

電力中央研究所 正会員 日比野 敏
建設企画コンサルタント(株) 川崎 逸男

1. 序

大規模な地下空洞の側壁，トンネル周壁岩盤および岩盤の掘削斜面などの補強によるすべり安定性の検討にさいして，従来，すべり面における岩盤の残留強度，導入緊張力や地圧分布などの評価が十分でなかった。そこで，これらの項目を考慮した手法を検討したので報告する。

2. すべり安全率に關与する項目

岩盤のすべり安全率を求めるにさいして，つぎの5項目を考慮する(図-1)。つまり，(a)岩盤のゆるみ領域における残留強度の分布，(b)岩盤内の応力分布，(c)ゆるみ領域の分布形状，(d)P S 工法等による緊張力，(e)P S 工，ロックボルトなどの材料強度。

ここで，上述のゆるみ領域の分布と岩盤内の応力分布は非線型逐次掘削解析手法¹⁾により求める。

3. すべり面群とすべり面形状の推定

岩盤内の最小すべり安全率の作用面の方向 θ_0 を次式により求める。

$$2\theta_0 = \cos^{-1} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \tan \phi_r}{(2C_r - (\sigma_1 + \sigma_2) \tan \phi_r)} \right] \quad \dots\dots (3.1)$$

ここで σ_1, σ_2 は岩盤内の主応力(圧縮を負とする)， C_r はせん断強度， ϕ_r は内部摩擦角である。 θ_0 は最大圧縮主応力とすべり面とのなす角である。掘削解析手法により求めた地圧分布(図-2)より(3.1)式により最小すべり安全率のすべり面群(図-3)を決定し，すべり面群のなかよりゆるみ領域の分布を考慮していくつかのすべり面をとり出してすべり安全率を計算する。

4. すべり安全率の算定

4.1 ゆるみ領域における残留強度の分布

ゆるみ領域内の残留せん断強度を岩盤せん断試験結果と岩石供試体についての3軸剛性試験結果から推定する。つまり，まず岩石供試体についてピーク強度および残留強度のモールの応力円の包絡線より各のせん断強度定数を求める(図-4)。岩盤について同様な試験を行なうことはかなり困難であるので，岩盤せん断試験結果より岩盤のピークせん断強度を求め，岩石供試体で求めた残留強度とピーク強度の比率が岩盤についても同一であるとして次式により岩盤の残留せん断強度 C_r を求める。岩盤の残留せん断強度 C_r = 岩盤のピークせん断強度 $\times$ (岩石供試体の残留せん断強度 / 岩石供試体のピークせん断強度) $\dots\dots (4.1)$

掘削表面では通常発破による損傷のために(4.1)式で求まる値よりはさらに低下していると考えられる。

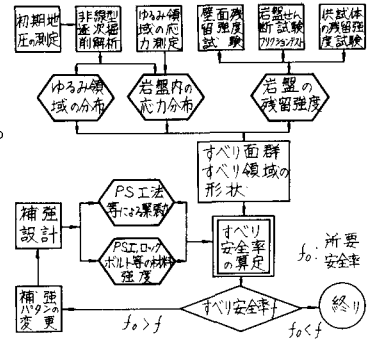


図-1 すべり安全率算定の流れ図

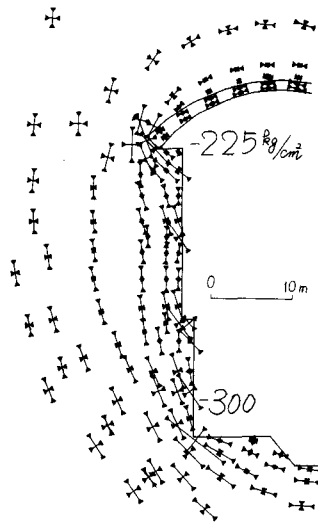


図-2 掘削終了後の地圧分布

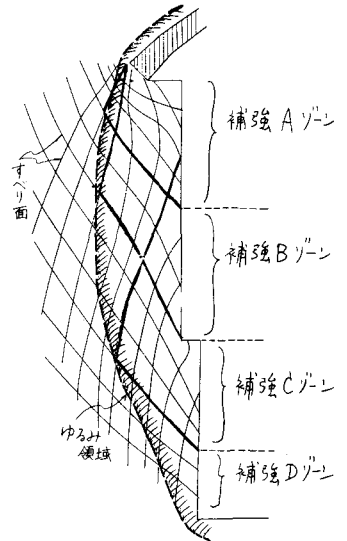


図-3 すべり面群とゆるみ領域

そこで別途壁面残留強度試験を行ない掘削表面における残留せん断強度を求める。発破の影響範囲を壁面より1～3 m程度とすれば、この区間の強度は漸変し、1～3 mより以深のところでは(4.1)式の強度を有するものとする(図-5)。

内部摩擦角 ϕ_r は3軸剛性試験、岩盤せん断試験、フリクションテストなどの結果から総合的に決める。この場合、 ϕ_r の適用はゆるみ領域内の比較的応力レベルが低い領域であるので、それに対応して低応力レベルでの ϕ_r を用いる。

4.2 PS工法等による緊張力

単位面積当り P (負号)の緊張力を導入した場合、想定すべり面(図-6)に発生する応力はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P \sin \alpha \sin 2\bar{\theta} + 0.5 P \cos \alpha (1 + \cos 2\bar{\theta}) \\ P_t &= P \sin \alpha \cos 2\bar{\theta} - 0.5 P \cos \alpha \sin 2\bar{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

ここで P_n , P_t は直応力、せん断応力である。 α は緊張力の作用方向が壁面の法線となす角である。一方、このすべり面上の地圧による応力成分は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 0.5 (\sigma_1 + \sigma_2) + 0.5 (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \\ \tau &= -0.5 (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

(4.2)式と(4.3)式を比較すると下記の点が明らかとなる。

- (i) 緊張力 P の壁面に対する法線方向成分 $P \cos \alpha$ はつねにすべり面を安定させる働きをする。
- (ii) 緊張力 P の壁面に対する接線方向成分 $P \sin \alpha$ はすべり面と壁面のなす角 $\bar{\theta}$ の大小と符号および α の符号によりすべり面の安定を増加させる場合と減少させる場合がある。したがって、PS工法の施工としては $\alpha = 0$ 、つまり壁面の法線方向に緊張力を作用させるのがその効果としては最も望ましい。しかしながら、充填材などの関係で $\alpha \neq 0$ の場合には、すべり面の壁面との交角、つまり残留強度と摩擦角および地圧により緊張力の作用傾度(α)の方向を決める必要がある。

4.3 補強後のすべり安全率

すべり面の安全率は次式により求める。

$$f_s = \frac{\sum (C_b + C_c) + \sum C_{r,i} l_i + \sum (\sigma_i + P_i \sin \alpha_i \sin 2\bar{\theta}_i + 0.5 \cos \alpha_i (1 + \cos 2\bar{\theta}_i)) l_i \tan \phi_r}{\sum (\tau_i + P_i \sin \alpha_i \cos 2\bar{\theta}_i - 0.5 P_i \cos \alpha_i \sin 2\bar{\theta}_i) l_i} \quad \dots\dots (4.3)$$

ここで l_i はすべり面の区分長さ、 i は区分番号、 Σ はすべり面上についての和を示す。 C_b はPS工法で用いた鋼棒などの抵抗である。 C_c は吹付けコンクリートによる抵抗要素である。具体的な検討例は当日紹介する。

参考文献

- 1) 林, 日比野: 地下発電所の空洞掘削時の岩盤挙動解析, 地下構造物の設計と施工, 土木学会編 1976年
- 2) 小林, 杉本: 圧縮破壊過程における岩石の力学的挙動について, 日本鉱業会誌 91巻 1052号, 1975年 10月

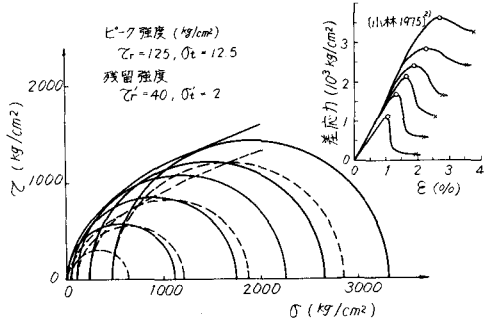


図-4 剛性試験結果とピーク強度, 残留強度の包絡線の例

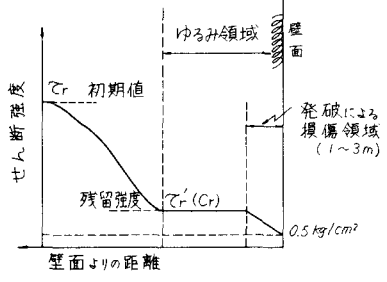


図-5 壁面周辺岩盤のせん断強度の分布

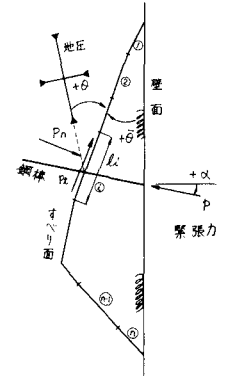


図-6 鋼棒の配置と緊張力