

未固結地山区間の長尺鋼管先受工法 に関する検討

外木場 康将¹・木下 茂樹²・稲垣 祐輔³・譽田 孝宏⁴・中井 照夫⁵

¹正会員 株式会社奥村組 土木本部土木設計部 (〒108-8381 東京都港区芝 5 丁目 6-1)
E-mail: yasumasa.sotokoba@okumuragumi.jp

²正会員 株式会社奥村組 土木本部土木設計部 (〒108-8381 東京都港区芝 5 丁目 6-1)
E-mail: shigeki.kinoshita@okumuragumi.jp

³正会員 (株) 地域 地盤 環境 研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前 2 丁目 1-2 国民會館・大阪城ビル 4F)
E-mail: inagaki@geor.co.jp

⁴正会員 (株) 地域 地盤 環境 研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前 2 丁目 1-2 国民會館・大阪城ビル 4F)
E-mail: konda@geor.co.jp

⁵正会員 (株) 地域 地盤 環境 研究所 名古屋事務所・解析技術開発センター
(〒464-0856 愛知県名古屋市千種区吹上 1 丁目 1-8 SOPHIA IZUMO706 号室)
E-mail: nakai@geor.co.jp

山岳道路トンネル (以下, F トンネル) の坑口部 (未固結地山区間) において, 補助工法として長尺鋼管先受工法 (以下, AGF 工法) を適用し掘削を行った. 施工時の計測において, 地表面沈下量が切羽到達前に全沈下量の約 80% に達する現象が確認された. 本挙動は, 一般的な山岳トンネル工事に見られる挙動とは異なっている. 本稿では, F トンネルの掘削過程を詳細に反映した 3 次元弾塑性 FEM 解析を実施し, 計測値と解析値の比較から一般的な山岳トンネル工事とは異なる坑口部の地表面挙動について検討した. また, 合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様選定を目指して AGF 工法の地山補強効果について確認した.

Key Words: All Ground Fastening Method, 3D elasto-plastic finite element method, mountain tunnel, on-site measurement, confirmation of countermeasure effectiveness

1. はじめに

F トンネル周辺地山は, 強度の低い崖錐堆積物や風化砂岩で構成される. また, 近くには数多くの石室等の遺跡が存在することから, トンネル掘削時における古墳群への影響を抑制することを目的に, AGF 工法 (All Ground Fastening Method) による補助工法を適用した.

AGF 工法は, 崖錐や断層破碎帯等の地山のアーチ作用が期待できない不安定な地山を補強し, 先行変位の抑制ならびに切羽の安定化を図る工法である. これは, トンネル縦断方向の梁効果によるものであり, 切羽前方上部の土塊を支えるとともに, 切羽の押出しを鋼管の軸方向の抵抗で拘束する機構である.

一般的な山岳トンネル工事に見られる地盤変形挙動は, 切羽通過約 2D 前 (D: トンネル掘削幅) から切羽到達

までに全変位量の 30~40% 程度の先行沈下が発生したのち, 切羽通過後残りの変位が発生して 2~2.5D で収束するケースが多い (図-1 参照).

しかし, F トンネル掘削工事において, 坑口部地表面の沈下量が切羽到達前に全沈下量の約 80% に達する現象が発生した. 本挙動は, 一般的な山岳トンネル工事に

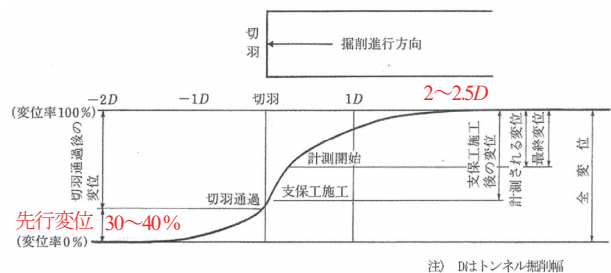


図-1 切羽位置とトンネル周辺地山挙動の一般的な関係 (D: 掘削幅)

は見られない挙動であった。

本稿では、F トンネルの掘削過程を詳細に反映した 3 次元弾塑性 FEM 解析を実施し、計測値と解析値の比較から一般的な山岳トンネル工事とは異なった坑口部の地表挙動について検証した。また、合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様選定に資する情報を得ることを目的に、AGF 工法の効果について検討した。

2. 本工事の特徴

(1) 工事概要

本トンネル工事は、掘削高さ 7.9m、掘削幅 13.4m で、走向・傾斜した地盤を縦断勾配 0.3% で掘進する。坑口部の AGF 工法は、トンネル掘削における地表面沈下を確実に抑制することを目的に、鋼管径 $\phi 114.3$ mm、鋼管の厚さ 4.2 mm、鋼管の長さ 21.5 m、打設角度 3° の注入式鋼管フォアパイリングをトンネル天端を中心に 180° の範囲にわたって、2 段配置した。

当該現場の AGF 工法断面図および現地における弾性

波探査から想定した縦断図を図-2 に、工法仕様一覧を表-1 に示す。

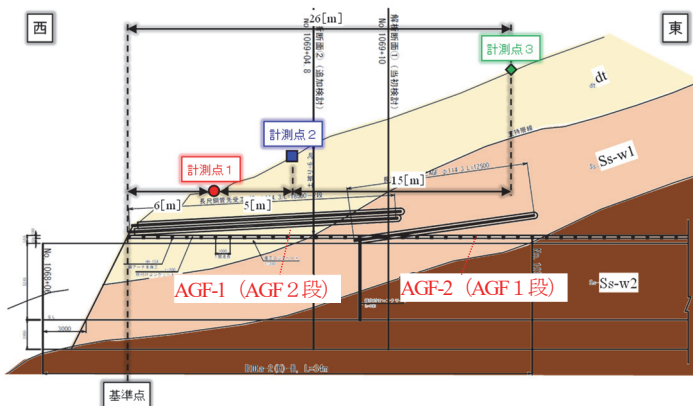
(2) 地盤概要

検討断面付近の土質縦断図を図-2 に、当該現場付近の室内土質試験結果を整理した土性図を図-3 に示す。

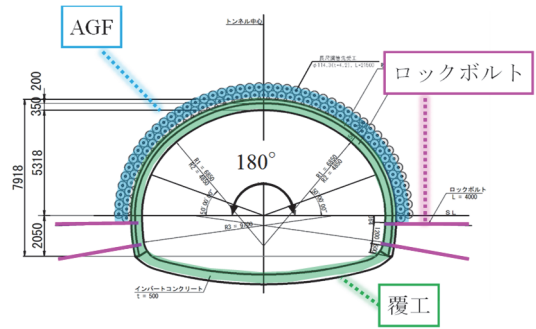
本検討の地質は中生代ジュラ紀の美濃帯上麻生ユニットに相当し、砂岩と泥岩で構成される。トンネル坑口部の掘削箇所は、地表面から崖錐堆積物 (dt)、強風化砂岩 (Ss-w1)、風化砂岩 (Ss-w2) および砂岩 (Ss-w3) の地層構成を呈している。dt は $\phi 1.5$ cm 程のチャートを含む礫混り砂で N 値 6 程度、粘着力 10 kN/m^2 、内部摩擦角 20.9° の非常に緩い二次堆積層である。風化部 (Ss-w1、Ss-w2) は代表 N 値が 100 以上を示すが、場所によって

表-1 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
打設角度 度	3	8



(a) トンネル縦断方向



(b) トンネル横断方向

図-2 地層構成と AGF 設置位置

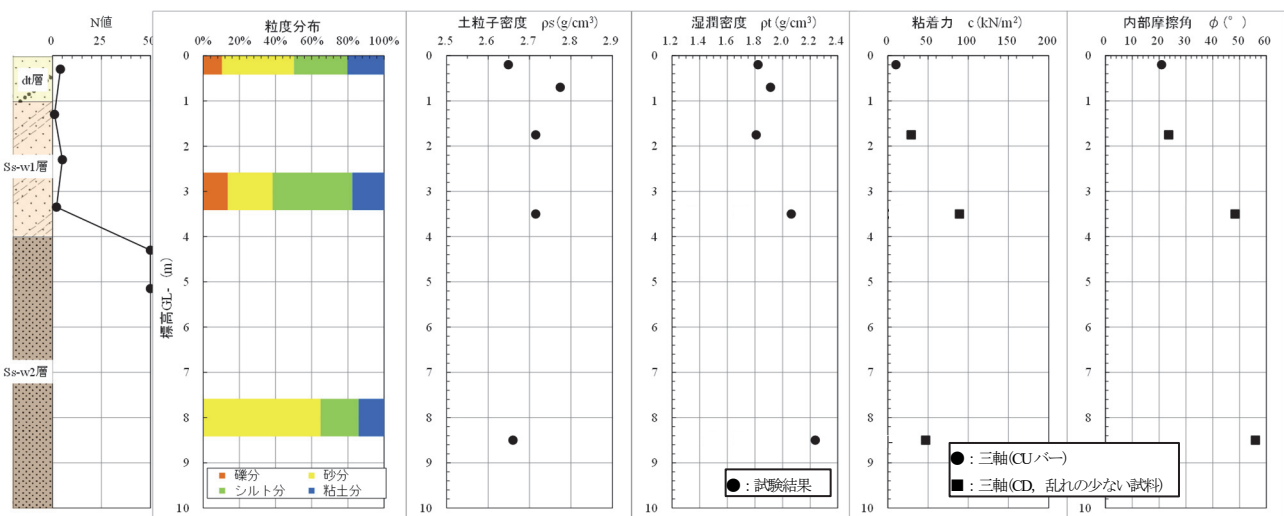


図-3 当該現場付近の室内土質試験結果を整理した土性図

はN値が14程度のところもあり、非常にばらつきが大きい。この傾向は、湿潤密度や粘着力、内部摩擦角においても同様である。また、N値が低い箇所は亀裂が発達し、岩芯まで風化が進行していることが確認された。Ss-w1は、風化が進行して細粒分含有率が50%を超えていることから、粘着力が比較的高くなる。一方、砂分が卓越するSs-w2は内部摩擦角が大きくなることを確認できる。なお、Ss-w3は比較的硬質なCM級岩盤である。

(3) 計測結果

図2に示す計測位置における地表面変位に関する現場計測結果を図4に示す。地表面変位計測は、トンネル坑口付近とAGF先端付近の合計3測点で計測した。なお、本計測データは、坑口部の地山掘削（明り掘削）以降のトンネル掘削に伴う変位量のみを整理している。

図4より地表面鉛直変位は、トンネル掘削に伴って沈下傾向を示し、トンネル坑口付近ほど沈下量大きいこ

とがわかった。また、各計測点の最大沈下量は10.4～10.9mmであり、切羽が到達する前に最大沈下量の51～83%の鉛直変位が発生し、計測点1と計測点2ではほぼ同時期に変位が進行した。

3. 弾塑性 FEM 解析によるトンネル坑口部の地表面挙動分析

(1) 弾塑性 FEM 解析の概要

ここでは、トンネル坑口部の地表面変位挙動について、トンネル掘削過程をシミュレーションした3次元弾塑性FEM解析を実施し、計測結果と比較することで要因分析を行った。なお、使用した解析ソフトは「PLAXIS-3D (Bentley Systems 製)」²⁾である。

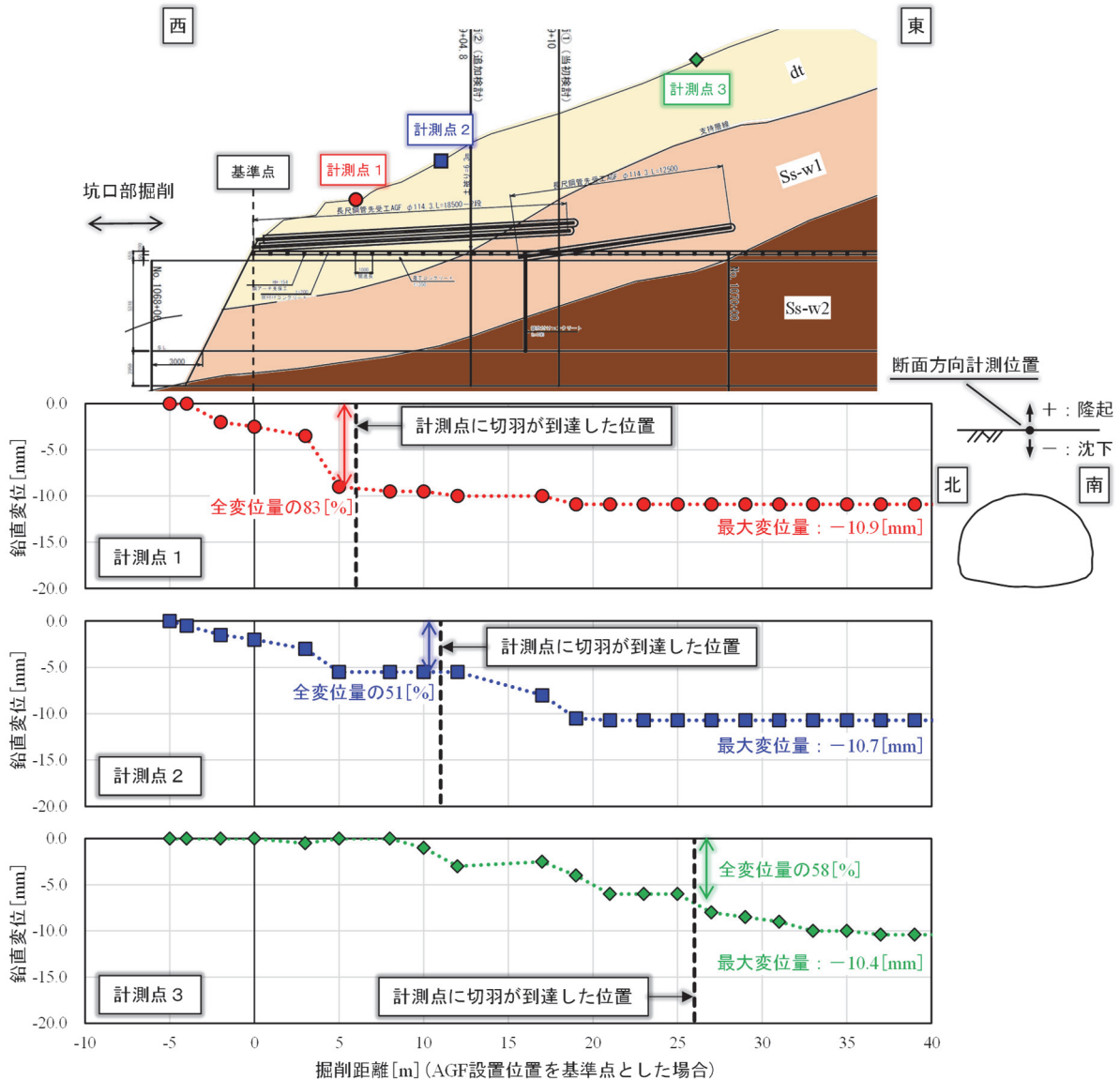


図4 地表面鉛直変位の経時変化図

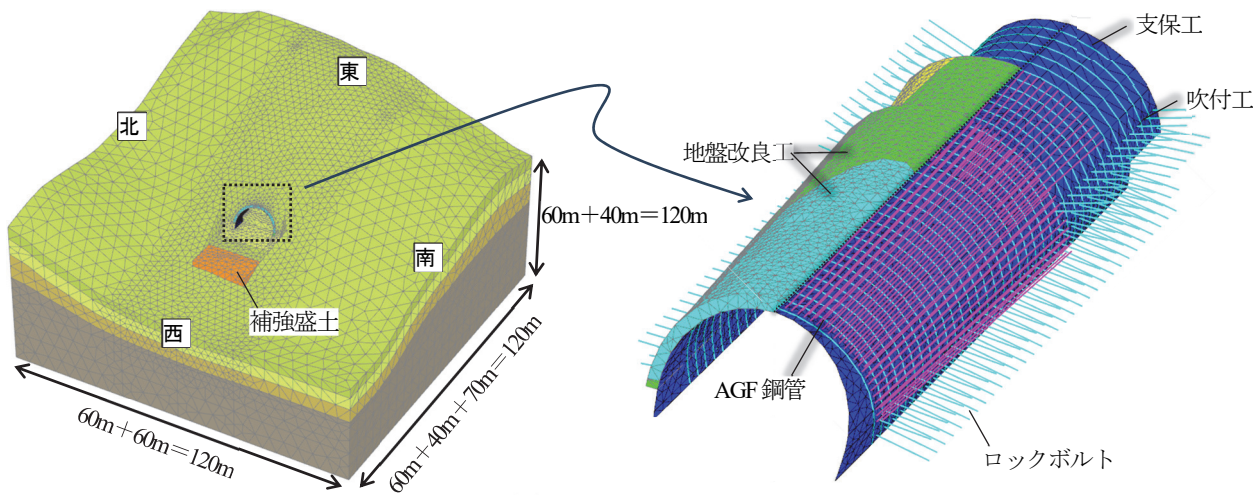


図-5 有限要素メッシュ図

表-2 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 E_i [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	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	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	3.4×10^6	23.0	—	—	0.20	0.20	Ss-w2	400000	0.33	0.25	268514	

(2) 解析モデル

有限要素メッシュ図を図-5に、構造諸元を表-2に示す。本検討では、坑口部を詳細に検討するため、地盤の不陸も考慮してモデル化した。

地盤をソリッド要素（10節点4面体要素）で、吹付コンクリートをシェル要素で、鋼製支保工、AGF鋼管およびロックボルトを梁要素でモデル化した。実施工を可能な限り忠実にモデル化するために、AGF鋼管施工時に注入する地盤改良工もソリッド要素でモデル化した。なお、構造物と地盤は剛結合（節点共有、摩擦は考慮しない）を仮定した。また、当該現場における施工データから地下水による影響は小さいことから、本検討では地下水の影響を除いた有効応力解析（非カップリング）を実施した。

解析領域は、トンネル掘削に伴う影響が無視できる領域まで広げることを念頭に設定した。トンネル横断方向は掘削幅の4倍以上を確保するため、トンネル中心から左右60mをモデル化した。トンネル縦断方向は、坑口から掘削方向に70mモデル化した。一般的に、山岳トンネルにおける縦断方向の変形は切羽通過後2D程度で収束することから、本検討では、AGF先端から2D位置までトンネル掘削することを念頭に、AGF先端から40mに側方境界を設定した。トンネル深度方向は、下方境界を硬質な地盤中に設定することを念頭に、掘削幅の2倍以上の位置に下方境界を仮定し、トンネル下端から40mまでモデル化した。

(3) 地盤構成モデル

本検討の解析では、地盤の構成則に Subloading n_1 model³⁾ ⁴⁾による弾塑性構成モデルを適用した。Subloading n_1 modelの特性を以下に示す。

- 中間主応力（ $=\sigma_2$ 、最小主応力 $\sigma_3 < \sigma_2 < \text{最大主応力}$ σ_1 ）が変形・強度特性に及ぼす影響
- ひずみ増分方向に及ぼす応力増分方向の影響
- 正・負のダイレイタンス特性
- 変形・強度特性に及ぼす密度（間隙比）や拘束応力の影響
- 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- 粘土も砂も統一された少ない土質パラメータ群で表現可能

当該現場におけるトンネル掘削対象地盤は、堆積物、風化砂岩、砂岩と様々な地層で構成され、さらに風化も見られ非常に複雑な機構を持つことから、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る本モデルを採用した。また、地盤内の密度や拘束応力の変化が地盤強度特性に与える影響を考慮できるため、トンネル掘削時の3次元応力分布も的確に表現できることも採用理由として挙げられる。

(4) 土質パラメータ

FEM解析に用いた土質パラメータを表-3に示す。当該地盤はN値にばらつきがあり、N値からの地盤推定値を

表-3 Subloading n_f model 土質パラメーター一覧

土層	単位体積重量 γ_s [kN/m ³]	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		自然堆積構造特性を表現する パラメータ			間隙比 e
							a	ka	Q_w	bw	kb	
dt層	17.9	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	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	0.080	0.003	0.50	8.0	1.5	100	1.0	0.0	0.0	0.0	0.325

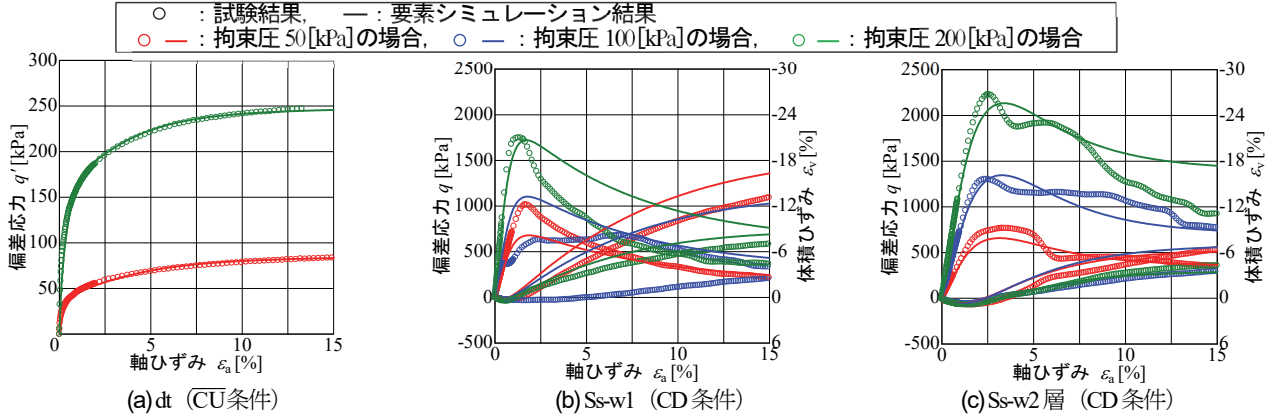


図-6 要素シミュレーション結果（応力-ひずみ関係）

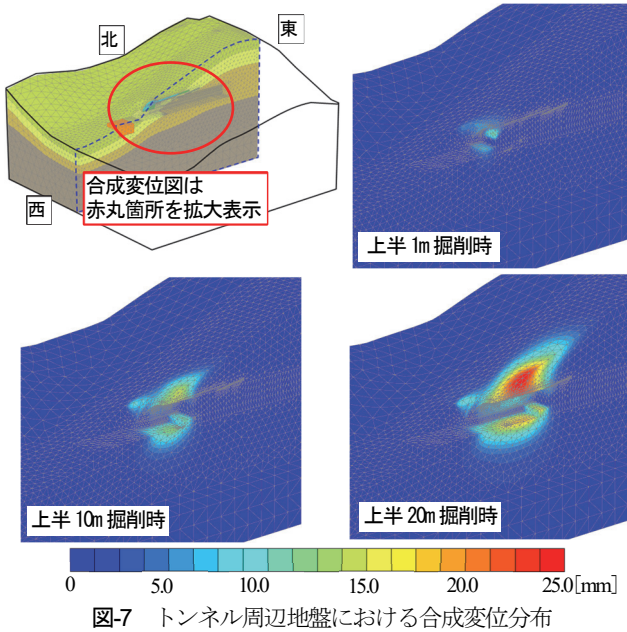


図-7 トンネル周辺地盤における合成変位分布

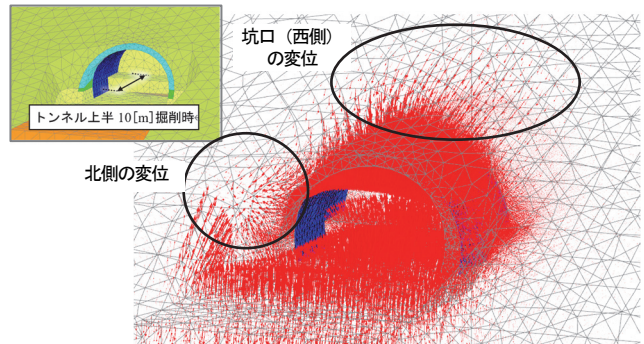


図-8 合成変位ベクトル図（上半10m掘削時）

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。コアの状態や物理試験の結果から、dtはCU条件での三軸圧縮試験、Ss-w1およびSs-w2はCD条件での三軸圧縮試験を適用した。なお、室内土質試験を実施していないSs-w3はSs-w2と同じ物性値を仮定した。

図-6に各土質試験ならびに要素シミュレーションの結果を示す。同図の土質試験結果から、強風化砂岩（Ss-w1）と風化砂岩（Ss-w2）を比較すると、強度はSs-w2が大きい、剛性（初期勾配）はSs-w1が大きいことがわかる。要素シミュレーションは、同一パラメータで三軸圧縮試験の拘束圧の違いのみで、フィッティングすることを試み、その結果、良い対応関係を得ることができ

た。要素シミュレーションにより設定した土質パラメータにおいて、地盤剛性に係わるパラメータである、大気圧下の間隙比 N 、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 、自然堆積構造特性を表現するパラメータ Q_w 、で Ss-w1の方が大きな値を示した。これは、Ss-w1の土質試験結果の剛性（初期勾配）が比較的大きいことからと推察されるが、一般的に風化が進行すると地盤は脆弱になる事象からは乖離している。これは、Ss-w1とSs-w2の風化の進行度合いにばらつきがあるためと推察され、採取した試料にも同様の傾向が見られた。そこで、解析では要素シミュレーションにより設定した土質パラメータに加え、Ss-w2の土質パラメータがSs-w1と同等と仮定したケースもあわせて実施した。

(5) 地表面の挙動分析

上半掘削1m、10m、20m時のトンネル周辺地盤における合成変位分布の鳥瞰図を図-7に示す。合成変位は、トンネル掘削に伴いトンネル天端付近を中心に变形が増大し、トンネル下方でも变形が発生していることがわかり、

トンネル掘削に伴う応力解放により変形が増大したものと考えられる。図-8に上半掘削10m時の合成変位ベクトル図を示す。同図より、トンネル掘削に伴い、坑口方向（西側）、北側方向に変位しながら沈下する挙動を示したことが確認できる。

地表面変位の経時変化に関する計測結果と解析結果の比較図を図-9に示す。要素シミュレーションにより設定した土質パラメータの解析結果は、各計測点ともに切羽到達前では計測結果を定性的にも定量的にもおおむね合致した。これは、切羽通過前の主たる掘削地盤である dt の土質パラメータを適切に実地盤を再現できたためと考えられる。

しかし、切羽通過後においては定性的には再現できているものの、定量的には解析結果の方が過大となった。そのため、各計測点における切羽通過時の変位量は全変位量の16~26%発生し、おおむね一般的な山岳トンネル

工事に見られる挙動と類似する結果となった。一方、Ss-w2の土質パラメータをSs-w1と同じと仮定した場合では、各計測点ともに切羽到達前の変位量はほとんど変化がなく、切羽通過後の変位量が小さくなる結果となった。また、図-10からもわかるように偏差ひずみはdtで卓越し、地層境界に沿って地表面方向に発達しているが、掘削の進行に伴い、その傾向は小さくなった。そのため、全変位量に対する切羽到達前の変位割合は22~31%に増え、全体的に計測結果に近づく結果となった。つまり、Ss-w2 (Ss-w3)の地盤剛性や地盤強度を大きくすることで計測結果を表現できることが示唆された。

以上のことから、当該現場において一般的な山岳トンネル工事に見られる地表面挙動と異なった要因は、軟質なdtを掘削した坑口部付近で地表面変位の大部分を占め、硬質なSs-w1およびSs-w2を掘削した切羽通過後は地表面への影響がほとんどなかったためと考えられる。ま

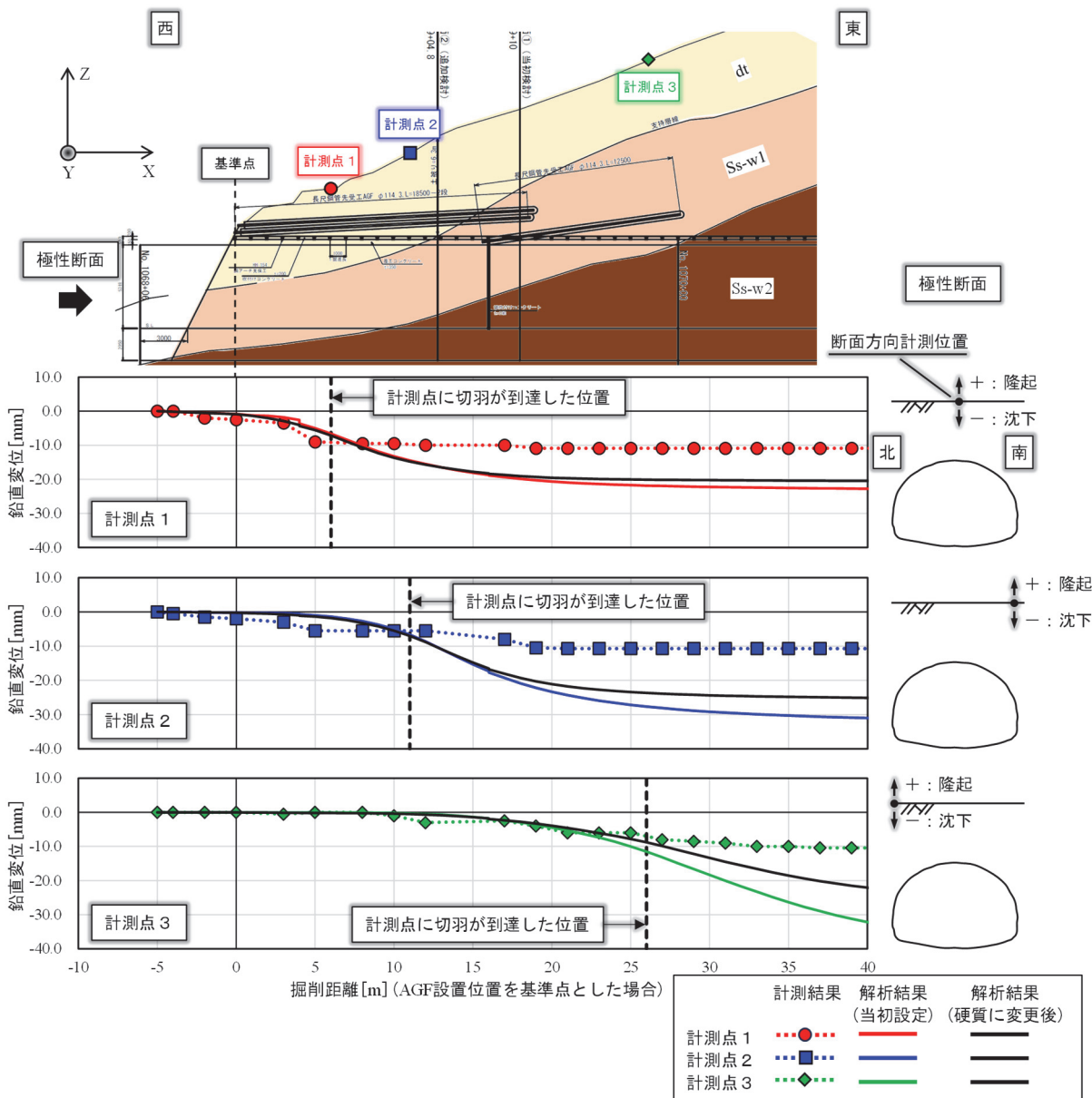


図-9 地表面鉛直変位の経時変化図に関する計測結果と解析結果の比較図

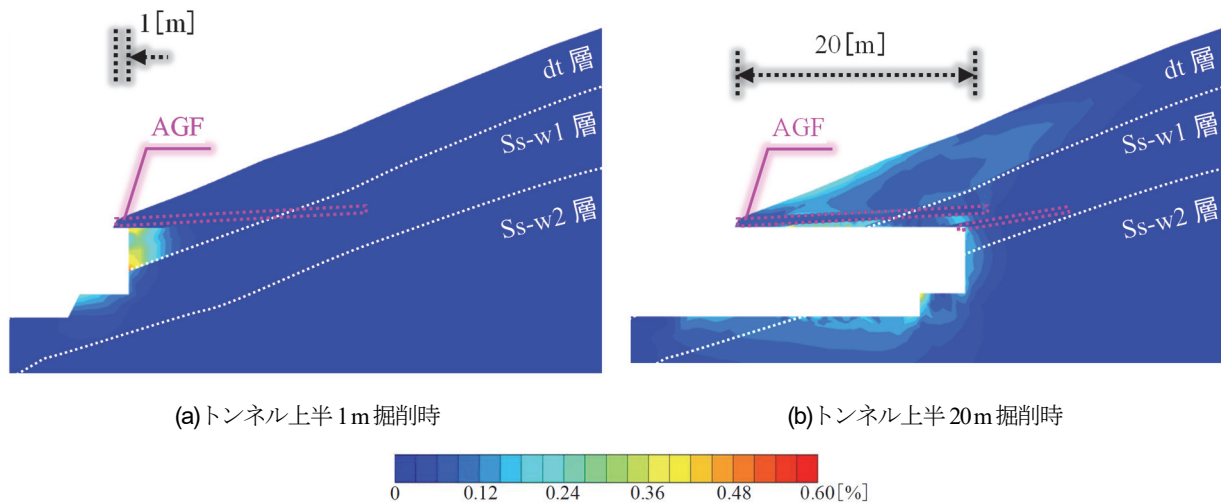


図-10 トンネル縦断方向における偏差ひずみコンター図（土質パラメータ：硬質に変更後）

た、当該現場の坑口付近における地質構成が地表面と同様の走向・傾斜を有していることもその要因の一つとして挙げられる。

4. AGF 工法の補助効果に関する分析

(1) 概要

3.では、坑口部の未固結地山区間において、一般的な山岳トンネル工事に見られる地表面挙動と異なった要因について、詳細な力学試験とそれに基づく Subloading t_h model を用いた 3次元弾塑性 FEM により分析を行った。結果、沈下の要因を推察することができ、Subloading t_h model による 3次元弾塑性 FEM 解析は定量的・定性的に実挙動を再現できることも確認できた。

現在、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 解析による検討が行われている。しかし、今回のような複雑な地盤条件においては、上記の検討だけでは合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様を選定することは難しい。

そこで、トンネル掘削時の地盤の実挙動を定量的・定性的に再現可能な Subloading t_h model による 3次元弾塑性 FEM 解析を活用し、AGF 鋼管の設置範囲と段数をパラメータとした数値解析を複数パターン実施した。これらの結果の比較から、AGF 工法の効果の詳細分析ならびに合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様選定を行う際のアプローチについて検討した。

(2) 解析条件

有限要素メッシュ図⁹⁾を図-11に示す。本検討では、AGF 工法の仕様選定に関する検討であるため、モデル

を簡略化して作成した。トンネル縦断方向には地盤が走向・傾斜しているものの、トンネル横断方向には水平堆積、かつ左右対称の施工方法として片側断面のみモデル化した。その他、解析モデル条件は 3.と同じであり、土質パラメータも表-3を使用した。

(3) 検討ケース

検討ケースを表-4に示す。解析は 4 ケース実施し、AGF なし (Case1) に対し、AGF の段数と設置範囲を変化させた 3 ケースを実施した。AGF の設置範囲は、天端を中心に 120° の範囲 (未固結地山の dt 途中まで) と 180° の範囲 (比較的強度のある地盤の Ss-w1 と dt の層境付近まで) を、 180° の範囲では AGF を 1 段と 2 段の場合を想定した。

(4) AGF 工法の施工パターン変更による効果分析

a) 地表面沈下挙動に関する分析

図-11の着目点における掘削距離と地表面沈下関係を図-12に示す。横軸はトンネル上半における切羽の進行距離であり、トンネル掘削に伴う地表面沈下の経時変化を表している。図-12よりすべてのケースにおいて、トンネル掘進に伴い地表面沈下が進行することが確認できる。また、AGF なし (Case1) と比べて AGF 工法を採用したケースは地表面沈下量が小さく、その中でも AGF 180° 2 段 (Case4) が最も地表面沈下を抑制していることがわかる。その傾向は坑口部が最も顕著であり、AGF 中間部では AGF 180° 1 段 (Case2) と AGF 120° 2 段 (Case3) は、ほぼ同じ変位抑制効果を示し、AGF 先端部では AGF を採用したすべてのケースで同じ変位抑制効果となった。

次に、図-13に偏差ひずみ分布を示す。同図は上半掘削 9m 時点におけるトンネルセンターでの縦断方向の偏差ひずみ分布である。すべてのケースにおいて未固結地

山のdtの切羽前面に偏差ひずみが集中していることがわかる。また、AGFなし (Case1) では、切羽前面に発生した偏差ひずみが地表面まで伝達するのに対し、AGF工法を採用したすべてのケースにおいて、AGFにより

切羽前面の偏差ひずみの地表面への進展が抑制されたことも確認できる。偏差ひずみの集中はdtで顕著であることから、掘削地盤の大半がdtである坑口付近で最もAGFによる沈下量の差が生じ、比較的強度を有するSs-w1が多くなるにつれて沈下量の差がなくなったものと考えられる。以上より、地盤強度の差による偏差ひずみの集中や分布状況がわかれば、経済的かつ合理的なAGFの仕様選定が可能であると考えられる。

上半 20 m 掘削時のトンネルセンターでの縦断方向における地表面沈下分布図を図-14 に、坑口から 3 m 地点のトンネル横断面の偏差ひずみ分布を図-15 に示す。坑口部から約 5 m の範囲において、AGF180° 1 段 (Case2)、AGF180° 2 段 (Case4) と AGF120° 2 段 (Case3) で沈下分布が異なる結果となった。図-15 (i) の箇所において、Case3 では dt の途中までしか補強していないため、補強範囲外の dt (トンネル側部) で偏差ひずみが発達しているが、Case2 および Case4 では dt と Ss-w1 の層境付近まで補強したため大きな偏差ひずみが発達しなかったことが要因として考えられる。また、トンネル縦断方向において、dt および Ss-w1 は地表面に沿って傾斜しており、Case3 においても坑口から 10 m の位置では AGF 端部が Ss-w1 に貫入している (図-16 参照)。その結果、坑口部から離れた位置での地表面沈下に明瞭な差異は見られな

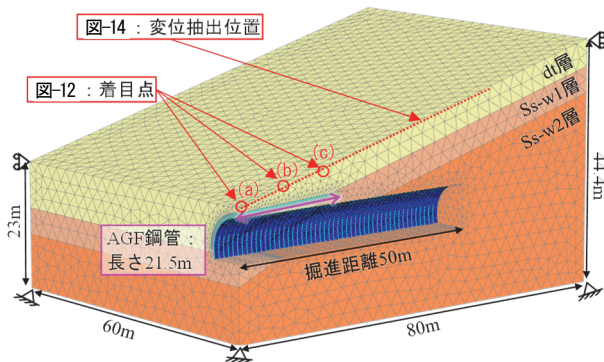


図-11 有限要素メッシュ図

表-4 解析ケース

ケース & 概略図	Case1	Case2	Case3	Case4
AGF範囲	設置なし	180度	120度	180度
段数	設置なし	1段	2段	2段

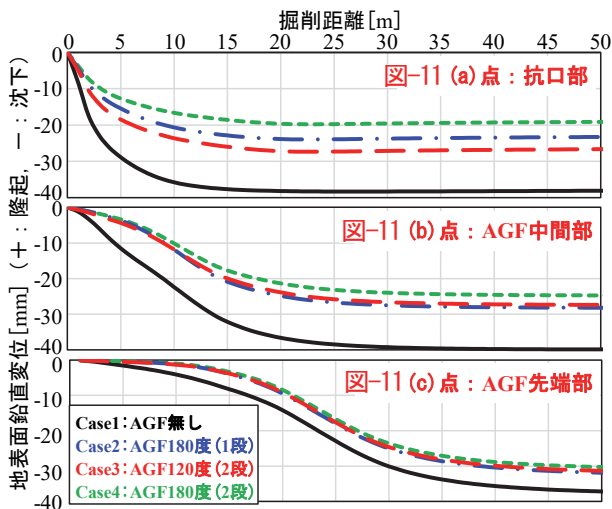


図-12 着目点における掘削距離と地表面沈下の関係

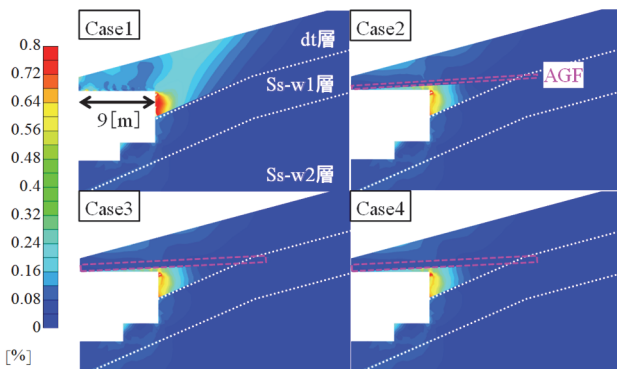


図-13 トンネル縦断方向の偏差主ひずみコンター図

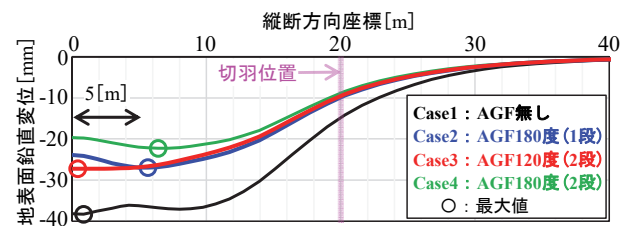


図-14 上半 20 m 掘削時におけるトンネル縦断方向の沈下分布

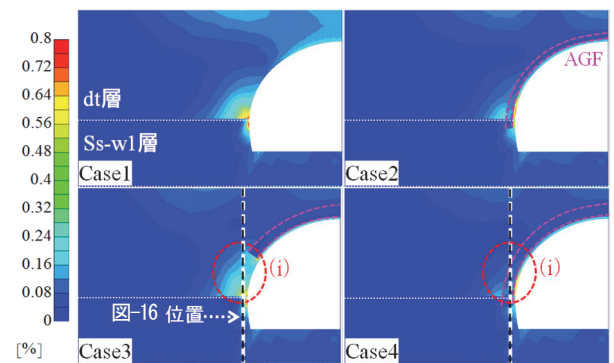


図-15 トンネル横断面の偏差ひずみコンター図

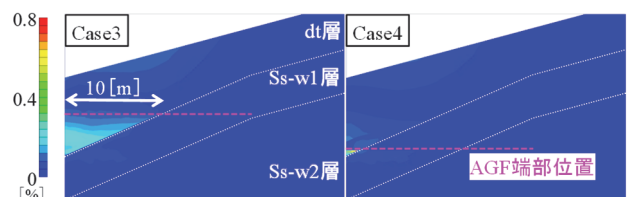


図-16 トンネル側部縦断方向の偏差ひずみコンター図

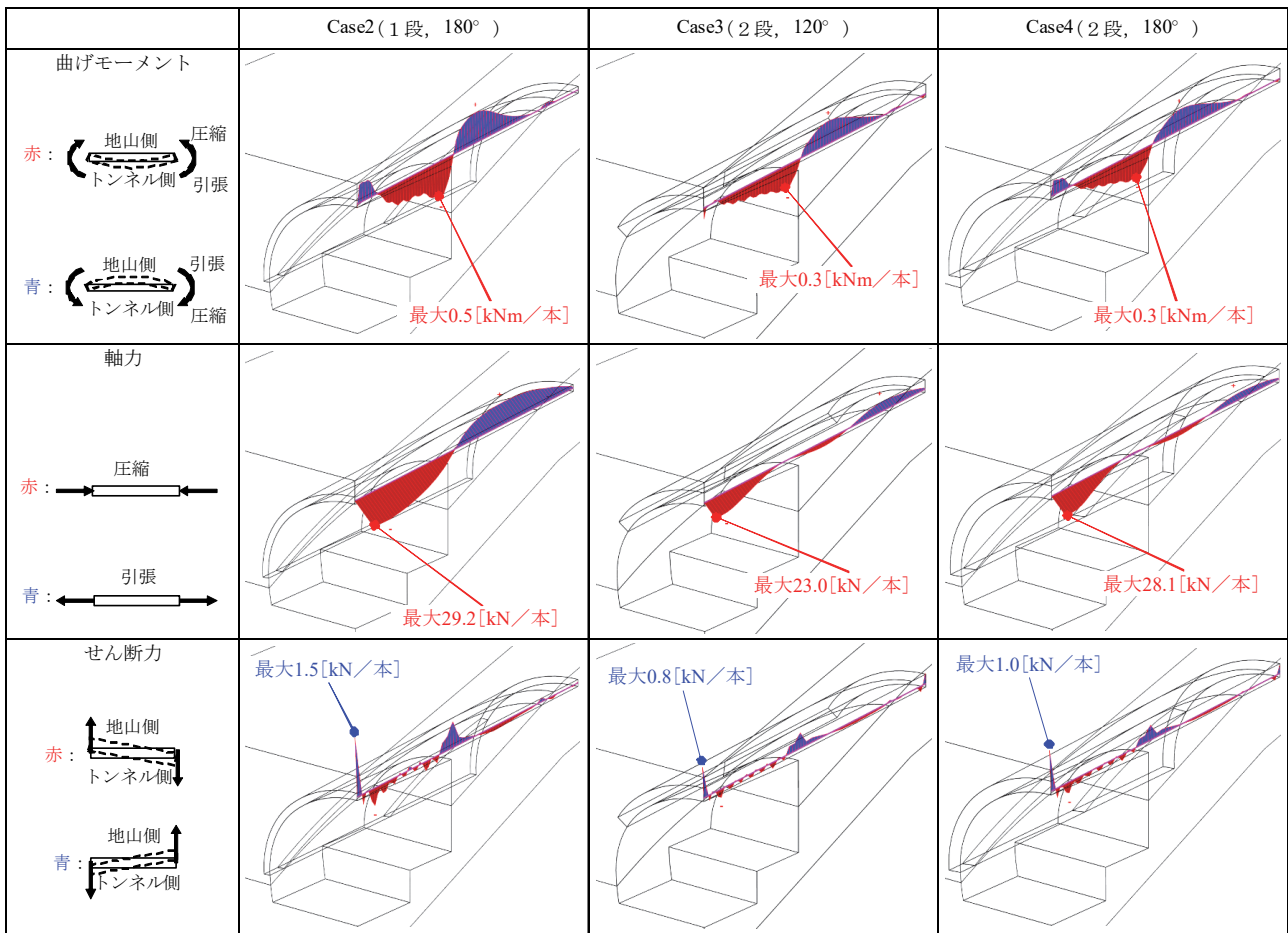


図-17 トンネル掘削時におけるトンネル直上 AGF 鋼管の断面力図 (トンネル上半9m掘削時)

かったものと考えられる。以上のことから、地表面付近の地盤が未固結地山の場合、AGF を強度を有する地盤まで設置することで、AGF の効果をさらに発揮できることが確認できた。

b) AGF 鋼管の断面力に関する分析

トンネル掘削時におけるトンネル直上 AGF 鋼管の断面力分布図を図-17 に示す。同図は、複数ある AGF 鋼管のうち、最も大きな断面力が発生した AGF 鋼管のみを示している。曲げモーメントおよびせん断力は、AGF 設置範囲により分布形状が異なる結果となった。これは、トンネル側部において比較的硬質な Ss-w1 まで AGF の範囲を広げたか否かによって AGF の変形モードが変わったためと考えられるが、最大発生量はいずれも微小であった。一方、軸力は AGF 鋼管段数により分布形状が異なる結果となった。これは、AGF2 段が地盤改良厚は厚く、AGF 本数も多いことから鋼管 1 本あたりが負担する割合が減ったためと考えられるが、最大発生量はいずれも微小であった。

以上のことから、AGF 鋼管の断面力に関しては、AGF の段数や設置範囲により分布形状は異なるものの、いずれの発生断面力も微小であった。つまり、先の地表面沈下挙動も含めて、AGF 工法の配置が 120° 2 段と 180° 1

段でほぼ同じ効果が期待できると言える。このことから、地山条件を詳細に表現できる検討手法を用いれば、合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様決定が可能となることを示唆している。

5. おわりに

低強度の崖錐堆積物や強風化岩で構成され、地表面と同様の走向・傾斜を有する地盤において、弾塑性 FEM 解析を実施し、計測値と解析値の比較から一般的な山岳トンネル工事とは異なった坑口部の地表面挙動について検討した。得られた検討結果および考察を以下に示す。

- 強度の低い崖錐堆積物 (dt) は、サンプリング試料にもとづく土質パラメータが実地盤を適切に表現できたため、トンネル坑口付近の地表面挙動に関する解析結果は定性的および定量的に計測結果をおおむね再現できた。
- 比較的強度の高い風化砂岩 (Ss-w2) は、サンプリング試料にもとづく土質パラメータを用いた解析結果では計測結果を定性的には再現できたものの、定量的には過大となった。

- c) 一般的な山岳トンネル工事に見られる地表面挙動とは異なった要因は、強度の低い崖錐堆積物などが地表地形と同様な走向・傾斜の地盤であったためと考えられる。つまり、強度の低いdtを掘削した坑口部付近の影響が切羽到達時まで支配的に発生し、硬質な Ss-w1 および Ss-w2 を掘削した切羽通過後では地表面への影響がほとんどなかったものと考えられる。

また、AGF 工法の効果について検討した。その結果、トンネル掘削に伴う地表面沈下量は、AGF なしの場合ではトンネル掘削に伴い、地表面沈下が大きく発生したが、AGF ありの場合ではトンネル掘削位置にかかわらず地表面沈下を抑制した。また、トンネル掘削に伴う偏差ひずみは、強度の低い崖錐堆積物 (dt) で大きく発生し、AGF を硬質な Ss-w1 まで貫入することでその発生を抑制した。

以上の結果から得られた知見を以下に示す。

- d) 走向・傾斜する地盤においてAGF工法の仕様選定する場合、地盤強度の低い土層で発達した偏差ひずみが地表面に進展しない範囲まで広げることが重要であることを確認した。
- e) AGF 工法の配置が 120° 2 段と 180° 1 段ではほぼ同じ効果が期待できる等、地山条件を詳細に表現できる検討手法を用いれば、合理的かつ経済的なAGF工法の仕様決定が可能となることを示唆した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、中日本高速道路株式会社 稲垣太浩氏には、FEM 解析・計測に関してご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[山岳工法編]・同解説，p.247，2016.
- 2) Bentley Systems：PLAXIS 3D-Reference Manual，2020.
- 3) Nakai T. and Hinokio M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soil and Foundations, 44(2), pp.53-70, 2004.
- 4) 中井照夫：地盤材料の構成モデル最前線－7.3 主応力条件下での材料特性のモデル化，地盤工学会誌，講座，59(9)，pp.66-75，2011.
- 5) Nakai T.: Constitutive Modeling of Geomaterials, Principles and Applications, (376pages), CRC Press, Boca Raton/London/New York, 2012.
- 6) 稲垣太浩，外木場康将，板谷裕次，稲垣祐輔，初谷樹弥，中井照夫：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），土木学会全国大会第78回年次学術講演会，III-335，2023.
- 7) 稲垣太浩，外木場康将，岩崎光，稲垣祐輔，初谷樹弥，中井照夫：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2：弾塑性 FEM 解析を活用した長尺先受工法の地表面沈下抑制効果），土木学会全国大会第78回年次学術講演会，III-336，2023.

(2024. 8. 23 受付)

STUDY ON ALL GROUND FASTENING METHOD FOR UNCONSOLIDATED GROUND SECTION

Yasumasa SOTOKOBA, Shigeki KINOSHITA, Yusuke INAGAKI, Takahiro KONDA and Teruo NAKAI

In the construction of the portal section (unconsolidated ground) of a mountain tunnel (tunnel F), the All Ground Fastening Method (AGF method) was applied for supplementary support during excavation. During construction, the subsidence of the ground surface reached approximately 80% of the total subsidence before reaching the face. This behavior is different from that seen in general mountain tunneling. In this paper, 3D elasto-plastic FEM analysis reflecting the excavation process of the F tunnel in detail is performed, and the ground surface behavior at the tunnel entrance, which is different from that of general mountain tunnel construction, is discussed by comparing the measurement and analysis results. The effectiveness of the AGF method is confirmed, and a rational and economical specification selection of the AGF method is reported.