

液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの現場適用性に関する実験的検討

車 紅升*¹・西脇 敬一*²

概 要

山岳トンネル工事に用いられる吹付けコンクリートでは、粉じんの発生抑制など作業環境の改善が重要な課題となっている。そこで、本開発では、急結剤に液体急結剤のみを使用する吹付けコンクリートに着目し、実施工への適用性の検討を目的に模擬トンネルにおいて吹付け実験を行った。その結果、液体急結剤をコンクリートポンプの脈動に同期させて添加する手法によって、液体急結剤のみを使用する吹付けコンクリートの課題と考えられた付着性が改善され、実施工へ適用可能であることが明らかとなった。

キーワード：作業環境改善，液体急結剤，脈動連動，均一性，強度発現性

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ON-SITE APPLICABILITY OF SHOTCRETE USING LIQUID SETTING ACCELERATORS

Hongsheng CHE*¹, Keiichi NISHIWAKI*²

Abstract

In shotcrete used for mountain tunnel construction, improving the working environment, such as suppressing dust generation, is an important issue. In this study, our research team, focusing on sprayed concrete using only liquid accelerators as the setting agent, conducted spraying experiments in a mock-up tunnel to investigate its suitability for practical application. As a result, it was demonstrated that by adding the liquid accelerator in synchronization with the pulsations of the concrete pump, the shotcrete adhesion issues—which had been considered a challenge in sprayed concrete using only liquid accelerators—were improved, and that this method is suitable for practical application to sites.

Keywords: Working environment improvement, Liquid accelerator, Pulsation linkage, Uniformity, Strength development

*1 Material Group, Research & Development Center

*2 Manager, Material Group, Research & Development Center

液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの現場適用性に関する実験的検討

車 紅升*1・西脇 敬一*2

1. はじめに

現在、トンネル工事においては、粉じんを対象とした坑内作業環境の改善が、重要な課題の一つとなっている。厚生労働省のガイドラインにおいても、吹付けコンクリート施工時に発生する粉じんの低減が求められている。その対策の一つとして、急結剤に粉体急結剤を用いず、液体急結剤のみを使用する吹付けコンクリート（以下、液体急結剤吹付けコンクリート）が考えられる。しかしながら、液体急結剤吹付けコンクリートは、粉体急結剤やハイブリッド急結剤を用いる場合に比べて付着性が弱く、厚吹き時に層間剥離が生じやすいといった課題がある¹⁾。これは、コンクリートポンプのピストンの脈動により、コンクリートが吐出されない時間帯が発生する一方で、液体急結剤は連続的に吐出されることで、急結剤を多く含む層が局所的に

形成されることが原因であると考えられる。

そこで、液体急結剤の供給をコンクリートポンプの脈動に同期させて制御する新たな急結剤添加装置を開発した。今回、この添加装置を用いた液体急結剤吹付けコンクリートの吹付け性状、強度発現性および施工性を確認し、実施工への適用性を検討することを目的として、高速道路トンネルを模擬した写真－1 および写真－2 に示す実大トンネルにおいて、実施工と同様の吹付け機を使用した吹付け実験を実施した。

本報は、液体急結剤吹付けコンクリートの吹付け実験の結果および実施工への適用性について報告するものである²⁾。

2. 実験概要

2.1 吹付けコンクリートの必要性能

吹付けコンクリートの仕様の例³⁾を表－1に示す。今回の実験では、高強度吹付けコンクリートを対象とし、必要性能は圧縮強度が、材齢3時間で2N/mm²以上、材齢1日で10N/mm²以上、材齢28日で36N/mm²に設定した。

2.2 吹付け実験

使用材料および吹付けコンクリートの配合を表－2と表－3に示す。吹付け実験は、模擬ト

表－1 標準仕様

種類	必要強度 (N/mm ²)	単位 結合材量	結合材種類
一般	$\sigma_{1日}=5$ $\sigma_{28日}=18$	360 kg/m ³	普通ポルトランドセメント
高強度	$\sigma_{3時間}=2$ $\sigma_{1日}=10$ $\sigma_{28日}=36$	450 kg/m ³	



写真－1 模擬トンネル外観



写真－2 模擬トンネル内部

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ グループリーダー

表－2 使用材料

材料名	種類・産地	密度 (g/cm ³)
セメント C	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材 S	陸砂（茨城県行方市麻生産）	2.56 （表乾）
粗骨材 G	S-13 砕石（笠間市片庭字由良々石産）	2.66 （表乾）
混和剤 Ad	ポリカルボン酸エーテル系化合物	—
急結剤 Ac	液体，主成分：水溶性アルミニウム塩（硫酸アルミニウム 20-30%，他）	1.37-1.41
水 W	上水道水	—

表－3 試験配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad	急結剤 Ac
42.0	52.4	189	450	849	815	C×1.2%	C×8%

表－4 試験項目

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法
供試体作製	JSCE-F 561-2023 吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の作り方
ピン貫入試験	JSCE-G 561-2010 引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法
圧縮強度	JIS A 1107 コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法
はね返り率	JSCE-F 563-2023 吹付けコンクリートのはね返り率試験方法
液体急結剤の均一性および三酸化硫黄分析	JSCE-G 574-2013 EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法

ンネルにおいて、写真－3と写真－4に示す実際の吹付け機を用いて行った。コンクリート吐出量は、12 m³/hに設定した。実験ケースは、コンクリートポンプの脈動に同期させて液体急結剤を添加する方法（以下：脈動連動添加あり）と通常の急結剤の添加方法（以下：脈動連動添加なし）の2ケースとした。実験では、吹付け性状、強度発現性およびはね返り率等を確認するために、表－4に示す試験を行った。液体急結剤の均一性は、採取したコアをEPMA面分析して確認した。吹付け性状は、目視により確認した。強



写真－3 吹付機外観



写真－4 吹付ノズル



写真－5 試料形成状況

度発現性は、写真－5に示すようにJSCE-F561「吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の作り方（案）」⁴⁾に準じてパネル型枠に試料を吹付け、深さ方向にφ45mmのコアを採取し材齢28日に圧縮強度試験を行い確認した。初期強度（材齢3時間，1日）は、ピン貫入試験により測定し、長期強度（材齢28日）は、圧縮強度試験により測定した。

液体急結剤の均一性の分析は、採取したコアから図－1に示すように深さ方向に分割したコア供試体を用いて、JSCE-G574「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法」⁵⁾により実施した。なお、面分析で対象とする化学組

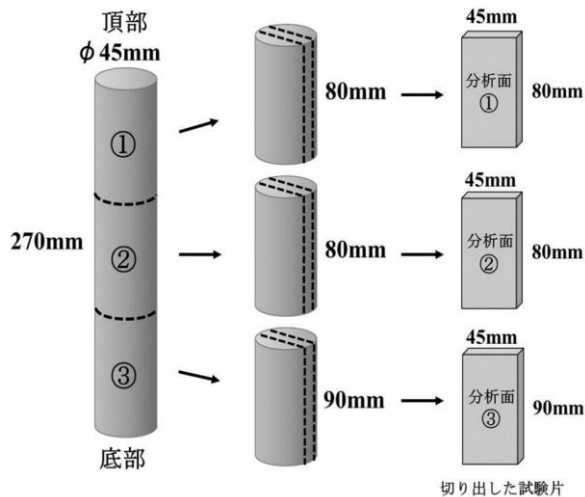


図-1 コア供試体分割方法

成は、液体急結剤の主成分である硫酸アルミニウムに関連する三酸化硫黄 SO_3 とし、その濃度分布状況により評価を行った。吹付け時は、ノズル近傍のコンクリート吐出圧と液体急結剤添加機のポンプの回転数を計測して脈動連動添加の確認を行った。

3. 実験結果

3.1 脈動連動添加の確認

ノズル近傍のコンクリート吐出圧および液体急結剤添加機ポンプの回転数の計測結果の一例を図-2 に示す。コンクリート吐出圧は、周



写真-6 脈動連動添加なし吹付け状況



写真-7 脈動連動添加あり吹付け状況

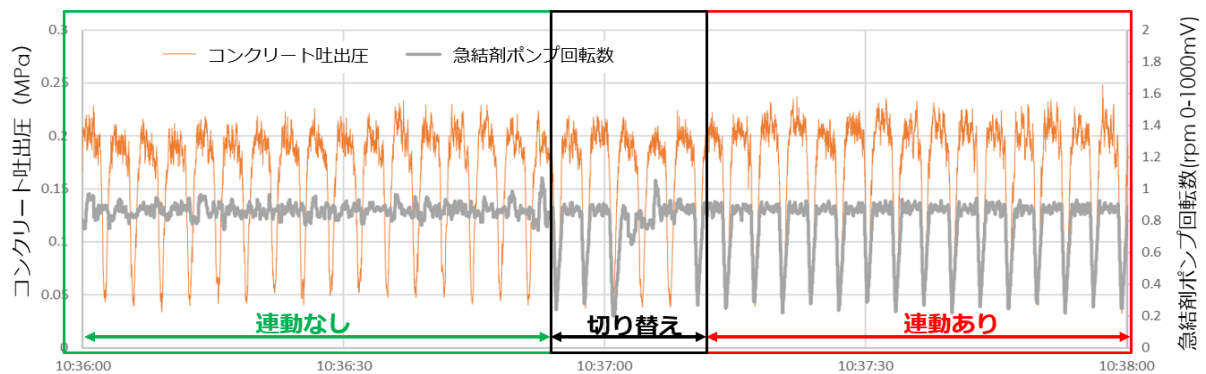


図-2 コンクリート吐出圧と液体急結剤添加機ポンプの回転数

期的に変動しており、ピストン切換えによる脈動がノズル近傍でも生じていた。また、急結剤添加方法を脈動連動添加なしとした通常の液体急結剤添加方法では、コンクリートの吐出圧の変動に関わらず、液体急結剤が定常的に吐出していた。よって、脈動時のコンクリート吐出が減少している時間帯においても、液体急結剤がノズルから吐出されているため、液体急結剤の添加が不均一となっていることが確認された。

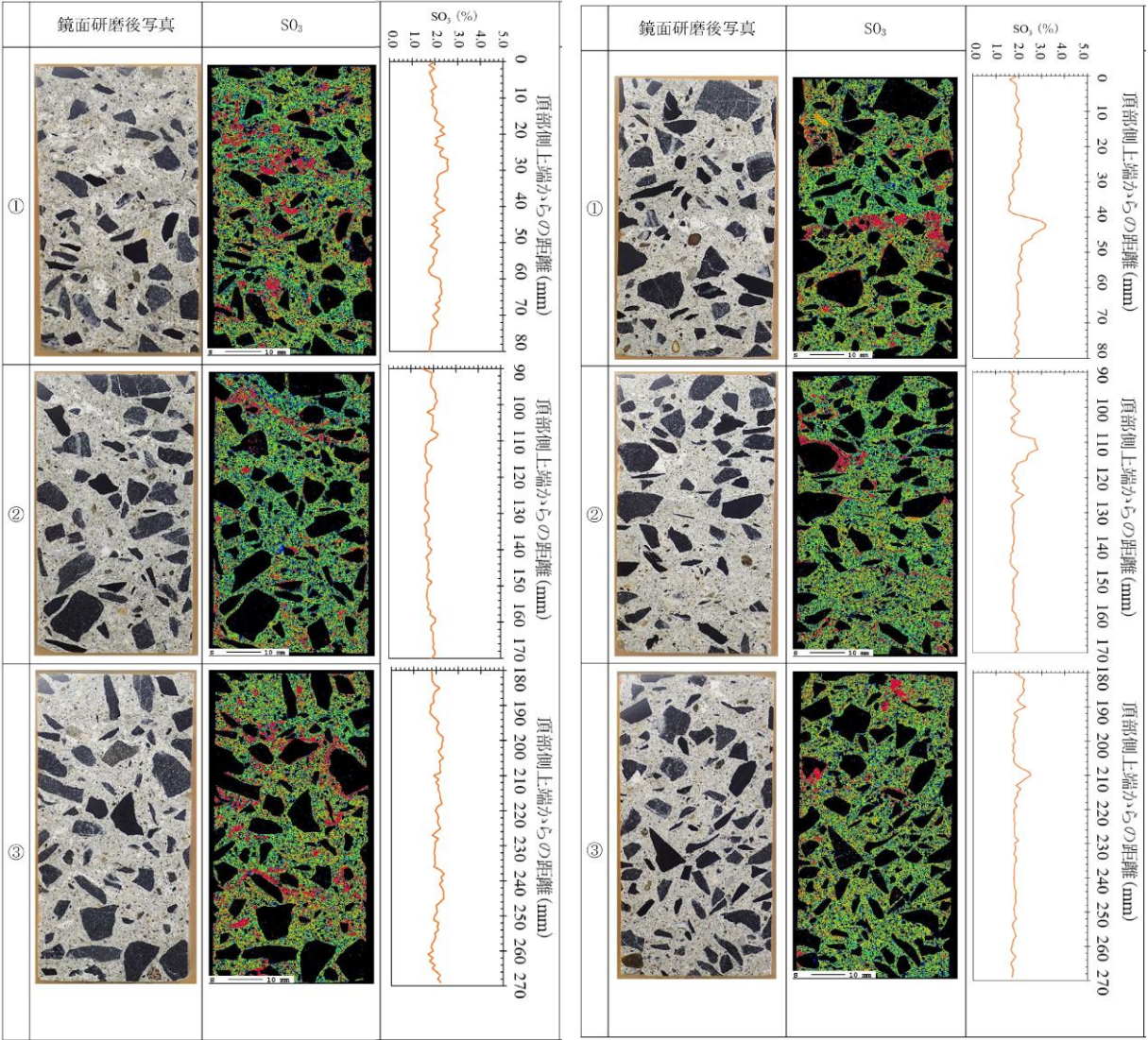
一方、脈動連動添加ありの場合は、圧縮強度が高強度吹付けコンクリートの標準仕様（表－1）を満足するとともに、脈動連動添加なしの場合と比較して、急結剤の添加率を約 1%低減できることが確認された。

3.2 吹付け状況

吹付け状況を写真－6、写真－7 に示す。脈動連動添加なしの条件では、写真－6 に示すようにノズルから液体急結剤のみが噴出される時間帯が生じ、急結剤だけが表面に付着することで層間剥離が確認された。一方、脈動連動添加ありの条件では、写真－7 に示すように材料の噴出が安定しており、良好な吹付け状況を確認することができた。

表－5 強度試験結果

	圧縮強度試験 (N/mm ²)				急結剤添加率 (C×%)	はね返り率 (%)
	3 時間 (ビン貫入)	1 日 (ビン貫入)	7 日 (コア)	28 日 (コア)		
脈動連動添加あり	2.37	20.5	28.4	39.9	6.8	12.0
脈動連動添加なし	2.63	20.8	21.8	36.2	7.8	12.7



図－3 SO₃ 濃度分布（左：脈動連動添加あり，右：脈動連動添加なし）

3.3 はね返率および強度発現性

急結剤の添加量と圧縮強度試験結果、はね返り率を表-5に示す。材齢3時間、1日および材齢28日の圧縮強度、およびはね返り率は、両ケースとも同程度の値を示した。圧縮強度については、高強度吹付けコンクリートの標準仕様（表-1）を満足したが、脈動連動添加ありの場合は、脈動連動添加なしの場合と比較して、急結剤の添加率を約1%低減できることが確認された。

3.4 液体急結剤の均一性

EPMA法による SO_3 濃度分布を図-3に示す。脈動連動添加なしでは、 SO_3 濃度が局部的に高い層（深さ41mm付近3.3%、深さ112mm付近2.8%）が存在した。これに対し、脈動連動添加ありでは、 SO_3 濃度のばらつきが小さく、1.6~2.1%程度の範囲であった。 SO_3 濃度は、液体急結剤の濃度を反映していると考えられることから、脈動連動添加ありでは、脈動連動添加なしに比較して、液体急結剤が均一に分布していると推察される。

4. まとめ

液体急結剤吹付けコンクリートの実用化の検討結果をまとめると、コンクリートポンプの脈動に同期させて液体急結剤を添加した場合、急結剤のみが吹付け面に付着する時間が短縮されることから、層間剥離を抑制できることが確認された。さらに、圧縮強度は、一般的な高強

度吹付けコンクリートの基準を満足することが確認された。

5. 今後の検討

液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの粉じん低減効果については、今後、実施工への適用を通じてその効果を確認する予定である。

参考文献

- 1) Marlene Sakoparnig, et al.: On the significance of accelerator enriched layers in wet-mix shotcrete, Tunnelling and Underground Space Technology 131 2023.
- 2) 車紅升, 岩城圭介, 西脇敬一, 舟橋孝仁, 須志田藤雄: 液体急結剤を用いる吹付けコンクリートにおける急結剤均一性向上に関する研究, 第80回土木学会年次学術講演会概要集, V-541, 2025.9
- 3) NEXCO標準仕様: 「トンネル施工管理要領」吹付けコンクリート材料の品質管理基準, pp30, 令和2年7月
- 4) コンクリート標準示方書（基準編）: JSCE-F561「吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の作り方（案）」, pp.333, 2023
- 5) コンクリート標準示方書（基準編）: JSCE-G574-2013「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法」, pp.418, 2023