

低温環境下における高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性に及ぼす
C-S-H 系硬化促進剤の効果

(株)ヤマウ 正会員 ○田中 孝一
ポゾリス ソリューションズ(株) 正会員 大島 正記
ポゾリス ソリューションズ(株) 正会員 井元 晴丈

1. はじめに

プレキャストコンクリート（以下、PCa と記す）における CO₂ 排出量の約 80%は、その多くが原料のポルトランドセメントに由来する¹⁾ため、高炉スラグ微粉末（以下、スラグと記す）などの混和材を使用することは CO₂ 排出量の削減に効果的である。一方、PCa の製造では、製造効率の観点から脱型可能な初期強度を早期で得るため蒸気養生が用いられることが多く、ボイラーで燃焼する際に CO₂ が排出されている。よって、スラグなどを積極的に使用しつつ蒸気養生を抑制することができれば、CO₂ 排出量削減の観点から有効といえる。

ここでは、PCa 製造における蒸気養生を抑制しつつ製造効率を維持することを実現するための基礎的検討として、コンクリートの強度発現性が低下する冬季環境を想定し、スラグを用いた配合に C-S-H 系硬化促進剤を使用したコンクリートの低温環境下における強度発現性について検討を行った。

2. 試験概要

表 1 に使用材料の種類および物理的性質を示す。セメントは早強ポルトランドセメント（早強セメント）、スラグは比表面積 5,860 cm²/g のものを用いた。硬化促進剤は、C-S-H 系硬化促進剤（AC）を用いた。表 2 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示す。試験温度は冬季の PCa 製造時を 10℃と想定して、水結合材比（W/B）は 40%とした。フレッシュコンクリートの練混ぜには二軸強制練りミキサー（容量 55L）を用い、スランプおよび空気量がそれぞれ 18±2.5cm および 2.0%以下になるように、高性能減水剤（SP）使用量を調整した。なお、AC は単位水量の一部として質量置換で添加した。フレッシュコンクリートの練混ぜ後、圧縮強度試験用の供試体を JIS A 1132 に準じて作製した。供試体は、10℃環境下で 20・27・45 時間および材齢 14 日まで封緘養生した後に、JIS A 1108 に準じて圧縮強度を測定した。

表 1 使用材料の種類および物理的性質

材料	記号	種類および物理的性質
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	H	早強ポルトランドセメント (密度: 3.14 g/cm ³ , 比表面積:4,630 cm ² /g)
スラグ	BF	高炉スラグ微粉末 (密度: 2.91 g/cm ³ , 比表面積:5,860 cm ² /g)
細骨材	S	大井川水系陸砂 表乾密度: 2.58g/cm ³
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度: 2.66g/cm ³ , 最大寸法: 20mm
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
硬化促進剤	AC	C-S-H 系硬化促進剤

表 2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

記号	目標スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	スラグ 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					(Bx%)		スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
						W	H	BF	S	G	SP	AC			
40-0-0	18.0 ±2.5	≤2.0	40	40	0	155	388	-	726	1,120	0.90	0	18.5	0.6	12
40-30-0			40	40	30	155	272	116	723	1,116	0.80	0	19.0	1.8	12
40-30-2											0.70	2	18.0	1.4	12
40-30-4											0.60	4	15.5	1.5	12
40-50-0											0.75	0	18.0	0.9	12
40-50-2			40	40	50	155	194	194	721	1,112	0.675	2	19.0	1.5	12
40-50-4											0.60	4	19.5	0.8	12

キーワード プレキャストコンクリート、高炉スラグ微粉末、C-S-H 系硬化促進剤、圧縮強度、蒸気養生

連絡先 〒839-0804 福岡県久留米市宮ノ陣町若松 1-18

(株)ヤマウ 技術本部 技術研究所 TEL0942-34-7740

3. 結果と考察

図 1 に圧縮強度試験結果を示す。スラグ置換率30%および50%の場合もいずれも、10℃の低温環境下においても AC の添加で材齢 20 時間から 14 日で、圧縮強度が増大することが確認された。AC 添加による圧縮強度増大量は、材齢 45 時間までの初期材齢では、スラグの置換率が小さいものの方が大きい。材齢 14 日ではスラグの置換率に関わらず同程度であった。また、スラグ無置換のものでは、スラグ置換率 30%のものに AC を 4%添加することで同等の強度発現性が得られることが確認された。

得られた圧縮強度試験結果を基に、スラグを置換した早強セメントの初期強度発現性について、積算温度により整理した。積算温度(M)は、-10℃を基準温度として次式により求めた。

$$M = \sum(\theta + 10)\Delta t$$

(Δt : 時間(hours), θ :コンクリート温度(℃))

図 2 に積算温度と材齢 45 時間までの圧縮強度の関係を示す。積算温度と圧縮強度の関係は高い相関で、以下の関数に線形近似された。

$$S(M) = a M + b \quad (a, b: \text{定数})$$

表 3 に得られた近似定数と算出された脱型強度 12 N/mm² を得るための積算温度、養生温度が 10℃および 20℃とした場合の必要な養生時間を示す。近似定数で強度増進率に相当する傾き a は AC 添加量ではなくスラグ置換率に依存し、強度発現開始時期に関連する切片 b は AC 添加率で増加することが確認された。脱型強度到達時間に関して、養生温度 10℃の場合スラグ 30%置換でも AC を 4%添加と 17.6 時間で脱型強度に到達することが試算された。さらに CO₂ 排出量削減で、より効果の大きいスラグ 50%置換の場合においても、20℃養生では 17.4 時間で脱型強度に到達すると試算されることから、標準期や夏季においてはスラグを 50%置換しても AC との併用により、蒸気養生の最高温度および時間を調整できる可能性や行わないことが考えられる。なお、実際の PCa 部材の製造においては、水和発熱による内部温度の上昇が期待できる。今後、蒸気養生の積算温度との比較および実部材の温度履歴を考慮して、PCa 製造における CO₂ 排出量削減について検討していく予定である。

4. まとめ

低温環境下においてスラグを置換した早強セメントの強度発現性に及ぼす C-S-H 系硬化促進剤の効果について、PCa 製造効率を維持しつつ蒸気養生を抑制する可能性について示した。

参考文献 1) 河合研至ほか、プレキャストコンクリートの環境負荷低減策に関する検討、コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.35-44 (2014)

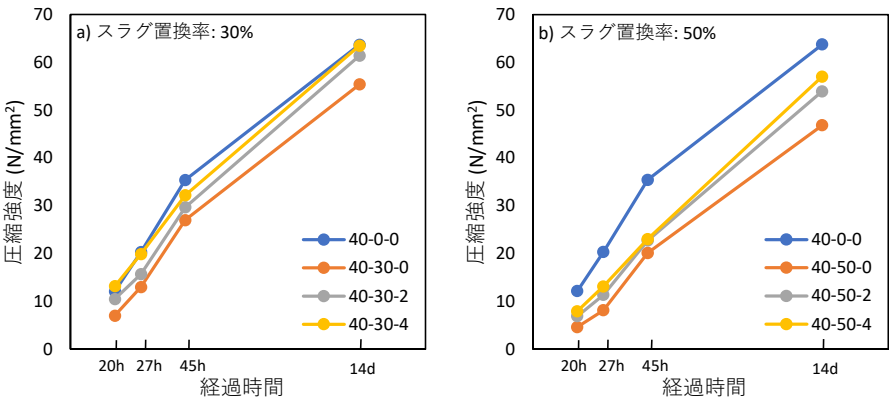


図 1 圧縮強度試験結果

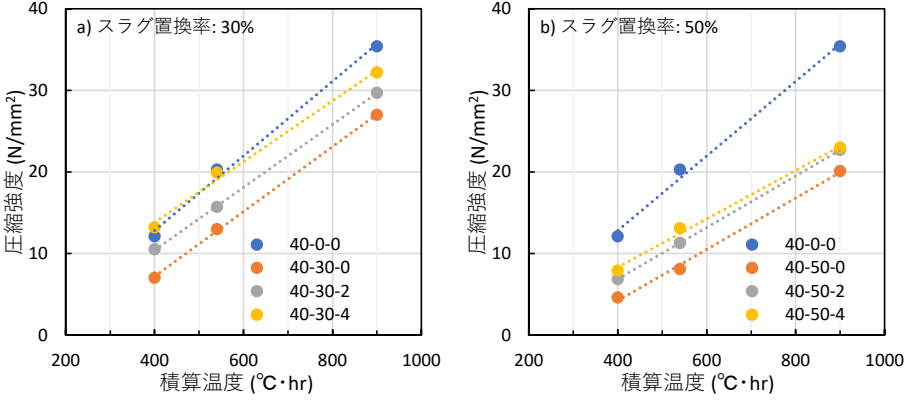


図 2 積算温度と材齢 45 時間までの圧縮強度の関係

表 3 12N/mm²到達積算温度および養生時間

記号	線形近似定数			積算温度 (℃・hr)	養生時間 (hr)	
	傾き a	切片 b	相関係数		10℃	20℃
40-0-0	0.0457	-5.41	0.9937	381	19.1	12.7
40-30-0	0.0397	-8.71	0.9996	521	26.0	17.4
40-30-2	0.0385	-4.98	0.9999	441	22.1	14.7
40-30-4	0.0372	-1.07	0.9936	351	17.6	11.7
40-50-0	0.0315	-8.36	0.9967	647	32.4	21.6
40-50-2	0.0316	-5.78	1.0000	562	28.1	18.7
40-50-4	0.0297	-3.53	0.9950	523	26.2	17.4