

アクティブマスダンパーによる構造物制御に関する振動台実験

山本雅史***・鈴木祥之・裊 起煥*・荒木時彦*・李 恵***

* 京都大学工学研究科

** (株) 竹中工務店

*** ハルピン建築大学

要 旨

構造物の制震装置としてアクティブマスダンパー (AMD) を大地震時にも有効に作動させるためには装置の性能限界を考慮した制御が不可欠である。本論では、このような観点から制御アルゴリズムを定式化し、振動台実験により検証する。本アルゴリズムは、応答をモード毎に分離し、極配置法に基づき各モード毎にAMDの活動度に応じて可変制御を行う。振動台による建物モデルの制震実験において、AMDのストローク制約を条件として行い、有効な制御が可能であることを確認した。

キーワード：制震，アクティブマスダンパー，振動台実験，可変ゲイン，制御アルゴリズム

1. はじめに

大地震時における建物の応答を抑制 (制震) することは、建物の構造安全性のみならず居住者の安全確保、心理的不安の緩和、更には財産の保全にもつながる。また、社会的に重要な建物では地震中、地震後においても建物機能の維持が要求されており、制震、特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を実現するための装置として、アクティブ・マス・ダンパー (以下、AMD) に着目した。AMDは強風時もしくは中小地震時の居住性を改善する目的で、1989年頃から実建物に適用されており、1995年までに20棟以上の建物に適用されている。また、橋梁における施工時の主塔の風による揺れを制振する目的で、1995年までに9本の橋でAMDが適用されている。建物、橋梁いずれも殆ど全ての適用例は日本におけるものである。これら適用例の内容については Spencer Jr. and Sain (1997) に詳しい。

橋梁では施工時の制振を目的としているため、使

用期間は比較的短い、建物では設置後5年以上経過したものも多くあり、長期観測によるAMDの制振効果に関する報告も増えつつある (小鹿ら、1994; 福島ら、1997; 相沢ら、1997; Yamamoto et al., 1998)。

以上のように、AMDは他のアクティブ系制震装置とは比較にならない程実績が多い。その結果、装置としての完成度が高く操作性・信頼性の面で優れていると考えられる。しかし、本研究が対象とする大地震にAMDを適用させるには多くの課題が未だ残されている。重要なものとして、大地震時にシステムを稼働させるための電源の確保、大振幅・大容量に対応するAMD機構の開発、大地震時のセンサ・コンピュータの信頼性の確保、大地震に対応する制御アルゴリズムの開発等である。これらの中で、本研究では特に制御アルゴリズムの開発を研究対象としている。

大地震を対象とするAMDの制御アルゴリズムに最も必要とされる性能は、AMDの限界性能を考慮して限界性能内で制御を行うことができることであると考えられる。大地震時にはAMDは限界性能に近い状態で制御を行うことになる。しかし、限界性

能を越えてしまった場合、AMDは停止してしまう可能性が大きく、この場合、以後の制震効果は期待できない。これは、耐震安全性に直接かわる問題なので避けなければならない。従って、本研究の第1の目的はAMDの限界性能を考慮して制御を行うアルゴリズムの開発にある。

第2の目的として、高次モードも制御できるアルゴリズムであることとする。通常、風に対する揺れの場合は、高次モードの揺れが問題になることは少ないため、AMDの制御においても積極的に高次モードを制御対象としてない。地震の場合も、耐震安全性にかかわる応答変形量の面からみれば、1次モードの影響が支配的であることに変わりないが、特に超高層建築を想定した場合は2次モードの影響が比較的大きくなる。高次モードの制御はAMDのストロークをあまり必要としないため、AMDの制御力に余裕がある場合は同じストロークでより効果的な制御を行うことが可能になる。

本論では、上記2点を考慮したAMDの制御アルゴリズムをカルマンフィルタによる状態推定により各モードを個別に制御することで定式化する。各モードに対しては他のモードに与える影響を最小限にするために制御により振動数が変わらない極配置を行う。また、各モード毎にAMDの活動度に基づく可変ゲインを適用し、AMDの性能限界を越えない範囲で制御を行う。

このような、制御アルゴリズムは実験により、検証を行う必要がある。実験的検証の第1として、京都大学宇治構内に既設の鋼構造実大試験架構を用いたAMDによる制震の実験的研究を既に実施している。これは、実大構造物に地震応答を再現するシステム（山本ら、1997；Yamamoto and Suzuki, 1997）を構築し、このシステムを用いてAMDの制震実験（鈴木ら、1997；Suzuki et al., 1997；Kagaya et al., 1997）を行うものである。

本論では、実験的検証の第2として引き続き実施した振動台実験により検証した結果について述べる。実大試験架構を用いた検証では実大規模のAMDお

よび建物での実験が可能であるが、2方向性の検討および地面が動くことによる影響の検討を行うことができない。振動台実験では特にこれら2点の検討を行うために計画されている。

2. 制御アルゴリズムの定式化

既報（山本・鈴木、1997）では、ある特定のモードに対する制御アルゴリズムを極配置法に基づいて定式化した。本論では構造物およびAMDの応答をモード毎に分離した後、各モード毎に上記の手法を適用する。

通常、モード分離により制御を行う場合は、構造物の応答のみに関しモード分離を行い、この応答量に基づいて制御がなされる。すなわち、構造物の低次元化モデルを作成し、このモデルをAMDで制御していることになる（Kagaya et al., 1997）。これに対し、本研究ではAMDの応答もモード毎に分離することを考える。これは、モード毎の独立性を高めることによって、AMDの限界性能を考慮した制御を行い易くするためである。モード分離はカルマンフィルタによる状態推定により各次のモード変位を推定することにより行う。本研究で行うモード分離の概念図を Fig. 1 に、制御の概念フローを Fig. 2 に示す。

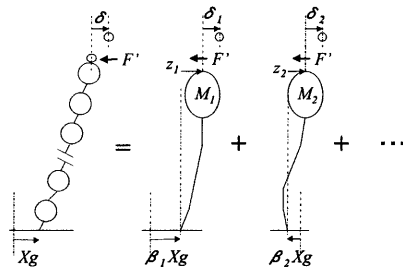


Fig. 1 Conceptual diagram of modal decomposition

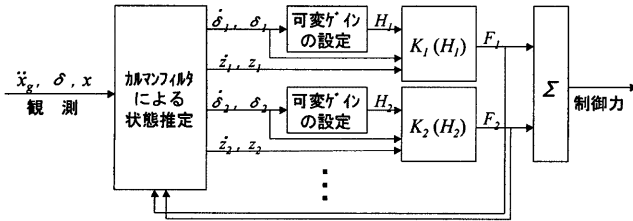


Fig. 2 Conceptual flowchart of the control algorithm

2.1 モードに関する状態方程式

地動外乱 $\ddot{x}_g$ をうける AMD を持つ多質点系の運動方程式は、 M , C および K をそれぞれ AMD の質量を除く構造物の質量、減衰および剛性に関するマトリクス、 m , δ をそれぞれ AMD の質量およびストローク、 x_i を AMD 設置部の変位として、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\{1, 1, \dots, 1\}^T \ddot{x}_g - \{1, 0, \dots, 0\}^T F \quad (1)$$

$$F = m(\ddot{\delta} + \ddot{x}_s + \ddot{x}_g) \quad (2)$$

と表すことが多い。しかし、(2)式で表される制御力 F は $\ddot{x}_s$ および $\ddot{x}_g$ の項を含むため、モード分離を円滑に行うことができない。このため、構造物の質量マトリクスとして、AMD の質量を含んだ質量マトリクス M' を使い、(1)式および(2)式をかきかえると、

$$M'\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M'\{1, 1, \dots, 1\}^T \ddot{x}_g - \{1, 0, \dots, 0\}^T F' \quad (3)$$

$$F' = m\ddot{\delta} \quad (4)$$

と表すことができる。いま、 M' と K から得られるモードを AMD の設置部が 1 になるよう正規化して ϕ_i で表すと、 i 次のモード変位 z_i を使って、

$$x = \sum z_i \phi_i \quad (5)$$

となる。(5)式を(1)式に代入し、左から ϕ_i^T をかければ、直交する項が消えて、

$$M_i \ddot{z}_i + C_i \dot{z}_i + K_i z_i = -M_i \beta_i \ddot{x}_g - F' \quad (6)$$

が得られる。ここで、 M_i , C_i および K_i はそれぞれ ϕ_i に関する i 次のモード質量、モード減衰およびモード剛性である。また、 β_i は i 次の刺激係数である。

$$\beta_i = \frac{\phi_i^T M' \{1, 1, \dots, 1\}^T}{\phi_i^T M' \phi_i} \quad (7)$$

なお、 ϕ_i は AMD の設置部が 1 になるよう正規化したので

$$x_s = \sum z_i \quad (8)$$

となる。一方、AMD に関するモード分離は、単に、

$$\delta = \sum \delta_i \quad (9)$$

$$F_i = m\ddot{\delta}_i \quad (10)$$

とするだけであり、このとき、(4)式から

$$F' = \sum F_i \quad (11)$$

が成立する。

AMD の制御指令がストローク加速度である場合は、(6)式および(10)式から直接、システム方程式が構成可能であるが、通常、制御指令はストローク加速度ではない。今回の実験で用いるボールねじ駆動方式の AMD の場合、制御指令はモータのトルクであり、トルク T と応答量との間に、

$$T/l_n = m\ddot{x}_s + m\ddot{x}_g + (m + l/l_n^2)\ddot{\delta} + C_d\dot{\delta} + K_d\delta \quad (12)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 l , l_n , C_d および K_d はそれぞれボールねじとモータの回転慣性の和、ボールねじ回転運動に対するマスの直進運動の割合 (= ボールねじリード / 2π)、AMD 装置全体の減衰係数およびバネ定数である。今回の振動台実験で用いる AMD はバネを有しないタイプのものであり、 $K_d = 0$ である。なお、今回の AMD はダンパーも有しないが、装置自身に摩擦や電気的な減衰要因があるために $C_d > 0$ となる。

上で述べたのと同様に、(12)式は、

$$T_i/l_n = m\ddot{z}_i + m\beta_i\ddot{x}_g + (m + l/l_n^2)\ddot{\delta}_i + C_d\dot{\delta}_i + K_d\delta_i \quad (13)$$

とモード毎のトルク T_i に分離することができる。明らかに、(13)式は

$$T = \sum T_i \quad (14)$$

を満たす。(4)式、(6)式および(13)式を整理すれば、

$$\overline{M}\ddot{q} + \overline{C}\dot{q} + \overline{K}q = Gg \quad (15)$$

$$q = \{z_1, z_2, \dots, z_n, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\} \quad (16)$$

$$g=\{T_1/l_n, T_2/l_n, \ddot{x}_g\} \quad (17)$$

と表すことができる。ここで、

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} M_1 & & m & \cdots & m \\ & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & M_n & m & \cdots & m \\ m & & & cm & \cdots & \\ & \ddots & & & \ddots & \\ & & m & & & cm \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\bar{C} = \text{diag}(\{C_1, C_2, \dots, C_n, C_d, C_d, \dots, C_d\}) \quad (19)$$

$$\bar{K} = \text{diag}(\{K_1, K_2, \dots, K_n, K_d, K_d, \dots, K_d\}) \quad (20)$$

$$G = \begin{bmatrix} & -M_1\beta_1 \\ & \vdots \\ & -M_n\beta_n \\ & -m\beta_1 \\ I & \vdots \\ & -m\beta_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

である。 $\text{diag}(\cdot)$ は各要素を対角成分にもつマトリクスを表す記号であり、

$$\alpha = 1 + \frac{I}{m l_n^2} \quad (22)$$

とおいた。(15)式は、

$$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B = \begin{bmatrix} O \\ M^{-1}G \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$X = \{z_1, \dots, z_n, \delta_1, \dots, \delta_n, \dot{z}_1, \dots, \dot{z}_n, \dot{\delta}_1, \dots, \dot{\delta}_n\}^T \quad (25)$$

とおくことにより、

$$\dot{X} = AX + Bg \quad (26)$$

と表現することができる。

2.2 カルマンフィルタによる状態推定

本論では観測量として、AMD設置部の加速度、AMDストロークおよび地動外乱の3つの状態量の

み観測することができるとして、定式化を行う。これらは実際のAMDの適用を考えた場合、妥当な選択である(羽生田, 1993; 田村ら, 1992)。

AMDストロークに関しては(9)式が観測方程式になる。AMD設置部の加速度に関しては、

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s &= \sum \ddot{x}_i + \ddot{x}_g \\ &= \sum_{i=n+1, 2n} A_{ij} X_j + \sum_{i=n+1, 2n} B_{ik} g_k + \{0, \dots, 0, 1\}g \end{aligned} \quad (27)$$

となる。ここで、 A_{ij} , B_{ik} , X_j および g_k はそれぞれ A , B , X および g の要素を表す。地動は g に直接入力するため、観測方程式には用いない。(9)式および(25)式をまとめて、

$$Y = \{\delta, \ddot{x}_s\}^T = CX + Dg \quad (28)$$

のように表すことができる。

さて、全ての状態量が観測できないために、制御指令を算出するのに必要な状態量 X は状態推定により得る必要がある。(26)式および(28)式にシステムノイズ w および観測ノイズ v を以下のように導入する。

$$\dot{X} = AX + Bg + Qw \quad (29)$$

$$Y = CX + Dg + Rv \quad (30)$$

このとき、

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Dg + L(Y - C\hat{X} - Dg) \quad (31)$$

という推定に対して、定常状態における誤差 $X - \hat{X}$ の共分散マトリクスを最小にする L は、 $E[ww^T] = O$ とすれば、

$$L = (PC^T + QWR^T)(V + RWR^T)^{-1} \quad (32)$$

$$W = E[ww^T], \quad V = E[vv^T] \quad (33)$$

として得ることができる。ただし、(32)式中の P は以下のリカッチ方程式の解である。

$$\bar{A}P + P\bar{A}^T + QWQ^T - PC^T(V + RWR^T)^{-1}CP \quad (34)$$

$$\bar{A} = A - QWR^T(V + RWR^T)^{-1}C \quad (35)$$

2.3 極配置による各次モードの制御

(15)式の運動方程式は各次が完全には独立ではなく、(18)式で表される質量マトリクス $\bar{M}$ の右上の部分で互いのモードに影響を与えている。これは、 i 次の制御力が j 次モードに影響を与えることによる。この影響を最小限にするために、本制御アルゴリズムでは極配置により、各次に減衰のみを付加し、制御後の振動数は制御前の振動数と同じになるような制御(山本ら, 1997)を行う。

各モードが完全に独立であるとして、(15)式を書き直せば、各モードに対して、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_i & m \\ m & cm \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_i \\ \ddot{\delta}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_i & 0 \\ 0 & C_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_i \\ \dot{\delta}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_i \\ \delta_i \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} 0 \\ T_i/l_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} M_i \\ m \end{bmatrix} \beta_i \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (36)$$

となる。

いま、制御トルク T_i を

$$T_i/l_n = f_1 z_i + f_2 \delta_i + f_3 \dot{z}_i + f_4 \dot{\delta}_i \quad (37)$$

のようにフィードバックする場合、(36)式の地動による外力項を除いた特性方程式の極が制御前の円振動数 $\omega_i = \sqrt{K_i/M_i}$ および任意に設定する減衰定数 H_i に関連する極になるという条件から、各係数が、陽に解ける。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m\omega_i^2 + (\alpha - \mu_i)4(H_i - h_i)^2 M_i \omega_i^2 \\ K_d - (\alpha - \mu_i)m\omega_i^2 \\ -2h_i m \omega_i \\ C_d - (\alpha - \mu_i)(4H_i - 2h_i)m\omega_i \end{Bmatrix} \quad (38)$$

ここで、 $h_i = C_i/(2M_i\omega_i)$ 、 $\mu_i = m/M_i$ である。

2.4 可変ゲイン制御

大地震時にはAMDの性能限界付近での制御が必要になるが、限界を越えるとAMDが停止する可能性が高くなる。このため、AMDの性能限界を考慮して、これを越えないよう制御を行うことが重要である。また、大地震時以外でも、性能を効率的に発揮させるという観点から性能限界を考慮した制御は

重要であり、研究も多くなされている(藤田ら, 1992; 田村ら, 1992; 中村ら 1992; 来田・三田, 1992; 羽生田, 1993; 長島ら, 1996; Iemura and Igarashi, 1996; 花村ら, 1997; 藤山ら, 1997)。

基本的には、小さな揺れのときは制御ゲインを高く設定し、揺れが大きくなると制御ゲインを落としてAMDの負担を小さくすることになるが、揺れが大きいかどうかを判断する方法およびそれに基づくゲインの変更方法が各研究で異なる。

揺れの大きさを判断する指標として、建物の応答を使う場合とAMDの応答を使う場合の2つに大きく分かれるが、本研究では後者の方が直接的であると考て、以下に示すAMDの活動度の指標 I_i を導入する。

$$I_i = \frac{\delta_i^2 + (\dot{\delta}_i/\omega_i)^2}{D_i^2} \quad (39)$$

ここで、 D_i は制限値の代表値で長さの次元をもつ。可変ゲインを行う上で注意すべき点に、滑らかにゲインを切り替えることが挙げられる。ゲインの切り替えが急峻である場合、衝撃的な力が作用し、建物およびAMDに悪影響を及ぼし、場合によってはスビルオーバーを引き起こす原因にもなる。このため、指標 I_i は変化が非常に滑らかになるよう設定している。先に述べたように本制御アルゴリズムは各モード個別に制御を行うため、 δ_i は振動数 ω_i で振動する。従って、定常状態では指標 I_i はほぼ一定になる。

ゲインの変更についても本制御アルゴリズムは非常に容易である。本制御アルゴリズムでは、制御の強さを表すパラメータは H_i のみであり、また、(38)式に示す通り、フィードバック係数は予め陽に解けているため、指標 I_i に対して H_i を決める関数を定義するだけでよい。指標 I_i が0に近いときはAMDに余裕があることを示すので、強い制御を行い、指標 I_i が1に近くなればAMDの性能限界に近いことを示すので弱い制御を行う。従って、指標 I_i に対して H_i を決める関数は、実験で実際に用いたFig. 4の関数のような非増加関数を一般的には設定する。

本制御アルゴリズムのもう1つの特徴として、AMDの限界性能をきめ細かく考慮することができる点が挙げられる。例えば、ストローク限界と制御力の限界を同時に考慮しながら1次モードと2次モードを制御するする場合、ストローク限界は殆ど1次モードで決定される。従って、ストローク限界に近いときは1次モードのゲインは低くなるが、制御力に余裕があれば2次モードは高いゲインでの制御を

行うことも可能である。

各次に対する D_i は、事前に値を定める必要がある。ストローク、ストローク速度および制御力を制約値として考慮する場合、

$$\sum D_i \leq \text{ストロークの制約値} \quad (40)$$

$$\sum D_i \omega_i R_{Vi} \leq \text{ストローク速度の制約値} \quad (41)$$

$$\sum D_i \omega_i^2 R_{Ai} \leq \text{制御力の制約値} \quad (42)$$

を満たすよう D_i を適宜定める。ここで、 R_{Vi} および R_{Ai} は応答が正弦波から外れる度合いを示す割り増し係数であり、1 以上の定数とする。可変ゲインを規定する関数を滑らかに設定すれば R_{Vi} および R_{Ai} は 1 に近い定数を設定できる。なお、制御力については AMD 設置部の加速度は AMD のマス加速度に比べ小さく無視できるものとしている。

(40) 式は AMD の全ストロークを 1 次用のストローク、2 次用のストローク、…、と分けて使うことを意味している。この場合、例えば 2 次用のストロークは 1 次の制御に使われることがないので、ストロークの有効利用の面から見れば望ましくない。(40) ~ (42) 式は保守的な D_i の設定法であるといえる。

3. 振動台実験モデル

制御アルゴリズムの検証を行うために用いた振動台実験用振動モデルを Fig. 3 に示す。1 層あたりの重量が約 2tf の 5 層の振動モデルで、柱として積層ゴムを使用し、設計周期を約 2 秒と長周期化している。同定実験から得られた各次の振動数と減衰について Table 1 にまとめる。振動モデルの同定については 渡辺 (1998) に詳しい。

Table 1 Natural frequencies and damping factors

	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
振動数 (Hz)	0.58	1.77	2.83	3.70	4.38
減衰 (%)	2.1	2.6	3.0	3.2	3.3

振動モデルの 5 層目は 2 段になっており、各段にそれぞれ 1 基の AMD を互いに直交するよう設置している。従って、水平 2 方向の AMD の制御試験が可能である。AMD は電気サーボモータによりボールねじを介してマスを駆動する方式であり、応答性

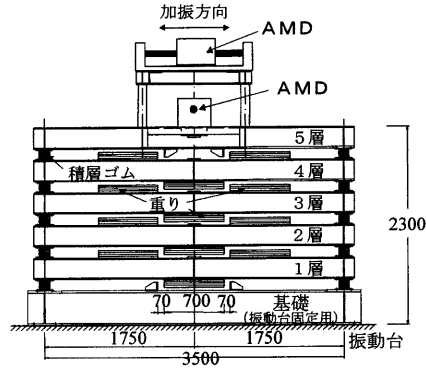


Fig. 3 Structural model with AMDs for shaking table tests

に非常に優れた方式である。AMD のマスは 200kgf の重量の鋼製マスであり、ストロークは $\pm 30\text{cm}$ まで使用可能である。

4. 振動台実験結果

上記試験体を用い、制御アルゴリズムの検証をするために振動台実験を行った。使用した振動台は京都大学防災研究所に設置されている振動台である。

制御は 1 次モードと 2 次モードのみを対象とし、推定に用いるモデルも 2 次までのモデルとした。本論ではシステムノイズおよび観測ノイズを以下のように設定した場合の結果を扱う。

$$W=0.01 \text{ または } 1.0 \quad (43)$$

$$V=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$Q=\{0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, 0, 0\}^T \quad (45)$$

$$R=\{0, \beta_1+\beta_2\}^T \quad (46)$$

4.1 極の確認

制御器の安定性を確認するために、 $H_2=10\%$ と固定し、 H_1 を 10% または 50%、 W を 0.01 または 1.0 とする 4 ケースについて観測器および制御器を求め、これらを用いて 5 次モードまで考慮したモデルを制御するときの極をそれぞれ計算した。制御に関する極の値を $W=0.01$ の結果について Table 2 に、 $W=1.0$ の結果について Table 3 に示す。 H_1 が 10% のときは、無視したモードに与える影響は殆どなく、制御対象のモードの減衰だけが增加する。 H_1 を 50% と大きくし

た場合、無視したモードは非制御時よりも減衰が小さくなる。この傾向は W を大きくした方が大きくなる。ただし、いずれの場合も各次の減衰は正であり、安定である。

Table 2 Natural frequencies and damping factors under AMD control ($W=0.01$)

H_i		1 次		2 次		3 次	4 次	5 次
10 %	振動数 (Hz)	0.58	0.60	1.75	1.79	2.84	3.71	4.38
	減衰 (%)	11.6	9.7	9.8	10.1	3.1	3.2	3.3
50 %	振動数 (Hz)	0.58	0.59	1.72	1.82	2.84	3.71	4.38
	減衰 (%)	51.4	48.7	9.0	10.9	2.7	3.1	3.3

Table 3 Natural frequencies and damping factors under AMD control ($W=1.0$)

H_i		1 次		2 次		3 次	4 次	5 次
10 %	振動数 (Hz)	0.57	0.60	1.74	1.81	2.84	3.71	4.38
	減衰 (%)	7.9	12.0	10.1	9.4	2.8	3.2	3.3
50 %	振動数 (Hz)	0.51	0.64	1.72	1.83	2.91	3.74	4.39
	減衰 (%)	57.8	46.4	8.8	11.8	0.7	1.8	2.9

4.2 ストローク制約実験

2 章では AMD の限界性能として、ストローク、力および速度を考えて一般化した定式化を行っている。しかし、AMD の限界性能の内、力の限界はリリーフ装置により対処することが可能であるがストロークに関しては装置による対処ができない。従って、制御アルゴリズムが考慮すべき限界性能としてはストロークに関する制約条件が最も重要であり本質的な制約条件となる。このため、本実験では、AMD の性能限界として、ストロークの制約条件のみを考慮している。また、今回の実験では、2 次モードのストロークは 1 次モードのストロークに比べ小さいと考え、1 次モードのみに可変ゲインを適用した。

全試験ケースを通して、可変ゲイン H_i を規定する関数として Fig. 4 に示すものを用い、ストロークの

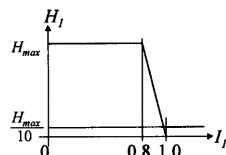


Fig. 4 Function to define variable gain control

制約条件を $D_i=15\text{cm}$ と設定した。2 次モードのゲインは $H_i=10\%$ と固定した。

まず、システムノイズを $W=0.01$ として、制御器を作成し制御実験をおこなった。振動台入力加速度は El Centro NS 波の最大値が 50cm/s^2 になるよう比例倍したもの（以降、El Centro NS 50cm/s^2 ）を用いている。 $H_{max}=10\%$ 、 30% 、 50% とした場合の応答結果を非制御時の結果と併せて Fig. 5 に示す。振動台加速度は指定した値より大きな加速度を観測したが再現性は非常に高い。変位応答は振動台を基準とした相対変位であり、観測した加速度を 2 階積分して求めている。積分の際に、6 秒以上の長周期成分を除去している。

Fig. 5 から、制御ゲイン H_{max} が大きくなるにつれて制御効果が向上することが分かる。また、制御時は全て可変ゲイン制御を適用しており、いずれの制御結果もストロークが設定値の 15cm を越えない範囲で制御されている。なお、 $H_{max}=10\%$ の場合は応答が小さく、ゲインの変更は行われていない。

次に、システムノイズを $W=1.0$ として、制御器を作成し制御実験をおこなった。振動台入力加速度は El Centro NS 50cm/s^2 である。 $H_{max}=10\%$ 、 30% 、 50% とした場合の応答結果を Fig. 6 に示す。Fig. 5 と同様、 H_{max} が大きくなるにつれて制御効果が向上し、ストロークは設定値の 15cm を越えない範囲で有効に制御されている。

$W=0.01$ (Fig. 5) と $W=1.0$ (Fig. 6) の制御結果を比較すれば、制御効果は殆ど同じであることが分かる。しかし、詳細に比較すれば、振動台の入力が大きいときは $W=0.01$ (Fig. 5) の方が制御効果が高く、入力が小さく自由振動状態のようにになると $W=1.0$ (Fig. 6) の方が制御効果が高いことが分かる。 $W=0.01$ のときはシステムの誤差を考慮する度合いが小さいため、応答の推定値が振動台入力によって殆ど決定される。このため、振動台入力が小さなときはモデル誤差の影響により推定精度が悪くなり、制御効果が落ちるものと考えられる。また、AMD は振幅が小さいときは摩擦等の影響により AMD のモデルの精度が悪くなる。このことも揺れの小さいときに制御効果が悪い原因だと考えられる。

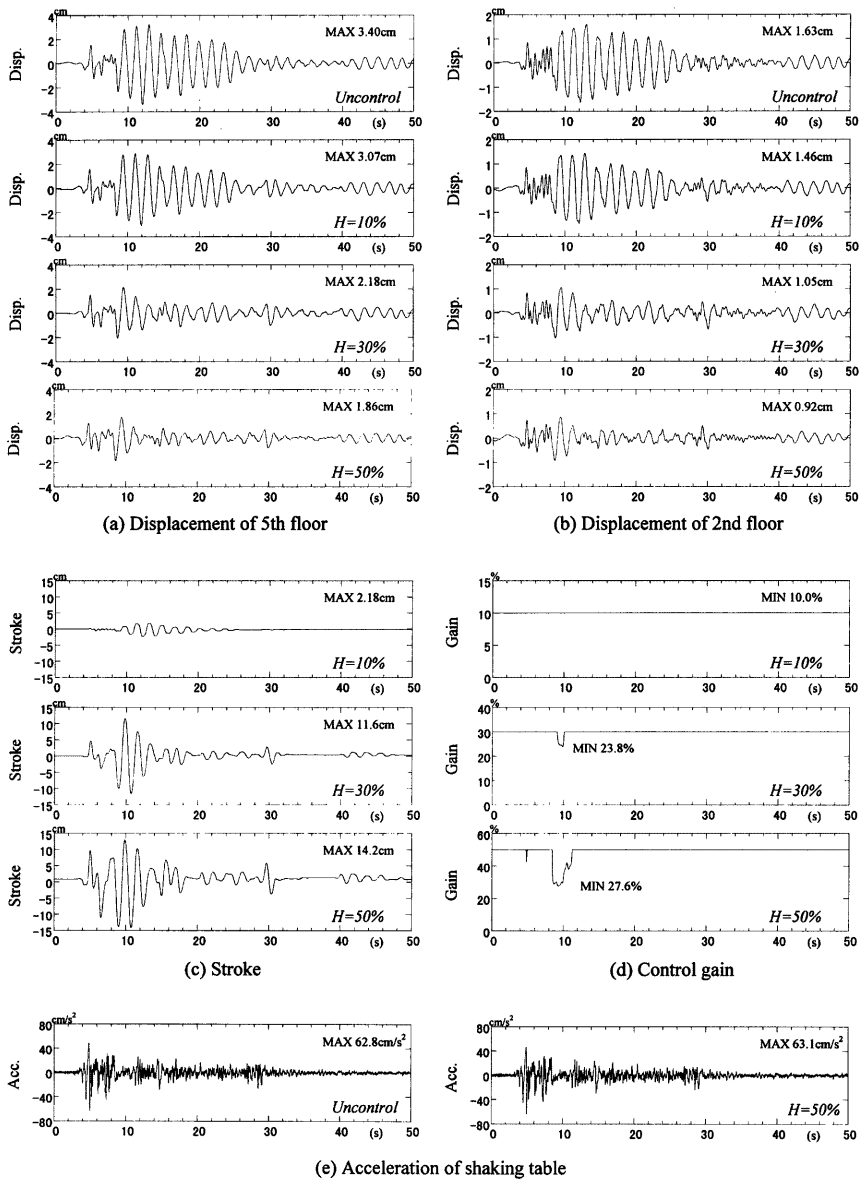
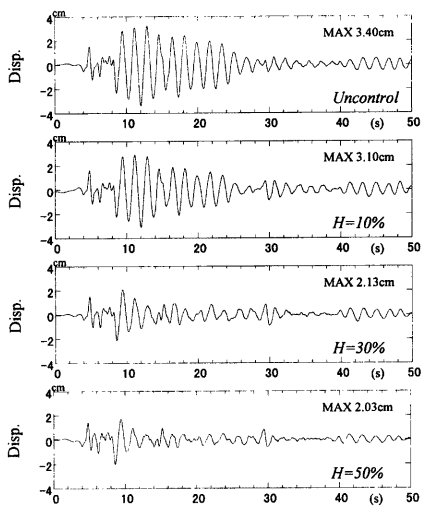
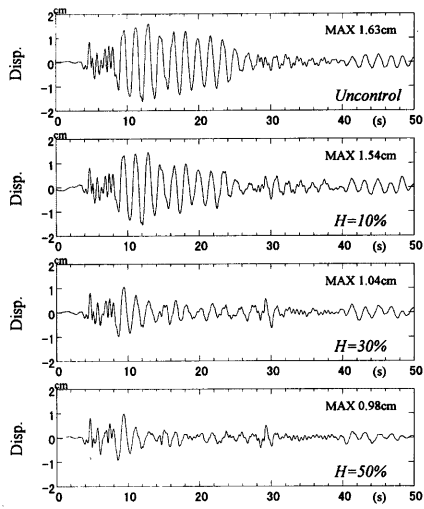


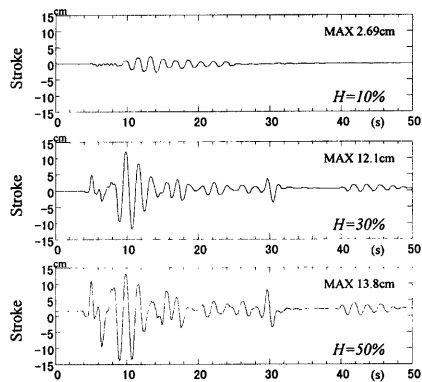
Fig. 5 Control results under El Centro NS 50cm/s² (W=0.01)



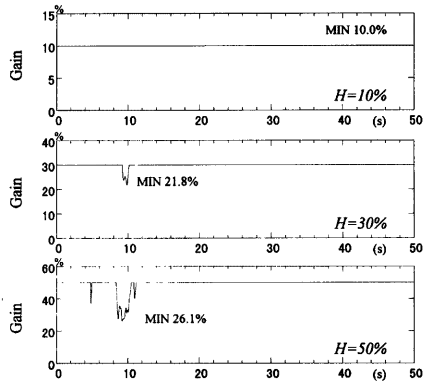
(a) Displacement of 5th floor



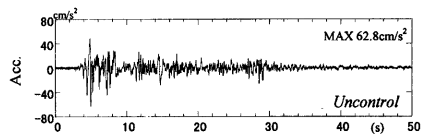
(b) Displacement of 2nd floor



(c) Stroke



(d) Control gain



(e) Acceleration of shaking table

Fig. 6 Control results under El Centro NS 50cm/s² (W=1.0)

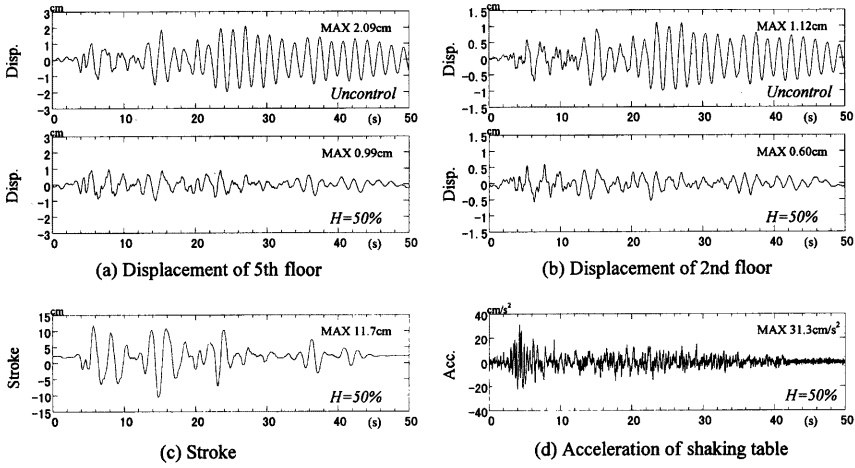


Fig. 7 Control results under Hachinohe NS 30cm/s² (W=1.0)

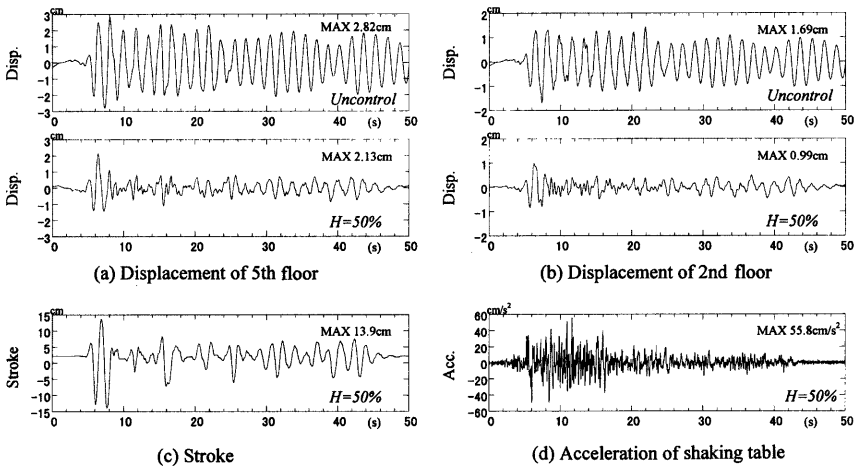


Fig. 8 Control results under Taft NS 50cm/s² (W=1.0)

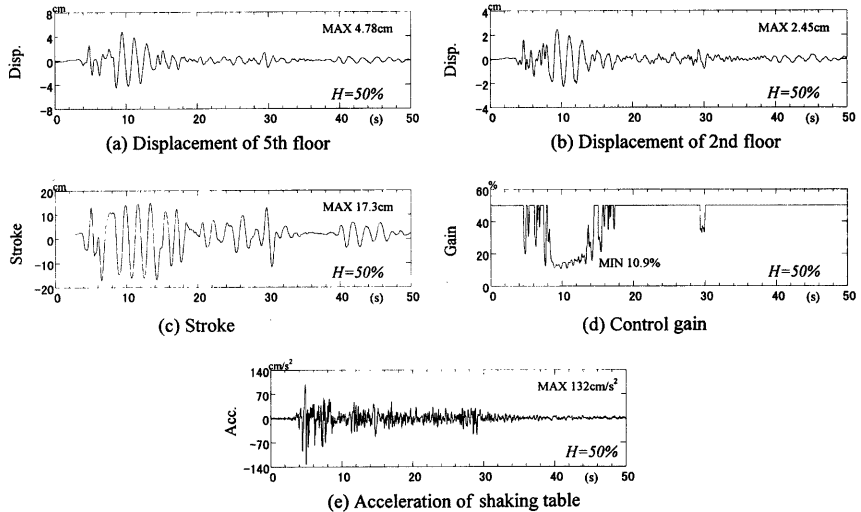


Fig. 9 Control results under El Centro NS 100cm/s² (W=1.0)

入力地震波の違いによる影響をみるために、Hachinohe NS 波を最大値が 30cm/s² になるよう比例倍したもの（以降、Hachinohe NS 30cm/s²）および Taft NS 波を最大値が 50cm/s² になるよう比例倍したもの（以降、Taft NS 50cm/s²）を用いて実験を行った。 $W=1.0$, $H_{max}=50\%$ の制御器に対する応答結果を Hachinohe NS 30cm/s² について Fig. 7 に、Taft NS 50cm/s² について Fig. 8 にそれぞれ示す。いずれの地震波に対してもストロークが設定値の 15cm を越えない範囲で有効に制御されている。

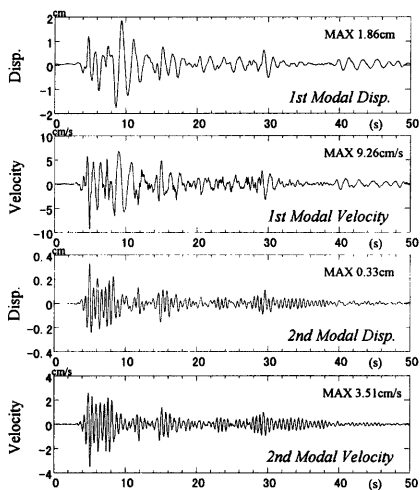
ストロークを考慮した制御のアルゴリズムの有効性をより明らかにするため、El Centro NS 100cm/s² に対する実験を行った。 $W=1.0$, $H_{max}=50\%$ としたときの結果を Fig. 9 に示す。Fig. 6 と比較して、入力が倍になったにも拘わらず、ゲインを調整することにより、ストロークは概ね 15cm におさまっている。なお、次節で述べるように、1 次モードに関するストローク推定値は完全に 15cm におさまっている。

4.3 観測器の推定結果

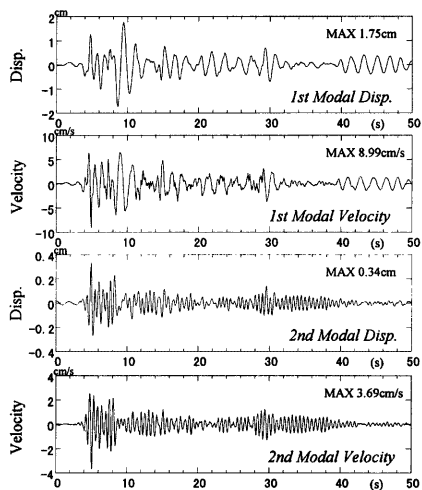
観測器による推定値の精度を確認するために、 $H_{max}=50\%$ の El Centro NS 50cm/s² に対する実験時推定値と、全層の観測値を使って 5 質点の同定モデルのモードマトリクスから計算した値を比較した。結果のうち、 $W=0.01$ に対するものを Fig. 10 に、 $W=1.0$ に

対するものを Fig. 11 に示す。5 層目のみを観測して推定した推定値と全層の観測値から求めた計算値は 1 次、2 次とも非常によく一致している。1 次モードには高次の影響が計算値にも見られる。これが制御によるものかどうかを調べるために、非制御時のデータに対し同様の計算を行ったが、Fig. 10(b), Fig. 11(b) と同様に高次の影響が見られた。従って、高次の影響は計算に用いた同定モデルの誤差によるものだと考えられる。Fig. 10 ($W=0.01$) と Fig. 11 ($W=1.0$) を比較すれば、Fig. 10 ($W=0.01$) では、1 次 2 次とも振幅の小さいところで応答を過小評価していることが分かる。一方、Fig. 11 ($W=1.0$) では、1 次の推定値に計算値に見られない高次モードが見られる。

Fig. 10 および Fig. 11 と同じ制御実験時におけるストロークに関する推定値を Fig. 12 に示す。ストロークは殆どが 1 次モードであることが分かる。このため、1 次モードのストロークは、Fig. 5 および Fig. 6 に示す観測されたストロークとほぼ一致しなければならない。しかし、ストロークの値が大きい所ではよく一致するものの、ストロークの値が小さいところでは差が大きい。これは、AMD 特性の同定誤差が原因であると考えられる。摩擦等の影響により、AMD の減衰項は実際は非線形になるが、今回の実験では、振幅 15cm 程度で等価になるような減衰係数を用いて同定を行っている。15cm 以下の振幅時に

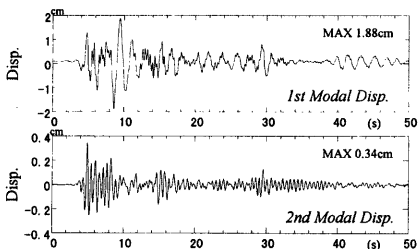


(a) Estimation during test

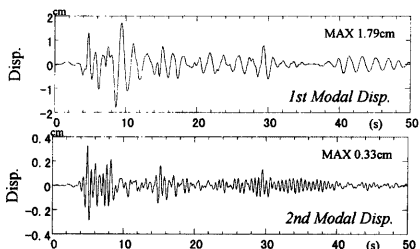


(b) Calculation based on 5.D.O.F. model

Fig. 10 Comparison between estimated values and calculated values (El Centro NS 50cm/s^2 ; $W=0.01$)

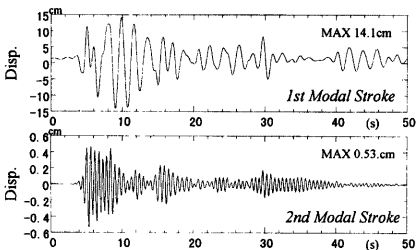


(a) Estimation during test

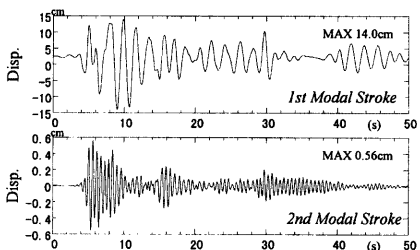


(b) Calculation based on 5.D.O.F. model

Fig. 11 Comparison between estimated values and calculated values (El Centro NS 50cm/s^2 ; $W=1.0$)



(a) $W=0.01$



(b) $W=1.0$

Fig. 12 Estimation of modal stroke under El Centro NS 50cm/s^2

は減衰を過小評価しているため、大きなストロークが推定されると考えられる。

El Centro NS 100cm/s²に対する実験時の1次モードに関するストローク推定値を Fig. 13 に示す。本制御アルゴリズムでは制御およびゲインの切り替えが全て各次の推定値に基づいて行われており、推定値は完全にストロークの制約条件を満たしている。しかし、上に述べたように、推定値と実測値には誤差があるため実測値は制約条件を満たさない可能性が大きい。このため、推定誤差を見込んで制限値を設定する必要がある。

4.4 吸収エネルギー

各モードでの制御効果を調べるために、AMDの制御力(=マス加速度×マス質量)と全層の観測値から計算によって求めた1次、2次および3次の5層目における速度を用いて、AMDが振動モデルから吸収したエネルギーを計算した。計算に用いたのは $H_{max}=50\%$ の El Centro NS 50cm/s² に対する結果である。 $W=0.01$ の場合の計算結果を Fig. 14 に、 $W=1.0$ の場合の計算結果を Fig. 15 に示す。両者とも1次および2次はエネルギーが吸収側であるが、3次モードは加振側になる。また、3次の加振エネルギーは

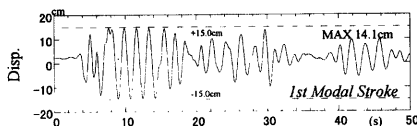


Fig. 13 Estimation of 1st modal stroke (El Centro NS 100cm/s²; $W=1.0$)

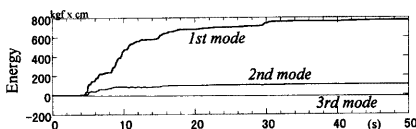


Fig. 14 Absorbed modal energy by AMD (El Centro NS 50cm/s²; $W=0.01$)

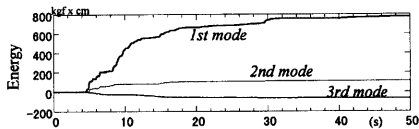
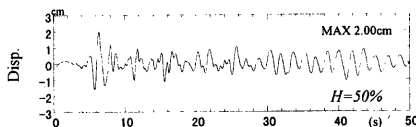
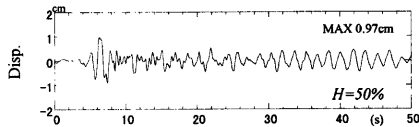


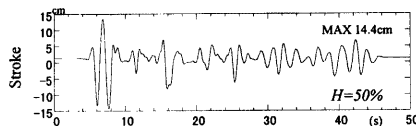
Fig. 15 Absorbed modal energy by AMD (El Centro NS 50cm/s²; $W=1.0$)



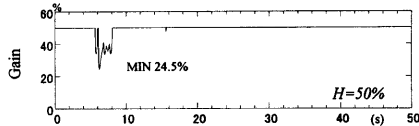
(a) Displacement of 5th floor



(b) Displacement of 2nd floor



(c) Stroke



(d) Control gain

Fig. 16 Control results under two directional input (Taft NS+EW 50cm/s²; $W=0.01$)

$W=0.01$ とした場合の方が小さい。これらの結果は、Table 2 および Table 3 に示す極の計算結果と対応する。

4.5 2方向制御

直交方向の揺れが制御に与える影響を調べるために、2方向同時入力・同時制御の実験を行った。地震波として Taft NS 50cm/s² と Taft EW 50cm/s² を各方向同時に入力した。 $W=0.01$ 、 $H_{max}=50\%$ とした実験結果のうち、Taft NS 50cm/s² を入力した方向の応答結果を Fig. 16 に示す。Fig. 8 とはシステムノイズの大きさ W が異なるが、建物の揺れおよびAMDのストロークはほぼ一致している。

5. まとめ

構造物の大地震時の制震を目的として、AMDの性能限界を考慮できる制御アルゴリズムについて定式化を行った。このアルゴリズムは各モードを個別に制御するため、ゲインの設定が容易であり、性能限界を考慮するために可変ゲインを適用する際にもきめ細かい設定が可能である。

この制御アルゴリズムを検証するために振動台実験を行った。振動モデルは1層約2tfの5層試験体で、積層ゴムを用いて長周期化(設計周期約2秒)を図っている。制御実験は全て、1次モードのストロークにのみに制約条件を与えた。複数の地震波を用いて制御実験を行ったが、いずれの場合も、AMDの活動度に従い自動的にゲインが切り替えられて、ストロークがほぼ制約値におさまることが確認できた。制御の際に、モードを分離するためにカルマンフィルターに基づく推定を行っているが、この推定値は計算値とよく一致した。ただし、ストロークの推定値は、小振幅時に実際よりも大きな推定値を与える。これはAMDの非線形動特性を線形に近似して用いているためだと考えられる。

可変ゲインの設定に用いた関数はかなり急激にゲインを落とす関数であることと、制御器設計時に高次モードを無視したために高次では若干加振側になることから、強い制御をかけると高次モードがAMDにより加振される。ただし、これがスビルオーバーにつながることは無かった。

システムノイズの大きさを変えて制御の様子を比較したところ、システムノイズを大きく設定した場合の方が、同定精度の影響を受けにくいことが確認できた。一方、無視したモードに与える影響も大きくなることが分かった。

本論の実験では、AMDの性能限界としてストロークのみを対象としたが、制御力等の性能限界を考

慮することも場合によっては必要である。今後、これらの検討を進めたい。

謝 辞

本研究の一部は、平成8年度～9年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)(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)によるものです。

振動台実験を行うにあたり、川崎重工業(株)の玉木利裕氏、加賀谷博昭氏にはAMD装置の設置、制御プログラムの作成に関し、京都大学防災研究所の市川信夫氏には振動台の操作に関し、多大なご協力を頂きました。

また、振動台モデルは、(株)竹中工務店の河本祐介氏および(株)本岡建設工業のご協力により設計・製作を行うことができました。

ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 相沢覚・大竹和夫・山本雅史・東武史・宮崎実・藤森智(1997): ポルテ水沢における風向風速特性と制振効果, 1997年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B 2, pp.937-938.
- 来田義弘, 三田彰(1992): ハイブリッドマスダンパに関する基礎的研究(その8), 1992年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.867-868.
- 小鹿紀英・坂本光雄・佐々木勝康・小堀鐸二(1994): アクティブ・マス・ドライバ(AMD)システム地震・強風観測記録, 1994年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.887-888.
- 藤山満・奥田浩文・稲葉学(1997): 可変ゲインを用いたAMDストロークサチュレーション制御に関する研究, 第5回運動と振動の制御シンポジウム, pp.46-49.
- 鈴木祥之・山本雅史・玉木利裕・加賀谷博昭・妻起煥, 荒木時彦(1997): 実大構造物のアクティブマスダンパによる制震実験(その2)制御則と制震効果, 京都大学防災研究所年報, 第40号, pp.95-106.
- 鈴木祥之・山本雅史: 実大構造物の地震応答加振システムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, (投稿中)。
- 田村和夫・三田彰・金子美香・前林和彦・小川雄一郎・稲田泰夫(1992): ハイブリッドマスダンパの高層建物への適用に関する研究, アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, pp.233-240.
- 中村佳也・田中清・大山秀美・石井勝・村越一也, 平澤光春(1992): 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, pp.249-256.
- 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), 日本建築学会構造系論文集, 第483号, pp.39-49.
- 花村浩嗣, 仁田佳宏, 西谷章(1997): AMDのストローク限界を考慮した可変ゲイン制御, 1997年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp.781-782.
- 羽生田信良(1993): 各論・各応用分野からみた制振手段の選択—高層ビル用制振装置, 油圧と空気圧, 日本油空圧学会, Vol.24(4), pp.75-80.
- 福島出・佐々木勝康・緑川功・柴田昭彦(1997): アクティブ二重動吸振器の高層建物への適用(その6) 風観測記録と制御効果, 1997年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp.935-936.
- 藤田隆文・鎌田崇義・正木信夫(1992): 多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの基礎的研究(第1報), 日本機械学会論文集(C編), 58巻, 545号, pp.87-91.
- 裏起煥・鈴木祥之・李恵・山本雅史(1998): 振動台による建物模型の同定・制震実験, 1998年度日本建築学会近畿支部研究報告集, (投稿中).
- 山本雅史・鈴木祥之・玉木利裕・加賀谷博昭・裏起煥, 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, pp.83-93.
- 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, 平成9年度日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, pp.141-144.
- 山本雅史・鈴木祥之: アクティブマスダンパーのストローク制約を考慮した極配置アルゴリズムによる実大構造物の制震に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, (投稿中).
- Fujita, T., Kamada, T., Teramoto, T., Kitamura, H., Suizu, Y., Masaki N., Kanno, T. and Kawachi, H. (1994): Application of Hybrid Mass Damper using Hydraulic Actuator and Multistage Rubber Bearing to High-rise Building, *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*, Vol. 3, FA4:53-62.
- Iemura, H. and Igarashi, A. (1996): Nonlinear Active Control Experiment of a Real Size Frame Structure, *Workshop Papers of the Second International Workshop on Structural Control*, pp.241-252.
- 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*, Vol.2, pp.1335-1340.
- Spencer Jr., B. F. and Sain, M. K. (1997): Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, *Control Systems*, IEEE, pp.19-35, 1997.12.
- Suzuki, Y., Bae, Gi-Hwan, Araki, T., Yamamoto, M., Tamaki, T. and Kagaya, H. (1997): Structural Control Experiments of Full-Scale Specimen Frame using LQ and LQG Control System, *Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering*, Vol.2, pp.1323-1328.
- 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*, Vol.2, pp.1329-1334.
- Yamamoto, M., Higashino, M., Toyama, K. and Aizawa S. (1998): Five Years of Wind and Earthquake Observation Results from a Building with AMD, *Proceedings of the First Structural Engineers World Congress* (under submitting).

Shaking Table Tests on Structural Control by Active Mass Dampers

Masashi YAMAMOTO* **, Yoshiyuki SUZUKI, Gi-Hwan BAE*, Tokihiko ARAKI* and Hui LI***

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Takenaka Corporation

***Harbin University of Civil Engineering and Architecture

Synopsis

In order to apply the Active Mass Damper (AMD) to seismic response control of building structures subjected to big earthquakes, an algorithm that can control the AMD under consideration of its capacities is essential. In this paper, the formulation of such algorithm is described and the performance of the proposed algorithm is confirmed by shaking table tests using a building structural model with the AMDs. In this algorithm, observed responses are separated into modal responses and variable gain control based on the pole assignment method is then executed for each mode by referring the activity of the AMD. The results of shaking table tests demonstrate that the algorithm is effective to control the AMD considering its stroke limitation.

Keywords: Seismic response control; Active mass damper; Shaking table test; Variable gain; Control algorithm