

I-352

制御時間遅れを考慮した制震システム

榎大林組 正 員 杉山和久
 京都大学防災研究所 正 員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正 員 佐藤忠信

1. まえがき 地震等の非定常な外力に対して構造物の振動を最適に制御するためには、時々刻々得られる情報のみから制御力を決定する必要があるが、既往のレギュレータ問題では、入力地震動の性質を十分に考慮した制御が行えない。本研究では、構造物に入力する震動エネルギーを考慮した時間依存型評価関数を用いることにより、入力地震動の性質を直接制御力に反映することが出来る制御則（閉ループ制御）を提案し、その適用例を示す。また、提案した制御則を実際の構造物に適用する際に問題となる制御力の作用時間遅れに関する考察を行う。

2. 地震入力エネルギーを考慮した時間依存型評価関数の提案
 地震による構造物の被害の程度を表現する指標に構造物に入力されるエネルギー量が提案されている¹⁾。本研究では、この地震入力エネルギー量を評価関数の中に組み込み最適化アルゴリズムを構築した。現時刻までの観測値のみから制御力を決定するため評価関数としては時間依存型²⁾のものを用いた。構造物のエネルギー方程式は、運動方程式の各項に dz を掛け、現時刻まで積分することにより次式となる。

$$\int_0^t \dot{x}'(\tau) M \ddot{x}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{x}'(\tau) C \dot{x}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{x}'(\tau) K x(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{x}'(\tau) m \ddot{x}_0(\tau) d\tau \\ = \int_0^t \dot{x}'(\tau) H u(\tau) d\tau \quad (1)$$

式(1)の左辺を時間依存型の評価関数の中に組み込み、次式で表される評価関数を定義した。このとき、式(1)の左辺の積分を台形近似を用いて計算し、現時刻 t に関する項とそれ以外の項とに分けた。

$$J(t) = z'(t) Q_1 z(t) + u'(t) R u(t) \\ + \alpha \{ z'(t) Q_2 z(t) + z'(t) W_2 \ddot{x}_0(t) + E(t - \Delta t) \} \quad (2)$$

ここで、
 $W_2 = [0 \mid m]'$, $Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\Delta t}{2} K & \frac{\Delta t}{2} C + \frac{1}{2} M \end{bmatrix}$

式(2)の評価関数を用いることにより制御力 $u(t)$ は次式のように求まる。

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B' Q_2 z(t) - \alpha \frac{\Delta t}{4} R^{-1} B' W_2 \ddot{x}_0(t) \quad (3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

式(3)より明らかなように制御量 $u(t)$ は、時刻 t における状態量 $z(t)$ のフィードバックと地動加速度 $\ddot{x}_0(t)$ の両者より決定される閉ループ制御（図-1）になっている。

3. 多質点系構造物の最適制御 提案した閉ループ制御の手法を用いて、3質点系モデルに対して数値解析を行っ

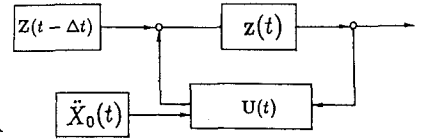


図-1 閉ループ制御

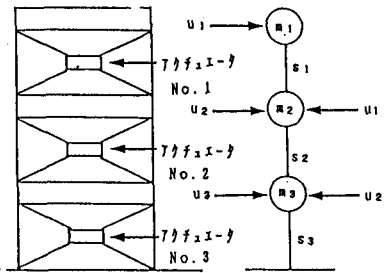
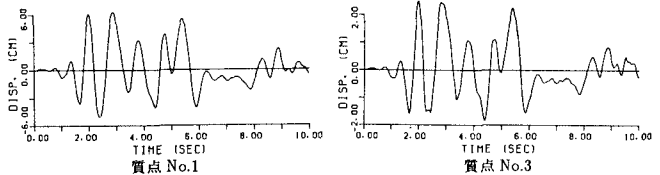
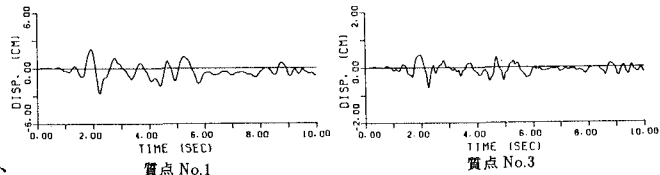


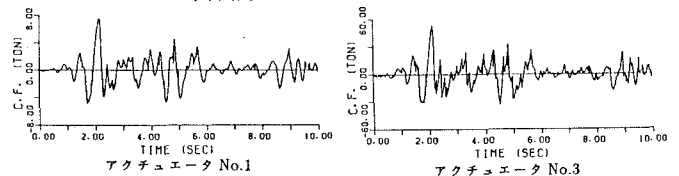
図-2 解析モデル



(a) 制御を行わない場合の相対変位



(b) 閉ループ制御による相対変位



(c) 閉ループ制御による制御力

図-3 非線形構造物の応答変位と制御力

た。制御装置としてはActiv Tendonを考えた。解析モデルを図-2に示す。バネの復元力特性としては、RC構造物のモデル化によく用いられる剛性低下型のトライリニアモデルである武藤モデルを用いた。図-3に結果を示す。(a)が制御なし(b)が制御を行った場合の相対変位であり、(c)はアクチュエータ1と3の制御力である。図より応答変位は半分以下に抑えられており、また、制御力が入力地震波に似ていることから、入力地震動に応じた制御が行えていることが分かる。

4. 時間遅れに関する考察 時間遅れの問題は、ディジタル制御を行う際に、計算に要する時間分だけ、制御力の作用時刻が遅れることから提起されたものであり、連続時間系で求めた制御力は、厳密解であり、この種の時間遅れを考慮する必要がない。提案した制御則は、連続時間系で求めたものであるが、非定常な地震に対して制御を行うため、現時刻までの情報から制御力を求める。このため、実際に構造物の震動制御を行う場合にはこの時間遅れを無視することができない。

閉開ループ制御による制御力は式(3)で与えられる。この式から明らかなように、応答量と地動加速度の係数は、時間によって、変化しない。したがって、時間遅れがある場合でも制御力 $u(t)$ は、この式(3)から求めることができる。また、応答は、システム状態方程式から計算されるが、状態方程式中に含まれる制御力は計算時間の分だけ遅れることになる。したがって、計算時間遅れを δt とすれば、システム状態方程式は次式で表される。

$$\dot{z}(t) = A z(t) + B u(t - \delta t) + W_1 \ddot{x}_0(t) \quad (4)$$

式(4)より時刻 t での応答 $z(t)$ が求まり、 $z(t)$ より直ちに式(3)を用いて制御力 $u(t)$ が決まる。作用時間遅れを考えた場合のフローを図-4に示す。

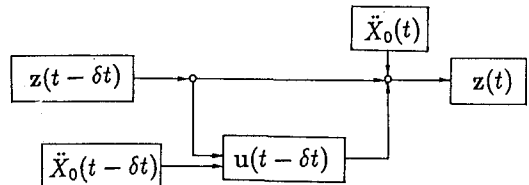


図-4 時間遅れがある場合の閉開ループ制御

図-2に示した3質点系モデルを用いて時間遅れの影響を考えた場合の質点1の変位応答を図-5に

示す。時間遅れの大きさとしては、状態方程式を積分のステップである0.01秒に合わせ、1ステップ遅れた場合、3ステップ遅れた場合、5ステップ遅れた場合の3通りについて、解析を行った。状態方程式を積分する際に用いた時間刻みにあたる、0.01秒程度の時間遅れであれば、時間遅れがある場合でも、最適な震動制御が行える。提案した制御則では、式(3)から制御力を求めるため、0.01秒という時間は制御力を求めるために必要とされる時間として十分な時間であるといえる。

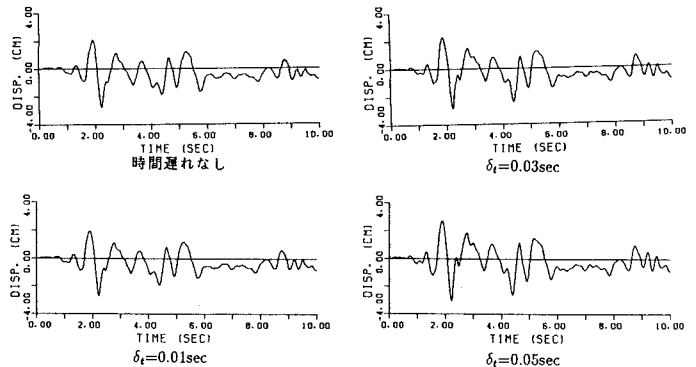


図-5 時間遅れがある場合の応答変位

5. 結論 (1)構造物に入力されるエネルギー量を考慮した評価関数を提案することにより、現時刻までの応答と地動加速度の両者を用いて制御力が求められる閉開ループ制御のアルゴリズムを開発し、系の特性が変化する非線形構造物に対しても制御が可能な制御則を定式化した。

(2)提案した閉開ループ制御では、簡単な四則演算だけで制御力が求められ、計算時間に起因する制御力の作用時間遅れが生じた場合でも、最適な震動制御が行えることが確認できた。

参考文献 1)家村浩和、茅野茂:多自由度履歴構造物における地震入力エネルギーの分担率と耐震設計、土木学会第41回年次学術講演会概要集、pp.1113-1114、昭和61年11月

2)J. N. Yang, M. ASCE., A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1369-1386, Sep. 1987