

# 山岳トンネルにおける大容量・高性能吹付け コンクリートの開発と現場展開について

天童 涼太<sup>1</sup>

<sup>1</sup>榎安藤・間 先端技術開発部 土木技術開発グループ

キーワード：山岳トンネル、吹付けコンクリート、NATM、低リバウンド、液体急結剤

山岳トンネルの掘削において、吹付けコンクリートの施工時間は掘削サイクルの15%程度と比較的大きな比率を占める。一方、吹付けコンクリートは通常、時間当りの吐出量が12 m<sup>3</sup>/h程度で施工され、そのうち30%程度は地山に付着せず落下するため、実際の付着量は8 m<sup>3</sup>/h程度にとどまる。これまでに、当社は施工速度を2倍にすることを目標に吐出量20 m<sup>3</sup>/h以上の大容量化とはね返り率15%以下での施工を可能とした大容量・高性能吹付けコンクリートシステムの開発を行い、実証実験でその性能を確認している<sup>1</sup>。さらに、開発した本システムを智頭用瀬トンネルに適用し、現場での長期運用でも実証実験で確認した性能が発揮できることを確認した。本稿では、当システムの開発と実現場での運用状況、および今後の展望について述べる。

## 1. はじめに

我が国における山岳トンネルの施工方法は、1980年代に矢板工法から吹付けコンクリートやロックボルトを主要部材とするNATMに換わり大きく進歩した。しかし、主要部材のひとつである吹付けコンクリートに着目するとその施工方法は、NATM導入以降、あまり変わっていない。一般の打込みコンクリートにおけるポンプ打設では、時間当たり数十 m<sup>3</sup>の施工を問題なく行うことができるのに対して、吹付けコンクリートは、その施工の特殊性から12 m<sup>3</sup>/h程度の吐出量での施工になっており、トンネル施工サイクルの向上を妨げる要因のひとつとなっている。また、吹付けコンクリートの一部は地山に付着せずにはね返ることになる。通常の吹付けコンクリートでは、はね返り率が30%程度にもなり、これも施工サイクルの向上の妨げる要因になるとともに、材料コストの上昇にも繋がっている。

このように、導入以降、大きな進歩が見られなかった吹付けコンクリートであるが、吹付けコンクリートを構成する要素技術に着目すると、近年は、機械面ではコンクリートポンプの高性能化が図られたり、材料面では液体急結剤や高性能減水剤が技術的に大きく進歩するなど、施工を抜本的に改善する土壌が成熟してきた。

このような背景のもと、筆者らは、吹付けコンクリートを従来の2倍以上の速度で施工することを目標として、大容量・高性能吹付けコンクリートシステムの開発を行った。現場での実証実験では、吐出量20 m<sup>3</sup>/h以上の大容量化とはね返り率10%程度を両立し、従来の2倍以上の速度で施工を実現できることを確認した。さらに、開発した本システムを2現場での実施工に適用し、現場における長期的な運用でも実証実験で確認した性能が発揮できることを確認した。

本稿では、これまでの当システムの開発と現場での運用状況、さらには今後の展望について述べる。

## 2. 山岳トンネルの吹付けコンクリート

### (1) 施工の特殊性

山岳トンネルの施工では、1サイクル当たり、1~2m程度ずつ素掘りで掘削を行い、掘削後、鋼製支保工建込み(図-1参照)、吹付けコンクリートの施工(図-2参照)、ロックボルト打設といった支保作業を行う(図-3参照)。これらの支保部材のうち、吹付けコンクリートは、掘削後ただちに地山に密着するように施工でき、掘削断面の大きさ、形状に左右されず容易に施工できることから、多用されている。山岳トンネルの吹付けコンクリートの代表的な特徴として、以下の2点が挙げられる。

- ・粗骨材(最大粗骨材寸法15 mm)の入ったコンクリートを用いる。
- ・コンクリートを急結させるためにノズル付近で急結剤を添加する。

図-4に、一般的な吹付けコンクリートのシステム概要図を示す。近年は、1台の台車に吹付けロボット、コンクリートポンプ、急結剤供給装置、コンプレッサー等の必要な設備を搭載した一体型の吹付け機が用いられることが多い(写真-1参照)。吹付けノズルは、吹付けロボット先端に取り付けた多関節マニピュレータに装着されており、リモコンで操作する。コンクリートは、吹付け機後方のホッパーで受けてポンプで圧送し、配管途中で圧縮空気を投入して浮遊搬送に切り替える。最後に、ノズル近傍で急結剤を添加し、地山に吹き付ける。



図-1 鋼製支保工建込み



図-2 吹付けコンクリートの施工



図-3 ロックボルト打設



写真-1 一体型の吹付け設備

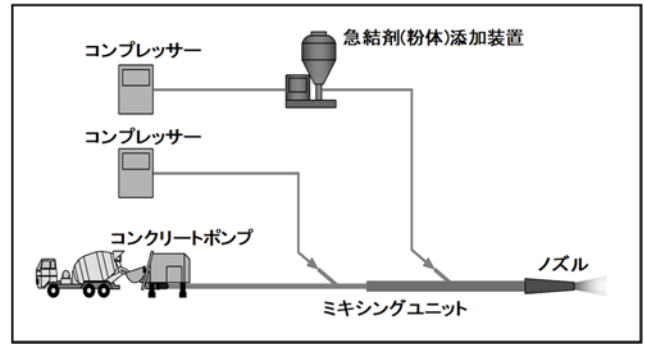


図-4 従来の吹付けシステム

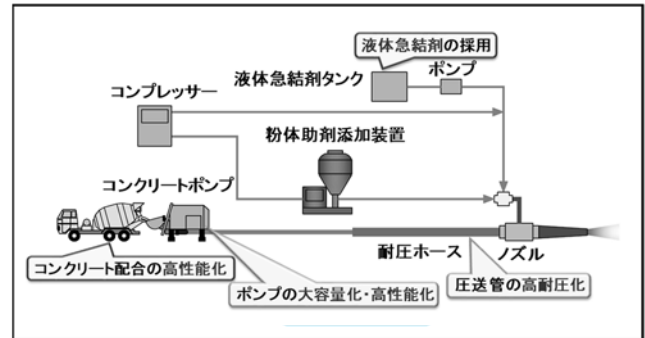


図-5 大容量・高性能吹付けシステム概要

## (2) 課題と開発目標

一般的な吹付けコンクリートは時間当たり12 m<sup>3</sup>程度の吐出量で施工されている。さらに、吹付けコンクリートの施工では、吹付けた材料のうち、30%程度が付着せずにはね返る。そのため、実際に地山に付着する量は時間当たり8 m<sup>3</sup>程度に留まる。これは、一般的な打ち込みコンクリートと比べて小さく、トンネル施工の生産性の向上に向けて改善が強く望まれるところである。

そこで、吹付けコンクリートの時間当たり付着量を2倍程度まで増加し、吹付け時間を半減するという生産性向上の目標を設定し、開発を行った。

## 3. 大容量・高性能吹付けコンクリートシステムの開発

### (1) 概要

本技術開発では、大容量高性能吹付けコンクリートを実現するために、コンクリートポンプなどの機械的なシステムの開発とベースコンクリートや急結剤などのコンクリート材料関係の開発を行った。図-5に本システムの概要を示す。

### (2) ポンプの大容量化・高効率化

一般的な吹付け機に搭載されているコンクリートポンプは吐出能力22 m<sup>3</sup>/h程度であるが、大容量化のため、吐出能力30 m<sup>3</sup>/hのものに変更した。一般的な吹付けには、ピストン式のコンクリートポンプが採用されているが、ピストン式ポンプはコンクリートの脈動を伴う。ピストンの往復運動に同期して、圧送管内を流動するコンクリートの流速および圧力が周期的に変化する。これが脈動である。脈動が大きいと急結剤を

表-1 ベースコンクリートの開発

目的	配合上の工夫	備考
コンクリート発現強度の確保	・ W/C (水セメント比) の低減	急結剤中の水分が後添加されるのを見越し、あらかじめ、コンクリート中の水分量を減らすことで、強度を確保する。
ワーカビリティの確保	・ フライアッシュの採用 ・ 単位水量の増量 ・ 単位セメント量の増量 ・ 高性能減水剤の使用	コンクリートの流動性や材料分離抵抗性を高め、コンクリートポンプへの吸い込み効率を高めるとともに、ポンプ圧送時の脈動を抑制する。
はね返り率の低減	・ s/aの低減	骨材中の粗骨材(碎石)の量を低減することで、リバウンドになりやすい粗骨材(碎石)の量を低減する
急結剤の確実な添加	・ 液体急結剤の採用	

表-2 通常吹付けと大容量吹付けの配合例

	スランプ (フロー) (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)	急結剤
				水	セメント	細骨材		粗骨材		
						砂	FA			
通常吹付けの例	10±2.0	61.0	62.0	220	360	1045	-	645	1.26	粉体
システム適用後	21±2.0 (45)	50.0	70.0	220	440	1064	119	524	0.8	液体

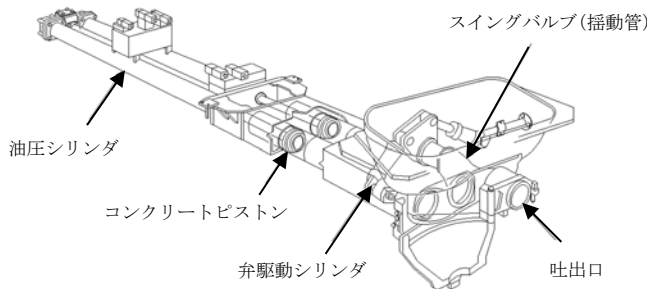


図-6 揺動弁（スイングバルブ）方式

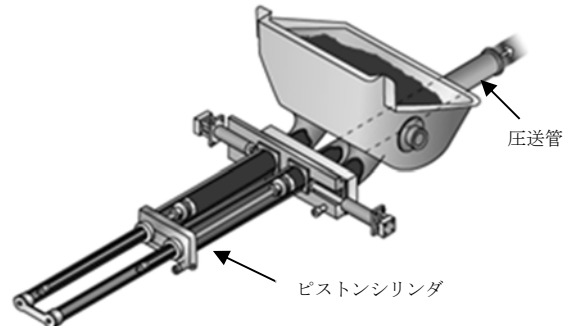


図-7 シリンダ摺動式

コンクリートに均一に混合するのが難しくなるため、脈動の抑制は、コンクリートを大容量で効率的に付着させるための重要な課題である。脈動を抑えるため、ポンプの吸引吐出弁方式について検討を行った。吸引吐出弁の方式には、揺動弁（スイングバルブ）方式（図-6参照）、シリンダ摺動（シリンダ揺動）式（図-7参照）などがある。揺動弁方式は、コンクリートを受けるホッパー内にスイングバルブが配置されるため、シリンダ内にコンクリートを引き込む際、配置されたスイングバルブが障害物となる。さらに、スイングバルブ部の配管が曲線となるため、コンクリートを圧送する際の圧力損失が大きくなる。これに対して、シリンダ摺動式は、ホッパー内部の吸い込み口付近に障害物がなく、吸い込みが有利であり、さらに、ピストンシリンダと圧送管が直線上に配置されることから曲がり部による損失が発生しない。このようなことから、シリンダ摺動式を採用した。

### (3) 液体急結剤の採用

吹付けコンクリートの急結剤には、粉体急結剤と液体急結剤がある。我が国には、崩落性の地山や湧水の多い地山などが多く、早期に地山を支持する目的から、これまで急結性に優れる粉体急結剤が多く用いられてきた。しかし、粉体急結剤は高速で圧送されるコンクリートに均一に混合するのは難しく、さらに、大容量化しようとする、コンクリートにうまく混合できなかった粉体急結剤が粉じんとなって、坑内環境に著しい悪影響を与える。これに対して、液体急結剤は急結性にやや難があるものの、コンクリートに均一に混合しやすく、液体であるため粉じんの問題も小さい。さらに、近年、液体急結剤に粉体の助剤を添加することにより、急結性の問題を大幅に改善できるようになった。このようなことから、本技術開発では、液体急結剤のシステムを採用した。

表-3 支保パターン毎の適用延長

支保パターン	延長(m)
D I -b	37.0
C II -b	217.8
C II -L	32.1



写真-2 吹付け作業状況

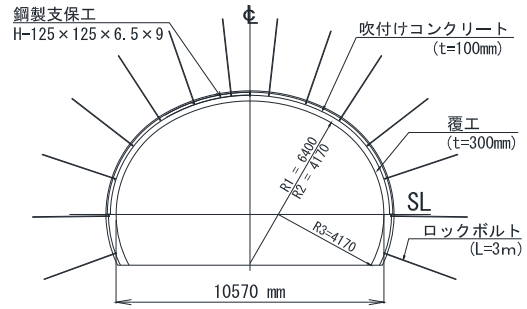


図-8 支保パターン図 (CII-b)

表-4 はね返り率と時間当り付着量

	吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	はね返り率 (%)	時間当り付着量 (m <sup>3</sup> /h)
適用前	12	30	12×0.7=8.4
適用後	20	10.0	20×0.9=18.0
		4.6	
		13.1	
		12.1	
		平均 10.0	

表-5 施工サイクル

作業工程	導入前		導入後		短縮率
	サイクルタイム	構成比率	サイクルタイム	構成比率	
掘削 (穿孔・装薬)	120 分	48.6 %	120 分	52.9 %	-
ずり出し・ソク・当取り					
鋼製支保工設置	30 分	12.1 %	30 分	13.2 %	-
吹付けコンクリート	42 分	17.0 %	22 分	9.7 %	48 %
ロックボルト	55 分	22.3 %	55 分	24.2 %	-
合計	247 分	100 %	227 分	100 %	8 %

#### (4) その他の改良

大容量化に伴う高圧下での急結剤の混合を確実にを行うため、急結剤添加ノズルの形状を改良した。また、大容量のポンプ圧送に対応するように吐出ノズルの形状の改良も行った。

#### (5) ベースコンクリートの開発

ベースコンクリートについては、以下の4項目に着目して開発を行った。

- ① コンクリート発現強度の確保
- ② ワークビリティーの確保
- ③ はね返り率の低減
- ④ 急結剤の確実な添加

これらの項目についての配合上の工夫を表-1にまとめる。また、表-2に通常吹付けと大容量吹付けの配合例を示す。

## 4. 実証実験

当システムを現場適用する前に、施工中の山岳トンネルにおいて実証実験を行った。実験は、施工性を確認しながら、コンクリートポンプの吐出量を徐々に増大させ、22 m<sup>3</sup>/h、25 m<sup>3</sup>/h、30 m<sup>3</sup>/hの3段階の吐出

量(コンクリートポンプの設定吐出量:ピストンの作動回数等により算出される理論吐出量)で行った。吐出量を22 m<sup>3</sup>/hに設定したときの実吐出量(1台の生コン車に搭載したコンクリートを吹付ける時間で算出)は21.1 m<sup>3</sup>/hであった。理論吐出量に対する実吐出量の割合は95.9%と非常に高い値であり、コンクリート配合とコンクリートポンプがうまく適合し、吹付けシステムが効果的に機能している目安になると考える。

この吐出量ではね返り率の測定を行った。はね返り率は土木学会規準(JSCE-F 563-2005)における実構造物による吹付け測定に準拠して、トンネルの天端部から側壁部に均等に吹付けを実施し、単位時間あたりの吐出量とはね返り量で算出した。このときのはね返り率は9.7%と小さい数値であり、実際の時間当り付着量は19.1 m<sup>3</sup>/h (=21.1 m<sup>3</sup>/h (実吐出量) × 0.903 (リバウンドを考慮した付着率))と極めて良好な値となった。本現場で実施している通常吹付けの時間当り付着量は9.9 m<sup>3</sup>/h (=15.0 m<sup>3</sup>/h (実吐出量) × 0.657 (リバウンドを考慮した付着率))であり、およそ2倍の速度で施工できることを確認した。

また、発生粉じん量は、1.65 mg/m<sup>3</sup> (測定位置: 切

羽から50m離れた地点)であり、粉じん濃度目標レベル(3.0 mg/m<sup>3</sup>)を大きく下回る結果が得られ、坑内環境面においても良好であった。

## 5. 適用結果

国土交通省中国地方整備局発注の智頭用瀬トンネル工事におけるトンネル施工延長785 mのうち、286.9 m間で本システムを適用した。表-3に支保パターン毎の適用延長、図-8にCII-bの支保パターン図を示す。以下に、本工事での長期運用により、得られた結果について述べる。

### (1) はね返り率・時間当りの付着量

写真-2に吹付けコンクリートの施工状況を示す。本システム適用後は、定期的にはね返り試験を実施した。はね返り率は、概ね10 %程度(表-4参照)であり、長期的適用においても大容量化とはね返り低減が両立できていることが確認できた。また、得られたはね返り率をもとに時間当りの吹付けコンクリート付着量を算出した。本システムを適用することにより、従来の吹付けコンクリートの2倍以上の施工量を実現できていることが確認できた。

### (2) 施工サイクル向上への寄与

表-5に施工サイクルを示す。なお、吹付けコンクリート以外のサイクルは、比較のために智頭用瀬トンネル南工事のCII-bパターンの標準的なサイクルとした。吹付けコンクリートの施工時間を、前後の準備時間を含めた時間で、従来の吹付けコンクリートに比べて、約47 %短縮できることが確認できた。トンネル掘削1サイクルに換算すると約8 %短縮効果が得られ、施工サイクル向上に大きく寄与した。

## 6. まとめ

智頭用瀬トンネル南工事において、本システムを現場適用した結果、長期的な運用においても大容量化(吐出量20 m<sup>3</sup>/h)と低いはね返り率(10 %程度)を両立させることで、従来の吹付けコンクリートの2倍の速度での施工が可能であることが確認できた。また、使用機械や現場プラントでのコンクリートの出荷については大きな問題はなく、長期的に運用可能であることが確認できた。さらに、発生粉じん量を低減させることで、坑内の労働環境を大きく改善した。

現在、九州地方整備局発注の二重峠トンネルにおいても、本システムを適用し、長期的な運用を行っている。今後も新規受注現場に順次投入していく予定であり、NATM導入以来の吹付けコンクリートの技術革新をもたらすとともに、建設業界の労働環境を3K(キツイ、汚い、危険)から新3K(給与、休暇、希望)へ改善する足がかりとなる技術になることを期待している。

## 参考文献：

- 1) 稲田匠吾, 横内静二, 串橋 巧, 嵯峨 豊, 多宝 徹: 山岳トンネルにおける大容量吹付けコンクリートシステムの開発, 土木学会トンネル工学報告集, 第27巻, I-29, 2017.11
- 2) 多宝 徹: 大容量・低リバウンド吹付けコンクリートの開発, 月間「建設機械」, 641, Vol.54, 2018.7