

# 構造物-杭-地盤系の相互作用解析における 3次元解析と2次元解析との比較

石原哲哉\*・三浦房紀\*\*

本研究は、構造物-杭-地盤系の地震応答解析を3次元有限要素法で行い、その結果に基づいて、2次元有限要素法で同様な解析を行う場合の解析方法等について検討するものである。初めに、境界の設定位置が連成系の応答に及ぼす影響について検討し、3次元の地震応答解析を行う。次に、2次元解析で地盤の奥行き方向解析幅を変えて、上部構造の応答が3次元のそれと一致する条件を求める。最後に、3次元解析と2次元解析とで建物の応答および杭応力の比較検討を行い、両者の差異を明らかにする。

**Key Words** : 3-dimensional system, 2-dimensional system, structure-pile-soil interaction, seismic response, group piles, group effect

## 1. はじめに

近年、大都市では土地の不足から臨海部を開発して大規模な構造物を建設することが計画されている。しかし、臨海部のような沖積層上の埋立地盤に高層建築物を含む大規模な構造物が建設された例は少なく、また大きな地震を経験したことがないことから、(財)日本建築防災協会に設けられた臨海部構造安全委員会により地盤の特性、種々の基礎形式による建築物への地震動の影響などについて調査・検討が行われた。その結果によると、基礎構造に関して、応答解析による地震力および杭の応力は、現行の設計手法に比較して大きくなることから、軟弱地盤における基礎構造の地震時応力としては、上部構造の慣性力から生じる応力の他に、現行の設計手法では取り入れられていない地盤の強制変位により生じる応力を考慮する必要があるとしている<sup>1),2)</sup>。また、清水等<sup>3)</sup>は構造物-杭-地盤系の地震観測の結果から、深い地下階を有する建物では、基礎杭の地震時曲げ歪は地盤震動に支配され、基礎の浅い建物と比較して慣性力による影響は小さいとしている。

杭基礎に関してはこれまでに多くの研究が行われてきた。しかし、その大部分は上部構造からの慣性力を静的に杭頭に作用させるか<sup>4),5)</sup>、または、慣性力を調和振動として作用させ杭基礎のインピーダンスを求めるものである<sup>6)</sup>。大平等<sup>7)</sup>は、2次元有限要素法により群杭基礎の挙動を解析する場合に、各杭の荷重分担率が3次元モデルと等価になるように杭間の地盤剛性を補正する方法を提案している。この方法は上部構造を考慮せずに静的な解析から補正を行っているので構造物-杭-地盤系の動的相互作用解析にはそのまま適用できない。これらの方法

は、いずれも上部構造からの慣性力だけを考慮しており、上記で指摘されているような地盤の変位による影響が考慮されていない。地盤の変位を考慮して静的な解析から杭応力を求める方法として高木等<sup>8)</sup>は、応答変位法を適用して杭基礎の応力解析を試みているが、相互作用バネ、上部構造の慣性力の評価が結果に強く影響し、その評価方法が今後の課題であるとしている。

構造物-杭-地盤系の相互作用は、本来3次元で解析されるべき問題である。さらに、軟弱地盤においては地盤の材料非線形性を考慮する必要がある。このような解析には、その汎用性から有限要素法が適していると考えられる。しかし、3次元非線形地震応答解析は、対象とする構造物の規模等にもよるが一般に膨大な計算量となり、設計の実務には適していない。もし、2次元解析で3次元解析と同等の結果が得られるモデル化が可能であれば、あるいは、少なくとも3次元と2次元との解析結果の違いが明らかになっていけば、設計解析上非常に有効である。

こうした観点から、本研究では3次元解析を地震観測、実験および解析などのこれまでの研究成果をできる範囲でより多く取り入れて再現できる方法ととらえ、これを用いたシミュレーション結果を実験に代わるものと位置づけて、構造物-杭-地盤系の地震応答解析を3次元有限要素法で行い、その結果に基づいて2次元有限要素法で同様な解析を行う場合の地盤の奥行き方向解析幅の影響等について検討するものである。筆者らは、3次元非線形地震応答解析について、荷重伝達法を用いた材料非線形性の扱いと境界処理方法について既に報告しており<sup>9)</sup>、構造物-杭-地盤系の問題は、材料非線形性を考慮した解析を行う必要があると考えているが、ここでは、その第一歩として線形での解析結果について報告するものである。

本論では、初めに地盤の境界設定位置が構造物、杭お

\*工修 日本国土開発(株) 技術研究所  
(〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

\*\*工博 山口大学教授 工学部

よび周辺地盤に与える影響について検討する。境界処理方法は、境界での応答が自由地盤の応答に等しいものとして処理する方法を用いる<sup>9)</sup>。次に、4種類の建物階数、5種類の杭配置について、地震応答解析を行う。次に、2次元有限要素法で、構造物の奥行き幅に対する地盤の奥行き方向解析幅比をパラメータとして解析を行い、上部構造の応答が2次元と3次元とで誤差が最小になるようパラメータを決定する。最後に、2次元解析の杭応力と3次元解析での杭応力について比較検討を行う。

## 2. 解析方法

上部構造はいわゆる「串団子モデル」とし、地盤は3次元の立体要素でモデル化する。このため基礎は、剛体と仮定する。ただし、ここでは杭を含めないフーチング部分を基礎と呼ぶ。3次元解析の上部構造、基礎、杭および地盤の解析上の主な仮定は、次のようである。

- ①上部構造は、6自由度を考慮する。ただし、鉛直変位および二方向のロッキングは、基礎と同一（相対変位がゼロ）とする。
- ②基礎は、剛体とし、6自由度を考慮する。
- ③杭は、梁要素を用いる。
- ④地盤は、6面体アイソパラメトリック要素とする。
- ⑤地盤の境界での応答は、全て既知であるとして扱う。
- ⑥各要素の材料特性は、弾性とする。

2次元解析は、平面歪状態を仮定しているが、解析方法は3次元解析に準じているので説明は省略する。

### (1) 基本となる運動方程式

構造物から十分離れた地盤での応答は、相互作用の影響が無視できる程度に小さくなると考えられる。従って、そこでの応答は自由地盤として求めた応答に等しく既知であるとしてとることができる。境界での応答が既知であれば、構造物-杭-地盤系の応答は、

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{aa}] & [M_{ab}] \\ [M_{ba}] & [M_{bb}] & [M_{bc}] \\ & [M_{cb}] & [M_{cc}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta_a\} + \{\delta_\rho\} \\ \{\delta_b\} + \{\delta_\rho\} \\ \{\delta_c\} + \{\delta_\rho\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [C_{aa}] & [C_{ab}] \\ [C_{ba}] & [C_{bb}] & [C_{bc}] \\ & [C_{cb}] & [C_{cc}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta_a\} \\ \{\delta_b\} \\ \{\delta_c\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K_{aa}] & [K_{ab}] \\ [K_{ba}] & [K_{bb}] & [K_{cc}] \\ & [K_{bb}] & [K_{cc}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta_a\} \\ \{\delta_b\} \\ \{\delta_c\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_a\} \\ \{P_b\} \\ \{P_{cd}\} \end{Bmatrix} \dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} \{P_{cd}\} &= \{P\} - [M_{cd}] (\{\delta_a\} + \{\delta_\rho\}) - [C_{cd}] \{\delta_a\} \\ &\quad - [K_{cd}] \{\delta_a\} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

と表される。

ただし、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{\delta\}$ 、 $\{P\}$ は順に、質量、

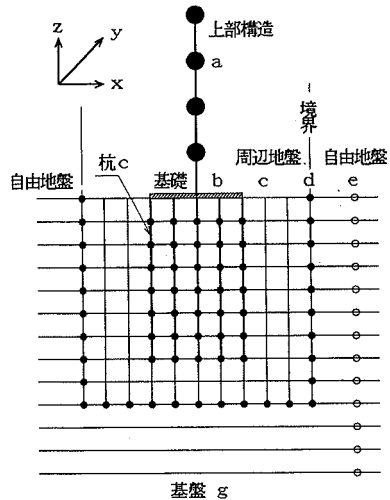


図-1 構造物-杭-地盤系の解析模式図

減衰、剛性、変位、外力のマトリクスまたはベクトルである。また、添え字は、対象系の構成部分を明示するもので、 $a$ は構造物の節点、 $b$ は基礎の節点、 $c$ は杭および周辺地盤の節点、 $d$ は境界の節点、 $g$ は基礎を表す(図-1参照)。

境界での応答を既知として処理する方法は、粘性境界と比較すると逸散波の吸収の点ではやや劣るが粘性マトリクスを省略できるので、その分だけ解析領域を大きくでき、計算機の記憶容量に制限を受けるような場合には有利である<sup>9)</sup>。

### (2) 上部構造・基礎の質量マトリクス

基礎を剛体と仮定しているのので上部構造の剛性マトリクスは、基礎固定の一般的な剛性マトリクスとなる。

上部構造・基礎の質量マトリクスは、基礎のスウェイおよびロッキングを考慮して、以下のように導かれる。

上部構造の質点 $i$ の重心位置での変位( $\delta_{xi}$ ,  $\delta_{yi}$ )は、基礎に対する相対変位( $u_i$ ,  $v_i$ )と基礎のスウェイ( $u_B$ ,  $v_B$ )とロッキングによる回転( $\theta_{xB}$ ,  $\theta_{yB}$ )とを合わせて、

$$\delta_{xi} = u_i + u_B + \theta_{yB} \cdot h_i \dots\dots\dots(3)$$

$$\delta_{yi} = v_i + v_B - \theta_{xB} \cdot h_i \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここに、 $h_i$ は質点 $i$ の基礎重心からの高さとする。また、座標系は、右手座標系とする(図-2参照)。従って、加速度は、

$$\ddot{\delta}_{xi} = \ddot{u}_i + \ddot{u}_B + \ddot{\theta}_{yB} \cdot h_i \dots\dots\dots(5)$$

$$\ddot{\delta}_{yi} = \ddot{v}_i + \ddot{v}_B - \ddot{\theta}_{xB} \cdot h_i \dots\dots\dots(6)$$

と表される。基礎重心での $x$ 方向および $y$ 方向の慣性力( $F'_{xB}$ ,  $F'_{yB}$ )は、

$$\begin{aligned} F'_{xB} &= \sum M_i \cdot \ddot{\delta}_{xi} + M_B \cdot \ddot{u}_B \\ &= \sum M_i \cdot \ddot{u}_i + (\sum M_i + M_B) \cdot \ddot{u}_B + \sum M_i \cdot h_i \cdot \ddot{\theta}_{yB} \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

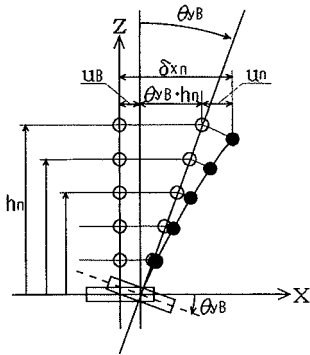


図-2 基礎のスウェイとロッキングによる上部構変位

表-1 上部構造・基礎の質量マトリクス

| $\ddot{u}_1$    | $\ddot{v}_1$     | $\ddot{\theta}_{z1}$ | $\ddot{u}_2$    | $\ddot{v}_2$     | $\ddot{\theta}_{z2}$ | ... | $\ddot{u}_n$         | $\ddot{v}_n$          | $\ddot{w}_n$     | $\ddot{\theta}_{xB}$            | $\ddot{\theta}_{yB}$          | $\ddot{\theta}_{zB}$ |
|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----|----------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| $M_1$           | $M_1$            | $J_{z1}$             |                 |                  |                      |     | $M_1$                | 0                     | 0                | 0                               | $M_1 \cdot h_1$               | 0                    |
|                 |                  |                      | $M_2$           | $M_2$            | $J_{z2}$             |     | $M_2$                | 0                     | 0                | 0                               | $M_2 \cdot h_2$               | 0                    |
|                 |                  |                      |                 |                  |                      | ... |                      |                       |                  |                                 |                               |                      |
| $M_1$           | 0                | 0                    | $M_2$           | 0                | 0                    | ... | $\sum M_i + M_B$     | 0                     | 0                | 0                               | $\sum M_i \cdot h_i$          | 0                    |
| 0               | $M_1$            | 0                    | 0               | $M_2$            | 0                    | ... | 0                    | $\sum M_i + M_B$      | 0                | 0                               | $-\sum M_i \cdot h_i$         | 0                    |
| 0               | 0                | 0                    | 0               | 0                | 0                    | ... | 0                    | 0                     | $\sum M_i + M_B$ | 0                               | 0                             | 0                    |
| 0               | $-M_1 \cdot h_1$ | 0                    | 0               | $-M_2 \cdot h_2$ | 0                    | ... | 0                    | $-\sum M_i \cdot h_i$ | 0                | $\sum M_i \cdot h_i^2 + J_{zB}$ | 0                             | 0                    |
| $M_1 \cdot h_1$ | 0                | 0                    | $M_2 \cdot h_2$ | 0                | 0                    | ... | $\sum M_i \cdot h_i$ | 0                     | 0                | 0                               | $\sum M_i \cdot h_i + J_{yB}$ | 0                    |
| 0               | 0                | 0                    | 0               | 0                | 0                    | ... | 0                    | 0                     | 0                | 0                               | 0                             | $J_{zB}$             |

$$F'_{yB} = \sum M_i \cdot \ddot{\theta}_{yi} + M_B \cdot \ddot{v}_B$$

$$= \sum M_i \cdot \ddot{v}_i + (\sum M_i + M_B) \cdot \ddot{v}_B - \sum M_i \cdot h_i \cdot \ddot{\theta}_{zB}$$

..... (8)

また、基礎重心での転倒モーメント ( $M'_{xB}$ ,  $M'_{yB}$ ) は、基礎の  $x$  軸および  $y$  軸に関する慣性 2 次モーメントをそれぞれ  $J_{xB}$ ,  $J_{yB}$  とすると、

$$M'_{xB} = -\sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{\theta}_{yi} + J_{xB} \cdot \ddot{\theta}_{zB}$$

$$= -\sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{v}_i - \sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{v}_B$$

$$+ \{ \sum M_i \cdot h_i^2 + J_{xB} \} \cdot \ddot{\theta}_{zB}$$

..... (9)

$$M'_{yB} = \sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{\theta}_{xi} + J_{yB} \cdot \ddot{\theta}_{zB}$$

$$= \sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{u}_i + \sum h_i \cdot M_i \cdot \ddot{u}_B$$

$$+ \{ \sum M_i \cdot h_i^2 + J_{yB} \} \cdot \ddot{\theta}_{zB}$$

..... (10)

となる。上記において、添字  $i$ ,  $B$  は、それぞれ上部構造の質点および基礎を表す。また、 $\Sigma$  は質点  $i$  に関する重ね合わせを表す。以上のようにして求めた上部構造・基礎の質量マトリクスを表-1 に示す。

(3) 基礎に接続される杭および地盤

基礎を剛体と仮定し、杭は鉛直に設置されるとすると、杭および地盤の要素の基礎に接している節点  $j$  の変位 ( $u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}$ ) は、基礎の重心の変位 ( $u_B, v_B, w_B, \theta_{xB}, \theta_{yB}, \theta_{zB}$ ) を用いて次のように表される。

$$u_j = u_B + \theta_{yB} \cdot L_{xj} - \theta_{zB} \cdot L_{zj}$$

..... (11)

$$v_j = v_B - \theta_{xB} \cdot L_{xj} + \theta_{zB} \cdot L_{zj}$$

..... (12)

$$w_j = w_B + \theta_{xB} \cdot L_{yj} - \theta_{yB} \cdot L_{zj}$$

..... (13)

$$\theta_{xj} = \theta_{xB}$$

..... (14)

$$\theta_{yj} = \theta_{yB}$$

..... (15)

$$\theta_{zj} = \theta_{zB}$$

..... (16)

ここに、 $L_{xj} = (x_j - x_B)$ ,  $L_{yj} = (y_j - y_B)$ ,  $L_{zj} = (z_j - z_B)$  ただし、 $(x_j, y_j, z_j)$  は節点  $j$  の座標、 $(x_B, y_B, z_B)$  は基礎重心の座標である。

杭および地盤の変位が基礎に及ぼす力 ( $F_{xB}, F_{yB}, F_{zB}$ ,

$M_{xB}, M_{yB}, M_{zB}$ ) は、杭および地盤の要素の基礎に接している節点  $j$  の変位に関する節点力 ( $F_{xj}, F_{yj}, F_{zj}, M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}$ ) の和として次のように表すことができる。

$$F_{xB} = \sum F_{xj}$$

..... (17)

$$F_{yB} = \sum F_{yj}$$

..... (18)

$$F_{zB} = \sum F_{zj}$$

..... (19)

$$M_{xB} = \sum F_{zj} \cdot L_{yj} - \sum F_{yj} \cdot L_{xj} + \sum M_{xj}$$

..... (20)

$$M_{yB} = -\sum F_{xj} \cdot L_{zj} + \sum F_{xj} \cdot L_{zj} + \sum M_{yj}$$

..... (21)

$$M_{zB} = -\sum F_{xj} \cdot L_{yj} + \sum F_{yj} \cdot L_{xj} + \sum M_{zj}$$

..... (22)

式 (11)~式 (22) を用いて、杭および地盤の要素の基礎に接している節点の変位、節点力を基礎重心の変位、節点力で置き換えることができる。

加速度および慣性力に関しても変位および変位に関する節点力と全く同様に扱うことができる。

3. 解析例

ここでは、初めに 3 次元解析において側方境界の設定位置が、上部構造、基礎およびその周辺地盤に及ぼす影響について把握し、次に 2 次元解析を行い、3 次元解析と同等の応答結果が得られるための地盤の奥行き方向解析幅の設定方法について検討する。

(1) 解析条件

a) 地盤および入力地震動

3 次元の解析領域の地盤の要素分割は、鉛直方向は自由地盤と同じ 3 m 間隔とし、水平 2 方向は 5 m 間隔とする。地盤の材料定数は、軟弱な地盤を想定して設定する。動的解析のポアソン比  $\nu$  は、非排水状態を仮定して 0.5 に近い値を設定することもあるが、ここでは 0.333, 0.40, 0.45 の 3 種類とし、地層によらず深さ方向には一様な値とし、解析ケースによって値を変えてポアソン比の影響を見る。地盤の材料定数を表-2 に示す。

入力地震動は、EL CENTRO NS 1940 を 100 cm/s<sup>2</sup>

表-2 地盤の材料定数

| 地層     | 単位重量<br>(tf/m <sup>3</sup> ) | せん断弾性係数<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |      |      |
|--------|------------------------------|---------------------------------|-------|------|------|
| 0~18m  | 1.8                          | $4.70 \times 10^3$              | 0.333 | 0.40 | 0.45 |
| 18~30m | 2.0                          | $2.09 \times 10^4$              | 0.333 | 0.40 | 0.45 |
| 30~∞   | 2.0                          | $4.70 \times 10^4$              | 0.333 | 0.40 | 0.45 |

表-3 上部構造・基礎・杭の材料定数

|    | 3階建            |                    | 6階建                |                    | 9階建                |                | 12階建           |                |     |
|----|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-----|
|    | W <sub>i</sub> | K <sub>i</sub>     | W <sub>i</sub>     | K <sub>i</sub>     | W <sub>i</sub>     | K <sub>i</sub> | W <sub>i</sub> | K <sub>i</sub> |     |
| 建  | R F            |                    |                    |                    |                    |                | 30             | 60             |     |
|    | 12 F           |                    |                    |                    |                    |                | 30             | 70             |     |
|    | 11 F           |                    |                    |                    |                    |                | 30             | 80             |     |
|    | 10 F           |                    |                    |                    |                    | 30             | 50             | 30             | 90  |
|    | 9 F            |                    |                    |                    |                    | 30             | 60             | 30             | 100 |
|    | 8 F            |                    |                    |                    |                    | 30             | 70             | 30             | 110 |
|    | 7 F            |                    |                    | 30                 | 40                 | 30             | 80             | 30             | 120 |
|    | 6 F            |                    |                    | 30                 | 50                 | 30             | 90             | 30             | 130 |
|    | 5 F            |                    |                    | 30                 | 60                 | 30             | 100            | 30             | 140 |
|    | 4 F            | 25                 | 30                 | 30                 | 70                 | 30             | 110            | 30             | 150 |
|    | 3 F            | 25                 | 40                 | 30                 | 80                 | 30             | 120            | 30             | 160 |
|    | 2 F            | 25                 | 50                 | 30                 | 90                 | 30             | 130            | 30             | 170 |
| 物  | T <sub>1</sub> | 0.344              | 0.536              | 0.660              | 0.764              |                |                |                |     |
|    | T <sub>2</sub> | 0.134              | 0.201              | 0.246              | 0.284              |                |                |                |     |
|    | T <sub>3</sub> | 0.090              | 0.097              | 0.152              | 0.175              |                |                |                |     |
| 基礎 | W <sub>b</sub> | 25                 | 30                 | 30                 | 30                 |                |                |                |     |
|    | J <sub>b</sub> | 250                | 750                | 1500               | 2500               |                |                |                |     |
| 杭  | A <sub>p</sub> | 0.283              | 0.785              | 1.54               | 2.55               |                |                |                |     |
|    | I <sub>p</sub> | $2.03 \times 10^3$ | $1.56 \times 10^2$ | $6.00 \times 10^2$ | $1.64 \times 10^1$ |                |                |                |     |
|    | W <sub>p</sub> | 0.650              | 1.81               | 3.54               | 5.85               |                |                |                |     |

注) 上部構造・基礎は、杭1本当りに換算した値である。

- W<sub>i</sub>: 各階の重量 (tf)
- K<sub>i</sub>: 各階の剛性 (tf/cm)
- W<sub>b</sub>: 基礎の重量 (tf)
- J<sub>b</sub>: 基礎の慣性2次モーメント (tf・m<sup>4</sup>)
- A<sub>p</sub>: 杭断面積 (m<sup>2</sup>)
- I<sub>p</sub>: 杭の断面2次モーメント (m<sup>4</sup>)
- W<sub>p</sub>: 杭の単位長重量 (tf/m)
- T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>: 上部構造1, 2, 3次固有周期 (s)

に基準化し、これを地表面の地震動としてGL-54 mでの入射波を算出する。この入射波を2倍したものを入力とし、底面 (GL-54 m) に粘性境界を設定して自由地盤の応答を求める。

入力は、x方向の一方方向とする。解析時間間隔は0.002秒、ニューマークのβは1/4とする。解析時間は10秒間とする。地盤の減衰は、最大歪が $1 \sim 5 \times 10^{-4}$ の場合には等価減衰で8~10%となる。一方、上部構造の減衰は、弾性領域では1~2%となる。ここでは、3次元解析の計算時の記憶容量の制約から、地盤と上部構造とで同一の減衰を用いることとし、両者の中間の5%の剛性比例型減衰とする。これらのパラメータは、以後の解析においても特にことわりがない限り一定とする。地盤の1次と2次の固有周期は0.59秒、0.26秒である。

b) 上部構造および杭基礎

上部構造は、建築構造物を想定し、3, 6, 9, 12階建ての4種類とする。上部構造に偏心は無いものとし、水平面内の回転は固定とする。杭は長さ21 mとし、地層と同じ3 m間隔で7要素とする。杭配列は2×2, 3×3,

表-4 境界設定位置による応答値の変化 (ν=0.333)

| 建物9階建て                                 | 5倍                     | 4倍    | 3倍    | 2倍    |
|--|------------------------|-------|-------|-------|
| 【最大加速度】                                |                        |       |       |       |
| 建物 RF                                  | 452                    | 1.03  | 1.03  | 0.96  |
| 6F                                     | 258                    | 1.06  | 1.11  | 1.13  |
| 3F                                     | 124                    | 1.04  | 1.10  | 1.18  |
| 基礎 BF                                  | 127                    | 1.00  | 0.95  | -1.02 |
| 基礎ロッキング                                | 0.0190                 | 1.02  | 1.03  | 1.01  |
| 周辺地盤 GL-3m                             | 101                    | 1.03  | 1.01  | 0.89  |
| GL-9m                                  | 74.3                   | 1.03  | 1.05  | 0.99  |
| GL-21m                                 | 57.1                   | 0.98  | 0.95  | 0.90  |
| 直下地盤 GL-3m                             | 108                    | 1.03  | 1.00  | -0.99 |
| GL-9m                                  | 75.3                   | 1.05  | 1.09  | 1.00  |
| GL-21m                                 | 57.8                   | 0.98  | 0.95  | 0.90  |
| 【最大歪】                                  |                        |       |       |       |
| 周辺地盤 第1層                               | $5.92 \times 10^{-4}$  | 1.08  | 1.19  | 1.42  |
| (ν <sub>xz</sub> ) 第5層                 | $4.62 \times 10^{-4}$  | 1.03  | 1.00  | -0.84 |
| 第9層                                    | $1.37 \times 10^{-4}$  | 0.96  | 0.83  | 0.80  |
| 直下地盤 第1層                               | $-3.81 \times 10^{-4}$ | -1.05 | -1.23 | -1.27 |
| (ν <sub>xz</sub> ) 第5層                 | $-5.75 \times 10^{-4}$ | 1.02  | 1.00  | 0.86  |
| 第9層                                    | $-1.49 \times 10^{-4}$ | 1.04  | 1.07  | 1.01  |
| 杭軸歪 第1層                                | $1.00 \times 10^{-4}$  | 0.96  | -0.95 | -0.90 |
| (ε <sub>x</sub> ) 第3層                  | $9.31 \times 10^{-5}$  | 0.96  | 0.89  | -0.82 |
| 第7層                                    | $4.79 \times 10^{-5}$  | 0.96  | 0.91  | 0.88  |
| 杭曲げ歪 第1層                               | $-8.69 \times 10^{-4}$ | 1.15  | 1.37  | 1.40  |
| (M <sub>r</sub> /EI <sub>r</sub> ) 第3層 | $6.30 \times 10^{-5}$  | 1.12  | 1.43  | 1.61  |
| 第7層                                    | $-1.59 \times 10^{-4}$ | 1.02  | 0.99  | 0.91  |

注) 加速度の単位はcm/s<sup>2</sup>、ただし、ロッキングの単位はrad/s<sup>2</sup>

4×4, 5×5, 6×6本の5種類とし、5 m間隔で配置する。基礎の幅は杭配置のそれぞれに対応して5 m×5 m, 10 m×10 m, 15 m×15 m, 20 m×20 m, 25 m×25 mとする。基礎の深さは、基礎の根入れ効果を除外するために零とする。上部構造および基礎の材料定数は4種類の建物毎に、杭1本当たりの材料定数が一定になるように設定する。上部構造、基礎および杭の材料定数を表-3に示す。2次元解析では、要素分割等は3次元解析に準じるものとするが、杭の剛性、質量は奥行き方向の杭本数倍する。また、地盤の解析領域幅は、加振方向(x方向)は3次元解析と同じとし、奥行き方向(y方向)は、建物の奥行き幅に係数αを乗じた値とする。係数αは1.0~3.0で0.1きざみとする。

(2) 解析結果

a) 境界設定位置の影響

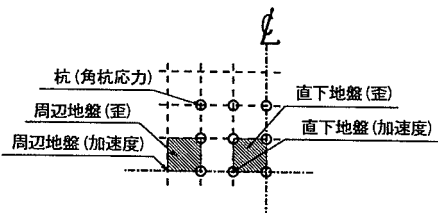
3次元解析において、境界の設定位置が構造物、地盤および杭の応答に与える影響について検討する。建物は3階建てと9階建ての2種類とし、杭配列は5×5本、建物の平面形は20 m×20 mとする。地盤の側方境界は、境界から境界までの幅が建物幅の2, 3, 4, 5倍の4種類とする。解析結果の一例として建物が9階建て、地盤のポアソン比が0.333の場合の結果を表-4に、同様にポアソン比が0.40の場合の結果を表-5に示す。表は、境界の位置が建物幅の5倍の結果のみ応答値で示し、他はこれに対する比で示した。

表-4において、境界の位置を建物幅の2倍, 3倍, 4倍と変えた時に応答値の比が1±0.2の範囲よりも大きく変化する箇所は、建物直下および建物周辺の地盤の第

表一五 境界設定位置による応答値の変化 ( $\nu=0.40$ )

| 建物9階建て                | 5倍                     | 4倍   | 3倍   | 2倍    |
|-----------------------|------------------------|------|------|-------|
| <b>【最大加速度】</b>        |                        |      |      |       |
| 建物 RF                 | 343                    | 1.00 | 1.01 | 1.05  |
| 6F                    | 217                    | 1.01 | 1.03 | 1.04  |
| 3F                    | 124                    | 1.02 | 1.05 | 1.01  |
| 基礎 BF                 | 87.9                   | 1.01 | 1.03 | 1.05  |
| 基礎ロッキング               | 0.0122                 | 1.01 | 1.04 | 1.04  |
| 周辺地盤 GL-3m            | 86.8                   | 1.01 | 1.03 | 1.05  |
| GL-9m                 | 68.8                   | 1.01 | 1.04 | 1.07  |
| GL-21m                | 51.9                   | 0.99 | 0.98 | 0.97  |
| 直下地盤 GL-3m            | 86.0                   | 1.01 | 1.03 | 1.06  |
| GL-9m                 | 69.5                   | 1.01 | 1.04 | 1.08  |
| GL-21m                | 50.9                   | 1.00 | 0.98 | 0.97  |
| <b>【最大歪】</b>          |                        |      |      |       |
| 周辺地盤 第1層              | $4.21 \times 10^{-4}$  | 1.02 | 1.04 | 1.14  |
| ( $\gamma_{xz}$ ) 第3層 | $3.88 \times 10^{-4}$  | 1.00 | 0.97 | 0.85  |
| 第7層                   | $1.45 \times 10^{-4}$  | 0.98 | 0.92 | 0.89  |
| 直下地盤 第1層              | $1.83 \times 10^{-4}$  | 0.99 | 0.99 | 0.95  |
| ( $\gamma_{xz}$ ) 第3層 | $-2.68 \times 10^{-4}$ | 1.01 | 1.02 | 1.02  |
| 第7層                   | $-1.23 \times 10^{-4}$ | 1.02 | 1.04 | 1.07  |
| 杭軸歪 第1層               | $7.56 \times 10^{-6}$  | 1.00 | 1.00 | 1.00  |
| ( $\epsilon_z$ ) 第3層  | $7.06 \times 10^{-5}$  | 1.00 | 0.99 | 0.97  |
| 第7層                   | $3.60 \times 10^{-5}$  | 0.99 | 0.99 | 0.97  |
| 杭曲げ歪 第1層              | $-4.15 \times 10^{-4}$ | 1.00 | 0.99 | 0.90  |
| ( $M_r/EI_r$ ) 第3層    | $3.41 \times 10^{-5}$  | 1.01 | 1.01 | -1.08 |
| 第7層                   | $-1.36 \times 10^{-4}$ | 1.01 | 1.03 | 1.05  |

注) 加速度の単位は  $cm/s^2$ 、ただし、ロッキングの単位は  $rad/s^2$



表中の平面位置

一層の歪、杭頭付近の曲げ歪であり、これらは境界位置の影響を受け易いと言える。

表一四では、境界の位置が建物幅の4倍の場合に、杭頭付近の曲げ歪を除いて、応答値の比が  $1 \pm 0.05$  の範囲に収まっている。このことから、地盤のポアソン比が0.333と比較的小さい場合には、境界の設定位置は、建物幅の4倍またはそれ以上の位置とする必要があると言える。

表一五では、境界の位置が建物幅の3倍の場合に、応答値の比が  $1 \pm 0.05$  の範囲に収まっている。境界の位置が建物幅の4倍の場合には、応答値の比が  $1 \pm 0.02$  であり、境界の影響はほとんど無い。

表一四と表一五との比較から、ポアソン比によって境界の影響が大きく変化し、ポアソン比が0.40以上になると、ポアソン比が0.333のときと比較して急激に境界の影響が小さくなると言える。

b) 3次元解析による杭応力

3次元の動的相互作用解析により杭の応力を求める。境界の設定位置は、上記の検討結果から、建物幅の4倍の位置とする。

表一六 地震応答解析による杭頭の荷重分担率 ( $\nu=0.45$ )

|       |      | 2×2  |      | 3×3  |      | 4×4  |      | 5×5  |      |      | 6×6  |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       |      | 横第1列 | 横第2列 | 横第1列 | 横第2列 | 横第1列 | 横第2列 | 横第1列 | 横第2列 | 横第3列 | 横第1列 | 横第2列 | 横第3列 |
| 3階建て  | 縦第1列 | 1.00 | 1.17 | 1.14 | 1.36 | 1.18 | 1.55 | 1.26 | 1.22 | 1.76 | 1.37 | 1.28 |      |
|       | 縦第2列 |      | 0.72 | 0.61 | 0.82 | 0.64 | 0.93 | 0.67 | 0.62 | 1.05 | 0.70 | 0.63 |      |
|       | 縦第3列 |      |      |      |      |      | 0.88 | 0.66 | 0.61 | 0.95 | 0.67 | 0.59 |      |
|       | 2次元  | 0.95 | 0.80 | 0.81 | 0.97 | 0.84 | 1.09 | 0.85 | 0.81 | 1.26 | 0.92 | 0.83 |      |
| 6階建て  | 縦第1列 | 1.00 | 1.18 | 1.29 | 1.34 | 1.22 | 1.53 | 1.27 | 1.23 | 1.72 | 1.36 | 1.28 |      |
|       | 縦第2列 |      | 0.56 | 0.59 | 0.77 | 0.67 | 0.90 | 0.70 | 0.66 | 1.01 | 0.74 | 0.67 |      |
|       | 縦第3列 |      |      |      |      |      | 0.82 | 0.68 | 0.64 | 0.90 | 0.70 | 0.63 |      |
|       | 2次元  | 1.13 | 0.59 | 0.87 | 0.85 | 0.86 | 0.96 | 0.84 | 0.81 | 1.10 | 0.87 | 0.81 |      |
| 9階建て  | 縦第1列 | 1.00 | 1.18 | 1.31 | 1.35 | 1.18 | 1.53 | 1.22 | 1.18 | 1.71 | 1.30 | 1.22 |      |
|       | 縦第2列 |      | 0.51 | 0.64 | 0.78 | 0.69 | 0.93 | 0.72 | 0.67 | 1.05 | 0.76 | 0.69 |      |
|       | 縦第3列 |      |      |      |      |      | 0.84 | 0.69 | 0.64 | 0.92 | 0.71 | 0.64 |      |
|       | 2次元  | 1.19 | 0.54 | 0.98 | 0.88 | 0.89 | 1.00 | 0.86 | 0.82 | 1.12 | 0.89 | 0.82 |      |
| 12階建て | 縦第1列 | 1.00 | 1.23 | 1.26 | 1.39 | 1.17 | 1.57 | 1.20 | 1.16 | 1.74 | 1.27 | 1.19 |      |
|       | 縦第2列 |      | 0.48 | 0.62 | 0.77 | 0.67 | 0.94 | 0.71 | 0.66 | 1.08 | 0.76 | 0.68 |      |
|       | 縦第3列 |      |      |      |      |      | 0.84 | 0.69 | 0.63 | 0.94 | 0.71 | 0.63 |      |
|       | 2次元  | 1.17 | 0.56 | 1.01 | 0.91 | 0.90 | 1.04 | 0.88 | 0.83 | 1.17 | 0.90 | 0.83 |      |

表一七 静的解析による杭頭の荷重分担率 ( $\nu=0.45$ )

( )は動的解析

|      | 横第1列           | 横第2列           | 横第3列           |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 縦第1列 | 1.53<br>(1.53) | 1.11<br>(1.22) | 1.06<br>(1.18) |
| 縦第2列 | 1.05<br>(0.93) | 0.71<br>(0.72) | 0.65<br>(0.67) |
| 縦第3列 | 0.98<br>(0.84) | 0.68<br>(0.69) | 0.62<br>(0.64) |

(建物9階、杭配置  $5 \times 5$ ,  $\nu=0.45$ )

各杭の杭頭の最大せん断力から求めた荷重分担率を表一六に示す。荷重分担率は、各杭の最大せん断力を平均負担せん断力で除した値と定義する。

表一六の3次元解析の荷重分担率において、同一の杭配置で建物階数の変化の影響を見ると、建物の階数が変わっても荷重分担率には大きな変化はみられない。

表一七に静的解析の結果から求めた建物9階、杭配置  $5 \times 5$  本の荷重分担率を示す。静的解析は、3次元の動的解析と同一のモデルを用いて、基礎重心に水平力を作用させ、転倒モーメントは考慮せず解析した。水平力は、上部構造から基礎に作用する水平力の最大値とし、動的解析の結果を用いた。

静的解析と動的解析の荷重分担率を比較すると、両者はほぼ一致している。

図一三に角杭の地中の変位とせん断力、曲げモーメントのそれぞれの最大値分布を示す。ただし、図は符号を考慮せず絶対値で示した。

杭頭のせん断力、曲げモーメントは、静的解析と動的解析とがほぼ一致している。しかし、杭先端部では、静的解析のせん断力、曲げモーメントがほぼ零になっているが、動的解析ではせん断力、曲げモーメントともやや大きくなっている。また、変位分布形は両者が大きく異

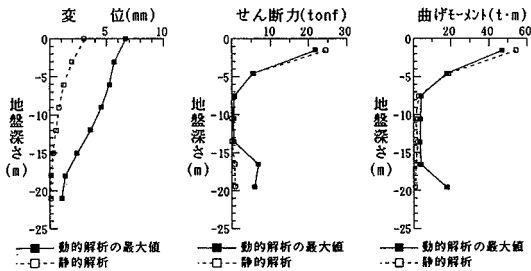


図-3 角杭の応力分布 ( $\nu=0.45$ )

表-8 奥行き方向解析幅による上部構造の応答加速度比の変化 ( $\nu=0.45$ )

| 3次元解析結果<br>Acc(cm/s <sup>2</sup> ) | 2次元解析の奥行き方向解析幅比 |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
|                                    | 1.0             | 1.2  | 1.4  | 1.6  | 1.8  | 2.0  | 3.0  |
| RF 302                             | 0.91            | 0.96 | 1.00 | 1.03 | 1.05 | 1.07 | 1.13 |
| 9F 288                             | 0.91            | 0.96 | 1.00 | 1.03 | 1.05 | 1.07 | 1.14 |
| 8F 264                             | 0.91            | 0.96 | 1.00 | 1.03 | 1.05 | 1.07 | 1.14 |
| 7F 234                             | 0.91            | 0.96 | 1.00 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.14 |
| 6F 199                             | 0.91            | 0.96 | 0.99 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.14 |
| 5F 162                             | -0.92           | 0.96 | 0.99 | 1.02 | 1.04 | 1.06 | 1.13 |
| 4F 128                             | -0.94           | 0.96 | 0.99 | 1.02 | 1.04 | 1.06 | 1.12 |
| 3F 98.3                            | 0.94            | 0.97 | 1.00 | 1.01 | 1.03 | 1.04 | 1.09 |
| 2F 74.0                            | 0.96            | 0.98 | 1.00 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.05 |
| BF 89.8                            | 0.96            | 0.98 | 1.00 | 1.01 | 1.02 | 1.02 | 1.04 |
| ロッキング $1.17 \times 10^{-2}$        | 1.06            | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.83 | 0.69 |

なっている。

このことは、杭頭の応力は上部構造の慣性力の影響が支配的であるが、杭先端部では地盤変形による応力が支配的であることを示している。これは、杭先端が比較的硬い地盤に根入れされているためと考えられる。

c) 2次元解析における地盤の奥行き方向解析幅の影響

一般的に変位では1次モードが支配的になり、これに対して加速度では、相対的に2次、3次のモードの影響が強く現れる。そこで、ここでは加速度の最大値を用いて、2次元解析と3次元解析とを比較する。

一例として建物9階建て、杭配置5×5本の建物応答加速度を表-8に示す。表-8では2次元解析の結果を3次元解析の結果に対する比で示した。以下では、上部構造の応答加速度比を $\beta_{acc}$ 、基礎のロッキング角加速度比を $\beta_R$ と記す。また、上部構造の応答加速度は、基礎のロッキングとスウェイの影響を除いて表示している(基礎に対する相対加速度+基盤への入力加速度)。

表-8において上部構造の基礎に対する相対加速度が3次元解析と2次元解析とで一致する( $\beta_{acc}$ が1.0となる) $\alpha$ は、1.4であり、基礎のロッキング角加速度が3次元解析と2次元解析とで一致する( $\beta_R$ が1.0となる) $\alpha$ は、1.2である。 $\beta_{acc}$ および $\beta_R$ が1.0となる $\alpha$ は、それぞれに異なっている。従って、基礎のロッキングとスウェイを考慮した上部構造の応答加速度が、3次元解析と2次元解析とで完全に一致するような $\alpha$ は一般に

表-9 上部構造の相対加速度と基礎のロッキングが $1 \pm 0.03$ に収まる $\alpha$ の値 ( $\nu=0.45$ )

|     | 杭 2×2 |     | 杭 3×3    |     | 杭 4×4 |     | 杭 5×5    |     | 杭 6×6 |     |
|-----|-------|-----|----------|-----|-------|-----|----------|-----|-------|-----|
|     | 1.5   | 2.0 | 2.0      | 2.5 | 1.5   | 2.0 | 2.5      | 1.5 | 2.0   | 2.5 |
| 3階  | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     |
| 6階  | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     |
| 9階  | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     |
| 12階 | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     | 基礎のロッキング |     | 上部構造  |     |

表-10 奥行き方向解析幅の最適値

| 建   | 階   | 杭 配 置 |     |     |     |     |
|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
|     |     | 2×2   | 3×3 | 4×4 | 5×5 | 6×6 |
| 3階  | 2.1 | 1.7   | 1.5 | 1.6 | 1.4 |     |
|     | 2.0 | 1.6   | 1.2 | 1.4 | 1.3 |     |
|     | 1.9 | 1.6   | 1.2 | 1.1 | 1.2 |     |
| 6階  | 2.1 | 1.7   | 1.5 | 1.3 | 1.2 |     |
|     | 2.0 | 1.7   | 1.4 | 1.2 | 1.0 |     |
|     | 2.0 | 1.6   | 1.4 | 1.1 | 0.9 |     |
| 9階  | 2.1 | 1.8   | 1.5 | 1.3 | 1.2 |     |
|     | 2.2 | 1.7   | 1.4 | 1.3 | 1.2 |     |
|     | 2.0 | 1.7   | 1.4 | 1.2 | 1.1 |     |
| 12階 | 2.3 | 1.7   | 1.5 | 1.4 | 1.3 |     |
|     | 2.1 | 1.7   | 1.5 | 1.3 | 1.3 |     |
|     | 2.1 | 1.6   | 1.4 | 1.3 | 1.2 |     |
| 平均値 |     | 2.1   | 1.7 | 1.4 | 1.3 | 1.2 |

上段:  $\nu=0.333$   
中段:  $\nu=0.40$   
下段:  $\nu=0.45$

は存在しない。そこで、ここでは基礎のロッキングとスウェイを考慮した上部構造の応答加速度について、3次元解析と2次元解析とで誤差が最小となるように $\alpha$ を定める。

上部構造は「申団子」モデルとしているので、基礎のスウェイの加速度が3次元解析と2次元解析とで一致していれば、上部構造の基礎に対する相対加速度は一致する(表-8の $\alpha$ が1.4の欄参照)。従って、上部構造の相対加速度は、基礎のスウェイの加速度で評価できる。従って、上部構造の絶対加速度の誤差を最小にする $\alpha$ は、基礎のスウェイの加速度とロッキングから両者の誤差が一致する $\alpha$ となる。または、両者の誤差のどちらか大きい方を最小にする $\alpha$ となる。例えば、表-8では $\alpha$ が1.2で最適値となる。

上部構造の応答加速度比 $\beta_{acc}$ が $1 \pm 0.03$ の範囲に収まる $\alpha$ と、基礎のロッキング角加速度比 $\beta_R$ が $1 \pm 0.03$ に収まる $\alpha$ とを一覧表にして表-9に示す。

6階建て建物の場合に $\beta_{acc}$ が $1 \pm 0.03$ となる $\alpha$ の範囲が広がっているが、これは地盤の1次卓越周期0.59秒と建物の基本周期0.53秒とがほぼ一致しているためと考えられる。

$\beta_{acc}$ と $\beta_R$ とが同時に $1 \pm 0.03$ に収まる $\alpha$ の値は、建物の階数によってはあまり変化せず、杭本数(建物の平面規模)によって変化する。また、杭本数が多くなると $\beta_{acc}$ が $1 \pm 0.03$ に収まる $\alpha$ と $\beta_R$ が $1 \pm 0.03$ に収まる $\alpha$ とがかけ離れる傾向にあり、両者が同時に $1 \pm 0.03$ の範囲に入らない場合もある。これは杭本数が多くなると群杭効果等の3次元の相互作用の影響が強くなるためと考

表-11 上部構造の絶対加速度比 ( $\nu=0.45$ )

|   |      | 杭配置        |       |       |       |       |       |
|---|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |      | 2×2        | 3×3   | 4×4   | 5×5   | 6×6   |       |
| 建 | 3階建  | RF         | 0.95  | 0.97  | 1.00  | 1.01  | 1.03  |
|   |      | $\theta_v$ | 0.96  | 0.94  | 0.90  | 0.91  | 0.96  |
| 物 | 6階建  | RF         | 0.99  | 1.00  | 0.99  | 0.99  | 0.97  |
|   |      | $\theta_v$ | 0.98  | 0.98  | 0.99  | 0.94  | 0.91  |
| 階 | 9階建  | RF         | 0.81  | 0.90  | 0.91  | 0.94  | 0.94  |
|   |      | $\theta_v$ | 0.99  | 1.00  | 1.00  | 0.97  | 0.96  |
| 数 | 12階建 | RF         | 1.01  | 1.00  | 0.99  | 1.00  | 1.01  |
|   |      | $\theta_v$ | 1.00  | 0.99  | 0.99  | 0.99  | 1.01  |
|   |      | e          | 0.185 | 0.108 | 0.089 | 0.069 | 0.065 |

2F~RF: 上部構造の絶対加速度比  
 BF: 基礎のスウェイの絶対加速度比  
 $\theta_v$ : ロッキングの角加速度比  
 e: 誤差の標準偏差

えられる。

$\alpha$ の最適値を表-10に示す。ポアソン比が大きくなると、 $\alpha$ の値が小さくなる傾向が認められるが0.1程度の差であり、 $\alpha$ の最適値はポアソン比によって変化しないと見なせる。 $\alpha$ の最適値は、建物の階数による変化は小さく、杭の本数が多くなるに従って1.0に近づく傾向が認められる。 $\alpha$ の最適値は、杭配置が2×2, 3×3, 4×4, 5×5, 6×6のそれぞれについて平均値をとると2.1, 1.7, 1.4, 1.3, 1.2となった。

d) 3次元解析と2次元解析との応答の比較

最適な $\alpha$ の平均値(表-10参照)を用いた場合の上部構造の絶対加速度比と誤差の標準偏差を表-11に示す。建物が3階, 6階の場合は誤差の標準偏差がほぼ10%以下で良く一致している。建物が9階, 12階の場合は、標準偏差が20%以上となる場合もありやや誤差が大きくなっている。これは、基本モードが一致していても建物が高くなると高次モードの差がより強く現れてくるためと考えられる。

上部構造9階建て、杭配置5×5本のケースについて、RF, 4F, BFの加速度波形とロッキングの角加速度の波形および杭頭のせん断歪、曲げ歪のそれぞれの波形について3次元と2次元との解析を対比させて図-4, 5, 6に示す。

上部構造の絶対加速度の形状は良く一致しており、最大値の差も10%以下となっている。基礎のスウェイ、ロッキングの波形は、最大値、形状とも良く一致している。このことは、奥行き方向解析幅の最適値として定め

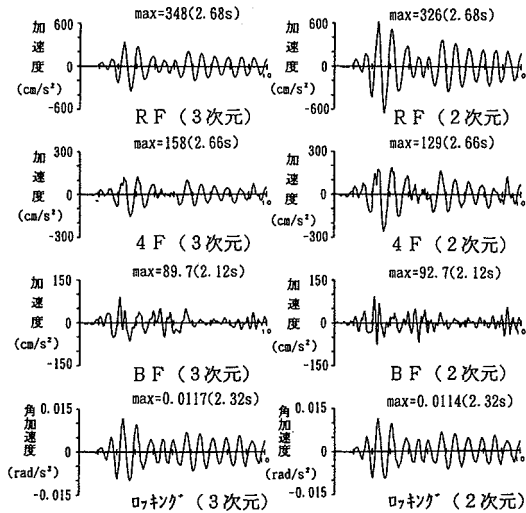


図-4 上部構造の応答比較 ( $\nu=0.45$ , 建物9階, 杭5×5)

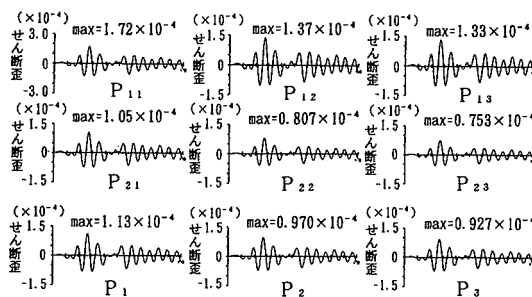
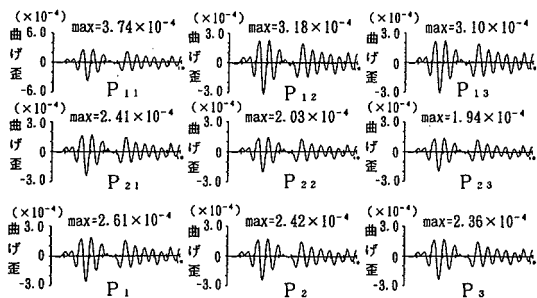


図-5 杭頭のせん断歪 ( $\nu=0.45$ )



凡例

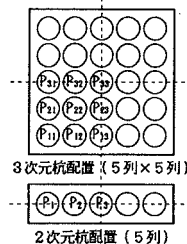


図-6 杭頭の曲げ歪 ( $\nu=0.45$ )

表-12 荷重分担率の変換係数 ( $\nu=0.45$ )

|     |         | 杭 配 置       |             |             |             |
|-----|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     |         | ( )は標準偏差    |             |             |             |
|     |         | 3×3         | 4×4         | 5×5         | 6×6         |
| 3階  | $\xi_1$ | 1.44 (0.03) | 1.41 (0.00) | 1.46 (0.03) | 1.48 (0.06) |
|     | $\xi_2$ | 0.85 (0.08) | 0.81 (0.05) | 0.81 (0.04) | 0.79 (0.03) |
|     | $\xi_3$ |             |             | 0.78 (0.02) | 0.73 (0.02) |
| 6階  | $\xi_1$ | 1.83 (0.24) | 1.50 (0.08) | 1.55 (0.04) | 1.57 (0.01) |
|     | $\xi_2$ | 0.86 (0.13) | 0.84 (0.06) | 0.87 (0.05) | 0.86 (0.04) |
|     | $\xi_3$ |             |             | 0.83 (0.02) | 0.80 (0.02) |
| 9階  | $\xi_1$ | 1.91 (0.40) | 1.44 (0.10) | 1.47 (0.05) | 1.49 (0.02) |
|     | $\xi_2$ | 0.84 (0.13) | 0.83 (0.05) | 0.87 (0.05) | 0.88 (0.04) |
|     | $\xi_3$ |             |             | 0.81 (0.02) | 0.80 (0.02) |
| 12階 | $\xi_1$ | 1.87 (0.43) | 1.42 (0.12) | 1.43 (0.07) | 1.44 (0.03) |
|     | $\xi_2$ | 0.77 (0.11) | 0.80 (0.05) | 0.85 (0.05) | 0.86 (0.04) |
|     | $\xi_3$ |             |             | 0.79 (0.02) | 0.79 (0.02) |
| 全体  | $\xi_1$ |             | 1.52 (0.20) |             |             |
|     | $\xi_2$ |             | 0.84 (0.07) |             |             |
|     | $\xi_3$ |             | 0.79 (0.03) |             |             |

た $\alpha$ の値の妥当性を示している。

3次元解析の杭頭の歪波形は、杭の位置によって最大値は異なっているが、歪波形の形状には大差がない。また、2次元解析の杭頭の歪波形と比較しても形状には大差がなく比較的良く一致している(図-5, 6参照)。このことは、2次元解析と3次元解析との最大値に基づいて前者の杭頭応力を後者のそれに変換できる可能性を示している。

2次元解析の杭頭のせん断力の一例を3次元解析の結果と合わせて表-6に示した。表の値は、2次元解析結果のせん断力を3次元解析結果の平均負担せん断力で除して分担率として示した。

せん断力 $Q$ に加振方向の杭列を表す添え字 $i$ と、奥行き方向の杭列を表す添え字 $j$ とを付けて、3次元解析の結果は $Q_{ij}$ 、2次元解析の結果は $Q_i$ で、それぞれ表すものとする。2次元解析の $Q_i$ を用いて、3次元解析の $Q_{ij}$ を近似的に求めるために、変換係数 $\xi_j$ を次式で定義する。

$$Q_{ij} = \xi_j \cdot Q_i \dots \dots \dots (23)$$

せん断力 $Q$ の代わりに表-6の荷重分担率 $\eta$ を用いると、

$$\xi_j = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{ij}/\eta_i)}{n} \dots \dots \dots (24)$$

と表せる。ここに、 $n$ は加振方向の杭列数である。表-12に式(24)から求めた変換係数 $\xi$ の一覧表と標準偏差とを示す。杭配置が3×3の場合には、外側の杭列の変換係数 $\xi_1$ およびその標準偏差が、他と比較して大きくなっているが、全体的には変換係数は、建物階数、杭配置による有為な変化は認められずほぼ一定の値となっている。そこで、変換係数を全体で1つの値に定めた。

それぞれのケース毎の結果および全体の結果も併に、奥行き方向の内側の杭列の変換係数 $\xi_2$ 、 $\xi_3$ の標準偏差

表-13 ポアソン比による変換係数の変化

|    |         | ポアソン比       |             |             |
|----|---------|-------------|-------------|-------------|
|    |         | 0.333       | 0.40        | 0.45        |
| 全体 | $\xi_1$ | 1.42 (0.29) | 1.49 (0.11) | 1.52 (0.20) |
|    | $\xi_2$ | 0.84 (0.08) | 0.84 (0.06) | 0.84 (0.07) |
|    | $\xi_3$ | 0.78 (0.05) | 0.79 (0.03) | 0.79 (0.03) |

が0.1以下と小さくなっている。このことは、3次元解析の内側の杭列のせん断力と2次元解析のせん断力とが一つの列ごとにほぼ比例していることを表している。つまり、内側の杭列の加振方向のせん断力の変化は、2次元解析においてもある程度考慮できることを示している。

変換係数 $\xi_1$ の標準偏差は、相対的に大きく、3次元解析の外側の杭列のせん断力が2次元解析の結果と単純に比例しないことを表している。これは、角杭が杭と地盤との相互作用の影響を強く受けているためと考えられる。

表-13に全体で定めた変換係数の値とポアソン比の関係を示した。ポアソン比による変換係数の変化は、極めて小さく、変換係数は、ポアソン比によらず一定と見なせる。

#### 4. 結 論

本研究は、上部構造-杭基礎-地盤系の地震応答解析を3次元線形有限要素法で行い、その結果に基づいて2次元有限要素法で同様な解析を行う場合の地盤の奥行き方向解析幅の影響等について検討したものである。

本論では、地盤の境界処理方法として、境界での応答が自由地盤の応答に等しいものとして処理する方法を用いた。初めに地盤の境界設定位置が構造物、杭および周辺地盤に与える影響について検討した。そして、建物の階数を3, 6, 9, 12階の4種類、杭配置を2×2, 3×3, 4×4, 5×5, 6×6の5種類について、3次元で構造物-杭-地盤系の地震応答解析を行い、構造物の応答、杭の荷重分担率等を求めた。次に、2次元有限要素法で、構造物の奥行き幅に対する地盤の奥行き方向解析幅を1.0~3.0倍に変えて解析し、2次元の上部構造の応答が3次元のそれと一致する条件を検討した。最後に、その条件に基づいて解析した結果と3次元解析の結果との杭応力の差異について検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 地盤境界の影響は、地盤のポアソン比によって大きく変化する。
- (2) ポアソン比が0.333の場合には、境界の影響が大きく、境界の設定位置を建物の幅の4倍以上とする必要がある。
- (3) ポアソン比が0.4以上の場合には、ポアソン比が0.333の場合と比較して境界の影響が小さく、境界の設



定位置を建物の幅の3倍とすれば、境界の影響は十分小さくなり、4倍とすればその影響はほとんど無い。

(4) 構造物-杭-地盤系の3次元線形地震応答解析の各杭の最大せん断力から求めた荷重分担率は、同じモデルによる3次元静的解析から求めた荷重分担率とほぼ同じであった。

(5) 上部構造物から基礎に加わる地震時の最大水平力を静的に基礎に作用させた結果は、杭頭および杭頭付近の曲げ応力、せん断力とも地震応答解析の結果と良く一致した。これは、杭頭の応力が上部構造の慣性力の影響を強く受けていることを示している。

(6) しかし、地盤定数が変化する杭先端付近では、地震応答解析結果と静的な解析結果とに差がある。これは、杭先端部の応力が地盤変形の影響を強く受けていることを示している。

(7) 2次元解析において、地盤の奥行き方向解析幅の建物の奥行き幅に対する比を $\alpha$ とすると、2次元と3次元との解析が一致する $\alpha$ は、上部構造の基礎に対する相対加速度と基礎のロッキング角加速度とでは、それぞれに異なっている。

(8) 3次元解析の上部構造の応答と2次元解析のそれとの差が最小になるように最適な $\alpha$ を定めると、地盤のポアソン比、建物の階数には関係なく杭の配置によってほぼ一定値になる。

(9) 最適な $\alpha$ を用いて2次元で解析した応答結果を3次元解析のそれとを比較すると、上部構造の絶対加速度の波形は、比較的良く一致した。また、杭頭のせん断歪、曲げ歪の波形の形状は、良い一致を示した。

(10) 2次元解析の杭頭の荷重分担率を3次元のそれに変換する係数は、地盤のポアソン比、建物階数、杭配置によらず杭列毎にほぼ一定値となる。

最後に、本研究では、地盤材料を線形として、2次元と3次元との解析結果の比較を行った。しかし、杭頭お

よび基礎の周辺地盤では局部的に大きな歪が発生しており、今後は材料非線形性と杭と地盤とのすべり、引き抜きを考慮した解析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 臨海部構造安全委員会：臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討報告書、(財)日本建築防災協会、1992年3月。
- 2) 久野雅祥・関 崇夫・林田敏弘・関松太郎・谷垣正治：東京湾臨海部に立地する高層建築物の基礎構造の応答特性(その1 建物-地盤連成系応答解析)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造I, pp.599~600, 1992年8月。
- 3) 清水勝美・田蔵 隆・横田治彦・片岡俊一・佐武直紀：杭支持高層建物の地震時挙動、清水建設研究報告、第56号, pp.17~29, 1992年10月。
- 4) 小坪清真・高西照彦：不規則な配置をもつ杭径の異なる群杭に対する横方向群杭効果の解析法、土木学会論文集、第277号, pp.15~24, 1978年9月。
- 5) 富永晃司・山肩邦男：地盤の塑性状態を考慮した群杭の水平抵抗理論、日本建築学会論文報告集、第317号, pp.32~40, 1982年7月。
- 6) 竹宮宏和・角谷 務・佐伯光昭：離散化手法による群杭基礎の動的解析法と動特性評価、土木学会論文集、第416号/I-13, pp.411~418, 1990年4月。
- 7) 大平 彰・田蔵 隆・中松 新・清水勝美：地盤反力の三次元的効果を考慮した群杭基礎構造の二次元有限要素法解析モデルの作成方法、土木学会論文集、第356号/I-3, pp.303~312, 1985年4月。
- 8) 高木政美・久野雅祥：東京湾臨海部に立地する高層建築物の基礎構造の応答特性(その2 応答変位法の建築構造物への適用)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造I, pp.601~602, 1992年8月。
- 9) 石原哲哉・三浦房紀：3次元構造物-地盤系の非線形地震応答解析、土木学会論文集、第465号/I-23, pp.145~154, 1993年4月。

(1993.6.15 受付)

## COMPARISON OF SEISMIC RESPONSES OF 3-DIMENSIONAL STRUCTURE-PILE FOUNDATION-GROUND INTERACTION SYSTEMS WITH THOSE OF 2-DIMENSIONAL SYSTEMS

Tetsuya ISHIHARA and Fusanori MIURA

The purpose of this study is to investigate the commonness and difference between seismic responses of 3-dimensional structure-pile foundation-ground systems and those of 2-dimensional systems. In performing the 2-dimensional FEM analysis, the determination of thickness of the ground model is one of the most difficult problems. We obtained the optimum ratio of the thickness of ground to that of foundation structure which give the least difference between 3-D and 2-D analysis by performing parametric analysis by changing the number of piles and the height of structures. The results indicate that the responses of 3-D structure-pile foundation-ground systems can be estimated from the responses of 2-D systems by introducing correction coefficients. The coefficients were almost constant according to the number of rows of piles irrespective of the height of the structure.