

低温環境下での高 C₃S フライアッシュコンクリートの蒸気養生による強度発現性に関する検討

太平洋セメント(株) 正会員 ○目黒 貴史
正会員 森 香奈子
正会員 高橋 悠
正会員 石田 征男

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品では、早期に脱型するために蒸気養生を行い、効率的な製造方法を導入している。しかし、気温の低い冬期には、凝結開始や強度発現に時間を要するため、前置き時間の延長、設定温度の上昇や養生時間の延長など対策が必要であることから、早強剤による硬化促進なども検討されている¹⁾。
当社では次世代型フライアッシュセメント(以下、AFC)のプレキャストコンクリート製品への適用を目指した検討を行っており、低温環境における AFC の初期の強度発現はポルトランドセメントよりも高かった²⁾。本検討では、既報²⁾よりもさらにブレーン比表面積および C₃S を増加した改良 AFC について低温環境での強度発現性を確認し、その要因の検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を、表-2 にセメントの特性を示す。結合材には高 C₃S セメント(以下、改良 A または A)、早強ポルトランドセメント(以下、H)および静電分離灰(以下、改良 FA または FA)を使用した。細骨材には山砂を、粗骨材には碎石 2005 を使用した。また、混和剤には高性能減水剤および AE 剤を使用した。表-3 に、コンクリートの配合を示す。本研究では、高 C₃S セメントに静電分離灰を 18%置換したセメントを AFC と記す。環境温度 20℃で同等の脱型強度となる既往の検討²⁾における配合を参考に、AFC の配合条件は水セメント比(以下、W/C)を 33%として、H(W/C=39%)と比較した。

2. 2 コンクリートの練混ぜおよび供試体作製・養生

コンクリートの練混ぜは、環境温度 5℃の試験室でパン型強制練りミキサ(容量 55L)を用いて行った。フレッシュ性状の測定後、供試体(φ100mm×200mm の円柱供試体)を作製し、蒸気養生を行った。図-1 に示す通り、蒸気養生のパターンは、前置き 3 時間→昇温 20℃/時間→最高温度 50℃で 4 時間保持→降温 4.5℃/時間とした。蒸気養生を行った供試体は材齢 18 時間で脱型し、環境温度 5℃の試験室で気中養生後、所定の材齢で試験を実施した。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	摘要
練混ぜ水	上水道水	W	—
セメント	高 C ₃ S セメント	改良 A	密度: 3.11g/cm ³
		A	密度: 3.11g/cm ³
	早強ポルトランドセメント	H	密度: 3.14g/cm ³
混和材	静電分離灰	改良 FA	密度: 2.30g/cm ³ ブレーン比表面積: 4390cm ² /g
		FA	密度: 2.19g/cm ³ ブレーン比表面積: 3490cm ² /g
細骨材	山砂	S	表乾密度: 2.59g/cm ³
粗骨材	碎石 2005	G	表乾密度: 2.65g/cm ³
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	AE 剤	AE	アルキルエーテル系
	フライアッシュ用 AE 剤	AE	アルキルカルボン酸系

表-2 セメントの特性

粉体種類	ブレーン比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)			
		C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
改良 A	5410	71.0	6.1	4.1	13.5
A	5380	68.7	8.9	7.7	10.7
H	4560	70.8	7.7	9.2	8.2

表-3 コンクリートの配合

水準名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C			S	G
				改良 AFC※	AFC※	H		
改良 AFC	33	43	160	485	—	—	699	952
AFC	33	43	160	—	485	—	699	944
H	39	44	160	—	—	410	756	984

※改良 AFC: 改良 A+改良 FA, AFC: A+FA

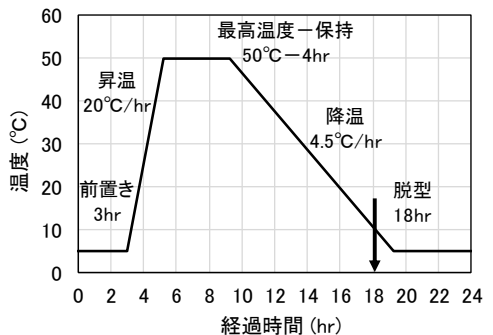


図-1 蒸気養生のパターン

3. 試験結果

図-2 に、蒸気養生後のコンクリートの圧縮強度を示す。改良 AFC の材齢 18 時間強度(脱型強度)は H より約 10N/mm², AFC よりも約 2N/mm²それぞれ大きかった。改良 AFC ではブレーン比表面積および基材セメントの C₃S を増加させたことから、セメントの反応性が向上し

たとえる。蒸気養生により製造する場合、前置き時間での強度発現が蒸気養生後のコンクリート強度に影響するとされている。そこで、環境温度 5℃における各コンクリートの凝結時間を測定し、環境温度 20℃の測定結果と比較した。図-3 に、凝結時間を示す。改良 AFC の環境温度 5℃での凝結始発時間は、AFC より約 1 時間、H より約 3 時間それぞれ早いことがわかった。さらに、前置き 3 時間における貫入抵抗値は、改良 AFC が 1.4N/mm²、AFC が 0.8N/mm²、H が 0.4N/mm² となった。また、環境温度 20℃に対する 5℃での凝結時間の遅れは、改良 AFC が 3.5 時間、AFC が 4.25 時間、H が 5 時間であった。以上より、改良 AFC は初期の水和反応が速く、蒸気養生開始時の硬化進行に優れるため、脱型強度が AFC や H よりも高くなったと推察する。

蒸気養生終了後の硬化体の評価として、改良 AFC と H の水準について細孔径分布の測定および顕微鏡観察を実施した。細孔径分布の測定には、所定の材齢でコンクリート供試体を粗砕して粗骨材を取り除き、5～8mm の大きさに調整した試料を用いた。表-4 に、50nm～2μm の空隙量およびそれらの総空隙量に対する割合を示す。50nm～2μm の空隙は主にコンクリートの遷移帯を構成する空隙であり、圧縮強度と負の相関があるとされる³⁾。改良 AFC の 50nm～2μm の空隙量は H よりも少なく、総空隙量に対するそれらの割合も少ないことから、改良 AFC は H より圧縮強度が大きかったと推察した。

図-4 および図-5 に、材齢 18 時間の改良 AFC および H の走査電子顕微鏡(以下、SEM)の写真を示す。骨材とセメントペーストの界面である遷移帯に着目した場合、改良 AFC では界面の付着は良好であり、水酸化カルシウム(以下、CH)の析出は非常に少なかった。一方、H では界面に CH の析出が認められた。これより、改良 AFC ではポズラン反応によって CH が消費され、遷移帯の形成が抑制されたことが強度発現に寄与したと考える。

4. まとめ

プレキャストコンクリート製品向けに蒸気養生後の初期強度向上のために基材セメントのブレン比表面積と C₃S を増加したフライアッシュセメント(改良 AFC)を低温環境で評価したところ、以下の知見を得た。

- (1) 20℃で同等の強度となる改良 AFC と H を 5℃で比較すると、改良 AFC の強度は H よりも高くなった。
- (2) 改良 AFC の凝結時間は H よりも早く、低温環境での凝結の遅れも短くなった。
- (3) 改良 AFC の 50nm～2μm の空隙量は、H と比べて脱型時、7 日、14 日のいずれにおいても少なかった。
- (4) 電子顕微鏡による遷移帯の観察では、改良 AFC を使用したコンクリートに水酸化カルシウムの析出

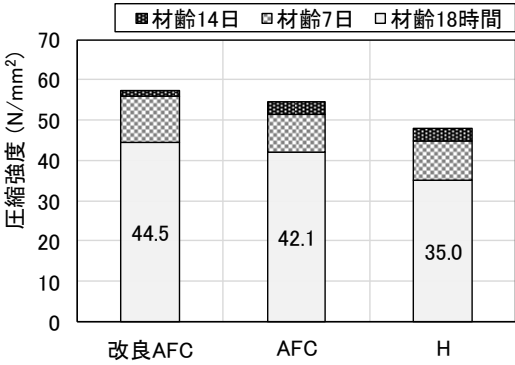


図-2 コンクリートの圧縮強度

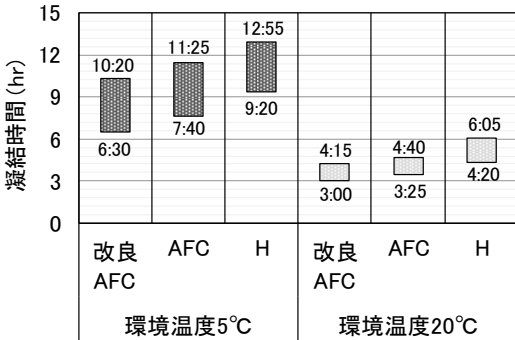


図-3 凝結時間

表-4 改良 AFC および H の空隙量

水準名	材齢	50nm～2μmの空隙量(Vol.%)	総空隙量に対する50nm～2μmの割合(%)
改良AFC	材齢18時間	5.0	25.6
	材齢7日	5.3	32.8
	材齢14日	6.5	39.8
H	材齢18時間	7.1	38.7
	材齢7日	8.1	45.2
	材齢14日	9.0	49.5

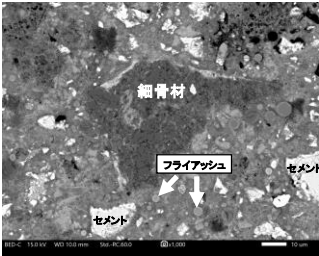


図-4 改良 AFC の SEM 画像



図-5 H の SEM 画像

はほぼみられなかったが、H では析出がみられた。

参考文献

[1] 中村敏行ほか：蒸気養生で製造するコンクリートの品質向上に関する早強剤の効果、プレストレストコンクリート工学会 第 24 回シンポジウム論文集、2015

[2] 目黒貴史ほか：高 C₃S フライアッシュセメントを適用したコンクリートの蒸気養生による強度発現性(その 2)、土木学会第 75 回年次学術講演会公演概要集、Vol.75、V-242、2020

[3] 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、33 巻 9 号、1995

【謝辞】

本研究は製品向け AFC 研究会の活動の一環として行ったものであり、関係各位に感謝の意を表する。