

断面性能可変型セミアクティブ制御の振動制御実験について

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 学 生 員 安達 一憲
 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
 新日本製鐵株式会社 正 員 下田 和敏

1. はじめに

構造物の振動制御方式として、最近ではセミアクティブ方式と称される制振手法の研究が進められている。この制御方式は構造物に直接制御力を作用させないため安定性に優れた制御が可能であるとともに、ON-OFF制御などのように制御装置の状態を選択的に変更することでも制御ができることから、制振システムは簡便となり土木構造物への適用性も高いと思われる。そこで本研究では、鋼製タワーを制御対象として構造物の剛性ならびに減衰を可変とする断面性能可変型システムを用いて振動制御実験を行い、その制振効果あるいは適用性に関して基礎的な検討を行うものである¹⁾。まず、実験に先立ち振動制御シミュレーションによって、制御系の設計を行い制振効果の確認を行った。この結果を基に実験供試体に対して制振実験を実施し、制御時、非制御時を比較するとともに解析と実験の差異について検討を加え、本研究で用いる制御手法の制振効果などについて考察を加えるものである。

2. 鋼製タワーモデルと固有振動特性

本研究では、写真-1のような3層ラーメン構造を有する高さ2.1mの実験供試体を製作した。この実験供試体は、中層に角鋼とオイルダンパーで構成された制御装置を有しており、装置に取り付けた電磁石により構造物と制御装置の接続状態を切り替えることで、剛性と減衰を付加する機構を有している。表-1は実験供試体の減衰自由振動実験結果である。実験は制御装置を作動させない状態(以下、通常状態と称す)および作動によって剛性・減衰を付加させた状態(以下、作動状態と称す)のそれぞれに対して行った。表-1より作動状態の1次固有振動数は、剛性の付加によって通常状態から40%程度上昇しており、制御系の設計はこの固有振動数の変化に着目して行う。次に、この実験供試体の断面諸元を用いて、通常状態および作動状態のそれぞれについて3次元骨組モデルを構築した。表-2は解析モデルに対して行った複素固有振動解析の結果である。

3. セミアクティブ制御系設計手法

構造物の減衰と剛性を変化させる場合の構造性能可変型制振システムの運動方程式は式(1)のようになる²⁾。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_v)\dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v)\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ここで可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ および可変剛性マトリックス $\mathbf{K}_v$ は、制御によって付加される粘性減衰あるいは剛性の増分であり、これらを随時変化させることで構造物の制振を図るものである。

本研究においては簡便な手法で制御系を構築することを目的として ON-OFF 制御^{3),4)}を採用し、制御装置の

動作によって1次モードの固有振動数が変化することに着目して制御系の設計を行う。具体的には、まず構造物上層における応答加速度からローパスあるいはハイパスフィルタによって通常・作動状態の1次モードの振動数成分をそれぞれ抽出する。それぞれの状態において抽出された応答加速度が、予め設定した基準値を超過した場合に、制御装置の状態を切り替えることで構造物の断面性能を変化させる。このような手法を用いる場合、制御装置の動作を決定する基準となる応答加速度の設定は、制振効果に大きな影響を与えると考えられるため、GAによって状態変更の基準となる応答加速度の最適化を行うこととした。

GAによる最適化においては、式(2)のような目的関数を用い、各々の最適化パラメータの組み合わせに対して個別に制振シミュレーションを実施し、式(2)の運動・減衰・ひずみエネルギーの総和がどの程度低減されるかを評価する^{2),4)}。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^n (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \quad (2)$$

GAによる解析によって得られた応答加速度の基準値は、それぞれローパスフィルタ通過成分に対して $a_1=5\text{gal}$ 、ハイパスフィルタ通過成分に対して $a_2=310\text{gal}$ になった。したがって、これらの値に基づいて制御系を設定し、制振シミュレーションを実施する。

4. 振動制御シミュレーション

本研究における時刻歴応答解析は、ニューマークβ法による直接数値積分法を用い、係数βは1/4、時間刻みは $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、解析時間は30秒間として1次モードの減衰自由振動を対象とした。図-1は解析結果であり、(a)は構造物上層の応答変位、(b)は制御装置の状態変化の履歴、(c)は応答変位のフーリエスペクトルであり、比較のために非制御時の最大値で無次元化を行った。

表-1 減衰自由振動実験結果

	固有振動数(Hz)		減衰定数(%)	
	通常	作動	通常	作動
1st.	1.86	2.61	0.95	4.49
2nd.	6.54	6.74	0.30	1.72
3rd.	9.96	---	0.27	---

表-2 複素固有振動解析結果

	固有振動数(Hz)		減衰定数(%)	
	通常	作動	通常	作動
1st.	1.86	2.61	0.94	4.49
2nd.	6.54	6.73	0.27	1.75
3rd.	9.95	---	0.18	---



写真-1 実験供試体

キーワード：セミアクティブ制御、振動制御実験、鋼製タワー、断面性能可変型システム

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

図-1(a)および(b)の応答変位および状態変更履歴に着目すると、制御開始直後から構造物の振動周期に応じて制御装置の状態が切り替わり、これによって制御時の応答変位が急激に減少している。制御時と非制御時の比較では、制御開始後 5 秒間で応答変位の振幅が約 1/4 になっており、制御開始後 15 秒後には構造物の振動がほぼ完全に抑制されていることが確認できる。図-1(b)においては、制御装置の切り替え周期がほぼ一定間隔となっているが、今回の解析では構造物が 1 次モードのみで振動しているため、制御装置の状態切り替えがローパスフィルタによって抽出された応答加速度とそれに対する基準値の大小関係のみによって行われているためと考えられる。また、図-1(c)のフーリエスペクトルについても、1 次モードのピーク値が非制御時の 1/3 程度まで減少しており、制御系の設計において観測対象とした 1 次モードの制振に極めて高い振動抑制効果を発揮していると考えられる。

5. 振動制御実験

本研究では、図-2 のような実験システムを構築し、解析結果に基づいて振動制御実験を行った。実験は解析と同様に 1 次モードの減衰自由振動に対して行い、制御時間は 30 秒間、サンプリング周波数は 100Hz であるが、制御装置の追従性を考慮して、制御装置が作動状態へ切り替わった後、0.05 秒間は通常状態に切り替わらないように設定を行った。図-3(a)は制振実験における構造物上層の応答変位、(b)は制御装置の状態変更履歴、(c)は応答変位のフーリエスペクトルである。

図-3 から、実験結果は解析結果と同様の傾向となっており、本研究の制御方式は実験においても高い振動抑制効果を確認することができた。解析と実験の相違について考察を加えると、制御装置の状態は解析結果と比較して極めて短い周期で切り替わっており、振動応答そのものはより短時間で抑制されている。これは、解析結果では 1 次の振動周期と同期して制御装置の状態が変更されていたが、実験においては制御装置の接続状態が変化の際に構造物に多少の衝撃を与え、応答加速度のハイパスフィルタ通過成分が設定した基準値を超過したため、このような小刻みな状態変更が行われたものと考えられる。さらに解析ではダンパーの粘性減衰をストロークに依らず一定としたが、ストロークが大きい場合にはより大きな減衰力が作用し、実験の応答変位は解析結果と比較してより速やかに低減されたものと推定される。

6. おわりに

本研究は、塔状構造物を制御対象として、解析および実験を通じて断面性能可変型セミアクティブ制御の有効性などについて検討を加えたものである。制御系設計に際しては、簡便な制振システムである程度の制振効果を期待できる ON-OFF 制御を採用し、GA を用いて設計変数の決定を行った。

本研究の解析および実験結果からは、制振シミュレーションおよび制振実験の双方において、構造物の 1 次固有振動モードに対して高い制振効果を確認できたことから、構造物の一部分の断面性能を 2 段階に切り替えるといった比較的簡便な手法でも、構造物の制振は十分に可能であると思われる。また、GA によって決定されたパラメータは、不確定要素がある程度含

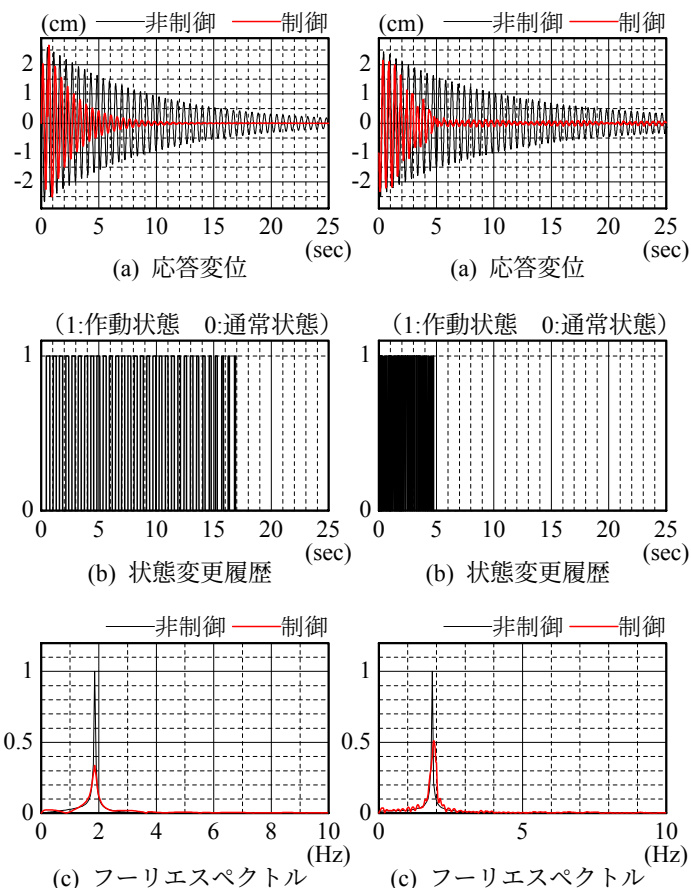


図-1 時刻歴応答解析結果

図-3 振動制御実験結果

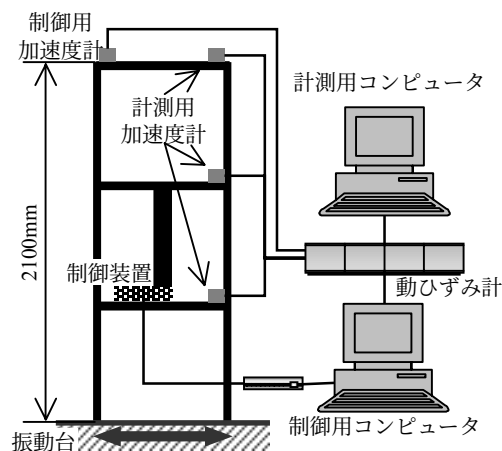


図-2 振動制御実験システム

まれる実験に適用した場合でも同等の結果が再現できたため、GA を制御系の設計に用いることは有効であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 宮森保紀, 安達一憲, 小幡卓司, 林川俊郎, 佐藤浩一, 下田和敏: 鋼製タワーにおける断面性能可変型セミアクティブ制御の適用性に関する実験的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 58 号, pp.220-223, 2002.
- 2) 小堀鐸二: 制震構造, 鹿島出版会, 1993.
- 3) 伊津野和行, 川村弘昌, 森泰樹, 小林紘士: 簡易アクティブ制御連結システムによる線状に連続する構造物の地震応答低減の試み, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.229-240, 2000.
- 4) 宮森保紀, 小幡卓司, 林川俊郎, 佐藤浩一: 可変減衰型セミアクティブ制御の橋梁構造物への適用に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.371-380, 2001.