

山岳トンネルの吹付けコンクリートと鋼製支保工建込み作業における DX

株式会社 大林組 正会員 ○木野村 有亮
正会員 久下 敦
正会員 山中 博登

1. はじめに

山岳トンネルにおける吹付けコンクリートおよび鋼製支保工建込みは、エレクター付き吹付機（以下、吹付機）を用いて機械操作により行うが、所定の出来形品質を満足するために従来は一部人力作業を必要とし、そのため切羽直下での作業があることから切羽災害のリスクが存在する。また、今後生産人口が減っていく中で生産力を維持していくためにはこれまで以上に一人当たりの生産性を向上させていく必要がある。これらの課題解決には、機械化・自動化・遠隔化の推進が不可欠である。

本報告では、このうち吹付けコンクリート開始から一次吹付け、鋼製支保工建込み、二次吹付け完了までの掘削サイクルに機械化・自動化・遠隔化技術を現場適用した結果について報告する。

2. 「OTISM/Tunneling」

筆者らは、山岳トンネル工事の安全と品質、生産性を飛躍的に向上させる統合システム『OTISM®（Obayashi Tunnel Integrated System）』¹⁾の開発にこれまで取り組んでいる。OTISMは、トンネル掘削、覆工、計測・評価の3つの分野で構成される。『OTISM/Tunneling』は、掘削作業の一連のサイクルである穿孔・装薬、ずり出し、吹付けコンクリート、鋼製支保工建込み、ロックボルト打設作業を遠隔化、自動化することにより安全性向上・省人化を実現するシステムである。『OTISM/Tunneling』は、図-1のように山岳トンネルの掘削作業を5つの分野でそれぞれ技術を開発し、山岳トンネルの安全性向上と省人化を実現する統合システムである。機械化、自動化・遠隔化で切羽直下への立入りをなくし、崩落など切羽災害のリスクが低減、省人化を図ることが目的としている。

3. 開発技術の概要

本章では、安全性向上と省人化を目的とした遠隔自動化施工技術を構成する鋼製支保工の遠隔建込み技術と遠隔自動吹付け技術、これらの概要について述べる。遠隔自動化施工技術が確立できれば、全自動施工技術へ繋げることが可能であると考えている。

(1) 吹付けコンクリートの遠隔化・簡略化

本技術では図-2に示すように、吹付けコンクリートの作業状況をモニターで確認しながら切羽から離れた位置でノズル操作を行う。吹付コンクリートの作業は鋼製支保工の影や地山の凹凸があり、これまでは吹付機の操作員が切羽直下にて目視で十分な吹付けコンクリートが実施されていることを確認していた。また、吹付けコンクリートはノズル先端と壁面²⁾との距離を一定とすることでその品質を安定させることができるが、その操作が複雑であり熟練作業員の経験に依存していた。そのため、ノズル操作遠隔化・簡略化することで切羽直下の立入りが不要となり品質と安全性が向上する。以下に、構成する要素技術について詳述する。

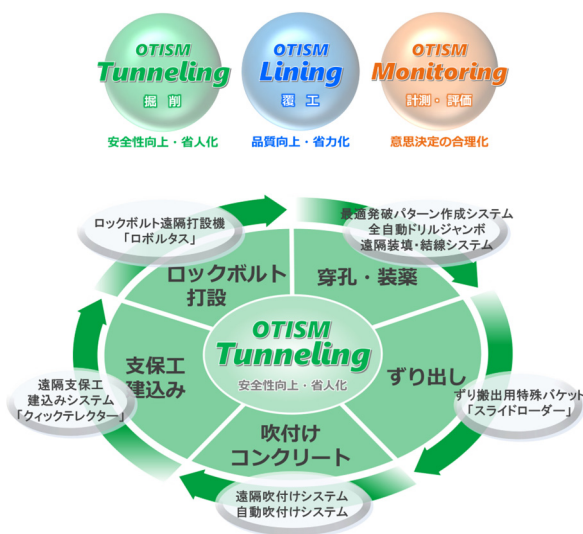


図-1 「OTISM/Tunneling」

a) 輪郭同調システム³⁾

従来の吹付機操作において、トンネルのアーチ形状に沿った操作が複雑であった。そこで、**図-3**に示すような平面同調システムを発展させブーム左右旋回操作のみでブームの起伏・伸縮動作を自動的に補助し、トンネルアーチからノズル先端までの距離を一定に保持させる輪郭同調システムを開発した。

b) オートノズル

ノズルの先端部は一定のリズムで左右に往復運動を実施するが、吹付機の操作を複雑化させている要因の一つである。そこで、ボタン一つで往復運動を開始・停止するように切り替わるオートノズルを搭載させた。これを前述の輪郭同調システムと組み合わせることで、一連の吹付けコンクリート作業の操作を「ブームの旋回操作」と「ノズルの動作開始操作」のみで行うことが可能となる。

c) 出来形監視 UGV

吹付けコンクリートの作業状況や出来形の確認には**図-4**に示す出来形監視 UGV を使用した。目視による確認を不要とするために切羽直下に接近可能な履帯式のカメラ台車に低遅延で映像が伝送可能なカメラを採用した。また、出来形の監視としては3DLiDAR を同台車上に搭載し、リアルタイムでの吹付けコンクリートの出来形を監視⁴⁾する。

(2) 鋼製支保工遠隔建込み技術

従来の鋼製支保工の建込みでは、鋼製支保工の移動や設置は機械により行うが、確実な建込み作業のためには高さや位置の微調整は切羽直下での作業を必要としていた。また、頂部のボルト接続や倒れ防止の繋ぎ材の設置の際もマンゲージに乗り込み設置していることで切羽直下での作業となっていた。これらの作業は切羽災害のリスクが高く、鋼製支保工建込み作業遠隔化により省人化および安全性の向上が課題となっていた。そこで、サブエレクター、ガイダンスシステム、ワンタッチジョイント、自重受け繋ぎ材を搭載した『クイックテレクター®』(**図-5**)を開発した。

a) サブエレクター

従来の皿板を用いた鋼製支保工脚部の高さ・調整を省力化するために、通常のエレクターに加えてサブエレクターを開発した。これによって、クイックテレクターでは4本のエレクターで建込み作業を行うこととなる。サブエレクターの追加により、支保工を把持したまま脚部の吹付けコンクリート施工が可能となる。

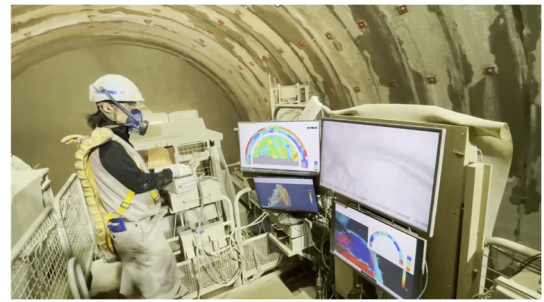


図-2 遠隔吹付けコンクリート

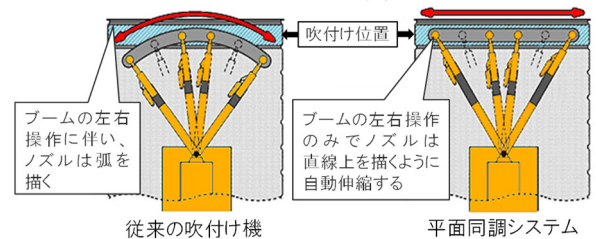


図-3 平面同調システム概要

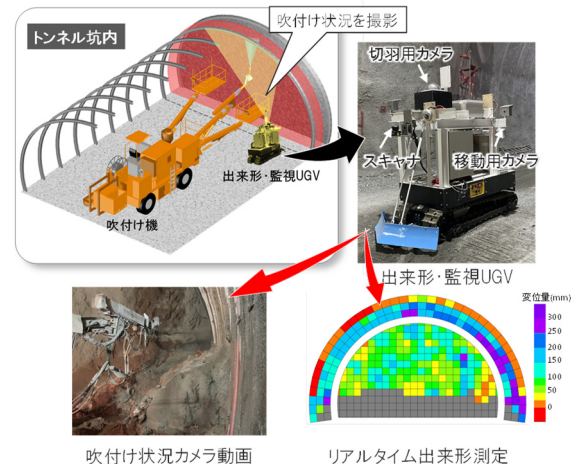


図-4 出来形監視 UGV



図-5 「クイックテレクター®」



図-6 ガイダンスシステム

b) ガイダンスシステム

従来のレーザーおよび定規を用いた鋼製支保工の建込み作業を省力化するため、図-6 に示すガイダンスシステム（以下、GS）を採用した。GS は鋼製支保工に取り付けた特殊マーカー4 個（頂部 2 個，SL 部 2 個）の位置を，4 台の赤外線カメラによるモーションキャプチャ技術によりリアルタイムで常時計測し，デジタルデータ化するシステムである，なお，吹付機の自己位置座標は常設されたトータルステーション（以下，TS）により事前に取得しておく必要がある。エレクター操作員はタブレット画面を確認しながら操作を行うことで設計建込み位置へ正確に誘導され，人力作業が不要で高精度な鋼製支保工の建込み作業が可能となる。

c) ワンタッチジョイント

従来の高所作業用ゲージに乗り込んで人力作業にて行うボルト接続に代わり，エレクター操作のみで接続が可能な継手としてワンタッチ式ジョイントを採用した。

d) 自重受け繋ぎ材⁵⁾

サブエレクターはトンネル掘削断面積に制約があるため，小断面トンネルにおける代替技術として図-7 に示す自重受け繋ぎ材を開発した。自重受け繋ぎ材には施工時の衝突や曲げに対応可能で，入手性の高い汎用材料を採用した。上弦材および下弦材を連結し Z 形状を保持するための斜材には，引張力に余裕のある鋼板を使用した。なお，接続後の片持ち状態については事前に荷重試験を実施しており，構造的に問題がないことを確認している。

サブエレクター、ガイダンスシステムやワンタッチジョイントなど，複数の技術を組み合わせて従来の標準的な施工において必要とされていたエレクター操作員 2 名および切羽に立ち入る作業員 2～3 名の計 5 名程度の人員が，エレクター操作員 2 名のみで対応可能となり省人化を実現した。さらに，切羽直下への作業員の立ち入りが不要となったことで，機械と作業員が近接する作業が排除され安全性の向上にも寄与している。

4. 現場適用

吹付けコンクリート作業と鋼製支保工建込み作業の機械化・自動化・遠隔化による一連のサイクルに与える効果は，二車線高速道路トンネル現場での実証試験により確認した。その手順については以下に示す。なお，表-1 に遠隔施工の必要人数・切羽直下の立入人数を従来方法と比較して記述する。必要人数には切羽監視員を含めていない。

(1) 一次吹付け

コソク作業が終了後に出来形監視 UGV を切羽まで移動し，3DLiDAR を起動して掘削出来形の計測を行う。その後，吹付機を切羽へ移動して一次吹付けを開始する。吹付けコンクリート中は無遅延カメラにより映し出される映像と 3DLiDAR によるリアルタイムに出力される吹付けコンクリート出来形画面の両者を確認しながら簡略化された吹付機のリモコン操作により作業を行う。この時，吹付機の操作員の位置は従来の切羽直下ではなく，吹付機の運転席後方にて遠隔操作で行う。

(2) 鋼製支保工建込（頂部接続）

一次吹付け終了後，鋼製支保工の頂部接続は目視で行う。ワンタッチ式ジョイントの採用により，マンゲージに乗った作業員が切羽に近づく必要はない。

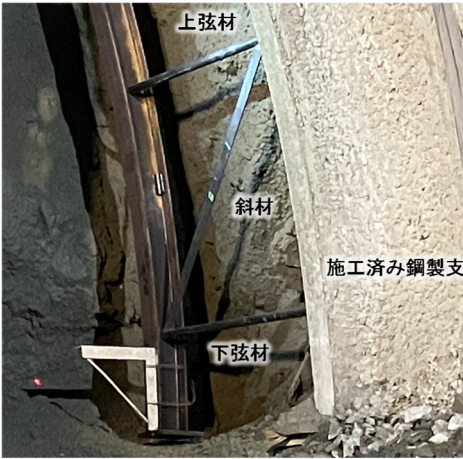


図-7 自重受け繋ぎ材

表-1 必要人数，切羽直下の立入人数

手順		必要人数		切羽直下の立入人数	
		従来	遠隔	従来	遠隔
1	一次吹付け コンクリート	投入：3 オペ：1	投入：3 オペ：1	1	0
2	鋼製支保工建込み （頂部接続）	接続：1 オペ：2	オペ：2	1	0
3	鋼製支保工建込み （位置計測）	計測：3 オペ：2	オペ：2	3	0
4	二次吹付け コンクリート	投入：3 オペ：1	投入：3 オペ：1	1	0
最大必要人数		5	4	※切羽監視員は含めていない	

(3) 鋼製支保工建込（位置計測）

まず、後方の常設 TS に操縦席から命令を送り、吹付機の自己位置計測を行う。従来は切羽直下に作業員が立ち入ってつなぎ材設置と各測点の計測、脚部位置調整を行っていたが、遠隔施工ではエレクター操作員が GS の計測画面を操縦席で確認しながらサブエレクターにて位置調整を行い固定する、また、特殊マーカーにはあらかじめワイヤーを取り付けておき、GS システムを用いて所定位置に鋼製支保工建込み完了後、フックで引っ掛けて特殊マーカーを外す。

(4) 二次吹付け

二次吹付けでは、脚部と天端部を固めた後でエレクターを鋼製支保工から順番に外しながら仕上げる。それ以降は一次吹付けと同様にカメラ映像と吹付けコンクリート出来形画面を確認しながら所定のラインまで吹付けコンクリートを行う。

5. 現場検証結果⁶⁾

以下に現場検証の結果を示す。

(1) サイクルタイム

a) 鋼製支保工の遠隔建込み技術

4 断面で試行した結果、**図-8** のように 4 回目の試行で目標建込み時間とした NEXCO の積算サイクルタイム 30 分を最終的に下回ることができた。1 から 3 回目の試行において時間を要した理由として、頂部接続では脚部の掘削量が足りず再掘削したこと、位置計測では通信エラーの発生が挙げられる。なお、その後も継続的にワンタッチジョイントを使用しており、頂部接続時間が同程度で収まっていることを確認している。

b) 遠隔自動吹付け技術

目視操作と遠隔操作にて各 19 回実施し施工時間を比較した結果を**図-9** に示す。目視操作による平均時間の方が遠隔操作よりわずかに下回るが、掘削精度により吹付けコンクリート量が異なることも考慮すると、その差は明瞭ではない。そのため、遠隔操作による吹付けコンクリート作業は従来の目視操作と比較してもほぼ同程度のサイクルタイムで行えることが明らかとなった。

図-10 に、鋼製支保工の建込みから二次吹付け完了までの累積施工時間を示す。従来工法における建込み時間は、当社の過去実績に基づいて算出したものである。地山の凹凸や余掘りの程度、一次吹付けの状況などにより厳密な比較は困難であるが、各工程を統合した施工サイクルにおいて本技術を用いた施工結果のサイクルタイムは従来工法と遜色ない水準であることが確認された。

(2) 安全性・省人化

表-1 に示す通り、一次吹付けから鋼製支保工の建込み、二次吹付けまでの一連作業において、最大必要人員を従来比で 20%削減し、省人化を実現した。また、切羽直下への作業員の立ち入りを完全に排除することができ、安全性の向上にも寄与した。

(3) GS の建込精度

GS による建込み精度については、TS を用いて建込み後の鋼製支保工位置を計測し検証した。その座標値を

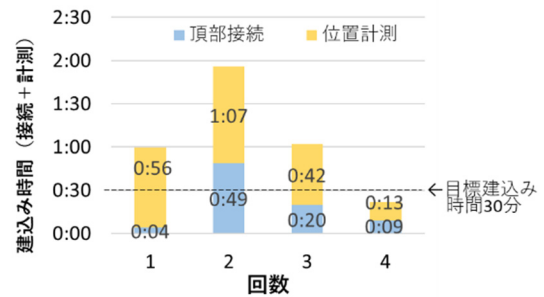


図-8 鋼製支保工建込みの施工時間の比較

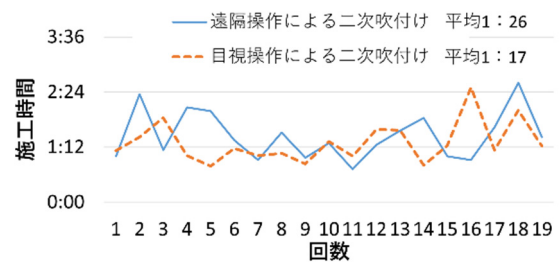


図-9 二次吹付けコンクリートの施工時間比較

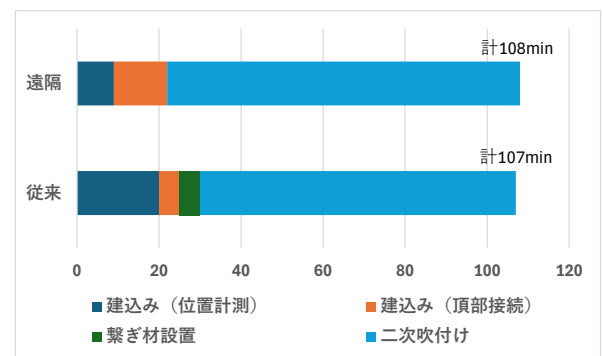


図-10 従来工法との累積サイクルタイム比較

比較した結果、目標精度が $\pm 30\text{ mm}$ に対して左右・上下・奥行方向の差の平均値は 54 mm であった。この理由を以下に示す。

- ・本トンネルの断面は小さく、赤外線カメラにて計測する際に特殊マーカをサブエレクターにて隠されてしまうことがあった。そのため精度が低下したと考えられる。この場合はサブエレクターを自重受け繋ぎ材へと変更することで解決が可能であると考えられる。

- ・吹付機はトンネルセンターに据え付けすることを前提とし赤外線カメラの位置を設定している。しかし、実際には、急結材の供給をするためトンネル中心から離れた据え付けとなった。そのため GS の計測範囲が縮小し、特殊マーカがカメラ画角の端に位置することとなり、一部が写らないことがあった。

なお、トンネル断面積に応じたサブエレクターと自重受け繋ぎ材の使い分けをし、切羽周辺で機械配置の変更により建込み精度の目標を満足することが確認できている。

(4) 吹付けコンクリートの出来栄

目視操作と遠隔操作での出来栄を確認するため 2 次吹付け後の凹凸をレーザースキャナーで計測した。平滑度 (D/L, D: 凹凸深さ, L: 幅 400 mm) を算出した結果を図-11 と図-12 に示す。目視操作と遠隔操作で大きな差はなく、平滑度は、覆工コンクリートのひび割れ発生に影響を与えない範囲 (1/6 未満) であった。

6. まとめ

従来、吹付けコンクリートと鋼製支保工の建込み作業はどちらも切羽に近付く必要のある作業であった。今回適用した技術を現場適用し、一次吹付けから鋼製支保工建込み、二次吹付け完了までのサイクルを機械化・遠隔化することにより大きく安全性・施工性を向上させることが明らかとなった。また、省人化を行えるだけでなく、品質的にも従来方法と比較して遜色ないことも確認できた。今後は、山岳トンネル掘削サイクル全体の無人化を目指し、機械化・遠隔化の効果を実証していく予定である。

7. 参考文献

- 1) 森野弘之, 木梨秀雄, 西浦秀明: 山岳トンネル施工統合システム OTISM の開発, 建設機械施工 Vol.76 No.7 July 2024
- 2) 今坂剛大, 山本信吾, 森野弘之, 藤岡大輔, 谷口信博, 宮越征一, 吉野隆伸: 吹付けコンクリートの遠隔施工に向けた取組み, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, VI-932
- 3) 今坂剛大, 石川和弥, 高橋宗一郎, 谷口信博, 久下敦, 石川和弥, 高橋宗一郎: 山岳トンネル吹付コンクリートにおけるリアルタイム出来形計測システムの開発, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, VI-1065
- 4) 木野村有亮, 渡辺淳, 久下敦, 白坂紀彦, 犬飼正: 山岳トンネル吹付コンクリートにおけるリアルタイム出来形計測システムの開発, 第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 020
- 5) 山中博登, 久下敦, 藤岡大輔, 大西克則, 日色大輔: 自重受け繋ぎ材による鋼製支保工建込技術の開発, 令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会
- 6) 久下敦, 山中博登, 藤岡大輔, 谷口信博, 杉本隆志, 今坂剛大: 安全性向上と省人化を目的とした鋼製支保工の建込みと吹付けコンクリートの遠隔自動化施工, 第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 019

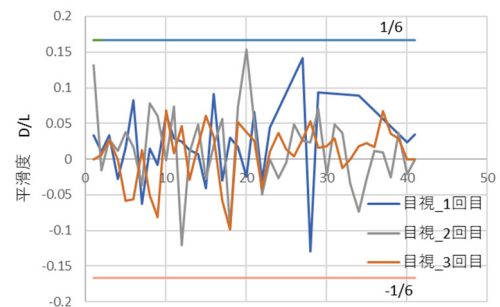


図-11 目視操作による平滑度

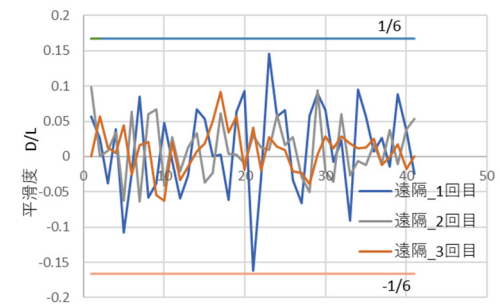


図-12 遠隔操作による平滑度