

III-379

非線形応力-ひずみ特性, 残留強度を考慮したトンネル挙動解析

近畿大学理工学部

正会員

久武勝保

University of Illinois

E.J. Cording

1. はじめに

本研究は, トンネル挙動に及ぼす地山の応力-ひずみ関係の非線形性, 残留強度の影響を明らかにしようとしたものであり, 理論解析に当っては, ピーク強度までは Kondnet の非線形応力-ひずみ式が用いられている。また, ピーク強度, 残留強度に対しては, 新たに非線形強度基準が提案され, Flow rule の適用により, ピーク強度後の体積膨張が評価されている。なお, 理論解析を容易にするために, トンネルは円形, 等方初期応力状態, とし 2 次元平面歪問題とした。

2. 地山の力学モデル

2.1 応力-ひずみ関係

ピーク強度までは, 八面体空間上での双曲線応力-ひずみ関係が用いられている(図-1参照)。

$$\sigma_{oct} = \frac{\epsilon_{oct}}{e_1 + f_1 \cdot \epsilon_{oct}} \quad (1)$$

$$e_1 = 1/E_1, \quad f_1 = R_f/\sigma_{oct,f}, \quad R_f = \sigma_{oct,f}/\sigma_{oct,ult},$$

E_1 : 初期接線係数, $\sigma_{oct,f}$: 計測される最大応力, $\sigma_{oct,ult}$: 双曲線モデルの終局応力。

E_1 , $\sigma_{oct,f}$ は共に拘束圧の関数とするが, その比 $E_1/\sigma_{oct,f}$ は一定と仮定する。また, 体積変化の主成分は降伏後に生じることから, 体積変化は, ピーク強度まではなし, 降伏後のみに生じるとする。

2.2 強度基準

実測結果によれば, 岩石の降伏条件は非線形になることが知られている。また, 強度低下を取り扱う場合, ピーク後の強度は, ピーク強度とひずみが十分生じた後の終局的な残留強度(図-2の直線)との間にあることから, 終局的な残留強度を基準として強度を表示するのが良い様に思われる。そこで, 本解析では次式を提案し, これを採用する。

$$\sigma_1 = \sqrt{\mu_r} \cdot \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + S \cdot \sigma_c^2} \quad (\text{for peak}) \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\mu_r} \cdot \sigma_3 + \sqrt{m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + S_r \cdot \sigma_c^2} \quad (\text{for residual}) \quad (3)$$

ここに, $\sqrt{\mu_r} = \tan^2(45^\circ + \phi_r/2)$, m, S (m_r, S_r) は定数, σ_c は 1 軸圧縮強度である。上式によれば, m_r, S_r の値の選択により, 任意のひずみに対応して, 曲線又は直線の残留強度が表現される。

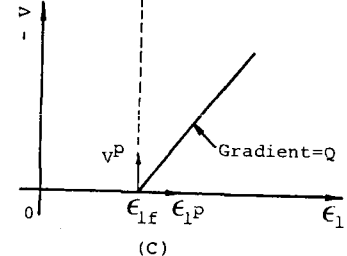
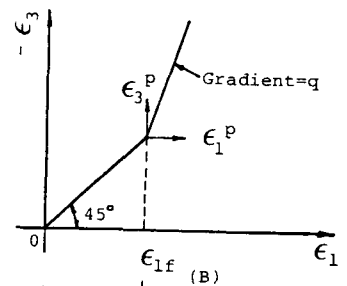
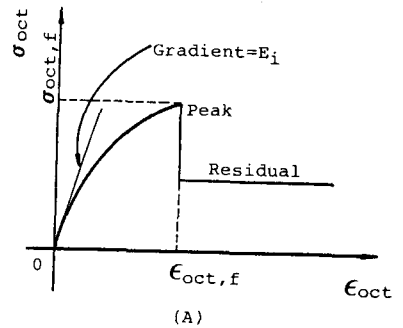


図-1 地山材料モデル

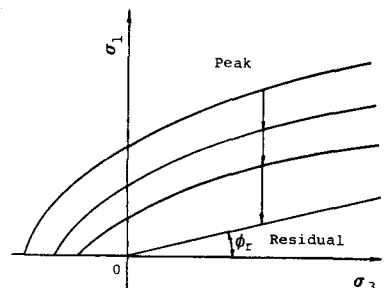


図-2 強度基準

3. 解析の概略

3.1 残留強度領域

釣り合い式に式(3)を代入した後、それにトノネル内壁での境界条件 ($\sigma_r = p_i$ (内圧)) を適用して解くと次式を得る。

$$\left(\frac{t_i}{r}\right) \left\{ \frac{a\sigma_r + \sqrt{b_1\sigma_r + C_1}}{a p_i + \sqrt{b_1 p_i + C_1}} \right\}^{\beta_1} \cdot \left\{ \frac{2a\sqrt{b_1 p_i + C_1} + b_1 - \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}}{2a\sqrt{b_1\sigma_r + C_1} + b_1 - \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}} \right\}^{\beta_1} \\ \times \left\{ \frac{2a\sqrt{b_1\sigma_r + C_1} + b_1 + \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}}{2a\sqrt{b_1 p_i + C_1} + b_1 + \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}} \right\}^{\beta_1} = 1 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha = 1/a$, $\beta_1 = b_1 / \{a\sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}\}$, $C_1 = S_k \sigma_c$,

$a = 2 \sin \phi / (1 - \sin \phi)$, $b_1 = m_k \cdot \sigma_c$.

式(4)から σ_r が求まれば、これを式(3)に入れて $\sigma_\theta (= \sigma_t)$ が得られる。

3.2 ピーク強度領域

本領域では体積変化がなく、また主せん断ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$ が主せん断応力に比例するという仮定の下で、式(1)を釣り合い条件式に適用し、さらにそれに式(2)の強度基準を用いて解けば、本領域の応力 σ_r は次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{a\sigma_r + \sqrt{b\sigma_r + C}}{ap + \sqrt{bp + C}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{2a\sqrt{bp + C} + b - \sqrt{4a^2 C + b^2}}{2a\sqrt{b\sigma_r + C} + b - \sqrt{4a^2 C + b^2}} \right\}^{\beta_2} \\ \times \left\{ \frac{2a\sqrt{b\sigma_r + C} + b + \sqrt{4a^2 C + b^2}}{2a\sqrt{bp + C} + b + \sqrt{4a^2 C + b^2}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{1}{k} \cdot \frac{A}{f^2} + 1 \right\}^{\gamma} = 1$$

---- (5)

ここに、 $\gamma = 1/(2R_f)$, $\beta_2 = b / \{a\sqrt{4a^2 C + b^2}\}$, $k = \sqrt{3} \cdot \sigma_{oct,f} / \{2R_f \cdot E_c\}$, $b = m\sigma_c$, $C = S\sigma_c^2$, A : 定数。

3.3 両領域の境界 t_0 及び境界応力 σ_0 の決定

$t = t_0$ におけるひずみ ϵ_{oct} は、図-1(A)に示す降伏ひずみ $\epsilon_{oct,f}$ に達し、また両領域境界での σ_r が釣り合うという条件から、 σ_0 と t_0 は次式で決定される。

$$\left\{ \frac{a\sigma_0 + \sqrt{b\sigma_0 + C}}{ap + \sqrt{bp + C}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{2a\sqrt{bp + C} + b - \sqrt{4a^2 C + b^2}}{2a\sqrt{b\sigma_0 + C} + b - \sqrt{4a^2 C + b^2}} \right\}^{\beta_2} \cdot \left\{ \frac{2a\sqrt{b\sigma_0 + C} + b + \sqrt{4a^2 C + b^2}}{2a\sqrt{bp + C} + b + \sqrt{4a^2 C + b^2}} \right\}^{\beta_2} \\ \times \frac{1}{(1-R_f)^{\gamma}} - 1 = 0, \quad (6)$$

$$t_0 = t_i \left\{ \frac{a\sigma_0 + \sqrt{b_1\sigma_0 + C_1}}{a p_i + \sqrt{b_1 p_i + C_1}} \right\}^{\beta_1} \cdot \left\{ \frac{2a\sqrt{b_1 p_i + C_1} + b_1 - \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}}{2a\sqrt{b_1\sigma_0 + C_1} + b_1 - \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}} \right\}^{\beta_1} \\ \times \left\{ \frac{2a\sqrt{b_1\sigma_0 + C_1} + b_1 + \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}}{2a\sqrt{b_1 p_i + C_1} + b_1 + \sqrt{4a^2 C_1 + b_1^2}} \right\}^{\beta_1} \quad (7)$$

t_0 が求められたので、式(5)に含まれる定数 A は容易に決定される。 $A = k t_0^2 R_f / (1 - R_f)$ (8)

3.4 変位の解析

ピーク強度領域の変位 u_p 、及び残留強度領域の変位 u_r は、図-1の関係を利用して次の様に求められる。

$$u_p = k \cdot \frac{R_f}{1-R_f} \cdot \frac{t_0^2}{t} \quad (9), \quad u_r = k \cdot \frac{R_f}{1-R_f} \cdot \frac{t}{\beta+1} \left\{ (\beta-1) + 2 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\beta+1} \right\} \quad (10)$$

解析結果の一例を図-4に示す。

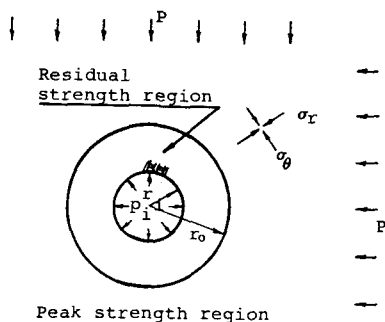


図-3 円形トノネル

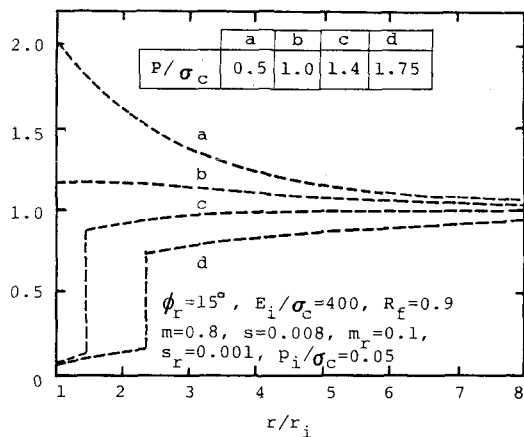


図-4 数値解析例