

(47) 構造振動制御問題へのファジィ
アクティブコントロールの応用

APPLICATION OF FUZZY ACTIVE CONTROL

TO STRUCTURAL VIBRATION PROBLEMS

岡南博夫*

古田均**

金吉正勝***

田中洋****

Hiroo OKANAN, Hitoshi FURUTA, Masakatsu KANEYOSHI, Hiroshi TANAKA

In this paper, an attempt is made to apply the fuzzy set theory to structural vibration control of earthquake-excited and wind-excited oscillations. The numerical examples of 1 degree of freedom model and 2 degree of freedom model show that the fuzzy control technique is useful for reducing the amplitude and acceleration of structural oscillation due to earthquake. The control experiments are performed using a system of prestressing tendons (with spring) connected to a stepping motor system with fuzzy control rules. The model is subject to base motions produced by a small shaking table and fluctuating flows generated by a fan. These experimental results confirm the efficiency of fuzzy control for structural vibration problems.

Key Words : Fuzzy Set Theory, Active Control, Structural Vibration, Earthquake-Excited Oscillation, Wind-Excited Oscillation

1. まえがき

現在、鉛直・水平方向共に超長大な構造物が建設される傾向にあるが、このような構造物は極めて可撓性に富み、その使用性・安全性などの面から地震・風などに起因して発生する振動を防止することが重要となってきた。そのため、構造物の振動制御に関する研究が数多く行われるようになってきたが、これらの研究の大部分は振動をいかに抑制するか、システムが複雑になっても振動振幅をできるだけ小さくするという立場をとっているように思われる。

本研究は、極めて簡単で、最適とは言えないまでもある程度の制振効果を挙げるシステムを開発することを目的としてファジィ制御の利用を試みたものであり、まず第一段階として、ファジィ制御を構造物の振動制御の分野へ応用する可能性を検討した。ファジィ制御は、制御プログラムが極めて簡単で、入力から出力までの計算時間を短かくでき、したがって、制御システムの信頼性が高く、頑健性に富み、振動系の状態に応じて制御パラメーターを容易に変更できるメリットを有する。ここでは、ファジィ制御ルールの抽出と最適なメンバーシップ関数の選定を行い、種々の振動パラメータについて数値シミュレーションにより検討を加える。また、その結果に基づき実験室で小型模型を使用した実験的検討を行い、ファジィ制御法の有効性について考究する。

* 工博 大阪府立工業高等専門学校教授 建設工学科

** 工博 京都大学助教授 土木工学科

*** 日立造船株式会社課長 橋梁設計部

**** 日立造船株式会社課長代理 橋梁設計部

2. ファジ理論の振動制御への応用、および数値計算による検討

本研究の目的は、簡単で信頼性の高い構造物の振動制御を行う方法を開発することであり、本章では、ファジ制御の構造物の振動制御問題への応用について簡単に述べ、数値シミュレーションによって検討を行う。

対象とした構造物の振動モデルは、1自由度系、および2層2自由度振動系であり、2自由度系では1層目のみに制御力を加える場合と1、2層共に制御力を加える場合とを考えた。本研究で用いたファジ推論法は、「min-max-高さ法」¹⁾であり、ファジ制御ルールとしては表1、2に示すif（前件部）-then（後件部）型のルールを用いる。また、前件部で用いる相対応答速度Vと地動加速度Aのメンバーシップ関数は図1に示すような三角型を採用する。メンバーシップ関数の代表値は構造物の無制振時相対

V							
NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	
PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB	
もし相対応答速度が負の向きで大きいならば、制御力は正の向きで大きくせよ。 if V is NB then P is PB							

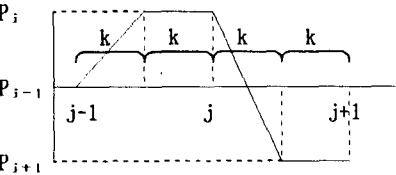


図2 制御力の加え方

応答速度の絶対値の最大値VMAXと地動加速度の絶対値の最大値AMAXに係数VV、AAを乗じた値に基づいて決定する。ここで、ルール1を用いて係数VVを1.0から0.1の間でチューニングしたところVVの値が小さい程、つまりBig, Medium, Smallに分けたメンバーシップ関数のBigの網羅する部分が広い程良い結果が得られた。そこで、ファジ制御の特殊な場合として、制御力をBig, Medium, Smallに分けるのではなく、常にBigの最大力を加えるというルール3についても検討した。なお、後件部で用いる制御力Pのメンバーシップ関数には、ファジ推論に高さ法を用いているため代表値のみを考えている。各ルールを統合する方法としては「min-max法」の他に「代数積-加算法」があるが、本研究ではいくつかのモデルを用いて図1 前件部メンバーシップ関数数値計算により検討を行い、その結果、両者でほとんど違いが認められなかったため、ここでは「min-max」法を採用した。

制御力の加え方は、時間遅れを考慮して、制御力を図2に示すように台形波として加える。時間遅れを0.002秒から0.02秒まで0.002秒刻みで変化させてみたが、大きな違いが認められなかったため、ここでは図2においてk=0.01秒として計算した。また、ルールを作成するに当たって、それぞれの応答量の1成分に着目したルールを作成し、それぞれの応答量が制御に及ぼす影響を調べた。その結果によれば、i層の相対応答変位のみを考慮したルールでは、制御力をほぼ4分の3周期ずらした場合が最もよく制御でき、相対応答速度のみを考慮したルールでは、ずらさない場合が最も良い結果となり、相対応答加速度のみを考慮したルール

表2 ルール2（相対応答速度と地動加速度を考慮）

	V						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB		NB		NB		NB
NM	PB		NM		NM		NB
NS	PB		NS		NS		NB
A ZR	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
PS	PB		PS		PS		NB
PM	PB		PM		PM		NB
PB	PB		PB		PB		NB
もし相対応答速度が負の向きで大きく地動加速度が負の向きで大きいならば、制御力を正の向きで大きくせよ。 if V is NB and A is NB then P is PB							

NB=Negative Big NM=Negative Medium
NS=Negative Small ZR=Zero
PS=Positive Small PM=Positive Medium
PB=Positive Big

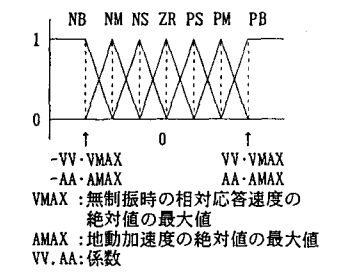


図1 前件部メンバーシップ関数

では、ほぼ4分の1周期ずらした場合は最も良い制御効果が得られた。したがって、相対応答速度に基づいたルールを作成するのが良い。

表3 最適制御²⁾とファジィ制御との比較
(エルセントロ地震NS成分による結果)

T=2.0s, k=0.01s, 最大制御力: 重量の0.88%			
	maxX/maxX0	maxV/maxV0	maxA/maxA0
OPT. C.	0.46	—	0.53
RULE 1	0.63	0.62	0.98
RULE 2	0.63	0.62	0.62
RULE 3	0.61	0.61	1.01

表4 十勝沖地震の余波NS成分による制御結果
各ルールの比較

T=1.0s, k=0.01s, 最大制御力: 重量の0.88%			
	maxX/maxX0	maxV/maxV0	maxA/maxA0
RULE 1	0.50	0.54	0.78
RULE 2	0.45	0.50	0.74
RULE 3	0.48	0.53	0.78

X0:無制振時相対応答変位 X:制振時相対応答変位
V0:無制振時相対応答速度 V:制振時相対応答速度
A0:無制振時相対応答加速度 A:制振時相対応答加速度

次に、以下の条件で数値計算を行った結果を示す。振動系: 1自由度系, 地震波: エルセントロ地震NS成分(最大加速度341.6gal), 最大制御力: 重量の0.88%, モデルの周期T: 2秒, 対数減衰率: 1%。計算結果は、表3に示す。同表には、文献2)による最適制御の結果を同時に示し、本結果との比較を行う。ただし、制振時の応答量と無制振時の応答量との比率によって比較した。表に示す結果より、加速度を制御する面では最適制御が優れていることが知られるが、振動による構造物の損傷の主要な原因と考えられる変位を制御する面では、本研究で用いたファジィ制御もかなり良い結果を与えている。また、ファジィ制御の特殊な場合であるルール3の結果が、3つの応答量の全ての面でルール1、ルール2の結果と同程度の制御結果を得ていることが認められる。また、この傾向が、地震波、モデルの周期などを変化させても同様の結果となるかどうかを調べるために、十勝沖地震の余波NS成分(最大加速度79.3gal)による計算結果を示したものが表4である。なお、モデルの周期Tは1秒に変更したもので、ルール1～ルール3のファジィ制御結果の比較を示す。この結果もルール3は、他のルールによる結果と同程度の制振効果が得られている。さらに、対象モデルとして2自由度系を考え、各層にそれぞれファジィ制御ルールを適用して1層、2層に共に制御力を加える場合と、1層のみに制御力を加える場合に関しても比較を行ったが、ルール3は他のルールと同程度の制御効果を与えることが分かった。

以上のとおり、モデルの周期や自由度、地震波、制御力の加え方、最大制御力、time lagなどのある程度変化させてもファジィ制御の特殊な場合であるルール3による制御は、他のファジィ制御と同程度の制御結果を与えるようである。本研究で目的とするより簡単なシステムを用いた振動制御を行うという観点からは、ルール3の方法である程度の制振効果を期待できる。次章で、これらの方法に関する実験的検討を行う。

3. 模型実験による検討

3. 1 実験概要

本章では、アクチュエータとして小型ステッピングモータを使用した模型実験によってファジィ制御に関する検討を行う。実験概要を以下に述べる。

前章で述べたルール3に従った実験では、3種類(MODEL1:質量 $m=0.0269\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{sec}^2$,固有振動数 $f=7.75\text{Hz}$,減衰比 $\zeta=0.017$, MODEL2: $m=0.0622\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{sec}^2$, $f=5.09\text{Hz}$, $\zeta=0.019$, MODEL3: $m=0.101\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{sec}^2$, $f=3.14\text{Hz}$, $\zeta=0.020$)の1層せん断変形模型を使用した。制御力は、ステッピングモータのシャフトに取り付けたブ

ーリからコイルスプリング（スプリング定数 $k=21.7\text{gf/cm}$, 83.3gf/cm の2種類を使用）を介して模型にステップ状に作用させ、1本のスプリングを斜めに（角度 25.7° ）設置する場合 CASE1とモータを模型中央に置き2本のスプリングでV字形に（角度 35.2° ）設置した場合 CASE2の2ケースで実験を行った。制御力の大きさは、MODEL1 CASE1 $k=21.7\text{gf/cm}$ では模型重量の 0.368% 、 $k=83.3\text{gf/cm}$ で 1.41% となる。

さらに、制御力を大、中、小のようにランクづけて作用させる実験では、2層せん断変形模型を使用した。1層目の質量 M_1 は $0.261\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{sec}^2$ で、2層目の質量 M_2 は $0.113\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{sec}^2$ である。また、1次モードの固有振動数 f_1 は 2.83Hz で、2次モードの固有振動数 f_2 は 5.36Hz である。振動型は、1次モード： $X_1^1:X_2^1=1:1.75$ 、2次モード： $X_1^2:X_2^2=1:-2.07$ である。本実験では、32ビットパソコンNEC PC9801-ES2を制御用として使用した。

模型の加振方法としては、地盤に相当する振動台を加振機で加振する方法と、発泡スチロール製角柱（ $B/D=10\text{cm}/8\text{cm}$ 、高さ 17.5cm ）を設置した模型に扇風機による乱流を作用させて振動させる方法をとった。加振機は、正弦波と外部信号による不規則波を発生させることができるが、不規則波としてはデータレコーダに記録したエルセントロ地震波を再生して利用した。

3. 2 実験結果および考察

2章で速度に関するルールのみで十分な制御効果の得られることが示されたが、実験では速度よりも相対応変位の検出が容易であることから、応変位の値によって制御力の決定を行う。これは、構造物の振動状態においては、速度と変位がほぼ $3/4$ 周期ずれていることに基づくものであり、相対変位が負から正に変化する時刻から $1/4$ 周期後に正の一定の制御力を加え、また、相対変位が正から負に変化する時刻から $1/4$ 周期後に負の制御力を加えるといった、ルール3に準じた方式をとる。この方式のメリットは、入力を判定してから制御力を加えるまでに $1/4$ 周期の時間的余裕があるため、この時間内にAD変換時間・計算機による解析処理時間・モータの慣性による起動遅れ時間などのシステム全体の遅れ時間を含められるという点にある。また、変位がゼロとなる時刻から $1/4$ 周期の待ち時間は、BASIC言語でプログラムを作成するときFOR NEXT文の空回りでつくる。このような制御方式に基づいて実験を行った結果を以下に示す。

まず、図3は、MODEL1 $k=88.3\text{kg/cm}$ CASE1の実験結果であり、白丸印は模型の固有振動数と同じ振動数で周期的に地盤変動を与えた時の変位応答の制御効果を制御前と制御後の振幅（rms）比で示した結果である。この結果は、応変位がゼロであることを判定してから制御力を加えるまでの待ち時間に関する変化特性を表す。したがって、実験結果は、待ち時間がちょうど固有周期の $1/4$ でなくても制御効果を有する時間的余裕がかなり残されていることを示すものであり、不規則外力による構造物の応答が固有振動数付近のある振動数範囲で振動することを考えれば、有効な制御力を与えられる時間的な幅を有することを示し都合が良い。黒丸印が、不規則変動風による応答に対する制御効果を表す実験結果の一つの例である。一点鎖線で示した振幅比が1より小さい場合が制振効果を有することを示し、1より大きくなれば、加振状態となることを表す。この図より、プログラム上の待ち時間の設定で、まだかなりの余裕を残すことが知られる。本システムの1自由度振動系では、 12Hz 程度以下の固有振動数を有する模型実験に適用できる。なお、BASICは、BASICをコンパイルして計算時間を短くしたものである。

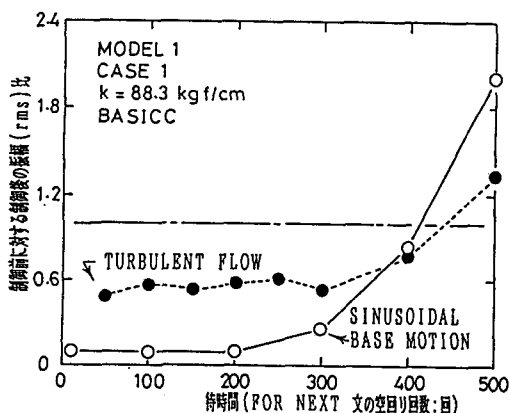


図3 プログラム中の待ち時間と制振効果

図4は、不規則変動風に起因して発生する振動に対

する制御効果を示す実験結果の例である。図の最上段は、扇風機を強風にセットした時の模型に作用する変動揚力のパワースペクトルをFFTアナライザー（Panasonic VS-3321A）で求めたものである。この実験時の変動揚力のrms値は6.0gfである。上のトレースは、MODEL1の制御前の変位応答の記録であり、下のトレースが制御力を作用させた時の結果である。制御力は、模型自重の2.82%で変動風荷重の最大値の約40%となる。なお、変動揚力のスペクトルはワイドバンドの特性を示し、したがって、渦励振の発生はなく、振動はガスト応答であると考えられる。

図5は、MODEL1の模型でエルセントロ地震波を加振機に入力して振動させたときの制御効果を調べた結果である。なお、地震波の再生時、データレコーダのテープスピードを2倍にして時間を1/2に短縮した。制御力は、模型自重の2.82%である。制御効果は、最大振幅比で制御力を加えない場合に比較して0.42となり、極めて簡単な制御方式であるにもかかわらず、かなりの制振効果を示す。

図6は、ルール3による制御力を一定とした制御方式と制御力をランクに分けて作用させる方式との制御効果を比較した結果で、エルセントロ地震波による応答変位のリニアスペクトルを3次元表示したものである。使用した模型は、先の模型と異なり2自由度2層せん断変形模型の2層目を取り外して1自由度振動系としたものとなっている。右が制御力一定、左が、変位がゼロとなる時刻の1/4周期前の相対変位振幅の大きさに従って制御力を3ランクに分けた方式による実験結果を示す。制御力が一定のステップ状の制御では、制御力が大きくなれば、低周波数領域で制御力による加振成分が認められる。数値シミュレーションでは、制御力が大きい程減衰力が大きくなり制振効果は大きくなるが、実際の制御では、理想的な理論どおりの制御力を作用させることが難しいことを示したものと考えられる。したがって、応答変位の小さいときには、制御力も小さくする方法が有利であると思われる。なお、この方法も制御力が大きくなりすぎる場合には、低周波数での加振傾向が認められる。これは、制御力を大きくするためには、ステップモータの駆動に際して入力パルス数を多くしなければなら

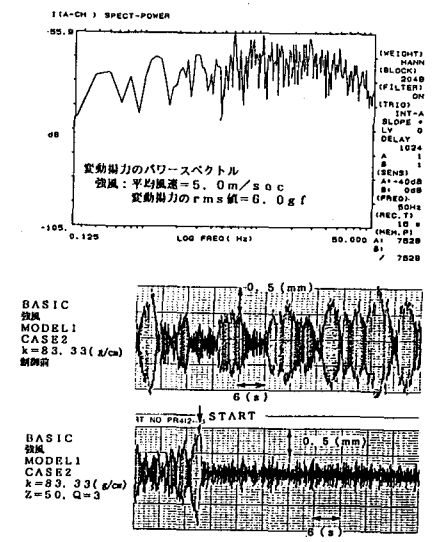


図4 変動風による変位応答の制振効果

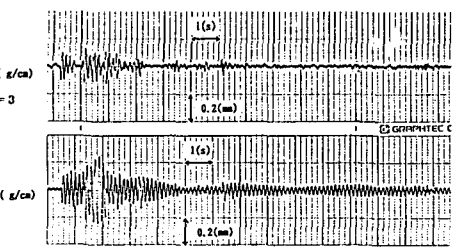


図5 地震波による変位応答の制振効果

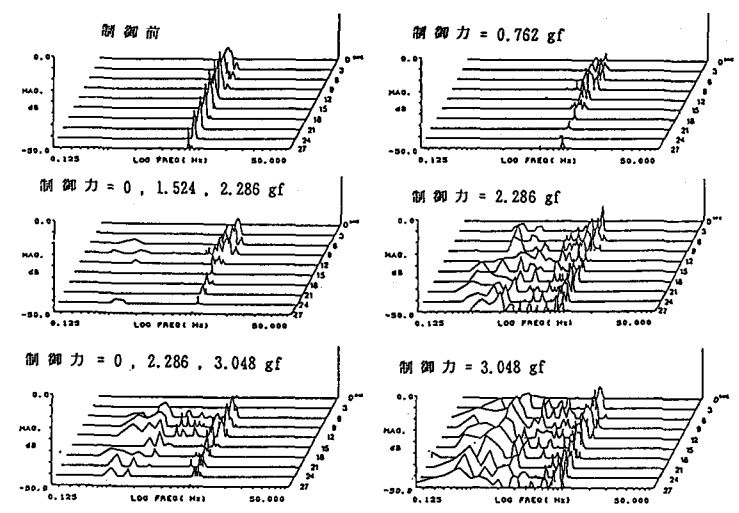


図6 制御方式による制振効果の比較（変位応答のリニアスペクトル）

ないため、応答変位に対する追従性が悪くなること、また、判定ランクの数を多くする場合にも処理時間が増大するなどの問題を生ずるといった点が考えられる。このような問題点は、アクチュエーターの性能・特性を含めた問題点としてこれからの課題である。

図7は、2自由度振動系の変位応答のリニアスペクトルであり、判定ランク数を3として制御効果を調べた結果である。各モードの結果は、それぞれ各モードの固有振動数付近で共振するように地盤変動を与えたときの結果である。図より、制御効果は、制御力の大きい方が制振効果の大きいことが認められるが、2次モードの加振時に1次モードの振動成分が現れ、この成分は制御力の増大に伴って大きくなる。ここでは、2次モードで振動しているとき1次モードの制御力を与えないように設定していることによるものであるが、モード別変位の分離を良くすれば、他のモードの振動成分の制御も効率良く行えるようになる。

4. 結 論

本研究では、ファジィ制御を用いた実用的振動制御システムの開発を行うための基礎的データを得ることを目的として、まず、数値シミュレーションによってファジィ制御に関する基礎的な検討を行い、その結果に基づき小型模型による実験的な検証を行った。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。①制御ルールについては、本研究で対象とした1自由度系、および2自由度系のような簡単な構造モデルでは、速度に関するルール、また、それに準じた変位に関するルールのみで十分な制振効果が得られる。しかしながら、地震による構造物の居住環境などを考える際の絶対制振を目標とする場合には、加速度に関するルールを考えなければならない。②制御力の大きさに制限があり、その制限が外力に比べてかなり小さい場合には、ファジィ制御と一定制御力を加える場合とでは、それほど大きな差異は認められない。この一定制御力を加える方法は、ファジィ制御の特殊な場合と考えられ、より簡単な制振システムを開発することを目的とするのであれば、この方法で十分な制振効果を期待できる。しかしながら、実際のシステムでは種々の問題点を有し、理想的な形で制御力を作用させることが難しく、振幅の小さい状態で大きな制御力を与えることになる場合には、加振する可能性も残されている。③2自由度系モデルの1層と2層を独立と考え、1自由度モデルのためのファジィ制御ルールを別々に適用する制御方法は、かなり良好な制振効果が得られる。実験では、2自由度系で、1層目のみに制御力を作用させる方法の検証を行ったが、ある程度の制振効果が得られる。この方法の制振効果は、システムにインプットされるモードに関する情報の精度に左右される。

今後の課題としては、ファジィ制御ルール、およびメンバーシップ関数の改良と、それをシステムに効率よく組み込み、アクチュエータなどシステム全体をスムーズに起動させるメカニズムの開発を行うことが挙げられる。最後に、本研究を行うに当たってご支援を頂いた、京都大学渡邊英一教授、当時京都大学学生三ヶ尻吉孝氏、当時大阪府立高専学生小林靖仁氏、松下泰弘氏、古賀康弘氏に感謝の意を表します。

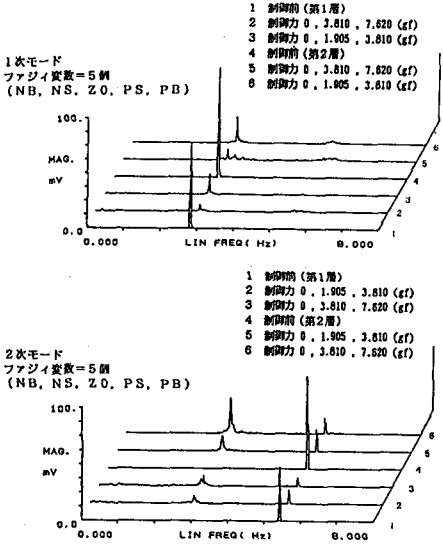


図7 制御力の大きさによる制振効果の比較

参 考 文 献

1) 水本雅晴：わかりやすいファジィ理論—ファジィ理論とファジィ制御—，コンピュータロール，コロナ社，1989，pp.32-45。
2) 阿部裕，深尾康三：アクティブマスダンパーにおける最適制御アルゴリズムについて（その2），日本建築学会学術講演梗概（中国），1990.10，pp.825-826。