

亀裂性岩盤内空洞掘削の DDA シミュレーションによる内空変位・崩壊予測

長崎大学工学部 正会員 棚橋 由彦 長崎大学大学院 学生員○中村 了悟
長崎大学大学院 学生員 佐藤 貴文 長崎大学工学部 正会員 奥村 運明

1. はじめに

地下の大規模空洞開発において、岩盤はその構成主体となる。岩盤には種々の不連続面が存在しており、岩盤は不連続体としての特性を有し、それにより応力の伝達も断続的となり、変形も複雑なものとなる。岩盤の挙動は不連続面に左右される。不連続性岩盤の力学的変形挙動の主な要因として、岩盤内に存在する節理などの不連続面に沿った滑りに起因するものが考えられる。

本研究では、解析手法として不連続変形解析法⁽¹⁾⁽²⁾(DDA;Discontinuous Deformation Analysis)(以下 DDA と略称)を用いた。不連続性の岩盤内に空洞を掘削した場合を DDA を用いてシミュレートし、空洞の内空変位や崩壊状況を予測するものである。

2. 解析概要

DDA は G.H.Shin⁽³⁾によって開発された手法で、任意の弾性体である多角形で構成されるブロック相互の運動を動的・準静的に解析することができる。

DDA の未知数は要素の変位、回転、ひずみである。2次元の場合、ブロック内の任意の点 (x, y) における変位 (u, v) と未知量 $\{D\}$ との関係は式(1)で与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{pmatrix} \{D\}, \quad \{D\} = (u_0 \quad v_0 \quad \omega_0 \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy})^T \quad \cdots(1)$$

ここに、 u_0, v_0 :剛体変位、 ω_0 :剛体回転、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$:ひずみ、 (x_0, y_0) :ブロックの重心である。

式(1)を用いて各ステップで要素形状が更新される。要素の剛性は要素のひずみエネルギーを最小化することにより得られる。

ブロック間の接触はブロックの辺と角が接した場合、辺に垂直な方向と辺に平行なバネが設定される。接触マトリックスはブロックの貫入によるポテンシャルエネルギーを最小化することで求められる。慣性力、点の拘束、初期応力、点荷重、線荷重、粘性力、接触力、ひずみエネルギー、体積力について、それぞれ、各マトリックスを求め、全てを重ね合わせることでブロック全体の釣り合い方程式(2)が得られる。 F_i は D_i に対応する外荷重、 $[K_{ij}]$ は材料物性により決定されるマトリックスである。

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad \cdots(2) \quad \text{式(2)を}\{D\}\text{に関して解くことにより、未知量}\{D\}\text{が得られる。}$$

3. DDA 解析条件および結果

3.1 解析条件

解析に用いたパラメータ(表-1)は、本学で別途行っている底面摩擦試験⁽⁴⁾に使用する材料試験から求めた。

図-1 に解析モデルを示す。これは、亀裂性岩盤内に矩形空洞を掘削した状態をモデル化したものである。解析は不連続面の傾斜角 α を $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ と変化させて各ブロックの挙動を見た。

表-1 解析に用いたパラメータ

単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	2.5
弾性係数 E (tf/m ²)	4.0×10^4
ポアソン比 ν	0.3
ブロック間の摩擦強度 c (tf/m ²), ϕ ($^\circ$)	$c=0, \phi=23^\circ$

3.2 解析結果と考察

解析結果を図-2 に示す。各ブロックには主応力も示してある。なおブロック上部の丸で囲んだ番号は図-3 の block. No.と一致している。
解析の結果、 $\alpha=30^\circ, 45^\circ$ ともブロックのすべりが途中で止まり安定したが、 $\alpha=60^\circ$ は矩形空洞が崩壊した。ブロックは不連続面に沿った挙動を示しており、ブロックの挙動は不連続面の傾斜角に大きく影響されることがわかる。

図-3 に矩形空洞の天端部を形成しているブロックの解析後の変位と応力の関係を示す。なお、応力は引張りを正としている。図-3 より、天端ブロックは、 $\alpha=30^\circ$ で最大 66cm、 45° で 13cm、 60° で 204cm、ブロックが滑り落ちている。また、鉛直変位 U_y は3パターンとも天端中央部のブロックの変位が多少大きいものの、ほぼ平行にブロックがずり落ちている。鉛直応力 σ_y については、3つとも同様に、右側のブロックほど圧縮力大きい。 45° と 30° の変位と応力の大きさの順序は同じであるが、 60° は応力が小さいのに変位は大きくなっている。これは、block. No.①が引張り力であるためにブロックの落ち込みが大きくなってしまったためと考えられる。

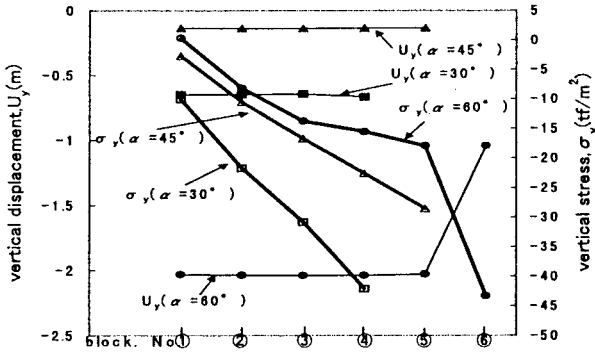


図-3 天端ブロックの鉛直変位、鉛直応力

4. おわりに

- (1) 今回は不連続性岩盤の解析のみであったが、今後は底面摩擦試験との実験結果との比較検討を行う。
- (2) 亀裂性岩盤の解析により不連続面の傾斜角とブロックの挙動との関係を求めた。今後は、空洞形状や空洞の深度を変化させたものや、もっと複雑な亀裂が入ったモデルの解析なども行っていく予定である。

<謝辞>本研究を行うのに際し、大西有三教授(京都大学工学部)には DDA 解析ソフトに関して多々、ご教示を頂いた。ここに末筆ながら深甚なる謝意を表します。

<参考文献> 1) G.H.Shi and R.E.Goodman: "Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis" Int.J.Numer.Anal. Methods Geomech, Vol.9, pp.541-556, 1985. 2) "DDA (Discontinuous Deformation Analysis) 解説書" システム総合研究所, 1993. 3) 大西有三・佐々木猛: "不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用について", 土木学会, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.296-300, 1992.2. 4) 棚橋, 熊川, 志田, 荒木, 江崎, 蔭: "底面摩擦試験による浅所地下空洞の安定性評価", 平成 9 年度土木学会西部支部講演概要集, 1997.4.

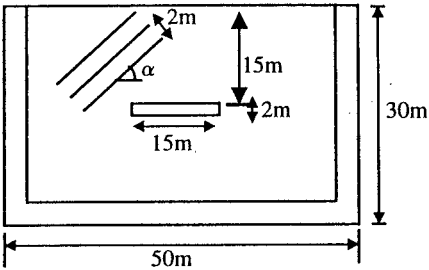
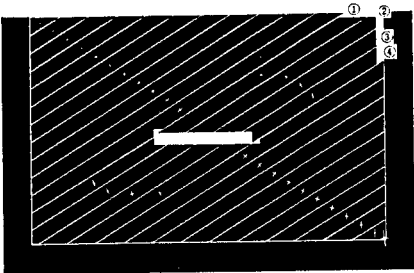
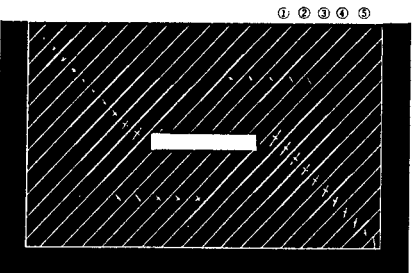


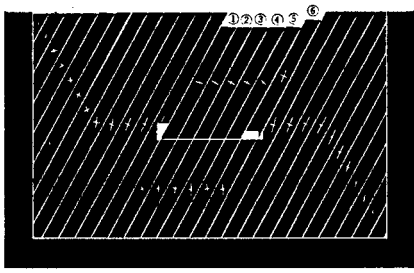
図-1 解析モデル



(a) $\alpha=30^\circ$



(b) $\alpha=45^\circ$



(c) $\alpha=60^\circ$

図-2 解析結果

0 300
tf/m²
応力スケール