

マサ土と花崗岩が輻輳した地盤における泥土圧シールドの掘進管理

－豊川用水二期西部幹線併設水路豊岡工区工事－

Driving control of the mud pressure shield in the ground where Masa and weathering granite are overcrowded

松田昌彦*1 森下康信*2 森 正嗣*3 渡辺 淳*4

概 要

本工事は、完成から30年以上経過し老朽化した豊川用水に併設して耐震性能を備えた水路（セグメント内径1,644mm）を新設する工事である。シールド工は、マサ土と花崗岩が輻輳した不均一な地盤での長距離（2,589m）掘進である。このため、シールドマシンの機能や既設水路下を掘進する2階建て区間の対応等、事前のリスク対策について入念な計画が求められた。本報では、弾塑性FEM解析を用いてシールド掘進に伴う周辺地盤の変形挙動について検討した結果および施工結果について報告する。

key words : 泥土圧シールド、弾塑性FEM解析、微動チェーンアレイ探査、音響トモグラフィ探査

1. はじめに

東三河地方は、古来より幾度となく干害に見舞われてきた地域である。この対策として、1968年に豊川の水を引く豊川用水事業を完成させた。しかし、この用水路も老朽化し、また東海地震等大規模地震の対策も必要となり、1999年～2030年にかけて、豊川用水二期事業として併設水路工事が進められている（図-1）。本工事は、この二期事業の西部幹線内下流部の豊岡工区で、延長2,589m、

セグメント外径1,800mmの泥土圧シールド工法の一次覆工、内径1,000mmのFRPM管を内挿しエアームタルで充填する二次覆工を施工する工事である。この地域の地盤はマサ土と花崗岩が輻輳した不均一な地盤であり、地盤に起因する各種リスクが懸念された。そこで、弾塑性FEM解析を用いてシールド掘進に伴う周辺地盤の変形挙動について検討し実施工に供した。

2. 工事概要

工 事 名 : 豊川用水二期西部幹線併設水路豊岡工区工事
発 注 者 : 独立行政法人水資源機構豊川用水総合事業部
工事場所 : 愛知県蒲郡市豊岡町上久貝地内
～豊岡町竹ノ下地内

工 期 : 2017年7月13日 ～ 2021年3月23日
工事延長 : L=2,625.905m

泥土圧シールド工 外径φ1,800mm L=2,589.101m
二次覆工 内径φ1,000mm FRPM管布設 L=2,589.401m

発進立坑築造 φ9.0m H=19.8m

中間立坑築造 φ5.0m H=22.3m

管水路付帯施設工

蒲郡揚水機場接続工1箇所、排水工1箇所、
分水工2箇所（若宮分水工、大池分水工）

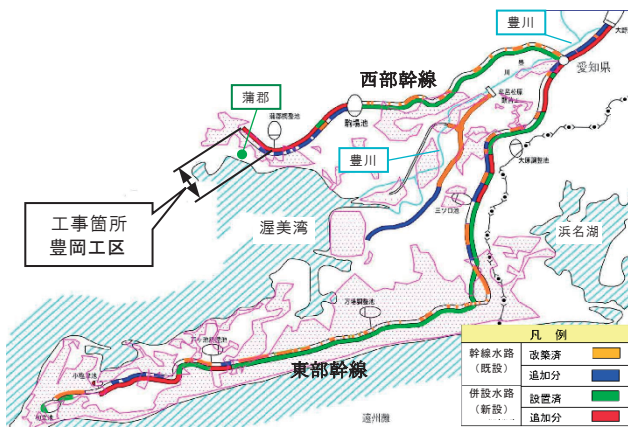


図-1 豊川用水概要図

*1 Masahiko MATSUDA

名古屋支店工事部 作業所長

*2 Yasunobu MORISHITA

名古屋支店工事部 課長

*3 Masatsugu MORI

技術本部技術研究所 主席研究員

*4 Jun WATAMABE

土木本部技術部 部長

3. シールド掘進に伴う懸念事項および対策

3.1 懸念事項

シールド掘進に伴い懸念される事項は、近接する既設構造物への影響と土砂取込み過多による地表面の沈下・陥没である。本工事における懸念箇所を図-2に示す。

(1) 蒲郡揚水機場付近（解析断面1）

地表付近に位置するAs層の有無および連続性が事前の調査結果だけからは不明確であり、蒲郡揚水機場の吸水

槽および民家が近接していることから、シールド掘進に伴う影響がこれらの構造物に発生すると考えられる。

(2) 若宮分水工付近（解析断面2）

新期扇状地堆積物層（軟質）から強風化花崗閃緑岩層（硬質）に地層が遷移する箇所であり、直上の既設管と最も近接する箇所でもあるため、シールド掘進に伴う影響を検討する必要性が大きいと考えられる。

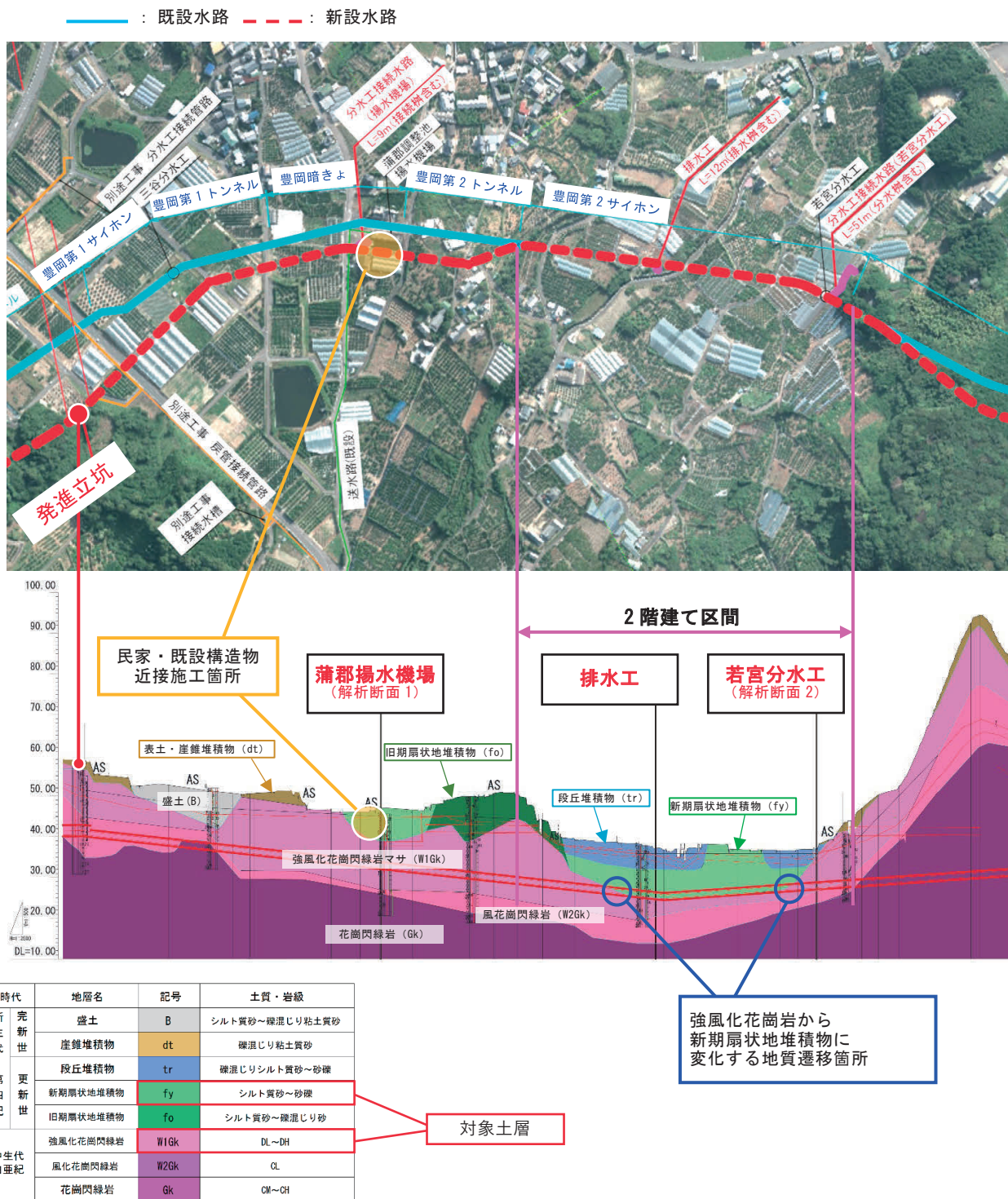


図-2 シールド工事に伴う懸念箇所図

3.2 安全対策

安全対策検討フローを図-3 に示す。安全対策は解析結果を反映させることとし、沈下量 5mm 以下では通常の掘削管理、5mm ≤ 沈下量 ≤ 10mm では地山計測管理とシールド排土管理、沈下量 10mm 以上では薬液注入等による地盤補強とシールド排土管理の対策を講じるものとした。

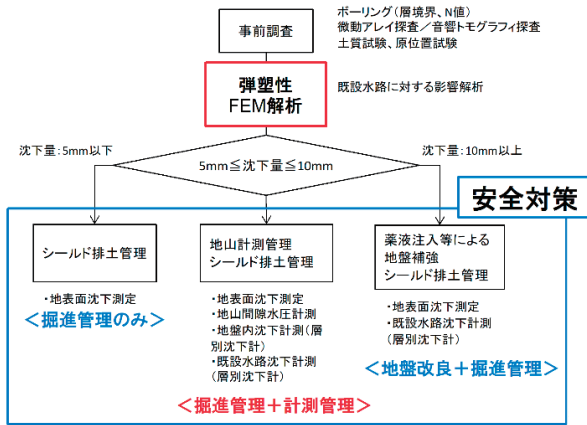


図-3 安全対策検討フロー図

4. 弾塑性 FEM 解析による地盤の沈下量予測

4.1 解析手法

トンネル周辺地盤の変形挙動の数値解析は、地盤内の密度や拘束力の変化が地盤強度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^{1) 2)}) に基づいた 2 次元 FEM 解析プログラム 2D-FEM t_{ij} ³⁾ を使用した。Subloading t_{ij} model は、三軸 (CD) 試験により圧密特性、せん断特性および過圧密度特性を表現するパラメータを、孔内水平載荷試験により自然堆積構造特性を表現するパラメータを、土粒子の密度試験、土の粒度試験、砂の最大・最小密度試験、密度検層、現場透水試験により初期応力状態を表現するパラメータを設定するモデルである。解析は施工過程を 4 段階に分け、シミュレーションした。解析ステップを以下に示す。

a) Step1: 自重解析

各地層の単位体積重量を用いた自重解析を実施し、地盤の初期応力状態を再現する。解析断面 1 では、吸水槽自重および吸水槽内の水自重と民家荷重を考慮する。解析断面 2 では、既設管については、その諸元および自重、既設管内の水の自重 (満水) を考慮する。

b) Step2: シールド掘進解析 (応力解放率 15、30%)

感度分析として、隣接工区の実績から応力解放率 $\alpha = 15\%$ 、取り込み過多を想定した応力解放率 $\alpha = 30\%$ の 2 ケースで解析した。

c) Step3: シールド掘進解析 (新設セグメント施工後、残り応力解放)

新設管 (鋼製セグメントを模擬した梁要素) を挿入して、応力解放率=100% (残りの応力解放) で解析した。

d) Step4: 放置解析

シールド掘進に伴って発生した過剰間隙水圧が消散するまで放置した。解析断面 1 の放置期間は 10 日間、解析断面 2 の放置期間は 90 日間である。

4.2 解析モデル

解析モデルの地盤条件は、追加ボーリング (N 値測定、試料採取)、微動チェーンアレイ探査、音響トモグラフィ探査を行い決定した。微動チェーンアレイ探査の概要を図-4 に、音響トモグラフィ探査の概要を図-5 に示す。

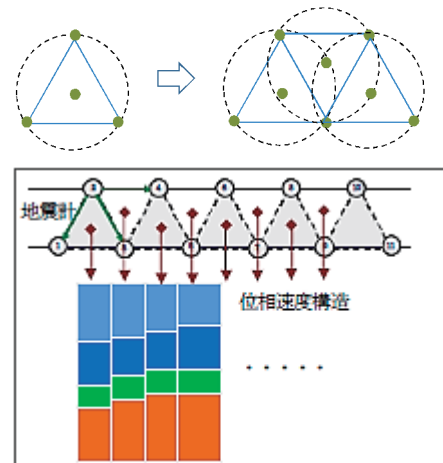


図-4 微動チェーンアレイ探査の概要⁴⁾

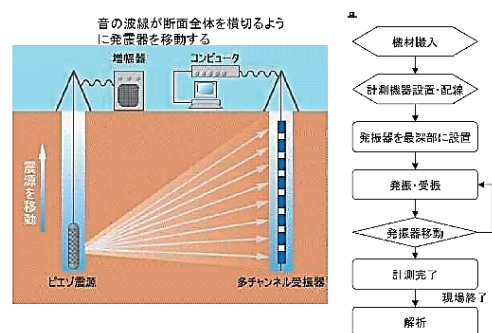


図-5 音響トモグラフィ探査の概要⁵⁾

微動チェーンアレイ探査は、地表面に地震計を円形正三角形に配置して、その三角形を横方向に並べて表面波を測定する。表面波は実体波と異なり、地盤を伝わる速さが周波数によって変化する性質 (位相速度の分散現象) がある。この表面波の分散特性 (表面波の周波数と伝播速度の関係) を利用して地下構造を推定するものである。

音響トモグラフィ探査は、対象断面の両端に計測孔を配置し、圧電式の孔内発振器 (ピエゾ震源) と多連の受信器 (ハイドロフォン) を、それぞれ計測孔内に設置する。受信器を所定の深度で固定した後、発振器を下から上へと移動しながら音響波 (可聴波) を発振し、受信波形からセンサー毎に到達時間とその振幅を計測する。この計測データの逆計算解析により、速度分布図と減衰率分布図を作成し、ボーリングによる土質柱状図を反映させ地盤構成を面的に把握するものである。音響トモグラ

フィで計測される速度と減衰率には、図-6のような関係があると考えられている。速度は地盤の閉まり具合と相関があり、砂質土・砂礫土では良く締まっている程、粘性土では固結土が高い程、大きい値を示す。減衰率は地盤を構成している土の粒径に影響を受け、粒径が大きくなる程（粘性土→砂質土→礫質土）大きい値を示す。このことから、速度が小さく減衰率が大きく地盤は砂礫土が緩く堆積していると考えられ、反対に速度が大きく減衰率が小さい地盤は固結度の高い粘性土であると推定される。

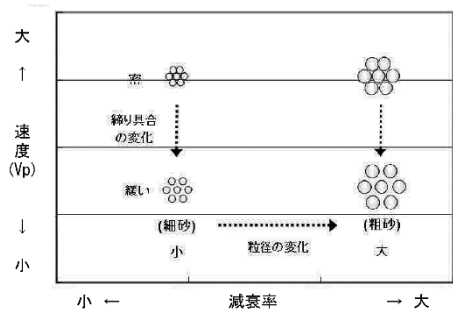


図-6 速度および減衰率の変化イメージ図



写真-1 微動チェーンアレイ探査の状況

(1) 蒲郡揚水機場付近（解析断面1）

地盤調査位置を図-7に、微動チェーンアレイ探査の状況を写真-1に示す。解析モデルの地盤構成は、微動チェーンアレイ探査で推定した地盤構成（図-8）に、既存ボーリング（Ty28-No.6）と追加ボーリング（No.1）の結果を反映させ決定した。解析モデルを図-9に、解析パラメータを表-1に示す。

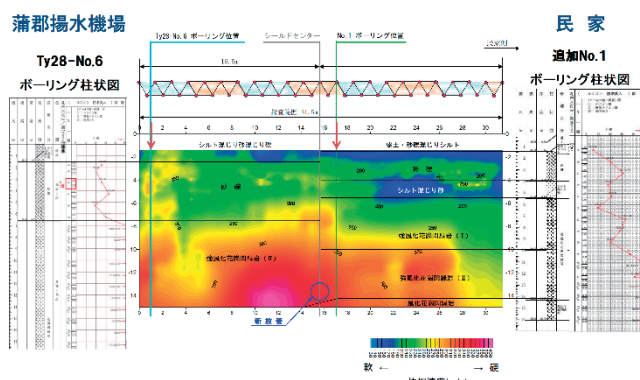


図-8 微動チェーンアレイ探査結果図

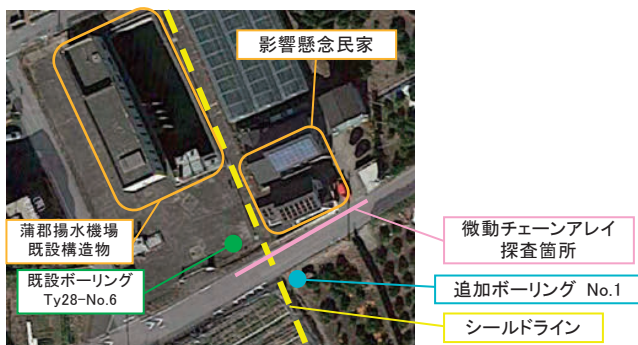


図-7 蒲郡揚水機場付近地盤調査位置図

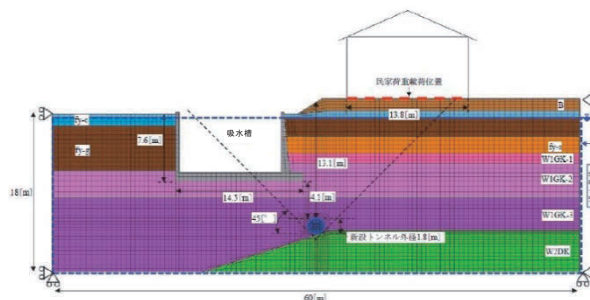


図-9 蒲郡揚水機場付近 解析モデル図

表-1 蒲郡揚水機場付近 設定土質パラメータ

土層	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		初期間隙比	
	単位体積重量 γ [kN/m ³]	透水係数 k [cm/sec]	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 a	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		
盛土	16.4	6.007E-06	0.082	0.0082	1.23	2.9	1.3	2	0	0	1.47	
新期扇状 地堆積物	fy-c	17.3									1.08	
	fy-g	17.7	9.270E-05	0.032	0.0032	1.06	2.9	1.7	2	150	1.08	
	fy-s	17.0	1.005E-04	0.082	0.0082	1.23	2.9	1.3	2	0	1.29	
強風化花 崗閃緑岩	W1GK-1	17.4	5.065E-03	0.050	0.0050	0.94	3.1	1.6	9	30	0.2	1.17
	W1GK-2	19.6			0.0025					100	2.0	0.64
	W1GK-3	21.1			0.0050					50	0.5	0.41
風化花崗 閃緑岩	W2DK	20.9	6.926E-02								0.45	

(2) 若宮分水工付近 (解析断面 2)

地盤調査位置を図-10、11に示す。微動チェーンアレイ探査の状況を写真-2に、音響トモグラフィ探査の状況を写真-3に示す。解析モデルの地盤構成は、微動チェーンアレイ探査と音響トモグラフィ探査の結果を反映させて決定した。追加ボーリングは1箇所 (No.2) である。音響トモグラフィの探査結果 (速度分布・減衰率分布) を図-12に、微動チェーンアレイ探査結果を図-13に示す。いずれの結果もN値30以下の強風化花崗岩と50以上の強風化花崗岩の2層構成であることが確認できた。また、図-12に示した音響トモグラフィ探査結果 (減衰率分布) より、埋戻し状態 (緩み範囲・程度) と既設水路との位置関係が確認できた。解析モデルを図-14に、解析パラメータを表-2に示す。



写真-2 微動チェーンアレイ探査の状況



写真-3 音響トモグラフィ探査の状況

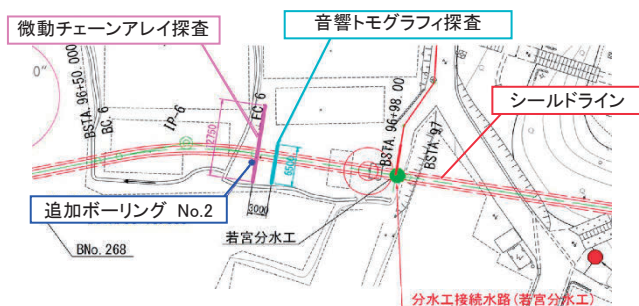


図-10 若宮分水工付近 地盤調査平面位置図

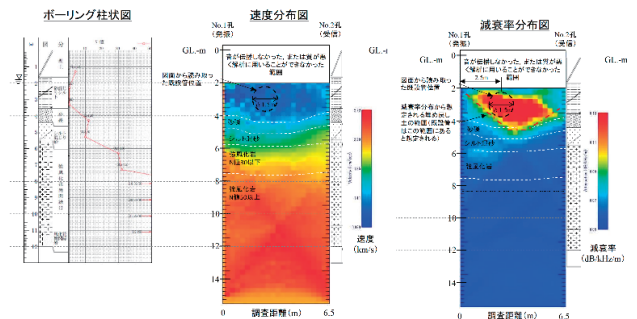


図-12 音響トモグラフィ探査結果図
 速度分布図(左) 減衰率分布(右)

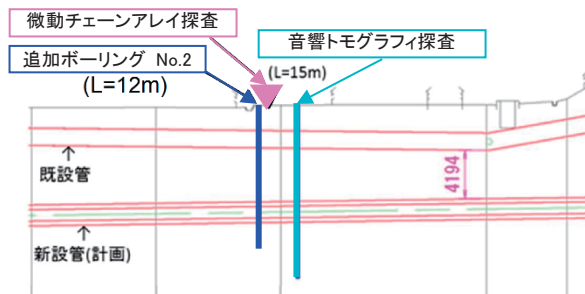


図-11 若宮分水工付近 地盤調査断面図

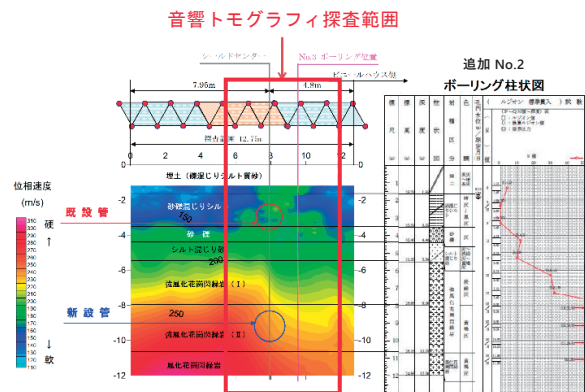


図-13 微動チェーンアレイ探査結果図

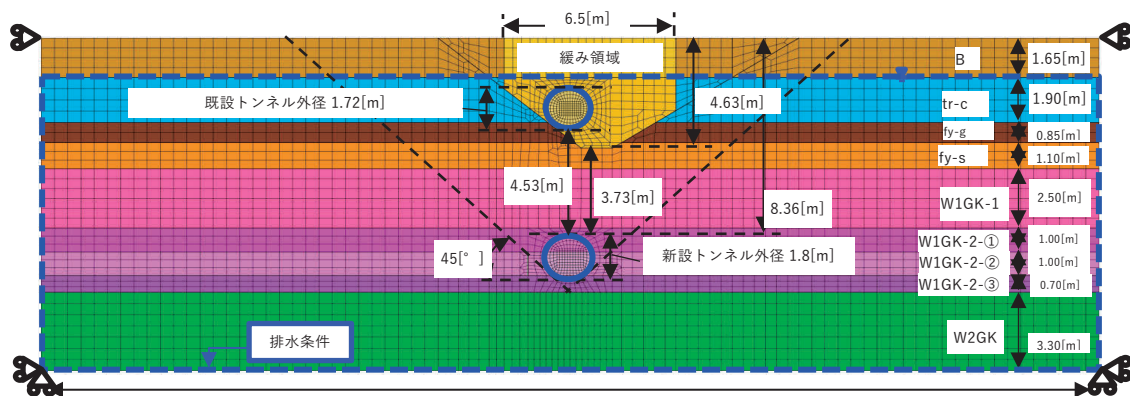


図-14 若宮分水工付近 解析モデル図

表一2 若宮分水工付近 設定土質パラメータ

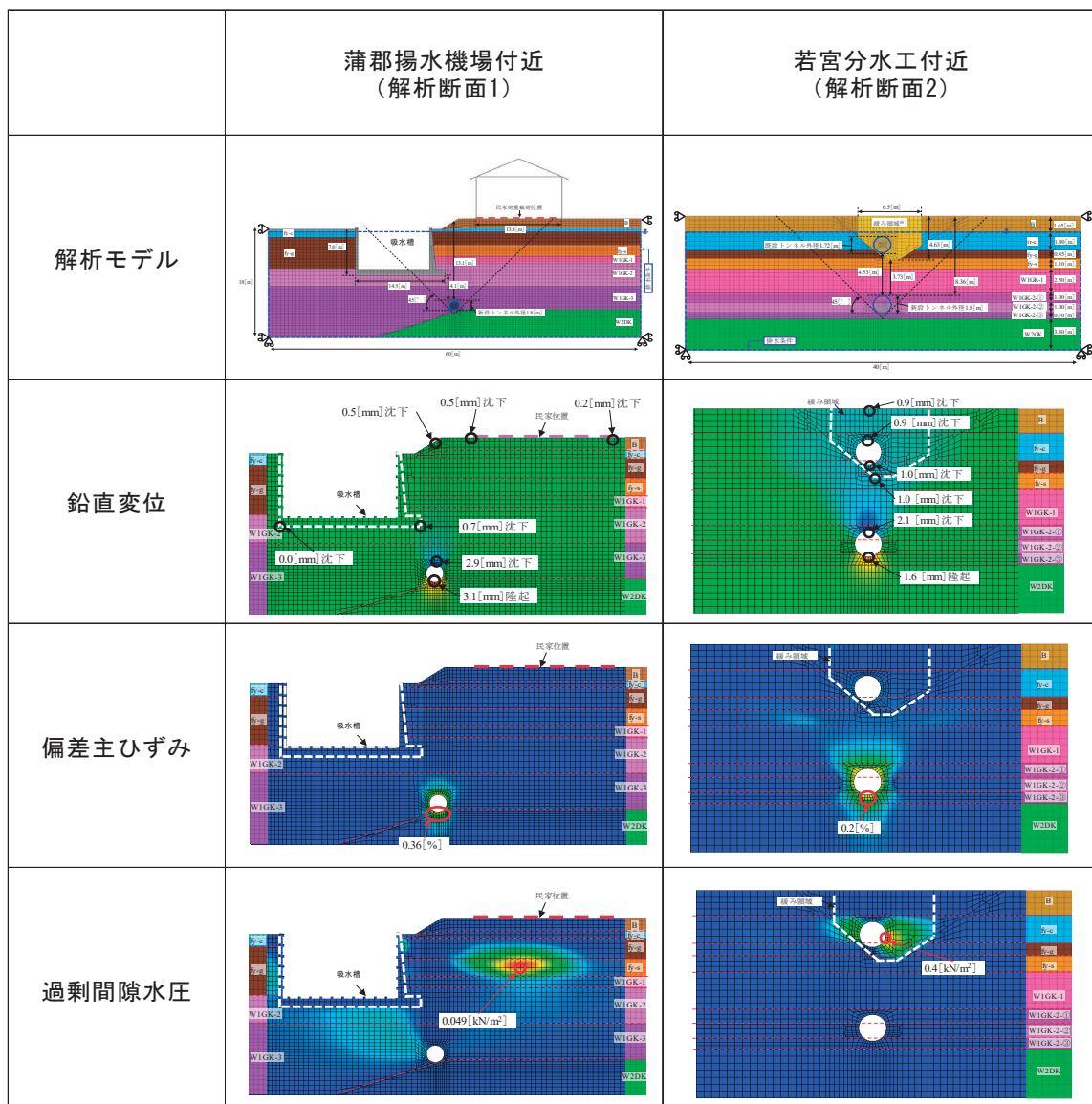
土層	基礎情報		圧密特性		せん断特性		過圧密特性	自然堆積構造特性		初期間隙比 e_{in}		
	単位体積重量 γ [kN/m ³]	透水係数 k [cm/sec]	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	大気圧下の間隙比 N	極限状態の主応力比 Rcs	隆伏曲面形状パラメータ β	密度と拘束圧のパラメータ a	ボンディング効果を表すパラメータ b		仮想上の密度増加初期値 ω_0	
緩み領域	14.7	1.777E-06									0.97	
段丘堆積物	B	18.4	8.723E-06	0.100	0.0100	0.8	3.7	1.1	300	0	0	0.87
	tr-c	16.5	1.777E-06									0.72
新期扇状地堆積物	fy-g	17.6	1.969E-03	0.087	0.0087	1.03	2.4	1.6	65	0	0	1.10
	fy-s	17.5	2.617E-03									1.08
強風化花崗閃緑岩	W1GK-1	17.6	4.368E-03	0.098	0.0049	1.04	2.9	2.2	30	200	0.2	1.06
	W1GK-2-○	19.7										0.62
	W1GK-2-○	19.2	1.411E-02	0.096	0.0024	0.71	3.9	2.1	30	500	0.3	0.71
	W1GK-2-○	19.6										0.63
風化花崗閃緑岩	W2GK	20.2	2.341E-01									0.55

4.3 解析結果および考察

解析結果一覧を表一3に示す。ここでは、応力開放率 $\alpha=15\%$ の結果を示す。解析の結果、いずれの懸念箇所でも応力開放率 $\alpha=15\%$ 程度の精度で掘進ができれば地盤によら

ず、5mm以下の沈下量になることが分かった。また、応力解放率 $\alpha=30\%$ 程度でも、強風化花崗岩であれば沈下量5mm以下で掘進でき、地山計測管理や薬液注入等による地山補強の安全対策の必要はないと考えられる。

表一3 弾塑性FEM解析結果一覧(応力解放率 $\alpha=15\%$)



(1) 蒲郡揚水機場付近（解析断面 1）

最終鉛直変位量を表-4 に示す。シールド掘進に伴う応力解放により、新設管上部の W1GK-3 層（強風化花崗岩）において沈下が発生したが、地表面への影響は小さい結果となった。地盤内の偏差主ひずみは、新設管付近で局所的に発生しているが、周辺地盤への発達が見られない。これは新設管上地盤である W1GK-3 層が硬質であることから、偏差主ひずみの進展がこの層で収束し、地表面への定量的な沈下の進展が微小であったためと考えられる。地盤内の過剰間隙水圧は、応力解放した際はあまり発生していないが、新設セグメント組立後に残りの応力を解放した時点において、新設管スプリングライン付近の W1GK-3 層およびその上部に位置する fy-g 層（砂礫）と fy-s 層（シルト混じり砂）でわずかに発生した。過剰間隙水圧は、10 日間後には消散したが、それに伴って沈下量も増加した。

表-4 蒲郡揚水機場付近 最終鉛直変位量

	新設管上端部	給水槽底面右端部	民家左端部
応力解放率 $\alpha=15\%$	2.9mm沈下	0.7mm沈下	0.6mm沈下
応力解放率 $\alpha=30\%$	5.1mm沈下	1.5mm沈下	1.2mm沈下

(2) 若宮分土工付近（解析断面 2）

最終鉛直変位量を表-5 に示す。シールド掘進に伴う応力解放により、新設管上部の W1GK-2-①層（強風化花崗岩 II）で沈下が発生し、その影響が既設管に向かって共下がり的に発達している。特に、応力解放率 $\alpha=30\%$ の場合、新設管から埋戻し土と自然堆積地盤の境界に向かって共下がり現象が顕著であった。これは新設管上部の W1GK-1 層が N 値=9 程度と軟質であることから、この層での偏差主ひずみが助長され、既設管を含む埋土領域全体にその影響が広がったためと考えられる。地盤内の偏差主ひずみは、新設管に隣接する W1GK-2-①層～W1GK-2-③層で、新設管全周にわたって発達し、スプリングライン付近においては、ひずみ量が最も大きかった。その影響は fy-s 層（シルト混じり砂）にも発達し、特に、応力解放率 $\alpha=30\%$ の場合、ひずみが水平方向に拡大している。地盤内の過剰間隙水圧は、応力解放した際に、透水係数の小さい埋戻し土および tr-c 層（砂礫混じりシルト）で大きく発生し、新設セグメント組立後に残りの応力を解放した時点でさらに増加した。過剰間隙水圧は、90 日後には消散したが、その間に圧密沈下量が増加する結果となった。

表-5 若宮分土工付近 最終鉛直変位量

	新設管上端部	既設管下端部
応力解放率 $\alpha=15\%$	2.1mm沈下	1.1mm沈下
応力解放率 $\alpha=30\%$	4.0mm沈下	2.3mm沈下

5. シールド掘進管理

5.1 掘進管理方法

蒲郡揚水機場付近でのシールド掘進は、強風化花崗岩になるが、2 階建て区間の中には、新期扇状地堆積物（シルト質砂～砂礫）が想定地層縦断面図に存在している。このため、地質遷移箇所と考えられる排水工付近で追加ボーリング（No.3）を実施した。調査の結果、この部分におけるシールド掘削位置は強風化花崗岩であることが分かった。この追加ボーリング No.3 と No.2 の強風化花崗岩と新期扇状地堆積物の変化ラインを結ぶと（図-15）、懸念された区間も強風化花崗岩での掘進となる。したがって、当該シールド工の懸念箇所は、全て強風化花崗岩であり、応力解放率 $\alpha=15\sim 20\%$ 程度で掘進すると沈下量を 5mm 以下に抑えられると考えられる。

そこで、強風化花崗岩における応力開放率を蒲郡揚水機場付近（解析断面 1）通過 10 日後の地表面沈下量より推定した。解析結果の応力開放率と表面沈下量の関係は、 $\alpha=15\%$ のとき 0.6mm、 $\alpha=30\%$ のとき 1.2mm である。解析断面 1 を含む蒲郡揚水機場付近の試験区間（95m）の地表面変位は、-1.0mm～+1.0mm で推移しており沈下傾向はみられなかった。また、その時の排土量（掘削土量）の平均は 1 リング当たり 5.63t/Ring であった。したがって、強風化花崗岩の掘進は $\alpha=20\%$ 程度であり、排土量も 5.63t/Ring 程度に抑えれば土砂取込み過多による地表面沈下の恐れはないと考えられる。

排土管理にはクレーンスケールを採用し、1 リング毎に掘削土量を計測管理した。

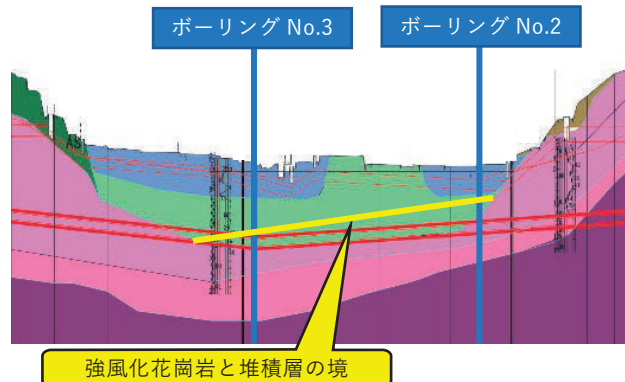


図-15 強風化花崗岩と新期扇状地堆積物の変化ライン

5.2 掘進管理結果

近接施工区間（解析断面 1 含む 128m）、2 階建て区間（解析断面 2 含む 413m）の排土管理結果を表-6 に示す。いずれの施工区間においても、地表面沈下量は -1.0mm～+1.0mm であった。排土量は 5.63t/Ring 以下であり、変動係数も 10～20% と比較的小さく安定して掘進できている。近接施工区間、2 階建て区間の排土量が、試験施工区間より 1.0t/Ring 程度少ないのは、掘進時間の長短や添加材量、地下水量の増減が影響したものと考えられる。

表-6 排土管理結果一覧

		排土管理 試験区間	近接施工区間 (解析断面 1)	2 階建て区間 (解析断面 2)
区間延長	(m)	71.25	128.25	413.25
地盤種類	-	強風化花崗岩	強風化花崗岩	強風化花崗岩
セグメント Ring 数	(Ring)	95	171	551
排土量	平均値	(t/Ring)	5.63	4.78
	標準偏差	(t/Ring)	0.47	0.85
	変動係数	(%)	8.3	17.8
地表面沈下		-1.0mm~+1.0mm で推移 沈下傾向はみられない。	-1.0mm~+1.0mm で推移 沈下傾向はみられない。	-1.0mm~+1.0mm で推移 沈下傾向はみられない。
考 察		応力開放率 $\alpha = 20\%$ 以下の掘進精度で施工できていると考えられる。	応力開放率 $\alpha = 20\%$ 以下の掘進精度で施工できていると考えられる。	応力開放率 $\alpha = 20\%$ 以下の掘進精度で施工できていると考えられる。

6. おわりに

今回の事前検討については、厚生労働省労働基準局長からの通達『「シールドトンネル工事に係る安全対策ガイドライン」の策定について(平成 29 年 3 月 21 日付け、基発 0321 第 4 号)』に基づき、発注者と受注者の他に第 3 者(今回は地質学専門の大学教授)を加えた委員会を発足して実施した。シールド工事は、目視で施工状況を確認することができない工種であるため、影響懸念箇所の事前地質調査や影響解析等の検討は、大変有効であると感じた。今回は、結果的には事前対策を講じなくて良い結果であったが、地質によっては 24 時間の沈下監視計測や地盤改良等の事前対策工事が必要な場合もあり得るので、当社として水平展開を図っていきたい。

最後に、今回の検討委員会のメンバーとして協力して頂いた関係各位に、この場を借りて感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) Nakai T. and Hinokio M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 2, pp. 53-70, 2004.
- 2) Nakai T.: Constitutive Modeling of Geomaterials-Principles and Applications, CRC Press, Boca Raton London New York, 2012.
- 3) 誉田孝宏、橋本正、長屋淳一、Shahin H. M、中井照夫：シールド推進時の施工荷重による影響を考慮した地盤変形解析、第 48 回地盤工学研究発表会、pp. 1475-1476、2013.
- 4) 林久夫、松岡達郎、水落幸広、小野雅弘：微動アレー探査法の拡張の試み-チェーンアレー探査法の適用について-、地盤工学会誌、Vol. 58、No. 8、pp. 10-13、2010. 8.
- 5) 吉塚守、陸門英男、山内淑人、誉田孝宏、榊原淳一：音響トモグラフィを用いたトンネル施工地盤詳細評価、土木学会第 63 回年次学術講演会、pp. 551-552、2008. 9.