

I-484 地盤特性の同定に基づく構造物震動のアクティブコントロールに関する研究

(株)大林組 正員 大野 了
京都大学工学部 正員 山田善一 家村浩和 伊津野和行

1. はじめに

構造物の地震時の動的応答を低減する方法に、アクティブコントロールの手法がある。本研究では、アクティブコントロールを実施する際に、地震動の振動数が時間的に変化する場合には対しても、地盤特性を同定することで、最適な制御を行えると考え、ここでは、その基礎的研究として、地盤特性が不明な場合には対して最適な制御を行う方法を提案した。

さらに、動作遅延時間を補償し、時間遅れの影響を軽減する方法についても検討した。

2. 地盤特性の同定

本研究では地盤特性を同定するに当たり、地震動を1自由度振動系フィルターを通過したものとして取り扱う。仮想的なフィルターへの入力を $w(t)$ とすると、地盤の運動方程式は、

$$\ddot{z} + 2\zeta_g\omega_g\dot{z} + \omega_g^2 z = w$$

である。これを線形加速度法を用いて離散化すれば、

$$z_{t+1} = A_z z_t + G_z w_{t+1}$$

$$\text{ただし、 } z_t^T = (z_t, \dot{z}_t, \ddot{z}_t, \zeta_{gt}, \omega_{gt}) \quad G_z^T = \frac{1}{1 + \Delta t \zeta_g \omega_g + \frac{\Delta t^2}{6} \omega_g^2} \left(\frac{\Delta t^2}{6}, \frac{\Delta t}{2}, 1, 0, 0 \right)$$

$$A_z = \frac{1}{1 + \Delta t \zeta_g \omega_g + \frac{\Delta t^2}{6} \omega_g^2} \begin{pmatrix} 1 + \Delta t \zeta_g \omega_g & \Delta t + \frac{2}{3} \Delta t^2 \zeta_g \omega_g & \frac{\Delta t^2}{3} + \frac{\Delta t^3}{6} \zeta_g \omega_g & 0 & 0 \\ -\frac{\Delta t}{2} \omega_g^2 & 1 - \frac{\Delta t^2}{3} \omega_g^2 & \frac{\Delta t}{2} - \frac{\Delta t^3}{12} \omega_g^2 & 0 & 0 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g - \Delta t \omega_g^2 & -\Delta t \zeta_g \omega_g - \frac{\Delta t^2}{3} \omega_g^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \Delta t \zeta_g \omega_g + \frac{\Delta t^2}{6} \omega_g^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + \Delta t \zeta_g \omega_g + \frac{\Delta t^2}{6} \omega_g^2 \end{pmatrix}$$

となる。しかし、行列 A_z, G_z が上式のように地盤特性 ζ_g と ω_g に関して線形ではないため非線形システムに対する拡張カルマンフィルターのアルゴリズムを適用する。

3. 遅延時間の補償法

現在から時間遅れのみ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から推定することにより、時間遅れを補償する。

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

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

ここで、最適制御理論を適用すれば、制御力は $u_{t+1} = Fx_{t+1} + Fz_{t+1}$ 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、離散化された構造物の運動方程式を次のように変形する。

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

ここで、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。

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

また、地動の予測値は、

$$\hat{z}_{t+1/t} = A_z z_t$$

となる。このように予測された応答を用いて制御力を

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

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。

4. 数値計算例

入力地震動として、1985年に起こったメキシコ地震のSCT記録(Fig.2)を用いて検討した。この地震記録では、振動数が0.5Hz付近に大きなピークが認められる。同定手法は、Fig.1に示す振動系にこの地震動を入力し、1秒毎の制御された応答に基づいて地盤特性を繰り返し同定するアルゴリズムとなっている。そこで、同定における初期値を様々に変化させて、検討すると初期値を $\zeta_g = 0.20$, $\omega_g = 3.14$ とした時が、最も良く制御された。その時の同定状況をFig.3で示す。これを見れば、約5秒程度で収束することがわかる。さらに、このときの変位波形をFig.4で示す。制御しないときの変位波形の最大値が70.40cmに対し、フィードバック制御のみの最大値が18.10cm、フィードフォワード併用制御のそれが9.92cmとなっており、制御しない場合の最大変位と比較すると、それぞれ25.7%、14.1%とかなり制御されている。また、フィードバック制御に比べ、フィードフォワード併用制御による最大変位は、54.8%に抑えることができており、フィードフォワード併用制御の優位性も明かである。

4. あとがき

本研究では、入力される地震動の特性を同定する問題として検討を加えたが、地震動の振動数が時間的に変化する場合に対しても追従性を高め、そのような場合に対しても対応できるようにすべきである。

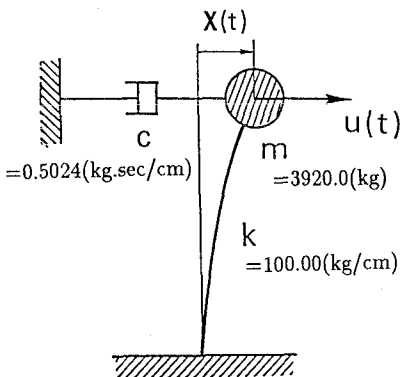


Fig.1 SDOF System Model

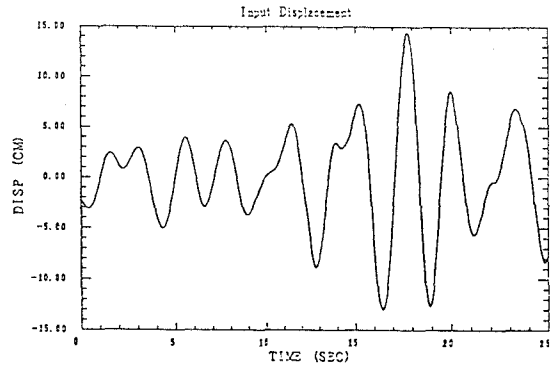


Fig.2 Time Series of Mexico Earthquake SCT Record

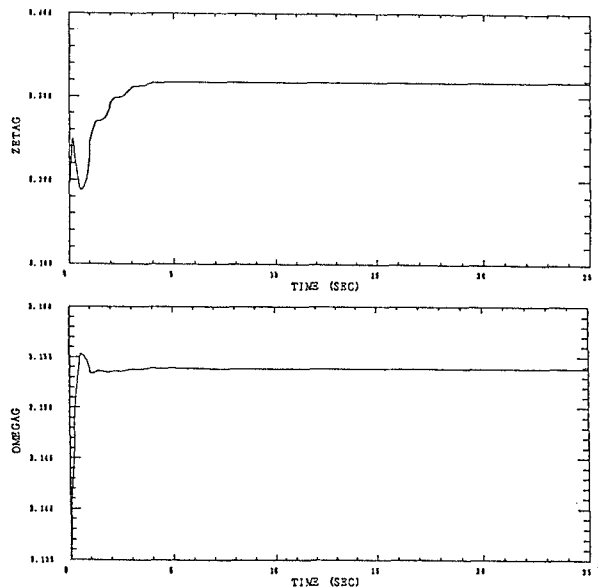


Fig.3 Identification of Dynamic Properties of Ground

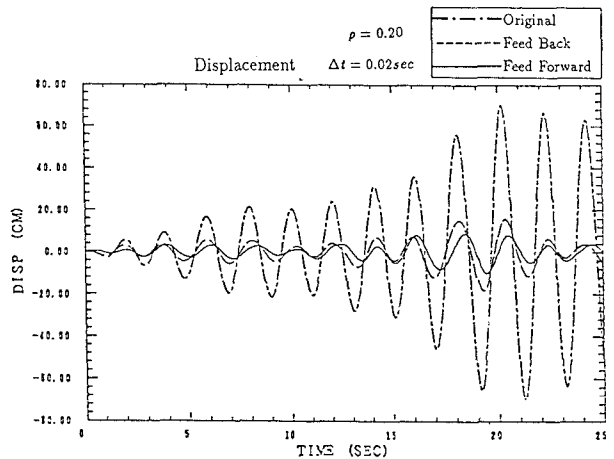


Fig.4 Simulated Response