

ファジィ理論を用いた減衰可変装置による橋の地震応答制御

孫 利民 後藤 洋三

Fuzzy Control of Bridge Earthquake Response by Using Variable Dampers

Limin Sun Yozo Goto

Abstract

This paper presents experimental and analytical simulation results of variable dampers for suppressing bridge vibrations during an earthquake. The variable damper is controlled using the fuzzy control theory. The experiment and simulations show that the variable dampers are effective to suppress bridge vibrations. It was found that the variable damper, controlled by the fuzzy theory with our proposed control rules, can contribute to the damping effect to the full extent possible with respect to various levels of seismic loadings.

概 要

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、振動変位を抑えることが望ましい。本研究では、橋台と橋桁の間に外部入力信号に応じて減衰可変のダンパ装置を設置し、橋台の反力を利用するセミアクティブ制振方式を考えた。減衰可変ダンパはファジィ理論を用いて制御される。ファジィ制御の適用性は解析結果および模型実験により検証した。数値解析結果から、可変ダンパの制振効果により、橋桁の最大変位が半分以上に低減できることが分かった。また、従来のダンパと比べ、過大な反力を避けながら橋の変位を最小限に抑えられることが分かった。

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、橋を通過する人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橋軸方向の振動変位を抑えることが望ましい。

従来の減衰一定のダンパを制振装置として装着した場合には、減衰定数が一定であるため、大きさの異なる個々の外部入力に対して制御効果は最適になっていないなどの問題点がある。本研究では、図-1に示すように、橋台と橋桁の間に外部入力に応じて減衰可変のダンパを設置し、橋台の反力を利用して、橋軸方向の桁の振動変位を最小限に低減するセミアクティブ制振方式を考えた。既に、減衰可変（バリエブル）ダンパが道路橋の制振に提案されているが^{1,2)}、ここでは、ファジィ制御理論を用いた減衰可変ダンパ装置による高橋脚道路橋の地震応答制御について検討した。

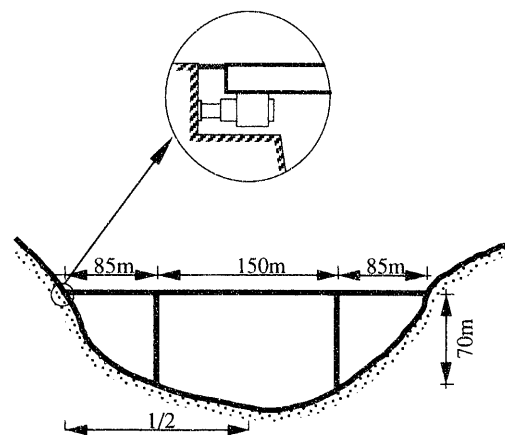


図-1 減衰可変ダンパによる道路橋の振動制御

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線形で、かつ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導びかれたものである。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^{3,4,5)}が盛んに研究されている。ここではファジィ制御理論を構造制御問題へ応用することを試みた。

本研究では、模型実験用の小型可変ダンパ装置を開発し、模型実験を行って提案した制振方式およびファジィ制御理論の適用性について検討した。また、理論解析により、実橋の数値計算例から、従来の減衰一定のダンパと比較して可変ダンパの有効性を示した。

2. 制御アルゴリズムおよびファジィ制御ルール

理論解析の結果⁶⁾により、桁端にダンパを付ける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。ダンパ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、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可変ダンパを提案した。

この制御では、ダンパの減衰力 F_d および全体系(橋+ダンパ)のトータルの減衰定数 ht からファジィ推論により、次の瞬間の可変ダンパの減衰定数の変化量 Δhd を決める(図-2)。ここに、ダンパ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、橋とダンパ自身を保護する。

この考えに従って15個の制御ルールを作成した(表-1)。

ファジィ推論には max-min 高さ法を用いた⁷⁾。ファジィ推論の前件部 F_d , ht と後件部 Δhd 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-3に示す。 F_d , ht , Δhd の幅はそれぞれ $F_d.BIG$, $ht.BIG$, $\Delta hd.BIG$ で表す。

3. 模型実験用可変ダンパの開発および性能検証

制振実験の状況、開発した可変ダンパを写真-1, 2に示す。実験用の1自由度系の橋模型は重さ約1tf、固有周期1.37sec、構造減衰0.45%である。

表-1 ファジィ制御ルール

		F_d				
		NB	NM	ZO	PM	PB
ht	PB	NB	NB	ZO	NB	NB
	PM	NB	ZO	PB	ZO	NB
	ZO	ZO	PB	PB	PB	ZO

Antecedent : F_d & ht

Consequent : Δhd

Fuzzy numbers : NB=Negative Big ;

NM=Negative Medium ;

ZO=Zero ;

PM=Positive Medium ;

PB=Positive Big.

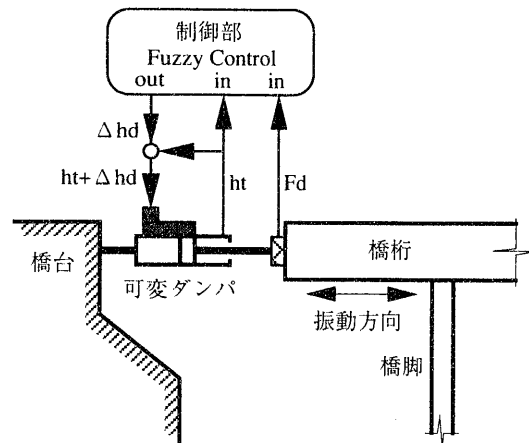


図-2 制御原理図

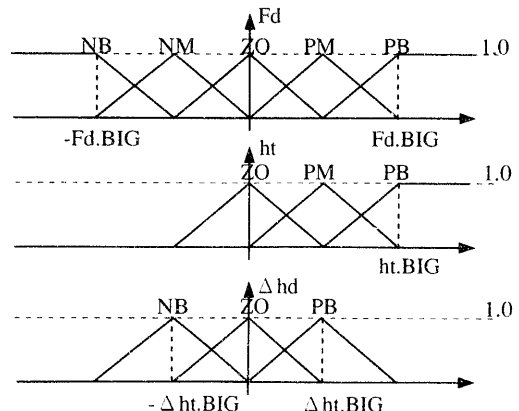


図-3 メンバーシップ関数

写真-1に示すように、橋模型が振動台上に載せられ、重り（橋桁に相当）と反力台（橋台に相当）の間に可変ダンパが装着されている。計測されたデータがEWSに記録され、可変ダンパはファジィ推論ボードを内蔵するパソコンPC-98により制御する。

可変ダンパの仕様は最大反力400 kgf、最大速度10 kine、ストローク±6 cmである。可変ダンパは従来のオイルダンパに油の流量を制御するバイパス管路を設けて構成されたものである。バイパス管路の開閉度を電磁リリーフ弁で制御する。それにより減衰が制御できる。

開発した可変ダンパの基本性能を確認するために、ダンパ装置の単体性能試験を行った。図-4は可変ダンパの最大反力と制御電圧の関係を示す。ここで、 V_p = ダンパのピストン速度 (kine) ; S = リリーフ弁の制御電圧 (volt) である。ある速度で、ダンパの最大反力は制御電圧の増大により単調に増大し、減衰の制御が簡単にできる。 $V_p = 2 \sim 10$ (kine), $S = 2 \sim 7$ (volt) の範囲ではダンパ反力 F_d が V_p , S にほぼ線形比例する。しかし、ダンパに採用された電磁リリーフ弁の低圧域での精度が低いいため、 $F_d < 100$ kgf の範囲内に計測したデータはバラツキが大きい。

試験結果から、ダンパの性能を表す理論式を次のように求めた。

ピストンが低速挙動する場合、ダンパの性能は内部の固定オリフィスの特性により決められ、

$$F_d = 250.0 V_p \quad \dots\dots\dots (1-a)$$

で示すことができる。

ピストン挙動速度 V_p がある臨界値を超えると、ダンパの性能はバイパス管路の電磁リリーフ弁で制御できる。

$$F_d = 10.1 V_p + 54.8 S - 109.6 \quad \dots\dots\dots (1-b)$$

ダンパ最大反力が設計値の400 kgfを超えないようにするため、バイパス管路に機械式リリーフ弁が設けられている。そのため、制御電圧 S が8 volt以上になると、機械式リリーフ弁が開き、ダンパ最大反力が頭打ちになる。この場合のダンパ性能を次の式で表す。

$$F_d = 10.1 V_p + 54.8 \times 8 - 109.6 \\ = 10.1 V_p + 328.8 \quad \dots\dots\dots (1-c)$$

図-4に示した解析値は式(1-a~c)の3式から計算した値の非負最小値である。

可変ダンパの応答性について単体性能試験で調べた。制御信号が高電圧から低電圧に変わる際、すなわちリリーフ弁が閉じる方向に挙動する際、約0.2 secの時間遅れが生じる。また、可変ダンパの性能の周波数依存性についても調べた。最大反力が一定で、周波数が0~10 Hzまで連続増加する正弦波でダンパを加载した。ダンパは高周波数領域でバネとしての効果が強くなる傾向がある。

橋模型の片側に可変ダンパを取り付けて制振実験を行った。入力道路橋示方書・同解説書V耐震設計編の参考資料⁹⁾に示されたI種地盤用の地震波で、最大加速度は約120 galとした。ファジィ制御メンバーシップ関数のファジィ数幅の設定は次のとおりである。

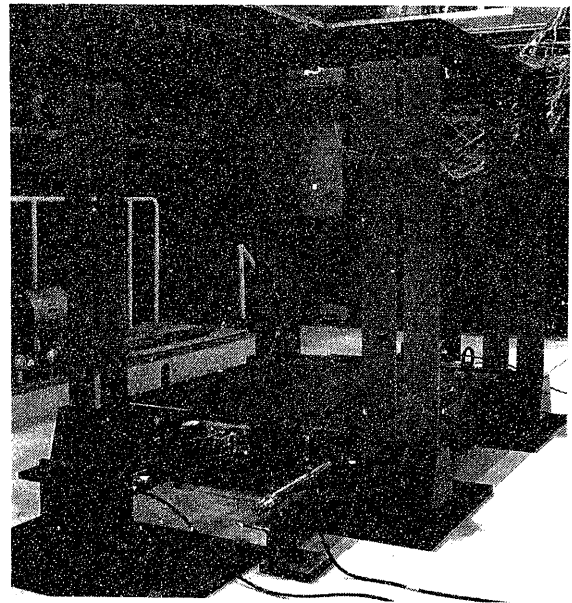


写真-1 模型実験

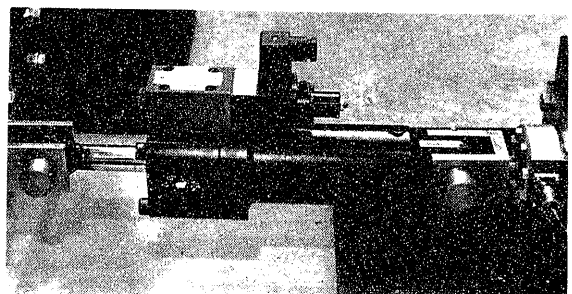


写真-2 模型実験用可変ダンパ

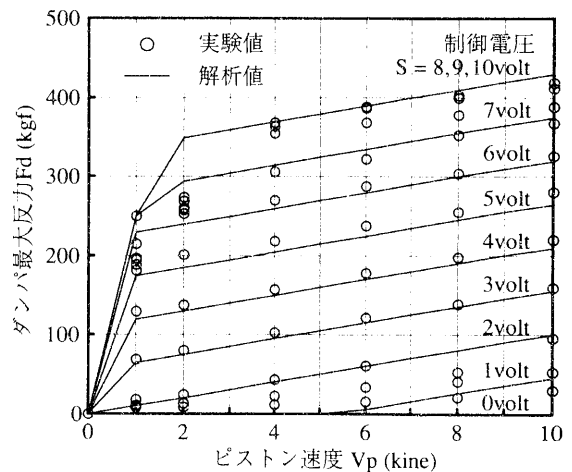


図-4 模型実験用ダンパの性能

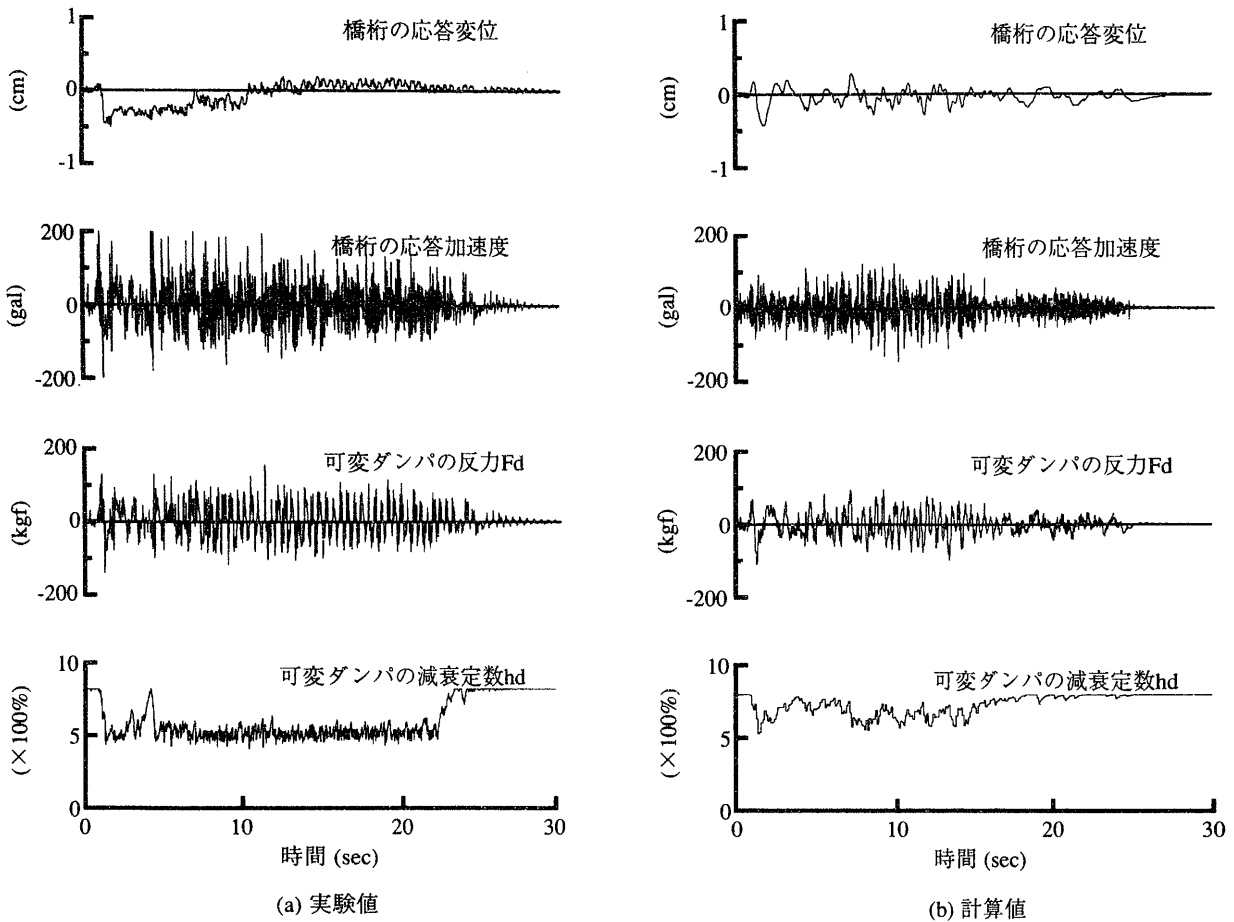


図-5 模型実験および解析結果

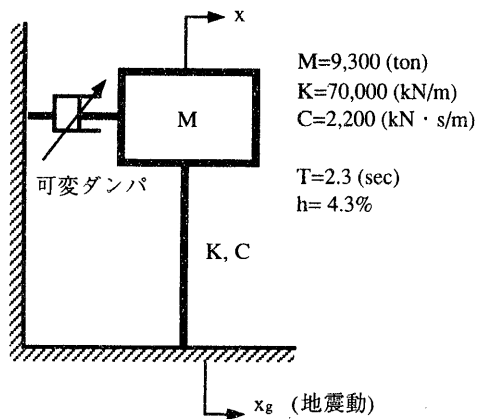


図-6 1自由度系解析用橋モデル

$Fd.BIG=100$ kgf; $ht.BIG=8.0$; $\Delta hd.BIG=1.0$
 上記の値から実験時の可変ダンパの制御電圧の幅を式(1-b)で換算した。解析によれば、模型の橋桁は可変ダンパを付けない場合、最大応答変位 10.0 cmであったが、可変ダンパにより制振する場合とそれを 0.5 cm までに低減された(図-5(a))。

可変ダンパの減衰(制御電圧信号)はダンパ反力およ

び減衰状態に応じて変動する。そのことによって、入力レベルが大きい場合は、可変ダンパの減衰が減少され、過大な反力の発生を回避する。入力レベルが小さくなると、可変ダンパの減衰が増大され、最大限に構造の揺れを抑えることが可能となる。

模型実験を対象とした理論解析(解析モデルについては第4章に述べる)を行った(図-5(b))。ダンパ装置の押しと引き方向の特性が多少異なるため、実験結果の変位がドリフトする現象が見られた。応答加速度とダンパ反力が理論解析の結果より大きくなっている。これは高次モードの影響と考えられる。ダンパ減衰の変化の傾向に関しては解析結果と一致していった。

4. 実橋の地震応答解析例および考察

図-1に示す道路橋の半分を1自由度系にモデル化した(図-6)。橋の1次モードの質量 M は約 9,300 t, バネ係数 K は 70,000 KN/m, 構造減衰係数 C は 2,200 KN · sec/m である。橋の1次固有周期 T は 2.3 sec, 構造減衰定数 $h(=C/(2\omega M))$ は約 4.3% とする。可変ダンパの減衰係数を C_d とすると(減衰定数は $hd=C_d/(2\omega M)$)、運動方程式は次のようになる。

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + C_d \dot{x} + Kx = -M \ddot{x}_g \quad \dots\dots\dots(2)$$

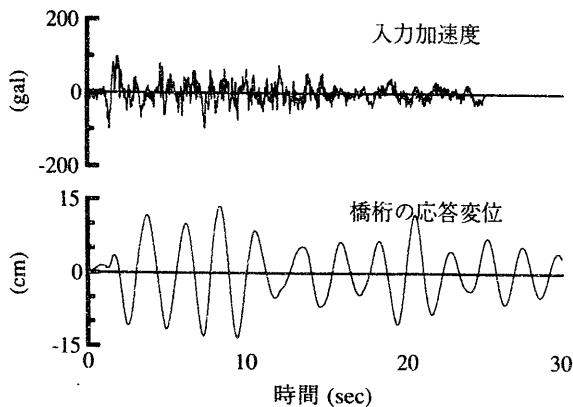


図-7 入力加速度および応答変位

ここで、 \ddot{x}_g は地表面加速度である。可変ダンパが負担する減衰力を

$$F_d = C_d \dot{x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

とすると、可変ダンパの減衰を含む橋モデルのトータル減衰定数は

$$h_t = h + h_d \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。

橋の地震応答の時刻歴を 0.01 sec 刻みで求めた。入力には前述地震波を用い、この最大加速度を 100 gal とし、解析時間を 30 sec とした (図-7)。可変ダンパの初期設定は、減衰定数で100%の値とした。

ダンパを装着しない場合 (図-7)、橋自身の構造減衰が小さいため ($h=4.3\%$)、地震時橋桁の橋軸方向最大変位が非常に大きいこと (14.0 cm) が分かる。可変ダンパを用いて制振した場合 (図-8)、橋桁の最大変位が低減され (7 cm)、しかも、最大減衰力は設定した ± 200 tf 以内に収まっている。この際の可変ダンパは減衰定数 0.2 ~ 1.0 の間に激しく変動していることが分る。

参考のため、従来の減衰一定のダンパを装着した場合について、地震時橋桁の応答変位とダンパの減衰力を計算して比較する。従来ダンパの減衰定数は、可変ダンパの減衰定数との対応を持たせて、その最小値 (0.2) と最大値 (1.0) を用いた。減衰定数 0.2 のダンパの場合 (図-9(a))、ダンパに掛かる減衰力は、可変ダンパの場合とほぼ同じであるが、橋桁の最大変位は大きくなり (10 cm)、特に後半では、小さい入力に対して相当大きな変位が生じる。一方、減衰定数 1.0 を持つダンパの場合 (図-9(b))、橋桁最大変位は小さくなっている (3.5 cm) が、ダンパの減衰力はかなり大きく (600 tf) なる。

可変ダンパは入力地震波のレベルの大きさに応じて、自身の能力を十分発揮し、効率よく橋の変位を抑えることができると言える。

5. まとめ

① ダンパを用いて長周期の橋の振動を制御する場合、ダンパの減衰定数を変動させることによって、ダンパに

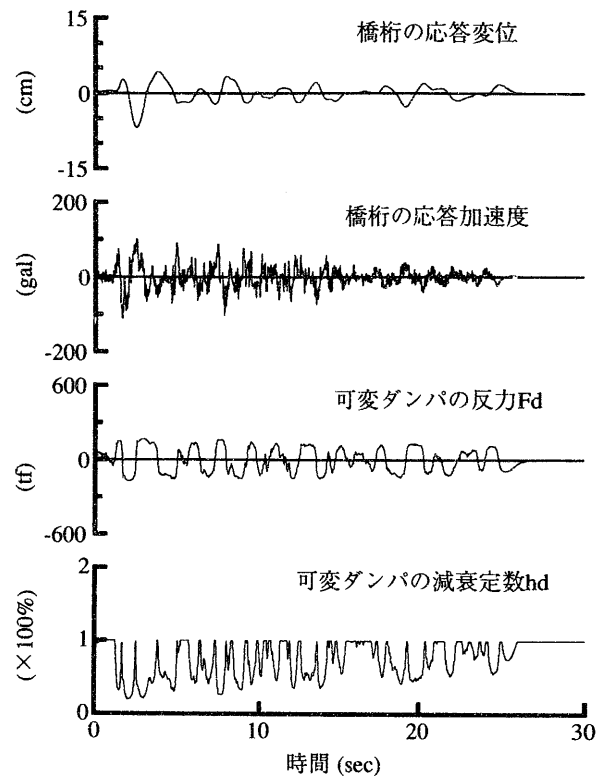


図-8 可変ダンパによる制振解析例

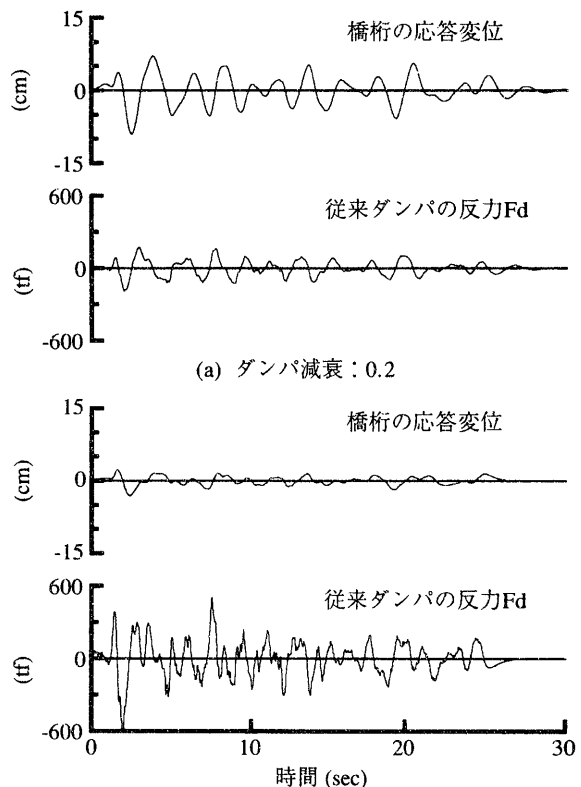


図-9 従来ダンパによる制振解析例

作用する力をお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。

② 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。実験結果から、提案した制振方式と採用したファジィ制御理論は適用性が高いと言える。

③ バリアブルダンパを用いることによって、橋桁の変位が小さくなるため伸縮装置を小さくできる。また、地震力の一部をダンパ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つながると考えられる。

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弱点である。今後の研究課題としては、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 制御理論についての検討も必要である。

参考文献

- 1) 川島, 運上, 清水: バリアブルダンパ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, p. 311~324, (1992)
- 2) Shinozuka: Seismic response variability of bridges on friction controlable isolator. UJNR, 第2回日米免震橋ワークショップ, (1992)
- 3) 菅野道夫: ファジィ制御, (1988)
- 4) 古田 均, 小尻利治, 他: ファジィ理論の土木工学への応用, (1992)
- 5) Pedrycz, W.: Fuzzy Control and Fuzzy Systems, second, extended edition, Research Studies Press, (1993)
- 6) Sun, L. M. and Goto, Y.: Application of fuzzy theory to variable dampers for bridge vibration control, Proc. of 1st World Conference on Structural Control, Cal, USA, (1994)
- 7) 水元: コンピュートロール, 特集/ファジィ制御, コロナ社, No28, p. 32~45, (1989)
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, (1990)