

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

A consideration of applicability to semi-active variable damping control on bridge structures

宮森 保紀*, 小幡 卓司**, 林川 俊郎***, 佐藤 浩一****

Yasunori MIYAMORI, Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

- * 工修 北海道大学大学院博士後期課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 ** 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 *** 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 **** 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Vibration control is effective method to improve safety and serviceability on bridge structures. Recently, advanced control methods such as hybrid system and semi-active system are investigated. Semi-active control system restrains vibration of structures by additional damping or stiffness, and this system can be driven by small power.

In this study, semi-active vibration control analyses are performed on a cable structure model and a steel tower model by using variable damping system. Since it is difficult to design semi-active control rules by human experience, control systems are optimized by using Genetic Algorithm (GA) from response energy of structural model. From analytical results, semi-active control system has good control effects for forced excitation. In consideration of practical use, semi-active control system has suitable applicability for vibration control on bridge structures.

Key Words: bridge structures, semi-active control, variable damping system, genetic algorithm

キーワード: 橋梁構造物, セミアクティブ制御, 可変減衰型システム, 遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

一般に、公共構造物の設計に際して考慮すべき項目として、安全性、合目的性、経済性などが重要であることは周知の事実である¹⁾。1995 年に発生した兵庫県南部地震の被害を教訓として、新設・既存の構造物を問わず安全性の向上が求められており、設計基準や示方書の改訂も進みつつある。これら構造物の設計法は、従来は専ら部材の断面や強度を増大させることによって行われてきたが、このような手法では設計における自由度を著しく阻害し、時には設計そのものが不可能となることがしばしば見受けられる。近年においては、要求される安全性および合目的性などをバランス良く満たすような性能照査型設計法の導入が考慮されており、設計自由度の増大に伴う各種新技術の導入も、設計における選択肢として採用される可能性が高まっているものと思われる²⁾。

このような背景から、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は、安全性などの向上に極めて有効であると考えられるが、土木構造物においては、制御対象が大規模で十分な制御力を得ることが難しく、制御装置の設置スペース、装置そのもののメンテナンス、あるいは駆動に要する電力などの確保も問題となることから、特にアクティブ制御の実用化はこれまで比較的困難であり、実構造物への適用は吊橋や斜張橋の主塔に

AMD(Active Mass Damper)の設置を行った例などに限定されていた³⁾。しかしながら、近年のセンサやマイクロプロセッサの大幅な性能向上と、少ない駆動エネルギーで動作が可能な制御装置の開発の進展から、振動制御の適用可能な範囲は拡大しつつある。よって、一般の道路橋や人道橋などの中小支間の橋梁においても、安全性あるいは使用性を高めるための一手法としてこのような振動制御手法について広く適用性を検討することは重要であると考えられる。

近年では、適用可能性の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^{4) 5)}。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^{6) 7)}や機能性流体^{8) 9)}を用いたダンパーなどの可変減衰機構を有する減衰装置を構造物に設置して、この装置の粘性減衰を変化させることによって構造物に減衰を与え、振動を抑制しようとする方法が知られている¹⁰⁾。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御手法と考えられている¹¹⁾。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必要とされるのに対して、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、アクティブ制御と比較して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設計上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。能動的な振動制御手法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¹²⁾、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、本研究は鋼製タワーを想定した3層の塔状構造物の水平振動、および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、これらの構造物に設置した可変減衰型制御装置のON-OFF制御¹³⁾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、構造物に可変減衰を付加して制振を行うこととした¹⁴⁾。したがって、この基準値と可変減衰装置の減衰係数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。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¹⁴⁾。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ローパスフィルタあるいはハイパス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、アクティブ方式による制振シミュレーションも同時に実施した。具体的な方法としては、塔状構造物についてはAMDの適用を想定した制御力型アクティブ制御を、ケーブル構造物については構造物のケーブル剛性を直接変化させるアクティブ剛性型制御を行う^{15,16)}。アクティブ制御を用い

る場合には適用する制御理論が重要であるが、塔状構造物の制振においては最適制御理論を、ケーブル構造物にはファジィ制御理論を適用した。

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、前述の各解析モデルに対する制振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、吊橋や斜張橋の鋼製タワーおよび吊床版橋やキャットウォークを想定して、著者らが従来から実験、解析を行ってきた3層塔状構造物ならびにケーブル構造を有する実験供試体について、それぞれの断面諸元、支間長などのデータを用いて解析モデルを構築し、制振シミュレーションを行った^{16,17)}。

3層塔状構造物については、実験供試体を3質点からなる集中質量系にモデル化し解析を行うこととした¹⁷⁾。図-1にこの実験供試体の一般図を、図-2および表-1に解析に用いた解析モデルとその諸元を示す。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-2にこれらから得られた振動特性の一覧を示す。

ケーブル構造物に関しては表-3の諸元を有する写真-1のような実験供試体を製作した¹⁶⁾。この実験供試体については整合質量法を用い、図-3のような2次元多自由度系の

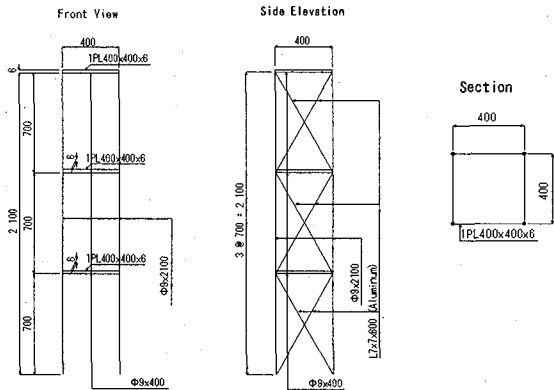


図-1 塔状構造物一般図

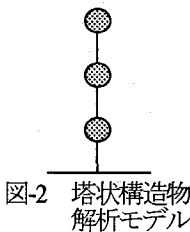


図-2 塔状構造物解析モデル

表-1 塔状構造物諸元

	質量 (kg)	剛性 (N/m)
上層	24.5	94367.3
中層	21.5	94367.3
下層	19.2	94367.3

表-2 塔状構造物固有振動特性

	1st	2nd	3rd
固有振動数 (Hz)	1.42	4.14	6.05
固有周期 (sec)	0.70	0.24	0.17

解析モデルを構築した。塔状構造物と同様にして得られた振動特性と各振動モードのモード形状は表4 および図4のとおりである。表4 および図4 から、この構造物の各振動モードの固有振動数は比較的近接しており、ケーブル構造物特有の振動特性を示すとともに、対称形状を有する2次モードが最も卓越しやすいことが確認された。

次に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 $\mathbf{f}(t)$ はそれぞれ質量マトリックス、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、本研究では減衰マトリックスにレーリー減衰を用いた。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、塔状構造物については1次 0.36%、2次 0.25%、ケーブル構造物については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は塔状構造物については1/6、ケーブル構造物については1/4として解析を行った。

2. 2 可変減衰型セミアクティブ制御

セミアクティブ方式による振動制御は、一般に構造物に設置した制振デバイスによって、構造物の剛性や減衰などの断面性能を変化させることで、振動を抑制しようとするものである。このため、制御系の対象外である振動モードの発現によって、スピルオーバーが生じるおそれのない安定性に優れた手法であり、同時に制御系の設計に関しても、アクティブ方式において求められるような複雑な制御理論を用いずに、比較的簡便な制御則の構築が可能と考えられている。セミアクティブ方式による具体的な制御手法としては、バリアブルダンパーなどを用いて制御装置の粘性減衰を変化させることによって制振を行う、可変減衰型システムなどが知られており、本研究でもこれを用いることとした。

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現できる⁶⁾。

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

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御系の設計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¹³⁾。このような制御手法は、構造物の固有振動特性に基づいて行うことが通常であり、比較的容易に制御システムの構築が可能である。

本研究においては構造物における1次あるいは2次と

表-3 ケーブル構造物諸元

支間長	1955mm	初期張力	137.2N
サグ	60mm	単位重量	17.5N/m

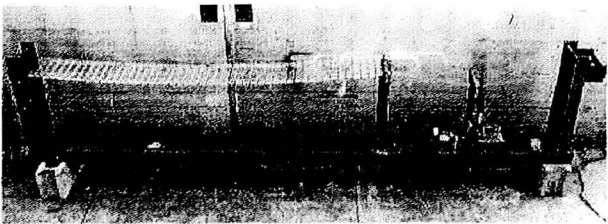


写真-1 ケーブル構造物

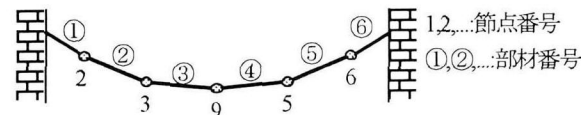


図-3 ケーブル構造物解析モデル

表-4 ケーブル構造物固有振動特性

	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

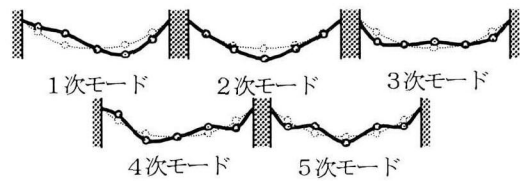


図-4 ケーブル構造物モード形状

いった比較的低次の振動モードの卓越状況に着目して減衰の切り替えを行うこととし、構造物の応答加速度から着目する振動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¹⁴⁾。応答加速度から低次の振動モードの応答を抽出するためには、ローパスあるいはハイパスフィルタによってフィルタリングを実施する。採用し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とされる IIR 型楕円フィルタであり、各フィルタの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って、フィルタリングを行う。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 を用いた。

以上のような制振システムを塔状構造物あるいはケーブル構造物に適用して振動制御シミュレーションを実施するが、塔状構造物に関しては各層間に粘性ダンパーを介した連結装置を搭載し、その連結状態を変更することによって可変減衰の付加を切り替えるような制振システムを想定する。具体的な設計手法としては、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）に制御対象の状態を固定し、時刻歴応答解析によって両者の振動特性を把握した。

この際の入力外力としては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波形（最大243.76gal）を用い、その最大加速度を100galに変換して、解析モデルの各層の水平方向に入力した。図-5(a)に入力した加速度波形を示す。

図-6(a),(b)は、上述の時刻歴応答解析によって得られた通常状態および高減衰状態における解析モデル上層の応答加速度のフーリエスペクトルである。図-6から2次モードが通常状態では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。したがって、塔状構造物では通常状態に関しては2次モードを、高減衰状態に関しては1次モードの応答を観測することとし、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ようなローパスフィルタおよび2次モードの振動数成分を通過させるようなハイパスフィルタを適用して、目標とする各振動モードの加速度応答値を抽出した。この抽出された加速度応答値をそれぞれ設定された状態変更の基準値と比較し、その結果に基づいて構造物の状態を変更し制御を行うこととした。

一方、ケーブル構造物については、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¹⁸⁾。ケーブル構造物においても、塔状構造物の場合と同様にして制御則を構築することとし、通常状態と高減衰状態の両者について振動特性の比較を行った。ケーブル構造物については鉛直振動を制御対象とするため、釧路沖地震の際の千代田大橋における鉛直方向の観測波形（最大70.04gal）について、塔状構造物と同様に最大加速度を100galに変換して入力した。図-5(b)は入力した加速度波形である。図-7(a),(b)に示す支間中央点の応答加速度のフーリエスペクトルからは、塔状構造物の場合と比較して、最も卓越しやすい2次モードのピーク値が突出しており、他の振動モードの卓越状況はあまり明瞭ではない。このため、ケーブル構造物においては2次モードの応答のみを監視し、支間中央点で得られた応答加速度に対して、2次モードの振動数成分を通過させるようなローパスフィルタを適用することとした。したがって構造物の状態の切り替えはこの抽出された2次モードを含む加速度応答値に対して、状態変更の基準値を比較することによって構造物の状態を変更して制振を行うものである。

2. 3 遺伝的アルゴリズムの適用

本研究で用いたような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決める方法は確立されておらず、経験的な手法によって行われる例が多い。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検索は非常に

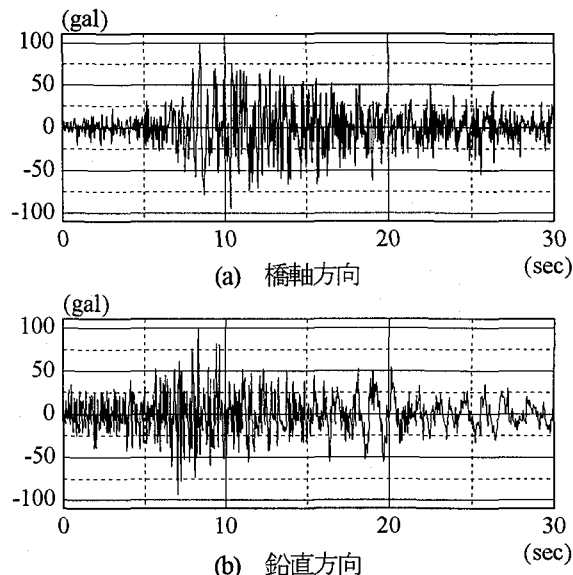


図-5 入力加速度波形（釧路沖地震）

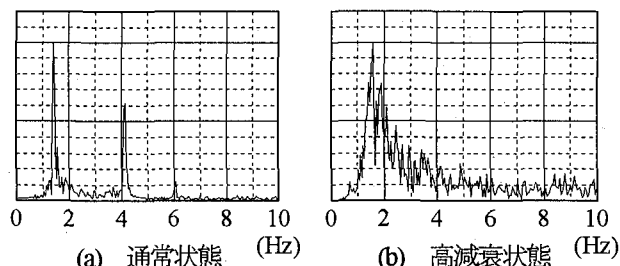


図-6 塔状構造物のフーリエスペクトル

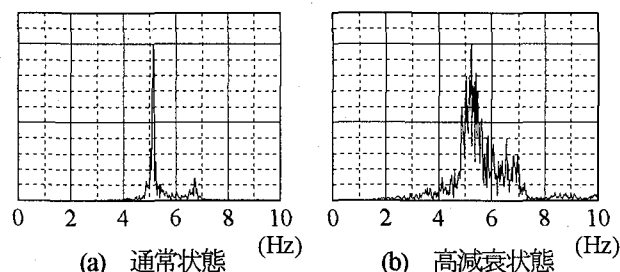


図-7 ケーブル構造物のフーリエスペクトル

有効であると考えられる。また、GAは解くべき問題について、対象となる変数のコード化と評価関数の設定が可能であれば、問題の種類に関わらずそのアルゴリズムは汎用的に適用することができ、比較的簡便な方法で最適解の検索を行うことが可能である。よって本研究においては、可変減衰装置の減衰係数および状態変更の基準値の決定に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^{19),20)}。

前述のように、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_d 、ローパスあるいはハイパスフィルタによるフィルタリング後の構造物の応答加速度に対する状態変更の基準値 a_1 , a_2 を最適解の検索対象として、塔状構造物については3変数、ケーブル構造物については c_d および a_1 の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それぞれ3組あるいは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量に着目して、以下のような関数を設定した¹⁴⁾。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^{3000} (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \cdots \cdots (3)$$

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^{21), 22)}。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各個体に対して実施し、それぞれについて適応度を算出した。

GAによる解析で用いた入力外力としては、前述と同様の釧路沖地震における地震波を用い、塔状構造物に関しては水平方向、ケーブル構造物に関しては鉛直方向に強制外力を入力した。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を表-5に示し、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。

2. 4 アクティブ制御

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²³⁾。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、セミアクティブ制御に対する制振効果の比較のため、塔状構造物については既に多くの研究例が知られている最適制御理論を用い、重錘を駆動してその反作用によって制御力を得る制御力型アクティブ制御を行った^{17), 24)}。ケーブル構造物においてはファジィ制御理論を適用して、ケーブル張力を直接変化させることによって制御するアクティブ剛性型制御を行う^{15), 16)}。

まず塔状構造物に関して、制御力型システムにおける運動方程式は以下の式で表される。

表-5 GA解析結果

解析モデル	可変減衰係数	状態変更基準値	
	c_v (Nsec/m)	a_1 (m/sec ²)	a_2 (m/sec ²)
塔状構造物	1094.8	0.32	2.03
ケーブル構造物	33.5	0.16	—

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

ここで $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{f}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ は、変位、外力、制御力ベクトルを表している。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 $\mathbf{u}_s(t)$ は状態ベクトル $\mathbf{x}_s(t)$ とフィードバックゲイン $\mathbf{F}_s$ の積で次式のように表される。

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

本研究では状態量を塔状構造物における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おける式(5)のフィードバックゲインは、以下に示す評価関数が最小の値となるように求められる。

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

式(6)において、 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ ($\mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{R} > 0$) 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、最適制御の制振効果はこれらの値の設定に大きく依存する。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定数倍して用いることにより、フィードバックゲイン $\mathbf{F}_s$ を求めている。なお、セミアクティブ制御との比較のため、 $\mathbf{F}_s$ は式(3)における構造物のエネルギーがセミアクティブ制御を行った場合とほぼ等価となるように設定した。

次にケーブル構造物においては、制振装置の設置スペースなどの問題から制御力型システムの適用が困難と考えられる。したがって、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制御理論であるファジィ制御理論を用いることとした¹⁶⁾。

アクティブ剛性型制振システムの運動方程式は式(7)のように与えられる¹²⁾

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \{\mathbf{K} + \mathbf{L}^T \mathbf{V}(t) \mathbf{L}\} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \cdots \cdots (7)$$

式(7)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規則の推論規則群を設定した。図-8に本研究で用いたメンバーシップ関数、表-6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¹⁶⁾。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 $a_{max}=0.40m/sec^2$ 、 $v_{max}=0.13m/sec$ 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。

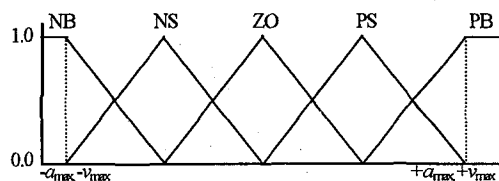
3. 時刻歴応答解析結果とその考察

3. 1 解析ケース

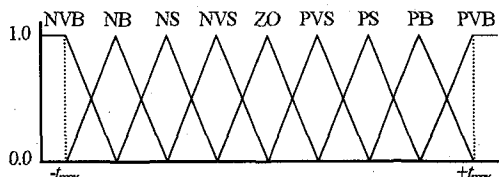
以上の解析手法によって、塔状構造物モデルならびにケーブル構造物モデルに対してセミアクティブおよびアクティブ制振シミュレーションを実施した。解析は強制振動について行うこととし、制御系の設計に用いた釧路沖地震の千代田大橋における観測波に加え、入力外力の振動性状が異なった場合における制振特性の差異を把握するために、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震におけるJR 鷹取駅における観測波のEW（最大664.20gal）成分およびUD（最大289.72gal）成分について最大加速度をそれぞれ100galに変換して用いた。図-9に入力した加速度波形を示す。塔状構造物については橋軸あるいはEW方向の加速度波形を解析モデルの水平方向に入力し、ケーブル構造物については鉛直方向の加速度波形によって鉛直振動の制御を行うものとする。制御手法としては、セミアクティブ制御については双方の構造物モデルにおいて可変減衰型システムを適用したが、アクティブ制御に関しては前述のとおり、塔状構造物については制御力型システムを、ケーブル構造物についてはアクティブ剛性型システムを用いた。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。表-7に本研究で行った振動制御シミュレーションの解析ケースをまとめる。

3. 2 塔状構造物の制振シミュレーション

塔状構造物における時刻歴応答解析結果の一例として、釧路沖地震における観測波を入力した場合を図-10に、兵庫県南部地震の観測波を用いた場合を図-11に示す。各図において(a)は解析モデル上層の応答加速度、(b)はそのフーリエスペクトル、(c)はセミアクティブ制御における状態変更履歴、(d)はアクティブ制御の制御力出力履歴であり、フーリエスペクトルについては比較のために非制御時の最大値で無次元化を行っている。また、表-8に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における構造物のひずみエネルギー、減衰エネルギー、運動エネルギーの総和



(a) 加速度・速度のメンバーシップ関数



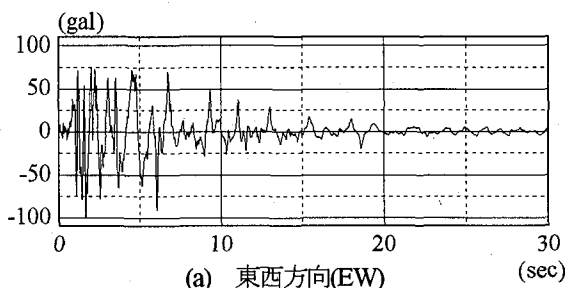
(b) 制御張力のメンバーシップ関数

図-8 メンバーシップ関数

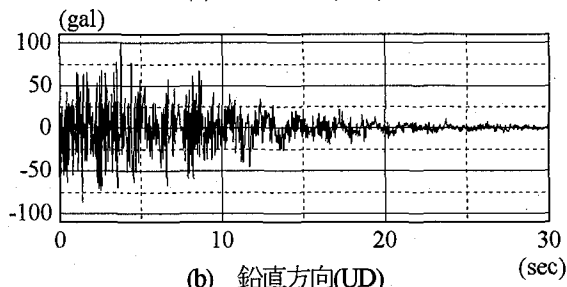
表-6 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	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



(a) 東西方向(EW)



(b) 鉛直方向(UD)

図-9 入力加速度波形（兵庫県南部地震）

表-7 時刻歴応答解析ケース

	解析モデル	
	塔状構造物	ケーブル構造物
入力地震波	釧路沖地震 (橋軸方向)	釧路沖地震 (鉛直方向)
	兵庫県南部地震 (東西方向)	兵庫県南部地震 (鉛直方向)
セミアクティブ制御	可変減衰型	
アクティブ制御	制御力型	アクティブ 剛性型

(以下、応答エネルギーと称する)を示す。

図-10の応答加速度波形から、セミアクティブ制御およびアクティブ制御は非制御時の応答波形と比較して、ともに良好な制振効果を発揮していると思われる。両者の制振過程の差異についても検討を加えると、構造物の応答に応じて時々刻々と最適な制御力を算出するアクティブ制御については、制振シミュレーションの開始とほぼ同時に制御が開始され、制御時間全体を通して比較的高い制振効果が得られている。一方、構造物の低次モードの卓越状況に応じて制御対象に付加する減衰の切り替えを行ったセミアクティブ制御については、構造物の応答が増大する10sec以降から可変減衰が付加されて構造物の応答が大きく低減されており、その最大応答加速度はアクティブ制御を適用した場合を下回っていることが確認できる。セミアクティブ制御においては、構造物の応答値が設定した基準値を超過しない制御開始後約10秒間と、減衰の付加によって応答が低減され制御装置がOFF状態になっている23秒付近においては、減衰の付加による制御が行われず応答加速度が増大しているが、解析時間全体にわたって構造物の応答加速度が一定レベル以内に抑制されており、特別な制御理論を用いずに構造物に付加する減衰を切り替えるのみで制御を行った場合でも十分な制振効果を期待できるものと考えられる。

さらに図-10(b)に示すフーリエスペクトルにおいては、1次モードおよび2次モードに関してはいずれの制御手法を用いた場合でも高い振動抑制効果が得られているが、3次モードに対してはアクティブ制御の制振効果はほとんど発揮されていない。アクティブ制御に関しては、すべてのモードに有効な重みマトリックス Q, R を経験的に設定することは困難であり、その設定は応答が最も卓越する1次モードを主に抑制するように行われたため、3次モードの制振効果が低下したものと考えられる。一方で、可変減衰型システムを適用したセミアクティブ制御では、各層の減衰係数を変化させることで構造物全体に減衰を付加することとなり、構造物の振動モードに関わらず有効な制振効果が得られたものと思われる。

次に、兵庫県南部地震における観測波を入力外力として解析を行ったが、図-9(a)に示す入力波形は主要動の継続時間が比較的小く、1Hz以下の振動数成分が卓越しているという特徴を有している。図-11に示す解析結果は、釧路沖地震の観測波を入力した場合とほぼ同様の傾向を示しており、おおむね良好

表-8 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	284.47	107.50
セミアクティブ	21.68	13.35
アクティブ	30.05	10.73

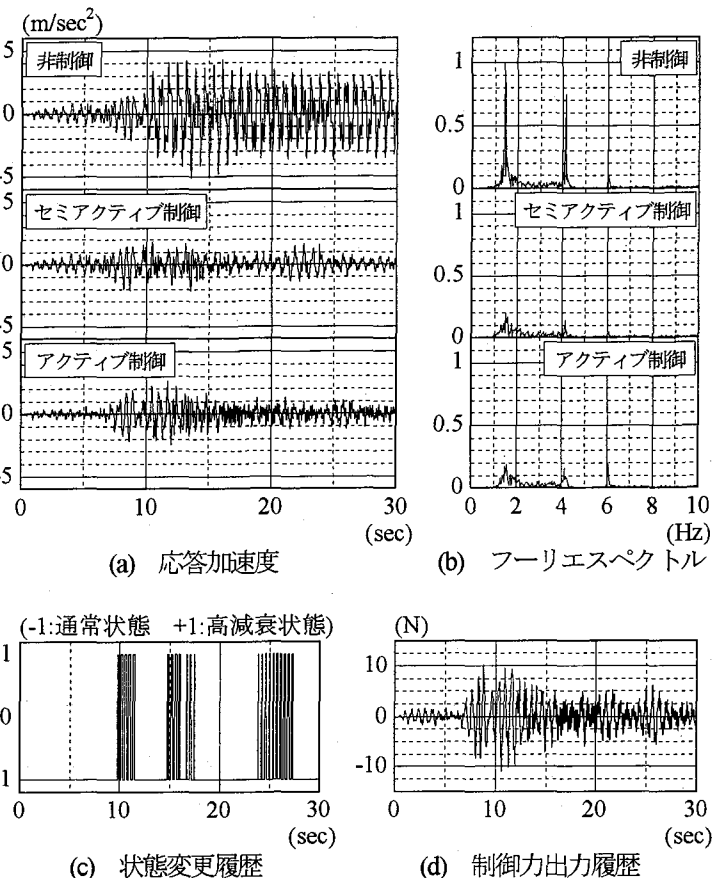


図-10 解析結果 (塔状構造物・釧路沖地震)

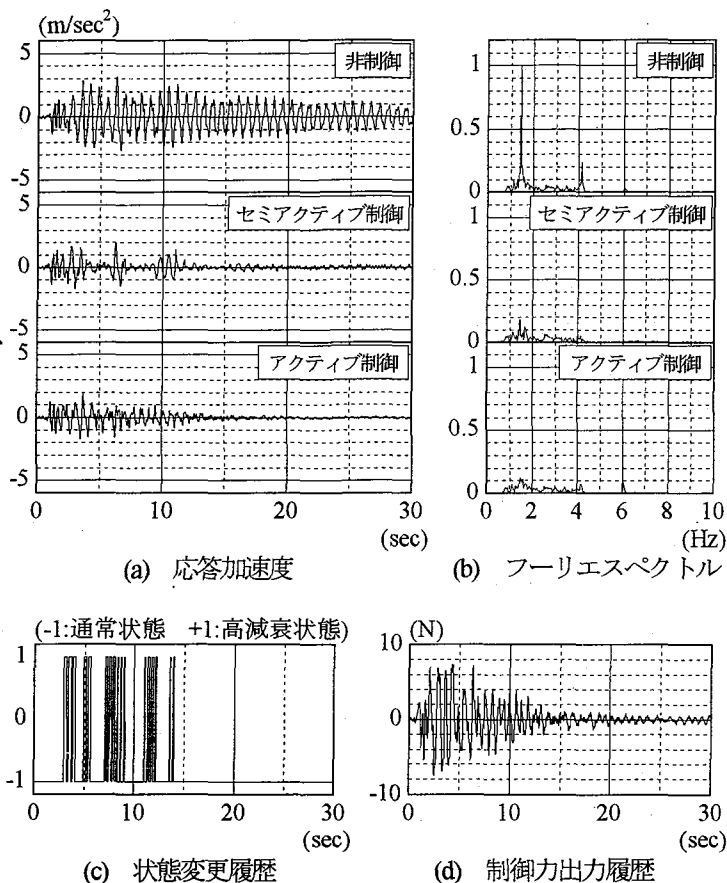


図-11 解析結果 (塔状構造物・兵庫県南部地震)

な制振効果が発揮されているものと考えられる。解析結果についてさらに詳細な検討を加えると、セミアクティブ制御を適用した場合の応答加速度において、制御開始後約6secおよび約9secで応答加速度が一時的に増大していることが確認できる。これは、制御によって振動が一旦抑制されて制御装置の状態がOFFになった状態で、再度大きな加速度入力が入力したためと推定され、このように構造物に大きな起振力が作用する場合には、高減衰状態をより長い時間維持するように制御則を調整することで対応が可能であると考えられる。

さらに表-8に示す各解析ケースにおける応答エネルギーに着目すると、まず非制御時においては、釧路沖地震を用いて解析を行った場合のエネルギー量が兵庫県南部地震の観測波を用いた場合の2.5倍以上となっている。本研究においては入力加速度の最大値を100galに調整しており、主要動継続時間がより長かった釧路沖地震を用いた場合の方が、制御時間全体での入力エネルギーが大きくなったためと考えられる。制御による応答エネルギーの低減については、セミアクティブ制御を適用した場合、釧路沖地震観測波に対しては非制御時の約1/13、兵庫県南部地震観測波に対しては約1/8に低減されており、釧路沖地震のように地震動が比較的長時間継続するような振動に対して特に制振効果が高いことがわかる。アクティブ制御に関してはいずれの入力加速度についても応答エネルギーが非制御時のおおむね1/10程度に低減されており、入力外力の振動特性によって両制御手法の制振効果には若干の相違が生じることが確認された。

以上より、セミアクティブ方式による振動制御は、アクティブ方式とほぼ同等の制振効果を有するものと考えられる。しかしながら、本研究の解析においては、アクティブ制御における最大制御力が約10Nとなっており、制御対象の規模を考慮するとかなり大きな制御力を構造物に作用させる必要がある。一方、セミアクティブ制御において制御装置に設定した粘性減衰は、既存のオイルダンパーなどを用いることによっても十分に実現可能な値と考えられる。これより、制御装置と構造物の接続状態を変更することのみで制御を行うセミアクティブ方式は、重錘を駆動させることによって構造物に制御力を直接作用させるようなアクティブ方式に比して、制御装置の駆動エネルギーを大幅に低減することが可能になると推定され、本研究で採用したようなセミアクティブ制御の実用上の優位性は高いものと思われる。

3.3 ケーブル構造物の制振シミュレーション

ケーブル構造物における鉛直振動の制振シミュレーション結果として、釧路沖地震観測波の鉛直成分を入力した場合を図-12に、兵庫県南部地震観測

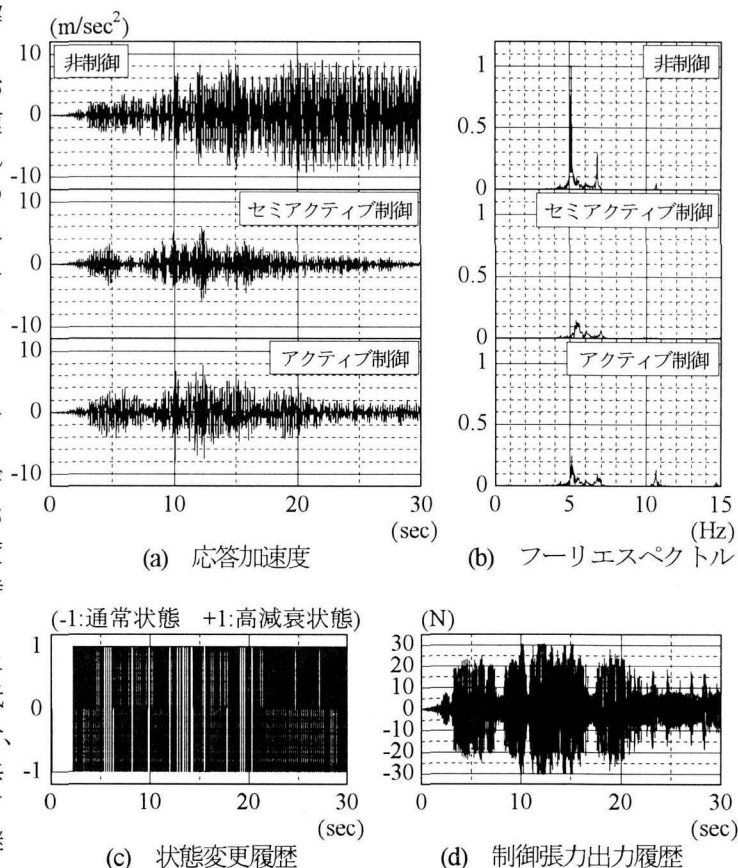


図-12 解析結果（ケーブル構造物・釧路沖地震）

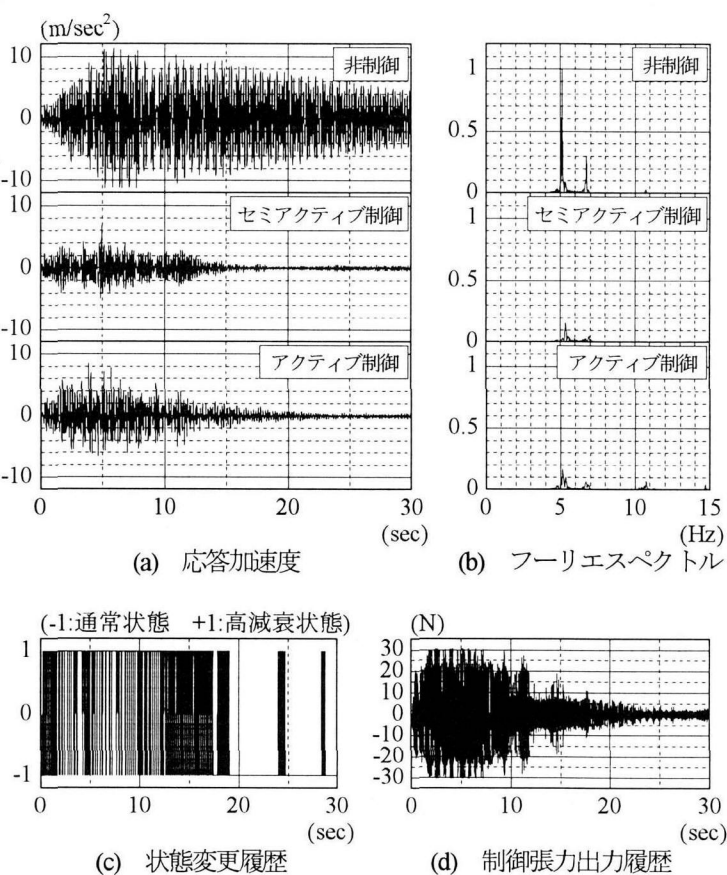


図-13 解析結果（ケーブル構造物・兵庫県南部地震）

波を用いた場合を図-13 に示す。表-9 は塔状構造物の場合と同様に各解析ケースにおける応答エネルギーである。各図において(a)は支間中央点における応答加速度、(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から出力可能な最大制御張力を求め、制御張力の最大値を初期張力に対して±30.4Nとした。

図-12 あるいは図-13 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ピーク値の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次モードのピーク値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き2次モードに対して主に制御が行われ、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-9 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。

このようにケーブル構造物における制振シミュレーション結果からも塔状構造物の場合と同様に、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、観測対象とした振動モードが最も卓越しやすい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、すべての振動モードに対して良好な制振効果を得られたため、制御システムの安定性も良好であると思われる。

表-9 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

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、塔状構造物の水平振動およびケーブル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制振効果および制振特性に関して考察を加えたものである。本研究における解析結果から得られた知見は、以下のように要約される。

- ①強制加振による塔状構造物の水平振動およびケーブル構造物の鉛直振動に対して、本研究で用いたセミアクティブ制御は応答加速度やフーリエスペクトルのピーク値が十分に低減され、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。ケーブル構造物においては、制御対象に部分的に可変減衰を導入し、上記の方法にしたがって一時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できることが、本研究においても確認された。
- ②本研究で用いたセミアクティブ制御は、1次あるいは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と考えられる。
- ③セミアクティブ制振システムの構築に際しては、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低次モードの応答加速度の設定に GA を適用したが、いずれの制御対象においても 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、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。また制振効果を評価する手法として、本研究では構造物のエネルギー量に着目したが、非制御時のエネルギー量と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。
- ④入力外力の振動性状の違いによる制振特性の差異にも言及すれば、振動がある程度の時間継続しており、含まれる振動数成分にも比較的偏りが無いような入力外力に対しては、可変減衰型セミアクティブ制振システムは極めて高い制振性能を有していると推定される。また、急激に大きな入力加速度が構造物に作用するような場

合には、セミアクティブ制御の制振効果はアクティブ制御と比して低下する傾向が見られた。本研究では構造物の状態の観測を応答加速度のみの一変数で行っていることから、構造物の振動性状を正確には把握出来ない場合もあり得る。このような場合には、構造物への減衰付加効果を向上させるために、長時間にわたり減衰を付加し続けるように制御則を調整することで、制振効果を向上させることが可能であると思われる。

以上を踏まえて、セミアクティブ制御あるいは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、構造物の応答に応じて適切な制御装置の出力を決定するアクティブ制御は常に高い制振効果が期待できるが、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確保などの制約が大きく、また土木構造物としての性質上、高度で複雑な制振システムの維持あるいは管理についても困難さが伴うものと考えられる。これらに関して、それらの制約が比較的少ないセミアクティブ制御の適用性あるいは実用性などは高いと思われる。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思われる。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]

- 村上永一：土木構造物の設計とは何か、土木学会誌、57巻7号、pp.3-6, 1972.
- 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.
- 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.
- 佐藤忠信、田中悟：可変減衰装置を用いた構造物の実時間ハイブリッド振動制御実験、土木学会論文集、No.647/I-51、pp.425-433, 2000.
- 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振動制御に関する研究、構造工学論文集、Vol. 46A、pp.575-582, 2000.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 山崎智之、大島俊之、三上修一、当麻庄司、杵本正信、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.
- 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.
- 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.
- 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.
- 宮森保紀、小幡卓司、鈴木隆、林川俊郎、佐藤浩一：可変減衰型セミアクティブ制御の鋼製タワーにおける適用性、鋼構造年次論文報告集、第 8 巻、pp.97-101, 2000.
- Yozo Fujino, Pennung Wamitchai, B. M. Pacheco: Active Stiffness Control of Cable Vibration, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 60, pp.948-953, 1993.
- 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.
- 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.
- 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.
- 岡南博夫、古田均、金吉正勝、田中洋：ファジィアクティブ制御のチューニングに対する遺伝的アルゴリズムの応用、第2回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.207-214, 1993.
- 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.
- 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.
- 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.
- 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.
- 白石昌武：入門現代制御理論、啓学出版、1987.

(2000 年 9 月 14 日受付)