

併設シールド掘進に伴う周辺地盤挙動の弾塑性有限要素解析

近接施工 シールドトンネル 数値解析

地域地盤環境研究所 正会員 ○稲垣祐輔  
 地域地盤環境研究所 国際会員 譽田孝宏, 中井照夫  
 名古屋工業大学大学院 国際会員 Hossain M. Shahin

1. はじめに 大断面、超近接条件下で洪積地盤を併設シールド掘進した事例に対して弾塑性FEM解析および弾性FEM解析を実施し、後行シールド掘進に伴い先行トンネルに発生する施工時荷重の影響や、併設トンネル周辺地盤の変形挙動について検討した。また、地盤モデルの違いのみによる併設トンネル周辺地盤内に発生する偏差主ひずみ分布の発達状況の差異について考察した。

2. 地盤条件および施工条件 シールド工事現場<sup>1)</sup>における計測機器設置位置図と土質柱状図を図1に、トンネル覆工緒元とシールド掘進条件を表1に示す。検討断面は、表層よりN値10程度の洪積粘性土地盤とN値60以上の良く締まった洪積砂礫地盤の互層状態にある。

3. 各施工段階における荷重モデルおよびFEM解析条件 先行および後行シールド掘進の施工過程を考慮し、施工時荷重(切羽圧や裏込め注入圧)と地山応力の差圧変動に基づいたFEM解析を実施した<sup>2)</sup>。有限要素メッシュ図を図2に示す。FEM解析については、弾塑性構成モデル(subloading  $t_f$  model)<sup>3)</sup>を用いた弾塑性解析と、地盤モデルのみ変更した弾性解析を実施した。解析に用いた土質パラメータを表2に示す。弾塑性解析用パラメータは、現場付近で実施した地盤調査結果に基づいて、代表土層から採取した不攪乱試料による三軸圧縮試験結果から決定した。その他の土層については、砂層および砂礫層はN値から、粘性土層は過圧密比から初期間隙比を推定し、地盤内の拘束応力の変化に着目してパラメータを決定した。弾性解析は、文献2)で使用したパラメータを用いた。なお、シールド掘進に要する掘削時間は短時間であると仮定し、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 後行シールド掘進に伴う先行トンネルの内空変位分布(変動量)について、実測値と解析値の比較図を図3に示す。なお、FEM解析では、各シールド施工段階の挙動をシミュレートしているが、ここでは、先行シールド通過後、後行シールドテール通過までの変動について比較、検討する。

後行シールド通過に伴い、先行トンネル内空変位は、実測値では水平方向に約5.0[mm]伸張、鉛直方向に約3.0[mm]圧縮した。一方、弾塑性解析結果は、水平方向に約8.0[mm]伸張、鉛直方向に約5.0[mm]圧縮し、変位量は大きいものの実測値と定性的には同じ傾向を示した。弾性解析では、水平方向にも鉛直方向にもほとんど変化はなかった。このように、先行トンネル側部を後行シールド掘進した場合、先行トンネルでは鉛直方向作用圧が大きくなり、水平方向作用圧が減少する結果、鉛直圧縮および横長変形挙動を示すことが現場実測値<sup>4)</sup>やモデル実験<sup>5)</sup>でも示されている。弾塑性解析で内空変位量が実測値よりも大きくなった理由としては、①切羽圧と裏込め注入圧の設定値が実施工値よりも小さかったことと、②トンネル側部地盤のDsg3層(砂礫層)が実地盤よりも軟質の設定になっている可能性が考えられる。

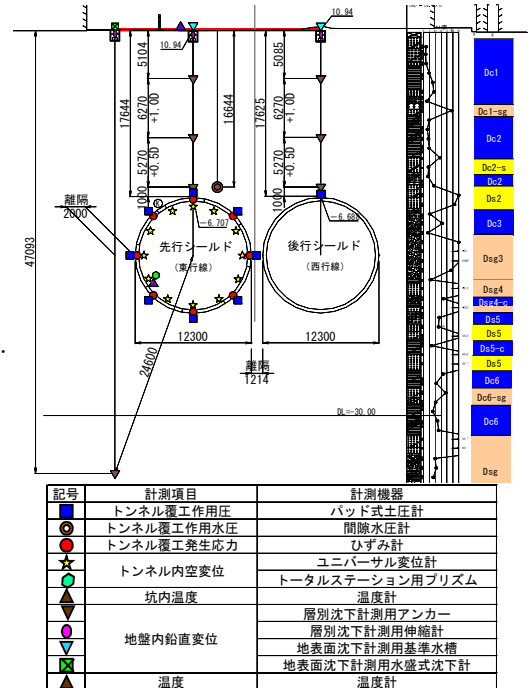


図1 計測器設置位置図<sup>1)</sup>

表1 トンネル緒元とシールド掘進条件<sup>1)</sup>

	先行トンネル	後行トンネル
シールド工法	泥土圧式シールド工法	
シールド外径 [m]	12.54	
セグメント	嵌合方式剛性セグメント	
ヤング率 E [kN/m <sup>2</sup> ]	3.30 × 10 <sup>7</sup>	
断面積 A [m <sup>2</sup> ]	4.04 × 10 <sup>4</sup>	
断面二次モーメント I [m <sup>4</sup> ]	4.82 × 10 <sup>9</sup>	
土被り厚 [m]	17.6	
切羽圧(天端部) [kN/m <sup>2</sup> ]	解析値	110
	実施工値	200 ~ 330
裏込め注入圧(天端部) [kN/m <sup>2</sup> ]	解析値	110
	実施工値	600
		400

表2 FEM解析に用いた土質パラメータ一覧表

土層名	下端深度 (GL - m)	平均N値	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弾性FEM解析用土質パラメータ		弾塑性FEM解析用土質パラメータ													
				変形係数 E (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	$\lambda$	$\kappa$	$R_{cs}$	N	$\beta$	$a_{AF}$	$a_{IC}$	e	$\omega_0$	b				
B	2.836	11.0	18.0	7.7	0.35														
Dc1	6.450	8.4	17.5	5.9	0.40														
Dc1-sg	0.650	48.0	19.0	19.0	0.34														
Dc2	4.500	10.1	18.3	7.1	0.40														
Dc2-s	1.600	29.7	18.0	21.0	0.35														
Dc2	1.300	10.1	18.3	7.1	0.35														
Ds2	2.500	33.9	18.0	25.6	0.35														
Dc3	2.750	26.2	19.0	18.3	0.40	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層	砂礫層
Dsg3	4.800	53.2	20.0	48.0	0.35	: 0.022	: 0.0043	: 3.72	: 1.00	: 1.50	: 30	: 500	: 681	: 0	: 0	: 0	: 0	: 0	: 0
Dsg4	3.440	52.5	19.0	40.6	0.35	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層	粘土層
Dc5	1.310	20.0	16.9	22.1	0.40	: 0.118	: 0.008	: 3.40	: 0.97	: 1.15	: 500	: 1500	: 0.440	: 0.798	: 0.08	: 200	: 0	: 0	: 0
Ds5	1.600	56.0	19.0	52.1	0.35														
Ds5-c	1.600	14.0	16.7	24.1	0.40														
Ds5	1.700	56.0	19.0	52.1	0.35														
Dc6	1.900	27.4	19.5	35.0	0.40														
Dc6-sg	1.700	47.8	19.0	47.4	0.35														
Dc7	3.300	24.0	18.5	55.5	0.40														
Ds7	7.100	49.0	20.0	34.3	0.35														

Elastoplastic finite Element analyses for investigating the surrounding ground behavior due to double-o-tube shield excavation : Yusuke Inagaki, Takahiro Konda and Teruo Nakai (Geo-Research Institute), Hossain M. Shahin (Nagoya Institute of Technology)

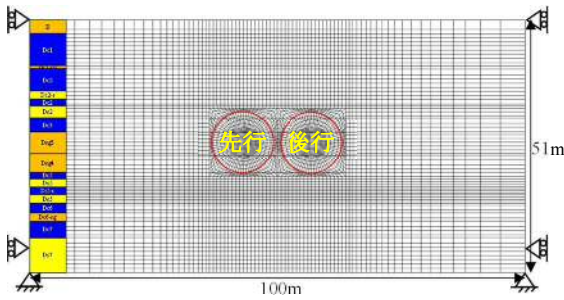


図2 有限要素メッシュ図

後行シールド通過時における併設トンネル周辺地盤内の偏差主ひずみ( $\epsilon_1$ - $\epsilon_3$ )分布を図5に示す。弾塑性解析では、トンネル内空変位およびトンネル直上地盤の沈下に連動して偏差主ひずみが発達し、特に両トンネル肩部および併設トンネル間上部付近に局所的に発生している。一方、弾性解析は、弾塑性解析に比べても偏差主ひずみの発達領域は小さく、また局所的な発生は見られず、異なる挙動を示した。

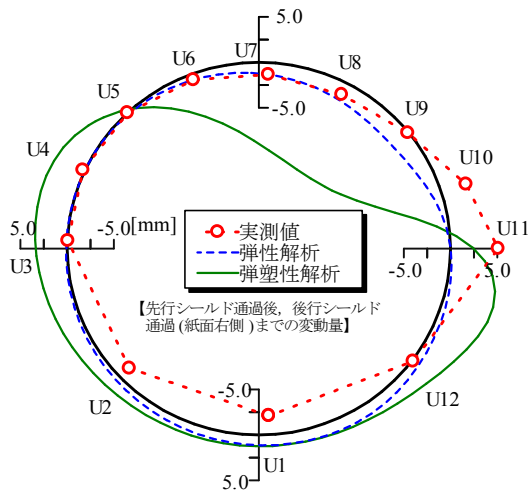


図3 先行トンネルの内空変位分布比較図

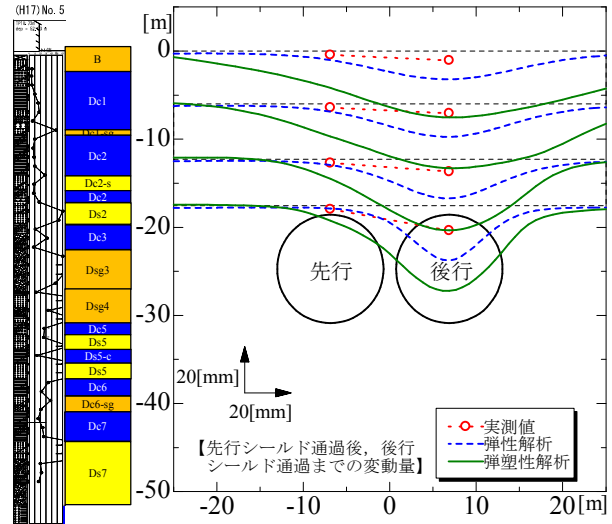


図4 併設トンネル直上地盤の鉛直変位挙動比較図

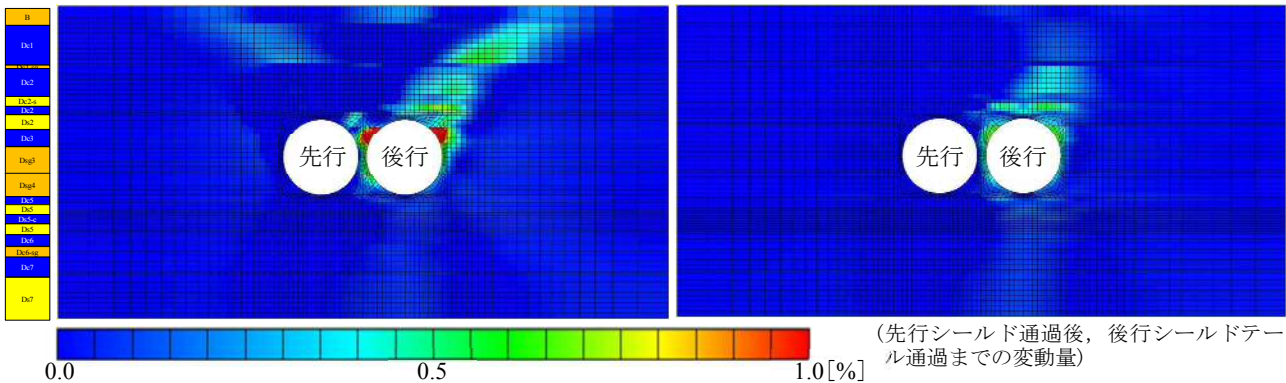


図5 併設トンネル周辺地盤の偏差主ひずみ分布図(左:弾塑性解析結果,右:弾性解析結果)

5. おわりに 洪積地盤中を大断面かつ超近接条件下で併設シールド掘進した事例に対して、地盤モデルの違いのみから生じるトンネル内空変位分布や併設トンネル周辺地盤の変形挙動を検討した。その結果、弾塑性解析の方が変位を過大に評価しているが、これまでの現場実測値でも報告されているようなトンネル内空変位形状やここでの実測値の特徴を表現できることや、偏差主ひずみ分布が併設トンネル間上部において局所的に発達するなどの違いを確認することができた。今後、各施工段階における荷重モデルを見直しし、より実現場の施工時荷重に近い荷重モデルを取り入れることを考えている。なお、本FEM解析は、(一財)先端建設技術センターの研究開発助成を受けて実施した。

参考文献 1) 卜部賢一, 陣野員久, 石垣兄太, 長屋淳一, 稲垣祐輔: 大断面, 超近接シールド掘進に伴う併設トンネルへの影響に関する分析, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.24, II-7, pp.1-9, 2014. 2) 崎谷浄, 新名勉, 卜部賢一, 陣野員久, 長屋淳一: 大断面・超近接併設シールドトンネル設計手法の提案, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.24, II-8, pp.1-2, 2014. 3) 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. 4) Mohamad, H. Bennett, P.J., Soga, K., Mair, R.J. & Bowers, K.: Behaviour of a masonry tunnel due to tunneling-induced ground settlement, *Geotechnique*, Vol. 60, No. 12, pp. 927-938, 2010. 5) 岩田敏和, 中井照夫, Shahin H.M., 菊本統, 石井健嗣: 新しい双設トンネル掘削実験とその解析, 土木学会論文集 F1(トンネル工学特集号), Vol. 67, No. 3, pp. 33~44, 2011.