

104 MRダンパを用いたセミアクティブ免震構造の振動台実験

Shaking Table Tests on Semi-active Base Isolation System Employing Magnetorheological Damper

○吉岡 宏和 (竹中工務店) スペンサー Jr., B.F. (ノートルダム大学)

Hirokazu YOSHIOKA, Takenaka Corp. R&D Research Institute, 1-5-1, Ohtsuka, Inzai, Chiba 270-1352
B.F. SPENCER, Jr., University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556-0767, U.S.A.

This paper presents the results of an experimental study of a particular adaptable, or smart, base isolation system that employs magnetorheological (MR) dampers. The experimental structure is a base-isolated two degree-of-freedom building model subjected to simulated ground motion. A sponge-type MR damper is installed between the base and the ground to provide controllable damping for the system. Bouc-Wen hysteresis model is employed to describe dynamic behavior of the MR damper. A clipped-optimal controller is introduced for the semi-active control. The effectiveness of the proposed smart base isolation system is demonstrated for both strong and moderate earthquake excitations.

Key Words Vibration Control, Base Isolation, Semi-active Control, Magnetorheological Damper, Shaking Table Test

1. はじめに

免震構造は、地震から建物や財産を守るためのもっとも有効な手段のひとつであり、近年急速に普及している⁽¹⁾。免震構造を形成する部材には様々なものが開発されているが、鉛入り積層ゴム、高減衰積層ゴム、摩擦支承など、多くのものは非線形性を有する。従って、幅広い入力に対して最適な振動低減効果を発揮することは難しい。例えば、免震構造の多くは大地震時に最適となるよう設計されるため、中小地震においても優れた性能を発揮する保証はない。また、内陸直下型地震と海洋型地震では、その特性も大きく異なり、両者に最適となるような免震装置の設計は一般に困難である。内陸直下型地震にみられるパルス状の大振幅入力に対する免震システムの効果を疑問視する意見もある⁽²⁾。

一方、病院、コンピュータセンタ、半導体・液晶工場などに代表される先端施設では、大地震のみならず、中小地震においても被害を受ける可能性が有る⁽³⁾。これらの先端施設に対して、局地的な振動制御としては、ハイブリッド除振テーブル⁽⁴⁾が実用化している。建物全体を制御するという観点からは、スマート構造によるアクティブ制御⁽⁵⁾などが提案されているが、実用化には至っていない。これらの先端施設においても免震構造が採用される場合があるが⁽⁶⁾、幅広い入力に対して最適となる免震システムが求められる。

それらの問題を解決する手段として、ハイブリッド免震システムがある。その1つが、パッシブな免震層にアクチュエータを増設したアクティブ免震システム^{(7),(8)}である。アクティブ免震は、上部構造の加速度応答低減や免震層の変形量低減など免震性能を飛躍的に向上させることができる。しかし、アクティブ制御力を供給するために、多大なインシヤルコストやランニングコストが必要となる場合が多い。また、アクティブ制御は常に制御不安定となる危険性ははらんでいる。

一方、別種のハイブリッド免震システムとして、可変減衰装置を設置したセミアクティブ免震システムがある。セミア

クティブ装置は、アクティブシステムに比べコストを抑えることができ、パッシブ系に比べ優れた免震効果を発揮することが可能となる。可変減衰装置には様々な種類⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾が考案されており、セミアクティブ免震システムに関する研究⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾も行われている。しかし、最適パッシブシステムとの詳細な比較検討、幅広い入力に対する性能の検証は行われていない。

本報では、可変減衰装置として磁気粘性ダンパ (MRダンパ) を用いたセミアクティブ免震建物の振動台実験結果を示す。実験に用いたスポンジタイプの MRダンパの動特性を Bouc-Wen 型履歴モデルで表現し、 H_2/LQG 制御則により算出される最適アクティブ制御力を可能な限りトレースする、Clipped Optimal 制御則によるセミアクティブ制御系を構築した。最適にチューニングされたパッシブ免震システムと比較して、セミアクティブ免震システムが幅広い入力に対して有効であることを確認した。

2. 試験体の概要

図1に実験対象となる試験体⁽¹⁵⁾を示す。試験体は2層のアルミ製および鉄製プレートから構成され、各層とも厚さの異なる積層ゴムにより支持されている。上層 (Structure) は1自由度で挙動する上部構造物を模擬しており、57.5 kgの重量を有する。下層 (Base) は重量 10.5 kgであり、図2に示すスポンジタイプの MRダンパが1基設置されている。MRダンパの最大発生力は 44 N、最大ストロークは 3 cmである。なお、試験体の挙動を水平1方向に拘束するため、Base下部にリニアガイドが設置されている。試験体の1次固有振動数は非免震時が 5.19 Hz、免震時が 1.42 Hzである。時間、長さ、重量の圧縮比はそれぞれ 1/3、1/20.4、1/1000に設定した。これは、5層程度の半導体製造工場を免震した状態を模擬している。これらの施設で重要な振動スペクトルの1つは、絶対加速度であり、本試験体では、クリーンルームなどの重要な機能が設置される Structure 部の絶対加速度応答を低減するこ

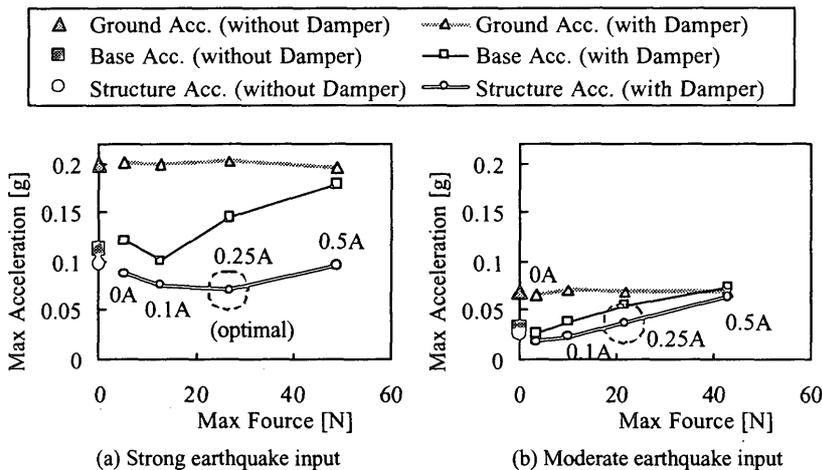


Fig.5 Max acceleration response with constant control current to the MR damper due to El Centro NS earthquake

Optimal 制御則を提案する。

入力として地震動を想定し、制御系設計用外乱としてホワイトノイズ w にフィルターを通したものを想定する。 w から、入力地動までの伝達関数は、補助状態ベクトル ξ を用いて、次式で表現できる。

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= A_W \xi + B_W w \\ \ddot{x}_g &= C_W \xi \end{aligned} \quad \dots (8)$$

拡大系の運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & EC_W \\ 0 & A_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ B_W \end{bmatrix} w \quad \dots (9)$$

制御に用いる情報として、圧電形加速度センサを用いた。計測した部位は上部構造、基礎部、地動であり、観測量の出力は、次式で表される。

$$Y = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ C_2 & 0 \\ 0 & C_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f + v \quad \dots (10)$$

制御規範となる出力は、上部構造物の任意の応答を選択でき、次式で表現される。

$$Z = C_Z \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix} + D_Z f \quad \dots (11)$$

(12)式の評価関数を最小とするアクティブ最適制御力 f_{opt} は、 H_2/LQG 理論により、(13)式のごとく一意に決定される。

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} E \left[\int_0^\tau \{ Z^T Q Z + r f^2 \} dt \right] \quad \dots (12)$$

$$f_{opt} = -K \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \xi \end{bmatrix} \quad \dots (13)$$

ここで、 Q と r は、応答と制御力への重み係数であり、 λ は

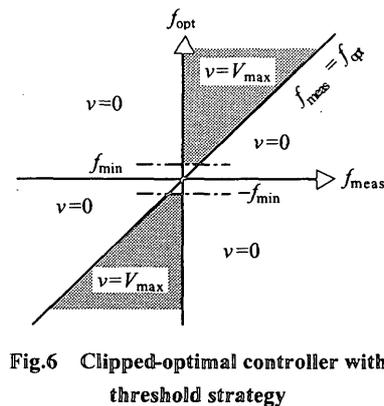


Fig.6 Clipped-optimal controller with threshold strategy

カルマンフィルターにより推定された状態ベクトルを表す。

MR ダンパは、エネルギーを消費する方向にしか制御力を発生できないため、次に示す Clipped Optimal 制御則により印加電圧を 0 または最大電圧のいずれかを選択し、最適制御力を可能な限りトレースすることを目指した。

$$v = \begin{cases} V_{max} H \{ (f_{opt} - f_{meas}) f_{meas} \} & \text{if } |f_{opt}| > f_{min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (14)$$

ここで、 V_{max} 、 f_{meas} 、 f_{min} 、 $H\{\cdot\}$ は、それぞれ、最大制御電圧、計測された制御力、制御力発生閾値、Heaviside ステップ関数である。最適制御力と実際に発生している制御力を比較し、図 6 の灰色に示す領域のみ最大制御電圧を発生するバングバング制御を行う。実際に発生している制御力は、圧電型ロードセルにより、直接計測した。制御力発生閾値 f_{min} は、MR ダンパに 0V を印加した場合の平均的な発生力とした。この閾値を設けることにより、常時微動などでは MR ダンパに電圧を印加しないよう配慮されている。

前節の最適パッシブ制御系で対象とした El Centro NS 波 (最大加速度 0.2g) を入力とした場合に、いろいろな応答への重みで設計されたセミアクティブ制御系による Structure 部の最大加速度応答を図 7 に示す。この図には、 H_2/LQG 制御則の応答に関する重み係数として、Base 部または Structure 部の変位、速度、加速度応答を単独に選択して、制御力に関する重み係数との比率を変化させた場合の結果を示している。Clipped Optimal 制御則は、最適となるアクティブ制御力を可能な限りトレースさせるものであるが、MR ダンパは前述の通りエネルギーを消費する方向にしか制御力を発生できないため、最適アクティブ制御がいわゆるネガティブダンピングを要求した場合、追従できない。その場合、制御電圧は 0V となり、パッシブ状態になってしまい、セミアクティブ制御の利点を生かすことができない。Structure 部加速度を最小にするために、式 (12) の重み係数 Q に Structure 部加速度を設定しても、そのとおりの保証はなく、実際、本検討範囲内では、Base 部の速度に重みをつけた場合に、最適となるコントローラ (図 7 に図示) が得られた。次章のセミアクティブ制御実験では、コントローラとして本制御系を採用している。

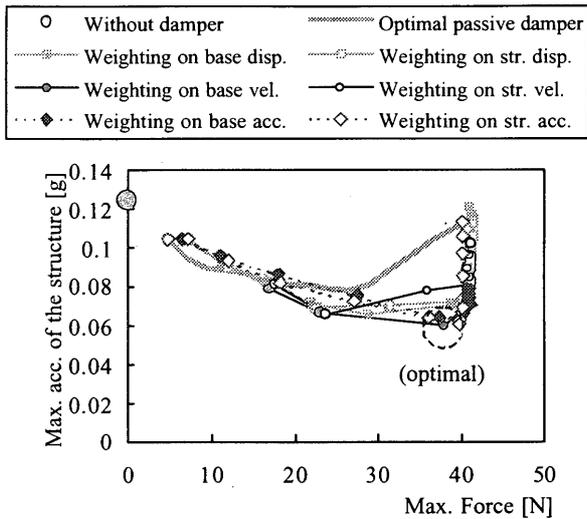


Fig.7 Numerical response for simulated El Centro NS earthquake record with maximum acceleration of 0.2 g

5. 制御結果

振動台に入力する地動外乱として、以下の3種類の地震記録波形を用いた。前述の通り、パッシブ制御とセミアクティブ制御の設定は、(1)に示した外乱を受けた場合に最適となるよう設計されている。

- (1) El Centro NS、最大加速度 0.20 g (実構造物 0.44 g 相当)
- (2) El Centro NS、最大加速度 0.07 g (実構造物 0.16 g 相当)
- (3) JMA Kobe NS、最大加速度 0.46 g (実構造物 1.04 g 相当)

図8は、制御系の設計対象である El Centro NS、最大加速度 0.2 g を受けたセミアクティブ制御系の応答を示す。MRダンパへの制御電圧は、最大電圧 1.5 V か 0 V が選択されるバングバング制御になっており、MRダンパが発生する制御力が望ましい制御力をよくトレースしていることがわかる。ダンパのない場合と比較して、各部の加速度応答および免震層のストロークともに低減されている。制御対象としている Structure 部の最大加速度は 52.5 cm/s^2 であり、地動の最大加速度 198.5 cm/s^2 に比べ 1/4 程度に低減されている。

表1は、各部の最大応答値について El Centro NS 0.2 g 入力に最適となるようチューニングされたパッシブ制御系とセミアクティブ制御系を比較したものである。対象とした 0.2 g 入力では最適パッシブは、効果的に応答を低減できている。しかし、前述の通り、El Centro NS 0.07 g 入力では、最適パッシブによる応答はダンパがない場合よりも劣っている。これに対し、セミアクティブ制御系では対象とした入力のみならず、中小の地震においても、優れた加速度低減効果を示しており、最適パッシブ系に比べ、24~58%程度の Structure 部加速度低減効果が認められた。また、地震特性と異なる JMA Kobe NS 波入力においてもパッシブ系より優れた Structure 部加速度低減効果を示している。最適パッシブ制御系は、3種類の地震に対してほぼ同じ最大制御力を発生しているのに対し、セミアクティブ制御系では、地震の大きさに応じて生じられる最大制御力が変化している。

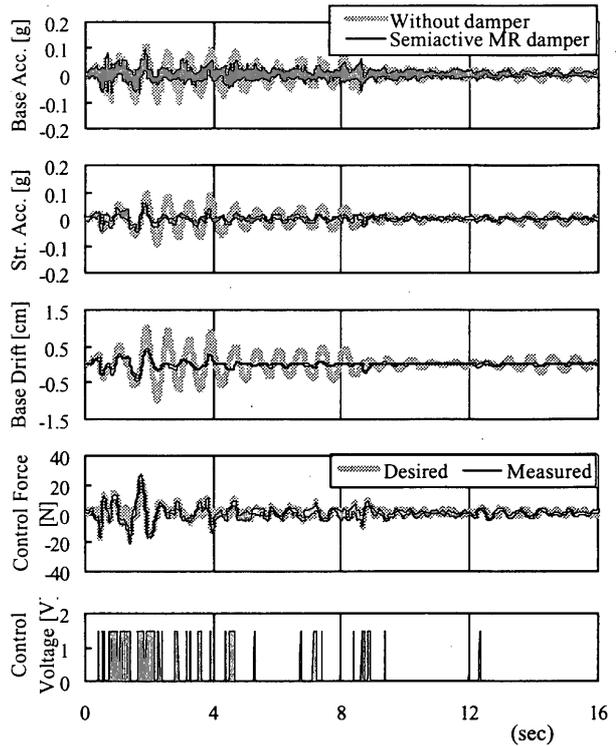


Fig.8 Experimental result due to the strong El Centro NS earthquake record

Table 1. Maximum experimental structural response due to simulated earthquakes.

	El Centro NS		JMA Kobe NS
	Ground Acceleration [cm/s^2]		
	198.5	68.76	455.6
	Base Acceleration [cm/s^2]		
Without Damper	111.6	33.41	236.4
Optimal Passive	142.2	54.94	237.4
MR Damper	89.0	30.56	179.5
	(37.4%)*	(44.4%)*	(24.4%)*
	Structural Acceleration [cm/s^2]		
Without Damper	96.24	24.93	179.9
Optimal Passive	69.47	37.18	150.4
MR Damper	52.49	15.73	134.5
	(24.4%)*	(57.7%)*	(10.6%)*
	Base Drift [cm]		
Without Damper	1.0639	0.2558	1.953
Optimal Passive	0.3988	0.0556	1.135
MR Damper	0.4567	0.0979	1.117
	Damper Force [N]		
Optimal Passive	26.74	21.56	28.88
MR Damper	27.30	7.30	40.07

*: reduction ratio over optimal passive defined by (Optimal Passive-MR Damper)/Optimal Passive $\times 100$

図9は、El Centro NS 波形の入力強度を変化させた場合の地動加速度に対する Structure 部応答加速度の低減比率を示したものである。パッシブ制御系が対象とした 0.2 g 入力付近の低減効果に比べ、0.2 g 以下の地震動に対する低減効果は

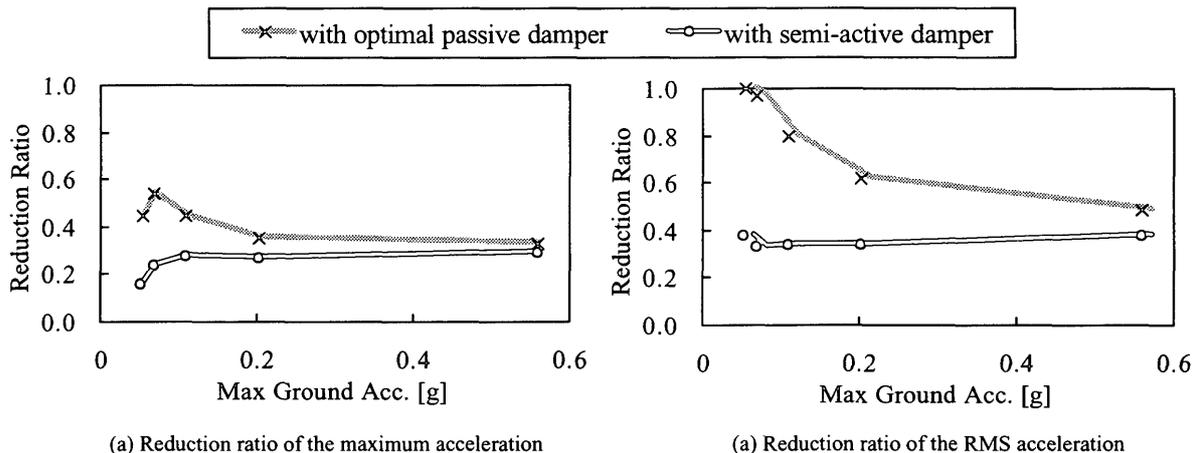


Fig.9 Experimental results for attenuation of the input ground acceleration due to scaled El Centro NS earthquake record

悪化している。この傾向は RMS 値の場合が顕著である。これに比べ、セミアクティブ制御系では、入力強度によらず、優れた加速度低減効果を発揮している。

図 10 には、セミアクティブ制御時の Structure 部の応答と制御力の実験値と設計値を比較して示す。両者はよく一致しており、Bouc-Wen 履歴モデルが MR ダンパの挙動をよく説明しているものと考えられる。

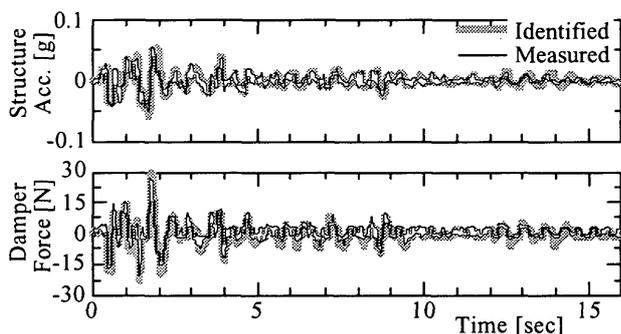


Fig.10 Comparison of the experimental results and simulated results due to scaled El Centro NS earthquake record

6. まとめ

本稿では、MR ダンパを用いたセミアクティブ免震建物の振動台実験を行った。2層の建物模型は、半導体工場を模擬しており、上部構造の加速度低減を振動制御の目的とした。H₂/LQG 制御則により算出された最適制御力と実際に発生している力を比較して、可能な限りトレースする Clipped Optimal 制御則によるセミアクティブ制御を行い、最適アクティブ制御力をよく追従することを示した。また、大地震時を対象に最適チューニングしたパッシブ免震システムに対し、提案したセミアクティブ制御系は、大地震時のみならず、中小地震に対しても、優れた振動低減効果を発揮することを示した。また、Bouc-Wen 履歴モデルにより、MR ダンパの挙動を精度良く表すことができることを確認した。

謝 辞

本研究は米国 Notre Dame 大学、Structural Dynamics and Control / Earthquake Engineering Laboratory において実施された。試験体作成および振動実験には、同研究室メンバーにご協力頂いた。また、MR ダンパーは、Lord Corporation より提供して頂いた。関係各位に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) Naeim, F. and Kelly, J.M., *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, (1999), John Wiley & Sons.
- (2) Hall, J.F. ほか 3 名, *Earthquake Spectra*, **11-4** (1995), 569-605.
- (3) Inaudi, J.A. and Kelly, J.M., *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, (1993), 297-313.
- (4) 例えば, Yoshioka, H. ほか 4 名, *Journal of Vibration and Acoustics*, **123-2** (2001), 269-275.
- (5) Fujita, T. ほか 7 名, *Proceedings of SPIE*, **4330** (2001), 449-459
- (6) 古橋・ほか 6 名, “新幹線に隣接する免震半導体工場の微振動性状,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1998), 711-718
- (7) Kelly, J.M. ほか 2 名, *Journal of Optimization*, **53-2** (1987), 159-181.
- (8) Nishimura, H. and Kojima, A., *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, **2** (1998), 1399-1406.
- (9) Feng, M.Q. ほか 2 名, *Journal of Engineering Mechanics*, **119-9** (1993), 1845-1864.
- (10) Spencer, Jr., B.F. ほか 3 名, *Journal of Engineering Mechanics*, **123-3** (1997), 230-238.
- (11) Gavin, H.P., *IEEE Transactions On Automatic Control*, **9-1** (2001), 27-36.
- (12) Makris, N., *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26** (1997), 571-591.
- (13) Johnson, E.A. ほか 3 名, *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, (1999), 367-376.
- (14) Symans, M.D. and Kelly S.W., *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28-1**, (1999), 37-60.
- (15) Yoshioka, H., ほか 2 名, *Journal of Engineering Mechanics*, (submitted)
- (16) Dyke, S.J. and Spencer, Jr., B.F. (1997). *Proceedings of the IASTED International Conference*,