

直下型及び長周期地震に対する高層構造物の免震に関する研究

日大生産工(院) ○ 柴田 拓実
日大生産工 高橋 亜佑美

ミシシッピ州立大学 本山 恵一
日大生産工 見坐地 一人

1. 緒言

日本は世界有数の地震大国である。首都圏では巨大地震の可能性が示唆されていることから、高層構造物に対する被害を抑えることは大変重要である。この被害を抑える方法として、免震積層ゴムがある。免震積層ゴムの復元力特性は、変形が小さいときにはソフトニング特性を示し、変形が大きいときにはハードニング特性を示す。従って、精度の高い解析を行うには、これらの非線形振動特性を考慮する必要がある。

過去に非線形振動解析手法であるべき関数型等価線形系解析手法（以下、PFT-ELS法と略す）を免震積層ゴムに適用させた事例がある^{(1),(2)}。しかしながら、PFT-ELS法を適用した免震積層ゴムを高層構造物に導入して地震応答解析を行った事例は極めて少ない。

そこで、本論ではPFT-ELS法を考慮した免震積層ゴムを高層構造物と組み合わせて16質点系モデルを作成した。その後、作成したモデルに直下型地震として兵庫県南部地震を、長周期地震として東北地方太平洋沖地震の地震波を入力することで、高層構造物に対する免震システムの効果を確認し、各々の地震波による応答解析結果の比較と考察を行った。

2. 解析手法

2.1. べき関数型等価線形系解析手法

(PFT-ELS法)

本手法は、変位振幅を変化させた履歴復元力曲線から骨格曲線と面積を求め、その値が等価となるべき関数型復元力モデル(以下PFT-RFMと略す)を作成し、減衰係数、ばね定数を求める手法である。一般に1自由度系の強制外力（加速度 $\ddot{y}$ ）が作用する場合の運動方程式は質点の質量を m 、変位を x 、復元力特性を $f(x, \dot{x})$ とすると次式で表される。

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}) = -m\ddot{y} \quad (1)$$

上式を無次元化すると次式となる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + F(X) = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} X = x / x_s, X_0 = x_0 / x_s, \omega_s^2 = F_s / (x_s \cdot m) \\ \eta = \omega / \omega_s, \tau = \omega_s t, P_0 = p_0 / F_s, k_s = F_s / x_s \end{array} \right)$$

$F(X)$ は無次元化した復元力、 x_s, F_s, ω_s はそれぞれ線形限界における変位と復元力、固有角振動数、 x_s は変位振幅を表す。式(2)の履歴振動系を等価な線形振動系に置き換えると、次式を得られる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2H_{eq} \frac{dX}{d\tau} + K_{eq} X = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (3)$$

また、逐次変化する等価減衰係数 H_{eq} と等価ばね定数 K_{eq} は次式で表される。

$$H_{eq} = \frac{1}{2\pi\eta} \left(\frac{1}{X_0} \right)^2 G(X_0) \quad (4)$$

$$K_{eq} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{X_0} \right)^2 \int P(X) R(X) dX \quad (5)$$

$G(X_0)$ ：変位振幅 X_0 に対応する履歴曲線の囲む面積

$$P(X) : X / \sqrt{X_0^2 - X^2}$$

$R(X)$ ：各変位での加力線と減力線を加えた曲線（和曲線）

ここで、 $G(X_0)$ 、 $R(X)$ を算定するために履歴曲線の基本モデルとして、免震積層ゴムの履歴曲線の形状が類似しているべき関数型復元力モデル

(PFT-RFM)のソフトばねタイプを適用する。基本式は次式で表せる。

Study on Seismic Isolation of High-rise Buildings for Direct-type and Long-period Earthquake

Takumi SHIBATA, Keiichi MOTOYAMA, Ayumi TAKAHASHI and
Kazuhito MISAJI

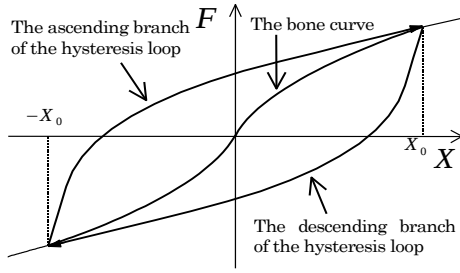


図1 べき関数型復元力モデル

$$\left. \begin{array}{l} \text{骨曲線} \quad F(X) = kX^\alpha \\ \text{加力線} \quad F(X) = 2k \left\{ \frac{1}{2}(X_0 + X) \right\}^\alpha - kX_0^\alpha \\ \text{減力線} \quad F(X) = -2k \left\{ \frac{1}{2}(X_0 - X) \right\}^\alpha + kX_0^\alpha \end{array} \right\} \quad (6)$$

この復元力モデルに対して、履歴曲線の囲む面積 $G_0(X_0)$ 及び、骨曲線 $F_0(X_0)$ は次のように計算することができる。

$$G_0(X_0) = 4k \frac{1-\alpha}{1+\alpha} X_0^{\alpha+1} \quad (7)$$

$$F_0(X_0) = kX_0^\alpha \quad (8)$$

形状パラメータ α , k は次式のようになる。

$$\alpha(X_0) = \frac{4F_0(X_0)X_0 - G_0(X_0)}{4F_0(X_0)X_0 + G_0(X_0)} \quad (9)$$

$$k(X_0) = \frac{F_0(X_0)}{X_0^\alpha} \quad (10)$$

ここで、変位振幅 X_0 に依存する履歴ループの囲む面積と骨曲線を関数化することができれば、式 (9), (10) の $\alpha(X_0)$, $k(X_0)$ を用いて、PFT-RFM に置き換えることができ、式 (4), (5) 中の $G_0(X_0)$, $R(X)$ が算出できる。これらの PFT-RFM の式である式 (6) より、 H_{eq} , K_{eq} は次式となる。

$$H_{eq} = \frac{2k}{\pi} \frac{1}{\eta} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) X_0^{\alpha+1} \quad (11)$$

$$K_{eq} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{\Gamma(\alpha+1/2)}{\Gamma(\alpha+1)} X_0^{\alpha-1} \quad (12)$$

式 (11), (12) をそれぞれ式 (13), (14) に代入することで、変位振幅 x_0 に依存する非線形の減衰係数 $C(x_0)$ 及びばね定数 $K(x_0)$ を求める。

$$C(x_0) = \frac{2F_s}{\omega_s X_s} H_{eq} \quad (13)$$

$$K(x_0) = k_s K_{eq} \quad (14)$$

$C(x_0)$, $K(x_0)$ を用いることにより、1 自由度系に強制外力が作用する場合の運動方程式 (1) は、次式のようになる。

$$m\ddot{x} + C(x_0)\dot{x} + K(x_0)x = -m\ddot{y} \quad (15)$$

式 (15) の運動方程式を各履歴ループ (変位振幅 x_0) に K , C を定めて解くことをべき関数型復元力モデルを用いた等価線形系解析手法という。

2.2. 高層構造物のモデル化

本論では、免震層と高層構造物の 16 層のバネマス質点系で表現した。そのバネマスモデル図、及び諸元を図 3 に示す⁽³⁾。

	質量 ($\times 10^3 \text{ kg}$)	減衰係数 ($\text{kN} \cdot \text{s} / \text{m}$)	ばね定数 (kN / m)
15層目	712.4	10168	1293200
14層目	745.1	9575	1217800
13層目	749.8	11888	1512000
12層目	752.5	12145	1544600
11層目	755.3	12164	1547000
10層目	760.0	12269	1560300
9層目	762.7	12538	1594600
8層目	770.2	12712	1616700
7層目	770.2	12897	1640200
6層目	772.9	13314	1693300
5層目	775.7	13282	1689200
4層目	773.7	13622	1732400
3層目	778.4	14199	1805800
2層目	781.2	17863	2271800
1層目	781.2	44093	5607700
免震層	986.8	C_b	K_b

図3 高層構造物の模式図

1 層目から 15 層目の質量を $m_1, m_2, \dots, m_{15}$, 減衰係数を $c_1, c_2, \dots, c_{15}$, ばね定数を $k_1, k_2, \dots, k_{15}$ とする。免震層の質量は m_b とする。免震層の減衰 C_b , 剛性 K_b は PFT-ELS 法により逐次値を求める。

図 3 のバネマスモデル図から免震層を考慮した 16 自由度系に強制外力 (加速度 $\ddot{y}$) が作用する場合の運動方程式は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + C_b \dot{x}_b + K_b x_b &= -m_b \ddot{y} \\ m_1(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_b) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_1(x_1 - x_b) &= -m_1 \ddot{y} \\ m_2(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) &= -m_2 \ddot{y} \\ &\vdots \\ m_{15}(\ddot{x}_{15} - \ddot{x}_{14}) + c_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) + k_{15}(x_{15} - x_{14}) &= -m_{15} \ddot{y} \end{aligned} \right\} (18)$$

3. 免震積層ゴム

免震積層ゴムはゴムと鋼板が交互に重なっている構造をしている。単層のゴムブロックと比べて、鉛直方向に硬く、水平方向はゴムブロックと同程度に柔らかい特徴がある。そのため、建物の荷重を支えながら地震のエネルギーを逃がすことが可能になる。本論で用いる免震積層ゴムは高減衰系積層ゴム支承であり、この免震積層ゴムの15層のパネマスモデルの下部に6個並列で配置した。表1に本論に使用した免震積層ゴム1個の主な仕様を示し、図4に免震積層ゴム1個あたりの復元力特性(実測値)を示す。この復元力特性からPFT-RFMのモデル化に必要な変位振幅毎の頂点と面積を算出し、それぞれ関数化を行った。

表1 免震積層ゴムの特性

形状と寸法	ゴム外径	1500 (mm)
	製品高さ	298 (mm)
	製品総重量	2.86 (ton)
水平性能	鉛直性能	17700 ($\times 10^3$ kN/m)
	推奨長期軸力	21200 (kN)

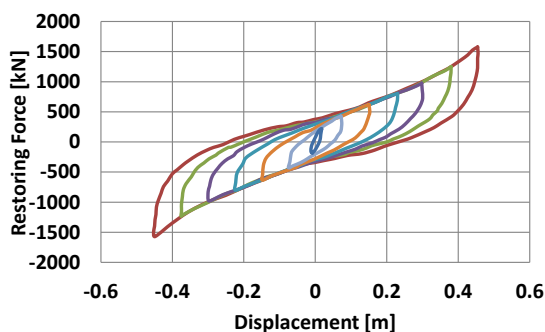


図4 履歴復元力曲線の実測値

3.1. 関数化

免震積層ゴム1個あたりの履歴復元力曲線(実測値)から、頂点を結んで得られる骨曲線と、履歴曲線の囲む面積をそれぞれ無次元化し、最小二乗法を用いて変位振幅 X_0 で関数化した。これにより、対象とする系の振動特性を求めることができる。

表2 免震層の特性

$F_0(X_0) = A_1 X_0^3 + A_2 X_0^2 + A_3 X_0 + A_4$	$G_0(X_0) = B_1 X_0^2 + B_2 X_0$
$A_1 = 2.0 \times 10^{-3}$, $A_2 = -0.0106$ $A_3 = 4.3811$, $A_4 = 151.27$	$B_1 = 2.2425$ $B_2 = 551.8$

4. 地震応答解析

本章では、2章で提案した16質点系のモデルに地震波を入力し、地震応答解析を行った。地震波は兵庫県南部地震(JMA Kobe EW)と、長周期地震として宮城県涌谷町で観測された東北地方太平洋沖地震(Tohoku Wakuya EW)を用いた。兵庫県南部地震の地震波を図5、兵庫県南部地震のパワースペクトルを図6に示す。また、東北地方太平洋沖地震の地震波を図7、東北地方太平洋沖地震のパワースペクトルを図8に示す⁽⁴⁾。

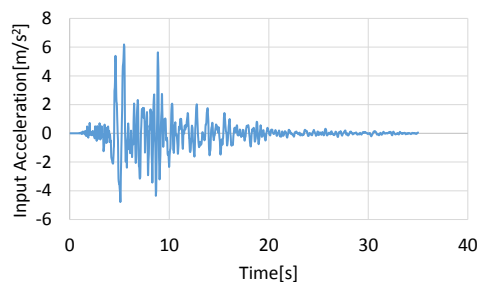


図5 入力加速度(兵庫県南部地震)

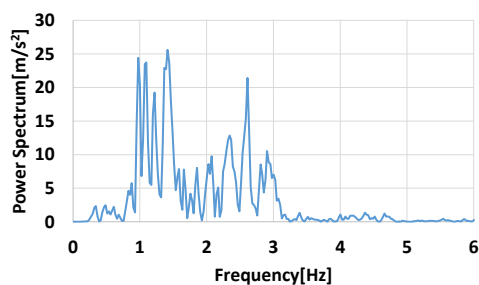


図6 パワースペクトル(兵庫県南部地震)

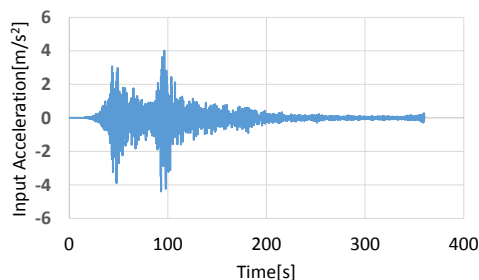


図7 入力加速度(東北地方太平洋沖地震)

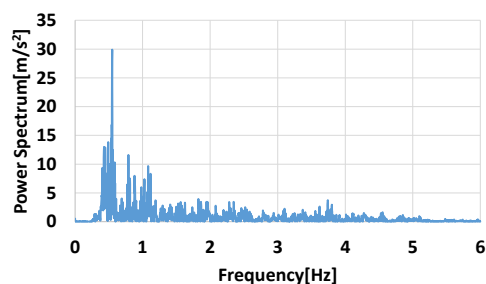


図8 パワースペクトル(東北地方太平洋沖地震)

上記の地震波を入力し、地震応答解析を行った。兵庫県南部地震の結果を図9、図10に、東北地方太平洋沖地震の結果を図11、図12に示す。図13には免震積層ゴムの非線形剛性を示し、非線形剛性の最小値 $K_{b(\min)}$ 、平均値 $K_{b(ave)}$ 、最大値 $K_{b(max)}$ を用いた、免震構造物の1次固有振動数を表3に示す。

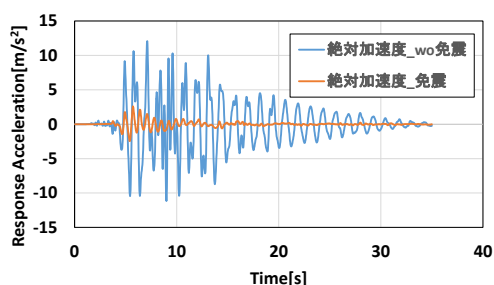


図10 15層目の絶対応答加速度
(JMA Kobe EW)

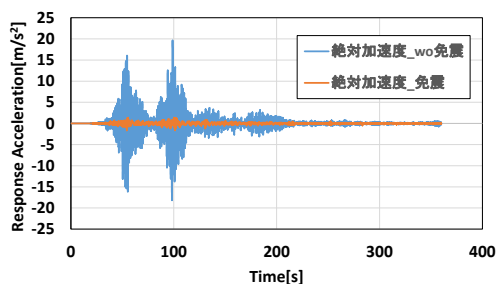


図12 15層目の絶対応答加速度
(Tohoku Wakuya EW)

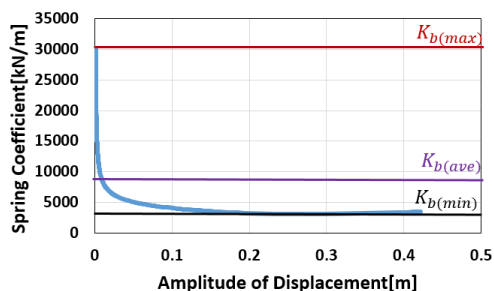


図13 ばね定数の振幅依存性

表3 免震層を考慮した高層構造物の
1次固有振動数

	$K_{b(\min)}$	$K_{b(ave)}$	$K_{b(ave)}$
K_b	3070[kN/m]	9175 [kN/m]	29874 [kN/m]
1 次固有 振動数	0.190[Hz]	0.315[Hz]	0.502[Hz]

図9、図10より、兵庫県南部地震では、免震有りのモデルは免震無しに比べ、1層目、15層目ともに絶対応答加速度が低減することがわかった。また、図11、図12より、東北地方太平洋沖地震においても、免震有りのモデルは免震無しに比べ、1層目、15層目ともに絶対応答加速度が低減することがわかった。

長周期地震である東北地方太平洋沖地震を用いたが、免震有りのモデルへの影響が低減された。この理由として、表3より、15層モデルに免震層を導入することで、免震層を考慮した15層モデルの1次固有振動数が地震波の卓越周波数と比べて小さくなった。その結果、建物への共振現象が見られなくなったため、地震による影響が抑えられたと考えられる。

5. 結論

本論はPFT-ELS法を適用した免震積層ゴムを考慮した高層構造物に導入し、16質点系モデルを作成した。作成したモデルに、兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震の地震波を用いて地震応答解析を行った。その後、免震積層ゴム有り無しの高層構造物の挙動を比較し、検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

1. 免震積層ゴムにPFT-ELS法を適用することで免震積層ゴムの非線形振動特性を把握することができた。
2. 兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震では今回提案した免震積層ゴムによる免震効果を確認することができた。

今後はさらに高層の構造物に対して直下型地震、長周期地震の地震波を用いて地震応答解析を行っていきたい。

謝辞

本論文の作成にあたり、見坐地研究室4年生の安達丈晃君、湯澤祐介君の協力に感謝します。

参考文献

- (1)柴田耕一、一ノ瀬博明、櫻井弘幸、大澤慶吉、ハードニング型復元力特性を示す免震用積層ゴムの非線形振動に関する研究(振幅、振動数、面圧の依存性と振動応答解析)、日本建築学会構造系論文集第490号(1996)、pp119-127
- (2)柴田耕一、高橋勤、笹川考義、一ノ瀬博明、免震用積層ゴムの振動特性に関する研究(履歴復元力特性のモデル化と非線形振動特性)、日本建築学会構造系論文集第475号(1995)、pp93-102
- (3)日本建築学会(2013)『免震構造設計指針』pp348
- (4)気象庁「主な地震の強震観測データ」
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html?sess=6e1b37b3613bd087e7ce042e42f4670b>