

ケーブル構造物におけるアクティブ剛性型制振システムの適用に関する一考察

Consideration of applicability of active stiffness control system on cable structures

小幡 卓司*, 宮森 保紀**, 井上 圭介**, 林川 俊郎***, 佐藤 浩一****

Takashi OBATA, Yasunori MIYAMORI, Keisuke INOUE, Toshiro HAYASHIKAWA, and Koichi SATO

- * 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 ** 工学士 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 *** 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 **** 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

The active control method has generally the ability to control a wide frequency region. In this study, active vibration control analyses and experiments are performed on cable structures that are assumed stress ribbon bridges or cat walks. The analyses and experiments are applied by using active stiffness control system, instantaneous optimal control theory and fuzzy control theory. The fuzzy control theory is difficult to set up membership functions and to design control rules. Then, the identification of membership functions is made by using Genetic Algorithm (GA).

From both analytical and experimental results, fuzzy control theory evaluated by GA has better effect in comparison with the results of instantaneous optimal control theory. Therefore, it is considered that fuzzy control theory evaluated by GA has good applicability for vibration control by using active stiffness control system.

Key Words: active stiffness control system, cable structures, Fuzzy control theory

1. まえがき

一般に、土木構造物において、交通荷重や風等に起因する振動に対してその安定性を向上させることは、構造物の耐久性、使用性、耐風安定性あるいは施工性を改善する観点から、極めて重要な一項目であると考えられている。従来用いられてきたこの安定性の改善手法は、構造物の断面形状を変化させたり、あるいは剛性を付加して対処することが大半であるが、近年においては、構造物に何らかのデバイスを設置することによって振動制御を行おうとする方法が次第に実用化されつつある。

橋梁構造物の振動制御はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される¹⁾。このアクティブ方式は、複数の振動モードにもある程度対応が可能であることから、まず矢作らが高架橋の水平振動制御にアクティブテンドン方式を適用したのをはじめ、現在では吊橋や斜張橋の主塔等における、主に水平振動に対する制振の実施例として比較的多く報告されている^{2),3)}。一方、一般の道路橋や歩道橋等の交通振動に起因する鉛直振動のアクティブ制振の研究例は少なく、著者らの知る限りでは岡林らの研究^{4),5)}と川谷らの研究のみである⁶⁾。これらの研究において

は、構造物の制御力付加方法として重錘をモーターで駆動してその反作用で制御力を得る、いわゆる AMD 方式による制御力型システムが採用されている。しかしながら、制御力型システムにおいては重錘のストロークを十分に確保する必要を有するため、通常の桁構造あるいはケーブル構造を有する橋梁等で面内の鉛直振動の低減を目的とする場合、桁高等を考慮すれば制振装置の設置スペースの確保が極めて困難であることが容易に理解できる。このような場合、部材の断面性能をその応答に応じて変化させ、構造物の振動を抑制するアクティブ剛性型システムによる制御が有効であると考えられる^{7),8)}。

本研究では、吊床版橋あるいはキャットウォークを想定したケーブル構造を有する橋梁構造物の鉛直振動を対象として、その制御力付加方法にアクティブ剛性型システムを導入し解析ならびに実験を行うことにより、その適用性、制振特性等に関して考察を行うことを目的とする。ここで、アクティブ振動制御において、適用すべき制御理論の検討は非常に重要な問題の一つである。アクティブ制御理論の研究は従来盛んに行われ、主なものとしては瞬間最適制御理論^{9),10)}のように制御対象を数学的にモデル化し、その数学的モデルに対し制御システムを構築する方法がある¹⁰⁾。これらに対し、主に人間

の経験などの知識ベースを生かし、厳密な制御対象のモデル化を行わずに構造物の制御を行う論理型制御理論が提唱されており、これには Fuzzy 制御理論^{11),12)}がその代表例として知られている。この Fuzzy 制御理論は、上記のように数学的モデルを必要としないため、非線形性を有するシステムにおいても比較的容易に対応が可能であり、また高いロバスト安定性を有するため、アクティブ剛性型システムへの適用は非常に有効であると考えられるが、十分な制振効果を発揮するための適切な制御規則とそれに対応したメンバーシップ関数の設計手法は、未だに確立されていないのが現状である。

以上より、本研究では制御理論に瞬間最適制御理論ならびに Fuzzy 制御理論を採用し、アクティブ剛性型システムの適用性のみならず、それぞれの制御理論による振動抑制効果の差違および Fuzzy 制御理論における汎用的な設計手法に関しても合わせて検討を実施する。そこで、Fuzzy 制御の設計においては、メンバーシップ関数や制御規則の構築は、非連続関数からなる組み合わせ最適化問題と考え、その最適化あるいは効率化に遺伝的アルゴリズム^{13),14)} (Genetic Algorithm, 以下 GA と称する)を用いることとした^{7),15)}。

具体的な解析方法は、基本的には吊床版橋を想定したケーブル構造を有する実験供試体を製作し、この実験供試体を 5 質点系にモデル化することによりニューマーク β 法による直接数値積分法を用いて数値解析を実施した。なお、本研究における実験供試体は、制御装置の性能を考慮して全体剛性におけるケーブルの依存度を高めるため床版を離散的に配置することとし、構造的にはキャットウォークに比較的近いものとなっている。アクティブ剛性型システムにおける制御力の付加は、制御対象のケーブル張力を直接変化させることにより、構造物の全体剛性を変化させている^{16),17)}。GA の適用方法に関しては、メンバーシップ関数の最大値をパラメータとして遺伝子列で表現し、評価関数としては、制御開始から一定時間経過後の応答変位の履歴面積がより小さくなれば、制振効果が向上したと判断することとした。また、比較のため人間の経験によるメンバーシップ関数の調整も合わせて実施した。さらに、上記の数値解析で得られた振動抑制効果を実際に検証するために、前述の実験供試体を用いて振動制御実験を行なった。実験方法は、供試体上に設置した加速度計により得られた応答値から制御張力を算出し、これを直接ケーブル張力に付加して所定のデータを得た。また、前述のとおり瞬間最適制御理論についても同様の解析、実験を行い、制御理論そのものの特性等についても比較検討を行った。

したがって、本研究はこれらの解析結果および実験結果を通じて、ケーブル構造物の鉛直振動制御におけるアクティブ剛性型システムの適用性や制振特性、あるいは Fuzzy 制御理論の設計方法等に関して考察を行ったので、ここに報告するものである。

2. 解析手法

2. 1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では、制御対象として吊床版橋等を想定した実験供試体を製作し、その断面諸元、支間長等のデータを用いて解析を行った。写真-1 に実験供試体を示す。本供試体の主な諸元は、支間長 1995mm、幅員 200mm、サグ 60mm、初期張力 137.2N である。構造物のモデル化については図-1 に示すような 2 次元の 5 質点系モデルを採用し、解析に先立ち固有振動実験ならびに解析を実施して、振動特性の把握およびモデル化の妥当性を検討した。表-1 はそれらの結果であり、図-2 は固有振動解析から得られた各振動モードにおけるモード形状である。表-1 から、比較的近接した振動数の範囲に複数の振動モードが認められ、ケーブル構造物特有の振動特性を有していることがわかる。また、解析結果に着目すると実験値と比較的良好一致が得られており、本研究の解析モデルは実験供試体と十分な整合性を有しているものと思われる。

一般にアクティブ剛性型システムにおける多自由度系の運動方程式は式(1)のように表現できる⁸⁾。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + \{K + L^T V(t)L\}x(t) = f(t) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 M, C, K はそれぞれ整合質量マトリックス、レーレー減衰マトリックスおよび剛性マトリックスであり、 $f(t)$ は外力ベクトル、 $V(t)$ は可変剛性マトリックス、また、 L は可変剛性配置マトリックスである。レーレー減衰マトリックスにおける 1 次および 2 次の減衰定数は実測値を用いることとし、実験供試体の予備振動実験から減衰定数を 1 次 0.1%、2 次 0.117% とした。また、アクティブ剛性型システムでは制御に応じて剛性が逐次変化するため、この非線形性に対応するため修正荷重増分法を用いたニューマーク β 法を用いて時刻歴応答解析を行なった。この際ニューマーク β 法における係数 β は 0.25、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{sec}$ を用いている。

2. 2 瞬間最適制御理論

瞬間最適制御理論とは、本来予知不可能な構造物が受ける外乱に対して、観測可能な外乱情報を積極的に用いることで、評価関数を各ステップごとに設定して最適化を行い、そのつど状態量に対する制御ゲインを計算し、制御を行う手法である^{5),9),9)}。よって、各制御時間刻み Δt において別個にゲインを求めることより非線形性を有する場合においても対応が可能となる。本研究では、式(1)における可変剛性マトリックス $V(t)$ を瞬間最適制御理論によって求めているが、可変剛性値の算出に関しては、可変剛性装置の数を m として、式(2)で定義されるような可変剛性ベクトル $v(t)$ を用いて、式(1)の左辺最終項の一部を式(3)によって置換する。

$$v(t)^T = \{v_1(t), v_2(t), \cdots, v_m(t)\} \cdots \cdots (2)$$

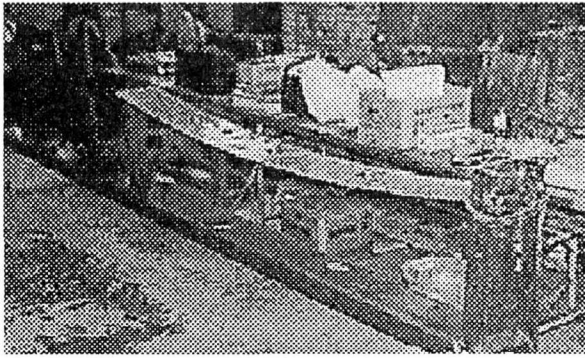


写真-1 実験供試体

$$\mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L} \mathbf{x}(t) = \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t) \mathbf{v}(t) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $\mathbf{v}(t)$ は可変剛性値そのものであり、 $\mathbf{F}(t)$ は可変剛性装置を接続した質点の、自由度間における相対変位を対角要素に持つマトリックスである。式(3)を式(1)に代入すると、以下の式を得る。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) + \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t) \mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \dots\dots(4)$$

一般の制御においては、可変剛性値の算定に実際の制御時より 1 ステップ前の応答あるいは外乱の情報を用いるために、式(4)を次式のように近似的に表現する。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) + \mathbf{L}^T \mathbf{F}(t-1) \mathbf{v}(t) = \mathbf{f}(t-1) \quad \dots\dots(5)$$

したがって、式(5)を変形することにより、次のような状態方程式を得ることができる。

$$\mathbf{x}_s(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}_s(t-1) - \mathbf{B}(t-1) \mathbf{v}(t) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t-1) \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $\mathbf{x}_s(t)$ は状態ベクトル、 \mathbf{A} はシステムマトリックスを表し、 \mathbf{B} および \mathbf{D} に関しては、それぞれ制御力配分マトリックス、外力配分マトリックスである。

上記の状態方程式から、重みマトリックス \mathbf{Q} および \mathbf{R} を介した状態ベクトルと制御力ベクトルの 2 次形式の和で構成された、以下に示す式(7)のような評価関数 $J(t)$ を得る。これが最小になるような可変剛性ベクトルは、式(8)を用いて求めることができる。

$$J(t) = \mathbf{x}_s^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{v}(t) \quad \dots\dots(7)$$

$$\mathbf{v}(t) = \left[\mathbf{R} + \mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \mathbf{B}(t-1) \right]^{-1} \cdot \left[\mathbf{B}^T(t-1) \mathbf{Q} \{ \mathbf{A} \mathbf{x}_s(t-1) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t-1) \} \right] \quad \dots\dots(8)$$

以上のように可変剛性ベクトル $\mathbf{v}(t)$ を可変剛性マトリックス $\mathbf{V}(t)$ に代入し、制振シミュレーションを実施する。なお本研究においては、状態ベクトル $\mathbf{x}_s(t)$ は構造物の応答変位、応答速度ならびに加速度を用いることとした。

2. 3 Fuzzy 制御理論

Fuzzy 制御を行うためには、IF-THEN 規則群とそれに対応したメンバーシップ関数が必要である。本研究では、注目する質点の応答速度、応答加速度ならびに制御張力をパラメータとした前件部 2 変数、後件部 1 変数からな

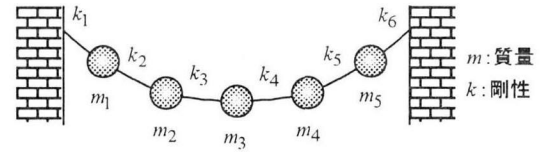


図-1 解析モデル

表-1 振動特性一覧表

振動モード		1st	2nd	3rd	4th	5th
実験	固有振動数 (Hz)	4.39	5.05	6.96	8.76	11.06
	固有振動数 (Hz)	4.38	5.18	6.83	8.83	11.11
解析	固有周期 (sec)	0.23	0.19	0.15	0.11	0.09
	有効質量率 (%)	1.13	73.01	25.30	0.11	0.45

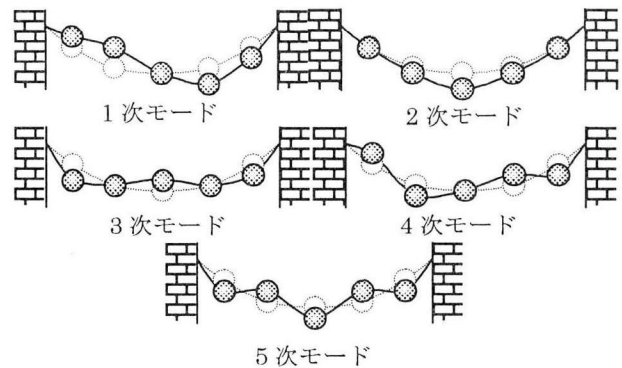


図-2 固有振動モード

る以下のような推論規則を 25 規則用いて解析を実施した¹²⁾。なお、本研究では鉛直下向きを正として推論規則の構築を行った。

推論規則例

- 1: もし加速度が負で速度が負ならば制御張力は正で大
IF a is NB and v is NB THEN u is PVB
- 2: もし加速度が負で速度が零ならば制御張力は零
IF a is NB and v is ZO THEN u is ZO

図-3 に速度、加速度および制御張力のメンバーシップ関数を、表-2 に今回用いた 25 規則の場合の規則表を示す。なお、Fuzzy 関係の合成法には max-min 合成を、確定値の計算には重心法を用いている。

前述のように、Fuzzy 制御理論による制振効果は設定されたメンバーシップ関数に大きく依存すると考えられる。特にメンバーシップ関数の最大値、 $|v_{max}|, |a_{max}|$ の設定は観測された状態量に対する制御力の発生感度に直接大きな影響を与えることが知られている。本研究においては、メンバーシップ関数の形状は三角形型を用いることとし、このメンバーシップ関数の $|v_{max}|, |a_{max}|$ の設定に GA を適用して最適化を試みた^{12), 15)}。

また、一般に制御対象の構造物が複数の振動モードを有する場合、Fuzzy 制御においては同一の制御則で多次

モードの同時制振は比較的困難であると考えられている。そこで本研究ではこの現象にある程度対応するため、全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中で最大のものをある時刻 t における制御張力とすることとした。その理由として、各質点で観測された状態量あるいは計算された制御張力の大小関係は、それぞれの時刻 t における卓越モードの情報にある程度含んでいるものと考えられることができるためである。

2. 4 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

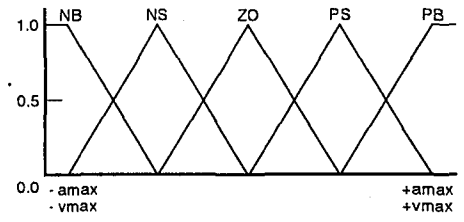
GA の適用に際してしばしば問題となるのは、問題のコード化および目的関数の設定である。本研究では、Fuzzy 制御理論における前件部のメンバーシップ関数の最大値 $|v_{max}|, |a_{max}|$ に対して、図-4 のような解空間を設定し、図中の X, Y を 12 ビットの 2 進数にコード化することで、各々の遺伝子列を表現することとし、一様乱数を用いて各個体毎にそれぞれ 2 組の遺伝子列を持つ初期集団を発生させた¹²⁾。また、適応度を評価するための目的関数は、制御効果を直接的かつ簡便に判断するために各質点の応答変位に着目して、以下のような関数を用いている。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{1000} \left(\sum_{n=1}^3 |x_{ni}| \right) \dots \dots \dots (9)$$

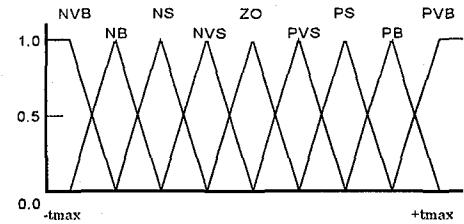
ここで、 x_{ni} は i ステップ目における第 n 質点の応答変位である。式(9)の右辺において総和を求める質点が 5 質点中の 3 質点分であるのは、変位の絶対値が等しい第 1、第 5 質点および第 2、第 4 質点の変位情報に比べ、中央質点の変位情報が目的関数中で反映されにくくなることを防ぐためである。なお、評価関数は各個体に対して個別に時刻歴応答解析による制振シミュレーションを実施して、制御開始後 10 秒間の応答変位に基づいて算出されている。具体的な計算過程は、選択にはルーレット戦略を、交叉には 2 点交叉を用い、突然変異に関しては 2 進数で表現されている遺伝子列に対し、定められた確率に基づいて直接遺伝子座を操作して行った。また初期集団は 30 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.07 とし、収束判定は最良線列が全個体の 30% に達した時点で計算を終了することとした。その結果に応じて最適解を判断することとした。図-5 に、本研究における GA の処理手順、遺伝子列および目的関数の関係を示す。

3. 各制御理論による時刻歴応答解析およびその考察

以上のようにして、本研究では瞬間最適制御理論および Fuzzy 制御理論を用いて振動制御シミュレーションを行った。解析は自由振動ならびに強制振動について行い、自由振動に関しては、構造物の低次の振動モードにおける有効質量率を考慮して 1 次～3 次モードの固有振動数を持つ正弦波を 5 秒間入力し、入力終了直後に制御を開



(a) 速度・加速度のメンバーシップ関数



(b) 制御張力のメンバーシップ関数

図-3 メンバーシップ関数

表-2 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	NB	ZO	PB	PVB
NS	NB	NS	ZO	PS	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	PVB	PB	ZO	NB	NVB

NVB: Negative Very Big, NB: Negative Big, NS: Negative Small, NVS: Negative Very Small, ZO: Zero, PVS: Positive Very Small, PS: Positive Small, PB: Positive

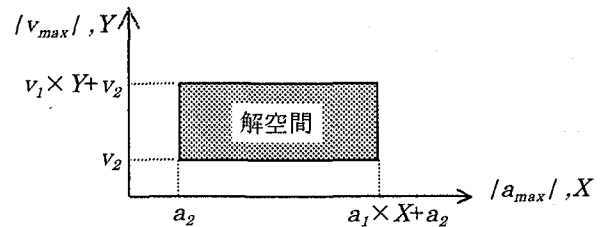


図-4 解空間

始することとした。入力波の最大値は振動制御実験の際の初期変位 15mm を考慮して調整した。また、強制振動に用いた入力地震波については、1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震の千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度波形を、鉛直方向に変換して用いている。制御張力の最大値は、後述の実験との整合性を考慮して最大 ± 30.4 N とし解析を行った。解析ケースに関しては、制御理論等の差違として、Fuzzy 制御理論に GA を適用した場合を "Case 1"、Fuzzy 制御理論で人間の経験によってメンバーシップ関数を調整した場合を "Case 2"、瞬間最適制御による場合を "Case 3" とする。解析ケースの一覧を表-3 に示す。また、上記の入力波の固有振動数に応じて、それらに対応する解析結果を、例えば「2 次卓越」、「3 次卓越」等と称することとする。なお、Fuzzy 制御については前節において、GA および人間の経験によって求めたメンバーシップ関数をデータとして入力し、時刻歴応答解析を行なった。表-4 にそれぞれのメンバーシップ関数

における $|v_{max}|, |a_{max}|$ の値を示す。

以上より得られた時刻歴応答解析の一例として、2次卓越の場合における各 Case における中央質点の応答変位と制御張力の履歴および応答変位のフーリエスペクトルを図-6 に、3次卓越における第1質点の応答変位、制御張力と応答変位のフーリエスペクトルを図-7 に示す。

まず、2次卓越における場合に着目すると、図-6 から Fuzzy 制御理論に GA を適用した Case 1 の場合が最も制振効果が高いと判断できる。図-6(a)の応答変位からは、Case 1 では制御開始後およそ 4sec 弱で十分に振動が抑制されているのに対し、Case 2 では約 7sec、また Case 3 ではおよそ 5sec を必要としていることがわかる。瞬間最適制御理論を用いた Case 3 では、制御を行うことにより3次モードが生じており、スビルオーバー等の問題点を考慮すると好ましくない結果が得られた。また、図-6(b)のフーリエスペクトルにおいても、応答変位と同様にそのピーク値から明らかに Case 1 の制振効果が優れていると考えられる。アクティブ剛性型システムの特徴である非共振化に関しては、非制御時における固有振動数に比較して判然としないが、これは本解析では入力波が単一の固有振動数しか持たないため、これが制御張力の出力履歴に影響を与え、特に Case 1 および Case 2 において正負がほぼつり合ったものになっていることが主な原因と考えられる。この制御張力の出力履歴に着目すれば、まず Case 1 と Case 2 に関しては表-4 のメンバーシップ関数の最大値に依存しており、これが直接制振効果に影響を及ぼしているものと判断できる。また Case 3 については、制御開始後 4.5sec 程度まで常に最大の張力を出力し続けており、その制御効率も Fuzzy 制御に比してかなり低いものと思われる。

次に、図-7 に示される3次卓越の場合においても2次卓越の場合とほぼ同様の傾向を有することが確認できる。ここで、Case 3 については2次卓越のように他の振動モードが励起されるような現象は生じていない。このこと

は、瞬間最適制御理論をアクティブ剛性型システムに適用した場合、その振動抑制効果が卓越する振動モードに

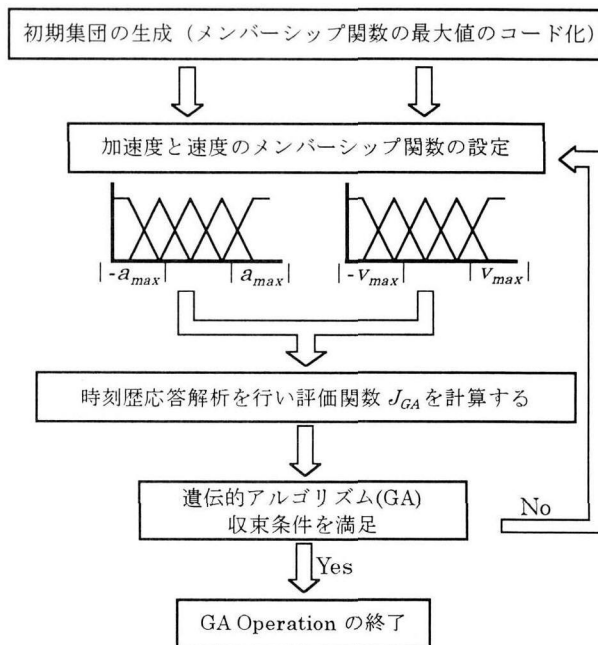


図-5 GA の適用方法

表-3 解析ケース

	制御理論等
Case1	GA を用いた Fuzzy 制御理論
Case2	人間の経験による Fuzzy 制御理論
Case3	瞬間最適制御理論

表-4 $|v_{max}|, |a_{max}|$ の値

mode	$v_{max}(\text{kine})$		$a_{max}(\text{gal})$	
	Case1	Case2	Case1	Case2
1st	1.43	3.00	241.59	50.00
2nd	5.00	30.00	60.00	500.00
3rd	7.59	10.00	246.29	300.00

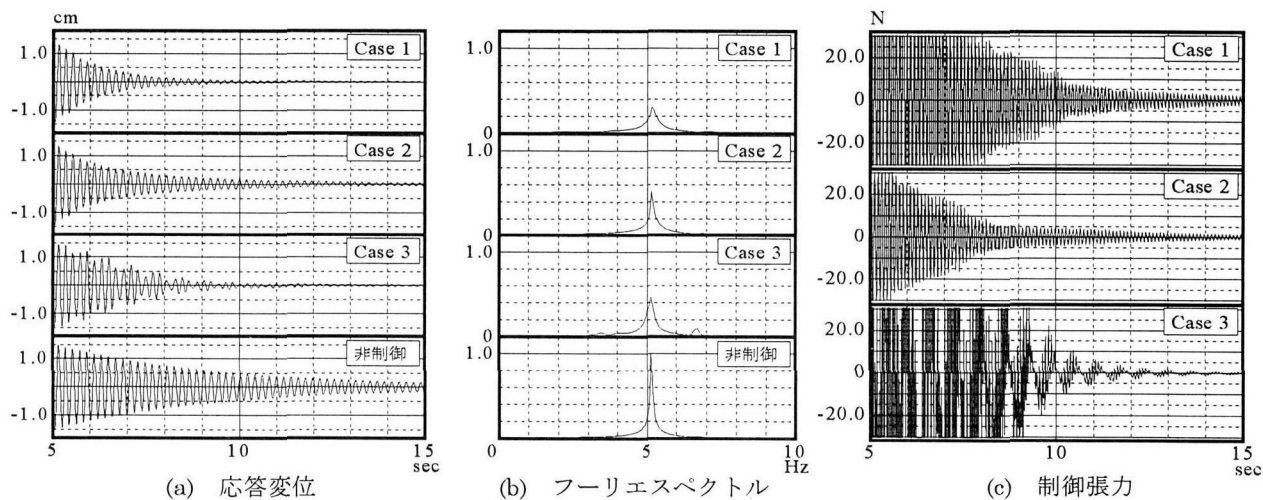


図-6 解析結果 (2次卓越)

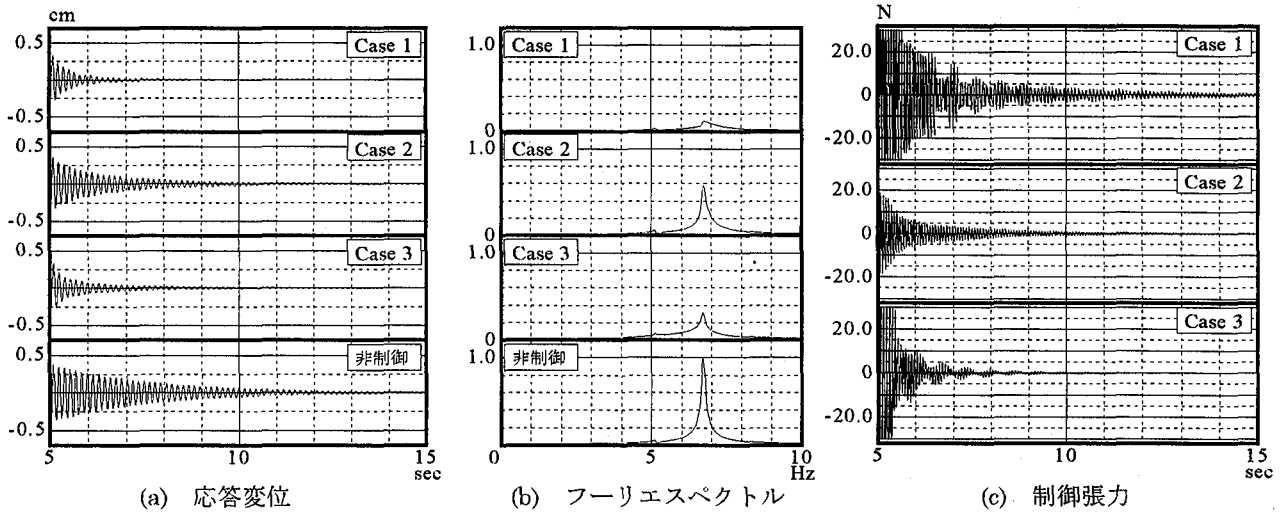


図-7 解析結果 (3次卓越)

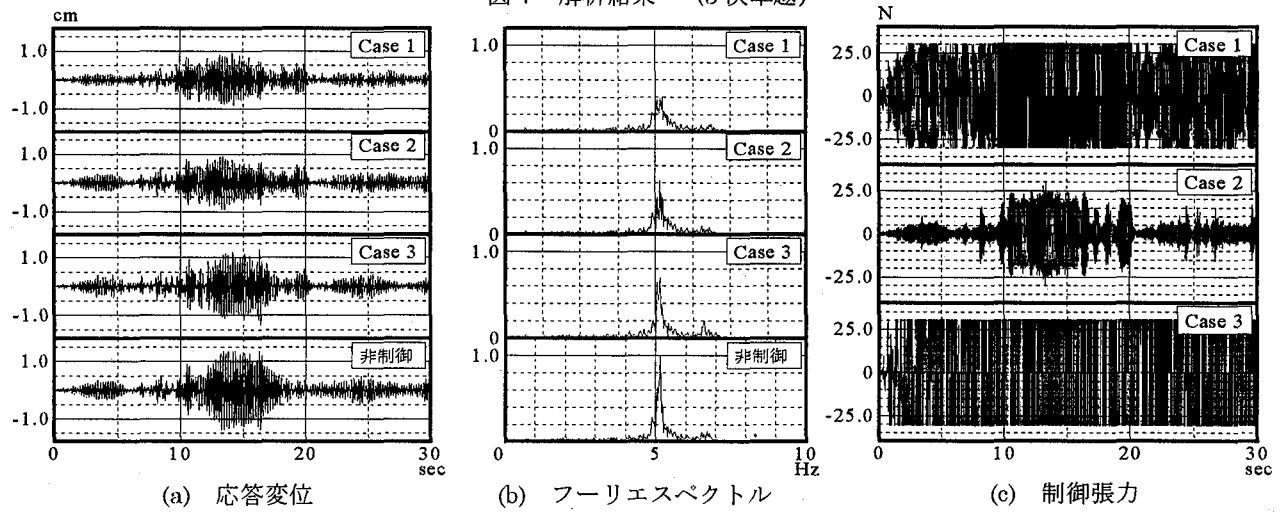


図-8 解析結果 (強制振動)

よってある程度大きな影響を受けるものと推定される。制御理論による制振特性の差違に関しては、Fuzzy 制御の場合は振幅の減衰過程が直線的であるのに対し、瞬間最適制御では指数関数的なものとなっており、これらの傾向は著者らの従来¹²⁾の研究と一致する結果となっている。

さらに強制振動に対する解析結果について考察を加えれば、図-8(a),(b)より Case 1 が最も高い制振効果を示していることがわかる。Case 1 および Case 2 においては、Case 3 のように 3 次モードを加振するような現象は生じていないため、本研究で採用した、全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中の最大のある時刻 t における制御張力とする方法は、良好な効果を上げているものと思われ、ランダムな加振にも十分に対応が可能であるものと推定できる。

以上の結果から、Fuzzy 制御理論はアクティブ剛性型システムのような非線形制御系に対して適用が可能であることが確認された。また、GA によるメンバーシップ関数の最適化は、自由振動の場合の解析結果も含めて、十分な適用性を持つものと思われ、Fuzzy 制御理論を用いた制御系設計における有効な一手法であると考えられる。

4. 振動制御実験

4.1 実験方法

本研究では、写真-1 に示すような吊床版橋等を想定した構造物に対して、そのケーブル張力を直接変化させることにより振動制御実験を行なった^{7),16),17)}。前述のとおり、実験供試体は全体剛性におけるケーブルの依存度を高めるため床版を離散的に配置しており、キャットウォークに比較的近い構造を有している。

具体的な実験方法は、まず供試体上に設置した加速度計によって測定された応答値を動ひずみ計、A/D 変換ボードを介して直接パソコンに入力する。パソコン内では、数値積分により応答速度および応答変位の算出を行い、制御理論に基づき必要な制御張力を求めてアクチュエータの作動命令を出力するものである。この際、Fuzzy 制御理論における制御則は、サンプリング周波数の高速化あるいは使用メモリ量等の関係から、規則数を 9 規則に簡略化して実験を実施した。また、データ記録専用のパソコンを別個に動ひずみ計に接続し、供試体の応答加速度を観測した。図-9 に本研究で用いた実験システム

の概略図を示す。なお、最大制御張力は初期張力およびアクチュエータのストローク（±25mm）を考慮して、最大±30.4Nとすることとした。

4. 2 実験結果およびその考察

本研究では、以上のような制御理論ならびに実験システムを用いて振動制御実験を実施した。制振は自由減衰振動に対して行うこととし、支間 3/4 点または 1/2 点に重錘を吊り下げることにより強制変位を与え、これを急速解放すると同時に制御を開始する。なお、実験における Fuzzy 制御は、GA によって同定されたメンバーシップ関数を適用したものである。解析結果の一例として図-10(a),(b)に支間 1/2 点に強制変位を与えた場合の支間中央における応答加速度を図-10(b)にそのフーリエスペクトルを示す。なお、この結果は解析における減衰自由振動・2次卓越の場合を想定したものである。

加振方法の相違から、その定量的な傾向は異なるものの、図-10より Fuzzy 制御における制振効果は瞬間最適制御と比較して、非常に良好な制振効果が発揮されていることが確認でき、定性的にはある程度解析と一致するものと思われる。図-10(b)に着目すると、Fuzzy 制御においては1次および2次モードの振動はほぼ完全に抑制されていることがわかる。また、3次以上のモードに対してもフーリエスペクトルのピーク値が概ね 1/4 程度に減少し、アクティブ剛性型システムの特徴である非共振化も十分に確認が可能であり、制御による剛性変化が効果的に作用しているものと考えられる。また、1/2 点加振時には、GA で同定された2次卓越に対するメンバーシップ関数の最大値を用いている。上述のように、実験結果では2次以外の他のモードに対しても有効な制振効果が得られていることから、Fuzzy 制御理論におけるロバスト安定性が大きく発揮されていることが推定でき、このことは解析結果と実測値が定量的に一致しない一つの理由であろう。一方、瞬間最適制御理論を適用した場合に関しては、1次、2次モードについてはある程度の

効果が得られているものの、3次以降のモードに対しては、非共振化は認められるがスペクトルのピーク値は1/3程度が抑制されたのみであり、制御が十分に行われたとは言えない結果となっている。これは、前章の解析において確認された、瞬間最適制御理論における振動モードに対する制振効果の差違が、実験時にも同様に生じているものと思われる。

したがって、比較的近接した固有振動数を有するケーブル構造物の振動制御において、Fuzzy 制御理論によるアクティブ剛性型システムを用いることにより、複数の振動モードの同時制振が可能であると思われる。また高次モードに対しては、非共振化も期待できることから、このような構造物の制御に関して極めて有効であると考えられることができる。

5. あとがき

以上のように、本研究では振動モードが複数存在する、ケーブル構造を有する構造物の鉛直振動に対するアクティブ振動制御において、瞬間最適制御理論とファジィ制

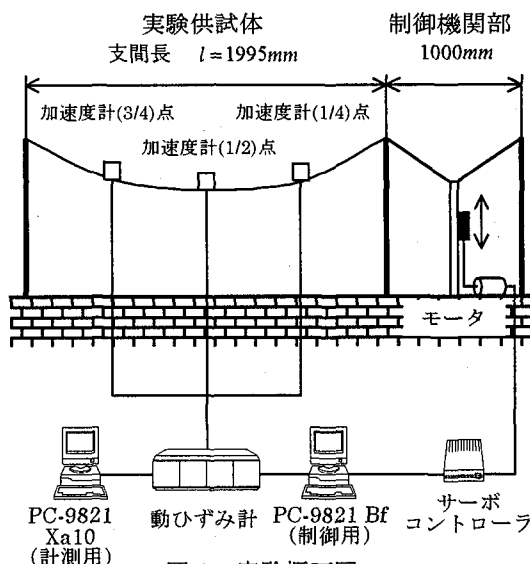


図-9 実験概要図

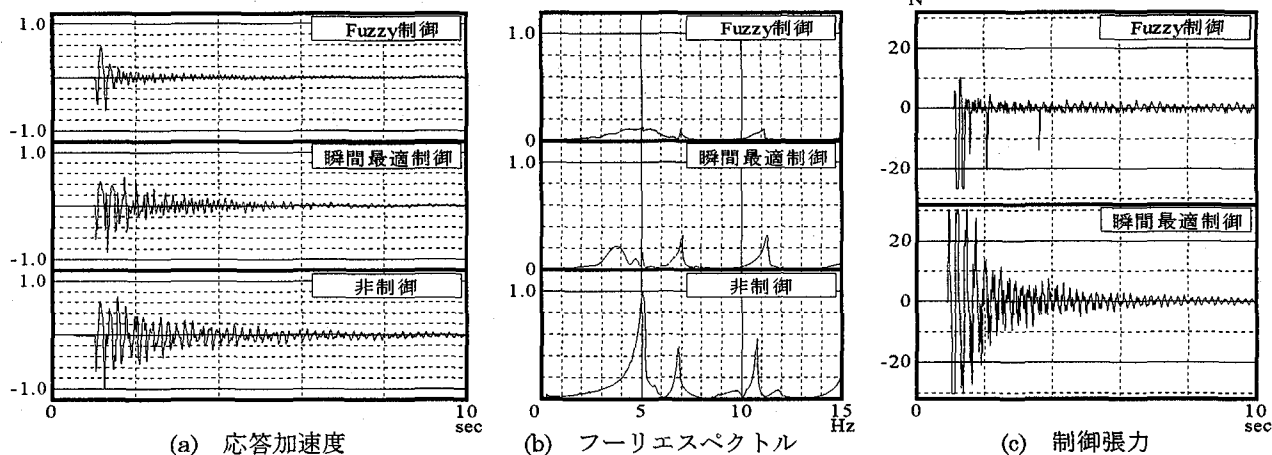


図-10 実験結果

御理論を適用して、解析と実験からその制振効果について考察を加えたものである。また、Fuzzy 制御理論におけるメンバーシップ関数の最適化に GA を適用し、制振効果の効率化についても検討を行った。

解析結果からは、GA によって最適化された Fuzzy 制御理論を適用した場合が最も効果が高く、その制振特性は直線的な振幅の減衰過程が得られ、著者らの従来の研究と一致することが確認された。また、強制振動に対する解析結果から、本研究で用いた全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中で最大のものをある時刻 t における制御張力とする方法は、良好な効果を上げているものと考えられる。加えて、卓越モードに応じたメンバーシップ関数の切り替えなどの操作を行うことによって、各振動モードに対して直接的に制御を行い、さらに制振効果を向上させることができると思われる。

実験結果においても、解析結果と同様に GA を適用した Fuzzy 制御は高い制振効果を発揮することが認められた。2次および3次の振動モードに対しては、制御による剛性変化が効果的に作用し、高次の振動モードに対しても制御張力による振動抑制効果のみならず、アクティブ剛性型システムの特徴である非共振化が有効に作用しているものと推定される。

また、Fuzzy 制御理論の設計に際して、GA によってメンバーシップ関数の同定を行うことは、人間の経験によるメンバーシップ関数の調整に比して、より簡便に有効な制振効果を得られることが確認できた。したがって、このような振動制御問題の効率化に対する遺伝的アルゴリズムの適用は有効な手法であると思われる。

以上の結果より、吊床版橋等を対象としたケーブル構造物の振動制御に対して、論理型制御である Fuzzy 制御理論を用いてアクティブ剛性型システムを適用することにより、複数の振動モードの同時制振が可能であると考えられ、非共振化も期待できることから、このような構造物の制御に関して非常に有効な手法の一つであると考えられる。

なお本研究の一部に平成 10 年度文部省科学研究費奨励研究(A) (代表研究者 小幡卓司、課題番号 10750359) の援助を受けたことを付記する。

【参考文献】

- 1) 家村和宏、谷田宏次、野波健蔵、佐藤忠信、鎌形修一：構造物のアクティブコントロール、振動コロキウム PART A, pp61-89,1991.
- 2) 辰巳正明、秦健作、大倉幸三、大西悦郎：明石海峡大橋主塔の制振対策、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.1-8,1993.
- 3) 矢作枢、吉田和彦：高架橋における交通振動のアク

ティブコントロール、土木学会論文集 第 356 号/I-3、pp.435-444,1985.

- 4) 岡林隆敏、岡部雅彦、角本周、梶川康男：歩行者による吊床版橋振動のアクティブ振動制御、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.167-174,1993.
- 5) 岡林隆敏、尾口慎也、加賀俊明：各種フィードバック制御則による道路交通振動制御のアクティブ振動制御、構造工学論文集、Vol.42A,pp.731-738,1996.
- 6) 川谷充郎、山田靖則、下野正人、清木計成、森淳彦：桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験。構造工学論文集 Vol.41A,pp.683-690,1995
- 7) 小幡卓司、宅和大助、林川俊郎、佐藤浩一、井上圭介：可変剛性型システムを用いた吊床版橋のアクティブ振動制御に関する一考察、鋼構造年次論文報告集第 5 巻、pp.321-328,1997.
- 8) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 9) Chang,C.C. and Yang,H.T.Y.: Instantaneous Optimal Control of Building Frames, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.120, No.4, pp.1307-1326, 1994.
- 10) 岡林隆敏：橋梁交通振動のパッシブ制御とアクティブ制御、橋梁交通振動コロキウム論文集 PART A, pp.121-131,1995.
- 11) 石松栄治、岡林隆敏、藤本一栄、河角省治：不規則外力を受ける構造物の Fuzzy 振動制御、土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 1 部、pp.524-525,1992.
- 12) 下田和敏、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、宅和大助：GA を用いたファジィアクティブ制御の効率化に関する研究、構造工学論文集 Vol.43A, pp.685-692, 1997.
- 13) 杉本博之、鹿比阿麗、山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究、土木学会論文集 No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 14) 近田康夫、橋謙二、城戸隆良、小堀為雄：GA による既存橋梁の補修計画支援の試み、土木学会論文集 No.543/I-36, pp.281-283, 1996.
- 15) 岡南博夫、古田均、金吉正勝、田中洋：ファジィアクティブ制御のチューニングに対する遺伝的アルゴリズムの応用、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.207-214,1993.
- 16) P. Warnitchai, Y. Fujino, T. Susumpow, and B.M. Pacheco : ACTIVE STIFFNESS CONTROL OF CABLE VIBRATION、土木学会第 46 回年次学術講演会概要集第 1 部、pp.960-961, 1991.
- 17) 黒羽達夫、金子成彦：ケーブルに発生する渦励振のアクティブテンションコントロール、日本機械学会機械力学計測制御講演論文集、No.95-6vol. B, pp.209-212, 1996.

(1998 年 9 月 18 日受付)