大型のマスを用いた制振システムの制御効果の検証

三　好　俊　康　＊徳　弘　吉　秀
古　川　忠　稔

要　旨

ACサーボモーター及びボールネジ機構により大型の付加質量を駆動するAMDを用いた制振システムの制御効果を、非定常波加振により実験的に検証した結果について報告する。制御には最適制御理論を適用し、制御成績を左右する評価関数の重みを様々に設定し、それぞれ算出したフィードバックゲインを適用した。また制御効果を数値計算により検討した結果等についても報告する。

1．まえがき

これまでに、土木・建築構造物を対象に、地震時や強風時の振動を低減させる目的で様々な制振システムが考案され、実建物並びに実験棟に適用されている。[1) 2) 3) 4)] その中には、ブレースを利用した可変剛性システムや、ダンパーなどを利用して構造物に付加減衰を与えるシステムなどもあるが、大半は建物屋上階などに設置した付加質量の慣性反力を利用したパッシブ型動吸振器（以下TMD）、アクティブ型動吸振器（以下AMD）、或はハイブリッド型動吸振器（以下HMD）である。

TMDは建物の固有周期に同調させた質量体、及びバネ機構、減衰機構等から構成されており、建物が振動した際に、その振動を低減するように質量体が運動することにより、建物の運動エネルギーを吸収するシステムである。地震時や強風時の建物振動に対しても質量体を運動させるのに外部エネルギーは必要ないが、振動低減に充分な運動をするまでに時間を要する。また、基本的にTMD１台につき、構造物の固有モードの主に１次モードの振動が制御対象となるが、TMDを構造物の１次モードに同調させることが必ずしも容易でない。。

AMDは、建物の応答変位、速度等の状態量を計算機に取り込み、様々な制御理論を適用して算出したフィードバックゲインを用いて、振動低減に必要な最適制御力を計算し、油圧式・電気式等アクチュエーターへ指令信号を送り、付加質量を能動的に駆動させて振動制御を行うシステムである。AMDでは、理論的には構造物の持つ全モード応答を低減することが可能であるが、大地震時の応答低減には制御力が多大になる。

一方HMDは、基本的に構造物の固有周期に同調させた質量体をアクティブに駆動させるシステムであり、AMDに対して制御力低減を期待できる。

これらのシステムはすでに実用化の段階にあるものが多いが、今後の一層の発展と普及に当ってはなお多くの課題が残されている。

例えば、制振システムの適用目的は、現状では居住性・快適性向上が多く、大地震時の振動制御にはTMDでは十分な振動低減は困難であり、アクティブ制御では制御力が多大になりアクチュエーターの能力の制限などが大きな問題となっている。

また、パッシブやアクティブ制御システムの大半は、質量体の質量が建物全重量の数%程度であるため、振動低減に必要な慣性反力を制御対象の建物に与えるには、制御装置の設置スペースや応答性などを考慮するとストロークや制御力の制限が解決すべき問題点となる。

しかし、アクティブ制御は多モード制御が可能であり、今後主流を占めるものと思われる。

そこで、建物最上階を制振体とするなど、質量比を増加させることにより、より多くの慣性反力を利用することで、制御効果を高めることも考えられる。

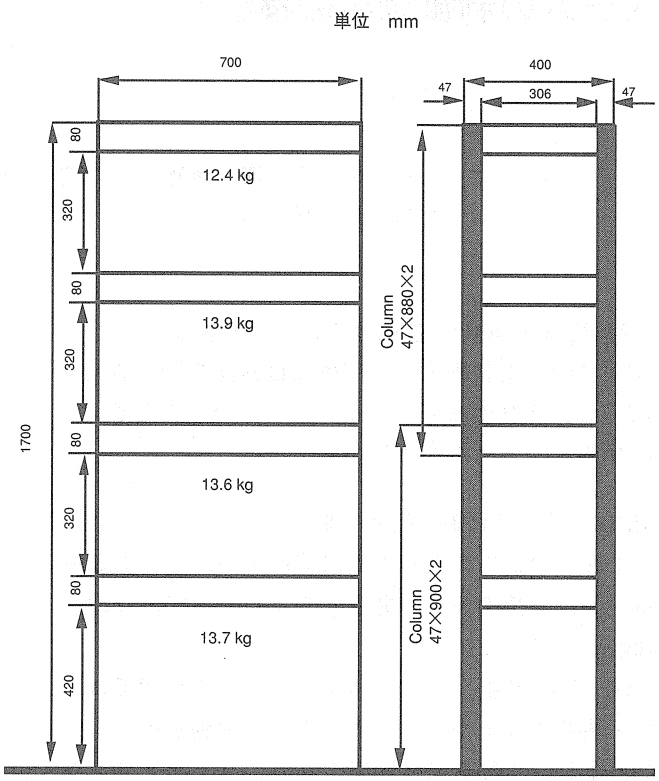
以上より本報告では、構造物の一部を制振体として使用することを想定して、質量比の大きい制振システムの適応性を把握することを目的とし、比較的標準的な制御システムであり、製作及び可動させることが容易な純アクティブ制御システムすなわちAMDを使用して、４層模型試験体を対象に、制振実験を実施した。

2．実験装置の概要

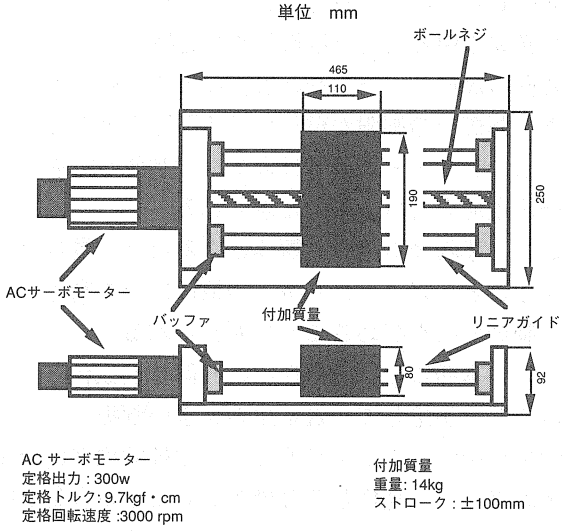
2.1　模型試験体及びAMDシステム

実験に使用した模型試験体の諸元を図－１に、AMDシステムの諸元を図－２に示す。試験体は４層構造と

＊　本社　建築設計部



図－1　模型試験体立面図



図－2　AMDシステム

なっており、各層スラブはステンレス製で重量は約10kg、柱は燐青銅製である。試験体総重量は約50kg（各種センサー含む）、AMDシステム全体は約26kgで、可動する付加質量は約14kgとなっている。質量比μは全重量に対して17%となり、本報告システムの質量比は、通常の約10倍程度となり重量が大きいことがわかる。

制振実験に当っては模型試験体の動特性を確認する必要がある。柱材が軟らかく、AMDシステムの重量の影響を受けやすいと考えられたため、AMDシステムを含んだ状態での動特性を制御対象と考え、模型試験体の自由振動及び地震動加振による応答から動特性を調べた。

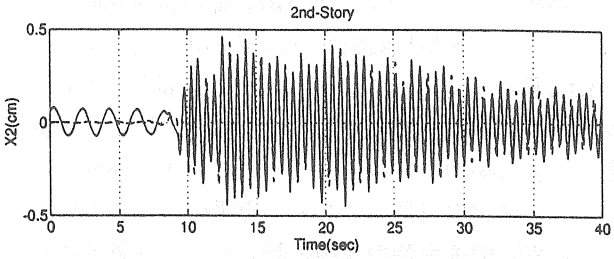
表－1に実測データから得られた模型試験体の減衰定数及び各モードの固有振動数を示す。但し、減衰定数は各モードで同一とした。

表－1　模型試験体の同定結果

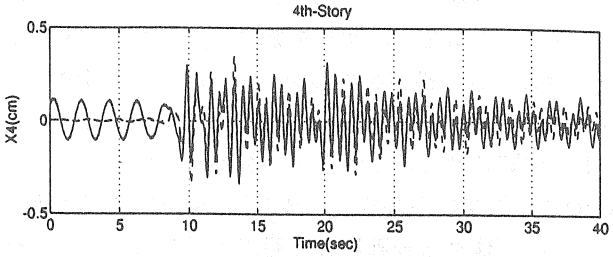
Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th
振動数 (Hz)	0.50	1.74	3.01	4.00
減衰定数 (%)	0.49	0.49	0.49	0.49

また、非制振状態での加振実験にはEL-CENTRO1940 NS波（最大加速度約30gal）とHACHINOHE 1968 EW波（最大加速度約15gal）を用いた。AMDシステムは可動させず設置した状態で制御電圧を与えない状態とした。

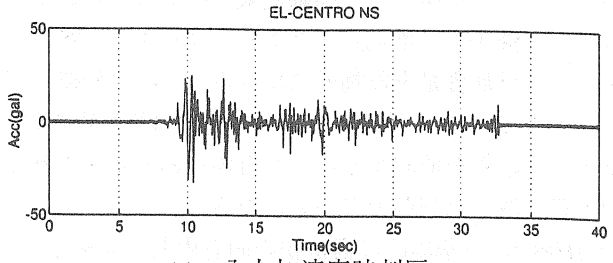
入力加速度と模型試験体の第2層と第4層の相対変位時刻歴について、図－3にEL-CENTRO NS入力、図－4にHACHINOHE EW入力による実験結果（実線）と数値計算結果（破線）の比較を示す。



(a)　第2層相対変位時刻歴

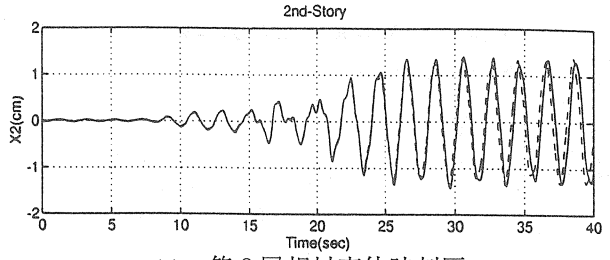


(b)　第4層相対変位時刻歴

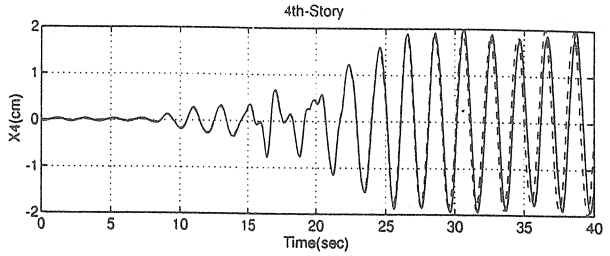


(c)　入力加速度時刻歴

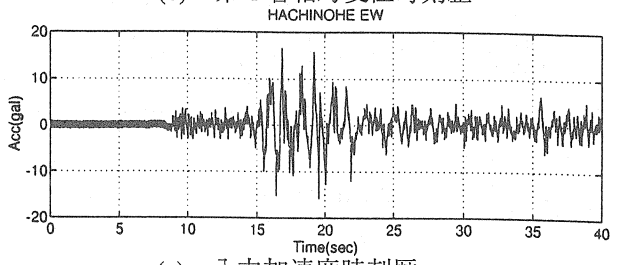
図－3　非制振実験結果（EL-CENTRO NS）



(a)　第２層相対変位時刻歴



(b)　第４層相対変位時刻歴

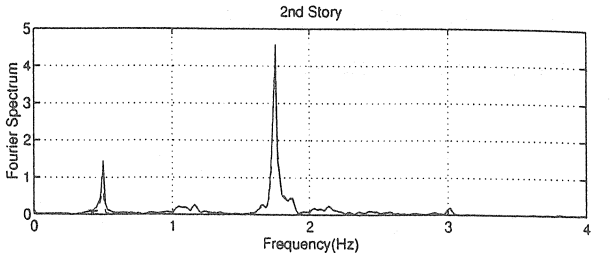


(c)　入力加速度時刻歴

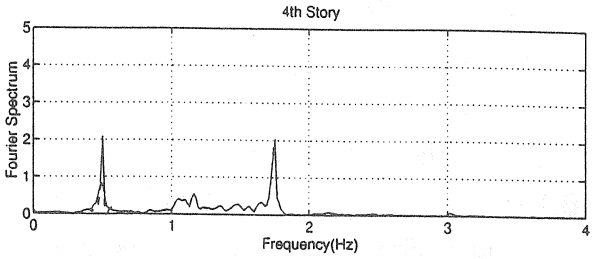
図－４　非制振実験結果（EL-CENTRO NS）

図－３、４から、実験結果と数値計算結果は良く一致しており、表－１に示した模型試験体の動特性同定結果が妥当であることがわかる。

またEL-CENTRO NSによる実験結果の応答変位のフーリエスペクトルを図－５に、HACHINOHE EWによる結果を図－６に示す。

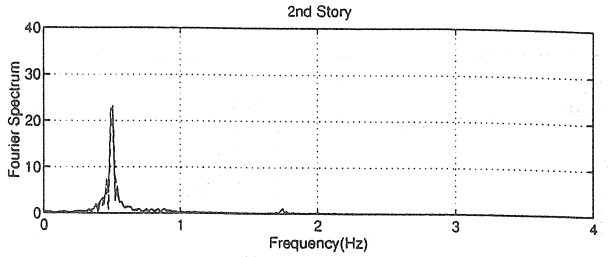


(a)　第２層相対変位

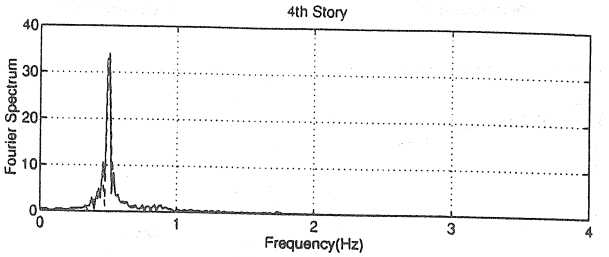


(b)　第４層相対変位

図－５　応答変位の周波数特性（EL-CENTRO NS）



(a)　第２層相対変位



(b)　第４層相対変位

図－６　応答変位の周波数特性（HACHINOHE EW）

以上から、EL-CENTRO NS入力では２次モードが卓越し、HACHINOHE EW入力では１次モードが卓越していることがわかる。

２.２　ACサーボモーターの動特性[5) 6) 7) 8) 9) 10) 11)]

本制振システムに適用したAMDシステムは、駆動用アクチュエーターとして、耐久性と信頼性及びメンテナンス面で有利なACサーボモーターを用いた。

モーターの定格出力は300wであり、速度制御を行うドライバーによりモーターに電圧を供給する。

本報告では、ACサーボモーターの動特性を考慮した制御系を構築するために、モーターの速度制御ドライバーに対する入力電圧$V(t)$に対する付加質量の応答速度$\dot{X}_a(t)$の周波数応答を、正弦波入力により実験的に調べた。

その結果を１次遅れ系で近似した後、電圧－速度間の関係式を求めた。周波数応答の実験結果を図－７に示す。

同定結果を式(1)に示す。但し、sはラプラス演算子、またBは任意の定数、Tは時定数である。

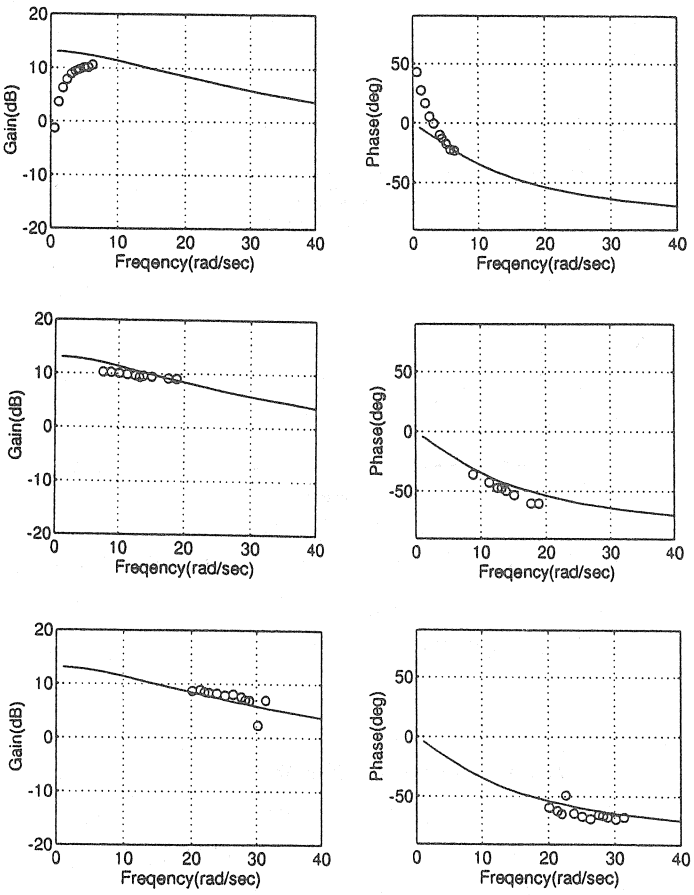
$$\frac{\dot{X}_a(s)}{V(s)} = \frac{B}{Ts+1} \qquad \text{------(1)}$$

ここに、B=4.48、T=0.069である。

図－７から、式(1)が実験結果を良く表していることがわかる。

次に，式(1)を逆ラプラス変換により、実時間領域における方程式に変換する。結果は以下の式(2)のようになる。

$$\ddot{X}a(t) = -\frac{1}{T}\dot{X}a(t) + \frac{B}{T}V(t) \qquad \text{------(2)}$$



(a) Gain　　(b) Phase

図－7　付加質量の周波数応答の実験結果と同定結果の比較

3．制御基本式の概要

3.1　状態方程式

実験に用いた4層模型試験体及び付加質量部のモデル化では、せん断変形を仮定し、減衰はレイリー減衰を仮定する。

このとき、運動方程式は以下の式(3)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4+m_a \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{Bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4+m_a \end{bmatrix}\ddot{Z}_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -m_a \end{bmatrix}\ddot{X}_a \qquad \text{-----(3)}$$

ここに、m_j, c_j, k_jはそれぞれ第j層の質量、粘性減衰係数せん断剛性を表す。

また$\ddot{X}_j, \dot{X}_j, X_j$はそれぞれ第j層の相対加速度、相対速度、相対変位を表す。但し、j=aは付加質量部を示す。

$\ddot{Z}_0$は入力地震動加速度、U_Fは制御力を表す。

$$\mathbf{M}_s\ddot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{C}_s\dot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{K}_s\mathbf{X}_s = \mathbf{G}_s\ddot{Z}_0 + \mathbf{N}_a\ddot{X}_a \qquad \text{-----(4)}$$

ただし、$\mathbf{X}_s = \{X_1\ X_2\ X_3\ X_4\}^T$

$$Ms = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4+m_a \end{bmatrix} \quad Cs = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 \end{bmatrix}$$

$$Ks = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \quad Gs = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4+m_a \end{bmatrix} \quad Na = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -m_a \end{bmatrix}$$

また、付加質量部の周波数特性に関しても式(2)より以下のように求められる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}_a \\ \ddot{X}_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} X_a \\ X_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{B}{T} \end{bmatrix} V \qquad \text{-----(5)}$$

ここで、式(5)に対して状態ベクトルを導入し、状態方程式へ変換する。

$\mathbf{X}_a = \{X_a\ \dot{X}_a\}^T$ を付加質量部の状態ベクトルとすると、式(5)は以下のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \mathbf{A}_a\mathbf{X}_a + \mathbf{B}_a\mathbf{V} \qquad \text{-----(6)}$$

上の式(6)が、状態空間表示された状態方程式である。同様に模型試験体及び付加質量部を含んだ全体系の状態方程式を導出する。

改めて、$\mathbf{X}_s = \{X_1\ X_2\ X_3\ X_4\ \dot{X}_1\ \dot{X}_2\ \dot{X}_3\ \dot{X}_4\}^T$ を構造物系の状態ベクトルとし、全体系の状態ベクトルを以下のように置く。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_a\ \mathbf{X}_s\ \dot{\mathbf{X}}_s]^T$$

よって、模型試験体及びAMDシステムを含んだ、全体系の状態方程式は以下のように導かれる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AA}\,\mathbf{X} + \mathbf{BB}\,\mathbf{V} + \mathbf{GG}\ddot{Z}_0 \qquad \text{-----(7)}$$

ただし、

$$AA = \begin{bmatrix} Aa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ M_s^{-1}(-\frac{1}{T})N_a[0\ \ 1] & -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}$$

$$BB = \begin{bmatrix} Ba \\ 0 \\ M_s^{-1}(-\frac{B}{T})N_a \end{bmatrix}, \qquad GG = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_s^{-1}G_s \end{bmatrix}$$

3.2　最適制御理論[12) 13) 14) 15)]

制御対象が以下の式(8)で表されているシステムとする。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \qquad \text{-----(8)}$$

ここで以下の二次形式評価関数を定義する。

$$J = \int_{t=0}^{t=T} \left[x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) \right] dt \qquad \text{-----(9)}$$

式(9)は評価関数と呼ばれ、制御効果を高めるために大きな制御力が必要とされ、制御力を小さく抑えようとすれば制御効果が低減するという、制御力と制御効果両者の要求を表す規範である。この評価関数を最小とする制御力u(t)を見いだす問題が最適レギュレータ問題と呼ばれる。即ち、この評価関数を用いるときには、振動エネルギーと制御エネルギーの和を最小にする制御力uを見いだす問題を考えていることに相当する。このときの制御則は式(10)で与えられるRiccati方程式の解から式(11)で与えられる。

$$\dot{P}(t) + P(t)A + A^T P(t) + Q - P(t)BR^{-1}B^T P(t) = 0$$
$$P(T) = 0 \qquad \text{-----(10)}$$

$$F(t) = -R^{-1}B^T P(t) \qquad \text{-----(11)}$$

但し、これは入力外乱が存在せず、過渡応答の確定的制御問題に適用されるものである。また式(11)のフィードバックゲインは時変形であるため制御システムの実現上から好ましくない。

そこで、入力が不規則外乱であるとして、状態量が確率変数であるので評価関数式(9)の期待値を評価し、終端時刻Tを無限大とする定常制御問題を考える。この場合には、Riccati方程式が式(12)で与えられ、制御入力は式(13)の様になりゲインが定数で与えられる。

$$\dot{P} + PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \qquad \text{-----(12)}$$

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = Fx(t) \qquad \text{-----(13)}$$

$$J = \int_{t=0}^{t=\infty} \left[x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) \right] dt$$
$$= E\left[x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) \right] \qquad \text{-----(14)}$$

式(14)は制振時間が無限大とした場合の評価関数であり、第一項は状態変数の２乗積分の期待値を、第二項は制御力の２乗積分の期待値を表している。

評価関数Ｊの第一項と第二項は違いに相反している要求であることから、設計者が任意に重要と思われる要求に、より大きい重みを課すことが必要となる。例えば、Ｑを大きくすることは状態量（相対変位、速度など）を低減する制御を施すことになり、また、ｒを小さくすることは制御力を増大する制御を施すことになる。

以上の最適制御理論を用いて、振動制御のための制御則を導出する。

まず、式(7)に対してモード分解を施し、モードマトリックスΦを導入するとモード座標ηと物理座標ｘの間の関係は以下の式(15)で与えられる。

$$\eta = Sx \qquad S = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \Phi & 0 \\ 0 & 0 & \Phi \end{bmatrix}^{-1} \qquad \text{-----(15)}$$

ここでは、構造物の相対変位を低減することを目的とした式(16)の様な二次形式で与えられる評価関数を導入する。

$$J = \int_{t=0}^{t=\infty} \left(\eta^T Q \eta + ru^2 \right) dt \qquad \text{-----(16)}$$

本報告では、重みＱを以下のように設定した。

$$Q = \begin{bmatrix} q_a & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & & \\ & & Q_d & 0 \\ 0 & & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad Q_d = \Phi^T \Phi \qquad \text{-----(17)}$$

最適制御理論は式(7)で外力項を無視した以下の状態方程式、式(18)に対して適用される。

$$\dot{X} = AA\,X + BB\,V \qquad \text{-----(18)}$$

ここで最適制御電圧Vを決定するためには任意の重みを与えたとき、評価関数を最小にするフィードバックゲインを決定すればよい。そのとき制御則は以下で与えられる。

$$V(t) = -K_S X(t),\ K_S = BB^T(S^T PS)/r \qquad \text{-----(19)}$$

ここに、Pは以下に示すRiccati方程式の一意正定解である。

$$PAA_m + AA_m^T P + Q - PBB_m BB_m^T P/r = 0 \qquad \text{-----(20)}$$

但し、$AA_m = SAAS^{-1}$，$BB_m = SBB$

以上の状態フィードバック制御では、制御に必要な状態量の増大に伴い、センサー数が増大し、また演算時間がかかることから全ての構造物に適用できるとは限らない。そこで、構造物の変位または速度をフィードバックする出力フィードバック制御を考える。

その場合制御構造制約が存在すると考えられるため、準最適制御手法として最小ノルム法を適用する。[1) 5)]

連続時間系においてフィードバックゲインKが求められたとき、準最適制御フィードバックゲインGは

$$L = \| G - K \| \qquad \text{-----(21)}$$

で表されるノルムを最小にするゲインと考えられる。

結果的にGは以下の式で与えられる。

$$G = KH^T(HH^T)^{-1} \qquad \text{-----(22)}$$

ここに、Hは制御構造制約マトリックスである。Gに対し、センサーから直接観測された変位、速度、加速度

などの状態量を乗じて制御量を決定する。

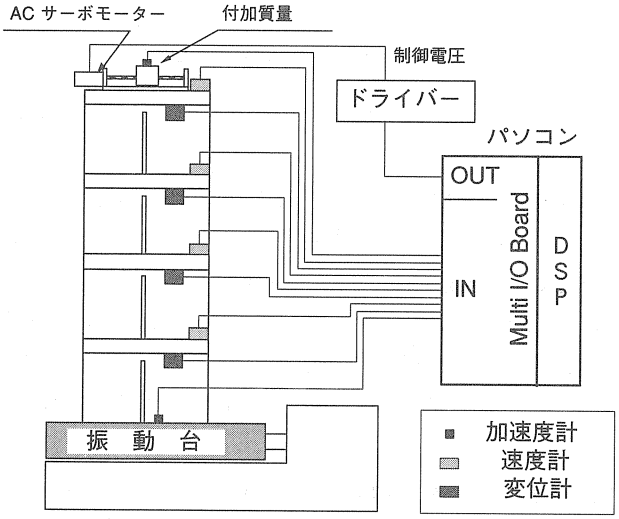
この手法は観測すべき状態量が少ないことから、システムの簡便化や演算時間の短縮が図れるが、必ずしも制御安定性は保証されないので、適用時には別途数値計算等で確認する必要がある。

しかし、アクチュエーター設置箇所の状態量、特に速度をフィードバックすれば、安定した制御が可能となることが分かっている。[1) 16)]

4．制御システムの構成

模型試験体の振動制御に要する状態量を計測する各種センサーの配置及び制御システムを構成した。

システムの構成を図－8に示す。



図－8　制御システムの概要

模型試験体の相対変位は、各層スラブ下に設置したレーザー式変位計から層間変位を測定し、順次加算することで求めた。相対速度は、各層スラブ上に設置したサーボ型速度計（加速度・速度同時計測可能）から測定した絶対速度から、振動台上に設置した動ひずみ型加速度計から計測した入力地震動加速度を積分することにより求めた地動速度を引くことより求めている。付加質量の相対変位即ちストロークは、最上層に設置されたレーザー式変位計から求めている。また相対速度は付加質量に設置された加速度計から計測した絶対加速度から、装置設置層の絶対加速度を引くことにより求めた相対加速度積分することで求めている。

以上の積分計算を実施する前に計測信号のDC成分によるドリフトを防ぐためにハイパスフィルターを挿入した。センサーからの信号はサンプリング周波数128(Hz)のA/D変換器を通してDSPへ送られ、相対変位、速度を算出し、フィードバックゲインを乗じた後に制御電圧が計算される。その後、D/A変換器を通してドライバーへ指令信号が送られ、サーボモーターにより付加質量を駆動する。

入力信号から制御電圧を算定する演算におけるタイムラグを極力小さくするためdSPACE社製DS1003 DSP（Digital Signal Processor）とDS2201 Multi I/O BoardをIBM PC/AT互換機に搭載して使用した。

5．実験内容

5.1　実験項目

本報告では、模型試験体と付加質量の応答を計測し、応答低減のための制御電圧をAMDシステムへ指令した状態での制御効果を、地震動加振実験により確認する。

実験で使用したフィードバックゲインは表－2に示した重みをあらかじめ算出した。

表－2　設定した重み

	q_a	r
Case 1	1.0	0.5
Case 2	0.5	0.5
Case 3	1.0	1.0
Case 4	1.0	50.0

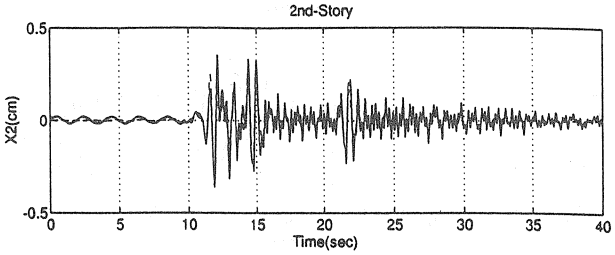
ただし、状態方程式は連続時間系で記述されているため、実際に計算機を用いて制御系を構成するために制御対象の状態方程式を離散時間系で記述し、それによりディジタル制御系を構成した。

本報告では、式(18)を双一次変換[16)]によりサンプリング時間T=0.0078125(sec)で離散時間系の状態方程式へ変換した後、フィードバックゲインを算出した。

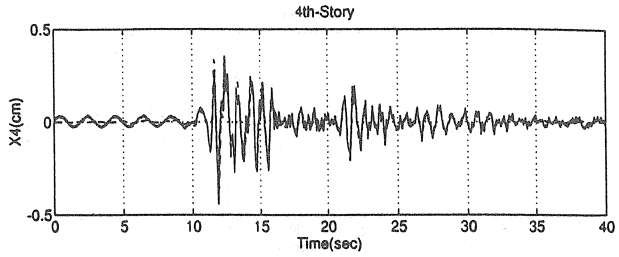
実験で使用した非定常波はEL-CENTRO 1940 NS波（最大加速度約30gal）とHACHINOHE 1968 EW波（最大加速度約15gal）の2種とした。

6．実験結果

非制振実験結果より模型試験体の構造同定はほぼ実施できたと考えられる。この動特性からフィードバックゲインを算出した。実験時に適用したフィードバックゲインは、表－2に示したCase1～4までの4種類の重みにより算出した。実験結果をCase1について、第2、4層相対変位時刻歴を図－9（EL-CENTRO NS）と図－10（HACHINOHE EW）に、また付加質量ストロークと制御電圧時刻歴を図－11（EL-CENTRO NS）と図－12（HACHINOHE EW）にそれぞれ示す。但し、実験結果を実線で数値計算結果を破線で示した。これらの図から

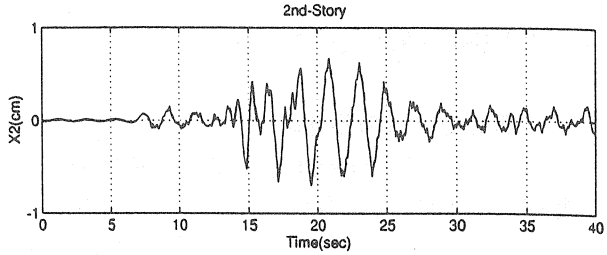


(a)　第２層相対変位時刻歴

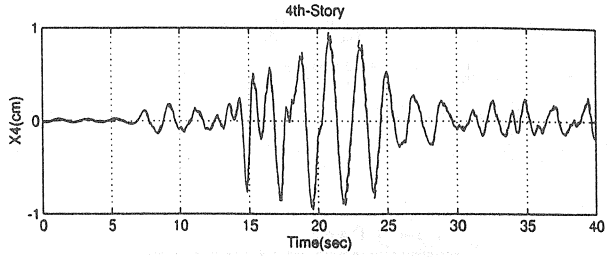


(b)　第４層相対変位時刻歴

図－９　制振実験結果（EL-CENTRO NS）

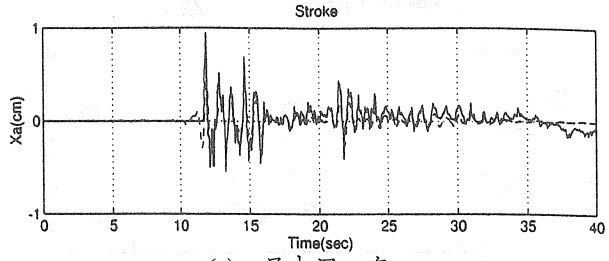


(a)　第２層相対変位時刻歴

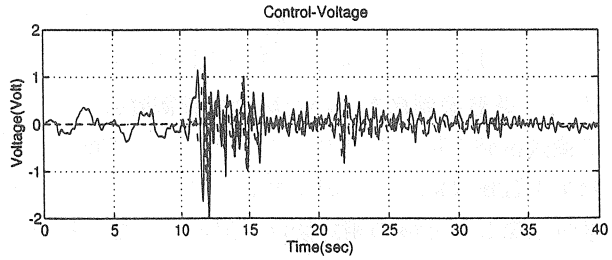


(b)　第４層相対変位時刻歴

図－１０　制振実験結果（HACHINOHE EW）

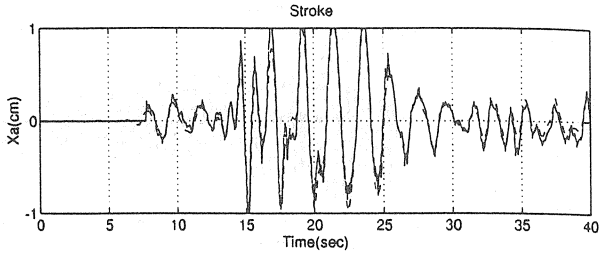


(a)　ストローク

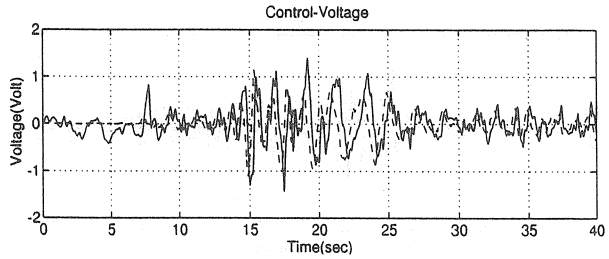


(b)　制御電圧

図－１１　制振実験結果（EL-CENTRO NS）



(a)　ストローク



(b)　制御電圧

図－１２　制振実験結果（HACHINOHE EW）

実験結果と数値計算結果が良く一致していることが分かる。

７．考察

７.１　制振実験結果について

Case1の重みを規準とすると、Case2はストロークへの制約が小さくなり、Case3は制御力への制約が大きくなる。またCase4はさらに大きくなっていると言える。即ち制御効果はCase2,1,3,4の順に低くなると考えられる。各層応答変位の低減率を、入力地震動毎に非制振時における応答最大値を１として表－３にまとめた。

表－３　応答低減率

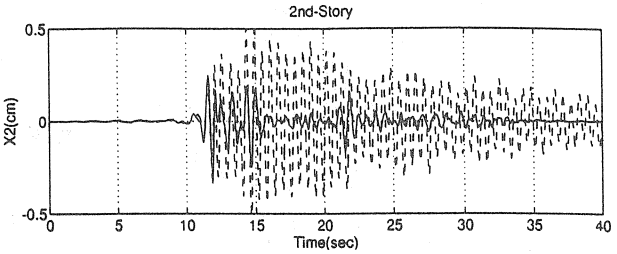
Story	1 st		2 nd		3 rd		4 th	
	EL*1	HA*2	EL	HA	EL	HA	EL	HA
Case 1	0.602	0.350	0.848	0.327	1.410	0.318	1.086	0.308
Case 2	0.624	0.348	0.785	0.311	1.336	0.283	1.057	0.279
Case 3	0.555	0.303	0.808	0.310	1.027	0.364	0.969	0.318
Case 4	0.972	0.524	1.103	0.502	1.182	0.488	1.006	0.497

*1 EL: EL-CENTRO NS, *2 HA: HACHINOHE EW

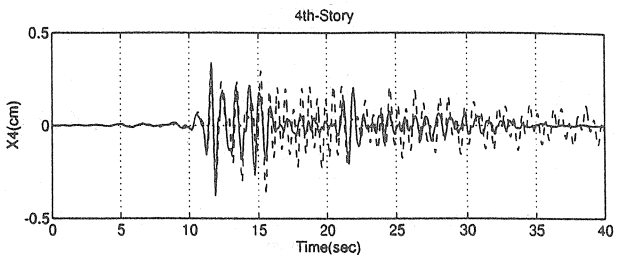
全体的に、先に示したケースの順に制御効果が変化していることがわかる。

次に,制振時の第２、４層の相対変位時刻歴を各入力地震動毎に非制振時応答（但し数値計算結果）との比較をCase1について図－１３（EL-CENTRO NS）と図－１４（HACHINOHE EW）に、Case4について図－１５（EL-CENTRO NS）と図－１６（HACHINOHE EW）に示す。但し、実線が制振時、破線が非制振時を表す。

以上から、今回設定した重みでは、ストローク制限内で十分な制御効果が得られ、また高次モードの振動が励起（制御スピルオーバー）されず安定であり、付加減衰

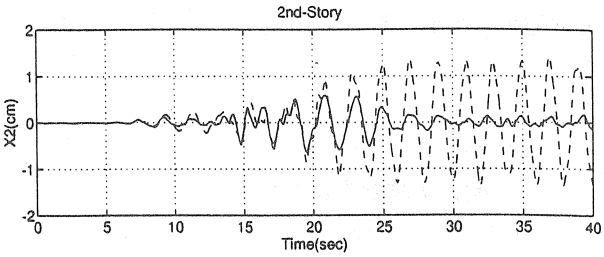


(a)　第２層相対変位時刻歴

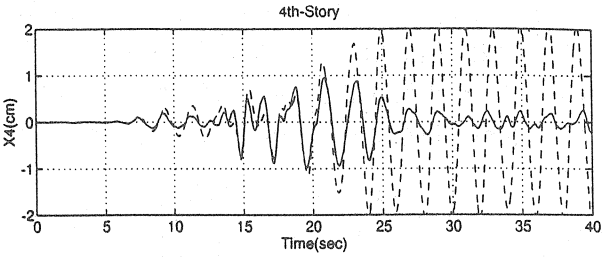


(b)　第４層相対変位時刻歴

図－１３　制振と非制振の比較（Case１）

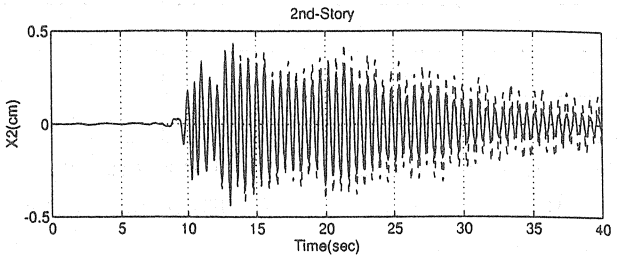


(a)　第２層相対変位時刻歴

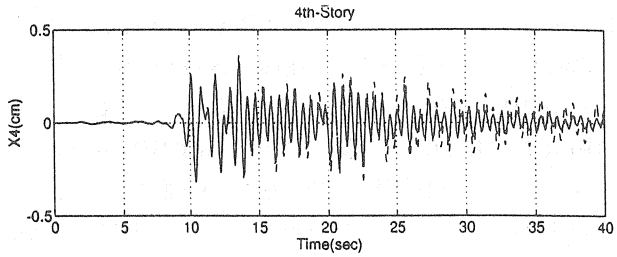


(b)　第４層相対変位時刻歴

図－１４　制振と非制振の比較（Case２）

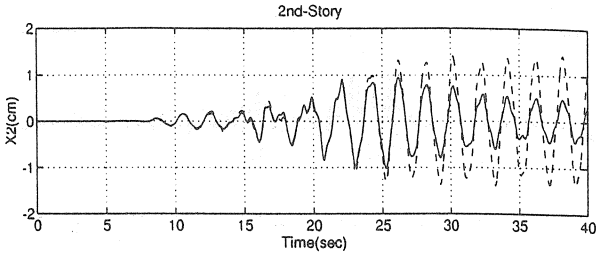


(a)　第２層相対変位時刻歴

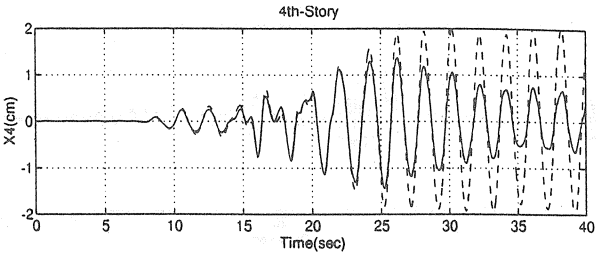


(b)　第４層相対変位時刻歴

図－１５　制振と非制振の比較（Case３）



(a)　第２層相対変位時刻歴



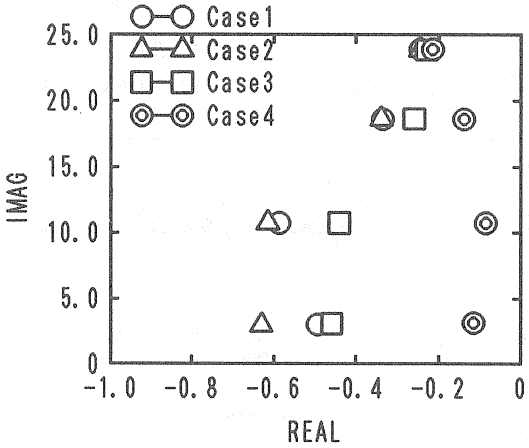
(b)　第４層相対変位時刻歴

図－１６　制振と非制振の比較（Case２）

効果による制御効果が高いことが分かる。

７．２　最適制御系の固有値

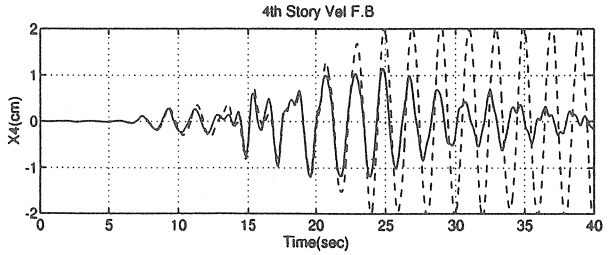
重みにより異なる最適制御系の特性を固有値から調べる。制御系の固有値の実数成分が負であれば制御系は安定であることが知られている。[7) 17)] ここではCase1～4の重みによるフィードバックゲインを与えたときの制御系の固有値を求めた。結果を図－１７に示す。この図から、Case2は他に比べて低次モードの減衰が大きくなっており、Case1,3,4の順に小さくなっていることが分かる。また高次モードでは差が段々小さくなっていることが分かる。



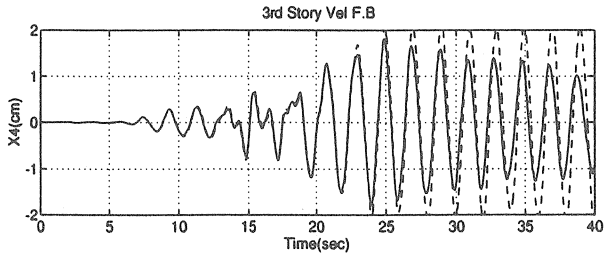
図－１７　最適制御系の固有値

７．３　準最適制御を用いた場合の制御効果

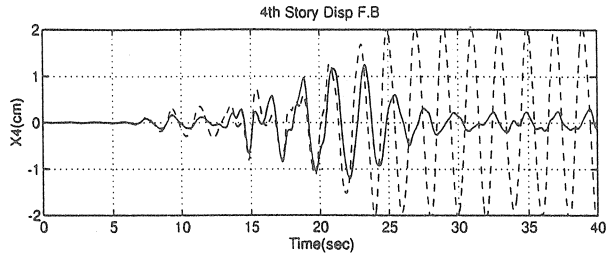
準最適制御を用いた出力フィードバック制御による制御効果を数値計算により確認する。フィードバックする状態量は第３、４層の相対変位、速度とした。それぞれの場合の第４層相対変位時刻歴の数値計算結果を図－１８に示す。ただし、入力地震動はHACHINOHE 1968 EW



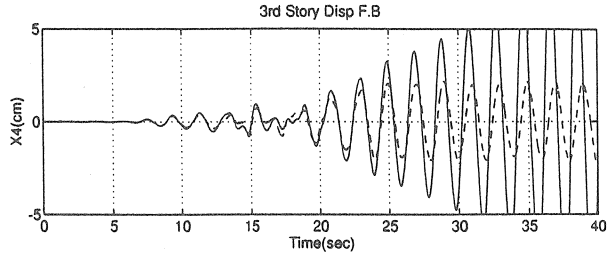
(a)　第４層相対速度F.B



(b)　第３層相対速度F.B



(c)　第４層相対変位F.B



(d)　第３層相対変位F.B

図－１８　準最適制御による応答結果

（最大加速度約15gal)を用い、実線が制振時、破線が非制振時である。また重みはCase1とした。これらから、4層の状態量をフィードバックする方が3層の状態量をフィードバックするよりも制御効果は高く、3層の相対変位では逆に発散してしまっていることから、制御装置設置階の状態量を用いれば安定した制御効果が得られることが分かる。

８．結語

本報告から、以下のことがわかった。

① 実験で構築した制御システムにより、安定した状態フィードバック制御が実施可能であり、数値計算により制御効果が把握できた。

② 簡便な出力フィードバック制御でもある程度の制御効果が得られた。

③ 評価関数の重みに従った制御効果が確認できた。

④ AMDシステムの周波数応答は、ゲインに関しては振動数全域において極端な差は見られないが、位相に関しては低振動数域と高振動数域において、位相進み、遅れが見られた。

しかし、今回の重みによる制御時には悪影響を及ぼさず問題は見られなかった。

理想的にはゲイン特性は全域で１が位相特性は全域で０が望ましいため、位相調整回路を組み込んだり、サーボモーターの出力を上げるなどの改良の余地はあると思われる。

以上から、大型のマスを用いた場合の制御効果が確認できた。

一般に、制御系を構築する際には制御対象である構造物の数学モデルを構築し、任意の制御理論を適用してそのモデルに相応する制御力を決定する必要がある。しかし本来無限自由度である構造物の設計時には例えば階数だけの自由度を与えて解析を行っている。この段階で既に、実モデルの完全な記述がなされていない。即ち、なんらかの形でモデル化に伴う誤差が存在する。この誤差が大きいと、あらかじめ算出したフィードバックゲインを用いても、制御系設計時の制御効果が実際には得られない可能性がある。

今後はこうした要因による制御効果の低下を抑制するようなロバスト性の高い制御系を構築する所存である。

参考文献

1)　振動制御コロキウム、PART A　構造物の振動制御、土木学会編、1991年7月

2)　振動制御コロキウム、PART B　講演論文集、土木学会編、1991年7月

3)　第２回振動制御コロキウム、PART A　構造物の振動制御、土木学会編、1993年8月

4)　第２回振動制御コロキウム、PART B　講演論文集、土木学会編、1993年8月

5)　鈴木哲夫、蔭山　満他：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システム、アクティブ制震（振）シンポジウム論文集、pp195～202、1992年3月

6)　中村佳也、田中　清他：ACサーボモータを用いたハイブリッドマスダンパに関する基礎的研究、アクティブ制震（振）シンポジウム論文集、pp249～256、1992年3月

7)　立見栄司、野路利幸他：TMDを利用したアクティブ制振（その３）、日本建築学会学術講演梗概集、pp889～890、1992年8月

8)　岡田　宏、鈴木哲夫他：中高層建物のアクティブ制

振システム（その１２）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp961～962、1992年8月
9)　土岐憲三、佐藤忠信他：AMDによる模型構造物の制振、第２２回地震工学研究発表会、pp843～846、1993年7月
10)　小原雅樹他：５層フレーム試験体のアクティブ制振実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp761～762、1993年9月
11)　大山秀美、藤田隆司他：ハイブリッドマスダンパを用いた制振システムの開発研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp787～788、1993年9月
12)　加藤寛一郎：最適制御入門レギュレータとカルマンフィルタ、東京大学出版会
13)　金原昭臣、黒須　茂：ディジタル制御入門、日刊工業新聞社
14)　土谷武士、江上　正：現代制御工学、産業図書
15)　美多　勉：ディジタル制御理論、昭晃堂
16)　小野裕幸：Mathematica　DSPと制御、トッパン
17)　小堀鐸二：制震構造　理論と実際、鹿島出版会