

AGF工法の支保効果について－東山トンネルの分析例－

On the supporting effect of the AGF method -Example of Higashiyama tunnel-

蛭子清二*・浜田 修**・井上昭治**・斎藤敏明***

Seiji EBISU, Osamu HAMADA, Shoji INOUE and Toshiaki SAITO

The strain measurements of steel pipes of the long scale grouting forepiling method was carried out at Higashiyama tunnel where the AGF(All Ground Fasten) method was adopted. According to the results of the strain measurements, the behavior that the axial strain of steel pipes changes their modes from elongation to compression as the tunnel face progresses has been found out. In this article, the attention is paid to the behavior of such a axial strain of steel pipes. Together with the finite element analysis, an example of interpreting the working mechanism of steel pipes in their axial direction is presented.

Keywords: long scale grouting forepiling method, working mechanism, strain measurement

1. はじめに

AGF工法(All Ground Fasten)は、山岳トンネル工事における注入式長尺先受工法の1種である。掘削前に切羽前方の地山に鋼管が打設され、鋼管の内部と周辺の地山がグラウトされる。AGF工法の場合、一般的な油圧削岩機を削孔に利用できて施工のサイクルに比較的容易に組込めることなどの特長から、その適用が増えてきた¹⁾。同工法の採用によって切羽の安定化が図られ、前方地山の変位や沈下が低減されることが、原位置の挙動計測から報告されている^{2), 3), 4)}。先受工法の効果に関しては、トンネルの縦断方向に主として内部が充填された鋼管による梁形成機構、トンネルの横断方向に鋼管とグラウトによるアーチ形成機構が期待される。これらを解明するために、室内の模型実験⁵⁾や有限要素法を適用したシミュレーションが行われている^{6), 7), 8)}。また、注入材であるウレタンの基本的な材料特性も調査されている⁹⁾。

しかし、鋼管と地山の間の相互作用や鋼管内からの注入による周辺地山の改良の程度など、具体的なメカニズムを明らかにするためには、さらに多くの挙動計測が必要であると考えられる。そこで、AGF工法が採用された京都市の地下鉄東西線東山トンネルで鋼管のひずみ計測を行った。ここでは、切羽進行に伴う鋼管軸方向ひずみの変化挙動に着目し、数値解析を加えた分析結果とメカニズムの解釈例を示す。

2. 東山トンネルの概要

東山トンネルの鳥瞰図を図-1に示す。蹴上駅に接続する終点側120mのM断面区間は掘削断面積148m²の大断面である。土被りが18~30mと小さく、地表に重要構造物が既存することから、地表面の沈下が厳しく規制された。このため、掘削工法に(横割り)CD工法、補助工法にAGF工法が適用された。

M断面の形状と支保パターンを図-2に示す。掘削幅が15.8m、高さ11.4mでアスペクト比は0.72である。

* 正会員 工博 株式会社奥村組, ** 正会員 株式会社奥村組, *** 正会員 工博 京都大学工学部

上半だけのアスペクト比は0.43と極めて偏平な形状である。掘削は、最初に上半左側、切羽距離で4 m 遅れて上半右側、50～60 m 遅れて下半左右の順に行われた。AGF工は、長さが6 m、外径が101.6 mm、肉厚が4.2 mmの鋼管が、さし角約20°で横断方向45 cm ピッチ（1断面49本）、縦断方向1 m ピッチで上半の中心角180°の範囲に打設された。また、注入材には発砲ウレタンが使用された。鋼管長は比較的に短い、トンネルの縦断方向に隣合う鋼管のラップ長さが大きい点の特徴である。なお、M断面区間周辺の地山は粘板岩とチャートを主体とする丹波層群である。トンネルの周辺でボーリング孔内載荷試験が行われ、周辺地山の変形係数が35～559 MPaと推定された。

3. 計測の方法

AGF鋼管の鋼管軸方向ひずみの計測はM断面区間で行った。計測器の配置を図-3に示す。AGF鋼管の中の4本でひずみの計測を行った。切羽前方の地山内に位置された鋼管の中に、外周面にひずみゲージを貼付した塩ビパイプを挿入し、モルタルを圧入して定着した。塩ビパイプの寸法は、長さが6 m、外径が60mm、肉厚が4.1 mmである。塩ビパイプに貼付したひずみゲージの位置を図-4に示す。計測用の4本のAGF鋼管は、左側先進坑側壁45°方向のものから時計回りに順に記号No.1、No.2、No.3、No.4で表す。ひずみゲージは鋼管の軸方向に先端と口元から50 cm 離して100 cm ピッチで6ヶ所に貼付した。先進坑のNo.1とNo.2鋼管では1ヶ所当たり4枚、後進坑のNo.3とNo.4鋼管では1ヶ所当たり2枚のゲージを貼付した。

4. AGF鋼管のひずみ計測結果と考察

ひずみの計測値は計測器埋設後から2日間、上半切羽距離が4～5 mに離れるまで大きく変動し、その後安定した。このため、計器埋設時点から2日後のひずみ計測値を初期値とし、以後の切羽進行に伴う変化分を分析した。この原因には、切羽が計測用鋼管の先端を通過するまで、後続したAGF鋼管の施工（削孔、注入）の影響が及んだ

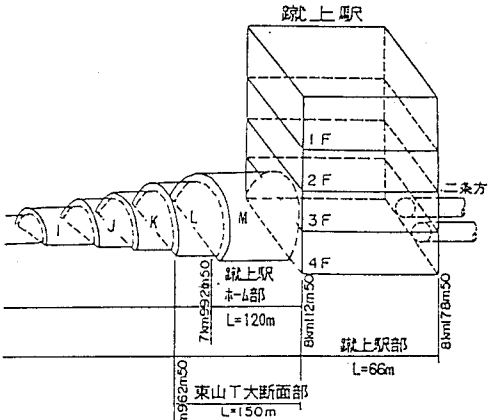


図-1 東山トンネルの鳥瞰図

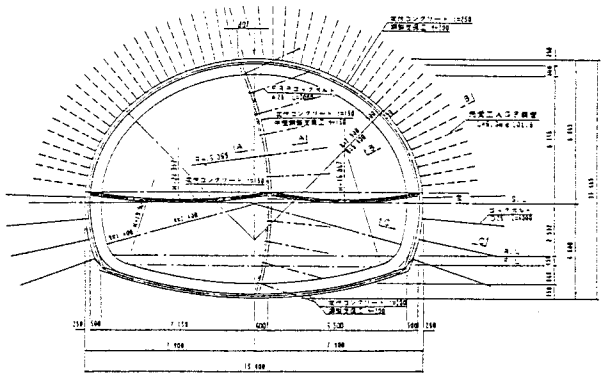


図-2 M断面の形状と支保パターン

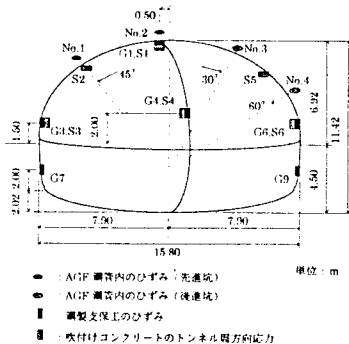


図-3 計測器の配置

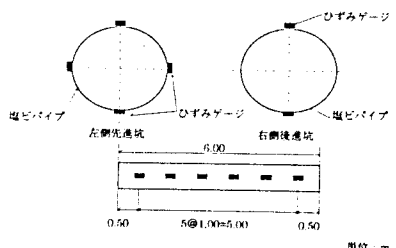


図-4 ひずみゲージの貼付位置

と考えられる。図-4に示したひずみゲージ貼付位置で、それぞれのゲージのひずみ計測値の算術平均から平均軸ひずみを、上下と左右のひずみ計測値の差から軸差ひずみを算出した。ここで、軸差ひずみは鋼管を梁と仮定した場合の曲げモーメントに比例すると考えた。また、軸差ひずみの上下はトンネルの半径方向、左右はトンネルの円周方向におおよそ対応する。なお、ひずみの符号は伸びを正にとった。上下軸差ひずみによるたわみは負符号がトンネル内空側、左右軸差ひずみによるたわみは負符号が天端に向かう方向である。

4.1 平均軸ひずみの分析

No. 1 鋼管の平均軸ひずみと切羽距離の関係を図-5に示す。平均軸ひずみは、上半切羽の進行に伴い指数関数的に縮みのひずみが大きくなり、一定値に収束した傾向を見出せる。軸ひずみが収束したときの切羽距離は約20 m と鋼管の長さ6 m に比較して大きく、切羽が1 D (D : トンネル掘削幅) 以上離れても掘削の影響が鋼管に及んでいたことが分かる。上半左の No. 1 と No. 2 鋼管では、最初に伸びのひずみが発生し、これらは直ちに縮みに転じた。ただし、切羽距離が5 m の位置に切羽が進行するまで計測の初期値をとれなかったため、鋼管に本当に伸びのひずみが発生したとは断定できない。しかし、切羽が鋼管の先端を通過するまでに軸ひずみが伸びの側に極大点を示したことは間違いない。下半切羽進行との関係を見ると、計測断面の前後約25 m (約1.6 D) の範囲で縮みひずみの増減があり、切羽位置では縮みひずみが低減する傾向が認められた。No. 1 と No. 2 鋼管の平均軸ひずみ分布を図-6に示す。鋼管軸方向の平均軸ひずみ分布が一樣でないこと、また、トンネル横断内の鋼管の位置によって平均軸ひずみの分布形が異なる点を指摘できる。ウレタン注入による地山状態変化の不均一性やC D工法の中壁の影響などが唆される。

4.2 軸差ひずみの分析

No. 1 と No. 2 鋼管の上下と左右の軸差ひずみ分布を図-7に示す。軸差ひずみの絶対値が平均軸ひずみのそれらよりも小さかったことを指摘できる。また、切羽進行に伴う軸差ひずみの変化分を見ると、鋼管が支間距離の短い片

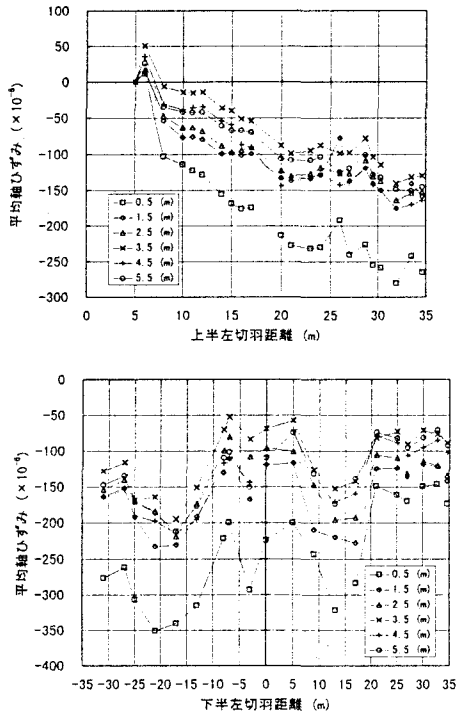


図-5 平均軸ひずみと切羽距離の関係
(No. 1 鋼管、凡例は鋼管上の位置)

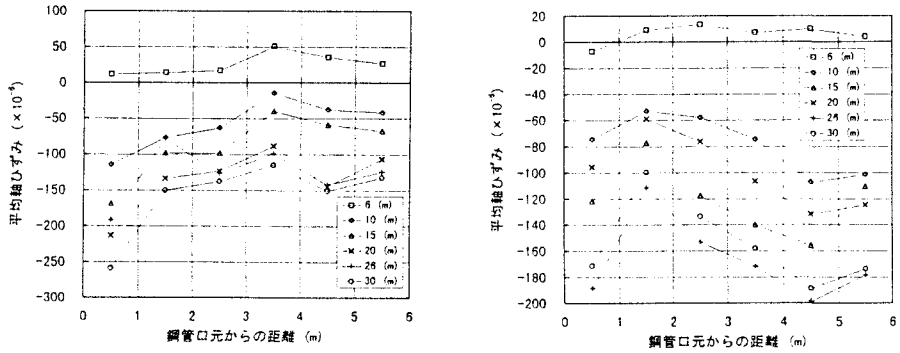


図-6 平均軸ひずみの分布 (左: No. 1 鋼管、右: No. 2 鋼管、凡例は切羽距離)

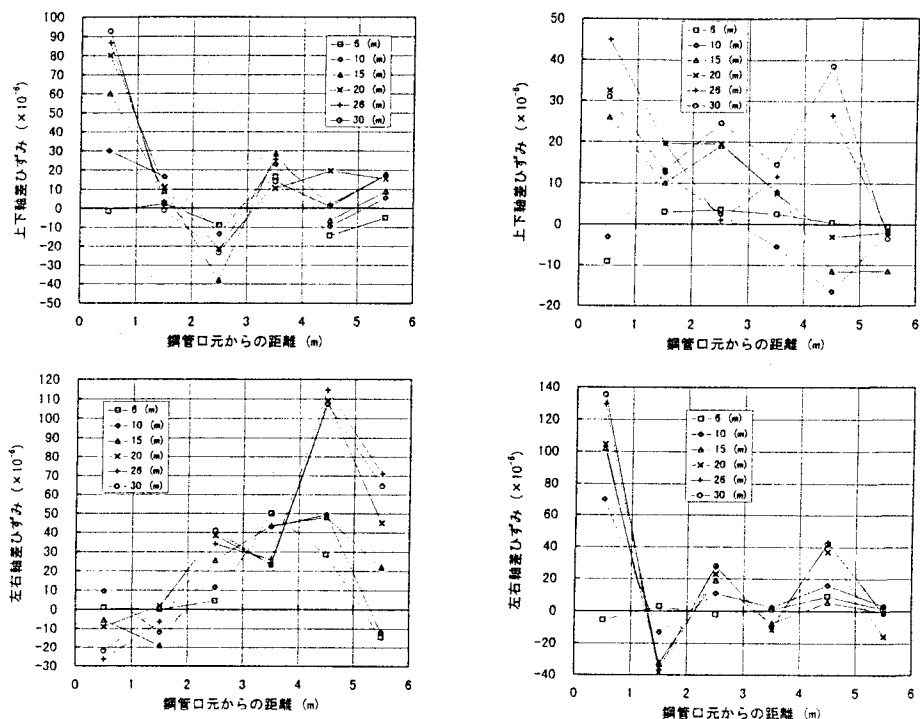
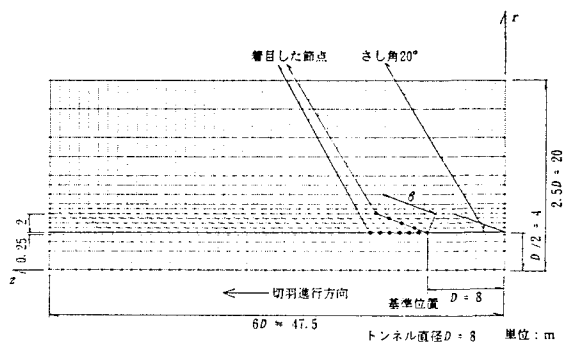


図-7 軸差ひずみの分布 (左: No. 1 鋼管, 右: No. 2 鋼管, 凡例は切羽距離)

持ち梁のように挙動した可能性が示唆される。このときの支承位置は、No. 1 鋼管のトンネル円周方向を除き、鋼管の口元から近い距離にあったと推察される。

4.3 数値解析による検討

軸対称の有限要素法弾性掘削解析を行い、AGF 鋼管の縮みひずみ発生メカニズムを分析した。図-8 に要素分割と解析条件を示す。最初は無支保の解析を行い、ひずみ計測の場合と同様にさし角 20° 方向の地山ひずみと切羽距離の関係を求めた。結果を図-9 に示す。同図では切羽がひずみ観測位置の下を通過するときに、プロットを結んだ曲線の極大点が現れた。これらの前後に初期値をとれば縮みひずみが支配的で計測結果に近い曲線形状となることが分かる。しかし、図-9 では観測位置によって伸びと縮みの両方のひずみが現れており、計測結果のひずみの正負を判断できない。そこで、AGF 鋼管を等価なシェル要素、注入の効果を地山のヤング率の向上として表現した解析を行った。結果は、図-10 に示すようであり、縮みひずみが支配的で計測結果に良く似た曲線が得られた。



ヤング率	$E = 40 \text{ MPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.35$
単位体積重量	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
土盛り	$h = 30 \text{ m}$
初期応力	$\sigma_{xx} = 0.57 \text{ MPa}$
	$\sigma_{yy} = 0.029 \text{ MPa}$
	$\tau_{xy} = 0 \text{ MPa}$

図-8 要素分割と解析条件

5. まとめ

CD工法と併用された長さ6mのAGF鋼管のひずみ計測を行い、切羽進行に伴う鋼管軸方向の縮みひずみの発生を示した。数値解析を加えた検討から、縮みひずみが鋼管軸方向の剛性と注入による地山改良の2つの効果に起因して発生した可能性が高いと指摘した。また、鋼管横断の上下と左右の軸差ひずみの分布から、鋼管が支間距離の短い片持ち梁のように挙動した可能性を示唆した。

最後に、計測にご協力頂いた日本鉄道建設公団大阪支社の関係者の方々に深く感謝します。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会圧入式ボルト分科会長尺先受工法（AGF）WG：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術資料（改訂版），p.123～126，1994。
- 2) 坂山安男・佐藤馨介・五十嵐瑞穂：低土かぶりに偏平大断面トンネルを掘削 山陽自動車道平井トンネル，トンネルと地下，第24巻6号，pp.15～28，1993。
- 3) 小島一路・小林正邦・奥田良三・五島三千明：極浅い土かぶりをAGF工法で施工 堀之内第二トンネル，トンネルと地下，第26巻3号，pp.23～30，1995。
- 4) 御手洗良夫・西間木朗：AGF工法の簡易設計法に関する研究，土木学会第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.61～65，1996。
- 5) 足立紀尚・木村亮・荒巻智・林憲裕：大断面トンネル掘削における長尺先受け工法の補助効果に関する研究，京都大学防災研究所年報，第37号B-2，pp.1～11，1994。
- 6) 伊藤公一・対馬祥一・居相好信・玉井昭雄：トンネル坑口部における3次元解析による鋼管補強RJFPの効果に関する一考察，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第5巻，pp.279～284，1995。
- 7) 玉村公児・森川誠司・鹿毛量・大野清・高橋祐治：三次元FEM解析による長尺先受け工の作用効果の検討，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第5巻，pp.297～302，1995。
- 8) 杉江茂彦・吉岡尚也・藤原紀夫：大断面トンネルの周辺地山の3次元挙動解析，土木学会第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.71～75，1996。
- 9) 肥後満朗・牧宏久・古川浩平・中川浩二：山岳トンネルにおける注入式フォアポーリング用ウレタンの材料特性に関する基礎的研究，土木学会論文集No.504/VI-25，pp.117～126，1994。

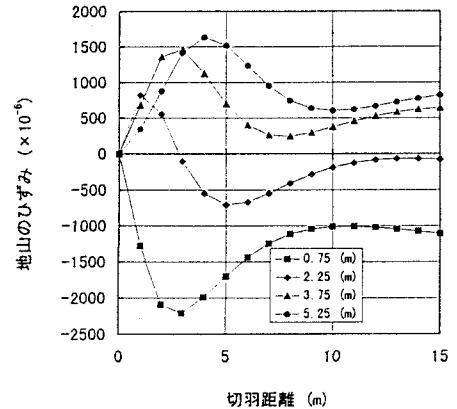


図-9 さし角 20° 方向の地山ひずみと切羽距離の関係（無支保の解析結果）

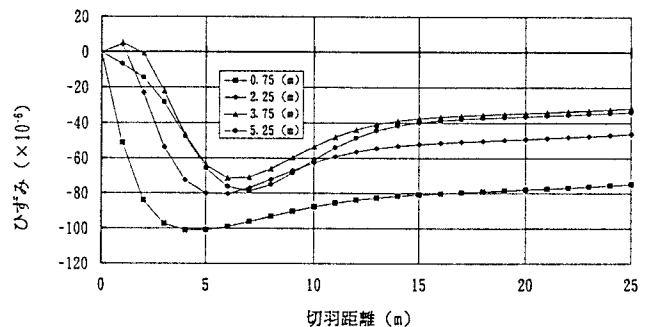


図-10 さし角 20° 方向の地山ひずみと切羽距離の関係（AGF工を考慮した解析結果）