

武蔵工業大学 正会員 丸山 収
東京電力(株) 正会員 小淵 康義

1. はじめに

本研究は、地盤に埋設された構造物基礎を想定し、その連成振動性状を支配するパラメータ同定を数値シミュレーションにより検討している。対象とする地盤-基礎連成振動系を水平および回転の2自由度を有する剛体モデルに表現し、動的挙動を支配するパラメータを星谷ら^{1,2)}による拡張カルマンフィルタ重み付き繰返し法(EK-WGI法)で同定することを試みている。ここでは、構造のモデル化および手法の適用性を検討するために、観測波形を数値シミュレーションにより作成し、結果の精度および安定性について検討を行った。

地盤-基礎系のパラメータ同定問題には、松島ら³⁾の研究がある。松島らは、変電機器基礎-地盤系の振動特性同定問題に対して、ガウシアン法による定式化を示し、実変電機器基礎の観測データから基礎-地盤連成系のパラメータ同定を試みている。

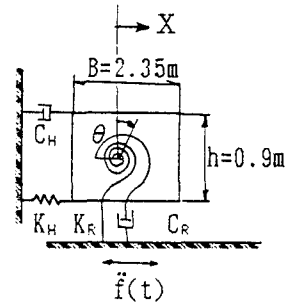
一方、カルマンフィルタを用いた構造物の動特性同定は、星谷らにより試みられている。星谷らは、せん断形多自由度系を対象として、構造系の減衰定数およびパラメータの同定¹⁾さらに構造系のモード減衰および固有円振動数の同定²⁾を行っている。ここで、前者は構造系の物理パラメータの同定、後者はモードパラメータの同定と考えられる。本研究は、物理パラメータ同定の定式化をカルマンフィルタに用い、対象とする構造系の水平および回転に関するパラメータ同定を試みている。

なお、本研究は、松島らの研究に刺激され、地盤-基礎系の強度の連成振動を示す系のパラメータ同定問題に対するEK-WGI法の適用の可能性について検討するために行われた。

2. 構造モデルおよび同定手法

地盤-基礎系に対しては、種々のモデル化が考えられるが、本研究で採用した構造モデルを、図-1に示す。ここでは基礎を、質量 m の剛体にモデル化し、剛体モデルが、水平のバネ K_H とダッシュポット C_H および回転のバネ K_R とダッシュポット C_R で支持されるモデルとした。このモデルに対し、強制外力 $\ddot{f}(t)$ が作用した場合の応答計算を行い、水平方向の変位 X 、速度 $\dot{X}$ および回転方向の回転角 θ および回転角速度 $\dot{\theta}$ を観測データとして、 K_H 、 C_H 、 K_R および C_R を同定する事を試みた。

次にカルマンフィルタに対する状態方程式および観測方程式を示す。同定すべきパラメータとして、水平および回転のバネ定数および減衰定数を選び $Z_1=X, Z_2=\theta, z_3=\dot{X}, Z_4=\dot{\theta}, Z_5=C_H, Z_6=K_H, Z_7=C_R$ および $Z_8=K_R$ とおけば、状態方程式および観測方程式は次式となる。



質量 $m=1.735 \text{ tfs}^2/\text{m}$
奥行き $W=4.4 \text{ m}$

図-1 検討モデル

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \\ \dot{z}_7 \\ \dot{z}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_3 \\ Z_4 \\ -(Z_3+Z_4 \frac{h}{2}) \frac{Z_3}{J} - (Z_1-Z_2 \frac{h}{2}) \frac{Z_6}{J} - \ddot{f}(t) \\ -\frac{h}{2J} Z_3 Z_5 - \frac{1}{J} (\frac{h^2}{4} Z_6 + Z_7) Z_4 + \frac{h}{2J} Z_1 Z_6 - \frac{1}{J} (\frac{h^2}{4} Z_6 + Z_8) Z_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \varepsilon(t) \quad (a)$$

ここに J : 剛体の重心に関する慣性モーメント
 $\varepsilon(t)$: システムのノイズ

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ Z_7 \\ Z_8 \end{bmatrix} + \omega(t) \quad (b)$$

ここに $\omega(t)$: 観測ノイズ

—————(1)

3. 数値計算例

今回行った、数値計算の設定条件を表-1.に示す。

表-1 数 値 計 算 条 件

計算 ケース	同 定 パ ラ メ ー タ (真 値)				観 測 ノイズ*	同定するパラメータ の初期値の与え方
	C_H tfs/m	K_H tf/m	C_R tfs/rad	K_R tfm/rad		
1	1.0	50.0	7.0	70.0	無し	初期値<真値
2					無し	初期値>真値
3					5%	初期値<真値
4					10%	初期値<真値
5	177.9	32584.4	94.9	37665.0	無し	初期値 $\leq$ 真値
6					無し	初期値>真値

* 観測データの標準偏差(σ_0) $\times\alpha\%$ の分散を持つ平均値0のホワイトノイズ

このうちケース1～ケース4は、同定手法の適用性を検討するために、基礎が地盤に対して十分に応答し、応答波形が十分な情報(振幅)を持つように値を設定したものであり、初期値の与え方、観測データに含まれるノイズを変化させて計算している。また、ケース5およびケース6は、文献3に示されている数値を用い、実変圧器基礎を想定した値である。この定数を用いると、地盤および基礎系は殆ど同一の挙動を示すこととなる。

まず同定パラメータ(真値)を用いた振動方程式をRunge-Kutta法により数値積分して応答波形を求め、これを観測データとして、EK-WGI法により、パラメータ同定を行った。使用した入力波は、EL-CENTRO(1940)である。計算結果を要約すれば以下ようになる。

(a).計算ケース1～ケース4について：①各パラメータとも安定した収束状況を示し、5回程度のグロバールな繰返しで収束する。②水平のバネ定数および減衰定数の方が回転方向よりも収束が早く、真値に近い値となる。③同定パラメータの初期値は、ある程度適当に設定しても収束はスムーズであり、同定結果には影響を与えない。④観測データにノイズを付加した場合でも精度良く真値に収束する。

(b)計算ケース5～ケース6について：①各ケースともに安定した結果を得ることはできなかった。②30回程度のグロバールな繰返しで計算不可能になる。

以上より、観測データが十分に系の情報を有する場合については、本手法の適用性が確認できた。また、実機相当の物理パラメータを設定した場合には、同定は困難であったが、現状の問題点を示すと次のようになる。

①地盤-基礎系の相対応答は、非常に小さな振幅レベルであり、連成振動の情報を十分に含んでいない。②系の固有値解析を行うと、システムの固有振動数(2次)が30Hz程度となり、数値計算上の問題であるが加減フィルタの更新アルゴリズムの積分が発散する可能性がある。

4. まとめ

地盤-基礎連成系の振動問題のパラメータ同定にカルマンフィルタ手法を適用することを試みた。その結果、システムの物理パラメータの設定によっては、数値シミュレーションにおいても、解が発散する場合があることが分かった。今後は、上記の問題点について、更に検討を進めシステム同定の精度の向上を図るとともに、実観測記録の解析などを行う予定である。

本研究を進めるにあたり、武蔵工業大学、星谷勝教授の指導を受けている。また、本研究を行うに当たり、東京電力(株)技術研究所、蔵持慈男氏および佐藤博氏、篠塚研究所(株)田中良広氏の協力を得ている。ここに記して感謝致します。

(参考文献)(1)Hoshiya, M., and Saito, E., Structural Identification by Extended Kalman Filter, Journal of E. M. Div., ASCE, Vol. 110, No. 12

(2)星谷、斉藤、線形多自由度系の動特性の推定、土論集第344号

(3)松島、大木、久保：変電機器基礎の振動特性同定の理論、土木学会第45回年次学術講演会、I部門、pp. 804-805