

多自由度系構造物の AMD 変位制約非線形 制御則に関する研究

塩見 豪¹・五十嵐 晃²・家村 浩和³

¹正会員 工(修) 鹿島建設(株) (〒460 名古屋市中区新栄町二丁目14番地)

²正会員 Ph.D. 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フェロー 工博 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)

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可動範囲を超えない制御を実現する必要がある。このような背景のもと、筆者らは1自由度構造物に関しては可変制御ゲインを用いた非線形制御則を提案し、数値シミュレーションや実大構造物制震実験などにより検討してきた。本論文では、AMDの可動範囲を有効に活用する制御則を、多自由度系構造物の複数モードの制御を行うように拡張し、数値シミュレーションによりこの可変ゲイン制御アルゴリズムが有効に作用することが示された。

Key Words : AMD, Nonlinear Control, MDOF, Displacement Restraint

1. はじめに

これまでAMDの制御手法としては最適レギュレータに代表される線形理論の適用が検討されているが、線形制御系を用いた場合、入力に比例してAMDの変位が大きくなるため、中・大地震時にはその可動範囲を超えてしまい動作が停止してしまう事態が十分予測される。このような装置に対し、大きな入力レベルを前提にして動作特性を設定することはその発生確率および経済性を考慮すると合理的ではない。またAMDの最大変位が可動範囲を超えない制御系を設計するためには、試行錯誤が必要になるという問題も無視できない。

こういった背景のもと、1自由度構造物に関しては可変制御ゲインを用いた非線形制御則¹⁾が提案され、数値シミュレーションや実大構造物制震実験²⁾等により検討が行われてきた。

そこで本稿では、AMDの可動範囲を有効に活用する制御則を、多自由度系構造物の複数モードの制御を行うよう拡張し、数値シミュレーションによりその理論的有効性を検証するものである。

2. 多自由度系構造物の複数モード制御則

アクティブ制御においては、1つの装置で2つ以上の振動モードを制御することが原理的に可能であることが知られており、図-1に示されるような多自由度構造物の制御の対象を必ずしも単一モードに限定する必要はない。複数モードを制御するためには、1つのAMDをどのように制御するかが問題となってくるが、ここ

ではAMDの可動範囲を次式に示すように複数の固有振動に振り分ける手法を用いた。

$$Y_{maz} = Y_{maz,n} + Y_{maz,m} + \dots$$

すなわち、図-2に示すように各次の固有振動に許容する可動範囲を、その線形和が全体の可動範囲となるように決定する。

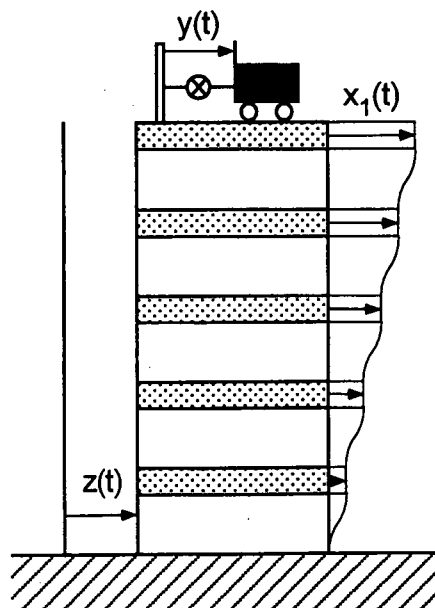


図-1 多自由度構造物モデル

また、制御則を $\dot{y} = \beta x_1$ と仮定し、構造物がある特定 n 次モードの定常状態で振動している場合にAMDの変位飽和 $|Y_0| = Y_{maz,n}$ を仮定すると、次式に示すよう

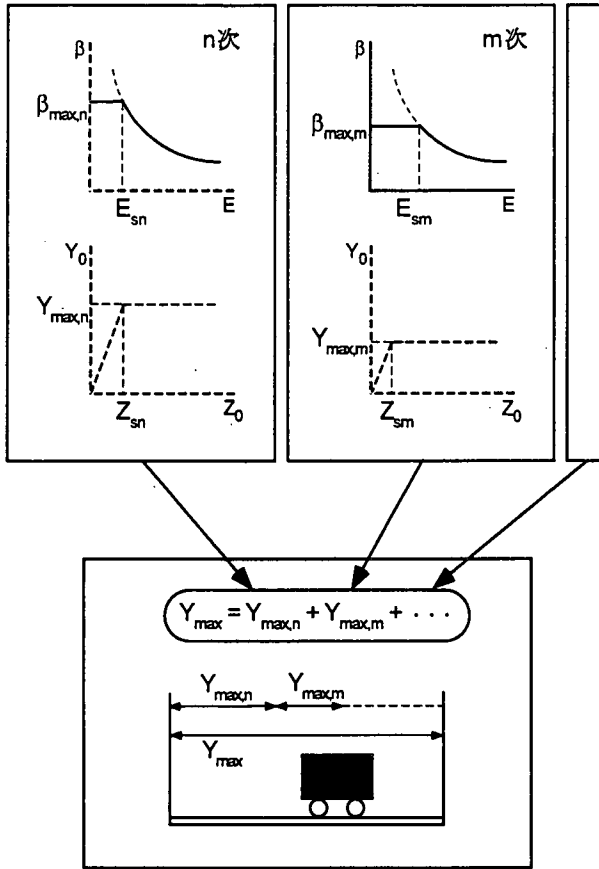


図-2 制御則と可動範囲の関係

に n 次の制御ゲイン β_n と振動エネルギー E_n の関係が n 次の固有振動数 ω_n とモード剛性 K_n を用いることにより得られる。

$$\beta_n = \frac{Y_{maz,n} \omega_n \sqrt{K_n}}{\sqrt{2E_n}}$$

実際に制御則を利用するために、AMD 取り付け位置での応答値 x_1 から FIR バンドパスフィルタを用いてステップ毎に特定次振動数付近の成分をたみ込みによりそれぞれ計算することとする。以上の点を考慮して制御則をまとめると以下になる。また、図-3 に応答計算アルゴリズムを示す。

$$\dot{y} = \beta_n x_{fn} + \beta_m x_{fm} \dots - \alpha y$$

ただし、

$$\beta_k = \begin{cases} \frac{Y_{maz,k} \omega_k \sqrt{K_k}}{\sqrt{2E_k}} & (E_k > E_{sk}) \\ \beta_{maz,k} & (E_k \leq E_{sk}) \end{cases}$$

$$(k = n, m, \dots)$$

$$\begin{cases} x_{fn}(l) = \sum_{k=0}^{N_n} h_{nk} x_1(l-k) \\ \dot{x}_{fn}(l) = \sum_{k=0}^{N_n} h_{nk} \dot{x}_1(l-k) \end{cases}$$

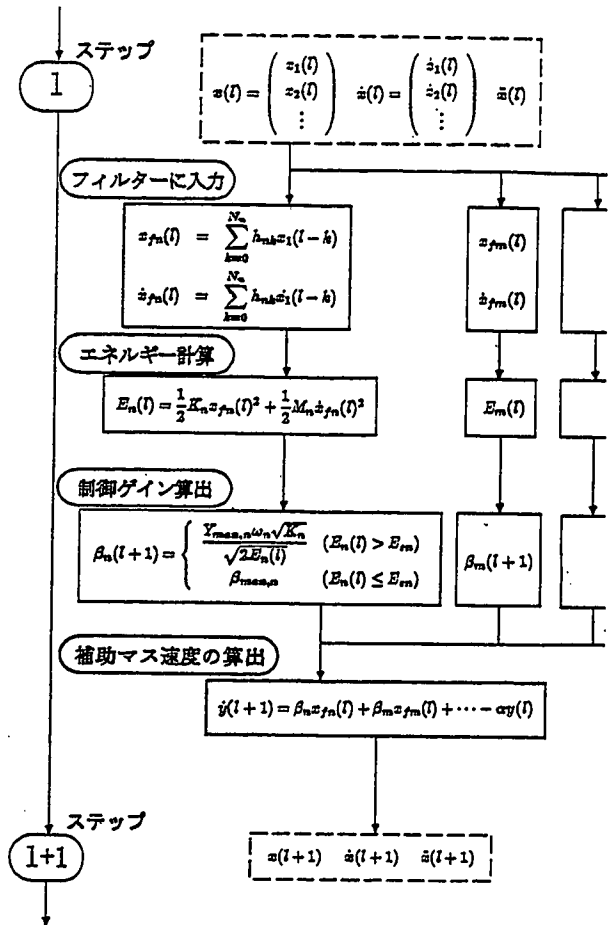


図-3 制御計算アルゴリズム

3. 応答解析結果 (正弦波入力時) による制御則の検証

制御則を検証するために、モデルの1次固有振動数及び1次と2次の間にある振動数を持つ正弦波の重ね合わせ波を入力した場合についての応答解析結果を図-4に示す。モデルとして、京都大学防災研究所内鉄骨5層フレーム²⁾を選んだ。制御対象モードとして1次・2次モードを選び、AMD 全体の可動範囲は $Y_{maz} = 15(\text{cm})$ とし、1次・2次それぞれの可動範囲は $Y_{maz,1} = 10(\text{cm})$, $Y_{maz,2} = 5(\text{cm})$ と設定した。また、 $\beta_{maz,1} = 80(1/\text{sec})$ を選び、AMD 補助マスの中立位置が可動範囲の中心を遊離しないための固定ゲインを $\alpha = 1(1/\text{sec})$ と設定した。

構造物 5F 変位応答は、1次・2次とも無制御状態(点線)と比較して振動低減効果が得られていることが示されている。また、本研究で着目していた AMD 装置変位に関しては1次振動に対する可動範囲 $Y_{maz,1}$ と、2次振動に対する可動範囲 $Y_{maz,2}$ を有効に用いながら、全体の可動範囲 Y_{maz} を最大限利用していることがわかる。このことは可動範囲 $Y_{maz,1}$, $Y_{maz,2}$ を超過しないように、可変制御ゲイン β_1, β_2 が変化していることから

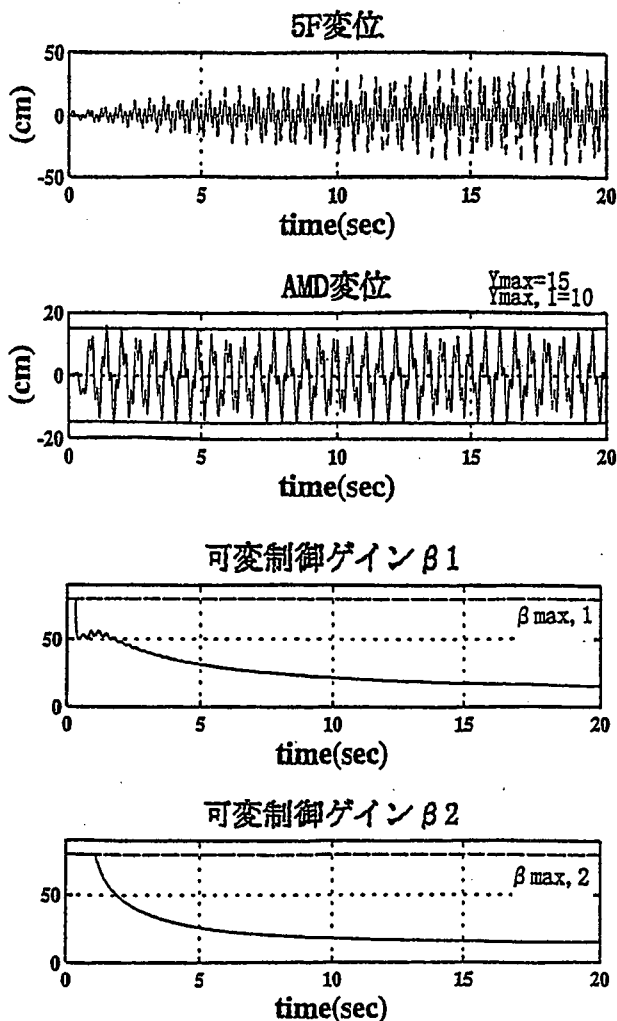


図-4 応答解析結果 (正弦波入力)

伺える。

これらの点より、応答に1次以外の振動が卓越している場合でも、AMDが可動範囲条件を満たしながら有効に制御を行うことが可能であることが示されたといえる。

4. 各モードに対する可動範囲決定法

正弦波入力時における応答解析により本制御則の有効性がある程度検証されたが、前節の場合、モデルの1次の固有振動が2次以上の固有振動と比較して卓越しているために、入力正弦波に含まれるモデルの2次固有振動数を持つ正弦波の振幅を、1次固有振動数を持つものと比較してかなり大きく設定していた。地震波入力を想定した場合、AMD全体の可動範囲を有効に利用するためには、モデルに応じてどのように可動範囲を振り分けるかを決定しておく必要がある。

ここでは1つの決定法として各モードの変位振幅比率の絶対値のピーク値の比によりAMD全体の可動範

囲を振り分けることを考える。すなわち、無制御の場合の運動方程式をモーダルアナリシスにより各モード毎に1自由度系のそれに帰着させると、 n 次モードにおける入力加速度の振幅に対する応答変位の振幅の比率 $H_n(\omega)$ は n 次の刺激係数を用いて以下のように示される。

$$H_n(\omega) = \frac{-p_n}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2ih_n\omega_n\omega}$$

ここで各モードの振幅比率の絶対値のピーク値、すなわち $\omega = \omega_n$ を代入して求めた値、

$$|H_n(\omega_n)| = \frac{p_n}{2h_n\omega_n^2}$$

のモード毎の比によって、AMD可動範囲を振り分ける方法である。

可動範囲 $Y_{max,1}$ と $Y_{max,2}$ が先に示した方法により決定すれば、振動エネルギーと可変制御ゲイン β_1, β_2 の関係は決定するので、 $\beta_{max,1}, \beta_{max,2}$ によって、線形制御領域と非線形制御領域の境界を決定することができる。入力が小さい場合に減衰を大きくしたい場合には、 $\beta_{max,1}, \beta_{max,2}$ を大きく選べば良いが、いずれにせよ可動範囲の制約上、入力が大きくなればすぐに非線形領域に入り、制御ゲインは小さくなる。

フィルタについては、そのウィンドウに関して周波数応答関数で、例えば1次モードが他に比べてかなり卓越している場合などには、1次振動数以外の固有振動数付近での減衰が必要でなくなり、ハミング窓などを用いずにバンドを鋭くした方が有効であると考えられる。しかし、他のモードもある程度卓越する場合には、ウィンドウを用いて遮断領域での減衰を大きくすべきである。

5. 地震波入力時の応答解析結果

先述のモデルに El Centro 波 (NS 成分、0.4 倍にスケールリング) を入力した場合の応答解析結果を図-5に示す。制御対象モードは正弦波入力時と同様に1次・2次モードを選び、AMD全体の可動範囲 $Y_{max} = 15(\text{cm})$ とした。ここで1次、2次振動それぞれに振り分ける可動範囲については上述の決定法を用いることとし、モデルに用いた5層フレームについて計算すると、 $H_1(\omega) = 0.994, H_2(\omega) = 0.05$ となり、1次振動と2次振動に与える可動範囲の比率は $Y_{max,1} : Y_{max,2} = 25 : 1$ となる。よって全体の可動範囲を振り分けると、 $Y_{max,1} = 14(\text{cm}), Y_{max,2} = 1(\text{cm})$ と決定される。また、 $\beta_{max,1} = 80(1/\text{sec}), \beta_{max,2} = 150(1/\text{sec})$ を選び、固定ゲインを $\alpha = 1(1/\text{sec})$ と設定した。

まず、構造物5F変位応答に関しては無制御の状態と比較して、良好な制震効果が得られていることが示されている。次に可変制御ゲイン β_1, β_2 に注目すると、入

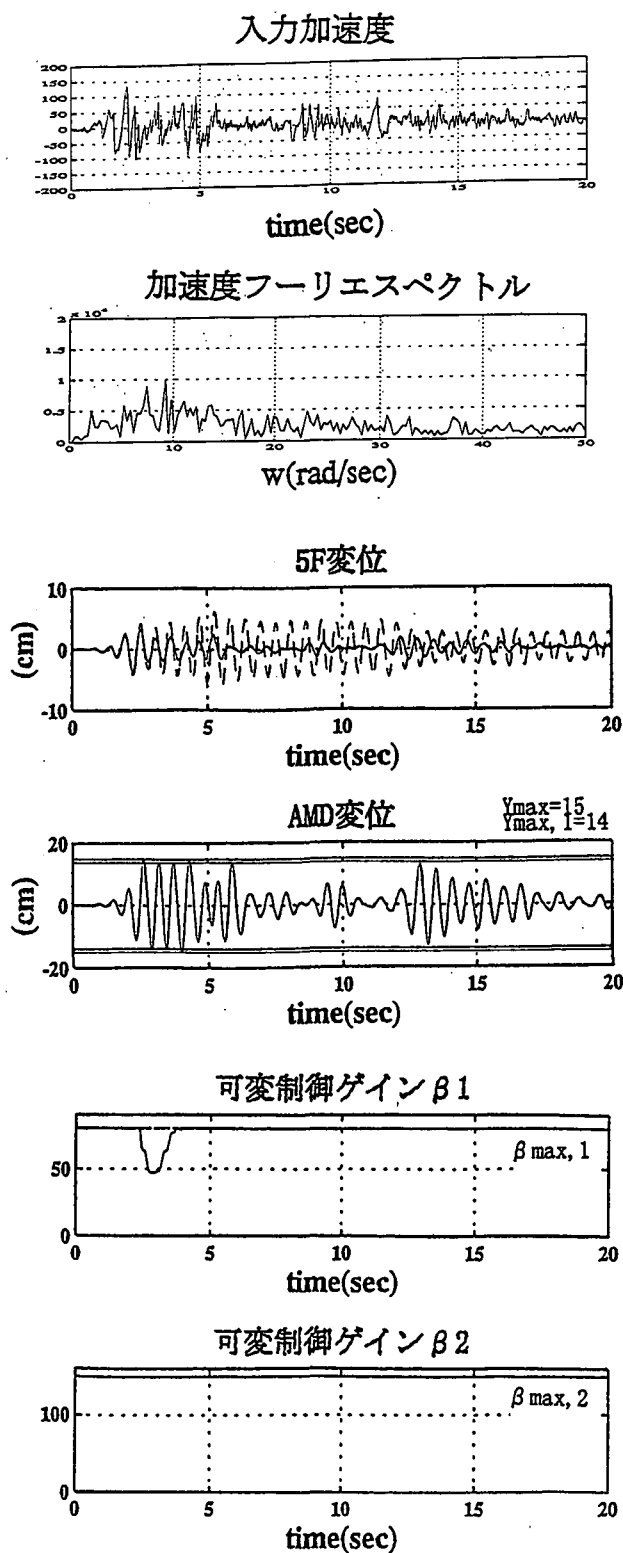


図-5 応答解析結果 (El Centro 波入力)

力の大きい2秒から4秒付近で β_1 がAMDの可動範囲を超えないように変化していることがわかり、それ以後は入力もそれほど大きくないため、 $\beta_1 = \beta_{max,1}$ であることが示されている。 β_2 に関しては、構造物の変位応答にほとんど2次振動が含まれておらず、2次の振動エネルギー E_2 が E_{s2} に到達しないために、 $\beta_2 = \beta_{max,2}$

のままであることがわかる。

AMD 変位応答に関しては、全体の可動範囲 $Y_{max} = 15(\text{cm})$ を超過することなく、ほぼ1次振動の可動範囲 $Y_{max,1} = 14(\text{cm})$ 内で振動していることがわかる。これは先にも述べたように今回用いたモデルの場合、応答にほとんど1次振動しか含まれていないため、各次振動に与える可動範囲決定法を用いて、2次振動に比べ1次振動に可動範囲を大きく割り振ったことで、全体の可動範囲が有効に利用できていることを示している。

6. おわりに

中・大地震時に問題となるAMD可動範囲制約を解決するために、可変制御ゲインを用いた非線形制御則が提案されてきたが、これまでは対象が1自由度系であり、実験においても1次モードのみを対象とした制御しか行われなかった。本研究では多自由度構造物の複数のモードを制御対象とするためにAMDの可動範囲を複数のモードに振り分け、デジタルフィルタにより振動応答値から各固有振動を取り出し、それぞれの振動に対して可変制御ゲインを変化させることでAMDの全体の可動範囲を有効に利用できるように制御則を拡張した。5層構造フレームをモデルとして応答解析を行った結果、正弦波・地震波入力に対してAMD全体の可動範囲を利用した有効な制御が実現できることが示された。

参考文献

- 1) 五十嵐晃・家村浩和・塩見豪：AMDの可動質量変位制約を考慮した非線形制御則，第3回振動制御コロキウム講演論文集，pp.111-118，平成7年。
- 2) 家村浩和・五十嵐晃・塩見豪・井上豊・坂本光雄：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，免震・制震コロキウム論文集，pp.233-240，平成8年。
- 3) 五十嵐晃・家村浩和・塩見豪：多自由度構造物のAMD変位制約非線形制御則に関する研究，関西支部年次学術講演概要，pp.I-101-1-I-101-2，平成9年。
- 4) 井上豊他：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，日本学術振興会産学協同研究支援事業研究成果報告書，平成8年。
- 5) 中村尚五：デジタルフィルタ，東京電機大学出版局，平成7年。