

III-472

EK-WL I法と有限要素法による逆解析

(株)地崎工業 正員 須藤 敦史
 武蔵工業大学 正員 星谷 勝

1. はじめに

設計時に評価した条件の再検討や構造物全体の安定性の評価のために、施工過程に応じて得られる観測データを用いて地盤の初期応力や土質定数を同定する逆解析が行われている。しかし、各種物性値試験や観測データは、ばらつきを有するものと考えられ、ベイズ理論により確率的にデータを取り扱い、地盤定数等の事前分布を更新し事後分布を推定するカルマンフィルタを用いた逆解析手法の研究が行われている。^{1) 2)} 本研究はこの流れの研究であり、著者らの提案した手法(EK-WL I法)³⁾と有限要素法と組み合わせた手法の逆解析への適応性について検討を行っている。

2. EK-WL I法への適用

(1) 有限要素法の定式化

一般に、有限要素法における二次元弾性平面ひずみ問題は、次式の剛性方程式で示される。

$$Ku = f \quad (1)$$

K: 剛性マトリクス
 u: 変位ベクトル
 f: 荷重ベクトル

式(1)より変位ベクトルは次式となる。

$$u = K^{-1}f \quad (2)$$

一方、拡張カルマンフィルタ中の観測方程式は変位量uに観測雑音を加えたものであり、この観測方程式を式(2)の形で現すと式(3),(4)のようになる。

$$y = u + v = h(X) + v \quad (3)$$

$$h(X) = K^{-1}f \quad (4)$$

ここで、剛性マトリクスは拡張カルマンフィルタの状態ベクトルの関数になる。

次に、地盤定数を要素とする状態ベクトルは、観測値が一時に得られれば時間的に遷移せず一定と考えられる。また地盤定数は、地盤内の特定箇所の値であり地盤全体の特性とは、異なる場合が多く、解析対象地盤は土質調査や試験等により空間的なばらつきを有し、地盤内では均質に存在するものとは限らない。そこで、これを拡張カルマンフィルタの状態方程式のノイズと仮定すると式(5)のようになる。

$$X(tk+1|tk) = IX(tk|tk) + wtk \quad (5)$$

(2) 拡張カルマンフィルタ中の変換行列

拡張カルマンフィルタ中の変換行列は、式(3)を各状態ベクトルで偏微分して得られるが、有限要素法を組み込んだ観測方程式を直接偏微分により求めることは難しい。そこで、この偏微分を近似的に求める手法として各状態ベクトルを順次微量変化させて求める影響係数法^{1) 4)}により算出する。

$$\frac{\partial h_i(X, t_k)}{\partial x_j} = \frac{h_i(X, t_k + \Delta X_j e_j) - h_i(X, t_k)}{\Delta X_j} \quad (6)$$

$h_i(X_j)$: $h(X)$ の j 番目の観測点, ΔX_j : X_j の微量増分
 $e_j = [0, 0, 1, 0, 0]^T$ (j 番目の要素が 1, 他は 0)

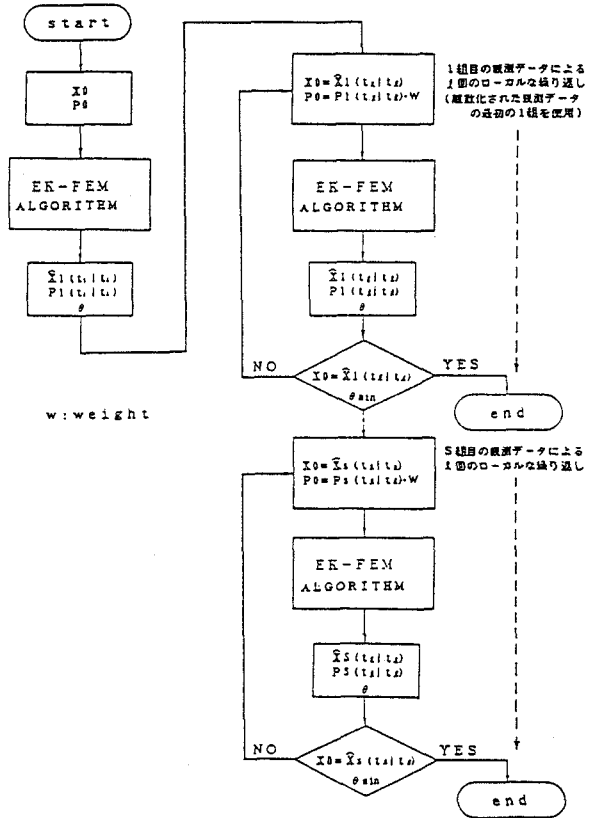


図-1 EK-WL I - FEMの逆解析フロー図

以上により、有限要素法と拡張カルマンフィルタを組み合わせた逆解析手法が、有限要素法の特別な定式化を用いずに行える。EK-WLI法による逆解析フローを図-1に示す。

3. 数値解析

本手法の適用性を検証する目的で地盤モデルを想定し、本手法による逆解析を行い地盤定数(弾性係数)を推定する。逆解析に使用したモデルは図-2に示す三層の地盤定数から成る掘削地盤モデルである。なお、ポアソン比は変位量への影響は小さいと仮定し確定値とした。ここでは、変位量を既知としてモデル化した地盤の弾性係数を推定する問題であることから、図-2に示した弾性係数に空間的ばらつきを有する値と考え、弾性係数の平均値の1.0%の分散値もつ正規性の平均0のノイズをシステムノイズとして加え実際の地盤とし、あらかじめ順解析より変位量を求めた。また観測値には、観測誤差等のノイズが含まれることより計算された変位量の平均値の5.0%の分散値をもつ正規性の平均0のノイズを観測ノイズとして加え観測データとし、本手法により逆解析を行っている。

逆解析を行った結果を表-1, 推定弾性係数の収束過程を図-3示す。

本手法は、土質調査・試験等の誤差や観測誤差が混入する場合の逆解析において、EK-WLI法の状態・観測方程式中にその誤差をノイズとして評価することにより、安定した状態ベクトルの推定結果が得られた。

本研究は星谷の指導により、須藤が行ったのものである。

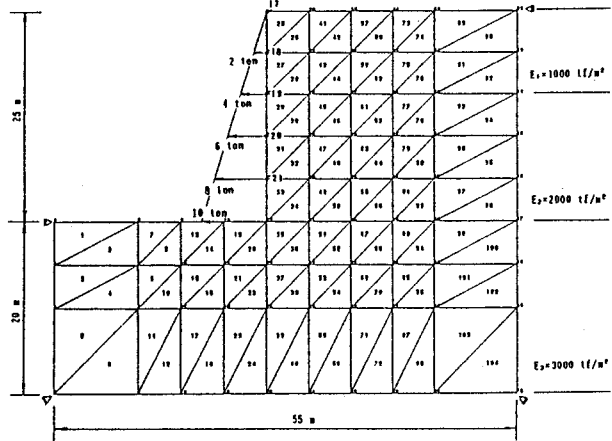


図-2 地盤解析モデル図

表-1 推定状態ベクトル(弾性係数)

回数	E1(1000tf/m ²)	E2(2000tf/m ²)	E3(3000tf/m ²)
0	1500.0	2500.0	3500.0
1	1500.0	2500.0	3500.0
2	1499.4	2499.4	3499.9
3	1153.1	2214.9	3403.8
4	934.1	1976.2	2862.4
5	970.0	2009.0	2899.5
6	983.5	2038.7	2911.2
7	983.2	2039.9	2911.2
8	983.2	2038.9	2911.2
9	924.5	2075.7	2945.9
10	875.9	2106.3	2984.2
11	880.1	2103.3	2985.6
12	879.8	2103.5	2985.5
13	949.5	2044.8	3042.9
14	1026.3	1983.3	3101.7
15	1026.5	1984.7	3100.8
16	1026.5	1984.7	3100.8

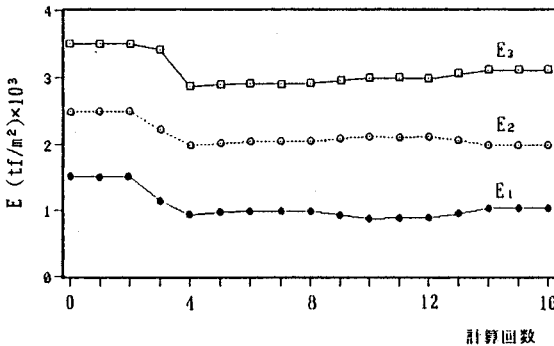


図-3 状態ベクトル(弾性係数)推定結果

〈参考文献〉 1)門田・斉藤ら：繰り返し拡張カルマンフィルタによる異方性岩盤物性の同定と地下空洞計測管理への適用, 土論集 Vol406, 2)鈴木・石井：拡張カルマンフィルタによる土質定数の空間分布推定, 土論集 Vol406, 3)須藤・星谷：拡張カルマンフィルタの基本的考察とEK-WLI法の提案, 土論集(投稿中), 4)W.G-W.Yen, Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem, Water Resources Research, 22(2) 1986