

外ケーブルを用いた橋梁構造物の可変剛性型セミアクティブ制御について

Study on Semi-Active Variable Stiffness Control of Bridge Structures by using External Cable System

北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀(Yasunori Miyamori)
北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司(Takashi Obata)
北海道大学大学院工学研究科○学生員 鈴木 隆(Takashi Suzuki)
北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川俊郎(Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科 F会員 佐藤浩一(Koichi Sato)

1. まえがき

高度経済成長期以降に架設された既存の橋梁構造物において、通過車両の大型化による活荷重の増大への対応や、大規模地震動に対する安全性向上のために何らかの補強が必要とされるものが多い。このような場合、これまでは比較的長期間の交通規制を伴う大規模な補強工事や、新橋への架け替えが行われてきた。しかしながら、昨今の財政状況の悪化や、交通規制による社会的損失を考慮すると、このような手法の適用は、今後は次第に困難になるものと思われ、より簡便で効果的に構造物の性能を向上させる手法の開発が求められている。また、構造物の設計方法に関しては、性能照査型設計法の導入¹⁾が進みつつあり、設計自由度の増大によって、合理的で経済性に優れた新技術の導入も促進されて行くものと考えられる。

近年においては、橋梁構造物の地震時の安全性あるいは振動使用性などの向上を目的とした一手法として、振動制御に関する研究が進められている。これまで、橋梁構造物に対する振動制御の研究および適用は、吊橋や斜張橋のような長大橋のタワーなどを中心に数多くなされており、桁構造などを有する一般的な橋梁構造物に対しては、研究例あるいは適用例は比較的少数にとどまっているのが実状である。しかしながら、今日のマイクロプロセッサやセンサなどの大幅な性能向上と、機能性流体^{2~4)}やスマート材料などの新素材⁵⁾を用いた制御装置の開発によって、比較的小規模で駆動エネルギーも小さい制振システムが実現可能になりつつある。よって、一般的な橋梁構造物に対して、その安全性や使用性を簡便に高める手法として振動制御の適用性を検討することは、社会基盤施設の整備を適切に行う上でも重要であると考えられる。

一般に、橋梁構造物の動的安定性向上を目的とした振動制御手法は、パッシブ方式およびアクティブ方式に大別することが可能である^{6,7)}。パッシブ方式は比較的容易に適用できる制御方法であり、TMD(Tuned Mass Damper)方式などを用いた研究例、実施例が数多く存在する。しかしながら、パッシブ方式は特定の振動モードを対象として設計されるため、その他の想定外の振動モードに対しては制振効果を期待することはできない。一方、アクティブ方式は構造物の状態に応じて、ある程度広い振動数領域に対応することができ、複数の振動モードの同時制振が可能である。アクティブ方式による制御は、AMD(Active Mass Damper)などの制振デバイスを用いて、構造物に制御力を付加することで行われるが、アクチュエータ駆動のために比較的大きなエネルギー入力が必要とし、また、常に構造物の応答を監視する必要があるなどといった問題点も有している。

現在においては、これらパッシブ方式、およびアクティブ方式の両者における問題点を解消、または軽減するために、セミアクティブ方式と称される制御手法に関す

る研究が盛んに行われている⁸⁾。セミアクティブ方式は、アクティブ方式のような制御力を直接作用させる制御方式とは異なり、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方法である。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、スビ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^{9),10)}や機能性流体^{2~4)}を用いたダンパーなどの可変減衰機構を有する減衰付加装置を構造物に設置して^{11),12)}、この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や、建築構造物などにおいて、ブレースとはりの接続状態を切り替えることによって、構造物の剛性を変化させて制御を行う可変剛性型システムが知られている¹³⁾。

以上を踏まえて、本研究では、桁構造を有する橋梁に設置した外ケーブル^{14~20)}の張力を、構造物の応答に応じて変化させる、可変剛性型セミアクティブ制御方式によって制振シミュレーションを行った^{21),22)}。具体的には、まず制御対象として、一般的な桁構造を有する歩道橋を骨組構造モデルに構築し、上述の外ケーブルを用いて主桁に制御張力を作用させ、地震による強制振動を抑制することを試みた。用いる制御手法としては、セミアクティブ方式の中でも複雑な制御理論を用いることなく、極めて容易にある程度の制振効果が得られることが知られている ON-OFF 制御を採用することとした²³⁾。この制御方式においては、制振デバイスを作動、あるいは停止するための何らかの基準値を設定する必要を有するが、本研究では構造物の1次モードの応答加速度に着目してフィルタリングを行うことにより抽出し、この値を常時監視することによって主桁に対する制御張力の付加を決定した。したがって、本研究はこれらの結果から、桁構造を有する橋梁の外ケーブルによる振動制御の可能性、あるいは適用制などに関して検討を加えるものである。

2. 解析方法

2. 1 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では、制御対象として表-1に示すような、鋼床版2主桁形式の一般的な横断歩道橋の断面諸元を用いて、21節点、20部材からなる2次元多自由度系モデルを構築した。図-1に解析モデルを示す。振動制御シミュレーションに先立って、制御対象の振動特性を把握するために固有振動解析を行い、減衰自由振動実験結果との比較を行った。表-2はその結果である。表-2から、解析結果は2次モードに関しては、実測値に比して若干高いものの、1次モードはほぼ完全に一致しており、構造物のモデル化は、ほぼ妥当だと思われる。

一般に多自由度系の運動方程式は式(1)のように表現することができる。

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

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質量比例型減衰を用いた。質量比例型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、表-2 の値を採用した。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 $1/4$ として解析を行った。解析に用いる入力外力としては、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加速度波形（最大 243.8 gal ）を用い、その最大加速度を 100 gal に変換して、解析モデルの各節点の鉛直方向に入力した。図-2 に入力した加速度波形を示す。

2. 2 可変剛性型セミアクティブ制御

前述のように、本研究では桁構造を有する橋梁の制振シミュレーションに際して、図-3 に示すような主桁に設置した外ケーブルを利用し、これに張力を与えて構造物に軸力を作用させることによって、構造物の剛性を変化させる可変剛性型セミアクティブ制御を行うこととした。

一般に構造性能可変型システムの運動方程式は式(2)のように表現することができる⁶⁾。

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

ここで、 $\mathbf{M}_v$, $\mathbf{C}_v$, $\mathbf{K}_v$ は、それぞれ構造物の質量、減衰、および剛性の変化を表したマトリックスである。本研究では、式(2)における剛性のみを可変にした、式(3)のような可変剛性型システムを導入した。

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

式(3)における $\mathbf{K}_v$ は、制御によって軸力が作用した場合の付加剛性である。本研究では、アクティブ制御を行う際に必要とされるような、比較的高度な制御理論を用いることなく、より簡便な制御則によって制御を行うために、構造物の応答に応じて制御張力による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。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制御則を構築することが一般的であり、制御システムの構築を比較的容易に行うことが可能である。

本研究における具体的な ON-OFF 制御の方法は、1 次モードの応答に着目して制御を行うこととし、支間中央点の鉛直方向の応答加速度に対して、1 次モード成分を通過させるようなローパスフィルタによって、振動成分の抽出を行うこととした。本研究で用いたフィルタは、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、あらかじめ計算した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し、抽出された応答加速度が、設定された基準値を超えた場合に構造物の剛性を変化させることとした。このような手法によって構造物の制御を行う場合、構造物に与える軸力の大きさと、状態を切り替える指標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考えられる。本研究においては、予備的な制振シミュレーションを行い、応答加速度の基準値は 20 gal に設定した。また、構造物に作用させた軸力は部材の許容座屈応力度に対して十分に小さい値として 490 kN とした²⁴⁾。なお、本研究の

表-1 断面諸元

支間長(m)	29.3
断面積(m ²)	2.98×10^{-2}
断面 2 次モーメント(m ⁴)	2.00×10^{-3}
単位長さ重量(kN/m)	2.29
主桁断面形状(mm)	Flg. 250×16
	Web. 768×9



図-1 解析モデル

表-2 固有振動特性

固有振動モード		1st	2nd
解析値	固有振動数(Hz)	2.43	9.71
	固有周期(sec)	0.41	0.10
実験値	固有振動数(Hz)	2.44	8.55
	固有周期(sec)	0.41	0.12
	減衰定数(%)	1.494	0.657

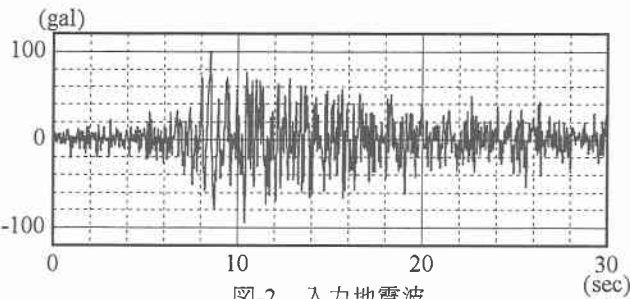


図-2 入力地震波

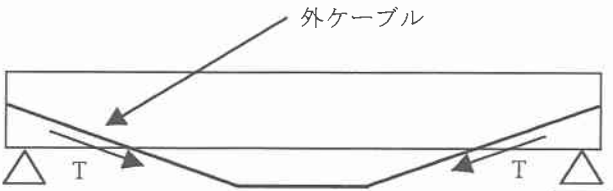


図-3 外ケーブルを有する桁構造

具体的な時刻歴応答解析およびフィルタの設計は、汎用数値解析プログラム MATLAB を用いて行った。

3. 解析結果およびその考察

以上の手法を用いて、可変剛性型セミアクティブ制振シミュレーションを行った。前述の通り、解析は強制振動について行うものとし、釧路沖地震観測波を 30 秒間にわたって入力して、強制外力の入力と同時に制御を開始することとした。

解析結果として、図-4 に支間中央点における非制御時・制御時および常にケーブル張力を作用させた状態に固定した場合の応答加速度を、図-5 にはそれらのフーリエスペクトルを示す。なお、フーリエスペクトルは比較のために、非制御時における最大値で無次元化を行った。また、図-6 は制御張力の履歴である。

図-4 における応答加速度波形に着目すると、制御時の応答加速度は非制御時と比較して、入力加速度が急激に増加する約 7~10 秒においては応答の低減はあまり明確

ではないが、比較的大きい入力外力が作用し続ける 10 秒以降においては高い振動抑制効果を発揮していることが確認できる。著者らの従来の研究²²⁾においても、構造性能可変型セミアクティブ制御は、入力外力が比較的長時間継続するような場合に、高い制振効果を有することが確認されており、本研究の解析結果でも同様の傾向が表れたものと考えられる。図-6 の制御張力の出力履歴についても合わせて考察すると、応答加速度が増大し始める 5 秒前後から張力の付加が行われ、最大応答加速度が発生する 10 秒前後では、頻繁に制御装置の状態が切り替わっており、これによって振動応答の抑制が行われているものと認められる。また、ケーブル張力を固定にした場合と比較すると、制御時の方が振動抑制効果が上回っているものと考えられ、制御対象に作用させる軸力を構造物の応答に応じて、一時的に増大させることによって、常に構造物にプレストレスを導入した場合と同等以上の効果を得ることが可能になるものと思われる。

図-5 のフーリエスペクトルについては、制御によって 1 次モードの応答が非制御時の 50% 以下に低減されており、制御系設計時に対象とした卓越モードの振動抑制に大きな効果を発揮していることが確認できる。さらに張力を固定した場合との比較においても、制御を行った場合に構造物の応答がより小さくなる結果が得られた。これは、制御対象の状態をタイムステップ毎に観測し、制御装置の状態を構造物の応答量が減少するように変化させる、セミアクティブ制御系の設計が適切に行われたためと考えられる。

以上の解析結果より、本研究で採用した構造物の剛性を一時的に切り替えるような制御手法によっても、構造物の振動を十分に制御することが可能であることが判明した。したがって、外ケーブルを制振デバイスとして利用した制御手法を用いることで、実際の橋梁構造物に対しても十分に適用性を有する結果が得られたものと思われる。

今後の展望として、本研究では構造物の応答加速度のみを観測対象として制御則を構築したが、応答速度や応答変位などの情報を用い、構造物の振動の状態を考慮することで、主要動に対する制振効果を向上させることが可能であると考えられる。また、構造物に作用させる軸力と制御装置の切り替え基準値については、本研究では予備的な制振シミュレーションを行うことにより、経験的に軸力を 490kN、切り替え基準値を 20gal としたが、これらの値の設定は、制御効果、あるいは制振効率にきわめて大きな影響を与えるものと思われる。したがって、遺伝的アルゴリズム(GA)などの最適化手法を用いて、構造物の応答をより効果的に制御できる、制御則の構築が必要であると考えられる。

4. あとがき

本研究では、桁構造を有する橋梁構造物を制御対象とし、構造物に作用させる軸力を変化させる可変剛性型セミアクティブ制御による、振動制御シミュレーションを行い、その制振効果および適用性に関して考察を加えたものである。セミアクティブ制御系の設計に際しては、比較的簡便な制振システムによって制御を行うことを目的として、対象とする振動モードの卓越状況に応じて、構造物に対する剛性付加を決定する ON-OFF 制御を適用した。

解析結果から、制御時の応答加速度は非制御時と比較して大きく抑制されており、1 次モードの応答量は 50%

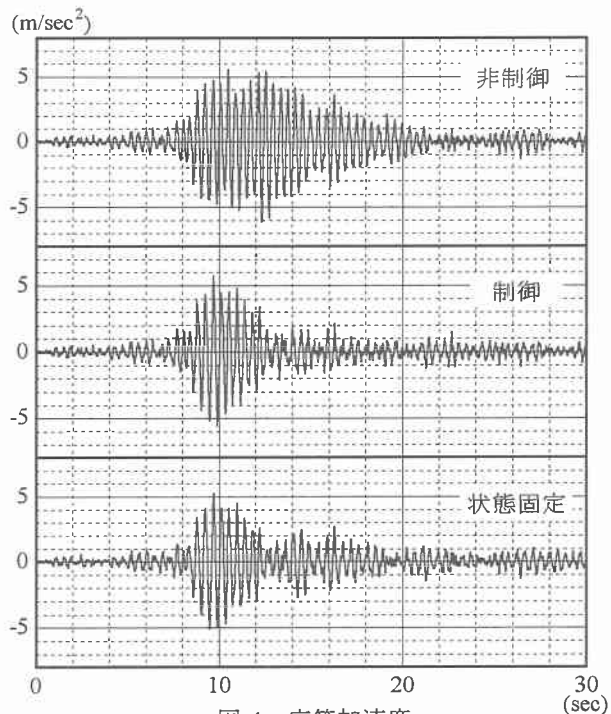


図-4 応答加速度

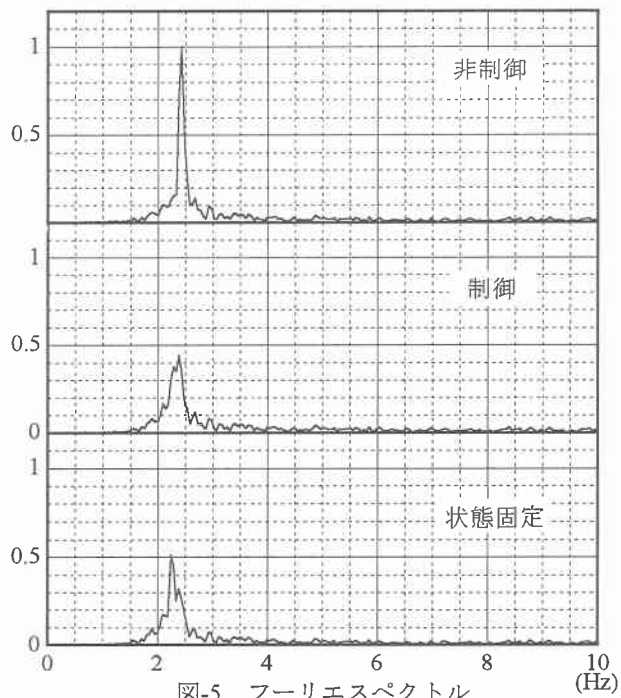


図-5 フーリエスペクトル

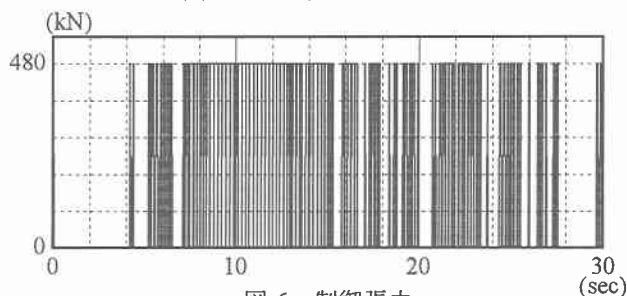


図-6 制御張力

以下に低減されていることを確認した。また、構造物に作用させる軸力を固定した場合の解析結果と比較しても、より大きな振動抑制効果が得られていることが判明し、観測された状態量に応じて構造物の断面性能を適切に変化させる本研究の制御手法は、橋梁構造物への適用が期

待できるものと考えられる。本研究においては、制御装置の動作を決定する指標として、応答加速度のみを用いて制御を行ったが、単一の状態量のみでは、構造物の振動の状態を正確に把握することは、一般的には困難である。したがって、制御則の構築にあたって、応答加速度に加え、応答速度、応答変位などの複数の状態量を用いることで、さらに制振効果を向上させることが可能になると推定される。また、構造物に作用させる軸力や、構造物の状態を切り替える基準値の設定について、本研究では予備的に行った解析結果に基づいて経験的に決定したが、GA による最適化手法などを応用することによって、制振効果の向上に加えて、制御装置の作動に必要な駆動エネルギーを最小にするといった、制振効率の向上も図ることが可能になると考えられる。

さらに、実際の橋梁構造物に対する振動制御手法の適用に関して考察を行えば、AMD などを用いる制御力型の制振システムは、桁下空間などに制御装置を設置するためのスペースや、制御装置を駆動させるための電力などの確保が困難となる場合が多いと思われる。このような場合、断面性能可変型の制御手法は、現在研究や開発が進められているスマート材料などを用いることで、比較的小型かつ低エネルギーで動作可能な制振システムを構築することができ、外ケーブル工法などの既に実施例の存在する橋梁構造物の補強手法とも組み合わせが可能であると推定される。また、制御力型の制振システムでは、構造物に直接制御力を作用させるため、制御対象の状態に変化が生じたり、制御系に異常が発生した場合に構造物を加振するおそれがあるが、本研究のように構造物の状態を2段階で切り替えるような簡便なセミアクティブ制御を用いることによって、安定性の高い制御が実現できると思われる。さらに、制御装置の状態の ON-OFF のみを切り替えるような制御手法は、例えば道路橋において、大型車の接近を感知して装置を作動させ構造物の耐荷力を向上させるような、目的に応じた制御も十分に可能であると考えられる。

今日においては、高度経済成長期に架設された橋梁構造物は老朽化などが著しく、その安全性あるいは使用性向上が今まで以上に望まれている。したがって、将来における橋梁構造物の性能確保のための一手法として、本研究のような比較的簡便な振動制御手法は、高い可能性あるいは適用性を有するものと思われる。

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,pp73-83,1997.
- 2) 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、日本機械学会論文誌(C 編),65 巻 638 号,pp110-116,1999.
- 3) 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、日本機械学会論文誌(C 編),65 巻 640 号,pp83-88,1999.
- 4) 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),pp202-205,1999.
- 5) 竹下昌樹、玉井宏章、北川良和：圧電材料のダンパーとしての基本的特性と最適抵抗値について、第 2 回日本制震(振)シンポジウム、pp31-37,2000.
- 6) 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),pp202-205,1999.小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 7) 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.
- 8) T.T.soong:Basic Concepts and Applications of Active Structural Vibration Control, Proceedings of International Conference on Advanced Problems in Vibration Theory and Applications,pp1-9,2000.
- 9) 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,pp575-582,2000.
- 10) 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、土木学会論集、第 501 号/I-29,pp143-152,1994.
- 11) 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,pp425-433,2000.
- 12) 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,pp203-215,1997.
- 13) 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,pp737-744,1999.
- 14) 藤原充、鄭勝二、中村秀明、宮本文穂：補強設計プロセスのシステム化に関する研究、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集共通セッション、pp.320-321,1998.
- 15) 中条潤一、栗田章光、坂下清信、武藤和好、松永進一、大山理、既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法(その 1)、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集共通セッション、pp340-341,1998.
- 16) 秦隆司、坂下清信、平野淳治、栗田章光、大山理、中条潤一、既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法(その 2)、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集共通セッション、pp342-343,1998.
- 17) 田中浩、前原直木、吉川貴信、石原靖弘、山本正寿、既設鋼桁橋の外ケーブル補強におけるモニタリング計測、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集、pp742-743,1999.
- 18) 山本晃久、梅田聡、宮本文穂、久保田安裕、駿河敏一、外ケーブルを用いた既存合成桁橋の機能向上設計・施工と実橋試験、鋼構造年次論文報告集第 5 巻、pp415-422,1997.
- 19) 松井繁之、東山浩士、江頭慶三、太田博士、外ケーブルを併用した既設合成桁橋の連続化、鋼構造年次論文報告集第 7 巻、pp549-556,1999.
- 20) 藤井堅、松尾武和、外ケーブル補強におけるプレートガーダー腹板の挙動解析、鋼構造年次論文報告集第 7 巻、pp459-466,1999.
- 21) 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、pp103-108,2000.
- 22) 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,2001.(印刷中)
- 23) 伊津野和行、川村弘晶、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,pp229-240,2000.
- 24) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II 鋼橋編、1996.