漸硬型抵抗力特性を持つ受動型 MR ダンパ* (準能動型 MR ダンパとの比較)

神田 佳^{*1}, 大亦 絢一郎^{*2}, 阿部 直人^{*3}
若林 信宏^{*4}, 與久田 健次^{*5}

Passive Type MR Damper with Hardening Type Resisting Force Characteristic (Comparison with Semi-Active Type MR Damper)

Kei KANDA, Kenichiro OHMATA^{*6}, Naoto ABE,
Nobuhiro WAKABAYASHI and Kenji YOKUDA

^{*6} Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University,
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 214-8571 Japan

In this paper, the authors propose a passive type MR damper which has hardening type resisting force characteristic. The damper consists of a piston, a cylinder, MR fluid and rare-earth magnets which are attached symmetrically about the center of the cylinder. A trial damper was made and the resisting force characteristic was measured. A semi-active type MR damper with a bypass was also made to compare the passive type MR damper. The frequency and seismic responses of a single-degree-of-freedom system supported with the MR dampers were measured with a shaking table using permanent magnets. The effects of vibration suppression of both dampers were compared, and the equality of the passive type MR damper with the semi-active type MR damper was substantiated. The experimental results were compared with calculated results, and the validity of the calculations was confirmed.

Key Words: MR Damper, Passive Type, Semi-Active Type, Rare-Earth Magnet, Frequency Response, Seismic Response

1. はじめに

質量-ばね-ダンパから成る1自由度振動系が変位加振を受けるとき、広い振動数範囲にわたって共振曲線を低下させるためには、共振点付近では減衰を大きくし、高振動数領域では減衰を小さくするのが良いことは、よく知られている。このような減衰特性を実現する一つの方法として、最近では、MR流体を用いた準能動型ダンパが開発され、建物等の制振に利用されている^{(1)~(11)}。準能動型ダンパの場合は、ダンパの他にセンサやプロセッサ(コンピュータ)も必要になるので、値段的には受動型に比べて高価なものとなる。したがって、受動型ダンパに上記のような可変減衰機能を持たせることができれば、安価で制振性能のよいダンパが得られることになる。

本研究では、共振点付近(大振幅領域)では大きな減

衰を与え、高振動数領域(小振幅領域)では小さな減衰を与えるような可変減衰特性を持つ受動型ダンパを得ることを目的とする。このような受動型ダンパの一つとして、ここではMRダンパの外側に間隔をおいて2組の希土類磁石を配置した、漸硬型抵抗力特性を持つ受動型MRダンパを提案する。このMRダンパを試作して、その抵抗力特性を実験と計算によって調べる。次に、本ダンパを1自由度振動系に取付けたときの制振効果を、周波数応答実験と解析および地震応答実験と解析によって確認する。続いて、試作した受動型MRダンパと同程度の抵抗力を発生するバイパス式準能動型MRダンパを試作し、1自由度振動系に取付け、スカイフック制御およびフィードフォワード制御を行ったときの制振効果を、周波数応答実験と解析および地震応答実験と解析により確かめる。これらの結果を比較することにより、本受動型MRダンパの制振性能が準能動型MRダンパの制振性能と同等であることを確認する。

2. 受動型 MR ダンパの構造

試作した受動型MRダンパの構造を図1に示す。受動型MRダンパでは、シリンダ中央から±45 mmの位置に上下6個ずつ、40×15×5 mmの長方形希土

* 原稿受付 2008年6月18日。

^{*1} 正員, 明治大学大学院理工学研究科(☎214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)。

^{*2} 正員, フェロー, 明治大学理工学部。

^{*3} 正員, 明治大学理工学部。

^{*4} 正員, (株)日立製作所(☎400-0304 南アルプス市吉田1000)。

^{*5} 電気化学工業(株)(☎103-8338 東京都中央区日本橋室町2-1-1)。

E-mail: ohmata@isc.meiji.ac.jp

類磁石が配置されており、上下の希土類磁石は磁気回路で連結されている。初期状態において、ピストンはシリンダの中央に位置しており、振動によってピストンが磁石部分に近づくと、オリフィス内で MR 流体中の強磁性微粒子が磁場方向に鎖状クラスタを形成するため流体が通過しにくくなり、抵抗力が漸硬的に増加するような構造となっている。

この受動型 MR ダンパのシリンダを除いて希土類磁石のみの状態とし、ガウスメータを用いてシリンダ中央線に沿った位置における磁束密度を測定した。実験結果の磁束密度分布を、有限要素法解析ソフト ANSYS による計算結果と合わせて図 2 に示す。図 2 から、本 MR ダンパは、シリンダ中央から約±40 mm の範囲で漸硬型抵抗力特性を持つことが期待できる。図 2 における実験値と計算値の違いは、おもに計算値が実験装置を取付けたリニアガイドと定盤の影響を考慮していないことによるものと考えられる。

3. 受動型 MR ダンパの抵抗力特性

3・1 実験結果 試作した受動型 MR ダンパの一端をロードセルを介して反力壁に、他端を水平振動台に固定し、振動台に振幅 70 mm、周波数 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 Hz の正弦波状変位を入力して抵抗力測定実験を行った。実験結果の抵抗力履歴曲線を図 3 に示す。図 3 から、本受動型 MR ダンパは、約±40 mm

の変位内で近似的に漸硬型の摩擦力と粘性減衰力を加えた抵抗力特性を持つことがわかる。この場合の粘性減衰係数の値を図 3 の 0.1 Hz と 1.5 Hz の履歴曲線から同定すると、145 Ns/m 程度となる。図 3 の 0.1 Hz の曲線が滑らかでないのは、MR 流体中の粒子の移動がスムーズでなかったためと考えられる。

3・2 抵抗力の近似式 図 3 から、受動型 MR ダンパの抵抗力 F_p [N] と変位 u [m] および速度 $\dot{u}$ [m/s] の関係を求めると、近似的に次式のように表される。

$$F_p = (\alpha \times |u|^2 + \beta \times |u| + \gamma) \times \text{SIGN}(\dot{u}) + 145 \dot{u} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} (76\,400, 0, 15.0) & (|u| \leq 0.02) \\ (122\,000, 1\,830, 33.3) & (0.02 < |u| \leq 0.03) \\ (-336\,000, 27\,200, -345) & (0.03 < |u| \leq 0.05) \\ (122\,000, 1\,890, 736) & (0.05 < |u| \leq 0.08) \end{cases}$$

ここで、SIGN($\dot{u}$) は $\dot{u}$ の正、零、負に応じて 1, 0, -1 の値をとる符号関数である。式(1)を用いて、本ダンパに振幅 70 mm、周波数 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 Hz の正弦波状変位を与えたときの抵抗力を計算すると、図 4 のようになる(実際の使用範囲は、振幅 40 mm 以下となる)。図 3, 4 からわかるように、0.5 Hz および 1.0 Hz における抵抗力の計算値が実験値よりもやや小さくなっているが、全体的には計算値と実験値はほぼ一

Fig. 1 Construction of the passive MR damper

Fig. 2 Distribution of the magnetic flux density

Fig. 3 Resisting force characteristics (Experiment)

Fig. 4 Resisting force characteristics (Calculation)

致しており、式(1)の妥当性が確認できた。

4. 準能動型 MR ダンパの構造と 抵抗力特性

4.1 準能動型 MR ダンパの構造 本研究で提案する受動型 MR ダンパが準能動型 MR ダンパと同等の制振性能を有することを確認するために、バイパス式準能動型 MR ダンパを試作した。試作した準能動型 MR ダンパの外観を図5に示す。本準能動型 MR ダンパでは、シリンダの端部間にバイパスを設け、バイパス中央部に電磁石を取付けて、印加電流により抵抗力を制御できるようにした。バイパスを取除き、ガウスメータを用いて測定した、バイパス中心における印加電流と磁束密度の関係を図6に示す。図6から、本準能動型 MR ダンパは、印加電流 0~2 A で磁束密度が電流にほぼ比例して増加する特性を持つことがわかる。

4.2 準能動型 MR ダンパの抵抗力特性 受動型 MR ダンパの抵抗力測定実験と同じ実験装置を用い、0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 A の電流を印加した準能動型 MR ダンパに、振幅 40 mm, 周波数 2.0 Hz の正弦波状変位を与えて測定した抵抗力履歴曲線を図7に示

Fig. 5 Construction of the semi-active MR damper

Fig. 6 Relation between current and magnetic flux density

す。図7から、試作した準能動型 MR ダンパの抵抗力は近似的に摩擦力と粘性減衰力の和で与えられ、電磁石に加える電流と共に増大することがわかる。図7より、準能動型 MR ダンパの抵抗力 F_s [N] と電流 i [A] および速度 $\dot{u}$ [m/s] の関係は、近似的に次式のように求まる。

$$F_s = (-2.07i^3 + 14.3i^2 + 4.10i + 17.2) \times \text{SIGN}(\dot{u}) + 99.6\dot{u} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式は、電流 4 A, 速度 0.5 m/s までの範囲で求めたものである。式(2)を用いて、0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 A の電流を印加した準能動型 MR ダンパに、振幅 40 mm, 周波数 2.0 Hz の正弦波状変位を与えたときの抵抗力を計算すると、図8のようになる。図7, 8からわかるように、実験値と計算値はほぼ一致しており、式(2)の妥当性が確認できた。図7の各曲線がわずかに左上りになっているのはピストンロッドの慣性力によるものであるが、その値は小さいので、振動解析においては無視した。

試作した MR ダンパを数週間放置してから同様な抵抗力測定実験を行ったところ、受動型 MR ダンパの場合は、最初から図3にほぼ一致する抵抗力特性が得られたが、準能動型 MR ダンパの場合は、最初は硬く、60 回程度繰り返して実験を行っている内に図7のような抵抗力特性に達した。最初の硬い抵抗力は、MR 流体内の粒子の沈殿によるものと考えられる。

Fig. 7 Resisting force characteristics (Experiment)

Fig. 8 Resisting force characteristics (Calculation)

5. 振動モデルと制御則

5.1 振動モデルと運動方程式 試作した受動型 MR ダンパおよび準能動型 MR ダンパの制振性能を比較検討するために、両ダンパを1自由度振動系に取付けたときの周波数応答実験と解析および地震応答実験と解析を行った。解析モデルを図9に示す。図9において、 m は主質量、 k はばね定数、 c_{eq} 、 f_{eq} はそれぞれ実験に使用したリニアガイドの粘性減衰係数と摩擦力を表し、 x は主質量の絶対変位、 $u (=x-z)$ は主質量と床の間の相対変位、 z は入力変位を表す。この振動系が入力加速度 $\ddot{z}$ を受けたときの運動方程式は次式のように表される。

$$m\ddot{u} + c_{eq}\dot{u} + ku + f_{eq}\text{SIGN}(\dot{u}) + F_d = -m\ddot{z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 F_d はダンパの全抵抗特性を表し、受動型 MR ダンパの場合は近似的に式(1)の F_p で与えられ、準能動型 MR ダンパの場合は式(2)の F_s で与えられる。式(3)を MATLAB/Simulink を用いてプログラムし、数値解析を行った。また、数値解析に用いた1自由度振動系の諸元は実験装置の諸元と同じであり、表1に示す通りである。

5.2 準能動型 MR ダンパの制御方法 振動実験に際して、準能動型 MR ダンパの制御には、予備実験を行った中で制振効果の高かったスカイフック制御と入力加速度フィードフォワード制御を用いた。

Table 1 Parameters of 1 DOF model

Mass	m	62 kg
Stiffness	k	9.8 kN/m
Damping coefficient	c_{eq}	4.1 Ns/m
Friction force	f_{eq}	3.5 N
Damping force	F_d	F_p , F_s [N]

Fig.9 Analytical model

(1) スカイフック制御(Karnopp ら⁽¹²⁾による on-off 切替え制御)

$$i = 2.0 \text{ [A]} \quad \text{if } x \cdot \dot{u} \geq 0$$

$$i = 0 \text{ [A]} \quad \text{if } x \cdot \dot{u} < 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

(2) 入力加速度フィードフォワード制御

$$i = 0.5|\ddot{z}| \text{ [A]} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(2)～(4)を MATLAB/Simulink を用いてプログラムし、準能動型 MR ダンパに電流を流さない場合 (Soft)、 $i=2.0$ A の一定電流を流した場合 (Hard)、およびスカイフック制御を行った場合の周波数応答曲線を計算した。計算結果を図10に示す。なお、制御時における準能動型 MR ダンパの抵抗特性の計算では、振動系を時定数 $T (=0.1 \text{ sec})$ 、収束値 F_s の1次遅れ系とみなして計算を行った。図10の計算結果から、スカイフック制御の場合は Hard の場合とそれ程変わらない制振効果を与えることがわかる。

6. 周波数応答実験と解析

試作した2種類の MR ダンパを1自由度振動系に取付け、永久磁石式振動試験機を用いて1自由度振動系の基礎部に振幅 10 mm、周波数 0.5～5 Hz の正弦波状変位を与え、主質量の絶対振幅比(応答振幅と入力振幅の比)を測定した。主質量と振動台の絶対振幅は、サーボ型加速度計を用いて測定した絶対加速度を、積分器により2回積分して求めた。実験結果の周波数応答曲線を計算結果と合わせて図11に示す。図11から、受動型 MR ダンパとスカイフック制御した準能動型 MR ダンパは、同等の制振性能を持っていること、および計算値は、受動型 MR ダンパ取付け時の共振点付近で実験値よりもやや小さくなっている以外は、実験値にほぼ一致していることがわかる。

7. 地震応答実験と解析

周波数応答実験と同じ実験装置を用いて、振動台に最大加速度を $1 \sim 4 \text{ m/s}^2$ に基準化した Imperial Val-

Fig.10 Frequency responses (Calculation)

ley 地震(1940) El Centro NS 成分および兵庫県南部地震(1995)神戸海洋気象台 NS 成分を入力し、主質量の絶対加速度および床に対する相対変位を測定した。受動型および準能動型 MR ダンパを取付けた場合について、El Centro NS 成分入力時および神戸海洋気象台 NS 成分入力時の最大応答値(実験値)を図 12(a), (b)に示し、応答波形の実験値と計算値の一例を図 13, 14 に示す。図 12~14 より、試作した受動型 MR ダンパと準能動型 MR ダンパの制振性能はほぼ等しく、これらのダンパを取付けると、ダンパなしの場合に比べて、主質量の最大加速度は約 1/2 に低減し、最大相対変位も約 1/2 に低減することがわかる。

(a) Passive damper

(b) Semi-active damper (Skyhook)

Fig. 11 Frequency responses

(a) El Centro NS

(b) JMA Kobe NS

Fig. 12 Maxima of the responses

(a) Input wave

(b) Without damper

(c) With passive damper

(d) With semi-active damper (Skyhook)

(e) With semi-active damper (Feed forward)

Fig. 13 Response waves (El Centro NS 4.0 m/s²)

スカイフック制御とフィードフォワード制御を比較すると、スカイフック制御の方が高い制振効果が得られるが、加える電流はフィードフォワード制御の方が少なく済む。また図 13, 14 よりわかるように、計算結果は、抵抗力履歴曲線および入力電流波形の一部を除いて、定性的および定量的に実験結果とほぼ一致しており、計算結果の妥当性が確かめられた。

8. ま と め

漸硬型抵抗力特性を持つ受動型 MR ダンパおよびバイパス式準能動型 MR ダンパを試作し、1 自由度振動系に取付けたときの周波数応答実験と解析および地震応答実験と解析を行って両ダンパの制振性能を比較検討した。主な結果は以下の通りである。

(1) シリンダの外側に対称的に 2 組の希土類磁石を配置した受動型 MR ダンパの抵抗力は、ほぼ摩擦力と粘性減衰力の和によって与えられ、摩擦力は約 ± 40 mm の範囲内で変位と共に増加する漸硬特性を持つ。

(2) 試作したバイパス式準能動型 MR ダンパの抵抗力は、ほぼ摩擦力と粘性減衰力の和で与えられ、摩擦力はダンパに印加する電流と共に増加する。

(3) 1 自由度振動系に受動型および準能動型 MR

ダンパを取付けた場合の周波数応答実験と解析を行った結果、両ダンパは共振点付近および、高振動数領域の両方で制振効果を持つことがわかった。また、試作した受動型 MR ダンパおよび準能動型 MR ダンパは、ほぼ同程度の制振性能を持つことが確認された。

(4) 1 自由度振動系に受動型および準能動型 MR ダンパを取付けた場合の地震応答実験と解析を行った結果、どちらのダンパを取付けた場合も、ダンパなしの場合に比べて、主質量の最大加速度は約 $1/2$ に低減し、最大相対変位も約 $1/2$ に低減することがわかった。

(5) 周波数応答解析および地震応答解析において、抵抗力履歴曲線と入力電流波形の一部を除き計算結果は実験結果にほぼ一致しており、計算の妥当性が確認できた。

(6) 受動型 MR ダンパにおいて、さらに大きな振幅にわたって漸硬型抵抗力特性を持たせるためには、磁石間距離を広げ、その間により小さな 2 組の磁石を配置する(磁石部分を 4 箇所にする)ことが必要にな

Fig. 14 Response waves (JMA Kobe NS 4.0 m/s²)

る。

終わりに、ダンパの製作と実験にご協力いただいた明治大学機械力学研究室卒業生の和田拓也君、張穎さんに謝意を表する。また、本研究の一部は平成15年度選定文部科学省学術フロンティア推進事業の一環として行われたことを付記し、ご支援に対してお礼申し上げる。

文 献

- (1) Carlson, J.D. and Spencer, Jr., B.F., Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control, *Proc. 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, Vol. III (1996-9), pp. 35-40.
- (2) Tsuchiya, T. et al., Vibration Control with a Variable Damping Mount Using MR Fluid, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 65, No. 640 (1999), pp. 4671-4676.
- (3) Sunakoda, K. et al., Dynamic Characteristics of Magneto-Rheological Fluid Damper, *Proc. SPIE's 7th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 3989 (2000-3), pp. 194-203.
- (4) Sodeyama, H. et al., Development of a Magneto-Rheological Fluid Damper for Semi-Active Vibration Control Systems of Real Building Structures, *Proc. 5th Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, Vol. II (2000-12), pp. 725-730.
- (5) Pan, G. et al., Controllable Vibration Damper Using Magnetorheological Fluid, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No. 660 (2001), pp. 2506-2512.
- (6) Pranoto, T. et al., Shear Type Linear MR Fluid Damper and Its Application to Plate Vibration Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 68, No. 667 (2002), pp. 761-767.
- (7) Nishimura, H. and Kayama, R., Gain-Scheduled Control of a Semi-Active Suspension Using an MR Damper, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 68, No. 676 (2002), pp. 3644-3651.
- (8) Sodeyama, H. et al., A Study on Design Method of the Bypass Type MR Damper, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 625-632.
- (9) Shi, F. et al., Optimization for a Semi-Active Shock Absorber Using Magnetorheological Fluid, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 708 (2005), pp. 2492-2500.
- (10) Tanaka, T. et al., Semi-active Control Strategy with Nonlinear Predictive Control and Development of MR Damper with Expanded Variable Damping Region, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 714 (2006), pp. 340-346.
- (11) Sato, E. and Fujita, T., Semi-Active Seismic Isolation System with Controllable Viscous Dampers Using Magneto-Rheological Fluid, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 717 (2006), pp. 1428-1434.
- (12) Karnopp, D. et al., Vibration Control Using Semi-Active Force Generators, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 2 (1974), pp. 619-626.