

I - B 485 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評価方法について

建 設 省 正 員 井上 圭介
 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

近年、土木構造物における地震荷重等の不規則な外力に起因する振動を、アクティブ振動制御により軽減しようとする研究が盛んに行われている。アクティブ制振では、構造物に設置した重錘を駆動することにより、制御力を発生させる制御力型的方式が現在では主流であるが、この方式では重錘のストロークを十分に確保する必要があり、制御装置の設置に比較的大きなスペースを必要とする。橋梁構造物において鉛直振動を制御対象とする場合、桁高等を考慮すると、制振装置の設置スペースの確保が困難であると考えられる。このような場合、構造物の断面性能を直接変化させることにより制振を行う、アクティブ剛性システムが有効であることが知られている¹⁾。そこで本研究では、鉛直振動が卓越する構造物におけるアクティブ剛性型システムの適用性、制振効果の評価方法を検討するために、キャットウォーク等を想定したケーブル構造を有する実験供試体を作製し、その張力を変化させることにより、振動制御実験を実施した。具体的には、制御理論に非線形性に対応が可能な瞬間最適制御理論²⁾、Fuzzy 制御理論³⁾を採用し、ケーブル張力を変化させることにより実験を行った。また、制振効果の評価において、従来は応答波形やフーリエスペクトルを用いた方法が主流であったが、両者においては、それぞれ振動数領域および時間領域の情報が無視されている。アクティブ剛性型システムにおいては、時間ごとに剛性を変化させていることから、時間領域を考慮した制振効果を評価する必要があると考えられる。そこで、本研究ではランニングスペクトルを用いた制振効果の評価を行った。したがって本研究はこれらの結果を報告するものである。

2. 制御理論

2-1. 瞬間最適制御理論

アクティブ剛性型システムを導入した際の多自由度系の運動方程式から得られる状態方程式は式(1)のようになる¹³⁾。ここで、式(1)中の k は離散時間系の時刻であり、状態ベクトルは $\mathbf{x}_s(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \dot{\mathbf{x}}(k)]^T$ である。

$$\dot{\mathbf{x}}_s(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}_s(k-1) + \mathbf{D}\mathbf{f}(k-1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

評価関数は、重みマトリックス $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ を介した状態ベクトル $\mathbf{x}_s(k)$ と制御張力 $T(k)$ のそれぞれの2次形式の和として構成する。

$$J(k) = \mathbf{x}_s^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(k) + T(k)^T \mathbf{R} T(k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

したがって、式(2)より制御張力 $T(k)$ は次式のように得ることができる。

$$T(k) = -\mathbf{R}^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}(k)}{\partial T(k)} \mathbf{x}_s(k-1) \mathbf{Q} \mathbf{A}(k) \mathbf{x}_s(k-1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上のようにして、観測された状態ベクトルを式(3)に代入することにより制御張力 $T(k)$ を逐次求め、アクティブ剛性型システムによる振動制御実験を実施した。

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²⁴⁾。本研究では、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-1のような推論規則を9規則用いて振動制御実験を実施した。推論規則の構築は鉛直下向きを正として行うこととした。また、表-2は今回用いた9規則の場合の規則表である。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各観測点ごとに制御張力 T を逐次求め、その中で絶対値が最大のものをその時間における制御張力とし、アクティブ剛性型システムによる振動制御実験を実施した。

3. ランニングスペクトル

本研究においては、時間領域を考慮した制振効果の評価を行うため、ランニングスペクトルを用いて、各時間における卓越振動モードを推定した。具体的にはサンプリング周波数 100Hz、データ点数 2048 個 (20.48 秒) の実験データに対して、1~20

表-1 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
⋮
⋮

表-2 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

Keywords : 、アクティブ剛性型システム、振動制御、ケーブル構造物、ランニングスペクトル

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

秒までの1秒間隔で連続的にFFT解析を実施することによりランニングスペクトルを求めた。各時間間隔におけるデータ点数は±200点としている。同時に振動数の分解能を考慮して、各標本点間について10点ずつの線形補間を行った。したがってこの場合の振動数領域における分解能はそれぞれ0.2441Hzとなる。

4. アクティブ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に示すようなキャットウォーク等を想定したケーブル構造物である。上記のとおり、こ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、振動制御実験を行った。実験供試体の基本的な諸元は、支間長199.5cm、ケーブル長200.0cm、サグ量6.0cm、初期張力137.2Nである。

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DPM、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、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。図-1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。

5. 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。制振は減衰自由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で強制変位を与え、これを急速解放すると同時に制御を開始して所定のデータを得た。図-2に支間1/2点に強制変位を与えた場合の応答加速度を無次元化したものを、図-3にランニングスペクトルを示す。なお、図-2中の細線は非制御時、太線は制御時を表している。図-2より、制御時の応答は非制御時と比して良好な制振効果が得られたと考えられる。図-3から、Fuzzy制御理論では卓越しているモードから順に制御を行っているのに対し、瞬間最適制御理論では各振動モードを均等に制御していることが確認される。この制御過程の差は、本研究において用いている制御張力の算出方法の違いを顕著に表していると考えられる。また、非制御時のランニングスペクトルと比して、制御時は、どの振動モードにおいてもピーク値が低減されていることから、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。時間領域に着目すれば、瞬間最適制御理論を用いた場合、振動モードによっては非制御時よりも振動継続時間が長く、加振していると思われる場合が確認される。これは、スビルオーバー等の問題点を考慮するとあまり好ましくない結果が得られたものと考えられる。以上のことより、本研究で用いた制御対象に対して、アクティブ剛性型システムのような非線形振動制御は適用が可能であると推定され、その制振効果や制御過程の確認を行う際に、ランニングスペクトルを用いることは有効な手法であることが確認された。

6. あとがき

以上より、本研究はアクティブ剛性型システムを用いた振動制御における制振効果の評価方法としてランニングスペクトルを導入し、その評価方法の有効性に関して考察を加えたものである。実験結果からは、アクティブ剛性型システムによる制振は非常に有効な効果を発揮することが判明し、その制御過程、制振効果を評価する際にランニングスペクトルを用いることは有効な手法であることが確認された。したがって、本研究のようなアクティブ剛性型システムによる振動制御の制振効果を評価する際にランニングスペクトルを使用することは有効な手法の一つであると考えられる。

<参考文献> 1) 小堀鐸二：制振構造，鹿島出版会，1993. 2) 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. 3) 小幡卓司，井上圭介，宮森保紀，林川俊郎，佐藤浩一：アクティブ剛性型システムを用いたアクティブ制振におけるファジィ制御理論の適用について，土木学会北海道支部論文報告集，第54号，pp.206-211，1998.



写真-1 実験供試体

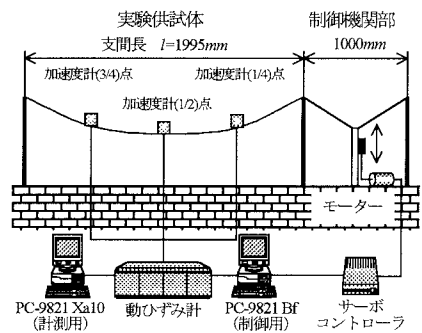


図-1 実験概要図

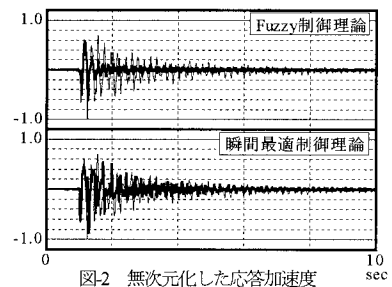


図-2 無次元化した応答加速度

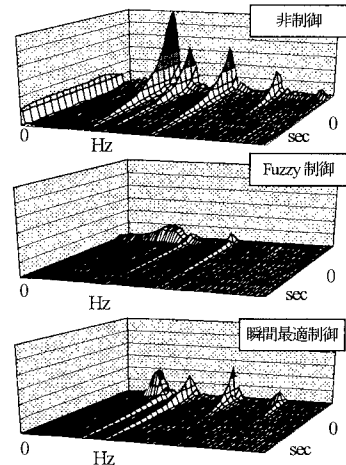


図-3 ランニングスペクトル