

# (136) 免震構造の終局時挙動に関する応答解析

㈱奥村組筑波研究所 ○正員 栗本 雅裕 稲葉 金正  
松田 敦夫

## 1 まえがき

積層ゴムで支持された免震構造物の安全性の評価および合理的な設計手法の確立には、積層ゴムの大変形領域での構造物の動的な挙動、集合体としての積層ゴムの終局時の挙動を把握しておく必要がある。そこで筆者らは、小型積層ゴムの破断試験、大変形領域を対象とした振動台試験および応答解析を実施し、免震構造物の終局時の挙動について考察した。なお、応答解析で積層ゴムの大変形領域での復元力特性にRATEモデルを適用した。

## 2 振動台試験および解析モデル概要

振動台試験に用いた試験体の形状を図-1に示す。試験体の上部構造はコンクリート製で、免震装置は12個(4×3列)の積層ゴムと2本の鋼棒ダンパーで構成されている。積層ゴムを図-2に示す。直径は5cm、ゴム厚は0.8mm×8層の6.4mmである。

解析モデルは上部構造を1質点3自由度の剛体とし、積層ゴムは12個の要素を一本に集約したせん断バネと、加振直交方向の3個を集約した4本の上下バネで表現した。解析モデルを図-3に示す。運動方程式を式-1に示す。

## 3 復元力特性のモデル化

積層ゴムの復元力特性を把握するため、積層ゴムに定格荷重(750kgf)を作用させ、振動数0.5Hzの漸増正弦波でせん断破壊させる試験と、積層ゴムに予めせん断ひずみを与えておいて(オフセットせん断ひずみ)引張り破壊させる試験を行なった。その結果を図-4、図-5に示す。積層ゴムのハードニング領域におけるせん断力は、一度経験した最大ひずみ以下のひずみ領域では骨格曲線より小さく、その最大ひずみを越えると骨格曲線に移る傾向を示している。また、上下方向の剛性と降伏荷重はオフセットせん断ひずみが高いほど高く、せん断ひずみに依存する傾向が表われている。

上述した復元力特性をRATEモデルを適用して近似した。積層ゴムのせん断力に関する近似式を式-2に示す。積層ゴムのハードニング領域まで対応できるようにRATEモデルを修正したものである。モデル化において、積層ゴムのせん断力は経験していないひずみ領域では骨格曲線に沿って進み、その最大ひずみを越えるまでは履歴曲線により決定される。モデルの各定数は、図-4に示した要素試験の各半ループにおいてせん断ひずみをパラメータとした等価剛性、等価減衰定数および荷重軸切片から決定され、要素試験によりこの定数を求めれば一義的に決まる。

また、上下方向の引張側の復元力は式-3を適用した。引張側は図-5の要素試験結果より第1剛性、第2剛性、降伏荷重を求め、多項式近似して用いた。圧縮剛性は、式-4を適用し、積層ゴムの重なった面積に比例して低減させた。式-2、式-3で

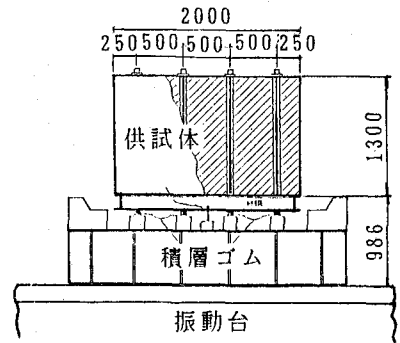
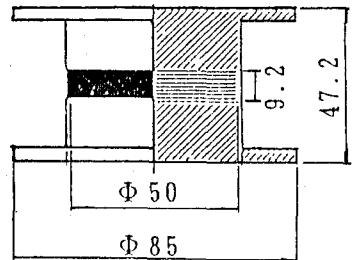


図-1 供試体の形状



ゴム : 0.8 × 8 = 6.4mm  
鉄板 : 0.4 × 7 = 2.8mm

図-2 積層ゴム

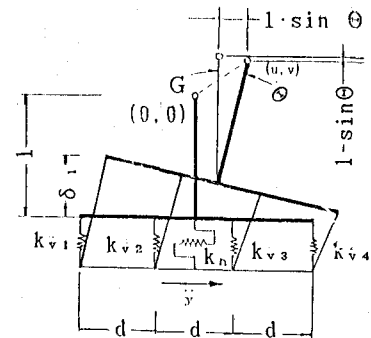


図-3 解析モデル

近似した復元力を図-6 (積層ゴムのせん断力)、図-7 (積層ゴムの引張力) に示す。

$$\begin{cases} m\ddot{u} + K_H(u - l\sin\theta) & = -m\ddot{y} \\ m\ddot{v} + K_V\{v + (1 - \cos\theta)l\} & = 0 \\ I_G\ddot{\theta} + K_R\theta - K_H(u - l\sin\theta) & = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここに

$K_H$  : 全体を集約した水平バネ定数,  $v$  : 重心の鉛直変位  
 $K_V$  : 奥行を集約した鉛直バネ定数,  $\theta$  : 上部構造の回転角  
 $K_R$  : 全体を集約した回転バネ定数,  $l$  : 重心の高さ  
 $u$  : 重心の相対変位,  $d$  : バネの間隔  
 $m$  : 上部構造質量,  $\ddot{y}$  : 地動  
 $I_G$  : 上部構造の慣性モーメント,  $\delta_i$  : 各バネの鉛直変位

$$\begin{cases} \text{骨格曲線} & F = K_0 X \\ \text{履歴曲線} & F = F_1 + F_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \alpha K_2 X \\ F_2 &= (k_1 - k_2) X \{1 - \text{sign}(\dot{X}) F_2 / F_u\} \\ K_1 &= (1 - u + u/s) K_0 \\ K_0 &= F_m / X_m, \quad K_2 = (1 - u) K_0, \quad u = F_u / F_m \\ q &= \pi h_{eq} / 2, \quad \text{stanh}(1/s) = (u - q) / u \end{aligned}$$

ここに

$F$  : 復元力,  $X$  : 相対変位  
 $X_m$  : 各ループの最大変位,  $F_m$  : 各ループの最大荷重  
 $F_u$  : 各ループの荷重切片 ( $\sum a_i \gamma^i$  で近似)  
 $K_0$  : 各ループの等価剛性 ( $\sum b_i \gamma^i$  " )  
 $h_{eq}$  : 各ループの等価減衰 ( $\sum c_i \gamma^i$  " )  
 $\alpha$  : ハードニングの形状関数

$$F = F_1 + F_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= K_1 Z + \{1 + \text{sign}(Z - Z_a) / 2 \cdot (K_2 - K_1) (Z - Z_a)\} \\ F_2 &= (K_2 - K_1) Z \cdot \{1 - \text{sign}(\dot{Z}) \cdot \{F_2 - (1 - \text{sign}(\dot{Z})) / 2 \cdot \\ &\quad \cdot [F_b - F_a] / (F_b - F_a)\} \cdot [1 - \{1 + \text{sign}(\dot{Z})\} \\ &\quad \cdot \{1 - \text{sign}(Z - Z_a)\} / 4]\} \\ Z_a &= F_a / K_1 \end{aligned}$$

ここに

$F$  : 復元力  
 $z$  : 上下変位 (浮き上り),  $F_b$  : ループが閉じるときの荷重  
 $K_1$  : 第1剛性 ( $\sum a_i \gamma^i$  で近似)  
 $F_a$  : 降伏荷重 ( $\sum c_i \gamma^i$  " )  
 $K_2$  : 第2剛性 ( $\sum b_i \gamma^i$  " )

$$\begin{aligned} F &= \alpha K Z \\ \alpha &= 1 / \pi (2\delta + \beta \sqrt{4 - \beta^2}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに

$K$  : 圧縮剛性,  $Z$  : 上下変位 (沈み込み),  $r$  : 積層ゴムの直径  
 $\alpha$  : 圧縮剛性の低減率,  $\beta = \delta_n / r$ ,  $\delta = \sqrt{1 / \beta^2 - 1}$

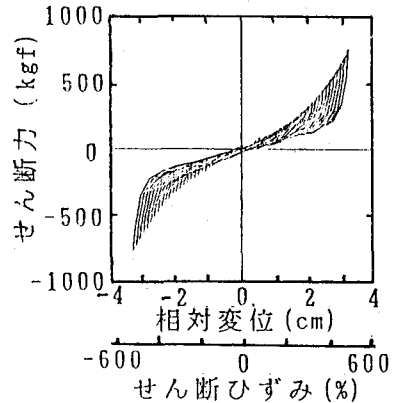


図-4 せん断破断試験結果

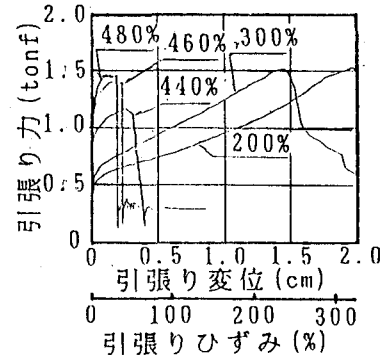


図-5 引張り破断試験結果

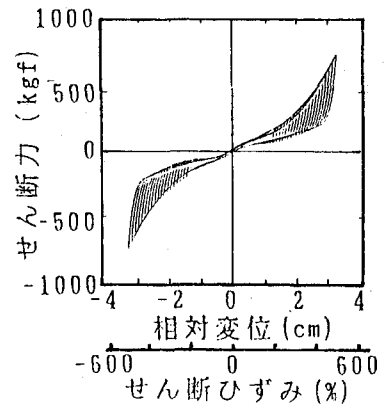


図-6 積層ゴムの復元力特性(水平)

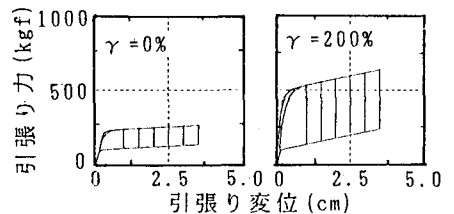


図-7 積層ゴムの復元力特性(鉛直)

解析は上述した式-2〜式-3を式-1に適用して行なった。用いた積分方法はRunge-Kutta法である。また鋼棒ダンパーの復元力もRATEモデルで近似している。

### 5 解析結果

解析は、入力地震波として振動台上の計測波（日本海中部地震秋田NS波の時間軸を1/4に縮尺した波）を用いた。またRATEモデルと比較のため図-8に示すバイリニア型復元力特性を適用した解析も実施した。

#### 5.1 応答波形

解析の応答波形を図-9に示す。入力最大加速度は830galで、免震層の最大相対変位が2.69cm（積層ゴムのせん断ひずみ440%）の実験結果と比較している。解析では、水平方向の相対変位は2.72cm（実験2.69cm）応答加速度は821gal（実験910gal）で、最大値の発生時刻も実験結果によく一致している。応答加速度波形は積層ゴムがハードニング領域に至った場合、復元力の急増により発生する針状の形状もほぼ表現できている。上下方向の浮き上がり変位と最大値の発生時刻はほぼ実験結果と一致しているが沈み込み量は解析結果が小さく、大変形領域での積層ゴム圧縮剛性の低減率（式-4）および引張剛性増加について、今後検討する必要があると考えられる。また衝撃的に発生する応答加速度は定性的にその傾向を表現できた。

#### 5.2 最大応答値

入力加速度と応答最大加速度および相対変位の関係を図-10、図-11に示す。図中の実線、破線は解析結果を示しており、復元力をバイリニア型のモデルと、RATEモデルで近似した結果を併記している。応答最大加速度は、RATEモデルの解析結果は実験結果とほぼ一致しているが、バイリニア型モデルは入力加速度が600

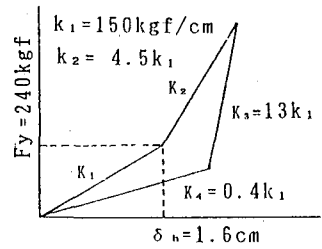


図-8 復元力のモデル化

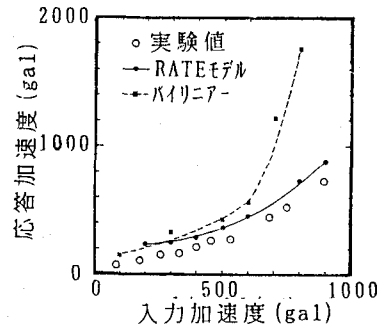


図-10 入力加速度と応答加速度

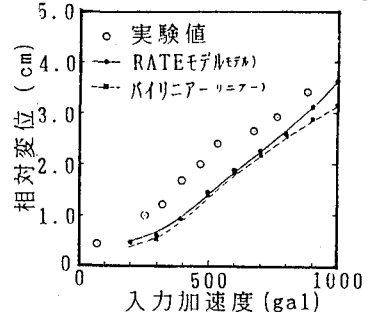


図-11 入力加速度と相対変位

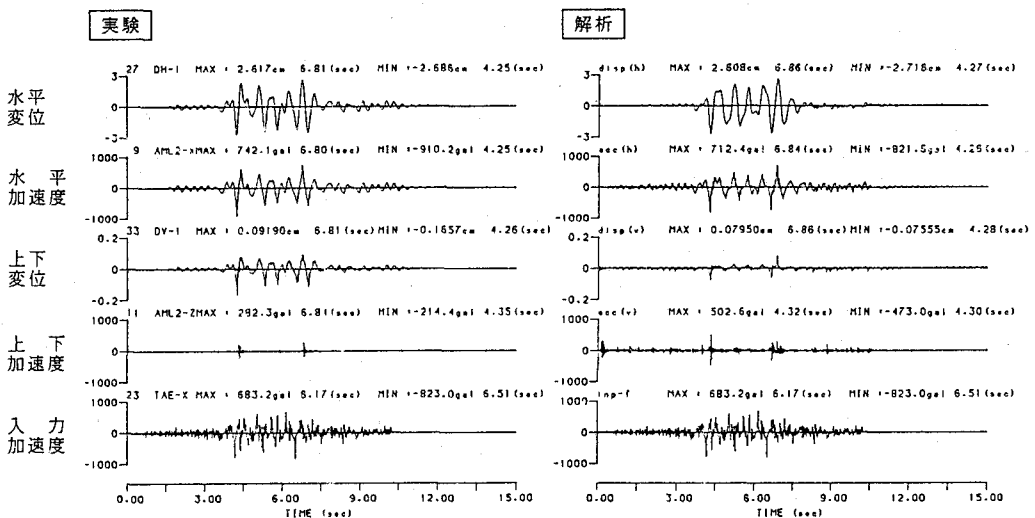


図-9 応答波形の比較

gal から急増している。相対変位については両モデルの解析結果はほぼ一致しており、実験結果よりやや小さくなっている。折れ線型のモデルでは大変形領域で折れ点を増やすことにより、精度が向上するものと考えられる。

相対変位と供試体端部の浮き上がり・沈み込みの関係を図-12に示す。せん断ひずみが400%から浮き上がりが急増していることが分かる。せん断ひずみが400%までは、浮き上がり・沈み込み共にほぼ同程度であるが、それを越えると浮き上がりが大きくなる傾向を示している。すなわち、積層ゴムのハードニングによる水平方向の復元力の急増と端部積層ゴムが引張り域に入り、軸剛性が低下することによるロッキング振動が発生し、鉛直方向の応答が大きくなると考えられる。

### 5.3 積層ゴムのハードニング域の振動モード

試験体端部の水平および上下方向の相対変位の軌跡を図-13(実験結果)、図-14(解析結果)に示す。図の正值(+)は供試体の浮き上がり、負値(-)は沈み込みを示す。供試体の浮き上がりは、相対変位が中立を過ぎると一旦沈み込み、その後浮き上がりに転ずる。また、相対変位が2.0 cm(ひずみ250%)までは沈み込みのみで、それを過ぎると浮き上がりに転じている。相対変位が最大に達した時の浮き上がりは約0.35cmで、ゴム総厚の50%に相当している。また、図-13の●印は破断試験による積層ゴムの破断点を示し、矢印は試験時の加力の方向を示している。また軌跡図は積層ゴムに破壊が生じていない実験例である。供試体端部の積層ゴムに動的に発生する最大ひずみは、積層ゴムの静的な破断限界に達し、地震時の積層ゴムの破断は静的な破断限界を下回ることはないと考えられる。

## 6 結論

免震構造物の地震時の終局挙動を検討するため、要素試験、振動台試験および応答解析を行なった。応答解析は要素試験より得られた復元力特性をRATEモデルで近似した。その結果は振動台試験結果をほぼ模擬でき、RATEモデルの有用性が検証された。したがって、積層ゴムの大変形時における免震構造物の動的な挙動を解析することが可能で、積層ゴムが破壊に至るまでの裕度に関する予測の見通しが得られた。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、ご指導を頂いた東京大学久保慶三郎名誉教授および東京大学生産技術研究所藤田隆史教授に厚く謝意を表します。

### <参考文献>

- 1) 塩尻弘雄他; 「FBR免震システム確認試験 その1~その9」日本建築学会大会梗概集1990
- 2) 藤田隆史他; 「建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究(第一報、履歴復元力の基本特性と解析モデル)」日本機械学会論文集C編56巻 523号(1990-3)3
- 3) 栗本雅裕他; 「積層ゴムで支持された免震構造物の終局時挙動に関する振動台実験(その1~3)」日本建築学会大会梗概集、1989
- 4) 川井伸泰他; 「積層ゴムで支持された免震構造物の終局時挙動に関する振動台実験(その4シミュレーション解析)」日本建築学会大会梗概集、1989

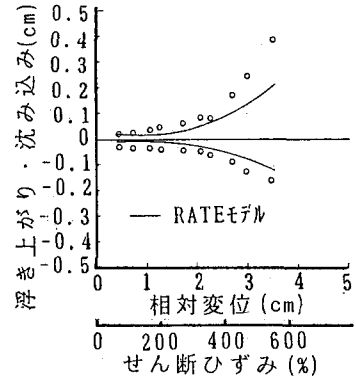


図-12 浮き上がり・沈み込み

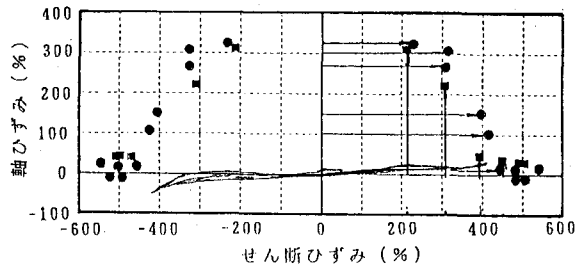


図-13 供試体の振動モード(実験)

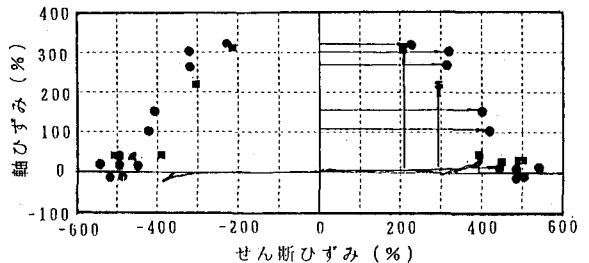


図-14 供試体の振動モード(解析)