

外ケーブルを用いた可変剛性型セミアクティブ制御の交通振動に対する適用性について

Applicability of Semi-Active Variable Stiffness Control for Traffic-Induced Vibration 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○学生員 鈴木 隆(Takashi Suzuki)
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 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、大規模地震動のみならず、通過車両の大型化による交通活荷重の増大に対する安全性向上のために何らかの対策が必要とされることが多い。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、工事期間中の通行止めによる経済的損失や、今後予測される公共投資の大幅な減額を考慮すると、上記のような対策の適用は、将来的には次第に困難になるものと思われる、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開発あるいは実現が促進されて行くものと考えられる¹⁾。

近年においては、橋梁構造物における風および地震動などの外力に対する安全性あるいは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。これまでの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、既存橋梁の構造形式として一般的な、桁構造を有する中小支間の橋梁に対して、振動制御の適用を行った例は比較的少数にとどまっているのが実状である²⁾。今日ではマイクロプロセッサやセンサなどの新素材を用いた制御装置の開発によって、比較的小規模で制御装置の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^{3~6)}。したがって、一般的な橋梁構造物の安全性、使用性などを向上させ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極めて重要であると考えられる。

通常、動的安定性の向上を目的とした橋梁構造物の振動制御手法は、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^{7,8)}。パッシブ方式は制御装置の駆動に特別な動力源を必要としないことから、比較的容易に適用できる制御方法であり、TMD(Tuned Mass Damper)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最適な制御力を時々刻々と計算することから、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ことが代表的な方法であるが、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を必要とし、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を用いた振動制御が注目されている⁹⁾。セミアクティブ方式は、アクティブ方式のような構造物に制御力を直接作用させる制御方式とは異なり、構造物に設置したバリアブルダンパー^{10,11)}や機能性流体を用いたダンパーなどを用いることで減衰を付加したり^{12~14)}、構造物に設置したブレース材の剛性を変化させる方法により構造物の断面性能を変化させ、振動を抑制しようとする方法である^{2),7)}。このような手法は、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がなく安定性の高い制御方式であり、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。

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^{15~17)}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¹⁸⁾。具体的には、まず制御対象として、昭和53年度改訂版の建設省制定土木構造物標準設計¹⁹⁾に基づいてスパン40(m)、6主桁形式の単純桁橋を骨組構造モデルに構築し、1自由度系バネ・マスモデルによってモデル化した大型車両を走行させることによって、制御対象の橋梁を加振した。これによって発生した鉛直振動に対して、制御装置として設置した外ケーブルの張力を、構造物の応答に応じて切り替えることにより振動応答の低減を試みるものである。用いる制御手法としては、複雑な制御理論を用いることなく、比較的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²⁰⁾。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に何らかの基準値を設定する必要がある。本研究では、制御によるケーブル張力の変化に応じて構造物の固有振動数が変化することに着目し、応答加速度のフィルタリングを行ってパラメータとして用いる振動モードの応答を監視することにより、主桁に対する制御張力の付加を行った。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、あるいは適用性などに関して検討を加えるものである。

2. 解析方法

2. 1 制御対象橋梁のモデル化

本研究では、制御対象としてスパン40(m)、6主桁形式の単純桁橋の断面諸元¹⁹⁾を用いて、37節点、39部材からなる2次元多自由度系モデルを構築した。可変剛性型システムの導入については、橋梁構造物の補強手法としてこれまで比較的多くの適用例がある外ケーブルを応用することを想定し、外ケーブルに加える張力を構造物の動的応答量に応じて変化させることによって振動制御を試みる。図-1には本研究で採用した外ケーブルを有する制御対象橋梁の解析モデルを、表-1には解析モデルの諸

元を示す。本研究では、1 本当り直径 80mm、断面積 4460mm²、切断荷重 5.19MN の鋼製ケーブル 12 本を、各主桁に 2 本ずつ設置することとした²¹⁾。制御時に付加する制御張力については、主桁に座屈に生じさせず、切断荷重を超過しない範囲で、剛性の増加によって制振効果が期待できる値として、ケーブル本当り初期張力を 40.8kN に、制御張力を 4.08MN に設定した。

また制御系設計に先立ち、解析モデルに対して制御張力を付加しない場合（以下、通常状態と称する）と、張力を付加した場合（以下、作動状態と称する）における固有振動数の変化を固有振動解析によって把握した。表-2 はその結果であり、構造物に張力を付加することで 1 次固有振動数が 13.8% 上昇することが確認された。

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交通振動に対して、主桁に設置した外ケーブルに張力を与え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振シミュレーションを行うものである。

一般に可変剛性型システムの運動方程式は式(1)のよう表現することができる^{18),22)}。

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

ここで M, C, K および K_v はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび可変剛性マトリックスであり、減衰マトリックスについては、質量比例型減衰マトリックスを採用した。また $f(t)$ は外力ベクトル、 $\varphi(t)$ は車両の移動に応じて交通荷重をモデルの各節点に分配する荷重分配係数ベクトルである。

可変剛性型制振システムにおいては、式(1)における K_v を随時変化させることで構造物の断面性能を変化させ制振を図るものである。本研究ではアクティブ方式を適用する際に必要とされるような、比較的高度な理論を用いることなく、より簡便な手法で設計を行うために、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、制振システムの設計を比較容易に行うことが可能である。

具体的な ON-OFF 制御の方法は、張力の付加により制御対象の 1 次モードの固有振動数が変化することに着目し、支間中央点における鉛直方向の応答加速度に対して、通常状態の 1 次モード成分をローパスフィルタ、作動状態の 1 次モード成分をハイパスフィルタによってそれぞれ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な 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を行った。これによって抽出された応答加速度が、それぞれ設定された基準値を超えた場合に構造物に付加する張力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、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、通常状態、作動状態に対してそれぞれ 80gal と 350gal に設定した。

2. 3 車両および路面凹凸のモデル化

本研究では走行車両による時刻歴応答解析に際して、図-2 に示すような 1 自由度系の車両モデルを用いた^{23),24)}。この場合の車両の運動方程式は次式のように表現することができる。

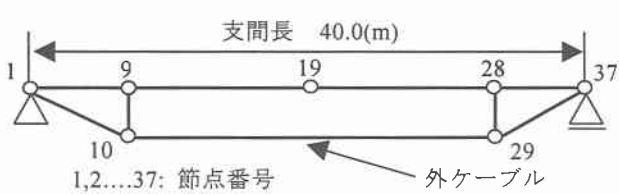


図-1 解析モデル

表-1 断面諸元（主桁 1 本当り）

	断面形状(mm)	長さ(mm)	断面積(mm ²)
u-Flg	250×12	4600	3000
	280×19	5300	5320
	380×19	3580	7220
	380×19	13640	7220
l-Flg	310×13	4600	4030
	480×25	5300	12000
	610×28	2880	17080
	610×36	700	21960
	610×28	12240	17080
Web	2000×10	13480	20000

表-2 固有振動数(Hz)

制御張力無		制御張力有	
1 次	4.13	1 次	4.70
2 次	15.30	2 次	15.96

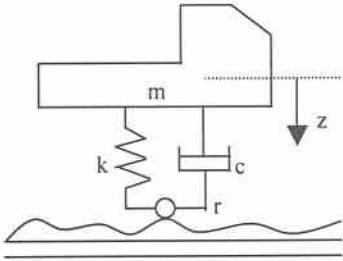


図-2 車両モデル

$$m\ddot{z}+c(\dot{z}-\dot{r}-\dot{y})+k(z-r-y)=0\cdots(2)$$

ここで、 m, c, k はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性を表しており、 r および y はそれぞれ路面の凹凸、荷重作用点における桁の相対変位である。

いま、路面に作用する接地力 $f(t)$ は

$$f(t)=mg-m\ddot{z}\cdots(3)$$

であるから、式(2)及び、式(3)より桁に作用する外力は、次式(4)のように表すことができる。

$$f(t)=mg+c(\dot{z}-\dot{r}-\dot{y})+k(z-r-y)\cdots(4)$$

本研究では式(4)によって得られた外力を式(1)に代入することで時刻歴応答解析を行う。なお車両の諸元としては自動車荷重を 250kN(25tf) 荷重とし、 $m=2.55\text{ton}$ 、 $c=3.63\text{kN}\cdot\text{sec/m}$ 、 $k=8879\text{kN/m}$ とした。

路面凹凸の設定に関しては、一般に直接法、スペクトルモデル法などが知られているが^{23)~25)}、本研究での路面凹凸は、スペクトルモデル法を採用することとし、次式で与えられる路面凹凸パワースペクトル密度 $S_r(\Omega)$ をモンテカルロ法により算出することとした。

$$S_r(\Omega)=\frac{\alpha}{\Omega^n+\beta^n}\quad(\Omega_L\leq\Omega\leq\Omega_U)\cdots(5)$$

式(5)において本研究では比較粗い路面凹凸を想定し、

$\alpha=0.003\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c})$, $n=2.5$, $\beta=0.02\text{c}/\text{m}$, $\Omega_L=0\text{c}/\text{m}$, $\Omega_U=1.0\text{c}/\text{m}$ に設定した^{26),27)}。

以上の手法により、交通荷重が作用する橋梁の制振シミュレーションを行うが、時刻歴応答解析の手法としては、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 $\Delta t=0.01$ 、係数 β は $1/4$ として解析を行った。

3. 解析結果およびその考察

本研究では可変剛性型セミアクティブ制振シミュレーションに際して、車両速度を $36\text{km}/\text{h}$ 、 $60\text{km}/\text{h}$ の 2 ケースについて解析を行った。図-3 および図-4 はそれぞれ車両速度 $36\text{km}/\text{h}$ と $60\text{km}/\text{h}$ の場合における解析結果である。図-3、図-4 において、(a)は支間中央点の鉛直方向変位、(b)は制御張力の履歴、(c)は応答変位のフーリエスペクトルを示している。また表-3 はそれぞれの解析ケースにおける最大応答変位、および応答変位の実効値の一覧である。

まず、図-3(a)および図-4(a)の非制御時における応答変位には、車両が橋梁上を渡り終わるまでの 4.0sec および 2.3sec までは車両荷重による橋梁の静的なたわみと、車両の振動による強制加振によって比較的大きな応答変位が発生している。車両の通過後は減衰自由振動状態となり、いずれの場合も車両通過後約 6sec で構造物はおおむね静止していることが確認できる。

セミアクティブ制御による制振効果について考察を加えると、走行速度 $36\text{km}/\text{h}$ における図-3(a)および(b)の応答変位と制御張力から、構造物の動的応答量の増大に伴って制御張力の付加が行われ、応答変位が減少していることがわかる。表-3 から、非制御時に対して最大応答変位は約 20% 、実効値は約 22% 減少しており、構造物に張力を一時的に付加することでも応答変位を抑制することが可能なことが明らかになった。図-3(b)の制御張力については、車両の走行によって構造物の応答量が增大する 2.5sec 程度まではローパスフィルタによって抽出された通常状態の 1 次モードと車両の固有振動数である 3.0Hz の応答が大きくなることから、比較的大きな時間張力の付加が行われている。一方、剛性の増加による固有振動数の上昇で、ハイパスフィルタの通過成分が増大する $2.5\text{sec}\sim 3.8\text{sec}$ では張力を付加する時間が短くなり、作動状態の 1 次モードの応答があまり大きくならないような制御が行われたと推定される。これより、構造物の固有振動特性の変化に基づいて、制御装置の ON-OFF を切り替えることで、構造物の状態に応じた剛性の選択が行われ、適切な制御が行われたものと考えられる。さらに図-3(c)のフーリエスペクトルについては、車両の固有振動数である 3.0Hz 付近のピーク値が制御によって $1/3$ 程度低減され、構造物の 1 次固有振動数である 4.13Hz 付近では剛性の切り替えによる非共振化が見受けられる。このように構造物の 1 次モードに着目して制御系の設計を行った場合でも、直接設計の対象とはしていない振動数成分の制御が十分に行われていることから、本研究の制御手法は比較的大きな振動数領域に対しても制振効果を期待できるものと思われる。

図-4 における走行速度を $60\text{km}/\text{h}$ の解析結果においては、構造物の応答量そのものが小さいため、制御装置が動作する時間は比較的小さいものとなっている。表-3 から、制御による動的応答量の減少率は最大応答変位および実効値ともに約 14% であった。本研究では制御系の設計において、張力を変更する応答加速度の基準値の決定を、構造物の応答量がより大きい走行速度 $36\text{km}/\text{h}$ に対して行っている。したがって、制御系の設計時と異なる加振条件でも、制振効果が得られている本研究のセミアクティブ制振システムは、ある程度のロバスト安定性を有し

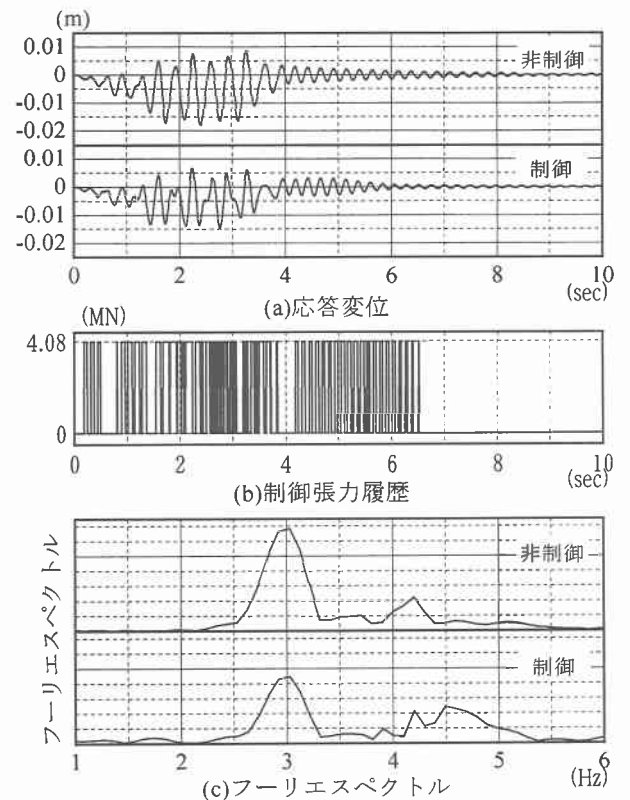


図-3 時刻歴応答解析結果 ($36\text{km}/\text{h}$)

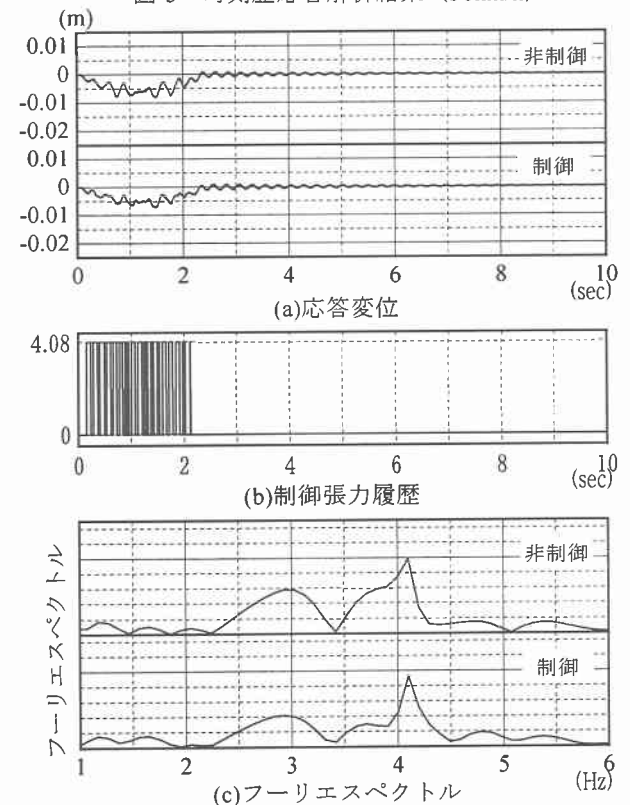


図-4 時刻歴応答解析結果 ($60\text{km}/\text{h}$)

表-3 動的応答量 (支間中央・単位 m)

		MAX	RMS
36km/h	非制御	0.0179	0.0046
	制御	0.0144	0.0036
60km/h	非制御	0.0080	0.0021
	制御	0.0069	0.0018

ているものと思われる。

以上の解析結果より、本研究のような張力の変化により、構造物の剛性を応答量の増減に応じて選択するような比較的簡便な手法でも、桁構造を有する橋梁の交通振動を抑制することが可能であると考えられる結果が得られた。これより、外ケーブルを制振デバイスとして利用する可変剛性型セミアクティブ制御は、一般的な構造形式を有する橋梁構造物の動的性能を改善する手法の一つとして有効であると思われる。

また、本研究の解析においては、制御装置の状態を決定する基準値の設定や、構造物に付加する制御張力の大きさを予備的なシミュレーションによって経験的に決定したが、制御系の設計を簡便かつ効率的に行うためには、遺伝的アルゴリズム(GA)などの最適化手法の導入が有効であると考えられる。さらに、応答加速度に加えて応答変位や応答速度といった複数の応答量を用いることで、構造物の状態量を正確に把握することが可能になり、制振効果を向上させることが可能になると推定される。したがって、適用する制御則あるいはその構築方法についてさらに検討を加え、実際の構造物に可変剛性型システムを導入する場合のアクチュエータの性能や実装方法に関しても検討を行うことで、橋梁構造物に対するセミアクティブ制御の実現可能性を向上させることが可能になるものと思われる。

4. あとがき

本研究は桁構造を有する橋梁構造物に外ケーブルを用いた可変剛性型システムを導入し、ケーブル張力の付加を構造物の応答に応じて切り替える ON-OFF 制御によって、大型車の走行を想定した交通振動に対する振動制御シミュレーションを実施し、その制振効果や適用性について検討したものである。

解析結果から、制御張力の ON-OFF を応答加速度のみを指標にして切り替える本研究のような比較的簡便な手法でも交通振動が低減され、構造物の固有振動モードに関しては非共振化が行われることで、構造物の振動全体に制振効果を発揮させることが可能と思われる結果が得られた。このことから、一般的な構造形式の橋梁に本研究のような制振手法を適用することで、構造物にプレストレスのような応力を常時加えることなくその動的性能を向上させることができ、既存の橋梁構造物の保有性能を維持、改善するための有効な手法になり得るものと期待できる。また、制御系の設計時とは異なる加振条件でも、構造物の制振が可能であると思われる結果が得られたことから、本研究で用いた制御則はある程度のロバスト安定性を有しているものと思われる。

実構造物への適用について言及すると、制御装置に用いるアクチュエータの特性や制御対象橋梁への実装方法などに関して、さらに検討を行う必要があるものの、すでに実用化されている技術を活用することで、本研究で検討した手法は十分に実現可能であると考えられる。また、近年盛んに研究が進んでいる ER 流体や MR 流体あるいは磁歪・電歪材料など各種のスマート材料を応用すれば、さらに効率的で簡便な制振システムを構築することも可能であると思われ、近年提唱されている橋梁のインテリジェント化を構造物の制御の面からも実現できるものと期待される。

【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) 矢作枢、吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール、土木学会論文集、第 356 号 /I-3,

pp.435-444, 1985.

- 3) 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, pp110-116, 1999.
- 4) 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, pp83-88, 1999.
- 5) 山崎智之、大島俊之、三上修一、当麻庄司、秋本正信、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.
- 6) 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 回日本制振(振)シンポジウム、pp31-37, 2000.
- 7) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.
- 8) 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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にへの適用に関する一考察、構造工学論文集、Vol.47A, 2001.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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、pp333-338, 2001.
- 19) 建設省土木研究所編：建設省制定土木構造物標準設計第 23~28 巻(活荷重合成プレートガーダー橋)の手引き(昭和 53 年度改訂版)、社団法人全日本建設技術協会、1979.
- 20) 伊津野和行、川村弘品、森泰樹、小林絃士：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.
- 21) 日本橋梁建設協会：'93 デザインデータブック, 1993.
- 22) 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.
- 23) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993.
- 24) 土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン、1999.
- 25) 中島章典、内川直洋、斉木功：車両-橋梁系振動問題の非線形動的応答解析、橋梁振動コロキウム 2001 論文集、pp55-62.
- 26) 川谷充郎、小管朗、嶋田玲志、小松定夫：路面不整の統計学的特性と道路橋の衝撃係数、構造工学論文集、Vol.33A, pp459-466, 1987.
- 27) 内谷保、彦坂照、大塚久哲：主桁支持方式の異なる長大斜張橋の走行車両による動的増幅率特性、構造工学論文集、Vol.33A, pp467-474, 1987.