

免震用積層ゴム支承の復元力モデルの等価線形化

吉田純司¹・阿部雅人²・藤野陽三³

¹正会員 博士(工) 山梨大学講師 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

²正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

³フェロー会員 Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

本研究では、著者らが構築した免震用積層ゴム支承の復元力モデルに等価線形化法を適用し、等価剛性と等価減衰比の近似式を理論的に導出する。この等価線形化は、積層ゴム支承のハードニングおよび剛性劣化の影響を含んだものである。また、復元力モデルによる数値計算との比較を行い、提案した等価パラメータの近似式の精度ならびに地震応答予測性能について検討する。

Key Words: base-isolation, laminated rubber bearings, equivalent linearization, hysteresis model, hardening property, seismic response analysis

1. はじめに

積層ゴム支承を用いた免震構造では、構造物の固有周期を長周期化するとともに、減衰性能を付与し地震による慣性力ならびに変位応答を低減させている。免震用積層ゴム支承の復元力特性は、このような動的な効果を積極的に応用していることから、構造物全体の応答に大きく影響する。従って構造物の挙動を精度良く予測するためには、支承の挙動を精緻に反映したモデルが必要となる¹⁾。

実際の免震構造の設計においては、等価線形化法を用いて支承の構造諸元を設計し、その後、非線形動的応答解析により設計の結果を照査することを規定している。しかし、非線形動的応答解析は、計算コストが大きいことから、計算を簡便にする目的で、等価線形化法のみを用いた応答予測手法が提案されている^{4),5)}。このような手法は、免震構造物のみならず鋼構造物やコンクリート構造物についてもこれまで広く行われてきた^{6),7)}。

鋼やコンクリートを応用した構造部材では、これまで精緻な復元力モデルが提案されていることから、それらの復元力モデルの等価剛性および等価減衰比を解析的に得、応答の予測などに利用している。一方、積層ゴム支承については、履歴ループの振幅依存性やハードニングなどの複雑な力学特性を有することから、これまで汎用的かつ高精度なモデルはなく、バイリニアモデルが代用されてきた。

このことから、著者らは、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ゴム支承の復元力特性を精緻に再現できる汎用的な復元力モデルを構築した¹⁾。

本研究では、上述した高精度の復元力モデルを基

に、支承の復元力特性を反映した等価剛性および等価減衰比を得ることを目的とする。

まず、非線形の復元力モデルに最大変位点の剛性を利用する等価線形化法³⁾を適用し、等価剛性および等価減衰比の近似式を理論的に導出する。これらの等価パラメータは、振幅依存性ならびにハードニングの影響を含んだものである。

次に提案した近似式の精度を検討するために、復元力モデルによる数値計算結果との比較を行う。また、提案した近似式を用いた地震応答解析結果と、復元力モデルを用いた地震応答解析結果とを比較し、近似式の地震応答予測精度について検討する。

2. 復元力モデルの等価線形化

ここでは、まず著者らが構築した免震用積層ゴム支承の復元力モデルについて簡潔に説明する。次いで、この復元力モデルに、最大変位点を用いた等価線形化法を適用し、等価剛性ならびに等価減衰比の近似式を導出する。

(1) 復元力モデル¹⁾

著者らは、免震用積層ゴム支承の復元力を精緻に再現するモデルを提案した。このモデルは図-1に示すように3つの非線形のバネを並列につないだものである。以下では各バネを、図-1に示すようにそれぞれ劣化弾性バネ、弾塑性バネおよびハードニングバネと呼ぶことにする。並列に連結されていることから、各バネに作用する変位 U は同一であり荷重は3つのバネから得られる荷重 F_1 、 F_2 および F_3 の和となる。本モデルの具体的な数式を以下に示す。

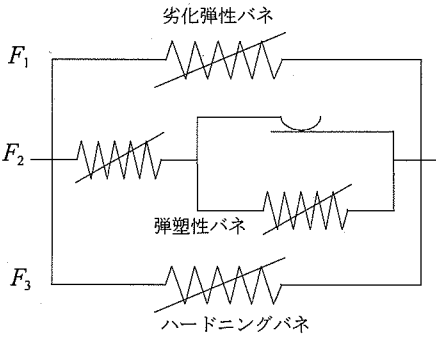


図-1 免震用積層ゴム支承の復元力モデルの概念図

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

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

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

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

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

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

ここに U_{\max} は変位 U の絶対値が過去に受けた最大値であり、現時刻を t として $U_{\max} = \max_{-\infty < s \leq t} |U(s)|$ のように定義される。また、未知パラメータは、 U_H : ハードニングが始まる変位、 Y_0 : 初期降伏荷重、 U_0 : 初期降伏変位、 K_1 : 劣化弾性バネの初期剛性、 α : 剛性劣化の進行率に関するパラメータ、 β : 最終的に剛性が劣化する割合、 n : 弾塑性バネにおいて、弾性域から塑性域に移る際の滑らかさに関するパラメータ、 p, r : ハードニングの大きさを決めるパラメータ、 K_2 : ハードニングバネの比例定数、 a : 小ひずみ領域で現れる非線形弾性における荷重の漸近値、 b : 小ひずみ領域で現れる非線形弾性の剛性変化率に関するパラメータ、 U_S : 降伏荷重の振幅に対する増加率に関するパラメータ、の計 13 個であり、すべて非負の実数である。

(2) 等価剛性

文献 2) の最大変位点を用いた等価線形化法を用いると、等価剛性は、

$$K_{eq} = \frac{F_m}{U_m} \quad (2)$$

のように記述できる。ただし U_m は最大変位であり、十分大きい値で $U_m \geq U_H$ を満足するものとする。また、変位 U_m での復元力を F_m とし、式(1)において各

バネによる復元力を $F_i^{(m)}$ ($i=1,2,3$) とおく。以下では近似を利用するが、それには文献 1) で示したパラメータの値を参考にする。

a) 劣化弾性バネ

式(1b)の F_1 は、非線形の弾性バネであり最大変位点を通じたとき、 $U_{\max} = U_m$ および $U = U_m$ となる。従って

$$F_1^{(m)} = \left[K_1 \left\{ \beta + (1 - \beta) \exp \left(-\frac{U_m}{\alpha} \right) \right\} + a \left\{ \frac{1 - \exp(-bU_m)}{U_m} \right\} \right] U_m \quad (3)$$

を得る。ここで U_m が十分大きい値(せん断ひずみ 200[%]以上)である場合を考えると、文献 1) で記したいずれのパラメータを用いた場合も

$$U_m / \alpha > 6.3, \quad bU_m > 3.2 \quad (4a,b)$$

となり、さらに β は $\beta \ll 1$ ではないことから

$$\beta + (1 - \beta) \exp(-U_m / \alpha) \approx \beta \quad (5a)$$

$$1 - \exp(-bU_m) \approx 1 \quad (5b)$$

が成立する。従って式(3)は以下のように近似することができる。

$$F_1^{(m)} \approx \left(K_1 \beta + \frac{a}{U_m} \right) U_m \quad (6)$$

b) 弾塑性バネ

弾塑性バネは、 $n=1$ の場合のみ解析解を得ることができる。ここで最大変位 U_m が降伏変位 U_t と比較して十分大きい場合を考えると、復元力は任意の n について完全に塑性状態であるとみなすことができる。このことから、 $F_2^{(m)}$ の値は $n=1$ の場合の解を用いて近似できる。そこで $n=1$ と置き、最大変位点 U_m での荷重 $F_2^{(m)}$ を算出する。

まず、式(1c)は

$$\dot{F}_2 = \frac{Y_t}{U_t^{(m)}} \left\{ \dot{U} - |\dot{U}| \left| \frac{F_2}{Y_t} \right| \right\} \quad (7)$$

となる。ただし

$$U_t^{(m)} = U_0 \left(1 + \frac{U_m}{U_S} \right) \quad (8)$$

である。ここで変位 U が無変形 $U=0$ の状態から $\dot{U} > 0$ の条件下で変形を受け、最大変位点 U_m に到達する荷重を想定する。このとき式(7)は、

$$\frac{dF_2}{dU} = \frac{(Y_t - F_2)}{U_t^{(m)}} \quad (9)$$

となる。上式を任意の p について解析的に解くことはできない。しかし p を整数に限定すると、初期条件 $F_2|_{U=0} = 0$ から

$$F_2^{(m)} = Y_0 \left[1 + \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^p - p \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p-1} \frac{U_t}{U_H} \right]$$

$$+\sum_{i=2}^{p-1} c_i \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right)^i \left(\frac{U}{U_H} \right)^{2-i} + c_p \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right)^p \left(1 - e^{-\frac{U}{U_i}} \right) - e^{-\frac{U}{U_i}} \quad (10)$$

のように統一した形の解を得ることができる。ただし c_i は実定数である。

ここで文献1)のパラメータを参照すると、

$$\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \ll 1, \quad \frac{U_m}{U_i^{(m)}} \gg 1 \quad (11a, b)$$

より

$$e^{-U_m/U_i^{(m)}} \approx 0, \quad \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right)^i \approx 0 \quad (i \geq 2) \quad (12a, b)$$

が成立する。従って式(10)に $U = U_m$ を代入し、式(12)の近似を用いると最終的に次式を得る。

$$F_2^{(m)} \approx Y_0 \left[1 + \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^p - p \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p-1} \frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right] \quad (13)$$

c) ハードニングバネ

式(1f)の F_3 は、非線形の弾性バネであり、最大変位点を通じたとき、 $U = U_m$ となる。従って

$$F_3^{(m)} = K_2 \left[\frac{U_m}{U_H} \right]^r U_m \quad (14)$$

を得る。上式は大変位時に現れるハードニング現象を近似するものであることから、これ以上の近似は用いないものとする。

d) 等価剛性のまとめ

以上の a)-c) の結果より、モデルの最大変位点 U_m における荷重の値 F_m は、

$$F_m \approx \left(K_1 \beta + \frac{a}{U_m} \right) U_m + K_2 \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^r U_m + Y_0 \left[\frac{1}{U_m} + \frac{U_m - p U_i^{(m)}}{U_H^2} \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p-2} \right] U_m \quad (15)$$

となり、上式より等価剛性 K_{eq} は、

$$K_{eq} \approx K_1 \beta + \frac{(a+Y_0)}{U_m} + K_2 \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^r + \frac{Y_0 (U_m - p U_i^{(m)})}{U_H^2} \left(\frac{U_m}{U_H} \right)^{p-2} \quad (16)$$

となる。なお、式(14)においてハードニングの影響を一切含まない場合を考えると $U_H \rightarrow \infty$ より、

$$K_{eq} \approx K_1 \beta + \frac{(a+Y_0)}{U_m} \quad (17)$$

を得る。

(3) 等価減衰比

等価減衰比 ζ_{eq} は、振幅 U_m を有する定常履歴ループが描く面積 ΔW から

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right) \quad (18)$$

のように算出することができる²⁾。ただし、 W_e は弾性ひずみエネルギーであり

$$W_e = \frac{K_{eq} U_m^2}{2} \quad (19)$$

である。式(1)に記したモデルにおいては、弾塑性バネのみ履歴ループを描く。そこで以下では、弾塑性バネが描く履歴の面積 ΔW を算出する。

定常履歴ループにおいて、 $(U_m, F_2^{(m)})$ から除荷を行い $(-U_m, -F_2^{(m)})$ に至るまでの荷重曲線を除荷曲線、 $(-U_m, -F_2^{(m)})$ から再載荷を行い $(U_m, F_2^{(m)})$ に至るまでの荷重曲線を再載荷曲線と呼び、それぞれ F_u および F_r とおく。これらを用いると ΔW は、

$$\Delta W = \int_{-U_m}^{U_m} (F_r - F_u) dU \quad (20)$$

のように記述できる。従って ΔW を陽な形で求めるためには、 F_r および F_u の解析解が必要となる。以下では、解析解を得るために本節(2)の b) と同様に $n=1$ とおく。ただし、履歴ループには除荷時および再載荷時に弾性域から塑性域への遷移が現れるため、 n により履歴形状が影響を受ける。従って $n \neq 1$ の場合に以下の理論を適用すると近似の精度は低下する。

a) 除荷曲線

$(U_m, F_2^{(m)})$ から除荷を行う場合を考えると $\dot{U} < 0$ より式(1c)は、

$$\frac{dF_2}{dU} = \frac{(Y_1 + F_2)}{U_i^{(m)}} \quad (21)$$

となる。ただし式(21)は、式(7)の場合と同様に任意 p に対し、解析解を得ることができない。そこで p を整数とし、式(21)を初期条件 $F_2|_{U=U_m} = F_2^{(m)}$ の下で解くと、次式のような共通の形で表される解を得ることができる。

$$F_u = -Q(U) + \{Q(U_m) + F_2^{(m)}\} e^{(U/U_i - U_m/U_i)} \quad (22)$$

ただし

$$\frac{Q(U)}{Y_0} = 1 + \left(\frac{|U|}{U_H} \right)^p + p \frac{U_i^{(m)}}{U_H} \left(\frac{|U|}{U_H} \right)^{p-1} \text{sgn}(U) + \sum_{i=2}^{p-1} c_i^{(n)} \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right)^i \left(\frac{|U|}{U_H} \right)^{2-i} + c_p^{(n)} \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H} \right)^p \left(1 - e^{-\frac{U}{U_i}} \right) - e^{-\frac{U}{U_i}} \quad (22)$$

であり $c_i^{(n)}$ は実定数である。

b) 再載荷曲線

$(-U_m, -F_2^{(m)})$ から再載荷を行う場合を考えると $\dot{U} > 0$ より、式(7)と同一の微分方程式を得る。この微分方程式を式(22)の場合と同様の方法により初期条件 $F_2|_{U=-U_m} = -F_2^{(m)}$ の下で解くと、以下のような統

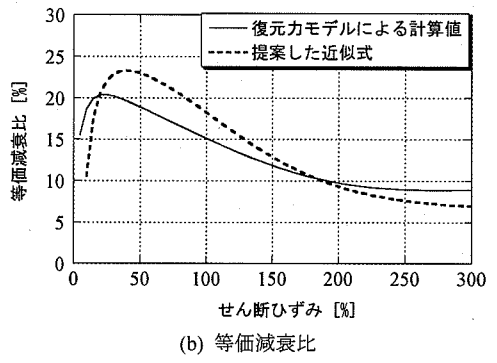
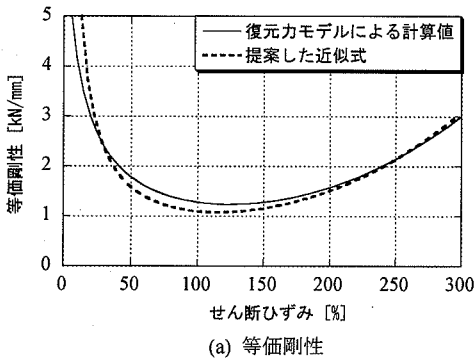


図-2 提案した等価剛性ならびに等価減衰比と、復元力モデルによる数値計算結果との比較

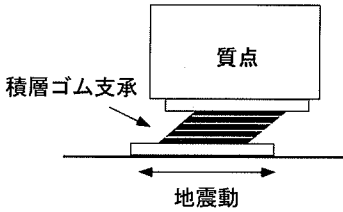


図-3 地震応答解析に用いた1質点系モデル

一した形の解を得ることができる。

$$F_r = R(U) - \{R(-U_m) + F_2^{(m)}\} e^{(U/U_i - U_m/U_i)} \quad (24)$$

ただし

$$\begin{aligned} \frac{R(U)}{Y_0} &= 1 + \left(\frac{|U|}{U_H}\right)^p - p \frac{U_i^{(m)}}{U_H} \left(\frac{|U|}{U_H}\right)^{p-1} \text{sgn}(U) \\ &+ \sum_{i=2}^{p-1} c_i^{(r)} \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H}\right)^i \left(\frac{|U|}{U_H}\right)^{2-i} + c_p^{(r)} \left(\frac{U_i^{(m)}}{U_H}\right)^p \left(1 - e^{-\frac{U}{U_i}}\right) - e^{-\frac{U}{U_i}} \end{aligned} \quad (25)$$

であり $c_i^{(r)}$ は実定数である。

c) 等価減衰比

式(22)および式(24)を式(20)に代入し積分を実行した後、式(12)の近似を用いると、以下の履歴面積 ΔW を求めることができる。

$$\Delta W \approx 4Y_0 \left\{ U_m - U_i^{(m)} + \left(\frac{U_m - U_i^{(m)}}{p+1}\right) \left(\frac{U_m}{U_H}\right)^p \right\} \quad (26)$$

上式において、ハードニングを考慮しない場合を考えると $U_H \rightarrow \infty$ より、

$$\Delta W \approx 4Y_0 (U_m - U_i^{(m)}) \quad (27)$$

のように簡潔に表現できる。式(27)の履歴面積は、降伏荷重 Y_0 、降伏変位 $U_i^{(m)}$ を有する完全弾塑性バイリニアモデル²⁾による履歴面積と同一である。このことから式(26)は完全弾塑性バイリニアモデルにハードニングの影響を組み合わせた一般形であることがわかる。

以上より式(13)および式(26)を、式(18)に代入して以下に示す等価減衰比 ζ_{eq} を算出することができる。

$$\zeta_{eq} = \frac{2Y_0 \left[U_m - U_i^{(m)} + \left(\frac{U_m - U_i^{(m)}}{p+1}\right) \left(\frac{U_m}{U_H}\right)^p \right]}{\pi(D_L + D_{NL})} \quad (28)$$

ただし

$$D_L = U_m (K_1 \beta U_m + \alpha + Y_0) \quad (29a)$$

$$D_{NL} = Y_0 (U_m - p U_i^{(m)}) \left(\frac{U_m}{U_H}\right)^p + K_2 U_H^2 \left(\frac{U_m}{U_H}\right)^{r+2} \quad (29b)$$

一方、ハードニングを考慮しない場合は、式(17)および式(27)を式(18)に適用して

$$\zeta_{eq} = \frac{2Y_0 (U_m - U_i^{(m)})}{\pi U_m (K_1 \beta U_m + \alpha + Y_0)} = \frac{2Y_0 (U_m - U_i^{(m)})}{\pi D_L} \quad (30)$$

を得る。

3. 等価線形化の精度の検討

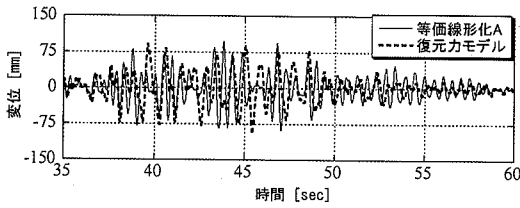
ここでは、本文2節で提案した等価剛性ならびに等価減衰比の近似精度について検討する。そのため、文献1)で実験から同定したパラメータに提案した近似式(式(16)、式(28))を適用した場合と、式(1)の復元力モデルから直接得られる等価剛性および等価減衰を比較する。次いで1質点系モデルを対象として地震応答解析を行い、提案した近似式の地震応答予測精度について検討する。

(1) 復元力モデルのパラメータ

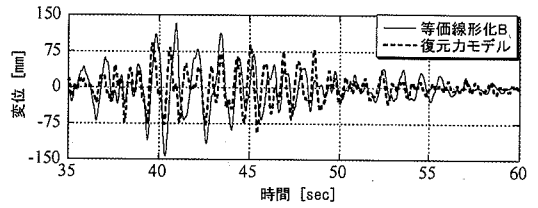
ここでは文献1)で同定した高減衰積層ゴム支承HDR-Cのパラメータを用いる。HDR-Cは対象とした積層ゴム支承の中で、履歴ループの振幅依存性およびハードニングが顕著にみられた支承である。

(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(16)および式(28)の近似式とを比較した結果を図-2

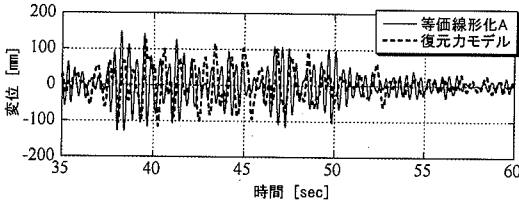


(a) 等価線形化 A

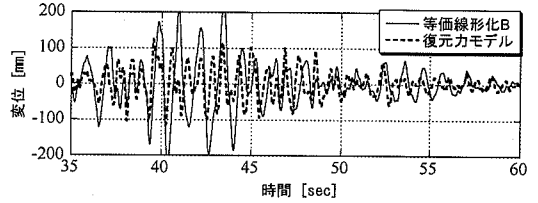


(b) 等価線形化 B

図-4 基準波を入力した場合の等価線形化法による変位応答と、復元力モデルによる変位応答の比較



(a) 等価線形化 A



(b) 等価線形化 B

図-5 基準波×1.5を入力した場合の等価線形化法による変位応答と、復元力モデルによる変位応答の比較

表-1 地震応答解析で得られた最大変位応答および2乗平均変位応答の比較

入力地震波	最大変位応答 [mm]			2乗平均変位応答 [mm]		
	復元力モデル	等価線形化 A	等価線形化 B	復元力モデル	等価線形化 A	等価線形化 B
基準波 (釧路沖地震 NS 成分)	95.5 (273%)*	96.6	143	10.6	10.6	13.9
基準波×0.75	79.7 (227%)*	84.1	104	8.11	7.79	9.71
基準波×1.5	124 (354%)*	148	223	14.4	15.3	23.5

(*)* は、最大変位応答を支承のゴム総厚 35[mm]で除したせん断ひずみを[%]で表示したもの。

に示す。まず、図-2(a)に着目すると、提案した等価剛性の近似式は、せん断ひずみ 50~300[%]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、提案した等価減衰比の近似式は、せん断ひずみ約 175[%]以下では復元力モデルによる計算値を過大評価し、逆に 175[%]以上の範囲では過小評価している。これらの差は、最大で 2 割弱程度であり、式(26)を導出する際に $n=1$ において、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。

(3) 提案した近似式の地震応答予測性能

a) 解析方法

図-3に示すように高減衰積層ゴム支承 HDR-C に支持された 1 質点系の構造に水平方向の地震動が作用する場合を考える。質点の質量は文献 1) に示したハイブリッド地震応答実験と同一の値 175/9800 [kN sec²/mm]とした。

入力地震動としては、1993 年釧路沖地震時に釧路気象台で観測された地震加速度記録の NS 成分 (最

大加速度: 840gal) を基準波として用いた。ここで用いた釧路沖地震波は、比較的大きい加速度の発生頻度が高いため、支承部に変位が繰り返し発生する特徴を有している。さらに提案した近似式の適用範囲を考察するため、基準波を 0.75 倍および 1.5 倍したものも併せて用い応答解析を行った。

支承の復元力特性は、復元力モデル、式(16)と式(28)の近似式、および式(17)と式(30)の近似式、によりモデル化した。以下では、式(16)および式(28)を用いる場合を「等価線形化 A」、ハードニングの影響を無視した式(17)および式(30)を用いる場合を「等価線形化 B」と呼ぶことにする。なお、近似式に含まれる最大変位 U_m は、復元力モデルを用いた地震応答解析から得られる最大変位応答値を用いた。

b) 解析結果と考察

図-4および図-5に基準波を用いた場合および基準波×1.5を用いた場合の変位応答の比較を示す。また、表-1に各応答解析で得られた最大変位応答値および 2 乗平均変位応答値を示す。

図-4、図-5より、等価線形化 A では復元力モデルを用いた時刻歴応答を全体的に精度よく再現していることがわかる。また、表-1より、ハードニングの影響を含まれずれの変位レベルにおいても、誤差 20%以下の精度で最大変位応答および 2 乗平均変位

応答を予測できていることがわかる。

一方、従来のハードニングを考慮しない等価線形化 B では、時刻歴全体を通して応答を過大評価しており、その差はハードニングの影響が大きくなるほど著しい。特に表-1 の基準波×1.5 を用いるケースをみると、支承が破壊に至る変位²⁾を生じており、このとき等価線形化 B では変位応答を約 1.8 倍過大評価している。

なお、これまで提案されている等価線形化法を用いた解析手法の精度は、本研究で対象とした復元力モデルの近似精度に加え、入力地震動の特性にも依存することが知られている^{4), 5)}。特に兵庫県南部地震にみられるようなパルスの地震動を対象とした場合に、等価線形化法を適用すると単純なバイリニア型復元力モデルを用いた場合でも十分な予測精度が得られない。今後、等価線形化法を用いた解析手法を実務において利用するためには、広範な地震動に対応した汎用的な手法を構築する必要がある。

4. まとめ

本研究では、著者らが文献 1) にて提案した積層ゴム支承の復元力モデルの等価剛性、等価減衰比を得ることを目的とした。得られた主たる知見は、以下の通りである。

- 1) 高精度の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。また、ハードニングの影響を除いた簡潔な近似式も併せて示した。
- 2) 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 50~300[%] の広範囲で、等価減衰比については 150[%] 以上の大ひずみ領域で、精度がよいことがわかった。

- 3) 提案した近似式を用いて地震応答解析を行った結果、ハードニングの影響を考慮しない従来の方法より応答予測精度が向上していることがわかった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 丸善, 1996.
- 3) 柴田明德: 最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981.
- 4) 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.
- 5) 横川英彰, 阿部雅人, 吉田純司: 不規則震動論を用いた橋梁の応答予測法, 第 5 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.177-182, 2002.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2002. 4. 3 受付)

EQUIVALENT LINEARIZATION OF A HYSTERESIS MODEL OF LAMINATED RUBBER BEARINGS

Junji YOSHIDA, Masato ABE and Yozo FUJINO

Equivalent linearization of a phenomenological hysteresis model of laminated rubber bearings which is proposed by the authors, is studied. At first, the approximated equations of the equivalent stiffness and damping ratio of the hysteresis model is analytically derived. The advantage of these equations are that they include the effects of the amplitude-dependency of the hysteresis loops and the hardening phenomenon. Then, by comparing the derived equations with the simulated results of the hysteresis model, these equations are found to be more accurate than the present design code.