

論文 C-S-H 系硬化促進剤を使用した高炉スラグ含有コンクリートの強度発現性と CO₂ 排出量に及ぼす養生方法の影響

井元 晴丈^{*1}・小泉 信一^{*1}・Chandra Kiran Vinukonda^{*2}・島田 昌宜^{*3}

要旨：C-S-H 系硬化促進剤（AC）を使用した高炉スラグ含有コンクリートの強度発現性と CO₂ 排出量削減効果に及ぼす養生方法の影響について検討した。翌日脱型を想定した材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる水結合材比は、スラグ置換率増加と蒸気養生の最高温度の低下により低くなるが、AC の添加により増加することを確認した。推定した各養生条件における材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる配合から原料由来と操業由来の CO₂ 排出量を試算し、総 CO₂ 排出量はスラグ置換率の増加により低下するが、蒸気養生温度の低減は排出量の増大を招くことを確認した。AC を添加することで総 CO₂ 排出量を低減できることが試算された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、C-S-H 系硬化促進剤、蒸気養生、水結合材比、CO₂ 排出量

1. はじめに

コンクリートの CO₂ 排出量削減対策として、セメントクリンカー使用量の削減につながる高炉セメントなどの混合セメントや高炉スラグ微粉末（GBFS）などの混和材の使用は有効である。プレキャストコンクリート（PCa）の製造においては、打設したコンクリートを早期脱型して製造効率を向上させるため、一般に蒸気養生等の加温養生が実施されている。加温養生は、PCa における CO₂ 排出量の約 20% を占めることから、蒸気養生温度の低減や蒸気導入期間の短縮あるいは蒸気導入をしない養生を適用するといった蒸気養生の低減も CO₂ 排出量削減対策として有効である。

蒸気養生の低減は、初期強度発現性の低下につながるため、水結合材比（W/B）の低減や、硬化促進剤の使用など、初期強度発現性を向上させる施策が必要となるが、W/B の低減は単位セメント量の増加、つまり原料由来の CO₂ 排出量の増加につながる。一方、我々は、C-S-H 系硬化促進剤（AC）の添加が GBFS の反応を促進し、高炉セメント B 種（BB）や C 種（BC）を使用したコンクリートの初期強度発現性を向上させることを報告している²⁾³⁾。つまり、PCa 製品の製造時に AC を使用することによって、GBFS の置換率を高め、W/B の低減を抑えつつ、蒸気養生等で使用する燃料を低減できれば、コンクリートの CO₂ 排出量の削減により効果的であると考えられる。しかし、AC を使用した GBFS コンクリートの強度発現性と CO₂ 排出量の削減効果に関する検討はこれまで行われていない。

本論では、AC を添加した GBFS 含有コンクリートの強度発現性に及ぼす蒸気養生の温度条件について検討した。PCa 製品を製造する際に前日午後に打込みしたもの

表-1 実験水準

記号	B (%)		AC (B×%)	W/B (%)			
	N	GBFS		45	40	35	30
N0	100	0	0	○	○	○	○
BB0	60	40	0	○	○	○	○
BB4	60	40	4.0	○	○	○	○
BC0	30	70	0	-	○	○	○
BC4	30	70	4.0	-	○	○	○

表-2 使用材料

材料	記号	種類および物理的性質
水	W	上水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³ , 比表面積 3,240 cm ² /g
混和材	GBFS	高炉スラグ微粉末 密度 2.89 g/cm ³ , 比表面積 4,510 cm ² /g
細骨材	S	大井川水系陸砂 表乾密度 2.59 g/cm ³ , 吸水率 1.94 %
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.62 % 最大寸法 20 mm
高性能減水剤	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 アルカリフリータイプ

を翌日朝に脱型することを想定し、その脱型材齢を材齢 17 時間と設定した。さらに、脱型に必要な強度を一般的に吊り上げ可能な強度といわれている 12 N/mm² として脱型時にその強度を達成していれば脱型可能と想定した。これらの想定を基に、実験により得られた強度発現性から材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる条件を整理した。さらに、材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる条件におけるコンクリートの CO₂ 排出量を試算することで、AC 添加による GBFS 含有コンクリートの蒸気養生温度の低減

*1 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）

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

*3 シーカ・ジャパン（株） イノベーション&サステナビリティ

表-3 使用したコンクリートの配合とフレッシュ性状

配合	W/B (%)	GBFS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					添加量 (B×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
				W	N	GBFS	S	G	SP	AC			
N0-45	45.0	0	43.8	165	367	0	793	1,048	0.850	0.0	18.5	1.3	20
N0-40	40.0	0	42.6	165	413	0	756	1,048	0.750	0.0	19.5	1.7	20
N0-35	35.0	0	41.1	165	471	0	708	1,048	0.750	0.0	20.0	1.3	20
N0-30	30.0	0	38.7	165	550	0	643	1,048	0.725	0.0	18.0	1.4	20
BB0-45	45.0	40	43.5	165	220	147	782	1,048	0.750	0.0	19.5	1.1	20
BB0-40	40.0	40	42.2	165	248	165	743	1,048	0.750	0.0	20.0	1.3	20
BB0-35	35.0	40	40.5	165	283	189	693	1,048	0.700	0.0	19.0	1.6	20
BB0-30	30.0	40	38.1	165	330	220	627	1,048	0.725	0.0	18.5	1.0	20
BB4-45	45.0	40	43.5	165	220	147	782	1,048	0.700	4.0	18.0	1.5	20
BB4-40	40.0	40	42.2	165	248	165	743	1,048	0.700	4.0	19.5	1.6	20
BB4-35	35.0	40	40.5	165	283	189	693	1,048	0.700	4.0	19.5	1.2	20
BB4-30	30.0	40	38.1	165	330	220	627	1,048	0.675	4.0	19.0	1.3	20
BC0-40	40.0	70	41.9	165	124	289	734	1,048	0.725	0.0	18.0	1.7	20
BC0-35	35.0	70	40.2	165	141	330	683	1,048	0.700	0.0	19.0	1.1	20
BC0-30	30.0	70	37.7	165	165	385	614	1,048	0.725	0.0	18.0	1.0	20
BC4-40	40.0	70	41.9	165	124	289	734	1,048	0.500	4.0	19.5	1.4	20
BC4-35	35.0	70	40.2	165	141	330	683	1,048	0.600	4.0	19.0	1.5	20
BC4-30	30.0	70	37.7	165	165	385	614	1,048	0.625	4.0	18.0	1.1	20

と CO₂ 排出量削減効果について議論した。

2. 実験概要

2.1 実験水準

表-1 に実験水準を示す。本実験では、結合材 (B) における普通ポルトランドセメント (N) に対する GBFS 置換率を、N 単独で無置換の 0% と、BB を想定した 40% および BC を想定した 70% に設定した。AC 添加率は、GBFS で置換した B に対して、0% および 4.0% とした。W/B は、45, 40, 35 および 30% を基本としたが、GBFS 置換率 70% の BC0 と BC4 については、初期強度発現性が低いことが予想されたため 40, 35 および 30% と設定した。

2.2 使用材料

表-2 に本実験で使用した材料の種類および物理的性質を示す。AC はアルカリフリータイプ³⁾を用いた。

2.3 コンクリート配合およびフレッシュ性状

表-3 に本実験で使用したコンクリートの配合とフレッシュ性状を示す。使用したコンクリートは、目標スランブを 18±2.5 cm、単位水量 165 kg/m³、単位粗骨材量を 1,048 kg/m³ とした。また、目標空気量は、凍結融解作用を受けない PCa を想定し、かつ、圧縮強度への影響を少なくすることを目的で 2.0% 以下とした。SP 添加量で、目標のフレッシュ性状が得られるように調製した。SP および AC は単位水量の一部として質量置換で添加した。コンクリートの練混ぜは環境温度 20 °C で実施した。コンクリートは、容量 55L の 2 軸強制練りミキサを用いて、材料を一括で 90 秒練り混ぜた。得られたコンクリートは、練混ぜ直後にスランブ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128) およびコンクリート温度 (JIS A 1156) の測定を行い、目標のフレッシュ性状が得られていることを確認し

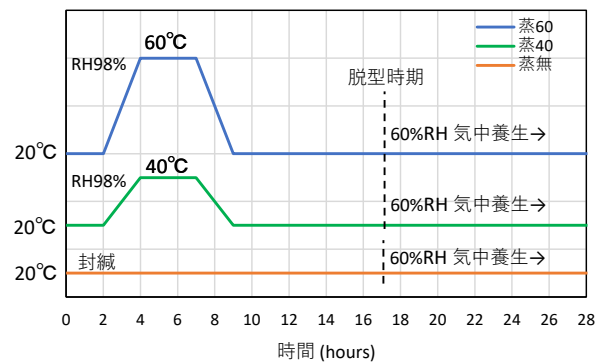


図-1 養生方法

表-4 各配合に適用させた養生条件

配合	蒸 60	蒸 40	蒸 無
N0-45	○	-	-
N0-40	○	-	-
N0-35	-	-	○
N0-30	-	-	○
BB0-45	○	-	-
BB0-40	○	○	-
BB0-35	-	○	○
BB0-30	-	-	○
BB4-45	○	-	-
BB4-40	○	○	-
BB4-35	-	○	○
BB4-30	-	-	○
BC0-40	-	○	-
BC0-35	-	○	○
BC0-30	-	-	○
BC4-40	-	○	-
BC4-35	-	○	○
BC4-30	-	-	○

た。

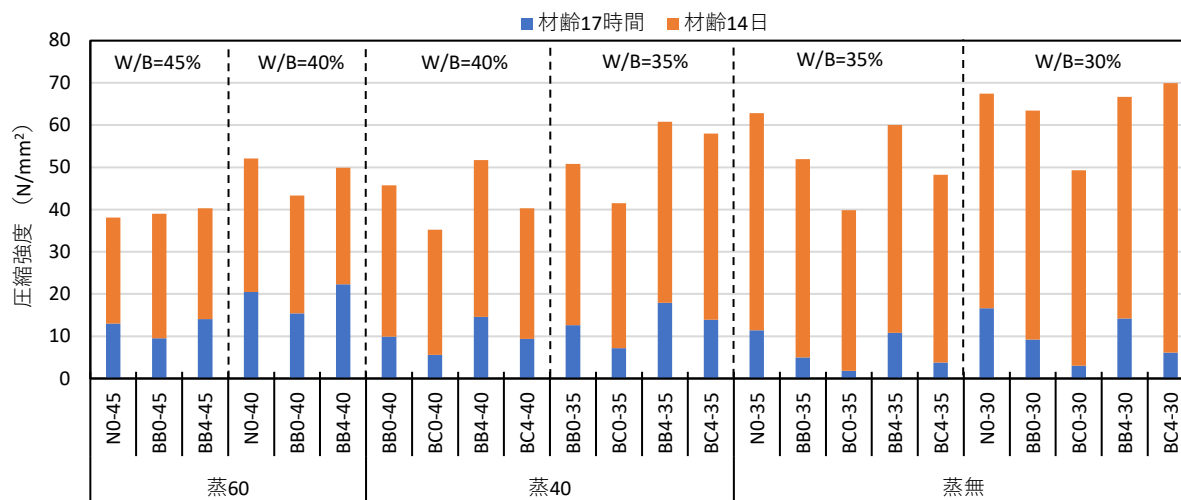


図-2 各種養生方法における各配合の強度発現性

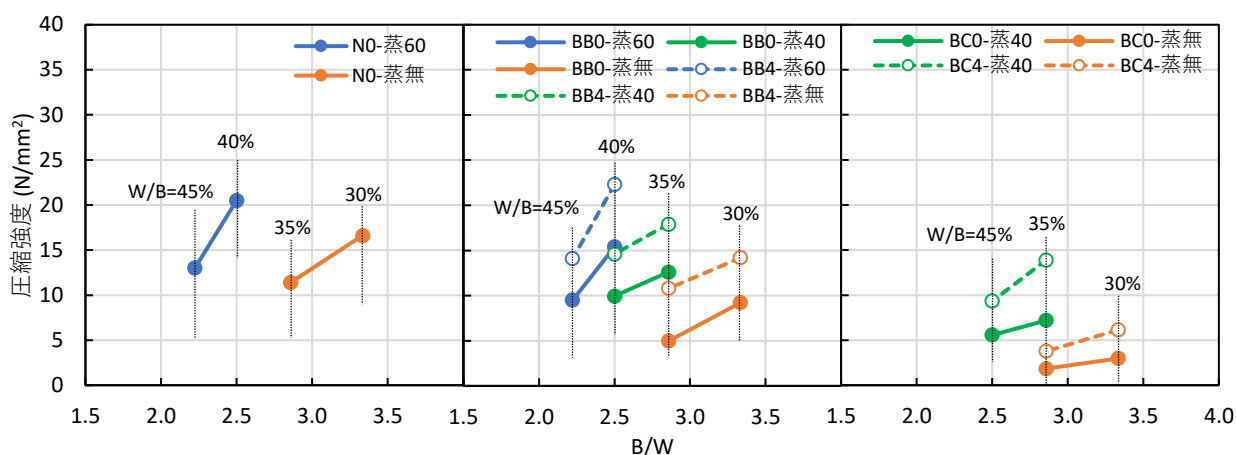


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係 (材齢 17 時間)

表-5 材齢 17 時間の線形近似曲線パラメータ a および b

	N0		BB0			BB4			BC0		BC4	
	蒸 60	蒸無	蒸 60	蒸 40	蒸無	蒸 60	蒸 40	蒸無	蒸 40	蒸無	蒸 40	蒸無
a	27.0	10.9	21.2	7.4	8.9	29.5	9.2	7.1	4.5	2.4	12.7	5.0
b	-47.0	-19.8	-37.7	-8.7	-20.5	-51.5	-8.5	-9.6	-5.6	-5.1	-22.5	-10.4

2.4 供試体の作製と各養生条件

2.3 で作製したコンクリートを用いて供試体を作製して強度発現性を評価した。φ100×200 mm の型枠にコンクリートを打ち込んだ後、図-1 に示す養生条件を表-4 に示す配合に適用させた。PCa 製品の製造を想定し最高温度を 60℃および 40℃と設定した条件（蒸 60 および蒸 40）と蒸気養生を行わない条件（蒸無）の 3 種類の養生方法を用いた。蒸 60 および蒸 40 では、打込み後 20℃で 2 時間前養生を行った後、各最高温度まで 2 時間かけて昇温させ、3 時間保持させた。それぞれの最高温度での保持時間が終了後、2 時間かけて 20℃まで降温させ、その後 20℃で保持した。蒸無は、打込み後 20℃で封緘養生した。各条件で養生した供試体は、材齢 17 時間で脱型し、20℃、60%RH の環境下で気中養生した。材齢 17

時間および材齢 14 日の圧縮強度を JIS A 1108 に準じて測定した。なお、PCa では、一般的に材齢 14 日の圧縮強度で品質管理が行われることが多いため、本実験においてもそれに倣い、材齢 14 日で圧縮強度を測定している。

3. 結果と考察

3.1 強度発現性

各養生条件における各配合の強度発現性を養生方法と W/B 毎に整理し図-2 に示す。養生方法、W/B、AC 添加量が同等の条件では、従来から言われている⁴⁾ように GBFS 置換率の増加 (N→BB→BC) に伴い材齢 17 時間の圧縮強度が低下する傾向を確認した。また、AC の添加により、いずれの養生条件、W/B においても材齢 17 時

間の圧縮強度が無添加のものより高くなる傾向が確認された。また、AC の添加による材齢 14 日の圧縮強度増進効果は、W/B が小さくなるほど高くなる傾向が見られた。

3.2 材齢 17 時間で脱型強度 12 N/mm² が得られる W/B の推定

ここで、本実験で得られた各養生方法における各配合の強度発現性の結果をもとに、各 GBFS 置換率、各養生方法で、材齢 17 時間で脱型強度 12 N/mm² が得られる W/B の推定を行った。現在でも強度推定に汎用的に使用されている、コンクリートの圧縮強度がセメント水比 (C/W) と線形近似関係にあるとするセメント水比説を適用した。なお C/W は、ここでは結合材水比 (B/W) に置き換え、圧縮強度を B/W で整理して得られた線形近似式から 12 N/mm² が得られる W/B を求めることにした。

図-3 に材齢 17 時間における GBFS 置換率、AC 添加の有無および養生条件毎の W/B と圧縮強度の関係を示す。セメント水比説に基づき、結合材水比 (B/W) と圧縮強度 S (N/mm²) の関係は、以下の式で近似される。

$$S = a \times (B/W) + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (1)$$

材齢 17 時間における W/B と圧縮強度の関係を線形近似して得られた線形近似曲線のパラメータ a および b を表-5 に示す。この線形近似曲線のパラメータを用いて、式(1)を以下のように展開して材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる W/B を求めた。

$$W/B = a / (12.0 - b) \quad (2)$$

式(2)により求められた材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる W/B を図-4 に示す。脱型強度を満足する W/B は、GBFS の置換率の増加と蒸気養生温度の低減により低下するが、AC の添加により増加する傾向がみられた。な

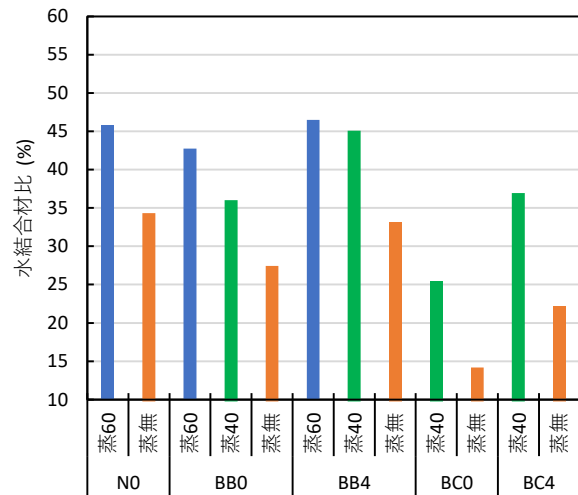


図-4 材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる水結合材比

お、求めた W/B のうち、N0-蒸 60、BB4-蒸 60、BB4-蒸 40、BB0-蒸無、BC0-蒸 40、BC0-蒸無、BC4-蒸無で外挿近似となった。その中で、BB0-蒸無、BC0-蒸無および BC4-蒸無は、W/B が 30%以下と低い値に近似されており、特に BC0-蒸無では 15%以下と非常に低い値に近似されている。いずれも一般的な PCa 製造では使用しない W/B で現実的なものではないが、CO₂ 排出量を試算して養生条件や配合条件の影響の傾向をつかむため、これらについても求めた W/B をそのまま利用して議論することにした。

3.3 材齢 17 時間で脱型強度 12 N/mm² が得られる W/B における材齢 14 日強度の推定

今回の実験においては、材齢 14 日の設計基準強度の設定は行っていないが、試算された材齢 17 時間で脱型

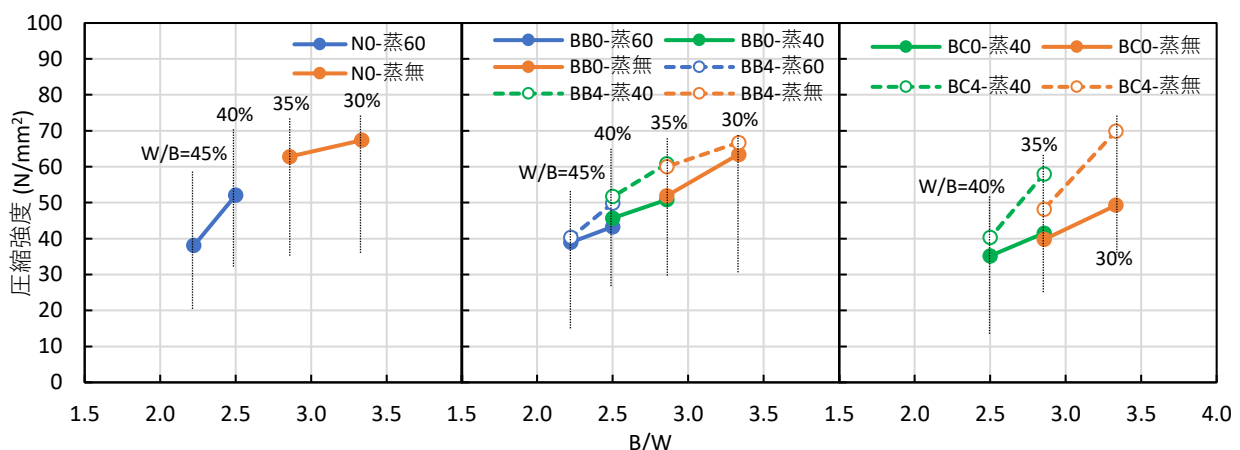
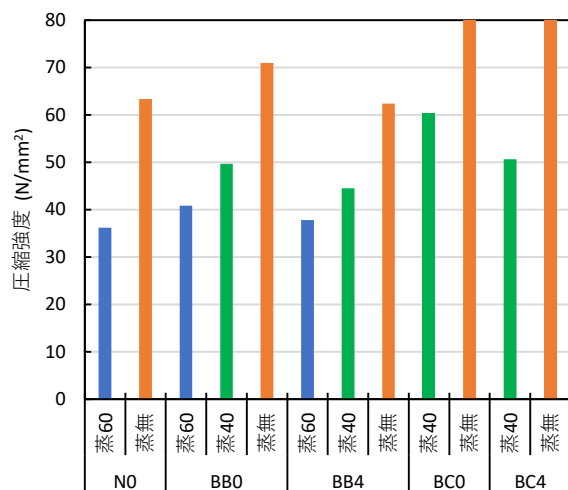


図-5 結合材水比と圧縮強度の関係 (材齢 14 日)

表-6 材齢 14 日の線形近似曲線パラメータ a および b

	N0		BB0			BB4			BC0		BC4	
	蒸 60	蒸無	蒸 60	蒸 40	蒸無	蒸 60	蒸 40	蒸無	蒸 40	蒸無	蒸 40	蒸無
a	50.4	9.7	15.5	14.3	24.2	34.6	25.5	14.1	17.6	20.0	49.6	45.6
b	-73.9	35.2	4.6	10.0	-17.1	-36.5	-12.0	19.8	-8.9	-17.2	-83.6	-82.0



図－6 脱型強度が得られる水結合材比の配合で試算される材齢 14 日の圧縮強度

強度 12 N/mm^2 が得られる W/B における、材齢 14 日強度についても推定を行った。図－5 に B/W と材齢 14 日の圧縮強度の関係を、表－6 に材齢 14 日における B/W と圧縮強度の関係を線形近似して得られた線形近似曲線のパラメータ a および b をそれぞれ示す。材齢 17 時間で 12 N/mm^2 が得られる W/B と表－6 のパラメータから式(1)を用いて材齢 14 日の圧縮強度を試算した。その結果を図－6 に示す。いずれの条件においても、材齢 14 日の圧縮強度は、 35 N/mm^2 以上を示した。設計基準強度が材齢 14 日で 35 N/mm^2 よりも高い値の設定であれば、材齢 14 日でそれに満たない配合は W/B の見直しを行い、設計基準強度を満足させる必要があるが、今回の場合は、設計基準強度は特に設定していないため、すべて設計基準強度を満たしているとした。

3.4 材齢 17 時間で 12 N/mm^2 が得られる配合・養生条件における CO_2 排出量の試算

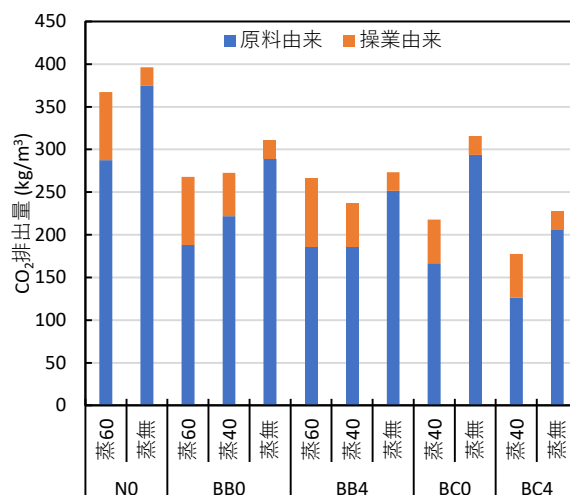
ここで、前項までに求めた、各 GBFS 置換率・AC 添加量および各養生条件における脱型強度（材齢 17 時間で 12 N/mm^2 ）を満足する W/B から、各条件における配合と CO_2 排出量を試算した。なお、配合の条件は、単位水量 165 kg/m^3 、単位粗骨材量を $1,048 \text{ kg/m}^3$ として、求めた W/B から各 GBFS 置換率における結合材量と単位細骨材量を算出した。得られた各単位量（表－7）に表－8 に示す CO_2 原単位を掛けることで、原料由来の CO_2 排出量をコンクリート 1m^3 当たりの質量として求めた。さらに、各配合における養生条件により操業由来の CO_2 排出量を次のように設定した。すなわち、河合らの報告¹⁾を参考に、最高温度 60°C の条件で養生する場合（蒸 60）の操業由来の CO_2 排出量を 80 kg/m^3 とし、さらに蒸気養生を施さない場合（蒸無）で、 22 kg/m^3 とした。なお、最高温度 40°C で蒸気養生する蒸 40 については、蒸 60 と蒸無の中間の CO_2 排出量（ 51 kg/m^3 ）とした。

表－7 材齢 17 時間で 12 N/mm^2 が得られる配合条件

		W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
				W	N	GBFS	S	G	AC
N0	蒸 60	45.8	44.0	165	361	-	799	1,048	-
	蒸無	34.3	40.8	165	480	-	700	1,048	-
BB0	蒸 60	42.7	43.0	165	232	154	766	1,048	-
	蒸 40	36.0	40.9	165	275	183	705	1,048	-
	蒸無	27.4	36.4	165	361	241	583	1,048	-
BB4	蒸 60	46.5	43.8	165	213	142	792	1,048	14.2
	蒸 40	45.1	43.5	165	220	146	783	1,048	14.6
	蒸無	33.1	39.7	165	299	200	670	1,048	20.0
BC0	蒸 40	25.5	34.2	165	194	454	528	1,048	-
	蒸無	14.2	7.0	165	349	815	77	1,048	-
BC4	蒸 40	36.9	40.9	165	134	313	704	1,048	17.9
	蒸無	22.2	30.4	165	223	521	444	1,048	29.8

表－8 CO_2 排出原単位

原料	記号	CO_2 原単位 ($\text{kg-CO}_2/\text{MT}$)
ポルトランドセメント	C	$766.6^{1)}$
高炉水砕スラグ微粉末	GBFS	$26.5^{1)}$
粗骨材	S	$2.9^{1)}$
細骨材	G	$3.7^{1)}$
C-S-H 系硬化促進剤	AC	528



図－7 CO_2 排出量試算結果

図－7 に結合材・AC 添加量および各養生条件における脱型強度（材齢 17 時間で 12 N/mm^2 ）を満足する W/B から、各条件における CO_2 排出量を試算した結果を示す。それぞれの条件で蒸気養生の最高温度を低減させると、操業由来の CO_2 排出量が低下するのが分かる。ただし、GBFS 置換率が 40% で AC を B×4% 添加している BB4 以外の条件では、原料由来の CO_2 排出量が高くなり、コンクリートの総量としての CO_2 排出量が増加することが試算された。また、BB で AC の添加の有無で比較した場合、最高温度 60°C の養生を施す蒸 60 では AC 添加にかかわらず総 CO_2 排出量は同等であると試算されたが、最高温度が低い蒸 40 および蒸無の条件では、AC の添加により総 CO_2 排出量が低下することが確認された。また、

BCにおいても同様に、蒸 40 および蒸無の条件で、AC の添加により CO₂ 排出量が低下することが確認された。

今回の試算で使用した実験条件では、N をベースセメントとして用いているため、初期強度発現性が低く蒸気養生温度を低下させた場合、特に AC 無添加の配合条件において、近似曲線の外挿による計算が必要になり、かつ、すでに述べたように求めた W/B も現実的な配合となっていないものも含まれている。よって、早強ポルトランドセメントなどをベースセメントとして使用して初期強度発現性を向上させることにより、GBFS 置換率を増加させてさらに蒸気養生を低減させた場合の CO₂ 排出量の試算がより現実的な配合で実施できると考えられることから、今後の課題として検討する予定である。

4. まとめ

本論では、AC を添加した GBFS 含有コンクリートの強度発現性と CO₂ 排出量削減効果に及ぼす養生条件の影響について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) GBFS 含有コンクリートの強度発現性は、GBFS の置換率の増加と蒸気養生温度の低減により低下するが、AC を添加することにより向上させることができる。
- (2) 得られた強度発現性から求めた、翌日脱型を想定した材齢 17 時間で 12 N/mm² が得られる W/B は、GBFS の置換率の増加と蒸気養生温度の低減により低下するが、AC の添加により増加した。

- (3) 脱型強度が得られる W/B をもとに、コンクリートの CO₂ 排出量を試算し、総 CO₂ 排出量は、GBFS 置換率の増加により低下するが、養生温度の低減は W/B の低下により総 CO₂ 排出量の増大を招くこと、さらに AC を添加することで総 CO₂ 排出量を低減できる結果を得た。

参考文献

- 1) 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, 2014.1
- 2) 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
- 3) 井元 晴丈, 小泉 信一, ビヌコンダ チャンドラキラン, 島田 昌宜: C-S-H 系硬化促進剤を使用した高炉水砕スラグ高含有コンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1309-1314, 2024
- 4) 小林 一輔, 魚本 健人, 嶋 文雄: 高炉水砕スラグ粉末のコンクリート混和剤としての使用方法に関する研究, コンクリート工学, Vol.17, No.5, pp.10-18, 1979.5