

第69回(2025年度) 北海道開発技術研究発表会論文

新稲穂トンネルにおけるICT施工の取り組み —新稲穂トンネルL側仁木工区の施工事例—

◇小樽開発建設部 小樽道路事務所 第3工務課 ○猪股 俊宏
山田 信行
前田・協成特定建設工事共同企業体 米田 正臣

少子高齢化の進展により、建設業界における担い手不足が深刻化する中、生産性向上をはかるため、i-Constructionが推進されている。小樽開発建設部は、平成31年3月にi-Constructionモデル事務所に指定されており、ICTを活用した生産性向上に取り組んできた。

本論文では、新稲穂トンネルL側仁木工区工事における3次元モデル、およびICTを活用した施工を実施したので、その事例について報告する。

キーワード： i-Construction、3次元モデル、生産性向上

1. はじめに

倶知安余市道路は、後志自動車道のうち倶知安町から余市町を結ぶ延長39.1kmの一般国道の自動車専用道路であり、北海道横断自動車道（余市～小樽）と一体となり、後志地域と新千歳空港や苫小牧港などを結び、後志地域における世界水準の観光地形成や多種多様でブランド力の高い食の生産空間の維持・発展を支援する事業である。

本工事は「倶知安余市道路」のうち、共和町国富地区と仁木町銀山地区を結び、稲穂峠の山道を回避する新稲穂トンネル（仮称）のうち、L側仁木工区を施工するものである（図1、図2）。

本工事では、トンネル工事における施工性や生産性の向上を目的として、3次元モデル、およびICTを活用した施工を実施している。それらの施工における課題を改善しつつ継続的に検証・改善を行いながら、さらなる効率的で効果的な施工性、および生産性向上を目指して取り組んだ事例について報告する。

【工事概要】

工 事 名：一般国道5号 仁木町外

新稲穂トンネルL側仁木工区工事

工事箇所：起点 岩内郡共和町～終点 余市郡仁木町

工 期：令和5年3月3日～令和8年10月16日

工事内容：工区延長 L=1,724m（幅員：W=8.80m）

掘削工（NATM、発破・機械掘削）L=1,712m

設計掘削断面積（CII）51 m²

覆工・防水工 L=2,720m、仮設工 N=1式

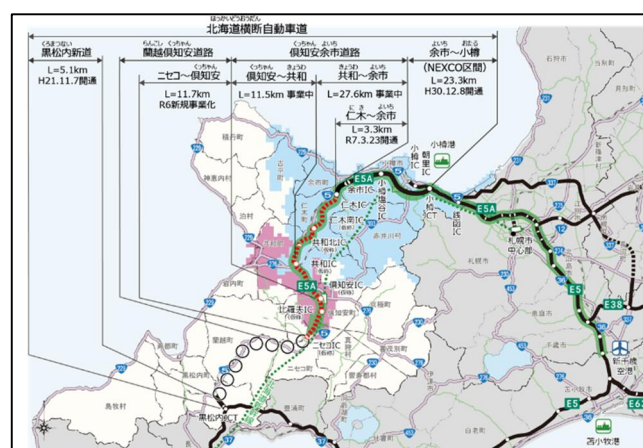


図1 倶知安余市道路 概要図

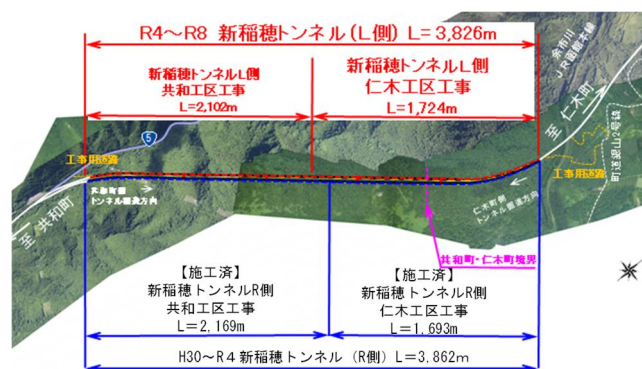


図2 新稲穂トンネル（仮称）位置図

2. 切羽前方地山の湧水把握

本L側トンネルは、R側トンネルに双設する工事であり、R側では突発湧水や多量湧水（最大湧水量：共和工区 4,000 L/min、仁木工区 2,700 L/min）によって掘削が中断する事象が度々発生していた。

L側においても、トンネル上方の岩相境界に存在が予想される多量湧水が掘削に伴い流れ盤に沿って切羽に突発湧水として出現する、もしくは破碎帯等の劣化や開口亀裂が分状発達した地山に沿って多量湧水が発生する可能性が予想された。そのため、R側の施工実績を元にしたL側全線での湧水の事前予測、多量湧水区間手前での切羽湧水量を高精度に予測できる地下水情報化施工「SWING法」を導入した。

(1) SWING法の3次元モデル化

(1)-1 実施方法

2次元図面で水抜きボーリングの延長・角度・本数を検討する場合、帯水層から外れ、水抜き効果が発現出来なくなる可能性がある。そのため、2次元解析結果を基に3次元モデルを作成し、トンネル構造物モデルと結合する（図3）。

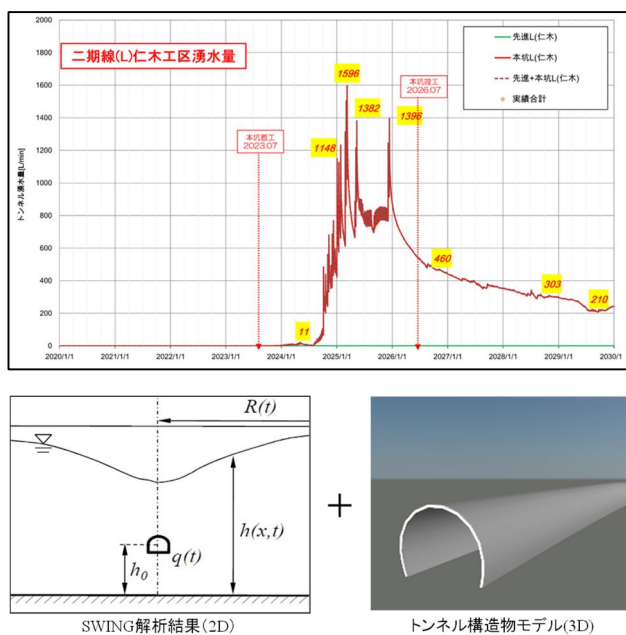


図3 2次元解析データと3次元モデル結合イメージ

(1)-2 3次元モデル概要

「SWING法」による横断方向の2次元モデル解析で得られた前方地山の帯水層範囲を3次元モデルで把握し、滞水層の水頭・傾斜等を高精度に可視化することで、効果的な水抜き対策の検討・実施が可能となるため、掘削作業の中断リスクを低減できる。

3次元モデル化による効果を以下に示す（図4）。

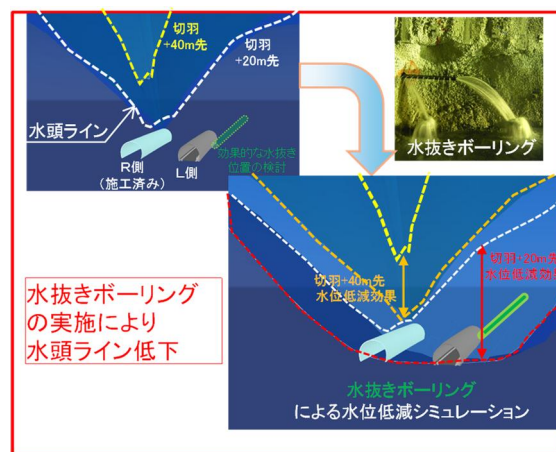


図4 3次元化モデル シミュレーションイメージ

(1)-3 湧水対策工法の選定

2024.12月に実施した第11回先進調査ボーリングにおいて、安山岩質凝灰岩と泥岩の層境本坑SP=686.57付近で200/minの湧水が発生し、SP=686.2時点において500/min（水圧：0.15MPa=水頭差15m）の湧水が確認された。

先進調査ボーリングによる湧水箇所とR側多量湧水箇所の関係性を以下に示す（図5）。

先進調査ボーリング結果とSWING予想結果より、切羽からの湧水量、および水圧低下を図るため、4パターンの水抜きボーリングシミュレーションを実施した（図6）。

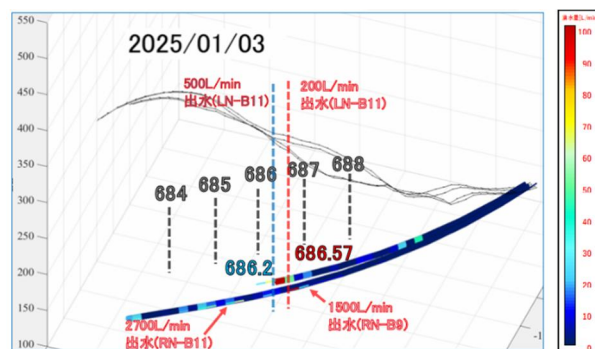


図5 R側の湧水実績とL側の湧水箇所比較

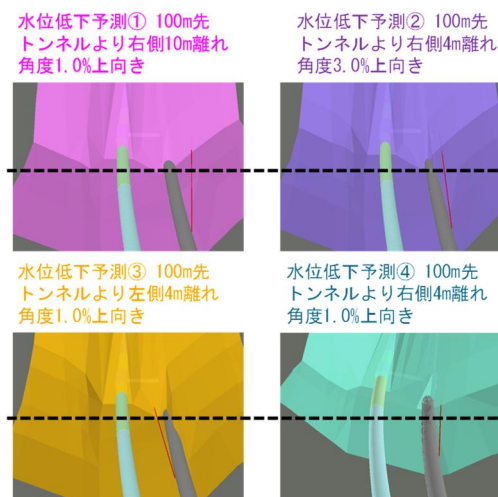


図6 湧水量低下予測比較（4パターン）

(1)-4 シミュレーション結果

切羽からの湧水量、および水圧低下を図るため、最も水位低下効果のあるSWING予想④を採用した(図7)。

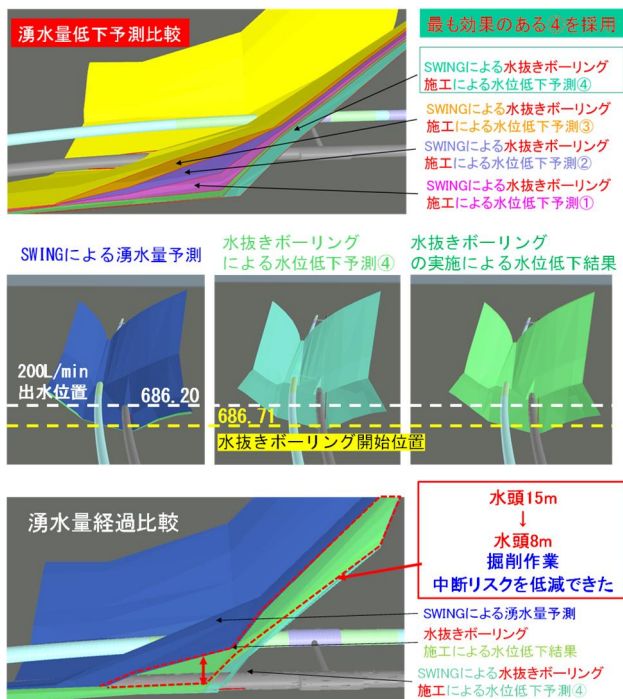


図7 湧水量低下予測と実績結果比較

P=686.71地点において、水抜きボーリングを実施した結果、切羽前方水頭差を15mから8mに低下できた。

(1)-5 結果

トンネル掘削前からのSWING予想と2025.9月時点の実績を比較すると、予測湧水量と施工実績が同様の傾向を示している(図8)。

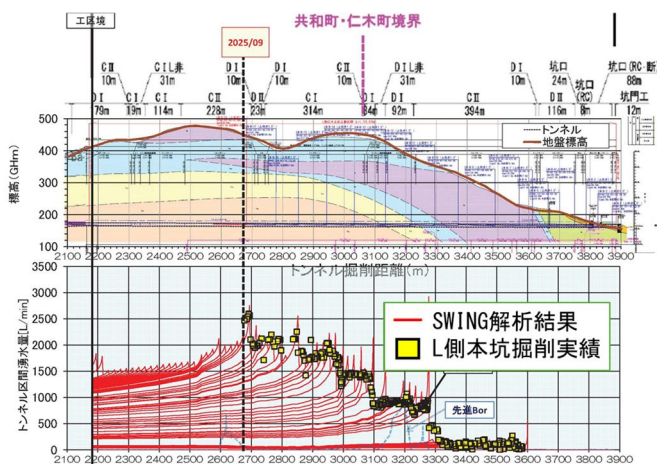


図8 2025.9月の予測湧水量と施工実績

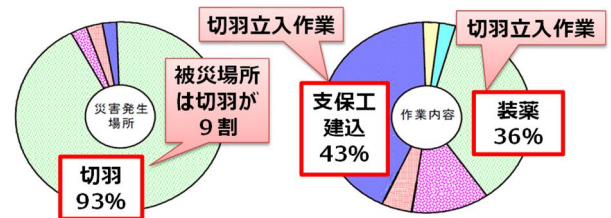
以上により、SWING法から予想される湧水量を3次元モデル化により、高精度に予測することで、掘削作業の中断を回避することができた。

3. 全自動鋼製支保工建込ロボット

(1) 社会的背景

切羽作業において、現行の鋼製支保工の建込み作業には、オペレータが操縦する機械作業の他に、相互に連絡しながら行う支保工脚部の設置や支保工天端継手部のボルト締付け、および支保工と吹付面の間に設置する溶接金網の取付け等の人力作業が多く発生する。

これら一連の支保工建込み作業は、切羽直下での施工となるため、作業員は常に切羽肌落ちへの危険に対して注意を払いながら、精神的負担が大きい作業を強いられる(図9)。そのため、切羽における岩石落下(肌落ち)による重篤災害の撲滅、また技能労働者不足(担い手不足)の観点からも省人化等による生産性向上が必要不可欠となる。



災害発生場所の内訳 災害発生時の作業内容
図9 切羽における災害発生時の場所・作業内容

(1)-1 目的

熟練技能者の経験に左右されない施工を実現し、人力による支保工建込み作業を軽減させるため、掘削全線の上半支保工に、「全自動鋼製支保工建込みロボット」を導入した。

作業者の切羽立入作業を無くすことで、切羽作業人員の省人化や省力化の実現により、生産性を向上させた。

(1)-2 システム概要

「全自動鋼製支保工建込みロボット」は、支保工位置追尾システム、高性能エレクター、建込ロボ用鋼製支保工、ナビゲーション画面、ミラー回収機構の5つの要素で構成されている(図10)。

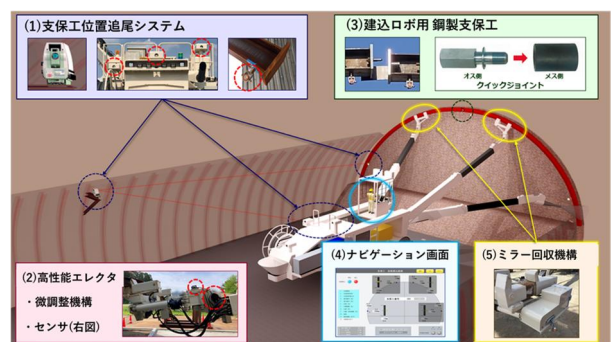


図10 全自動鋼製支保工建込みロボット システム概要

(2)-3 支保工位置追尾システム

エレクター機体後方に機体位置計測用プリズムに対して、座標を付与することで、エレクターのブームに取り付けた各計測機により支保工姿勢を算出できる。そのため、支保工に設置したプリズムの座標値を設計値に誘導できる（図11）。

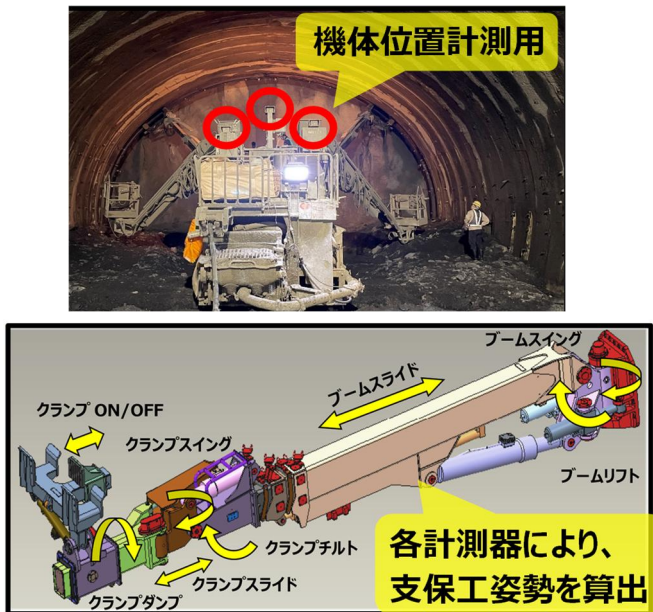


図 11 支保工位置追尾システム概要

(2)-4 建込口ボ用鋼製支保工

自動建込用鋼製支保工の工夫として、天端部の継手に対して、人の手によるボルト締め作業を削減できるクイックジョイントを採用した。また、支保工誘導時の座標誤差（±20mm）により、クイックジョイントの天端締結を補助するため、テーパ部をつけた当て板を設置した（図12）。

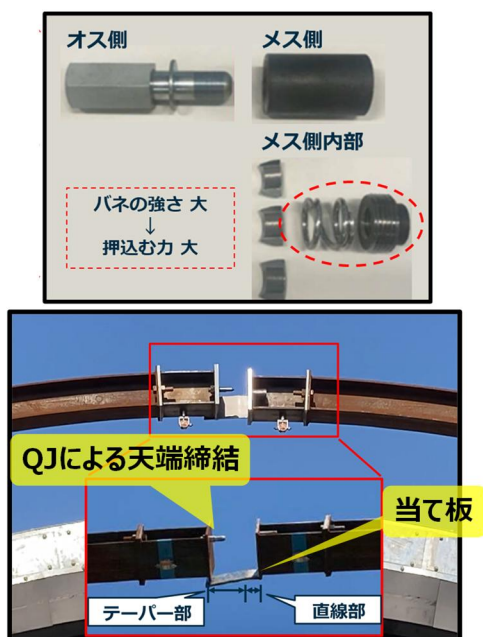


図 12 天端継手部概要

支保工の背面に溶接金網を設置するDパターンにおいては、建込前の支保工に金網を事前設置することで、切羽直下への立入を不要とした。また、つなぎ材としてさや管、タイロッドの代わりに、頭付アンカーを使用することで、つなぎ材の設置による切羽立入作業を削減できた（図13）。

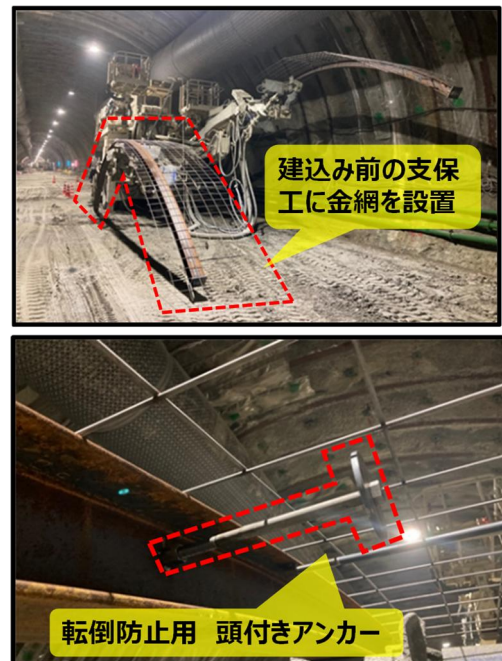


図 13 溶接金網、つなぎ材 概要

(2)-5 ナビゲーション画面

熟練工による技能差を解消するため、設計値と実測値の差分表示をリアルタイムで表示することができる画面表示、および自動建込用ボタンによるワンタッチ操作とした（図14）。

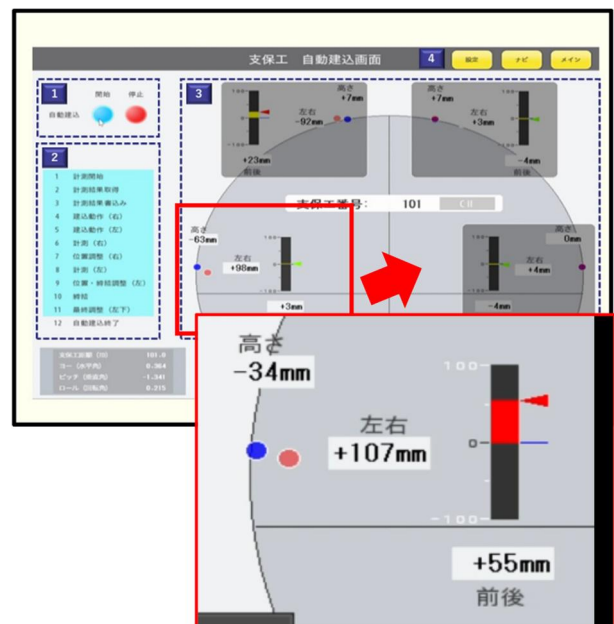


図 14 ナビゲーション画面 施工例

(2)-6 ミラー回収機構

コンクリート吹付による測量用プリズムミラーの破損を防止するため、エレクターのキャッチ部に運転席からワンボタンで操作できる小型ウインチを用いたミラー巻取り機構を装備した（図15）。



図15 ミラー巻取り機構 概要

(2)-7 運用上の課題

ワンボタンでの天端締結～位置合わせ動作を実現したが、切羽の掘削形状によっては自動動作が停止する事象が発生した。

事象1：鋼製支保工に事前に固定された金網

鋼製支保工を切羽まで誘導する際に、金網が地山や既に建込まれた支保工に接触することで、自動動作が停止した（図16）。

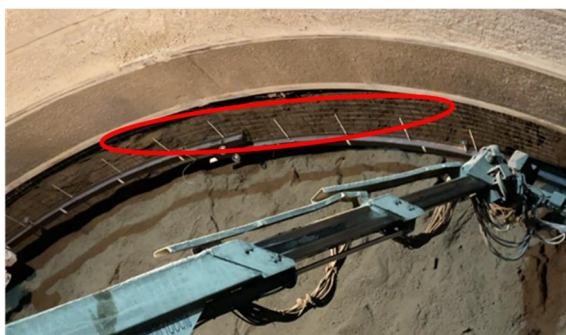


図16 不具合事象1 溶接金網

事象2：ベンチ部への接触

自動建込を実現するためには、20cm程度の余掘が発生するが、サイクル向上を目的に余掘量を削減した際に、鋼製支保工の根脚部がベンチ部分と接触することで、自動動作が停止した（図17）。

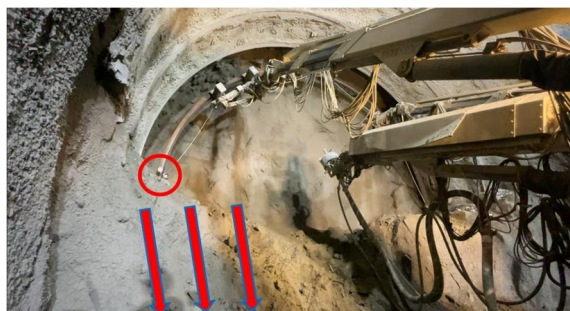


図17 不具合事象2 ベンチ部への接触

自動動作停止事象に対して、以下の対策を講じた。

自動動作作業中は、各所のセンサー（約10cmの範囲で岩塊等の障害物）が反応することで停止し、初期化してしまうため、プログラムの再構築を実施した。なお、再構築には1カ月程度を要したため、その間は手動で誘導できる「支保工ナビゲーション」を導入した。

(2)-8 結果

- ① 鋼製支保工建込み作業における切羽立入り作業を削減することで、省人化・省力化を実現できた。
従来技術：5名⇒開発技術：1名
- ② 熟練技能者の経験に左右されない施工を実現した。
- ③ 施工サイクルが通常施工スピードの約1/2に短縮できた。

4. まとめ

3次元モデル、およびICTを活用した効果的な施工性、および生産性向上の取り組みについて報告した。

結論、および考察は次のとおりである。

(1) SWING法の3次元モデル化

- ① 2次元の断面図と平面図によるデータの読み取りから、3次元モデル化による水抜きシミュレーション結果を実施することで、より効果の高い水抜き施工箇所をピンポイントで施工することができた。
- ② 湧水予測を高精度に早期把握することで、切羽の安定や排水処理への次施工対策（水抜きボーリング追加、濁水処理設備増設、清濁分離処理）を実施することで、掘削作業の中断を回避することができた。
- ③ 3次元モデル化による視覚効果により専門知識が無くても理解しやすいので、説明資料として使用することができた。

(2) 全自動鋼製支保工建込みロボット

- ① オペ1名によるワンボタン操作で支保工建込み作業を完了させるため、切羽作業人員は現行5名から1名に削減することができた。
- ② 建込み作業時間を25分から8分程度に減少することができた。
- ③ 切羽直下での人力作業がなくなるため、切羽肌落ち災害の防止も図れる。
- ④ 『全自動建込み』+『ナビゲーション』により、＜施工効率の維持＞＜熟練技能に依存しない施工＞の両立を実現することができた。

以上の取り組みにより、施工管理職員やトンネル従事者に対して、熟練技能者の経験に左右されない施工を実現することができた。

また、担い手不足による知識や技術力の低下を防止し、施工時の安全性や生産性が大きく向上した。

謝辞：最後に本稿を執筆するにあたり、ご指導とご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 独立行政法人 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