

(6) アクティブ動吸振器を用いた
高層建物の多モード振動制御

MULTI-MODE VIBRATION CONTROL OF HIGH-RISE BUILDING
USING ACTIVE DYNAMIC VIBRATION ABSORBER

鈴木哲夫* 蔭山 満* 野畑有秀* 吉田和夫**
T. SUZUKI M. KAGEYAMA A. NOHATA K. YOSHIDA

An active dynamic vibration absorber(DVA) driven by an AC servo motor through a ball screw has been developed for maintaining functional properties and the betterment of amenity in high-rise buildings at medium and small earthquakes and under strong wind. For the realization of stable multi-mode active vibration control using the DVA, three methods including simple reduced-order control, suboptimal control taking into account the spillover and robust control using a low-pass filter are presented in this paper. In order to investigate the usefulness of the above mentioned control methods, experiments using 8-story frame model were carried out for the 4_{th} order reduced control. From the experimental results, the spillover-considered suboptimal control and the robust control show considerably high and high control performance, respectively.

KEY WORDS: Active vibration control, Multi-mode control, High-rise building, Dynamic vibration absorber, Spillover, Robustness

1. まえがき

著者らは、比較的頻度の多い中小地震あるいは強風時に於ける中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、全状態フィードバックで構成される最適制御則を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⁽¹⁾。

しかし、実際の高層建物を対象とした場合、フルオーダーの状態フィードバックを実現することは困難であり、現実的には限定された状態量のセンシングによる制御、即ち低次元化モデルによる制御や、観測点のみの状態量を用いた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。その場合、無視されたモード(残留モード)によるスピルオーバーのため不安定問題が生じたり、制振性能の劣化問題が生じる⁽²⁾。

本報告では、多自由度系である中高層建物に対して低次元化した制御系による制振を加えるための実用的な制御手法を確立することを目指して、高さ6.4mの8層実験構造物を制御対象とし、理論的・実験的な検討を加えた。制御則として通常の低次元最適制御則、スピルオーバーを考慮した準最適制御則およびローパスフィルタを用いたスピルオーバーにロバストな制御則を用い、制御手法と制振効果およびその安定性について定量的に検討した。

* ㈱大林組技術研究所

** 工博 慶應義塾大学助教授 理工学部機械工学科

2. 実験の概要

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、主構造物の総重量は約12.5t、動吸振器質量は50kg（質量比： $\mu = 0.40\%$ ）である。構造物の基礎は振動台（質量約50t）に剛接しており、このため振動台の剛性の影響でロッキングが生じる。表1に構造物各モードの固有振動数と減衰定数を示す。

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2次系の式で近似し⁽³⁾、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している。

$$\ddot{x}_a(t) = -\alpha_1 \dot{x}_a(t) - \alpha_2 x_a(t) - \beta u(t) \quad (1)$$

ただし、 $x_a(t)$ ：動吸振器質量の相対変位

2.3 力学モデルの定式化と制御法

本実験の力学モデルを図3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。

$$\left. \begin{aligned} M_s \ddot{x}_s(t) + C_s \dot{x}_s(t) + K_s x_s(t) = \\ \Delta m_a \ddot{x}_a(t) - M_s e \ddot{z}(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t)$$

ただし、 A_a 、 B_a は2.2節(1)式参照、

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

として、この力学モデルの状態方程式は次式となる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_s \mathbf{x}(t) + B_s u(t) + D_s \ddot{z}(t) \quad (3)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0_{3 \times 18} \\ 0 & 0 & 1 & 0_{3 \times 18} \\ 0 & -\alpha_2 & -\alpha_1 & 0_{9 \times 9} \\ 0_{18 \times 2} & 0_{9 \times 1} & 0_{9 \times 9} & I_{9 \times 9} \\ & M_a^{-1} \Delta m_a & -M_a^{-1} K_s & -M_a^{-1} C_s \end{bmatrix}$$

$$B_s^T = [0 \quad 0 \quad -\beta \quad 0_{1 \times 9} \quad 0_{1 \times 9}]$$

$$D_s^T = [0_{1 \times (3+9)} \quad -e^T]$$

ここで、 $y_s(t)$ ：各質点の絶対変位ベクトル

$y_a(t)$ ：動吸振器の絶対変位

$x_s(t)$ ：各質点の相対変位ベクトル

$x_a(t) = y_a(t) - \Delta^T y_s(t)$

$z(t)$ ：入力変位

θ ：構造物のロッキング

M_s ：主構造物の質量行列

表1 固有振動数と減衰定数

Mode	f [Hz]	ζ [%]
1	1.83	0.397
2	5.65	0.403
3	9.89	0.397
4	13.57	0.398
5	16.95	0.451
6	20.40	0.450
7	22.05	0.449
8	25.05	0.451
9	36.20	0.450

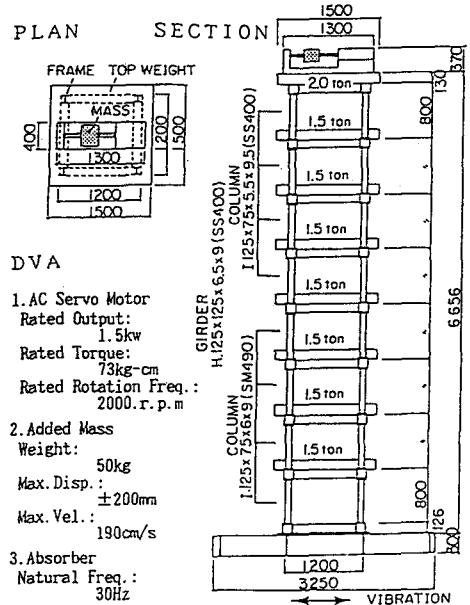


図1 構造物模型の諸元

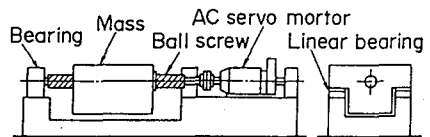


図2 動吸振器

K_a : 主構造物の剛性行列

C_a : 主構造物の減衰行列

m_a : 動吸振器の質量

$u(t)$: サーマトコイル に印加する電圧 (V)

$\alpha_1, \alpha_2, \beta$: サーマトコイルの動特性係数⁽¹⁾

$$M_d = M_a + \Delta m_a \Delta^T$$

$$e^T = [1 \ 1 \ \cdots \ 1 \ 0], \Delta^T = [1 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]$$

$$x_s^T = [y_{s8} - z, \dots, y_{s1} - z, \theta, \dot{y}_{s8} - \dot{z}, \dots, \dot{y}_{s1} - \dot{z}, \dot{\theta}]$$

式 (3) に対して全ての状態量が得られる場合のフィードバックゲイン F 、すなわちフルオーダーのゲインを計算する。状態方程式 (3) をそのまま使い、評価関数

$$J(u) = E[x^T Q x + r u^2] \quad (4)$$

を設定する。 $E[\cdot]$ は数学的期待値である。

これに対する最適制御ゲイン F は

$$u(t) = Fx(t), \quad F = -B^T P / r \quad (5)$$

である。ただし P は次のリカッチ方程式の解である。

$$PA + A^T P + Q - PBB^T P / r = 0 \quad (6)$$

2.4 制御系の構成

制御系の構成を図4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によって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・フィルタ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、スビルオーバーに対してロバストな制御系を構築するため、出力電圧にローパスフィルタを挿入した実験も行なう。

3. 準最適制御則

3.1 一般的な低次元化最適制御則

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、奇数層の情報が得られず、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 (3) 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、第2章のように状態方程式化することと等価となる。

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r u(t) + D_r \dot{z}(t) \quad (7)$$

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。

$$J(u) = E[x_r^T Q x_r + r u^2] \quad (8)$$

式 (8) を最小にする低次元化最適制御ゲイン F_r は

$$u(t) = F_r x_r(t), \quad F_r = -B_r^T P / r \quad (9)$$

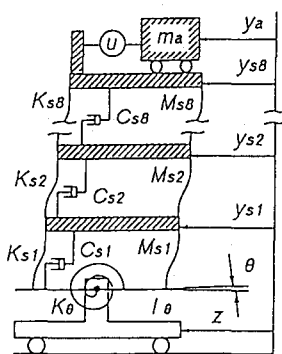


図3 振動系の力学モデル

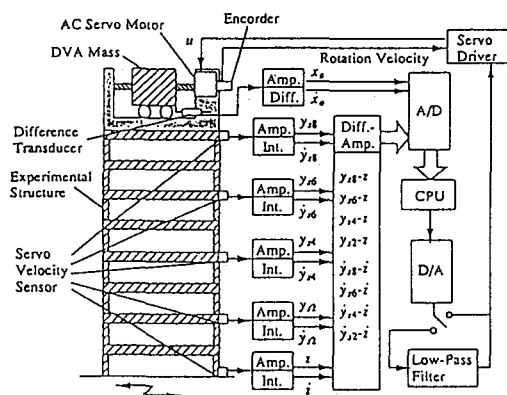


図4 制振システムの構成

となる。ただし、Pは次のリカッチ方程式の解である。

$$P A_r + A_r^T P + Q - P B_r B_r^T P / r = 0 \quad (10)$$

3.2 スピルオーバを考慮した準最適制御

本節では、限られた観測量に存在するスピルオーバを考慮する制御系の設計法⁽⁴⁾について述べる。部分的な観測量によるフィードバック制御は、フルオーダーの状態量のフィードバック制御から見れば制御構造制約を有する最適制御問題と捉えられる⁽⁵⁾。すなわち、全状態量 x と実際に観測できる状態量 x_r の間の制御構造制約は次式のように表わされる。

$$x_r = M_c x \quad (11)$$

ただし、本実験では、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ための出力ベクトルは

$$x_r^T = [x_a, \dot{x}_a, x_{s8}, \dot{x}_{s8}, \dots, x_{s2}, \dot{x}_{s2}] \quad (12)$$

したがって、

$$M_c = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{sen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{sen} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_{sen} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

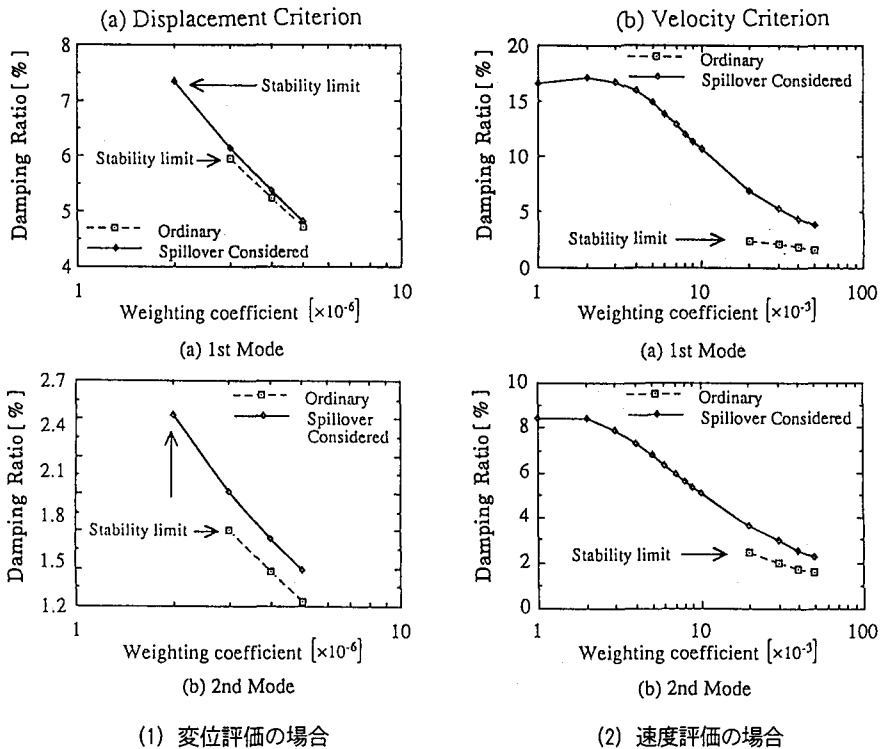


図5 評価関数における重みと各モードの減衰定数の関係

本制御問題は与えられた行列M。においてフィードバックゲイン行列 $\bar{H}$ を求める制御構造制約付きディジタル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の離散時間表現は以下のように与えられる。

$$u(t) = \bar{H}^T M_c x(t) \quad (15)$$

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⁽⁶⁾（以下MNMと略す）を適用し、全モードを考慮した準最適制御則、すなわちスビルオーバーを考慮した制御則を求める。制御構造付きフィードバックゲイン $\bar{H}$ は、FとM。を用いて次式によって求められる。

$$\bar{H} = F M_c^T (M_c M_c^T)^{-1} \quad (16)$$

評価関数（変位・速度）と制御則の制御性能に与える影響を検討するために、それらを組み合わせた場合のそれぞれについて、計算機を用いて理論的に性能比較を行なった。図5、表2はその結果である。図5は制御力に対する重み関数（これが小さいほど制御力大きい）と、構造物の1次モード又は2次モードの減衰比の関係を表わしたものである。これによると、一般の低次元化制御則ではスビルオーバー不安定による安定限界が存在するが、スビルオーバーを考慮した制御を行なうと限界が向上し、速度評価では限界は現われなくなる。図5の結果をもとに、それぞれの制御則における最高性能の制御を加えたときの各モードの減衰定数を表2に示す。これより、スビルオーバーを考慮することで、低次モードのみならず、ほぼ全てのモードでより大きな減衰効果が得られることが分かる。

表2 非制御あるいは臨界制御における構造物の各モードの減衰定数（単位：%）

(a) Displacement Criterion				(b) Velocity Criterion			
	No Cntl.	Ordinary	Present		No Cntl.	Ordinary	Present
1	0.397	5.958	7.733	1	0.397	2.434	17.16
2	0.403	1.806	2.421	2	0.403	2.407	8.419
3	0.397	0.965	1.348	3	0.397	2.159	4.589
4	0.398	0.642	0.786	4	0.398	1.700	3.325
5	0.451	0.604	0.646	5	0.451	0.691	1.668
6	0.450	0.142	0.125	6	0.450	0.019	0.737
7	0.449	0.394	0.395	7	0.449	0.436	0.448
8	0.451	0.450	0.450	8	0.451	0.450	0.450
9	0.450	0.450	0.450	9	0.450	0.450	0.450

3.3 ローパスフィルタを用いたスビルオーバーにロバストな制御

スビルオーバー不安定が高次モードで生じることに注目し、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、かつ、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⁽⁷⁾。

構造物と動吸振器の状態方程式は、2章同様、式（3）で表わされる。一方、ローパスフィルタの特性は状態方程式を用いて

$$\dot{v}(t) = A_f v(t) + B_f w(t), \quad u(t) = C_f v(t) \quad (17)$$

と表わされる。ただし、w は CPUから出力された制御出力電圧であり、各マトリクスはフィルタの遮断周波数を ω 、減衰比を ζ として次のように表わされる。

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega^2 \end{bmatrix}, \quad C_f^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & B_s C_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} D_s \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{z}(t)$$

となる。これを書き換えて

$$\dot{\hat{x}}_e(t) = A_e \hat{x}_e(t) + B_e u(t) + D_e \ddot{z}(t) \quad (18)$$

とすると、前節と同様にして最適制御ゲイン F 。が求められる。すなわち、評価関数

$$J(u) = E \left[x_0^T Q x_0 + r u^2 \right] \tag{19}$$

を設定すると、最適制御ゲイン F 。は

$$u(t) = F_0 x_0(t), \quad F_0 = -B_0^T P / r \tag{20}$$

である。ただし P は次のリカッチ方程式の解である。

$$P A_0 + A_0^T P + Q - P B_0 B_0^T P / r = 0 \tag{21}$$

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

$$M'_c = \begin{bmatrix} M_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

と書ける。これより前報同様に最小ノルム法 (MNM)を用いると、準最適制御ゲイン $\bar{H}$ 。は

$$\bar{H} = F_0 M'_c{}^T (M'_c M'_c{}^T)^{-1} \tag{23}$$

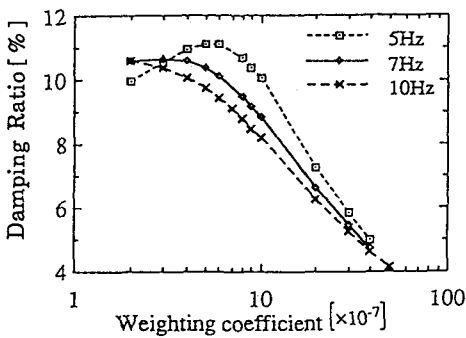
と求められる。

3.2 節同様、計算機を用いて理論的に制振性能比較を行なった。前手法の結果によると、変位評価の場合、制御力を徐々に大きくすると6次モードがスピルオーバーにより不安定になり、スピルオーバーを考慮してもなお安定限界が存在していた。そこで計算に当たっては主に4次モード以下の低次モードを抑えることを目的とし、フィルタの遮断周波数を4次モード (約14Hz) 以下の、5、7、10Hzの3通りとし、減衰比は一般的な値の0.7とした。

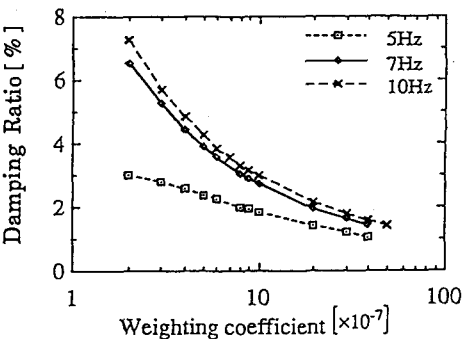
図6は制御力に対する重み関数と、構造物の1次・2次・3次モードの減衰定数の関係を表わしたものである。どの遮断周波数でも安定限界は見られない。また各モードにおける制振性能の間には遮断周波数に依存するトレードオフ関係があり、制振目標に応じて最適となる遮断周波数が存在する可能性を示唆している。なお、これらの結果は動吸振器ストロークに関する重み係数によって変化することに注意しなければならない。

表3は、それぞれの制御則で最も良い制御を加えたときの各モードの減衰定数を前報の結果も含めて示したものである。

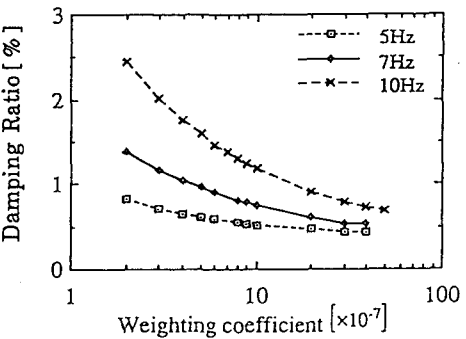
本報で用いた制御系は全体的に大きな減衰効果を実現しているが、その効果は低次モードで特に大きい。



(a) 1st Mode



(b) 2nd Mode



(c) 3rd Mode

図6 各遮断周波数に対する重み係数と各モードの減衰定数の関係

表3 非制御あるいは臨界制御における構造物の各モードの減衰定数 (単位: %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NO Control	0.397	0.403	0.397	0.398	0.451	0.450	0.449	0.451	0.450
Ordinary	5.958	1.806	0.965	0.642	0.604	0.142	0.394	0.450	0.450
Spillover Consider	7.733	2.421	1.348	0.786	0.646	0.142	0.394	0.450	0.450
Present	10.56	7.288	2.455	0.793	0.253	0.697	0.507	0.451	0.450

4. 実験方法と実験結果

4.1 実験方法

制御性能を比較するため、振動台に帯域を限定した白色雑音加速度を入力し、最上階の加速度を出力とする周波数応答を求めた。まず動吸振器を固定した場合を実験し、次いでフィルタをオフにしてフィルタを入れないスビルオーバー考慮の準最適制御則ゲインを用いて、不安定になるまで制御を強くしていく。同様にしてフィルタを入れた簡易ロバスト制御則ゲインで実験を行ない、その安定限界を求める。

次に、そのようにして得られたゲインを用いて、時間領域における性能を確認するため、実地震波に対し応答を求める。振動台にエル・セントロNS波を60秒を入力し、各層の相対変位と絶対加速度応答を測定し、制御性能を比較する。

4.1 実験結果

以下では、評価関数として相対変位を用いたときの結果を、また、簡易ロバスト制御についてはローパスフィルタの遮断周波数を10Hzとしたときの結果について述べる。

無制振時および安定限界ゲインに対する周波数応答を図7に示す。同図より、制御構造制約を有する場合でもアクティブ動吸振器が多モード振動制御に有効であることが分かる。また、スビルオーバーを考慮することによって高次モードまで比較的大きな減衰効果が期待できること、更に、フィルタを挿入することにより、制御目標モードに対し安定的により大きな減衰効果が得られることが確認できる。これらのことは、3章で示した理論解と一致していることが分かる。

上記安定限界ゲインを用い、エル・セントロ地震波50ガル入力による非定常不規則波加振実験での屋上階の応答波形および各階での最大応答値をそれぞれ図8、表4に示す。同図、表より時間領域における制振性能も確認された。尚、動吸振器の最大ストロークは、フィルタ無しで約12.8cm、フィルタ有りで約17.7cmであった。

次に、フィルタ挿入時の簡易ロバスト制御において、動吸振器のストロークに対する制約を緩め、より大きなゲインでの周波数応答を検討し、結果を図9に示す。同図において、上述した50ガル入力での限界ゲインは($Q=1E-3$, $r=2E-7$)であったが、より大きいゲイン($Q=1E-4$, $r=1E-7$)でも安定状態である。このような大きなゲインは、小地震または風荷重時のように応答振幅が比較的小さくストロークの制約が緩い場合の振動抑制に対してかなり効果的であると考えられる。なお、この大きいゲインに対しては、エルセントロ波で約30cm/sec²程度の入力が可能である。

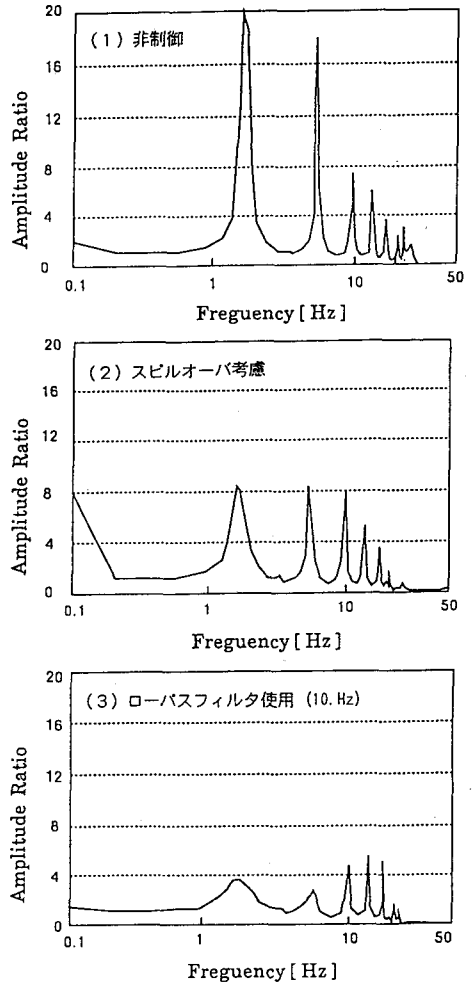


図7 R階の周波数応答特性(実験結果)

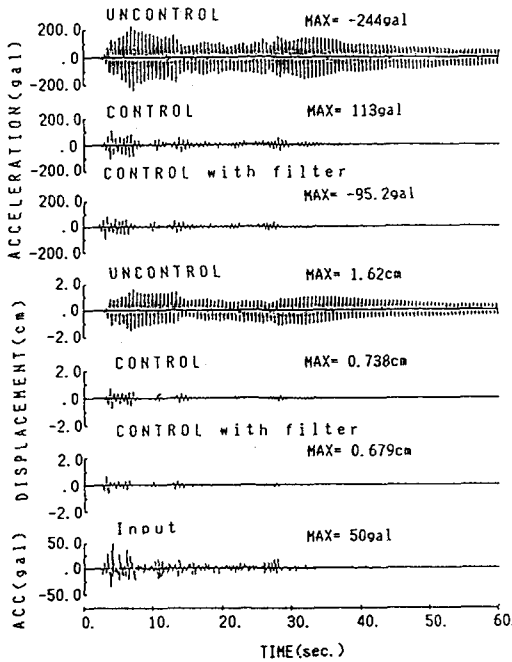


図8 エル・セントロ波入力時の構造物の応答波形比較 (R階)

表4 エル・セントロ波入力時の最大応答

質点	Disp. (cm)					Acc. (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。

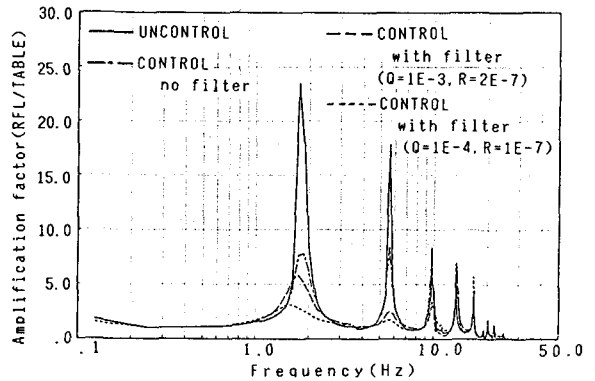


図9 R階の周波数応答特性 (実験結果)

5. 結び

実構造物を制振する場合、構造物の全状態量を観測することは現実には不可能であるため、部分的な観測量を用いて、多モード制御を行なう手法を示し、実験を行なった。その結果、スビルオーバーを考慮した準最適制御手法を用いることにより、高次まで比較的安定な制御が行なえることが分かった。さらに高次スビルオーバーに対しロバストな設計の一手法として、積極的にローパスフィルターを用いる制御手法を示し、実験を行った。その結果は、かなり強いゲインまで安定性が保証され、大きな制振効果が得られることが、実験的に実証された。この手法により、制御次数とセンサーの数を選ぶことで、任意のモード次数内で制御を行うことが可能である。

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、1990.10、pp 867-872
- (2) Balas, M.J.,: Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures, Journal of Guidance and Control, Vol. 2, NO. 3, 1979, pp 252-253
- (3) 吉田、鈴木、蔭山、野畑：サービモータ駆動型動吸振器を用いたアクティブ制振、日本土木学会振動制御コロキウム講演論文集- PART. B、1991.7、pp 299-308
- (4) 吉田、下郷、猪瀬：スビ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, 1988, pp 201-207
- (5) 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, 1988, pp 2948-2956
- (6) Kosut, R.L.,: Suboptimal Control of Linear Time-Invariant Systems Subject to Control Structure Constraints, IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-15, 1970, pp 557-563
- (7) 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, 1991, pp 209-214