

# 杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価技術

廣瀬 榛名 勝二 理智  
藤森 健史

## Evaluation Technique of Pile Stress Acting on Large-scale Buildings Supported by Piles with Different Lengths During Earthquakes

Haruna Hirose Michito Shoji  
Takeshi Fujimori

### Abstract

The evaluation of pile stress during an earthquake for piles with different pile lengths is complicated; therefore, seismic design must be considered. In addition, the “Recommendations for Design of Building Foundation” was revised in 2019, and a new pile design method for large earthquakes has been proposed. Therefore, in this study, a technique to evaluate pile stress that is applicable to practical designs is developed, and an application example is presented. The findings obtained are as follows: 1) The established evaluation technique is effective; 2) the inertial force and soil displacement on the pile should be loaded in the same and opposite directions; and 3) the soil response for each pile position should be considered.

### 概要

地震時杭応力において、杭長が異なる杭が混在することの影響の評価は、難易度が高く、手間もかかるため、一般的な耐震設計には、十分に取り入れられておらず、課題となっている。さらに、2019年に建築基礎構造設計指針<sup>1)</sup>が改定され、杭に関する大地震時の設計法が大きく変わっている。このような状況を鑑み、本報では、杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価について、実務設計に適用できる合理的な評価法を確立し、適用事例の考察をとおして、評価法適用上の留意点を示した。得られた主な知見は次のとおりである。1) 確立した杭応力評価法は、杭基礎の地震時杭応力を合理的に評価できる。2) 安全側への配慮のため、設計時の杭頭荷重と地盤変位は同方向と逆方向に載荷することが必要である。3) 地盤変位による杭応力に関して、杭位置ごとに地盤応答を評価し、その影響を取り込む必要がある。

## 1. はじめに

近年、大型物流施設や半導体・精密機械工場等の建設計画が急増している。これらの建築物は、平面的に大きいため、支持地盤の傾斜の影響により、杭長が大きく異なることがある。杭長が大きく異なると、各杭位置の表層地盤により増幅特性に差が生じる。これにより、地震時に発生する杭応力がより複雑になり、耐震設計においては、細心の注意が必要となる。このように、杭長が異なる杭の地震時杭応力評価技術は、難易度が高く、手間もかかるため、一般的な耐震設計には、十分に取り入れられておらず、課題となっている。

一方、2019年に建築基礎構造設計指針<sup>1)</sup>が改定され、杭基礎においても、大地震対応や群杭フレーム全体としての地震時杭応力評価が要求されている。

本報では、このような状況を鑑み、杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価技術について、実務設計に適用できる合理的な評価法を確立した。また、同手法の適用上の留意点について示した。

## 2. 杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価法

実務設計に適用するために確立した、杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価法の概要をTable 1に示す。なお、三次元有限要素法（以降、3DFEMと記す）は、汎用的な手法であるため、参考のために併記した。以下に、各方法の詳細を示す。

### 2.1 群杭フレーム応答変位法

ここでは、最新の建築基礎構造設計指針<sup>1)</sup>で推奨されている群杭フレーム応答変位法を実務設計に合理的かつ高精度に適用するための解析モデル設定方法について検討した。

はじめに、杭の剛性に応じた杭応力の再配分を考慮するために、基礎梁を剛体で、群杭を線材要素でモデル化し、軸力依存する杭の曲げ変形特性を考慮する。軸力依存する杭の曲げ変形特性の評価法は2種類ある。各杭位置における杭頭軸力を算出して、断面解析により変形特性を定義する方法と、ファイバー要素を用いて杭断面に材

料の応力 - ひずみ関係を直接設定することで、軸力変動に合わせて変形特性を逐次更新する方法である。前者の方法では、杭の曲げ変形特性の設定時に仮定した軸力と地震時荷重の載荷により作用する軸力とに差が生じており、作用軸力と曲げ変形特性が必ずしも対応していない。一方、後者の方法では、地震時荷重により作用する軸力で曲げ変形特性を逐次更新できる。このため、ここでは、載荷に伴う軸力変動を精緻に考慮できる後者を推奨している<sup>2)</sup>。

次に、杭水平地盤ばねを式(1)により設定する。

$$p = \begin{cases} 3.16 k_{h0} \cdot y & (0 \leq \bar{y} \leq 0.1) \\ \frac{k_{h0}}{\sqrt{\bar{y}}} \cdot y & (0.1 < \bar{y}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $p$  : 地盤反力度 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $k_{h0}$  : 基準水平地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $\bar{y}$  : 無次元化水平変位 ( $=y/y_0$ )

$y$  : 杭水平変位 (m)

$y_0$  : 基準水平変位 (=0.01 m)

基準水平地盤反力係数  $k_{h0}$  は、式(2)で与える。

$$k_{h0} = 80 \xi E_0 \left( \frac{B}{B_0} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

ここに、 $\xi$ : 群杭の影響を考慮した係数

$E_0$ : 基準水平地盤反力係数の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$B$ : 杭径 (m)

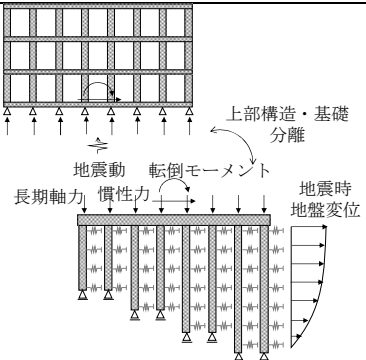
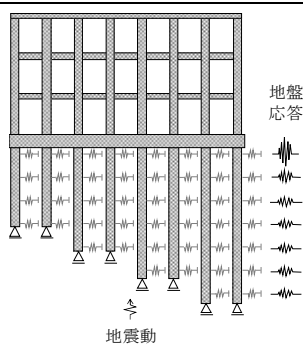
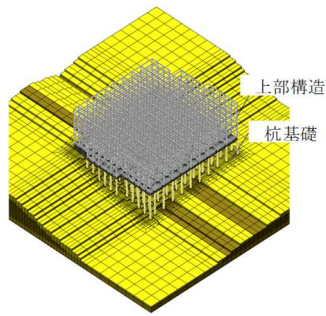
$B_0$ : 杭径の基準値 (=0.01m)

群杭の影響を考慮した係数  $\xi$  は、式(3)で与える<sup>3)</sup>。

$$\xi = \left( \frac{1.2}{N_p^{0.65} \left( \frac{B}{R} \right)} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

ここに、 $N_p$ : 基礎全体の杭本数

Table 1 杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価法  
 Evaluation Technique of Pile Stress acting on Large-scale Buildings  
 Supported by Piles with Different Lengths during Earthquakes

| 杭応力評価法          | 群杭フレーム応答変位法  | ペンゼン型モデル  | 3DFEM  |
|-----------------|--|---|--|
|                 |  |  |  |
| 杭応力再分配          | 逐次考慮される  | 逐次考慮される   | 逐次考慮される  |
| 軸力変動する杭体の変形特性   | 逐次考慮される  | 逐次考慮される   | 逐次考慮される  |
| 上部構造と基礎の軸力の連続性  | 上部構造の反力を基礎に作用  | 逐次考慮される   | 逐次考慮される  |
| 慣性力と地盤変位の位相・同時性 | 上部構造の固有周期と地表面加速度の卓越周期との関係から考慮  | 逐次考慮される   | 逐次考慮される  |
| 上部構造－杭－地盤の連成    | 上部構造の応答の反力を基礎に作用させ、地盤変位を杭水平地盤ばねに付与することで考慮  | 逐次考慮される<br>ただし、地盤変位を杭水平地盤ばねに付与  | 逐次考慮される  |
| 外力              | 上部構造の慣性力、転倒モーメント、地震時地盤変位を同時に静的漸増載荷する   | 地動加速度に加えて、杭水平地盤ばねを介して各節点に、地盤の相対変位、速度時刻歴応答を多点入力する                                    | 地動加速度を入力する   |
| 解析コスト           | 低い   | 中   | 高い   |

$B$  : 杭径 (m)

$R$  : 杭の中心間距離(m)

さらに、地下階がある場合には、基礎の根入れ効果を考慮するために土圧合力ばねを設ける<sup>4)</sup>。土圧合力ばねは、基礎と地盤の相対変位に依存する土圧に基づいており、式(4)で評価する。

$$P_{Et}W = \begin{cases} \frac{90y}{H+70y}(P_p-P_0)W & (y \leq \Delta_p) \\ (P_p-P_0)W & (y \geq \Delta_p) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $P_{Et}$  : 土圧合力 (kN)

$y$  : 地下外壁と地盤の相対変位 (m)

$H$  : 地下階の根入れ深さ (m)

$W$  : 基礎幅 (m)

$P_p$  : 受働土圧の合力 (kN)

$P_0$  : 静止土圧の合力 (kN)

$\Delta_p$  : 受働土圧にいたる相対変位 (m)

なお、 $\Delta_p=0.05H$ が推奨である<sup>5)</sup>。

外力には、上部構造の慣性力、転倒モーメント、地震時地盤変位を同時に静的漸増载荷する。ここで、荷重と地盤変位の時間増分について検討した結果、それらを均等分割して载荷することで妥当な結果を得ることができたので、载荷の増分刻みは、各外力の最大値の均等分割とした。また、上部構造と基礎の荷重のつり合いは、上部構造からの反力を群杭フレームに作用させることで考慮した。

上部構造の地震荷重は、静的に評価する方法と、動的解析に基づいて評価する方法がある。動的解析により評価する場合の入力動は、支持地盤が傾斜していることを合理的に考慮するために、3DFEMや、杭-地盤系モデル(ペンゼン型モデルの基礎部分のみのモデル)で評価する。また、上部構造と基礎の連成を精度よく考慮するために、上部構造に地盤ばねを設けることが有効と考えられる<sup>6)</sup>。

なお、地震時地盤変位については、各杭位置で表層地盤の層厚が異なるため、杭位置ごとの深さ方向の最大地盤変位分布を考慮することが必要と考えられる。

さらに、上部構造慣性力と地盤変位による応力の重ね合わせについては、上部構造の基礎固定時の固有周期 $T_b$ と地表面加速度の卓越周期 $T_g$ の比 $T_b/T_g$ により低減係数を設定する<sup>7)</sup>。各杭位置の増幅特性に応じて、地表面加速度の卓越周期 $T_g$ が異なってくるため、判断が難しいが、安全側の配慮から、最も長い杭位置での $T_g$ を用いて、低減係数を評価することが妥当だと考えられる。

## 2.2 ペンゼン型モデル

ここでは、地盤連成効果を簡易に考慮できるペンゼン型のモデルを杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価の実務設計に適用するための、解析モデルと定数の合理的かつ効率的な設定方法について示す。

はじめに、上部構造を立体フレームとし、柱、大梁を線材要素でモデル化する。基礎は、群杭フレームモデル

と同様に基礎梁を剛体、杭を線材要素とする。

次に、軸力依存する曲げ変形特性を考慮するため、ファイバー要素を用いて軸力変動に合わせて変形特性を逐次更新する。この際、杭水平地盤ばねの非線形特性は、式(5)により設定する<sup>8)</sup>。

$$p = \frac{k_f u}{1 + \frac{k_f u}{p_y}} \quad (5)$$

ここに、 $k_f$  : 杭水平地盤ばね定数 (kN/m<sup>3</sup>)

$u$  : 杭と地盤の相対変位 (m)

$p_y$  : 塑性地盤反力度 (kN/m<sup>2</sup>)

杭水平地盤ばね定数については、式(6)で与える<sup>9)</sup>。

$$k_f = \beta^3 \frac{4}{1-\nu^2} \frac{1.3E_s}{E_p I_p} \left( \frac{E_s B^4}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{1}{B} \quad (6)$$

ここに、 $\beta$  : 群杭の影響を考慮した係数

$E_s$  : 地盤のヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$\nu$  : ポアソン比

$E_p I_p$  : 杭の曲げ剛性 (kNm<sup>2</sup>)

地盤の逸散減衰を考慮する場合には、杭水平地盤ばねの減衰を式(7)により設定する<sup>10)</sup>。

$$c_g = 1.57\rho B(V_s + V_{La}) \quad (7)$$

ここに、 $\rho$  : 密度 (t/m<sup>3</sup>)

$B$  : 杭径 (m)

$V_s$  : せん断波速度 (m/s)

$V_{La}$  : Lysmerの波動速度 (m/s)

ただし、杭が密に配置された場合には、減衰係数が過大評価になることを避けるために基礎底面の大きさから式(8)の減衰係数を算定し、小さい方を採用する<sup>11)</sup>。

$$c_b = 2\rho(B_x V_s + B_y V_{La}) \quad (8)$$

ここに、 $B_x$  : 加振方向の基礎幅 (m)

$B_y$  : 加振直交方向の基礎幅 (m)

なお、外力は、地動加速度に加えて、杭水平地盤ばねを介して各節点に、地盤の相対変位、速度を多点入力する。ここで、地盤応答は、各杭位置での増幅特性を考慮するために、杭位置ごとに評価をすることを推奨する。

## 2.3 3DFEM

3DFEMは、2.2節の方法より詳細な方法であり、地盤を連続的にモデル化することで、相互作用を現実によく評価することができるが、その一方で、解析コストが高くなる。

大規模建築物の地震時杭応力評価に適用するための3DFEMでは、上部構造を立体フレームとし、柱、大梁を線材要素でモデル化する、基礎梁はソリッド要素または、線材要素でモデル化する。前節同様に、杭体は、軸力依存する曲げ変形特性を考慮するため、ファイバー要素を用いて、軸力変動に合わせて変形特性を逐次更新する。

地盤はソリッド要素でモデル化し、傾斜支持地盤の形

状を取り込む。なお、杭周地盤には、杭の体積による排土を考慮しモデル化する。地盤の非線形特性としては、修正 GHEモデル<sup>12)</sup>、R-Oモデル等を用いる。

### 3. 適用例

本章では、前章で示した杭応力評価法のうち、実務に推奨する方法として、群杭フレーム応答変位法とペンゼン型モデルに関する適用例を示す。なお、比較の対象として、旧指針<sup>13)</sup>に示されている単杭の応答変位法による結果も3.3.1項に示した。

#### 3.1 対象建物

傾斜基盤に建つ実際の杭基礎建物を検討対象とする。建物は、Table 2に示す地上7階、地下階なし、平面93.6m×111.8mの1階柱頭免震建物である。構造種別は、柱 SRC 造、梁 S 造である。基礎固定とした1次固有周期をTable 3に示す。基礎は、Table 4に示す場所打ちコンクリート杭 ( $\phi 2000\text{mm}$ , 杭長 6~27m) と、一部直接基礎で構成される。建設地の地盤状況はFig. 1のとおりである。傾斜基盤の風化花崗岩は、工学的基盤であるとともに、杭支持地盤でもある。地盤物性をTable 5に示す、盛土は、砂質土に分類し、Fig. 2に示す土質試験結果を修正 GHEモデル<sup>12)</sup>にフィッティングさせて動的変形特性を設定した。

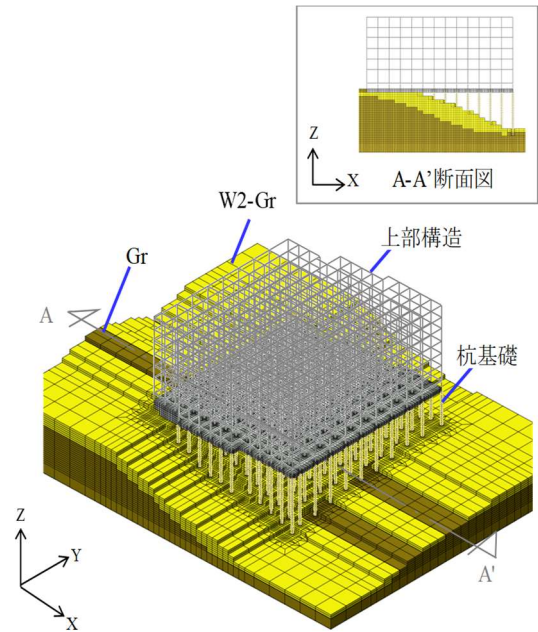


Fig. 1 検討に用いる上部構造・杭基礎・地盤の概要 (盛土を非表示)

Outline of Superstructure, Pile Foundation, and Soil Used for Study (Hide Embankment)

Table 2 建物概要

| Outline of Structure |      |                               |
|----------------------|------|-------------------------------|
| 架構形式                 | X 方向 | 純ラーメン構造                       |
|                      | Y 方向 | 純ラーメン構造                       |
| 建物規模                 | X 方向 | 93.6m<br>(基準スパン 7.2m×13)      |
|                      | Y 方向 | 111.8m<br>(基準スパン 10.8m×11)    |
|                      | 階高   | 1 階 : 3.2m,                   |
|                      |      | 2 階 : 7.4m,<br>3 階~7 階 : 5.4m |

Table 5 地盤物性

| Soil Properties |             |                        |             |       |
|-----------------|-------------|------------------------|-------------|-------|
| No.             | 土質区分        | 密度 (t/m <sup>3</sup> ) | S 波速度 (m/s) | ポアソン比 |
| 1               | 盛土 B (砂質土)  | 2.06                   | 280         | 0.48  |
| 2               | 風化花崗岩 W2-Gr | 2.2                    | 370         | 0.483 |
| 3               | 風化花崗岩 Gr    | 2.4                    | 750         | 0.441 |

Table 3 対象建物基礎固定の固有周期  
Natural Period of Structure Used for Study

|           | 1 次固有周期 (s) |       |       |
|-----------|-------------|-------|-------|
|           | 10%         | 50%   | 150%  |
| 免震層のせん断変形 |             |       |       |
| X 方向      | 1.954       | 2.797 | 3.403 |
| Y 方向      | 1.98        | 2.813 | 3.415 |

Table 4 杭物性

| Piles Properties |  |         |
|------------------|--|---------|
| 杭種               | 場所打ち杭                                  |         |
| 杭長               | 6~27 m                                 |         |
| 設計用基準強度          | 21 N/mm <sup>2</sup>                   |         |
| ヤング係数            | 2.36×10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup> |         |
| 杭径               | 2000 mm                                |         |
| 配筋               | かぶり厚さ                                  | 140 mm  |
|                  | 主筋 (SD390)                             | 20-D29  |
|                  | せん断補強筋(SD295)                          | D13@300 |

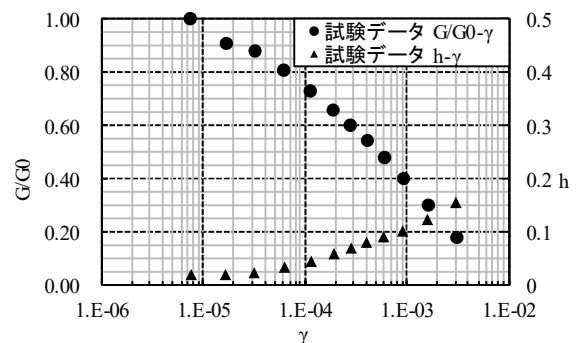


Fig. 2 盛土の動的変形特性  
Dynamic Deformation Characteristics of Embankment

### 3.2 外力評価

群杭フレーム応答変位法では、基礎と上部構造が分離されているので、上部構造応答を別途評価する必要がある。群杭フレーム応答変位法のモデルに作用させる上部構造からの慣性力、転倒モーメントは、地震応答解析により評価した。解析モデルは、柱、大梁を線形の線材要素、免震層をばね要素でモデル化した。上部構造応答に相互作用効果を考慮するために地盤ばねを設けた。地盤ばねには、弾性支承梁の理論解より算出した杭頭の水平地盤ばね、Randolfの式より算出した杭頭の上下地盤ばねを用いた。

入力動は、杭 - 地盤系モデル(ペンゼン型モデルの基礎部分のみのモデル)に地動加速度(告示波神戸位相)と、杭周地盤ばねを介して地盤応答を多点入力して評価した基礎応答を用いた。地盤応答には、各杭位置での表層厚さに応じた1次元逐次非線形解析の結果を用いた。地盤の動的変形特性は、修正 GHEモデル<sup>12)</sup>を用いて、Fig. 2に示す土質試験結果にフィッティングさせて設定した。

### 3.3 評価結果

適用例に用いた各評価法の解析モデル概要をFig. 3に示す。なお、Fig. 3には、代表的な1構面を示しているが、3次的にモデル化し、解析を行った。

**3.3.1 単杭の応答変位法** 解析モデルの概要をFig. 3(a)に示す。各杭を単杭でモデル化し、杭頭慣性力と地震時地盤変位を同時に静的漸増载荷した。杭頭に作用させる慣性力は、3.2節で評価した上部構造の架構に設計用荷重を作用させたときの支点反力である。

Fig. 4に杭の曲げモーメント分布を示す。このとき、慣性力、地盤変位はともに+X方向に载荷している。単杭に外力を作用させているので、応力再配分は生じない。したがって、慣性力、地盤変位の大きさに応じたモーメントが生じている。

Fig. 5(a)に杭および地盤変位分布を示す。杭は、地盤変位に追従して変位しており、各杭頭変位に大きな差が生じている。これは、実際には杭頭が剛性の高い基礎梁に

より連結していることと矛盾している。

**3.3.2 群杭フレーム応答変位法** 解析モデルの概要をFig. 3(b)に示す。上部構造慣性力評価法、载荷方向は、3.3.1項と同様である。なお、上部構造慣性力は、上部構造の基礎固定時の固有周期 $T_b$ と地盤の卓越周期 $T_g$ の比 $T_b/T_g$ から評価した低減係数(=0.5)を乗じており、 $4.50 \times 10^4 \text{kN}$ である。

Fig. 4に杭の曲げモーメント分布を示す。群杭フレーム応答変位法では、杭長によりモーメント分布が大きく異なることが確認できる。杭長が短いP1~P9は、杭頭モーメントが上部構造慣性力の作用方向に対応して生じているのに対して、杭長が長いP11, P13は、上部構造慣性力の作用方向とは逆向きに生じている。

Fig. 5(b)に杭および地盤変位分布を示す。群杭フレームでは、杭を基礎梁によって連結しているため、各杭頭の変位は等しい、そのため杭長により杭 - 地盤の相対変位関係が異なることが確認できる。この相対関係に応じて地盤反力が作用するため、モーメント分布の差が生じている。Fig. 6(a)に杭頭せん断力の平面分布を示す。杭長が長いX10~X14通りには载荷方向と逆にせん断力が生じており、上述した内容と対応している。

以上より、杭長が異なる杭基礎においては、地盤変位による応力の作用方向が杭位置によって逆になることがあり、群杭フレーム応答変位法を用いればそれに対応できることを確認した。

**3.3.3 ペンゼン型モデル** 解析モデルの概要をFig. 3(c)に示す。ここでは、支持地盤が最も深い位置における地表面変位が最大となる時刻の評価結果を示す。この時、慣性力(=4.45×10<sup>4</sup>kN)、地盤変位はともに+X方向に作用している。

Fig. 4に杭の曲げモーメント分布を示す。群杭フレーム応答変位法同様に、杭長が長いP11, P13は、上部構造慣性力の作用方向とは逆向きに曲げモーメントが生じている。Fig. 5(c)に杭および地盤変位分布を示す。群杭フレーム応答変位法と同様に各杭頭の変位は等しい。地盤変位については、地盤深度による位相のずれがあることが

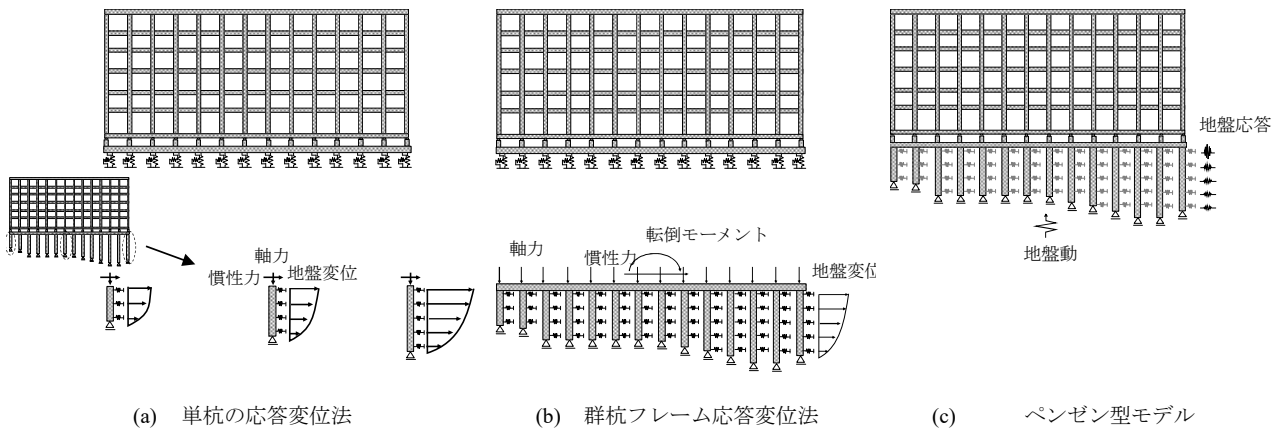


Fig. 3 解析モデル概要  
Outline of Analysis Model

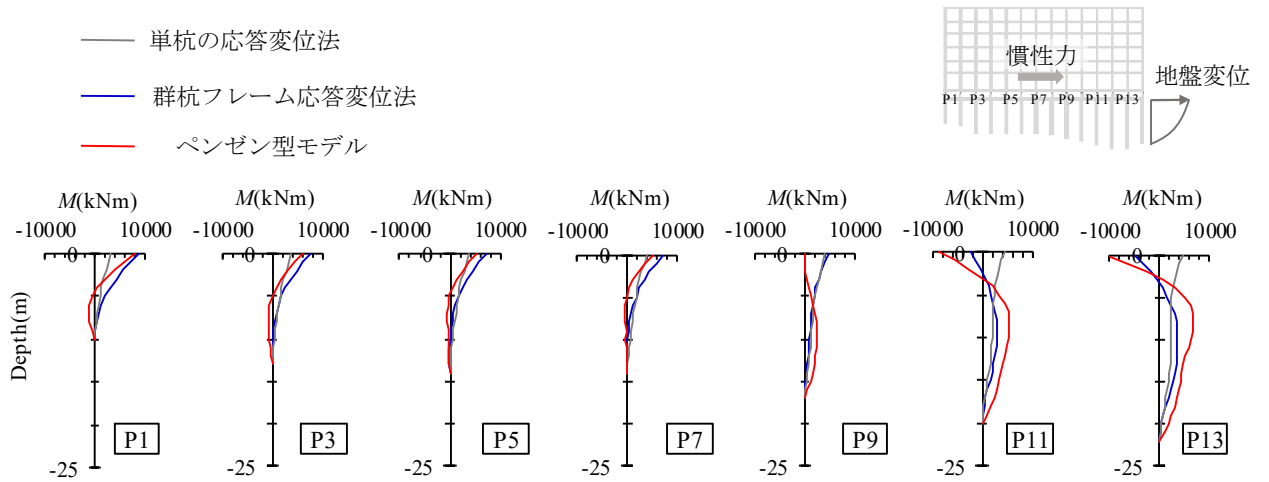


Fig. 4 杭の曲げモーメント分布の評価法による比較 (Y9通り)

Comparison of Pile Bending Moment Distribution by Evaluation Method (Y9 Plane)

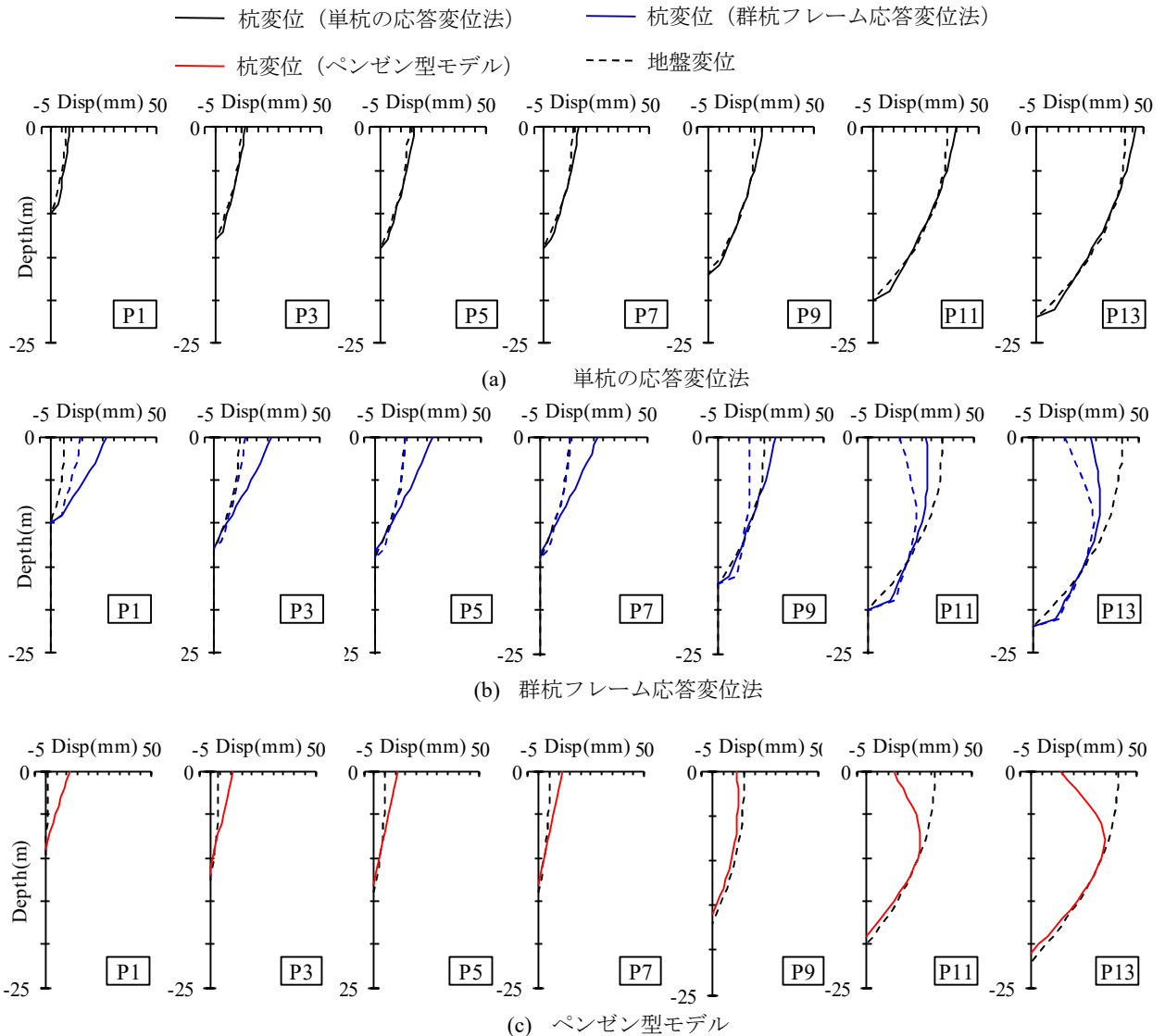


Fig. 5 杭および地盤変位分布の評価法による比較 (Y9通り)

Comparison of Pile and Soil Displacement Distribution by Evaluation Method (Y9 Plane)

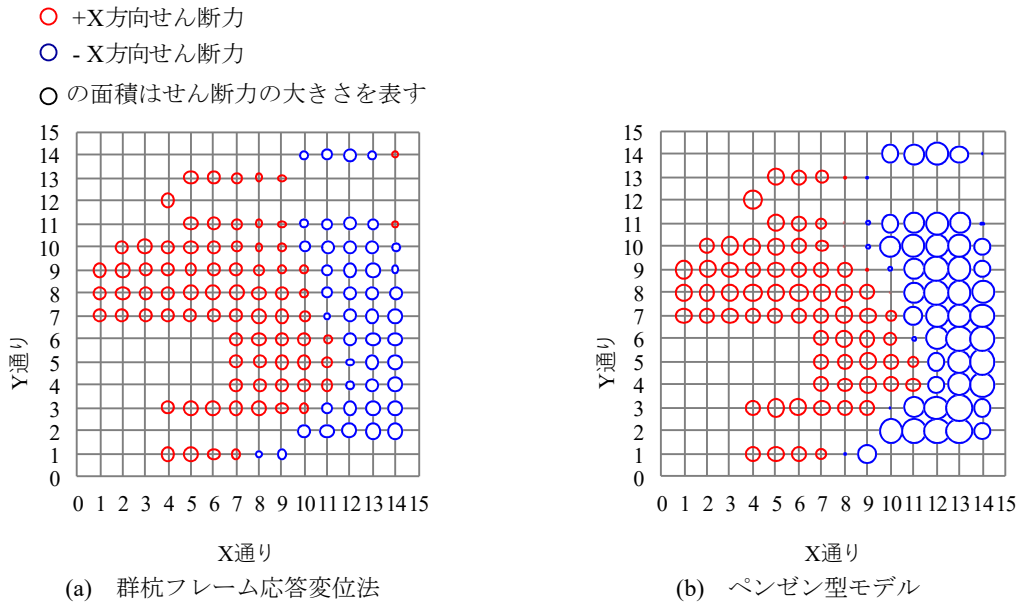


Fig. 6 杭頭せん断力の平面分布  
 Pile and Soil Displacement Distribution

確認できる。これが、群杭フレーム応答変位法による評価結果との差の一因と考えられる。Fig. 6(b)に杭頭せん断力の平面分布を示す。杭長が長いX10～X14通りには載荷方向と逆方向にせん断力が生じている。

以上より、ペンゼン型モデルでは、群杭フレーム応答変位法では直接には考慮できない上部構造慣性力と地盤変位の同時性を考慮できることに加えて、支持地盤傾斜による各杭位置の地盤応答の違いも考慮できるため、より合理的かつ詳細な評価が可能となることを確認できる。

### 3.4 考察

3.3節より、杭長が異なる杭基礎では、相対的に長い杭の杭頭せん断力が上部構造慣性力の載荷方向とは逆方向に生じることがある。このような杭では、上部構造慣性力と地盤変位による応力が、打ち消しあうように作用している。群杭フレーム応答変位法を適用する場合、このようなケースでも安全側に対応するため、上部構造慣性力と地盤変位を同方向および逆方向で杭に載荷することが必要である。

また、群杭フレーム応答変位法では、上部構造慣性力と地盤変位による応力の重ね合わせについて、上部構造の基礎固定時の固有周期 $T_b$ と地表面加速度の卓越周期 $T_g$ の大小関係により、上部構造慣性力と地盤変位の低減が可能である。本報の適用事例は、免震建物のため、明確に $T_b/T_g > 1$ となり、低減係数を適用できた。しかし、通常は、杭長が異なる建物においては、安全側の配慮から、杭長が最も長い位置での $T_g$ を用いて、低減係数を評価することが妥当だと考えられる。

さらに、杭長が異なる杭基礎では、杭位置による地盤応答の差異が、杭応力に大きく影響している。そのため、地盤変位による杭応力に関しては、杭位置ごとに地盤応答を評価し、その影響を適切に取り込む必要がある。

## 4. まとめ

実務設計に適用するために確立した杭長が異なる大規模建築物の地震時杭応力評価法と、それらの適用事例を示した。

以下に得られた知見を記す。

- 1) 確立した地震時杭応力評価法は、いずれも杭長が異なる杭基礎の地震時杭応力を合理的に評価できることを確認した。
- 2) 適用事例より、杭長が異なる杭基礎では、杭頭せん断力が載荷方向とは逆方向に生じることがある。そのため、群杭フレーム応答変位法を適用する場合、安全側への配慮のため、上部構造慣性力と地盤変位を同方向および逆方向で杭に載荷することが必要である。
- 3) 適用事例より、杭長が異なる杭基礎において、群杭フレーム応答変位法を適用する場合、杭長が最も長い位置での地表面加速度の卓越周期 $T_g$ と上部構造の基礎固定時の固有周期 $T_b$ の関係から、上部構造慣性力と地盤変位による応力の重ね合わせに関わる低減係数を評価することが妥当と考えられる。
- 4) 適用事例より、杭長が異なる杭基礎では、地盤変位による杭応力に関して、杭位置ごとに地盤応答を評価し、その影響を取り込む必要がある。

なお、今後は、3DFEMによる結果も加えて、地震時杭応力評価技術のさらなる高度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019.12
- 2) 廣瀬榛名，勝二理智，藤森健史：軸力依存する杭の曲げ変形特性に着目した群杭フレーム応答変位法による杭応力評価，日本地盤工学会大会年次大会，2019
- 3) 土方勝一郎，光原恵太朗，下村修一：実用的な群杭効率評価式の一提案，構造工学論文集，Vol. 64B，2018.3
- 4) 田村修次，尾高大介：基礎の根入れ部に作用する地震時土圧の簡易評価法，第 51 回地盤工学研究発表会，pp. 1333-1334，2016.9
- 5) 田村修次：杭基礎の水平抵抗，改訂によって基礎構造設計指針はどのように変わるのか，日本建築学会大会（基礎構造）PD 資料，pp. 62-68，2017
- 6) 廣瀬榛名，勝二理智，藤森健史：軸力変動を考慮した群杭基礎の地震時杭応力評価（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，2020
- 7) 田村修次，藤森健史，勝二理智，三町直志，眞野英之，内田明彦，船原英樹，関口徹：応答変位法における地盤変位と構造物慣性力の低減係数，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp. 519-520，2012
- 8) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006
- 9) Vesic, A. B. : Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solid Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 87, Issue 2, pp. 35-54, 1961
- 10) Gazetas, G. and Dobry, R. : Horizontal response of piles in layered soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 110(1), pp. 20-40, 1984
- 11) 酒向裕司，宮本裕司：弾性支承梁の理論解を用いた成層地盤中の杭基礎の水平地盤ばねの簡易評価法，第 3 回日本地震工学会研究発表会，pp. 418-419，2004
- 12) 室野剛隆：強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，1999
- 13) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10