

## トンネル発破作業の自動化・遠隔化技術

伊藤 良介

国土交通省では発破の自動化・遠隔化技術を新技術導入促進のテーマとして設定し、当該技術の開発や導入促進のための方策が検討されている。当協会は、新技術導入促進機関として業務を実施しており、令和4年度に開催した勉強会では、山岳トンネルの発破掘削における現状と課題や、国内外における自動化・遠隔化技術の開発状況を整理した。本稿では現行の発破作業における課題と、国内外で開発されている自動化・遠隔化技術の一部を紹介する。

キーワード：トンネル，発破，切羽，自動化，遠隔化

### 1. はじめに

山岳トンネルの発破掘削では、切羽鏡面の直近において爆薬の装填や結線等の人力作業が行われるため、切羽鏡面からの肌落ちにより作業員が被災しやすい状況にある。図—1<sup>1)</sup>はトンネル工事における肌落ち災害の発生状況を図示したものである。トンネル工事では爆薬の装薬や結線等の一連の発破作業以外にも、支保工建込み、吹付けコンクリート等の様々な作業があるが、そのうち肌落ちにより被災する割合が多い作業が支保工建込みと装薬であることが示されている。また肌落ち災害の発生場所としては、切羽周辺で発生することがほとんどであることが分かる。

このような背景のもと、国土交通省では発破の自動化・遠隔化技術を新技術導入促進のテーマとして設定し、当該技術の開発や導入促進のための方策が検討されている。当協会は、新技術導入促進機関として、国土交通省 中国地方整備局より、導入促進のための検討業務を受託しており、令和4年度には、国土交通省等の行政機関や、ゼネコン、建機メーカー、火薬メー

カー、各種業団体からなる勉強会を開催し、山岳トンネルの発破掘削における現状と課題や、国内外における自動化・遠隔化技術の開発状況を整理した。

本稿では、当該勉強会で整理された、発破掘削における現状や国内外での取り組み状況について紹介する。

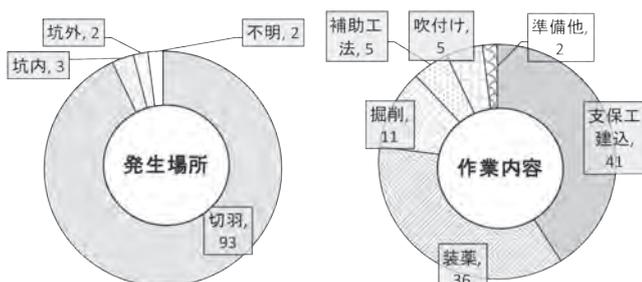
### 2. 従来のトンネル発破作業における課題

山岳トンネルにおける発破作業は、(1) 削孔位置のマーキング、(2) 装薬孔の削孔、(3) 装薬孔の清掃、(4) 装薬、(5) 結線、(6) 点火の順に行われる。このうち(2) 装薬孔の削孔については、ドリルジャンボの普及により、作業員が切羽直近で削孔作業を行うことはほとんどなくなった(図—2<sup>2)</sup>)。また、コンピュータジャンボ(写真—1<sup>3)</sup>)の普及などにより、(1) マーキング作業が省略されることも多い。一方で、(3) 装薬孔の清掃、(4) 装薬、(5) 結線については、切羽(鏡面)直近での人力作業となっており(写真—2<sup>4)</sup>)、これらの作業の自動化・遠隔化が安全上の課題となっている。

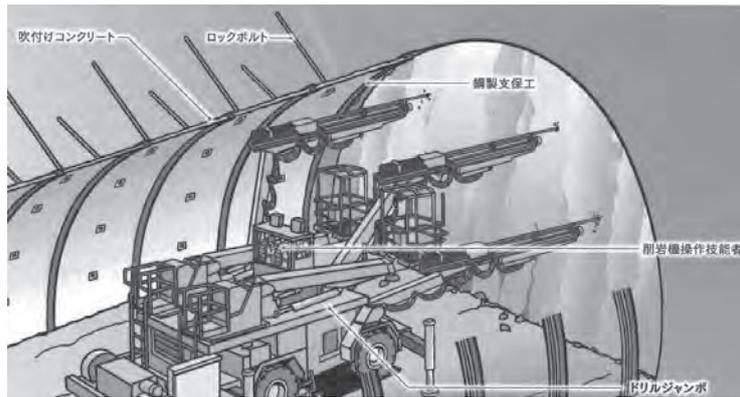
### 3. 国内外における開発動向

前章で課題として述べた、装薬孔の清掃、装薬、結線作業に対して、ゼネコンやメーカー各社によって、自動化・遠隔化に向けた取り組みが進められている。

装薬孔の清掃作業では、エアー駆動のドリルの回転により、切羽から1m程度の離隔を確保した上で小石を除去できる装置が開発されている(写真—3<sup>5)</sup>)。また、装薬作業についても、写真—4<sup>4)</sup>に示すような



図—1 切羽における肌落ち災害の発生場所と作業内容の内訳<sup>1)</sup>



図一 2 ドリルジャンボによる装薬孔の掘削作業<sup>2)</sup>



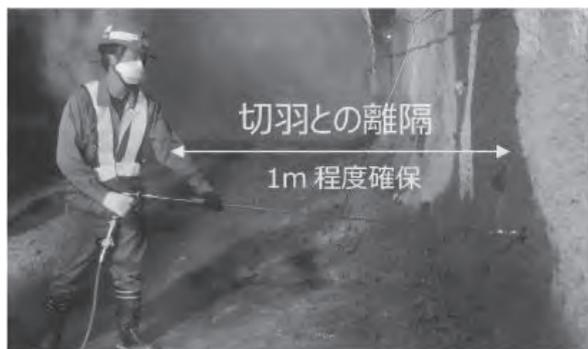
写真一 1 コンピュータジャンボによるブーム制御<sup>3)</sup>



写真一 4 爆薬の遠隔装填<sup>4)</sup>



写真一 2 人力による装薬作業<sup>4)</sup>

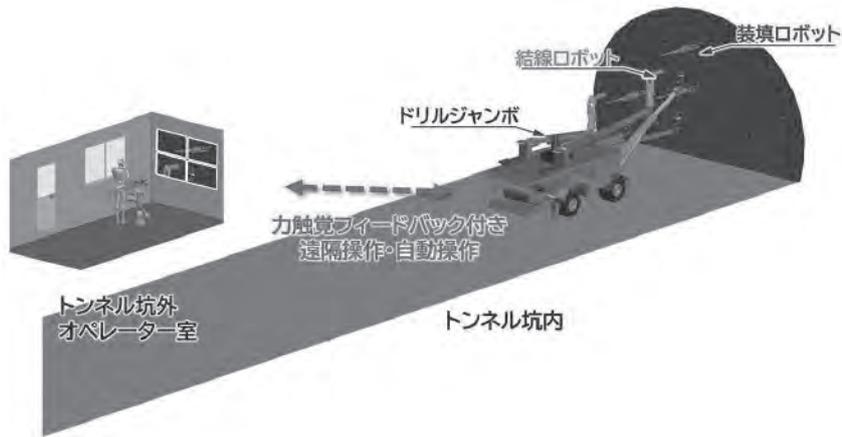


写真一 3 遠隔での装薬孔の清掃<sup>5)</sup>

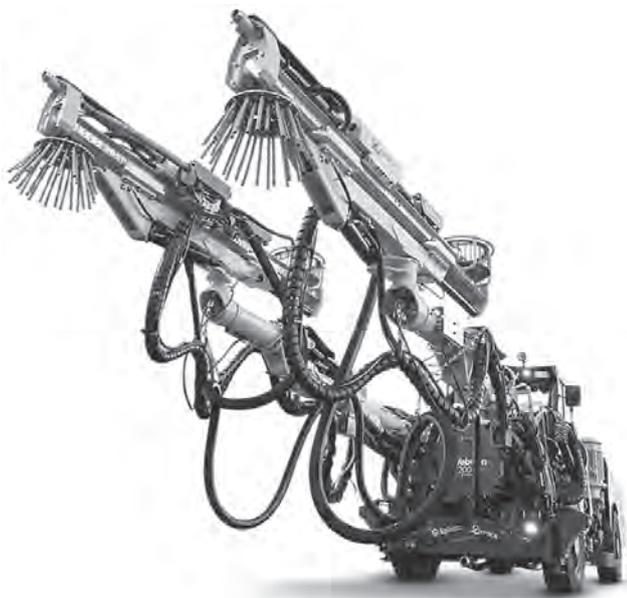
装填機械が開発されている。この機械は、手元のリモコンを操作することで爆薬をエア圧送するため、切羽から1.5m程度離れた位置から作業を行える。いずれの機械も、従来は切羽に密着して行う必要があった作業が、ある程度の離隔を確保できるようになるため、肌落ち等のリスクを低減できる。

結線作業については、勉強会（令和4年度）時点では、具体的な取り組み内容は出なかったが、例えば、遠隔で力触覚を再現する技術（リアルハプティクス<sup>®</sup>）を用いて、結線用のロボットを遠隔で操作する技術の開発が進められている（図一3<sup>6)</sup>）。一方、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）では、雷管の結線作業そのものを省略する技術として、無線電子雷管の開発が進められている。両技術とも、実用化されれば切羽直近での人力による結線作業が完全に不要となると考えられる。

発破作業の自動化・遠隔化の取り組みは、海外でも進められている。Epiroc社のAvatel<sup>TM</sup>（図一4<sup>7)</sup>は、装薬孔の削孔から装薬作業までの全ての作業を遠隔から行える技術である。また、雷管には無線電子雷管である、Orica社のWebGen<sup>TM</sup>（図一5<sup>8)</sup>を使用するため、結線作業も不要となっている。ただし、これら



図一三 自動火薬装填・結線システムイメージ<sup>6)</sup>



図一四 Avatel™<sup>7)</sup>



**WebGen™ 200**

図一五 WebGen™<sup>8)</sup>

剤を混合することによって爆薬としての機能を発揮する。混合前の材料は爆薬としての機能は持たないため、移送から装薬前までは、爆発の危険が無く、安全性が高い。しかし、日本の火薬取締法においては、装薬孔で材料を混合して爆薬化することが、製造行為とみなされるため、火薬類製造保安責任者の資格保有者を常駐させる必要があり、火薬製造許可申請などの各種手続きも必要となるため、国内のトンネル現場で使用するには超えるべきハードルが非常に高いのが現状である。

#### 4. おわりに

令和4年度の勉強会では、山岳トンネルにおける発破作業において、従来手法の安全上の課題を整理し、現在開発・実証が進められている、発破作業の自動化・遠隔化技術についての知見が得られた。今後、これらの技術の導入を進めていくためには、メーカーや施工業者による取り組みはもちろんだが、開発中の技術に対して、トンネル工事を想定した法規制・法解釈の整理・検証、フィールド実証のための現場提供、各種技術基準等への反映といった、行政サイドによる働きかけも重要である。当協会は、令和5年以降も中国地方整備局より業務を受託しており、現在は、現存技術や開発中の技術をとりまとめるとともに、新技術を運用する際に反映が必要な技術基準や法令上の課題等を整理し、ガイドラインとして取りまとめるため、各種検討を実施しているところである。これにより、各種技術が広く周知され、技術の開発促進や導入促進がなされることが期待される。

JICMA

の技術をそのまま日本で活用することは難しい。その理由の一つとして、本技術がバルクエマルジョン爆薬の使用を前提としていることが挙げられる。バルクエマルジョン爆薬は、海外の発破作業においては多く使用されている爆薬であり、装薬孔にて、中間体と発砲

## 《参考文献》

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドラインの解説（平成30年1月改正版）  
平成30年1月（<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>）
- 2) 日本建設業連合会：施工がよくわかるイラスト土木入門 第1版 P.50, 令和4年12月
- 3) 鹿島建設㈱ 東日本大震災における鹿島の取組み 白井地区道路工事, 令和6年7月5日時点（[https://www.kajima.co.jp/tech/c\\_great\\_east\\_japan\\_earthquake/deconstruction/deconstruction11/index.html](https://www.kajima.co.jp/tech/c_great_east_japan_earthquake/deconstruction/deconstruction11/index.html)）
- 4) ㈱熊谷組 技術研究報告 第73号 復興道路工事における新技術への取り組み－爆薬の遠隔装填システムと中流動コンクリートの適用－ P.79, 平成26年12月（<https://www.kumagaigumi.co.jp/tech/research/item/KTRR073-311.pdf>）
- 5) 大成建設㈱ トンネル発破掘削時の装薬孔内清掃器具を開発, 令和6年7月5日時点（[https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/2021/210512\\_8239.html](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210512_8239.html)）
- 6) ㈱大林組 山岳トンネル掘削作業における自動火薬装填システムの開発, 令和6年7月5日時点（[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230912\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230912_1.html)）
- 7) Epiroc Avatel, 令和6年7月5日時点（<https://www.epiroc.com/ja-jp/products/drill-rigs/face-drill-rigs/avatel>）
- 8) ORICA WebGen™ 200 – second generation Wireless Initiating System, 令和6年7月5日時点（<https://www.orica.com/Products-Services/Blasting/Wireless/How-it-works/WebGen-200/webgen-200>）

## 【筆者紹介】

伊藤 良介（いとう りょうすけ）  
（一社）日本建設機械施工協会  
施工技術総合研究所  
研究第一部

