

論文 凝結時間調整のための混和材がコンクリートの耐久性に及ぼす影響

石井 泰寛*1・伊藤 慎也*2・荒木 昭俊*3

要旨: 寒冷期において、コンクリート施工の生産性を向上させるためには、コンクリートの仕上げ終了までの時間を短縮させることが重要である。本報では表面仕上げまでの時間短縮による作業の効率化とコンクリートの品質向上を目的とし、凝結時間を短縮可能な混和材を用いたコンクリートについて、基礎物性および耐久性の評価を行った。その結果、硫酸塩を主成分とする凝結調整用混和材を所定量コンクリートに混和することにより、無混和の場合と比較して凝結時間が短くなり、打込み面の表層品質が向上することがわかった。

キーワード: 混和材, 仕上げ時間, 凝結時間, 耐久性, 凍害, 表層品質

1. はじめに

現在、国土交通省による『i-Construction』¹⁾の施策としてコンクリート工事の生産性向上が求められている。特に寒冷期におけるコンクリートの施工では、低温環境下であるためフレッシュコンクリートの流動性保持が良好である一方で、凝結遅延によって仕上げ作業の終了時間も遅延して生産性が低下する。寒冷期のコンクリートの施工においては、凝結を促進させるために、主として液状の混和剤である耐寒促進剤²⁾や早強剤³⁾が使用されることがある。

しかし、その添加量は比較的多く、コンクリートの練混ぜ水の一部として生コン工場でのコンクリート製造時に添加することが一般的であり、現場の外気温などの施工当日の条件に応じて適宜調整することが困難であるなどの課題がある。上記課題解消に向け、寒中コンクリートの仕上げ作業時間を短縮するとともに、施工現場で容易に添加できる凝結時間調整用混和材について検討を行ってきた。

過去の検討⁴⁾により、現場添加の容易性や混和材添加後の混合性、コンクリート物性への影響について検証を行い、凝結時間の短縮にともなうブリーディングの低減効果や、硬化体物性への悪影響がないことを確認している。一方、耐久性に関する検討はほとんど実施していなかった。

そこで、本研究においては、異なる環境温度における凝結調整用混和材を用いたコンクリートの基礎物性と混和材添加による効果を確認した。また、コンクリートの耐久性に与える影響として、一般的な長さ変化・中性化抵抗性・凍結融解抵抗性に加え、コンクリートの表層品質にも着目した検討を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

(1) 使用材料

本研究の使用材料を表-1に示す。凝結時間を調整するための混和材（以降、混和材Aと称する）は硫酸塩を主成分とする粉末で、主な化学成分は Al_2O_3 : 28~30%、 SO_3 : 68~70%である。ただし、既報において初期の流動性に影響を与える可能性が示唆されたため⁴⁾、別途初期の流動性を制御するオキシカルボン酸系化合物と界面活性剤を組み合わせた成分を少量添加した。

(2) コンクリート配合

コンクリート配合を表-2に示す。水セメント比は

表-1 使用材料

材料名	記号	仕様
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³ , プレーン値 3280cm ² /g
粗骨材	G	栃木県鹿沼産砕石, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.90%, 実積率 62.0%
細骨材	S	千葉県君津市産山砂, 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.62%, 粗粒率 2.45
水	W	上水道水
減水剤	AD	AE減水剤 標準型 リク [®] コンスルホン酸化合物ポリオール複合体
空気量調整剤	AE	AE剤 アルキルアリスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤

*1 デンカ (株) 青海工場 セメント・特混研究部 研究員 (正会員)

*2 デンカ (株) 青海工場 セメント・特混研究部 主席研究員 (正会員)

*3 デンカ (株) 青海工場 セメント・特混研究部 部長 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				添加率(C×%)		A (kg/m ³)
				W	C	S	G	AD	AE	
Plain	55	4.5	45.6	165	300	829	998	0.4	0.005	0
A4	55	4.5	45.6	165	300	829	998	0.4	0.005	4

55%とし、混和材 A の添加量は 0 kg/m³ (以下 Plain) または 4kg/m³ (以下 A4) とし、環境温度は 10℃および 20℃とした。以下では、コンクリート名に環境温度を付記した記号で記述することとした。例えば、環境温度 10℃の A4 コンクリートは A4 (10℃) と記述する。

2.2 コンクリートの練混ぜ方法

強制二軸ミキサに骨材、セメントを投入し、空練りを 10 秒行った後、水を入れて 30 秒練り混ぜ、掻き落としを行い、さらに 30 秒練り混ぜた。その後、混和材 A を添加し、30 秒練り混ぜ、コンクリートを排出した。混和材 A の添加をコンクリートの練混ぜ後としたのは、現場でのアジテータ車への後添加を想定したためである。各バッチのコンクリートの練混ぜ量は 65 リットルとした。

2.3 試験項目

以下に、本試験で実施した試験項目の詳細について示す。

(1) コンクリートのフレッシュ性状評価

表-3 にコンクリートのフレッシュ性状評価の試験項目とその方法について示す。

(2) 硬化体の評価と養生条件

いずれの硬化体物性の試験項目においても、各環境温度にて材齢 1 日まで封緘養生を施し、その後、脱型し、各種試験に供した。硬化体の物性および耐久性評価の試験項目と脱型後の養生条件を表-4 に示す。

2.4 水中凍結融解・スケーリング試験の詳細

水中凍結融解試験は JIS A 1148 に準拠した。10×10×40cm の硬化体を各配合 3 本ずつ作製し、300 サイクルまで 30 サイクル毎に相対動弾性係数を測定した。

スケーリング試験は、ASTM C 672 に準じた。φ10×20cm の硬化体を作製し、気中乾燥過程で、図-1 に示すように硬化体の打込み面周りに内径 10cm の塩化ビニル管とシリコンシーラントで土手を作製し、高さを 8cm に切断加工した。打設面から高さ 6mm まで湛水する試験液には 4%の CaCl₂ 水溶液とした。1 日 1 サイクルとなるように、-18℃で 16 時間、+23℃で 6 時間、冷却・昇温過程 1 時間となる凍結融解工程とし、25 サイクル実施した。5 サイクル毎に目視による表面の観察に加えて、スケーリングしたコンクリートを採取し、40℃で 3 時間以上乾燥させ計量した。

透水量試験は、写真-1 に示すように表面含浸材の試験方法 (案) (JSCE-K 571) で示されている透水量試験

表-3 フレッシュ性状の試験項目

試験項目	方法
スランプ測定	JIS A 1101 に準拠
空気量測定	JIS A 1123 に準拠
コンクリートの練上り温度	JIS A 1156 に準拠
凝結時間試験	JIS A 1123 に準拠
ブリーディング試験	JIS A 1147 に準拠

表-4 脱型後の養生条件

試験項目と方法	養生条件
①硬化体の物性評価	
圧縮強度 JIS A 1108 に準拠	測定材齢 (7 日, 28 日) まで 20℃水中養生。
②硬化体の耐久性評価	
長さ変化 JIS A 1129-2 付属書 A に準拠 材齢 140 日まで測定	材齢 7 日まで 20℃水中養生後、20℃/60RH%恒温室にて気中養生
促進中性化試験 JIS A 1153 に準拠 材齢 91 日まで測定	材齢 28 日まで 20℃水中養生後、20℃/60RH%恒温室にて材齢 56 日まで封緘シール養生
水中凍結融解試験 2.4 項に詳細を記述	材齢 28 日まで 20℃水中養生後、試験開始
スケーリング試験 2.4 項に詳細を記述	材齢 28 日まで 20℃水中養生後、20℃/60RH%で 14 日間気中養生
透水量試験 2.4 項に詳細を記述	材齢 28 日まで 20℃水中養生後、20℃/60RH%恒温室にて材齢 28 日まで気中養生

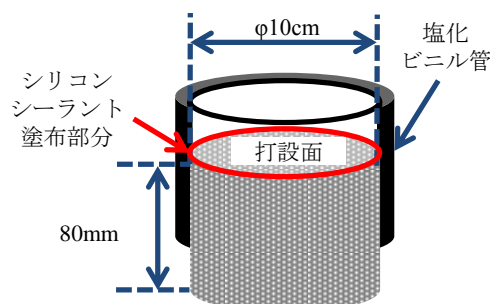


図-1 スケーリング試験の硬化体の模式図

に準拠し、口径 75mm の漏斗をコンクリート打設面に設置して水頭高さを 250mm として透水量を測定した。

3. フレッシュ性状・物性試験の結果および考察

3.1 フレッシュ性状

各環境温度におけるフレッシュ性状を表-5 に示す。環境温度 10°C においては、スランプ、空気量およびコンクリートの練上り温度のいずれにおいても混和材 A の添加の有無によらず同等であった。一方で、環境温度 20°C においては、練上り温度、空気量は同程度であったが、混和材 A を混和したコンクリートのスランプが 3.5cm ほど大きくなった。これは混和材 A 中の凝結促進と流動性を制御する成分により、流動性増進効果が発揮されたためと推察される。

3.2 ブリーディング

ブリーディング試験の結果を図-2 に示す。図中には、コンクリートの練上り時を起点とし、経過時間に伴うブリーディング水の累積量を示した。環境温度 10°C における Plain のブリーディング率は 6.6% で、ブリーディングが終了するまで 330 分程度を要した。環境温度 20°C において、ブリーディング率は 5.0% で、ブリーディングが終了するまで 360 分程度を要した。一方で、A4 のブリーディング率はいずれの環境温度においても、Plain より著しく小さく、環境温度 10°C において 0.18%、環境温度 20°C において 0.10% であった。また、ブリーディングが終了するまでいずれも 60~90 分程度であり、ブリーディング

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

実験ケース	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
Plain(10°C)	17.0	5.7	13.8
A4(10°C)	18.0	5.8	13.8
Plain(20°C)	12.0	5.7	22.0
A4(20°C)	15.5	5.4	22.2



写真-1 透水量試験状況

の低減効果について確認できており、低温環境下で実施した既報⁴⁾と概ね同じ結果であった。

3.3 凝結時間

図-3 に各環境温度におけるコンクリートの凝結性状を示す。環境温度 20°C においては、Plain は 420 分程度で始発に到達したのに対して、A4 は 300 分程度と 120 分程度短縮された。また、環境温度 10°C においては、Plain は 660 分程度で始発に到達したのに対して A4 では 480 分程度と、180 分程度凝結が短縮された。混和材添加による凝結促進効果を確認できており、ブリーディング試験と同様に既報⁴⁾と概ね同じ結果であった。

3.4 硬化後の圧縮強度について

図-4 に各環境温度で打設した硬化体の材齢 7 日および材齢 28 日における圧縮強度の結果を示す。環境温度および混和材の有無に拠らず圧縮強度は各材齢ともに同程度となり、材齢 7 日で 20N/mm² 程度、材齢 28 日で 30N/mm² 程度であった。混和材 A の添加による強度への影響は認められなかった。

4 耐久性試験の結果および考察

4.1 長さ変化

図-5 に各環境温度で打設した硬化体の乾燥収縮の測定結果を示す。乾燥収縮はいずれの環境温度においても、Plain より A4 の方がわずかに大きい傾向を示し、材齢 140

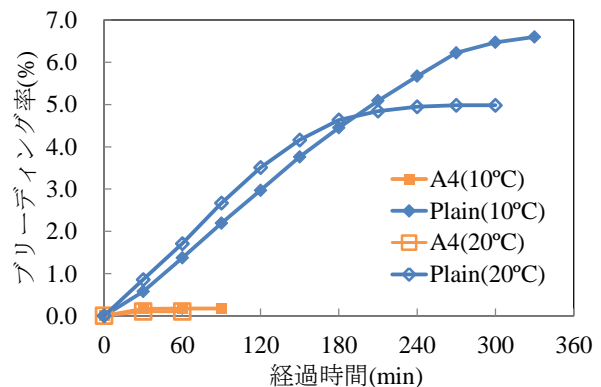


図-2 ブリーディング試験結果

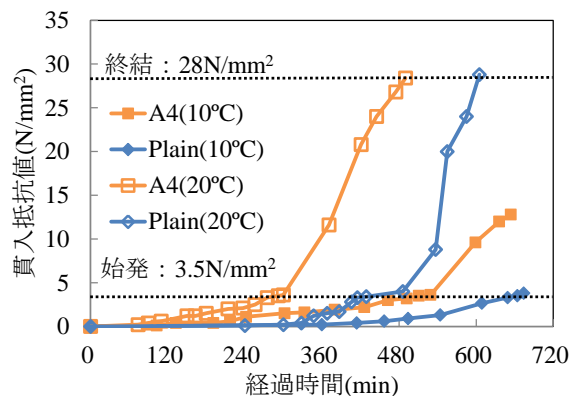


図-3 凝結試験結果

日時点で、A4 (20°C) は Plain (20°C) より 40 μ 程度、A4 (10°C) は Plain (10°C) より 80 μ 程度大きい乾燥収縮であった。これは混和材 A の添加による影響かどうか詳細に検討する必要がある。今後も継続して測定を行い、長期材齢における硬化体の乾燥収縮変化について検討する。

4.2 中性化抵抗性

図-6 に各環境温度で打設した硬化体の促進中性化試験の結果を示す。いずれの環境温度においても、A4 は Plain より中性化がわずかに促進している傾向にあり、促進材齢 91 日までの中性化速度係数を比較すると、A4 は Plain より 0.9mm/ \sqrt{t} 程度大きかった。乾燥収縮と同様に、長期材齢における中性化抵抗性について混和材 A の添加の影響があるか検討する。

4.3 凍結融解抵抗性

各環境温度で打設した硬化体の 300 サイクルまでの相対動弾性係数を図-7 に示す。相対動弾性係数を比較すると、いずれの環境温度においても Plain と A4 は同等であり、高い凍結融解抵抗性を得られた。この結果から、いずれも適切な空気量の導入を行っていたため、混和材 A の添加による凍結融解抵抗性への影響はないことが確認された。一般的にはブリーディング量の抑制により、凍結融解抵抗性は高くなるとされているが、そのブリーディング量の差による影響は認められず、Plain と A4 が同等の高い凍結融解抵抗性が得られる結果となった。

4.4 スケーリング抵抗性

各環境温度で打設した硬化体の 0 サイクルからの総スケーリング量変化の結果を図-8 に示す。また、スケーリング劣化の目視による評価として 0, 10, 25 サイクル目の打込み面の表面形態の様子について写真-2 に示す。Plain (20°C)、Plain (10°C) の 25 サイクル終了時点における総スケーリング量はともに、1.3kg/m² 程度であり、総スケーリング量は 5 サイクルまでに急激に増加し、それ以降緩やかに増加する傾向であった。また、Plain (20°C)、Plain (10°C) の表面形態を観察すると、どち

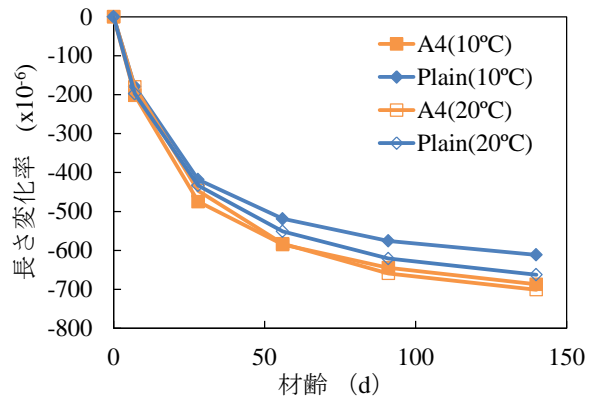


図-5 乾燥収縮試験結果

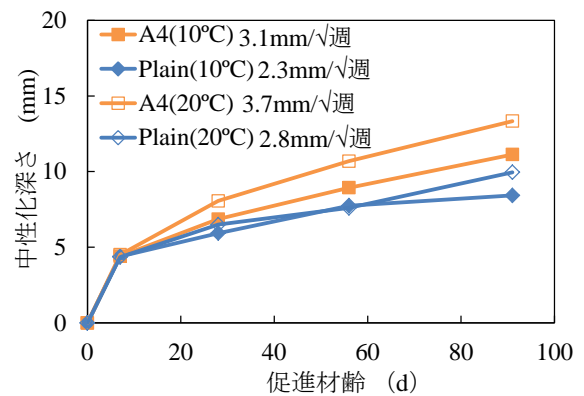


図-6 促進中性化試験結果

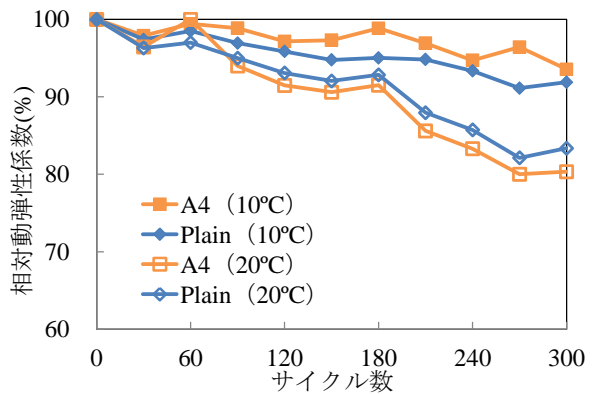


図-7 相対動弾性係数

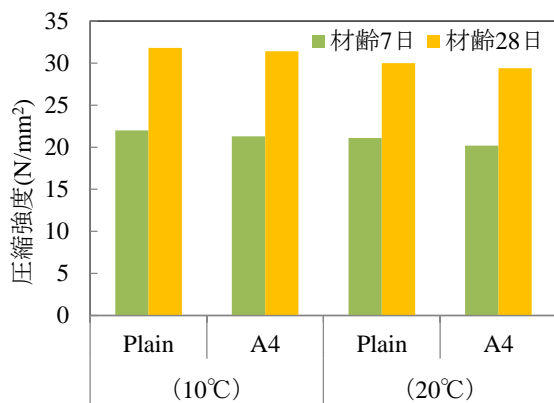


図-4 圧縮強度試験結果

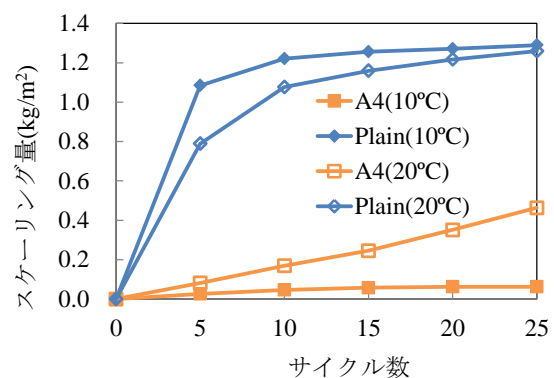


図-8 スケーリング量

らも 10 サイクルで打ち込み面全体に砂利が露出していた。これはブリーディングによって生成したレイタンス層が試験初期段階にて剥離したためと推察される。またレイタンス層以下の硬化体は緻密であるためスケーリング量の変化が5サイクル以降緩やかになったと推察される。一方で、A4 (20°C)、A4 (10°C) の25サイクル終了時点における総スケーリング量は、環境温度に抛らず Plain よりはるかに低く、それぞれ、0.5kg/m²、0.1kg/m²以下であった。また、Plain のような試験初期段階における急激なスケーリング量変化は無かった。A4 (20°C)、A4 (10°C) の表面形態を観察すると、どちらも10サイクルで打ち込み面の剥離はほとんど無く、25サイクル終了時点においても剥離した部分は Plain より少なかった。これらの結果から混和材Aの添加によって打ち込み面のスケーリング抵抗性が向上することを確認できた。これは混和材のブリーディング低減効果に伴い、打ち込み面の表層が混和材無添加よりも緻密となり、表層品質が向上したためと推察される。

4.5 透水量

透水量試験結果を図-9に示す。4.4節のスケーリング試験とほぼ同様の傾向を示しており、打ち込み面の透水量は、混和材を添加した水準の方が少ないことを確認できた。このことから、硬化体の表面仕上げを施した打ち込み面の表層品質が混和材の添加により改善されていることが示唆された。4.1節と4.2節の試験結果は、打ち込み面

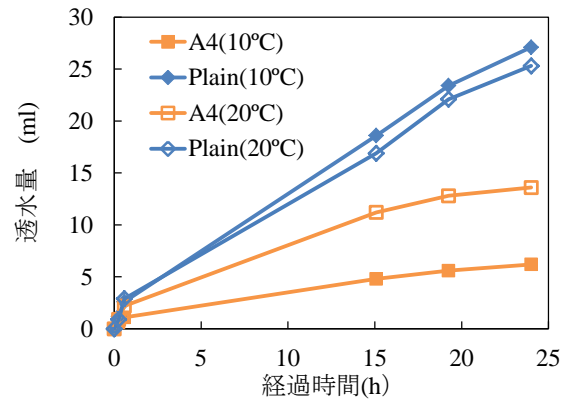


図-9 透水量試験結果

配合	0 サイクル	10 サイクル	25 サイクル
Plain (10°C)			
A4 (10°C)			
Plain (20°C)			
A4 (20°C)			

写真-2 スケーリング試験状況

はなく、硬化体の側面から乾燥および中性化を進めているため、表層品質の差異が試験結果に表れていないと考えられる。そこで、今後、表層を劣化面とした中性化速度・塩化物イオン浸透速度について、本混和材がコンクリートの表層品質および耐久性に大きく寄与できる可能性を検討する予定である。

5 まとめ

寒冷期におけるコンクリート施工の仕上げ作業の生産性を向上させることを目的として、凝結時間調整用混和材の添加によるコンクリートの品質および耐久性への影響について検討を実施した。凝結時間調整用混和材添加後のコンクリートに関する基本特性を把握するため、10℃および20℃試験室環境下でのコンクリート試験の結果から、本実験の範囲内で以下のことについて確認できた。

- (1) 混和材 A を添加したコンクリートは、ベース配合のコンクリートと比較して、同等のフレッシュ性状を有することを確認した。
- (2) 混和材 A を添加したコンクリートは、ベース配合のコンクリートと比較して、凝結始発に至るまでに20℃で120分、10℃で180分程度の凝結促進効果が得られた。
- (3) 混和材 A を添加することによって、著しいブリーディング低減効果が発揮されることを確認した。
- (4) 混和材 A を添加した硬化体は、圧縮強度はベース配合と同等であったが、乾燥収縮量と中性化速度係数

はわずかに大きくなることを確認できた。

- (5) 耐凍害性は混和材 A の添加の有無によらず同等であったが、打込み面のスケーリング抵抗性は、混和材 A を添加した硬化体の方が優れており、透水量試験によっても打込み面の表層品質の向上が確認できた。

以上より、混和材 A は凝結時間短縮の効果およびブリーディング低減効果に伴い、打込み面におけるスケーリング抵抗性があることを確認できた。今後は、実現場において実際に混和材 A を添加し、仕上げ作業を施したコンクリートの表層品質の改善効果および耐久性への寄与について更に検討する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP 「コンクリート工における生産性向上」：<http://www.mlit.go.jp/tec/i-con-concrete.html> (閲覧日：2019年1月8日)
- 2) 浜幸雄，鎌田英治：耐寒促進剤を用いたコンクリートの特性，コンクリート工学，Vol.37, No.11, pp.3-8, 1999.11
- 3) 井元晴丈，榊原直樹，田中泰司，佐藤和徳：C-S-H系早強剤を使用したフライアッシュコンクリートの冬期施工性および表層品質評価，セメントコンクリート論文集，Vol.70, pp.297-304, 2017.3
- 4) 石井泰寛，宮口克一，浦野真次，依田侑也：寒冷期における凝結時間調整のための混和材の効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.231-236, 2018