

山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化 実地山における実証試験の現況報告

犬塚 隆明・牟田口 茂・平岡 耕介

トンネル工事における「生産性・安全性の向上」、「熟練技能者・担い手不足の対応」などの重要な課題解決を目的として、掘削作業全般を対象に自動化施工システムの構築を進めている。本稿で紹介する吹付けコンクリートの自動化では、技能者の経験や技量に依らず生産性の高い吹付けを行うことを目標とし、地山条件に応じた最適なノズルワークと自動吹付け機を核とした自動吹付けシステムの開発に取り組んでいる。現在は、実地山を対象とした実証試験の段階であり、サイクルタイムや品質において良好な結果を得られているが、実用化を目指しさらなる改良を行っている。

キーワード：自動化施工システム、自動吹付け、自動吹付けシステム、最適ノズルワーク、生産性・安全性向上

1. はじめに

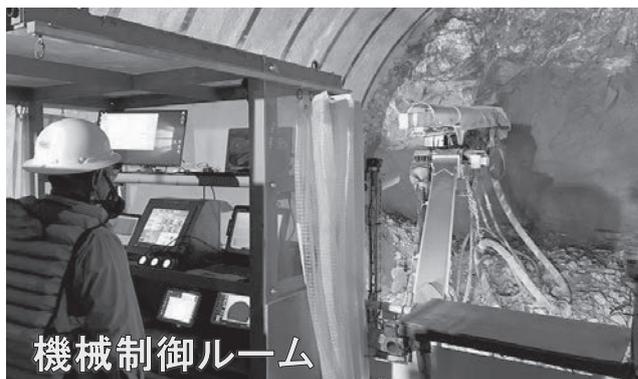
(1) 自動化施工システムの目的

トンネル工事は、掘削最前線である切羽直近での危険な作業や重労働が多いため、「生産性・安全性の向上」の対策が急務である。さらには、労働人口の減少・高齢化が進むなか、上記の労働環境を背景にトンネル作業員の新規参入者も少なく、「熟練技能者・担い手不足」も喫緊の課題となっている。これらの課題に対する解決策として、自動化施工システムの開発を進めている。これらの開発によって、トンネル掘削作業の主体を人から自動化機械にすることで、課題の根底にある労働集約型の作業体制を抜本的に変革し、省人化を図るとともに生産性・安全性を飛躍的に向上させることが狙いである¹⁾。

本開発においては、自動化機械の導入により、省人化と安全性の向上は実現できるものと考えているが、単に機械を導入しただけでは生産性の向上は見込めず、いかに効率の良い作業を実施できるかが重要である。つまり、生産性を向上させる最適な作業方法と手順を策定し、各施工条件から最も効率的な作業を導出する作業計画の構築が必要不可欠である。そのため、後述する模擬トンネルや実地山における試験においては、作業データの取集と分析、作業計画の改善に重点を置き取り組んでいる。

(2) 吹付けコンクリートの自動化

山岳トンネル工法の施工サイクルのうち吹付けコンクリートは、技量や経験を特に要する作業であり、施工の良し悪しは吹付けノズルを操作するオペレータの腕に依存するところが大きい。そのため、将来、熟練技能者が不足した場合には、現状の水準と比べて品質や生産性の低下が懸念される作業の一つである。一方で、開発を進めている自動吹付けシステム（以下、本吹付けシステム）は、吹付け機が施工条件をもとに計画されたノズルワークにしたがって自動で吹付けを行っていくものであり、オペレータの技量や経験に依らない吹付けが可能である。また、従来はオペレータが吹付け状況を確認するために切羽近傍に立入る必要があったが、本吹付けシステムでは写真-1に示す制御ルームで機械動作を監視することが主作業であるため、安全に吹付け作業を行うことができる。



機械制御ルーム

写真-1 自動吹付け機の制御ルーム

2. 本吹付けシステム

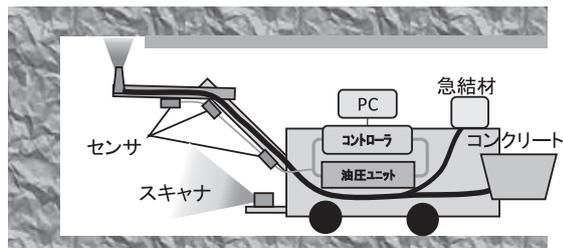
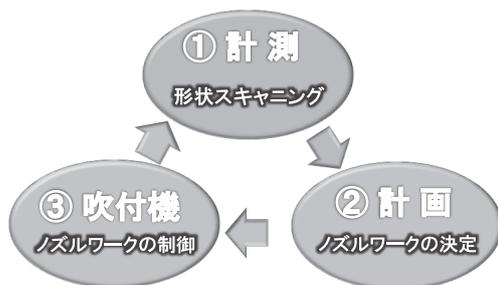
本吹付けシステムは、吹付け前に計測した地山形状に基づき、ノズルワークとノズルの配置や経路を決め、鏡部や坑壁部などの所定の範囲を任意の厚さで連続的に吹付けすることが可能である。この自動吹付けを実現するために重要な3つの開発項目は、①計測システム、②吹付け計画、③自動吹付機（機械制御）であり、これらについて述べる（図—1）。

(1) 計測システム

計測システムは、図—2に示すように、吹付機の前方に設置したレーザスキャナで切羽を計測し、吹付け計画に必要な地山形状や吹付け厚さを算出するものである。計測システムの特長は、走査時間の短いレーザスキャナの採用に加えて、計測と演算処理を連動させるプログラムの構築により、スキャン開始から短時

間で結果を出力できる点である。さらに、レーザスキャナの欠点である限定的な計測範囲を解決するために、回転架台を組み合わせてスキャナ1台で切羽全体の広域を計測できるものになっている²⁾（図—3）。これらの改良により、自動吹付けに十分なデータを1分程度で取得できるようにした。また、スキャナ計測の障害となる粉塵対策として、エア清掃機能を付加し、吹付けの環境下においてもデータの精度を確保できるように工夫した。

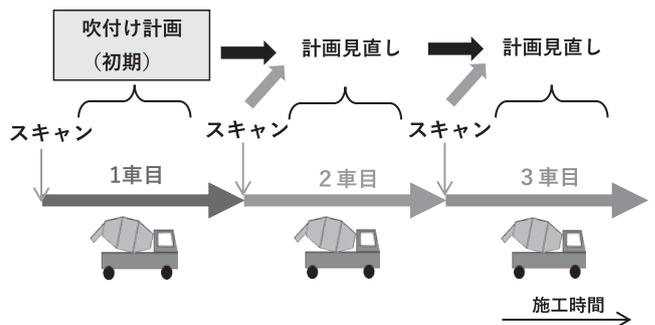
また、吹付け作業中は粉塵や作業振動、吹付機のブームが障害となり、スキャンデータの精度が低下したため、トラックミキサの入替え時などの吹付け中断時にスキャナ計測を行っている。本吹付けシステムでは、上記の計測タイミングで、吹付け厚さの確認と吹付け計画の見直しを行い、自動吹付けの精度を高めている（図—4）。



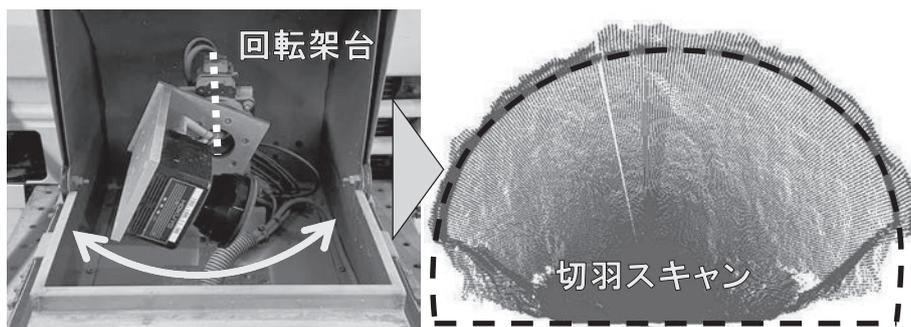
図—1 自動吹付けの開発項目



図—2 吹付機搭載型の計測システム



図—4 計測システムの運用方法



図—3 レーザスキャナを活用した切羽広域計測

(2) 吹付け計画

吹付け計画では、計測システムにて得た地山形状と必要吹付け厚さのデータから、最適なノズルワークと吹付け経路を決定する。ここで言う「最適なノズルワーク」とは、後述する模擬トンネルでの吹付け実験で得られた最小限のリバウンドで均一にムラなく所定の厚さを吹付けられるノズル動作である。吹付け計画では、この最適なノズルワークを効率的な吹付けを行うための基本ノズル動作としている。

凹凸を有する実際の地山を対象とした計画では、必要な吹付け厚さをもとに区分し、そのエリアごとにノズルワークを導出する（図—5）。次に、下部から吹付けすることを基本として、エリアごとに吹付けの順序と、スキャンデータをもとに坑壁および鏡部に衝突しないように、エリア間のノズル移動経路を決める。

天端部や余掘りの深いエリアにおいては、一度に多量の吹付けを行うと一旦付着したコンクリートが自重により剥落するため、一度に吹付けする量を制限し複数の層に分けて吹付けを行う計画にしている。また、そのエリアを吹く際は、連続した吹付けとならないよう途中で別のエリアを吹付けることにより、コンクリートの凝結時間を確保し剥落を防止している（図—6）。さらに、余掘り部では、層ごとに変わる形状を予測計算し、平滑に埋まるようノズルワークの再計算を行っている（図—7）。吹付け計画では、上記の処理をスキャンデータの取込みから数十秒で計算完了するロジックを構築しており、遅滞なく吹付け作業へ移

ることができる。

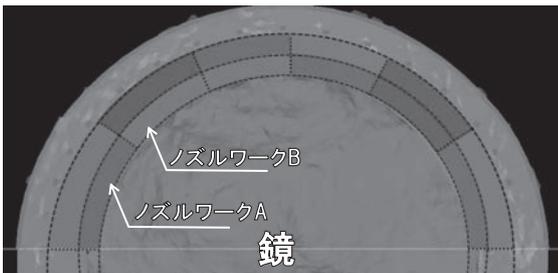
(3) 自動吹付け機

吹付け機の自動化では、吹付け計画で要求されるノズルワークを自動で動作する制御システムを構築した。

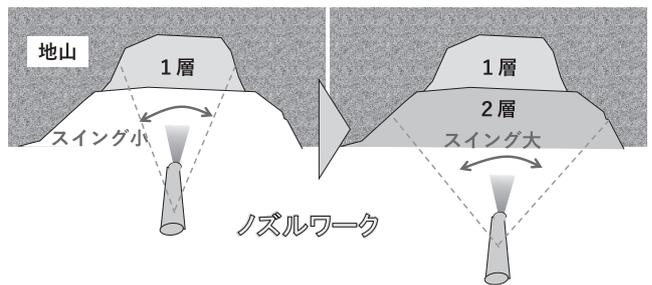
自動吹付け機の動作制御システムは吹付け姿勢計算部と油圧制御部に大別され、姿勢計算部においては、自動吹付け機に設置した測量用のプリズムから把握される機体の位置や姿勢と、吹付けブーム、アーム、ノズルの可動部すべてに取り付けた角度と伸縮センサを用いて、吹付け姿勢の計算を行う。また、センサのみでは把握できないブーム等の位置により異なる機械たわみなどの補正を加えており、ノズルの位置精度を高めている。

油圧制御部では、通常のON/OFF制御を比例制御に改造したことにより、任意の速度での動作を可能にし、さらに、動作の応答性と速度の追従性を高めるためフィードバック制御を組み込んでいる。また、ノズルの振角度 θ や振角速度 ω は（図—8）、吹付けの出来形に大きく影響するため、ノズルスイング時の制御遅れ時間の改善や、ノズル振角速度のキャリブレーション等を特に留意して行った。

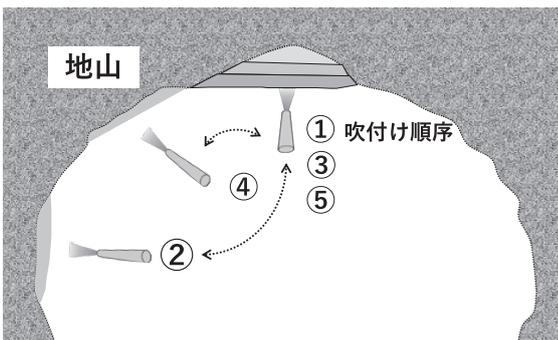
この他に、コンクリートの圧送やエア、水バルブの制御システムを開発し、吹付け前に行うコンクリート配管の水通しなどの準備作業や吹付け後の清掃なども自動化している。また、コンクリートの付着に重要な急結剤の量や添加時のエア量も制御しており、制御ルーム（写真—1）にて一連の吹付け作業を管理できるようにした。



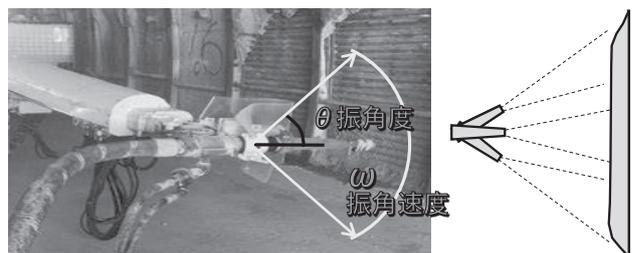
図—5 必要吹付け厚さによるエリア分割とノズルワーク決定



図—7 余掘り部でのノズルワークの再計算



図—6 天端および余掘り部の吹き方



図—8 ノズルの振角度 θ と振角速度 ω

3. 模擬トンネル

(1) 実験目的

自動吹付機はノズルの位置決めや動作速度の精度が高く、ノズル動作の繰り返し制御が可能であることから、自動吹付機の特長を生かした最適なノズルワークを確立できると考えた。そこで、最適な吹付けを行うノズルワークを確立するために、吹付け距離や振角速度といったノズルワークをパラメータとし、リバウンドや出来形との関係性を見出す吹付け実験を行った(写真—2)。

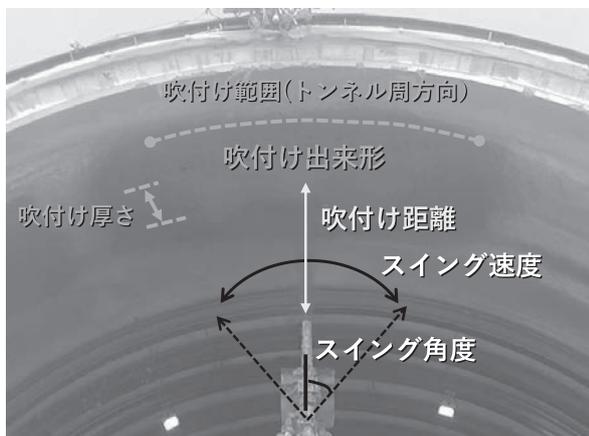
(2) 吹付け実験

はじめに行った材料関係の実験では、急結剤として採用しているクリアショットの標準配合をベースにスランプを変えたコンクリート配合を準備し、ノズルを振らない最も単純なノズルワークによって材料の影響を確認した(表—1)。その結果、実験で用いるコンクリート性状のバラつきの範囲内では、リバウンド率や品質に大きな差異は見られず、材料の影響は低いものとして、吹付け条件をパラメータとした実験を進めた。吹付け条件をパラメータとした実験では、吹付

け距離や角度、ノズルの振角速度などを変えてリバウンドとの関係を整理した(図—9)。この結果をもとに、地山を対象とした吹付け計画では、地山形状データからリバウンドを最小限とする吹付け距離、角度となるようにノズルの配置計算を行っている。また、図—9の結果からノズルの振角速度は遅い方がリバウンドは少ないが、ノズルの移動速度に対して遅すぎると吹付け面にムラが生じるため(図—10)、吹付け面が平滑となる適正な速さを算出するようにしている。

吹付け出来形においては、上記で求めたリバウンド量の関係をもとにリバウンド量を見越した吹付け量、つまりノズルの移動速度の計算と、コンクリート噴射角などによるコンクリートの広がりや考慮した振角速度の計算により、吹付け厚さと幅の予測値と実測値が一致することを確認している^{3), 4)}。

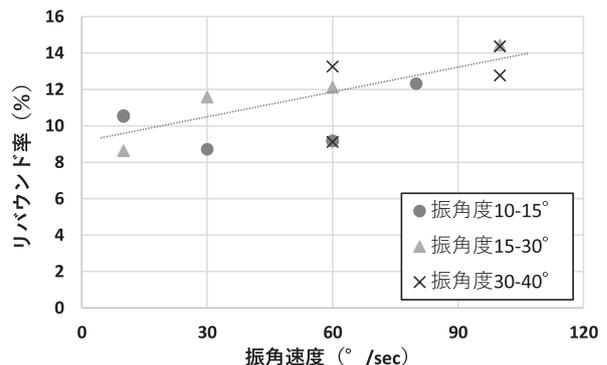
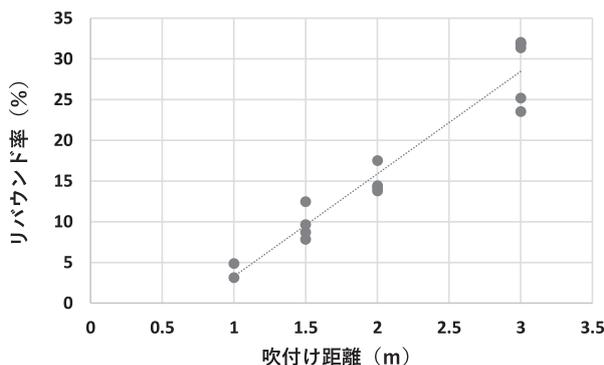
以上より、模擬トンネルの吹付け実験において、吹付け距離、吹付け角度、振角速度のパラメータとリバウンドの関係性を定量的にデータ取得し、得たい出来形からノズルの移動速度と振角速度、振角速度を算出する式を構築することができた。吹付け計画では、この式をもとに、地山の凹凸に応じて区分された部位ごとに最適なノズルワークを算出し、リバウンドを最小にし



写真—2 吹付け実験 (模擬トンネル)

表—1 コンクリート配合の影響確認試験

		配合 1	配合 2	配合 3
配合	C (kg/m ³)	400		
	Gmax(mm)	13		
	W/C(%)	50		
スランプ (現着) (cm)		20.0	22.5	16.0
自動吹付	吹付け状況			
	品質 (目視評価)	○ (ダレなし)	○ (ダレなし)	○ (ダレなし)
	リバウンド率	7%	7%	9%



図—9 吹付け距離および振角速度とリバウンドの関係

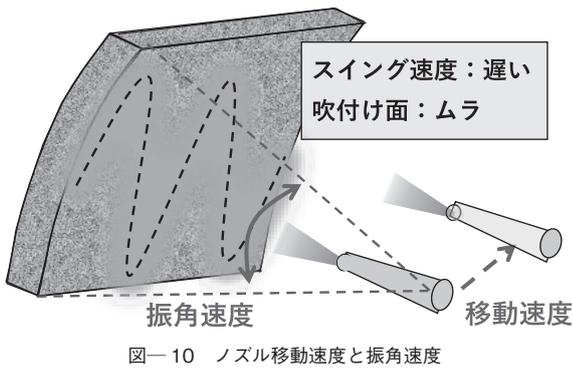


図-10 ノズル移動速度と振角速度

て設計の仕上げ面まで平滑に吹付けられるロジックとなっている。

4. 実証試験

現在は、模擬トンネルの実験を経て、本吹付けシステムを実地山に適用し、吹付けの品質やサイクルタイムの検証結果をもとに改良を行っている。以下に一次吹付けと二次吹付けについての現況を報告する⁵⁾。

(1) 一次吹付け

一次吹付けは、掘削後の地山に対する最初の支保部材となるため、掘削地山全体に所定の厚さを確実に吹付けることが求められる。本システムの適用当初は、掘削範囲の過少評価による吹き残しや切羽の凹凸を適切に捉えられずノズルが切羽に接触することが生じたが、スキャンデータの解析粒度を細かくするなどのロジック改良を重ね、現在はトラブルなく、吹付け開始

から終了まで連続動作で自動吹付けを実施できている。

自動一次吹付けの一例として、図-11に鏡部の吹付け厚さの結果を示す。この図は、鏡面を50cm四方のメッシュに分割し、そのメッシュごとに吹付け前後のスキャンデータから吹付け厚さを求めたものであり、全体的に所定の厚さで吹付けできていることが分かる。また、坑壁部の吹付け厚さも鏡部と同様に良好な結果が得られている。一方、前述のとおり吹付け中のスキャナ計測は難しいため、実地山を対象とした吹付けにおいては、特に地山不良部等で見られる吹付けの剥落への対応が課題であると考えている。この対策として、カメラ画像を用いて剥落箇所を特定するなどにより、リアルタイムに再吹付けを行うシステム改良を検討している。

(2) 二次吹付け

二次吹付けでは、鋼製支保工の間を設計の仕上がり面まで平滑に吹付き上げることを目標としており、一次吹付け後に行うスキャナ計測により、2章(2)で述べた方法にて、部位ごとの必要吹付け厚さに応じて吹付け計画を再作成する。この際、一次吹付けの計画と実測を比較評価し、必要に応じてリバウンド率などの吹付け計画の諸パラメータの見直しを行い、二次吹付けの精度を高めている。

図-12に坑壁部の自動吹付け結果を示す。グラフの縦軸は設計仕上がり面までの吹付け厚さ、横軸は天端を0°とした断面位置を示しており、吹付け前と後の差分が本吹付けシステムによって吹付けた厚さであ

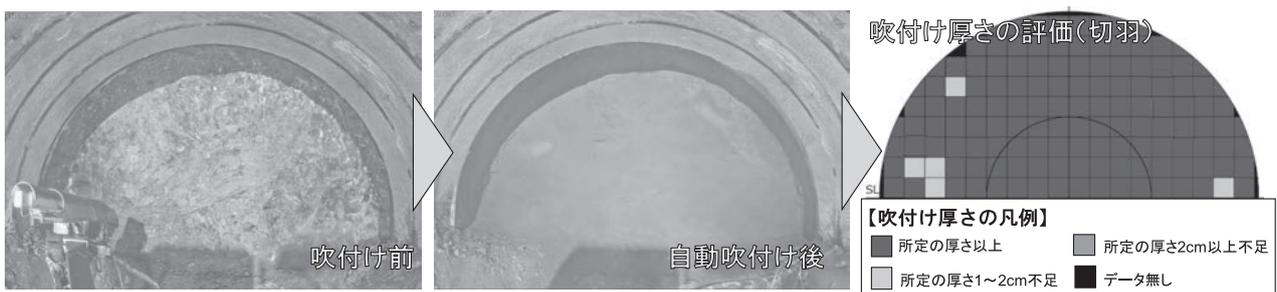


図-11 自動一次吹付けの結果(鏡部)

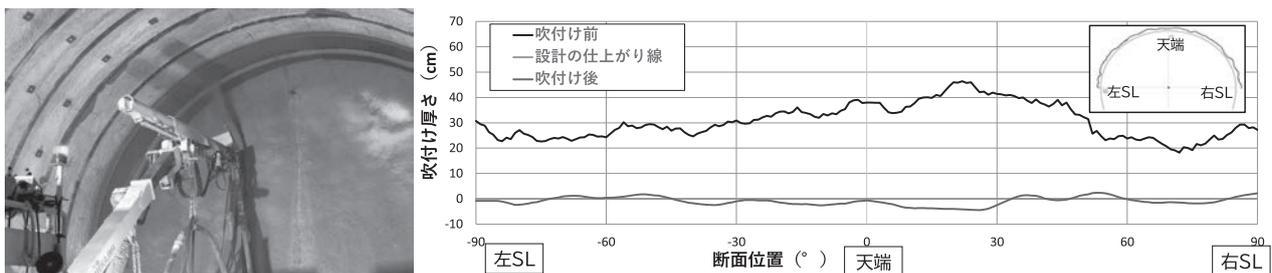


図-12 自動二次吹付けの結果(坑壁部)

る。本結果より、吹付け後の仕上がりに多少の凹凸があるものの十分な吹付けができていることを確認できる。また、鋼製支保工を有する支保パターンでは、鋼製支保工の背面やフランジ間を吹付けるノズルワークを坑壁部の吹付けパターンに組み込み、坑壁部と支保工部への吹付けを連続的に行うことで地山との一体化を図っている（写真—3）。

サイクルタイムについては、吹付け前の形状スキャンや自動吹付機のセットなど通常にはない手順が増えるが、吹付け時のコンクリートポンプの吐出量を $20\text{ m}^3/\text{h}$ 以上に増やして作業時間の短縮を図っている。また、コンクリート配合と急結剤添加量の適宜見直し⁶⁾と、最適なノズルワークによる吹付けにより、リバウンドの少ない施工を実現している。

5. おわりに

本稿では、吹付けコンクリートの自動化におけるシステムの特長と、模擬トンネルでの吹付け実験、現在行っている実地山を対象とした実証試験について報告した。実証試験においては、模擬トンネルでの基礎研究開発により構築した自動吹付けシステムを実地山に適用した結果、吹付けの品質とサイクルタイムについて良好な結果が得られ、本システムの適用性を確認することができた。現在は、さらなる生産性向上を目指して2ノズル吹付機の自動吹付けに挑戦中であり（写真—4）、2つのブームを制御しながら効率的に動作させるシステムの構築を進めている。

また、吹付け自動化の他にも、トンネル掘削一連の施工ステップである発破掘削、ずり出し、あたり取り、ロックボルト打設の自動化・遠隔化も並行して進めている。これらが完成した際には、トンネル工事における「生産性・安全性の向上」と「担い手不足への対応」



写真—3 支保工背面部への吹付け



写真—4 2ノズル吹付機の自動化

の課題に対し、抜本的な解決が図れると考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 三浦 悟, 牟田口茂, 岩野圭太: 自動化技術による施工の生産性向上, 構想・計画調査・設計・施工・維持補修・管理の総合土木技術誌, 第61巻, 1号, p.p. 96-99, 2019.12.
- 2) 犬塚隆明, 手塚康成, 岩野圭太, 浜本研一, 白坂紀彦: 一体型簡易3Dスキャナと余掘り評価ソフトの開発, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-718, 2017.
- 3) 犬塚隆明, 岩野圭太, 松本修治, 松村匡樹: 山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化, 土木学会第74回年次学術講演会, VI-1080, 2019.
- 4) 犬塚隆明, 岩野圭太, 三浦 悟: 山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化(その2), 土木学会第75回年次学術講演会, VI-433, 2020.
- 5) 犬塚隆明, 牟田口茂, 平岡耕介: 山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化(その3), 土木学会第78回年次学術講演会, VI-930, 2023.
- 6) 松本修治, 犬塚隆明, 平岡耕介, 渡邊賢三: 吹付けコンクリートの配合要因などが付着性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, 2023.

【筆者紹介】

犬塚 隆明 (いぬづか たかあき)
鹿島建設㈱
機械部 自動化施工推進室
主任



牟田口 茂 (むたぐち しげる)
鹿島建設㈱
機械部 生産機械技術グループ
部長



平岡 耕介 (ひらおか こうすけ)
鹿島建設㈱
機械部 自動化施工推進室
課長代理

