MRダンパを設置した小型3層免震フレームのセミアクティブ振動制御実験

SEMI-ACTIVE SEISMIC RESPONSE CONTROL OF A THREE-STORY BASE-ISOLATED FRAME WITH MAGNETO-RHEOLOGICAL DAMPER

沈 里 通*, 荻野和臣**, 曾田五月也***

Li-tung SHEN, Kazuomi OGINO and Satsuya SODA

The purpose of this study is to find out a proper algorithm for semi-active seismic response control of base-isolated building. In the study, in order to perform hundreds of shaking table test, a scaled base-isolated three-story steel frame with a miniature capacity adjustable damper is used. In the first part, mechanical properties of the miniature bypass type magneto-rheological fluid damper are studied based on a series of the sinusoidal displacement tests results. The Bingham model was found to be quite effective to simulate the mechanical properties of the MR damper. In the second part, several passive/semi-active control algorithms are studied, among which, both the response feed-forward control algorithm and the fuzzy control algorithm are found to be better than the other semi-active ones and the passive ones. It is also confirmed that test results compare with prior analytical ones fairly well.

Keywords: Magneto-rheological Damper, Bingham Model, Semi-active Control,
Response Feed-forward Control, Fuzzy Control, Skyhook Control

MRダンパ, ビンガムモデル, セミアクティブ制御, 応答予測制御, ファジィ制御, スカيفック制御

1. はじめに

建築物の耐震性能を向上することを目的として各種の制振構造や免震構造が適用されるようになってきている。これらの構造では、エネルギー吸収装置（ダンパ）が主要な役割を果たしているが、構造システムが単純で性能が安定していることの確認が比較的容易である、いわゆるパッシブダンパが主に利用されてきた。これらのパッシブダンパによる応答低減効果は変位の低減効果と加速度の低減効果とに大別され、両低減効果が互いに背反する場合も多い。そこで、パッシブダンパの弱点を補うスマートパッシブダンパの工夫も種々提案されて来ているが、理想的には、ダンパの特性を構造の応答状態に応じて時々刻々に変動させることでパッシブ制御では実現が困難である制御効果を生むことの策定も開始されている。このような制御目的に使用するダンパをセミアクティブダンパと呼んでいる。セミアクティブダンパとしては可変式オイルダンパ、電気粘性流体ダンパ（ERダンパ）、磁気粘性流体ダンパ（MRダンパ）などが既に存在するが、その中で、MRダンパは比較的低コストで制御力を連続的に変動できることを利点として将来技術としての期待が大きい。

MRダンパを利用した構造物のセミアクティブ制御に関する研究として、米国ではSpencerらによる研究が広く知られ¹⁾、日本でも同研究を踏まえて1998～2002年の間日米共同研究が実施されている。後者においては、制御アルゴリズムやダンパの力学性能の長期安定性が必ずしも検証され尽くして居ないことを踏まえて極少量のキャ

パシティに止められたものの、2棟の実建築物にMRダンパを設置するという成果に結びつけられている²⁾。その後もダンパの長期安定性（主に磁性鉄粉の沈殿対策）が大きくは向上していないために、同ダンパが広汎に利用されるには今少しの時間を要するであろうが、同ダンパを有効に活用するための制御アルゴリズムに関するさらなる検討を進めることには十分な意義が有るものと考えている。何れにしても、セミアクティブ制御則の有効性を実験的に比較検証するためには、数多くの振動台加振実験を行うことが必要であるが、前記の日米共同研究におけるものに匹敵するような大型モデルを使用する実験を実施する機会は得がたい実情である。そこで、本研究では、新たに小型MRダンパを開発し、小型免震フレームと組み合わせで多数の振動台実験を行うこととした。

本研究の目的はMRダンパを設置した免震構造物において、免震層の変位と上部構造屋根階の絶対加速度の両応答を、他のパッシブ制御による両応答よりも同時に下回ることを可能とするセミアクティブ制御則を策定する事である。はじめに、小型免震用MRダンパの構造概要・単体性能・力学モデルを記す。次いで、3層小型鉄骨フレームの下部を固定した場合、および免震層を付加した場合それぞれの固有振動特性について記す。次に、応答予測制御、ファジィ制御、最適レギュレータ制御、スカيفック制御、速度比例減衰制御等の各種セミアクティブ制御手法の概要と実際の制御実験結果を記す。

* 早稲田大学理工学研究科 大学院生・工修

** 早稲田大学理工学研究科 大学院生

*** 早稲田大学理工学術院建築学科 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Waseda University, M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Waseda University

Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

2. 小型 MR ダンパの概要

2.1 ダンパの構造³⁾

両ロッド式の 100N 級 MR ダンパの構造を図 1 に示す。内径 30mm のシリンダ内でピストンが移動する時に、内蔵される MR 流体は内径 18mm のバイパス流路を経由して移動する構造となっている。表 1 に諸元の一覧を示す。バイパス部⁴⁾には 7mm の鉄芯を入れ（オリフィス隙間 5.5mm）、電磁石は 2 個のコイルを直列に配置し、電流の大小に応じて磁界が変化して MR 流体のせん断降伏応力も変化する。温度と圧力による流体の体積変化の影響を除くために、アキュムレータが設置され、圧力はハンドポンプを用いて 0.2Mpa 程度に調整・維持している。

図 1 100N 級 MR ダンパの構造図 (単位:mm)

表 1 小型 MR ダンパの諸元

項目	仕様
Maximum Force	100N
Maximum velocity	30cm/sec
Stroke	24cm(±12cm)
Diameter of Cylinder Bore	30mm
Diameter of piston rod	10mm
Orifice(Steel bar)	5.5mm(φ7mm)
Electromagnet	Coil Cycles
	Resistance
	Max. Voltage
MR fluid	#230(Bando Chemistry)
Weight	45N

2.2 ダンパの動力学特性

MR ダンパの力学特性を特定するため、コイルに 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5, 3A の一定電流を印加し、正弦波繰り返し加振実験を行った。図 2 に示すように、ダンパ荷重は、印加電流とピストン速度(振動数)が増加するとともに上がり、ダンパ荷重とピストン変位の関係は常に安定した履歴を描いている。MR ダンパは電流無印加の場合にはオイルダンパの力学特性に良く似て荷重変形関係が概ね楕円状の履歴を描くが、ピストンとシリンダ間およびピストンロッドシール部分において若干の摩擦力が生じることの影響が変形のピーク(速度=0)点で認められる。なお、本稿では、図 1 においてピストンの右方向への移動時の荷重を圧縮(正)と定義している。

上記単体加振実験により得られる最大荷重と最大ピストン速度の関係をプロットしたものが図 3 であり、同図中の実線は電流値毎に実験結果を最小自乗法により直線で近似したものである。電流値を 0~3A と変える事によるダンパの減衰力の可変幅は、ピストン速度が遅い場合に約 0~50 N、ピストン速度が早い場合には、10~100N とな

ることによりセミアクティブ制御に十分適用できると判断した。

(a) 振動数 0.5Hz, 振幅 25mm (b) 振動数 0.5Hz, 振幅 50mm

図 2 正弦波加振に対するダンパの履歴特性

図 3 MR ダンパの最大荷重-最大ピストン速度関係

2.3 ダンパの力学モデル

図 3 に挿入されている直線は電流により勾配が異なり、また速度=0 の点での摩擦抵抗力も電流値に比例はしていない。そこで、ダッシュポット要素および摩擦要素の何れも電流変化に対して非線形であると、それらを並列に組み合わせるビンガムモデルを用い、ダンパの荷重を式(1)で近似することとする。図 3 をもとにして、可変粘性係数と可変滑り荷重ともに印加電流の 2 次関数に回帰して図 4(a)、図 4(b)のように近似した。特に滑り荷重に関しては、やや複雑にはなるが精度を上げるために $I=0.8A$ を境にして係数を変えてある。

(a) 粘性係数の電流依存性

(b) 滑り荷重の電流依存性

図 4 ビンガムモデルによる MR ダンパ荷重の同定

$$F_{MR} = V * C(I) + Q(I) \quad (1)$$

ここに、

F_{MR} : MR ダンパの荷重、 C : 粘性係数[N・s/cm]、

I : 印加電流[A]、 Q : 降伏耐力[N]、 V : ピストン速度[kine]

3. 小型3層免震フレームの概要

3.1 上部3層鉄骨フレーム

写真1の3層鉄骨フレームの各階質量と各階剛性を表2に示す。試験体はSS400鋼材を使用した。試験体の固有振動特性を検証するために、基礎を固定した上部3層フレームをホワイトノイズ(バンド幅0~20Hz、最大振幅0.5mm、継続時間170sec)により加振し、FDD法⁵⁾(Frequency Domain Decomposition Method)を用いて固有振動数と減衰定数の評価を行った。1次モードの固有周期は約0.26秒(3.796Hz)、減衰定数は約1.2%であった。本加振により得られた伝達関数を図5に示す。

写真1 3層フレーム

表2 試験体の質量と剛性

階/層	質量 [N/gal]	剛性 [N/cm]
3	0.568	1710.0
2	0.629	1660.0
1	0.624	1660.0
免震	1.241	18.0

図5 伝達関数(基礎固定)

写真2 V溝レールと鋼球による支承

3.2 免震装置

摩擦力を低く抑えるために若干の試行錯誤の結果、免震装置は、写真2に示すように、L-20×20×3を利用したV溝レール上を直径50.5mmの鋼球が転がる単純な機構とした。その上に厚さ9mm鋼板の免震土台(1階床)を設置した。

3.3 免震層付き建物モデルの概要

(a)正面図

(b)側面図

(c)ダンパ取り付け部の拡大図

図6 3層鉄骨免震フレームの構造図(単位:mm)

図6(a)(b)に試験体構造図を示す、上部構造の総重量は3,001Nで、逆V型に設置した厚さ4.5mmの鋼板バネの水平剛性は18.0N/cmであり、鋼球が上部構造を載せてV型溝を転がる際のクーロン摩擦力は2.3Nとなる。

このように構築される免震フレームのホワイトノイズ波(バンド幅0~20Hz、最大振幅90mm、継続時間170sec)に対する伝達関数は図7となる。1次の固有周期は約2.6秒(①のピーク)になり、1次の減衰定数は約3%である。図中の②~④は、上部構造の振動形に対応するピークであり、その他のピークは水平ばねの振動に起因するものである事を確認してある。

図7 伝達関数(免震建物)

4. セミアクティブ制御実験の概要

4.1 実験の進め方

本研究で適用するセミアクティブ制御のためのアルゴリズムの多くは、事前にパラメータを適切に設定しておく必要がある。本章の4.2節で地震応答解析用4質点系モデルに対して制御力の項を含む振動方程式の一般的な定式化を示す。解析では4質点系モデルを用いて、免震層の変位と最上階の絶対加速度を同時に抑えることを目標にして最適な制御パラメータを策定した。4.3節には適用する各種制御アルゴリズムにおける制御力の設定方法の概要を記す。

4.2 地震応答解析モデル

図8には、図6の免震試験体のセミアクティブ制御解析モデルを示す。上部構造を4質点系($m_0 \sim m_3$)、免震層鋼板バネを線形バネ(k_0)とダッシュポット(C_0)、鋼球とV溝レールの接触面を摩擦要素(F_r)で代表する。これらの変数を用いて運動方程式は式(2)となる。

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C_S\dot{\mathbf{x}} + rF_r + rF_{MR} + K\mathbf{x} = -M1\ddot{x}_g \quad (2)$$

ここに、 M は質量マトリクス、 K は剛性マトリクス、 C_s は減衰係数マトリクス、 F_{MR} はMRダンパの荷重である。また、 $\mathbf{1} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ は単位ベクトル、 $\mathbf{x} = [x_0 \ \dots \ x_3]^T$ は各階の基礎に対する相対変位、 x_g は基礎の絶対変位、 $\mathbf{r} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ はMRダンパの設置位置を表すベクトルである。

図8 地震応答解析用モデル

式(2)を相対加速度ベクトルで表すと、下記の通りになる。

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_s\dot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{x}}_g - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}F_r - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}F_{MR} \quad (3)$$

これより、式(4)の状態方程式と式(5)の出力方程式が得られる。

$$\text{状態方程式: } \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{f} \quad (4)$$

$$\text{出力方程式: } \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{z} + \mathbf{D}\mathbf{f} \quad (5)$$

ここに、A, B, C, Dマトリクスは下記の通りである。

$$\text{システムマトリクス } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_s \end{bmatrix}$$

$$\text{入力マトリクス } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ -1 & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} \end{bmatrix}$$

$$\text{出力マトリクス } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_s \end{bmatrix}$$

$$\text{直達マトリクス } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ -1 & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{r} \end{bmatrix}$$

$$\text{入力ベクトル } \mathbf{f} = [\ddot{x}_g \quad F_r \quad F_{MR}]$$

4.3 制御アルゴリズム

一般的な免震建物が地震力を受ける時の免震層の応答は、上部構造を剛体と見なした場合の応答と大差ない。実際に本構造モデルでも上部を剛体とした1質点モデルの周期と、図7に見られる多質点系の固有周期は何れも約2.6秒であり両モデルの免震基礎の動きはほぼ同等と考えることが出来る。従って、制御実験を行う時は、MRダンパの制御力は免震モデルを1質点系(SDOF)として算出することとした。非制御の場合に免震層の最大変形が12cmに収まるように基準化した入力に対してセミアクティブ制御効果が最も高くなるように制御パラメータの値を決めた。ここで、ある地震動に対する制御パラメータの最適値は、各セミアクティブ制御時と非制御(電流無印加)時の、免震層の最大相対変位の比と、最上階の最大絶対加速度の比の2乗和平方根が最小となる値(最適判断値)と定義する。さらに、各地震動について決定したその値の平均値を最小とする時のパラメータを最適パラメータとする。以下に実験で用いた種々の制御則の概要を記す。

4.3.1 MR ダンパのパッシブ使用(以下、CC 制御)

本制御では、MR ダンパに定電流を0Aから3Aまで0.5A刻みで作用させて、パッシブダンパとして用いる。

4.3.2 速度比例制御(以下、CV 制御)

MRダンパを用いて速度比例型オイルダンパの力学特性を模擬する制御である。ダンパの粘性減衰係数は建物モデルの上部構造を剛体と見なしたSDOFの剛性比例減衰系としてその減衰定数が10%, 20%, 30%, 40%に対応する楕円型の履歴を描くように時々刻々変化させるように決める。本制御ではダンパの特性が変動するので厳密にはパッシブ制御では無いが、パッシブオイルダンパの特性を模擬することから、パッシブ制御の範疇に加えることにする。

4.3.3 ファジィ制御(以下、FC 制御)

筆者らがファジィ2次元推論によるMRダンパのセミアクティブ

制御の有効性を解析的に確認した結果を応用する⁹⁾。表3に示すように、2次元の制御規則は、前件部を免震層相対変位と同相対速度として、後件部の制御力を決めることとした。また、応答変位や応答速度、制御力の規則は、ゼロを中心にした正負3段階のファジィ集合を用い、NB(負で、大きい値)、NM(負で、中ぐらいの値)、NS(負で、小さい値)、ZR(ゼロ)、PS(正で、小さい値)、PM(正で、中ぐらいの値)、PB(正で、大きい値)と定義している。免震層の応答変位が大きい時には、応答変位フィードバック制御を行い、応答変位が小さい時には、応答速度フィードバック制御を行って、応答速度がゼロの時は制御力をゼロにすることとする。図9に応答情報(前件部)に対するフィードバック制御力(後件部)曲面を示す。

図9 ファジィ制御力

表3 2次元制御規則

後件部: 制御力	前件部2:免震層相対速度							
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	
前件部1: 免震層 相対変位	NB	PB	PB	ZR	ZR	PB	PB	PB
	NM	PM	PM	PM	ZR	PM	PM	PM
	NS	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	ZR	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
免震層 相対速度	PS	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
	PM	NM	NM	NM	ZR	NM	NM	NB
	PB	NB	NB	NB	ZR	NB	NB	NB

ZR:Zero NB:Negative Big PB:Positive Big
NM:Negative Middle PM:Positive Middle
NS:Negative Small PS:Positive Small

4.3.4 スカيفック制御(以下、SH 制御)

スカيفック制御⁷⁾では、文献8の手法により式(6)に示すような印加電流と免震層相対速度を制御条件とし、後に7項に例示する予備解析により最適な境界値を決める。ダンパへの印加電流は式(6)となり、 A_1 と A_2 は印加電流[A]の境界値、 V_1 と V_2 は免震層相対速度[kine]の境界値である。なお、式(7)に示すように、免震層の相対速度と絶対速度の符号が逆の場合には、電流を印加しない。

$$I_{SH} = \begin{cases} A_2 & \text{for } |\dot{x}_o| > V_2 \\ A_1 & \text{for } V_1 \leq |\dot{x}_o| \leq V_2 \\ 0 & \text{for } |\dot{x}_o| < V_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$I = \begin{cases} I_{SH} & (\dot{x}_o)(\dot{x}_g + \dot{x}_o) \geq 0 \\ 0 & (\dot{x}_o)(\dot{x}_g + \dot{x}_o) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

4.3.5 最適レギュレータ制御(以下、LQR 制御)

最適レギュレータ制御^{9),10)}(Linear Quadratic Regulator)の目標は応答と制御力の大きさをバランス良くすることであり、式(8)の評価関数(Criterion function)を最小化する事を基本とする。

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + R u^2] dt \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{x}$, u は建物の応答と制御力であり、 $\mathbf{Q}$ と R は重み関数である。ダンパの制御力は式(9)になる。

$$F_{MR} = -R^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{P} = -\mathbf{K} \mathbf{x} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ は 2×2 のマトリクスであり、式(10)のリッカティ方程式(Riccati Equation)を満たす正定唯一解であり、 $\mathbf{b}$ はSDOFとしての入力マトリクスである。 $\mathbf{K}(1 \times 2)$ を最適フィードバックゲインと呼ぶ。

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{b} R^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (10)$$

一連の試行錯誤的予備解析により、変位を抑えつつ加速度を抑制するのに最も適したパラメータは、4.3節に記した方法で探索した結果、重み関数は $\mathbf{Q} = \text{diag}([100 \ 100])$, $R=5$ を用い、フィードバックゲインは $\mathbf{K} = \text{diag}([-1.5078 \ -4.7474])$ とした。

4.3.6 応答予測制御(以下、FF制御)

後に5章に制御結果を記す通り、通常の粘性減衰パッシブダンパも、減衰係数の決め方によっては十分に効果的である。そこで、粘性減衰をさらに効果的に利用するために、免震層の変形がゼロとなる時の速度に応じて減衰係数(減衰定数)を可変とする制御則として、1/4サイクル前の変位のピーク時に、次に原点を通過する際の前速度を予測するようにした。

図10に例を示すように、1質点系に変換した上記の免震構造モデルの地震応答解析により得られる図11の変形の時刻歴を基にして、応答変位が原点を横切る時の運動エネルギーとそ

図10 SDOFによる振動エネルギーの関係

れに対応する約1/4サイクル前の変位のピークにおける歪エネルギーの関係をプロットすると図10となる。これより、応答レベルの高い領域では、減衰の大小によらず、位置エネルギーと運動エネルギーは、互いに1対1の関係として近似できることがわかった。この関係を利用して応答予測を交えた制御則を下記の通りに構築した。

免震層の剛性を k_0 、免震建物全体の質量を m とする。免震層の応答速度を予測する場合には、図11に示すように時々刻々に免震層の応答をモニターし、各免震層のピーク変位(例えば、速度がゼロである:②)毎に位置エネルギーおよび運動エネルギーの関係をを用い、次に原点を通過する時のピーク速度 V_i (⑤)を予測することが出来る。これを利用して、

本制御アルゴリズムでは制御力を、

$$F_{MR} = 2h_i \dot{x}_o(t) \sqrt{k_0 m} \quad (11)$$

とする。ここでは、半サイクルごとに変化する減衰定数は20%~40%の間で変化させることとして、下式とした。

$$h_i = 0.2 + \alpha |V_i| \leq 0.4 \quad (12)$$

ここに、 $\alpha=0.01(\text{s/cm})$ である。

4.3.7 最適パラメータの策定例

4.3節の末尾に記した方法により、本研究ではセミアクティブ制御のための最適パラメータを事前解析により探索している。SH制御の

図11 振動エネルギーによる応答速度の予測

写真3 振動台とアクチュエータ

場合の探索例を図12に示す。表4は式(6)により設定した免震層相対速度の境界値と、免震層相対速度の境界値に対する種々の印加電流であり、それらを組み併せて得られた最適性評価値を最右列に記してある。図中の※印が最適なSH制御パラメータに対応している。各セミアクティブ制御について、このように定めたパラメータ値を用いて行った実験結果を5章では相互に比較している。なお、事前解析で使用する外乱は振動台上で事前に記録した波形である。

表4 SH制御のパラメータの設定

	免震層相対速度の境界[kine]		免震層相対速度の境界に対する印加電流[A]		最適判断値
	V_1	V_2	A_1	A_2	
SH1	5	15	0.5	1	1.0083
SH2	5	15	1	1.5	1.0451
SH3	5	20	1.5	2	1.0522
SH4	5	25	2	2.5	1.0377
SH5	10	15	0.5	1.5	1.1174
SH6	10	20	1	2	1.2027
SH7	10	25	1.5	2.5	1.1416
SH8	15	20	0.5	2	1.267
SH9	15	25	1	2.5	1.2876

※ SH: $V_1=5\text{kine}$, $V_2=10\text{kine}$; $A_1=1.5\text{A}$, $A_2=2\text{A}$ を最適とする

(a) El-Centro(1940)NS 17kine

(b) Kobe(1995)NS 26kine

(c) Hachinohe(1968)EW 12kine

図12 事前解析による最適なSH制御パラメータの策定

4.4 振動台実験システム

4.4.1 振動台

本実験では早稲田大学喜久井町キャンパス第2研究棟に設置された1,000kN動的アクチュエータの先端に直動ベアリングで支持された梁を取り付け、その上にさらに900×1400×9mmの鋼板を取り付けて振動台とした。後に図15、16で見る通り、必ずしも目標とする原波形を正確には模擬できないが、実験の繰り返しに対する再現性の高いことは確認してある。

4.4.2 計測システム

各計測装置の設置状況を図13に示す。試験体の各床面に加速度計(ARF-10AおよびARF-20A)、層間に接触式変位計(DLT-20AS)、加力梁のヘッドに接触型変位計(SDP-200D)、免震層にロードセル(TKA-50A)を設置した。免震層の変位測定には接触式変位計

図13 計測と制御装置の配置

(DLT-150AS)を用いた。また、MR ダンパへの印加電流を計測するため、 1Ω の抵抗をダンパのコイルに直列結合してある。

4.4.3 制御システム

制御 PC には MATLAB/Simulink¹¹⁾及び高速デジタル信号処理ボード(DSP-6367)をインストールし、200Hzのサンプリング時間でセミアクティブ制御実験を行った。DSP ボードは分解能 14bit の AD コンバータと 16bit の DA コンバータをそれぞれ 4 チャンネル備えている。図 14 に示すようなブロック線図のセミアクティブ制御則を C コードにより生成し、リアルタイムで MR ダンパの目標抵抗値に対応する電流値を制御する。すなわち、AD コンバータからの変位信号を微分した速度信号と、セミアクティブ制御則により算定した制御力から、式(1)のビンガムモデルにより目標荷重に相当する電流値を算定する。電流は DA コンバータを経由し、安定化電源から MR ダンパのコイルに印加される。なお、電磁石の定格電圧を超えないよう、印加電流の最大値は 3A に設定した。

図 14 Simulink によるセミアクティブ制御

図 15 振動台水平加速度の時刻歴

図 16 振動台水平加速度のフーリエスペクトル

4.4.4 入力外乱

El-Centro(1940)NS、JMA Kobe(1995)NS、Hachinohe(1968)EW を用い、事前の予備解析により CC 制御(0A)の時に免震層の変位が MR ダンパのピストンの制限変位である 12cm を超えないよう、それぞれの地震波につき、その最大速度を 17kine、26kine、12kine に標準化した。振動台上で記録した加速度波形の例を図 15 に示す。これらの振動台水平加速度をフーリエ変換し、得られたフーリエスペクトルを図 16 に示す。

5. 実験結果および考察

5.1 各階最大応答分布の比較

使用した入力地震動ごとに、基礎(Floor: 0)に対する各階床の最大変位(Floor: 1~4)の分布を図 17 に示す。図中の記号は 4.3 節に記した制御アルゴリズムの違いに対応している。セミアクティブ制御の結果は、前述の方法による最適化パラメータを用いた場合に対応している。図 18 は各階の最大絶対加速度である。これらの図に基く考察の要約は下記の通りになる。

パンプ制御(CC, CV)では条件の設定の違いにより応答の変動幅が広いが、セミアクティブ制御では何れの地震波、何れのセミアクティブ制御則(FC, FF, SH, LQR)の組み合わせに関わらず応答の変動幅は小さく、良好な制御効果が得られる。また、制御において免震床の応答情報のみに基づいて制御している事の誤差は十分に小さいものと考えられる。

(a)El-Centro(1940)NS 17kine

(b)Kobe(1995)NS 26kine

(c)Hachinohe(1968)EW 12kine

図 17 各階の最大相対変位

(a)El-Centro(1940)NS 17kine

(b)Kobe(1995)NS 26kine

(c)Hachinohe(1968)EW 12kine

図 18 各階の最大絶対加速度

5.2 パッシブ制御時の荷重変形関係

5.2.1 CC 制御の場合

図19は、El-Centro(1940)NS17kine波を用いてMRダンパの定電流制御を行った時の荷重とピストン変位の関係である。安定した履歴が得られ、印加電流の増加によってダンパ荷重が増加するとともに変位が低減している。ただし、ダンパの荷重が過度に増加すると上部構造の加速度が増加する要因となり易い事を図17、18中のCC制御における印加電流値の違いに対応して確認できる。

5.2.2 CV 制御の場合

図20(a)は、El-Centro(1940)NS17kine波に対するMRダンパのCV制御の荷重とピストン変位の関係である。想定する減衰定数が増加するにつれ、ダンパ荷重が増加し、変位が低減する一方で加速度応答が増加するのはCC制御と同じ傾向であるが、CC制御よりも加速度応答を増加させる好ましくない影響は小さい。図20(b)は、本CV制御におけるダンパの速度と抵抗力の関係例を示す。完全な粘性減衰であればこの関係は直線になるはずである。MRダンパは本来非線形であるので必ずしも直線にならないが、実験において、この程度には粘性減衰を模擬できている事を確認できる。本制御において、変位のピーク（速度がゼロ）で荷重がゼロにならないのは、ダンパの摩擦の影響と考えられる。

図19 CC制御の荷重・変形関係

図20 CV制御の履歴

図21 目標履歴と実測履歴の比較

5.3 セミアクティブ制御時の荷重変形関係

El-Centro(1940)NS17kine波を用いたセミアクティブ制御により得られた免震層の荷重変形関係の例を図21に示す。(a)図はFF制御、(b)図はSH制御の場合である。太い実線はロードセルの実測荷重と実測変位の履歴、細い実線は各制御則に基づいて算定した目標荷重と実測変位との履歴である。FF及びSHのセミアクティブ制御が制御則通りに実現されて居ることを確認できる。

図22はHachinohe(1968)EW12kine波を用いて、FF制御を行った場合の免震層が変形ゼロを通過する時点の予測速度（○印）と実測速度の絶対値の時刻歴である。4.3.6項の図10に見られる程度の予測誤差が伴うため、図22でも半サイクルごとに予測した速度は、全てのピーク速度に対応しないが、予測した速度の傾向は概ね実測速度と同等である。この予測した速度を用い、式(12)により決めた減衰定数の時刻歴を図23に示す。さらに、この減衰定数と免震層相対速度を用い、式(11)に与える制御力と印加電流の時刻歴を図24に示す。これらの印加電流の変化は、免震層相対速度の変化と対応する。

図22 予測速度と実測速度の時刻歴 (FF制御)

図23 予測速度と実測減衰定数の時刻歴 (FF制御)

図24 印加電流と荷重の時刻歴 (FF制御)

図 25 最上階最大加速度と免震層最大変位によるトレードオフ関係

5.4 応答変位と応答加速度のトレードオフ関係

セミアクティブ制御およびパッシブ制御の制振効果を比較するため、図 25 に、各制御アルゴリズムを用いた振動台実験から得られた最上階の最大絶対加速度と免震層の最大変位の関係をプロットした結果を示す。先に、制御アルゴリズムの最適化の目安としたのと同様に、プロットが原点に近いほど、総合的に、より制御効果が高いと考えている。

5.4.1 パッシブ制御の考察

Kobe波の場合において、CC制御の印加電流とCV制御で設定する減衰定数が高いほど応答変位は抑えられているが、最大応答加速度はほぼ単調に増加している。これに対して、El-Centro波の場合には、変位に関してはほぼ同じ傾向であるが、最大加速度は印加電流の増加とともに一旦下がってから再び増加する。Hachinohe波の場合には、CC制御ではEl-Centro波の場合と同様に加速度応答が極値を有するのに対して、CV制御では減衰定数の増加につれて、変位、加速度の何れも単調に減少する。Hachinohe波におけるCV制御、また、Kobe波における両制御実験結果で加速度応答に極値が見られていないが、図12の事前解析ではいずれにおいても僅かに極値が認められている。これは、実験パラメータの範囲の選択が影響したものと思われる。このようにパッシブ制御におけるトレードオフ関係は地震動の特性の影響を強く受ける。

5.4.2 セミアクティブ制御の考察

Kobe波とHachinohe波に対して、LQR制御による応答制御効果はCC制御より良好な結果が得られるが、El-Centro波に対しては、LQR制御の効果が低い結果となった。El-Centro波とKobe波に対するSH制御の効果は良好な結果となったが、Hachinohe波に対してはCV制御よりも効果が低い結果となった。

El-Centro波とKobe波に対するFC制御とFF制御は、CC制御およびCV制御と比較すると、最大応答変位の制御効果は同等であるものの、最大応答加速度はよく抑制する結果となった。Hachinohe波については、CC制御と比較して良い制御効果が得られるものの、CV制御よりは効果が低い結果となった。Kobe波に対しては、FF制御の制御効果がFC制御より若干良く、Hachinohe波に対しては、FC制御の結果が、FF制御より若干良い。

総括的に言えば、セミアクティブ制御が常にパッシブ制御より良い制振効果をもたらすとは言えないものの、パッシブ制御は減衰機構の違いやパラメータの設定値の違いによる制御効果への影響が大きい。一方、応答予測制御(FF制御)やファジィ制御は、定電流制御より良い制御効果を得ることが出来、Hachinohe波に対して速度比例制御はより加速度を抑えることが確認されるなど、地震動の違い

により、絶対値としては安定した応答抑制に有効な手法と考えられる。

6. まとめ

本稿では、小型MRダンパを用いた免震フレームモデルの振動台実験によりパッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を行った。実験結果により得られた知見を要約すると以下の通りとなる。

- 1) MRダンパの単体実験結果より、ビンガムモデルを用いてダンパの荷重変形関係を模擬することの有効性を確認した。
- 2) 小型免震フレームと小型MRダンパの組み合わせによる振動台実験によっても、研究の目標である、多様なパッシブ制御とセミアクティブ制御の比較検討を達成する事が出来た。
- 3) パッシブ制御においても十分に応答は低減できるものの、最適な制御のための条件設定が難しく、地震動特性の影響を強く受ける。
- 4) セミアクティブ制御が常にパッシブ制御を上回る結果とはならなかったものの、応答予測を交えたセミアクティブ制御は比較的良好かつ安定した制御効果を発揮すると考えられる。

- 5) セミアクティブ制御のための最適なパラメータを決めるための事前解析結果と、実験結果との対応は概ね良好であり、ダンパのモデル化や、1自由度系による近似制御に大きな問題の無いことを確認できた。

謝辞

本研究は 2005 年度科学研究費基盤 B・一般(代表者：曾田五月也 17360276)及び私立大学学術研究高度化推進事業(代表者曾田五月也)より助成を受けて行った。小型 MR ダンパの設計、製作には、(有)シズメテックの協力を賜りました。

参考文献

- 1) Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D.: Phenomenological Model of a Magneto-rheological Damper, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.123, pp.230-238, 1997
- 2) 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システム開発」技術調整委員会、独立行政法人建築研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所、(財)日本建築センター：日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成15年報告書、pp.V-1-V-143, 2003.3
- 3) MR-2 ダンパ取り扱い説明書、シズメテック、2004.11
- 4) 袖山博、砂子田勝昭、藤谷秀雄、曾田五月也、岩田範生：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、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B-2, pp.917-918, 2000.9
- 5) Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P.: Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proc. of the 19th IMAC, pp.625-630, 2001.2
- 6) 沈里通、曾田五月也、内藤雄介、荻野和臣：MRダンパを設置した小型3層免震フレームのファジィ推論に基づくセミアクティブ振動制御解析、第12回地震工学シンポジウム論文集、pp.1034-1037, 2006.11
- 7) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A.: Vibration Control using Semi-active Force Generators, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, pp.619-626, 1974.5
- 8) 藤谷秀雄、植渡 健、塩崎洋一、曾田五月也：MRダンパによる免震構造のスカイフック制御実験、構造工学論文集、Vol.49B, pp.105-110, 2003.3
- 9) Franklin, G.F., Powell, J.D. and Emami-Naeini, A.: Feedback control of Dynamic Systems, pp.492-645, Prentice Hall, 2002
- 10) 植渡 健、塩崎洋一、藤谷秀雄、曾田五月也：最適レギュレータ理論を用いたMRダンパによるセミアクティブ免震、日本建築学会構造系論文集、No.567, pp.47-54, 2003.5
- 11) Dabney, J.B. and Harman, T. L.: Mastering Simulink, pp.49-218, Person Education, 2004

(2006年10月10日原稿受理、2007年3月16日採用決定)