

# 高硬度ゴム粘弾性ダンパーによる 建物の風応答低減効果に関する実験的研究

## 2.構造-3.応用力学

高硬度ゴム                  粘弾性ダンパー                  風応答  
 等価減衰係数              三要素モデル                      極微小変形

正会員    ○鈴木    ちひろ\*                  同    辻                  聖晃\*  
 同        谷        翼\*                      同    吉富                信太\*  
 同        竹脇     出\*                      同    松本                達治\*\*

### 1. 序

建築物の地震応答や風応答を低減するための制振（制震）装置は、様々な材料や構法を用いたものが提案・実用化されている。なかでも、粘弾性体を用いたダンパーは、微小振幅振動から大振幅振動まで広範囲にわたって振動を低減させることができる有効な制振装置として、多くの適用例がある。

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振動時に、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するのかを、ダンパー単体に対する動的載荷実験結果を用いたシミュレーションと、ダンパーを組み込んだ小型建物模型に対する振動実験により明らかにすることである。

粘弾性体は、材料の組成により様々な復元力特性を示す。本研究で対象とする高硬度ゴムは、一般的に使用される粘弾性材料に比べて温度依存性が低く、極微小変形時にはコンクリートに近い剛性を有し、せん断ひずみが5%程度以上になると鋼材に近い平行四辺形状の復元カールを描くという特徴を有している[1]。

本研究ではまず、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、高硬度ゴムダンパーの復元力モデルを構築する。次に、このようにモデル化した高硬度ゴムダンパーを組み込んだ建物モデルの等価減衰定数をシミュレートし、減衰性能を評価する。さらに、高硬度ゴムダンパーを組み込んだ建物模型に送風機により定常風荷重を作用させる振動実験を実施し、上記の復元力特性モデルを用いたシミュレーションから予想される建物モデルの減衰特性と、実験で観測される建物モデルの減衰特性がどの程度一致するのかを評価し、高硬度ゴムの力学モデルの妥当性を検証する。

### 2. 高硬度ゴムダンパーの極微小変形実験

供試体の形状と寸法を図1に示す。2枚の鋼板に挟まれた高硬度ゴムは、直径が25mm、厚さが5mmの円筒状である。この供試体を一軸せん断試験機に設置し、正負の水平変形を4サイクル繰り返し載荷した。載荷周波数は0.01Hz～2.0Hz、載荷振幅は0.025mm（せん断ひずみで0.5%）～5mm（同100%）とした。各実験の載荷の時刻歴は、振幅、周波数が実験中に変化しない正弦波によって与えた。試験は周波数ごとに2回実施した。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替えた。なお、実験時の気温は23℃であった。

載荷周波数が0.01Hz, 0.5Hz, 2.0Hzの場合について、極微

小ひずみ領域と大ひずみ領域での復元カール（3サイクル目のもの）を図2に示す。極微小ひずみ領域では履歴ループはほぼ楕円形をしており、粘性が卓越した復元力特性を示すのに対して、せん断ひずみが2.5%以上になると、復元カールが平行四辺形状となり、粘性と弾塑性の混在した復元力特性を示していることが観察される。

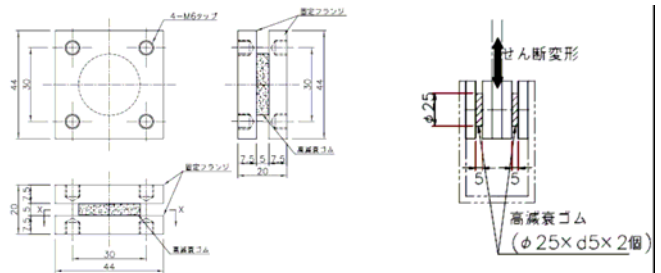


図1 供試体の形状と寸法

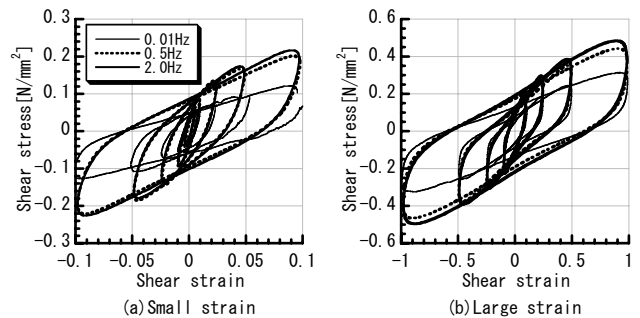


図2 極微小ひずみ領域と大ひずみ領域の復元カール

### 3. 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手順によりモデル化した[2]。(1)0.01Hz 載荷時の復元カールを静的載荷時の復元カールとみなし、これに適合するような弾塑性要素モデルを構築する。(2)0.01Hz 載荷時と0.5～2.0Hz 載荷時の最大変形点における割線剛性の差を動的載荷による剛性の付加とみなし、これに適合するような弾性要素モデルを構築する。(3)0.01Hz 載荷時と0.5～2.0Hz 載荷時の復元カールが取り囲む面積の差が粘性力によるものとみなし、これに適合するような粘性要素を構築する。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わす。

(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。図3に履歴ループ

ルの概要を示す。

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

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

$$\text{再降伏曲線} : \tau = 0.11 \operatorname{sgn}(\gamma) |\gamma|^{0.38} \quad (3)$$

ここで  $\gamma_u$  は除荷時のひずみである。

(b)動的弾性要素：剛性は載荷周波数にはよらず、 $\gamma_{\max}$  により決まるものとする。 $\tau - \gamma$  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。

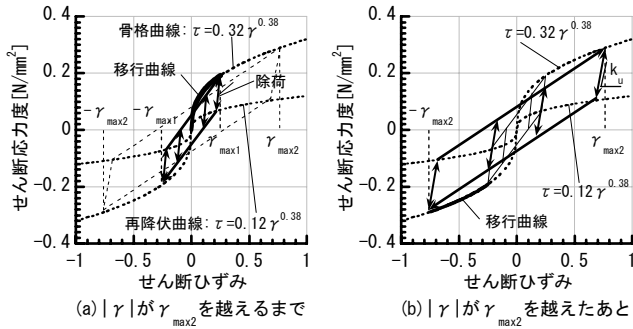


図3 弾塑性要素の履歴ルール

## 4. 高硬度ゴムダンパーの減衰特性

### 4.1 等価剛性と等価減衰係数

前述の3要素は、いずれもひずみあるいはひずみ速度に関して非線形の復元力特性を示す。そこで、円振動数  $\omega$  で定常履歴ループを描くとしたときの弾塑性要素の等価剛性  $k_{eq1}$  および等価減衰係数  $c_{eq1}$ 、動的弾性要素の等価剛性  $k_{eq2}$ 、粘性要素の等価減衰係数  $c_{eq3}$  を幾何学的方法により求めると、それぞれ以下ようになる。

$$k_{eq1} = \frac{0.32 + 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \bar{\gamma}_{\max}^{-0.62} + \frac{0.32\varepsilon - 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \frac{\bar{\gamma}_{\max}^{0.38}}{\gamma_{\max}}, \quad (6a,b)$$

$$c_{eq1} = \frac{0.64 - 0.22\varepsilon^{0.38}}{\pi\omega} \frac{\bar{\gamma}_{\max}^{0.38}}{\gamma_{\max}} \quad (7)$$

$$k_{eq2} = 0.10 \gamma_{\max}^{-0.66} \quad (7)$$

$$c_{eq3} = \frac{0.306}{2\pi^2} \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^{-0.75} \gamma_{\max}^{-0.75} \quad (8)$$

ここで、 $\bar{\gamma}_{\max}$  は過去に経験した最大ひずみ、 $\gamma_{\max}$  は現在のループの最大ひずみである。

### 4.2 高硬度ゴムダンパー単体の等価減衰定数

高硬度ゴムダンパー単体での等価減衰定数  $h_{eq}$  は、1サイクル間に消費されたエネルギー、すなわち復元カーループによって囲まれた面積を  $W_p$ 、原点と最大ひずみを結ぶ直線を斜辺

とする直角三角形の面積を  $W_E$  とすると、次式で表される。

$$h_{eq} = W_p / (4\pi W_E) \quad (9)$$

図4に、4.1で示した等価剛性と等価減衰係数より評価した、高硬度ゴム単体での等価減衰定数を示す。ただし、 $\gamma_{\max} = \bar{\gamma}_{\max}$  とした。高硬度ゴム単体では、載荷周波数や載荷振幅にあまり依存しない等価減衰定数を示すことがわかる。

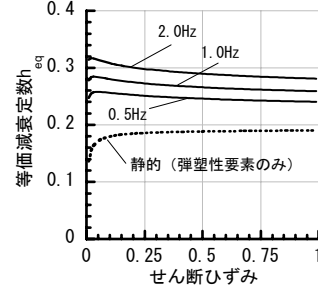


図4 高硬度ゴム単体での等価減衰定数 ( $\gamma_{\max} = \bar{\gamma}_{\max}$ )

### 4.3 建物モデルに組み込んだ場合の等価減衰定数

次節で示す実験に使用する2種類の建物モデルに対して高硬度ゴムダンパーを組み込んだ場合の減衰性能をシミュレートする。建物モデルの諸元は5.1に示す。ダンパーの個数は1個(第1層のみ)、2個(各層に1個ずつ)、4個(各層に2個ずつ)とする。ダンパーのサイズは1個あたり3mm×6mm×6mmとし、ダンパー取り付け用部材は十分剛であるとした。

等価減衰定数は、非比例減衰構造物の減衰定数の近似評価式としてしばしば用いられる、非減衰モード  ${}_s u^*$  と非減衰円振動数  ${}_s \omega^*$  を用いた次式により評価する。

$${}_s h = \frac{1}{{}_s \omega^*} \frac{{}_s u^{*T} \mathbf{C} {}_s u^*}{{}_s u^{*T} \mathbf{M} {}_s u^*} \quad (10)$$

ここで  $s$  は固有振動の次数、 $\mathbf{C}$  は減衰行列、 $\mathbf{M}$  は質量行列を表わす。

図5に、2種類の建物モデルそれぞれの1次減衰定数と高硬度ゴムのせん断ひずみの関係を示す。ただし、 $\gamma_{\max} = \bar{\gamma}_{\max}$  とした。図より、建物モデルとしての等価減衰定数は、図4に示した高硬度ゴム単体での等価減衰定数とは異なり、高硬度ゴムのせん断ひずみに顕著に依存することがわかる。

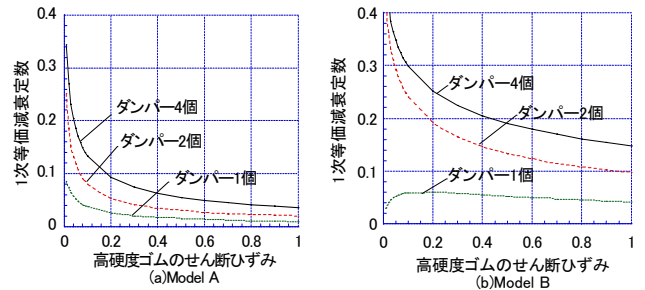


図5 1次等価減衰定数

## 5. 高硬度ゴムを組み込んだ建物モデルの振動実験

### 5.1 実験概要

建物モデルは、水平一方向への並進振動のみが可能な二層モデルとし、各層の質量は第1層、第2層ともに22.0kgとした。ダンパーは模型全体に対して最大4個(各層2個)取り付けることができ、今回の実験では3mm(厚さ)×6mm×6mmの

サイズの高硬度ゴムを用いた。図6にダンパーとその取り付け部材の形状と寸法を、図7に建物模型の形状と寸法を示す。

建物模型の層剛性は、ダンパーのせん断ひずみが3%程度の小振幅振動時に第2層の建物剛性とダンパー2個分の剛性の比が1:1程度となる場合 (Model A と称する) と、ダンパーのせん断ひずみが100%程度の大振幅振動時に第2層の建物剛性とダンパー2個分の剛性比が1:1程度となる場合 (Model B と称する) を設定した。両モデルとも、第1層と第2層の剛性比は3:2とした。ダンパーを取り付けていないときの建物模型の層剛性 (理論値) は、Model A で第1層が100.4N/mm、第2層が66.9N/mm、Model B で第1層が15.8N/mm、第2層が10.5N/mmとなり、固有周期 (同) は Model A で1次が0.16s、2次が0.066s、Model B で1次が0.41s、2次が0.17sとなる。

微動計測用のサーボ型加速度計を第1層および第2層天井床面に設置し、加速度を計測した。サンプリング周波数は100または200Hzとした。

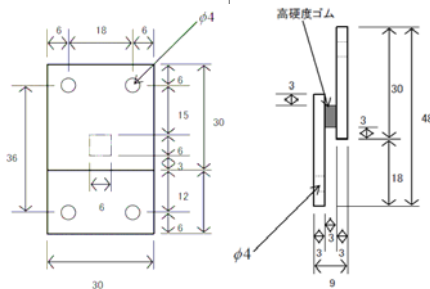


図6 ダンパー模型 (寸法単位は mm)

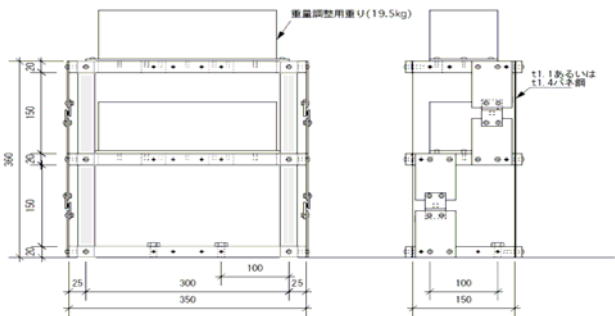


図7 実験用建物模型立面図 (寸法単位は mm)

## 5.2 自由振動実験

建物模型の第2層天井床面を水平方向に牽引して所定の初期変位 (1.0mm、3.0mm、5.0mm) を与え、これを急に解放して自由振動を生じさせた。各実験パラメタについて2回の実験を実施した。なお、実験時の気温は19°Cであった。以下では Model A の結果のみを示すが、Model B でも定性的には同じ結果が得られた。

図8には、初期変位を1mmとしたときの各層床面加速度の時刻歴を示す。図より、ダンパーの付加により自由振動の固有周期が短くなることと、減衰性能が増大していることが観察される。また、ダンパー量の増加に従ってこの傾向は顕著になっている。

図9には、初期変位を1mmとしたときの第2層天井床面の加速度波形 (フィルタ処理はせず) から描いたフーリエスペクトルを示す。なお、縦軸はピークの値が1となるように無

次元化してある。フーリエスペクトルを描くためのデータ範囲は、ダンパーなしの場合は自由振動開始後の6秒間、ダンパーありの場合は同1秒間とした。ダンパー量が多くなるほどフーリエスペクトルのピークが高周波数側に移動し、かつ、裾の広がりが大きくなっており (=減衰定数の増大を意味する)、加速度波形からの考察を裏付ける結果が得られた。

初期変位を5mmとしたときの自由振動波形から対数減衰率により評価した減衰定数と、4節で示した力学モデルを用いて算出した1次等価減衰定数の比較を図10に示す。なお、前者は2回実施した実験のそれぞれで評価した値を示してある。また、後者には、ダンパーなしの実験より推定された構造減衰定数1%を付加してある。図より、実験から得られた減衰定数は、力学モデルを用いて算出される1次等価減衰定数と良好な対応をみせているといえる。ただし、高硬度ゴムのせん断ひずみが微小な領域で、定量的な差が生じている。

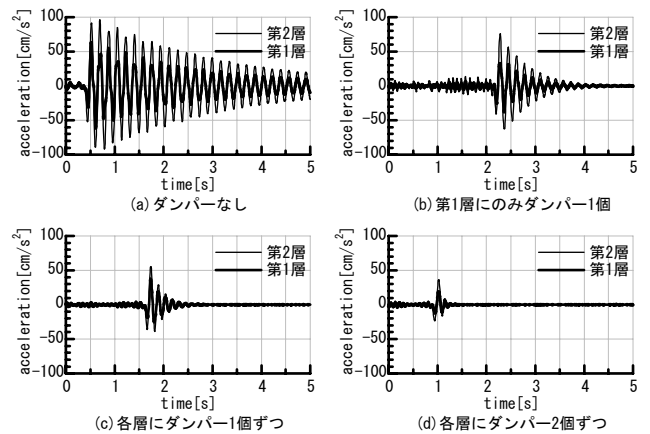


図8 Model A の第1層、第2層の床面加速度

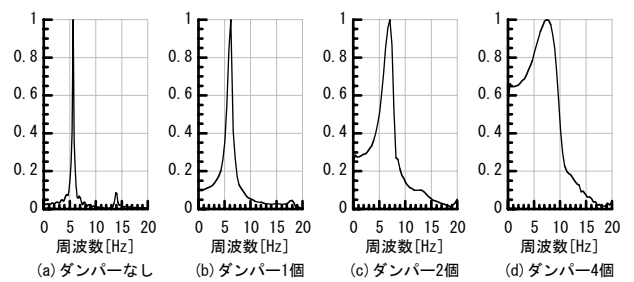


図9 Model A 第2層床面加速度のフーリエスペクトル

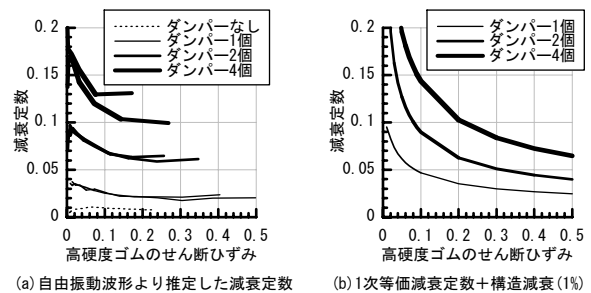


図10 実験から得られる減衰定数と等価減衰定数の比較

## 5.3 風荷重による振動実験

5.1で示した Model B の建物模型に送風機により風をあて、風荷重を与える実験を実施した (図11)。受風面積を増やすため、模型の全面と背面には、全面に0.5mm厚の透明アクリ

ル板を両面テープで貼付した。実験は、強風首振りなし・弱風首振りなし・強風首振りありの3種類で実施した。小型風速計で計測した建物頂部での風速は、強風首振りなしで8~9m/s, 強風首振りありで3.6~4.5m/sであった。なお、実験時の気温は14℃であった。図12に、強風首振りありで、ダンパーなしの場合の第2層天井床面加速度波形を示す。

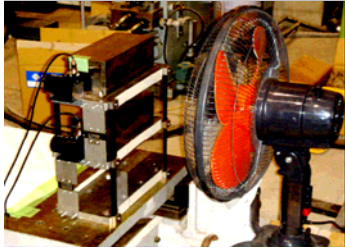


図11 実験時の写真

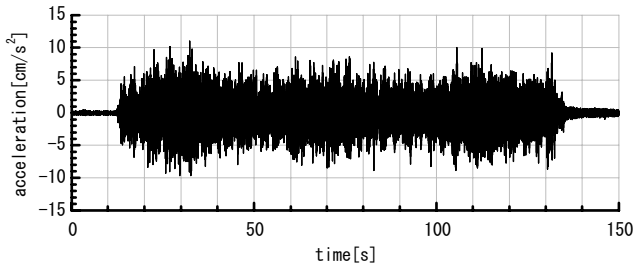


図12 強風時の床面加速度

図13に強風時の第2層天井床面の加速度から、フーリエスペクトルを描いたものを示す。フーリエスペクトルを描くためのデータ範囲は、振動し始めた時刻から、風力を停止するまでとする。図より、ダンパーの付加によってフーリエスペクトルのピークが高周波数側に移動し、かつ、裾の広がりが大きくなっており、力学モデルによるシミュレーションを裏付ける結果が得られていることがわかる。

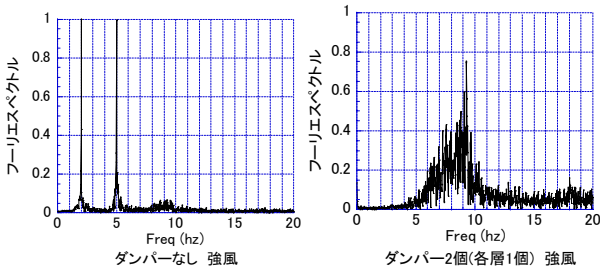


図13 風荷重振動のフーリエスペクトル

風荷重による定常的な振動では、対数減衰率を用いた減衰性能の評価はできないため、床面加速度応答および床面速度応答の最大値と二乗平均値を、ダンパーの数により比較して減衰性能を評価することとする。なお、床面速度応答は、計測された加速度波形を積分し、基線補正を行って推定した。

図14および図15にはそれぞれ、ダンパーの数による加速度の最大値(●と▲)と二乗平均値(○と△)の比較、および、速度の最大値(●と▲)と二乗平均値(○と△)の比較を示す。図より、床面加速度と速度の両者において、最大値・二乗平均値ともに、ダンパーの付加によって減少がみられる。しかしながら、加速度応答の低減は、シミュレーションによる減衰性能の増加から予想されるほどは得られなかった。

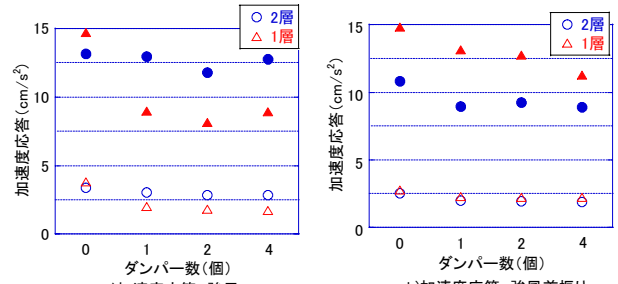


図14 床面加速度応答の最大値および二乗平均値の比較

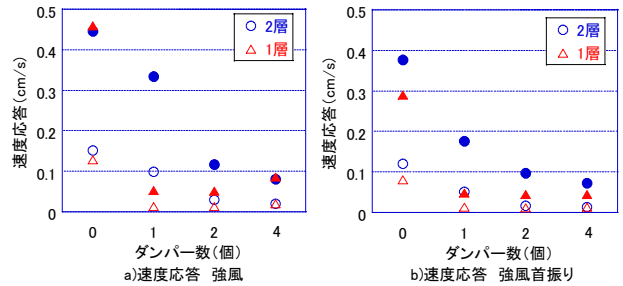


図15 床面速度応答の最大値および二乗平均値の比較

## 6. まとめ

本研究によって、以下の結果が得られた。

- 1) 高硬度ゴム粘弾性ダンパーについて実施した極微小変形領域を含む動的載荷実験により、高硬度ゴムの極微小変形領域の復元力特性を明らかにした。
- 2) 上記の実験から得られた復元力特性に基づいて、極微小ひずみから大ひずみ領域での特性を表現できる三要素を並列結合した復元力モデルを構築した。
- 3) 構築した復元力モデルに対して、等価線形化手法を適用し、高硬度ゴムダンパー単体での等価減衰定数及び等価剛性、等価粘性係数を示した。
- 4) 高硬度ゴムダンパーを組み込んだ建物模型を用いた自由振動実験から、ダンパーの付加によって減衰性能が顕著に向上することを示した。また、実験から得られた減衰定数と、3)から算出した等価減衰定数が良好に一致することを示した。
- 5) 高硬度ゴムを組み込んだ建物模型の風荷重による振動実験によって、風外乱に対する加速度応答および速度応答が低減されることを明らかにした。

## 文献

- [1] 平田俊次ほか:木質接着パネル構法住宅における制振構造に関する研究 その1 研究のねらい,日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.61-62 (2005)
- [2] 辻聖晃ほか: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,第56回理論応用力学講演会講演論文集, 75-76 (2007)

## 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。