履歴減衰型免震部材の復元力モデルに関する研究

AN ANALYTICAL MODEL FOR SEISMIC ISOLATION DEVICES WITH HYSTERETIC DAMPING

菊地 優*, 北村佳久**, 井上圭一***, 上田正生****

Masaru KIKUCHI, Yoshihisa KITAMURA, Keiichi INOUE
and Masaiki UEDA

For the purpose of accurately predicting the seismic response of an isolated building, an analytical model for seismic isolation devices with hysteretic damping is proposed. The proposed model is capable of well-predicting the force-displacement relationships of various different types of devices, high-damping rubber bearings, lead-rubber bearings, and two types of steel dampers. Seismic response analyses are conducted to study the effectiveness of both existing models and the proposed model. The responses given by the existing models are mostly conservative. This fact indicates that the proposed model can be used to evaluate the performance of isolation devices accurately and effectively.

Keywords: seismic isolation device, hysteretic damping, high-damping rubber bearing, lead-rubber bearing, steel damper, hysteresis model

免震部材, 履歴減衰, 高減衰積層ゴム, 鉛プラグ入り積層ゴム, 鋼材系ダンパー, 復元力モデル

1. はじめに

減衰性能を有する積層ゴムアイソレータ、あるいは履歴型ダンパーで構成される免震システムを適用した建物の設計では、各免震部材の復元力特性を適切にモデル化することが地震時応答予測において不可欠となる。減衰性能を有する積層ゴムアイソレータとしては高減衰積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、滑り減衰免震部材の3タイプが一般的である。一方、履歴型ダンパーとしては主として鋼材系ダンパー、鉛ダンパー、摩擦ダンパーの3タイプが挙げられる。履歴減衰性能を期待するこれらの免震部材（以下、履歴減衰型免震部材と称する）を採用した免震システムの設計では、免震部材の種類ごとに異なる復元力モデルが使用されているのが現状である¹⁾。本論文ではこの現状に着目し、免震部材の種類ごとに異なる復元力モデルを使い分けなければならないという煩雑性を回避して、効果的な免震システムの選択を容易とする共通の復元力モデルの提案を目的として掲げる。なお、ここで提案する復元力モデルは、各履歴減衰型免震部材で用いられてきた既往の復元力モデルよりも復元力特性の良好な再現性を意図しており、各免震部材の復元力特性に共通性を見出して簡略なモデル化を施すこととは主旨が異なる。

本論文では、初めに履歴減衰型免震部材に適用されてきた既往の

復元力モデルについて概観し、その利点・欠点を明確にする。続いて、高減衰積層ゴムに対して著者が提案した復元力モデル²⁾について概説し、他の履歴減衰型免震部材への拡張を試みる。具体的には、本研究において実験データを入手した、低弾性タイプの高減衰積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、免震鋼棒ダンパー、免震U型ダンパーの4種類の履歴減衰型免震部材の荷重変形関係を再現する。最後に、これを用いて得られる免震建物の地震応答値を、既往の復元力モデルによる結果との比較において考察する。

2. 既往の復元力モデルに関する考察

履歴減衰型免震部材は荷重変形関係に見られるエネルギー消費によって減衰性能を発揮する免震部材であり、減衰性能は履歴ループの面積から直接的に評価される。これを復元力モデルとして表現するには、復元力モデルと実験結果の履歴ループ面積が等価になるようにパラメータを設定する必要がある。エネルギー消費を履歴モデルで表現する最も単純な方法はバイリニアモデルであり、多くの履歴減衰型免震部材に適用されてきた。ただし、高減衰積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムでは、せん断ひずみに依存した履歴ループ形状の変化に対応させるために、初期剛性 K_1 、降伏後剛性 K_2 、降伏荷重

本論文の一部は1999年—2002年度日本建築学会大会³⁾⁻⁵⁾で発表している。

* 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

** 清水建設(株)設計本部 設計長

*** 北海道大学大学院工学研究科 助手・博士(工学)

**** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Manager, Design Division, Shimizu Corporation

Instructor, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

図1 修正バイリニアモデル

Q_y の3パラメータをゴムのせん断ひずみに応じて更新する修正バイリニアモデルが提案され実用に供されている(図1参照)¹⁾。

例えば、高減衰積層ゴムに適用される修正バイリニアモデルでは、等価せん断弾性率 G_{eq} 、等価粘性減衰定数 h_{eq} 、荷重切片比 $u (=Q_u/Q_m)$ について、せん断ひずみを変数とする実験式が用意されていることが前提となる。スケルトンカーブからの除荷時の変形 X_m と荷重 Q_m を用い、復元力モデルの履歴ループ面積を実験結果と等価にする条件よりバイリニアモデルの各パラメータを以下のように設定する。

$$K_1 = \frac{2u - (1-u)\pi h_{eq}}{2u - \pi h_{eq}} K_{eq} \quad (1)$$

$$K_2 = (1-u)K_{eq} \quad (2)$$

$$Q_y = \frac{uQ_m K_1}{K_1 - K_2} \quad (3)$$

ここで、 K_{eq} は積層ゴムの等価剛性であり、ゴムの総厚 H_r およびゴムの断面積 A_r を介した相似則が成立するとして、ゴムの等価せん断弾性率 G_{eq} から(4)式によって求めることができる。

$$K_{eq} = \frac{G_{eq} A_r}{H_r} \quad (4)$$

(1)～(3)式の主旨は、勾配を K_2 とし荷重切片の正負(図1(b)の $\pm Q_u$)をそれぞれ通る2直線で囲まれる面積を初期剛性 K_1 を(1)式で求めることで実験結果の履歴ループ面積と等価にすることにある。しかし、 G_{eq} 、 h_{eq} 、 u の組み合わせによっては K_1 が不定となる場合があり、何らかの条件緩和が必要となる。

本論文では、図2に形状を示した低弾性(G4)タイプの高減衰積層ゴムの実験結果⁶⁾(図3参照)に対して修正バイリニアモデルの適用を考える。初めに、実験結果から各ひずみレベルにおける G_{eq} 、 h_{eq} 、 u を求め、データの散布状況から累乗式あるいは多項式をあてはめ最小2乗法によって表1に示す実験式を得た。例として G_{eq} 、 h_{eq} の回帰状況について散布データ、回帰式による結果を比較して図4に示す。この実験式を用いて(1)式から K_1 を評価した結果を図5に太線(1.0 u)で示す。せん断ひずみ γ が2.0を超えるあたりから K_1 は不定となるが、これは $K_1 \rightarrow \infty$ としてもバイリニアモデルでは h_{eq} を等価にする条件を満足させる所要の履歴ループ面積を確保できないことが原因である。 K_1 が不定となる問題を回避するためには、例えば、以下のような方法が考えられる。

- ① h_{eq} を等価にする条件を無視して K_1 に制限を設ける。
- ② h_{eq} を等価にする条件を重視して u の条件を緩和する。
- ③ ①と②を併用する。

以上履歴ループの形状がバイリニア型とはならない状況において

- ・本体ゴム：高減衰ゴム(G4)
- ・被覆ゴム：天然ゴム(厚さ10mm)
- ・積層部：
 - ゴム：2.4mm×33層
 - 鋼板：3.2mm×32層
 - ゴム総厚：79.2mm
- ・形状係数：S1=40, S2=5.05

図2 高減衰積層ゴム試験体の形状

- ・実験条件
 - 振動数：0.01 Hz
 - 面圧：9.81 N/mm² (100kgf/cm²)
 - せん断ひずみ：±25～325%
 - (変形：±19.8～257.4mm)
 - 各ひずみ4サイクル加力
 - 図は3サイクル目を採用
 - 実験時室温：20℃

図3 高減衰積層ゴムの実験結果

表1 高減衰積層ゴムの復元力パラメータ評価式

$$G_{eq} = 0.302\gamma^{-0.461} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\gamma \leq 1.35)$$

$$= 0.417 - 0.165\gamma + 0.0454\gamma^2 - 0.00117\gamma^3 \quad (1.35 < \gamma \leq 3.25)$$

$$h_{eq} = 0.196 - 0.0474\gamma + 0.0231\gamma^2 - 0.00475\gamma^3 \quad (\gamma \leq 3.25)$$

$$u = 0.329 + 0.0156\gamma - 0.0357\gamma^2 + 0.00459\gamma^3 \quad (\gamma \leq 3.25)$$

$$n = 1.0 \quad (\gamma \leq 1.68)$$

$$= 2.60 - 2.30\gamma + 0.804\gamma^2 \quad (1.68 < \gamma \leq 3.25)$$

γ はゴムのせん断ひずみ ($\gamma = X/H_r$) とする。

図4 高減衰積層ゴムの G_{eq} 、 h_{eq} の回帰分析

図5 修正バイリニアモデルのパラメータ評価

も、これを適用することで生じた問題である。①の方法では減衰定数が過小評価されることから安全側の評価になると言えるが、一方で免震部材の性能を十分に評価していないという欠点があると言える。図5には②の方法に従って u の条件を緩和させた場合として、表1の実験式で得られる u を1.1～1.5倍の範囲で変化させたときに(1)式から得られる K_1 を合わせて示している。 u を実験式の1.3倍ま

で緩和することで K_1 の不連続領域を一応回避できるが、①あるいは②のみをすべてのひずみ領域で一律に適用すると、不自然な履歴ループ形状となる可能性があるため、①と②を併用することが現実的である。パラメータを変形(せん断ひずみ)に依存させて更新することは、広い変形領域で免震部材の減衰性能を適切に評価できる利点を有するが、条件の緩和措置が必要であることはバイリニアモデルの適用限界が露呈した結果と言える。

3. 高減衰積層ゴムの復元力モデル

3.1 復元力特性の検討

著者は修正バイリニアモデルに関する上述の問題点を解決すべく、履歴ループ形状を剛性を操作する Q_1 と履歴ループ面積を操作する Q_2 に分離して評価し、荷重変形関係を(5)～(7)式のように表現する復元力モデルをG6タイプの高減衰積層ゴムに対して提案した²⁾。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (5)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2}(1-u)Q_m \left\{ x \pm |x|^n \right\} \quad (6)$$

$$Q_2 = \pm u Q_m \left\{ 1 - 2e^{-a(1 \pm x)} + b(1 \pm x)e^{-c(1 \pm x)} \right\} \quad (7)$$

(複合同順, $\dot{X} > 0$ のとき+, $\dot{X} < 0$ のとき-)

ここで、 x は変形の無次元量($=X/X_m$)であり、 a, b, c, n は履歴ループ形状を操作するパラメータである。

図6に(5)～(7)式で表現される履歴ループ形状を無次元量にして示す。パラメータの操作によって図3の実験結果に見られるような低ひずみ領域での紡錘形から高ひずみ領域でのハードニングに至る履歴ループ形状の特徴が表現されていることがわかる。 n はハードニングを表現するパラメータであり、 $n > 1$ とすることで徐々にハードニングが強くなる。 c は図6の(7)式の曲線における極大点(荷重正側)、極小点(荷重負側)の位置を操作するパラメータであり、(5)～(7)式の性質から $c=6 \sim 7$ の範囲で概ね高減衰積層ゴムの復元力特性を表現できる⁷⁾。 a, b については修正バイリニアモデルと同様に履歴ループ面積を実験結果と等価にする条件を導入することで、(8)、(9)式から算出する。ただし、 a はスケルトンカーブからの除荷時の剛性に大きく寄ることから、 a をあるひずみの値で頭打ちとし、それ以降は b によって面積を等価にする手順が妥当である。

$$\frac{1 - e^{-2a}}{a} = \frac{2u - \pi h_{eq}}{2u} \quad (8)$$

$$b = c^2 \left[\frac{\pi h_{eq}}{u} - \left\{ 2 + \frac{2}{a} \left(e^{-2a} - 1 \right) \right\} \right] \quad (9)$$

本論文では、これを図3に実験結果を示したG4タイプの高減衰積層ゴムに適用してみる。図7に③の方法($u'=1.1u$ 、および $K_1 \leq 10K_2$ の併用)を適用した場合の修正バイリニアモデルと、(5)～(7)式の提案モデルの履歴ループの比較を示す。提案モデルの適用にあたり、文献⁷⁾を参照して帰した n の評価式を前掲の表1に示す。なお、提案モデルについては、 $\gamma \leq 1.5$ では $b=0$ として(8)式のみを用い、 $\gamma > 1.5$ において $c=6$ として(9)式を適用した。図7によれば③の方法でパラメータが不定とならずに評価できたとしても、バイリニア型の履歴ループ形状ではひずみの大きな領域では実験結果を良好に再現することができない。一方、提案モデルはあらゆるひずみ領域において実験結果を良好に再現していることがわかる。

図6 提案復元力モデルの無次元化ループ

図7 高減衰積層ゴムの解析結果

図8 免震建物の振動モデル

なお、ここで試みた荷重変形関係の再現は図3の実験結果を対象としており、実験条件と異なる面圧、載荷速度、温度等が復元力特性に及ぼす変動は考慮していない。これらの要因が復元力特性に及ぼす影響については G_{eq}, h_{eq} の変動として実験データが整理されている⁶⁾。よって、実験条件と異なる状況での提案モデルの適用には、各要因による G_{eq}, h_{eq} の変動の有無を実験的に考慮する必要がある。また、大変形経験後の剛性回復現象については2段階のスケルトンカーブを用意し最大経験ひずみによってこれらを使い分ける方法が提案されており²⁾、修正バイリニアモデル、提案モデルの双方に適用可能である。しかし、図3の実験結果は時間を経過させた複数回の加力実験ではないことから、本論文ではこれを考慮していない。

3.2 地震応答解析による検討

復元力モデルの違いによる免震建物の地震応答値の変化を把握するために、地震応答解析による検討を行う。建物モデルとしては6

層および12層のRC造建物を想定し、図8に示す振動モデルを作成した。上部構造は弾性とし、基礎固定時に建物高さ(m)に0.02を乗じた値が1次固有周期(s)になるような直線分布の層剛性を与え、減衰は基礎固定時の1次固有振動数に対して2%の剛性比例型減衰とした。免震層に位置するせん断ばねに対して、前述の各種復元力モデルを適用した。

入力地震動は図9に示すBCJ-L2とした。解析時間は120秒、時刻は0.005秒とし、数値積分はNewmark- β 法($\beta=0.25$)を用いた。

以上のような解析条件のもとで、以下の2種類の検討を行った。

- 1) 入力地震動の原波形を入力して各階の応答加速度分布を見る。
- 2) 入力地震動の最大加速度を50Galごとに基準化して50～500Galの範囲で変化させて入力した場合の入力レベルと免震層の最大応答変位の関係を見る。

なお、2)の検討では、本論文で対象とする免震部材の復元力モデル評価パラメータの実験式の適用範囲、あるいは併用する免震部材の限界ひずみ⁸⁾を超えた時点で解析を打ち切った。

図3に実験結果を示したG4タイプの高減衰積層ゴムのみで構成される免震システムを考え、建物規模に応じて積層ゴムのサイズと台数を以下のように設定した。ゴム総厚はいずれも200mmとした。

- ・6層モデル：1000 ϕ ×16台
- ・12層モデル：1000 ϕ ×4台、1100 ϕ ×10台、1300 ϕ ×6台

適用した復元力モデルは以下に示すようにパラメータ不定領域に対する対処方法を3通りに変えた修正バイリニアモデルと提案モデルの合計4種類であり、いずれも表1の評価式を用いた。

- ・修正バイリニアモデル(①の方法, $K_1 \leq 10K_2$)
- ・修正バイリニアモデル(③の方法, $u'=1.1u$ と $K_1 \leq 10K_2$ の併用)
- ・修正バイリニアモデル(③の方法, $u'=1.2u$ と $K_1 \leq 10K_2$ の併用)
- ・提案モデル

図10(a)に示す最大加速度分布については、6層モデルでは復元力モデルの差異は小さいが、12層モデルでは修正バイリニアモデルの結果が提案モデルのそれよりも上回り、最下階と最上階においてその傾向が顕著に現れる。修正バイリニアモデルにおいてパラメータが不定となる以前のひずみ領域では両復元力モデルの減衰定数は同じであり、両者の違いは履歴ループ形状のみである。大きな相違点はスケルトンカーブからの除荷時の剛性であり、提案モデルのように刻々と剛性を変化させるか、修正バイリニアモデルのように初期剛性により同じ剛性を保持させるかの違いである。①の方法は荷重切片比の条件を緩和していないことにより、他よりも初期剛性が大きく評価される。一方、③の方法では、荷重切片比の条件緩和を大きくするに従い初期剛性は小さく評価される。図10(a)に見られるように最下階と最上階で顕著となる加速度分布の差は、以上のような復元力モデルの除荷時の剛性評価の差が免震建物の2次以上の振動モードの励起状態の違いとして現れたものと考えられる。高減衰積層ゴムに対する修正バイリニアモデルでは、初期剛性は履歴ループ面積を等価にする条件から決定され、実験結果における剛性を直接評価していない。したがって、実際の履歴ループ形状がバイリニア型とはならない状況では、初期剛性が実験結果を反映できない可能性がある。また、条件の緩和措置が加速度応答に大きく影響を及ぼすことから、緩和措置の適用には十分な注意を要する。

続いて、図10(b)に応答加速度分布に差が見られた12層モデルに

図9 地震応答解析に用いた入力地震動 (BCJ-L2)

(a) 原波形入力時の応答加速度分布

(b) 入力地震動レベルと免震層最大応答変位の関係

図10 高減衰積層ゴムを用いた建物モデルの最大応答値

おける入力地震動レベルと免震層の最大応答変位の関係を示す。両復元力モデルの結果はほぼ同じであり、応答加速度分布に見られた程の差異はない。これはいずれの復元力モデルにおいても履歴ループ面積をほぼ同じく評価していることによると考えられる。

4. 鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデル

4.1 復元力特性の検討

鉛プラグ入り積層ゴムは鉛プラグとゴムの複合構造であり、高減衰積層ゴムのようにゴムのせん断ひずみ-せん断応力度の関係を相似則から(4)式のように任意の形状に拡張できない。ゴム径と鉛プラグ径の組み合わせは、ある範囲において任意である。特定の形状に対する提案モデルの適用は高減衰積層ゴムの場合と同様に可能であるが²⁾、すべての組み合わせについて実験結果を分析することは現実的ではない。現状では、修正バイリニアモデルの適用を前提として実験データの分析・整理が行われている。そこで、任意のゴム径、鉛プラグ径に対応できるように、修正バイリニアモデルのパラメータ評価式⁹⁾を用いて提案モデルを拡張する。よって、拡張に先立ち文献⁹⁾に記載されている修正バイリニアモデルについて概説する。

鉛プラグ入り積層ゴムは履歴ループ形状がバイリニア型に近いことを出発点として、 K_1 、 K_2 、 Q_u の3パラメータが(10)～(12)式のように直接的に評価される。

表2 鉛プラグ入り積層ゴムの復元力パラメータ評価式⁹⁾

$G_r = 0.392 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (G4)}$	$C_K = 0.779\gamma^{-0.43} \text{ (}\gamma < 0.25\text{)}$
$= 0.539 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (G6)}$	$= \gamma^{-0.25} \text{ (}0.25 \leq \gamma < 1.0\text{)}$
$\alpha = 0.588 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (G4)}$	$= \gamma^{-0.12} \text{ (}1.0 \leq \gamma < 2.5\text{)}$
$= 0.883 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (G6)}$	$C_Q = 2.036\gamma^{0.41} \text{ (}\gamma \leq 0.1\text{)}$
$\sigma_{pb} = 8.33 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$= 1.106\gamma^{0.145} \text{ (}0.1 < \gamma < 0.5\text{)}$
$\beta = 13 \text{ (G4)}$	$= 1.0 \text{ (}\gamma \geq 0.5\text{)}$
$= 10 \text{ (G6)}$	γ はゴムのせん断ひずみとする。

・実験条件

載荷速度: 15 mm/sec
 面圧: 11.8 N/mm² (120kgf/cm²)
 せん断ひずみ: ±10 ~ 250%
 (変形: ±20.4 ~ 510mm)
 各ひずみ4サイクル加力
 実験時室温: 26℃

図12 鉛プラグ入り積層ゴムの実験結果

- ・本体ゴム: 天然ゴム (G4)
- ・被覆ゴム: 天然ゴム (厚さ10mm)
- ・鉛プラグ径: 200mm
- ・積層部:
 - ゴム: 6.0mm × 34層
 - 鋼板: 3.1mm × 33層
 - ゴム総厚: 204mm
- ・形状係数: S1=41.7, S2=4.9

図11 鉛プラグ入り積層ゴム試験体の形状

図13 鉛プラグ入り積層ゴムの解析結果

初めに、降伏後剛性 K_2 がゴムと鉛プラグのせん断剛性の和として(10)式より評価される。

$$K_2 = C_K \left(\frac{G_r A_r}{H_r} + \frac{\alpha A_p}{H_r} \right) \quad (10)$$

ここで、 C_K はひずみ依存性によるせん断剛性の修正係数、 G_r はゴムのせん断弾性率、 A_r はゴムの断面積、 A_p は鉛プラグの断面積、 α は鉛プラグの見かけのせん断弾性率、 H_r はゴムの総厚である。

初期剛性 K_1 は K_2 の係数倍として(11)式のように評価される。

$$K_1 = \beta K_2 \quad (11)$$

さらに、荷重切片 Q_u が(12)式のように評価される。

$$Q_u = C_Q \sigma_{pb} A_p \quad (12)$$

ここで、 C_Q はひずみ依存性による荷重切片の修正係数であり、 σ_{pb} は鉛の降伏せん断応力度である。

(10)~(12)式の適用にあたっては、表2に示す評価式が具体的に提示されている⁹⁾。この中で修正係数 C_K 、 C_Q の実験式は、ゴム径φ600~φ1300、鉛プラグ径φ100~φ260、ゴム総厚139~204mmの範囲にある合計13種類の鉛プラグ入り積層ゴムの加力実験データをもとに、せん断ひずみ100%を基準ひずみとし、この時の降伏後剛性および荷重切片に対する変動量を回帰して得られたものである。

さらに、荷重切片 Q_u からバイリニアモデルの降伏荷重 Q_y への変換は(13)式を用いる。

$$Q_y = \frac{K_1}{K_1 - K_2} Q_u \quad (13)$$

提案モデルの適用にあたっては、(14)式で評価される修正バイリニアモデルの等価粘性減衰定数 $h_{eq,bl}$ と等価になる条件を導入する。すなわち、 $h_{eq,bl}$ を(8)式の h_{eq} と置き換えて a を評価する。

$$h_{eq,bl} = \frac{2}{\pi} \frac{Q_u}{Q_m} \left\{ 1 - \frac{Q_u}{(K_1 - K_2) X_m} \right\} \quad (14)$$

ここで、 X_m 、 Q_m はスケルトンカーブからの除荷時の変形および荷重である。また、後述の図12に示すように実験結果ではハードニングが見られないことから、(6)式では $n=1$ 、(7)式では $b=0$ とする。

図11の鉛プラグ入り積層ゴムに対して加力実験を行った結果を図12に示す。また、修正バイリニアモデルと提案モデルに対して図12

(a) 原波形入力時の応答加速度分布

(b) 入力地震動レベルと免震層最大応答変位の関係

図14 鉛プラグ入り積層ゴムを用いた建物モデルの最大応答値

と同じ変形履歴を与えた解析結果を図13に示す。なお、表2の評価式は15℃を基準としていることから、実験結果と条件を合わせるためにいずれの解析も文献¹⁰⁾に従って K_2 、 Q_u の温度補正を行っている。鉛プラグ入り積層ゴムの履歴ループ形状は本来的にバイリニア型に近いことから、修正バイリニアモデルにおいても実験結果は良好に表現されているが、提案モデルはバイリニアモデルの角がなめらかになった分、実験結果により近い履歴ループ形状となっている。

4.2 地震応答解析による検討

地震応答解析による検討では、前述の図8に示した建物モデルに対して鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成される免震システムを考え、

積層ゴムのサイズと台数を以下のように設定した。

- ・ 6層モデル：800φ（ゴム総厚200mm，鉛プラグ径150mm）×16台
 - ・ 12層モデル：900φ（ゴム総厚200mm，鉛プラグ径170mm）×20台
- ゴムのせん断弾性率は $G=0.392\text{N/mm}^2$ (G4)とし、表2に示される評価式に従って復元力モデルのパラメータを設定した。

図14に地震応答解析結果を示す。原波形入力時の最大応答加速度分布では、6層モデルでは両復元力モデルによる差は僅かであるが、12層モデルでは修正バイリニアモデルの結果が提案モデルのそれを上回る。この傾向が最も顕著となる最上階では両者の差は約20%である。鉛プラグ入り積層ゴムの場合、両復元力モデルはすべてのひずみレベルにおいて減衰定数を同じに評価し、両者の違いは履歴ループ形状にある。特に図13に示した両復元力モデルの履歴ループ形状は高減衰積層ゴムの場合と比較して実験結果との差はいずれも小さく、両者の違いはスケルトンカーブからの除荷時の剛性のみにある。除荷直後の剛性は提案モデルの方が大きいことから、単純に初期剛性の大小が応答加速度の差と関連づけられるものではなく、これを一定とすると変化させるかという剛性変化に対する扱いの違いが同図に見られるような応答加速度分布の差をもたらしたと考えられる。一方、12層モデルにおける入力地震動レベルと免震層の最大応答変位の関係では、高減衰積層ゴムと同様に両復元力モデルともほぼ同じであり、応答加速度分布のような差異は見られない。

5. 免震鋼棒ダンパーの復元力モデル

5.1 復元力特性の検討

免震鋼棒ダンパーの復元力特性は、通常、バイリニアモデルが用いられる。高減衰積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムのように変形に依存したパラメータの更新は行わず、あらかじめ想定した変形における履歴ループ形状に合わせてパラメータを設定することが多い。したがって、地震応答解析において想定変形量と異なる応答値が生じた場合には、実挙動との差が生じる可能性がある。免震鋼棒ダンパーに対して(5)～(7)式の提案モデルを適用するには、高減衰積層ゴムのモデル化で用いた手法を適用して、あらかじめ実験結果から等価剛性、等価粘性減衰定数、荷重切片比についてダンパーの変形

量を変数とする実験式を用意しておくことを前提とする。

本論文では図15に形状を示す免震鋼棒ダンパー¹¹⁾に対して、提案モデルの適用を試みる。同図のダンパーは90φの鋼棒(SCM415)を半径365mmでループ状に加工したものであり、鋼棒の上下端は回転を拘束してベースプレートに固定されている。図16に加力実験より得られた荷重変形関係¹²⁾を示す。各方向ともほぼ同様の紡錘形の履歴ループ形状を示しており、エネルギー吸収能に富んだ復元力特性となっている。免震鋼棒ダンパーの復元力特性は鋼棒の一軸引張試験結果とは異なり、その幾何学的形状により鋼棒の降伏領域が徐々に広がっていくことから、明確な降伏荷重を定義することは困難である。この復元力特性をバイリニアモデルに置換する際の降伏荷重は、履歴ループ形状をバイリニア型に近似させるための一パラメータとしての位置付けに過ぎないと言える。

図16の実験結果を回帰分析することで等価剛性 K_{eq} 、等価粘性減衰定数 h_{eq} 、荷重切片比 u に関する実験式を表3のように得た。回帰分析の方法は高減衰積層ゴムの場合と同様であるが、ここではダンパー単体を対象とすることから各実験式の変数はダンパーの変形量とし、A方向の結果を代表させた。図17に K_{eq} 、 h_{eq} の回帰状況について散布データ、回帰式による結果を比較して示す。提案モデルの

図15 免震鋼棒ダンパーの形状¹¹⁾

図16 免震鋼棒ダンパーの実験結果

図18 免震鋼棒ダンパーの解析結果

表3 免震鋼棒ダンパーの復元力パラメータ評価式

$$\begin{aligned}
 K_{eq} &= 0.695X^{-0.735} \quad (\text{MN/m}) \quad (X \leq 0.75) \\
 h_{eq} &= -0.0959 + 7.13X + 41.2X^2 + 107X^3 + 101X^4 \quad (X \leq 0.2) \\
 &= 0.303 + 0.435X - 0.316X^2 \quad (0.2 < X \leq 0.75) \\
 u &= -0.260 + 16.2X - 98.7X^2 + 264X^3 - 255X^4 \quad (X \leq 0.2) \\
 &= 0.603 + 0.789X - 0.710X^2 \quad (0.2 < X \leq 0.75)
 \end{aligned}$$

X はダンパーの変形(m)とする。

図17 免震鋼棒ダンパーの K_{eq} 、 h_{eq} の回帰分析

(a) 原波形入力時の応答加速度分布

(b) 入力地震動レベルと免震層最大応答変位の関係

図 19 免震鋼棒ダンパーを用いた建物モデルの最大応答値

適用にあたり、ハードニングが見られないことから鉛プラグ入り積層ゴムの場合と同様に(6)式では $n=1$ 、(7)式では $b=0$ とし、 a のみで履歴ループ形状を表現できると判断した。

パイリニアモデルと提案モデルに対して図16の加力実験と同じ変形履歴を与えて得られた解析結果を実験結果と比較して図18に示す。比較に用いた実験結果はA方向の結果である。また、パイリニアモデルのパラメータは変形量300mmのときの履歴ループ形状に合うように設定している。両者を比較すると、提案モデルはすべての変形領域で実験結果を良好に再現していることがわかる。

5. 2 地震応答解析による検討

通常、免震鋼棒ダンパーを用いた免震システムでは、免震鋼棒ダンパーが降伏変形に至る以前の減衰を補償するために鉛ダンパーと併用されることが多い。本論文では復元力モデルによる応答の差異を明確にする目的から、図8の建物モデルに対して天然ゴム系積層ゴムと図15の免震鋼棒ダンパーのみで構成される免震システムを考え、以下のように積層ゴムのサイズとダンパーの台数を設定した。

・ 6層モデル：天然ゴム系積層ゴム 800φ (ゴム総厚156mm) × 16台

図 20 免震U型ダンパーの形状¹³⁾
(NSUD55 × 6 タイプ)

ダンパー × 6 台

・ 12層モデル：天然ゴム系積層ゴム 900φ (ゴム総厚177mm) × 20台

ダンパー × 10 台

天然ゴム系積層ゴムのせん断弾性率はいずれも $G=0.343\text{N/mm}^2$ (G3.5)とした。天然ゴム系積層ゴムは線形とし、ダンパーのみにパイリニアモデルあるいは提案モデルの復元力モデルを適用した。

図19に地震応答解析結果を示す。最大応答加速度分布については、6層モデルにおける両復元力モデルの差は僅かであるが、12層モデルではパイリニアモデルの結果が提案モデルのそれを上回る。これまでの検討結果と同様に最上階と最下階で両者の差が顕著であり、復元力モデルによる高次モードの励起状態の差が原因となっている傾向が見られる。一方、入力地震動レベルと免震層の最大応答変位の関係では、両者の差は僅かである。

6. 免震U型ダンパーの復元力モデル

6. 1 復元力特性の検討

免震U型ダンパーは、U型に加工した圧延鋼材の塑性変形による履歴吸収エネルギーを利用した免震ダンパーである¹³⁾。鋼材のサイズ、本数を自由に組み合わせることができ、ダンパーの配置を積層ゴムと一体とする、あるいは別置きにすることで比較的自由的な設計が可能となる利点を有する。ここでは図20に示すNSUD55 × 6¹³⁾と称するタイプを対象とする。

免震U型ダンパーに対する(5)～(7)式の提案モデルの適用方法、ならびに実験結果の回帰分析方法は免震鋼棒ダンパーと同様である。図21に加力実験^{14), 15)}から得られた荷重変形関係を示す。また、実験結果を回帰分析して得られた等価剛性 K_{eq} 、等価粘性減衰定数 h_{eq} 、荷重切片比 u の実験式を表4に示し、 K_{eq} 、 h_{eq} の回帰状況について散布データ、回帰式による結果を比較して図22に示す。図21の実験結果ではハードニングの傾向が見られることから、これを表現するために(6)式では $n > 1$ となる場合を考慮する。文献⁷⁾を参照して求めた n の評価式を表4に合わせて示す。また、(7)式では $b=0$ とし、(8)式から得られる a のみで履歴ループ面積を実験結果と等価にする条件を満足させる。

パイリニアモデルと提案モデルに対して、加力実験と同じ変形履歴を与えて得られた解析結果を実験結果と比較して図23に示す。パイリニアモデルのパラメータは変形量400mmのときの履歴ループ形状に合うように設定したものである。両者を比較すると、提案モデルはハードニングの傾向を含め、すべての変形領域で実験結果を良好に再現していることがわかる。

図 21 免震U型ダンパーの実験結果

表4 免震U型ダンパーの復元力パラメータ評価式

$$\begin{aligned}
 K_{eq} &= 0.633X^{-0.856} \text{ (MN/m)} \quad (X \leq 0.5) \\
 &= 2.53 - 3.95X + 2.35X^2 \text{ (MN/m)} \quad (0.5 < X \leq 0.9) \\
 h_{eq} &= -0.0582 + 4.22X - 13.7X^2 + 16.6X^3 \quad (X \leq 0.2) \\
 &= 0.132 + 1.65X - 2.47X^2 + 1.10X^3 \quad (0.2 < X \leq 0.9) \\
 u &= -0.506 + 20.6X - 111X^2 + 214X^3 \quad (X \leq 0.1) \\
 &= 0.257 + 5.28X - 14.3X^2 + 15.6X^3 - 6.22X^4 \quad (0.1 < X \leq 0.9) \\
 n &= 1.0 \quad (X \leq 0.2) \\
 &= 12.4X - 1.48 \quad (0.2 < X \leq 0.9)
 \end{aligned}$$

ここで、 X はダンパーの変形(m)である。

図23 免震U型ダンパーの解析結果

6. 2 地震応答解析による検討

免震U型ダンパーの検討で用いた免震システムは免震鋼棒ダンパーの場合と同様であり、天然ゴム系積層ゴムと図20の免震U型ダンパーのみで構成される免震システムを設定した。積層ゴムの形状と台数、ダンパーの台数は6層モデル、12層モデルとも免震鋼棒ダンパーの検討と同一とした。

図24に地震応答解析結果を示す。最大応答加速度分布の比較では、他の免震部材と同様に6層モデルでの差はほとんど見られないが、12層モデルではバイリニアモデルの結果が提案モデルのそれを上回る。やはり最上階と最下階での差が顕著であり、バイリニアモデルでは高次モードが提案モデルよりも大きく励起される応答加速度分布となっている。一方、12層モデルにおける入力地震動レベルと免震層の最大応答変位の関係では、入力加速度が200Gal付近でバイリニアモデルの結果が提案モデルのそれを下回るが、それ以外の入力レベルでは両者の結果はほぼ同じである。

7. 結論

本論文では、履歴減衰型免震部材の復元力特性について検討を行い、共通の数式表現によって荷重変形関係を再現する復元力モデルを提案した。対象とした免震部材は実験データを入手した、低弾性(G4)タイプの高減衰積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、免震鋼棒ダンパー、免震U型ダンパーの4種類である。この復元力モデルは著者がG6タイプの高減衰積層ゴムに対して提案したものであるが²⁾、本論文では他の履歴減衰型免震部材に対して復元力モデルの拡張を試みた。高減衰積層ゴム、免震鋼棒ダンパー、免震U型ダンパーの3種類の免震部材については、実験結果より得られた等価剛性(あるいは等価せん断弾性率)、等価粘性減衰定数、荷重切片比の3種類の指標を用いて復元力特性を評価することによって復元力モデルの拡張を行った。鉛プラグ入り積層ゴムについては、ゴム径と鉛プ

図22 免震U型ダンパーの K_{eq} , h_{eq} の回帰分析

(a) 原波形入力時の応答加速度分布

(b) 入力地震動レベルと免震層最大応答変位の関係

図24 免震鋼棒ダンパーを用いた建物モデルの最大応答値

グ径の任意の組み合わせに対応すべく、従来から用いられている修正バイリニアモデルのパラメータ評価式を適用し、提案モデルによる等価粘性減衰定数を修正バイリニアモデルのそれと等価にするという仮定を導入することによって復元力モデルを拡張した。

復元力モデルの妥当性を検証するために、免震部材の加力実験より得られた荷重変形関係との比較を行った。加力実験と同じ変形履歴を与えて得られた既往のモデルと提案モデルの各荷重変形関係を比較した結果、いずれの免震部材についても提案モデルは既往のモデルよりも実験結果を良好に再現できた。ただし、いずれの検討も特定の条件下で実施された実験結果を再現し比較したものである。したがって、本研究で扱った実験条件と異なる状況下での適用に関しては、条件の相違がもたらす復元力特性の変動の有無を別途考慮する必要がある。

続いて、同じ条件下で復元力データを設定した既往のモデルと提案モデルによる地震応答値について比較検討を行った。2種類の免震建物に対して、上記4種類の履歴減衰型免震部材を用いた免震システムを設定した。地震応答解析結果の比較では、提案モデルの方が既往の復元力モデルよりも小さな最大応答加速度値を与えた。既

往の復元力モデルは概ね安全側の評価を与えているが、一方で免震部材の性能を十分に評価していないとも言える。応答値の違いは主として上部構造の応答加速度に見られ、特に最下階と最上階に顕著な差があった。これは、2次以上の振動モードの励起状態が復元力モデルによって異なることが原因であると考えられる。

上部構造が十分に剛であり1次モードが卓越する場合、上部構造の高さ方向の応答加速度分布はほぼ一定である¹⁶⁾。しかし、最近に見られる高層免震建物や上部構造を鉄骨造とした免震建物の事例から判断すると、上部構造の剛性は以前よりも相対的に小さくなる傾向にある。よって、免震部材の復元力モデルの違いが免震建物の応答値、特に2次以上の振動モードに起因した応答値に及ぼす影響は一層大きくなると考えられる。したがって、免震部材の復元力特性の評価、および復元力モデルの適用には十分な配慮が必要となる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東洋ゴム工業株式会社、オイレス工業株式会社、株式会社巴コーポレーション、新日本製鐵株式会社より免震部材の実験データならびに貴重な助言を頂きました。また、地震応答解析は清水建設株式会社開発の3次元非線形振動解析システムDAC3Nを使用しました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)日本免震構造協会：免震構造入門
- 2) M. Kikuchi and I. D. Aiken: An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 215-231, 1997.
- 3) 菊地優, 北村佳久, 太田雅己: 鉛プラグ入り積層ゴムの復元力特性に関する一考察(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 583-586, 1999年
- 4) 菊地優: 免震鋼棒ダンパーの復元力モデルに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 673-674, 2000年
- 5) 菊地優, 吉川秀昭: 免震U型ダンパーの復元力モデルに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 515-516, 2002年
- 6) 東洋ゴム工業(株): 免震用積層ゴム(G=4)技術資料, 平成9年
- 7) 菊地優: 免震構造物の地震時損傷度評価法に関する研究, IRI研究報告, 95-03, 1995年
- 8) (財)日本免震構造協会: 免震部材標準品リスト, 2001年
- 9) オイレス工業(株): LRB技術資料, 2000年6月
- 10) オイレス工業(株): LRB技術データ集CD-ROM版 Ver. 1.1, 2000年
- 11) (株)巴コーポレーション: 免震鋼棒ダンパー, 2000年
- 12) 岡本哲美, 玉松健一郎, 高瀬恵悟, 土師利昭, 島貫貴志: 免震鋼棒ダンパーφ90R365の性能確認試験(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000年, 667-668
- 13) 新日本製鐵(株): 免震U型ダンパー技術資料, 平成12年12月
- 14) 鈴木一弁, 吉川英章, 佐伯英一郎, 渡辺厚: 免震U型ダンパーに関する実験的研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 665-668, 1999年
- 15) 鈴木一弁, 渡辺厚, 吉川英章, 小西宏明, 高山峯夫: 免震U型ダンパーに関する実験的研究(その3~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 659-666, 2000年
- 16) J. M. Kelly: *Earthquake-resistant design with rubber*, Springer, 1997.

付録 提案モデルのパラメータの数値変化

復元力モデルの荷重変形関係を表現する(5)~(7)式に関して、履歴ループの形状を操作する各パラメータのうち、初めに a を履歴ループ面積を等価にする条件のもとに(8)式より決定するが、これを a について代数的に解くことはできない。したがって、Newton法

を用いて数値的に求める必要がある。通常は陽な形で現れないパラメータであるが、付図1に各免震部材における a の具体的な数値の変化を示す。なお、各免震部材の実験式の変数の違いにより、高減衰積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムはせん断ひずみに対する値として付図1(a)に、免震鋼棒ダンパーと免震U型ダンパーは変形に対する値として付図1(b)に分けて図示した。

高減衰積層ゴムについては、修正バイリニアモデルの初期剛性 K_1 の変化と同様に、初期剛性に大きく影響する a がせん断ひずみ1.5を越えるあたりから、付図1(a)の太破線部分のように急激に増大する傾向がある。これは $a \rightarrow \infty$ としても所要の履歴ループ面積を確保できないことが原因であり、提案モデルではパラメータ b による履歴ループ面積を付与することでこれを解決している。本論文で適用した高減衰積層ゴムについては、せん断ひずみ1.5を越える時点において a を固定($\gamma=1.5$ で $a=8.26$)とし、パラメータ b によって履歴ループ面積を等価とした。同図では、 a について採用した部分を太実線で表現している。また、付図1(a)にはせん断ひずみ1.5以上において(9)式によって計算される b を合わせて示している。鉛プラグ入り積層ゴムについては、 a はほぼ直線的に増大しており著しい増加とならないことから、パラメータ b による履歴ループ面積の付与は必要としない。免震鋼棒ダンパーに関しても鉛プラグ入り積層ゴムと同様である。免震U型ダンパーについては変形が80cmを越えるあたりから a が急激に増大する傾向が見られるものの、この変形が非常に大きな領域であることから a のみで評価できると判断した。

(a) 高減衰積層ゴム, 鉛プラグ入り積層ゴムの場合

(b) 免震鋼棒ダンパー, 免震U型ダンパーの場合

付図1 復元力モデルのパラメータの変化

(2002年9月6日原稿受理, 2002年12月27日採用決定)