの結果より、9.1.1.で述べたように、理論解の減衰定数が実験値に比して大きくなる原因としては、理論値の水平減衰係数( $C_H$ )が実際の値よりも大きくなるためと考えられる。

### 9.1.6 独立基礎および連成系の結果

上記の解析結果より、共振振巾が増大するにつれて共振振動数が低下する主な原因としては、土の付加質量が増加すると考えるよりは、地盤の非線形性(土のせん断剛性の低下)によるものと考えられる。また、基礎底面の大きさによる地盤のバネ定数の変化は接地圧分布あるいは土の付加質量の相異とも考えられるが、今後更に検討をする必要がある。

地盤のバネ定数の算定において、特に回転バネ定数の場合基礎底面の接地圧を十分に考慮する必要があるであろう。

理論より求めた減衰定数は実験値に比して大きくなる傾向を示しているが、今回の実験範囲では、地盤の水平減衰係数によるものと判明した。

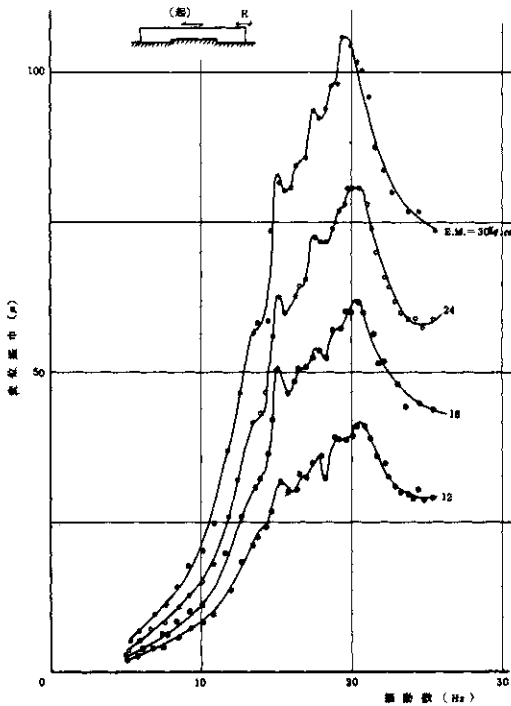


図-26 水平動共振曲線(2FL+BG)

9.2 連結基礎(2FL+BG, 2FL+B)

9.2.1 実験結果

(a) 2FL+BG

図-26に各起振力に対する水平動の共振曲線を、図-27には起振機の偏心モーメント  $E \cdot M = 30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  の時の水平、上下および回転動の共振曲線を示した。これらの共振曲線には約  $1.5 \text{ Hz}$ 、 $1.75 \text{ Hz}$ 、 $2.0 \text{ Hz}$  に共振点が見られる。 $2.0 \text{ Hz}$  の共振点において水平変位は最大のピークを示すが、上下変位から求めた回転角  $(\theta)$  は逆に落ちこんでいる。このため、約  $2.0 \text{ Hz}$  の共振周期は回転動の少ない、純水平動に近い共振動数と考え

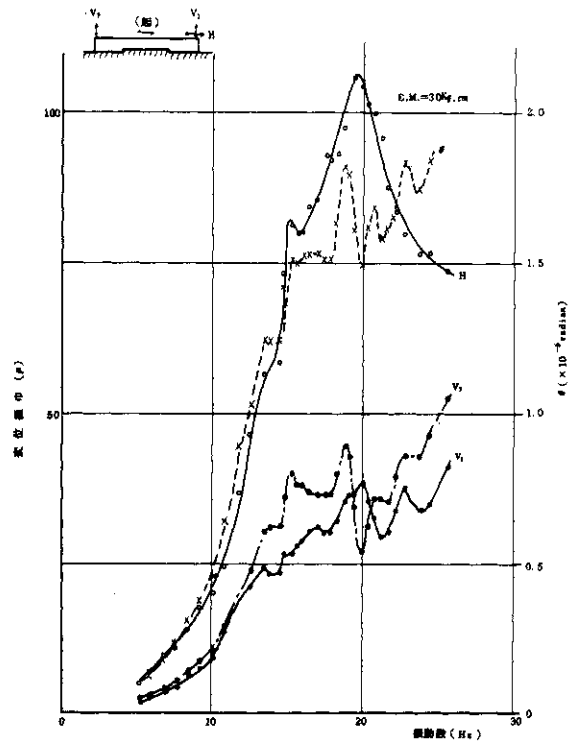


図-27 共振曲線(2FL+BG)

られる。また、 $1.75 \text{ Hz}$  付近の共振点においては回転角  $(\theta)$  と水平変位の両者がピークをなしていることおよび後述の理論解析結果より、この  $1.75 \text{ Hz}$  が  $2 \text{ FL} + \text{BG}$  の1次固有周期と判断される。なお、約  $1.5 \text{ Hz}$  の共振周期は加振直角方向の共振周期であることが、自由振動実験から判明した。

図-28に起振機の振動数の変化に伴う上下方向変形曲線と接地圧分布を対比して示した。上下方向の変形をみると、変形曲線はほぼ直線的であることにより基礎は剛体変位をしていることがわかる。また土圧の値は上下変位によく対応しており、基礎端部  $(P_1, P_0)$  で最大となる。

起振力と最大変位より減衰定数の計算(8.1.1参照)を行なうと、約  $2.05\%$  となる。



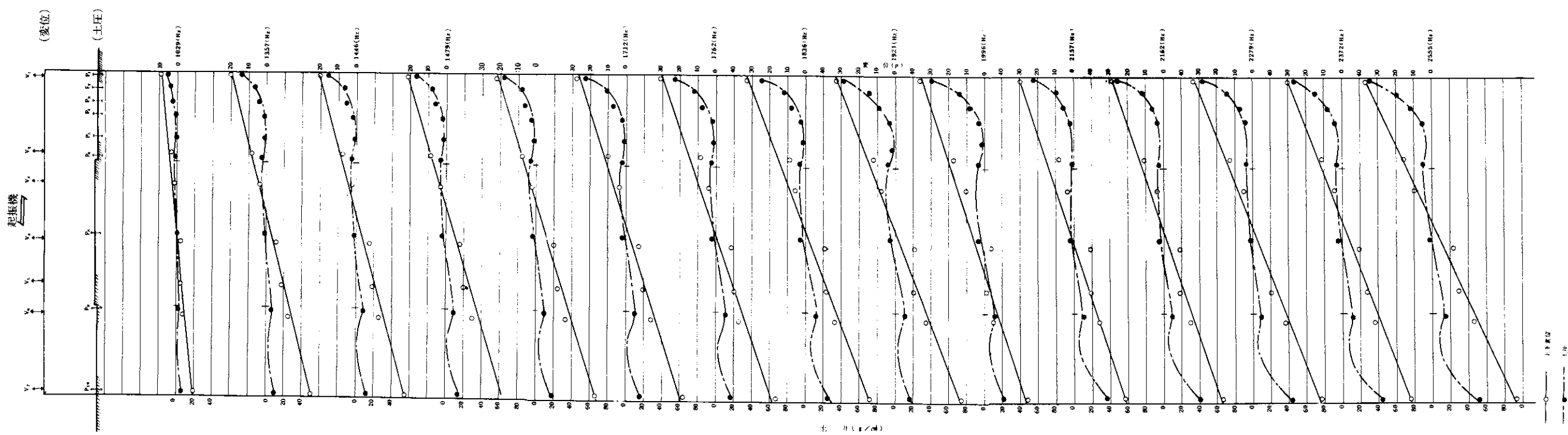


图-28 上下变位, 土压 (2FL+BG)

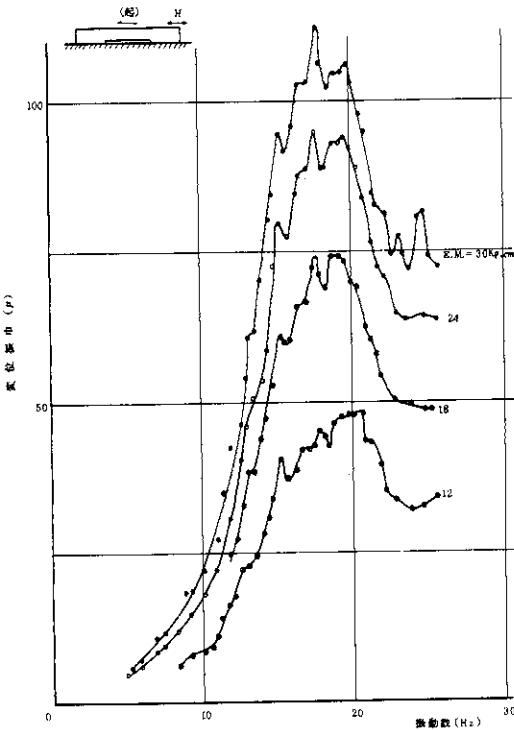


図-29 水平動共振曲線(2FL+B)

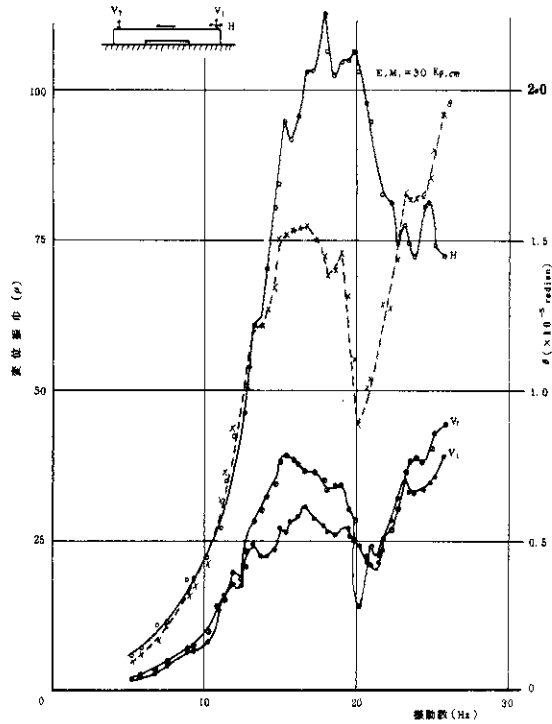


図-30 共振曲線(2FL+B)

(b) 2FL+B

図-29に各起振力に対する水平動の共振曲線を、また図-30には起振機の偏心モーメント  $E \cdot M = 30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  の時の水平、上下および回転動の共振曲線を示したが、2FL+BGの場合とほぼ同様な傾向を示している。共振点は約1.5 Hz, 17.5 Hz, 20 Hz 前後に現われているが、2FL+BGの場合と同様に約17.5 Hzの共振振動数は基礎の回転水平動の連成の1次固有振動数であり、約20 Hzは回転動の少ない、純水平動に近い振動系である。なお、約1.5 Hzは加振直角方向の共振振動数である。

図-31に上下変位と接地圧分布を対比して示した。2FL+BG(図-28)と比較すると、接地圧は基礎の内端( $P_6, P_9$ )の値が相対的に

大きくなり、独立基礎の上下動の場合の剛版分布の型に近づく。また、2FL+BGの接地圧の大きさはつなぎ梁が土に接していないために、2FL+BGの値の約2倍程度となる。

また、減衰定数を求めると、約19%となり、2FL+BGの値とほぼ同じ値を示している。

以上の如く、つなぎ梁が土に接していることによる影響は、接地圧にかなり現われているが、固有値に対しては、今回の実験範囲内では、少ないことが判明した。

9.2.2 理論解析結果

(a) 2FL+BG

実験および分割法より求めたバネ定数を表-3に示したが、両者は非常によく一致している。

また、固有振動数に関して、表-3(分割法)

表-3 パネ定数

基礎 パネ定数	2FL+BG		2FL+B		
	実験値	理論値	実験値	理論値	理論値A
水平 ( $\times 10^4 \text{ kg/cm}$ )	9.78	9.26	9.45	9.59	9.32
回転 ( $\times 10^9 \text{ kg}\cdot\text{cm/rad.}$ )	3.92	4.44	4.48	3.55	4.48

理論値A: FLの実験値を用いた値

表-4 固有値および減衰係数

基礎 固有値	2FL+BG		2FL+B		
	実験値	理論値	実験値	理論値	理論値A
固有振動数 (Hz)	17.64	17.31	17.70	16.15	17.55
モード ( $\theta/U_0$ ) $\times 10^3$	1.75	1.75	1.30	2.04	1.41
減衰定数 $h, (\%)$	20.5	-	19.0	24.2*	9.2
水平減衰係数 ( $C_H$ )	( $\times 10^2 \text{ kg sec/cm}$ )		3.16	4.02*	1.58
回転減衰係数 ( $C_R$ )	( $\times 10^7 \text{ kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec/rad}$ )		2.31	2.20	2.68

理論値A: FLの実験値を用いた値

\*  $C_H, C_R$  山原氏の値

のパネ定数を用いて求めた値と実験値を対比して表-4に示したが振動数およびモードともほぼ一致している。

以上の結果より、仕意の形状の基礎に対するパネ定数の算定において、分割法が非常に有効な解析方法であることが判明した。

(b) 2FL+B

独立基礎(FL)の理論値および実験値より求めた(8.2.2)パネ定数と実験(2FL+B)から求めたパネ定数を表-3に示した。水平パネ定数の理論値の両者(表-3)は実験値とよく一致

している。また、回転パネ定数は、独立基礎の実験値を用いた理論値Aが実験値とよく一致する。

表-4に表-3のパネ定数を用いて求めた固有振動数とモードを、実験値と対比して示したが、パネ定数からも判かるごとく、理論値Aが実験値とよく対応する。

以上の如く、独立基礎がある程度離れ、つなぎ梁で連結された基礎に対してのパネ定数の算定には、8.2.2のii)による独立基礎の値を用いた計算方法でほぼ評価出来ることが判明した。

また、理論(8.2.2)から求めた減衰係数と実

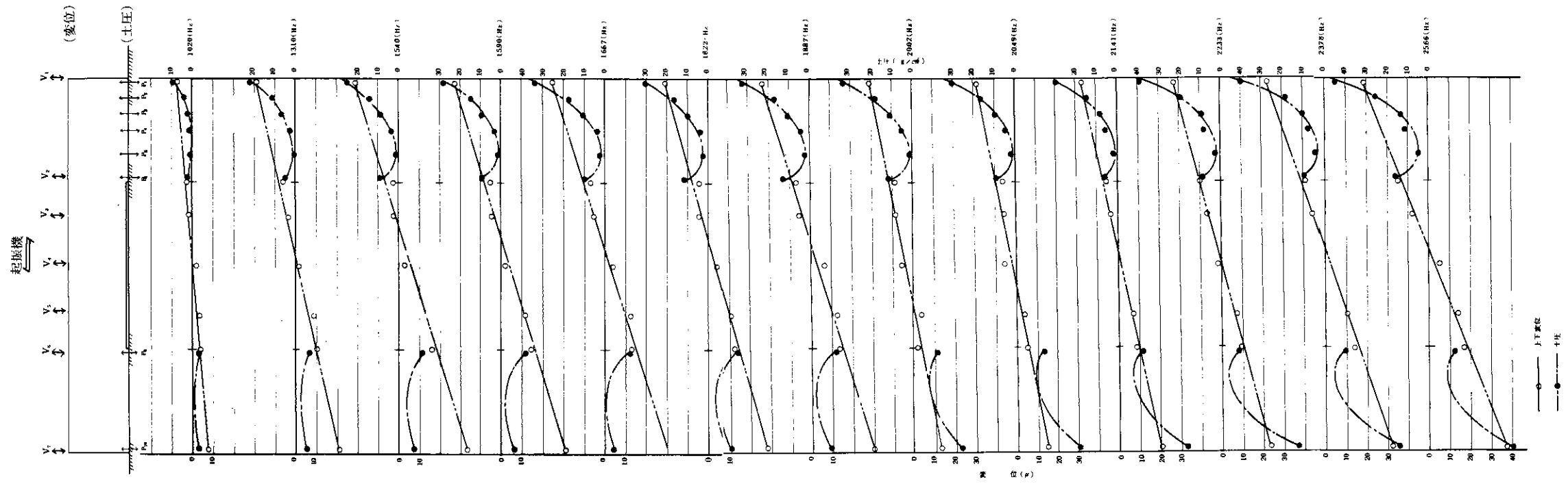


図-31 上下変位, 土圧 (2FL+B)

験から(8.1.1の(b))求めた減衰係数を表-4に示したが、独立基礎(FL, FM)の場合と同様に、理論から求めた水平減衰係数( $C_H$ )が実験値に比してかなり大きくなる。これに対して回転の減衰係数( $C_R$ )は理論値と実験値がよく一致している。

表-4の減衰定数に関してみると、理論値は実験値に比して約2割大きい。この原因としては同表に示した如く水平の減衰係数( $C_H$ )によると考えられる。

以上の如く、連結基礎の減衰性は独立基礎の場合と全く同様な傾向を示していることが判明した。

### 9.2.3 連結基礎に関する結果

上記の実験および解析結果より、つなぎ梁が土に接している場合と接していない場合の相異は振動数、減衰定数および振動モードの固有値にはあまり影響は現われないが、接地圧に大きく影響することが判明した。

また、バネ定数の算定に当っては、分割法または独立基礎の値を用いた方法により十分評価出来る。

減衰定数の算定に当っては、独立基礎の場合と同様に地盤の水平減衰係数について十分注意する必要がある。

## 10. 結 論

地盤—建物連成系の地盤部分の算定に当って、次のことが言えよう。

地盤のバネ定数に関しては、土の非線型性、また回転バネ定数については接地圧による影響を十

分考慮する必要がある。

独立基礎の値をつなぎ梁でつないだ基礎の場合には、独立基礎の値を用いておおむね評価出来る。

地盤の減衰については、理論値が実験値に比して大きくなる傾向があるが、この原因としては理論値の水平地盤係数が実験より求めた値より大きくなることによるものであり、解析に当っては十分検討する必要がある。

### <参考文献>

- 1) 田治見宏：建築振動学 彰国社
- 2) 金井清他：地震工学 コロナ社
- 3) 田治見宏：「地震理論に関する基礎的研究」  
東京大学生産技術研究所報告、  
1959年
- 4) 山原 浩：「動的解析における地盤の考え方」  
土と基礎、1971年8月
- 5) F.E.Richart and others: "Vibrations of Soils and Foundations"  
Prentice-Hall, Inc.,
- 6) 山本鎮男：「土の動的性質とその応用」  
土質工学会
- 7) J.Elorduy and others: "DYNAMIC RESPONSE OF BASES OF ARBITRARY SHAPE SUBJECTED TO PERIODIC VERTICAL LOADING"  
Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, August, 1967