

新しい補助工法の開発とその適用 一般国道 458 号長谷堂トンネルにおける適用結果

渡邊 伸弘* 沖田 徳**
森 武志** 福與 智***
大森 禎敏* 武内 秀木*

要 旨

本論文は、一般国道 458 号 長谷堂トンネル（施工：五洋・西武・渋谷建設共同企業体）の坑口部において適用した NATM の新しい補助工法の適用結果について報告するものである。

今回開発・適用した補助工法は、当社保有技術である曲がり AGF 工法を改良した注入式長尺先受工で、坑口部の低土被り軟質地山という施工的悪条件のもと、切羽天端部の安定、地表面沈下の抑制を主な目的に採用された。本工法では、先頭管に曲がり鋼管を、後続管に切削可能なガラス繊維補強プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastic)製の直管を配し、先頭管の削孔経路を後続直管が追隨する形で円弧状の先受構造を構築する。先受材を弧状に打設することにより、掘削面のより近傍を改良補強すること、低土被り条件下で先受材の地表拔出しを防止すること等が期待され、採用に至った。

今回の施工に伴う各種計測結果により、主に本工法の施工性と効果について考察・評価を加えたので、その詳細について報告する。

1. まえがき

トンネル補助工法の一つである長尺鋼管フォアパイリング工法は、全長 12m 程度の鋼管と地山改良材による地山改良補強体をトンネル切羽前方地山に構築することにより、掘削時の地山の緩み抑制、切羽天端部の安定、地表面沈下抑制等に効果が期待される工法である。その中でも AGF 工法(All Ground Fastening Method)は、トンネル施工で標準的に使用されるさく岩機(ドリルジヤンボ)を用いて比較的容易に施工できるという特徴を有することからその施工実績は年々増加し、工法に対する非常に高い評価が数多く報告されている¹⁾。

一方で、当社保有技術である曲がり AGF 工法は、従来の AGF 工法で指摘されてきた施工上、トンネル品質上の問題点を解消するために開発された改良型 AGF 工法という位置づけにある。先受材として弧状の鋼管を用いることにより、従来型 AGF 工法の問題点の主要因である施工時の掘削断面幅を不要としたことが曲がり AGF 工法の最大の特徴である。すでに報告したように²⁾、曲げ半径 R=30m の先受材を用いて曲がり AGF 工法を実現場へ適用した際には、限定された地質条件下ではあるが良好な精度で施工され、トンネル掘削面のより近傍に地山改良補強体が構築されていたことを確認している。

今回適用した曲がり GFRP 管フォアパイリング工法(仮称：特許出願中 以下、本工法と記述する。)は、弧

状の先受材と地山改良材による地山改良補強体を掘削前方地山内に構築し、先受け効果の向上を目指す点で曲がり AGF 工法と同じスタンスを取っている。本工法と曲がり AGF 工法を含めた従来工法とで大きく異なる点は、先受材として小口径管を使用していること、先頭管にだけ曲がり鋼管を使用していること、後続する 3 本の先受材には切削可能なガラス繊維補強プラスチック製の管を使用していること、等が挙げられる。

今回の施工では、従来工法からの使用資機材や施工法に関する工夫・改善に伴い、施工性や施工精度、先受け効果等に関してどの程度の変化が生じたか確認したので以下に報告する。

2. 本工法の概要

2.1 工法の特徴

本工法と曲がり AGF 工法を含む従来の AGF 工法を比較して、施工法や使用資機材等に関して大きく変化した点は以下のようにまとめられる。

AGF 工法では、主に外径 101.6mm または 114.3mm の鋼管を先受材として用いるのに対し、本工法では外径 76.3mm の小口径管を使用している。

曲がり AGF 工法では、接続する 4 本全ての鋼管に同じ曲率で曲げ加工を施したが、本工法では先頭管だけを弧状にし、3 本の後続管には直管を使用している。

*技術研究所 **東北支店 ***北陸支店

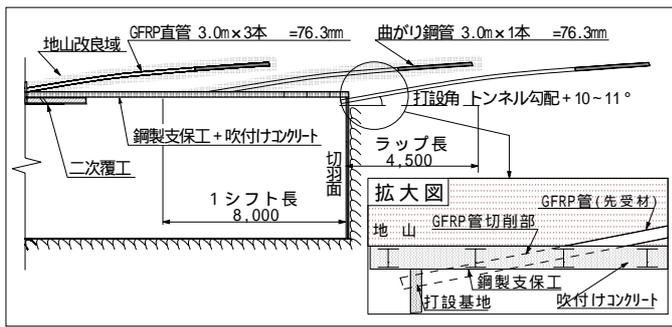


図 - 1 本工法の施工概念図

本工法では、曲げ加工を施す先頭管以外の後続管には、軽量で切削が可能ながら高い引張強度を有するGFRP製の直管を用いている。

図 - 1 に、本工法の施工概念図を示す。

に関しては先受材の諸元を後に示すが、小口径管を用いている分、AGF鋼管と比較して曲げおよび軸剛性とも劣っている。つまり、掘削時の地山荷重に対する先受材の梁効果に関しては、AGF工法の方が高い効果を期待できる。それに対して、小口径管を用いるメリットとしては、さく孔速度が速い、さく孔時のトラブルが少ない、より多種にわたる地質に対応が可能で地質的適用範囲が広い、等が考えられる。

に関しては、ロストビットによるさく孔システムと牽引による推進方式を用いることにより可能となっている。後続する直管はそのたわみ特性により、先頭の曲がり鋼管（曲げ半径 $R=80m$ ）によるポアホール内を追随し、全長にわたって円弧状の先受け部材が地山内に打設されることになる。これは曲がり鋼管の数を減らすことにより、曲げ加工費を低減させることが狙いである。

に関しては図 - 1 に示したように、切削可能な管を用いることで先受材の掘削断面内からの打設が可能となり、打設基地の断面幅が不要となる。断面外周部に打設されたGFRP管が掘削断面内に現れる打設基地から2~3m区間は、管を切削しながらトンネルを掘削することになる。また、軽量のGFRP管を用いることにより、高所作業を伴う管の接続作業や切羽での人力による小運搬等が安全かつ迅速に作業できるという利点も有する。

以上のように、本工法とAGF工法を比較してみると、本工法は効果の面で多少の犠牲を払うことにより施工性および経済性を向上させた工法であると位置づけられる。AGF工法以外の代表的なトンネル補助工法として、短尺の先受工である注入式フォアポーリングが挙げられるが、本工法は効果、施工性、経済性等の各面でこの両工法の間中に位置する工法であると考えられる。このような位置づけの工法を新しく開発してこれまでになかった適用

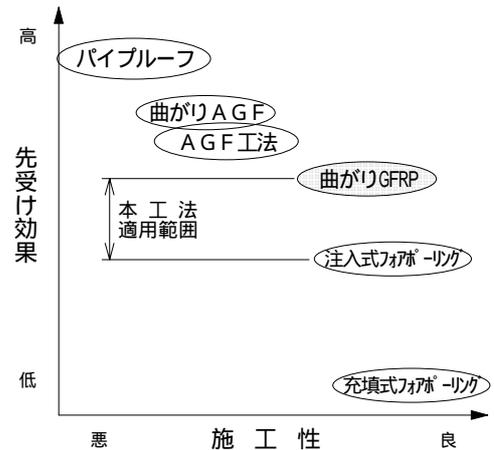


図 - 2 各先受工の効果と施工性による分類

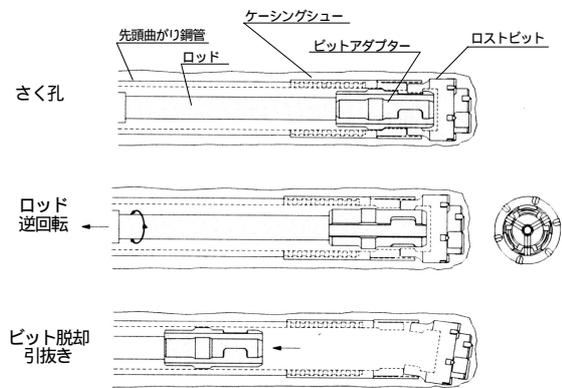


図 - 3 さく孔システム

範囲を補うことにより、採用する補助工法の選択肢が増え、より現場条件に即した最適補助工法の選定、つまりはトンネル補助工法に関する過大もしくは過小設計の減少が実現されるものと考えられる。図 - 2 に、その他の実績の多い工法を含む各先受工を、効果と施工性により定性的に分類した概念図を示す。

2.2 使用資機材

写真 - 1 は、本工法における主な使用資機材である。その中から、本工法で用いるさく孔用資材と先受け部材について詳細を以下に述べる。

2.2.1 さく孔用資材

本工法では、最初に打設される曲がり鋼管の推進に伴うポアホール内を後続するGFRP直管のたわみ特性を利用して追随させ、先受材全長にわたって弧状に打設する必要がある。そのため本工法のさく孔システムではロストビットを用い、先受け部材を牽引する推進方式を採用している。図 - 3 に本工法のさく孔システムを示す。ロストビットおよびロッド先端に装着するビットアダプターと鋼管先端部に接続するケーシングシューとの噛み合いにより、先頭管は牽引されるシステムとなっている。

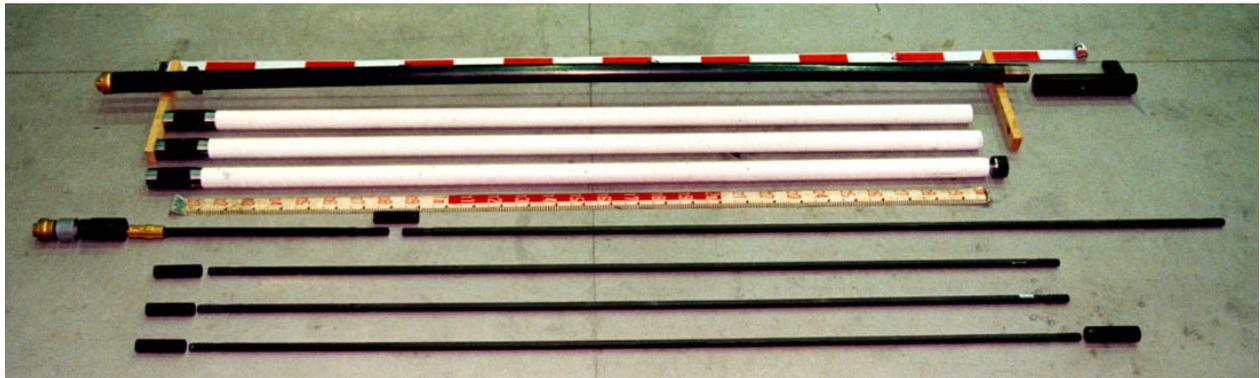


写真 - 1 曲がり GFRP フォアパイリング 使用資機材

表 - 1 各先受材の諸元一覧

項目	従来工法	本工法	
	AGF 鋼管	曲がり鋼管	GFRP 管
外径 (mm)	114.3	76.3	76.3
肉厚 t (mm)	6.0	8.2	8.2
単位重量 (kg/m)	15.7	13.5	3.0
弾性係数 E (N/mm ²)	2.1×10^5	2.1×10^5	2.5×10^4
曲げ剛性 EI (kN・m ²)	6.2×10^2	2.1×10^2	2.6×10
軸剛性 EA (kN)	4.2×10^5	3.6×10^5	4.4×10^4

また、全ての鋼管打設完了後ロッドを逆回転することで、ビットアダプターの機能によりロストビットが脱却される機構となっている。ロストビットは脱却後地山内に残置され回収されないが、ビットアダプターとロッドは回収されて次のさく孔に利用される。

2.2.2 曲がり鋼管

今回の施工では、先頭管に曲げ半径 R=80m の鋼管を採用している。牽引のためのケーシングシューを接続した 1 本長さは 3m である。曲がり鋼管の先端部には、地山内での掘進方向性を高めるために、羽根状のスタビライザーが溶接されている。

2.2.3 ガラス繊維補強プラスチック(GFRP)管

表 - 1 に、GFRP 管および AGF 鋼管の諸元を示す。AGF 鋼管と比較した場合、本工法の曲がり鋼管は曲げ剛性で約 1/3、GFRP 管に至っては曲げ剛性で約 1/24、軸剛性で約 1/10 となっている。これは長尺先受工の効果の 1 つと考えられる、梁材としての機能に伴う地山の变形抑止効果が低減していることは否めない。図 - 4 に示した既存の実験結果³⁾にあるように、先受材の剛性は地表面沈下の抑制効果に影響すると考えられるが、同じ実験では切羽天端の安定効果には先受材剛性はあまり影響し

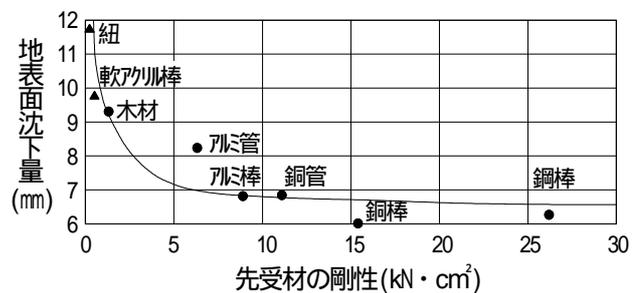


図 - 4 先受材剛性と地表面沈下量の関係³⁾

ないという結果も得られている。GFRP 管は引張強度 600Mpa 以上、せん断強度 100Mpa 以上と、先受材として十分な強度を有している素材ではあるが、AGF 工法と比較すると先受けによる地山の沈下抑制というよりも注入による地盤改良効果に主眼をおいた工法と位置づけられる。

GFRP 管を用いる優位性としては、AGF 鋼管 1 本 (3.5m) あたり約 55kg に対し、GFRP 管の重量は約 10kg である。これは、切羽付近で管を小運搬する、ドリルジャンボのバスケット内で管を接続する、等の作業がトンネル作業員一人で安全かつ容易に行うことが可能となり、施工性の面で明らかに有利となる。また、前述したように先受材打設のための拡幅掘削を省略し、断面内に現れる管を切削しながらトンネルを掘削する方法は、GFRP の特性を生かした施工方法である。

3. 実施工への適用

3.1 施工条件

今回実施工を行った「一般国道 458 号 長谷堂トンネル工事 (発注者: 山形県)」の終点側坑口部では、起点側坑口部における地質条件や施工状況、計測結果等を参考に本工法が採用された。低土被り、軟質地山という施工条件下で、主に切羽天端の崩落防止、地表面沈下の抑制

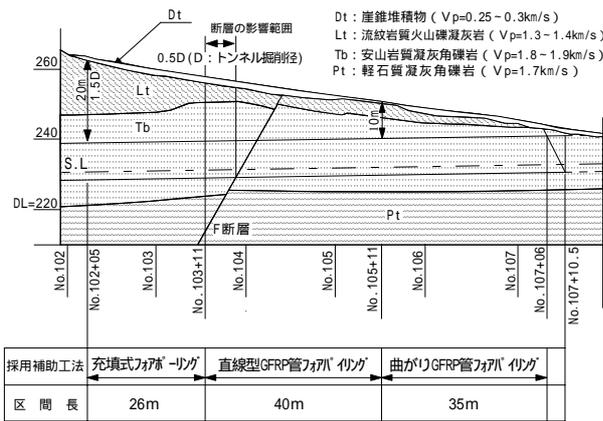


図 - 5 施工箇所付近地質縦断図

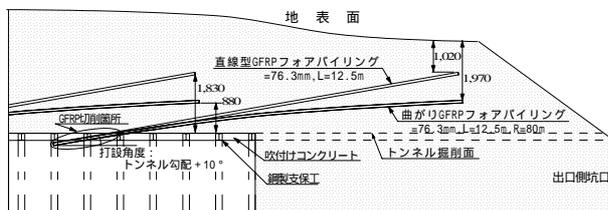


図 - 6 低土被り条件下における本工法と直線型 GFRP 管フォアパイリングとの比較

等の効果が期待された。以下にその施工概要を示す。

3.1.1 地形および地質条件

図 - 5 は、本工法施工箇所付近の地質縦断図に採用された補助工法を併記したものである。終点側坑口部の地形条件としては、土被り 20m 以下の低土被り区間が約 100m 続くことが最大の特徴である。地質条件としては、 $V_p=2.0\text{km/s}$ 以下の風化凝灰角礫岩および $V_p=0.3\text{km/s}$ 程度の崖錐堆積物が主体を成している。事前地質調査報告によると、凝灰角礫岩層には大径の岩礫（転石）が多く含まれていることが予想された。実際に施工時の切羽観察では、切羽面に最大径 1~2m 程度の転石が多く認められている。

図中測点 No.103+11 ~ 105+11 の 40m (5 シフト) 間は、主に切羽天端の安定を目的に直線型 GFRP 管フォアパイリングを施工した。本工法は土被りが 10m 以下となり、地質条件もさらに悪くなる No.105+11 ~ 107+06 の 35m (4 シフト) 間で採用された。これは、切羽天端の地質条件が劣悪になるため極力掘削面の近傍に地山改良域を造成すること、低土被り箇所地表への先受材の抜けだしを防止すること、注入時のバルクヘッドとなる地山部分を厚くすることにより地山改良材の地表へのリークを防止し、注入効果を十分に発揮させること、等を主目的に採用されたものである。図 - 6 に当該地形条件下における本工法と直線型 GFRP 工法との比較図

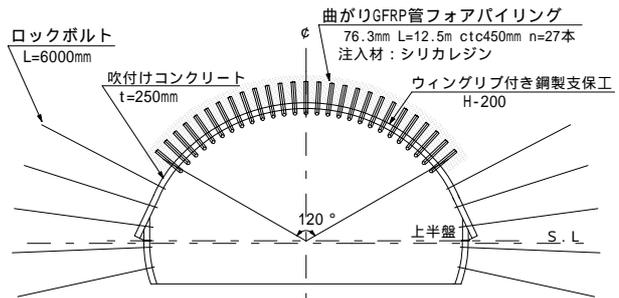


図 - 7 支保パターン図

表 - 2 各工法の平均施工時間

作業項目	従来 AGF 工法	曲がり AGF 工法	本工法
位置セット	3'22"	3'16"	2'07"
打設	14'09"	21'21"	11'27"
鋼管接続	16'17"	35'59"	13'30"
ロッド引抜き	4'23"	12'19"	4'33"
合計	38'11"	72'55"	31'37"

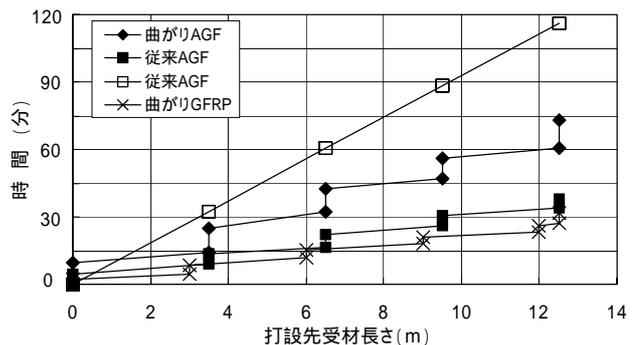


図 - 8 先受材 1 本あたり施工時間の比較

を示す。

3.1.2 打設パターン

図 - 7 に本工法施工箇所の支保パターン図を示す。打設範囲 120° および打設間隔 45cm は AGF 工法で標準パターンとされている値であり、1 断面あたりの打設本数は 27 本となる。地山改良材には、対象地山の種類および期待する注入効果等から判断し、ウレタン系材料であるシリカレジンを採用した。

3.2 施工性の確認

本工法の施工性に関して主に施工サイクルおよび施工出来形の精度に着目し、以下にまとめる。

3.2.1 施工サイクル

本工法と従来型 AGF 工法および曲がり AGF 工法の先受材 1 本あたりの施工サイクルタイムを表 - 2 および図 - 8 に示す。図に示した従来 AGF および曲がり AGF



写真 - 2 曲がり鋼管先端部測量状況

は、既に報告した笠谷トンネル工事における実績²⁾で、均質なシルト岩主体の地質条件下における結果である。既報にあるように、同条件下で施工した両工法に大きな施工時間差（約 34 分）が生じた主要因は、鋼管接続作業にあり、鋼管形状の相違によるノミ下がり差はあまり生じていない。図中、従来 AGF は当社施工トンネルの実績で、強風化花崗岩～マサ土という地質条件下における結果である。作業別に細分したサイクルタイムを示すことができなかつたので、先受材 1 本当たりの平均施工時間を一定勾配で示している。ここで明確に現れているのは、AGF 工法が地質条件によって非常に大きな施工時間差が生じていることである。著者らが実際に施工サイクルを計測した笠谷トンネルでは、さく孔に関するトラブルは皆無であったと言える。

本工法の施工時間は先受材打設および接続作業ともに、施工条件が良好であった笠谷トンネルにおける従来の AGF 工法より早く、全体で 2 割弱（約 7 分）の施工速度の向上が見られた。これは、小口径・軽量管を用いている本工法の特長が発揮された結果であると捉えられる。また、小口径管を用いている本工法では、AGF 工法で顕著に見られた地質条件による施工性の差は生じにくいものと推察される。

さらに、当現場に従事していたトンネル作業員数人に本工法の施工性に関してヒヤリングを行ってみた。トンネル作業員の多くは従来の AGF 工法を施工した経験があったが、本工法では主に軽量の GFRP 管を用いていることにより、運搬や接続時の苦渋作業が大幅に軽減されたという意見が圧倒的多数を占めていた。

3.2.2 施工精度

写真 - 2 に先受材先端部の打設位置測量状況を示す。測量対象は、トンネル貫通後の坑口処理において切土のり面に露出した最終シフトの曲がり鋼管である。露出鋼管の先端部と掘削断面外周部（吹付けコンクリート外縁）との離れを測量し、計画形状と比較した。打設した全て

の鋼管を測量できたわけではないが、図 - 6 に示した計画値（880mm）に対し、1,200～1,500mm と計画形状より伸び、直線形状に近く打設されている管が多く見られた。これは既に報告したように、全ての鋼管に同一曲率で曲げ加工を施す曲がり AGF 工法でほぼ計画通りの打設形状が得られている²⁾ことを考慮すると、後続管に GFRP 直管を使用していることが大きな要因の 1 つだと考えられる。打設精度だけに着目した場合、やはり全ての管を曲げた方が有利であると推察される。本施工では先頭管に R=80m の曲げ加工を施し、先受材全体の曲げ半径も同じ 80m を計画していたが、実測値から推定すると先受材形状は曲げ半径約 120m 程度となった。今後、施工実績を重ねることにより、先受材全体の計画曲げ半径より小さい半径で先頭管を曲げ加工し、相互の関連を把握して施工精度の向上を図るよう努めていく必要があると考える。

4. 計測による効果の評価

ここでは、先受材ひずみ計測および地表面沈下計測の計測結果をもとに、本工法の有する先受け効果について検証する。

4.1 先受材ひずみ計測による効果の検証

4.1.1 計測方法

先受材として新しい素材である GFRP 管に着目し、先受材ひずみ計測を実施した。先受材に発生する応力およびその挙動を把握することにより、本工法の先受け効果と本現場における対策工としての妥当性を検証した。

図 - 9 にひずみ計測箇所を示す。本工法を施工した合計 4 シフト（終点側補助工法第 6～9 シフト）のうち、最初のシフト天端部 1 本の先受材でひずみ計測を実施した。ひずみ計測には高温用箔ひずみゲージを用いた。曲げ・軸ひずみとも計測できるよう、上下にゲージを貼付けた測定管を GFRP 管に挿入し、測定管の内外を充填材（シリカレジン）によって充填する。図 - 10 に GFRP 管と測定管の位置関係を示す。GFRP 管に発生したひずみは充填材を介して測定管に貼付けたひずみゲージにより測

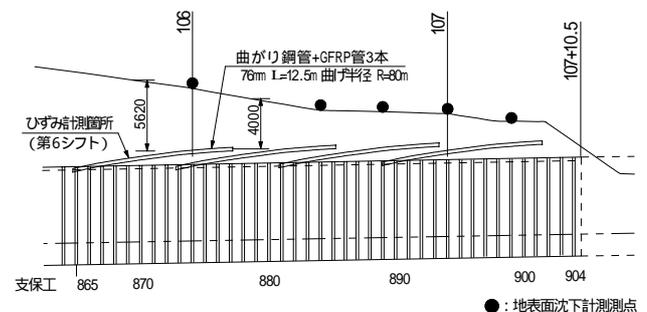


図 - 9 計測位置図

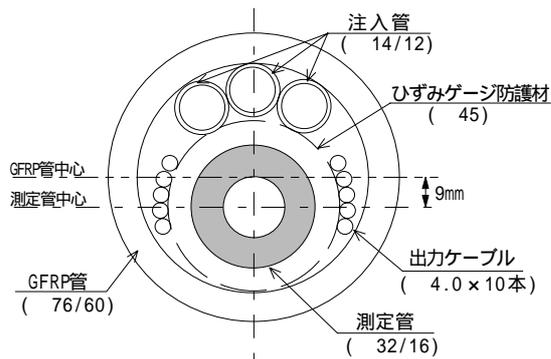


図 - 1 0 GFRP 管と測定管の位置関係

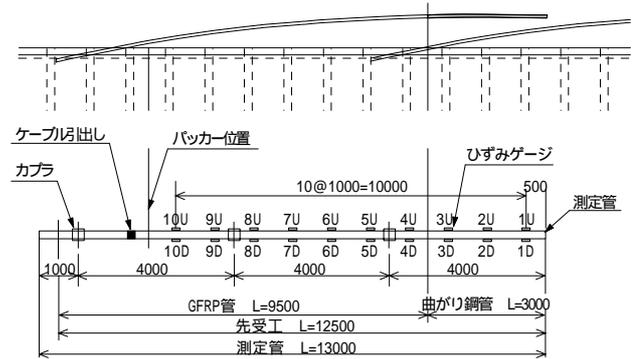


図 - 1 1 ひずみゲージ設置箇所

定される。図 - 1 1 に示すように、測点は鋼管の先端 50cm 離れから 1m ピッチで 10×2 測点設置した。

4.1.2 計測結果

図 - 1 2、1 3 に GFRP 管に発生した軸および曲げ応力の経時変化図を示す。凡例中の数字は、先受材口元からの距離を示している(図 - 1 1 参照)。経時変化図にはトンネルの作業項目を併記してあるが、多くの測点において上半掘削完了時に収束値の 40~60%の応力が発生する。その後、各応力は微増を継続するが徐々に収束に

向かう。その増加量は最大 3N/mm^2 程度で地山の安定などに関して特に大きな問題ではなく、トンネル作業の影響と言うよりは地山のクリープ特性などによるものであると考えられる。

図 - 1 4、1 5 は各応力のトンネル作業毎の変化図を示したものである。横軸に先受材長さを取り、トンネル上半掘削の進捗、下半掘削、インバート掘削等の各トンネル作業別の先受材応力状態を示したものである。各応力の最大値に着目すると、曲げよりも軸引張応力の方が

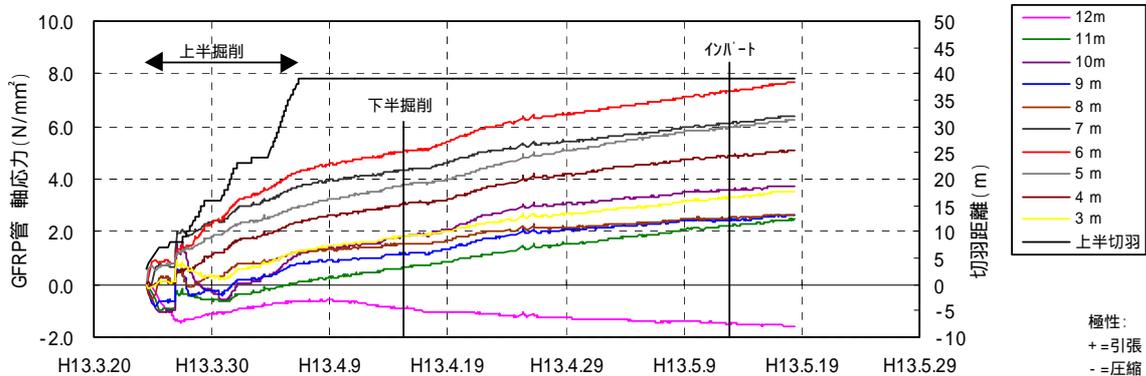


図 - 1 2 先受材軸応力 経時変化図

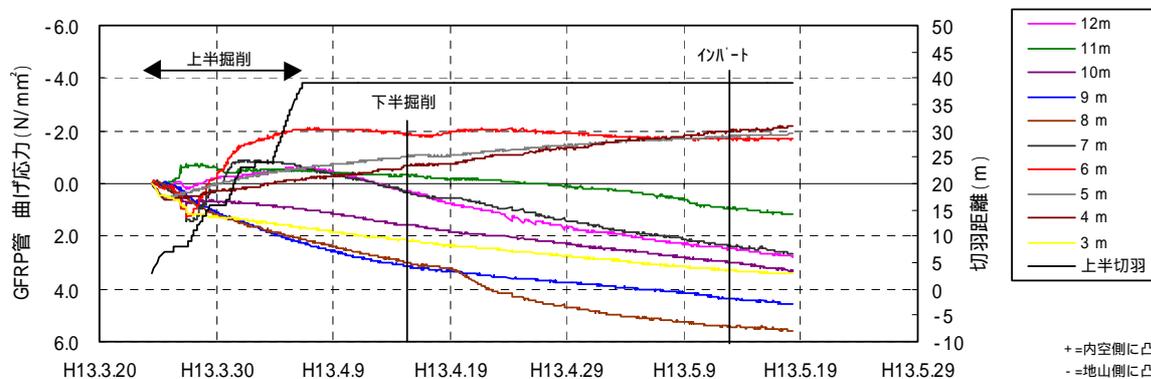


図 - 1 3 先受材曲げ応力 経時変化図

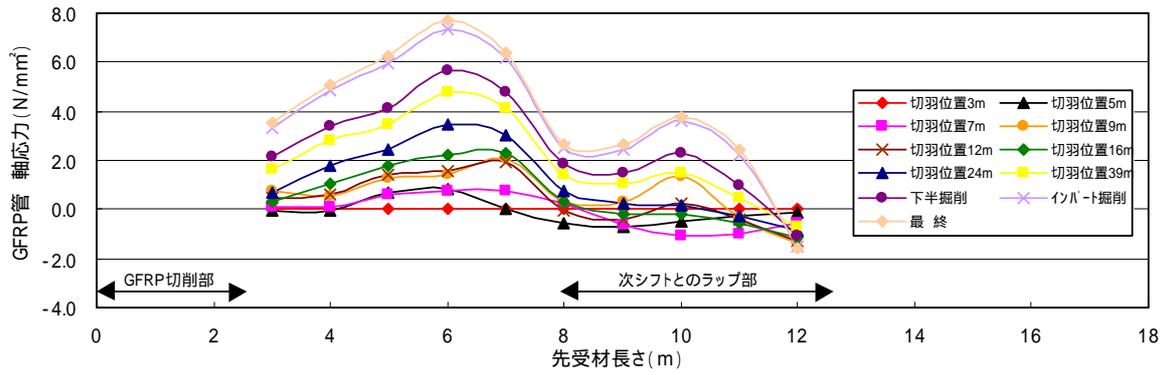


図 - 14 トンネル作業別 先受材軸応力

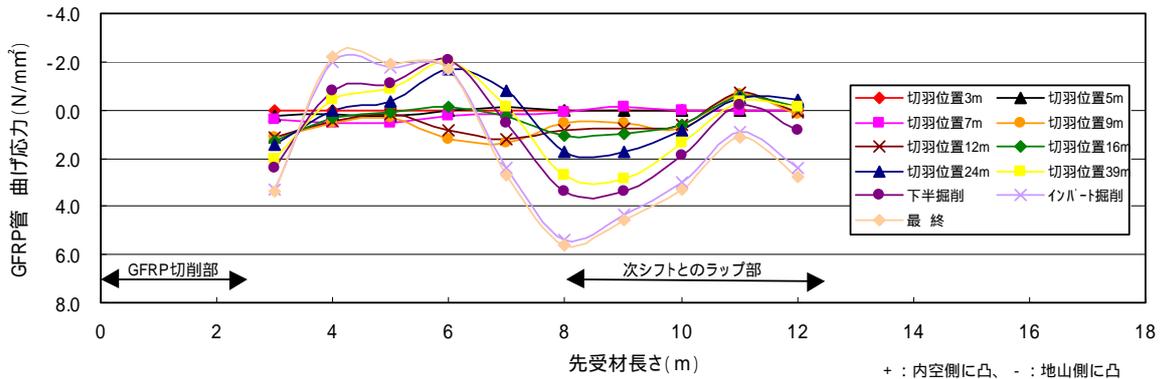


図 - 15 トンネル作業別 先受材曲げ応力

卓越している。これは、これまでの AGF 鋼管による計測実績では見られない現象である。

GFRP 管に発生している曲げのモードに着目すると、先受材長さ 4m および 11m 付近に常に地山側に凸の形状が認められ、これは上半切羽の進行や他作業状況に関わらず同じ傾向である。前者は、直近で GFRP 管口元部が吹付けコンクリート内で固定されている影響であると推察されるが、後者の原因は明確でない。先受材長 11m 付近で転石上に GFRP 管が乗って支点となっていることや、次シフト（第 7シフト）とのラップ部であることが

ら地山改良により周辺地山が改良補強され、その部分の地山反力が強化されたこと等の原因が考えられる。内空側へ凸の最大値は概ね先受材長 8m 付近で常に見られる。

収束時の軸・曲げ成分を合成した最大引張応力は約 10N/mm^2 程度である。この値は、構造的に最も弱いネジ部の公称許容応力の $1/6$ 程度であり、応力的に十分余裕がある。これは、長尺先受けによる前方地山の改良効果がよく発揮され、地山の緩みが十分抑制された結果であると推察される。このことから本坑口部では、従来の AGF 工法のような剛な先受材までは必要でなかったと

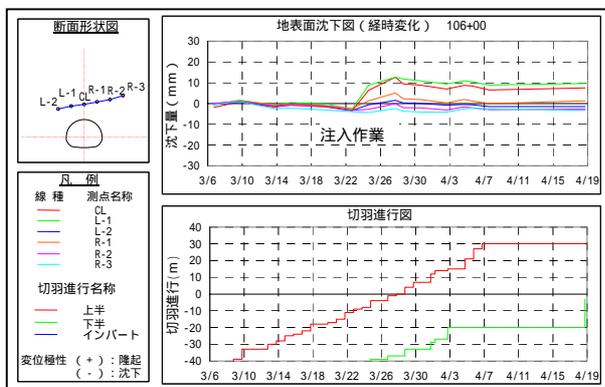


図 - 16 地表面沈下計測結果（測点 106+00）

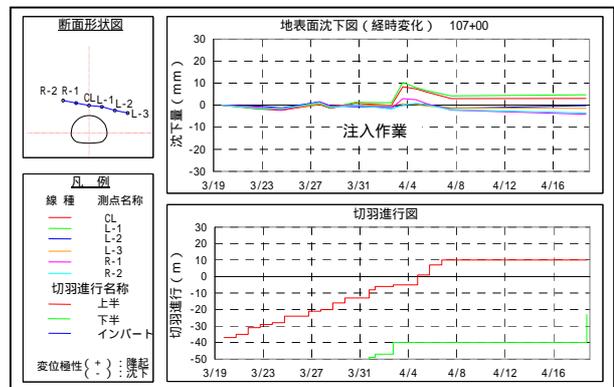


図 - 17 地表面沈下計測結果（測点 107+00）

判断でき、本工法の採用は当該地山に対して妥当であったと考えられる。

4.2 地表面沈下計測による効果の検証

本工法施工区間では、図-9中に示した5測点で三次元光波測距儀による地表面沈下計測を実施した。その中から、図-16、17に測点106および107における地表面沈下の経時変化図を示す。各測点の土被りはそれぞれ約5m、2.5mである。両図とも右上の地表面沈下量図に合わせる形で切羽の進行図を右下に並べてある。図より、切羽が測点後方5~10m付近にある位置から、そのシフトの注入作業による影響で地表面が10mm程度隆起している。その後、上半切羽の測点直下通過（切羽進行図中0の位置）と共に僅かに沈下が見られるが、沈下量は最大でも5mm未満である。沈下範囲に関してはトンネルセンターより5m離れている測点L-1、R-1までしか地表の変位が生じておらず、非常に狭い範囲でしか掘削の影響が現れていない。なお、ここに図示した2点以外の測点でも同様な傾向が認められている。これらのことは、地山改良材により切羽前方地山が確実に改良補強された結果であると考えられ、今回の施工条件では、本工法により地表面沈下を十分抑制することができた。

5.まとめ

本トンネルの終点側坑口部では、適切な補助工法の適用により切羽天端の崩落および地表面沈下を防止し、安全に品質の高いトンネルを構築することができた。今回実現場で初適用した本工法の施工性および効果等に関して、以下のようにまとめられる。

転石が多いという地質条件の下、4シフトの施工で目立った施工トラブルは見られなかった。先受材の打設時間に関しては、良好な施工条件下における従来型AGF工法と比較して2割程度のサイクルタイム縮減を図ることができた。

トンネル作業員へのヒヤリングによると、GFRP製の軽量管を用いることにより、切羽での苦渋作業が大幅に軽減した。上記と併せて施工性に関しては、小口

径・軽量管を用いる本工法の特長を十分に発揮した良好な結果が得られた。

施工精度に関しては、全ての管に曲げ加工を施した曲がりAGF工法と比較して直線状に伸びる傾向が認められた。今後、施工実績を重ねることにより先頭曲がり管の曲げ半径と先受材全体の曲がり形状相互の関係を把握する必要がある。

ひずみ計測により先受材は応力的に余裕があることを確認した。また、地表面沈下はほとんど発生しなかった。これら計測結果から判断し、当該施工条件下における本工法の採用は妥当であったと考えられる。

以上のように、地形・地質的に厳しい施工条件の下、本工法の有する特長を十分に活かし、施工性・効果等の面から良好な施工結果を得ることができた。

著者らは、本工法をこれまでにない適用範囲を補うトンネル補助工法として位置づけているが、その判断は定性的・感覚的なものであり、工法の効果のメカニズムには不明な点が多々ある。今後、各々の施工条件に対して最適な補助工法を選定・提案することを可能とするためにも、数多くの施工実績を重ねて計測データ等を集積・分析し、本工法の有する先受け効果のメカニズムを明らかにしていくことが必要と考えられる。

謝辞

本工事において新工法を適用するにあたり、山形県村山総合支庁の方々には多大なご協力をいただき、心より感謝します。

参考文献

- 1) ジエオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法(AGF工法)実態調査に基づく設計パターン(案)、1997.
- 2) 渡邊ほか：曲がりAGF工法の開発と現場への適用、五洋建設技術年報、Vol.28、pp1~8、1998.
- 3) 武内ほか：長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)の効果に関する研究、土木学会論文集、623/ - 43、pp233~246、1999.6.