

# 風に対する建物応答低減のための高硬度ゴムダンパーによる極小振幅時付加減衰

## Damping effect of high-hardness rubbers in small vibration amplitude for response reduction of buildings for wind loading

辻 聖晃, 谷 翼, 鈴木ちひろ, 吉富信太, 竹脇 出 (京大・工) 松本達治 (SRI ハイブリッド)

Masaaki TSUJI, Tsubasa TANI, Chihiro SUZUKI, Shinta YOSHITOMI, Izuru TAKEWAKI, Kyoto University

Tatsuji MATSUMOTO, SRI Hybrid

FAX: 075-383-3297 E-mail: mtsuji@archi.kyoto-u.ac.jp

The objectives of this study are to construct a constitutive model of a high-hardness rubber, and to propose an evaluation method of added damping by visco-elastic dampers using high-hardness rubber in small vibration amplitude. The constitutive model of the high-hardness rubber is constructed based on stationary and random vibration test in small strain amplitude. The validity of the proposed constitutive model and the method for response evaluation is verified by free-vibration and wind-loading tests on small-scaled models.

### 1. 序

粘弾性体を用いたダンパー（粘弾性ダンパー）は、建築物の地震応答および風応答の両者を低減させることができる制振装置として、多くの実物件に適用されてきた。

粘弾性体は、材料の構成により様々な復元力特性を呈する。本研究で対象としている高硬度ゴムは、コンクリートに近い弾性剛性を有し、せん断ひずみが5%程度以上の大変形時には鋼材に近い平行四辺形状の復元力ループを描くという特徴を有している。

本研究の目的は、常時風や環境振動などの微小な外乱に対する建築物の極微小変形時に、高硬度ゴムを用いたダンパーがどのような減衰性能を発揮できるのかを明らかにするため、高硬度ゴムダンパー供試体の極微小振幅載荷実験に基づいて復元力モデルを構築し、微小な外乱に対する高硬度ゴムダンパーの減衰性能を明らかにすることにある。

### 2. 高硬度ゴムの微小振幅動的載荷実験

Fig. 1 に示した、2枚の鋼板の間に直径25mm、厚さ5mmの高硬度ゴムを接着した高硬度ゴムダンパー供試体に、高硬度ゴム部分がせん断変形するような定常繰返し載荷実験を実施した。各実験における載荷の時刻歴は、振幅、周波数が実験中に変化しない正弦波により与えた。振幅の範囲は0.025mm（せん断ひずみ換算で0.5%）～5.0mm（同100%）、周波数の範囲は0.01Hz～2.0Hzとした。なお、高硬度ゴムダンパーは予載荷がある場合とない場合で復元力特性に差があるため、実験ごとに供試体を取り換えた。

Fig. 2 に、0.01Hz、0.5Hz、2.0Hz 載荷時のせん断応力度-せん断ひずみ履歴ループを示す。なおこの図は、各実験における履歴ループのうちの第3回目のループを示している。図より、せん断ひずみが0.5%程度の極微小ひずみ領域でも高硬度ゴムが傾斜した楕円状の履歴ループを描いていること、せん断ひずみが5%程度以上になると、平行四辺形状の履歴ループを描く傾向が強くなること、および、載荷周波数が大きくなれば履歴ループの取り囲む面積も大きくなるのが観察される。このことから、高硬度ゴムにお

ける極微小ひずみ領域から大ひずみ領域にわたる広い範囲での減衰特性を的確に表現するには、粘弾性要素と履歴要素を適切に組み合わせた復元力モデルを構築することが必要であるといえる。

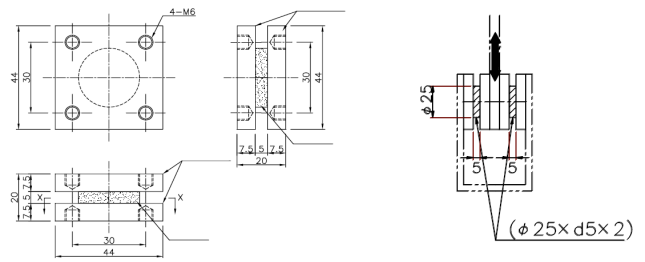


Fig. 1 Test specimen of high-hardness rubber damper

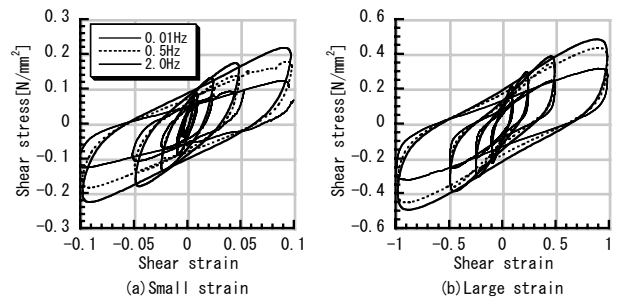


Fig. 2 Shear stress-shear strain hysteresis in the 3rd cycle

### 3. 実験結果に基づく復元力モデルの構築

前述の実験結果に基づき、高硬度ゴムを以下のような3要素の並列モデルとしてモデル化した。なお、以下では $\tau$  [N/mm<sup>2</sup>]はせん断応力度、 $\gamma$ は現時刻のせん断ひずみ、 $\gamma_{\max}$ は載荷開始後から現時刻までに経験したせん断ひずみの絶対値の最大値を表す。

(a)弾塑性要素： $\gamma_{\max}$ 以上にひずみの絶対値が増加する場

合には(1)式の骨格曲線上を移動し、除荷後は $\gamma_{\max}$ により決められるノルマルバイリニア復元力特性を描く。Fig. 3に概要を示す。骨格曲線、除荷勾配 $k_u$ 、再降伏曲線は0.01Hz 載荷時の結果に適合するように下記のように設定した。

$$\text{骨格曲線: } \tau = 0.32 \operatorname{sgn}(\gamma) |\gamma|^{0.38} \quad (1)$$

$$\text{除荷勾配: } k_u = \frac{0.32 - 0.11\varepsilon^{0.38}}{(1-\varepsilon)|\gamma_u|^{0.62}}, \quad \varepsilon = \frac{0.94|\gamma_u|^{0.73}}{|\gamma_u|^{0.73} + 0.01} \quad (2)$$

$$\text{再降伏曲線: } \tau = 0.12 \operatorname{sgn}(\gamma) |\gamma|^{0.38} \quad (3)$$

ここで $\gamma_u$ は除荷時のひずみである。

(b)動的弾性要素：剛性は $\gamma_{\max}$ により決まる。 $\tau - \gamma$ 関係は以下のように書ける。

$$\tau = \begin{cases} 0.10\gamma_{\max}^{-0.66}\gamma & (\gamma_{\max} \geq 0.005) \\ 3.30\gamma & (\gamma_{\max} < 0.005) \end{cases} \quad (4)$$

(c)粘性要素：現時刻のひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の実数乗に比例する復元力を示す。 $\tau - \dot{\gamma}$ 関係は以下のように書ける。

$$\tau = 5.2 \times 10^2 \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) |\dot{\gamma}|^{0.25} \quad (5)$$

高硬度ゴムのせん断応力度は、上記各要素のせん断応力度の合計で表わされる。

Fig. 4に、定常振幅載荷に対して上記のモデルにより得られる復元力ループのシミュレーションを示す。Fig. 2との比較より、載荷周波数が0.5Hzから2.0Hzの範囲で、極微小ひずみから大ひずみの広い領域にわたって、良好に実験結果をシミュレートできているといえる。

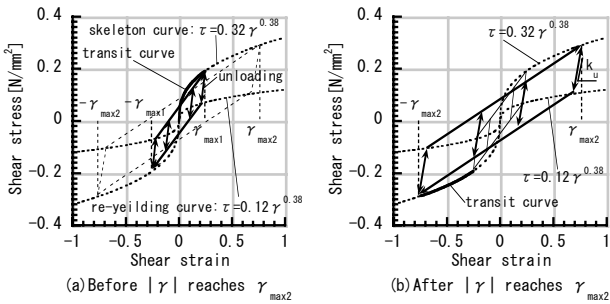


Fig. 3 Constitutive rule of elasto-plastic element

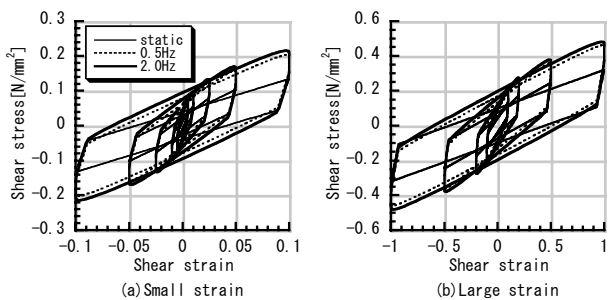


Fig. 4 Simulation of shear stress-shear strain hysteresis

#### 4. 等価線形化による微小振幅時減衰特性の把握

定常振幅載荷に対する復元力ループが取り囲む面積を $W$ 、原点と最大変形点を結ぶ直線を斜辺とする直角三角形の面積を $\Delta W$ とすると、等価減衰定数 $h_{eq}$ は次式で表わされる。

$$h_{eq} = (1/4\pi)(W/\Delta W) \quad (6)$$

Fig. 5(a)に、3節で示した復元力モデルから計算される $h_{eq}$ を示す。高硬度ゴム単体としては、載荷振幅および載荷周波数にほぼ依存せず、極微小ひずみ領域から25%前後の等価減衰定数が得られていることがわかる。このことから、

高硬度ゴムの減衰特性は、等価減衰定数が載荷振幅に顕著に依存する低降伏点鋼や、載荷周波数に顕著に依存する一般的な粘弾性材料のいずれとも大きく異なることがわかる。

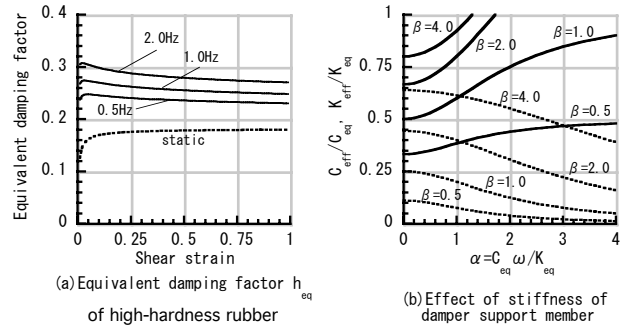


Fig. 5 Damping characteristics of high-hardness rubber

ダンパーに使用する高硬度ゴムの厚みを $d$ [mm]、断面積を $S$ [mm<sup>2</sup>]、単位面積あたりのひずみに対する等価剛性を $k_{eq}$ [N/mm<sup>2</sup>]とし、円振動数 $\omega$ で定常振幅載荷されるとすると、高硬度ゴム単体での等価減衰係数 $C_{eq}$ [Ns/mm]および等価剛性 $K_{eq}$ [N/mm]はそれぞれ次式で表わされる。

$$C_{eq} = \frac{S}{d} \frac{2}{\omega} k_{eq} h_{eq}, \quad K_{eq} = \frac{S}{d} k_{eq} \quad (7a,b)$$

高硬度ゴムを用いたダンパーが建物に組み込まれた場合、特に微小変形領域では、ダンパー周辺部材の弾性変形による減衰特性への影響が顕著になる。そこで、ダンパーを高硬度ゴムとダンパー周辺部材の直列モデルとすると、周辺部材も含めたダンパーとしての等価減衰係数 $C_{eff}$ および等価剛性 $K_{eff}$ は以下のように書ける。

$$C_{eff} = \frac{\beta^2}{\alpha^2 + (1+\beta)^2} C_{eq}, \quad K_{eff} = \frac{\beta(1+\alpha^2 + \beta)}{\alpha^2 + (1+\beta)^2} K_{eq} \quad (8a,b)$$

$$\text{ただし } \alpha = C_{eq}\omega/K_{eq}, \quad \beta = K_b/K_{eq} \quad (9a,b)$$

ここで $K_b$ は周辺部材の剛性である。上式において、 $C_{eq}$ および $K_{eq}$ は、ダンパーに生じる変形ではなく、ダンパー内のゴムに生じる変形で評価しなければならない。

Fig. 5(b)に、 $\alpha$ を横軸とし、 $\beta$ をパラメタとしたときの、 $C_{eff}/C_{eq}$  (破線)と $K_{eff}/K_{eq}$  (実線)の変化を示す。 $\beta$ が小さくなる、つまり周辺部材剛性が十分でない場合には、 $C_{eff}/C_{eq}$ 、 $K_{eff}/K_{eq}$ ともに1より小さくなる、つまり、ダンパーとしての効率が低下することが観察される。

#### 5. まとめ

(1)高硬度ゴムを用いた粘弾性ダンパーについて、せん断ひずみが0.5%程度の極微小変形領域も含む動的載荷実験を実施し、高硬度ゴムの極微小ひずみ時の復元力特性を明らかにした。

(2)上記の実験に基づき、高硬度ゴムの極微小ひずみ〜大ひずみ領域での特性を統一的に表現できる復元力モデルを構築した。

(3)上記復元力モデルに対して、等価線形化手法を適用し、ダンパー周辺部材剛性を考慮したときの等価減衰係数および等価剛性を示した。

#### 謝辞

本研究の一部は、京都大学と(株)SRIハイブリッドとの共同研究による。実験に際し、田中克往氏ならびに田中和宏氏(SRIハイブリッド)より多大な尽力をいただいた。ここに記して謝意を表す。