

バリアブルダンパーとしての MR ダンパーの適用性に関する研究

中村剛¹・Anat RUANGRASSAMEE²・川島一彦³

¹学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²チュラロンコ大学助教授, Ph. D (Phayathai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, Thailand)

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

ダンパーの減衰力を任意に変化させることができれば、橋梁の地震応答を抑える上で有利であり、構造物の応答に応じて特性を変化させることのできるバリアブルダンパーの利用が効果的であると考えられている。本研究では、電流で減衰力を制御可能な MR ダンパーを用いたバリアブルダンパーの有効性を実験、解析の両面から検討する。小型 MR ダンパーの特性を明らかにすることを目的として繰り返し載荷実験を行った後、模型橋の振動台加振実験を行い、地震時の MR ダンパー及び橋梁の挙動を調べた。また、バリアブルダンパーをモデル化し、橋の地震応答を地震応答解析によってよく再現できることを示した。

Key Words: MR damper, variable damper, shaking table test, seismic design, bridge

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、橋梁の地震応答を低減するために、鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承等を用いたパッシブ制御が広く用いられるようになった。中小地震に対する居住性の向上のためにアクティブ制御が普及している建築物と異なり、居住性向上というニーズがなく、大規模地震時の耐震性向上が主目的となる橋梁の制御では、免震設計が重要な役割を果たす。大地震下では、橋梁は橋脚の塑性化や落橋防止構造の作用、桁間衝突等、強い非線形性を示す。このため、橋の地震応答に応じてパッシブ制御の特性を変化させることが有効と考えられる。

このようなコンセプトに基づいて川島、運上はバリアブルダンパーを提案すると同時に、最大減衰力 200kN のパイロットモデルを開発して、実験、解析両面からこの有効性を示した^{1),2)}。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。バリアブルダンパーを用いる際には、減衰力を橋の応答に応じてどのように変化させるか(減衰力の制御則)を予め与えておくプリセット方式と、最適制御理論に基づいてこれを与える方式がある。最適制御理論を用

いると、減衰力の大きさを与えることはできても、制御則を定めることはできない。このため、川島、運上はプリセット方式を採用して、上下部構造間の相対変位がごく小さい間には、風や交通振動による桁の応答を小さくするため減衰力を大きくし、地震により相対変位がある程度大きくなった場合には、エネルギー吸収が最大となるように減衰力を設定し、相対変位が過度に大きくなった場合には、減衰力を徐々に大きくして、ダンパーストッパーとして機能する制御則を提案した。

このほかにも、橋梁に対するバリアブルダンパーの適用は、佐藤ら³⁾、孫・後藤⁴⁾によっても行われている。また、バリアブルダンパーを用いた最適制御理論の適用も Yang らによっても行われている⁵⁾。

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ため、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。すでに、Ruangrassamee, 川島は、MR ダンパーの利用を念頭に置いて、バリアブルダンパーの制御則として、2段階摩擦型および2段階粘性減衰型制御則を提案し、これらが、桁と橋脚間のロックを防止し、強震時の橋の地震応答の低減に有効であることを解析的に示している^{6)~8)}。

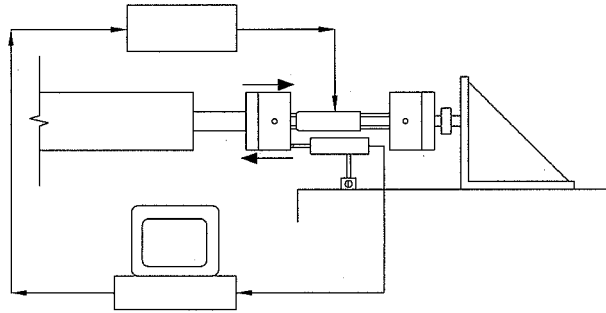


図-1 繰り返し載荷実験装置

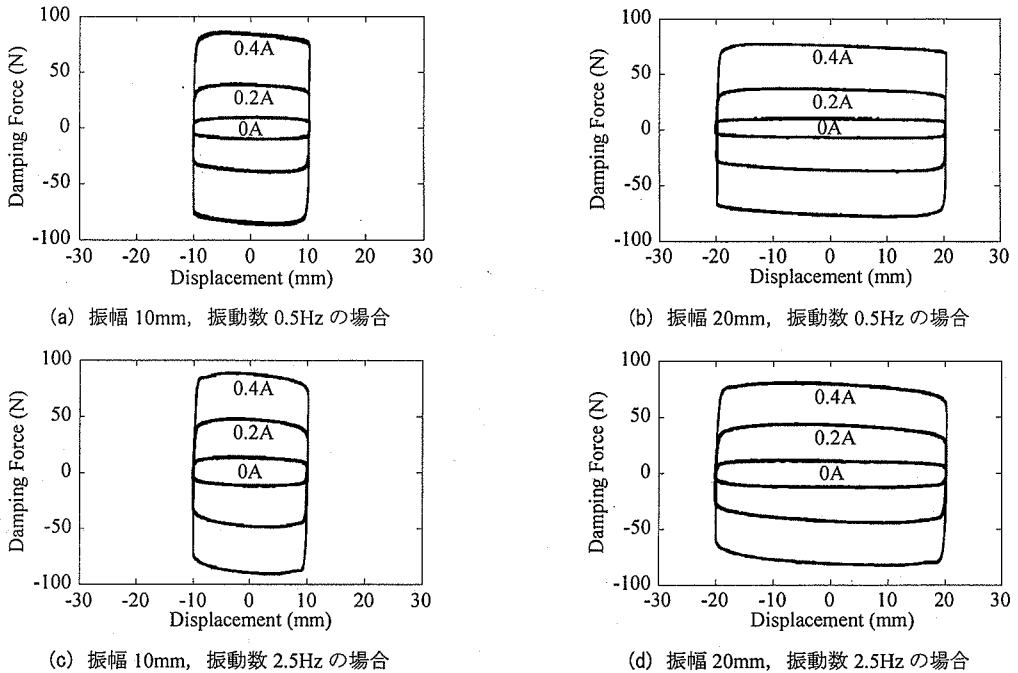
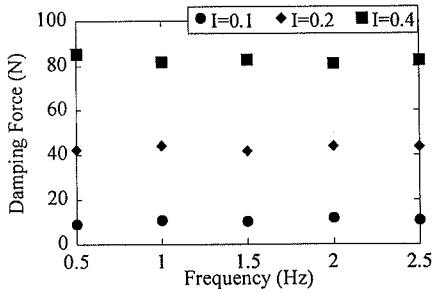


図-2 一定電流下におけるMRダンパー単体の減衰力～変位振幅の関係

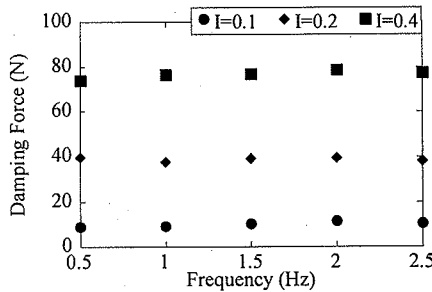
バリアブルダンパーでは、減衰力をいかに応答に応じて自由に変化させることができるかが重要である。近年、磁気粘性流体を用いたダンパー（以下、MRダンパーと呼ぶ）が開発され^{9),10)}、低速度領域ではサーボバルブを用いるよりも性能の良いバリアブルダンパーの製作が可能になりつつある。MRダンパーでは、作用電流を変化させることにより減衰力を変化させることができる。このため、意図した減衰定数を与えるように電流を与えることも可能である。MRダンパーをバリアブルダンパーとして使用する場合の問題点の1つとして、電流を与えた際のMR流体の応答の遅れがある。例えば、Ruangrassamee, 川島は最大減衰力600NのMRダンパーを用いた検討から、この応答の遅れが減衰力を

増加させる場合には0.15s程度、減衰力を低下させる場合には0.1s程度であることを示している⁹⁾。また、樋渡ら、曾田らも、最大減衰力40kNのMRダンパーを用いた研究から、減衰力を増加、減少させる場合の応答の遅れを、それぞれ0.2s, 0.01s程度と報告している^{11),12)}。

ここでは、MRダンパーを用いたバリアブルダンパーの開発を目的として、小型MRダンパーを用いて、繰り返し載荷実験からその単体としての特性を明らかにすると同時に、小型MRダンパーを上下部構造間に設置した橋梁模型に対する振動台実験を行い、バリアブルダンパーの適用性を検討すると同時に、実験結果を解析によってシミュレートした結果を示す。



(a) 振幅 10mm の場合



(b) 振幅 20mm の場合

図-3 MR ダンパーの減衰力の振動数依存性

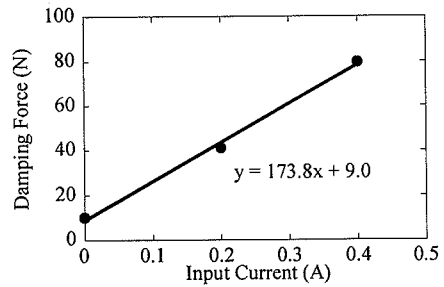


図-4 MR ダンパーの減衰力～電流の関係

概ね矩形であるが、速度の符号が変化する付近（最大変位付近）では、変位に対して減衰力は滑らかに変化し、完全な矩形とはなっていない。これは MR 流体の応答の時間遅れの影響である。後述する通り、摩擦型制御のように、減衰力のある変位で急速に変化させようとする、この影響が顕著になる。

減衰力 F_D の振動数依存性を 0.1A, 0.2A, 0.4A に対して示した結果が図-3 である。減衰力 F_D は振動数によってほとんど変化しないため、各振動数に対して減衰力 F_D の平均値を求め、これをもとに減衰力 F_D ～電流 I の関係を求めると図-4 のようになる。減衰力 F_D は電流 I によってほぼ線形に変化し、これを最小 2 乗近似すると、次式のようになる。

$$F_D = 173.8I + 9.0 \quad (1)$$

上式では $I = 0$ でも減衰力が生じるが、これは、MR ダンパーのピストン・ロッド間の摩擦や MR 流体が持つ自然の粘性によるものである。

(2) 減衰力の制御則

MR ダンパーの制御則として、ここでは図-5 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、非線形粘性減衰型とは、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。粘性減衰型、非線形粘性減衰型ダンパーの減衰力 F_{Dy} はそれぞれ式 (2), (3) によって与えられる。

$$F_D = c\dot{u} \quad (2)$$

$$F_D = c\dot{u} \quad \text{ただし、} |\dot{u}| \leq F_{Dy} \quad (3)$$

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。粘性係数 c 及び降伏減衰力 F_{Dy} を式 (2), (3) のように与えるためには、ダンパーの速度 \dot{u} に基づいて式 (1) から作用電流を定めなければならない。

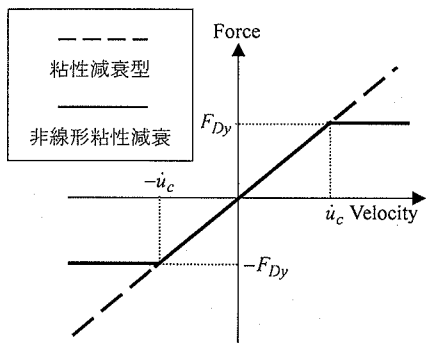
また、摩擦型減衰はエネルギー吸収効率が非常に高いが、

2. MR ダンパーに対する繰り返し载荷実験

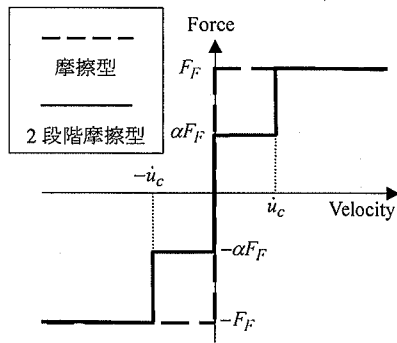
(1) MR ダンパー特性の定式化

MR ダンパーの作動特性を検討するために、MR ダンパー単体の繰り返し载荷実験を行った。実験には 0～2A で作動し、最大減衰力 100N の MR ダンパー (Lord Corporation 製, RD1084-1B 型モデル) とこのドライバー (Lord Corporation 製, Current Driver RD-3002 型) を用いた。これは、トラックの運転席の振動制御用に大量生産されている MR ダンパーで、橋梁用バリアブルダンパーとしては、減衰力が小さすぎる。しかし、MR ダンパーとしての基本的な構造は大型でも同じであることから、模型橋のサイズを考慮してこれを使用することとしたものである。

この MR ダンパーを東京工業大学の加振力 15kN のアクチュエーターを用いて繰り返し载荷した。実験では、図-1 に示すように、MR ダンパーの一端をアクチュエーターに、他端を反力床に設置した反力装置に固定し、変位制御で正弦波によって加振した。減衰力 F_D (N) と電流 I (A) の関係を求めるため、加振振動数を 0.5～2.5Hz に変化させた。図-2 は加振振動数を 0.5Hz と 2.5Hz とした場合の結果を示している。これは、減衰力と変位の履歴が矩形となるように、一定電流の下で MR ダンパーを制御した場合である。コマンドに応じて出力される減衰力～変位の履歴は



(a) 粘性減衰型・非線形粘性減衰型



(b) 摩擦型・2段階摩擦型

図-5 減衰力履歴モデル

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、エネルギー吸収できなくなる。ロックが生じるのは応答速度が小さい範囲であるため、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2段階摩擦型減衰である^{6)~8)}。すなわち、摩擦型、2段階摩擦型の減衰力はそれぞれ式(4)、(5)のように与えられる。

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

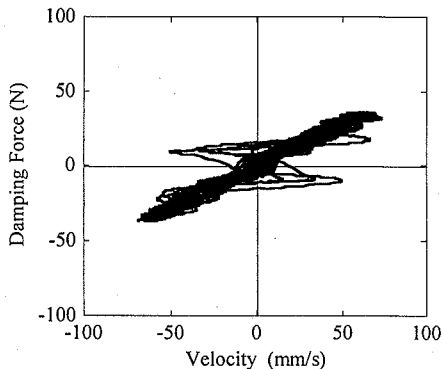
$$F_D = \begin{cases} F_F & \cdots \dot{u} > \dot{u}_c \\ \alpha F_F & \cdots 0 < \dot{u} \leq \dot{u}_c \\ -\alpha F_F & \cdots -\dot{u}_c \leq \dot{u} < 0 \\ -F_F & \cdots \dot{u} < -\dot{u}_c \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)において、 $\dot{u} = 0$ のときには外部作用力に応じて、 F_D はそれぞれ $-F_F \sim F_F$ 、 $-\alpha F_F \sim \alpha F_F$ の間のある値をとる。

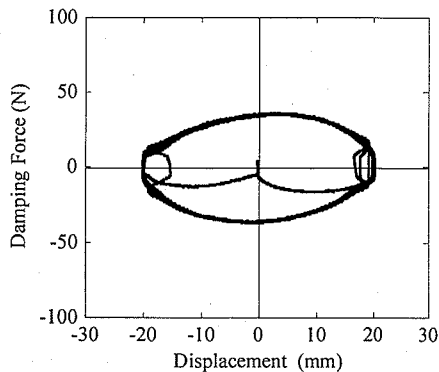
(3) アルゴリズム制御によるMRダンパーの繰り返し载荷実験

式(1)を用いることにより、意図した減衰力がどの程度MRダンパーによって得られるかを調べるため、MRダンパーに対して繰り返し载荷実験を行った。図-6、図-7はこのようにして得られた粘性減衰型及び非線形粘性減衰型履歴を用いた場合の履歴を示した結果である。式(2)、(3)の c は 1.0Ns/mm とし、式(3)の F_{Dy} は 80N としている。

図-6によれば減衰力は速度に比例して増加しており、式(1)の適用性に問題はないことがわかる。減衰力～速度の履歴において、直線関係から大きく



(a) 減衰力～速度の履歴

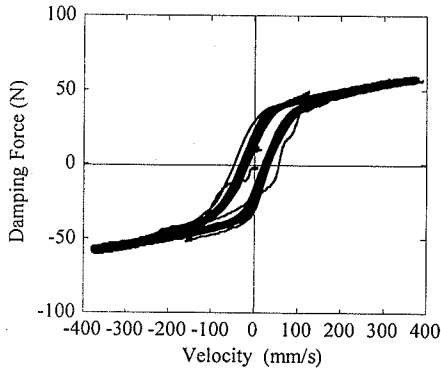


(b) 減衰力～変位の履歴

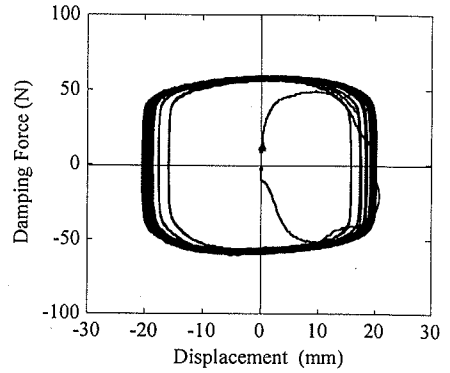
図-6 粘性減衰型で制御した場合の履歴特性

ずれた箇所があるが、これは減衰力～変位の履歴からわかるように载荷開始と終了段階に相当する。また、減衰力～変位の履歴において、正側、負側ともに、最大変位に達する付近で履歴曲線がひずんでいる。これは速度符号が変化する付近でMRダンパーの減衰力が制御通りにはならないことを示している。

図-7は降伏減衰力 F_{Dy} を 80N とした場合の履歴である。非線形粘性減衰としての特徴はよく現れているが、速度が $\pm 100\text{mm/s}$ 以下の範囲では押しと引き

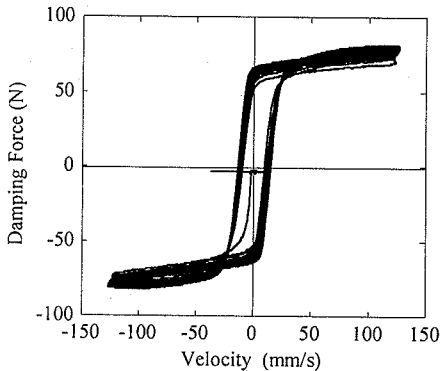


(a) 減衰力～速度の履歴

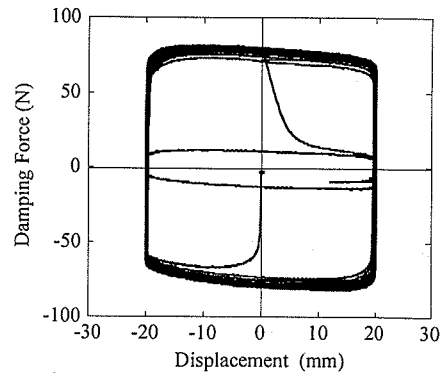


(b) 減衰力～変位の履歴

図-7 非線形粘性減衰型で制御した場合の履歴特性

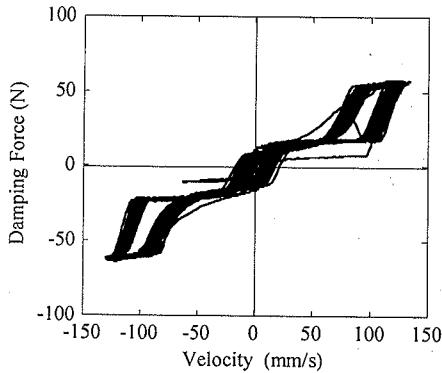


(a) 減衰力～速度の履歴

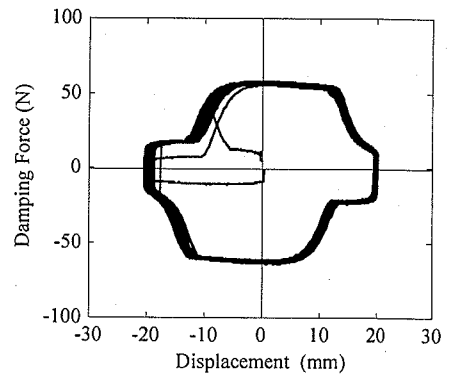


(b) 減衰力～変位の履歴

図-8 摩擦型で制御した場合の履歴特性



(a) 減衰力～速度の履歴



(b) 減衰力～変位の履歴

図-9 2段階摩擦型で制御した場合の履歴特性

では減衰力は異なる履歴を描く。また、応答速度が 80mm/s 以上では降伏減衰力が 80N となるようにしたにも関わらず、実際には 80mm/s の時点では減衰力は 40N 程度でしかない。応答速度が 80mm/s を越えた後も徐々に減衰力は増大し続けるが、最大でも 60N 程度にしか達しない。この理由は、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^{6),11)}。これに対しては、制御アルゴリズムを

改善することも考えられるので、この方面の研究も行っていく必要がある。なお、図-2 では応答速度が最大で 300mm/s に達する領域でもかなり矩形に近い履歴が得られている。これはこのように意図してコントロールしたわけではなく、一定電流の下で MR ダンパーを繰り返し载荷すると、このような減衰力が得られることを表しているに過ぎない。図-7 は意図した減衰履歴が得られるように、式(1)及び式(3)

を用いて MR ダンパーに与える電流を変化させた場合の結果であり、図-2 とは性格が異なることに注意しなければならない。

図-8、図-9 は、それぞれ摩擦型及び2段階摩擦型で制御した場合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～変位の履歴を得ることができている。一方、2段階摩擦型においては式(5)において定義した荷重低減係数 $\alpha=0.25$ としたが、減衰力が大きい領域では約 60N、減衰力を小さくした領域では約 20N の減衰力が生じており、 α に応じた履歴となっている。ただし、速度変化点では減衰力は必ずしも十分シャープに変化していない。これは上述した MR 流体の速度追従性によるものである。

以上のように、MR ダンパーの減衰力は、式(1)によって概ねコントロール可能であることがわかる。ただし、速度が速い領域では、減衰力の再現性には MR 流体の速度追従性という課題を残している。

3. MR ダンパーを用いた模型橋の振動実験

MR ダンパーをバリアブルダンパーとして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。模型橋は図-10 に示す通りである。非線形性を MR ダンパーに限定するため、桁及び橋脚は鋼材で製作し、これらが線形範囲で加振することとした。小型の模型では支承のモデル化が困難であるため、桁と橋脚は剛結合とした。このため、MR ダンパーは、本来ならば桁～橋脚間に設置すべきであるが、ここでは、振動台に剛な取り付け装置を設け、これと桁間に取り付けた。桁質量は 199kg であり、桁～橋脚系の基本固有周期は 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定数を求めると 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 ($\alpha=0.25$) の 4 種類の制御則で制御し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 は各制御に用いた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 方向成分を加速度振幅だけスケールダウンして使用した。

なお、以下の実験では応答の評価をどのように行うかが重要である。基本的にはできるだけ小さな減衰力で桁変位や加速度を小さくでき、橋脚に生じる

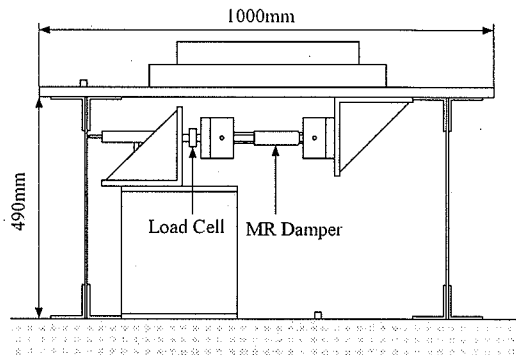


図-10 振動台実験の模型橋

表-1 振動台実験に用いたパラメータ

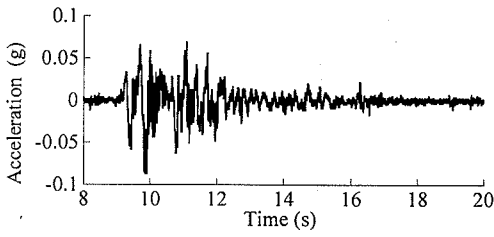
(a) 粘性減衰型		
タイプ	粘性係数 c (Ns/mm)	降伏減衰力 (N)
粘性減衰型	1.0	—
非線形粘性減衰型	1.0	30

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

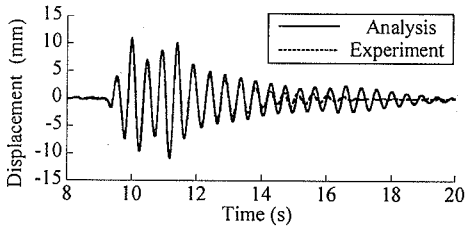
曲げモーメント等の断面力も小さく、ダンパーに必要なストロークも製作可能な値に収まることが望ましい。全てを満足することができなければ、当然何を評価するかを決めなければならない。これらの判断は端に依存するものであり、個々の橋の置かれた条件でも異なってくる。このため、耐震設計に重要な橋脚に生じる曲げモーメントに直接関係することから、ここでは主として桁変位を中心に結果を評価することにするが、これが全体評価の一部に過ぎないことは言うまでもない。

図-11 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波形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-12 及び図-13 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を 0.088g、0.092g とし加振し

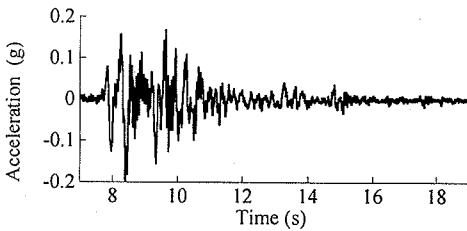


(a) 入力加速度

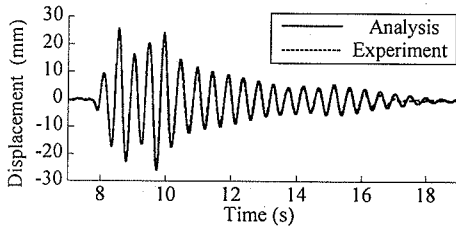


(b) 桁の応答変位

(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

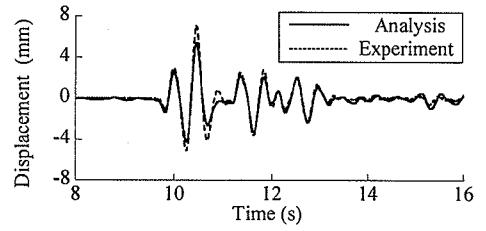
(2) 最大加速度 0.196g で加振した場合

図-11 MR ダンパーを取り付けていない場合の応答

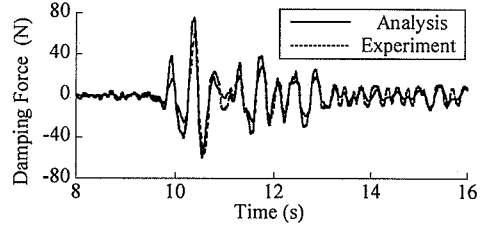
表-2 模型橋の最大応答 (実験結果)

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

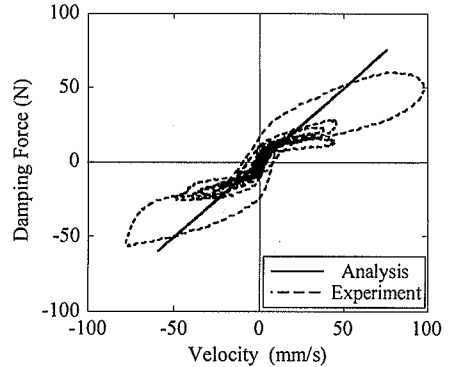
た場合の結果を示している。また、図-11と同様に、



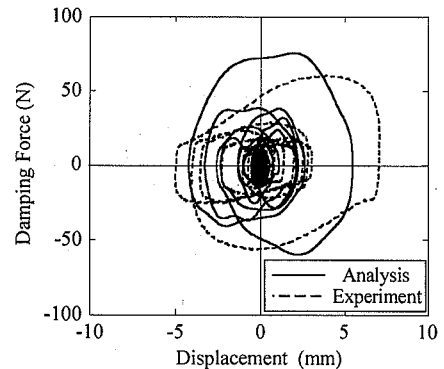
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



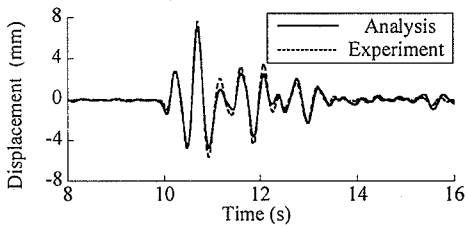
(c) 減衰力～速度の履歴



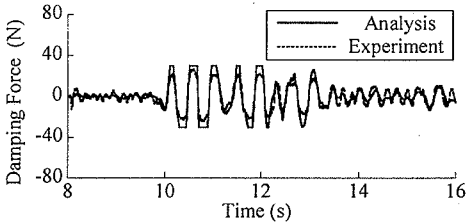
(d) 減衰力～変位の履歴

図-12 粘性減衰型制御を行った場合の応答

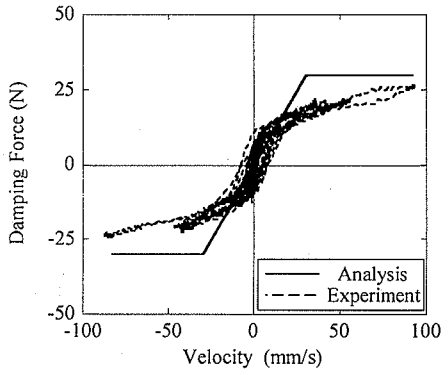
ここにも後述する解析結果が比較のために示されている。図-12の粘性減衰型の場合には、桁の応答速度が大きくなるとMRダンパーの追従性が十分でないため、減衰力は目標値を下回っている。表-2に示すように、桁の応答変位の最大は7.1mmであり、最大減衰力は60.8Nである。



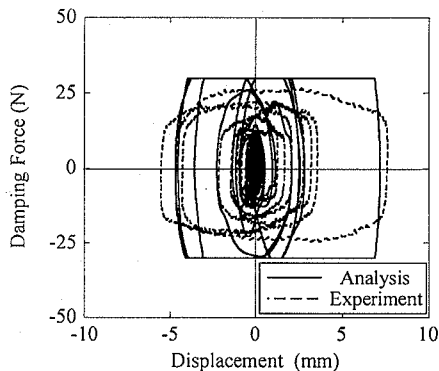
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



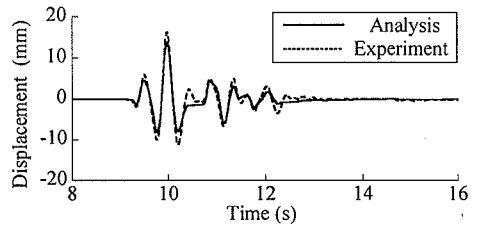
(c) 減衰力～速度の履歴



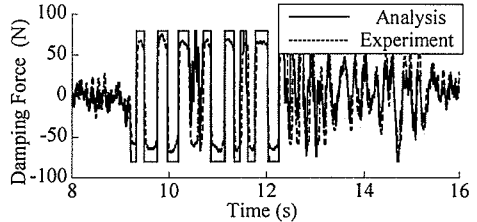
(d) 減衰力～変位の履歴

図-13 非線形粘性減衰型制御を行った場合の応答

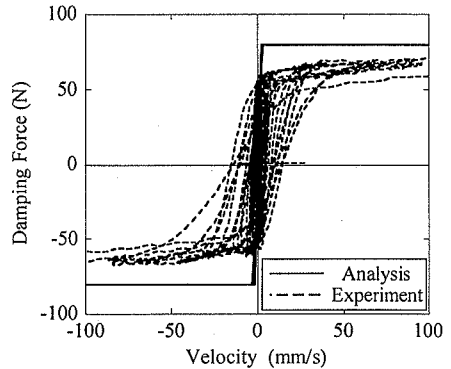
図-13 に示すように、非線形粘性減衰型の場合には、減衰力～速度の履歴は図-7 に示した減衰特性とよく似た特性を示す。減衰力の時刻歴や減衰力～変位の履歴にも減衰力を降伏させた特徴がよく現れている。表-2 に示すように、桁の応答変位の最大は 7.6mm であり、最大減衰力は 26.7N と、粘性減衰型



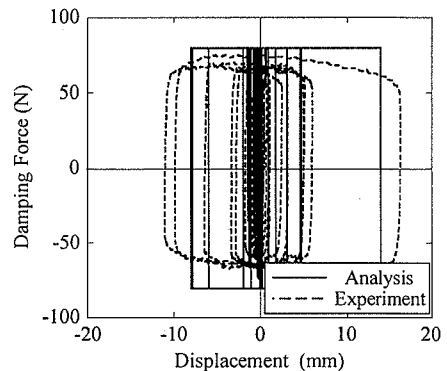
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



(c) 減衰力～速度の履歴

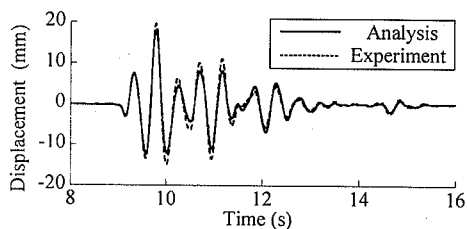


(d) 減衰力～変位の履歴

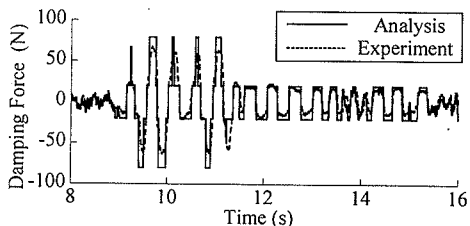
図-14 摩擦型制御を行った場合の応答

の場合と比較して 44% と小さくなっている。減衰力を抑えるためには、非線形粘性減衰型のメリットは大きい。

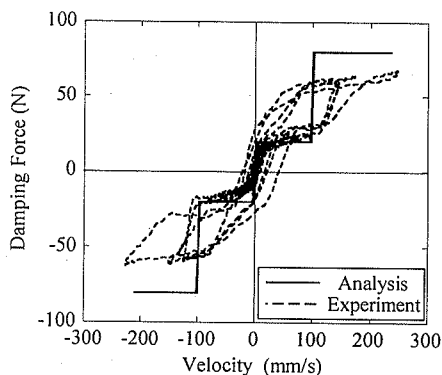
図-14、図-15 はそれぞれ摩擦型および 2 段階摩擦型 ($\alpha=0.25$) で制御した場合の応答である。それぞれ入力最大加速度を 0.182g, 0.192g として加振し



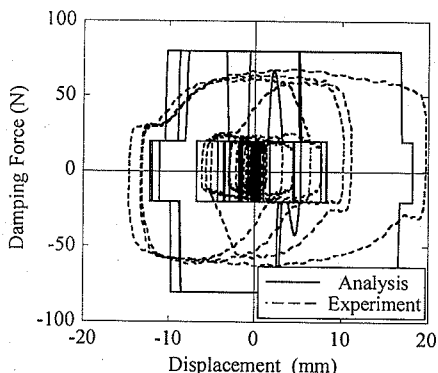
(a) 桁の応答変位



(b) MR ダンパーの減衰力



(c) 減衰力～速度の履歴



(d) 減衰力～変位の履歴

図-15 2段階摩擦型制御を行った場合の応答

た場合の結果を示している。また、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。摩擦型減衰、2段階摩擦型減衰の場合ともに、減衰力～速度の履歴はそれぞれ図-8、図-9に示した減衰力～速度の履歴をよく表している。ただし、コマンドに対する追従性は良いとは言えない。表-2に示すように、

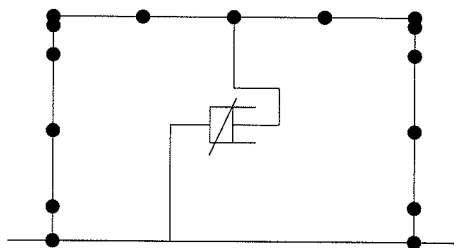


図-16 模型橋の解析モデル

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段階摩擦型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るため、当然、摩擦型減衰で制御した場合には2段階摩擦型減衰で制御した場合の82%と桁の応答変位は小さくなる。今回用いた模型橋では支承がモデル化されていないため、摩擦減衰力を大きくすると桁～橋脚間にロック^{6)~8)}が生じない。このため、ロックを回避することができる2段階摩擦型減衰の特徴が実験では現れていないが、もしこの効果が現れていれば、2段階摩擦型減衰の優位性はもっとはっきりしたと考えられる。

4. 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-16に示す通りである。MRダンパーの特性は式(2)～式(5)で与えた。積分時間間隔は1/1000sとし、Newmarkの一定加速度法を用いた。解析モデルでは桁質量は実験から得られた199kgとし、橋脚の剛性は橋の基本固有周期が計測値0.47sと一致するように微調整した。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をレーリー減衰によって与えることとし、1次および2次の減衰定数を0.027としてレーリー減衰の2つの係数を定めた。振動台実験において橋脚は塑性化していないため、桁及び橋脚は全て線形はり要素でモデル化した。

以上のようにして、上述した実験結果を解析した結果を前出の図-11～図-15に示している。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減衰機構が粘性減衰とは異なるためと考えられる。MRダンパーを取り付けた場合にも、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。ただし、上

述したように振動台実験では、MR ダンパーの時間遅れのためにコマンド通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。

5. 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、MR ダンパー単体の繰り返し載荷実験とこれを用いた模型橋の振動台実験を行った。さらに、振動台実験に対する非線形動的解析も行った。以上の実験、解析から得られた結論をまとめると以下ようになる。

- 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、載荷速度によらず、式(1)のように電流に応じて与えることができる。
- 2) 模型振動実験では、全体としては、MR ダンパーはコマンドの特性を表すことができる。しかし、非線形粘性型や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変化させる必要があるが、MR 流体の速度追従性の不足のため、現状では、減衰力の遅れを生じ、バリアブルダンパーとして意図した減衰力よりも小さい減衰力となる。MR ダンパーをバリアブルダンパーとして使用するためには、今後MR ダンパーの速度追従性を高めるか、もしくは制御法を改良していく必要がある。
- 3) 模型振動実験による桁の応答を非線形動的解析によって解析すると、解析値は実験値の特徴をよく再現する。ただし、上記2)に示したMR ダンパーの速度追従性の限界は、解析では考慮していないため、これに伴う誤差が生じている。

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得ました。また、イリノイ大学のBill Spencer教授からはMR ダンパーの特性に関して懇切なご指導を得ました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

1) Kawashima, K. and Unjoh, S.: Seismic Response Control of Bridges by Variable Dampers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.120, No.9, pp.2583-2601, 1994.

2) 川島一彦, 運上茂樹: バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御, 土木学会論文集, No.501, pp.143-152, 1994.

3) 佐藤忠信, 土岐憲三, 佐藤誠: 可変減衰装置の開発と減衰力の制御システムの構築, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.203-215, 1997.

4) 孫利民, 後藤洋三: バリアブルダンパーによる高橋脚道路橋の地震応答制御, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol.9, No.2, pp.1969-1974, 1994.

5) Yang, J. N., Wu, J. C., Kawashima, K., and Unjoh, S.: Hybrid Control of Seismic-Excited Bridge Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 1437-1451, 1995.

6) Ruangrassamee, A., and Kawashima, K.: Experimental Study on Semi-Active Control of Bridges with Use of Magneto-Rheological Damper, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol.47A, pp.639-650, 2001.

7) Ruangrassamee, A., and Kawashima, K.: Control of Nonlinear Bridge Response with Pounding Effect by Variable Dampers, *Engineering Structures*, Vol. 25, No.5, pp. 593-606, 2003.

8) Ruangrassamee, A., and Kawashima, K.: The Effect of Variable Damper for Controlling Nonlinear Response of Bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Accepted for Publication.

9) Spencer, B. F., Jr., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D.: Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 3, pp. 230-238, ASCE, 1997.

10) Sunakoda, K., Sodeyama, H., Iwata, N., Fujitani, H., and Soda, S.: Dynamic Characteristics of Magnetorheological Fluid Damper, *Proc. 7th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, USA, 2000.

11) 樋渡健, 塩崎洋一, 藤谷秀雄, 袖山博, 外村卓也, 曾田五月也: 動的加力実験・振動台実験によるMR ダンパーの制御特, 第11回日本工学シンポジウム, pp. 1903-1908, 2002.

12) 曾田五月也, 楠本玄英, 茶谷良介, 岩田範生, 藤谷秀雄, 袖山博: バイパス式MR ダンパーによる建築物のせみアクティブ制御に関する研究, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 1925-1930, 2002.

(2003.7.2 受付)

APPLICATION OF MR DAMPERS TO VARIABLE DAMPERS

Goh NAKAMURA, Anat RUANGRASSAMEE and Kazuhiko KAWASHIMA

Variable dampers are effective to mitigate the seismic response of bridges. This paper clarifies the application of MR-dampers (Dampers using the magnetic rheological fluid) to the variable dampers. A cyclic loading test was conducted for a MR-damper with the maximum damping capacity of 100 N to study its performance under four control algorithms; (1) viscous, (2) nonlinear viscous, (3) friction, and (4) 2-step friction. Then a series of shaking table test was conducted for a model bridge with the MR-damper to clarify the seismic response of the model bridge. An analytical simulation was also conducted.