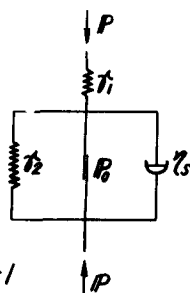


I-39 レオロジー的特性の地山中の素掘円形トンネルの変形挙動について

正員 徳島大学工学部 小田英一

前回に於て粘土の如き軟弱なる地山の素掘円形トンネルの変形挙動は地山を粘弾性体とみなして解明したが、この実験に於て変形がトンネル掘削直後急激な変形を示すが、ある時間を過ぎるとその変形が緩慢となって徐々に進行してやうのが観測された。このことより粘土の如き地山の力学的特性はレオロジー的特性としてこの問題を解明するのがよいと考えられる。このような地山材料のとき水平地表面の下かなり深い地更に掘削した素掘円形トンネル円孔及びその周辺の変形形式を地山の応力～歪～時間関係式が図-1に示されるレオロジー的力学模型をもつものとして導いたのである。

図-1は応力の deviator P が作用するときの粘性土の力学模型で1個のバネ(せん断弾性係数 B_1)と下限降伏値の応力の deviator B_2 に相当するスライダーを並列に加えた Voigt 要素(せん断弾性係数 B_1 , 粘性係数 η_1)とを直列に組合わせたものである。ただし Voigt 要素の粘性係数 η_1 は単純な dash pot でなく Eyring の粘性理論を拡張展開して統計力学的に求めた構造粘性式¹⁾で示されるものである。



この力学模型を利用して粘性土のレオロジー的特性をクリープ試験によつて求める。荷重制御式三軸圧縮試験機を利用して一定荷重を載荷して側液圧を零としたときのクリープ歪を測定する。下限降伏値以下の荷重条件では

$$\epsilon_i / (\epsilon_i)_{t \rightarrow \infty} = a + b \log t = \Phi(t) \quad \text{----- (1)}$$

となる。ただし ϵ_i は粘性土の円柱形試料の鉛直方向の歪であり、 $(\epsilon_i)_{t \rightarrow \infty}$ は時間 t が無限大のときの ϵ_i の値である。 a , b は係数であつて、クリープ試験に於て $\epsilon_i / (\epsilon_i)_{t \rightarrow \infty}$ と $\log_{10} t$ との実測値を半対数座標に plot するとき得られる直線部の傾斜より b が求められ、 $t=1$ のときの $\epsilon_i / (\epsilon_i)_{t \rightarrow \infty}$ の値が a となる。 A_2 , B_2 をレオロジー的常数とすれば

$$a = 1 + \frac{2.3}{B_2 \left(\frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_1} \right)} \log_{10} A_2 B_2 \eta_2, \quad b = \frac{2.3}{B_2 \eta_2 \left(\frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_1} \right)} \quad \text{----- (2)}$$

となる。

いま図-2に示す如く水平な地表面より H の深さにある素掘円形トンネルの半径を r とし、その中心を座標原点とする極座標 (r, θ) を考える。地山の単位体積重量を w , ポアッソン数を μ , 地山の弾性係数を E , せん断弾性係数を σ とする。

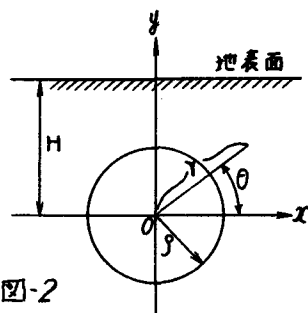


図-2

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}, \quad E = 2\sigma(1 + \frac{1}{\mu}) \quad \text{となり}$$

$$p = \left(\frac{\sigma}{r} \right)^2, \quad \mu_0 = \mu + 1, \quad \mu_1 = \frac{1}{\mu}(\mu + 1)(\mu - 1),$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\mu}(\mu + 1)(\mu - 2), \quad m = -\frac{\mu_2}{4\mu_1}$$

$$\sigma_1 = \frac{W}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu-1}\right), \quad \sigma_2 = \frac{W}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu-1}\right) \quad \text{とする。}$$

トンネル周辺の半径方向の変位を u_r とすれば、トンネル周辺の変位としては現場に於て u_r が問題となる故、上限降伏値以下の地山荷重状態では弾性論より求めた u_r を $(u_r)_{el.}$ として $(u_r)_{t=\infty} = (u_r)_{el.}$ となり、 u_r の変形挙動の式は次式で示される。

$$\begin{aligned} u_r = (u_r)_{el.} \Phi(t) = \frac{1}{\mu E} & \left[-r \sigma_1 H(\mu_2 + \mu_0 p) + \left\{ \frac{1}{4} (2\sigma_1 \mu_2 + \sigma_2 \mu_0) - (\mu_1 + m \mu_2) w p \log r \right. \right. \\ & - \frac{\mu_0}{2} \left(m w + \frac{\sigma_2}{2} \right) p^2 \left. \right\} r^2 \sin \theta + \sigma_2 H \left\{ \mu_0 (1-p^2) + 4\mu_1 p \right\} r \cos 2\theta \\ & \left. - \frac{\sigma_2}{4} \left\{ \mu_0 (1+p^2 - 2p^3) + 4\mu_1 p^2 \right\} r^2 \sin 3\theta \right] (a + b \log_{10} t) \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

(3)式の理論をトンネル模型実験によつて検証するため、高さ 70cm 、幅 60cm 、厚さ 10cm の木製容器を作り、前面の $70 \times 60\text{cm}$ の面は強化ガラスとしてトンネル円孔の写真撮影をなした。

トンネル地山荷重としてはLever比 $1/3$ の下部懸吊式として載荷した。使用した土は徳島市南昭和町の silty loam (粘土 10% 、シルト 60% 、砂 30%) で、真比重 2.77 、 $L.L. = 38.5\%$ 、 $P.L. = 21.7\%$ のものを含水比 35.3% にして均質になるよう模型実験箱につめ、充分均質にしめ固めレオロジー的特性をもつように荷重 0.288kg/cm^2 で圧密し 1550 分で一次圧密状態より二次圧密状態になった。載荷後 4000 分たつて更に荷重 0.288kg/cm^2 で圧密し 210 分で一次圧密状態より二次圧密状態になり 1200 分たつて荷重を降した。その後この土の $70 \times 60\text{cm}$ の面に半径 $r = 8\text{cm}$ のトンネル円孔を掘削して後地山荷重として 0.288kg/cm^2 をかけ、地表面の実際の変形をなすような載荷板装置を用いて地山荷重をかけ、載荷と同時にトンネル変形挙動を写真撮影した。この粘性土の上限降伏値は 0.522kg/cm^2 となり、下限降伏値 $p_{i0} = 0.035\text{kg/cm}^2$ であった。土の静圧係数は同する実験より $K = \frac{1}{\mu-1} = 0.90$ より $\mu = 2.111$ 、ポアッソン比 $\nu = \frac{1}{\mu} = 0.474$ となった。

クリープ試験の載荷荷重 p_i と ν とより $\sigma = \frac{(p_i - p_{i0})}{2(1+\nu)} (e_i)_{t=\infty}$ によつて σ が求められる。
 $p_i = 0.208\text{kg/cm}^2$ で $(e_i)_{t=\infty} = 0.0406$ 、 $p_i = 0.416\text{kg/cm}^2$ で $(e_i)_{t=\infty} = 0.0849$ 、 $p_i = 0.520\text{kg/cm}^2$ で $(e_i)_{t=\infty} = 0.1122$ により平均値として $\sigma = 1.478\text{kg/cm}^2$ となった。またクリープ試験結果より $\Phi(t) = 0.70 + 0.09 \log_{10} t$ となる。 $W = 0.00196\text{kg}$ 、トンネル地山荷重と土冠り厚さより換算土冠高さ $H = 174.03\text{cm}$ として(3)式より u_r の理論値を求めた。またトンネル模型実験の写真撮影より u_r の実測値を得て理論値と比較したものを図-3に示す。

- 1) 土木学会論文集 40号
- 2) Hanns Schmidt: Statische Probleme des Tunnel- und Druck Stollenbaues und ihre gegenseitigen Beziehungen, 1926. Berlin
- 3) 第12回土木学会年次学術講演会講演概要 141頁

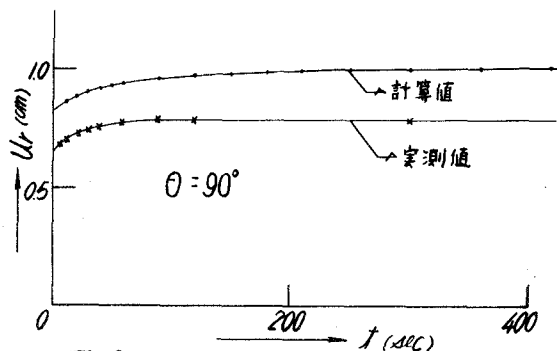


図-3