

2層化されたセミアクティブ免震システムの基礎実験



渡壁 守正*

稲井 慎介*

概 要

本報告は、従来1層で構成されていた免震層を2層に分け、複数の磁気粘性流体 (MR : Magneto-Rheological Fluid) ダンパを配置することで、より効果的な応答低減を目指した2層化セミアクティブ免震システムを提案する。免震システムのセミアクティブ制御は、幅広い周波数帯域で応答を制御できる H_{∞} 理論を採用したゲインスケジュールド (GS : Gain-Scheduled) 制御手法を用いる。まず免震層の各層間に配置されたふたつの可変ダンパをひとつの制御器で制御する集中制御系の設計を示す。次に、シミュレーション解析および小型の多自由度系試験体を用いた振動台実験により、2層化セミアクティブ免震システムの制御性能について検討を行った。免震層をふたつに分け、ストローク量が小さく発生減衰力の小さいMR ダンパを2箇所分散させた2層化免震システムを導入することで、ひとつの免震層にMR ダンパを集中させ、大きな減衰力を発生させる従来の1層免震システムと比べ、より効率的かつ効果的な応答低減が可能となることを示し、本提案手法の有効性を確認した。

Two-Layer Seismic Isolation System with Magneto-Rheological Fluid Dampers for a Multi-Degree-of-Freedom Structure

Morimasa WATAKABE*¹
Shinsuke INAI*¹

This paper deals with a new semi-active seismic isolation system which is composed of two layers with a Magneto-Rheological fluid (MR) damper on each layer. We design a Gain-Scheduled (GS) controller based on H_{∞} control theory, as applied in the semi-active seismic isolation system installed a multi-degree-of-freedom structure. By using the new seismic isolation system and dividing the roles into two layers, it is expected that the total damping force of the traditional seismic isolation system is reduced and performance of isolation is held or improved. It has been demonstrated by simulation analysis and experiments that seismic responses installed the new isolation system are compared with those of the one-layer isolation system. It is verified that the new system is superior to the traditional one and the gain-scheduled controller designed is effective for seismic isolation.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

2層化されたセミアクティブ免震システムの基礎実験

渡壁 守正*

稲井 慎介*

1. はじめに

阪神淡路大震災以降、建築物への地震入力を低減させる目的で免震構造とする事例が普及している。しかし、免震構造とした場合であっても、想定外のレベル・周期帯を持つ地震外力が作用する場合には、その性能を十分発揮できず、過大な加速度・変位などが生ずることも考えられる。現在までに、免震構造の耐震性向上のため、減衰力を可変とする種々の装置が開発され、セミアクティブ免震・制震構造システムの技術開発も報告されている。中でも、微細な金属粉を混入することで磁場の作用下における流体の粘度の調整を可能とした磁気粘性流体 (Magneto-Rheological fluid : MR) を使って開発された MR ダンパ^{1,2)}を組み込んだセミアクティブ免震構造システムについて、実用化への検討も進められている。筆者らも、(独)建築研究所、千葉大学および民間7社(戸田建設株、株熊谷組、佐藤工業株、西松建設株、株間組、株フジタ、前田建設工業株)の共同研究体制のもと、免震構造の性能向上を目指し、MR ダンパを使用したセミアクティブ免震システムにゲインスケジュールド(GS)制御手法を適用し、その制御性能について報告してきた^{3,4)}。本報は、共同研究開発成果の内容の一部として、GS制御手法を用いた2層化セミアクティブ免震システムの内容について紹介する。2層化免震システムは、従来1層で構成されていた免震層(1層化免震と呼ぶ)を2層に分け、複数のダンパを配置することで、よ

り効果的な応答低減を目指した免震システムある。ここでは、免震層を2層化した新たな免震システムを提案し、GS制御手法を用いて免震層の各層間に配置されたふたつの変ダンパをひとつの制御器で制御する集中制御系の設計を行った。さらに、小型の多自由度系試験体を用いた振動台実験およびシミュレーション解析より、その制御性能の有効性を確認した。

2. 2層化免震システムの概要と制御系設計

2.1 試験体および解析モデル

2層化免震層を6層試験体の下部に設置した状況および解析モデルを図-1、図-2に示す。上部構造は、柱を板ばね、各階床版をSS400の鋼材で構成している。2層化免震システム外観および2層化免震層の内部を図-3に示す。2層化された免震層は、MRダンパ(RD1005-05M LORD社製2kN)、コイルばね、リニアベアリング、質量から構成されている。従来の免震層を2層化し、その各層間にもセミアクティブダンパを配置することで、より効果的な応答低減を図るものである。最下部の板は基礎部、最上部の板は上部構造の1階部分であり、その下部が従来の免震システムの免震層に相当する。解析モデルの各パラメータを表-1に示す。従来免震システムと2層化免震システムの解析モデルを図-4に示す。図-4(b)に示すように、2層化した免震層を構成することで、下部のダンパで基礎部から建物への振動を緩和し、上部のダンパで層間変位を抑制すること



図-1 試験体外観

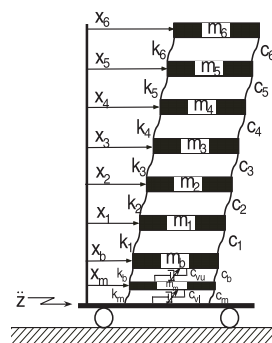
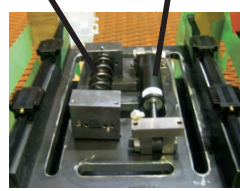


図-2 解析モデル



(a) 2層化免震外観

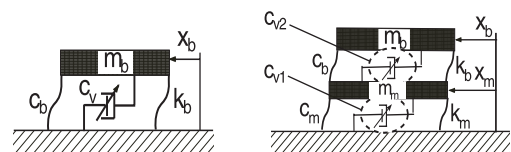


(b) 2層化免震内部構造

図-3 2層化免震装置の概要

表-1 解析モデルの各種パラメータ

Mass (kg)	Stiffness (N/m)	Damping (Ns/m)
m_6 46.54	k_6 148750	c_6 1.0
m_5 50.46	k_5 140000	c_5 1.0
m_4 50.46	k_4 140000	c_4 1.0
m_3 50.46	k_3 113750	c_3 1.0
m_2 50.00	k_2 122500	c_2 1.0
m_1 50.32	k_1 140000	c_1 1.0
m_b 36.93	k_b 18375	c_b 125.0
m_m 33.44	k_m 18375	c_m 125.0



(a) 1層化免震モデル

(b) 2層化免震モデル

図-4 免震層のモデル化

* 戸田建設(株) 技術研究所

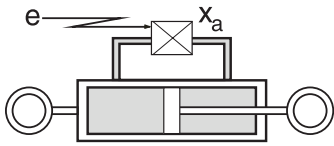


図-5 セミアクティブダンパモデル

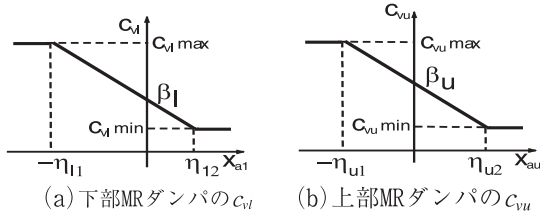


図-6 MR ダンパ減衰係数の変動範囲

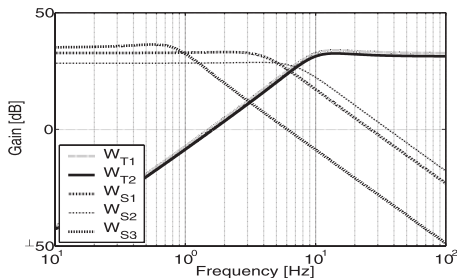


図-7 周波数重み関数

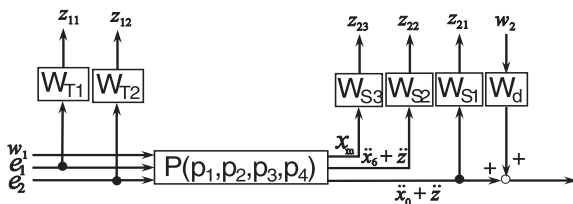


図-8 一般化プラント

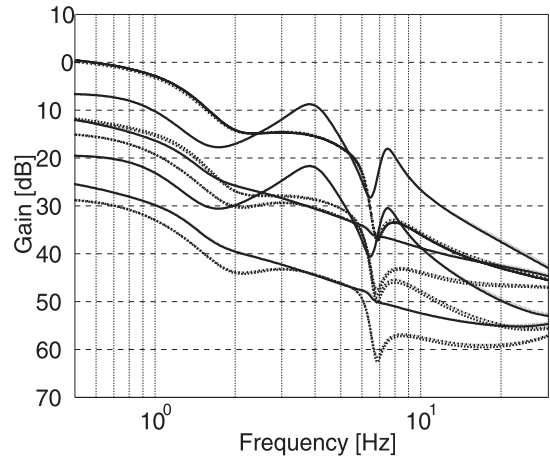
が可能となる。制御対象は、6自由度の上部構造と2自由度の2層化免震層からなる8自由度系のモデルを想定している。模型高さは約2m、総重量は約300kgである。振動台と構造物基礎部の間には質点 m_m 、 m_b とふたつのMRダンパ、コイルばね、リニアベアリングにより構成される2層化免震層が設けてある。非免震時の固有振動数は一次2.0Hz、二次6.0Hz、三次9.8Hz、四次13.1Hzである。2層化免震層を設置することで固有振動数は一次0.77Hz、二次3.7Hz、三次5.1Hz、四次7.5Hzとなる。

2.2 セミアクティブモデルと制御系設計

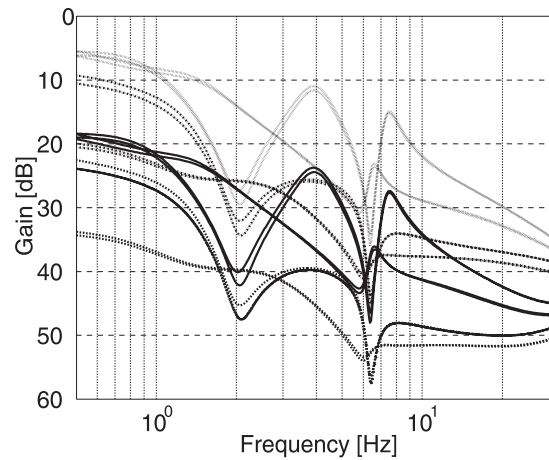
GS制御系設計の際には、図-5に示すセミアクティブダンパモデルを想定する。このダンパは入力電圧 e^* ($e^*=l$ or u) によりオリフィス部のバルブ開度 x_{a^*} を変化させ、以下の式で示すように $\eta_{l1} \sim \eta_{l2}$ 、 $\eta_{u1} \sim \eta_{u2}$ の範囲内でバルブ開度 x_{a^*} に比例した減衰係数 c_{v^*} を発生するものとする。模式図を図-7に示す。

$$\begin{aligned} c_{vl} &= -\alpha x_{al} + \beta_l & (\eta_{l1} < x_{al} < \eta_{l2}) \\ c_{vu} &= -\alpha x_{au} + \beta_u & (\eta_{u1} < x_{au} < \eta_{u2}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $\eta_{l1}=0.065$ 、 $\eta_{l2}=0.035$ 、 $\eta_{u1}=0.05$ 、 $\eta_{u2}=0.05$ 、 $\alpha=26600$ 、 $\beta_l=1000$ 、 $\beta_u=1400$ とし、 c_{vu} は $70 \sim 2340$ Ns/m の範囲で変動させるものとする。バルブ開度 x_{al} の変動



(a) 下部の制御器 (e_l)



(b) 上部の制御器 (e_u)

図-9 制御器の周波数応答

幅に非対称性を持たせることで β_l を小さくすることができ、免震性能の向上が期待できる³⁾。

運動方程式は各層の変位を並べたベクトルを用いて次のようにあらわすことができる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = ME\ddot{z} + Fu \quad (2)$$

ここに、 M 、 C 、 K は質量行列、減衰行列、剛性行列をそれぞれ示す。制御入力 $u=[u_l \ u_u]^T$ は、2層化免震層下部および上部に配置された各セミアクティブダンパの発生減衰力であり、各ダンパの可変減衰係数とストローク速度を用いると次のようにあらわされる。

$$u_l = c_{vl} \dot{x}_m \quad (3)$$

$$u_u = c_{vu} (\dot{x}_b - \dot{x}_m)$$

ここでは、ふたつの可変ダンパそれぞれにセミアクティブダンパモデルを想定し、制御対象の運動方程式にバルブ開度の制約による支配方程式を含めた拡大系を構成する。 p_{11} 、 p_{12} を変動パラメータとして、各ダンパのストローク速度 p_{21} 、 p_{22} をバルブ開度の制約によるパラメータとして、系をよつつのスケジューリングパラメータが変動する線形パラメータ依存 (LPV) モデルへと変換し、GS制御を適用する。周波数重み関数を図-7に示す。周波数重み関数 W_T によって高周波数領域での制御入力の影響を低減し、周波数重み関数 W_S によって外乱に対する応答を低感度化する。一般化プラントを図-8のように構成し、決定した周波数重み関数を用い

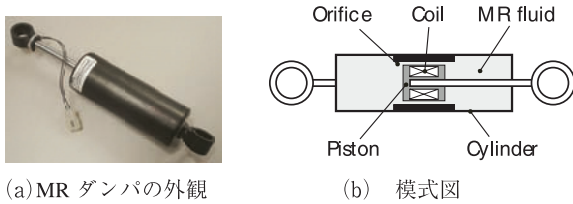


図-10 実験に用いたMRダンパ

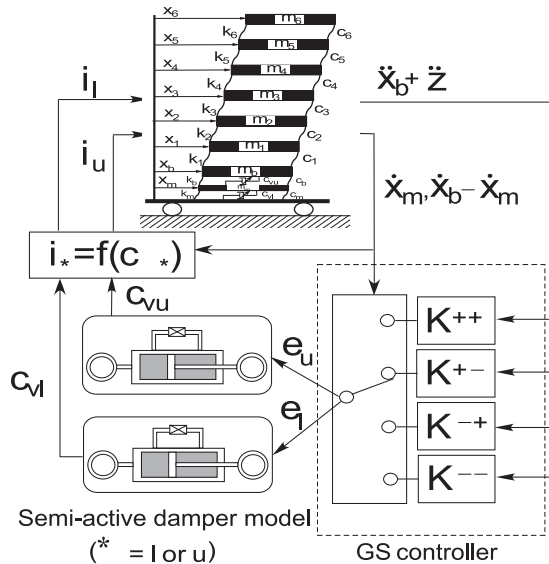


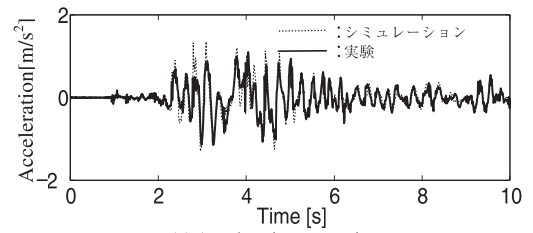
図-11 制御実験フロー

て制御器を設計する。システムの動作点はよっつのスケジューリングパラメータ (p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22}) の最大値と最小値の組み合わせで囲まれる範囲で変動する。2層化免震層に組み込んだ上部、下部に対する端点制御器の周波数応答を図-9に示す⁵⁾。

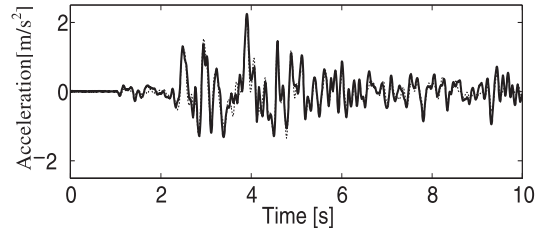
3. 実験とシミュレーション解析結果

2層化免震システムのセミアクティブ制御用に設計したGS制御器の性能を検証し、シミュレーションと加振実験により2層化免震システムの有効性を検証する。

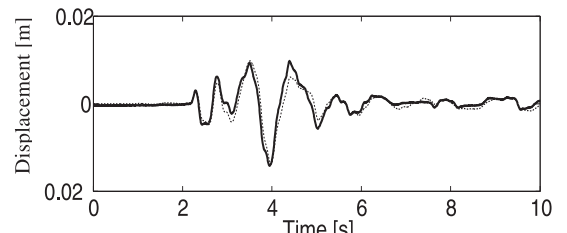
実験で用いた2kN小型MRダンパの外観および模式図を図-10に、制御実験フローを図-11にそれぞれ示す。制御の流れは、まず質点 m_b の絶対加速度をフィードバック信号とし、設計したGS制御器に入力する。その際、制御器はふたつのダンパそれぞれのストローク速度の正負によって異なるため、相対速度データを取り込み制御器の切り換え判定をする。次に、算出された制御入力 e_l , e_u をそれぞれ仮想セミアクティブダンパに入力し、バルブ開度 x_{v*} ($*=l$ or u) から減衰係数 c_{v*} を求める。必要な減衰力は c_{v*} とダンパのストローク速度により求まるので、この減衰力を発生させるために必要な入力電流により逆算し、直流電源を介して各MRダンパへ印加する。直流電源は松定プレジジョン製PL-36-3を1台用いる。解析モデルおよびGS制御器の妥当性を検討するために、JMA Kobe NS地震波を外乱とした場合の実験とシミュレーション解析結果を図-12に示す。図は免震層加速度、最上層加速度、基礎部-中間層間の相対変位、中間層-免震層間の相対変位を示している。発



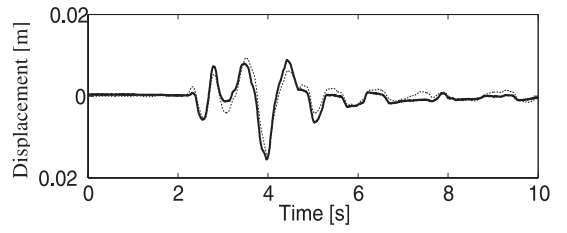
(a) Acceleration $x_b + z$



(b) Acceleration $x_6 + z$



(c) Relative Displacement x_m



(d) Relative Displacement $x_b - x_m$

図-12 実験とシミュレーション解析結果の比較

生ずる減衰係数 c_{v*} , c_{vm} , 入力電流 i_l , i_u の時刻歴応答を図-13に示す。いずれも実線が実験結果、破線がシミュレーション結果である。実験とシミュレーション解析結果はよく対応していることが確認できる。

2層化免震システムの性能検証のため、特性の異なる地震波について検討を行った。一例として、JMA Kobe NS地震波を入力とした1層免震モデル、2層化免震モデルのシミュレーション解析結果を比較して図-14に示す。同図(a), (b)より、2層化免震システムでは1層免震に比べ、質量 m_b , m_6 の応答最大加速度値で約25%程度を抑制していることが確認できる。免震層部の応答変位とMRダンパ減衰力を図-15にそれぞれ示す。2層化免震システムの基礎部変位 x_b は1層免震システムに比べ、応答最大変位値が約20%程度大きくなっている。しかし、(b), (c)の2層化免震システムにおける各ダンパのストローク量(相対変位)は、(a)の1層免震システムの場合の約半分程度と小さい。これにともない(d), (e)に示した各ダンパの減衰力は、1層免震時より小さくでき、免震層を2層化することで各ダンパひとつひとつにかかる負荷も小さくすることができる。多層化免震層システムを導入することで、従来のように1層にダンパを集中させた免震システムよりもダン

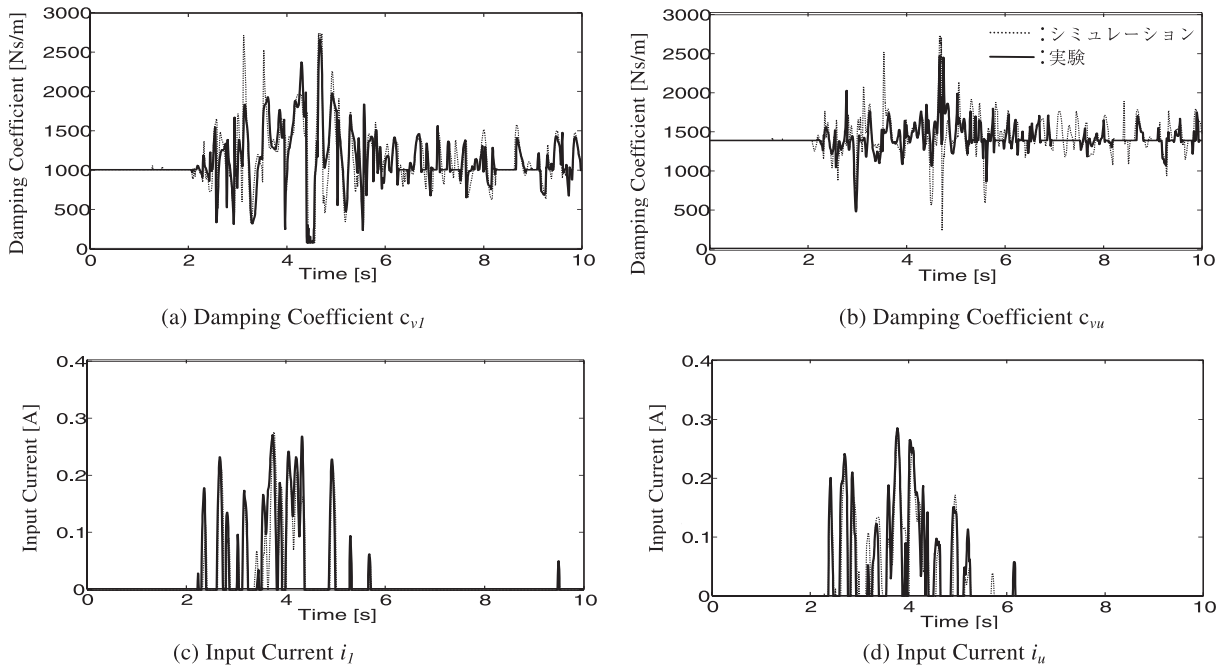


図-13 減衰係数と入力電流の比較

パのストローク量、発生減衰力ともに小さく抑えることが可能となる。シミュレーション解析結果を表-2、表-3に示す。表には各地震波に対する免震層 m_b 、最上層 m_6 の応答加速度の R.M.S. 値を示す。いずれも2層化免震層に減衰係数が最小値 70Ns/m のパッシブダンパを設置した場合の応答加速度値を 100% とした比率であらわしている。神戸地震波、タフト地震波を入力した場合の各層応答加速度の R.M.S. 値を比較して図-16に示す。最上層加速度の R.M.S. 値は各層でばらつきはあるが、従来の免震システムに比べ約 10% ~ 20% 低減していることが確認できる。ひとつの免震層にダンパを集中させ、大きな減衰力を発生させる従来型免震システムよりも、免震層をふたつに分散させ、ストローク量が小さく発生減衰力の小さいダンパを2カ所に分散させた2層化免震システムを導入することで、より効果的かつ効果的な応答低減が可能となることを示しており、本提案手法の有効性が確認できる。

4. まとめ

免震層を2層化した新たな免震システムを提案し、GS制御を用いて免震層の各層間に配置されたふたつの可変ダンパをひとつの制御器で制御する集中制御系の設計を行い、その制御性能を確認した。2層化免震システムを導入することで、従来の免震システムと比べ、より効果的かつ効果的な応答低減が可能となることを、実験とシミュレーション解析により示した。今後、実構造物に近い大規模システムに対する有効性の検証や、2層化免震層を上層に配置した中間層2層化システムなどの検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、(社)建築研究振興協会に設置された「新システムによる免・制震化技術の開発(原子力施設を含

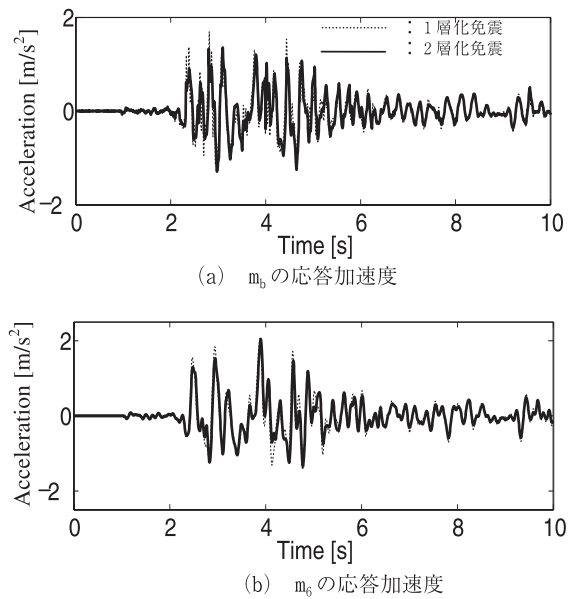


図-14 応答加速度記録の比較 (JMA 神戸 NS)

表-2 1F 応答加速度 R.M.S. 値の比率 (%)

	JMA Kobe	Hachinohe	El Centro	Taft
Proposal	76.7	19.9	82.5	60.7
Traditional	79.5	17.3	82.7	63.2
Soft damper(m/s/s)	100(1.0)	100(1.5)	100(0.7)	100(0.8)

表-3 6F 応答加速度 R.M.S. 値の比率 (%)

	JMA Kobe	Hachinohe	El Centro	Taft
Proposal	87.3	20.5	95.3	67.4
Traditional	93.5	18.5	98.6	71.7
Soft damper(m/s/s)	100(0.8)	100(1.8)	100(1.1)	100(0.9)

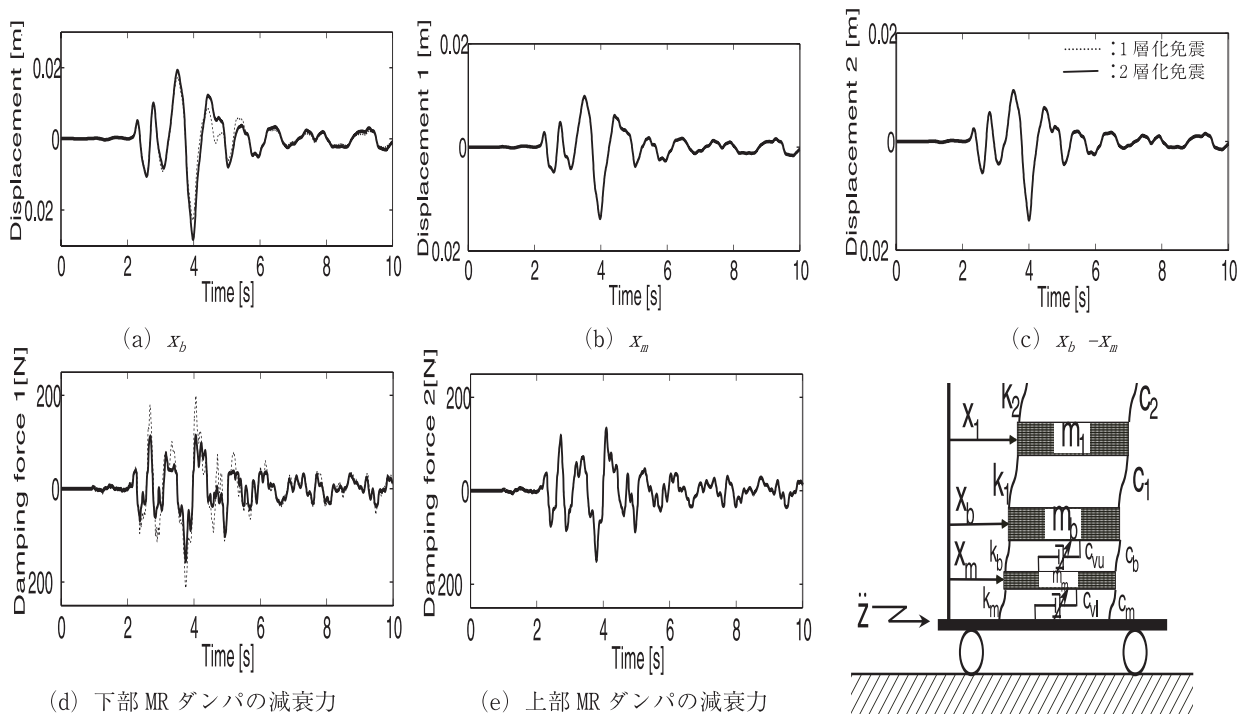


図-15 免震部応答変位とMRダンパ減衰力の比較

む) 委員会」により、独立行政法人建築研究所、千葉大学および民間7社(戸田建設㈱、㈱熊谷組、佐藤工業㈱、西松建設㈱、㈱間組、㈱フジタ、前田建設工業㈱)の共同研究として実施された。関係各位に謝意を表す。また、本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

【参考文献】

- 1) 建築研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所、日本建築センター：「高知能建築構造システムの開発」平成14年度報告書、IV、V、平成15年3月
- 2) 袖山・砂子田ほか：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究(その14) 2kN級20kN級MRダンパの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、No.21459、pp.917-918、2000
- 3) 西村秀和、井上波彦、渡壁守正、龍神弘明、藤波健剛、仲宗根淳、安田征一郎、高井茂光、木本幸一郎、中村佳也：MRダンパを用いたセミアクティブ免震建物に関する研究(その1-5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol. B、pp.919-926、2003
- 4) H. Nishimura, Y. Miyahara, N. Iwata, N. Inoue, M. Watakabe, J. Nakasone, Y. Nakamura, H. Ryujin, M. Kanagawa and C. Minowa: Experimental Verification of Semi-Active Seismic Isolation for four-degree-of-freedom structures using mr damper, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Kobe, Japan, June 13-16, 2005
- 5) Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A.J., Chilali, M.: LMI Control Toolbox, For Use with MATLAB, The MATH WORKS INC, 1995

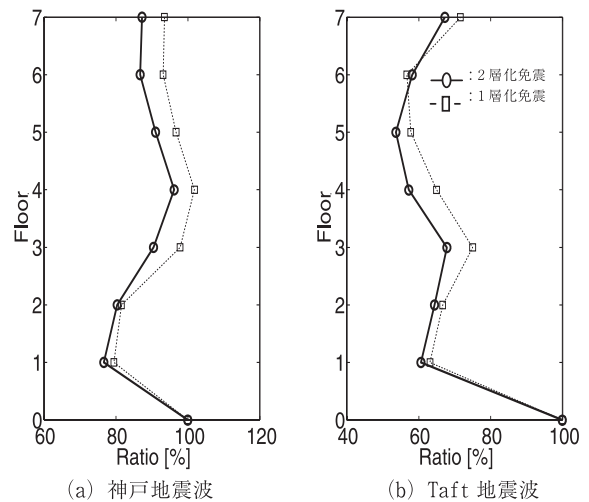


図-16 2層化免震システムと1層化免震システムの比較(応答最大加速度値のR.M.S.値)