

先行アーチ支保工の開発とめがねトンネルへの適用結果について

Development of Pre-Supporting System Arch Method and Application to Eye-Glasses-shaped Twin Tunnel

高橋裕之¹・田中志人²・岩永茂治³・中北昭浩⁴

Hiroyuki Takahashi and Yukihiro Tanaka and Sigeharu Iwanaga and Akihiro Nakakita

¹石川県 土木部 道路建設課 (〒920-8580 石川県金沢市鞍月1丁目1番地)

²石川県 県央土木総合事務所 外環状道路建設課 (〒921-8042 石川県金沢市泉本町6-34)

³榑熊谷組 東北支店 三本木原トンネル作業所 (〒034-0102 青森県十和田市大沢田字早坂13-5)

⁴正会員 榑熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

E-mail: anakakit@ku.kumagaigumi.co.jp

The PSS-Arch method uses curved boring to drive curved steel pipes prior to excavation. Curved steel pipes are inserted, from the center drift, into the ground along the excavation circumference of the main tunnels. A chemical agent is injected through these pipes to improve the ground, and the pipes, filled with mortar, form highly rigid supports ahead of the face.

This method was proposed on the basis of a value engineering approach after conclusion of the contract, and adopted at Wakunami Tunnel in Kanazawa City. This paper discusses the development of this new method and the construction records of this project.

Key Words : tunnel, pre-supporting system, ground reinforcement, curved steel pipe, water jet

1. はじめに

山岳トンネル工事ではNATMが標準工法となり、機械化施工は格段に発達したといえる。機械化が進むにつれ、さらなる現場作業の省力化と安全性の向上が求められている。特に、掘削作業を行う切羽では、依然、人（作業員）が切羽に接近して行う作業が多く、肌落ちや崩落による事故が発生する危険性が高い。従来から「トンネル切羽の安全性の確保は永遠の課題である」とまで言われている。

現在の山岳トンネル工事では、切羽の自立性が悪い脆弱地山において、比較的剛性の高いパイル状の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崩落・肌落ちを防止する工法が多く用いられている。これらの補助工法は、切羽における掘削作業との交互施工であるため、切羽前方の補強範囲には限界があり、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、近年、都市部山岳工法（都市NATM）に

よるトンネルが、数多く施工されるようになって、土被りの小さい箇所での地表面沈下抑制や地下埋設物の防護のために、多種多様の補助工法が用いられ、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、切羽接近作業の軽減・切羽の肌落ち・崩落防止による安全性向上、多大な補助工法を伴わないことによるコスト縮減、地表面沈下抑制による品質向上および切羽掘削との並行作業による工程短縮を可能とした先行アーチ支保による地山補強工法『PSS-Arch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）において実用化した。

本稿では、このPSS-Arch工法とめがねトンネルでの施工実績を報告する。

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。

(2) 工法の特長

本坑掘削はあらかじめ設置された支保工の中を掘削するため、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ので、地表面沈下や切羽崩落の減少につながるとともに、支保工建込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。

図-1にPSS-Arch工法の概念図を示す。

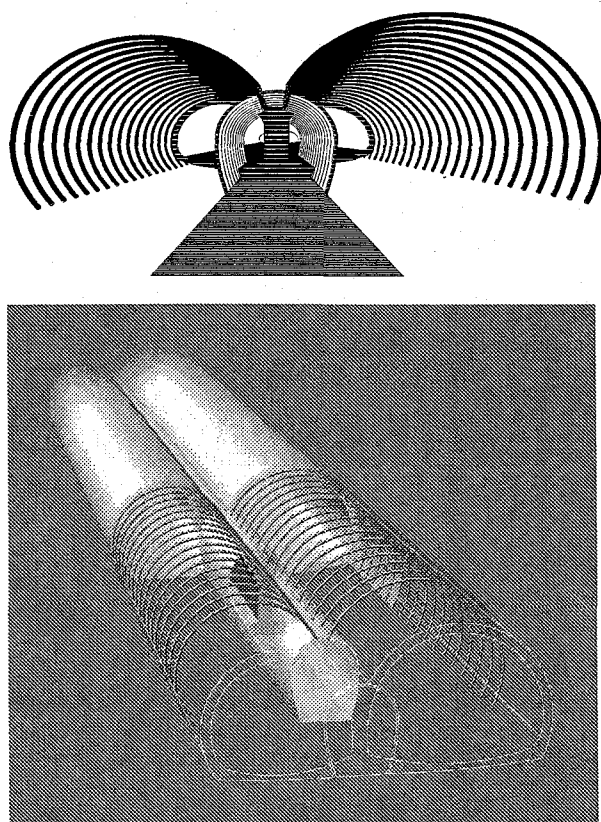


図-1 PSS-Arch工法概念図

(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。

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 推進工

曲線鋼管（1ピースL=3m）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一次注入を行い、さらに二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。

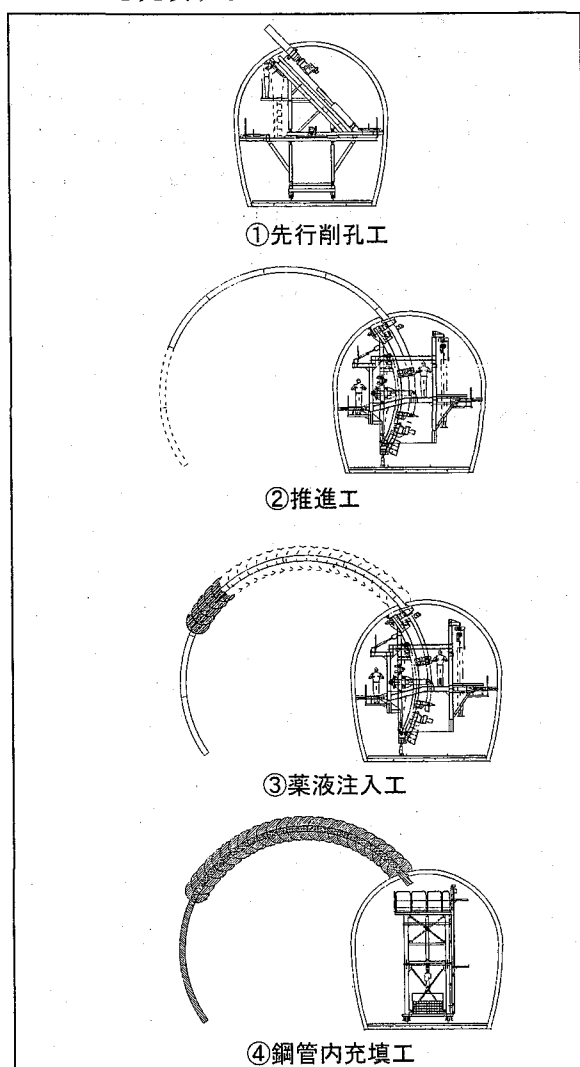


図-2 PSS-Arch工法施工順序図

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「先端に取り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-3、写真-1参照）。

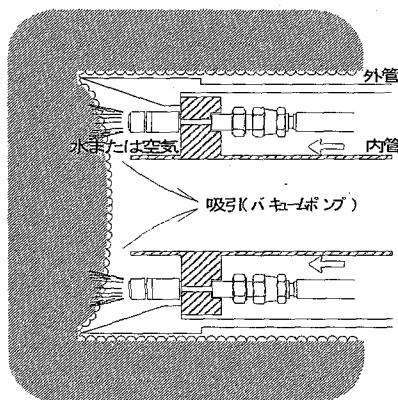


図-3 削孔システム

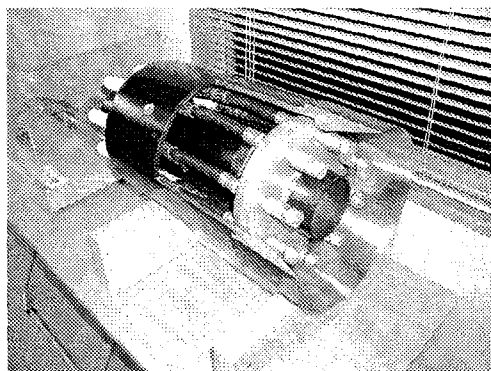


写真-1 刃口と先端ノズル

(2) 推進機構

推進方法は、推力80kN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、地山の締め付け等による推力不足に備えて、サブ推進ジャッキ（350kN×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-2参照）。また、推進中に外管（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（図-4参照）。

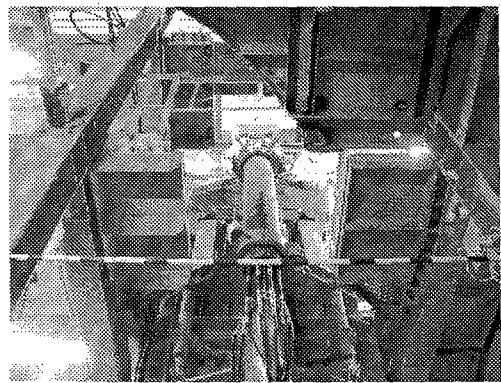


写真-2 推進機

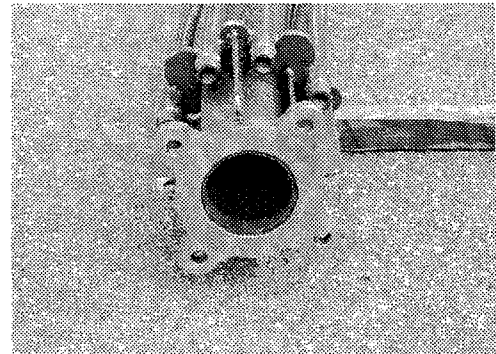


図-4 特殊フランジを用いた内管

(3) 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-3参照）。

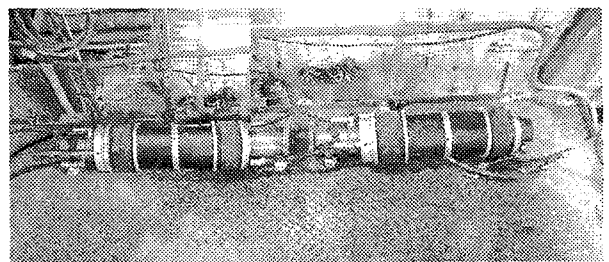


写真-3 重層ダブルパッカー

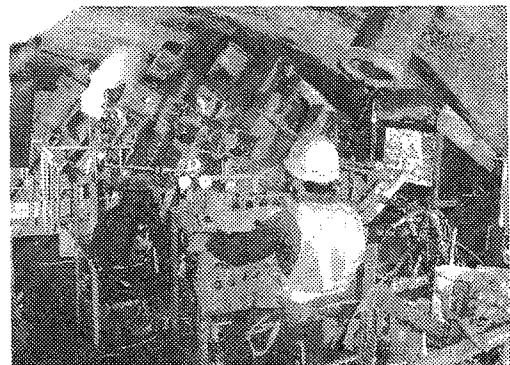


写真-4 推進操作状況

4. めがねトンネルでの施工実績

(1) 採用現場と地質概要

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（写真-5、図-5参照）。

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、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、コストの縮減をはかるため、PSS-Arch工法が契約後VE方式により本線トンネル延長636mのうち500mで採用された（図-5、6）。

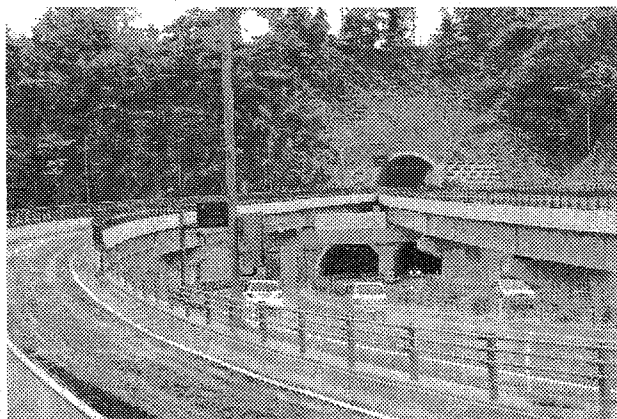


写真-5 浅野川側坑口（供用）

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：H12.9.30～H17.8.31

工事内容：中央導坑 延長636m、掘削断面積50.2m²
本線トンネル（山側）延長636m、掘削断面積71.5m²
本線トンネル（海側）延長636m、掘削断面積111.2m²
連絡道トンネル 延長154m、掘削断面積120.6m²

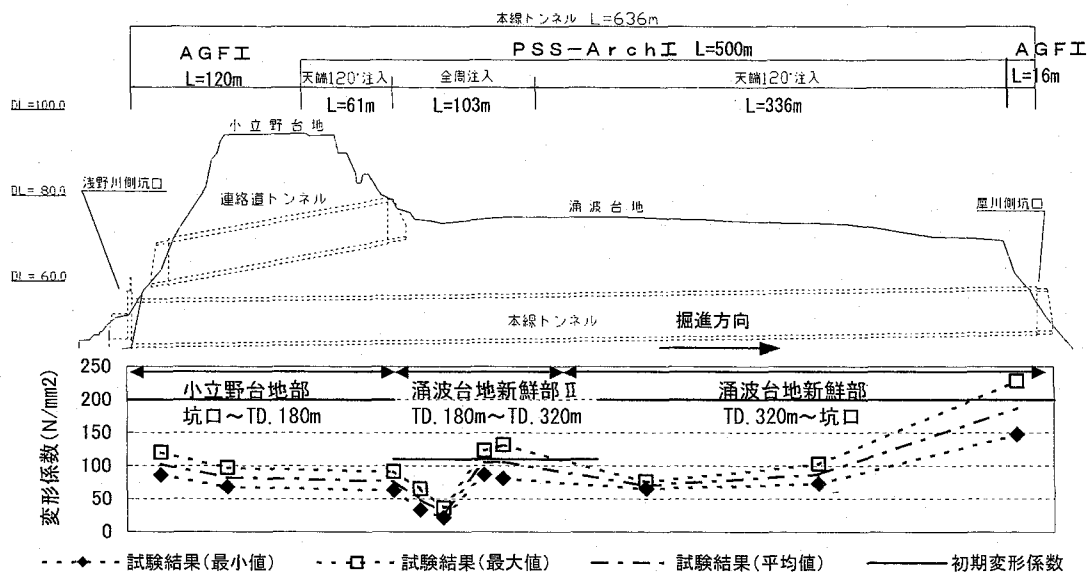


図-5 PSS-Arch工法の施工範囲

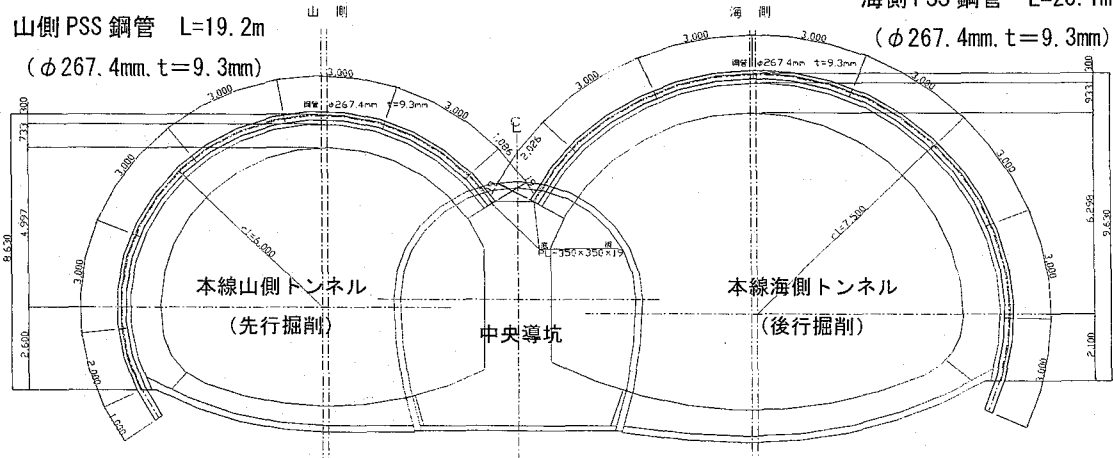


図-6 PSS-Arch工法の施工パターン

(2) 施工実績

PSS-Arch工法の施工（推進工）実績は、山・海合わせて1,000本施工を行ったが、転石があつて途中で施工不能になったり、硬質シルト層や転石（写真-6）等により鋼管が曲げられ隣接の鋼管と接触して途中で施工不能になっている個所がある。これらを統計的にまとめた表を表-1、表-2に示す。出来形全体に関する完工率としては約97～98%で、基数当りに換算すると不具合発生率として、設計長に対して約13.2%、下半盤まで約10.4%、SL盤まで約7.1%となる。このうち約7割が隣接鋼管に接触して施工不能になったもので、不具合発生率としては設計長に対して9.1%となる。推進不能箇所については、トンネル掘削時に補強支保工（H-125）を建込むこととした。

表-1 出来形全体に関する統計量

項目	山側	海側
施工延長(m)	9179.65	10963.47
施工基数(基)	500	500
設計延長(m)	9339.50	11306.50
完工率	98.3%	97.0%
平均延長(m)	18.359	21.927
設計長(m)	18.679	22.613

表-2 基数あたりの不具合発生に関する統計量

項目	山側	海側
不具合発生件数	【<設計長】	45基
		9.0%
	【<下半盤】	34基
		6.8%
	【<SL盤】	23基
		4.6%

山側の平均サイクルタイムは2基/日（2方）の結果となった（図-7参照）。海側の平均サイクルタイムは1.3基/日（2方）結果となった（図-8参照）。

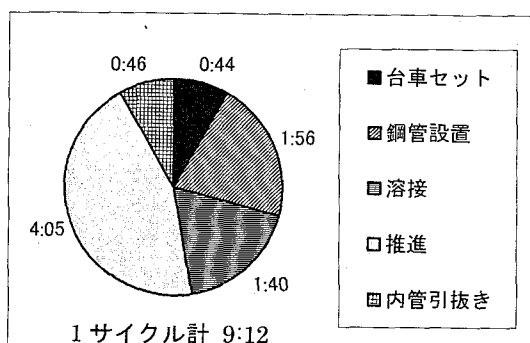


図-7 山側1基当りの平均サイクルタイム

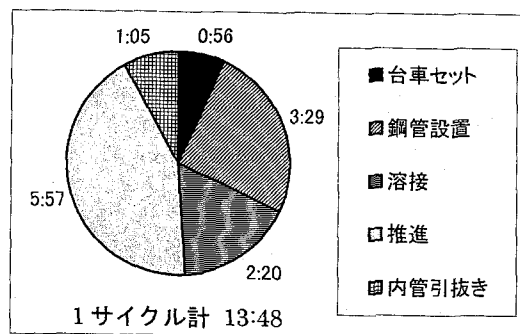


図-8 海側1基当りの平均サイクルタイム



写真-6 玉石や硬いシルト層の破碎片（1基の施工分）

5. PSS-Arch工法の効果

(1) 切羽の安定性

中央導坑掘削時は、湧水を伴う切羽の崩落が発生し、掘削工法を補助ベンチ付き全断面工法から3段ベンチカット工法に変更した。しかし、本坑掘削時は、PSS-Arch工法により、トンネル周辺地山は、あらかじめ鋼管支保が設置され薬液注入による地山改良も行われているため、切羽の安定性が格段に向上している（写真-7参照）。

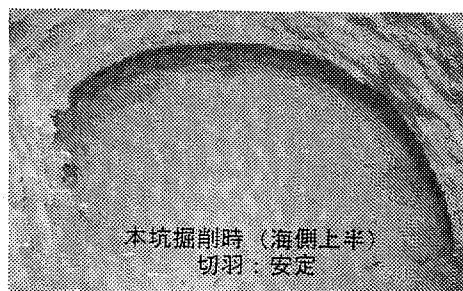


写真-7 中央導坑と本坑（海側）の切羽状況

(2) 地表面沈下

表-3と図-9に地表面沈下量の実績と管理基準値を示す。涌波トンネルでは、民地内の地表面沈下勾配を $1/1000\text{rad}$ 以下とすることを考慮し、トンネル直上の地表面沈下量(FEM解析結果をもとに管理基準値設定)にて管理を行い、無事管理値内で施工できた。

AGF工法を補助工法とした小立野台地部では、本坑掘削による沈下量の増加が明確に現れている(20mm超)のに対し、PSS-Arch工法を導入した涌波台地区間では、本坑掘削10mm以下に小さく

表-3 地表面沈下量(導坑中心上の最大値)の実績

施工段階 (掘削)	小立野台地 坑口-180m	涌波新鮮部Ⅱ TD.180m-320m	涌波新鮮部 TD.320m-坑口
中央導坑	5mm	8mm	12mm
山側本坑	17mm	12mm	12mm
海側本坑	29mm	14mm	15mm
連絡道Ⅰ	33mm	—	—
管理値	40mm	25mm	15mm

注) 沈下方向を正とする(坑口斜面部は除く)

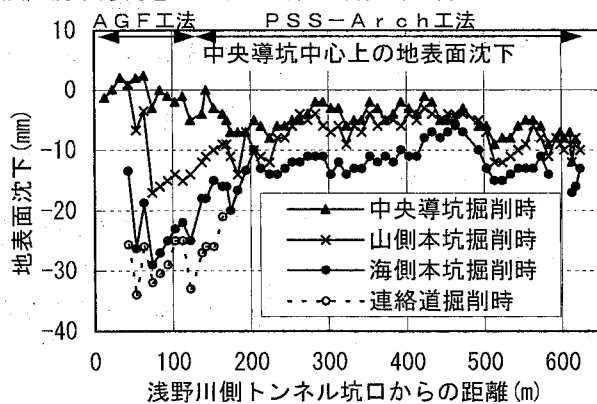


図-9 各掘削段階の地表面沈下(導坑中心上)

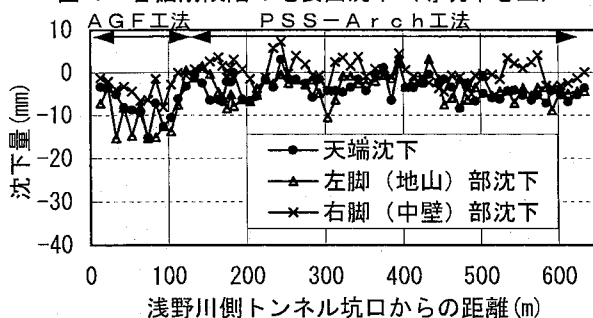


図-10 山側(先行)トンネルの沈下量

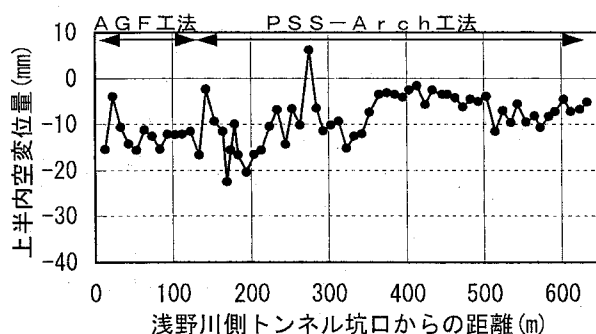


図-11 山側(先行)トンネルの内空変位量

抑制されている。また、PSS-Arch工法を導入した涌波台地区間では、地質状況に違いがある涌波台地新鮮部Ⅱと涌波台地新鮮部の沈下量が同程度となっており、地質変化による差が現れていない。これらは、PSS-Arch工法による先行支保効果(変位抑制効果)が得られた結果と考えられる。

(3) 坑内変位

本坑の天端沈下、脚部沈下及び水平内空変位測定結果を図-10～図-13に示す。

天端沈下は、AGF工法区間とPSS-Arch工法区間の差が明瞭に現れており、地山強度や土被りによる差も小さく抑えられている。地山側脚部沈下は、天端沈下と同様に、PSS-Arch工法区間において大きく抑制されている。中壁側脚部は、いずれも天端沈下と同程度で収まっており、中壁コンクリートによる地山荷重の伝達・支持効果が十分得られたものと考えられる。内空変位は、土被りや地山強度による差がみられ、小立野台地では土被りにほぼ比例して内空変位が発生し、涌波台地新鮮部Ⅱでは地山強度の低下による変化が見られる。

また、山側(先行)と海側(後行)トンネルの比較では、AGF工法区間では沈下、内空変位とも海側(後行)トンネルの変位が大きく発生しているのに対し、PSS-Arch工法区間では先行・後行の差がほとんど見られない。

坑内変位でも、PSS-Arch工法の先行支保効果が明確に現れるとともに、隣接トンネルへの影響抑制効果も期待できると考えられる。

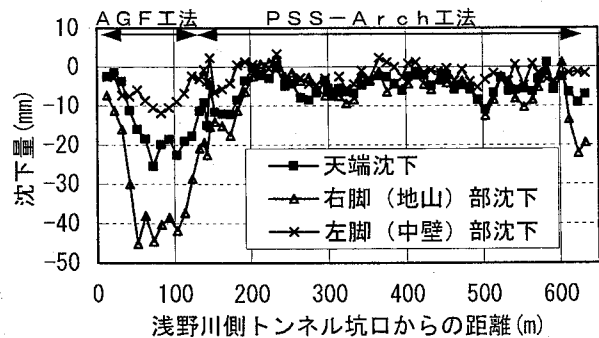


図-12 海側(後行)トンネルの沈下量



図-13 海側(後行)トンネルの内空変位量

(4) PSS鋼管の応力測定結果

PSS鋼管応力測定は、6箇所で行っている。PSS鋼管応力の測定結果（最大値）を表-4、経距変化（No.86+14）を図-14、応力分布（No.86+14）を図-15に示す。PSS鋼管の応力は全て軸圧縮応力状態にあり、圧縮部材として有効に働いている。また、最大応力は許容応力以下で収まっており、十分な支保機能を発揮している。応力発生の特長として、先行（山側）トンネルと後行（海側）トンネルの干渉は、中壁部分に見られる

だけで、トンネル全体への影響はほとんど発生していない。AGF区間では、後行トンネル掘削が先行トンネルの変位、支保応力（図-16参照）にも大きな影響を及ぼしており、めがねトンネル全体に応力再配分を生じる状態となっている。PSS-Arch工法は、全線にわたり事前に連続したアーチ支持体（曲線鋼管+地山改良体）を設置するため、地山の緩み・塑性化が大きく抑制され、発生変位・応力も小さくなり、あたかも単独トンネルを別々に掘削しているような状態になっている。

表-4 PSS鋼管応力の測定結果（最大値 N/mm^2 , +: 引張, -: 圧縮）

測点	設計区分	山側（先行）トンネル掘削時		測点	設計区分	海側（後行）トンネル掘削時	
		山側トンネル	海側トンネル			山側トンネル	海側トンネル
No. 86+ 4	涌波台地	-96（中壁肩 L5）	+26（中壁上 R6）	No. 86+ 4	涌波台地	-73（地山肩 L3）	-101（地山肩 R3）
No. 86+14		-83（中壁肩 L5）	+19（中壁上 R6）	No. 86+14		-86（地山肩 L3）	-134（中壁肩 R5）
No. 87+ 4		-104（中壁肩 L5）	+8（中壁肩 R5）	No. 87+ 4		-79（天端 L3）	-143（地山肩 R3）
No. 90+19	新鮮部Ⅱ	-125（天端 L4）	+16（中壁肩 R5）	No. 90+19	新鮮部Ⅱ	-112（天端 L4）	-83（中壁肩 R6）
No. 92+ 9	涌波台地	-66（中壁肩 L5）	+22（中壁肩 R5）	No. 92+ 9	涌波台地	-62（中壁肩 L5）	-103（地山肩 R3）
No. 99+ 7	新鮮部	-120（中壁肩 L5）	+10（中壁肩 R5）	No. 99+ 7	新鮮部	-125（中壁肩 L5）	-108（中壁肩 R6）

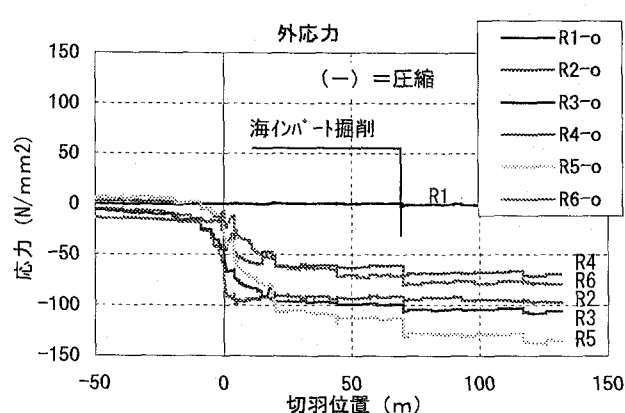
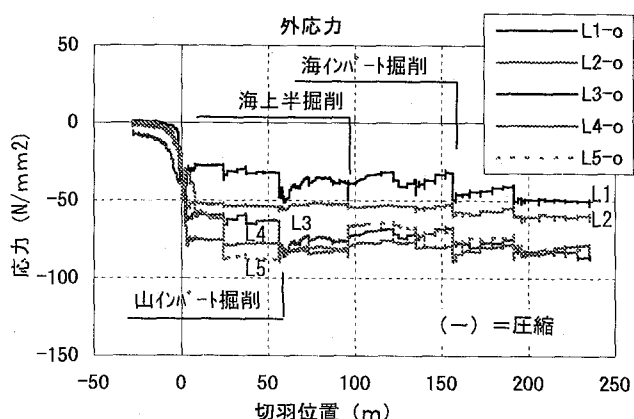


図-14 PSS鋼管応力（No.86+14）の経距変化図

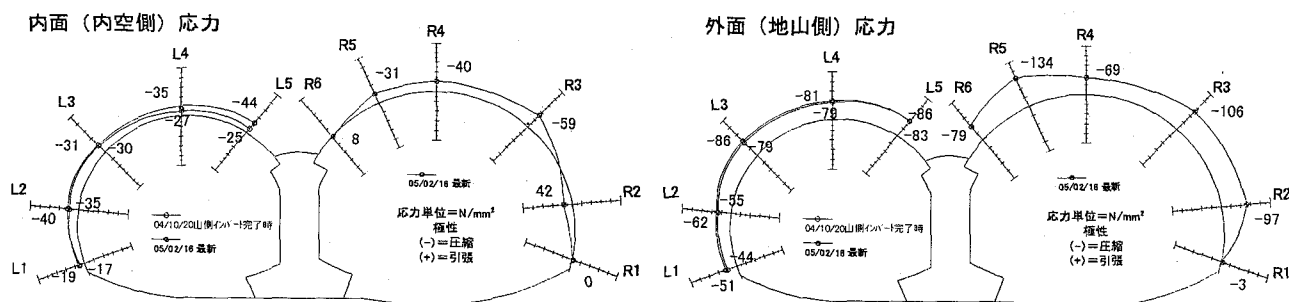


図-15 PSS鋼管応力（No.86+14）分布図

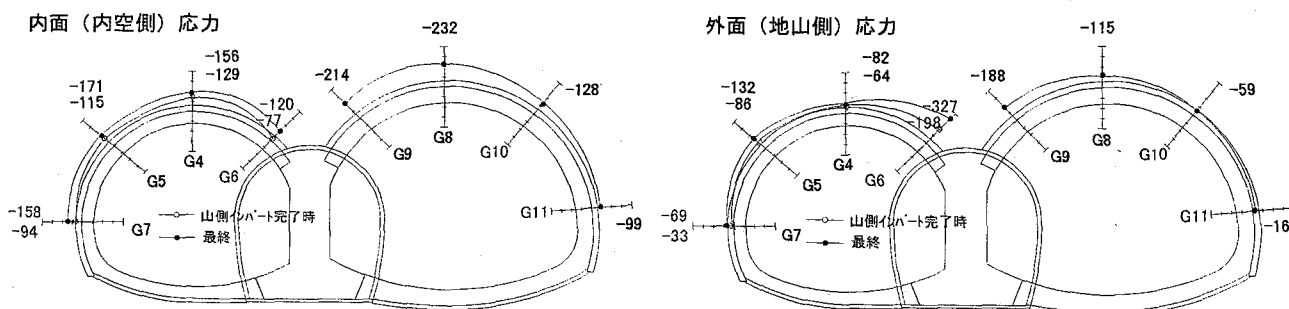


図-16 AGF区間（No.79+6）鋼製支保工の応力分布図

(5) 切羽到達前後の挙動

切羽到達前後における挙動として、AGF区間の直上沈下測定結果とPSS区間の鋼管応力経距変化（天端部測点）を図-17～図-19に示す。

トンネル掘削による影響は、AGF区間が切羽到達前-10m～切羽通過後+20mであるのに対し、PSS-Arch工法区間は-10m～+10mと小さく抑えられ、切羽を中心とした対称分布に近い状態となっている。また、トンネル直上沈下測定による切羽到達前の変位は全変位量の約30%であり、AGF工法による先行変位抑制効果が現れているものと考えられる。一方、PSS-Arch工法区間は、PSS鋼管の先行応力が全応力の50～70%であった。

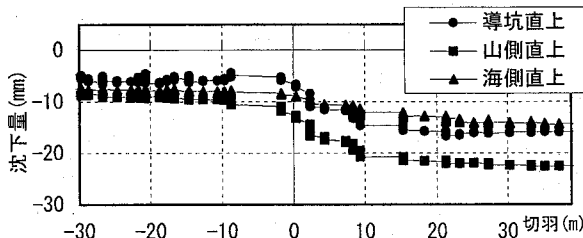


図-17 直上沈下測定結果（AGF区間）

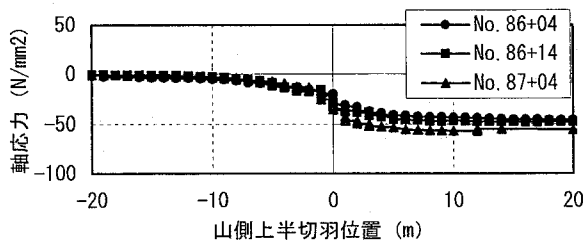


図-18 PSS鋼管天端部の応力（涌波台地新鮮部Ⅱ）

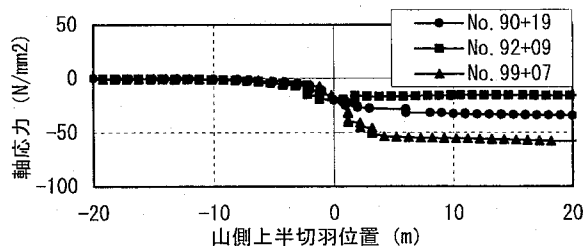


図-19 PSS鋼管天端部の応力（涌波台地新鮮部）

切羽到達前後のPSS鋼管応力の挙動を、掘削に伴うトンネル周辺地山の変位挙動（トンネル縦断方向の変位挙動）で考えると、PSS-Arch工法により先行変位が小さく抑えられるとともに、切羽通過後の変位量も緩み抑制により非常に小さい状況

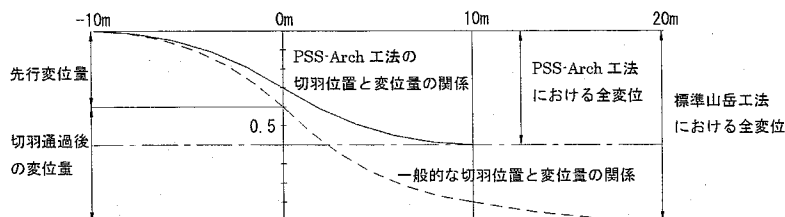


図-20 掘削に伴うトンネル周辺地山の想定変位挙

となっていることが想定される（図-20参照）。

これについては、今後、解析による検証を進め、実現象との比較により、PSS-Arch工法の解析モデル化に結び付けたいと考えている。

6. まとめ

先行アーチ支保工による地山補強工法「PSS-Arch工法」を開発し、低土被り・未固結地山を貫くめがねトンネルに採用した。この掘削状況・計測結果からPSS-Arch工法の効果をまとめると次のようになる。

- ① 先行して設置された鋼管支保，注入改良効果により，地山の安定性（自立性）が格段に向上する。
- ② 左右（隣接）トンネルへの影響は中壁周辺の応力再配分に見られるだけで，極めて小さく抑えられる。
- ③ トンネル掘削による影響は，切羽到達前10m～切羽通過後10m程度で，切羽を中心とした対称分布に近い状態である。
- ④ トンネル周辺地山の挙動は，先行緩みの抑制により，切羽通過後の変位量も小さく抑えられると想定される。
- ⑤ 地山安定性の向上，支保工建込作業がなくなることによって切羽接近作業が少なくなり，作業の安全性が大きく向上する。

謝辞：最後にPSS-Arch工法の施工を採用・実施する上で貴重な助言を頂いた東京工業大学太田秀樹教授をはじめとする山側幹線施工検討委員会委員各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 石川県金沢土木事務所：山側幹線技術検討委員会報告書，1999
- 2) 熊谷・西松・北都・豊蔵JV：PSS-Arch工法パンフレット，2003