

論文 アルカリフリー液体急結剤を用いたモルタルの凝結特性に関する基礎的研究

馬場 勇介*1・高森 秀*2・井元 晴丈*3

要旨: アルカリフリー液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの基礎データを把握する目的で、室内におけるモルタル試験によって凝結特性等について実験的検討を行った。液体急結剤の凝結特性を、湿式工法を模したモルタル試験によって適切に評価するためには、ミキサで急結剤を混合する方法ではなく、実際の施工と同様に練り混ぜたモルタルに吹付け時に急結剤を混合する方法を適用する必要があることを示した。また、液体急結剤を用いた場合、低温時にはモルタル温度を5°C高くすることやW/Cを5%低下させること、湧水時にもW/Cを5%低下させることが効果的であり、凝結が早まることで付着性が向上することを確認した。

キーワード: 液体急結剤, アルカリフリー, 凝結時間, モルタル, 低温, 湧水, 吹付けコンクリート

1. はじめに

山岳トンネルの標準工法である NATM の吹付けコンクリートでは、これまで主にセメント鉱物系の粉体急結剤が使用されてきた。しかし、2018年の厚生労働省による従来の粉体急結剤成分の劇物指定や、現場での粉じん目標濃度レベルの引下げなど、急結剤を取巻く環境が大きく変化している。また、吹付けコンクリートの施工においても、今後ますます合理化、省力化、省人化、自動化¹⁾の流れが加速するものと予想され、センサ等の誤動作を防止する観点からも、ノイズとなる粉じんの発生がより少ない急結剤が求められている。こうした中、安全でかつ吹付け時に粉じんが発生しにくく、さらにSDGsの観点からははね返りの発生量が少なく廃棄物の削減に大きく貢献するアルカリフリー液体急結剤に期待が寄せられている²⁾。

しかし一方で、液体急結剤は従来の粉体急結剤と反応メカニズムが異なることから、吹付け直後の付着性能が異なることが指摘されている³⁾。付着性能は凝結時間と強い関係性があると考えられるが、その凝結時間に影響を及ぼすW/C等の配合要因や急結剤使用量の影響を定量的に研究した事例⁴⁾は少ない。また、従来の一般的な粉体急結剤を用いた吹付けコンクリートでは、コンクリート温度が低い場合に地山との付着性が低下することが経験的に広く知られているが、液体急結剤を用いた場合のコンクリート温度が付着性に及ぼす影響度合いも明確でない。さらに湧水箇所(滴水程度)への吹付けの際、十分な付着性が確保できるかどうか懸念がある³⁾。

そこで本稿では、アルカリフリー液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの基礎データを把握する目的で、室内におけるモルタル試験によって凝結特性等について実

験的検討を行った。まず、液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの凝結特性を簡便に再現・評価できるモルタル試験方法を確立することを目的に検討を行った。次に、そこで選定したモルタル吹付け試験により、W/C、モルタル温度や急結剤使用量が凝結特性および付着性能に及ぼす影響を評価し、低温時の付着性向上に関する対策の方向性について検討した。さらに、模擬的に再現した湧水環境下でのモルタル吹付け試験を行い、液体急結剤を用いた場合の湧水箇所への吹付け時の配合面における対策について考察した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。普通ポルトランドセメント、大井川水系陸砂(表乾密度:2.58g/cm³,粗粒率:2.60)および高性能減水剤を用いた。急結剤には、近年新たに開発したアルカリフリー液体急結剤(ソリューションタイプ)を用いた。ソリューションタイプは従来のサスペンションタイプ⁴⁾と比較して、1)極初期の凝結・強度発現性に優れる、2)粘性が低く、透明度が高く、液自体の安

表-1 使用材料

	記号	種類	物理的・化学的性質
水	W	上水道水	-
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
細骨材	S	大井川水系陸砂	密度:2.58g/cm ³ ,粗粒率:2.60
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体
急結剤	SA	アルカリフリー液体急結剤	水溶性アルミニウム塩(ソリューションタイプ)

*1 ポゾリス ソリューションズ(株) 混和剤営業本部 UGC 営業部 部長 博士(工学) (正会員)

*2 ポゾリス ソリューションズ(株) 混和剤営業本部 UGC 営業部 係長 修士(理学) (正会員)

*3 ポゾリス ソリューションズ(株) 技術開発センター AS 技術開発 主任 博士(工学) (正会員)

表-2 液体急結剤の添加・混合方法がモルタルの凝結特性に及ぼす影響に関する試験水準および試験項目

水準	記号	ミキサの種類	練混ぜ量	モルタルの練混ぜ・SAの混合方法	試験項目	凝結用試料の成形方法
乾式	乾式 (ミキサ)	モルタルミキサ (5リットル)	1.6リットル	C + S → 空練り → W(SP) + SA → 練混ぜ (低速10秒) (高速10秒)	凝結試験 (JSCE-D 102)	試料を容器に入れ、突き棒・金こてを用いて成形
湿式	湿式 (ミキサ)			C + S → 空練り → W(SP) → 練混ぜ → SA → 練混ぜ (低速10秒) (低速90秒) (高速10秒)		
湿式吹付け	湿式 (吹付け)	パン型ミキサ (55リットル)	30リットル	C + S → 空練り → W(SP) → 練混ぜ → 排出 → 吹付け (+SA) (10秒) (120秒)		容器に試料を吹き付け、金こてを用いて成形



写真-1 吹付けシステム



写真-2 モルタルのホッパーへの投入



写真-3 ノズル・急結剤添加部



写真-4 急結剤添加部

定性に優れることから沈殿が発生しにくいなどの特徴がある⁵⁾。ソリューションタイプの液体急結剤は、従来のサスペンションタイプよりも液の粘性が低いことから、コンクリートとのより均一な混合が期待できる。

2.2 液体急結剤の添加・混合方法がモルタルの凝結特性に及ぼす影響の検討

液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの凝結特性を簡便に再現・評価できるモルタル試験方法を確立することを目的に、液体急結剤の混合方法に着目して検討を行った。モルタルの配合は、実際に現場で使用されている液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの配合をベースに、そこから粗骨材を除いたものを想定して W/C40%, S/C:2.25 とし、また練混ぜ水の温度を調整しモルタルの練上がり温度を 20℃とした。また、試験環境温度は 20±2℃とし、液体急結剤の使用量はセメント質量の 9%とした。試験水準を表-2 に示す。モルタルの練混ぜ・液体急結剤の混合方法は、1. JSCE-D 102-2018「吹付けコンクリート (モルタル) 用急結剤品質規格 (案)」に示される液体急結剤と練混ぜ水を同時に添加する方法 (以下、乾式と称する), 2. 実際の現場での湿式吹付け工法を想定し、事前に練混ぜ水を混合したモルタル (JIS R 5201 によるフロー: 230±10mm) を製造した後、モルタルミキサを用いて液体急結剤を混合する方法 (以下、湿式と称する), 3. 現場での吹付けと同様に、事前に製造したモルタルを写真-1 および写真-2 に示すモルタル用ロータリーポンプ、液体急結剤用ポンプおよびコンプレッサーから構成される吹付けシステムを用いて吹き付ける方法 (以下、湿式吹付けと称する) の 3 種類とした。なお、モルタルは、配管 φ40mm×5m を用い吐出量 0.6-0.7m³/h で圧送し、先端のノズル手前のシャワーリング (写真-3, 写真-4) で圧縮空気 (0.7MPa) と液体急結剤を添加・混合して吹き付けた (写真-5)。試験項目は、凝結試験

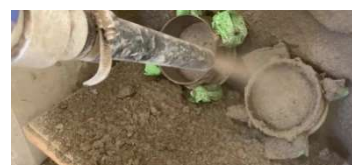


写真-5 モルタルの吹付け状況

表-3 モルタル温度が吹付けモルタルの凝結特性に及ぼす影響に関する試験水準

W/C (%)	S/C	試験環境温度 (°C)	モルタル温度 (°C)	SA 使用量 (C×%)	試験項目
45	2.64	12	10	9 11	・凝結試験 (JSCE-D 102) ・天端への吹付け (目視観察) おもに W/C40%, C×9% (一部 W/C35%, C×9%)
40	2.25		15		
35	1.88		20		



写真-6 天端の吹付け面

表-4 液体急結剤の温度がモルタルの凝結特性に及ぼす影響に関する試験水準

W/C (%)	S/C	試験環境温度 (°C)	モルタル温度 (°C)	SA 温度 (°C)	SA 使用量 (C×%)	試験項目
40	2.25	12	15	5 20 60	9	凝結試験 (JSCE-D 102)

(JSCE-D 102 附属書 3) とした。

2.3 吹付けモルタルによる液体急結剤の凝結特性に関する検討

W/C およびモルタル温度が吹付けモルタルの凝結特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。試験水準を表-3 に示す。配合は W/C45% (S/C:2.64), 40%

(S/C : 2.25), 35% (S/C : 1.88) の 3 水準とし、また練混ぜ水の温度を調整し、モルタルの練上がり温度を 10, 15, 20℃とした。試験温度はトンネル坑内の一般的な温度よりやや低めを想定し 12℃程度とした。練混ぜには公称容量 55 リットルの強制練りパン型ミキサを用い、練上がり直後のフロー (JIS R 5201) を 230±10mm とした。吹付けには 2.2 に示す吹付けシステムを用いた。試験項目は、凝結試験 (JSCE-D 102 附属書 3) および写真-6 に示す室内に設置した天端面 (化粧合板裏面、寸法 : 45 × 45cm) への吹付け状況の目視観察とした。液体急結剤の使用量はセメント質量の 9, 11%とした。

また、W/C40%の条件では、液体急結剤自体の温度がモルタルの凝結特性に及ぼす影響を検討した。試験水準を表-4 に示す。液体急結剤温度の試験水準は、5, 20 および 60℃とし、恒温槽で各温度に調整したものを試験に用いた。また 60℃の条件では、実際の現場での加温を想定し、投込みヒーターで液を直接加温したものも試験に用いた。

2.4 吹付けモルタルによる液体急結剤の湧水対策に関する検討

液体急結剤を用いた系の湧水への抵抗性を明らかにすることを目的に、模擬的に再現した湧水環境下でのモルタル吹付け試験を行った。試験水準を表-5 に示す。配合は W/C40% (S/C : 2.25), 35% (S/C : 1.88) の 2 水準とし、また練混ぜ水の温度を調整し、モルタルの練上がり温度を 20℃とした。試験環境温度は 20±2℃とした。吹付けには 2.2 に示す吹付けシステムを用いた。模擬湧水試験は、垂直面および天端面への吹付けの 2 水準とした。垂直面は写真-7 に示す垂直に立てかけた練り舟の底板面に沿って上部からホースで水を流し、その水が流れるプラスチック底板面 (垂直面) にモルタルを吹き付けた場合の付着性を目視観察した。また天端面は、写真-7 の吹付け試験装置上部に設置した写真-6 に示す木箱 (寸法 45×45×9cm) の底部に直径 3mm の穴を開け、そこから流下する水を湧水に見立て、その木箱底板に下からモルタルを吹き付けた。なお、穴の数は、5 個 (写真-8) および 13 個 (写真-9) の 2 水準とするとともに、吹付け面 (化粧合板裏面) にはスリットを設け水が滴るようにし、また穴がモルタルにより直接閉塞しないようプラスチックシートで加工を施した (写真-10)。天端の模擬湧水の状況を写真-11、写真-12 に示す。5 穴は湧水が滴るような状況であり (2.8L/min), 13 穴はやや強めの雨が降るような状況であった (7.2L/min)。試験項目は、吹付け状況の目視観察および凝結試験 (JSCE-D 102 附属書 3) とした。液体急結剤の使用量はセメント質量の 9%とした。

表-5 湧水環境下でのモルタル吹付けに関する試験水準

W/C (%)	S/C	試験環境温度 (°C)	モルタル温度 (°C)	SA 使用量 (C×%)	試験項目
40	2.25	20	20	9	・凝結試験 (JSCE-D 102) ・湧水環境での吹付け (目視観察) (おもに W/C40%, 一部 35%) 垂直面 天端面 (φ3mm×5穴, φ3mm×13穴)
35	1.88				



写真-7 吹付け試験装置

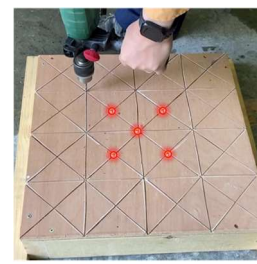


写真-8 天端吹付け面 φ3mm×5穴

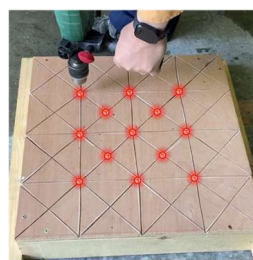


写真-9 天端吹付け面 φ3mm×13穴

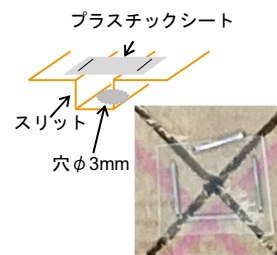


写真-10 模擬湧水穴の閉塞防止加工

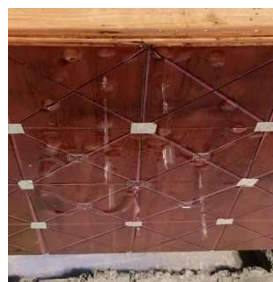


写真-11 模擬湧水の状況 φ3mm×5穴

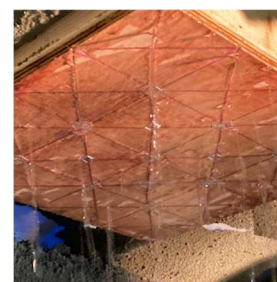


写真-12 模擬湧水の状況 φ3mm×13穴

3. 試験結果および考察

3.1 液体急結剤の添加・混合方法がモルタルの凝結特性に及ぼす影響の検討

図-1 に液体急結剤の添加・混合方法がモルタルの凝結特性に及ぼす影響を示す。事前にモルタルを製造した後、モルタルミキサを用いて液体急結剤を混合した湿式 (ミキサ) の場合、凝結の発現性が遅く、15 分が経過しても終結に達しなかった。一方、モルタルを液体急結剤と混合しながら吹き付ける湿式 (吹付け) の場合、終結時間は約 5 分程度であり、同程度の配合の吹付けコンクリートの終結時間⁶⁾と近い傾向を示した。また、

JSCE-D 102-2018 を準用した乾式（ミキサ）も比較的近い性状であった。湿式（ミキサ）の場合に凝結が大幅に遅延する理由は、セメントと液体急結剤の反応が早いため、水和生成物の組織がミキサでの練混ぜによって破壊されたことなどが考えられる。また、湿式と乾式では、セメント、水および液体急結剤の3者の接触タイミングやインタラクションが異なることから、結果的に極初期の水和反応速度や生成物の組織に違いが生じ、これが凝結特性に影響を及ぼしているものと推察された。

なお、従来の粉体急結剤の場合、モルタルミキサを用いて練り混ぜても、乾式や湿式によらず、凝結時間に極端な差は認められないことが報告されている^{7,8)}。

また、JSCE-D 102 の解説³⁾によると、2005 年の改訂当時、急結剤を用いた吹付けコンクリートの施工方法の主流が湿式吹付け工法となってきたことから、試験方法を、湿式吹付け工法を模した方法へ変更することを審議している。その結果、品質規格は現場への適用性を判断する試験ではなく、急結剤の品質を確認する試験方法であることから、変更する必要はないとしており、乾式や湿式といった試験方法の違いが凝結特性に及ぼす影響については触れられていない。一方、アルカリフリー液体急結剤が主流のヨーロッパにおける急結剤の品質規格⁹⁾では、湿式を模した W/C50%以下のモルタルを用い、質量 300g のピカー針によって始発（10 分以内）、終結（60 分以内）を評価している。しかし、これもあくまでも品質規格であり、現場への適用性を判断する試験ではない。何れにしても本試験の範囲では、液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの凝結特性を簡便に再現・評価できるとともに、付着性などの吹付け性状も併せて評価することを視野に入れると、湿式（吹付け）が最適なモルタル試験方法であると判断し、以降の試験ではこの方法を適用した。

3.2 吹付けモルタルによる液体急結剤の凝結特性に関する検討

(1) 凝結時間

本試験では、凝結時間の指標として終結時間を用いた。図-2 に W/C と終結時間の関係を、図-3 にモルタル温度と終結時間の関係を示す。W/C が高いほど、またモルタル温度が低いほど終結が遅く、特に W/C45%、10℃、使用量 9% の条件では、大幅に遅延する傾向にあった。一方、W/C を低下させるほど、モルタル温度を増大させるほど、また液体急結剤の使用量を 9% から 11% に増大させることで明確に終結時間が早くなる傾向にあった。現場でのコンクリートの付着性能は、凝結特性と強い関係性があると思われるが、十分な付着性を確保するためには、施工できる範囲で、W/C、コンクリート温度および急結剤使用量の 3 項目を適切なバランスで組み合わせることが有効であることが確認された。

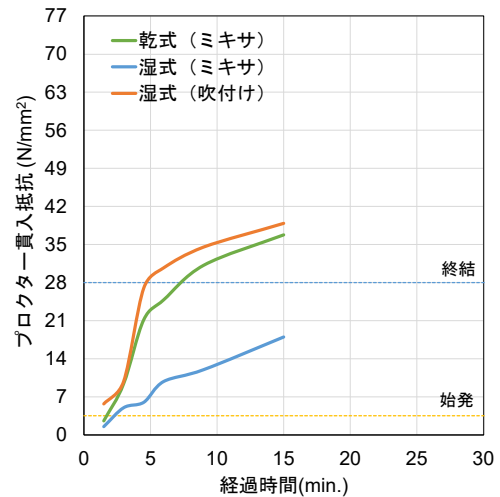


図-1 液体急結剤の添加・混合方法がモルタルの凝結特性に及ぼす影響

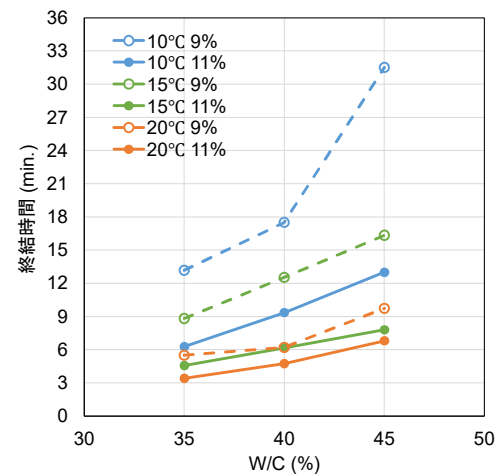


図-2 W/C と終結時間の関係

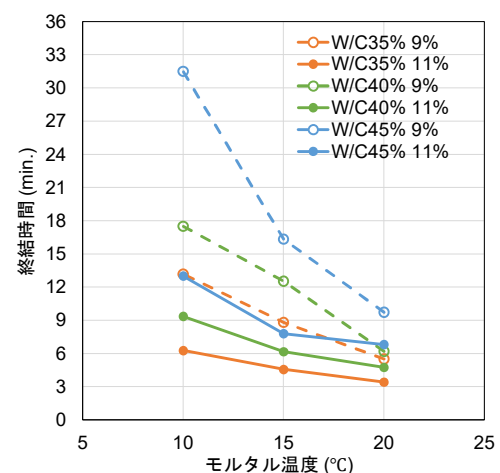


図-3 モルタル温度と終結時間の関係

図-4 に W/C40%（液体急結剤使用量：9%）の条件における、液体急結剤の温度がモルタルの凝結特性に及ぼす影響を示す。終結時間の早さは、5℃、60℃（恒温室での間接加温）、20℃、60℃（投込みヒーターによる直接加温）の順であり、試験結果のバラツキも考慮すると、液体急結剤自体の温度や加温方法が凝結時間に与える影響

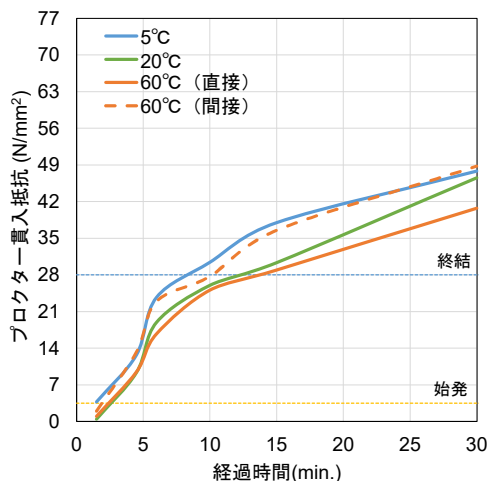


図-4 液体急結剤の温度がモルタルの凝結特性に及ぼす影響

は明確に認められなかった。従来一般的に、低温時に液体急結剤を用いる場合、凝結速度や岩盤への付着性を向上させるためには液を加温することが効果的であると言われてきたが、本試験の範囲内では加温することによる明確な効果は確認できなかった。

(2) 天端への吹付け性状

W/C40%の条件で、モルタル温度が吹付け性状および吹付け厚さに及ぼす影響について検討した。安全に実験できる範囲で実施した天端への吹付け性状および吹付け厚の状況を写真-13～写真-15に示す。吹付け厚については、目視でおおよその厚さを観察した。モルタル温度が低い10℃では、吹付け厚は5-10cm程度であったが、モルタル温度の増大に伴い、吹付け厚が大きくなり、15℃では10-15cm程度、20℃では15-20cm程度となった。また、冬期間に現場でコンクリート・モルタル温度を20℃程度まで確保できない場合を想定し、15℃の条件でW/C35%の配合を実施した(写真-16)。吹付け厚は15-20cm程度となり、W/C40%、15℃よりもより高い付着性を示し、W/C40%、20℃と同程度となった。これらの傾向は、上記で示した終結時間の早さと相関関係が認められた。やむを得ずコンクリート・モルタル温度を十分に確保できない場合、付着性を確保するためには、W/Cを5%低下させることが有効であることが示唆された。

3.3 吹付けモルタルによる液体急結剤の湧水対策に関する検討

(1) 垂直面への吹付け性状

予備試験として、W/C40%の条件で水を少量流した面にモルタルを吹き付けたが、水の影響はなく十分な付着性が確認された。そこで水の蛇口を全開にしたケース(26.4L/min)について試験を行った。吹付け開始直後の状況を写真-17(a)に、吹付け終了時の状況を写真-17(b)に示すが、モルタル分の顕著な流出や浮き・剥落もなく、吹付け面との十分な付着性が確認された。



写真-13 吹付け状況
W/C40% 10℃



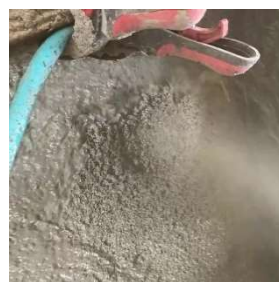
写真-14 吹付け状況
W/C40% 15℃



写真-15 吹付け状況
W/C40% 20℃



写真-16 吹付け状況
W/C35% 15℃



(a) 吹付け開始直後



(b) 吹付け終了時

写真-17 垂直面への吹付け



(a) 吹付け終了時



(b) 吹付け厚さ

写真-18 天端への吹付け (φ3mm×5穴, W/C40%)

(2) 天端面への吹付け性状

φ3mm×5穴の条件の天端面にW/C40%のモルタルを吹き付けた状況を写真-18(a)に示す。湧水の影響はなく浮きや剥落もなく、吹付け面との十分な付着性が確認され、その吹付け厚は15cm程度であった(写真-18(b))。φ3mm×13穴の湧水が多い条件にW/C40%のモルタルを吹き付けた状況を写真-19に示す。吹付け厚が5cm程度になると、付着したモルタルが水圧により膨らむように浮き、剥落を2度繰り返した。一方、W/C35%のケースでは、W/C40%と比較し湧水抵抗性が高く、15cm程度の厚みになった時点で一度剥落したものの(写真-

20(a)), 最終的な吹付け終了時点の厚みは 15cm 程度であり (写真-20(b)), 十分な付着性が確認された。この W/C による湧水抵抗性の違いは, 図-5 に示すように W/C の低下により凝結時間が早くなることによるものであると推察された。

4. まとめ

アルカリフリー液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの基礎データを把握する目的で, 室内におけるモルタル試験によって凝結特性等について実験的検討を行った。その結果, 本試験の範囲内で以下の知見を得た。

- (1) 液体急結剤の凝結特性を, 湿式工法を模したモルタル試験によって適切に評価するためには, ミキサで急結剤を混合する方法ではなく, 実際の施工と同様に練り混ぜたモルタルに吹付け時に急結剤を混合する方法を適用する必要がある。
- (2) 従来一般的な粉体急結剤を用いた吹付けコンクリートと同様に, 液体急結剤を用いた系においても, コンクリート・モルタル温度が付着性に及ぼす影響は大きいことから, 低温時には十分な温度を確保する必要があることが確認された。また, W/C も付着性に及ぼす影響が大きいことから, 骨材の表面水管理を適切に行うとともに, 冬期間などにやむを得ずコンクリート・モルタル温度を十分に確保できない場合には, W/C を 5%低下させることが付着性向上に有効であることが示唆された。
- (3) 液体急結剤自体の温度や加温方法が凝結時間に与える影響は明確に認められなかった。
- (4) 液体急結剤を用いた場合, 湧水への抵抗性を高めるには W/C を 5%低下させることが有効であり, これにより凝結時間が早まり付着性が向上することが確認された。

参考文献

- 1) 犬塚隆明, 岩野圭太, 松本修治, 松村匡樹: 山岳トンネルにおける吹付けコンクリートの自動化, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, VI-1080, 2019
- 2) 例えば, 高波太郎ほか: 大容量吹付けを可能にする液体急結剤を用いた生産性向上への取り組み, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, VI-47, 2019
- 3) (社) 土木学会: 吹付けコンクリート指針 (案) トンネル編, コンクリートライブラリー121 号, 2005
- 4) 例えば, 清水哲史ほか: 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, pp.47-59, 2002
- 5) 馬場勇介: ヨーロッパにおける吹付けコンクリート



写真-19 (a) 剥落時 (b) 吹付け終了時
天端への吹付け (φ3mm×13 穴, W/C40%)



写真-20 (a) 剥落時 (b) 吹付け終了時
天端への吹付け (φ3mm×13 穴, W/C35%)

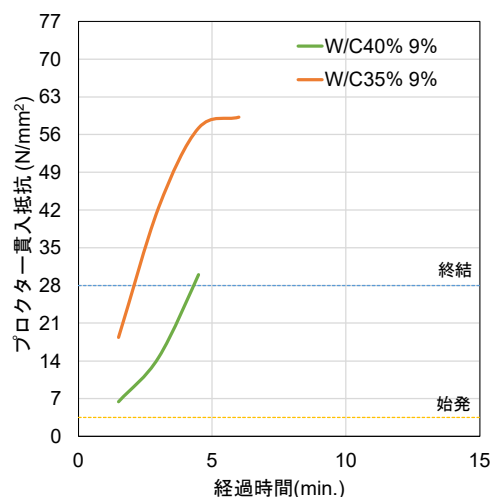


図-5 凝結時間試験結果

のトレンド, 生産技術研究奨励会 RC-73 コンクリートのバリア性能研究会 令和 2 年度 第 2 回講演会, 2020

- 6) 西堀裕介ほか: 吹付けコンクリート用液体急結剤の添加システムの最適化に関する検討, 土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集, VI-1000, 2023.9
- 7) 中島康宏, 室川貴光, 石田 積, 小菅啓一: 液体急結剤-粉体急結剤を複合した吹付け技術: コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp. 2117-2122, 2006
- 8) 荒木昭俊: 吹付けコンクリート用急結剤の最前線, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp. 32-36, 2019
- 9) DIN EN 934-5 Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 5: Admixtures for sprayed concrete - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling, 2008