

非線形振動特性を示す免震積層ゴムの復元力特性の最適化

○高橋亜佑美 (日大生産工・数情) 本山恵一 (ミシシッピ州立大学)
見坐地一人 (日大生産工・数情)

1 はじめに

地震による建物及び建物内の人への被害を抑える有効な方法として免震積層ゴムがある。対象とする地震を入力し、免震構造物の挙動を最小にする免震積層ゴムの復元力特性が求められれば、免震積層ゴムの設計に非常に価値があると考えられる。本研究は、構造物に地震波を入力したときの挙動の最小化を目的関数、免震積層ゴムの履歴復元力特性を設計変数とする最適化計算を、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いて実施する。地震波は、Elcentro EWを用いた。これらの解析結果から地震波の違いによる免震積層ゴムの最適解について考察し、本論で示した手法の有用性と価値を検証する。

2 解析手法

2. 1 免震構造を有する高層構造物のモデル化

本論では、免震積層ゴムを含む 15 階建ての高層構造物²⁾を 16 質点のバネマスモデルで表現する。免震層を考慮した高層構造物のバネマスモデル図を図 1 に示す。各層の高層構造物の質量、減衰、剛性をそれぞれ m_i , c_i , k_i とする。免震層の質量は m_b , 免震層の減衰 C_b , 剛性 K_b とし、減衰係数とばね定数はべき関数型等価線形系解析手法により逐次算出する。16 質点系に地震による加速度 $\ddot{y}$ が作用する場合の運動方程式は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + C_b \dot{x}_b - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + K_b x_b - k_1(x_1 - x_b) &= -m_b \ddot{y} \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1(x_1 - x_b) - k_2(x_2 - x_1) &= -m_1 \ddot{y} \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_2(x_2 - x_1) - k_3(x_3 - x_2) &= -m_2 \ddot{y} \\ &\vdots \\ m_{15} \ddot{x}_{15} + c_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) + k_{15}(x_{15} - x_{14}) &= -m_{15} \ddot{y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2. 2 免震積層ゴムの非線形振動解析

本論では免震積層ゴムの非線形振動特性を解析する手法としてべき関数型等価線形系解析手法を用いる。本手法は、変位振幅を変化させた履歴復元力曲線から骨曲線と面積を求め、その値が等価となるべき関数型復元力モデル (Restoring Force Model of Power Function Type : PFT-RFM) を作成し、減衰係数、ばね定数を求める手法である。

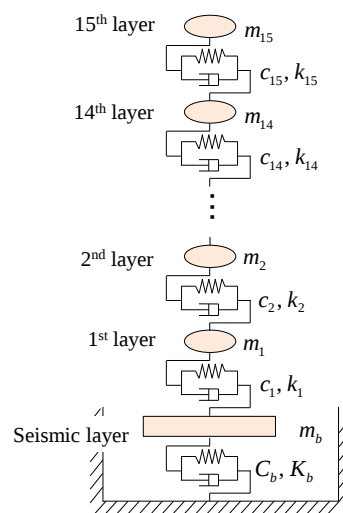
一般に 1 自由度系の強制外力 (加速度 $\ddot{y}$) が作用する場合の運動方程式は質点の質量 m , 変位 x , 復元力 $f(x)$ とすると次式で表される。

$$m\ddot{x} + f(x) = -m\ddot{y} \quad (2)$$

上記を無次元化すると次式となる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + F(X) = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (3)$$

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



Optimization of Restoring Force Characteristics for Seismic Isolation Rubber with Nonlinear Vibration Characteristics

Ayumi TAKAHASHI, Keiichi MOTOYAMA and Kazuhito MISAJI

$F(X)$ 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_0 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, 次式が得られる.

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2H_{eq} \frac{dX}{d\tau} + K_{eq} X = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (4)$$

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.

$$H_{eq} = \frac{2k}{\pi} \frac{1}{\eta} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) X_0^{\alpha+1} \quad (5)$$

$$K_{eq} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{\Gamma(\alpha+1/2)}{\Gamma(\alpha+1)} X_0^{\alpha-1} \quad (6)$$

ここで α, k は PFT-RFM の形状パラメータである. 従って変位振幅 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.

$$C(x_0) = \frac{2F_s}{\omega_s x_s} H_{eq} \quad (7)$$

$$K(x_0) = k_s K_{eq} \quad (8)$$

$C(x_0), K(x_0)$ 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.

$$m\ddot{x} + C(x_0)\dot{x} + K(x_0)x = -m\ddot{y} \quad (9)$$

式(9)の運動方程式を各履歴ループ (変位振幅 x_0) に C, K 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.

3 免震積層ゴム

本研究で使用した免震積層ゴムは高減衰積層ゴムである. そして, 鉛直荷重を加えながら水平方向にせん断変形を与え, せん断荷重を測定した. 本研究では, 高層構造物の質量と免震積層ゴムの推奨長期軸力から, 免震積層ゴム6個をモデルに適用した.

3.1 関数化

免震積層ゴムの履歴復元力曲線から PFT-RFM のモデル化に必要な, 各ループの頂点と面積を算出し, それぞれ関数化を行った. 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, 最小二乗法で関

数化する. 変位振幅 X_0 で関数化した近似式を表1に示す. これにより PFT-RFM の形状パラメータ α, k を求めることができ, 式(7), (8)から減衰定数, ばね定数を算出することができる.

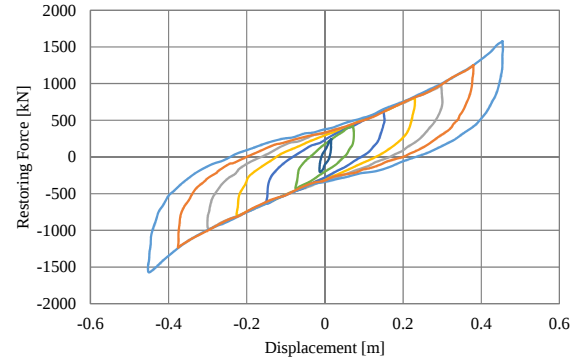


図2 履歴復元力曲線(実測値)

表1 F_0 と G_0 の関数式

$F_0(X_0) = A_1 X_0^3 + A_2 X_0^2 + A_3 X_0 + A_4$
$A_1 = 1.67 \times 10^{-5}$
$A_2 = -9.97 \times 10^{-3}$
$A_3 = 4.23$
$A_4 = 162.59$
$G_0(X_0) = B_1 X_0^2 + B_2 X_0$
$B_1 = 2.24$
$B_2 = 551.91$

4 各種地震波を入力したときの免震積層ゴムの最適化

本章では, 地震に対する免震構造物の被害が最小となる免震積層ゴムの履歴復元力特性を, 遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する. そして最適化した復元力特性を用いて地震応答解析を実施し, 最適化前の応答解析結果解析結果と比較し, 考察をする. 本章では, 波はランダムな性質を持つ Elcentro EW (図3) を用いて, 復元力特性は各地震波で最適化される.

4.1 各種地震波を入力したときの免震積層ゴムの最適化

2.2 節でも述べたように骨曲線と面積関数から形状パラメータを求めることで PFT-RFM を構築することができる. そこで, 骨曲線と面積関数(表 1)の定数倍を設計変数として定義する.

$$F_0(X_0) = \beta (A_1 X_0^3 + A_2 X_0^2 + A_3 X_0 + A_4) \quad (10)$$

$$G_0(X_0) = \gamma (B_1 X_0^2 + B_2 X_0) \quad (11)$$

それぞれの設計変数 F_0 , G_0 の組み合わせにより骨曲線と面積関数を算出し, PFT-RFM を構築する. 設計変数の範囲は 0.5~2.0 で, 刻み幅は 0.1 である. そして構築した PFT-RFM を用いて, 図 2 に示す免震構造モデルの地震応答解析を行い, 各層の応答変位, 応答速度, 応答加速度を算出する. 本研究では, 最上層の最大応答速度振幅を最小(目的関数 1)及び最大応答加速度振幅を最小(目的関数 2)とするそれぞれの目的関数を設定し, これを満たす設計変数を GA により探索する.

4.2 各種地震波による最適化結果

はじめに, Elcentro EW(図 3)に対する免震ゴムの特性を最適化した. パレート図を図 4 に示す. 図 5 に最適化後の免震ゴムの履歴復元力, 図 6 に減衰係数, 図 7 にばね定数を示す. 最適化の結果, $\beta = 0.6$, $\gamma = 0.6$ は, 最上層の最大応答速度振幅および最大応答加速度振幅を最小にする組み合わせであることがわかった. 履歴ループの面積および骨曲線の勾配は, 最適化前と比較して減少した. すなわち, 剛性は柔らかく, 減衰特性は減少する傾向である. 最適復元力モデルを用いて, 地震応答解析を再度行い, 最適化前の地震応答解析の結果と比較した. 最適化後の履歴復元力特性を用いて最大応答振幅が低減されていることが確認できた.

次に, 周波数特性で最適化の効果を確認する. 図 9 は Elcentro 地震波に対する 15 層の最適化前後の応答加速度の周波数特性を示す. 図中, 赤線は最適化前, 青線は最適化後を示す. 図 9 から, 最適化後は全周波数域で効果があり, 特に構造物の 1 次固有振動数 0.2Hz のピークがおおよそ 30%低減した. そして, 2 次の固有振動数 1.4Hz のピークもおおよそ 60%低減した. その他の周波数では効果がほとんどなかった. これらの結果から地震波により, 最適化の効果が異なることを時間軸上でも周波数特性でも確認することができた.

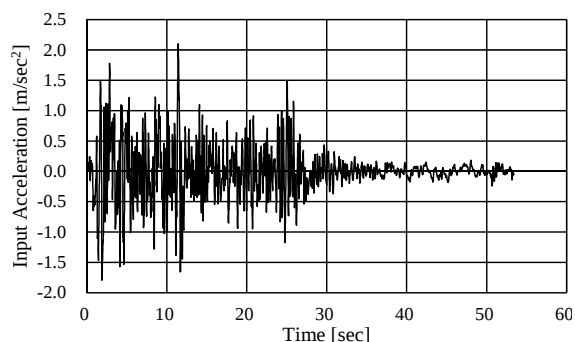


図3 入力地震波(Elcentro EW)

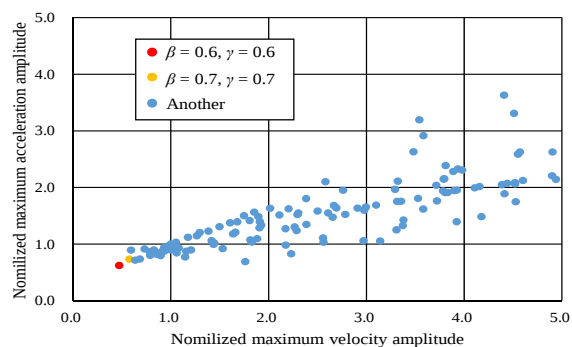


図4 パレート図

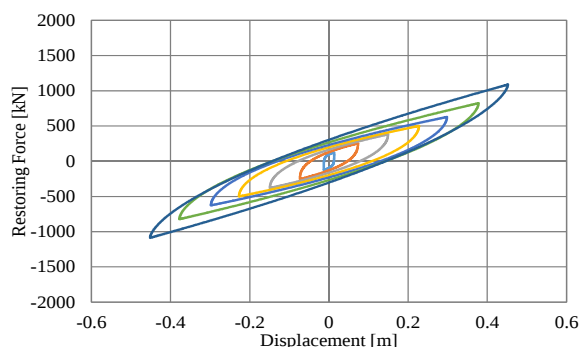


図5 履歴復元力曲線(最適化後)

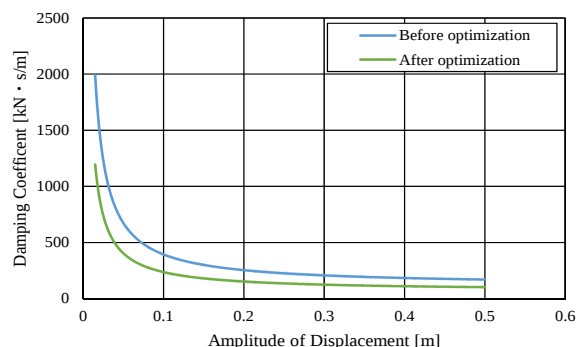


図6 減衰係数(最適化後)

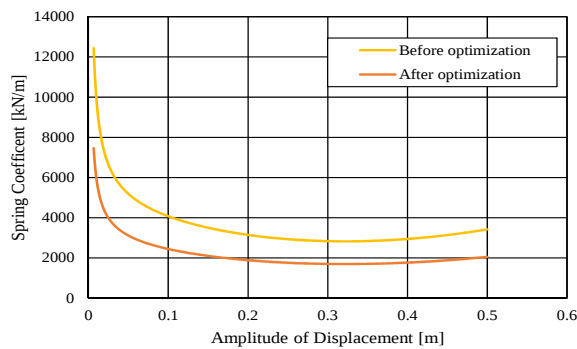


図7 ばね定数(最適化後)

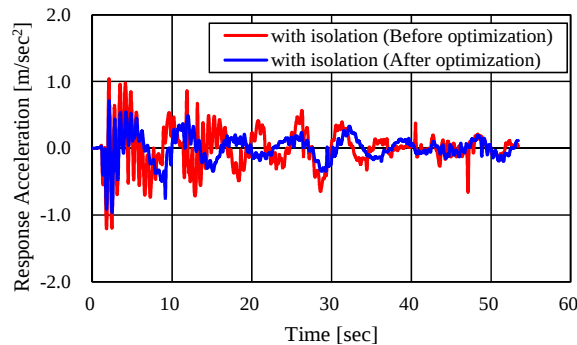


図8 15層の絶対応答加速度

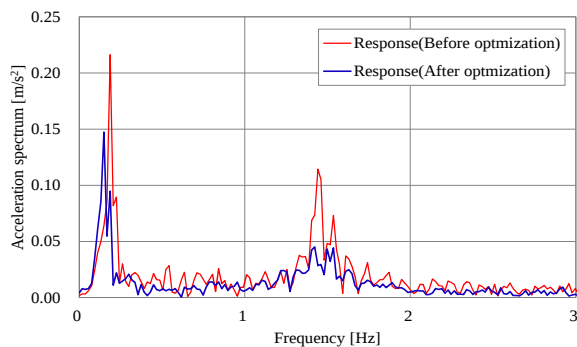


図9 履歴復元力曲線(実測値)

5 結論

本論文では、まず免震積層ゴムの非線形振動特性のモデル化とその解析に PFT-ELS 法を適用した。次に、その免震積層ゴムを基礎に有する高層建物の応答解析モデルを構築した。そしてこの高層建物の応答解析モデルに性質の異なる地震波を入力し遺伝的アルゴリズム (GA) によりこの構造物の挙動を最小にする免震積層ゴムの復元力特性求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 変位振幅に依存する免震積層ゴムの非線形振動特性を PFT-ELS 法により精度よく求めることができた。

(2) 2つの目的関数(最上層の最大応答速度振幅の最小値と、最大応答加速度振幅の最小値)に対して GA により免震積層ゴムの最適

な復元力特性を示す 2つの設計変数 (γ , β) が求められる。

(3) 地震波により高層構造物の挙動を最小限にする免震積層ゴムの復元力特性が異なる。

(4) 以上のことより今回提案した手法を用いることで、地震の挙動を最小限にする免震積層ゴムの復元力特性を得ることができた。このことから本論で提案した手法により、既存の免震ゴムから選択する従来の設計ではなく、免震積層ゴムの最適設計が可能になったと考えられる。

謝辞

本研究は日本大学生産工学部自動車工学リサーチ・センターから一部資金援助を受けて行われました。

「参考文献」

- 1) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥井信吾, 辻泰一, 北村佳久, "超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討 -長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建物の応答解析-", 建築研究資料, No.144号, 2013. 8.
- 2) 日本建築学会, 免震構造設計指針 (1989), p.348.
- 3) 柴田拓実, 高橋亜佑美, 見坐地一人, "べき関数型等価線形系解析手法を用いた高層構造物の免震に関する研究", 機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, 2015 年8月.
- 4) 高橋亜佑美, 柴田拓実, 本山恵一, 見坐地一人, "べき関数型等価線形系解析手法とGAを用いた免震積層ゴムの最適化に関する研究", 機械学会 Dynamics & Design Conference 2016, 2016 年8月.
- 5) 見坐地一人, 加藤英樹, 柴田耕一, "車両用防振ゴムの振動特性に関する研究: 非線形振動応答解析", 日本機械学会論文集 C編, Vol. 60 (1994), No. 578, pp. 3274-3280.
- 6) 神保浩之, 見坐地一人, 柴田耕一, "周波数, 変位振幅依存型非線形振動に対する履歴系解析手法の研究(履歴則の改良と防振ゴムの振動応答)", 日本機械学会論文集C編, Vol. 65 (1999), No. 630, pp. 441-448.