

積層ゴム支承の復元力特性を近似する等価剛性と等価減衰比

山梨大学 正会員 吉田純司
 東京大学 正会員 阿部雅人
 東京大学 フェロー会員 藤野陽三

1. はじめに

等価線形化法は、構造物の地震応答解析において動的効果を容易にかつ精度良く取り入れることが可能な手法である¹⁾。そのため鋼構造物、コンクリート構造物および免震構造物などの応答を予測する解析手法がこれまで提案されている^{2),3),4)}。しかし積層ゴム支承の剛性劣化やハードニングを精緻に再現できるモデルはなく、古典的なバイリニアモデルが代用されてきた。本研究では、著者らが構築した積層ゴム支承の精緻な復元力モデル⁵⁾の等価剛性および等価減衰比を得ることを目的とする。

2. 等価線形化

(1) 復元力モデル⁵⁾

著者らは、図-1に示すように3つの非線形バネを組み合わせる積層ゴム支承を構築した。このモデルは、高減衰積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承および天然積層ゴム支承のいずれの復元力特性も精緻に再現可能なモデルである。モデルの具体的な式を以下に示す。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1a)$$

$$F_1 = K_1 \left\{ \beta + (1 - \beta) \exp \left(-\frac{U_{\max}}{\alpha} \right) \right\} U + a [1 - \exp(-b|U|)] \operatorname{sgn}(U) \quad (1b)$$

$$\dot{F}_2 = \frac{Y_t}{U_t} \left[\dot{U} - \left| \dot{U} \right| \left| \frac{F_2}{Y_t} \right|^n \operatorname{sgn} \left(\frac{F_2}{Y_t} \right) \right] \quad (1c)$$

$$Y_t = Y_0 \left[1 + \left| \frac{U}{U_H} \right|^p \right] \quad (1d)$$

$$U_t = U_0 \left[1 + \frac{U_{\max}}{U_S} \right] \quad (1e)$$

$$F_3 = K_2 \left| \frac{U}{U_H} \right|^r U \quad (1f)$$

ただし U は変位、 F は荷重を表す。また、未知パラメータは、 K_1 、 α 、 β 、 a 、 b 、 n 、 Y_0 、 U_H 、 p 、 U_0 、 U_S 、 K_2 および r の13個であり、すべて非負の実数である。以下では、このモデルに最大変位点での剛性を利用した等価線形化法¹⁾を適用して、等価剛性および等価減衰比を解析的に導出する。ただし、最大変位を U_m とし、 U_m は十分大きな値で $U_m \geq U_H$ を満足するものとする。

(2) 等価剛性

最大変位点 U_m での復元力モデル全体の荷重値を

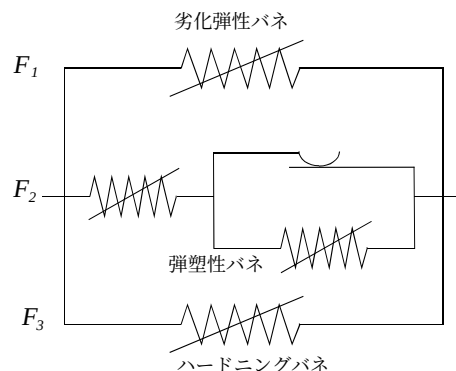


図-1 積層ゴム支承の復元力モデルの概念図

F_m とし、各バネにおける荷重値を $F_i^{(m)}$ とおく。式(1)に $U = U_m$ 、 $U_{\max} = U_m$ を代入し、さらに近似

$$e^{-U_m/U_t^{(m)}} \approx 0 \quad (2a)$$

$$\left(\frac{U_t^{(m)}}{U_H} \right)^i \approx 0 \quad (i \geq 2) \quad (2b)$$

$$\beta + (1 - \beta) \exp \left(-\frac{U_m}{\alpha} \right) \approx \beta \quad (2c)$$

$$1 - \exp(-bU_m) \approx 1 \quad (2d)$$

を用いると以下のような等価剛性の近似式を得る。

$$K_{eq} \approx K_1 \beta + \frac{(a + Y_0)}{U_m} + \frac{Y_0 (U_m - p U_t^{(m)})}{U_H^2} \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p-2} + K_2 \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^r \quad (3)$$

ただし、式(3)を導くにあたっては、式(1c)の微分方程式の解析解を得るために $n=1$ とおき、さらに p が整数であるとしている。

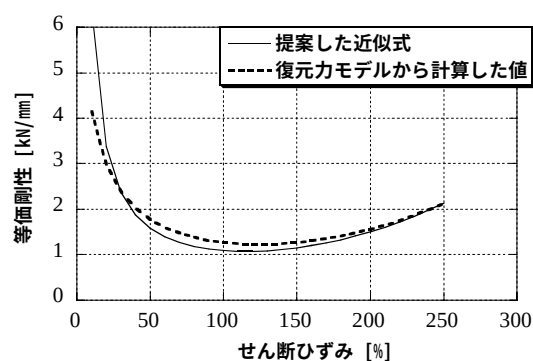
(3) 等価減衰比

式(1)の復元力モデルにおいて、減衰は弾塑性バネによる履歴減衰のみである。そこで振幅 U_m の繰返し変位を与えた場合を考え、弾塑性バネの履歴ループの面積を求めると以下ようになる。

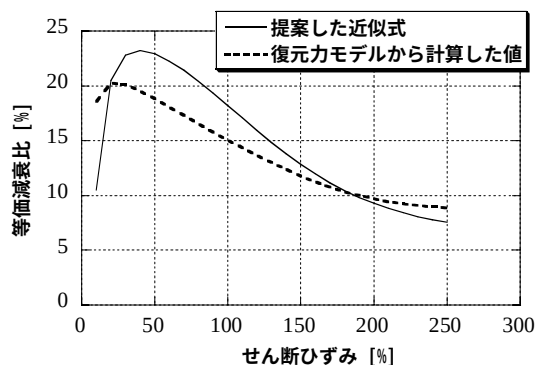
$$\Delta W = \int_{-U_m}^{U_m} (F_r - F_u) dU \approx 4Y_0 \left\{ U_m - U_t^{(m)} + \left(\frac{U_m}{p+1} - U_t^{(m)} \right) \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^p \right\} \quad (4)$$

ただし F_u は (U_m, F_m) からの除荷曲線を表し、 F_r は $(-U_m, -F_m)$ からの再載荷曲線を表す。また、式(4)を導出するにあたっては、 $n=1$ 、 p を整数値とし、さらに式(2a,b)の近似を用いている。

ここで、最大変位点の剛性を利用する等価線形化法では、等価減衰比は次式のように表される¹⁾。



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰比

図-2 提案した等価剛性ならびに等価減衰比と、復元力モデルによる数値計算結果との比較

$$\zeta_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} U_m^2} \quad (5)$$

従って式(3)および式(4)を上式に代入して

$$\zeta_{eq} = \frac{2Y_0 \left[U_m - U_t^{(m)} + \left(\frac{U_m}{p+1} - U_t^{(m)} \right) \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^p \right]}{\pi(D_L + D_{NL})} \quad (6)$$

を得る。ただし

$$D_L = U_m (K_1 \beta U_m + a + Y_0) \quad (7a)$$

$$D_{NL} = Y_0 (U_m - p U_t^{(m)}) \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^p + K_2 U_H^2 \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p+2} \quad (7b)$$

である。

3. 等価線形化の精度の検討

本節では、上述した等価剛性ならびに等価減衰比の近似精度について検討する。そのために、文献5)で実験結果から同定したパラメータに式(3)および式(6)を適用した場合と、式(1)の復元力モデルを直接計算して数値計算により求めた場合の等価剛性および等価減衰を比較する。

(1) 復元力モデルのパラメータ

ここでは文献5)で同定した高減衰積層ゴム支承HDR-Cのパラメータを用いる。HDR-Cは対象とした積層ゴム支承の中で、履歴ループの振幅依存性およびハードニングが顕著にみられた支承である。

(2) 提案した近似式の精度

式(1)に示した非線形の復元力モデルを直接シミュレーションして得た等価剛性、等価減衰比と、式(6)および式(7)による等価剛性、等価減衰を比較したものを図-2に示す。

図-2(a)をみると、提案した等価剛性の近似式は、せん断ひずみ50~250[%]の範囲において復元力モデルの剛性を精度よく再現できていることがわかる。特にせん断ひずみ150[%]以上の範囲に着目すると、ハードニングによる剛性の硬化が再現できていることがわかる。

次に図-2(b)をみると、等価減衰比については、せん断ひずみ30~150[%]の範囲において、近似式と復元力モデルの間に最大2割弱の差がみられる。これは、式(6)を導出する際に $n=1$ とされていること、ならびに除荷および再載荷曲線に現れる高次項を積分後すべて近似して零としたことに起因すると考えられる。しかし、150[%]以上の大ひずみ領域において、両等価減衰比の値の差は小さく、提案した近似式の精度が良いことがわかる。

4. まとめ

本研究では、著者らが提案した積層ゴム支承の復元力モデルに基づき、ハードニングおよび剛性劣化の影響を含む等価剛性および等価減衰比を理論的に導出した。非線形の復元力モデルによる数値計算結果を用いて、提案した等価剛性および等価減衰比の近似精度を検討した。その結果、等価剛性はせん断ひずみ50~250[%]の広範囲で、等価減衰比には150[%]以上の大ひずみ領域で、精度がよいことがわかった。

参考文献

- 1) 柴田明徳：最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析，森北出版，1981。
- 2) 足立幸郎：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，博士論文，京都大学大学院 工学系研究科 土木システム工学専攻，2002。
- 3) 宇佐美勉，鄭 沂，葛 漢彬：Pushover 解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.231-240，1999。
- 4) 川島一彦，庄司学，斎藤淳：ハイブリッド実験による免震橋の非線形地震応答特性に関する検討，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.65-84，2001。
- 5) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三：免震用積層ゴム支承の水平2方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.125-144，2002。