

論文 プレキャストコンクリートの初期強度発現性に及ぼすカルシウムサルホアルミネート系早強材の影響

田中 館 悠登*1・樋口 隆行*2・荒木 昭俊*3

要旨: プレキャストコンクリートの強度発現性におけるカルシウムサルホアルミネート系早強材 (EA) が及ぼす影響を検討した。EA の添加により、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種において、凝結促進効果および脱型強度の増加を確認した。EA 添加配合の材齢 28 日強度は、水中養生および封緘養生ともに、無添加配合と同等以上となった。養生温度 5~60 °Cにおける圧縮強度 (実測値) と、常用対数を用いた近似式で求めた推定値は強い正の相関を示し、EA を添加することにより等価材齢初期の段階からコンクリートの圧縮強度の向上を明らかにし、更に養生時間の短縮が可能な事が示唆された。

キーワード: 早強材, 高炉スラグ微粉末, プレキャストコンクリート, 等価材齢

1. はじめに

労働人口の減少にともない、建設業界においても生産性向上が喫緊の課題となっている。国土交通省は i-Construction¹⁾を掲げて省力化が進められており、現場における作業負担低減や施工期間短縮の観点から、プレキャスト製品 (部材) の使用が促進されている。一方で、プレキャスト製品においては蒸気養生時に化石燃料由来で CO₂ が排出²⁾ され、生産性向上を目的として蒸気養生温度および時間の増加を施すことによる CO₂ 排出量の増加が問題となる。

また、環境負荷低減も重要な課題で、コンクリート構造物のライフサイクルを考慮した CO₂ 排出量の低減が検討されており、炭酸化混和材³⁾、高炉スラグ微粉末 (以下 GGBS) やフライアッシュなど産業副産物を使用しセメントレスな材料^{4,5)} を使用したコンクリートの開発が進められており、その中で GGBS の置換率を高める検討が活発となっている。GGBS は普通セメントに比べて材齢初期の強度発現に時間を要するため、プレキャスト製品に適用する場合は、蒸気養生温度の上昇および養生時間を増加させるなど対策が必要となる傾向にある。そのため、蒸気養生時に使用される化石燃料の増加が課題となっている。以上の背景より、筆者ら⁶⁾ は蒸気養生温度や蒸気養生時間の短縮を目的としたプレキャスト製品向

けの早強材を開発し、普通セメント配合だけでなく GGBS の置換率が高い条件においても強度発現性を向上させることを明らかとした。

本研究では、カルシウムサルホアルミネート系の早強材がプレキャストコンクリートの凝結促進効果および材齢初期の強度発現における促進効果について評価した。更に、様々な養生温度条件での強度発現性を評価し、早強材の添加効果について検証した。

2. 実験概要

2.1 実験構成

プレキャストコンクリートの 1 日 2 回転製造の 1 回転目 (養生時間短縮条件) を想定した蒸気養生条件でカルシウムサルホアルミネート系の早強材 (以下 EA) の早期脱型効果について、コンクリート試験を実施した。養生時間短縮を目的とし、蒸気養生終了直後に脱型や吊り上げなどの後工程を実施することを想定し蒸気養生終了時点での圧縮強度に着目した。更に、セメント種や養生温度が異なる条件での EA の強度発現性効果を定量的に評価すべく、モルタル試験により検証した。

2.2 使用材料および配合

(1) 使用材料

セメントは市販の普通ポルトランドセメント (以下

表-1 材料特性

	密度 (g/cm ³)	ブレン比表 面積 (cm ² /g)	化学組成 (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
OPC	3.14	3,430	20.15	5.28	2.90	65.10	1.01	2.10	0.47
BB	3.03	3,580	25.54	8.88	2.03	55.01	3.39	1.34	0.40
GGBS	2.89	4,390	31.25	14.31	0.49	44.05	5.28	1.94	0.61
EA	2.52	2,970	2.00	1.83	0.45	50.45	0.69	21.75	1.76

*1 デンカ (株) 青海インフラ技術研究部 研究員 博士(工学) (正会員)

*2 デンカ (株) 青海インフラ技術研究部 グループリーダー 博士(工学) (正会員)

*3 デンカ (株) 青海インフラ技術研究部 部長

表-2 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AD (B%)
			W	OPC	BB	EA	S	G	
OPC	37.5	44.0	150	400	0	0	813	1039	1.3
OPC2%	37.5	44.0	150	392	0	8	812	1038	1.3
OPC4%	37.5	44.0	150	384	0	16	812	1037	1.3
OPC6%	37.5	44.0	150	376	0	24	811	1036	1.25
BB	37.5	44.0	150	0	400	0	808	1033	1.0
BB2%	37.5	44.0	150	0	392	8	808	1032	1.0
BB4%	37.5	44.0	150	0	384	16	807	1031	1.0
BB6%	37.5	44.0	150	0	376	24	806	1030	1.0

※ 結合材：B = OPC + BB + EA, スランブ：8.0 ± 2.5cm, 空気量：3.0% ± 1.5%

OPC) および高炉スラグセメント B 種 (以下 BB) を用いた。GGBS は石膏を含むタイプを用いた。カルシウムサルホアルミネート系の早強材 (以下 EA) を含めた各種材料の特性を表-1 に示す。細骨材は新潟県姫川水系の川砂 (以下 S, 密度：2.63 g/cm³, 粗粒率：2.69), 粗骨材は新潟県姫川水系の川砂利 (以下 G, 密度：2.68 g/cm³, 最大粒径：25 mm), 減水剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤 (以下 AD) を使用した。

(2) コンクリート配合と養生方法

コンクリート配合を表-2 に示す。プレキャスト製品配合を想定し、基本配合は単位水量 150kg, 単位セメント量 400 kg, 水結合材比 37.5%, 細骨材率 44.0%とした。EA はセメント置換で、8kg/m³ (2%), 16kg/m³ (4%), 及び 24kg/m³ (6%)となるように添加した。練混ぜ及び打設は 20 °C 80 %RH の環境で行った。養生は標準水中養生と最高温度を 30 及び 50 °Cの蒸気養生を施した。標準水中養生は 20°C環境下で材齢 1 日まで型枠内養生させ脱型後に水中養生した。蒸気養生の条件を図-1 に示す。60 °C を超える高温蒸気養生による、温度収縮やエトリングaitの遅延生成等を懸念し最高温度を 50 °Cとした。最高温度 50 °Cに対して、蒸気養生時のエネルギー削減を試み、最高温度 30°Cについても実施した。注水から脱型までの時間短縮のため前養生を 20 °Cで 1.5 時間とし 20 °C/時間の昇温速度で昇温し、30 及び 50 °Cまで昇温させ、30 °C養生では 30 °C到達後に OPC 配合では 4 時間保持、BB 配合では 4 時間および 6 時間保持し、50 °C養生では 50 °C到達後 3 時間保持し、蒸気養生終了後自然冷却させた。蒸気養生したコンクリートについては、自然冷却後、材齢 1 日まで 20°C環境下で養生し、脱型後に 20°C封緘養生した。

(3) モルタル配合と養生方法

モルタル配合を表-3 に示す。水結合材 (OPC と GGBS の合算) 比は 0.35, 砂結合材比は 1.5 とした。OPC 単味配合および GGBS 置換率が 50 %配合の 2 種の結合材に

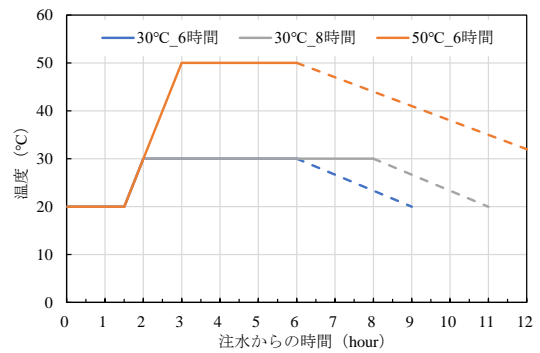


図-1 蒸気養生条件

表-3 モルタル配合 (g)

配合名	W	OPC	GGBS	EA	S
OPC	280	800	0	0	1200
OPC-4%		738	0	32	
OPC-6%		752	0	48	
B50		400	400	0	
B50-4%		384	384	32	
B50-6%		379	379	48	

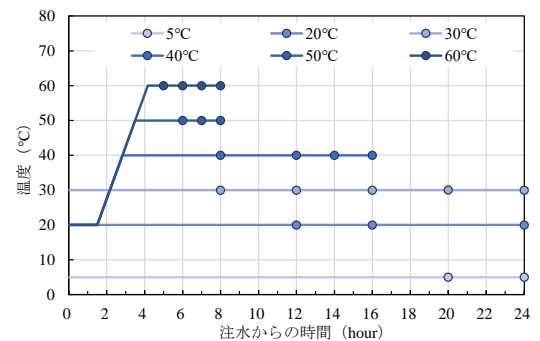
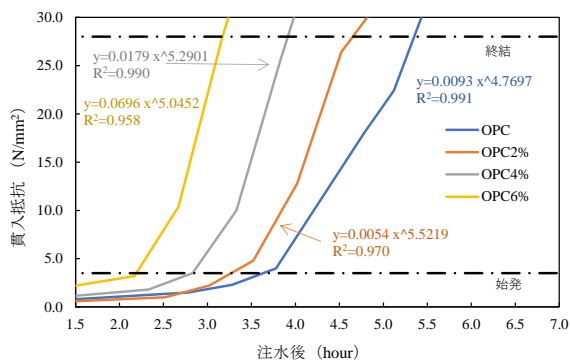
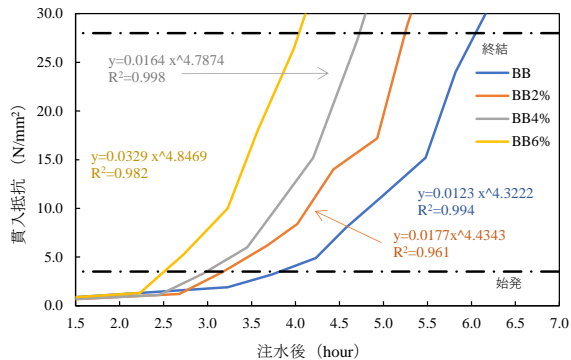


図-2 モルタル養生条件

対して、EA を結合材置換で 4 および 6 %置換となるように添加した。減水剤は結合材に対して 0.5 %添加した。各種養生温度を図-2 に示す。最高温度を 5~60 °Cの範囲で養生を施し、各凡例のプロット点で圧縮強度を測定している。5 および 30 °Cは、各種温度で 1 日以上材料を保

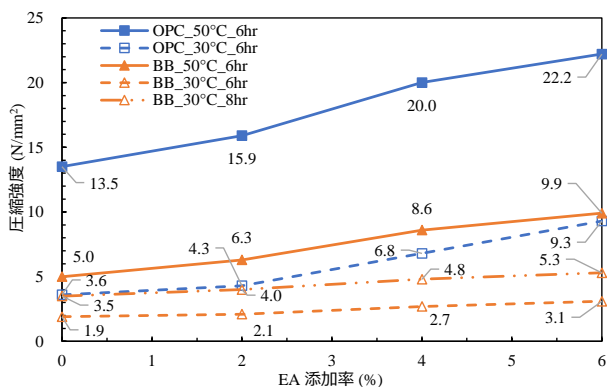


(a) OPC 配合

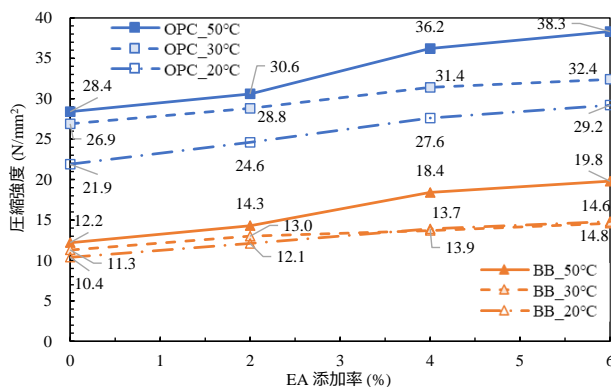


(b) BB 配合

図-3 凝結試験 貫入抵抗値



(a) 蒸気養生終了時点 (材齢 6~8 時間)



(b) 材齢 1 日時点

図-4 材齢初期強度

管し、練混ぜ直前に材料を 20℃環境に移動させ 20℃環境で練混ぜと打設を行い、打設直後に各温度で保管した。20, 40, 50 および 60℃は、20℃環境で材料の保管と練混ぜを行い各温度の養生を実施した。

2.3 試験項目

(1)コンクリートの凝結試験と圧縮強度試験

JISA 1147 に準じてコンクリートの凝結試験を行った。20℃80%RH 環境の室内で実施した。JIS A 1108 に準じて、直径：100 mm、高さ：200 mm の円柱供試体で強度測定を行った。材齢 1 日以下の場合ではアンボンドキャッピングにより強度を測定した。材齢 28 日では打設面を研磨し強度測定を行った。

(2)モルタル強度測定

モルタルの圧縮強度試験については、40×40×160 mm の供試体を作製し強度測定を行った。脱型強度測定までは型枠内養生とした。

3. 実験結果

3.1 コンクリート試験結果

(1)コンクリートの凝結試験

凝結試験における貫入抵抗値の結果を図-3 に示す。始発と終結時間は、材齢と貫入抵抗値との関係を累乗関数と仮定し、近似式と決定係数を図に示す。OPC および

表-4 材齢 28 日圧縮強度 (N/mm²)

	20℃標準 水中養生	30℃蒸気 封緘養生	50℃蒸気 封緘養生
OPC	71.1	48.9	48.0
OPC2%	70.4	50.2	49.9
OPC4%	69.9	56.5	55.5
OPC6%	76.8	57.3	59.5
BB	63.8	45.8	35.7
BB2%	66.0	45.5	38.6
BB4%	66.5	45.5	40.9
BB6%	70.0	50.8	42.3

BB の EA 無添加配合では、始発が 3.5~4.0 時間程度と差は見られなかったが、終結時間は OPC の方が 1 時間早い結果となった。EA を添加することで、OPC の場合、始発時間は添加率が 2%で 25 分、4%で 55 分、6%で 85 分短縮された。また、始発から終結までの時間も添加率が 2%で 10 分、4%で 20 分、6%で 35 分短縮された。BB の場合、始発時間は、添加率が 2%で 25 分、4%で 40 分、6%で 65 分短縮された。また、始発から終結までの時間も添加率が 2%で 15 分、4%で 35 分、6%で 50 分短縮された。以上の結果より、OPC および BB どちらにおいても EA 添加による凝結促進効果と添加率の増加による凝結の短縮効果を確認した。

(2)コンクリート圧縮強度試験

材齢 1 日までの圧縮強度と EA 添加率の関係を図-4 に示す。蒸気養生終了時点では EA の添加量が増加するほど脱型強度は高くなる結果となった。30℃蒸気養生に比べて、50℃蒸気養生の方が EA の添加率の増加による圧縮強度の増加量は大きい結果となった。50℃での EA の添加量による強度増加量は、BB に比べて OPC の方が大きくなる傾向となった。一方で、BB の 50℃では、EA 無添加に比べ EA 添加率が 2% で 1.28 倍、4% で 1.72 倍、6% で 1.96 倍となり、優位な強度発現性が生じている。30℃強度で比較すると、OPC の EA 無添加は材齢 6 時間時点では 3.6 N/mm²、BB の EA 無添加は 30℃材齢 8 時間時点で 3.5 N/mm² と EA 無添加配合の脱型強度自体は同等であるが、EA 添加による強度発現の傾きは異なった。

既往の研究⁶⁾より、EA 添加によりエトリンガイト生成とセメントおよび GGBS の反応を促進することが示唆されている。一方で、セメントに対する GGBS の置換率が高くなるほど、EA 無添加配合の強度に依存して、EA 添加配合の強度は低下する事も示唆されている。そのため、EA の強度発現性効果は、セメントと GGBS の材齢初期の反応性に依存しているため、本論文においても、BB 配合の方が、OPC 配合に比べ養生時間が長いにも関わらず、EA 添加量による増加が小さい結果となっていると考えられる。

材齢 1 日の 20℃においては、OPC では EA 無添加に比べ EA 添加率が 2% で 1.12 倍、4% で 1.26 倍、6% で 1.33 倍となり、BB では EA 無添加に比べ EA 添加率が 2% で 1.16 倍、4% で 1.33 倍、6% で 1.42 倍となり、EA の添加による強度増進効果が確認された。特に OPC と BB 共に 20℃養生で EA を 6% 添加することにより、EA 無添加 50℃養生条件と同等の圧縮強度と同等の結果となった。このことから、蒸気養生を行わない条件でも EA の使用により初期強度の発現性が向上することが確認された。蒸気養生 30℃と 50℃においても EA の添加率の増加に伴い圧縮強度が増加する結果となり、50℃の方が 30℃に比べて EA 添加による強度発現性が高い結果となった。BB 配合においては、各配合において、20℃と 30℃では大きな差はなかった。

材齢 28 日の強度を表-4 に示す。OPC および BB 配合ともに、標準養生が最も高い結果となった。OPC 配合では材齢初期の蒸気養生温度の違いによる材齢 28 日強度の変化は小さい。BB 配合の場合、蒸気養生 30℃の方が 50℃に比べて圧縮強度が高くなった。本試験範囲における各配合および各養生方法においては、EA 添加配合は無添加と同等以上の強度となった。50℃蒸気養生後に材齢 28 日まで封緘養生した条件においては、EA 添加量の増加により強度が増加する傾向となった。GGBS を使用

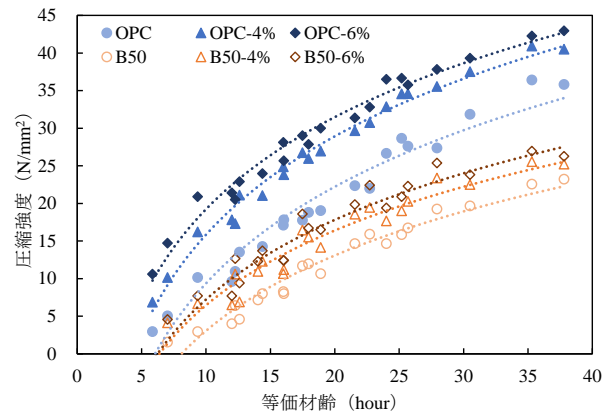


図-5 等価材齢とモルタルの圧縮強度との関係

し水中養生を施さず強度発現性に不利な条件においても、早強材がセメント内割であるにも関わらず EA の添加効果が認められた。

3.2 早強材の強度発現性に関する検討

(1) モルタル圧縮強度試験および強度推定モデル

モルタル試験の実験結果は、全ての養生条件において、OPC 配合および GGBS 置換率 50% 配合 (以下、B50) ともに EA 添加配合が、無添加配合よりも圧縮強度が高くなる結果であった。本論文では、強度発現性を積算温度 (Maturity) および等価材齢 (Equivalent age)⁷⁾ の指標から検証する事とした。等価材齢は以下式より算定した。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left\{ \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \cdot \Delta t_i \right\} \dots \dots (1)$$

$$E_a = \begin{cases} T \geq 20^\circ\text{C}, & 33.5 \\ T < 20^\circ\text{C}, & 33.5 + 1.47(20 - T) \end{cases} \dots (2)$$

ここに、 t_e : 等価材齢 (hour)

T_0 : 基準絶対温度 (293K)

T_i : 養生温度 (293K)

E_a : 見かけの活性化エネルギー (kJ/mol)

R : 気体定数 (8.314J/(K·mol))

Δt_i : 養生温度が T_i であった時間 (hour)

見かけの活性化エネルギーについては、Hansen⁷⁾が提案したセメントの活性化エネルギーを使用して算出した。配合ごとに各指標と強度の相関係数について求めると、積算温度では 0.34~0.69、等価材齢では 0.93~0.98 であったため、相関係数の高い等価材齢を評価指標として採用した。等価材齢と圧縮強度の実測強度 (プロット) および推定強度 (破線) の関係を図-5 に示す。相関係数の算出は Python ライブラリの SciPy を使用して求めた。以降に示す解析等に関しても SciPy を用いた。等価材齢が積算温度よりも相関性が高い要因としては、積算温度は -10℃を基準として温度変化の影響を線形で考慮しているのに対し、等価材齢は Arrhenius 則に基づき温度変化による水和反応 (化学反応) の変化を活性化エネルギーで評価しているため、材齢極初期のセメントの水和反応

率が低い段階での強度発現性への応答が良好であると推察される。等価材齢と圧縮強度との関係を見ると、養生温度が異なる場合でも等価材齢が同程度であれば、圧縮強度は同程度となる。EA 添加による強度増加は、OPC 配合では 7.5 時間以上から確認され、B50 配合は 10 時間以降から確認された。無添加配合と EA 添加配合の強度比は、等価材齢 25 時間以下では、強度比が 1.2 倍以上となった。このことから、等価材齢初期から EA 添加の効果が生じていると伺える。

次に、各配合の強度を推定するため、以下に示す式(3)線形近似および式(4) 常用対数近似式によりそれぞれの係数と決定係数を求めた。

$$f(t_e) = a_1 \cdot t_e + b_1 \dots \dots \dots (3)$$

$$f(t_e) = a_2 \cdot \log_{10} t_e + b_2 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $f(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²)

a_1, a_2, b_1, b_2 : 係数, 定数

その結果を表-5 に示す。線形近似と対数近似の決定係数を比較すると、EA 無添加配合は線形近似、EA 添加配合は常用対数近似の方が高くなった。この要因としては、前述の通り EA を添加することにより等価材齢 25 時間までの強度発現性が良好なため、線形より対数曲線での近似が良好であると推察する。レディーミクストコンクリートの材齢初期からの強度推定モデルとしては、等価材齢を指標として氏家ら⁸⁾はゴーラル曲線で、谷口ら⁹⁾はゴンベルツ曲線で近似することで高い精度で推定できることを示している。一方で、プレキャストコンクリートの初期強度では、菊地ら¹⁰⁾および丸山ら¹¹⁾は、常用対数や自然対数で近似することで、決定係数が 0.8 以上と高い精度で推定できることを示している。本検討は、既往の研究よりも温度域が広域であるものの、対数近似により全ての配合において決定係数が 0.93 以上となり、既往の研究と同様に高い推定精度を示した。

実測強度と対数近似式(4)により求めた推定強度との差分と養生温度の関係を図-6 に示す。縦軸は、実測強度が推定強度より高い場合は正を、実測強度が推定強度より低い場合は負を示す。OPC 配合および B50 配合ともに、5℃では実測強度と推定強度との差が大きくなる傾向にあり、等価材齢 10 時間以下でその傾向が大きい。等価材齢 10 時間以下だとセメントの水和が不十分のため、推定精度が低下すると推察される。OPC 配合の 20℃以上では、EA を添加した配合では差分の絶対値が 3 N/mm²以下と実測値と推定値との差が小さい傾向であった。GGBS 配合の 20℃以上では、温度と差分は正の相関関係の傾向となった。このことから、本解析手法では GGBS の高温における反応が過少評価されていると推察される。この要因としては等価材齢算出時の E_a (式(2)) をセメントの値で仮定していることに起因していると推察される。

表-5 解析結果

	線形近似_式(3)			対数近似_式(4)		
	a_1	b_1	R^2	a_2	b_2	R^2
OPC	1.065	-1.021	0.972	42.690	-33.322	0.952
OPC-4%	1.048	5.967	0.943	43.437	-27.585	0.986
OPC-6%	0.991	9.790	0.950	40.668	-21.433	0.974
B50	0.761	-3.367	0.966	33.284	-30.221	0.955
B50-4%	0.745	0.274	0.921	33.014	-26.555	0.935
B50-6%	0.753	1.753	0.900	33.800	-25.909	0.937

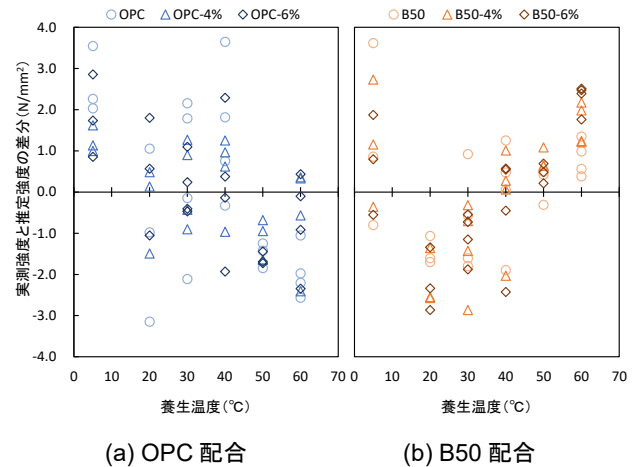


図-6 実測強度と推定強度の差分と養生温度の関係

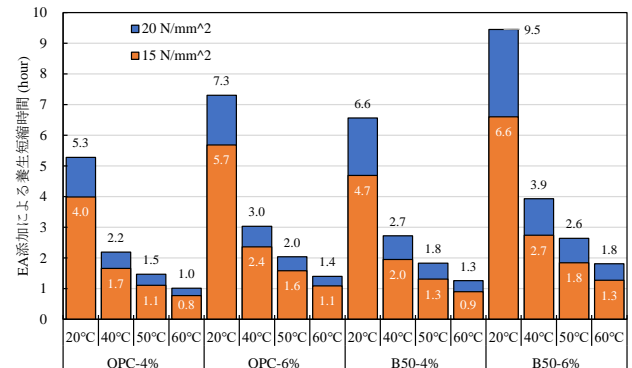


図-7 養生短縮時間

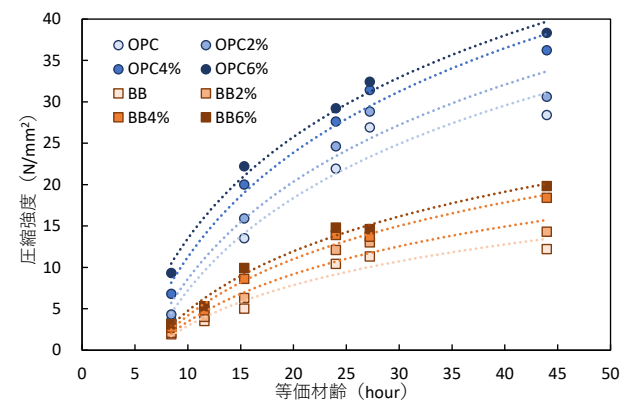


図-8 等価材齢とコンクリートの圧縮強度との関係

各種材料の精密な E_a の解明には更なる検討が必要であり、本論文では既往の手法を参照した現状の推定方法より、EA の添加効果を推量する。

等価材齢の常用対数近似式 (式(4)) より、コンクリートの圧縮強度 $10\sim 15\text{ N/mm}^2$ を想定しモルタルの圧縮強度が 15 および 20 N/mm^2 に到達する時間について算出し、EA を添加することにより、各養生温度における養生を短縮可能な時間の推定値を図-7 に示す。20℃環境においては、OPC 配合および B50 配合 EA の添加量が高くなるほど、各温度における養生時間が短縮する結果となった。60℃養生条件でも 1 時間程度の短縮が可能である事が示唆された。特に、B50 配合は OPC 配合に比べて短縮時間が大きい。このことから、EA を添加することにより、OPC だけでなく、GGBS を使用したプレキャストコンクリートの養生時間の短縮が期待できる。

(2) コンクリートの強度推定

モルタルの強度推定が良好であったため、3.1 章で実施したコンクリート試験の材齢 1 日までの圧縮強度について、モルタル試験と同様に等価材齢よりコンクリート強度の発現性を整理した。その結果を図-8 に示す。測定点数が少ないため近似の精度について議論は難しいものの、OPC 配合および BB 配合ともに対数曲線上にプロットされる傾向となった。モルタル試験と同様に、等価材齢が 15 時間程度に相当する 50℃蒸気養生 6 時間以上の養生条件で、EA 添加率が 4%以上で EA 添加による強度発現性の向上が見受けられた。一方、図-3 で示したように BB 配合の材齢 1 日 20℃と 30℃の様に等価温度と強度の関係が逆転している点も見られ、推定精度の向上が必要である。推定精度の向上には、試験点数の増加と各種材料の E_a の解明が必要であると思われる。

4. まとめ

カルシウムサルホアルミネート系の早強材がプレキャストコンクリートの凝結促進および強度発現における促進効果について評価した。

- 1) EA 添加によりコンクリートの凝結が促進する事を確認した。促進効果は OPC 配合だけでなく BB 配合においても有効であることを確認した。EA を添加することで脱型強度、材齢 1 日および材齢 28 日強度が増加する結果となった。特に、50℃蒸気養生では EA の添加による圧縮強度の増加が顕著であり、蒸気養生後は封緘養生でも圧縮強度の増加が見られた。
- 2) 養生温度 5~60℃における材齢 1 日程度までのモルタルの圧縮強度を評価し、常用対数を用いた近似式を算定した。圧縮強度と等価材齢は、相関関係が高

い事が確認され、近似式を用いて想定養生時間を算出し、EA 添加による養生時間の短縮が可能なことが示唆された。

- 3) コンクリートの圧縮強度試験結果を等価材齢で評価した結果、モルタルと同様に常用対数で近似できるような結果となり、等価材齢が 15 時間程度から EA の添加効果が見受けられた。推定精度については、更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) i-Construction 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (閲覧日: 2024 年 1 月 8 日)
- 2) 河合研至, 藤木昭宏, 赤崎大希, 徳久陽一: 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
- 3) T. Higuchi et al.: Development of a new ecological concrete with CO₂ emissions below zero, Construction and Building Materials, Vol.67, pp.338-343, 2014
- 4) 米澤敏夫ほか: エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 5) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1969-1974, 2013
- 6) 田中館悠登, 樋口隆行, 荒木昭俊: 高炉スラグ微粉末を使用したモルタルの強度発現性に及ぼすカルシウムサルホアルミネート系早強材の影響, セメント技術大会, Vol.77, pp.122-123, 2023
- 7) P. Freisleben Hansen et al.: Maturity Computer for controlled curing and hardening of concrete, Nordisk Betong, V.1, pp. 19-34, 1977
- 8) 氏家勲, 大野浩二: 各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討, 土木学会論文集, No.798, VI-68, pp. 51-61, 2005
- 9) 谷口円, 桂修, 佐川孝広, 濱幸雄: 等価材齢によるコンクリート強度推定手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.668, pp. 1745-1753, 2011
- 10) 菊地俊文, 片山行雄, 瀧論, 黒田泰弘: 現場内プレキャスト部材に用いるコンクリートのマチュリティ則に基づく初期強度発現の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.415-420, 2013
- 11) 丸山貴吉, 中嶋望, 橋本 紳一郎, 伊達 重之: プレキャストコンクリートの初期強度発現に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.577-582, 2016