

山岳トンネル施工統合システム OTISM の開発

森野 弘之・木梨 秀雄・西浦 秀明

山岳トンネル工事では、熟練技能者の経験と知識に依存した施工方法や苦渋作業、切羽近傍作業での肌落ち災害などのリスクが大きな課題となっている。そのため ICT を駆使した DX を推進し、遠隔化・自動化・省力化の技術開発が盛んに行われている。このような背景のもと、著者らは山岳トンネルの安全・品質・生産性を飛躍的に向上させる施工統合システム OTISM を開発中である。本システムは、掘削時切羽作業の遠隔・自動化施工技術、覆工の自動化施工技術、計測・解析による意思決定の合理化技術の3分野で構成される。本報文ではこれらのうち、掘削および覆工関連の技術について紹介する。

キーワード：山岳トンネル，DX，遠隔化，自動化，省人化，省力化

1. はじめに

近年、我が国ではさらなる人口減少が予測されるなか、インフラの整備・維持管理を将来にわたり担う技術者や熟練技能者の不足が懸念されており、ICT を適用した施工の生産性向上が不可欠となっている。国交省は2024年4月に i-Construction 2.0 を策定し、2040年度までに建設現場の省人化を最低3割目指して施工の自動化を推進すると発表した¹⁾。山岳トンネル工事においては、熟練技能者の経験と知識に依存した施工方法や苦渋作業、および切羽近傍作業での肌落ち災害などのリスクが大きな課題となっている。しかし、山岳トンネルの切羽には、掘削作業のためリスクを許容しながら人が立ち入らざるを得ない状況がある。このため、2016年には厚生労働省²⁾が肌落ち防止対策に関するガイドラインを策定して、真に必要な場合以外は切羽への立ち入りを原則禁止し、立ち入る場合の肌落ち防止計画の作成や切羽監視責任者の選任などを推奨した。さらに、2024年3月にはこのガイドラインが改正され³⁾、鏡吹付けの原則実施や、切羽天端から45度以内を可能な限り立ち入りを避ける範囲とする等の内容を追加している。一方、覆工の施工に関しても種々の条件下での品質の確保をはじめ、狭隘な空間での苦渋作業、および省人化といった課題を解決すべく、自動化施工などに関する新技術の開発が盛んに行われている。

このように、建設業界や山岳トンネル分野においては、切羽での無人化施工や、覆工作業の自動化を推進

しようという機運が高まりつつある。

以上のような情勢のもと、著者らは山岳トンネル工事の安全と品質、生産性を飛躍的に向上させる施工統合システム「OTISM (オーティズム)」(以下、本システムと記す)の開発に取り組んでいる。本システムはトンネル掘削、覆工、計測・評価の3つの分野で構成され、ICT を組み合わせた遠隔・自動化技術を鋭意開発中である。これら3つの分野は、図-1に示すように、掘削時切羽作業の遠隔・自動化施工技術、覆工作業の自動化施工技術、および計測・解析等により施工の意思決定を合理化する技術の3分野で構成さ



図-1 山岳トンネル施工統合システム

れる。本稿ではこれらのうち掘削および覆工に関する構成技術について紹介する。

2. 火薬の自動装填・結線システム

本システムはドリルジャンボや高所作業車などの移動式大型機械の先端に、火薬装填ロボットと結線ロボットを搭載し、力触覚をリアルタイムに伝送するリアルハプティクス技術を用いて、火薬装填・結線作業の遠隔化および自動・自律化をするものである。紙巻含水爆薬、粒状爆薬、バルクエマルジョン爆薬などのあらゆる爆薬を対象としている。

リアルハプティクスとは、遠隔操作装置と作業装置間で、接触情報を双方向に伝送し、力触覚を再現する技術で、この技術により人間が行う柔軟で適度な強さの動作の記録、編集、再現、拡張/縮小が実現する。

火薬装填作業は鋭敏な火薬を扱うことから、作業を遠隔化する場合、人と同様の力加減や触覚を切羽のロボットとオペレータの相互間で伝達することが不可欠である。リアルハプティクス技術を適用することで、あたかも切羽で作業しているかのように遠隔での装填作業ができる。

また、リアルハプティクス技術は作業を記憶、学習する。そして記憶した作業の再現だけでなく、形状の変化にも追従して作業を行うことができる。例えば六角形のボルトを締め付ける作業を記憶させたときに、ネジの形状が三角形や四角形に変わった場合でも繰り返し作業を行うことができる。この機能を付加することで切羽や装薬孔などの均一ではない形状に対して、孔の角度の調整や孔荒れにも対応でき、装薬作業の自動・自律化が可能になる。

図-2に示すように、ドリルジャンボなどの大型機械で、装薬孔の近くまで装填ロボットを移動し、そこからはオペレータがカメラ映像とリアルハプティクス技術を使用し、装填ロボット先端を孔に挿入し、親ダイ、増しダイ、込め物を押し込む。写真-1に示すように、操作するオペレータは、装填ロボットから操作装置に伝送された切羽への接触や火薬を押し込ん



写真-1 装填ロボット

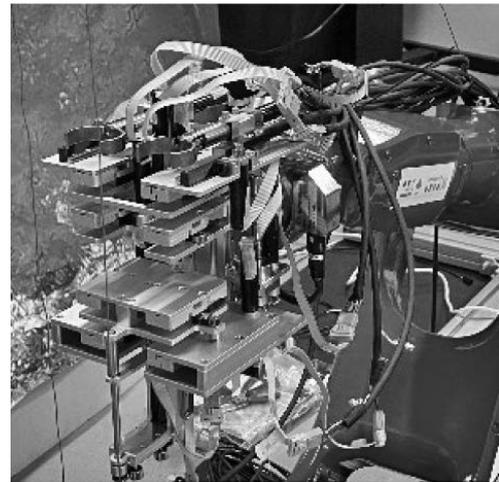


写真-2 結線ロボット

でいるときの接触情報を感じながら適切な力加減で作業が行える。これらの作業を記憶し、プログラムすることで自動や自律操作を可能にする。

つぎに、結線システムは、装填システムと同様に移動式大型機械に写真-2に示すような結線ロボットを搭載する。結線ロボットには脚線をつかむためのフック形状を設け、脚線をつかむ際にはリアルハプティクス技術を適用し、切羽との接触を判断する。脚線をつかんで引っ張り、被覆を剥ぎ、捻って結線し、端部の切断までを自動で行うシステムとする。

これらのシステムにより切羽に立ち入らない装薬・結線が可能となる。

3. 遠隔支保建込み・吹付けシステム

本章では、支保工建込み・吹付けコンクリートの遠隔化と自動化に向けて開発した3つの技術を紹介する。

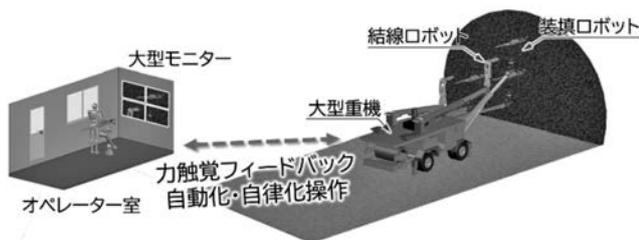


図-2 自動装填・結線システムの概要



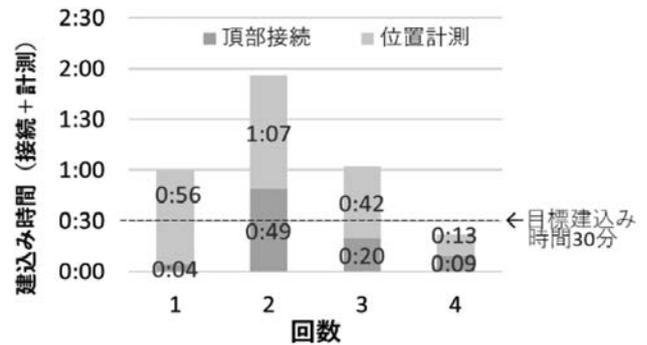
図一三 遠隔支保工建込み技術

(1) 遠隔支保工建込み技術

クイックエレクター（以下、本技術と記す）は、切羽直下に作業員が立ち入ることなく遠隔操作で鋼製支保工を建込む技術で、図一三に示すように、4本の専用エレクター、鋼製支保工を計画建込み位置まで誘導するガイダンスシステム、頂部の接続を遠隔で行うためのワンタッチジョイントで構成される。各システムは、汎用性を高めるため、メーカーを問わず既存のエレクター付き吹付け機に後付けが可能である。

4本の専用エレクターは、ブームに取り付けられた2本のメインエレクターと2本のサブエレクターで構成される。メインエレクターは上半鋼製支保工を把持し建て込む。エレクターの可動部で、支保工頂部の接続や建込み位置の微調整を可能にした。サブエレクターは鋼製支保工脚部を把持し、地面にサポートジャッキで支持することで、ブーム自体のたわみおよび吹付け時に発生する振動を抑制する。サブエレクターで把持した状態で、鋼製支保工脚部への吹付けが可能である。ガイダンスシステムは、モーションキャプチャーの技術を応用し支保工を計画建込み位置へ誘導する技術である。吹付け機本体に取り付けた赤外線4眼カメラにより、鋼製支保工に取り付けたマーカーの位置をカメラの視差角から計測する。ワンタッチジョイントは、抜け止め機構が付いたピンと孔で構成されており、ピンを孔に差し込むだけで接続が完了し、遠隔施工が可能である。

磐越道宝珠山トンネルにおいて、本技術の実証を行った。図一四に示すように4か所で試行した結果、当初は脚部掘削量不足で再掘削したことや、位置計測時の通信エラーの発生等により30分以上を要したが、最終的には目標とした積算サイクルタイム30分未満の22分で完了できた。建込み精度に関しては、ガイダンスシステムとトータルステーションによる鋼製支保工の計測座標値を比較した結果、両者の差の平



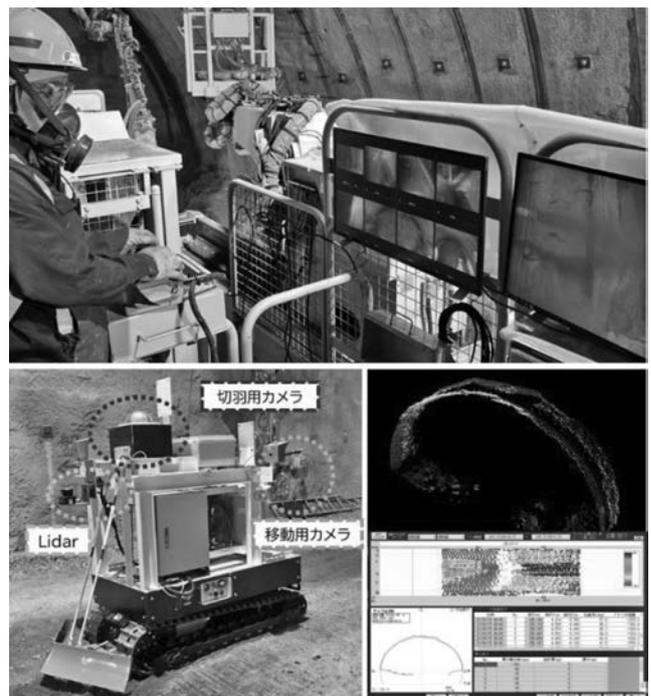
図一四 鋼製支保工建込みの施工時間の比較

均値は54 mmであった。切羽直下に作業員が立ち入ることなく、作業人員は5名から2名に削減できる。

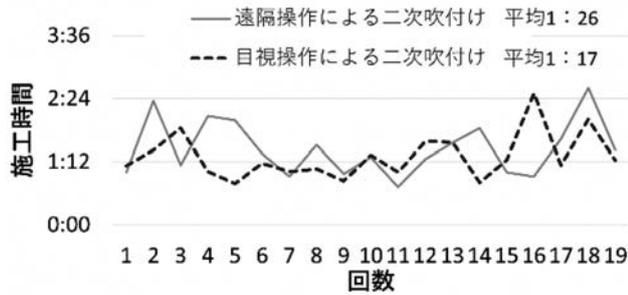
(2) 出来形・監視 UGV を用いた遠隔吹付けシステム

出来形・監視 UGV は、遠隔で吹付けコンクリートを施工する作業員の目の代わりを担う。図一五のように、不整地や狭隘な場所でも走行可能なクローラ式台車に画角調整可能なカメラを搭載し、無遅延の映像を遠隔地に伝送する。鏡面や支保工建込部の全方位を確認するカメラの他、移動時に周囲の状況を確認するカメラを複数台搭載する。UGV の前面部分に取り付けた Lidar で、切羽直近にて無人で掘削出来形や吹付けの仕上がりを随時計測し、図一五のように吹付けコンクリート厚さの過不足を吹付け作業中に判断できる。

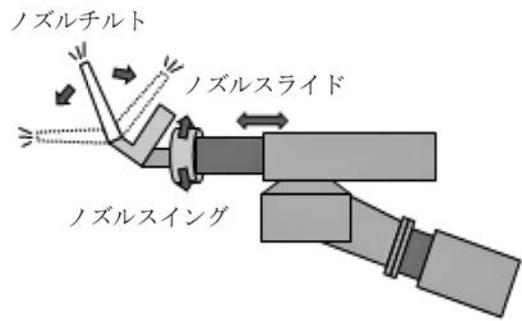
本システムを磐越道宝珠山トンネル工事で適用し、



図一五 遠隔吹付けシステムと出来形・監視 UGV



図一六 二次吹付けの施工時間の比較



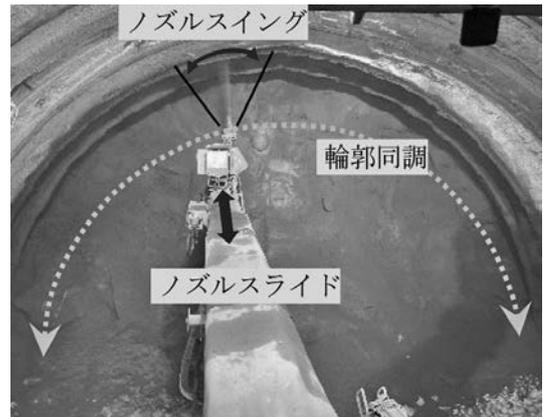
図一八 オートノズルの概要

切羽直下に配置した出来形・監視 UGV により、オペレータは切羽に入ることなく、遠隔場所でモニター画像を見ながら円滑な吹付けを実施できた。二次吹付けの作業時間は、図一六のように目視操作と遠隔操作での両者には大差がなく、同等であった。二次吹付け後の凹凸形状をレーザースキャナで計測した結果、目視操作と遠隔操作での差はなく、平滑度 (D/L, D:凹凸深さ, L:幅 400 mm) は、覆工コンクリートのひび割れ発生に影響を与えない範囲 (1/6 未満) であった。

(3) 輪郭同調システムによる自動吹付け

輪郭同調システムは、図一七に示すように側壁・天端を吹付ける際に、ブーム左右操作のみで起伏・伸縮動作を自動的にを行い、トンネルアーチからノズル先端までの距離を自動的に一定に保持する技術である。動作開始前に、支保工継ぎ目部にノズル先端をセットすることで、吹付機本体据付位置を認識できる。また、ノズル動作の三要素、チルト・スイング・スライドは、図一八に示すオートノズルにより設定した一定間隔で往復運動させて自動で吹き付けるシステムとした。これら二つのシステムによって、一連の吹付作業をブームの左右操作とノズルのスタート操作のみで実施することを可能とした。

磐越道宝珠山トンネルにおいて、本システムを用い

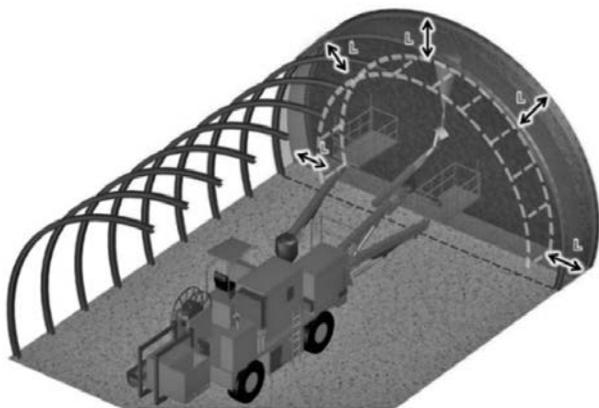


図一九 輪郭同調+オートノズル吹付け試験結果の比較

た実証実験を行った。この現場では、吹付機と急結剤台車が並列配置での施工となるため、吹付機が中央から 3 m 程度側壁側に寄っていたが、初期設定で正しく位置を認識し、図一九に示すような一定の離隔距離を保ちながら輪郭軌跡を描くことを確認した。ノズルと吹付面の離隔距離を 1, 1.5, 2 m で比較したところ 1.5 m の場合が最もリバウンド率が低くなった。また、ノズルの離隔距離を 1.5 m に固定して熟練作業員による吹付け結果と比較してみたところ、リバウンド率はおおよそ同等程度となり、仕上り面の平滑性も遜色なかった。以上の結果から、輪郭同調およびオートノズルの両システムにより、出来形・生産性ともに熟練作業員と同等の施工が見込めることが確認できた。今後、さらなる検討・検証を行い、早期に吹付けの完全な自動化を目指す。

4. ロックボルト遠隔打設システム

従来のロックボルト打設作業は、削孔騒音のなかでドリルジャンボの作業用バスケット上において人力で行っている。長尺のモルタルホースや重量物であるロックボルトを取り扱うことは、身体への負担が大きく、トンネル掘削サイクルで最も苦渋な作業となっている。また、切羽直下での作業のため、肌落ち災害の



図一七 輪郭同調吹付けシステム

リスクや重機による挟まれ災害もしばしば発生している。これらの課題を解決するため、ロックボルト遠隔打設専用機「ロボルタス[®]」(以下、本打設機と記す)を開発した。本打設機は、図-10に示すように、左右2本のガイドセルに2基のマガジンを搭載し、把持機能付のハンドリングアームおよびドリルヘッドで構成されている。ガイドセル下部にスライドテーブルを備え、奥行き方向の位置合わせが容易に可能である。2基のマガジンには削孔用ロッドと注入用ロッド、ロックボルト材料を搭載し、ロックボルトは最大20本収納可能である。

本打設機の特長は以下のとおりである。

(a) 作業員が切羽に立ち入らずに施工

1つのブームで削孔・モルタル注入・ロックボルト挿入の一連作業を遠隔で行うことが可能である。作業員が人力で行う作業はなく、タブレット端末でガイドセルを操作するため、切羽に立ち入る作業をなくし、切羽災害を排除した。

(b) 容易な操作性と機械化による品質確保

タブレットに表示された工程ボタンをタップすることで、削孔からロックボルト挿入までの作業を操作し、マガジンの回転や把持機構の開閉も自動制御できる。これにより未経験者でも熟練技能者と遜色ない品質と施工スピードの作業が可能となる。モルタル注入も地山に確実に付着するように注入位置や量を制御し、一定の品質が確保できる。

(c) 種々のロックボルト長に対応

ロックボルト長の適用範囲は3m, 4m, 6mで、ボルトの種類も各種条件を設定できる。



図-10 本打設機の概要

(d) 独自の削岩機構と機械構成

削岩機のドリルヘッドは、バックハンマー機構を有しており、ジャミング時の引抜作業を皿バネがアシストする機能を備えているため、軟質な地質に向いている。なお、本打設機は従来のドリルジャンボに搭載可能であり、ジャンボのメーカーを問わない。

5. セントル自動セット、覆工自動打設システム

トンネル覆工作業は「セントル(移動式型枠)セット→妻板設置→コンクリート打設→妻板解体→脱型→セントル移動・ケレン」をくり返し進めていく。このうち、コンクリート打設作業に関する機械化・省人化については進展しているが、セントルセットを含めたほかの作業についても機械化や自動化による省人化を図り、覆工作業の人員編成を検討することが重要である。本章では覆工作業の自動化施工技術のうち、セントルセットと覆工コンクリート打設の自動化に関する2つの技術を紹介する。

(1) セントル自動セットシステム

セントル自動セットシステムとは、セントルに各種のセンシング機器や測量器を設置し、セントル部材の位置や傾斜を高精度に計測し、コンピューター(PC)により、所定の位置までの移動量や油圧ジャッキの伸縮量を演算し、駆動制御するシステムである。図-11に概要を示す。

あらかじめPCにトンネル線形や測量座標、セントルの配置計画情報等を入力しておく。セントルセット開始時にはタッチパネル式のモニターを操作するだけで、所定の位置に移動し、天端フォーム・サイドフォームそれぞれのジャッキを伸ばして、自動でセントルを据付け可能である。また、各ステップにおいて各計器の計測値をチェックする機能を設けており、許容値を超えた場合には自動でフィードバックを行い、誤差を修正するシステムである。安全機能については、既設コンクリートとの接触にはリミットセンサーによる危険検出型のインターロックシステムを備えている。また、非常停止ボタンも備えているのでボタンを押すことで停止させることも可能である。

監視・計測・操作・調整を各種のセンシング技術で代替することで、2~3名での作業が可能となり、セット作業に要した時間も従来の90分程度から30分程度と大幅に改善され、生産性向上に大きく寄与する。また、目視や巻き尺ではなくセンシング技術による精密な計測に基づく制御を行うことにより、高い精度での

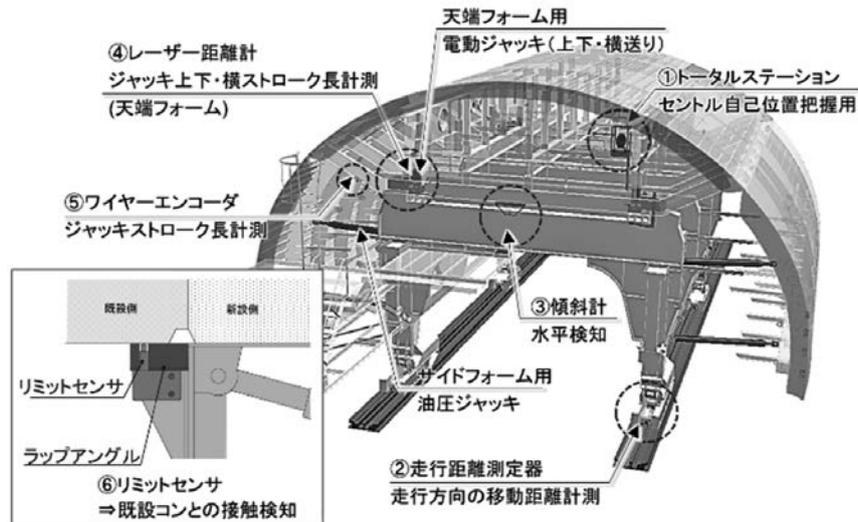


図-11 センترل自動セットシステム概要

センترلセットが可能となるとともにヒューマンエラーによる不具合も防止し、品質確保にも貢献する。本技術は全て後付け可能な装置で構成されており、センترلメーカーを問わず広く適用可能である。

(2) 覆工コンクリートホース伸縮式連続打設システム

ホース伸縮式連続打設システムは、センترل天端フォームの打設口から左右それぞれに1本のホースを脚部まで伸ばし、コンクリートの打上がり高さに合わせてホースを引き上げるシステムである。図-12にシステムの概要と全景を示す。

ホースの引上げ機構は、門型移動架台（ガントリ）上部に配置した移動台がホースを抱えてトンネル軸方向へスライドする。スライドベースの操作（ホースの引上げ・挿入）は付属のコントローラーにより自在に調節できる。またセンترلにセンサを設置し、打ちあがり高さに合わせてホースの引き上げを自動で行うことも可能である。コンクリートが天端部へ達した時点で吹上口へ切り替え、以降は従来の覆工打設と同様の方法で打設を完了する。

本システムで最小限の落下高さでの打ち込みが可能となり、材料分離や余剰空気を巻き込むリスクを低減できる。また、従来の配管切替式からホースの連続引き上げ式にすることで、配管の切替作業（20分×6箇所程度）をなくし、苦渋作業を改善するとともにコールドジョイント発生リスクも低減する。品質に影響もなく、見映えも良好である。

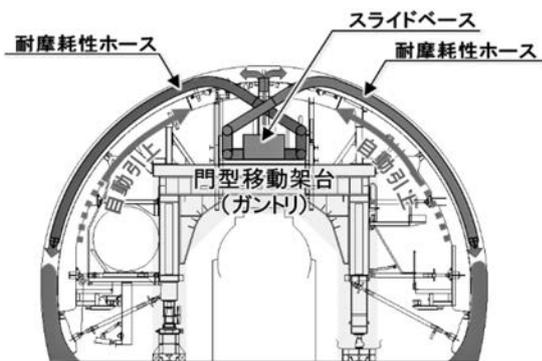


図-12 ホース伸縮式連続打設システムの概要および全景

6. おわりに

本稿では、山岳トンネルの切羽での各掘削作業を無人化する技術、および覆工の自動化施工について紹介した。覆工の自動化施工システムはまもなく実証を完了し実装段階に達し、近い将来に省力化と省人化が実現する見込みである。また、掘削の遠隔化技術に関しては現場実証～実装の段階にあり、詳細部分の課題修正を実施しているところである。とくに遠隔装薬・結線に関しては、他の作業に比べて難関であり課題も多いが、リアルハプティクス技術を駆使することで、切羽では完全な無人化施工が可能となり、さらに自動化・自律化に向けた開発を進めている。今後、掘削に係わる全サイクルにおいても切羽直下の作業を完全に無人

化し、早期に切羽での災害ゼロの達成および省人化を目指して引き続き技術開発を進める所存である。

謝 辞

共同開発者の慶應義塾大学 野崎准教授，マルマテクニカ(株)，鉦研工業(株)，北陸鋼産(株)のご尽力に対しここに記して感謝の意を表す。



《参考文献》

- 1) i-Construction2.0：国土交通省，<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 2) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち防止対策に係わるガイドライン，2016.12.26
- 3) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち防止対策に係わるガイドラインの改正について，2024.3.26

【筆者紹介】

森野 弘之 (もりの ひろゆき)
 (株)大林組
 東日本ロボティクスセンター運用管理部
 部長



木梨 秀雄 (きなし ひでお)
 (株)大林組
 生産技術本部 トンネル技術部
 上級主席技師



西浦 秀明 (にしうら ひであき)
 (株)大林組
 生産技術本部 トンネル技術部
 上級主席技師

