

# 山岳トンネル工事の安全性・生産性向上技術

## 鋼製支保工建込みロボットの開発

水谷和彦

切羽肌落ち災害は山岳トンネル特有の労働災害であり、統計上、鋼製支保工建込み作業中の被災事例が最も多い。切羽に作業員が立ち入ること無く、山岳トンネル用鋼製支保工を設置可能な『鋼製支保工建込みロボット』を開発した。

本技術は、自動追尾型トータルステーションなどで構成する「支保工位置ナビゲーションシステム」、支保工位置の微調整が可能な「高性能エレクターマシン」、ボルト・ナットの締付を必要としない「自動建込用鋼製支保工」により、測量や支保工の位置合わせなど、従来は人が切羽直下で行っていた作業を機械化し、運転席からの操作のみで高精度な支保工の建込みを実現する。トンネル切羽直下に人が立ち入ることなく、オペレーター1人で支保工の建込みが可能となるので安全性と生産性が格段に向上する。

キーワード：山岳トンネル、切羽肌落ち災害、鋼製支保工建込み、生産性向上、安全性向上

### 1. はじめに

切羽肌落ち災害は山岳トンネル特有の労働災害であり、統計上、鋼製支保工建込み作業中の被災事例が最も多いのが現状であることが報告されている<sup>1)</sup>。災害防止対策として、地山の緩み抑制(鏡吹付けコンクリートや鏡ボルトなど)や岩石落下の予測(切羽監視員の配置や切羽押出計測など)、設備的防護対策(マット設置やマンゲージガードなど)を複合的に実施し、災害発生確率を可能な限り下げる努力をしているが、抜本的な対策とは言い難いのが現状である。平成28年12月に厚生労働省より通達された「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」(平成30年1月改正)<sup>2)</sup>においては、機械化による事故防止対策が要望されており、そもそも切羽に作業員が立入ることがなければ被災することはない。そこで我々は、切羽に作業員が立ち入ること無く、山岳トンネル用鋼製支保工を設置可能な「鋼製支保工建込みロボット」を開発した。本稿では、開発した鋼製支保工建込みロボットの技術概要および導入実績について報告する。

### 2. 現行の施工方法

現行の鋼製支保工建込み方法としては、オペレーター以外の作業員は切羽直下における作業となる(写

真一1)。特に、鋼製支保工脚部では支保工の位置合せ作業が必要となり、最も被災リスクの高い作業である(写真一2)。また、支保工天端部では、天端ボルト・ナット締結やつなぎ材設置、溶接金網設置の為に作業員が切羽に立入る作業となる(写真一3)。

### 3. 開発技術の概要

鋼製支保工建込みロボットのシステム構成概略図を示す(図一1)。本技術は、鋼製支保工にマグネット装着した測量用プリズムや自動追尾型トータルステーションなどで構成された「支保工位置ナビゲーションシステム」と、鋼製支保工位置を微調整可能な「高性能エレクター」により、運転席からの操作のみで高精度な支保工建込みを可能とした。また、当社保有特許技術であるクイックジョイントを備えた「自動建込用鋼製支保工」による天端継手締結や支保工を把持しながらコンクリートを吹付けることにより、作業員の切羽立入を不要にする。

支保工建込み作業における標準的な施工では、少なくともオペレーター1名と切羽に立ち入る作業員4名必要となるが、本技術の導入により、切羽直下に作業員が立ち入ることなく、オペレーター1名による機械作業での対応が可能となるため、省人化と施工サイクル短縮による生産性向上を実現するとともに、切羽肌落ち災害撲滅が期待できる。



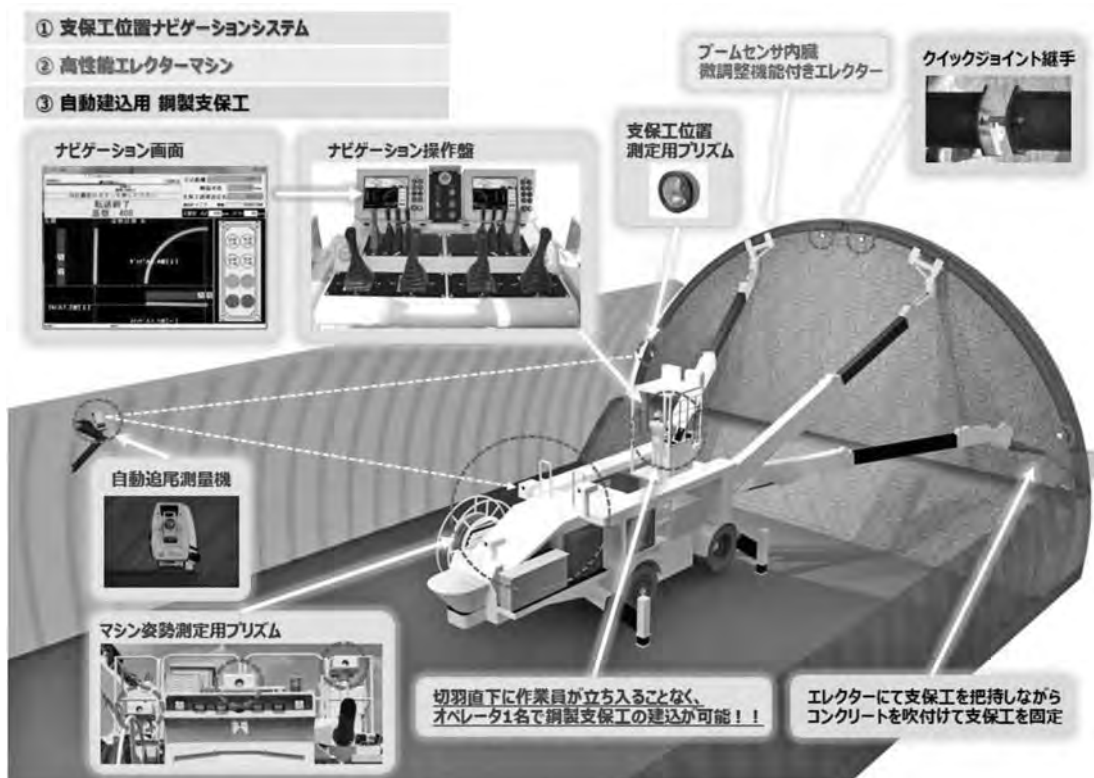
写真一 1 現行のエレクター搭載型吹付機による施工方法



写真一 2 現行の鋼製支保工脚部における作業フロー（切羽左側）



写真一 3 現行の鋼製支保工天端部における作業フロー



図一 1 鋼製支保工建込みロボットのシステム構成概略図

### 4. 新システムの構成と機能

鋼製支保工建込みロボットは、支保工位置ナビゲーションシステム、高性能エレクター、自動建込用鋼製支保工で構成される。以下、各機能について説明する。

#### (1) 鋼製支保工位置ナビゲーションシステム

鋼製支保工位置ナビゲーションは、ロボット本体姿勢測定機能、鋼製支保工角度表示機能、測量用プリズムによる鋼製支保工位置の詳細表示機能で構成される。

##### (a) ロボット本体姿勢測定機能

ロボットに給電すると自動追尾型トータルステーションにより、ロボット本体の位置を自動計測する(写真-4)。

##### (b) 鋼製支保工角度表示機能

ロボット本体の姿勢とブームセンサーデータとを合成計算し、エレクター位置をナビゲーション画面でリア

ルタイムに把握できる(写真-5)。

#### (c) 測量用プリズムによる鋼製支保工位置詳細表示機能

トンネル線形管理については、従来施工で用いている掘削管理システムを基本とし、鋼製支保工へのミラー設置位置など初期設定を事前入力する。鋼製支保工を仮置きしている時点で所定の位置に測量用プリズムをマグネット装着し、本機能を用いてミリ精度の位置合わせを行うことができる。カラーバーにより設計値と実測値の差分を視覚的に把握することができる(写真-6)。

#### (2) 高性能エレクター

エレクター操作は、微調整可能な微速モード切替スイッチを装備し、鋼製支保工を把持したまま前後移動が可能なスライド機構を新たに設けた(写真-7)。また、クランプ姿勢を把握するため、各関節に姿勢を把握するためのセンサー(ブームセンサー)を内蔵した(図-2)。



写真-4 マシン姿勢測定機能



写真-7 クランプ部のスライド機構

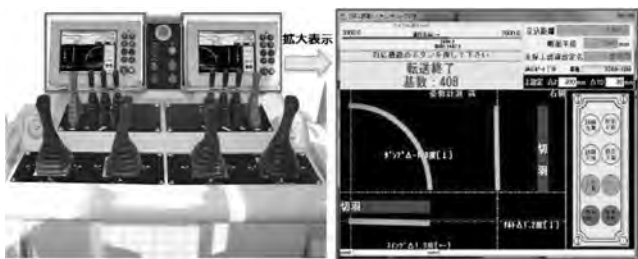


写真-5 運転席およびナビゲーション画面



図-2 各関節のブームセンサー位置図

#### 右側天端ミラー-自動追尾測定時

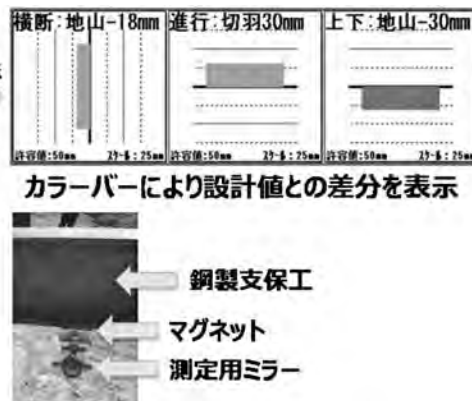
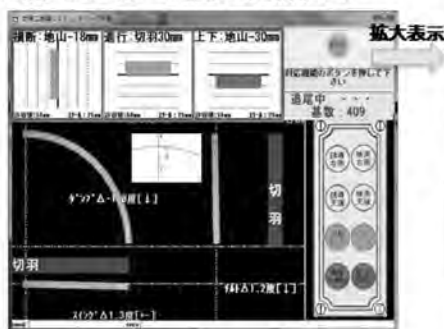


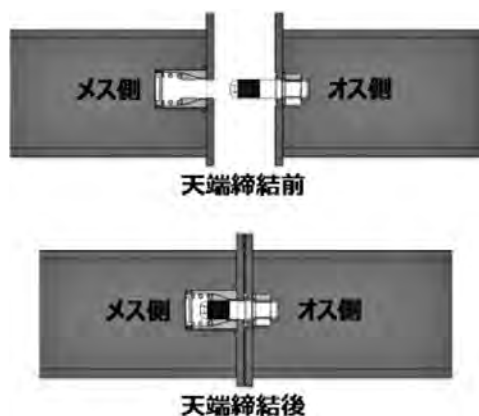
写真-6 測量用プリズムによる鋼製支保工位置の詳細表示

### (3) 自動建込用鋼製支保工

従来の作業員による天端ボルト・ナット締結を無くすことを目的に、エレクター操作のみで締結可能なクイックジョイント（写真—8）を鋼製支保工に溶接設置した（図—3）。クイックジョイントは、当社がシールドセグメント用に開発した継手であり、目開きが発生しにくい構造となり、締結部の品質確保にも寄与する。



写真—8 クイックジョイント



図—3 天端締結概念図

## 5. 工場試験

現場試験に先立ち、鋼製支保工建込みを模擬した試験を古河ロックドリル(株) 吉井工場にて実施した（写真—9, 10）。工場試験では、鋼製支保工建込みロボットの操作性や自動建込用鋼製支保工の施工性を確認し、操作手順のマニュアル立案と自動建込用鋼製支保工の仕様を決定した。



写真—9 工場試験状況



写真—10 自動追尾型トータルステーション架台

## 6. 現場試験

現場での試験施工を複数回繰り返す、鋼製支保工建込みロボットによる作業手順を以下のように決定した（今回は、最初に右側鋼製支保工の位置合わせ、次に左側鋼製支保工の位置合わせをすることとした。左右逆であっても問題ない）。

### (1) 準備工

架台に仮置きしている鋼製支保工をエレクターアームにて把持して待機場所に停車する。エレクターアームにて把持している鋼製支保工に、溶接金網を溶接により固定する（写真—11）。また、左右鋼製支保工脚部と右側鋼製支保工天端部に測量用プリズムをマグネット装着する。



写真—11 溶接金網取付完了

### (2) 鋼製支保工建込みロボット移動

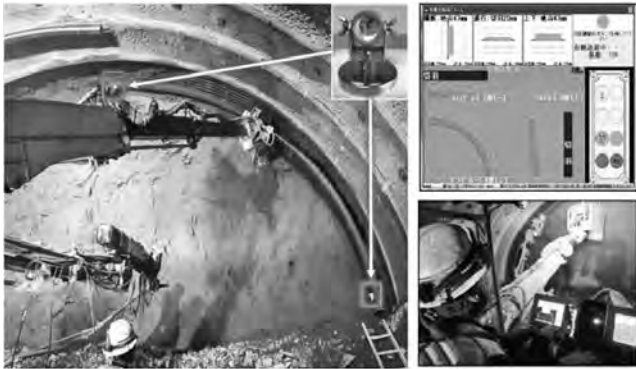
掘削が完了した後、エレクターアームにて鋼製支保工を把持した状態で支保工建込みロボットを機械待機場所から切羽に移動する。

### (3) 一次吹付けコンクリート

最初に位置合わせを実施する右側素掘り面より一次吹付けコンクリートを施す。

#### (4) 右側鋼製支保工位置合わせ

オペレーターは運転席のナビゲーション画面を見ながら、右側鋼製支保工脚部と右側鋼製支保工天端部の位置合わせを行う（写真—12）。位置合わせ完了後、作業員が切羽直下に立入らないように、網付きの棒により測量用プリズムを回収する。



写真—12 右側鋼製支保工位置合わせ状況

#### (5) 右側鋼製支保工脚部二次吹付けコンクリート

エレクターアームにて把持した状態で、右側鋼製支保工のエレクターアーム下まで吹付けコンクリートにて固定する（写真—13）。



写真—13 右側鋼製支保工脚部固定状況

#### (6) 鋼製支保工天端締結

クイックジョイントにより左右鋼製支保工の天端部を締結する（写真—14）。

#### (7) 左側鋼製支保工位置合わせ

オペレーターは運転席のナビゲーション画面を見ながら、左側鋼製支保工脚部の位置合わせを行う。位置合わせ完了後、測量用プリズムは回収する。



写真—14 左側鋼製支保工位置合わせ状況

#### (8) 左側鋼製支保工脚部二次吹付けコンクリート

エレクターアームにて把持した状態で、左側鋼製支保工のエレクターアーム下まで吹付けコンクリートにて固定する（写真—15）。

#### (9) 天端部二次吹付けコンクリート

左右のエレクターアームを解除し、エレクターアーム把持部から上部の吹付けコンクリートを施す（写真—16）。



写真—15 左側鋼製支保工脚部固定状況



写真—16 天端部二次吹付けコンクリート状況

## 7. 本技術の導入効果

現場試験の結果、以下の効果が確認できた。

### (1) 鋼製支保工建込み作業における切羽立入り作業ゼロを達成

標準施工では切羽に4名の作業員が立ち入って作業していたが、本技術の採用により作業員の切羽への立入り作業はゼロとなった。

### (2) 鋼製支保工建込み作業における省人化

鋼製支保工位置合わせオペレーター1名での鋼製支保工建込み作業が可能となった（ただし、吹付けコンクリートノズル操作者（他工程作業員）やプリズム回収補助員は必要）。

### (3) 施工サイクルの短縮

鋼製支保工建込み時の切羽立入り作業がゼロになったため、一次吹付けコンクリート、鋼製支保工建込み、二次吹付けコンクリート作業において各サイクルの終了後に次サイクルに移行する必要がなくなった。そのため、左側一次吹付けコンクリート時の右側鋼製支保工位置合わせおよび右側二次吹付けコンクリート時の左側鋼製支保工位置合わせが同時作業可能となり、施工サイクルが短縮できた。

### (4) 鋼製支保工建込み精度の向上

従来のつなぎ材を省略することで、鋼製支保工を設

計位置に建込むことができる為、カーブ区間での鋼製支保工建込精度が向上した。

## 8. おわりに

鋼製支保工建込み時の切羽立入り作業がゼロとなり、建込み時の切羽肌落ち災害に対する安全性を格段に向上させることができた。また、鋼製支保工建込作業の省人化と施工サイクル短縮による生産性向上、高精度建込による品質向上を実現できた。

本技術は、ナビゲーション技術を活用したマシンガイダンス技術であり、現状はオペレーター操作の技量が必要になる。今後は、熟練していない作業員でも施工可能な完全自動化技術の構築を目指す。

JICMA

### 《参考文献》

- 1) トンネル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 2012, 労働安全衛生総合研究所
- 2) 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 2018, 厚生労働省

### 【筆者紹介】

水谷 和彦（みずたに かずひこ）  
前田建設工業(株)  
土木事業本部 土木技術部 トンネル技術チーム  
チーム長

