

平成21年 3月31日現在

研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686046
 研究課題名(和文) 可変摩擦ダンパーとMRダンパーによる複合型セミアクティブ制振に関する研究
 研究課題名(英文) COMPLEX SEMI-ACTIVE SEISMIC RESPONSE CONTROL UTILIZING VALIABLE FRICTIONAL DAMPERS AND MAGNETO-RHEOLOGICAL DAMPERS
 研究代表者
 菅野 秀人 (KANNO HIDETO)
 秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
 研究者番号：20336449

研究成果の概要：

本研究は、合理的な建物の地震応答制御として、制震デバイスであるダンパーと建物の架構を繋ぐダンパー支持部材の負担軽減と、建物高さ方向の応答分布の均一化を図ることを目標とした。本研究を通して試作した可変ダンパーの基本的な特性把握と、目標を達成する制御則ならびにこれを実現する比較的簡便な制御システムの構築を行うことができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2007年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

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：構造制御，セミアクティブ制振

1. 研究開始当初の背景

制震(振)構造技術が、建築構造に適用されるようになったのは1980年以降で、その後、兵庫県南部地震においてその有用性が実証されると、急速的に普及し始め、現在では多くの建築構造物に何らかの制震(振)部材が付加されるようになった。さらに1989年には世界初のアクティブ制震構造の建物が東京都に誕生し、これを契機として、建築構造技術には機械力学や材料力学の先端技術が積極的に取り入れられ、急速に発展することとなった。アクティブ振動制御は、振動制御を行うにあたって何らかの外部エネルギー供給を行って制御装置を作動させるもので、比較的大きな駆動エネルギーが必要であり、地震時の停電などのフェイルセーフの観点

などから、強風時や小地震時の快適な居住性の確保、大地震時のあと揺れの低減を目的の中心としている。これに対し近年、地震時の安全性確保という目標に向けて着目されてきたセミアクティブ振動制御は、外乱に応じて構造特性の一部を制御することによって効率的に制御目標を達成しようとするものである。近年インテリジェント材料の研究開発が活発に行われている背景から、これをセミアクティブデバイスに適用する研究も進められている。独立行政法人建築研究所と米国科学技術財団では、1998年より日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」を実施しており、これを契機として日本国内ではセミアクティブ制震構造に関する研究開発が一層活発化している。セミアクテ

ィブデバイスの中で最も注目されているのが、磁気粘性流体ダンパー（MR ダンパー）であり、これは、励磁によって減衰特性をリアルタイムで制御することが可能な可変減衰デバイスである。MR ダンパーはその歴史が浅く、本格的な実用化に向けてさらなる研究開発が期待されている。MR ダンパーを用いたセミアクティブ振動制御に関する既往の研究では、免震層に MR ダンパーを設置するセミアクティブ免震の検討例が多く、MR ダンパーを建物層間に設置するセミアクティブ制震に関する検討例は少ない。また制御アルゴリズムについては、最適制御理論などのアクティブ制御からのアプローチと、ダンパーの履歴形状を制御するパッシブ制御からのアプローチに分類でき、特にセミアクティブ免震ではアクティブ制御からのアプローチの検討例が多い。一方、多層建物を対象とした層間設置型セミアクティブ制震の場合、実構造物の振動特性は非線形性を有することが多く、そのモデル化は難しい側面があることから、構造物のモデル化が必要なアクティブ制御からのアプローチは不向きである。また、MR ダンパーを建物の各層間に設置するような場合には、制御システムはフェイルセーフの観点からも各層独立分散型システムであることが望ましく、制御則についても構造物の応答や比較的正確に捉えやすい構造物諸元を用いた簡易なものが望まれている。

2. 研究の目的

以上のような背景を鑑みて、本研究では多層建物を対象とした層間設置型ダンパーによる比較的簡易なセミアクティブ制御則の提案を行い、その有用性について検討する。本研究における制御の主旨は、まず多層建物を対象とすることからダンパー設置により建物の各層の最大応答を均一にするような合理的な制御を行うことである。さらに、ダンパーは各層間に設置されることを考慮すると、ダンパーと主架構を繋ぐ支持部材の影響が無視できない場合が多いことから、本研究では、このダンパー支持部材の変形による影響も考慮して、応答制御に影響を及ぼしにくい制御則の検討を行う。

本研究ではまず、2kN 級の小型 MR ダンパー模型を製作し、動的載荷試験を通して基本特性を把握した。次に、1 質点系を対象に等価粘性減衰定数の評価、地震応答解析を通して、比較的簡易なセミアクティブ制御則の提案とその基本的な制御の特徴を整理し、鉄骨造 1 層フレーム試験体にダンパーを設置した振動台実験を行い、その妥当性を検証した。次に多層建物を想定した鉄骨造 3 層フレーム試験体の各層にダンパーを設置して振動制御実験を行い、各層独立制御システムの動作性状を確認した。以上得られた知見を基に鉄

筋コンクリート造の多層建物を対象としたセミアクティブ制震の解析的検討を行い、特に建物高さ（層）方向の最大応答値分布と、支持部材の応答制御への影響について着目して検討を行った。

3. 研究の方法

(1) セミアクティブダンパーの検討

可変性能デバイス（セミアクティブダンパー）として本研究で採用した MR ダンパーについて、2kN 級ダンパーを試作し、動的載荷試験結果を基に動力学特性、可変減衰能の特徴について整理し、その数値力学モデルの検討を行った。

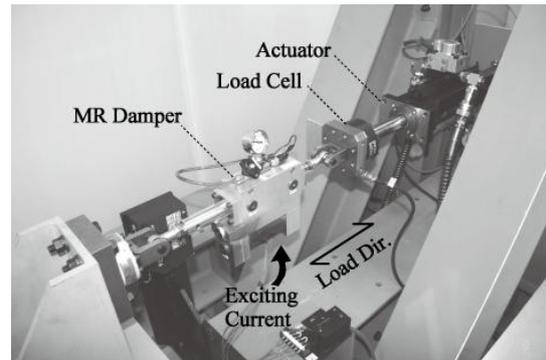


図 1 ダンパー単体試験

(2) セミアクティブ振動制御則の検討

地震時の可変デバイスの性能制御方法であるセミアクティブ制御則の基本的な検討を行った。本研究では地震時における建物エネルギー応答に着目して、これに比例させてダンパーに発揮させる減衰力（振動を抑制する力の大きさ）を決定する方法を提案した。ここでは、制御則の基本的な特徴を把握することを目的として、建物を簡易なモデル（線形 1 質点系モデル）として検討を行った。はじめに机上での検討として、振動抑制能の基本的な指標となる減衰定数などを幾何学的に算出し、次に地震応答解析により地震時応答における振動制御効果を検討し、最後に鉄骨造の一層フレームモデルの振動台実験により、1 質点系モデルでの地震応答制御効果について実験的に検証した。

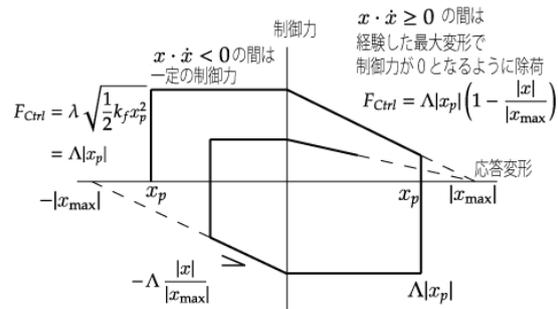


図 2 制御則の概要

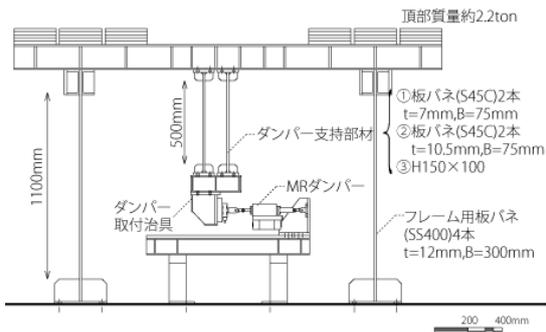


図3 鉄骨造1層フレーム試験体

(3) 鉄骨造3層試験体の振動制御実験

前述に行った検討について、さらに多層の建物における振動制御技術に発展させることを目的として、3層の鉄骨造建物を想定して鉄骨造の3層フレーム試験体を用いた振動台実験と地震応答解析による検討を行った。またこの実験では、制御システムの問題等の洗い出しも併せて行った。

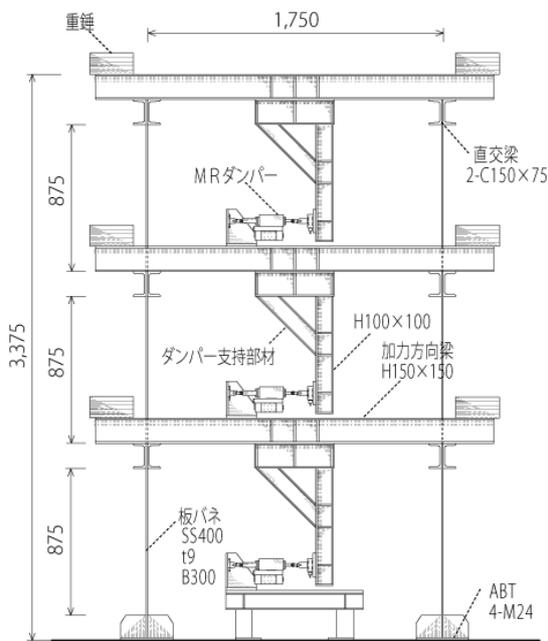


図4 鉄骨造3層フレーム試験体

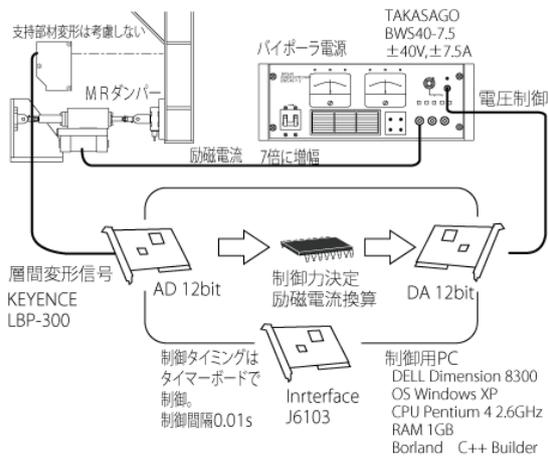


図5 制御システムのダイアグラム

(4) 中高層建物を対象とした検討

ここでは、さらに中高層の建物を対象として検討を行うために、11階建ての鉄筋コンクリート造および鉄骨造のオフィスビルを試設計し、これをテーマストラクチャとして、本セミアクティブ制御システムの地震応答制御について解析的な検討を行った。本研究で地震応答制御を行うためには、前述の検討の結果から制御を行うための制御係数を建物の構造的な特徴に合わせて最適な値に設定しておく必要がある。ここでは中高層建物が対象であった場合に、各階に設置される制御システムの制御係数を簡便に決定するための方法について検討を行った。また建物が非線形な場合における本制御システムの問題点等についても併せて検討を行った。

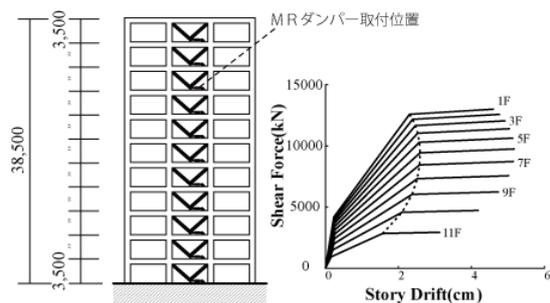


図6 RC造想定建物の概要

4. 研究成果

(1) セミアクティブダンパーの検討

本ダンパーの作動油である磁気粘性流体は、流体内に分散される強磁性粒子の沈降が問題とされており、これに対し、粒子濃度を下げ、粒子沈降による機能性劣化の起こしにくい磁性粒子混合流体の提案や、ダンパー励磁部内に粒子沈降抑止のための積層磁気デバイスを設置することの提案を示すことができた。さらに今回試作した2kN級バイパス式MRダンパーに対し動的載荷試験を行った結果、励磁によりダンパー力は最大で約7.5倍に増大することを確認し、その履歴形状は既往のMRダンパーと同じく摩擦力に粘性力を足し合わせたビンガム特性を示していることを確認した。またダンパー速度とダンパー力の関係においては、低速度域で非線形性が見られ、S形状の履歴を描くことが確認された。数値力学モデルとして採用されることの多いビンガムモデルは、粘性の非線形性を無視するため、最大ダンパー力を試験結果に合わせてモデル化すると、励磁電流が高い場合に摩擦要素力を過大評価する傾向が見られた。そこで、線形として扱われる粘性要素をバイリニア型粘性特性に置き換え、これに並列に接続される摩擦スライダーを作動油の圧縮剛性やギャップを模擬できる完全弾塑性型履歴特性を有するバネ要素に置換

した拡張ビンガムモデルの提案を行った。検討結果、この拡張ビンガムモデルにより、動的試験結果を十分な精度で表現可能であり、粘性要素の非線形性を概ね取り扱うことが可能であることが分かった。

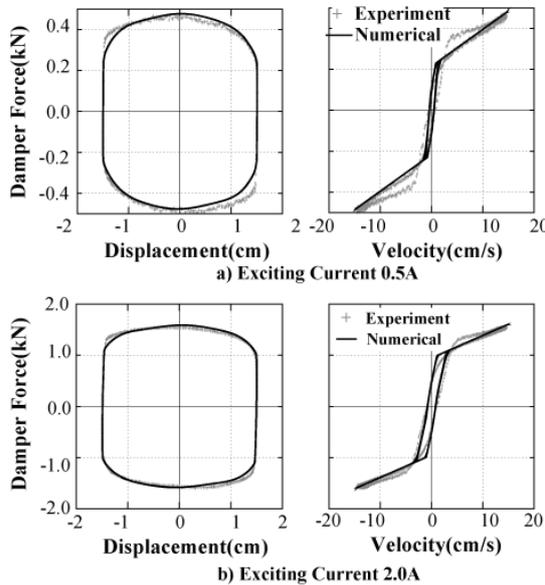


図7 ダンパー単体試験結果と数値モデル

(2) セミアクティブ振動制御則の検討

まず、本研究で提案するセミアクティブ制御則を「ReEF制御」と「EFH制御」と名付けた。ここでは「EF」とは「Energy Function」の略で建物エネルギー応答に着目した制御則であることを表す。既往の研究においてEF制御という名称の定義されていることを受け、本研究ではこれをさらに簡易に改良した「Revised EF制御」(「ReEF制御」)と、これにダンパーの履歴形状制御を付加した「Energy Functional Hysteresis制御」(「EFH制御」)を提案した。この2つの制御での定常応答性状についてCaugheyの等価線形化手法により、支持部材剛性比と損失剛性比を用いて等価粘性減衰定数を定式化を検討した。さらにMaxwell要素モデルで置換されるパッシブ粘性ダンパーとの比較を行った結果、損失剛性比と等価粘性減衰定数の関係において、支持部材剛性比が小さい場合においては等価粘性減衰定数を最大にする最適な損失剛性比が存在し、ReEF制御、パッシブ粘性ダンパーではそれ以上の損失剛性比では等価粘性減衰定数が減少するが、EFH制御においては比較的過大な損失剛性比に対しても等価粘性減衰定数が減少することがないことが分かった。

模擬地震動入力による地震応答解析により、ReEF制御、パッシブ粘性ダンパーにおいては、最大応答変形と最大応答加速度を最小にする制御係数が支持部材剛性比ごとに存在し、それ以上の制御力は最大応答値の増大

を招くことを確認した。このことについては既にパッシブ制震においては確認されていたが、今回提案するEFH制御においてはその影響が非常に小さいことが分かった。最後に鉄骨造1層フレーム試験体の振動台を用いたセミアクティブ地震応答制御実験を行った結果、EFH制御が、支持部材剛性の小さい場合に制御力増大による最大応答値の増加を抑えた制御であること、他制御に比べて最大応答加速度低減に効果があること等の数値解析的検討で得られた知見を実験により実証することができた。

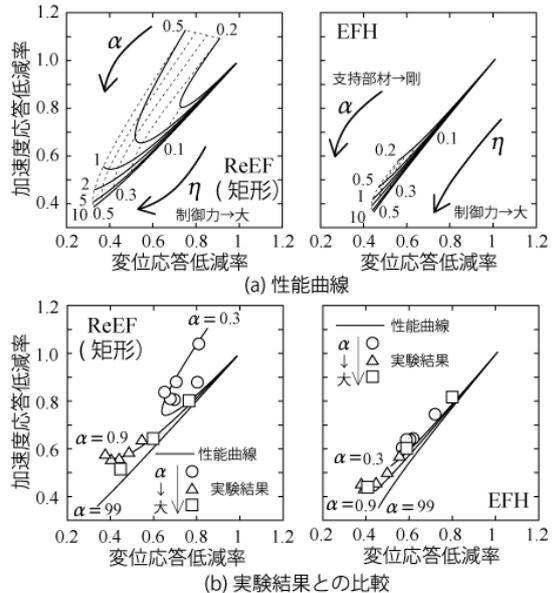


図8 性能曲線と実験結果の比較

(3) 鉄骨造3層試験体の振動制御実験

まずReEF制御とEFH制御を実現するため、市販のコンピュータによる簡易な各層独立の制御システムを試作した。振動制御実験の結果、比較的簡便な制御システムを用いて概ね意図通りの応答制御が可能であることを確認した。またEFH制御は、応答加速度の増大抑制のため履歴形状制御によりダンパー力一層間変形関係の第1、第3象限において制御力の除荷を行っており、制御力の除荷を行わないReEF制御に比べて履歴吸収能が小さい制御則であるが、今回の実験結果から概ねReEF制御と同等の応答制御が可能であることを実証した。ReEF制御とEFH制御との比較では、その差は小さい結果であるものの、同じ制御変数とした場合では、ReEF制御は層間変形抑制に、EFH制御については最大応答加速度抑制に効果があること、さらにReEF制御については、履歴エネルギー吸収がEFH制御に比べて、より各層均一に行われていることが確認され、最大層間変形時の半サイクル間の履歴ループから算出した等価粘性減衰定数も特に上層においてEFH制御よりも高い値となる結果を得ることができた。また今

回試作した制御システムの制御遅れ時間は0.05sと評価され、これは励磁から磁場形成を経てダンパー抵抗力の発生に至るダンパーの反応時間による影響が大きく、この遅れ時間0.05sは制御発生のタイミングに依らないことを示した。さらに数値解析結果と合わせた検討の結果、本システムで評価された0.05sの制御遅れ時間は履歴形状への影響も小さく、また最大応答値への影響も小さいことから、解析的な検討に当たっては十分無視できることを示した。MRダンパーによるセミアクティブ制御の数値解析手法として、ダンパー支持部材バネを直列結合したビンガムモデルについてその数値解析方法を示し、実験結果のシミュレーションを行った結果、ケルビン体を線形バネに直列結合した今回の数値解析モデルは、加速度応答において瞬時的にパルス状の応答を示すことが確認されたが、履歴形状や層間変形への影響は小さく、総じて実験結果を良好に再現できており、先に検討した数値解析モデルが妥当であることを確認することができた。

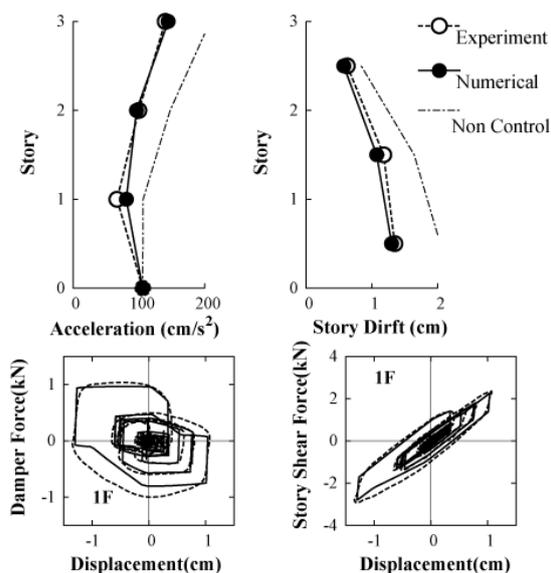


図9 3層実験結果と解析結果

(4) 中高層建物を対象とした検討

まず鉄筋コンクリート造建物対象とした場合の検討として、トリリニア復元力特性を有するせん断11質点系モデルを対象に地震応答解析を行い、支持部材剛性の影響、層方向の最大応答値分布について検討を行った。提案するセミアクティブ制御はいずれも層間変形とダンパー力の関係における象限情報により制御力の発生のタイミングを決定しているが、系が多層で応答波形に高次モード成分が含まれる場合、象限判定による制御力の更新が頻繁に行われるようになり、必ずしも適切な象限判定とはいえなくなることを確認された。これに対し、象限判定のため

の層間速度信号に、位相遅れ要素と位相進み要素からなる低振動数成分増幅フィルタ処理を行う改良を行い、これにより適切な象限判定を行うことができるようになった。また支持部材剛性の最大応答値への影響は、系が大きく塑性化する場合においては、塑性化ともなう主架構の剛性低下により、見かけ上の支持部材剛性比の増加が見込めるため、系を線形と仮定する場合に比べて小さくなることを確認された。ただし、入力レベルが小さく、最大応答値が小さく塑性化が進まない場合は、見かけ上の支持部材剛性比の増加は小さくなるが、この場合においてもEFH制御は他制御に比べて支持部材剛性による最大応答値への影響が小さいというEFH制御の特徴を得ることができた。最大応答値の層方向の分布性状については、ReEF制御、EFH制御ともに粘性ダンパーに比べてより最大層間変形を均一に近づけることができた。さらにReEF制御については、パッシブ制御よりも最大ダンパー力を小さく抑え、目標とする最大層間変形に制御することが可能であると分かった。

また制御係数の簡便な設計方法としては、まず1質点系に対しては、制御システムの性能曲線を用いることで、最適な制御係数を設計することが可能であることを実験的・解析的に確認している。そこで、1質点系で得られた制御量を多質点系に拡張するため、一般にパッシブ振動制御で用いられる考え方を本セミアクティブ制御則に適用することを試みた。ひとつは主架構の層剛性に比例して各質点の制御係数を設定する方法、もうひとつは建物に作用すると想定される層せん断力に比例させる方法である。鉄骨造10層の建物を想定して解析的な検討を行った結果、どちらの手法も各層の応答が設計クライテリアを満足し、かつ過度な制御量とならないような合理的な制御係数の設定ができた。さらにこの2つ方法を発展させ、各層のエネルギー応答量に比例された設計方法についても検討を行ったが、こちらも同様の結果であった。これら3つ設計方法にあまり差が見られなかったのは、今回想定した建物が比較的層剛性が均一であるためと考えられ、例えば特定の層が変形しやすいといった不均等な剛性分布をもつ場合の検討等が今後の課題である。

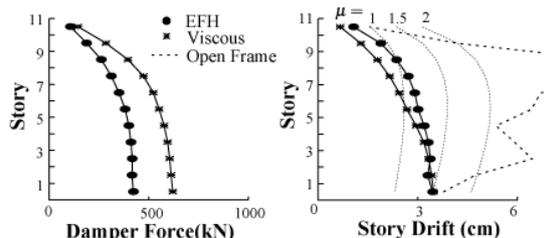


図10 RC造解析結果の一例

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14件)

- ① 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫: 磁気粘性流体ダンパーを用いた層間変形情報に基づくセミアクティブ制御に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 617-622, 2008 (査読あり)
- ② 荒井達朗, 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫: ”セミアクティブ制御を行うダンパーの支持部材剛性が制振構造物の応答に与える影響の検討 その1 一層試験体の加振実験”, 日本建築学会大会(中国) 学術講演梗概集, B-2, pp.485-486, 2008
- ③ 菅野秀人, 荒井達朗, 堀則男, 井上範夫: ”セミアクティブ制御を行うダンパーの支持部材剛性が制振構造物の応答に与える影響の検討 その2 等価線形化法による最大応答予測の検討”, 日本建築学会大会(中国) 学術講演梗概集, B-2, pp.487-488, 2008
- ④ 荒井達朗, 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫: ”セミアクティブ制御を行うダンパーの支持部材剛性が制振構造物の応答に与える影響の実験的検討”, 日本建築学会東北支部研究報告集, No. 71, pp.211-214, 2008
- ⑤ Kunio Shimada, Hideto Kanno: Possibility of utilizing MCF in Viscous Damper of Passive Type, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 25, No. 1-4, pp. 119-125, 2007 (査読あり)
- ⑥ Hideto Kanno, Kunio Shimada, Junji Ogawa and Norio Inoue: MR Fluid Damper Composed of Different Size of Particles, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 25. No. 1-4, pp. 109-112, 2007 (査読あり)
- ⑦ 富橋直哉, 中井川敦, 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫: 多層建物の各層間に設置したMRダンパーによるセミアクティブ制振: その3) 鉄筋コンクリート造建物への適用, 日本建築学会大会(九州) 学術講演梗概集, B-2, pp. 693-694, 2007
- ⑧ 中井川敦, 富橋直哉, 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫: 多層建物の各層間に設置したMRダンパーによるセミアクティブ制振: その2) 3層試験体の振動実験結果, 日本建築学会大会(九州) 学術講演梗概集, B-2, pp. 691-692, 2007
- ⑨ 菅野秀人, 中井川敦, 富橋直哉, 堀則男, 井上範夫: 多層建物の各層間に設置したMRダンパーによるセミアクティブ制振: その1) MRダンパーの基本特性と

3層試験体の振動実験方法, 日本建築学会大会(九州) 学術講演梗概集, B-2, pp. 689-690, 2007

- ⑩ 菅野秀人, 井上範夫, 小川淳二: ダンパー支持部材剛性がセミアクティブ制御に及ぼす影響に関する基礎的検討, 日本建築学会東北支部研究報告集. No. 70, pp. 71-74, 2007
- ⑪ Hideto Kanno, Kunio Shimada and Junji Ogawa: Study on a MR Damper utilizing Magnetorheological Fluid Composed of Different Size of Particles, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 55, pp. 91-96, 2006
- ⑫ 富橋直哉, 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫, 小川淳二: セミアクティブ制御を行うMRダンパーを設置した制振構造物の振動実験, 日本建築学会東北支部研究報告集. No. 69, pp. 135-136, 2006
- ⑬ 菅野秀人, 堀則男, 井上範夫, 小川淳二: MRダンパーによる一層フレーム試験体のセミアクティブ制御則に関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告集. No. 69, pp. 115-118, 2006
- ⑭ 菅野秀人, 富橋直哉, 堀則男, 井上範夫, 小川淳二: MRダンパーを用いた鋼製1層フレーム試験体のセミアクティブ振動制御: その2) エネルギー応答に基づくセミアクティブ制御, 日本建築学会大会(関東) 学術講演梗概集, B-2, pp. 687-688, 2006

[学会発表] (計1件)

- ① Hideto Kanno, Norio Hori, Norio Inoue: ”Semiactive Control of Seismic Response Based on Story Displacement using Magnetorheological Fluid Damper”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008年10月13日, 中国・北京

[その他]

本研究で得られた成果の一部については, 所属研究機関である公立大学法人秋田県立大学のウェブページ上で公開した。

<http://www.akita-pu.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 秀人 (Kanno Hideto)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号: 20336449