

(2) 拡張カルマンフィルターによる異方性岩盤物性の同定精度について

フジタ工業(株)技術研究所 ○ 門田俊一 斎藤悦郎
野間達也 和久昭正

On the Accuracy of Identification Method for Anisotropic Constants of Rock Mass
by Extended Kalman Filter

Shunichi KADOTA, Eturo SAITO, Tatuya NOMA & Akimasa WAKU
(FUJITA Corporation)

Abstract

We have already developed a method for parameter identification of mechanical constants of anisotropic rock mass. A local iterated extended Kalman Filter combined by Finite Element Method are applied to the parameter identification method. In this paper, the accuracy of this identification method is discussed using block models made of cement, calcium carbonate and hard papers.

It is concluded that this method is effective for parameter identification of anisotropic rock mass.

1. はじめに

最近、種々の岩盤構造物において、設計時に評価した設計条件の見直しや構造物全体の安定性評価を施工過程に応じて行なうために、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する逆解析手法が多用されつつある。

筆者らは、岩盤構造物の計測管理への適用を目的として、くり返し拡張カルマンフィルター^{1), 2)}と有限要素法を組み合わせた手法を用い、観測データから異方性岩盤物性値を同定する方法の研究を進めており、現時点までに、数値シミュレーションによる同定精度の検証、実測データへの適用性等について検討してきた³⁾。その結果、実測データに本手法を適用した場合、収束した解は得られるものの、得られた解の妥当性についてはさらに検討する必要がある。しかも、これらの検討は、実岩盤を対象とした場合一般に困難である。そこで、本論文では、セメント・炭酸カルシウムで作成した供試体中に、岩盤の不連続面を表現する硬質紙を挿入することによって模擬岩盤を作成し、山辺らの提案するクラックテンソル⁴⁾から模擬岩盤と等価な異方連続体の岩盤物性値を求め、これを正解値として筆者らの提案する同定手法の精度を検討した結果について報告する。

なお、本報告で対象とするパラメータ同定問題は未知パラメータに対して非線形である。くり返し拡張カルマンフィルターによる同定手法については、非線形のシステム、観測系のデータ処理としての拡張カルマンフィルターを修正し、観測系における非線形性の影響を小さくするアルゴリズムを構成したものであり、確率量に対してキャリブレーションを行なっておけば、実測データを対象とした場合の解の安定性が良いことを数値的に確認している。

2. 模擬岩盤実験の概要

実験に用いた模擬岩盤は、図-1に示すように、セメント：炭酸カルシウム：水を3：2：1.5（水セメント比0.5）の割合で混合した材料を縦・横を40cm、高さ15cmのブロック状に打設し、このブロック中に開口クラックを表現する硬質紙（スノーマット）を挿入して製作した。模擬岩盤の载荷には、模擬岩盤の中心に外形66mmのビットを用いて削孔した後、ここに外径65mm、長さ15cmの载荷板を有するポアホールジャッキを挿入し、模擬岩盤の周囲が完全拘束となる条件下で図-2に示す荷重パターンを設定した。実験は、以下の3ケースについて行ない、各ケース2体ずつ実施した。

CASE1 硬質紙を挿入しない場合。

CASE2 図-3に示すように、1軸方向のみに、幅2cm、長さ15cmの硬質紙を挿入した場合。

CASE3 図-4に示すように、CASE2に、さらに2軸方向に幅1cm、長さ15cmの硬質紙を挿入した場合。

図3、4には、挿入した硬質紙数と方向から定まる二階のクラックテンソル F_{ij} を付記している。

パラメータ同定に用いる計測変位は、ポアホールジャッキにより载荷した結果として得られる模擬岩盤内の変位であり、これらの変位は $0.5\mu\text{m}$ の感度を有するパイ型変位計を用いて計測した。変位計は、図-1に示す8点に配置し、①～④は200mm、⑤～⑧は150mmの測定長である。なお、载荷荷重は 150kgf/cm の集中荷重を与えたが、計測変位は、 $50\text{kgf/cm} \sim 150\text{kgf/cm}$ における増分変位とした。

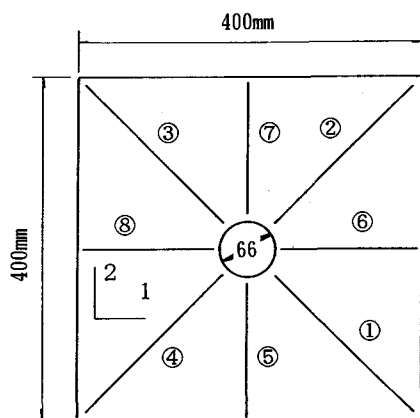


図-1 模擬岩盤

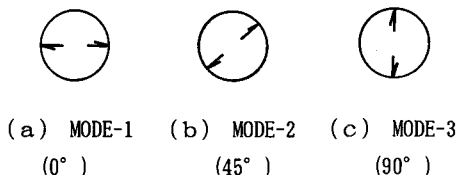


図-2 荷重载荷パターン

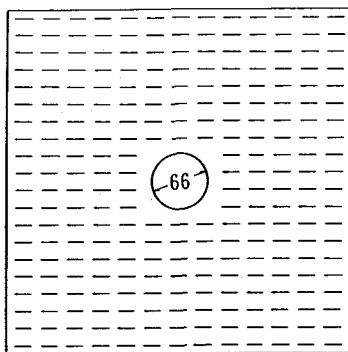


図-3 模擬岩盤 (CASE2)
($F_{11}=0$, $F_{22}=0.62$)

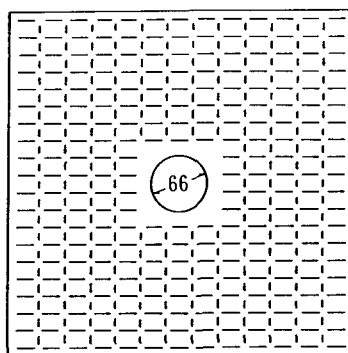


図-4 模擬岩盤 (CASE3)
($F_{11}=0.13$, $F_{22}=0.62$)

3. 同定対象としたパラメータと同定精度の検討方法

本報告では、異方性を示す岩盤の等価連続体力学モデルを線形直交異方性と仮定した上で、そのモデルのパラメータを同定する。ここでは、2. で述べた模擬岩盤実験を平面応力問題として扱うが、この場合の弾性コンプライアンスマトリクスは、次式で示される。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_1} & 0. \\ & \frac{1}{E_2} & 0. \\ \text{Sym.} & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

ここに、
E₁ : 1 方向のヤング率
E₂ : 2 方向のヤング率
G : せん断弾性係数
ν₂₁ : 1 軸方向载荷に対する
2 軸方向のポアソン比

----- (1)

これらのパラメータのうち、本報告では、E₁、E₂、Gを同定対象とし、ポアソン比ν₂₁については、同定パラメータ数を少なくする観点から、すべてのケースについて0.28の固定パラメータとした。

つぎに、精度の比較対象とするクラックテンソルによる巨視的弾性コンプライアンスマトリクスは、次式で示される。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{11}}{D} + \frac{1}{E} & -\frac{1}{E} \nu & \frac{F_{12}}{2D} \\ & \frac{F_{22}}{D} + \frac{1}{E} & \frac{F_{12}}{2D} \\ \text{Sym.} & & \frac{(F_{11}+F_{22})}{4D} + \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

ここに、
F_{ij} : 二階のクラックテンソル
E : 基質部のヤング率
ν : 基質部のポアソン比
D : 2 E / π (二次元楕円ク
ラックを仮定)

----- (2)

以上から、まず、2. で述べた模擬岩盤の計測変位から直交異方性に関するパラメータE₁、E₂、Gを同定し、式(1)に従うコンプライアンスマトリクスを求める。つぎに、基質部のヤング率、ポアソン比、および、F_{ij}から(2)式に従うコンプライアンスマトリクスを求める。そして、両者の比較検討から同定精度を検討した。

実験結果に対する検討の前に、検討方法の妥当性を調べる目的で、シュミレーションデータによる同定精度の検証を行った。すなわち、基質部のヤング率150000kgf/cm²、ポアソン比0.28の場合について、2. で示したCASE3 のクラックパターンを想定し、このモデルの計算結果を仮の計測変位とみなす。つぎに、この計算変位を用いて本手法により未知パラメータの推定を行なった。その結果、E₁=113600kgf/cm²、E₂=757446kgf/cm²、G=52085kgf/cm² が得られたが、式(1)、式(2)によるコンプライアンスマトリクスを比較して表-1に示す。この表より、両者がほぼ一致していることから、今回採用する検討方法の妥当性が証明された。

表-1 コンプライアンスマトリクスの比較

クラックテンソル によるコンプライアンス	直交異方性モデル によるコンプライアンス
$\begin{bmatrix} 0.803 & -0.187 & 0. \\ & 1.316 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.903 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.883 & -0.247 & 0. \\ & 1.320 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.920 \end{bmatrix}$

表-2 供試体の物性値

	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン比
CASE1-1	169000	0.26
CASE1-2	175000	0.28
CASE2-1	163000	0.26
CASE2-2	196000	0.26
CASE3-1	171100	0.27
CASE3-2	174500	0.29

表-3 同定されたパラメータ

	E ₁ (kgf/cm ²)	E ₂ (kgf/cm ²)	G (kgf/cm ²)
CASE1-1	157760	176020	41163
CASE2-1	156600	94000	56400
CASE3-2	143400	73736	47201

表-4 コンプライアンスマトリクスの比較

	クラックテンソル によるコンプライアンス	直交異方性材料 によるコンプライアンス
CASE1-1	$\begin{bmatrix} 0.592 & -0.154 & 0. \\ & 0.592 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.491 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.634 & -0.165 & 0. \\ & 0.568 & 0. \\ \text{Sym.} & & 2.429 \end{bmatrix}$
CASE2-1	$\begin{bmatrix} 0.614 & -0.160 & 0. \\ & 1.211 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.695 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.639 & -0.166 & 0. \\ & 1.064 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.773 \end{bmatrix}$
CASE3-2	$\begin{bmatrix} 0.690 & -0.166 & 0. \\ & 1.131 & 0. \\ \text{Sym.} & & 1.647 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.697 & -0.202 & 0. \\ & 1.356 & 0. \\ \text{Sym.} & & 2.119 \end{bmatrix}$

表-5 変位比較 (×10⁻²mm)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
CASE1-1	-0.32 -0.08 -0.10	-0.24 -0.08 -0.10	-0.18 -0.08 -0.10	-0.37 -0.08 -0.10	-1.55 -1.78 -2.09	0.18 0.24 0.22	-2.60 -1.78 -2.09	0.15 0.24 0.22
CASE2-1	0.41 0.39 0.37	-2.08 -1.74 -1.69	0.25 0.39 0.37	-2.09 -1.74 -1.69	-0.99 -0.20 -0.18	-0.06 -0.05 -0.07	-0.66 -0.20 -0.18	-0.06 -0.05 -0.07
CASE3-2	0.57 0.40 0.44	-3.29 -1.76 -2.01	0.49 0.40 0.44	-1.40 -1.76 -2.01	-0.24 -0.16 -0.24	-0.06 -0.06 -0.06	-0.60 -0.16 -0.24	-0.06 -0.06 -0.06

注1) 上段 実測変位
 中段 クラックテンソルによる変位
 下段 同定されたパラメータによる確認変位

注2) 伸長が正

4. 実測データによる検証

今回はすべての実測データの内、CASE1-1、CASE2-1、CASE3-2 の場合について検討する。このうち、等方等質なCASE1-1 の載荷方向は 90° (MODE-3)であるが、CASE2-1、CASE3-2 については 45° (MODE-2)を採用した。これは、この荷重載荷方向においては、荷重載荷点付近の局所的なクラックの影響が少ないことが予想されるためである。表-2に各模擬岩盤基質部のヤング率、ポアソン比 ($\phi=50\text{mm}$ 、 $h=100\text{mm}$ の供試体使用)、表-3に同定された E_1 、 E_2 、 G を示す。また、表-2、表-3から式(1)、式(2)で求められるコンプライアンスマトリクスを比較して表-4に、実測値、クラックテンソルによる変位、同定されたパラメータに基づく変位(確認変位と呼ぶ)の比較を表-5に示す。

なお、拡張カルマンフィルターによるパラメータ同定では、観測データに対する測定誤差、未知パラメータの初期推定値および、その推定誤差に関する入力が必要である。まず測定誤差について、事前に各変位計の測定誤差を検定したところ、各変位計同様に約4%の測定誤差が含まれていることが判明した。しかしながら、今回の実験においては、載荷孔が真円、あるいは、鉛直に削孔されていないことによる誤差等、測定値には実験モデルの設定誤差に起因するものも含まれていると考え、測定誤差は基本的に20%を与えた。さらに、パイ型変位計ではせん断変形に対する測定誤差がかなり大きくなるものと考えられるため、せん断変形が予想される位置の変位計には、測定誤差として50%を与えた。つぎに、未知パラメータの初期推定値は、すべてのケースについてヤング率 100000kgf/cm^2 の等方等質な場合とし、初期値推定誤差は、文献5)から経験的な値として50%を与えた。

以上から、CASE1 は G がやや小さめに評価されているもののほぼ等方等質に、CASE2 については E_2 がやや大きめに、CASE3 については G がやや小さめに評価されているものの異方性モデルとして同定されていることが理解できる。従って、計測誤差が正しく評価されていれば、本手法を用いて異方性岩盤物性を精度よく同定できるものと考えられる。なお、初期未知パラメータ、および、その推定誤差の設定法については今後の課題である。

5. おわりに

今回の実験では、4. で述べたように、測定変位中に、載荷孔が真円、あるいは、鉛直に削孔されていないことによる誤差がかなり含まれているものと考えられる。この意味で、ポアホールジャッキタイプの載荷方法よりも、プレシオタイプの載荷方法のほうがこれらの誤差を避けられる可能性が強い。今後、この点に留意するとともに、さらにランダムなクラックパターンについても検討する予定である。

(参考文献)

- 1) Jazwinski, A.H.: Stochastic process and filtering theory, Academic Press, pp272~286, 1970.
- 2) Hoshiya, M. and Saito, E.: Structural identification by extended Kalman Filter, Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol.110, No.12, pp1757~1770, 1984.
- 3) 門田、斎藤、和久、鎌田: 拡張カルマンフィルターによる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, pp123~128、1987.
- 4) 山辺、小田: クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形と入力パラメータの決定に関する研究、土木学会論文報告集, No.382/ III-7, pp121~130、1987.
- 5) 斎藤、古賀、鎌田: 拡張カルマンフィルター支援による山留め工事の計測管理手法、土木学会論文報告集, No.391/ VI-8, pp115~124、1988.