

高強度材料により軽量化した 長尺鋼管先受工の開発

伊藤 哲¹・斎藤 有佐²・亀山 元則³・坂口 穂積⁴・阿形 淳⁵

¹正会員 株式会社大林組 生産技術本部トンネル技術部（〒108-8502 東京都港区港南二丁目 15-2）

E-mail: ito.s@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 生産技術本部トンネル技術部（〒108-8502 東京都港区港南二丁目 15-2）

E-mail: saito.arisa@obayashi.co.jp

³株式会社亀山（〒832-0081 福岡県柳川市西浜武 978-1）

E-mail: kameyama.m@kamenet.co.jp

⁴株式会社亀山（〒832-0081 福岡県柳川市西浜武 978-1）

E-mail: sakaguchi.h@kamenet.co.jp

⁵日本製鉄株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所（〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1）

E-mail: agata.3nf.jun@jp.nipponsteel.com

山岳トンネル工事では，長尺鋼管先受工法（以下，AGF 工法と記す）は標準的な補助工法として，広く施工されている．汎用の油圧削岩機で施工できることが理由の一つと思われる．一方で，一般的な AGF 工法では，外径 114.3mm，厚さ 6mm の鋼管約 12m をトンネル頂部付近に打設するが，3m の鋼管 1 本あたりの重量が約 50kg あり，鋼管の運搬と高所での接続作業において作業員の負担が大きいたことが課題であった．そこで，高強度材料を用いて軽量化した新しい鋼管を開発した．従来の AGF 鋼管と同等の強度を保持しながら，作業員の負担を軽減するものである．現場に適用し，従来と軽量鋼管を用いた場合の作業時間を比較した．軽量鋼管を用いた場合，作業時間が約 10%短縮し，生産性向上に寄与することを確認した．

Key Words: all ground fastening method, forepiling, high strength, thin pipe, productivity improvement

1. はじめに

山岳トンネル工事では，切羽天井部の岩盤が不安定な場合に AGF 工法を補助工法として施工し，トンネルの前方および上部からの崩落を防止する．標準的な AGF 工法は，外径φ114.3mm，厚さ t=6mm の鋼管を，掘削作業に先行してトンネル頂部から 120° の範囲に打込み，岩盤を補強する．打込み場所ごとに，長さ約 3m の鋼管を 4 本つないで約 12m を打込むが，3m の鋼管 1 本あたりの重量は 50kg もあり，作業員の大きな負担になっていた．

そこで，自動車業界などで適用が拡大している高強度材料を使用して，AGF に用いる鋼管を薄肉・軽量化するとともに，従来と同等の曲げ強度と引張強度を有する新たな鋼管を開発した¹⁾．鋼管を大幅に軽量化させることで，作業員の負荷を軽減し，生産性の向上を図った．

2. 開発した軽量鋼管の概要

(1) 高強度材料の採用による薄肉化

従来の AGF 鋼管の材質が STK400（引張強さ 400N/mm²）であるのに対し，新たに開発した鋼管（以下，軽量鋼管と記す）には高強度材料 NSP-HT2-TK（日本製鉄の社内規格，引張強さ 730N/mm²）を採用した．鋼管の厚さが従来の 6mm から 3.5mm となり，3m の鋼管 1 本あたりの重量は 50kg から 29.4kg に，約 60%に軽量化した．写真-1 に従来の AGF 鋼管と軽量鋼管の断面形状の比較を示す．

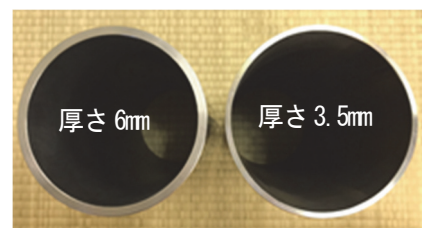


写真-1 従来の鋼管（左）と軽量鋼管（右）の断面比較

(2) 継手部にテーパーねじを採用

鋼管の薄肉化により継手部も薄肉化するため、その強度低下が課題である。継手部にテーパーねじを採用して、継手部の引張強度と曲げ強度を確保した。テーパーねじは鋼管に直接ねじを切り、加工をする。

本鋼管の開発の前提として、薄肉化により弱点となる継手部においても、従来の AGF 鋼管の素材部の曲げ強度を有することを目標とする。また、AGF 鋼管は施工中に削岩機の打撃により継手部が損傷して削孔不能となる事例もあるため、引張強度も従来と同等を目標とする。

ここで、従来の AGF 鋼管の曲げ強度は、材質 STK400 の降伏強度から算出した曲げモーメントと定義し、 $12.3\text{kN}\cdot\text{m}$ とした。従来鋼管の引張強度も同様に STK400 の降伏強度から求めた引張荷重と定義し、 480kN とした。

3. 室内試験結果

開発した軽量鋼管の試験体を使って、室内試験を行った。曲げ試験と引張試験の2種類である。それぞれの結果を以下に示す。

(1) 曲げ試験

図-1 に曲げ試験の模式図、写真-2 に試験の実施状況を示す。継手部が試験体の支間中央になるよう配置して、载荷試験機により試験体に曲げ荷重を与えた。最大の曲げモーメントを示した試験結果の一覧を表-1、グラフを図-2 に示す。試験のケースは、製作日が異なる3種類の

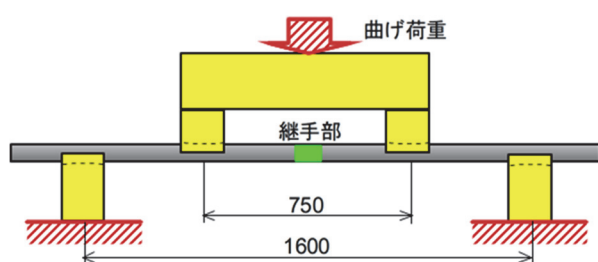


図-1 曲げ試験の模式図



写真-2 曲げ試験実施状況

材料 A,B,C から作成した試験体を用いて行った。

すべての試験体で、従来の AGF 鋼管の曲げ強度 $12.3\text{kN}\cdot\text{m}$ を上回り、平均で $18.8\text{kN}\cdot\text{m}$ であった。これは、従来 AGF 鋼管の曲げ強度の1.5倍である。

(2) 引張試験

同様に、図-3 に引張試験の模式図、写真-3 に試験の実

表-1 曲げ試験結果一覧 (最大曲げモーメント)

材料	材料強度	サンプルNo.	曲げモーメント(kN・m)
A	引張強さ $\geq$ 730N/mm ²	A1	17.7
		A2	18.5
		A3	17.5
		A4	18.3
		A5	19.1
		A6	18.1
B		B1	18.8
		B2	20.5
		B3	20.3
		B4	19.0
		B5	18.3
		B6	19.2
C		C1	19.0
		C2	19.2
		C3	18.7
		C4	18.3
		C5	18.7

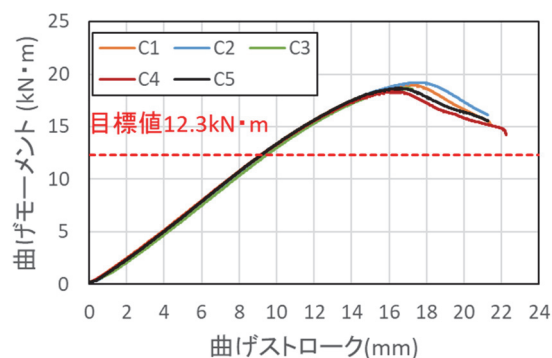


図-2 変位量と曲げモーメントの関係 (材料Cのケース)

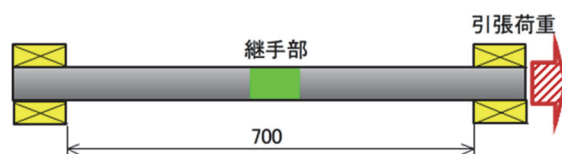


図-3 引張試験の模式図



写真-3 引張試験実施状況

表-2 引張試験結果一覧（最大引張荷重）

材料	材料強度	サンプルNo.	引張荷重(kN)
A	引張強さ $\geq$ 730N/mm ²	A1	541
		A2	540
B		B1	555
		B2	537
C		C1	569
		C2	562

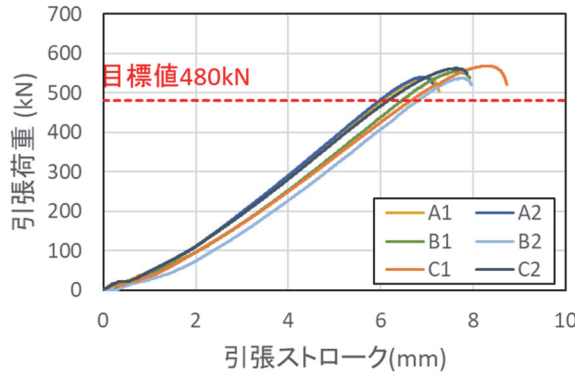


図-4 変位量と引張荷重の関係

施状況を示す。曲げ試験と同様に、継手部が試験体の中央になるように配置し、一端を固定し、もう一端を試験機により引張る。最大引張荷重を示した試験結果を表-2、グラフを図-4に示す。試験のケースも曲げ試験と同様に製作日が異なる3種類の材料A,B,Cから作成した試験体で行った。

すべての試験体で従来のAGF鋼管の引張強度の480kNを上回り、平均で550kNであった。従来鋼管の引張強度の1.1倍である。

4. 施工方法の工夫

一般的にAGF工法は、削岩機（以下、ドリルジャンボと記す）のブームとドリルジャンボに付属する高所作業用足場で施工する。従来の鋼管は重量が大きいため、図-5の下に示すように、次に施工する鋼管は路盤上に置いておき、先行する鋼管の削孔が完了した後にドリルジャンボのブームを路盤まで降ろして、ブームへ次に施工する鋼管を載せて再度上昇させる必要がある。加えて、ブームが天井部に上昇したら、高所作業用足場にいる作業員が狭隘な空間で接続作業をする。作業員の負担が大きく効率的でない。

それに対して軽量鋼管は軽くなるため、図-5の上のように次に施工する鋼管の運搬を高所作業用足場で行うことができる。これによりドリルジャンボのブームを動かさずに鋼管の削孔中に次に施工する鋼管の運搬を並行してできるため、二つの利点がある。一つ目は削孔作業と鋼管の運搬を同時にできるので作業時間を短縮できること、二つ目はブームを動かさないため継手部の接続時間を短

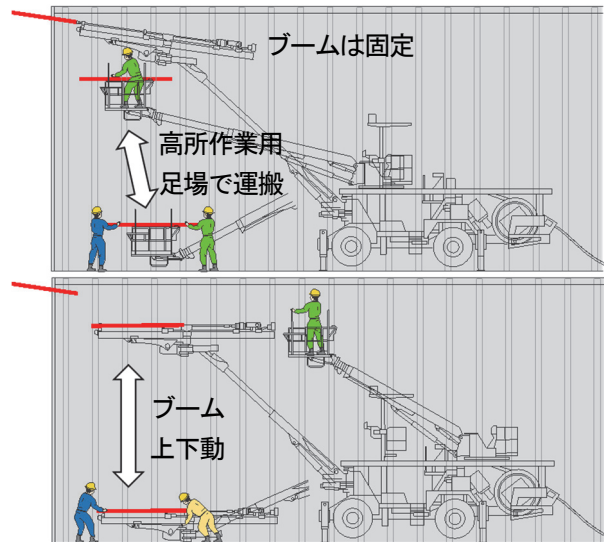


図-5 施工方法の比較（上：軽量鋼管，下：従来の鋼管）

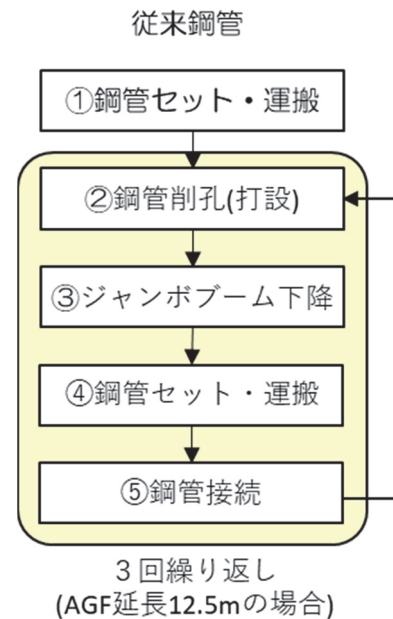
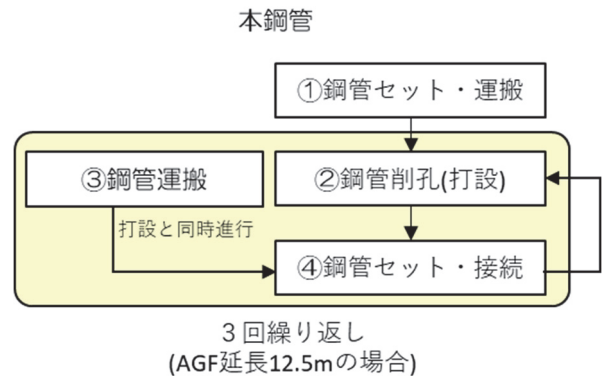


図-6 施工手順の比較（上：軽量鋼管，下：従来の鋼管）

縮できることである。従来の鋼管を用いる場合と軽量鋼管を用いる場合の作業手順の比較を図-6に示す。

5. 地表面沈下の解析

軽量鋼管は高強度材料を用いて薄肉化しており、3章の室内試験結果で従来の AGF 鋼管と同等以上の曲げ強度と引張強度を有することを確認した。一方で、薄肉化により鋼管の曲げ剛性は減少する。鋼管厚さが 6mm から 3.5mm に約 60% となるため、曲げ剛性も約 60% に低減する。AGF 工法を地表面沈下対策で用いる場合、対象物件に応じて沈下量の管理値を設定する場合がある。軽量鋼管を地表面沈下対策で用いる場合、その管理値を満足することが必要である。

AGF 工法による地表面沈下の抑制効果は FEM 解析で推定する方法がある。トンネル数値解析マニュアル²⁾を参考に、FEM 解析で地表面沈下の解析を行った。解析モデルで従来の AGF 鋼管と軽量鋼管を天端部 120 度の範囲で設置した場合の各々の沈下量を比較する。本検討では二車線道路トンネルを想定し、土かぶり厚は 1D (D: トンネル直径) とした。また、地質条件は地山等級を土砂、DII, DI, CII に変化させて、その時の AGF 鋼管が従来の鋼管と軽量鋼管の場合における沈下量を比較した。地質条件はトンネル数値解析マニュアルを参考に表-3 で設定した²⁾。二次元の弾塑性モデルであり、初期応力状態からインバート掘削までの各施工ステップで掘削解放率を与える。解析モデルの施工ステップを図-7 に示す。

解析結果の変位一覧を表-4 に示す。地山等級ごとの軽量鋼管と従来の鋼管の場合における地表面沈下およびトンネル坑内の天端沈下・内空変位を示す。また、図-8 に地山等級が土砂および CII の場合における、解析結果の変位分布を示す。地表面沈下は土砂の場合で最大となり、従来の鋼管の 72.5mm に対し、軽量鋼管で 74.7mm と 2.2mm

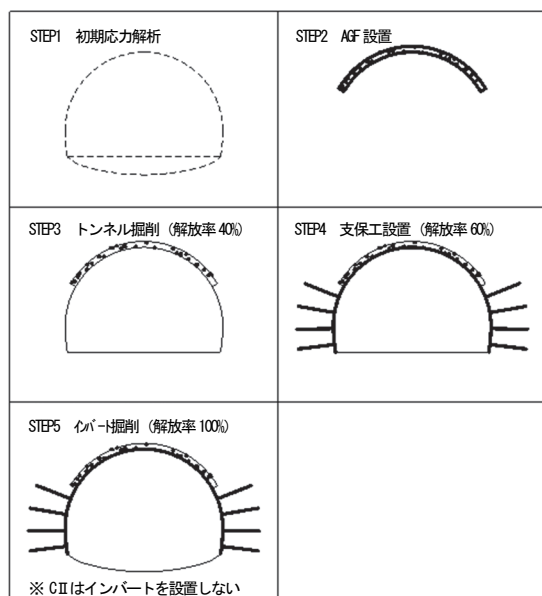


図-7 FEM 解析モデルの施工ステップ

表-3 解析で用いた各地山等級の物性値

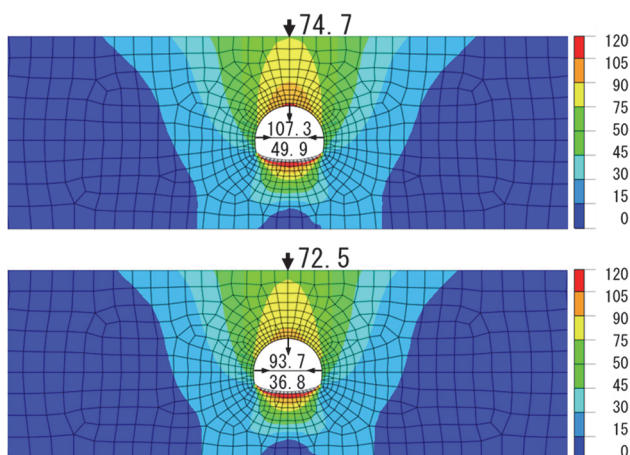
地山等級	変形係数 D (MN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 C (MN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	単位体積重量 γ 10 ⁻³ (MN/m ³)
土砂	20	0.35	0.02	30°	16
D II	150	0.35	0.2	30°	21
D I	500	0.35	0.4	35°	22
C II	1000	0.30	1	40°	23

表-4 解析結果一覧（地表面沈下・天端沈下・内空変位）

地山等級	AGF 鋼管	地表面沈下 (mm)	天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)
土砂	軽量	74.7	107.3	49.9
	従来	72.5	93.7	36.8
D II	軽量	12.3	18.8	9.2
	従来	11.7	16.5	7.3
D I	軽量	4.5	7.1	3.7
	従来	4.3	6.5	3.2
C II	軽量	2.9	4.3	0.9
	従来	2.8	4.1	0.8

地山等級（土砂）の場合

上：軽量鋼管，下：従来の AGF 鋼管



地山等級（CII）の場合

上：軽量鋼管，下：従来の AGF 鋼管

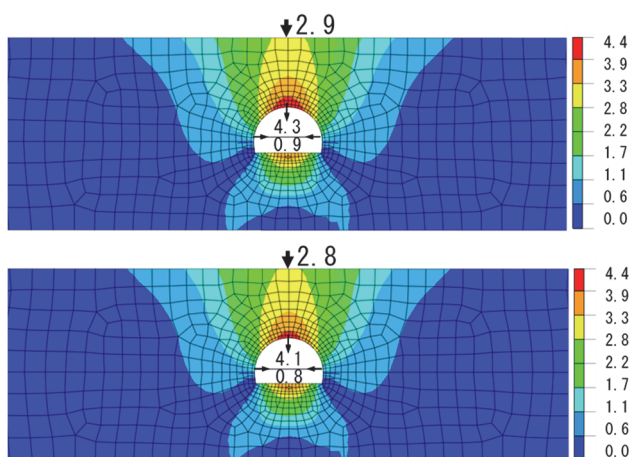


図-8 解析結果の変位分布

の差異であった。同様に、従来鋼管に対する軽量鋼管の地表面沈下の増加分は D II の場合で+0.6mm、D I で+0.2mm、C II で+0.1mm であった。このように、解析の結果では、曲げ剛性が小さい軽量鋼管の方が沈下量は若干大きくなるが、その値は 2mm 程度であった。すなわち、本解析の条件では、軽量鋼管と従来の AGF 鋼管の地表面沈下の差異はほとんどない結果となった。

6. 現場適用事例

軽量鋼管をトンネル現場で適用した事例を概説する。

(1) T トンネル（石川県、道路トンネル）

本トンネルは、トンネル全線で RQD=0 の土砂地山が主体であり、トンネル全線の約 4 割に AGF 工法が設計されていた。軽量鋼管の適用区間は入口側の AGF 工法全 15 シフトの内の、13、14 シフト目の 2 シフト分である。図-9 の上に縦断面図を示す。赤で示す 13、14 シフト目が軽量鋼管、それ以外は従来の AGF 鋼管である。適用した AGF 鋼管 1 本あたりの長さは 12.5m、施工本数は 1 断面あたり 43 本である。軽量鋼管の打設完了状況を写真-4 に示す。以下に施工結果を示す。

a) 施工時間の短縮

14 シフト目の軽量鋼管と 15 シフト目の従来の AGF 鋼管で施工時間の比較を行った。今回の 14 シフト目の軽量鋼管の施工では、4 章施工方法の工夫の図-5 に示す鋼管の運搬方法は行わず、15 シフト目の従来の AGF 鋼管と同一の条件とした。

表-5 に 12.5m あたり平均施工時間の比較を示す。従来の AGF 鋼管の 150 分に対し、軽量鋼管では 135 分と 10% の時間短縮になった。鋼管の軽量化により作業効率が向上したと考えられる。

b) 施工性について

施工状況を目視で観察・確認し、作業員へヒアリングを実施した。作業状況を観察した結果、重量の違いによる作業員への負担の軽減は明らかであった。またヒアリングの結果より、昼夜 2 班のいずれの作業員も、軽量鋼管を採用することで作業が効率的になると回答した。また、後向き工の作業ではあるが、トンネル掘削時に切羽で撤去する AGF 鋼管を運搬する作業においても、重量が軽くなり、作業効率が上がったとの意見を得た。

c) 先行変位計測結果

トンネル坑口部から AGF 鋼管の上部に先行変位計を設置した。計測器は加速度式変位計を用いた。図-9 の上図に先行変位計の配置、下図には先行変位量と先行変位率のグラフを示す。計測器はトンネル掘削に先立ち埋設しており、掘削前からの全変位量を計測しているため、



写真-4 軽量鋼管の打設完了状況

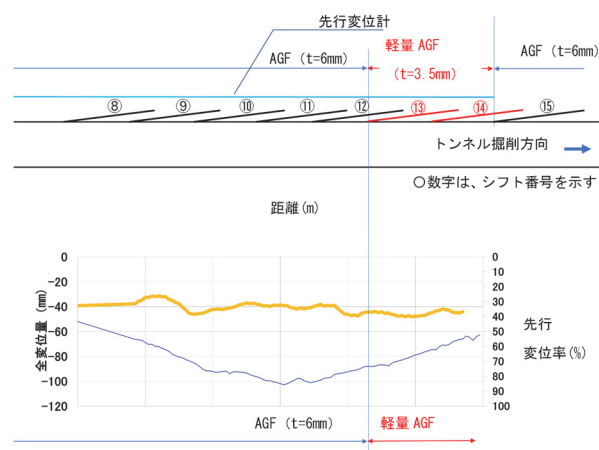


図-9 先行変位計の計測結果

表-5 従来の AGF 鋼管と軽量鋼管との施工時間の比較

AGF鋼管	平均施工時間 (12.5mあたり)
軽量鋼管	135分
従来AGF	150分
軽量/従来	0.90
時間短縮率	-10%

グラフの全変位量には AGF 施工前の先行変位量も含まれる。

計測結果では、13、14 シフト目の軽量鋼管の施工範囲の全変位量が最大で約 90mm に対し、12 シフト目より坑口側の従来の AGF 鋼管の施工範囲の全変位量は最大で約 100mm であった。A 計測の結果も同様の傾向であるため、これは地質の違いによるものと考えられる。

一方で、全変位量に対する先行変位量の割合である、先行変位率を黄色で示す。先行変位率は従来の AGF 鋼管の施工範囲と軽量鋼管の施工範囲ともほぼ同程度の 30-40% ほどであった。この結果、先行変位率は AGF 鋼管違いによらず差異がないため、軽量鋼管が先受工として従来の AGF 鋼管と同等に機能していると考えられる。

(2) Hトンネル（福島県、道路トンネル）

2車線道路トンネルで、地山は比較的硬質な安山岩であった。軽量鋼管と従来のAGF鋼管を用いた場合の施工時間と施工性の比較を行った。本施工は試験施工であり、トンネル左右の土平に2本ずつ、AGF鋼管を打設した。従来のAGF鋼管12.5mを左右に1本ずつ、軽量鋼管12.5mも近傍に左右に1本ずつを同一条件で削孔した。軽量鋼管と従来の鋼管とで、図-5の施工方法を適用して比較検証をした。

従来AGF鋼管の施工時間が平均160分だったのに対し、軽量鋼管は146分であり、8.5%の時間が短縮した。

また、ヒアリングの結果から、作業の負荷が軽減するので、作業の安全性につながるとの意見を得た。

(3) Mトンネル（愛媛県、道路トンネル）

坑口部は安山岩が貫入し、熱水変質作用で軟質化していると想定されており、坑口から6シフト（64m）で軽量鋼管のAGFを採用した。1断面あたりのAGF鋼管の本数は、上半120度の範囲に27本である。

坑口部から先行変位計測と鋼管応力計測を実施したが、地表面沈下は8mm、鋼管応力は最大15N/mm²と小さく（降伏応力の1/10以下）、大きな土荷重は作用していなかった。施工は順調に完了した。



写真-5 軽量鋼管の施工状況（Hトンネル）



写真-6 軽量鋼管の施工状況（Mトンネル）

(4) Kトンネル（岩手県、道路トンネル）

古第三紀の砂岩泥岩互層であり、6mの小土かぶり部で軽量鋼管を1シフト適用した。1断面あたり31本を上半120度の範囲に打設した。AGFの施工の前に小崩落があり、不安定な切羽であったが、AGF打設後の切羽は特に大きな変位はなく、順調に掘削を進めることができた。

本現場では図-5の作業方法で、鋼管を高所作業用足場に載せて、一人の作業員で接続作業を実施した。鋼管が軽量であるため、順調に施工をすることができた。

施工後のヒアリングでは、作業員にとってのメリットが大きく、他の施工機会でも使用したいとの意見を得た。また、従来のAGF工法と同様のツール（削孔ロッドやジャンボの鋼管受け台）を利用できる点がよいとの意見も得た。

(5) Oトンネル（愛知県、水路トンネル）

小断面のTBMによるトンネルの小土かぶり部で設計にAGFがある区間で、軽量鋼管を採用し、生産性向上を図った。地質は硬質な片岩であった。写真-7の下に示すように、従来の3mのAGF鋼管に対し、本トンネルでは短尺の2mの鋼管を6本接続して12.5mの施工を行った。写真-8のような狭隘な空間であったため、軽量化により作業の負担が軽減された。継手部が増えたが、引張強度が向上しており、順調に削孔を完了した。

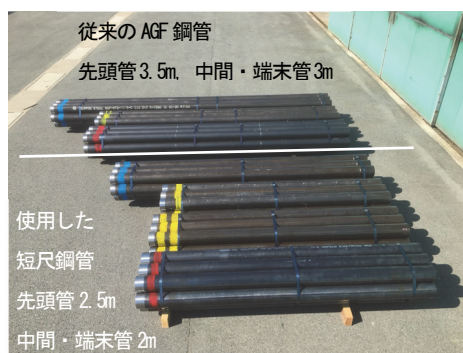


写真-7 使用した短尺の軽量鋼管（白線より下）



写真-8 軽量鋼管の施工状況（Oトンネル）

7. まとめ

本開発で得られた知見を下記に示す。

- ・作業員の負荷低減を目的に、従来の AGF 鋼管を薄肉化した軽量の AGF 鋼管を開発した。
 - ・継手部にテーパねじを採用することで、鋼管に直接ねじ切りをした継手構造を実現した。加えて、テーパねじの採用で、継手部の曲げ強度と引張強度を向上させることができた。
 - ・高強度材料（引張強さ 730N/mm^2 ）を用いることで、薄肉化とともに鋼管の曲げ強度、引張強度が向上した。
- 表-6** に示すように、室内試験の結果、従来の AGF 鋼管の素材部の強度と比較して、本開発の軽量鋼管の強度は弱部となる継手部においても、曲げ強度で 1.5 倍、引張強度で 1.1 倍であった。
- ・鋼管の軽量化と施工手順の改善で生産性が向上した。
- 表-7** で示すように、二つの現場で従来鋼管と軽量鋼管を用いた AGF 工法の施工時間の比較検証を行った結果、鋼管 12.5m あたりの平均施工時間は、従来の AGF 鋼管を用いた場合で 150～160 分に対し、軽量鋼管の場合で 135～146 分であった。平均で約 9% の施工時間が短縮した。
- ・施工状況を目視した結果、従来の鋼管と比べると、作業用足場上で無理なく安全に作業をしていることを確認できた。また、施工後に行った作業員へのヒアリングにおいて、軽量鋼管は軽いため作業が効率的になるとの回答を得た。次施工でも本鋼管を使用したいという意見が多数あった。
 - ・鋼管の引張強度は従来鋼管の素材部と同等以上であり、順調な施工ができた。継手部の数を増やした O トンネルの事例では、従来通りに順調に施工ができた。
 - ・狭隘な TBM のトンネルで短尺の AGF をテストし、良好な施工性の確認ができた。今後は TBM や小断面トンネルへの展開が期待できる。

表-6 軽量鋼管と従来の AGF 鋼管の曲げ強度と引張強度の比較（室内試験結果）

	材質	曲げ強度 (kN・m)	引張強度 (kN)
軽量鋼管 (継手部)	NSP-HT2-TK	18.8	550
従来の AGF 鋼管	STK400	12.3 ^{※1}	480 ^{※2}
従来鋼管 に対する割合		1.5	1.1

※1 材料 STK400 の降伏強度から求めた曲げモーメント

※2 材料 STK400 の降伏強度から求めた引張荷重

表-7 軽量鋼管と従来の AGF 鋼管を用いた施工時間の比較（鋼管 12.5m あたり）

AGF 鋼管	試験 1	試験 2
軽量鋼管	135分	146分
従来 AGF	150分	160分
時間短縮率	-10%	-8.7%

謝辞： 施工現場をご提供いただいた、発注者の皆様、現場関係者および協力会社の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 伊藤哲, 斎藤有佐: 薄肉化した高強度鋼管を用いた新 AGF 工法の開発, 第 74 回年次学術講演会講演概要集 (令和元年度土木学会全国大会), VI-926, 土木学会, 2019.
- 2) 西日本高速道路株式会社: トンネル数値解析マニュアル, p.2-16, 2018.

(2020. 8. 7 受付)

DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT FOREPILING USING HIGH STRENGTH MATERIAL

Satoshi ITO, Arisa SAITO, Motonori KAMEYAMA, Hozumi SAKAGUCHI
and Jun AGATA

In mountain tunnel construction, instability and collapse of the front face are prevented by applying the long steel pipe front receiving method when the bedrock of the face is weak. In standard AGF method, steel pipes with 114.3 mm diameter and 6 mm wall thickness, is driven into the tunnel top 120° in advance of the excavation work to reinforce the rock mass. However, the weight of a 3 m steel pipe is as much as 50 kg, which poses a heavy burden on workers due to working in high places and in narrow spaces. We have developed a new steel pipe with the aim of improving productivity and safety.