

坑内 ICT を活用した大断面トンネル高速施工(最大月進 232.5m)

—国道 45 号 ^{くわだい}新鍬台トンネル工事—

前田建設工業株式会社 正会員 ○賀川 昌純
前田建設工業株式会社 正会員 山本 高志
前田建設工業株式会社 正会員 水谷 和彦

1. はじめに

国道 45 号 新鍬台トンネル工事（以下に本工事と称す）は、東日本大震災復興道路整備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 の避難坑を含む 2 本のトンネルを新設するものである。また、本坑においては約 340m 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 本が計画された三陸沿岸道路最長の長大トンネル工事である（図-1）。

本工事周辺環境は、坑口から約 200m 程度の位置に周辺家屋が数多く点在しており、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ていた。

しかし、三陸沿岸道路は、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、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、技術的課題克服に取り込んだ。

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 を活用した高速施工技术について述べるものである。



2. 新規施工技術の適用性検証

高速施工を達成するため、比較的地山が安定し始めた掘削初期段階から複数の新規施工技術を導入し、現場への順応性、適用性、有効性を試験施工により検証した。また、坑口から 200m 程度隔てた位置には数多くの周辺家屋が点在しているため、大量爆薬を消費する高速施工方法を確立するとともに周辺環境保全対策

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

連絡先 〒026-0121 岩手県釜石市唐丹町字上荒川 148-3

前田建設工業株式会社 東北支店 新鍬台トンネル作業所 TEL 0193-54-1215

についても繰り返し検証を行った（写真-1）。

試験施工によって確認された大断面トンネル高速施工時の課題は以下の4点である。このうち、単独で解決すべき課題もあるが、ほとんどの課題は複数のサイクルに関連する複合的なものであり、綿密な施工計画の検討が必要であった。

- ① 各单位サイクルタイム向上
- ② 余掘り低減によるサイクルタイム向上
- ③ 発破作業の効率化
- ④ 発破方式と周辺環境保全



写真-1 坑口周辺環境(大船渡側坑口)

3. 各課題に対する対策

3.1. 各单位サイクルタイム向上

各单位サイクルタイム向上を図るうえで重要なのは、施工機械の能力アップと複数機械を配置した場合のベストマッチである。どんなに能力の優れた施工機械を配備したとしても、地質条件や施工ヤードなどの施工条件が合わなければ、施工機械が持つ能力を最大限生かすことができず、標準施工よりもサイクルタイムが劣る結果となるケースもある。

本工事施工条件は、掘削断面積が 110 m²を超える大断面トンネル工事であり、トンネル全体の約8割を硬質で均一な花崗閃緑岩が占める地質条件であることを考慮し、すべての作業は複数の施工機械を導入する計画とした。また、大断面である条件を有効活用するため、配備する施工機械はすべて大型機械を選定した。

このうち、大断面トンネル施工サイクルタイムにもっとも大きなウェイトを占めるずり出し作業に対しては、特に慎重な検討を要した。高速ずり出し施工を達成するため、ベルトコンベア搭載型バックホウ2台の組合せ、ベルトコンベア搭載型バックホウと大型ホイールローダの組合せ、または大型ホイールローダ2台の組合せを実際に試験施工で検証し、標準施工とのサイクルタイム向上性を評価した。

試験施工の結果、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台の組合せであり、重ダンプトラック（30 t 積み）1台当た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55%

まで短縮可能という結果を得た。このことは、高速施工を確立するうえで大きな前進であった。

本工事で実際に採用した施工機械組合せは、以下のとおりである（写真-2～5）。



写真-2 穿孔速度向上(2台穿孔)



写真-3 高速ずり出し(2台積み込み)



写真-4 吹付け時間短縮(2台吹付け)



写真-5 ロックボルト時間短縮(2台施工)

3. 2. 坑内ICTを活用した余掘り低減とサイクルタイム向上

各単位サイクルタイム向上が確立されてきた中、さらなるサイクルタイム向上を図るため、サイクルタイムロスに着目して検証を行った。山岳工法トンネル工事の場合、どのような地質条件であっても問題視され、かつ解決を図るべく努力するのは、余掘りの低減である。余掘り低減は、ずり出しサイクルタイムが向上するばかりでなく、のちに続くコンクリート吹付け作業、覆工作業、残土処理・運搬作業にも大きな影響を及ぼすものである。さらに、余掘り低減はトンネル工事全体のコスト低減にも直結するため、サイクルタイム向上以外にも非常に重要なテーマである。

本工事では、余掘り低減によるサイクルタイム向上を図るため、坑内ICTと連携するコンピュータジャンボを各切羽に2台ずつ導入した。また、採用した坑内測量技術は、自動追尾型レーザー断面照射システムと全方位3Dスキャナーである（写真-6, 7）。

大船渡側工区で採用したドリルジャンボは、国産のトンネルナビゲーションシステム機能搭載型ドリルジャンボである。ドリルジャンボにトンネル線形情報、トンネル断面形状、発破パターン、ロックボルト配置情報などを登録し、ドリルジャンボに位置情報を与えることにより、車のナビゲーションと同様、穿孔方向や穿孔深さ・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機能付きドリルジャンボである（写真-8）。

このICT技術を活用して穿孔・装薬し、発破・ずり出し後の掘削仕上り形状ならびに吹付け完了後の仕上り形状を3Dスキャナーで断面測定し、次の発破計画にフィードバックした。

この結果、大船渡側工区における平均余掘り厚さは、システム使用前と比較し約70mm低減することが可能となり（余掘り低減率約20%）、ずり出し開始から吹付け完了までのサイクルタイムを約20分短縮することが可能となった（図-2）。



写真-6 自動追尾型レーザー断面照射

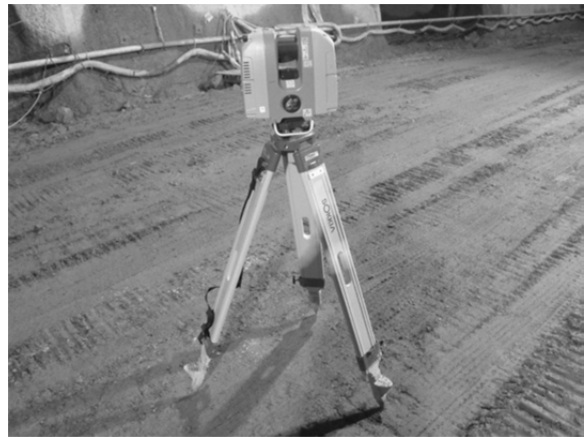


写真-7 全方位 3D スキャナー



写真-8 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)

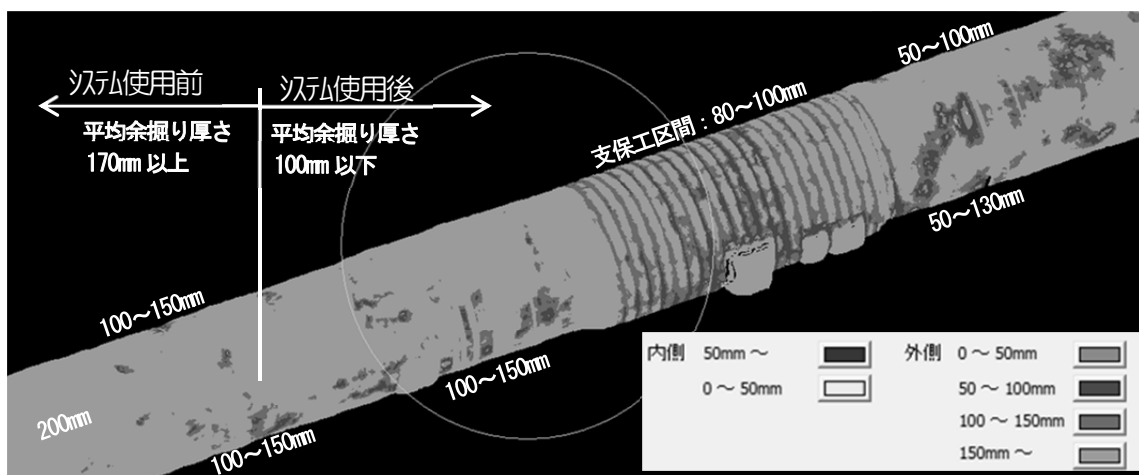


図-2 掘削・吹付け仕上り断面形状(大船渡側工区)

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国内で初めて導入した。位置情報などを与えるまでは前述のドリルジャンボと同様であるが、ドリルジャンボの位置決め完了後、作業開始ボタンを押すだけでブーム移動・穿孔から所定の深度まで穿孔完了、次の孔へ移動など、すべての操作をコンピュータで全自動制御するマシンコントロール機能付きのドリルジャンボである（写真-9）。

この ICT 技術を活用することにより、作業員の技量に左右されることなく均一で円滑な掘削仕上り形状を構築することが可能となった。平均余掘り厚さは、計画+60mm 程度まで高精度に仕上げる事が可能となり、ずり出し開始から吹付け完了までのサイクルタイムを約 40 分短縮することが可能となった（図-3）。

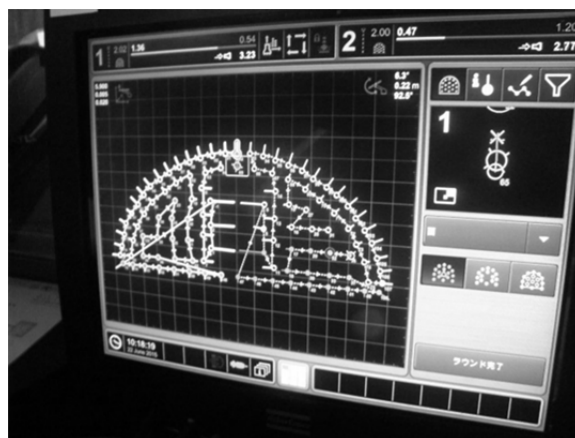


写真-9 釜石側工区ドリルジャンボ(全自動コンピュータジャンボ)

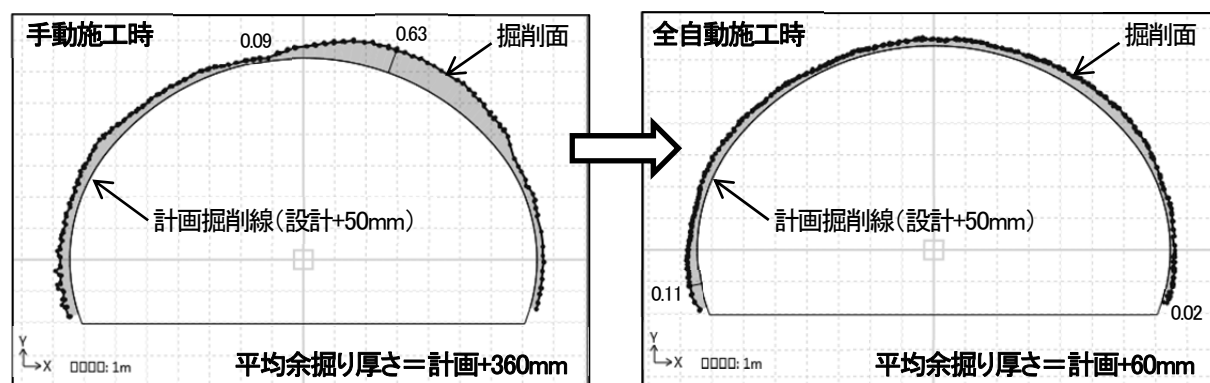


図-3 掘削・吹付け仕上り断面形状(釜石側工区)

また、このドリルジャンボは 3D スキャナーも搭載しているため、穿孔作業やロックボルト施工中にトンネル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。断面測定データ引継ぎや次の発破計画へのフィードバックも非常に容易であるため、本工事で見出した活用方法によっては、高速施工のほか将来的には省人化または無人化施工へ貢献できるドリルジャンボである。

3. 3. 発破作業の効率化

本工事では、切羽直下におけるもっとも危険な作業となる装薬と結線作業時間の短縮を図り、硬質で均一な花崗閃緑岩を確実にかつ経済的に破碎するため、機械装填式で密充填が可能な威力ある ANFO 爆薬を使用した発破技術を選択した。使用する雷管は、導火管付き雷管（LP 雷管）と電子雷管（e-Dev II）を採用した。電子雷管（e-Dev II）は、電子制御で起爆時間を自在に設定・変更することが可能な次世代型電子発破システムであり、バーコードリーダーを介して現地で容易に起爆時間の設定・変更が可能な雷管である。

3. 3. 1. 発破換気時間の短縮

ANFO 爆薬で施工する場合、装薬量が多くなるため、飛び石距離が大きくなるばかりでなく、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および換気時間短縮を図る対策を検討した。検討の結果、本工事では飛び石防護と換気作業の効率化を図るマルチバルーンを採用した（写真-10）。

マルチバルーンとは、トンネル断面形状に合わせて縫合した防弾チョッキとパラシュート素材の袋内に空

気を送り込み、発破時に切羽後方に隔壁を設けて飛び石と発破後ガスを切羽近傍に遮断・密閉するものである。マルチバルーンに加えて伸縮風管を配備した排気ファンを組み合わせることにより、発破後ガスを切羽から隔壁までの間に封じ込めたまま強制的に換気することが可能となるため、発破退避距離と発破後換気時間の大幅な短縮が可能となった。

本工事ではマルチバルーンを活用した吸引捕集排気方式を採用することにより、換気時間は約 20 分で完了する結果となった（写真-11、12）。



写真-10 マルチバルーン



写真-11 発破後ガス封じ込め状況



写真-12 伸縮風管

3. 3. 2. 飛び石距離抑制によるずり出し時間の短縮

導火管付き雷管と電子雷管の2種の雷管を採用し、発破方式の違いによる破碎された岩塊の坑内飛散状況を確認した。その結果、導火管付き雷管を使用した場合に比べ、電子雷管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。

導火管付き雷管の場合、切羽より約 80m 後方まで破碎された岩塊が拡がり、ずり出し前のずり処理に時間を要する。これに対し、電子雷管を用いて全孔を 25ms 秒時差で発破した場合、破碎された岩塊は切羽後方 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を示した（写真-13、14）。



写真-13 発破後岩塊飛散状況(LP 雷管)



写真-14 発破後岩塊飛散状況(電子雷管 e-Dev II)

3. 4. 発破方式と周辺環境保全

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・振動などの周辺環境への影響も大きくなる。そこで、試験発破により最適な発破方式の検証を行うこととした。

試験内容は、バンチコネクターを併用した導火管付き雷管による制御発破（多段発破）と電子雷管を採用した制御発破（全孔段発破）である。電子雷管の秒時差は、発破継続時間を極力短くするため、全孔の秒時差を 17ms と 25ms の 2 種類に設定した。導火管付き雷管を含めた合計 3 種類の試験発破を行い、周辺環境への影響程度と発破方式の違いによる影響低減効果を検証した。

坑口にもっとも近接する家屋（P1 地点）における環境測定の結果、いずれの制御発破方式を採用してもすべて環境基準値を下回る結果であったが、導火管付き雷管による多段発破よりも電子雷管を使用した全孔段発破のほうが騒音、低周波、振動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。

これは、導火管付き雷管による多段発破は最大 50 段発程度であることにに対し、電子雷管による多段発破は最大 500 段発まで分割することが可能であり、1 段当りの斉発量を大きく制御できるためである。

特に、発破による周辺環境への影響のうち、もっとも低減対策が困難とされる低周波音レベルに着目すると、電子雷管で全孔の秒時差を 17ms から 25ms に変更するのみで約 3dB の低減効果があり、導火管付き雷管と電子雷管の秒時差 25ms を比較すると約 8dB 程度の低減効果が確認された（表-1）。

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	934.85	6.54	28	57	94.4	+3.2	全143孔-143段発
	秒時差 25ms	709.15	6.06	28	57	91.2	—	全117孔-117段発

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 割を占める状態であると推測されていた。しかし、トンネル工事は、わずかな情報しかない中、手探り状態で掘り進めていかなければならないため、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なく、坑内作業の安全確保も困難となる場合もある。そのため、このようなトラブル発生を未然防止するとともに、高速施工の適用が可能か否かを判定するため、坑口区間施工時にさまざまな前方探査技術を導入し、切羽前方地質状況の把握ならびに前方地質予想の精度向上を図ることとした。

採用した前方地質探査技術は、PS ワイヤライン工法によるオールコアボーリング探査、ドリルジャンボ穿孔エネルギーを活用した穿孔探査法ならびに発破を併用する反射法切羽前方探査（以後、TSP303 と称す）である。また、ドリルジャンボ穿孔探査時にボアホール写真検層も合わせて実施した。

実際に目視で確認される岩盤状態と得られた数値結果を同一軸上にならべて評価し、本工事における前方地質全容を TSP303 のみで評価できる指標を確立した。これにより、トンネル掘削をトラブルなく安全に施工するうえで、もっとも重要となる前方地質概要を事前に精度よく把握することが可能となった。また、事前に入手された前方地質情報をもとに地山条件に応じた施工計画を立案することが可能となり、得られた地山評価にもとづいて高速施工の適用対象区間選定を行った（図-4）。

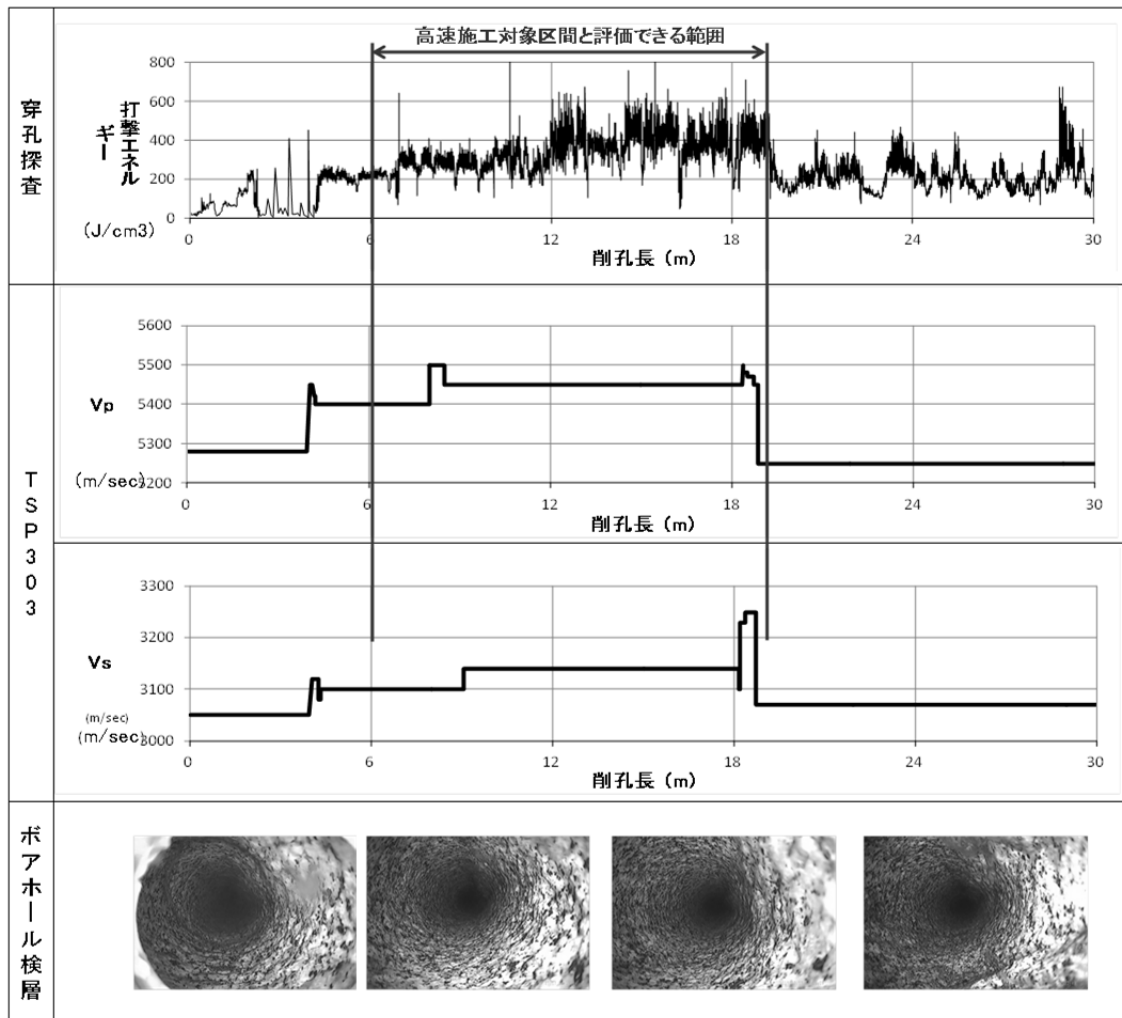


図-4 穿孔エネルギー・TSP303 とボアホール検層データ評価例(TD150m)

5. 本工事施工実績について

周辺環境への影響程度を確認しながら最適な発破計画を繰り返し策定し、坑内 ICT を活用した高速施工スタイルの確立を図った。最適な発破計画は、周辺環境に対する影響程度から求められる装薬量より算出した穿孔長と、昼夜作業で支保工完了までの施工が可能なサイクルタイムの組合せによりフレキシブルに設定した。この結果、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、最大月進長 232.5m を記録した。当該月間における日最大掘進長は 12.6m（平均 9.5m/日）であり、釜石側からの掘削長を加えると、本工事における最大月進長は 384.0m を記録する。

6. おわりに

新鍬台トンネル工事は、大船渡市と釜石市間に位置する鍬台峠を上ることなく、スムーズな通り抜けを可能とする三陸地域の早期復興へ向けた基幹道路工事であり、早期完成に向けてさまざまな国内外の最先端技術導入、新技術活用に取り組んだ。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、大断面トンネルにおいて月進 200m を超える掘進記録を樹立できた。

記録的な掘進長を支えた技術は、威力ある発破技術、発破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、計画見直し・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、非常に有効な手段であった。