

## 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

## Applicability of Variable Stiffness and Damping Vibration Control on Tower Models

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 学 生 員 安達 一憲 (Adachi Kazunori)  
 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

地震や風、交通荷重などの不規則外力を受ける構造物の動的性能を向上させる手法として、振動制御の有効性が知られている<sup>1)</sup>。構造物の制振手法としては、パッシブ方式やアクティブ方式など各種の方法が知られている。近年では構造物に直接制御力を作用させずに、制御装置の動作により構造特性を可変として制御を行うセミアクティブ方式が注目されており、エネルギー効率に優れ安定した制御効果を期待できる手法として、実際の構造物への適用が検討されている<sup>2)</sup>。

本研究では、土木構造物の動的性能を効率的かつ簡便に向上させることができる、セミアクティブ制御の実構造物における実現可能性を向上させるために、比較的簡便な制御則と制御装置により実験供試体の構造性能可変振動制御を行った。具体的な制御方式としては、制御対象となる実験供試体に剛性と減衰を付加する可変剛性・減衰型の制御装置を搭載し、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。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閾値などの設定が制振効果に大きな影響を与える。このため、設計パラメータの決定を組み合わせ最適化問題として、遺伝的アルゴリズム（以下、GA と称する）を適用した<sup>3)~5)</sup>。このような制振システムについて、地震加速度を用いた強制加振に対する制振シミュレーションと振動制御実験を実施した。本研究はこれらの実験と解析から、可変剛性・減衰型セミアクティブ制御の制振効果や適用性と、制御系設計手法の妥当性について考察を行ったもので、これらの結果について報告する。

## 2. 制御対象構造物と固有振動特性

本研究では、写真-1のような3層塔状構造を有する高さ 2.1m の実験供試体を製作した<sup>6),7)</sup>。この供試体は中層に鋼管とオイルダンパからなる制御装置を有しており、ダンパの先端に取り付けた電磁石によって、構造物と制御装置の接続状態を ON-OFF で切り替える。ここでは、電磁石が作動して制御装置と構造物が接続され、鋼管の剛性とダンパの粘性減衰が作用する状態を作動状態と称し、制御装置を作動させない状態を通常状態と称する。この実験供試体の断面諸元などを用いて、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2次元多自由度系の解析モデルを構築した。実験供試体および解析モデルの固有振動特性を把握するために、減衰自由振動実験と複素固有振動解析を実施した。表-1 は減衰自由振動実験で得られた各振動モードの固有振動数および減衰定数である。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33%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



写真-1 実験供試体

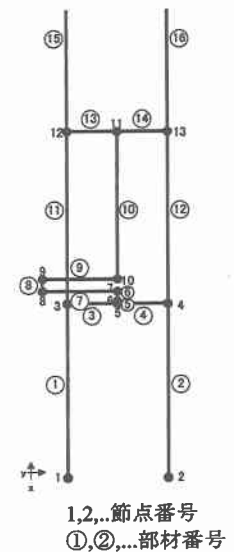
図-1 解析モデル  
1,2,...節点番号  
①,②,...部材番号

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. | 1.95      | 2.61 | 0.28    | 2.17 |
| 2nd. | 6.53      | 6.65 | 0.29    | 0.58 |
| 3rd. | 9.95      | ---  | 0.19    | ---  |

ととした。また、作動状態の減衰定数もダンパの粘性減衰によって通常状態から大幅に上昇している。複素固有振動解析の結果から、解析モデルも表-1の実験結果とほぼ等しい固有振動特性を有しており、構造物のモデル化は適切に行われたと考えられる。

## 3. 可変剛性・減衰型セミアクティブ制御

## 3. 1. ON-OFF 制御

可変剛性・減衰型システムの運動方程式は式(1)のように表される<sup>8)</sup>。

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

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。本研究では可変減衰マトリックス  $\mathbf{C}_v$  はダンパの減衰係数を所定の自由度に配置したものであり、可変剛性マトリックス  $\mathbf{K}_v$  は制御装置の鋼管の剛性から構成される。また、構造物そのものの減衰である減

減衰マトリックス  $\mathbf{C}$  には質量比例型減衰マトリックスを採用し、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。

この可変剛性・減衰型システムについて、本研究では簡便に制御系を構築するために、低次モードの卓越状況に応じて剛性と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。制御装置が作動することで 1 次固有振動数が増加することから、構造物上層の応答加速度を観測量とし、通常状態と作動状態における 1 次モードをフィルタリングによってそれぞれ抽出する。抽出した応答加速度が予め設定した閾値を超過した場合に、制御装置の ON-OFF を切り替えて動的応答量の抑制を図る。採用したフィルタは IIR 型楕円フィルタであり、通常状態と作動状態の 1 次モードを抽出するために、カットオフ周波数が 2.2Hz のローパスフィルタおよびパスバンドが 2.3~10.0Hz のバンドパスフィルタを用いた。ON-OFF 変更の判定はタイムステップ毎に実施するが、構造特性の変化による振動抑制効果を発揮させるためには、制御装置の作動後に一定時間作動状態を維持することが効果的であるため、本研究では制御装置が ON になった場合に状態固定時間を設定する。このような制御則では、状態変更の基準となる閾値と状態固定時間の設定が制振効果に極めて大きな影響を与える。そこで本研究では、GA によってこの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。

### 3. 2. 遺伝的アルゴリズム(GA)

本研究では ON-OFF 制御において、剛性および減衰を切り替える際の、ローパスフィルタ通過成分とバンドパスフィルタ通過成分に対する閾値と作動状態固定時間の 3 変数を同時に決定するために GA を用いた。

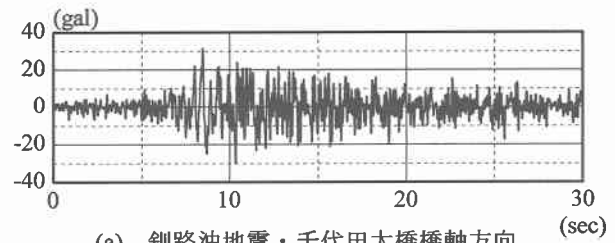
GA の適用に際しては、生成された個体の評価を行う目的関数の設定が重要な問題となる。本研究においては、構造物のエネルギー量に着目して以下のような関数を設定した。

$$J_{GA} = \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{m=1}^n \left( \dot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}_m + \dot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}_m + \dot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{K} \mathbf{x}_m \right) \Delta t \right] \quad (2)$$

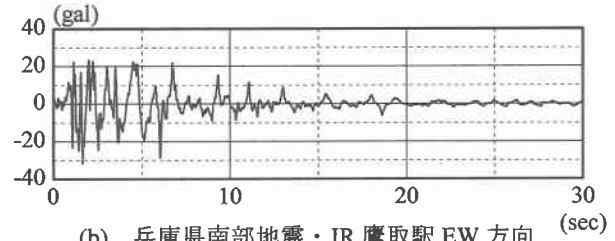
式(2)において総和記号内の第 1 項は構造物の運動エネルギーを、第 2 項は減衰エネルギーを、第 3 項はひずみエネルギーを表しており、これらの制御時間全体での総和を求めることにより、構造物のエネルギー量がどの程度低減されるかを算出することとした。したがって、式(2)における  $J_{GA}$  の値をより小さくする個体がより高い制振効果を有する変数の組み合わせであると評価することができる。GA オペレーション中では各個体の適応度を評価するため、時刻歴応答解析による制振シミュレーションを個別に実施した。このシミュレーションでは釧路沖地震における千代田大橋の橋軸方向の観測波形を入力外力として、最大値を 32.5gal に変換して用いた。入力した加速度波形を図-2(a)に示す。

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 100 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.03 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。

GA による解析によって得られた、ON-OFF 制御の設計パラメータは、通常状態のローパスフィルタ通過成分



(a) 釧路沖地震・千代田大橋橋軸方向



(b) 兵庫県南部地震・JR 鷹取駅 EW 方向

図-2 入力加速度

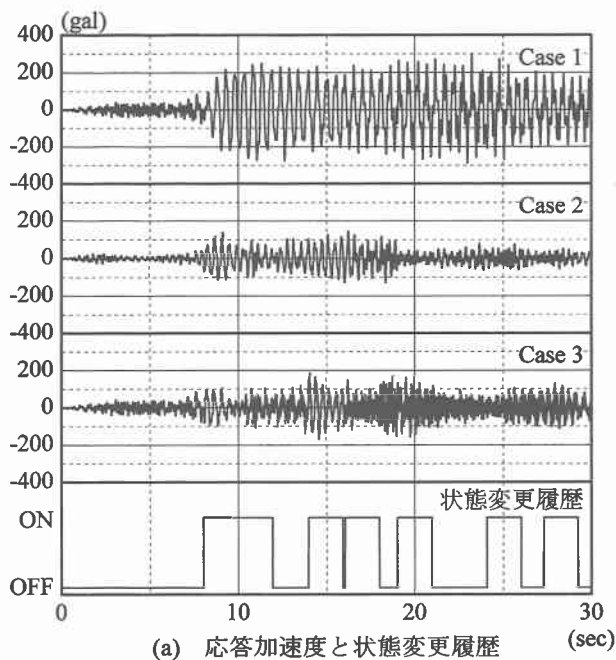
に対する閾値が 12.52gal、作動状態のバンドパスフィルタ通過成分に対する閾値は 385.52gal、状態固定時間は 1.94sec になった。したがって、これらの値に基づいて制御系を設定し、制振シミュレーションを実施する。

### 4. 振動制御シミュレーション

振動制御実験に先立って、解析モデルに対する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、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 1/2、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。入力外力は GA による制御系設計で用いた釧路沖地震観測波に加えて、振動特性が異なる外力に対する制振効果についても検討を行うために、図-2(b)の兵庫県南部地震における JR 鷹取駅観測波(EW 方向)を入力した場合の解析も行った。解析ケースは構造物に可変剛性・減衰を付加しない通常状態で固定した Case 1、可変剛性・減衰を全制御時間で固定した Case 2、ON-OFF 制御を行う Case 3 の 3 ケースとした。図-3 は釧路沖地震観測波、図-4 は兵庫県南部地震観測波を入力した場合の時刻歴応答解析結果である。

図-3 の釧路沖地震観測波を入力した結果に着目すると、Case 3 では応答加速度が増大し始める約 8sec から ON-OFF の変更が断続的に行われ、Case 1 と比較して一時的に剛性と減衰を付加するのみで加速度振幅が大幅に減少している。可変剛性・減衰を固定した Case 2 では、ダンパによる減衰付加の影響が大きく動的応答量の抑制効果は極めて高いが、図-3(b)における 1 次モードのフーリエスペクトルのピーク値は、Case 3 がもっとも小さくなっており、剛性変化による非共振化によって 1 次モードの振動が抑制されている。

兵庫県南部地震観測波を入力した場合の図-4 でも、ON-OFF 制御を行った Case 3 では、応答量に応じて適切な制御が行われ、応答加速度が Case 1 より小さくなっている。フーリエスペクトルでは構造物の状態を固定した Case 1、Case 2 と比較して 1 次モードのピーク値が大幅に減少しており、卓越振動モードに対して高い制振効果を発揮している。また、図-4(a)では可変剛性と減衰を固定した Case 2 の 0~5sec で応答加速度が大きくなり最大値は Case 1 を上回っている。これは入力の卓越振動数成分が、作動状態の 1 次固有振動数と近接することで大きな応答が発生したものと推定される。このような場合、



(a) 応答加速度と状態変更履歴 (sec)

(b) フーリエスペクトル (Hz)

図-3 時刻歴応答解析結果（釧路沖地震観測波入力）

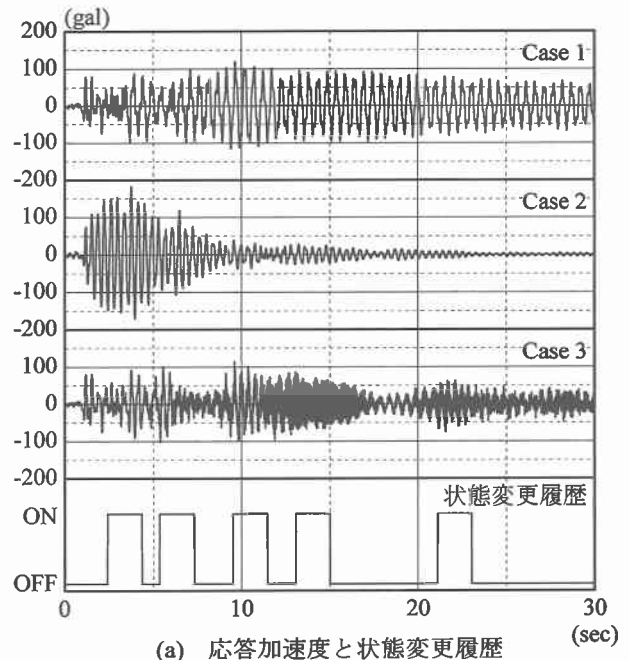
応答量に応じて構造物の状態を適切に変更して非共振化による制振を行う、本研究のような構造成能可変型システムは動的応答量の低減に有効な手法であると考えられる。これらの結果から本研究の制御手法は、制御系設計時とは異なる入力加速度に対しても制振効果が発揮されており、不規則外力による振動応答の低減に適用性を有すると考えられる。

さらに、図-3 および図-4 の状態変更履歴では、観測量がローパスフィルタの閾値を超過することで制御装置が ON になり、設定した状態固定時間の経過後に通常状態に復帰している。このため、作動状態に対する閾値は機能していないが、状態の切り替えそのものは適切に行われ、制振効果が発揮されていることから、GA による制御系設計は妥当であったと考えられる。

## 5. 振動制御実験

解析で確認した制振効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。実験は解析と同様の制御手法で行い、制御系の設計変数は解析と同一の値を用いている。入力外力も釧路沖地震観測波と兵庫県南部地震観測波を用いたが、釧路波については入力時間を 60sec とした。実験は可変剛性・減衰を作用させない非制御と ON-OFF 方式による制御の 2 ケースで行った。図-5 が釧路沖地震観測波、図-6 が兵庫県南部地震観測波を入力した場合の実験結果である。

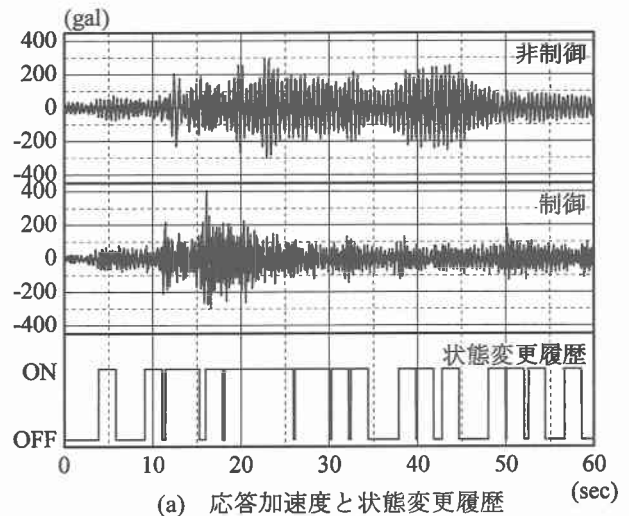
まず非制御時の実験結果を解析と比較すると、若干のモデル化誤差などの影響があるものの、図-5、図-6 の加速度波形とスペクトルは図-3、図-4 の Case 1 の応答加速度とおおむね同様の傾向を示している。



(a) 応答加速度と状態変更履歴 (sec)

(b) フーリエスペクトル (Hz)

図-4 時刻歴応答解析結果（兵庫県南部地震観測波入力）



(a) 応答加速度と状態変更履歴 (sec)

(b) フーリエスペクトル (Hz)

図-5 振動制御実験結果（釧路沖地震観測波入力）

図-5 では、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ている。入力外力が大きくなり応答量が急速に増大する 10～20sec では応答加速度が一時的に大きくなるが、入力外力が継続して作用する 20～50sec においては、応答量の

増減に応じて制御装置が動作し、高い振動抑制効果が発揮されている。またフーリエスペクトルは、1次モードの最大ピークが通常状態の1次固有振動数である2.0Hz前後から作動状態の2.6Hz前後に移動しており、ピーク値は実験供試体上層では非制御時の1/3程度まで低下している。また、制御系の設計時に直接考慮していない2次モードについても制御によってピーク値が2割程度低減されている。これは制御装置の動作による剛性および減衰の増加が構造物の応答量全体の抑制に寄与したものと考えられ、本研究の制御システムはある程度のロバスト安定性も期待できる。このため、本研究の可変剛性・減衰型システムは不規則外力に対して、構造物の動的性能を確保することが十分に可能であると判断できる。

図-6の兵庫県南部地震観測波を入力した場合は、制御装置の動作により5.0secから振動振幅が減少し、7.5sec以降ではおおむね一定レベルに抑制されている。非制御時の応答加速度が8.0～9.0secにかけて最大値に達していることと比較すると、制御時は剛性と減衰の付加によって振動振幅が大きく抑制されていることが確認できる。フーリエスペクトルにおいても最大ピークがON-OFF制御によって通常状態から作動状態の固有振動数に遷移し、ピーク値も大幅に低減されている。

このように、本研究のON-OFF制御やその設計手法は、簡便ながら高い制振効果が発揮でき、実験においても解析と同様の結果を得られたことから、実構造物における適用性も十分に有すると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、構造物の剛性および減衰をその応答量に応じて変更することで制振を行う、構造性能可変型セミアクティブ制御の振動抑制効果や適用性を検討するために、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制御を用いて、制御系のパラメータをGAによって決定した。この制振システムに対して、振動特性の異なる2つの地震加速度を入力して解析と実験を行った。

解析結果において、制御装置を通常状態で固定した場合と作動状態で固定した場合では、入力加速度によって応答量の傾向に相違が生じ、動的応答量が入力外力と構造物の振動特性の関係に密接に依存することを確認した。このような場合、固有振動モードの卓越状況に応じて構造物の状態を変更すれば動的応答量の抑制が可能だと考えられ、制御を行ったCase 3では、可変剛性・減衰をON-OFFで切り替えることで、固有振動特性の変化による非共振化と全体剛性・減衰の増大により1次モードの応答量が大きく抑制された。また、構造物全体に剛性と減衰が付加されることで、制御系の設計時に直接対象としていない2次モードでも動的応答量が減少し、本研究の制御系はある程度のロバスト性も有するものと思われる。さらに、制御系設計時とは異なる入力加速度を用いた場合でも、動的応答量の低減が確認され、実験においても解析と同様の制振効果が発揮された。このため、本研究の可変剛性・減衰型制振システムとGAによる制御系設計は不規則外力に対して高い制振性能を発揮すると認められ、実験でも同等の結果が得られたことから、実際の構造物における適用性も十分に有すると考えられる。

今後は、制御装置の実装方法についてさらに検討を進

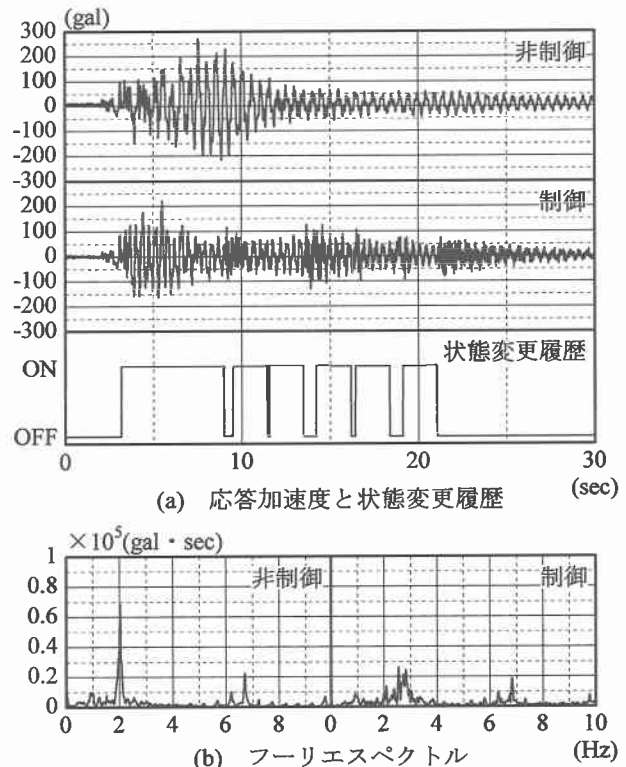


図-6 振動制御実験結果（兵庫県南部地震観測波入力）

めることで、本研究のようなセミアクティブ制御は土木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。最後に、実験に協力して頂いた北海道大学大学院工学研究科 及川昭夫技官、博士課程1年 鈴木隆氏をはじめとする大学院生の諸氏に対し、ここに記して感謝の意を表する次第である。

## 【参考文献】

- 1) 津村直宣編：制振事例、振動制御コロキウム、PART A, pp. 102-172, 1991.
- 2) W.N. Patten, J. Sun, G. Li, J. Kuhen and G. Song : 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.
- 3) 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.
- 4) 鹿汴麗、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.
- 5) 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.
- 6) 宮森保紀、安達一憲、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、下田和敏：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、土木学会北海道支部論文報告集、第58号、pp.220-223, 2002.
- 7) 宮森保紀、安達一憲、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一、下田和敏：断面性能可変型セミアクティブ制御の振動制御実験について、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.57, I-607, pp.1213-1214, 2002.
- 8) 小堀鐸二：制震構造、鹿島出版会、1993.