

シールド掘進時の施工時荷重による影響を考慮した地盤変形解析

シールドトンネル 施工時荷重 数値解析

地域地盤環境研究所 国際会員 ○譽田孝宏, 橋本正, 長屋淳一  
名古屋工業大学 国際会員 Hossain M. Shahin, 中井照夫

**1. はじめに** 都市部におけるシールドトンネル工事では、道路幅員や地下埋設物等の制約条件から既設構造物に対して狭い離隔での近接施工を強いられることがある。このような場合、シールド掘進に伴う地盤変形や既設構造物への影響を適切に評価し、構造物の安全性を把握する必要がある。ここでは、シールド掘進に伴う周辺地盤他の挙動をより精度良く予測することを目的に、あるシールド工事現場において、施工過程を考慮した有限要素解析(以下、FEM 解析)を実施し、実測値との比較および検討をおこなった。

**2. 地盤条件および施工条件** 対象となるシールド工事現場における土質柱状図と計測機器設置位置図を図1に、トンネル覆工諸元と計測断面通過時におけるシールド掘進条件を表1に示す。先行シールド上半は軟弱粘土層(Amc2)と沖積砂層(Ams)であり、下半は硬質粘土層(Oc2)と洪積礫層(Tg)である。一方、後行シールドは、上半が沖積礫層(Amg)であり、下半は軟弱粘土層(Amc2)である。各土層の地盤特性を表3に示す。

**3. 各施工段階における荷重モデルおよび FEM 解析条件** 各シールド施工段階において考慮すべき荷重要因とその考え方(荷重モデル)を図2に示す。ここでは、切羽圧や裏込め注入圧と地山側圧のバランスによって地盤変形が発生するという観点に立ち、またトンネル覆工の自重やシールド機の姿勢制御による負荷荷重も合わせて考慮し、これら実施工条件を FEM 解析時に反映している<sup>1)</sup>。有限要素メッシュを図3に示す。FEM 解析については、地盤内の密度や拘束応力の変化が地盤強度特性に与える影響を適切に考慮できる弾塑性構成モデル(subloading  $t_{ij}$  model)<sup>2)</sup>に基づいた2次元 FEM 解析プログラムである FEM  $t_{ij}$  - 2D を使用した。FEM 解析に用いた土質パラメータを表3に示す。弾塑性 FEM 解析用のパラメータについては、本現場が文献3)に近接していることから、文献3)で使用したパラメータを用いている。なお、シールド掘進に要する掘削時間は短時間であることから、非排水条件下で FEM 解析を実施した。

**4. FEM 解析結果と計測結果の比較・検討** 各解析ステップにおける先行トンネル直上の鉛直変位量および1m 離れ側部の水平変位量について、実測値と解析値を比較した図を図4に示す。なお、解析値については、弾塑性 FEM 解析結果と、地盤を弾性体と仮定した弾性 FEM 解析結果を併記している。FEM 解析では、「①切羽到達時」「②マシン前半部通過時」「③マシン後半部通過時」「④テール通過時」の各施工段階における挙動をシミュレートしているが、ここでは、変形挙動が特に大きかった②と③について比較・検討する。

マシン前半部では、トンネル直上で4.7mmの沈下、側方へ最大約3mmの押し広げ変位を計測した。一方、弾塑性 FEM 解析では、トンネル直上で10mm程度の沈下と側方へ最大3mm程度の押し広げ変位を示した。トンネル天端部では切羽圧よりも地山応力が大きく、トンネル内側に応力解放する状態にあったことから沈下し、実測値と解析値は定性的に良い対応関係にあった。ただし、先行トンネル直上地盤について、解析では実地盤よりもさらに軟弱な粘土層であると設定したことから、解析値は実測値の2倍程度大きい沈下量となった。この結果、トンネル右肩地盤はトンネル内側に変位し、実測値と傾向が異なった。

表1 シールドトンネル諸元とシールド掘進条件

		先行トンネル	後行トンネル
シールド工法		泥水式	
シールド外径, セグメント外径 (m)		5.44, 5.30	
セグメントタイプ(1リング幅)		ダグタイプセグメント (0.9m/Ring)	
ヤング率 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )		1.70 × 10 <sup>4</sup>	
面積 $A$ (m <sup>2</sup> )		2.46 × 10 <sup>-2</sup>	
断面2次モーメント $I$ (m <sup>4</sup> )		1.30 × 10 <sup>-4</sup>	
全土被り圧 $\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )		340	240
切羽圧 (kN/m <sup>2</sup> )	設定値	245	185
	実施工値	190~280	170~190
裏込め注入圧 (kN/m <sup>2</sup> )	設定値	360	280
	実施工値	掘進中 100~360 停止中 280~310	100~300
ピッチング (%)	切羽~テールばらつき範囲	-40.0~-35.0	-8.0~-6.8
	平均値	-35.5	-7.5
掘進線形(上下) (%)		-33.0	-10.0
余堀り量 (mm)		15	

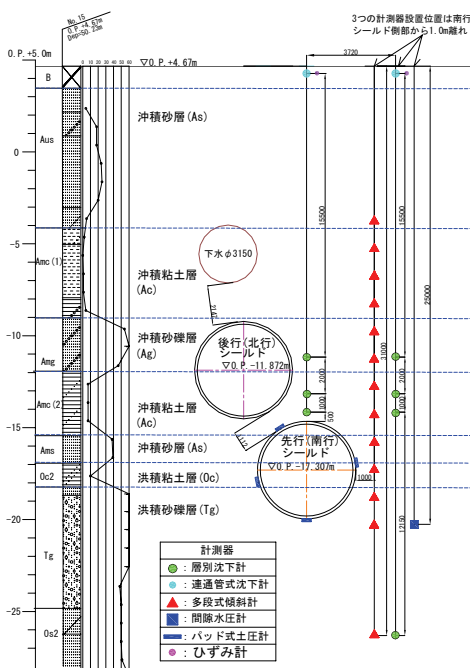


図1 計測器設置位置図

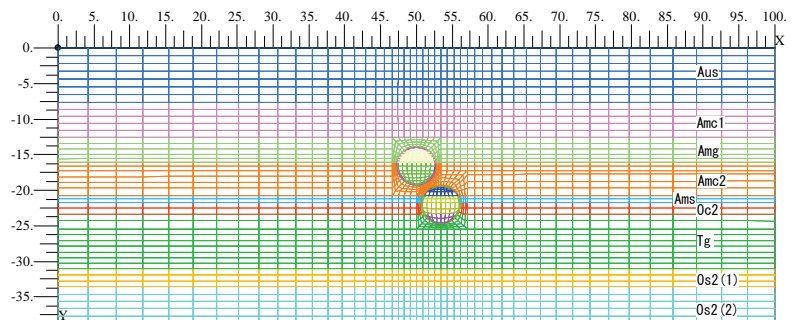


図3 有限要素メッシュ図

Step	計算式	荷重モデル
1 step 切羽 到達時	$\Delta p_1 = (p_{ch} - p_h) \times \alpha$ $p_{ch}$ : 切羽圧力 (中心位置) $p_h$ : 切羽面の地山側圧 $\alpha$ : 切羽面の応力増加に対するシールド半径方向の応力増加割合 ( $\alpha=0.15$ )	
2 step マシン 前半部	$\Delta p_2 = p_G + (p_s - p_i) \times \beta_1$ $p_G$ : 浮力を考慮した自重 $p_s$ : シールドマシンによる地山への作用圧力 (= 泥水・泥土圧) $p_i$ : 1step 終了時の地山応力 $\beta_1$ : 3次元応力状態の2次元応力状態への補正値 ( $\beta_1=0.75$ )	
3 step マシン 後半部	$\Delta p_3 = p_G + (p_s - p_i') \times \beta_2 + p_p$ $p_G$ : 浮力を考慮した自重 $p_s$ : 裏込め注入圧 $p_i'$ : 2step 終了時の地山応力 $p_p$ : シールド機姿勢制御による荷重 $\beta_2$ : 3次元応力状態の2次元応力状態への補正値 ( $\beta_2=0.25$ )	
4 step テール 通過時	$\Delta p_4 = (p_s - p_i') \times \beta_3$ $p_s$ : 裏込め注入圧 $p_i'$ : 3step 終了時の地山応力 $\beta_3$ : 3次元応力状態の2次元応力状態への補正値 ( $\beta_3=0.50$ )	

図2 各シールド施工段階における荷重モデル概念図

表3 FEM解析に用いた土質パラメータ一覧表<sup>3)</sup>に加筆

土層名	下端深度 (GL-m)	N値	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	弾塑性FEM解析用パラメータ (FEM ij-2D)							
						$\lambda$	$\kappa$	$N$	$R_{cs}$	$\beta$	$a_{AF}$	$a_{IC}$	
沖積層	Aus	7.60	20	18	56000	0.30	0.07	0.01	0.68	3.50	1.50	200	100000
	Amc1	12.60	0	16	17745	0.45	0.16	0.02	1.23	2.25	1.57	40	500
	Amg	16.10	40	19	112000	0.30	0.07	0.01	0.68	3.50	1.50	200	100000
	Amc2	20.75	4	17.5	31500	0.45	0.25	0.04	1.50	3.55	1.70	130	500
	Ams	21.70	39	19	107800	0.30	0.07	0.01	0.68	3.50	1.50	200	100000
洪積層	Oc2	23.40	10	18	43750	0.45	0.10	0.02	1.85	4.00	1.70	3500	500
	Tg	31.00	90	20	252000	0.30	0.035	0.0023	1.10	3.20	2.00	30	500
	Os2-1	33.60	30	18	84000	0.30	0.007	0.0005	1.10	3.20	2.00	30	500
	Os2-2	38.70	90	20	252000	0.30	0.007	0.0005	1.10	3.20	2.00	30	500

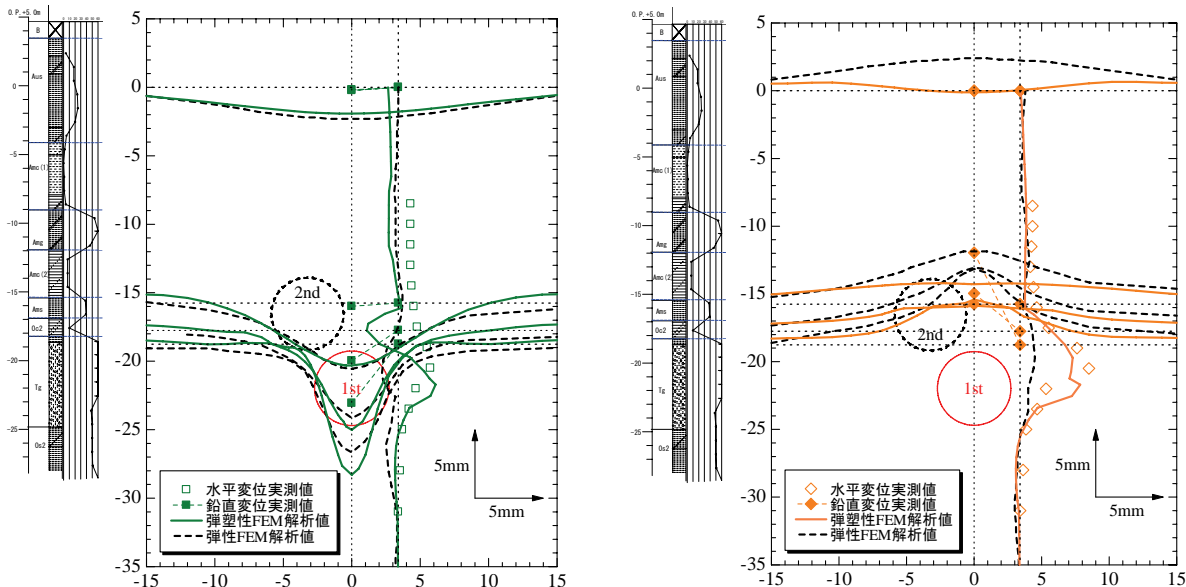


図4 マシン前半部通過時(左側)およびマシン後半部通過時(右側)におけるトンネル周辺地盤の変形挙動比較図

5. おわりに 各施工段階における地盤変形要因を考慮した荷重モデルを用いて FEM 解析を実施し、トンネル周辺地盤の変形挙動についてシミュレートをおこなった。その結果、各掘進段階における施工時荷重を荷重モデルに取り入れることにより、従来の応力解放率を用いた変形解析では表現できなかった現場計測の挙動(シールド上部で沈下、シールド側部で押し広げる挙動)を再現することが可能となり、より実現場の挙動に近い予測が可能であることが判明した。

参考文献 1) 太田 他: 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) Nakai, T., and M. Hinokio: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, 44(2), pp.53-70, 2004. 3) 畷田 他: 土留め掘削に伴う地盤変形挙動の弾塑性有限要素解析, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.213-225, 2009.