

I-20

ケーブル構造物における可変減衰型セミアクティブ制御の適用性について

北海道大学大学院工学研究科○学 生 員 宮森 保紀
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

橋梁構造物においては、交通荷重や風荷重および地震動による不規則外力による振動に対して、構造物の耐久性、使用性、耐風安定性および施工性を確保することが極めて重要な項目の一つであると考えられてきている。近年では、土木構造物の設計に際して、各種限界状態に対する要求性能を満たすような設計法も取り入れられる傾向にあり、今後これらに関して、より詳細な検討が必要になると思われる。従来は上記のような問題を改善するために、構造物の剛性そのものを向上させたり、あるいは断面形状を変化させるような手法が採られてきたが、近年では構造物に何らかのデバイスを設置し、このデバイスによるエネルギーの吸収や制御力の付加によって振動を抑制する方法の実用化が進みつつある。

一般に、橋梁構造物の振動制御はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される¹⁾。パッシブ方式は、TMD(Tuned Mass Dumper)方式などを採用した制振手法の研究例および実施例が多数存在し²⁾、比較的簡便な制振システムによってある程度の振動抑制効果が得られることが知られている。しかしながらパッシブ方式における制振効果は、制振デバイスの設計時に対象とした振動モードの応答のみに限られ、地震など不規則な外力によって想定外のモードが生じた場合には、その効果はほとんど期待できない。一方、アクティブ方式は比較的広い振動数領域に対応することが容易であり、複数の振動モードの同時制振が十分に可能である¹⁾。通常、この方式は構造物の状態に応じてデバイスを駆動することによって制御を行うが、これにはデバイスの駆動に要する電力などのエネルギーの確保、構造物の振動応答の連続的な計測と複雑な制御理論の適用が必要であり、この点においてアクティブ方式の振動制御はしばしば困難さを伴うものと思われる。これらパッシブ、アクティブ制振の両者における問題点を解消または軽減するために、動的応答の観測は行いが、応答に応じて付加する制御力などの調整をあまり行わないセミアクティブ方式による振動制御手法が提案され、近年盛んに研究が進められている³⁾。セミアクティブ方式とは、上述のように、観測された状態量に対して何らかの制御理論に基づいた最適な制御力を各タイムステップ毎に出力するアクティブ方式とは異なり、例えば観測量の大小関係などに応じて、構造物の状態や付加する制御力を2～3段階程度に切り替えて振動抑制効果を期待する方法で、一般に、必要とする外部からのエネルギー入力と比較的小さいと考えられている。よって、セミアクティブ方式による制振システムはアクティブ方式に比してその構成が簡便で、故障に対する信頼性もある程度高いという特性を有している。また、セミアクティブあるいはアクティブのような能動的な制御方式には、観測量の取り扱い方法の差違によってフィードバック制御とフィードフォワード制御に細分化される。前者は観測された構造物の状態量に応じて制御装置が発生させるべき出力をその都度調整するため極めて高い制振効果を得ることができ、その設計手法も比較的高度な専門知識が要求されるものの、十分に確立されている。一方のフィードフォワード制御は、制御対象の例えば応答加速度のみをパラメータとして監視し、その値に対して制振装置の出力を変更するのみであるため、制御システムそのものは比較的簡便であるが、アクティブ方式と同等の振動抑制効果を上げるためには、その制御系設計手法などに大きく左右される。

また、これまでの橋梁構造物におけるアクティブ振動制御の適用例としては、吊橋や斜張橋の主塔等において主に水平振動に対してのAMD方式による振動制御が主流であり、一般の橋梁において交通振動などに起因する鉛直振動を対象とした研究例は比較的少ない⁴⁾⁵⁾。このような通常の桁構造あるいはケーブル構造を有する橋梁等においては制振装置の設置スペースが限られ、AMD方式の適用は極めて困難であると考えられる。このような場合には、部材の断面性能をその応答に応じて変化させることによって構造物の振動を抑制するアクティブ剛性型制振システムの適用が有効である⁶⁾。また、近年このような制振システムに適用が

可能と思われる制振装置として、各種の可変減衰ダンパーの研究および開発が進みつつあり、これらを用いた場合の橋梁の振動に対する適用性が確認されれば、より簡便にエネルギー効率の高い制御系の設計が可能になると考えられ、これらの橋梁振動に対する使用性などの向上に大きく寄与するものと思われる。

以上を踏まえて、本研究は著者らが従来より研究を進めてきた⁷⁾吊床版橋あるいはキャットウォーク等を想定したケーブル構造を有する橋梁構造物を制御対象として、可変減衰部材を導入したフィードフォワード型セミアクティブ振動制御シミュレーションを行い、その制振効果あるいは適用性、実用性などに関して考察を加えるものである。すなわち、構造物の所定の部材における減衰定数を、応答に応じて2段階に変更することにより、通常状態ならびに高減衰状態を適宜切り替え、強制加振に対する振動制御を行った。得られた結果に関して、フィードバック型アクティブ剛性型制振システムを用いた場合の制振効果と比較し、その適用性などについて検討を試みた。したがって、本研究は以上の結果を報告するものである。

2. 解析手法

2.1 構造物のモデル化と固有振動特性

本研究では制御対象として写真-1に示すような、吊床版橋あるいはキャットウォークを想定したケーブル構造を有する実験供試体を作成し、その断面諸元、支間長等のデータを用いて解析を行った。実験供試体の主な諸元は表-1に示すように、支間長 1,995mm、幅員 200mm、サグ 60mm であり、ケーブルの初期張力は 137.2N である。構造物のモデル化については図-1に示すような6部材からなる2次元多自由度系モデルを作成した。構造物モデルの妥当性を検討するために、固有振動解析を実施して減衰自由振動実験との比較を行った、その結果を表-2および図-2に示す。表-2から、解析結果は実測値とほぼ一致し、本研究の構造物モデルは妥当であると考えられる。また、各振動モードは比較的近接した固有振動数となっており、ケーブル構造物特有の振動特性を有していることが認められる。

また、表-2における有効質量率と図-2に示す固有振動モード形状から、この構造物は対称なモード形状を有する2次モードおよび3次モードが卓越しやすいと思われる結果が得られた。

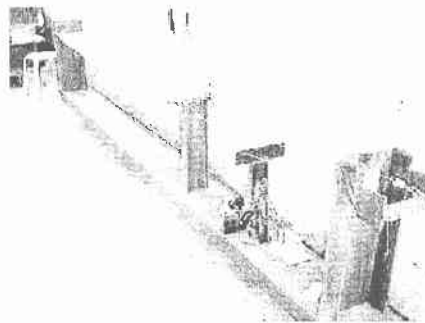


写真-1 実験供試体

表-1 実験供試体の主な諸元

支間長	1.995 m
サグ	0.06 m
初期張力	137.2 N
単位重量	17.5 N/m
減衰定数	0.1 % (1st)
	0.117 % (2nd)



図-1 解析モデル

表-2 固有振動特性

固有振動モード		1st	2nd	3rd	4th	5th
実験値	固有振動数 (Hz)	4.39	5.05	6.96	8.76	11.1
	固有振動数 (Hz)	4.38	5.18	6.83	8.83	11.1
解析値	固有周期 (sec)	0.23	0.19	0.15	0.11	0.09
	有効質量率 (%)	1.13	73.0	25.3	0.11	0.45

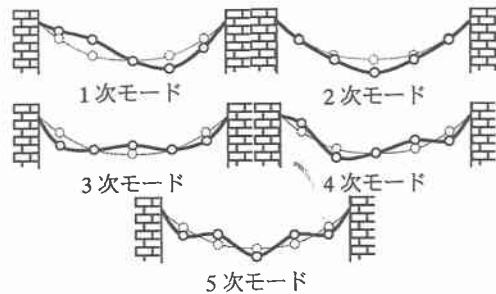


図-2 固有振動モード

2. 2 可変減衰型フィードフォワード制御

前述のように、フィードフォワード制御は構造物の減衰、剛性をダンパー等のデバイスによって予め数種の状態に設定しておき、構造物の応答に応じてそれらを切り替えることによって制御を行う方法である。この制御システムの設計に際しては厳密な制御理論を用いることなく、制御対象とする構造物の固有振動特性を考慮して行われることが多く、本研究の場合は構造物の固有振動数の卓越状況に着目し、設定した部材の減衰係数を2段階に変化させる可変減衰型フィードフォワードシステムによる、セミアクティブ振動制御シミュレーションを行った。

一般に多自由度系の運動方程式は式(1)のように表現できる。

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

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ および $\mathbf{f}(t)$ はそれぞれ整合質量マトリックス、レーリー減衰マトリックス、剛性マトリックスおよび外力ベクトルである。レーリー減衰マトリックスにおける低次の減衰定数は実測値を用い、実験供試体の減衰自由振動実験から減衰定数を1次0.1%、2次0.117%とした。可変減衰型制振システムを導入した場合の運動方程式は、式(1)に可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ を導入して以下のように表される。

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

この可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_v$ は、減衰を変化させる部材において2種類の減衰係数 c_1, c_2 を設定し、これを所定の自由度に配置した可変減衰マトリックス $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ のいずれかであり、構造物モデルの応答値に応じてこれらの $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ を切り替えることによって制御を行うものである。

本研究における具体的な制御方法については、まず図-1に示す部材番号②の部材に可変粘性減衰を導入することとし、通常時の減衰係数を $c_1 = 4.9 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{sec/m}$ 、高減衰時を $c_2 = 4.9 \text{ N} \cdot \text{sec/m}$ に設定した。これらによって構造物の状態を2段階に設定し、支間中央点における応答加速度をパラメータとして適宜切り替えを行うことでシミュレーションを実施した。状態の切り替えは、固有振動解析によって最も卓越しやすいことが確認された2次モードの応答を監視することとし、2次固有振動数の振動成分を通過させるようなローパスフィルタを適用することにより、タイムステップ毎の2次モードの加速度応答値を抽出し、この値が定められた値を超過した場合に構造物の状態を変更することとした。なお、この判定値は制御効果に大きな影響を与えるが、本研究では数回の予備解析の結果に基づいて、支間中央点におけるフィルタリング後の加速度で 2.0 m/sec^2 に設定した。本研究で採用したフィルタは、比較的低いフィルタ次数で良好なカットオフ特性を得ることが可能とされる IIR 型楕円フィルタである⁹⁾。具体的なフィルタの設計は汎用数値解析プログラム MATLAB を用いて行い、得られ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値を乗じてフィルタリングを行った。また、時刻歴応答解析に際しては、ニューマーク β 法を用いて行なった。ニューマーク β 法における係数 β は 0.25、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ である。

2. 3 アクティブ剛性型フィードバック制御

アクティブ剛性型フィードバック制振システムの運動方程式は式(3)で与えられる⁹⁾。

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

式(3)において $\mathbf{V}(t)$ はアクティブ剛性マトリックス、 $\mathbf{L}$ はアクティブ剛性配置マトリックスである。本研究では、アクティブ剛性マトリックスを算出するための制御理論として Fuzzy 制御理論を適用した。

Fuzzy 制御を行うためには、制御則を構成する IF-THEN 規則群とそれに対応したメンバーシップ関数が必要となる。本研究では部材の各節点の応答速度、応答加速度ならびに制御張力をパラメータとして以下に例示するような前件部2変数、後件部1変数からなる25規則の推論規則群を設定し、Fuzzy 制御による振動制御シミュレーションを実施する⁹⁾。

推論規則例

- 1 : 加速度が負で速度が負ならば制御張力は正で大
 IF a is NB and v is NB THEN u is PVB

2：加速度が負で速度が零ならば制御張力は零

IF a is NB and v is ZO THEN u is ZO

図-3 に速度、加速度および制御張力のメンバーシップ関数を、表-3 に 25 規則の規則表を示す。なお Fuzzy 関係の合成法には max-min 合成を用い、制御張力の確定値の算出には重心法を用いている。本研究においては、以上のように算出された制御張力を式(3)中のアクティブ剛性マトリックスに代入することによって解析を行う。この際の制御張力の最大値は実験供試体のアクチュエータのストロークを考慮して $\pm 30.4\text{N}$ とした。また、前件部における加速度および速度に関するメンバーシップ関数の最大値 $a_{\max}$, $v_{\max}$ の最適化については、これらの変数を組み合わせ最適化問題と見なし遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を適用して同定を行った。GA による同定の結果は $a_{\max}=0.97\text{m/sec}^2$, $v_{\max}=0.31\text{m/sec}$ となり、これらの値を用いて Fuzzy 制御におけるメンバーシップ関数を設定した。

一般に制御対象の構造物が複数の振動モードを有する場合、Fuzzy 制御理論において同一の制御則で多次モードを同時制御することは比較的困難であると考えられている。そこで本研究では制御張力の算出に際して、全ての節点において個別に制御張力を算出し、その中で最大のものを制御時刻 t における制御張力とすることとした。これは各節点で観測された状態量と、それによって計算された制御張力の大小関係は、その時点における卓越モードあるいはモード形状に関する情報がある程度含まれていると考えられることによるものである。

3. 各制御手法による時刻歴応答解析とその考察

以上の解析手法により、本研究ではアクティブおよびセミアクティブ制御によるケーブル構造物の振動制御シミュレーションを行った。解析は強制振動について行い、外力としては 1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震の際の千代田大橋における橋軸方向加速度波形を鉛直方向に変換して用いている。観測地震波の最大加速度は 243.8gal であり、その波形を図-4 に示す。解析ケースに関しては、表-4 に示すように可変減衰型フィードフォワード制御による場合を Case 1、アクティブ剛性型フィードバック制御によるものを Case 2 とした。解析結果について、図-5 に支間中央点の応答加速度を、図-6 にそれらのフーリエスペクトル図を示す。なお、スペクトル図においては制振効果の比較のために非制御時の最大値で無次元化を行った。さらにフィードバック制御における制御張力の出力履歴を図-7、フィードフォワード制御における状態変化履歴を図-8 に示す。

図-5 の応答変位からは、セミアクティブ、アクティブのいずれの制御手法とも良好な制振効果を発揮しているものと考えられる。特に主要動によって応答が増大する

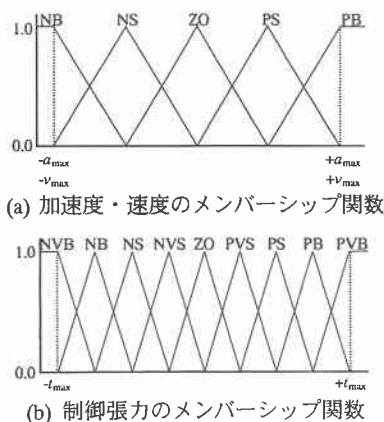


図-3 メンバーシップ関数

表-3 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	NB	ZO	PB	PVB
NS	NB	NS	ZO	PS	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PS	ZO	NS	NB
PB	PVB	PB	ZO	NB	NVB

NVB: Negative Very Big, NB: Negative Big,
NS: Negative Small, NVS: Negative Very Small,
ZO: Zero, PVS: Positive Very Small,
PS: Positive Small, PB: Positive Big
PVB: Positive Very Big

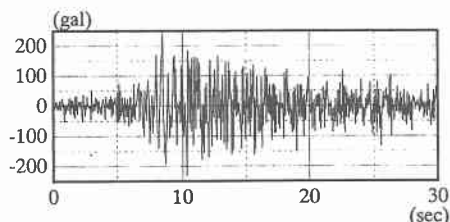


図-4 入力加速度波形

表-4 解析ケース

	制御手法
Case 1	可変減衰型フィードフォワード制御 (セミアクティブ制御)
Case 2	アクティブ剛性型フィードバック制御 (アクティブ制御)

10～20sec 付近においては、アクティブ制御を適用した Case 2 の制振効果が顕著であり、構造物の応答に応じて制御装置の出力を適切に調整するフィードバック型アクティブ制御は極めて高い制振性能を有することが確認された。また、セミアクティブ制御による Case 1 においては、起振力の極めて大きい部分では Case 2 に比してその振動抑制効果はやや劣ると思われるが、その他の部分では Case 2 と同等かそれ以上の制御が行われており、部分的に減衰を変化させることによっても、構造物全体に対して有効な制振効果が期待できると思われる。また、主要動に対する制振効果に関しても、構造物の通常状態と高減衰状態を変化させるパラメータの設定を、例えば大きな起振力が作用するような場合には高減衰状態をより長く維持する、あるいは図-7の制御張力の出力履歴と同等となるような状態変更を行えるように最適化することにより、アクティブ方式に匹敵する性能を与えることも十分に可能であると推定される。

さらに図-6 のフーリエスペクトルにおいても、Case 1, Case 2 ともに非制御時に比較してほぼ等しくピーク値が減少し、高い振動抑制効果を示していることがわかる。また、非制御時のフーリエスペクトルにおいて認められる 3 次モードのピーク値については、Case 2 ではほぼ完全に抑制されており、アクティブ制御が複数の振動数領域に適応可能であることは自明であると思われるが、2 次モードの応答のみに着目して制御を行っている Case 1 においても、3 次モードに対して Case 2 とほぼ同等の制振効果が得られている。これは、前述のように、部分的な減衰の変化が構造全体に対して有効に作用することを意味しているものと考えられ、セミアクティブ制御においても複数の振動モードの同時制振に対応が可能であることを示唆する結果となっている。さらに、セミアクティブ制御の設計時に想定外であるモードに対しても比較的良好な振動抑制効果が期待できることから、ある程度のロバスト安定性も有するものと思われる。

以上の解析結果より、強制外力を受けるケーブル構造物の鉛直方向の振動制御において、セミアクティブ、アクティブ方式の両者とも十分な制振が行えることが判明した。まず、アクティブ制御においては、構造物の応答量に応じて制振装置の出力を調整するため、従来から指摘されているとおり十分な応答の低減と、多次モードの同時制振に関して、極めて高い効果を発揮することが確認された。これに対

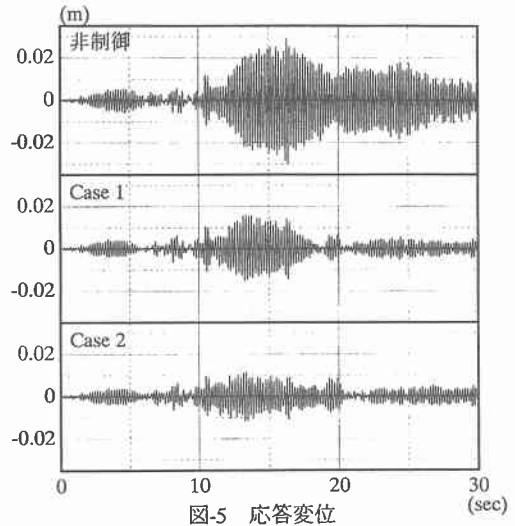


図-5 応答変位

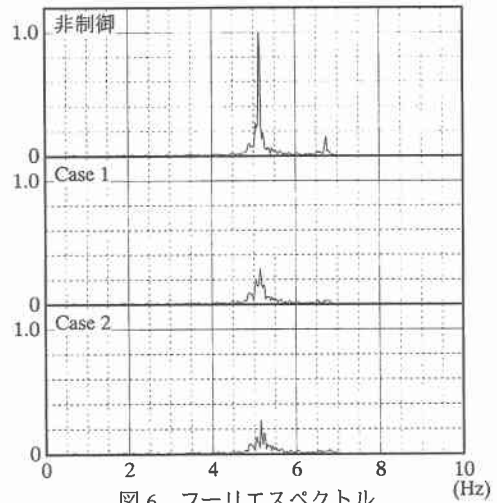


図-6 フーリエスペクトル

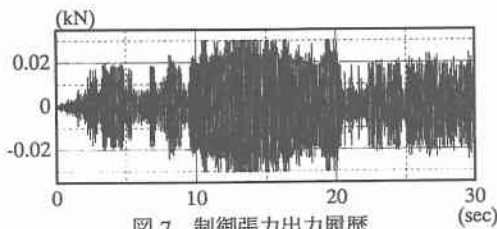


図-7 制御張力出力履歴

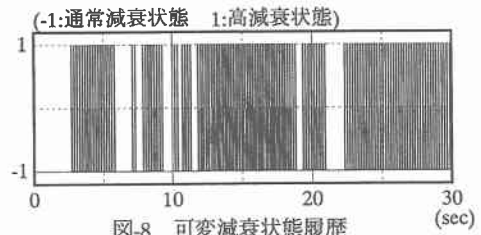


図-8 可変減衰状態履歴

し、セミアクティブ制御のように、単一のモードにおける応答値のみ着目し、構造物の一部の減衰を2段階に変更するような簡便な方法を用いることによって、アクティブ方式にほぼ匹敵するような、十分な振動制御効果を得ることが可能であることが判明した。また、セミアクティブ制御においても、複数の振動モードに対して同時制振が可能であると思われる結果が得られた。

さらに、実用的な観点から考察を加えると、アクティブ制御の場合はその制振効果は極めて高いものの、制振装置の駆動に大きなエネルギーを必要とし、また、多くの測点での状態量の観測が不可欠である。この点、セミアクティブ制御はこれらの制約が比較的少ないため、本研究で制御対象としたケーブル構造物のみならず、一般の橋梁構造物への応用も簡便かつ経済的に実現できる可能性があるため、その妥当性あるいは実用性なども比較的高いと考えられる。

4. あとがき

以上のように、本研究は吊床版橋あるいはキャットウォーク等を想定したケーブル構造を有する橋梁構造物を制御対象として、フィードフォワード型セミアクティブ可変減衰振動制御、ならびフィードバック型アクティブ剛性振動制御を行い、両者の比較を通じて、橋梁構造物におけるセミアクティブ制御の制振効果あるいは適用性、実用性などに関して考察を試みた。

解析結果からは、セミアクティブ制御を用いた場合においても、その制御プロセスに十分な検討を加えることにより、アクティブ制御に匹敵するような振動抑制効果を期待できることが認められた。アクティブ制御の制振効果は極めて高いことは周知のとおりではあるが、デバイスの駆動に要するエネルギー、状態量の観測などの制約条件が比較的多く存在し、これらに関してセミアクティブ制御はその制約が少ないため、その適用性あるいは実用性なども比較的高いと考えられ、一般の橋梁構造物などへの応用も簡便かつ経済的に実現できると思われる結果が得られた。

加えて、セミアクティブ制御における問題点として、その設計手法が確立されていないことが挙げられる。本研究のような可変減衰システムでは、変更する減衰値、あるいは状態を切り替えるべき具体的な観測量によって、その制振効果は大きく左右されることが判明した。したがって、これらの設計に関して、GAなどを導入して最適なシステムを構築する必要があると思われる。

最後に、本研究の一部に平成 11 年度文部省科学研究費奨励研究(A) (代表研究者 小幡卓司、課題番号 10750359) の援助を受けたことを付記する。

[参考文献]

- 1) 家村和宏、谷田宏次、野波健蔵、佐藤忠信、鎌形修一：構造物のアクティブコントロール、振動制御コロキウム PART A, pp.61-89, 1991.
- 2) 山口宏樹、藤野陽三、津村直宣：構造物のパッシブコントロール(2)、振動制御コロキウム PART A, pp.36-60, 1991.
- 3) Pinkaew Tospol, Fujino Yozo and Abe Masato : Development of a New Semi-Active Mass Damper, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部(B)、Vol.51, pp.42-43, 1996.
- 4) 岡林隆敏、岡部雅彦、角本周、梶川康男：歩行者による吊床版橋振動のアクティブ振動制御、第 2 回振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.167-174, 1993.
- 5) 川谷充郎、山田靖則、下野正人、清水計成、森淳彦：桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験、構造工学論文集、Vol.42A, pp.683-690, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) The Math Works Inc. : MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社、1999.
- 9) 小堀鐸二：制振構造、鹿島出版会、1993.