

東京都立大学 正会員 山本 稔
東京都立大学 正会員 久保田 尚子

岩盤は本質的に破壊した後も崩壊しないように拘束すれば、残留強度を有し、ひずみの進行とともに徐々に強度が劣化する性質をもっている。地山の一次応力として等方圧力を受ける円形トンネルの周辺岩盤が破壊して塑性状態にあるとき、残留強度を考慮して岩盤の変形挙動を述べ、平面ひずみ状態にある軸対称問題として、

図-1のように模式的に示すことができる。①は完全塑性、②は突然に発生する強度劣化、③は徐々に発生する強度劣化の場合を表わしている。なお、①と②は③の特別な場合に相当すると考えることができる。

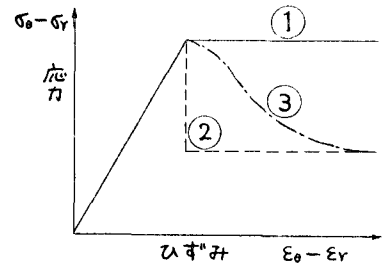


図-1 強度劣化と変形

円形トンネルの軸対称問題として①と②の場合に対する理論解は、P. Egger氏が従来の研究を補って、応力と変形に関する式を完全な形で与えている。しかし、③の場合については、閉じた理論解は与えられないとし、図-2のような直線的に強度劣化する場合に対して数値解析例を示している。ここには③の場合に対して実用に耐えうる理論解を与えることを目的とし、この強度劣化を同じく図-2に示す破線を用いる段階状の劣化に近似し、②の場合の拡張として理論解をうよう試みている。図は最も簡単な場合の1つで、2段階の突然劣化によるものである。

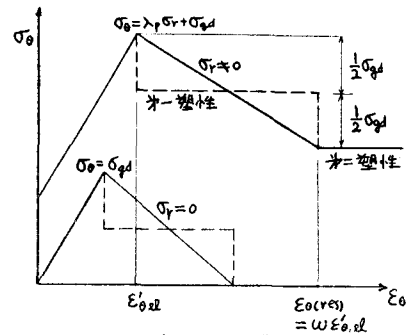


図-2 応力とひずみの関係

軸対称問題におけるつり合いと変形の関係式は次式で与えられる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r}(\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (1) \quad \frac{du}{dr} = \epsilon_r \quad \frac{u}{r} = \epsilon_\theta \quad (2)$$

塑性域発生条件はモール・クーロンの破壊規準によるとして

$$\sigma_\theta = \lambda_p \sigma_r + \sigma_{qd} \quad \lambda_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

ここに ϕ は内部摩擦角、 σ_{qd} は一軸圧縮強度である。ここには図-2の破線に対応する図-3の場合に限って解を示すことにすれば

$$\text{第一塑性域に対して} \quad \sigma_{\theta, p1} = \lambda_p \sigma_{r, p1} + \frac{1}{2} \sigma_{qd} \quad (4)$$

$$\text{第二塑性域に対して} \quad \sigma_{\theta, p2} = \lambda_p \sigma_{r, p2}$$

各領域の境界における応力には

弾性域と第一塑性域の境界 $r = R_1$ において

$$\sigma_{r, el} = \sigma_{r, p1} \quad \sigma_{\theta, el} = \lambda_p \sigma_{r, p1} + \sigma_{qd}$$

第一塑性域と第二塑性域の境界 $r = R_2$ において

$$\sigma_{r, p1} = \sigma_{r, p2} \quad \sigma_{\theta, p1} = \lambda_p \sigma_{r, p2} + \frac{1}{2} \sigma_{qd} \quad (5)$$

また、変位とひずみを求めるために α を塑性域におけるひずみ係数として

$$\epsilon_r = \epsilon'_{r, el} + \alpha \epsilon_{pl} \quad \epsilon_\theta = \epsilon'_{\theta, el} - \epsilon_{pl}$$

と置き、 α を一定値として式(2)を用い ϵ_{pl} を消去すれば

$$du/dr + \alpha \cdot u/r = \epsilon'_{r, el} + \alpha \epsilon'_{\theta, el} \quad (6)$$

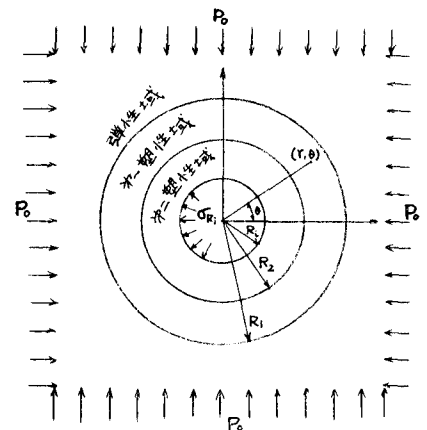


図-3 等方圧力を受ける円形トンネル

ここに、 $\varepsilon'_{0,el}$ 、 $\varepsilon'_{0,pl}$ は弾性域と非弾性域の境界におけるひずみである。さらに強度劣化の様相を規定する応力とひずみの関係として、非弾性から非弾性に入る境界のひずみが ω を一定の係数として次式で与えられるものとする。

$$\varepsilon_{0,pl} = \omega \varepsilon'_{0,el} \quad (7)$$

式(1)、(4)、(7) と図-3の境界条件を満たす解として非弾性域まで発生する場合を示せば、弾性域に対し

$$\begin{aligned} \sigma_{r,el} &= \frac{R_1^2}{r^2} \sigma_{R_1} + (1 - \frac{R_1^2}{r^2}) p_0 & \sigma_{\theta,el} &= -\frac{R_1^2}{r^2} \sigma_{R_1} + (1 + \frac{R_1^2}{r^2}) p_0 \\ u &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ \left((1-2\nu)r + \frac{R_1^2}{r} \right) p_0 - \frac{R_1^2}{r} \sigma_{R_1} \right\} \end{aligned} \quad (8a)$$

非弾性域に対して

$$\begin{aligned} \sigma_{r,pl} &= \left(\frac{r}{R_2} \right)^{\lambda_p-1} \left\{ \sigma_{R_2} + \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \right\} - \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \\ \sigma_{\theta,pl} &= \lambda_p \left(\frac{r}{R_2} \right)^{\lambda_p-1} \left\{ \sigma_{R_2} + \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \right\} - \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \\ u_{pl} &= \frac{C_{11}}{r^\alpha} + C_{12} r^\lambda + C_{13} r \end{aligned} \quad (8b)$$

ここに

$$\begin{aligned} C_{11} &= R_1^{\alpha+1} \left[\frac{1+\nu}{E} \left\{ 2(1-\nu)p_0 - \frac{2p_0 - \sigma_{gd}}{\lambda_p+1} \right\} - C_{12} R_1^{\lambda_p-1} - C_{13} \right] \\ C_{12} &= \frac{(1+\nu) \left\{ 1 + \alpha\lambda_p - \nu(\lambda_p+1)(1+\alpha) \right\}}{E(\lambda_p+\alpha) R_2^{\lambda_p-1}} \left\{ \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\lambda_p-1} \sigma_{R_1} + \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \right\} \\ C_{13} &= \frac{(1+\nu)(2\nu-1)}{2E(\lambda_p-1)} \sigma_{gd} \end{aligned}$$

また非弾性域に対して

$$\begin{aligned} \sigma_{r,pl} &= \left(\frac{r}{R_2} \right)^{\lambda_p-1} \sigma_{R_2} & \sigma_{\theta,pl} &= \lambda_p \left(\frac{r}{R_2} \right)^{\lambda_p-1} \sigma_{R_2} \\ u_{pl} &= C_{21}/r^\alpha + C_{22} r^\lambda \end{aligned} \quad (8c)$$

ここに

$$\begin{aligned} C_{21} &= R_2^{\alpha+1} \left\{ C_{11}/R_2^{\alpha+1} + (C_{12} - C_{22})R_2^{\lambda_p-1} + C_{13} \right\} \\ C_{22} &= \frac{(1+\nu)\sigma_{R_1}}{E(\lambda_p+\alpha)R_1^{\lambda_p-1}} \left\{ (1-\nu-\nu\lambda_p) + \alpha(\lambda_p-\nu\lambda_p-\nu) \right\} \end{aligned}$$

さらに式(5)および(7)から

$$\begin{aligned} \sigma_{R_1} &= \frac{2p_0 - \sigma_{gd}}{\lambda_p+1} & \sigma_{R_2} &= \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\lambda_p-1} \sigma_{R_1} \\ \frac{2p_0 - \sigma_{gd}}{\lambda_p+1} &= \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\lambda_p-1} \left\{ \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\lambda_p-1} \sigma_{R_1} + \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \right\} - \frac{\sigma_{gd}}{2(\lambda_p-1)} \\ \omega \varepsilon'_{0,pl} &= \frac{C_{11}}{R_2^{\alpha+1}} + C_{12} R_2^{\lambda_p-1} + C_{13} \end{aligned} \quad (9)$$

(9)

(10)

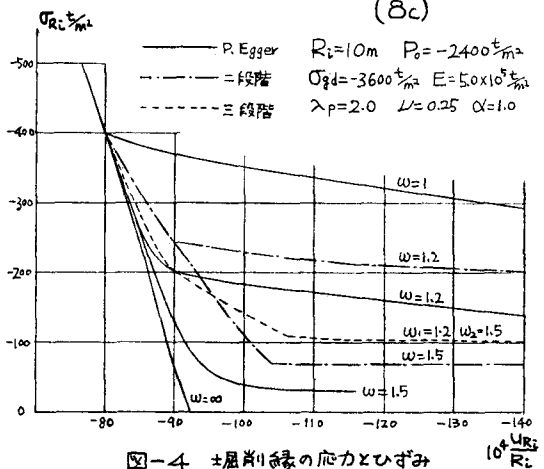


図-4 土層劣化の応力とひずみ

図-4は式(8)~(10)の計算例であるが、地山が強度劣化の領域にある限り、2段階の劣化によっても現象を説明することができると考えられる。なお、2段階の劣化には完全弾性と突然の強度劣化の組合わせがある。また、3段階以上の強度劣化も取扱うことができるが、計算は複雑になる。