

論文 低温環境下のプレキャスト製造における C-S-H 系硬化促進剤を添加した高炉スラグ含有コンクリートの適用性評価

田中 孝一^{*1}・壽上 隆司^{*2}・日宇 崇^{*3}・井元 晴丈^{*4}

要旨：低温環境下となる冬期において、C-S-H 系硬化促進剤を添加した高炉スラグ含有コンクリートを用いて実規模プレキャスト部材の試験製造を実施した。高炉スラグ含有コンクリートに C-S-H 系硬化促進剤を用いることで、冬期の環境においても蒸気養生を施さないでプレキャスト部材の製造が可能であることを示した。さらに、C-S-H 系硬化促進剤を添加し、蒸気養生を施さないで製造・作製した高炉スラグ含有コンクリートの吸水性は、無添加で蒸気養生を施したものよりも低いことを確認した。一方、高炉スラグ含有コンクリートの塩分浸透抵抗性は、C-S-H 系硬化促進剤の添加や蒸気養生の有無にかかわらず同等であった。

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

1. はじめに

我が国の生産年齢人口の減少が予想される中、建設分野においても生産性向上は避けられない課題となっている。その対策の一つとして、現場作業の効率化と工期短縮に貢献できるプレキャストコンクリート(PCa)の利用促進に関する検討が進んでいる¹⁾。また、地球温暖化への対応としてCO₂排出量の削減は重要な課題となっている。コンクリートでは原料由来のCO₂削減に、クリンカー量の低減が有効であることから、高炉スラグ微粉末(BF)など、積極的に用いられている。PCaの製造過程では、製造効率の観点から脱型可能な初期強度を早期に得るために蒸気養生は多く用いられるが、製造過程におけるCO₂の排出量の多くは、蒸気養生等の加温養生に起因している²⁾。特に、冬期では初期強度の発現が遅くなることから、生産効率の観点からも蒸気養生が必要であり、効果的に蒸気養生を抑制することができれば、CO₂排出量の更なる削減に繋がる。

筆者らは、低温環境下におけるBF含有コンクリートにC-S-H系硬化促進剤(AC)を用いることで、初期強度発現性の向上により、蒸気養生を抑制しつつ生産効率を維持できる可能性を室内試験で確認した³⁾。

本論では、低温環境下となる冬期において、ACを添加したBF含有コンクリートを用いて実規模PCa部材の試験製造を実施した。BF含有コンクリートを用いたPCa製造において、AC添加による蒸気養生の削減可能性について検証・評価した。

2. 試験概要

2.1 PCa部材

実規模PCa部材の製造試験は、冬期の2024年2月末

から3月初頭にかけて、佐賀県佐賀市の実機プラントで実施した。製造するPCa部材は、図-1に示すボックスカルバートとした。ボックスカルバートの型枠(BOX型枠)は、小口から打ち込む構造のものを使用した。

2.2 使用材料および配合

表-1に本試験で使用した材料を示す。結合材(B)は、早強ポルトランドセメント(H)と石こうが添加された(SO₃含有率3.18%)BFと石灰系膨張材(EX)を用いた。硬化促進剤は、アルカリフリーのAC⁴⁾を用いた。

表-2に使用配合を示す。水結合材比(W/B)を35%、単位EX量を20kg/m³として、Hを用いたBF0-0に対して、Hの50%をBFで置換したBF50-0と、さらに、BF50-0にACをB×4.5%添加したBF50-4.5の3種類の配合を使用した。なお、ACの添加率は、これまでの検討結果³⁾をもとに設定した。目標スランプフローおよび空気量は、

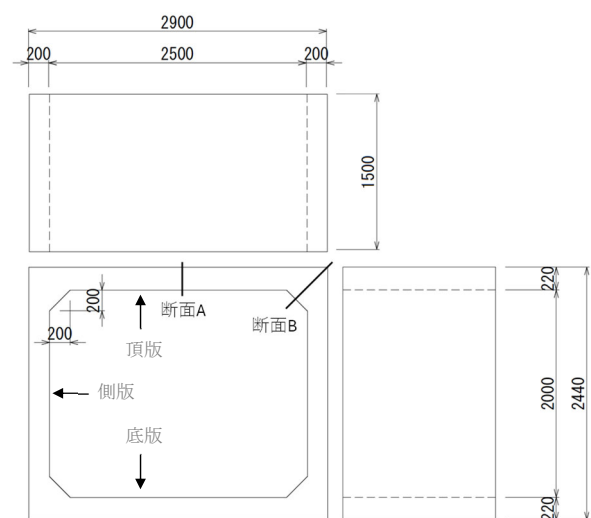


図-1 作製したPCa部材(単位:mm)

*1 (株)ヤマウ 技術本部技術研究所 所長 (正会員)

*2 (株)ヤマウ 取締役 上席執行役員

*3 (株)ヤマウ 製造本部佐賀工場品質管理グループ グループリーダー

*4 シーカ・ジャパン (株) イノベーション&サステナビリティ 博士(工学) (正会員)

それぞれ、500±100 mm および 2.0±1.5%に設定した。

2.3 コンクリート練混ぜおよび打込み

コンクリートの練混ぜは、らせんアーム式二軸強制練りミキサ（公称容量:1.25 m³）を用いた。練混ぜ量を 1 m³ として、BOX 型枠に設置した型枠振動機で外振を加えながら、3 層に分けて打込みを行った。

2.4 養生方法

BOX 型枠に打ち込んだコンクリート（PCa 部材）の養生は、以下の方法で実施した。AC を添加していない BF0-0 と BF50-0 は、BOX 型枠をシートで覆ったのち、打込み開始 2 時間後から、制御温度 40℃ の設定で 1 時間蒸気を導入した。蒸気導入終了後、自然徐冷とした。なお、本試験で使用した設備は、昇温・降温速度の制御ができないため、それらの制御は行っていない。AC を添加した BF50-4.5 については、AC 添加による蒸気養生の削減可能性を検証するため、打込み後にシートで覆うのみのシート養生を施した。蒸気養生およびシート養生を施した PCa 部材は、打込み開始から材齢 17 時間後に、シートを除去・脱型した。脱型後、屋外に静置した。

2.5 評価項目

(1) フレッシュ性状

練り混ぜたフレッシュコンクリートのスランプフロー、空気量およびコンクリート温度を、それぞれ JIS A 1150、JIS A 1128 および JIS A 1156 により測定した。

(2) 養生時温度履歴

打込み開始時から外気温、PCa 部材、強度試験用 φ 100 × 200 mm 供試体内部、シート内の蒸気養生およびシート養生時の温度を測定した。なお、熱電対には銅-コンスタンタンの T 型熱電対を使用した。PCa 部材の温度測定は、図-1 に示したボックスカルバートの頂版の断面 A と隅角部の断面 B に熱電対を設置して行った。図-2 に熱電対を設置した各断面の概念図を示す。中心部(c)と上下左右(a, b, d, e)の鉄筋部分（芯かぶり 35 mm、断面 B（隅角部）の外側に沿う主鉄筋の R 加工部である d のみ芯かぶり 50 mm）に熱電対を設置した。

(3) 試作した PCa 部材の目視観察

蒸気養生およびシート養生後の PCa 部材の目視観察を行い、ひび割れ発生状況を調査した。

(4) 圧縮強さ

PCa 部材に打込みしたものと同一バッチのコンクリートを用いて、φ 100 × 200 mm の型枠に JIS A 1132 に準じて打ち込んだ後、BOX 型枠の足場（底面より 800 mm）に

設置して PCa 部材と同一の養生（製品同一養生）を施した。材齢 17 時間で脱型後、材齢 17 時間、20 時間および 24 時間で圧縮強度を JIS A 1108 により実施した。さらに、材齢 17 時間で脱型後、材齢 14 日まで製品同一養生した供試体および材齢 28 日まで 20℃ で水中養生した供試体についても JIS A 1108 によって圧縮強度を測定した。

表-1 使用材料

材料	記号	種類・概要
水	W	地下水
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: 4,610 cm ² /g
混和材	BF	高炉スラグ微粉末 6000 石こう添加有 密度: 2.91 g/cm ³ , 比表面積: 5,540 cm ² /g
	EX	石灰系膨張材 密度: 3.17 g/cm ³
細骨材	S1	砕砂 表乾密度: 2.57 g/cm ³ 佐賀県鳥栖市川内町産
	S2	洗砂 表乾密度: 2.55 g/cm ³ 熊本県玉名郡和泉産
粗骨材	G	碎石 2005 表乾密度: 3.02 g/cm ³ 熊本県山鹿市鹿北町産
化学混和剤	SP	増粘剤含有高性能減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物と 増粘性高分子化合物の複合体
	AC	C-S-H 系硬化促進剤 アルカリフリータイプ

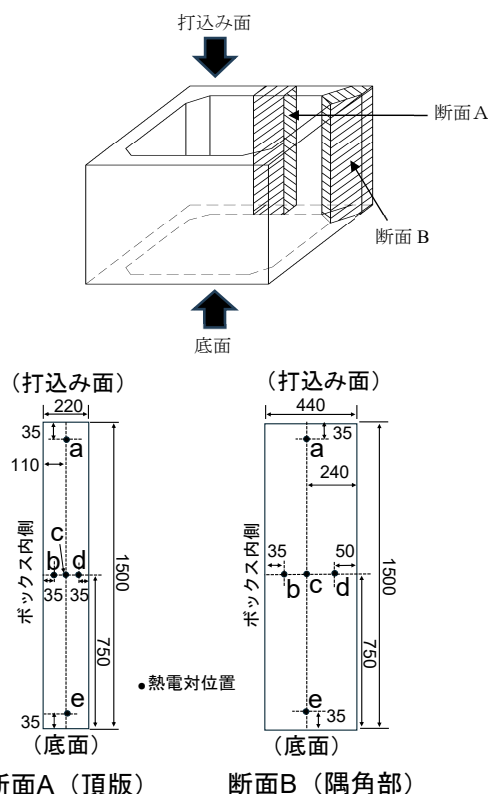


図-2 温度測定位置概念図(単位:mm)

表-2 使用配合

配合	W/B (%)	BF 置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								添加量 (B%)	
				W	H	BF	EX	S1	S2	G	SP	AC	
BF0-0	35	0	47	165	451	0	20	565	240	1,060	1.00	0.0	
BF50-0	35	50	47	165	226	226	20	560	237	1,050	0.80	0.0	
BF50-4.5	35	50	47	165	226	226	20	560	237	1,050	0.75	4.5	

(5) 吸水性

コンクリートの吸水性は、供試体を用いた JSCE-G 582 による水分浸透速度係数と製造した PCa 部材に対し林らが提案している表面吸水試験⁹⁾を実施して得られる 10 分後の表面吸水速度により評価した。

JSCE-G 582 に供する供試体は、PCa 部材に打込みしたものと同一バッチのコンクリートを用いて、 $\phi 100 \times 200$ mm の型枠に JIS A 1132 に準じて打ち込んだ後、BOX 型枠の足場に設置して、シート内にて材齢 17 時間まで養生を施し脱型まで製品同一養生条件下で静置した。材齢 1 週で型枠を脱型した後、材齢 28 日まで 20°C 、60%RH の環境下で気中養生を行った。養生終了後、供試体の打込み時の底面側端面から約 25mm 部分を切断し 20°C 、60%RH の環境下で 91 日間乾燥させた。乾燥終了後、水に浸せきする面およびその対面以外の面をアルミニウム箔テープにてシールして浸せきを開始した。浸せき試験は 20°C 、60%RH の環境下で実施し、浸せき期間は浸せきから 5 時間、24 時間および 48 時間とした。

PCa 部材の表面吸水試験は、屋外に設置して 3 か月経過後に雨掛かりの少ないボックスカルバート内側の側版の中心部で実施した。

(6) 塩分浸透抵抗性

試験に供する供試体は、JSCE-G 572 によって作製した。PCa 部材に打込みしたものと同一バッチのコンクリートを用いて、 $\phi 100 \times 200$ mm の型枠に JIS A 1132 に準じて打ち込んだ後、BOX 型枠の足場に設置して、シート内にて材齢 17 時間まで養生を施し脱型まで製品同一養生条件下で静置した。材齢 1 週で型枠を脱型した後、材齢 28 日まで 20°C 、60%RH の環境下で気中養生を行った。なお、この期間に供試体の両端から 25mm を切断し、打込み面側の切断面以外をエポキシ樹脂でコーティングした。コーティングした試料は、材齢 28 日から 24 時間、 20°C で水中養生した後、 20°C 環境下で 10%NaCl 水溶液に 6 か月間浸せきさせた。浸せきさせた試料は、JSCE-G 574 によって塩化物イオン濃度分析を行い、その結果を用いて塩化物イオンの濃度分布を作成し、塩化物イオンの見かけの拡散係数を求めた。

3. 結果と考察

3.1 フレッシュ性状

表-3 に使用したコンクリートのフレッシュ性状の測定結果を示す。いずれの配合においても、目標スランプ

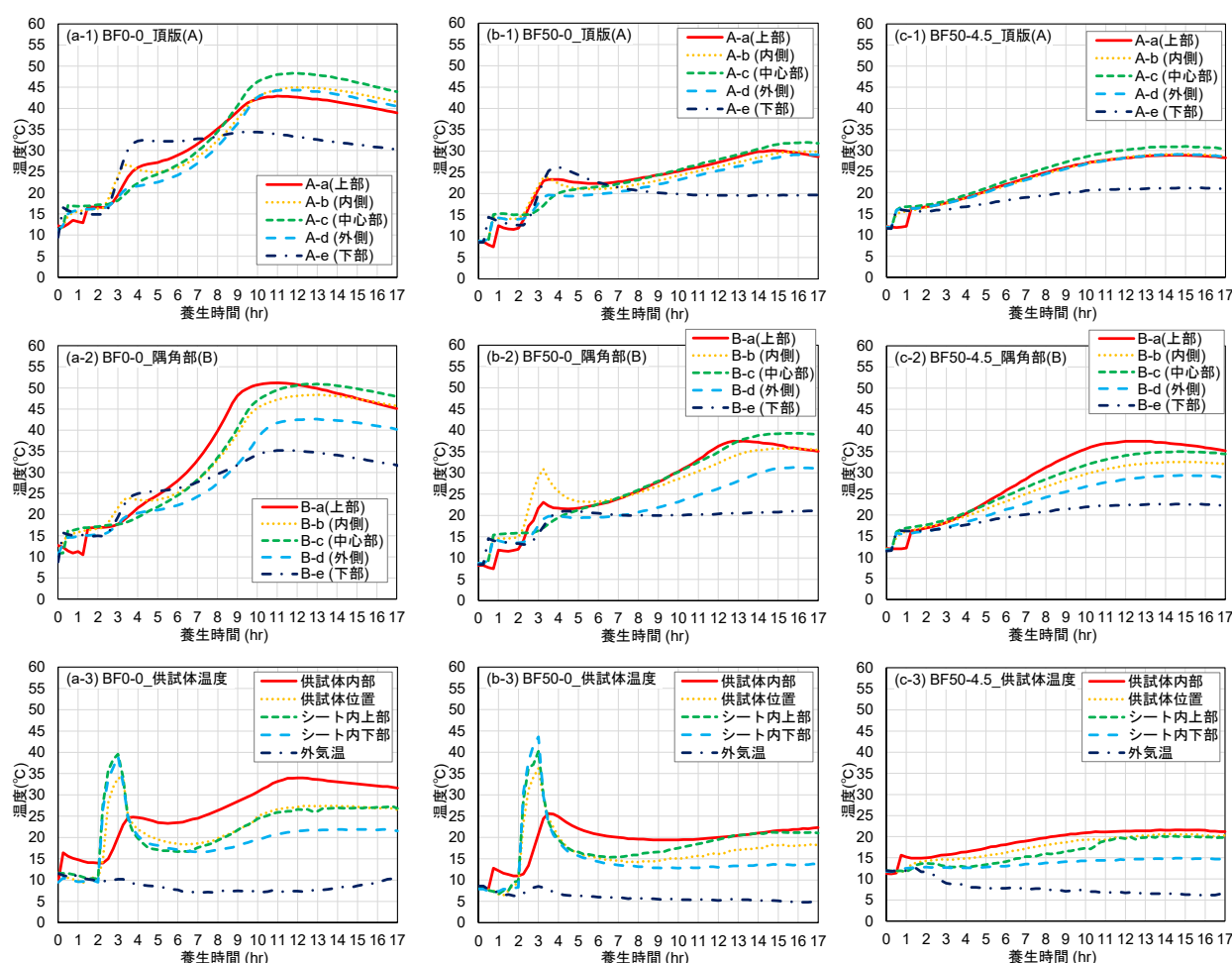


図-3 蒸気養生およびシート養生時の温度履歴

フローおよび目標空気量を満足していることを確認した。

また、練上りのコンクリート温度はいずれの配合においても $15.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ に収まっており、配合間で差がほとんどないことを確認した。

3.2 部材温度履歴

打込み開始時からの各測定箇所における温度履歴測定結果を図-3 に示す。なお、PCa 部材の各測定点や供試体内部で 0～1.5 時間で 5°C 程度の急激な温度上昇を示しているが、これは打込み開始から終了まで 30 分ほど要したことによる。PCa 部材の上部 (A-a および B-a) では、かの測定点よりも上記の温度上昇が遅れているのは、打込み面の仕上げ終了後に熱電対をコンクリートに挿入したためである。養生期間中の外気温の変動は $5 \sim 12^{\circ}\text{C}$ の間であった。17 時間の養生期間中の外気温の平均は、BF0-0 で 8.8°C 、BF50-0 で 6.0°C 、BF50-4.5 で 8.0°C であることから、試験環境条件としては同等の温度環境であったといえる。

頂版 (断面 A) と隅角部 (断面 B) の各測定点における温度履歴を比較すると、いずれの配合においても、部材の底面のかぶり部分に設置した A-e および B-e の温度が最終的に最も低くなることを確認した。これは、型枠が地面に設置されているため、熱が逃げやすいことによると考えられる。また、いずれの配合・養生条件においても、頂版のほうが隅角部よりも、熱の逃げやすい測定点の A-e、B-e を除けば、測定点の位置による温度の差が小さくなった。これは、頂版の部材厚さが隅角部より小さいことに起因するものと考えられる。また、中心部 (A-c、B-c) の比較では、いずれの養生条件においても隅角部 (B-c) のほうが最高到達温度が高くなったが、これに関しても部材厚さの影響によるものと考えられる。

蒸気養生を施した場合の PCa 部材と供試体内部の温度履歴の比較では、BF で 50% 置換されている BF50-0 のほうが、無置換の BF0-0 よりも温度上昇が緩やかで、最高到達温度も低いことが確認できる。これは、BF の置換により初期に水和発熱するクリンカー鉱物量が少ないことによると推察される。同一の BF 置換率で、蒸気養生を施した BF50-0 と AC を $B \times 4.5\%$ 添加してシート養生を施した BF50-4.5 の PCa 部材および供試体の温度履歴について比較すると、蒸気養生を施した BF50-0 で養生時間 2 時間から 6 時間にかけて、蒸気導入による影響と思われる温度上昇がみられるが、その後の温度履歴に大きな差がないことが確認できる。6 時間以降のなだらかな温度上昇は、結合材の反応に起因する発熱により生じているものと考えられることから、蒸気養生を施さないシート養生の BF50-4.5 においても、AC の作用により結合材の反応が蒸気養生を施した BF50-0 と同様に進行しているものと推察される。ここで、得られた PCa 部材内部

表-3 フレッシュコンクリートの性状

配合	スランブフロー		空気量 (%)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)
	mm×mm	平均		
BF0-0	585×585	585	1.0	15.7
BF50-0	480×455	470	1.5	14.0
BF50-4.5	530×520	525	1.3	16.0

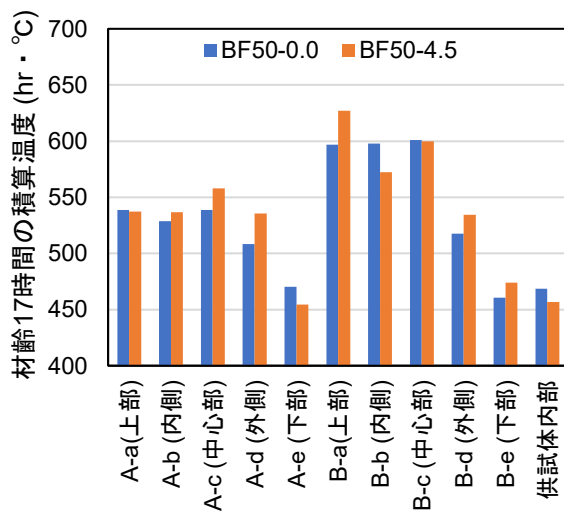


図-4 材齢 17 時間の積算温度

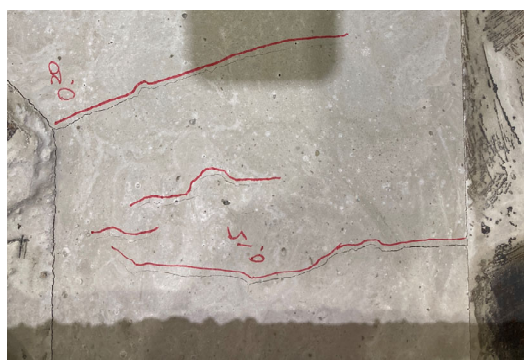


写真-1 シート養生終了後に観察されたひび割れ (BF50-4.5)

と供試体内部の温度履歴から、材齢 17 時間における積算温度を算出した。なお、積算温度 (M) は、基準温度を -10°C として以下の式により算出した。

$$M = \sum (\theta + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに、 Δt : 時間 (hr), θ : コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。積算には、打込み開始から 1.5 時間以降のデータを用いた。算出した材齢 17 時間における各温度測定位置における積算温度を図-4 に示す。蒸気養生を施した BF50-0 と AC を $B \times 4.5\%$ 添加してシート養生を施した BF50-4.5 の部材および供試体の材齢 17 時間における積算温度は、同じ測定位置の場合、蒸気養生とシート養生で差がないことを確認した。また、部材の測定位置で最も積算温度が低くなるのが部材の底面側であり、この部分が部材で最も強度が低い部分であると推察されるが、

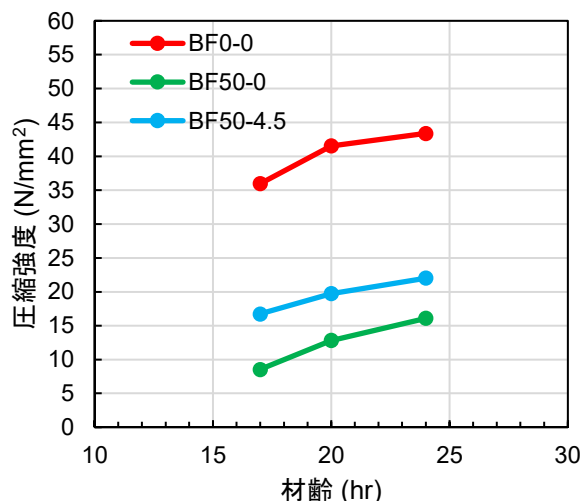


図-5 材齢 24 時間までの圧縮強度

表-4 圧縮強度 (単位: N/mm²)

配合	BF0-0	BF50-0	BF50-4.5
製品同一 14 日	70.8	46.7	59.5
標準 28 日	76.3	72.7	82.4

部材底面の積算温度は供試体の積算温度と同等であった。

3.3 部材目視観察

蒸気養生およびシート養生後の PCa 部材の目視観察を行い、ひび割れ発生状況等の調査を行った。蒸気養生を施した BF0-0 と BF50-0 では、脱型時にひび割れの発生は確認されなかったが、蒸気養生を施していないシート養生の BF50-4.5 では、写真-1 に示すように打込み面に幅 0.20mm 以下のひび割れの発生が認められた。このひび割れに関しては、シートを外した時点で観測されており、さらに、温度履歴をみても、打込み面付近と中心部で温度差はほとんどないことから、温度ひび割れの可能性は低いと考えられる。ほかの発生因子としては、BF50-4.5 では蒸気を導入していないため、均し・押さえ(仕上げ)のタイミングが早かった、または、シート養生を施したが、冬期は乾燥しやすい環境のため、コンクリートの表面の乾燥が早い時期に起こりひび割れが生じたと推察される。このようなひび割れ発生を抑制するには、仕上げのタイミングを遅らせたり、回数を増やしたり、または水分の逸散を防止するような養生剤の散布・塗布が効果的であると考えられるが、今後の検討が必要である。

3.4 圧縮強さ

図-5 に蒸気養生およびシート養生後の供試体の圧縮強度を示す。蒸気養生を施した BF0-0 および蒸気を導入しないシート養生を施した BF50-4.5 は、部材の吊り上げ可能な基準の強度である 12 N/mm² を材齢 17 時間で満足していることを確認した。その一方、蒸気養生を施した BF50-0 は、材齢 17 時間で基準を満足せず、12 N/mm² 以上を得るためには、材齢 20 時間まで待つ必要があっ

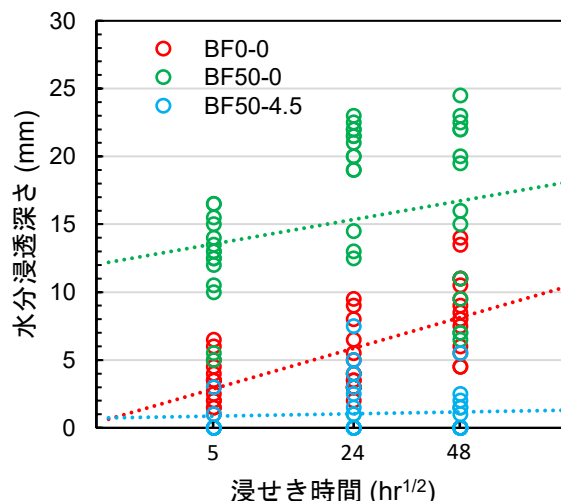


図-6 浸せき時間と水分浸透深さの関係

表-5 水分浸透速度係数 (JSCE-G 582)

配合	BF0-0	BF50-0	BF50-4.5
水分浸透速度係数 (mm/hr ^{1/2})	1.12	0.67	0.08
定数 B (mm)	0.38	12.0	0.64

表-6 表面吸水速度

配合	BF0-0	BF50-0	BF50-4.5
表面吸水速度 at 10min (mL/m²/s)	0.018	0.155	0.057

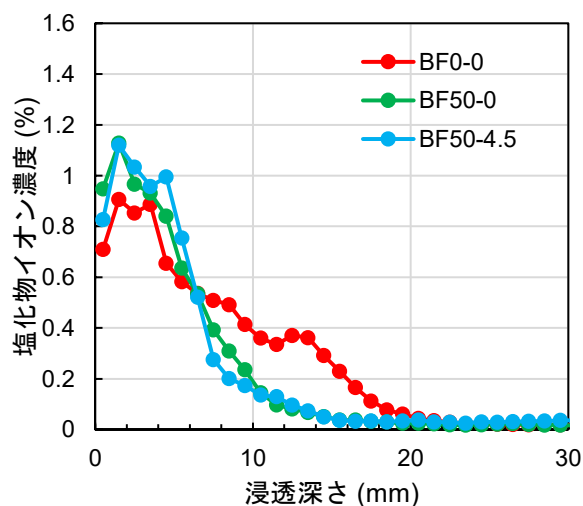


図-7 塩化物イオン濃度と浸透深さの関係

表-7 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

配合	BF0-0	BF50-0	BF50-4.5
拡散係数 (cm²/y)	1.10	0.45	0.45

た。なお、3.2 で示したように、材齢 17 時間の積算温度は BF50-0 と BF50-4.5 で同等であった。積算温度が同等にも関わらず圧縮強度に差が出ている原因については、AC を添加した場合、その結合材の反応促進効果により無添加のものに比べて同一材齢・同一積算温度において圧縮強度が高くなることが報告⁴⁶⁾されており、今回の試

験においても AC による結合材の反応促進効果に起因するものと考えられる。

表-4 に材齢 17 時間で脱型後、材齢 14 日まで養生した供試体（製品同一 14 日）と材齢 28 日まで 20℃で水中養生した供試体（標準 28 日）の圧縮強度を示す。試作した部材の設計基準強度（製品同一 14 日）は 45 N/mm²であるが、いずれの配合においても満足していることを確認した。また、蒸気養生を施していない BF50-4.5 のほうが、蒸気養生を施した BF50-0 よりも圧縮強度は高くなった。この理由としては、蒸気養生をしないことによる組織の損傷⁷⁾の低減や AC の添加による長期的な強度増進効果⁴⁶⁾によるものと推察される。

以上のことから、低温環境下となる冬期において BF で 50%置換した H を用いたコンクリートに、AC を B×4.5%添加することで、材齢 17 時間のシート内養生にて蒸気を導入しなくても脱型強度に到達可能であることが示された。

3.5 吸水性

(1) 水分浸透速度係数

JSCE-G 582 により測定した浸せき期間と水分浸透深さの関係を図-6 に、その関係により求めた水分浸透速度係数を表-5 に示す。水分浸透速度係数は、BF で置換していない BF0-0 よりも BF で置換した BF50-0 のほうが低く、AC を添加してシート養生をした BF50-4.5 で更に低い値を示した。

(2) 表面吸水速度

水分浸透性は試作した PCa 部材の雨掛かりの少ないボックスカルバート内側の側版の中心部でも確認した。表-6 に表面吸水試験により得られた 10 分後の表面吸水速度を示す。PCa 部材においては、BF0-0 が最も表面吸水速度が低くなったが、BF50-0 と BF50-4.5 の比較では BF50-4.5 で表面吸水速度が低く、水分浸透速度係数と同様の傾向を示した。なお、いずれの配合の表面吸水速度も、吸水抵抗性が「良」と判断される 0.250 mL/m²/s 以下⁹⁾であった。BF50-4.5 が BF50-0 より吸水性が低くなった原因については、蒸気養生を施さないことにより蒸気養生によって生じる微細組織の破壊⁷⁾が生じていないことや AC 添加による組織の緻密化⁹⁾の影響などが考えられるが、組織観察等による検証など、今後の検討が必要である。

3.6 塩分浸透抵抗性

図-7 および表-7 に 10%NaCl 水溶液に 6 か月間浸せきさせた供試体の塩化物イオン濃度と浸透深さの関係および塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示す。BF50-0 および BF50-4.5 では、蒸気養生および AC 添加の有無での差は見られなかった。これまで得られている強度発現性や吸水性の比較結果から、BF50-0 より BF50-4.5 の方が

物質透過性は低いと予測される。一方、塩分浸透抵抗性での差が見られなかった理由は、塩分浸透は湿潤環境における評価であることから、蒸気養生の有無で生じた微細組織の差異が湿潤環境下で類似化⁷⁾して小さくなり、それらの差が検出されにくくなったことなどが考えられるが、今後の検討が必要である。

4. まとめ

本論では、低温環境下での PCa 部材製造における AC を添加した BF 含有コンクリートの適用性について評価を行い、以下の知見を得た。

- (1) BF 含有コンクリートに AC を添加することで、気温 5～10℃の環境下においても蒸気養生を施さなくても PCa 部材を製造できることを確認した。
- (2) AC を添加し、蒸気養生を施さなくても作製した BF 含有コンクリートの水浸透速度係数は、AC 無添加で蒸気養生を施したものよりも低かった。
- (3) BF 含有コンクリートの塩分浸透抵抗性は、AC 無添加で蒸気養生を施したのものと、AC を添加して蒸気養生を施さないものでは、差が見られなかった。

参考文献

- 1) i-Construction: <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>（閲覧日：2024 年 12 月 23 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) 田中孝一，大島正記，井元晴丈：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，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，V-43，2023
- 4) 井元晴丈，Chandra Kiran Vinukonda，三森耀介，小泉信一：新規 C-S-H 系硬化促進剤を使用した高炉セメントコンクリートの凝結と強度発現性，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-301，2022
- 5) 林和彦，細田暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011
- 6) 井元晴丈，花房賢治，小泉信一，杉山知巳：C-S-H 系早強剤が高炉セメントを使用したコンクリートの強度発現性に及ぼす効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.175-180，2015.7
- 7) 住吉宏，窪山潔，今橋太一，塩谷勝：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント技術年報，Vol.35，pp.290-293，1981