

## 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）

鹿島建設(株) 正会員 ○犬塚隆明 岩野圭太 三浦 悟

### 1. はじめに

「熟練労働者不足への対応」、「建設生産性の向上」、「労働災害・事故の撲滅」などの建設業界における重要な課題解決を目的として、施工の自動化に取り組んでいる。山岳トンネル工事における切羽周辺での作業（穿孔～ロックボルト：図-1）は、典型的な危険・苦渋作業であり、自動化による安全性向上の効果は非常に大きい。一方で、これらの作業には高度な熟練性を要するため、生産性の向上や品質の確保が自動化では極めて困難であると考えられてきた。筆者らは前報<sup>1)</sup>で、典型的な熟練作業である吹付けコンクリートを自動化するための基本データを紹介した。本報では、目標とする出来形を得られる最適な吹付けを実現するための機械の改良と実大規模の模擬トンネルにおける吹付け実験の結果について報告する。

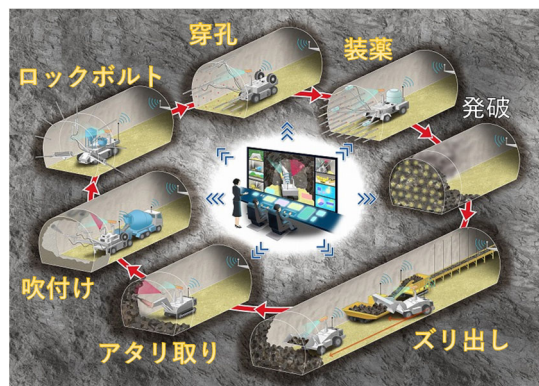


図-1 トンネル自動化のコンセプト

### 2. 機械制御の改良

従来の吹付け機では、各アクチュエータ（ブーム、アーム、ノズル）の動作に単純な ON/OFF 制御の油圧バルブが使用されている。自動吹付け作業では、吹付け時のノズルの位置や振り方を吹付け対象の地山状況に合わせて調整することが必要とされるため、アクチュエータ毎に任意の速度設定が可能な比例制御のバルブに変更した。更に、指定した位置に到達するまでの動作では、これまで単一の速度で動作していたところを、指定位置との距離に応じて各アクチュエータが加減速する制御プログラムの改良も行い、指定位置の到達までに要する時間を2割短縮するとともに、高い停止精度（目標位置に対する距離誤差は平均 100mm 以内）を得た。また、これらの制御特性を強化したことによって、機械の制御誤差による吹付け実験データのバラツキは抑えられ、吹付け実験の再現性は大きく向上した。吹付け作業を自動化するにあたり、「吹付け方法」（どのように吹くか）の構築を、作業員の吹付け作業の分析をベースにするのではなく、実験データを基にしたことから、機械の制御誤差を最小限までに抑え、実験の再現性を確保できたことは非常に有意である。

### 3. 吹付け実験による「吹付け方法」の構築

実験を基に構築している「吹付け方法」は、ノズルの位置や振角度といったある吹付けパラメータにおけるコンクリートの付着量（吐出量からリバウンドを引いた量）を推定し、主に振角度によって吹付け形状（厚さ、幅）をコントロールすることを考えている（図-2）。したがって、「吹付け方法」の構築には、ある吹付けパラメータにおけるリバウンド量と振角度による吹付け形状の変化を正確に捉えることを目的として、今回の実験を実施した。

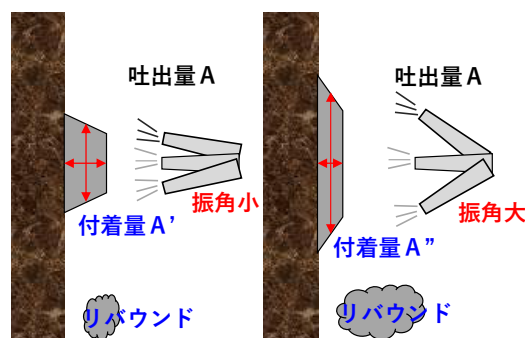


図-2 「吹付け方法」の概念

#### (1) 吹付けパラメータとリバウンド量の関係

リバウンドに影響する主な吹付けパラメータは、ノズルと壁面の距離（吹付け距離）、ノズルの振角度、ノズルの振角速度の3要素と考えている。吹付け距離とリバウンドの関係は図-3 となり、吹付け距離を増加させるとともにリバウンドは増える結果となった。吹付け距離を 1.0m とするときにリバウンドは最小となるが、

キーワード 山岳トンネル, 吹付け, 自動化

連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設(株)機械部 TEL 03-5544-1410

ノズル先端と壁面までの距離が近い場合、ノズルのエア圧力により凝結前のコンクリートが押しつけられ、不規則に吹付け形状が変化することが見受けられた。そのため、エア圧力の影響を受けない範囲でリバウンドが最小となる1.5mを最適な吹付け距離と判断した。本実験では、最適な吹付け距離を1.5mとして進めるが、適切な吹付け距離はエア圧力などによって変わると推測される。

ノズルの振角度、振角速度とリバウンドの関係を図-4に示す。実験時のパラメータの範囲は実際の吹付けを想定し、振角度は10°～40°、振角速度は10～100°/secとした。振角度によるリバウンドの明確な差異は確認されなかったが、振角速度とリバウンドの関係は比例傾向にあることが分かった。これは、振角速度を大きくすると吐出したコンクリートのトンネル周方向の速度成分が大きくなり、コンクリートは壁面に付着しにくくなるため、リバウンドが多くなったと推測される。実際にノズルのスイングの端点で多くのコンクリートが散らばる(＝リバウンド)様子が観測された。

## (2) 振角度による形状変化 (吹付け幅)

吹付け形状のトンネル周方向の長さを吹付け幅と定義し、ノズルの振角度と吹付け幅の関係を幾何学的に求めた。この幾何学的な関係に加えて、もともとノズルから噴き出すコンクリートの放射角などの吹付け特有の事象も考慮し(図-5)、関係式を構築した。図-6に関係式と実測値をプロットした図を示す。実測は振角度と振角速度をパラメータとし、複数のパターンによって行ったものであり、関係式と実測はよく整合していると言える。

## (3) 吹付け形状の予測 (吹付け厚さ)

以上から、吹付けパラメータとリバウンド、吹付け幅の関係を実験結果をベースに整理することができた。このデータから、ある吹付けパラメータにおける付着量と吹付け幅は分かるため、吹付け形状は矩形である前提のもと、体積計算により吹付け厚さを推定できることになる。この「吹付け方法」により、設定した吹付けパラメータの吹付け形状を予測し、実験と比較した結果、予測と実測はよく整合した(図-7)。

## 4. おわりに

次の段階として、本実験データを反映させ、吹付けを再現できるシミュレータの開発を行っている。本シミュレータにより、実際の地山の凹凸状況を想定した吹付けシミュレーションを行い、地山条件に応じた最適な吹付けパラメータを検討していく。

## 参考文献

- 1) 犬塚ほか: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.

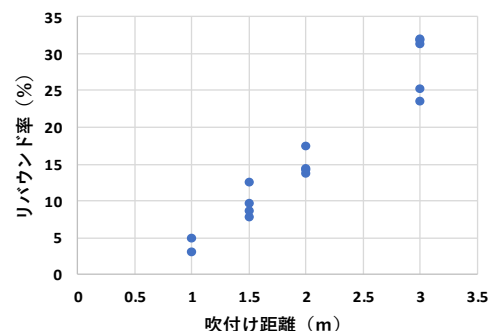


図-3 吹付け距離とリバウンド

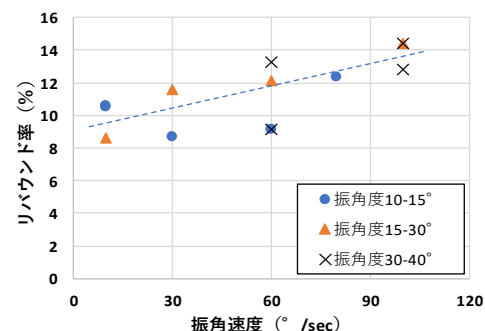


図-4 振角速度とリバウンド

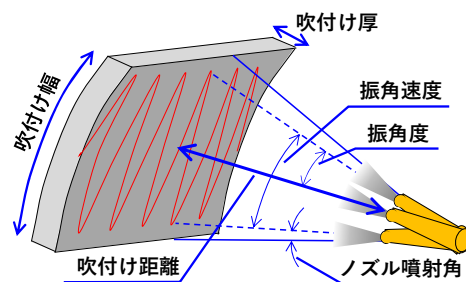


図-5 振角度と吹付け幅の関係

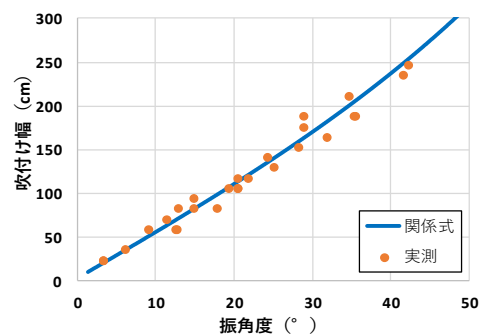


図-6 関係式と実験の比較

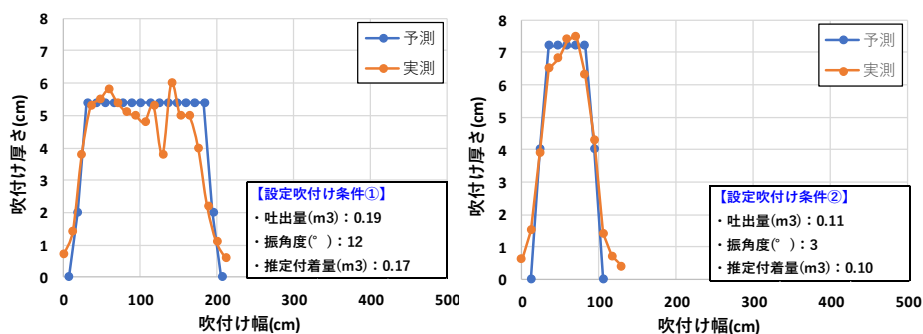


図-7 吹付け形状 (厚さ・幅) の予測 (目標) と実験の比較