

## Ⅲ-B 383

## 地下空洞掘削における不連続性岩盤の力学パラメータの同定

清水建設技術研究所 正会員 多田浩幸

清水建設技術研究所 正会員 若林成樹

埼玉大学工学部 正会員 山辺 正

## 1. はじめに

不連続性岩盤解析によって岩盤の挙動予測を精度よく行うためには、原位置での調査・計測結果からより信頼性の高い入力定数を設定して解析に用いる必要がある。多数の不連続面を含む岩盤の弾性挙動を予測する解析手法として、クラックテンソルによる応力・変形解析<sup>1)</sup>がある。通常、この解析を実施する場合、入力パラメータの一つである不連続面の剛性に関しては、弾性解や室内実験結果を参考にして決めるケースが多く、実岩盤における不連続面の適切な剛性値を評価する方法が必要であると考えられていた<sup>2)</sup>。本検討では、観測変位から材料特性を推定する逆解析手法を用いて、地下空洞掘削における実岩盤の不連続面の垂直剛性とせん断剛性の同定を行い、室内試験から得られた物性と比較した。

## 2. 解析対象

解析の対象としたのは図1に示す土被り約1,000mの非常に良好な角閃石片麻岩中に掘削された直径40m、高さ57mのドーム型の地下空洞である。空洞中間レベルの断面には同図に示すように①～③の3本の岩盤内変位計が設置されている。不連続面に関しては、図中の天端スケッチに示すようにNE～SW系の高角度の不連続面が連続して卓越している。また、岩石コアの一軸圧縮試験からは弾性係数50.3GPa、ポアソン比0.25、不連続面のせん断試験・垂直載荷試験からはせん断剛性50～4GPa/m、垂直剛性100～30GPa/mの物性値が得られている。

## 3. 解析手法

クラックテンソル解析に必要な入力パラメータは、不連続面の分布特性を表す2階と4階のクラックテンソル $F_{ij}, F_{ijkl}$ 、岩盤基質部の弾性係数 $E$ とポアソン比 $\nu$ 、不連続面の垂直剛性 $H$ とせん断剛性 $G$ の3種類である。同定する物性は $H, G$ の2つとし、 $\nu$ は岩石コアの0.25とした。同定方法には、クラックテンソルによる不連続性岩盤の応力とひずみの関係を組み込んだ2次元有限要素解析コードに拡張カルマンフィルタ逆解析手法を組み合わせた解析コード<sup>3),4)</sup>を用いた。本解析において、不連続面に作用する垂直応力の依存性を省略する場合、不連続面の垂直剛性 $H$ とせん断剛性 $G$ は、不連続面の寸法を $r$ とすると、 $H=h/r, G=g/r$ で近似され、解析では応力の次元を持つ定数 $h, g$ が入力パラメータとして用いられる。よって、逆解析では、この不連続面の垂直とせん断の剛性に関するパラメータ $h, g$ を推定した。具体的には、空洞掘削による観測変位を入力値として、推定パラメータ $h, g$ の初期値 $h_0, g_0$ を設定し、拡張カルマンフィルタによる推定パラメータ $h, g$ が収束するまで繰り返し計算を行い、推定値を決定する方法とした。逆解析に用いた解析メッシュ図を図2に示す。観測変位については同図に示す変位計①と変位計③の壁面からの深度が0.3, 6mの3地点における岩盤内変位の計測値を入力した。解析ケースは、岩盤基質部の弾性係数 $E$ をパラメータとして、 $E=30, 40, 50\text{GPa}$ の3ケースを設定した。不連続面の分布特性を示す2階と4階のクラックテンソル $F_{ij}, F_{ijkl}$ は、

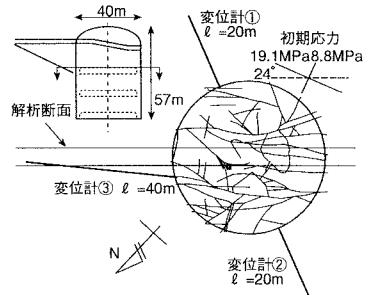


図1 解析対象とした地下空洞

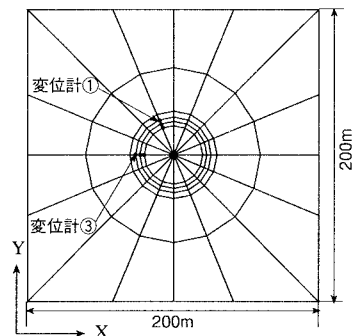


図2 解析メッシュ図

キーワード：不連続性岩盤、同定、クラックテンソル、垂直剛性、せん断剛性

連 絡 先：〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 TEL 03-3820-5520 FAX 03-3820-5955

図1に示すスケッチ図から求めた個々の不連続面のトレース長と方向を用いて、式（1）、（2）のように決定した。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.77 & 0.26 \\ \text{sym.} & 5.58 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ F_{2211} & F_{2222} & F_{2212} \\ F_{1211} & F_{1222} & F_{1212} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.28 & -0.01 \\ & 5.31 & 0.26 \\ \text{sym.} & & 0.28 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、基準軸  $x_i (i=1,2)$  は座標軸  $X, Y$  に一致させた。

#### 4. 解析結果

逆解析より得られた解析結果の一例として、 $E=50\text{GPa}$  のケースの  $h, g$  の収束状況を図3に示す。どのケースも  $h$  は数回の計算後直ちに収束するが、 $g$  は数回の計算を経ても収束の傾向を示さなかった。今回は、 $g$  がほぼ一定値に収束したと見なせる33回目の  $h, g$  の値を求めるべき推定値と判断した。各ケースの推定結果を表1に示す。同表には不連続面の寸法  $r$  を平均値の  $9.7\text{m}$  として  $h, g$  を  $H, G$  に換算した剛性値も併せて示した。これによると、 $E$  が増加するに従い、 $h, g$  は低下し、剛性比  $h/g$  は  $0.078 \sim 0.085$  の範囲となった。また、各ケース毎に推定値  $h, g$  を用いて順解析を行い、解析値と観測値の誤差の自乗和を求めてみると、 $E=50\text{GPa}$  のケースが最小となった。よって、 $E=50\text{GPa}, h=10.8\text{GPa} (H=1.1\text{GPa/m}), g=139.2\text{GPa} (G=14.4\text{GPa/m})$  が最も計測値に近い変形挙動を予測する物性値と判断した。このときの変位計①～③の計測値と解析値の比較を図4に示す。変位計①と③は計測値と解析値がほぼ一致するが、①の壁面近傍では計測値の方が大きくなっている。②は①と対称の位置関係にあり、解析値は①と等しく計測値よりも大きくなる。なお、100回計算時の  $h, g$  と33回計算時の  $h, g$  を用いた順解析による変位分布を比較したがほとんど差はなかった。

今回同定された不連続面の物性値は室内試験から得られた物性値に比べて小さくなった。これは、クラックテンソ

ルの決定に取り込まれなかった不連続面、不連続面の挙動の非線形性を考慮しなかった影響によると考えられる。また、計測値と解析値が一致しないのは解析領域内を均一としたことによるものであり、実際には変位計①の壁面付近では不連続面密度が高いか不連続面や岩盤の物性が小さいことが想定される。これについては、このような不均一な領域の影響を考慮すればさらに計測値に近づくと考えられる。

#### 5. まとめ

空洞掘削時の岩盤内変位の計測結果から実岩盤における不連続面の垂直剛性とせん断剛性の同定を行った。その結果、同定された不連続面の剛性は不連続面の分布特性に取り込まれなかった不連続面、不連続面の非線形な挙動特性などを考慮しなかった影響によって室内試験結果よりも小さくなった。

今後は施工段階毎に得られる実測データを用いて物性同定と挙動予測を行い、本手法の実岩盤への適用性ならびに挙動予測の精度について検討を進める予定である。

**参考文献：** 1) Oda, M.: An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988. 2) 多田浩幸, 石塚与志雄, 山辺正, 小田匠寛: 岩盤不連続面を考慮したトンネル交差部の応力・変形解析, 土木学会論文集, No.511/Ⅲ-30, pp.47-55, 1995. 3) 山辺正, 松本卓也, 大矢敏雄: 岩盤掘削における力学パラメータの逆解析に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ-B, pp.356-357, 1997. 4) 松本卓也: 岩盤掘削における力学パラメータの逆解析に関する研究, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程建設基礎工学専攻平成7年度修士論文, 1996.

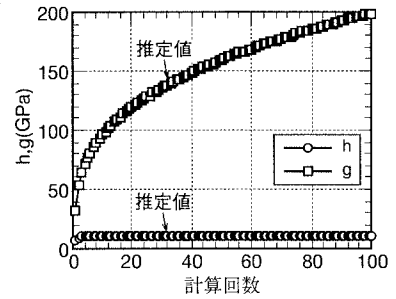


図3  $h, g$  の収束状況 ( $E=50\text{GPa}$ )

表1 弾性係数  $E$  毎の収束物性値

| $E$<br>(GPa) | $h$<br>(GPa) | $H$<br>(GPa/m) | $g$<br>(GPa) | $G$<br>(GPa/m) |
|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 30           | 13.4         | 1.4            | 157.8        | 16.3           |
| 40           | 11.8         | 1.2            | 145.1        | 15.0           |
| 50           | 10.8         | 1.1            | 139.2        | 14.4           |

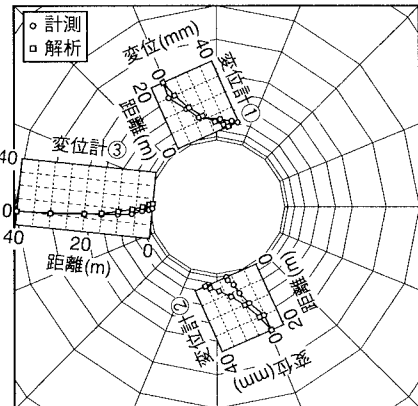


図4 計測値と解析値の比較