

ケーブル構造物における可変減衰型セミアクティブ制御に関する一考察

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 正 員 小幡 卓司
 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. はじめに

近年では橋梁構造物においても振動制御の研究および実用化が進みつつあるが、桁構造やケーブル構造を有する橋梁の鉛直振動を対象とした制振の研究例は比較的少ない。これらの振動制御は一般にパッシブ方式とアクティブ方式に大別されるが、両者の長所を併せ持つ制御手法として、構造物の状態に応じて制御装置を2、3の比較的少数の状態に切り替えるセミアクティブ制御を適用することが有利であると考えられる。また最近ではセミアクティブ制御に適用可能な制御装置として、機能性流体を用いたダンパーなどの可変減衰機構を有するデバイスの開発も進められている。そこで本研究はケーブル構造を有する橋梁の鉛直振動制御を簡便かつ高効率に行うために、可変減衰型システムを用いたフィードフォワード型のセミアクティブ制御を適用し、振動制御シミュレーションを行った。またアクティブ剛性型システムを適用したアクティブ制振による解析も同時に実施し、両者の比較を通じて可変減衰型セミアクティブ制御の制振効果あるいは適用性について考察を加えるものである。

2. 構造物のモデル化と動的応答解析

制御対象としては、ケーブル構造を有する実験供試体を製作し、これを図-1に示すような2次元多自由度系にモデル化して解析を行った。またモデル化の妥当性を検討するために、固有振動解析を実施して減衰自由振動実験との比較を行った。表-1から解析結果は実測値とほぼ一致し、各振動モードは比較的近接した固有振動数を有するケーブル構造物特有の振動特性が確認され、モデル化は適切に行われたと考えられる。また、表-1および図-2のモード形状から、この構造物は2次モードおよび3次モードが卓越しやすいと考えられる結果が得られた。動的応答解析手法としては、ニューマークβ法による直接数値積分法を採用して時刻歴応答解析を行った。アクティブ剛性型システムを採用した振動制御においては構造物の剛性が時々刻々と変化する非線形性に対応するために修正荷重増分法を採用した。本研究においてはニューマークβ法における係数βはβ=1/4、時間刻みはΔt=0.01secとした。

3. 振動制御理論

3.1 可変減衰型フィードフォワード制御

可変減衰装置を導入した場合の多自由度系制振システムにおける運動方程式は次式で表される¹⁾。

$$M\ddot{x}(t) + \{C + C_v\}\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M, C, K および $F(t)$ はそれぞれ整合質量マトリックス、レーリー減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび外力ベクトルである。 C_v は可変減衰マトリックスであり、通常時および高減衰時の減衰係数 c_1, c_2 からなる可変減衰マトリックス C_1, C_2 のいずれかを、構造物の応答値に応じて C_v に代入することによって制御を行うものである。具体的には図-1において部材番号で示す部材の鉛直方向に可変粘性減衰を導入した場合を想定した。この減衰係数の値は制振効果に重要な影響を与えと考えられるが、この最適値の算出方法については明確な定式化はなされていない。このため最適化手法の一つとして知られている遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を用いて高減衰時の減衰係数 c_2 を決定することとし、解析の結果 $c_2=4.9\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ を得た。通常時の減衰係数 c_1 については制振装置の特性に基づいて値が定められるものであるが、本研究においては過去の研究例²⁾を参考に $c_1=c_2/100=4.9\times 10^{-2}\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ とした。

減衰係数の切り替えは、最も卓越しやすい2次モードの応答に着目して、これが定められた値を超過した場合にデバイスを高減衰状態に変更することとした。2次モードの応答の抽出にはIIR型ローパスフィルタを用いている。

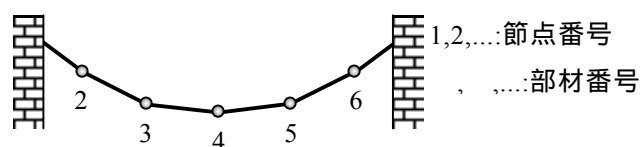


図-1 解析モデル

表-1 固有振動特性

固有振動モード		1st	2nd	3rd	4th	5th
実験	固有振動数(Hz)	4.39	5.05	6.96	8.76	11.1
	固有振動数(Hz)	4.38	5.18	6.83	8.83	11.1
解析	固有振動数(Hz)	4.38	5.18	6.83	8.83	11.1
	有効質量率(%)	1.13	73.0	25.3	0.11	0.45

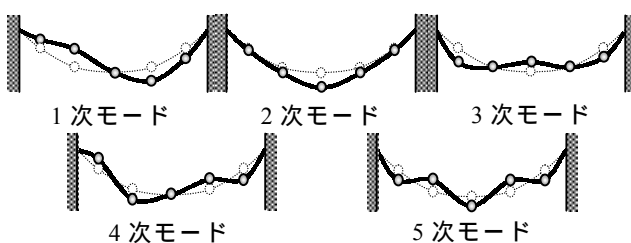


図-2 固有振動モード

キーワード：セミアクティブ制御、ケーブル構造物、可変減衰型システム

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL: 011-706-6172 FAX: 011-706-6172

なお、この状態変更の判定値も制御効果に大きな影響を与えるものであるが、本研究では数回の予備解析に基づいて、支間中央点におけるフィルタリング後の加速度で 2.0m/sec^2 に設定した。

3.2 アクティブ剛性型フィードバック制御

アクティブ剛性型システムを導入した制御系の運動方程式は以下の式で与えられる²⁾。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + \{K + L^T V(t)L\}x(t) = F(t) \cdots \cdots (2)$$

式(2)において $V(t)$ はアクティブ剛性マトリックス、 L はアクティブ剛性配置マトリックスである。本研究では、構造物の応答に応じてケーブル張力を直接変更することにより制御を行うこととし、制御理論としては Fuzzy 制御理論を適用した。推論規則については、前件部を各節点の応答速度、応答加速度の 2 変数、後件部を制御張力の 1 変数からなる 25 規則の推論規則群を用いた。またメンバーシップ関数は三角形型とし、これらを用いて制御張力を算出し、式(2)中のアクティブ剛性マトリックスに代入することによって解析を行う³⁾。この際の制御張力の最大値は実験供試体のアクチュエータのストロークを考慮して $\pm 30.4\text{N}$ とした。また、前件部における加速度および速度に関するメンバーシップ関数の最大値 $a_{\max}$, $v_{\max}$ の最適化については、これらの変数を組み合わせ最適化問題と見なし GA を適用して同定を行った³⁾。その結果、 $a_{\max}=0.97\text{m/sec}^2$, $v_{\max}=0.31\text{m/sec}$ となり、これらの値を用いて Fuzzy 制御におけるメンバーシップ関数を設定した。

4. ケーブル構造物の振動制御

振動制御シミュレーションは強制振動について行い、入力外力は 1993 年の釧路沖地震の際に千代田大橋において観測された加速度波形（最大加速度 243.8gal ）を用いた。解析結果の一例として、図-3 および図-4 に支間中央点における応答変位とそのフーリエスペクトルを示す。

図-3 の応答変位からは、セミアクティブ、アクティブのいずれの制御手法とも良好な制振効果を発揮しているものと考えられる。入力外力によって応答が増大する 10～20sec 付近においては、アクティブ制御を適用した場合の制振効果が顕著である。セミアクティブ制御においては主要動付近の振動抑制効果は前者と比してやや劣ると思われるが、その他の部分ではアクティブ制御と同等かそれ以上の制御が行われており、部分的に減衰を変化させることによって、構造物全体に対して有効な制振効果が期待できると思われる。また、構造物の通常状態と高減衰状態を変化させるパラメータの設定を、例えば入力外力がある程度大きい場合には高減衰状態をより長く維持するように最適化することにより、アクティブ方式に匹敵する制振性能を与えることも十分に可能であると推定される。図-4 のフーリエスペクトルにおいても、非制御時に比較して両者ともにほぼ等しくピーク値が減少し、高い振動抑制効果を示していることがわかる。また、非制御時において認められる 3 次モードについては、2 次モードの応答のみに着目して制御を行っているセミアクティブ制御においても、アクティブ制御とほぼ同等の制振効果が得られている。これは、可変減衰を設定した部材の位置が 3 次モードのモード形状に効果的に作用したためと考えられ、制御装置を適切な位置に設置することによって、より複数の振動モードの制振が可能であると思われる。

5. おわりに

本研究はケーブル構造を有する橋梁構造物の鉛直振動制御を目的として、制御装置の減衰係数を複数の状態に変更する可変減衰型セミアクティブ制御を適用し、振動制御シミュレーションを行いその制振効果および適用性について検討したものである。解析結果から、セミアクティブ制御を用いた場合においても、その制御プロセスに十分な検討を加えることにより、アクティブ制御に匹敵するような振動抑制効果を期待できることが認められた。また、本研究では最も卓越しやすい振動モードのみに着目して制御を行ったが、制御装置を適切な位置に設置することによって複数の振動モードの制振が可能と考えられる結果が得られた。

セミアクティブ制御における問題点としては、その設計手法が確立されていないことが挙げられる。本研究のような可変減衰型システムでは、変更する減衰値や状態を切り替えるべき観測量などによって、その制振効果は大きく左右されることが判明した。したがって、これらの設計に関して GA などを導入して最適なシステムを構築する必要があると思われる。

【参考文献】

- 1)川島一彦、運上茂樹：バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御，土木学会論文集，No.501/I-29, pp.143-152, 1994. 2)小堀鐸二：制震構造，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：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.

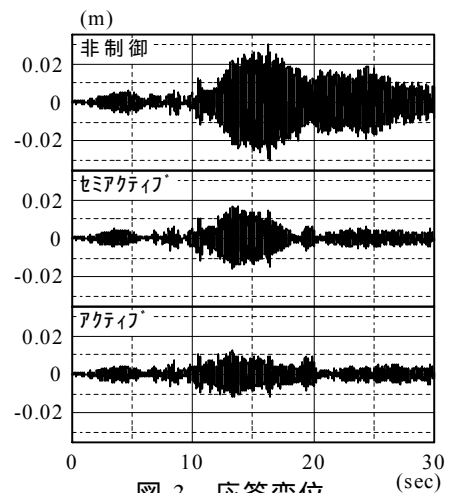


図-3 応答変位

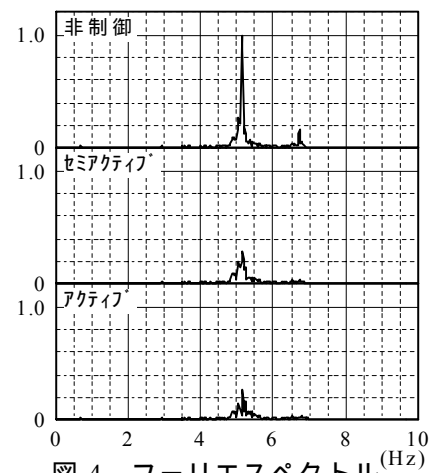


図-4 フーリエスペクトル