

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560588

研究課題名（和文） 高硬度ゴムとポストテンションブレースを用いた高性能コンパクト制振システムの開発

研究課題名（英文） Post-Tensioning High-Hardness Rubber Damper System for Vibration Control of Residential Houses

研究代表者

辻 聖晃 (TSUJI MASAOKI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00243121

研究成果の概要（和文）：戸建住宅などの小規模建築物に適した高性能コンパクト制振システムを開発した。本制振システムは、高硬度ゴムをダンパー要素として用いることにより、0.1mm程度の微小な変形から高い減衰性能を発揮する。実物大の制振システム供試体に対して、動的載荷実験および自由振動実験を実施し、シミュレーションにより予想される減衰性能を発揮できることを確認した。本制振システムを設置した建物の地震時応答を、時刻歴応答解析を用いずに予測することができる簡易応答評価法を開発し、その精度を検証した。

研究成果の概要（英文）：High performance and compact vibration-control system with high-hardness rubber is proposed. This vibration-control system show vibration reduction effect to sub-millimeter amplitude. Dynamic loading and free vibration experiments using full-scale test piece are performed to verify damping performance of proposed system. A simple evaluation method for earthquake response of building with proposed vibration-control system is proposed. It is shown that the proposed method has reasonable accuracy through comparison with time-history analysis.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：高硬度ゴム，ポストテンションブレース，微小振動，居住性能，耐震補強，自由振動実験

1. 研究開始当初の背景

1995年の兵庫県南部地震では、既存不適格建物の耐震性能不足による都市災害の危険性があらためてクローズアップされた。庁舎や学校建築では、公的補助および法規制の存在により、速やかにではないが着実に、既存不適格建物の耐震補強が進められている。しかしながら、戸建住宅ではいまだにほとんど耐震補強が進められていないというのが

実情である。そのこと理由として、費用が個人の負担としては高額なこと、大地震が生じないとその効用を実感できないこと、開口の閉鎖や柱の増設に伴い建物の使い勝手が変化すること、などが挙げられる。逆に言えば、できるだけ安価で、大地震以外でもその効用を実感でき、建物の使い勝手があまり変化しないコンパクトさを兼ね備えた耐震補強構法が望まれている。

2. 研究の目的

(1)極微小変形時には粘弾性材料としての性格が卓越し、大変形時には弾塑性材料としての性格が卓越するという、粘弾性体と弾塑性体の両者の特徴を兼ね備えた高硬度ゴムを用いたダンパーユニットを、ポストテンションブレースを介して建物に組み込むことで、大地震以外でもその効果を実感でき、かつ、大地震時の安全性の付与にも貢献できる、戸建住宅用高性能コンパクト制振システムを構築する。

図1に高硬度ゴムの復元力特性を示す。

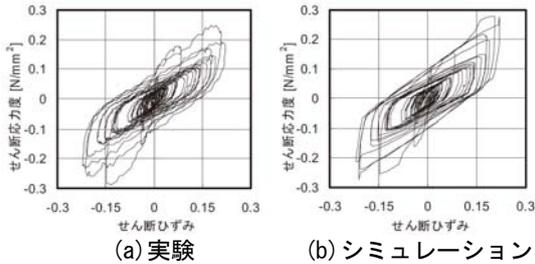


図1 高硬度ゴムのひずみ応力関係

(2)本制振システムでは、高硬度ゴムを用いたダンパーユニットと鋼棒を用いたポストテンションブレースが直列に接続される。このため、建物に生じた層間変形とダンパーユニットに生じる変形は、ポストテンションブレースの伸縮、ダンパーユニットの剛体回転、建物の梁の曲げ変形など、様々な要因により同一ではなくなる。また、建物の層間変形がある限界値を越え、ポストテンションが消失すると、圧縮側の鋼棒ブレースは直ちに座屈するため、ポストテンションが残留しているかどうかで、制振システムとしての復元力特性は大きく異なる。このようなコンパクト制振システムの基本特性を、物理モデルを忠実に再現したシミュレーションおよび動的载荷実験により明らかにする。

(3)戸建住宅を対象とした耐震補強システムでは、高精度に性能評価が可能なシミュレーションモデルよりも、簡便におおよその性能評価が可能な性能評価式ないしは性能評価図表が一般には必要とされる。そこで、(2)で得られた結果を分析して、コンパクト制振システムおよびコンパクト制振システムを組み込んだ建物の性能評価が、できるだけ簡便な方法で可能な性能評価法を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の2種類の制振システムを研究対象とする。Aタイプは、高硬度ゴムをエネルギー吸収要素とするダンパーユニット、ターンバックル付き鋼棒ブレース、ブレースを骨組に接合するためのT形鋼から構成されている。ターンバックルの締付けによ

り、鋼棒ブレースへポストテンションが導入される(図2(a))。Bタイプは、溝形鋼で構成した上下フレームの間に、ブレースを介してAタイプと同様のダンパーユニットを設置するもので、ブレースにはポストテンションは導入しない(図2(b))。

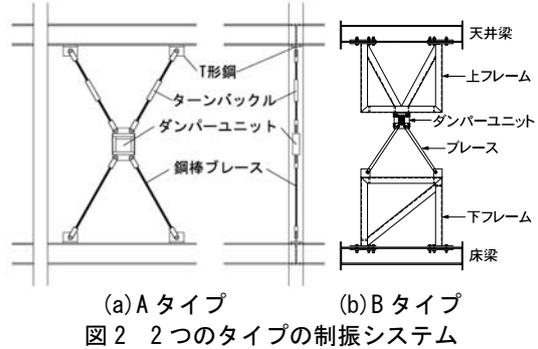


図2 2つのタイプの制振システム

(1)制振システムの性能シミュレーション

高硬度ゴム単体の復元力モデルと、ポストテンションブレースの復元力モデル(Aタイプ)または上下フレーム(Bタイプ)を組み合わせた、コンパクト制振システムのシミュレーションモデルを構築し、その基本的な性能シミュレーションを実施した。高硬度ゴム単体の復元力モデルは、繰り返し入力による剛性の低下を考慮できる高精度のものを使用するため、地震などの非定常入力に対しても高い精度での性能シミュレーションが可能である。

(2)Aタイプ制振システムの動的载荷実験

ポストテンションブレースの導入張力を実験パラメータとして、Aタイプの制振システムに対する動的载荷実験を実施した(図3)。実験には、振動台と反力壁を用いた载荷実験システムを用いた。鋼製梁に直接制振システムを組み込んだケースと、鉄骨系戸建住宅への設置を想定して、ALC製天井と木製床の間に設置した石膏ボード製の間仕切り壁内に制振システムを組み込んだケースの比較を行った。

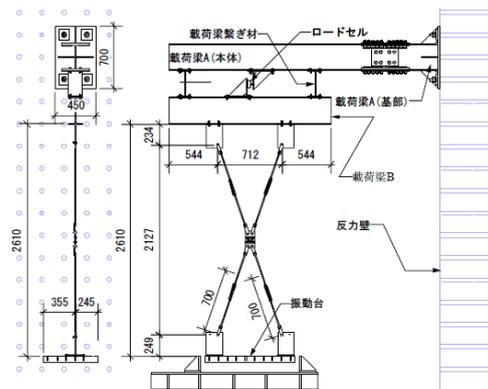


図3 振動台と反力壁を用いた载荷システム

(3) Bタイプ制振システムの自由振動実験

ダンパーユニットに設置する高硬度ゴムのサイズを実験パラメタとして、Bタイプの制振システムに対する自由振動実験を実施した(図4)。実験には、反力壁と反力床に設置したフレームから重りを吊り下げた、自由振動実験システムを用いた。高硬度ゴムとの比較のため、速度依存型の復元力特性を示す粘弾性体(速度依存型ゴム)をダンパー要素とする供試体についても実験を実施した。

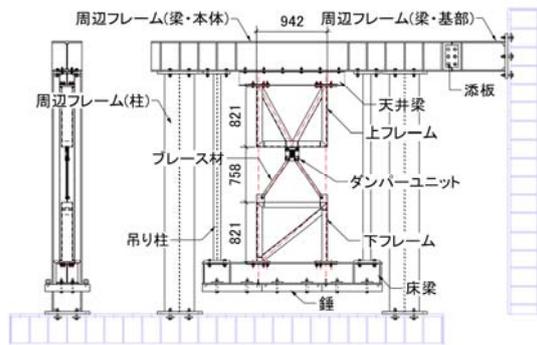


図4 吊り下げ型自由振動実験システム

(4) シミュレーションの妥当性評価

(1)で構築したシミュレーションモデルにより(2)と(3)の実験をシミュレートし、シミュレーションモデルの精度と妥当性を検証するとともに、必要に応じてシミュレーションモデルの修正を実施した。

(5) 制振システムを組み込んだ建物の簡易応答評価法の構築

高硬度ゴムは、図1に示したような強度の非線形復元力特性を有している。そこで、応答スペクトル法に等価線形化法を導入して、制振性能が入力のレベルに応じて変化することを考慮した、本制振システムの簡易応答評価法を構築した。

4. 研究成果

(1) Aタイプの制振システムについて、プレース取り付け角、ポストテンションの大きさ、高硬度ゴムのせん断ひずみ、ダンパーユニット上下でのプレースの相対的ずれなどが、ダンパーの実効率(制振システムに生じるせん断変形に対する高硬度ゴムに生じるせん断変形の割合のことを指し、これが1に近いほど、ダンパーシステムとして効率が良いことを意味する)に与える影響を明らかにした。

図5はプレースのずれをパラメタとして、高硬度ゴムのせん断ひずみと実効率の関係を示したものである。プレースのずれが大きくなると急激に実効率が低下することがわかる。プレースにずれがあると、制振システムの変形につれてダンパーユニットが回転し、制振システムの変形がダンパーユニット

に十分に伝わらないことがその原因である。

この結果と次項の結果から、ダンパーユニットの回転を防ぐことがダンパーの効率化に役立つことが明らかになったため、ダンパーユニットの回転が生じないBタイプの制振システム(図2(b))を提案することとなった。

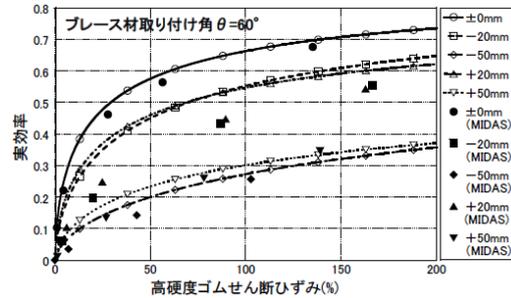
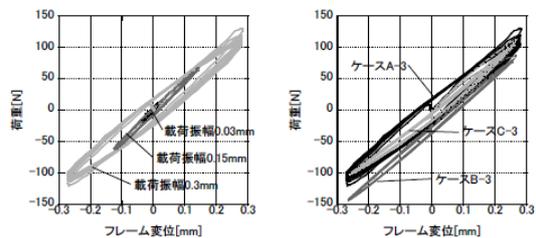


図5 プレースのずれが実効率に与える影響

(2) Aタイプの制振システムについて、動的載荷実験を実施し、以下のことを明らかにした。

- ・0.15mm程度の載荷振幅に対しても、本制振システムはエネルギーを吸収する。
- ・制振システムを間仕切壁の内部に設置する場合、微小振幅域においては間仕切壁を構成する石膏ボードがロッキングを起こし、制振性能を低下させる。
- ・制振システムを載荷装置に直接設置した場合、シミュレーション結果と実験結果は良好な対応を示す。

図6は、制振システムの変位と荷重の関係を示したものである。(a)は、制振システムを載荷装置に直接設置した場合について、載荷振幅の違いによる復元力特性の違いを示したものであり、(b)は載荷振幅が0.3mmの場合について、制振システムの設置方法の違いによる復元力特性の違いを示したものである。ケースA-3は載荷装置に直接設置したもの、ケースB-3は間仕切り壁のみを設置したもの、ケースC-3は間仕切り壁内に制振システムを設置したものを表す。



(a) 振幅による違い (b) 設置方法による違い

図6 制振システムの変位と荷重の関係

(3) Bタイプの制振システムについて、自由振動実験を実施し、以下のことを明らかにした。

- ・高硬度ゴムダンパーの性能保証範囲であるせん断変形200%までの範囲では、制振システムが自由振動を効果的に減衰させるこ

とを実証した。

- 自由振動実験の結果と汎用構造解析ソフトを用いた非線形時刻歴応答解析によるシミュレーションの結果を比較することにより、シミュレーションに用いた解析モデルの妥当性を示した。
- 高硬度ゴムダンパーが有する減衰性能のひずみ依存性を自由振動実験により実証した。

図7は、高硬度ゴムと2種類の速度依存型ゴムをダンパー要素とする制振システムの自由振動波形の違いを示している。3つのゴムの寸法は同じである。図8には、自由振動波形から対数減衰率を用いて評価した平均振幅ごとの減衰定数を示す。高硬度ゴムが最も早期に振動を減衰できており、特に小振幅時の減衰定数が速度依存型ゴムに比べて大きくなっていることがわかる。

図9は、実験とシミュレーションの比較である。高硬度ゴムの面積の大小にかかわらず、良好な精度で実験結果をシミュレートできていることがわかる。

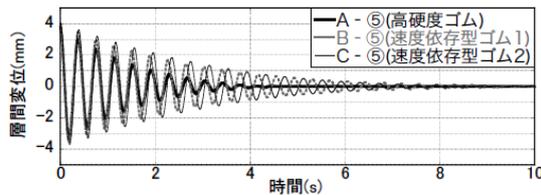


図7 高硬度ゴムと速度依存型ゴムの自由振動減衰波形の比較

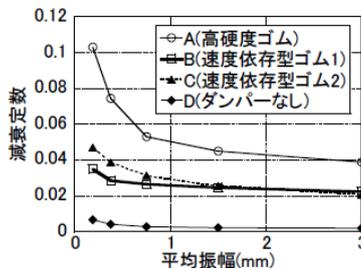
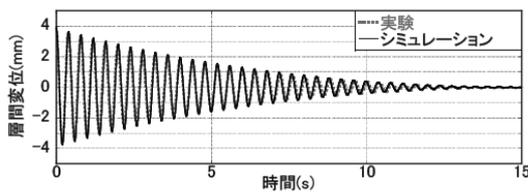
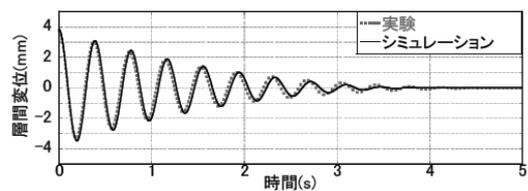


図8 高硬度ゴムと速度依存型ゴムの平均振幅ごとの減衰定数の比較



(a) A-③ (高硬度ゴム 100mm²)

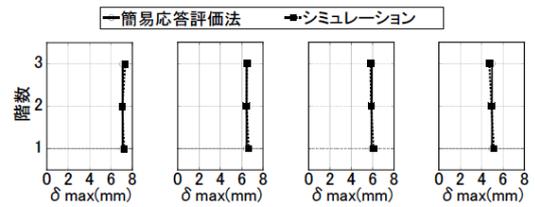


(b) A-⑤ (高硬度ゴム 400mm²)

図9 自由振動実験とシミュレーションの比較

(4) 構築した簡易応答評価法と、時刻歴応答解析法を用いて、Bタイプの制振システムを組み込んだ建物の最大応答を比較し、提案した簡易応答評価法が高い精度を有していることを示した。

図10は、3層鉄骨造戸建住宅をモデル化した3自由度せん断質点系に、Bタイプの制振システムを各層に1ユニット、2ユニット、4ユニット設置した場合の地震動に対する最大層間変位分布について、非線形時刻歴応答解析を用いたシミュレーションと提案する簡易応答評価法でそれぞれ計算したものの比較を示す。制振システムの設置数にかかわらず、提案した簡易応答評価法が高い精度を有していることがわかる。



(a) 各層0ユニット (b) 各層1ユニット (c) 各層2ユニット (d) 各層4ユニット

図10 簡易応答評価法と時刻歴応答解析法(シミュレーション)による最大応答評価の比較

(5) 本研究で明らかになったように、高硬度ゴムは、微小変形時には高い減衰性能を発揮する一方、変形が大きくなると軟化して減衰性能が低下する。これを補うため、大変形時に高い減衰性能を発揮する履歴型のダンパーを本制振システムに組み込んで、ハイブリッド型の制振システムとすることが考えられる。このハイブリッド型の制振システムについて、減衰性能の特徴を明らかにし、様々な性能要求に対して応えうる制振システムを構築することが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① 辻聖晃, 藤原悠祐, 金亨國, 吉富信太, 竹脇出: 高硬度ゴムを用いた3段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と制振特性の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, No.677, pp.1037-1046, 2012年
- ② 金亨國, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出: 3段ユニット間柱型履歴ダンパーシステムの開発とその減衰性能の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 査読無, B-2分冊, p.817-818, 2011年
- ③ 藤原悠祐, 金亨國, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出: 3段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と実大制振システムを用

- いた自由振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 査読無, B-2 分冊, p. 815-816, 2011 年
- ④ 藤原悠佑, 金亨國, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出: 3 段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と制振特性の簡易評価法, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読無, 第 51 号, pp.77-80, 2011 年, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008900992>
- ⑤ 藤原悠祐, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出, 佐田貴浩, 田中和宏: 戸建住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構の開発 その 2 変形拡大機構を用いた実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読無, 第 50 号, pp.101-104, 2010 年, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008900880>
- ⑥ 村田翔太郎, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出, 佐田貴浩, 田中和宏: 戸建住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構の開発 その 1 実大実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読無, 第 50 号, pp.97-100, 2010 年, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008900879>
- ⑦ Kim Hyeong-Gook, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出: Post-Tensioning Viscoelastic Damper System for Vibration Control, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 査読無, 第 50 号, pp.93-96, 2010 年, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008900878>
- ⑧ 辻聖晃, 藤原悠祐, 村田翔太郎, 金亨國, 吉富信太, 竹脇出: 戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構 簡略化モデルによる実効率の解析, 構造工学論文集, 査読有, Vol.56B, pp.171-178, 2010 年
- ⑨ 辻聖晃, 村田翔太郎, 吉富信太, 竹脇出: 戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 17 巻, pp.127-132, 2009 年
- 建築学会近畿支部研究発表会, 2010 年 6 月 20 日, 大阪工業技術専門学校
- ⑤ 村田翔太郎: 戸建住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構の開発 その 1 実大実験, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2010 年 6 月 20 日, 大阪工業技術専門学校
- ⑥ 金亨國: Post-Tensioning Viscoelastic Damper System for Vibration Control, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2010 年 6 月 20 日, 大阪工業技術専門学校
- ⑦ 金亨國: Post-Tensioning High-Hardness Rubber Damper System for Vibration Control of Residential Houses, *1st Int. Conf. Advances in Interaction & Multiscale Mechanics*, 2010 年 5 月 31 日, Seogwipo KAL Hotel, Jeju, Korea
- ⑧ 辻聖晃: 戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構 簡略化モデルによる実効率の解析, 構造工学シンポジウム, 2010 年 4 月 25 日, 東京工業大学
- ⑨ 村田翔太郎: 戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構, 第 17 回鋼構造年次論文発表会, 2009 年 11 月 19 日, 東京ファッションタウンビル東館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 聖晃 (TSUJI MASAOKI)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 00243121

(2) 研究分担者

吉富 信太 (YOSHITOMI SHINTA)
 京都大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 30432363

[学会発表] (計 9 件)

- ① 金亨國: 3 段ユニット間柱型履歴ダンパーシステムの開発とその減衰性能の評価, 日本建築学会大会, 2011 年 8 月 25 日, 東京工業大学
- ② 藤原悠祐: 3 段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と実大制振システムを用いた自由振動実験, 日本建築学会大会, 2011 年 8 月 25 日, 東京工業大学
- ③ 藤原悠佑: 3 段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と制振特性の簡易評価法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2011 年 6 月 18 日, 大阪工業技術専門学校
- ④ 藤原悠祐: 戸建住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構の開発 その 2 変形拡大機構を用いた実験, 日本