

発破の高度化技術と日々延伸型テーブルピース台車を活用した トンネル掘削作業の生産性向上の取り組み

安藤ハザマ 正会員 ○油井 敦弘 人見 直輝
中島 健太 太田 学
鉄道建設・運輸施設整備支援機構 長田 英俊

1. はじめに

山岳トンネルの施工は、いまだに多くの部分を熟練技能者の技能に依存しているのが現状である。一方で、少子高齢化に起因する熟練技能者の減少や新規入職者の不足といった問題も抱えている。また、近年では、建設業全体として、週休2日制の導入や時間外労働時間の上限設定といった働き方改革も推進されており、限られた時間で工事の生産性を確保していくことが強く求められている。

このような背景のもと、筆者らは、ICTによる山岳トンネル工事の生産性を飛躍的に高める取組みとして、「山岳トンネル統合型掘削管理システム (i-NATM®)」の開発を推進している。その一環として、これまでに「切羽出来形取得システム」、「発破パターン作成プログラム」などの発破の高度化技術や、連続ベルトコンベヤー方式におけるずり運搬作業の効率化を目的とした「日々延伸型テーブルピース台車」を開発した。

「切羽出来形取得システム」、「発破パターン作成プログラム」は、全自動ドリルジャンボと連携を図ることで、「穿孔作業の自動化による省人化」や「発破の最適化による余掘り量低減」といった生産性向上効果が期待できるものである。

連続ベルトコンベヤーの運用については、従来、30~50m程度のトンネル掘削の進捗にあわせて2~4方程度、掘削作業を中断して延伸作業を行わなければならないという問題点があった。これに対して「日々延伸型テーブルピース台車」は、掘削サイクルの合間時間を活用することで、トンネル掘削作業を中断せず連続ベルトコンベヤーの延伸が可能のため、生産性向上効果が期待できるものである。

今回、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構北海道新幹線建設局発注の後志トンネル（天神）他工事に先述した開発技術を適用し、長期的な運用を行っている。本稿では、当社が開発した生産性向上技術の内容について詳述するとともに、現場適用によって得られた生産性向上効果について報告する。

2. 後志トンネル（天神）他工事について

(1) 工事概要

後志トンネル（天神）他工事は（以下、本工事と示す.）、北海道新幹線新函館北斗・札幌間に位置する後志トンネル（延長L=17,975m）のうち、新青森起点、323km650m~328km212m（工事延長L=4,562m）までのトンネル区間（トンネル延長L=4,460m）および坑外の路盤工（延長L=102m）を施工するものである。

本工事の概要を図-1に示す。

(2) 対象地質と生産性向上に向けた課題

後志トンネル（天神工区）の基盤岩を構成するのは、新第三紀・中中新世の大和層と呼称される安山岩および同質火砕岩である。この大和層を被覆する形で、後期中新世の山沢層および第四紀・更新世の安山岩溶岩が厚く堆積している。



工事名：北海道新幹線、後志トンネル（天神）他
発注者：独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
北海道新幹線建設局
施工者：安藤ハザマ・伊藤・堀口・泰進北海道新幹線、
後志トンネル（天神）他特定建設工事共同企業体
工期：2019年11月1日~2025年6月30日
トンネル施工延長：4,460m 幅員：約10m 高さ：約8m

図-1 工事概要

キーワード 山岳トンネル, 発破, 全自動ドリルジャンボ, 連続ベルトコンベヤー方式, 日々延伸

連絡先 〒047-0011 北海道小樽市天神 2-5-1 安藤ハザマ・伊藤・堀口・泰進 JV 天神トンネル作業所 TEL:0134-64-6577

4. 発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボ

(1) 切羽出来形取得システム

「切羽出来形取得システム」は、発破後の切羽出来形を3Dスキャナによって取得し、発破の良否や余掘り量について、定量的に評価する技術である。切羽出来形の取得にあたっては、3Dスキャナと評定点を架装した計測車両とトンネル坑内に設置したトータルステーションを連携させることで、発破後の切羽出来形を短時間かつ高精度に取得することができる。図-3に切羽出来形取得システムの概要を示す。

(2) 発破パターン作成プログラム

「発破パターン作成プログラム」は、トンネル断面、1発破あたりの進行長、岩盤の硬軟などの施工情報を入力することで、自動で発破パターン（装薬孔の位置、穿孔角度）を作成するプログラムである。「発破パターン作成プログラム」は、トンネル断面や岩盤の硬軟などの情報から、発破パターンの作成に必要な孔間隔や抵抗線長などを算出する「発破設計プログラム」と、発破設計プログラムによって算出した情報をもとに、孔位置を座標化する「発破パターン描画プログラム」により構成されている。

プログラムの開発にあたっては、これまでにマシンガイダンス機能付きドリルジャンボを適用したトンネル現場において蓄積した装薬孔の位置や切羽出来形などの施工データを分析し、発破の理論式と組み合わせることで、独自の発破理論を構築した。図-4に発破パターン作成プログラムの出力例を示す。

(3) 全自動ドリルジャンボ（J32RX-Hi）

本工事に適用した全自動ドリルジャンボの機種は、古河ロックドリル社製のJ32RX-Hiである。全自動ドリルジャンボは、発破パターンや穿孔順序などの情報を事前に登録しておくことで、穿孔作業を自動で行うことができる。これにより、従来はオペレータ2～3人で行っていた穿孔作業を1で行うことが可能となる。

また、あらかじめ作成された発破パターンをもとに自動で穿孔作業を行うことができるため、切羽技能者の技術力の違いによる穿孔精度のばらつきを抑制することができる。

写真-1、写真-2に全自動ドリルジャンボを示す。

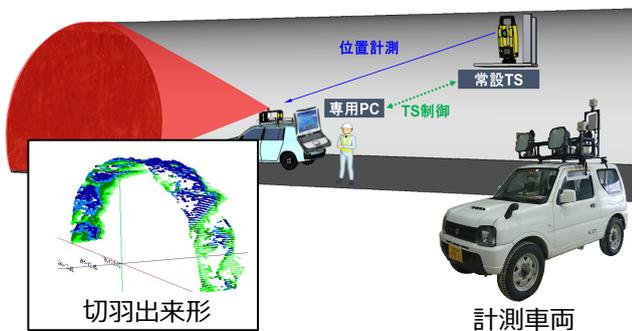


図-3 切羽出来形取得システムの概要

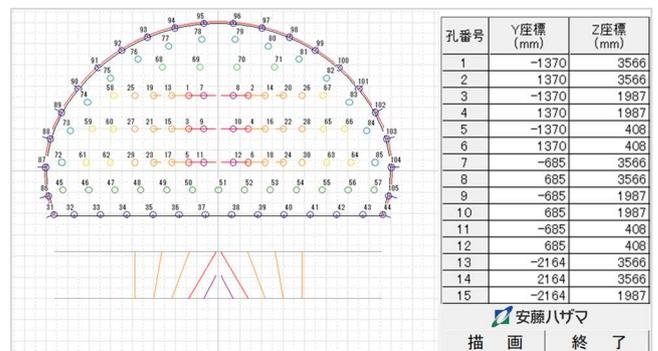


図-4 発破パターン作成プログラムの出力例



写真-1 全自動ドリルジャンボ（外観）



写真-2 全自動ドリルジャンボ（運転席）

5. 現場における穿孔作業の自動化に向けた取組み

(1) 地山の硬軟に応じた発破パターンの修正

本工事では、「切羽出来形取得システム」、「発破パターン作成プログラム」といった発破の高度化技術を活用することで地山の硬軟に応じて柔軟に装薬孔の孔配置の見直しを行っている。また、余掘り量に応じて、外周孔の差し角を調整することで、より精度の高い発破パターンを作成している。

後志トンネル（天神工区）における発破パターンの修正例を図-5に示す。

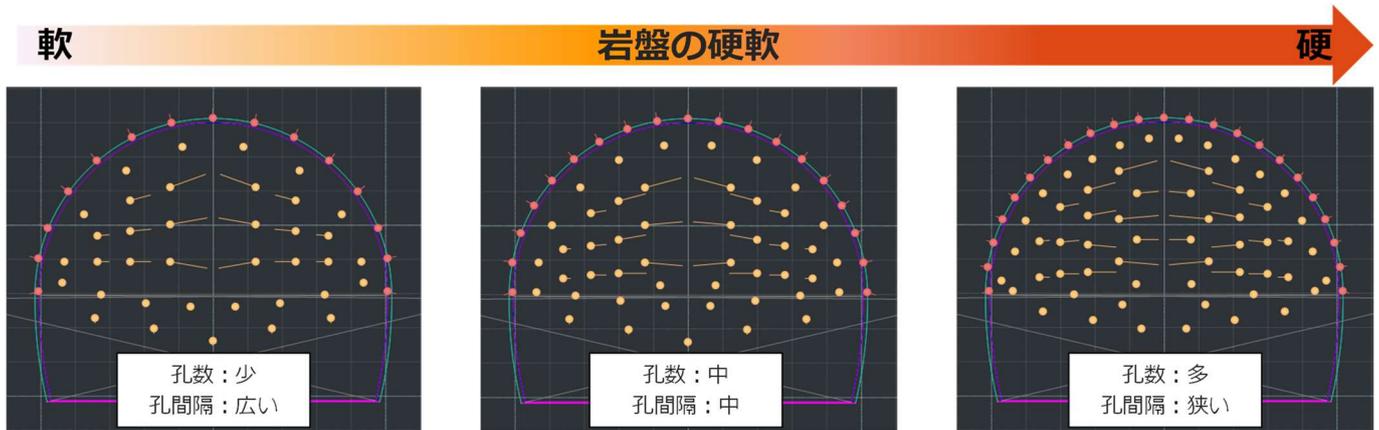


図-5 後志トンネル（天神工区）における発破パターンの修正例（IN-2）

(2) 自動穿孔のための発破パターン作成

本工事では、全自動ドリルジャンボを活用して、自動で穿孔作業を行うため、「各ブームの穿孔範囲」、「穿孔順序」、「ガイドロータリの回転角度」など、これまで熟練技能者の経験や勘を頼りに決定されてきた発破パターン作成に関する技術を数値化することで、発破パターンに反映した。

a) 各ブームの穿孔範囲

各ブームの穿孔範囲の設定にあたっては、穿孔作業を最適化するため、極力ブームの待機時間が発生しないよう考慮した。さらに、中ブームについては、取付け位置の都合上、左右ブームとは異なり、Vカットにおける心抜き孔などの穿孔には適さない場合がある。そのため、穿孔範囲については各ブームの特性について留意し、設定した。

心抜き孔、払い孔、肩部よりも低い位置の外周孔および外周助孔については、左右のブームで穿孔するものとした。天端付近の外周孔および外周助孔については、中ブームにて穿孔するものとした。

b) 穿孔順序

穿孔順序の設定にあたっては、ブーム同士の接触を防止する必要がある。また、装薬孔の種類により穿孔長が異なるため、穿孔時間を考慮して決定した。

c) ガイドロータリの回転角度

穿孔作業時のガイドロータリの回転角度は、図-6に示すように定義されている。左ブームと中、右ブームでは、ガイドロータリの機構が左右対称となるため、左右反転した値となる。自動で穿孔作業を行うためには、全ての装薬孔に対して、ガイドロータリの回転角度を設定しておく必要がある。

ガイドロータリの回転角度の設定にあたっては、トンネル壁面や地山との接触を防止する必要がある。

また、連続性のない不規則なガイドロータリの回転は、油圧ホースなどの絡まりの原因となるため、ロスの

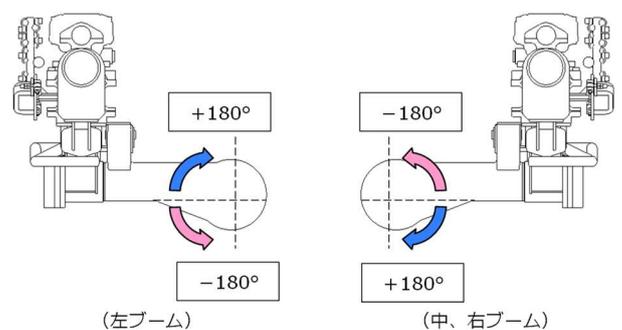


図-6 ガイドロータリの回転角度の定義

少なく、連続性のあるスムーズなものとする必要がある。

筆者らは、全自動ドリルジャンボの適用に先立ち、ドリルジャンボの遠隔操作技術の開発、現場適用にも取り組み、熟練技能者の技能に依存しない発破技術の確立を目指してきた。自動で穿孔作業を行うために必要となる「各ブームの穿孔範囲」、「穿孔順序」、「ガイドロータリの回転角度」については、上記技術の現場適用によって得られた知見をもとに決定した。

また、図-7に示す全自動ドリルジャンボ専用のシミュレータを用いて「各ブームの穿孔範囲」、「穿孔順序」、「ガイドロータリの回転角度」について事前にシミュレートすることで精度を高めた。

(3) 発破の最適化サイクルの実践

本工事では、発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携を図ることにより、図-8に示す発破の最適化サイクルを実践している。具体的には、「切羽出来形取得システム」によって取得した切羽出来形から発破の良否や余掘り量について定量的に評価する。さらに、全自動ドリルジャンボによって取得した穿孔エネルギーなどの情報から岩盤の硬軟について判定する。発破の評価結果をもとに「発破パターン作成プログラム」により、装薬孔の孔間隔の見直しや外周孔の差し角の調整といった発破パターンの修正を行う。

そして、全自動ドリルジャンボの自動穿孔機能により、修正した発破パターン通りの正確な穿孔作業を行う。これらの一連のサイクルを繰り返すことで、発破作業の最適化を図っている。

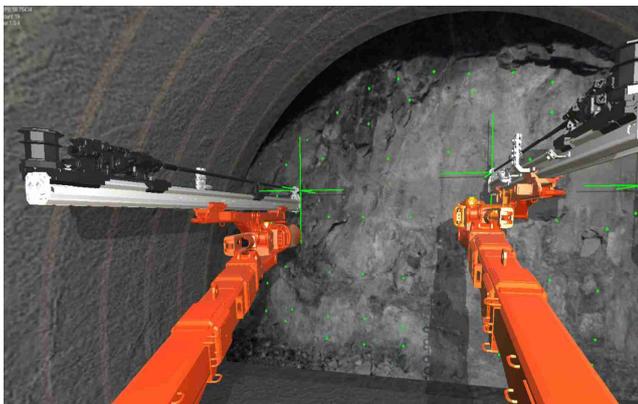


図-7 全自動ドリルジャンボ専用シミュレータ

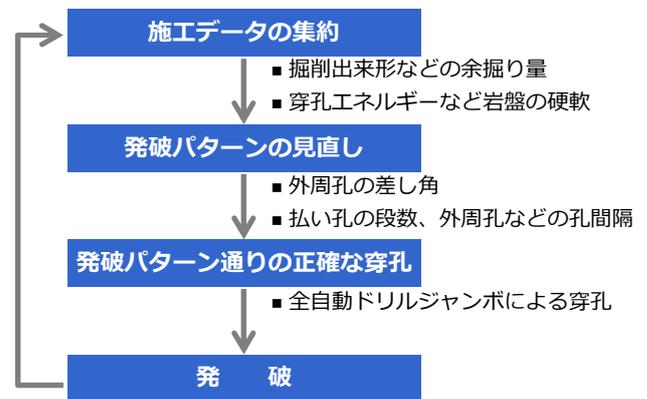


図-8 発破の最適化サイクル

6. 連続ベルトコンベヤーの延伸作業の課題

(1) 従来の連続ベルトコンベヤーの延伸作業の問題点

山岳トンネルの連続ベルトコンベヤー方式によるずり運搬作業では、発破による掘削ずりをホイールローダで集積し、切羽後方に設置したクラッシャーへと投入する。投入された掘削ずりは、クラッシャーにてベルトコンベヤーで運搬可能な大きさまで破碎されたあと、後方の連続ベルトコンベヤーに載せ替え、トンネル坑外の仮設ヤードへと搬出する。

連続ベルトコンベヤー方式は、タイヤ方式と比較して、坑内環境改善や安全性向上といった長所がある一方で、ベルトコンベヤーの延伸作業に時間を要するといった問題点を抱えている。連続ベルトコンベヤー方式では、切羽に近い位置にクラッシャーを配置することで、ずりの集積、投入に伴うホイールローダの走行距離を短く保つことが、ずり運搬作業を効率化するうえで重要となる。そのため、30～50mのトンネル掘削の進捗に併せて、2～4方（1～2日分）程度、切羽作業を休止し、ベルトコンベヤーの延伸作業を行うケースが多い。

(2) 連続ベルトコンベヤー方式における生産性向上のための課題

ベルトコンベヤーの延伸作業では、吊りチェーンや中間フレームなどの部材をベルトコンベヤーの延伸作業に先行して設置する必要がある。また、ベルトコンベヤーと併せて、電気設備や換気設備も延伸する必要があるため、作業にあたっては、多くの人員と時間を必要とする。そのため、作業を効率化し、より少ない人数で延伸作業を可能にすることが、連続ベルトコンベヤー方式における生産性向上のための課題である。

本工事では、先述のとおり、全自動ドリルジャンボの適用により、1名での穿孔作業が可能である。そのため、表-1 に示すトンネル掘削作業と切羽技能者の動きの中で、黄色部分の待機時間に加えて、穿孔作業時の待機時間（黄色網掛け部分）が長くなる。筆者らは、この時間に着目し、全自動ドリルジャンボを用いた発破の高度化技術との連携により、連続ベルトコンベヤーの延伸作業時間を確保できると考えた。

表-1 トンネル掘削サイクルと切羽技能者の動き

切羽技能者	作業	穿孔							装薬			発破			ずり出し							吹付けコンクリート①		鋼製支保工建込み		吹付けコンクリート②			ロックボルト	
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	
A	ドリルジャンボ操作	ドリルジャンボ操作							監視			点火準備			ブレーカー操作							待機		エレクター操作		待機			ドリルジャンボ操作	
B	ドリルジャンボ操作⇒待機	ドリルジャンボ操作⇒待機							装薬			重機移動			ホイールローダ操作							待機		鋼製支保工建込み		ドリルジャンボ準備			ドリルジャンボ操作	
C	ドリルジャンボ操作⇒待機	ドリルジャンボ操作⇒待機										装薬			防音扉			バックホウ操作			生コン車運転			モルタル台車準備		吹付け機洗浄			ロックボルト挿入	
D	ロックボルト準備	ロックボルト準備							装薬準備						ロックボルト積込み			その他作業							吹付けロボット操作		モルタル練り混ぜ			
E	鋼製支保工準備	鋼製支保工準備										装薬準備			鋼製支保工積込み															
時間(分)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110				120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270

7. 日々延伸型テールピース台車

(1) システム概要

筆者らは、従来の連続ベルトコンベヤーの延伸作業の問題点を改善し、トンネル掘削作業サイクルの中で、ベルトコンベヤーの延伸作業を行うことができる「日々延伸型テールピース台車」を開発した⁴⁾。

図-9 に日々延伸型テールピース台車の概要を示す。日々延伸型テールピース台車は、3つのステージとベルトの仮受け機構を装備することで、延伸作業の大幅な時間短縮と安全性向上を実現する。

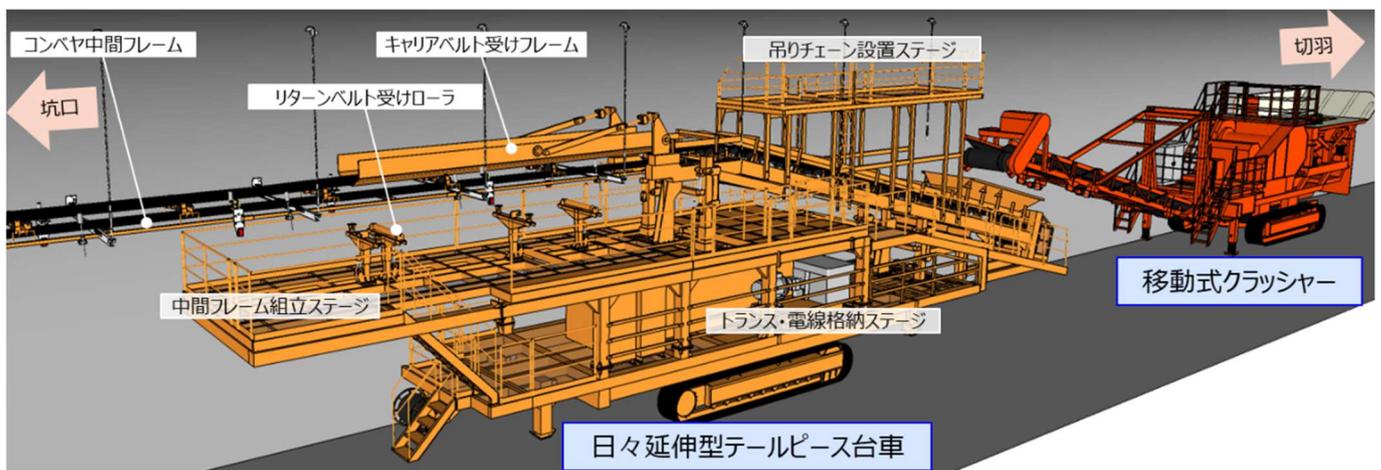


図-9 日々延伸型テールピース台車

(2) 日々延伸型テールピース台車による効果

a) 各部材の事前設置

吊りチェーン設置ステージおよび中間フレーム組立ステージにより、延伸作業における各部材の組立を事前に行うことができる。これにより、従来はトンネル掘削作業を中断し、高所作業車を使用して各部材の組立を行っていたが、トンネル掘削作業を中断することなく、ステージ上で安全かつ効率的に部材の設置作業を行うことができる。なお、各部材の設置作業は、ずり搬出以外の掘削サイクルの中で、2名の切羽技能者で実施することができる。

b) 電源台車としての活用

日々延伸型テールピース台車では、トランス・電線収納ステージにトランスおよび電気設備を収納することで、トンネル坑内に別途配置していた電源台車を兼ねることができる。これにより、移動設備を減らすことができるとともに、テールピース台車とクラッシャーの電源供給も容易となる。

c) トンネル掘削作業の効率化

日々延伸型テールピース台車では、1回あたり7.2m（中間フレーム2本分）の延伸が可能となる。延伸の際、移動式クラッシャーとテールピース台車の間隔を一定に保つことができるため、移動式クラッシャーとテールピース台車の乗り継ぎ部において発生する土砂の過剰な堆積を抑制できる。また、移動式クラッシャーおよびテールピース台車が常に切羽に近い位置に設置することができるため、それらの後方に駐車する重機の移動時間を短縮することができ、トンネル掘削作業の効率化へと繋がる。

8. 現場適用によって得られた生産性向上効果

(1) 発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボによる生産性向上効果

a) 穿孔作業の自動化による省人化

本工事では、「切羽出来形取得システム」、「発破パターン作成プログラム」などの発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携により、経験の浅い技術者においても、短時間で精度の高い発破パターンを作成、登録することが可能となった。そのため、全自動ドリルジャンボの操作は簡単なボタン操作のみとなり、専任のオペレータではなく、通常の切羽技能者1名で穿孔作業を行うことができる。

b) 発破の最適化による余掘り量低減

本工事では、オペレータがドリルジャンボを直接操作して穿孔作業を行う従来の施工方法に比べて、余掘り量の低減効果が確認できている。各支保パターンにおける余掘り量（余吹き量+余巻き量）の低減効果を図-10に示す。一般的にIINパターンのように鋼製支保工を設置しない区間では、内空断面の仕上りの目安となる部材がないため、掘削面を平滑に仕上げることが困難である。発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携により、写真-3に示すように鋼製支保工を設置しない支保パターンにおいても掘削面を平滑に仕上げることができている。

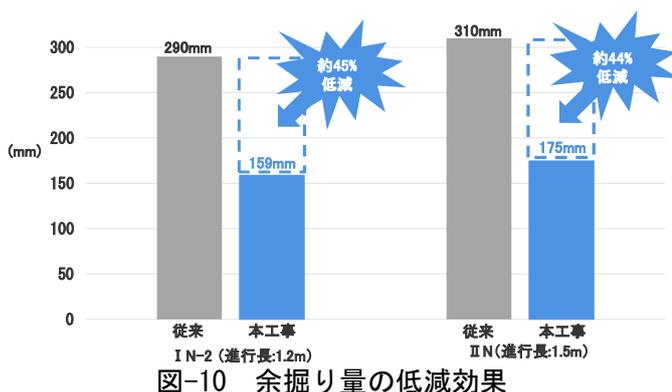


図-10 余掘り量の低減効果

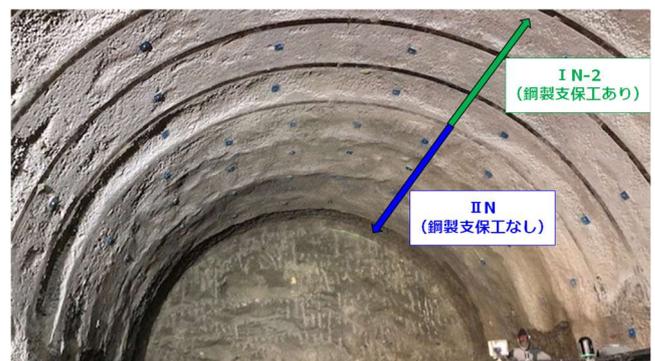


写真-3 掘削面の平滑な仕上がり

(2) 日々延伸型テールピース台車による生産性向上効果

a) 各部材の事前設置

本工事では、「日々延伸型テールピース台車」の吊りチェーン設置ステージおよび中間フレーム組立ステージを活用することにより、日々延伸の1回の移動距離である7.2m分の中間フレームや吊チェーンなどの部材をトンネル掘削作業の合間に設置できることを確認した。

b) ベルトコンベヤーの延伸における作業時間の短縮

本工事では、約25mのベルトコンベヤーの延伸を技能者5人により、150分程度で行うことができおり、

ベルトコンベヤーの延伸における作業時間の短縮効果が確認できている。作業時間の短縮効果を表-2に示す。表-2に記載のない「クラッシャー移動」および「試運転調整」については、従来工法と同等の作業時間である。なお、「準備工」は、現場条件により異なるため、効果の比較は行わないものとした。

ベルトコンベヤーの延伸における作業時間の短縮効果が確認できている一方で、現状は、ベルトコンベヤー延伸作業のうち、半分以上の作業はトンネル掘削作業を中断して行っている。また、所要人数も5人である。延伸作業の省人化とベルトコンベヤーの日々延伸を実現するためには、さらなる機能改善が必要である。

表-2 日々延伸型テールピース台車の導入効果

作業内容	従来型テールピース台車		日々延伸型テールピース台車	短縮効果
	Aトンネル (1スパン長:3.0m)	Bトンネル (1スパン長:3.6m)	本工事 (1スパン長:3.6m)	
①アンカー設置	14.0min/スパン ⇒7.0min/箇所 ※1.5m毎にアンカーを設置	14.4min/スパン ⇒7.2min/箇所 ※1.8m毎にアンカーを設置	8.0min/スパン ⇒4.0min/箇所 ※1.8m毎にアンカーを設置	約40% 短縮
②中間フレーム組立	1スパン組立の場合			約10~40% 短縮
	15.0min/スパン 移動2.0min 組立13.0min	10.0min/スパン 移動2.0min 組立8.0min	10.0min/スパン 移動2.0min 組立8.0min	
	2スパン組立の場合			
	30.0min/2スパン 移動2.0min×2回=4.0min 組立13.0min×2回=26.0min	20.0min/2スパン 移動2.0min×2回=4.0min 組立8.0min×2回=16.0min	18.0min/2スパン 移動2.0min 組立8.0min×2回=16.0min	
③電源台車移動	30~50mの移動:約10.0min ※移動中の電線養生と約10mの設備スペースが必要		0min ※テールピース台車が 電源台車を兼ねるため	100% 短縮
④ずり出し	1基あたりの進行長を2.0mとして算出			約20% 短縮
	ずり出し時間(平均):約90.0min/基 ※切羽とクラッシャーの離隔:40~90m (50mごとに延伸作業を実施するため)		ずり出し時間:約72.0min/基 ※切羽とクラッシャーの離隔:約40m	

9. おわりに

本工事では、「切羽出来形取得システム」、「発破パターン作成プログラム」などの発破の高度化技術や連続ベルトコンベヤー方式におけるずり運搬作業の効率化を目的とした「日々延伸型テールピース台車」の活用により、生産性向上効果が確認できている。その結果、改正労働基準法により、労働時間の縮小される傾向にある中、本工事のトンネル掘削における1ヶ月あたりの進捗は、改正労働基準法が適用される前と比べて、遜色のない実績となっている。

一方で、まだまだ理想とする姿と現実にギャップがあるのが実情である。新技術を完成させるためには、現場でのトライアンドエラーが必要不可欠であり、今後も現場での長期的な運用を通して、技術改善に努め、将来的な山岳トンネルの無人化施工を目指して技術開発を推進していく。

参考文献

- 1) 天童涼太, 谷口翔, 池村幹生, 森田亨: 穿孔作業の集中管理による山岳トンネルの発破の高度化, トンネル工学報告集, 第30巻, I-11, 2020
- 2) 原和利, 及川修二, 北川隆: 日本初の全自動コンピュータジャンボによる施工, トンネルと地下, Vol.35, No.1, pp.15-20, 2004
- 3) 赤石広秋, 手塚康成, 川野広道, 栗山和之: 4ブームフルオートコンピュータジャンボによるICT施工例-国道106号宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事-, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-717, pp.1,433-1,434, 2017
- 4) 人見直輝: 後志トンネル(天神)他工事における日々延伸型テールピース台車の適用, 日本建設業連合会土木工事技術委員会「新技術・新工法に関する講習会」, 2022