

# 切羽作業の自動化に向けた取り組み

(株) 熊谷組 土木事業本部 土木技術統括部 トンネル技術部 正会員 ○青木 宏一  
同 上 正会員 杉本 憲一  
同 上 正会員 尾畑 洋

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では、機械化による作業の省力化と安全性が図られているものの、依然として切羽付近における事故の発生の可能性は高く、重大災害に繋がることが多い。

熊谷組では 2015 年より山岳トンネルの切羽作業に関して、効率化・安全性の向上を目的とし、施工サイクル連の遠隔化・自動化を目指して技術開発に取り組んでいる。これまでに長崎県雲仙普賢岳や阿蘇斜面の災害復旧工事で当社が培ってきた「無人化施工技術」を取り入れ、既往の技術の改良を行いながら開発を行っている。

本稿では、このうち、爆薬の遠隔装填システム、遠隔吹付け技術、ロックボルトの機械打設の開発について報告する。

## 2. 爆薬の遠隔装填システムの改良

爆薬の遠隔装填システムは、2001 年に切羽での安全性向上のために 1 号機を開発導入した。すでに約 23 年が経過しているが、改良を繰り返し、現在では 1 台のユニット台車に 4 本の装填ホースとそれぞれに対する 4 台のリモコンを有し、発破孔全てに対して切羽から 1~2m 離れて爆薬の遠隔装填作業を効率的に行えるようになっている(写真-1、写真-2)。爆薬・込め物の詰まりの原因を追究し、装填機内部やホース接続部、ホースの改良を続けており、格段に詰まりがなくなっている。



写真-1 爆薬の遠隔装填システム

### (1) システム構成

爆薬の遠隔装填システムは、台車に搭載した遠隔装填装置および装填ホース・装填パイプ・手元リモコンスイッチからなっている。また、爆薬の遠隔装填装置は爆薬供給・込め物供給・装填機の各装置とこれらを制御するコンピュータで構成されている。

### (2) 装薬手順

装薬手順は、親ダイ(雷管をつけた爆薬)を装填パイプ先端にセットし、孔内に挿入後は手元のボタン操作のみで、増ダイ(親ダイと同一孔に装薬する爆薬)・込め物が後方の遠隔装填装置よりホースを経由して全自動で圧送・装填される。なお、装薬作業途中で装填パイプに増ダイや込め物を逐次挿入し装填する必要はない。



写真-2 装填機 4 本による装薬状況

### (3) 装薬作業の効率化

機械装填と人力装填の装薬作業時間の比較を図-1 に示す。1 孔当りの平均装薬時間は、機械装填では 1 孔当りの平均薬量が多いにもかかわらず、人力装填 27 秒/孔に対し機械装填 15 秒/孔と 12 秒ほど早く、約 45% の装薬時間の短縮となり、作業の効率化が図れることを確認した。

キーワード 山岳トンネル、切羽作業、遠隔化、自動化、鋼管膨張型ロックボルト

連絡先 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1 株式会社熊谷組 土木事業本部 土木技術統括部 トンネル技術部

以上より、爆薬の遠隔装填システムの導入は、従来の人力作業に比べ、装薬作業時の作業員の安全性が向上し、苦渋作業が軽減するだけでなく、装薬作業時間の短縮が図れ、作業員の切羽への張り付き時間も低減することができる。

### 3. 遠隔吹付け技術の開発

従来のコンクリート吹付け作業は、粉じん濃度が高い環境下で、作業員が保護具（保護メガネや防塵マスク）を着用しての作業である。そのため、作業員が切羽にできるだけ接近しないで作業できる技術の開発が不可欠で「労働環境の改善」と「安全性の向上」を目的として、遠隔吹付け機を開発した。

#### (1) システム構成

遠隔吹付けのシステムは、吹付け機と作業員目（視野）となる複数のカメラなどと、無人化施工の技術を活用した遠隔操作オペレーションを組み合わせたものである。カメラにはレンズへの粉じん付着防止のため、エアシャワーリングを装備、吹付けロボットには自動で首振りを行うノズルスウィング機能を装備している。

遠隔操作室は移動式とし、吹付け機とは無線（もしくは有線）LAN を通じて映像やロボット操作信号を伝送する。オペレータは、操作室からモニタ映像を見ながら吹付け機のリモコンボックスを操作する。

#### a) カメラユニット

カメラユニット（写真-3）は、PTZ 機能搭載カメラとエアシャワーリング、モバイルバッテリー、カメラ操作および映像用の各無線ボックスで構成される。筐体背面と底部に取り付けた強力マグネットで、鋼製支保工や吹付け機エレクターム等に固定する。これにより、カメラユニットの配置の自由度が高まり、吹付けオペレータの希望に応じたカメラ配置が可能となる。

また、映像無線機（5GHz）は、フル HD 映像を操作室に低遅延で伝送することが可能である。

エアシャワーリングは、吹付け機本体に装備したエアホースリールからエアを供給し、カメラへの吹付け粉塵の付着を防止する。

#### b) 小型移動式操作室

操作室は（写真-4、写真-5）、坑内移動の取り回しの良さを優先させ、ワンボックスカーの後部座席を改造し、ディスプレイや通信機器等を配置した。また、車内に大容量バッテリーを搭載し、ディスプレイや通信機器に電力を供給した。

#### c) ノズルワークシステム

カメラと操作室内のモニタ映像には、ハードの制約により 0.3 秒以上の遅延が生じる。吹付け作業時のオペレータの操作は、ノズル

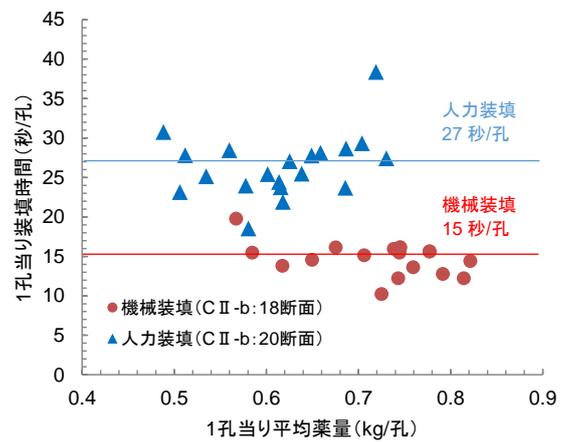


図-1 機械装填と人力装填の装薬時間



写真-3 カメラユニット



写真-4 小型移動式操作室



写真-5 操作室内部

の前後・回転とアームスライドを反復操作する時間が大半を占める。特に、ノズル回転操作をしている時間は長く、オペレータは操作器を 50ms のハイスピードで反復操作し、ノズル回転の微妙な動作を制御している。このような操作に対する遅延は遠隔操作を難しくする一因であり、ノズルワークが仕上がり精度を左右することから、吹付けロボットにセンサを取付け、ノズルの回転や前後移動を制御する自動ノズルスウィング機能（前後・回転）を付加することで、映像遅延に伴うレスポンス低下を防止できるようにした。

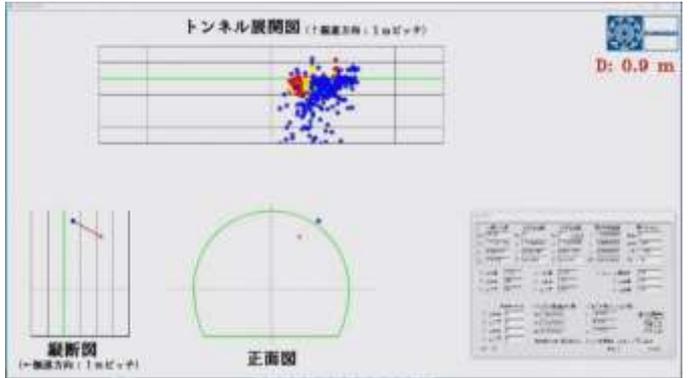


図-2 ガイダンスシステム表示画面

#### d) ガイダンスシステム

操作室のモニタ画面のみでは、吹付け個所とノズルとの位置関係を正確に把握することが難しい。そこで、吹付け機本体にミニコン内蔵カメラを複数台設置し、各カメラがレーザーマーキングシステムから切羽面に照射された点を認識することで、カメラ位置（3次元座標）を同定する。そして、ノズル先端から吹付け面に照射する緑色レーザーを連続撮影（30fps）することで、即時に照射点を3次元座標に変換し、ノズルと吹付け面との距離や方向、吹付け厚さをリアルタイムに表示（図-2）する。

#### (2) 遠隔吹付け状況

遠隔吹付け状況を写真-6示す。これにより、掘削直後の切羽に接近することなく、切羽から離れた操作室からコンクリート吹付け作業を遠隔操作することができる。また、吹付け中の作業員の曝露粉じんをゼロにでき、坑内労働環境を抜本的に改善して、快適な労働環境での作業を提供することができる。



写真-6 遠隔吹付け状況

### 4. ロックボルトの機械打設システムの開発

一般的にロックボルトの打設作業は人力による苦渋作業かつ切羽近傍の高所での危険を伴う作業であり、改善すべき作業のひとつである。そこで、ロックボルトの施工性の向上を目的として、ボルト挿入から定着作業までを機械化するシステムを開発し、試験施工を行った結果について報告する。

なお、今回の開発対象としたロックボルトは、一般的に用いられているモルタル等による定着式ではなく、主に湧水対策や早期の支保性能発揮を期待する場合に用いられる鋼管膨張型ロックボルト「RPE ロックボルト」とした。従来どおりドリルジャンボによるロックボルト孔の削孔後に、ボルトの挿入と高水圧ポンプによるロックボルトの拡張作業を専用治具により機械化し、人力作業を介さない一連の作業となるよう開発を行った。

#### (1) システム構成

鋼管膨張型ロックボルトの機械打設のため、注水用専用取付け治具と水圧制御ユニット、専用セントラライザの開発を行った。

##### a) 注水用専用取付け治具

注水用専用取付け治具（写真-7）は、ボルト拡張のための注水ヘッドとボルト挿入のための角度調整用バネ（2箇所）で構成され、これをドリフタに連結する。この専用治具の注水ヘッドにボルトをセットし、水圧により把持した状態でボルトの挿入を行う。角度調整用バネを2箇所設けることで、削孔した孔中心と挿入する

ボルトの軸心を一致させやすくし、ボルト挿入・注水拡張作業をスムーズかつ正確に行えるようにした。

### b) 水圧制御ユニット

ボルト把持のための水圧は、鋼管膨張型ロックボルトの拡張に必要な水圧（通常 25MPa）より小さく、かつボルト拡張が生じずにボルト把持が確実にできる水圧（10MPa）とした。

水圧制御ユニット（写真-8）は、通常の高水圧ポンプに接続することで 10MPa でも水圧を保持できる機構を備えている。これにより、10MPa と 25MPa の 2 段階の水圧を設定することができる。

注水によるボルト拡張作業は、ドリルジャンボの操作室で削孔・ボルト挿入を終えたオペレータがリモコン操作により行うことができるため、地上でロックボルトをドリフタにセットする作業員とドリルジャンボのオペレータの 2 人で打設作業を進めることができる。

### c) 専用セントライザ

専用セントライザ（写真-9）は、あらかじめ座金（150×150）をセットできる構造とした。

座金は、セントライザに磁石により取り付けられ、ボルト挿入時には注水専用取付け治具の先端の注水ヘッドによりセントライザからボルト挿入とともに押し出されて、吹付けコンクリート壁面に設置される。

## (2) 試験施工

実際に稼働中の山岳トンネル現場にて、施工性（作業性や打設時間）、品質（所定の位置へのロックボルトの挿入、プレート設置、注水による定着、引抜耐力）、専用治具の耐久性の確認のための試験施工を行った。なお、試験施工では、通常の支保機能を損なわないよう、標準支保パターンのロックボルトを打設した箇所の中間位置に、試験施工用のロックボルトを打設することとした。

試験施工の順序を下記に示す。

- ① 従来工法と同様に、ドリルジャンボの左右ブームでロックボルト孔を削孔する。
- ② 中央ブームに設置した専用治具に、ボルトをセットする。座金（丸型）をガイドセルに取り付けた専用セントライザに、マグネットにより取り付ける。
- ③ リリーフバルブを開放後、注水ポンプを起動させ、注水アームのレバーを引き、ボルトを把持するための注水（注水圧 10MPa）を開始する。
- ④ 注水圧 10MPa は保持したまま、ガイドセルを所定の打設位置に誘導し、ボルトを挿入する。誘導は削孔誘導装置により、削孔位置やボルト挿入方向にガイドセルを誘導する。
- ⑤ ボルト挿入完了後、リリーフバルブを閉栓し、ボルトを膨張させ定着させる。注水ポンプが停止するまでレバーを引き続ける（注水圧 25MPa）。注水アームのレバーを放し注水完了。
- ⑥ ガイドセルを移動させ、ボルト打設完了。

試験施工の状況を写真-10 に示す。試験施工後に引抜き試験による品質確認を行ったが、いずれもロックボルトの品質基準を満足することが確認できた。

試験施工では、いずれも 30～40 秒程度でスムーズなボルト挿入が行え、挿入後のボルト拡張も含めて、概



写真-7 遠隔吹付け状況



写真-8 水圧制御ユニット

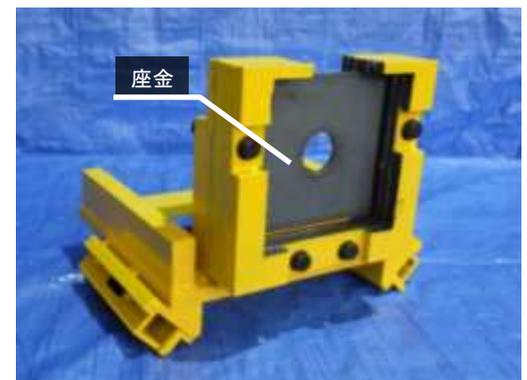


写真-9 専用セントライザ  
(座金セット)



(a) ボルト・座金セット状況



(b) ボルト・座金セット状況



(c) 水圧制御ユニット



(d) 水圧制御ユニットのリモコン操作



(e) ボルト挿入状況



(f) ボルト挿入・座金設置状況



(g) ボルトの注水拡張状況



(h) 打設完了

## 写真-10 試験施工状況

ね 90 秒程度で打設完了した。

また、**写真-10(g)**に示すように、ドリフタに取り付けた専用治具と挿入したボルトの軸心が多少ずれた場合でも、想定どおり角度調整用バネと注水ヘッド部の水圧把持により、漏水することなく、確実に注水拡張を行えることがわかった。

今回の開発は、鋼管膨張型ロックボルトを対象に、ロックボルト専用機械でなく、従来どおりドリルジャンボに専用治具を取り付けるだけで、ボルト挿入・摩擦式による定着作業を機械化し、人力作業を介さない一連の作業をスムーズかつ効率的に行えたものとする。

## 5. 今後の展開

山岳トンネルの切羽作業に対し、特徴的な災害である落盤・土砂崩壊災害リスクを回避するため、当社で培ってきた無人化施工における遠隔操作技術を活用し、切羽作業の遠隔化・自動化を図るとともに、更なる効率化・省力化を目指して、今後も技術開発を進めていく所存である。