

(ICTを駆使した山岳トンネルの発破技術) マシンガイダンス機能を有するドリルジャンボを用いた山岳トンネルにおける発破の高度化の取り組み

天童 涼太¹

¹安藤ハザマ 建設本部 先端技術開発部 土木技術開発グループ

山岳トンネルの施工は、1980年代のNATM普及により機械の高度化、大型化が進んだものの、いまだに機械化できていない部分も残っており、施工の多くの部分が熟練作業員の技能に頼ったものとなっている。近年は、これらの作業を行う熟練作業員の減少や若手入職者の不足への対応が喫緊の課題となっている。

筆者らは、このような課題に対して、ICTを活用して山岳トンネルの生産性を向上させる取り組みを行っている。本稿では、その中から、トンネル内に中央操作室を設置しトンネルの発破作業を効率化する取り組みについて紹介する。

キーワード：山岳トンネル，発破，自動化，マシンガイダンス

1. はじめに

山岳トンネルの生産性は、1980年代に施工方法が矢板工法から吹付けコンクリートやロックボルトを主要な支保部材とするNATMに替わった際に大きく向上した。大型重機の採用等により施工性が向上し、トンネル1mあたりの構築に要する作業員数が大幅に減少した。しかし、作業員数は減少したものの、現在でも山岳トンネルの切羽作業は重機と人力の共同作業で、熟練作業員の技能に頼った施工が行われている。写真-1~3に切羽での作業状況を示す。これら人力作業はいわゆる3K

(キツイ、危険、汚い)の代表的なものとなっている。このような背景のもと、近年、山岳トンネルでは、熟練作業員の減少や若手入職者の不足といった問題に直面しており、これらの問題の解決は喫緊の課題である。

筆者らは、これらの課題の解決に向けて、山岳トンネルの切羽作業の機械化を大幅に拡大し、熟練作業員の技能に過度に依存する作業の生産性を向上させる取り組みを行っている。

本稿では、これらの取り組みの中から、トンネルの発破作業を機械化し、発破作業の効率化を目指す取り組みについて報告する。



写真-1 爆薬の装填状況



写真-2 ロックボルトの挿入状況



写真-3 鋼製支保工の建込み

作業工程	削岩(穿孔/装薬・発破)	ずり出し(破碎した岩盤の搬出)	鋼製支保工建込み	コンクリート吹付け	ロックボルト
作業概要					

図-1 トンネルの掘削工程

2. 山岳トンネルの施工の現状

(1) 山岳トンネルの施工方法

山岳トンネルは、切羽での作業を繰り返しながら通常1.0～2.0 m程度ずつ掘り進められる。最初に、発破などで岩盤を破碎し、破碎した岩盤片（ずり）を坑外に搬出する。鋼製支保工建込み、コンクリート吹付け、ロックボルト打設といった支保部材の設置作業を行い、トンネルの安定を図る（図-1）。

(2) 人力依存した施工

前述のように、山岳トンネルの施工においては、人力に依存する作業が多く残っている。

重機の操作においても特殊で、一般に、穿孔作業や鋼製支保工の建込みなどは、立位でむき出しの運転席で重機を操作している。作業環境は劣悪で、粉じん作業下で常時保護マスクを着用し、非常に大きい騒音下で耳栓を着用した作業を行っている。夏場の坑内温度は非常に高く、熱中症のリスクもある。

(3) 発破の現状

発破作業は、作業員の経験と勘に頼って進められている部分が大きく、発破作業を機械化するためには、熟練作業員が有している知識を形式化することが必要である。

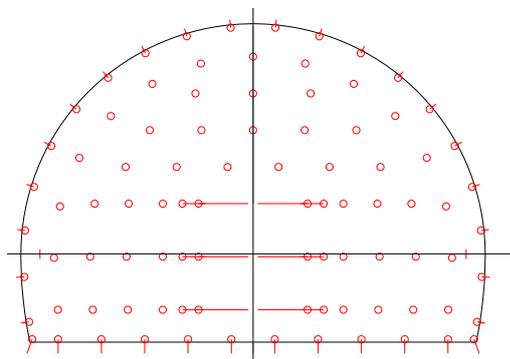


図-2 発破パターン例



写真-4 装薬孔の目安のマーキング

a) 従来の発破施工

発破作業では、事前に発破パターン（装薬孔の位置や角度；図-2）を設定し、発破パターンをもとに穿孔作業を行う。本来は、発破パターンに忠実に穿孔を行うべきもとの考えられるが、実際は、切羽面に発破パターンに基づいた穿孔位置を示す方法がなく、スプレーによるマーキング（写真-4）を目安に、作業員の感覚に頼って、穿孔位置が決められている。すなわち、発破パターン通りの穿孔を行うことができない。

また、実際の装薬孔を穿孔した位置の座標を簡易に取得する技術と発破による掘削出来形を簡易に取得する技術がなかったため、実際の発破パターンとそれによる掘削出来形の関係を詳細に検討することができなかった。

このようなことから、現場では、大きな余掘りが生じたり、所定の掘削断面が確保できないといった問題が発生しており、その対策として、作業員の経験や勘に基づいた修正を行うケースがほとんどであった。そのため、問題の真の原因に関する詳細な検証が行われてこなかった。

b) 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 ジャンボという）の導入が進んできている。

マシンガイダンス機能は、ドリルジャンボの運転席に配置したマシンガイダンスのモニター（写真-5）に、あらかじめ入力した設計の発破パターン（穿孔位置、さし角、穿孔深さ）を表示する（図-3）。オペレータは、設計の発破パターンに、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するブームの位置は、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 ジャンボのブーム内に設置したセンサーにより特定している（図-4、5）。

また、MG ジャンボは、穿孔位置情報を記録できることから、実際に穿孔した装薬孔の位置を確認することができるようになった。



写真-5 運転席に配置したマシンガイダンスモニター

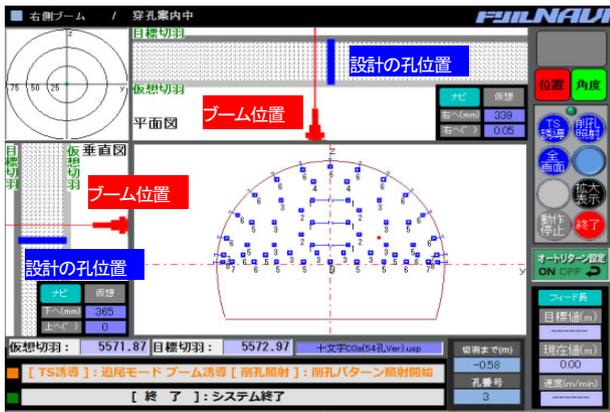


図-3 マシンガイダンス画面

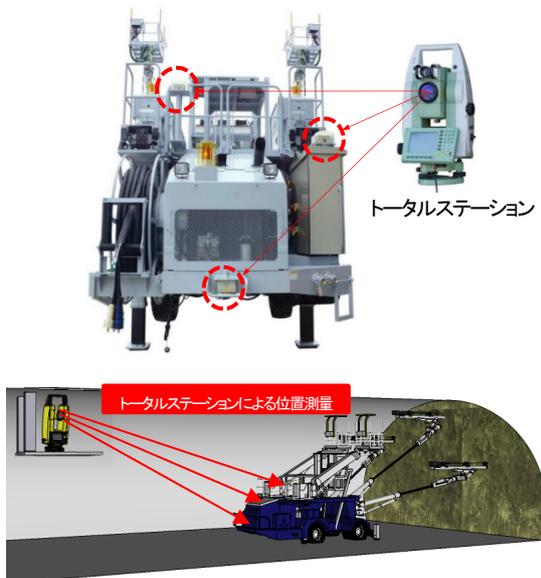


図-4 トータルステーションによる位置測量

3. 中央操作室による発破の高度化

(1) トンネル作業の中央操作化

トンネル発破作業の高度化、労働環境の向上を目的として、トンネル内に中央操作室を設置し、遠隔で切羽作業を行う。

発破作業のデータを中央操作室に集約し、集約したデータを活用して、MG ジャンボを遠隔操作し、トンネル発破の高度化を図る。

将来的には、すべての切羽作業の遠隔化、自動化を目指し、トンネル施工の生産性の飛躍的な向上を目指す。

(2) システム概要

MG ジャンボを遠隔化改造し、切羽後方 100 m ほどの地点に設置する中央操作室と MG ジャンボを通信ケーブルで接続し操作する。MG ジャンボの操作は、MG ジャンボに搭載したカメラ画像とマシンガイダンス情報に従って行う。

図-6 にシステム全体概要図を示す。

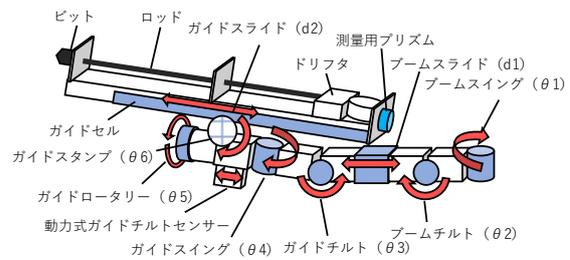


図-5 位置検知用センサー概要図

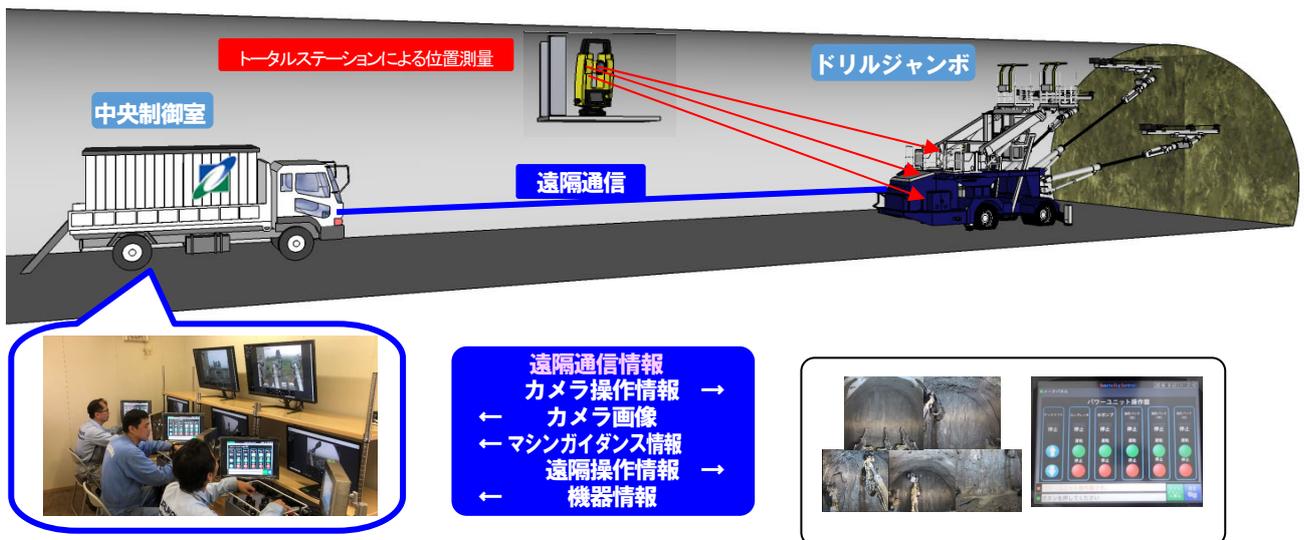


図-6 システム全体概要図

(3) 中央操作室の防じん化

中央操作室は、トンネル内で粉じんのないクリーンな作業環境を得るために防じんルームとする。防じんルームは、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で構成し、一体型で架台に架装し、運搬車両に搭載する。表-1に防じんルームの構成と設備の概要を示す。

これにより、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作業することが可能となる。

写真-7に防じんルームを示す。

(4) ドリルジャンボ遠隔化技術の概要

a) ドリルジャンボの遠隔化

ドリルジャンボは古河ロックドリル社の MG ジャンボをベースマシンとして改造を行った。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改造した。

遠隔からの各操作信号は PLC (Programmable 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。

表-1 防じんルームの構成設備と設備の概要

構成設備	設備の概要
ユニットハウス	加圧補強改造
コンプレッサ	ユニットハウス内を加圧 外部からの粉じんの侵入を防止
エアシャワールーム	人が入場する際に、体についた粉じんを除去
ハウス内パージ用集塵機	人の出入り等で進入する粉じんを除去



写真-7 防じんルーム

また、遠隔操作と直接操作の切り替えは中央制御室の機器とドリルジャンボ本体後方の切り替えスイッチで行うことができる。

写真-8に電磁バルブ化した運転席を示す。

b) 映像取得

MG ジャンボに搭載している3つのブームをそれぞれ確認できるようにブーム用に3台のカメラを運転席のヘッドガード上に搭載している。また、全体を俯瞰できるカメラをその上に設置し、ブームの下部を見ることができるよう本体の下部にもカメラを設置している(写真-9)。カメラはネットワークカメラを選定し、防水・防じんケースに収納して設置している。また、カメラのパン・チルトの操作は操作室側のPCから行う。

c) マシンガイダンス機能の活用

操作室側のモニタ画像は200 ms程度の遅延が発生する。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操作を行う。ブームと壁面との離隔やブーム同士の離隔などはカメラ画像で確認し、細かいブームの位置合わせはマシンガイダンス情報に従って行う。

d) データ通信

データ通信は、ジャンボ操作情報、カメラ画像情報、マシンガイダンス情報、機器情報などを通信ケーブルに載せて行う。



写真-8 電磁バルブ化した搭乗用の運転席

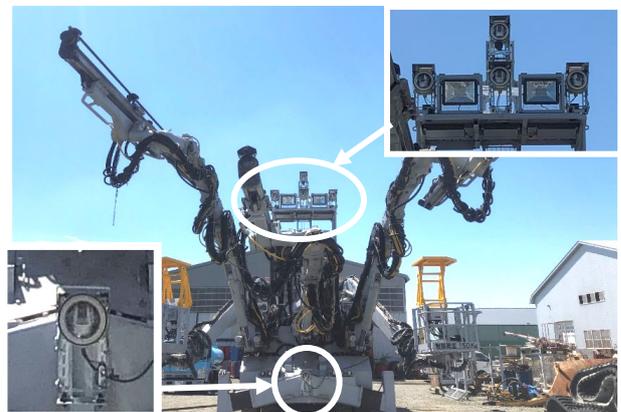


写真-9 カメラ搭載状況

4. 六条院トンネルでの活用

(1) 概要

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、本システムを適用し、今後、本格的に運用していく。

六条院トンネルは、延長 1,088m の 2 車線道路トンネルである。トンネルのほぼ全線で硬質な花崗岩の出現が想定されており、発破の効率がトンネルの生産性に直結する。

六条院トンネルでは、中央操作室に施工情報を一元化して集約し、データ取得から発破の一連の改善サイクルを繰り返すことで、より最適な発破パターンを作成し、発破の効率を最大化する。

六条院トンネルに導入した遠隔改造 MG ジャンボを写真-10 に示す。



写真-10 遠隔改造 MG ジャンボ

(2) 施工データの取得

装薬孔の穿孔位置データ、発破による掘削出来形データおよび地質情報を取得し中央操作室にデータを集約する。

a)穿孔データの取得

穿孔データは、MGジャンボにて取得し、中央制御室内のPCにWi-Fiで転送する。図-7に装薬孔の穿孔データの取得概要図を示す。

b)掘削出来形データ・地質データの取得

発破による掘削出来形と地質情報は専用の切羽情報取得システムにより取得する。図-8 に取得概要図を示す。

本システムは、計測車両に切羽出来形計測用のスキャナー、ターゲット、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搭載し(写真-11)、切羽でのデータ取得を短時間かつ効率的に実施する。計測機器は車載のPCで制御し、車載PCはタブレット端末と無線で通信する。

写真-12に切羽でデータを取得する状況を示す。

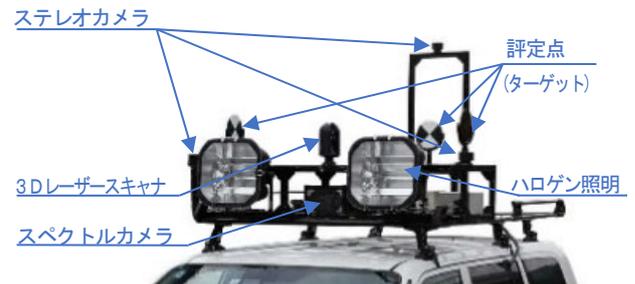


写真-11 計測車両への架装



写真-12 計測車両を用いたデータ取得状況

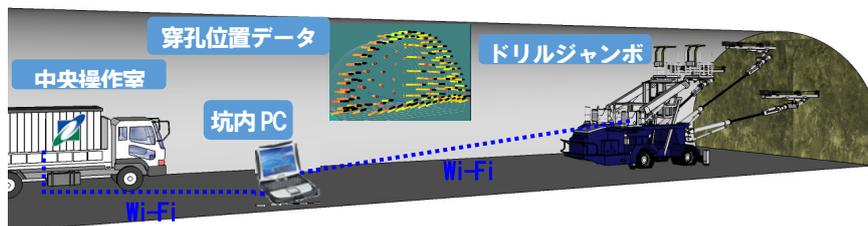


図-7 装薬孔の穿孔データの取得概要図

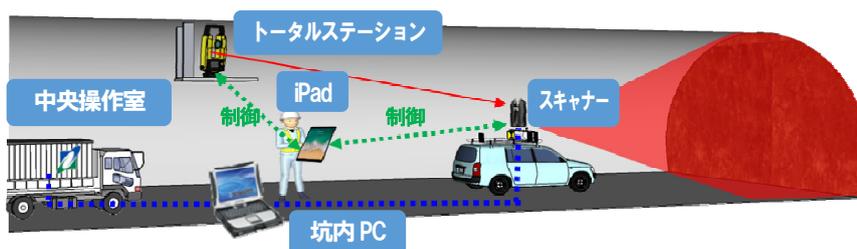


図-8 掘削出来形データ・地質データの取得概念図

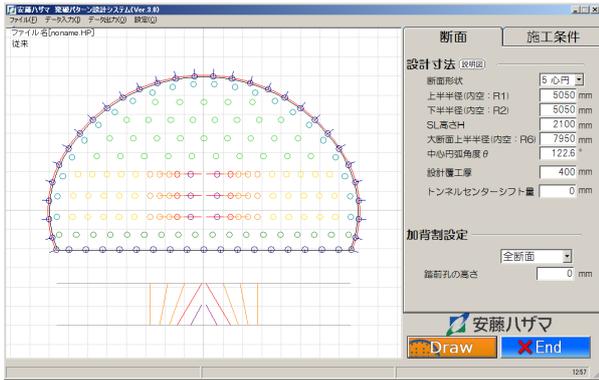


図-9 発破プログラム画面

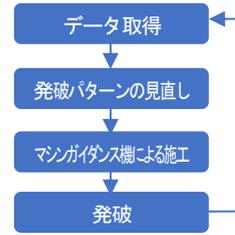


図-11 発破の改善サイクル

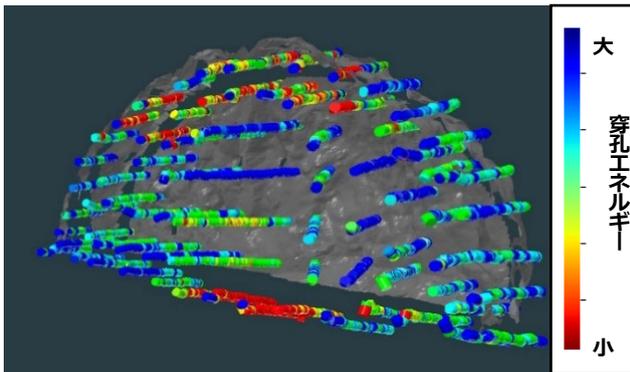


図-10 穿孔データと掘削出来形の統合表示

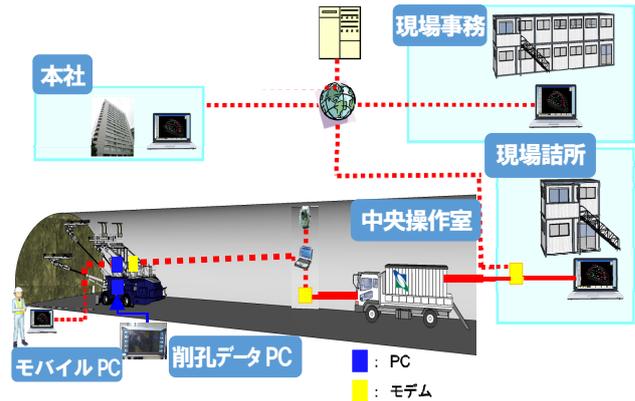


図-12 データの共有

(3) データ活用

a) 最適発破パターンの作成

発破理論をベースに、トンネルの断面に併せて三次元の座標を持たせて発破パターン図を作成するには、1日単位で時間を要しており、発破の良否をフィードバックして次の発破に生かすためのネックとなっていた。そこで、筆者らは、これまでに発破パターンを素早く作図するプログラムを作成した(図-9)。本プログラムを用いることにより、数分で発破パターンを作成でき、発破の良否をフィードバックできるようになった。

発破の良否をフィードバックすることにより、岩盤状況に応じて、穿孔数や爆薬量をより減らす取り組みを行っている。

地質情報や掘削出来形を専用の CIM ソフトに一元的に表示し(図-10)、穿孔数や爆薬量の変更検討を行う。変更検討により、装薬孔のピッチや角度などの基本条数の修正を行い、発破パターン作成プログラムを用いて、装薬孔の位置を三次元の座標データ化した発破パターンを作成する。

作成した発破パターンのデータは、ネットワークを通じて MG ジャンボにインストールする。

b) 中央制御室での穿孔作業

中央制御室から、マシンガイダンス機能を用いて、ジャンボを遠隔操作することで、作成した発破パターン通りの正確な穿孔作業を行う。

c) データのフィードバック

データ取得から発破の一連の改善サイクル(図-11)を繰り返すことで、より最適な発破パターンを作成し、発破の効率を最大化する。

また、取得したデータは、中央制御室と現場詰所・現場事務所・本社とネットワークでつなぎ(図-12)、岩盤状況や他のトンネルデータと併せてリアルタイムで共有し、地質状況に応じた発破のデータベースを整理する。

5. おわりに

将来的には、複数現場でデータの収集・分析を行い、トンネル断面や岩盤状況に応じて最適発破パターンを自動作成する手法を確立する。また、筆者らは、遠隔ドリルジャンボに続き、他作業の遠隔化にも取り組んでおり、ICT を活用し、中央制御室での施工を高度化して行きたいと考えている。