

# トンネル坑内の高速通信環境下における あたり取り作業の無人化施工の検証

村岡亜美<sup>1</sup>・中原法久<sup>2</sup>・舟橋孝仁<sup>3</sup>・高橋幹夫<sup>4</sup>・須志田藤雄<sup>5</sup>・  
佐野雄治<sup>6</sup>・島根米三郎<sup>7</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄建建設株式会社土木本部トンネル技術部

(〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: ami-muraoka@tekken.co.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄建建設株式会社土木本部トンネル技術部

(〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: norihisa-nakahara@tekken.co.jp

<sup>3</sup>正会員 鉄建建設株式会社土木本部トンネル技術部

(〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: takahito-funahashi@tekken.co.jp

<sup>4</sup>正会員 鉄建建設株式会社土木本部トンネル技術部

(〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: mikio-takahashi@tekken.co.jp

<sup>5</sup>正会員 鉄建建設株式会社土木本部トンネル技術部

(〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: fujio-sushida@tekken.co.jp

<sup>6</sup>正会員 鉄建建設株式会社 (〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: yuuji-sano@tekken.co.jp

<sup>7</sup>正会員 鉄建建設株式会社 (〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号)

E-mail: yonesaburou-shimane@tekken.co.jp

近年の建設業における担い手の確保や安全性、生産性の向上の観点から、トンネル工事においても省人化、無人化、自動化による安全性や生産性を向上させる取り組みが必要である。トンネル工事の切羽近傍における作業のうち、発破後のあたり取り作業は、肌落ち災害の危険性が高く、無人化や自動化が特に求められる作業である。著者らは、そのあたり取り作業の無人化に着目し、高速通信環境を用いた遠隔操作可能な油圧ブレイカでの施工想定試験を実施し、検証を行った。油圧ブレイカの遠隔操作はカメラ映像を見ながらの操作となるため、従来操作と同程度の作業効率で行うことは難しいものの、あたり取りの基本的な動作として、重機走行、ノミ先の壁面への誘導、ブレイカによる掘削（小割）作業を遠隔操作で行うことは可能であることを確認した。

**Key Words :** *mountain tunnel, unmanned construction, remote control, scaling, telecommunication network facilities in mountain tunnel under construction*

## 1. はじめに

近年、建設業では生産年齢人口の減少や技能者の高齢化に伴い、担い手確保や生産性の向上は喫緊の課題である。トンネル工事においても、無人化や自動化等による安全性や生産性を向上させる取り組みは必要であり、近年ではDX推進の一環として様々な技術開発が進められている。

トンネル工事の切羽近傍における作業のうち、発破後のあたり取り作業は、肌落ち災害の危険性が高く、人が作業環境に立ち入らない、機械による無人化や自動化が特に求められる作業である。また、工事に使用する機械の無人化や自動化を安全に実施するためには、操作と機械動作との遅延時間が少なく、安定した高速通信環境が必要となる。そこで筆者らは、光ケーブルを用いた高速通信環境を整備した上で、あたり取り作業の無人化施工

を想定した試験を実施し、作業状況や所要時間、今後の課題についての検証を行った。本稿では、その試験概要、結果および今後の課題について報告する。

## 2. 試験概要

### (1) 高速通信環境

本試験では、高速通信、長距離伝送が可能な光ケーブルをトンネル全線（坑外詰所からトンネル坑内の切羽付近）に敷設し、切羽付近において高速通信環境を整備し、坑内と坑外詰所とのデータ転送を行った。本試験での通信環境概要図を図-1 に示す。

iPerf による実効通信容量の測定値は、光ケーブル端間では下り 633Mbps～上り 699Mbps, Wi-fi を経由した場合では下り 260Mbps～上り 248Mbps を示した。

### (2) 使用機器

本試験では、無人化施工システムを搭載した油圧ブレーカを使用した。重機には、小型 HD カメラが 4 台、各種通信用無線機および油圧制御系システムを搭載し、トンネル側壁部には重機との通信を行うための通信設備を設置した。さらに、重機遠隔操作を行う際の補助的なカメラとして、テールピース側に IP カメラを設置し、作業状況の全体像を確認できるようにした。

また、操作リモコンを坑内に持ち込んだ場合には、操作リモコンと重機側の通信設備が直接通信し、重機の遠隔操作が可能となる。

### (3) 遠隔操作システム

本試験で使用した遠隔操作システムは、重機側の小型 HD カメラ 4 台（前方上部、前方下部、前方正面、後方）、カメラ映像送信用無線機、カメラ映像切替信号用無線機、遠隔操作信号用無線機、その他油圧制御系システムから構成されている。

遠隔操作を行う坑外詰所には、操作リモコン、机上カメラ映像切替機、フット式カメラ映像切替機、重機カメラ映像用モニター、IP カメラ映像用 PC、その他通信用機器を設置した。

坑内テールピース付近には、各重機側無線機からの信号を受信する映像受信機、制御送信機およびカメラ映像切替信号送信機、制御中継ユニット、それぞれの信号を変換する機器接続 BOX、坑外詰所とデータ通信を行う通信 BOX を設置した。これらを総称して坑内設置式遠隔操作信号送受信機器と呼ぶ。

重機側無線機と坑内設置式遠隔操作信号送受信機器との無線通信は、映像送信用で 5.1～5.8GHz、カメラ切替信号で 2.4GHz、遠隔操作信号で 429MHz の周波数帯をそれぞれ使用している。通信 BOX で集約された通信データは、光ケーブルにより切羽付近と坑外詰所の間で相互に通信される。

### (4) 試験ケース

本試験は、操作方法の異なる 3 つのケースで実施し、結果を比較した。

#### a) ケース 1（坑外遠隔操作）

オペレータが坑外詰所において、重機に搭載された

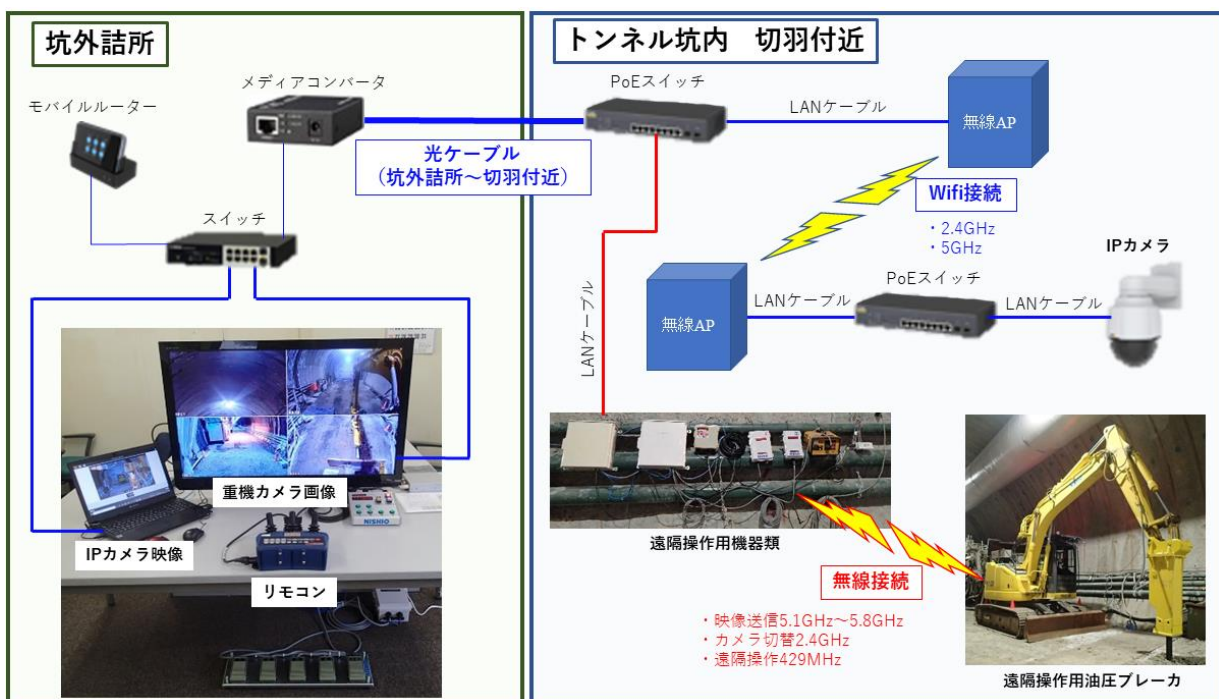


図-1 通信環境概要図

4 台の小型カメラ映像, およびテールピースに設置された IP カメラ映像を見ながら, リモコンを操作し重機を遠隔で操作した. オペレータは, モニターに映る映像を, 作業に応じて 1 分割, 2 分割および 4 分割に適宜切り替えを行った. 表示映像の切替は, 机上カメラ映像切替機, またはフット式カメラ映像切替機で行った.

**b) ケース 2 (坑内遠隔操作)**

オペレータがトンネル坑内の重機付近 (作業半径外) において, 自らがリモコンを所持し, 重機や作業エリアの状況を見ながらリモコン操作を行った.

**c) ケース 3 (従来操作)**

従来通りオペレータが重機に搭乗し, 操作を行った. ブレーカーは遠隔操作時と同じものを使用した.

**(5) 試験内容**

ブレーカによるあたり取り作業を行う際の基本的な重機の動きを遠隔操作により確認するため, 試験内容は各ケースに対し, 重機の走行, トンネル壁面へのノミ先の誘導, 掘削作業を模したコンクリートブロック (地上設置) の小割を実施した (表-1).

試験全体概要図を図-2 に示す. 試験は, 重機駐機位置から①重機走行 (往路 100m), ②壁面へのノミ先誘導 (4 箇所), ③ブロック小割 (2 個), ④重機走行 (復路 100m) の順で実施した. 試験中は重機の走行性, 操作・操縦性, 制動性, 安全性等を確認し, 作業時間の測定を行った.

**a) 重機走行**

重機走行では, 駐機位置から集塵機, テールピース, クラッシャー横を通過し, 発破バルーン設置箇所までの約 100m を走行した. 駐機位置から重機遠隔操作作用通信設備までの距離は約 61m である.

往路は駐機位置から発破バルーン設置位置まで, 復路は発破バルーン位置から駐機位置までの走行 (方向転換も含む) を行い, 各ケースの走行時間測定, 走行状況 (走行スピード, 蛇行の有無) を確認した.

**b) トンネル側壁へのノミ先の誘導**

トンネル周面タッチは, 重機走行①の停止位置から移動し, トンネル断面の脚部, 側壁, 肩部および天端部のあたり取り作業を想定し, ブレーカのノミ先を所定箇所まで誘導させることを行った. 誘導先には目印として予め風船を設置し, ノミ先を風船に接触させることとした.

**c) コンクリートブロック小割**

コンクリートブロック小割は, トンネル周面タッチ後にコンクリートブロック前まで移動し, ブレーカによる

表-1 実施項目と内容

実施項目	内容
重機走行	駐機箇所から所定位置まで100mを走行
トンネル壁面へのノミ先の誘導	所定箇所 (脚部, 側壁, 肩, 天端) のあたり取りを想定し, ブレーカーノミを誘導
コンクリートブロックの小割	掘削を想定し, ブロックを小割



図-2 試験全体概要図

掘削作業を想定したブロックの小割を行った。コンクリートブロックの大きさは、長さ 1.0m、幅 0.5m、高さ 0.6m であり、小割の程度は、ブロックが概ね 8 分割とした。コンクリートブロックは、1 ケースに 2 個用意し、トンネル路盤の左右に設置した。

### 3. 試験結果、および今後の課題

#### (1) 作業状況

##### a) 重機走行

ケース 1 では、重機搭載の小型カメラ映像および IP カメラ映像のみにより、重機と坑内設備との離隔や重機進行方向を把握し、走行スペースを安全に走行でき、一旦停止や減速等の重機の制動も問題なく行うことができた。しかし、従来操作であるケース 3 に比べると、視認性が劣り、かつ重機の重心も把握しづらく、走行時の減速や一旦停止を伴う方向修正などにより時間を要することが分かった。

ケース 2 では、オペレータが立ち位置を調整することで確認したい箇所を自由に見ることができ、ケース 1 よりも重機や作業エリアの状況を把握しやすかった。そのためケース 3 ほどではないものの、往路、復路ともに円滑に重機を走行できた。

##### b) ノミ先誘導およびブロック小割

ケース 1、ケース 2 において、ケース 3 と同様に作業を行うことができた、しかし、遠隔操作での作業は、操作速度が低下する、ノミ先誘導の目印やブロックとブレーカノミとの距離感覚がつかみにくく作業に時間を要するなど、ケース 3 の作業状況に比べると作業効率が劣る結果となった。

今後は、視認性や安全性向上のため、カメラの映像品質、視野、台数、設置箇所等の検討や、正確な距離感をつかむためのセンシング技術の導入が必要と考えられる。

#### (2) 所要時間

各ケースにおける重機走行、トンネル壁面へのノミ先誘導およびブロック小割に要した時間を図-3 に示す。一連の実施内容に要した時間は、ケース 3 と比べるとケース 1 では約 3.9 倍、ケース 2 では 2.3 倍の時間を要した。また、作業ごとの所要時間割合（図-4）を見ると、壁面タッチ、ブロック打撃は、ケース 3 では概ね同程度の作業時間であるものの、ケース 1 とケース 2 ではブロック小割作業に多分の時間を要している。

これは、慣れた環境にて作業するケース 3 に比べ、モニター越しとなるケース 1、および運転席外からの操作となるケース 2 は、ブロックとノミ先との距離感が把握しづらかったこと、ノミ先を接触させればよいノミ先誘

導に対し、ブロック小割の際にはブロックへのノミの当て位置を調整する必要があったためその調整により時間がかかったことが理由として挙げられる。また今回の試験では、実際の重機と同様な操作レバーを使用しておらず、オペレータの操作感覚の不慣れさもあったと考える。

今後は、操作性の向上のため、コックピット型操縦席の採用や作業の臨場感が感じられる環境、操作時の安全性の向上に向けた検討が必要と考えられる。

### 4. まとめ

トンネル工事におけるあたり取り作業の無人化のため、油圧ブレーカの遠隔操作について検討を行った。遠隔操作は、カメラ映像等の不慣れた視点からの操作となるため、従来操作と同程度の作業効率で行うことは難しいものの、あたり取りの基本的な動作は遠隔操作で行うことが可能であることを確認できた。遠隔操作による作業の安全性や操作性の向上、さらなる効率化を図るためには、より実際に近い操作環境を確保することや正確な距離感が得られるセンシング技術が必要と考えられる。

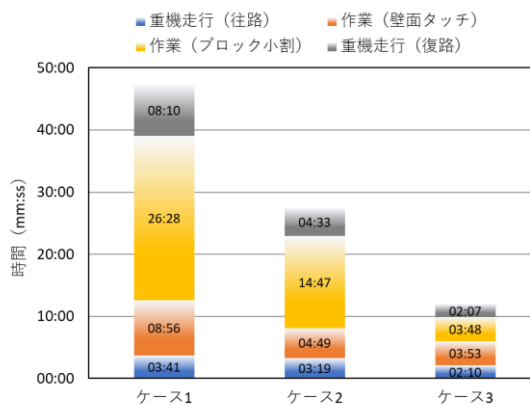


図-3 作業所要時間

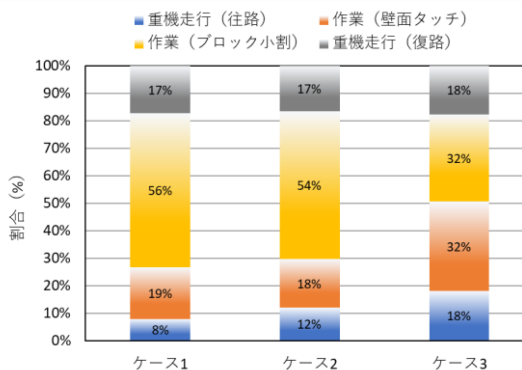


図-4 作業ごとの所要時間割合

(2022. 8. 26 受付)

## STUDY OF UNMANNED CONSTRUCTION OF SCALING WITH TELECOMMUNICATION NETWORK FACILITIES IN MOUNTAIN TUNNEL

Ami MURAOKA, Norihisa NAKAHARA, Takahito FUNAHASHI, Mikio Takahashi,  
Fujio SUSHIDA, Yuji SANO and Yonesaburo SHIMANE

In recent years, in order to secure a workforce and improve safety and productivity in the construction industry, it is necessary to improve safety and productivity through labor saving, unmanned operations, and automation in tunnel construction. Among the work near the face of a tunnel, the scaling after blasting is particularly vulnerable to the risk of rockfall hazards, and thus requires unmanned and automated operations. We focused on the unmanned operation of the scaling and conducted a hypothetical construction test using a hydraulic breaker that can be remotely operated using a high-speed communication environment.

Although it is difficult to operate the hydraulic breaker remotely with the same level of efficiency as conventional operations because the breaker is operated while viewing camera images, the authors confirmed that it is possible to perform the basic operations of scaling, such as driving the heavy equipment, guiding the chisel tip to the wall surface, and excavating (breaking into small sections) with the breaker, by remote control.