

弾塑性有限要素解析を用いたシールド掘削に伴う直上既設水路への影響検討

数値解析 シールド工法 近接施工

地域地盤環境研究所
水資源機構
フジタ

正会員 ○出射知佳
国際会員 譽田孝宏, 中井照夫
竹中 実, 山邊達也
正会員 村山秀幸, 川尻澄夫

1. はじめに 豊川用水二期事業のうち西部幹線併設水路相楽工区工事では、新設するシールドトンネルの直上に既設水路管が位置し、既設管周辺の地盤性状とシールド施工条件から、既設管や地表周辺施設に与える影響を事前に予測することが安全管理上重要となった¹⁾。ここでは、Subloading t_{ij} model²⁾を用いた2次元弾塑性有限要素解析(FEM t_{ij} -2D)を実施することによって、シールド掘削に伴ってトンネル周辺地盤が塑性化する危険性を事前に把握し、得られた知見をシールド施工管理に活用した。

2. 地盤条件 検討断面付近の土質縦断面を図1に示す。検討断面の上部には表層堆積物(粘性土層(Ac層)、砂礫層(Ag層))があり、その下部にはN値=20~50以上の風化岩(DL級)が堆積している。新設トンネルは、この風化岩中をシールド掘削するが、約1[m]上部にN値=9程度の軟質な表層堆積物が1[m]程度の厚さで狭在していることが特徴的である。既設管は、GL-4.7[m]まで開削した後、敷設して埋め戻している。この埋土領域は、微動アレー探査の結果から図2に示すように想定した。

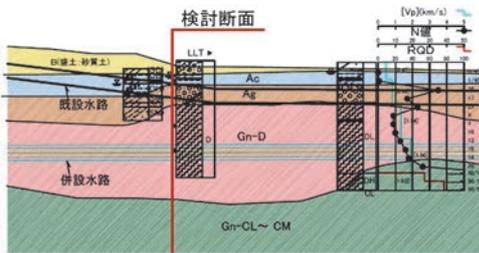


図1 土質縦断面図

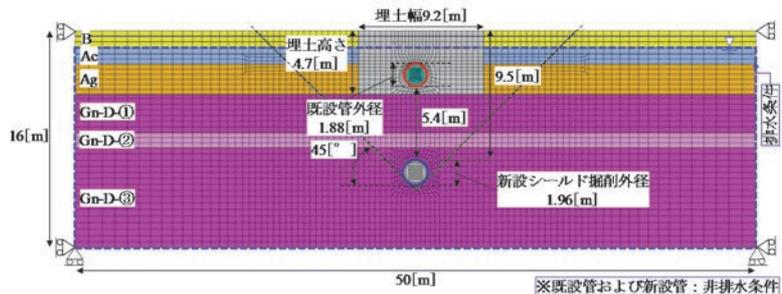
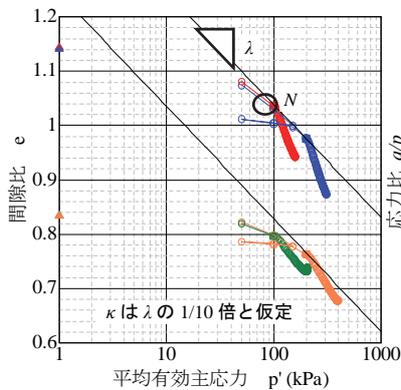


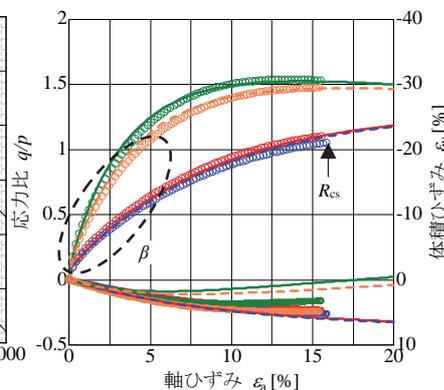
図2 有限要素メッシュ図

3. 解析条件 影響予測解析に用いた有限要素メッシュ図を図2に示す。解析は、2次元平面ひずみ条件下において側方および下方境界に静水圧境界を設定し、土~水連成解析を実施した。解析に用いた土質パラメータを表1に示す。弾塑性FEM解析用パラメータについて、Ac層は、解析断面付近で採取した乱れの少ない試料を用いた定ひずみ速度圧密試験および三軸圧縮試験(CU(バー)条件)から決定した。その他の土層は、原位置における孔内水平載荷試験と採取試料の再構成供試体を用いた三軸圧縮試験(CD条件)から決定した。ここでは、1例としてシールド掘削対象地質である風化岩(Gn-D-③層)の要素シミュレーション結果を図3に示す。一方、弾性FEM解析用パラメータについては、弾塑性FEM解析用パラメータによる要素シミュレーションの応力~ひずみ関係から E_{50} を設定し、ポアソン比については、表1中の値を仮定した。なお、シールド掘削による影響は、応力解放率 α を変化させて表現しているが、ここでは $\alpha=15\%$ の解析結果について示す。

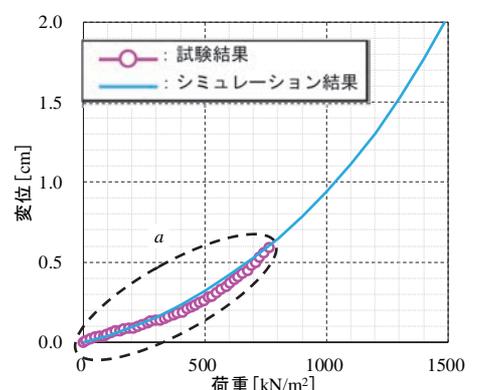
【試験結果】	【シミュレーション結果】
○ : 緩詰め, $\sigma_r=100$ [kPa]	— : 緩詰め, $\sigma_r=100$ [kPa]
○ : 緩詰め, $\sigma_r=200$ [kPa]	- - : 緩詰め, $\sigma_r=200$ [kPa]
● : 密詰め, $\sigma_r=100$ [kPa]	— : 密詰め, $\sigma_r=100$ [kPa]
● : 密詰め, $\sigma_r=200$ [kPa]	- - : 密詰め, $\sigma_r=200$ [kPa]



(a) 間隙比~平均有効主応力関係 (等方圧縮時およびせん断時)



(b) 応力比~軸ひずみ関係 (三軸圧縮試験(CD条件))



(c) 荷重~変位関係 (孔内水平載荷試験)

図3 要素シミュレーション結果

Elasto-plastic finite element analysis to investigate the influence of shield tunneling on the existing overhead tunnel : Tomoyoshi Idei, Takahiro Konda and Teruo Nakai (Geo-Research Institute), Minoru Takenaka and Tatsuya Yamabe (Japan Water Agency), Hideyuki Murayama and Sumio Kawashiri (Fujita)

表 1 FEM 解析に用いた土質パラメーター一覧表

土層	基礎情報				弾性定数		圧密特性			せん断特性		過圧密特性	初期間隙比
	下端深度 [GL-m]	平均 N値	単位 体積 重量 γ [kN/m ³]	透水 係数 k [cm/sec]	変形係数 E [kN/m ²]	ポアソン比 ν	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 R_{cs}	降伏曲面 形状 パラメータ β	密度と 拘束圧の パラメータ a	
埋土	-	-	15.0	1.51E-05	372	0.49	0.130	0.013	2.41	3.0	1.1	1	2.12
表層 堆積物	B-①	0.81	6	18.5	1.25E-02	186	0.35	0.060	0.006	1.05	3.4	1.1	2
	B-②	1.26	6			448	0.35						
	Ac-①	1.71	0	17.7	6.40E-08	1249	0.49	0.120	0.007	0.88	3.9	1.9	300
	Ac-②	2.46	0			2864	0.49						
Ag	4.71	26	18.9	8.95E-03	1765	0.35	0.070	0.007	1.23	3.4	1.1	3	0.81
風化岩	Gn-D-①	7.54	16	18.1	3.15E-05	14972	0.35	0.120	0.012	1.75	3.1	1.1	80
	Gn-D-②	8.66	9	15.7		968	0.35						
	Gn-D-③	16.00	18	18.7		13307	0.35						

4. 影響予測解析結果と計測結果の比較および検討 弾塑性 FEM 解析による鉛直変位と偏差主ひずみの分布を図 4 に示す。鉛直変位は、シールド掘進に伴う応力解放により、新設トンネル上部の地盤において沈下が発生し、その影響が地表付近の既設管に向かって共下り的に発達している。また、偏差主ひずみは、新設トンネル周辺部において局所的に発達する傾向にあり、特にスプリングライン付近や下端において最も大きく、新設トンネル肩部から斜め上部方向に発達している。本影響は、N 値=9 程度の軟質層(Gn-D-②層)に到達した後、水平方向に拡大しているのが特徴的である。一方、弾性 FEM 解析による偏差主ひずみ分布を図 5 に示す。弾性 FEM 解析による偏差主ひずみは、新設トンネル周辺部を中心に上下方向へ発達している。ただし、弾塑性 FEM 解析で見られたような偏差主ひずみ分布ではなく、新設トンネル直上にひずみが集中して発達し、その影響が全体的に広がるような異なる傾向を示した。

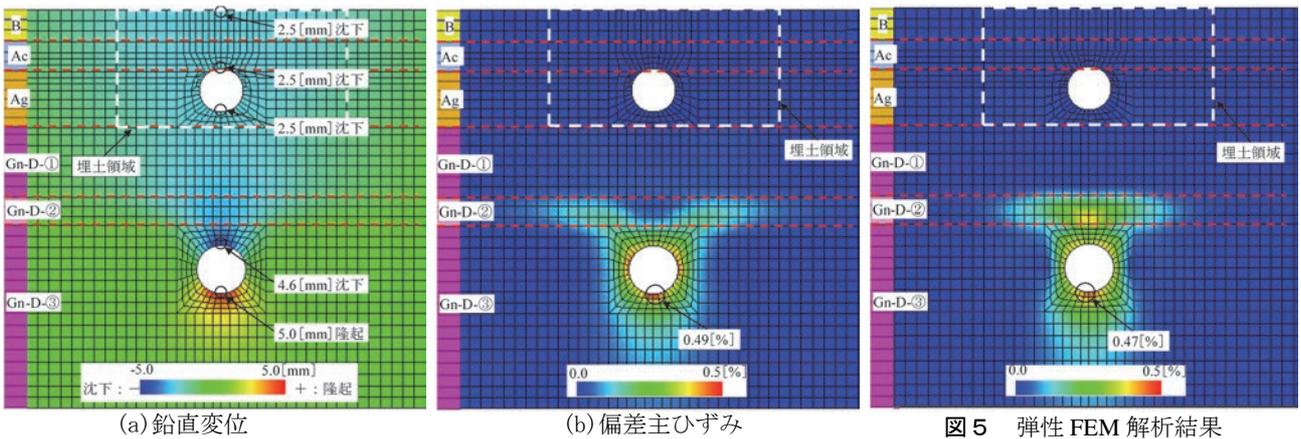


図 4 弾塑性 FEM 解析結果コンター図

図 5 弾性 FEM 解析結果 (偏差主ひずみコンター図)

新設トンネル中心から離隔 2[m] 側方の鉛直変位について、計測値と弾塑性 FEM 解析値の比較を図 6 に示す。解析値は、新設トンネル上部に位置する軟質層(Gn-D-②層)において増大する傾向を示しており、埋土領域にも伝播してほぼ一様に沈下している。計測値は、新設トンネル天端深度で最大沈下量 1.5[mm] となり、解析値と定量的に類似した結果になった。また、浅部ではそのまま共下り的な挙動を示すなど、定性的には解析値と良い対応関係にあった。ただ、軟質層である Gn-D-②層において解析沈下量は拡大しているが、計測値ではその傾向が見られなかった。図中には、Gn-D-②層がその上部層 Gn-D-①層と同じ場合を仮定した解析結果も示している。この場合、軟質層深度における沈下量の増大は見られず、上部地盤がそのまま共下りする沈下分布形状を示しており、軟質層(Gn-D-②層)における鉛直変位量の発達程度を確認することができた。

5. おわりに 新設シールドトンネルの直上に既設水路管が近接し、既設管の周辺地盤が軟質地盤条件において、2次元弾塑性有限要素解析(FEM_{tj}-2D)を用いて影響予測解析を実施した。その結果、シールド掘進に伴う応力解放の影響が上部地盤に伝播し、既設管を含む周辺地盤が局所的に共下りする現象を確認することができた。ここで得られた知見は、文献 1) に示すようにシールド施工管理において適切に反映させることができた。

参考文献: 1) 村山他: 既設水路直下に近接する新設シールドトンネルの施工と地山挙動, 第

53 回地盤工学研究発表会, 2019(本研究発表会投稿中)。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.

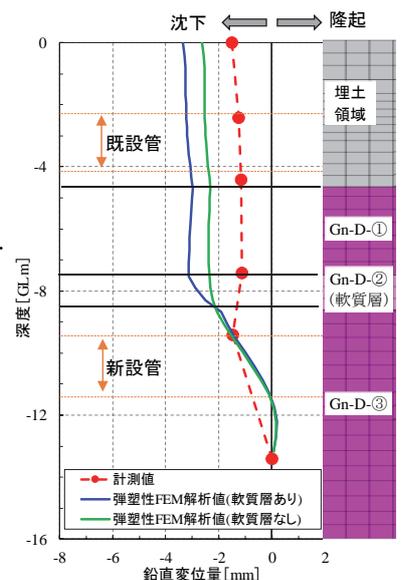


図 6 鉛直変位分布図