III−29 　　円形トンネル覆工に作用する圧力に対する間隙水圧の影響

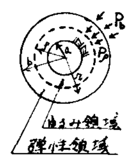
神戸大学　正員　桜井　春輔　○学生員　西垣　誠

1. はしがき

圧力水が存在する破砕帯にトンネルを開削する場合，薬液注入により止水した後掘削する場合がある。ここではトンネル覆工に作用する圧力に対する間隙水圧の影響を理論的に解析する。まず地山を粘弾塑性体と仮定し計算を容易にする為に地山は等質等方性で，その初期応力は静水圧状態であるとする。またトンネルは円形断面でその周辺に注入領域が存在する。そして覆工においては止水しないものとする。なお，計算の手法は先に著者の一人が発表したものと同じである[1]。

2. 間隙水圧分布

岩盤内の水の流れは地下水の運動に関する基本式を満足し非圧縮性でダルシーの法則に従うものと仮定する。トンネル開削周辺の注入領域には図-1 に示す様に弾性領域およびゆるみ領域が存在するものとする。弾性領域，ゆるみ領域における透水係数および間隙水圧を k_e, k_p, U_e, U_p とし等方性とすると間隙水圧分布は次の様になる。



(図−1)

$$U_e=\frac{P_b-P_\rho}{\log(b/\rho)}\cdot\log(r/\rho)+P_\rho,\qquad U_p=\frac{P_\rho}{\log(\rho/a)}\cdot\log(r/a) \quad \text{--------}(2\text{-}1)$$

3. 弾塑性解析

(1) 弾性領域における応力分布．　トンネル掘削前の地山の歪みは，地山の初期有効応力を P^* とすれば，$\varepsilon_r=\varepsilon_\theta=\varepsilon_z=\frac{1-2\nu}{E}P^*$　またトンネル軸方向の掘削による歪みの変化分は零と考える。この領域においては有効応力と歪みの間にフックの法則が成立する。そして，図-2 に示す境界条件のもとで，釣合い方程式と歪みの適合条件式から，この領域における応力分布を求め得る。

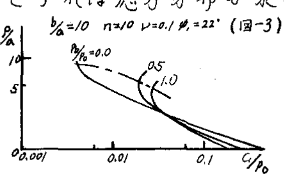
(図−2)

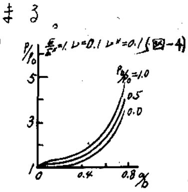
(2) ゆるみ領域における応力分布．　ゆるみ領域における軸方向の応力は，$\sigma_z=\frac{1}{2}(\sigma_r+\sigma_\theta)$，と仮定し釣合い条件式と塑性条件式として有効平均応力に対する正八面体剪断応力の関係式

$$\tau_{oct}=(\sigma_m-U_p)\tan\phi_1+C_1 \quad \text{--------}(3\text{-}1)$$

を用いるとすれば応力分布が求まる。

$r=\rho$ で上記の両領域の応力の連続から C_1 と ρ の関係式が求まる。その数値計算結果を図-3 に示す。また地山の初期応力 P と P_0 の関係を図-4 に示す。





4. 粘弾性解析

トンネルに覆工を施せば，その時点から覆工には σ_{r0} の圧力が作用し経時的に増大する。この σ_{r0} による地山内の応力分布は $\sigma_r=0$ at $r=\infty$，$\sigma_r=\sigma_{r0}$ at $r=a$，なる境界条件によって求められる。

(1) 弾性領域における変位．地山内の偏差応力−偏差歪み−時間関係は　$\varepsilon'_{ij}=\psi(t)\sigma'_{ij}$，地山の静水圧有効応力成分の初期有効応力に対する変化と体積歪みと時間の関係は，$\varepsilon_m=\psi^*(t)(\sigma_m-u-P^*)$ ここで $\psi(t),\psi^*(t)$ はクリープ関数である。いまトンネル掘削後 t_0 時間経過した後に覆工を施すとすれば，この領域内の変位は Boltzmann の重ね合せの定理によって容易に求められる。

(2) ゆるみ領域における変位　　この領域においては，すでに地山は降伏状態にあり，したがって，偏差応力と偏差歪みの関係は成立しないと考える。静水圧応力分布に変化が生ずる為，形状変化と独立に体積変化によるクリープが生ずる。平均有効応力と体積歪みの関係は，$\Delta V/V = \varphi^{*}(t) \cdot P$，ここで $\varphi^{*}(t)$ はクリープ関数を表わす。したがって覆工施工後のこの領域における体積変化は覆工時を基準とすれば　　$\Delta V/V = \{\varphi^{**}(t_0+t) - \varphi^{**}(t_0)\} \Delta P$ - - - - - - - - (4-1)

この式と変位-歪みの関係式および $r=\rho$ における弾性領域との変位の連続条件よりこの領域における変位を求め得る。次に覆工に作用する圧力 σ_{r_0} と変位 u_ℓ が　　$u_\ell = \varphi(t) \sigma_{r_0}$ - - - - - (4-2)

と表わされると仮定する。$\varphi(t)$ は覆工の構造および材料の力学的性質によって定まるクリープ関数である。ここで覆工と地山の間の変位の適合条件から，ボルテラ型第2種積分方程式を得る。　$\varphi(t) = \frac{1}{2}\left\{\frac{1}{G} + \frac{1}{G^*}(1-e^{-t/\tau})\right\}$，$\varphi^{**}(t) = \frac{1}{K} + \frac{1}{K^*}(1-e^{-t/\tau''})$，$\varphi^{*}(t) = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\left\{\frac{1}{G} + \frac{1}{G^*}(1-e^{-t/\tau})\right\}$，$a\varphi(t) + \varphi(t) = \frac{1}{M} + \frac{1}{M^*}(1-e^{-t/\tau'})$ - - - - - (4-3)

の様にクリープ関数を仮定して解を求め $t \to \infty$ とすれば覆工作用する最大圧力を求め得る。

すなわち　　$\sigma_{r_0} = (M_I + M_{II}) \,/\, (1+\beta)$ - - - - - - - (4-4)

ここで　$M_I = \frac{M\rho^2}{4G^*a} \cdot m_I e^{-t_0/\tau}$，$M_{II} = \frac{M}{K^*} m_{II} e^{-t_0/\tau''}$，$m_I = S_1^* + \frac{A}{2} + \frac{3(1-2\nu)}{1+\nu}\left\{X_1 \log\left(\frac{\rho}{b}\right) + X_3\right\}$，$X_1 = \frac{1+\nu}{3} A$，$\beta = M/M^*$

$X_3 = \frac{1+\nu}{3}\left[\frac{2\rho^2}{\rho^2-b^2}\left\{\sigma_r^{\rho} - \frac{A}{2}\log\left(\frac{\rho}{b}\right) - P_a\right\} + 2\left\{P_0 - P_\rho - p^*\right\} + \frac{A}{2}\right]$，$S_1^* = \frac{2b^2}{\rho^2-b^2}\left\{\sigma_r^{0} - \frac{A}{2}\log\left(\frac{\rho}{b}\right) - P_0\right\}$，$A = \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \frac{(P_b - P_\rho)}{\log(b/\rho)}$，

$m_{II} = \frac{a(k_2 - A^*)}{2k_1}\left\{1 - \left(\frac{\rho}{a}\right)^{k+2}\right\} - \frac{a}{2}\left\{\frac{(2+k_1)\cdot(k_2 - A^*)}{2k_1} - \frac{k_2}{2} + p^*\right\}\left\{1 - \left(\frac{\rho}{a}\right)^2\right\}$，　$A^* = P_\rho/\log(\rho/a)$，$K_1 = \frac{\sqrt{6}\tan\phi_1}{1-\sqrt{6}\tan\phi_1/2}$，$K_2 = \sqrt{6}C_1/(1-\frac{\sqrt{6}}{2}\tan\phi_1)$，

最も簡単な場合として　$\varphi(t) = A_\varphi$（定数）とすると．

$$\sigma_{r_0} = m \Big/ \left\{\frac{G^*}{G}\left(\frac{2GA_\varphi}{a}+1\right)+1\right\} \quad \text{- - - - - - (4-7)}$$

ここで　$m = \frac{\rho^2}{2a^2} m_I e^{-t_0/\tau} + \frac{2G^*}{aK^*} m_{II} e^{-t_0/\tau''}$ である。この式の数値計算結果を図-5.6 に示す。

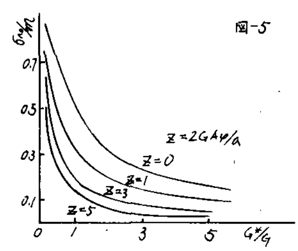


図-5

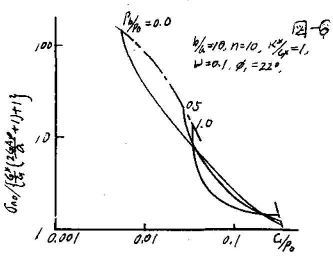


図-6

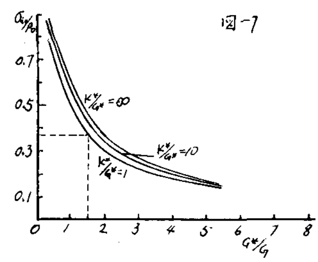


図-7

(3) 計　算　例　　下河内氏の提案する方法[2]との比較を行なうために彼の場合と同一のデータを用いる。すなわち，$\phi_1 = 27°41'$，$P_b/P_0 = 0.8$，$\nu = 0.3$，$k_a/k_p = 10$，$b/a = 10$，$\frac{2GA_\varphi}{a} = 0.3987$，$C/P_0 = 0.1142$，

このデータによって彼の計算を行なうと，$\sigma_{r_0}/P_0 = 0.375$　となる。本計算法による結果は図-7に示すように，G^*/G，K^*/G^* の関数として求まる。いま $G^*/G = 1.4$，$K^*/G^* = 1$ とすれば下河内氏と同じ結果を得る。しかし，G^*/G の値によってはかなり異なる結果を得る事がわかる。

参考文献

1) 桜井　春輔：“粘弾塑性地山内の円形トンネル覆工について” 土木学会論文報告集 No 181，1970，PP77-89

2) 下河内　稔：“水底トンネルの静的性質についての考察”　土木学会論文報告集 No197，1972，PP93-100．