

報告 高 C₃A 早強型セメントを用いたコンクリートの諸特性

深谷 峻平*1・石田 征男*2・天野 幹久*1

要旨：本研究は、低温環境下での早期強度発現性に優れる高 C₃A 早強型セメントに着目し、コンクリート製品用材料としての適用性評価を目的として行った。検討では、高 C₃A 早強型セメントを用いたコンクリートの基礎物性、耐久性および屋外暴露期間 1 年における硬化体性状について評価した。その結果、高 C₃A 早強型セメントを使用したコンクリートでは、低温環境下であっても蒸気養生を必要とすることなく十分な早期強度が得られることが確認した。また、耐久性についても普通ポルトランドセメントを使用し、蒸気養生を行ったコンクリートと同等であり、良好であることが確認された。

キーワード：高 C₃A 早強型セメント, 蒸気養生, 耐久性, 暴露試験

1. はじめに

コンクリート製品工場では早期脱型による生産出荷サイクルの短縮や型枠投資の削減を目的として、蒸気養生を採用することが一般的である。しかし、近年、製品工場では蒸気養生で使用するボイラーの燃料である重油コストの上昇や、二酸化炭素の排出量削減などが課題となっている。また、最近の課題として労働集約型の産業構造における労働生産性の改善も挙げられている。これらの背景より、低温環境下においても早期の強度発現を可能とし、蒸気養生を必要としないコンクリート製品用セメントの開発が期待されている。

多田¹⁾は、低温環境における早期強度発現性の向上を目的として、セメントの主要鉱物のうち最も反応が早い C₃A に着目し、C₃A 量を普通ポルトランドセメントと比較して大幅に増加させた高 C₃A 早強型セメントについて検討している。この高 C₃A 早強型セメントは、クリンカー原料中の Fe₂O₃ に対する Al₂O₃ の比率(鉄率:IM)を高めることにより C₃A 量を増加させており、この C₃A 量の増加に合わせて石膏添加量を増加させ、なおかつ、反応性を高めるために粉末度を向上させた設計となっている。このセメントを使用したモルタルの低温環境下における評価結果によると、早強ポルトランドセメントを使用し、更に促進剤を添加した場合と比較して、大幅に

優れる早期強度発現性を有していることを明らかにしている。

そこで、本研究では、この高 C₃A 早強型セメントのコンクリート製品用材料としての適用性評価を目的とした。また、一般に、C₃A 量が多いセメントは、耐硫酸塩性や長期強度の低下等といった懸念があるとされている²⁾。

このような背景から、本研究では、多田¹⁾の提案する高 C₃A 早強型セメントを用いたコンクリートの基礎物性および耐久性について、普通ポルトランドセメントを使用し、蒸気養生を行ったコンクリートと比較することにより評価した。また、2023 年より実施している暴露試験の、暴露期間 1 年における圧縮強度および細孔径分布の測定結果についても報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に、使用材料を示す。セメントは、テストキルンおよびテストミルを使用して試製した高 C₃A 早強型セメント (以下、AC) および市販の普通ポルトランドセメント (以下、OPC) の 2 種を使用した。本検討で使用した AC の鉱物組成を表-2 に示す。本検討で使用した AC は、多田らの研究と同一のセメントである。骨材は石灰石砕砂および石灰石碎石を使用し、化学混和剤として高

表-1 使用材料

使用材料	種類	記号	密度(g/cm ³)	産地・銘柄
水	上水道水	W	1.00	千葉県佐倉市上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	—
	高 C ₃ A 早強型セメント	AC	3.07	テストキルン製造試製セメント
骨材	石灰石砕砂	S	2.69	栃木県佐野市仙波町産
	石灰石碎石 2005	G	2.75	栃木県佐野市仙波町産
混和剤	高性能減水剤	SP	1.06	ポリカルボン酸系化合物
	AE 剤	AE	—	アルキルエーテル系アニオン界面活性剤

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

表-2 ACの鉱物組成

IM	SO ₃ [%]	鉱物組成(Rietveld)[%]			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
3.84	3.82	65.4	8.3	13.5	1.9

表-3 基礎物性試験における配合

配合	一次養生	W/C (%)	環境温度 (°C)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				目標値	
					W	C	S	G	スランブ (cm)	空気量 (%)
OPC-46	蒸気	46	20	41.5	155	OPC 337	775	1114	12.0 ±1.5	4.5 ±0.5
AC-35	封緘	35	5, 20	41.5	155	AC 443	732	1056		
AC-45		45			155	AC 344	769	1106		
AC-55		55			155	AC 282	791	1139		

表-4 耐久性試験および暴露試験における配合

配合	一次養生	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				目標値		σ _{18hr} (N/mm ²)
				W	C	S	G	スランブ (cm)	空気量 (%)	
OPC-46	蒸気	46	41.5	155	OPC 337	775	1119	12.0 ±2.5	4.0 ±1.0	≥10.0
AC-46	封緘	46	41.5	155	AC 337	780	1122			

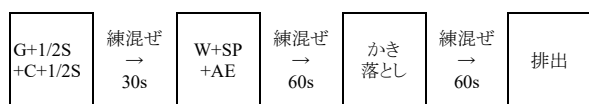


図-1 コンクリートの作製方法

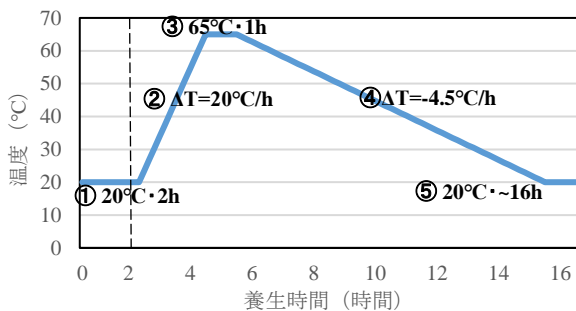


図-2 蒸気養生条件

性能減水剤および AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合および養生方法

本研究は、基礎物性を評価するシリーズ 1 と耐久性評価や暴露試験を行うシリーズ 2 に分けて実施した。それぞれのシリーズの実験概要を以下に示す。

(1) シリーズ 1 (基礎物性)

シリーズ 1 では、AC を使用したコンクリートの基礎物性を確認することを目的とした。表-3 に、シリーズ 1 における配合を示す。OPC の場合は、実際の製品工場で使用されている配合を参考にし、水セメント比(以下、W/C)は 46%、単位水量は 155kg/m³ とした。AC の場合は、W/C を 35%、45%、55% の 3 水準とし、単位水量は W/C によらず 155kg/m³ 一定とした。スランブの目標値は、12.0 ± 1.5cm とし、高性能減水剤の使用量により調整した。ま

た、空気量の目標値は W/C によらず 4.5 ± 0.5% とし AE 剤の使用量により調整した。OPC を用いる水準では、材齢 16h まで蒸気養生を実施した後に脱型し、材齢 14 日まで温度が 20°C の恒温室内において気中養生を実施した。AC を用いる水準では、材齢 16h まで封緘養生を実施した後に脱型し、材齢 14 日まで環境温度 20°C および 5°C の恒温室内において気中養生を実施した。

(2) シリーズ 2 (耐久性, 屋外暴露)

表-4 に、耐久性試験および暴露試験における配合を示す。コンクリートの配合は、使用したセメントの種類によらず、W/C46%、単位水量 155kg/m³ とした。スランブの目標値は 12.0 ± 2.5cm、空気量の目標値は 4.0 ± 1.0% とし、それぞれ高性能減水剤および AE 剤の使用量を調節した。養生方法は、シリーズ 1 と同一とした。また、シリーズ 2 では、コンクリート製品会社へのヒアリング結果を参考に、材齢 18h における脱型強度の目標値を 10N/mm² とした。

2.3 コンクリートの作製方法

図-1 に、コンクリートの作製方法を示す。コンクリートの練混ぜはパン形ミキサ(公称容量: 55L)を用いて行い、1 バッチの練混ぜ量は 35L とした。使用材料は試験前日より 20°C および 5°C に管理された恒温室内で温度管理を行い、コンクリート試験に供した。コンクリートの練混ぜ、フレッシュ試験および供試体作製は温度 20°C または 5°C、湿度 80%RH の恒温室内で実施した。また、図-2 に、OPC を用いたコンクリートに対して実施した蒸気養生のパターンを示す。

2.4 試験項目および試験方法

表-5 に、試験項目および試験方法を示す。フレッシュコンクリートの性状は、スランブ試験 (JIS A 1101)、空気量試験 (JIS A 1128) および温度測定 (JIS A 1156) を実施した。コンクリートの硬化特性として圧縮強度試験 (JIS A 1108) を実施した。圧縮強度は、円柱供試体 (φ10×20cm) において実施した。試験材齢について、環境温度 20°C では 16h, 18h, 20h および 14d において、環境温度 5°C では 18h, 24h, 48h, 72h および 14d においてそれぞれ実施した。コンクリートの初期水和発熱を把握するため、熱電対を用いてコンクリート供試体 (φ10×20cm) の中心温度を材齢 14 日まで測定した。コンクリートの耐久性として、耐硫酸塩、凍結融解抵抗性 (JIS A 1148)、促進中性化試験 (JIS A 1153) による中性化深さ、乾燥収縮 (JIS A 1129-2) の各試験を実施した。耐硫酸塩性は、材齢 18h で脱型し、材齢 7d まで 20°C の水中養生、材齢 26d まで 20°C の封緘気中養生、材齢 28 日まで 20°C の水中養生の順で前養生を行った後、10%硫酸ナトリウム水溶液に浸漬し、質量変化およびリングゲージによる長さ変化を測定した。凍結融解抵抗性は、材齢 24 時間で

表-5 試験項目

試験項目		規格・準拠	
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」	
	空気量	JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量圧力による試験方法-空気室圧力方法」	
	コンクリート温度	JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」	
強度性状	圧縮強度	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」	
供試体中心部の温度履歴		熱電対およびデータロガーにより温度取得	
耐久性	耐硫酸塩性	JIS 原案「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法(案)」	
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」A法(水中凍結融解試験方法)	
	促進中性化	JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」	
	乾燥収縮	水中	JIS A 1129-2「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法-コンタクトゲージ法」
		気中	JIS A 1129-2「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法-コンタクトゲージ法」
暴露	圧縮強度	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」	
	細孔径分布	水銀圧入式ポロシメーターによる測定	



図-3 コンクリートの暴露状況

にかけて行い、この期間における平均気温は 17.1℃、平均湿度は 81.2%、降水量は 1804mm であった³⁾。圧縮強度は、円柱供試体 (φ10×20cm) において実施し、試験材齢は、7d, 14d, 28d, 91d, 182d, 331d および 364d とした。図-3 にコンクリートの屋外暴露の状況を示す。

3. 実験結果

3.1 基礎物性 (シリーズ 1)

(1) フレッシュ性状

表-6 に、練上り直後におけるコンクリートのフレッシュ性状試験の結果を示す。AC を用いたコンクリートは、いずれの W/C でも標準的な添加率の範囲で目標値を満足し、従来のポルトランドセメントと同様に、混和剤の添加量を調整することで、所要のフレッシュ性状を得ることが可能であることを確認した。また、AC を使用したコンクリートにおける所定のスランブを得るための SP 添加量は OPC とほぼ同等であった。一方、AC を使用した場合における所定の空気量を得るための AE 添加量は、OPC の場合よりも僅かに増加した。また、練上がり直後のコンクリート温度は、AC のほうが OPC よりも約 1℃高い結果であった。

(2) 圧縮強度

図-4 に、環境温度 20℃におけるコンクリートの圧縮強度を示す。OPC においては、材齢 16h における蒸気養生終了時 (材齢 16h) において、供試体の内部温度がやや高いことが想定されたため、20℃の恒温室内で 2 時間静置した後に試験に供した。AC を用いたコンクリートの材齢 16h における圧縮強度は、W/C55%が 19.7N/mm²、W/C45%が 27.9N/mm²、W/C35%が 44.2N/mm² であり、OPC を使用した場合の蒸気養生後 (材齢 18h) の圧縮強度 (21.1N/mm²) と同等以上であり、製品工場における脱型強度の目標値を上回っていることを確認した。この結果より、AC を使用したコンクリートでは、蒸気養生を行わなくても十分に強度が発現することを確認した。また、

表-6 フレッシュ性状

環境温度 (°C)	水準名	混和剤添加率		フレッシュ性状		
		SP (C×%)	AE (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
20	OPC-46	0.63	0.001	11.5	4.2	22.7
	AC-35	0.83	0.019	13.5	4.6	24.8
	AC-45	0.66	0.005	12.0	4.5	23.8
	AC-55	0.68	0.003	10.5	4.6	23.1
5	AC-35	0.90	0.005	11.0	4.2	11.1
	AC-45	0.70	0.0045	13.5	4.6	9.3
	AC-55	0.63	0.005	10.5	4.9	9.2

脱型した供試体を、材齢 14 日まで 20℃、RH80%の恒温室内で前養生を行った後に試験を開始した。促進中性化試験は、材齢 24 時間で脱型した供試体を材齢 14d まで 20℃、RH60%の恒温室内で気中養生を行った後に、20℃、RH60%、CO₂ 濃度 5%環境下にて静置を行い、7d, 28d, 8w, 13w, 26w 時点で測定した。乾燥収縮は、水中および気中養生を行ったそれぞれの供試体について実施した。水中養生を行った供試体は、材齢 24hr まで 20℃、RH80%の恒温室内で養生を行った後に脱型し、材齢 7d まで標準養生を行った時点を目長とした。一方、気中養生を行った供試体は、材齢 24hr まで 20℃、RH80%の恒温室内で気中養生を行った後に脱型し、脱型時を目長とした。

コンクリートの暴露試験は、千葉県佐倉市において、材齢 1 年まで屋外暴露した供試体の圧縮強度および細孔径分布を評価した。屋外暴露は、2023 年 6 月～2024 年 6 月

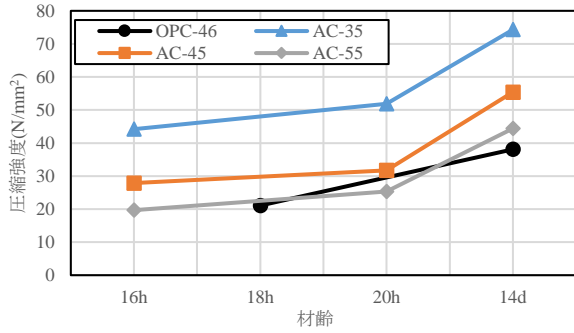


図-4 圧縮強度 (環境温度 20°C)

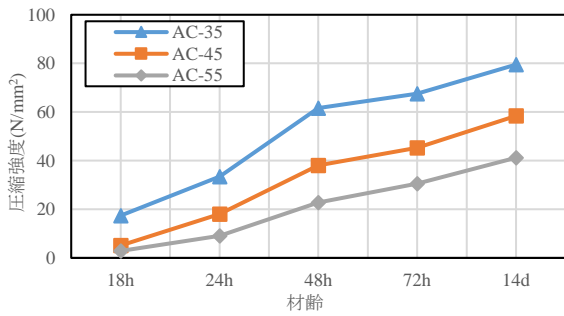


図-5 圧縮強度 (環境温度 5°C)

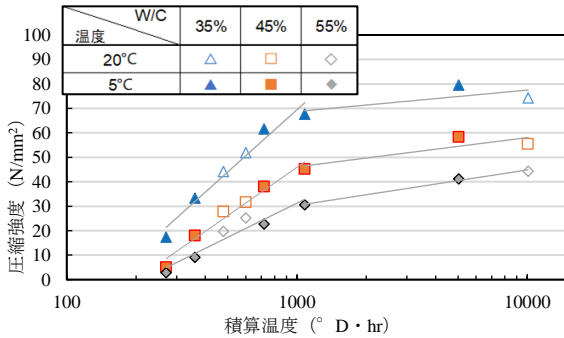


図-6 積算温度と圧縮強度

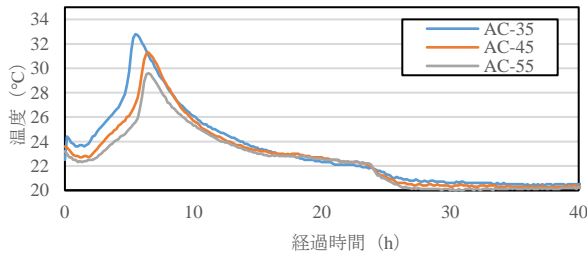


図-7 温度履歴 (環境温度 20°C)

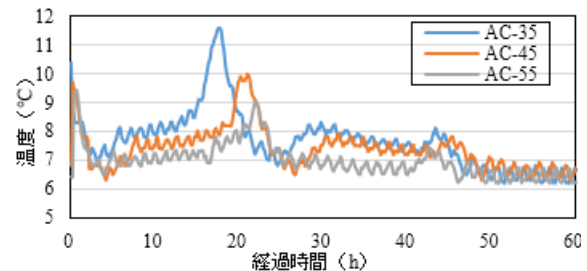


図-8 温度履歴 (環境温度 5°C)

材齢 14 日における圧縮強度は、AC を用いたコンクリートにおいて、W/C55%が 44.4N/mm²、W/C45%が 55.4N/mm²、W/C35%が 74.3N/mm²、OPC が 38.1N/mm²であり、いずれの W/C も OPC よりも高い強度発現が見込まれる結果となった。

図-5 に、環境温度 5°Cにおける AC を用いたコンクリートの圧縮強度を示す。すべての材齢において W/C が低いほど圧縮強度が高いことを確認した。材齢 18h における圧縮強度は、W/C55%が 2.9N/mm²、W/C45%が 5.1N/mm²、W/C35%が 17.4N/mm² であり、脱型強度の目標値 10N/mm²を満足したのは W/C35%の水準のみであったが、材齢 24h においては、W/C55%においても 10N/mm²程度の強度発現が見られた。また、材齢 48h 以降では、W/C の違いによる圧縮強度の増加量に大きな差は確認されず、材齢 14d では W/C35%が 79.5N/mm²、W/C45%が 58.4N/mm²、W/C55%が 41.2N/mm²であった。また、図-6 に、-10°Cを起点として算出した積算温度と圧縮強度の関係を示す。AC を用いたコンクリートにおける積算温度と圧縮強度の関係はバイリニアの関係で表せることを確認した。すなわち、積算温度 1000°D·hr までは、圧縮強度の増進が急激であり、積算温度 1000°D·hr 以上においては圧縮強度の増進量が緩やかになることが確認された。また、W/C が低いほど積算温度 1000°D·hr までの強度増進が顕著に認められた。

(3) 温度履歴

図-7 に、環境温度 20°Cにおけるコンクリート供試体中心部の温度履歴を、図-8 に、環境温度 5°Cにおけるコンクリート供試体中心部の温度履歴を示す。環境温度が高く、W/C が低いほど温度上昇を開始する時間が早く、最高温度が高い結果となった。今回の結果より、環境温度が 20°Cでは、打設後 5 時間程度から温度が急激に上昇するのに対し、環境温度が 5°Cでは、打設後 15 時間程度から温度が上昇した。また、コンクリート中心部の最高温度は、環境温度 20°Cにおいて、W/C35%が 33°C、W/C45%が 31°C、W/C55%が 30°C程度であり、環境温度 5°Cにおいては W/C35%が 12°C、W/C45%が 10°C、W/C55%が 9°C程度であった。

3.2 耐久性 (シリーズ 2)

(1) 耐硫酸塩

図-9 に長さ変化量を、図-10 に質量減少率を示す。AC を用いたコンクリートの浸漬期間 26 週における長さ変化率は、OPC の場合よりも小さい値であった。また、質量減少率に関しては、AC を用いたコンクリートと OPC の間で差は確認されず、浸漬期間 26 週における質量減少量は 1%未満であった。耐硫酸塩は、長期的に劣化が進行する傾向がある。このため、本稿においては、浸漬期間が材齢 26 週と短いため、長期的な材齢において

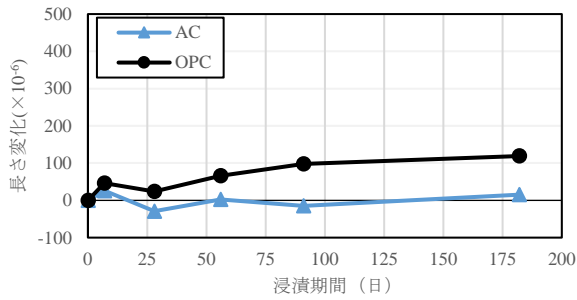


図-9 長さ変化 (耐硫酸塩)

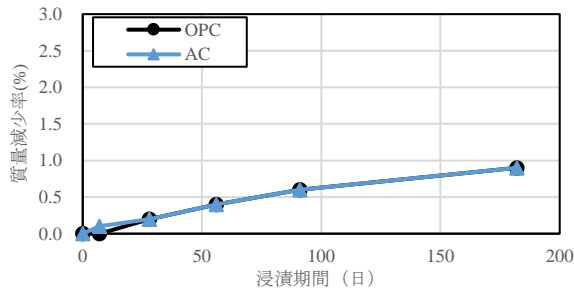


図-10 質量減少率 (耐硫酸塩)

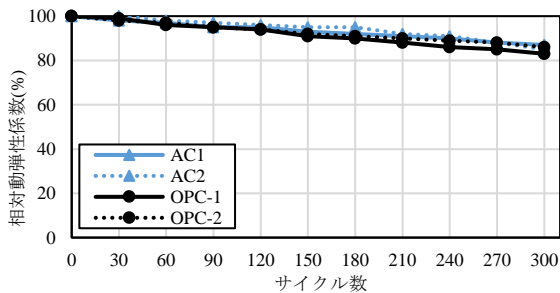


図-11 相対動弾性係数 (凍結融解)

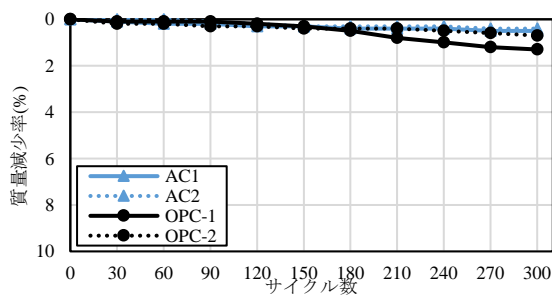


図-12 質量減少率 (凍結融解)

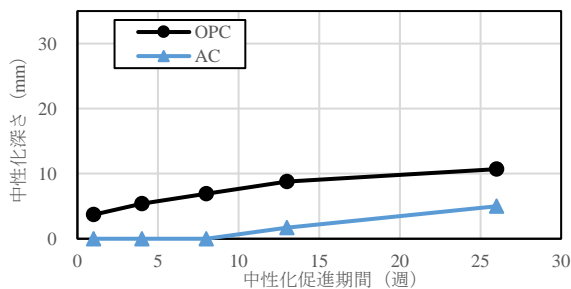


図-13 促進中性化深さ

も確認が必要である。

(2) 凍結融解抵抗性

図-11 に相対動弾性係数を、図-12 に質量減少率を示す。AC を用いたコンクリートの 300 サイクル終了時における相対動弾性係数は 80%以上であり、質量減少率も 1.0%以下と小さいことから、OPC と同様に、十分な耐凍害性を有することが確認された。

(3) 促進中性化深さ

図-13 に促進中性化深さの測定結果を示す。促進中性化期間 26 週における中性化深さは、OPC を用いたコンクリートが 10.7mm であるのに対して、AC の場合は 5.0mm であった。また、AC を用いたコンクリートでは、促進中性化期間が 8 週時点では中性化の進行は確認されず、中性化の進行が OPC の場合と比べて遅いことが確認された。今回の検討では、セメントの種類によらず同一 W/C のコンクリートで試験を実施したことによって、AC を用いたコンクリートの圧縮強度が OPC の場合よりも大きくなったことが影響していると推察される。

(4) 乾燥収縮

図-14 および図-15 に長さ変化および質量減少率を示す。前養生条件によらず、AC を用いたコンクリートの長さ変化率は、OPC の場合よりも大きい結果となったが、いずれも小さい値であり、セメント種類による差も 100 μ m 程度であることから、コンクリートの品質としては問題の無い範囲と考えた。また、AC を用いたコンクリートの方が、質量減少率は小さい結果であった。

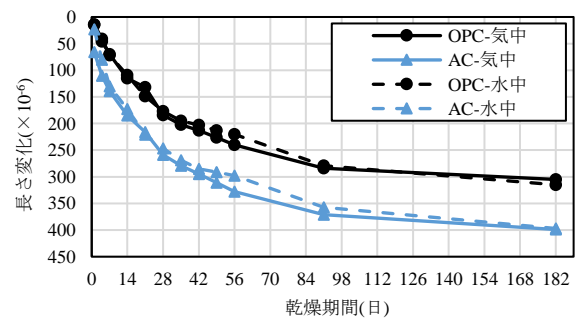


図-14 長さ変化 (乾燥収縮)

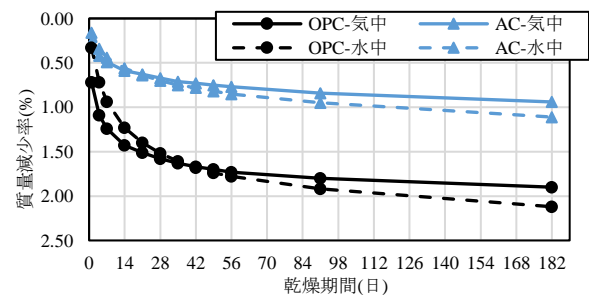


図-15 質量変化率 (乾燥収縮)

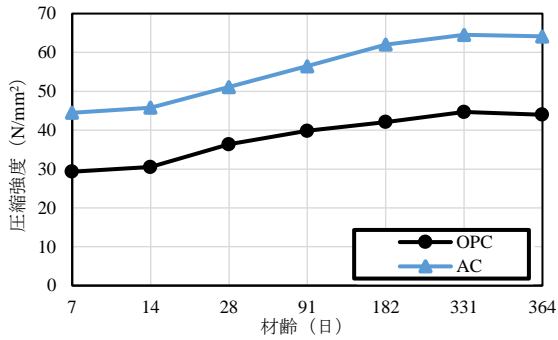


図-16 圧縮強度 (暴露試験)

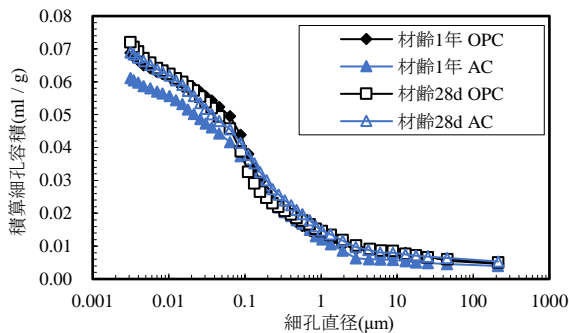


図-17 細孔径と積算細孔容積の関係 (暴露試験)

3.3 暴露試験 (シリーズ2)

(1) 圧縮強度

図-16 に暴露試験における圧縮強度の結果を示す。材齢 365 日における圧縮強度は AC が 64N/mm^2 、OPC が 44N/mm^2 であり、材齢 1 年においては、OPC と同等以上の強度発現が得られることを確認した。

(2) 細孔径分布

図-17 に細孔径と積算細孔容積の関係を示す。AC を用いたコンクリートの積算細孔容積は、材齢 28d 時点では OPC と差が見られないが、材齢 1 年では、細孔径 $0.1\sim 0.001\mu\text{m}$ の範囲において顕著な減少が確認され、OPC よりも小さい結果となった。このような、空隙量の減少が、AC を用いたコンクリートの長期材齢における圧縮強度の向上に寄与したと考えられる。

4. まとめ

C_3A 量を普通ポルトランドセメントと比較して大幅に増加させた高 C_3A 早強型セメントのコンクリート製品用材料としての適用性評価を目的として、基礎物性、耐久性および暴露試験の各種性状について蒸気養生を施した OPC との比較により評価した。本稿において、得られた知見を以下に示す。

- (1) 高 C_3A 早強型セメントを使用したコンクリートは、OPC と同様に、混和剤の添加量を調整することで、所要のフレッシュ性状を確保することが可能であ

った。

- (2) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートは、低温環境下においても高い初期強度発現性が認められ、材齢 14 日における圧縮強度も OPC と同等以上であった。
- (3) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートは、環境温度によらず、W/C が低いほど温度が上昇する時間が早く、最高温度が高い結果であった。
- (4) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートの浸漬期間 26 週までの耐硫酸塩性に関しては、OPC の場合と明確な差は確認されなかった。
- (5) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートは、OPC と同様に、十分な耐凍害性を有することを確認した。
- (6) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートの中性化速度は、OPC の場合と比べて遅いことを確認した。
- (7) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートの乾燥による長さ変化率は、OPC の場合よりも大きい結果となった。
- (8) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートの暴露期間 1 年経過時の圧縮強度は、OPC の場合と同等以上であった。
- (9) 高 C_3A 早強型セメントを用いたコンクリートの暴露期間 1 年経過時における積算細孔容積は、OPC よりも小さい結果となった。

参考文献

- 1) 多田真人ほか:高 C_3A 早強型セメントの低温環境における初期強度発現機構,セメント・コンクリート論文集, Vol.77, pp.145-152,2023
- 2) 原田匠ほか:クリンカーの高 C_3A ・高 SO_3 化によるセメントの諸物性への影響,セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.204-209,2017
- 3) 国土交通省 気象庁: <https://www.data.jma.go.jp/stat/s/etrn/index.php> (閲覧日:2025.1.8.)