

# 免震層簡易風応答評価法への高減衰積層ゴムの適用

## その2 高減衰積層ゴムの復元力モデル

免震構造 高減衰積層ゴム 風応答  
簡易評価法

### 1. はじめに

その1では、免震建築物の風応答評価<sup>1)</sup>に利用される簡易風応答評価法<sup>2)</sup>（以下、簡易評価法）に高減衰積層ゴムの適用をめざすための処理概要と変位計算法を示した。その2では、簡易評価法に導入する高減衰積層ゴムの復元力モデルを提案し、これを反映した計算プログラムによるゴム種ごとの計算結果を検証する。ここで検証は風荷重の組合せは考慮せず、風方向を対象とする。

### 2. 簡易評価法で用いる高減衰積層ゴムの復元力モデル

#### 2.1. 変動荷重時の復元力モデルと降伏判定応力

風最大荷重の変動成分（変動荷重）での免震層変位を計算するときの高減衰積層ゴムの復元力モデルは地震応答解析時の復元力特性とし、せん断歪み  $\gamma \geq 0.1$  での応力は  $\tau = G_{eq}(\gamma) \times \gamma$  で求める。ここに、 $G_{eq}(\gamma)$  は  $\gamma$  に依存する等価せん断弾性係数<sup>3)</sup>である。 $\gamma < 0.1$  では  $\tau = G_{eq}(\gamma=0.1) \times \gamma$  で求める。修正バイリニアの剛性を採用しないのは歪みの小さな領域で応力の誤差が無視できないからである。等価せん断ばね定数は  $K_{eq} = G_{eq}(\gamma) \times A_r / H_r$  であり、 $A_r$  = ゴム断面積、 $H_r$  = ゴム層総厚である。表1に各ゴム種の  $G_{eq}(\gamma)$  を示す。また、変動荷重時における降伏判定応力  $\tau_y$  は歪み  $\gamma=1.0$  の修正バイリニアでの折れ点応力値とする<sup>1)</sup>。図1に応力-歪み関係と  $\gamma=1.0$  の修正バイリニアを合わせて示す。

表1 変動荷重時の等価せん断弾性係数<sup>3)</sup>

ゴム種	$G_{eq}(\gamma)$ (N/mm <sup>2</sup> )
X0.6R	$0.62 \times (2.855 - 3.878 \gamma + 2.903 \gamma^2 - 1.016 \gamma^3 + 0.1364 \gamma^4)$
X0.4S	$1.145 - 1.583 \gamma + 1.192 \gamma^2 - 0.416 \gamma^3 + 0.054 \gamma^4$
X0.4T	$1.1295 - 1.9087 \gamma + 1.9592 \gamma^2 - 1.0192 \gamma^3 + 0.2556 \gamma^4 - 0.0244 \gamma^5$
X0.3R	$0.8703 - 1.1028 \gamma + 0.7283 \gamma^2 - 0.2213 \gamma^3 + 0.0255 \gamma^4$

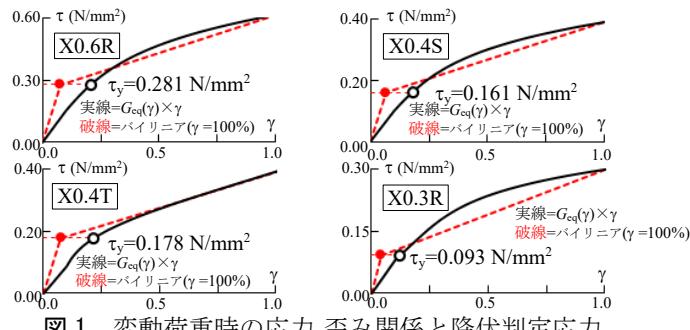


図1 変動荷重時の応力-歪み関係と降伏判定応力

正会員 ○竹内 貞光\*1 同 山崎 久雄\*2  
同 岩本 裕史\*2 同 貝谷 淳一\*3  
同 河合 謙 \*3

### 2.2. 最大荷重時の復元力モデル

高減衰積層ゴムの風荷重平均成分歪み  $\gamma_m$  と平均成分応力  $\tau_m$  との関係は次式の形とパラメータで評価されている<sup>4)</sup>。

$$\gamma_m = a \times X^2 + b \times X, \quad X = (\tau_m + \tau_d') / \tau_{100}, \quad \tau_d' = \alpha_Q \times \tau' \quad (2a-c)$$

表2に各ゴム種のパラメータを示す。式(2)を  $\tau_m$  で整理した後、 $\tau_{max} = \tau_m + \tau'$  と  $\gamma_{max} = \gamma_m + \gamma'$  を代入し  $(\gamma_m, \tau_m)$  を消去すると、風最大荷重時の  $(\gamma_{max}, \tau_{max})$  について次式を得る。

$$\tau_{max} = \left\{ \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a(\gamma_{max} - \gamma')}}{2a} \right\} \tau_{100} + (1 - \alpha_Q) \tau' \quad (3)$$

提案法では、式(3)をクリープ性が考慮された最大風荷重時の応力-歪み関係とし、変動成分  $(\gamma', \tau')$  と  $\gamma_{max}$  より  $\tau_{max}$  を求める。等価せん断ばね定数は  $K_{eq} = \tau_{max} / \gamma_{max} \times A_r / H_r$  である。

ここで、式(2)は風方向の実験から得られた評価式のため組合せ荷重を考慮した二方向への展開ができない。そこで、 $(\tau_{max,D}^2 + \tau_{L}^2)^{0.5}$  (D=風方向, L=直交方向) を  $\tau_{max}$  のベクトル成分

表2 風荷重平均成分応力  $\tau_m$  と歪み  $\gamma_m$  の関係式の係数<sup>4)</sup>

ゴム種	$a$	$b$	$\tau_{100}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\alpha_Q$
X0.6R	0.7709	0.7146	0.620	0.5
X0.4S,X0.4T	0.5140	0.8860	0.392	
X0.3R	0.3655	0.9379	0.300	

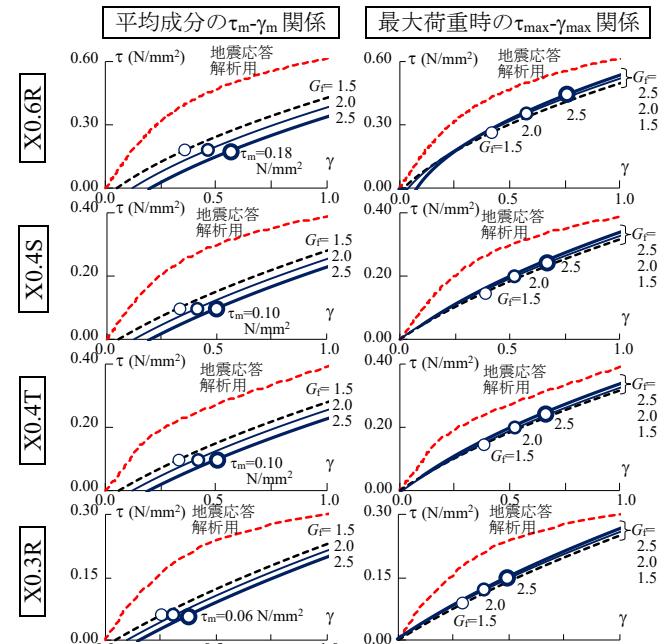


図2 平均成分および最大荷重時の応力-歪み関係の例

$\bar{\gamma}_{\max}$ とする方法①,  $\bar{\gamma}_{\max}$ を見かけの $\gamma_{\max,D}$ として求まる $\tau_{\max,D}$ を $\bar{\tau}_{\max}$ とする方法②の二方法を提案し, その3で考察する。

図2はゴム種ごとに図中の $\tau_m$ を与え, ガスト影響係数を $G_f=1.5, 2.0, 2.5$ に, すなわち $\tau'$ を変化させたときの応力-歪み関係である。風荷重平均成分の $\tau_m-\gamma_m$ 関係(式(2))は $\tau'$ に依存して $\tau' \rightarrow$ 大で $\gamma_m \rightarrow$ 大(クリープ性→大)となる。したがって, 式(2)を基とした風最大荷重時の $\tau_{\max}-\gamma_{\max}$ 関係(式(3))も $(\gamma', \tau')$ に依存して $(\gamma', \tau') \rightarrow$ 大で $(\gamma_{\max}, \tau_{\max}) \rightarrow$ 大となる。また, 同図には地震応答解析(変動荷重時)で用いる応力-歪み関係も参考に示している。

### 2.3. 残留変位計算用の復元力モデル

高減衰積層ゴムの風荷重を想定した加振実験で生じた最大歪み $\gamma_{\max}$ と加振終了1時間後の歪み $\gamma_{lh}$ との関係が, 表3に示す式でゴム種ごとに評価されている<sup>4)</sup>。提案法では $\gamma_{lh}$ に達した時点で応力が0になるものとし,  $\gamma_{\max}$ から式(4)で求まる $\gamma_{lh}$ を高減衰積層ゴムの残留変位 $\gamma_r$ とする。残留変位計算用の剛性は平均成分での応答点 $(\gamma_m, \tau_m)$ から残留変位点 $(\gamma_r, 0)$ を直線で結んだ勾配とする。このときのばね定数は $K_{eq} = \tau_m / (\gamma_m - \gamma_r) \times A_r / H_r$ となり, 他の要素のばね定数に累加して免震層の残留変位を計算する。

図3にゴム種ごとに,  $(\gamma_{\max}, \tau_{\max})$ ,  $(\gamma_m, \tau_m)$ ,  $(\gamma_r, 0)$ 各点の関係とそのときの剛性 $\tau_m / (\gamma_m - \gamma_r)$ を淡太線で示す。地震応答解析用の応力-歪み関係も参考に示している。

表3 1時間後の残留歪み $\gamma_{lh}$ と最大歪み $\gamma_{\max}$ の関係<sup>4)</sup>

ゴム種	$\gamma_{lh}$ と $\gamma_{\max}$ の関係	(4a-c)
X0.6R	$\gamma_{lh} = 0.0939 \gamma_{\max} + 0.1452 \gamma_{\max}^2$	
X0.4S, X0.4T	$\gamma_{lh} = 0.1976 \gamma_{\max}$	
X0.3R	$\gamma_{lh} = 0.077 \gamma_{\max} + 0.0341 \gamma_{\max}^2$	

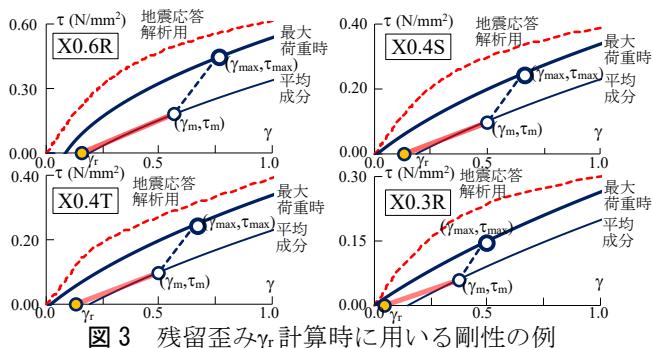


図3 残留歪み $\gamma_r$ 計算時に用いる剛性の例

### 3. 適用結果の検証

2章に示した方法で計算した結果の検証を行う。検証例には各ゴム種(X0.6R, X0.4S, X0.4T, X0.3R)に対して, 風荷重平均成分応力 $\tau_m$ (0.18, 0.10, 0.10, 0.06 N/mm<sup>2</sup>)を設定し, ガスト影響係数をそれぞれ $G_f=2.0, 2.5$ とした計算を行った。

\*1 ブリヂストン

\*2 ユニオンシステム

\*3 能勢建築構造研究所

表4, 表5に $G_f$ ごとの変動成分, 平均成分, 最大荷重時の各歪みと残留歪みを示す。各数値は, 2章に示した評価式やパラメータから求まる値に一致しており, 高減衰積層ゴムに対する計算が正しく行われていると判断できる。

また, 共通の $\tau_m$ に対して $\gamma_m$ が,  $G_f$ (すなわち $\tau'$ )に依存して評価式どおりに変化していることも確認できた。

表4  $G_f=2.0$ とした計算結果

	X0.6R	X0.4S	X0.4T	X0.3R
$\tau_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.18	0.10	0.10	0.06
$\gamma'$	0.1194	0.1002	0.1054	0.0782
$\gamma_m$	0.4574	0.4143	0.4143	0.3143
$\gamma_{\max}$	0.5768	0.5145	0.5197	0.3925
$\gamma_r$	0.1025	0.1017	0.1027	0.0355

全ゴム種で変動荷重時の応力は降伏応力未満を確認

表5  $G_f=2.5$ とした計算結果

	X0.6R	X0.4S	X0.4T	X0.3R
$\tau_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.18	0.10	0.10	0.06
$\gamma'$	0.1987	0.1638	0.1769	0.1204
$\gamma_m$	0.5621	0.4980	0.4980	0.3731
$\gamma_{\max}$	0.7608	0.6617	0.6749	0.4934
$\gamma_r$	0.1555	0.1308	0.1334	0.0463

全ゴム種で変動荷重時の応力は降伏応力未満を確認

### 4. まとめ

その2では, 簡易評価法に導入する高減衰積層ゴムの風荷重変動成分時, 風最大荷重時, 残留変位計算時のそれぞれの復元力モデルを提案し, これを反映した計算プログラムによる計算結果を検証した。その結果, 反復処理による変位(歪み)は評価式による結果に一致することを確認した。

その3では, 実際の免震建築物の想定モデルに提案法を適用した結果を示し, 考察する。

### 参考文献

- 1) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐風設計指針, 2023.3
- 2) 安井八紀, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 大熊武司, 島岡俊輔: 風荷重の組合せを考慮した免震建築物の簡易風応答評価方法, 日本建築学会技術報告集 第71号, 2023.2
- 3) ブリヂストン: 建築免震用積層ゴム製品仕様一覧, 2024 Vol.1
- 4) 石田安澄, 森隆浩, 竹内貞光, 鈴木重信, 中村昌弘: 高減衰ゴム系積層ゴムの風荷重によるクリープ変形および残留変形の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.8

\*1 Bridgestone Corporation

\*2 UNION SYSTEM Inc.

\*3 Nose Structural Engineering