

京都大学工学部 正員 山田 善一 家村 浩和
神戸市 正員 ○岩崎 好寿

1. はじめに

構造物の地震時の動的応答を低減する方法として、アクティブコントロールの適用が検討されるようになっている。この方法を実施する際の問題点として、制御力を加える際の加力装置の動作時間遅れが存在することが指摘されている。この時間遅れが大きくなると、制御力によって構造物が加振され、安定性が失われることがある。そこで本研究では、時間遅れの影響を軽減する方法を提案した。

2. 遅延時間の補償方法

本研究では時間遅れを補償する方法として、現在から時間遅れの分だけ先の時刻において加えるべき制御力を、現在観測された状態量から推定する方法を考えた。

Fig.1 で表される 1 自由度系が制御力 u を受ける場合の運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = u - m\ddot{z}$$

これを線形加速度法を用いて離散化すると

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_{t+1} + G\ddot{z}_{t+1}$$

ただし、

$$x_t = \begin{pmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ \ddot{x}_t \end{pmatrix} \quad A = \frac{1}{m + \frac{\Delta t}{2}c + \frac{\Delta t^2}{6}k} \begin{pmatrix} m + \frac{\Delta t}{2}c & \Delta tm + 2\Delta t^2c & \frac{\Delta t^2}{3}m + \frac{\Delta t^3}{12}c \\ -\frac{\Delta t}{2}k & m - \frac{\Delta t^2}{3}k & \frac{\Delta t}{2}m - \frac{\Delta t^3}{12}k \\ -k & -c - \Delta tk & -\frac{\Delta t}{2}c - \frac{\Delta t^2}{3}k \end{pmatrix}$$

$$B = \frac{1}{m + \frac{\Delta t}{2}c + \frac{\Delta t^2}{6}k} \begin{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{6} \\ \frac{\Delta t}{2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad G = \frac{-m}{m + \frac{\Delta t}{2}c + \frac{\Delta t^2}{6}k} \begin{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{6} \\ \frac{\Delta t}{2} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Δt : 観測時間間隔

ここで、最適制御理論を適用すれば、制御力は $u_{t+1} = Fx_{t+1}$ という形で表すことができる。ところが、これでは x_{t+1} が観測されると同時に u_{t+1} を計算して加えなければならないので、現実には不可能である。そこで、 u_{t+1} を x_t から求めることを考える。それにはまず、 x_{t+1} を予測しなければならない。

まず、離散化された運動方程式を次のように変形する。

$$x_{t+1} = Ax_t + BFx_{t+1} + G\ddot{z}_{t+1}$$

$$x_{t+1} = (I - BF)^{-1}(Ax_t + G\ddot{z}_{t+1})$$

ここで、地動加速度 $\ddot{z}$ が正規ホワイトノイズ過程であるとする、カルマンフィルターのアルゴリズムを用いることにより、構造物の応答は次のように予測することができる。

$$\hat{x}_{t+1/t} = (I - BF)^{-1}Ax_t$$

つまり、次のステップにおける外力を 0 と仮定して応答を求めればよいことになる。これは、ホワイトノイズの性質により、現在の地動と将来起こる地動とにまったく相関がないためだと考えられる。

地盤振動が卓越振動数を持つ場合にはその不規則波形がホワイトノイズ加振を受ける 1 自由度振動系の応答であるとモデル化する。すると、上に述べた方法で、地動を予測することができる。つまり、

$$\hat{z}_{t+1/t} = A_z z_t \quad \text{ただし、} z = (z \quad \dot{z} \quad \ddot{z})^T$$

として地盤の状態変数を予測できる。すると、構造物の応答は、

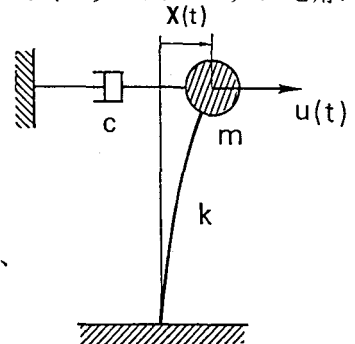


Fig.1 SDOF System

Yosikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Yoshihisa IWASAKI

$\hat{x}_{t+1/t} = (I - BF)^{-1}(Ax_t + G\hat{z}_{t+1/t})$
 として予測することができる。このよう
 に予測された応答を用いて制御力を

$$u_{t+1} = F_x \hat{x}_{t+1/t}$$

と設定すれば、遅延時間を考慮したアク
 ティブコントロールを行うことができる。

3. 数値計算例

入力地震動として、卓越振動数が0.8
 Hz、地盤の減衰定数が0.2の模擬地震動
 を作成し (Fig.2)、 $m=4(\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm})$ 、
 減衰定数2%、固有周期2秒の1自由度
 振動系にこの地動が入力された場合の遅
 延時間と振動エネルギーおよび制御力と
 の関係を表したのが Fig.3 である。振動
 エネルギーについては、制振効果がわか
 りやすいように、制御を行わない場合と
 の比をとって、無次元化している。ここ
 では、制御力の予測を行った場合と行わ
 なかった場合とを比較している。これを
 見ると、制御力の予測を行わなかった場
 合は、時間遅れとともに、振動エネルギ
 ーが急激に増加している。それに対して、
 制御力を予測した場合は、振動エネルギ
 ーはそれほど大きくはならず、時間遅れ
 が1秒 (固有周期の $\frac{1}{2}$) になっても、無制
 振の時の0.4以下である。

時間遅れが0.4秒の場合を例にとり、
 応答と制御力の時刻歴を Fig.4 に示す。
 応答は時間遅れがない場合とほとんど同
 じであり、制振効果がよく保たれている。
 また、制御力を見ると、ピークの値が少
 し小さくなっているが、位相のずれはほ
 とんど見られず、予測を行うことにより、
 時間遅れがある場合でも、時間遅れがな
 い場合とほぼ同じ制御力を得ることがで
 きた。

4. あとがき

本研究では、入力される地震動の特
 性が事前にわかっているものとしたが、
 これが不明な場合は、地盤の特性を表す
 パラメーターを同定する問題を考える必
 要がある。

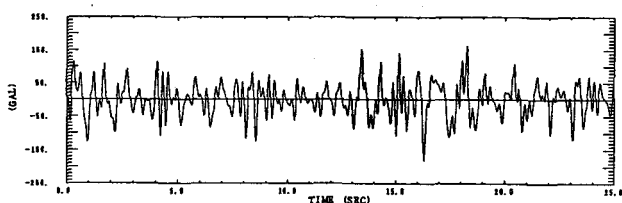


Fig.2 Simulated Ground Acceleration

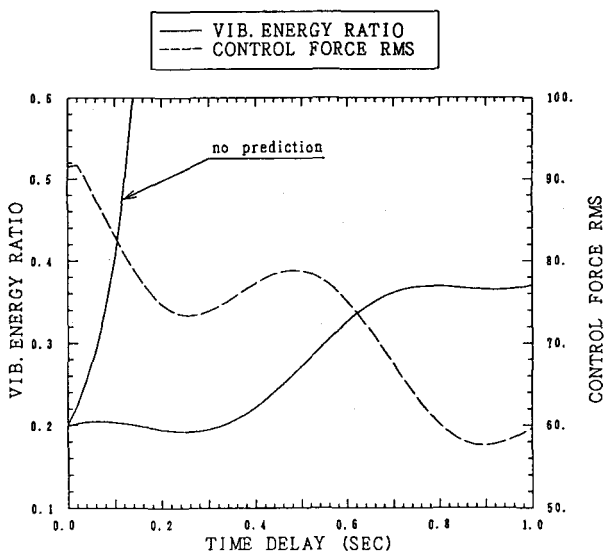


Fig.3 Time Delay Effect Using Control Force Prediction

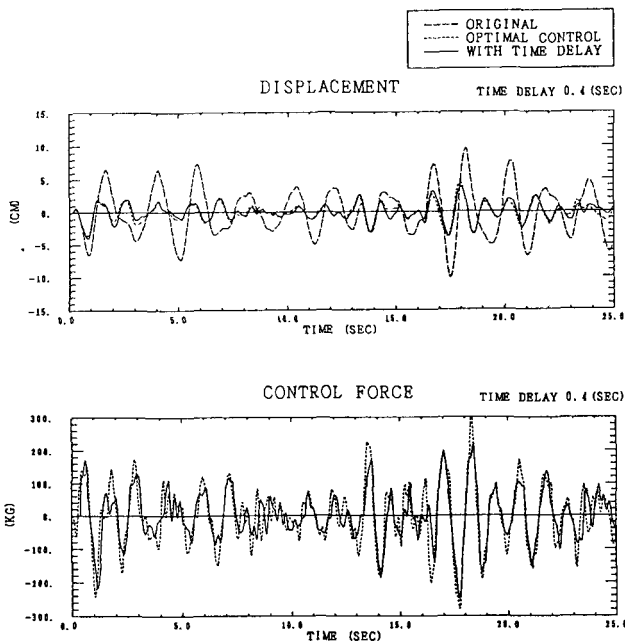


Fig.4 Simulated Response and Control Force