

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

谷口 翔・天童 涼太・池村 幹生

山岳トンネルの施工は、いまだに多くの部分を熟練作業員の技能に頼っている現状があり、近年は、熟練作業員の減少や新規入職者の不足への対応が喫緊の課題となっている。このような背景のもと、当社は、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、「山岳トンネル統合型掘削管理システム」の開発を推進している。その一環として、トンネル坑内に設置した中央制御室に施工データを集約して穿孔作業を集中管理するシステムを構築し、国土交通省中国地方整備局発注の玉島笠岡道路六条院トンネル工事に適用した。本稿では、その技術概要および現場適用の状況について報告する。

キーワード：山岳トンネル、発破作業、遠隔化、マシンガイダンス、集中管理

1. はじめに

1980年代以前の山岳トンネルでは、鋼製支保工と矢板を主な支保部材とする矢板工法が一般的であったが、その後、吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保部材とするNATMが導入され、トンネル工事の生産性は大きく向上した。一方で、いまだに施工の多くの部分を熟練作業員の技能に頼っている現状があり、近年は、熟練作業員の減少や新規入職者の不足への対応が喫緊の課題となっている。

熟練作業員の技能に大きく依存する作業の代表的な例として、切羽掘削における発破作業が挙げられる。発破掘削は硬岩から中硬岩地山を対象としており、地山の変化に対しても比較的容易に対応できるため、効率と経済性の面から山岳トンネルでは一般的な掘削方式である。発破作業はトンネル切羽における施工サイクルの約3割を占めており、その効率が山岳トンネル工事の生産性に大きく影響する。

このような背景のもと、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「山岳トンネル統合型掘削管理システム」の開発を推進している。その一環として、トンネル坑内に設置した中央制御室に装薬孔の位置データや掘削出来形データなどの施工データを集約し、穿孔作業を集中管理するシステムを構築し、国土交通省中国地方整備局発注の玉島笠岡道路六条院トンネル工事に適用した。

2. 発破作業の現状

(1) 従来の発破作業

山岳トンネルの発破作業では、事前に発破パターン（装薬孔の位置や角度）を設定し、発破パターンをもとに穿孔作業を行う（図-1）。効率的な発破を行うためには、以下の2つの技術が重要となる。

- ① 定量的根拠にもとづいた発破パターンを作成する技術
- ② 発破パターンどおりに正確に穿孔する技術

しかし、これまでは、切羽面に穿孔位置を素早く測量する技術がなく、作業員の感覚に頼って穿孔作業が行われてきた（写真-1）。

また、実際に穿孔した位置と掘削出来形の関係を定量的に評価する技術がなく、発破パターンの修正も作業員の経験や勘を頼りに行われてきた。

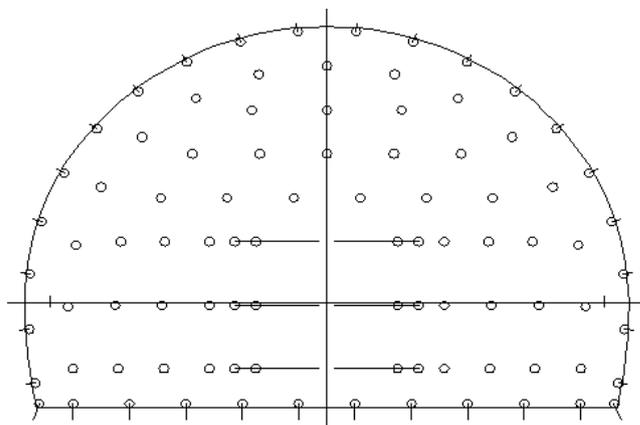


図-1 発破パターンの一例



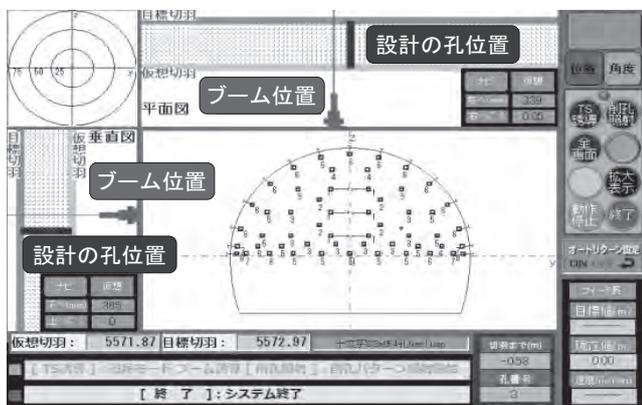
写真一 装薬孔の位置決め

(2) マシンガイダンス機の導入

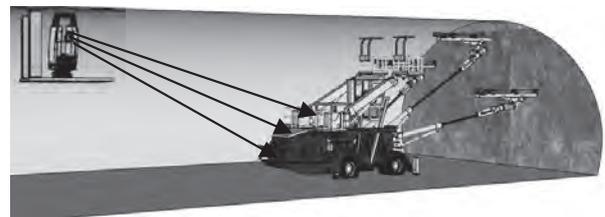
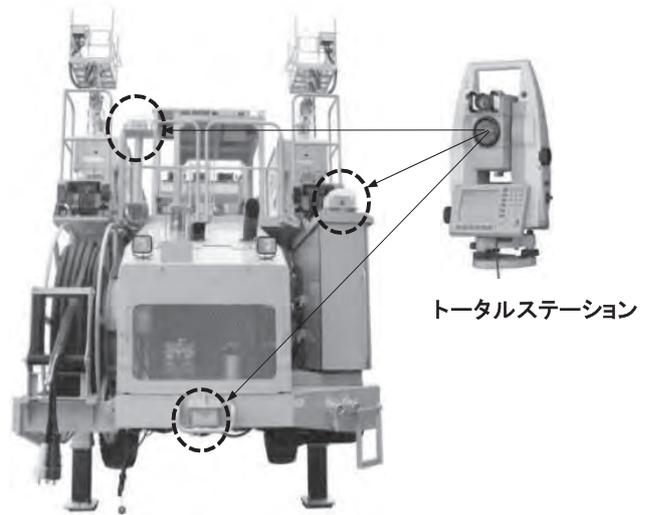
近年、効率的なトンネル発破の実現に向けて、マシンガイダンス機能を有するドリルジャンボ（以後 MG ジャンボ）の導入が進んでいる。

MG ジャンボの運転席には、ブームごとにマシンガイダンス画面が配置されている。マシンガイダンス画面には、あらかじめ登録しておいた発破パターン（穿孔位置、さし角、穿孔深さなど）が表示される（図一2）。オペレータは、マシンガイダンスモニタに表示される発破パターンに、穿孔位置、さし角、穿孔深さが一致するように実際のブーム、ガイドセル操作を行う。この際、マシンガイダンス画面に表示されるブームの位置は、トータルステーションによる MG ジャンボの位置測量と、MG ジャンボのブームに内蔵されているセンサーにより特定している（図一3）。

MG ジャンボではブーム、ガイドセルを正確に誘導することで、設定した発破パターン通りの穿孔を行うことができる。また、MG ジャンボは、実際に穿孔した装薬孔の位置データを記録する機能も有している。



図一2 マシンガイダンス画面



図一3 MG ジャンボの位置計測

3. 穿孔作業の集中管理

(1) 集中管理システムの概要

本システムは、MG ジャンボで取得した施工データを分析し発破の改善サイクルを実践することで、発破作業を効率化し、トンネル工事の生産性向上を図ることを目的とする。発破の改善サイクルの実践にあたっては、トンネル坑内に中央制御室を設置し、中央制御室内に装薬孔の位置データや掘削出来形データ、地質情報などの施工データを集約し、発破パターンの見直しを行う（図一4）。MG ジャンボを中央制御室から遠隔で操作し、修正した発破パターン通りに正確に穿孔を行うことで、施工データを確実にフィードバックする（図一5）。

(2) 中央制御室の設置

中央制御室は、トンネル内でクリーンな作業環境を得るために防じん仕様とした。加圧補強改造ユニットハウス、コンプレッサ、エアシャワールーム、ハウス内パージ用集塵機などを一体で架台に架装し、台車に搭載する。写真一2に中央制御室の外観を示す。中央制御室では粉じん作業下で常時着用していた保護マスクから解放され、エアコンのある快適な環境下で穿孔作業を行うことが可能となる。

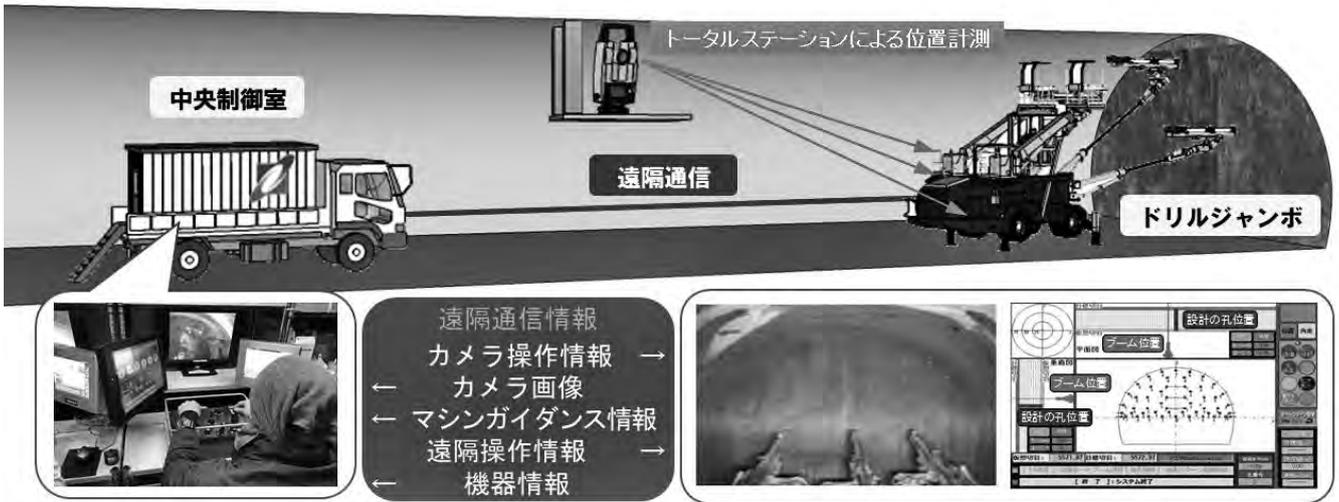


図-4 穿孔作業の集中管理システム

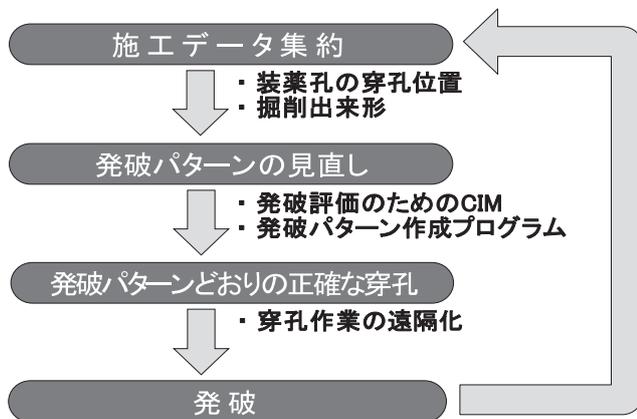


図-5 発破の改善サイクル

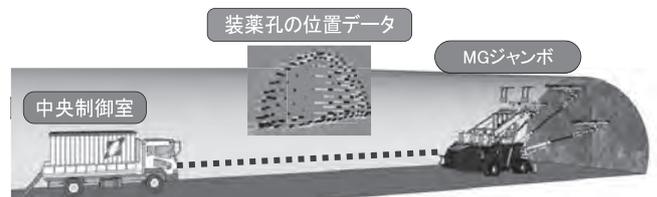


図-6 装薬孔の位置データの取得



図-7 掘削出来形・地質データの取得



写真-2 中央制御室

(3) 施工データの集約

(a) 装薬孔の位置データ

実際に穿孔した装薬孔の位置データは、MGジャンボで取得、記録され、坑内のネットワークを通じて、中央制御室内のPCに転送される。図-6に装薬孔の位置データの取得概要図を示す。

(b) 掘削出来形、地質データ

発破後の切羽の掘削出来形データと地質情報を専用の「切羽情報取得システム」により取得する(図-7)。本システムは、切羽出来形計測用の3Dレーザースキャナと評定点、地質情報取得用のマルチスペクトルカメラとステレオカメラ、ハロゲン照明などを1台の計測車両に搭載し、掘削直後の切羽に計測車両を進入させて計測を行う。計測に使用する機器類は車載PCで制御し、切羽でのデータ取得を短時間かつ効率的に実施する。写真-3に切羽でのデータ取得状況を示す。

データ取得後、専用のシステムを用いて処理を行い、掘削出来形および地質情報を定量的に評価する。

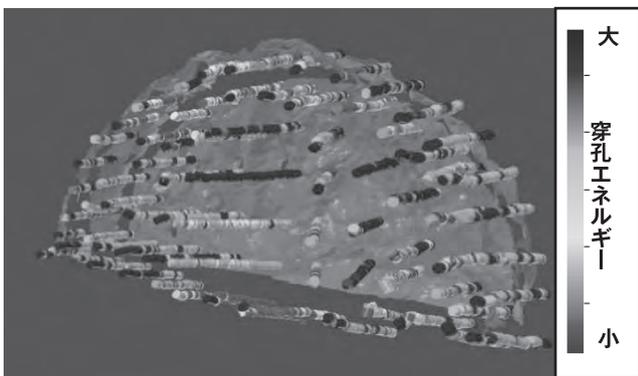
(4) 発破パターンの見直し

(a) 発破の評価

取得した装薬孔の穿孔位置データと3Dレーザースキャナで取得した切羽の掘削出来形データを、トンネル坑内に設置した中央制御室に集約し、両者の関係を



写真—3 掘削出来形・地質データの取得状況



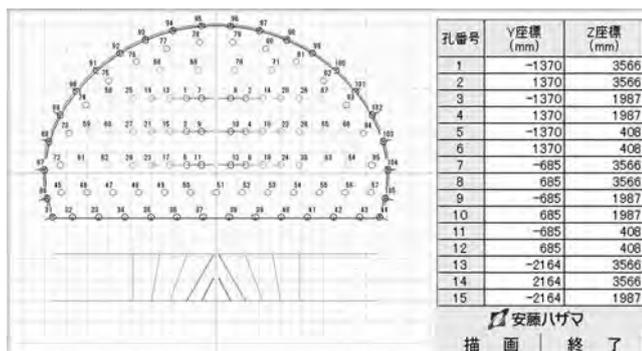
図—8 穿孔位置と掘削出来形の一元表示

評価する。取得データを CIM に一元的に表示することで、穿孔数や爆薬量の変更検討を行い、定量的な根拠にもとづいて装薬孔の間隔や穿孔角度を算出することができる (図—8)。

(b) 発破パターンの作成

当社開発の発破パターン作成プログラムに、算出した装薬孔の間隔や穿孔角度を入力することで、施工データを反映した修正発破パターンを自動で作成することができる (図—9)。修正した発破パターンは、ネットワークを通じて MG ジャンボに転送される。

従来の発破パターンの修正では、発破の評価をもと



図—9 発破パターン作成プログラム

にトンネルの断面にあわせて三次元座標を付与する作業を手作業で行う必要があり、1日単位で時間を要していた。発破パターン作成プログラムを用いることで、発破パターンを数分で修正でき、発破の評価を即座にフィードバックすることが可能である。

(5) 発破パターンどおりの正確な穿孔

MG ジャンボを改造し、中央制御室から MG ジャンボを遠隔で操作する仕組みを構築した。中央制御室と MG ジャンボを通信ケーブルで接続し、遠隔操作に必要な情報の通信を行う。オペレータは、中央制御室から、MG ジャンボに搭載したカメラの画像とマシンガイダンス情報をもとに遠隔でドリルジャンボを操作し、正確な穿孔作業を行う。

(a) ドリルジャンボの遠隔化

ドリルジャンボを遠隔で操作するにあたって、古河ロックドリル社製の MG ジャンボをベースマシンとして改造を行った (写真—4)。

ベースマシンの MG ジャンボは、レバー操作の入力に対して油圧バルブを作動させることでブームなど各種装置の動作を行う。この油圧回路に電磁バルブを追加し、遠隔からの電気信号の入力により操作できるようにした (写真—5)。遠隔からの各操作信号は



写真—4 遠隔改造した MG ジャンボ



写真—5 電磁バルブ化した運転席

PLC (Programable Logic Controller) によって制御され、ドリルジャンボの対応するリレーへと信号が送られる。この信号を受けることによって、ドリルジャンボは直接操作する場合と同じように作動する。

遠隔操作と直接操作の切替えは、中央制御室に設置した操作盤と、ドリルジャンボ本体後方に追加した切替えスイッチの両方を操作して行う。

(b) 映像取得

遠隔操作で穿孔作業を行うため、MG ジャンボにカメラを新たに設置した。

MG ジャンボの3本のブームをそれぞれ確認するためのカメラを運転席のヘッドガード上に搭載し、さらにその上部に、切羽全体を俯瞰するカメラを搭載した。また、切羽の下半および大背部を確認するためのカメラをドリルジャンボ本体下部に搭載した(写真-6)。カメラは防水・防じんケースに収納され、免震装置をあわせて取り付けられている。



写真-6 ジャンボに搭載したカメラ

取得したカメラ画像は、中央制御室に設置されたモニタに表示され、オペレータは、このモニタを見ながら穿孔作業を行う。中央制御室からの操作で、カメラ視点の移動や拡大・縮小が可能である。

(c) マシンガイダンス機能の活用

中央制御室のモニタ画像は200ms程度の遅延が生じる。また、二次元画像であることから、直接目視する場合に比べて奥行情報が欠如し、ブームの位置を正確に把握することが難しい。そこで、MG ジャンボのマシンガイダンス機能と連携して操作を行う。中央制御室の操作席には、MG ジャンボ本体側と同様に、マシンガイダンス画面やドリフタの油圧情報などの表示画面が設置されている。オペレータは、ブームとトンネル壁面ならびにブーム同士の離隔をカメラ画像で確認しながら、マシンガイダンス情報に従って細かいブームの位置合わせを行う。

4. 六条院トンネルへの適用

本システムを、国土交通省中国地方整備局発注の玉島笠岡道路六条院トンネル工事に適用し、その運用効果の検証を行った。写真-7に遠隔で操作されるMGジャンボを示す。



写真-7 遠隔で操作されるMGジャンボ

六条院トンネルは、施工延長L=1,088mの2車線道路トンネルである。本トンネルの対象地山は中生代白亜紀～古第三紀の中粒花崗岩および粗粒花崗岩で、トンネルのほぼ全線で硬質な岩盤の出現が想定されていた。このため、本トンネルでは、生産性を向上させるために発破の改善サイクルを効果的に運用することが求められた。

(1) 発破の改善サイクルの運用例

本システムの適用開始後、六条院トンネルでは岩盤性状がたびたび変化したため、取得した施工データを用いた発破パターンの修正を繰り返し行った。六条院トンネルでの発破の改善サイクルの運用例を示す。

(a) 孔間隔の調整

図-10に示すように、全面に硬質な岩盤が出現する切羽で、払い部分に岩盤の破碎が不十分な箇所が生じ、所定の進行長が確保できない事態があった。この

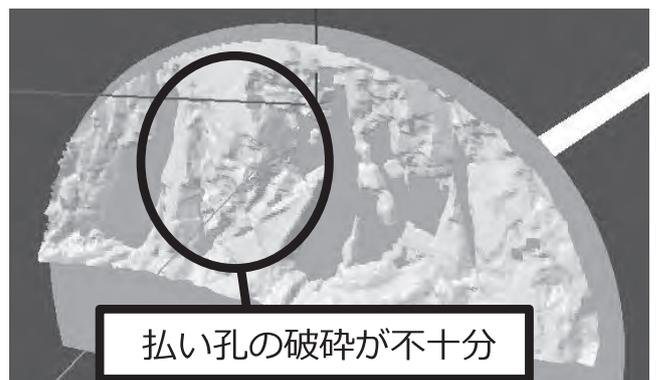
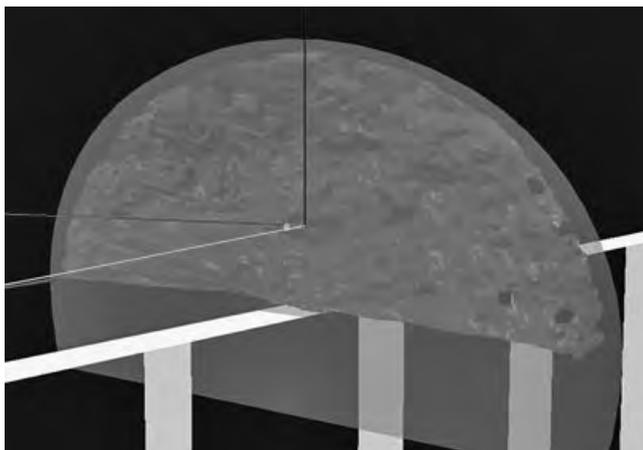


図-10 払い孔の破碎が不十分な箇所



図—11 発破パターン修正後の掘削出来形

とき、払い孔の抵抗線長が短くなるよう孔間隔を調整し、発破パターンの修正を行った。修正後に掘削出来形を計測し、所定の進行長を確保できていることを確認した(図—11)。

発破の改善サイクルを実践することで、硬質な岩盤においても確実に岩盤を破碎する最適な発破パターンを簡単に作成することが可能である。

(b) 孔数の見直し

写真—8に示すように、側壁脚部で硬質な岩盤が出現し、局所的な掘削不足が生じた。このため、隅部の装薬孔を追加し、孔間隔を短くする発破パターンの修正を行った。発破パターン修正後、硬質な隅部の岩盤を十分に破碎し、所定の掘削断面を確保できていることを確認した。このような局所的な岩盤の変化に対しても、迅速で柔軟な発破パターンの修正が可能である。



写真—8 側壁脚部の硬質な岩盤

(c) 差し角の見直し

これまで、差し角の調整は、岩盤の硬さや割れ目の状態を考慮しながら、熟練作業員の経験にもとづいて行われてきた。六条院トンネルでは、本システムを適用することで、定量的な根拠にもとづいてサイクルごとに差し角を調整し、余掘り量の低減を図った。

六条院トンネルで本システムを運用して、施工データの集約から穿孔作業までの全ての作業を中央制御室内で集中管理し、発破の改善サイクルを繰り返していくことで、効率的に発破作業を行えることを確認した。

5. おわりに

これまででは発破パターンの修正には多くの労力と時間が必要だったが、本システムにより、取得した施工データにもとづいて迅速にパターンの修正を行うことができ、次発破への柔軟な対応が可能であることを確認した。

現在、本トンネルの運用実績を分析し、発破作業のさらなる高度化に向けた検討を行っている。また、MGジャンボの遠隔化に続いて、他作業の遠隔化・自動化にも取り組んでおり、ICTを活用し、中央制御室からトンネル施工を一元管理することを目指して技術開発を推し進めていく。

JCMA

【筆者紹介】

谷口 翔 (たにぐち しょう)

安藤・間

建設本部 先端技術開発部 土木技術開発グループ
グループ長



天童 涼太 (てんどう りょうた)

安藤・間

建設本部 土木技術統括部 技術第三部
トンネルグループ



池村 幹生 (いけむら みきお)

安藤・間

建設本部 先端技術開発部 土木技術開発グループ

