

日本電信電話公社 茨城電気通信研究所 正員 田中邦男

1. まえがき

レジンコンクリートトンネルは、わが国の多くの市街地共通の、ローム、沖積粘土、シルト、細砂、等よりなる軟弱地盤への適用が予想され、普遍的な複雑多岐に亘る軟弱地盤特有の変状に基づき、累層地盤にまたがって存在するトンネルの不等沈下問題が重要となってくる。本文では、これらの基本例および管路等の多くの事例より類推して、不同沈下時のトンネル形態の諸例が包含可能な、地盤係数 k_0 、土圧 p_0 のトンネルの周辺に、地盤係数 k 、土圧 p の地山ゆるみが生じた、標準的一事象を解析し、実際面でトンネルが遭遇する k_0, k, p_0, p 値間の比率 $k/k_0, p/p_0$ を中心に、レジンコンクリートトンネルに生ずる最大応力の影響性を考察する。

2. 基礎方程式と解

軸力 P を内蔵するレジンコンクリートトンネルが、地盤係数 k なる弾性地盤によって支持され、土圧 p を受けるときの基礎方程式は、式(1)で示され、解は、 p が一定の場合 $C_{1i} \sim C_{4i}$ を積分定数として、式(2)のように表わされる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} + k_i D y = p_i D \quad \text{--- (1)}$$

$$y = C_{1i} \sin \alpha_i x \delta h \beta_i x + C_{2i} \cos \alpha_i x \delta h \beta_i x + C_{3i} \sin \alpha_i x \operatorname{ch} \beta_i x + C_{4i} \cos \alpha_i x \operatorname{ch} \beta_i x + \frac{p_i}{k_i} \quad \text{--- (2)}$$

ここに

E : トンネルのヤング係数

I : " 断面2次モーメント

D : " 外径

P : " 軸力

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{k_i D}{4EI} + \frac{P}{4EI}}$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{k_i D}{4EI} - \frac{P}{4EI}}$$

(II 区間の添字 i を0, I 区間は無添字)

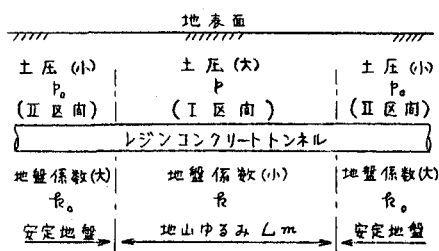


図1. 地山ゆるみ区間 L, m 発生時の解析モデル

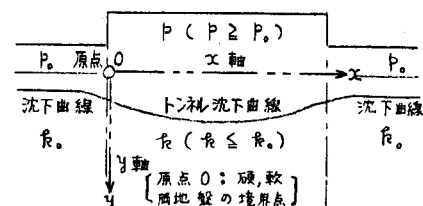


図2. トンネル沈下曲線と x, y 座標の設定

上記のI, II相互区間に対する境界条件として、各 y, y', y'', y''' での連続性を適用し、任意定数 $C_{1i} \sim C_{4i}$ を定めると図1モデルの厳密解が求まる。通常、不等沈下時トンネルの最大発生応力は、 k, p 値急変力所付近の沈下曲線急変部に生ずるため、本例では図2のように、原点 O を、硬軟両地盤の境界点にとり、次章のごとく、最大発生応力を表示する。また、軸力存在時における二つの相対的曲げ剛さ α, β 値については、軸力 P が数10 ton以下であって、不等沈下問題への影響が微少となることが言えるため、 α と β とみなし、以後の具体的な検討を進める。

3. 最大発生応力

以上によって、 k 値比 $\xi = k/k_0$ 、 p 値比 $\eta = p/p_0$ の例の発生応力 $\sigma(\xi, \eta, x)$ は、I 区間側の場合、式(3)で表わされる。この式(3)中の $\Delta, \Delta_1 \sim \Delta_4$ は、次式で示され、また、 Δ, C, S, C は、 $\sin \alpha L, \cos \alpha L, \delta h \beta L, \operatorname{ch} \beta L$ を表わす。

$$\sigma(\xi, \eta, x) = \frac{ED\alpha\beta}{2} y'' = \frac{PD^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2k}} \sqrt{\frac{E}{I}} \frac{S-\Delta}{S+\Delta} \frac{\eta-\xi}{\eta\Delta} \left\{ \begin{aligned} &\Delta_1 \sin \alpha x \delta h \beta x + \Delta_2 \cos \alpha x \delta h \beta x \\ &- \Delta_3 \sin \alpha x \operatorname{ch} \beta x + \Delta_4 \cos \alpha x \operatorname{ch} \beta x \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (3)}$$

$$\Delta = 1 + 2\sqrt{\xi} \left\{ 1 + \frac{C-\Delta}{S+\Delta} + \frac{1}{(S+C)(S+\Delta)} \right\} + 2\sqrt{\xi} \left(1 - \frac{2\Delta}{S+\Delta} \right) + 2\sqrt{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{C+\Delta}{S+\Delta} + \frac{1}{(S+C)(S+\Delta)} \right\} + \xi$$

$$\Delta_1 = 1 + 2\sqrt{\xi} \left\{ 1 + \frac{C+\delta}{S+\delta} + \frac{1}{(S+C)(S+\delta)} \right\} + \sqrt{\xi} \left(1 - \frac{2\delta}{S+\delta} \right), \quad \Delta_2 = -1 + \frac{C+\delta}{S+\delta} - \frac{1}{(S+C)(S+\delta)} + 2\sqrt{\xi} \frac{\delta}{S+\delta} + \sqrt{\xi} \left\{ 1 - \frac{C+\delta}{S+\delta} + \frac{1}{(S+C)(S+\delta)} \right\},$$

$$\Delta_3 = -1 + \frac{C+\delta}{S+\delta} - \frac{1}{(S+C)(S+\delta)} - 2\sqrt{\xi} \left(1 - \frac{\delta}{S+\delta} \right) - \sqrt{\xi} \left\{ 1 - \frac{C+\delta}{S+\delta} + \frac{1}{(S+C)(S+\delta)} \right\}, \quad \Delta_4 = 1 - \frac{2\delta}{S+\delta} - \sqrt{\xi},$$

通常、予想される地山ゆるみ L は 10 m 以上であるため、 L が長くなるに伴い、双曲線関数 S, C が急増し、式(3)の近似的把握は容易となる。これより、トンネルに生ずる最大応力 $\sigma_m(\xi, \eta, L)$ は、以下の近似式(4)で算定が可能となる。すなわち、 $\sigma_m(\xi, \eta, L)$ は、 $\xi \rightarrow 0$ での最大応力 $\sigma_m(0, \eta, L)$ に補正関数 $\Psi[\Xi(\xi), H(\eta)]$ を乗じた形で表わされる。また、この場合における最大値発生点 x_m は、式(5)で算出できる。

4. 考察

式(4)右辺の補正関数 $\Psi = \sigma_m(\xi)/\sigma_m(0)$ は、図3例の様に、 ξ 値比、 η 値比に基づく応力緩和作用の程度を示すものであり、通常例での応力緩和効果について、次の諸点が言える。

- 1)、通常、極端な ξ 値比がない $0.1 < \xi < 1.0$ の大部分の ξ の存在範囲において、 $\sigma_m(\xi)$ は $\sigma_m(0)$ の $1/3 \sim 1/5$ の値となり、顕著なる最大発生応力値の低下が推測される。
- 2)、実際に $\xi_0 \rightarrow \infty$ の例は存在し難いが、 $\xi = 0.005 \approx 0$ の場合をとっても、 $\sigma_m(\xi)$ は、 $\sigma_m(0)$ の $3/5$ 程度に過ぎないことがわかり、応力緩和作用が大きく効くことが言える。
- 3)、 η 値比による最大発生応力への影響は、 ξ 値比の場合と比較して著しく小さくなり、 $\xi_0 = 0$ ($\eta^{-1} = 0$) 時の Ψ の最大値に対する緩和効果で、マクロ的に把握できる。

以上の応力緩和効果の概念を基本とし、不同沈下時のレジントンネルに生ずる最大応力 $\sigma_m(\xi, \eta, L)$ の一例を示すと、図4, 5 のようになり、 $\rho_0 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$, $\rho_0 = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$ の場合、 $\sigma_m = 50 \text{ Kg/cm}^2$ の最大値が得られた。この時の σ_m, x_m の変化状況は、図4より、 σ_m は ρ_0 の増加で急減する反面、 x_m は殆ど影響が小さいことがわかった。すなわち、全般的にみて、式(4), (5)より、最大発生応力 σ_m は、 $\sqrt{\rho_0}$ に逆比例する傾向が強く、 σ_m の発生点 x_m は、 $\sqrt{\rho_0}$ に逆比例する傾向が著しくなることが言える。

5. あとがき

以上、レジンコンクリートトンネルの不等沈下現象で生ずる最大応力について、 ξ 値比、 η 値比に基づき変化する応力緩和効果の基礎概念を中心に考察を進めてきた。今後は、レジンコンクリートトンネルの高機能化に対する研究のテーマとして、より深く検討する予定である。

$$\sigma_m(\xi, \eta, L) = \sigma_m(0, \eta, L) \Psi[\Xi(\xi), H(\eta)] \quad \text{--- (4)}$$

$$\sigma_m(0, \eta, L) = \frac{p D^2}{2\sqrt{\rho_0}} \frac{\sqrt{E}}{I} \frac{S-\delta}{S+\delta}, \quad \Xi(\xi) = \tan^{-1} \sqrt{\xi}, \quad H(\eta) = \eta^{-1},$$

$$\Psi[\Xi(\xi), H(\eta)] = \frac{3(1-H) + 4(1+H)\cos 2\Xi + (1-H)\cos 4\Xi}{4\sqrt{2} \sin(\Xi + \frac{\pi}{4})(1 + \cos 2\Xi)} e^{-H}$$

$$x_m = \sqrt{\frac{4EI}{\rho_0 D}} \tan^{-1} \sqrt{\xi} = \sqrt{\frac{4EI}{\rho_0 D}} \left(1 - \frac{1}{3}\sqrt{\xi} + \dots \right) \quad \text{--- (5)}$$

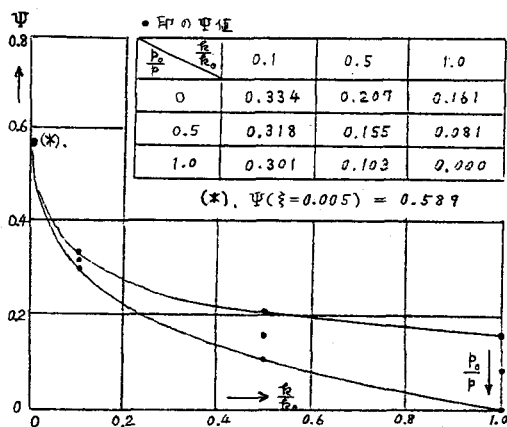


図3. $\Psi \sim \xi/\rho_0, \rho_0/p$

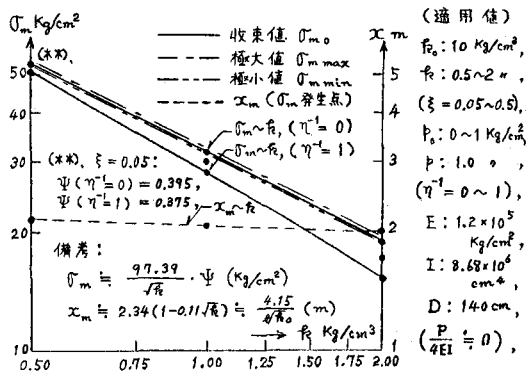


図4. $\sigma_m, x_m \sim \rho_0$

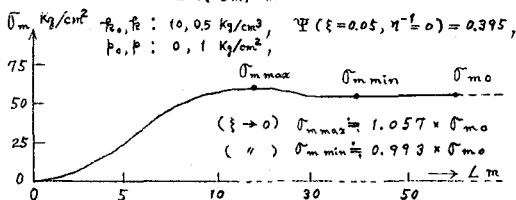


図5. $\sigma_m \sim L$