

論文 吹付けコンクリートの性状に及ぼす液体急結剤の添加方法および配合の影響

高森 秀*1・馬場 勇介*2・北 俊介*3

要旨：模擬トンネルにおいて、近年新たに開発した NATM 用の液体急結剤（ソリューションタイプ）を用いたコンクリートの吹付け試験を行い、液体急結剤の添加方法やコンクリートの配合の最適化の検討を行った。その結果、液体急結剤の添加部にはシャワーリング（直径 8mm, 16 穴）を用いること、また、添加部からノズル先端までの長さは 550mm が最適であると判断された。また、液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの吹付け性状、付着性、凝結および圧縮強度等の品質向上のためには、単位セメント量を極端に増大せず 450kg/m³ 程度としたうえで、施工できる範囲で W/C を数%低下させることが有効であることが確認された。

キーワード：液体急結剤、吹付けコンクリート、凝結時間、添加方法、単位セメント量、水セメント比

1. はじめに

近年、山岳トンネルの NATM の吹付けコンクリートでは、急結剤に求められる性能が高度化している。厚生労働省による規制、SDGs さらには工事の省力・省人化、合理化の観点から、安全かつ粉じん・廃棄物発生量を低減できるアルカリフリー液体急結剤に期待が寄せられている¹⁾。

アルカリフリー液体急結剤はヨーロッパで開発され、2000 年代前半に日本でも基礎的な検討²⁾や、いくつかの工事^{2), 3)}に適用されたが、当時は最終的に根付かなかった。その理由としては、ヨーロッパと日本では材料、配合、吹付け機の仕様、施工の考え方、要求性能等が異なることから、その液体急結剤のコンセプトや性能が当時の日本の状況に馴染まなかったことが考えられる。また吹付けコンクリートの付着性を決定する、1) 急結剤そのものの性能、2) その性能を十分に引出す吹付けシステム、3) 液体急結剤の性能に合わせた適切な吹付け方法（業界における理解の向上）の 3 つを日本の条件に合わせて改善する必要があったが、これが十分でなかったものと推察される。液体急結剤を汎用的に使用できる様にするためには、これらの最適化を図る必要がある。

また、さらに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、それに適した配合を選定する必要もある。一般的に吹付けコンクリートの単位セメント量は、一般強度配合では 360kg/m³ 以上、高強度配合では 450kg/m³ 以上とされるが³⁾、現在液体急結剤を用いた場合には一般強度・高強度の区分に関わらず、経験的に 450kg/m³ 以上とされる場合が多い。これは、吹付け直後の十分な付着性等を確保することを目的としたものであるが、この効果が単位セメント量の増大によるもの

のか、あるいは結果的に W/C が低下したことによるものなのか明確でない。また、著者ら⁴⁾は液体急結剤を用いた場合の低温対策や湧水対策として、適切な W/C を選定することを提案しているが、実規模での施工性や強度等の検討は行っていない。

本研究では、模擬トンネルにおいて、近年新たに開発した液体急結剤（ソリューションタイプ）を用いたコンクリート吹付け試験を行い、当該急結剤に適した添加方法・添加部からノズル先端までの長さなどといった添加システムについて検討した。また、液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの配合設計に関する基礎データを収集する目的で、単位セメント量や W/C が吹付けコンクリートの性状や凝結、圧縮強度に及ぼす影響を検討し、最適な配合について考察した。

2. 試験概要

2.1 模擬トンネルと吹付け試験の概要

吹付け試験は、試験環境温度（外気温）がトンネル坑内の一般的な温度と同等の 16±2℃となる時期を選定し、12 月に大阪で実施した。模擬トンネルは写真-1 に示す幅 6.5m×高さ 4.5m×長さ 6m のものを用いた。写真-2 に使用した吹付け機および図-1 に液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの施工システムを示す。



写真-1 模擬トンネル

*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 係長 修士（理学）（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 部長 博士（工学）（正会員）

*3 ニシオティーアンドエム（株） 代表取締役社長



写真-2 吹付け機

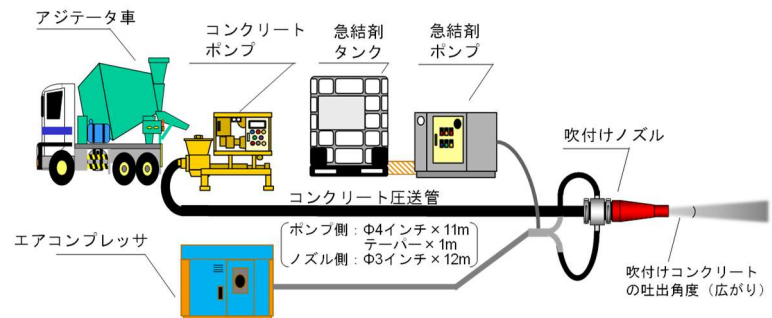


図-1 液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの施工システム

表-1 使用材料

	記号	種類	物理的・化学的性質
水	W	-	-
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³
細骨材	S	大阪府高槻産砕砂 / 大分県津久見産石灰砕砂	密度:2.66g/cm ³ , 粗粒率:2.80
粗骨材	G	大阪府茨木産碎石1505	密度:2.69g/cm ³ , 実積率:56.0%
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)

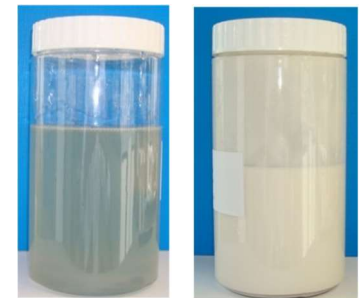


写真-3 液体急結剤の外観

2.2 使用材料

表-1 に使用材料を示す。コンクリートは、現場で使用する吹付けコンクリートを想定し、粗骨材の最大寸法を 15mm とし、市中のレディーミクストコンクリート工場で製造し試験場まで運搬したものを使用した。骨材は当該工場の定常品を用いた。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²⁾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（写真-3）、液自体の安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⁾。吹付けコンクリート中の急結剤の濃度と分散状態を EPMA による表面分析で評価した既往の研究⁶⁾では、液体系急結剤は従来の一般的な粉体系急結剤と比較してより均一な分散性を示すことが示されている。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。

2.3 吹付けコンクリート用液体急結剤の添加方法の最適化に関する検討

シリーズ 1 では図-1 に示す吹付けシステムをベースに、急結剤の添加方法（添加部）に関する検討を、シリーズ 2 では最適な添加位置に関する検討を行った。コンクリートの配合は、W/C: 42.0%, s/a: 60.0%, W: 189kg/m³, C: 450kg/m³ とし、液体急結剤の添加量は C×9% とした。吹付け時のコンクリートの吐出量は 14m³/h とした。試験

表-2 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101: 2020
空気量	JIS A 1128: 2020
コンクリート温度	JIS A 1156: 2014
吹付け性状関連	目視 ・はね返り・粉じん ・ノズル先端からのコンクリートの吐出角度（広がり） ・吹付け後の配管内のコレステロール付着状況
ペネトレーション ニードル試験	EN 14488-2 Method A (デジタル試験機)



写真-4 シャワーリング添加システム

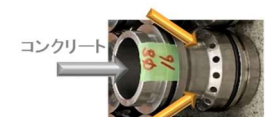


写真-5 シャワーリングの構造



写真-6 Y字管添加システム

項目を表-2 に示す。シリーズ 1 の液体急結剤の添加部には、写真-4、写真-5 に示す 2 種類のシャワーリング（直径 8mm×10 穴、直径 8mm×16 穴）および写真-6 に示す Y 字管（直径 1 インチ）をそれぞれ用いた。なお、添加位置は固定管よりも切羽側とし、ノズルは 550mm の

長さのものを用いた。それぞれの条件で各2回コンクリートを吹き付け、ペネトレーションニードル試験（写真－7）を実施し、そのバラツキについて評価を行った。なお、ペネトレーションニードル試験は、長さ15mm、直径3mmの針を貫入した際の抵抗値を計測することで、吹き付け直後からのコンクリートの強度発現性を経時的に測定でき、これをコンクリートの地山への付着安定性・肌落ち抵抗性の指標として用いることができる。また、1回の測定につき、12箇所の値を測定するが、12個のデータのバラツキが小さいほど、コンクリートと急結剤がより均一に混合されていると判断でき、これを均一混合性の指標として用いることができる。

シリーズ2では、シリーズ1で選定した急結剤添加方法（添加部）を用い、その添加部からノズル先端までの長さを250～1,850mmまで変化させた条件で吹き付け試験を行った。実際に現場で使用されている液体急結剤を用いた吹き付けコンクリートでは、この長さを350～650mm程度に設定しているケースが多い。距離が長いほどコンクリートと液体急結剤の均一な混合が期待できる一方で、セメントの水和反応は両者の接触直後に開始することから、配管内でコンクリートが流動性を失い、閉塞する可能性がある。ここでは、現実的に施工が可能と思われる水準を設定し、該液体急結剤に最適な長さを検討した。

2.4 液体急結剤を用いた吹き付けコンクリートの性状に及ぼす配合の影響

単位セメント量やW/Cが液体急結剤を用いた吹き付けコンクリートの性状や凝結、圧縮強度に及ぼす影響を検討した。表－3にコンクリートの配合を示す。液体急結剤を用いた吹き付けコンクリートの実績配合を参考にし、単位セメント量450kg/m³、W/C42%の配合をベースに、同一単位セメント量でW/Cを39%に低下させた配合、さらには単位セメント量を480kg/m³および500kg/m³に増大させ、W/Cをそれぞれ39%および36%とした配合について検討した。液体急結剤の添加量はC×9%およびC×11%とし、添加方法・位置は2.3で選定したものを用いた。また、吹き付け時のコンクリートの吐出量は14m³/hとした。試験項目を表－2および表－4に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 吹き付けコンクリート用液体急結剤の添加方法の最適化に関する検討

(1) シリーズ1

フレッシュコンクリートのスランプの性状を写真－8に示す。スランプは23.0cm、温度は16℃であった。コンクリートの吹き付け状況を写真－9に示す。なお、理想的な吹き付け性状とは、コンクリートと液体急結剤が均一に混合され凝結や強度の発現性のバラツキが少ないとともに



写真－7 ペネトレーション試験

表－3 配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
			W	C	S	G	
450-42	42.0	60.0	189	450	1019	686	0.8
450-39	39.0	59.0	175	450	1022	702	0.9
480-39	39.0	58.0	187	480	973	713	0.9
500-36	36.0	56.0	180	500	939	748	1.2

表－4 試験項目および試験方法

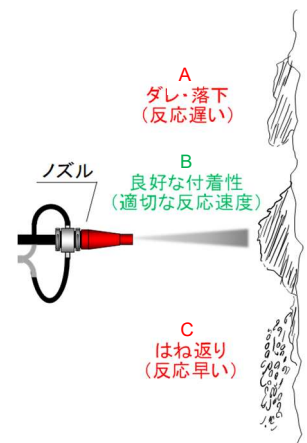
試験項目	試験方法	設計基準強度の参考値 (N/mm ²)	
		一般強度	高強度
ブルアウト法による初期強度試験	JSCE-G 561-2010 (材齢3時間、24時間)	σ24h ≥ 5	σ3h ≥ 2 σ24h ≥ 10
圧縮強度試験	JSCE-F 561-2013 JIS A1107: 2022 (材齢28日)	σ28d ≥ 18	σ28d ≥ 36



写真－8 スランプ性状



写真－9 コンクリートの吹き付け状況



図－2 コンクリートの吹き付け性状の評価

に、図－2のBに示す様に、セメントと液体急結剤の反応速度が適切であり、吹き付けたコンクリートが地山に接触した時点でダレたり、はね返りしたりせず、かつ適度な軟らかさを有して、連続して吹き付けた際、ラミネーション、いわゆるコールドジョイントのようなものを生じさせず、下層のコンクリートと一体化できる状態である。図－2のAでは、反応が遅くコンクリートが軟らかすぎるためダレが生じ、図－2のCでは反応が早いいため、コンクリートがバサつき、はね返りが多くなるとともに、ラミネーションが生じやすい。

測定したペネトレーションニードルの試験結果を図－3に示す。なお、国内では一般的な試験ではないことか

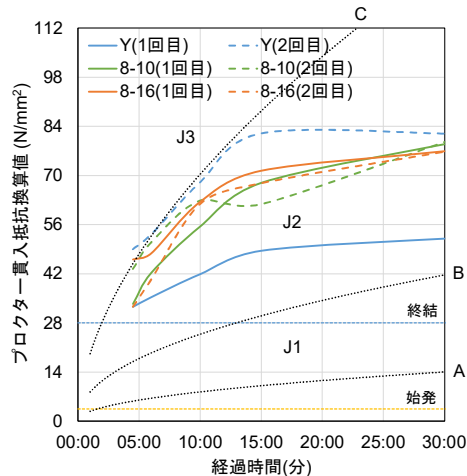


図-3 プロクター貫入抵抗換算値

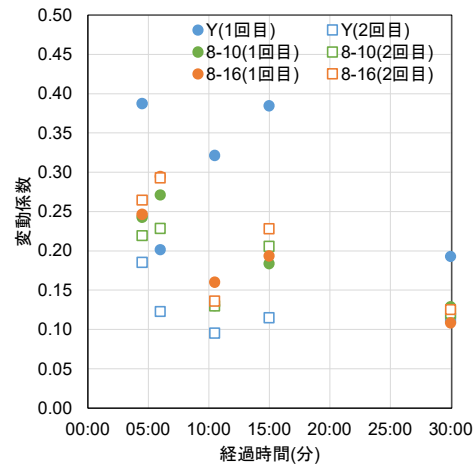


図-4 変動係数

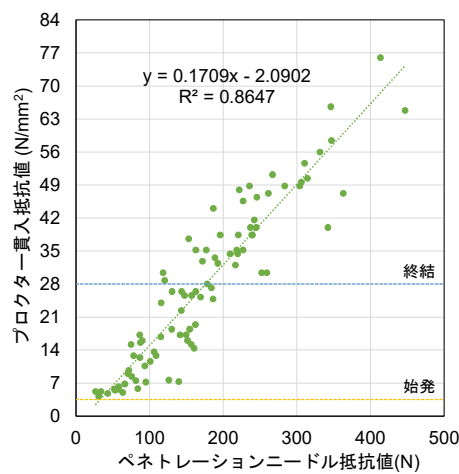


図-5 各測定方法の相関性

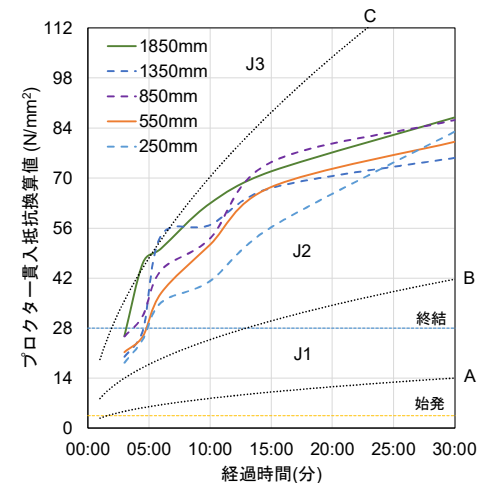


図-6 急結剤添加位置からノズル先端までの長さがプロクター貫入抵抗換算値に及ぼす影響

ら、直感的にコンクリートの地山への付着安定性・肌落ち抵抗性を判断できるようプロクター貫入抵抗値に換算した結果を示した。また、その結果の変動係数（各時間における 12 回の測定結果のバラツキ）を図-4 に示す。換算には、著者らがこれまでに、同一サンプルから作製した試験体で同時に測定した、プロクター貫入試験（試験機適用範囲：96N/mm²まで）とペネトレーションニードル試験（試験機適用範囲：1,200N まで）の測定結果の蓄積データを直線回帰した計算式（図-5）を用いた。なお、本研究では回帰した範囲を上回る抵抗値の領域でも両者には同様な相関関係があると仮定し、プロクター貫入抵抗換算値をコンクリートの凝結・強度発現の度合いを表す指標として用いた。また、図-3 にはヨーロッパにおける初期強度区分をプロクター貫入抵抗値に換算した値も併記した。厚い層や湧水がある地山に施工するコンクリートは J2 エリア（点線 B と C に挟まれたエリア）に入ることが求められる。一方、乾燥した基盤へ薄い層を施工する場合には J1 エリア（点線 A と B に挟まれたエリア）が、湧水が非常に多いなどの特殊条件下は J3 エリア（点線 C より上のエリア）が適用される³⁾。

図-3 に示す通り、何れの条件でも、プロクター貫入抵抗換算値は J2 エリアの範囲に入り、15 分程度までは急激に増大した。それ以降は増大が小さくなった。これはセメントの急激な水和反応の後に生じる、一時的な停滞期だと推察される。Y 字管（記号：Y）を用いた場合、2 回の結果の再現性が低く、また図-4 に示す変動係数の幅が 0.1-0.4 と大きく安定しなかった。一方シャワーリングでは 10 穴（記号：8-10）、16 穴（記号 8-16）の場合も高い再現性が得られた。Y 字管とシャワーリングの変動係数の標準偏差を取るとそれぞれ 0.11 と 0.06 となり、シャワーリングのバラツキが小さいことが分かった。Y 字管はコンクリート配管の 1 方向から急結剤を添加する為、バラツキが大きかったものと考えられる。またシャワーリングの穴の数によって急結剤の噴出圧力異なり、コンクリートとの混合性や均一性が異なるものと予想したが、差異は認められなかった。穴が閉塞した場合のリスクを勘案すると、穴の数の多い 16 穴の方が施工の時のトラブル回避の観点から適していると判断された。

(2) シリーズ 2

急結剤添加部からノズル先端までの最適な長さ等につ

表-5 急結剤の添加位置およびノズルの長さの最適化試験結果

急結剤添加位置からノズル先端までの長さ (mm)		評価・点数	プロクター貫入抵抗換算値 P (N/mm ²)		吹付け性状等 (目視)			合計点数Σ 総合評価
			5分	10分	はね返り・粉じん	コンクリート吐出角度 A (度)	配管のコレステロール	
			◎ 5 ○ 3 △ 1 × 0	P ≥ 28 P ≥ 56 56 > P ≥ 42 42 > P ≥ 28 28 > P	ほぼなし 少しあり 多い かなり多い	20 > A 30 > A ≥ 20 45 > A ≥ 30 A ≥ 45	なし 少しあり 多い 閉塞に近い	
1850			◎	△	◎	△	△	12 △
1350			◎	△	◎	△	△	12 △
850			○	○	◎	◎	◎	16 ○
550			○	◎	◎	◎	◎	18 ◎
250			△	◎	△	◎	◎	12 △

いて検討した。試験水準および試験結果を図-6 および表-5 に示す。図-6 に示す通り、添加部からノズル先端までの長さが長くなることにより、急結剤とコンクリートの混合距離・時間が長くなり、結果的に凝結はやや早くなる傾向にあった。著者らのこれまでの検討では、コンクリートの地山への付着安定性・肌落ち抵抗性を確保するためには、吹付け後 5 分および 10 分までの凝結特性がとくに重要であることが明らかとなっている。そこで、図-6 の吹付け後 5 分および 10 分のプロクター貫入抵抗換算値を、著者らの判断基準で評価した結果を表-5 に示す。また併せて、表-2 に示す吹付け性状等の試験の目視観察状況を著者らの判断基準で評価した結果も示すとともに、それぞれの結果を点数化し最適な水準を検討した。急結剤添加部からノズル先端までの距離が長くなることで、凝結は早くなる一方で、セメントと急結剤の反応が既に始まりかけているものをノズルから吐出することから、はね返り量や粉じんもやや多い傾向にあった(図-2 の C の状態)。各評価項目を点数化し合計した総合評価で判断すると、急結剤添加位置からノズル先端までの長さが 550mm のものが最適であると考えられた。

3.2 液体急結剤を用いた吹付けコンクリートの性状に及ぼす配合の影響

(1) 吹付け性状

各配合のフレッシュコンクリートのスランプは 23 ± 2cm、コンクリート温度は 16 ± 2℃であった。液体急結剤の使用量をセメントの質量の 9% (C×9%) とした場合、W/C 42%, 39%の配合は良好な吹付け性状を示し、天端において 15cm の支保工よりもやや厚い、目視で 15-20cm 程度の吹付け厚さを確保することができた。一方、W/C 36%の 500-36 は、C×9%の場合、セメントと急結剤の反応が過剰に早いため、図-2 の C の状態となり、目視ではね返り量や粉じんもやや多い傾向にあった(表-5 に示す評価基準で△)。そこで、使用量を C×7%にすると過剰な反応が改善され、図-2 の B の状態となり、良好な

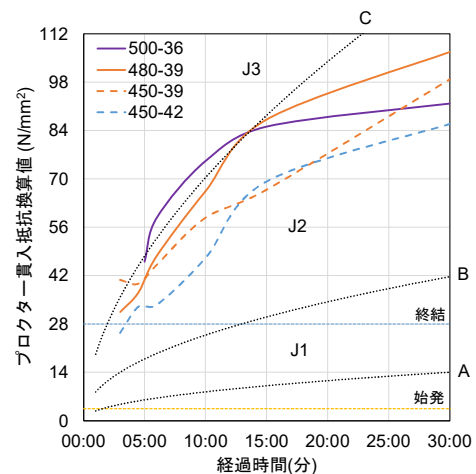


図-7 プロクター貫入抵抗換算値 (C×9%)

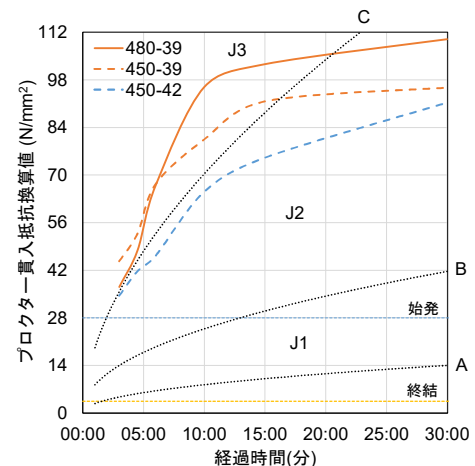


図-8 プロクター貫入抵抗換算値 (C×11%)

吹付け性状を示した。一方その他の配合は C×11%に使用量を増大しても、良好な吹付け性状が得られた。

(2) 凝結発現性

ペネトレーションニードルの試験結果をプロクター貫入抵抗値に換算した結果を図-7 (C×9%) および図-8 (C×11%) に示す。何れの使用量の水準においても、測定開始時(吹付け後 3 分)の時点ではほぼ終結に達しているとともに、吹付け後 10 分の値も含めて判断すると、表

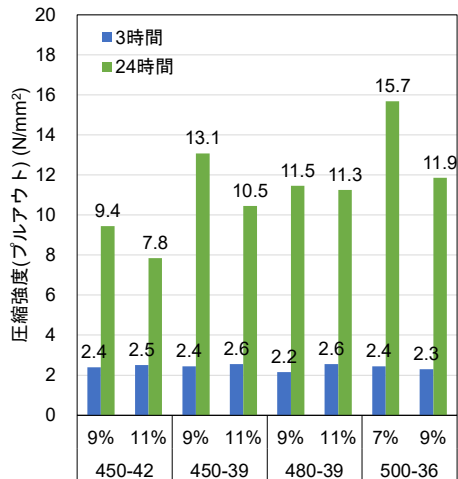


図-9 材齢 3, 24 時間圧縮強度

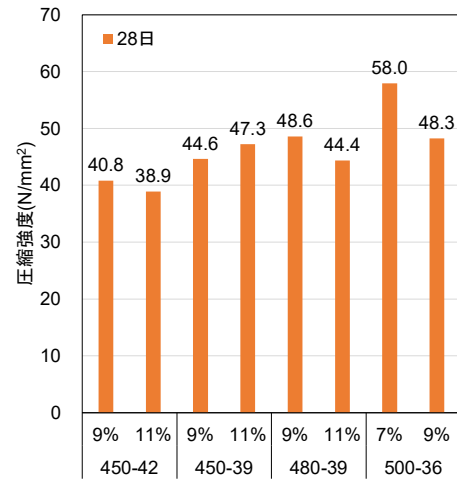


図-10 材齢 28 日圧縮強度

ー5 に示す評価基準で○以上の良好な性状を示した。また、W/C が低いほど凝結の立上りが早くなる傾向にあった。同一 W/C の 450-39 および 480-39 の比較では、何れの使用量においても、単位セメント量が多い 480-39 の方がやや凝結の立上りが早かった。これは、単位セメント量の増大により、結果的にセメントペースト量が多くなり、フレッシュ性状・ポンプ圧送性が改善され、液体急結剤がより均一に混合された可能性があること、また水和熱の蓄積効果もあったものと推察される。

(3) 圧縮強度

図-9 に材齢 3 時間および 24 時間の圧縮強度試験結果を、図-10 に材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。何れの条件でも、材齢 3 時間強度は 2N/mm² を上回ったが配合や使用量による大きな違いは認められなかった。また、材齢 24 時間強度は 450-42 を除く配合では 10N/mm² を上回り、材齢 28 日強度は全配合において 36N/mm² を上回った。同一 W/C の 450-39 および 480-39 の比較では、バラツキを考慮して考えると大きな違いはないと判断され、骨材等の使用材料の条件によっては、単位セメント量を極端に増大せず、施工できる範囲で W/C を数%低下させることが品質向上に有効であることが認められた。配合強度が最も高い 500-36 は、C×7%の場合最も高い値を示したが、C×9%に使用量を増大すると、他の同一使用量の場合と同程度までに低下した。これは、セメントと急結剤の反応が早すぎるため、十分なコンパクションが得られなかったことが原因と推察され(図-2 の C の状態)、3.2(1)の目視観察結果と一致した。

4. まとめ

模擬トンネルにおいて、近年新たに開発した NATM 用の液体急結剤(ソリューションタイプ)を用いたコンクリートの吹付け試験を行い、液体急結剤の添加方法やコンクリートの配合の最適化に関する検討を行った。その

結果、本試験の範囲内で以下の知見を得た。

- (1) 液体急結剤の添加部は、混合均一性や凝結のバラツキを考慮すると、シャワーリング直径 8mm×16 穴が最適であった。また、液体急結剤添加部からノズル先端までの長さは 550mm が適していると判断された。
- (2) 液体急結剤を用いた吹付けコンクリートは、単位セメント量を極端に増大せず 450kg/m³ 程度を目安としたうえで、施工できる範囲で W/C を数%低下させることが、コンクリートの吹付け性状・付着性、凝結および圧縮強度等の品質向上に有効であることが確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 清水哲史ほか：低アルカリ型液状急結剤「メイコ SA163」を用いた吹付けコンクリートの施工性、強度発現性ならびに現場適用例、エヌエムビー研究所報、No.15, pp.48-60, 2004
- 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) 馬場勇介ほか：液体急結剤を用いた吹付けモルタルの凝結特性に関する検討、土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集、V-21, 2023.9
- 5) 馬場勇介：ヨーロッパにおける吹付けコンクリートのトレンド、生産技術研究奨励会 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) 荒木昭俊, 安藤慎一郎, 西村次男, 魚本健人：吹付けコンクリート中の急結剤濃度に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1333-1338, 2001