

非線形振動特性を示す免震積層ゴムの解析手法に関する研究

日大生産工(学部) ○冷牟田 涼馬 日大生産工 高橋 亜佑美
日大生産工 見坐地 一人

1 はじめに

日本は世界有数の地震大国である。構造物への地震の影響を軽減する手段として免震積層ゴムがあり、この地震応答を精度良く予測するためには非線形振動特性を考慮する必要がある。

これまで、べき関数型等価線形系解析手法 (PFT-ELS法) を免震積層ゴムの非線形振動解析に適用した事例がある¹⁾。しかしPFT-ELS法は、変形が急激に起こるため応答解析に不連続が生じる。そこで、本論は履歴曲線の形状が類似するべき関数型履歴復元力モデルを運動方程式に直接代入するべき関数型履歴系解析手法 (PFT-HYS法) を適用する²⁾。免震積層ゴムの非線形振動解析にPFT-ELS法とHYS法を適用し、それぞれの地震応答解析結果を比較し考察を行った。

2 解析手法

2. 1 べき関数型履歴系解析手法(PFT-HYS法)

一般に強制外力(加速度 $\ddot{y}$) が作用する場合の1自由度系の運動方程式は質点の質量を m 、変位を x 、復元力特性を $f(x)$ とすると次式で表せる。

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

上式を無次元化すると次式になる。

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

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

$F(X)$ 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、復元力と固有角振動数、 x_0 は変位振幅を表す。

今回計算に使用した免震積層ゴムの履歴復元力曲線の実測値を図1に示す。ここで、履歴復元力の実測値に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を適用する(図2)。その基本式は以下となる。

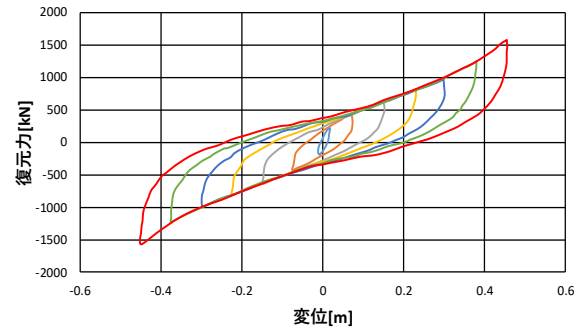


図1. 履歴復元力曲線の実測値

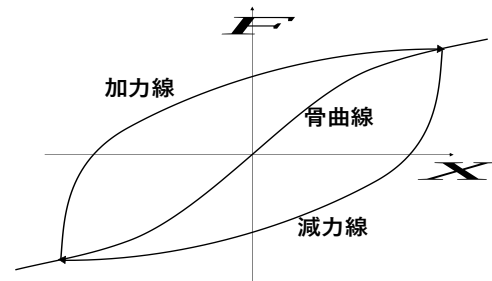


図2. べき関数型復元力モデル

$$\left. \begin{array}{l} \text{骨曲線} \quad F(X) = kX^\alpha \\ \text{加力線} \quad F(X) = 2k \left[\frac{1}{2}(X_0 + X) \right]^\alpha - kX_0^\alpha \\ \text{減力線} \quad F(X) = -2k \left[\frac{1}{2}(X_0 - X) \right]^\alpha + kX_0^\alpha \end{array} \right\} \quad (3)$$

式(3)の形状パラメータ α, k は次式のようにになる。

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

$$k = \frac{F_0(X_0)}{X_0^\alpha} \quad (5)$$

履歴復元力の実測値をべき関数型復元力モデルに置き換え、動的履歴則で定義された復元力を直接運動方程式に代入することで応答計算を行う。以下、動的履歴則を述べる(図3)。

Analytical Method of Seismic Isolation Laminated Rubber with Nonlinear Vibration Characteristics

Ryouma HIYAMUTA, Ayumi TAKAHASHI and Kazuhito MISAJI

(Ⅰ)初期履歴(最大変位 X_m が $|X_m| \leq 1$ の場合)において、変位が $-1 \leq X \leq 1$ の領域にある場合、力-変位関係は線形とする。(Ⅱ)変位の絶対値が初めて1を超える場合、力-変位関係は骨曲線①で与えられる。骨曲線上で変位振幅が折り返す場合、折り返した点Aの対称点Bを目指して、履歴本線(減力線、加力線)上を進む。この場合折り返し点の変位の絶対値が最大点であれば、 α 、 k はその変位を用いて式(4)、(5)から求まる。また、対称点Bに到達したときはそれ以降骨曲線上を進む。(Ⅲ)本線上で対称点に到達する前に折り返しがある場合、折り返し点Cと同じ変位振幅Eを目標点として減力支線に沿って進むものとする。目標点Eに到達したときは、それ以降骨曲線を進む。(Ⅳ)本線から入った1回目の支線上で目標点に到達する前に折り返しがある場合(点F)、加力本線の元の折り返し点Dと同じ変位振幅の点Gを目標点として、加力支線を進む。目標点Gに到達したときは、加力本線を進む。(Ⅴ)履歴支線上でさらに折り返しをする場合(点H)、元の折り返し点Fと同じ変位振幅の点Iを目指す。(Ⅵ)以後の力-変位関係は(Ⅱ)～(Ⅴ)の繰り返しである。

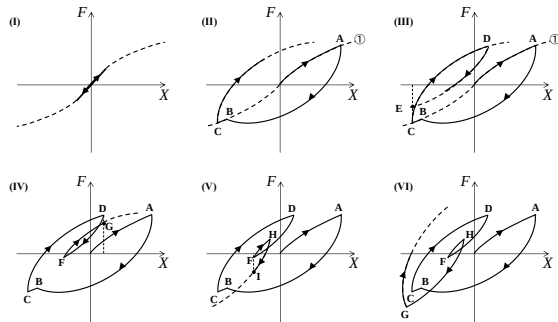


図3. 動的履歴則

2.2 べき関数型等価線形系解析手法(PFT-ELS法)

式(2)を等価な線形振動系に置換した式を式(6)に示す。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2H_{eq} \frac{dX}{d\tau} + K_{eq} X = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (6)$$

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} は形状パラメータ α 、 k を用いて次式で表され、有次元化すると動ばね定数 $K(x_0)$ 、減衰係数 $C(x_0)$ を求めることができる。

$$H_{eq} = \frac{2k}{\pi} \frac{1}{\eta} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) X_0^{\alpha-1} \quad (7)$$

$$K_{eq} = \frac{4k}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \frac{\Gamma(\alpha+0.5)}{\Gamma(\alpha+1)} X_0^{\alpha-1} \quad (8)$$

$$C(x_0) = \frac{2F_s}{\omega_s x_s} H_{eq}, \quad K(x_0) = K_s K_{eq} \quad (9)$$

$K(x_0)$ 、 $C(x_0)$ を用いることで式(1)は等価線形系の運動方程式である式(10)で表すことができる。

$$m\ddot{x} + C(x_0)\dot{x} + K(x_0)x = -m\ddot{y} \quad (10)$$

3 解析結果

入力地震波はEl Centro波EW方向を用いた。図4にPFT-ELS法、PFT-HYS法で求めた履歴復元力曲線を示す。PFT-ELS法では、原点付近で折り返す場合や、振幅が急激に変化してしまう場合に不連続が生じてしまった(図4のa, b)。実験値と等価な剛性、減衰を求めてから運動方程式により復元力を算出するPFT-ELS法と違い、べき関数型復元力モデルから直接復元力を求めるPFT-HYS法の場合この不連続を解消することができた。

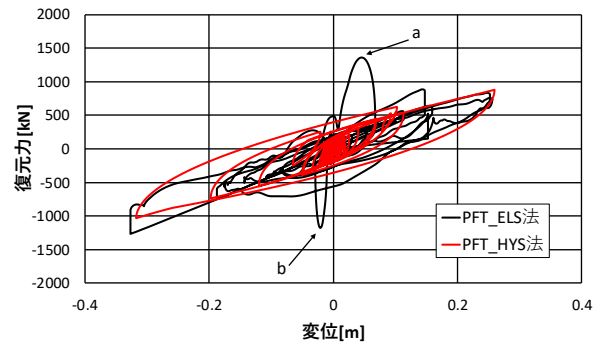


図4. 履歴復元力曲線
(PFT-ELS法とPFT-HYS法)

4 結論

免震積層ゴムを1自由度のパネマスモデルに置き換え、2章で提案した手法をそれぞれ適用し地震応答解析を行った。履歴復元力特性を形状の類似したべき関数型復元力モデルに置き換えたPFT-HYS法は、減衰量と剛性量を逐次求めて線形の運動方程式を解くPFT-ELS法に比べ、解析精度が高いと考えられる。

また、本論は免震積層ゴムの変位依存性を考慮した復元力モデルを構築し、静的加力実験の実験値から本手法の妥当性を示したが、今後は周波数依存性や面圧依存性を考慮した復元力モデルを構築し、実験値と比較することで本手法の更なる妥当性を示したい。

「参考文献」

- 1) Ayumi Takahashi, Takumi Shibata, Keiichi Motoyama and Kazuhito Misaji, "Optimization of Nonlinear Vibration Characteristics for Seismic Isolation Rubber", Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 113, No. 1, pp. 1-15(2017).
- 2) 高橋亜佑美, 本山恵一, 見坐地一人, "非線形振動特性を示す免震積層ゴムの振動応答解析", 機械学会 Dynamics and Design Conference 2017, 2017年8月.