I-361 動作遅延時間を考慮した振動系の最適アクティブコントロール

神戸市 正員 岩崎 好寿
京都大学工学部 正員 山田 善一 家村 浩和

1. 概説　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数理的方法を提案し、シミュレーションを行った。

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

$$\mathrm{x}_{t+1} = A\mathrm{x}_t + Bu_{t+1} + G\ddot{z}_{t+1}$$

ただし、

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

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

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 $u_{t+1} = F\mathrm{x}_{t+1}$ 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。

$$\mathrm{x}_{t+1} = A\mathrm{x}_t + BF\mathrm{x}_{t+1} + G\ddot{z}_{t+1}$$

$$\mathrm{x}_{t+1} = (I - BF)^{-1}(A\mathrm{x}_t + G\ddot{z}_{t+1})$$

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と、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。

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

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、

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

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、

$$\hat{\mathrm{x}}_{t+1/t} = (I - BF)^{-1}(A\mathrm{x}_t + G\hat{\ddot{z}}_{t+1/t})$$

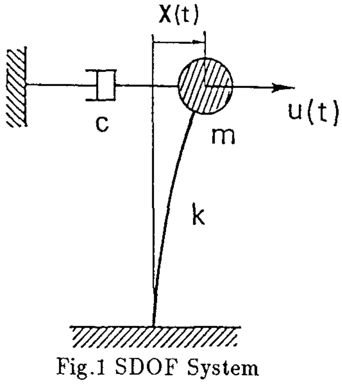

Fig.1 SDOF System

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(kg・sec^2/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、入力される不規則地震動の周波数特性が事前にわかっているものとしたが、これが事前に不明な場合や時間的に変動する場合には、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。

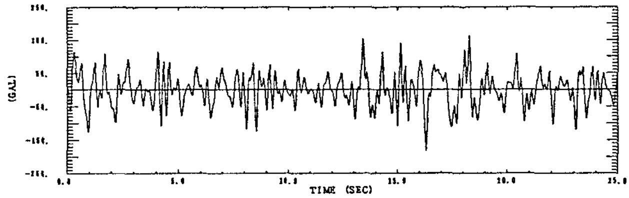

Fig.2 Simulated Ground Accerelation

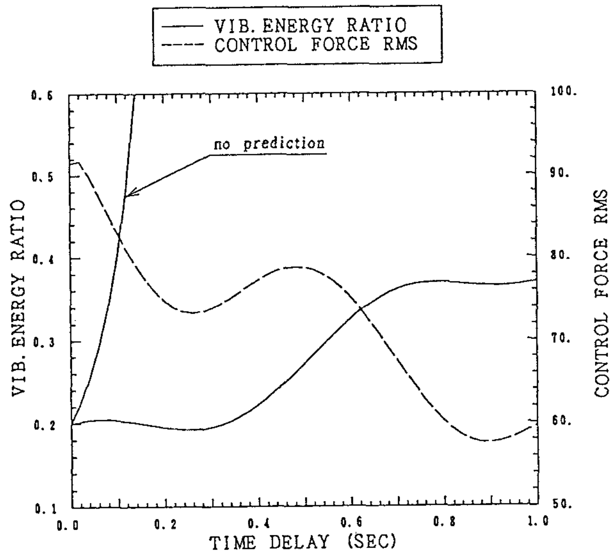

Fig.3 Time Delay Effect Using Control Force Prediction

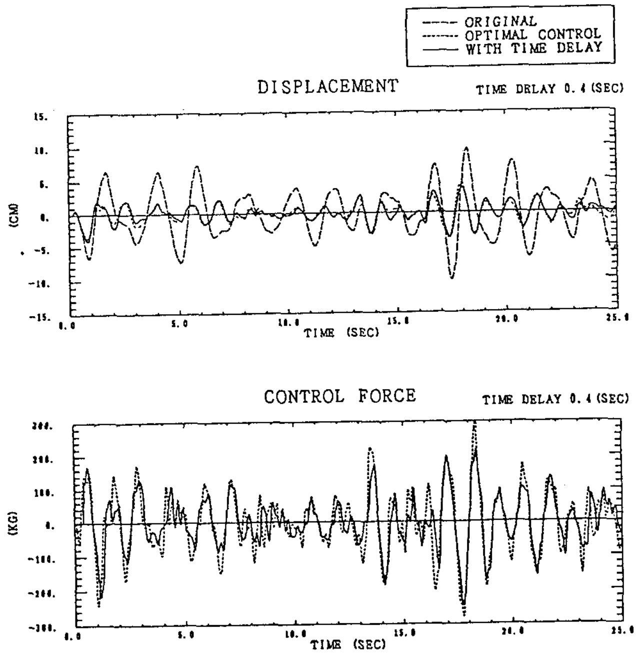

Fig.4 Simulated Response and Control Force