

## 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鋼管先受工法の地表面沈下抑制効果)

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)地域地盤環境研究所 初谷 樹弥

(株)奥村組 正会員 外木場康将  
 (株)奥村組 正会員 岩崎 光  
 (株)地域地盤環境研究所 正会員 中井 照夫

### 1. はじめに

低強度小土被りの地山区間において、合理的かつ経済的な長尺鋼管先受け工法（以下、AGF 工法）の仕様選定を行うためには、複雑な地盤条件を反映した検討を行うことが重要である。その検討方法として、詳細な力学試験とそれに基づく Subloading  $t_{ij}$  model を用いた 3次元弾塑性 FEM 解析が有効であることを確認した<sup>1)</sup>。本稿では、その 3次元弾塑性 FEM 解析を使用して、先受け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 工法適用時のトンネル掘削による地表面沈下の発生機構の解明、ならびに合理的かつ経済的な AGF 工法の仕様選定のアプローチについて報告する。

### 2. 数値解析による AGF 工法の効果の確認

トンネル掘削時の地盤状態を適切に表現できる Subloading  $t_{ij}$  model による 3次元弾塑性 FEM 解析 (PLAXIS) を適用した。解析モデルを図-1 に示す。解析モデルは半断面でモデル化し、境界条件は、側方にトンネル SL から 4D 以上、下方にトンネル下端から 1D 以上を取り、側方境界を鉛直自由、下方境界を完全固定とした。地盤材料パラメータは、現場付近から採取した乱れの少ない試料による三軸圧縮試験結果から決定した。解析の物性値は参考文献 1) に記載の値を採用した。

解析ケースを表-1 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 度の範囲 (低強度地盤の dt 層途中まで) と 180 度の範囲 (比較的強度のある地盤の Ss-w1 層層境付近まで) を、180 度の範囲では AGF を 1 段と 2 段の場合を想定した。

### 3. 解析結果と考察

図-1 の着目点における掘削距離と地表面沈下の関係を図-2 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、トンネル掘進に伴う地表面沈下の経時変化を表している。図-2 より全てのケースで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、坑口部では AGF180 度・2 段 (Case4) が最も地表面沈下を抑制していることがわかる。一方、AGF 中間部では、AGF180 度・1 段 (Case2) と AGF120 度・2 段 (Case3) がほぼ同じ変位抑制効果を示し、AGF 先端部では AGF を採用した全てのケースで同じ変位抑制効果となった。次に、偏差ひずみの分布を図-3 に示す。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の分布である。全てのケースにおいて低強度層である dt 層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 工法を採用した全てのケー

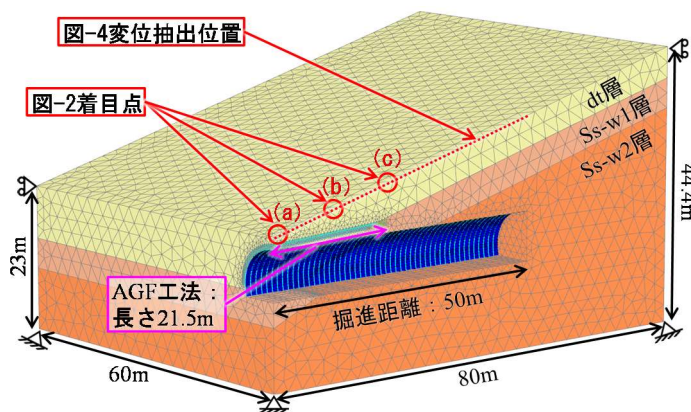


図-1 FEM 解析モデル図

表-1 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

※概略図は坑口部の断面を示す

キーワード 山岳トンネル, 注入式長尺鋼管先受工法, 3次元弾塑性有限要素法  
 連絡先 〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1 (株)奥村組 TEL:03-5427-8041 FAX:03-5427-8114

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層で顕著であることから、掘削地盤の大半がdt層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層が多くなるにつれ沈下量の差が無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、経済的なAGFの仕様の選定が可能であると考えられる。

上半20m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の分布を図-4に示す。坑口部から約5mの範囲において、AGF180度・1段(Case2)ならびにAGF180度・2段(Case4)とAGF120度・2段(Case3)で沈下分布が異なる結果となった。図-5に坑口から3m地点のトンネル横断面の偏差ひずみの分布を示す。同図(i)の箇所において、Case3ではdt層の途中までしか補強していないため、補強範囲外のdt層(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層とSs-w1層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層およびSs-w1層は地表面に沿って傾斜しており、Case3においても坑口から10mの位置ではAGF端部がSs-w1層に貫入している(図-6参照)。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かったものと考えられる。以上から、地表面付近の地盤強度が低い場合、AGF工法の設置範囲は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。

#### 4. まとめ

Subloading  $t_{ij}$  modelを用いた3次元弾塑性FEM解析により、AGF工法の効果について検討した。解析結果から、当該トンネル現場におけるAGF工法による地表面沈下の抑制効果や、鋼管の設置範囲や段数に応じて、地表面へ進展する偏差ひずみに差異が生じることを確認した。今回の解析結果からもわかるように、AGF工法の配置が120度2段と180度1段で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。今後、トンネル現場の地表面形状ならびに施工ステップを詳細に模擬した解析と計測結果から、トンネル掘削時における坑口部の挙動解明をおこなう予定である。

#### 参考文献

1) 稲垣他：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)，第78回土木学会年次学術講演会，投稿中，2023.9

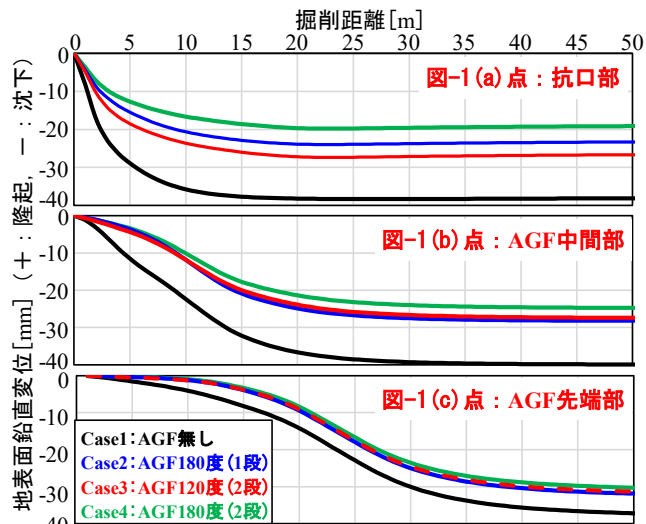


図-2 着目点の地表面沈下と掘削距離の関係

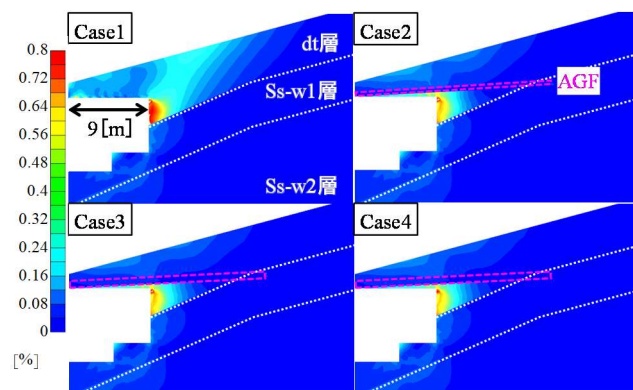


図-3 トンネル縦断方向の偏差ひずみコンター図

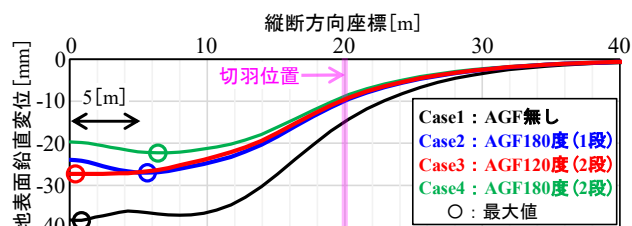


図-4 上半20m掘削時の各地表面地点での沈下量分布

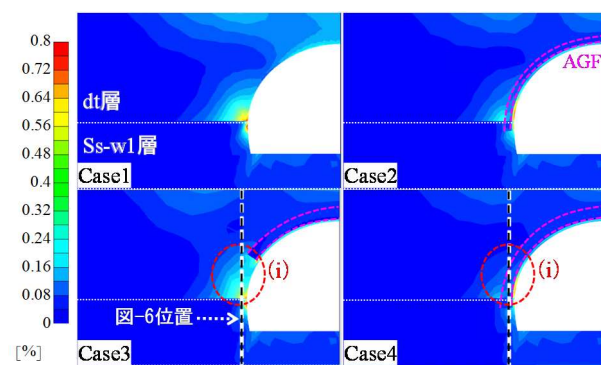


図-5 トンネル横断面偏差ひずみコンター図

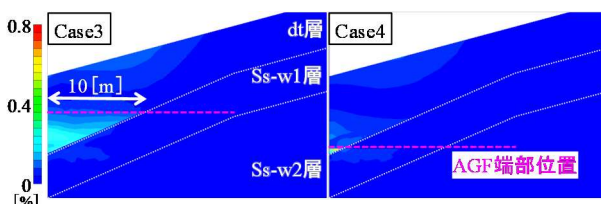


図-6 トンネル側部縦断方向の偏差ひずみコンター図