

## 曲がりAGF工法の開発と現場への適用

渡邊 伸弘\* 武内 秀木\*  
徳永 豊\*

### 要旨

長尺鋼管フォアパイリング工法(AGF工法)は、鋼管と地盤改良材を用いてトンネル掘削前方地山を改良補強する、NATMにおける補助工法の一つである。今回筆者らが開発した曲がりAGF工法は、地山補強材として打設する鋼管に曲げ半径30mの曲がり鋼管を用いることにより、従来のAGF工法施工時には必要不可欠であったトンネル掘削断面の拡幅を不要とする新しい先受工法である。今回「石川県笠谷トンネル工事」にて、トンネル掘削に伴う地山の緩み防止、近接構造物への影響の低減を目的に本工法を現場に適用し、施工性、施工精度等について確認した。本稿ではその施工概要を報告するとともに、開発過程で行った先受効果確認のための模型実験結果についても報告する。

### 1. まえがき

AGF工法は鋼管と地盤改良材を用いたアンブレラ工法の1つで、トンネル掘削前方地山に地山改良補強体を構築することによって地山の緩み抑制、切羽の安定、地表面沈下抑制等に効果が期待される工法である。施工の合理化、安全性の確保、経済的なトンネル建設を実現させる代表的なトンネル補助工法であり、1992年1月に初施工が行われて以来急速に普及し、1997年9月現在で200件以上にまで施工実績を伸ばしている。しかし、従来のAGF工法では以下に挙げるような施工上の問題点も指摘されている。

先受効果を上げるため4～5°という小さな打設角度で鋼管を打設する必要があり、打設基地の数m手前からトンネル断面の拡幅(図-1参照)が必要となる。トンネル断面の拡幅に伴い、掘削土量や吹付けコンクリート、覆工コンクリート、防水シート等の各種使用材料が増加する。

トンネル断面の拡幅のために、拡大鋼製支保工が必要となり、地山急変時には対応が遅れる。

従来のAGF工法から派生し、トンネル掘削断面の拡幅が不要なAGF工法も適用されているが、鋼管の打設角度が大きくなり、掘削面と鋼管の離れが増大するといった問題点がある。そこで筆者らはR=30mの弧状の鋼管を用いることにより掘削断面の拡幅が不要でしかも掘削面と鋼管の離れが増大しない曲がりAGF工法を開発し、1997年7月に「石川県 笠谷トンネル工事」にて初めて適用した。本稿では同工法の開発の詳細と現場での施工概要について述べる。

### 2. 工法の特長

曲がりAGF工法の特長として以下の点が挙げられる。

掘削断面の拡幅がなくなるため、掘削土量や各種使用材料が低減され、経済的に有利である。

断面拡幅用の鋼製支保工が不要なので、地山急変時に即座に対応できる。

弧状の鋼管を用いることで掘削面により近い位置に地山改良補強体を構築することができる。

覆工コンクリート厚さが一定になり、覆工体の品質の向上が期待できる。

図-1に両AGF工法の施工概念図を示す。

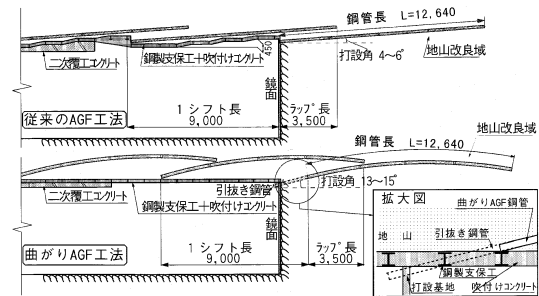


図-1 AGF工法の施工概念図

### 3. 開発の経緯

#### 3.1 試験施工

今回の施工に先立ち、数現場の下半切羽面において曲がり鋼管の打設試験施工を行った。試験施工では鋼管の曲がり方向を鉛直・水平の各方向とし、鋼管出来形、打設時間等を測定した。西神自動車道 高塚山トンネルにおける試験施工では

削孔ビットと接続されているロッドが鋼管と“競る”ことによって鋼管の曲がり方向に沿ってビットが推進することができずに、鋼管の出来形が計画形状よりも直線に近い形状になった。

\* 技術研究所

曲がり方向を水平にして打設した鋼管が接続部で回転することにより上向きの曲がりになり、打設中に先頭管が上半盤から現れた。

等、打設精度に関して満足する結果が得られなかった。そこで各削孔資機材等にいくつかの改良を加えた後、石川県 笠谷トンネル工事にて再度試みた試験施工では所定の形状に鋼管が打設され、大幅なノミ下がりも見られず良好な施工精度と施工性が確認された。図 - 2 にその際の鋼管出来形図を示す。

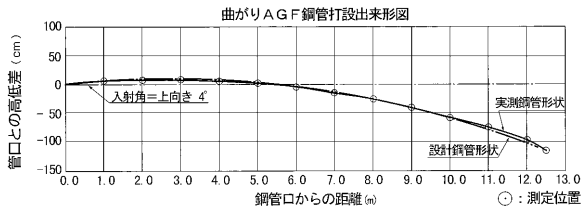


図 - 2 試験施工における打設鋼管出来形図

### 3.2 使用資機材の改良

前述したように数回にわたる鋼管打設の試験施工を経て、施工精度向上のために曲がりAGF工法の使用資機材として従来のものに以下のような改良を加えた。

#### 3.2.1 正確な掘進性を得るための改良

##### 1) ガイドアダプター

試験施工ではロッドと鋼管が競りながら削孔していくことによって計画形状よりも直線に近い鋼管出来形が確認された。所定の形状を得るためには曲がり鋼管の接線方向にビットが掘進していく必要があった。そこで弧状の鋼管内でロッドを湾曲させ、PCDビットが常に鋼管の接線方向へ向くための補助具としてロッド・ビット間にガイドアダプター(写真-1)を設置した。装置の有無による削孔システムの相違を図-3に示す。

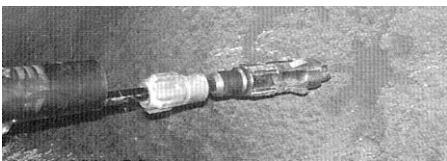


写真 - 1 PCDビットおよびガイドアダプター

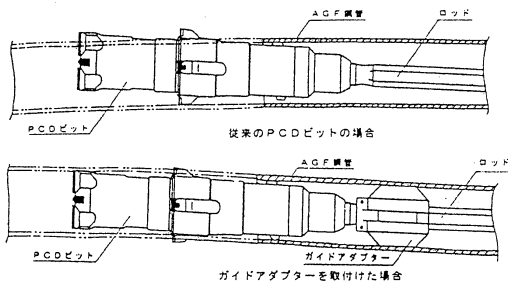


図 - 3 削孔システムの相違

##### 2) スタビライザー

先頭管の掘進方向性を向上させるため、先頭管の先端部に薄い羽根状の鋼板(スタビライザー:写真-2)を溶接した。

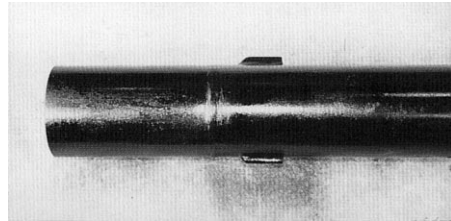


写真 - 2 スタビライザー

#### 3.2.2 鋼管の回転防止のための改良

曲がりAGF工法では、鋼管を打設する際の所定の曲がり方向の確保が重要であるので、ドリフター側のガイドセル上および接続部での鋼管の回転によるズレを防止する必要がある。

##### 1) 回転防止装置

各鋼管をジャンボのドリフター部にセットする際、回転防止装置(ドリフター側:写真-3)で保護鋼管側の突起(写真-4)を挟み込んで固定し、ガイドセル上での鋼管の回転を防止する。

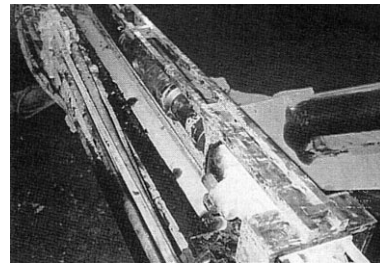


写真 - 3 回転防止装置(ドリフター側)

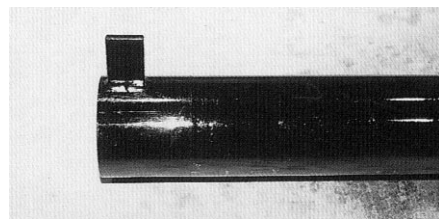


写真 - 4 回転防止装置(保護鋼管側)

##### 2) 鋼管接続部ズレ止め

曲がりAGF工法では鋼管相互の接続にワンタッチ方式を採用しているため、接続部において鋼管相互の回転によるズレを防止するため凹凸状のずれ止め(写真-5)を設置した。

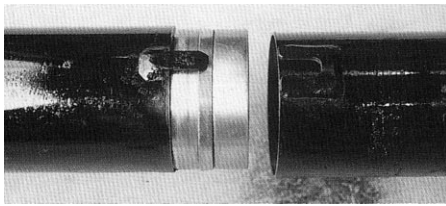


写真 - 5 鋼管接続部ズレ止め

4. 実施工

本施工を行った「石川県 笠谷トンネル工事」では掘削に伴う地山の緩み防止、近接構造物への影響低減を目的にAGF工法が補助工法として採用された。そこで、切羽断面の半分で曲がりAGF工法の施工を提案し、承諾を得た。以下にその施工概要を示す。

4.1 地質および地形条件

本工法施工箇所付近（起点側坑口部）の地質、地形条件および地質縦断面図は以下の通りである。

1) 地質条件

- 切羽天端部・・・崩積土層 ( $V_p=0.3 \sim 0.4\text{km/s}$ )
- 掘削面・・・シルト岩 ( $V_p=1.2 \sim 1.3\text{km/s}$ )

2) 地形条件

- 既設トンネルおよび道路に近接
- 土被りが非常に小さい(最大4m)

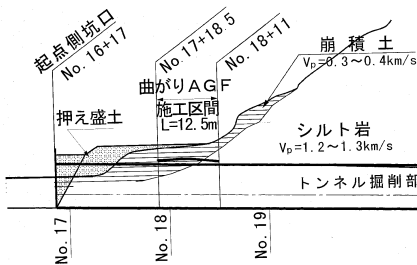


図 - 4 起点側坑口部縦断面図

4.2 打設条件

両AGF工法の打設基地である、18+11における支保パターン図を図-5に示す。

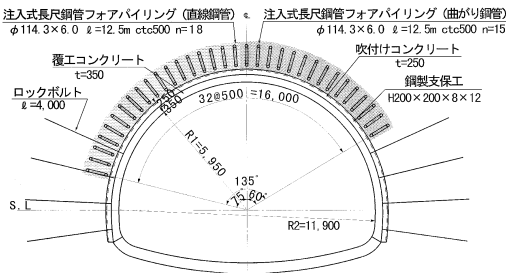


図 - 5 支保パターン図 (18+11)

打設条件

- 打設位置・・・STA. 18+11 ~ 17+18.5 (L=12.5m)
- 打設本数・・・断面左側 18本(直線AGF鋼管)
- 右側 15本(曲がりAGF鋼管)
- 打設範囲・・・断面左側 トンネル中心より75°
- 右側 トンネル中心より60°
- 打設ピッチ・・・ctc50cm 断面拡幅・・・45cm
- 打設角度・・・直線鋼管 5.5° 曲がり鋼管 11.0°

本施工では、上述したように断面の左半分で従来のAGF工法を採用しているため、トンネル断面を拡幅している。よって、通常曲がり鋼管を掘削断面外に押し込むために用いる引抜き鋼管は使用していない。

4.3 使用資機材

1) 曲がりAGF鋼管

曲がりAGF鋼管(写真-6)は従来のAGF鋼管にR=30mの曲げ加工を施したものである。4本の鋼管を接続し、1シフト長12.5mになった時の曲げ半径は、加工時のつかみ代を含めてR 40m程度である。鋼管形状の詳細を図-6に示す。

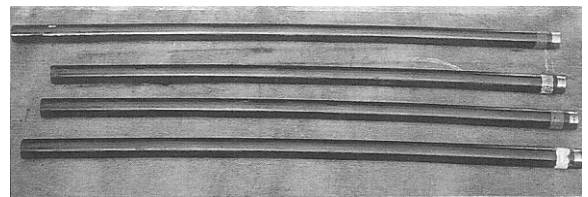


写真 - 6 曲がりAGF鋼管

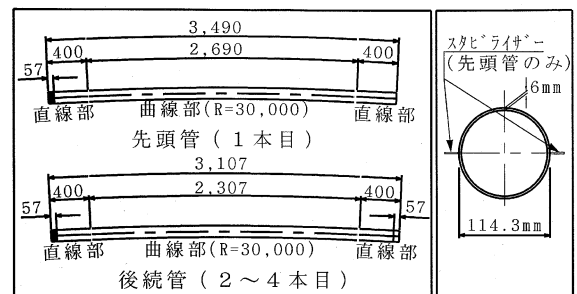


図 - 6 曲がりAGF鋼管形状詳細図

2) 削孔用資材

3.2で述べたように試験施工を経て、本工法用に改良を加えているが、ガイドアダプターと回転防止装置以外は、基本的には従来のAGF工法で使用しているものを準用できる。

4.4 施工

図-7に本施工の施工フローを示す。施工法は、準備工および注入工(注入材:セメントミルク 700g/本)



に関しては両工法共通であるが、打設工において曲がりAGF工法特有の注意点が有り、施工の際には以下の事項に留意するよう徹底した。

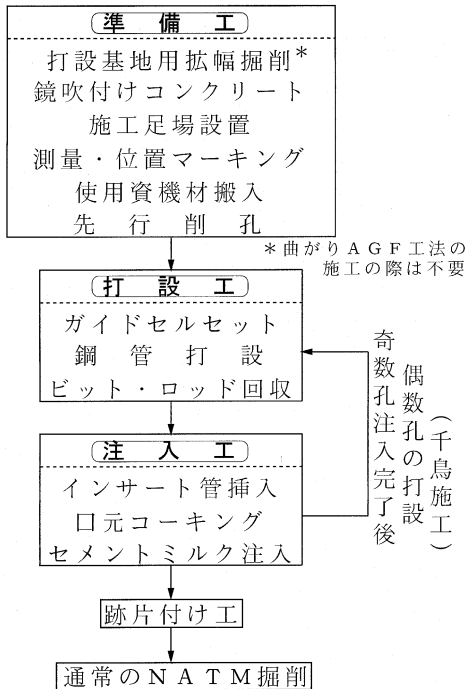


図 - 7 AGF工法施工フロー図

1) 鋼管のセット

各鋼管をガイドセル上にセットする際、回転防止装置の噛み合いを確認してから打撃を開始する。

2) 打設角度管理

鋼管の打設角の精度は所定の出来形の確保のために非常に重要であり、ドリルジャンボのガイドセルの角度保持には慎重な対応が必要である。曲がり鋼管はその形状の性格上、打設角度によっては先頭管のトンネル掘削断面への抜け出し、隣の鋼管との接触、前後のシフトの鋼管との接触等の事態が起こる。今回の施工では図 - 8 に示すように曲がり鋼管先端部と鋼製支保工天端との離れが200mmになるように打設角度を設定している。施工時の管理方法は、打設位置手前3基の鋼製支保工とガイドセルとの距離(図 - 8 参照)に加工した定規を横断方向打設ピッチのマーキングに合わせてあてがう。その際定規の傾きは、SLとトンネル中心の交点方向に向くように作業員が目視により誘導し、縦横断とも所定の方向性を得た時点でガイドセルを定規に沿わせ打撃を開始する。

3) 鋼管接続

接続の際には接続部ズレ止めにて前後の鋼管が確実に固定されたことを確認して打撃を加える。

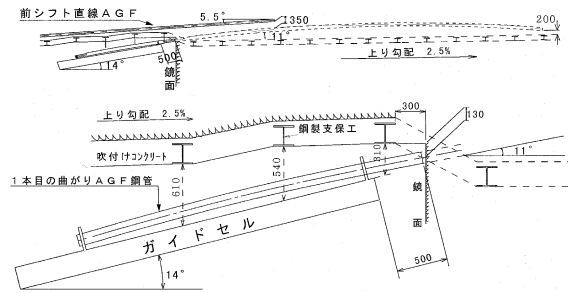


図 - 8 打設角度設定方法



写真 - 7 曲がりAGF鋼管打設状況

4.5 計測

本施工では以下に示す計測を行った。

1) 打設時間

各AGF工法の打設時間を計測し比較する。

2) 出来形確認

水平傾斜計による形状確認

打設完了後、曲がり鋼管(20)内に水平傾斜計を挿入し、管口から50cmピッチで測定器の傾斜角から測点間の高低差を算出し、各値を累計することにより打設鋼管形状を確認する。

三次元計測による先端位置確認

三次元計測システムを用いて打設完了後鋼管管口を測量し、その絶対位置をおさえる。さらに、12.5m掘削後鋼管先端部を掘り出し、その絶対位置および鋼製支保工との離れを同システムによって測量する。

4.5.1 打設時間

AGF工法および曲がりAGF工法の平均施工時間を表 - 1 および図 - 9 に示す。

表 - 1 各AGF工法の平均施工時間

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

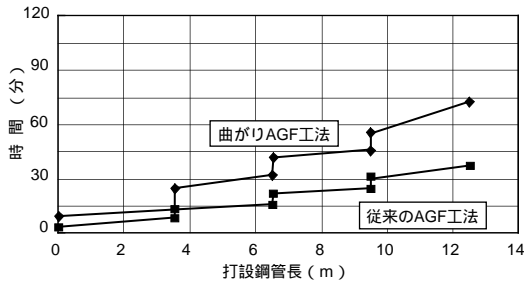


図 - 9 平均施工時間の比較

表 - 1 および図 - 9 より曲がりAGF工法で多くの施工時間が費やされているが、その差の原因として次のようなことが考えられる。

両AGF工法の施工時間の差(34分)の主要因は鋼管の接続作業にある。施工の不慣れもあり、曲がりAGF鋼管の接続部ズレ止めのはめ込みに時間を費やしている。鋼管接続作業の効率化を図る必要がある。鋼管の打設時間(削孔時間)に関しては、1本当たり1~2分の差であり、鋼管形状の相違によるノミ下ガリの差は少なかった。

ビット・ロッドの回収作業に関しては、曲がり鋼管の形状の性格上、より大きな引抜き力が必要になる。人力による引抜きでは多くの時間を費やすが、ドリフターを利用した引抜き作業に慣れれば差は解消されると思われる。

各AGF工法の施工時間に関する結論としては、純粋な鋼管打設時間に大差はなく、施工に対する慣れや接続部ズレ止めの改良により曲がりAGF工法の施工サイクルの短縮は今後十分可能であり、従来のAGF工法と同等の施工サイクルまで向上させ得るものと考えられる。

4.5.2 鋼管出来形

水平傾斜計による打設鋼管形状測定および掘出し測量による先端部の位置測定によって作成した曲がり鋼管の打設出来形図を図 - 10 に示す。

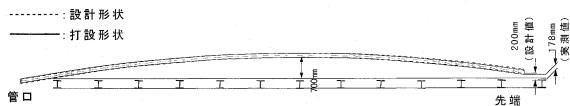


図 - 10 曲がり鋼管打設出来形図

曲がり鋼管の打設計画形状として、鋼管先端部の掘削断面からの離れを20cm、中間部における最大離れを70cmと設定したが、計測結果によるとほぼ計画通りの打設形状が得られ、当地質条件下での曲がりAGF工法の良好な打設精度が確認された。

5. AGF工法の先受効果確認のための模型実験

5.1 実験目的

試験施工および本施工は曲がりAGF鋼管が実際地山に打設が可能か、打設計画形状が確保できるかという施工性の確認に重点が置かれていた。その結果、限られた地質条件下ではあるが、本工法の良好な施工性、施工精度が確認できた。ここでは、効果の面での工法間の比較を目的に、AGF工法の模型実験を行った。AGF工法には一般的に図 - 11 に示すような効果が期待されている。本実験ではこれらの効果に対応する各種計測を行い、曲がりAGF工法と従来のAGF工法において、どの程度効果の差が生じるか確認する。

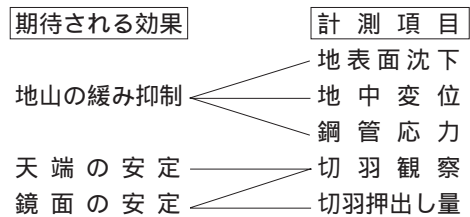


図 - 11 AGF工法の効果と確認のための計測項目

5.2 実験模型

1) 土槽

本実験に使用した土槽を写真 - 8 に示す。土槽はアクリル板にて作成して半割断面とし、側面から地盤の挙動が目視できるようにした。トンネル掘削部は1掘削長(4cm)毎にスリットを入れて取り外し可能になっており、側面から掘削する。トンネル形状は半円形で、縮尺は1/25を想定して半径20cmとし、土被りには地表面の沈下が確実に現れる範囲として0.5D(D:トンネル直径)を採用した。

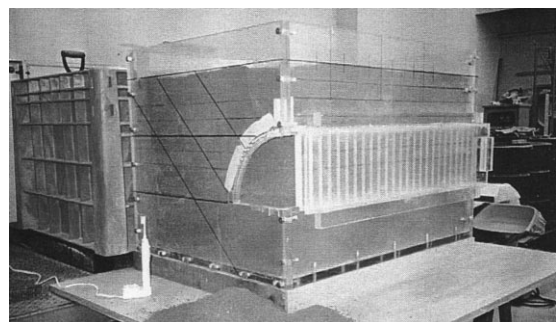


写真 - 8 実験土槽

2) 地盤

地盤材料には、粒度分布の良好なマサ土を用いた。模擬地盤は切羽自立限界地山を想定して地盤の締固めは行

わなかった。土槽天端に設置したふるいを通して一定高さから自由落下させ、一様な地盤を作成した。実験終了後毎回、模型地盤の単位体積重量( )および含水比( )の試験を行い、 $\gamma = 1.40 \sim 1.42\text{g/cm}^3$ 、 $w = 4.20\%$ 程度で管理した。

3) 支保工

鋼製支保工と吹付けコンクリートはモデル化が難しく、今回はAGF鋼管の違いによる先受け効果の比較を行うという観点から、以下のように実際と比較して十分に柔らかいものでモデル化した。

鋼製支保工:溶接金網 B=4cm, 6.5mmメッシュ  
吹付けコンクリート:スプレー接着剤 SS333

4) 地山改良補強部

AGF鋼管の実際の寸法および剛性から縮尺(1/25)を考慮して計算し、AGF鋼管のモデルとして銅棒を採用した。表-2に実物とモデル化した鋼管の諸元を示す。

表-2 AGF鋼管諸元

	実際の鋼管	モデル(銅棒)
形状	円形管	円形棒
延長(L)	12.5m	50cm
外径( $\phi$ )	114.3mm	4mm
厚さ(t)	6mm	—
剛性(EI)	$6.3 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$	$1508.4 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$
曲げ半径	30m	1.2m

地盤改良材のモデルにはスプレー接着剤(SS333)を用いた。地盤内に設置した鋼管の間を均一に吹付けて粒子を結合させ、改良補強体とする。強度差がないように、吹付け時間・放置時間を各実験で一定にした。

5.3 実験内容

1) 実験ケース

AGF工法の先受け効果の確認および従来のAGF工法と曲がりAGF工法の工法間の比較のため、実験は以下の3ケースとし、各ケース3回づつ実験を行った。

case 1: 支保工

case 2: 支保工 + 従来のAGF工法

case 3: 支保工 + 曲がりAGF工法

2) 計測項目

表-3に計測項目を、図-12、13に計測器配置図を示す。

表-3 実施計測項目

計測項目	設置数	備考
地表面沈下量	9	縦断方向6,横断方向3点
地中変位量	3	
切羽押し量	1	
鋼管曲げ歪み	1	天端部鋼管に設置

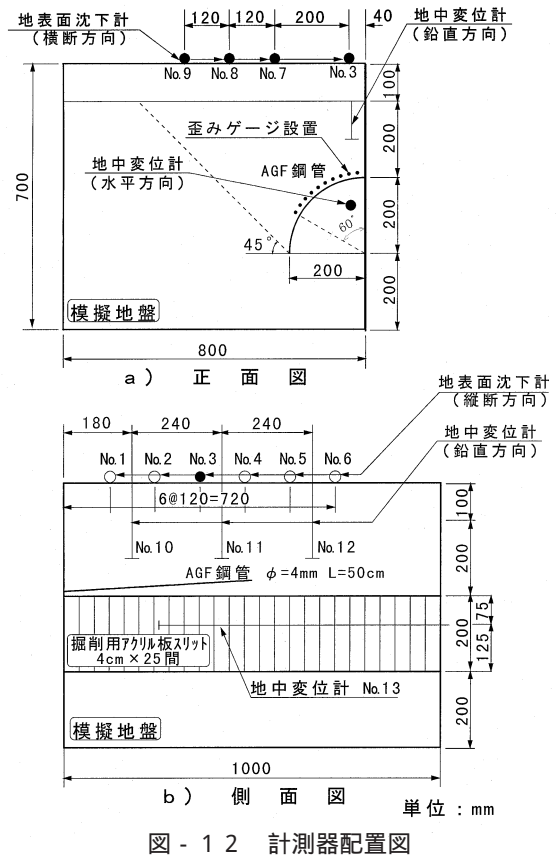


図-12 計測器配置図



図-13 歪みゲージ設置箇所

3) 実験フロー

実験は以下のような流れで行う。

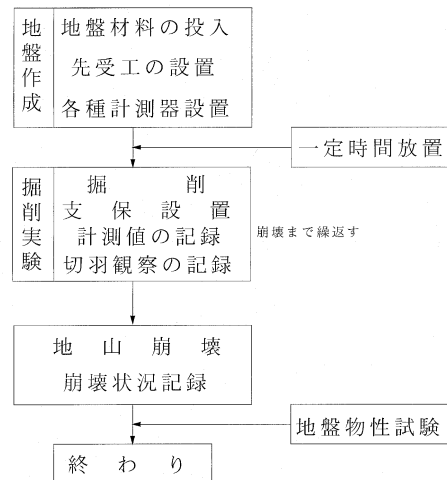


図-14 AGF工法模型実験フロー図

5.4 実験結果

1) 縦断方向地表面沈下

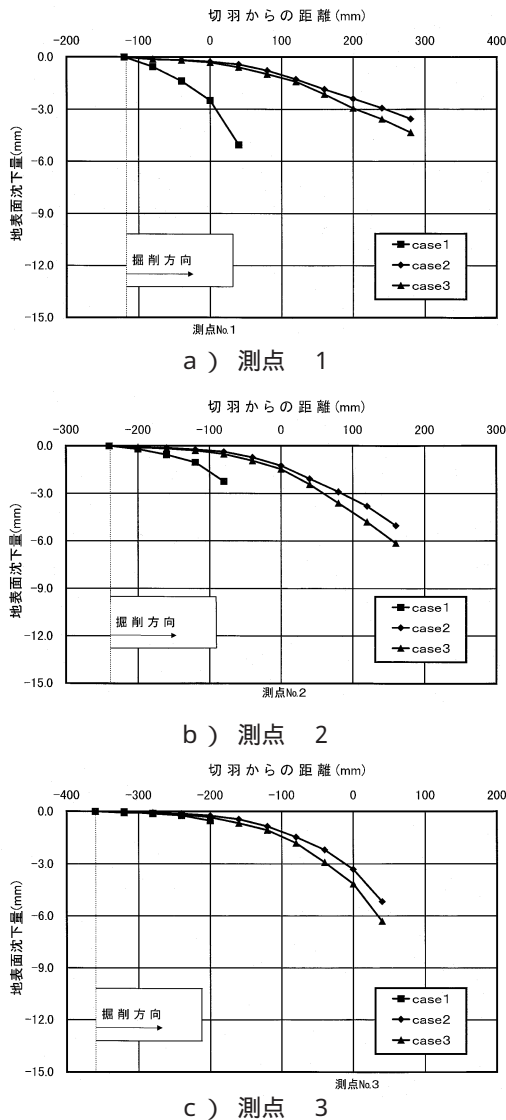


図 - 1 5 各測点における地表面沈下経距変化図

図 - 1 5 にトンネル縦断方向の地表面沈下計測結果を示す。グラフは、各測点における沈下量と切羽距離の関係を表す経距変化図である。計測値は1間(40mm)掘削毎に記録し、3回の実験の平均値である。なお、測点 4 ~ 6 は沈下量がわずかであるため省略する。図より、A G F 工法を施工することによる沈下抑制効果の向上は明らかである。case1(支保工だけ)では4 ~ 6間目掘削時に緩み荷重に耐えられずに地山が崩壊しているのに対し、case2(従来のA G F) およびCASE3(曲がりA G F)においては先受長が短くなる11 ~ 12間程度まで掘削が継続できる。崩壊直前の沈下量を比較するとcase1の値はcase2,3の5 ~ 10倍を示している。また、case1では崩壊

が早く起こってしまうため、切羽直上の計測が可能なのは測点 1だけであるが、case2,3の先行沈下量が0.3mm程度であるのに対してcase1では2.5mmを示しており、A G F 工法の先行沈下抑制効果が大いに発揮されていると言える。case2とcase3に関しては、ほぼ同等の効果と考える。図では8 ~ 9間目の掘削から徐々にcase3の沈下量が増大しているが、この近辺は先受長10cm程度と効果を発揮するために十分の長さではなく、掘削作業時のわずかな変化(天端部地山の小規模な肌落ち等)により地山の緩みが増長され易いことが切羽観察でも記録されている。この区間ではcase2,3共に1掘削長あたりの沈下量が増大しており、工法に関わらず先受効果の低下が計測値から読み取れる。図には示されていないが、case2の沈下量が大きい場合もあり、計測値を比較するには不確定な要素が多い区間と言える。また、実際の施工では1シフト当たりの掘削長さ9m(ラップ長さ3.5m)が標準パターンとなっており、一般的に先端部3.5mには先受効果を期待していない。case2と3で計測値に差が出始めるのはまさにこの区間であり、以上から総合的に考えて曲がりA G F 工法は従来のA G F 工法と同等の沈下抑制効果があると判断する。逆に言うと、実施工において3.5m程度のラップ長を確保することは妥当であり、ラップのない最終シフトに関しては余裕のある設計(地山の良好な部分まで施工する、先端部でフォアポーリングをラップの代用として施工する等)が求められ、施工時には十分注意を払う必要があることが実験結果から理解できる。

2) 横断方向地表面沈下

トンネル横断方向の地表面沈下計測結果を図 - 1 6 に示す。計測位置は図 - 1 2 に示すように坑口から360mmであるが、case1では比較できるような計測値が記録される前に崩壊が起こるため図から省く。計測結果は8間目掘削時(計測位置より縦断的に40mm手前)および10間目掘削時(同様に40mm奥)のものを示す。測点 3にて差が見られるが、縦断方向の計測結果に対する考察で述べたとおりである。他測点で比較すると両caseで横断方向の沈下抑制効果(沈下範囲の広さ)に大差は見られない。

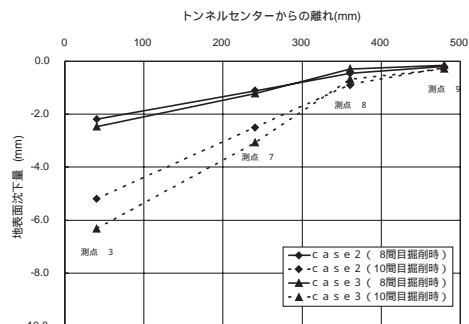
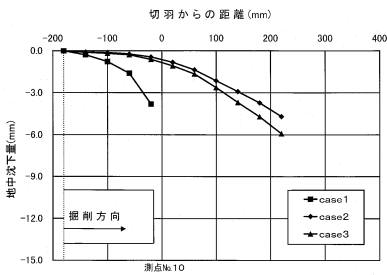


図 - 1 6 横断方向地表面沈下図

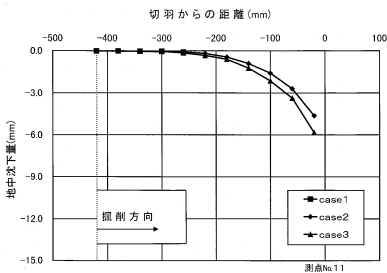


3) 地中変位測定 (鉛直方向、水平方向)

地中沈下計測結果(測点 10,11)を図 - 17 に示す。地表面沈下と同様に、鋼管先端部にて case3 で沈下量の増加が見られる。図 - 18 は切羽押し出し量計測の結果である。case1 では地山崩壊のため、計測位置直前での押し出し量を図から確認することができないが、計測位置 -130mm 付近と、他ケースより1掘削長手前から押し出し変位が発現しており、AGF工法の施工により切羽安定性が向上しているのが読み取れる。



a) 測点 10



b) 測点 11

図 - 17 地中変位 (鉛直方向) 経距変化図

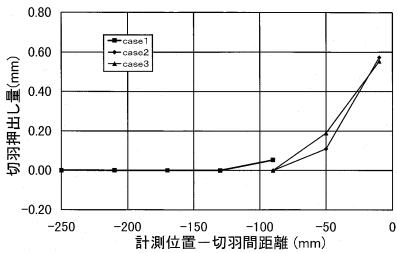


図 - 18 切羽押し出し量計測結果

4) 鋼管歪み測定

鋼管耐力の比較を目的に鋼管断面力を、地山の緩みの程度の比較を目的に鋼管の変形形状(たわみ)をそれぞれ確認するために鋼管の曲げ歪み測定を行った。その中から、両caseの1回目の実験における計測結果を図 - 19、20 に示す。曲げ歪みの値から鋼管の断面力およびたわみを計算したものであるが、case3の方がやや大きな値となった。曲げモーメント、沈下量ともその最大値は切羽面やや手前に生じる。最大曲げモーメントは正の値を取

り、鋼管による先受効果が認められる。10間目掘削時の鋼管たわみ図では先端部の沈下が見られ、本実験の条件下で10cmの先受長では十分に先受効果が発揮されないことを示している。

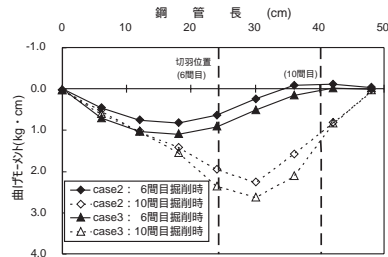


図 - 19 鋼管曲げモーメント図

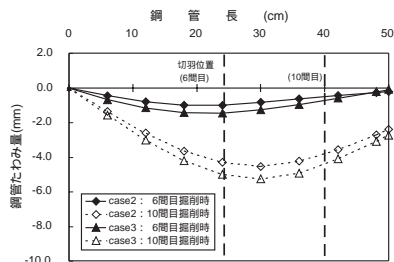


図 - 20 鋼管たわみ図

6. まとめ

曲がりAGF工法の現場施工および模型実験を通じ、以下の事項が確認された。

比較的均一なシルト岩という地質条件下で本工法の良好な施工性、施工精度が確認できた。

本工法の施工時間短縮には鋼管接続作業の効率化が必要である。

本工法は変位抑制、切羽の安定化に対し従来のAGF工法とほぼ同等の効果を発揮する。

今後の課題として

各種地盤条件下で施工を重ね、本工法の適用地山を確認する。

接続作業効率化のために、機能性は損わず作業性だけを向上させるような形状にズレ止めを改良する。

等が挙げられる。今後、実績を重ねながら課題を解決し、さらなる工法の改良、改善に努める所存である。なお、本工法は東邦金属(株)との共同開発によるものである。

謝辞

本工事を施工するにあたり、石川県 津幡土木事務所の方々に多大なるご協力を頂き、ここに深く感謝の意を表します。