

# 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

前田建設工業(株) 正会員 ○春田 克樹  
正会員 水谷 和彦  
馬場 雄大

## 1. はじめに

山岳トンネル工事において、掘削の最前線である切羽は岩盤が露出しており、岩石の落下等による肌落ち災害が発生する恐れがある。特に、鋼製支保工（以下、支保工）の建込み作業や火薬の装薬作業においては、切羽直下で作業を行うため、肌落ちが発生した場合、重篤災害につながる危険性がある。そこで、災害発生防止の施策として、厚生労働省から「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」が制定され、肌落ち災害を防止するために、切羽監視員の配置や鏡吹付け等の肌落ち防止措置を講じている。同時に、施工会社は、切羽へ立入る機会が多いとされる支保工の建込み作業等の遠隔化・機械化を積極的に進めることが求められている。また、昨今、建設業においては人手不足が深刻化しており、それに伴い熟練技能者の不足が問題視されている。そのため、熟練者から後世へ技能伝承できないといった懸念に対応した仕組みの構築が急務である。

以上のような背景より、当社は支保工建込み作業における支保工のナビゲーションシステムが可能な鋼製支保工建込ロボット（以下、建込ロボ）を開発し、支保工建込み作業時の切羽立ち入り作業ゼロを達成した。しかしながら、ナビゲーション画面に沿った支保工の建込み作業は、ある程度の“慣れ”が必要であり、開発技術の導入初期は作業効率が低下してしまうという課題があった。そこで、筆者らは建込ロボを用いた効率的な施工が実現可能な施工手順を提案する。

## 2. 支保工位置ナビゲーションシステムの概要

通常、支保工の建込み作業は切羽作業員が切羽直下に立ち入って、目視と定規により確認しながら支保工の位置合わせを行うが、前述の通り切羽直下での作業は大変危険である。そこで筆者らは、ナビゲーション画面を見ながら支保工の建込みができる「支保工位置ナビゲーションシステム（以下、支保工ナビ）」を開発し、現場導入を進めてきた<sup>1)</sup>。支保工ナビは、設計の建込み位置と実際の支保工位置との差分が表示されたナビゲーション画面(図-1)をオペレータが確認しながら支保工を設計位置へ建て込むシステムである。本システムを活用することで、切羽直下へ立入らずに支保工の建込みを施工できるようになっただけでなく、支保工の建込み位置をシステムで可視化できるため、建込み精度が向上した。

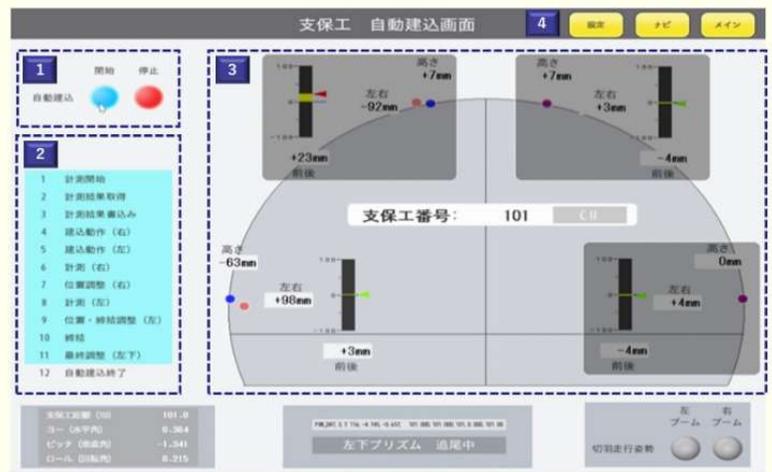


図-1 ナビゲーション画面

キーワード 鋼製支保工建込み, 切羽立ち入りゼロ, 作業効率向上

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株) TEL03-5276-5551

### 3. 鋼製支保工建込ロボットを構成する要素

建込ロボは図-2に示す鋼製支保工建込システム（以下、建込システム）により、支保工建込み作業時の切羽立ち入り作業ゼロを可能にする。

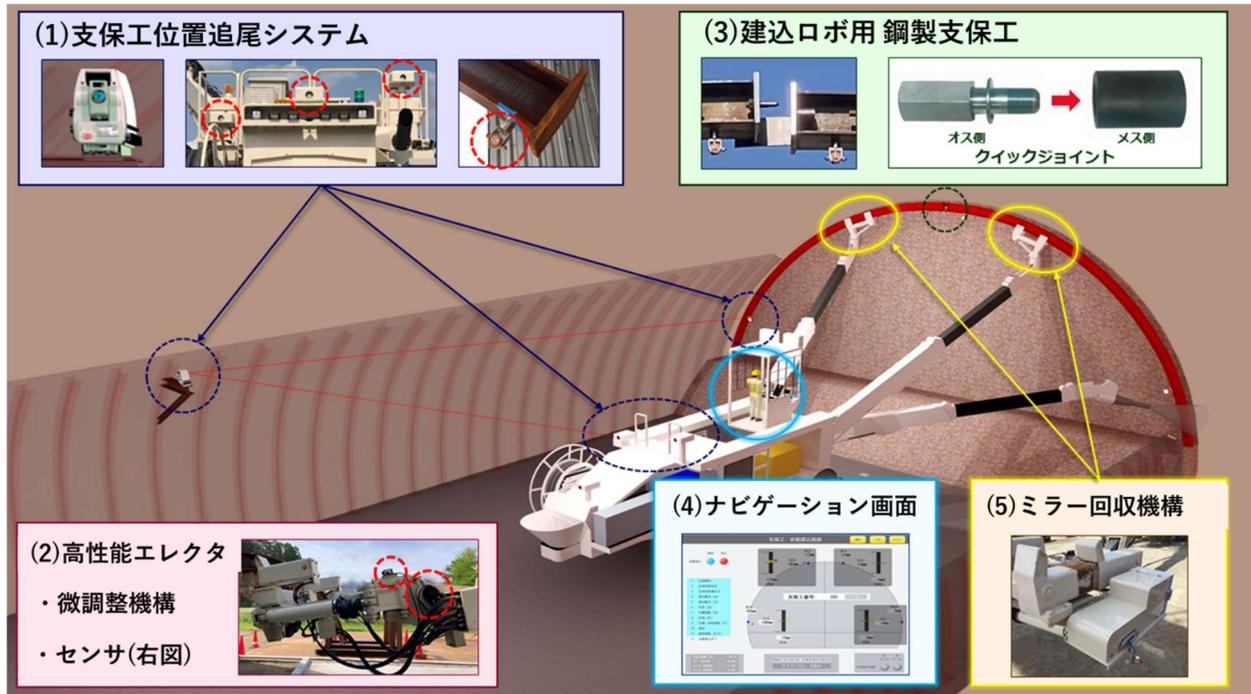


図-2 鋼製支保工建込システム概要図

#### (1) 支保工位置追尾システム

エレクター一体型吹付け機（以下、エレクタ）および支保工の位置情報を把握するために、エレクタにはマシン姿勢測定用プリズム、支保工には位置測定用プリズムを設置する。切羽近傍にエレクタを設置後、切羽後方のトンネル壁面に設置された自動追尾型トータルステーション（以下、TS）でマシン姿勢測定用プリズムを視準し、エレクタの機体中心座標を算出する。支保工の位置取得にあたっては、TSで支保工の天端と足元に設置したミラーを順番に自動追尾することで、支保工の座標をリアルタイムに取得する。

#### (2) 高性能エレクタマシン

エレクタには、ブームや機体にセンサを取り付けており、そのセンサを使用することで、ブームの長さや高さ、傾き等を詳細に把握できる。

#### (3) 建込ロボ用 鋼製支保工

建込システムに用いる支保工は、人が切羽に立ち入る必要が無い仕様である。表-1に一般的に用いられている支保工仕様と建込システム用の支保工仕様を対比した表を示す。

表-1に示す通り、鋼製支保工建込システムの適用にあたり、従来とは異なる支保工の仕様を考案した。以下に仕様の詳細を示す。

##### ① 天頂部の継手

従来、支保工天頂部の継手にはボルトナットが用いられており、切羽作業員がエレクタに設置されている高所作業用ゲージに乗り込んで支保工天頂部まで近付き素掘り面直下にて、人力で締結していた。建込みシステムの開発に伴い、天頂部の継手締結を人力作業なしで行うため、ワンタッチ式クイックジョイント（以下、QJ）を継手部に採用した。QJの構成部品を写真-1に示す。

表-1 支保工仕様の対比表

項目	従来の仕様	建込ロボ用の仕様
①天頂部の継手	ボルトナットを人力で締結	ワンタッチ式の継手による締結
②奥行の確認	切羽直下に立入り，支保工の鉛直精度を確認しながら締結	天頂部に設置されたガイドプレートにスライドさせながら締結
③金網の設置	切羽直下に立入り，支保工背面に手作業で設置	支保工に金網を事前設置して建込み
④支保工の転倒防止	つなぎ材もしくはタイロッドを使用した転倒防止	頭付きアンカーと吹付けコンクリートを一体化させることで転倒を防止

## ② 奥行の目安

建込みシステムは、天頂部の締結においては、高度な測量精度を要する。支保工が建込み時に揺れて、測量精度が低下することを防止するため、天端部に当て板を設置した。当て板にはテーパ部と直線部を設けており、支保工を当て板に押し当てながらスライドすることで、QJのピン先端がメス側に向くように設計した。当て板を活用しながら支保工を建て込む状況を写真-2に示す。

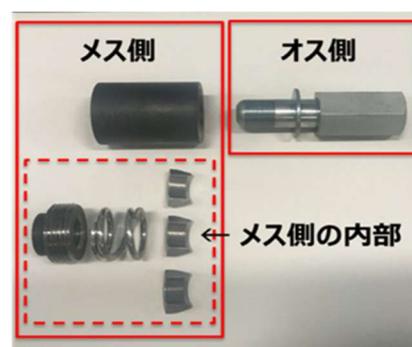


写真-1 QJ 構成部品

## ③ 金網の設置

従来、金網は、切羽作業員が切羽直下に立入って素掘り面を覆うように設置しており、非常に危険な作業である。そこで、建込みシステムにおいては、金網を支保工に事前設置することで、切羽直下へ立入ることなく金網設置を行う。写真-3に金網を設置した支保工の一例を示す。金網のたわみ防止材(L=600 mm, φ16 mm)を支保工の要所に配置し、支保工に金網を溶接する。



写真-2 天端当て板

## ④ 支保工の転倒防止

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ている。つなぎ材の施工は、直近で建て込んだ支保工と1基手前に建て込まれた支保工を連結するが、頭付きアンカーを支保工に事前設置することでつなぎ材の設置作業を不要にした。頭付きアンカーの設置例を写真-4に示す。頭付きアンカーと吹付けコンクリートの連結構造を構築することで、支保工の転倒防止を図る。



写真-3 金網設置状況

## (4) ナビゲーション画面

図-1に示した建込み用ナビゲーション画面の各種表示を以下の①～②に示す。

### ① 動作ステップ表示

建込みの動作ステップを示す。動作が終了すると、青くハッチングされ、建込み状況を逐次把握できる。

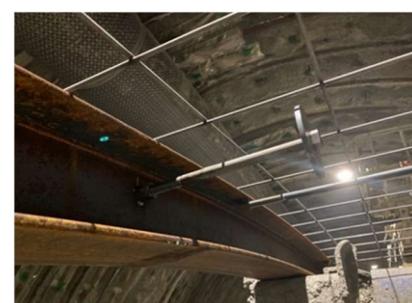


写真-4 頭付きアンカー設置状況

## ② 建込み状況の表示

支保工の建込み状況を可視化する役割があり、画面内の赤丸が実測位置、青丸が設計位置を示し、実測と設計のずれを数値化する。「前後」の数値上部に配置されているインジゲータは、奥行方向のずれを可視化しており、傾き方向を指す三角印が 0 に位置すれば支保工の前後が設計と一致したことを示す。測量の状況は、ハッチングの有無で表現しており、ハッチングされていない箇所は、追尾測量中であることを示している。支保工の位置情報は、追尾測量結果をシステム内で逐次計算し、実測と設計との差をリアルタイムに画面表示する。

### (5) ミラー回収機構

本機構の運用においては、エレクタで支保工を把持した状態でウィンチからけん引ロープを引き出し、支保工の天端と足元にミラーを設置する。支保工建込み完了後、運転席のリモコンを操作して各ミラーを回収し、吹付けコンクリートの施工に移行する。ミラー回収機構の適用状況を**写真-5**に示す。



写真-5 ミラー回収機構

## 4. ナビゲーションに沿った効率的な建込み作業

支保工ナビを含む鋼製支保工建込システムを活用した作業に際して、いくつかのトンネル現場へ建込ロボを導入した結果、現場ごとに作業効率のばらつきが大きいことがヒアリングの結果明らかとなった。支保工ナビを使った建込み作業では、鋼製支保工の位置合わせ方法が従来の方法と異なる。そのため、現場ごとに建込位置合わせ手順にばらつきがあったためだと考えられる。

そこで、筆者らは各現場の支保工ナビを用いた作業手順と位置合わせに必要な時間を整理し、最も効率的な建込み位置合わせ手順をまとめた。位置合わせの作業フロー案を**図-3**に示す。

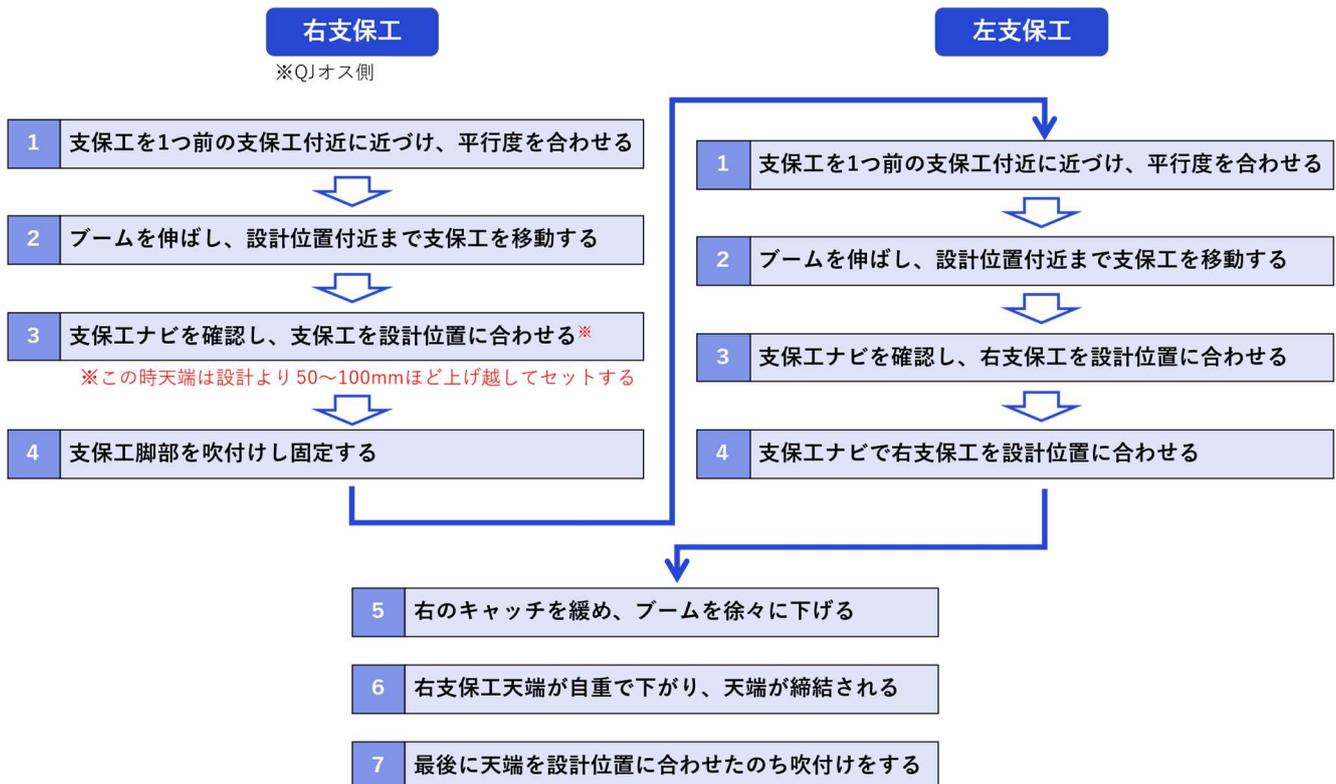


図-3 効率的な建込みフロー案

位置合わせ手順でポイントとなる手順は以下の4つである。

① **支保工を建込み位置に移動する前に平行度（立ち）を合わせておく（図-4）**

支保工の平行度は、はじめに目視で手前の支保工と合わせておくことで、支保工ナビでの計測からの位置合わせ回数を減らすことができる。その結果、最終的な位置合わせの時間を短縮することが可能。

② **左右支保工の根足部分は、設計位置で天端締結前に吹付けコンクリートで固定しておく（図-5）**

仮に根足を固めず天端を締結した場合、締結後に再び設計位置への位置合わせが必要となり時間を要してしまう。そのため、根足を先に固定した状態での支保工の締結は、位置合わせ工程を削減することが可能。

③ **QJの締結は、右支保工天端を自重で下げながら締結する（図-6）**

天端の締結時においては、左右支保工の根足を吹付けコンクリートで固定しているため、QJ軸方向に支保工を移動させることは困難である。また、軸方向での締結では、奥行き方向の位置合わせが困難であるため、支保工の自重とたわみを利用した締結を提案する。

④ **右支保工の位置合わせをする際、天端を50~100mm程度上げ越しておく（図-6）**

根足部分を固定された状態において、支保工の自重とたわみを利用した締結のため、あらかじめ右支保工を設計位置より上げ越しておく必要がある。



図-4 右支保工 平行度合わせ



図-5 右支保工 締結前の脚部吹付け

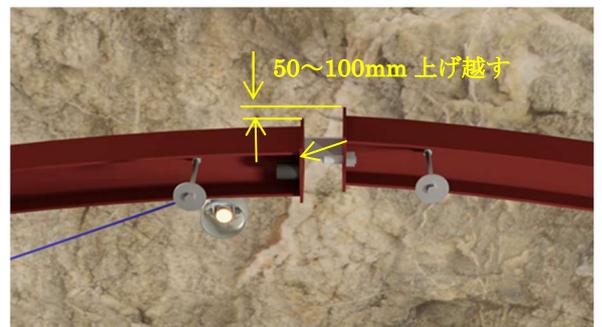


図-6 天端締結前

## 5. おわりに

本システムによる建込み方法を検討する上で、効率的に設計位置に支保工を建て込む方法を導くことができた。効率的な支保工建込みについて、先行して部分的に支保工を固定することで、その後の支保工移動が制限され、結果的に位置合わせの工程（締結作業におけるQJオス側支保工脚部の位置合わせ動作）を短縮できることを確認した。支保工天端の締結については、外気温の違いによる精度検証やエレクタブームの把持角度の調整、天頂部のプレート形状の検討に加え、建込ロボオペレーターのヒアリング結果を反映することで、位置合わせに要する時間を5~10分程度短縮することを目標としている。

今回の検討を通して、人が持つ感覚や経験を機械に落とし込むことは非常に難しく、様々な状況を考慮して開発を進めることの重要性を再認識した。今後は、さらなる作業の効率化に向けた課題解決に取り組み、現場作業の生産性向上に寄与する技術確立に努める。

## 参考文献

- 1) 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, トンネルと地下, Vol.51, No.4, pp.57-66, 2020.4