

名古屋大学 工学部

正員 川本 朋 乃

名古屋大学 工学部

学生員 野崎 隆 司

ハナ代エンジニアリング(株)

河合 徹

緒 言

岩盤構造物を経路的、合理的に設計・施工するためには、潜在的に多くの弱面群を有するこれら岩盤の変形、破壊の機構を正確に把握するとともに、その挙動を予測することが必要となってくる。これまで、高剛性圧縮試験機の発達に伴い、岩質材料の強度破壊後の変形特性(ひずみ軟化)が明らかにされつつあり、これを考慮した解析が石塚等¹⁾によって行なわれている。本研究では、ひずみ軟化特性を考慮し、単一方向に無数の弱面群を有する岩盤を対象とし、その中に地下空洞を開削した場合の、弱面の傾度による変形、破壊挙動の相違を、有限要素法を用いた数値解析により検討している。

岩盤の特性および応力-ひずみ関係の理想化

解析に当り、対象とする岩盤の特性に関して、次の理想化を行う。

- 1) 一種類の岩質材料から成る均質な岩盤(母岩)内に、ある単一方向に厚さの十分小さな弱面の層が無数に存在しているものとする。
- 2) ピーク破壊後、母岩はひずみ軟化特性を示し、残留強度に至るが、弱面では一気にエネルギーを消散して残留強度に至るものとする。
- 3) 破壊基準は、母岩については、ピーク強度、残留強度に対して線型の Mohr-Coulomb 型の規準を用いる。弱面については、Jaeger 理論を用い、弱面と最大主応力のなす角度によって推移する線型の破壊基準を用いる。なお、母岩、弱面ともにピーク破壊後の応力経路は最小主応力一定とする。
- 4) 破壊後の岩盤要素は、引張応力には抵抗できない No-Tension 材料とする。

以上の理想化の下で、破壊基準を表1に、母岩、弱面の応力-ひずみ関係をそれぞれ図1、図2に示す。なお図1、図2中の S_t, S_{jt} は母岩、弱面充填材料の一軸引張強度を示す。

	ピーク強度	残留強度
母 岩	$\sigma_1 - \sigma_3 = S_p + (\delta_p - 1)\sigma_3$	$\sigma_1 - \sigma_3 = S_R + (\delta_R - 1)\sigma_3$
	$\delta_p = \tan^2(\pi/4 + \phi_p/2)$	$\delta_R = \tan^2(\pi/4 + \phi_R/2)$
	$S_p = 2C_p \tan(\pi/4 + \phi_p/2)$	$S_R = 2C_R \tan(\pi/4 + \phi_p/2)$
	$(C_p, \phi_p), (C_R, \phi_R)$: 母岩のせん断強度, 内部摩擦角	
弱 面	$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_j \cos \phi_j + \sigma_3 \sin \phi_j}{\cos(\phi_j + \beta) \sin \beta}$	$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_{jR} \cos \phi_{jR} + \sigma_3 \sin \phi_{jR}}{\cos(\phi_{jR} + \beta) \sin \beta}$
	β : 弱面と最大主応力のなす角度 $(S_j, \phi_j), (S_{jR}, \phi_{jR})$: 弱面充填材料のせん断強度, 内部摩擦角	

表1 母岩および弱面の破壊基準

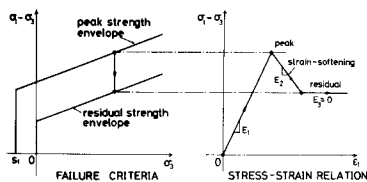


図1 母岩の破壊基準と応力-ひずみ関係

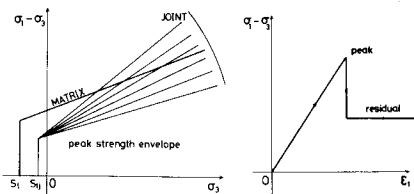


図2 弱面の破壊基準と応力-ひずみ関係

解析の方法

解析領域を図3に示す。今回は地表面より深い開削を対象としたので、解析領域の上下側面は完全拘束とした。解析手順は以下のようなものである。まず解析領域全体に初期応力 (σ_x^0, σ_y^0) を与え、外力として開削荷重を考える。

ここで開削荷重とは、開削面において開削前に作用していた応力とつり合う今析荷重である。各荷重ステップで応力が破壊基準を越えているか否かをチェックし、越えている場合には、修正 Newton-Raphson 法を用いて、過剰な応力を構造系へ分配し、仮定した応力-ひずみ関係に収束するまでこれを繰り返す。今回、対象としたケースは弱面の傾度を水平面に対して、 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に変えた場合、およびコンクリート覆工も施した場合であり、材料定数は以下の値を用いた。

$$C_p = 1.0 \times 10^2 \text{ kPa}, \phi_p = 30^\circ, C_R = 5.0 \times 10^2 \text{ kPa}, \phi_R = 30^\circ, S_T = 2.0 \times 10^2 \text{ kPa}, \phi_T = 35^\circ, \\ S_{TR} = 1.5 \times 10^2 \text{ kPa}, \phi_{TR} = 35^\circ, \sigma_c = 4.0 \times 10^2 \text{ kPa}, \sigma_s = 8.0 \times 10^2 \text{ kPa}$$

解析結果と考察

(1) 弱面の傾度の相違による挙動の比較 図4～図7は、弱面の傾度が $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合の破壊進展図を示している。ここで p は、修正 Newton-Raphson 法による解が収束する最後の段階までの作用荷重と全開削荷重との比を示している、岩盤の安定性を議論する土での一つの目安となる。これらの図からわかるように弱面の傾度が小さいほど、空洞の天端および底部付近で弱面のすべり破壊を生じやすく、 p の値から 60° 付近で最も安定性が悪くなるのがわかる。また母岩の破壊は、弱面の傾度によらず、ほぼ空洞の左右側壁付近から進展している。

(2) 等方性岩盤の地下空洞との比較 図8は、弱面を含んでいない等方性均質岩盤内の破壊進展図を示している。破壊は、左右側壁から広がり、その領域もかなり広がっているが、 p が1.0に至ってもなお解が収束し、安定性を保っていることから、弱面群を含んだ岩盤が等方性岩盤に比べて、安定性が低いことが判る。

(3) コンクリート覆工を施した空洞との比較 図9は、弱面の傾度が、 30° で、コンクリート覆工を施した場合の破壊進展図を示している。なおコンクリート覆工要素は完全弾塑性体であると仮定している。素堀りの場合と比較すると、 p が1.0に至っても依然安定であり、破壊域の進展もかなり抑制されていることがわかる。また開削面の変形量も、素堀りの場合と比較して、最大値で50～60%である。これによりコンクリート覆工の効果を知ることができる。

本研究では、弱面群を有する岩盤の地下空洞開削問題を極めて単純化した形で考え、岩盤のフリップ変形は、いさぎ無視している。また破壊後の弾性係数の評価や、拘束圧が高くなるというひずみ軟化特性を示さないという問題が残っていると考えられる。今後、これらの点を考慮し、より現実に近いモデルを導入して行くことが必要となるであろう。

(参考文献)

- 1) 川本, 石塚; 岩質材料のひずみ軟化特性を考慮した解析について: 第14回土質工学会研究発表会, G4, 349.

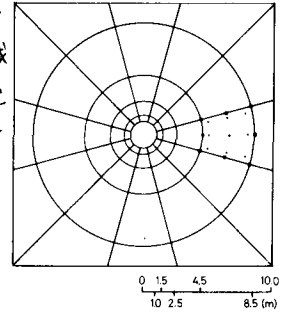


図3 解析領域

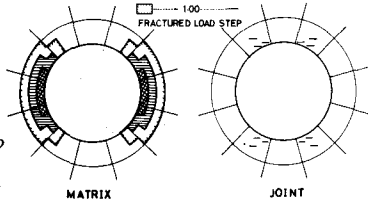
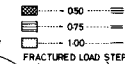


図4 $\theta = 0^\circ$ ($p = 0.955$)

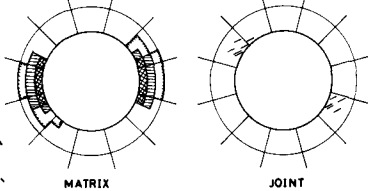


図5 $\theta = 30^\circ$ ($p = 0.855$)

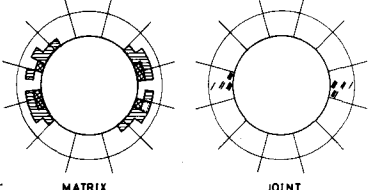


図6 $\theta = 60^\circ$ ($p = 0.750$)

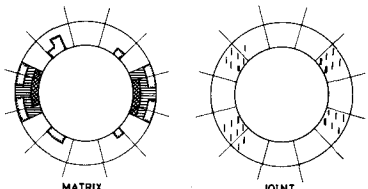


図7 $\theta = 90^\circ$ ($p = 0.885$)

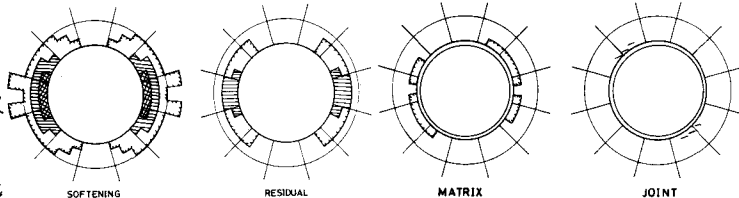


図8 等方性 ($p = 1.000$)

図9 コンクリート覆工 ($\theta = 30^\circ, p = 1.000$)