

# 高層建物のアクティブ制振に関する研究

鈴木 哲夫 蔭山 満 野畑 有秀 諸戸 竜一  
寺村 彰 安井 讓 岡田 宏

## Study on Active Vibration Control for High-rise Buildings

Tetsuo Suzuki Mitsuru Kageyama Arihide Nobata Ryuichi Moroto  
Akira Teramura Yuzuru Yasui Hiroshi Okada

### Abstract

An active dynamic vibration absorber (DVA) driven by an AC servomotor and a ball screw has been developed for maintaining functional properties and enhancing amenity in high-rise buildings in medium and small earthquakes and in strong wind.

This paper describes semi-optimal control using the minimum norm method to realize non-full-scale state vector feed-back control. As the minimum norm method itself does not ensure stability of control, a robust control method using a low-pass filter between controller and actuator is presented. In this control method, the spillover problem caused by high frequency modes is investigated to provide better control effects for target low-frequency modes. In order to investigate the usefulness of the present control method, an experiment using 4 sensing points for an 8-story frame model was carried out.

### 概 要

著者らは、比較的頻度の高い中小地震あるいは強風時における高層建物の機能性保持と居住性の向上を図ることを目的として、AC サーボモータとボールネジで駆動するアクティブ動吸振器(DVA)システムの開発を行ってきた。

本論では全状態量のフィードバックを用いない場合の制御法について述べる。その制御法では、限定された情報量から準最適制御力を得るために、最小ノルム法を用いている。また1次から数次の制御対象モードの制振効果をより高めるために、高次モードのスピルオーバーに対して、ロバストなものとする必要がある。ここでは、ローパスフィルタを積極的に用いることによって、この問題の解決を図っている。さらに8層モデルに対し4層分のセンシングで振動台実験を行ない、その有効性について検証した。

## 1. まえがき

著者らは、比較的頻度の高い中小地震あるいは強風時における高層建物の機能性保持と居住性の向上を図ることを目的として、AC サーボモータとボールネジで駆動するアクティブ制振システムの開発を行ってきた。既に、全状態量フィードバックで構成される最適制御を4層建物モデルの実験に適用し、多モード同時制御を実現すると共に大きな制振効果が得られたことを報告してきた<sup>1)</sup>。しかし、実際の高層建物を対象とした場合、全階の応答を観測してフィードバック制御に用いることは困難であり、建物をモデル化する段階で低次元化する低次元化モデルによる制御や、フィードバック成分を用いる段階で制約を加える出力フィードバック制御などを行なうことが必要となる。この場合、無視されたモード(残留モード)の不安定化(スピルオーバー<sup>2)</sup>)を押えることが制振性能を確保する上で重要な課題となる。

本論ではまず、低次元化モデルによる制御と出力フィードバック制御の制振効果を理論的に比較検討し、後者が優位にあることを示す。後者の場合、全状態量を用いる最適制御の観点から見ると制御構造制約を有する出力最適化制御問題として定式化できる<sup>3)</sup>ので、準最適制御力を求める手法として、最小ノルム法(MNM)<sup>4)</sup>を用いている。

次に、出力フィードバック制御において、ローパスフィルタの積極的利用が、高次モードのスピルオーバーに対し、ロバスト性を確保し、かつ制御対象である低次モードの制振効果を高めるのに有効であることを理論的に検討している。

最後に、上記制御の有効性を8層モデルに対し、4層分のセンシングで行なった振動台実験において確認したことを報告する。

## 2. 実験装置の概要とその基本式

### 2.1 実験モデルの諸元

アクティブ動吸振器を最上部に装着した8層構造物および動吸振器の諸元を図-1に示す。構造物は鉄骨造で、その総重量は約12.5tf、動吸振器可動部の重量は50kgf(質量比： $\mu=0.40\%$ )である。構造物の基礎は振動台(重量約50tf)に剛接しているが、振動台の剛性の影響でロッキングが生じる。表-1は実測によって得られた構造物各モードの固有振動数と減衰定数である。

### 2.2 ACサーボモータの動特性

本実験で用いるアクティブ動吸振器の構成概念図を図-2に示す。アクチュエータとして用いるACサーボモータは動吸振器質量と必要な制御力の兼ね合いから定格出力1.5kwのものを用い、マイナーループで速度制御を施すドライバにより駆動する。本研究では、ACサーボモータの速度制御ドライバへの入力電圧 $u$ に対する動吸振器質量の速度 $\dot{x}_a$ の周波数応答を実験的に調べ、次の2次系の式で近似した。

$$\frac{\dot{x}_a(s)}{u(s)} = \frac{-\beta}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ :サーボモータの動特性係数<sup>1)</sup>,

$x_a(s) = L[x_a(t)]$ ,  $u(s) = L[u(t)]$ ,

$L[\cdot]$ :ラプラス変換,  $s$ :ラプラス演算子

ただし,  $x_a(t)$ :動吸振器質量の相対変位

$u(t)$ :入力電圧

従って、速度制御ドライバを含めたアクティブ動吸振器の運動方程式は以下のように近似できる。

$$\ddot{x}_a(t) = -\alpha_1 \dot{x}_a(t) - \alpha_2 x_a(t) - \beta u(t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(2)は状態ベクトル $X_a$ を用いて状態方程式で表すと、

$$\dot{X}_a(t) = A_a X_a(t) + B_a u(t) \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。ただし、

$$X_a^T(t) = [x_a(t) \quad \dot{x}_a(t) \quad \ddot{x}_a(t)]$$

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$B_a^T = [0 \quad 0 \quad -\beta] \quad \dots\dots\dots(5)$$

### 2.3 制御系の構成

制御系の構成を図-3に示す。構造物には基礎および偶数階に絶対速度センサが装着されている。これらの速度信号は、積分器を通して得られた絶対変位信号と共に減算器にかけられ、相対変位信号が得られる。一方、アクチュエータには差動トランスが装着され、相対変位信号とこれを微分器にかけることで相対速度信号が得られる。これらの信号はサンプリング間隔5msのA/D変換器を通してCPUに送られ、ここで制御量が計算される。制御信号はD/A変換器を通してサーボドライバに送られ、モータを駆動する。なお、スピルオーバーに対してローパスフィルタを挿入した実験についても行なえるように構成されている。

表-1 固有振動数と減衰定数

モード次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
固有振動数 $f_0$ (Hz)	1.83	5.65	9.89	13.57	16.95	20.40	22.05	25.05	36.20
減衰定数 (%)	0.397	0.403	0.397	0.398	0.451	0.450	0.449	0.451	0.450

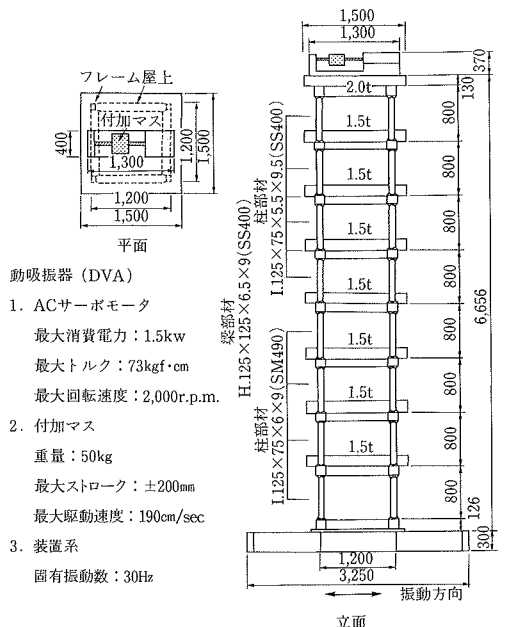


図-1 構造物模型の諸元

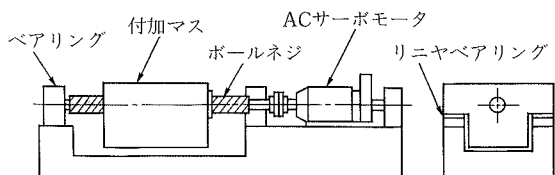


図-2 動吸振器の構造

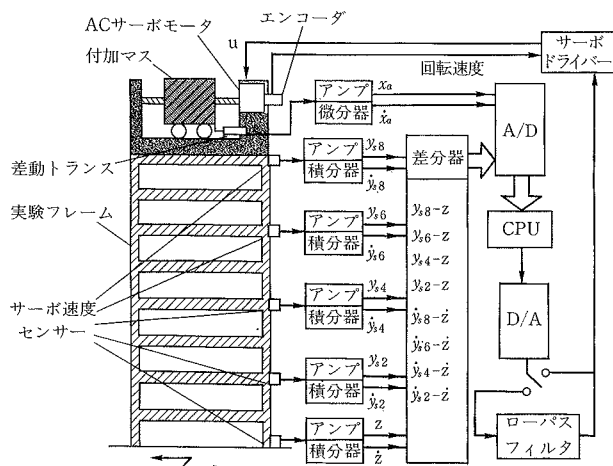


図-3 制振システムの構成

2.4 力学モデルの定式化と最適制御法

本実験の力学モデルを図-4に示す。構造物とアクチュエータはそれぞれ次のような式で表わせる。

$$M_s \ddot{X}_s(t) + C_s \dot{X}_s(t) + K_s X_s(t) = \Delta m_a \ddot{x}_a(t) + M_d e \ddot{z}(t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$X^T(t) = [X_a^T(t) \quad X_s^T(t) \quad \dot{X}_s^T(t)] \quad \dots\dots\dots(7)$$

として、この力学モデルの状態方程式を式(3)の装置特性も含めた形で表すと次式となる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + Dz(t) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_a & & & O_{3 \times 18} \\ & O_{17 \times 1} & & O_{9 \times 9} & I_{9 \times 9} \\ & O_{18 \times 2} & & & \\ & & M_d^{-1} \Delta m_a & -M_d^{-1} K_s & -M_d^{-1} C_s \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$B^T = [B_a^T \quad O_{1 \times 9} \quad O_{1 \times 9}] \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$D^T = [O_{1 \times (3+9)} \quad -e^T] \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、

- $y_s(t)$  : 各質点の絶対変位ベクトル
- $z(t)$  : 入力変位
- $\theta$  : 構造物のロッキング角度
- $X_s^T = [y_{s8}-z, \dots, y_{s1}-z, \theta]$  : 相対変位ベクトル
- $M_s$  : 構造物の質量行列
- $K_s$  : 構造物の剛性行列
- $C_s$  : 構造物の減衰行列
- $m_a$  : 動吸振器の質量
- $u(t)$  : サーボモータコイルに印加する電圧(V)
- $M_d = M_s + \Delta m_a \Delta^T$
- $e^T = [1 \quad 1 \dots 1 \quad 0]$
- $\Delta^T = [1 \quad 0 \dots 0]$
- $I$  : 単位行列
- $O$  : 0 行列

なお、添字の $m \times n$ は  $m$  行  $n$  列のマトリックスを示す。

制御時に式(7)の状態量  $X$  を全て用いることが可能な場合には、評価関数  $J$  として式(12)を規定することによって、その最適なフィードバックゲインベクトル  $F$  は一義的に決定される。

$$J(u) = E[X^T Q X + ru^2] \quad \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $Q$  と  $r$  は重み係数であり、 $E[\cdot]$  は数学的期待値である。

これを最小とする最適制御ゲイン  $F$  とその操作量  $u(t)$  は

$$F = -B^T P / r \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$u(t) = F X(t) \quad \dots\dots\dots(14)$$

となる。

ただし、 $P$  は次のリカッチ方程式の正定唯一解である。

$$PA + A^T P + Q - PBB^T P / r = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

式(12)の  $r$  を小さく、または  $Q$  を大きくすることによって、系の安定性が保証された、大きな制御ゲイン  $F$  を求めることができる。

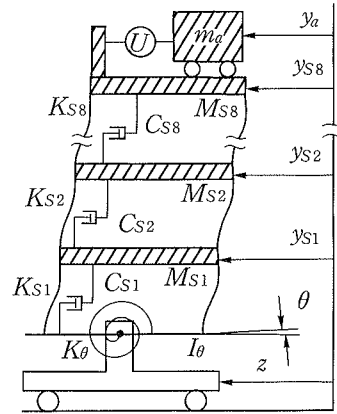


図-4 振動系の力学モデル

3. 準最適制御則

実際の高層建物を対象とした場合、全状態量を用いた制御は経済的または計算機による処理速度の点で現実的ではなく、建物の代表点数箇所の観測値を用いた制御方法の確立が望まれる。

3.1 低次元化モデルによる制御

本実験モデルでは、センサ数の制限のため状態量のうちアクチュエータの加速度、奇数層の情報得られず、基本的には、4つの情報しか得られない。そこで本節では、4次までのモードのみを制御する一般的な低次元化最適制御則を求める。モード変換を用いて状態方程式(8)を低次元化する。この操作は、構造物を4自由度系として同定し、式(8)に準じて次式のように状態方程式化することと等価となる。

$$\dot{X}_r(t) = A_r X_r(t) + B_r u(t) + D_r z(t) \quad \dots\dots\dots(16)$$

ただし、添字  $r$  は低次元化したことを表す。

構造物の応答抑制を目標とし、動吸振器のストロークの制約を考慮して次の評価関数を設定する。

$$J(u) = E[X_r^T Q X_r + ru^2] \quad \dots\dots\dots(17)$$

式(17)を最小にする低次元化最適制御ゲイン  $F_r$  は

$$u(t) = F_r X_r(t), \quad F_r = -B_r^T P / r \quad \dots\dots\dots(18)$$

となる。ただし、 $P$  は次のリカッチ方程式の解である。

$$PA_r + A_r^T P + Q - PB_r B_r^T P / r = 0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

3.2 最小ノルム法を用いた出力フィードバック制御

本節では、限られた観測量で制御を行なうことにより生じるスピルオーバー問題を配慮した制御系の設計法<sup>5)</sup>について述べる。全状態量  $X$  と実際に観測できる出力  $X_c$  との関係は、制御構造制約を表すマトリクス  $M_c$  を用いて次式のように表される。

$$X_c = M_c X \quad \dots\dots\dots(20)$$

ただし、実験モデルの状態量式(7)に対し、制御構造制約として、1, 3, 5, 7層の状態量、ロッキングの状態量および動吸振器の加速度は検出しないとする。実際の構造系からセンサーにより可観測な状態量のみ出力ベクトルは次の式(21)として表される。

$$X_c^T = [\dot{x}_a \quad x_a \quad x_{s8} \quad x_{s6} \dots \quad x_{s2} \quad \dot{x}_{s8} \quad \dot{x}_{s6} \dots \quad \dot{x}_{s2}] \quad \dots\dots\dots(21)$$

従って、

$$M_c = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 & O & O \\ O & 0 & S_{sen} & O \\ O & 0 & O & S_{sen} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(22)$$

$$S_{sen} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(23)$$

本制御問題は、与えられた行列  $M_c$  においてフィードバックゲイン行列  $F_c$  を求める制御構造制約による準最適制御問題として捉えることができる。制御構造制約を有する場合の状態フィードバック制御は以下のように与えられる。

$$u(t) = F_c^T M_c X(t) \dots\dots\dots(24)$$

ここで、モデル化モードの情報を活かすために、この制御構造制約付き最適制御問題に最小ノルム法<sup>9)</sup>を適用する。これは最適なゲイン  $F$  に対し、制御ゲイン  $F_c$  を  $F$  との誤差ノルムが最小となるように選ぶものである。最適ゲイン  $F$  には全モードに関する情報が含まれているため、 $F_c$  は高次モードを考慮した、すなわち、スピルオーバを考慮したゲインとなる。制御構造付きフィードバックゲイン  $F_c$  は、 $F$  と  $M_c$  を用いて次式によって求められる。

$$F_c = F M_c^T (M_c M_c^T)^{-1} \dots\dots\dots(25)$$

### 3.3 フィルタを用いたロバスト制御

前節ではスピルオーバを考慮する手法を示したが、本節ではさらに積極的にこれを抑制する一手法を示す。スピルオーバによる不安定が高次モードにおいて生じること、および高次モードに対するモデル化設定誤差による不安定問題に注目し、ローパスフィルタを通して制御出力電圧の高次成分をカットした制御を行なう。本節では、このローパスフィルタ挿入による制御構造制約を考慮する最適制御則を求める<sup>6)</sup>。構造物と動吸振器の状態方程式は、前節までと同じ式(8)で表されるものとする。一方、ローパスフィルタを用いた場合の特性は、フィルタ内の状態ベクトル  $V(t)$  を用いた状態方程式(26)と出力式(27)で説明される。

$$\dot{V}(t) = A_f V(t) + B_f W(t) \dots\dots\dots(26)$$

ここで、 $V^T = [u \ U]$  である。また、上式の  $W(t)$  は CPU から出力された制御出力電圧であり、 $A_f$ 、 $B_f$  はフィルタの遮断周波数を  $\omega$ 、減衰比を  $\xi$  とし、各々次のように表される。

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\xi\omega \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(27)$$

モータへの印加電圧  $u$  は状態ベクトル  $V(t)$  の出力式として、式(28)となる。

$$u(t) = C_f V(t) \dots\dots\dots(28)$$

ただし、 $C_f = [1 \ 0]$

以上より、ローパスフィルタを併合した拡大システム(図-3参照)の状態方程式は

$$\dot{X}_e(t) = A_e X_e(t) + B_e w(t) + D_e \ddot{z}(t) \dots\dots\dots(29)$$

となる。ただし、

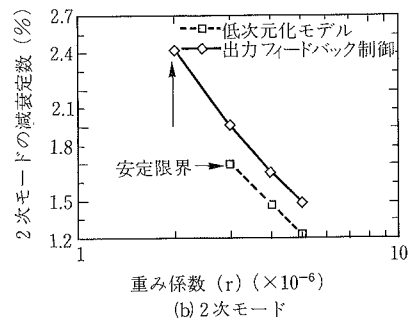
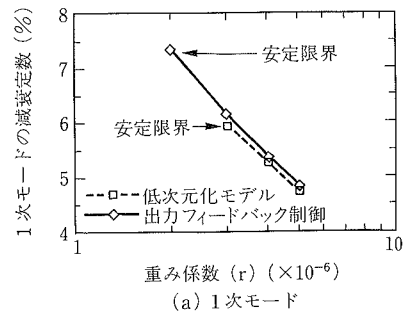
$$X_e^T(t) = [X(t), V(t)]$$

$$A_e = \begin{bmatrix} A & B C_f \\ O & A_f \end{bmatrix}$$

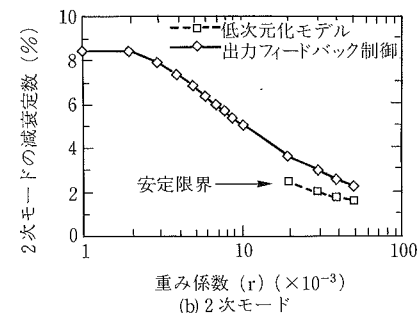
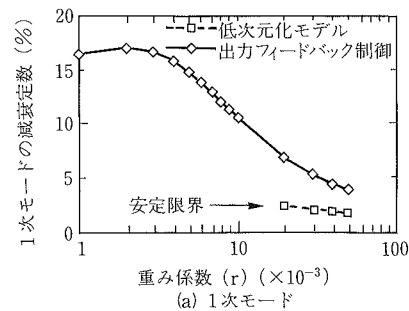
$$B_e^T = [O \ B_f]$$

$$D_e^T = [D \ O]$$

ここで添字  $e$  は、拡大系を意味する。



(1) 変位評価の場合



(2) 速度評価の場合

図-5 評価関数における重みと各モードの減衰定数の関係

最適制御ゲイン  $F_e$  は、前節と同様にして求められる。

すなわち、評価関数

$$J(w) = E[X_e^T Q X_e + r w^2] \quad \dots\dots\dots(30)$$

を設定すると、最適制御ゲイン  $F_e$  は

$$w(t) = F_e X_e(t), \quad F_e = -B_e^T P / r \quad \dots\dots\dots(31)$$

である。ただし  $P$  は次のリカッチ方程式の解である。

$$P A_e + A_e^T P + Q - P B_e B_e^T P / r = 0 \quad \dots\dots\dots(32)$$

ローパスフィルタの状態量を特に測定しないとすると拡大システムにおける制御構造制約は

$$\tilde{M}_c = \begin{bmatrix} M_c & O \\ O & O \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(33)$$

と書ける。これより前節の最小ノルム法を用いると、準最適制御ゲイン  $\tilde{F}_e$  は

$$\tilde{F}_e = F_e \tilde{M}_c^T (\tilde{M}_c \tilde{M}_c^T)^{-1} \quad \dots\dots\dots(34)$$

と求められる。

#### 4. 理論計算による性能比較

##### 4.1 低次元化モデル制御と最小ノルム法を用いた出力フィードバック制御との比較

スピルオーバーを考慮しない低次元化モデル制御則と、高次モードでのスピルオーバーを考慮した出力フィードバック制御則との性能を定量的に比較するため、制御力に対する重み関数（これが小さいほど制御力が大きい）と構造物のモード減衰比の関係を求めた。評価関数には構造物の相対変位と速度を用いている。

得られた結果のうち1次および2次モードの減衰比を図-5に示す。同図より、低次元化モデル制御ではスピルオーバー不安定による安定限界が存在する。一方、スピルオーバーを考慮した出力フィードバック制御では、安定限界が向上し制振性能を高めることが可能となることが分かる。

また、速度を評価関数とした場合は重み関数に対する安定限界が現れなくなり、理論的には変位を評価関数とした場合より優れているといえる。変位を評価関数とした場合は速度評価に比べ高次モードの制御に重点が置かれていないため、高次モードが不安定になりやすく、結局、低次モードに対する制御力を増大できない。変位を評価関数とした場合の効率的制御手法の定量的考察については3.3節の制御則を用い、次節以下で行なう。

##### 4.2 フィルタを用いたロバスト制御則の検討

高次モードのスピルオーバーから生じる不安定問題を解決する方法として、次の2つが考えられる。不安定振動数の制御信号の位相を修正する方法と、信号の大きさを小さくして低感度制御とする方法である。ここでは変位を評価関数とした場合の高次の不安定振動数の信号をローパスフィルタによって低減し、不安定問題の解決を図る後者の立場を取る。その場合の安定判別基準とフィルタ効果の概念を、一巡伝達関数の数値解析例によって示す。ここで一巡伝達関数とは、ある入力信号をオープンループで制御システムに印加し構造物を加振した場合において、マイナスイードバック制御信号の入力信号に

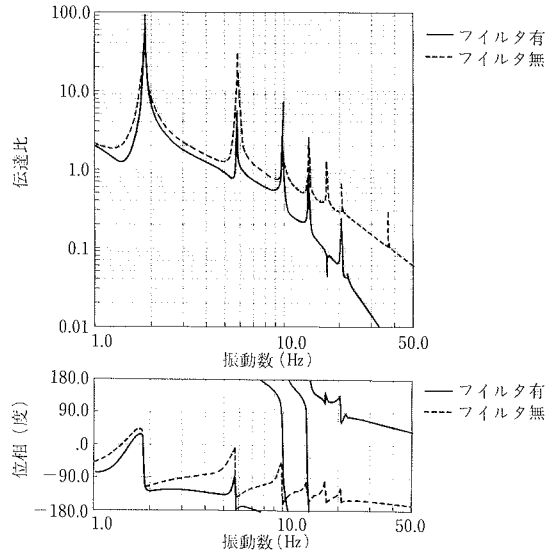


図-6 フィルタの有無による一巡伝達関数の比較 (変位評価の場合)

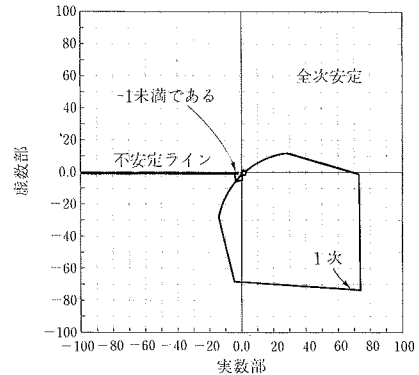


図-7 フィルタ有りの一巡伝達関数ナイキスト表示 (変位評価の場合)

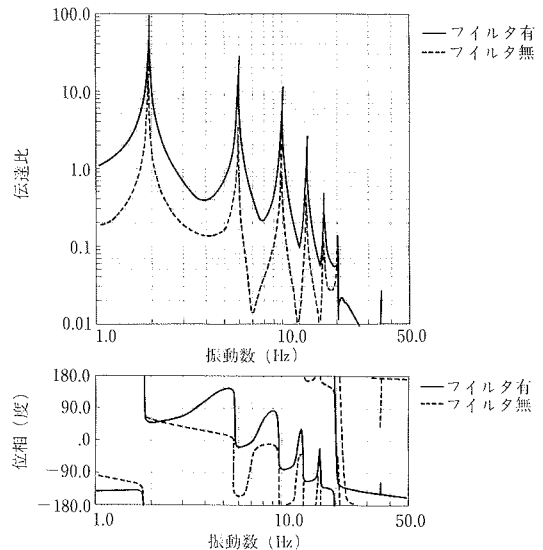


図-8 フィルタの有無による一巡伝達関数の比較 (速度評価の場合)

対する伝達関数のことをいう。安定問題を一巡伝達関数のナイキスト表示で考えた場合、制御系の安定は、負の実数軸を通過する時の一巡伝達関数成分の振幅が1より小さい場合であると規定される。

図一6はフィルタを用いた場合と用いない場合の一巡伝達関数をボード線図で示したものである。フィルタの遮断周波数は構造物の3次と4次の固有振動数の間とし、その減衰定数として0.7を用いている。この結果より、高振動数における信号の振幅低減効果が認められ、3次振動数より高次ではその振幅が1.0より小さくなっており、振幅的に安定が保証されていることが分かる。

次に、フィルタを用いた場合の一巡伝達関数をナイキスト表示で表した結果を図一7に示す。この結果より、一巡伝達関数は、-1より左の実数軸上を通過していないことが分かる。従って、低次モードは、位相的な安定性が保証されている。このように変位を評価関数としてフィルタを用いる手法は、低次側モードの位相的な安定性を確保し、さらにその低次側モードの振幅ゲインをできる限り温存しながら高次モード振動数の振幅ゲインを低減することができ、構造制御付き制御のスピルオーバーに対してロバストな手法となる。これは変位を評価関数とした場合、低次モードに制御の重点があり、その傾向とローパスフィルタの特性が合致して、意図した効果を発揮することが可能となるためである。

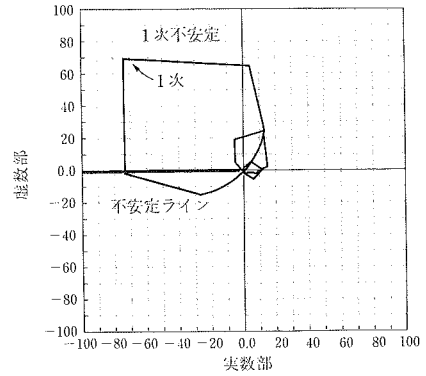
ちなみに、速度を評価関数として用いた場合の一巡伝達関数を同様なボード線図とナイキスト表示で示した結果を図一8と図一9に示す。この場合、制御の重点が高次モードに有り、高次モードの振幅ゲインを温存するため、それより低次モード側のすべての振幅ゲインはフィルタを用いた場合の方が逆に大きくなっている。また位相的には低次モードで不安定となっている。このことは、フィルタは、その特性と評価関数による制御の重点が掛かるモード次数とを考慮して用いなければかえって逆効果となることを示していると言える。

### 4.3 フィルタの遮断周波数と制振性能

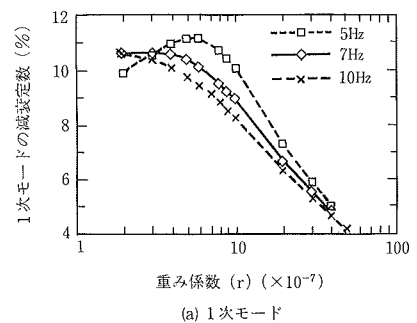
4次モード以上の不安定現象を抑えることを目的としてフィルタの遮断周波数を4次モード(約14 Hz)以下の5, 7, 10 Hzの3通りとし、パラメータスタディを行なった。図一10は制御力に対する重み関数と、構造物の1次, 2次, 3次モードの減衰定数の関係を表わしたものである。どの遮断周波数でも安定限界は見られない。また各モードにおける制振性能の間には遮断周波数に依存するトレードオフ関係があり、制振目標に応じて最適となる遮断周波数が存在する可能性を示唆している。なお、これらの結果は動吸振器ストロークに関する重み係数によって変化する。この重み係数を緩めることによって、更に大きな制御減衰を得ることも可能である。

## 5. 実験による検証

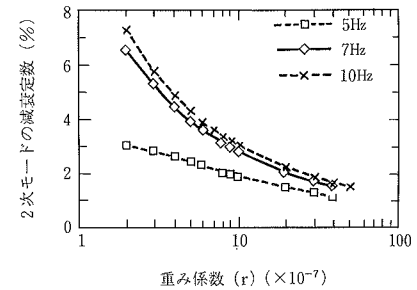
前章までの検討結果から、状態量のセンシングが限定された高層建物のアクティブ制振問題において、多モー



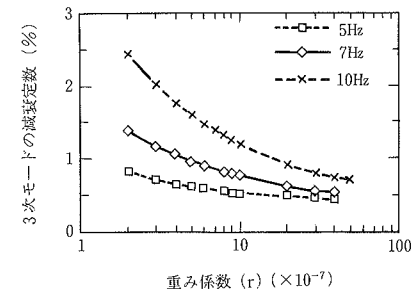
図一9 フィルタ有りの一巡伝達関数ナイキスト表示 (速度評価の場合)



(a) 1次モード



(b) 2次モード



(c) 3次モード

図一10 各遮断周波数に対する評価関数における重みと各モードの減衰定数の関係

表一2 各階の最大応答値の比較

質点	変位 (cm)				加速度 (gal)					
	8	6	4	2	MASS	8	6	4	2	MASS
無制振	1.63	1.24	0.86	0.47	—	245.	176.	118.	97.9	—
制振 (比率)	0.74 0.45	0.59 0.47	0.48 0.56	0.22 0.47	12.4 —	113. 0.46	93.9 0.53	64.3 0.55	74.0 0.76	2004 —
制振+フィルタ (比率)	0.68 0.42	0.53 0.43	0.40 0.46	0.17 0.37	17.6 —	95.2 0.39	85.5 0.49	77.0 0.65	50.0 0.51	3280 —

比率とは、制振/無制振時の値を示す。

ドを効率的にかつ安定的に制御する手法としては、以下に示す2つの制御則を用いることが有効であることが明らかとなった。すなわち、①速度を評価関数とし、最小ノルム法を用いた出力フィードバック制御則、②変位を評価関数とし、ローパスフィルタを用いたロバスト制御則の2つである。

実験はまず、上記2つの制御則の優位性を実験的に検証するため、振動台に帯域を限定したホワイトノイズ(加速度)を入力し、最上階の加速度を出力とする周波数応答を求めた。制御力ゲインは理論計算を参考にし、制御不安定になるまで高めた。①の制御則による方法は理論上は有効であったが、実験結果においては②の制御則に依った方が制振効果が大きかった。この原因としては、①の方法は構造物のモデル化誤差およびセンサの位相ズレが生じやすい高次モードの制御に重きが置かれているため、現実的には理論値の再現が困難だった、と考えられる。従って以下においては、評価関数を変位とし、かつフィルタを用いたロバスト制御則による実験結果について、主に記述する。

### 5.1 フィルタの有無による制振性能比較

ローパスフィルタ有り無しのそれぞれの場合について制御ゲインを独立に求め制振効果を比較した。制御ゲイン決定に当たっては、アクチュエータのストローク限界(20 cm)およびエルセントロ波 50 gal 入力実験が可能なることを条件として与えた。最終ゲインは、フィルタ無しの場合には高次スピルオーバーによる不安定現象により、フィルタ有りの場合はストローク限界により各々決まっている。上記の最終ゲインを用いた制振実験の結果を図-11、図-12に示す。

図-11は、振動台正弦波入力実験から求めた入力加速度に対する屋上階の加速度周波数応答倍率、および位相差である。フィルタ有りで制御を行なった場合を○印で、フィルタ無しで制御を行なった場合を△印で示している。同図より、フィルタを用いることにより、安定限界領域が広がってより強いゲインを与え得ることが理解されよう。非制振実験では1次モードでの応答倍率が約200倍であったが、フィルタを用いた制振実験では約6倍に低減されている。また、フィルタ無しの制振実験に比べると、2次、3次モードでの制振効果が大幅に改善されており、フィルタを用いた制御手法の有効性が明らかである。

図-12には、エルセントロ波地震波を用いた非定常不規則波加振実験における屋上階の応答波形を示す。同図から、非制振実験の最大応答値と比較すると、フィルタ無しの制振実験では相対変位、加速度とも約1/2に抑制されているのに対し、フィルタ有りの制振実験では両者ともに更に、約1/2.5に抑制されており、非定常不規則外乱に対してもフィルタを用いた制御手法の有効性が実証された。なお、アクチュエータの最大ストロークは、フィルタ無しで約12.8 cm、フィルタ有りでは約17.7 cmであった。表-2にエルセントロ波地震波入力を50 cm/sec<sup>2</sup>に基準化した時の各階の最大応答値の一覧表を示す。

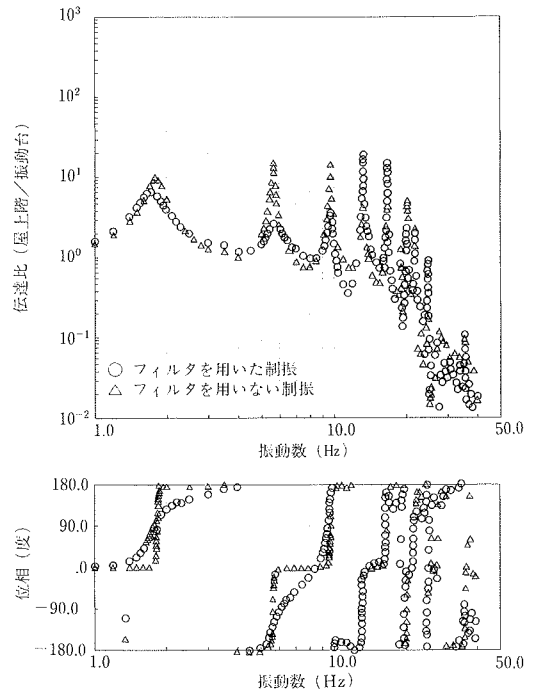


図-11 加速度周波数応答倍率(屋上階/振動台)

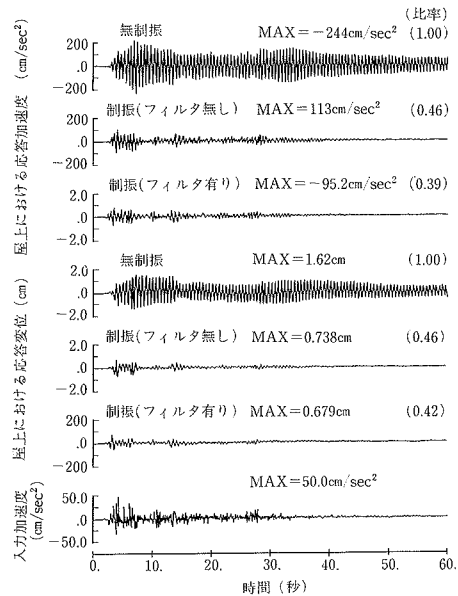


図-12 エルセントロ波入力時の構造物の応答波形比較(屋上階)

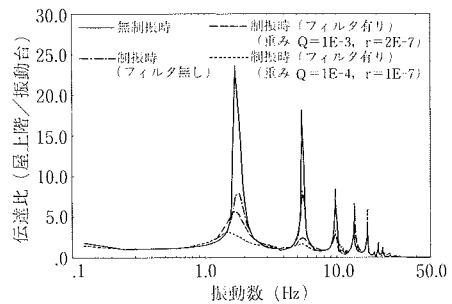


図-13 ホワイトノイズ入力による伝達関数(屋上階/振動台)

一方、フィルタを用いた制御においてストロークに対する制約を緩め、より大きな制御力ゲインに関する検討結果を図-13に示す。同図は振動台にホワイトノイズを入力した場合の伝達関数である。ストロークの制約を緩めることにより、前述した 50 gal 入力時での限界ゲイン ( $Q=1E-3$ ,  $r=1E-7$ ) より強いゲイン ( $Q=1E-4$ ,  $r=1E-7$ ) でも安定制御が可能であった。このような可変ゲインの考え方は、小地震または風荷重のようにストローク制約が緩やかな小振幅応答レベルの振動抑制に対して効果的であろう。なお、この強いゲインは、エルセントロ波 30 gal 入力時の制御が可能であった。

## 5.2 遮断周波数による制振効果の差異

ローパスフィルタの遮断振動数を 5 Hz, 7 Hz, 10 Hz とした場合の制振効果を検討し、結果を図-14に示す。同図は振動台にホワイトノイズを入力した時の屋上階の伝達関数である。図から明らかなように遮断振動数以上の振動数領域では、制振効果が悪くなる。従って、今回用いるような高次 (4 次/約 14 Hz) 以降のスピルオーバーに対するロバスト性確保の面から論ずると 10 Hz の遮断振動数が妥当であると判断される。しかし、4 章で検討したように、遮断振動数を低く設定して制御対象モードを積極的に少なくすると、そのモードでは比較的小さなゲインから大きな減衰が確保されるという側面もある。従って、振動制御に際しローパスフィルタを用いる時には、効率のかつ安定的な制御が可能となるような遮断振動数の決定が重要である。その際、制振対象モードの振動数と予想される外力の卓越振動数の両面、およびセンサーの数を考慮する必要があり、詳細については今後検討する予定である。

## 6. 結び

実際の高層建物を制振する場合、全階の状態量を観測して制御に用いることは不可能である。本報告では、部分的な観測量を用いた多モード振動制御手法について理論的な考察を加え、さらに検証実験を行なった。

制御手法としてスピルオーバーを考慮した準最適制御手法 (最小ノルム法) を用いることにより、高次モードまで比較的安定的な制御が行なえることが明らかとなったさらに、本論で提案するローパスフィルタの積極的な活用法によって、高次のスピルオーバーに対しロバストな制御が可能となり、かつ、より強い制御ゲインまで安定性が

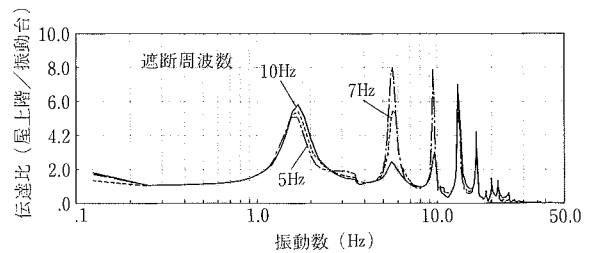


図-14 遮断周波数による伝達関数の差

保証され大きな制振効果の得られることが実験的にも実証された。

ここで示した制御手法により、制振対象モード次数とセンサー数の両者を勘案すれば実際の高層建物に対する多モード制御を効果的に行なうことが可能となった。

## 謝 辞

本開発研究は慶應義塾大学 下郷・吉田研究室とトキコ株式会社との共同研究であり、関係者各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 吉田, 下郷, 岡田, 他: 中高層建物のアクティブ制振システム, (その 4~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, p. 867~872, (1990. 10)
- 2) Balas, M. J.,: Feedback Control of Flexible System, IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-23, p. 673~679 (1978)
- 3) 西村, 吉田, 下郷: 多自由度系に対する最適アクティブ動吸振器 (低次元化モデルを用いた制御および出力フィードバック制御), 日本機械学会論文集(C), Vol. 54, No. 508, p. 2948~2956, (1988)
- 4) Kosut, R. L.,: Suboptimal Control of Linear Time-Invariant Systems Subject to Control Structure Constraints, IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-15, p. 557~563, (1970)
- 5) 吉田, 下郷, 猪瀬: スピルオーバーを考慮する弾性構造系の最適制御 (弾性回転アームの位置決め制御への応用), 日本機械学会論文集(C), Vol. 54, No. 497, p. 201~207 (1988)
- 6) 桐野, 原田, 吉田: 慣性モーメントアクチュエータによる柔軟構造物のねじり振動制御, 日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 534, p. 209~214, (1991)