

徳島大学工学部 正員 小田英一

1. まえがき: 土のような地山中のトンネル覆工が可縮性構造であるとき, 覆工土圧が作用すると覆工の周長が縮小し, それにつれて覆工土圧が緩和する現象につき模型実験により研究した。これに因りて昨年の研究は覆工土圧緩和の経過時間が短時間であったが, 今回の実験では長時間にわたる覆工土圧緩和の様相について測定して, この現象の特性について研究した。

2. 模型実験の概要と実験結果: トンネルの模型実験に用いた模型箱は $60 \times 10 \times 70$ cm の鋼製の箱の面の中央に直径 16 cm の円孔のトンネル可縮性覆工を設置した。この可縮性覆工の模型は図-1 に示されるが, 鋼製セグメント 6 ケとセグメントの 4 ケの継ぎに挿入する発泡スチロールとよりなり, 継ぎの発泡スチロールが可縮性を附与することとなる。土圧測定法と模型実験法は昨年の発表のものと同様である。この模型箱の 10×60 cm の上面に等分布荷重として $p = 0.554 \text{ kg/cm}^2$ を作用させて, 覆工土圧を発生させた。可縮性覆工の半径方向の変位 u_r と半径方向土圧 σ_r と時間 $t = 2000'$ まで測定した。使用した地山材料としての土は $L, L = 38.6\%$, $P, L = 23.0\%$, 粘土試験より砂分 5.1% , シルト分 69.5% , 粘土分 25.4% で, シルト質粘土ロームである。単位重量は 1.834 g/cm^3 , 含水比は 41.0% である。圧密非排水三軸圧縮試験による強度常数は $c = 0.15 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 27^\circ$, $c' = 0.01 \text{ kg/cm}^2$, $\phi' = 32^\circ$ である。Jaky による静止土圧係数 $K_0 = 1 - \sin \phi$ を用い, 土のポアソン比 $\mu_g = 1/K_0 + 1 = 3.13$ となる。Duncan, Chang の双曲線応力-ひずみ関係と応力に依存した材料の性質を利用してえられる地山材料の弾性係数 E_x は次式となる。

$$E_x = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \dots \dots (1)$$

ただし, E_x : 初期弾性係数, p_a : 大気圧 $= 1.035 \text{ kg/cm}^2$, σ_1, σ_3 : 三軸圧縮試験のときの軸圧, 側圧である。K は次式で定義される。

$$E_x = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad \dots \dots (2)$$

この実験用地山材料では $R = 0.95$, $n = 0.363$, $K = 54.34$ となる。

(1) 式を用いて $p = 0.554 \text{ kg/cm}^2$ のとき, $E_x = 8.17 \text{ kg/cm}^2$, セン断弾性係数 $\mu_g = 3.09$ となる。

図-2 に u_r と時間 t の関係を示す。この図で極座標 r, θ をとったとき, 水平軸の右向きを基準として反時計方向の θ を正, 時計方向の θ を負として θ の値をパラメータとして示している。図-3 では σ_r と t の関係を示している。これによれば u_r の変化は $t = 100'$ 付近双曲線的に増加して, $t \leq 100'$ では大体どの曲線も一定の値に達しているが, σ_r の土圧緩和は $t = 2000'$ になっても進行中であり, $\theta = 90^\circ$ と -90° の場合には $t = 200'$ より以後は土圧緩和の速度が多少増加してきている。このように u_r は可縮性覆工の最終変位量に到達するのに比較的短時間主要するの, σ_r の土圧緩和が最終値になるのに相当長時間を要することがわかる。

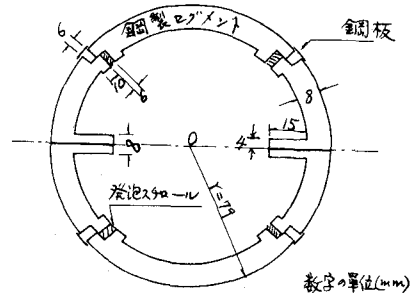


図-1 可縮性覆工模型

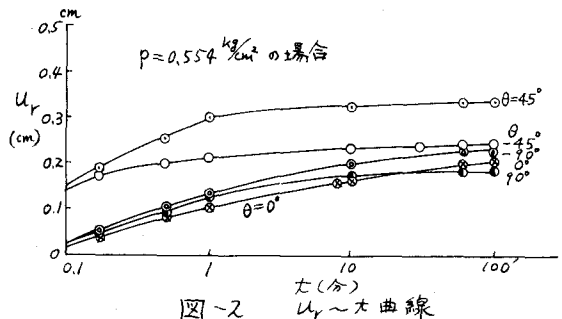


図-2 $u_r \sim t$ 大曲線

3. 考察: 図-2 と図-3 より σ_r と u_r との関係が明らかになったものが図-4 であり, u_r は σ_r が大きくなると一定値になるのに対し, σ_r は σ_r の相対大なるときは緩急現象が続くから, どの曲線も鉛直線に漸近して下降する型となっている。図-5 には土圧緩和初期の u_r と土圧緩和量 $\Delta\sigma_r$ との関係を示し, θ のすべての値に対して直線性を示している。

覆工土圧 σ_r について著者の理論より

$$\sigma_r = \{2\alpha_{1c2} + \alpha'_{1c1} + 2(\beta'_{2c1} - \beta_{2c2})\sin\theta\} / K \quad \text{----- (3)}$$

$$\alpha_{1c2} = \frac{-w_g d m_g K \frac{\mu_c}{\mu_g} (1 + K_g)}{\{(K_c + 1) - 2(1 - \frac{\mu_c}{\mu_g})\} + 2\rho_0^2 (1 - \frac{\mu_c}{\mu_g})} \quad \text{----- (4)}$$

$$\beta_{2c2} = \frac{-\frac{w_g K^2}{4} \frac{\mu_c}{\mu_g} K_g}{(K_c + \frac{\mu_c}{\mu_g}) + (1 - \frac{\mu_c}{\mu_g}) \rho_0^2} \quad \text{----- (5)}$$

$$\alpha'_{1c1} = -2\rho_0^2 \alpha_{1c2} \quad \text{---- (6)}, \quad \beta'_{2c1} = \rho_0^4 \beta_{2c2} \quad \text{---- (7)}$$

土圧緩和直前では $m_g = 3.13$, $\mu_g = 3.09 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, μ_c , λ_c : 覆工の Lamé 常数, $\mu_c = 10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, $\lambda_c = 5 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, $K_c = (\lambda_c + 3\mu_c) / (\lambda_c + \mu_c) = 2.33$, $E_g = E_c = 8.17 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, $\lambda_g = E_g / (\mu_g + 1) = 1.98 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, $K_g = (\lambda_g + 3\mu_g) / (\lambda_g + \mu_g) = 2.22$, K = 覆工外径 = 8 cm, $K\rho_0$ = 覆工内径 = 7.2 cm, $\rho_0 = 0.9$, $p = 0.554 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ に該当する d (土核厚) = 77 cm となり, w_g (土の単位重量) = $0.00183 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ となり, (3) 式より (7) 式を用いて σ_r を θ に対して計算したものと実験値とを図-6 (a) に示す。また土圧緩和最終の σ_r の計算で, 可塑性覆工模型の力学的常数として, ポアッソン数 $\mu_c = 0$, 弾性係数 $E_c = 13.75 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ より $\lambda_c = \frac{E_c}{(\mu_c + 1)} = 0$, $\mu_c = E_c / 2(1 + \mu_c) = 6.88 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ を用い, 地山の力学的常数は前と同じとして (3) 式より計算した σ_r と $\sigma = 2000'$ のときの σ_r の実験値とを図-6 (b) に示す。これより計算値と実験値は比較的良好に一致していることがみられる。

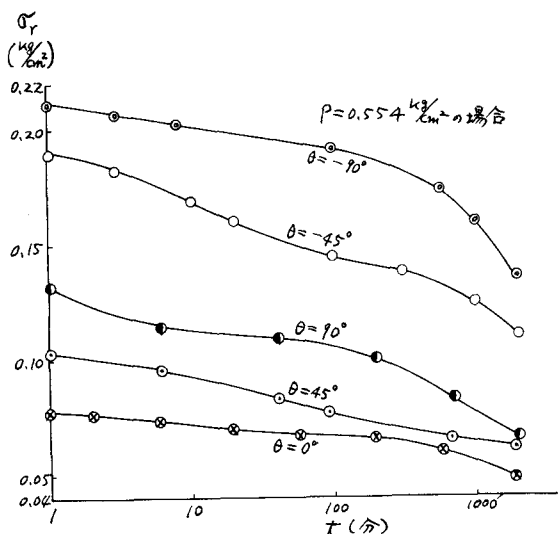


図-3 σ_r - t 曲線

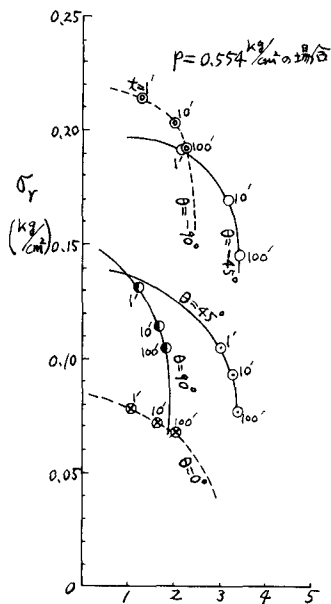


図-4 σ_r - u_r 曲線

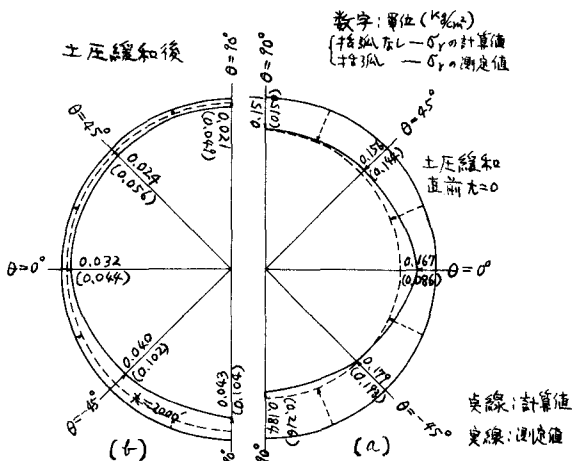


図-6 σ_r の分布

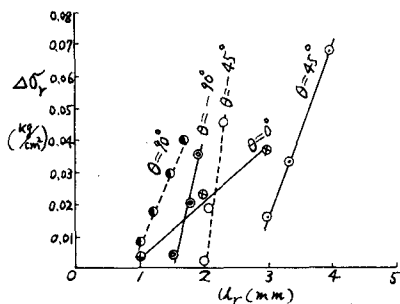


図-5 u_r - $\Delta\sigma_r$ 関係