

免震積層ゴムの非線形振動特性の最適化

○高橋亜佑美 (日大生産工・数情) 柴田拓実 ((株)総合技術コンサルタント)
 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、兵庫県南部地震、国立研究開発法人建築研究所が作成した南海トラフ3連動地震¹⁾、2016年4月16日に発生した熊本地震を用いた。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。

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

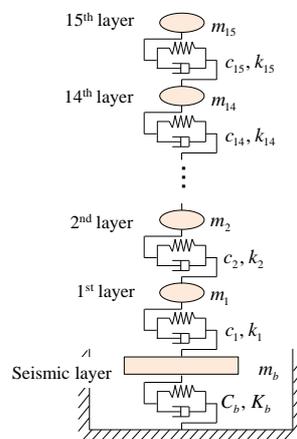


図1 免震構造モデル

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 Nonlinear Vibration Characteristics for Seismic Isolation Rubber

Ayumi TAKAHASHI, Takumi SHIBATA, 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.

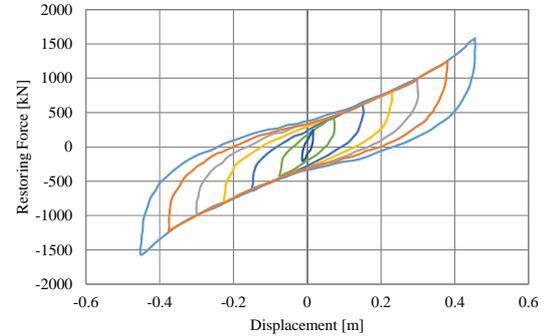


図2 履歴復元力曲線(実測値)

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(GA)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, 最適化前の解析結果と比較し, 考察をする. また本論で用いる地震波は, 兵庫県南部地震, 南海トラフ3連動地震, 熊本地震であり, 各地震波に最適な履歴復元力特性を求める.

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、免震層の最大応答変位振幅を最小(目的関数1)、最上層の最大応答速度振幅を最小(目的関数2)及び最大応答加速度振幅を最小(目的関数3)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

はじめに兵庫県南部地震南北方向(JMA Kobe NS)を用いて、免震積層ゴムの最適化を実施した。図3に入力加速度、図4に速度応答スペクトルを示す。速度応答スペクトルから、卓越周期は1 [sec] 付近であることが確認出来た。最適化計算を行った結果、 $\beta=0.5, \gamma=0.6$ が免震層の最大応答変位振幅、15層目の最大応答速度振幅及び最大応答加速度振幅が最小となる組み合わせであることがわかった。図5に最適化した履歴復元力曲線を示す。この結果から、最適化前に比べて、履歴ループの面積と骨曲線の傾きは減少することがわかった。即ち、剛性が柔らかく、減衰特性が減少する傾向である。

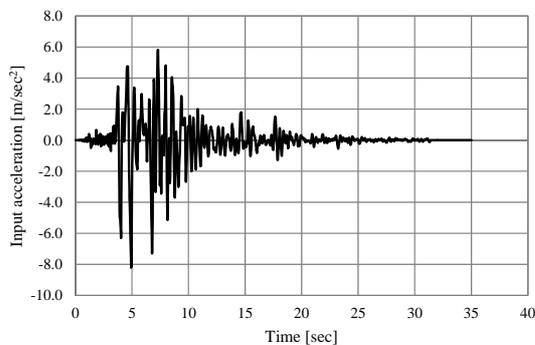


図3 入力加速度(JMA Kobe NS)

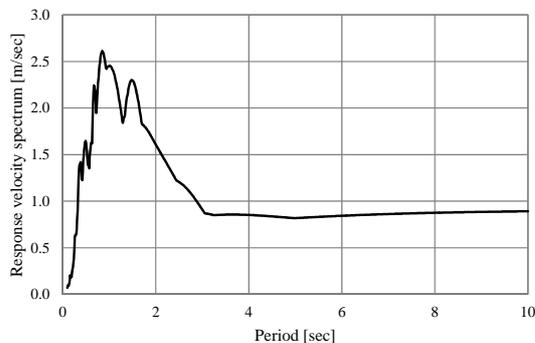


図4 速度応答スペクトル(JMA Kobe NS)

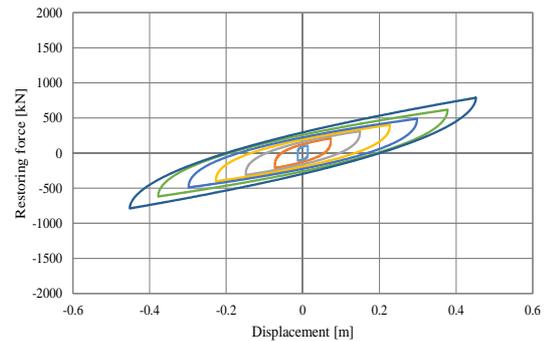


図5 最適化後の履歴復元力曲線 (JMA Kobe NS)

次に国立研究開発法人建築研究所が作成した南海トラフ3連動地震(Traf)を用いる¹⁾。この3連動地震の評価地点は東京都新宿であり、卓越周期は約7秒のいわゆる長周期地震である。図6に入力加速度、図7に速度応答スペクトルを示す。最適化計算を行った結果、 β が免震層の最大応答変位振幅、15層目の最大応答速度振幅及び最大応答加速度振幅が最小となる組み合わせであることがわかった。図8に最適化した履歴復元力曲線を示す。この結果から、最適化前に比べて、履歴ループの面積は増加し、骨曲線の傾きは変化しないことがわかった。即ち減衰特性が増加する傾向となる。

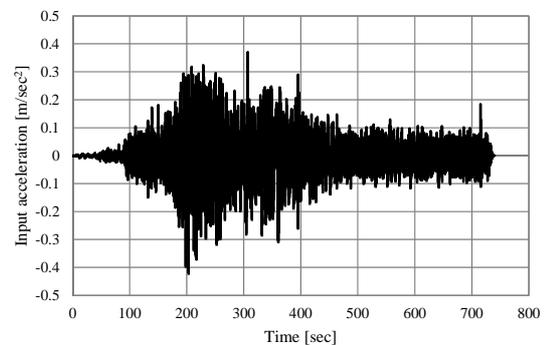


図6 入力加速度(Traf)

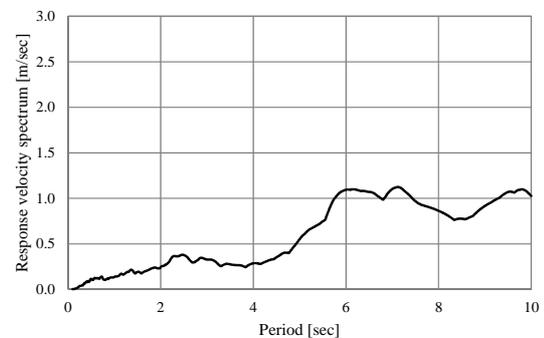


図7 速度応答スペクトル(Traf)

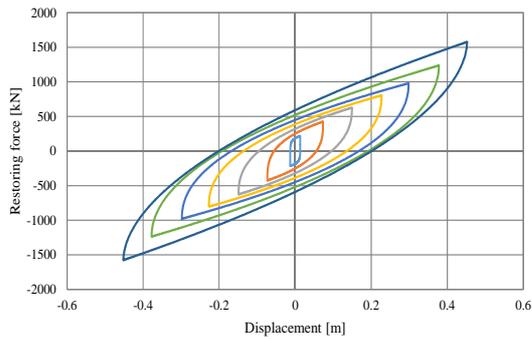


図8 最適化後の履歴復元力曲線(Traf)

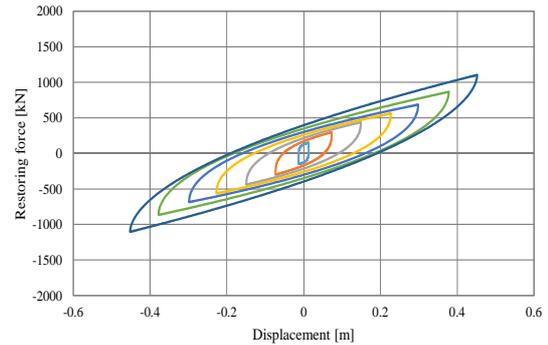


図11 最適化後の履歴復元力曲線
(Kumamoto NS)

次に平成28年4月16日1時25分に発生した熊本地震南北方向(Kumamoto NS)を用いる。図9に入力加速度、図10に速度応答スペクトルを示す。速度応答スペクトルから、卓越周期は約1 [sec] であるが、2 [sec] ~ 4 [sec] 付近も応答速度が1 [m/sec] を超えていることから長周期地震波でもあることがわかる。最適化計算を行った結果、が免震層の最大応答変位振幅、15層目の最大応答速度振幅及び最大応答加速度振幅が最小となる組み合わせであることがわかった。図11に最適化した履歴復元力曲線を示す。この結果から、最適化前に比べて、履歴ループの面積と骨曲線の傾きが減少する傾向にあることがわかった。即ちばね剛性が柔らかくなり、減衰特性も減少傾向となる。

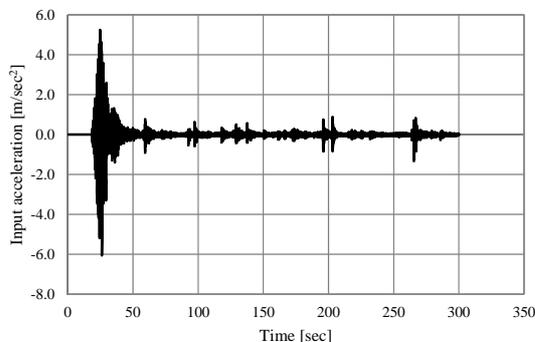


図9 入力加速度(Kumamoto NS)

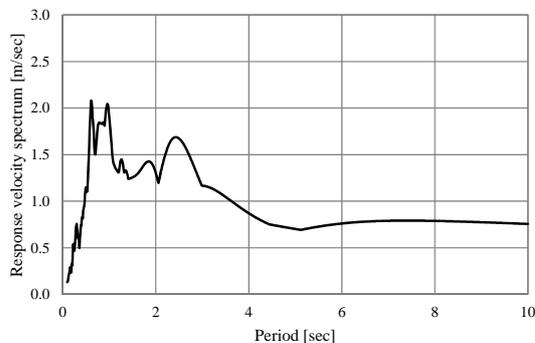


図10 速度応答スペクトル
(Kumamoto NS)

5 結論

本論は特徴の異なる地震波におけるこの構造物の挙動を最小とす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により求めた。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 3種の目的関数(免震層の最大応答変位振幅を最小、最上層の最大応答速度振幅を最小及び、最大応答加速度振幅を最小)に対しGAを用いて免震積層ゴムの履歴復元力特性を示す2個の設計変数(F_0 , G_0)の最適解を求めることができた。
- (2) 地震波により最適な免震積層ゴムの復元力特性は異なることがわかった。
- (3) 本論で示す手法により、対象とする地震に対する挙動を最小にする免震積層ゴムの最適な復元力特性を求めることが可能になった。これにより、既存の免震積層ゴムから選定する設計ではなく、免震積層ゴムの最適設計が可能になったと考える。

今後は、地震波だけでなく風荷重などの外力に対する免震積層ゴムの復元力特性の最適化も実施していきたい。

「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.