

セミアクティブ振動制御における可変粘性流体システムの適用性

Study on applicability of variable damping fluid system for semi-active control on infrastructures

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡 卓司 (Takashi Obata)
北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 角間 恒 (Ko Kakuma)
北見工業大学工学部土木開発工学科 正員 宮森 保紀 (Yasunori Miyamori)

1. まえがき

土木構造物に求められる要求性能には安全性、合目的性、経済性などが挙げられる。代表的な社会基盤構造物の一つである橋梁に関して言及すると、大規模地震動や交通量の増大、車両の大型化に対する安全性、あるいは耐風安定性のような不規則外力に対する振動使用性の確保など、橋梁構造物に求められる要求性能は、近年では次第に多様化する傾向にある。また、近年では、構造物の設計法に関して、性能照査型設計法への移行が進められつつあり、設計自由度の増大による新技術の導入の可能性が高まっているものと考えられる¹⁾。

このような背景から、構造物に対する振動制御は構造物の動的性能を向上させ、安全性、使用性の向上に有効であると考えられており、橋梁構造物において、風や走行荷重、地震動などの各種外力に対する動的応答性能の向上を目的とした、振動制御に関する研究が、各国において進められている。

一般に、振動制御方式はパッシブ方式とアクティブ方式に大別することができる²⁾。パッシブ方式は、ダンパーなどを用い、振動エネルギーを吸収することで振動を抑制する方法であり、比較的簡便な制御システムにより振動抑制効果が得られる反面、制御可能な振動が、制御装置の設計時に対象とした振動モードの応答のみに限られ、想定外の振動モードに対しては、その効果を期待することができない。一方、アクティブ方式は、構造物に直接制御力を作用させることにより振動を抑制するという手法である。アクティブ方式はある程度広範囲の振動数に対して有効であり、パッシブ方式と比較して、高い制振効果を得ることができる。しかしながら、アクチュエータの駆動に比較的大きなエネルギーを要するなどの問題が挙げられることから、アクティブ方式の実用化には困難な点が多いとされる。

そこで、近年では、パッシブ方式とアクティブ方式の中間的な手法として、セミアクティブ方式と呼ばれる制御手法の関する研究が進められている³⁾。セミアクティブ方式は、バリアブルダンパー⁴⁾、あるいは電場や磁場を与えることで流体の粘性が変化する ER(Electro-Rheological)流体や MR(Magneto-Rheological)流体^{5),6)}を用いたダンパーなどにより構造特性を変化させることによって振動を抑制する方法である。セミアクティブ方式は比較的高い振動抑制効果を有するとともに、直接制御力を与えないことから、構造物を加振する恐れのない安定性の高い制御システムであり、アクティブ方式と比較して、少ない駆動エネルギー

で制御装置の動作が可能であると考えられる。また、複雑な制御側を用いることなく、比較的簡便な制御側の構築が可能であると考えられる。

そこで本研究では、吊橋や斜張橋のタワーを想定した3層塔状構造物を制御対象とし、制御手法としては、各層間に設置した可変粘性流体を用いたダンパーの状態を一義的に切り替えることによる、セミアクティブ ON-OFF 制御⁷⁾によって、どの程度、動的応答性能の向上が可能であるか検討を加えることを目的とする。可変粘性流体を用いたダンパーによって構造物に付加される減衰および構造物の状態を切り替える基準となる応答加速度の設定は、これらのパラメータが相互に動的性能に影響することから、これを組み合わせ最適化問題と考え、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA)を用いて設計することとした。その際の評価関数には、解析モデルにおける各質点の応答変位の総和を用いている。

また、制振効果の比較を行うため、重錘の反作用によって制御力を得る、一般的な AMD(Active Mass Damper)の使用を想定した、最適制御理論を用いた制御力型アクティブ制御による解析も合わせて行った。

したがって、本研究はこれらの解析結果から、可変粘性流体を用いたセミアクティブ振動制御の橋梁構造物に対する適用性などを検討するものである。

2. 解析手法

2.1 制御対象構造物と時刻歴応答解析

本研究では、前述の通り吊橋や斜張橋のタワーを想定した、3層塔状構造物を制御対象として用いた。実験供試体を3質点からなる集中質量系にモデル化し、制振シミュレーションを行った⁸⁾。表-1にその諸元を示す。制振シミュレーションに先立って、固有振動解析を行い、固有振動特性を把握することとした。その結果を表-2に示す。

一般に、多自由度系の運動方程式は、式(1)のように表すことができる。

表-1 構造物諸元

	質量(kg)	剛性(N/m)
上層	21.54	9248.0
中層	21.54	9248.0
下層	18.64	9248.0

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

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ はそれぞれ質量マトリックス、レーリー減衰マトリックス、剛性マトリックスであり、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルである。レーリー減衰マトリックスにおける1次および2次の減衰定数には実測値を用いることとし、1次 0.36%、2次 0.25%とした。また、時刻歴応答解析にはニューマークβ法による直接数値積分法を採用し、時間刻みは 0.01sec、係数βは 1/6 とした。

2.2 可変減衰型セミアクティブ制御

本研究は、構造物に入力される不規則外力に対して、各層間に設置した可変粘性流体を用いたダンパーを用いて各層の粘性減衰を必要に応じて増減させ、セミアクティブ制御を行うものである。

一般に、可変減衰型制御システムの運動方程式は可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ を用いて、式(2)のように表現することができる⁴⁾。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_v)\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \cdots \cdots (2)$$

可変減衰型制御システムは、式(2)における $\mathbf{C}_v$ を随時変化させることで、制振を図るものである。MR 流体などでは、理論的には任意の磁気や電圧を与えることで必要な減衰力を連続的に得ることが可能ではあるが、圧縮側と引張側での減衰力は異なり、また、特に MR 流体では必要とされる磁気を電力供給のコントロールで操作する必要があり、可変減衰量を任意の値に即座に設定することは、容易なことではない。ただし、可変減衰値を最小値と最大値に変化させることは、供給する磁気・電力等をゼロ、または最大値に変化させるだけで、非常に簡単に行うことが可能である。

そこで本研究では、可変粘性流体の特性を考慮した簡便な制御を行うため、構造物の応答に応じて減衰の付加を一義的に行う ON-OFF 制御を採用することとした。このような手法は構造物の固有振動特性に基づいて制御則を構築するのが一般的であり、制御システムの設計を比較的容易に行うことが可能であると考えられる。

制御装置の ON と OFF の切り替えは、制御対象において卓越しやすい1次および2次モードに着目することとし、解析モデルの上層で得られた応答加速度に対して、1次モードの振動数成分を通過させるローパスフィルタ、2次モードの振動数成分を通過させるハイパスフィルタを用いてそれぞれ抽出し、その絶対値に応じて制御装置をコントロールすることとした。本研究で用いたフィルタは、比較的低いフィルタ次数でもカットオフ特性が良好な IIR 型楕円フィルタであり、フィルタ係数に時刻歴応答解析におけるタイムステップ毎の応答加速度を乗じることによりフィルタリングを行った。

表-2 固有振動数

振動モード	1 次	2 次	3 次
固有振動数(Hz)	1.524	4.220	5.995

表-3 解空間

	min	max
可変減衰係数 C_v (Nsec/m)	0	358.3
状態変更値 a_1 (m/sec ²)	0	2.5
状態変更値 a_2 (m/sec ²)	0	1.0

表-4 GA 結果

C_v (Nsec/m)	a_1 (m/sec ²)	a_2 (m/sec ²)
358.3	0.066	0.044

2.3 遺伝的アルゴリズムの適用

本研究で用いるような手法により構造物の制御を行う場合、構造物に付加する減衰および構造物の状態の切り替えを行う応答量の設定が制振効果に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、それらを GA によって決定した。GA は選択、交叉、突然変異といった生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、工学的分野における GA の応用は非常に有効であることが知られている。

一般に、GA の適用に際しては、最適化変数のコード化および評価関数の設定が重要となる。本研究では表-3 のように解空間を設定し、それぞれをビット長 10 の 2 進数にコード化することで遺伝子列を表現し、一様乱数を用いて各個体について 3 組の遺伝子列を持つ初期集団を発生させた。なお、可変減衰装置には MR ダンパーを用いることを想定した解空間を設定した⁹⁾。また、適応度の評価関数には、以下のような関数を用いることとした。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{3000} \left(\sum_{n=1}^3 |\mathbf{x}_n| \right)_i \cdots \cdots (3)$$

式(3)は制御開始から終了までの各質点における応答変位の総和を表し、式(3)の値が小さいほど適応度が高いと評価することとなる。

具体的な計算過程は、選択にはルーレット戦略を、交叉には 2 点交叉を用い、突然変異には固定された確率で任意の遺伝子列が変化する方法を用いた¹⁰⁾。初期集団は 100 個体、交叉率は 50%、突然変異率は 3%とした。また、各個体の適応度を評価するため、各個体に対して時刻歴応答解析を行い、評価関数の値を求めた。なお、入力外力には 1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震の際に千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度を 50gal に変換して用いている。入力時間は 30sec とし、加振と同時に制御を

開始して 30sec 経過した際の式(3)の値から適応度の評価を行った。また収束判定は、ある世代における全個体の評価関数の値が、全て同一となった場合に収束したと判断することとした。表-4 に GA の結果を示す。

2.4 制御力型アクティブ制御

本研究では、制振効果の比較のため、最適制御理論を用いた制御力型アクティブ制御を行った。制御力型システムの運動方程式は制御力ベクトル $\mathbf{u}(t)$ を用いて、式(4)のように表現できる

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) + \mathbf{u}(t) \quad \cdot \cdot (4)$$

ここで、状態ベクトルを $\mathbf{x}_s(t) = \{\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t)\}^T$ とおくと、制御力ベクトルは状態ベクトルとフィードバックゲインの積で次のように表される。

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}_s \mathbf{x}_s(t) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

一般に最適制御理論では、式(6)に示す評価関数が最小となるようにフィードバックゲインを求める。

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

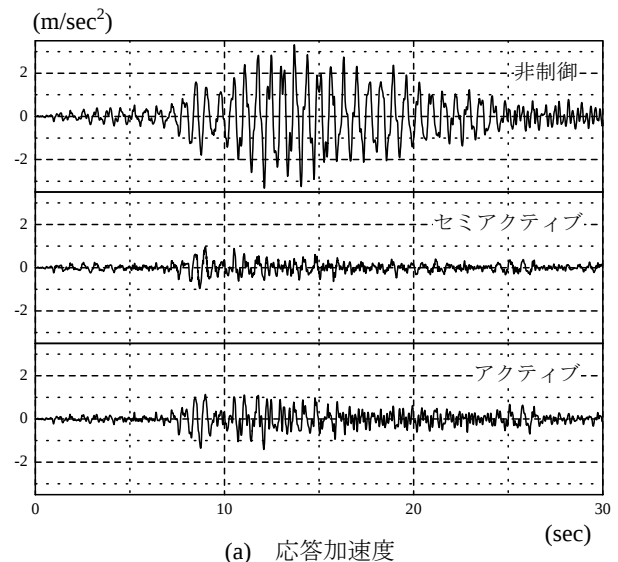
また、式(6)における $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ はそれぞれ状態ベクトル、制御力ベクトルに対する重みマトリックスである。本研究では、 $\mathbf{R}$ は単位行列とし、 $\mathbf{Q}$ は式(6)の右辺第 1 項が構造系のエネルギー状態を表現するものとみなし、解析モデルの各質点の質量および剛性を定数倍して用いることにより、フィードバックゲインを決定した。なお、ここでは重錘の重量は構造物重量の約 2% とし、この重錘に対し加速度で 500gal 程度の制御力を発生させることのできるアクチュエータを使用するものと想定して、最大制御力が約 6N となるよう $\mathbf{F}_s$ を設定した。

3. 解析結果とその考察

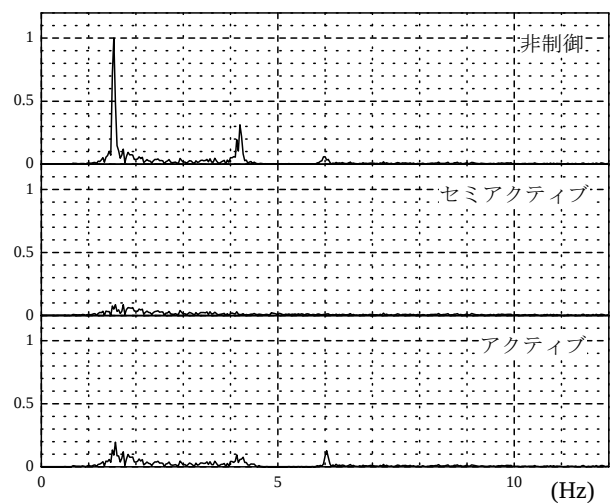
以上を踏まえて、解析モデルに対してセミアクティブおよびアクティブ制御シミュレーションを行った。図-2 に、解析モデル上層における応答加速度、そのフーリエスペクトル、セミアクティブ制御における状態変更履歴、ならびにアクティブ制御における制御力履歴をそれぞれ示す。また、表-4 は各解析における応答加速度最大値および応答加速度実効値である。

図-2(a)の応答加速度波形から、セミアクティブ制御、アクティブ制御は非制御時と比較して、両者とも有効な制振効果を発揮していると思われる。

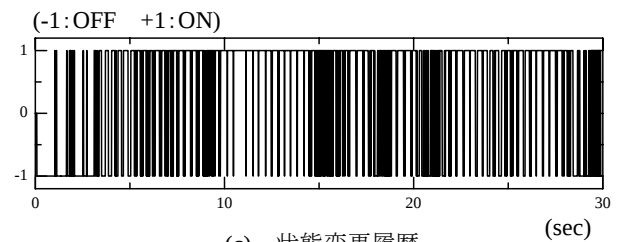
セミアクティブ制御による制振効果について考察を加えると、主要動が到達する約 7sec までは、制御則にお



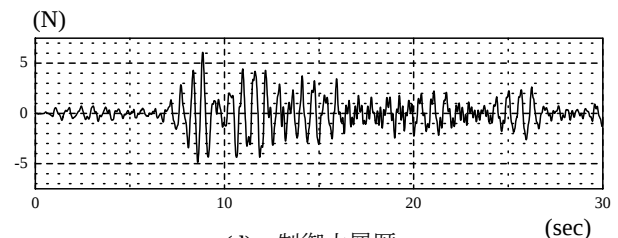
(a) 応答加速度



(b) フーリエスペクトル



(c) 状態変更履歴



(d) 制御力履歴

図-2 解析結果

表-5 応答量(m/sec²)

	最大値	実効値
非制御	3.32	0.93
セミアクティブ制御	0.97	0.21
アクティブ制御	1.41	0.33

る ON の閾値を超える頻度が少ないセミアクティブ制御は、構造物に応答が生じるとほぼ同時に制御が開始されるアクティブ制御と比して、制振効果は低い、その後は制御時間全体を通してアクティブ制御を上回る高い制振効果を発揮していることがわかる。また、表-4 から、最大応答加速度は非制御時の約 29%まで、実効値は約 17%まで低減されており、応答に応じて構造物の状態を一義的に切り替えるという比較的簡便な制御系であっても、十分な制振効果を期待できると思われる。

さらに、図-2 (b)に示すフーリエスペクトルに着目すると、1 次および 2 次モードに対しては、セミアクティブ、アクティブとも非制御時と比較してピーク値が大きく低減されており、高い制振効果を有していると思われる。一方、3 次モードに関しては、アクティブ制御の場合、非制御時と同等程度のピークが生じているのに対し、セミアクティブ制御では明確なピークは認められず、3 次モードの振動も抑制されていることがわかる。このことから、本研究におけるセミアクティブ制御では、複数の卓越モードを有する制御系にも振動抑制効果を発揮することが可能であると思われる。

以上の解析より、可変粘性流体を用いたセミアクティブ ON-OFF 制御でも、アクティブ制御を上回る制振効果が得られることが判明した。また、MR ダンパーなどを用いることにより、構造物の減衰を直接的に大きくすることが可能であり、複数の振動モードに対する制振効果も期待出来るため、本研究の手法は橋梁をはじめとする社会基盤構造物の制御に関して、高い有効性あるいは適用性を有しているものと考えられる。

4. あとがき

以上のように、本研究では、3 層塔状構造物を制御対象とし、各層間に設置した可変粘性流体を用いたダンパーの状態を一義的に切り替えることによる、セミアクティブ ON-OFF 制御によって、どの程度の動的応答性能の向上が可能であるか、その制振効果を評価することによって、社会基盤構造物に対する有効性等を検討したものである。

解析結果から、構造物の応答加速度に応じて可変粘性流体の状態を一義的に変化させるという比較的簡便な制御

手法であっても、構造物全体の振動を抑制できることが確認された。最適制御理論によって、制御系設計法が確立されているアクティブ制御に対しても、同等以上の制振効果を発揮したと考えられることから、MR ダンパー等を用いたセミアクティブ ON-OFF 制御は、社会基盤構造物の動的性能の向上に有効な手法であると考えられる。

また、可変粘性流体では理論上は任意の減衰力を得ることが出来るため、例えば ON-MIDDLE-OFF のような 3 状態による制御システムの構築も、GA における制御系パラメータの設定を工夫することにより設計可能と推定され、このような制御系への可変粘性流体の適用は、極めて効果的であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 堺孝司：性能照査型設計法の行方、橋梁と基礎、97-8, pp.73-83,1997.
- 2) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 3) T. T. Soong : Basic Concepts and Applications of Active Structural Vibration Control, Proceedings of International Conference on Advanced Problems in Vibration Theory and Applications, pp.1-9, 2000.
- 4) 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、土木学会論集、第 501 号/I-29, pp.143-152, 1994.
- 5) 日高尚志、森下信：ER 流体を用いた可変減衰型動吸振器による適応的制振システム、日本機械学会論文集 (C 編)、65 巻 638 号、pp.110-116, 1999.
- 6) 土屋高志、森下信、安永供、阿部裕子：MR 流体を用いた可変減衰マウントによる振動制御、日本機械学会論文集(C 編)、65 巻 640 号、pp.83-88, 1999.
- 7) 伊津野和行、川村弘晶、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上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.
- 8) 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に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A, pp.685-692, 1997.
- 9) Anat Ruangrassamee, Kazuhiko Kawashima : Experimental Study on Semi-Active Control of Bridges with Use of Magnetorheological Damper, Journal of Structural Engineering Vol.47A, 2001.
- 10) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.