

数値解析を用いた低強度地山区間における長尺鋼管先受工法の検討 (その1: Subloading t_{ij} model を用いた弾塑性 FEM 解析の有効性確認)

中日本高速道路株式会社 正会員 稲垣 太浩 (株)地域地盤環境研究所 正会員○稲垣 祐輔
 (株)奥村組 正会員 外木場康将 (株)地域地盤環境研究所 初谷 樹弥
 (株)奥村組 正会員 板谷 裕次 (株)地域地盤環境研究所 正会員 中井 照夫

1. はじめに

本検討のトンネルの坑口部は古墳群が存在し、トンネル周辺地山は強度の低い崖錐堆積物(dt層)と風化砂岩(Ss-w1層)で構成される。そのため、坑口小土被り区間ではトンネル掘削時に地表面沈下が生じ、古墳群への影響が懸念されることから、長尺鋼管先受け工法(以下、AGF工法)による補助工法を適用した。従来、AGF工法の仕様を選定するにあたり、ボーリングコア等の調査結果に基づく標準設計パターンの適用や、N値等から換算した地盤推定値を用いた梁-バネモデルや2次元弾性FEM解析による検討がおこなわれてきた。しかし、当該トンネル坑口部の地盤は走向・傾斜ならびに風化も見られる非常に複雑な機構を持つ地質構成であることから、標準設計パターンや弾性計算による方法だけでは、合理的かつ経済的なAGF工法の仕様にならないことが懸念された。そこで今回、従来のN値からの地盤推定に加え、新たに詳細な力学試験を実施し、さらにその結果をより適切に表現できる3次元弾塑性FEM解析を採用した検討を実施した。本稿は、詳細な力学試験に基づく地盤物性値のフィッティングと弾塑性FEM解析の有効性確認について報告する。

2. 当該現場の地盤条件とAGF工法の概要

本検討箇所の地質は中生代ジュラ紀の美濃帯上麻生ユニットに相当し、砂岩と泥岩で構成される地山である。坑口付近は、10~30°の比較的緩傾斜の竹林であり、場所によって、表層崩壊地形や崖錐堆積物の分布が散見される。当該トンネル坑口部周辺の地層構成とAGF工法の設置位置を図-1に示す。また、坑口部の地質状況を写真-1に、標準貫入試験の結果を表-1に示す。坑口部のトンネル掘削箇所は、崖錐堆積物(dt層)、強風化砂岩(Ss-w1層)および風化砂岩(Ss-w2層)で構成され、dt層は代表N値6程度の緩い地盤、Ss-w1層およびSs-w2層は代表N値100以上を示すが、風化が激しい箇所のSs-w1層のN値は14を示すなど非常に大きなばらつきが見られた。当該現場のAGF工法の概要を図-2および表-2に、施工状況を写真-2に示す。上記に示す地盤条件に対して、坑口部のAGF工法(図-1におけるAGF-1)を適切に配置し、地表面沈下を確実に30mm以内に抑制することが求められる。径114.3mm、長さ21.5mの注入式鋼管フォアパイリングを、天端を中心に180度の範囲にわたり、2段配置した。

3. 弾塑性構成モデル(Subloading t_{ij} model)の概要

本検討の解析では、地盤の構成則にSubloading t_{ij} model¹⁾による弾塑性構成モデルを適用した。Subloading t_{ij} modelは、地盤の力学挙動を粘性土と砂質土に区分することなく統一的なパラメータで表現でき、さらに中間主応力を的確に評価できるモデルである。従って、風化も見られ非常に複雑な機構を持つ当該地盤において、トンネル掘削時の3次元応力分布も的確に表現できる。

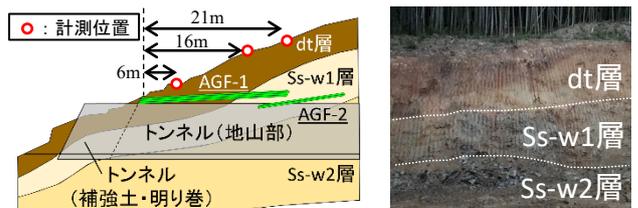


図-1 地層構成とAGF設置位置 写真-1 坑口部の地質状況
表-1 標準貫入試験の結果一覧

地層名	標本数	平均N値	最小N値	最大N値	変動係数	代表N値
dt層	10	10	0	24	1.3	6
Ss-w1層	12	146	14	300	1.6	100
Ss-w2層	3	171	150	214	4.6	153

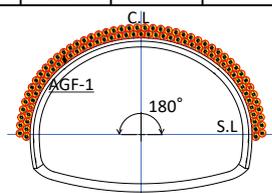


図-2 AGF工法概要
表-2 AGF工法仕様一覧

仕様	AGF-1	AGF-2
径 (mm)	114.3	114.3
長さ (m)	21.5	12.5
範囲 度	180	120
段数 段	2	1



写真-2 施工状況

キーワード 山岳トンネル, 3次元弾塑性有限要素法, Subloading t_{ij} model

連絡先 〒540-0008 大阪市中央区大手前2丁目1番2号 (株)地域地盤環境研究所 TEL:06-6943-9706 FAX:06-6943-9709

4. 力学試験と地盤物性値の同定

当該地盤は N 値にばらつきがあるため、N 値からの地盤推定値を使用した解析では、結果に大きな影響を及ぼすため、乱れの少ない試料を採取し力学試験を実施した。力学試験は全ての層で行い、コアの状態ならびに物理試験の結果から、dt 層はCU条件での三軸圧縮試験、Ss-w1層とSs-w2層はCD条件での三軸圧縮試験を適用した。これらの力学試験の結果を元に要素シミュレーションを実施した(図-3)。要素シミュレーションは同一パラメータで拘束圧のみを変化させた結果であるが、拘束応力(密度)に拘わらず試験結果を十分に再現できており、トンネル掘削に伴う実地盤の挙動が表現可能と判断できる。土質パラメータを表-3に示す。

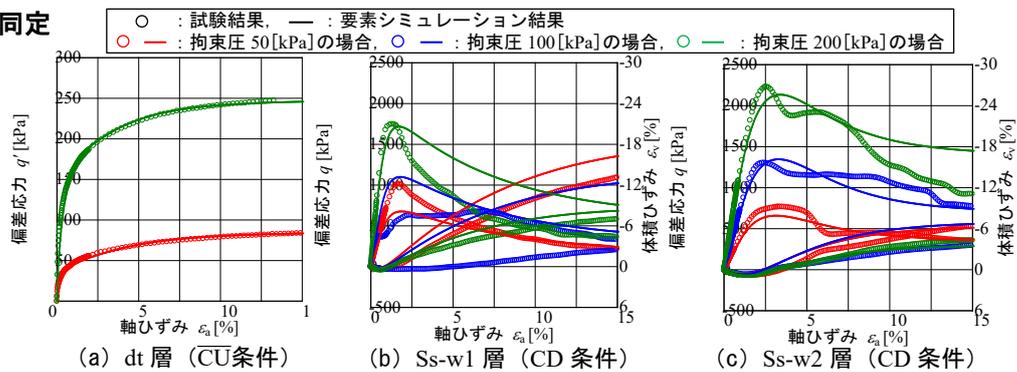


図-3 要素シミュレーション結果(応力-ひずみ関係)

表-3 Subloading t_{ij} model 土質パラメーター一覧

土層	弾性材料パラメータ						弾塑性材料パラメータ							
	単位体積重量 γ [kN/m ³]	弾性係数 E [kN/m ²]	静止土圧係数 K_0	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	大気圧下の間隙比 N	極限状態主応力比 Rcs	降伏局面パラメータ β	過圧密特性を表現するパラメータ a	過圧密特性を表現するパラメータ ka	自然堆積構造特性を表現するパラメータ Qw	自然堆積構造特性を表現するパラメータ bw	自然堆積構造特性を表現するパラメータ kb	間隙比 e
dt層	17.9	4200	0.5	0.120	0.010	0.78	4.1	1.5	10	100.0	7.0	10.0	2.0	0.621
Ss-w1層	20.2	36000	0.5	0.120	0.002	0.78	4.4	1.6	200	0.0	30.0	1.0	0.0	0.427
Ss-w2層	21.9	95000	0.5	0.080	0.003	0.50	8.0	1.5	100	1.0	0.0	0.0	0.0	0.325

表-4 構造諸元

(a) トンネル支保工							(b) 改良体				
要素タイプ	弾性係数 E [kN/m ²]	単位体積重量 γ [kN/m ³]	断面面積 A [m ²]	断面二次モーメント I [m ⁴]	板厚 d [m]	ポアソン比 ν	注入剤弾性係数 Ei [kN/m ²]	間隙比 e	注入率 λ	改良部弾性係数 E [kN/m ²]	
長尺鋼管	ビーム 2.0×10^8	77.0	1.45×10^3	2.20×10^{-6}	—	—	dt	400000	0.62	0.38	158655
鋼製支保工	ビーム 2.0×10^8	77.0	4.72×10^3	2.00×10^{-5}	—	—	Ss-w1	400000	0.43	0.30	366298
吹付け工	シェル 3.4×10^6	23.0	—	—	0.20	0.20	Ss-w2	400000	0.33	0.25	268514

要素シミュレーションは同一パラメータで拘束圧のみを変化させた結果であるが、拘束応力(密度)に拘わらず試験結果を十分に再現できており、トンネル掘削に伴う実地盤の挙動が表現可能と判断できる。土質パラメータを表-3に示す。

5. 弾塑性構成モデル (Subloading t_{ij} model) の有効性確認

本検討に用いる Subloading t_{ij} model のパラメータ以外の物性値を表-4に、3次元FEM解析モデル図を図-4に示す。地盤および地盤改良はソリッド要素、AGFおよび鋼製支保工は梁要素、吹付け工はシェル要素でモデル化し、側方境界は鉛直自由、下方境界は完全固定とした。なお、比較計算として、N 値からの推定値を使用した弾性計算をあわせて実施する。坑口から 10 m 掘削時における地表面沈下分布図を図-5に示す。坑口から 15 m の範囲では、弾性解析より弾塑性解析の地表面沈下量が小さく、坑口から 15 m 以降では弾性解析と弾塑性解析ではほぼ同じ結果となった。また、坑口から 6 m 位置における地表面沈下量は弾性解析より弾塑性解析の方が計測値をおおむね表現できることもわかった。これは、掘削対象土層が坑口から 15 m の範囲は dt 層、それ以降では Ss-w1 層であり、低強度である dt 層のモデル化が弾性解析と弾塑性解析で乖離があったものと考えられ、低強度層のモデル化が実挙動を再現する上で重要であることが確認できた。

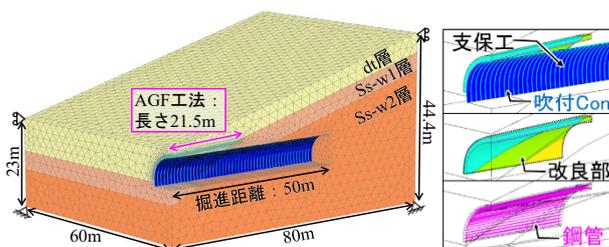


図-4 3次元FEM解析モデル

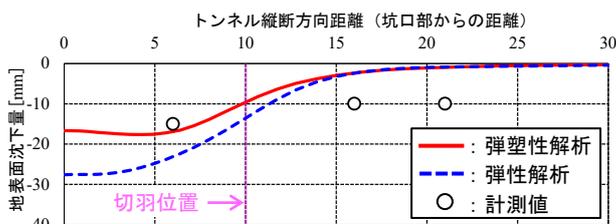


図-5 坑口から 10m 掘削時における地表面沈下分布図

6. まとめ

低強度地山区間のトンネル掘削において、詳細な力学試験と Subloading t_{ij} model を用いた 3次元弾塑性 FEM 解析 (PLAXIS) による地表面沈下の検討を実施した。計測結果との比較から、特に低強度層に対して、詳細な力学試験とそれに基づく高度な解析手法を用いることが実挙動を再現する上で重要であることを確認した。

参考文献

1) 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*, 51(6), pp.1149-1168, 2011.