

## 鋼製タワーにおける断面性能可変型セミアクティブ制御の適用性に関する実験的研究

## Experimental Study on Applicability of Semi-Active Variable Stiffness and Damping Control on Steel Towers

|               |        |                             |
|---------------|--------|-----------------------------|
| 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 | 学 生 員  | 安達 一憲 (Adachi Kazunori)     |
| 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)         |
| 新日本製鐵株式会社     | 正 員    | 下田 和敏 (Shimoda Kazutoshi)   |

## 1. はじめに

兵庫県南部地震においては、多くの構造物が損傷を受けたことから、近年では構造物の安全性に関して検討を行うことは、従来よりもはるかに重要視されるようになってきた。橋梁構造物の耐震性を向上させるためには、従来、部材の断面や強度を増大させることによって構造物の剛性を高めることに主眼がおかれていたが、このような手法では通常時に作用する荷重に対しては過大な設計となるおそれがあり、また、構造物の剛性を高めることにより作用する慣性力が増大し、設計自体が不可能となる場合もある。さらに、構造形式や架設位置の状況によっては、断面形状や部材強度の変更などによって耐震性や振動使用性などの確保が困難な場合があり得る。このようなときには、構造物に何らかのデバイスを設置することによって制振を行う、振動制御手法を導入することが有効であると考えられる。橋梁構造物における振動制御の適用例としては、吊橋および斜張橋の主塔などを中心としてこれまで数多く報告されており<sup>1),2)</sup>、架設時の作業性や耐風安定性の向上を目的としたものが多い。これらの制御方式はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される。パッシブ方式は制御装置を駆動させる動力源が不要であるため、実構造物への適用が比較的容易であるものの、制御装置の設計対象とした振動モードのみにしか制振効果が得られないことや、立ち上がり時間が遅いなどの短所がある。また、多次モードの同時制振が可能なアクティブ方式に関しては、制御装置の設置スペースや駆動エネルギーの確保などの解決すべき課題が多く残されている。橋梁構造物の振動制御においては、これらのパッシブ方式・アクティブ方式のそれぞれの制約から、作用する外力の規模が大きく、入力外力の振動数特性の予測も困難な地震に起因する振動の抑制を目的としたものは比較的少数にとどまっている。

これらのパッシブ方式あるいはアクティブ方式の問題点を解消あるいは軽減するものとして、最近ではセミアクティブ方式と称される制振手法の研究が進められている<sup>3),4)</sup>。セミアクティブ方式は制御装置の動作によって制御対象に減衰あるいは剛性を付加することで、構造物の断面性能を可変として振動応答の抑制を図ろうとするものである。この制御方式は構造物に直接制御力を作用させないため、想定外の振動モードを励起させる危険性などがなく安定性に優れた制御が可能であり、比較的小さな駆動エネルギーで制御装置を動作させることができる。また、アクティブ制御のように何らかの制御理論を用いて制御力を算出することなく、ON-OFF制御などのように制御装置の状態を選択的に変更することでも制御ができることから、制振システムは簡便で廉価になるものと思われる。したがって、セミアクティブ方式を用いた橋梁構造物の振動制御は、耐風性能の向上や交通振動の低減のみならず、地震動に対して構造物の安全性を合理的に向上させるための一手法として、高い適用可能性を有しているものと思われる。

以上を踏まえて本研究は、吊橋あるいは斜張橋などの鋼製タワーを制御対象として、断面性能可変型システムを用

いたセミアクティブ振動制御実験を行い、その制振効果あるいは適用性に関して基礎的な検討を行うことを目的とする。本研究で採用する断面性能可変型セミアクティブ制御は、制御対象となる実験供試体に剛性と減衰を付加する制御装置を搭載し、構造物の応答量に応じて制御装置の動作をON-OFFで切り替える手法を採用した<sup>5)</sup>。このようなON-OFF制御においては、制御装置の状態を切り替える際の構造物の応答量に対する閾値が制振効果に大きな影響を与えると考えられる。このため、実験に先立って振動制御シミュレーションを実施し、遺伝的アルゴリズム<sup>6~9)</sup>（以下、GAと称する）を用いて設計パラメータの決定を行った。具体的には、まず実験供試体の断面諸元から構築した3次元骨組モデルを用いて、構造物の1次モードの減衰自由振動に対する振動制御シミュレーションとGAによる設計パラメータの決定を行った。この制振シミュレーション結果を基に、実験供試体に対して制振実験を実施し、解析および実験で得られたそれぞれの結果について制御時、非制御時を比較することにより制振効果を検討した。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。

## 2. 鋼製タワーモデルと固有振動特性

本研究では、写真-1のような吊橋や斜張橋の鋼製タワーを想定した3層ラーメン構造を有する高さ2.1mの実験供試体を製作した<sup>8)</sup>。この実験供試体は、中層に角鋼とオイルダンパーで構成された制御装置を有しており、オイルダンパーのピストンロッド先端部に取り付けた電磁石の動作によって、構造物と制御装置の接続状態を切り替えることで制御対象に剛性と減衰を付加できる機構を有している。この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。減衰自由振動実験は制御装置を動作させない状態(以下、通常状態と称す)および作動によって剛性・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。表-1は実験供試体の弱軸

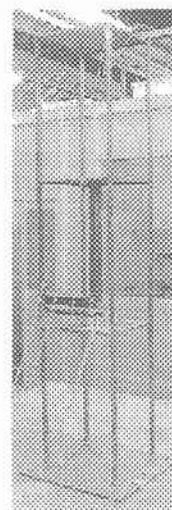


写真-1 実験供試体

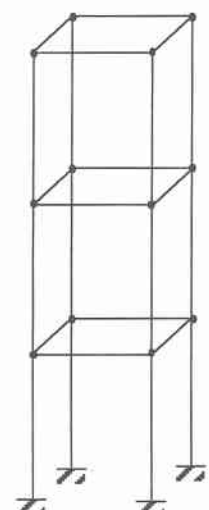


図-1 解析モデル

方向における各振動モードの固有振動数および減衰定数である。表-1 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40%程度上昇しており、制御系の設計はこの固有振動数の変化に着目して行うこととした。なお、作動状態の3次モードに関しては、制御装置の動作によって実験供試体の中層の剛性が大きくなることから、3次モードが極めて卓越しにくい構造特性となり、減衰自由振動波形を得ることができなかった。次に、この実験供試体の断面諸元を用いて、通常状態および作動状態のそれぞれについて図-1 のような3次元骨組モデルを構築した。表-2はこの解析モデルに対して行った複素固有振動解析の結果であり、表-1の減衰自由振動実験結果と比較すると、解析モデルの固有振動特性は実験供試体とほぼ一致していることから、構造物のモデル化は適切に行われたと考えられる。

### 3. 制御系設計手法

#### 3. 1. 断面性能可変型セミアクティブ制御

構造物の断面性能を変化させて制御を行う構造性能可変型システム<sup>10)</sup>において、減衰と剛性の両者を変化させる場合の運動方程式は式(1)のように表される。

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

ここで $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{C}_v$ および $\mathbf{K}_v$ 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、可変減衰マトリックスおよび可変剛性マトリックスであり、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルである。可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ および可変剛性マトリックス $\mathbf{K}_v$ は、制御によって付加される粘性減衰あるいは剛性の増分であり、これらを構造物の応答に応じて随時変化させることで構造物の断面性能を可変とし、構造物の制振を図るものである。なお本研究においては、減衰マトリックス $\mathbf{C}$ に質量比例型減衰マトリックスを採用し、このマトリックスの算定における減衰定数は、表-1における減衰自由振動実験の実測値を用いた。

本研究においては簡便な手法で制御系を構築することを目的として、構造物の応答に応じて粘性減衰および剛性の付加を一義的に行うON-OFF制御を採用することとした<sup>9), 11)</sup>。この手法は、構造物の単一の応答量を観測すれば制御則を定めることができ、制御装置の作動もしくは非作動の切り替えのみで制御を行うため、制振システム全体を簡便に構成できる利点を有する。このような場合は、構造物の固有振動特性に基づいて制御則を構築することが通常であり、本研究においても、制御装置の動作によって1次モードの固有振動数が変化することに着目して制御系の設計を行うものである。具体的な設計手法は、制御装置が構造物に連結されることによって、制御対象の1次モードの固有振動数がおよそ0.75Hz変化することから、通常状態および作動状態における1次モードの卓越状況をそれぞれ観測することで、制御装置の動作を切り替えることとした。すなわち、構造物上層における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制御装置の状態を切り替えて制振を行うものである。着目する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なIIR型楕円フィルタであり、フィルタ係数にタイムステップ毎の応答加速度を乗じて着目する振動数成分を抽出する。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応答量の設定は、制振効果に大きな影響を与えられとされる。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い、制御システムの設計を行うこととした。

表-1 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   |
| 1st. | 1.86      | 2.61 | 0.95    | 4.49 |
| 2nd. | 6.54      | 6.74 | 0.30    | 1.72 |
| 3rd. | 9.96      | ---  | 0.27    | ---  |

表-2 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   |
| 1st. | 1.86      | 2.61 | 0.94    | 4.49 |
| 2nd. | 6.54      | 6.73 | 0.27    | 1.75 |
| 3rd. | 9.95      | ---  | 0.18    | ---  |

#### 3. 2. 遺伝的アルゴリズム(GA)

GAは生物進化の過程に着想を得て、2進数のビット列で表現した最適化パラメータに対して、選択、交叉、突然変異といった操作を繰り返しながら解の探索を行う最適化手法の一種で、近年では各種の工学的分野で応用が進められている<sup>7)</sup>。本研究では構造性能可変型制御において、構造物に減衰および剛性を付加する際の、フィルタリングされた応答加速度の基準値を決定するためにGAを用いた。

GAの適用に際しては、生成された個体の評価を行う目的関数の設定が重要な問題となる。本研究においては、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<sup>10), 11)</sup>。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^n (\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \mathbf{x}) \quad \cdots (2)$$

ここで、式(2)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(2)における $J_{GA}$ の値をより小さくする個体がより高い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オペレーション中に生成される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個別に実施することで適応度を算出した。

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。なお、初期集団は50個体、交叉率は0.5、突然変異率は0.02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。

以上のようなGAによる解析によって得られた、本研究のセミアクティブ制御における応答加速度の基準値は、それぞれローパスフィルタ通過成分に対して $a_1=5\text{gal}$ 、ハイパスフィルタ通過成分に対して $a_2=310\text{gal}$ になった。したがって、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。

#### 4. 振動制御シミュレーション

本研究では振動制御実験に先立って、鋼製タワーモデルに対するセミアクティブ制振シミュレーションを実施した。時刻歴応答解析手法としては、修正荷重増分法を用いたニューマークβ法による直接数値積分法を採用し、係数βは1/4、時間刻みは $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、解析時間は30秒間として解析を行った<sup>9)</sup>。本研究においては、構造物の卓越振動モードに対する制振効果を検討するため、解析は1次モードの減衰自由振動を対象とした。加振方法としては通常状態

の1次固有振動数(1.86Hz)を有する正弦波を一定時間入力し、加振終了と同時に制御を開始することとしたが、実験との整合性を考慮して、制御開始時の構造物上層の応答加速度が400gal程度になるように正弦波の振幅を調整した。

時刻歴応答解析の結果を図-2に示す。図-2(a)は構造物上層の時刻歴応答変位であり、上段は非制御時、下段は制御時の解析結果である。(b)は制御装置の状態変化の履歴を表しており、制御装置が作動した場合を1、作動しない場合を0で表現している。また、(c)は(a)で示した応答変位のフーリエスペクトルであり、比較のために非制御時の最大値で無次元化を行った。

図-2(a)および(b)の応答変位および状態変更履歴に着目すると、制御開始直後から構造物の振動周期に応じて制御装置の状態が切り替わり、これによって制御時の応答変位が急激に減少している。制御時と非制御時の比較では、制御開始後5秒間で応答変位の振幅が約1/4になっており、制御開始後15秒後には構造物の振動がほぼ完全に抑制されていることが確認できる。図-2(b)においては、制御装置の切り替え周期がほぼ一定間隔となっているが、今回の解析では構造物が1次モードのみで振動しているため、制御装置の状態切り替えがローパスフィルタによって抽出された応答加速度とそれに対する基準値の大小関係のみによって行われているためと考えられる。また、図-2(c)のフーリエスペクトルについても、1次モードのピーク値が非制御時の1/3程度まで減少しており、制御系の設計において観測対象とした1次モードの制振に極めて高い振動抑制効果を発揮していると考えられる。

### 5. 振動制御実験

本研究では、図-3のような実験システムを構築し、GAによって最適化された設計変数を用いてセミアクティブ振動制御実験を行った。実験は解析と同様に1次モードの減衰自由振動に対して行い、振動台上に設置した実験供試体を一定時間加振し、振動台の停止と同時に制御と応答加速度の計測を開始した。制御時間は30秒間で、サンプリング周波数は100Hzであるが、制御装置の追従性を考慮して、制御装置が作動状態へ切り替わった後、0.05秒間は通常状態に切り替わらないように設定を行った。

振動制御実験の結果を図-4に示す。解析結果と同様に(a)は構造物上層の応答変位、(b)は制御装置の状態変更履歴、(c)は応答変位のフーリエスペクトルであり、(a)、(c)においては上段が非制御時、下段が制御時の実験結果である。なお、応答変位の算出は加速度計によって得られた応答加速度を時間積分することによって計算したが、加速度データに含まれるノイズ成分を除去するために多項式適合法を用いて移動平均を算出し、さらに加速度計のオフセットによる積分誤差を補正するための数値補正を行った。

図-4(a)の応答変位においては、非制御時には計測終了時においても構造物は振動を続けているが、制御時は制御開始後速やかに応答量の低減がなされ、約6秒間でほぼ完全に振動が抑制される結果となっている。図-4(b)における状態変更履歴についても、応答量が十分に低減される制御開始後約5秒まで頻繁に装置の切り替えが行われていることが確認できる。また図-4(c)のフーリエスペクトルについても、1次モードのピーク値が制御によって非制御時の5割程度に減少しており、解析と同様に卓越モードに対する振動抑制効果が十分に発揮されていることがわかる。解析結果と実験結果の相違について考察を加えると、まず制御装置の状態変更履歴について、図-4(b)においては解析結果である図-2(b)と比較して極めて短い周期で切り替わり、解析結果と比較して約1/3の時間で制御装置の動作が停止していることがわかる。解析結果においては前述のように構

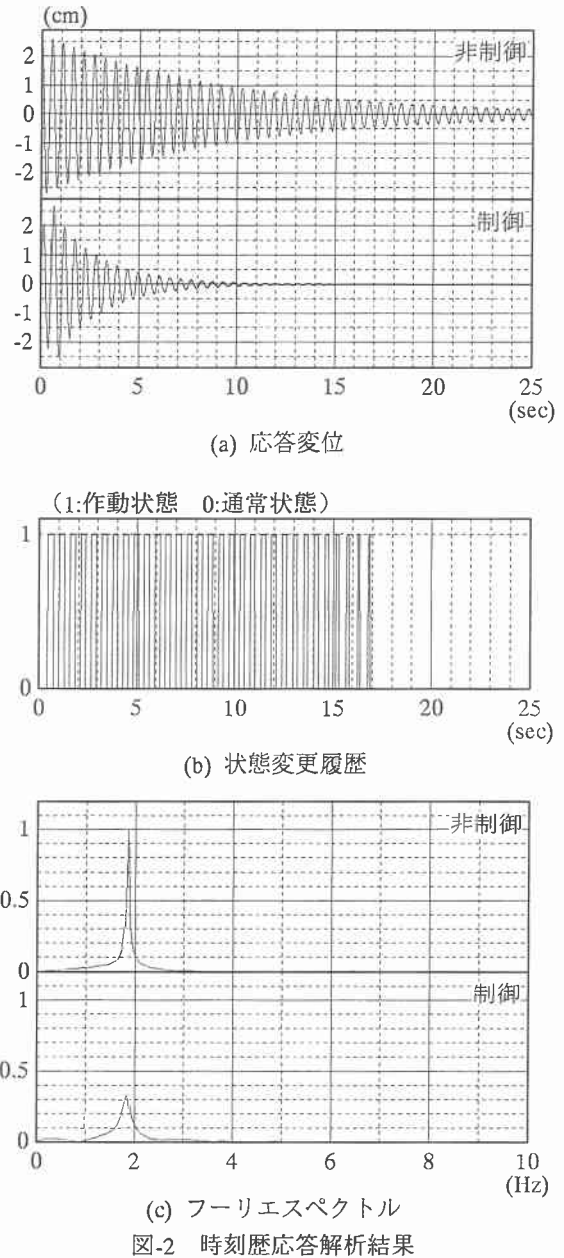


図-2 時刻歴応答解析結果

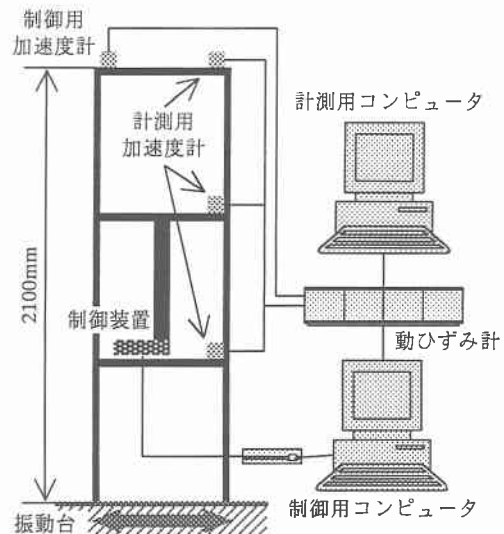


図-3 実験システム概要

造物の振動周期と同期して状態変更が行われていたが、実験においては、制御装置に取り付けた電磁石が実験供試体に接触する際に構造物に多少の衝撃を与え、これが応答加速度においては比較的高い振動数成分を有するものとなっている。このため、応答加速度のハイパスフィルタ通過成分が設定した基準値を超過し、制御装置の状態が変更されることで、このような小刻みな状態変更が行われたものと考えられる。また、解析ではダンパーの粘性減衰をストロークに依らず一定としたが、ストロークが大きい場合にはより大きな減衰力が作用し、装置の接続・開放時の摩擦によるエネルギー吸収も行われたため、実験の応答変位は解析結果と比較してより速やかに低減されたものと推定される。さらに、構造物の応答変位が上記のような理由により速やかに低減されたことに加えて、通常状態に対する動作基準値が小さかったことから、加速度センサーの閾値や A/D 変換ボードの分解能の影響により、構造物の応答量が小さい場合に制御装置の動作が行われず、解析と比較して短時間で制御装置の動作が停止したものと思われる。以上の結果より、本研究の断面性能可変型制御は、実験および解析ともに卓越する振動モードに対して高い振動抑制効果を期待できることが明らかになった。

## 6. おわりに

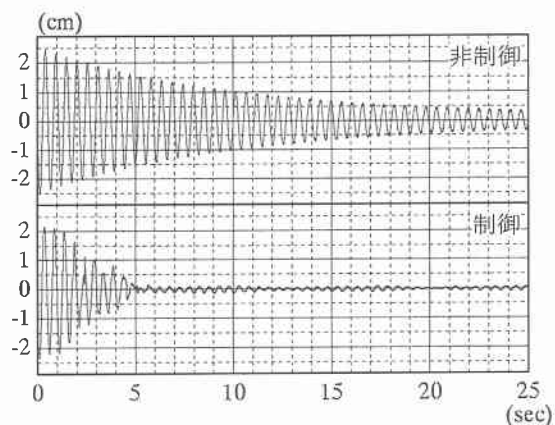
本研究は、吊橋・斜張橋などの鋼製タワーを想定した塔状構造物を制御対象として、解析および実験を通じて断面性能可変型セミアクティブ制御の有効性などについて検討を加えたものである。制御系設計に際しては、簡便な制振システムである程度の制振効果を期待できる ON-OFF 制御を採用し、GA を用いて設計変数の決定を行った。

本研究の解析および実験結果からは、制振シミュレーションおよび制振実験の双方において、構造物の 1 次固有振動モードに対して高い制振効果を確認できたことから、構造物の一部分の断面性能を 2 段階に切り替えるといった比較的簡便な手法でも、構造物の制振は十分に可能であるものと思われる。また、GA によって決定されたパラメータは、不確定要素がある程度含まれる実験に適用した場合でも同等の結果が再現できたため、GA を制御系の設計に用いることは有効であると考えられる。

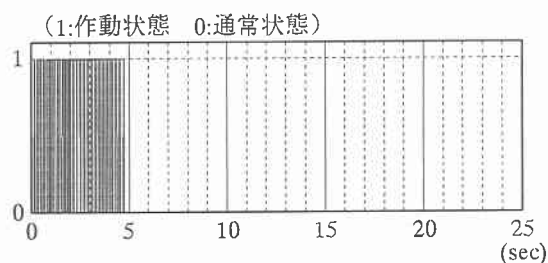
以上より本研究の手法は、アクティブ制御と比較して簡便な制振システムで高い制振効果が発揮できることから、実構造物への適用性も比較的高いものと考えられる。加えて制御装置についても、近年では機能性流体や圧電材料などを用いた制振デバイスの研究が進んでおり、橋梁構造物に適用可能なセミアクティブ制御装置の実現可能性も十分にあると思われる。したがって、実構造物への制御装置の実装方法についてさらに検討を進めると同時に、地震動などを用いたランダム加振に対する制振効果を検討することで、本研究のようなセミアクティブ方式による振動制御は、橋梁構造物の動的性能を確保・向上させるための有効な手法になり得るものと思われる。

## 【参考文献】

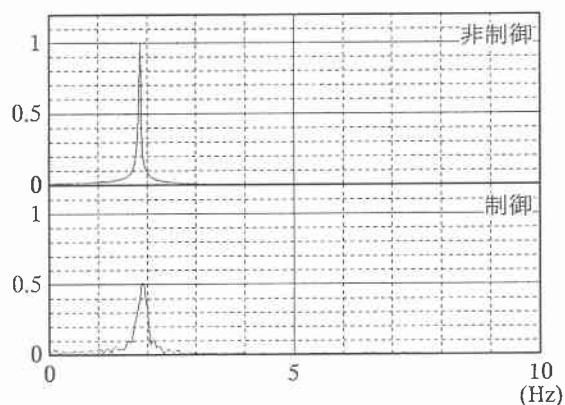
- 1) 藤野陽三：土木構造物のアクティブ制振の研究動向、計測と制御、Vol.31, No.4, pp.473-478, 1992.
- 2) 津村直宣編：制振事例、振動制御コロキウム、PART B, pp. 102-172, 1991.
- 3) 家村浩和、五十嵐晃、中田成智：連結構造物のバリアブルダンパーによる最適震動制御に関する研究、構造工学論文集、Vol. 46A, pp.575-582, 2000.
- 4) 川島一彦、運上茂樹：バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御、土木学会論文集、第 501 号/I-29, pp.143-152, 1994.



(a) 応答変位



(b) 状態変更履歴



(c) フーリエスペクトル

図-4 振動制御実験結果

- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 鹿沓麗、杉本博之：GA におけるパラメータの効果に関する研究、構造工学論文集、Vol.41A, pp.619-626, 1995.
- 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化に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A, pp.685-692, 1997.
- 9) 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.
- 10) 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.
- 11) 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.