

I - B 486

アクティブ剛性型制振システムにおける制御効率について

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 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。近年においては、構造物に何らかのデバイスを設置し、アクティブあるいはパッシブ方式による振動制御によって安定性の改善を目指す方法が次第に実用化されつつある。一般に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、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。このような観点から、著者らは吊床版橋等を対象としたケーブル構造物のアクティブ剛性型システムによる振動制御を行った¹⁾。しかしながら、アクティブ剛性型システムは非線形な制御システムであり、制振効果の把握は通常的最適制御等に比して困難であると思われる。したがって、本システムを適用する場合には、構造物の剛性をどの程度変化させれば十分な制振効果が得られるのかを把握することは、極めて重要な課題である。

これらを踏まえて、本研究ではケーブル構造物におけるアクティブ剛性型システムの制御効率を検討することを目的として、ケーブルに与える制御張力を初期張力の 5%～50%まで変化させ、振動制御シミュレーションを行った。具体的には、著者らが以前から用いてきたケーブル構造を有する実験供試体を 5 質点系にモデル化し、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、制御理論に関しては Fuzzy 制御理論を用いることとし、制御張力の変化に対する制振効果に関して考察を加えた。以上より、本研究はこれらの結果を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ケーブル構造を有する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。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解析を実施して、振動特性を把握した。その結果を表-1 に示す。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。

一般に可変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²⁾。

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

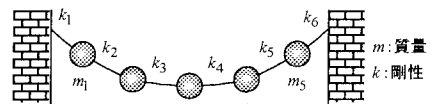


図-1 解析モデル

表-1 振動特性一覧表

振動モード	1st	2nd	3rd	4th	5th
固有円振動数 (rad/sec)	27.49	32.55	42.91	55.46	69.81
固有振動数 (Hz)	4.375	5.181	6.830	8.827	11.11
固有周期 (sec)	0.229	0.193	0.146	0.113	0.090
有効質量率 (%)	1.13	73.01	25.30	0.11	0.45

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 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、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトル、 $\mathbf{V}(t)$ は可変剛性マトリックス、また、 $\mathbf{L}$ 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、実験供試体の減衰自由振動実験による実測値を用いた。また、可変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 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 変数からなる表-2 のような推論規則を 25 規則用いて解析を実施した^{1), 3)}。

表-2 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 は負で大
IF a is N and v is N THEN T is NVB
2: もし加速度 a が負で速度 v が 0 ならば制御張力 T はゼロ
IF a is N and v is ZO THEN T is ZO
⋮
⋮

Keywords : 制振、アクティブ剛性型システム、制振効率、ケーブル構造物

北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 TEL:011-706-6172 FAX:011-726-2296

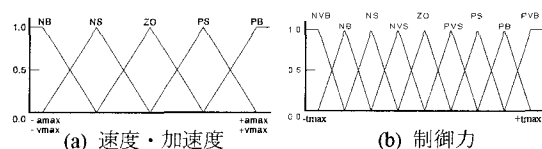


図-2 メンバーシップ関数

図-2 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-3 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。

メンバーシップ関数の設定に関しては、制御張力の最大値が $\pm 30.4\text{N}$ の場合において、遺伝的アルゴリズムを適用して得られた $|v_{\max}|$ および $|a_{\max}|$ の値を用いることとした。また、一般に Fuzzy 制御で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が、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。

3. 解析結果とその考察

前述のように、本研究ではケーブルに与える制御張力を初期張力の 5%~50%まで変化させ、振動制御シミュレーションを実施した。解析は減衰自由振動について行い、2 次固有振動数を有する正弦波を 10 秒間入力し、入力終了と同時に制御を開始することとした。図-3 に解析結果の一例として、制御張力が 10.0N および 20.0N の際のスパン中央点における応答波形を、図-4 に制御開始 10 秒後の最大応答変位と制御張力の関係を示す。

これらの結果に着目すると、図-3 より制御張力が 10.0N 程度までは最大応答変位の減少率は比較的大きいが、その後は制御張力の増加に対して制振効果はあまり変化しない傾向が認められる。よって、制御張力が初期張力のおよそ 10%の範囲でもある程度の制振効果が得られていると思われ、歩道橋の振動使用性向上等の目的には十分な効果を発揮するであろうことが推定できる。一方、耐震等の構造物の安定性を確保する際には、初期張力に対して 20%程度の制御張力を設定すれば比較的效率良く制振が行えるものと考えられる。図-4 においては、制御張力の差は明らかに制振に要する時間の長短となって現れているが、今回用いたメンバーシップ関数は、制御張力を $\pm 30.4\text{N}$ として設計されたものであり、制御張力に見合った適切な制御則を構築する、あるいは他の制御理論を適用することによって、さらに効果的な制御が実現できるものと考えられる。

4. まとめ

以上のように、本研究はケーブル構造物におけるアクティブ剛性型システムの制御効率を検討することを目的として、ケーブルに与える制御張力を変化させ、振動制御シミュレーションを行ったものである。解析結果から、制御張力が初期張力の 10%程度までは最大応答変位の減少率は大きく変化するが、その後は制御張力の増加に対して制振効果はあまり増大せず、20%を越えるとその効果は概ね一定となることが判明した。また、制御張力の大小は制振に要する時間の差となって現れているが、これは制御張力に応じた適切な制御則を構築や、他の制御理論の適用によって比較的容易に改善が可能であるものと思われる。

以上より、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は、制御理論、制御則等の十分な検討を行うことにより、比較的小さい制御張力でも十分な制振効果が発揮できるものと推定される。したがって、本研究で用いた手法は、土木構造物の制振にも適用できる十分な可能性を有するものと考えられる。

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) 小幡卓司, 宮森保紀, 井上圭介, 林川俊郎, 佐藤浩一: 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, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.737-744, 1999. 2) 小堀鐸二: 制振構造, 鹿島出版会, 1993. 3) 小幡卓司, 宮森保紀, 井上圭介, 林川俊郎, 佐藤浩一: 可変剛性型制振システムにおける Fuzzy 制御理論の適用に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 55 号(A), pp.192-197, 1999.

表-3 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, NNS: Negative Very Small, ZO: Zero, PVS: Positive Very Small, PS: Positive Small, PB: Positive Big, PVB: Positive Very Big

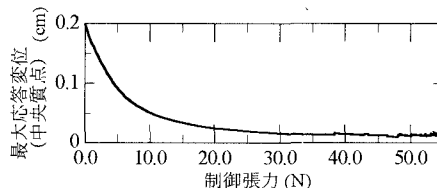
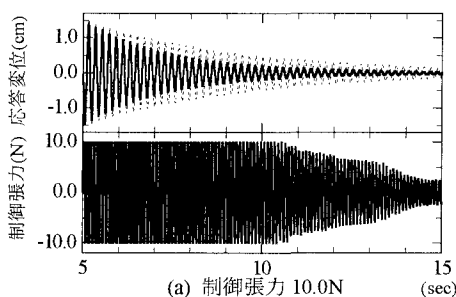
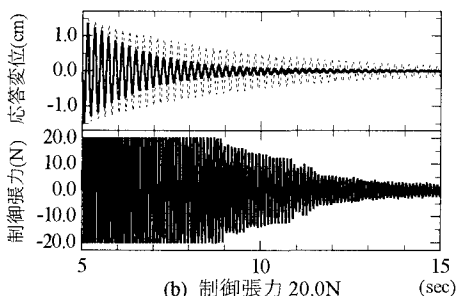


図-3 最大応答変位



(a) 制御張力 10.0N



(b) 制御張力 20.0N

図-4 時刻歴応答解析結果