

III-239

岩盤分類と特性曲線に関する一考察

西松建設（株） 正会員 北川 隆，一條 俊之，曾我 誠意

1. はじめに

岩盤の特性曲線は，トンネルや地下空洞の力学的挙動を知る上で重要な考え方の一つである。特性曲線を解析的に求める方法としては，Hoek-Brown, Egger, Kastnerの式からの展開式等がある。ここでは，この3つの方法による解析比較を行なうため，岩盤分類毎に強度定数の特定化を試み，各々の違いについて考察を加えた。

2. 解析方法

Hoek-Brown¹⁾, Egger²⁾, Kastner³⁾の方法は，以下の基本的な仮定条件で成り立っている。

- ・岩盤：等方等質の弾塑性体（ E, ν ）で初期応力は静水圧状態とする。
- ・トンネル：円形で2次元平面歪問題とする。
- ・塑性条件：

1) Hoek-Brownの方法

Hoek-Brownの提案する次の実験式より定義される。

$$\text{塑性前； } \sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{1/2}, \text{ 塑性後； } \sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{1/2}$$

ここに， σ_1, σ_3 ：最大及び最小主応力， σ_c ：インタクトロックの一軸圧縮強さ，

$m, s/m_r, s_r$ ：塑性前及び塑性後の岩石の材料定数。

この方法は，Q値で設定される材料定数を用い，インタクトロックの一軸圧縮強さを低減させて原位置岩盤をマスとして評価し，現実的なトンネル周辺岩盤の解析を行なうものである。

2) Egger, Kastnerの方法

クーロンの塑性条件として次式で定義される。

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) + 2c \cdot \cos \phi / (1 - \sin \phi)$$

ここに， σ_1, σ_3 ：最大及び最小主応力， c, ϕ ：岩盤の強度定数。

この条件式には，強度定数の低減は考慮されておらず，原位置岩盤としての強度定数を評価する場合には，亀裂係数などによる低減率を乗じる必要がある。

- ・支保：トンネル内壁に等分布放射荷重 p_i を与えたと考える。
- ・体積ひずみ：Hoek-Brown, Eggerとも塑性点で岩盤は体積膨張するものとする。

表-1 に3つの特性曲線の式を

表-1 特性曲線の計算式

示す。なおEggerの方法では，急激な劣化モデルの式を採用する。

3. 解析法の比較

Hoek-Brownの方法は，Q値による材料定数の低減を行なうことで，現実の地山挙動との対応がすでに確認されている⁴⁾。そこでEggerとKastnerの解析結果を岩盤分類別にHoek-Brownの結果に対応させることで比較を試みた。表-2に，電研方式による岩盤分類とQ値の

Hoek-Brownの方法 ・塑性前 $U_0 = \frac{(1+\nu)}{E} (P_0 - P_i) \cdot R_0$	・塑性後 $U_0 = R_0 \left[1 - \left(\frac{1 - \sigma_{ss}}{1 + A} \right)^{1/2} \right]$ $M = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m}{s} \right)^2 + m p_i / \sigma_c + s \right\}^{1/2} \cdot \frac{m}{8}$ $D = \frac{m}{m + 4 \{ m (P_0 - M \sigma_c) / \sigma_c + s \}^{1/2}}$ $N = 2 \left\{ \frac{P_0 - M \sigma_c}{m_r \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r} \right\}^{1/2}$ $\frac{U_0}{R_0} = \frac{(1+\nu)}{E} M \sigma_c \quad \frac{R'}{R_0} = \exp \left\{ N - 2 \left(\frac{P_i}{m_r \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r} \right)^{1/2} \right\}$ $R'/R_0 < \sqrt{3} \text{ に対して： } R = 2 D m (R'/R_0) \quad R'/R_0 > \sqrt{3} \text{ に対して： } R = 1.1 D$ $\sigma_{ss} = \frac{2 (U_0/R') (R'/R_0)^2}{(R'/R_0)^2 - 1} (1 + 1/R) \quad A = \{ 2 U_0 / (R' - \sigma_{ss}) \} (R'/R_0)^2$
Eggerの方法 ・塑性前 $U_0 = \frac{1}{R_0} \left[C \sigma_1 + \frac{1 - \nu}{E} \cdot P_i \cdot P_0 \cdot \left(\frac{1 + \sigma \lambda_r}{\sigma + \lambda_r} - \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \right]$ $R' = R_0 \left[\frac{1}{\lambda_r + 1} + \frac{2 P_0 - \sigma_{ss}}{P_i} \right] \frac{1}{\lambda_r - 1}$ $U_0' = \frac{1 + \nu}{E} \cdot R' \left[2 (1 - \nu) \cdot P_0 - \frac{2 P_0 - \sigma_{ss}}{\lambda_r + 1} \right]$ $\sigma_{ss} = \frac{2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \lambda_r \cdot \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \sigma = \frac{-\epsilon_r \cdot r_0}{\epsilon_r \cdot r_0}$	・塑性後 ここに $C \sigma_1 = R' \cdot \sigma_c \cdot \frac{1 - \nu}{E} \cdot R' \cdot \sigma_c \cdot \frac{2 P_0 - \sigma_{ss}}{\lambda_r + 1} \left[\frac{1 + \sigma \lambda_r}{\sigma + \lambda_r} - \frac{\nu}{1 - \nu} \right]$
Kastnerの方法 ・塑性前 $U_0 = \frac{(1+\nu)}{E} \left\{ P_0 - \frac{2 P_0 - \sigma_{ss}}{1 + \lambda_r} \right\} \frac{R'}{R_0}$ $R' = R_0 \left[\frac{2 P_0 (\lambda_r - 1) + \sigma_{ss}}{(1 + \lambda_r) \{ (\lambda_r - 1) P_i + \sigma_{ss} \}} \right]^{1/2} (\lambda_r - 1)$ $\sigma_{ss} = \frac{2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \lambda_r \cdot \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$	・塑性後 ここに $R' = R_0 \left[\frac{2 P_0 (\lambda_r - 1) + \sigma_{ss}}{(1 + \lambda_r) \{ (\lambda_r - 1) P_i + \sigma_{ss} \}} \right]^{1/2} (\lambda_r - 1)$

E：変形係数， ν ：ポアソン比，C：粘着力， ϕ ：内部摩擦角， σ_c ：インタクトロックの一軸圧縮強さ

表-2 岩盤分類に対応する材料定数と強度定数

岩盤分類	Q値	円筒状の 一軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	岩盤の変形係数 E (kgf/cm ²)	塑性前の材料定数		塑性後の材料定数		強度定数	
				m	s	m _r	s _r	C(kgf/cm ²)	ϕ (deg)
B	$1 < Q \leq 4$	500	100000	0.4	0.0006	0.1	0.00003	40 ~ 60	55 ~ 65
C _H	$0.4 < Q \leq 1$	500	50000	0.2	0.00008	0.04	0.00001	24 ~ 40	45 ~ 55
C _N	$0.1 < Q \leq 0.4$	500	15000	0.1	0.00004	0.03	0.00001	10 ~ 24	38 ~ 45
C _L	$0.01 < Q \leq 0.1$	500	4000	0.03	0.00001	0.01	0	4 ~ 10	30 ~ 38
D	$0.001 < Q \leq 0.01$	500	1000	0.01	0	0.001	0	0 ~ 4	15 ~ 30

表-3 塑性限界応力比対応表

岩盤分類		塑性限界応力比 (P_i/P_0)								強度定数 (kgf/cm ²)(deg)
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	
B	① ②	—	—	—	—	—	—	—	—	C = 2.0, $\phi = 55$
C _H	① ②	—	—	—	—	—	—	—	—	C = 1.25, $\phi = 45$
C _N	① ②	—	—	—	—	—	—	—	—	C = 0.5, $\phi = 38$
C _L	① ②	—	—	—	—	—	—	—	—	C = 0.25, $\phi = 30$
D	① ②	—	—	—	—	—	—	—	—	C = 0.1, $\phi = 15$

① Hoek-Brown, ② Egger, Kastner

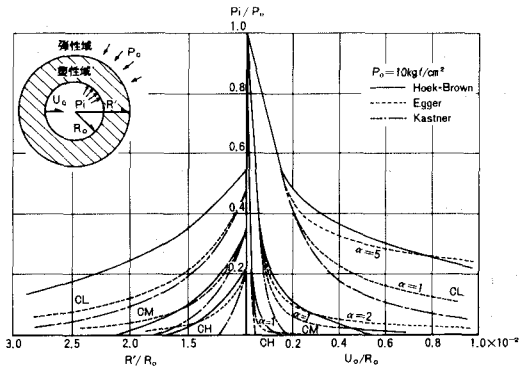


図-1 特性曲線の計算例

それぞれに対応する材料定数と強度定数 c , ϕ を示す^{4), 5)}。解析法を比較するため、初期応力 p_0 と支保圧力 p_i の比、すなわち塑性限界応力比 p_i/p_0 がそれぞれ対応するように c , ϕ の低減を行った。なお p_0 は $5 \sim 30$ kgf/cm² とし、強度定数の低減は ϕ の下限値を一定として c についてのみ行なった。塑性限界応力比は、それぞれ以下の式で示される。

Hoek-Brown : $p_i/p_0 = 1 - \{ (m/4)^2 + m p_0/\sigma_c + s \}^{1/2} / 2 - m/8 \} \cdot \sigma_c/p_0$

Egger, Kastner : $p_i/p_0 = (1 - \sin \phi) \{ 1 - c \cdot \cos \phi / p_0 / (1 - \sin \phi) \}$

表-3 に岩盤分類別の対応を示す。Egger, Kastner の塑性限度応力比 p_i/p_0 は、 c について1/20以下の低減率で、ほぼHoek-Brownで得られた岩盤分類別のカテゴリーに入っている。この強度定数を用い、3つの解析結果を C_L , C_M , C_H 別に比較したのが図-1である。

Hoek-Brown, Egger の方法は、塑性後の強度定数の低減と体積膨張を考慮しているが、Kastner の方法は考慮されていない。そのため、Kastner の特性曲線は他の方法と異なる傾向を示す。またEggerの方法では、体積膨張率 α が1から5と変化するに従ってHoek-Brownの特性曲線に近づく傾向にある。

4. まとめ

電研方式の岩盤分類を用いて、各々の岩種に対応する特性曲線をHoek-Brown, Egger, Kastnerの方法で解析的に求めた。特性曲線の比較検討を行なった結果、各パラメータの概略の関連性を把握することができた。塑性後の変位挙動は、脆弱な地山においてトンネルの安定を評価する上で特に重要である。今後は、実際トンネル現場で計測される変位挙動と特性曲線の関連性について検討を加える予定である。

5. 参考文献

1) E.フック, E.T.ブラウン: 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, 昭60年, 2) P.Egger: トンネル支保工に及ぼす破壊後の岩盤の影響, トンネル技術協会, 1978年, 3) H.Kastner: Statik des Tunnel- und Stollenbaues (金原弘訳「トンネルの力学」, 森北出版, 1974年), 4) 北川: 岩盤分類と岩盤-支保相互作用解析, 第19回岩盤力学に関するシンポジウム, 1987年, 5) 谷本, 山本, 森: BartonのQ値と日本での岩盤分類および弾性波速度との関係, 土木学会第37回年次学術講演会, 昭57年。