

山岳トンネルにおける油圧ブレーカによる あたり取り作業の無人化施工に関する検討

舟橋 孝仁*1・須志田 藤雄*2

概 要

トンネル工事における切羽作業の無人化施工への取り組みとして、こそく・あたり取り作業の遠隔操作について試験を行った。試験はトンネル仮設備が並ぶ走行幅の狭いエリアおよびトンネル切羽付近の広い作業幅が確保できるエリアにおいて、重機の走行およびあたり取りを模擬した重機作業を遠隔操作により実施した。遠隔操作は、重機に設置されたカメラ映像を見ながらの操作となるため、従来作業と同程度の作業効率で行うことは難しいものの、こそく・あたり取りの基本的な作業は遠隔操作で行うことが可能であることを確認した。

キーワード：山岳トンネル，無人化施工，遠隔操作，光ケーブル，あたり取り

STUDY ON UNMANNED CONSTRUCTION IN MOUNTAIN TUNNELS USING A HYDRAULIC BREAKER FOR SCALING WORK

Takahito FUNAHASHI *1, Fujio SUSHIDA *2

Abstract

As a potential method for unmanned tunnel face work, we conducted a test of remote operation for chopping/scaling work. The movement and scaling work by heavy equipment was tested in remote operation mode for simulation at a narrow path area lined with temporary facilities for tunneling and an area where a spacious working area could be provided near the tunnel face. Although it was difficult to perform remote operation with the same level of efficiency as conventional operation because the operation was performed while watching video from a camera installed on the heavy equipment, it was confirmed that the basic operations of chopping and scaling can be performed by remote operation.

Keywords: Mountain tunnel, Unmanned construction, Remote operation, Optical cable, Scaling

*1 Manager, Tunnel Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*2 General Manager, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

2. 2 遠隔操作システム

本試験では、写真-1に示す無人化施工システム（着脱式油圧制御ラジコンシステム）を搭載した油圧ブレーカを使用した。油圧ブレーカは、ベースマシンが 0.5m³ 級であり 800kg 級のブレーカを装着している。重機には、写真-2(a)に示す小型カメラを設置した。設置したカメラの向きは写真-2(b)に示すように、前方上部、前方下部、前方正面、後方とした。重機の操作信号やカメラ映像切替信号等は、重機側およびトンネル側壁に設置した通信機器により無線通信を行った。重機側には写真-2(c)に示す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が搭載されている。また、トンネル側壁部には写真-2(d)に

示す重機側と通信を行うための設備、信号を集約し変換する装置が設置されている。さらに、重機遠隔操作を行う際の補助的なカメラとして、テーブルピースには写真-3に示す 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。一方、遠隔操作を行う坑外の現場詰所（操作室）には、写真-2(e)に示すように IP カメラ映像を表示するノート PC、操作リモコン、カメラ映像切替機、モニター等を設置した。なお、モニターに映し出す小型カメラの映像は、1 画面、2 画面、4 画面で表示できる仕様である（写真-2(b)および(e)は 4 画面表示の例）。図-2 に本試験で構築した、現場詰所（操作室）から重機が稼働する切羽付近までのデータ伝送路を示した遠隔操作試験系統図を示す。



写真-1 使用重機



写真-3 IPカメラ



(a) 重機搭載カメラの一部



(b) カメラ映像



(c) 重機側通信設備



(d) 側壁部通信設備



(e) 操作室

写真-2 主な設備

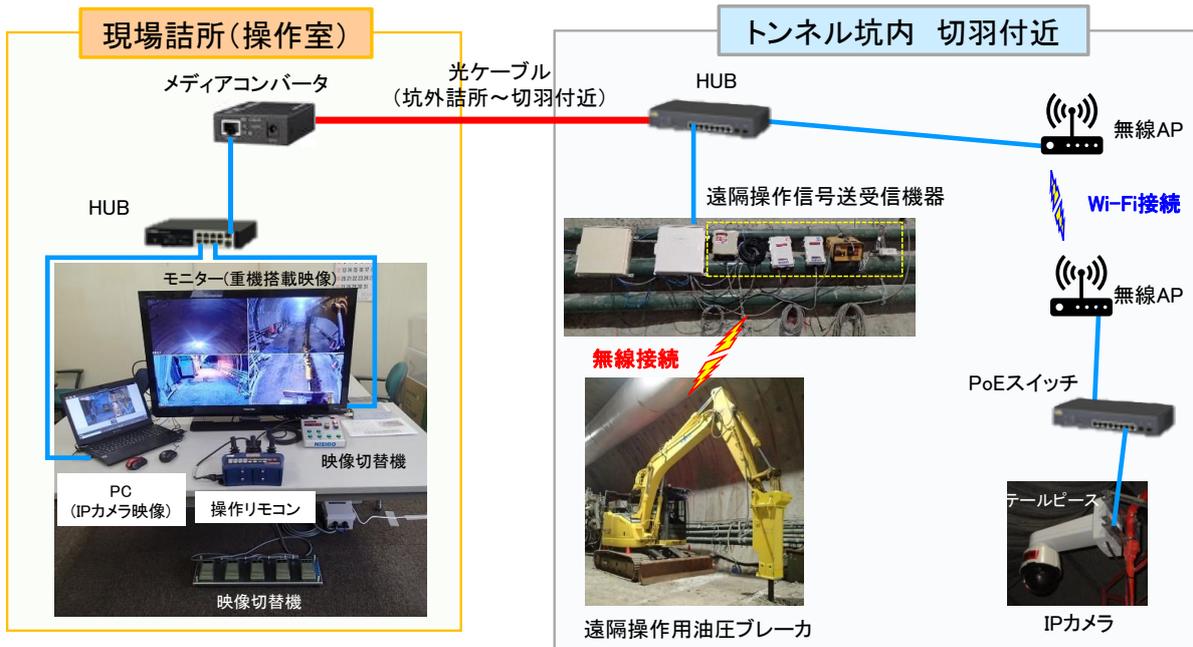


図-2 遠隔操作試験系統図

2.3 試験ケース

(1) ケース1：坑外における遠隔操作

坑外における遠隔操作は、オペレータが現場詰所（操作室）において、重機に搭載された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、操作リモコンを使用し重機を遠隔で操作した。なお、オペレータは作業に応じてモニターに映る映像を1分割、2分割および4分割に適宜切替えを行った。

(2) ケース2：坑内における遠隔操作

坑内における遠隔操作は、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、重機の姿勢や進行方向、作業エリアおよび坑内における仮設備との離隔を確認しながら操作リモコンを使用し重機を遠隔で操作した。

(3) ケース3：従来操作

従来操作は、オペレータが重機コックピットに搭乗し、コックピットからの目線で通常の実操作を行うものとし、ケース1およびケース2との比較のために実施した。

2.4 試験内容

本試験では、重機が駐機場所から所定の走行路

表-1 試験内容

項目	内容
重機走行	駐機箇所から所定の位置まで100m走行する
トンネル壁面へのノミ先誘導	所定箇所（脚部、側壁、肩、天端）にブレーカのノミを誘導する
コンクリートブロックの小割	掘削を想定し、地上に設置したコンクリートブロックを小割する

を走行し作業箇所まで移動する動き、ブレーカの基本的な作業として、ノミを所定の位置に移動（誘導）させる動き、およびあたり箇所の掘削作業を想定した。そこで試験内容は、表-1に示すように、重機の走行、トンネル壁面へのノミ先の誘導、模擬的な掘削作業としてコンクリートブロック（地上設置）の小割の3項目とした。また、各ケース同じ作業を実施し、作業状況や作業時間等を比較することとした。

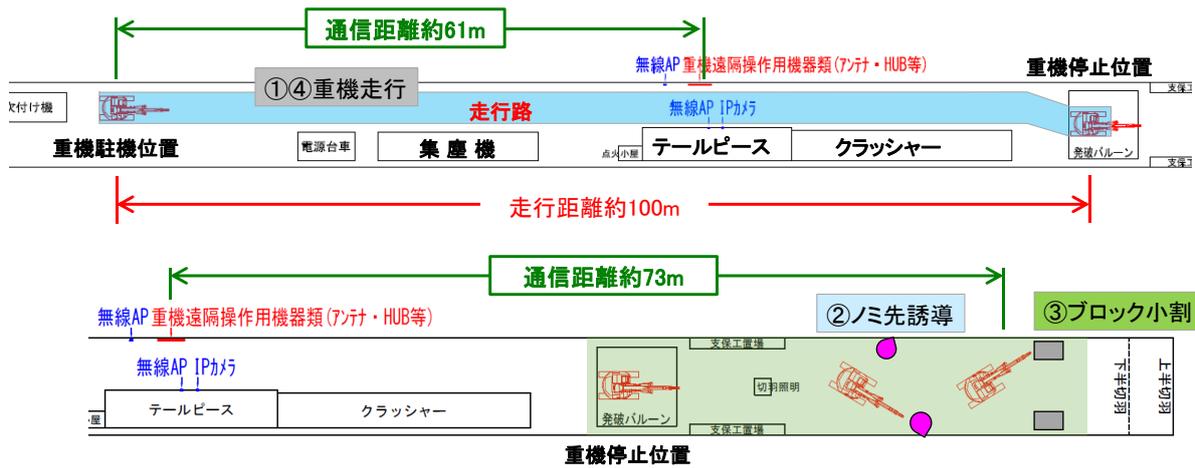


図-3 試験概要図

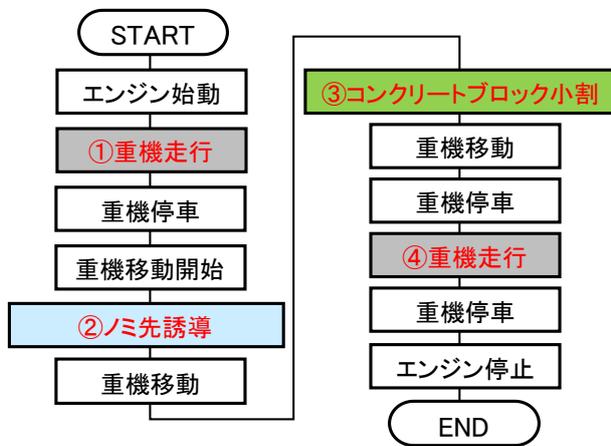


図-4 試験の流れ



(a) 駐機箇所から走行路を望む

(b) テールピース位置から走行路を望む



(c) 発破バルーン位置から走行路を望む

写真-4 走行路の状況

試験概要図を図-3に、試験の流れを図-4に示す。試験は、重機駐機位置から、①重機走行（往路約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。この時、トンネル側壁部に設置した通信設備（写真-2(d)）から通信距離が最大となる作業は、“③ブロック小割”であり、その通信距離は約73mである。試験中は重機の走行性、操作・操縦性、制動性、安全性等を確認することとし、作業に要した時間を測定した。

(1) 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、クラッシャーの横を通過し、発破バルーン設置箇所までの約100mを走行した。各箇所からの走行路の状況を写真-4に示す。

(2) トンネル壁面へのノミ先誘導



写真-5 ノミ先誘導用目印およびコンクリートブロックの設置状況

トンネル壁面へのノミ先誘導では、重機走行①の停止位置（発破バルーン位置）から移動し、トンネル断面の脚部、側壁、肩および天端に設けた目印（写真-5）にブレイカのノミ先を誘導した。

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。なお、目印の風船は同一断面に設置せず、前後にずらすことで、ノミ先誘導時の奥行調整を行えるようにした。

(3) コンクリートブロックの小割

トンネル壁面へのノミ先誘導完了後にコンクリートブロック前まで移動し、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 である（写真-6）。コンクリートブロックは各試験ケースで 2 個用意し、トンネル下半盤の左右に 1 つずつ設置した（写真-5）。小割作業完了の目安は、コンクリートブロックの大きさが概ね 8 分割程度となるまでとした。コンクリートブロックの小割作業完了後は、発破バルーン位置まで戻り重機を停止させた。

界が限られ視認性が劣ること、重機と坑内仮設備等との距離感が得にくいことなどにより、周囲の安全確認や方向修正のための減速や一旦停止が必要であった。

モニター映像を見ながらの遠隔操作による重機走行は、走行重機の周囲の状況（例えば、人の動きや他重機の稼働状況）を常に把握することが必要であり、全方位を俯瞰可能なカメラやセンサが有効であると考えられる。また、本試験では、現場詰所の操作室と作業箇所間の音声通話や作業箇所周辺の集音については行っていないが、実際の遠隔操作環境を考えると、音声通話や集音設備等の設置は操作感や安全性を向上させることに繋がるものと考えられる。

3. 試験結果

3.1 作業状況

ケース 1 およびケース 2 における作業状況を写真-7 に示す。

(1) 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、重機と坑内仮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、ケース 3（従来操作）に比べると、カメラ映像のみでは視

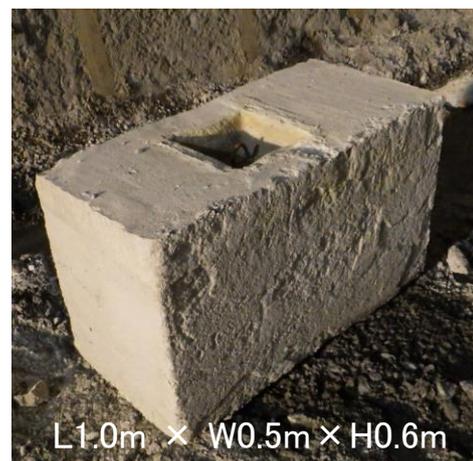


写真-6 コンクリートブロック



写真-7 作業状況（ケース 1 およびケース 2）

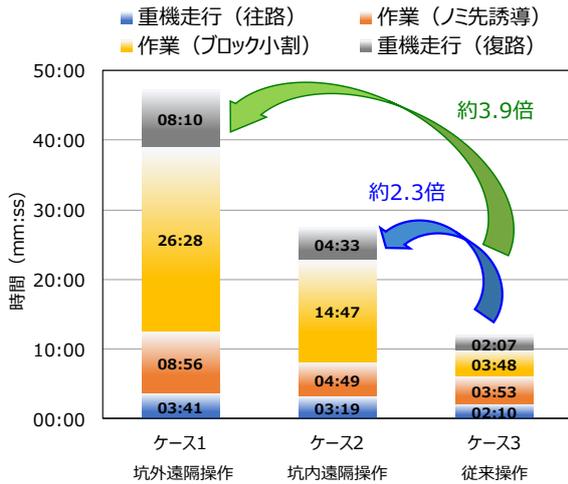


図-5 作業時間

ケース2では、ケース1に比べると往路、復路ともに円滑な重機走行ができていた。これは、オペレータが自ら立ち位置を調整できることから、目視により重機の姿勢、走行方向および重機と坑内仮設備等との距離感がケース1に比べ把握しやすくなったためと考えられる。

(2) ノミ先誘導およびブロック小割

ケース1およびケース2において、ケース3と同様の作業を行うことができた。しかし、ケース1および2における遠隔操作での作業は、ノミ先誘導の目印やコンクリートブロックとブレーカノミ先端との距離感が得にくく、その距離合わせや微調整を行う作業に時間を要し、作業効率が劣る結果となった。とくに、コンクリートブロックの小割では、その都度ガラをノミ先で小割しやすい向きに動かし、ノミ先を打撃位置に合わせる作業が発生し、ケース3に比べると相当な時間を要し作業効率が劣る結果となった。

3.2 作業時間

各試験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-5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では約2.3倍の時間を要した。また、ケース1における復路の走行において、往路より時間を要しているが、これは、走行路に設置された敷き鉄板が支障し走行部（キャタピラ）が空回り

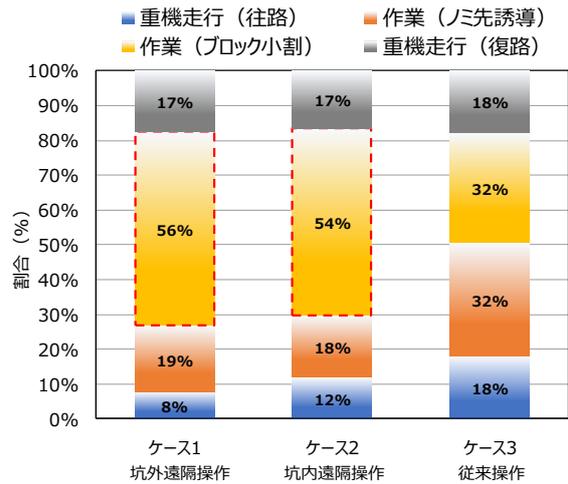


図-6 作業ごと作業時間の割合

を起こしてその対応を行ったためである。オペレータは、重機に搭載したカメラ映像のみでは、この状況を把握することができておらず、補助的に使用したIPカメラ映像で状況を確認し、事態の対処を行った。

次に、図-6で作業ごとに要した時間の割合を見ると、ノミ先誘導とブロック小割は、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、オペレータが慣れた操作環境で作業するケース3に比べ、モニター映像越しの操作となるケース1、および運転席外からの操作となるケース2では、ブロックとノミ先との距離感が把握しづらかったこと、ブロックへのノミの当て位置調整に時間がかかったことが理由として挙げられる。また今回の試験で使用した操作リモコンは、実際の重機操作レバーとは形状や操作感が異なったため、オペレータの操作感覚の不慣れさも要因となったと考える。

4. おわりに

トンネル工事における切羽作業の無人化施工への取り組みとして、こそく・あたり取り作業の遠隔操作について試験を行った。実際の切羽面に対する試験ではないものの、本試験では、トンネル内における限られたエリアであたり取り作業を模擬した遠隔操作試験を実施し、以下の知見を

得た。

- ①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、あたり取り作業の基本的な動作は遠隔操作で行うことは可能である。
- ②カメラ映像を見ながらの重機操作は、対象物との距離感が得にくく、視認性が劣り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。また、リモコン式のレバー操作は、オペレータの慣れ等が必要である。
- ③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の確保や正確な距離感が得られるセンシング技術や補助的なカメラ等の導入が必要と考えられる。

- ④操作性の向上のためには、コックピット型操縦席の採用やオペレータがコックピットと作業箇所間での音声通話などができる設備、重機周囲の安全確認設備、コックピットにおける安全装置の整備など、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。