

全自動鋼製支保工建込みシステムの開発

前田建設工業（株）	正会員	○五味 春香	正会員	水谷 和彦
	正会員	小笠原 裕介	正会員	鈴木 麟太郎
	正会員	坂下 誠	正会員	浅井 秀明

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。

2. システム開発の背景と課題

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¹⁾。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。

一方で、支保工ナビを活用した建込み作業においてオペレータは、支保工を把持しているブームの小さなたわみ量や支保工の微小なゆがみやねじれを鑑みて、操作レバーで位置を微調整しながら支保工を建て込む必要があった。そのため、技能者が培ってきた操作技術や感覚が求められ、通常の施工に支保工ナビを適用してスムーズに作業を行うには、熟練の技能者であっても操作習得に時間を要した。また、経験の浅い技能者においては、支保工ナビ操作を習得できず、支保工の建込み作業において、従来通り切羽直下に立ち入って目視等で位置合わせする様子が散見された。

これらの課題を解決するため、筆者らは、経験に関係なく支保工の建込みを安全に施工できる全自動鋼製支保工建込みシステム（以下、自動建込みシステム）を開発した。

3. 自動建込みシステム

自動建込みシステムは、ボタンひとつで支保工を把持した状態から設計位置に建て込むまでの一連の動作を行う。自動建込みシステムの概要図を図-3.1 に示す。本システムは、(1) 支保工位置追尾システムおよび(2) 高性能エレクタを自動制御するプログラムのほか、切羽直下に立入ることなく作業を遂行できる(3) 自動建込用鋼製支保工に加え、(4) 自動建込み用操作画面と(5) ミラー自動回収機構で構成している。

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

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2 前田建設工業株式会社 TEL 03-3265-5551

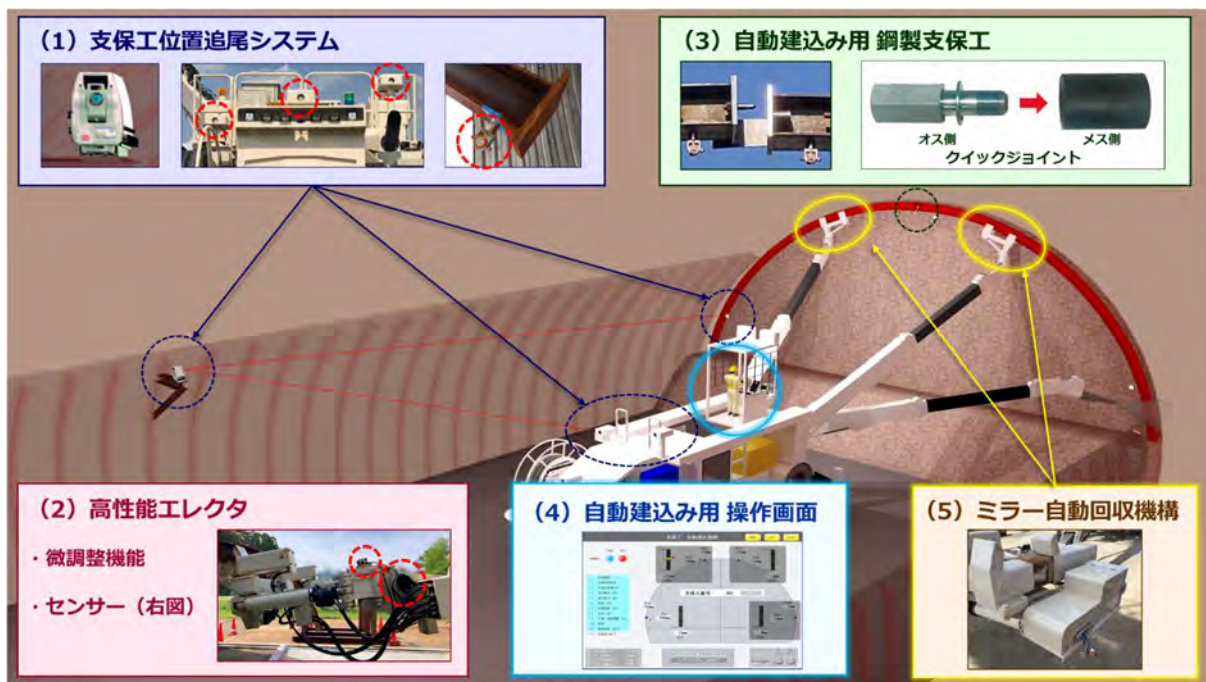


図-3.1 自動建込みシステム概要図

4. 自動建込みシステムを構成する要素

自動建込みシステムを構成する要素の仕様を以下に示す。

(1) 支保工位置追尾システム

エレクタや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。中心座標は、自動建込みシステムの制御パソコンに自動転送され、エレクタのブーム位置等の算出に用いられる。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

本開発においては、エフティーエス株式会社製エレクタ一体型吹付け機「ヘラクレス」を自動建込みシステム仕様に改造した。開発に使用したエレクタには、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) 自動建込み用 鋼製支保工

自動建込みシステムに用いる支保工は、人が切羽に立ち入る必要がない仕様である。表-4.1 に一般的に用いられている支保工仕様と自動建込み用の支保工仕様を対比した表を示す。

表-4.1 支保工仕様の対比表

項目	従来の仕様	自動建込み用の仕様
①天頂部の継手	ボルトナットによる手締め	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

表-4.1 に示す通り、自動建込み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、素掘り面直下で手締めしていた。自動建込みシステムの開発に伴い、天頂部の継手締結を遠隔で行うため、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-4.1に示す。QJのメス側内部はテーパ状で中にはクサビ状のネジコマやバネが入っている。ネジ先を押し込む力を利用し、メス側のネジコマがボルトのネジを飛び越えることで無回転でも締結できる。

②奥行の目安

自動建込みシステムは、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-4.2に示す。写真-4.2は、右支保工に当て板（PL=100×200、テーパ部l=150mm、直線部l=50mm）を設置した状態で建込み動作を行い、その状況を支保工直下から撮影したものである。

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、自動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-4.3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=600mm、φ16mm）を支保工の要所に配置し、支保工に金網を溶接する。

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おり、吹付けコンクリートを施すまでの間、支保工を仮支えすることを目的として使用されている。つなぎ材の施工は、切羽作業員が切羽直下において、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、本開発では、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。頭付きアンカーと吹付けコンクリートの連結構造



写真-4.1 QJ 構成部品

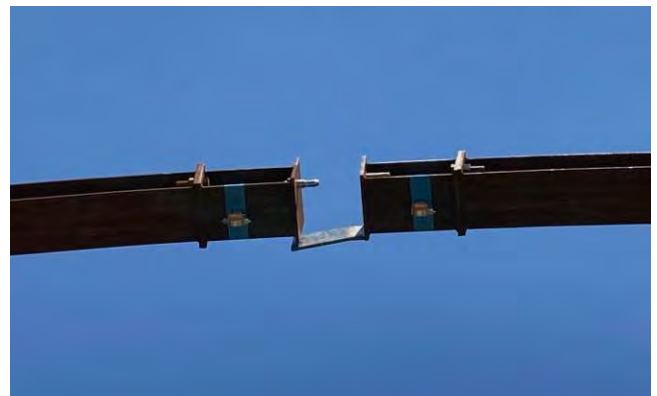


写真-4.2 当て板を活用した建込み状況

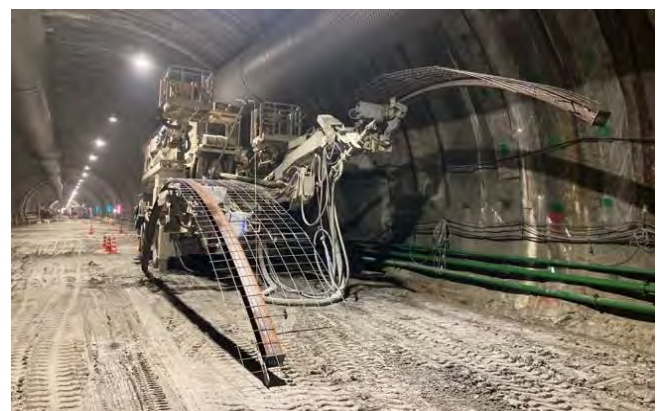


写真-4.3 金網の設置状況

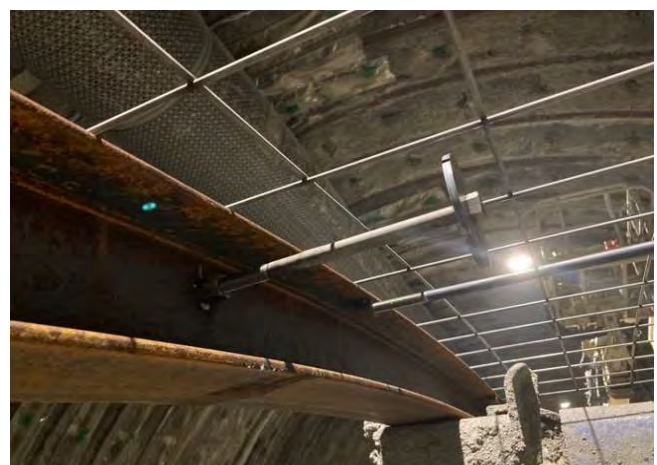


写真-4.4 頭付きアンカーの設置例

を構築することで、支保工の転倒防止を図る。頭付きアンカーの設置例を写真-4.4に示す。

(4) 自動建込み用操作画面

自動建込み用操作画面を図-4.1に示し、各種表示を以下の①～④に記す。

①自動建込み開始ボタン

青いボタンが建込み開始ボタン、赤いボタンが停止ボタンである。建込み開始ボタンを押下すると、自動建込みが開始され、終了するまでの作業を一貫して行う。停止ボタンは、エレクタに備わっている停止装置に直結している。

②動作ステップ表示

自動建込みの動作ステップを示している。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。

③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、実測と設計のずれも併せて数値化する。「前後」の数値上部に配置されているインジゲータは、奥行き方向のずれを可視化しており、傾き方向を指す三角マークが0に位置すれば支保工の立ちが良好であることを示す。測定の状況は、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。例えば、図-4.1においては、左支保工足元を追尾測量しながら支保工を設計位置に移動させている状況である。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-4.5に示す。

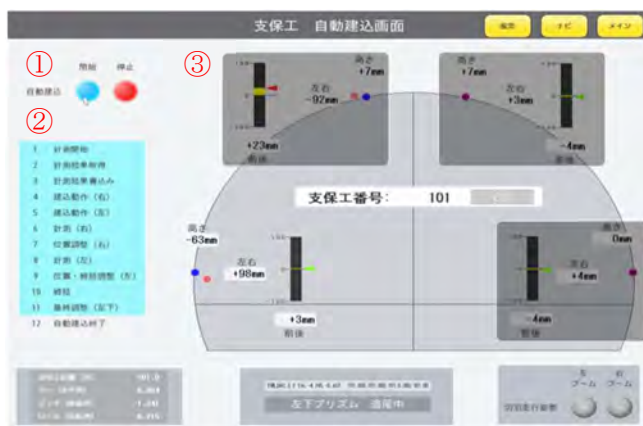


図-4.1 自動建込みシステム画面



写真-4.5 ミラー回収機構適用状況

5. 自動建込みシステムの動作試験

(1) 概要

自動建込みシステムの開発に際し、現場適用に向けて屋外試験を重ねてきた²⁾。従来の試験においては、支保工を建て込む際のブーム動作自動制御プログラムの作成や支保工天端の継手にQJを採用し、継手締結作業を自動化できることを確認した。そこで筆者らは、現場適用に向けた次の段階として、閉鎖空間におけるシステムの動作検証を行う必要があると考えた。

当社は、山岳トンネル工事に関わる技術開発を加速させるため、茨城県取手市にあるICI総合センター敷地内に模擬トンネルを設置した。本章は、模擬トンネルを活用した自動建込みシステムの試験実施結果を以下に述べる。

(2) 試験環境

模擬トンネルは、前田建設工業ICI総合センター敷地内に設置されており、トンネル延長はL=29.570m、

断面積は固定部 $A = 50.7\text{m}^2$ ，移動部 $A' = 55.2\text{m}^2$ である。模擬トンネル先端の移動部はスライド稼働式で開閉できる。模擬トンネル内での試験状況を写真-5.1に示す。

試験環境は、坑壁と支保工の接触等を防止するため、移動部を前方にスライドさせ、天井を開口部とした状態で試験を行った。それによって移動部は屋外試験と同様の環境のため、固定部と移動部にゴム糸を張ることでトンネル内空を模擬した。測量機器は模擬トンネル坑口付近に設置し、試験中は随時、エレクタの姿勢測量と支保工の追尾測量を行った。



写真-5.1 模擬トンネル内での試験状況

(3) 試験内容

a) 断面より過大な動作の有無を確認

自動建込みシステムによる建込み動作時、断面より支保工が過大な動作をしているかどうかを確認する必要があった。過大な動作とは、トンネルの壁面に支保工が接触する状況や切羽の余掘り量を実際よりも大きく確保する必要がある状況を指す。過大な動作は、基本的にはゴム糸への接触有無により確認した。また、支保工締結時に必要な余掘り量は、TSで位置座標を取得することで支保工の動作範囲を確認した。

b) 締結精度の検証

屋外試験において締結の可否に関する検証は実施しており、その際、締結不可の割合は3～5割程度であった。締結できない状況の一例としては、QJのピン1本分程度、メス側の孔より上下左右にずれていた。

締結精度が5割以上に達しない原因として、外気温が低い(5～10℃)とエレクタの動作油温も低くなることで制御に支障をきたしていることやブームのたわみ・がたつきが影響していることが考えられたが、真の原因究明には至らなかった。そこで、本試験ではプログラムや測量手順を変更しながら、締結精度向上のための解決策を講じる必要があると考えた。なお、屋外試験は冬に実施していたが、模擬トンネルでの試験においては外気温が実現場の坑内温度と同程度(20～25℃)である5月に実施した。

c) 建込み方法の検討

実際の支保工建込み作業は、吹付けコンクリートと支保工の一体化を図るため、両者を同時に施工する。そのため、自動建込みシステムの適用にあたって、吹付けコンクリートとの同時施工を想定して建込み方法のプログラムを構築する必要があった。なお、自動建込みシステムにおける建込み順序は、右支保工を設計位置に建込み後、左支保工を建て込むことを基本とした。

(4) 試験結果

各試験内容の結果を以下に示す。

a) 断面より過大な動作の有無を確認

模擬トンネル内で動作を検証した結果、右支保工は、開口部に張ったゴム糸への接触はなく、動作状況は良好であった。しかし、支保工締結時に左支保工がトンネル断面よりも20～30 cm程度、過大に動作していた。これは、QJのボルト長が約10 cmのため、ボルト長以上の離隔が必要だからである。締結時に過大な動作をする場合、余掘り量を大きく設定する必要があるが、現場にとっては不利益につながると考え、右支保工のプレートから15 cm離隔をとった位置から締結できるようにプログラムを再構築した。

b) 締結精度の検証

自動建込みシステムの当初設計プログラムにおける建込み手順は、右支保工を設計位置に建込み後、左支保工も設計位置に建て込む方法であり、左右支保工の測量精度が悪い場合、締結精度も悪くなる。そのため、右支保工を建込み後、右支保工の座標位置に合わせて左支保工を建て込む方法を検討した。しかし、右支保工の建

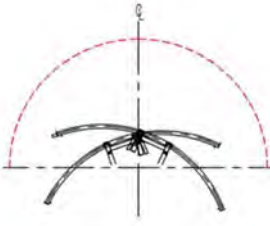







込み精度が悪い場合、左支保工も併せて建込み精度が悪くなることが予想された。また、支保工のたわみにより、設計の内空を侵すことが懸念されたため、左右支保工締結後、左ブームを動かして左支保工の足元を設計位置に移動させることで、左支保工の建込み精度の向上と内空を確保する方策を考案した。

建込み手順の変更により、締結精度は6～7割程度まで向上したが、動作を繰り返すうちに精度が悪くなる現象が見受けられた。そして、締結失敗のたびに制御パソコンで把持位置や角度を再設定して、たわみやがたつきを調整するなど、煩雑な作業が必要であった。そこで、支保工の天端と足元に設置したミラーの測量結果から支保工の建込み角度を算出し、設計の建込み角度になるように支保工を回転させるプログラムを加えることで締結精度の向上を図った。以上の手法を動作に加えたことで、支保工の締結精度は、9～10割に達した。

c) 建込み方法の検討

b) の検証により、自動建込みシステムによる支保工の建込み順序が概ね決定されたため、実際の施工に即して、吹付けコンクリート工を含めた建込み方法を検討した。建込み方法は、支保工ナビを導入している現場を参考に検討した。表-5.1 に建込み方法の施工案を示す。

表-5.1 自動建込みシステムによる建込み方法 施工案

凡例 ----- : 支保工の設計位置			
<p>① 切羽付近にエレクタを据えてエレクタ前方で支保工を構え、支保工を設計建込み位置付近まで移動させる。</p> 	<p>② 右支保工に設置した天端と足元のミラーを視準し、支保工の角度を算出して角度調整する。</p> 	<p>③ 右足元を設計位置に移動する。</p> 	<p>④ 右天端のミラーを視準しながら、設計位置に移動する。移動後、ミラーを回収し、足元を吹付ける。</p> 
<p>⑤ 左支保工に設置した天端と足元のミラーを視準し、支保工の角度を算出して角度調整する。</p> 	<p>⑥ 左天端のミラーを視準しながら右支保工の天端プレートから約15cmまで移動させる。</p> 	<p>⑦ 左支保工を動かし、左右支保工を締結する。</p> 	<p>⑧ 左足元のミラーを視準しながら設計位置に移動させ、右支保工の肩から天端、続いて左支保工の吹付けを行う。</p> 

6. 現場適用への課題

(1) 支保工を建て込む空間の確保

素掘り面に支保工を建て込む際には、支保工を微調整するための空間や天端締結するための空間を確保しなければならない。現場適用の際は、地質状況等を鑑みながら浮石除去を行い、支保工を建て込む空間の確保が必要である。

(2) 既設支保工との接触防止

本試験において坑内よりも過大な動作の有無は確認したが、既設支保工と実切羽の間（1.2～2m 程度）に建て込むことを想定した試験の実施には至っていない。実現場において既設支保工と接触した場合、吹付けコンクリートにひび割れが発生するなど、支保工の品質が低下する恐れがある。自動建込みシステムで一連の動作を行うためには、現プログラムが既設支保工を回避できるかどうか確認するとともに、接触を未然に防止できる機構の検討が必要である。

(3) 支保工出来形の確認方法

自動建込みシステムは、エレクタ後方に設置された TS でエレクタや支保工の絶対座標を管理している。また、支保工の建込み位置は、支保工に設置されたミラーを視準することで管理しているが、ミラーが正規の位置に設置されていない場合、支保工を設計位置に建て込むことができない。このような状況を避けるため、自動建込みシステムと支保工位置を示すレーザーを併用するなどの検討が必要である。

7. おわりに

自動建込みシステムの動作試験を重ね、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込む方法や締結精度向上を図る方法を導くことができた。効率的に設計位置に支保工を移動させるには、ブームの滑らかな動きを実現させるため、左右ブームの同時動作に加え、1ブームで最大6動作（ブーム上下左右および伸縮、チルト上下左右および回転）できるプログラムを構築したことで、無駄な動きがない建込みを実現した。締結精度の向上にあたっては、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など、様々な検証・検討を重ねたことで現在の締結精度に至った。

今回の動作試験や自動建込みシステムの検討を通して、人が持つ感覚や経験を自動化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、課題解決に向けた検討・試験を行い、現場適用を目指す。

8. 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
- 2) 遠亮太, 水谷和彦, 坂下誠, 浅井秀明: 完全自動鋼製支保工建込みロボットの開発, 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, VI-914, 2021