

PID制御を用いたMRダンパーによる橋梁の 地震応答制御に関する研究

下山田英介¹・川島一彦²

¹ 学生会員 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）
² F会員 工修 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

免震支承や粘性ダンパーを用いた受動的な応答制御は、橋に生じる地震応答を抑制するために一定の効果をあげてきた。しかし、橋梁は地震時に下部構造の塑性化や桁間衝突等により、強い非線形性を有するため、橋の応答に応じて制御レベルを変えることが有効である。しかし、粘性ダンパーを始めとする受動的な手法では、構造物の地震応答に応じて任意にその応答を制御することは困難である。

近年、減衰力を比較的自由に変化させることができるMRダンパーが開発された。MRダンパーは磁場の中に磁気粘性流体を置くことにより減衰力を制御できるダンパーである。MRダンパーを用いることにより、地震時に構造物の応答を効率よく制御できるバリアブルダンパー¹⁾を製作することが可能となりつつある。Ruangrassamee and Kawashima²⁾、中村・Ruangrassamee・川島³⁾らは、MRダンパーを用

いた効率的なバリアブルダンパーの制御則を提案しており、この制御則の有効性を実験及び解析によって検討している。

しかし、電流をMRダンパーに与えてから、目標とする減衰力がMRダンパーに生じるまでには、ある時間遅れが生じる²⁾ことが確認されている。精度良く構造物の地震応答制御を行うためには、時間遅れをできるだけ小さくすることが課題となっている。

本研究では、MRダンパーの時間的な遅れを解消するために、フィードバック制御の一種であるPID制御の効果を模型振動実験に基づいて検討した。

2. MRダンパーに与える制御則

MRダンパーに与える制御則としては、図1に示すように摩擦型制御則⁴⁾の他、Ruangrassamee・川島によって提案された2段階摩擦型制御則を用いることとした。摩擦型制御則は橋脚～桁間に生じる相対速

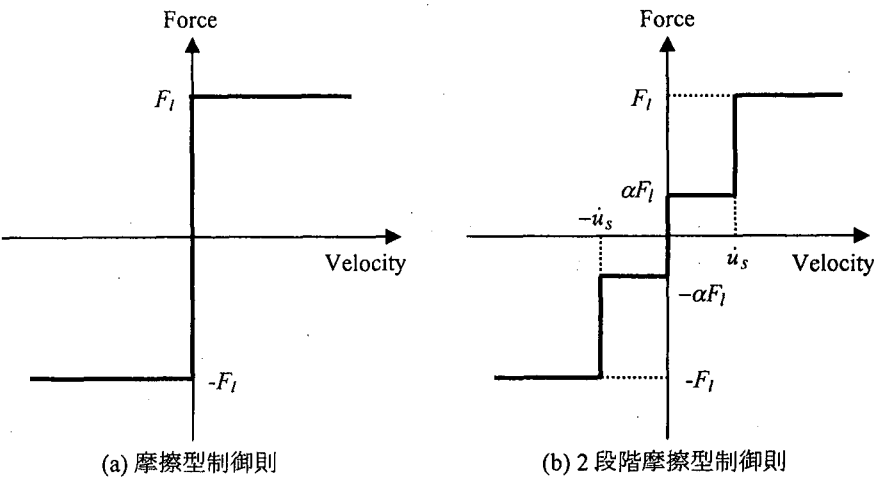
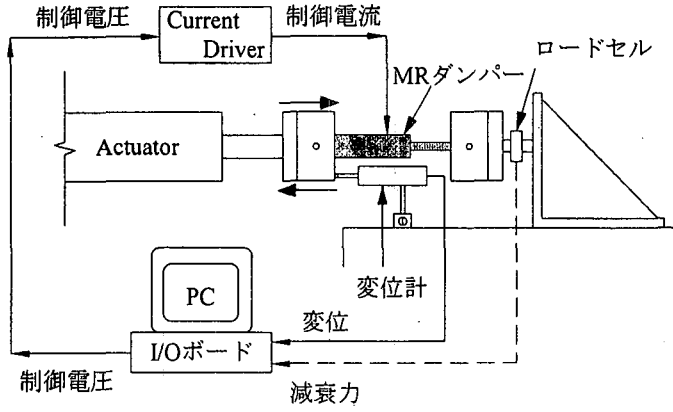
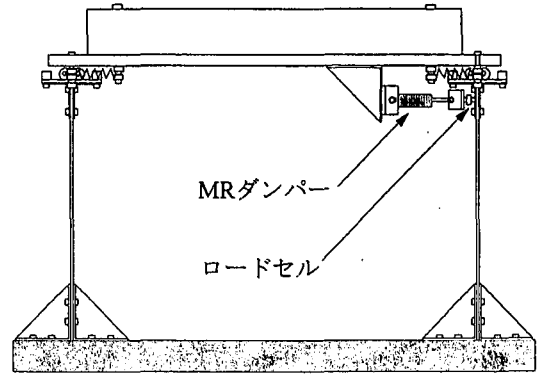


図1 MRダンパーの制御則



(a) 繰返し載荷実験装置



(b) 振動台実験の模型橋

図2 実験装置

度によらず一定の減衰力をMRダンパーに生じさせるものであり、エネルギーの吸収効率がが高く、橋梁の地震応答を低減するのに適している。摩擦力を F_l 、橋脚～桁間の相対速度を $\dot{u}$ とすれば、減衰力 F_D は次式のように与えられる。

$$F_D = \begin{cases} F_l & (0 < \dot{u}) \\ -F_l & (\dot{u} < 0) \end{cases} \quad (1)$$

減衰力が大きい方がエネルギー吸収は増大するが、式(1)では、減衰力を大きくし過ぎると速度が小さい領域で橋脚～桁間がロックし、エネルギー吸収を阻害する可能性がある。この影響を低減するために提案された制御則が2段階摩擦型制御則である。摩擦力を低下させる相対速度を $\dot{u}_s$ 、摩擦力の低下率を α ($0 < \alpha < 1$)とすれば、2段階摩擦型制御を用いた場合の減衰力 F_D は、

$$F_D = \begin{cases} F_l & (\dot{u}_s < \dot{u}) \\ \alpha F_l & (0 < \dot{u} < \dot{u}_s) \\ -\alpha F_l & (-\dot{u}_s < \dot{u} < 0) \\ -F_l & (\dot{u} < -\dot{u}_s) \end{cases} \quad (2)$$

なお、式(2)では2段階に摩擦力を変化させているが、原理的には任意の n 段階で変化させることも可能である。また、 n を非常に大きくすれば、非線形粘性型の減衰とすることも可能である。

式(1)においては、外部作用力に応じて $\dot{u} = 0$ の時には F_D は $-F_l \sim F_l$ の範囲にある値を、式(2)において、 $\dot{u} = 0$ 、 $\dot{u} = \dot{u}_s$ 及び $\dot{u} = -\dot{u}_s$ の時には、 F_D はそれぞれ $-\alpha F_l \sim \alpha F_l$ 、 $\alpha F_l \sim F_l$ 、 $-F_l \sim -\alpha F_l$ の範囲にある値をとる。

3. MRダンパーの特性の定式化

本研究では、最大減衰力が600N、ストロークが $\pm 25\text{mm}$ のLord Corporation製のMRダンパーを用いた。制御電圧を電流に変換するためには、Current Driverを用いた。

最初は、MRダンパーの特性を調べるために、MRダンパー単体の繰返し載荷実験を行った。図2(a)に示すように、MRダンパーをアクチュエーターと反力床の間に固定し、変位制御によりアクチュエーターをコントロールして、MRダンパーに作用させる電流 I とその結果生じる減衰力 F 、速度 $\dot{u}$ の関係を次式のように求めた。

$$F = f + c\dot{u} \quad (3)$$

ここで、

$$f = \begin{cases} 28.0 + 0.179 \times I & (I < 150\text{mA}) \\ -47.3 + 0.636 \times I & (I \geq 150\text{mA}) \end{cases} \quad (4)$$

$$c = 0.0984 + 0.000346 \times I \quad (5)$$

ここで、 f は電流を流すことによって生じるMR流体の摩擦抵抗、 c は粘性係数である。

4. PID制御を用いたMRダンパーの制御

(1) PID制御

MRダンパーの時間遅れをできるだけ小さくするために、図2(a)の点線のようにMRダンパーの制御回路に減衰力のフィードバック機構を組み込んだ。

PID制御とは、目標値と測定値の偏差を求め、偏差に比例した項と偏差を時間で積分した項、さらに偏差を時間で微分した項にそれぞれ適当な重み係数を乗じた値を組み合わせ、制御出力を決定する制御法である。すなわち、今ある時刻 t での橋脚～桁間

の応答速度を $\dot{u}(t)$ 、この時刻で実際にMRダンパーにより出力される減衰力を $F_D^S(t)$ とすれば、時刻 $t+\Delta t$ におけるMRダンパーの減衰力の目標値 $F_D^T(t+\Delta t)$ は、例えば摩擦型減衰であれば、式(1)から次式のようになる。

$$F_D^T(t+\Delta t) = \begin{cases} F_l & (0 < \dot{u}(t)) \\ -F_l & (\dot{u}(t) < 0) \end{cases} \quad (6)$$

いま、時刻 $t+\Delta t$ での目標減衰力を $F_D^T(t+\Delta t)$ とし、偏差 $\Delta F_D(t+\Delta t)$ を次式のように定義すると、

$$\Delta F_D(t+\Delta t) = F_D^T(t+\Delta t) - F_D^S(t) \quad (7)$$

PID制御では、時刻 $t+\Delta t$ で与えるべき減衰力 $F_D^C(t+\Delta t)$ は次式で与えられる。

$$F_D^C(t+\Delta t) = K_p \left(\Delta F_D(t+\Delta t) + \frac{1}{T_I} \int \Delta F_D(t+\Delta t) dt + T_D \frac{d\Delta F_D(t+\Delta t)}{dt} \right) \quad (8)$$

ここで、 K_p ：比例係数、 T_I ：積分係数、 T_D ：微分係数である。これらはPID係数と呼ばれ、実験等に基づいて最適化をして定める必要がある。比例係数 K_p は目標値に到達するために要する時間をコントロールする係数であり、一般に K_p を大きくする程目標値に速く到達する。また、積分係数 T_I は、目標値のまわりでオーバーシュートとアンダーシュートを繰り返させることにより目標値に到達するために必要な時間をコントロールする係数であり、一般に積分係数 T_I を小さくすると、オーバーシュートやアンダーシュートは大きくなるが、目標値への到達は速くなる。

なお、微分項は、目標値の変更時に微分キックと呼ばれる出力の急変を生じさせる性質を持っており、本研究のように、目標値の変更が時間的に頻繁に起こる系の制御には適当ではない。このため、本研究においては微分係数 T_D を0とすることとした。

ただし、PID制御を与えて、式(8)による $F_D^C(t+\Delta t)$ を求めると、これが時間的に大きく振動する場合がある。このため、

$$\beta = \frac{F_D^C(t+\Delta t)}{F_D^T(t+\Delta t)} \quad (9)$$

を定義し、時刻 $t+\Delta t$ での減衰力 $\tilde{F}_D^C(t+\Delta t)$ を次式の

ように与えることを提案する。

$$\tilde{F}_D^C(t+\Delta t) = \begin{cases} F_D^C(t+\Delta t) & (|\beta| < \gamma) \\ \gamma F_D^T(t+\Delta t) & (|\beta| > \gamma) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 γ はオーバーシュート、アンダーシュートの上限値を決める係数である。これをOTC制御(Overshoot Termination Control)と呼ぶこととする。

(2) 最適なPID係数の導出

PID制御を用いてMRダンパーを制御するために、MRダンパーの繰り返し载荷実験に基づいて最適な K_p と T_I を求めることとした。

摩擦型制御則を対象として、PID係数を変化させた場合の変位～減衰力関係を求めた結果が図3である。これは、式(1)において最大減衰力 F_l を400(N)とし、振幅20mm、振動数0.5Hzの正弦波で、MRダンパーを繰り返し载荷した場合の結果である。式(10)において $\gamma=1.5$ としたOTC制御を用いた。これによれば、 T_I を小さくしていくに従って、目標とする減衰力に早く到達するようになるが、 T_I を小さくし過ぎると減衰力のオーバーシュートとアンダーシュートが著しくなる。

一方、 K_p を大きくしていくと、早い段階で目標とする減衰力に到達するようになる。ただし、例えば $K_p=1.5$ 、 $T_I=0.005$ とした場合のように、 K_p を大きくし過ぎると減衰力が振動し始める。

K_p を大きくし、これに T_I がある条件で重なると、減衰力の目標値への接近が不安定に振動したり、 T_I を小さくしすぎるとオーバーシュートやアンダーシュートが著しくなり過ぎる等、 K_p と T_I は相互に関連しあっており、いずれを優先させてPID係数を定めるべきかが重要である。本研究においては減衰力のオーバーシュートのある程度許すかわりに、収束を早くすることを目的として、 $K_p=1.0$ 、 $T_I=0.01$ とすることとした。

一方、この係数をそのまま2段階摩擦型制御則に適用すると、減衰力のオーバーシュート、アンダーシュートが大きくなり過ぎ、うまく制御できない。これは、2段階摩擦型制御では減衰力の目標値が時間的に頻繁に変化するためである。

このため、1段階目の減衰力 $|\alpha F_l|$ を目指す場合と2段階目の減衰力 $|F_l|$ を目指す場合とでPID係数を変化させることを試みた。摩擦型制御則の場合と同様に2段階摩擦型制御における最適なPID係数を実験的に求めた結果、1段階目の減衰力 $|\alpha F_l|$ を目指す場合には $K_{PS}=0.05$ 、 $T_{IS}=0.008$ 、2段階目の減衰力 $|F_l|$ を

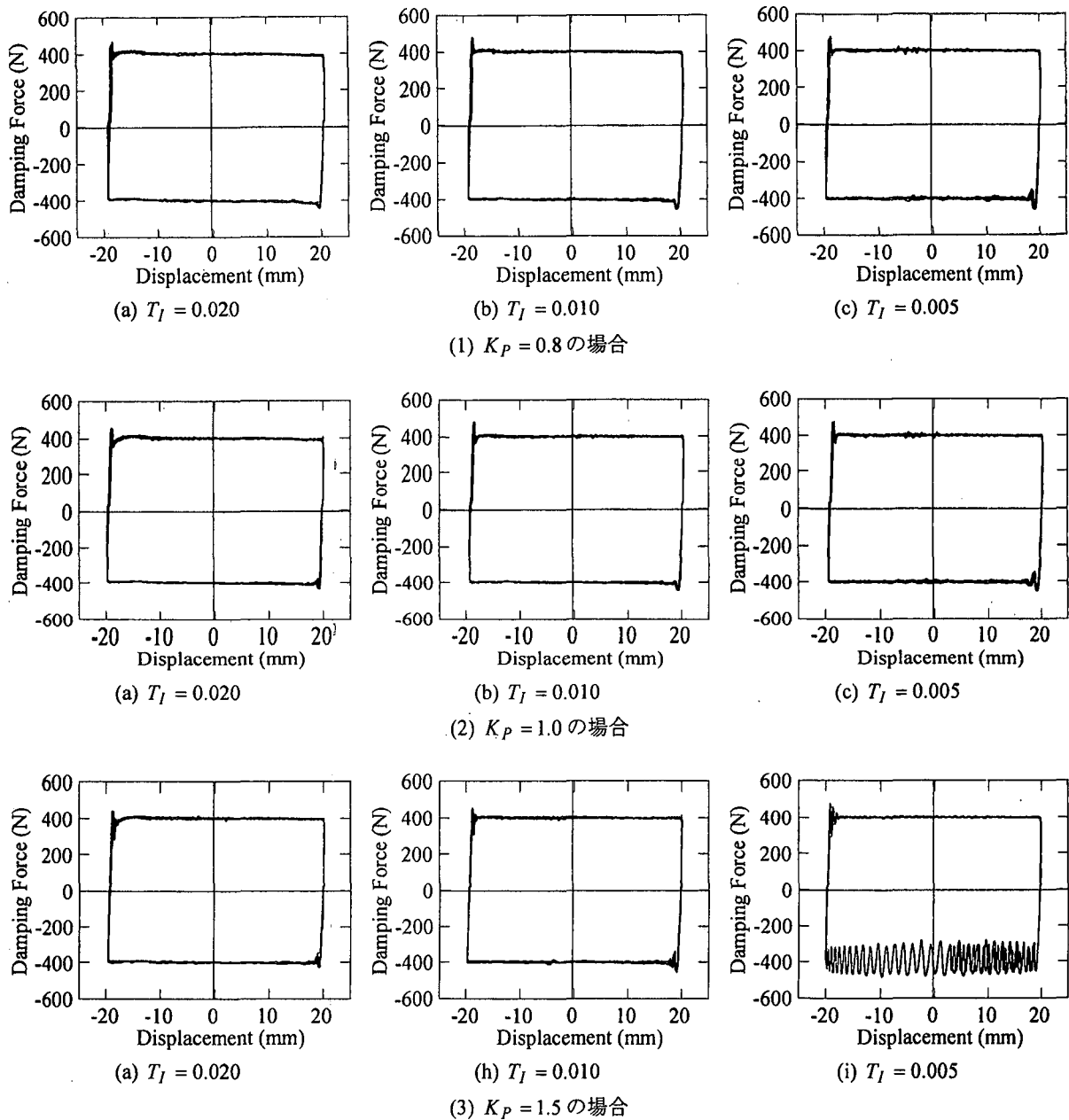


図3 摩擦型制御に対してPID係数を変化させた場合の変位－減衰力関係の比較

目指す場合には $K_{PL} = 1.0$, $T_{IL} = 0.01$ とした。

(3) 提案制御則に基づく繰り返し载荷実験

上述したPID係数を用いて $F_l = 200$ Nとして摩擦型制御則を対象にPID制御した。加振条件は上述した場合と同じで、振幅20mm、振動数2.0Hzの正弦波を入力した。ただし、以下の例では式(10)において $\gamma = 3.0$ としたOTC制御を用いた。この結果が図4である。ここには目標とする履歴及びPID制御を用いない場合の実験結果も、比較のために示している。図4(c)及び(d)より、減衰力の目標値が変化した後、実際にMRダンパーに目標とする減衰力が生じるまでに必要とする時間は、PID制御を用いない場合には0.036秒であるのに対して、PID制御を用いた場合

には0.016秒となり、時間遅れが約44%に短縮されている。また、PID制御を用いない場合には、MRダンパーに実際に生じる減衰力と目標減衰力の間には最大で約50Nの誤差が生じるが、PID制御を用いた場合にはこうした誤差はほとんどない。ただし、PID制御を用いた場合には目標減衰力を変化させる瞬間に、この約2.2倍に相当する減衰力のオーバーシュートが生じる。

一方、PID制御を2段階摩擦型制御則に適用してMRダンパーの繰り返し実験を行った結果が図5である。ここで、最大減衰力 F_l 、減衰力の変化点速度 $\dot{u}_s$ 、減衰力低減係数 α をそれぞれ400N、200mm/s、0.25とした。MRダンパーの加振条件は上述した場合と同じで、振幅20mm、振動数2.0Hzの正弦波を入

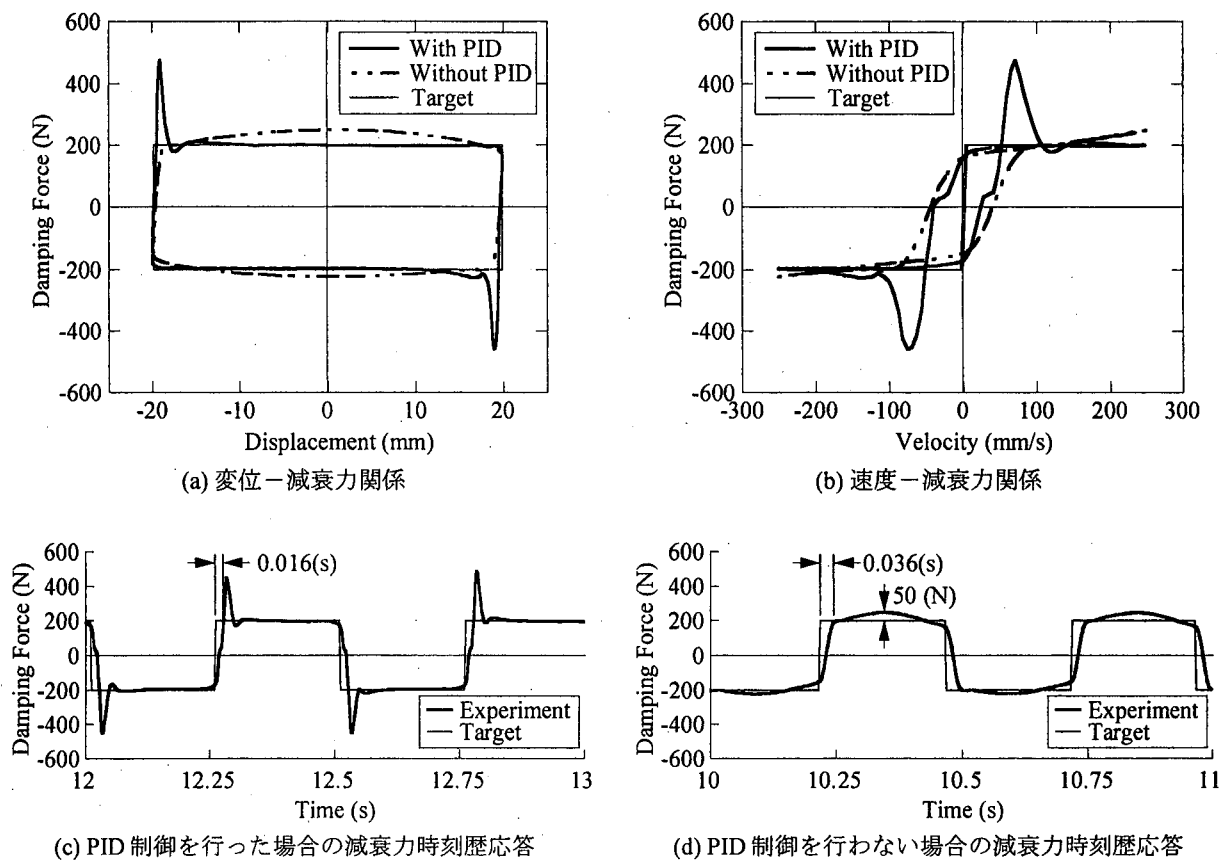


図4 摩擦型制御則で制御した場合の履歴特性

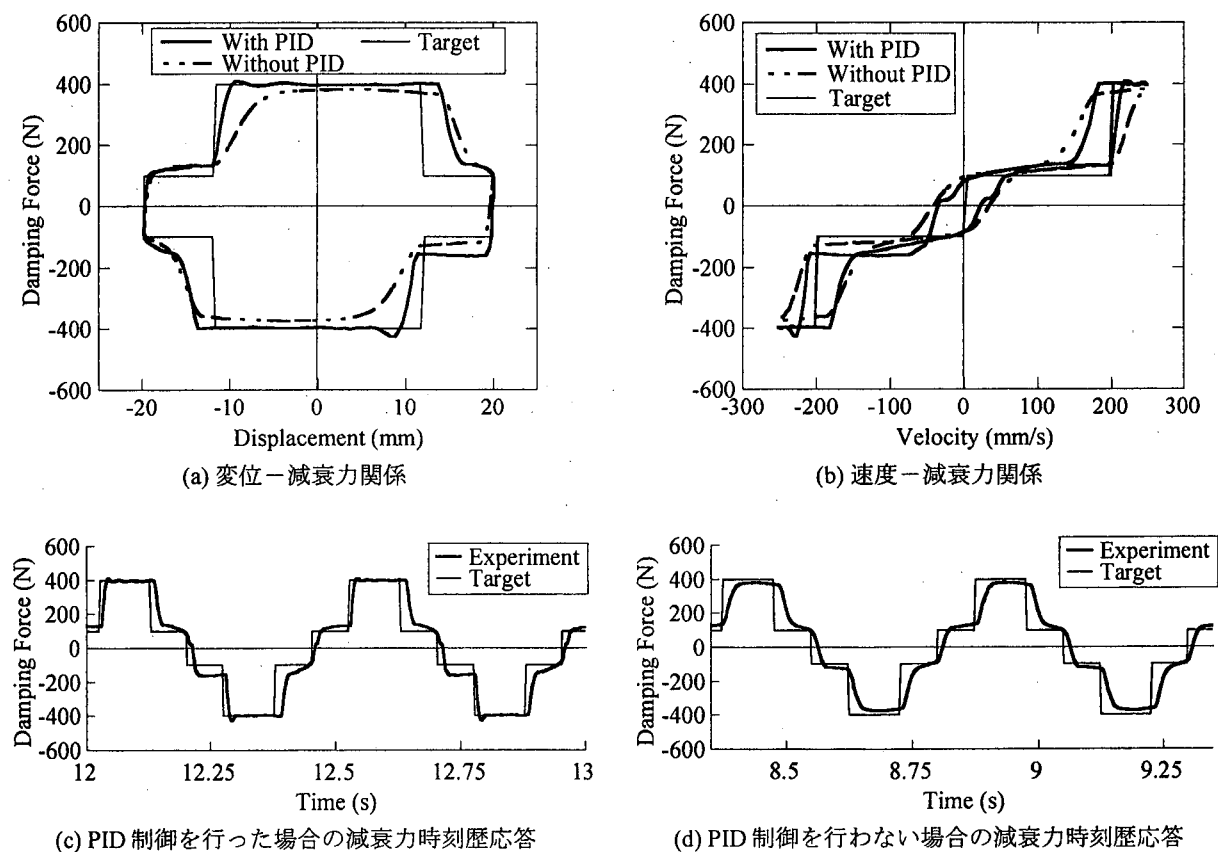
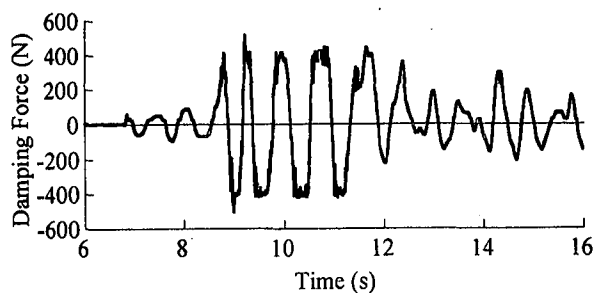
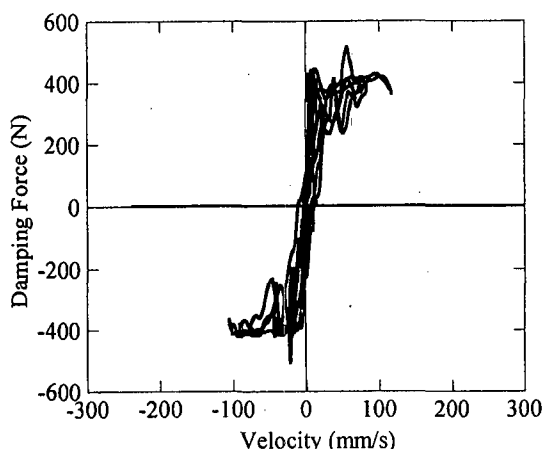


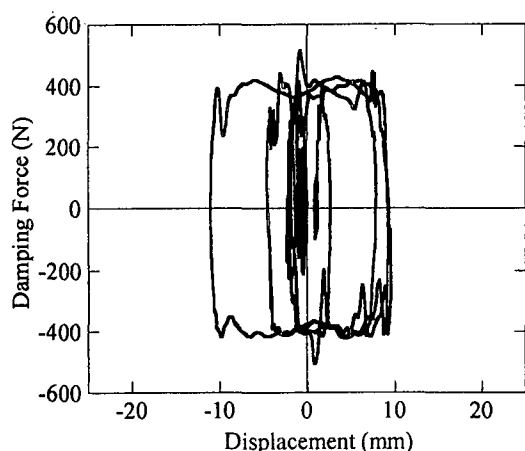
図5 2段階摩擦型制御則で制御した場合の履歴特性



(a) MRダンパーの減衰力

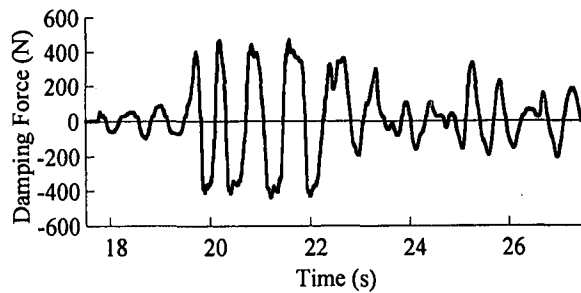


(b) 速度－減衰力関係

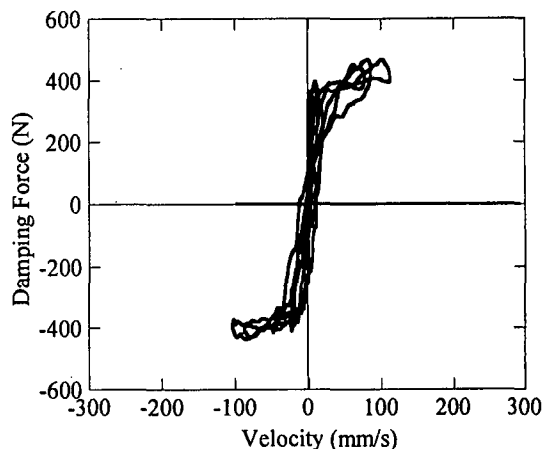


(c) 変位－減衰力関係

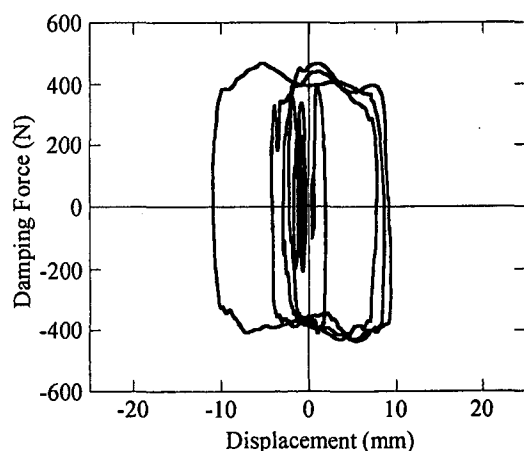
図6 PID制御を行った場合の応答(摩擦型)



(a) MRダンパーの減衰力



(b) 速度－減衰力関係



(c) 変位－減衰力関係

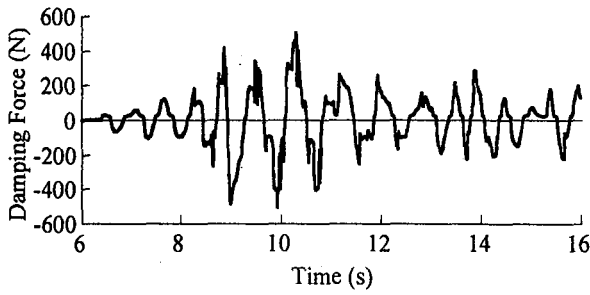
図7 PID制御を行わない場合の応答(摩擦型)

力した。ここでも、目標とする履歴及びPID制御を用いない場合の実験結果も比較のために示している。これによれば、変位～減衰力関係、速度～減衰力関係ともに、PID制御を用いた方が減衰力の追従性が良いことがわかる。減衰力の時刻歴応答を見ると、PID制御を用いない場合には1段階目の目標減衰力に達するまでに約0.021秒の時間遅れが生じており、さらに、2段階目の目標減衰力への追従性も悪くなっているのに対して、PID制御を行った場合には、1段階目の目標減衰力に達するまでの時間遅れが0.015秒程度に短縮され、さらに、2段階目の目標減衰力への追従性も改善されている。ただし、1段階

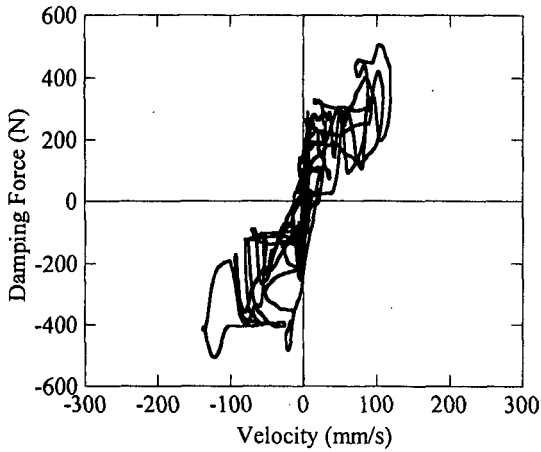
目の目標減衰力への追従性には、まだ改善の余地が残されている。

5. MRダンパーを用いた模型橋の振動台実験

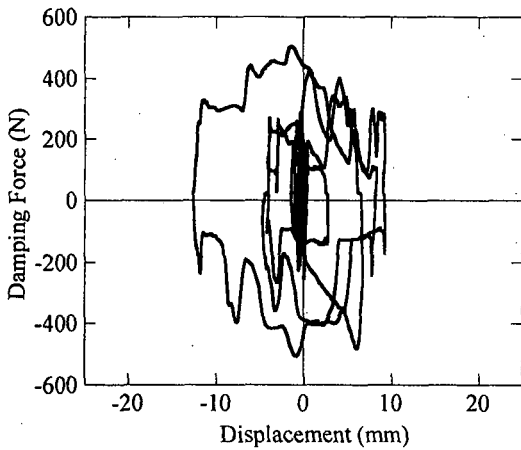
MRダンパーを橋に用いた場合に、PID制御の効果がどの程度あるかを検証するために、模型橋を用いた振動台加振実験を行った。実験に用いた模型橋は図2(b)の通りであり、橋脚高さ800mm、支間長1300mm、桁質量527.3kgの鋼性の模型である。支承は車輪と圧縮引張両用ばねを用いてモデル化している。MRダンパーは橋脚～桁間に設置した。模型橋



(a) MR ダンパーの減衰力



(b) 速度-減衰力関係

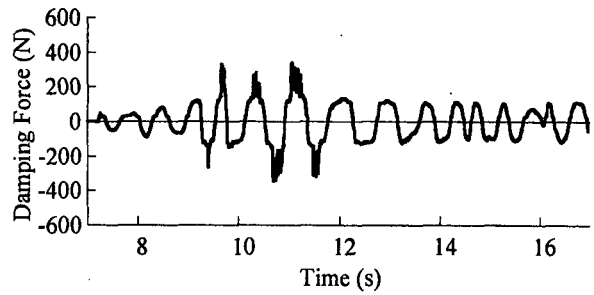


(c) 変位-減衰力関係

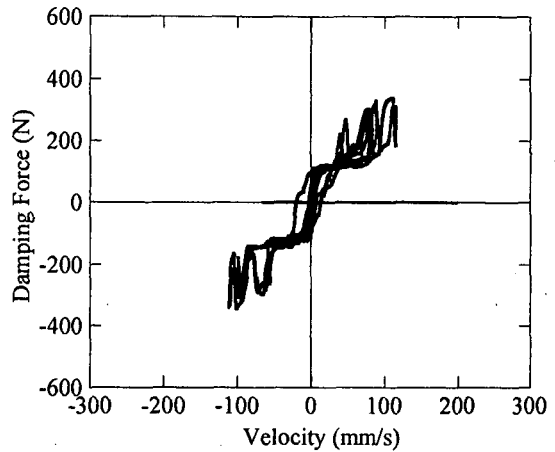
図8 PID制御を行った場合の応答(2段階摩擦型)

の基本固有周期は0.91秒, MRダンパーを取りつけない状態での減衰定数は5.6%である。

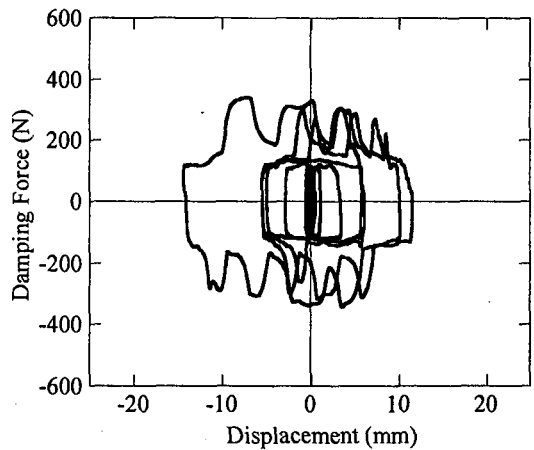
実験では, 摩擦型制御則と2段階摩擦型制御則を対象に, PID制御を用いた場合と用いない場合とで模型橋の応答を求めた。表1には各制御則のパラメータを示している。なお, PID制御を用いた場合のPID係数には, 摩擦型制御では $K_p = 1.0$, $T_I = 0.01$ を, 2段階摩擦型制御では $K_{PL} = 1.0$, $T_{IL} = 0.01$, $K_{PS} = 0.05$, $T_{IS} = 0.008$ をそれぞれ用いている。以下の例では, 摩擦型制御においては式(10)の γ を1.5, 2段階摩擦型制御においては1段階目, 2段階目の γ をそれぞれ6.0, 1.5としてOTC制御を用



(a) MR ダンパーの減衰力



(b) 速度-減衰力関係



(c) 変位-減衰力関係

図9 PID制御を行わない場合の応答(2段階摩擦型)

いている。

入力地震動としては, 兵庫県南部地震での神戸海洋気象台におけるNS成分の最大加速度を0.324gに縮小して作用させた。

図6および図7はそれぞれ, 摩擦型制御則を用いた場合にPID制御を行った場合と行わない場合の応答である。変位～減衰力関係を比較すると, PID制御を用いない場合には, 減衰力は最大減衰力付近で一定ではなく, 時間的に変化しているのに対し, PID制御を用いた場合には減衰力は振動しながらも目標値に近づいている。速度～減衰力関係においても, PID制御を行わない場合には速度が大きくなるにつ

れて減衰力も微増するのに対して、PID制御を行った場合には目標減衰力どおり、速度によらず減衰力に近い値となっている。

表ー1 振動台実験に用いた制御則のパラメータ

タイプ	減衰力 F_d (N)	減衰力低減係数 α
摩擦型	400	—
2段階摩擦型	400	0.25 ($\dot{u}=100\text{ mm/s}$)

次に、図8および図9は、2段階摩擦型を対象に、それぞれ、PID制御を行った場合と行わない場合の応答を示した結果である。減衰力の時刻歴応答において、PID制御を行わない場合には、時刻11.2～11.7秒の応答を例にとると、減衰力は緩やかに1段階目の目標減衰力100Nに近づき、その後2段階目の目標減衰力400Nを目指すのが、結局このレベルに達することができない。一方、PID制御を行った場合には、時刻10.5～11秒のように減衰力が目標減衰力にシャープに追従できる部分と時刻8.5～9秒のように、そうではない部分がある。目標減衰力が時間的に頻繁に変化するため、PID制御の特徴である減衰力のオーバーシュートが顕著に現れている。変位～減衰力関係、速度～減衰力関係を見ると、PID制御を行った場合の方が、PID制御を行わない場合よりも履歴の変動が大きくなっている。これは目標減衰力をシャープに追えない場合や減衰力のオーバーシュートによるものであり、こうした現象がない部分では減衰力はおおむね目標減衰力を追従している。

以上より、PID制御は、摩擦型制御に対しては振動台加振実験においても目標減衰力に対する追従性の向上に効果を発揮するが、2段階摩擦型制御に対してはPID係数の調整等によりさらに追従性を向上させる必要がある。

6. 結論

本研究では、MRダンパーの減衰力の時間的な遅れを短縮させるために、PID制御を用いた制御則を開発することを目的として、一連の実験的検討を行った。本研究で得られた結論は、以下の通りである。

1) 2段階摩擦型制御則では、1段階目の目標減衰力を目指す際と2段階目の目標減衰力を目指す際とで異なるPID係数を与えることを提案し、これにより制御精度を向上させることが可能であることを示した。

2) MRダンパーの要素実験においては、MRダンパーの時間遅れを短縮し、目標減衰力への追従性を向上

させるためには、摩擦型、2段階摩擦型ともにPID制御は有効である。

3) MRダンパーを模型橋に組み込んだ状態で地震動を作用させた場合には、摩擦型制御則に対しては、要素実験と同様に時間遅れの短縮及び目標減衰力への追従性の向上に対してPID制御は効果がある。しかし、2段階摩擦型制御則に対しては、PID制御を用いても目標減衰力に対する追従性が限られる場合があり、PID係数を調整する等、今後さらに工夫が必要である。

7. 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をはじめ、多数の方のご尽力をいただきました。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1) Kawashima, K. and Unjoh, S., (1994), "Seismic Response Control of Bridge by Variable Dampers," Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.2583-2601,120-9.

2) Anat Ruangrassamee and 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.

3) 中村剛, Anat Ruangrassamee, 川島一彦, (2001), "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," 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.51-58,土木学会

4) 山本重彦, 加藤尚武,(1997),"PID制御の基礎と応用," 朝倉書店.