

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の効率化について

A Study on Efficiency of Semi-Active Variable Damping Vibration Control on Cable Structures

北海道大学大学院工学研究科 ○学 生 員 宮 森 保 紀 (Miyamori Yasunori)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小 幡 卓 司 (Obata Takashi)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林 川 俊 郎 (Hayashikawa Toshiro)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐 藤 浩 一 (Sato Koichi)

1. まえがき

土木構造物の設計法においては、安全性や使用性などの構造物に要求される性能を、個々の構造物に応じて規定する性能照査型設計法の導入が進みつつあり、今後、設計自由度の増大により新技術の適用も容易になるものと推測される¹⁾。橋梁構造物に関しては構造形式の多様化が進み、特に人道橋などのスレンダーな構造を有する場合には、大規模地震動に対する安全性の確保に加えて、振動使用性の確保についても十分な検討がなされなければならない²⁾。これらの安全性あるいは振動使用性を確保・向上させるために、構造物に何らかのデバイスを設置して振動を抑制する振動制御の研究が、近年盛んに進められている。特に最近では、センサやマイクロプロセッサの大幅な性能向上に加え、少ない駆動エネルギーで動作が可能な制御装置の開発が進み、橋梁構造物などの比較的大型な構造物への適用可能性も高まりつつある。

近年では、実構造物への適用可能性が比較的高い制振手法としてセミアクティブ制御と称される方法の研究が進められている³⁾。セミアクティブ制御の代表的な例としては、バリアブルダンパー⁴⁻⁶⁾や機能性流体^{7, 8)}を用いたダンパーなどの可変減衰機構を有する装置を構造物に設置して減衰を付加し、振動を抑制しようとする方法が知られている。この手法はAMDを適用したアクティブ制振などと比較して、少ない駆動エネルギーで制御装置を動作させることが可能であり、構造物に直接制御力を入力しないことから、構造物を加振するおそれがない安定性の高い制振手法と考えられている³⁾。また、制御則の構築に関しても、アクティブ制御を適用する場合には制御理論に関する比較的高度な知識が要求されるのに対して、セミアクティブ方式は複雑な制御理論を用いることなく、構造物の応答量の大小に応じて制御装置への出力を切り替えることのみによっても制御を行うことが可能であり、比較的容易に制振システムを構築することができると考えられる。

このように、セミアクティブ方式を用いた制振システムは、簡便で安定性の高い制御を実現できる可能性を有しているが、その振動抑制効果は制御系の設計手法に大きく左右される。したがって、十分な制振効果を有する制御系を構築するためには各種のパラメータを適切に設定することが必要であるが、この種の制振システムの設計手法は未だに確立されていないのが現状である。このような場合、これらの設計変数の設定について何らかの最適化手法を導入すれば、比較的簡便に適切な制振効果を有する制御システムを構築することが可能になると思われる。そのためには、制御による振動抑制効果を適切に評価することが極めて重要である。アクティブ方式あるいはセミアクティブ方式による振動制御は、制御装置に外部からエネルギーを供給することによって構造物の振動を抑制していると考えられることから⁹⁾、一般に行われているような構造物の動的応答量の大小関係についての評価に加えて、外力による入力エネルギーと構造物の運動、ひずみあるいは減衰エネルギーとの関係を把握しておくことも重要であると考えられる。

これらを踏まえて、本研究は吊床版橋やキャットウォークを想定したケーブル構造物の鉛直振動を制御対象とし、構造物に設置した可変減衰型制御装置のON-OFF制御¹⁰⁾によるセミアクティブ制振シミュレーションを実施する。具体的な制御手法としては、構造物における低次モードの応答加速度を観測し、こ

れが一定の基準値を超過した場合に制御装置を作動させて、構造物に減衰を付加して制振を行うこととした¹¹⁾。したがって、この基準値と可変減衰装置の粘性減衰の設定が制御効果に極めて大きな影響を与えると考えられるが、本研究ではこれらの値の設定を組み合わせて最適化問題として扱い、このような問題に適用可能な最適化手法として知られる遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)を用いて制御則を構築した¹²⁾。GAに用いる目的関数としては、構造物の運動、ひずみ、減衰エネルギーを算出し、制御によってこれらがどの程度低減されるかを評価することとした¹³⁾。また、低次モードの応答加速度に着目して制御を行うため、構造物の応答から低次モードの振動数成分を抽出する必要があるが、これには着目した振動数成分を通過させるようなデジタルフィルタを適用して、応答加速度をフィルタリングする。なお、振動制御シミュレーションは強制振動について実施することとし、ニューマークβ法を用いた直接数値積分法によって時刻歴応答解析を行う。また、本研究では制振効果の比較のために、ファジィ制御理論を適用したアクティブ剛性型方式による制振シミュレーションも同時に実施した¹⁴⁾。

以上より本研究は、可変減衰型セミアクティブ制御の橋梁構造物への適用性、制振システムの設計方法およびその制振効果に対する評価方法を検討することを目的として振動制御シミュレーションを実施し、その結果を報告するものである。

2. 解析手法

2.1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では、制御対象として吊床版橋やキャットウォークを想定した、写真-1に示すようなケーブル構造を有する実験供試

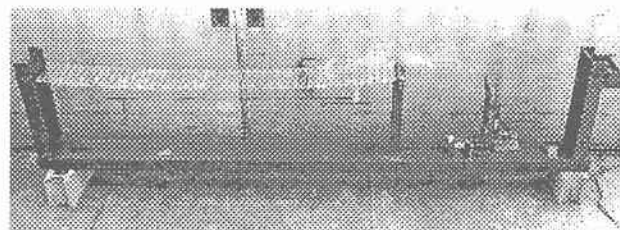


写真-1 実験供試体

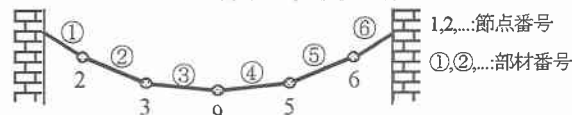


図-1 解析モデル

表-1 固有振動特性

	1st	2nd	3rd	4th	5th
固有振動数 (Hz)	4.38	5.18	6.83	8.83	11.1
固有周期 (sec)	0.23	0.19	0.15	0.11	0.09
有効質量率 (%)	1.13	73.0	25.3	0.11	0.45

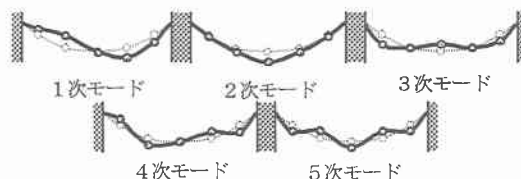


図-2 モード形状

体を製作し、その断面諸元、支間長などのデータを用いて解析を行った。実験供試体の主な諸元は、支間長 1.995m、幅員 0.2m、サグ 0.06m、初期張力 137.2N である。この実験供試体について、図-1 のような 2 次元多自由度系の解析モデルを構築した。制振シミュレーションに先立ち、構造物の固有振動特性を把握するために減衰自由振動実験および固有振動解析を実施した。表-1 にこれから得られた振動特性の一覧を示す。各振動モードのモード形状は図-2 のとおりである。表-1 および図-2 から、制御対象における各振動モードの固有振動数は比較的近接していることから、ケーブル構造物特有の振動特性を示しており、また 2 次モードが最も卓越しやすいことが確認された。

時刻歴応答解析については、一般に多自由度系の運動方程式を式(1)のように表現する。

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

ここで $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ および $\mathbf{f}(t)$ 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り、レーリー減衰マトリックスにおける減衰定数は実測値を用いることとし、1 次 0.10%、2 次 0.12% とした。時刻歴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、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 、係数βは 1/4 とし解析を行った。

2.2 可変減衰型セミアクティブ制御

可変減衰型制振システムを導入した場合の多自由度系の運動方程式は、式(1)に可変減衰装置の粘性減衰を用いた可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ を導入して以下のように表される⁹⁾。

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

可変減衰型制御は式(2)における可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ を構造物の応答に応じて変化させることによって振動を制御しようとするものであるが、本研究においてはアクティブ制御で用いられるような複雑な制御理論を用いることなく制振を行うことを目的として、構造物に減衰を付加した場合と、減衰を付加しない場合の 2 つの状態を設定し、構造物の応答に応じてこれらの状態を切り替える ON-OFF 制御を行うこととした¹⁰⁾。

本研究においては固有振動解析の結果、最も卓越しやすいと考えられる 2 次モードの応答に着目して減衰の切り替えを行うこととし、支間中央点における応答加速度から 2 次モードを含む振動数成分を抽出し、これが設定した基準値を超過した場合に減衰を付加して制振を行うこととした。応答加速度から対象とする振動モードの応答を抽出するためには、ローパスフィルタを用いたフィルタリングを実施する。また、可変減衰の導入位置については、固有振動解析におけるモード形状と予備的に行った制振シミュレーションの結果に基づいて、図-3 において部材番号②で示した部材の鉛直方向に可変減衰を導入して振動制御を行うこととした¹¹⁾。なお本研究において、具体的なフィルタの設計および時刻歴応答解析などの数値解析は汎用数値解析プログラム MATLAB を用いている。

2.3 遺伝的アルゴリズムの適用

本研究で用いる可変減衰型制御システムにおいては、構造物に付加する減衰の大きさと、構造物の状態変更を行う際の基準値の設定が制振効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、これらの変数の最適値を同時に求める方法は確立されておらず、経験的に決定されている例が多い。このように解の決定方法は必ずしも明確ではないものの、得られた解に対する評価が可能な問題に対しては、GA の適用による最適解の探索は非常に有効であると考えられる。よって本研究においては、可変減衰装置の粘性減衰および状態変更の基準値の設計に GA を適用することで、これらの値を効率的かつ簡便に設定することを試みた。

GA の適用に際しては、最適化を行う変数のコード化および評価関数の設定が重要な問題となる。コード化については、可変減衰装置の減衰係数 c_v 、ローパスフィルタ適用後の構造物の応答加速度に対する状態変更の基準値 a を最適解の探索対象とし

て、2 変数からなる解空間を設定した。これらの変数を 10 ビットの 2 進数にコード化することで、GA における各々の遺伝子列を表現することとし、一様乱数を用いて各個体について 2 組の遺伝子列を有する初期集団を発生させた。

各個体の適応度を評価するための目的関数は、構造物のエネルギーに着目して、以下のような関数を設定した¹³⁾。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^n (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \cdots \cdots (3)$$

ここで、式(3)における右辺第 1 項は構造物の運動エネルギーを、第 2 項は減衰エネルギーを、第 3 項はひずみエネルギーを表しており、これらを制御開始から制御終了までの時間で積分することにより、制御によって構造物の各エネルギーの総和がどの程度低減されるかを算出することとした。したがって、式(3)における J_{GA} の値をより小さくする個体が、より有効な制振効果を有する変数の組み合わせであると評価することができる。

GA によ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、突然変異に関しては 2 進数で表現されている各遺伝子列に対し、所定の突然変異率に基づいて各遺伝子座に対して操作を加える方法を採用した¹⁵⁾。なお、初期集団は 100 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.05 とし、全個体の遺伝子列が同一の値に収束するまで計算を繰り返すこととした。各個体の適応度を評価するためには、時刻歴応答解析による制振シミュレーションをそれぞれに対して実施することにより、個々の適応度を算出した。GA による設計変数の最適化に際して用いた入力外力としては、1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震において、千代田大橋で観測された鉛直方向の加速度波形(最大 70.04gal)を用い、その最大加速度を 100gal に変換して、解析モデルの鉛直方向に入力した。強制外力の入力時間は 30 秒間とし、入力と同時に制御を開始してこの 30 秒間における目的関数の値を求め、適応度の評価を行った。

以上のような方法によって得られたセミアクティブ制御における各変数の最適解は $c_v = 33.5 (\text{Nsec/m})$ 、 $a = 0.16 (\text{m/sec}^2)$ となり、これらの値に基づいて制御系を設計し、制振シミュレーションを実施する。

2.4 アクティブ剛性型制御

アクティブ方式による振動制御は、何らかの制御理論を用いることによって、観測された構造物の状態量から最適な制御装置の出力を決定するために、一般にその制振効果は高いと考えられる¹⁶⁾。アクティブ制御を実現するには適用すべき制御理論に関する比較的高度な専門知識が必要となるが、その設計手法はすでに確立されているものが多い。本研究では、ケーブル張力を直接変化させることによって、構造物の剛性を変化させて制振を行うアクティブ剛性型制御を適用することとした。制御理論としては、非線形性を有するシステムに適用可能な論理型

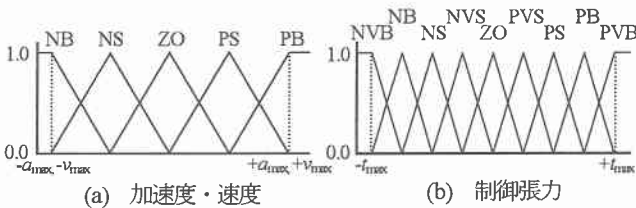


図-3 メンバーシップ関数

表-2 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	ZO	PB	PVB
NS	NB	NS	ZO	PS	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	PVB	PB	ZO	NB	NVB

NVB: Negative Very Big, NB: Negative Big, NS: Negative Small, NVS: Negative Very Small, ZO: Zero, PVS: Positive Very Small, PS: Positive Small, PB: Positive Big, PVB: Positive Very Big

制御理論であるファジィ制御理論を採用した¹⁴⁾。
 アクティブ剛性型制振システムの運動方程式は式(4)のように与えられる⁹⁾。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \{\mathbf{K} + \mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L}\} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \cdots (4)$$

式(4)の左辺において、 $\mathbf{V}(t)$ はアクティブ剛性マトリックス、 $\mathbf{L}$ はアクティブ剛性配置マトリックスである。本研究ではこのアクティブ剛性マトリックスを算出するためにファジィ制御理論を適用したが、ファジィ制御を行うためには制御則を構成する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となる。本研究では構造物の各節点の応答速度、応答加速度および制御張力をパラメータとして、前件部 2 変数、後件部 1 変数からなる 25 規則の規則群を設定した。図-3 に本研究で用いたメンバーシップ関数、表-2 に規則表を示す。なおファジィ制御理論の適用に際しては、メンバーシップ関数の最大値の設定が制振効果に大きな影響を及ぼすと考えられるが、この最適化に関しても GA を用いた¹⁴⁾。GA による解析結果から、加速度および速度のメンバーシップ関数の最大値は $a_{\max}=0.40\text{m/sec}^2$ 、 $v_{\max}=0.13\text{m/sec}$ となり、これらの値を用いてメンバーシップ関数を構築した。また、一般に制御対象が複数の振動モードを有する場合、ファジィ制御理論においては同一の制御則で複数の振動モードの同時制振は比較的困難であると考えられている。そこで制御張力の算出に際して、解析モデルの全節点において個別に制御張力を算出し、その中で最大のものを出力することとして、各タイムステップにおける卓越モードの情報を反映させることとした。

3. 制振シミュレーション結果とその考察

以上の解析手法によって、ケーブル構造物モデルに対するセミアクティブおよびアクティブ制振シミュレーションを実施した。解析は強制振動について行うこととし、制御系の設計に用いた釧路沖地震の千代田大橋における観測波に加え、異なる入力外力が作用した場合における制振特性の差異を把握するために、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震における JR 鷹取駅における観測波の UD (最大 289.72gal) 成分について最大

加速度をそれぞれ 100gal に変換して用いた。なお、強制外力の入力時間は 30 秒間であり、強制外力の入力と同時に制御を開始するものとした。釧路沖地震観測波を入力した場合を図-4 に、兵庫県南部地震観測波を入力した場合を図-5 に示す。各図において(a)は支間中央点の応答加速度、(b)はそのフーリエスペクトル、(c)は制御装置の状態変更履歴、(d)はアクティブ剛性型制御における制御張力の履歴である。なお、アクティブ剛性型制御においては、実験供試体における制御装置のストロークを考慮して最大制御張力を 30.4N とした。表-3 は非制御時および各制御手法を適用して時刻歴応答解析を行った際に、式(3)によって算出された全制御時間での構造物のひずみ、減衰、運動エネルギーの総和 (以下、応答エネルギーと称する) である。

図4、図5の応答加速度波形からは、セミアクティブおよびアクティブ制御のどちらの制御手法を適用した場合でも、非制御時と比較して構造物の応答が大きく抑制されているが、特にセミアクティブ制御を適用した場合の制振効果が優れていることがわかる。これらのフーリエスペクトルに関して検討を行うと、非制御時の応答が比較的大きい 2 次モードおよび 3 次モードのピークに関してはいずれの制御手法を用いた場合でも、ピーク値が非制御時と比較して大幅に低減されており、極めて高い制振効果を発揮していると考えられる。また、セミアクティブ制御を適用した場合の 2 次モードに関しては、卓越振動数が変化しており、制御対象の構造特性の変化によって非共振化がなされていることが確認できる。アクティブ制御においては 5 次モードの応答が非制御時と比較して増大しているが、本研究では出力する制御張力の決定にあたって、節点毎に制御張力を算出し、その中で最大のものを制御装置の出力としており、このため相対的に応答が大きな 2 次モードに対して主に制御が行われ、

表-3 各制御手法における応答エネルギー (Nm)

制御手法	釧路沖地震	兵庫県南部地震
非制御	7.05	7.09
セミアクティブ	0.53	0.42
アクティブ	1.00	0.83

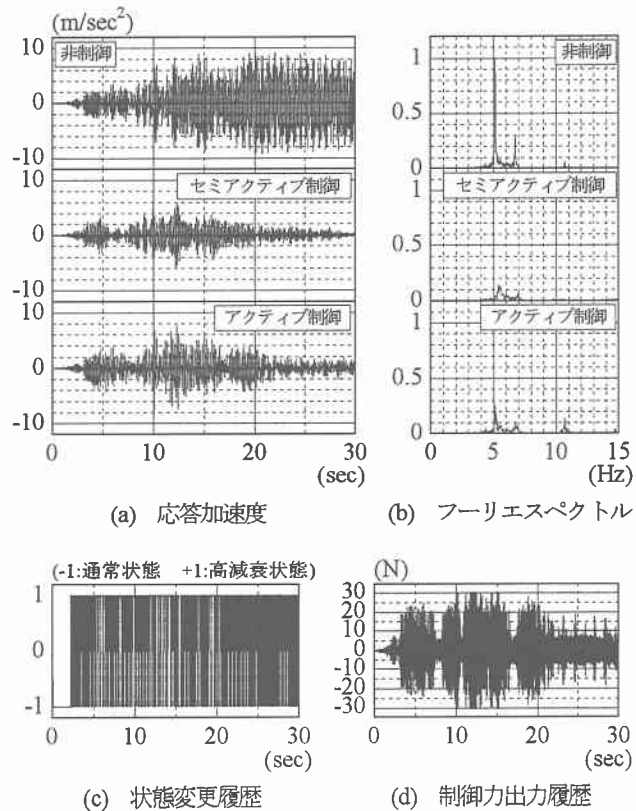


図-4 解析結果 (釧路沖地震)

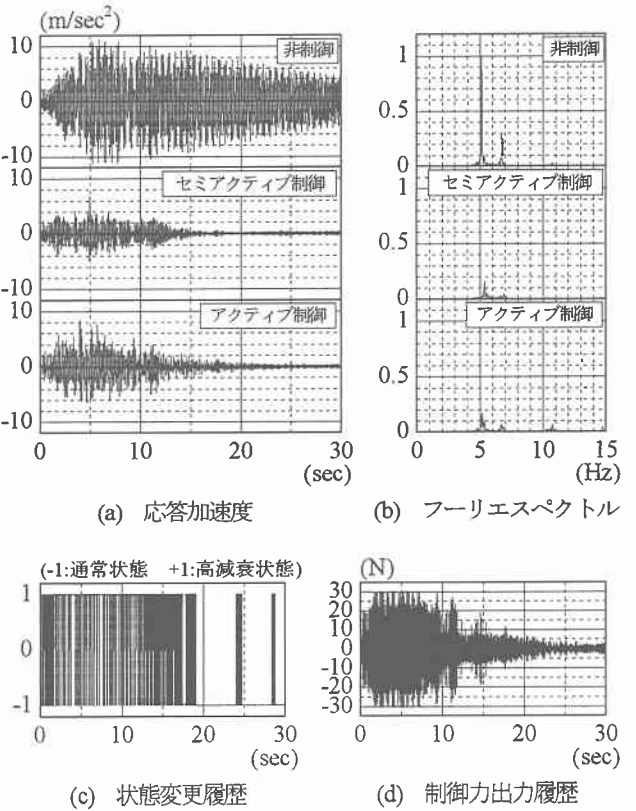


図-5 解析結果 (兵庫県南部地震)

比較的応答が小さい5次モードに対しては若干加振するような制御力が作用したものと考えられる。一方、セミアクティブ制御においては一部の部材に与えた可変減衰が構造物全体に対して大きな効果を発揮し、最も卓越する2次モードの応答のみに着目して制御を行ったにも関わらず、すべての振動モードに対して高い振動抑制効果を得ることが可能となったものと推定される。さらに、表3における応答エネルギーに着目すると、釧路沖地震と兵庫県南部地震のいずれの入力加速度に対しても、セミアクティブ制御では非制御時の応答エネルギーの概ね 1/15 に、アクティブ制御に関しては 1/7 以下程度に低減されており、本研究で用いたようなセミアクティブ制御は優れた制振効果を発揮していることが応答エネルギーの面からも確認できる。

以上の結果から、本研究で用いたセミアクティブ制御手法は、比較的簡便な制振システムで、アクティブ制振と同等以上の制振効果を有すると思われる結果が得られた。また、制御対象とした振動モードが2次モードのみであったにも関わらず、他の振動モードを加振するような現象が生じず、制御系の設計時に想定していない他の振動モードについても制振効果が得られ、ロバスト安定性も良好な制御手法であると思われる。

4. あとがき

本研究は比較的簡便な制御システムを用いたセミアクティブ制御の橋梁構造物への適用性を検討することを目的に、吊床版橋あるいはキャットウォークなどのケーブル構造を有する構造物の鉛直振動を制御対象として、可変減衰型セミアクティブ制御による制振シミュレーションを実施し、アクティブ制御との比較によってその振動抑制効果および制振特性に関して考察を加えたものである。また、GA を適用することによって、簡便かつ効率的に、高い制振効果を有する制御系の設計手法の確立に關しても、合わせて検討を試みた。

解析結果から、本研究で用いたセミアクティブ制御は構造物に与える減衰の ON-OFF を切り替えるのみの簡便な制御則でも、十分な振動抑制効果を有する制振システムが構築可能であることが判明した。また、制御対象に部分的に減衰を付加することによっても、構造物全体の振動を抑制することが可能であることが明らかになった。本研究で用いたセミアクティブ制御は、2次モードの卓越状況に応じて制御を行ったものであるが、構造物に減衰を付加することで、直接制御力を作用させることなく、全ての振動モードに対して、安定して高い制振効果を発揮することが可能であることも確認された。セミアクティブ制振システムの設計に関しては、構造物に付加する粘性減衰の大きさと、構造物の状態変更を行う際の応答加速度の設定に GA を適用したが、GA によって設定された制振システムは良好な制振効果が得られ、このような制御系の設計に際して GA を汎用的に用いることが可能であると思われる。これらの制振効果を評価する手法としては、本研究のように構造物のエネルギー量に着目することにより、非制御時および制御時の比較によって振動抑制効果を数値的に把握することができ、応答加速度やフーリエスペクトルの大小関係とも整合性を有していることから、制御効果を総合的に評価するための一手法として有効であると判断できる。

さらに、入力外力の違いによる制振特性の差異に言及すれば、本研究における2つの地震波の鉛直成分を用いた解析の結果、いずれの場合においてもセミアクティブ制御によって構造物の振動が大幅に抑制された。したがって、入力外力の振動数成分が比較的広い範囲に分布し、継続的に構造物を加振するような場合には可変減衰型セミアクティブ制御はアクティブ制御と同等以上の制御効果を発揮することが可能であることが確認され、その制御系設計手法にもある程度の汎用性を有するものと考えられる。

以上を踏まえて、セミアクティブ制御の橋梁構造物への適用性に関して考察を加えれば、構造物の状態量の測定や制振デバ

イスの駆動に要するエネルギーの制約が比較的少なく、制振システムをより簡便に構築することが可能なセミアクティブ制御の適用性あるいは実用性などはアクティブ制御と比較して高いと思われる。また、可変減衰型システムによって構造物の一部の減衰性能を変化させることで、構造物全体の制振が可能であると考えられる結果が得られたことから、この種の制御装置を橋梁の桁端部や桁の一部に取り付けることによって、橋梁全体の制振が可能になり、一般の橋梁構造物などにおいても構造物の安全性や振動使用性の向上を比較的容易かつ経済的に実現しうる可能性を有しているものと推定される。しかしながら今回の解析では、ある程度長時間ランダムに構造物を加振する地震波の入力のみで制振効果を検討したものである。したがって、例えば風荷重、あるいは人間の歩行外力のように、より周期性の高い入力に対してもその振動抑制効果を把握する必要があるものと考えられる。

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) 日本鋼構造協会編：これからの歩道橋 付・人にやさしい歩道橋計画設計指針、技報堂出版、1998.
- 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) 家村浩和、五十嵐晃、中田成智：連結構造物のバリアブルダンパーによる最適震動制御に関する研究、構造工学論文集、Vol. 46A, pp.575-582, 2000.
- 5) 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、第 501 号/I-29, pp.143-152, 1994.
- 6) 佐藤忠信、土岐憲三、佐藤誠：可変減衰装置の開発と減衰力の制御システムの構築、土木学会論文集、No.570/I-40, pp.203-215, 1997.
- 7) 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.
- 8) 山崎智之、大島俊之、三上修一、当麻庄司、松本正信、藤村浩：ER 流体によるインテリジェント振動減衰装置の開発、土木学会北海道支部論文報告集、第 55 号(A), pp.202-205, 1999.
- 9) 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.
- 10) 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.
- 11) 宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、鈴木隆：可変減衰型セミアクティブ制御によるケーブル構造物の動的挙動、鋼構造年次論文報告集、第 8 巻、pp.103-108, 2000.
- 12) 杉本博之、鹿汗麗、山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 13) 宮森保紀、小幡卓司、鈴木隆、林川俊郎、佐藤浩一：GA を用いたセミアクティブ振動制御の効率化に関する研究、第 2 回日本制震 (振) シンポジウム、pp.393-398, 2000.
- 14) 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.
- 15) L.デービス編、嘉数侑昇、三上貞芳、皆川雅章、川上敬、高取則彦、鈴木恵二共訳：遺伝アルゴリズムハンドブック、森北出版、1994.
- 16) 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.