

低粉じん型新方式コンクリート吹付機の現場適用

鈴木 裕 一 野 間 達 也
土 屋 敏 郎 ^{*1} 三 河 内 永 康 ^{*2}

概 要

我国のトンネル工事における坑内発生粉じん濃度は $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を目標値としているが、現行の吹付け方法ではほとんど達成されていない。これは、我国では吹付け方法として圧縮空気をうい、急結剤として粉体急結剤を用いる点に課題がある。

本報では、粉じん発生の低減効果が期待できるエアレス吹付機と液体急結剤の組み合わせに注目し、実際のトンネル施工への適用について示し、発生粉じんの低減効果や施工性・経済性について述べる。

Application of a New Process Shotcrete System for Tunnel Lining Works

Abstract

Although a target of $3\text{mg}/\text{m}^3$ or less has been set for dust concentration as an environmental standard at Japanese tunnel construction sites, most shotcreting methods have not been able to meet this value. This is due to the widespread use of compressed air and powder accelerators to spray concrete for tunnel lining. In this study the application of a new airless shotcrete system using a liquid accelerator is discussed, and dust reduction efficiency, workability and cost effectiveness of the system are mainly evaluated.

キーワード： 山岳トンネル，吹付けコンクリート
粉じん濃度

*1 広島支店 土木部

*2 首都圏土木支店 土木部

§1. はじめに

現代のトンネル建設では、支保として吹付けコンクリートを用いることが一般的となっている¹⁾²⁾。その反面、吹付けコンクリート作業には多量の粉じんが発生することが問題となっている。坑内の浮遊粉じんは、けい肺の原因となり、塵肺訴訟などの社会問題となっている。こうした社会情勢をふまえ、厚生労働省は、2000年12月に坑内作業の粉じん濃度に関するガイドラインを制定し、坑内粉じん濃度の目標値(切羽50m後方での粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下)を設定した³⁾。

近年の高粘性・高品質コンクリートの開発や液体急結剤の導入により吹付けコンクリートの発生粉じん量は減少の方向に向かっている。しかし、これらの技術によっても粉じん濃度目標値を完全に達成するまでには至っておらず、将来予想される粉じん濃度目標値の引き下げにも対応可能な抜本的な解決策が求められている。

筆者らは、平成11年度より切羽での発生粉じん抑制技術開発に取り組み始め、平成12～14年度に石川島播磨重工業・リブエンジニアリング・ラサ商事・ボゾリス物産との5社共同実験を実施した。共同実験では、トンネル施工現場において石川島播磨重工業開発の新方式コンクリート吹付機(エアレス吹付機)を用いた吹付実験を行い、同システムを用いた場合の粉じん低減効果や施工性、経済性などの評価を行った。本論では、共同実験結果を総括し、新方式コンクリート吹付機の実用化に対する課題と今後の展望について述べる。

§2. システムの概要

本研究に使用した低粉じん型コンクリート吹付機(以下エアレス吹付と称す)は、一般に用いられている従来方式の吹付けコンクリート(以下エア吹付と称す)と異なり、圧縮空気を用いずにコンクリートを吹付けるのが特徴である。表1にエアレス吹付機の主仕様を、表2に吹付方式の比較を示す⁴⁾。

エア吹付けでは、コンクリートポンプによりコンクリートを圧送し、経路途中で圧縮空気を添加することでノズル先端までのコンクリート搬送と吹付けを行う。粉体急結剤は、ノズル先端より2m程度手前のホース内に圧縮空気を用いて添加される。このため、ノズル先端からは加圧されたコンクリートが噴射され、これが飛散することにより多量の粉じんが発生する。

これに対しエアレス吹付機では、コンクリートはポンプ圧送により吹付機先端に取り付けられたインペラヘッドまで搬送され、4枚のインペラブレードが高速回転することにより打撃投射される。液体急結剤は投射口外周に設けられた

噴射ノズルより添加される。このように、吹付けや急結剤添加の過程で圧縮空気を用いないことにより、飛散したセメント粉などが粉じんとなることを抑制している。また、急結剤を液状にすることで急結剤自体が粉じんとなることを防止している。

表 1 エアレス吹付主仕様

コンクリート供給法	ポンプ圧送直投入
急結剤供給法	液体急結剤ポンプ圧送噴射
投射方式	ブレード打撃投射
定格投射量	$20\text{ m}^3/\text{h}$
急結剤噴射	投射管外周 2 箇所
インペラ径	300mm
投入管径	65mm
投射管径	$80 \times 104\text{mm}$
投射速度	約 40m/s
重量	70kg
油圧源	$35\text{MPa} \times 55\text{kW}$



図 1 エアレス吹付機全景

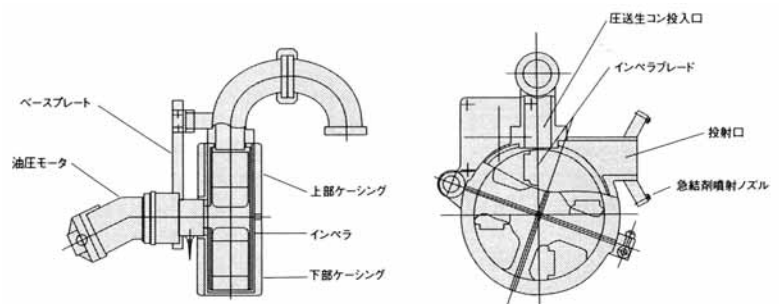


図 2 インペラヘッド構造図



図 3 液体急結剤添加方法

表 2 吹付方式の比較

		エアレス吹付 (新方式)	エア吹付 (従来方式)
搬送 方式	鋼管部	ポンプ圧送	ポンプ圧送
	ホース部	ポンプ圧送	エア搬送 (ほぐしエア)
先端部構造		インペラヘッド	ノズル
吹付方式		インペラの回転による打撃投射	圧縮空気による噴射
使用急結剤		液体	粉体
添加位置		投射口外側	ノズル手前
添加方法		ポンプ噴射	圧縮空気

§3. 試験施工概要

3.1 試験施工条件

本研究において実施した試験施工の諸元を表3に示す。試験施工は、2箇所のトンネル施工現場において合計3回行った。それぞれの試験において施工時期(1・3は冬期、2は夏期)、トンネル内空断面、支保パターン(設計吹付厚・鋼製支保工の有無)の諸条件が異なっている。

表 3 試験施工諸元

No.	1	2	3
試験実施日	2001.2	2001.7	2002.3
トンネル名	A	B	B
内空断面(m ²)	71.4	46.7 (上半)	62.9
設計吹付厚(cm)	10	15	10
鋼製支保工	-	H-125	H-125
送風量(m ³ /min)	1,200	1,200	1,200
吹付回数(回)	3	5	10
合計吹付量(m ³)	20.5	10.0	29.7

3.2 使用資機材

試験施工に使用した資機材は、エアレス吹付けにのみ使用するもの(エアレス吹付機・早強セメント・高性能減水剤・液体急結剤)は現場に持ち込み使用した。それ以外の資機材はすべて現場で使用しているものをを用いた。吹付材料として使用した骨材の諸元を表4に示す。

表 4 使用資材(骨材)諸元

トンネル名		A	B
細骨材	種類	粗砂	砕砂
	表乾密度(g/cm ³)	2.70	2.60
	粗粒率	3.07	2.47
粗骨材	種類	碎石	碎石
	最大寸法(cm)	15	15
	表乾密度(g/cm ³)	2.64	2.64

3.3 コンクリート配合

試験施工に用いたコンクリート配合を表5に示す。エアレス吹付けではアルカリフリー液体急結剤を使用するため、粉体急結剤を使用した場合に比べ吹付けコンクリートの初期強度が低い^{5),6)}。このため、施工に十分な初期強度を確保するためにベースコンクリートの水セメント比を45%前後とする必要がある。またワーカビリティ確保のため200kg/m³程度の単位水量が必要となる。この結果、単位セメント量は440～450kg/m³となった。スランプはポンプ圧送性を考慮して18cmとし、高性能減水剤を用いて調整を行った。また、一部の試験に早強セメントを使用した。

表 5 コンクリート配合

	エアレス吹付	エア吹付
セメント種類	普通・早強	普通
水セメント比(%)	45.0-47.7	60.0-61.1
細骨材率(%)	60.0-70.0	61.0-62.0
セメント(kg/m ³)	440-450	360
水(kg/m ³)	198-203	216-220
粗骨材(kg/m ³)	475-686	686-721
細骨材(kg/m ³)	948-1,183	1,056-1,147
混和剤(%)	高性能減水剤 0.5-1.0	-
目標スランプ(cm)	18	10
使用急結剤	アルカリフリー 液体急結剤	セメント系 粉体急結剤
急結剤添加率(%)	5-12	7

3.4 測定項目

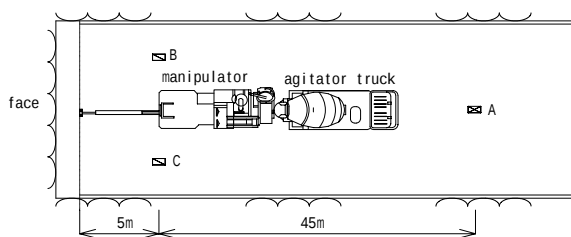
吹付時の測定項目を表6に示す。粉じん濃度はデジタル粉じん計を用いた相対濃度測定とし、カウント値(cpm)に粉じん計に固有のK値(厚生労働省ガイドラインによる)を乗じたものを粉じん濃度とした。測定位置はガイドラインに指定されている切羽50m後方地点および切羽近傍の5m後方地点とした(図5)。リバウンド率の測定は0.5m³のコンクリートを天端付近に吹付け、落下したコンクリートの重量を計量

することにより行った。吹付状況やコンクリートの付着性状は主として目視により評価することとし、施工性や作業性に関しては、目視による観察とした。

表 6 測定項目一覧

	測定方法	備考
粉じん濃度	相対濃度測定 デジタル粉じん計 (P5-L2,P5-H)	切羽5m後方 切羽 50m後方 (図5参照)
吹付状況	目視	
付着性状	目視	
施工性・作業性	目視	
リバウンド率	重量測定	吹付量 0.5m ³
長期強度	圧縮強度試験 (ベース, コア)	材令 7,28 日
短期強度	プルアウト試験	材令 3,24 時間
超短期強度	針貫入試験 (メイコ式)	材令 5,15,30,60 分
フレッシュ性状	スランプ, 空気量, 温度	

図 5 粉じん濃度計測位置



§4. 試験施工結果

4.1 粉じん濃度

図6に3回の試験施工で行った粉じん測定結果(厚生労働省ガイドラインに準拠: 切羽 50m後方における 10 分間の粉じん濃度)を示す。エア吹付けの場合、内空断面の小さいほど高い粉じん濃度を示し、Bトンネルでは7～10mg/m³に達している。これに対し、エアレス吹付けの粉じん濃度は、トンネル内空断面などの条件に関わらず、3mg/m³以下となっている。図7および8は粉じん濃度の経時変化の一例であるが、切羽後方 50m地点の粉じん濃度は、エア吹付けでは吹付け開始とともに上昇し、最大 13.6mg/m³に達しているのに対し、エアレス吹付けでは最大でも 2.2mg/m³である。また、切羽5m後方地点の粉じん濃度は、エア吹付けでは吹付け開始後数分で 15mg/m³程度に上昇し、最大 20.8mg/m³にまで達している。これに対してエアレス吹付け

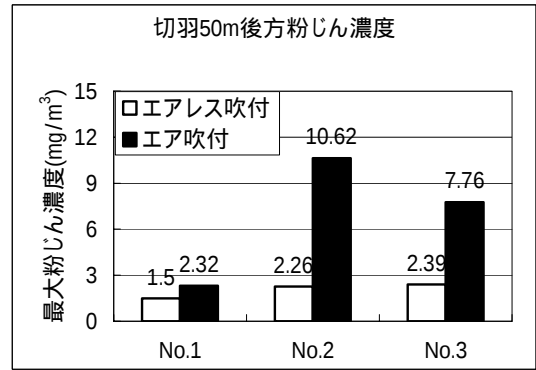


図 6 試験施工における最大粉じん濃度

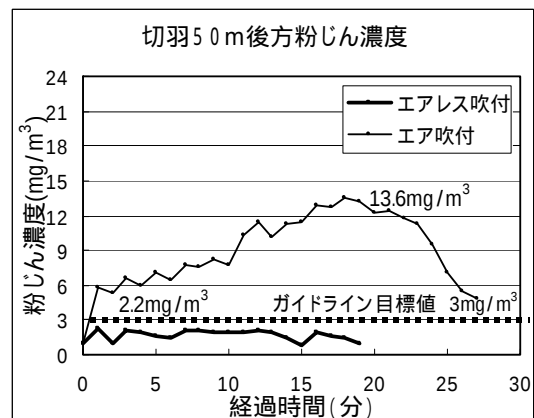


図 7 切羽後方 50m地点の粉じん濃度経時変化

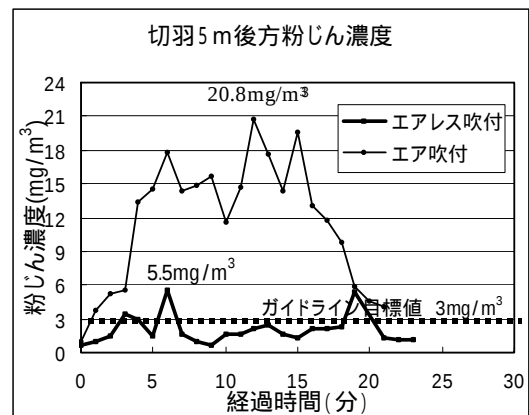


図 8 切羽後方 5m地点の粉じん濃度経時変化



図 9 エアレス吹付けによる吹付状況

では粉じん濃度が $3\text{mg}/\text{m}^3$ を超えたのはわずか数分である。この結果、エアレス吹付けでは吹付け場所の近傍においても、低い粉じん濃度を維持できることが明らかとなった。また、粉じんが少ないため吹付作業時の視界も良好で作業性・安全性が向上することも確認された(図9)。

4.2 付着性状

試験施工 No.1 では、実質吹付厚さが15cm 未満であったため、付着性状に関する問題は生じなかった。しかし、試験施工 No.2 では実質吹付厚は平均25cm 程度となり、最大吹付厚は50cm 程度必要であった。この際、厚く吹付けられたコンクリートが地山から剥離する付着不良の問題が生じた。ここで、試験施工 No.1,2 では、液体急結剤添加率を9%に固定して試験を行っている。これより、付着性状と急結剤添加率の関係を把握するため、試験施工 No.3 では、急結剤添加率を5～12%で変化させ、コンクリートの付着状況を評価した。目視による付着性状観察結果を表5に示す。

付着性状は急結剤添加率と高い相関を示したが、添加率11.3%の場合でも天端部に一定以上の厚さで吹付けた場合には一部で剥落が生じた。エア吹付けで液体急結剤を使用する場合の一般的な添加率は7～9%であるが、エアレス吹付けにおいて十分な付着性状を得るためには、液体急結剤添加率を12%以上添加する必要がある。これは、液体急結剤は粉体急結剤と比較して初期の付着強度が低いことによるとともに、急結剤添加方法に起因するコンクリートと液体急結剤の混合不良である可能性があり、空中でコンクリートと急結剤を混合させる現在の添加方法には改善の余地があると考えられる。

表5 付着性状試験結果

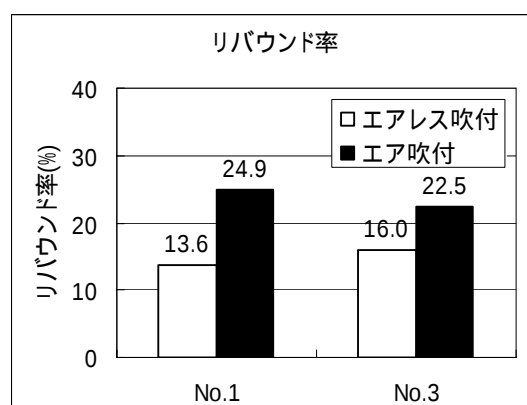
試験施工 No.	急結剤 添加率 (%)	付着性状			
		吹付厚 15cm 未満		吹付厚 15cm 以上	
		側壁	天端	側壁	天端
No.1	9.0			-	-
No.2	9.0	○	○	×	×
No.3	4.4			×	×
	4.9			×	×
	7.1	○		×	×
	8.7		○		×
	9.5		○	○	
	11.3			○	○

：非常に良好な付着 ○：付着しているが不安定

：剥落が生じる ×：付着が弱く大きく剥落する

4.3 リバウンド率

リバウンド率測定結果を図10に示す。エアレス吹付けのリバウンド率は、エア吹付けに比べ30%以上改善された。しかし、このリバウンド率測定は付着不良を生じない条件(液体急結剤添加率10%以上、厚さ15cm 未満の薄吹き施工)で行ったため、厚吹き施工となった場合などには、エアレス吹付けのリバウンド率はこれより高くなる。安定したリバウンド率低減の為に、付着性状の改善が不可欠と



なると考えられる。

図10 リバウンド率測定結果

4.4 施工性

一連の試験施工において一部でトラブルがあったものの、トンネル掘削サイクルに合わせた吹付け作業を、エアレス吹付けによって行うことができた。従って、エアレス吹付けを現場適用することは十分可能であると考えられる。ただし、操作がやや煩雑であることや、準備・後片付けに時間が掛かるなど、施工性に関しては従来のエア吹付けに及ばない部分も明らかとなった。施工性の問題は掘削サイクル全体に影響を及ぼし、経済性の低下にもつながるため、実施の際には改善される必要がある。

4.5 経済性

今回のエアレス吹付け試験施工で使用したコンクリートは、単位セメント量をエア吹付けと比較すると約 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 多い結果となった。また液体急結剤は粉体急結剤より高価な上、添加量についてもエア吹付けより必要なことが分かった。このため、エア吹付けに比較してエアレス吹付けの吹付材料費は経済性に劣る傾向にある。リバウンドの低減等コストダウン効果を考慮しても、全体としてエアレス吹付けはエア吹付けに対してコストアップとなる。

今後は、より低い単位セメント量のコンクリートの使用や、より低い急結剤添加率で吹付けることを可能とすることなど、経済性の改善を図る必要がある。

§5 . まとめ

トンネル掘削現場においてエアレス吹付けの試験施工を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) エアレス吹付けの発生粉じん量は極めて少なく、切羽近傍においても粉じん濃度はガイドライン基準値の $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を達成可能である。
- 2) エアレス吹付けで良好な吹付けの付着を得るためには、液体急結剤添加率を高くする必要がある。これは液体急結剤添加方法に起因する可能性が高い。
- 3) エアレス吹付け機は、実用上十分な性能を備えているが、施工性・経済性に関しては改善の必要がある。

謝 辞 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた石川島播磨重工業(株)、リブコンエンジニアリング株式会社、(株)ポリス物産の皆様へ深謝いたします。



鈴木裕一

ひとこと

本研究は、土木研究所との官民共同研究として引き継がれたが、共同研究の中核となり、早期の実用化を目指したい。

参 考 文 献

- 1) トンネル標準示方書〔山岳工法編〕、土木学会、1996.
- 2) トンネルの吹付けコンクリート、日本トンネル技術協会、1996
- 3) ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン、労働省、2000.
- 4) エアレスコンクリート吹付けにおけるインペラヘッドの開発、石川島播磨技報、vol.38、1998.
- 5) アルカリフリー液状急結剤「メイコSA161」について、エヌエムビー研究所報、No.13、2000.
- 6) 新しい液状急結剤「メイコ SA163」について、エヌエムビー研究所報、No.14、2002.