特集≫≫　トンネル

小断面トンネルでの長孔発破による急速施工

東京大学（宇宙線）大型低温重力波望遠鏡施設（掘削その他）工事

花　田　則　昭・川　野　広　道

トンネルの長大化が進む中，施工工程の短縮は一つの命題となっており，長孔発破による急速施工は，その対応策のうちの一つと言える。本工事は，アインシュタインの一般相対性理論でその存在が予言された「重力波」を検出する実験施設用トンネルであり，一日も早く研究利用に供するため，長大トンネル（掘削延長 7,697 m，掘削断面積 15 m^2）で工期 2 年と工程的な制約が厳しい工事であった。工程確保が求められる中，長孔発破を採用し工期内竣工を目指した結果，NATM での国内最高記録である月進 359 m，同一作業坑から発進する 2 切羽の合計においても月進 660 m を達成した。本稿ではその施工実績について報告する。

キーワード：山岳トンネル，小断面，長孔発破，急速施工

1. はじめに

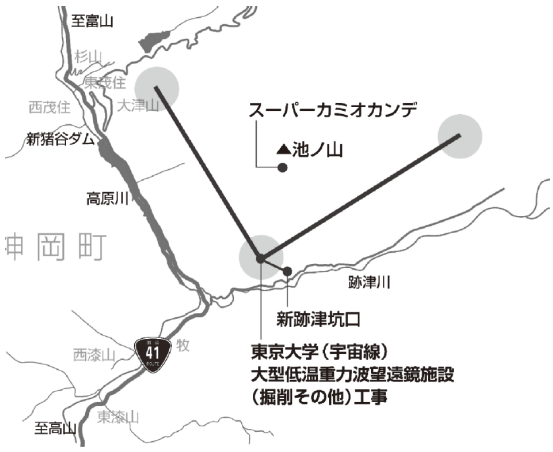
本工事は，東京大学が岐阜県飛騨市神岡町茂住地内（神岡鉱業㈱茂住坑内）に大型低温重力波望遠鏡 LCGT 計画のため，極めて地面振動が少なく，温度・湿度が安定した神岡鉱山内に，直交する長さ約 3 km の直線トンネルを 2 本（X アームトンネル・Y アームトンネル）掘削し，レーザー干渉計（3 km × 2）など各種の重力波検出器を設置するための実験空間及び実験環境を整備することを目的とした工事である（**図—1，2**）。

アインシュタインの一般相対性理論でその存在が予言された「重力波」を検出するための実験施設用トンネルであり，一日も早い研究利用に供するため，全掘削延長 7,697 m の長大トンネルを工期 2 年で構築する必要があり，工程的な制約が非常に厳しい工事であったが，本サイトの地質は大部分が硬質かつ均質な岩盤と想定されていたため，掘削に長孔発破を採用し工期内竣工を目指した。

平成 25 年 9 月には NATM での国内最高記録である月進 359 m，同一作業坑から発進する 2 切羽の合計においても月進 660 m を達成した。

断面が 15 m^2（掘削幅 4 m）という小断面トンネルでの急速施工を実現するためには，1. 小断面用長孔発破，2. 効率的なズリ出し作業，3. 良好な坑内環境を維持するための換気，4. 情報化施工による切羽前方地山の把握に重点を置いた。

本稿では上記を踏まえ，これまでの施工実績について報告する。



図—1　トンネル位置図

図—2　全体イメージ図

2. 工事概要と施工計画

工事概要を**表―1**に，施設全体図を**図―3**に示す。当初は2本のアームトンネルとその頂点に配置される実験室断面を掘削するために，アームトンネル6 kmをTBM，実験室断面をNATMにより掘削する計画であった。しかし，当初より複数の断層の存在が確認されており，①地山不良部を掘進する際のリスクが小さいこと，②大小異なる断面が存在するため，一度の掘削で設計断面が仕上がる，という点でNATMが工期的に有利と判断し，全線NATMによる掘削に変更した。

掘削は神岡鉱山の既設坑道よりYエンド側へアクセスする茂住作業坑（茂住工区）と坑外から中央エリアへ直接アクセスする新跡津坑道（跡津工区）から掘削を行った。Xアームは中央エリアから3,000 mの片押し掘削とし，Yアームは茂住工区・跡津工区の両側から各1,500 mの掘削とし，跡津工区については，掘削機械の制約上，XアームとYアームを交互施工とした。湧水が予想されたため，小断面ながらアームトンネルには中央排水工（ϕ300 ～ 400）を敷設し，坑内湧水は側溝を介して中央排水から排水する計画とした（**図―4**参照）。

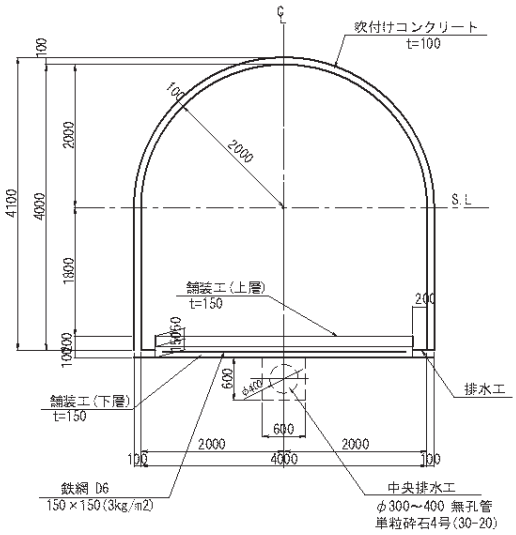
表―1　工事概要

工事名称	東京大学（宇宙線）大型低温重力波望遠鏡施設（掘削その他）工事
工事場所	岐阜県飛騨市神岡町内
発注者	国立大学法人東京大学
施工者	鹿島建設株式会社
工期	平成23年12月～平成26年3月
ﾄﾝﾈﾙ概要	トンネル総延長(NATM) L=7,697m (掘削断面積B＝15～130㎡) 実験室等大空洞トンネル L=870m 茂住作業坑 L=314m 新跡津作業坑 L=459m Xアームトンネル L=2,920m Yアームトンネル L=2,920m

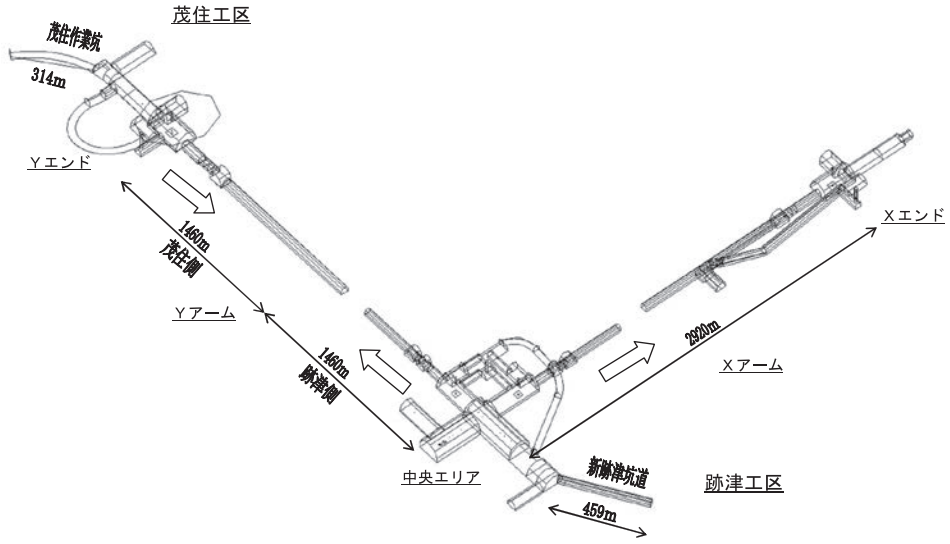
3. 地形・地質概要

当実験施設は，急峻な池の山（標高1,369 m）内の，土かぶり200 ～ 600 mの地点に計画されている。

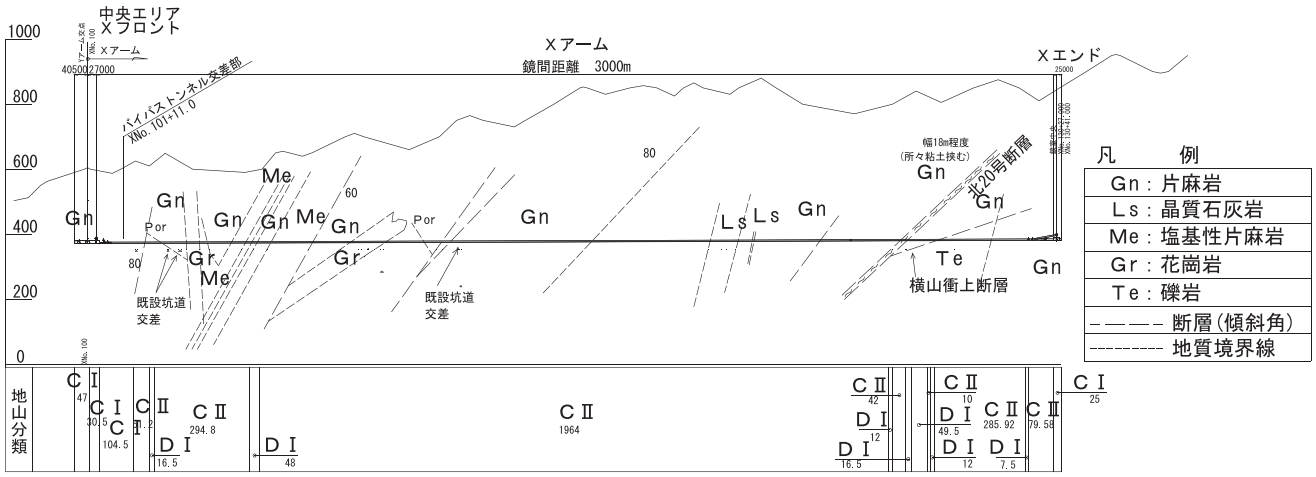
地質は飛騨片麻岩を主体とした硬岩及び中硬岩であり，計4本の断層（横山衝上断層，北20号断層，南東部断層，池の山断層）がアームトンネルを横断し，各所に亀裂の発達した区間が存在する。片麻岩は概ね100 MPaを超え，200 MPaを超える区間も存在する。



図―4　標準断面図（CⅡ）



図―3　施設全体図



図―５　地質縦断図（Ｘアーム）

片麻岩の健岩部の透水性は低いとみられるが，晶質石灰岩や粘土層を挟み，亀裂やこれらの境界部からの湧水が比較的多いと予想された。なお，Ｘアームの横山衝上断層～Ｘエンドと，Ｙエンド付近においては堆積岩(礫岩～砂岩)が局所的に分布している(**図―５**)。

4. 計画変更

Ｙアームは茂住工区，跡津工区両側から各 1,500 m ずつの掘削のため，タイヤ工法を選択したが，Ｘアームは 3,000 m の片押し施工となるため，坑内環境を良好に保つ目的でレール方式を計画していた。

また，掘削に伴い発生する濁水は茂住工区側に位置する神岡鉱業㈱の濁水プラントで全て処理する計画であった。

掘削は平成 25 年 5 月より茂住側の作業坑から開始したが，掘削開始後ただちに湧水量が 60 t/h 以上発生し，そのまま掘削を進めると濁水量が神岡鉱山所有の濁水プラント（処理能力 180 t/h）の能力を上回ることが予想された。

そこで，濁水の低減を目的として路盤コンクリートを掘削後随時打設し，中央排水（φ300 ～ 400）に坑内湧水を導き，切羽濁水を強制排水する清濁分離を行った。路盤コンクリートの打設によって，坑内はダンプ走行に有利な条件が加わったうえ，換気は送排気方式の採用により長距離区間でも坑道内の換気が良好に保てることがＹアーム茂住側工区掘削時に確認できたので，坑内環境の制約によりレール工法としていたＸアーム掘削もＹアームと同様にタイヤ工法に変更した。

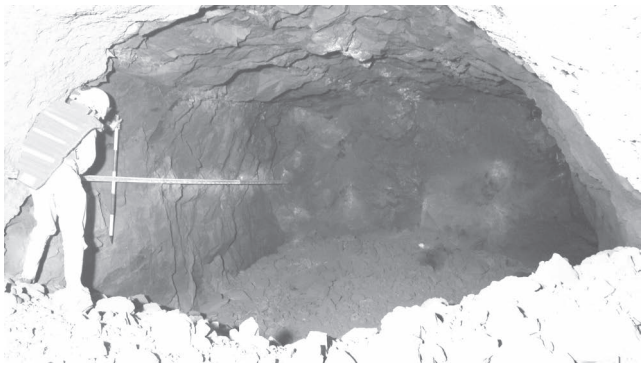
5. 急速施工を実現するための工夫

(1) 小断面における長孔発破

①長孔発破の採用

均質で安定した岩盤の多い欧米諸国では長孔発破は盛んに行われているが，日本においては地質が不均質であることから諸外国に比べると施工実績が少ない。

本トンネルの地質は大部分が飛騨地方に広く分布する硬質な飛騨片麻岩であり，断層部等を除けば比較的均質であることが予想されたため，工期短縮を目的として長孔発破を採用した（**写真―１**）。



写真―１　長孔発破状況

②長孔発破のための削岩機の選定

長孔穿孔を行うため，ドリルジャンボのガイドセルは 14 フィート級（全長約 5.9 m）を搭載し，穿孔長はロッド１本分で穿孔できる最大穿孔長から，１発破進行長を 4.0 m とした。

表―２にＸアームとＹアームに採用したドリルジャンボ諸元を示す。削岩機（ドリフター）は当該ジャンボに搭載可能な最高性能をもつものを選定した。

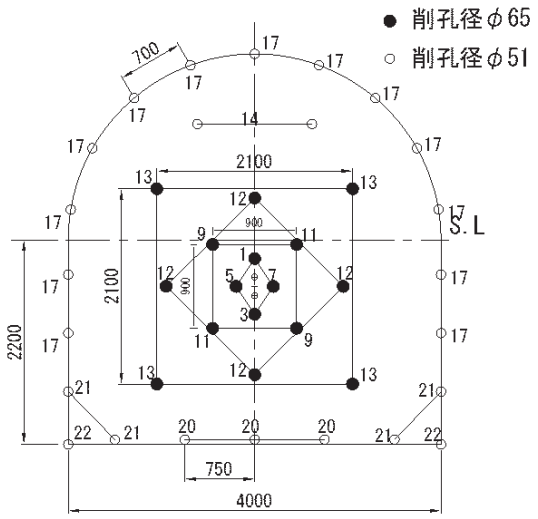
表―2　油圧ジャンボ諸元

	Xアーム	Yアーム
メーカー	古河ロックドリル	AtlasCopco
型式	JTH2100A	RB352-1B
ドリフター	HD210Ⅱ	COP1838ME
ドリフター重量	174kg	171kg
ガイドセル フィード長	4,040mm	4,043mm

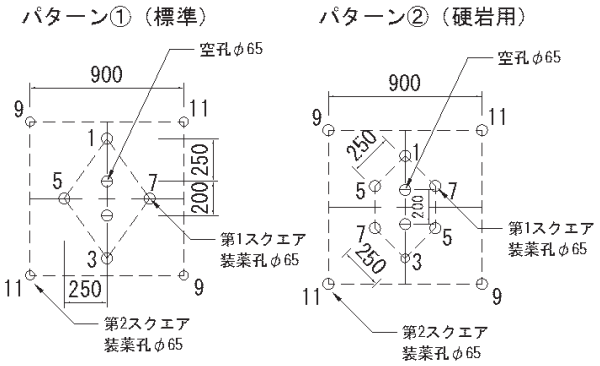
③発破パターンおよび穿孔径

長孔発破で重要な芯抜き部の発破パターンは，6 mを超える長孔発破を実施した「平成 19 年度熊野尾鷲道路逢神曽根トンネル工事（国土交通省中部地方整備局 2012 年竣工)」と同じ配置を採用した。**図―6** に標準発破パターンを示す。ビットは芯抜きにφ65 mm，その他の孔はφ51 mm のボタンビットを使用した。芯抜き部の標準パターンを**図―7** のパターン①に示す。

心抜き部の第 1 スクエア（1 番内側の四角部）の発破の成否により全体の進行が大きく影響を受けるため，地山状況に応じて第 1 スクエアの形状を変更することで進行率の向上を目指した。



図―6　標準発破パターン

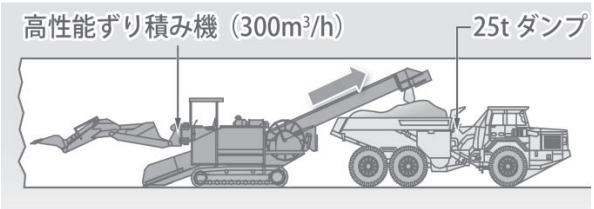


図―7　芯抜き部発破パターン

心抜き部を確実に起砕するためには，自由面となる空孔を大口径にすることが一般的であるが，当現場の硬質な飛騨片麻岩では穿孔速度が極端に遅くなるため，大口径で穿孔する代わりに 2 孔の同径空孔（φ65 mm）を設けた。また，特に硬岩部においては，第 1 スクエアの形状を**図―7** のパターン②に変更し，装填火薬量を増加させることで確実な発破進行と大口径空孔穿孔によるサイクルロス抑制の両立を図った。

(2) ズリ出し作業の効率化

ズリ出しはシャフローダ KL-41（コンベア能力 300 m^3/h）と 25 t ダンプ（X,Y アーム各 3 台）を採用した。



図―8　ズリ積込み状況図

写真―2　シャフローダ KL-41

写真―3　25 t ダンプによるズリ出し状況

通常 15 m^2 程度のトンネルにおいてシャフローダを選定する場合は KL-20（コンベア能力 150 m^3/h）級と 15 t ダンプの組み合わせが一般的である。しかし，当現場では断面内に収まる様に改造した KL-41（300 m^3/h）級と 25 t ダンプを採用し，ズリ出し時間を大幅に短縮した（**図―8**，**写真―2**，3）。また，坑内を仮舗装して路盤の不陸と泥濘化を防止し，機械走行時の安全性の確保，及び機械故障の防止に努めた。また，ズリ出し中は坑内への立入りを完全に禁止し，重機と人の接触災害を防止した。

(3) 小断面における換気方式の工夫

長大トンネル工事においては，良好な坑内環境の維持が作業性向上に大きく寄与するため，重機の排ガス，火薬発破の後ガス，吹付けコンクリート時の粉じん等に対する十分な換気対策が重要である。

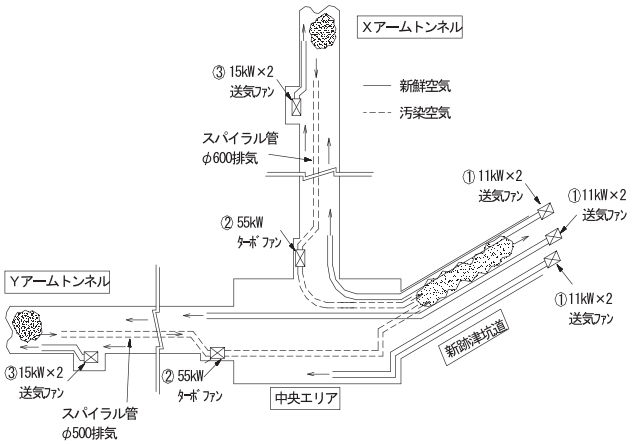
当現場における具体的な換気方法を以下と**写真―4**，**図―9** に示す。

①坑外に設置したコントラファン（11 kW2 台，250 m^3/min，2.94 kPa）により新鮮空気をアームトンネル入口から 50 m 付近までビニール風管にて送気

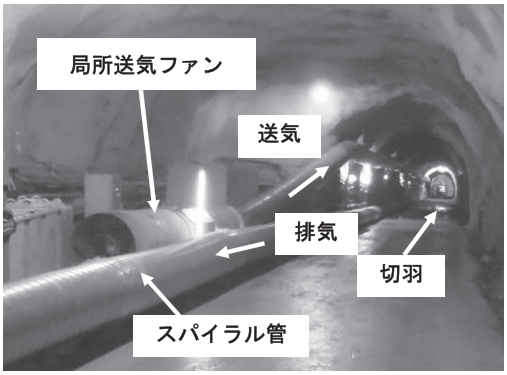
②アームトンネル入口にターボファン（55 kW，280 m^3/min，7.84 kPa）を設置し，切羽後方（150 ～ 200 m）までスパイラル管 ϕ600 を延伸し，切羽からの汚染空気を排気

③拡幅部（375 m 毎）に切羽用局所ファン（15 kW2 台，350 m^3/min, 3.92 kPa）を設置し，ビニール風管（ϕ600）にて切羽へ新鮮空気を送気

上記の設備により坑内全体にわたり良好な環境を維持することができた。



図―9　全体換気平面図（跡津工区）

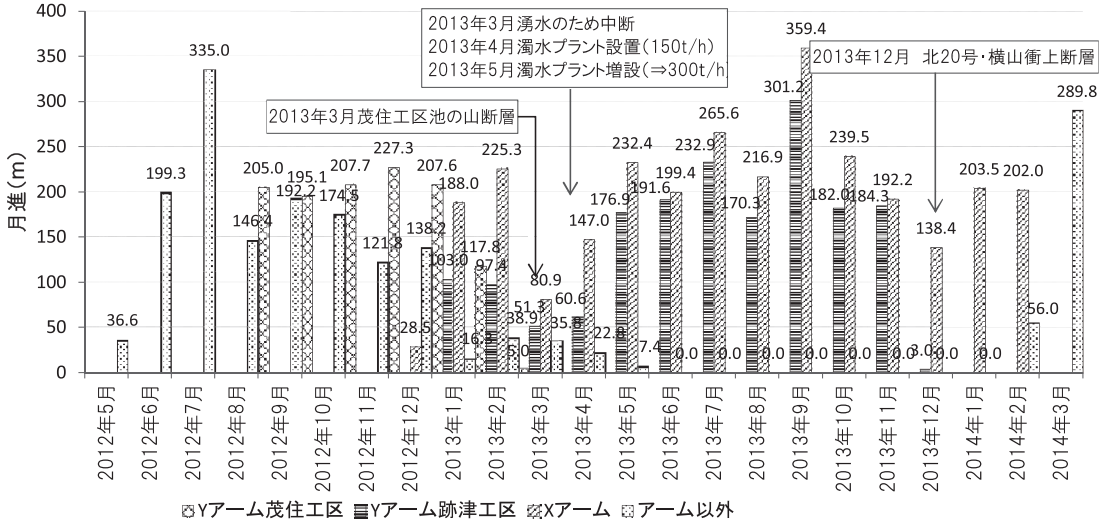


写真―4　坑内換気状況

6. 施工実績

(1) 月進

図―10 に工区別月進グラフ，**表―3** に平均月進表を示す。アームトンネルでは，拡幅部掘削の際速度が落ちるが，ほぼ平均 200 m/月の進行を確保している。Y アーム（跡津側）は 0.3％の下り勾配であり，湧水



図―10　工区別月進グラフ

表―３　平均月進

	Yアーム 茂住側	Yアーム 跡津側	Xアーム	茂住 作業坑	新跡津 坑道
掘削延長（m）	1165.5	1754.5	2919.0	315.4	459.5
所要月数（月）	6	11	15	3	4
平均月進（m/月）	194.3	159.5	194.6	105.1	114.9

表―４　H25 年９月度　掘削実績

	Xアーム	Yアーム
月進	359.4m	301.2m
稼働日数	24.5日	23.5日
日進平均	14.7m	12.8m
進行率	93.6%	92.1%

※進行率=1発破掘進長/穿孔長

処理に時間を要したことから平均月進が伸びなやむ結果となった。

平成 25 年 9 月度の掘削実績を**図―11**，**表―4** に示す。当該月は既存坑道との交差部や地山不良箇所等の掘進阻害要因が少なかったため，切羽から 60 t/hr 以上の湧水にみまわれながらも X アーム 359.4 m, Y アーム 301.2 m の月進を達成することができた。

(2) シャフローダの大型化による効果

跡津工区は新跡津坑道（坑外から中央エリアまでの連絡坑道）より掘削を開始しているが，当初 X アームはズリ出し方式をレール工法で計画していたため，ズリ出し機械もガントリーの通過を見越して KL-20 と 15 t ダンプの標準的組合せで施工した。

新跡津坑道と X アームの条件の比較を**表―5** に示す。X アームはズリ運搬距離が長いが，大型機械の使用により新跡津坑道での m あたり施工時間を約 20％短縮することができた。なお，シャフローダ（KL-41）の積込み能力は平均 93 m^3/hr（地山）であったが，重ダンプ入れ替えによる待ち時間を考慮したズリ出し能力としては平均 40 m^3/hr（地山）であった。

表―５　新跡津坑道・X アームズリ出し条件

	新跡津坑道	Xアーム
ズリ積機械	KL-20	KL-41
ズリ出し車両	15tDT×2台	25tDT×3台
ズリ出し距離	約100～550m	約50～3000m

7. まとめ（残された課題）

(1) 長孔発破について

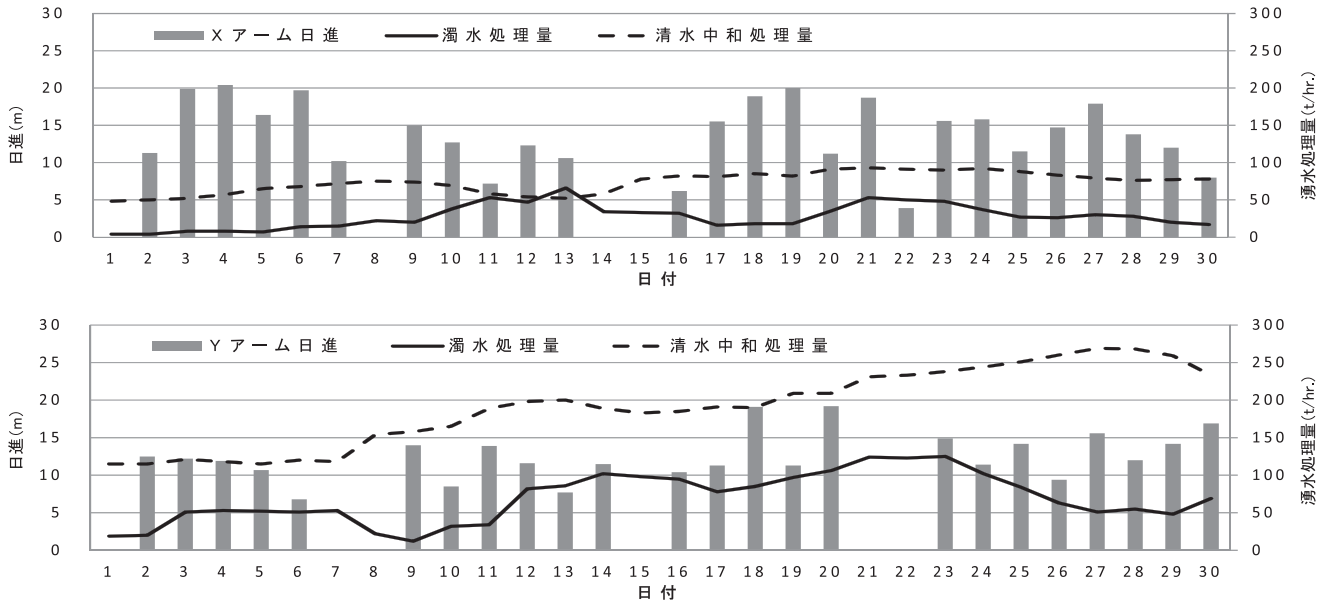
長孔発破を実施するうえで最も重要なのは進行率(1発破掘進長／穿孔長）の向上である。当現場では，進行率の向上のため，

①穿孔精度の向上
②起爆技術の改善
③湧水への対策

が課題となった。

①はレーザー照射などの既存の技術を駆使して穿孔精度確保に努めたが，コンピュータージャンボを活用することでさらに進行率向上が期待できる。

②については，斉発精度を向上させた高精度雷管の採用や親ダイの起爆力の向上により，更なる進行率向



図―11　H25 年９月度　日進・湧水処理量

上が期待できる。

③は含水爆薬に切り替える場合が多いが，装填密度に難があるため，耐水性が高く密装填可能な低コスト爆薬の開発が待たれる。

(2) 換気設備について

小断面トンネルの場合は，特にスペースの都合上換気設備計画に制約が多い。まず，①発生源対策と②後ガスの処理とタイヤ工法の場合は排気ガスの処理を効率的に実施できる換気計画が重要となる。

①については，当現場では ANFO 爆薬を主体としたため，粒状含水爆薬の使用は一つの解決策であったが，後ガスの発生が少ない低コスト火薬の開発が待たれる。

また，小断面トンネルでは，当然のことながら，ダンプ等の排気ガスも坑内環境を悪化させる。当現場では，坑内での車両・機械類のアイドリングストップを徹底した。

②については，できるだけ切羽近くで集気し新鮮な空気を坑道換気により供給する考え方がよく機能した。しかしながら，発破による飛石や重機接触による排気風管の損傷は換気効率を著しく低下させ，特に排気風管から漏気した汚染空気は切羽に戻り坑内環境を悪化させることに注意しなくてはならない。切羽近くでの集気と風管の保護を両立させることが小断面トンネルでの効率の良い換気の鍵となる。

8. おわりに

トンネルの長大化が進む中，海外では長孔発破による掘削が一般的に行われているが，国内での実施例は少ない。そこで，当現場では小断面トンネルにおける長孔発破の実現にむけて種々の課題に取り組んだ結果，NATM での国内最高記録である月進 359 m を達成できた。本工事での長孔発破で得られた知見をもとに，今後も種々のデータを蓄積しながら，長孔発破技術の確立を目指していく所存である。

JCMA

《参 考 文 献》

1）齋藤修一・大橋正健・花田則昭・川野広道，15 m^2 の小断面を長孔発破で月進 359 m 達成，トンネルと地下，Vol.45，No.7，p31-40　2014

［筆者紹介］

花田　則昭（はなだ　のりあき）
鹿島建設㈱　中部支店
神岡トンネル工事事務所
所長

川野　広道（かわの　ひろみち）
鹿島建設㈱　東北支店
新区界トンネル JV 工事事務所
次長