

高硬度ゴム粘弹性ダンパーによる建築物の居住性能の改善

Habitability Upgrade of Buildings by Visco-elastic Damper Using High-hardness Rubber

辻 聖晃¹, 谷 翼¹, 竹脇 出¹, 松本達治²

Masaaki TSUJI¹, Tsubasa TANI¹, Izuru TAKEWAKI¹ and Tatsuji MATSUMOTO²

¹ 京都大学工学研究科都市環境工学専攻, Dept. of Urban & Environmental Eng., Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.
²SRI ハイブリッド株式会社, SRI Hybrid Co. LTD.

SUMMARY: The objective of this paper is to demonstrate the fundamental response reduction properties of viscoelastic dampers using high-hardness rubber and to show that the dampers enable one to upgrade habitability and aseismic performances of high-rise buildings. The high-hardness rubber exhibits viscoelastic behaviour in a small strain region and elastoplastic behaviour in a large strain region. The fundamental properties of the dampers are revealed by an equivalent linearization approach and time-history response analyses subjected to recorded earthquake ground motions magnified to various levels.

1 序

本研究の目的は、高硬度ゴムをエネルギー吸収要素として用いた制震壁タイプ粘弹性ダンパー（以下では単に高硬度ゴムダンパーと呼ぶ）の基本特性を明らかにすることと、この粘弹性ダンパーを高層建築物に組み込んだ場合の地震応答および風応答の低減効果の特徴を明らかにし、高硬度ゴムダンパーが高層建築物の居住性能改善に対して有効なデバイスであることを示すことがある。

高層建築物では、ごく稀に生じる地震に対する耐震安全性能ばかりではなく、頻繁に生じる小地震や台風時の居住性能も、建物の構造性能の重要な要素となる。

高層建築物の耐震安全性能を向上させる制震デバイスとしては、低降伏点鋼を用いた履歴ダンパー（以下では単に履歴ダンパーと呼ぶ）が最も一般的に用いられている。履歴ダンパーは、その材料として用いられている低降伏点鋼に累積塑性変形の限界が存在するため、頻繁に生じる小地震や台風時には弾性範囲以内に留まるように設計され、このような外乱に対する居住性能の改善にはほとんど寄与することができない。

一方、本研究で取り扱う高硬度ゴムダンパーは、使用されている高硬度ゴムに累積塑性変形の限界が事実上存在しないため、極めて小さなレベルの外乱からエネルギー吸収性能を発揮することが可能となる。しかしながら、ごく稀に生じる地震に対する応答抑制効果は、履歴ダンパーに比べれば相対的には小さくならざるを得ない。

そこで本研究では、このような、応答抑制効果を最大に発揮できる外乱レベルが異なるダンパーを組み合わせることで、外乱のレベルに関らず応答抑制効果を発揮できる制震（制振）機構が構成できることを示す。

2 高硬度ゴムを用いた粘弹性ダンパー

2.1 高硬度ゴムの基本特性

本研究で取り扱う高硬度ゴム[1]は、一般的な粘弹性ダ

ンパーに使用されるエネルギー吸収要素（粘弹性材料）に比べて、初期弾性剛性が大きく、また、温度依存性および周波数依存性が小さいという特徴を有する。また、載荷履歴に依存した降伏現象を示す。この結果、一般的な粘弹性材料に比べて、大きな等価減衰を得ることができる。Fig. 1に、高硬度ゴムダンパーを用いた標準的ダンパユニットを示す。

Fig. 2 および Fig. 3 に、高硬度ゴム単体（厚さ 20mm）の動的繰り返し載荷実験により得られた復元力ループの例を示す。Fig. 2 に示すように、中一大変形領域（せん断ひずみで 2%~200%程度）においては、一般的な粘弹性材料よりも、むしろ低降伏点鋼に近い復元力特性を示していることがわかる。また、載荷周波数が 0.5Hz 時と 2.0Hz 時で、復元力特性にはほとんど差がみられない。一方、Fig. 3 に示すように、微小変形領域（せん断ひずみで 2%程度以下）においては、粘弹性体に特有の、傾斜した橈円状で、載荷周波数に依存する復元力特性を示す。

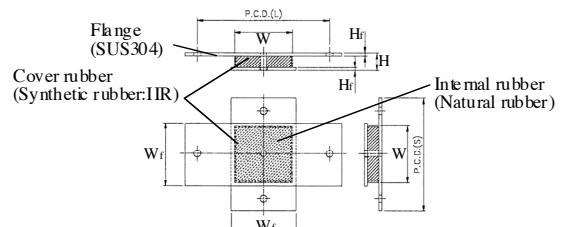
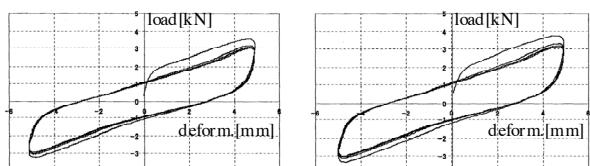


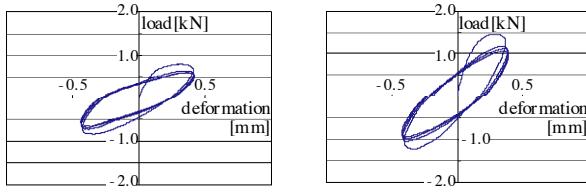
Fig. 1 Basic damper unit using high-hardness rubber



(a) 0.5Hz cyclic loading

(b) 2.0Hz cyclic loading

Fig. 2 Force-deformation relationship of high-hardness rubber
(100 × 100 × 20mm) at large deformation amplitude



(a) 0.01Hz cyclic loading (b) 2.0Hz cyclic loading
Fig. 3 Force-deformation relationship of high-hardness rubber (74×74×20mm) at small deformation amplitude

Fig. 4 には、厚さ 20mm の高硬度ゴム試験体に対する繰り返し載荷実験（載荷周波数は 0.1Hz）により得られた、小振幅時（振幅 10mm, せん断変形角で 50%）および大振幅時（振幅 60mm, せん断変形角で 300%）の復元力ループを示す。Fig. 5 には、同載荷実験により得られた、載荷振幅 - 等価剛性（＝最大変形点での割線剛性）関係を示す。なお、縦軸は、基準変形 20mm（せん断変形角 100%）での等価剛性を 1 としたときの比である。両図より、載荷振幅の増大により、降伏後の二次剛性および等価剛性が顕著に低下する傾向を有していることがわかる。

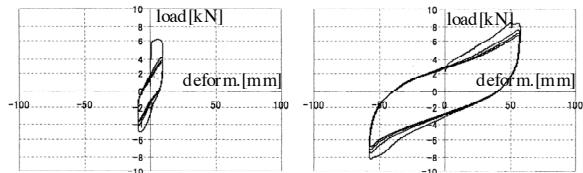


Fig. 4 Comparison of hysteresis loop of high-hardness rubber (100×100×20mm) at small and large deformation amplitude

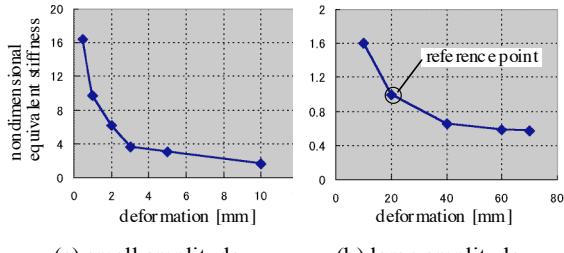


Fig. 5 Nondimensional equivalent stiffness with respect to deformation amplitude (0.1Hz loading)

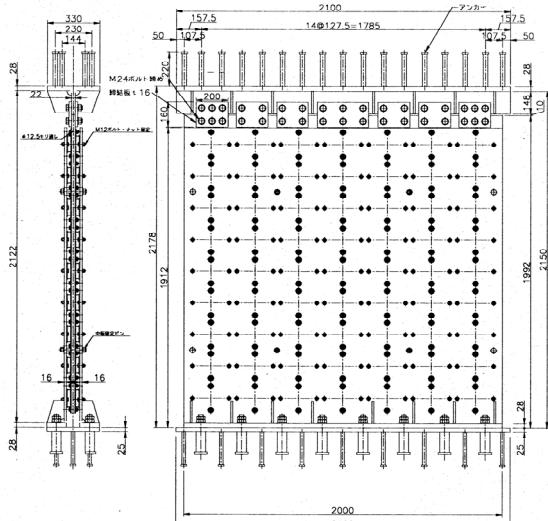


Fig. 6 Wall-type viscoelastic damper using high-hardness rubber

2.2 高硬度ゴムを用いた制振壁タイプ粘弾性ダンパー

この高硬度ゴムを使用した標準的な仕様に基づく制振壁タイプの粘弾性ダンパーを Fig. 6 に示す。100mm×100mm×20mm の高硬度ゴムの表裏に厚さ 5mm の鋼板を加硫接着し、この鋼板を、厚さ 22mm（中板）および 16mm（外板）の鋼板にボルト接合してある。高硬度ゴムは、Fig. 1 に示した基本ユニットが、中板の表裏に 63 枚ずつ、合計 126 枚使用されている。中板を上階梁下、外板を下階梁上に接合することにより、層間変形の大部分が高硬度ゴムのせん断変形に変換されることになる。

2.3 周辺架構の弾性変形を考慮した場合の性能低下特性

高硬度ゴムがせん断変形するとき、その取り付け部分の鋼板にも面内曲げ変形および面内せん断変形が生じる。この鋼板の変形により、制振壁の剛性および制振性能（エネルギー吸収性能）が低下することになる。

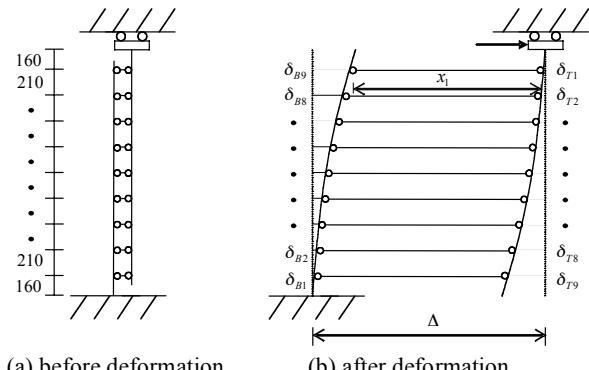
次式により、性能低下率 α を定義する。

$$\alpha = \frac{\delta_{av}}{\Delta} \quad (1)$$

ここで Δ : 層間変位

δ_{av} : 鋼板の変形（層間変位成分）の平均値

α が大きいほど、層間変位に対する高硬度ゴムの変形の割合が少ないと、つまり性能が低下することになる。Fig. 6 に示した、標準的な高硬度ゴムダンパーについて、Fig. 7 に示すモデルを用い、(1)式で定義した性能低下率を評価したものを Fig. 8 に示す。図より、鋼板厚と性能低下率がほぼ逆比例すること、および、振幅が小さい方が性能低下率が大きくなることが観察される。



(a) before deformation (b) after deformation
Fig. 7 Model of damping wall

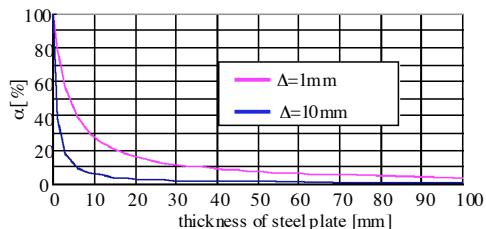


Fig. 8 Performance degradation ratio

Fig. 7 で示したモデルに対する性能低下率を厳密に求めるには、多元連立一次方程式を解く必要があり、構造計画の段階では労力を要する。また、各パラメーターが性能低下率に及ぼす影響を把握することが困難であるため、ここでは、ほぼ同等の精度を有する近似式を導出する。まず、上から i 番目の高硬度ゴム取り付け位置での鋼板の変形の和

がすべての位置で等しいと仮定する。そしてその値は、上から3番目のゴムダンパー取り付け位置のものとする。これは、上から3番目の値が平均値に一番近い値であるからである。この仮定より、以下の近似式が導出できる。

$$\alpha \approx \left[\frac{1}{k_d \left(\frac{6.7 \times 10^9}{EI} + \frac{1.3 \times 10^4 \times 1.2}{GA} \right)} + 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

ここで k_d : 一列分のゴムダンパーの剛性 [kN/mm]

EI : 鋼板の面内曲げ剛性 [kN·mm²]

GA : 鋼板の面内せん断剛性 [kN]

近似式(2)と厳密解は、±0.4%以下の誤差で一致することを数値的に確認している。

3 等価減衰定数

Fig. 2 に示したように、本研究で対象とする高硬度ゴムは、粘弾性体というよりもむしろ弾塑性体としての復元力特性を示すため、減衰性能の評価には等価線形化手法により評価した等価減衰定数を用いることとする。

簡単のため、1自由度モデルを考える。弾塑性復元力を描く1自由度系の等価減衰定数 h_{eq} は次式で表される。

$$h_{eq} = W_p (4\pi W_E)^{-1} \quad (3)$$

ここで W_p は1サイクルの復元力ループが囲む面積、 W_E は最大変形点と原点を結ぶ線分を斜辺とし、変形軸を一边とする直角三角形の面積である。

建物骨組および高硬度ゴムダンパーの復元力特性を、ともに完全弾塑性型とすると、復元力特性は Fig. 9 に示すようなトリリニア型となり、 h_{eq} は次式のように書ける。

$$R_{DY} \leq R_{max} : h_{eq} = \frac{2 \left\{ kR_{DY} (R_{max} - R_{DY}) + R_{FY} (R_{max} - R_{FY}) \right\}}{\pi (kR_{DY} + R_{max}) R_{max}} \quad (4a)$$

$$R_{DY} > R_{max} : h_{eq} = \frac{2kR_{DY} (R_{max} - R_{DY})}{\pi (kR_{DY} + R_{max}) R_{max}} \quad (4b)$$

また、 h_{eq} の最大値 $h_{eq\max}$ は次式のように書ける。

$$h_{eq\max} = \frac{2k\sqrt{1+k}}{\pi(k+1+\sqrt{1+k})(1+\sqrt{1+k})} \quad (5)$$

ここで $k = K_D / K_F$ である。等価減衰定数の最大値は、建物骨組剛性 K_F に対するダンパー初期剛性 K_D の比 k のみによって表わされることがわかる。

高硬度ゴムは、Fig. 5 にも示したように、それまでに経験した最大変形 R_{max} によって、降伏変形 R_{DY} および初期剛性 K_D が変化するので、このことを考慮して(4a,b)式に基づき h_{eq} を描いたものを Fig. 10 に示す。なお、図は、単調載荷時のダンパー初期剛性 K_{Dmono} を用いて計算した剛性比 $k_{mono} = K_{Dmono} / K_F$ が 1.0 となるように描いた。従って、横軸（層間変形角）の値により、対応する剛性比 k の値は異なっている。比較のため、単調載荷時の復元力特性に基づいた場合の高硬度ゴムの h_{eq} ($k_{mono} = 1.0$)、および、低降伏点鋼を用いた鋼材ダンパーの h_{eq} ($k = 1.0$) も同図中に示す。図より、層間変形角が 1/1000 を下回るような微小変形領域では、高硬度ゴムダンパーの方が高い等価減衰定数が得られていることがわかる。

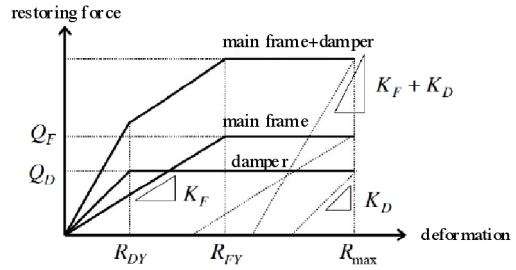


Fig. 9 Force-deformation relationship of SDOF system

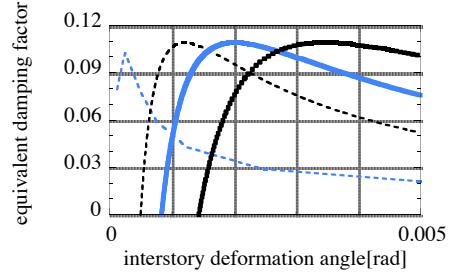
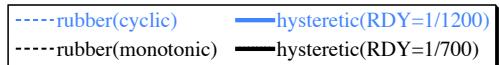


Fig. 10 Comparison of equivalent damping factor ($k=1$)

4 地震入力に対する応答低減効果

実在する高層建築物を例として、高硬度ゴムダンパーによる応答低減効果を検証した。対象としたのは、整形な平面形状（基準階面積約 1,000m²）を有する履歴ダンパー付き 22 階建て建物である[2]。この建物から仮想的に履歴ダンパーを取り除いた骨組に対して、高硬度ゴムダンパー（Case VE）、履歴ダンパー（Case HD）、両ダンパーを並列的に組み合わせたダンパー（Case VE+HD）の三者を組み込んだときの応答低減効果の違いを比較した。

解析用建物モデルは基礎固定の平面せん断型モデルとし、各層の復元力特性は層間変形角 1/150 で降伏を開始する完全弾塑性型とした。解析用ダンパーモデルとしては、高硬度ゴムダンパーには、繰り返し載荷時の実験結果に合致するようパラメーターを調整した高減衰ゴムモデル（単調載荷時の降伏層間変位 2mm、二次勾配比 0.03）を、履歴ダンパーには、層間変形角が 1/1000 で初期降伏する降伏点上昇型バイリニアモデル（二次勾配比 0.0、ひずみ硬化勾配比-0.1）を用いた。なお、高硬度ゴムにおける粘性減衰と極大変形時の耐力上昇は考慮していない。また、高硬度ゴムダンパーにおける性能低下率 α は、本解析では簡単のためゼロとした。

入力地震波には、複数の記録地震波原波の振幅を、1/8, 1/4, 1/2, 1/1 倍したものを用いた。地震時応答解析には、市販の汎用構造解析プログラム（RESP シリーズ）を使用した。また、剛性比 k については、 $k = 0.5, 1.0, 2.0$ の 3 ケースを設定した。本稿ではそのうちの代表的なものとして、El Centro 1940 NS 地震波に対する $k=1.0$ での結果を示す。

Fig. 11 および Fig. 12 に、上記の各 Case のそれぞれについて $k=1.0$ (Case VE+HD においては、履歴ダンパーと高硬度ゴムダンパーの初期剛性を同じとする) としたときの最大層間変位分布および最大絶対加速度分布を示す。なお、高硬度ゴムダンパーにおける剛性比 k は、単調載荷時のダンパー初期剛性を用いて計算した値を用いた。

図より、地震入力のレベルが小さいときには、高硬度ゴムダンパーの方が層間変位、絶対加速度とも最大値は小さくなってしまっており、大きな制震効果が得られているがわかる。一方、地震入力のレベルが大きいときには逆の結果となっている。従って、頻度の高い微小地震や常時風荷重に対する居住性能の改善には、高硬度ゴムダンパーの方が効果的であるといえる。また、高硬度ゴムダンパーと履歴ダンパーを併用した場合には、地震動のレベルに関らず安定した制震効果が得られており、複数の特性を有するダンパーを組み合わせることで、ロバスト性の高い制震機構が構成できるといえる。なお、上記の傾向は、解析に用いた全ての記録地震波および剛性比 k に対して共通して観察された。

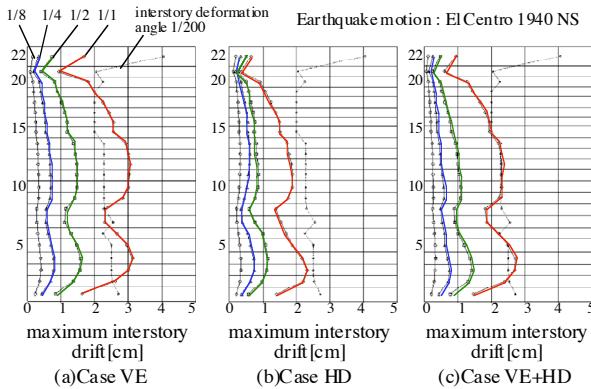


Fig. 11 Distributions of maximum interstory drift

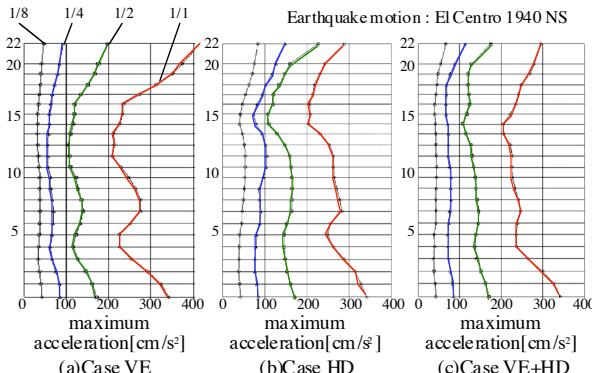


Fig. 12 Distributions of maximum absolute acceleration

5 風外乱に対する応答低減効果

高硬度ゴムダンパーは、Fig. 10 に示したように、層間変形角で $1/10000$ 程度の微小変形領域からエネルギー吸収性能を発揮するため、頻繁に生じる風外乱に対する応答を低減する効果も期待できる。

超高層建築物でしばしば問題となる風向直交方向振動について、建物頂部での加速度の標準偏差値 σ_y に対する近似式として、文献[3]では次式が示されている。

$$\sigma_y = v_1 v_2 \left(\frac{H}{B} \right)^{v_3} \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{T_0 U_H^3}{BD} \quad (6)$$

ここで、 v_1 :補正係数、 v_2, v_3 :建物の形状により決まる係数、 ρ, ρ_s :空気の密度、建物の密度、 U_H :建物頂部での平均風速、 T_0 、 h :1次固有周期、1次減衰定数、 H, B, D :建物の高さ、幅、奥行き、である。この式によれば、風向直交方

向振動における建物頂部での加速度は、振動方向の1次減衰定数 h の平方根に逆比例するため、高硬度ゴムダンパーの付加により減衰定数が 0.5%から 2%に増加すれば、風荷重時の加速度応答が半減できることになる。Fig. 10 に示したように、例えば剛性比 $k=1$ とすれば、高硬度ゴムダンパーにより、層間変形角が $1/400$ までの領域で 3%以上の減衰定数の付加が可能である。従って、高硬度ゴムダンパーにより、頻繁に作用する風外乱に対する居住性能の改善が可能であるといえる。

6 結論

本研究により以下の結果を得た。

- (1) 高硬度ゴムを用いた粘弹性ダンパー（高硬度ゴムダンパー）について、単調載荷時と繰返し載荷時の等価粘性減衰定数と層間変形角との関係を明らかにした。
- (2) 高層建築物に、高硬度ゴムダンパー、履歴ダンパー、およびこの両ダンパーを併用した場合について、複数の記録地震波に対する地震応答解析を実施し、地震入力レベルが小さいときには高硬度ゴムダンパーの方が、大きい場合には履歴ダンパーの方が、絶対加速度、層間変位とも、より大きい低減効果が得られる事を示した。また、両ダンパーを併用することで、地震入力レベルの変化への依存が少ない安定した応答低減効果が得られる事を示した。
- (3) 高層建築物に高硬度ゴムダンパーを組み込むことにより、頻繁に生じる風外乱に対しても、加速度応答の低減による居住性能の改善ができる事を示した。

以上より、高硬度ゴムダンパーは、頻繁に生じる小地震や風荷重時の居住性能の改善が可能であり、さらに履歴ダンパーと複合的に使用することで、入力レベルに依存しない高い居住性能と耐震性能を実現することが可能であると結論付けることができる。

なお、高硬度ゴムダンパーにおいては、ゴム剛性のひずみ依存性により、ダンパー変形振幅が小さくなるほど、ダンパー構成部材の弾性変形によるダンパーの性能低下が顕著になるので、小レベル地震入力あるいは常時風荷重時の高硬度ゴムダンパーの効果をより高精度で評価するためには、ダンパー構成部材の弾性変形による性能低下率を導入した解析を実施することが必要である。

謝辞

本研究の一部は、SRI ハイブリッドと京都大学の共同研究によるものである。

参考文献

- [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] 日本建築構造技術者協会編：応答制御構造設計法、彰国社, 2000
- [3] 藤本盛久ほか：高層建築物の強風時の揺れによる居住性劣化の防止に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.1055-1056, 1981

高硬度ゴム粘弾性ダンパーによる建築物の居住性能の改善

辻聖晃（京大），谷翼（京大）^{*}，竹脇出（京大），松本達治（SRI ハイブリッド）

Habitability Upgrade of Buildings by Visco-elastic Damper Using High-hardness Rubber

Masaaki TSUJI (Kyoto Univ.), Tsubasa TANI^{*} (Kyoto Univ.),
Izuru Takewaki (Kyoto Univ.) and Tatsuji MATSUMOTO (SRI Hybrid)

本研究の目的は、高硬度ゴムをエネルギー吸収要素として用いた制震壁タイプ粘弾性ダンパーの基本特性を明らかにすることと、この粘弾性ダンパーを高層建築物に組み込んだ場合の地震応答および風応答の低減効果の特徴を明らかにし、高硬度ゴムダンパーが高層建築物の居住性能改善に対して有効なデバイスであることを示すことにある。

本研究により以下の結果を得た。(1)高硬度ゴムダンパーについて、単調載荷時と繰返し載荷時の等価粘性減衰定数と層間変形角との関係を明らかにした。(2)高層建築物に、高硬度ゴムダンパー、履歴ダンパー、およびこの両ダンパーを並列的に組み合わせたダンパーを組み込んだ場合について地震応答解析を実施し、地震入力レベルが小さいときには高硬度ゴムダンパーの方が、地震入力レベルが大きい場合には履歴ダンパーの方が、絶対加速度、層間変位とも、より大きい低減効果が得られることを示した。また、両ダンパーを並列的に組み合わせたダンパーを用いることで、地震入力レベルの変化への依存が少ない安定した応答低減効果が得られることを示した。(3)高層建築物に高硬度ゴムダンパーを組み込むことにより、頻繁に生じる風外乱に対しても、加速度応答の低減による居住性能の改善ができるることを示した。

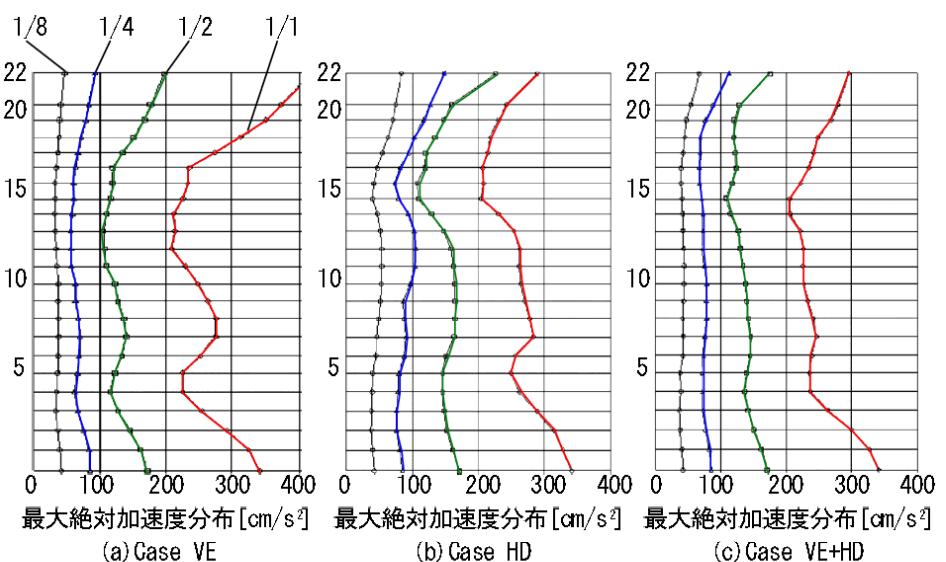


Fig. 1 Distributions of maximum absolute acceleration