

急峻な落石傾斜地の道路直上でのトンネル到達部の施工

—国道 158 号奈川渡 2 号トンネル—

Construction of Arrival Section of a Tunnel Directly Above a Road on a Steep Slope

森川 淳司*1

概 要

本工事は、奈川渡ダム下流に、防災や線形改良等を目的として、2本のトンネルと1本の橋梁により計画する延長2.2kmの改良事業である。当該地域は、上高地、白骨温泉、乗鞍高原等の観光名所が点在するため、事業による安全な走行や移動時間短縮、観光産業の活性化にも期待されている。本工事は同事業のうち、(仮称)奈川渡2号トンネルをNATM工法で建設する工事である。このうち到達側坑口は、亀裂質な花崗岩が分布し、凹地形に土砂や転石を包有する急傾斜地にあり供用中の国道直上に計画されている。

本報では、伸縮ダクトと換気装置の自動制御による作業環境改善および転石の散在する急傾斜地形における供用中の現道に配慮した到達部の施工について報告する。

key words : トンネル到達部、急傾斜地、落石防止対策、伸縮ダクト、換気装置、自動制御

1. はじめに

本工事は、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の改良事業のうち、(仮称)奈川渡2号トンネルをNATM工法で建設する工事である(図-1、2)。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。計画トンネル区間は急傾斜地をなし、坑口周辺の地形も斜面傾斜40~45°と急峻な地形である。

本報では、伸縮ダクトと換気装置の自動制御による作業環境改善と、供用中の国道直上に計画された到達側坑口部の落石対策について報告する。



図-1 工事位置図

2. 工事概要

2.1 工事概要

工事名称：奈川渡2号トンネル(その2)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：2018年7月14日~2021年2月26日

・トンネル掘削(NATM発破方式)：

L=734m(2号トンネル総延長L=1,534m)

・覆工コンクリート・防水工：L=1,002m

・道路改良(残土処理工)：V=65,000m³

・橋梁下部(A2橋台)：1基

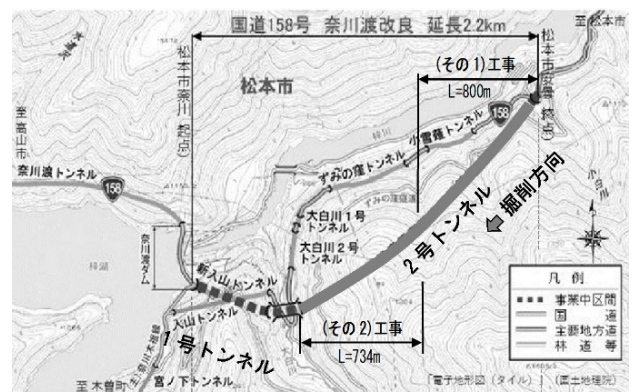


図-2 奈川渡改良事業計画概要図

*1 Junji MORIKAWA

東京支社土木支店土木部 作業所長

2.2 地質概要

トンネル付近の地質層序を表-1に示す。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。

奈川渡2号トンネルは呼称梓川断層群(推定断層)に位置しており、工事区間においても図-3に示すように、既往調査より破碎部が3か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いることが確認され¹⁾、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。

3. 伸縮ダクトと換気装置の自動制御²⁾

3.1 自動制御システムの概要

伸縮ダクトと換気装置の自動制御システム概要を図-4に示す。通常、集塵機の伸縮ダクトは、手動のリモコン操作により、粉塵が発生しない場合には、作業に支障が出

ないように、または破損させないように切羽後方まで後退させ、粉塵が発生する作業の場合は、粉塵吸引のために切羽まで前進させる。同時に、粉塵が発生する作業の場合は、集塵機の吸引量を高め、換気ファンは吸引量よりも低い風量で送風し、切羽後方への粉塵の充満を抑制する風量調整を行う必要がある。なお、これらの調整は作業が変わる都度行う必要があり、伸縮ダクトの操作時期や、換気装置の運転調整のタイミングが遅れると、粉塵などが切羽後方のトンネル坑内へ充満することがある。また、発破直後は粉塵・後ガスが充満することや、見通しが悪いため、伸縮ダクトのリモコン操作を直ぐに行うことができない等の課題がある。

そこで、作業工程判断に応じて、伸縮ダクトを含む換気装置を全自動で最適な状態に制御できる仕組みを構築した。また、各種濃度計・センサーによる風量調整機能も加えており、定置式濃度計等を用いて、作業環境管理の閾値以上の濃度となった場合に伸縮ダクトを前進させることや、換気装置の風量や吸引量を強める自動制御も加えて、換気機能の確実性を高めている。

3.2 自動制御による作業環境改善

伸縮ダクトと換気装置の自動制御システムは、作業開始前に換気ファンの運転ボタンを押した後、直ちに運転が開始される。そして、発破センサーが発破を検知すると、自動で伸縮ダクトが切羽まで前進し、集塵機が高速運転で発破粉塵の吸引を開始する。その際、粉塵を吸引しや

表-1 奈川渡2号トンネル周辺の地質層序

第四紀	完新世	c	人工斜面	のり面保護工、コンクリート構造物
		dt	新期崩積土類	現河床堆積物、谷底堆積物、崩壊性堆積物など
		df		土石流堆積物
	odt	古期崩積土類	古期崩壊性堆積物	
	odf		古期土石流堆積物	
	更新世	tr	段丘堆積物	
中生代	sGr	変位基盤岩	花崗岩	
	sSl		中生層(頁岩優勢層)	
	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	中生層	チャート	
	Ss		砂岩優勢層	
	W-Sl		頁岩優勢層(風化部)	
Sl	頁岩優勢層			

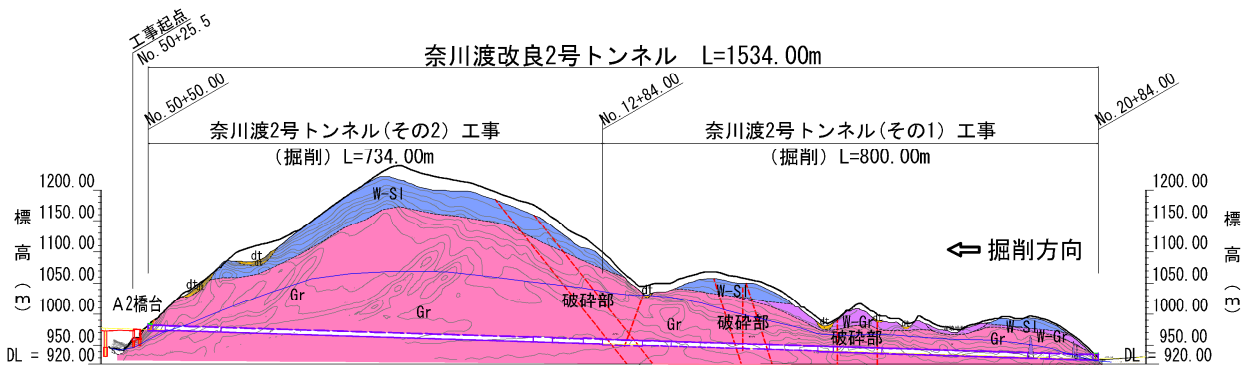


図-3 奈川渡2号トンネル地質縦断面図

すいように、換気ファンは自動で適した風量（集塵機の吸引量よりも少ない風量）で運転する。次に、発破後の所定時間経過後の粉塵濃度が下がった時期に、自動で集塵機が停止し、伸縮ダクトが後退する。同時に、発破で破碎したずりを搬出する作業工程を判断し、坑内全域の排出ガスなどを換気できる風量を送風するために換気ファンは自動で高速運転を開始する。

これまで、粉塵計の濃度測定値が高くなると集塵機の吸引量を高めるなどの制御が行われていたが、本システムでは、「粉塵濃度が高くなる作業工程」を判断して制御

するため、粉塵濃度が高まる前に集塵機の吸引量を高め、伸縮ダクトを前進させておくことができる。また、操作を無人で自動化することで、人為的な操作ミスや、操作遅れによる作業環境悪化を防ぐことができる。

作業環境の改善効果を示す 1 例として、発破直後の換気装置の電力量と粉塵量の関係を図-5 に示す。図-5 の左図においては、時刻 8:02 直前に発破が行われ、発破センサーが発破を検知し、サーバーで発破状態を記録している。その後、坑外の換気ファンの操作盤で、換気ファンの運転ボタンを押すことで、換気ファンが自動で低速運



図-4 伸縮ダクト・換気装置の自動制御システム概要

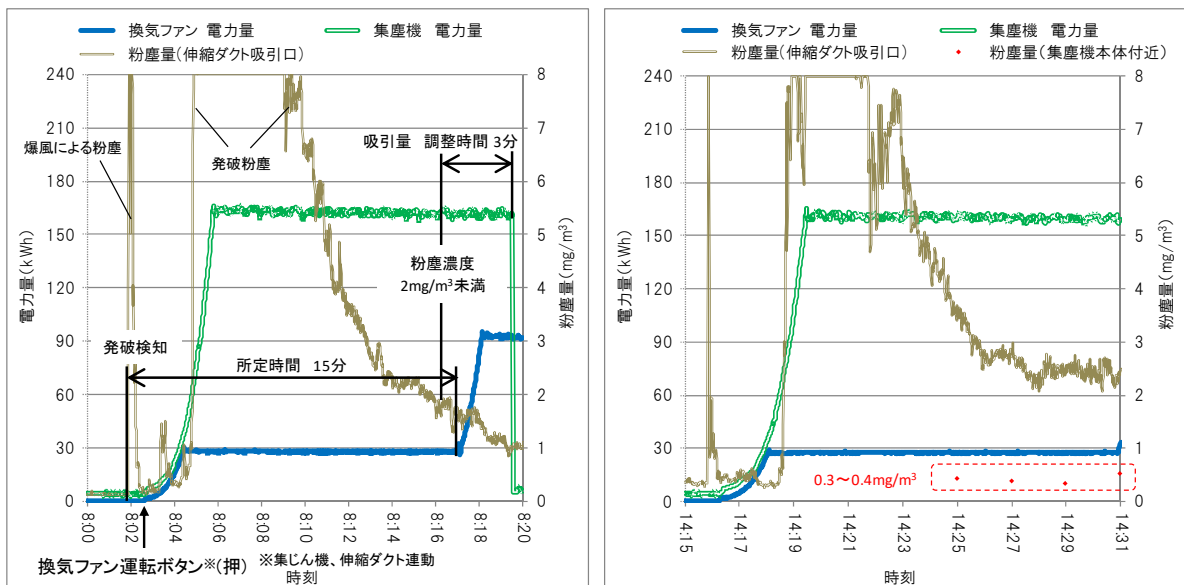


図-5 発破直後の換気装置の電力量と粉じん量の関係

転、集塵機が高速運転を開始している。この際、グラフには表示されていないが、連動して伸縮ダクトが自動で切羽付近へ前進している。また、サーバーで発破状態が記録されているため、設置した 15 分間は発破による粉塵を吸引除去する工程として、換気ファンの風量と集塵機の吸引量の状態を維持している。所定時間経過後は、換気ファンはその時点の作業工程である「ずり出し中」を判断し、高速運転を開始し、集塵機は粉塵濃度が $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下になった時点でサーバーで記録し、粉塵が再び上昇しないように直ぐには吸引量を低下させず、調整時間 3 分間を経過した時点で吸引量を低下させる。この時、伸縮ダクトも自動で後退する。

図-5 の右図は、異なる時刻の発破直後における換気・集塵を行った際に、集塵機本体付近で手動により粉塵量を測定した値 (4 点) を記したものである。粉塵量は、 $0.3 \sim 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ を示しているため、切羽における高濃度の発破粉塵が、集塵機本体付近まで充満していないことが分かる。

4. トンネル到達側 (起点側) 坑口部の検討

4.1 到達側 (起点側) 坑口部の地形地質

到達側坑口部周辺の地形地質的特徴は以下のとおりである。

①急峻な斜面中に露岩したやや出尾根部に坑口が計画されている (写真-1)。

②坑口斜面は亀裂の発達した花崗岩が広く分布し、落石供給源も多数確認されている。

③既往のボーリング調査により、芯部に至るまで風化が確認されている。

到達側坑口周辺の斜面は、図-6 に示すように大小さまざまな凹地状地形とそれらの境界となる尾根状地形が繰り返す地形を成している。表-2 に到達側坑口部の斜面評価一覧を示す。尾根状地形部は亀裂質な花崗岩が分布し急傾斜地となり、凹地状地形は土砂状の表土が堆積し、表層に花崗岩の転石を包有する斜面となっている (写真-2、3)。

4.2 周辺施設 (国道 158 号) への影響

到達側坑口は国道 158 号の直上、現道と交差する線形で計画されており、トンネル到達部と切替道路 (メタルロード) との離隔が少ない (図-7)。また、当時切替道路の施工中であった。

4.3 トンネル到達時における課題

トンネル到達時における課題は以下のとおりである。

- 課題① トンネル掘削時の発破振動に伴う斜面浮石等の落石
- 課題② 到達時の天端崩壊による地山の落石
- 課題③ 国道 158 号利用者への落石防止

5. 課題に対する対策

前述の課題に対し、現地の地形地質の状況、また隣接工事との工程調整などの施工条件により、トンネル坑外からの対策工は施工上の制約が大きいと判断し、トンネル坑内からの施工を基本とし対策工を計画、実施した。



写真-1 到達側坑口位置

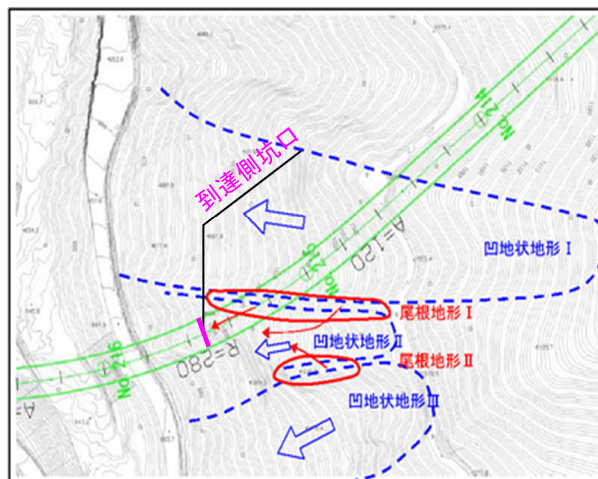


図-6 到達側斜面の落石経路想定図

表-2 斜面評価一覧

地形区分	落石供給源	落石落下方向	斜面評価
凹地状地形 I	ランク I の岩塊が確認されている。	坑口 I と斜交する凹地となるため、坑口方向へは落下しない。	評価不要
凹地状地形 II	50cm未満の転石が散在。	凹地としては小規模であるが、坑口方向に向かう。ただし、中腹に急こう配の露岩部があるため坑口に達するか不明である。	落石シュミレーションにより到達範囲を検討
凹地状地形 III	転石が散在し、現道の落石柵背面へ落石が達する。	坑口方向から離れているため、坑口方向へは落下しない。	評価不要
尾根地形 I	ランク I の岩塊が多数確認されている	坑口直上に位置し、坑口へ向かい落下する。	落石シュミレーションにより落下軌跡 (飛跳高さ等) を検討
尾根地形 II	ランク評価は行われていないが露岩部が確認される。	直接落下はないが、凹地状地形 II 方向へ落下した落石は坑口方向へ向かう可能性がある。	凹地状地形 II の評価に従う

- 対策工① 発破振動抑制工法の採用による斜面落石防止対策
- 対策工② 掘削補助工法（AGF 工法）の採用によるトンネル到達時の天端崩壊による地山の落石防止対策
- 対策工③ 落石防護柵による供用中の国道 158 号利用者に対する防護対策

5.1 発破振動抑制工法による発破振動抑制対策

トンネル掘削時の発破振動に対し、地表面へ伝播する振動の許容値（管理値）を設定し、「制御発破工法（EDD）」、「無発破工法（LS カッター工法）」の採用により、発破振動に起因する到達側坑口斜面の落石を防止する。

トンネル発破掘削時の発破振動制御フローを図-8 に示す。発破振動の「許容値」の設定は、次のとおりとした。発破振動による岩盤斜面に対する影響について、Oriard の示した値を表-3 に示す。それによれば、斜面上の浮石が落下する変位速度の値は、5.1~10.2(cm/sec)となっている。本工事ではその下限に、さらに安全率 70%を設定し、 $5.1 \times 70\% = 3.57$ (cm/sec)を発破振動の許容値とした。

本工事の地山等級 C II の標準発破設計より心抜の装薬量 W ならびに許容振動値を式に代入して、距離 D を求める。次式は発破振動の推定一般式である。

$$V = K \cdot W^{3/4} \cdot d^{-2}$$

$$d^2 = 900 \times 4.8^{3/4} \div 3.57$$

$$d = \sqrt{900 \times 4.8^{3/4} \div 3.57} = 28.6\text{m}$$

上記推定式の値により、地山等級 C II では、斜面より 28.6m までは通常発破が可能であるが、それ以下では発破振動対策が必要となる。ここでの距離はトンネル心抜位置（トンネル中心）から斜面までの斜距離であり、坑口までの距離に直すと、およそ 38.6m となる（図-9）。

なお、許容値の変位速度（ $V = 3.57\text{cm/s}$ ）は、許容値の変位速度（V）と振動レベル（VL）の関係式 $VL = 20\text{Log}V + 83$ により、振動レベル $VL = 94\text{dB}$ （震度 4 中震相当）となる。気象庁震度階級と対応する変位加速度、振動レベルを表-4 に示す。ここで、事前に試験的に実施した発破時の坑内振動測定の結果を表-5 に示す。試験した坑内振動測定に基づき、震度 3（弱震）⇒震度 4（中震）の変化点である「振動レベル 85dB」、「震源からの離れ $L \approx 80\text{m}$ 」を振動計測区間に設定した。振動計測は自動計測システムを採用し、設置位置は地表面の想定影響位置とした。

(1) 制御発破工法（EDD）

発破振動を抑制するためには、通常の電気雷管では段数が不足し、切羽を分割して発破を実施する必要があり、掘削効率の著しい低下を招く。このため電子遅延式雷管である EDD を採用することとした。EDD は、電子タイマーにより秒時をコントロールするもので、最大 200 段発の多段化を実現することができる。通常発破と制御発破の装薬量比較を表-6 に、発破パターンを図-10 に示す。



写真-2 到達側斜面の浮石



写真-3 現道防護柵表土、転石堆積

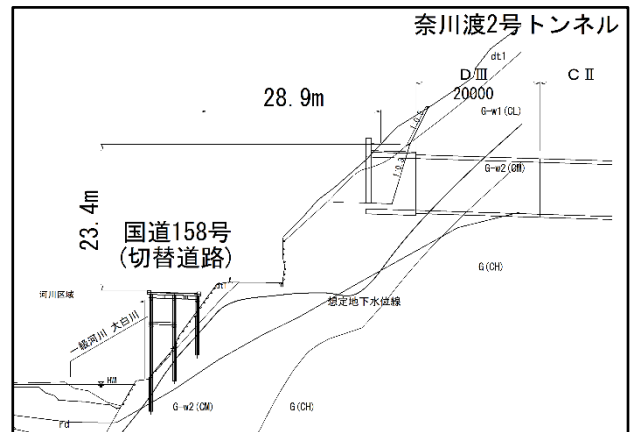


図-7 到達側坑口と現道との位置関係

制御発破区間については、前述の発破振動許容値（変位速度 $< 3.57\text{cm/sec}$ ）に基づき、表-7 のとおりとした。ただし、制御発破区間については、振動自動計測に基づき、随時見直し変更を伴うものとした。

(2) 無発破工法（LS カッター工法）

坑口からの距離 $L = 13.8\text{m}$ 以内では表-7 に示すように、発破振動許容値（変位速度 3.57cm/sec ）を超えるため、当該区間においては、無発破工法（LS カッター工法）を採用した。LS カッター工法とは、先行する孔に案内ガイドを挿入し、平行して穿孔ビットにて新しい孔を穿孔し、孔間をリアガイドで破碎してスリットを造成する。

この方式により、一回の穿孔動作でできるスリット幅

は、穿孔径+孔間と従来方法よりも長くすることが可能となり、スリット造成時間の短縮、施工の効率化が図れる(図-11)。また、LSカッター工法の特徴は、①無発破工法により地表面への振動抑制に効果、②当現場で使用しているドリルジャンボ、大型ブレーカーで施工可能であることである(写真-4)。

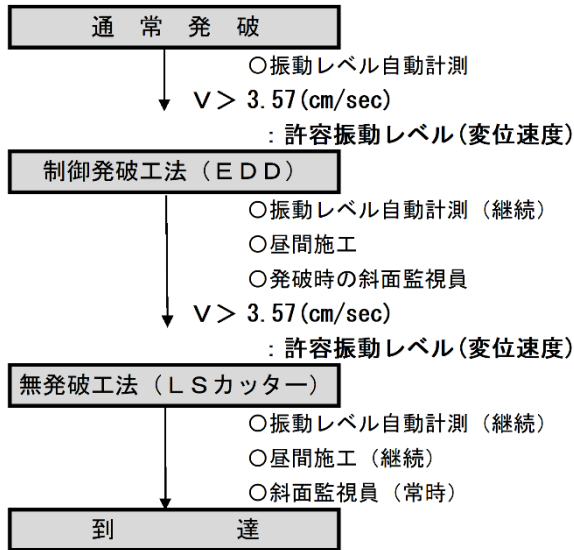


図-8 トンネル発破掘削制御フロー

表-3 岩盤斜面に対する変位速度の影響

変位速度 (cm/s)	岩盤斜面に対する影響
5.1~10.2	斜面上の浮石が落下
12.7~38.1	ゆるんだ岩石の崩落
63.5以上	弱い斜面に損傷が起こる

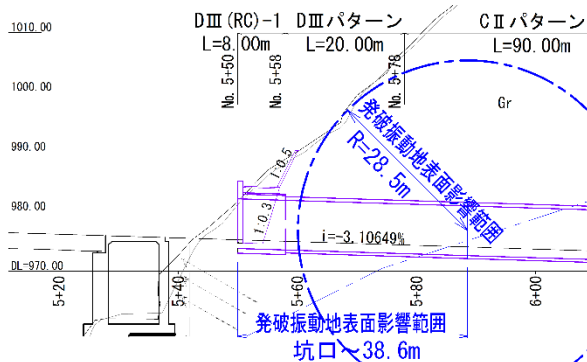


図-9 発破振動影響範囲

(3) 到達側坑口斜面の監視

制御発破区間(予定到達側坑口から距離L=38.6m)からは、トンネル掘削(発破掘削)は昼間施工とし、発破時には斜面監視員を配置した。また、機械掘削区間では、掘削中の常時監視を実施した。

表-4 気象庁震度階級と対応する変位加速度振動レベル

震度	人間	木造構造物	鉄筋コンクリート構造物	加速度 (cm/s ²)	振動レベル (dB)
3 弱震	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。			8.0~25	75~85
4 中震	かなりの恐怖感があり一部の人には身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。			25~80	85~95
5弱 強震	多くの人が見の安全を図ろうとする。一部の人には、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁等に亀裂が生じるものがある。	80~250	95~105
5強 強震	非常に恐怖を感じる。多くの人々が、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱がかなり破損したり、傾くものがある。	耐震性の低い建物では、壁、柱等に大きな亀裂が生じるものがある。耐震性の高い建物でも壁等に亀裂が生じるものがある。		

表-5 発破時の坑内振動測定結果

震源(切羽)からの離れ (m)	振動レベル (dB)	震度
50	93	4 (中震)
100	79	3 (弱震)



震源(切羽)からの離れ (m)	振動レベル (dB)	震度
80	85	3と4の境界

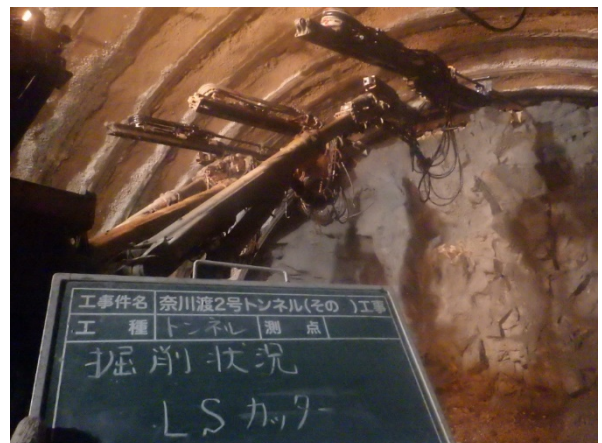


写真-4 LSカッター穿孔状況

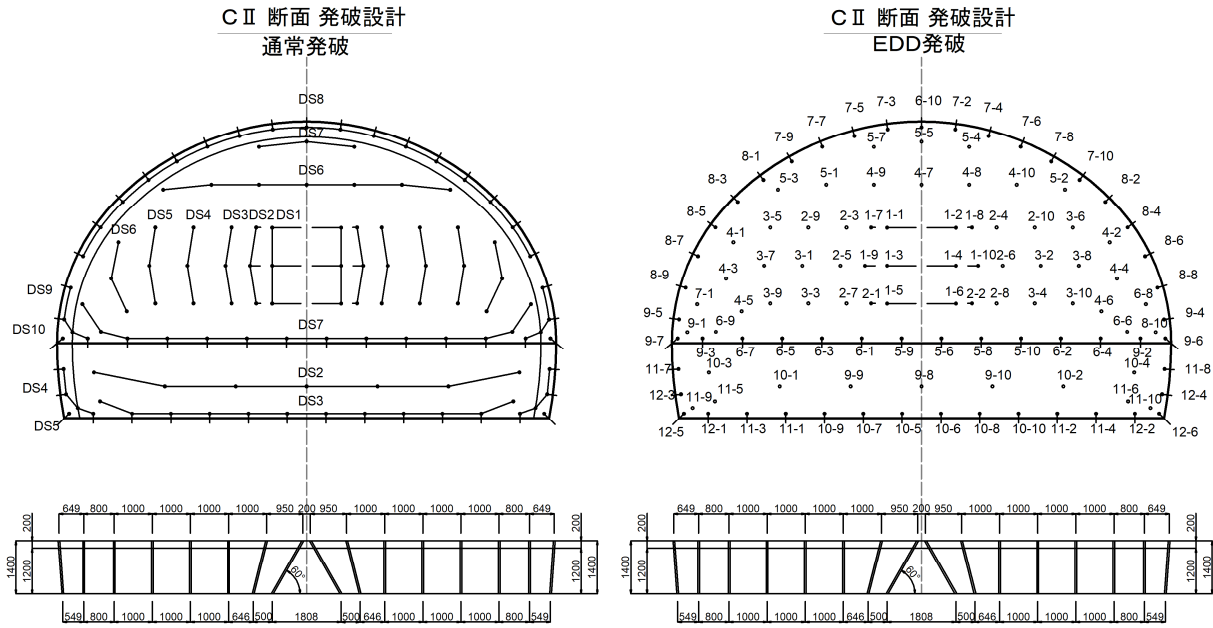


図-10 発破パターン（C II 断面）

表-6 装薬量比較表

（C II：通常発破）

掘削区分	段数	各段孔数 (孔)	各孔装薬量 (kg/孔)	合計装薬量 (kg/段)
上半	DS 1	6	0.8	4.8
	DS 2	6	0.8	4.8
	DS 3	6	0.6	3.6
	DS 4	6	0.6	3.6
	DS 5	6	0.6	3.6
	DS 6	13	0.6	7.8
	DS 7	17	0.6	10.2
	DS 8	17	0.6	10.2
	DS 9	8	0.8	6.4
	DS 10	2	0.8	1.6
上半計		87		56.6
下半	DS 2	7	0.6	4.2
	DS 3	12	0.6	7.2
	DS 4	8	0.8	6.4
	DS 5	2	0.8	1.6
下半計		29		19.4
合計	雷管数(固)	116	爆薬計(kg)	76.0

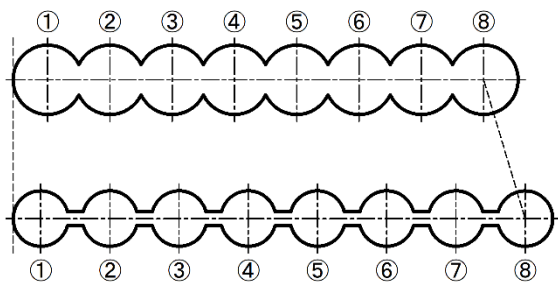
（C II：制御発破）

掘削区分	段数	各段孔数 (孔)	各孔装薬量 (kg/孔)	合計装薬量 (kg/段)
上半	EDD 1	10	0.8	8.0
	EDD 2	2	0.8	1.6
		8	0.6	4.8
	EDD 3	10	0.6	6.0
	EDD 4	10	0.6	6.0
	EDD 5	10	0.6	6.0
	EDD 6	10	0.6	6.0
	EDD 7	10	0.6	6.0
	EDD 8	7	0.6	4.2
3		0.8	2.4	
EDD 9	7	0.8	5.6	
上半計		87		56.6
下半	EDD 9	3	0.6	1.8
	EDD 10	10	0.6	6.0
		6	0.6	3.6
	EDD 11	4	0.8	3.2
6		0.8	4.8	
EDD 12	6	0.8	4.8	
下半計		29		19.4
合計	雷管数(固)	116	爆薬計(kg)	76.0

表-7 制御発破区間

パターン	坑口からの距離 (m)	発破種別	進行長 (m)	斜面側境界 振動推定値 (cm/sec)
C II	38.6以上	通常発破	1.2	3.57
	28.0~38.6	制御発破(EDD)	1.2	1.49
D III	13.8~28.0	制御発破(EDD)	1.0	3.57

従来工法によるスリット
(穿孔径100mm)



LSカッター工法によるスリット
(穿孔径80mm+孔間20mm)

図-11 穿孔スリット比較

5.2 AGF 工法によるトンネル天端地山崩壊抑制

トンネルの坑口部はトンネルの一般部とは異なり、岩質、地質構造、地下水など地山内部の条件のほか、地形や気象などの外的影響を大きく受け、施工上の問題点が発生しやすい。また、トンネル工事の始終点となる重要な箇所であり、施工上の安全確保、周辺構造物の安全確保、周辺環境への配慮が必要である。トンネル掘削時に切羽天端での崩落が発生すると、作業員への安全性の問題だけでなく、特に坑口部においては土被りが少ないため、アーチアクションが期待できず、周辺の緩み領域が拡大され、地表面の陥没、崩壊、ひいては地すべりの発生につながる危険性が懸念される。

トンネル到達側坑口部の施工において考慮すべき問題は、地表面沈下、斜面崩壊、地すべりである。特に本トンネル坑口直下には国道 158 号が交差していることから、トンネル掘削にあたっては、地山を緩めないように配慮し、これらの現象が生じないよう適切な補助工法を採用する必要がある。

したがって、当該到達側坑口天端部の補助工法として、坑内からの施工が可能で、発進側でも施工実績がある AGF 工法を採用した。注入材には、鋼管間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。さらに、AGF 施工完了次第掘削を開始することから、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した (図-12、13)。

5.3 落石防護柵の設置

国道 158 号道路切替え後、切替道路 (メタルロード) 斜面側に仮設落石防護柵を設置し、国道 158 号道路利用者に対する落石防護対策を実施した (写真-5)。

6. 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。一方、山岳トンネルの工事では、非常に硬い地山を掘進することが多く、掘削方法には発破掘削がよく用いられるが、現地では発破にともなう騒音や振動が周辺に伝搬するため、環境対策が求められることが多い。特に近隣に構造物がある場合は、振動による影響が懸念されるため、影響範囲を推定し対策を行うことが重要である。

山岳トンネルの建設において、工事を円滑に進め、地山の崩壊、陥没、落石などに起因する災害の防止を図るためには、当該地盤の特性、周辺地域の特性を踏まえたうえで、適切な災害防止対策を計画、実施することが重要であり、本報が今後の同種工事における計画、施工の参考になれ

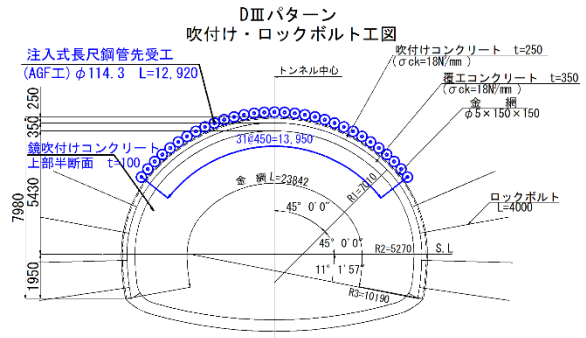


図-12 補助工法 (AGF 工) 断面図

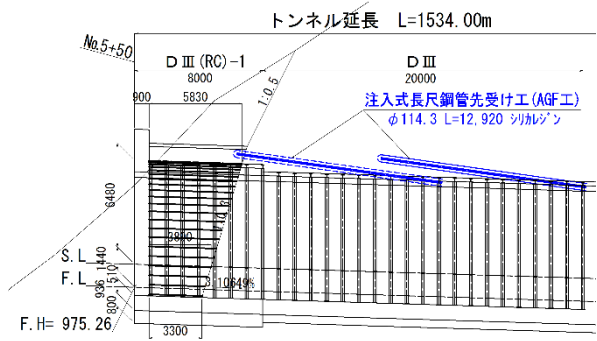


図-13 補助工法 (AGF 工) 側面図



写真-5 落石防護柵設置状況

ば幸いである。

最後に、本工事でトンネル掘削にかかわる様々な地山トラブル、課題、問題点に直面した際、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) H26 年奈川渡第 1 トンネル設計他業務 第 7 編 2 号 トンネル修正設計
- 2) 白石他：IoT の価値用による山岳トンネル工事の安全管理と作業環境改善、建設機械施工、Vol. 70、No. 2、2018. 2