

(61) 拡張カルマンフィルターを用いた不均質岩盤の物性同定

フジタ工業 (株) 技術研究所	門田俊一
同 上	斉藤悦郎
同 上	和久昭正
同 上	鎌田正孝

1. はじめに

最近、地下空洞・トンネル・斜面等の岩盤工事において、工事中の観測データから岩盤の力学定数や初期地圧を同定し、設計時に評価した値の見直しや岩盤構造物全体の安定性を評価する方法が多用されている。このような逆解析手法を用いた安定性評価においては、解析モデルとして採用する地盤の等価モデルを慎重に選択する必要がある。一般に、岩盤は、不連続面の影響や不均質さの影響により、複雑な力学特性を示すものの、岩盤を等方等質とする等価モデルが、最も実用的かつ多用されている。しかしながら、逆解析精度をさらに向上させるためには、不連続面や不均質さの影響を考慮したより現実に近い等価モデルを採用する必要がある。

筆者らは、不連続面の力学的特性や空間における分布性状による異方性岩盤物性の同定問題については既に報告した¹⁾。今回は、さらに、不均質な岩盤(物性の異なる領域が複合する岩盤)の物性同定問題に、前報と同様に、拡張カルマンフィルターによる逆解析手法を適用した。ここでは、まず、この手法のパラメータ同定問題への定式化方法の概要を示し、つぎにシミュレーションデータを基にした未知パラメータの同定精度を検討した結果を報告する。検討対象とした岩盤構造物は地下空洞・岩盤斜面であり、それぞれ、拡張カルマンフィルターに境界要素法及び有限要素法を組み合わせた逆解析手法によるものとする。

2. 拡張カルマンフィルターによる逆解析

有限要素法を例として取り上げ、拡張カルマンフィルターを用いた逆解析手法の概要を示す。

有限要素法の定式化において、不均質性を考慮した力学モデルを

$$P = K \delta \quad (1)$$

ここで、P : 外力ベクトル
K : 剛性マトリクス
δ : 変位ベクトル

のように示し、(1)式の部分マトリクス、部分ベクトルを

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ K_{1N} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、
P_i : Pの部分ベクトル
δ_i : δの部分ベクトル
K_{ij} : Kの部分マトリクス

とする。ここで、K_{ij}においては、不均質な力学特性が考慮されているものとする。

次に、観測データとして、任意位置の変位δ_i、および、任意位置の外力P_jが得られるものとし、これらによって作られる観測ベクトルyを次式で示すものとする。

$$\begin{bmatrix} y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i \\ P_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

さらに、未知パラメータθを変数とし、(1)式をyについて展開して次式のように示すものとする。

$$y = h(\theta) \quad (4)$$

拡張カルマンフィルター^{2), 3)}は、線形ダイナミックシステムに対する最適状態推定のカルマンフィルターに対して、より一般的な非線形システムに適用できるように拡張されたものである。一般に拡張カルマンフィルターの基本式である非線形の状態方程式、および、観測方程式は、それぞれ、(5)式、(6)式のように示される。

$$dX_t/dt = f(X_t, t) + G_t w_t \quad (5)$$

$$y_{tk} = h(X_{tk}, t_k) + v_{tk} \quad (6)$$

ここで、 X_t , X_{tk} :それぞれ連続型、離散型の状態ベクトル

y_{tk} : t_k 時間での観測ベクトル

w_t : 状態方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ $E[w_t w_{\tau}^T] = Q_t(t - \tau)$

v_{tk} : 観測方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ $E[v_{tk} v_{tj}^T] = R_{tk} \delta_{kj}$
(δ_{kj} : クロネッカデルタ関数)

G_t : 変換行列

そして、初期状態ベクトル X_0 と初期の誤差の共分散行列 P_0 が与えられれば、観測データを順次取り込み漸次的に最適推定値を求めることができる。(4)式は、拡張カルマンフィルターの基本式である(6)式と対応した式として示されることがわかる。すなわち、初期の状態ベクトル X_0 (ここでは、未知パラメータ θ)の値、および、初期の誤差の共分散行列(P_0)の値を与え、観測データ y を取り込むことにより、その観測データを基にした未知パラメータ θ の最適推定値を求めることができる。

さて、逆解析の定式化⁴⁾は、逆定式化と直接定式化とに分類することができる。逆定式化法は、(4)式を関数形として定式化し直す方法であるが、複雑な数学モデルの場合には、この定式化はかなり困難である。ここでは、任意の観測データを簡単に選択できることから、直接定式化を用いて計算を行なうこととした。計算に必要な $h(\cdot)$ は、推定された未知パラメータ θ に対して順解析により直接求める。すなわち、ここでの直接定式化法では、拡張カルマンフィルターと順解析プログラム(有限要素法や境界要素法による解析プログラム)が準備されていれば、特別な定式化を行なう必要がなく、確率論的手法による未知パラメータ推定可能となる。なお、計算では、山留め工事の情報化施工における逆解析において、実測データによる適用性が良いものとして確認した繰返し拡張カルマンフィルター⁵⁾を用いた。

3. シミュレーションデータによる検証

本直接定式化法の逆解析によって得られる未知パラメータの推定結果の検証は、岩盤斜面・地下空洞を対象として、以下に示す方法により行なった。まず、物性が既知であるとして掘削解析を実施し、得られた変位を仮の観測データとみなす。つぎに、この観測データを用いて本手法により未知パラメータの推定を行う。そして、推定パラメータと仮の観測データを評価したパラメータとの数値比較により、推定精度を検討する。

本逆解析手法では、個々の領域は等方等質な線形弾性域であるものの、材料特性の異なる複合岩盤の物性を対象とする。従って、同定すべき未知パラメータは、各領域のヤング率 E 、ポアソン比 ν 、および、複合領域全域の初期地圧である。しかしながら、逆解析においては、解の安定性からできる限り未知パラメータの数を絞り込んでおくことが必要である。このため、未知パラメータはヤング率のみとし、ポアソン比($\nu=0.3$)、初期地圧については、すべての領域で既知パラメータとした。なお、作用外力と考えられる初期地圧の扱いについては今後の課題である。

検証モデルとして、地下空洞モデルでは、図-1に示すように、材料特性が異なる2つの領域が複合する岩盤中に、直径10m、長さ32mの円柱形地下空洞を、静水圧 $P_0=50\text{kgf/cm}^2$ の初期地圧下に掘削する問題を扱い、堅岩部ヤング率 E_1 、弱岩部ヤング率 E_2 を逆解析した。観測変位は、図-1(b)の縦・横断面図中

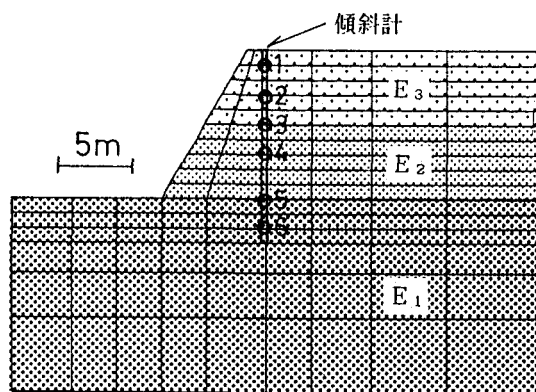
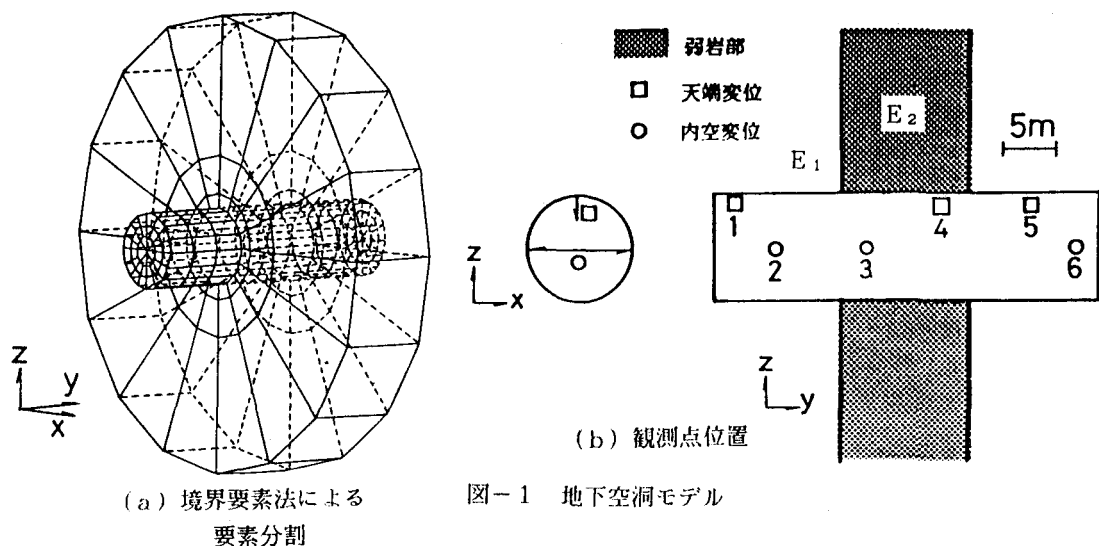


表-1 未知パラメータの正解値および推定値
(地下空洞モデル)

	正解値	推定値
E_1 (kgf/cm ²)	10000	9969
E_2 (kgf/cm ²)	2000	2003

表-2 未知パラメータの正解値および推定値
(岩盤斜面モデル)

	正解値	推定値
E_1 (kgf/cm ²)	5000	4997
E_2 (kgf/cm ²)	3000	3000
E_3 (kgf/cm ²)	1000	1000

に示すように地下空洞壁面変位とした。また、順解析プログラムには、データ作成を極めて簡略化できる三次元境界要素法による掘削解析手法⁶⁾を用いた。

つぎに、岩盤斜面モデルでは、図-2に示すように、3層構造をなす地山中を掘削する問題を扱い、物性値が異なる領域のヤング率 E_1 、 E_2 、 E_3 を逆解析した。観測変位は、斜面法先より挿入した傾斜計の水平変位を用いた。また、順解析プログラムには、二次元平面ひずみモデルによる有限要素法を用いた。なお、掘削前の初期地圧は、物体力による自重解析 (単位体積重量 2.5 tf/cm^3) により鉛直方向初期地圧を評価し、水平方向初期地圧は、側圧係数 $K_0=1$ として評価することとした。

検証結果として、収束した各パラメータと検証モデルに使用した各パラメータとの比較を表-1、2に示した。また、各未知パラメータ、および、観測変位の収束状況をそれぞれ図-3、4、表-3、4に示した。

以上の図表から、数回の繰返し計算により各未知パラメータは収束し、その精度も良好であり、また観測変位と収束した未知パラメータによる観測変位ともかなり良い精度でフィッティングできることが確認できた。

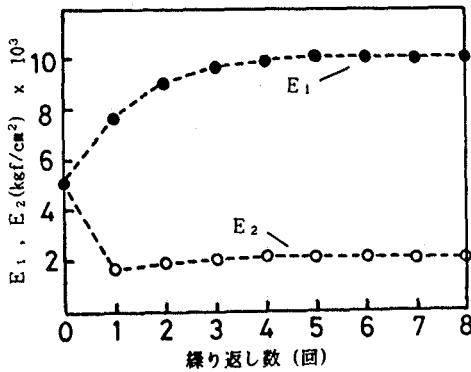


図-3 パラメータの収束状況
(地下空洞モデル)

表-3 観測変位および確認変位
(地下空洞モデル)

観測位置	正解値 (cm)	確認値 (cm)
1	-1.70	-1.70
2	-4.70	-4.71
3	-14.65	-14.75
4	-7.35	-7.40
5	-2.35	-2.35
6	-1.70	-1.70

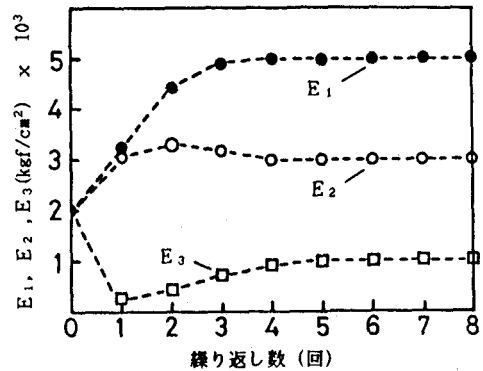


図-4 パラメータの収束状況
(岩盤斜面モデル)

表-4 観測変位および確認変位
(岩盤斜面モデル)

観測位置	正解値 (mm)	確認値 (mm)
1	-3.70	-3.70
2	-3.21	-3.21
3	-2.66	-2.66
4	-2.39	-2.39
5	-1.77	-1.77
6	-1.63	-1.64

4. おわりに

本報告は、拡張カルマンフィルターと境界要素法及び拡張カルマンフィルターと有限要素法を組合せた逆解析方法を示し、それぞれ地下空洞及び岩盤斜面の不均質物性の同定を試みたものである。シミュレーションデータに基づく逆解析結果より、両者とも5～6回のくり返し計算により、精度良く未知パラメータの同定ができることが確認できた。くり返し計算に用いた局所的な拡張カルマンフィルターのくり返し法は、文献^{1),5)}にも示した様に、実務問題に対して安定性の良い解が得られている。また、本事例の未知パラメータ及び観測データに対する確率量は、文献^{1),5)}と同様な値を用いている。拡張カルマンフィルターによる逆解析は、未知パラメータ及び観測データを確率量として捕えた解析法で、上述のくり返し法及び確率量程度を用いれば、実務問題に対して有効な方法であると考えられる。

今後は、実測データによる検証を実施し、実務問題への適用性についても検討を加える予定である。

(参考文献)

- 1) 門田、斉藤、和久、鎌田；拡張カルマンフィルターを用いた異方性岩盤物性の同定、第7回岩の力学国内シンポジウム講演概要集、1987。
- 2) Jazwinski, A.H.; Stochastic processes and filtering theory, Academic Press, 1970。
- 3) Hoshiya, M. and Saito E.; Structural identification by extended Kalman filter, Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 110, No. 12, 1984。
- 4) Gioda, G.; Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, April, 1985。
- 5) 斉藤・古賀他；拡張カルマンフィルター支援による山留め工事の情報化施工-解析手順-、フジタ工業技術研究所所報、第23号1987。
- 6) 門田、和久、鎌田；三次元境界要素法による領域分割法を用いた掘削解析手法、土木学会第42回年次講演会概要集(Ⅲ)、1987。

(61) Identification method of elastic constants for inhomogeneous
rock mass using extended Kalman filter

by

Shunichi Kadota
Etsuro Saito
Akimasa Waku
Masataka Kamata
(Fujita Corporation)

ABSTRACT

Recently the Identification or Inverse problem can be applied to any geotechnical problems. This is a report on a study of identification problem of elastic constants for inhomogeneous rock mass from set of displacements.

The extended Kalman filter (EFK) of controle theory and numerical methods such as Finite Element Method and Boundary Element Method was applied to the parameters identification method. In this paper, verification of this method was mainly discussed using simulated data from underground opening and rock slope. In the underground opening problem, two mechanical constants were identified and this problem was analysed by EKF combined with three dimensional Boundary Element Method. In the rock slope problem, three mechanical constants were identified and this problem was analysed by EKF combined with two dimensional Finite Element Method.

From numerical results, it was clealy observed that this method was effective for parameters identification of inhomogeneous rock mass.