

大断面トンネルにおける高速施工技術(月進 232.5m達成)

国道 45 号 新鍬台トンネル工事

賀川 昌純^{*1}・山本 高志^{*2}・相場 清志^{*2}・小花 拓郎^{*2}・福井 康仁^{*3}・村瀬 邦彦^{*4}

High-speed construction technology of large section tunnel(monthly record reached 232.5m)

National Route 45th Shin-Kuwadai Tunnel Construction

Masazumi KAGAWA, Takashi YAMAMOTO, Kiyoshi AIBA, Takuro KOBANA, Yasuhito FUKUI, Kunihiko MURASE



写真-1 ロックボルト 2 台施工状況



写真-2 すり出し 2 台施工状況

研究の目的

国道 45 号 新鍬台トンネル工事は、東日本大震災復興道路事業の一環として整備が進められている三陸沿岸道路工事のうち、岩手県大船渡市と釜石市を貫く延長 3,330mの本坑と延長 3,362mの避難坑を新設する三陸沿岸道路最長の長大トンネル工事である。三陸沿岸道路は、地域の復興を後押しする『命の道』として位置づけられる震災復興整備事業のシンボルであるとともに、一日も早い開通が地域住民より強く切望されているため、さまざまな最先端技術・建設 ICT 技術導入による掘削・支保工の効率化を図り、高速施工の実現が必要不可欠であった。

技術の説明

掘削断面積が 100 m²を超える大断面トンネル工事であること、トンネル全体の約 8 割を占める範囲に硬質で均一な花崗閃緑岩が分布する地質条件であること、坑口から約 200m付近には近隣家屋が点在する周辺環境を考慮し、各単位施工に対し複数の大型施工機械を導入するとともに環境に配慮した長孔発破技術の改善によりサイクルタイム向上を図る計画とした。また、サイクルタイム向上を図るうえで着目すべきサイクルロス低減のため、坑内 ICT と連携する 2 種類のコンピュータジャンボを導入し、大断面トンネルにおける高速施工技術確立した。

主な結論

- ・ 地山条件に応じた発破計画などの施工方法を事前に確立するとともに、高速施工の実現が可能か否かの判定を行ううえでもっとも必要な情報となるトンネル前方地質分布状況把握のため、最新技術である反射法切羽前方探査(TSP303)を導入した。
- ・ コンピュータ制御のドリルジャンボを活用することによって、余掘り量を約 10%低減。
- ・ 標準断面区間を 1 ヶ月間連続して掘削した月間において、最大月進 232.5mを記録。日最大掘進長は 12.6m、平均 9.5mを記録した(CI パターン)。
- ・ 本坑貫通までに要した期間は 18 ヶ月間であり、標準施工による掘削工程 27 ヶ月間に対し、約 1.5 倍の掘削速度で掘削完了を迎えた。

* 1 新鍬台トンネル作業所 副所長・現場代理人
* 3 新鍬台トンネル作業所 工事課長

* 2 新鍬台トンネル作業所 主任
* 4 新鍬台トンネル作業所 所長・監理技術者

大断面トンネルにおける高速施工技術（月進232.5m達成） 国道45号 新鋤台トンネル工事

村瀬 邦彦*¹ 賀川 昌純*²
 福井 康仁*³ 小花 拓郎*⁴
 相場 清志*⁵ 山本 高志*⁶

要 旨

国道45号 新鋤台トンネル工事は、東日本大震災復興道路事業の一環として整備が進められる三陸沿岸道路工事のうち、岩手県大船渡市と釜石市を貫く延長3,330mの本坑と延長3,362mの避難坑を新設する三陸沿岸道路最長の長大トンネル工事である。三陸沿岸道路は、地域の復興を後押しする『命の道』として位置づけられる震災復興整備事業のシンボルであるとともに、一日も早い開通が地域住民より強く要望されているため、さまざまな掘削・支保工の効率化を図り、高速施工を実現することが必要不可欠であった。

そこで、トンネル前方地質状況を把握するための反射法切羽前方探査（TSP303）のほか、国内初導入となるコンピュータ制御のドリルジャンボなど、さまざまな最先端技術・建設ICT技術を導入し、想定される技術的課題克服に取り組んできた。その結果、掘削断面積100㎡を超える大断面トンネルにおいて、最大月進232.5mを記録した。本坑貫通までに要した期間は18ヵ月間であり、標準施工による掘削工程27ヵ月間に対し、約1.5倍の掘削速度で掘削完了を迎えることとなった。

キーワード 高速施工／ベストマッチ／周辺環境保全／坑内ICT技術／坑内作業の安全と効率化

目 次

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1. はじめに | 4. 課題克服に対し取り組んだ高速施工技術 |
| 2. 工事概要 | 5. 本工事施工実績 |
| 3. 施工条件と克服すべき技術的課題 | 6. おわりに |

HIGH-SPEED CONSTRUCTION TECHNOLOGY OF LARGE SECTION TUNNEL (MONTHLY RECORD REACHED 232.5m) NATIONAL ROUTE 45TH SHIN-KUWADAI TUNNEL CONSTRUCTION

Kunihiko MURASE	Masazumi KAGAWA
Yasuhito FUKUI	Takurou KOBANA
Kiyoshi AIBA	Takashi YAMAMOTO

Synopsis:

National route 45th SHIN-KUWADAI TUNNEL construction is part of the SANRIKU Expressway which is built as part of the reconstruction and improvement project from the Great East Japan Earthquake. The tunnel is the longest tunnel in SANRIKU Expressway, and consists of two tunnels with a main tunnel length of 3330m and an evacuation tunnel 3362m. This Expressway is a symbol of the earthquake disaster reconstruction that is positioned as 【The Road of Life】 to promote the reconstruction of the region, and it is strongly desired that the opening of the SANRIKU Expressway as soon as possible from local residents. For the above reason, we had to optimize the efficiency of drilling and support work everywhere and realize high-speed construction.

* 1 新鋤台トンネル作業所 所長・監理技術者
 * 3 新鋤台トンネル作業所 工事課長

* 2 新鋤台トンネル作業所 副所長・現場代理人(執筆者)
 * 4, 5, 6 新鋤台トンネル作業所 主任

1. はじめに

国道 45 号 新釜台トンネル工事（以下に本工事と称す）は、東日本大震災復興道路事業の一環として整備が進められる三陸沿岸道路工事を構成する吉浜釜石道路のうち、岩手県大船渡市と釜石市を貫く延長 3,330m の本坑と延長 3,362m の避難坑を 4 切羽同時に掘り進めるものである。また、本坑において、約 370m ごとに非常駐車帯区間が 8 箇所計画されており、それぞれの区間において本坑と避難坑をつなぐ避難連絡坑 8 本を施工する三陸沿岸道路最長の長大トンネル工事である（図-1）。

本工事周辺環境として、坑口から約 200m 程度の位置に家屋が数多く点在するとともに国道に近接した立地条件であるため、施工に際しては坑内作業の安全確保はもとより周辺環境にも十分配慮した施工が求められた。

しかし、三陸沿岸道路は、震災地域の復興を後押しする『命の道』として、一日も早い開通が地域住民より切望されているため、本工事では長大トンネルの早期完成に向けて、周辺環境に配慮するとともに掘削・支保工の効率化を図るべく、さまざまな最先端技術・建設 ICT 技術を導入し、技術的課題に取り組んできた。

本報告書は、掘削断面積 110 m² を超える大断面トンネル工事において果敢に挑んだ高速施工技术について述べるものである。



図-1 工事位置図

2. 工事概要

工事名称：国道 45 号 新釜台トンネル工事

発注者：国土交通省 東北地方整備局

施工者：前田建設工業株式会社 東北支店

工事場所：岩手県大船渡市三陸町吉浜字扇洞

～釜石市唐丹町字上荒川 地内

工期：2014 年 2 月 6 日～2017 年 9 月 8 日

工事内容：本坑トンネル延長…3,329.8m

(掘削断面積 114.9～132.6 m²)

覆工コンクリート…3,328.4m

インパート工…131.7m

坑門工…2 基

避難坑トンネル延長…3,362.0m

(掘削断面積 20.7～35.0 m²)

覆工コンクリート…30.0m

坑門工…2 基

掘削工法：全断面・補助ベンチ付全断面(NATM 工法)

掘削方式：発破掘削，タイヤ方式

3. 施工条件と克服すべき技術的課題

本工事地質条件は、両坑口側には CII パターン以下の区間が約 570m あるものの、トンネル全体約 8 割の区間には B または CI 等級の花崗閃緑岩が分布し、最大土かぶりは約 400m である（図-2）。坑口ヤードは国道 45 号に近接し、さらに坑口より約 200m 程度隔てた位置には周辺家屋が数多く点在する施工条件である（写真-1）。

本工事掘削断面は、幅員 14m の大断面Ⅱクラスであるため、1 サイクル当りの作業量が非常に多くなる。また、本工事を代表する地質は、一軸圧縮強度 200MPa（弾性波速度 5000m/sec 以上）を超える B または CI 等級地山であるため、確実な岩盤破砕を行うためには大量の爆薬を消費することとなる。

このような施工条件において非常に硬い硬岩を対象とした高速施工を行うため、地山が比較的安定し始めた掘削初期段階よりさまざまな最先端技術・建設 ICT 技術を



写真-1 坑口周辺環境（大船渡側坑口）

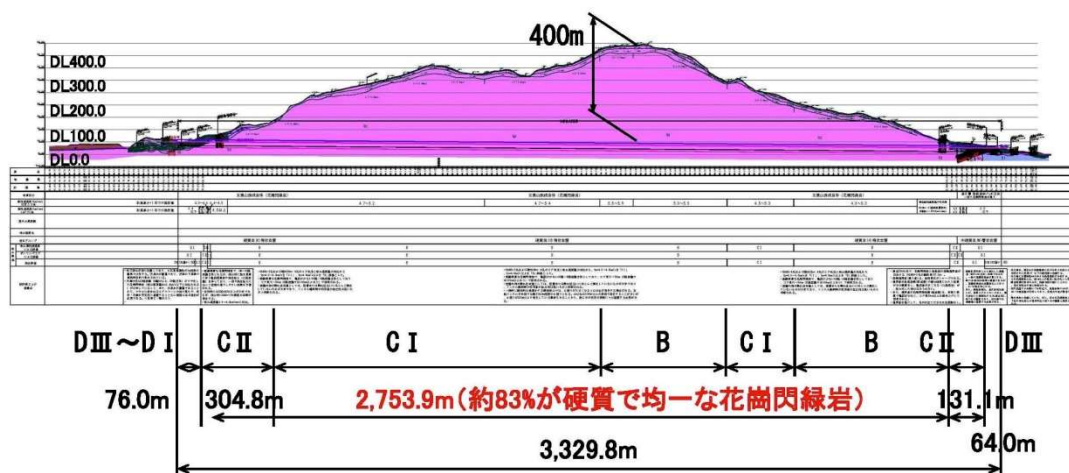


図-2 地質縦断面図

導入し、高速施工への適用性について現場検証を繰り返して行った。その結果、高速施工にむけて克服すべき 3 つの課題が確認された。

- ①単位作業サイクルタイム向上と余掘り低減
- ②発破作業の効率化と周辺環境保全
- ③切羽前方探査の精度向上

4. 課題克服に対し取り組んだ高速施工技術

4.1 各単位作業サイクルタイム向上

掘削断面積 110 m²を超える大断面トンネルにおいてサイクルタイム向上を図るためには、各単位作業のサイクルタイム向上が必要となる。サイクルタイム向上を図るうえでは、可能な限りの大型機械導入や主要機械の能力アップが有効な手段となる。本工事施工条件は、大断面トンネル施工であること、トンネル全体の約 8 割を占める範囲に硬質で均一な花崗閃緑岩が分布すると想定される地質条件であることを考慮し、各単位作業に対して複数の施工機械を導入する計画とした。また、大断面である施工条件を有効活用し、複数配備する施工機械はすべて大型機械を選定した。

トンネル施工サイクルは、発破孔穿孔⇒装薬⇒発破・換気⇒ずり出し⇒吹付け⇒ロックボルトの順序となる。このうち、トンネル施工サイクルの中でもっとも大きなウェイトを占める『ずり出し作業』の高速化が一番の課題となるため、特に慎重な計画と現場検証を繰り返し実施した（図-3）。

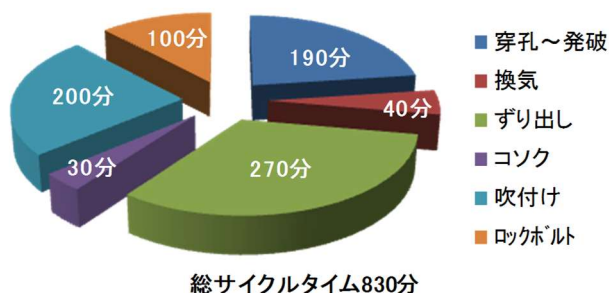


図-3 初期掘進時サイクルタイム(4.0m 掘進)

高速ずり出し施工を達成するため、ホイール式のベルトコンベア搭載型バックホウ『ヘグロード』を国内で初めて導入した（写真-2）。積込能力 300 m³/hr という非常に高い能力を秘めた積込機械ではあるものの、発破で飛散した岩塊を切羽側に集積する能力が不足するため、本工事発破スタイルにはマッチせず、標準機による施工よりも作業効率が劣る結果となった。



写真-2 ヘグロード

そこで、ヘグロード以外の組合せをさらに検証した結果、もっとも高速ずり出し施工が可能なベストマッチは大型ホイールローダ 2 台（3.5 m³級）と重ダンプトラック（30t 積み）8 台の組合せとなり、重ダンプトラック 1 台当りの積み込み時間約 1 分、全体ずり出し時間は標準施工時の約 45%短縮することが可能となった。この検証結果は、高速施工の確立に大きく寄与した。

以上のように、能力の優れた機械を配備したとしても、地質条件や作業ヤードなどの施工条件が合わなければ機械の能力を最大限発揮できず、機械単体の能力よりも条件への適合性を重視した機械選定と複数機械の最適な組合せを見つけることが重要であった。本工事で採用した施工機械の組合せは以下のとおりである（写真-3～6）。



写真-3 穿孔速度向上 (2 台穿孔)



写真-4 高速ずり出し (2 台積み込み)



写真-5 吹付け時間短縮 (2 台吹付け)

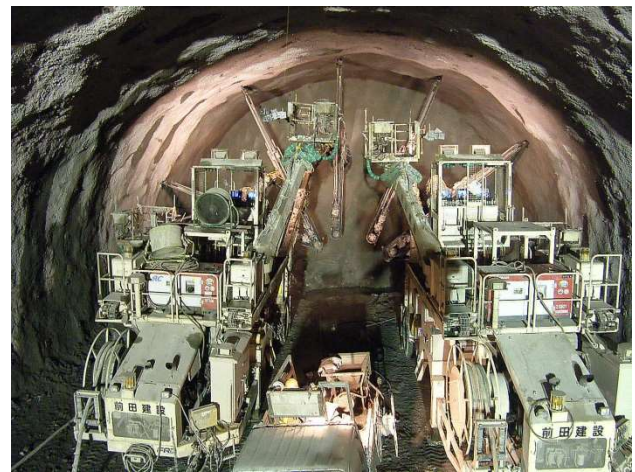


写真-6 ロックボルト時間短縮 (2 台施工)

この複数機械によるベストマッチ施工と、繰り返して作業手順や作業順序の改善により、全体サイクルタイムを約 40%向上することとなった。

4.2 坑内 ICT を活用した余掘り低減

複数機械による作業標準が確立される中、さらなるサイクルタイム向上を図るうえで着目したのは、余掘りによるサイクルロスの低減である。山岳工法トンネル工事の場合、余掘りはすべてのサイクルタイムに影響を及ぼすばかりではなく、残土処理やトンネル工事全体のコストにも直結する問題であるため、サイクルタイム向上以外の観点でも非常に重要なテーマとなる。

余掘り低減を図るため、本工事では坑内 ICT と連携する 2 種類のコンピュータジャンボを起終点側それぞれの切羽に 2 台ずつ導入した。コンピュータジャンボを制御する坑内 ICT 技術として、自動追尾型レーザー断面照射システムと全方位 3D スキャナーを採用した (写真-7, 8)。

(1) マシンガイダンス型ジャンボ (大船渡側工区)

大船渡側工区では、国産のトンネルナビゲーションシステム搭載型ドリルジャンボを導入した。

このドリルジャンボは、トンネル線形情報、断面形状、発破パターンやロックボルト配置情報などをあらかじめ登録し、切羽でドリルジャンボに位置情報を与えることによって、車のナビゲーションと同様、穿孔位置や方向、深さ、角度をモニターに表示し、モニターに合わせてオペレータが操作するマシンガイダンス型のコンピュータジャンボである (写真-9)。

このシステム導入により、すべての穿孔データが記録されるため、3D スキャナーを用いて発破後の掘削仕上り形状を測定し、測定結果と穿孔データを比較して次の発破計画時に穿孔方向や角度などを修正することによって、余掘り量のコントロールが可能となる。また、すべての発破孔の孔尻を同一断面に揃えることが可能となるため、発破後の鏡は常に平滑な面となり、発破効率の向上にもつながることとなる。さらに、穿孔時の打撃エネルギーや穿孔速度も記録されるため、常に切羽前方の岩盤特性を把握することも可能となる (図-4)。

トンネルナビゲーションシステムを活用することによって、穿孔データにもとづく最適な発破計画や掘削断面制御が可能となるため、余掘り低減のほか、アタリ発生のない合理的な施工が可能となった。大船渡側工区では、

ナビゲーションシステム使用前の平均余掘り厚さは170mm 以上であったが、ナビゲーションシステムを活用した施工により、平均余掘り厚さを 100mm 以下程度まで低減することとなった（図-5）。



写真-7 自動追尾型レーザー断面照射システム



写真-8 全方位 3D スキャナー



写真-9 大船渡側工区ドリルジャンボ（トンネルナビゲーションシステム搭載型）

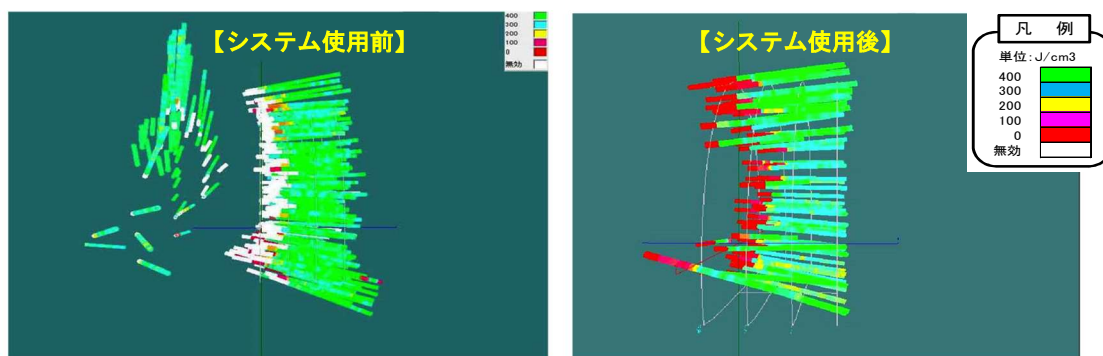


図-4 発破孔穿孔情報

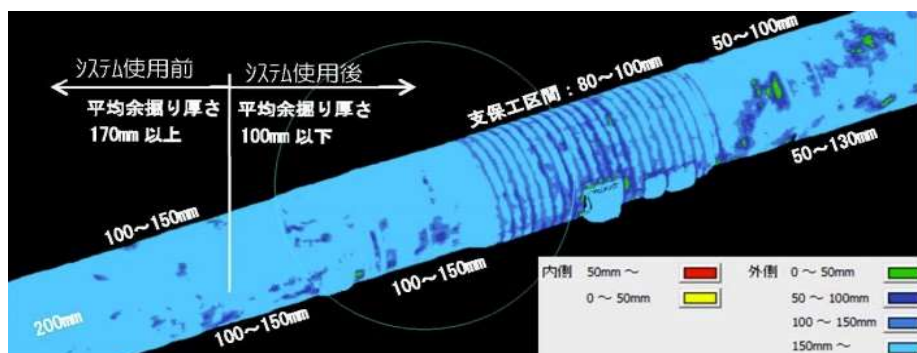


図-5 掘削・吹付け仕上り形状（大船渡側工区）

(2) マシンコントロール型ジャンボ（釜石側工区）

釜石側工区では、スウェーデン産のフルコンピュータ制御ドリルジャンボを導入し、大船渡側工区で先に採用した国産ドリルジャンボとの性能の違いを確認した。国内では、初めての導入となるマシンコントロール型のドリルジャンボである。

このドリルジャンボは、大船渡側工区と同様、トンネル情報を登録するほか、各ドリフターに穿孔順序を一筆書きの順番であらかじめ登録し、切羽でドリルジャンボに位置情報を与えるだけで、ブーム移動、穿孔位置決め、穿孔、孔内洗浄、次孔への移動など、すべての動作を全自動でコンピュータ制御するものである（写真10）。

このシステムを導入することによって、釜石側工区では作業員の技量に左右されることがなく、設計断面形状に近似した非常に均一で円滑な掘削仕上り形状の構築が可能となった。

当該ドリルジャンボは3D スキャナー搭載型であるため、穿孔作業やロックボルト施工中に坑内作業に支障を及ぼすことなく断面測定を行うことが可能である（写真-11）。大船渡側工区と同様、発破後の仕上り形状を測定し、次の発破計画時に測定結果をフィードバックすることによって、余掘り量を大きくコントロールすることが可能となった。釜石側工区では、余掘り厚さ 60mm 程度の高精度な掘削仕上り形状構築が可能となり、ずり発生量も約 10%低減された（図-6）。このことにより、全体サイクルタイムを約 40 分短縮することが可能となった。さらに、すべての動作は全自動でコンピュータ制御されるため、対象地山の岩盤特性に合わせた最適なエネルギー調整を自動で検出しながら穿孔することによって、ビットやロッドなど、消耗材料の寿命を延ばす効果も確認された。将来的には、省人化・無人化施工にも大きく貢献できるシステムである。



写真-10 釜石側工区ドリルジャンボ（全自動フルコンピュータジャンボ）

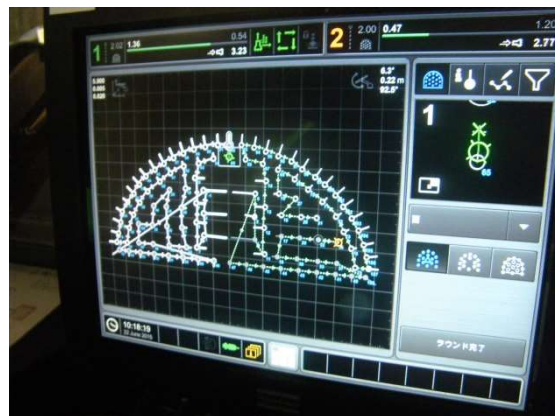


写真-11 3D スキャナー搭載型ドリルジャンボ（全自動フルコンピュータジャンボ）

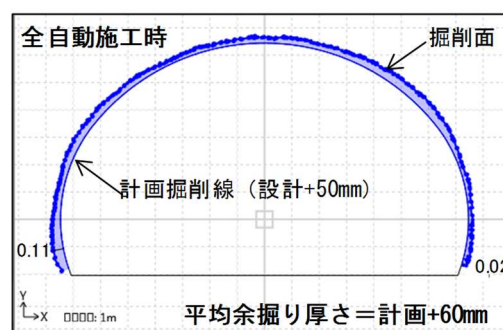
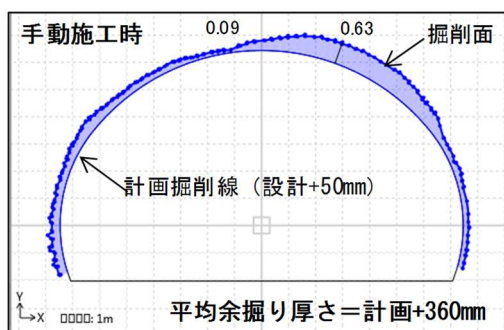


図-6 掘削・仕上り断面形状（釜石側工区）

4.3 発破作業の効率化と周辺環境保全

本工事を代表する地質は、一軸圧縮強度 200MPa を超える花崗閃緑岩であるため、確実な岩盤破砕を行うためには大量の爆薬を消費することとなる。そこで、確実かつ経済的で安全な発破掘削を行うため、機械装填式で密充填が可能な威力ある ANFO 爆薬 (Ammonium Nitrate Fuel Oil) を採用した発破技術を選択した。使用する雷管は、切羽直下で行うもっとも危険な結線作業時間の短縮が可能であり、かつ、静電気や迷走電流、落雷に対して安全な導火管付き雷管 (以下に LP 雷管と略する) と電子雷管 (以後、e-Dev II と称す) を採用した。

(1) 発破作業の効率化

大量爆薬を消費する際の発破作業の効率化として着目したのは、上記に示す装薬作業の効率化のほか、発破時の飛び石と発破後ガスの対策である。大量爆薬を消費すると、飛び石距離が大きくなるばかりではなく、大量の発破後ガスが発生することとなる。

そこで、発破作業時の飛び石飛散抑制ならびに発破後ガスの換気時間短縮を図るため、マルチバルーンを採用した。マルチバルーンとは、防弾チョッキとパラシュート素材で縫合された特殊バルーン内に空気を送り込み、切羽後方約 80m の位置に隔壁を設けて、飛び石や発破後ガスを密閉・遮断する設備である。マルチバルーン採用により、坑内設備の防護が非常に容易となり、発破退避距離を大きく短縮することが可能となった (写真-12)。



写真-12 マルチバルーン (飛び石防護時)

さらに、マルチバルーンと伸縮風管を配備した排気ファンを組合せることによって、発破後ガスの換気時間短縮も可能となる。本工事では、発破後ガスをマルチバルーンと切羽間に封じ込めたまま、マルチバルーンに設けた開口部より伸縮風管のみ切羽側に延伸して強制換気することによって、発破後ガスの換気時間を約 20 分短縮することが可能となった。換気計算結果の約半分の時間である (写真-13, 14)。



写真-13 発破後ガス発生状況



写真-14 発破後ガス封じ込め強制換気状況

しかし、大量の爆薬を消費する際に発生する発破衝撃波は非常にすさまじく、切羽後方約 500m を隔てた覆工・防水作業エリアにまで達することが確認され、トンネル仕上げ工事を行ううえで安全作業に支障を来す結果となった。

そのため、当該作業エリアにおける安心かつ安全な作業環境を確保するため、当該作業エリア切羽側に発破衝撃波を遮る隔壁を設けることとした。本工事では、通常、

坑口部に設置する防音扉を移動式牽引タイプに改良し、常に、当該作業エリアよりも切羽側に移動式防音扉を配置することによって、発破衝撃波遮断と坑内外への防音対策を兼用することとした（写真-15）。



写真-15 移動式防音扉

(2) 大量爆薬消費時の周辺環境保全

大量の爆薬を消費する場合、坑内を発生源とする発破騒音や振動など周辺環境に及ぼす影響が非常に大きくなるため、総薬量を制限する対策が一般的に採用されている。しかし、総薬量を制限することは1発破当りの発破対象土量を制限することとなるため、高速施工を目的とした発破方式とは相反する対策となる。

そのため、本工事では発破対象土量に対して必要となる総薬量は制御せず、1段当りの斉発量制御を目的として、秒時差付きバンチコネクターを併用したLP雷管による制御発破方式を採用した（最大50段発）。

環境測定の結果、芯抜き時の瞬間発破騒音や振動値が環境基準値に対して余裕がないため、芯抜き方式の改善によって対策を行った。芯抜き方式は、平行芯抜きとダブルVカット方式を取り入れた。平行芯抜き方式は、確実な芯抜き破碎効果を得るため、発破孔のほか、発破時の自由面形成のためバーンホール（φ90～115mm）をトンネル中心部に2～4箇所設置する必要がある、穿孔時間が通常よりも長くなる（図-7）。

そのため、周辺環境に対する影響低減効果と穿孔サイクルタイムを考慮し、ダブルVカット方式を基本方針として周辺環境に対する保全対策を行った。この結果、総薬量約900kg/回の爆薬を消費する発破時においても、発破騒音値69dB（＜70dB）、発破振動値39dB（＜64dB）、低周波97dB（＜100dB）であり、環境基準値以下の発破が可能となった。

しかし、鉄台中核部に向かうにつれ、さらに地山特性は高くなり始め、弾性波速度 $V_p=6000\text{m/sec}$ 級の硬岩地山となってきたため、1発破当りの総薬量は1000kgを超える状況となった。

そこで、さらなる周辺環境保全対策を図るため、電子雷管（e-Dev II）を用いた新たな制御発破技術（全孔段発発破）の導入へと切り替えを行った。e-Dev IIとは、バーコードリーダーを介して起爆時間を現地で自由自在に設定・変更可能な電子制御式の次世代型電子発破制御システムであり、最大500段まで分割制御発破が可能な電子雷管である（写真-16）。

e-Dev IIは、非常に高価な制御発破システムであるため、バンチコネクターを併用したLP雷管による制御発破時と比較し、発破騒音、振動値ならびに低周波に対してどの程度の効果があるか確認するため、坑口から約500m地点において試験発破により検証を行った。

【電子雷管（e-Dev II）】



【スキャナー】

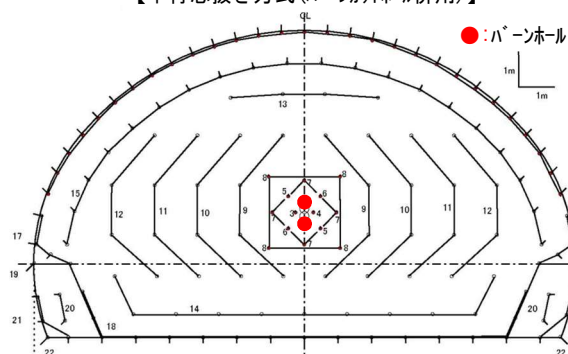


【コンピュータ制御発破器】



写真-16 電子雷管（e-Dev II）発破制御システム

【平行芯抜き方式（バーンホール併用）】



【ダブルVカット芯抜き方式】

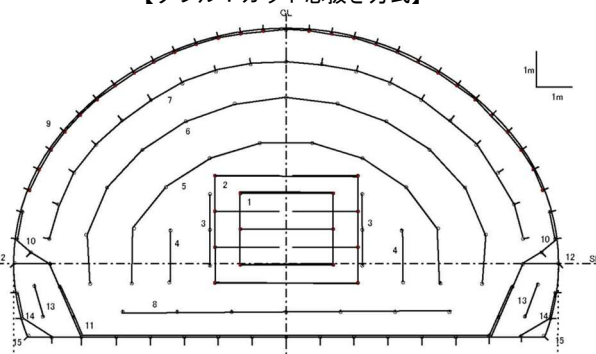


図-7 計画発破パターン図

試験発破の内容は、パンチコネクターを併用した LP 雷管による制御発破（多段発破、全 45 段）と e-Dev II を採用した制御発破（全孔段発破、全 120～143 段）である。電子雷管の秒時差は、発破継続時間を極力短縮するため、全孔の段発秒時差を 17ms と 25ms の 2 種類に設定した。環境測定位置は坑口からもっとも近接する家屋とし、LP 雷管を含めた 3 種類の試験発破を行った。試験発破結果を以下に示す（表-1）。

e-Dev II を採用することによって全孔をバラバラに分割発破することができるため、1 段当りの斉発量を大きく制御することが可能となる。今回の試験では、総薬量に多少の差はあるが、LP 雷管を使用した制御発破時 1 段当りの斉発量 44.7kg/段に対し、e-Dev II では約 6kg/段まで制御された。そのため、e-Dev II を採用した制御発破では、パンチコネクターを併用した LP 雷管による制御発破よりも発破振動約 6dB・騒音約 7dB の低減効果が確認された。低周波レベルは、e-Dev II の段発秒時差を 17ms から 25ms に変更するだけで約 3dB の低減効果があり、LP 雷管と比較すると約 8dB の低減効果が確認された（99→91dB）。

3 種類の制御発破の結果は、すべて環境基準値を下回る結果ではあるが、LP 雷管による多段発破よりも e-Dev II を使用した全孔段発破のほうが騒音・振動・低周波など、すべての環境保全対策に対して優位であることが確認された。とくに、周辺環境のうち対策がもっとも困難とされている低周波に対しても低減効果が確認された。

低周波音圧レベル測定結果図を確認すると、いずれの測定結果も芯抜き発破瞬間に音圧ピークが発生している。LP 雷管使用の際には、周辺環境保全対策としてダブル V カット方式を採用し、45 段発すべての段発瞬間で環境基準値を下回ってはいるものの、環境基準値（100dB）に近い低周波音圧レベルが発生している（図-8）。

また、今回の試験発破では、通常的环境測定と併行して全音圧レベル調査も実施した。この結果、LP 雷管による多段発破時の全音圧レベルは各段発ごとに大きなエネルギー差を示している。これに対し、e-Dev II による全孔段発発破時には、芯抜きから隅踏まえまでの全発破継続中、ほぼ一定した小さなレベルで全音圧レベルが推移していることが確認された（図-9）。

表-1 試験発破結果一覧表

試験発破ケース	総薬量 (kg/1発破)	最大斉発量 (kg/段)	振動値 (dB)	騒音値 (dB)	低周波値 (dB)		備 考
					低周波値	電子雷管 25msとの差	
導火管付き雷管 (秒時差0～93ms)	897.80	44.73	34	64	98.9	+7.7	全135孔-45段発
電子雷管	秒時差17ms	6.54	28	57	94.4	+3.2	全143孔-143段発
	秒時差25ms	6.06	28	57	91.2	—	全117孔-117段発

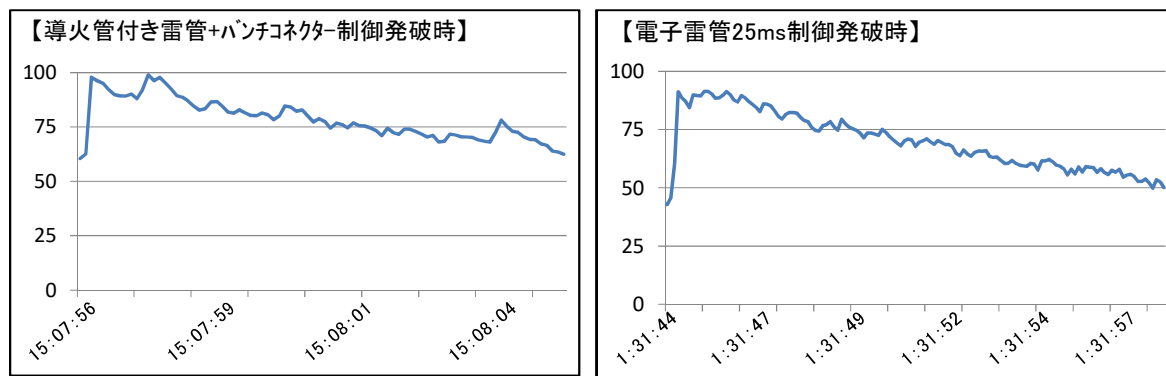


図-8 低周波音圧レベル測定結果図

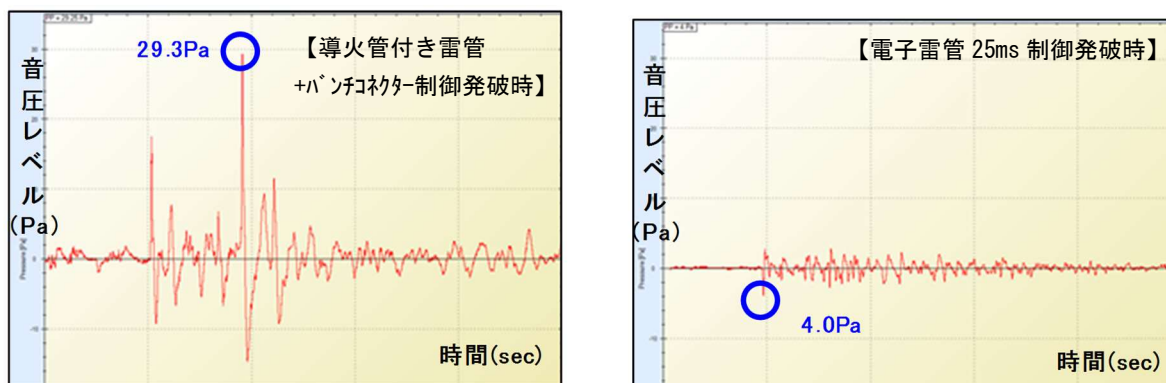


図-9 全音圧レベル測定結果図

これは、LP 雷管による多段発火は最大 50 段発程度であることにに対し、e-Dev II による多段発火は最大 500 段発まで分割することが可能なため、1 段当りの斉発量が大きく制御できたためである。1 段当りの斉発量を制御することによって発破時の全音圧レベルを下げる事が可能となるため、とくに低周波音レベルを低減させる必要がある場合には、e-Dev II を使用した制御発破（全孔段発破）は非常に有効な手段であることが確認された。

(3) 飛び石距離抑制によるずり出し時間の効率化

バンチコネクターを併用した LP 雷管と e-Dev II の 2 種類の発破方式を採用し、発破方式の違いによって破碎された岩塊の坑内飛散状況に違いがあるか否かを確認した。

その結果、LP 雷管を使用した多段発破の場合に比べ、e-Dev II による全孔段発破のほうが飛び石距離抑制に効果があることが確認された（写真-17, 18, 図-10）。LP 雷管による多段発破の場合、破碎された岩塊は切羽後方約 80m 付近まで拡がるため、ずり出し前のずり集積作業に約 20 分程度の時間を要する。これに対し、e-Dev II を使用して全孔 25ms 秒時差で全孔段発破を行った場合には、破碎された岩塊は切羽後方約 30m 程度の位置に集積されており、ずり出し作業の効率化に大きな効果があることが確認された。



写真-17 岩塊飛散状況 (LP 雷管-多段発破時)



写真-18 岩塊飛散状況 (e-Dev II 25ms 全孔段発破時)

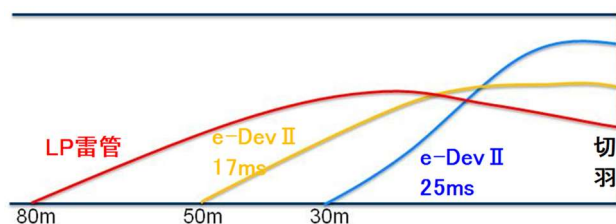


図-10 発破方式の違いによる発破後岩塊飛散状況図

4.4 前方探査技術を駆使した高速施工適否の検証

本工事当初地質想定では、坑口区間ならびに坑口より約 200m 区間は亀裂が発達する風化岩が分布するが、それ以深については徐々に岩盤等級も高くなり、均一な亀裂の少ない花崗閃緑岩（B または C I 等級）がトンネル全体の約 8 割を占めるものとされていた。しかし、トンネル工事は限られた情報のもとで不確実性を考慮して掘り進めていかなければならないため、地山急変や異常出水など、ひとたびトラブルが発生すると切羽作業が中断するばかりではなく、坑内作業の安全確保が困難となる場合もある。

高速施工を行ううえでもっとも必要かつ重要な情報は、切羽前方に分布する地質状況の事前把握である。これは、切羽急変時のトラブルを未然に回避するとともに、地質条件に応じた最適な発破計画などの施工計画立案のためである。また、本工事では、地山等級 B または C I 等級以上の地山を対象とした高速施工を計画しているため、事前に前方地質状況に対し高速施工の適用が可能か否かを判定する必要があった。

一般的に、トンネルの地山等級分類は、坑口部の鉛直・水平ボーリング調査や地表からの弾性波探査のみで全線想定されるものである。しかし、本工事のように、最大土かぶり が 400m もあるような場合、地上からの事前調査のみでは地山内に分布する不連続層や断層破碎帯などの脆弱部ならびに大量帯水層の有無を精度よく調査することが困難である。

そのため、さまざまな前方探査技術の特性、精度を把握するため、坑口区間では 4 つの技術を導入し高速施工区間の施工にむけて適用性を比較検証した。導入した前方探査技術は、以下の 4 つの技術である。

- ①PS ワイヤライン工法（以後、PS-WL）
- ②穿孔探査法
- ③ボアホール検層
- ④反射法切羽前方探査（以後、TSP303 と称す）

①PS-WL とは、専用の PS ワイヤラインサンプリングツールとアロードリルとの組合せによって、あらゆる岩盤を 1 つのサンプラーで連続的にサンプリングすることを可能にした前方地質探査技術である。目視で直接的に切羽前方 100～150m 程度の地質分布状態を調査するものであり、確実性は高いが、調査時間を要するものである。②穿孔探査法は、ドリルジャンボで穿孔を行う際の打撃

エネルギーを換算係数で表したものであり、③ボアホール検層は、穿孔内壁をカメラで間接的に目視調査するものである。上記に示す 3 技術は、すでにオーソライズされた技術である。

これに対し、新たな技術として導入した④TSP303 とは、わずかな火薬を使用して切羽後方で 24 回発破を行い、発破時に岩盤内を伝達する弾性波速度や地質境界からの反射波を受信孔で測定記録し、切羽前方 100～150m 間の地質構造を把握する技術である（図-11）。従来技術である TSP203 では、探査結果は 2 次元モデルで表現されていた（図-12）。しかし、新たな技術となる TSP303 は、左右両側に 2 個ずつ、計 4 個の受信孔を設けることによって、切羽前方の地質分布状況を 3 次元モデルで表現できるように改良されたものである（図-13）。このことによって、トンネル前方に分布する地質状況をあらゆる角度・方向から確認することが可能となり、あらかじめ地質境界や走向・傾斜・節理状況を確認できるようになった新しい

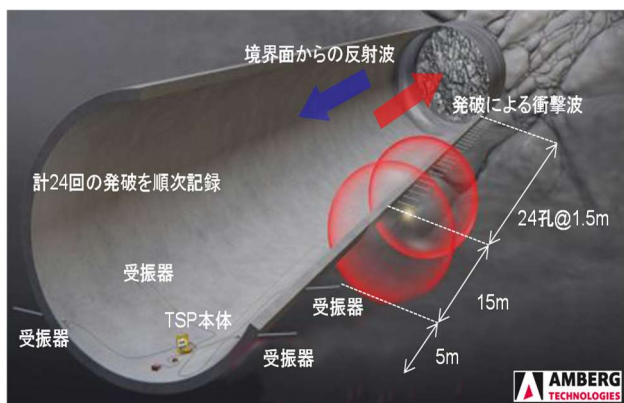


図-11 TSP303 探査概念図

前方探査技術である。

さらに、ポアソン比と Vs 波の関係から予測される帯水層や断層破砕帯とトンネルとの位置関係を立面的に確認できるように改良された技術である。本工事で発生した異常出水発生に対しても、事前に精度よく予見することが可能であった（写真-19）。

坑口区間施工時に実施した複数の前方探査結果を同軸上にならべて評価した結果を下図に示す（図-14）。実施した複数の前方探査結果を同軸上にならべて評価した結果、ボーリングコアや写真検層などで実際に目視で確認される亀裂や風化などの発達する深度と、穿孔探査法や TSP303 で得られた数値変化点がほぼ同程度の位置にあることが確認された。そのため、以後の調査については、TSP303 によってトンネル全線に亘る前方地質の全容を把握するとともに、発破孔穿孔時の穿孔探査法による切羽近傍の岩盤特性を見比べながら施工を行うこととした。



写真-19 切羽異常出水発生状況（TD1180m 地点）

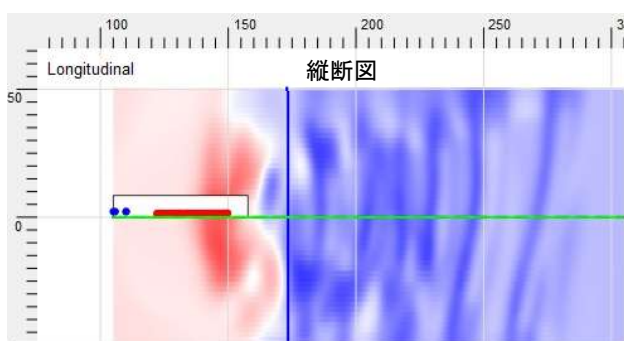


図-12 TSP203 探査結果図（2D モデル）

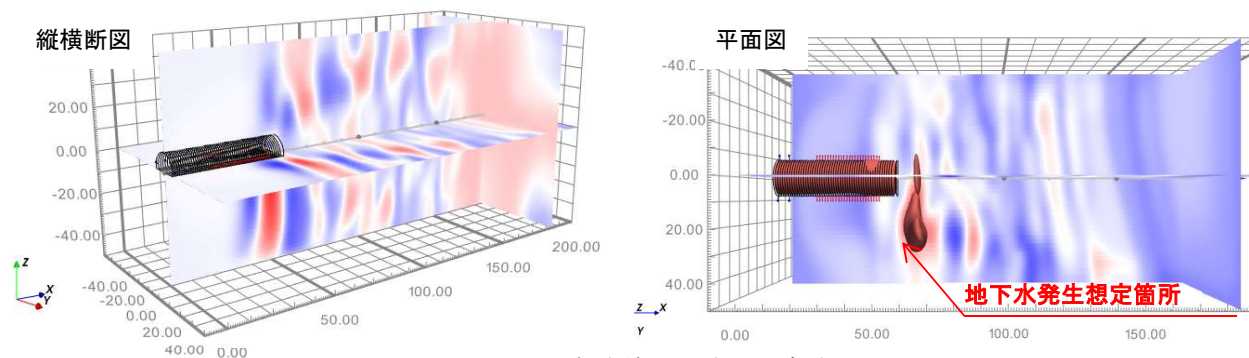


図-13 TSP303 探査結果図（3D モデル）

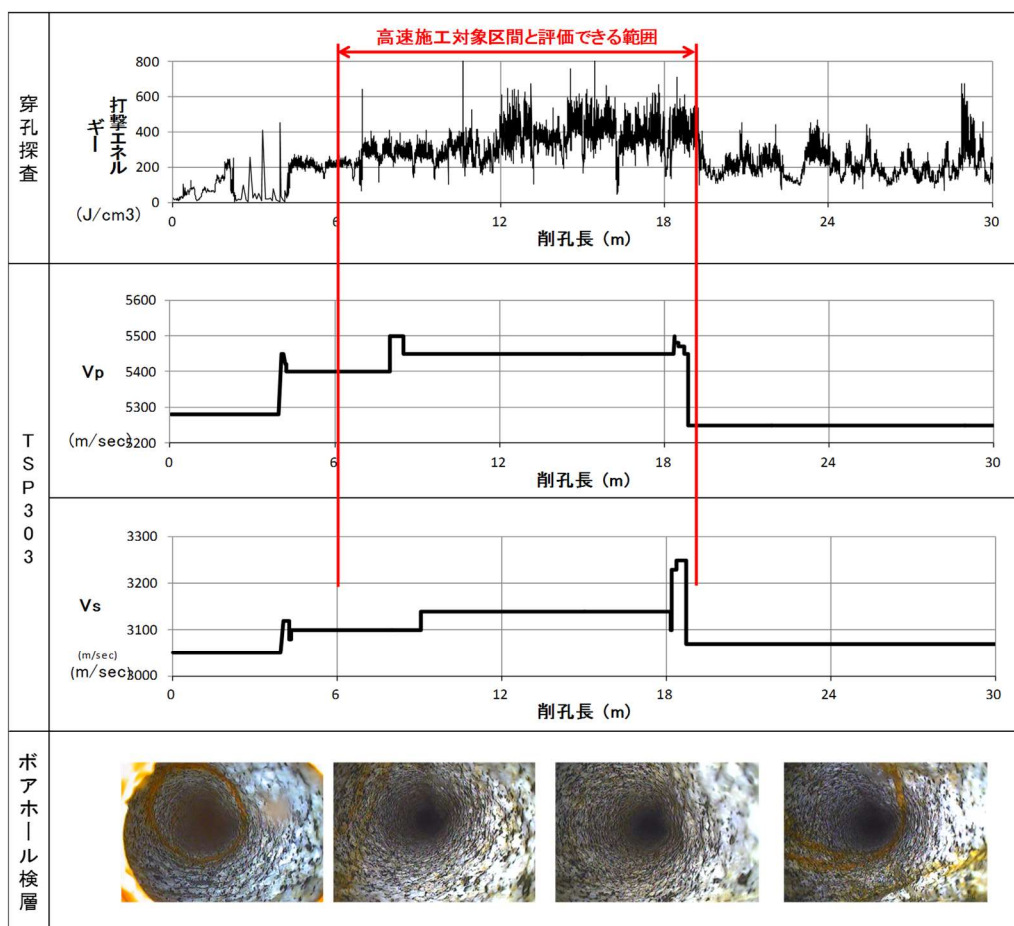


図-14 前方地質探査結果比較図

5. 本工事施工実績

トンネル全線において実施した前方地質探査結果と定期的に実施した環境測定結果を反映した発破騒音・振動影響予測を行い、周辺環境に対する影響の程度を確認しながら最適な発破計画の見直しを繰り返し策定し、坑内 ICT 技術を活用した高速施工スタイルの確立を図ってきた。最適な発破計画は、周辺環境に対する影響の程度から求められる装薬量より算出した穿孔長によってフレキシブルに設定した。

その結果、以下の標準的な掘進長別サイクルタイムが確立された(表-2)。標準機械の組合せによる標準的なサイクルタイムは1.5m 当り 426 分でであり、約 40% のサイクルタイム短縮を達成した。標準サイクルタイム 426 分に該当する掘進長は 3.5m であり、進行長では標準×2.3 倍の掘削速度まで短縮された。また、掘進長 4.0m の初期掘進時とさまざまな最先端技術を採用した高速施工時と比較すると、総サイクルタイムは 330 分(短縮率 60%)短縮することが可能となった(表-2, 図-15)。

表-2 掘進長別サイクルタイム表 単位：分

掘進長	削孔 ～装薬	換気	ずり出し	コソク	吹付け	ロックボルト	合 計
1.5m	85	20	50	10	40	35	240
2.5m	110	20	80	10	60	60	340
3.0m	110	20	110	15	90	60	405
3.5m	110	20	120	15	100	60	425
4.0m	120	20	160	15	125	60	500
4.5m	125	20	165	15	130	60	515

※標準サイクルタイム：426分/1.5m

掘進長 4.0m	削孔 ～装薬	換気	ずり出し	コソク	吹付け	ロックボルト (2間-42本)	合 計
初期掘進	190	40	270	30	200	100	830
高速施工	120	20	160	15	125	60	500
短縮時間	70	20	110	15	75	40	330
短縮率	63.2%	50.0%	59.3%	50.0%	62.5%	60.0%	60.2%

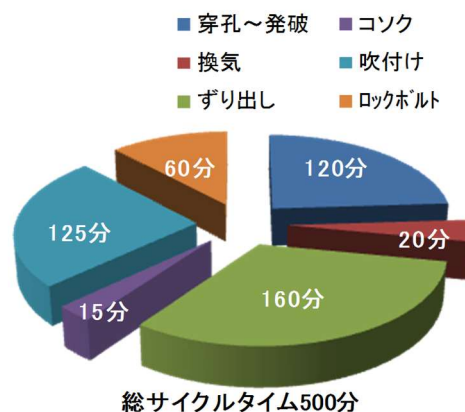


図-15 高速施工サイクルタイム(4.0m 掘進)

本工事では長孔発破スタイルを基本とした高速施工を計画してきたが、周辺環境に配慮した発破方式の検討により、環境基準値を満足する最長の発破長は 6.0m まで記録できた。しかし、本工事の最終目標は最長発破記録ではなく、あくまでも高速施工であるため、得られた掘進長別サイクルタイムを活用した 1 日当たりの進行がもっとも確保できる施工サイクルの組合せを検討した。

1 日当りの作業時間を考慮した 1 日当りの発破長別掘進長は、下表のとおり算出される（表-3）。

表-3 発破長別サイクルタイムと 1 日当り掘進長

発破長	サイクルタイム	1日当り掘進長
1.5m	240分	5.0サイクル/日 ⇒ 7.5m/日
2.5m	340分	3.5サイクル/日 ⇒ 8.8m/日
3.0m	405分	3.0サイクル/日 ⇒ 9.0m/日
3.5m	425分	2.8サイクル/日 ⇒ 9.8m/日
4.0m	500分	2.4サイクル/日 ⇒ 9.6m/日
4.5m	515分	2.3サイクル/日 ⇒ 10.4m/日

※標準施工サイクル(1.5m): 426分⇒4.2m/日

このうち、昼夜 2 交替制の作業体制において、発破孔の穿孔から支保工までの全施工サイクルが完了することが可能であり、かつ、昼夜作業員交替時にスムーズな作業引継ぎが可能なサイクルタイムの組合せを検討し、本工事では『3.0m+4.0m+3.0m』の 3 発破施工を基本スタイルに決定した。

この結果、約 370m ごとに設定されている非常駐車帯区間以外の標準断面区間を 1 ヶ月間連続して掘削した月間において、大船渡側より掘進を行った工区では最大月進 232.5m/月を記録した。日最大掘進長は 12.6m/日、平均日進は 9.5m/日であり、目標として掲げてきた 190.4m/月、9.1m/日を大きく超える記録を達成した。釜石側からの掘進長を加えると、本工事における最大月進長は 384.0m を記録する。この期間中に消費した爆薬量は約 92t、火工品は約 16,000 個である。

トンネル掘削工事は、平成 27 年 3 月中旬より大船渡側工区の掘削を開始し、2 ヶ月遅れて、同 5 月中旬より釜石側工区の掘進を開始した。本坑貫通までに要した期間は約 18 ヶ月間であり、標準施工による掘削工程 27 ヶ月間に対し、約 1.5 倍の掘削速度という結果となった（表-4）。

表-4 掘削速度実績一覧表

【トンネル全体平均記録】

支保パターン		掘削区分	平均掘進記録		大船渡側工区施工記録		釜石側工区施工記録	
			月進(m/月)	日進(m/日)	月進(m/月)	日進(m/日)	月進(m/月)	日進(m/日)
B	32.0m (1.0%)	全断面	252.0	12.0	—	—	252.00	12.00
C I	2,498.8m (75%)	全断面	191.3	9.1	202.02	9.62	123.48	5.88
C II	401.4m (12%)	全断面	109.1	5.2	115.08	5.48	90.19	4.29
D I	9.0m (0.3%)	上半	112.0	5.3	112.00	5.33	—	—
		下半	210.0	10.0	210.00	10.00	—	—
D III	130.3m (3.9%)	上半	65.1	3.1	77.70	3.70	53.00	2.52
		下半	251.0	12.0	266.00	12.67	241.92	11.52
C I-L	224.7m (6.8%)	全断面	128.2	6.1	131.46	6.26	123.48	5.88
C II-L	32.2m (1.0%)	全断面	93.5	4.5	93.45	4.45	—	—
合計	3,328.4m (100.0%)							

【大船渡側工区 施工記録】

支保パターン	実稼働 日数(日)	実稼働対象 延長 (m)	平均日進 (m/日)	月進換算 掘進長(m/月)
D III	上半	10.0	37.0	3.70
	下半	1.5	19.0	12.67
D I	上半	1.5	8.0	5.33
	下半	0.5	5.0	10.00
C II	C II-1	25.0	136.8	5.47
	C II-2	1.0	4.8	4.80
	C II-3	4.0	22.8	5.70
	C II 計	30.0	164.4	5.48
C I	C I-1	3.0	19.5	6.50
	C I-2	12.0	88.5	7.38
	C I-3	18.0	165.0	9.17
	C I-4	30.0	292.5	9.75
	C I-5	28.0	291.0	10.39
	C I-6	30.0	303.0	10.10
	C I-7	2.0	24.0	12.00
	C I 計	123.0	1,183.5	9.62
C II-L	4.0	17.8	4.45	93.45
C I-L	C I-L1	3.0	18.0	6.00
	C I-L2	5.0	30.0	6.00
	C I-L3	4.0	27.0	6.75
	C I-L4	5.0	31.5	6.30
	C I-L 計	17.0	106.5	6.26

【釜石側工区 施工記録】

支保パターン	実稼働 日数(日)	実稼働対象 延長 (m)	平均日進 (m/日)	月進換算 掘進長(m/月)
D III	上半	10.5	26.5	2.52
	下半	2.5	28.8	11.52
D I	上半			
	下半			
C II		9.5	40.8	4.29
C I	C I-1	13.5	79.5	5.89
	C I-2	36.5	277.5	7.60
	C I-3	33.0	321.0	9.73
	C I-4	23.0	229.5	9.98
	C I 計	106.0	907.5	8.56
C I-L	C I-L1	3.0	15.0	5.00
	C I-L2	4.0	24.0	6.00
	C I-L3	5.0	31.5	6.30
	C I-L 計	12.0	70.5	5.88
B	2.0	24.0	12.00	252.00

※実稼働日数とは、非常用施設箱抜き、坑内設備段取り替えを除く
施工日数

※実稼働対象延長とは、実稼働日に掘削した延長

※月進換算掘進長とは、平均日進に月稼働日数(21日/月)を乗じたもの

6. おわりに

新鍬台トンネル工事は、岩手県大船渡市と釜石市間に位置する鍬台峠を上ることなく、スムーズな両市間の通り抜けを可能とする三陸地域の早期震災復興へ向けた幹線道路トンネル工事であり、長大トンネルの早期完成に向けて、さまざまな国内外の最先端技術、建設 ICT 技術の積極的活用に取り組んできた。その結果、偉大な先人たちが記録した日本最大月進記録には及ばないものの、大断面トンネル施工において月進 200m を超える掘進記録を樹立し、トンネルずり出し量（掘削断面積×掘進長）では 26,738 m³ という日本記録を樹立することとなった。

この記録的な掘進を支えた技術は、威力ある制御発破技術、掘削精度を制御する坑内 ICT と連携するコンピュータジャンボではあるが、施工時に得られた情報を次の施工にフィードバックし、作業手順や施工計画の見直し・改善を繰り返すという従来からの施工管理手法は色あせることなく重要なものであり、依然として非常に有効な管理手法であった。

今後、本工事で取り組んできた技術に対し、他の地質条件や施工条件に対する有効性、適用性を検証し、さらなるトンネル高速施工技術の発展に寄与していきたいと考える所存である。さらに、現在、急ピッチで整備が急がれる北陸整備新幹線事業や北海道整備新幹線事業、リニア中央新幹線事業の一助けになれば幸いである。

謝辞：本工事で実施した大断面トンネルにおける高速施工を実現するにあたり、コンピュータジャンボや大型ホイローダなど、さまざまな最先端技術を搭載した数多くの最新鋭機導入に向けてご理解とご協力をいただきました本支店の方々、また、チャレンジ精神から当該技術を導入する際にご理解をいただきました発注者のみなさまがた、ならびに度々現場まで足を運んでいただき適切なご指導をいただきました中川先生（NPO 法人 臨床トンネル工学研究会）、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2006 年制定 トンネル標準示方書[山岳工法・同解説]，pp.51-93, pp.129-167
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，pp.71-131, pp.176-210, 2003.11
- 3) 大島洋志：わかりやすい土木地質学，pp.95-198, 2000.12
- 4) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，pp.82-199, 2009.02
- 5) 山田隆昭：わかりやすいトンネルの発破技術，pp.49-62, 2008.04
- 6) 日本化薬工業会：あんな発破こんな発破，pp.1-79, 2002.03