

施工時荷重を考慮したシールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の変形挙動検討

シールド, 軟弱地盤, 施工時荷重

中之島高速鉄道

中野道夫

京阪電気鉄道

久ノ坪宏司

地域 地盤 環境 研究所 正会員

○菅茜様

地域 地盤 環境 研究所 国際会員

長屋淳一, 譽田孝宏

1. はじめに シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の変形挙動を事前予測する場合, 応力解放率を用いた有限要素解析による検討が一般的に多い. この手法は, 解放応力をトンネル半径方向内側に作用させる解析であるため, トンネル上部地盤は沈下し, 側部地盤はトンネル内側へ引き込まれる変形挙動になる. しかし, 実際にはトンネル上部地盤は沈下または隆起し, 側部地盤については押し広げる変形を示すなど, 解析結果と異なる傾向を示すことが多い. この要因としては, 切羽圧や裏込め注入圧と地山応力とのバランス変化などが考えられることから, ここでは施工時荷重の影響を考慮した 2 次元線形弾性有限要素解析を実施し, 中之島新線工事で得られた実測値との比較, 検討をおこなった.

2. 施工時荷重を考慮した弾性 FEM 解析モデル シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の変形は, 通過中において直上地盤では沈下または隆起傾向にあり, 側部地盤で押し広げ傾向にあることが現場計測結果から知られている<sup>1)</sup>. 地盤変形の要因としては, ①切羽圧や裏込め注入圧と地山応力のバランス(差圧)変化, ②マシン姿勢の変化やマシン〜周辺地盤間の摩擦による影響, 等が考えられる. ここでは, 特に①の側部地盤の押し広げ変形時における地山への圧力と地山応力の関係に注目し, 「施工時荷重を考慮した FEM 解析<sup>2)</sup>(以下, 解析 A)」を用いた検討をおこなう. 荷重モデルは, 地山への圧力(切羽圧や裏込め注入圧など)と地山応力の差圧を変動荷重としてトンネル周辺地盤に作用させる(図-1 参照). 具体的な地山への圧力については, 泥土圧や裏込め材の比重(12kN/m<sup>2</sup>)を考慮して深度方向に分布荷重させた. 3 次元応力状態から 2 次元応力状態への補正値  $\beta$  については,  $L/D \sim \beta$  関係図<sup>3)</sup>( $L$ : テールボイド長,  $D$ : 掘削外径)より想定した. シールド半径方向への増加荷重  $\Delta P$  を式(1)に示す.

$$\Delta P = P_G + (P_S - P) \times \beta \quad \text{式(1)}$$

$P_G$ : シールドマシン自重

$P_S$ : 地山への圧力(切羽圧や裏込め注入圧)

$P$ : 地山応力

$\beta$ : 3 次元応力状態の 2 次元応力状態への補正値

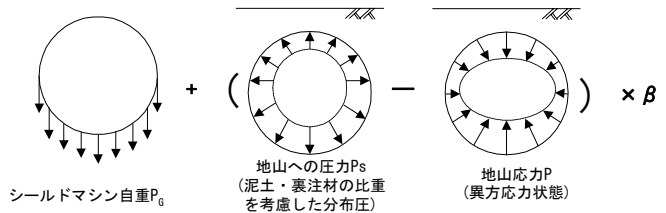


図-1 施工時荷重を考慮した荷重モデルの概念図

3. 解析条件 解析には, 応力解放率を用いる FEM 解析(以下, 解析 B)も実施した. 2 次元線形弾性 FEM 解析(全応力解析)に用いたメッシュ図を図-2 に, 土質パラメータは表-1 に示す. 主たるシールド掘進土層である軟弱な沖積粘性土層(Ma13 層)については, 深度方向の強度変化を考慮して 3 分割とした. 変形係数については, 以下のように設定した.

(沖積砂・砂礫層: F, Asc)

$$E = (5N + 70) \times 98 \text{ (kN/m}^2\text{)}^4 \quad \text{式(2)}$$

(軟弱な沖積粘性土層: Ma13-1~Ma13-3)

$$E = 210 \times c \text{ (kN/m}^2\text{)}^5 \quad \text{式(3)}$$

(洪積砂・砂礫層: Asg, Tg1)

$$E = 28N \times 98 \text{ (kN/m}^2\text{)}^6 \quad \text{式(4)}$$

解析 B については, 応力解放率  $\alpha = 10\%$  を仮定して解析を実施した<sup>7)</sup>. また, 地盤の鉛直変位に関する簡易予測手法として Jeffery 式<sup>8)</sup>を用いた解析も実施したが, トンネル上部地盤については均一な土層と仮定し, Asc1 層の土質パラメータを用いた. なお, ここでは, 先行トンネル掘進に伴う影響のみを比較している.

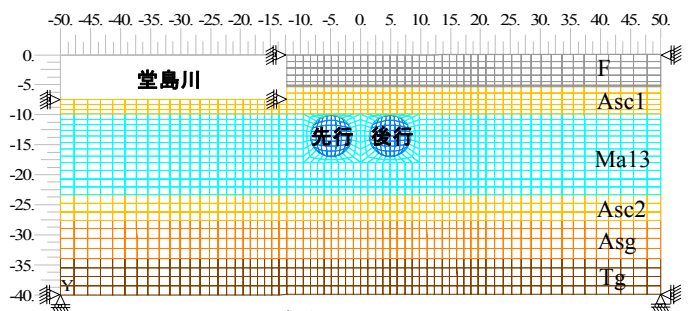


図-2 FEM 解析に用いたメッシュ図

表-1 土質パラメータ

土層名	下端深度 (GL-m)	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	平均N値	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	変形係数 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$
F	5.8	18.0	10	—	11.76	0.35
Asc1	9.9	18.0	20	—	16.66	0.35
Ma13-1	14.6	16.5	4	53	11.13	0.45
Ma13-2	19.3	16.5	2	79	16.59	0.45
Ma13-3	23.3	16.5	6	108	22.68	0.45
Asc2	27.6	18.0	40	—	26.46	0.35
Asg	34.0	18.0	95	—	260.68	0.35
Tg1	40.0	20.0	100	—	274.40	0.35

表-2 荷重条件(解析 A)

荷重項目	先行トンネル掘削時	備考
マシン自重圧力 $P_G$ (kPa)	7.85	マシン自重 350tf
地山への圧力 $P_S$ (kPa)	150	トンネル天端における裏込め注入圧(実測値)
3D → 2D補正值 $\beta$	0.7	裏込め注入圧の影響範囲を2リング程度と仮定

施工時荷重を考慮した FEM 解析時に想定した荷重条件を表-2に示す。解析 A ではテール通過前後の裏込め注入圧に着目して、施工時荷重としてトンネル天端位置での実測の裏込め注入圧  $150\text{kN/m}^2$  を用いた。

4. 解析結果および実測値との比較・考察 先行シールド掘進に伴うトンネル側部地盤の水平変位量に関する実測値と解析値の比較を図-3に示す。なお、以下に示す実測値については、テール通過前後の最大変形発生時のデータを示している。実測値は、両側とも外側に押し広げる変形挙動を示しているのに対して、解析 B では、応力解放に伴ってトンネル内側に周辺地盤が引き込まれる形で変位し、実挙動とは逆の傾向を示した。一方、解析 A の結果については、トンネル外側に地盤を押し出す挙動について実測値と類似した変形モードを示した。なお実測値について、北側の水平変位の方が南側に比べて押し出し量が大きくなっている。これは、若干南側への曲線施工による影響と考えられるが、解析ではそこまで考慮していないことから、解析値はトンネルを挟んで対象形になり、南側の解析値は実測値に比べて大きかった。ただし、解析 B に比べると、定性的および定量的に解析 A は実挙動を適切に表現できていると考えられる。

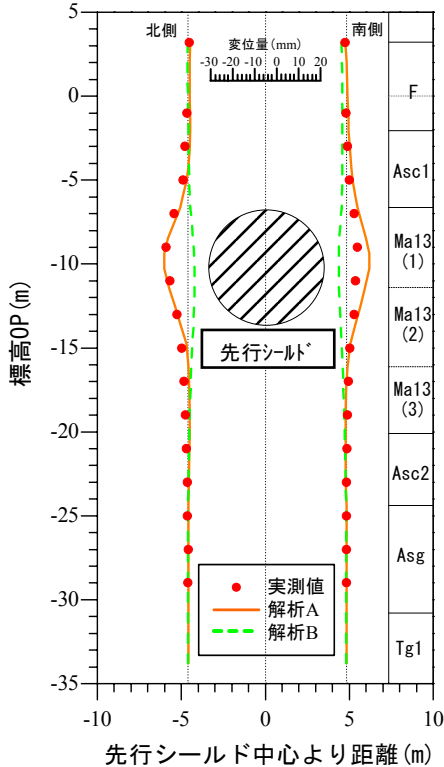


図-3 水平変位に関する実測値と解析値の比較

先行シールド掘進に伴うトンネル直上地盤の鉛直変位量に関する実測値と解析値の比較を図-4に示す。各解析結果ともに各深度における沈下モードについて、トンネル直上での実測値と解析値は良好な対応関係にあった。ただし、トンネル直上から南北方向に離れた領域に関しては、Jeffery式を用いた解析結果と解析 B の結果がなだらかな沈下分布を示しているのに対して、解析 A の結果については、実挙動が示す下に凸の沈下モードを再現できており、他の解析結果とは傾向が異なっており、実測値と良好な対応関係にあった。

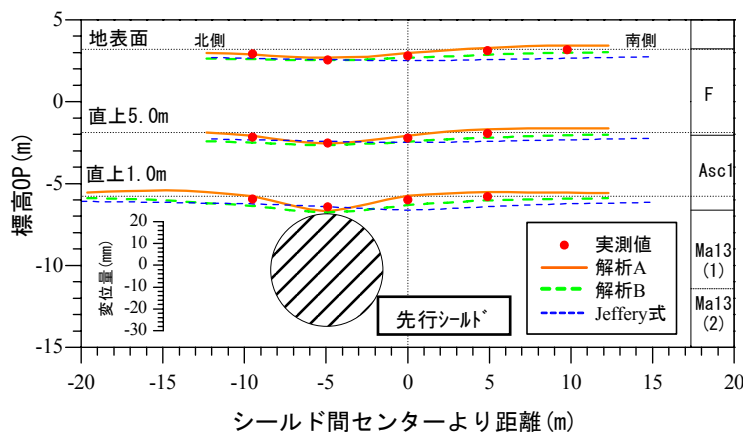


図-4 鉛直変位に関する実測値と解析値の比較

5. おわりに シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の変形挙動について、現場計測によって得られた実測値と、応力解放率を用いた FEM 解析(解析 A)および施工時荷重を考慮した FEM 解析(解析 B)による解析値をそれぞれ比較した。その結果、水平方向変位については、解析 B よりも解析 A の方が実測変形挙動を定性的および定量的により適切に表現できることがわかった。鉛直方向変位についても、解析 A は他の方法より実挙動で見られる下に凸の沈下モードを表現できており、定量的にもよい対応関係にあった。以上のことから、施工時荷重として切羽圧や裏込め注入圧を解析条件として考慮することにより、地盤の変形挙動を適切に予測でき、既設構造物や近接施工時にシールド工事がおよぼす影響を抑制するための施工管理に解析 A は有効であることがわかった。

参考文献 1) 太田 拓, 橋本 昭雄, 長屋 淳一, 菅 茜 様: シールド掘進時の施工時荷重による地盤変形に関する計測結果とその分析, トンネル工学報告集第 16 巻, pp.395-402, 2006. 2) 沢田 充弘, 太田 拓, 橋本 正, 長屋 淳一: 施工過程を考慮したシールド掘進に伴う近接構造物の影響予測, 施工過程を考慮した地盤変形・破壊予測に関するシンポジウム発表論文集, pp.175-182, 2002. 3) 新田 耕司, 中廣 俊幸, 橋本 正, 小谷 丈二: シールド施工における切羽およびテールボイドの応力解放率に関する研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会, III-691, pp.1372-1373, 1994. 4) 竹山 喬, 葛野 恒夫: 鉄道シールドの施工に伴う地盤沈下とその予測, トンネルと地下, Vol.14, No.9, pp.7-18, 1983. 5) 竹中 準之介: 粘土のサンプリングとその信頼度「土質材料の力学と試験法における最近の問題点」, 土質工学会関西支部, pp.1-22, 1962. 6) (社) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.153, 1988. 7) 川口 大仁, 太田 拓, 塩谷 智弘: 大阪地下鉄 7 号線・泥水式シールド掘進に伴う近接構造物の計測管理, 基礎工, Vol.17, No.12, pp.115-121, 1989. 8) Jeffery, G. B.: Plane stress and plane strain in bipolar co-ordinates, *Trans. Royal Society, Series A*, Vol.221, pp.265-293, 1920.