

(43) ファジィ制御理論を使ったバリアブルダンパーによる道路橋の振動制御
FUZZY CONTROL OF VARIABLE DAMPER FOR SUPPRESSING BRIDGE VIBRATIONS

孫 利民 * 後藤洋三*

Limin SUN and Yozo GOTO

The paper presents an application of fuzzy control theory to a variable damper for suppressing bridge vibrations during earthquake. A single-degree-of-freedom bridge mode with an installed variable damper, which locates between the bridge deck and the bridge abutment, is employed for analytical simulations. The simulation results show that the variable damper proposed is effective to suppress the bridge vibrations due to seismic loading providing the rules of fuzzy control are built suitably. It is also found that the variable damper controlled by fuzzy theory can contribute its damping effect as much as possible respect to various levels of seismic loadings.

Keywords: vibration control, fuzzy sets, bridges, simulation

1 まえがき

高橋脚道路橋、免震橋などの固有周期の長い橋では、地震時の橋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、道路の利用者に不快感を与える可能性もある。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。本研究では、図-1に示すように、橋台と橋桁の間に減衰可変のバリアブルダンパーを設置し、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セミアクティブ制振方式を考えた。既に、バリアブルダンパーが免震橋の制振に提案されているが[1]、ここでは、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検討を行なった。

古典制御理論、現代制御理論など従来よく使われている制御理論は被制御システムが数学的に厳密に定義されていることとコントロール目標関数(performance index)がシステムのパラメータで表示できることを仮定して立てられたものである。ところが、長大橋の場合には、構造が複雑になっているため、構造パラメータの同定が難しくなる。また、異なる外部入力によって、performance index も違ってくる。そのため、それらの制御理論の仮定が不適当になる。一方、非線形性が強いと言われる人間オペレーターに係わる制御問題の分野で、ファジィ制御理論の応用[2]が盛んに研究されている。そこで、本研究ではファジィ制御理論を構造制御問題へ応用し、その適用性について検討した。

2 橋のモデル

図-1に示すように、左右対称の高橋脚PC道路橋の半分を解析対象として選定した。まず、橋桁端部に減衰一定のダンパーを付けることによって構造体全体のモード減衰とモード型がどう変わるかを把握するため、複素固有値解析[3]を行った。図-2に示すように、ダンパーの減衰を上げると、1次、3次、5次モードのモード減衰が大きく

* 工博 (株)大林組技術研究所土木第五研究室

(〒204 清瀬市下清戸4-640)

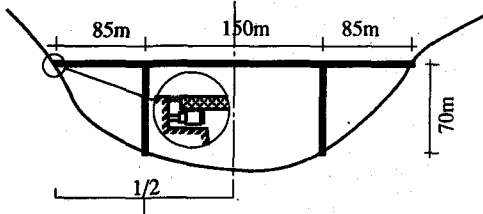


図-1 高橋脚道路橋と
パリアブルダンパー

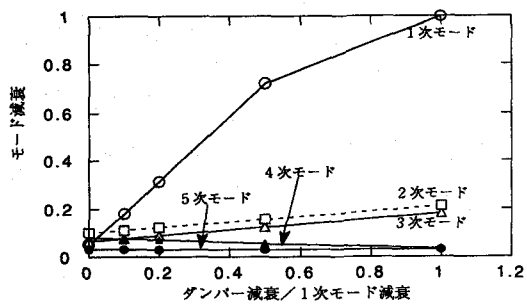


図-2 道路橋モード減衰

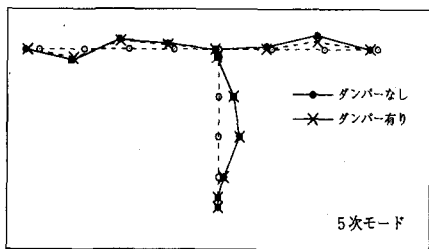
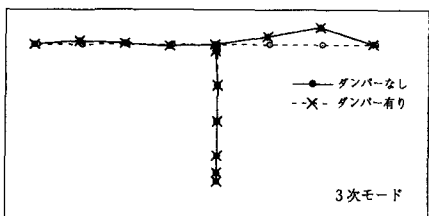
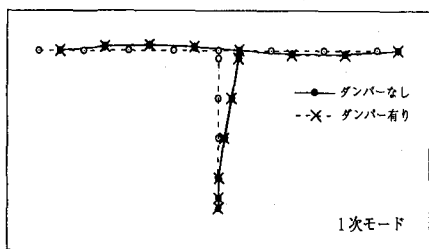


図-3 道路橋モード型

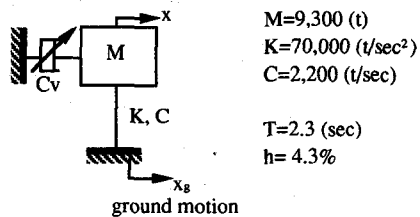


図-4 1自由度化した道路橋モデル

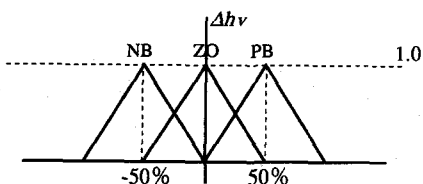
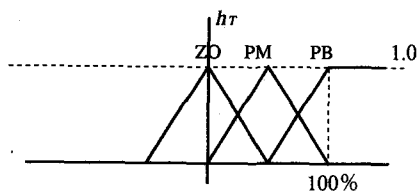
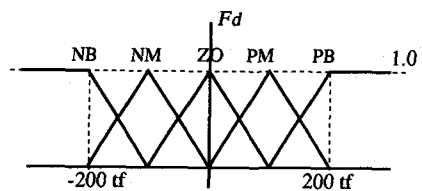


図-5 メンバシップ関数

なる。2次、4次モードについては水平変位がないため、モード減衰がほとんど変わらないことが分かった。構造の形式とダンパーを付ける位置によって、最大モード減衰に対応するダンパー減衰が存在する場合もあるが、本研究の例では、調べた範囲（1次モードから5次モードまで）にそのような現象を見られずモード減衰がすべてダンパーの減衰に単調比例している。図-3はダンパーを付けない場合とダンパーを付けた場合の橋の1次、3次、5次モード型を示すものである。ダンパーを付けた場合のモード型は複素モードになるが、ここでは、簡単のため各節点の最大振幅をプロットした。図-3から分かるように、ダンパーを付けることによってモードの形状が多少変わるが、いずれのモードも最大振幅のある節点位置が変わっておらず、即ち、構造の最大応力の分布が質的変化がないことが分かった。

本研究では、橋の1次モードに注目し、橋を1自由度系にモデル化した（図-4）。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 （ $=C/(2\omega M)$ ）は約4.3%とした。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 $h_v=C_v/(2\omega M)$ ）、運動方程式は次のようになる。

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

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

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

である。バリアブルダンパーを含む橋モデルのトータルの減衰定数は

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

と示される。

3 ファジィ制御

第2章の検討から、提案した制御方式は橋桁の橋軸方向変位の制御に有効かつ適当であることが分かった。図-2から分かるようにダンパーの減衰を大きくすればするほど、よい制振効果を得られる。しかし、実際にはダンパー、橋桁の部材、橋台などの耐力に限界がある。これを意識して、ファジィ制御を用いたバリアブルダンパーを提案した。

即ち、この制御では、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を加えた橋のトータルの減衰定数 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。ここに、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。

1) 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。

2) 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 $\Delta h_v = NB$ 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”；

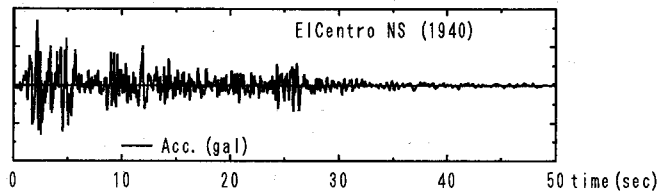
ルール：IF $F_d = ZO$ & $h_T = PM$; THEN $\Delta h_v = PB$ は”もし F_d がゼロに近く、かつ h_T も正で中位であれば、 Δh_v を正で大きくせよ、即ち、 h_v は次の時間ステップで大幅に増大するとうにしよう”；

.....
と意味する。以上のようなルールを全部で25個を作成した。

ファジィ推論にはmax-min-高さ法を用いた[4]。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-5に示す。 Δh_v の幅を50%に設定した。 F_d と h_T の幅はそれぞれ200t、100%の値を用いた。

4 数値解析と考察

橋の地震応答の時刻歴を0.02sec刻みで求めた。入力はいくつかの地震波で、継続時間は50secである（図-6）。まず、異なる地震入力の大さきに対してバリアブルダンパーの制振効果を検討した。入力地震波の最大加速度



図－6 入力地震波、ElCentro NS (1940)

の値として50gal、100gal、300galを用いて計算した。結果を図－7に示す。バリアブルダンパーを付けない場合は、橋自身の構造減衰が小さいため($\eta=4.3\%$)、地震時の橋桁の変位は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は、計算した3ケースの最大変位はそれぞれ4.1cmから0.9cmに、8.2cmから2.7cmに、24.6cmから10.1cmに低減された。最大入力加速度が小さい場合(図－7 (a))、ダンパーの減衰は高いレベルに安定している。最大入力加速度が大きい場合(図－7 (c))、ダンパーの反力 F_d はかなり大きくなり、それを小さくするため、ダンパーの減衰は大幅に下げられている。また、入力の後半(30sec－50sec)では、入力加速度の低下によって、ダンパーの減衰は高レベルに戻っている。以上の解析結果から、バリアブルダンパーは異なる大きさの入力地震波に対し、自身の機能を十分発揮し、効率よく橋の変位を抑えることができると言える。

図－7 (c)の場合、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。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ので、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ろう。

図－7の例ではバリアブルダンパーの減衰変動の刻み ΔT_v を橋の固有周期 $T=2.3\text{sec}$ の $1/4$ (0.58sec)に設定した。ここに、 ΔT_v がバリアブルダンパーの性能にどう影響するかについて検討を加えるため、 $\Delta T_v=1/4T$ (0.58sec)、 $1/2T$ (1.12sec)、 T (2.3sec)の三つの値を用いて計算した(図－8)。 ΔT_v を長くすれば、実用ダンパー装置の設計が容易になり、エネルギーの消耗も少ない。実用の立場から見ると、これは望ましいことである。一方、 ΔT_v が大きすぎると、ダンパーの反応が鈍くなり、入力の変動が激しい場合には過大なダンパー反力が生じる可能性がある(図－8 (d))。本研究の例では、 $\Delta T_v=1/4-1/2T$ が妥当であることが数値解析の結果によって示された。

5 まとめ

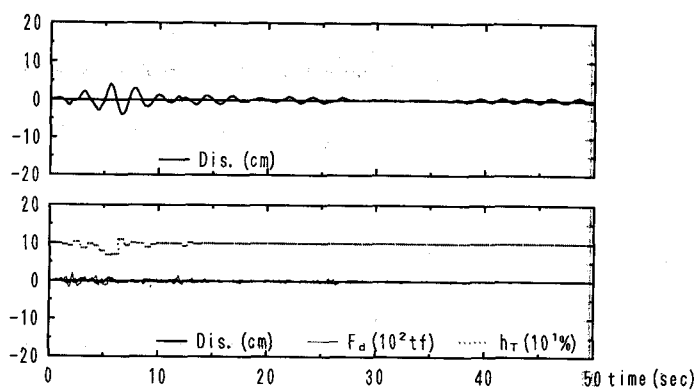
ダンパーを用いて長周期の橋の振動を制御する場合、ダンパーの減衰定数をバリアブルに変動させることによって、ダンパーに作用する力がある設定したレベル以上にならないようにすると同時に、ダンパーの減衰性能を十分発揮した制振効果を得ることができる。ファジィ制御理論を用いた場合、制御規則が単純、明快であり、適切な制御ルールの作成によって、期待する制御効果が容易に達成できる。さらに、複雑な構造解析モデルは不要のため、制御の計算が簡単で、実用性が高いと言える。本研究で用いたファジィ制御ルールはダンパーの減衰力とトータル減衰定数がファジィ推論の前件部になっている。そのため、それらの設定幅をダンパーの最大荷重、減衰可変範囲などの性能を考慮して適切な値に決めることができる。

バリアブルダンパーを用いることによって、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。

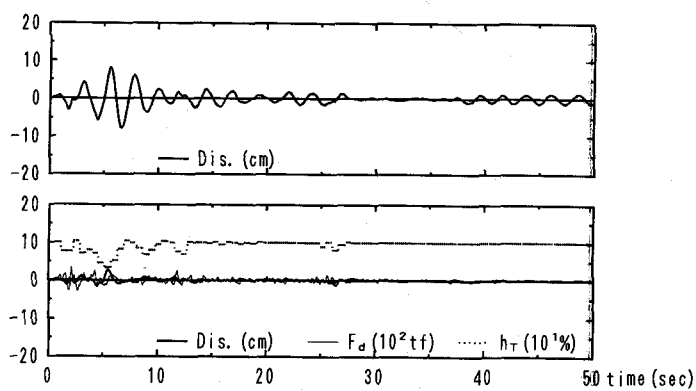
6 今後の課題

ファジィ理論がよく用られるオペレーターに係わる制御問題の場合には、オペレーターの知識ベースを参照して制御ルールを作成できる。構造物の振動制御の場合には参照できる知識ベースがないため、制御ルールの作成が難しい。解決方法としては：1) 実験及び解析によって、Try-and-Errorのアプローチで作成する；2) 学習機能のあるNeural Networkの手法を導入し、いわゆるNeural-Fuzzy Control 理論によって解決する、などの方法を考えられる。それらは本研究の今後の検討課題である。

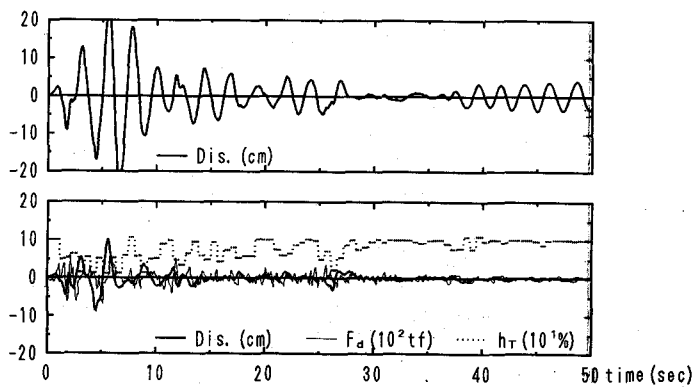
また、ファジィ理論は構造物制御の非線形制御目標関数によく対応できるが、制御精度が低いのがファジィ制御の弱点である。今後、ファジィ理論と汎用制御理論を組み合わせた、いわゆる、Hybrid制御理論の検討も必要である。



(a) 最大加速度：50gal

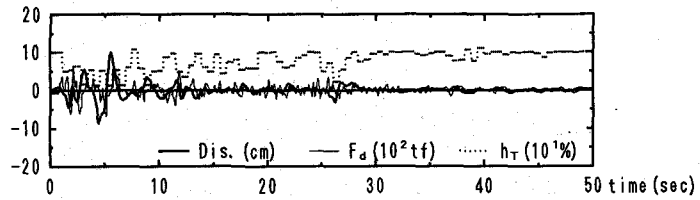


(b) 最大加速度：100gal

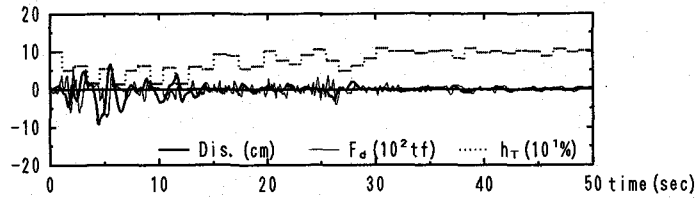


(c) 最大加速度：300gal

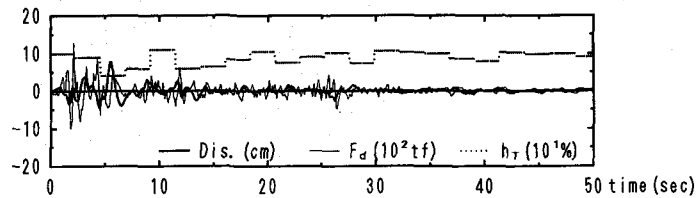
図ー7 地震応答：異なる大きさの入力地震波の場合



(a) $\Delta T_v = 0.58 \text{ sec}$



(b) $\Delta T_v = 1.16 \text{ sec}$



(c) $\Delta T_v = 2.30 \text{ sec}$

図-8 地震応答：異なるダンパー減衰変動刻みの場合

表-1 ファジィ制御ルール

Δh_v		F_d				
		NB	NM	ZO	PM	PB
h_T	PB	NB	NB	NB	NB	NB
	PM	NB	ZO	PB	ZO	NB
	ZO	ZO	PB	PB	PB	ZO

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

前件部変数： F_d 、 h_T 後件部変数： Δh_v

ファジィ変数： $\text{NB} = \text{Negative Big}$; $\text{NM} = \text{Negative Medium}$;

$\text{ZO} = \text{Zero}$;

$\text{PM} = \text{Positive Medium}$; $\text{PB} = \text{Positive Big}$.

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、1992年3月。
- [2] Pedrycz, W. : Fuzzy Control and Fuzzy Systems, second, extended edition, Research Studies Press, 1993.
- [3] Veletsos, A. S. and Ventura, C. E. : Modal analysis of non-classically damped linear systems, Earthq. Eng. & Struct. Dyn., Vol.14, P217-243, 1986.
- [4] 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、1989年10月。