

I-73

不連続性材料の弾・塑性掘削解析

清水建設(株) 正員 多田 浩幸
 埼玉大学大学院 学員 木村 健司
 埼玉大学工学部 正員 小田 匡寛

1. はじめに

岩盤には、よく知られているように多数の地質不連続面(クラックと総称する)が存在し、岩盤の強度・変形特性に複雑かつ支配的な影響を与えている。このような岩盤内に地下空洞を建設する場合、初期地圧や地質構造を考慮した岩盤の力学特性を正確に把握することが、構造物の安全性・信頼性を高める上で重要である。本研究では、地下深部に掘削する岩盤空洞の安定解析を実施するに先立ち、岩盤のような不連続性材料の降伏条件を有限要素解析に導入し、二次元弾・塑性掘削解析を行い、解析結果から、クラックの幾何学性が空洞の弾・塑性変形挙動に及ぼす影響を空洞の立地及び初期地圧との相互関係から表すことを目的としている。

2. 解析手法

多数のクラックを含む材料の弾・塑性解析を実岩盤と大きく遊離しないように実行するためには、その構成関係や降伏条件をクラックに関する情報を含む形式で定式化しなければならない。小田らは、不連続性材料を力学的に等価な連続体で定義し、それに対する構成式を次のように示した^{1)~3)}。

$$\varepsilon_{ij} = \left\{ \frac{1+\nu}{E} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\nu}{E} \delta_{il} \delta_{kj} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{ik} F_{jl} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{il} F_{jk}) \right\} \sigma_{kl} \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} 及び ε_{ij} はそれぞれ平均化した応力とひずみであり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号、 E 、 ν はそれぞれ基質部の弾性係数とポアソン比、 h 、 g はクラックの垂直剛性とせん断剛性である。式(1)中の F_{ij} 、 F_{ijkl} は、

$$F_{ij \dots k} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{t_n} \int_0^{t_n} \int_{\Omega} t^b r^a n_i n_j \dots n_k E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (2)$$

で定義されるクラックテンソルの二階、四階の成分であって、クラックの幾何学性を定量的に示している。なお、ここでは材料定数の応力依存性を考慮しないで $h=g=\text{const.}$ と仮定し、不連続性材料を異方線形弾性体で表現した。また、不連続性材料の降伏条件は、従来の研究⁴⁾から以下のように示される。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)_f}{2} = \kappa q_u \cos \phi + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)_f}{2} \sin \phi \quad (3)$$

式(3)中の q_u は不連続性材料の一軸圧縮強度であり、 κ 、 ϕ はそれぞれ固有な粘着力係数及び内部摩擦角と呼ばれる材料固有の定数である。式(3)はMohr-Coulomb型の降伏条件に一致しているが、この関係をさらに実質的に意味のある降伏条件とするために、 q_u をクラックの情報を取り入れた形式で表現する必要がある。

$$q_u = \frac{b}{(a+b) \frac{2}{3} F_{11}' + b} q_u^{(a)} \quad (4)$$

式(4)はクラックが開いた楕円であると仮定して導かれた関係であり、 q_u はクラックの幾何学的性質を示す F_{11}' 、基質部の力学的性質を示す $q_u^{(a)}$ 、 $(a+b)$ によって表されることを示している。式(4)を式(3)の q_u に施せば、不連続性材料の降伏条件が応力テンソルだけでなく、クラックテンソルにも依存した形で表現される。

3. 解析結果

式(1)~(4)を有限要素解析に導入し、図1に示した要素分割を用いて二次元弾・塑性掘削解析を実施した。本解析では平面ひずみ状態を仮定し、非線形解析法としては初期応力法を採用した。不連続性材料の弾・塑

性解析に必要なパラメーターを、人工的なクラックを挿入した石膏供試体の二軸圧縮試験の結果から次のように決定した。基質部の弾性係数は $E=3.86 \times 10^4 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比は $\nu=0.22$ 、内部摩擦角は $\phi=38^\circ$ 、基質部の一軸圧縮強度は $q_u^{(0)}=6.5 \times 10^2 \text{ tf/m}^2$ 、各定数は $\kappa=0.2$ 、 $a=0.6$ 、 $b=0.075$ とした。本研究の目的より、クラックの幾何学性が空洞の弾・塑性変形挙動に及ぼす影響を調べるために、クラックの配列方向の異方性に注目し、クラックが全て同一の方向に配列している場合を想定した。用いたクラックパターンはクラックの法線方向に立てた主軸がX軸に一致する場合を 0° とし、反時計方向に主軸を回転させその回転角 θ で表現した。今回は、土被り深さ、つまり初期地圧の大きさを変化させ空洞周辺で降伏が始まるとき（一定の判定規準を設けておく）の地表面から空洞天端までの深さを求め、これと θ との関係を調べた。図2は F_0 （ F_{ij} の跡でその値が大きいほどクラックの密度が高いことを示す）の違う各ケースごとに降伏の始まる土被り位置を縦軸、 θ を横軸とした図である。これによると、クラックの配列が水平（ $\theta=90^\circ$ ）に近いほど地表から浅い位置で空洞周辺に塑性域が現れ、 $\theta=0^\circ$ の場合はどのケースも F_0 に関係なくクラックを含まない解析結果に一致していることがわかる。同図は、不連続性材料の降伏はクラックの幾何学性に決定的に依存していることを示している。図3は初期地圧の影響を見るために、側圧比 k を0.5, 1.0, 1.5, 2.0とした結果を図2と同様な形で作成した図である。この図は、 k 値が大きいほど地表から浅い位置で降伏する傾向があることを示している。また、 $k=0.5$ と $k=1.0$ の結果はほぼ同じであり、水平方向地圧の影響は鉛直地圧を上回る場合にその影響が表れている。

4. まとめ

石膏の物性値で示される不連続性材料でモデル化した地盤内に、地下空洞を掘削すること想定した弾・塑性変形解析を実施し、クラックの幾何学性と初期地圧は空洞の弾・塑性変形挙動に重要な影響を与えることを示した。本解析手法は、実岩盤に適用するにはまだパラメーター決定に若干の問題が残っているが、割れ目の情報を取り込んだ降伏条件を解析に導入し、その効果を明らかにしたという意味で、岩盤空洞の安定性評価の解析手法として期待できる。

参考文献

- 1) M.Oda: Similarity rule of crack geometry in statistically homogeneous rock masses, Mechanics of Materials, Vol.3, pp.119-129, 1984.
- 2) M.Oda: An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Flow Analysis in Jointed Rock Masses, Water Resources Reserches, Vol.22, No.13, pp.1845-1856, December 1986.
- 3) M.Oda: An Experimental Study on Elasticity of Mylonite Rock with Random Cracks, Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- 4) 羽田山・小田：不連続性岩盤の降伏条件、第21回土質工学研究発表会、1986年。

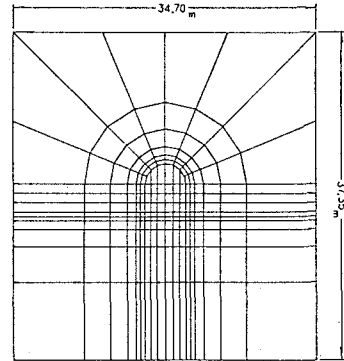


図1 有限要素モデル

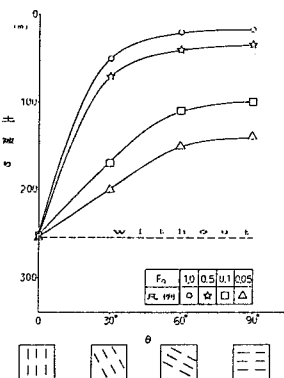


図2 クラックの主軸方向と土被り、 F_0 の関係

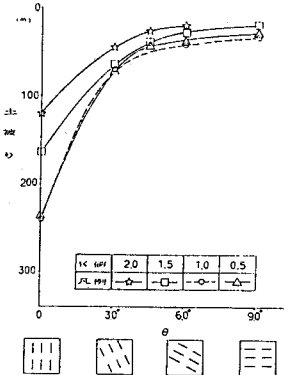


図3 クラックの主軸方向と土被り、 K 値の関係