

## 地震応答解析のための超高減衰ゴム支承のバイリニアモデル

山梨大学 正会員 吉田純司, HDR 研究会 正会員 鶴野禎史, HDR 研究会 正会員 山本吉久  
HDR 研究会 正会員 朝倉康信, HDR 研究会 正会員 坂口達, HDR 研究会 正会員 宮内康宏  
HDR 研究会 正会員 西村貴明

## 1. はじめに

超高減衰ゴム支承(HDR-S)は, 従来の高減衰ゴムの減衰性能を20%程度向上させたゴム材料を用いている積層ゴム支承であり<sup>1)</sup>, 高いエネルギー吸収性能を有することから, 近年, 免震支承の1つとして利用されてきている. 設計や地震応答解析において, HDR-S の復元力特性はバイリニアモデルとしてモデル化され, モデルのパラメータは載荷実験から得られる等価剛性や履歴面積などから, 最大せん断ひずみの関数として決定される<sup>1), 2)</sup>. しかし, これらのパラメータの地震応答解析における応答予測精度についてはこれまで検討されていない.

本研究では, HDR-S を対象としてその設計式の地震応答解析の精度を検討するとともに, 解析に適したバイリニアモデルの構築を目的とする.

## 2. 超高減衰ゴム支承の高精度モデル

まず, 地震応答解析における高精度の予測値を算出することを目的として, 文献3)で提案されている復元力モデルを拡張し, HDR-S の載荷実験結果を精緻に再現するモデルを構築した. 具体的には, 支承に作用する変位を  $U$ , 復元力を  $F$  として,

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

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

$$F_2 = \frac{Y_t}{U_0} \left\{ \dot{U} - \left| \dot{U} \right| \frac{F_2}{Y_t} \right\}^{1/2} \operatorname{sgn} \left( \frac{F_2}{Y_t} \right) \quad (1c)$$

$$F_3 = K_2 \left\{ 1 - A \cdot \frac{(U_{\max}/B)^C}{1 + (U_{\max}/B)^C} \right\} \left| \frac{U}{U_H} \right|^q U \quad (1d)$$

$$Y_t = Y_0 \left\{ 1 + \left( \frac{U_{\max}}{U_m} \right)^m + \left| \frac{U}{U_H} \right|^p \right\} \quad (1e)$$

$$U_{\max} = \max_{-\infty < s \leq t} |U(s)| \quad (1f)$$

である. ただし  $Y_0, U_0, U_H, K_1, \alpha, \beta, p, q, K_2, A, B, C, U_m, m$  は, 未知パラメータであり, これらは実数値  $GA^4$  を用いて載荷実験での HDR-S の復元力との差が最小になるよう同定した. なお, ここで用いた実験データは, 平面寸法 400 mm × 400 mm, ゴム総厚 50 mm(5層), せん断弾性係数 1.2 N/mm<sup>2</sup> を有し, かつ設計式<sup>1)</sup>と合致する「支承の単位面積当りの荷重とせん断ひずみの関係」である. 図-1は同定したパラメータを用いた解析結果と実験結果との比較を表しており, モデルにより実験結果を大ひずみ域に至るまで精度よく再現できている

ことがわかる.

## 3. 地震応答解析のためのバイリニアモデル

まず, 設計式<sup>1)</sup>から定まるバイリニアモデルを用いて図-2のような面圧 7.84 N/mm<sup>2</sup> 相当の質量を有し HDR-S に支持される 1 自由度系モデルについて地震応答解析を行った. その結果の一例を表-1 に示す. 表-1 の結果にもみられるように設計式から定まるバイリニアモデルでは, 妥当な予測結果を与える場合もあるが大きく異なる場合も存在する.

そこで本研究では, 地震応答解析に最適なバイリニアモデルのパラメータを決定する. 具体的には, 図-2 のモデルにおいて支承部を, 式(1)の高精度モデルならびにバイリニアモデルで近似し, 変位応答が以下に示す  $E$  を最小とするバイリニアモデルの 1 次剛性, 2 次剛性および降伏荷重を, 実数値  $GA^4$  により求める.

$$E = \left| 1 - \frac{U_{\max}^{(b)}}{U_{\max}^{(h)}} \right| + \left| 1 - \frac{U_{\min}^{(b)}}{U_{\min}^{(h)}} \right| + \left| 1 - \frac{U_{rms}^{(b)}}{U_{rms}^{(h)}} \right| \quad (2)$$

ここに,  $U_{\max}^{(b)}, U_{\min}^{(b)}, U_{rms}^{(b)}$  は, それぞれバイリニアモデルを用いた場合の変位応答の最大値, 最小値, 二乗平均であり,  $U_{\max}^{(h)}, U_{\min}^{(h)}, U_{rms}^{(h)}$  は高精度モデルを用いた場合の変位応答の最大値, 最小値, 二乗平均である. また, 図-2 のモデルにおいて, 質量は, 面圧 3.92 N/mm<sup>2</sup> および 7.84 N/mm<sup>2</sup> に相当する値とし, 入力地震動は表-2 に示す 5 つの実地震加速度記録を定数倍して用いた.

図-3, 図-4 および図-5 に上述した方法により同定した 1 次剛性, 2 次剛性および降伏荷重と, 現行の設計式(実線)との比較を示す. 図をみると同定結果にはかなりのばらつきがあり, また設計式と異なる傾向を示しているものも見られる. そこで, これらを最大せん断ひずみ  $\gamma$  の多項式により近似すると次式のようになる(図-3 ~ 図-5 の点線).

$$G_1 = 16.7 - 9.32\gamma + 2.47\gamma^2 \quad (3a)$$

$$G_2 = 1.40 - 0.602\gamma + 0.126\gamma^2 \quad (3b)$$

$$\tau_y = 0.0653 + 0.669\gamma - 0.294\gamma^2 + 0.0458\gamma^3 \quad (3c)$$

ただし,  $G_1$  [N/mm<sup>2</sup>],  $G_2$  [N/mm<sup>2</sup>] および  $\tau_y$  [N/mm<sup>2</sup>] は, それぞれ「単位面積当りの復元力とせん断ひずみの関係」における 1 次剛性, 2 次剛性および降伏荷重である. また, 図より明らかかなように式(3)の適用範囲は  $1 \leq \gamma \leq 4$  である.

キーワード: 超高減衰ゴム支承, 復元力特性, バイリニアモデル, 地震応答解析, 最適パラメータ

連絡先: 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 TEL: 055-220-8521, FAX: 055-220-8773

4. まとめ

本研究では、HDR-S を対象としてその設計式の精度を検討し、かつ地震応答解析に適したバイリニアモデルのパラメータ推定式を提示した。

参考文献：1) HDR 研究会：超高減衰ゴム支承（HDR-S）共通設計式，HDR 研究会技術資料，2004． 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（耐震設計編），丸善，1996． 3) 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. 4) 樋口隆英，筒井茂義，山村雅幸：実数値 GA におけるシンプレクス交叉の提案，人工知能学会論文誌，Vol.16, No.1, pp.147-155, 2001.

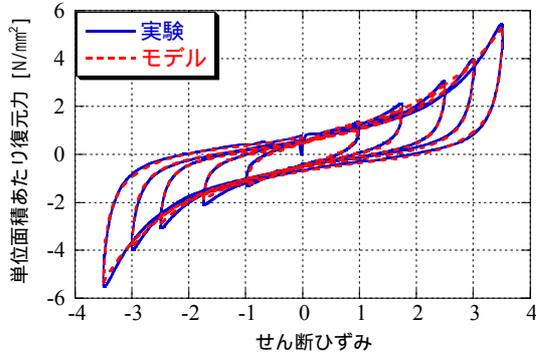


図-1 HDR-S の実験結果と高精度モデルの比較

表-1 バイリニアモデル(設計式)と高精度モデルの地震応答解析結果の比較

入力地震動	最大変位 [mm]		二乗平均 [mm]	
	Bilinear	高精度	Bilinear	高精度
兵庫県南部地震	269	160	98.8	61.5
釧路沖地震	117	124	93.1	37.0
Imperial Valley 地震	56.7	71.4	13.8	16.0

表-2 バイリニアモデルの最適パラメータ同定に用いた入力地震動

地震名	兵庫県南部地震	兵庫県南部地震	釧路沖地震	Imperial Valley 地震	Sanfernando 地震
観測場所と成分	東神戸大橋, NS	神戸海洋気象台, NS	釧路気象台, NS	El Centro, NS	California, NS
倍率	0.1~3 倍し，高精度モデルでの地震応答解析の最大せん断ひずみ $\gamma$ が $1 \leq \gamma \leq 4$ を満足するもの				

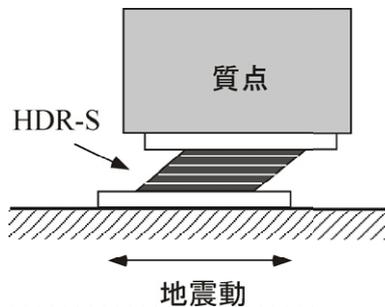


図-2 地震応答解析に用いた 1 質点系モデル

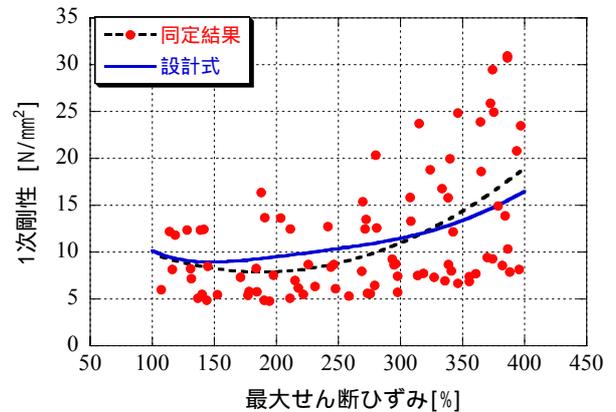


図-3 地震応答解析に適した 1 次剛性と設計式の比較

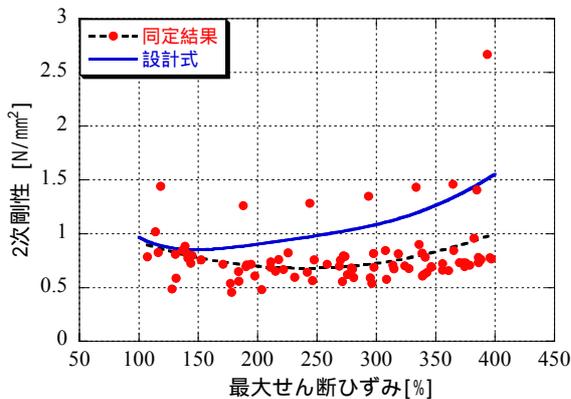


図-4 地震応答解析に適した 2 次剛性と設計式の比較

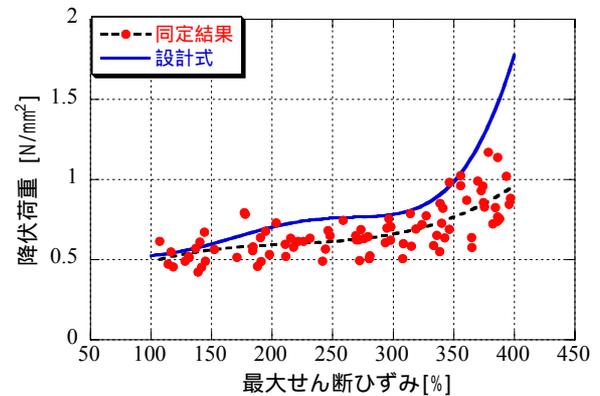


図-5 地震応答解析に適した降伏荷重と設計式の比較