

鋼製支保工建込ロボット ROBOARCH による 切羽作業の遠隔化

宮 原 宏 史

山岳トンネル建設工事における切羽からの肌落ちは、死傷災害の原因ともなりうる山岳トンネルに特有の災害である。その防止のため「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」が2016年12月26日に発出され、2024年まで数度の改正がなされているが、残念ながらいまだ災害の発生は続いている。

そこで、リスクアセスメントの観点から最も有効な対策である切羽への立入禁止措置を、最も危険な作業である支保工建込において実現すべく開発された「鋼製支保工建込ロボット ROBOARCH (ロボアーチ)」を開発し現場導入を行った。その結果、切羽への立入人数ゼロを実現し、標準的な施工と比較し22分の時間低減効果を確認した。

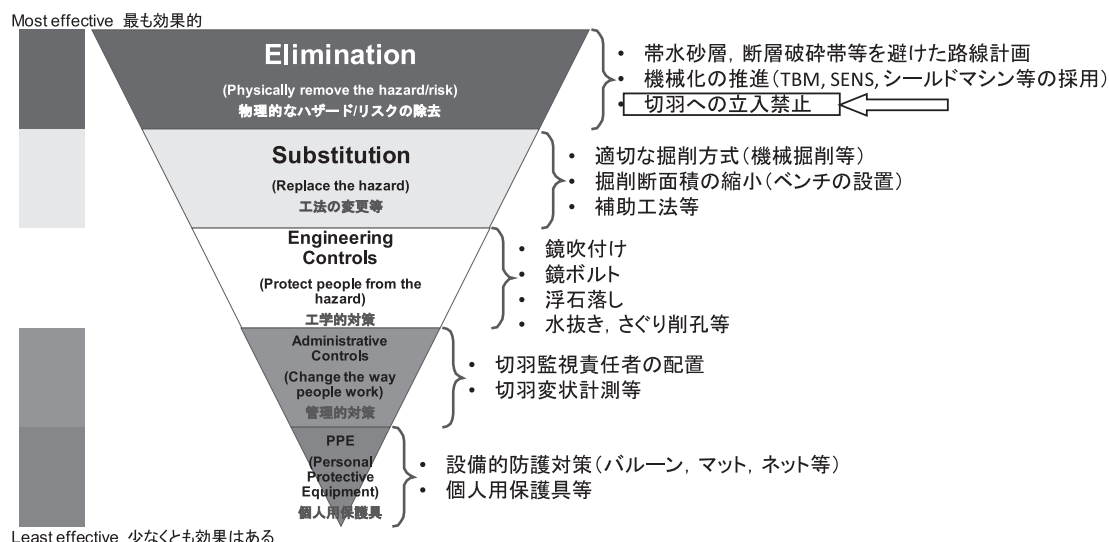
キーワード：安全、肌落ち災害、肌落ちガイドライン、鋼製支保工、エレクター一体型吹付ロボット

1. はじめに

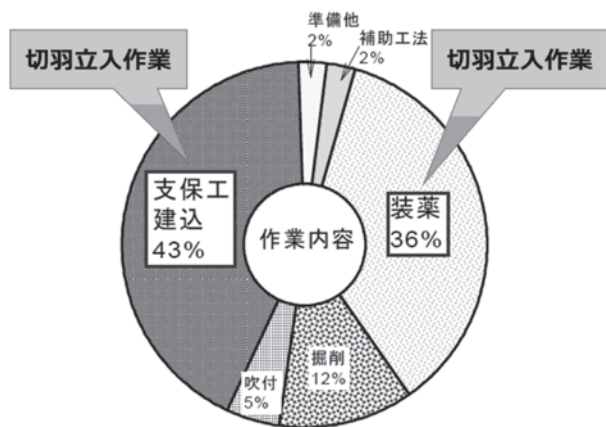
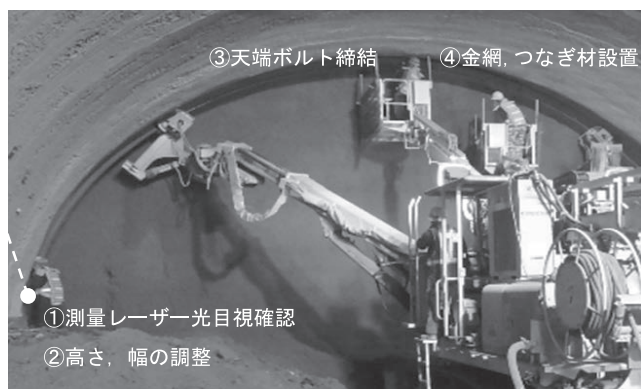
山岳トンネル建設工事における切羽からの肌落ちは、死傷災害の原因ともなりうる山岳トンネルに特有の災害である¹⁾。様々な関係機関の尽力により2016年12月26日に発出された「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」(以下GL)は、2024年まで数度の改正が行われ施工環境はより安全側に変化し、切羽監視責任者の専任や鏡吹付けの実施が広く行われるようになった。しかしながら2025年現在においても肌落ち災害事例の報告は続

いており、さらなる対策が求められている。

ここで山岳トンネル工事における各種対策を災害リスクアセスメントの考え方に当てはめた例を図一²⁾に示す。このうち施工時に取ることが可能な最も効果的な対策は「切羽への立入禁止」であり、さらにトンネルにおける労働災害に関する分析結果³⁾(図一2)によると、災害が最も多い作業は「支保工建込」であることがわかる。一方で標準的な設計および施工方法⁴⁾に基づいた支保工建込作業状況(上半)をみると(図一3)、主に①測量レーザー光目視確認、②高さ、幅の調整、③天端ボルト締結、④金網、つなぎ材の設置



図一 肌落ち災害防止対策の優先順位²⁾

図一2 トンネルにおける労働災害に関する分析結果³⁾図一3 標準的な設計、施工方法⁴⁾に基づいた支保工建込作業状況（上半）

時は切羽直下に作業員が侵入せざるを得ず、災害防止のためには切羽監視責任者と熟練作業員の経験と勘に頼らざるを得ない状況であった。

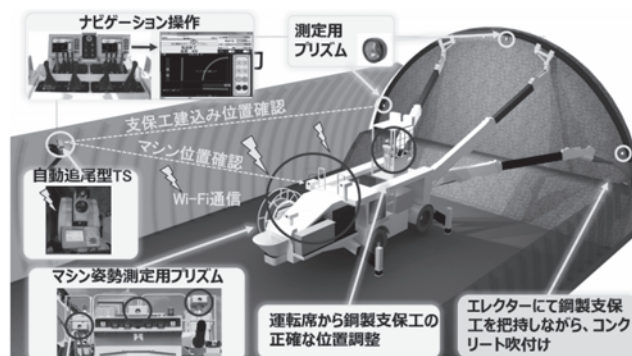
そこで①～④の作業を切羽へ侵入することなく行うことを実現すべく、古河ロックドリル製エレクター一体型吹付ロボット（MTH1220型）をベースに「鋼製支保工建込ロボット ROBOARCH（ロボアーチ）」（NETIS登録番号 KT-230301-A）を開発し現場導入を行った。本稿が肌落ち災害減少の一助となれば幸いである。

2. 開発技術の説明

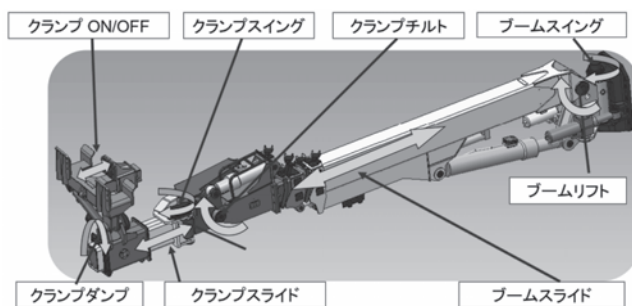
図一4に開発技術の全体イメージを示す。支保工建込作業（上半）における切羽への立入禁止を実現するためには、測量方法、エレクター一体型吹付ロボット、支保部材、作業手順についての開発が必要であった。以下詳細に説明する。

(1) 自動追尾式トータルステーションと高性能エレクター一体型吹付ロボットの連動

主に①測量レーザー光目視確認、②高さ、幅の調整



図一4 開発技術による支保工建込状況



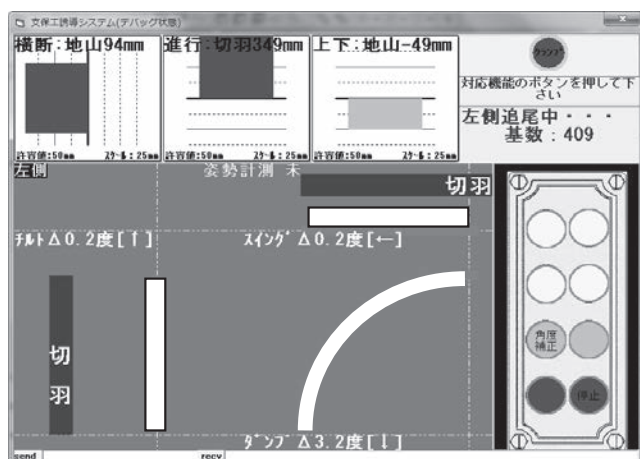
図一5 ブーム各関節とセンサー



図一6 マグネット基台付きプリズム

作業を遠隔化するために、坑内に設置された自動追尾式トータルステーション（以下 TS）と、マシン位置姿勢計測プリズムおよびブーム各関節に角度、伸縮センサーが内蔵（図一5）され、微小動作モードを備えた高性能エレクター一体型吹付ロボット（以下ロボット）を連動制御する手法を採用した。

まず、TSによりマシン位置姿勢計測プリズムが計測され、ロボットの位置と姿勢が計測される。その後 TSは支保工の所定位置に取り付けられたマグネット基台付きプリズム（図一6）の自動追尾を開始し、プリズム座標値を基に建込む支保工と設計値との差をリ



図一七 運転席表示画面

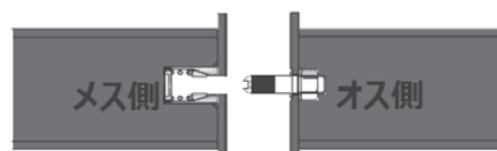


図一八 プリズム回収用ウインチとワイヤー

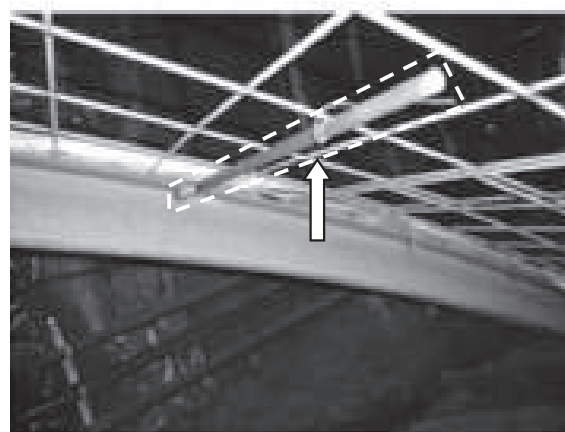
アルタイムに運転席モニター（図一七）に表示する。さらにロボット姿勢とブームセンサー値を合成し、支保工とトンネル設計値との角度差もリアルタイム算出、表示され、作業員は切羽に侵入することなく支保工の高さ、幅、傾きの数値確認が可能となり、微小動作モードにより位置調整が素早く行える。マグネット基台付きプリズムは支保工キャッチ部に備えられたウインチとワイヤー（図一八）により吹付開始前に自動回収が可能となっている。

(2) 自動建込用鋼製支保工

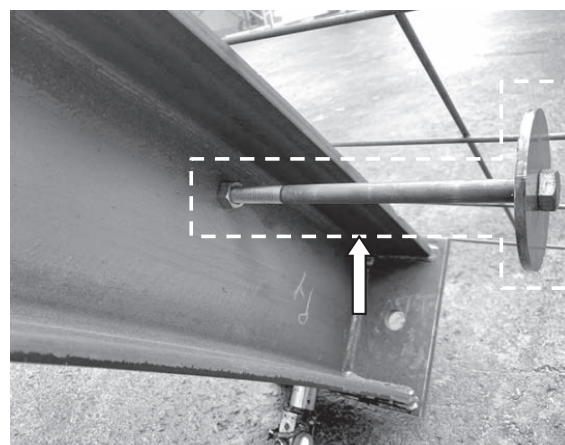
さらに③天端ボルト締結、④金網、つなぎ材設置を遠隔化するために自動建込用鋼製支保工を開発した。天端部にはクイックジョイント（図一九）を備え、作業員によるボルトナット締結作業を省略することができる。また金網をロボットの後方駐機中に支保工に一体化することを可能にするため、金網のたわみ防止材を備えている（図一十）。さらにH鋼ウェブ部から坑口方向に延びる頭付きアンカー（図一十一）を片側3～5本（支保工サイズにより異なる）備え、坑口側の既設支保工と締結することなく吹付コンクリート内に



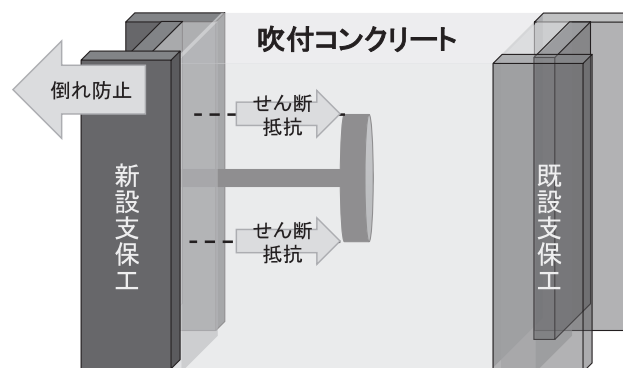
図一九 天端部クイックジョイント



図一十 金網たわみ防止材



図一十一 頭付きアンカー



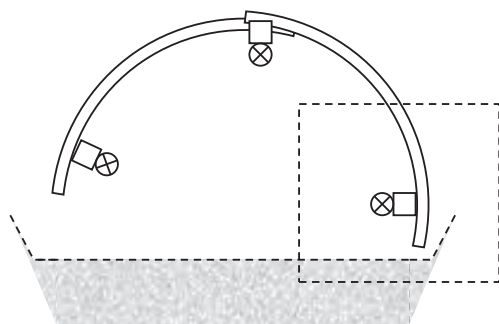
図一十二 頭付きアンカーによる倒れ防止状況

呑ませる（図一十二）ことにより支保工の倒れ防止を実現している。

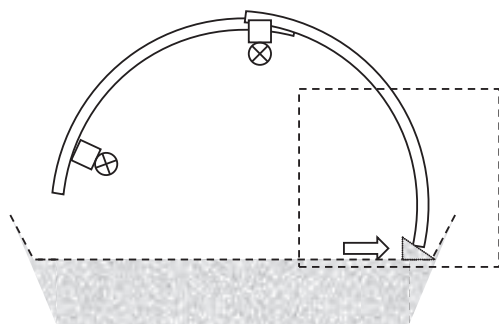
(3) 作業手順

切羽への立入禁止を実現するために、作業手順についても開発が必要であった。様々な試行錯誤を経て、下記手順を採用した。カッコ内の所要時間は導入現場における平均的な数値（CⅡパターン 60 m² クラス）である。標準的な手順との大きな相違点は天端締結前に根足の位置を決め、皿板（支保工の高さ調整のためのスペーサー）に代わり吹付コンクリートを吹き込むという点である。

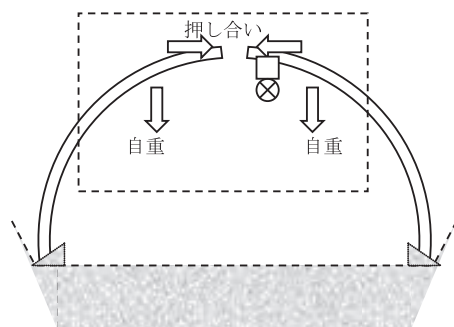
- (a) 右側の根足位置を画面表示に従い調整する（所要時間 1 分 30 秒）（図—13）。
- (b) 根足位置確定の後にプリズムをウインチで回収し、皿板の代わりに支保工重量を吹付コンクリートで支えるために右根足部分に吹付コンクリートを吹き込み支保工根足部を支える（図—14）。



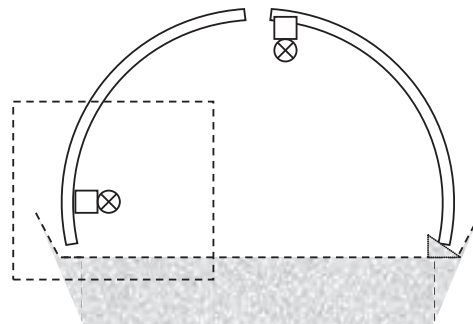
図—13 右根足調整



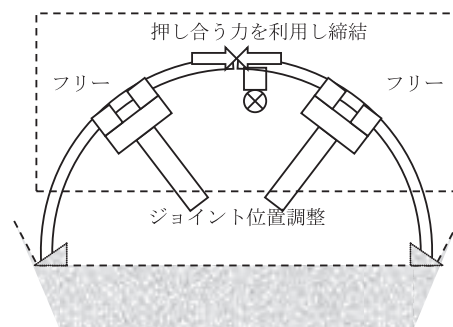
図—14 右根足吹付



図—15 左根足調整

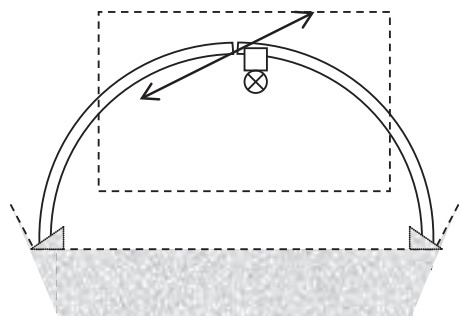


図—16 左根足吹付



図—17 締結

- (c) 右根足吹付中に左根足位置を画面表示に従い調整する（所要時間 4 分 30 秒）（図—15）。
- (d) 右根足と同様に左根足部分を吹付コンクリートで支える（図—16）。
- (e) 左根足吹付が完了間近になると、天端締結を開始する。天端締結はエレクターブームで左右から押し込むというより、根足部で支えられた支保工が自重でジョイントを押し込んで締結しているイメージである。このとき、エレクターブームの支保工クランプはフリーであり、支保工の動きをガイドする役目を果たしている（所要時間 6 分 20 秒）（図—17）。
- (f) 締結後は、天端の進行方向調整を行い、プリズムを外した後にアーチ部吹付を開始する（所要時間 7 分 50 秒）（図—18）。



図—18 進行調整

※注意：つなぎ材は存在しないため，エレクトラブームで把持を続け，吹付で自立可能な状況までブーム運転席にオペがいる必要がある。

3. 効果

開発技術を複数のトンネル工事現場に適用した結果，以下の結果を得た。

(1) 安全性向上

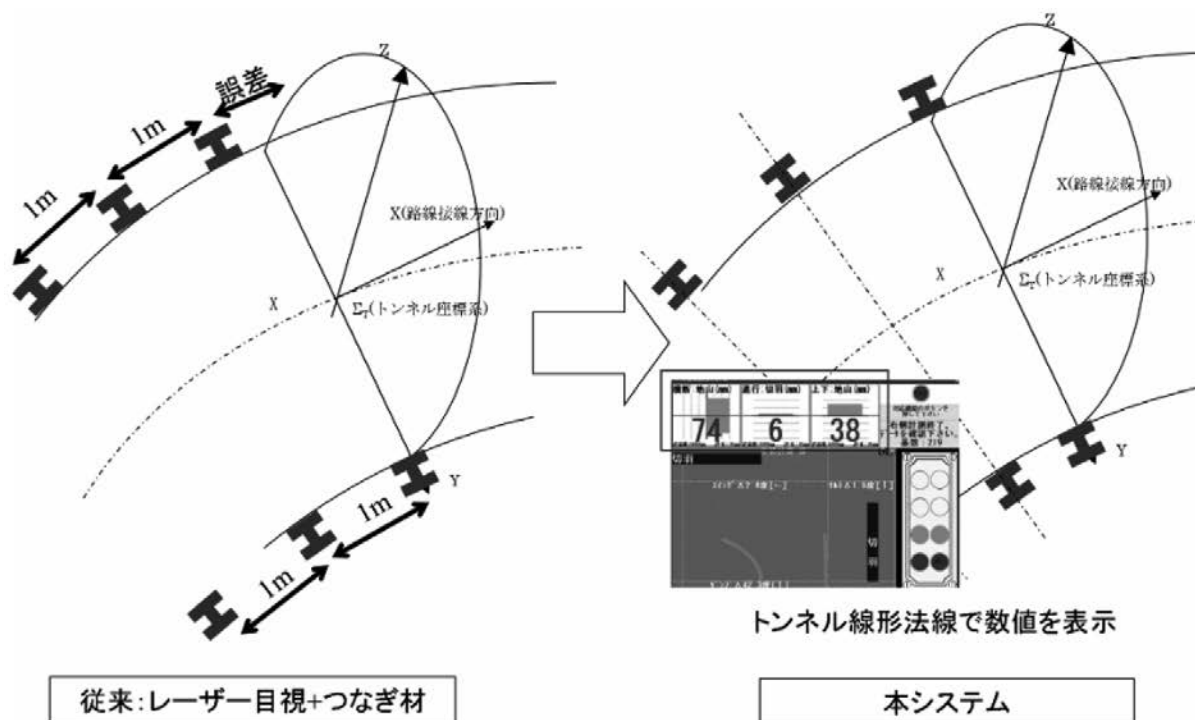
作業員は、「開発技術を使用したほうが安全である」と評価しており，実験，試験施工という認識はなく従来手法に代わり施工を行っている。GL 記載の「切羽における作業はできる限り機械等で行うようにし，既に一般化している浮石落しの機械化や機械掘削の採用にとどまらず，例えば，装薬作業の遠隔化，支保工建込み作業等の完全な機械化等を積極的に進めること。」に照らすと，上半支保工の施工に際し，一切切羽に立ち入らず施工が可能であり，現場の標準的な施工方法として採用できる技術である。

(2) 生産性向上

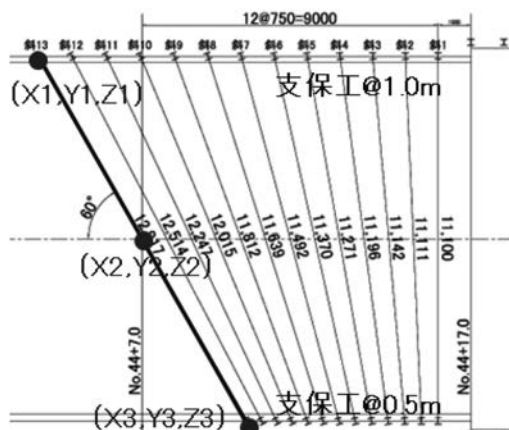
CII パターンにおける標準的な施工時間で，一次吹き完了から二次吹き開始までが7分50秒で完了しており，CII 発破掘削標準サイクル⁵⁾30分（支保工準備10分，建込20分）と比較し約22分/基の低減効果が見込まれ，国土交通省が進める i-Construction による生産性向上の観点から見た効果も備えている。

(3) 支保工建て込み精度の向上

つなぎ材を用いることなく進行，幅，高さ全てを座標管理することの効果として，図—19に示すような，曲線部に見られるトンネルの歩み誤差に起因する支保工位置ずれが解消された。座標管理の効果は斜坑門における支保工建込みににおいてより顕著な効果を発揮⁶⁾するが，地山の無い空間に設置されるため倒れ防止にはつなぎ材の設置が必要となる（図—20，21）。



図—19 トンネルの歩み誤差に起因する支保工位置ずれの解消効果



図—20 斜坑門における支保工設置位置



図—21 開発技術による斜坑門施工状況

4. 課題

拡幅断面に開発技術を適用する場合、TSを拡幅側根足マグネット基台付きプリズムの視通がとれる位置に設置する必要がある、測量作業が増大する。また下半支保工の設置に関しては①クイックジョイントを重力に反する方向に差し込むことの困難性、②肌落ち発生時の落石が持つ位置エネルギーが上半と比較し低いこと、により導入が見送られているが、今後の開発課題として取り組む所存である。

5. おわりに

以上、「鋼製支保工建込ロボット ROBOARCH（ロボアーチ）」を開発、導入した結果、以下の知見を得た。

- (1) 支保工建込み作業（上半）において、切羽への侵入人数をゼロにすることを実現した。
- (2) 開発技術によりCⅡ発破掘削、60 m²クラス断面において、22分/基の時間低減効果を確認した。
- (3) 拡幅断面、下半等の施工への適用には更なる開発が必要である。

謝 辞

共同開発者である古河ロックドリル(株)の各位には様々な機器開発のご協力を頂いた。また専用支保工の開発に当たっては(株)マシノの各位よりご協力を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表するとともに、厚く御礼申し上げる次第である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 菊池二二年, 横山英樹, 石田誠一, 吉川直孝, 三浦正博, 西田進, 木部哲実, 武田正実, 岩下秀伸, 森崎達之助, 池田康浩: トンネル工事における肌落ち労働災害防止のハンドブックその2, (一社)日本トンネル専門工事業協会, 2012.
- 2) 吉川直孝, 大幡勝利, 平岡伸隆, 濱島京子, 清水尚憲, 豊澤康男: トンネル建設工事における設計段階からの安全衛生対策の検討, 「労働安全衛生研究」, Vol. 13, No. 1, pp. 79-84, 2020.
- 3) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 玉手聡, 豊澤康男: トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安定対策の検討, 土木学会論文集 F6, Vol. 67, No. 2, pp. I_125-I_130, 2011.
- 4) (公社)土木学会編: 2016年制定 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, (公社)土木学会, 2016.
- 5) 国土交通省: 土木工事積算基準, 建設物価調査会, 2007.
- 6) 賀川昌純, 五對将之, 水谷和彦, 高原克己: 偏圧地形坑口の斜め支保工を切羽無人化建込みロボットで施工—県道吉間田滝根線広瀬1号トンネル工事—, トンネルと地下, Vol. 51, No. 4, 土木工学社, pp. 57-66, 2020.4

【筆者紹介】

宮原 宏史 (みやはら ひろふみ)
マック(株)
代表取締役

