

発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボ の連携による生産性向上の取組み

天童 涼太¹・日向 哲朗²・横内 静二³・小柳 武徳⁴
・太田 学⁵・中島 健太⁶・斉藤 将平⁷・人見 直輝⁸

¹正会員 安藤ハザマ 建設本部 土木技術統括部 技術第三部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)
E-mail:tendo.ryota@ad-hzm.co.jp

²正会員 安藤ハザマ 建設本部 土木技術統括部 技術第三部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)
E-mail:hyuga.tetsuro@ad-hzm.co.jp

³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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:yokouchi.seiji@ad-hzm.co.jp

⁴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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:koyanagi@itogumi.co.jp

⁵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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:manabu.ota@ad-hzm.co.jp

⁶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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:nakajima.kenta@ad-hzm.co.jp

⁷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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:s-saito@itogumi.co.jp

⁸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
(〒047-0011 北海道小樽市天神 2 丁目 5-1)
E-mail:hitomi.naoki@ad-hzm.co.jp

近年、山岳トンネルでは、自動施工技術の確立が強く望まれている。その一環として、発破作業の自動化を目的に全自動ドリルジャンボの導入が進められている。しかしながら、従来の全自動ドリルジャンボの運用においては、ドリルジャンボに位置情報を付与するための追加作業が必要であることや地山状況に応じて、速やかに発破パターンを修正することができないなどいくつかの課題があり、全自動ドリルジャンボ本来の機能を十分に発揮することができなかった。このような背景のもと、これまで開発した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、「穿孔作業の省人化」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に向けて取り組んだ。

Key Words: tunnel, blastig, blasting pattern, fully automatic drill junbo, automated construction

1. はじめに

山岳トンネルの施工は、いまだ多くの部分を熟練作業員の技能に依存している。また、近年は、少子高齢化に起因する熟練作業員の減少や新規入職者の不足といった問題も抱えており、山岳トンネルにおける自動施工技術

の確立が強く望まれている。

熟練作業員の技能に依存する代表的な作業として、発破作業が挙げられる。発破掘削は、中硬岩から硬岩地山を対象としており、地山の変化に対して、柔軟に対応できるため、効率と経済性の観点から、山岳トンネルでは一般的な掘削方式とされている。

筆者らは、ICTにより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、図-1に示す「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」など発破作業の高度化を目的とした技術を開発した¹⁾。

近年では、発破作業の自動化を目的として、全自動ドリルジャンボの導入が進められている。しかしながら、従来の全自動ドリルジャンボの運用においては、いくつかの課題があり、その機能を十分に発揮することができなかった。

このような背景のもと、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、これまでに開発した発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボを適用し、技術の連携を図ることで、「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に向けて取組んだ。

本稿では、発破の高度化技術により、発破を最適化するための手順や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の発破パターン作成手法について詳述する。さらに、現場での運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. 穿孔作業の自動化に向けた課題

(1) 従来の全自動ドリルジャンボの運用

我が国においては、2000年代初頭に全自動ドリルジャンボ

の導入が報告されている。当時は、ドリルジャンボの位置を自動で計測する手法が一般的ではなく、ドリルジャンボに位置座標を付与するため、レーザーターゲットの取付けなどの追加作業が必要であり、それらの作業に時間を要していた。また、自動で穿孔するための発破パターン作成に手間を要したことや地山状況に応じて、速やかに発破パターンを修正することができないといった運用面においてのいくつかの課題が報告されており²⁾、なかなか普及が進まなかった。さらに、当時は、3Dスキャナなど簡易に切羽出来形を取得する技術も一般的ではなく、発破の良否について、定量的に評価することが困難だった。その後、ドリルジャンボに搭載されるドリフトの高出力化や通信機器類の高性能化により、全自動ドリルジャンボ活用への期待がふくらみ、再び導入が進められるようになった。しかしながら、全自動ドリルジャンボの操作は、専任のオペレータが行っているとの報告もあり³⁾、従来のトンネル作業員1名での穿孔作業までには至っていないのが現状である。

(2) 自動穿孔を行うための情報

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には、装薬孔の配置に加えて、下記の情報について、事前に登録しておく必要がある。

- ・各ブームの穿孔範囲
- ・穿孔順序
- ・ガイドロータリ回転角度などの機械制御情報

熟練作業員がドリルジャンボに直接搭乗し、穿孔作業を行う場合、上記の情報については、熟練作業員の経験や勘を頼りに決定し、穿孔作業が行われている。



図-1 山岳トンネル統合型掘削管理システム（i-NATM®）

そのため、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には、これまで熟練作業員の経験や勘を頼りに決定されていた上記の情報について数値化し、装薬孔の配置と併せて全自動ドリルジャンボに登録する必要がある。

3. 発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボ

これまでに、筆者らが開発した発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボについて、以下に詳述する。

(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-2 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、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-3 に発破パターン作成プログラムを示す。

(3) 全自動ドリルジャンボ (J32RX-Hi)

今回、後志トンネル（天神）他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 人で行うことが可能となる。また、古河ロックドリル社製の J32RX-Hi は、岩盤の変化に対して、フィード・回転・打撃といった穿孔作業における重要な 3 要素をより効率的・高精度に自動制御する機能を有している。

写真-1、写真-2 に全自動ドリルジャンボを示す。

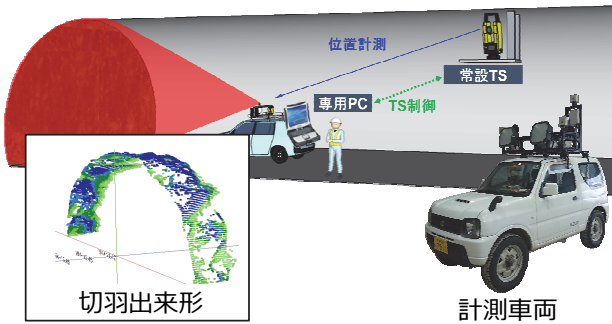


図-2 切羽出来形取得システム

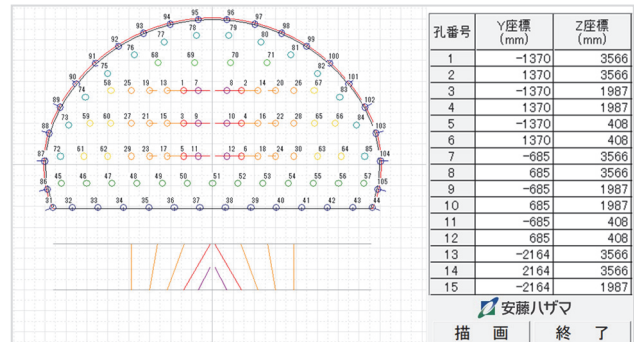


図-3 発破パターン作成プログラム



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)

4. 後志トンネル（天神）他工事への適用

(1) 後志トンネル（天神）他工事の概要

後志トンネル（天神）他工事は、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=17,990m）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）について、施工するものである。

後志トンネル（天神）他工事の概要を図-4、地質縦断面図を図-5以下に示す。



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4 後志トンネル（天神）他工事の概要

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載っている。これらの地層は、いずれも安山岩の活動による堆積岩～溶岩であり、岩相も安山岩と同質の凝灰岩類である。上記の地質状況をふまえ、後志トンネル（天神工区）の設計においては、トンネル延長の約94%が鋼製支保工を設置しない支保パターンが占めている。後志トンネル（天神）他工事における支保パターン図を図-6に支保パターンの内訳を表-1に示す。

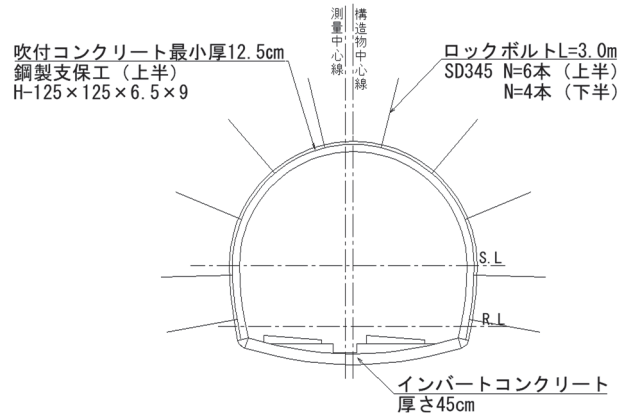


図6 支保パターン図 (I_N-2)

表-1 支保パターンの内訳

| 支保パターン | 延長 (m) | 比率 (%) | 備考 |
|-------------------|--------|--------|---------|
| 特L | 25 | 0.6 | 鋼製支保工あり |
| I _N -2 | 245 | 5.5 | 鋼製支保工あり |
| Ⅲ _N | 2,910 | 65.2 | 鋼製支保工なし |
| Ⅳ _N | 1,280 | 28.7 | 鋼製支保工なし |
| 合計 | 4,460 | 100.0 | |

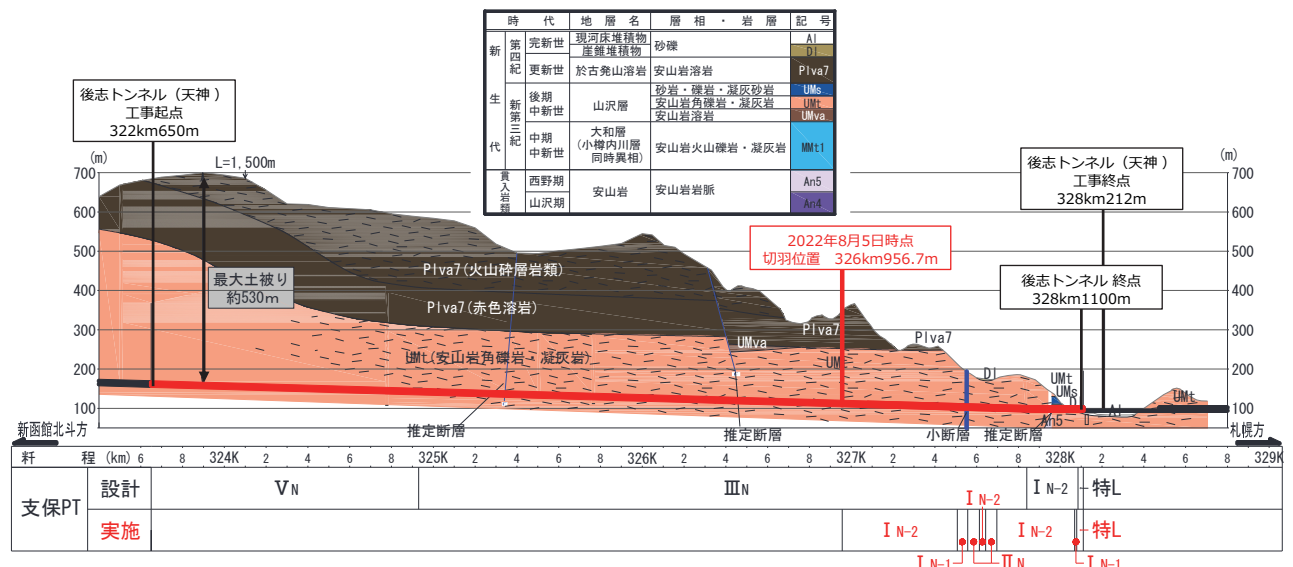


図5 地質縦断面図

一般的に、鋼製支保工を設置しない支保パターンにおいては、内空断面の仕上がりの目安となる部材がないため、余掘り量が大きくなる。また、1発破あたりの進行長（1.5m～2.5m程度）も長くなるため、発破の精度が掘削サイクルに大きく影響する。

そのため、後志トンネル（天神）他工事においては、発破作業の最適化による生産性向上が強く望まれている。

(2) 地山の硬軟に応じた発破パターンの修正

後志トンネル（天神）他工事では、「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）他工事における発破パターンの修正例を図-7に示す。

(3) 自動穿孔のための発破パターン作成

後志トンネル（天神）他工事では、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、これまで熟練作業員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、極力、ブームの待機時間を減らすことが穿孔作業を最適化するうえで重要となる。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、図-8に示すように設定した。

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する必要がある。

今回の運用で設定した穿孔順序の一例を図-9に示す。

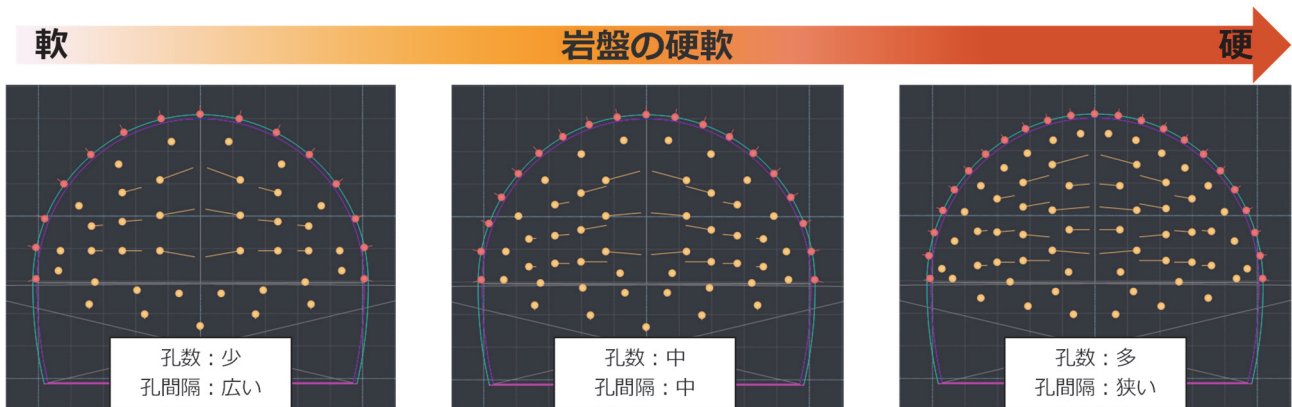


図-7 後志トンネル（天神）他工事における発破パターンの修正例 (I_N2)

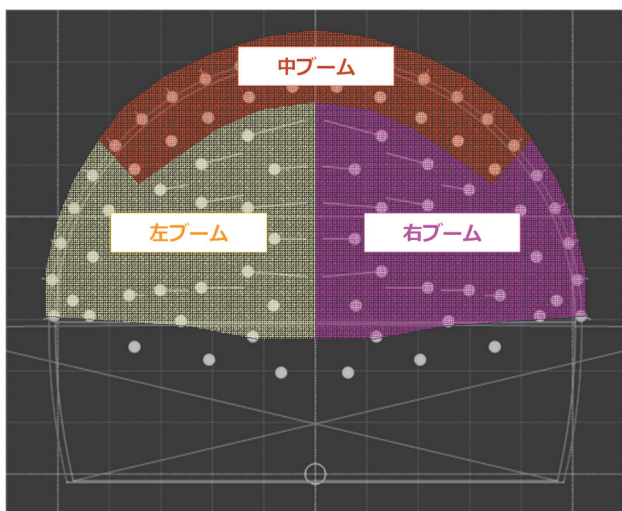


図-8 各ブームの穿孔範囲

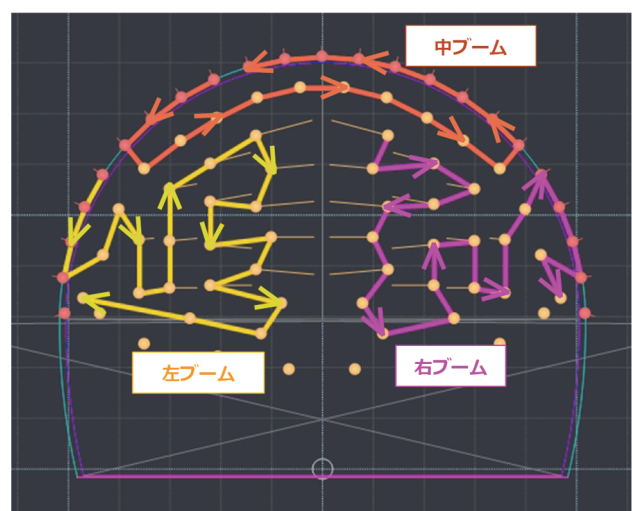


図-9 穿孔順序の一例 (I_N2)

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については、**図-10** 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、ロスの少なく、連続性のあるスムーズなものとする必要がある。

今回の運用で設定したガイドロータリの回転角度の一例を**図-11** に示す。

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、熟練作業員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-12** 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。

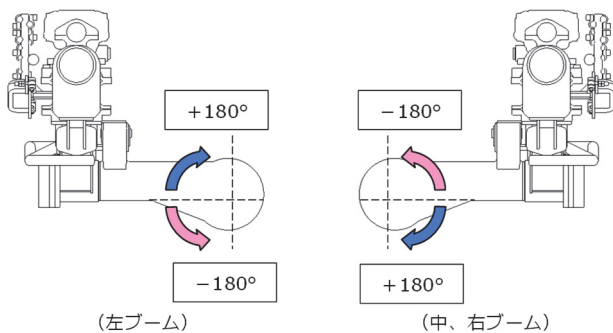


図-10 ガイドロータリの回転角度の定義

(4) 発破の最適化サイクルの実践

後志トンネル（天神）他工事では、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-13** 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。

5. 得られた生産性向上効果

(1) 穿孔作業の自動化による省人化

後志トンネル（天神）他工事では、「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を連携することにより、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。

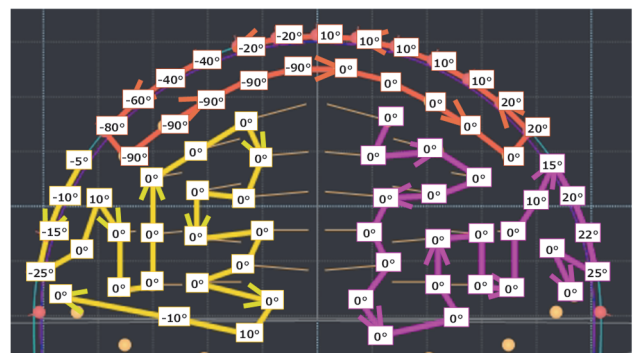


図-11 ガイドロータリの回転角度の一例 (I_N2)

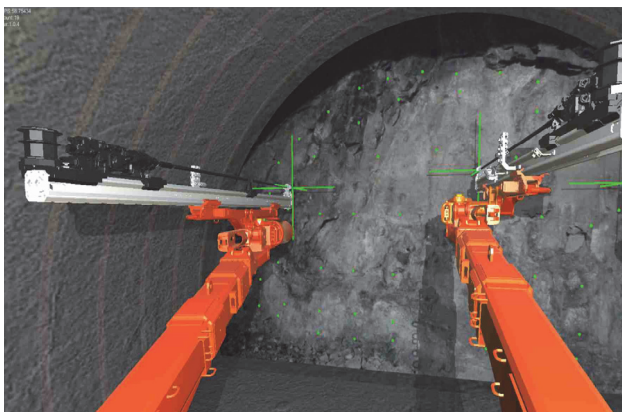


図-12 全自動ドリルジャンボ専用のシミュレータの画面

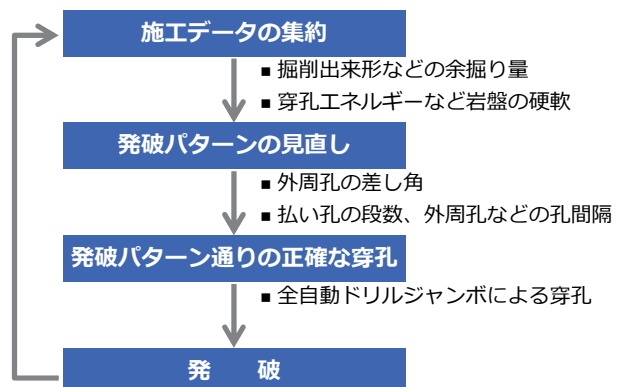


図-13 発破の最適化サイクル

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、通常のトンネル作業員1名で穿孔作業を行うことができる。

後志トンネル（天神）他工事では、写真-3 に示すように1名で穿孔作業を行っており、省人化による生産性向上効果が得られている。

(2) 発破の最適化による余掘り量低減

後志トンネル（天神）他工事では、 I_N2 パターンにおいて、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、約40%の余掘り量低減効果が確認できている。

また、後志トンネル（天神）他工事では、鋼製支保工を設置しない II_N パターンの施工も行っている。鋼製支保工を設置しない支保パターンにおいては、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-4 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。



写真-3 穿孔作業の省人化

6. おわりに

後志トンネル（天神）他工事では、発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携により、「穿孔作業の省人化」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確認できている。

今後、後志トンネル（天神）他工事では、鋼製支保工を設置しない支保パターンの施工が主体となっていくことが想定されている。引き続き、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、工事の生産性向上を目指していく。

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

(2022. 8. 26 受付)

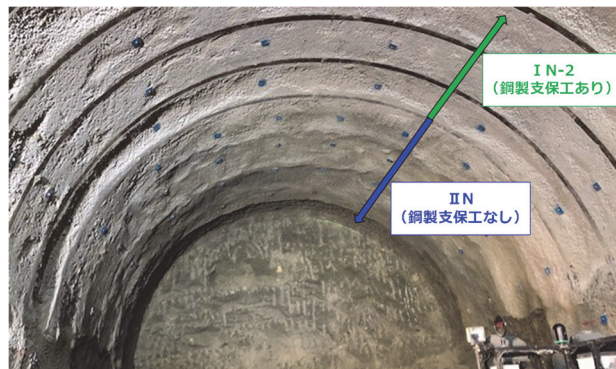


写真-4 掘削面の平滑な仕上がり (II_N)

EFFORTS TO IMPROVE PRODUCTIVITY BY LINKING ADVANCED BLASTING TECHNOLOGY AND FULLY AUTOMATIC DRILL JUMBO

Ryota TENDO, Tetsuro HYUGA, Seiji YOKOUCHI, Takenori KOYANAGI,
Manabu OTA, Kenta NAKAJIMA, Shohei SAITO and Naoki HITOMI

In recent years, the establishment of automatic construction technology has been strongly desired for mountain tunnels. As part of this, the introduction of fully automatic drill jumbo is being promoted for the purpose of automating rupture work. However, in the operation of the conventional fully automatic drill jumbo, there are many additional procedures for adding position information to the drill jumbo, and it is not possible to quickly correct the rupture pattern depending on the ground conditions. Due to the above problems, the original function of the fully automatic drill jumbo could not be fully exhibited. Against this background, by linking the advanced rupture technology developed so far with the fully automatic drill jumbo, "labor saving in drilling work" and "reduction of excess digging amount by optimizing rupture" We worked to improve productivity.