

坑内 ICT を駆使した大断面トンネル高速施工技術

国道 45 号 新鍬台トンネル工事 (月進 232.5m 達成)

賀川 昌純

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る三陸沿岸道路で最長となる岩手県大船渡市と釜石市を貫く延長 3,330 m 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』として位置付けられる震災復興事業のシンボルであり、一日も早い開通が地域住民より切望されている。そこで、国内初導入となるコンピュータ制御のドリルジャンボのほか、コンピュータで制御する次世代型電子発破制御システムなど、さまざまな最先端の ICT 技術を導入し、想定される技術的課題に取り組み、NATM の大断面山岳トンネルにおける過去最長記録を達成した。
 キーワード：高速施工，ベストマッチ，坑内 ICT 技術，坑内作業の安全と効率化，周辺環境保全

1. はじめに

国道 45 号新鍬台トンネル工事（以下に本工事と略す）は、延長 3,330 m の本坑と延長 3,362 m の避難坑を 4 切羽同時に掘り進めるものである。また、延長約 370 m ごとに非常駐車帯区間が計画されており、各非常駐車帯区間において、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。本工事周辺環境は、坑口から約 200 m 程度の位置に周辺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。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坑内 ICT を駆使した高速施工技術について述べるものである。

2. 施工条件と克服すべき技術的課題

本工事掘削断面は、幅員 14 m（断面積 110 m²）の大断面Ⅱクラスに該当するため、1 サイクル当りの作業量が非常に多くなる。また、本工事地質条件は、両坑口側には CⅡ パターン以下の区間が約 570 m 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、最大土かぶり厚は約 400 m である（図-1）。本工事を代表する地質は、一軸圧縮強度 200 MPa（弾性波速度 V_p = 5,000 m/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、非常に硬い硬岩地山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を

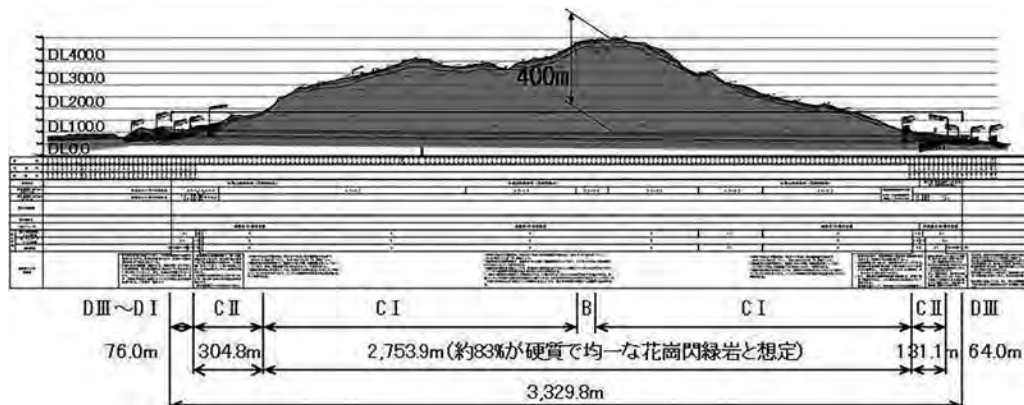


図-1 地質縦断面

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以下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. 課題克服に対し取り組んだ高速施工技術

(1) 各単位作業サイクルタイム向上

掘削断面積 110 m^2 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、複数配置する施工機械は、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のは『ずり出し作業』であり、ずり出し作業の高速化に対しては特に慎重な計画と現場検証を繰り返し実施した(図-2)。

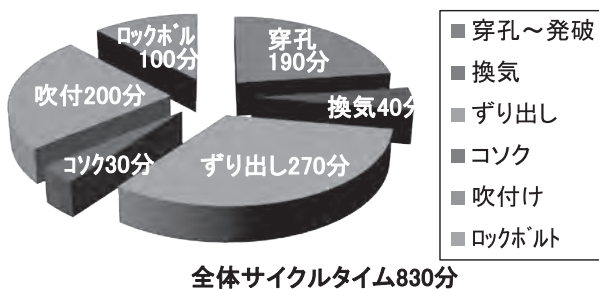


図-2 初期掘進時サイクルタイム (4.0m掘進)

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(積込能力 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 級)や大型ホイールローダなど、さまざまな組合せを計画し、現場検証を行った。ベルトコンベア積込み方式のバックホウは非常に高い積込み能力を有するが、発破で破碎する掘削ずり粒径をベルトコンベア幅よりも小さくする必要があるため、発破孔穿孔に時間を要することとなる。ホイールローダによる積込み方式は、ベルトコンベア方式よりも積込み能力は劣るものの、掘削ずりの粒径に制限がないため、発破孔穿孔時間を短縮

することが可能となる。

このように、ずり出し作業の効率化の検証とはいえ、他の作業との関連を含めて総合的に検討し、もっとも高速ずり出し施工が可能なベストマッチ施工となる配置機械の組合せを決定した。最終的には、大型ホイールローダ (3.5 m^3 級) 2台と重ダンプトラック (27t 積み) 8台の組合せが最適な組合せとなり、重ダンプトラック1台当りの積込み時間約1分、全体ずり出し時間は標準施工の約45%短縮することとなった。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、施工条件が合わなければ機械の能力を発揮できず、機械単体の能力よりも施工条件への適用性を重視した機械選定と複数機械の最適な組合せを見出す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-1~4)。

この複数機械によるベストマッチ施工と、繰り返して行ってきた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%短縮することが可能となった。



写真-1 穿孔速度向上 (2台穿孔)



写真-2 高速ずり出し (2台積込み)



写真一 3 吹付け時間短縮 (2台吹付け)



写真一 4 ロックボルト時間短縮 (2台施工)

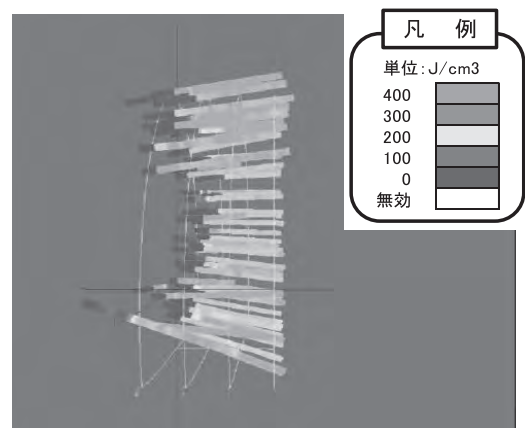
(2) 坑内 ICT を活用した余掘り低減

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低減である。本工事では、余掘り低減を図るため、坑内 ICT と連携する2種類のコンピュータ制御のドリル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 技術は、自動追尾型レーザー断面

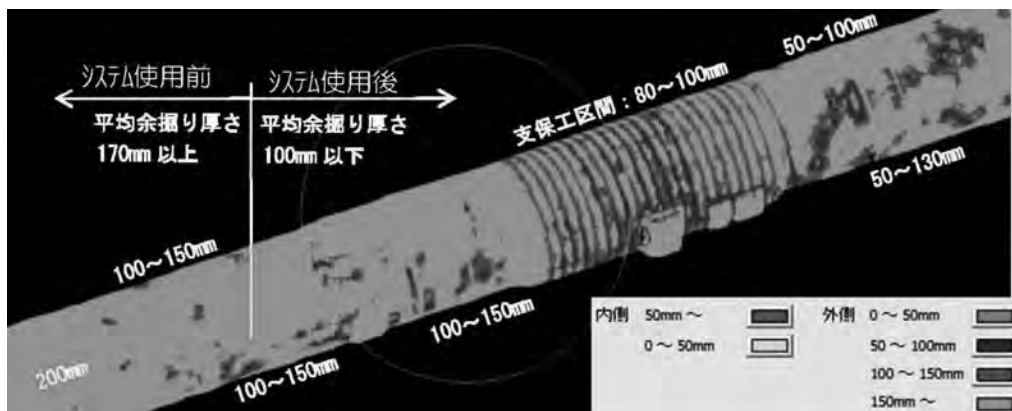
照射システムと全方位 3D スキャナーを採用した。

コンピュータジャンボとは、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穿孔方向や深さ・角度をコンピュータで制御するシステムである。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、発破後の掘削仕上り形状を 3D スキャナーを用いて測定し、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コントロールすることが可能となる。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、発破効率が向上するとともに、作業員の技量に左右されることなく均一で円滑な仕上り形状を構築することも可能となる。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 (図一 3)。

このシステム導入によって、起終点側両工区とも余掘り量が 100 mm 程度低減され、ずり発生量も 10% 程度低減された。ずり出しから吹付け完了までのサイクルタイムは、約 40 分短縮することとなった(図一 4)。



図一 3 発破孔穿孔情報



図一 4 掘削仕上り形状

(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 200 MPa 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必要がある。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、さらに、静電気や迷走電流、落雷に対しても安全な導火管付き雷管（以下に LP 雷管と称す）と電子雷管を採用した。

(a) 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・結線作業効率化のほか、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とともに、大量の発破後ガスが発生することとなる。そこで、発破時の飛び石飛散抑制と発破後ガス換気時間の短縮を図るため、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 80 m 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容易となり、発破退避距離と換気時間の短縮が可能となった。発破後ガスの換気時間は、本工事では約 20 分短縮可能となった（写真—5）。



写真—5 マルチバルーン（飛び石防護時）

(b) 大量爆薬消費時の周辺環境保全

大量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

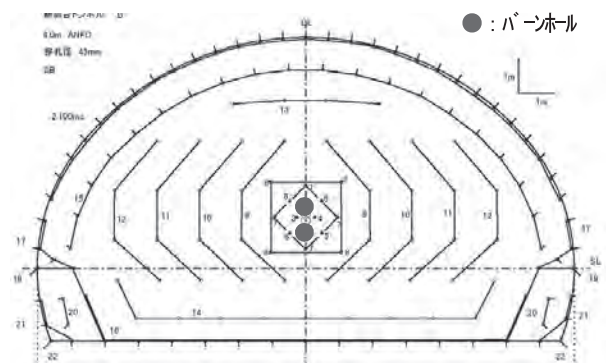
を目的とした発破方式とは相反する対策となる。

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限せず、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 雷管による多段発制御発破を採用した（最大 50 段発）。

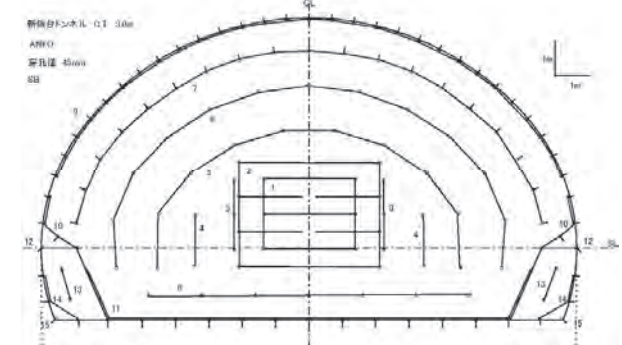
環境測定の結果、芯抜き時の瞬間発破騒音や振動値が環境基準値に対して余裕がないため、芯抜き方式の改善によって対策を行った。芯抜き方式は、平行芯抜きとダブル V カット方式を取り入れた。平行芯抜き方式とは、確実な芯抜き破砕効果を得るため、発破孔のほか、発破時の自由面形成のために空孔（バーンホール $\phi 90 \sim 115$ mm）をトンネル中心部に 2～4 箇所設置する必要がある。穿孔時間が通常よりも長くなる。

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 カット方式を基本スタイルとした。この結果、芯抜き時の発破騒音、振動値ともに約 3 dB の低減効果が確認された（図—5）。

【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—5 計画発破パターン図

しかし、鉾台山中核部に向かうにつれて地山特性はさらに高くなり、弾性波速度 $V_p = 6,000$ 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 1,000 kg 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、電子雷管を用いた新たな制御発破技術（全孔段発発破）への切り替えが必要となった。

採用した電子雷管は、バーコードリーダーを介して



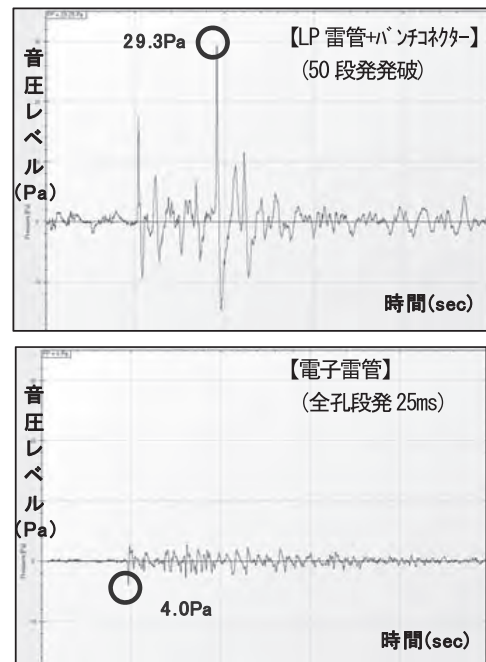
写真一6 電子雷管と発破制御システム

起爆時間を現地で自由自在に設定変更が可能なコンピュータ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(写真一6)。

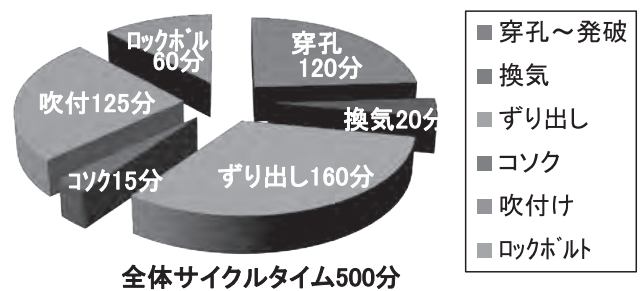
電子雷管を採用することによって、全孔をバラバラに分割発破することが可能となり、1段当りの斉発量も大きく制御することが可能となる。本工事実績では、LP雷管と比較し、1段当りの斉発量は約1/8、発破騒音7dB、振動値6dBの低減効果が確認された。低周波レベルは、電子雷管秒時差を17msから25msに変更するだけで約3dBの低減効果があり、LP雷管と比較すると約8dBの低減効果を得ることができた。さらに、電子雷管は全音圧レベル制御に対しても優れた効果があることが新たな知見として得られた。LP雷管による制御発破時には、全音圧レベルは各段発ごとに大きなエネルギー差を示している。これに対し、電子雷管で全孔段発発破を行った際には、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、対策が困難とされる低周波レベル低減効果が発揮されたものとする(図一6)。

4. おわりに

定期的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発破長によってフレキシブルに設定した。その結果、掘進長4.0mの初期掘進時と比較し、さまざまな最先端技術を駆使した高速施工時の全体サイクルタイムは830分から約330分短縮する結果となった(図一7)。



図一6 全音圧レベル測定結果図



図一7 高速施工サイクルタイム (4.0m掘進)

また、非常駐車帯区間以外の標準断面区間を1か月連続して掘削した月間において、最大月進232.5m/月を記録した。本坑貫通までに要した期間は18か月であり、標準施工による掘削工程27か月に対し約1.5倍の掘削速度という結果となった。

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。

JICMA

【筆者紹介】

賀川 昌純 (かがわ まさずみ)
前田建設工業(株)
東北支店 新銀台トンネル作業所
現場代理人

