

1. はじめに

免震建物の設計を考える時、床応答加速度は建物内の人間の行動や什器の移動に影響を与え、免震層の水平変位は建物の安全性能を決定する。応答変位を低減させるためにダンパー量を増大させると、上部構造の加速度が増大して免震構造の特性を犠牲にすることがある。このように、上部構造の床応答加速度を上昇させないためには、減衰性能が可変であるセミアクティブ制御が有効と考えられる。セミアクティブ制御には、大きく分けて可変剛性と可変減衰があるが、ここでは可変減衰のセミアクティブ制御に関する筆者の研究を紹介したい。

セミアクティブ制御の効果を検証する場合、解析あるいは振動台実験を行うが、解析では可変ダンパーのモデル化に伴う不確実性により、場合によってはその結果が危険側の評価になる可能性がある。また振動台実験では実験規模に応じてコストが増大する。本文では、3章で振動台実験によるセミアクティブ免震の検証事例を紹介し、4章と5章でリアルタイム・ハイブリッド実験による検証事例を紹介する。リアルタイム・ハイブリッド実験は、速度依存性を考慮する必要のある構造性能の検証方法として有効で、モデル化可能な構造部分はコンピューターで解析し、不確定要素が比較的多く含まれるセミアクティブ制御装置を試験体としリアルタイムで加振して制御効果を検証する方法である。

本文は、文献1)2)の要旨を簡潔にまとめたものである。詳細は、これらをご覧いただきたい。なお、本来ならここで引用すべき文献も省略しているので、それらについても文献1)2)を参照していただきたい。

2. 可変ダンパー

可変ダンパーとして磁気粘性流体ダンパー (Magnetorheological damper : 以下「MRダンパー」という) を使用する。MRダンパーは磁場の作用によって見かけの粘度が変化する磁気粘性流体 (MR流体) を用いたダンパーである。図1, 2にMR流体の性質を示

す。MR流体はベースオイルの中に磁性体粒子が混入されたもので、この磁性体粒子は磁場を受けると鎖状につながり、せん断変形を受けた場合や、圧力流れを生じた場合に抵抗力を発生させる (図1)。抵抗力の大きさは与える磁場の大きさにより異なり、ある範囲まではより強い磁場を発生させるほど見かけの粘度は上昇する (図2)。振動台実験に用いたMRダンパーの構造を図4に示す。バイパス部を流れるMR流体が電磁石によって磁場を受ける構造である。MRダンパーを図3に示すビンガムプラスチックモデルにモデル化し、その出力 F_{MR} を式(1)で表す。1項目が電流の印加による降伏応力に伴う出力であり、2項目が粘性減衰による出力である。実験とモデルによるMRダンパーの荷重変形関係を図5に示す。MRダンパーの出力は速度にあまり依存せず、印加電流によって支配的に決まることがわかる。またビンガムプ

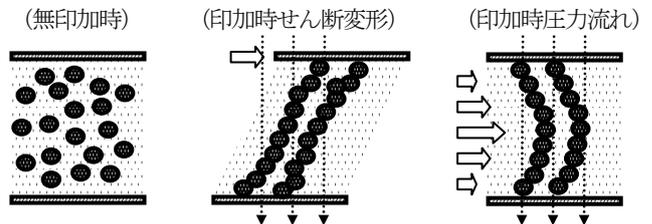


図1 MR流体の抵抗メカニズム

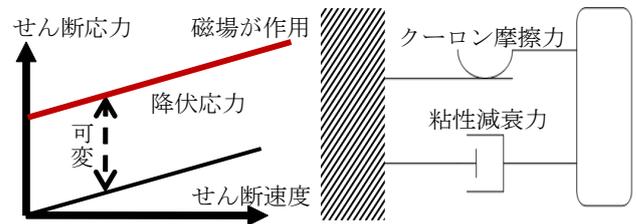


図2 MR流体の特性

図3 ビンガムプラスチックモデル

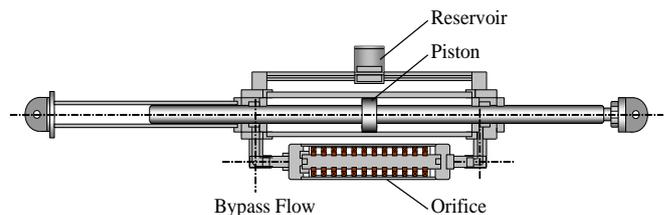


図4 MRダンパーの構造

ラスチックモデルによって、概ね適切にモデル化されていることがわかる。また図6にピストン速度と最大荷重の関係を示すが、速度依存性が低く、出力が印加電流値によって支配的に決定されることがわかる。

$$F_{MR} = \text{sign}(v) \left(-0.198 \times I^2 + 2.684 \times I + 0.553 \right) + 0.015 \times v$$

v : ピストン速度(cm/s) I : 電流値(A) (1)

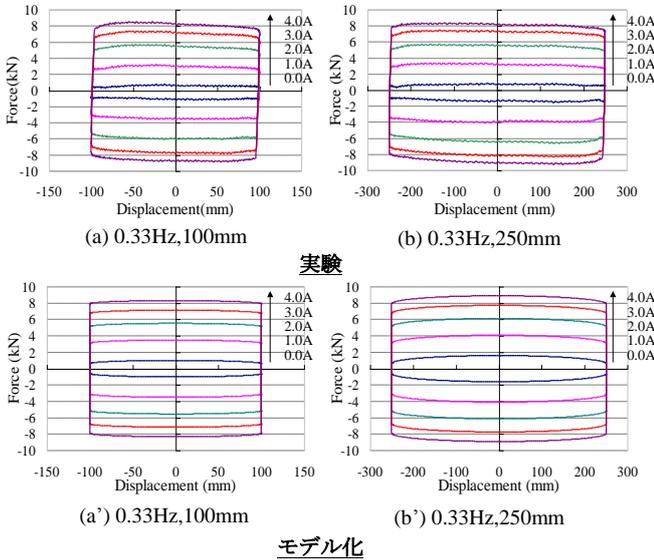


図5 MRダンパーの荷重変形関係 (実験とモデルの比較)

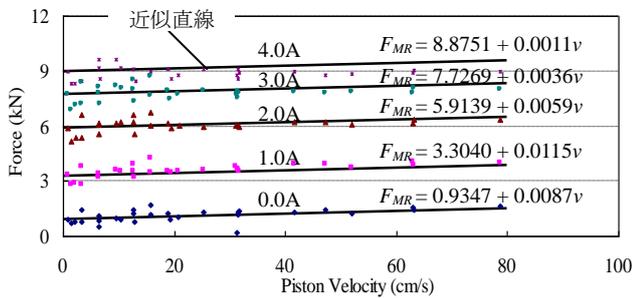


図6 MRダンパーのピストン速度と荷重の関係

3. 振動台実験によるセミアクティブ免震の検証

図7に振動台上に設置された2自由度の免震試験体の概観と、各種センサーからの信号を得てMRダンパーに電流を印加するまでの制御の流れを示す。試験体は上部構造を支持する4つの転がり支承で支持され、復元力を得るための積層ゴム2体、および上部構造に見立てた2層のおもりから構成されており、1層目のおもりにはMRダンパーが設置されている。構造物の状態量を観測するためのセンサーは、MRダンパーのピストン-シリンダー間と1層目と2層目の層間に変位計を設置し、各おもりと振動台に加速度計を設置した。またMRダンパーにはロードセルを設置しダンパー出力を計測した。得られたデータを元に制御用PCに構造物の状態量をフィードバックして制御演算を行い、指令電流値を決定して直流安定化電源からMRダンパーに電流を供給する。

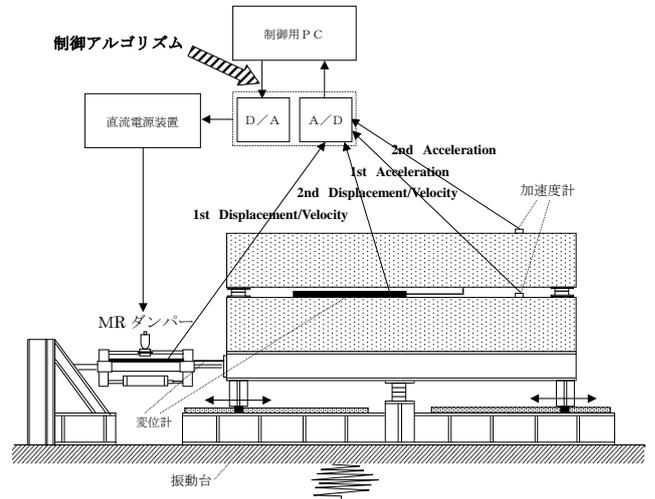


図7 振動台実験試験体

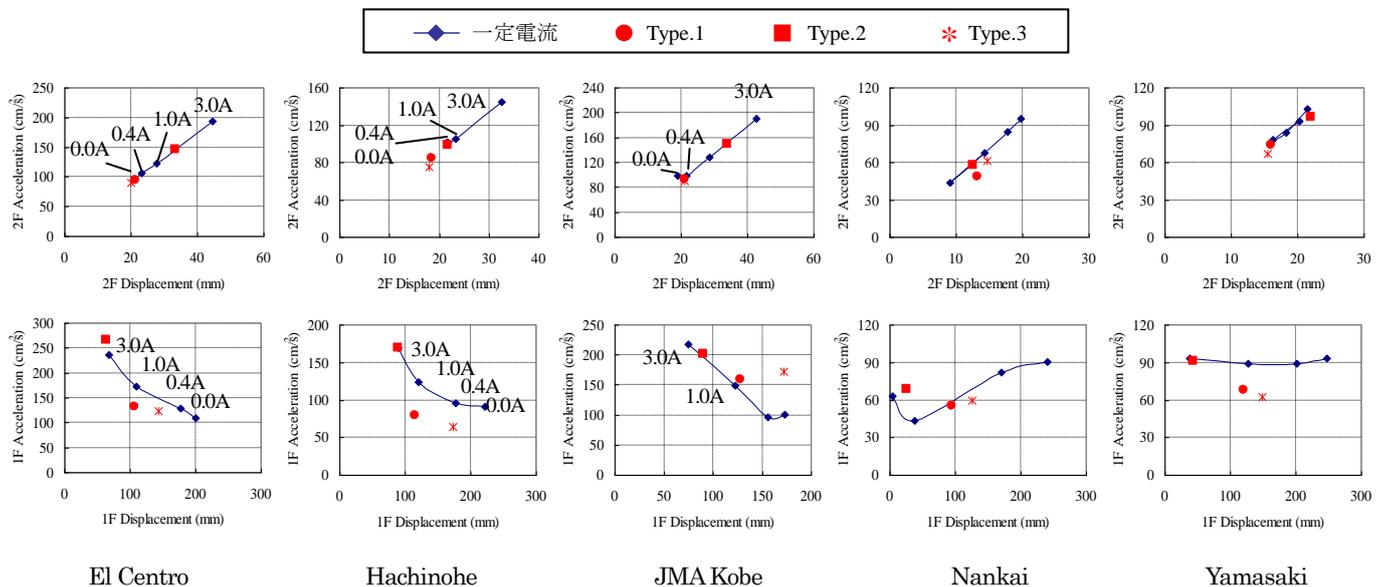


図8 セミアクティブ制御の振動台実験結果

セミアクティブ制御の振動台実験結果を図 8 に示す。ここでは 3 通りのセミアクティブ制御方法 (Type.1, Type.2, Type.3) を適用した結果を、MR ダンパーに一定電流値を与えた場合の結果と比較して示す。図の横軸は応答変位、縦軸は床応答加速度の最大値である。セミアクティブの制御結果が、一定電流値による応答結果を結んだ線より左下にあれば、応答変位および床応答加速度が低減されており、セミアクティブ制御の効果が発揮できていることを示す。制御方法によって、セミアクティブ制御の効果がある場合とない場合があった。

これに対し、特に長周期地震動である想定南海地震 (Nankai) による応答低減に目標を絞って、Type.1 と Type.2 の制御をあるルールで組み合わせてセミアクティブ制御を行った結果を図 9 に示す。Nankai に対しては、床応答加速度が 18% 上昇したが、応答変位を劇的に低減することができた。

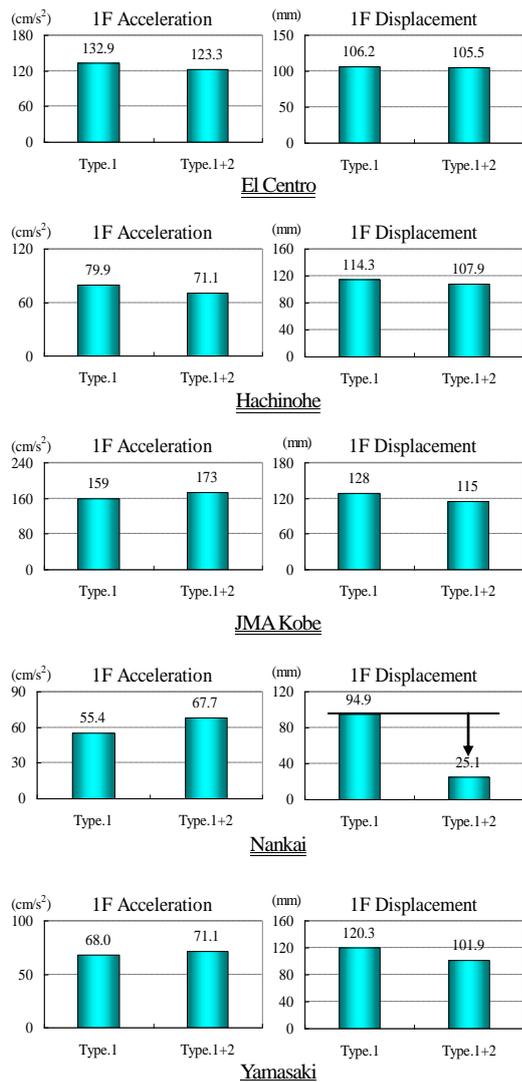


図 9 Type.1 と Type.1+2 の応答結果の比較

4. リアルタイム・ハイブリッド実験

リアルタイム・ハイブリッド実験では、モデル化に不確定要素を含む構造部材を試験体として用い、それ以外の構造部分はモデル化してコンピューター上で地震応答解析を行うと同時に、制御演算も行う。特に、制御構造では制御部材を試験体としており、本研究では MR ダンパーを試験体とする。図 10 にその概念図を示す。

つまり、MR ダンパーに取り付けたロードセルによって計測される荷重値を制御力 (q) として加えた運動方程式 (式 (2)) をコンピューターで数値積分し、かつ MR ダンパーの制御力を決定するために時々刻々 (1/100s) 制御演算を行い MR ダンパーに直流電流を印加し、リアルタイムで加振を行う。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z} + q \quad (2)$$

\ddot{x} : 相対加速度、 \dot{x} : 相対速度、 x : 相対変位、 \ddot{z} : 地動加速度

m : 質量、 c : 減衰、 k : 剛性

リアルタイム・ハイブリッド実験の結果の一例を図 11 に示す。時刻歴波形では、3つの検証手法による応答の概略は一致している。特に、絶対加速度 (acc) と荷重 (force) はリアルタイム・ハイブリッド実験 (以下、RH 実験) と振動台実験でよく一致している。El Centro や JMA Kobe といった、やや短周期成分を含む地震動における急な応答変化が生じる箇所でも、RH 実験は解析に比べて安全側の評価をしている。RH 実験が主体構造のモデル化の不確定さだけを含んでいることに比べ、解析は主体構造のモデル化の他、MR ダンパーのモデル化やそれらの接合部 (ピン接合) の不確定さも含むので「RH 実験結果 > 解析結果」となるのは妥当である。また、El Centro と長周期成分を多く含む Hachinohe では、ピーク値発生時刻のずれも小さい。ただし、断層近傍の地震波である JMA Kobe ではピーク値発生時刻が振動台実験に比べてやや遅れている。

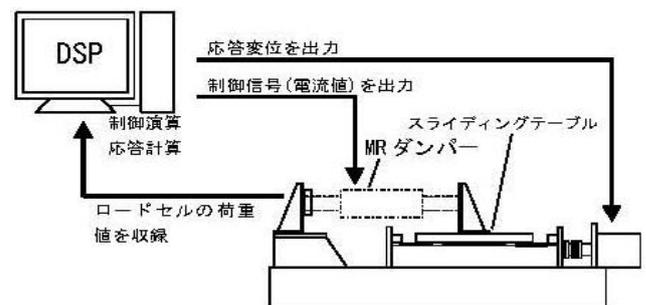
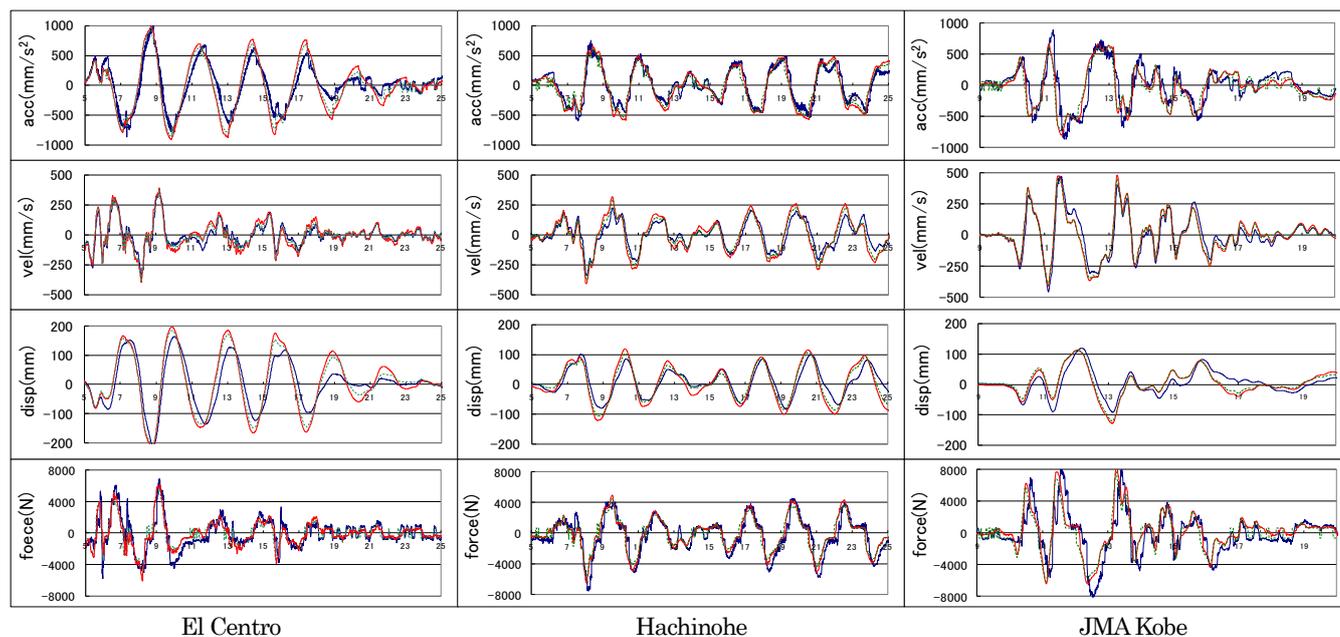


図 10 リアルタイム・ハイブリッド実験概要

リアルタイム・ハイブリッド実験 (—)・振動台実験 (—)・解析 (—)



El Centro Hachinohe JMA Kobe
図 11 リアルタイムハイブリッド実験、振動台実験、数値シミュレーションによる結果の比較

表 1 リアルタイム・ハイブリッド実験による制御方法による制御効果の比較

	ELCENTRO 1940 NS 原波		HACHINOHE 1968 NS 原波		JMA KOBE 1995 NS (500mm/sに基準化)			
	最適制御	速度比例	最適制御	速度比例	最適制御	速度比例		
acc(mm/s ²)	743	832	acc(mm/s ²)	766	802	acc(mm/s ²)	888	888
vel(mm/s)	396	392	vel(mm/s)	409	460	vel(mm/s)	479	508
disp(mm)	104	102	disp(mm)	121	123	disp(mm)	119	121
RMS(acc)	151	157	RMS(acc)	205	205	RMS(acc)	222	234

5. 制御比較 (リアルタイム・ハイブリッド実験)

制御手法による応答低減の比較を、リアルタイム・ハイブリッド実験を用いて行う。ここでは最適制御とオイルダンパーに代表される速度比例型制御の比較を行う。表 1 に示す応答値の最大値を見ると、JMA KOBE 1995 NS(500mm/sに基準化)を除いた2波において応答変位を同程度に低減できている各制御において、最適制御が絶対加速度をより低減していることがわかる。特に HACHINOHE 1968 NS 原波に関しては絶対加速度、応答速度ともに低減できている。断層近傍の地震動については速度比例型制御と同程度の低減効果であった。最適制御においても、急な応答変形を生じる地震動で絶対加速度の低減効果が低いといえる。これは最適制御のようにフィードバックのみの制御方法では応答の速さについていくことが難しく、応答にあった適切な制御を実現できず、絶対加速度の低減効果が低いという結果に至ったと考える。そのため、断層近傍地震動に適した制御方法の開発が今後の課題である。

6. まとめ

MR ダンパーを用いた免震構造のセミアクティブ制御の例を示した。制御則を工夫することにより、免震構造の長所(床応答加速度を低減)を生かしながら、応答変位を制御できる可能性が見いだせた。今後は、断層近傍のパルス性地震動に対する応答制御を可能にする制御則の研究が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり独立行政法人建築研究所の中型振動台を使用した。想定南海地震および想定山崎断層地震の地震波は、京都大学原子炉実験所の川辺秀憲助教からご提供いただいた。感謝の意を表します。また本研究は兵庫県COEプログラム推進事業(平成16-17年度)、財団法人前田記念工学振興財団(平成18年度)、科学研究費補助金基盤研究(c)(平成20-22年度)の助成を受けたものである。

文献

- 藤井秀樹, 樋渡 健, 藤谷秀雄: MRダンパーによる免震構造物のセミアクティブ制御実験 —最適レギュレータ理論における重み係数の効果—, 日本建築学会構造系論文集, 第618号, pp. 73-80, 平成19年8月.
- 伊藤彰浩, 川崎瑠衣, 藤谷秀雄: セミアクティブ制御免震構造のリアルタイム・ハイブリッド実験の有効性, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第663号, pp. 891-897, 平成23年5月.