

# MR ダンパーによる擬似負剛性セミアクティブ制御の 実時間ハイブリッド実験による検証

家村浩和<sup>1</sup>·五十嵐晃<sup>2</sup>·鈴木陽介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 教授 (〒606-8501京都市左京区吉田本町) E-mail: iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>2</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 助教授 (〒606-8501京都市左京区吉田本町) E-mail: igarashi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>3</sup>新日鉄ソリューションズ

MR ダンパーを用いて擬似負剛性セミアクティブ制御を実現するシステムを構築し、制震デバイ スとしての性能の実験的検証を行った。実時間サブストラクチャー・ハイブリッド試験手法により、 構造物に本装置を適用した場合の地震時応答の低減効果を検討した。MR ダンパーの電流制御にお ける時間遅れの影響は見られるものの、固有周期が2秒程度の構造物に対してはセミアクティブ制 御による応答低減が効果的に現れることが示された。

Key Words : Semi-active control, MR damper, real-time test, pseudo dynamic test

### 1. 概要

構造物の地震応答を低減する手段として、擬似負 剛性セミアクティブ制御手法を用いた制震システム が提案されている。実際のMRダンパーを擬似負剛 性制御デバイスとして用いるための制御システムを 構築するとともに、実時間ハイブリッド実験により 構造物に適用した場合の応答低減効果を実験的に検 証した。

#### 2. 制御手法

次式のような荷重 F(t)を発生するデバイスを 用いた制御手法を考える。

$$F(t) = K_D x(t) + C_D \dot{x}(t)$$
 (1)  
ここに、 $x(t)$  : デバイスのストローク変位  
 $K_D$  (<0) : 負の剛性  
 $C_D$  (>0) : 正の粘性

F(t) MR # 2 - 15--- C.K

図-1 1自由度系の擬似負剛性制御の例

このようなデバイスを構造物に設置すれば、負剛性 の効果と粘性によるエネルギー吸収により、粘性ダ ンパーを用いるよりも効率的に構造物の加速度応答 を低減する効果が期待される。

擬似負剛性制御とは、MRダンパーなどのセミア クティプ制御デバイスの物理的な制約範囲内で、式 (1)で表されるような見かけの負剛性と正の粘性の 特性を持つ荷重を発生させることにより構造物の応



図-2 負剛性・擬似負剛性の概念図

答を制御する手法を指す。説明のため、変位 - 荷重 関係と速度 - 荷重関係について、式(1)で表される目 標値と擬似負剛性アルゴリズムにより発生される関 係を対比したものを図-2 に示す。MRダンパーなど の制御装置では、速度 - 復元力関係の第2および第 4象限(すなわち、荷重と速度が逆符号の場合)の 荷重を発生させることができない。「擬似負剛性」は、 このような装置の制約範囲内で実現できる負剛性特 性を意味するものとして定義している。

#### 3. MR ダンパー

擬似負剛性を実現するために使用した MR ダンパーは、最大ストローク±50mm、最大定格荷重 60kN のものである。使用した MR ダンパーの構造を図3にまた諸元を表-1 に示す。MR 流体は2つのピストン室の間をシリンダの外側に配置されたバイパス流路を通過し、そこに設置された電磁石により制御を行う機構となっている。



図-3 MRダンパー

定格荷重		60kN
最大速度		25 kine
ストローク		100mm (±50mm)
電磁石	コイル	線径0.8mm,272巻×5層
	最大印加電流	3 A
	電気抵抗	15
	インダクタンス	46.4mH @ 1kHz

表-1 MRダンパー諸元

正弦波加振試験における変位 - 復元力関係を図4 に示す。この結果によると本ダンパーは電磁石への 印加電流を増加するにつれ降伏荷重が増加するよう な、摩擦型に近い荷重履歴特性を持つことがわかる。

本研究では、Gavin ら<sup>1)</sup>により提案されたモデル を参考に、次の式(2)により MR ダンパーの特性をモ デル化した。

$$f(x, \dot{x}, A) = (22.40A + 0.70) \tanh\left(\frac{x}{1.16} + \frac{\dot{x}}{1.90}\right) + 0.60\dot{x}$$
(2)

ここに、*f*:荷重(kN),*x*:変位(cm), *x*:速度 (kine),*A*:MR ダンパー電磁石への供給電流(A)であ り、A 0 である。上式を代数的に解くことにより、 荷重 Fc に対応するMRダンパー電磁石への供給電 流値 Ac が、次式のように表される。



図-4 MRダンパーの変位 荷重特性

$$A_{c} = \frac{F_{c} - 0.60\dot{x}}{22.40 \tanh\left(\frac{x}{1.16} + \frac{\dot{x}}{1.90}\right)} - 0.0313 \quad (3)$$

ただし、式(3)で算出される Ac<0 の場合は、対応する電流値が存在しない。

#### 4. 制御システムと正弦波試験

本試験システムでは、オンライン制御された安定 化電源装置により電流の供給を行っている。DSP に より制御則に基づいて目標供給電流値を時々刻々計 算し、指令信号を安定化電源装置に送ることにより、 MR ダンパーを制御している。指令電流の決定には以 下の手順を用いた。

1. 変位、速度計測値および想定ダンパーの剛性お よび粘性係数より荷重目標値を計算する。

2. 式(3)より、目標供給電流値を求める。

3. 目標荷重と計測速度が同符号の時は、求めた目 標電流を、逆符号の場合はゼロを目標電流とする。

4. 計測荷重と目標荷重の差を用いた PID 制御を 制御信号の算出に適用し、電源装置に指令信号を送 る。 擬似負剛性の履歴の実現を確認するため、様々な 剛性・粘性を与えた場合の正弦波加振試験を、擬似 負剛性制御系を組み込んだ MR ダンパーに対して行った。載荷試験の状況を図-5 に示す。



図-5 MRダンパーの載荷実験の状況

周波数を 1Hz、振幅 1cm の正弦波加振実験の結果 を図-6 に示す。計測変位、速度から式(3)に基づき 求めた荷重を比較のため併記している。荷重の正負 が反転する領域では立ち上がりが緩やかになってい る点は改善されるべきであるが、これは図-6 にも見 られるMRダンパーの特性と、電磁石コイルの自己 誘導の影響であり、MRダンパーの設計手法、電源装 置の変更など根本的な改善が必要である。



図-6 正弦波加振により得られた擬似負剛性 ダンパーの履歴特性

5. 実時間ハイブリッド実験

1 自由度モデルを用いた実時間ハイブリッド実験 を行い、構築した擬似負剛性セミアクティブ制御シ ステムの応答低減効果を検証した。

本研究での実時間ハイブリッド実験の概念は、図 -7に示すように、MRダンパーを組み込んだ全体構 造系を想定し、このうちMRダンパーを実験部分と して載荷試験を行い、構造物部分は計算部分として 応答を数値計算により得るものとして、この載荷試 験・数値計算の両者より得られる結果を互いに参照 しながら想定された全体構造系の応答を得るサブス トラクチャー手法を用いることと、ハイブリッド実 験を実時間スケールで進めて応答を得る実時間載荷 実験の両者を含んでいる。対象としたMRダンパー の挙動は速度依存性を示すことから、特に実際の制 震装置としての性能を検証する上では、ハイブリッ ド実験において実時間での載荷により性能の検証を 行うことが重要である。



図-7 実時間ハイブリッド実験の概念図

ダンパーの設置の対象となる構造物のモデルの設 定には相当の自由度があるが、ここでは図-1 で示し たような、線形 1 自由度系モデルを用いた。質量 M=100 t、剛性 K=1000 kN/m、固有周期が 1.99 sec のモデルとした。ダンパーの付加剛性  $K_D=-1000$  kN/m、 粘性係数  $C_D=100$  kN/(m/sec)とし、入力として El Centro NS 記録を 50 gal にスケーリングしたものを 用いた。

図-8 に実験結果を示す。F(t)=C<sub>D</sub> x(t)で表される粘 性ダンパーの場合の解析値を併記した。変位 - 復元 力関係を見ると、荷重の正負が反転する領域で正の 傾きが現れているが、長周期で有る程度の変位振幅 が生じているため全体的な履歴形状は良好な擬似負 剛性の形となっている。時刻歴を見ると、擬似負剛 性制御が理想的に実現された場合の応答を計算によ リ予測した場合と比べ、実験結果はやや大きめの値 となっているもののほぼ想定した応答低減性能を発 揮しており、最大加速度応答は 15.6%低減している ことがわかる。

図-9は、ダンパーによる累積吸収エネルギーを粘 性ダンパーと擬似負剛性の場合(計算、実験)で比 較したものである。粘性ダンパーと擬似負剛性では 最終的なエネルギー吸収は同様の値となっているが、 最大応答が現れる時間において擬似負剛性制御のエ ネルギー吸収量の増加割合が大きい傾向があり、こ の時間付近において粘性ダンパーに比べて最大応答 を効率的に低減する効果が現れているものと考えら れる。吸収エネルギーで見る限り、計算による予測 と実験結果の間での著しい差は現れていない。

図-10 に対象モデルにおける質量 M=100t、剛性 K=3000kN/m、粘性係数 C-30kN/(m/sec)の線形1自由 度系の構造モデルの場合の変位 復元力関係を示す。





図-9 ダンパーによる累積吸収エネルギーの比較



図-10 短周期構造モデルの場合のダンパー履歴

固有周期は 1.14sec で前述のケースよりも短く、変位 振幅は小さくなる。入力は El Cento、Kobe それぞれ 最大 100gal にスケーリングしている。この結果によ ると、荷重の正負が反転した直後の領域で正の荷重 復元力の傾斜が現れ、応答低減効果が著しく低下 している。制御効果を得るためには、MR ダンパー の荷重制御をより正確に行う必要がある。

#### 6. 結論

MR ダンパーにより擬似負剛性セミアクティブ制 御システム構成し、ほぼ想定された復元力特性を発 揮することを確認した。実時間ハイブリッド実験に より本制御デバイスを1自由度系構造モデルに適用 した場合の応答を検証し、パッシブな粘性ダンパー よりも大きな加速度応答低減効果があることを示し た。

#### 参考文献

1) Gavin, H., Hoagg, J. and Dobossy, M, Optimal design of MR dampers, US-Japan Workshop on Smart Structure for Improved Seismic Performance in Urban Regions, pp.225-236, 2001.

(2003.10.10 受付)

# REAL-TIME HYBRID LOADING TEST FOR THE VERIFICATION OF SEMI-ACTIVE PSEUDO-NEGATIVE STIFFNESS CONTROL USING MR DAMPERS

## Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI and Yosuke SUZUKI

The pseudo-negative stiffness control system is developed with the use of an MR damper, and experimental verification of the performance of the developed system as the seismic control device for structures is conducted. The real-time substructure hybrid loading test is used as the verification test method, and the seismic response of the structures assuming that the MR damper and developed control system are installed to the structure. Although noticeable time delay from the electric current control to the MR damper response can be observed, seismic response reduction can be effectively achieved by the semi-active control for the case of structures with the natural period of 2 seconds.