# 1. 動的挙動を考慮した杭頭免震建物における積層ゴム力学特性の評価

Evaluation of Characteristics of Laminated Rubber Bearing in Pile Top Seismic Isolation Buildings Considering Seismic Behaviors

山内 豊英\*1 飛田 喜則\*1 橋本 拓\*2 関 敏宏\*2

# 要旨

杭頭免震建物を対象として、近年の研究に基づく連成解析モデルを構築し、基礎梁剛性、杭種別、地盤条件を変動因子とした地震応答解析による検討を行い、動的挙動を考慮した積層ゴム力学特性の定量的評価を行った。積層ゴムの力学特性として等価水平剛性と積層ゴム上下部材への曲げモーメント分配率に着目し、解析変動因子に応じた各特性値の傾向を明らかにした。また、地震による動的外乱下の積層ゴムの力学特性値は静的解析では適正に評価できないことを示し、本研究による評価の妥当性を示した。

キーワード: 杭頭免震工法/積層ゴム/非線形性/地震応答解析

#### 1. はじめに

近年、物流施設では荷崩れの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、特に大規模 な計画では杭頭免震工法を採用する場合が多い。杭頭免 震工法は杭頭に直接免震装置を設置して杭を連結する基 礎梁やマットスラブなど(以下、連結部材と称す)を小 断面化あるいは省略する工法であり、従来の基礎免震構 造と比較して基礎工事の合理化や建設コストの削減が可 能となる。

一方、杭頭免震工法は連結部材の剛性が低いことから、 杭頭に曲げ回転変形が生じ易くなる。免震装置に積層ゴムを使用した場合、杭頭に過大な曲げ回転変形が生じる と鉛直荷重の水平分力が積層ゴムへの付加せん断力として作用することから、見かけ上の水平剛性が低下し、従来の水平剛性評価式では水平変形を過小評価することが 指摘されている <sup>1)</sup>。また、積層ゴムの下端に曲げ回転変 形が生じると、従来の基礎免震では積層ゴムの中央高さ となる反曲点が下方に移動する。反曲点が下方に移動すると、積層ゴムのせん断力による曲げモーメントの上下 部材への分配率が変化するため、それらの影響を考慮する必要も生じる。

このような杭頭免震特有の現象に着目し、既往研究<sup>2),3)</sup>では積層ゴムの力学特性の定量的評価が行われている。いずれの研究においても、下部構造の連成解析モデルに積層ゴム端部の曲げ回転変形に伴う力学特性変化を考慮できる積層ゴムモデル<sup>4),5)</sup>を組み込み、上部構造からの慣性力のみを外力とした静的解析で検討が行われている。

しかし、地震による動的外乱の中では、静的解析のよ

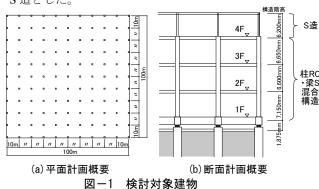
うに積層ゴムの水平変形に応じて曲げ回転変形が単調増加するとは考え難い。また、作用する外力についても、慣性力だけでなく地盤変形の影響も考慮する必要がある。動的特性や地盤変形も考慮できる地震応答解析で杭頭免震の研究を行った例 <sup>6)</sup>はあるが、積層ゴムの力学特性の定量的評価を行った例は見られない。

本研究では、杭頭免震建物を対象とした地盤-杭-基礎梁 -積層ゴム-上部構造の連成解析モデルを用いて地震応答 解析を行い、動的挙動を考慮した積層ゴムの力学特性に ついて定量的評価を行った結果を述べる。

### 2. 解析モデルおよび地震応答解析の概要

# 2.1 検討対象建物

杭頭免震工法は中低層の大型物流施設で採用されることが多いことから、検討対象建物は図-1のような地上4階建て、延床面積 40000 ㎡の物流施設とした。平面計画は縦横共に  $10m \times 10$  スパンとし、 $1\sim3$  階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、4階をS 造とした。



<sup>\*1</sup>技術研究所構造研究グループ \*2東京本店設計部構造第2グループ

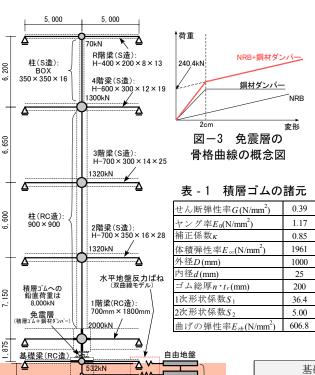
## 2.2 連成解析モデル

### 2.2.1 連成解析モデルの概要

本研究で用いた連成解析モデルを図-2に示す。図-1に示すように、物流施設は10m前後の均等スパンで計画されることが多いため、積層ゴムを中心に中柱部の1スパン分を取り出した図-2の魚骨型モデルで建物全体の挙動を代表できると判断した。また、魚骨型の連成モデルとすることで地盤や杭の挙動が積層ゴムの曲げ回転変形に与える影響を直接評価することも可能となる。

上部構造の RC 柱のコンクリートの設計基準強度 Fc は  $36 \text{N/mm}^2$  とし、ヤング係数は文献 7) の方法により Fc から 算 定 し た。 S 部 材 の ヤン グ 係 数 は 文 献 8) よ り  $205000 \text{N/mm}^2$  とした (以下、同様とする)。上部構造の柱、梁は弾性梁要素とし、柱と梁の接合部節点に 1 スパンの 負担重量に相当する質点を設けた。

積層ゴムは天然ゴム系とし、作用する鉛直荷重は 8000kN(面圧で  $10.2~N/mm^2$ )で一定とした。積層ゴムは 三山の方法  $^{5)}$  でモデル化した(詳細は 2.2.2 で述べる)。 積層ゴムの諸元を表-1 に示す。 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



杭 (鋼管, RC造

表層地盤 (N値一様)

(寸法単位:mm)

水平地盤反力ばね

図-2 連成解析モデル

正係数 $\kappa$ と体積弾性率 $E_\infty$ は文献 9)を参考にした。曲げに対する弾性率 $E_n$ は式(1)で算定した  $^{10}$ 。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 $k_s$  は式(2)で表される。

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

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

鋼材ダンパーは完全弾塑性の標準バイリニア型としてモデル化し、降伏耐力を降伏せん断力係数で 0.04 相当の 240.4kN、降伏変位を 2cm とした。免震層の骨格曲線の概念図を図-3 に示す。

下部構造部材(基礎梁、杭)、地盤条件、表層地盤厚は、 積層ゴム下端に生じる曲げ回転変形への影響が大きいた め、解析の変動因子とした。解析変動因子を表-2に示す。

基礎梁は RC (Fc=36N/mm<sup>2</sup>) の弾性梁要素とした。**表** -2 に示ように、基礎梁の梁せいは一律 350mm として梁 幅を 1000mm~4000mm とした 4 種類の断面を設定し、基 礎梁の無いケース (杭とピン接合) も対象とした。**表-2** には 1 階梁に対する剛比も併せて示す。

杭は鋼管杭と RC 杭の 2 種類を設定し、いずれも弾性 梁要素とした。杭長は 22m、32m の 2 種類として杭先端 2m を工学的基盤に貫入させた。鋼管杭は直径 1200mm で 鋼板厚を 19mm、RC 杭は直径 2000mm( $Fc=36N/mm^2$ )とした。各杭には杭の区分重量分の質点を設けた。

自由地盤と水平地盤反力ばねの設定は地盤条件に依存し、 $\mathbf{表}-\mathbf{2}$  のように、 $\mathbf{N}$  値を  $\mathbf{1}\sim\mathbf{20}$  の  $\mathbf{5}$  種類とした。 $\mathbf{N}$  値  $\mathbf{1}$  のみ粘性土、他は砂質土とし、いずれも一様地盤とした。水平地盤反力ばねは  $\mathbf{1m}$  ピッチで設定し、 $\mathbf{Francis}$  の式に群杭係数  $\beta_{\mu}$   $\mathbf{111}$  を考慮した式(3)の  $k_{\sigma}$  を初期剛性とした。

$$k_{fS} = \frac{1.3E_S}{1 - v_S^2} \left( \frac{E_S B^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} H \beta_H^{4/3}, (E_S = 2(1 + v_S) \rho V_S^2)$$
 (3)

ここで、 $E_s$  は地盤のヤング係数、 $v_s$  は地盤のポアソン

表 - 2 解析変動因子

	基礎梁*1		杭種別		地盤条	表層		
幅(mm)	せい(mm)	剛比*2	小儿生力リ	N値	土質	$V_S^{*3}$ (m/sec)	地盤厚(m)	
杭とピン接合		0.0	鋼管杭	1	粘性土	100		
1000	350	0.011	(径1200mm、	5	砂質土	137	30	
2000	350	0.021	厚19mm) RC杭	10	砂質土	172		
3000	350	0.032	- 5 -	15	砂質土	197		
4000	350	0.042	(径2000mm、 Fc=36N/mm <sup>2</sup> )	20	砂質土	217		
*1 RC造、Fc *2 1階梁に対			-	*3 VsはN値から推定			-	

比で一律 0.48 とした。 B は杭直径、  $E_p$  および  $I_p$  はそれぞれ杭のヤング係数および断面二次モーメント、 H は区分された土層厚、  $V_s$  は地盤の S 波速度、  $\rho$  は土の密度で一律  $1.8t/m^3$  とした。表層地盤の  $k_s$  を求める際の  $V_s$  には、自由地盤の地盤応答解析結果に基づき、地盤のせん断剛性低下(最大せん断歪みの 65% 相当の剛性低下)を考慮した等価線形物性による  $V_s$  を用いた。工学的基盤の  $V_s$  は 450m/sec とした。表層地盤は双曲線モデルの非線形ばね、工学的基盤は線形ばねとした。表層地盤における水平地盤反力ばねの極限地盤反力は Broms の式より算定した  $^{11}$ 0。

自由地盤は断面積  $10000 \text{m}^2$  の土柱を想定し、1 m ピッチで区分した多質点系モデルとした。土層区分間はせん断ばね要素で構成し、表層地盤は石原、吉田の方法に基づく H-D モデル  $^{12}$ 、工学的基盤は線形ばねとした。せん断ばねの初期剛性は初期地盤物性による  $V_s$  と密度  $\rho$  から算定し、表層地盤の  $V_s$  は N 値から推定した  $^{13}$ )。表層地盤の歪依存特性は、古山田ら  $^{14}$  の提案に基づき、粘性土の基準せん断歪  $\gamma_{0.5}$  および最大減衰定数  $h_{\text{max}}$  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。また、自由地盤の下端には工学的基盤の半無限性を表すダッシュポット  $^{15}$  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。

# 2.2.2 連成解析モデルにおける積層ゴムモデル

杭頭免震建物における積層ゴムの力学特性を評価するには、積層ゴム端部の曲げ回転変形に伴う力学特性の変化を表現できる解析モデルを使用する必要がある。三山は $^{5}$ 、飯塚 $^{4}$ が Haringx 理論に基づいて定式化した積層ゴムの剛性マトリクスの物理的意味をより明確化し、式(4)のように水平剛性  $[K_{\scriptscriptstyle R}]$ 、幾何学的非線形性を表す剛性  $[K_{\scriptscriptstyle R}]$ 、曲げ回転剛性 $[K_{\scriptscriptstyle R}]$ に分けて整理した。Haringx 理論による端部回転を有する積層ゴムの概念図を $\mathbf{Z}-\mathbf{Z}$  に示す。

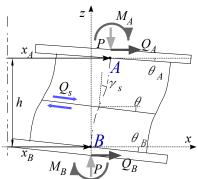


図-4 積層ゴムのモデル概念図

$$= \begin{pmatrix} K_h \begin{bmatrix} 1 & -h/2 & -1 & -h/2 \\ & h^2/4 & h/2 & h^2/4 \\ & & 1 & h/2 \\ & sym. & & h^2/4 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} 0 & -1/2 & 0 & -1/2 \\ & h/4 & 1/2 & h/4 \\ & & 0 & 1/2 \\ & sym. & & h/4 \end{bmatrix}$$

$$+K_{r}\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ & 1 & 0 & -1\\ & & 0 & 0\\ & sym. & & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{A}\\\theta_{A}\\x_{B}\\\theta_{B}\end{bmatrix}$$
(4)

 $Q_A$ および $Q_B$ 、 $M_A$ および $M_B$ 、 $x_A$ および $x_B$ 、 $\theta_A$ および $\theta_B$ はそれぞれ図-4のA点およびB点の水平力、曲げモーメント、水平変位、曲げ回転角を示し、Pは鉛直荷重を示す。

また、式(4)の水平剛性を表す  $K_h$  と曲げ回転剛性を表す  $K_r$  に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、水平変位依存性  $\phi_h$  および  $\phi_{rc}$  を乗じて定式化した。更に、西村ら  $^{16}$  により曲げ回転剛性の材料非線形性  $\phi_{\sigma}$  も考慮され、 $K_h$  と  $K_r$  を式(5) および式(6)のように表した。

$$K_{h} = \frac{k_{s}}{h} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^{2} \right\} \phi_{h} \tag{5}$$

$$K_{r} = \frac{k_{rc}}{h} \left\{ 1 - \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^{2} \right\} \phi_{rc} \cdot \phi_{\sigma}$$
 (6)

ここで

$$\phi_h = \left(\frac{x}{nt_r}\right)^u \tag{7}$$

$$\phi_{rc} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{1}{2} \theta_d + 2 \theta_d \cos^2 \theta_d \right)$$

$$-\frac{13}{6}\sin^3\theta_d\cos\theta_d - \frac{5}{2}\sin\theta_d\cos^3\theta_d$$
 (8)

$$\cos \theta_d = \frac{x}{D} \tag{9}$$

$$\phi_{\sigma} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta} \left( \left| \frac{\theta}{\theta_{y}} \right| - 1 \right)^{\frac{1+\alpha}{\alpha}}} \left( \left| \theta \right| > \theta_{y} \right)$$
(11)

$$\theta_{y} = \frac{Z(P/A + \sigma_{y})}{K_{b}h^{2}/4 + PH/4 + K_{z}}$$
 (12)

式(7)の水平剛性の水平変位依存性 φ, は、三山の実験結 果 $^{5)}$ の近似式であり、積層ゴムの水平変形x、ゴム層数n、 ゴム 1 層の厚さ  $t_r$ 、 $\phi_t$  の分布形状を決めるパラメータ uで構成される。なお、三山による積層ゴムの試験検証 5) により、式(7)はせん断変形で 150%まで整合することが 確認されている。

式(8)の曲げ回転剛性の水平変位依存性 φ... は、積層ゴム の水平変形xと積層ゴムの直径Dにより構成される関数 であり、図-5のように、水平変形xの変化に伴う積層ゴ ム上下の重なり部分の重心回りの断面二次モーメントと 積層ゴム全断面積の断面二次モーメントの比を表す。ま た、式(10)と式(11)の ø は曲げ回転剛性の材料非線形性を 表す。 $\phi_z$ は、積層ゴムの曲げ回転角 $\theta$ 、断面係数Z、引 張降伏応力度 $\sigma$ 、最外縁の応力度が $\sigma$ 。に達する時の曲 げ回転角 $\theta_v$ 、 $\phi_a$ の分布形状を決めるパラメータ $\alpha$  および βなどで構成される。なお、三山<sup>5)</sup>、石井ら<sup>17)</sup>および西 村ら 16)による積層ゴムの試験検証により、式(8)、式(10) および式(11)はせん断変形で250%、曲げ回転角で0.02rad まで整合することが確認されている。

連成解析モデルの積層ゴムは式(4)の三山による方法で モデル化した。ただし、本研究では幾何学的非線形性に

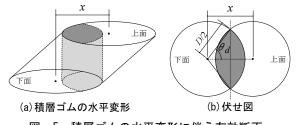
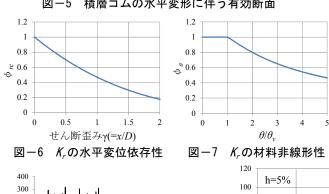


図-5 積層ゴムの水平変形に伴う有効断面



200

100

-100

-200

-300

-400

100 地震波の時刻歴加速度波形と速度応答スペクトル

継続時間: 120sec

60

時刻(sec)

速度応答(cm/sec)

120

80

60

40

20

0.01

起因する積層ゴムの水平剛性低下のみに着目することと し、積層ゴムの水平剛性  $K_n$  を表す式(5)の水平変位依存性  $\phi_{k}$  を考慮せず  $\phi_{k} = 1$  とした。また、式(11)の曲げ回転剛性 の材料非線形性  $\phi_a$  の分布形状を決めるパラメータ  $\alpha$  お よび $\beta$ は、西村らの実験結果 16) より $\alpha$  = 10、 $\beta$  = 40 とし、 よび $\phi_{\sigma}$ の分布形状を図-6 および図-7 に示す。

### 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 に基づいて作成した。地震波の位相特性には乱数を用い た。入力地震波の時刻歴加速度波形と減衰定数 5%の速度 応答スペクトルを図-8に示す。地震波は、自由地盤の下 端に設けた工学的基盤の半無限性を表すダッシュポット を介して入力した。

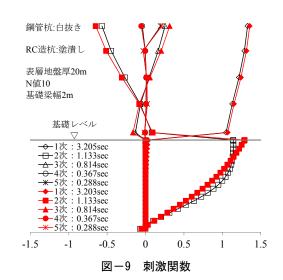
### 3. 地震応答解析の結果

#### 3.1 固有値解析結果

代表して表層厚 20m、N 値 10、基礎梁幅 2m のモデル の刺激関数を図-9に示す。固有値解析においては、免震 層の剛性はせん断歪 100%時の等価剛性、自由地盤のせん 断ばね剛性も前述と同様に地盤応答解析に基づく剛性低 下を考慮した。1次モードは免震装置のせん断変形に伴う モードであり、2次モードは杭部の形状から明らかなよう に地盤振動の影響によるモードである。基礎梁幅 2m での 全モデルの固有周期一覧を表-3に示す(網掛け部は地盤 振動の影響によるものを示す)。

# 3.2 積層ゴムの等価水平剛性

連成解析モデルにおける積層ゴムのせん断力と水平変 形の履歴の一例を図-10に示す。同図には式(4)における 水平剛性 $[K_{H}]$ による成分と幾何学的非線形性を表す剛性



周期(sec)

10

 $[K_{
ho}]$ による成分の履歴も併せて示す。積層ゴム下端に曲 げ回転変形が生じると積層ゴムの見かけ上の水平剛性が 低下することが指摘されており $^{1}$ 、図-10から $[K_{\rho}]$ によ る負剛性の履歴に起因して総せん断力-水平変形関係の 水平剛性が低下する様子がわかる。

そこで、連成解析モデルによる地震応答解析の積層ゴ ムの総せん断力-水平変形の履歴から積層ゴムの等価水 平剛性  $K_{eq}$  を導出した。また、既往研究で行われている静 的解析との差異を見るため、地震応答解析における免震 層の最大せん断力作用時に相当する慣性力を図-11の解 析モデルに静的に与えた場合の等価水平剛性も導出した。 等価水平剛性を算定する際の直線近似には最小二乗法を 用いた。

表-3 固有周期一覧(sec)

	N	1次		2次		3次		4次		5次			
	値	20m*	30m*	20m	30m	20m	30m	20m	30m	20m	30m		
鋼管杭	1	3.26	3.39	2.38	3.22	0.82	0.84	0.58	0.82	0.37	0.50		
	5	3.23	3.25	2.06	3.09	0.81	0.81	0.47	0.68	0.37	0.40		
	10	3.21	3.21	1.13	1.89	0.81	0.81	0.37	0.46	0.29	0.37		
	15	3.20	3.20	0.88	1.26	0.81	0.81	0.37	0.37	0.29	0.34		
	20	3.19	3.19	0.81	1.03	0.69	0.81	0.37	0.37	0.29	0.29		
RC造杭	1	3.28	3.39	2.38	3.22	0.82	0.84	0.58	0.82	0.37	0.50		
	5	3.23	3.25	2.06	3.08	0.81	0.81	0.47	0.68	0.37	0.40		
	10	3.20	3.20	1.13	1.89	0.81	0.81	0.37	0.46	0.29	0.37		
	15	3.19	3.19	0.88	1.26	0.81	0.81	0.37	0.37	0.29	0.34		
	20	3.19	3.19	0.81	1.03	0.69	0.81	0.37	0.37	0.29	0.29		

\*各次数の下欄の値は表層地盤厚を示す。

積層ゴムの水平剛性比率

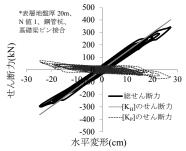
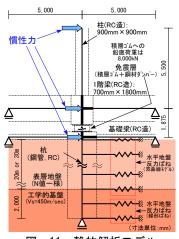


図-10 積層ゴムのせん断力と 水平変形の履歴

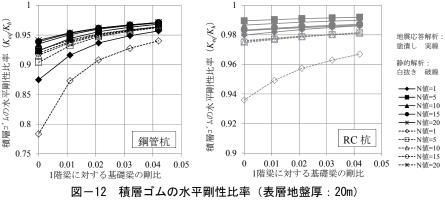


静的解析モデル 図-11

地震応答解析および静的解析それぞれの等価水平剛性  $K_{eq}$  を積層ゴムの端部回転が無い時の水平剛性  $K_{h}$  で除し た水平剛性比率  $K_{eq}/K_h$  を図-12 および図-13 に示す。 横軸は 1 階梁に対する基礎梁剛比を示しており、表-1 の基礎梁剛比と対応する。地震応答解析の水平剛性比率 (実線の塗潰しプロット) によると、鋼管杭では表層厚 20m で最大 13%程度、表層厚 30m で最大 17%程度の剛性 低下が見られ、RC 杭では全てが 4%以下に納まっている。 一方、静的解析の水平剛性比率(破線の白抜きプロット) によると、鋼管杭では表層厚 20m、30m ともに最大 22% 程度、RC 杭で最大5~6%程度もの剛性低下となる。いず れも地震応答解析の剛性低下を上回り、特に軟弱地盤で は静的解析の方が剛性低下を過大評価する傾向がある。

# 3.3 積層ゴムの曲げモーメント分配率

杭頭免震工法のように積層ゴムの下端に曲げ回転変形 が生じる場合の積層ゴム端部に分配する曲げモーメント  $M_A$  および  $M_B$  と、式(4)の 3 つの剛性マトリクスによる分 配を示した概念図を図-14に示す。水平剛性 $[K_H]$ と幾何 学的非線形性を表す剛性 $[K_p]$ は上下部材に均等に曲げモ ーメントを分配するが、曲げ回転剛性 $[K_R]$ による一様な 曲げモーメント分布により反曲点が下方に移動して上部 材への曲げモーメント分配率が大きくなることが理解で きる。以下、積層ゴムの反曲点移動に伴う曲げモーメン トの分配を定量的に評価するため、積層ゴム上端部が負 担する曲げモーメントM。を回転が生じない場合の曲げ



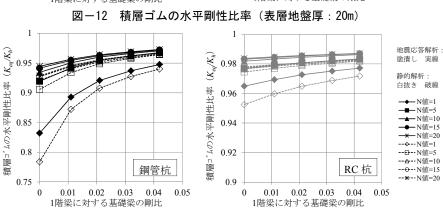


図-13 積層ゴムの水平剛性比率 (表層地盤厚:30m)

モーメント $M_0$ で基準化した曲げモーメント分配率 $\alpha_M$ を式(13)で定義する 3)。

$$\alpha_{M} = \frac{M_{A}}{M_{C}} \tag{13}$$

連成解析モデルによる地震応答解析の積層ゴムの水平 変形と曲げモーメント分配率  $\alpha_{\scriptscriptstyle M}$  の時刻歴を重ねた一例 を図-15に示す。図-15によると、水平変形が0と交差 する付近で $\alpha_M$ が大きく変動する様子がわかる。これは、 地震応答解析では積層ゴムの水平変形が 0 付近となる場 合でも曲げ回転変形によるモーメント分配が生じている ためである。このことは図-14からも理解でき、静的解 析とは異なる部分である。

一方、図-15において、水平変形の絶対値がある程度 大きくなると $\alpha_{N}$ の値が安定することがわかる。設計にお いて $\alpha_{\scriptscriptstyle M}$ が重要となるのは、P- $\triangle$ 効果や積層ゴムのせん断 力による曲げモーメントが大きくなる時、つまり、積層 ゴムの水平変形が大きい時に限定される。

ここで、積層ゴムの水平変形の時刻歴 $\delta(t)$ を最大水平 変形  $\delta_{\max}$  で基準化した  $\left|\delta(t)/\delta_{\max}\right|$  と曲げモーメント分配 率の時刻歴 $\alpha_{M}(t)$ の散布図の一例を図-16 に示す。図-16 によると $|\delta(t)/\delta_{\max}|$ の増加に伴って $\alpha_{M}$ が一定値に収 束することがわかる。全ケースで同様の傾向が見られた ため、本研究では積層ゴムの水平変形の絶対値が  $0.9 \times \delta_{\max}$  以上となる区間の  $\alpha_{\scriptscriptstyle M}(t)$  を平均して  $\alpha_{\scriptscriptstyle M}$  を評価 することとした。

積層ゴムの曲げモーメント分配率  $\alpha_{\scriptscriptstyle M}$  と 1 階梁に対す る基礎梁剛比との関係を図-17 および図-18 に示す。ま た、水平剛性比率と同様に、静的解析による曲げモーメ ント分配率  $\alpha_M$  も同図に併せて示す。

しプロット)は、鋼管杭では表層厚 20m、30m ともに最 大 1.5 程度になるのに対し、RC 杭では最大でも 1.08 程度 と小さく、表層厚 20m の N 値 5 では 1 を下回っている。

静的解析の曲げモーメント分配率 $\alpha_{\scriptscriptstyle M}$ (破線の白抜きプ ロット) は、鋼管杭で表層厚 20m、30m ともに最大 1.5 程度、RC 杭で最大 1.1 程度となる。また、鋼管杭では地 震応答解析と静的解析が概ね整合するが、RC 杭では両者 に差異が見られる。

# 3.4 動的挙動を考慮した積層ゴム力学特性の考察

積層ゴムの最大水平変形と 1 階梁に対する基礎梁剛比 との関係を示した図-19 および図-20 によると、杭種別 にかかわらず、いずれの図においても地震応答解析と静 的解析の差異は小さく概ね整合している。一方、積層ゴ ムの最大曲げ回転角と 1 階梁に対する基礎梁剛比との関 係を示した図-21 および図-22 によると、鋼管杭では地 震応答解析と静的解析が概ね整合するものの、RC 杭では 両者に差異が見られる。上部構造からの慣性力と地盤変 形による影響の両方を考慮できる地震応答解析に対し、 静的解析は上部構造からの慣性力のみを対象としており 地盤変形による影響が現れない。したがって、RC 杭の積 層ゴムの曲げモーメント分配率や曲げ回転角で見られる 地震応答解析と静的解析の差異は地盤変形の影響に起因 することが推測される。

ここで、地震応答解析における鋼管杭および RC 杭そ れぞれの積層ゴムの曲げ回転角と水平変形の軌跡の一例 を図-23 に示す。鋼管杭では両者に正の相関が見られ、 RC 杭は無相関に近い軌跡を描いている。これは、免震効

鋼管杭

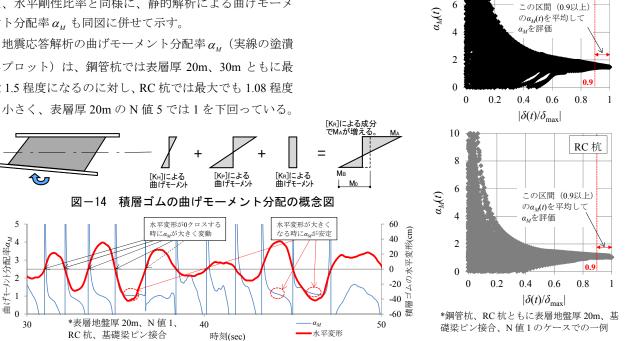


図-16  $|\delta(t)|/\delta_{max} \geq \alpha_{M}(t)$  の散布図

図-15 積層ゴムの曲げモーメント分配率と水平変形の関係

果による長周期成分が卓越する積層ゴムの水平変形に対し、積層ゴムの曲げ回転角は地盤振動による短周期成分の割合が相対的に高くなり、RC 杭ではより強く現れていることを意味する。このことは、既報 <sup>6)</sup>で示した積層ゴムの曲げ回転角のスペクトルにおいて、RC 杭の場合に地

盤の固有周期付近にピークが見られることからもわかる。 このように、地震応答解析では下部構造特性に応じて 積層ゴムの水平変形と曲げ回転角との相関が変化する。 積層ゴムの曲げモーメント分配率や水平剛性低下におい て地震応答解析と静的解析に差異が生じているのはこの

> 相関関係に起因すると考えられる。以 上より、動的構造特性を考慮した積層 ゴムの水平剛性低下や曲げモーメント 分配率は、静的解析では適正に評価す ることが困難だと考えられる。

#### 1.6 RC 杭\_ 鋼管杭 地震応答解析 途清し 実線 ムの曲げモーバト分配率a<sub>M</sub> 静的解析 1.4 ムの曲げモ/小分配 1.05 白抜き 破線 - N値=1 —**■**—N値=5 1.2 —▲ N値=10 —● N値=15 ────N値=13 ─────N値=20 ----◆---N値=1 1.1 --E--N値=5 --△--N値=10 --⊖--N値=15 1 害 -\*--N値=20 0.95 0.9 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0 0.01 0.02 0.03 1階梁に対する基礎梁の剛比 1階梁に対する基礎梁の剛比

図-17 積層ゴムの曲げモーメント分配率 (表層地盤厚:20m)

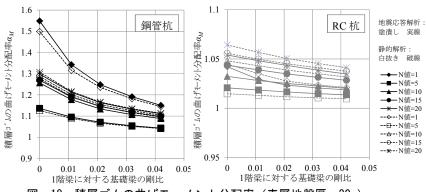


図-18 積層ゴムの曲げモーメント分配率 (表層地盤厚:30m)

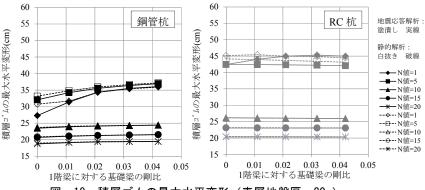


図-19 積層ゴムの最大水平変形 (表層地盤厚: 20m)

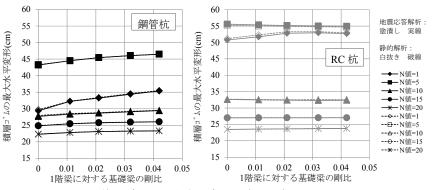


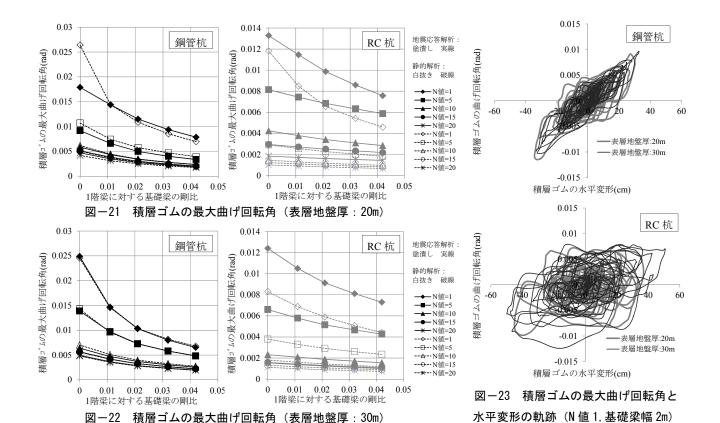
図-20 積層ゴムの最大水平変形 (表層地盤厚:30m)

#### 4. まとめ

杭頭免震建物を対象として、近年の研究に基づく連成解析モデルを構築し、地震応答解析によるパラメトリック・スタディにより、動的挙動を考慮した積層ゴム力学特性の定量的評価を行った。積層ゴムの力学特性として等価水平剛性と曲げモーメント分配率に着目し、基礎梁剛性、杭種別、地盤条件に応じた各特性値の傾向を明らかにした。また、地震による動的外乱下の積層ゴムの力学特性値は静的解析では適正に評価できないことを示し、本研究による評価の妥当性を示した。

# [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・理工学部建築学科の北村春幸教授、永野正行教授、鈴木賢人助教、松田頼征助教、並びに、九州大学大学院・人間環境学研究院の佐藤利昭准教授に深く感謝申し上げます。



# 「参考文献]

- 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) 飯塚真巨:積層ゴムの剛性マトリクス Haringx 理論 に基づく定式化、日本建築学会学術講演梗概集、 pp.619-620、1995.8
- 5) 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
- 6) 山内豊英、北村春幸、佐藤利昭、森浩二: 杭頭免震 建物における部材構成や地盤条件を変動因子とした 解析的検討 その 2 魚骨モデルを用いた地震応答解 析による検討、日本建築学会学術講演梗概集、 pp.551-552、2013.
- 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: 免震構造設計指針、2001
- 10)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
- 11) 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
- 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) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説V耐震設計編、 2012
- 14) 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
- 15) 北村春幸:性能設計のための建築振動解析入門、2009
- 16) 西村拓也、渡辺宏一: 3 次元免震装置における積層ゴムの回転剛性評価と解析モデルの検証、清水建設研究報告 第87号、pp.19-25、2010.1
- 17) 石井健、菊地優、猿田正明、西村拓也、北村佳久: 積層ゴムにおける傾斜付加時の力学特性について (その2)回転特性試験結果、日本建築学会学術講演梗 概集、pp.373-374、2008.9