

# 1. 杭頭免震建物の外周部に生じる変動軸力の影響を考慮した

## 杭の曲げモーメント評価

### Evaluation of Bending Moment Distribution for Piles in Pile Top Seismic Isolation Buildings Considering Variable Axial Load

山内 豊英<sup>\*1</sup> 飛田 喜則<sup>\*1</sup>

#### 要 旨

杭頭免震建物を対象とした2次元フレームモデルの地震応答解析により、変動軸力が作用する外周部の杭基礎の曲げモーメント分布や既報<sup>6)</sup>で提案した杭基礎に対する応答変位法の適用性について検証を行った。変動軸力が増加する側と減少する側の杭の最大曲げモーメント分布を比較し、杭頭部付近における変動軸力の影響を明らかにした。また、提案した応答変位法に変動軸力の影響を考慮する方法を示すとともに、その評価結果が地震応答解析による精算解と概ね一致することを確認し、外周部の杭基礎にも本提案法が適用できることを示した。

キーワード：杭頭免震構造／杭／地震応答解析／変動軸力

#### 1. はじめに

近年、物流施設では免震化へのニーズが高まっており、基礎工事の合理化や建設コストの削減を可能とする杭頭免震構造を採用することが多い。杭頭免震構造は、杭を繋ぐ連結部材の剛性が低いため、軟弱地盤の場合に杭頭に曲げ回転変形が生じ易く、積層ゴムの力学特性や杭基礎の応力分布に影響を及ぼすことが指摘されている<sup>1)~3)</sup>。

筆者らは、杭頭の曲げ回転変形や地盤との動的相互作用の影響を考慮できる連成振動解析モデルを構築し、杭頭免震構造の動的特性に関する研究を行ってきた<sup>4)~6)</sup>。さらに、部材構成や地盤条件に応じた積層ゴムの力学特性評価法<sup>4),5)</sup>や杭基礎に対する応答変位法の適用法<sup>6)</sup>等、杭頭免震構造の応答評価法として幾つかの提案を行った。

前報<sup>7)</sup>では、2次元フレームモデルを用いた地震応答解析により、杭頭免震建物の外周部に生じる変動軸力が積層ゴムの力学特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、変動軸力が作用する積層ゴムの力学特性も提案した評価法<sup>4),5)</sup>により概ね評価できることを示した。

本研究では、杭頭免震建物の外周部に生じる変動軸力が杭基礎の曲げモーメント分布に及ぼす影響について考察を行うとともに、既報で提案した杭基礎に対する応答変位法<sup>6)</sup>の適用性について検証を行った。

#### 2. 解析モデルおよび地震応答解析の概要

##### 2.1 2次元フレームモデル概要

検討対象建物は、既報<sup>4)~7)</sup>と同様に、図-1のようなX,Y両方向10m×10mスパンの地上4階建て、延床面積

40000m<sup>2</sup>の物流施設とした。構造種別は、柱を鉄筋コンクリート造（以下、RCと称す）、梁を鉄骨造（以下、Sと称す）とした柱RC梁Sハイブリッド構法とした。

地震応答解析に用いる2次元フレームモデルを図-2に示す。検討対象建物の1構面を取出したフレームモデルとし、側柱部（X1通りおよびX11通り）に生じる変動軸力を考慮できるようにした。RC部材のコンクリートの設計基準強度 $F_c$ は36N/mm<sup>2</sup>とし、ヤング係数は $F_c$ から算定<sup>8)</sup>した。また、S部材のヤング係数は $2.05 \times 10^5$ N/mm<sup>2</sup>とした<sup>9)</sup>。上部構造の部材は、既報<sup>4)~7)</sup>と同様に全て弾性梁要素とし、上部構造の柱と梁の接合部節点には負担するスパンの重量に相当する質点を設けた。

解析変動因子を表-1に示す。既報<sup>4)~7)</sup>までと同様に、基礎梁および杭はいずれも弾性梁要素とした。

基礎梁はRC造とし、梁せいが一律350mm、梁幅を1000mm~4000mmとした4種類の扁平梁と、杭とピン接合のケースも対象とした。

杭は鋼管杭とRC杭の2種類とし、鋼管杭は中柱部を

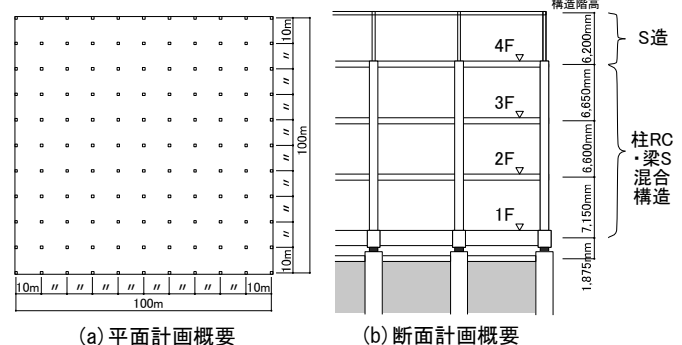


図-1 検討対象建物

<sup>\*1</sup>技術研究所建築構造研究グループ

直径 1200mm( $t=19\text{mm}$ )、側柱部を直径 800mm( $t=14\text{mm}$ )、RC 杭は中柱部を直径 2000mm、側柱部を直径 1400mm とした。各杭の節点には杭の区分重量分の質点を設けた。

地盤条件は、文献 10)において第 2 種地盤相当として設定された「地盤-2」を対象とした。地盤-2 の  $N$  値と  $S$  波速度の分布を図-3、地盤物性諸元と自由地盤の等価固有周期をそれぞれ表-2 と表-3 に示す。

水平地盤反力ばねの剛性は Francis の式<sup>10)</sup>と群杭係数<sup>11)</sup>の積とし、層番号 1~5 の地盤 (以下、表層地盤と称す)の剛性は等価地盤物性、工学的基盤の剛性は初期地盤物性を用いて算定した。水平地盤反力ばねの非線形特性は表層地盤を双曲線モデル、工学的基盤を線形ばねとし、表層地盤の極限地盤反力は Broms の式<sup>10)</sup>より算定した。

自由地盤は断面積 100000  $\text{m}^2$ の土柱を想定し、表層地盤は石原、吉田の方法に基づく H-D モデル<sup>12)</sup>、工学的基盤は線形ばねとした。表層地盤の歪依存特性は、古山田らの提案<sup>13)</sup>に基づき、粘性土の基準せん断歪  $\gamma_{0.5}$  および最大減衰定数  $h_{\max}$  をそれぞれ 0.18%および 17%、砂質土のそれらの値を 0.10%および 21%とした。自由地盤下端には工学的基盤の半無限性を表すダッシュポット<sup>14)</sup>を設けた。

内部粘性減衰は初期剛性比例型とし、上部構造の減衰定数は 3%、鋼管杭は 2%、RC 杭は 3%とし、免震層、水平地盤反力ばね、自由地盤の内部粘性減衰は 0 とし、履歴減衰のみを考慮した。

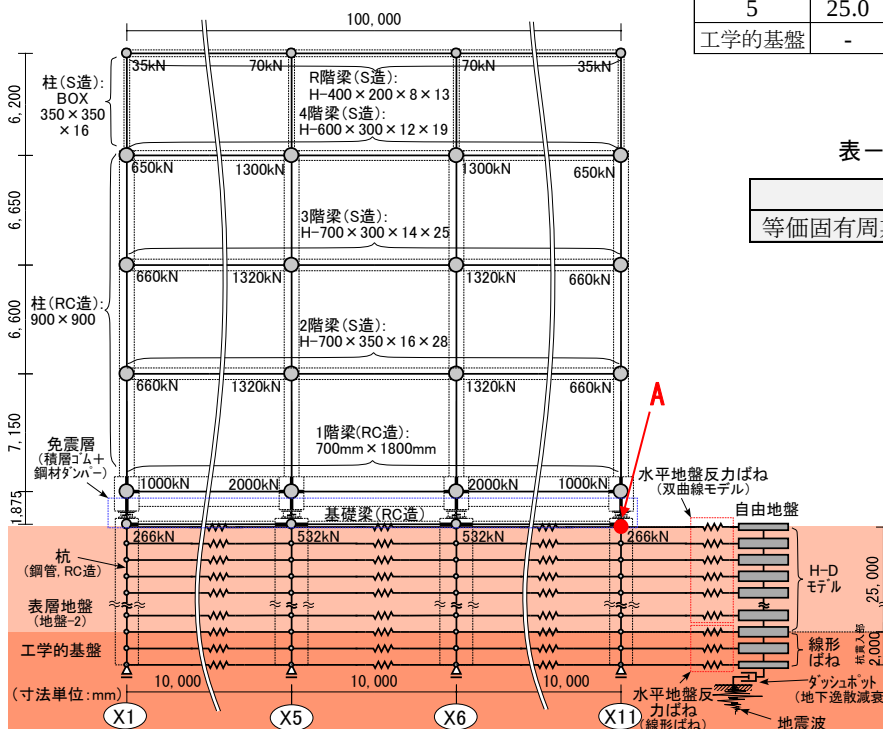


図-2 2次元フレームモデル

## 2.2 免震層のモデル化

免震層も既報<sup>4)~7)</sup>と同様に天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーで構成した。免震層の骨格曲線の概念を図-4に示す。積層ゴム、鋼材ダンパーは 1 箇所につきそれぞれ 1 基ずつ設けることとした。鋼材ダンパーは、降伏せん断力係数で 0.04 相当の標準バイリニア型モデルとした。

表-1 解析変動因子

| 基礎梁 <sup>*1</sup>                        |        |                  | 杭   |                          |                          |
|------------------------------------------|--------|------------------|-----|--------------------------|--------------------------|
| 幅(mm)                                    | せい(mm) | 剛比 <sup>*2</sup> | 種別  | 中柱部                      | 側柱部                      |
| 杭とピン接合                                   |        | 0.0              | 鋼管杭 | 直径:<br>1200mm<br>(厚19mm) | 直径:<br>800mm<br>(厚14mm)  |
| 1000                                     | 350    | 0.011            |     |                          |                          |
| 2000                                     | 350    | 0.021            |     |                          |                          |
| 3000                                     | 350    | 0.032            | RC杭 | 直径:<br>2000mm<br>(Fc=36) | 直径:<br>1400mm<br>(Fc=36) |
| 4000                                     | 350    | 0.042            |     |                          |                          |
| <sup>*1</sup> RC造、Fc=36N/mm <sup>2</sup> |        |                  | -   |                          |                          |
| <sup>*2</sup> 1階梁に対する剛比                  |        |                  |     |                          |                          |

表-2 地盤-2 の地盤物性諸元<sup>10)</sup>

| 層番号   | 深度 (m) | 層厚 (m) | 密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> ) | S波速度 $V_s$ (m/s) | P波速度 $V_p$ (m/s) | 土質  |
|-------|--------|--------|-------------------------------|------------------|------------------|-----|
| 1     | 4.5    | 4.5    | 1.8                           | 90               | 1360             | 粘性土 |
| 2     | 10.0   | 5.5    | 1.6                           | 150              | 1560             | 砂質土 |
| 3     | 17.0   | 7.0    | 1.8                           | 210              | 1560             | 砂質土 |
| 4     | 18.5   | 1.5    | 1.7                           | 150              | 1560             | 粘性土 |
| 5     | 25.0   | 6.5    | 1.8                           | 260              | 1560             | 砂質土 |
| 工学的基盤 | -      | -      | 1.8                           | 390              | 1700             | -   |

表-3 地盤-2 の等価固有周期

|        | 1次     | 2次     | 3次     |
|--------|--------|--------|--------|
| 等価固有周期 | 1.01 s | 0.38 s | 0.24 s |

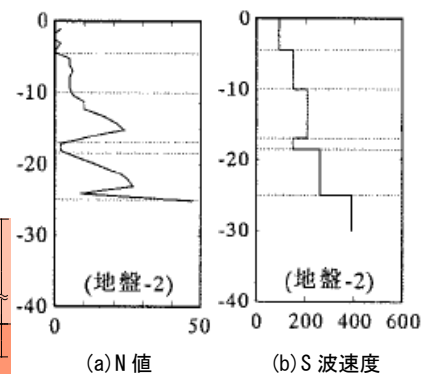


図-3 地盤-2 の地盤物性の鉛直方向分布<sup>10)</sup>

積層ゴムの諸元を表-4 に示す。ゴムのヤング率  $E_0$  はポアソン比 0.5 とせん断弾性率  $G$  を用いて算定 ( $E_0 = 3G$ ) し、補正係数  $\kappa$  と体積弾性率  $E_\infty$  は文献 15) を参考にした。曲げに対する弾性率  $E_{rb}$  は式(1)で算定した<sup>16)</sup>。積層ゴムの断面積  $A$ 、断面二次モーメント  $I$ 、ゴム層数  $n$ 、ゴム 1 層の厚さ  $t_r$ 、ゴムと内部鋼板を合わせた全高さ  $h$  により、圧縮時における積層ゴムの有効水平剛性  $k_s$  および有効曲げ回転剛性  $k_{rc}$  は式(2)で表される。

$$E_{rb} = \frac{E_b \cdot E_\infty}{E_b + E_\infty}, \quad \left( E_b = E_0 \left( 1 + \frac{2}{3} \kappa S_1^2 \right) \right) \quad (1)$$

$$k_s = \frac{GAh}{nt_r}, \quad k_{rc} = \frac{E_{rb}Ih}{nt_r} \quad (2)$$

中柱部の積層ゴムは、既報<sup>4)~7)</sup>と同様に、外径 1000mm、ゴム総厚 200mm (2 次形状係数:5.0) とし、長期鉛直荷重を 8000kN (面圧:10.2N/mm<sup>2</sup>) とした。側柱部の積層ゴムは、後述の積層ゴムの力学特性と回転剛性比の関係は積層ゴムの面圧や 2 次形状係数等が同じであればほとんど変化しない<sup>3)</sup>ため、提案した力学特性評価法の適用性を考慮して外径 700mm、ゴム総厚 140mm (2 次形状係数: 5.0)、長期鉛直荷重を 4000kN (面圧:10.4N/mm<sup>2</sup>) とし、2 次形状係数と面圧を既報の設定と概ね一致させた。

積層ゴムの解析モデルは既報<sup>4)~7)</sup>と同様に三山の方法<sup>17)</sup>によった。水平剛性  $[K_H]$ 、幾何学的非線形性を表す剛性  $[K_P]$ 、曲げ回転剛性  $[K_R]$  の各マトリクスを並列結合した積層ゴムの剛性マトリクスを式(3)に示す。

$$\begin{Bmatrix} Q_A \\ M_A \\ Q_B \\ M_B \end{Bmatrix} = ([K_H] + [K_P] + [K_R]) \begin{Bmatrix} x_A \\ \theta_A \\ x_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} 1 & -h/2 & -1 & -h/2 \\ & h^2/4 & h/2 & h^2/4 \\ & & 1 & h/2 \\ \text{sym.} & & & h^2/4 \end{Bmatrix} + P \begin{Bmatrix} 0 & -1/2 & 0 & -1/2 \\ & h/4 & 1/2 & h/4 \\ & & 0 & 1/2 \\ \text{sym.} & & & h/4 \end{Bmatrix} \\ + K_r \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & -1 \\ & & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_A \\ \theta_A \\ x_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

なお、積層ゴムの水平剛性  $K_h$  と曲げ回転剛性  $K_r$  には積層ゴムの座屈荷重  $P_{cr}$  と鉛直荷重  $P$  の関係に基づいた面圧依存性の近似式を適用し、さらに、曲げ回転剛性には水平変位依存性  $\phi_{rc}$  を考慮した。 $K_h$  と  $K_r$  を式(4)および式(5)に示す。

$$K_h = \frac{k_s}{h} \left\{ 1 - \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

$$K_r = \frac{k_{rc}}{h} \left\{ 1 - \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \phi_{rc} \quad (5)$$

## 2.3 入力地震波

入力地震波は、建設省告示第 1461 号の解放工学的基盤における極めて稀に発生する地震の加速度応答スペクトルに基づき、位相特性を乱数として作成した。入力地震波の概要を図-5 に示す。地震波は、2.1 節で示した自由地盤の下端のダッシュポットを介して入力した。

## 3. 外周部の杭の曲げモーメント

### 3.1 最大曲げモーメント分布

外周部に位置する X1 通りと X11 通りの杭の最大曲げモーメント分布 (絶対値) を図-6 に示す。図中の「幅」は基礎梁の幅を表す。鋼管杭、RC 杭ともに X1 通りと X11

表-4 天然ゴム系積層ゴムの諸元

| 項目                                       | 中柱部   | 側柱部   |
|------------------------------------------|-------|-------|
| せん断弾性率: $G$ (N/mm <sup>2</sup> )         | 0.39  |       |
| ヤング率: $E_0 (=3G)$ (N/mm <sup>2</sup> )   | 1.17  |       |
| 補正係数: $\kappa$                           | 0.85  |       |
| 体積弾性率: $E_\infty$ (N/mm <sup>2</sup> )   | 1961  |       |
| 外径: $D$ (mm)                             | 1000  | 700   |
| 内径: $d$ (mm)                             | 25    | 15    |
| ゴム総厚: $n \cdot t_r$ (mm)                 | 200   | 140   |
| 1次形状係数: $S_1$                            | 36.4  |       |
| 2次形状係数: $S_2$                            | 5.00  |       |
| 曲げに対する弾性率: $E_{rb}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 606.8 | 608.1 |

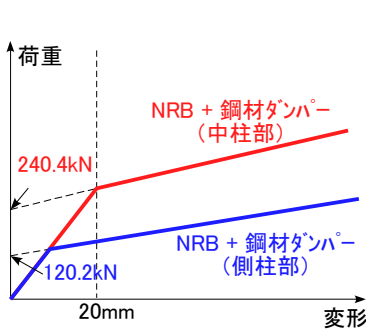
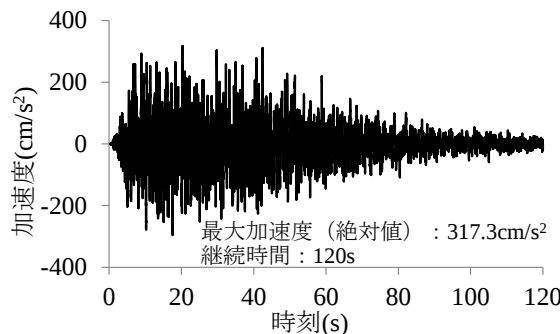
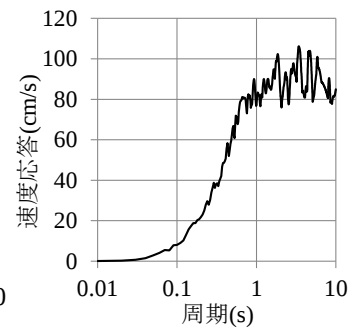


図-4 免震層の骨格曲線



(a) 加速度の時系列波形



(b) 速度応答スペクトル (h=5%)

図-5 入力地震波

通りの最大曲げモーメントは概ね近い分布となるが、杭頭部の曲げモーメントに着目すると、基礎梁による拘束が小さいほど(図-6の左側ほど)X11通りの値が大きく、拘束が大きくなるにつれて(図-6の右側ほど)X1通りの値が大きいく。本解析において杭の曲げモーメントが最大となる時、上部構造の慣性力は図-2の右方向に作用しており、X1通りの軸力は減少、X11通りの軸力は増加し、P-△効果はX11通りの方が大きくなる。図-7のように、杭頭免震構造で杭頭の拘束が小さい場合、P-△効果は杭頭曲げモーメントが増加する方向に作用する傾向がある。よって、杭頭曲げモーメントは、拘束が小さいピン接合だとP-△効果が大きいX11通り、拘束が大きい幅4000mmの基礎梁だとP-△効果が小さいX1通りが大きくなる。

### 3.2 杭頭の曲げモーメントについての考察

鋼管杭で基礎梁の幅が1000mmのケースについて、上部構造の慣性力が最大となる時刻( $t=45.95s$ )、並びに、杭頭の曲げモーメントが最大となる時刻( $t=42.91s$ )のX11通りの曲げモーメント分布を図-8に示し、X11通りの積層

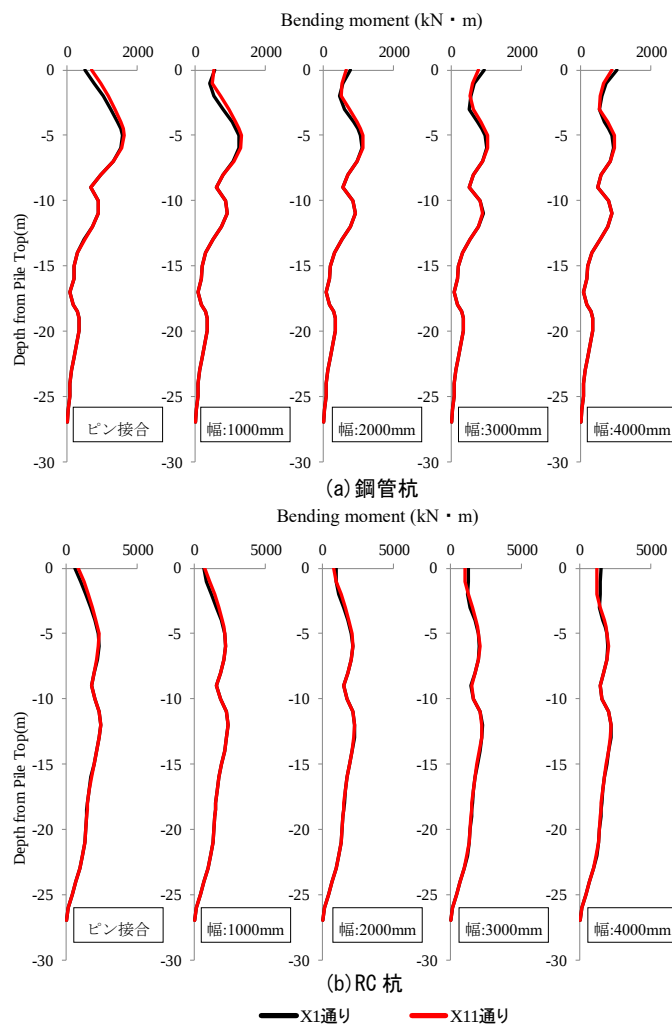


図-6 外周部の杭の最大曲げモーメント分布

ゴムおよび鋼材ダンパーのせん断力と基礎梁質点(図-2のA部)の加速度の時刻歴波形を図-9に示す。慣性力最大時の図-8(a)によると、杭頭の曲げモーメントが概ね0となっている。一方、杭頭曲げモーメント最大時の図-8(b)、並びに、図-9の時刻歴波形によると、 $t=42.91s$ において、積層ゴムのせん断力は(P-△効果も含めて)小さいものの、鋼材ダンパーのせん断力と基礎梁質点の慣性力が概ね最大値で作用しており、これに起因して杭頭の曲げモーメントが大きくなることがわかる。このように、杭頭免震構造ではP-△効果が小さい時に杭頭の曲げモーメントが最大となる場合がある。この現象は既報<sup>2)</sup>の中柱部でも見られた杭頭免震構造特有の現象である。

### 4. 既報で提案した応答変位法の適用性に関する考察

本章では、既報で提案した応答変位法の適用法<sup>5)</sup>を変動軸力が作用する外周部の杭に適用する方法について示す。また、杭の最大曲げモーメント分布について、本提案法による評価と地震応答解析による精算解(以下、単に精算解と称す)との比較および考察を行う。

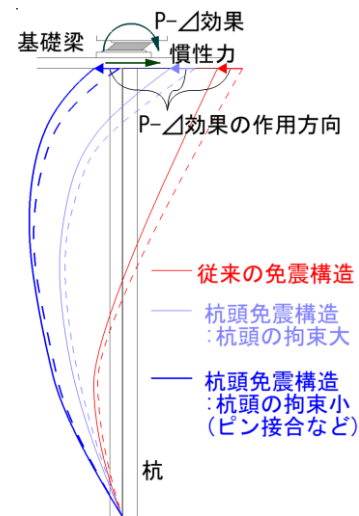


図-7 杭頭免震構造における杭の曲げモーメント分布の概念

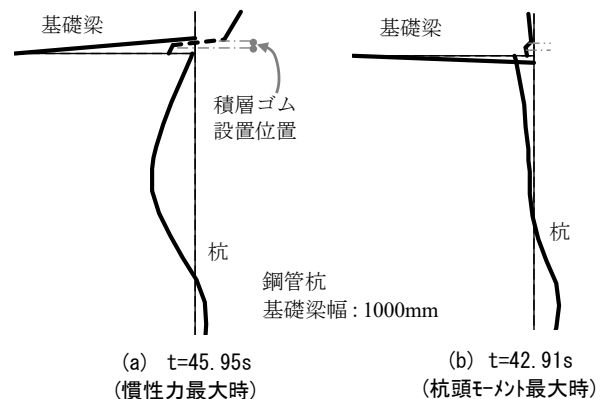


図-8 杭と周辺部材の曲げモーメント分布(X11通り)

#### 4.1 外周部の杭に対する応答変位法の適用法

既報<sup>6)</sup>で提案した慣性力作用時の静的解析モデルを外周部の杭に適用したものを図-10に示す。3.2節で示したように、杭頭免震構造ではP-Δ効果による付加曲げモーメントが小さい時に杭頭の曲げモーメントが最大となる場合がある。したがって、図-10(b)のような荷重条件でも解析を行い、それぞれの解析で得られた応力分布を包絡する。

慣性力最大時を表す図-10(a)のモデルでは曲げモーメント分配率 $\alpha_M$ を考慮する<sup>4), 5)</sup>。曲げモーメント分配率 $\alpha_M$ は積層ゴムの反曲点移動を表す指標であり、積層ゴム上端部が負担する曲げモーメント $M_A$ を回転が生じない場合の曲げモーメント $M_0$ で基準化した値である。積層ゴム下端への曲げモーメント分配の概念を図-11に示し、関連する定義式を式(6)および式(7)に示す。 $isoQ_{max}$ は免震層の最大せん断力、 $P$ は最大せん断力時(慣性力最大時)の軸力を採用する。

$$\alpha_M = \frac{M_A}{M_0} \quad (6)$$

$$M_0 = \frac{1}{2} (isoQ_{max} \cdot h + P \cdot \delta_{max}) \quad (7)$$

ここで、既報で示した曲げモーメント分配率 $\alpha_M$ と回転剛性比を表す指標 $\phi_{rc}(\delta_{max}) \cdot K_{rp} / K_B$ の関係<sup>4), 5)</sup>に対し、前報<sup>7)</sup>と同様の方法でX1通りとX11通りの積層ゴムの結果を併せて示したものを図-12に示す。X1通りおよびX11通りの結果は、それぞれ面圧 7.6 N/mm<sup>2</sup>、面圧 12.7 N/mm<sup>2</sup>の直線近似式<sup>5)</sup>と一致しており、時刻歴応答解析で得られた慣性力最大時付近のそれぞれの面圧とも概ね一致する。次節の応答変位法の評価で使用した $\alpha_M$ は、それぞれの直線近似式に $\phi_{rc}(\delta_{max}) \cdot K_{rp} / K_B$ を代入して導出している。なお、 $K_{rp} / K_B$ は積層ゴムの回転剛性 $K_{rp}$ を下部構造の回転剛性 $K_B$ で除した回転剛性比<sup>4), 5)</sup>、 $\phi_{rc}(\delta_{max})$ は回転剛性 $K_{rp}$ の水平変位依存性<sup>4), 17)</sup>を表す。

次に、図-10(b)のモデルは、3.2節の図-8(b)の状態を表しており、積層ゴム中央高さに位置する節点にダン

パーの降伏耐力 $dQ_y$ 、基礎梁部分に最大慣性力 $W_F \cdot a_{max} / g$  ( $W_F$ :基礎梁部の重量、 $a_{max}$ :基礎梁部の最大加速度、 $g$ :重力加速度)を作用させる。

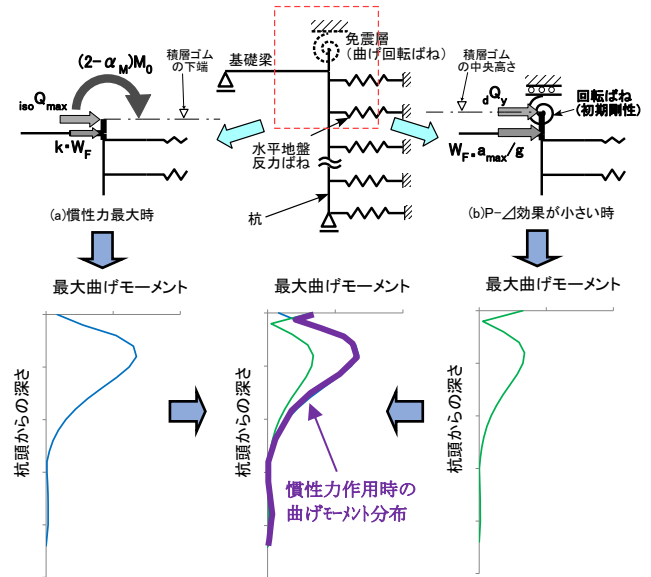


図-10 慣性力作用時の解析モデル

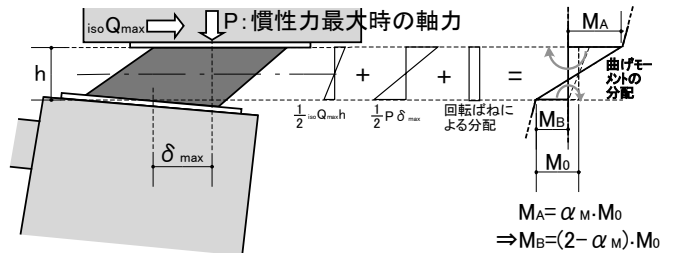


図-11 積層ゴム下端への曲げモーメント分配

太線プロット:鋼管杭  
細線プロット:RC杭

- ◇乱数位相: N値1    △KOBE位相: N値1    ○HACHINOHE位相: N値1
- ◇乱数位相: N値5    △KOBE位相: N値5    ○HACHINOHE位相: N値5
- ◇乱数位相: N値10    △KOBE位相: N値10    ○HACHINOHE位相: N値10
- ◇乱数位相: N値15    △KOBE位相: N値15    ○HACHINOHE位相: N値15
- ◇乱数位相: N値20    △KOBE位相: N値20    ○HACHINOHE位相: N値20

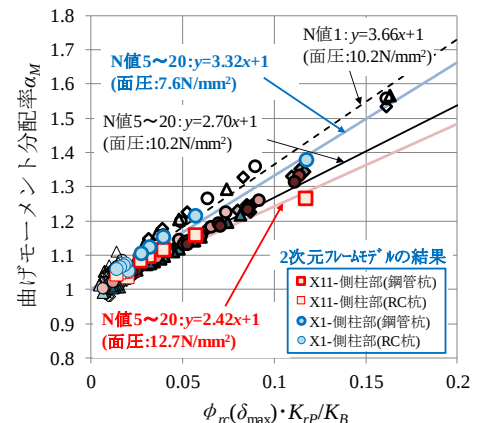


図-12 曲げモーメント分配率と回転剛性比の関係<sup>4), 5)</sup>

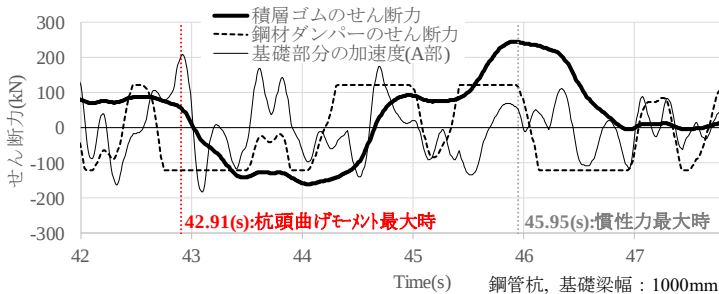


図-9 せん断力と応答加速度の時刻歴波形 (X11 通り)

地盤変形作用時のモデルは、図-13 に示すように積層ゴムの中央高さに積層ゴムの初期曲げ回転剛性に相当する回転ばねを設け、地盤応答解析で得られた最大水平変位を水平地盤反力ばねに強制変位として与える。

次節の応答変位法の評価において、慣性力作用時と地盤変形作用時の曲げモーメントの重ね合わせ方法は二乗和平方根(以下、SRSS と称す)と単純和の2 ケースとした。

#### 4.2 精算解と応答変位法(提案法)の比較

X1 通りおよび X11 通りの杭について、精算解と応答変位法による最大曲げモーメント分布の比較をそれぞれ図-14 および図-15 に示す。鋼管杭については、図-14

および図-15 のいずれも応答変位法の SRSS による評価が精算解と概ね一致しており、単純和による評価がやや安全側の評価となっている。特に、杭頭部の曲げモーメント

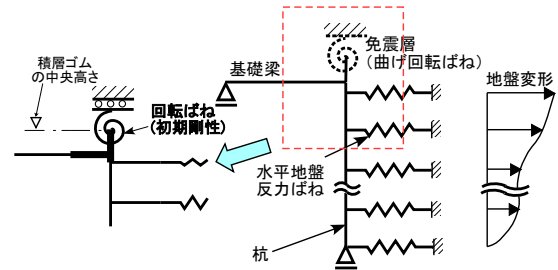


図-13 地盤変形作用時の解析モデル

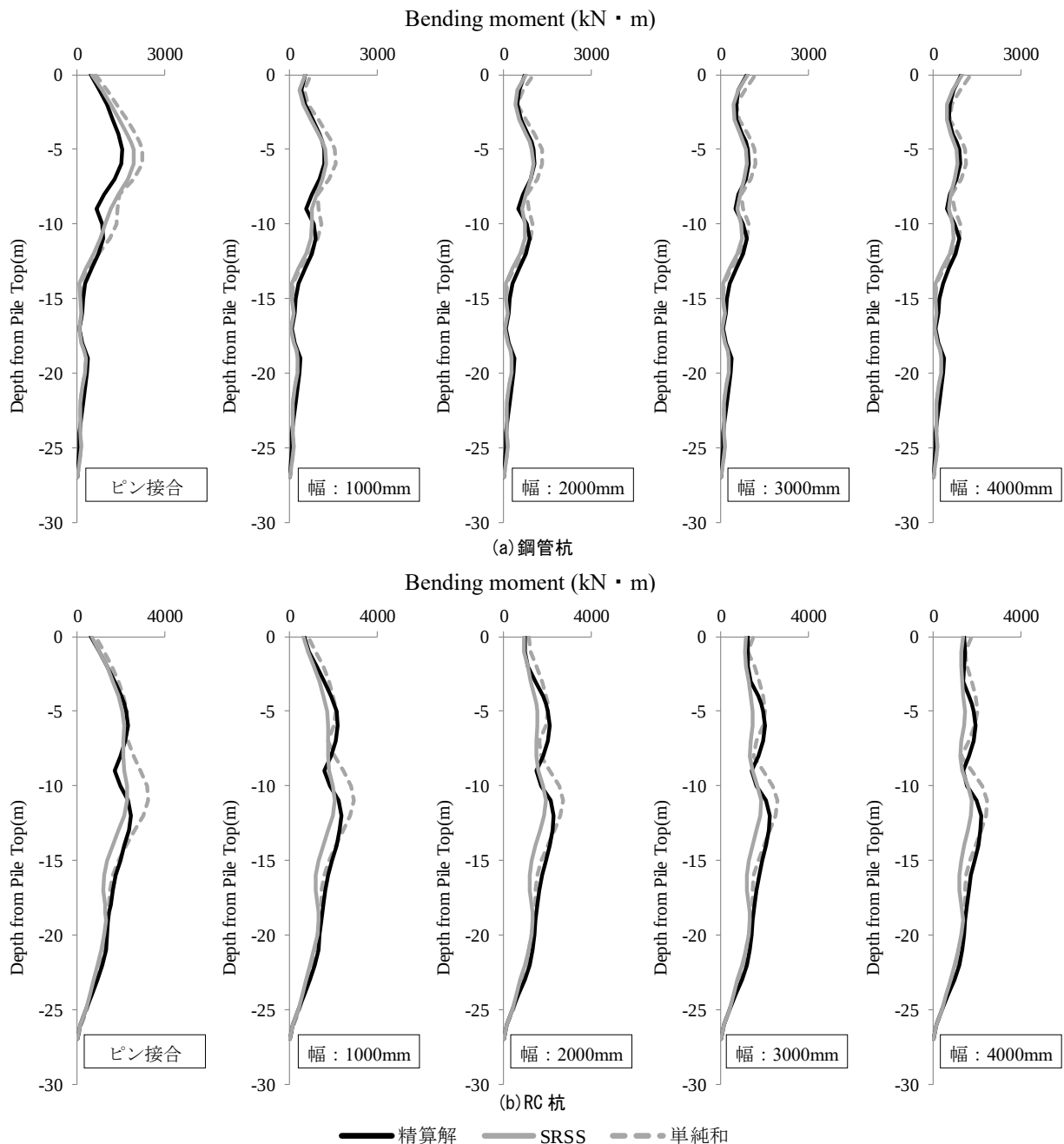


図-14 X1 通り杭の最大曲げモーメント分布

ントについては、変動軸力の作用する外周部の杭においても筆者らの提案する適用法を採用することで精算解を精度よく表現できている。

一方、RC 杭については、図-14 および図-15 のいずれも応答変位法の SRSS による評価が精算解をやや危険側に評価しており、単純和による評価が精算解と概ね一致している。これは、既報<sup>6)</sup>で指摘した応答変位法の重ね合わせ方法に関する課題、並びに、地盤変形を 1 次モードに近い最大変位分布で作用させる応答変位法では高次モードの影響が考慮されないことなどが原因として考えられる。

## 5. まとめ

杭頭免震建物を対象とした 2 次元フレームモデルの地震応答解析により、外周部に生じる変動軸力が杭基礎の曲げモーメント分布に及ぼす影響や既報で提案した杭基礎に対する応答変位法の適用性について検証を行った。

変動軸力が増加する側と減少する側の杭の最大曲げモーメント分布を比較し、杭頭部付近における変動軸力の影響を明らかにした。また、既報でも見られた P- $\Delta$ 効果が小さい時に杭頭の曲げモーメントが最大となる杭頭免震構造特有の現象が外周部の杭でも現れることを確認した。

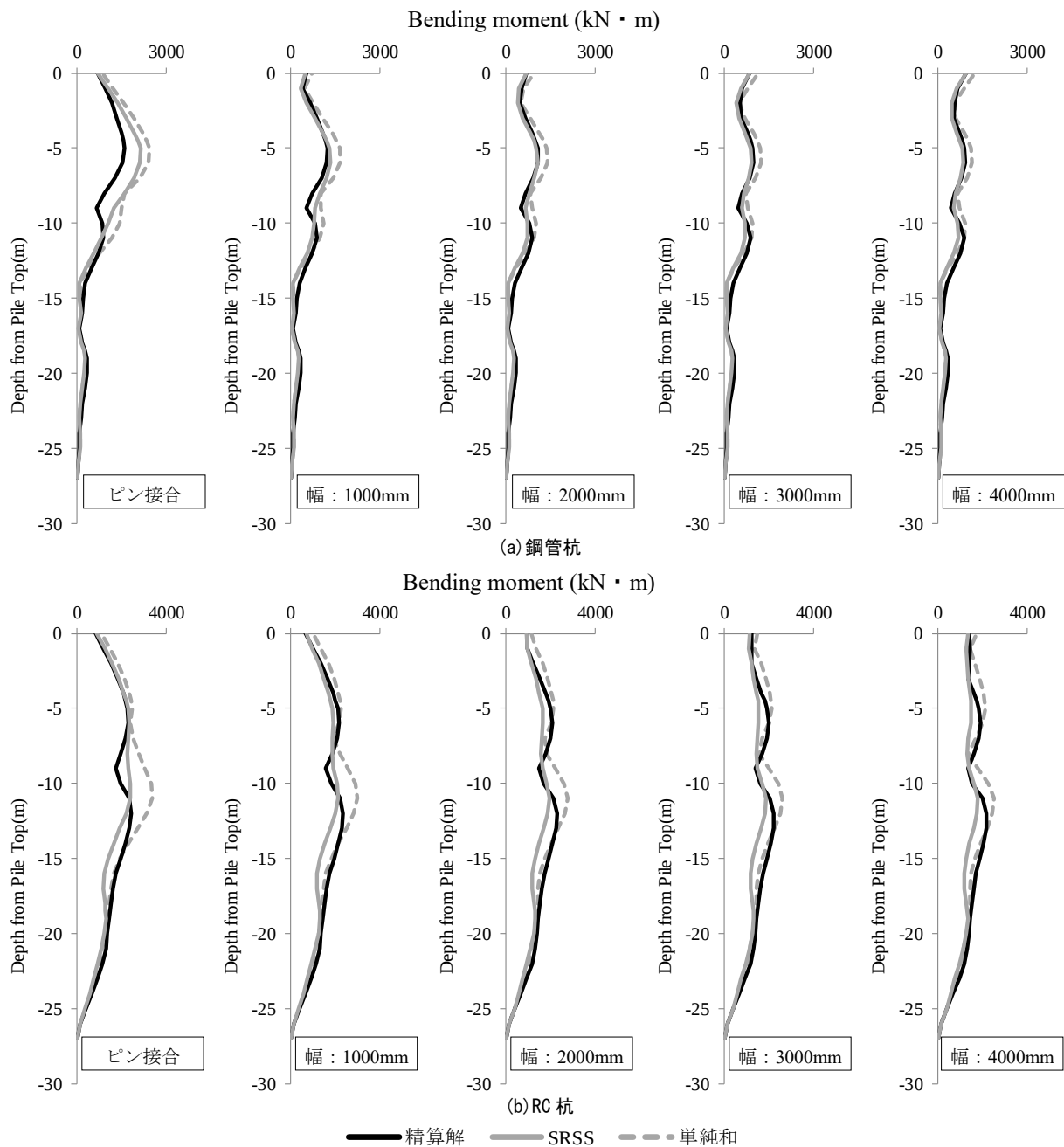


図-15 X11 通り杭の最大曲げモーメント分布

さらに、既報で提案した応答変位法については、変動軸力のピーク値に相当する積層ゴムの曲げモーメント分配率評価式を使用することにより、地震応答解析による精算解と概ね一致することを確認し、外周部の杭基礎にも本提案法が適用できることを示した。

〔謝 辞〕

最後に、本研究を行うにあたり多くの御指導を頂いた東京理科大学の北村春幸副学長、理工学部建築学科の永野正行教授、松田頼征助教、九州大学大学院・人間環境学研究院の佐藤利昭准教授、並びに、国立研究開発法人・森林研究・整備機構・森林総合研究所の鈴木賢人氏に深く感謝申し上げます。

〔参考文献〕

- 1) 浅野三男、嶺脇重雄：取付部の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価、日本建築学会技術報告集 第8号、pp.57-62、1999.6
- 2) 高岡栄治、宮田章：杭基礎の柔性を考慮した積層ゴム力学特性の解析的評価、日本建築学会構造系論文集 第678号、pp.1219-1226、2012.8
- 3) 小林正人、下田卓、西村拓也：端部回転を有する免震用積層ゴムの水平剛性と取付け部材の設計用応力に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第682号、pp.1873-1880、2012.12
- 4) 山内豊英、北村春幸、永野正行、佐藤利昭、鈴木賢人、飛田喜則：地震応答解析による杭頭免震建物の動的特性に関する研究 -動的挙動を考慮した積層ゴムの力学特性の評価-、日本建築学会構造系論文集、第81巻 第730号、pp.2025-2035、2016.12
- 5) T. Yamauchi, H. Kitamura, M. Nagano, T. Sato, K. Suzuki: Dynamic Characteristics of Buildings Constructed by Pile Top Seismic Isolation System Considering Nonlinearity of Laminated Rubber Bearing, 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No1275, 2017.1
- 6) 山内豊英、北村春幸、永野正行、佐藤利昭、鈴木賢人、松田頼征、飛田喜則：杭頭免震建物の杭基礎に対する応答変位法の適用に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第83巻 第743号、pp.69-79、2018.1
- 7) 山内豊英、飛田喜則：杭頭免震建物の側柱部に設置される積層ゴムの力学特性評価、浅沼組技術研究報告、No.30、2018
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2018
- 9) 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準、2019
- 10) 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
- 11) 護雅史、森川和彦：加振方向を考慮した群杭効率の推定式の提案、第3回日本地震工学会大会梗概集、pp.416-417、2005.1
- 12) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S.:Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Nagoya, pp.373-380, 1985
- 13) 古山田耕司、宮本裕司、三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性、第38回地盤工学研究発表会、pp.2077-2078、2003.7
- 14) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門、2009
- 15) 日本建築学会：免震構造設計指針、2001
- 16) 藤田聡、藤田隆史：重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験 第3報 剛性についての理論的検討、生産研究 38巻 第4号、pp.189-191、1986.4
- 17) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学的性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第556号、pp.43-50、2002.6