

全自動鋼製支保工建込みロボットの開発と機能拡張

馬 場 雄 大*¹ 春 田 克 樹*¹
 今 井 崇 満*¹ 水 谷 和 彦*²

要 旨

当社は、山岳トンネル工事における安全性向上および省人化・省力化を目的として、これまでに「鋼製支保工建込みロボット」を開発してきた¹⁾。この技術は、マシンガイダンス技術であり、操作の訓練や熟練技術が必要であった。その課題を解決するためマシンコントロール技術である「全自動鋼製支保工建込みロボット」（以下、全自動ロボット）を開発した²⁾。しかし、全自動ロボットによる鋼製支保工の全自動建込みにおいて、現場の条件によっては、建込みできない事象が認められた。そこで、筆者らは「自動動作（マシンコントロール）」と「手動動作（マシンガイダンス）」を切り替え可能なシステムへ改良を加えた。現場条件によって自動動作が難しい工程では手動動作を採用し、熟練技術が求められる工程については自動動作を活用することで、現場条件に左右されない効率的な建込み作業を実現した。

キーワード 山岳トンネル／鋼製支保工／支保工建込み／自動化／効率化

目 次

- | | |
|---------------|------------------|
| 1. はじめに | 5. 改良システムでの建込み検証 |
| 2. 全自動ロボット | 6. まとめ |
| 3. 全自動ロボットの課題 | 7. おわりに |
| 4. 課題の解決方法 | |

DEVELOPMENT AND FUNCTIONAL ENHANCEMENT OF A FULLY AUTOMATED STEEL SUPPORT INSTALLATION ROBOT FOR MOUNTAIN TUNNELS

Yudai BABA
Takamitsu IMAI

Katsuki HARUTA
Kazuhiko MIZUTANI

Synopsis:

Our company has developed a “Steel Support Installation Robot” to enhance safety and reduce labor requirements in mountain tunnel construction. This technology utilized machine guidance, necessitating operator training and skilled expertise. To address these challenges, we developed a “Fully Automated Steel Support Installation Robot” (hereafter referred to as the robot), employing machine control technology. However, during fully automated installation of steel support frames using the robot, instances where installation was impossible depending on site conditions were observed. Therefore, the authors improved the system to enable switching between “automatic operation (machine control)” and “manual operation (machine guidance)”. By adopting manual operation for processes where automatic operation is difficult due to site conditions and utilizing automatic operation for processes requiring skilled techniques, efficient installation work unaffected by site conditions was achieved.

* 1 本店 土木事業本部 土木技術部 トンネルグループ

* 2 本店 土木事業本部 土木技術部 新技術推進グループ

1. はじめに

山岳トンネル工事において、掘削最前線となる切羽は岩盤が露出状態となるため、岩石の剥離や落下による肌落ち災害のリスクが存在する。特に、鋼製支保工（以下、支保工）の建込み作業は切羽直下に人が立入ることから、肌落ちによる重大災害へ直結する危険性が高い。このため、施工者は切羽監視員の配置や鏡吹付けなど、肌落ち防止のための各種対策を講じ、災害の未然防止に努めている。しかし、これらの対策のみでは肌落ち災害を完全に防ぐことは難しく、現在も肌落ち災害が発生しているのが現状である。したがって、切羽への立ち入り作業自体を不要とすることが、より一層の安全確保に向けて重要な課題となっている。一方で、今後は生産年齢人口の減少が予測されており、熟練作業からの技能継承が十分に行えないといった課題も顕在化している。

こうした状況を踏まえ、当社では支保工建込み作業における切羽への立ち入りを不要とすることを目的に「鋼製支保工建込みロボット」を開発してきた。この技術は、マシンガイダンス技術であり、操作の訓練や熟練技術が必要であった。そこで、熟練技術者でなくても建込み作業が可能となるよう、支保工を自動的に設計位置へ配置し、天端部の締結もワンタッチで行えるマシンコントロール技術「全自動鋼製支保工建込みロボット」（以下、全自動ロボット）を開発した²⁾。しかし、全自動ロボットによる支保工の全自動建込みでは、現場条件によっては、すべての作業工程を自動化することが難しい場合があった。このため、建込み作業の一部においては、現場の状況に応じて手動動作による対応が必要となることが課題として挙げられた。そこで、次のステップとして、建込

み動作中に「自動動作（マシンコントロール）」と「手動動作（マシンガイダンス）」を切り替え可能なシステムへの改良を実施した。これにより、現場条件によって自動動作が難しい工程では手動動作を、また熟練技術が必要とされる作業は自動動作によって補うことで、現場条件に左右されない効率的かつ安全な支保工建込みを実現した。

2. 全自動ロボット

全自動ロボットは、ボタン操作ひとつで支保工を把持した状態から、設計位置への建込みまでの一連の動作を自動で実行するものである。以下に、本全自動ロボットの主な構成要素を示す（図-1）。

(1) 支保工位置追尾システム

エレクター体型吹付け機および支保工の空間位置を高精度に把握するため、エレクター体型吹付け機にはマシン姿勢測定用ミラー、支保工には位置測定用ミラーをそれぞれ設置（写真-1）。エレクター体型吹付け機を切羽近傍に設置した後、切羽後方のトンネル壁面に配した自動追尾型トータルステーション（以下、TS）がマシン姿勢測定用ミラーを自動視準し、エレクター体型吹付け機の機体中心座標を三次元的に算出する。算出された中心座標は全自動ロボットの制御コンピュータに即時転送され、エレクター体型吹付け機のブーム位置等の精緻な制御に活用される。また、支保工の位置計測に際しては、TS が支保工天端および脚部に設置したプリズムミラー（以下、ミラー）を順次自動追尾することで、支保工の座標情報をリアルタイムに取得する。

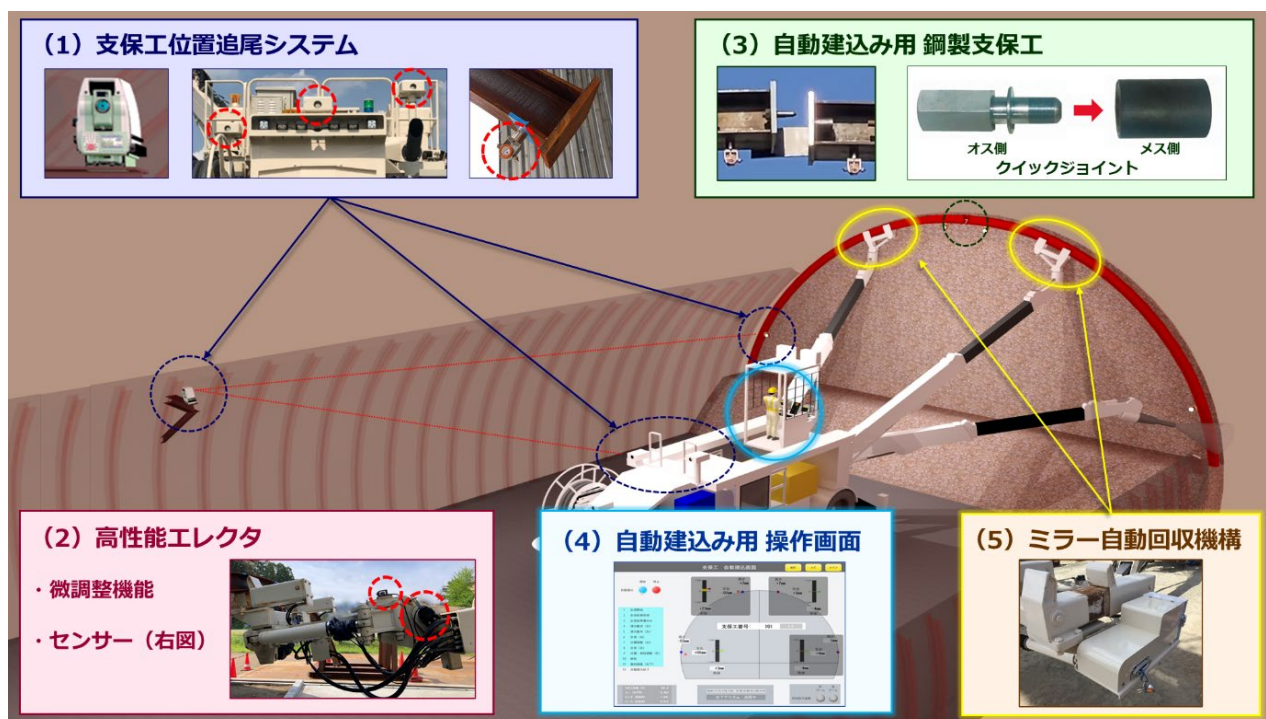


図-1 全自動ロボット概要図



写真-1 支保工位置追尾システムのミラー設置位置

(2) 高性能エレクタ

各種センサがブームおよび機体に搭載されており、これによりブームの位置と姿勢をリアルタイムに計測可能である。さらに、微調整機能を備えており、支保工を切羽直下へ誘導する作業は通常速度で行い、天端継手や位置合わせなどの精度が要求される工程では微速による微調整が可能となっている（写真-2）。



写真-2 高性能エレクタ

(3) 自動建込み用鋼製支保工

全自動ロボットに用いる支保工は、作業員が切羽直下に立ち入ることなく建込み作業を完結できる設計とし、以下に示す4つの仕様を有している。

① 天端部の継手

従来、支保工天端部の継手にはボルト・ナットによる締結方式が採用されており、切羽作業員がエレクター一体型吹付け機に設置された高所作業用ゲージに搭乗し、支保工天端部へ接近した上で、素掘り面直下において手作業による締結を行う必要があった。本全自動ロボットの

開発にあたり、天端部継手の遠隔締結を実現するため、継手部にワンタッチ締結が可能なクイックジョイント（以下、QJ）を新たに採用した（写真-3）。QJのメス側内部にはテーパ形状を有し、内部にはクサビ状のネジコマおよびバネが配置されている。ボルト先端を押し込む力によって、メス側ネジコマがボルトのねじ山を乗り越えることで、無回転での迅速な締結が可能となっている。



写真-3 クイックジョイント

② 奥行の目安（写真-4）

全自動ロボットにおける天端部の締結作業には、高精度な測量精度が要求される。特に、支保工の建込み時に発生する揺動に起因する締結精度の低下を防止する目的で、天端部に当て板を設置した。当該当て板はテーパ部および直線部から構成されており、支保工を当て板に押し当てつつスライドさせることにより、QJのピン先端が確実にメス側へ誘導されるよう設計されている。これにより、当て板を活用しつつ、支保工の精度の高い締結動作を実現している。

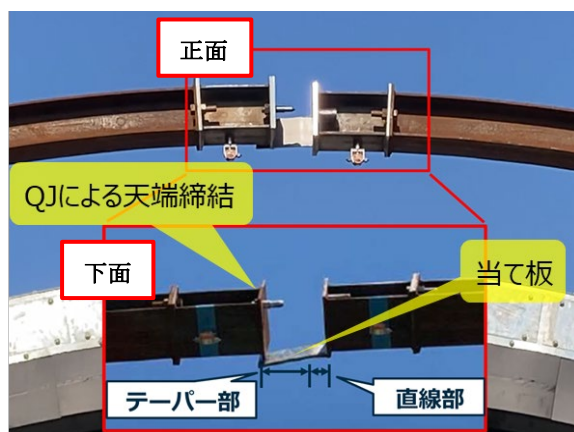


写真-4 天端部の継手構造

③ 金網の設置（写真-5）

従来、金網の設置作業は切羽作業員が切羽直下に立ち入った上で、素掘り面を覆うように実施されており、極

めて危険性の高い作業であった。これに対し、全自動ロボットでは、金網をあらかじめ支保工に設置した状態で建込みを行うことにより、作業員が切羽直下へ立ち入ることなく金網の設置が可能となり、作業時の安全性が向上した。



写真-5 金網の設置

④ 支保工の転倒防止 (写真-6)

従来、支保工の転倒防止対策としては、つなぎ材が用いられ、吹付けコンクリートの施工までの間、支保工の仮支持を目的として設置されていた。本開発においては、支保工に頭付きアンカーを事前に取り付け、エレクター一体型吹付け機で支保工を把持した状態で吹付けコンクリートを施工し、脚部を固定したうえで、頭付きアンカーと一体化した構造とし、その後エレクタを外すことで、つなぎ材の設置作業を不要とした。この頭付きアンカーと吹付けコンクリートの一体的な連結構造により、支保工の転倒防止対策としている。



写真-6 支保工の転倒防止

(4) 自動建込み用操作画面

自動建込み用操作画面を図-2 に示す。

① 自動建込み開始ボタン

青色のボタンは建込み開始ボタン、赤色のボタンは停止ボタンとして機能する。建込み開始ボタンを押下する

ことで、自動建込みが開始され、終了までの一連の作業が自動的に実施される。

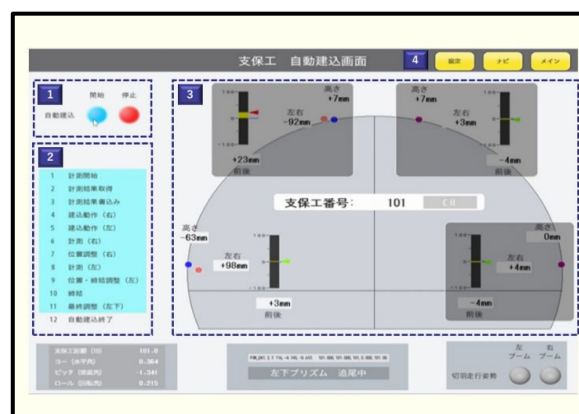


図-2 自動建込み用操作画面

② 動作ステップ表示

自動建込みにおける各動作ステップを表示する機能であり、各動作が完了すると青色でハッチング表示されるため、建込み作業の進捗状況を逐次把握することが可能である。

③ 建込み状況の表示

支保工の建込み位置を可視化する機能を有し、画面上の赤丸が実測位置、青丸が設計位置を示す。また、実測位置と設計位置の差異は数値として併せて表示される。測定の進捗状況はハッチングの有無で示され、ハッチングがない部分は追尾測量中であることを表す。例えば、図-2 では、左支保工脚部を追尾測量しつつ、支保工を設計位置へ移動させている状態である。支保工の位置情報は、追尾測量結果に基づきシステム内で逐次演算され、実測値と設計値との差異がリアルタイムで画面上に表示される。

(5) ミラー自動回収機構 (写真-7)

本機構の運用に際しては、エレクター一体型吹付け機により支保工を把持した状態で、ウィンチからけん引ロープを展開し、支保工の天端および脚部にミラーを設置する。支保工の建込み完了後、運転席に設置されたリモコンを用いてウィンチを操作し、各ミラーを回収した後、



写真-7 ミラー自動回収機構

吹付けコンクリートの施工工程へ移行する。

3. 全自動ロボットの課題

全自動ロボットにおける課題として、建込み動作中の「自動動作の停止」が挙げられる。主な要因は以下の通りである。

(1) 地山や支保工への接触

金網施工区間において、支保工を切羽まで自動で移動する過程で、金網が地山や既に建て込まれた支保工に接触し、自動動作が停止する事象が頻発した。この際、接触の衝撃により支保工に取り付けたミラーが落下し、ミラーの再取り付けや再測定作業が発生するなど、復旧に数分の時間を要する場合もあった（写真-8）。

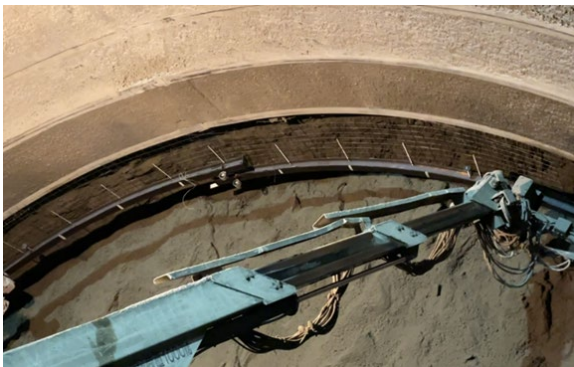


写真-8 金網事前設置時の建込状況

(2) ベンチ部分への接触

ベンチカット工法を適用した掘削現場では、支保工を切羽まで誘導する際、脚部がベンチ部分と接触しやすくなり、自動動作の停止が発生した（写真-9）。この場合も、位置調整や障害物の除去などの復旧作業に時間を要

することがあった。



写真-9 脚部接触状況

これらの要因によって自動動作の停止が生じた場合、支保工に取り付けたミラーの再取り付けや再測定、位置調整などの復旧作業が必要となり、1回の接触につき数分以上の追加作業時間を要した。

4. 課題の解決方法

支保工建込みの各方式の比較を表-1に示す。当社では、これまでに支保工建込み手法として、3つの方式を採用していた。1つ目は、通常のエレクター一体型吹付け機と定規を用いた「通常の建込み」である。TSからレーザーを照射し、作業員が直接定規を合わせて建込み位置を決定するため、切羽への立ち入りが不可欠であった。2つ目は、鋼製支保工建込みロボットを用いた「ナビゲーション建込み」である³⁾。支保工に取り付けたミラーをレーザーで照射し、建込み目標位置を可視化しながら手動で建込み作業を行う。本方式では切羽への立ち入りは不要となるが、ナビゲーション画面を用いた操作には高度な熟練技

表-1 支保工建込みの各方式の比較

使用機体	通常のエレクター一体型吹付け機	鋼製支保工建込みロボット	全自動鋼製支保工建込みロボット	
名称	通常の建込み	ナビゲーション建込み	ハイブリット建込み	フルオート建込み
システム	—	ナビゲーション	ナビゲーション+全自動制御	全自動制御
動作	TSからのレーザー表示を基に、手動操作で建込み。	支保工ミラーをTSで測定し、手動で建込み目標位置まで移動・締結。	支保工ミラーをTSで測定し、 手動 でおおまかな建込み目標位置まで移動し、 自動 で調整・締結。	支保工ミラーをTSで測定し、 自動 で建込み目標位置まで移動させ、 自動 で調整・締結。
評価	切羽立入ゼロ × 熟練技術不要度 × 施工時間 ○	切羽立入ゼロ ◎ 熟練技術不要度 △ 施工時間 ◎	切羽立入ゼロ ◎ 熟練技術不要度 ◎ 施工時間 ◎	切羽立入ゼロ ◎ 熟練技術不要度 ◎ 施工時間 ○

術が求められた。3つ目は、全自動ロボットを用いた「フルオート建込み」である。建込み作業を完全自動制御で行う方式であるが、前述の課題により、実施工においては接触部分のベンチや地山部分を削る作業が必要となり、場合によっては余掘りが発生することがあった。

そこで、今回新たに「ハイブリット建込み」方式を提案した。本方式では、機械が苦手とする切羽への支保工誘導動作を手動動作とし、熟練技術を必要とする精度の高い建込みの位置決めや締結動作については自動動作で実施することで、「自動動作（マシンコントロール）」と「手動動作（マシンガイダンス）」を切り替え可能なシステムへと改良した。これに伴い、「フルオート建込み」の利点を維持しつつ、従来方式の課題を克服することを可能とした。ハイブリット建込み手順を写真-10、11、12で示す。

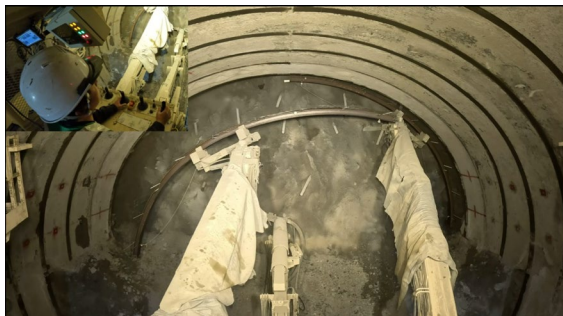


写真-10 右支保工 切羽へ誘導（手動）



写真-11 支保工 切羽へ誘導（手動）

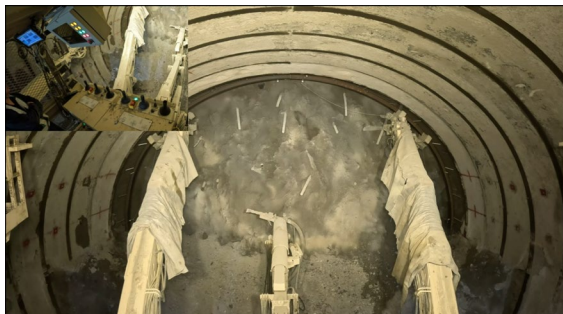
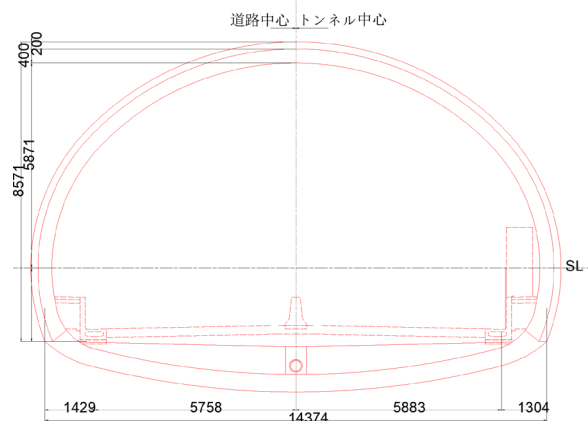


写真-12 天端締結 座標位置合わせ（自動）

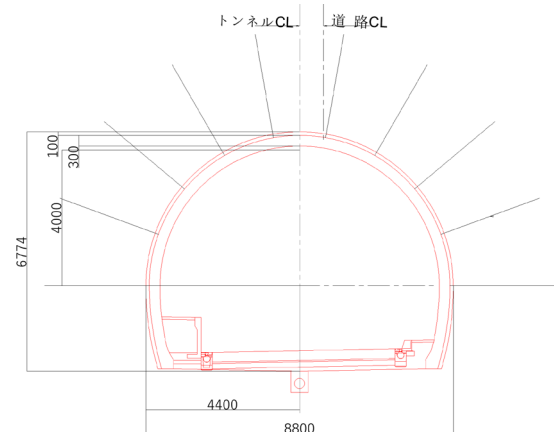
5. 改良システムでの建込み検証

(1) 概要

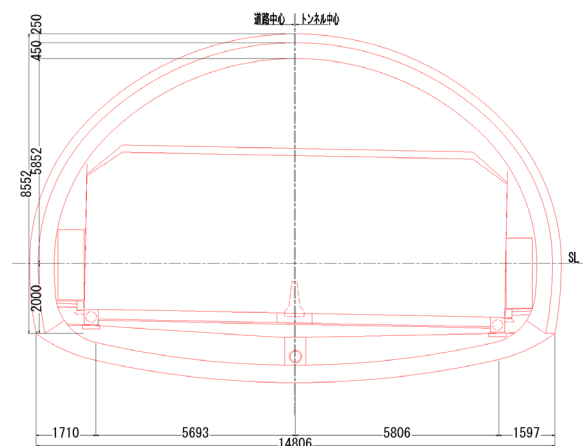
本検証は、2025年時点で全国4現場において実施した。各現場は通常断面（内空幅 8.8～11.2m）から大断面（内空幅 14.0m 程度）まで多様な条件を含み、いずれもベンチカット工法を採用している。各現場の標準断面図一例を図示する（図-3、図-4）。



現場 A DI パターン

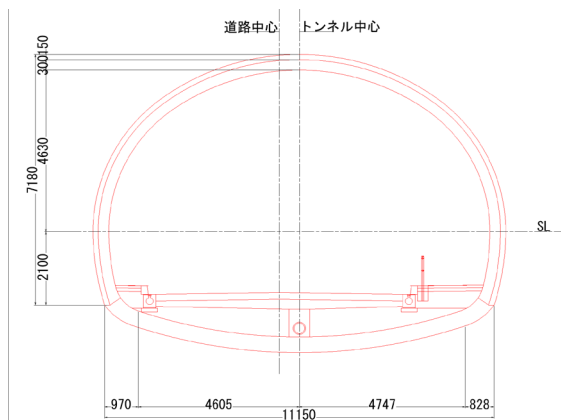


現場 B CI パターン



現場 C DI パターン

図-3 導入現場標準断面図例



現場D DⅢパターン
図-4 導入現場標準断面図例

(2) 試験内容

各現場において、ハイブリット建込みによる建込み手順の有効性検証を実施した。主な評価項目は、①建込み作業に要する時間、②断面サイズによる建込み成功頻度への影響、③事前金網設置時の自動動作停止発生の有無、④フルオート建込み手順との比較による作業時間の定量的評価である。

(3) 試験結果

試験結果を表-2に示す。

表-2 試験結果

現場	建込み方式	金網有無	平均建込み時間(分)	自動動作停止回数
A	フルオート	有	15.0	3
A	ハイブリット	有	8.2	0
B	フルオート	無	9.0	0
B	ハイブリット	無	7.5	0
C	ハイブリット	有	7.0	0
C	ナビゲーション	有	6.8	-
D	フルオート	有	13.2	2
D	ハイブリット	有	7.6	0

① 建込み作業に要する時間

通常断面および 100m² クラスの大断面現場において、ハイブリット建込みでは断面サイズに関わらず建込み時間が平均7分程度で安定し、作業時間の増加はみられなかった。

② 断面サイズによる建込み成功頻度への影響

断面の大小による作業効率の差は見られず、ハイブリット建込み手順は断面サイズを問わず安定した建込み精度を発揮した。

③ 事前金網設置時の自動動作停止発生の有無

従来「自動動作の停止」の主因となっていた事前金網設置についても、ハイブリット建込みを適用することで建込み動作中の停止は発生しなかった。

④ フルオート建込み手順との比較による作業時間の定量的評価

ハイブリット建込みでは、フルオート建込みと比較して建込み時間が最大 50%短縮され、作業効率の向上が定量的に確認された。

6. まとめ

本開発では、鋼製支保工建込み作業において自動動作と手動動作を柔軟に切り替え可能なハイブリット建込み手順の現場適用性を検証した。通常の建込み方法では、天端ボルトの締結や皿板の設置、タイロッドの取付けや金網の設置作業を含むと切羽付近での作業に通常 30 分を要したため、フルオート建込みでは、金網の事前設置や皿板の設置作業を除去することによって切羽への立入ゼロを実現かつ切羽付近での建込み作業時間を縮小していた。しかし、現場特有の条件下で「自動動作の停止」が頻発し、切羽付近での建込み作業時間が最大 15 分程度に達する事例も確認されていた。一方、ハイブリット建込みを導入することで、オペレータが状況に応じて手動制御を介入させることが可能となり、自動動作の停止発生をゼロに抑えることができた。これにより、1 基あたりの建込み作業時間は 7~8 分と大幅に短縮され、建込み作業の確実性と効率性が著しく向上した。また、断面サイズや現場条件に関わらず安定した施工品質が得られることも確認できた。

7. おわりに

今回の検証を通じて、手動動作と自動動作の切替えを可能とするハイブリット建込み手順は、現場ごとの多様な条件や作業者の熟練度に対応できる運用性の高さを有することが示された。作業者は自身の経験や現場状況に応じて操作方法を選択でき、熟練技術が求められる工程や危険性の高い作業を自動化に委ねることで、切羽への立入をなくし、作業の安全性・効率性が向上するとともに、作業負担も軽減される。本手法は、今後ますます深刻化が懸念される建設現場における熟練作業不足への対応策としても有効であると考えられる。今後はさらなる現場での適用拡大と、システム改良を進めたい。

参考文献

- 1) 水谷和彦, 坂下誠, 能代泰範, 宮原宏史: 鋼製支保工建込みロボットの開発, 前田技術研究所報, vol. 59, 2018
- 2) 五味春香, 水谷和彦, 小笠原祐介, 鈴木麟太郎, 坂下誠, 浅井秀明: 全自動鋼製支保工建込みシステムの開発, 土木建設技術発表会概要集(CD-ROM),

pp.183-189, 2023 年 03 月 30 日

3) 春田克樹, 水谷和彦, 馬場雄大: 鋼製支保工建込ロ

ボットを用いた効率的な施工手順の提案, 土木建設
技術発表会 2024, III-05