

# 山岳トンネル工事における切羽安定化対策および安全対策事例報告

Stabilizing measures of working face and case report of its safety measures management in mountain tunnel construction

森川 淳司\*1

## 概 要

奈川渡2号トンネルは、梓川断層群（推定断層）に位置しているが、既往調査では露岩など確認されておらず、ほぼ全線で花崗岩が分布するとされているため、変形構造に伴う土质的問題は当初想定されていなかった。しかし実際は、地殻変動に伴う褶曲およびブロックの回転など著しい変形作用を受けており、これら変形作用と亀裂面の風化作用により、脆く岩塊となって崩れやすい状況下での掘削作業となった。

本報では、この崩れやすい切羽の安定化対策を目的に実施した各種補助工法の施工および切羽作業時の肌落ち災害防止対策で実施した事例について報告する。

key words : NATM、地質不良、補助工法、切羽肌落ち

## 1. はじめに

国道158号奈川渡改良は、国道158号奈川渡ダム下流に、防災や線形改良を目的として計画された延長2.2kmの改良事業である。

本工事は同事業である2号トンネル（トンネル延長約1,534m）のうち、事業終点側から延長約800mをNATMで建設する工事である。

当該地域は、上高地、白骨温泉および乗鞍高原等、国内有数の観光名所が点在し、観光シーズンは当該路線に観光目的の交通が集中しており、奈川渡改良の整備事業により、時間短縮や安全な走行が図られ、観光産業の活性化が期待されている。図-1に工事位置図を示す。



図-1 工事位置図

## 2. 工事の概要

### 2.1 工事概要

工事名称：奈川渡2号トンネル(その1)工事

施工場所：長野県松本市安曇地先

発注者：国土交通省関東地方整備局

工期：平成28年3月15日～平成31年2月25日

トンネル掘削：L=800m（2号トンネル総延長L=1,534m）  
（NATM 発破方式）

道路土工：残土処理工 76,200m<sup>3</sup>（発生土受入地造成）

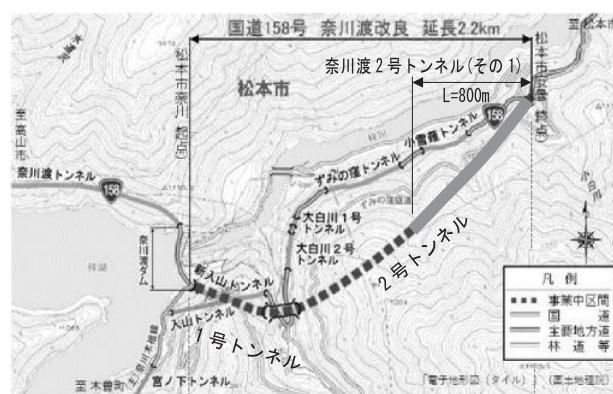


図-2 奈川渡改良事業計画図

\*1 Junji MORIKAWA

東京支社土木支店土木部 作業所長

2.2 地質概要

奈川渡2号トンネルは、飛騨山脈の最南部乗鞍岳の東部、松本市の南西部約30kmの梓川に建設された奈川渡ダムの直下流右岸側に位置し、梓川中流の右岸側に建設された国道158号とほぼ平行に計画されている(図-2)。計画トンネル区間は急傾斜地を呈し、現国道においてもトンネルが連続する区間である。坑口周辺の地形も斜面傾斜40~45°と急峻な地形を呈す。

当該地周辺は、飛騨山脈南部から木曾山脈北部にわたって分布する美濃帯が広く分布する。美濃帯は西南日本内帯の主要な地質帯の1つで中生層の付加体からなる。当該地は、美濃帯堆積岩コンプレックスのうち、島々コンプレックス(島々帯)の頁岩が梓川に沿って分布し、これに後期白亜-新第三紀の奈川花崗岩が貫入しており、それぞれは低角に接触する。島々帯は主に珪質泥岩や泥岩などの泥質岩をマトリックスとするオリストストロームからなり、チャート、砂岩、凝灰質泥岩および珪質泥岩などのオリストリスを含む。島々帯は著しい変形を受けており、変形構造として、劈開面、リーデル剪断面、小褶曲およびブロックの回転などが見られる。島々から奈川渡にかけてNE-SW方向に伸びるリニアメントが確認されており、梓川断層群(推定断層)と呼称されているが、既往調査では露頭など確認されていない。

トンネルは、坑口周辺および坑口上部斜面で一部頁岩が確認されるが、ほぼ全線で花崗岩が分布するとされているため、変形構造に伴う土木的問題は想定されない。

トンネルに分布する地質は、中生代/奈川花崗岩の花崗岩(Gr)である。終点側坑口部のボーリング調査では、花崗岩中に、捕獲岩として泥質砂岩(S1)がブロック状に挟在していることが確認されている。2号トンネル周辺の地質層序を表-1に示す。

表-1 2号トンネル周辺の地質層序

第四紀	更新世	c	人工斜面	のり面保護工、コンクリート構造物
		dt	新期前積土類	現河床堆積物、谷底堆積物、崩壊性堆積物など
		df	新期前積土類	土石流堆積物
		odt	古期前積土類	古期崩壊性堆積物
		odf	古期前積土類	古期土石流堆積物
中生代	更新世	tr	段丘堆積物	
		sGr	変位基盤岩	花崗岩
	sSl	中古生層(頁岩優勢層)		
	中生代	W-Gr	花崗岩	花崗岩(風化部)
		Gr	花崗岩	花崗岩 2号トンネル全体に分布
		Ch		チャート
		Ss	中生層	砂岩優勢層
		W-Sl		頁岩優勢層(風化部)
SI			頁岩優勢層 終点側坑口付近に捕獲岩として分布	

3. トンネル切羽安定化対策

奈川渡2号トンネルは梓川断層群(推定断層)に位置しており、その1工事区間においても図-3に示すように既往調査で破碎部が3箇所確認されているものの、それに伴う露岩などは明確に確認されておらず、さらにほぼ全線で花崗岩が分布するとされているため、変形構造に伴う土木的問題は当初想定されていなかった。しかし実際は、トンネル本坑掘削開始から約150mの区間において、小褶曲およびブロックの回転など著しい変形作用を受けており、これら変形作用と亀裂面の風化作用により、脆く岩塊となって崩れ易い状況下での掘削作業となった。

以下に、切羽安定化の検討概要と本トンネルで発生した天端部および切羽の崩壊を受けて対策した各種トンネル補助工法の施工について報告する。

3.1 切羽安定化対策の検討概要

通常、トンネル掘削の難易度は湧水と地圧の程度に左右される。トンネル掘削が安定するためには支保工が施工されて効果を発揮するまでの間、切羽および天端が安

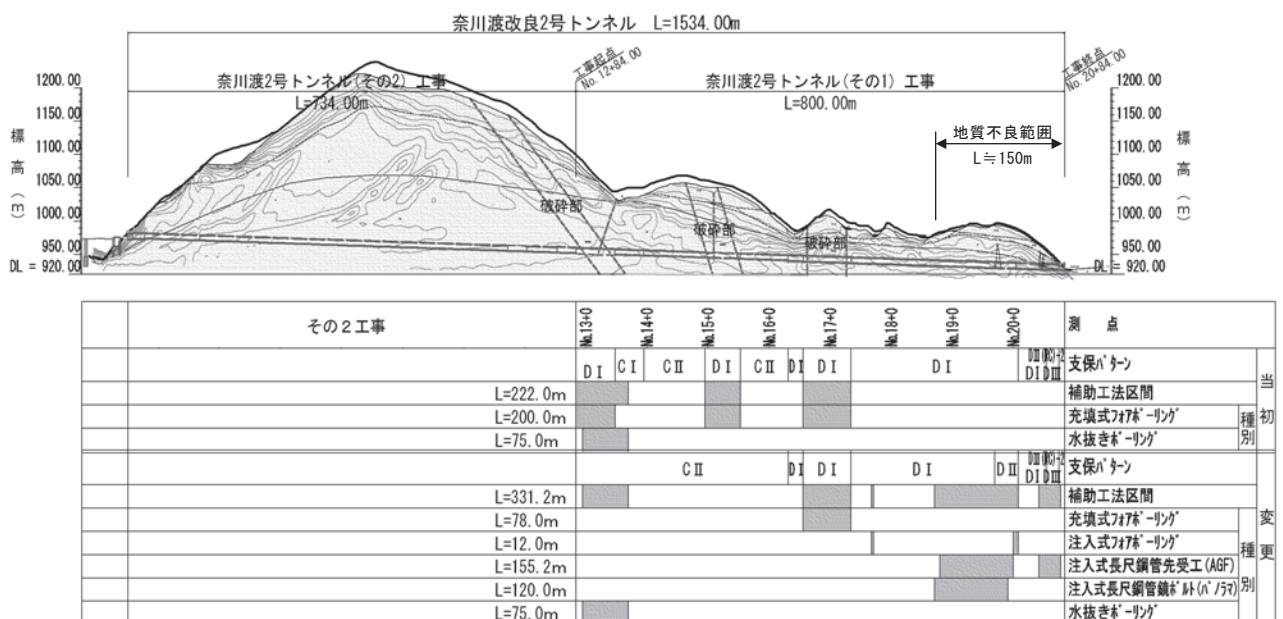


図-3 奈川渡2号トンネル地質縦断図および補助工法範囲図

定していることが必要である。しかし、風化の著しい軟岩～土砂状地山、あるいは湧水によって脆弱化した地山においては、吹付けコンクリートの強度発現以前に切羽斜め前方の地山が早期に緩み、切羽の崩壊、天端崩落等の災害が発生しやすくなる。これらの対策工として、現在種々の補助工法が研究開発され使用されている。

補助工法は、その目的に応じて切羽安定対策、湧水対策、地表面沈下対策、近接構造物対策などに分類される。現在、種々の補助工法が用いられているが、代表的な補助工法について、その目的と対象地山との適応性を表-2に示す

表-2 補助工法の分類

工 法	補助工法の目的					対象地山条件			
	天端の安定対策	鏡面の安定対策	脚部の安定対策	湧水対策	地表面沈下対策	近接構造物対策	硬岩	軟岩	土砂
先受け工	フォアボーリング	◎	○			○	○	◎	◎
	注入式フォアボーリング	◎	○			○	○	◎	◎
	長尺鋼管フォアパイリング	○	○			○	○	◎	◎
	パイプルーフ	○	○		◎	○		○	○
	水平ジェットグラウト	○	○	○		○		○	○
鏡面の補強	フレライニング	○	○		○	○		○	○
	鏡吹付コンクリート		◎					○	◎
脚部の補強	鏡止めボルト(パイル)		◎					○	○
	支保工脚部の拡幅			◎				○	◎
	仮インパート			○				○	○
	脚部補強ボルト・パイル			○				○	○
湧水対策	脚部改良			○				○	○
	水抜きボーリング	○	○		◎			◎	◎
	ディープウェル	○	○		○			○	○
地山補強	ウェルポイント	○	○		○			○	○
	垂直縫地	○	○		○			○	○
	注入	○	○	○	◎	◎		○	○
	遮断壁	○	○		○			○	○

◎：比較的良く用いられる工法、○：場合によって用いられる工法  
「道路トンネル技術基準（構造編）・同解説」（社）日本道路協会

本工事で実施した天端対策補助工法と鏡面対策補助工法について報告する。

### 3.2 天端安定化対策補助工法の検討

#### 3.2.1 天端安定化対策補助工法の検討フロー

トンネルを掘削すると天端地山は緩み、放置すると崩落する。したがって、トンネル掘削においては、地山が崩落するまでの間にできるだけ素早く鋼製支保工・吹付けコンクリート、ロックボルト工等の一次支保部材を設置することが重要となる。

一般に地質の悪い区間の一掘進長は 1.0m であり、一次支保が完成するまでの時間は数時間程度であるが、その間、地山が自立できないことが考えられる。この場合、先受け工と呼ばれる天端部の安定の対策補助工法を実施する。掘削された地山は既設区間と切羽の両支点に支えられた梁として機能するが、地山が悪い場合には天端が梁として機能せず自立しない。そこで両支点にまたがる梁材として、ボルトや鋼管を事前に打設して、その後に掘削を開始する。これが先受け工である。地質がさらに悪い場合には、切羽の地山が支点の役割を果たせなくなるため、先受け工として長尺で剛性の高いものが必要となる。場合によっては、薬液注入による地盤改良が必要となる。

天端対策補助工法の選定については、図-4 のフローに従い決定する。

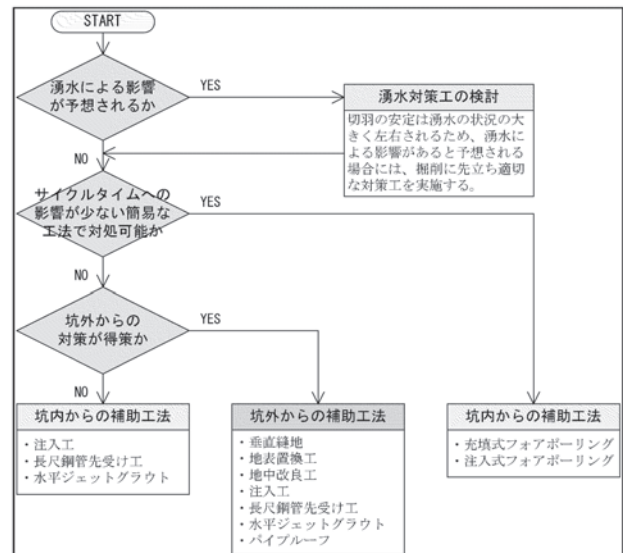


図-4 天端安定対策補助工法の選定フローチャート

「NATM 補助工法の手引き（案）」平成 12 年 3 月建設省近畿地方整備局より抜粋

#### 3.2.2 天端崩落の要因と補助工法の選定

##### （注入式長尺鋼管先受け工（AGF-P 工法））

本坑掘削開始 7 基目支保工上半の発破掘削時にトンネル右肩上部より、土砂および岩塊（大塊）の崩落が発生した（図-5）。

当該地山については、風化花崗岩が分布し、地質は全体に不規則な亀裂で覆われ、亀裂沿いの風化および一部にマサ化が進んでいることが認められた。今回はその風化した亀裂に囲われた岩塊が掘削時の振動で緩みブロック状で崩落したこともあり、さらなる天端部崩落や切羽の肌落ちを防止し安全にトンネル掘削作業を進めるため、補助工法が不可欠であると判断した。

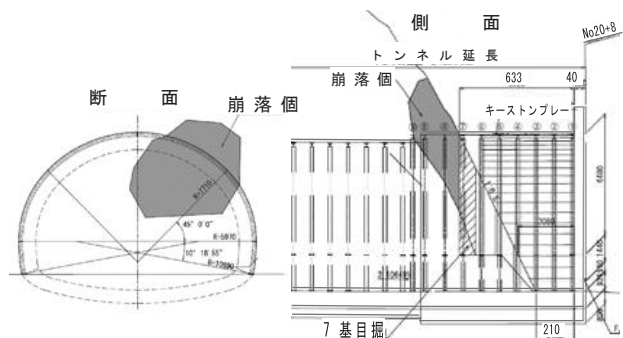


図-5 坑口部崩落箇所



写真-1 切羽天端部崩落の状況



本トンネルでの補助工法は天端・切羽の安定および先行変位の抑制、地山の緩み防止に効果があり、大塊の荷重に対しても剛性が保たれる AGF 工法を採用することとした。

当該区間で長尺鋼管先受け工を選定した理由は、「天端・切羽の安定」および「先行変位の抑制、地山の先行緩み防止」を重要課題として考慮する上で、本トンネル坑口部の地山に見られるような多亀裂で、さらに亀裂面で風化変質の進んだ崩れ易い岩塊が積み重なった地山においては、梁材として十分な剛性をもった補助工法が必要となる（図-6）。従って安全確保を第一とし、施工性や費用対効果も比較した結果、長尺鋼管先受け工（AGF 工法）が最適であると判断した。

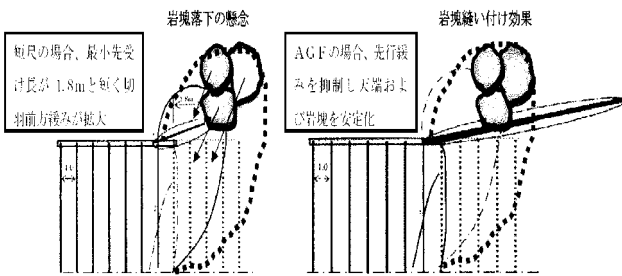


図-6 崩落対策模式図

また、注入材については、鋼管打設周辺部を十分改良し岩石の抜け落ちが発生しないよう亀裂内への浸透と岩片の結合効果の高い材料が求められる。AGF 施工完了次第掘削を開始することからも反応硬化時間と強度発現が速いウレタン系注入材（シリカレジンを採用することとした（表-4）。

表-4 長尺フォアパイル用注入材の性能比較表

注入材名称	項目	瞬結性	浸透性	発泡性	耐湧水	耐凍水	充填効果 (ホモゲル強度)	限定改良	施工性・反応制御	適用地山 (実績参考)
		○	△	○	○	○	○	○	○	
ウレタン系	ウレタン	○	△	○	○	○	○	○	○	全般
	シリカレジ	○	△	○	○	○	○	○	○	全般
セメント系	1.5 ショット	○	△	×	△	×	○	△	△	粘性土 風化岩
	1 液型	×	△	×	×	×	○	△	○	粘性土 風化岩
水ガラス系	溶液型	△	○	×	×	×	×	△	△	砂層 砂礫層
	懸濁型	△	○	×	×	×	△	△	△	砂層 砂礫層

○：良、△：中位、または地山条件・注入方式により可能、  
×：なし、または期待できない  
トンネルライブラリー 第 20 号 山岳トンネルの補助工法-2009 年版-  
土木学会より抜粋

### 3.3 鏡面安定化対策補助工法の検討

#### 3.3.1 鏡面安定化対策補助工法の検討フロー

鏡面の安定は、掘削断面を小さくして 1 回の掘進長を短くして安定を図る工法もあるが、近年の施工実績等を踏まえた場合、鏡面の安定を別途対策で確保した上で比較的大きな断面にて施工する工法が主流となっている。

なお、図-7 に示すフローは天端部を含む鏡面対策補助工法であるため、純粋な鏡面対策補助工法としては、リングカット、鏡吹付コンクリート、鏡ボルト（パイル）工が抽出される。

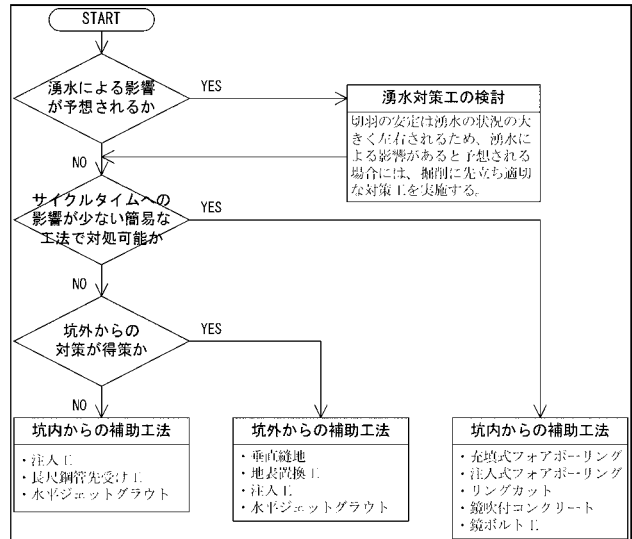


図-7 切羽安定対策補助工法の選定フローチャート「NATM 補助工法の手引き（案）」平成 12 年 3 月建設省近畿地方整備局より抜粋

鏡吹付けコンクリートは、切羽の自立性の向上を図ることを目的として、掘削直後の鏡面に吹付けコンクリートを施すことにより、鏡面の肌落ち防止とともに鏡面の応力解放を抑制する効果を期待するものである。

鏡ボルトは、鏡面の核残しと鏡吹付けコンクリートで鏡の自立性が確保できない場合に、これらと併用、あるいは単独で、ボルトの縫い付け効果（充填式）あるいは鏡面の岩盤固結による地山の改良効果（注入式）を期待する場合に適用される。さらに長尺鏡ボルトは、短尺鏡ボルトの鏡面の自立性向上効果に加え、先行変位を抑制する効果を期待する場合が多い。すなわち、切羽面から鋼管等のボルトを打設・定着させ、その引張力により切羽の岩塊の剥落を抑えるものである。

#### 3.3.2 鏡面の崩落の要因と補助工法の選定

##### （注入式長尺鋼管鏡ボルト工（パノラマ工法））

本工事 DII パターン区間において、当初設計で採用されていた注入フォアボーリング（補助工法）で掘削を実施したが、天端部を含む切羽面の先行緩みによる岩塊の崩落が発生したため、坑口部にて実績のある長尺先受け工（AGF-P 工法 L=12.5m）に変更し掘削を再開した。

その結果、長尺鋼管先受け工による剛性の強化とシリ

カレジンの注入効果（地山改良効果）により天端部に関しては安定し崩落等は特に見られなかったが、当該地質が想定以上に切羽の自立性に乏しい地山で、掘削中の振動などにより、切羽から3~4m程度前方まで層理に沿って鏡面の崩落が発生した（写真-2）。



写真-2 鏡面の崩落状況

今回の崩落の要因は、掘削に伴う応力の開放で切羽の先行緩みが拡大し、鏡面の岩塊が剥落しようとした際に働く剪断や引張に耐えられないことを示している。よって、当区間の掘削（発破、上半先進掘削工法）にあたっては、掘削高さが6.0mと高いこと、さらに鏡面の崩落は鏡吹付けコンクリートの施工前に発生しており、鏡吹付けコンクリートだけでは先行した緩み域の拡大に対し十分な安定化対策にならないことから、先に実施した注入式長尺鋼管先受け工（AGF-P工法）に加え、鏡ボルトの施工が必要であると判断した（図-5）。

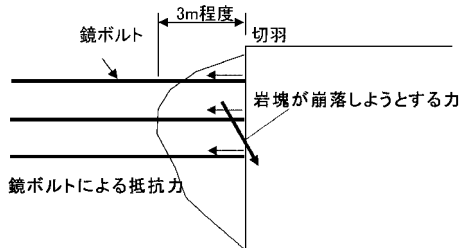


図-5 鏡面の安定化対策模式図

鏡ボルトの選定については、掘削中の崩落要因が多亀裂質な強風化岩による先行変位の増大によるものと想定されたため、短尺鏡ボルトの自立性向上効果に加え、先行変位を抑制する効果も期待できる注入式長尺鋼管鏡ボルト（パノラマ工法）を採用した。

なお、短尺の鏡ボルトと比較して、長尺鏡ボルトを採用する利点としては以下の点が挙げられる。

- ・一打設長を長くすることにより打設回数を減じ、施工サイクルを効率化できる。
- ・切羽前方の緩みや変位が生じていない地山部分にも打設されるため、掘削時に生じる切羽の押し出し変位にตอบสนองして軸力が発生し、ボルトの内圧効果が発生する。これにより、切羽の自立性がさらに向上することが期待できる。
- ・注入圧を高く取ることができるため、注入材の岩盤への浸透による地山改良効果を期待できる。

表-5に鏡ボルトの標準設計パターン例、表-6に長尺鏡ボルトの種類と諸元の例を示す。

表-5 鏡ボルトの標準設計パターン例

設計パターン	I	II	III
打設間隔	1.2m程度	1.5m程度	1.8m程度
縦方向	1.2m程度	1.5m程度	1.8m程度
横方向	1.2m程度	1.5m程度	1.8m程度
適用地山	・非常に軟質な地山、もしくは土砂地山 ・岩塊や土砂の崩壊した地山 ・非常に空隙の多い地山 ・非常に押し出し性、地圧の大きい地山	・崖錐や破砕帯等 ・切羽が崩壊しやすい地山 ・押し出し性地圧のある地山	・固結度の低い地山 ・亀裂の多い地山 ・切羽の肌落ちが見られる地山
参考地山等級（道路）	E等級	D等級	C等級

注）鏡面に湧水のある場合は、事前に排水対策を採用することを基本とする。湧水が十分に処理できない場合は、上表の設計パターンを1ランク上げる。

表-6 長尺鏡ボルトの種類と諸元の例

	GFRPボルト （中空タイプ）	GFRP管	スリット式 鋼管	連結式鋼管 膨張型
外径(mm)/内径 (mm)	32/14	76/60	76.3/5.9	挿入時外径 36 拡張時 54/48
標準削孔径(mm)	65	90	89	43~51
1ユニット長 (mm)	通常部 4.0.5.0.6.0 先頭部 —	3.00	3.05	3.0.4.0
単位重量(kg/m)	0.92	3.0	9.1	約 4.0
施工法	削孔	単管式	二重管式	単管式
	定着	注入式	注入式	単管式

なお、本工事では掘削時の鋼管回収を容易にするため、スリット式鋼管（φ76.3）を採用した。打設長は鏡ボルトと先に実施しているAGF-P工法が同一断面で施工できるようL=12.5m（有効長9.0m）、配置については表-5（設計パターンII）のとおり@1.5mとし、注入材はAGF-P工法で実績のあるシリカレジンを採用した（図-6）。

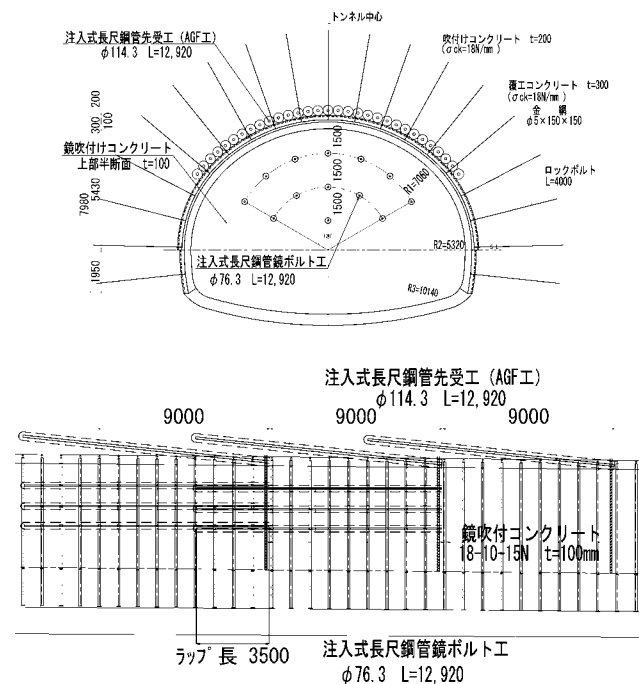


図-6 補助工法配置図

#### 4. 切羽作業時の肌落ち災害防止対策事例の紹介

山岳トンネル工事の切羽における労働災害の防止を図ることを目的として、厚生労働省より「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」（平成28年12月26日基発 平成30年1月18日改正）が策定されているが、ここでは、本工事で実施している切羽立入作業時の肌落ち災害防止対策事例についていくつか紹介する。

##### 4.1 切羽監視責任者の選任

発破の点火やズリ出し等切羽に労働者が接近しない作業工程を除き、切羽監視責任者を専任し、常時監視を実施した（写真-3）。



写真-3 切羽監視員の専任  
(バックプロテクターに明示)

##### 4.2 ジャンボバスケット防護カバーの採用（装薬作業）

ホイールジャンボ・バスケットに折り畳み可能な落石防護カバーを設置し、装薬作業等切羽近接作業時における切羽からの落石による災害を防止した（写真-4）。



写真-4 ホイールジャンボ・バスケット落石防護

##### 4.3 エレクタ搭載型吹付け機と支保工建込時の

###### 落石防護カバーの採用（支保工建込作業）

装薬・発破・ズリだし後の次工程である1次吹付け～支保工建込～2次吹付け作業にて、支保工エレクタ、バスケット搭載型吹付けロボットを採用。吹付け機一台で吹付けから支保工建込まで行うことで、機械の入替時間を短縮させ、時間経過に伴う切羽地山の緩みを抑制した（写真-5）。

また、支保工建込時、切羽近傍に立ち入る際は、既設支保工に落石防護カバーを取り付け、切羽、外周地山からの落石による災害を防止した（写真-6）。



写真-5 支保工建込状況  
(支保工エレクタ搭載型吹付け機)



写真-6 支保工建込状況  
(落石防護カバー)

#### 5. おわりに

元来、急峻な地山が多い我が国は、狭い平野部に人口が密集しており、鉄道、道路、上下水道などの社会資本整備において、山岳工法は近年ますますその適用範囲が拡大されてきている。さらに、山岳部のみならず、地形、地質条件の悪い市街地においてもその施工実績が増加してきている。これは、山岳工法の設計・施工に関わる技術の進歩、とくに補助工法の材料、施工法などの技術的進歩によるところも大きい。

一方で山岳トンネル工事における掘削の最先端(切羽)ではほぼ垂直に地山が露出し、岩石の落下(肌落ち)などに起因する労働災害がたびたび発生しており、発生した場合の重篤度も高くなっている。

山岳トンネルの建設において、工事を円滑に進め、肌落ちなどに起因する災害の防止を図るためには、切羽地山を安定させることが重要であり、さらには労働安全衛生関係法令と相まって、当該切羽地山の特性を踏まえた上で、適切な切羽肌落ち防止対策を計画・実施することが重要である。

本報告が、今後の同種工事における計画・施工の参考になれば幸いである。

最後に、当工事で様々な切羽地山トラブルに直面した際、その対策にあたり多大なるご協力をいただいた関係者各位に対し、心から感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[山岳工法編]・同解説
- 2) 土木学会：トンネルライブラリ第20号 山岳トンネルの補助工法-2009年版-
- 3) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説
- 4) 近畿地方整備局：NATM補助工法の手引き(案)
- 5) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン 平成30年1月18日改正版