

MR流体ダンパを用いたセミアクティブ免震構造

—第1報, MR流体ダンパの特性実験—

Study on Semi-Active Seismic Isolation System with MR Damper

— 1st Report, Characteristic Tests of MR Damper —

佐藤 栄児*・藤田 隆史**

Eiji SATO and Takafumi FUJITA

1. ま え が き

地震による構造物の応答加速度の低減を目的としてパッシブ免震構造を用いた建築構造物が実用化されている。このパッシブ免震構造では、応答加速度を低減させるために、地盤と構造物の間に大きな相対変位が発生してしまう問題がある。

そこで、この相対変位を低減させるために可変摩擦ダンパ等を用いたセミアクティブ免震構造が提案されている¹⁾。

ここでは、セミアクティブ免震のエネルギー吸収装置として、流体に外部から磁界をかけると粘性が変化するMR流体を用いた可変粘性ダンパ(以後、「MRダンパ」という。)を用いる。これにより、比較的単純な構造および単純な制御構成でセミアクティブ免震構造が実現できる。しかし、MRダンパはMR流体の特性およびダンパの構造等により、制御入力から発生荷重への応答に遅れが存在し、この遅れがセミアクティブ免震性能に少なからず影響を与える。

そこで本研究では、このMRダンパの応答の遅れを考慮したセミアクティブ免震について検討する。本報告では、MRダンパ単体での特性を把握する目的で実施した実験結果について述べ、その特性実験結果よりMRダンパの解析モデルを作成する。

2. MRダンパ

今回製作したMRダンパを図1に、その構造を図2に示す。

MRダンパはオイルダンパと同様に、シリンダ内に封入

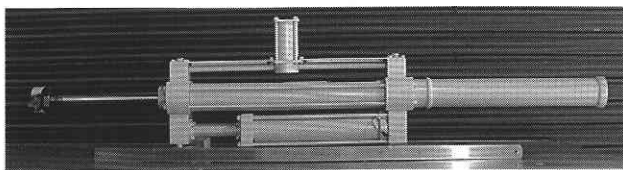


図1 MRダンパ

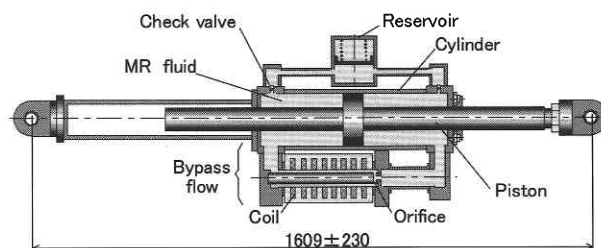


図2 MRダンパの構造

表1 MRダンパの仕様

項目	仕様
製作	三和テッキ
MR流体	LORD MRF-132AD (1ℓ)
定格発生荷重	10kN
定格変位	±230mm
定格入力電流	4A
コイル抵抗	31.5Ω
インダクタンス	70.2mH
コイル巻き数	280巻

した作動流体の流動抵抗を利用したエネルギー吸収装置である。左右のシリンダに封入されたMR流体はダンパ下部のバイパス流路内のオリフィスを通り流れる。バイパス部に設置したコイルにより磁場を変化させるとバイパス流路内のオリフィスを流れるMR流体の流動抵抗が変化し、エネルギー吸収特性(減衰力)が変化する²⁾。このことよりコイルに流す電流を制御すれば、減衰力を可変できる。なお、流体の熱膨張による体積の増加を吸収するためにリザーバをMRダンパ上部に設置している。

コイルに電流を流す場合、磁場の変化の遅れやMR流体の流動抵抗の変化の遅れにより、入力電流から発生荷重までの応答に遅れが生じる。この遅れがセミアクティブ免震制御の性能において少なからず影響する。

本MRダンパの仕様を表1に示す。

*防災科学技術研究所

**東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

3. 特性実験

3.1 実験システム

特性実験は、高性能油圧アクチュエータに MR ダンパを設置し、加振波形、加振速度およびコイルへの入力電流等を変化させ各種データを収録した。図3に特性実験のための実験システムを、図4に実験状況の写真を示す。

3.2 実験結果

3.2.1 速度依存性

MR ダンパのピストンの摺動速度による発生荷重の特性および履歴特性を確認するため、入力電流を一定にし油圧アクチュエータで正弦波加振を実施した。入力電流をそれぞれ、0 A, 0.5 A, 1.0 A, 1.5 A, 2.0 A, 2.5 A とし、速度振幅 20 cm/s の正弦波で加振したときの結果を図5に示す。

この結果から、本 MR ダンパは速度比例減衰要素のみのダンパではなく、クーロン摩擦要素と速度比例型の粘性減衰要素を並列に結合したビンガムモデルであることが解る。また、移動方向が切り替わる部分で若干の不感帯要素

が存在することも確認できる。この不感帯は MR ダンパに設けられた逆止弁等による影響と思われる。

3.2.2 応答特性

MR ダンパの入力電流から発生荷重までの応答特性を確認するため、ステップ応答実験と周波数応答実験を行った。まず、ステップ応答実験では、入力電流を 0 A から 3 A にステップ状に入力し、そのときの発生力の応答を計測した。その結果を図6に示す。

入力電流に対して約 0.01 s 後に荷重が立ち上がり、入力電流が定常となってから約 0.1 s 後に発生荷重がほぼ収束していることがわかる。その後ゆっくりと荷重が増幅し一定値となる。

また、周波数応答実験では、信号発生器により正弦波電流を MR ダンパのコイルに入力し、入力電流の周波数を変化させ、発生荷重を計測し、周波数応答を確認した。これを図7に示す。

図7の上図は荷重 [kN] / 入力電流 [A] を dB 表示したものを、下図は位相を、また図中の点線は一次遅れ系で同定した結果を示す。振幅は 35 Hz までほぼフラットであるが、位相は 10 Hz で約 20° の遅れが存在していることがわかる。また、一次遅れ系による同定結果と実験結果がよく一致していることが確認できる。

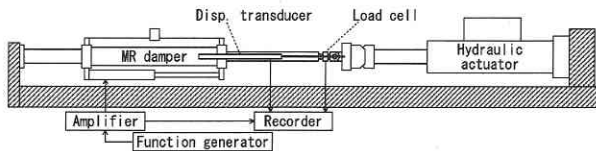


図3 実験システム構成図

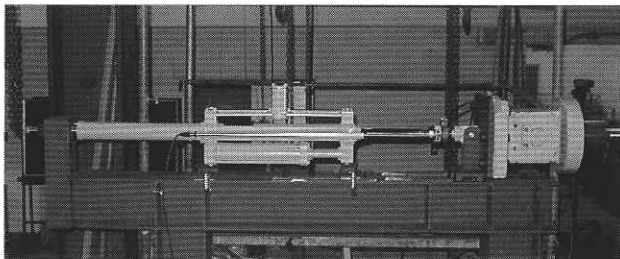


図4 実験状況

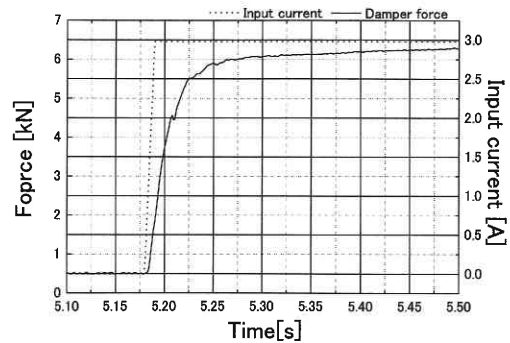


図6 ステップ応答実験結果

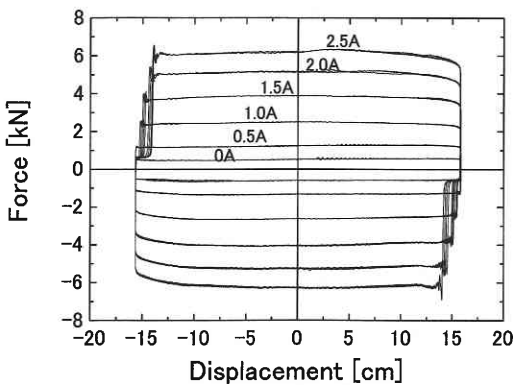


図5 速度依存性確認試験結果 (履歴特性)

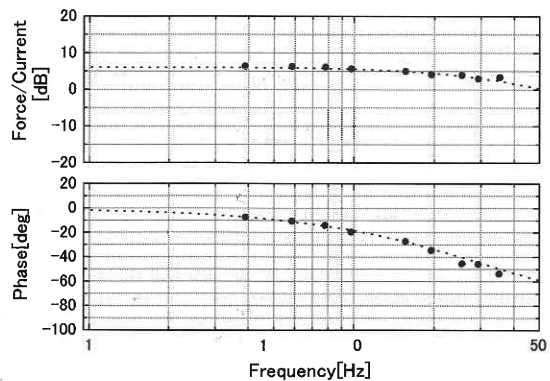


図7 MR ダンパの周波数応答実験結果

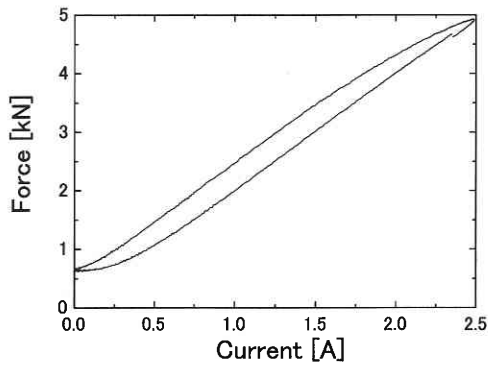


図8 入力電流と発生荷重の関係

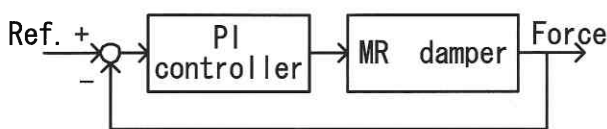


図9 ブロック線図

3.2.3 変動特性

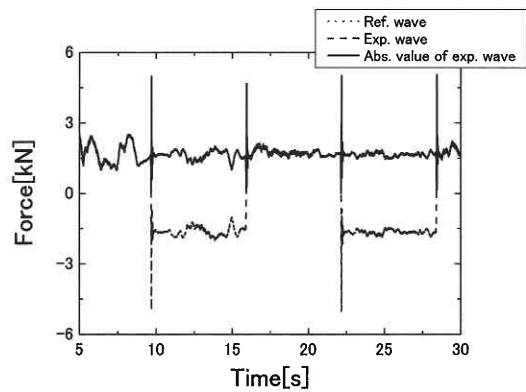
入力電流に対するMRダンパの発生荷重の変動特性を確認するため、油圧アクチュエータで加振中に入力電流を0Aから2.5Aまで正弦波状に変化させて実験を行った。その結果を図8に示す。

入力電流と発生荷重の関係に若干のヒステリシスが存在していることが解る。これは入力電圧から荷重発生までの遅れ等による影響と思われる。また、荷重の変動範囲は約0.7kNから約5kNであることが解る。なお、定格入力電流が4Aなのに対し、実験では2.5Aまでとしたのは、実験で用いた電源アンプの定格電圧とコイルの電気抵抗の関係により2.5A程度までしか入力することができないためである。この条件下においても、この荷重変動幅であれば、今後実施を予定している実験建物モデルを用いた振動実験で必要とされる荷重範囲を十分満たしている。

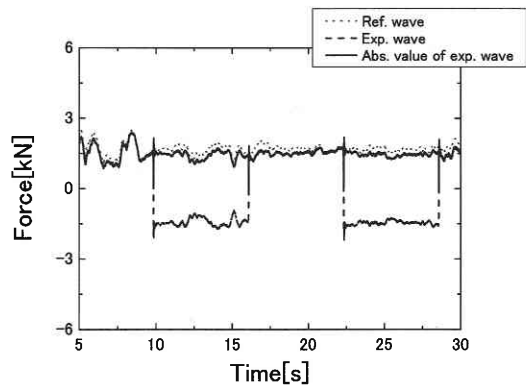
3.2.4 追従性向上試験

入力電流と発生荷重におけるヒステリシスの存在や、応答性の遅れおよび目標荷重への追従性向上を考慮し、MRダンパの発生荷重が目標荷重に追従するフィードバック制御系を構築した。用いた制御器は、発生荷重の定常偏差低減を考慮しPI制御器とした。そのときのブロック線図を図9に示す。

セミアクティブ免震で必要とされる荷重を数値解析より求め、この荷重を目標荷重とし実験を行った。そのときの発生荷重を図10に示す。図には、比較のためフィードバック制御系を構築しない場合も示す。各図には目標荷重(点線)と、実験より得られた計測荷重(破線)および計測荷重の絶対値(実線)を示す。これらの結果からフィードバック制御器を構築しない場合は、波形の形状は良く一



(a) フィードバック制御器を構築した場合



(b) フィードバック制御器を構築しない場合

図10 追従性確認試験結果

致しているが目標荷重値と発生荷重値に多少の誤差がみられる。一方、フィードバック制御器を構築した場合は、荷重の方向が切り替わる時点で多少波形が乱れるが、目標荷重と発生荷重はほぼ一致しており、より精度良く目標荷重に追従していることがわかる。

3.3 解析モデル

MRダンパの解析モデルを、特性実験結果より図11に示すようなビンガムモデルと不感帯をあわせたモデルとした。

また、MRダンパの遅れに関して以下に示す一次遅れ系を用いモデル化した。

$$T_L \dot{f}(t) + f(t) = f'(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 T_L は時定数、 $f(t)$ はMRダンパの発生荷重を表す。以上の解析モデルを用いたときのMRダンパの荷重の履歴特性を図12に示す。

図中には、比較のため特性実験で得られた履歴特性も同時に示す。この結果から、本解析モデルが実験結果と良く一致していることがわかる。これより、今後のセミアクティブ免震の制御系設計およびセミアクティブ免震の数値解析において本解析モデルを用いることとする。

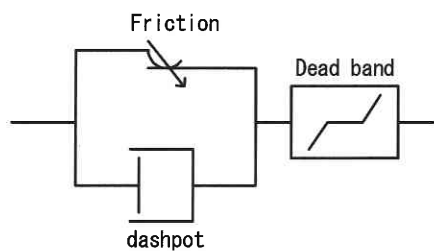


図 11 MR ダンパのモデル

6. ま と め

免震実験用の MR ダンパを実際に製作し、その特性実験を行った。これらの実験から MR ダンパに応答の遅れや荷重の方向が切り替わるときの不感帯の存在が確認された。また、MR ダンパに PI 制御器を付加することにより、より精度よく目標とする荷重に一致させることが可能であることを確認した。

さらに、特性実験から得られたデータより MR ダンパの遅れおよび不感帯を考慮した解析モデルを作成した。本解析モデルが実験結果と一致しており、セミアクティブ免震の制御系設計、数値解析および振動制御実験に用いるのに十分なものであることを確認した。

(2004 年 9 月 29 日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤田, 壁矢ほか, 機論 (C 編) 57 巻 536 号 (1991)
- 2) 袖山, 砂子田ほか, 機構論, No. 00-6, 738 (2000)

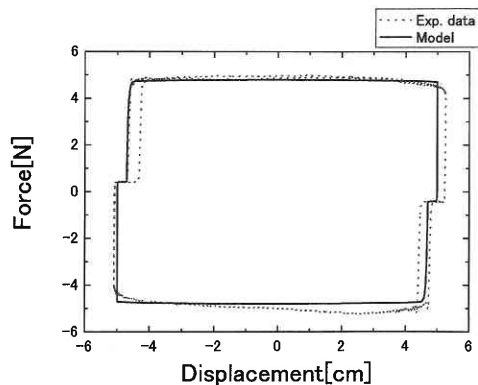


図 12 荷重の履歴特性 (解析モデルと実験値)