

山岳トンネル支保工建込みの自動化

前田建設工業株式会社	東北支店	正会員	○賀川	昌純
同 上		正会員	五対	将之
同 上		正会員	江頭	遼一
同 上	本店 土木事業本部	正会員	水谷	和彦

1. はじめに

山岳トンネル工事は、狭あいな作業空間や照度の低い作業場所における重機械と人との接触災害などの危険のほか、切羽からの肌落ちや天端崩落、土平崩壊などの危険が常に隣り合わせにある作業環境であり、統計では山岳トンネル工事における災害発生場所の約9割は切羽作業中とされている。また、切羽作業のうち、とくに切羽直下に、直接、坑内作業員が立ち入らなければならない作業となる装薬作業や鋼アーチ支保工（以下、支保工と略す）建込み作業中の災害が7割以上を占めている（図-1, 2）^{※1)}。

肌落ちや天端崩落を伴った災害が発生した場合には、災害の重篤度が非常に高く、最悪の場合には重大災害につながる事となる。

このような統計から確認された山岳トンネル工事における災害発生状況をふまえ、厚生労働省は平成30年1月に『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、ガイドラインと略す）^{※2)}を改訂し、一次吹付け、鏡吹付けを確実に実施すること、切羽作業中は切羽監視責任者を専任配置することのほか、装薬作業の遠隔化や支保工建込み作業の機械化などを積極的に進めるよう義務付けた。

当社では、切羽直下で行われる作業のうち、災害発生の約4割を占める支保工建込み作業の機械化に対するシステム構築構想や室内レベルの試験を繰り返し行ってきた。その後、ガイドライン改定を機に本格的に開発が進み、支保工建込みロボット1号機が九州地方整備局発注のトンネル工事現場に導入され、実証試験が行われた。実証試験で確認されたシステムエラーや機械的な不具合の改良・改善を繰り返し行い、平成30年7月に2号機製作が完成した。

東北地方整備局発注のトンネル工事（以後、本工事）では、狭あいなトンネル断面内における接触災害に対するICT技術導入のほか、既往技術を活用した機械装填機による装薬作業の遠隔化に取り組むとともに、とくに到達側400m区間で想定される崩落性地山における肌落ち災害に対する安全性向上を図るため、新たに開発した支保工建込みロボットによる切羽無人化支保工建込みシステムを導入し、ガイドラインで示された切羽作業の機械化に対して積極的な取り組みを行った。

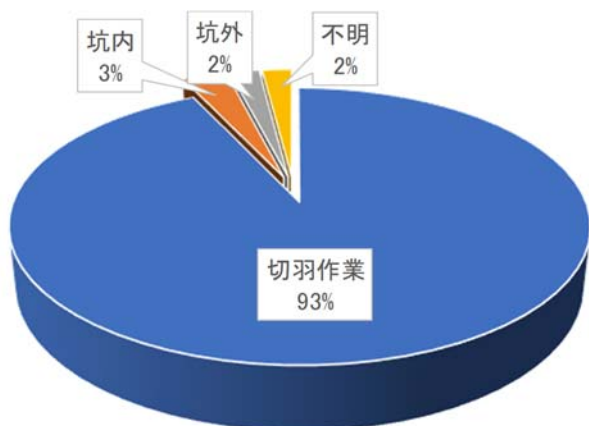


図-1 災害発生場所の内訳

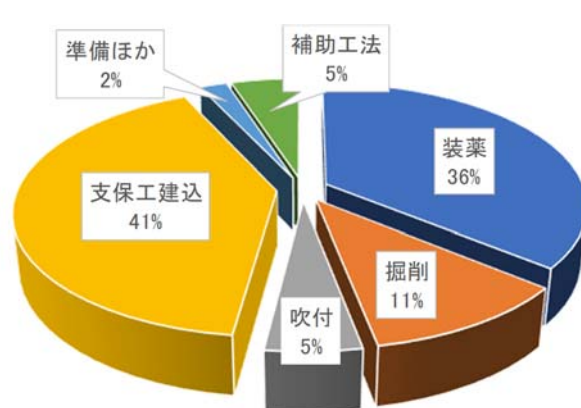


図-2 災害発生時の切羽作業内容

キーワード 切羽無人化、支保工建込みロボット、生産性向上、省人化、AI技術

連絡先 〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町4-11 前田建設工業株式会社 東北支店 TEL 022-225-8326

2. 切羽無人化支保工建込みシステム概要

(1) 従来の支保工建込み方法

従来の支保工建込み方法は、直接、坑内作業員が切羽直下に立ち入り、以下の手順で支保工を建て込むこととなる（エレクター機能搭載一体型吹付け機採用時）。

- ①左右2分割された支保工を、仮置き場から切羽まで運搬（写真-1①）
- ②鏡吹付けおよび掘削素掘り面に一次吹付け実施
- ③左右2分割された支保工を、天端ボルトとナットで連結（写真-1②）
- ④作業員が所定の建込み位置付近まで支保工を誘導し仮設置（写真-1③）
- ⑤金テコを用いて、計画された支保工建込み位置となるよう微調整（写真-1③）
- ⑥支保工微調整完了後、既設支保工と継ぎ材を用いて連結固定（写真-1④）
- ⑦連結固定完了後、既設支保工と新設支保工間の周方向に溶接金網設置（写真-1④）

①



②



③



④



写真-1 支保工建込み状況（エレクター機能搭載一体型吹付け機採用時）

以上に示すとおり、近年ではエレクター機能搭載一体型吹付け機などの支保工建込み専用機械の使用が主流となってきたものの、従来の支保工建込み方法では支保工誘導や連結・固定作業、支保工位置合わせ、溶接金網設置など一連のすべての作業は、坑内作業員が直接切羽直下に立ち入らなければならない作業である。

この作業中の切羽周辺状態は、厚さ 30～50mm 程度の一次吹付けコンクリートしか施されていない状態であるため、切羽からの肌落ちや応力解放に伴う地山のゆるみ変状を起因とした天端崩落が発生しやすい条件であり、非常に不安定な作業環境下での作業となる。そのため、この作業中に肌落ちや天端崩落が発生し、被災するケースが後を絶たない。

また、支保工建込みや溶接金網設置に要する作業時間は、坑内作業員の技量や経験に大きく左右されるため、経験不足の坑内作業員が多く配置されている場合には、切羽直下に立ち入る作業時間が長くなり、肌落ちや天端崩落による災害のリスクが高くなることとなる。

(2) 切羽無人化支保工建込みシステムの概要

当社において開発した切羽無人化支保工建込みシステムとは、自動追尾型トータルステーション（以下、TSと略す）を用いたナビゲーションシステムと支保工建込みロボットを連動させたシステムである。支保工建込みロボットを切羽に設置し作業指令ボタンを押すと、切羽後方に設置したTSが支保工建込みロボットの位置を自動計測し、坑内Wi-Fi通信を介して支保工建込みロボットへ位置情報を送信する。その後、支保工建込みロボットに搭載するモニター画面に、これから設置する支保工建込み位置が3次元で表示され、その画面情報を見ながらオペレータが支保工建込みロボットのレバー操作を行うものである。

この支保工建込みシステムを採用することにより、従来、切羽直下に坑内作業員が直接立ち入らなければならなかった作業は省略され、切羽直下は無人化状態で支保工を建て込むことが可能となる（図-3）。

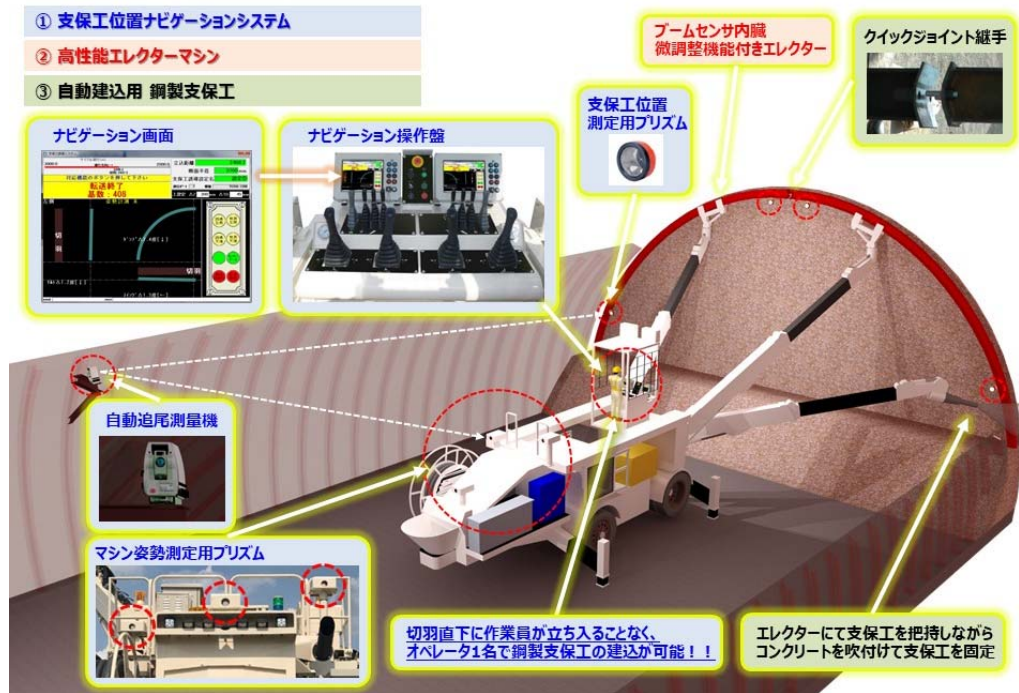


図-3 切羽無人化支保工建込みシステム概念図

3. 支保工建込みシステム構築技術

前述に示すとおり、切羽無人化支保工建込みシステムを採用することによって、一次吹付けから支保工建込み、二次吹付けまでの作業中、切羽直下に坑内作業員が立ち入らなければならなかった作業はすべて省略することが可能となる（表-1）。当該システムによる切羽無人化施工を支える技術は、以下の技術である。

表-1 従来の支保工建込みと新システム採用時の相違点

近年の一般的な施工 (エレクター機能搭載一体型吹付機使用時)	切羽無人化支保工建込みシステム (高性能エレクター+ナビゲーションシステム)
● 支保工運搬時の切羽作業を省略するため、切羽後方でエレクターにセットし、切羽まで直接運搬。 ● 一次吹付け・鏡吹付け。 ● 支保工建込み基盤高さ確認⇒支保工設置位置へ誘導（エレクター能力：1t） 【切羽直下で人力作業】 ● 左右に2分割された支保工を天端ボルトで締め付けて連結固定【切羽直下で人力作業】 ● 既設支保工と継ぎ材で固定 【切羽直下で人力作業】 ● 支保工建込み位置固定完了後、溶接金網設置 【切羽直下で人力作業】 ● 機械入替なく二次吹付け作業開始	● 支保工運搬時の切羽作業を省略するため、切羽後方でエレクターにセットし、切羽まで直接運搬。 ● 一次吹付け・鏡吹付け。 ● 自動追尾型TSで建込みロボット位置計測・情報送信を行い、ナビゲーション画面を見ながら支保工を誘導（エレクター能力：1t）【オペレータ操作のみ】 ● 左右に2分割された支保工を天端にあらかじめ仕込まれたクイックジョイントを高性能エレクターマシンで連結固定【オペレータ操作のみ】 ● エレクターで支保工を把持したまま二次吹付け作業が可能のため、継ぎ材で固定する作業不要【オペレータ操作のみ】 ● 高強度吹付けによる溶接金網を要しない支保構造採用により、切羽直下に立入る作業は全て省略可能【オペレータ操作のみ】 ● 機械入替なく二次吹付け作業開始

(1) 高性能エレクターシステム

高性能エレクターシステムとは、近年では一般的となる支保工建込みのために開発されたエレクター機能の改良型であり、伸縮方向や上下方向、チルト方向などエレクター可動部分すべての動作を計測するための各種センサーを内蔵したものである。各種センサーを配備することにより、支保工の建込み方向や位置・ねじれ修正がモニターに表示される。さらに、従来のエレクター機能では困難であった微調整操作を可能とするため、エレクター微速モード切替機能を追加配備し、微調整操作時の操作性を飛躍的に向上させたものである。このほか、クランプスライド、ダンプ、チルト機能など、従来、坑内作業員が直接切羽直下に立ち入り行ってきた動作を再現するための可動部分を追加配備したものである。

当該技術開発により、坑内作業員が直接切羽直下に立ち入り行わなければならなかった細かな手作業は、すべて切羽後方に設置した支保工建込みロボットからの遠隔操作のみで対応可能となる（図-4）。



図-4 高性能エレクターシステム概念図

(2) 無人化建込み用支保工

支保工建込みロボットによる切羽無人化支保工建込みシステムを構成するもうひとつの重要な技術は、支保工の連結固定方法である。従来の方法では、左右2分割された支保工を天端ではボルトとナットで連結固定する。その後、吹付けコンクリートが凝結するまでの間、新たに建て込んだ支保工が倒壊しないようにするため、既設支保工と新設支保工は継ぎ材を用いて連結する方法が取られている。

この方法を無人化するため、幾つかの連結方法を試行錯誤した結果、当社では以下の連結方法による無人化が最適であると判断した。

a) 支保工天端連結方法…クイックジョイント方式

クイックジョイントとは、オスとメス構造のジョイントを押し込むだけで即座に連結可能なジョイントシステムであり、シールドトンネルセグメント自動組み立て用に開発されたものである。ねじ強度は10.9相当であり、通常のボルト強度（4.8）よりも2倍以上の強度を有する（写真-2）。

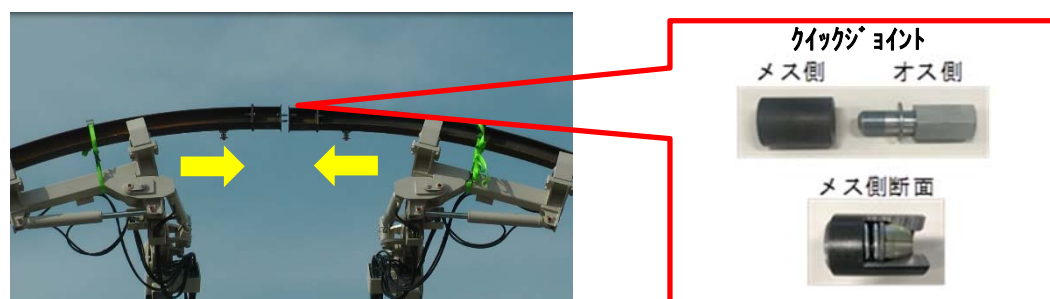


写真-2 クイックジョイントによる支保工天端プレート連結

b) 既設支保工との連結方法…頭部プレート付きアンカーによる摩擦定着

支保工間の連結方法は、NATM工法では一般的にさや管方式が採用され、既設支保工と新設支保工をφ16mmの丸鋼とφ21.7mmのさや管で接続し、吹付けコンクリートによって固定されるまでの間に新たに建て込んだ支保工が転倒することを防止する。そこで、支保工転倒防止を目的とする新たな連結方式として頭部プレート付きアンカーによる定着方式をはね出し単純梁によるモデルで検討した。

頭部プレート付きアンカーの引抜きせん断強度は吹付けコンクリート 10 分材齢時の強度、支保工の倒れ幅 5cm 以内（倒れ角度 1.5°），安全率 3 とし、アンカー必要本数を算出した．その結果、アンカー先端に φ100mm 以上のプレートを設置することにより、一般配合吹付けコンクリートで片側 4.3 本、高強度吹付けや瞬結吹付けでは 1 本以上のアンカーがあれば、支保工転倒を抑制することが可能となる（図-5、写真-3）．

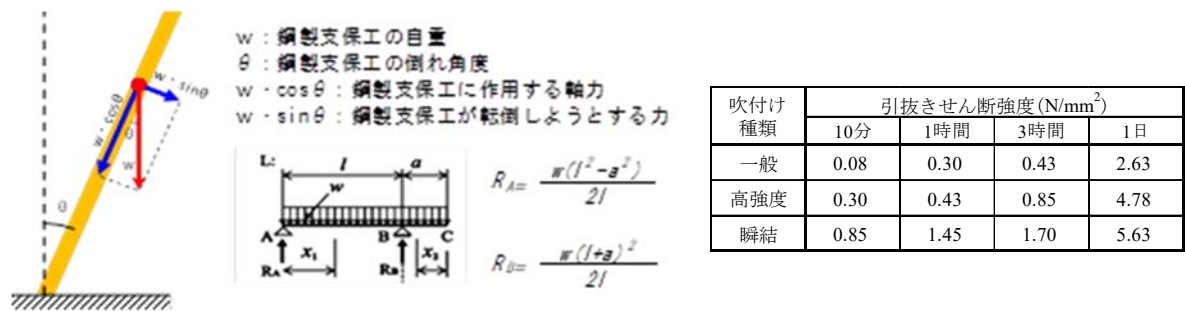


図-5 はね出し単純梁によるアンカー本数検討モデル



写真-3 無人化建込み用支保工（写真左は天端）

(3) 溶接金網省略化

従来、地山等級 D クラスでは、吹付けコンクリートのせん断補強、施工時と施工後の剥落防止・ひび割れ発生後のじん性向上を目的として溶接金網が設置される．しかし、溶接金網設置作業は、支保工建込みと同様、切羽直下での作業となり、完全な切羽直下作業の無人化を図るためには別途対策を検討する必要がある．1 号機が導入されたトンネル工事では、支保工にあらかじめ溶接金網を設置する溶接金網のプレハブ化で対応してきたが、本工事では、溶接金網の設置目的を再検証し、溶接金網を不要とする支保工構造を検討した．

道路トンネル技術基準^{※3)}、トンネル標準示方書^{※4)}、日本高速道路株式会社の設計要領^{※5)}などを参照すると、鋼繊維吹付けコンクリート（SFRC）や高強度吹付けコンクリートの採用により、溶接金網の省略が可能とされる．この点に着目し、本工事では大規模な設備改造を要しない高強度吹付けコンクリート採用による当該システムの生産性向上を図ることとした（表-2）．

表-2 溶接金網に関する各機関技術・設計基準一覧表

項 目	道路トンネル技術基準 (構造編)	設計要領 (NEXCO)	山岳トンネル設計施工標準(JRTT)
溶接金網 設置基準	小断面トンネル： (内空幅3.0～5.0m) なし 通常断面トンネル： (内空幅8.5m～12.5m) DⅠ 上半 DⅡは上下半 大断面トンネル： (内空幅12.5～14.0m) CⅡ 120° DⅠ・DⅡ 上下半	吹付け厚さが15cm以上の場合や変形の大きな地山では設置を検討。	吹付けコンクリートの付着の悪い地山や自立性の悪い地山、比較的変形の大きな地山で採用。 粗骨材のはね返りや吹付けコンクリートに『す』が入りやすいため、採用には十分な検討が必要。
溶接金網 省略基準	鋼繊維補強吹付けコンクリート（SFRC）などを用いる場合には省略可。	σ 3hr=2N/mm ² と規定した高強度吹付けコンクリートを用いる場合は、金網は設置しない。	平成25年通達により、初期高強度吹付けコンクリート配合（SEC練り）の確立により、金網を設置しない支保パターンへと変更。

(4) 鏡吹付け・一次吹付けと支保工建込み同時施工

当該システム導入目的は、切羽直下における作業の無人化である。従来の支保工建込み方法では、切羽直下に坑内作業員が立ち入らなければならないため、事前に鏡吹付けや一次吹付けを素掘り面に施す必要があった。

一方、当社が開発した支保工建込みロボットは、エレクター機能のほか吹付け機能も一体化されたものであり、支保工建込み作業途中で吹付け作業へ切り替えることは容易である。また、当該システムを採用することにより、切羽直下に坑内作業員が立ち入る必要もないため、鏡吹付け・一次吹付け作業は、支保工建込み作業と同時施工することが可能となる。

そこで、本工事では、比較的自立性のよい区間における支保工建込み手順は、以下のように改善を行った。

- ①支保工を切羽へ運搬
- ②支保工建込みロボットを切羽にセット
- ③支保工を切羽側に暫定誘導（写真-4①②）
- ④クイックジョイントによる支保工天端プレート連結（写真-4③）
- ⑤先行支保工建込み位置調整（本工事では右側支保工）（写真-4④）
- ⑥先行支保工建込み完了後、鏡吹付け・右側吹付けコンクリート施工開始（写真-4⑤）
- ⑦右側吹付けコンクリート施工中に、後行支保工建込み開始（本工事では左側支保工）
- ⑧後行支保工建込み完了後、支保工を把持したまま全周吹付け作業へ移行（写真-4⑥）



①支保工建込み（操作室）



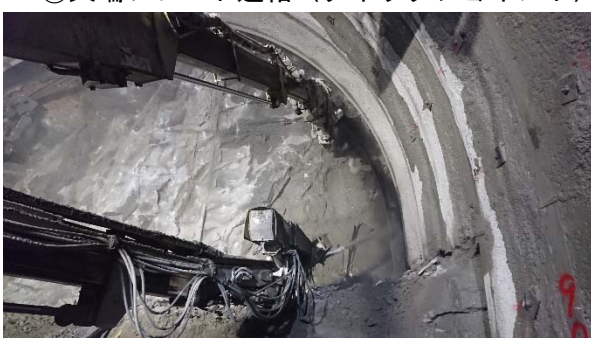
②支保工建込み（切羽側）



③天端プレート連結（クイックジョイント）



④支保工建込み位置調整（プリズム併用）



⑤先行支保工吹付け



⑥支保工を把持したまま全周吹付け

写真-4 新システムによる支保工施工状況

4. 切羽無人化支保工建込みシステム導入結果

本工事で取り組んだ切羽無人化支保工建込みシステムでは、期待された切羽直下への坑内作業員立ち入りを完全になくす安全性向上のほか、生産性向上にも大きな成果を得ることができた。以下に導入結果を示す。

○モニター画面に送られた位置情報をもとに、支保工建込みからコンクリート吹付けまで、一連の作業を支保工建込みロボットとオペレータのみで施工することが可能となり、支保工建込み中の肌落ち災害に対する安全性が格段に向上した。

○支保工建込み精度確認のため、マグネット付きミニブリズムと TS による再測量を実施。支保工建込み精度が $\pm 30\text{mm}$ 以下となるまで微調整を繰り返すことによって、所定の支保工建込み精度が確保された（図-6）。

○当該システム操作に慣れることにより徐々に支保工建込み時間は短縮し、最終的には一次吹付けから支保工建込み完了までの総サイクルタイムは従来方法の約 1/3 程度まで短縮することとなった（表-3）。

○先行支保工建込み完了後、後行支保工建込み開始と同時に吹付け作業を開始することにより、支保工建込み完了時点で既に全体コンクリート量の約 1/3 の吹付けが完了し、生産性が大きく向上する結果となった。

○支保工のない無普請区間（C I）では、吹付け厚さを確認するため、従来の検査孔による管理に加えてレーザースキャナによる管理を行った。レーザースキャナの測定精度は検査孔と比較し 10mm 未満であるため、レーザースキャナと吹付け機を連動することによって自動吹付け技術への可能性が見出せた（写真-5）。

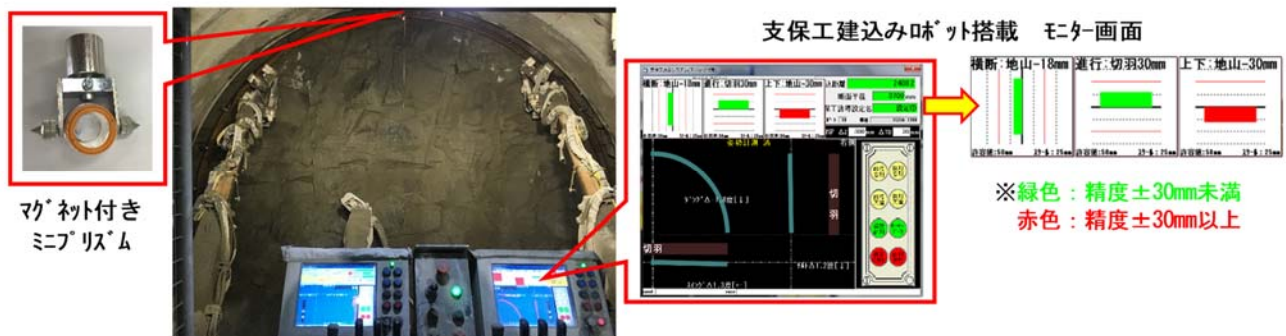


図-6 支保工建込み精度確認状況

表-3 従来と新建込みシステム採用時の支保工建込みサイクルタイム比較表

項 目		一次吹付け	支保工建込み	溶接金網	合 計
従来の 建込み	作業時間	7分	15分	8分	30分
	切羽直下	1人	5人	3人	—
新建込み システム	作業時間	(7分)	12分	0分	12分
	切羽直下	0人	0人	0人	—



写真-5 レーザースキャナを活用した吹付け厚さ確認

5. おわりに

本工事では、切羽無人化支保工建込みシステム導入のほか、硬岩掘削区間においても生産性向上を目的としたさまざまな技術を導入し、掘削期間 13.5 ヶ月で 1,403m のトンネル実貫通を迎えることとなった。また、本工事で特に取り組んできた切羽無人化支保工建込みシステムでは、期待された切羽直下への坑内作業員立ち入

りを完全になくす安全性向上のほか、生産性向上にも大きな成果を得ることができた。今後、本工事で取り組んできた技術に関し、他の地質条件や施工条件に対する有効性、適用性を検証するとともに、世界各国で目まぐるしい技術発展を遂げる AI 技術を当該技術に導入し、現在、【山岳トンネル支保工建込みの自動化】に向けた 3 号機制作に取り組んでいる。

また、近年では建設労働者の担い手不足や働き方改革に対応すべく生産性向上に向けた技術発展が強く求められ、さまざまな分野において開発が進められている。山岳トンネル工事では、本論文で紹介した支保工建込みシステム導入による生産性向上・省人化のほか、他の作業工程においてもコンピュータ制御による無人化施工技術の開発が進められてきている。本システムで見出された支保工建込み時の省人化は、従来 7 名編成であった作業を最大 3 名程度まで省人化が見込まれる技術である。このほか、以下に示す開発済みの既往活用技術や現在開発中の新技術を導入することにより、さらなる生産性向上の可能性が見込まれる。それぞれの技術特性や適用性を検証し、さらなるトンネル施工技術の発展に寄与していきたい所存である（写真-6～9）。



写真-6 フルオートコンピュータジャンボ（穿孔作業の無人化（既往技術））

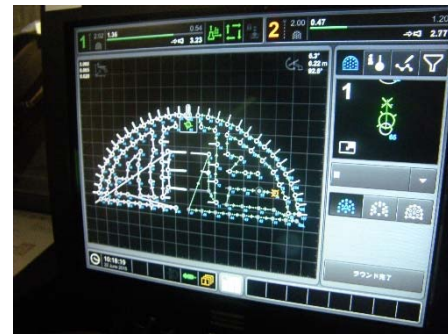


写真-7 ボルテック（ロックボルト作業の無人化（既往技術））



写真-8 急カーブ連続ベルコン（既往技術）
（ずり出し作業の省人化）



写真-9 コンピュータ制御自由断面掘進機（機械掘削作業の無人化（新技術））

参考文献：

- 1) 労働安全衛生総合研究所：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，pp4-8，2012
- 2) 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，pp1-5，2018
- 3) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，pp125-128，2003
- 4) 土木学会：2016 年制定 トンネル標準示方書【山岳工法編】，pp83-88，pp179-184，2016
- 5) 日本高速道路株式会社：設計要領 第三集，pp4.56-4.61，2016