

MRダンパーをバリアブルダンパーとして用いた橋の地震応答

中村剛¹⁾・Anat Ruangrassamee²⁾・川島一彦³⁾

1) 東京工業大学工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

2) チュラロンコ大学土木工学科助教授 (Phayathai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND)

3) 正会員・東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

1. はじめに

橋梁の地震応答を制御するためには、エネルギー供給が少なくすむことから、セミアクティブコントロールが有効と考えられている。従来型の粘性ダンパーでは減衰力を構造物の応答に応じて任意に変化させることは困難であったが、Kawashima and Unjoh (1994)¹⁾ はバリアブルダンパーとして初めて構造物の応答依存性を有するダンパーを開発し、解析、実験両面からこの有効性を示した。これは粘性ダンパーにバイパスを設け、バイパスのオリフィスをサーボバルブでコントロールすることにより任意に減衰力を設定できるようにしたものである。しかしながら、近年、MRダンパーが開発され、さらに容易に変型ダンパーの製作が可能になりつつある。橋梁は地震時に橋脚や下部構造の塑性化、桁間衝突等により強い非線形性を有すると考えられる。したがって、バリアブルダンパーを用いた応答制御においては、こうした強い非線形下でも作動し、また、構造物の応答を効率よく制御できるものでなければならない。

ここでは、MRダンパーを用いたバリアブルダンパーを開発することを目的として、小型MRダンパーを用いてその特性を明らかにすると同時に、2種類の減衰力モデルを開発し、これらの有効性を振動台実験とその解析によって検討した結果を示す。

2. 解析で対象とするMRダンパーの制御則

MRダンパーの制御則として、図1に示すように、粘性減衰型、非線形粘性減衰型、摩擦型、2段階摩擦型の4種類を考える。ここで、粘性減衰型は一般的な粘性減衰を表現するためにMRダンパーを用いただけのものであり、非線形粘性減衰型は粘性型減衰において、最大減衰力が F_{Dy} で頭打ちするようにしたものである。すなわち、粘性減衰型、非線形粘性減衰型ダンパーの減衰力はそれぞれ式(1)、(2)

によって与えられる。

$$F_D = c\dot{u} \quad (1)$$

$$F_D = c\dot{u} \quad \text{ただし, } |c\dot{u}| < F_{Dy} \quad (2)$$

ここで、 c はMRダンパーの粘性係数、 F_{Dy} は降伏減衰力である。

また、摩擦型減衰はエネルギー吸収効率が良いため、橋梁への適用性が良いが、摩擦係数をある程度以上大きくすると桁と橋脚がロックされ、エネルギー吸収ができなくなる。ロックが生じるのは応答速度が小さくなる範囲であるため、桁と橋脚間の相対速度がある値 $\dot{u}_c$ 以下となった場合には、減衰力を摩擦力 F_F からある割合 α ($\alpha < 1$, 減衰力低減係数)だけ減少させようというのがここで提案する2段階摩擦型減衰である。すなわち、摩擦型、2段階摩擦型の減衰力はそれぞれ式(3)、(4)のように与えられる。

$$F_D = \begin{cases} F_F & \cdots \dot{u} > 0 \\ -F_F & \cdots \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_D = \begin{cases} F_F & \cdots \dot{u} > \dot{u}_c \\ \alpha F_F & \cdots 0 < \dot{u} \leq \dot{u}_c \\ -\alpha F_F & \cdots -\dot{u}_c \leq \dot{u} < 0 \\ -F_F & \cdots \dot{u} < -\dot{u}_c \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)において、 $\dot{u} = 0$ のときには F_D は外部作用力に応じて、それぞれ $-F_F \sim F_F$ 、 $-\alpha F_F \sim \alpha F_F$ 任意の範囲にある値をとる。

3. MRダンパーに対する繰り返し載荷実験

(1) MRダンパー特性の定式化

減衰力と電流の関係を検討するために、MRダンパー単体の繰り返し載荷実験を行った。実験には0～2Aで作動し、最大減衰力100NのMRダンパー (Lord Corporation, RD1084-1B, Current Driver RD-3002) を用いた。図2に示すように、MRダンパーの一端をアクチュエーターに、他端を反力床に固定

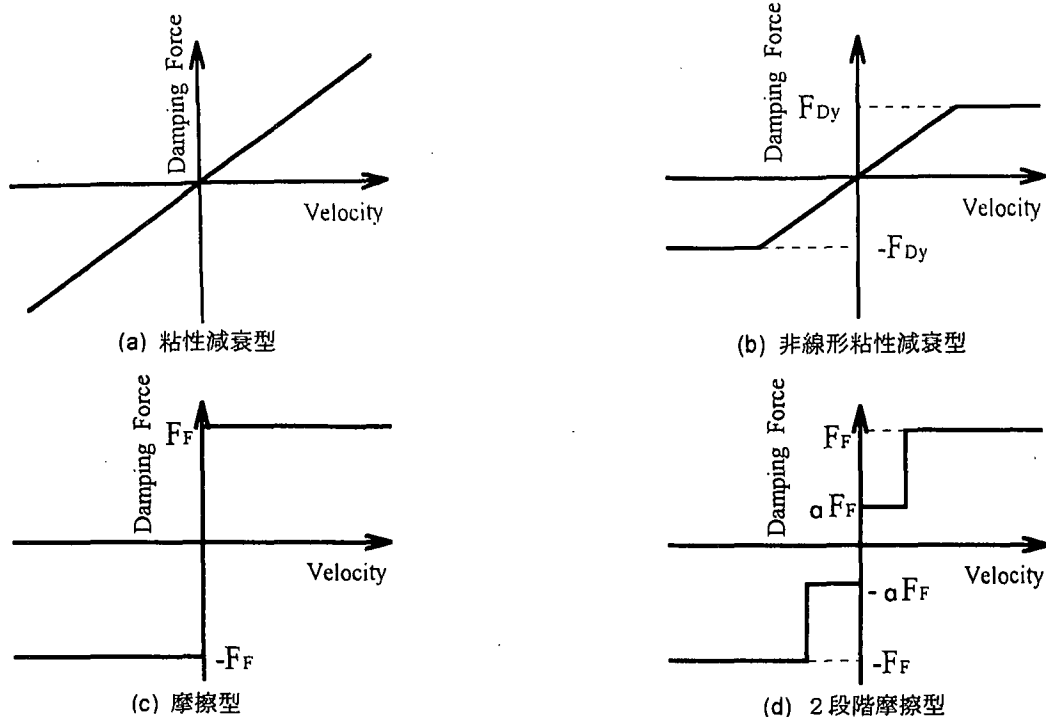


図1 MRダンパーの制御則

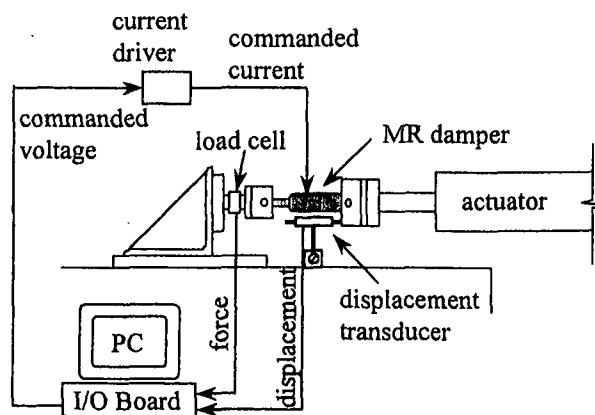


図2 繰り返し載荷実験装置

し、変位制御で正弦波によって加振し、減衰力 F_D (N) と電流 I (A) の関係を次式のように求めた。

$$F_D = 173.8I + 9.0 \quad (5)$$

上式では $I = 0$ でも減衰力が生じるが、これは摩擦等の影響やMR流体の持つ特性によると考えられる。式(5)の載荷速度依存性を検討したが、載荷速度 $\dot{u}$ が $|\dot{u}| \leq 300 \text{ mm/s}$ の範囲ではほとんど載荷速度の依存性は認められなかった。

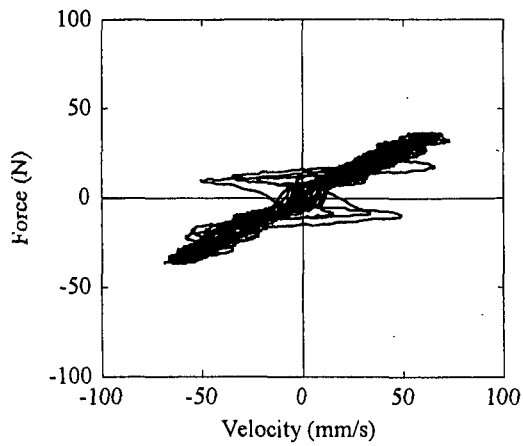
(2) アルゴリズム制御によるMRダンパーの繰り返し載荷実験

式(5)を用いることにより、意図した減衰力がどの程度正確に出力されるかを調べるため、MRダンパーに対して繰り返し載荷実験を行った。図3、図4はこのようにして得られた粘性減衰型、非線形粘性減衰型履歴を用いた場合の結果を示したものであ

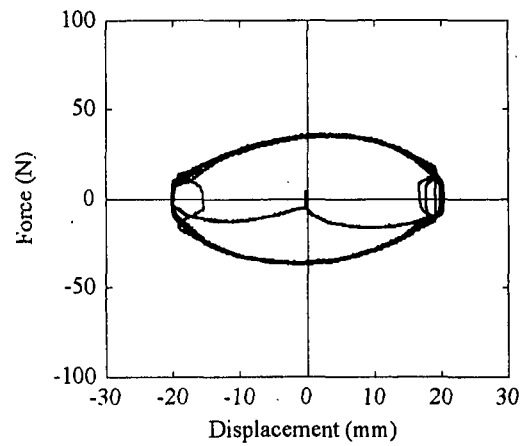
る。

図3によれば減衰力は速度に比例して増加しており、式(5)の適用性に問題ないことがわかる。減衰力～速度の履歴において、多少直線関係からずれた箇所があるが、これは減衰力～変位関係に示すように載荷を開始する段階と終える段階に相当するものである。また、減衰力～変位関係において、正側、負側ともに、最大変位に達する付近で履歴曲線の形状がひずんでいる。これは速度の符号が変化する付近でMRダンパーの減衰力にひずみが生じることを示している。

図4は降伏減衰力 F_{Dy} を 80 N とした場合の結果である。意図した非線形粘性減衰としての特徴は現れているが、降伏減衰力を 80 N としたにもかかわらず、減衰力は速度が $\pm 100 \text{ mm/s}$ 以下の範囲では押しと引きでは異なる履歴を描き、また、値も 40 N 程度にしか達しない。さらに、減衰力が降伏しだし

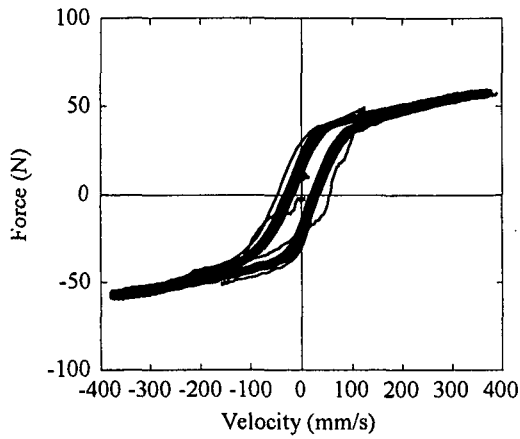


(a) 減衰力-速度関係

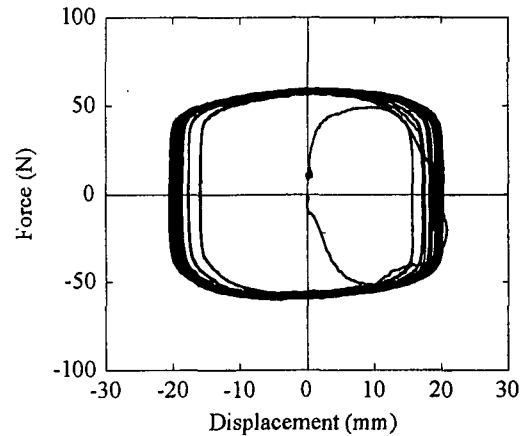


(b) 減衰力-変位関係

図3 粘性減衰型で制御した場合の履歴特性

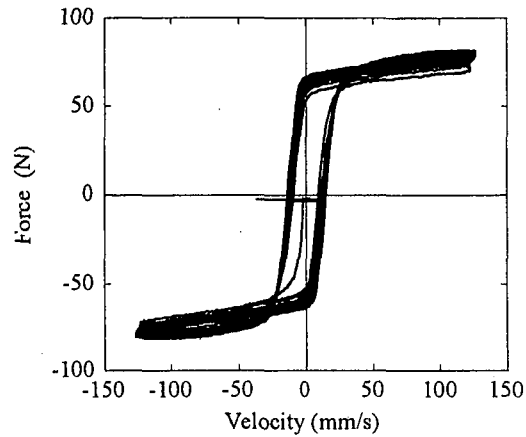


(a) 減衰力-速度関係

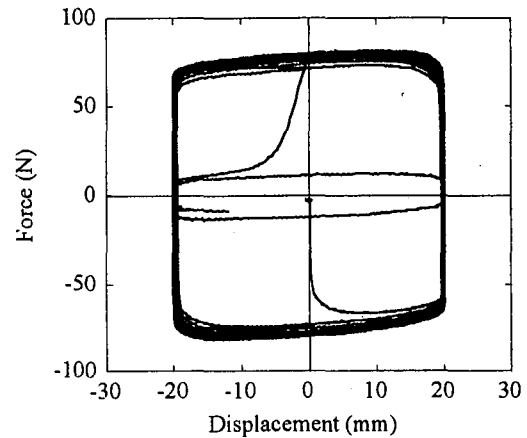


(b) 減衰力-変位関係

図4 非線形粘性減衰型で制御した場合の履歴特性



(a) 減衰力-速度関係



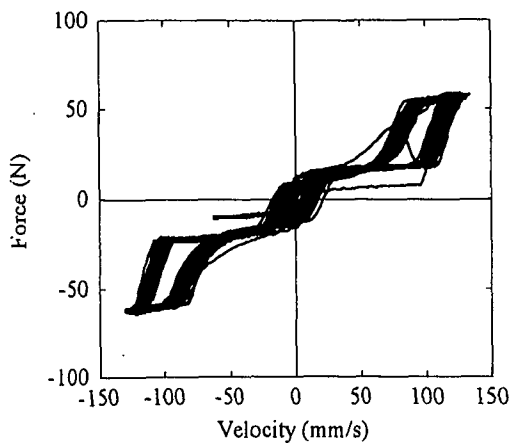
(b) 減衰力-変位関係

図5 摩擦型で制御した場合の履歴特性

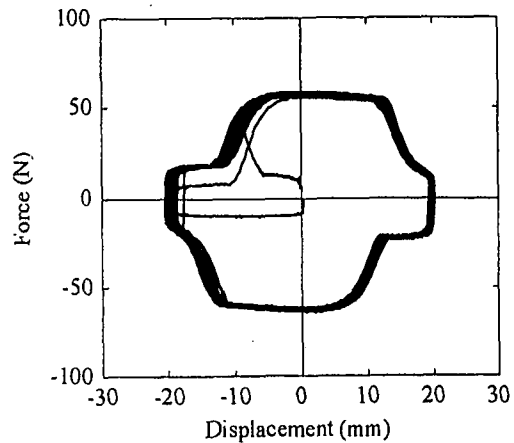
た後も徐々に減衰力が増加していき、速度が 400mm/s 付近で 50N 程度の減衰力となっている。このため、図3に示したよりもさらに最大変位付近における減衰力のひずみが大きくなっている。この理由としては、上述した摩擦の影響のほか、速度の速い領域ではMR流体の追従性に限界があるためと考えられるが、詳細は今後さらに検討していく必要

がある。

図5、図6は、それぞれ摩擦型、2段階摩擦型の履歴を示した結果である。摩擦型の場合には $F_F = 79\text{N}$ としたが、ほぼコマンド通りの減衰力の出力を得ることができた。摩擦型ダンパーの減衰力-変位関係は長方形の形状になるが、この特性もよく現れている。一方、2段階摩擦型の場合には、減



(a) 減衰力-速度関係



(b) 減衰力-変位関係

図6 2段階摩擦型で制御した場合の履歴特性

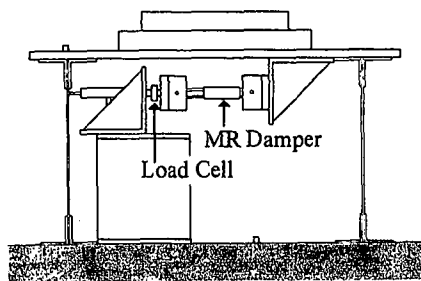


図7 振動台実験の橋模型

衰力大きい部分では約 60N, 減衰力を小さくした部分では約 20N の値が生じている。ここでは減衰力低減係数 $\alpha = 0.25$ としたため、ほぼこれに応じた結果となっている。ただし、減衰力を変化させる位置では減衰力がシャープに変化していない。これには上述したMR流体の速度追従性が関係していると考えられる。

以上のように、MRダンパーの速度依存性や速度が変化する位置における減衰力の再現にはまだいろいろな課題を残しているが、簡単なダンパー構造でおおよその減衰力を与えることができるといえる。

4. MR ダンパーを用いた模型橋の振動実験

MR ダンパーを用いた場合の橋の地震応答を検討するために、模型橋を用いた振動台加振実験を行った。実験に用いた模型橋は図7に示すとおりであり、鋼材で作製した。小型模型では支承のモデル化が困難であるため、桁と橋脚は剛固定とした。このためMRダンパーは桁～振動台間に取り付けた。橋模型の桁質量は 199kg であり、基本固有周期は 0.47 秒である。自由振動実験からMRダンパーを取り付けない状態での模型橋の減衰を求めると 2.7%となる。

実験ではMRダンパーを取り付けていない場合を

表1 振動台実験に用いた制御則のパラメータ

(a) 粘性減衰型

タイプ	粘性係数 c (Ns/mm)	降伏減衰力 (N)
粘性減衰型	1.0	—
非線形粘性減衰型	1.0	30

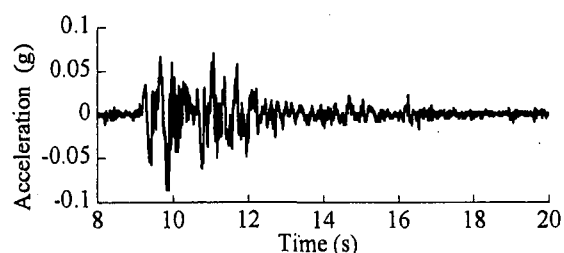
(b) 摩擦型減衰

タイプ	減衰力 F_p (N)	減衰力低減係数 α
摩擦型	80	—
2段階摩擦型	80	0.25 ($\dot{u} = 100\text{mm/s}$)

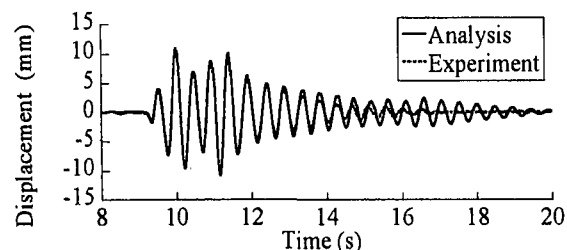
表2 免震橋の最大応答 (実験結果)

種別	入力加速度 (g)	桁変位 (mm)	減衰力 (N)
MRダンパーがない場合	0.086	10.4	—
	0.196	25.2	—
粘性減衰型	0.088	7.1	60.8
非線形粘性減衰型	0.092	7.6	26.7
摩擦型	0.182	16.3	75.6
2段階摩擦型	0.192	19.7	68.2

基本とし、これにMRダンパーを取り付け、粘性減衰型、非線形粘性減衰型、摩擦型、2段階摩擦型の4種類の制御則を用いた場合の応答を求めた。加振は橋軸方向に行っている。表1は各制御則のパラメータを示している。入力地震動には、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測記録のNS方向成分

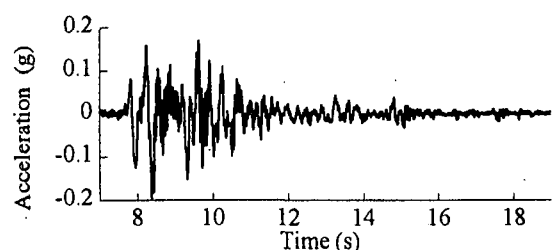


(a) 入力加速度

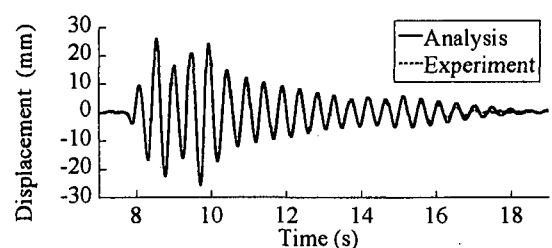


(b) 桁の応答変位

(1) 最大加速度 0.086g で加振した場合



(a) 入力加速度



(b) 桁の応答変位

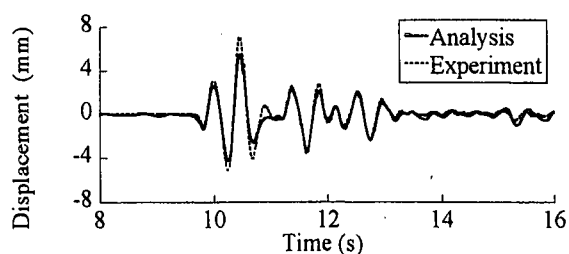
(2) 最大加速度 0.196g で加振した場合

図 8 MR ダンパーを取り付けていない場合の応答

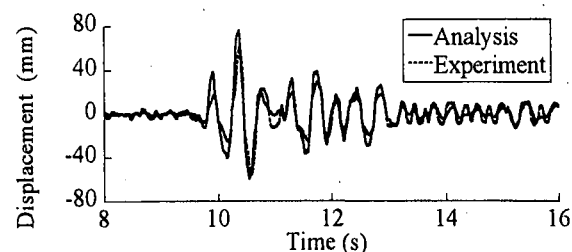
をスケールダウンして使用した。

図 8 はMRダンパーを取り付けない状態で、神戸海洋気象台記録を 0.086g および 0.196g にスケールダウンした記録で加振した場合の桁の応答変位である。ここには後述する解析結果も比較のために示している。いずれの場合にも減衰が小さい構造物の典型的な応答を示している。桁の最大応答変位は、表 2 に示すように、入力最大加速度が 0.086g の場合には 10.4mm, 入力最大加速度が 0.196g の場合には 25.2mm である。

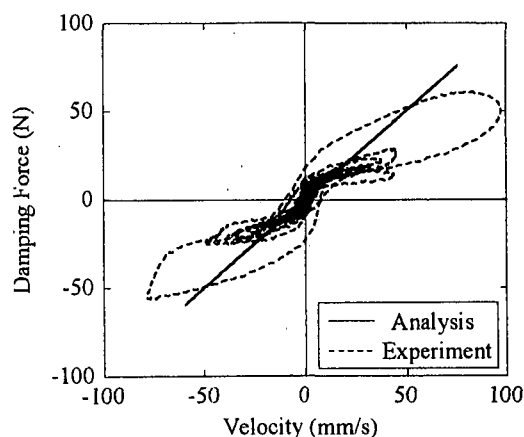
図 9 および図 10 はそれぞれ粘性減衰型および非線形粘性減衰型で制御した場合の応答である。それぞれ入力最大加速度は 0.088g, 0.092g で加振した場合の結果を示している。また、図 8 の場合と同じく、ここにも後述する解析結果が比較のために示されている。図 9 の粘性減衰型の場合には、桁の応答速度



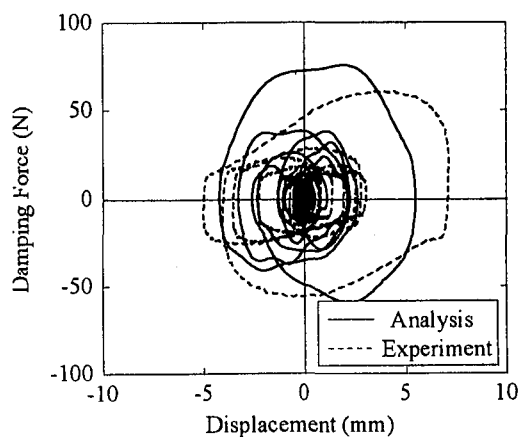
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



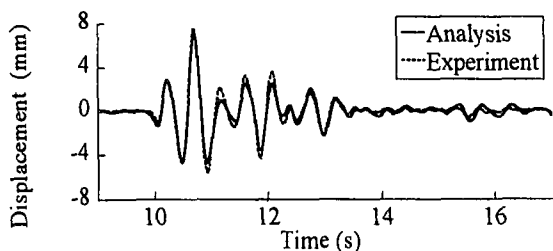
(c) 減衰力-速度関係



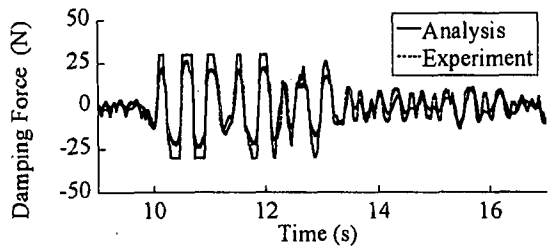
(d) 減衰力-変位関係

図 9 粘性減衰型制御を行った場合の応答

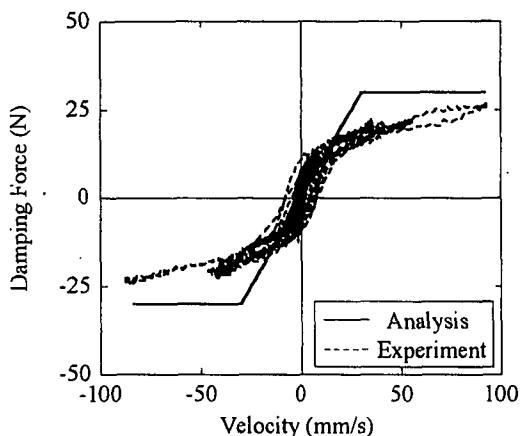
が大きくなるとMRダンパーの減衰力が十分でないため、減衰力～速度の関係がバイリニア型となっている。このため、図 10 に示す非線形粘性減衰型の場合に似た特性となっている。これは上述したMR流体の速度追従性によると考えられる。表 2 に示すように、桁の応答変位の最大は 7.1mm であり、最



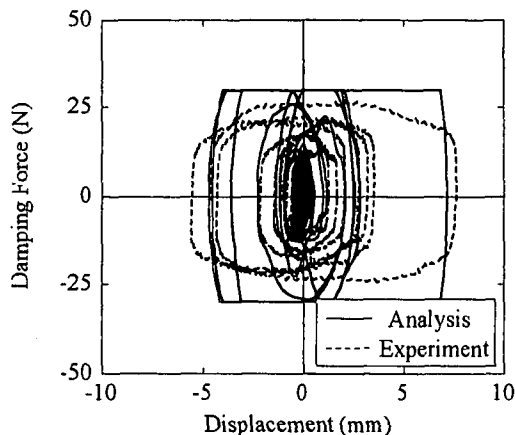
(a) 桁の応答変位



(b) MRダンパーの減衰力



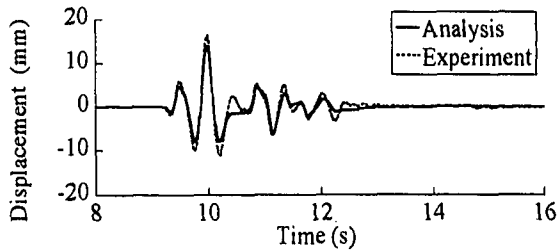
(c) 減衰力-速度関係



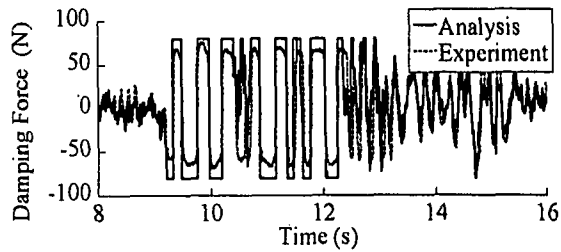
(d) 減衰力-変位関係

図 10 非線形粘性減衰型制御を行った場合の応答

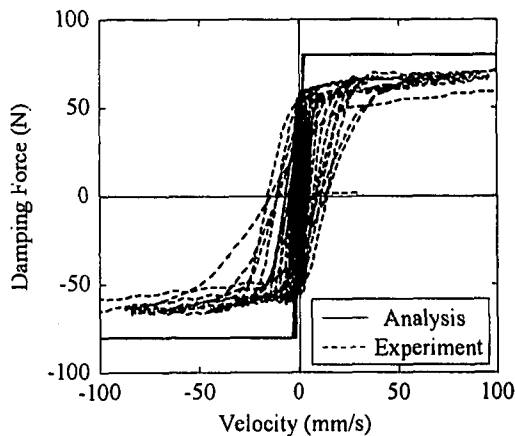
大減衰力は 60.8N である。非線形粘性減衰型の場合 (図 10) には、減衰力～速度の履歴は図 4 に示した減衰特性とよく似た特性を示している。減衰力の時刻歴や減衰力～変位の履歴にも減衰力に降伏させた特徴がよく現れている。表 2 に示すように、桁の応答変位の最大は 7.6mm であり、最大減衰力は



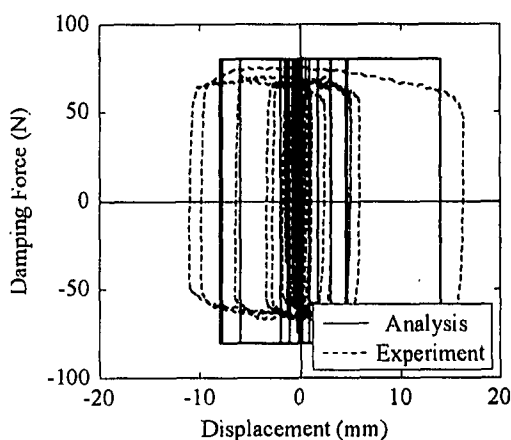
(a) 桁の応答変位



(b) MRダンパーの減衰力



(c) 減衰力-速度関係

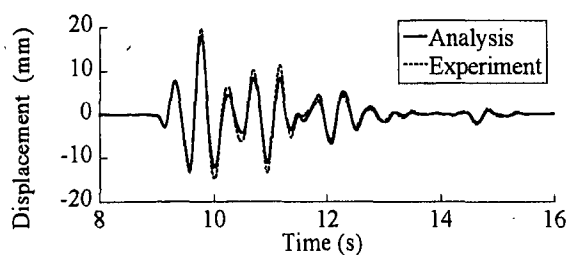


(d) 減衰力-変位関係

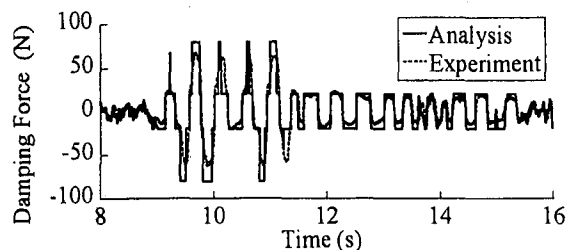
図 11 摩擦型制御を行った場合の応答

26.7N である。

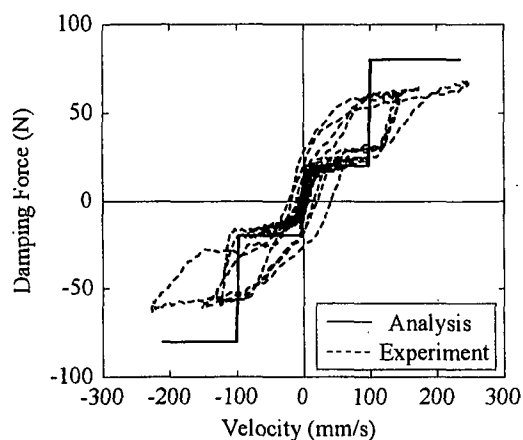
図 11, 図 12 はそれぞれ摩擦型および 2 段階摩擦型で制御した場合の応答である。それぞれ入力最大加速度は 0.182g, 0.192g で加振した場合の結果を示している。また、図 8～図 10 の場合と同じく、ここにも後述する解析結果が比較のために示されてい



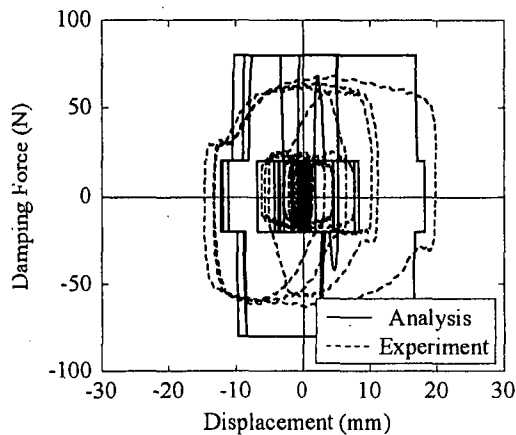
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



(c) 減衰力-速度関係



(d) 減衰力-変位関係

図 1 2 段階摩擦型制御を行った場合の応答

る。摩擦型減衰, 2 段階摩擦減衰の場合ともに, 減衰力~速度の関係はそれぞれ図 5, 図 6 に示した減衰力~速度の履歴をよく表している。表 2 に示すように, 桁の最大応答変位は, 摩擦型減衰で制御した場合には 16.3mm, 2 段階摩擦減衰で制御した場合には 19.7mm となる。入力最大加速度は同程度であっても摩擦型減衰で制御した場合の方が 2 段階摩擦

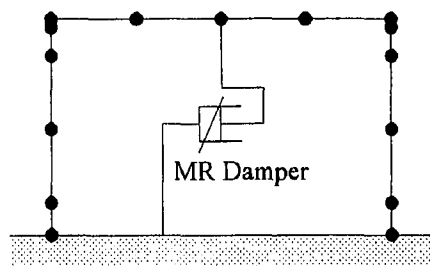


図 1 3 橋模型のモデル化

減衰で制御した場合よりも桁の応答変位は小さいが, これは今回用いた模型では支承がモデル化されていないため, 桁と地盤間に MR ダンパーを設置したためである。このようにした場合には, 減衰力を大きくした場合に桁と橋脚がロックする現象を再現できない。

5. 動的解析による模型橋の地震応答の解析

以上に示した模型橋の振動台実験結果を動的解析に基づいて解析した。解析モデルは図 13 に示す通りである。解析モデルでは桁質量は実験から得られた 199kg とし, 固有周期は計測した 0.47s と一致するように橋脚の剛性を微調整した。MR ダンパーを設置しない状態で模型橋が有していた減衰定数 (0.027) はレーリー型粘性減衰で与えることとし, 1 次および 2 次の減衰定数を 0.027 としてレーリー型粘性減衰の 2 つの係数を定めた。振動台実験においては橋模型の橋脚は塑性化していないため, 桁及び橋脚は線形はり要素でモデル化した。MR ダンパーは式(1)~式(4)に基づいて非線形ダンパー要素によりモデル化した。

以上のようにして, 上述した実験結果を解析した結果が前出の図 8~図 12 に示されている。MR ダンパーを取り付けない場合には, 解析値は実験値とよく一致している。振幅が 2mm 程度以下と小さい領域では解析値に比較して実験値の方が応答の減衰が小さいが, これは微小変位領域における MR ダンパーの特性によると考えられる。MR ダンパーを取り付けた場合には, 上述したように MR ダンパーの特性によって意図したとおりの減衰力が発揮されていないことによる解析値と実験値の差異が認められるが, 桁の応答変位や減衰力の時刻歴は全体としてよく一致している。

6. 結論

本研究では近年開発が著しい MR ダンパーの特性に着目し, これをバリアブルダンパーとして利用することを目的として 4 種類の減衰力履歴の適用性を検討した。このため MR ダンパーの減衰の特徴とこれを取り付けた模型橋の振動台実験を行い, これに対する非線形動的解析を実施した。これまでに得られた結論をまとめると以下のようになる。

- 1) MRダンパーの減衰力は、応答速度がある一定値以下であれば、式(5)の形で与えることができる。今回用いたMRダンパーでは摩擦力の影響は比較的小さく、また、速度依存性も小さかった。
- 2) 従来の粘性型および摩擦型の減衰特性を改良して、非線形粘性型および2段階摩擦型減衰特性を提案した。
- 3) 非線形粘性型および2段階摩擦型減衰特性を表すためには、速度変化に対してシャープに減衰力を切り替える必要があるが、MR流体の速度依存性のため、現状では意図したとおりの制御ができていない。これに対しては、制御方式の開発が必要である。
- 4) 模型振動実験にMRダンパーを使用すると、上記3)の制約があるが、全体としてはMRダンパーを取り付けることによって模型橋の応答はこれがない場合に比較して小さくなる。また、MRダンパーの特性を式(1)～式(4)によって与えることにより、

模型橋の応答をかなりの精度で解析することができる。

謝辞

本実験の実施に際しては、東京工業大学土木工学専攻の渡邊学歩助手、植原健治氏をはじめ、多数の方のご尽力を頂きました。また、University Of Notre Dame の Bill Spencer 教授のご指導を得ました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kawashima, K. & Unjoh, S., (1994), "Seismic Response Control of Bridges by Variable Dampers," Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 2583-2601, 120-9.
- 2) Anat Ruangrassamee & Kawashima, K., (2001), "Experimental Study on Semi-Active Control of Bridges with Use of Magneto-rheological Damper," Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.47A, pp.639-650.