

(104) 連成系振動問題に対するパラメータ同定の基礎検討

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
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、地盤と基礎の動的相互作用を支配するパラメータの同定に関する基礎研究である。ここでは、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の同定を数値シミュレーションにより検討している。構造物基礎は、水平と回転の2自由度を有する剛体モデルで表現した。同定するパラメータは、水平および回転のバネ定数と減衰定数とした。パラメータ同定手法には星谷・斉藤による拡張カルマンフィルタ重み付き繰返し法(EK-WGI法)^{1,2)}を使用した。今回の検討では、同定手法の適用性を検討するために、観測波形を応答計算により作成し、同定結果の精度および同定手法の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^{3,4)}による研究がある。松島らは、変電機器-地盤系の振動特性同定問題を対象として、ガウス・ニュートン法による定式化を示すとともに、実データを用いた同定を行っている。この研究では、実地震観測記録によるパラメータ同定結果と設計値の比較を行い、実際の構造系の動特性は設計値の50%程度に同定されることを報告している。

本研究は、松島らの研究に刺激され、強い連成を伴う振動を示す地盤-基礎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

(1) 構造モデル

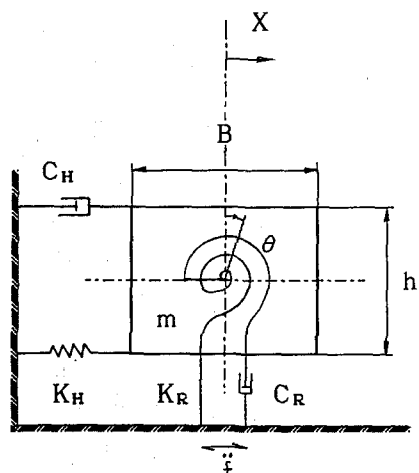
地盤-基礎連成系振動問題に対しては種々のモデル化が考えられる。本研究では、基本的な検討を行うため、構造モデルは図-1に示すような簡単なモデルを採用した。地盤に埋設された基礎は質量 m の剛体でモデル化した。剛体モデルは水平のバネ; K_H とダッシュポット; C_H および回転のバネ; K_R とダッシュポット; C_R により地盤に支持されているものとした。なお、各バネ定数および減衰定数とも非線形性は考慮していない。

(2) 同定手法

同定手法は、拡張カルマンフィルタ重み付き繰返し法を用いる。状態方程式の定式化は、直接定式化とした。

ここでは剛体の質量 m 、および剛体の重心に関する慣性モーメント J が既知であるものとし、水平および回転のバネ定数および減衰定数を同定パラメータとした。

振動方程式を状態空間表示するために $Z_1=X, Z_2=\theta, Z_3=\dot{X}, Z_4=\dot{\theta}, Z_5=C_H, Z_6=K_H, Z_7=C_R$ および $Z_8=K_R$ とおき、システムのノイズを $\varepsilon(t)$ とすれば、状態方程式は(1)式で表される。



ここに 質量 $m=1.735\text{tfs}^2/\text{m}$
幅 $B=2.35\text{m}$
高さ $h=0.90\text{m}$

図-1 検討モデル

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \\ \dot{z}_7 \\ \dot{z}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_3 \\ z_4 \\ -(z_3 + z_4 \frac{h}{2}) \frac{z_3}{m} - (z_1 - z_2 \frac{h}{2}) \frac{z_6}{m} - \ddot{f}(t) \\ -\frac{h}{2J} z_3 z_5 - \frac{1}{J} (\frac{h^2}{4} z_5 + z_7) z_4 + \frac{h}{2J} z_1 z_6 - \frac{1}{J} (\frac{h^2}{4} z_6 + z_8) z_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \varepsilon(t) \quad (1)$$

また水平方向の変位；X，速度； $\dot{X}$ ，回転角； θ および回転角速度 $\dot{\theta}$ を観測データとし，観測ノイズを $\omega(t)$ とすれば，観測方程式は（2）式となる。

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{bmatrix} + \omega(t) \quad (2)$$

（1）および（2）式をEK-WGI法のアルゴリズムに組み込み，同定を行った。

3. 数値計算例

（1）計算条件

計算条件を，表－1に示す。

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，応答波形が十分な振幅を持つよう物理定数を設定したものである。この場合には，同定に用いるパラメータの初期値の影響や観測データに含まれるノイズの影響を検討するため，条件を変化させている。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ており，実変電機器基礎を想定したものである。この場合には，系の固有振動数が高くなり，基礎は周辺地盤と同一の挙動を示すこととなる。なお，基礎の寸法および質量は全ケースとも文献3のデータを使用している。

また，カルマンフィルタの誤差共分散行列の初期値，観測方程式のノイズの分散値およびグローバルな繰り返しにおける重みは，各計算ケースとも共通の値を使用している。今回の計算では状態方程式に含まれるノイズは考慮していない。

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					$\sigma_y \times 5\%$	初期値<真値
4					$\sigma_y \times 10\%$	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_y) $\times \alpha\%$ の分散を持つ平均値0のホワイトノイズ

(2) 計算方法

数値計算は、まず表-1の同定パラメータ(真値)を与えた振動方程式をルンゲクッタ法により解き、応答波形を求めた。次に、この応答波形を観測波形とみなし、EK-WGI法によりパラメータ同定を行った。入力波形は、全てEL-CENTRO(1940)を使用した。ただし、ケース5およびケース6では時間刻みを0.01秒に直線補間している。

(3) 計算結果

基礎の応答波形が十分な情報を持つようにパラメータを設定した計算ケース1～ケース4はいずれの場合も、1回目の繰返しで真値近くに収束し安定した。しかしパラメータを実変電機器基礎相当に設定した計算ケース5および計算ケース6については、計算が安定せず30回程度繰返した後に計算不可能となった。各パラメータの推定値を既知の真値で正規化した結果を表-2に示す。ただし、計算ケース5および計算ケース6については、20回繰返した時の推定値を示してある。この表より以下の結果が得られる。

表-2 パラメータ推定結果

推定値/真値で表示

	C_H/C_{H0}	K_H/K_{H0}	C_R/C_{R0}	K_R/K_{R0}
ケース1	0.939	0.989	1.070	0.962
ケース2	0.939	0.984	1.070	0.962
ケース3	0.943	0.983	1.073	0.965
ケース4	0.949	0.983	1.077	0.968
ケース5	1.295	0.641	2.490	0.795
ケース6	1.619	0.658	4.435	2.240

① 応答が十分な情報を有する場合には、初期条件やノイズによる同定精度への影響は認められない。

② 同定に成功した場合の推定値の真値に対する誤差は、8%以下である。

③ バネ定数、減衰定数とも水平方向のパラメータの方が回転方向に比べて精度が良い。

④ 同定に失敗した計算では、回転方向の減衰定数の真値からのズレが最も大きい。

また、パラメータの収束の状況を図-2および図-3に示す。図-2は同定に成功した例として、計算ケース1の収束状況を示したものであり、図-3は同定に失敗した例として、計算ケース5の収束状況を示したものである。

図-2では、どのパラメータも1回の繰返しにより真値近くに収束し、その後の繰返しでは大きな変動は認められない。また、回転方向の減衰定数のみが、真値よりも大きな値に同定されている。これは計算ケース2～計算ケース4に共通の結果であった。

一方、図-3では、回転方向の減衰定数が大きな変動を示しており、最終的にはこれがオーバフローを起こし計算不能になっている。これに対し、水平方向のパラメータおよび回転のバネ定数は20回程度の繰返しまでは、あまり大きな変動を示していない。特に水平のバネ定数は真値との誤差が35%程度あるものの安定した挙動を示している。この現象はケース6でも同様であった。

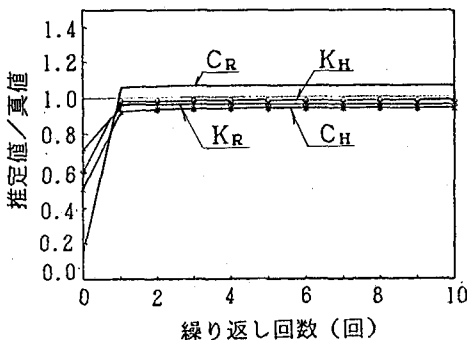


図-2 パラメータ収束状況 (ケース1)

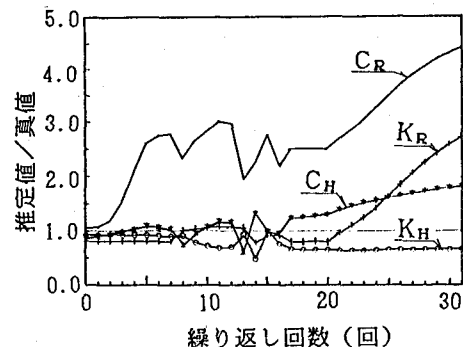


図-3 パラメータ収束状況 (ケース5)

以上の結果より、連成系の同定問題に対して次の結論が得られた。

- ①観測データに十分な情報が含まれている場合には、本手法によりパラメータ同定が可能である。パラメータは真値に対し数パーセントの誤差で同定できる。
- ②実変電機器を対象とした物理データを使用した場合、同定が困難となる。これは、応答計算では基礎と地盤がほとんど同一の挙動を示し、連成効果の影響が観測データに十分含まれていないためと考えられる。

(4) 現状における問題点

連成系のパラメータ同定に対して、現状の問題点を検討した結果は次のとおりである。

- ①観測データに地盤と基礎の相対変位・速度・回転角速度および回転角を使用しているがこれらの振幅が非常に小さい。このため、観測波形に連成振動の情報を十分に含んでいない。このため、図-3に示すように、回転方向のパラメータの変動が大きくなったものと考えられる。したがって、使用するデータに連成振動の情報が十分含まれるよう、観測波形の種類やデータの振幅などの観測データの質に対する検討が必要である。
- ②同定するシステムの固有周波数が2次で30Hz程度と高い。これは、カルマンフィルタの更新アルゴリズム中の積分が発散する可能性を示唆している。比較対象の意味で文献3に示されている方法で計算を行った結果、同定は成功した。文献3では積分にニューマークβ法を使用しており、本研究とはこの点で大きく異なっている。本研究においても、システムの固有周波数が低い場合では同定に成功したことから、高い固有周波数を有する連成振動方程式の積分における数値安定性について検討する必要がある。

4. まとめ

地盤-基礎連成系振動問題のパラメータ同定に対し、カルマンフィルタ手法を適用するための基礎検討を行った。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わかった。今後は、上記の問題点について、さら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も行う予定である。

また、本研究では、構造系の支配方程式を規定したうえでのパラメータ同定を対象としているが、実変電機器-基礎系のシステムのモデル化を含むシステム同定についても検討を進めることとしている。

本研究を進めるにあたり、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。ここに記して感謝いたします。

(参考文献)

- (1) Hoshiya, M., and Saito, E.; Structural Identification by Extended Kalman Filter, Jour. 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, 土木学会論文集第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
- (4) 大滝, 松島, 松井; 変電機器基礎の振動特性同定の適用, 土木学会第45回年次学術講演会, I部門 pp. 802-803