

埼玉大学工学部 正会員 山辺 正

埼玉大学大学院 松本卓也

篠塚研究所 正会員 亀村勝美

1. はじめに

不連続性岩盤の変形挙動を特徴づける要素としては、(1)不連続面の幾何学特性(2)不連続面の力学特性(3)岩石実質部分の力学特性が挙げられよう。これらの影響を取り込んだ解析手法として、クラックテンソルによる構成則¹⁾がある。本研究では、上述の(2)に示した不連続面の力学特性を推定パラメータとして取り上げ、逆解析における推定精度について検討するものである。

2. 不連続性岩盤の順解析における構成則

クラックテンソルによる二次元変形解析における構成則は以下のように書くことができる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \left[\left(\frac{1}{H} - \frac{1}{G} \right) \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ F_{2222} & F_{2212} & F_{2212} \\ \text{sym.} & & F_{1212} \end{bmatrix} + \frac{1}{4G} \begin{bmatrix} 4F_{11} & 0 & 2F_{12} \\ \text{sym.} & 4F_{22} & 2F_{12} \\ F_{11} + F_{22} \end{bmatrix} + \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ \text{sym.} & 1 & 0 \\ & & (1+\nu)/2 \end{bmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad \cdots (1)$$

上式は、不連続性岩盤に生じる巨視的なひずみをクラック部分に生じるひずみと岩石実質部分に生じるひずみの和として求めており、不連続性岩盤と等価な異方弾性コンプライアンスを与えている。ここで、 F_{ijkl} と F_{ij} ($i, j; 1 \sim 2$)は4階と2階のクラックテンソル、 E , ν は岩石実質部分の変形性を示すヤング率とポアソン比、 H , G は不連続面の力学特性としての垂直剛性とせん断剛性を意味している。応力-ひずみ関係の初期に存在する非線形性が、対象とする岩盤あるいはそれに付随する構造物にとって問題にならない場合には、 H , G の応力依存性を考慮せずに、式(1)で示される線形異方弾性コンプライアンスによる変形解析を実施すれば十分である。

式(1)に含まれるパラメータのうちクラックテンソルを求めるにはクラック方向とクラック長さに関する確率密度関数を決定するか、あるいは露頭で観察されるクラックのトレース長さ分布などを用いることができる。岩石実質部分については多くの場合、ヤング率とポアソン比で表される等方線形弾性体とすれば十分であろう。したがって、不連続面の力学特性 H , G 以外のパラメータは、決定する上での困難は少ない。一方、 H , G についてもクラックの形状を三次元のコイン状(penny-shape)と仮定すれば、岩石実質部分の弾性係数 E を用いてクラックの垂直剛性 H を $H=3\pi E/8$ と推定することができ、さらに過去の多くの実験結果を参照にして第1近似としてせん断剛性 G として $G=H/10$ と置くことができる。ただし、この H , G を実岩盤における変位観測結果を用いて決定できるならば上記の近似よりさらに精度の高い解析を実施でき、その意味で垂直剛性 H とせん断剛性 G を逆解析の対象とした。

3. カルマンフィルターによる逆解析

ここではカルマンフィルターによる逆解析手法²⁾を適用して、不連続性岩盤内の亀裂に関する垂直剛性とせん断剛性を求める。対象とする現象が亀裂を多数含む供試体の一軸圧縮試験であるとして、順解析により観測変位 $\{y_k\}$ を算出する。次に、推定すべき物性値 $\{x_k\}$ として垂直、せん断剛性を選び、基本システムとして場の状態方程式の式(2)と誤差 $\{v_k\}$ を含んだ観測方程式として式(3)を定める。この式(3)をテイラー展開して線形化すれば、新たな観測方程式として式(4)を得る。

$$\{x_{k+1}\} = [I] \{x_k\} \cdots (2), \quad \{y_k\} = \{h_k(\{x_k\})\} + \{v_k\} \cdots (3), \quad \{\eta_k\} = [H_k] \{x_k\} + \{v_k\} \cdots (4)$$

ただし、式(4)において

$$\{\eta_k\} = \{y_k\} - h_k(\{\hat{x}_{k/k-1}\}) + [H_k] \{\hat{x}_{k/k-1}\} \cdots (5), \quad [H_k] = \left\{ \frac{\partial h_k}{\partial x_k} \right\} \cdots (6), \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial H} & \frac{\partial U_1}{\partial G} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial U_N}{\partial H} & \frac{\partial U_N}{\partial G} \end{bmatrix}_k \cdots (7)$$

式(5), (6)を用いて反復計算により物性値の推定量 $\{\hat{x}_{k/k-1}\}$ を順次決定する。

一軸圧縮試験の順解析において用いた要素分割の一例として、図1の場合には節点1, 4, 7のx, y方向変位を観測点としている。すなわち6自由度分の変位を観測していることになるが、これら各々の観測点が推定物性値に与える影響は式(7)の感度係数で評価され、式(7)に含まれる1からNは自由度数に一致している。これらの関係を用いた逆解析プログラムを作成するために、*Mathematica*³⁾を利用して式(1)のコンプライアンスの逆行列を求めた後、H, Gに関する文字式の偏微分を明示的に実行した。

4. 解析結果

逆解析の入力値として用いる変位を計算するために、順解析においては、いずれの場合も無次元力学パラメータとして表1の値を用いた。また、幾何学パラメータには $F_{III}=F_{II}=F_0=10$ の場合を第1の解析例とした。表1のH, Gを目標値としたときの逆解析結果を図2に示す。この場合、両剛性の初期値が異なっているがいずれも収束を得た。H, Gの初期値を同一の値としても図2と同様の収束が得られた。次に、実際の岩盤斜面で計測されたクラックテンソルの値を、二次元断面について考えた式(8),(9)を用いて逆解析した例を図3に示す。同図においては、弾性コンプライアンスの値が複雑になるため特に垂直剛性の収束が遅くなっているが、せん断剛性については目標値に一致した収束が得られている。図4は、図3の例でメッシュ分割数を図1とは異なる場合を検討した結果である。メッシュ分割数が増加するに従っていずれの剛性も推定精度が急速に改善されることがわかる。

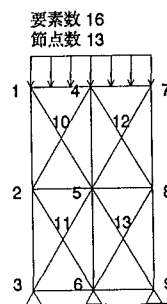


図1 メッシュ分割の例

表1 無次元力学パラメータ

岩石実質部分	ヤング率	E = 980
	ポアソン比	$\nu = 0.3$
亀裂部分	垂直剛性	H = 1150
	せん断剛性	G = 115

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} 3.26 & 1.42 & -0.27 \\ & 2.82 & -0.58 \\ \text{sym.} & & 1.42 \end{bmatrix} \dots (8), F_{ij} = \begin{bmatrix} 5.12 & -0.93 \\ \text{sym.} & 4.73 \end{bmatrix} \dots (9)$$

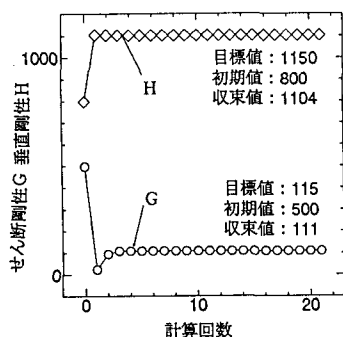


図2 垂直剛性とせん断剛性の収束状況
($F_{III}=F_{II}=F_0=10$ の場合)

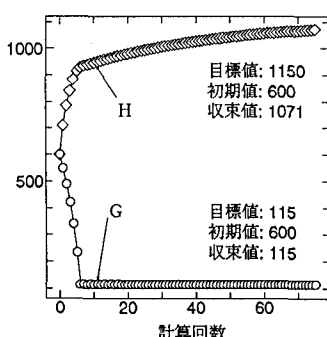


図3 垂直剛性とせん断剛性の収束状況
(式(8),(9)の場合)

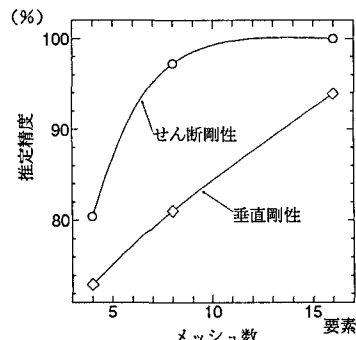


図4 推定精度のメッシュ依存性

5. まとめ

不連続性岩盤と等価な異方線形弾性体の構成則としてクラックテンソルによる解析手法を採用し、推定すべき物性値として不連続面の垂直剛性とせん断剛性を逆解析することができた。今後、逆解析のアルゴリズムを改善するとともに、より現実的な問題に取り組む予定である。

参考文献

- 1) Oda, M., Yamabe, T., Ishizuka, Y., Kumasaka, H. & Tada, H. (1993), Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.26 No.2, pp.89-112.
- 2) 村上 章・長谷川高士(1987), Kalman フィルター-有限要素法による逆解析と観測節点配置, *土木学会論文集*第388号/III-8, pp.227-235.
- 3) Wolfram, S. (1991), *Mathematica A System for doing mathematics by computer* Ver.2.2