

めがねトンネル中央導坑からの本坑支保工の構築 —先行アーチ支保による地山補強工法 (PSS-Arch 工法)—

稲田 正毅・松本 壮太郎

PSS-Arch 技術は、トンネル等の地下空洞構築による周辺環境への影響抑制、安全性向上、建設コスト縮減、工期短縮要請に応える「掘る前にトンネル断面形状の支持体を設置できる工法」の開発を目的とし、めがねトンネルのほぼ全延長に初めて実用化した「先行支保技術」である。施工法は、めがねトンネル（本坑）施工に先行して掘削される中央導坑内から、本坑のアーチ状断面に沿ってウォータージェット併用の刃口推進方式により曲線鋼管を圧入し、鋼管から薬液注入により地山補強するとともに、この鋼管を本坑トンネル支保工とするプレ・サポーティング・システム (PSS) である。

キーワード：トンネル，先行支保，刃口推進，ウォータージェット，周辺環境，安全

1. はじめに

近年、都市部山岳工法（都市 NATM）によるめがねトンネルや大断面トンネルが、数多く施工されるようになり、土被りの小さい箇所での地表面沈下や地下埋設物の防護のために、多種多様の補助工法が発展している。自立性が低い脆弱地山においては、剛性の高いパイル状部材を切羽面に打設する（長尺）先受け工やそれに伴う薬液注入工による地山改良で切羽安定、沈下抑制を図る工法が多く用いられるが、切羽前方の補強範囲には限界があり、切羽における掘削作業との交互施工であるため、切羽での安全性を十分に確保しているとは言えない。また、これに伴って建設コスト

も増大しているのが現状である。

このような背景を踏まえ、「掘る前にトンネル断面形状の支持体（先行アーチ支保）を地山中に設置することにより『地山のゆるみ』を極力抑える」技術構想に着目して、

- ・地表面沈下抑制による品質向上、
- ・切羽接近作業の軽減による安全性向上、
- ・多大な補助工法を伴わないことによるコスト縮減、
- ・工程短縮、

を可能とした工法を開発し、めがねトンネル（金沢外環状道路涌波トンネル）で実用化した「PSS-Arch 工法」について報告する。

2. PSS-Arch 工法

（1）工法概要

PSS-Arch 工法は、曲線ボーリングを用いて曲線鋼管を地山に挿入設置していく工法で、めがねトンネルにおいて本線トンネルの掘削に先立ち、中央導坑から事前にトンネル支保工を設置することができる。また、鋼管を用いて薬液注入を行うことにより、注入式長尺先受け工と同程度以上の地盤改良が可能である。さらに、鋼管内をモルタル充填することにより、剛性の非常に高いトンネル支保工を本坑掘削作業前のはるか先方に連続して設置することができる（図-1）。

（2）工法の特長

あらかじめ設置された支保工の中を掘削するため、

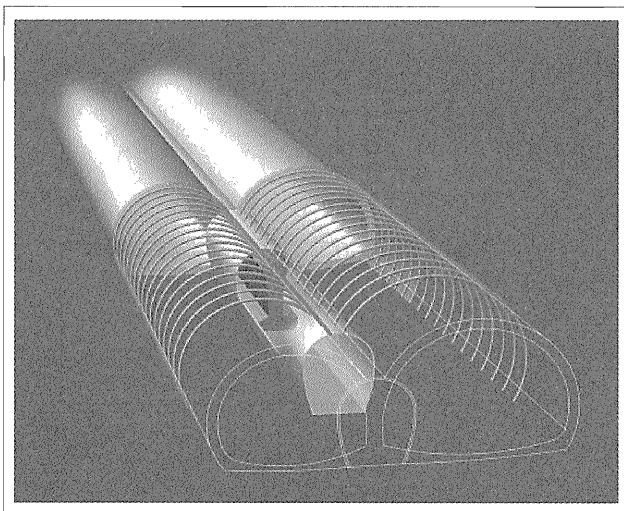


図-1 PSS-Arch 工法概念図

先行変位の抑制効果が大きく、支保工をトンネル掘削底盤より根入れさせることによる沈下抑制の効果も大きい。また、トンネル掘削工程に影響しない工法であるため、工期の大幅な短縮が図られる。安全面においても、先行変位抑制の効果が大きいと、地表面沈下や切羽崩落の減少につながることも、支保工建込み時の切羽での作業も少なくなり、非常に安全性の高い工法となっている。

(3) 施工方法

PSS-Arch 工法の施工順序は、図-2 に示すとおりである。

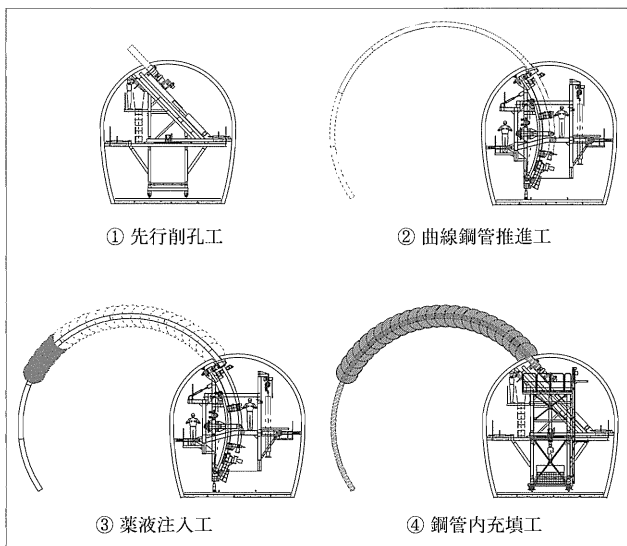


図-2 施工順序図

① 先行削孔工

中央導坑の支保部材である吹付けコンクリート等の切削に大口径ボーリングマシンを使用し、先行削孔を行う。

② 曲線鋼管推進工

1 ピース $L=3\text{ m}$ の曲線鋼管 ($\phi 267.4\text{ mm}$) を溶接等で順次接続しながら所定の長さまで、後述する掘削機構により推進する。泥水は坑外に設置されたバキュームポンプで直接吸引、排出する。

③ 薬液注入工

地山と鋼管の間を充填する1次注入を行い、さらに2次注入として浸透性のある水ガラス系溶液型無機長結材を使用し、地山改良を行う。

④ 鋼管内充填工

先行支保としての鋼管の剛性向上のため、鋼管内にモルタルを充填する。

(4) 数値解析による効果の検証

PSS-Arch 工法では、切羽到達より前に支保工が地

中に設置されることとなり、先行変位の抑制効果や沈下抑制効果が非常に大きいと考えられる。そこで2次元および3次元 FEM 解析を用いてこれらの効果について確認を行う。

図-3 に示す3次元解析では、先行変位率、沈下量についての抑制効果を比較検証するために、通常の掘削方法として、

- ・切羽到達直後に支保工 (H-200) を施工するケース、
 - ・切羽到達前に PSS-Arch 鋼管 ($\phi 267.4\text{ mm}$) が事前に設置されているケース、
- の2ケースについて行った。この結果によれば、先行

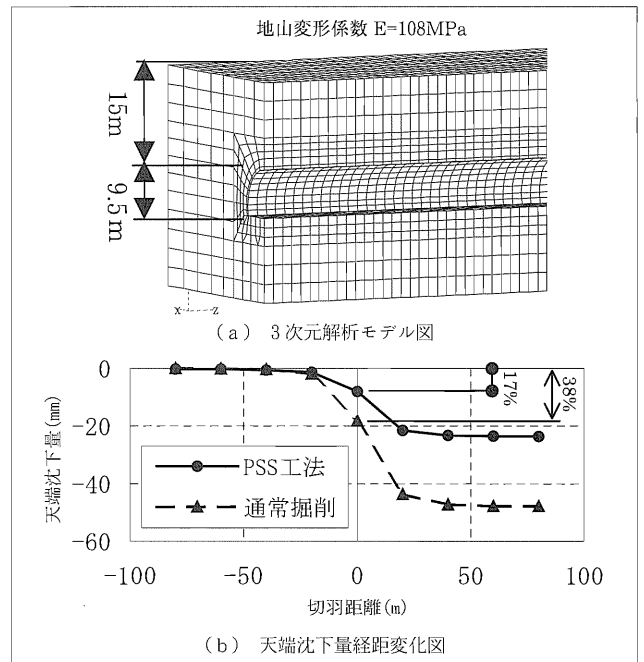


図-3 3次元 FEM 解析結果

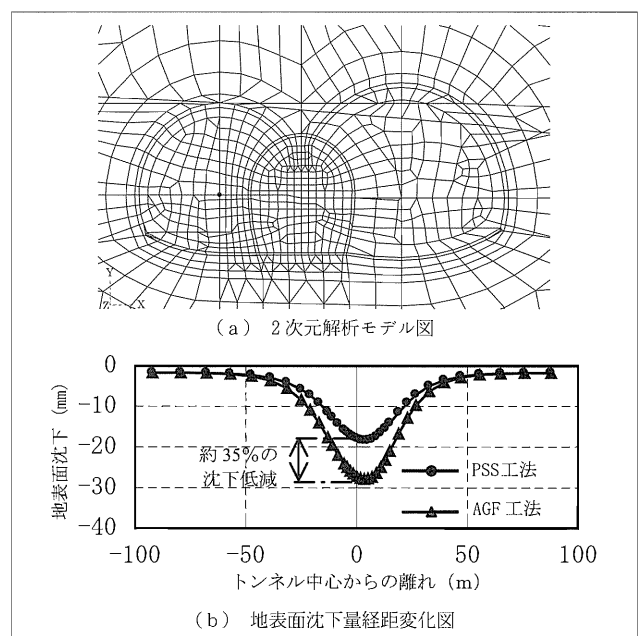


図-4 2次元 FEM 解析結果

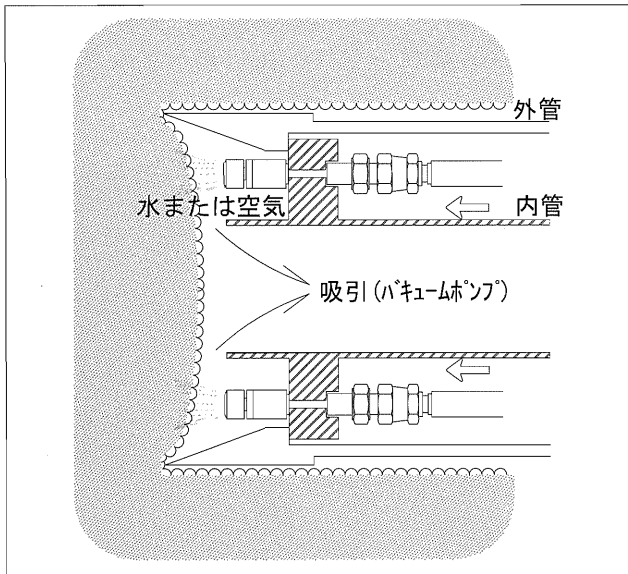
変位率は、通常の掘削工法の 38% に対して本工法では 17% に抑制され、全沈下量も通常の掘削工法 47 mm に対して 24 mm と約半分に抑制される。

また、図—4 に示す 2 次元解析では、PSS-Arch 工法は、通常の補助工法を適用した掘削工法（AGF（All Ground Fasten）工法）と比較して、地表面沈下量が 35% 低減されている。2 次元、3 次元の数値解析結果より、PSS-Arch 工法は AGF 工法よりも、先行変位、沈下量に対して大きな抑制効果があることが確認できた。

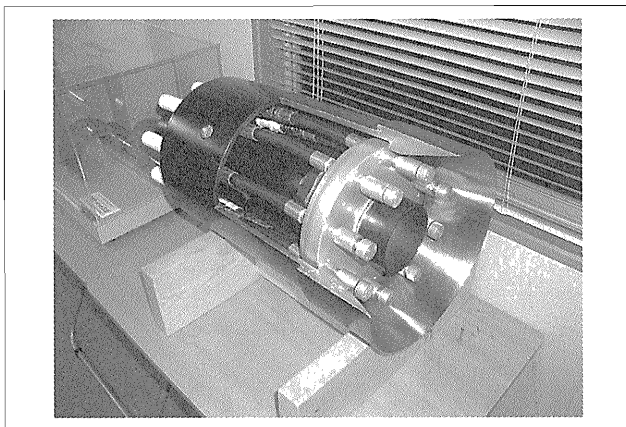
3. PSS-Arch 工法の技術

（1）掘削機構

PSS-Arch 工法における曲線鋼管推進のための掘削機構は、従来の回転式の推進機を使用した方法とは異なり、新たに開発した「先端に取付けた刃口とウォータージェット及び圧縮空気の併用で、刃口を圧入させ



図—5 削孔システム

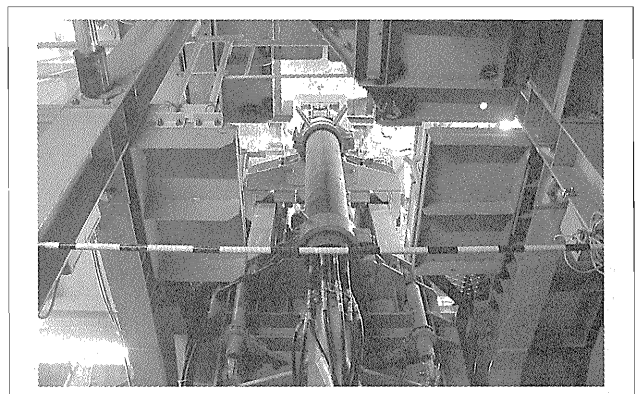


写真—1 刃口と先端ノズル

ながら掘削を行う非回転式方法」であり、泥水の排出は中央の排泥管（内管）からバキュームポンプにより吸引するもので、これまでに施工実績のない全く新しい方法である（図—5、写真—1）。

（2）推進機構

推進方法は、推力 80 kN のチェーンフィード方式で、内管を元押すことにより先端で外管を引っ張る先端牽引方式を採用している。また、地山の締付け等による推力不足に備えて、サブ推進ジャッキ（350 kN × 2 台）を搭載しており、チェーンフィードとの併用が可能となっている（写真—2）。



写真—2 推進機

また、推進中に外管（曲線鋼管）が変形することで、内部の削孔機械が回収できなくなる危険性を回避するため、外管の変形に追従できるような特殊フランジを開発し、これを内管の継手部他に適用した（写真—3）。



写真—3 特殊フランジを用いた内管

（3）鋼管接続機構

鋼管の接続は角度や方向を修正して仮止め溶接を行ったのち、自動溶接機で本付け溶接を行う方法としている（写真—4）。

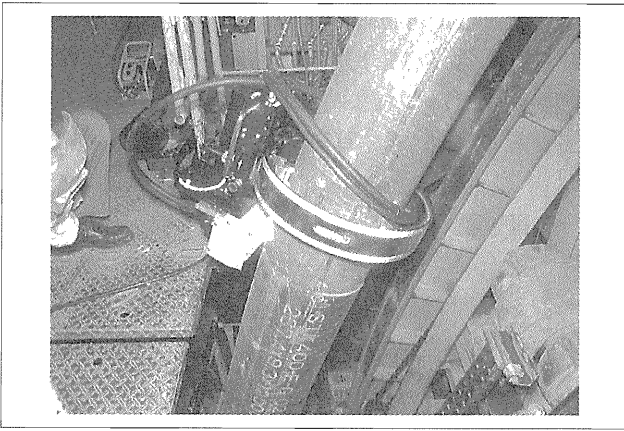


写真-4 鋼管の自動溶接

(4) 薬液注入機構

鋼管を利用した地山への薬液注入工には、各々が独立して作動する重層ダブルパッカー（2連式）を新たに開発、適用し、注入時間を大幅に短縮することが可能となった（写真-5）。

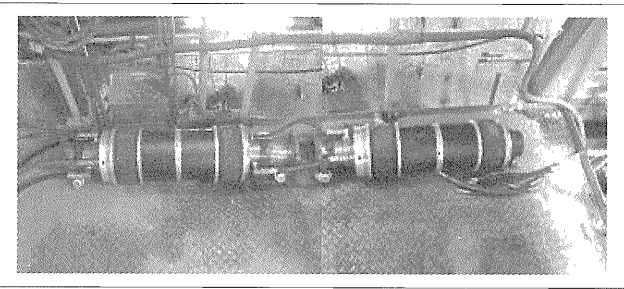


写真-5 重層ダブルパッカー

4. 涌波トンネルでの実績

(1) 工事概要

- ・工事名：金沢外環状道路（山側幹線） 鈴見新庄線道路改築（街路）工事（涌波トンネル）
- ・工事場所：石川県金沢市錦町～大桑町地内

- ・工期：平成12年9月30日～平成17年9月30日
- ・工事内容：
 - 先進中央導坑……………掘削・覆工延長 636 m
掘削断面積 50.2 m²
 - 本坑（先行トンネル）…掘削・覆工延長 636 m
掘削断面積 71.5 m²
 - 本坑（後行トンネル）…掘削・覆工延長 636 m
掘削断面積 111.2 m²
 - 連絡道トンネル…………掘削・覆工延長 154 m
掘削断面積 120.6 m²

涌波トンネルは都市計画道路・鈴見新庄線のうち、浅野川と犀川に挟まれた金沢市錦町～大桑町に位置し、本線のめがねトンネルとその直上の連絡道トンネルから構成される全国的にも例のない三つ目構造のトンネルである。

地上部は住宅地で、土被りは最小で約12mと小さく、本線トンネルと連絡道トンネルの離れも3～12mである。また、トンネルの掘削対象となる地質は、第四紀更新世前期の大桑層を主体とする固結度の低い細粒砂岩、シルト岩である。地下水位は全体に高く、均等係数4以下、細粒分含有率10%以下であるため、

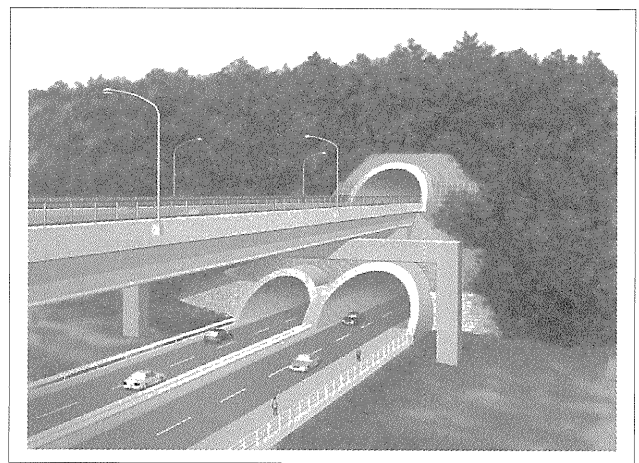


図-6 完成予想図

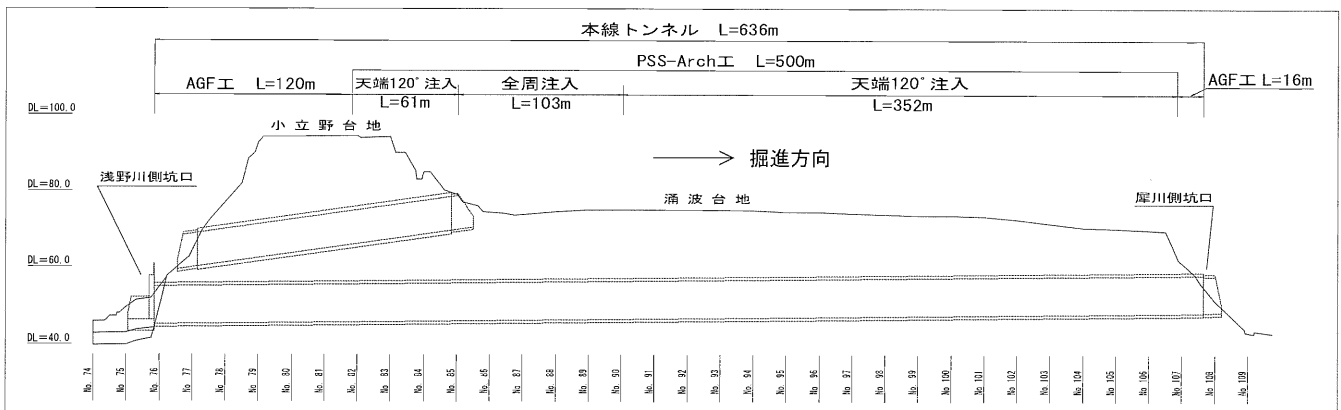


図-7 PSS-Arch 工法施工範囲図

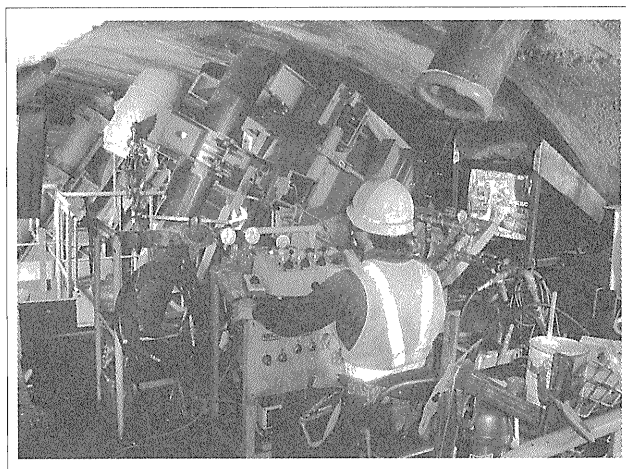
地下水は砂分の流出や天端の崩落等、地山の安定性に強く影響を与える。

このような条件の下で地表面沈下の抑制、切羽作業の安全性向上、また、コストの縮減をはかるため、PSS-Arch 工法を開発し、契約後 VE 方式により採用され、本線トンネル延長 636 m のうち 500 m で施工している。

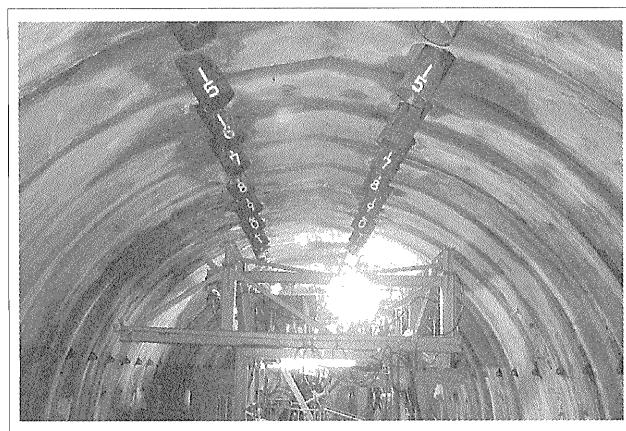
図一6 に完成予想図を、図一7 に PSS-Arch 工法施工範囲を示す。

(2) PSS-Arch 施工状況

涌波トンネルでの PSS-Arch 工法による施工状況を写真一6、写真一7 に示す。



写真一6 鋼管推進状況



写真一7 鋼管推進完了全景

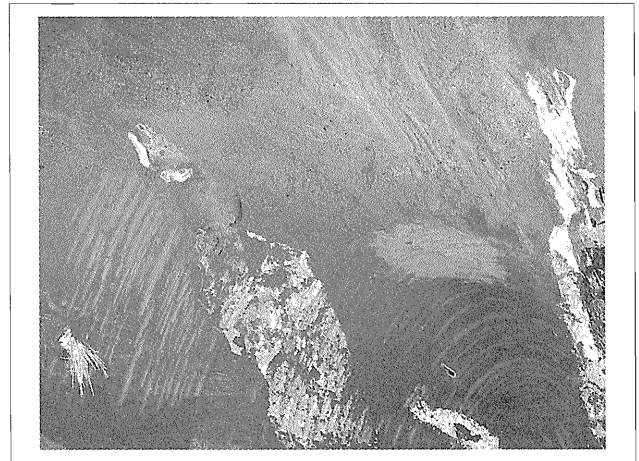
施工開始当初は、不慣れによる遅延やトラブルによる作業の損失時間が多く、また、部分的にシルト層を挟む地質であったため推進速度が小さく、1基の施工に17時間を要していたが、現在は、機械やシステムの改良を行うことで1基の施工を9時間程度で行うことが可能となった。

鋼管を所定の位置に推進する精度は、地質状況によ

り左右され、礫や隣接管に当たり施工途中で推進が不能となった箇所もある。推進不能な箇所は、従来通りトンネル掘削時に補強支保工を建込むこととしている。

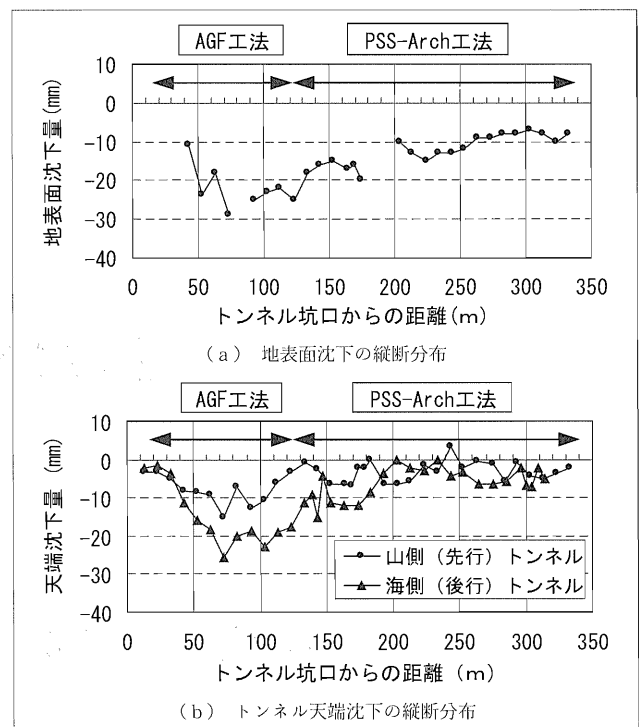
(3) PSS-Arch 工法の効果

PSS-Arch 工法により、本坑掘削時のトンネル周辺地山は比較的固結度が高く、あらかじめ鋼管支保が設置されているため、切羽崩落・肌落ちの危険性は著しく低下している(写真一8)。



写真一8 掘削により露出したPSS鋼管

図一8 に計測結果(地表面沈下、トンネル天端沈下)を示す。実際の地表面沈下量は予想解析結果と同等以下で、AGF 工法に比べて約 10~15 mm (35~50% 減) 小さくなっている。トンネル天端沈下量は、



図一8 実計測結果

AGF 工法区間が 10~25 mm 沈下しているのに対し、PSS-Arch 工法では 10 mm 未満と沈下抑制効果が大きく現れており、早期に収束（切羽進行 10 m 程度：1D、ここで、D はトンネル径）する傾向を示す。また、AGF 工法区間は後行トンネルの沈下が先行トンネルに比べて大きいのに対し、PSS-Arch 工法では先行・後行トンネル天端沈下に差がなく、左右（隣接）トンネルへの影響が抑制されていると考えられる。

5. おわりに

今回、開発・実用化した PSS-Arch 工法は、涌波トンネルの地質に合わせて開発したものであり、鋼管を推進するための掘削機構としてウォータージェットを併用した刃口推進方式を用いた。このため、この掘削機構は、涌波トンネルの地質のような固結度の低い砂質（土砂）地山に限定される。

この工法は都市部の土被りの浅い軟弱な地質にある程度、適用することが可能であるが、鋼管（φ267.4 mm）内の排土径（10 cm）を超える礫が混入している場合、鋼管の推進に支障をきたすことが考えられる。

今後、この工法を幅広く活用するためには、上記の掘削機構に改良、改善を加え、めがねトンネルへの適

用だけではなく、都市部の流出入トンネルランプ部のような超大断面トンネルおよび既設トンネルの拡幅・変状補修のトンネルリニューアル等に採用していきたいと考えている。

最後に PSS-Arch 工法の施工を実施する上で貴重なご意見を頂いた東京工業大学大学院理工学研究科・太田秀樹教授をはじめとする山側幹線施工委員会の各位、契約後 VE 方式により PSS-Arch 工法を採用していただいた石川県の関係各位に深く感謝する次第である。

J C M A

【筆者紹介】

稲田 正毅（いなだ まさたけ）
株式会社熊谷組
北陸支店
熊谷・西松・北部・豊蔵 JV
涌波トンネル作業所
工務課長
（監理技術者）



松本 壮太郎（まつもと そうたろう）
株式会社熊谷組
北陸支店
熊谷・西松・北部・豊蔵 JV
涌波トンネル作業所
工事主任



建設機械図鑑

本書は、日本建設機械要覧のダイジェスト版として、写真・図版を主体に最近の建設機械をわかりやすく解説したものです。建設事業に携わる方々、建設施工法を学ばれる方々、そして建設事業に関心のある一般の方々のための参考書です。

A4判 102頁 オールカラー 本体価格 2,500 円 送料 600 円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289