

(223) ファジィ制御理論に用いたバリアブルダンパーによる道路橋の地震応答制御

(株)大林組技術研究所 ○孫 利民 後藤洋三

1 はじめに

高橋脚道路橋、免震橋などの固有周期の長い橋では、地震時の桁の橋軸方向の変位が大きく、大きな伸縮継手が必要となる。また、交通荷重の作用によって揺れ易く、道路の走行性が低下する可能性もある。従って、これらの橋に附加制振装置を装着し振動変位を抑えることが望ましい。その一方式として、図-1に示すように、橋台と橋桁の間に粘性ダンパーを設置し、橋台の反力を利用して、橋軸方向の桁の振動変位を低減する方法が考えられる。既に、減衰可変のバリアブルダンパーが橋梁制振に提案されているが[1,2]、本研究では、ファジィ制御理論を用いたバリアブルダンパーによる道路橋の地震応答制御について理論解析を行い、その適用性および制御パラメーターの設定幅による制振効果への影響について検討した。

2 道路橋のモデルとファジィ制御

図-1に示すように、左右対称の高橋脚PC道路橋を解析モデルとして選定し、その半分を1自由度系にモデル化した。橋の1次モードの質量Mは約9,300t、剛性係数Kは70,000t/sec²、構造減衰係数Cは2,200t/secである。橋の1次固有周期Tは2.3sec、構造減衰定数h(=C/(2ωM))は約4.3%となる。バリアブルダンパーの減衰係数をC_vとすると(減衰定数はh_v=C_v/(2ωM))、運動方程式は次のようになる。

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + C_v \dot{x} + K x = -M \ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで、 \ddot{x}_g は地表面加速度である。バリアブルダンパーが負担する減衰力は

$$F_d = C_v \dot{x} \quad (2)$$

で、橋脚のせん断力は

$$F_s = C \dot{x} + K x \quad (3)$$

である。バリアブルダンパーを含む橋モデルのトータル減衰定数は

$$h_T = h + h_v \quad (4)$$

と示される。

ファジィ制御では、バリアブルダンパーの減衰力F_d及びバリアブルダンパーと橋のトータル減衰定数h_Tからファジィ推論により、次の時間ステップのバリアブルダンパーの減衰定数の変化量Δh_vを決める。バリアブルダンパーの減衰の変動原則を次のように定めた。減衰力F_dについては、ある設定した大きさのレベルにならない限り、できるだけ高減衰レベルに近づけ、減衰効果を十分発揮させる。もし、減衰力F_dが設定したレベルよりも大きくなりそうであれば、ダンパーの減衰を下げ、それによって減衰力を低減させ、橋とダンパー自身を保護する。この考えに従って作成した制御ルールを表-1に示す。例えば、

ルール: IF F_d = PB & h_T = PB; THEN Δh_v = NB は
 "もしF_dが正で大きく、かつh_Tも正で大きければ、
 Δh_vを負で大きくせよ、即ち、h_vは次の時間ステップ

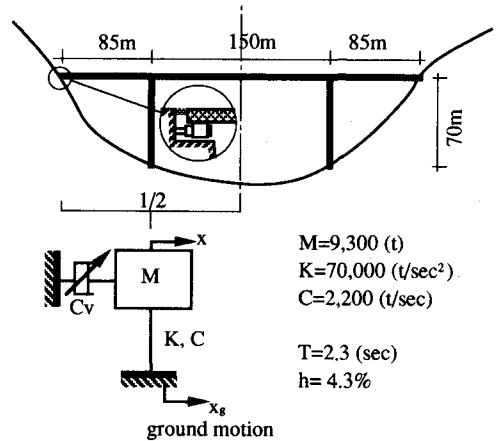


図-1 道路橋モデル

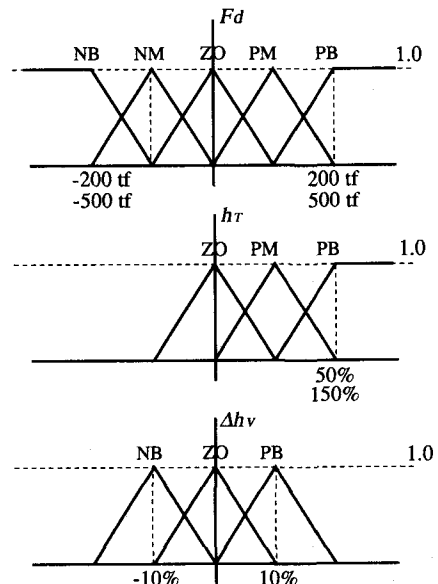


図-2 メンバシップ関数

ブで大幅に減小するようにしよう”；

ルール：IF $F_d = PB$ & $h_T = ZO$ ； THEN $\Delta h_v = ZO$ は
 “もし F_d が正で大きく、かつ h_T がゼロに近ければ、
 Δh_v をゼロにせよ、即ち、 h_v は次の時間ステップで
 変化しないようにしよう”；

ルール：IF $F_d = ZO$ & $h_T = PM$ ； THEN $\Delta h_v = PB$ は
 “もし F_d がゼロに近く、かつ h_T も正で中位であら
 ば、 Δh_v を正で大きくせよ、即ち、 h_v は次の時間ス
 テップで大幅に増大するとうにしよう”；

.....
 と意味する。以上のようなルールを全部で25を作成した。

ファジィ推論にはmax-min-高さ法を用いた[3]。ファジィ推論の前件部 F_d 、 h_T と後件部 Δh_v はファジィ数であり、それぞれのメンバーシップ関数を図-2に示す。 Δh_v の幅を10%に設定した。 F_d と h_T については、その幅が制振効果に与える影響を調べるため、それぞれ200t、500tと50%、150%の2つの値を用いた(表-2)。

3 理論解析結果と考察

橋の地震応答の時刻歴を0.02sec刻みで求めた。表-2に示す4ケースを計算した。解析結果を図-3~7に示す。入力はELcentro NS(1940)地震波で、最大加速度は314.7 gal、継続時間は50secである(図-3(a))。入力地震波は加速度レベルにより、二つの部分に分けられる。即ち、前30secの高加速度レベルの部分(最大加速度314.7gal)と後20sec(30secから50secまで)の低加速度レベルの部分(最大加速度51.8gal)である。

バリアブルダンパーを装着しない場合(図-3)、橋自身の構造減衰が小さいため($h = 4.3\%$)、地震時の橋桁の橋軸方向の最大変位は25.9cm(図-3(b))で、非常に大きいことが分かる。バリアブルダンパーにより制振した場合(図-4~7)、計算した4ケースのいずれでも橋桁の最大変位が15.9cm(図-4(a)~7(a))以下に低減された。

F_d または h_T の幅を大きく設定するほど、橋の応答変位が小さくなり、よい制振効果が得られる。しかし、 F_d の応答値も同時に大きくなるのが分かる。また、実際の F_d の最大応答値は制御のために設定した幅を越えている(ケース1、2、4)。これは F_d の応答値がダンパーの減衰定数 h_v にのみならず、入力加速度にも依存しているからである。本研究で用いた制御ルールは入力加速度を考慮していない。この点については今後の制御ルールの作成で検討すべきである。

ケース2(図-5)とケース3(図-6)では、 F_d の最大応答値が近く、制振効果もほぼ同じである。しかし、後半の低加速度レベル入力の部分で(30sec-

表-1 ファジィ制御ルール

Δh_v		F_d				
		NB	NM	ZO	PM	PB
hr	PB	NB	NB	NB	NB	NB
	PM	NB	ZO	PB	ZO	NB
	ZO	ZO	PB	PB	PB	ZO

IF $F_d = PB$ & $h_T = PB$ THEN $\Delta h_v = NB$

前件部変数： F_d 、 h_T 後件部変数： Δh_v

ファジィ変数：NB = Negative Big; NM = Negative Medium;

ZO = Zero;

PM = Positive Medium; PB = Positive Big.

表2 理論解析ケース

hr		F_d	
		200 tf	500 tf
50%	50%	ケース1	ケース2
	150%	ケース3	ケース4

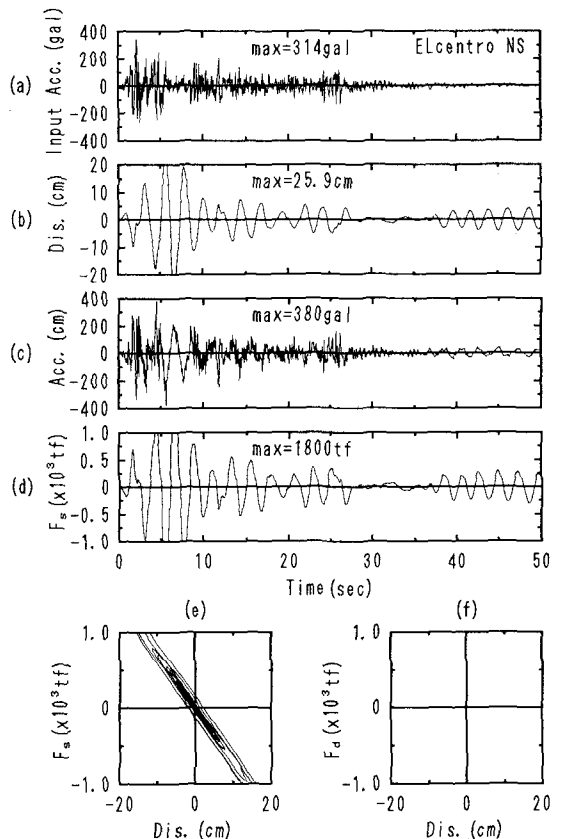


図-3 地震応答(制御なし)

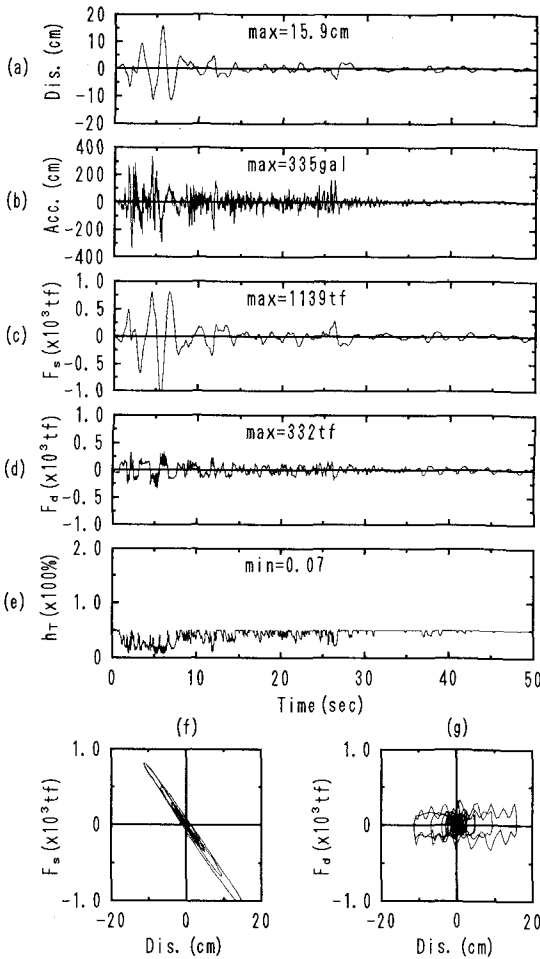


図-4 地震応答 (ケース1)

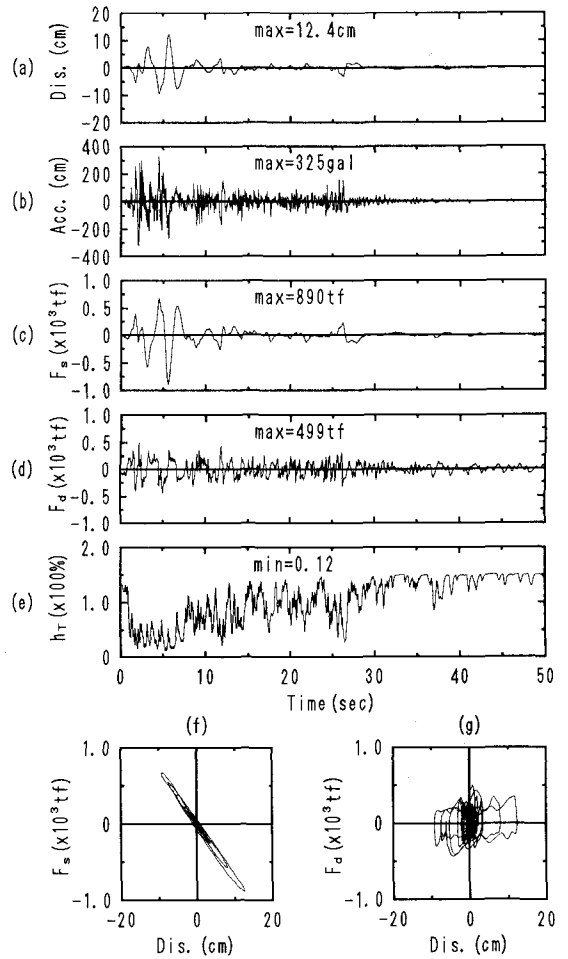


図-5 地震応答 (ケース2)

50sec)、ケース2の最大変位はケース3より小さいことが分かる。ケース2の場合には、中小地震あるいは交通荷重による振動に対してもよい制振効果を得られると言える。

橋脚せん断力 F_s が制振によって軽減される(図-4(c)~7(c))。せん断力-変位、減衰力-変位のループ(図-4(f)(g)~7(f)(g))からも分かるように、 F_d と h_T の設定幅の増大につれて、バリアブルダンパーによる振動エネルギーの逸散が多くなり、橋脚の負担がより多く軽減される。また、減衰力-変位ループの形状が長方形に近いことから、本研究で用いた制御ルールによるバリアブルダンパーは摩擦タイプのバッシブダンパーに近い性能を持つことが分かる。

橋を1自由度系にモデル化したため、本研究で計算した無制振、制振のいずれのケースにおいても、加速度の応答が低減されておらず、全て入力地震波とほぼ同じ程度の300gal以上となっている。

バリアブルダンパーの減衰定数は、前半で変動が激しい。しかし、後半では地震入力加速度が小さいため、バリアブルダンパーの減衰力のレベルは小さくなり、減衰比は高いレベルで安定している。

4 結び

バリアブルダンパーを用いて長周期の橋の振動を制御する場合、ダンパーの減衰定数をバリアブルに変動させることによって、ダンパーに作用する力がある設定したレベル以上にならないようにすると同時に、ダンパーの減衰性能

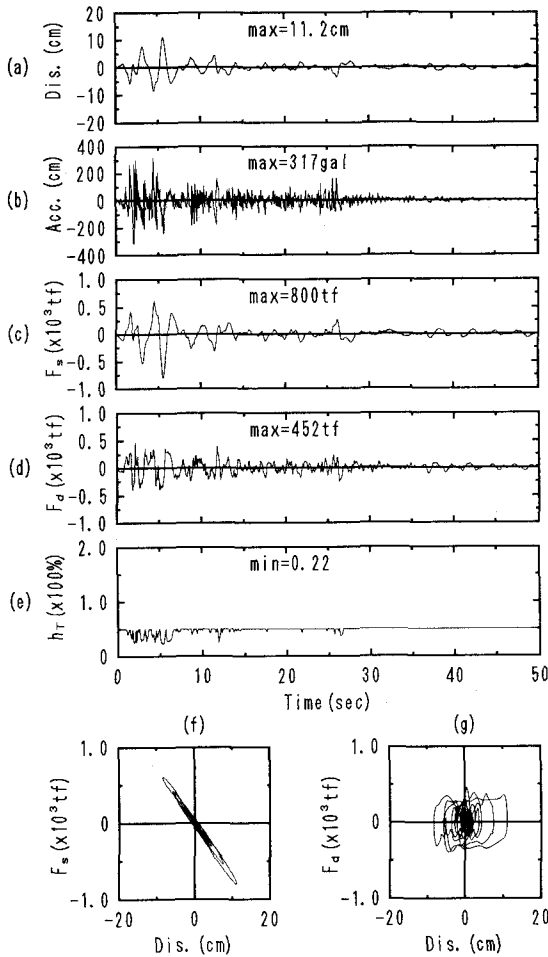


図-6 地震応答 (ケース3)

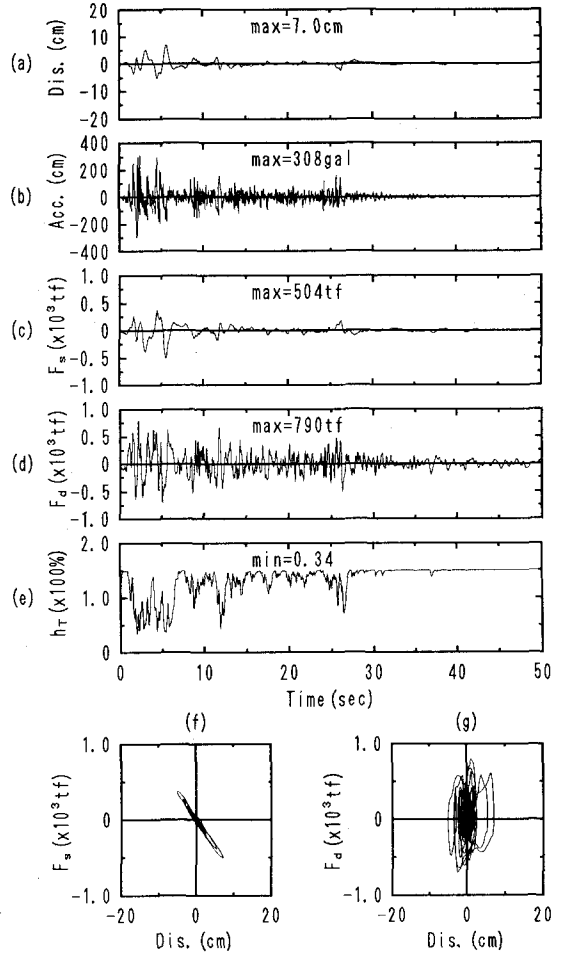


図-7 地震応答 (ケース4)

を十分発揮した制振効果を得ることができる。また、水平地震力のかなりの部分がダンパーによって負担され、橋脚のせん断力とモーメントも軽減できる。ファジィ制御理論を用いた場合、制御規則が単純、明快であり、適切な制御ルールの作成によって、期待する制御効果が容易に達成可能である。さらに、複雑な構造解析モデルは不要のため、制御の計算が簡単で、実用性がかなり高いと言える。本研究で用いたファジィ制御ルールはダンパーの減衰力とトータル減衰定数がファジィ推論の前件部になっている。そのため、それらの設定幅をダンパーの最大荷重、減衰可変範囲などの性能を考えて適切な値に決めることができる。橋桁の変位が小さくなると伸縮装置を小さくできる。また、地震力の一部をダンパーに負担させることができるので橋脚の耐震設計が容易になり、トータルではコストダウンになる可能性がある。

今後は、多自由度化した橋梁のモデルの複数固有値解析を行ないダンパーの最適変動幅について検討するつもりである。また、地震入力、位相差、ダンパー装置の特性などを取り込んだ制御ルールの作成も検討する予定である。

参考文献

[1] 川島、運上、清水：バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御、アクティブ制震(振)シンポジウム、p311-324、92年3月。 [2] Shinozuka：Seismic response variability of bridges on friction controlable isolators. UJNR 第2回日米免震橋ワークショップ、92年12月。 [3] 水元：コンピュータール、特集/ファジィ制御、コロナ社、No28、p32-45、89年10月。