

不規則外力を受ける塔状構造物の可変剛性・減衰型振動制御に関する研究

A study of variable stiffness and damping semi-active vibration control under random excitation on tower structures

宮森保紀*, 小幡卓司**, 安達一憲***, 林川俊郎****, 佐藤浩一*****, 大塚久哲*****

Miyamori Yasunori, Obata Takashi, Adachi Kazunori, Hayashikawa Toshiro, Sato Koichi and Otsuka Hisanori

* 博(工)、九州大学大学院助手、工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 博(工)、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)

*** 修(工)、国土交通省、中部地方整備局 (〒455-0045 名古屋市港区築地町2番地)

**** 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)

***** 工博、九州大学大学院教授、工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

Vibration control is expected to be one of efficient method for improving dynamic performance on bridges. Semi-active vibration control is proposed recently for simple control system and high-energy efficiency. Variable stiffness and damping semi-active control system with simple ON-OFF device control is developed in this study. The state of control device is switched depending on predominance of 1st vibration mode. As parameters of ON-OFF control have large influence to control performance, Genetic Algorithm is adopted for optimizing these parameters. Vibration control effects and applicability of the proposed system are demonstrated through numerical simulations and model experiments on tower structures under random excitation using seismic waves.

Key Words: Semi-active vibration control, variable stiffness and damping system, ON-OFF device control, random excitation

キーワード: セミアクティブ振動制御, 可変剛性・減衰型システム, ON-OFF 制御, 不規則外力

1. はじめに

大規模地震動に対する耐震性や、風あるいは交通荷重に対する振動使用性など、橋梁構造物の保有性能として安全性、使用性はもともと重要視されるべき一項目である。また、建設や補修補強に際しての経済性や施工性に関しても今後はより厳しい制約条件を課せられる場合が増えると考えられ、このように多様化かつ高度化する要求性能のバランスをとりながら、橋梁の機能を向上あるいは維持させるためには、新しい技術を取り入れた合理的な手法を採用することが極めて重要と考えられる。

構造物に作用する入力外力や制御対象の応答に応じて制御装置を動作させる振動制御は、その動的性能を向上させる手法の一つとして有効であるが、土木構造物のように制御対象の規模が大きい場合、十分な制御力を得ることや装置の駆動エネルギーの確保が難しく、橋梁に対して常時アクティブな制振手法を適用することはこれまで困難であった。そこで構造物に制御力を直接作用させることなく、剛性や減衰などの構造性能を変化させることで制振を行う、セミアクティブ方式の振動制御が提案されている。セミアクティブ制御の方式としては可変減

衰型に分類される研究例が比較的多く、道路橋の水平振動に対して可変減衰ダンパを適用した川島ら¹⁾の研究や、家村、五十嵐ら^{2)~4)}によるダンパ装置によって連結したフレーム連結構造物の振動制御に関する一連の研究などが行われている。可変剛性型システムに関しては、可変減衰型と組み合わせた例が存在し、米国では Patten ら⁵⁾が大型車両の通過に伴うたわみと応力の低減を目的として、実在の道路橋に ISB(Intelligent Stiffener for Bridges)を設置して実験を行っている。また建築構造物に対しては、小堀ら⁶⁾が研究所の壁面に AVSD(Active Variable Stiffness and Damping)システムを設置した例がある。著者らも塔状構造物やケーブル構造物に可変減衰型システムや桁構造に可変剛性型システムを導入した場合の制振効果や制御系設計手法について解析的研究を行っている^{7)~10)}。

本研究は、振動制御手法によって不規則外力を受ける橋梁構造物の動的性能を向上させるために、簡便で適用性の高い制御システムやその設計手法について検討するものである。振動制御方式としては、簡便でエネルギー効率に優れた制御システムを構築するために、制御装置の動作によって構造物の剛性と減衰を同時に可変とする

可変剛性・減衰型システムによるセミアクティブ制御を採用する。また、制御則に関してもセンサやアクチュエータなどを含む制御系全体を簡便な構成にし、設計が容易に行えるようにするために、構造物の振動の状態によって制御装置の出力を選択的に変更する ON-OFF 制御を適用する^{7)~10),11)}。ON-OFF 制御を採用した場合には、制御装置の動作を切り替える閾値の設定などが制振効果に極めて重要な影響を及ぼすが、この決定に汎用性のある最適化手法を導入すれば、容易かつ合理的に設計パラメータを決定することが可能になる。そこで、近年工学の各分野で最適化手法や同定手法として有用性が広く認められている遺伝的アルゴリズム(GA,Gentic Alogorithm)¹²⁾を採用し、前述の制御装置の動作における閾値などを決定する¹³⁾。

具体的には、橋梁構造物において振動制御の適用例が多い、吊橋や斜張橋の主塔を想定した塔状の実験供試体に、剛性と減衰を同時に変更できるような制御装置を取り付けた¹⁴⁾。この供試体の 1 次振動モードの卓越状況に応じて、制御装置の出力を ON-OFF で切り替えて振動応答の抑制を図る。このような制御システムでは、制御装置の出力を変更する際の閾値の設定が制振効果に影響を及ぼすため、これらの設計変数を GA により最適化した。GA の評価関数は構造物に発生するエネルギー量に着目して設定し、これを最小化するように応答加速度の閾値を最適化した。

以上のセミアクティブ制振システムに対して、不規則外力として地震観測波を入力した強制加振時における解析と実験を行う。入力波は振動性状の異なる釧路沖地震観測波と兵庫県南部地震観測波を用いた。GA による制御パラメータの設定では釧路沖地震波を用いるため、まず釧路沖地震波に対する時刻歴応答解析によって、適切な振動抑制効果が得られることを確認する。続いて兵庫県南部地震観測波を入力した解析を行い、設計時と異なる振動特性を有する入力外力に対して制振効果を検討する。さらに、シミュレーションで得られた結果を実際の構造物で確認するために振動制御実験を実施した。実験は解析と同じ制御系の設計変数を用いて、振動台上に設置した実験供試体に上述の 2 つの地震加速度を入力して制振を行う。

以上の解析や実験を通じて、ON-OFF 方式による可変剛性・減衰型制御の振動制御手法の制振効果や適用性および、制御系設計手法の妥当性を検討したので、その結果を報告する。

2. 制御対象構造物

本研究で製作した実験供試体は写真-1 のような 3 層からなる高さ 2.1m の鋼製塔状構造物で、この供試体の中層部に角形鋼管とオイルダンパからなる制御装置を搭載した。制御装置と供試体本体を、写真-2 のように電磁石

を介して接続することで、ダンパの粘性減衰と鋼管の剛性が構造物全体に作用する。表-1,2 はオイルダンパと電磁石の諸元である。制御装置の ON-OFF が切り替わる際に電磁石の動作に要する時間を測定したところ、接触時

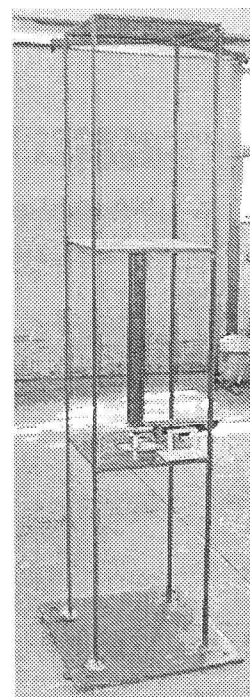


写真-1 実験供試体

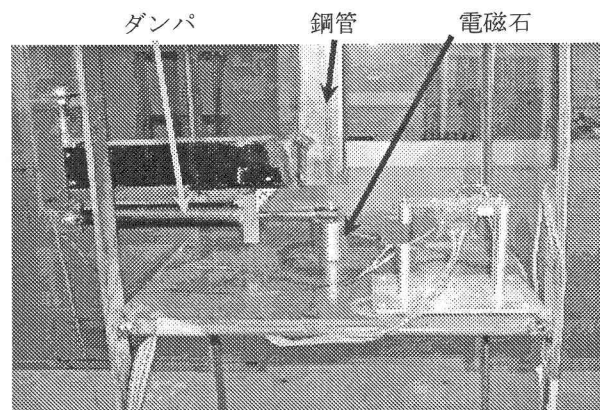


写真-2 制御装置

表-1 オイルダンパの諸元

型式	RB-ADA510M (エニダイン製)	
シリンダ寸法	φ 30mm×224 mm	
ストローク	100 mm	
最大推進力	伸長	2,000 N
	圧縮	1,670 N
質量	372 g	

表-2 電磁石の諸元

型式	KE-4B (カネテック製)	
寸法	φ 40×40 mm	
最大吸着力	400 N	
電圧	DC24 V	
電流	0.24 A	
質量	300 g	

で平均 0.065sec、離隔時では平均 0.039sec だった。本研究では、実験における制御装置の動作検証を確実にするため、中層の中央部に制御装置を 1 機のみ設置した。このため、鋼管の断面寸法は供試体全体と比較して大きなものになるが、小規模な制御装置を各層の壁面に分散して配置することでも同様の制御システムが実現できると考えられる。

実験供試体の固有振動特性を把握するために減衰自由振動実験を実施した。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)と作動させて剛性と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。図-1 にモード形状図を、表-3 に固有振動特性を示す。なお、作動状態の 3 次モードに関しては、鋼管によって中層の剛性が大きくなり卓越振動モードなどが確認できなかった。表-3 より作動状態の 1 次固有振動数は、制御装置による剛性の付加によって通常状態から約 33%上昇しており、セミアクティブ制御系の設計はこの固有振動数の変化に着目して行う。減衰定数に関しては、通常状態ではいずれのモードでも 0.3%以下であり極めて減衰が小さいが、作動状態では、1 次モードで 2.17%、2 次モードで 0.58%と通常状態と比較すると大きな減衰を有しており、制御装置の作動時には卓越モードに関わらず減衰付加効果が期待できる。

数値解析を行うためのモデル化に際しては、各部材の断面諸元を用いて図-2 のような 2 次元骨組モデルを構築した。本研究では、制御装置の動作によって構造特性が異なるため、通常状態および作動状態のそれぞれについてモデル化を行った。図-2 において部材⑤～⑩までが制御装置の鋼管、オイルダンパおよび電磁石を想定した部材であり、電磁石と鋼板の接続部分となる仮想的な部材⑤の剛性を変化させるとともに、ダンパ⑦の粘性減衰を変化させることで通常状態と作動状態を表現する。

解析モデルの固有振動特性を検討するための固有振動解析は、減衰の影響を考慮するために複素固有振動解析を行った。減衰マトリックスは、通常状態では質量比例型減衰マトリックスを用い、作動状態ではダンパの粘性減衰が付加されるため、ダンパに相当する部材に粘性減衰係数を加えた。具体的には図-2 の部材⑦の軸方向に関する自由度に、ダンパの性能試験から得られた減衰係数 $c=2399.8\text{Nsec/m}$ を与えて式(1)のような要素減衰マトリックスを作成して全体座標系へ変換後、通常状態と同じ質量比例型減衰マトリックスに加えた。

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdots \cdots (1)$$

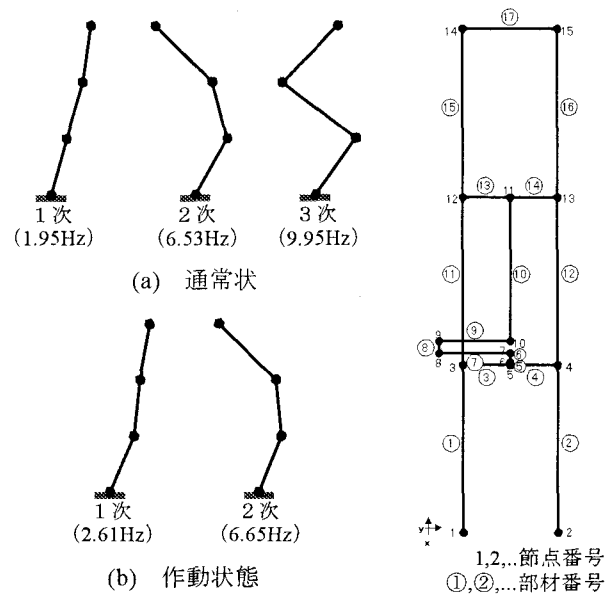


図-1 実験供試体の固有振動モード 図-2 解析モデル

表-3 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
1 次モード	1.95	2.61	0.0028	0.0217
2 次モード	6.53	6.65	0.0029	0.0058
3 次モード	9.95	---	0.0019	---

表-4 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
1 次モード	1.95	2.61	0.0028	0.0217
2 次モード	6.53	6.73	0.0008	0.0087
3 次モード	10.42	11.76	0.0005	0.0048

表-4 は複素固有振動解析結果である。実験と解析の結果を比較すると、固有振動数に関しては通常状態と作動状態のいずれにおいても解析値は実測値とほぼ一致している。減衰定数については、もっとも卓越しやすい 1 次モードで通常状態、作動状態ともにほぼ同一となった。なお、2 次モードと 3 次モードでは解析値が実験値より小さくなっている。これは質量比例減衰を用いたため、高次モードで減衰定数が小さくなったためと考えられ、これらのモードは有効質量が小さく構造物の振動応答全体に与える影響は少ないと考えられる。なお、モード形状についても解析と実験は概ね一致しており、以上の結果から実験供試体のモデル化は妥当であったと判断できる。

3. セミアクティブ振動制御

3.1 可変剛性・減衰型方式による ON-OFF 制御

多自由度系構造物に強制外力が作用する場合の運動方程式は次式のように表現できる。

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

ここで、 $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリ

ックス、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルであり、 $\mathbf{x}(t)$ は構造物の変位ベクトルである。また、構造物の応答に応じて剛性と減衰を変化させる可変剛性・減衰型システムは式(3)のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_v)\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v)\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad \cdots (3)$$

$\mathbf{C}_v$ 、 $\mathbf{K}_v$ は可変減衰マトリックスおよび可変剛性マトリックスと称される。この可変剛性・減衰型システムでは、剛性を可変とすることで固有振動特性を変化させる非共振化と、減衰の付加によるエネルギー吸収を同時に行って振動応答の低減を図る。具体的には鋼管およびオイルダンパからなる制御装置の接続状態を切り替えることによって $\mathbf{C}_v$ 、 $\mathbf{K}_v$ を変化させる。ここで、可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ は前章のモデル化においてオイルダンパの粘性減衰係数から作成された減衰マトリックスの増分である。また可変剛性マトリックス $\mathbf{K}_v$ は、作動状態の剛性マトリックスと通常状態の剛性マトリックスの差分として考慮できる。なお、制振シミュレーションとGAによる制御パラメータ決定では数値解析によって構造物の応答を求めるが、本研究ではニューマーク β 法による直接数値積分法を採用し、係数 β と時間刻みは $\beta=1/2$ 、 $\Delta t=0.01\text{sec}$ とした。

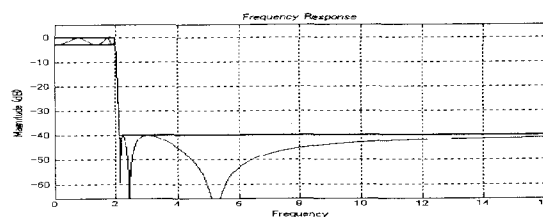
以上の変剛性・減衰型システムについて、入力外力と共振しやすい1次モードの固有振動特性が、通常状態と作動状態で変化することに着目して、制御装置の動作をON状態とOFF状態の2段階で切り替えるON-OFF制御を採用する。この手法は、構造物に外力が作用し観測対象とした振動モードの応答が増大した場合、制御対象の固有振動特性を変化させることで、非共振化によって動的応答を低減させるものである。また、制御出力をONとOFFだけで切り替えることから、極めて簡単な制御系を構築することができる。

具体的なON-OFF変更の手順は、構造物の上層の応答加速度を観測対象として、通常状態の1次モードの振動数成分と、作動状態の1次モードの振動数成分をローパスフィルタとバンドパスフィルタによってそれぞれ抽出し、この抽出後の応答加速度が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て制振を行う。減衰自由振動実験および固有振動解析結果から、作動状態と通常状態の1次固有振動数の差は塔状構造物で0.66Hzであり、2つの作動状態の振動数成分を抽出するためのフィルタは急峻な遷移域を有する必要がある。また、コンピュータへの演算負荷を少なくするためにはフィルタ次数をできるだけ低くするためにはフィルタ次数でもカットオフ特性が優れたIIR型楕円フィルタを採用する。表-5は設定したフィルタの諸元、図-3はフィルタの周波数-ゲイン特性である。

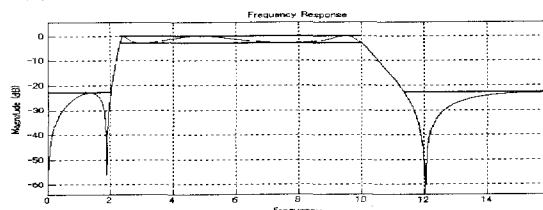
以上のようなON-OFF方式のセミアクティブ制御システムにおいては、フィルタリングされた加速度応答量に

表-5 フィルタの諸元

抽出対象	パスバンド	ストップバンド
通常状態 (ローパス)	2.00 Hz	2.20 Hz
作動状態 (バンドパス)	2.30~10.00 Hz	1.99, 11.38 Hz



(a)ローパスフィルタ (通常状態1次モード用)



(a)バンドパスフィルタ (作動状態1次モード用)

図-3 フィルタの周波数-ゲイン特性

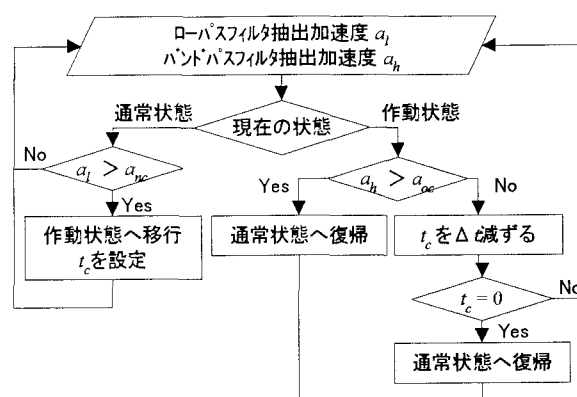


図-4 ON-OFF 制御手順

基づいて制御装置の動作を切り替えるが、具体的には以下の2つのルールに基づいて行う。ここではローパスフィルタで抽出された加速度を a_l 、バンドパスフィルタで抽出された加速度を a_h とし、 a_l 、 a_h に対する閾値をそれぞれ a_{nc} 、 a_{oc} とする。

ルール1＝通常状態の卓越状況に関する判定

ローパスフィルタの通過成分 a_l が閾値 a_{nc} を超過した場合、作動状態に移行する。

ルール2＝作動状態の卓越状況に関する判定

バンドパスフィルタの通過成分 a_h が閾値 a_{oc} を超過した場合、通常状態に移行する。

構造物が静止している場合は制御装置を動作させる必要がないため通常状態になる。また、このような構造物性を可変とする制御手法は、構造物の動的特性を変化させることで振動応答の低減を図るものであることから、

ある程度の時間構造物の状態を固定することで制振効果を向上できると考えられる。このため、上記のルール 1 が適用され、構造物が作動状態に移行した際は一定の時間、作動状態を固定することとし、状態固定時間 t_c を設定する。ただし状態固定中にルール 2 の条件を満たした場合は即座に通常状態に復帰する。図-4 は以上の制御手順をフローチャートで表したものである。このような手法を用いて構造物の制振を行う場合、制御装置の動作を決定する基準となる閾値と状態固定時間の設定は、制振効果に直接大きな影響を与えられと考えられる。そこで本研究では、GA によってこの状態変更パラメータの最適化を行うこととした。

3.2 GA による制御パラメータの設定

本節では GA によって、ON-OFF 制御の ON 状態と OFF 状態を切り替える際の閾値と、制御装置が ON 状態となつてからの状態固定継続時間の合計 3 変数を最適化する。

まず解のコード化については、解空間の設定が必要であるが、ON-OFF 変更の閾値については、閾値をランダムに設定して数回シミュレーションを試行した上で、フィルタによって抽出された最大加速度を考慮して検索範囲の最大値を定める。最小値は実験時のノイズの影響による誤作動を防ぐために 10.0gal とした。状態固定時間については、電磁石の動作時間に関する予備実験の結果を考慮して最小値を 0.07sec とした。最大値については制御装置の駆動エネルギーなども考慮して定める必要があるが、作動状態の 1 次固有周期の 4～5 周期分を目安として 2.0sec とした。

次に、各個体において 3 本の 2 進数表現の遺伝子列を持つ初期集団を一樣乱数によって発生させる。適応度を求めるための時刻歴応答解析では、2 進数でコード化された各個体の遺伝子列を 10 進数にデコードして用いる。コード化に際してのビット長は 1 変数あたり 10 ビットとしており、これは上述した解の検索範囲が 1024 分割されて変数が割り当てられることを意味する。GA の解析に用いた他の諸数値については、初期集団の個体数を 100 個体とし、交叉率 50%、突然変異率は 3% に設定した。

各個体の適応度を評価する評価関数は、制振効果を総合的に判断するために式(4)のような構造物のエネルギーに着目した。

$$E(t) = \int_0^t [\dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}(t) + \dot{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{x}(t)] dt \cdots (4)$$

式(4)の第 1 項は構造物の運動エネルギー、第 2 項は減衰によって消費されるエネルギー、第 3 項はひずみエネルギーを意味する。GA の評価関数として構造物の動的応答量をこの応答エネルギーから評価する場合、式(4)の値をそのまま用いると解析終了時のエネルギーのみを評価することになり、解析時間中に発生する応答量の大小を評価することができない。このためエネルギーの全解析時間での総和を用いることとし、式(5)のような評価関数を採用

表-6 最適化された ON-OFF 制御パラメータ

通常状態閾値 a_{nc} (gal)	作動状態閾値 a_{oc} (gal)	状態継続時間 t_c (sec)
12.519	385.523	1.94

表-7 解析ケース

Case 1	Case 2	Case 3
通常状態固定	作動状態固定	ON-OFF 制御

する。なお、式(5)中の E_k は式(4)を離散時間で求めたものである。

$$J_{GA} = \sum_{k=1}^N E_k \cdots \cdots (5)$$

式(5)の値が小さくなればなるほど解析時間全体における応答加速度、応答速度、応答変位の動的応答量は減少することとなるので、これを 1 乗でスケールリングすることで GA の適応度とする。なお、式(5)の定義では構造物の全節点に関する情報が含まれるが、本研究では制御対象となる構造物本体について制振効果を評価するために、制御装置を想定した部材の応答量を除いて計算を行っている。GA のオペレーション中では各個体の適応度を求めるために、個別に時刻歴応答解析による制振シミュレーションを行って式(5)を適用し、適応度を算出することとした。この際の入力外力は次章の解析に準じて、釧路沖地震における千代田大橋の橋軸方向加速度波形を用いた。なお、収束条件は全線列が一致した場合に計算を終了することとした。

GA による解析結果は表-6 のようになった。最適化されたパラメータは解の検索範囲の上限値あるいは下限値に比較的近接しているものの、解空間全体における初期集団の発生にばらつきがなく、解析中の収束状況も適切であったと考えられるので、これらの値を用いて制振シミュレーションを行う。

4. 振動制御シミュレーション

以上の制御手法ならびに解析手法によって、強制加振に対する振動制御シミュレーションを実施する。強制外力は 2 つの地震加速度を用いて、解析ケースを表-7 のように設定した。Case 1 および Case 2 は構造物の状態を固定した場合で、Case 1 は構造物に可変剛性・可変減衰を付加しない通常状態、Case 2 は可変剛性・可変減衰を付加した作動状態で解析を行う。Case 3 は ON-OFF 制御を行う場合で、制御系のパラメータは GA を用いて設計した値を用いる。入力外力とした釧路沖地震の千代田大橋における橋軸方向観測波と兵庫県南部地震の JR 鷹取駅 EW 方向観測波について、加速度波形とフーリエスペクトルを図-5 と図-6 に示す。入力加速度は実験における振動台の能力や加速度計の容量を考慮して、最大応答加速度が 300gal 程度となるように原波形を定数倍し、入力加速度の最大値を 31.5gal とした。

最初に GA による制御パラメータ決定で入力した釧路

沖地震観測波に対する結果について述べる。解析結果として、実験供試体の上層、中層、下層に対応する、解析モデルの節点 3, 12, 14 における水平方向の時刻歴応答変位波形とフーリエスペクトルを図-7～9に示す。図-10は Case 3 で応答量の観測点とした節点 14 の加速度について、フィルタリングによって抽出された応答加速度で、図中の太い水平線は表-6 の閾値を表している。図-11 は制御における ON-OFF 変更の履歴である。さらに、各解析ケースにおける動的応答量の比較として、表-8 に節点 14 における絶対応答加速度と相対応答変位の最大値と実効値を示す。

まず、Case 1 および Case 2 の非制御の場合について述べると、図-7(a)では入力加速度が大きくなる 8～9sec にかけて上層と中層の応答変位が急速に増大し、11～12sec で上層の応答変位は最大値に達している。表-8 より Case 1 の上層における最大応答加速度は 299.48gal であった。また、フーリエスペクトルに関しては上層では 1 次モードの振動数成分が大きく卓越しており、中層および下層では 2 次、3 次モードのピークも生じているものの振幅そのものが小さいことから、塔状構造物が 1 次モードで振動しやすいことが確認できる。構造物に剛性および減衰を付加した図-8 の Case 2 では、Case 1 と比較して大幅に振幅が小さくなっており、上層の応答変位の最大値は 1/3 以下になった。また、振動数領域については、固有振動特性の変化によって 1 次モードのピークが 1.95Hz から 2.61Hz に遷移するとともに、大幅にピーク値が減少している。これは、制御装置が ON 状態になることによって全体剛性が大きく増加するとともに、ダンパによる減衰の付加効果が寄与したことが主要な原因である。

以上のような通常状態固定時と作動状態固定時における動的応答特性の相異を踏まえて、ON-OFF 制御を行った図-9～11 の Case 3 について考察を加える。図-10、図-11 のフィルタリングした加速度と状態変更履歴に着目すると、制御開始後 8.0sec でローパスフィルタの抽出

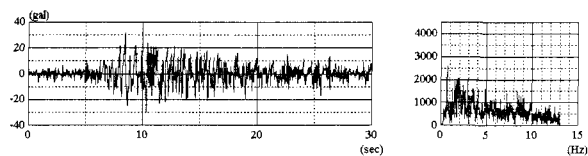


図-5 釧路沖地震・千代田大橋橋軸方向観測

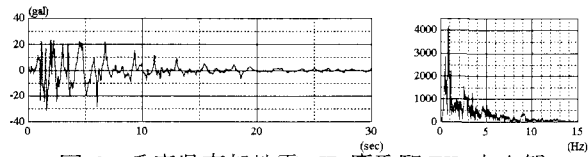
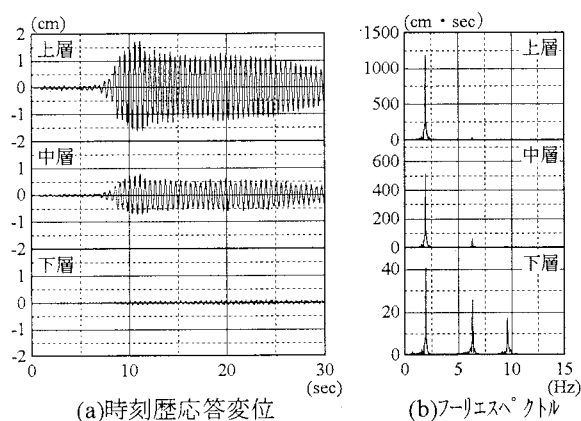


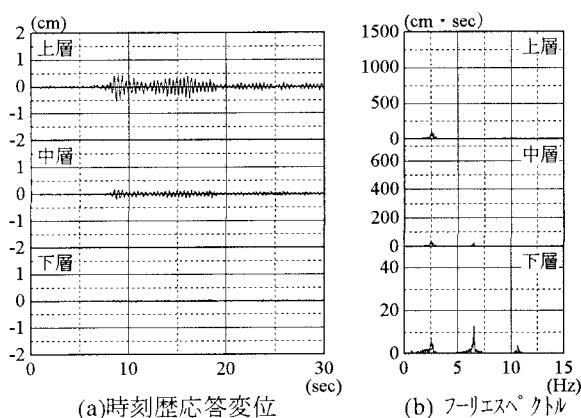
図-6 兵庫県南部地震・JR 鷹取駅 EW 方向観

表-8 上層の動的応答量（釧路沖地震観測波入力）

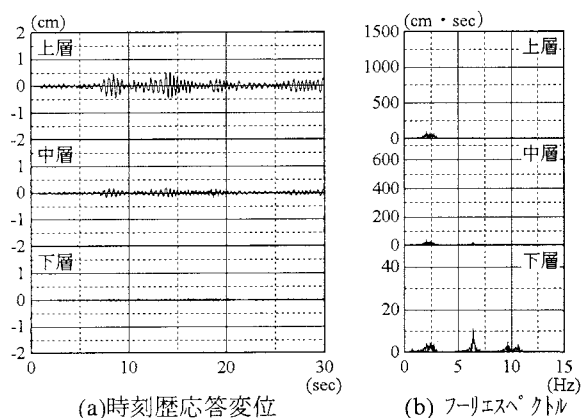
	応答加速度 (gal)		応答変位 (cm)	
	最大値	実効値	最大値	実効値
Case 1	299.48	113.83	1.73	0.70
Case 2	158.21	40.57	0.53	0.13
Case 3	195.77	47.44	0.49	0.14



(a)時刻歴応答変位 (b)フーリエスペクトル
図-7 解析結果（釧路沖地震観測波・Case 1）



(a)時刻歴応答変位 (b)フーリエスペクトル
図-8 解析結果（釧路沖地震観測波・Case 2）



(a)時刻歴応答変位 (b)フーリエスペクトル
図-9 解析結果（釧路沖地震観測波・Case 3）

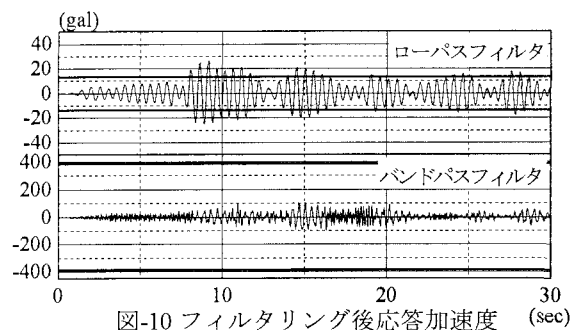


図-10 フィルタリング後応答加速度（釧路沖地震観測波・Case 3）

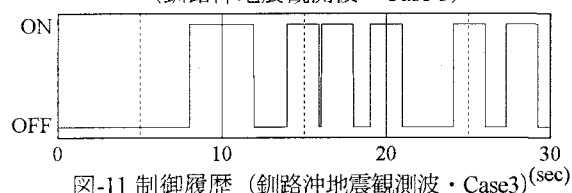


図-11 制御履歴（釧路沖地震観測波・Case3）(sec)

成分が閾値を超過し、作動状態に移行する。作動状態は 11.93sec まで継続してから通常状態に復帰するが、この動作によって 8sec から増大し始めた図-9(a)の応答変位は Case 1 と比較して大幅に抑制されている。13.97sec でローパスフィルタ通過成分が再び閾値を超過し、作動状態に移行することで、14~16sec の応答変位は減少している。このように構造物の状態が適時切り替わることによって、動的応答量は Case 2 と同程度まで抑制されている。釧路沖地震観測波を入力した場合は入力外力の卓越振動数と通常状態の固有振動数が近接したため、Case 1 では動的応答量はかなり大きくなった。したがって、制御はこの通常状態から作動状態への非共振化が中心となり、作動状態から通常状態に移行することによる作動状態に対する非共振化はなされず、制振効果は作動状態に固定した Case 2 と同程度になったものと考えられる。

次に GA によって行った設計変数の最適化について述べる。図-10 で、ローパスフィルタ通過成分に対しては入力外力の増大によって加速度応答が大きくなるところで閾値が設定され、状態変更が行われている。一方、高域側のバンドパスフィルタ通過成分に対しては、抽出加速度の最大値をはるかに上回る値に閾値が設定されており、作動状態における応答量の増大を検知して状態変更がなされるようにはなっていない。GA では遺伝子列の組替えとその評価によって最適化が行われ、その過程においてどのように最適解への誘導が行われるかは明らかではないが、このような結果となった理由として以下の 2 点が推測できる。まず、前述のように釧路沖地震波を入力とした場合は通常状態から作動状態へ移行することによる動的応答量の抑制が支配的となり、作動状態から通常状態への移行がなされないようなパラメータの組み合わせが選択された。次に、制御時の解析結果では、剛性と減衰が切り替わる際に下層を中心として加速度の増大が見受けられた。評価関数を構造物のエネルギー量としたことから、状態変更の繰り返しによって部分的にも応答加速度が増大すると、運動エネルギーが大きくなることから状態変更回数を少なくするようになったと思われる。作動状態の固定時間についても最適化のパラメータとしたが、GA の解析結果では 1.94sec と検索範囲の上限に近い値となっており、これも状態変更を頻繁に行わずにできるだけ作動状態を維持するように決定されたものと考えられる。このように GA により制御パラメータを決定した結果、制御パラメータが解空間の限界値に近傍に決定されたことで、制御装置の動作は当初の意図とは若干異なったが、最適解の探索そのものは適切だった

表-9 上層の動的応答量 (兵庫県南部地震観測波入力)

	応答加速度 (gal)		応答変位 (cm)	
	最大値	実効値	最大値	実効値
Case 1	121.70	48.38	0.72	0.31
Case 2	179.95	40.35	0.68	0.14
Case 3	113.87	30.97	0.45	0.10

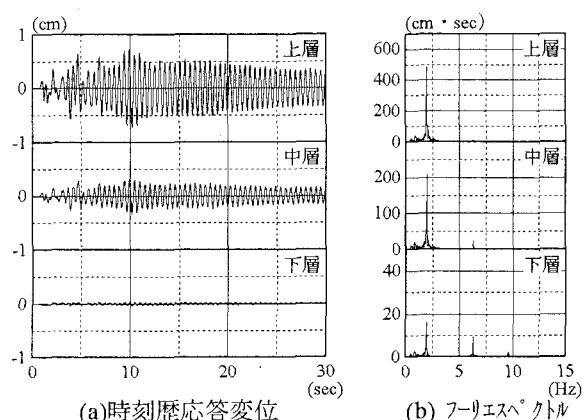


図-12 解析結果 (兵庫県南部地震観測波・Case 1)

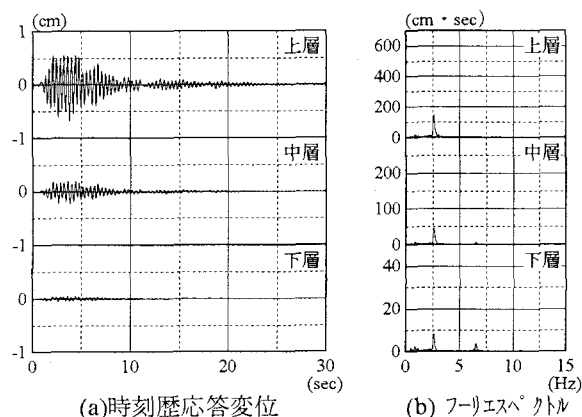


図-13 解析結果 (兵庫県南部地震観測波・Case 2)

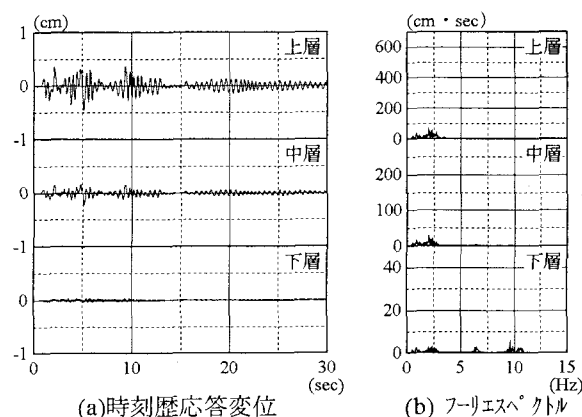


図-14 解析結果 (兵庫県南部地震観測波・Case 3)

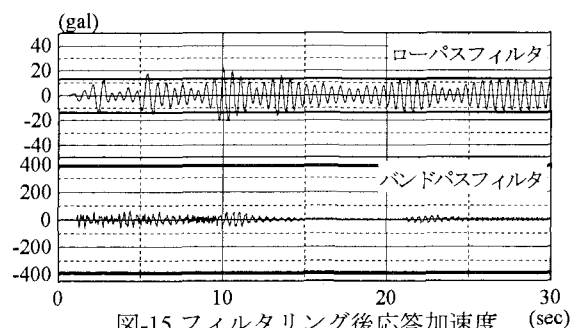


図-15 フィルタリング後応答加速度 (兵庫県南部地震観測波・Case 3)

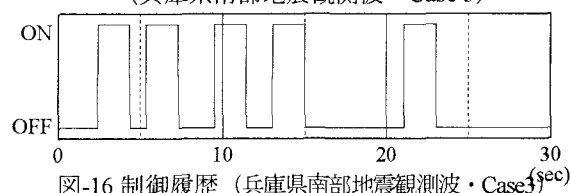


図-16 制御履歴 (兵庫県南部地震観測波・Case 3)

と判断でき、制振効果も優れた結果が得られた。

さらに、兵庫県南部地震観測波を入力して、異なる振動性状を有する外力に対する検討を行った。解析ケースは釧路沖地震観測波の場合と同じ表-7の3ケースとする。解析結果も同様に、図-12がCase 1、図-13がCase 2、図-14がCase 3における応答変位、図-15が制御時の加速度のフィルタリング結果、図-16が状態変更履歴で、表-9は応答加速度と応答変位の最大値と実効値をまとめたものである。

まず図-6の入力加速度に着目すると、1～7secで大きな入力が約1sec周期で数回発生し、その後速やかに振幅は減少して20secでは入力加速度はほとんどなくなっている。このため図-12(a)の応答変位は、9sec以降で減衰自由振動とみなせる状態になっている。図-13のCase 2に関してもCase 1と同様、初期の強制加振状態からおおよそ7secで減衰自由振動状態となっている。Case 1との相違を挙げると、付加減衰を与えたCase 2では1次モードの減衰定数がCase 1の0.28%から2.17%へとかなり大きくなっているため、7sec以降では振動が急速に減衰している。また、表-7の応答加速度の最大値はCase 1で121.70galであったが、Case 2では179.95galと釧路沖地震観測波を入力した場合とは異なった傾向が現れている。これは図-6のフーリエスペクトルの振動数成分が通常状態の1次固有振動数に近い2.0Hz前後より、作動状態の固有振動数に近い2.5～2.8Hz付近で大きく、作動状態のほうが通常状態より加速度が増大しやすいためである。

ON-OFF制御を行ったCase 3の結果について、まず制御の過程を表す図-15、図-16では、ローパスフィルタ通過成分の増大によって構造物が断続的に作動状態に移行するような制御が行われている。この結果、観測対象とした上層の応答加速度ならびに各層の応答変位は、解析した3ケース中でもっとも小さくなっている。表-9では上層の応答変位の最大値がCase 1およびCase 2の約65%に減少し、実効値ではCase 1の約30%、Case 2に対しても約70%に減少している。図-14におけるフーリエスペクトルは、状態変更による非共振化に伴い、明確なピーク値が判別できない程度にまでなっている。このように兵庫県南部地震観測波を入力した場合には、可変剛性や減衰を固定した場合より制御を行った場合の動的応答量が小さくなっており、構造物の状態を選択的に変更する本制御手法の特長が発揮されている。

以上の2つの入力加速度に対する強制加振時の解析結果から、固有振動モードの卓越状況に応じて構造特性を変化させて非共振化を図ることで、構造物の剛性や減衰を固定する場合よりも振動応答を抑制できることが判明した。また、制御対象に制御力を加えることなく、振動応答の抑制が可能なことから、制御系の安定性も有すると考えられる。これらの制振効果を実験によって確認するため、次章においては実験供試体に対する制振実験を実施する。

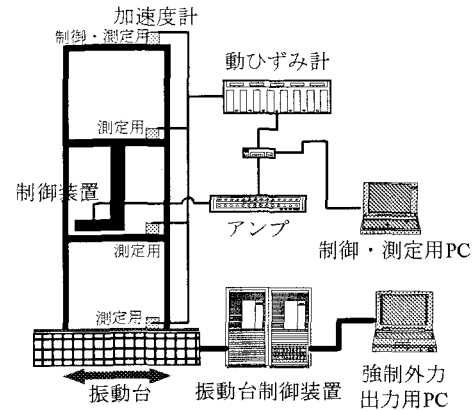


図-17 振動制御実験システム

5. セミアクティブ制振実験

図-17は本研究の振動制御実験システムの概略図である。実験供試体は振動台上に据え付けられ、実験供試体の各層と振動台に測定用と測定・制御両用のひずみゲージ型加速度計を計4基設置している。観測された波形は動ひずみ計を介しA/D変換されてコンピュータに取り込まれる。取り込んだ加速度データのうち、観測点である供試体上層の応答加速度は振動制御用プログラムでフィルタリングによる卓越成分の抽出と、制御装置のON-OFF判定がなされ電磁石への出力電圧が決定される。電磁石への出力はDAQカードからデジタル信号として送出され、アンプにおいてD/A変換と電圧増幅が行われて制御装置の電磁石へ入力される。

制振実験においても釧路沖地震観測波と兵庫県南部地震観測波を入力したが、釧路沖地震観測波は解析では主要動部分の30secを使用した。実験においては加速度振幅が十分に小さくなるまでの60secを用いる。実験でも解析と同様の加振状態となるように、振動台の周波数伝達関数を求め、解析の入力波形を振動数領域で振幅調整し振動台に入力した。以上の手法に基づいて、実験供試体のセミアクティブ振動制御実験を行うが、実験ケースはそれぞれの入力加速度に対して、制御装置を動作させない非制御時とON-OFF制御を行う制御時の2ケースとする。

まず、制御系設計に用いた釧路沖地震観測波を入力した場合について述べる。実験結果として、図-18、図-19に非制御時と制御時の供試体各層の応答変位とフーリエスペクトルを示す。また図-20、図-21はフィルタリングした加速度波形とこれに基づく制御装置の状態変更履歴であり、図-22はフィルタリングを行う前の供試体上層の時刻歴応答加速度である。さらに応答加速度と応答変位について、供試体上層の最大値と実効値を算出した結果が表-10である。なお変位波形については、加速度計で測定された各層の絶対加速度と振動台上の絶対加速度の差による相対加速度を算出し、これを時間積分するこ

とで相対応答変位を算出した。

図-18 制御時の実験結果に着目すると、入力外力の振幅が増大し始める 10sec 以降において各層の変位振幅が増大し強制加振状態になる。主要な加速度入力が終了する 52sec 以降は減衰自由振動となり、振動振幅は緩やかに減衰している。フーリエスペクトルにおいては、1 次モードの固有振動数である 2.0Hz 前後の振動数成分が卓越しており、2 次モードなどの高振動数成分の応答は比較的小さい。実験と解析の相違点としては、加速度の入力時間が実験と解析で異なること、解析では 2、3 次モードの減衰定数が実測値より小さかったことに加えて、電磁石が供試体と接触、離隔する際の衝撃や滑りを解析では考慮していないことが挙げられる。したがって、波形の形状や応答量の正確な値には相違があるものの、各層における振動モードの卓越状況は整合しており、表-8 と表-11 の応答量についても傾向が一致している。したがって、実験結果は解析結果とある程度の整合性を有していると考えられる。

次に、制御を行った場合の実験結果について考察を行う。図-19～図-22 においては、制御開始後約 4.0sec でローパスフィルタ通過成分が閾値を超過して制御装置が作動し始め、応答変位の振幅が非制御時より抑制されている。入力外力が大きくなる 10～20sec では振幅が増大するが、振動台からの入力が続いて作用する 20～50sec においては、応答加速度のローパスフィルタ通過成分に応じて断続的に制御装置が動作し、高い振動抑制効果が得られている。表-10 における応答加速度の実効値は約 35%、変位の実効値は約 50%低減されており、制御時間全体では良好な制振効果が得られている。図-19(b)のフーリエスペクトルは、2.0Hz 前後の 1 次モードのピーク値が制御によって大きく減少しており、卓越する振動モードに対する制振効果は高い。

表-10 および図-22 において最大応答加速度は非制御時を上回る結果となった。この最大加速度は電磁石が供試体に接触した直後の 16sec で瞬間的に発生している。実験供試体では電磁石の接触点や鋼管の溶接位置が加速度計の設置位置と比較的接近しているために、このような大きな応答が記録されたと推定できる。しかしながら、制御時間全体で応答変位が低減されており、制御装置の動作によって構造物全体に悪影響を与えるような挙動は生じないものと考えられる。AMD などの制御力型システムでは、制御力を発生させるアクチュエータの動作により制御対象を加振する場合があるが、本研究の制御装置は構造物に制御力を作用させるものではないため、構造物を加振する恐れはほとんどない。また、シミュレーションでも制御装置の動作による応答量の変化をある程度把握できことから、実際の構造物に適用する場合でも制御装置のモデル化を適切に行うことで制御系の設計は可能である。AMD などの制御力型システムと比較して、制御装置の駆動に要するエネルギーが少なく、状態量の

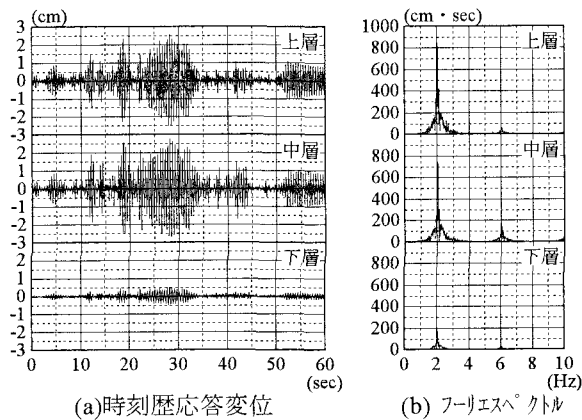


図-18 実験結果（釧路沖地震観測波・非制御）

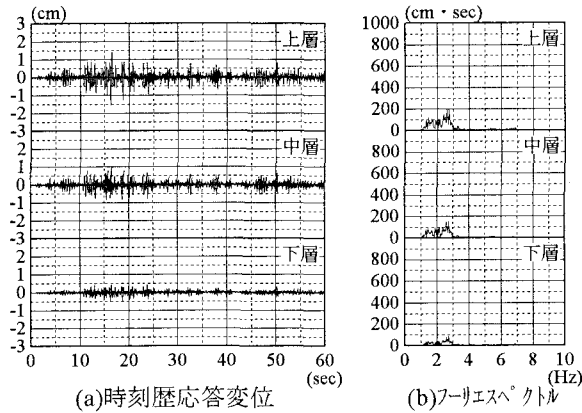


図-19 実験結果（釧路沖地震観測波・制御）

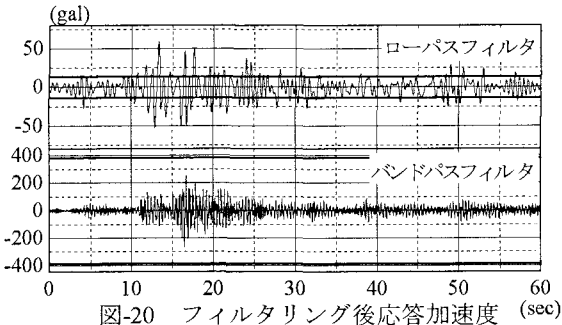


図-20 フィルタリング後応答加速度（釧路沖地震観測波・制御）

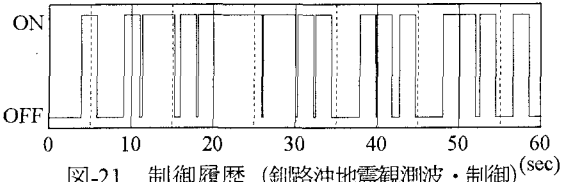


図-21 制御履歴（釧路沖地震観測波・制御）

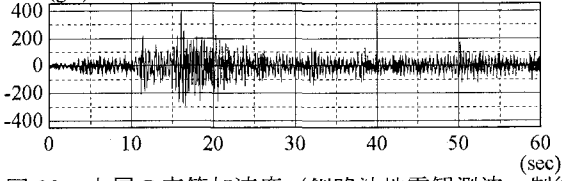


図-22 上層の応答加速度（釧路沖地震観測波・制御）

表-10 上層の動的応答量（釧路沖地震観測波）

		非制御	制御
応答加速度 (gal)	最大値	297.95	403.25
	実効値	83.64	54.89
応答変位 (cm)	最大値	2.57	1.41
	実効値	0.52	0.23

観測に要するセンサや出力を算出するためのプロセッサが簡便にできることから、制御システムとしての実用性も比較的高いと考えられる。

さらに、図-20 のフィルタリングによって抽出された応答加速度に着目すると、ローパスフィルタ通過成分のみに対して制御装置の状態判定が行われている。これは解析でも述べたように、GA による制御パラメータ決定の結果として作動状態に対する閾値がかなり大きく設定されたためである。図-20 下段のバンドパスフィルタの抽出結果は、作動状態の 1 次モードの 2.61Hz と 2 次モードの 6.6Hz 前後の振動数成分が混在して、抽出加速度は 200gal を超えているものの作動状態の閾値には達していない。このため、ON-OFF 切り替えはローパスフィルタに対する閾値と状態継続時間の 2 つのパラメータに基づいて制御を行っているが、十分な制振性能を有していることが実験でも明らかになった。

次に、兵庫県南部地震観測波を用いて制振実験を実施した。図-23 は非制御時、図-24 は制御時の応答変位とフーリエスペクトルである。図-25 は制御時のフィルタリング後の加速度で、図-26 は制御装置の状態変更履歴である。表-11 は応答加速度と応答変位について、実験供試体上層の最大値と実効値をまとめたものである。

非制御時の結果について検討を行うと、図-23(a)の応答変位では、実験供試体の応答変位が加振開始後から増大し、入力外力が小さくなる 8sec 以降は減衰自由振動に近い状態で振動振幅が減少している。フーリエスペクトルにおいては、1 次モードの振動数成分が卓越している。解析と実験の結果を比較すると、前述のような解析モデルと実験供試体の減衰の違いなどによる応答波形の相違はあるものの、スペクトルのピーク値などはおおむね一致しており、兵庫県南部地震の観測波を入力した場合でも解析と実験の整合性には問題がないと思われる。

制御時の結果について検討すると、図-25～図-26 から制御開始後 3.2sec で入力加速度を検知して制御装置が動作している。図-24(a)の応答変位では制御装置が作動した直後に各層の最大応答変位に達しており、その後は図-23(a)と比較して振動抑制効果が得られている。フーリエスペクトルにおける振動数特性についても、制御によって 1 次モードのピーク値が大幅に減少している。表-11 では非制御時に対する最大応答値は加速度で 82%、変位で 50%、実効値は加速度で 78%、変位で 44%になっており、釧路沖地震観測波を入力した場合と同程度の制振効果が発揮されていると考えられる。図-25 のフィルタリングされた加速度と状態変更履歴を検討すると、3.0～8.0sec にかけてローパスフィルタ通過成分の振動周期は、入力加速度の低振動数成分の影響を大きく受けており、これが閾値を超過することで制御装置は 3.2sec～9.0sec まで 6.8sec にわたって作動状態で固定されている。10sec 以降では、ローパスフィルタの抽出加速度は供試体の 1 次モードが卓越しており、比較的小さな入力に対する応

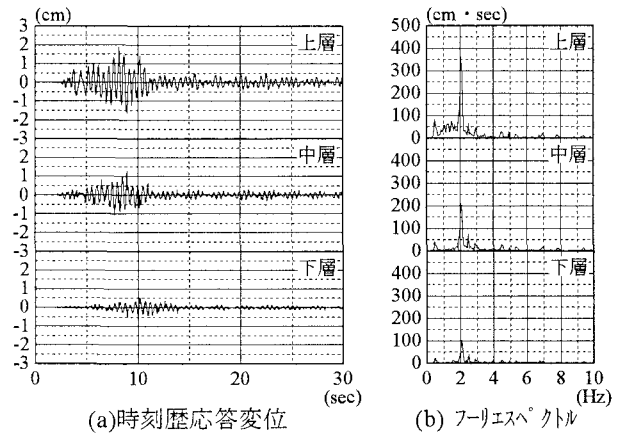


図-23 実験結果（兵庫県南部地震観測波・非制御）

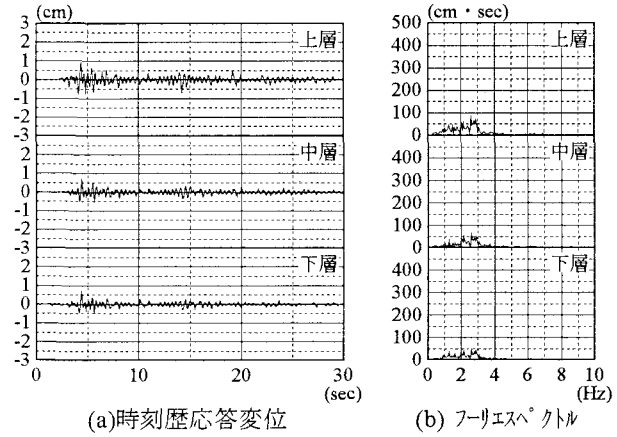


図-24 実験結果（兵庫県南部地震観測波・制御）

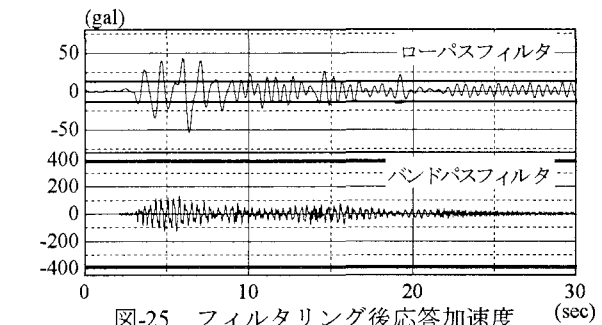


図-25 フィルタリング後応答加速度（兵庫県南部地震観測波・制御）

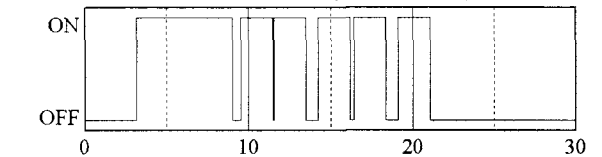


図-26 制御履歴（兵庫県南部地震観測波・制御）

表-11 上層の動的応答量（兵庫県南部地震観測波）

		非制御	制御
応答加速度 (gal)	最大値	269.23	221.37
	実効値	53.39	41.82
応答変位 (cm)	最大値	1.85	0.92
	実効値	0.32	0.14

答量の増大に対して、制御装置が断続的に ON 状態に切り替わっている。このことから、本研究の制御系は供試体の 1 次モードの応答と同時に、低振動数成分が卓越しやすい地震波の入力に対しても、ON-OFF 切り替えが行

われて制御がなされたと考えられる。制御装置の動作履歴については、構造物の応答量に実験と解析で若干の相違があり、ON-OFF が切り替わる時間は必ずしも一致しなかったものの、観測量の増減に応じて、制御装置の出力が切り替わっており、制御装置の動作は妥当であった。制御装置のモデル化を含む解析モデルの構築に際しては、実験供試体や制御装置の特性を簡略化した部分があるものの、解析結果は実験と十分な整合性を有し、いずれの入力加速度に対しても制振効果を確認できたため、構造物のモデル化や制御系設計手法は妥当だったと考えられる。

以上のように解析・実験の双方を通じて、振動特性の異なる不規則外力に対して制振効果が確認されたことから、本研究のセミアクティブ制振手法は比較的簡便に構造物の動的性能を確保、向上する振動制御方法として適用性を有するものと判断できる。

6. おわりに

本研究では、構造物の応答量に応じて剛性と減衰を変更する可変剛性・減衰型セミアクティブ制振システムの制振効果や制御系設計手法を検討するために、実験供試体を制御対象として制振シミュレーションと振動制御実験を行った。制御方式としては、観測対象とした振動モードの卓越状況を観測して、剛性と減衰を2段階で切り替える ON-OFF 制御を用いた。この制振システムに対して、不規則外力として振動数性状の異なる2つの地震加速度を入力して解析と実験を行った。また、ON-OFF 制御の設計パラメータを最適化するために、構造物のエネルギー量を評価関数とした GA を適用した。本研究によって得られた知見は以下のように要約される。

- ① 非制御時の結果は、解析と実験はおおむね一致しており、解析におけるモデル化は妥当であったと考えられる。解析では、釧路沖地震観測波の場合は制御装置を作動状態に固定したCase 2の応答量が通常状態に固定したCase 1と比較してかなり小さくなったが、兵庫県南部地震観測波の場合はCase 2の最大応答加速度はCase 1を上回り、構造物の動的応答量は入力外力の振動特性と密接に関係することを確認した。このため、入力や応答の卓越振動数に応じて構造物の状態を変更する構造性能可変型システムは、不規則外力が作用する構造物の制振手法として適用性を有するものと考えられる。
- ② 可変剛性・減衰型セミアクティブ制御に関して、本研究の振動制御システムは剛性・減衰の両方を同時に可変とする。可変剛性機構としては、鋼管の剛性付加により固有振動特性が変化して非共振が行われると同時に、構造物の全体剛性が増大することで応答変位が抑制された。可変減衰機

構については、ダンパの粘性減衰によって構造系の減衰定数が増加することで振動応答が抑制された。

- ③ 制御系設計に用いた釧路沖地震観測波を入力した解析では、ローパスフィルタ通過成分である通常状態の1次モードの応答に応じて状態の変更がなされ、通常状態に固定した場合と比較して高い制振効果が得られた。解析と同様の条件によって実施した実験においては、応答波形の形状や制御装置の動作履歴などでは若干の相違はあるものの、解析と同様のメカニズムで制御が行われ、応答加速度の実効値や応答変位が非制御時と比べて大幅に低減された。
- ④ 制御系設計時とは異なる兵庫県南部地震観測波を入力した結果、釧路沖地震波を入力した場合と同様の制振過程により振動応答が減少した。解析では構造物を通常状態あるいは作動状態に固定したいずれのケースに対しても動的応答量が小さくなり、実験でも制振効果が確認された。このようにいずれの入力外力に対しても、固有振動モードの卓越状況に応じて構造特性を変化させる本研究の制御手法は、構造物に単に剛性や減衰を付加するよりも高い振動抑制効果を有することがわかった。
- ⑤ 制御装置のON-OFFを切り替える簡便な手法により、制御対象に制御力を加えることなく制振効果を得た。また、ON-OFF制御のパラメータはGAによって決定したが、解析と実験の双方において、入力外力が異なった場合でも状態変更は適切に行われたことから、複数の設計変数を同時に決定するための手法として、GAの適用は有効である。本研究では単一の不規則外力に対して制御系のパラメータを決定したが、強制加振時における構造物の応答は、入力外力の振動性状や大きさそのものと密接な関係があるため、実際の構造物への適用に際しては、作用する外力の規模や特性について十分な検討を行った上で、制御系の設計を行うことが必要であり今後の課題だと考えられる。

【参考文献】

- 1) 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、No.501/I-29, pp.143-152, 1994.
- 2) 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.
- 3) 家村浩和、五十嵐晃、豊岡亮洋：実大構造物を用いた JDS の制振効果に関する実験的検討、地震工学研究発表会講演論文集、26 巻、pp.1121-1124, 2001.
- 4) 家村浩和、五十嵐晃、中田成智：実大連結構造システムのセミアクティブ最適震動制御実験、地震工学

- 研究発表会講演論文集、26 巻、pp.1113-1116, 2001.
- 5) Patten, W.N., Sun, J., Li, G., Kuhen, J. and Song, G.: Field test of an intelligent stiffener for bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.28, Issue 2, pp.109-126, 1999.
- 6) 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、鈴木隆：外ケーブルを用いた可変剛性型セミアクティブ制御について、鋼構造年次論文報告集 第 9 巻、pp.333-338, 2001.
- 11) 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.
- 12) L.デービス編：遺伝アルゴリズムハンドブック、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、森北出版、1994.
- 13) Miyamori, Y., Obata, T., Hayashikawa, T., Sato, K. and Oikawa, A.: Analytical study on variable stiffness vibration control on bridge structures by using external cable system, *Proceedings of the Fifth European Conference on Structural Dynamics (Eurodyn2002)*, pp.961-966, 2002.
- 14) 宮森保紀、小幡卓司、安達一憲、林川俊郎、佐藤浩一、下田和敏：塔状構造物の可変剛性・減衰型振動制御の適用性について、土木学会北海道支部論文報告集、第 59 号、2003.

(2003 年 9 月 12 日受付)