

III-264 シールドトンネル掘削の際の応力解放に伴う圧密沈下の解析

早稲田大学 理工学部 正会員 森 麟
同大学院 赤木 寛一
○同大学院(現三菱重工(株)) 正会員 小野 晶俊

1. まえがき

軟弱粘性土地盤でシールド工事が行なわれた場合、しばしば数cm以上の圧密沈下が発生する。本研究では、シールド掘削の際の応力解放で地山がセン断による乱れを受けることによって圧密が発生することに着目し、土の乱れ程度と圧密体積収縮率との関係を求め、その関係を用いて地下水位の変動がない場合のシールド掘削に伴う乱れによる地山の最終圧密沈下量の概算を試みた。

2. 乱れによる圧密沈下の発生機構

シールド掘削に伴う応力解放によって地山の平均主応力は減少する。しかし、地山が変形してセグメントリングまたは裏込めグラウトに接すると次第に平均主応力は回復しはじめ、最終的には初期の応力状態に近くなる。この様な経過から、地山の平均主応力は増加することはないので、一般的な有効応力の増加による圧密は発生しない。しかし、土がセン断による乱れを受けるために土粒子の骨格構造が変化し、圧縮に対する土の抵抗力が減少するために、圧力が不変あるいはやや減少しても圧密が発生する。

3. 乱れによる圧密沈下の解析

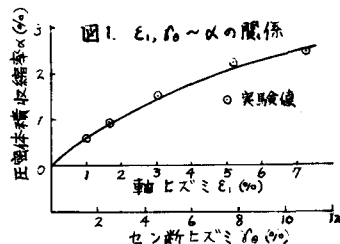
このように、乱れによる圧密現象は一般の圧密とは異なるので、その沈下解析を行なうに当りては、一般の圧密理論は適用できない。そこで、土の乱れ程度に基づく圧密体積収縮率がその土の受けたセン断にズミにより、一義的に表わされるものと仮定し、次の様な方法によって乱れによる地山の最終圧密沈下量を算定した。

今回の解析では、飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}=1.6 \text{ t/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi=0^\circ$ の均一な正規圧密飽和粘性土地盤内の地下20mの地点で、半径 $R_0=2.0 \text{ m}$ のシールド掘削が行なわれた場合を想定し、地下水位の変動はないものとした。実験に用いた試料は、東京江東地区の現場より採取したシルト質粘土をミキサーで練返した後、大型圧密土作成装置によって、最終圧密 0.8 kg/cm^2 にて約1ヶ月圧密させたもので、鋭敏比は約5.5であった。

(1) セン断にズミ ρ_0 と圧密体積収縮率 α との関係

最初に次の様な実験を行なうて、セン断にズミ ρ_0 と乱れによる圧密体積収縮率 α との関係を決定した。すなわち、まず大型圧密土作成装置によって作成した試料より直径5cm高さ10cmの供試体を切り出し、三軸室内で圧密荷重 $P_0=0.8 \text{ kg/cm}^2$ にてペーパードレーンを併用して48時間圧密させた。圧密終了後非排水状態で三軸圧縮試験を行ない軸にズミを与えた。所定の軸にズミに到達した後、圧力を再び初期の P_0 にもどし、再度圧密させた。この2度目の圧密の際の排水量を乱れによる圧密量とし、さらにこれを供試体体積で割ったものを圧密体積収縮率 α とした。以上の操作を軸にズミ ε_1 を1.0~7.3%の5種類に変化させて行ない、 ε_1 と α との関係を求めた(図1)。ところで、供試体の等方弾性を仮定し、ポアソン比を0.5とすれば $\rho_0=\varepsilon_1-\varepsilon_3=1.5\varepsilon_1$ の関係があるから、 $\varepsilon_1 \sim \alpha$ の関係は直ちに $\rho_0 \sim \alpha$ の関係へと変換される。

(※注) 土盤より20mの地点における鉛直有効応力は 1.2 kg/cm^2 であり、また静止土圧係数 K_0 を0.5とすれば、水平有効応力は 0.6 kg/cm^2 である。従って平均主応力は 0.8 kg/cm^2 となる。



(2) 有限要素法によるセン断にズミの解析

次に、掘削によって発生すると考えられるセン断にズミ ρ_0 の分布を有限要素法によって求めた(図2)。この解析では三角形要素及び双曲線応力-ズミ関係を用い、地山がセグメントリングに接した時は、リングによる変位の拘束を考慮した。すなわち、セグメントリングは半径 $R_0=1.95 \text{ m}$ の剛体で不動であり、リングの最下点は初めから地山に接しているものとした。さらに、地山が変形してリングに接した時点でのその部分はリング周上に固定され、その部分における応力解放は終了するものとした。この解析の結果 ρ_0 はシールド周辺要素で最大7.9%となった。

また図2によれば γ_0 の等値線はトンネルの上方45°の方向に発達しており、その方向で地山が大きな乱れを設けていることが考察される。

(3) 乱れによる圧密沈下量の算定

①の実験結果及び④の解析結果を用いて、乱れによる圧密沈下量の算定を行なった。その手順は次に示すとおりである。(図3参照)

- ① セン断にズミの領域を細かく分割する。(A,B,C,D,...)
- ② 例えばその細分化された領域の1つAに注目する。この領域はセン断にズミ γ_0 が0.5%以上1.0%未満の領域であるから、0.75%の均一なセン断にズミを受けている領域とみなすと、それに相当する圧密体積収縮率 ϵ は、図1より0.3141%である。従って領域Aの体積を V_A とすれば、この領域内の圧密収縮体積 ΔV_A は $\Delta V_A = 0.003141 \cdot V_A$ となる。

- ③ 次に領域Aの中央部(図3の斜線部)で落し戸現象が発生するものと仮定する。この時、落し戸体積を圧密収縮体積 ΔV_A に等しくとる。この落し戸現象によって発生する地表面及び地中の沈下量は次式で表わされる。(文献2参照)

$$\begin{aligned} \cdot 0 \leq x_A \leq l_A \quad \delta_{A1} &= \frac{\delta_A}{2} \left(\sqrt{1 - e^{-\frac{(x_A + l_A)^2}{2\sigma_A^2}}} + \sqrt{1 - e^{-\frac{(l_A - x_A)^2}{2\sigma_A^2}}} \right) \\ \cdot x_A \geq l_A \quad \delta_{A2} &= \frac{\delta_A}{2} \left(\sqrt{1 - e^{-\frac{(x_A + l_A)^2}{2\sigma_A^2}}} - \sqrt{1 - e^{-\frac{(x_A - l_A)^2}{2\sigma_A^2}}} \right) \end{aligned}$$

ただし、
 $2l_A$: 落し戸幅 δ_A : 降下量 $2l_A \cdot \delta_A = \Delta V_A$
 $2\sigma_A$: 沈下影響領域、深さ z の関数
 σ_A : 沈下曲線の変曲点までの距離 z の関数、一般に $\sigma_A = 2.13 \sigma_0$

- ④ 以上の計算をそれぞれの細分化された領域(B,C,...)について行ないそれらを重ね合せば、地表面及び地中での最終圧密沈下量が求まる。この方法に従い $\gamma_0 \geq 0.5\%$ の全ての領域を対象として求めた地表面及び地中の圧密沈下の状況を図4に示す。図によれば、トンネル中心線付近では圧密沈下曲線と即時沈下曲線は形状が似ており、トンネルクラウンに近いほど大きな沈下が生じている。しかし中心線より5.25m離れた地点における圧密沈下曲線によればトンネルクラウンと地表面の間部で沈下が最大となっていることがわかる。

4. 結語

解析結果(図4)によれば、トンネル直上地表面において圧密沈下量は3.38cm、即時沈下量は3.47cmとなった。このことから、シールド掘削の際に発生する沈下の中で、圧密沈下の占める割合は非常に大きなものだといえる。しかも、今回の実験で用いた試料は敏感比が55と低く、敏感比が20前後の現場の土の場合にはより大きな圧密沈下が発生することが予想される。さらに、今回の解析ではセグメントを挿入して変形を拘束したために応力解放は44%程度しか行なわれず、周辺地山に発生するセン断にズミも最大で7.96%であったが、同じ地盤条件を用い、変形を拘束しない条件でセグメント解析を行なった結果、セン断にズミは最大20.7%となった。以上の考察から、シールド掘削の圧密沈下を防止するためには、応力解放の際の地山の変形を極力小さくすることが必要であり、そのためには、シールドテール通過後ただちに地山を乱さぬように裏込め注入を行なうのが効果的であると思われる。

<参考文献> 1. 森 麟: シールド工事による軟弱地盤の圧密沈下 第5回 最近のシールド工法 講習会テキスト(昭53.7)
 2. 西尾宣明: Aversin等の仮説による地盤の不等沈下の評価について、東京ガス総合研究所報 (昭51.7)

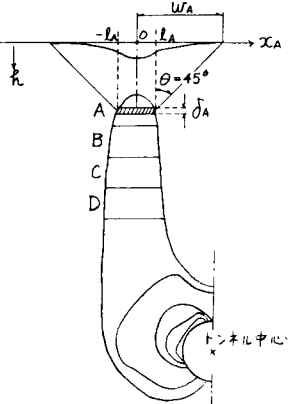
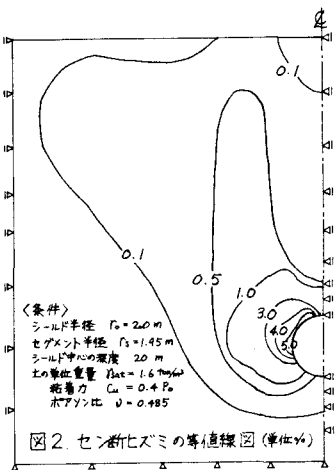


図3 分割落し戸による圧密沈下量の算定

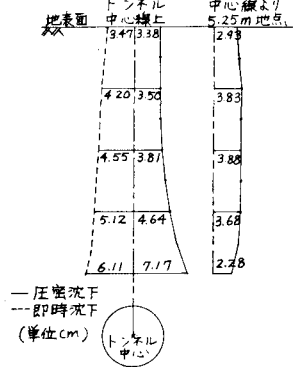


図4 地表面及び地中の沈下状況