

5. 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

Evaluation of Mechanical Characteristics of Laminated Rubber Bearing Installed on Perimeter Part in Pile Top Seismic Isolation Buildings

山内 豊英*¹ 飛田 喜則*¹

要 旨

杭頭免震建物の1構面を取り出した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側柱部の積層ゴムの力学特性を評価するとともに、既報で提案した力学特性評価法との関係についても考察を行った。側柱部の変動軸力に起因し、積層ゴムの水平剛性には正・負方向で非線形性の差異が見られたが、既報で提案した積層ゴムの水平剛性評価式については変動軸力の影響が小さいことを確認した。既報で提案した積層ゴムの曲げモーメント分配率の評価式については、変動軸力に応じた面圧の最大値を適用した評価式と側柱部の解析結果が概ね一致することを確認した。

キーワード：杭頭免震構造／積層ゴム／地震応答解析／変動軸力

1. はじめに

近年、物流施設では荷崩れ防止や事業継続計画上の対策から免震化へのニーズが高まっており、大規模な計画では杭頭免震構造を採用する場合が多い。杭頭免震構造は、杭頭に直接免震装置を設置して基礎梁やマットスラブなど（以下、連結部材と称す）を小断面化する構造であり、基礎工事の合理化や建設コストの削減を可能とする。一方、杭を繋ぐ連結部材の剛性が低いため、特に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に影響を及ぼすことが指摘されている^{1)~3)}。

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^{4)~6)}。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⁴⁾や杭基礎に対する応答変位法の適用法⁵⁾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。

筆者らのこれまでの研究では、中柱部の1スパンを対象とした地盤-杭-上部構造の魚骨型モデルを使用しており、積層ゴムに作用する鉛直荷重を一定として検討を行ってきたが、建物の側柱部の積層ゴムには地震力の方向に応じた変動軸力が作用する。変動軸力は積層ゴムの力学特性に影響を及ぼすことから、筆者らが提案した応答評価法の適用性を論じるためには当該評価法と変動軸力の関係について整理する必要があると考える。

本研究では、杭頭免震建物の2次元フレームモデルを用いた地震応答解析により、変動軸力を考慮して側柱部の積層ゴムの力学特性を評価し、提案した積層ゴムの力学特性評価法⁴⁾との関係について考察した。

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^{4)~6)}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40000m²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、地震力に伴い側柱部（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。上部構造のRC柱のコンクリートの設計基準強度 F_c は36N/mm²としてヤング係数は F_c から算定⁷⁾し、S部材のヤング係数は 2.05×10^5 N/mm²とした⁸⁾。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。上部構造の部材断面は全て既報^{4)~6)}と同様に弾性梁要素とした。

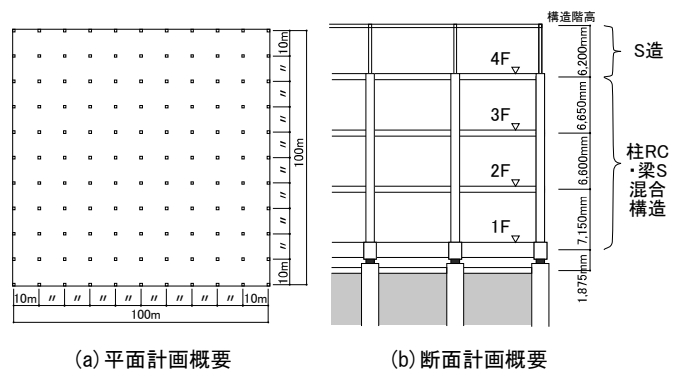


図-1 検討対象建物

*¹技術研究所構造研究グループ

解析変動因子を表-1に示す。既報^{4)~6)}までと同様に、基礎梁および杭の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で梁幅を1000mm~4000mmとした4種類の断面を設定し、杭とピン接合のケースも対象とした。杭種別は鋼管杭とRC杭の2種類とした。鋼管杭は中柱部を直径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、各杭の節点には杭の区分重量分の質点を設けた。基礎梁およびRC杭の設計基準強度 F_c は 36N/mm^2 とした。

地盤条件は、文献9)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⁹⁾と群杭係数¹⁰⁾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として算定した。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た。また、表層地盤の極限地盤反力はBromsの式⁹⁾より算定した。自由地盤は断面積 100000 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¹¹⁾、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¹²⁾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¹³⁾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として履歴減衰のみを考慮した。

表-1 解析変動因子

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

表-2 地盤-2の地盤物性諸元⁹⁾

層番号	深度 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	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

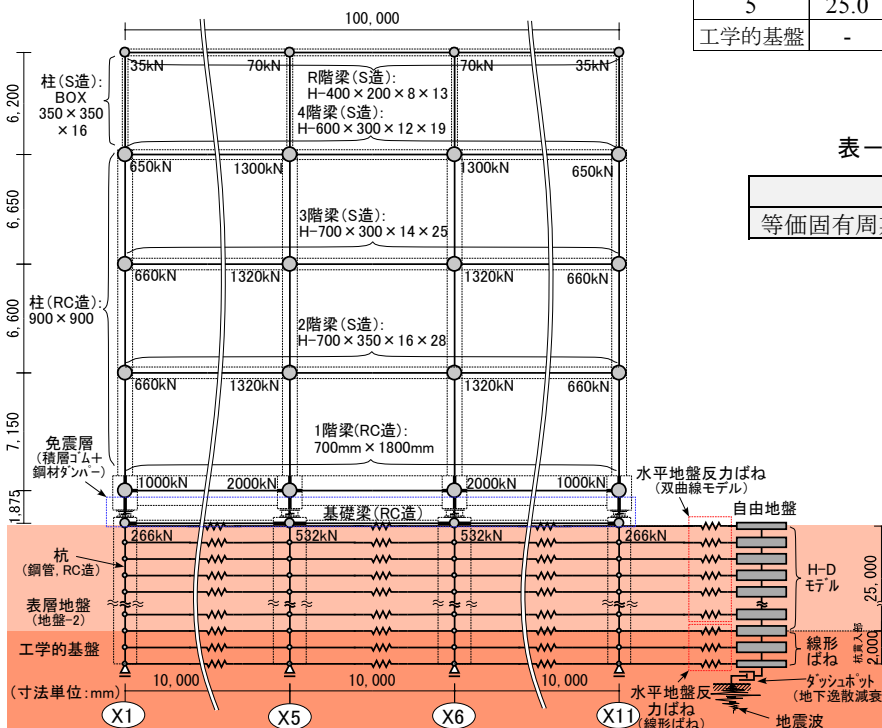


図-2 2次元フレームモデル

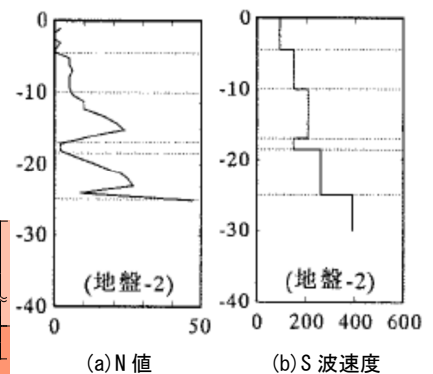


図-3 地盤-2の地盤物性の鉛直方向分布⁹⁾

2.2 免震層のモデル化

免震層も既報^{4)~6)}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。

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 κ と体積弾性率 E_∞ は文献14)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¹⁵⁾。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^{4)~6)}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/mm²)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ため³⁾、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:

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 ²)	0.39	
ヤング率: $E_0(=3G)$ (N/mm ²)	1.17	
補正係数: κ	0.85	
体積弾性率: E_∞ (N/mm ²)	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 ²)	606.8	608.1

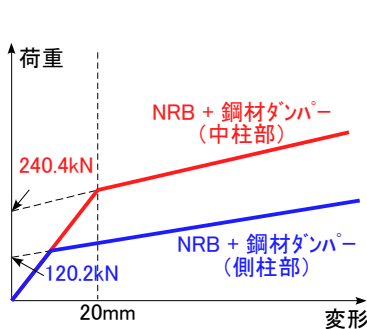
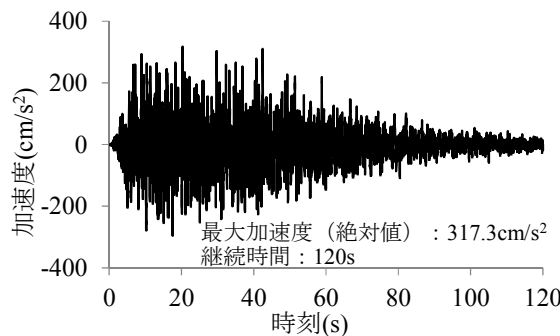
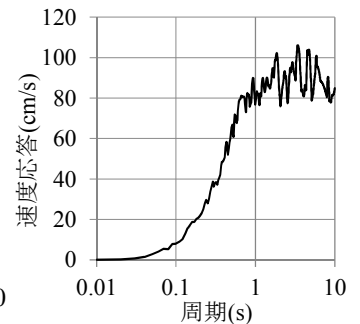


図-4 免震層の骨格曲線



(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

5.0)、長期鉛直荷重を4000kN(面圧:10.4N/mm²)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^{4)~6)}と同様に三山の方法¹⁶⁾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。

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

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 ϕ_{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. 地震応答解析の結果

3.1 積層ゴムの変形と軸力の関係

鋼管杭で基礎梁をピン接合とした場合の積層ゴムの水平変形と軸力の時刻歴を図-6に示す。図-6(a)がX6通りの中柱部（以下、X6中柱部と称す）、図-6(b)がX11通りの側柱部（以下、X11側柱部と称す）の結果を示す。水平変形は積層ゴムの下フランジに対して上フランジが右側に水平変形する場合を正とし、軸力は引張力が正、圧縮力を負とする。図-6(a)のX6中柱部では積層ゴムに作用する軸力がほとんど変動しないのに対し、図-6(b)のX11側柱部では-2686～-5491kNの範囲で大きく変動している。また、X11側柱部では水平変形と軸力が概ね逆位相で推移しており、積層ゴムが右側に水平変形すると圧縮軸力が増加し、左側に水平変形すると圧縮軸力が減少する様子がわかる。

次に、鋼管杭で基礎梁をピン接合とした場合のX11側柱部における積層ゴムの水平変形と曲げ回転角の時刻歴を図-7に示す。曲げ回転角は杭頭部が時計回りに回転する方向を正とする。図-7より、積層ゴムの水平変形と曲げ回転角は概ね同位相で推移していることがわかる。

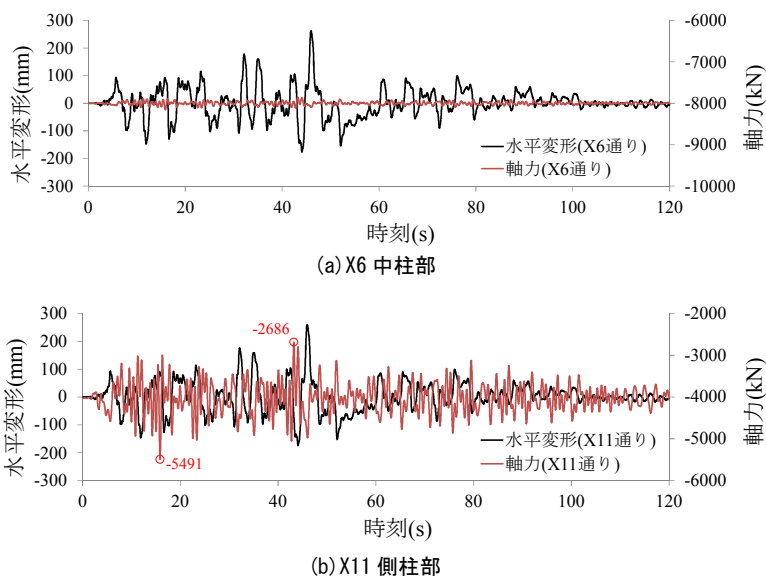


図-6 積層ゴムの水平変形と軸力の時刻歴波形

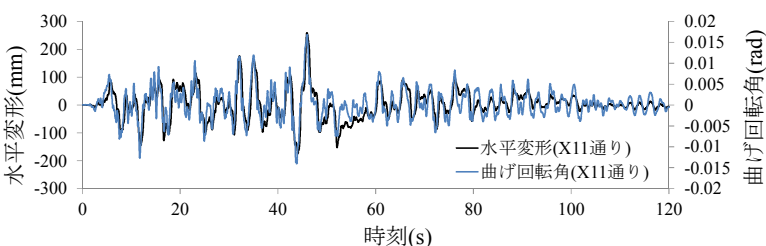


図-7 積層ゴムの水平変形と曲げ回転角の時刻歴波形

3.2 積層ゴムの等価水平剛性の評価

鋼管杭で基礎梁をピン接合とした場合のX11側柱部における積層ゴムのせん断力-水平変形履歴を図-8に示す。図-8より、水平変形が正方向の場合には剛性低下が大きくなり、負方向の場合には剛性低下が小さくなるのがわかる。図-6および図-7からもわかるように、積層ゴムが正方向に水平変形すると側柱部の軸力が増加し、それに伴って杭頭回転角も増加する。図-8において水平変形が正方向の場合に剛性低下が大きくなるのは、杭頭回転角が増加することで軸力による水平分力がより大きくなり、積層ゴムの水平剛性により強い非線形性が現れるためである。

既報⁴⁾と同様に、解析を行った全ケースについて、X11側柱部における積層ゴムのせん断力-水平変形履歴から最小二乗法により等価水平剛性 K_{eq} を導出した。更に、等価水平剛性 K_{eq} を積層ゴムの曲げ回転変形が生じない場合の水平剛性 K_h で除した値を水平剛性比率 K_{eq}/K_h とした。水平剛性比率 K_{eq}/K_h と1階梁に対する基礎梁の剛比との関係を図-9に示す。既報までと同様に、基礎梁の剛比が小さいほど剛性低下が大きく、鋼管杭ではより顕著となり最大で約12%剛性が低下している。

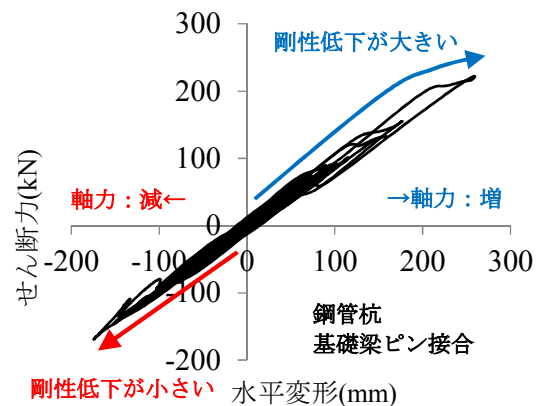


図-8 積層ゴムのせん断力-水平変形関係

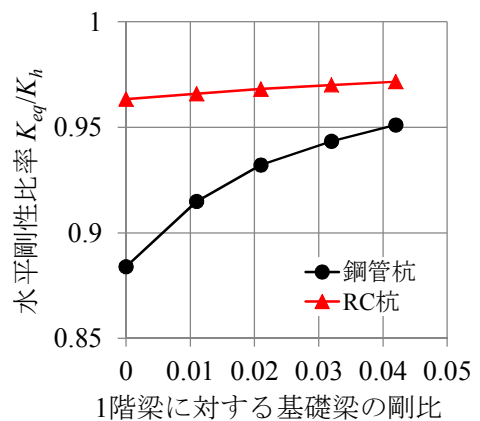


図-9 積層ゴムの水平剛性比率

次に、積層ゴムの曲げ回転剛性 K_{rp} を下部構造の回転剛性 K_B で除した値を回転剛性比 K_{rp}/K_B ^{3), 4)} と定義し、既報で示した水平剛性比率 K_{eq}/K_h と回転剛性比 K_{rp}/K_B の関係 ⁴⁾ に本論の解析結果を併せて示したものを図-10 に示す。図-10 において、X11 側柱部および X6 中柱部の結果をそれぞれ□および*のプロットで示す。図-10 より、X11 側柱部でも一定軸力とした既報の直線近似式と概ね一致し、提案した評価法で等価水平剛性を推測可能であることがわかる。図-8 では変動軸力の影響がわずかに見られたが、平均的な剛性は一定軸力の場合と概ね同じと判断できる。

3.3 積層ゴムの曲げモーメント分配率

積層ゴムの反曲点移動を表す指標として、積層ゴム上端部が負担する曲げモーメント M_A を積層ゴムに回転が生じない場合の負担曲げモーメント M_0 で基準化した値を曲げモーメント分配率 $\alpha_M (= M_A / M_0)$ と定義する ^{3), 4)}。鋼管杭で基礎梁をピン接合とした場合の X11 側柱部における時刻 t における $\alpha_M(t)$ と積層ゴムの水平変形 $\delta(t)$ の散布図を図-11 に示す。既報と同様に、積層ゴムの水平変形 $\delta(t)$ が大きくなると一定値に収束している。設計上 α_M が重要となるのは P- Δ 効果が最大となる最大変形 δ_{max} 付近であるため ⁴⁾、 $0.9\delta_{max}$ 以上の $\alpha_M(t)$ を平均して α_M を評価した ⁴⁾。

解析を行った全ケースについて曲げモーメント分配率 α_M を導出し、1 階梁に対する基礎梁の剛比との関係をプロットした図を図-12 に示す。既報までと同様に、基礎梁の剛比が小さいほど曲げモーメント分配率 α_M が大きく、鋼管杭ではより顕著となる。

次に、既報で示した曲げモーメント分配率 α_M と回転剛性比を表す指標 $\phi_{rc}(\delta_{max}) \cdot K_{rp}/K_B$ の関係 ⁴⁾ に本論の結果を併せて示したものを図-13 に示す。側柱部の α_M も一定

軸力とした既報の直線近似式付近には分布するものの、横軸の増加に伴い極僅かな差異が生じている。これは、変動軸力により $0.9\delta_{max}$ 以上の積層ゴムの面圧が $12.5 \sim 12.8 \text{ N/mm}^2$ 程度まで増加するためである。一方、併せて示した面圧 12.7 N/mm^2 で一定とした場合の直線近似式 ¹⁰⁾ とは一致しており、側柱部の α_M は変動軸力に応じた評価式により推測可能と考えられる。

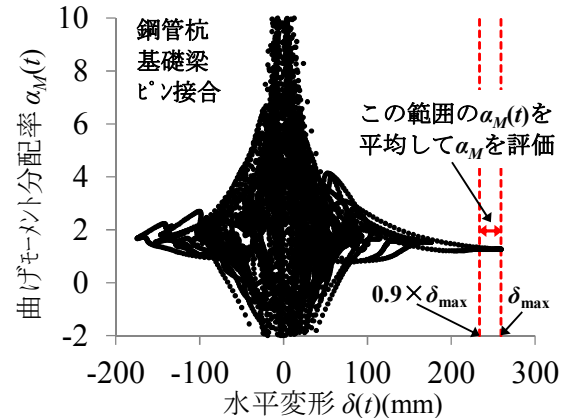


図-11 時刻 t における積層ゴムの曲げモーメント分配率と水平変形の関係

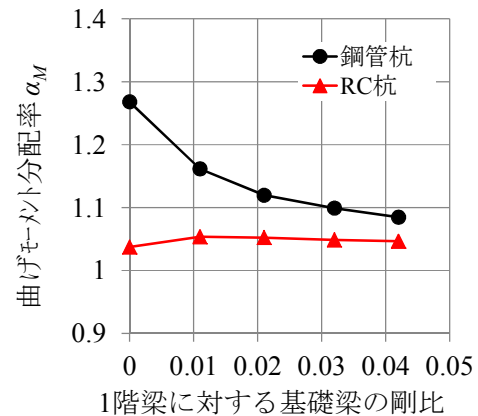


図-12 積層ゴムの曲げモーメント分配率

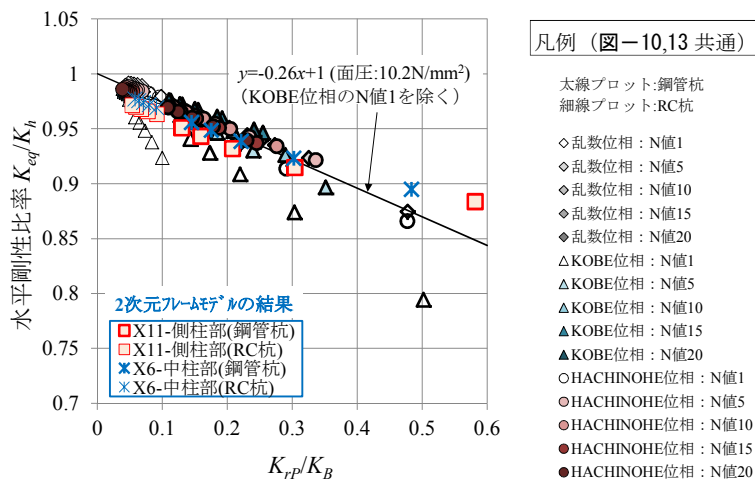


図-10 水平剛性比率と回転剛性比の関係 ⁴⁾

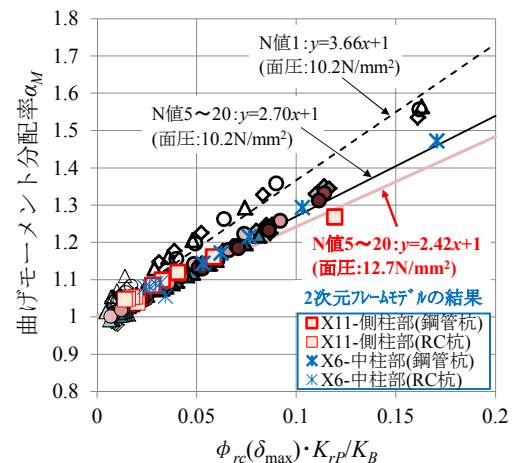


図-13 曲げモーメント分配率と回転剛性比の関係 ^{4), 17)}

4. 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、変動軸力が作用する側柱部の積層ゴムの力学特性を評価し、既報で提案した力学特性評価法との関係について考察を行った。

側柱部の変動軸力に起因し、積層ゴムの水平剛性において正・負方向で非線形性の差異が見られたものの、積層ゴムの水平剛性評価式は一定軸力として導出した既報の評価式と側柱部の解析結果が概ね一致することを確認した。免震層全体の水平剛性を対象とした場合、側柱部の変動軸力が水平剛性に及ぼす影響は小さい。

積層ゴムの曲げモーメント分配率の評価式については、変動軸力の最大値相当の一定軸力で導出した既報の評価式と側柱部の解析結果が概ね一致したことから、面圧の最大値を適用した評価式により推測可能と考えられる。

[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) 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

- 6) 山内豊英：地盤との連成振動を考慮した杭頭免震構造の応答評価法の提案、東京理科大学学位論文、2018 (浅沼組技術研究報告 (別冊)、No.29-1)
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010
- 8) 日本建築学会：鋼構造設計基準許容応力度設計、2005
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門、2009
- 14) 日本建築学会：免震構造設計指針、2001
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No1275, 2017.1