

早稲田大学理工学部土木工学科 正員○赤木 貴一
同 上 同 森 麟

1. 予え概さ

軟弱粘土地盤においてシールドトンネルを施工する場合に地盤の沈下防止は重要な問題である。発生する沈下量のうち最も大きな部分を占めるものは一般にテールボルトに関連した沈下と考える。筆者らは従来よりテールボルトの応力解放やテールボルトに対する長込め注入に伴う土の動きとその時に生じた土の乱れに基づく圧密沈下挙動について研究を行ってきた。しかしながら、シールド前面に作用する推力の過不足やシールド機周面に作用する摩擦力により周辺部の土は変形し、乱れに基づく圧密沈下が発生する。本研究は粘土地盤のシールド前面推力の過不足に起因する土の取込み土量の違いがシールド通過後の圧密沈下と含めた地盤変形挙動に及ぼす影響を有限要素法による解析結果をもとに調査したものである。

2. 粘土の乱れに基づく圧密現象

軟弱粘土地盤のシールド工事でシールド切羽における土の取込みやシールド機周面摩擦によって、トンネル周辺の土は非排水条件下でせん断変形し土の骨格構造に乱れが生じる。この乱れに伴う圧密による体積収縮率 α は、土の圧縮指数 C_c 、鋭敏比 S_t 、塑性指数 I_p が決まれば次式のようにせん断ひずみ $\gamma(\%)$ の関数として求めることができる。⁽³⁾

$$\alpha = \{0.3 \cdot C_c / (1 + e_0) + \log \{0.33 \cdot I_p^{-0.17} \log S_t\} \cdot \gamma + 1\} \quad (1)$$

3. シールド切羽からの土の取込みに伴う地盤変形の解析

3.1 解析モデルおよび解析手順

解析モデルは図1(a)、(b)に示す縦断面および横断面をもつ均一な軟弱粘土地盤であり、その内部を土の固り15m、外径5mのシールドが通過する場合を想定して有限要素法により解析した。解析においては地盤は $E=180 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu=0.475$ の等方弾性体であると仮定し、要素は8節点四面体アイソパラメトリック要素である。

解析手順は次のとおりである。

① 図1(a)のシールド切羽の中心線上節点にシールド前面推力 p と切羽部分の静止土圧 σ_h の過不足 $\Delta\sigma$ に相当する節点力と作用させた時の地盤変形量を求める。(図2参照) ② ①、シールド前面推力 p は切羽面に均等に作用すると仮定し、その大きさとしは $p=20.224, 21.248, 22.400, 23.552, 24.576 \text{ tf/m}^2$ の5種類とし、 $(K_0=0.8)$

③ 実際にはシールド切羽における土の取込みは連続して行われ、取込みに伴う地盤の動きはシールド通過後徐々に定常状態に到達すると考えられるが、そのような状況を解析的に表現することはきわめて困難である。本解析ではシールド通過後定常的な変形状態に到達した横断面と次のように推定した。図1(b)の横断面で同一の座標をもつ節点(5方向に5点ある)はシールド通過後において①の結果で最大の変位ベクトルを示す節点と同一変形になるはずである。したがって、そのような最大変位ベクトルを示す節点を集めたものをシールド通過後の変形に横断面とした。

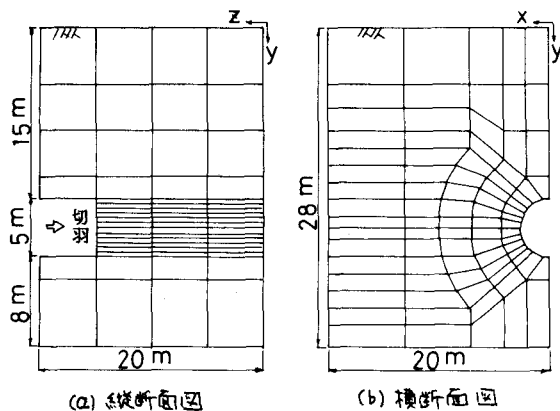


図1 解析モデル

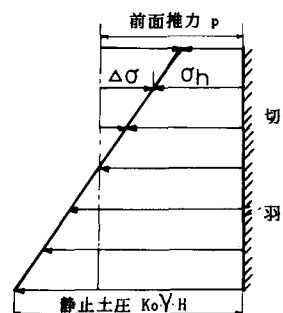


図2 シールド前面推力の過不足

③ このように求められた横断面内のシールド外周部に相当する節点の値をもとに取込み土量 M を算出する。たとえば、前面推力が不足し余分に土を取込んで、シールド外周部の節点がすべてシールド断面 (A0) 内部に流入した場合には図3の余り部分 (ΔA) を余り分として掘削することにする。したがって、この時の取込み土量 $M = \{1 + (\Delta A/A_0)\} \times 100 (\%)$ と求める。一方、前面推力が過剰に作用して切羽前面の土を押し込んだ場合にも同様の考え方を取込み土量 M を求める。

①の5種類の前面推力に対応する取込み土量 M はそれぞれ、 $M = 100.7, 100.3, 99.9, 99.5, 99.1 \%$ になる。これらの値はいずれも100%に近い値であり、シールドが正常にうまく施工されている場合に相当する。これらの M の値はさらに模型実験を行って取込み土量と前面推力の関係を調査した結果からみても妥当な値と言える。(4)

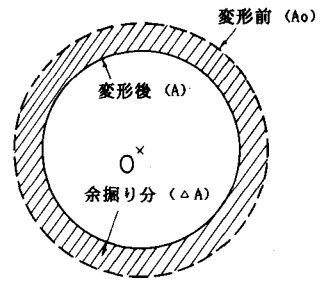


図3 取込み土量 M の算出

④ 以上の結果をもとにしてシールド切羽からの土の取込みに伴って変形した地盤の乱れに基づく圧密沈下量を算定する。圧密沈下量の算定にあたっては②で求めたシールド通過後の横断面内の寄与について、最大上面体立断面積 $Q_{\text{cut}} (= \frac{\pi}{2} \times \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (z_2 - z_3)^2 + (z_3 - z_1)^2})$ と求め、(1)式と利用して計算した。なお、粘土層の土質としてはそれぞれ乱れに伴う圧密収縮の発生し易さの異なるI, II, III, IVの4種類を想定した。(参考文献(2)参照)

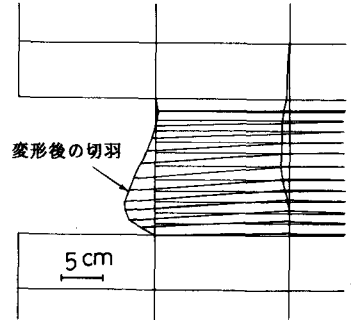


図4 土の取込みに伴う地盤の動き(縦断面)

4. シールド切羽からの取込み土量と地盤変形挙動の関係

図4はシールド前面推力が $p = 20.224 \text{ t/m}^2$ と静止土圧よりも不足した場合のトンネル中心線上縦断面の動きの一部を示したものである。切羽面は斜め下向きに大きく変形し、切羽前方もそれに引きずられる形で動いている。

図5は図4に示した土の動きをもとに想定したシールド通過後の横断面の地表面の動きであり、切羽における土の余剰の取込み ($M = 100.7 \%$) に伴って沈下した地表面が後続する土の乱れに基づく圧密現象により同程度の沈下を生じる状況がわかる。なお、この場合の粘土の土質としては中程度の乱れ易さをもつ $St = 20, Ip = 30, C_c = 0.5, e_0 = 1.6$ と想定している。

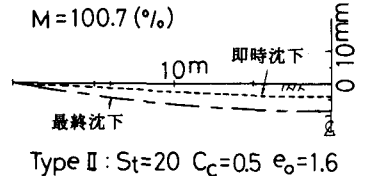


図5 土の取込みに伴う地表面の動き(横断方向)

図6は本研究で得られた解析結果を取りまとめたものであり、シールド切羽からの取込み土量 M とトンネル中心線上地表面の変形量の関係を示したものである。取込み土量 M が100%以上では地表面は沈下し、その後にはさらに同程度あるいはそれ以上の乱れに基づく圧密沈下が発生する。 M が100%に近づくにつれて地表面の動きは減少する。しかし、100%以下になると即時的に地表面は隆起するものの、その後乱れに基づく圧密による大きく沈下し、本解析に関する限りいずれも元の地表面よりも最終的には沈下している。すなわち、前面推力を過大にして M が100%以下になって地盤に受動的な動きを与えた場合の方が乱れによる圧密が大きく発生し、地上・地下構造物に与える有害な影響を及ぼす。

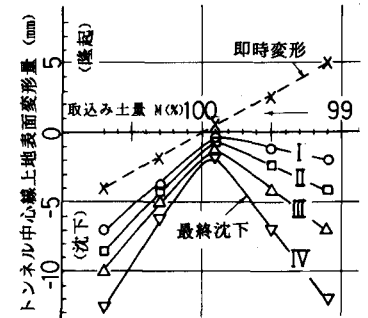


図6 取込み土量と地表面変形量の関係

5. まとめ

本研究はシールド切羽からの土の取込みに伴う地盤の動きを種々の仮定を設けて理想的な条件下で解析したものであり、その妥当性については現場の実測結果等に基づいて吟味する必要がある。しかしながら、取込み土量がほぼ100%という正常な施工時に、トンネルの影響が小さい切羽からの土の取込みのみによってもかなりの地盤変状が生じることは明らかであり、今後のシールド施工に伴う土の動きを考慮の上で意義深いと言える。

6. 参考文献: (1) トンネルと地下, Vol. 11, No. 8 (1980), (2) トンネルと地下, Vol. 15, No. 12 (1984), (3) 土木学会論文報告集, No. 335 (1983), (4) トンネルと地下

Vol. 15, No. 8 (1984)