

1. はじめに

文献1)では、観測量としてシミュレーションによる切梁軸力及び山留め壁の変位量を用いて、EK-WGI法により未知パラメーターの作用外力及び地盤反力係数の推定を行い精度良い推定結果が得られることを示した。文献2)は文献1)での定式化法を用いて、実測データから各パラメーターの推定を行い、実測値との比較から本推定法の検証を行った。文献3)では文献2)で推定した設計パラメーターを用いて、次の掘削段階の予測計算を行った。そして推定された山留め壁の変位量、曲げモーメント、切梁軸力等は実測データとほぼ良い対応を示すことが明らかになった。本報告は、文献1)の定式化に対して以下3点の改良を行った。i 掘削面下の塑性域の深さは、推定時には未知である。この深さを推定するには、塑性域と弾性域の定式化が異なるため多くの繰返しが必要となる。そこで掘削面下を1つの定式化とする。ii 実測データの切梁軸力は、外気温の影響を強く受けることから未知のパラメーターとして取り扱う。iii 側圧分布は、任意のデータ個数間に対して線形変化の任意分布とする。

2. 定式化

拡張カルマンフィルターは、次式に示した非線形の状態方程式(1)と非線形の観測方程式(2)を基本式としている⁶⁾。

$$\frac{dY_k}{dx} = f(Y_k, x), Y_{k0} \sim N(\hat{Y}_{k0}, P_{k0}) \quad (1)$$

$$Z_k = h(Y_k, x_k) + v_{k0} \quad (2)$$

ある物理現象を数学モデルで表わす場合、微分方程式による定式化が一般的である。このモデル化によって生ずる定数(パラメーター)を未知パラメーターとして推定する問題をパラメーター同定と呼んでいる。拡張カルマンフィルターによる未知パラメーター推定への定式化には、2つの方法が考えられる。すなわち、[A] 微分方程式を状態空間表示を用い、1階のベクトル微分方程式として(1)式に対応する状態方程式とする方法 [B] 微分方程式の一般解を求め(2)式の観測方程式とする方法である。

さて山留め架構に対する定式化は、地表面～掘削面間、掘削面下の塑性域に対して

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = f(x) \quad (3)$$

また掘削面下の弾性域に対しては

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y = g(x) \quad (4)$$

ただし $f(x), g(x)$ は、多項式として示されている⁴⁾。

しかしながら、逆解析では掘削面下の塑性域と弾性域において定式化を異にすることは、推定時点で塑性域の深さが明らかでないので繰返し計算が必要となる。そこで掘削面下を(4)式による定式化とし、塑性域と弾性域との区別を行わないこととした。

[A] の方法では、(3)式及び(4)式に対して状態空間表示を用いることにより容易に(1)式の状態方程式と対応できる。

つぎに[B]の方法で定式化する場合には

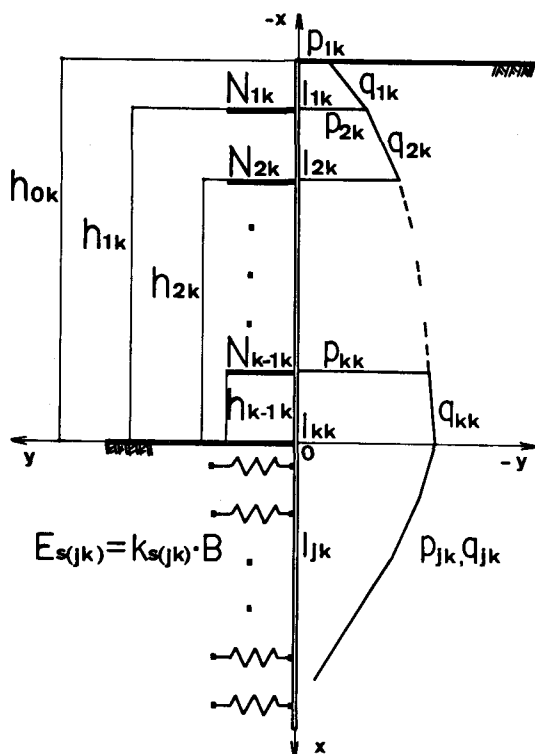


図-1 k次掘削過程の推定モデル

(3) 式の一般解は

$$y = \frac{1}{EI} (a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0) \quad (5)$$

(4) 式の一般解は

$$y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + \frac{1}{4EI\beta^2} q(x) \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}} \quad \text{として示され}$$

(5) (6) 式は (2) 式の観測方程式と対応できる。なお、この時の状態方程式は線形となり遷移行列は単位行列となる。

1 例として k 次掘削過程 (図-1) における $k-1$ 段切梁～掘削面下の微分方程式は

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{1}{EI_{k-1}} \{ q_{k-1} (x + h_{k-1,0}) + P_{k-1} \} \quad (7)$$

として示される。

ここでは切梁軸力を未知のパラメーターとすることからモーメントのつり合い

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} = & \frac{1}{EI_{k-1}} \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{1}{6} \{ 3P_{i-1} + q_{i-1} (h_{i-1,0} - h_{i,0}) \} \{ h_{i-1,0} - h_{i,0} \}^2 \right. \right. \\ & + \frac{1}{2} \{ 2P_{i-1} + q_{i-1} (h_{i-1,0} - h_{i,0}) \} \{ h_{i-1,0} - h_{i,0} \} \{ h_{i,0} + x \} \\ & \left. \left. + \frac{1}{6} \{ 3P_{i-1} + q_{i-1} (h_{i-1,0} + x) \} \{ h_{i-1,0} + x \}^2 - \sum_{i=1}^{k-1} N_i (h_{i,0} + x) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

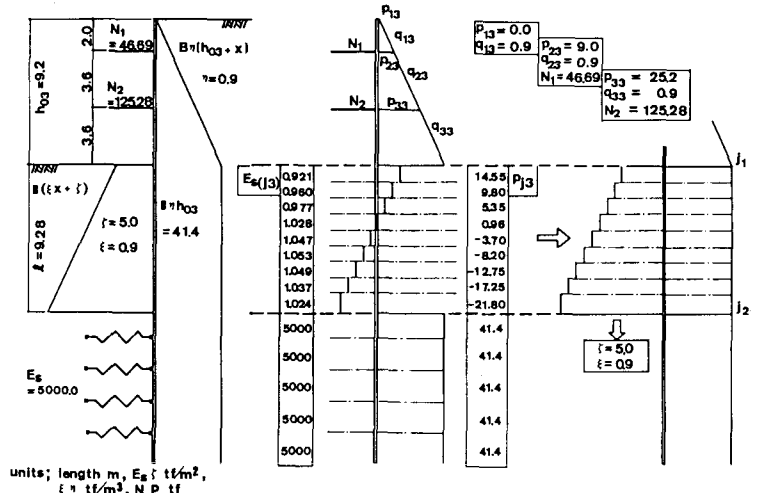
により定式化を行った。

3. 計算例

図-2 (a) に示した山留め架構モデル及び各定数を用いて、順解析を行いシミュレーションデータ (回転角、変位) を求めた。図-2 (b) の□内は推定値である。地表面～掘削面間の切梁軸力及び側圧分布は、精度良く推定できることがわかる。掘削面下全体の側圧分布形状には、同図から明らかなように不連続な分布形状になることがわかる。図-2 (c) は、 $j=1, j=2$ 点で等しい値として主働側側圧を求め、図-2 (b) の相対的な側圧とつり合う側圧を受働側に作用させたものである。この方法により、主働側及び受働側側圧の推定が可能となり、また塑性域の深さ l の判断も繰返し計算を行うことなく可能となる。

なお、これらの推定は、EK-WG I 法⁵⁾を用いれば **A** 及び **B**

による定式化方法とも同様な精度の結果が得られる。また **A** 及び **B** による定式化の数値計算上の特徴は、**A** 離散化に注意を要する点¹⁾ **B** 掘削面下では β の初期値の与え方により発散現象を生ずる点、また非線形 (掘削面下) である場合には、繰返し拡張カルマンフィルタアルゴリズム⁶⁾を併用する必要がある点である。



(a) 順解析モデル (b) 推定結果 (c) 塑性域の推定
図-2 順解析モデル及び推定結果

参考文献

- 1) 斉藤, 山根, 他: 拡張カルマンフィルタによる山留め設計パラメータの推定 (その1), 土質工学研究発表会, 1985.
- 2) 山根, 斉藤, 他: 拡張カルマンフィルタによる山留め設計パラメータの推定 (その2) -実測データを用いた場合-, 土質工学研究発表会, 1985.
- 3) 山根, 斉藤, 他: 拡張カルマンフィルタによる山留め設計パラメータの推定 (その3) -次の掘削段階の予測計算-, 土木学会第40回年次学術講演会, 1985.
- 4) たとえば 山根, 吉田, 秋野: 掘削工事における切り土留め機構の理論的考察, 土と基礎, 17-9, 1989.
- 5) M.Hoshiya, E.Saito: Structural Identification by Extended Kalman Filter, Jour. E.M.Div., ASCE, Vol.110, No.12, Dec., 1984.
- 6) Jazwinski, A.H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970.