

I-21

塔状構造物のセミアクティブ制御における制振効率について

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司
 北海道大学工学部 学生員 鈴木 隆
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 佐藤浩一
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀

1. まえがき

近年における橋梁構造物の大規模化に伴い、その施工性あるいは耐風安定性等を向上させる一手法として振動制御が着目され、吊橋、斜張橋等のタワーを中心として次第に実用化されつつある¹⁾。この振動制御においては、パッシブ、セミアクティブ(ハイブリッド)、アクティブ制御等の各種の方法が用いられているが、これらの制振特性、制御効果はそれぞれ非常に異なっていることが知られている²⁾。すなわち、パッシブ制御においては、制振装置に対する外部からのエネルギー入力、振動モニタリング等は必要としないが、制振効果はその設計時において目標とした振動数の応答に限られ、ロバスト安定性も十分ではないと思われる。一方、アクティブ制御に関しては、常に構造物の振動状態の監視が必要であること、アクチュエータ駆動のための比較的大きなエネルギー入力を要すること等、問題点も有するが、複数の振動モードの同時制振が可能であり、またロバスト安定性も大きいことから非常に効果的な制振が可能である。これら両者の特徴を兼ね備えた中間的な特性を有する制御方法が、セミアクティブあるいはハイブリッドと称されるものであるが、その実績あるいは研究はパッシブ、アクティブ方式に比較して少なく、構造物の効率的な制御を考える上でセミアクティブ方式の設計手法、制振効果を検討することは重要な課題であると考えられる。

以上を踏まえて、本研究では著者が従来より研究を加えてきた3層の塔状構造物³⁾を制御対象に、セミアクティブ方式によるフィードフォワード制御の数値解析を行って、アクティブ制御との比較検討を試みた。具体的には、上述の塔状構造物において各層の減衰を2段階に設定し、フィルタリングを用いて特定の振動数帯の応答を抽出して、その情報に応じて構造物の状態を能動的に切り替えることにより制御を行った。また、制御効果の把握には、構造物のエネルギーを計算することによって、減衰定数の変化に対する制御効果の検討を実施することとした。さらに、制振方法の相違による比較を行うために、一般的な最適制御理論を用いたAMDによるアクティブ制御を行って最大制御力とエネルギー状態の関係を把握することにより、両者の振動抑制効果、制御効率等に関する考察を試みた。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。

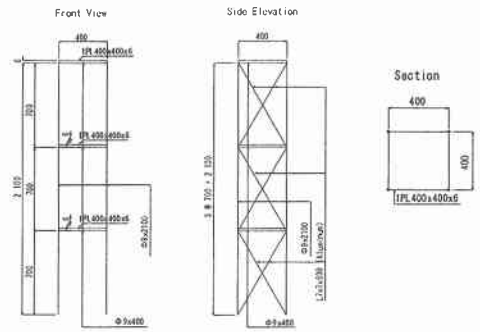


図-1 実験供試体一般図

2. 解析理論

2.1 構造物のモデル化

前述の通り、本研究で用いた制御対象は著者が従来から研究を行ってきた3層の実験供試体であり、これを3質点系にモデル化することにより解析を行った³⁾。図-1に実験供試体の一般図を、これをモデル化したものを図-2に示す。また、実験供試体の振動特性を把握するために減衰自由振動実験を行って、固有振動数、減衰定数等の測定を実施した。表-1は、解析モデルの諸定数であり、表-2は、これらの実測値である。表-2より、本供試体は比較的長周期であり、極めて小さい減衰を有する構造物であることがわかる。

2.2 フィードフォワード制御

フィードフォワード制御とは、構造物の減衰、剛性をダンパー等を用いて数種の状態に設定し、構造物の応答に応じてそれらを適切に切り替えることに

表-1 断面諸元

	質量 (kg)	剛性 (kg/cm)
上層	24.5	9248.0
中層	21.5	9348.0
下層	19.2	9248.0

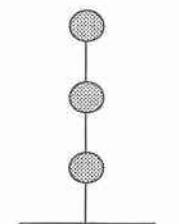


図-2 3質点系モデル

表-2 振動特性一覧表

	1st	2nd	3rd
ω (rad/sec)	8.943	26.026	37.997
F (Hz)	1.423	4.242	6.047
T (sec)	0.703	0.241	0.165
ξ (%)	0.360	0.250	0.282

Analytical Study on efficiency of Semi-active Control on toll building structures

by Takashi Obata, Takashi Suzuki, Toshiro Hayashikawa, Koichi Sato and Yasunori Miyamori

よって非共振化、高減衰化を図り、振動応答を抑制する制御方法である⁹⁾。その設計は、固有振動特性に基づいて行うことが通常であり、特別な制御系設計理論は必要としないため、比較的容易に検討が可能であることが知られている。本研究においては、ER ダンパー等の使用を想定して、各層の減衰定数を2段階に変化させる可変減衰型システムを用いたセミアクティブ制御を行うこととした。

一般に、可変減衰システムを考慮した多自由度系の運動方程式は、以下のようになる。

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

ここで M, C, K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $x(t), F(t)$ は、変位、外力ベクトルを表している。本研究では質量マトリックスに集中質量法を、減衰マトリックスにはレーレー減衰を用いている。また、 C_c は可変減衰マトリックスを表しており、この項を0から所定の値に変化させることにより制御を行うこととした。式(1)において、この C_c に関する項を右辺に移項すれば、後述の式(2)に示すような AMD 等を用いた一般的な制御力型の振動制御とほぼ同様の入出力関係となる。

次に、制御系設計に関しては、まず減衰を付加しない状態（以下、通常状態と称す）ならびに減衰を付加した状態（以下、高減衰状態と称す）において強制加振を行い、両者の振動特性の相違を把握した。図-3(a),(b)に、それらのフーリエスペクトルを示す。なお強制加振における入力地震波は、1993年1月15日に発生した釧路沖地震の千代田大橋において観測された加速度波形の最大値を100galに変換して用いている。図-3に着目すると、通常状態では2次モードの応答が比較的大きく励起されているのに対し、高減衰状態では2次モードのピークはほとんど生じていないことがわかる。よって、本研究では通常状態に関しては2次モードを、高減衰状態においては1次モードの応答をパラメータとして、それぞれハイパスフィルタおよびローパスフィルタを適用することにより、タイムステップ毎に目標としたモードの加速度応答値を抽出し、それらを監視することにより構造物を所定の状態に変更して制御を行った。本研究で適用したフィルタに関しては、比較的低い次数で良好な周波数特性を得ることができる IIR 型楕円フィルタを採用することとした⁹⁾。具体的なフィルタの設計および解析は、制御系設計 CAD ソフト MATLAB[®]を用いて行い、得られたフィルタ係数に時刻歴応答解析のタイムステップごとの応答を乗じることによりフィルタリングを行った。

2. 3 フィードバック制御

フィードバック制御理論は各種のものが知られているが、本研究では最も一般的な理論である最適制御理論を用いることとした^{3),6)}。その特徴は、数学的モデルに基づいた状態方程式で構成されること、線形の比例型制御であること、重み行列の設定によって制御効果の調整が容易に可能であること、また、ある程度のロバスト安定性を有すること等が知られている。

一般に、制御装置の重錘を駆動してその反作用により制御力を得る、いわゆる制御力型システムは以下のような運動方程式で表現することができる。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) + u(t) \cdots \cdots (2)$$

ここで M, C, K は質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $x(t), f(t), u(t)$ は、変位、外力、制御力ベクトルを表している。本研究では質量マトリックスに集中質量法を、減衰マトリックスにはレーレー減衰を採用することとした。ここで、状態ベクトルを $x_s(t) = \{x(t), \dot{x}(t)\}^T$ において式(2)を状態空間表示すると、

$$\dot{x}_s(t) = Ax_s(t) + Bu_s(t) \cdots \cdots (3)$$

$$y_s(t) = Cx_s(t) + Du_s(t) \cdots \cdots (4)$$

となる。ここで、 A, B, C, D はシステム、制御、出力、伝達の各マトリックスである。また、制御力ベクトル $u_s(t)$ は、以下の式のように状態ベクトル $x_s(t)$ とフィードバックゲイン F_s の積で表される。

$$u_s(t) = -F_s x_s(t) \cdots \cdots (5)$$

ここで、本研究では状態量を各層の応答変位および応答速度とし、また制御力の作用位置は上層のみに入力することとした。一般に最適制御理論によるレギュレータの設計法では、式(5)のフィードバックゲイン $F_s(t)$

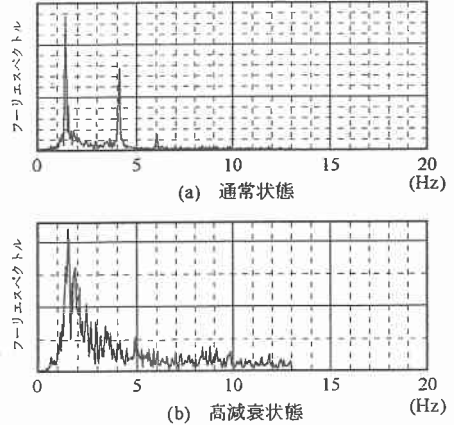


図-3 フーリエスペクトル

は式(6)に示すような評価関数が最小になるように求められる。

$$J = \sum_{t=0}^{\infty} \{ \mathbf{x}_s(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{u}_s(t)^T \mathbf{R} \mathbf{u}_s(t) \} \quad (\mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{R} > 0) \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ は状態・制御力の各ベクトルに対する重みマトリックスであり、最適制御による制振効果はこれらの設定によって大きく左右される。本研究では、式(6)の右辺第1項を構造系のエネルギー状態を表現するものとみなし、 $\mathbf{Q}$ に構造物モデルにおける各質点の質量および剛性を用いて、これを定数倍することによりフィードバックゲイン $\mathbf{F}_s$ を求めている。ここでは、これらの重みマトリックスを変化させることにより制御力の大小を設定し、その際のエネルギーを求めることによって制御効率の検討を行った。

2. 4 制御効率の検討と時刻歴応答解析

前述のように、本研究では制御方法の相違による制振効率の把握が必要となる。この制御効率の把握には、構造物のエネルギー状態を求めることにより検討を加えることを試みた。具体的には、式(1)あるいは式(2)の運動方程式における右辺に対して応答速度を乗じて、これを制御を行った時間で積分することにより、それぞれの可変減衰値あるいは制御力におけるエネルギーを求めることとした。式(7)にこの算定式を示す。

$$E = \sum_{i=1}^n (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \dots\dots\dots(7)$$

また、時刻歴応答解析に関しては、Newmark- β 法による直接数値積分法を採用し、 $\beta=1/6$ 、サンプリング周波数 100Hz として解析を行った。加振方法は、前述のとおり入力地震波を 30 秒間入力し、その間の全てのタイムステップに関して制御を行うこととした。式(7)は、この 30 秒間におけるエネルギーを計算して、制御方法等の差違による振動抑制効果あるいは制御効率の検討を行うものである。

3. 解析結果とその考察

以上の手法を用いて、本研究では塔状構造物の振動制御を行った。解析結果の一例として、図-4(a),(b) に非制御時の応答とスペクトルを、図-5(a),(b) に高減衰状態の減衰定数を 200kgf・sec/cm とした場合のセミアクティブ制御を、また図-6(a),(b)に、最大制御力が 721.3kgf の場合のアクティブ制御における結果を示す。なお、スペクトル図は、比較のため非制御時の最大値で無次元化を行った。セミアクティブ制御においては、通常状態と高減衰状態を変更する加速度応答値をそれぞれ 7gal と 70gal に設定した。これら3つを比較すると、常に応答に応じた制御力を出力するアクティブ制御が有効であることは当然であると思われるが、特別な制御理論等はないセミアクティブ方式においてもかなりの振動抑制効果が得られていることがわかる。よって、セミアクティブ制御の実構造物への適用も、十分期待できるものと思われる。

次に、図-7(a)および(b)は、可変減衰値ならびに制御力の最大値を次第に増加させた場合のエネルギーの変化を表している。図-7の横軸は、制御力型との比較を考慮して減衰定数と最大応答速度を乗ずることにより、仮想的な制御力として表現することとし、制御を行った 30 秒間における実効値を用いてグラフ化した。図-7 からは、セミアクティブ制御において可変減衰値の増大に伴い、その制振効果は明らかに向上しているものと判断でき、構造物の応答に伴いその状態を2段階程度に切り替える制御でも、ほぼアクティブ方式と同等の振動抑制効果が期待できることが判明した。近年の技術的背景からは、ER あるいはバリアブルダンパー等を用いることにより、局部的ではあるものの、部材の減衰定数を 10～50 倍程度にすることは十分可能であると考えられ、実構造物への適用の可能性も、ある程度高いものであろうことが推定される。一方、アクティブ制御に関しては制御力の増

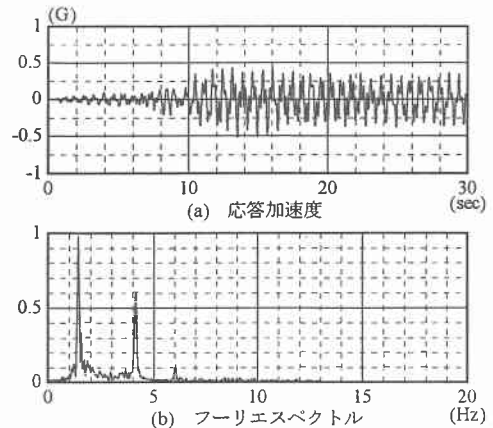


図-4 非制御時の応答

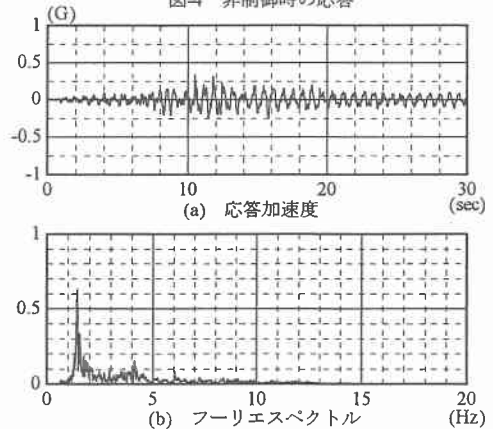


図-5 セミアクティブ制御

加に応じて振動抑制効果も大きくなっており、その増加傾向も比較的良好で、制振効率の観点から考えればセミアクティブ制御よりも若干勝る結果となっている。しかしながら、一般に AMD 等を用いた制御力型の振動制御では、構造物の 1% 程度の重錘をモーター等で駆動する場合が大半であり、制御力の最大値は機械的な制約が大きく、十分な制御力が得られるとは限らないことが知られている。加えて、アクティブ制御においては状態量の測定も極めて重要な要素であり、セミアクティブ制御よりも高精度かつ多数の測点からの応答値が必要である。したがって、これらの比較からセミアクティブ制御は、アクティブ制御に比して簡便に用いることが可能と推定され、またある程度のロバスト安定性も期待されることから、土木構造物における制振手法の一つとして極めて有効であると考えられる。

以上の解析結果より、上記のようにアクティブ、セミアクティブ制御の 2 つの制振手法とも、土木構造物には有効であると思われるが、実用性の観点から考察を加えると、アクティブ制御の場合、制振効率は極めて高いものの、高精度な状態量の測定の必要性、あるいは制振デバイスの機械的制約が非常に大きいと考えられる。したがって、このような制約条件の少ないセミアクティブ制御の方が、簡便かつ安価に土木構造物に適用できる可能性を有するものと思われ、その実用性も比較的高いものと推定できる。

4. あとがき

以上のように、本研究では吊橋等のタワーを想定した塔状構造物を制御対象に、セミアクティブならびにアクティブ制御の数値解析を実施して、両者の制振効率等の比較から土木構造物における振動制御手法に関して考察を加えたものである。

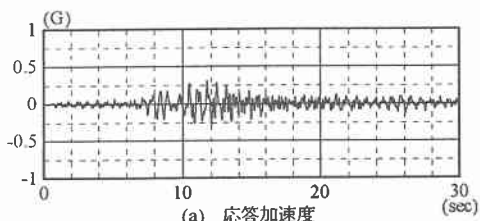
解析結果から、アクティブ制御は、タイムステップごとに構造物の振動状態を測定し、それに応じて制御力を出力することから制振効率は、当然ながら極めて高いことが判明した。一方、セミアクティブ制御においては、制振効率の観点からはアクティブ制御より若干劣るが、可変減衰値がある程度大きい場合には、その制御効果はアクティブ方式とほぼ同等となることが判明した。よって、構造物の応答に伴いその状態を 2 段階程度に切り替えるような非常に簡便な制御でも、可変減衰値あるいは切り替えのパラメータ等の十分な検討を行うことにより、かなりの振動抑制効果が期待できると思われる。

以上より、土木構造物の振動制御への適用性あるいは実用性に関して考察を加えると、アクティブ制御はその制振効率は比較的良好ではあるが、状態量の測定あるいは制振デバイスの性能等の制約が厳しいことから、目標とする効果を発揮させることは比較困難であると推定される。これに対して、複雑な制御系を必要としないセミアクティブ方式は、ダンパー等によってある程度容易に減衰を変化させることが可能と思われる、土木構造物における適用性あるいは実用化の可能性も大きいものと考えられる。したがって、本研究においては、セミアクティブ制御はアクティブ制御に比して、土木構造物の制振に有効な手法であると考えられ、その実用化等に対して十分な検討の必要があろう。

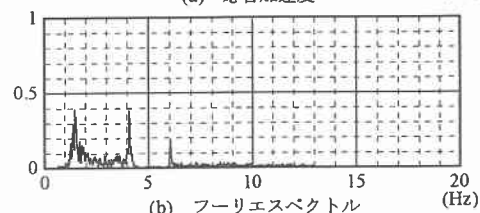
最後に、本研究の一部に平成 11 年度文部省科学研究費奨励研究(A) (代表研究者 小幡卓司、課題番号 10750359) の援助を受けたことを付記する。

【参考文献】

- 1) 辰巳正明, 秦健作, 大倉幸三, 大西悦郎: 明石海峡大橋主塔の制振対策, 第 2 回振動制御コロキウム講演論文集, PART B, pp.1-8, 1993.
- 2) 岡林隆敏: 橋梁交通振動のバッシブ制御とアクティブ制御, 橋梁交通振動コロキウム論文集, PART A, pp. 121-131, 1995.
- 3) 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.
- 4) 小堀鐸二: 制振構造, 鹿島出版会, 1993.
- 5) The Math Works Inc.: MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide, 日本電気システム株式会社, 1999.
- 6) 白石昌武: 入門現代制御理論, 啓学出版, 1987.

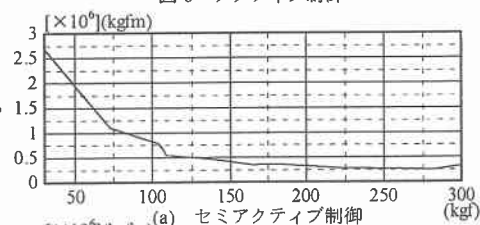


(a) 応答加速度

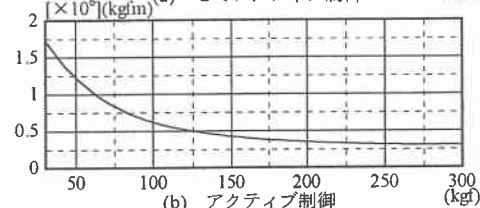


(b) フーリエスペクトル

図-6 アクティブ制御



(a) セミアクティブ制御



(b) アクティブ制御

図-7 制振効率