

論文 液体急結剤 粉体急結剤を複合した吹付け技術

中島 康宏^{*1}・室川 貴光^{*2}・石田 積^{*3}・小菅 啓一^{*4}

要旨: アルミニウム塩を主成分とした酸性タイプの液体急結剤とカルシウムサルフォアルミネート系の粉体急結剤を複合し,モルタル・コンクリートに添加して以下の物性を確認した。(1)液体急結剤の量を一定とし,粉体急結剤の添加量を増加させることにより,高い急結性状を得た。(2)液体・粉体急結剤の複合技術を用いて吹付けすることで,低粉じん・低はね返り性を得た。(3)複合急結剤において粉体急結剤の使用量を増すことで,初期強度発現性が高くなった。早期から地山への高い支保効果を必要とする場合には,粉体急結剤の添加量を調整した吹付けが有効になると思われる。

キーワード: トンネル, 吹付け, 低粉じん, 耐久性, 液体急結剤, 粉体急結剤, 複合

1. はじめに

我が国のトンネル掘削工法は NATM を標準工法として用いる場合が多い。特に近年では,吹付け時における材料のはね返りの少ない高品質化を目標に吹付け材料や吹付けシステムの開発が活発に行われている。吹付け時に発生する粉じんについては,トンネル建設工事の作業環境改善のために平成 12 年 12 月に厚生労働省が「**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**」を策定し,粉じん濃度の目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ での施工が行われており,吹付け作業環境の改善は社会的責務といえる。NATM で用いる吹付けコンクリートでは,水和活性が高く急結性に優れたカルシウムアルミネート系やカルシウムサルフォアルミネート系の粉体急結剤を広く用いるが,最近では,取り扱いの利便性・安全性や粉じん量低減の観点から新たに開発された酸性タイプの液体急結剤を用いる場合がある。しかしながら,酸性液体急結剤の急結性や初期強度発現性は,自硬性を持つ上記の粉体急結剤と比べて低く^{1,2,3)}湧水や寒冷時に十分な急結性や強度発現性が得られない場合では,物性改善のため,吹付けコンクリートの水/セメント

比の低減等の対策を講じる場合が多い。

本研究では,高い急結・強度発現性,低粉じんおよび低はね返り等を満足する液体・粉体急結剤を複合した吹付け技術を考案し,モルタルの基礎的特性や吹付けコンクリートの性状を確認することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に用いる急結剤の主成分と物理的性状を表-1に,使用材料を表-2に示す。液体急結剤(以下,AF)の主成分はアルミニウム塩であり,pH2~4の酸性溶液である。一方,粉体急結剤(以下,CSA)の主成分はカルシウムサルフォ

表-1 急結剤の主成分および物理的性状

種類	記号	主成分	密度	pH
液体急結剤	AF	アルミニウム塩	1.40	2.3
粉体急結剤	CSA	カルシウムサルフォアルミネート	2.80	

*1 電気化学工業(株) 無機材料研究センター 工修(正会員)

*2 電気化学工業(株) 無機材料研究センター

*3 電気化学工業(株) 無機材料研究センター主任研究員 学博(正会員)

*4 電気化学工業(株) 特殊混和材事業部(正会員)

表-2 使用材料

材料(記号)	名称	密度	諸元, 主成分等
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積 3,310cm ² /g
細骨材(S)	新潟県姫川産砕砂	2.62	FM 2.76
粗骨材(G)	新潟県姫川産砕石	2.64	FM 6.34, 最大寸法 15mm
減水剤(SP)	高性能減水剤	1.05	ポリエチレングリコール系高分子化合物
急結剤(CA)	一般トンネル向け粉体急結剤	2.80	比較用, カルシウムアルミネート系

アルミネートであるが, AF と併用して使用するため, 専用に開発したものである。使用時には, AF と CSA を混合してスラリーにし, モルタル・コンクリートに添加した。

2.2 モルタル試験

モルタル試験では, 急結剤添加後の凝結性状や圧縮強度等の項目について試験した。凝結性状はプロクター貫入抵抗値にて測定した。急結剤の使用量を表-3 に, 試験項目を表-4 に示す。

表-3 急結剤使用量

急結剤種類		添加量
CA (汎用品)		C × 6%
AF (液体のみ)		C × 10%, 12%, 14%
AF + CSA (複合型)	AF	C × 8%一定
	CSA	C × 2%, 4%, 6%

表-4 モルタル試験項目

試験項目	試験方法
プロクター貫入抵抗試験	JSCE D 102-2005 に準拠
圧縮強度試験	JIS R 5201-1997 に準拠

モルタル配合は, C/S = 1/3, W/C=50%に減水剤(SP)を C × 1.0% 添加した条件とした。練混ぜ方法は, モルタルミキサーを用い, 所定量の砂およびセメントを投入して 10 秒間攪拌し, 次いで所定量の SP および水を添加した後, 1 分間高速攪拌してモルタルを調製した。このモルタルに急結剤を添加し, 10 秒間高速攪拌して型枠に詰め込み, 成型した供試体について表-4 の各試験項目を評価した。本論文では, 急結剤添加前のモルタルをベースモルタル, 急結剤添加後を急結性モルタルという。AF と CSA を複合して添加する際には, 表-3 に示す使用量で予め両者を 2 秒間混合してスラリー状にしたものをモルタルに添加した。なお, 比較のため, 一般の吹付けコンクリートで用いられているカルシウムアルミネート系急結剤や液体急結剤のみを添加した急結性モルタルも同様に試験した。

2.3 コンクリートを用いた吹付け試験

吹付け試験に用いたコンクリート配合を表-5 に, 試験方法を表-6 および吹付け条件を表-7 に示す。本試験の吹付けコンクリートシステムは図-1 の通りとした。AF は液体圧送ポンプを用いて定量圧送し, CSA は圧縮空気粉体圧送して両者をスラリー化部分で混合してスラリーにしてベースコンクリートに添加した。

表-5 コンクリート配合

目標 スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				減水剤
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
18 ± 2	49	65	196	400	1153	626	1.3%

表-6 試験方法（吹付けコンクリート）

評価項目	供試体サイズ	試験方法
粉じん量測定		吹付けノズル後方 5m 地点の模擬トンネル横断方向の中央部で、デジタル粉じん計（型式 P-5L）を用いて測定。模擬トンネルの一方をカーテンで閉じた状態とした。
はね返り試験		模擬トンネル内の天端から肩にかけて 1m ³ 吹付けし、付着せずに落ちた重量からはね返り率を求めた。
強度試験	プルアウト	JSCE-G 561-1999 に準拠（試験材齢：1 時間，3 時間，1 日） 初期強度（材齢 1 日）：5N/mm ² （日本道路協会ほか）
	コア	5.5 × 11cm JSCE-F 561-1999 に準じて型枠にブロックを採取し，JIS A 1107-1999 に準じて，吹付け 4 日後にコア供試体を採取（以後 20 水中養生，試験材齢：7 日，28 日） 設計基準強度（材齢 28 日）：18N/mm ² （日本道路協会ほか）
長さ変化試験	5.5 × 11cm	上記方法でコア供試体を採取後，側面に 100m 間隔でゲージプラグを貼付けてコンタクトゲージ方法にて長さ変化を測定（20 60%RH で気乾養生）。
凍結融解試験	10 × 10 × 40cm	上記ブロックから切り出し，JIS A 1148-2001 に準拠。

表-7 吹付け条件

設備名	条件
模擬トンネル	内空幅=5.2m，高さ=4.4m，延長=20m
コンクリート吐出量	10m ³ /h
吹付けエア量	260m ³ /h

一方，コンクリートはコンクリートポンプで圧送し，スラリー・コンクリート混合部にてスラリーとコンクリートを混合して吹き付けた。スラリー・コンクリート混合部は，配管の周囲から配管内に向かって，スラリーと吹付け用エアをコンクリートに混合する構造になっている。吹付けに使用するエア量は，粉体急結剤を用いた一般的な吹付けの約 1/4 の量とし，コンクリートを先端まで圧送して少ないエア量で吹き付けることを特徴としている。便宜上，急結剤添加前のコンクリートをベースコンクリート，急結剤添加後を急結性コンクリートとする。

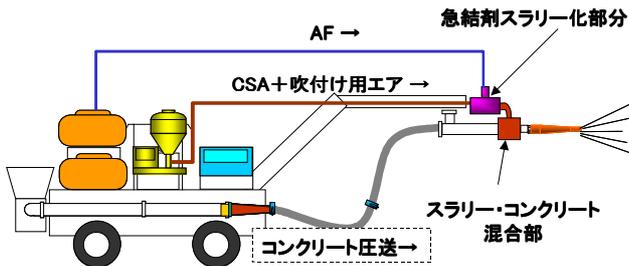


図-1 吹付けシステム図

3. 実験結果

3.1 モルタル試験

(1) 凝結性状

AF8%と各添加量の CSA を複合し，モルタルの凝結を確認した。また，比較として汎用品の CA や AF のみの場合についても評価した。結果を図-2 に示す。

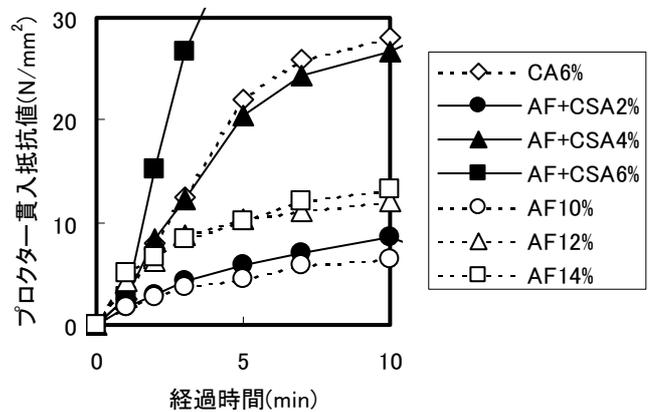


図-2 モルタル凝結性状

AF と CSA を組み合わせたもの（以下，複合急結剤）と AF のみの系は，急結剤の添加量を 3 水準で評価しており，トータルの急結剤添加量はそれぞれ 10，12 および 14% の点で共通している。複合急結剤では，急結剤の添加量を増やすことで高い急結性状が得られ，AF8% + CSA4% の配合で，CA を用いた場合と同等の性状となっ

た。一方、AF のみの場合、急結剤の添加量を増やしても高い急結性状が得られず、12%と 14%の性状は、ほぼ同等となった。AF のみでは、添加量の増加に従い、混和剤から急結成分の他に水も供給されてしまうため、急結性モルタルの水/結合材比が上昇し、添加量を多くしても更なる物性の向上が難しいと思われる。一方、複合急結剤では、AF の同一添加量と比較して、水/結合材比が小さくなるために優れた急結性状が得られる。AF の固形分含有量は約 50%であり、水を 50%程度含んでおり、例えば、AF8% + CSA4%の組み合わせではベースモルタルと急結性モルタルの水/結合材比は、ほぼ同じとなる。

(2) 強度発現性

圧縮強度の試験結果を図-3 に示す。AF のみの場合と比較して、複合急結剤は 1 日までの初期強度発現性に優れており、材齢 1 日で 9.2 ~ 12.6N/mm² の値が得られた。28 日強度はいずれの添加量も 44.2 ~ 46.8N/mm² の範囲でほぼ同程度の強度値が得られた。一方、AF のみの場合には 7 日から 28 日にかけての強度発現性が高く、この材齢間の強度発現性は、AF > AF+CSA > CA の順に高くなった。

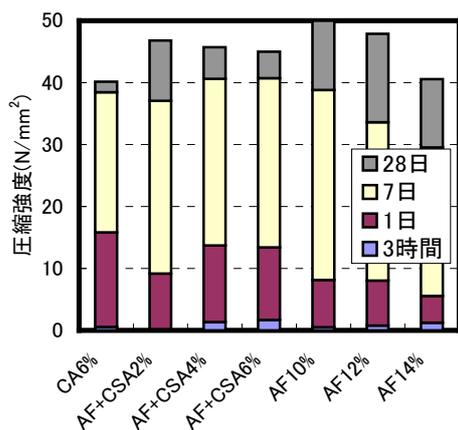


図-3 各種急結剤でのモルタル圧縮強度

3.2 コンクリート吹付け試験

(1) コンクリートフレッシュ性状

吹付け試験に用いたコンクリートのフレッシュ性状を表-8 に示す。

表-8 コンクリートフレッシュ性状

スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()
20.0	3.6	19.0

(2) 粉じん量とはね返り率

吹付け時の発生粉じん量を測定した結果を表-9 に、吹付け状況を図-4 に示す。急結剤の添加量は、AF8% + CSA4%である。

表-9 粉じん測定結果

相対粉じん濃度 (c.p.m)							5m 後方 粉じん濃度 (mg/m ³)
1分	2分	3分	4分	5分	6分	平均	
7	12	16	14	13	15	12.8	0.51

使用した粉じん計の質量濃度変換係数は 0.04 であり、得られた相対粉じん濃度に係数をかけて平均粉じん濃度を算出した。吹付け時の模擬ト



図-4 複合急結剤を用いた吹付け状況

ンネル内の視界は良好であり、吹付けノズルから 5m 後方の平均粉じん濃度は 0.51mg/m³ となった。なお、同じ模擬トンネルで粉体急結剤を用いた吹付け試験では、8 ~ 12 mg/m³ の粉じん濃度であり、今回の結果に比べて非常に高くなる。

コンクリートのはね返り率を表-10 に示す。吹

付け量 2375kg のうち、はね返り量は 230kg であり、はね返り率は 9.7% となった。粉体急結剤を用いた一般的な吹付けでは、はね返り率 20 ~ 30% 程度であるが、複合急結剤を使用することで、はね返り率は 1/2 ~ 1/3 程度となった。はね返り率が低減した理由として、本システムでは吹付けで使用するエア量が少なく、一旦付着した急結性コンクリートが吹付けエアにより吹き飛ばされにくい、また、吹付け直後の急結性コンクリートの可塑性が付着性を向上させ、はね返りの低減に有効である等が挙げられる。

表-10 はね返り率

吹付け量 (kg/m ³)	はね返り量 (kg)	はね返り率 (%)
2375	230	9.7

(3) 強度発現性

AF の添加量は 8% 一定とし、CSA の添加量を 2 ~ 6% の範囲で供試体を採取し、強度発現性を確認した。24 時間までの短時間材齢の強度値を図-5 に、7 日以降の値を図-6 に示す。

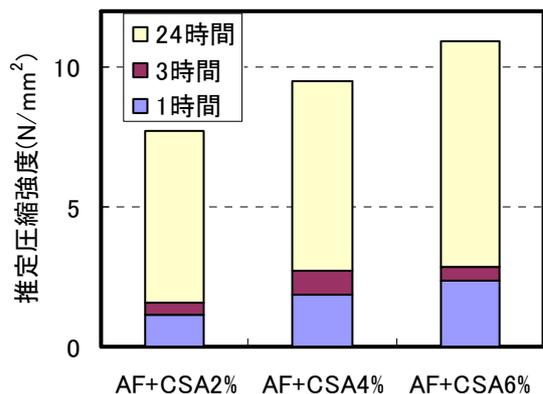


図-5 吹付けコンクリートの短時間強度

モルタル試験と同様に、CSA の添加量の増加に伴い、いずれの材齢においても強度値が大きくなり、材齢 1 日で 7.7 ~ 10.9 N/mm² の値が得られた。早期から地山への高い支保効果を必要とする場合には、CSA の添加量を調整した吹付けが

有効になると思われる。今回用いたコンクリート配合では、材齢 28 日で 36.5 ~ 39.4 N/mm² の値が得られた。

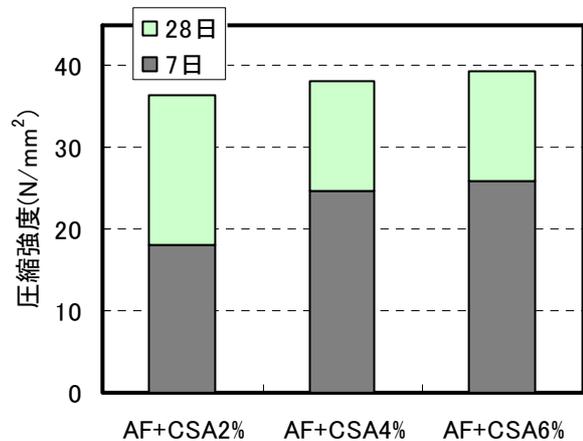


図-6 吹付けコンクリートの中期強度

(4) 長さ変化

各急結剤添加量で長さ変化を測定した結果を図-7 に示す。ベースコンクリートは、吹付け前

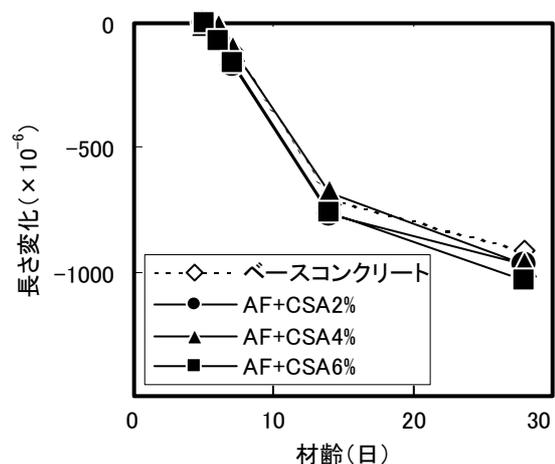


図-7 吹付けコンクリートの長さ変化

に 15 × 15 × 40cm 型枠に打設し、材齢 4 日目に吹付けブロックのものと同様にコアリングした。いずれの試験体も表-6 に示す方法で材齢 5 日目に基長測定、材齢 6 日目以降の長さ変化を測定したものである。ベースコンクリートと比較して急結性コンクリートは、材齢 28 日で同程度の長さ変化となった。ベースコンクリートも含め、

全体的に収縮量が大きめであるが、初期材齢でコアリング後、十分な養生を施さず気乾養生を開始したためと考えられる。また、供試体の上面と側面から乾燥を受けた結果であり、実際に地山に吹き付けた場合には、本試験結果よりも緩やかに乾燥・収縮するものと予想される。

(5) 耐凍結融解性

ベースコンクリートと急結性コンクリートとで耐凍結融解性を比較した結果を図-8 に示す。急結剤の添加量は AF8% + CSA4% である。一般に、300 サイクルで相対動弾性係数が 60% 以上で十分な耐凍害性を有すると言われている。相対動弾性係数が 60% を下回るのに、ベースコンクリートは約 120 サイクル、急結性コンクリートは約 140 サイクルとなった。急結剤を使用して吹き付けることで多少物性が向上したが、十分な耐凍害性を付与するにはベースコンクリートを改善する必要がある。吹き付けコンクリートの耐凍害性を向上させる方法として、例えば、ベースコンクリート中の空気量の調整や水比の低減⁴⁾、シリカフューム⁵⁾や鋼繊維の使用⁶⁾等が挙げられ、本急結性コンクリートにおいても有効であると考えられる。耐凍害性の向上については今後の検討課題としたい。

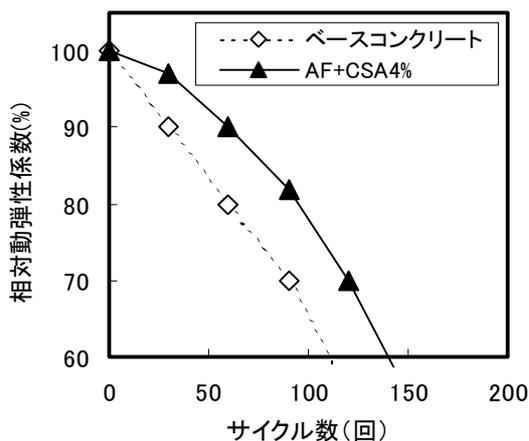


図-8 耐凍結融解性

4. まとめ

液体・粉体急結剤の複合技術に関して以下の結果を得た。

(1) 液体急結剤の量を一定とし、粉体急結剤の添

加量を増加することで、高い急結性状を得た。

- (2) 液体・粉体急結剤の複合技術を用いて吹き付けすることで、低粉じん・低はね返り性を得た。
- (3) 複合急結剤において粉体急結剤の使用量を増すことで、初期強度発現性が高くなった。早期から地山への高い支保効果を必要とする場合には、粉体急結剤の添加量を調整した吹き付けが有効になると思われる。
- (4) ベースコンクリートと比較して複合急結剤を用いた急結性コンクリートは、材齢 28 日で同程度の長さ変化となった。
- (5) 複合急結剤を使用して吹き付けることで、ベースコンクリートと比較して耐凍結融解性は向上したが、十分な耐凍害性を付与するにはベースコンクリートを改善する必要がある。

参考文献

- 1) 酒井芳文ほか：急結剤の種類および添加量が吹き付けコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.1141-1146，1998
- 2) 平間昭信ほか：使用材料が吹き付けコンクリートの強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1381-1386，2000
- 3) 大窪克己ほか：アルカリフリー液体急結剤の日本での適応について，トンネル工学研究論文，Vol.13，pp.333-338，2000
- 4) 坂本淳ほか：吹き付けコンクリートの耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1363-1368，1999
- 5) 弘中義昭ほか：シリカフュームを混和した吹き付けコンクリートの性質，土木学会年次学術講演会，第 56 回，pp.154-155，1991
- 6) 田中 徹ほか：鋼繊維補強吹き付けコンクリートの耐久性に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会，第 56 回，pp.488-489，2001