

可変ゲイン制御による大地震を対象とした制震システムの実大構造フレーム実験

家村浩和¹・五十嵐晃²・塩見豪³・井上豊⁴・坂本光雄⁵

¹フェロー会員 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

³学生会員 京都大学大学院生 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-01 京都市左京区吉田本町)

⁴大阪大学教授 工学部建築工学科 (〒 565 吹田市山田丘 2-1)

⁵鹿島小堀研究室部長 (〒 107 東京都港区赤坂 6-5-30 KIビル)

大地震に対する制震システムにおいては、入力レベルに関わらず装置の性能制約範囲を超えない制御を実現する必要がある。特にアクティブマスダンパー装置における補助質量の変位制約問題を解決するために提案されている非線型可変ゲイン制御の実用性を検証するため、AMD 装置を実物大構造フレームに実装した実験を行った。可変ゲイン制御アルゴリズムにより十分な制震効果を確保しつつ、装置の能力を有効に用いた制御が実現されることが示された。

Key Words : AMD, seismic response control, variable gain control, full-scale multi-story steel frame, experimental study

1. 序説

大容量かつダイナミックレンジの広い、インテリジェントな制震構造システムを産学の英知を結集して開発し、各種構造物の地震時安全性を飛躍的に向上させることを目的として、大地震を対象としたインテリジェント制震構造システムの開発のための産学共同研究プロジェクトが日本学術振興会支援事業として行われた。このプロジェクトにおける構造物モデル制震実験として、京都大学防災研究所内の実大 5 層鉄骨フレームに AMD 制震装置および加振装置を設置した検証実験が行われた。本論文は、検証実験の概要とその結果に基づき、可変ゲイン制御の実大構造物への適用について述べるものである。大地震時における制震システムにおいて問題となると考えられるのは、制御力またはマスダンパー装置の工学的な制約によって引き起こされる問題である。すなわち、小さなレベルの地震を想定して制震システムを設計した場合、大地震時にそれらの設計値を超えた性能を装置に要求する事になれば、装置に損傷を与えたり、あるいは事実上それらを越えないように動作を停止させるなどの機構が動作することになるため、制震装置は動作が期待できないと言う事態が発生することが十分考えられる。従って、大地震時における制震装置に関する重要な検討項目として、いかなる入力レベルにおいても装置の性能制約を超えないような制御が行われる事が考慮されていることを挙げる事ができる。

本実験で用いた制御アルゴリズムにおいてはアクティブマスダンパー装置の補助質量の変位に関する制約に注目することとした。補助質量の変位は、実用上一般にアクティブマスダンパー装置を設置する空間的スペースに大きく制約され、それが大いに制震装置の導入に当たっての制約となる場合も少なくないと考えられる。一方、これまでのマスダンパー型の制振装置に対する補助質量の変位は、制御パラメータの試行錯誤の過程において結果的な応答評価によって評価するというアプローチを取る場合が多く、これが制振装置の設計に当たっての陽な制約である場合には設計に当たってパラメータの決定に非常に手間がかかることになる。この2つの問題点を解決するために、ここでは可変ゲインを用いるアプローチによる非線形制御を使用することとした。この方法を用いることにより、大地震時におけるアクティブマスダンパーの安定した動作を確保することが出来ると共に、パラメータを補助質量の可動範囲制約値により直接指定することが出来るため、試行錯誤を経ずに特性値を決定することが出来るという利点を有している。

ここで用いる制御アルゴリズムは数値シミュレーションおよび模型実験によりその特質が既にある程度明らかにされているが^{(1),(2)}、本実験においては、これを試験体フレームのケースに対する適用性の検証を行い、具体的には正弦波加振時および模擬的な地震荷重入力時の制振効果について検討、さらに従来の LQ 制御との比較を行い、可変ゲイン制御の利点を実証的に明らか

表-1 試験体フレーム緒元

| | | | |
|------|---|--------|-----------------|
| 部材断面 | 柱 | 1,2階 | H-400x400x12x19 |
| | | 3,4,5階 | H-400x400x9x12 |
| | 梁 | 外周長辺 | H-300x500x9x14 |
| | | 外周短辺 | H-200x500x9x12 |
| | | 中央短辺 | H-250x500x9x12 |
| 各階重量 | | 約30ton | |
| 長辺全長 | | 15.0m | |
| 短辺全長 | | 3.75m | |
| 高さ | | 17.22m | |

表-2 固有値解析結果

| | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| natural frequency (rad/sec) | | | | |
| 12.91415 | 39.44363 | 69.63371 | 103.56248 | 132.03842 |
| eigen vector | | | | |
| 3.60250 | 3.23608 | 2.71917 | 1.78886 | 0.57562 |
| 3.25325 | 0.73658 | -2.31908 | -3.70925 | -1.67387 |
| 2.59240 | -2.28587 | -2.87896 | 2.38190 | 2.74895 |
| 1.68051 | -3.48643 | 1.86203 | 1.21199 | -3.58324 |
| 0.77084 | -2.20731 | 2.93552 | -2.98694 | 3.03156 |

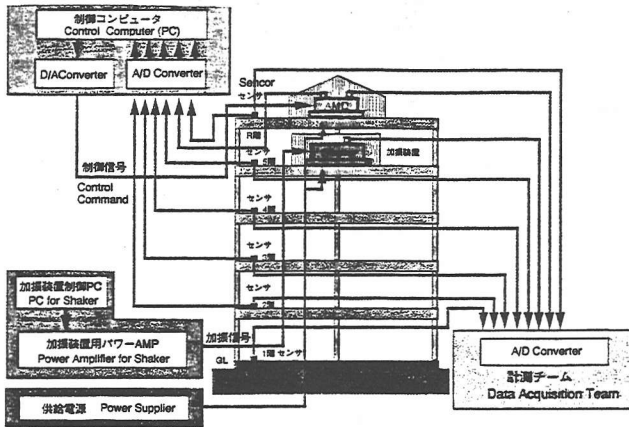


図-1 実験の全体構成

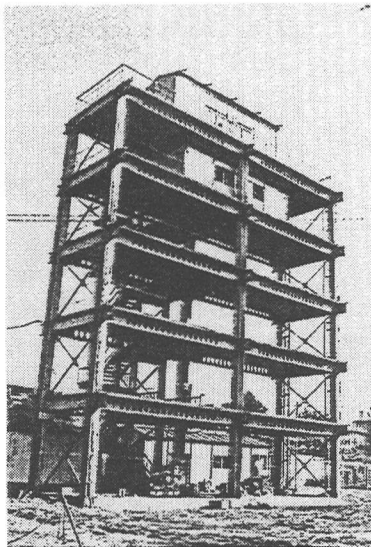


図-2 試験体フレーム

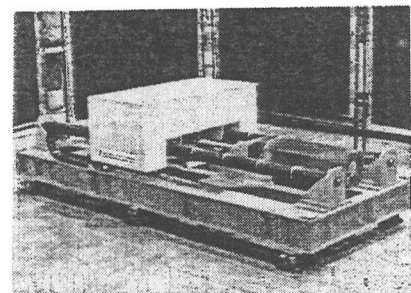


図-3 制震装置 (AMD)

することを目的とした。

2. 実験システムと実大構造フレーム

(1) 実験システムの全体概要

実験の全体構成を図1に示す。実験は試験体の長辺方向とし、ランダム波加振を可能とするためAMD装置と同等の制御性を持つ加振装置を用い、これを5階に設置している。制御装置はAMDシステムをR階に設置する。試験体フレームの応答観測値と制御信号作成用の観測値は、センサーを共用することとするが、コンピュータへの出力はそれぞれ独立とし、各々の信号はお互い干渉しないようにする。

(2) 試験体フレームと固有値解析

京都大学防災研究所内の実大5層(1×2スパン)鉄骨フレームを図2に示す。また、試験体フレームの諸元を表1に示す。試験体の総重量は約150tであり、有効質量に換算した値は約75tである。これに対し、AMD装置の駆動部質量は約2tであり、質量比は約2.5%である。

また試験体フレームの固有値解析を行った結果を表2に示す。得られた1次から3次までの固有振動数は観測結果と良い一致を示す。

(3) AMD装置、加振装置と計測装置

制御実験用のAMD装置は汎用性の高さが要求される。AMD装置のばね定数は最低限必要な小さい値と

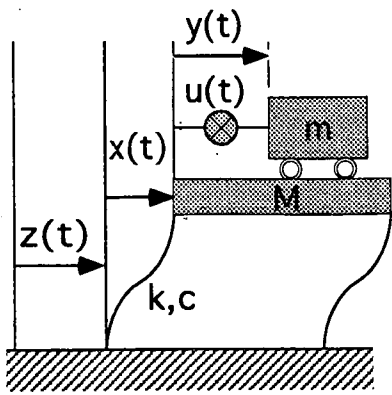


図-4 解析モデル

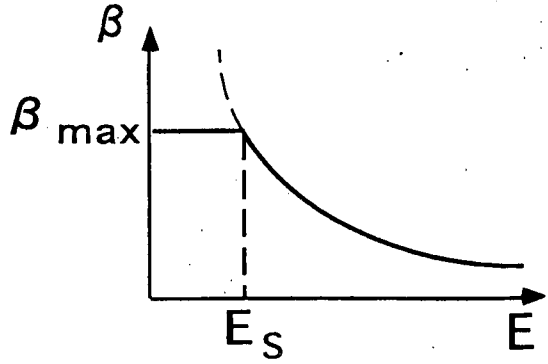


図-5 可変制御ゲインと系の振動エネルギーの関係

し、付加質量は大きな入力信号を対象としているため、 $2t$ と多少大き目の値を採用した。ストロークは 50cm である。AMD 装置外形を図 3 に示す。

加振装置は、AMD 装置と同じタイプの装置で、重量は $5t$ 、ストロークは 100cm である。これは、実験の主要項目に地震応答波などのランダム波加振に対する制御性能の検証があるため、ランダム波加振を容易にするためである。

計測量は各階絶対加速度、速度、および AMD 装置のストローク、絶対加速度、速度ならびに、加振装置の付加質量体のストローク、絶対加速度、速度である。

3. 変位制約を考慮した非線形制御則

まず、図 4 に示す 1 自由度の構造物モデルに付加質量の駆動装置 (AMD) が乗る系について、制御則を与えた時の制震効果と付加質量の変位量について考察する。

ここでは重錘の速度をコントロールする次の形式の制御則を仮定する。

$$\text{重錘の駆動速度} = \beta \times \text{構造物の相対変位} \quad (1)$$

β は制御ゲインであり、系の応答状態などによって変化するものとする (後で詳しく述べる)。それぞれについて、まず入力地動が構造物の固有振動数に等しい振動数の調和外力であるときの構造物の応答変位を導く。すなわち共振曲線のピークの位置の状態に着目して、制振効果の尺度とする。(共振曲線のピークを下げることに相当)

(1) 補助マスの変位飽和による制御則

図 4 において、構造物の地盤に対する相対変位を $x(t)$ 、マスの構造物に対する相対変位を $y(t)$ 、地盤の変位を $z(t)$ とし、 ω_0 (構造物の固有振動数) に等しい振動数の調和変位入力による定常応答状態を考え、

$$x(t) = X_0 e^{i\omega_0 t}, y(t) = Y_0 e^{i\omega_0 t}, z(t) = Z_0 e^{i\omega_0 t} \text{ と置}$$

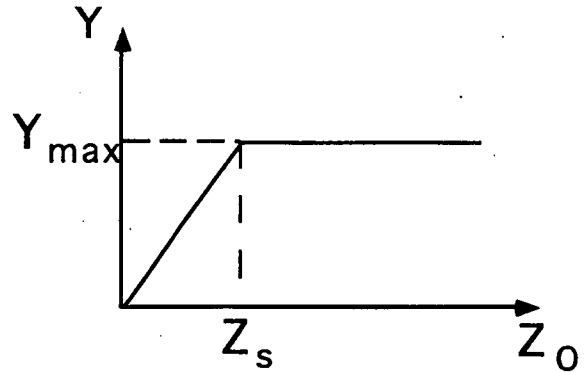


図-6 補助マス変位振幅と入力地動変位の関係

く。運動方程式は、

$$M(\ddot{x} + \ddot{z}) + c\dot{x} + kx = -u \quad (\text{構造物}) \quad (2)$$

$$m(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}) = u \quad (\text{マス}) \quad (3)$$

ここで、 $\dot{y} = \beta x$ として、上式に代入し、整理すると、

$$\left| \frac{X_0}{Z_0} \right| = \frac{1 + \mu}{\sqrt{\mu^2 + (2h + \mu\beta/\omega_0)^2}} \quad (4)$$

$$\left| \frac{Y_0}{Z_0} \right| = \frac{\beta}{\omega_0} \frac{1 + \mu}{\sqrt{\mu^2 + (2h + \mu\beta/\omega_0)^2}} \quad (5)$$

ここに、 $\mu = m/M$ (質量比)、 $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ (固有振動数)、 h : 減衰定数 としている。

ところで、望ましい制御則は、入力の大きさにかかわらず、マスが構造上可能な最大値動けるような、すなわち Z_0 にかかわらず、 $|Y_0| = Y_{max}$ となるものである。ここに、 Y_{max} は指定されたマスの最大変位である。そこでそのような制御をゲイン β が構造物の振動エネルギー

$$E = \frac{1}{2} k (Re(x))^2 + \frac{1}{2} M (Re(\dot{x}))^2$$

の関数として表されると仮定するとこれまで挙げた諸式を用いることにより、

$$\beta = \frac{Y_{max} \omega_0 \sqrt{k}}{\sqrt{2E}} \quad (6)$$

なる関係を誘導することができる。これにより、構造物のエネルギーが大きく入力が大きいときには β の値を

小さく、エネルギーが小さく入力が小さいときには β の値を大きくすることにより、補助マスの振幅を一定に保つとともに可能な限り建造物の振動を速く減衰させる有効な制御が実現できることが予想される。

ただし、制御ゲイン β の値は過大とならないよう適切な上限値 β_{max} を設定するものとする。これは、制御ゲイン β と振動エネルギー E 、定常応答時の補助マスの変位振幅と入力地動振幅の関係がそれぞれ図5、図6の実線のような形で与えることを意味する。

(2) 補助マス変位による補正項の導入

前節(1)式の制御則においては、補助マスの変位 y そのものは制御に反映されないため、このまま制御系に実装すると補助マスの中立位置が可動範囲の中心から遊離していく可能性がある。また、非定常な地震動などを入力として用いると、補助マスの変位が最初に仮定した許容振幅よりやや大きく現れる傾向がある。これらの事態を防ぐため、(1)式に補助マス変位による補正項を加え、次式で示される形式の制御則に修正する。

$$\dot{y} = \beta x - \alpha y \quad (7)$$

ここに α は定数ゲイン($\alpha > 0$)である。

以上の結果をまとめると、制御則は次式のように表すことができる。

$$\dot{y} = \beta x = \begin{cases} \frac{Y_{max}\omega_0\sqrt{k}}{\sqrt{2E}}x - \alpha y & (E > E_s) \\ \frac{Y_{max}\omega_0\sqrt{k}}{\sqrt{2E_s}}x - \alpha y & (0 \leq E \leq E_s) \end{cases} \quad (8)$$

4. 実験モデルに対する制御則の適用

(1) モーダルフィルタによる1自由度系への変換

前項までにおいて与えられた可変ゲイン制御は1自由度系を対象としているのに対し、実験用フレームは5自由度せん断モデルであるので、その1次モードのみを対象として制御を行うこととする。

各階変位を上から x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 とし、 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ とする。またモーダルマトリックスを $\Phi = (\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4 \ \phi_5)$ とする。ここで $x = \Phi\eta$ とする。(ただし $\eta = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5)$)

これらを用いてモード変換を行い、実際のモデルに対しての運動方程式は以下の様になる。

$$M_1(\ddot{\eta}_1 + \ddot{z}) + c_1\dot{\eta}_1 + k_1\eta_1 = -u \quad (\text{建造物})$$

$$m(\ddot{x}_1 + \ddot{y} + \ddot{z}) = u \quad (\text{マス})$$

上式と2章で述べたモデルの運動方程式とを見比べると、 η_1 と \bar{x}_1 、すなわち η_1 と x_1 が一致していなければならない。この条件を満足するようにモーダルフィルタを定義する。

まず1次固有モードベクトル ϕ_1 を第1成分が1となるように定義する。この時の、一次モード質量と一次モード剛性はそれぞれ

$$M_1 = \phi_1^T M \phi_1 \quad k_1 = \phi_1^T K \phi_1$$

により与えられる。さらに、

$$F = \frac{\phi_1}{\|\phi_1\|^2}$$

なるベクトル F を定めれば、

$$\eta_1 = F^T x$$

により1次モード応答 η_1 を近似的に求めることができる。この η_1 は $x = x_1\phi_1$ の場合に条件 $\eta_1 = x_1$ を満足する。したがって、 F は求めるモーダルフィルタである。

実験に際しては、各階に設置されたセンサ出力に基づく計測値に対して、上述のモーダルフィルタを適用して可変ゲイン制御を実装した。

(2) 速度計測値の数値積分

本研究で用いた可変ゲイン制御においては、計測量として建造物の1次モード変位が必要である。試験体フレームの各階に設置された速度および絶対加速度センサーによる計測値は、アナログチャンネルを通じて制御用計算機に送られる。したがって、制御に必要な建造物変位データは、リアルタイムで取得された速度計測値を数値積分する事により得ることとした。

速度計測値に単純に台形公式等による数値積分を適用して変位データを得ることを試みると、積分結果である変位値が、積分ステップの進行につれ実際の変位値から遊離していくことがしばしば経験される。これは速度計測データ中の低周波数成分の信頼性が十分でないことに起因している。このため、速度計測値の数値積分に当たっては積分値の遊離・発散に対する対策を講じることが必要となった。

速度計測値の数値積分は、各時刻ステップ n において次のような手順を適用することより行った。

(a) 計測系より取得した速度計測値 v_n よりセンサー初期値 v_0 (静止状態での100回の計測値の平均値)を減算することにより、DCバイアス成分を取り除く。すなわち、

$$\hat{v}_n = v_n - v_0$$

(b) さらに、次式により速度計測値を修正する。

$$\bar{v}_n = \hat{v}_n - \epsilon \bar{x}_{n-1}$$

ここに ϵ は正の微小な係数であり、 \bar{x}_{n-1} は前時刻ステップにおける積分値(すなわち算出された変位)である。

(c) 得られた \tilde{v}_n に対して台形公式を適用して積分値 \tilde{x}_n を計算する。

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{n-1} + \frac{\Delta t}{2}(\tilde{v}_n + \tilde{v}_{n-1})$$

ここに、 Δt は積分のステップ幅である。上式により得られる積分値 \tilde{x}_n を構造物変位として制御に使用する。

上記の積分手順において注意すべき点は、係数 ϵ の適切な設定である。本来の数値積分の意味からは $\epsilon = 0$ であり、可能な限り小さな値を用いる必要があるが、計測データの品質によっては、積分値の発散傾向を防ぐために ϵ の値の調整を行う必要がある。

係数 ϵ の値が積分値に与える影響を次のような考え方により検討した。まず、積分ステップ幅 Δt が十分小さく、 $\tilde{x}_n \cong \tilde{x}_{n-1}$ が成立していると仮定する。このとき、計測データおよび積分値を連続関数とみなせば、 $\tilde{x}(t)$ および $\tilde{v}(t)$ の間には次式の様な関係が近似的に成り立っていると仮定することができる。

$$\ddot{\tilde{x}} = \tilde{v} - \epsilon \tilde{x}$$

上式の両辺のラプラス変換より、次式の関係を得る。

$$\tilde{X}(i\omega) = \frac{1}{\epsilon + i\omega} \tilde{V}(i\omega) = \frac{\omega^2}{\epsilon^2 + \omega^2} \left(\frac{\epsilon}{\omega^2} + \frac{1}{i\omega} \right) \tilde{V}(i\omega) \quad (9)$$

実際の変位値 x は速度値 v の積分であるから、周波数領域においては

$$X(i\omega) = \frac{1}{i\omega} V(i\omega)$$

という関係が成り立つ。したがって係数 ϵ を使用することにより積分により得られる変位値 \tilde{x}_n と実際の値 x の間には振幅および位相について相違が生じる。

ここで、制御を試験体フレームの1次モード応答に対して適用することから、1次固有振動数である $\omega = 12.914(\text{rad/sec})$ の周波数成分が構造物応答において卓越すると仮定する。補正係数を $\epsilon = 1.0(1/\text{sec})$ とすると、上式より大まかな評価としては

$$\frac{\omega^2}{\epsilon^2 + \omega^2} = 0.994 \quad \frac{\epsilon}{\omega} = 0.077$$

より一次固有振動数における振幅の値は真値の0.994倍、位相が $0.077(\text{rad}) = 4.4^\circ$ 程度ずれることが推計できる。この結果より、数値積分において $\epsilon = 1.0(1/\text{sec})$ の値を用いても、振幅・位相に及ぼす影響は重大ではないと考えられる。

5. 制震実験結果

制御用コンピュータの実験プログラムに本制御則を組み込み制震実験を行った。入力加振波として、正弦波およびEl-Centro波を用いた。はじめに制御則のパラメーターを固定した場合について示し、次にパラ

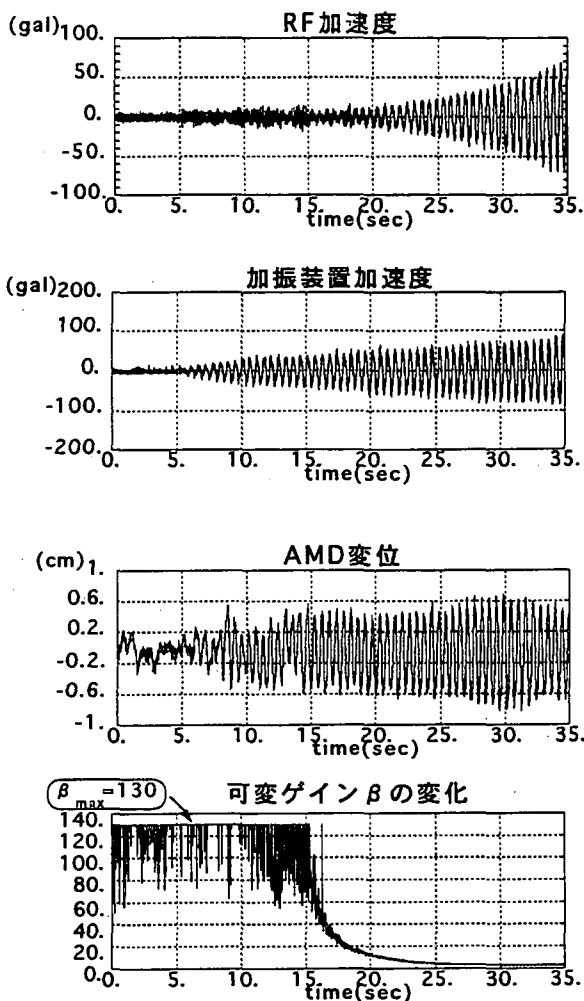


図-7 漸増正弦波加振

メーターを変化させた場合、最後にLQ制御則との比較について示す。

(1) 漸増正弦波加振

正弦波として、周波数を実験フレームの1次固有周波数である 1.77Hz としたものを用いて、ファンクションジェネレーターにより振幅を徐々に増加させた漸増正弦波を用いた。

応答結果を図7に示す。 $(Y_{\text{max}} = 0.3\text{cm}, \beta_{\text{max}} = 130, \alpha = 6.0)$ を用いた。

これを見ると15秒付近まで加振装置加速度の増加に伴ってRF(最上階)加速度やAMD変位も増加しているが、それ以降は、加振装置加速度は増加しているにもかかわらずAMD変位はほぼ一定のストロークで振動している。ここから入力が入力が所定の大きさに達するまでは線形制御であるが、その入力レベルに達すると非線形制御域に入り、制御ゲイン β が振動エネルギーに従って変化し、AMD変位は一定に保たれていることがわかる。

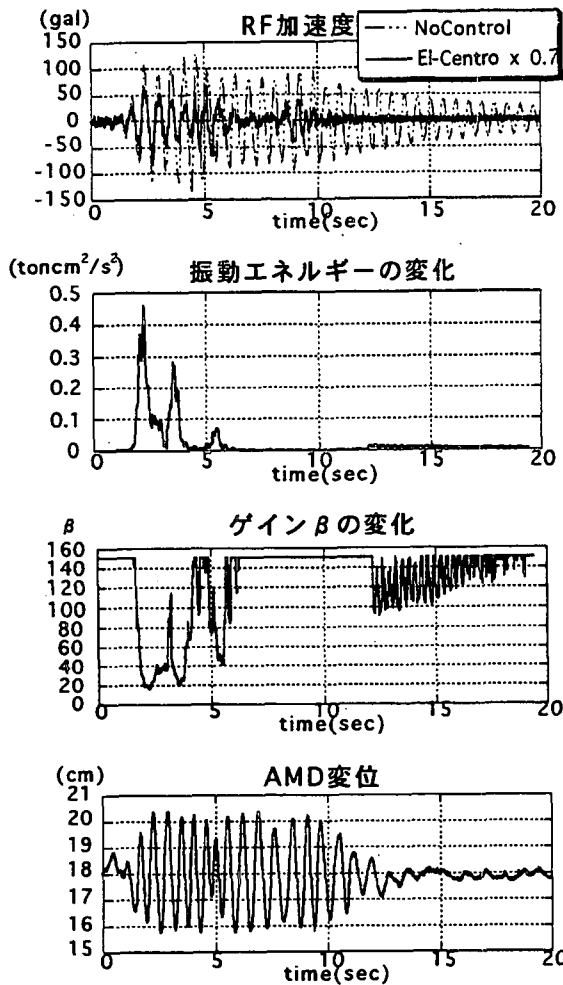


図-8 El-Centro 波加振 (×0.7)

(2) 地震波による加振

次に加振装置制御用コンピューターを用いて地震波を入力した。地震波としては、El-Centro 記録を用いた。実験結果を図 8, 図 9 に示す。 $(Y_{maz} = 1\text{cm}, \beta_{maz} = 150, \alpha = 8.34)$ 図 8 は El-Centro 記録に対し 0.7 倍にスケールを行ったものを入力として用い、無制震の場合と制震を行った場合の応答を比較したものである。RF 加速度を見ると、入力値の大きくなる 4 秒付近では制震効果が他の部分に比べ少々低下している。これは、AMD 変位を制限しているためである。

図 9 は El-Centro 波を 50gal レベルにスケールしたのに対し、その 0.5 倍、1.0 倍の 2 つの場合の入力波を用いたときの応答値を比較したものである。加振装置加速度と RF 加速度は、1.0 倍のケースが 0.5 倍のケースの約 2 倍となっているのに対し、AMD 変位の振幅は両方の場合で変わらない。すなわち入力レベルにかかわらず AMD の可動範囲は一定に保たれていることを意味する。

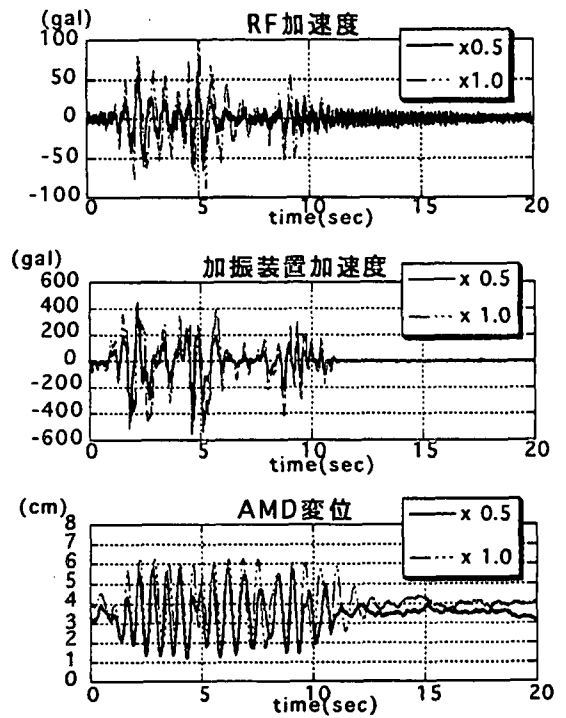


図-9 El-Centro 波加振 (×0.5, 1.0)

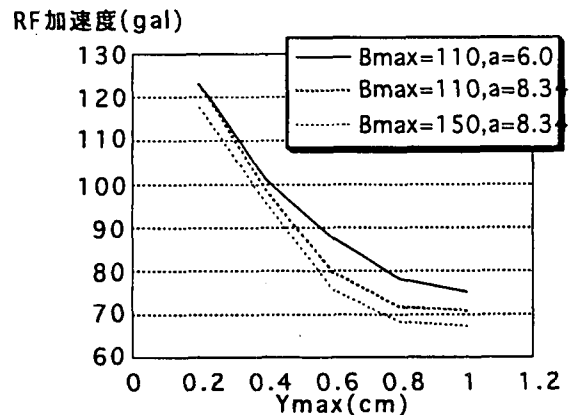


図-10 Y_{maz} と RF 加速度最大値の関係

(3) パラメーターの変化による結果

前節までにおいて、様々な加振入力のもとでの本制御則の有効性を検討したが、ここではパラメーターを変化させた場合の応答結果を比較していくこととする。

図 10 に $Y_{maz} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の 5 種類と、 $\beta = 110, 150$ の 2 種類、 $\alpha = 6.0, 8.34$ の 2 種類の値に変化させ、 Y_{maz} を横軸に、RF 加速度応答の最大値を縦軸にとりプロットしたものを示す。

まず、 Y_{maz} が大きいほど RF 加速度応答は低減するが、その低減率は一定ではなく、徐々に減少していることがわかる。 Y_{maz} が大きい場合には、その分線形領域の大きさが増加するため、制御ゲイン $\beta = \beta_{maz}$ である時間が長くなる。このため、制震効果の差が次第に減

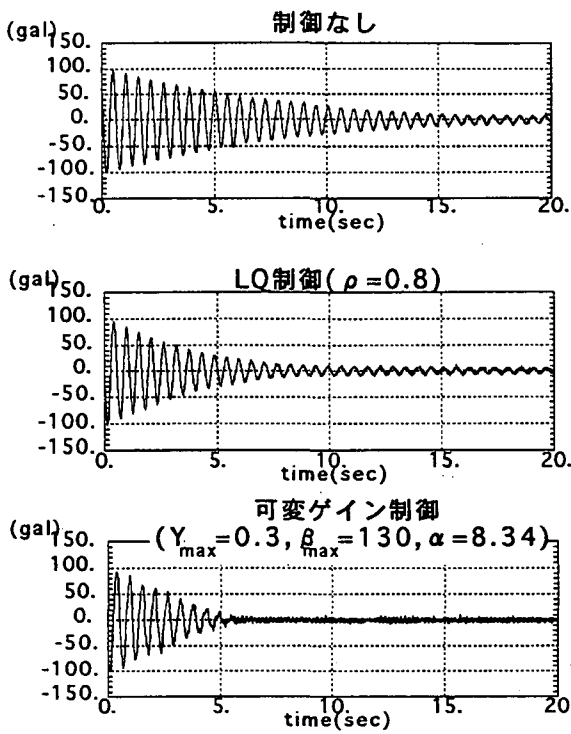


図-11 LQ 制御則との比較 (RF 加速度)

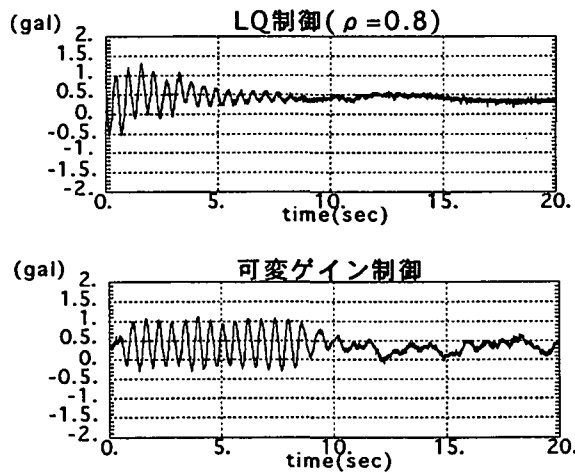


図-12 LQ 制御則との比較 (AMD 変位)

少していくためであると考えられる。 β_{max} の変化に対しては、予想通り $\beta_{max} = 110$ の場合より $\beta_{max} = 150$ の場合の方が制御効果が增大している。 α の変化については、図に示される通り $\alpha = 8.34$ の場合の方が制震効果は良好である。 α が、ある値に達するまでは、共振周波数以外の周波数の影響を低減しつつ共振周波数では制震効果を上げ AMD の振幅も増加させる場合があることが判明している。 α の値の検討にあたっては、このような効果を考慮に入れていくことが適切であることを示す例であると考えられる。

(4) LQ 制御則との比較

本節では本制御則と、線形制御として広く用いられている最適レギュレータ法 (LQ 制御則) とを比較について述べる。本実験フレームについて運動方程式を以下に示す。

$$M\ddot{\mathbf{y}} + C\dot{\mathbf{y}} + K\mathbf{y} = D\mathbf{u} - M\ddot{\mathbf{z}}$$

\mathbf{y} : AMD を含めた変位ベクトル (今回の場合 6 次元)

D : 制御の形式に対応した行列 $(-1, 1, 0, 0, 0, 0)^T$

\mathbf{u} : 制御力ベクトル (1 次元)

ここで次式で与えられる評価関数 J を最小にするような制御を与える。

$$J = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{2} \dot{\mathbf{y}}^T M \dot{\mathbf{y}} + \frac{1}{2} \mathbf{y}^T K \mathbf{y} + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) dt \rightarrow \min$$

この系に対し、Riccati 方程式を解くと最終的に評価関数を最小とするような $\mathbf{u}(t)$ はフィードバックゲイン F を定義すれば

$$\mathbf{u}(t) = F\mathbf{x}(t)$$

と書き表せる。(ただし $\mathbf{x} = (\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}})$ 本実験では 1 行 12 列) $\rho = 0.8$ としてゲインを求め、自由振動実験を行った。図 11 に RF 加速度、図 12 に AMD 変位の応答結果を示す。比較のために本制御則 (可変ゲイン制御) による結果も併せて示している。いずれの場合も、AMD 変位振幅は最初には変わらないが、LQ 制御では RF 加速度が低減していくとともに減衰しているのに対し、可変ゲイン制御の場合は、10 秒近くまでその振幅のまま振動している。そのために RF 加速度は、LQ 制御則に比べて、振動が圧倒的に速く減衰していることがわかる。すなわち、この実験では可変ゲイン制御の方が有効に AMD の可動範囲を利用しながら、構造物の振動をより速く低減しているということを実証しているものである。

(5) 周波数応答特性

様々な周波数の正弦波を入力として用いた試験を行い、得られた応答振幅をプロットすることにより、周波数特性を求めた結果を図 13 に示す。図 13 は横軸に周波数、縦軸には RF 加速度出力最大値を加振装置加速度出力最大値で除したものを示している。

無制御の場合、可変ゲイン制御則を用いた場合 ($\alpha = 6.0, 8.34$)、LQ 制御の場合 ($\rho = 0.8$) の 4 通りについてプロットした。図に示されているように、可変ゲイン制御の場合、構造物の 1 次固有振動数 (1.77Hz) 付近では制震効果は大きいのにに対し、それ以外の部分では無制御の場合に比べ、応答値がわずかに増加している。本制御則が 1 次モード振動に対するものであることも一因と考えられる。LQ 制御に関しては、1 次固有振動数付近でも可変ゲイン制御ほど顕著な制震効果は見られ

R階/加振装置
(加速度)

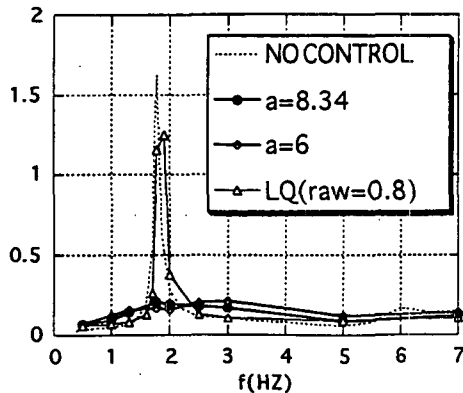


図-13 周波数応答特性

ない。ここで用いたよりも小さな ρ の値を指定して制震効果を上げようとした場合、AMDの振幅が徐々に大きくなり不安定な挙動を示したため、これ以上の制震効果は得られなかった。これらの結果から、今後の課題として更に高次付近の影響も考慮した制御則を検討することが必要であると考えられる。

6. 結論

本論文では、京都大学防災研究所内の実大5層鉄骨フレームにAMD制震装置を設置した検証実験の概要と実験結果に基づく可変ゲイン制御の実大構造物への適用性について述べた。提案する可変ゲイン制御則は、正弦波および地震波入力において補助質量の可動範囲を有効に使い、またLQ制御よりも優れた制震性能を実現することができた。

謝辞： 本研究は、日本学術振興会・京都大学防災研究所支援事業の産学共同研究プロジェクト「大地震を対象としたインテリジェント制震構造システムの開発」(代表者 井上豊)として実施されたものであり、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 五十嵐晃、家村浩和、塩見稔：AMDの可動質量変位制約を考慮した非線形制御則，第3回振動制御則コロキウム、PARTB、pp.111-118、1995
- 2) H.Iemura, A.Igarashi and I.Katayama : Development of an Active TMD and Control Algorithms for strong Earthquake Excitation -Numerical Simulation and Shaking Table Tests-, Proceeding of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering、1996(to be published)

(1996. 9. 14 受付)

Dynamic Response Control of Full-Size Frame Structure under Strong Seismic Excitation Using Variable Gain Control

Hirokazu Iemura, Akira Igarashi, Go Shiomi, Yutaka Inoue

In order to use Active Mass Dampers(AMD) for the seismic response control of structures, excessive auxiliary mass displacements must be avoided even under a high level of excitation, which becomes a critical factor in the event of strong earthquakes. The control algorithm for the full-scale multi-story steel frame test structure at DPRI, Kyoto University takes advantage of a nonlinear control scheme based on a variable gain method to overcome this difficulty. The nonlinear control scheme based on a variable gain method to overcome this difficulty. The nonlinear control used in the test achieves effective use of AMD with a limited displacement range of the auxiliary mass for structures under various levels of seismic input. The structural control test is conducted to verify the efficiency of the variable gain control scheme when used with the full-scale test structure. The test result using a seismic record shows the effectiveness of the control method, especially when subjected to a strong earthquake excitation.