

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）

鹿島建設(株) 正会員 ○犬塚隆明 牟田口茂 平岡耕介

1. はじめに

筆者らは既報¹⁾²⁾において、吹付けコンクリートの自動化にむけて実大規模の模擬トンネルで実施した実験について報告した。そこでは、吹付け対象面との距離（以下、吹付け距離）やノズルのスイング角度、速度といったノズルワークをパラメータとし、吹付け厚さにムラがなくリバウンドを最小限とする効率的な吹付けを追究した。加えて、図-1に示すようにノズルワークを決定するパラメータの組合せと出来形の関係性を見出し、所定範囲を任意の厚さに吹付けできるようになった。

模擬トンネルでの基礎実験を経て、現在は実トンネル（試験坑道）にて実証実験を行っている（写真-1）。実験は一次吹付けと二次吹付けの両方を実施しているが、本報では一次吹付けについて報告する。

2. 自動吹付け

自動吹付け機は、吹付け計画のプログラムによって算出されたノズルワークに従って動作する。吹付け計画は、スキャナで計測した吹付け対象の形状データをもとにして、図-2の①切羽、②側壁、③切羽と側壁の境界部の吹付け（以下、境の吹付け）部位ごとに、所定の吹付け厚さとなるよう対象の形状（地山の凹凸）を考慮したノズルワークを決定する。

(1) 切羽の吹付け

切羽の吹付けは、ノズルを上下にスイングさせながら横断方向に移動させ、下部から順に上部へ吹付けすることを基本としている（図-3）。ノズルワークは、所定の吹付け厚さとなるよう横断方向の速度を設定し、その速度に応じて吹付けにムラがなく、さらにリバウンドを最小限とするノズルスイング速度を設定する。また、形状データから切羽の凹凸情報を処理し、常に切羽からの吹付け距離が一定となるようノズルの配置を計算する。

(2) 側壁の吹付け

側壁の吹付けは、側部の下方から天端へ順に行い、特に天端部では地山の硬軟に応じて、所定の厚さを1層または2層以上の複数層に分けて吹付けを行う。これは、一旦地山に付着したコンクリートが地山ごと剥落するのを防ぐためである。

ノズルは切羽の吹付け時と同様に、側壁の凹凸に応じて吹付け距離を一定に保ちながら、ノズルの移動速度を変化させて吹



図-1 吹付け実験（模擬トンネル）



写真-1 自動吹付けの実証実験

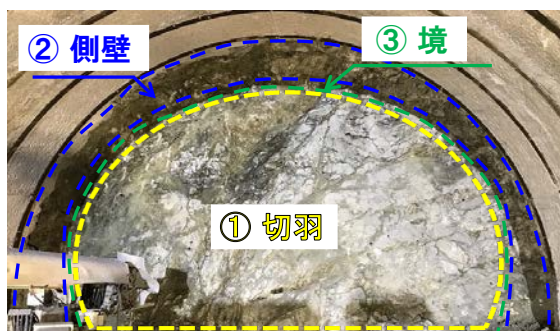


図-2 3つの吹付け部位



図-3 切羽の吹付け

キーワード 山岳トンネル, 吹付けコンクリート, 自動化, 自動吹付け

連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株)機械部 TEL 03-5544-1111

付け厚さを調整している。また、側壁部は断面の位置ごとにトンネル進行方向の掘削長さが異なるため、吹き残しやノズルを切羽に衝突させないように正確な吹付け長さを形状データから算出する（図-4）。

(3) 境の吹付け

境の吹付けは、切羽と側壁の境界部を形状データから求め、斜めから狙って吹付けを行い（図-5）、側壁と切羽の吹付けを一体化させ、支保部材としての機能を最大限発揮させる。

これら一連のノズル軌跡やノズルワークは、1つの形状データから模擬トンネルの要素実験と実トンネルの実験を経て構築したロジック（吹付け計画）によって、自動的に算出される。この計画に従って自動吹付け機は止まることなく連続的に動作し、吹付けを行う。

3. 実証実験

実験結果の一例を図-6に示す。図-6の切羽の吹付け厚さの評価は、吹付け前後のスキャンデータを差分したものを、50cm四方のメッシュにて表示したもので行う。一部、厚さが若干足りない箇所があるものの、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、側壁の吹付け厚さも切羽の評価と同様に良好な結果が得られており、吹き残しなど問題となるようなケースは発生していない。

施工サイクルについて、吹付け前の形状スキャンやデータ解析、自動吹付け機のセットなど手動吹付けにはない工程が自動吹付けには必要になる。これを挽回するため、コンクリートポンプの吐出量を20m³/hに増やして、手動吹付けと同等以上の施工速度を確保している。また、本技術では、自動吹付け機の規則的な動作に加えて、圧送性と付着の良さのバランスをとったコンクリート配合の適宜見直し³⁾とその配合に適切な急結剤の添加量およびエアの量に制御している。これにより、通常の現場に見られるコンクリートの付着のバラつきは小さく、リバウンドも少なくなる。

4. おわりに

自動吹付けの実運用を目指し、今後も実証実験を通じて吹付け計画のロジックや自動吹付け機の改良を重ねていく。特に、脆弱な地山や湧水が発生している箇所などコンクリートの付着しにくい特殊な地山条件への対応などを進めていく。また、施工速度については、自動化特有の準備時間の短縮や、さらにコンクリートポンプの吐出量を上げて施工サイクルの短縮を図っていく所存である。



図-6 自動吹付けによる一次吹きの実験結果（一例）

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その1, 土木学会第74回年次学術講演会, VI-1080, 2019.
- 2) 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その2, 土木学会第75回年次学術講演会, VI-433, 2020.
- 3) 松本ほか: 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 (投稿中).