

高架橋基礎杭直下のシールド掘削工事における近接影響評価

地域地盤環境研究所 正会員 ○山内 雅基, 稲垣 祐輔, 中井 照夫
大成建設 正会員 原 信行, 内田 泰彦

1. はじめに 名古屋中央雨水幹線下水道築造工事(その2)および(その3)工事は、大深度(土被り厚約 50 m)かつ長距離(総延長約 5 km)のシールド掘削工事であり、このうち延長約 3 km にわたって名古屋高速道路に平行しており、高架橋基礎杭(以下、橋脚杭)下端部との最小離隔 1D 程度(約 7.5 m、D：シールド外径)である。高水圧下における全断面砂礫層のシールド掘進に伴い、掘削領域から橋脚杭に向かってせん断変形が進展し、高架橋へ影響がおよぶことが懸念された。ここでは、事前に実施した弾塑性有限要素解析(以下、FEM 解析)の結果と、高架橋に対する現場計測結果¹⁾との比較について示す。

2. 解析条件 有限要素メッシュ図を図-1 に示す。FEM 解析は、平面ひずみ条件下で図に示す変位境界および水理境界のもと、弾塑性構成モデル(Subloading t_{ij} model)²⁾に基づいた弾塑性解析コード(FEM tij-2D)を採用し、土〜水連成解析を実施した。解析に用いた地盤材料パラメータを表-1 に示す。本解析モデルは、砂も粘土も同じパラメータを用いて地盤の弾塑性挙動を表現できる特徴を有している。砂・砂礫土層のパラメータは、乱れた試料を再構成した供試体を用いた三軸圧縮試験

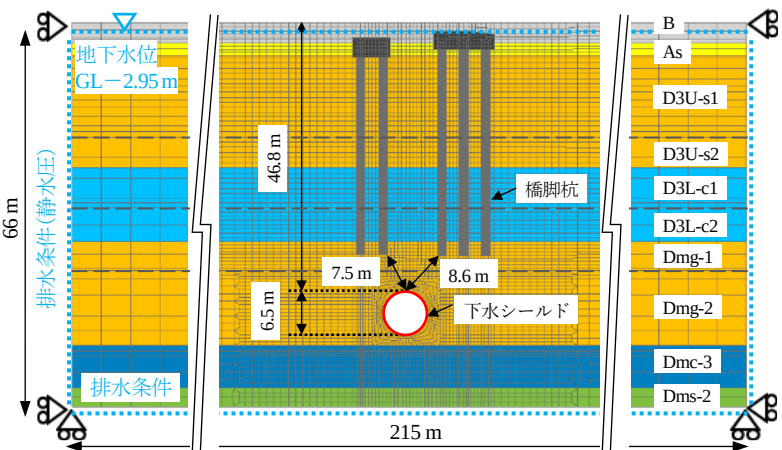


図-1 有限要素メッシュ図

表-1 地盤材料パラメータ

土層	層厚 [m]	基礎情報				圧密特性		せん断特性			過圧密特性	自然堆積構造特性	
		N値	単位体積重量 γ [kN/m ³]	弾性係数 E [kN/m ²]	透水係数 k [m/s]	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	大気圧下の 間隙比 N	極限状態の 主応力比 Rcs	降伏曲面形状 パラメータ β	密度と拘束圧 のパラメータ α	ボンディング効果 を表すパラメータ b	仮想上の密度 増加初期値 ω_0
B	2.95	2	18.3	5,600	9.96×10^{-7}	0.0400	0.0040	1.09	3.40	1.1	50.0	0.0	0.0
As	0.56	8	17.2	22,400									
D3U-s1上	4.20	10	17.0	28,000									
D3U-s1下	10.00	16	17.4	44,100									
D3U-s2	5.25	41	17.5	114,800									
D3L-c1	6.85	11	17.3	30,800	5.00×10^{-9}	0.1700	0.0050	1.34	4.56	1.9	200.0	10.0	0.5
D3L-c2	5.90	11	17.6	30,800	2.20×10^{-9}	0.2000	0.0050	1.38	5.09	1.5			0.4
Dmg-1	4.95	83	19.9	232,400	1.67×10^{-4}	0.0400	0.0040	0.61	4.00	1.6	200.0	0.0	0.0
Dmg-2	13.00	100	19.5	280,000				0.58	4.50	1.2			
Dmc-3	7.30	11	17.0	30,800				1.20	4.57	1.8			
Dms-2	3.20	85	17.6	238,000				0.58	4.50	1.2			

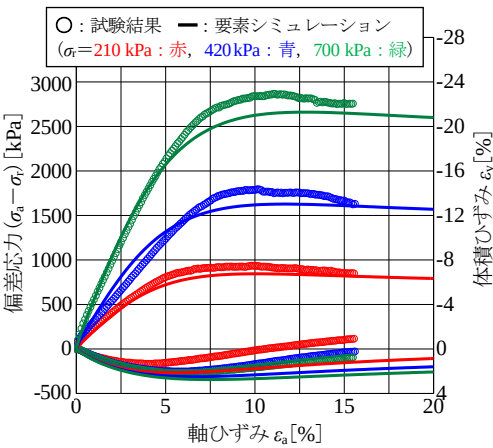


図-2 要素シミュレーション結果例(Dmg-2)
(三軸圧縮試験(CD 条件)の応力〜ひずみ関係)

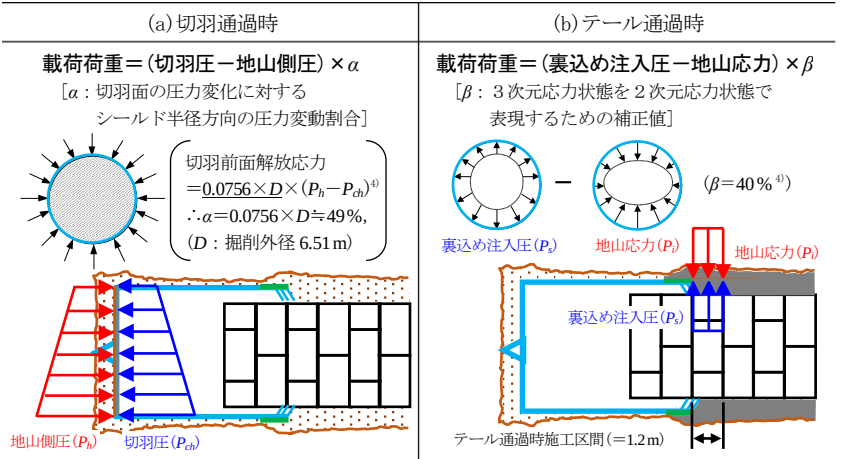


図-3 施工時荷重を考慮した荷重モデル

キーワード シールドトンネル、大深度、砂礫地盤、近接施工、弾塑性構成モデル

連絡先 〒540-008 大阪府大阪市中央区大手前 2-1-2 国民會館大阪城ビル 4F TEL：06-6943-9706

結果(CD 条件)と孔内水平載荷試験結果から決定した。例として、掘削対象土層である Dmg-2 の要素シミュレーション結果を図-2 に示す。一方、粘性土層のパラメータは、乱れの少ない試料を用いた定ひずみ速度圧密試験結果と三軸圧縮試験結果(CU 条件)から決定した。比較のために実施した弾性解析では、N 値を用いて $E=2800 \times N(\text{kN/m}^2)^{3)}$ より変形係数を設定し、弾塑性解析で得られたシールド内空変位を強制変位として作用させた。初期応力は、両解析とも弾塑性解析結果を使用し、荷重モデルは、施工時荷重(切羽圧と裏込め注入圧)と地山応力の差圧変動に着目したモデル⁴⁾(図-3 参照)を設定している。なお、本解析ではトンネル覆工剛性を考慮していない。

3. 解析結果 テール通過時における弾塑性解析結果と弾性解析結果の比較を図-4～図-5 に示す。偏差応力($\sigma_1 - \sigma_2$)分布は、弾塑性解析および弾性解析ともにトンネル側部において大きくなる傾向を示した。これは、裏込め注入圧と地山応力の関係が、トンネル側部ではバランスしたものの、トンネル上部では差圧が大きくなって沈下した結果と考えられる。一方、偏差主ひずみ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$)分布は、弾塑性解析ではトンネルの両肩部から橋脚杭下端部に向かって局所的に進展しているのに対して、弾性解析ではトンネル全周にわたって発達する傾向であった。このような弾塑性解析に見られるようなせん断変形に伴う局所的なひずみの進展傾向は、弾性解析では表現が困難である。

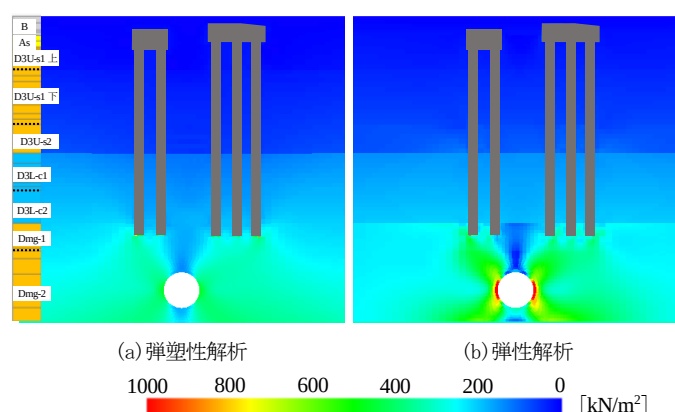


図-4 偏差応力($\sigma_1 - \sigma_2$)コンター図

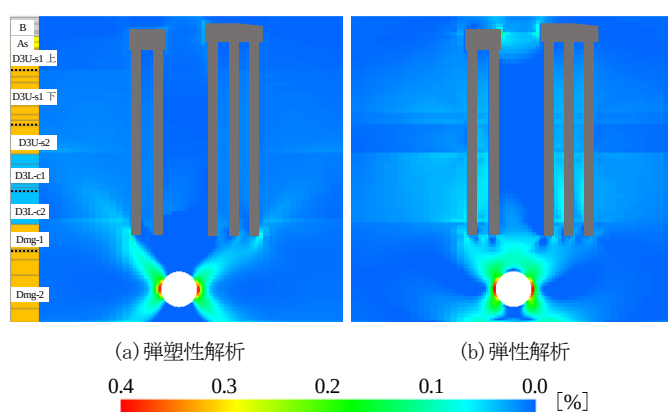


図-5 偏差主ひずみ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$)コンター図

4. 計測結果との比較 高架橋の計測結果¹⁾を図-6 に示す。実施工では、切羽通過時から沈下が発生し、テール通過時に 0.5～1.0 mm の沈下を示したのち、若干の日変動は見られたものの許容値内に収束した。解析値は、計測値と同様、シールド通過に伴ってトンネル直上地盤の沈下が進行する傾向を示しており、切羽通過時には定量的にも適切に評価できた。テール通過時の沈下量については、解析値の方が計測値よりも大きい結果になった。これは、事前予測段階で設定した補正値 β が実挙動時に比べて大きかった、つまり、3次元的な裏込め注入圧による影響を2次元状態に変換する際の補正を大きく設定した影響が原因の1つとして考えられる。トンネル掘削問題の定量的な評価については、今後3次元解析が必須と言える。

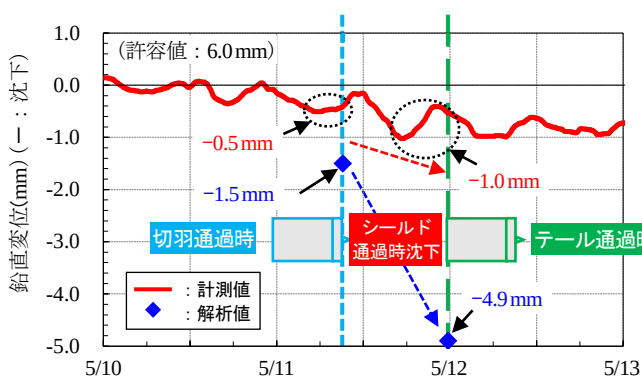


図-6 高架橋の鉛直変位量に関する経時変化図

5. おわりに 本施工は、橋脚杭直下において高水圧下で全断面砂礫層を大深度・長距離シールド掘進する難易度の高い施工であったが、トンネル周辺地盤の応力～ひずみ関係を適切に表現できる地盤構成モデルを用いた弾塑性 FEM 解析を実施することによって、通常良く用いられる弾性解析では表現できない各施工段階におけるせん断変形の進展、つまり、砂・砂礫地盤における弾塑性的な挙動を事前に確認することができた。また、本解析手法は、シールド掘進時における施工時荷重を考慮した荷重モデルを採用しており、実施工におけるシールド掘進管理に直結させて検討できることから、有用性は高いと考える。

参考文献 1) 原他: 大深度・長距離シールド掘削工事における高架橋の計測管理, 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会(投稿中), 2023. 2) Nakai, T., H. M. Shahin, Kikumoto, M., Kyokawa, H., F. Zhang, and M. M. Farias: A simple and unified three-dimensional model to describe various characteristics of soils, *Soils and Foundations*, pp.1149-1168, 2011. 3) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書(IV 下部構造編)・同解説, p.188, 2017. 4) 崎谷他: 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, 2014.