

実大構造物のアクティブマスダンパーによる制震実験 その2 制御則と制震効果

鈴木祥之・山本雅史^{*,***}・玉木利裕^{**}・加賀谷博昭^{**}・裊 起煥^{*}・荒木時彦^{*}

^{*}京都大学大学院工学研究科

^{**}川崎重工業(株)

^{***}(株)竹中工務店

要 旨

本報では、その1で述べた地震波加振システムを用いて実大試験架構のアクティブマスダンパーによる制震実験を行った結果について述べる。ここでは、アクティブマスダンパーの制御則として検証を行ったのは、 $LQ \cdot LQG$ 制御、極配置法による制御および H^∞ 制御理論による制御である。低次元モデル化による高次モードの安定性と1次モードのみでなく高次モードへの制御効果などを実験的に確認した。

キーワード：制震，アクティブマスダンパー，実大実験， $LQ \cdot LQG$ ，極配置， H^∞ 制御理論

1. はじめに

大地震にも有効な制震システムの開発は重要かつ緊急の課題である。このような制震システムの開発には理論的研究の他に実験的研究も不可欠となる。このため、京都大学宇治構内に既設の鋼構造実大試験架構を用いて制震システムの実験的研究を行っている。制震システムとしては操作性・信頼性の面で優れているAMD（アクティブマスダンパー）を用いている。

その1では、試験架構の同定実験結果およびアクティブマス型の加振機（以下、CMM：Controllable Moving Mass）を2台同時に制御することにより試験架構に地震応答を再現するシステム（以下、地震波加振システム）について述べた。地震波加振システムを用いれば、地震を受ける構造物の非制震時と制震時の応答を実験的に得られるため、シミュレーション解析を介することなく、制御性能・効率が直接的に検証し得る。また、任意の地震に対する応答を再現することができるので、振動台を用いた場合と同様に実大構造物を対象とする実験が可能である。

本稿では、実大試験架構を対象に地震波加振シ

ステムを用いて、各種制御アルゴリズムの検証のために行った実験結果について述べる。制御アルゴリズムとしては、代表的な最適フィードバック制御である「 LQ 制御」、さらにオブザーバを用いる「 LQG 制御」、複素平面上の極を指定配置することによる「極配置制御」および制震要求を振動数領域において最適化を計る「 H^∞ 制御」を検証の対象とした。

2. 実験システム

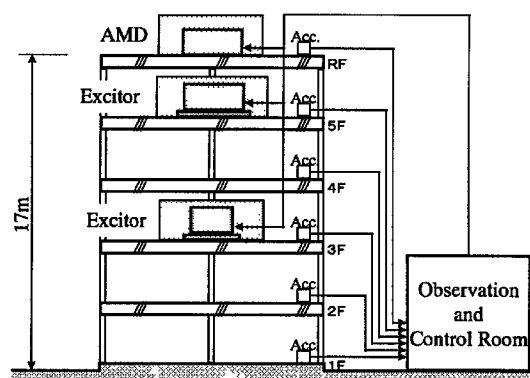


Fig. 1 Constitution of structural control experiment

鋼構造実大架構を用いた制震実験システムの概要を Fig. 1 に示す。3 階と 5 階に設置した CMM を地震波加振用に使用し、R 階の CMM を制御用 AMD として用いて制震を行う実験システムである。試験架構は 5 層で、1 層あたりの重量は約 30tonf である。一方、制御用の AMD はマス重量 4tonf であり、比較的大きなマス比（制御対象重量に対する制御マス重量の比）である。

これら実験システムについて、特に試験架構の振動特性および地震波加振システムの詳細は、その 1 で述べた。

3. LQ・LQG 制御

3.1 定式化

(1) LQ 制御則

最適フィードバック制御である LQ 制御則の狙いは、構造物の振動制御を行う際、できるだけ小さな制御力でできるだけ大きな制振効果を得ようとするにある。従って、LQ 制御則においては、相反の関係にある構造物の応答と制御力の大きさを同時に小さくするため、応答と制御力の 2 次形式の和を最小にする評価関数を採用し、最適な制御力を求める。

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + R u(t)^2] dt \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$ は状態ベクトル、 $u(t)$ は制御力であり、 Q と R はそれぞれ状態ベクトルと制御力に対する重み係数マトリクスである。本研究では、一つの制御力を考えているので、 R はスカラ量になる。

一般的な構造物系の状態空間表現は次の状態方程式で現される。

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + E w(t) \quad (2)$$

ここで、 w は雑音であり、 E は雑音に関係するマトリクスである。地震外乱は雑音として扱う。 A はシステム行列、 B は制御力の作用位置を規定する行列である。

評価関数が最小となるような制御力を求める問題は、系の微分方程式を拘束条件とする J の最小化問題であるから、Lagrange の未定乗数法を用いて解け、以下のようにフィードバックゲイン G を誘導する。未定乗数ベクトルを $p(t)$ として Hamiltonian H を次式で定義する。

$$H = 1/2 x(t)^T Q x(t) + 1/2 R u(t)^2 + p(t)^T (A x(t) + B u(t) - \dot{x}(t)) \quad (3)$$

Euler の方程式を適用して次式を得る。

$$-\dot{p}(t) = Q x(t) + A^T p(t) \quad (4)$$

$$R u(t) + B^T p(t) = 0 \quad (5)$$

状態フィードバックによる制御力を求めようとしているので未定乗数は次式で表現できる。

$$p(t) = P(t) x(t) \quad (6)$$

以上から、制御力と状態ベクトルとの関係は次のようになる。ここで、 P は式(8)の Riccati 方程式の解である。

$$u(t) = G x(t) = -R^{-1} B^T P x(t) \quad (7)$$

$$\dot{P} + P A + A^T P + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (8)$$

(2) LQG 制御則

状態フィードバック制御の LQ 制御則は、制御に必要な状態量すべてが時々刻々正確に直接観測できるという前提に立っている。しかし、実際には構造物の全状態量を観測することは不可能であるため、構造物の自由度を減らして低次元化する場合が多い。さらに、観測値そのものにも、観測雑音が含まれている。従って、低次元化の際に無視した高次モードの影響や雑音により、構造物の振動を逆に励起させる、いわゆるスピルオーバーの恐れがある。

そこで、限られた観測値からオブザーバを利用して制御に必要な全状態量を推定する、すなわち状態推定フィードバック制御の LQG 制御則による制御を行う。

状態ベクトルおよび制御力に関連する観測方程式は次のように定義される。

$$Y(t) = C x(t) + D u(t) + F v(t) \quad (9)$$

ここで、 $Y(t)$ は $(l \times 1)$ の観測ベクトル、 $v(t)$ は雑音であり、 F は雑音に関係するマトリクスである。 C は状態ベクトルに関係する行列、 D は制御力の作用位置を規定する行列である。本研究において、雑音はホワイトノイズと仮定する。本システムに対する同次元オブザーバを次のようにする。

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - KC)\hat{x}(t) + KY(t) + (B - KF)u(t) \quad (10)$$

ここで、 $\hat{x}(t)$ は推定状態ベクトルであり、 K はオブザーバゲインである。雑音に対する仮定を次のように定義する。

$$\begin{aligned} E[v(t)] &= 0, \quad E[w(t)] = 0 \\ E[Ev(t)v(\tau)^T E^T] &= \Gamma \delta(t - \tau) \\ E[Fw(t)w(\tau)^T F^T] &= \Psi \delta(t - \tau) \end{aligned} \quad (11)$$

状態ベクトルの推定値と正解値の誤差を次式のように定義し、時刻 t での 2 乗平均誤差を最小にするようなオブザーバゲイン K を求める。

$$e(t) = \hat{x}(t) - x(t) \quad (12)$$

$$J = E[e(t)^T e(t)] \quad (13)$$

最適オブザーバゲイン K は次のように与えられる。ここで、 P は Riccati 方程式の解である。

$$K = PC^T \Psi^{-1} \quad (14)$$

$$\dot{P} + PA + A^T P + \Gamma - PB\Psi^{-1}B^T P = 0 \quad (15)$$

3.2 地震波加振結果

実大鋼構造架構に実地震波に相当する振動を加振装置により発生させ、LQ 制御則および LQG 制御則を利用した制震実験を実施した。

(1) LQ 制御則による制震実験

実際の構造物制御では制御に必要な状態量全てを観測することは困難であるため、構造物の低次モードのみを制御対象とする LQ 制御が一般に行われている。本節では、5 層の鋼構造試験架構を 1 自由度系モデルに置換し、地震波加振による制震実験を行う。その際、必要になる試験架構の等価質量、等価減衰および等価剛性は次式のように定義する。

$$m_{eq} = \sum_{i=1}^5 m_i \cdot d_i^2 \quad (16)$$

$$c_{eq} = 2 h_1 \omega_1 \cdot m_{eq} \quad (17)$$

$$k_{eq} = \omega_1^2 \cdot m_{eq} \quad (18)$$

ここで、 ${}_1d^T = \{{}_1d_1 \quad {}_1d_2 \quad \cdots \quad {}_1d_5\}$ は 1 次の固有モードであり、 h_1, ω_1 はそれぞれ 1 次の固有円振動数および 1 次の減衰定数である。

制御装置のモータ特性を考慮した AMD の運動方程式は次式のようになる。

$$m_a(\ddot{x}_a + \ddot{x}_R) + c_a \dot{x}_a + k_a x_a = u/l_m - J/l_m^2 \ddot{x}_a \quad (19)$$

ここで、 x_a は AMD の層間変位、 l_m はボールネジリード、 J はモータ回転子のイナーシャであり、 c_a と k_a は AMD の減衰係数と剛性である。

AMD の運動方程式と低次元化された実大試験架構の運動方程式から式(2)の状態方程式の状態ベクトルと係数マトリクスは次のように定義される。

$$x = \{x_a \quad x_R \quad \dot{x}_a \quad \dot{x}_R\}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_\phi \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}\{1/l_m \quad -1/l_m\}^T \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}\{0 \quad 1\}^T \end{bmatrix}$$

ただし、

$$M = \begin{bmatrix} m_a + r & -r \\ -r & m_{eq} + r \end{bmatrix}$$

$$C_\phi = \begin{bmatrix} c_a & -c_a \\ -c_a & c_a + c_{eq} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_a & -k_a \\ -k_a & k_a + k_{eq} \end{bmatrix}$$

$$r = J/l_m^2$$

制震実験の際に用いられた重みマトリクスは次のような値を用いた。

$$Q = \text{diag}[0.1 \quad 1 \quad 0.1 \quad 1] \\ R = [10]$$

(2) LQG 制御則による制震実験

LQG 則による制御問題の解は、いわゆる分離原理を基に Kalman フィルタの解と全状態フィードバック問題を組合わせたものである。すなわち、限られた観測値に基づいて制御に必要な全状態量を推定し、全状態フィードバックのゲインにその状態量をかけることによって制御力を求める方法である。

本実験では、AMD の変位と絶対加速度および屋上階の絶対加速度のみが観測できるとする。従って、観測方程式の観測量 Y の要素は AMD と屋上階の絶対加速度になり、Kalman フィルタによって

制御に必要な各階の変位と速度応答が推定される。

系の状態方程式と観測方程式の係数マトリクスは次のように定義される。

$$A = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ M^{-1}\{1/I_m \quad -1/I_m \quad 0_{1 \times 4}\}^T \end{bmatrix}$$

$$C = S[-M^{-1}K \quad -M^{-1}C]$$

$$D = S[M^{-1}\{1/I_m \quad -1/I_m \quad 0_{1 \times 4}\}^T]$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ここで、 S は観測位置を決める位置マトリクスである。

重みマトリクスおよび雑音の共分散マトリクスは次のような値を用いた。

$$Q = \text{diag}[0.1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0.1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$R = [80]$$

$$\Gamma = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 100 \quad 1 \quad 100 \quad 1]$$

$$\Psi = \text{diag}[0.1 \quad 0.1 \quad 0.1 \quad 0.1]$$

(3) 実験結果および考察

LQ および LQG 制御則による鋼構造実大試験体の制震結果を以下に述べる。その1において、El Centro 25gal に相当するよう設計された地震波の1, 3～5次モードは試験体の5階に設置されている加振機を用いて、2次モードは3階に設置されている加振機を用いて地震波加振を行った。その応答制御を屋上階に設置されているAMDにより行った。

図2は低次元化モデルに対するLQ制御時と非制御時の屋上階加速度応答の比較を示す。図3はAMDの変位と加速度および屋上階の加速度を観測値とした場合の屋上階加速度応答のLQG制御結果を示す。図4はその際の屋上階加速度応答を周波数領域において示したフーリエスペクトル結果である。図5はLQG制御則のオブザーバにより推定した5階の速度応答と5階に設置されているセンサーからの観測値との比較を示す。

LQ および LQG 制御を行い、両方とも非制御時と比較して、屋上階の加速度応答を30%以上低減させる制御結果を示した。LQ 制御と LQG 制御

の結果に差がないことは1次モードが卓越する地震波を採用したためであると考えられる。

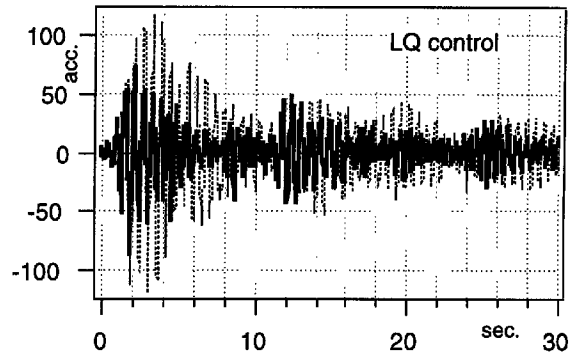


Fig. 2 Comparison of RF acc. responses (LQ)

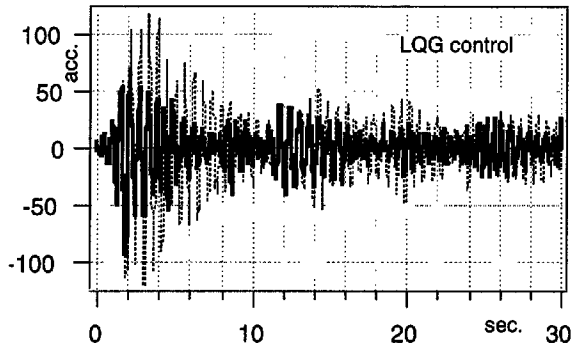


Fig. 3 Comparison of RF acc. responses (LQG)

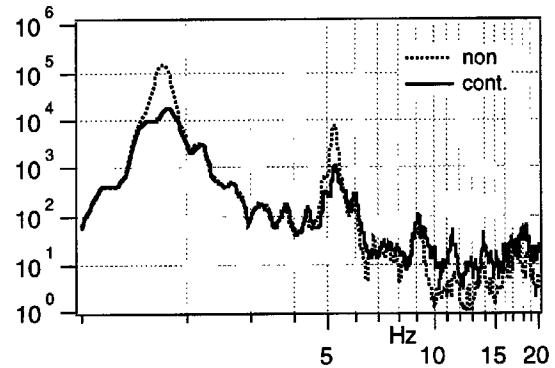


Fig. 4 Comparison of RF Fourier spectra (LQG)

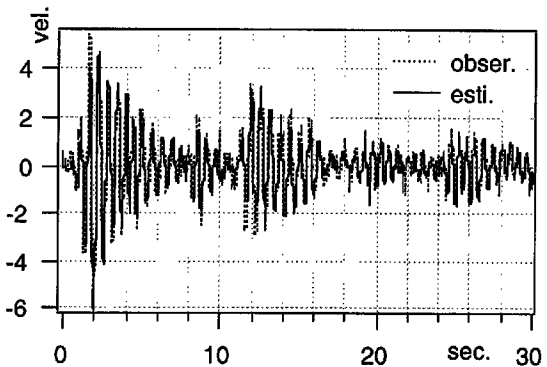


Fig. 5 Comparison of estimated and observed velocity responses of the 5th floor

4. 極配置制御

4.1 定式化

(1) 基本式

試験架構にAMD (4t-CMM) が搭載された場合の動力学モデルは Fig. 6 に示される。外力項を無視した運動方程式は、

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = -\{u, 0, 0, 0\}^T \quad (20)$$

$$m_D(\ddot{\delta} + \ddot{x}_5) = u \quad (21)$$

と書ける。ただし、 $x (= \{x_5, x_4, x_3, x_2, x_1\}^T)$ は各層の架構基礎からの相対変位量を要素にもつ変位ベクトル、 δ および u はAMDのストロークおよび制御力である。また、

$$M = \text{diag}(\{m_5 m_4 + m_{D1}, m_3 m_2 + m_{D2}, m_1\}) \quad (22)$$

である。ここで、 $\text{diag}(\cdot)$ はベクトルを対角マトリクスに変換する関数を表す。

1つのモードだけに注目して、架構を1質点に縮約する (Fig. 6 参照)。式(1)の右辺を0として得られた i 次のモードベクトルを ϕ_i とする。ただし、 ϕ_i はAMDの設置階に対応する成分が1となるよう正規化を行っているものとする。このとき、式(1)に左から ϕ_i^T を乗じると直交するモードが消えて、

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = -F \quad (4)$$

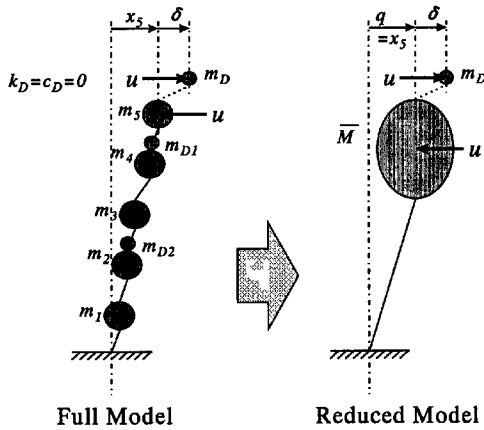


Fig. 6 Full model and reduced model

となる。ここで、

$$\bar{M} = \phi_i^T M \phi_i \quad (6)$$

$$\bar{C} = \phi_i^T C \phi_i = 2h\bar{M}\omega \quad (25)$$

$$\bar{K} = \phi_i^T K \phi_i = \bar{M}\omega^2 \quad (26)$$

であり、 q は i 次のモード変位である。また、 h, ω はそれぞれ i 次のモードの減衰定数および円振動数である。架構が i 次のモードのみの振動をしている時は、

$$q = x_5 \quad (27)$$

となる。この時、式(20)および(21)は、2質点系の運動方程式となり、次式で表される。

$$\begin{bmatrix} m_D & m_D \\ 0 & \bar{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ -u \end{bmatrix} \quad (28)$$

いま、制御力 F を次式のように状態フィードバックで与えるとすると、

$$u = f_1 q + f_2 \delta + f_3 \dot{q} + f_4 \dot{\delta} \quad (29)$$

式(28)は

$$\begin{bmatrix} m_D & m_D \\ 0 & \bar{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f_4 & -f_3 \\ f_4 & \bar{C} + f_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f_2 & f_1 \\ f_2 & \bar{K} + f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

となる。式(30)の極は通常4個あるが、2個が1組になって1つの円振動数および減衰に対応している。このため、2組の円振動数および減衰を指定すれば、式(30)の全ての極が配置できる。ここでは、他のモードに影響を与えないようにするために、この2組の円振動数として ω を設定する。また、減衰定数も2組とも H とし、重根を配置する。

式(12)が上記の極を持つとして(29)式の制御ゲイン $f_1 \sim f_4$ を求めれば (山本・相沢, 1996) ,

$$f_1 = \left\{ -m_D + 4(H - h)^2 \bar{M} \right\} \omega^2 \quad (31)$$

$$f_2 = -m_D \omega^2 \quad (32)$$

$$f_3 = f_4 = -2(2H - h)m_D \omega \quad (33)$$

と得られる。

さて、本制御では、架構の応答をモード分離せず、式(27)のように設置階の応答をそのまま用いてフィードバック制御を行っている。この影響をみるために式(20)および式(21)で表されるフルモデルの運動方程式に対する極を求めた。この結果を Fig. 7 に示す。いずれも非制御時に比べて、全てのモードで減衰が増加している。これは安定した制御が可能であることを示しているが、理想的には制御モード以外は影響しないことが望ましい(制御できて効率が悪く)。このような意味で、2次モード制御の H が大きいものは望ましい制御ではない。

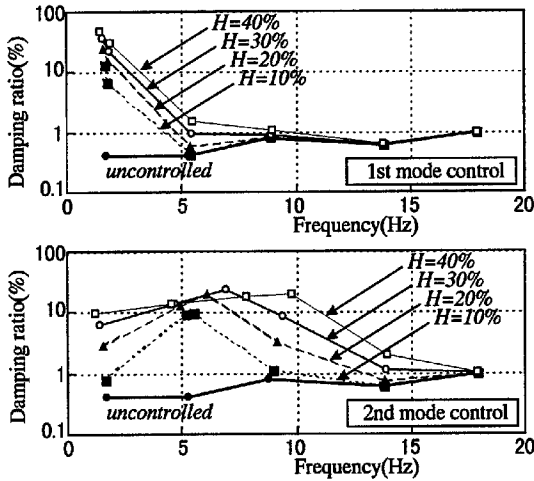


Fig. 7 Damping ratios of full model

(2) ストローク制約

AMDのストロークや制御力には制約があるため、制約内で制御を有効に行うために、応答に応じてゲインを変えることが一般によく行われており、これに関する研究も多い(例えば、長島他, 1996)。ゲイン切替えの基準となる応答は建物応答が使われる場合とAMDの応答が使われる場合に分かれる。しかし、AMDの能力内で有効に制御を行うという観点から考えると後者の方が妥当である。また、ゲインの切替えを不連続に行うと切替え時に衝撃を生じるために連続的にゲインを切替えることが望ましい。

以上の考えに基づき、本制御実験ではAMDの活動度の指標として、下式の値を定義し、この指標 I (≥ 0)に基づいて各制御ステップ毎にゲインを切り替える。

$$I = \frac{\delta^2 + (\dot{\delta}/\omega)^2}{D^2} \quad (34)$$

ここで、 D はストロークの制約値に関する値である。

式(31)~(33)のように、本制御則のゲインに関するパラメータは H だけなので、Fig. 7 にしめされるようにゲイン切替えを定義する $H = f(I)$ を決めるだけでよい。

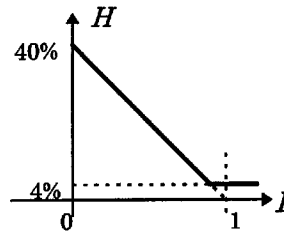


Fig. 8 Sample function to define control gain

4.2 地震波加振結果

(1) 制御実験1：基本特性実験

本制御では減衰定数 H のみをパラメータとしているので、 H の値を変えて制御の効果や安定性等を実験的に確認した。実験は1次モードおよび2次モードを対象にして行った。なお、架構の振動センサーは加速度計を用いているため、制御時には時間積分により、速度及び変位を求めた。加振入力には1940 El Centro NS 25cm/s^2 応答再現波および1995 JMA Kobe NS 30cm/s^2 応答再現波である。

1次モードについては、 H が50%程度までは安定して制御を行うことができたが、 H が60%程度から高次モードが見られるようになり、更に大きくすると加振前にスピルオーバーが発生した。 H をパラメータにして、架構の最大加速度およびストロークの最大値の変化の様子を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。 H の増加により加速度の最大値が低減し、一方ストローク量が大きくなること判る。El Centro NS 25cm/s^2 に対して、架構の加速度応答波形の一部を Fig. 11 に示す。また、Fig. 12 には制御時のシミュレーション解析結果を示す。シミュレーションとの対応はよく一致しており、想定

通りの制御がなされていることが判る。

2次モードについては H が 10%の時には制御可能であったが, 更に大きくすると加振前にスピルオーバーが発生した。 $H=10\%$ の場合について架

構の加速度応答波形を Fig. 13 に示す。

また, これらの加速度応答のフーリエスペクトルの比較を Fig. 14 に示す。

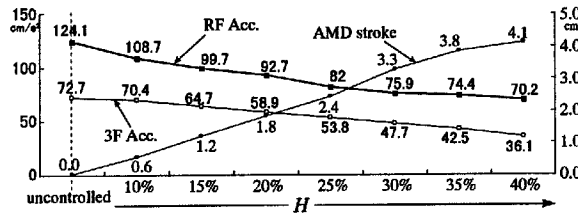


Fig. 9 Relation between frame responses and AMD stroke as a parameter of control gain H (El Centro NS)

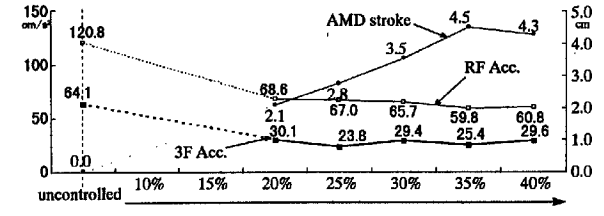


Fig. 10 Relation between frame responses and AMD stroke as a parameter of control gain H (JMA Kobe NS)

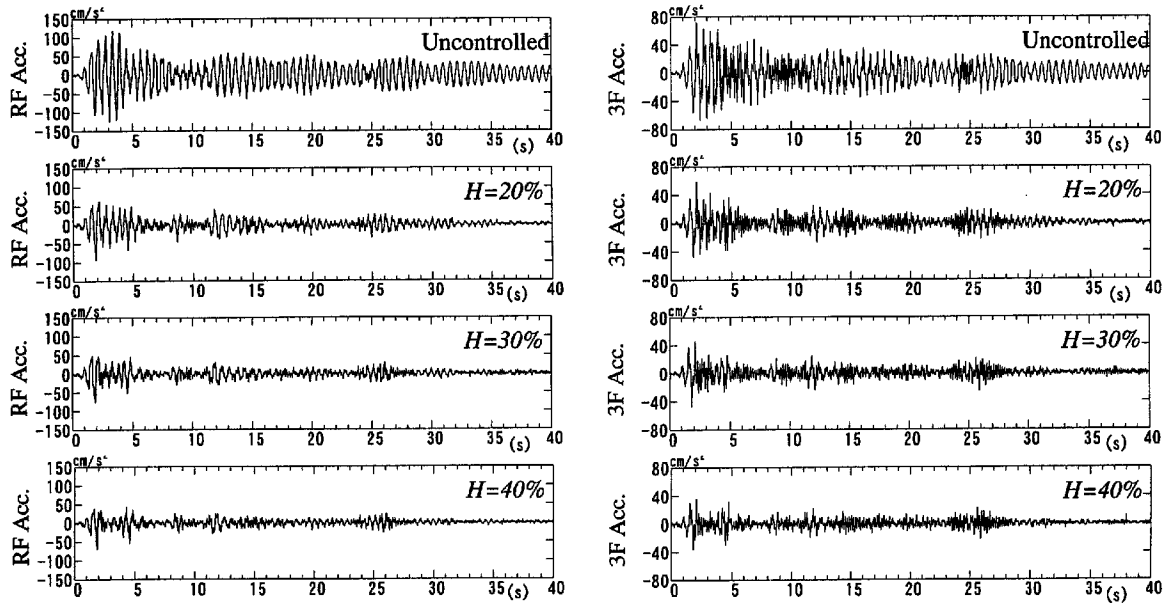


Fig. 11 Acceleration responses of frame under various control gain H (El Centro)

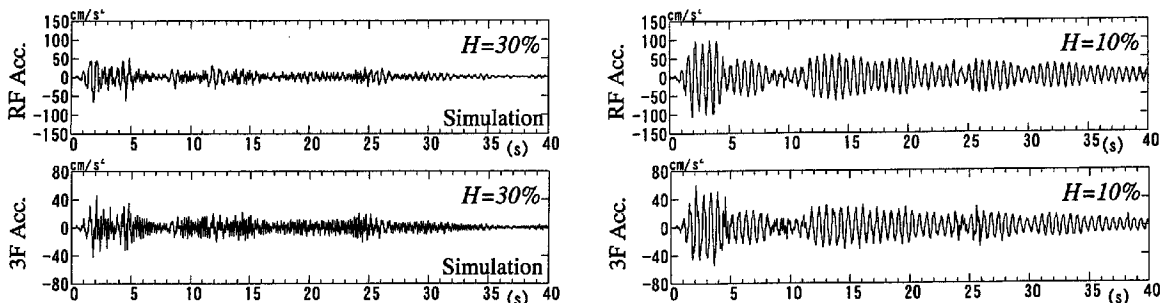


Fig. 12 Result of simulation (El Centro; $H=30\%$)

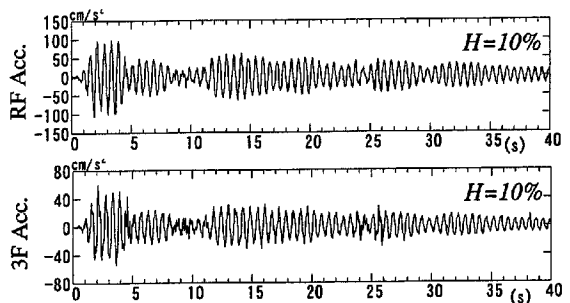


Fig. 13 Result of 2nd mode control (El Centro; $H=10\%$)

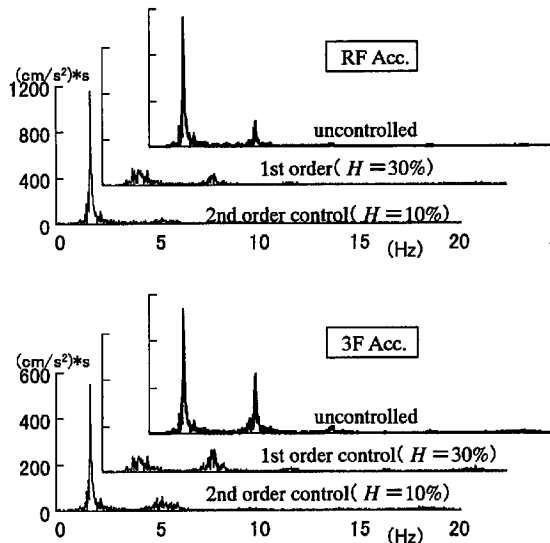


Fig. 14 Comparison of Fourier spectra

(2) 制御実験 2 : 架構のパラメータ変動の影響

架構のモデル誤差が制御に与える影響を調べるために、架構の固有振動数を r 倍と考慮して制御ゲインを算出し、制御実験を行った。実験を行った条件は 1 モード制御で H を 30% と固定し、 r を 90%, 95%, 105%, 110% とした 4 ケースである。結果は、いずれのケースもほぼ同様に制御が可能であった。

r をパラメータとして、フルモデルにおける 1 次モードに関する極の様子を、振動数と減衰の形で表せば Fig. 15 のようになる。図中破線で囲んだ部分は制震実験を行ったケースの範囲であり、1 割程度の振動数の変動では制御面にドラスティックな変動は生じないことが判る。また、 r が 0.1 や 2.0 と極端な値の場合でも、全てのモードの減衰定数が非制御時を下回らないため、制御効果は落ちる（制御効果が殆どない場合もある）が安定な制御である。

(3) 制御実験 3 : 可変ゲインの適用

実験は、Fig. 8 に示す関数を用いて、 $D=1.0\text{cm}$, 2.0cm , 3.0cm , 4.0cm , 5.0cm の 5 ケースについて行った。結果は、いずれのケースもストロークは設定した D よりも小さくなり、本可変ゲイン則の有効性が示された。 $D=2.0\text{cm}$ の場合について結果を Fig. 16 に示す。

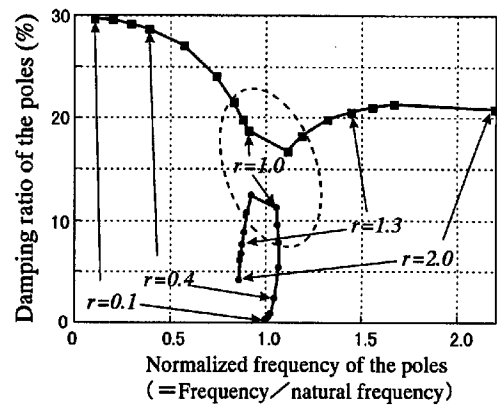


Fig. 15 Loci of poles according to parameter r (r : ratio of estimated frequency of structure to real one)

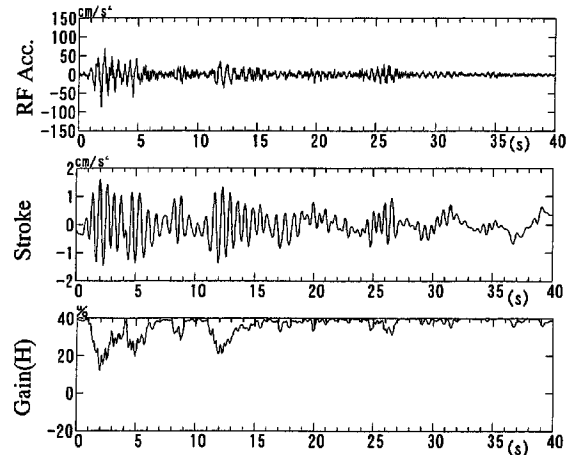


Fig. 16 Results of variable gain control

5. H^∞ 制御

5.1 定式化

(1) 状態空間モデルの導出

実大試験架構モデルを AMD 設置階 (RF) に対する成分で正規化したモードベクトルを用いてモード座標で表す。ここでは、1 次と 2 次のモードのみを考慮する。このモード変位 q_1, q_2 および AMD の地面からの相対変位 x_a を用いて、状態変数ベクトル $\xi = [q_1 \ q_2 \ x_a \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{x}_a]^T$ を定義すれば、AMD を含む架構の状態方程式は、

$$\dot{\xi} = A \xi + B u \quad (35)$$

となる。ここで、

$$A = \left[\begin{array}{ccc|ccc} O & & & I & & \\ -\omega_1^2 & 0 & 0 & -2h_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_2^2 & 0 & 0 & -2h_2\omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (36)$$

$$B = \left[\begin{array}{c} 0 \\ -1/M_1 \\ -1/M_2 \\ -1/m_D \end{array} \right] \quad (37)$$

であり, ω_i, h_i, M_i はそれぞれ i 次の固有円振動数, モード減衰, モード質量である。また, m_D は AMD のマス質量を表す。一方, 本研究では建物の情報として最上階加速度, AMD の情報としてストローク量のみを観測量として制御を試みる。従って, 観測に関する方程式は,

$$y = C\xi + Du \\ = [-\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2, x_a - q_1 - q_2] \quad (38)$$

となる。よって,

$$C = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \omega_1^2 & \omega_2^2 & 0 & 2h_1\omega_1 & 2h_2\omega_2 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (39)$$

$$D = [1/M_1 + 1/M_2 \quad 0] \quad (40)$$

である。

(2) モデルの同定

同定モデルの構造を以下のように定義する。

$$x_{k+1} = \hat{A}x_k + \hat{B}u_k + \Gamma e_k \\ y_k = \hat{C}x_k + \hat{D}u_k + e_k \quad (41)$$

ここで, $\hat{A} \in R^{n \times n}$, $\hat{B} \in R^{n \times m}$, $\hat{C} \in R^{p \times n}$,

$\hat{D} \in R^{p \times m}$ および $\Gamma \in R^{n \times p}$ で, $x_k \in R^n$ は状態ベクトルを表す。また, e_k は平均値 0 の白色雑音である。

このモデルに対し, トルク指令入力 u_k に同定対象となる振動数成分を含む地震波を入れたときの RF の加速度応答値を出力 y_k として部分空間法 (Overschee and Moo, 1994) を適用して, $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \Gamma$ の推定を行った。この $\hat{A}$ の固有値から

ω_i, h_i を求めることができ, 公称モデルに対応する式(35)および(38)が決定できる。

公称モデル $G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$ と同定されたモデル $\hat{G}(s) = \hat{D} + \hat{C}(sI - \hat{A})^{-1}\hat{B}$ について, トルク指令に対する RF 加速度の周波数応答を Fig. 17 に示す。図中, 下添え字 el, kb は同定用に入力した地震波 El Centro と JMA Kobe の違いを示す。

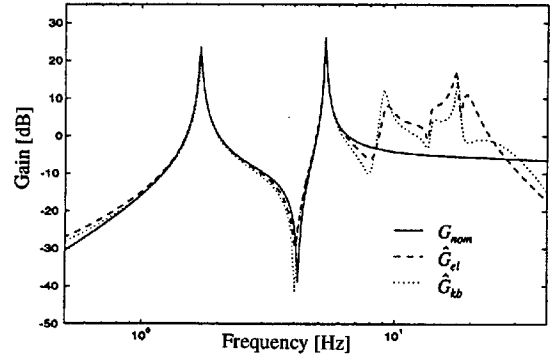


Fig. 17 Comparison of transfer function from torque command to RF acceleration

(3) H^∞ 制御系の設計

本論では H^∞ 制御系設計にプラントの正規既約分解表現に基づくロバスト制御系設計手法であるループ整形法 (McFarlane and Glover, 1992) を適用した。

公称モデル G を正規左既約分解形 $G = M^{-1}N$ で表す。このとき, モデル誤差の最大値 $\varepsilon_{\max}$ は

$$\varepsilon_{\max} = \left(\inf_K \left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \right)^{-1} \\ = \left\{ 1 - \left\| \begin{bmatrix} N, M \end{bmatrix}_H \right\|_H^2 \right\}^{1/2} \quad (42)$$

となる。ここで, $\|\cdot\|_H$ はハンケルノルムを表す。ループ成型法は以下のステップからなる。

- ① ループ整形: 前置・後置重み w_1, w_2 によって G に対する開ループ特性の整形を行う。
- ② ロバスト安定化: 制御対象を $G_s = w_2 G w_1$ として, $\varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$ を選んでコントローラ K^∞ を求める。 $\varepsilon_{\max}$ が小さすぎるときは[1]に戻って w_1, w_2 を調整する。
- ③ 最終的なコントローラは $K = w_1 K^\infty w_2$ とする。この手法を用いて, コントローラの設計を行う。

設計における制御目的を以下のように定める。

- ① 制御効果: 1 次モード, 2 次モードの減衰を 10% 以上にする。
- ② ロバスト安定性: $\pm 3\%$ の固有振動数の変動に対して安定して制御を行う。モデル化で無視した動特性にも安定を保証することが望ましい。上記の制御目標を満足する重み関数として

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{0.6s^2 + 10.18s + 1919}{s^2 + 33.47s + 1120}, 0.1 \left(1 + \frac{1}{s} \right) \right\} \quad (43)$$

を用いる。\$W\$ の第 1 成分は制御効果とロバスト安定に関する項で, 第 2 成分は AMD ストロークを抑える項である。これにより求めたコントローラの効果を Fig. 18 に示す。

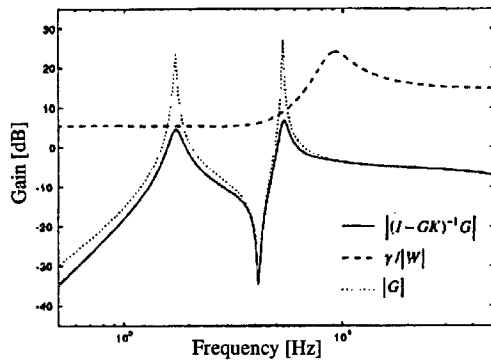


Fig. 18 Closed-loop measures relevant to the performance of the design

次にこのコントローラのロバスト安定性を確認する。ロバスト安定性の判断は, スモールゲイン定理によって導かれる次式による。

$$|\Delta| \cdot |K(I - GK)^{-1}| < 1 \quad (44)$$

ここで, Δ は公称モデルの加法的誤差を表す。Fig. 19 に公称モデルと (2) 項で述べた同定により求めたモデルの誤差と式 (44) との関係を示す。この図より, 公称モデルでは無視した高次モードのロバスト安定性が保証されていることがわかる。

5.2 地震波加振結果

5.1(3)の方法で設計したコントローラを用いて実大試験架構の制震実験を行った。加振入力は, 前述の LQ 制御, LQG 制御および極配置制御と同

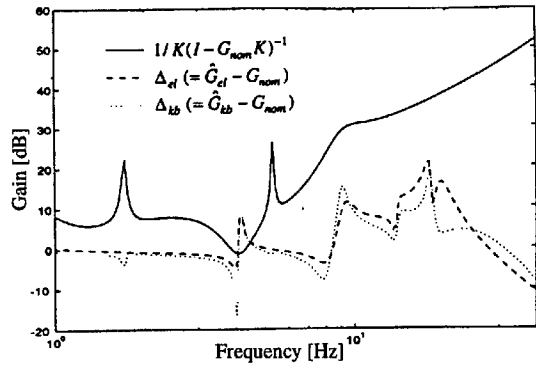


Fig. 19 Allowable additive error

様に 1940 El Centro NS 25cm/s² 応答再現波である。

図 19 に El Centro NS 25cm/s² を加振した場合について制震時と非制震時の RF の加速度, 3F の加速度の比較を示す。また, 制震時の AMD のストロークも示している。

これらの実験結果から, El Centro NS 25cm/s² の場合で, 制震時の RF 加速度は最大値で非制震時の 45% に, RMS 値で 33% に低減された。

また, 高いゲインのフィードバックにもかかわらず高次モードによる不安定現象は発生しなかった。さらに, 高次モードの影響を調べるために, El Centro NS 25cm/s² 応答再現波および JMA Kobe NS 30 cm/s² 応答再現波を構成する 1 ~ 5 次モードのうち 4 次と 5 次モード成分のみによる加振を行い, 制震時に不安定現象が見られないことを確認した。

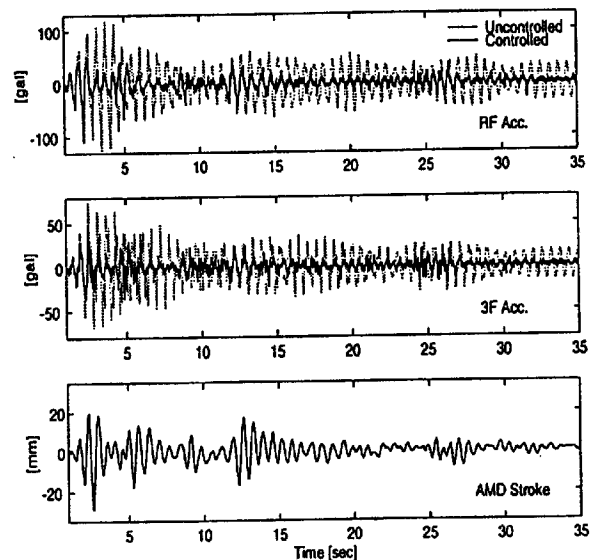


Fig. 20 Comparison between controlled and uncontrolled responses (El Centro NS)

6. まとめ

2台の加振装置と1台の制震装置（AMD）を搭載する実大試験架構を用いた制震実験システムによって、各種の制御アルゴリズムの検証実験を行った。従来よく用いられてきたLQ制御では、試験架構を1自由度に低次元化した。一方、LQG制御では、限定された観測地を用いて全状態量を推定し、高次モードにも対応した。地震時に励起される高次モード振動にも対応した制御が行えることを実験的に示した。

極配置法による制御では、モード減衰比を変化させ、すなわち制御ゲインを変えて、制御効果を実験的に確認し得た。制震の対象である試験架構のモデル誤差が比較的大きくても安定な制御が可能であった。また、可変ゲインによる制御にも適用可能であった。

H^∞ 制御理論を適用した制御では、1次および2次モードにしてループ整形法によるコントローラの設計を行った。設計目標の制御効率が得られることと高次モードによる不安定現象が乗じないことが実験的に確認し得た。

本研究で用いた実大試験架構制震実験システムは、制御則等の検証に有効であり、今後さらに制震システムの開発研究を行う。

謝 辞

本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)(1)「建築構造物の制震システムに関する理論的・実験的研究」（課題番号08555141、代表・京都大学防災研究所 鈴木祥之）によるものである。

参考文献

- 鈴木祥之・裊 起煥・山本雅史・玉木利裕・加賀谷博昭・荒木時彦（1997）：鋼構造実大試験架構の同定とLQ・LQG制震実験，日本建築学会近畿支部研究発表会梗概集（投稿中）。
- 鈴木祥之・裊 起煥・山本雅史・玉木利裕・加賀谷博昭・中山裕樹（1997）：鋼構造実大試験架構を用いた制震実験システムとLQ・LQG制御，1997年日本建築学会大会学術講演梗概集（投稿中）。
- 鈴木祥之・山本雅史・村井信義・玉木利裕・加賀谷博昭・裊 起煥・荒木時彦（1997）：極配置法を用いた鋼構造実大試験架構のAMDによる

制震実験，1997年日本建築学会大会学術講演梗概集（投稿中）。

鈴木祥之・玉木利裕・加賀谷博昭・山本雅史（1997）： H^∞ 制御理論に基づく鋼構造実大試験架構のアクティブ制震実験，1997年日本建築学会大会学術講演梗概集（投稿中）。

長島一郎・西山正三・篠崎祐三（1996）：アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御（その2，装置能力を考慮した可変ゲイン制御手法とその制御性能に関する研究），日本建築学会構造系論文集，第483号，p.39～p.49。

山本雅史・相沢 覚（1996）：アクティブマスダンパーの制御則（速度フィードバックの考察），平成8年度日本建築学会大会学術講演梗概集，p.941～p.942。

山本雅史・鈴木祥之（1997）：極配置法に基づく鋼構造実大試験架構のアクティブ制震実験，日本建築学会近畿支部研究発表会梗概集（投稿中）。

山本雅史・鈴木祥之・玉木利裕・加賀谷博昭・裊 起煥・荒木時彦（1997）：実大構造物のアクティブマスダンパーによる制震実験，その1 同定と地震波加振システム，京都大学防災研究所年報 第40号 平成9年4月。

Kagaya, H., Tamaki, T. and Suzuki Y.(1997): Active Seismic Response Control of a Building Structure using H^∞ Control Theory, Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering（投稿中）。

McFarlane, D. C. and Glover, K.: A Loop Shaping Design Procedure Using H^∞ Synthesis, IEEE Trans., Automatic Control, Vol. 37, No. 6

Overschee, P. V. and Moo, B. D.(1994): Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic Stochastic Systems, Automatica, Vol. 30, No. 1, pp. 75-93.

Suzuki, Y., Bae, G., Tamaki, T., Kagaya, H., Yamamoto, M. and Araki, T.(1997): Structural Control Experiments of Full-Scale Specimen Frame using LQ and LQG Control Systems, Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering（投稿中）。

Yamamoto, M. and Suzuki, Y.(1997): Full-Scale Structural Control with Earthquake Response Generator System and Pole Assignment Control Algorithm, Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering（投稿中）。

Seismic Response Control Experiments of Full-Scale Structures By Active Mass Damper
Part 2: Control Algorithms and Control Effects of Seismic Responses

Yoshiyuki SUZUKI, Masashi YAMAMOTO^{*,***}, Toshihiro TAMAKI^{**},
Hiroaki KAGAYA^{**}, Gi-Hwan BAE^{*} and Tokihiko ARAKI^{*}

^{*} Graduate School of Engineering, Kyoto University

^{**} Kawasaki Heavy Industries, LTD

^{***} Takenaka Corporation

Synopsis

Results is described on seismic response control experiments of full-scale test frame with an active mass damper(AMD) by using the seismic response generator system described in Part 1. The control algorithms adopted here are the typical LQ and LQG optimal control, pole assignment control and H^∞ control. From experiments it was confirmed that the spillover phenomenon due to model reductions did not occur and that these control methods were effective in controlling the AMD and in reducing seismic responses not only in the first mode vibration but higher mode vibrations.

Keywords: seismic response control; active mass damper; full-scale test; LQ/LQG; pole assignment; H^∞ control theory