

FFT によるアクティブコントロール制振装置

高 橋 修*・丸 山 暉 彦*・鳥 居 邦 夫*・矢 鍋 重 夫**・寺 田 博 昌**

Reducing Vibration System of Active Control by means of FFT Method

Osamu TAKAHASHI, Teruhiko MARUYAMA, Kunio TORII, Shigeo YANABE and Hiromasa TERADA

Recently an active control method is investigated to reduce the vibration of structure. The active control system in using the FFT and the inverse FFT method is explained in this paper. As concerns an active control, the data which represents state of vibrating structure is inputted in a computer and then a computer calculates the control force, after that output the data of the control force. In this method, these processes have to be done continuously, not to cut off the flow of input data and output data. However, a computer can do only one thing at one time, so this control system adopts three methods: the direct memory access (DMA), the multi task system using a vector signal processor (VSP), and the pipeline array processing (PAP). This paper also includes experimental examination. Applying this control system to the simple beam model, the effect of reducing vibration and that characteristic are examined. In the experiment, it can be confirmed that the active control system mentioned in this paper has the excellent ability to reduce vibration.

Key words: vibration reduction /active control/FFT method/feedback

1. はじめに

土木構造物において振動発生源として主に注目されるのは地震と風であろう。これらはときに多大なエネルギーとして構造物に作用し、破壊にいたらしめることもある。一方、交通荷重は構造物の加振源として常時作用するが、その加振源は構造物の強度に影響を与えるほど重大なものでない。しかしながら、橋梁、特に鋼橋のようにスレンダーな構造物は、他の構造物に比べて振動しやすく減衰性が小さいために車両等の交通荷重によって容易に励振されてしまう。この橋梁の振動は交通荷重によって起因される物理現象であると同時に、橋梁自体の振動が周囲の空気を励振して低周波空気振動を発生させる源となっている。低周波空気振動は周辺の家屋に影響を与えるだけでなく、人体に対して生理的、精神的に影響を及ぼすとされ¹⁾、重大な環境問題の1つとして位置付けられている。高架橋で

行われた実態調査より、橋梁による低周波空気振動の原因として、車両が橋梁ジョイント部を通過する際の振動によるものと橋全体が上下に運動する曲げたわみ振動によるものが挙げられる²⁾。

このような状況のなか、低周波空気振動の発生を防止すべく橋梁の振動を制御しようという問題が盛んに検討されている。これまでの研究では構造物の動的応答についてシミュレーションを主体に把握するものやTMD(Tuned Mass Damper)、ダイレクトダンパー等の受動型(Passive)による方法の検討が主なものであった。近年では受動型に対し能動型(Active)、即ち外部より構造物に制振エネルギーを与え、積極的に振動を制御しようというアクティブコントロールの研究が活発に行われるようになった³⁾⁴⁾。アクティブコントロールは、外乱によって生じる様々な振動をセンサーでとらえ、その情報を基に有効な制御力を算出して構造物に作用させ、制振の効果を得ようというものである。従って、構造物の情報を入力し、解析を行って、制御力を出力するといったコンピュータ処理が必要となる。アクティブコントロールは外部から制御エネルギーを供給するために、パッシブ型と比べ制御システムが複雑でありコストも高価であるが、制振効果はか

原稿受付：平成3年5月30日

*長岡技術科学大学建設系

**長岡技術科学大学機械系

***銚子横河ブリッジ

なり期待でき系の振動特性が変化しても対応できる。

制御力の与え方やデータの解析手法には種々のものがある。本研究では制御力を与える方式としてアクティブマスダンパとし、制御力を求める制御手法としてFFTおよび逆FFTを用いた位相差制御による手法を採用した。制御の原理としては、振動の方向と逆方向に制御力を作用させることによって制振効果を得ようとするものである。制御の手順は、まず振動データを入力し、FFTによる卓越振動数の検出を行う。そして、これを基に演算を行って有効な制御力を逆FFTによって出力する。これらの作業を高速にかつ連続に実行できるように、制御システムには種々な工夫が施してあり実用的な制御システムとなっている。またこの制御システムでは制御力を出力している間も振動体の振動データを入力し続け、出力している制御力が有効に作用しているかどうか検定し、有効でない場合は制御力算出において補正が行なわれるような機能も考慮されている。つまり自動制御におけるフィードバックの概念を取り入れている。従って、ターゲットとする構造物の振動数が多少変動しても、それなりの順応性が期待できる。

本研究報告では、制振システムの紹介と簡単な実用例として溝型鋼を単純支持したものに適用した場合について述べる。

2. 制御システム

2.1 システムの概要

本制御システムを単純桁に適用した場合の概略図を図-1に示す。このシステムは桁本体に取り付けられた加速度センサー(図中②)で桁振動をピックアップし、A/D変換ボードによってコンピュータ(NEC 9801

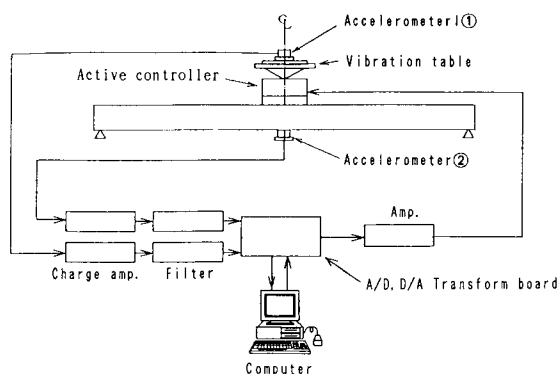


Fig. 1 Outline of control system.

RA, CPU 80386)に取り込む。コンピュータでは取り込んだデータに対しFFTを用いた周波数分析を行い、卓越周波数の検出、卓越振動波形の位相を計算し、これらのデータよりアクティブコントローラ振動部の加速度波形を決定する。決定された加速度データはD/A変換ボード、アンプを介してアクティブコントローラに出力され振動部が駆動される。この際、アクティブコントローラ振動部に取り付けられた加速度センサ(図中①)でも同様にデータのサンプリングを行い、これら2波形より制振可能な位相差となっているかどうか判断する。桁に作用する制御力はコントローラ振動部の質量と加速度によって決まる。

一連のデータ処理はすべてコンピュータによって回転されており、コンピュータは振動データの入力、演算処理、結果の出力の3行程を連続に行っている。本システムでは、この3行程を並列処理できるようにコンピュータのハードウェアを強化した。通常のコンピュータはCPUが1つだけ搭載されているので3行程をそれぞれ1行程ずつ処理し、これを繰り返すといった形態であるが、本システムでは演算専用のプロセッサを装備し、データをパイプライン処理することによって連続したデータの入出力を可能にした。

2.2 制御の方法

制御力を求める方法は、振動体の卓越振動波形の位相を計算し、この位相と逆位相となるような制御力波形を決定しようというものである。この位相差を図-2のように定義する。実線がFFTによって解析された振動体の卓越振動波形で、点線が制御力の波形である。2波形の位相差が 180° 、つまり逆位相のときに最適な制振効果が得られ、これより $\pm 90^\circ$ の範囲が制御可能とされている⁵⁾。本研究でもこの位相差が 180° になるように制御を行う。制御力の位相は、周辺機器(フィルタ、アンプ等)通過時に生じる応答遅れや外力に対する橋梁の応答遅れ等が考慮され、実際に制御力が作用

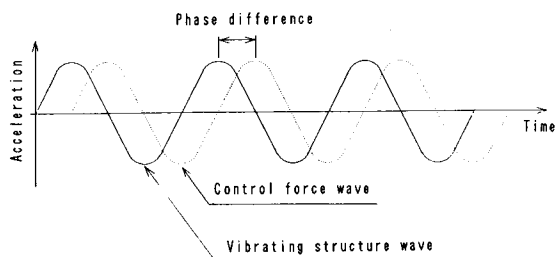


Fig. 2 Definition of phase difference.

するときには橋梁の位相との差が 180° になるように決定される。

前節で述べたように、コンピュータでは振動体の振動とは別にコントローラ振動部の振動データもピックアップしており、これら2つの波形を比較することにより最適な制御が行われているかどうか判断する。そしてこの状態を次回の制御にフィードバックする。1データブロックのサンプリングを開始してから出力が開始されるまでタイムラグが生じてしまい、そこで処理された結果が出力されたときに必ずしも有効に作用しているのか不明なので、フィードバックはこの不確実性を考慮するために行われる。

2.3 データの流れ

加速度センサで入力されたアナログ信号は、A/D変換ボードによって12ビットバイナリのデジタル信号に変換され、コンピュータのメインメモリにDMA (Direct Memory Access) 転送される。1チャンネル当り 5μ 秒で変換と転送が実行される。そしてコンピュータによって演算処理された16ビットバイナリのデータはD/A変換ボードにDMA転送され、再びアナログ信号に戻され出力される。DMA転送は、コンピュータに登載されているDMAコントローラを直接ユーザがコントロールするもので、コンピュータのCPUを経由することなく高速にデータの転送が行われる。DMA転送が行われている間でもコンピュータ本体のCPUは他の処理することが可能であり、本体のCPUに関与することなく自動的にデータ転送が行われる。このDMA転送の導入により、データの入出力が連続して行われる様子を図-3に示す。

2.4 演算の高速化

また、制御システムではFFT演算に専用のCPU (VSP: Vector Signal Processor) を搭載したプロセッサボードとパイプライン処理を採用し、信号処理の高速化を図った。従って、本システムにはCPUが2つ装備されていることになる。卓越振動数の検出、位相の計算および逆FFTもVSPが担当し、コンピュータのCPUは各ボードへの指示と位相差の補正のみを行うマルチタスクシステムを構成している。

これら2つのCPU間でのデータの受け渡しをパイプライン処理することでより高速に処理が行われる。ここで、FFT演算のために連続したデータを一定のブロックに分割し、VSPに転送して演算処理する場合を考える。パイプライン処理を行わない図-4の(a)に

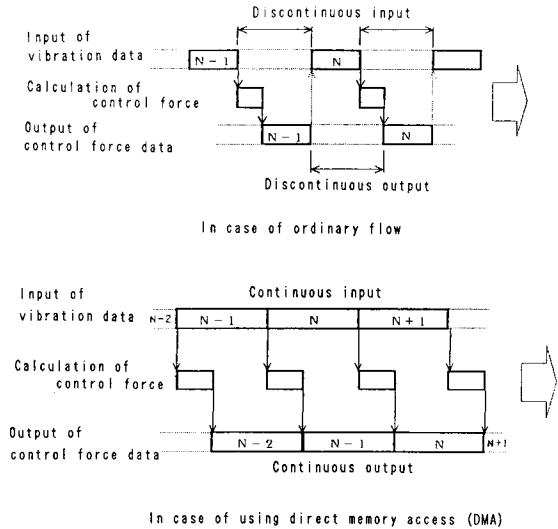
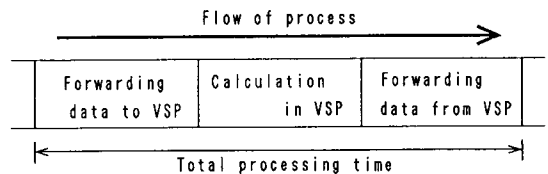


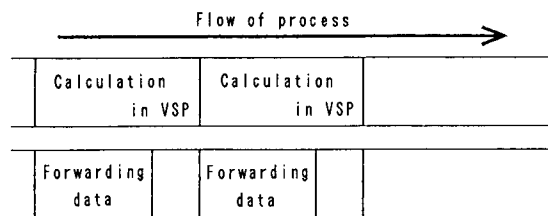
Fig. 3 Flow of data.

示すようにデータの転送、演算、結果の読み取りがこの順序でシークェルにしか行えない。そのため処理時間は演算時間にデータ転送時間が加わったものとする。パイプライン処理を導入すると図-4の(b)に示すように演算とデータ転送を同時に行うことが可能となり、処理時間を大幅に短縮することができる。

パイプライン処理の具体的なデータの流れを図-5に示す。プロセッサボードにはA,Bの完全に独立した2つのRAMがあり、一方を使ってVSPが演算中に



(a) In case of ordinary process



(b) In case of pipeline array process

Fig. 4 Concept of pipeline array process.

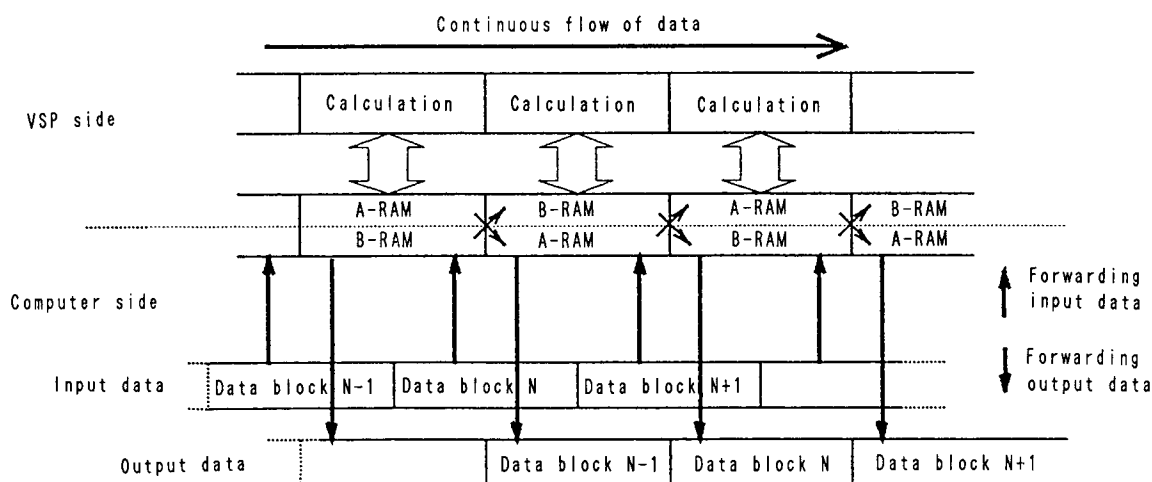


Fig. 5 Concrete flow of data in pipeline array process.

他方のRAMにデータを転送し、演算が終了するとRAMを入れ換えてもう一方のRAMに対して演算を行う。2つのRAMのうち一方はVSPが、他方はコンピュータがアクセスし、互いに競合することなく連続的に処理を行うことができる。

3. 模型橋を用いた制振実験

3.1 実験方法

本研究で開発した振動制御システムを小型の模型橋に適用し単発加振によって発生した桁の1次振動を制振する実験を行った。模型橋は溝型鋼を図-6のように単純支持したもので、その諸元を表-1に示す。実験パラメータとして、(a)コントローラ振動部の質量 (b)コントローラの取付位置、(c)コントローラ本体の重量を設定し、制振システムの基本的な実験条件を表-2に示す。実験は、それぞれの場合の制御力に対する制振効果を測定する。

単発加振の方法は図-7に示すように、衝撃加振の代わりに桁の固有振動でACを駆動し振動を発生させる。この加振後、直ちに制御を開始する。桁に作用させる制御力の大きさとして次式で示す無次元量 Φ を定義する。

$$\Phi = F_c / F_B \quad (1)$$

ここで、 F_c はコントローラの振動部に作用する力(N)であり F_B は加振による桁の慣性力(N)である。制御力の大きさはコントローラ振動部の振幅を変化させることによって調節する。また、制振効果の定量的な評価値として次式で定義した相対加速度レベル α を用い

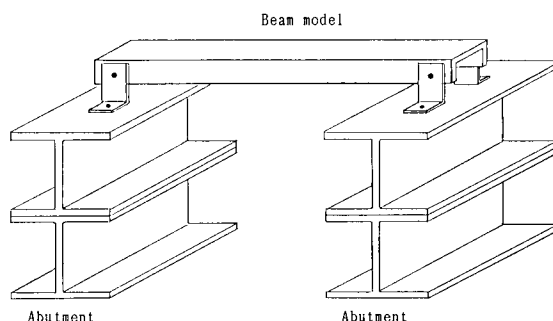


Fig. 6 A view of beam model.

Table 1. Specification of beam model.

Sectional shape	a=150, b=75 (mm)
Span	3000 (mm)
Weight	56.0 (kgf)
Moment of inertia	122 (cm ⁴)

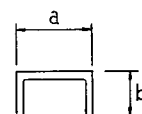


Table 2. The conditions of experiment.

No.	Weight of controller	Location of control force	Mass of vibration table*
Case 1	35kgf	Midspan	0.85kg (1/100)
Case 2	35kgf	Midspan	1.35kg (1/67)
Case 3	35kgf	Midspan	1.85kg (1/50)
Case 4	35kgf	1/4 of span	1.35kg (1/67)
Case 5	8.3kgf	Midspan	1.30kg (1/50)

* () value indicates ratio of vibration table weight to beam weight which includes controller weight also.

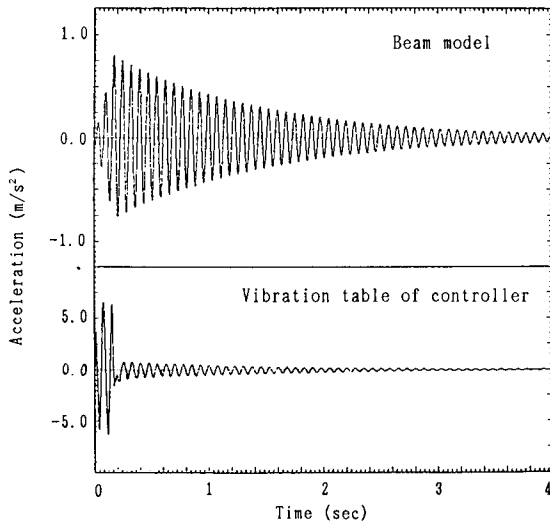


Fig. 7 Impulsive excitment.

た。

$$\alpha = 20 \log(A/A_0) \quad (2)$$

A_0 は制御力を作用させないときの 4 秒間の加速度実効値であり、 A は制御力を作用させたときの 4 秒間の加速度実効値である。式より制振効果がある場合には負の値となる。

3.2 実験結果

実験結果の一例を示す。桁の中央に自重 35 kgf のアクティブコントローラを設置し、コントローラ振動部に 1.35 kg の質量を取付けた場合 (Case 2) の単発加振に対する制振結果を図-8 に示し、連続的な衝撃に対する制振結果を図-9 に示す。どちらの加振に対しても制振効果によって急速に減衰しているのがわかる。以下に各パラメータについてまとめたものを示す。

(1) コントローラ振動部の質量を変化させた場合

桁の中央に自重 35 kgf のアクティブコントローラとコントローラの振動部として 0.85 kg, 1.35 kg, 1.85 kg の質量を付けた場合 (Case 1 ~ 3) の制振結果を図-10 に示す。制振効果は質量の大きさに影響されることなく、制御力の大きさに依存しているのがわかる。制御力の大きさは質量の大きさとコントローラ振動部の加速度によって決まる。質量が小さくても振幅を大きく駆動することにより制御力を確保できる。従って、制御力にはコントローラの能力による制限が存在することになる。

また、制御力が大きすぎると制振効果が低下してい

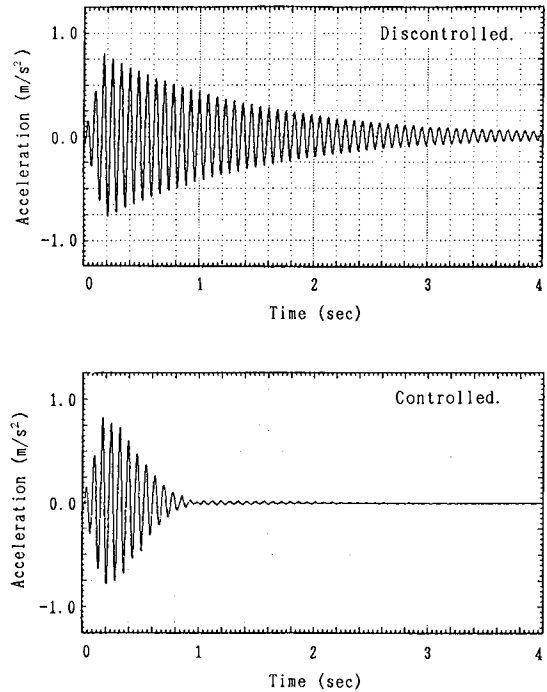


Fig. 8 Efficiency of control system in case of a singular impulsive excitement.

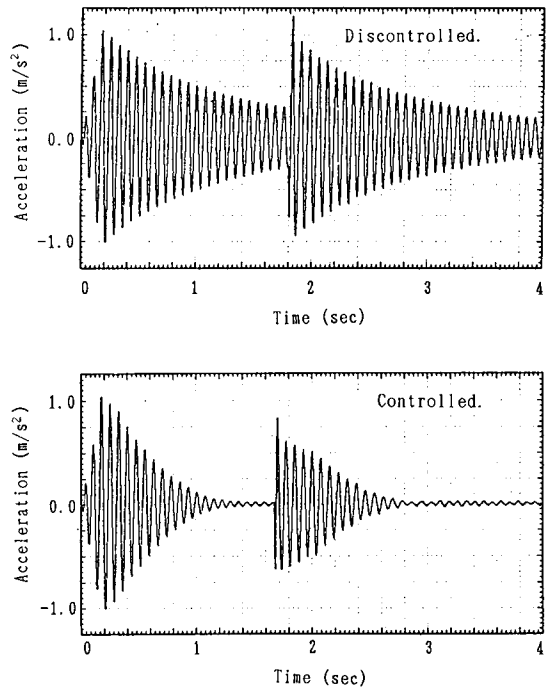


Fig. 9 Efficiency of control system in case of plural impulsive excitements.

る。これは、制御を行うためのデータ入出力が一定量（一定時間）毎に繰り返されていて、制御完了が直ちに識別できないために大きな制御力によって逆に加振されてしまうからである。つまり、制御が完了した時点でも制御力の出力が行われているという状況である。この対応としては、制御力の大きさについてもフィードバック制御を行うようにソフトウェアを改良すればよい。

(2) コントローラ取付位置が変化した場合

支間 1/4 にアクティブコントローラを取付け振動部の質量 1.35 kg (Case 4) で実験を行い、支間中央のもの (Case 2) と比較すると図-11 のようになる。高次モードへの対応を考慮した場合、コントローラ取付位置を中央より支点方向にシフトさせた方がより大きな制振効果が得られると期待される⁶⁾。このような場合においても十分に制振効果が得られている。両者に差がみられないのは、コントローラ本体の重量が大きいので取付位置が変化すると 1 次モードも多少変化してしまうためである。

(3) コントローラ本体の重量が変化した場合

図-12 にコントローラの自重が 8.5 kgf (Case 5) と 35 kgf (Case 2) の結果について示す。8.5 kgf のコントローラを用いた場合は制御力の変化により制振効果がばらついている。これは、コントローラが軽量化されたことにより桁の振動数が変化してしまい、FFT の分解能がこの振動数とうまく合わず、正確な卓越振動数の検出が行われなために最適な制振効果となる逆位相の制御力が出力されていないからである。このために制振効果が変動したのである。FFT の分解能を桁の振動数に対応するように設定し直せば、結果のばらつきをなくすることができるはずである。一般に、サンプリング周波数とサンプル数で分解能とサンプリング時間が決まり、分解能とサンプリング時間は逆数の関係である。

しかしながら、分解能の設定がうまく行われていなくとも制振効果は -20 dB 程度と十分に得られている。

4. おわりに

本研究で構築した制御システムは、振動体の応答として出力された加速度データのみの情報を取り込んで制御力を決定しようというもので、振動体の詳しい特性をブラックボックスとして対応してきた。そして、

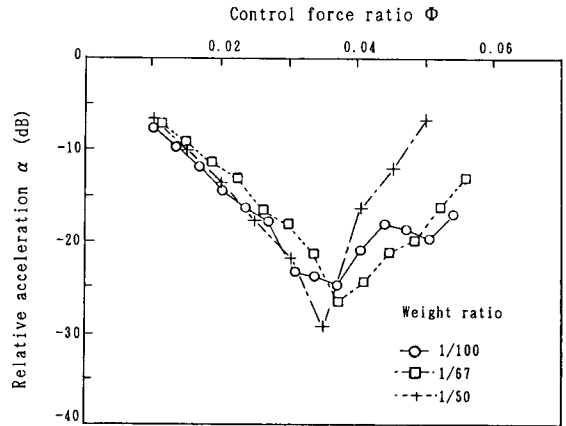


Fig. 10 Comparison of the efficiency in changing mass of vibration table.

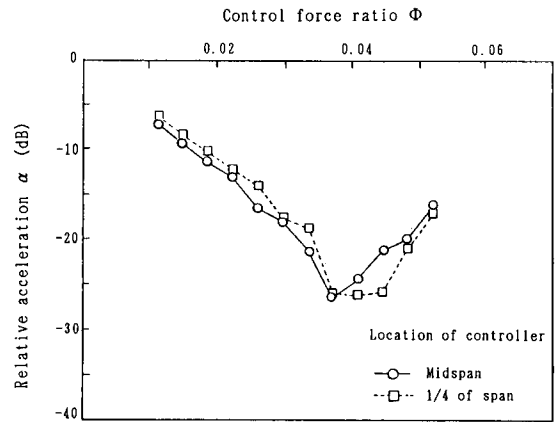


Fig. 11 Comparison of the efficiency in changing location of controller.

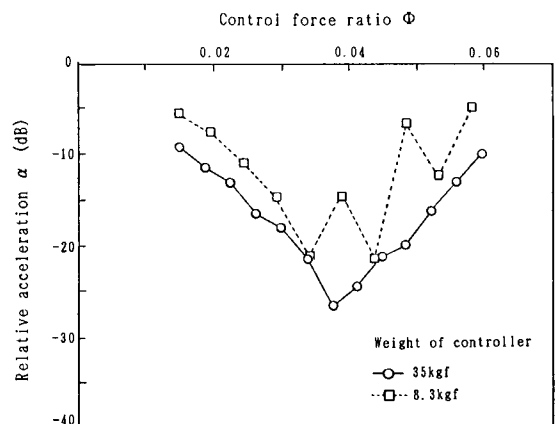


Fig. 12 Comparison of the efficiency in changing type of controller. It changes weight.

取り込んだ加速度データを最大限に活用するために、またデータ入力から制御力出力までを短時間で行うために種々の周辺機器や演算法を駆使して、実用性を十分に考慮した制御システムを開発した。そして、この制御システムを簡単な振動体に適用した実験を行って制振の効果と特性について調べた。実験結果より制振効果はかなり期待できることが判明し、その特性はコントローラ能力やサンプリング周波数およびサンプル数に影響されることがわかった。

最近では、様々な振動に対しても安定性が理論的に保証され、制御力の決定が瞬時に行われる現代制御理論に基づいた制御方法が土木構造物に対しても導入されようとしている。現代制御理論では振動体の動的応答の特性を表す数式モデルをその対象振動体ごとに求める手続きが必要となる。この手続きは振動体の構造物が複雑になるとかなりの手間を要する。本システムの制御方法ではこのような手間のかかる予備調査を必要とせず、システムを構成する機器の特性にも大きく左右されない。このように、本システムでは手軽さという汎用性が期待できる。

本システムではFFTの分解能が制御効果に影響を及ぼすという問題がある。FFTの分解能はサンプリング時間の逆数の関係であり、サンプリング時間を長くすれば精度は向上するが迅速な対応ができない。つまり、速応性と確実性の両方を同時に兼ね備えることができない。このような不変の現実問題を打破することは難しい。しかし、構造物の振動形態が、極端に変動する振動や不規則な連続衝撃加振によるものでないと固定されれば、卓越振動数もさほど変動しないはずである。ある程度振動形態が固定でき、ターゲットとな

る振動数が設定できる構造物に対しては、サンプリング時間を短くして速応性を期待しても十分な振動効果が得られる。振動が不明である場合にはサンプリング時間を長くして確実性を確保するようにすればよい。このような状況に応じたサンプリング時間の設定や、制御力が悪影響を与えないようにする安全機能をシステムに組み入れることが今後の課題となるであろう。また外力として移動荷重に対しても制振特性を調査する必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたり本学建設系池田清宏助教授からの多くの御指導をいただいた。また、実験においては道路研究室、施工研究室の諸君に手伝っていただいた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小堀為雄, 梶川康男, 橋梁振動の人間工学的評価法, 土木学会論文報告書, 第230号, 1974, pp.23-31.
- 2) 梶川康男, 大島信太郎, 周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法, 土木学会論文報告集, 第341号, 1984, pp.79-86.
- 3) 矢作根, 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, pp.435-444.
- 4) 川島一彦, 長谷川金二, 吉田武史, 足立敏行, アクティブマスダンパーによる制振実験, 第44回土木学会年次学術講演会概要集, 第1部, 1989, pp.770-771.
- 5) 小泉博之, 橋梁の能動型振動制御に関する研究, 長岡技術学科大学院修士論文, 1990.
- 6) K. Torii, S. Igarashi, H. Terada, K. Ikeda, K. Ikeda, T. Maruyama, Active Damping Control of Flexural Vibration of Steel Bridges. Proceedings of the Korea-Japan Joint Seminar on Steel Bridges., 1990, pp. 153-160.