

38. 全自動鋼製支保工建込みシステムの開発

切羽作業を無人化するシステムの開発と自動化に向けた取り組み

前田建設工業株式会社
前田建設工業株式会社
前田建設工業株式会社

○五味 春香
水谷 和彦
小笠原 裕介

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、岩石等の落下による肌落ち災害が発生する恐れがある。特に、支保工の建込み作業においては、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。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。

2. 開発の流れ

筆者らは、「切羽直下に立入らなければ被災しない」と考え、支保工建込み時に切羽直下に立入らずに建込みができるシステムの構築を試みた。開発においては、まず、切羽直下に作業員が立入ることなく建込み可能な支保工仕様の検討を行った。続いて、ナビゲーション画面を見ながら建込みを行う「支保工建込みナビシステム（以下、建込みナビ）」を構築した。そして、オートメーションで支保工を建て込む技術と「建込みナビ」を併用する「全自動鋼製支保工建込みシステム（以下、全自動建込みシステム）」の構築を行った。

3. 支保工仕様の検討

従来、支保工の建込みにあたっては、天端をボルトとナットで締結、転倒防止のために支保工を相互に連結するためのつなぎ材の設置、吹付けコンクリートのはく落防止などを目的に金網の設置を行う。これらの作業は全て人力による作業であり、切羽直下での作業が発生する。そこで、表-3.1に示す支保工仕様に変更することで、切羽直下作業の無人化を図った。次章より、支保工仕様の検討内容を示す。

表-3.1 支保工仕様の対比表

項目	従来の仕様	切羽無人化の仕様
天端締結	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
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
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. 天端締結方法の検討

4.1 概要

一般的に、支保工天端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の高所作業用ゲージに乗り込んで支保工天端まで近付き、切羽直下で手締めしている。本開発の目的は切羽での無人化のため、オペレータが操作席から遠隔で締結可能なワンタッチ式の締結部材であるクイックジョイント（以下、QJ）の採用を検討した。QJの締結にあたっては、ネジ先を押し込む力を利用し、無回転でメス側のネジコマがボルトのネジを乗り越えるため、ネジ締めを必要としない。

4.2 強度試験の実施

QJの採用にあたり、QJを用いた継手が、ボルト・ナットを用いて締結する従来の継手と同等以上の強度を有するのかを確認するため、強度試験を行った。試験は、3等分曲げ試験と2面せん断試験を実施し、せん断抵抗、曲げ抵抗について強度を把握し、ボルト・ナットによる従来継手とQJによる継手の比較を行った。なお、トンネル標準示方書では支保工に必要な性能として、軸圧縮抵抗、せん断抵抗、曲げ抵抗が示されている。しかし、本試験では、H鋼断面が同じであれば軸圧縮抵抗は同等であるとして、軸圧縮抵抗に関する試験は行っていない。

表-4.1 試験ケース一覧

ケース	締結方法	継手板厚さ	面取り寸法	ボルト配置
1	標準継手	9mm	なし	左右対称
2	QJ	9mm	6mm	中心
3	QJ	9mm	6mm	偏心

表-4.2 3等分曲げ試験 最大荷重の一覧

ケース	締結方法	ボルト配置	最大荷重 (kN)
1	標準継手	左右対称	90.3
2	QJ	中心	101.4
3	QJ	偏心	94.4

表-4.3 2面せん断試験 最大荷重の一覧

ケース	締結方法	ボルト配置	最大荷重 (kN)
1	標準継手	左右対称	384.8
2	QJ	中心	661.7
3	QJ	偏心	679.0

試験ケース一覧表を表-4.1に示す。ボルト・ナットの強度区分は4.8, QJの強度区分は10.9であり, QJはボルト・ナットと比較すると1本あたりの強度が2倍以上である。そのため, ケース1のボルト・ナット本数は2本, ケース2とケース3のQJ本数は1本とした。

4.3 試験結果

(1) 3等分曲げ試験 試験結果

3等分曲げ試験の最大荷重の一覧を表-4.2に示す。表-4.2より, ケース1の最大荷重が最も小さく, ケース2の最大荷重が最も大きいことがわかる。

(2) 2面せん断試験 試験結果

2面せん断試験の最大荷重の一覧を表-4.3に示す。表-4.3より, ケース1の最大荷重が最も小さく, ケース3の最大荷重が最も大きいことがわかる。また, ケース2とケース3の最大荷重の差は小さく, 同程度である。

(3) QJの採用

3等分曲げ試験と2面せん断試験の結果より, QJは, 標準継手と比較して, 曲げ抵抗性能およびせん断抵抗性能が高いことを確認した。以上の結果をもって, QJを採用することを決定するに至った。ボルトの配置については, 支保工製作時の作業

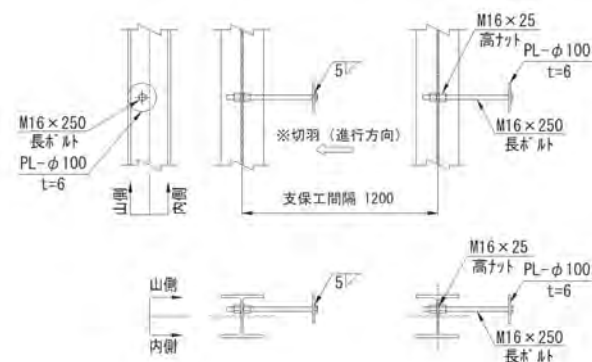


図-5.1 頭付きアンカーの一例



図-6.1 支保工と金網のユニット化した一例

性を考慮して, 偏心配置とした。

5. 支保工の転倒防止

一般的に, 支保工の転倒防止には, 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, 切羽直下において建て込む支保工と1基手前に建て込まれた支保工を連結する。しかし, 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。頭付きアンカーは, 長さ $L=250\text{mm}$, 軸径 $d=16\text{mm}$ の長ボルトの先端に頭部直径 $D=100\text{mm}$, 頭部厚 $t=6\text{mm}$ のプレートを固定したものである。頭付きアンカーを支保工に設置し, 吹付けコンクリートと一体化することで転倒防止を図る。図-5.1に頭付きアンカーの一例を示す。

6. 金網の設置

従来, 金網は, 切羽作業員により, 地山と支保工の間に手作業で設置しており, 切羽直下のため危険な作業である。そこで, 本開発においては, 支保工に金網を事前設置し, 支保工と金網のユニット化を図った。図-6.1に支保工と金網のユニット化した一例を示す。

なお, 金網は, 高強度吹付けコンクリートや鋼繊維補強吹付けコンクリート(SFRC)等を用いる場合, 省略できる¹⁾²⁾。

7. 建込みナビの構築

7.1 概要

切羽への立入りを無人化できる支保工仕様の検討を踏まえて、建込みナビを開発し、現場導入を行った。建込みナビは、自動追尾型トータルステーション（以下、TS）を用いたナビゲーションシステムとエレクタを連動させたシステムである。エレクタを切羽に設置して作業指令ボタンを押下すると、切羽後方に設置したTSがエレクタの位置を自動計測し、坑内 Wi-Fi 通信を介して建込みナビへ位置情報を送信する。その後、支保工の天端と足元に設置したミラーを TS で自動追尾することで、操作盤のナビゲーション画面に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る。

7.2 課題

現場導入を通じて、建込みナビによる施工に慣れてくることで、支保工建込み作業を無人化できた。一方で、以下の課題が露見した。

(1) 支保工の鉛直度

支保工に生じるゆがみ等から、度々、支保工を鉛直に建て込むことが困難であった。そのため、一部の技能者においては、従来通り切羽直下に立入って、目視等で位置合わせをする様子が見受けられた。

(2) 操作の習得

建込みナビは、ナビゲーション画面と実際の支保工位置を見比べながら操作を行う必要があった。そのため、通常の施工に建込みナビを適用してスムーズに作業を行うには、熟練のオペレータであっても操作習得に一定期間を要した。

(3) 支保工ミラーの回収

支保工の天端と足元に設置したミラーは、吹付けコンクリートを施工する前に回収する。回収にあたっては、ミラーに釣り糸等を括り付け、釣り竿や柄の長い網を用いていた。そのため、ミラーの回収には、切羽作業員の配置が必要であった。

8. 全自動建込みシステムの構築

建込みナビでの課題を踏まえて筆者らは、全自動建込みシステムの開発に着手した。全自動建込みシステムの概念図を図-8.1 に示す。

9. 全自動建込みシステム動作試験

9.1 試験概要

全自動建込みシステムの開発にあたっては、茨城県取手市にある前田建設工業 ICI 総合センター敷地内に設置した模擬トンネルを活用した。模擬トンネルの延長は、 $L=29.570\text{m}$ 、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可動式で開閉できる。試験においては、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。模擬トンネルの概要図を図-9.1、試験状況を図-9.2 に示す。

9.2 試験内容

(1) 断面より過大な動作の有無を確認

全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

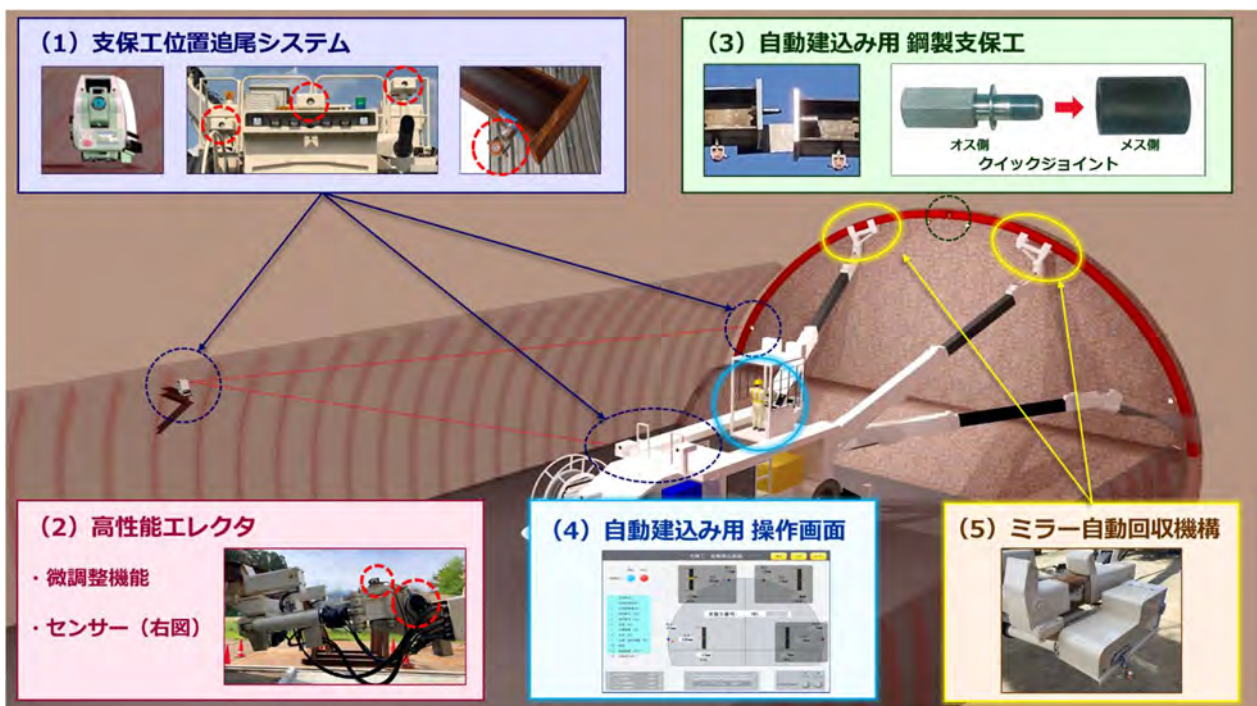


図-8.1 全自動建込みシステム 概念図

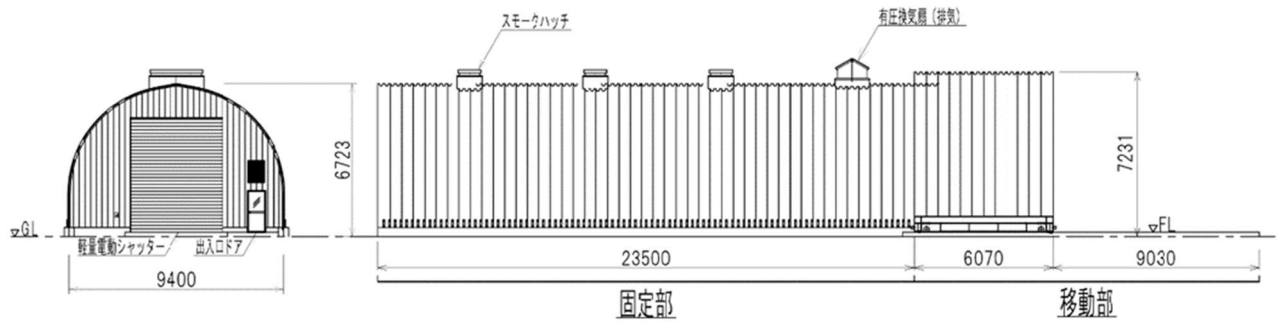


図-9.1 模擬トンネル 概要図



図-9.2 模擬トンネル内での試験状況

確認する必要があった。過大な動作とは、トンネル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、ゴム糸への接触有無やTSによる測量にて確認を行った。

(2) 支保工建込み手順の確認

全自動建込みの手順を確立するため、動作手順を検討・確認した。基本の動作は、左右支保工を大まかな位置まで移動後、右支保工位置を測量して設計位置に移動させたあとに左支保工を移動させ、左右支保工を締結する。検討した動作手順を①～②に示す。

- ・動作手順①：右支保工を設計位置に建込み後、左支保工を設計位置に建て込む方法
- ・動作手順②：右支保工を設計位置に建込み後、左支保工を右支保工の位置に合わせて建て込む方法

9.3 試験結果

試験内容に対する結果とその対応策を以下に示す。

(1) 断面より過大な動作の有無を確認

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20～30cm程度、過大に動作していた。これは、QJのボルト長が約10cmのため、ボルト長以上の離隔が必要だからである。この場合、余掘り量を大きく設定する必

要があると考え、右支保工のプレートから10～15cmの離隔から締結できるようにプログラムを再構築した。

(2) 支保工建込み手順の確認

動作手順①を検証したところ、右支保工と左支保工のそれぞれの測量精度が悪い場合、QJによる締結が難しくなることがわかった。動作手順②を検証した結果、右支保工の位置に合わせて左支保工を建て込むため、動作手順①に比べて、QJによる締結は容易になった。しかしながら、動作手順②は、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。そこで、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を向上させた。

10. おわりに

支保工建込みにおける切羽の無人化を行うべく、建込みナビを現場導入し、得られた課題に基づいて、全自動建込みシステムを開発した。今後は、全自動建込みシステムを現場に適用していく。

本開発を進めることで、切羽作業の安全性だけでなく生産性にも寄与できる。今後も本開発を邁進し、施工技術の発展に寄与していく。

参考文献

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル【建設編 令和2年7月】，p.4-61，2020.7
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，p.76，2016.