

2段階摩擦型及び非線形粘性型制御を用いた橋梁の地震応答特性

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 理工学研究科土木工学専攻修士課程（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

² 工博 チュラロンコ大学土木工学科講師（Phayathai Rd., Patumwan, Bangkok, 10330, THAILAND）

³ 正会員 工博 東京工業大学教授 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

兵庫県南部地震以降、積層ゴム支承が広く用いられるようになった。鋼製支承に比較して、積層ゴム支承は桁の地震応答に追従することができ、維持管理上も優れている。しかしながら、積層ゴム支承を用いると、兵庫県南部地震クラスの断層近傍地震動の作用下では、橋脚高さ10m程度の一般橋でも、容易に±0.5m程度の応答が生じる。従来の鋼製支承では、桁と橋脚間に応答が生じないように設計したはずでも、大地震時に鋼製支承が破壊し、桁が橋脚に対して予期しない大きな変位を生じる結果、落橋等の重大な被害が生じてきたことを考慮すれば、積層ゴム支承の採用は耐震性の向上にとってプラスと考えられる。しかし、一方では、桁の応答が大きくなったことから、新しいタイプの被害が生じないように注意しておく必要がある。このためには、落橋防止構造も含めた橋全体としての耐震性を評価することが重要であるが、付加ダンパーを用いて橋のエネルギー吸収を増加させ、地震応答を引き下げることが有効ではないかと考えられる。バリアブルダンパーとしては、MRダンパー¹⁾が有効と考えられる。

ここでは、バリアブルダンパー²⁾を付加ダンパーとして用いることにより、積層ゴム支承で支持された一般的な橋の地震応答がどの程度低減されるかを検討した結果を示す。

2. 解析対象橋及び解析モデル

解析対象とするのは、図-1に示す幅員12m、橋長40@5=200mの5径間連続鋼I桁橋である。地盤種別はⅡ種地盤である。橋軸方向の地盤条件の変化は小さいため、図-2に示すように、P1橋脚とそれが支持する上部構造部分から構成される構造系を取り出し、これを解析対象とすることとした。この橋は平成8年道路橋示方書に基づき、地震時保有水平耐力法により耐震設計されている。

P1橋脚が分担する上部構造重量は6.96MNであり、基本固有周期は1.3秒である。積層ゴム支承の平面寸法は900×900mm、ゴム総厚は80mmであり、2基の積層ゴム支承を併せて水平剛性は19.8MN/mである。

バリアブルダンパーは、桁と橋脚頂部の間に1基設置することとした。バリアブルダンパーの制御則について

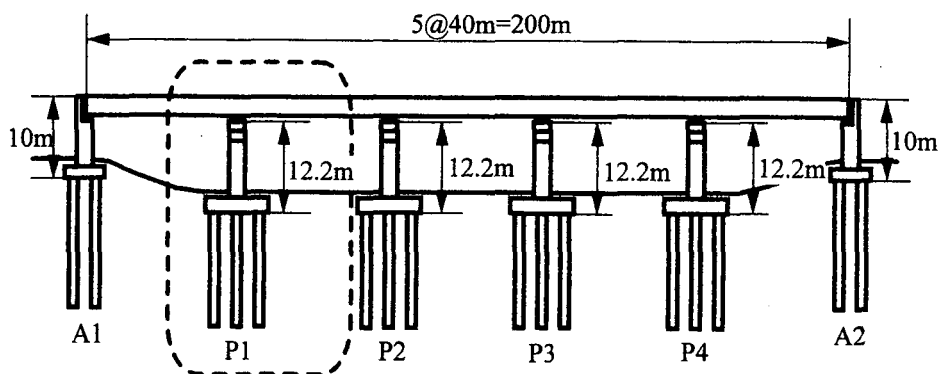


図-1 解析対象橋

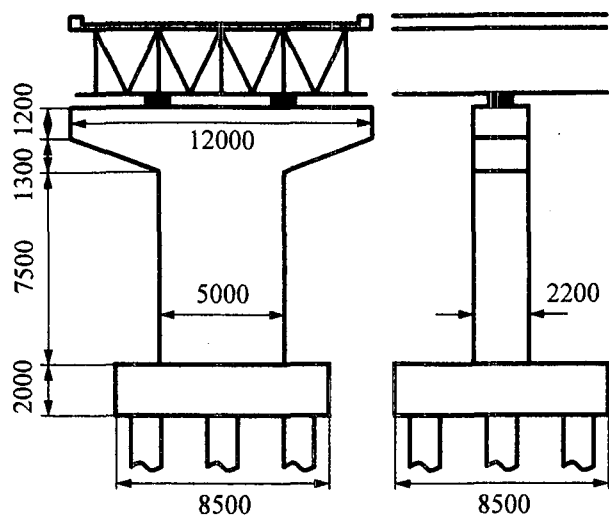


図-2 解析対象橋脚

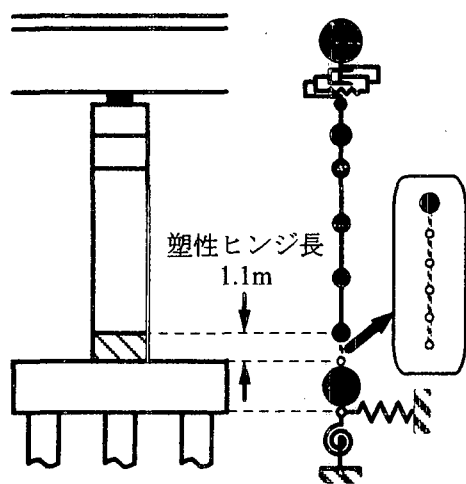


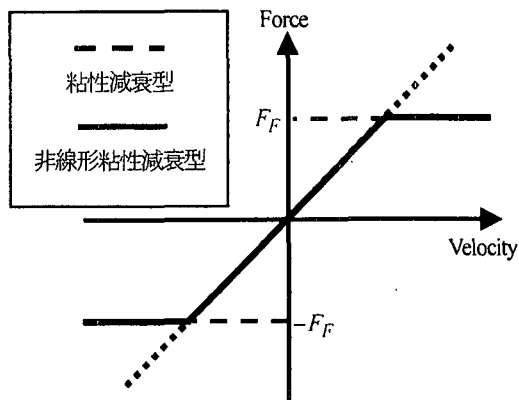
図-3 解析モデル

は 3 章に示す。橋脚の曲げモーメント～曲率の履歴は、道路橋示方書に基づきタイプⅡ地震動を想定して求めた。

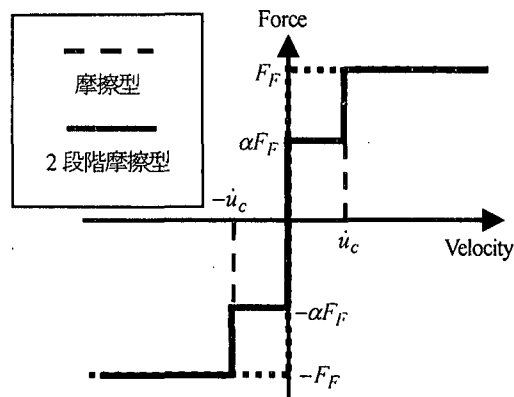
図-3 は、本解析で用いる 2 次元モデルである。橋軸方向の応答を対象とする。橋脚基部の塑性ヒンジ区間は、降伏剛性を 1 次剛性として持つようにバイリニア型に修正した Takeda 型モデルによって表した。入力地震動には兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された NS 成分記録を用いた。

3. 減衰力の履歴モデル

付加ダンパーとしては、図-4 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 種類の減衰力履歴モデルを用いる。非線形粘性減衰型とは、最大減衰力 F_D に達すると減衰力が降伏するようにしたものである。2 段階摩擦型は摩擦型に改良を加えたもので、減衰力を大きくしても、桁と橋脚がロックしないように、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、



(a) 粘性減衰型・非線形粘性型



(b) 摩擦型・2 段階摩擦型

図 4 減衰力履歴モデル

表-1 減衰力履歴モデルのパラメータ

(a) 粘性型減衰

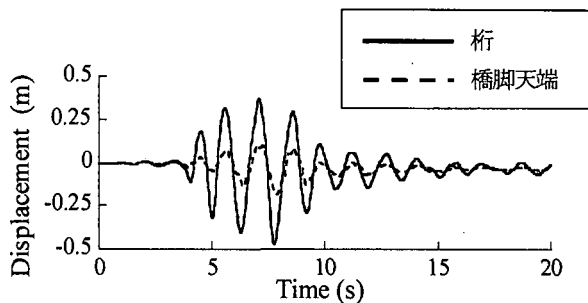
モデル	粘性係数 $c(\text{MN/m})$	降伏減衰力 $F_D(\text{MN})$
粘性減衰型	3.92	—
非線形粘性減衰型	3.92	2.94

(b) 摩擦型減衰

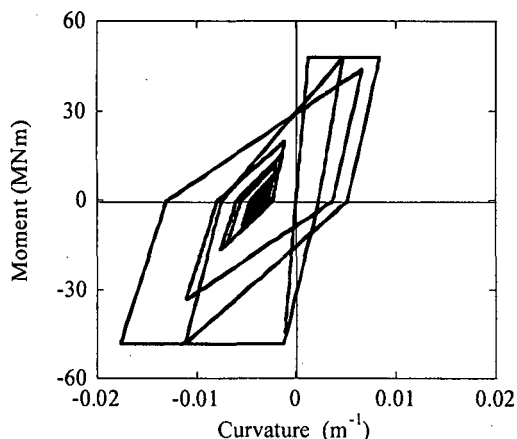
モデル	減衰力 $F_F(\text{MN})$	減衰力低減係数 α
摩擦型 A	0.98	—
摩擦型 B	3.92	—
2 段階摩擦型	3.92	0.40 ($\dot{u}_c = 0.75\text{m/s}$)

減衰力 F_F をある割合 α ($\alpha < 1$) だけ減少させたようにしたものである^{3) 4)}。

粘性減衰型の場合には、粘性係数をどの程度とするかが重要である。ここでは、粘性係数を 3.92MN/m とし、非線形粘性減衰型の場合には、降伏減衰力を 2.94MN とした。摩擦型減衰の場合には、摩擦力を 0.98MN と 3.92MN の 2 種類の場合について解析することとし、2 段階摩擦型の場合には、応答速度 $\dot{u}_c$ が 0.75m/s 以下となった場合に



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



(b) 橋脚基部の $M \sim \Phi$ 関係

図-5 地震応答解析結果 (ダンパーなしの場合)

は、 $\alpha=0.4$ とした。

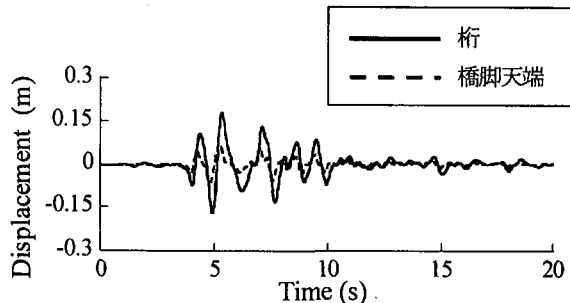
4. ダンパーを設置しない場合の応答

ダンパーを設置しない場合の地震応答を求めた結果が図-5である、桁には最大で0.469mの応答変位が生じ、橋脚天端の最大応答は0.182mとなる。橋脚は塑性ヒンジ区間で降伏し、変位応答じん性率は4.8となる。

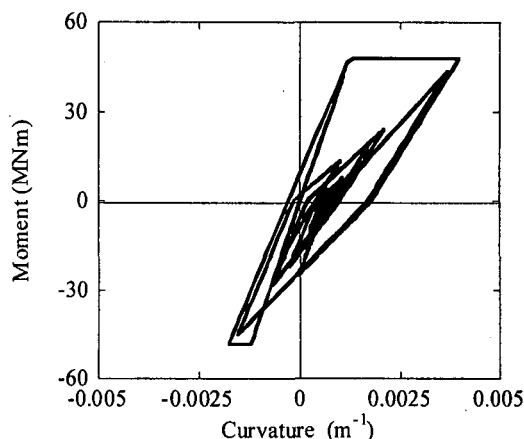
5. 粘性減衰型モデルで制御した場合の応答

図-6は、粘性減衰型ダンパーを用いた場合の桁および橋脚の地震応答変位である。ダンパーに生じる最大減衰力は4.57MNである。桁の応答変位は0.182m、橋脚頂部の応答変位は0.072mとなる。前述したダンパーを設置しない場合と比較すると、桁、橋脚ともに40%程度に応答が低下している。したがって、橋脚基部の変位応答じん性率は1.7となり、ダンパーを設置しなかった場合の35%と小さくなる。付加ダンパーを設置することにより、桁と橋脚天端間の相対変位を抑えることができ、橋脚基部の塑性化を低減することができる。

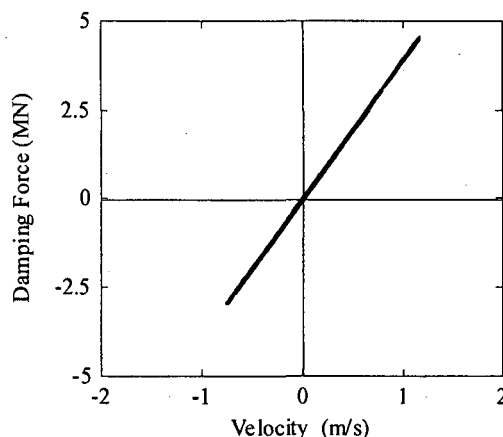
次に、バリアブルダンパーを非線形粘性減衰型として制御した場合の応答が、図-7である。降伏減衰力は2.94MNである。上述したように、粘性減衰型とした場合



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



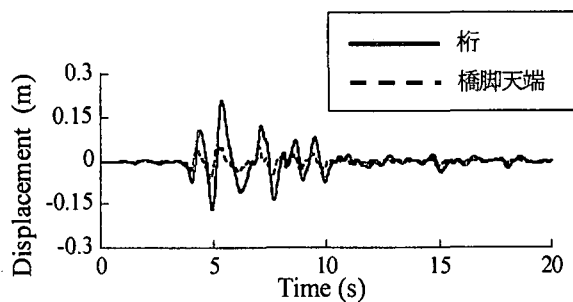
(b) 橋脚基部の $M \sim \Phi$ 関係



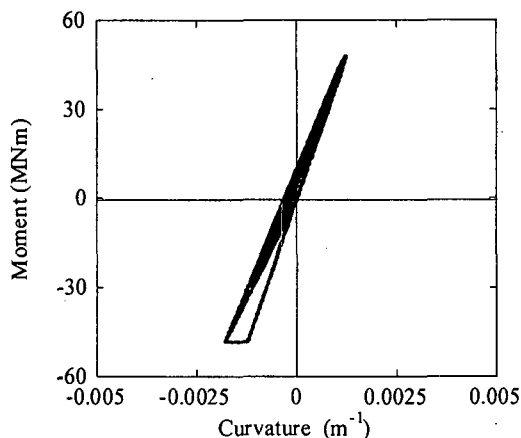
(c) ダンパーの減衰力～速度関係

図-6 地震応答解析結果 (粘性減衰型モデルを用いた場合)

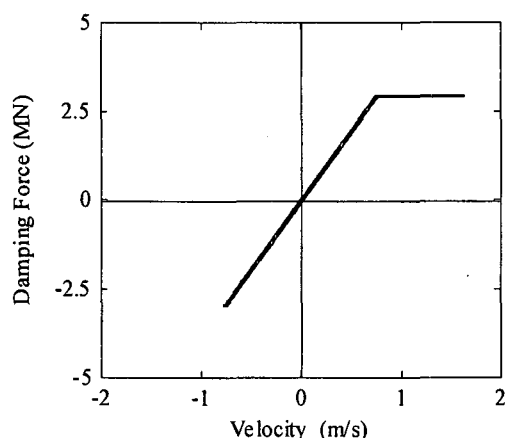
の最大減衰力は4.57MNであるから、降伏減衰力2.94MNはこの64%に相当している。最大応答変位は、桁では0.21m、橋脚天端では0.058mで、橋脚の変位応答じん性率は1.3となる。上述した粘性減衰型ダンパーを用いた場合に比較して、桁の変位は16%増加するが、橋脚の変位応答じん性率は76%と小さくなる。降伏減衰力 F_{Dy} を設けたことにより、相対速度が $\dot{u}_c$ を上回る応答に対するダンパーのエネルギー吸収は、粘性減衰型と比較して小さくなるために、粘性減衰型に比較して非線形粘性減衰型とした場合には、桁の応答変位が多少増大するが、橋脚基部の塑性化を抑えることができる。



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



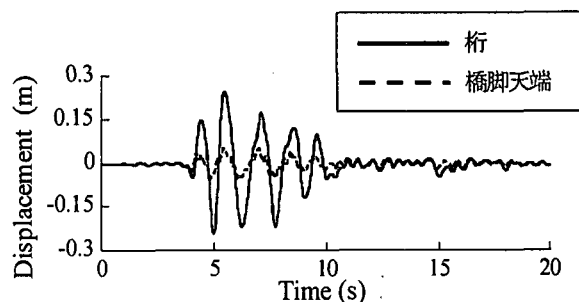
(b) 橋脚基部の $M \sim \Phi$ 関係



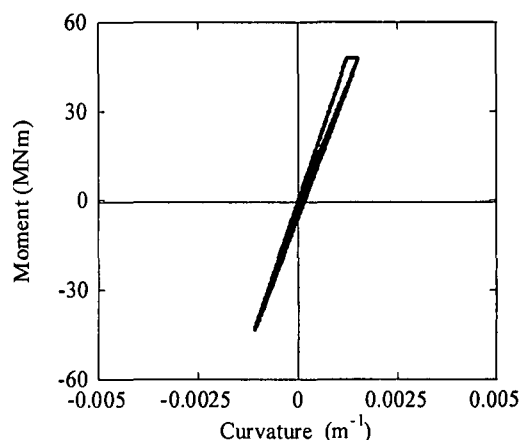
(c) ダンパーの減衰力～速度関係

図-7 地震応答解析結果

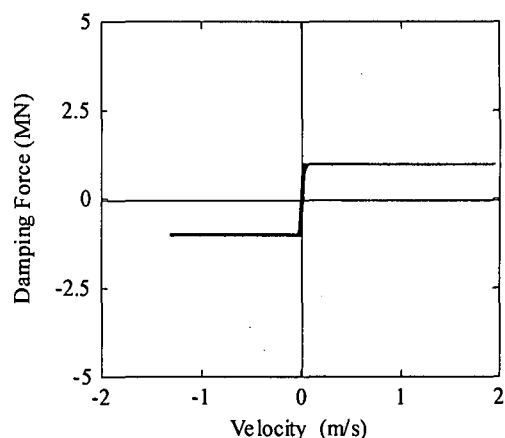
(非線形粘性減衰型モデルを用いた場合)



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



(b) 橋脚基部の $M \sim \Phi$ 関係



(c) ダンパーの減衰力～速度関係

図-8 地震応答解析結果 (摩擦型 A モデルを用いた場合)

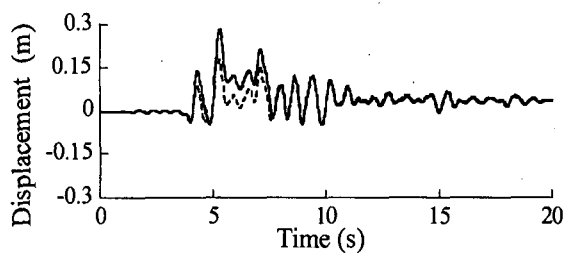
6. 摩擦型モデルで制御した場合の応答

摩擦型モデルを用い、摩擦力を 0.98MN とした場合の解析結果を図-8 に示す。桁及び橋脚頂部の最大変位はそれぞれ 0.248m , 0.054m となる。橋脚の変位応答じん性率は 1.2 であり、ダンパーを設置しない場合と比較すると、桁変位は 52% 、橋脚基部の変位応答じん性率は 25% に抑えることができる。

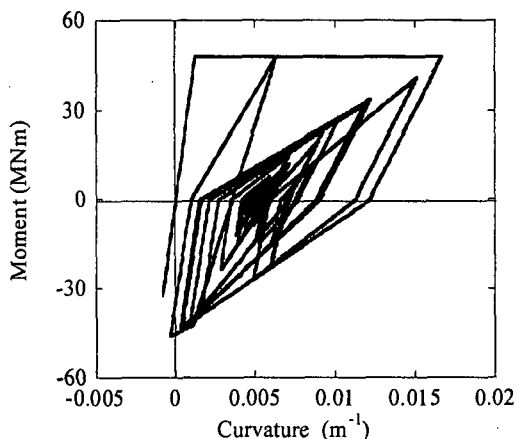
次に、摩擦力を 3.92MN と大きくした場合の解析結果が図-9 である。この場合には、最大応答変位は桁では

0.287m 、橋脚頂部では 0.177m となる。橋脚の変位応答じん性率は 4.7 である。ダンパーを設置しない場合と比較すると多少応答は小さいが、上述した摩擦力を 0.98MN とした摩擦型ダンパーを用いた場合より、桁変位では 116% 、橋脚の変位応答じん性率では 391% に、それぞれ増加する。また、橋全体が正側に偏った応答となり、このため橋脚基部の塑性ヒンジ領域には、正側にしか曲率が発生しない。図-10 に桁と橋脚頂部間に生じる相対変位及び相対速度を示す。桁と橋脚間には相対変位があまり生じておらず、桁と橋脚間がロックされていることがわかる。

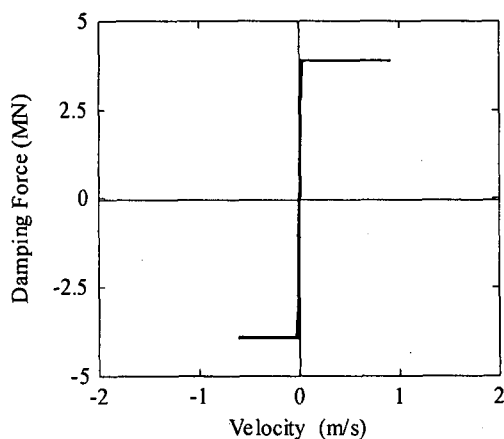
これに対して、摩擦力を 3.92MN 、 $\alpha=0.4$ として 2 段階摩擦型モデルを用いた場合の結果が図-11 である。桁



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



(b) 橋脚基部の $M \sim \Phi$ 関係



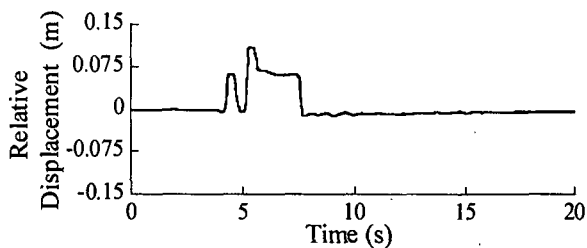
(c) ダンパーの減衰力～速度関係

図-9 地震応答解析結果（摩擦型Bモデルを用いた場合）

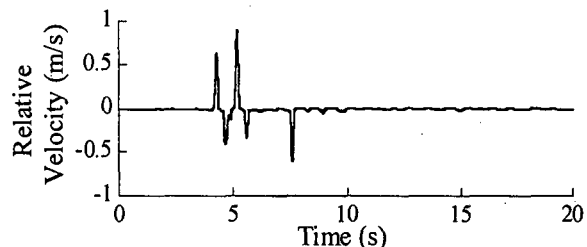
及び橋脚頂部には、最大でそれぞれ0.174m、0.061mの応答変位が生じ、このときの橋脚の変位応答じん性率は1.4である。したがって、2段階摩擦型を用いた場合には、3.92MNの摩擦型ダンパーを用いた場合に比較して、桁変位では61%、変位応答じん性率では30%に応答が小さくなる。また摩擦型の場合のように正側に偏った応答は生じない。

7. 結論

付加ダンパーとしてバリアブルダンパーを用いた場合に、橋脚の地震時応答の低減に減衰力履歴モデルが与え



(a) 相対変位



(b) 相対速度

図-10 桁と橋脚の相対応答

る影響について検討を行った。ここに示した検討から得た結論をまとめると以下になる。

- 1) 最大減衰力として当該橋脚が支持する6.96MNの桁重量の67%に相当する4.57MNの最大減衰力が生じる粘性型付加ダンパーを設置すると、付加ダンパーを用いない場合に比較して、桁の応答変位、橋脚の変位応答じん性率ともに40%程度に小さくすることができる。
- 2) 粘性型付加ダンパーに生じる最大減衰力64%に相当する2.94MNで降伏するようにした非線形粘性減衰型付加ダンパーを用いると、粘性型ダンパーを用いた場合に比較して、桁の応答変位は116%と微増するが、橋脚の変位応答じん性率では76%に応答を小さくすることができる。
- 3) 摩擦力を0.98MNと桁重量6.96MNの14%にした摩擦型付加ダンパーを設置すると、付加ダンパーを設置しない場合に比較して、桁の応答変位では52%、橋脚の変位応答じん性率では25%と応答を小さくすることができる。
- 4) 摩擦力を桁重量6.96MNの56% (3.92MN) と、上記3)よりも大きくした摩擦型付加ダンパーを設置すると、摩擦力を0.98MNとした場合と比較して、桁変位では116%、橋脚の変位応答じん性率では391%と応答は大きくなる。これは、桁と橋脚間がロックされ、エネルギー吸収が限定されるためである。
- 5) 桁と橋脚間の応答速度が0.75m/s以下となった場合に、摩擦力を上記4)の40%に低下させる2段階摩擦型付加ダンパーを設置すると、上記4)の応答に比較して、桁の応答変位では61%、橋脚の変位応答じん性率では30%に応答を小さくすることができる。

参考文献

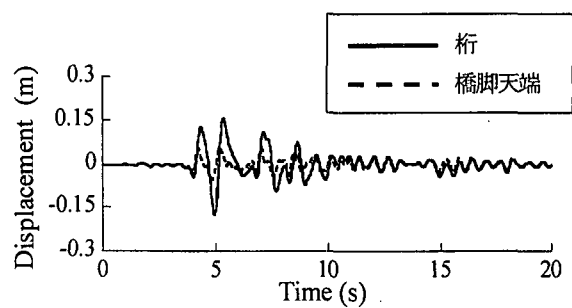
- 1) Spencer, B.F., Jr., and Sain, M. K., and Carlson, J. D. (1997), "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper," Journal

of Engineering Mechanics, ASCE, pp. 230-238, 123-3.

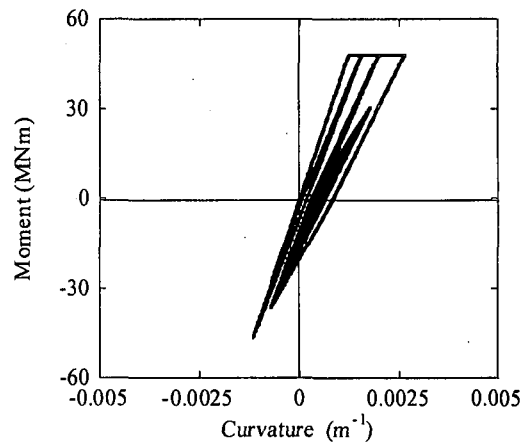
2) Kawashima, K. & Unjoh, S., (1994), "Seismic Response Control of Bridges by Variable Dampers," Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 2583-2601,120-9.

3) 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.

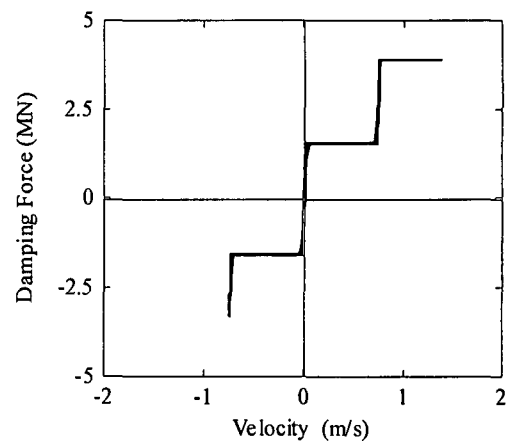
4) 中村剛, Anat Ruangrassamee, 川島一彦., (2002), : MR ダンパーをバリアブルダンパーとして用いた橋の地震応答, 第 5 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.51-58, 土木学会



(a) 桁・橋脚天端の応答変位



(b) 橋脚基部の $M \sim \phi$ 関係



(c) ダンパーの減衰力～速度関係

図-11 地震応答解析結果
(2 段階摩擦型モデルを用いた場合)