

I-54

ケーブル構造物における可変剛性型制振システムの
適用性に関する実験的研究

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司

北海道大学大学院工学研究科〇学 生 員 井上 圭介

北海道大学大学院工学研究科 学 生 員 宮森 保紀

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一

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、吊橋あるいは斜張橋の主塔を代表例として各種のデバイスを用いた振動制御が行われ、次第に実用化の域に達しつつある¹⁾。

一般に、アクティブ振動制御においては、構造物に設置した重錘を駆動して制御力を得る、いわゆる制御力型が現在では主流である。しかしながら、制御力型で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は容易に理解できる。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可変剛性型システムを用いた制振が有効であると考えられる²⁾。

可変剛性型システムにおいては、構造物の剛性を時間と共に能動的に変化させるため、この非線形性に対応可能な制御理論を用いる必要性が生じる。そのため、アクティブ制御系の設計において、採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は、制御工学の分野における精力的な研究の結果、多数の理論が開発された。その主なものとして、 H^∞ 制御理論、最適制御理論に代表されるような、制御対象とする構造物に対応する数学的モデルを構築し、そのモデルについて制御システムを設計する方法がある^{3,4)}。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、上記のような制御対象の数学的モデルを用いずに構造物の制御を行う論理型制御があり、これには人工知能の応用、Fuzzy 制御理論等が知られている。

そこで本研究では、制御理論に上記の非線形性に対応が可能な Fuzzy 制御理論^{5,6)}ならびに瞬間最適制御理論^{2,4)}を採用し、ケーブル構造を有する構造物に対して振動制御実験を行なった。具体的には、制御対象としてキャットウォーク等を想定した実験供試体を作成し、前述の2種の制御理論に基づき制御対象のケーブル張力を直接変化させることにより制振実験を行った。実験結果から、両制御理論の比較検討を通じて、ケーブル構造物における鉛直振動の制御に対する可変剛性型システムの適用性あるいは有効性等に関して考察を加えたものである。

2. 制御理論

2. 1 Fuzzy 制御理論

前述のとおり、可変剛性型システムは、観測された構造物の応答量に応じて部材の剛性を変化させて制振を行うため、本研究では非線形性を有する制御対象に対応が可能な Fuzzy 制御理論ならびに瞬間最適制御理論を採用することとした。

まず、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^{5,6)}。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変数からなる次に示すような推論規則を9規則用いて振動制御実験を実施した。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。

Experimental Study on Applicability of Adjustable Stiffness System on Cable Structures

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

推論規則例

- 1:もし加速度 a が負で速度 v が負ならば
制御張力 T は正で大
IF a is N and v is N THEN T is PB
2:もし加速度 a が負で速度 v が 0 ならば
制御張力 T は正で小
IF a is N and v is ZO THEN T is PS

図-1 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-1 に今回用いた 9 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。

以上のようにして、観測された応答値から制御張力 T を逐次求め、可変剛性型システムによる振動制御実験を実施した。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、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をある程度含んでいるものと考えることができるため、全ての質点で個別に制御張力を計算し、その中において絶対値が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。

2. 2 瞬間最適制御理論

瞬間最適制御理論とは、本来構造物が受ける外乱は予知不可能ではあるが、観測可能な外乱情報を積極的に用いることを目的として、評価関数を各ステップごとに設定して最適化を行い、その都度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²⁾。

一般に可変剛性型システムを導入した場合の多自由度系の運動方程式は、以下のようになる。

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

ここで、 M, C, K はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスであり、 $\mathbf{f}(t)$ 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。

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 $\mathbf{v}(t)$ 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。

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

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

ここで、 $\mathbf{v}(t)$ は可変剛性値そのものであり、 $F(t)$ 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。

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

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を用いるために、式(4)を次式のように近似的に表現する。

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

以上より、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。

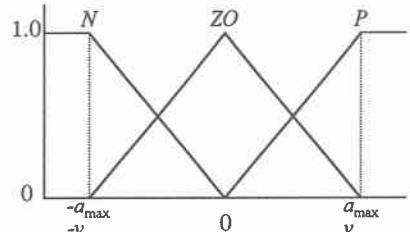
$$\mathbf{x}_s(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_s(t-1) - \mathbf{B}(t-1)\mathbf{v}(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}(t-1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

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 $\mathbf{R}$

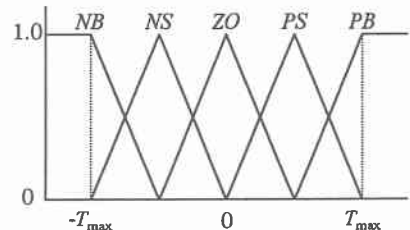
表-1 規則表

	N	ZO	P
N	PB	PS	ZO
ZO	PS	ZO	NS
P	ZO	NS	NB

NB:Negative Big NS:Negative Small
N:Negative ZO:Zero P:Positive
PS:Positive Small PB:Positive Big



(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-1 メンバーシップ関数

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 $J(t)$ を用いて、これが最小になるような可変剛性ベクトルを式(8)を用いて求めることができる³⁾。

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

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

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、速度ならびに加速度を用いることとした。
 以上のようにして、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、Fuzzy 制御理論を用いた場合と同様に制振実験を実施した。

3. 可変剛性型実験システム

本研究で用いた実験供試体は、写真-1 に示すような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物である。前述のとおり、この構造物のケーブル張力を各制御理論に基づいて制御張力を算出し、直接変化させることにより振動制御実験を行なった³⁾。実験供試体の基本的な諸元は、支間長 199.5cm、ケーブル長 200cm、サグ量 6cm、初期張力 137.2N である。表-2 は実験供試体の振動特性を把握するために行った、減衰自由振動実験の結果である。表-2 から、本研究の実験供試体は、比較的近接した固有振動数を持つ多数の振動モードが存在する、ケーブル構造特有の振動特性を有することがわかる。

具体的実験方法は、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、制御力の算出に必要な応答量として応答速度および応答変位を、数値積分により算出し、各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。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-2 に本研究で用いた実験システムの概略図を示す。なお、制御張力の最大値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。

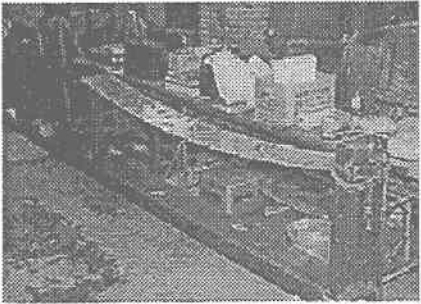


写真-1 実験供試体

4. 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。制振実験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、メンバーシップ関数の最大値に関しては、予備実験によって有効な制振効果が得られる組合せを検討した上で決定することとした。図-3 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非制御時の応答の最大値で無次元化したものであり、図-4 は、そのフーリエスペクトルである。なお、図-4 において細線は非制御時の応答を、太線は制御時の応答を示している。

図-3 に着目すると、実験開始 2 秒後には応答波形の振幅が概ね 1/2 程度に減少していることが確認され、有効な制振効果が得られているものと推測される。図-4 に着目すれば、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おり、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 程度に減少していることがわかる。一方、瞬間最適制御を適用した場合に関しても 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ことが確認されるが、Fuzzy 制御に比べて十分とは言えない結果となっている。

次に可変剛性型システムの特徴の一つである非共振化に関しては、フーリエスペクトルから判断すると高次のモードにおいて顕著に現れており、Fuzzy 制御理

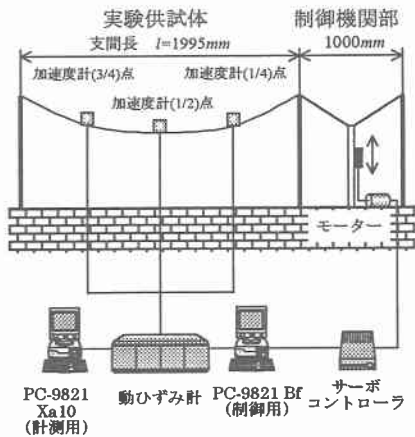


図-2 実験概要図

表-2 固有振動特性一覧表

振動モード	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
固有振動数(Hz)	4.32	5.78	6.88	8.64	10.80	12.96	15.09
減衰定数 (%)	0.712	2.386	1.066	0.897	0.567	0.435	0.859

論の場合を例にとると、5 次モードの振動数が 10.89Hz から 11.12Hz に、7 次モードの振動数が 15.09Hz から 15.19Hz へと変化しており、瞬間最適制御理論においても同様の結果が確認される。この結果から、制御による剛性変化が低次のモードのみならず高次においても効果的に作用し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、本研究の手法を用いれば複数の振動モードの同時制振が可能であると思われ、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可変剛性型制振システムの適用は極めて有効であると考えることができる。また、今回の制振実験のような鉛直振動の抑制を目的とした非線形振動制御システムにおいて、Fuzzy 制御理論ならびに瞬間最適制御理論を用いることにより極めて有効な振動抑制効果を発揮することが確認された。加えて、Fuzzy 制御においてはメンバーシップ関数の最適化等により、その制振効果が大きく向上することが知られており、例えば、遺伝的アルゴリズム等を用いてメンバーシップ関数の最適化を行えば、その効果は大きく向上するものと考えられる。

5. あとがき

以上のように本研究は、Fuzzy 制御理論ならびに瞬間最適制御理論を用いて、吊床版橋等を想定したケーブル構造を有する構造物に対して可変剛性型システムを適用して制振実験を実施したものである。

実験結果からは、低次モードに関してはフーリエスペクトルのピーク値が大きく低減され、高次モードに対しては可変剛性型システムの特徴の一つである非共振化が確認された。これより、ケーブル構造物のような比較的固有振動数が近接している構造物に対して複数モードの同時制振が可能であると推測され、可変剛性型システムによる振動制御によって良好な制振効果を得られたものと考えられる。また、制御理論の比較を行えば Fuzzy 制御理論は瞬間最適制御理論に比して同等、もしくはそれ以上の振動抑制効果を発揮し得ることが判明した。

したがって、本研究のような制御対象に対して、可変剛性型システムを適用した振動制御は有効な制振効果を得られるものと推測され、特に Fuzzy 制御理論を用いた際の制振効果は、遺伝的アルゴリズム等を用いてメンバーシップ関数の最適化を行い、さらには卓越する振動モードに応じた制御則の切り替え等を行えば極めて有効になるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 米田昌弘, 岡林隆敏, 川谷充郎: 交通振動制御の可能性, 第 2 回振動制御コロキウム PART A, pp.185-210, 1993.
- 2) 小堀鐸二: 制振構造, 鹿島出版会, 1993.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 下田和敏, 小幡卓司, 林川俊郎, 佐藤浩一: アクティブ振動制御における Fuzzy 制御理論の適用に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 52 号(A), pp.392-397, 1996.

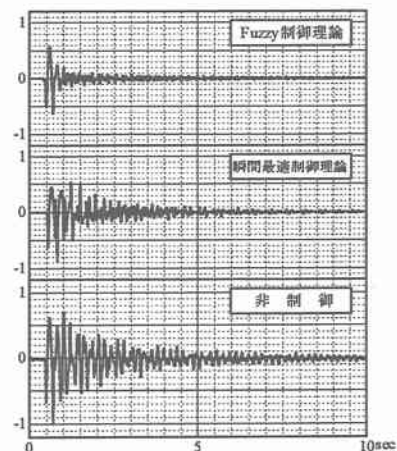


図-3 応答加速度波形

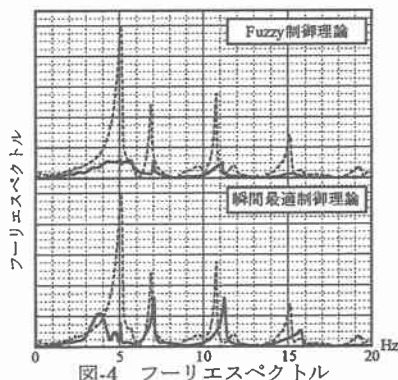


図-4 フーリエスペクトル