

論文 炭酸化混和材量と前養生期間が高炉スラグ高含有コンクリートの硬化特性に及ぼす影響と CO₂ 固定量に関する検討

藤田 和希*1・山口 健輔*2・金沢 智彦*3・江口 康平*4

要旨：本研究は、高炉スラグ微粉末高含有コンクリートに加熱養生と炭酸化養生を施した際の、炭酸化混和材 (γ -C₂S) の量および炭酸化養生前の前養生期間が硬化特性に及ぼす影響と、それらの CO₂ 固定量について検討を行った。その結果、 γ -C₂S は添加量を増加させることで圧縮強度が向上し、炭酸化部における CO₂ 固定量も増加することがわかった。前養生は、その期間を延ばすことで圧縮強度と CO₂ 固定量が増加した。

キーワード：高炉スラグ微粉末, γ -C₂S, 前養生期間, 炭酸化養生, 圧縮強度, 加熱養生, CO₂ 固定量

1. はじめに

近年、地球温暖化の要因の一つである二酸化炭素の排出量の削減が急務となっており、各業界において脱炭素社会に向けた研究が活発に行われている。

セメント・コンクリート分野においては、セメントを 1t 製造する際に、エネルギー・原料由来で約 800kg の CO₂ を排出するとされている¹⁾。この CO₂ 削減の対策として、セメント使用量を低減することが効果的であり、CO₂ 排出量が少ないとされる高炉スラグ微粉末を混和材として高含有させた、コンクリートの開発が進められてきた²⁾。また、CO₂ をコンクリートに吸収・固定する技術の一つに、炭酸化混和材 (γ -C₂S) の使用がある。この γ -C₂S は、水和反応はしないものの、CO₂ と反応して生成するカルサイトやバテライトが硬化体組織の空隙を埋めて緻密化することにより、モルタルやコンクリートの圧縮強度が増進することが報告されている³⁾。

最近では、より多くの CO₂ 削減を目的とし、高炉スラグ微粉末の高含有による CO₂ 削減技術と、CO₂ をコンクリート中に固定する技術を組み合わせたコンクリートや CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料を使用したコンクリートの開発が進められている⁴⁾。

筆者らは、脱型強度確保のため加熱養生を初期に行うプレキャストコンクリートを対象として、高炉スラグ微粉末高含有セメントと炭酸化混和材を用いて、炭酸化養生を行うことで、強度発現性や耐凍害性が向上するといった知見を得た⁵⁾。本研究では、 γ -C₂S を主成分とする炭酸化混和材の量および前養生期間が、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの硬化特性に及ぼす影響と CO₂ の固定量について基礎的な検討を行った。 γ -C₂S 添加量の検討を Case1、炭酸化養生前の加熱養生と封緘養生を含む前養生期間の検討を Case2 として報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリート調(配)合

コンクリートの使用材料を表-1 に、試験に用いたコンクリートの調(配)合とフレッシュ性状を表-2 に示す。コンクリートには、高炉スラグ微粉末を 65% 含有させた JIS R 5211 高炉セメント C 種に適合する試製セメントを使用した。また、炭酸化混和材 (γ -C₂S) は、セメントの外割 0, 10, 20% を細骨材 S に置換した。コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ 18.0±2.5cm、空気量 4.5±1.0% を目標値として、化学混和剤(高性能減水剤, AE 剤, 消泡剤)の添加量で調整した。

2.2 Case1, 2 における養生条件と検討水準

供試体の養生は、成形後型枠存置のまま加熱養生を行い、脱型後各種環境条件下に所定の期間保管した。加熱養生は、コンクリートの成形後、型枠に入れた状態で、恒温恒湿槽を用いて行った。加熱養生条件を図-1 に示す。加熱養生の条件は、前置きを 20℃, 60%RH で 2 時間, 17.5℃/h で昇温, 最高温度を 55℃, 95%RH で 6 時間保持し, 17.5℃/h で降温, その後 20℃, 60%RH で 12 時間静置とした。また、炭酸化養生は、高濃度中性化促進

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	主な物性
水	W	水道水
セメント	BC	高炉セメント C 種 密度 2.99 g/cm ³ SO ₃ 量 3.10%
混和材	γ	炭酸化混和材(主成分 γ -C ₂ S) 密度 3.09 g/cm ³
細骨材	S1	苦小牧錦岡産陸砂 密度 2.67 g/cm ³
	S2	白老敷生川産砕砂, 安山岩, 密度 2.68 g/cm ³
粗骨材	G1	白老敷生川産砕石 1505 安山岩, 密度 2.64 g/cm ³
	G2	白老敷生川産砕石 2013 安山岩, 密度 2.65 g/cm ³
化学混和剤		高性能減水剤 (SP 剤) ポリカルボン酸系
	AE 剤	陰イオン界面活性剤
	消泡剤	ポリアルキレングリコール系

*1 日鉄セメント (株) 製品開発部 製品開発課 研究員 (正会員)

*2 日鉄セメント (株) 製品開発部 製品開発課 副主幹研究員 (正会員)

*3 日鉄セメント (株) 製品開発部 主席研究員 博士 (環境学)

*4 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ 研究主任 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調(配)合とフレッシュ性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)					添加率 (×wt%-BC)			フレッシュ試験結果		
				水 W	セメント BC	炭酸化混和材 γ	細骨材 S※1	粗骨材 G※2	SP 剤	AE 剤※3	消泡剤※3	SL (cm)	air (%)	温度 (°C)
BCγ0	55	50.1	20	162	295	0	937	915	0.25	0.20	0.05	19.0	4.8	20.4
BCγ10	55	50.1	20	162	295	29	910	915	0.25	0.15	0.05	18.5	4.8	19.9
BCγ20	55	50.1	20	162	295	59	883	915	0.25	0.15	0.05	19.0	4.7	19.8

※1 S1 と S2 を 6 : 4 の容積割合で混合した ※2 G1 と G2 を 3.5 : 6.5 の容積割合で混合した ※3 100 倍希釈液を使用した

装置を用いて、20°C、60%RH、CO₂ 濃度 80%の環境で、気中養生は 20°C、60%RH の環境で行った。

Case1 における養生手順を図-2 に示す。Case1 は、BCγ0、10、20 の水準とし、BCγ0 は加熱養生後に気中養生と炭酸化養生を、BCγ10、20 は、炭酸化養生のみを行った。

Case2 における養生手順を図-3 に示す。Case2 は、前養生期間による、高炉スラグ微粉末の水和反応や炭酸化による挙動を、明らかにすることを目的とした。この目的から、γ-C₂S の影響を受けない BCγ0 の配合で検討した。前養生期間は、加熱養生を施した材齢 1 日 (BCγ0σ1) と、加熱養生後に封緘養生を 2、6 日間行った材齢 3 日 (BCγ0σ3)、7 日 (BCγ0σ7) の 3 水準とした。BCγ0σ1、σ3、σ7 は、それぞれの前養生が終了した時点から、炭酸化養生を最長で 27 日間行った。

2.3 試験方法

Case1, 2 における試験項目と試験材齢を表-3 に示す。Case1 の試験では材齢 1, 2, 7, 28 日を試験材齢として試験を実施した。また Case2 では、前養生期間が異なる条件で試験を行うため、炭酸化養生期間を統一し炭酸化養生期間 0, 1, 6, 27 日となる材齢を試験材齢とした。

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度は、JIS A 1108 に準拠し、φ100×200mm の円柱供試体を用いた。Case1 の圧縮強度の測定は、材齢 1, 2, 7, 28 日で行い、Case2 では、炭酸化養生期間 0, 27 日で測定した。

(2) 炭酸化深さ測定

試験に用いた試料を図-4(a)に示す。コンクリートは、長手面(100×400mm)を打ち込み面として成形した。試験に用いた供試体は、加熱養生後に 100×100×400mm の供試体の長手面の 4 面をアルミテープでシーリングし、100×100mm の小口面を解放面として、Case1, 2 の各種養生を行った。試験材齢までの養生終了後、供試体を小口面から 200mm の位置で切断した後、打ち込み面から小口面に対して垂直に割裂し炭酸化深さ試験用試料とした。

炭酸化深さは、JIS A 1152 を参考に、炭酸化深さ試験用試料を割裂後、割裂面の片面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、解放面から呈色部までの 5 か所の距離の平均値とした。また、試験体数は 1 個とした。

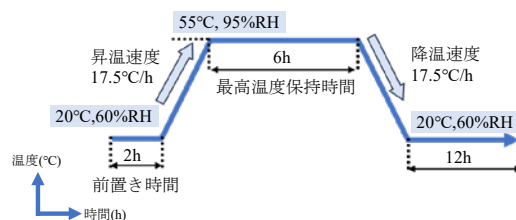


図-1 加熱養生条件

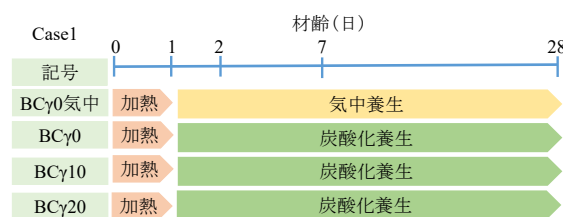


図-2 Case1 における養生手順

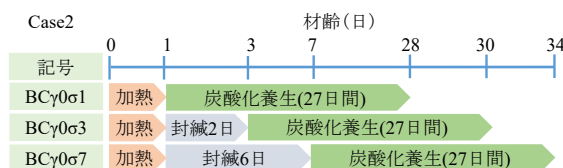


図-3 Case2 における養生手順

表-3 試験項目と試験材齢

Case	Case1				Case2											
					BCγ0σ1				BCγ0σ3				BCγ0σ7			
試験材齢 (日)	1	2	7	28	1	2	7	28	3	4	9	30	7	8	13	34
炭酸化養生期間 (日)	0	1	6	27	0	1	6	27	0	1	6	27	0	1	6	27
圧縮強度試験	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
炭酸化深さ測定	-	○	○	○	-	○	○	○	-	○	○	○	-	○	○	○
細孔径測定	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X線回折による定性分析	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
走査型電子顕微鏡観察	-	-	-	△	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-
熱分析	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○

※ ○該当全水準 △BCγ20

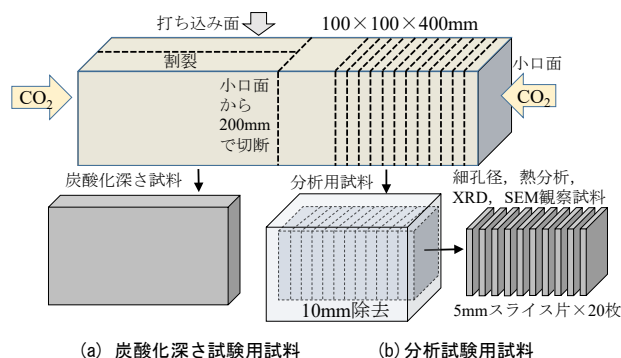


図-4 試験に用いた試料

(3) 細孔径測定

図4-(b)より分析試験用試料は、供試体の各シーリング面から 10mm 除去した中心部を用いた。その後、解放

面から厚さ 5mm にスライスし、スライス片 2 枚 1 組を 1 層として計 10 層の試料とした。1 層の厚さは、スライス時の刃厚分が 1.6mm あったため、刃厚分 2 回を併せた 13.2mm と定めた。

細孔径測定は、各層のスライス片を 5mm 角にカットした試料を用いた。作製した試料は、多量のアセトンに 24 時間浸漬し水和を停止させた。その後 45℃の乾燥機内で 24 時間乾燥させ、アセトンを気化させた後、凍結乾燥機による真空乾燥処理を行い、水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔径分布を測定した。細孔径は 2 回測定しその平均値を求めた。

(4) X 線回折による定性分析

X 線回折では、水和反応と炭酸化反応による生成物の定性分析を行った。用いた試料は、細孔径測定用試料と同様の方法で採取した 5mm 角の試料をアセトンによる水和停止処理後に、乳鉢を使用して粉碎しながら骨材を分離し、75 μ m の篩を通過した粉末試料を試験に供した。

(5) 走査型電子顕微鏡観察 (SEM)

SEM 観察では、炭酸化部と未炭酸化部の組織構造を観察するため反射電子像を撮影した。観察用試料は、細孔径測定用試料と同じものを用いた。前処理はエポキシ樹脂を包埋させ、表面をダイヤモンドペーストで研磨した。

(6) 熱分析

熱分析は、X 線回折に使用した試料を用いて、炭酸カルシウムの脱炭酸に伴う減量を測定した。測定回数は 2 回としてその平均値を求めた。測定条件は、室温から 1000℃までとし、昇温速度 20℃/min、N₂ フロー環境下 (流量 150ml/min) とした。吸収した CO₂ の測定は、既往の文献⁶⁾で用いられている脱炭酸温度範囲 550～850℃の質量変化とした。また、CO₂ の含有量は、骨材量による影響を除去するため、試料の不溶残分で補正を行い、式(1)により算出した。

$$\text{CO}_2 \text{ 含有量}(\%) = A/B \times 100 \quad (1)$$

A: 熱分析による 550℃～850℃での質量減量(mg)

B: 熱分析試料の初期質量から不溶残分を除去したペースト部分の初期質量(mg)

3. 実験結果および考察

3.1 Case1: γ -C₂S 添加量の影響

(1) 圧縮強度と炭酸化深さ

圧縮強度を図-5 に、炭酸化深さを図-6 に示す。図-5 より、BC γ 0 の圧縮強度は、気中養生と炭酸化養生で比較すると、炭酸化養生の方が低い値を示した。また、炭酸化養生を行った BC γ 10、20 の圧縮強度は、BC γ 0 に比べ、各材齢においても γ -C₂S 添加量が多いほど増加傾向を示した。材齢 28 日の圧縮強度は、BC γ 0、10、20 でそれぞれ 21.5、30.8、37.3N/mm² であった。

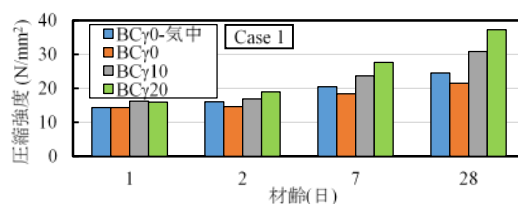


図-5 圧縮強度

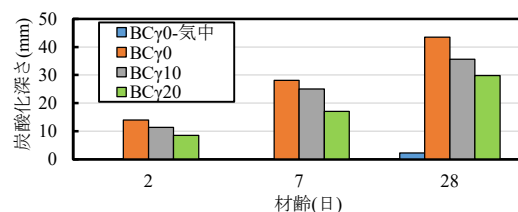


図-6 炭酸化深さ

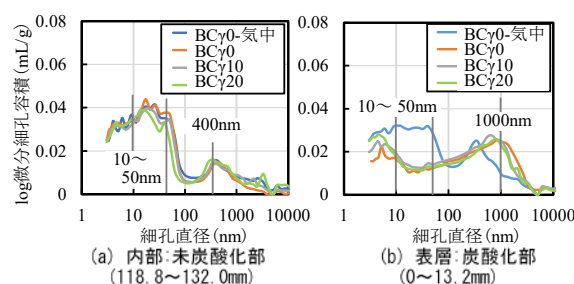


図-7 細孔径分布

炭酸化深さは、図-6 から、いずれの材齢においても、 γ -C₂S の添加量の多い水準ほど小さくなる傾向であった。材齢 28 日の炭酸化深さは、BC γ 0 気中、BC γ 0、10、20 でそれぞれ 2、43、35、30mm であった。 γ -C₂S の添加量が多い程、圧縮強度が増加したことから、 γ -C₂S と CO₂ が反応して硬化体組織が緻密化したため、炭酸化深さは小さくなったものと推察する。

(2) 炭酸化による水和組織への影響

材齢 28 日における細孔径分布を図-7 に示す。図-6 より、図-7(a) 内部(10 層目 118.8～132.0mm)は未炭酸化部、(b) 表層(1 層目 0～13.2mm)は炭酸化部と判断した。また、比較として内部と表層の BC γ 0 気中をそれぞれ図中に示した。図-7(a) より、材齢 28 日における未炭酸化部の細孔径分布は、BC γ 0 気中を含めた各水準ともに概ね同様の分布を示しており、 γ -C₂S の添加量および養生による影響は見られなかった。また、細孔径分布の特徴は、10～50nm と 400nm にピークを示した。

図-7(b) より、BC γ 0 気中に比べ、促進炭酸化した BC γ 0、10、20 の細孔径分布は、10～50nm の微細な細孔径が減少し、1000nm 付近の粗大な細孔径が増加する傾向となった。また、 γ -C₂S の添加量の増加で、粗大な空隙は、僅かに小径側へシフトすることがわかった。

材齢 1 日と 7 日における BC γ 0、10、20 の表層(1 層目 0～13.2mm)の X 線回折の結果を図-8 に示す。材齢 1 日

では、BC γ 0, 10, 20 のいずれの水準においてもエトリンガイト、モノサルフェートおよびカルサイトのピークが見られた。また、BC γ 10, 20 では、未反応の γ -C $_2$ S のピークが確認された。材齢 7 日では、炭酸化によってエトリンガイト、モノサルフェートおよび、 γ -C $_2$ S のピークが消失し、バテライトとカルサイトのピークが確認された。石川ら⁶⁾は、加熱養生を行わずに、高炉セメント C 種相当のセメントペーストを用いた実験で前養生期間が短期間の水準では炭酸化によるバテライトの生成は見られず、前養生期間を長期間とした水準でバテライトの生成が見られることを報告している。今回の検討では、材齢 1 日からの炭酸化でバテライトの生成が確認されており、成形後の加熱養生により、高炉スラグの反応が促進されることで、材齢初期からの炭酸化であってもバテライトが生成されたと推察される。

SEM 観察により得られた材齢 28 日における BC γ 20 の反射電子像を図-9 に示す。

図-9(a) より、未炭酸化部では、高炉スラグ粒子の界面にリム状の反応層が確認され、粒子の内部は未水合のまま残存している様子が見られた。一方で、コンクリート中の γ -C $_2$ S 粒子は、粒子周囲の水和物の析出が見られなかったため、水合反応が生じていないと推察される。

また、図-9(b)は、画像全体が明灰色であり(a)に見られた暗灰色の γ -C $_2$ S 粒子周辺の空隙部分は、生成物により充填されていると考えられる。この γ -C $_2$ S 粒子周辺を充填した生成物は、XRD の結果から、カルサイトやバテライトであると推察される。

3.2 Case2：前養生期間による影響

Case2 では前養生期間による影響を検討するため材齢ではなく、前養生期間で結果を整理した。

(1) 圧縮強度と炭酸化深さ

BC γ 0 における前養生期間を変化させた水準の圧縮強度を図-10 に、炭酸化深さを図-11 に示す。

図-10 より、炭酸化養生期間 0 日の圧縮強度は、前養生期間の影響により、BC γ 0 σ 1 と比べ BC γ 0 σ 3, σ 7 では 5N/mm² 程度圧縮強度が増加した。また、炭酸化養生期間 27 日においても、BC γ 0 σ 1 と比べ BC γ 0 σ 3, σ 7 の圧縮強度は増加した。

炭酸化養生期間 0 日から 27 日の強度増進は、BC γ 0 σ 1, σ 3, σ 7 それぞれ材齢 28, 30, 34 日に対して 8, 6, 5N/mm² であり、炭酸化養生を施すことにより、材齢が圧縮強度に与える影響と強度の増進は小さくなることがわかった。したがって、炭酸化養生での圧縮強度の大きな増進は期待できないことから、圧縮強度を確保するには前養生が重要であり、今回の検討では、前養生期間 3 日以上とすることが、炭酸化後の圧縮強度には効果的だと考えられる。

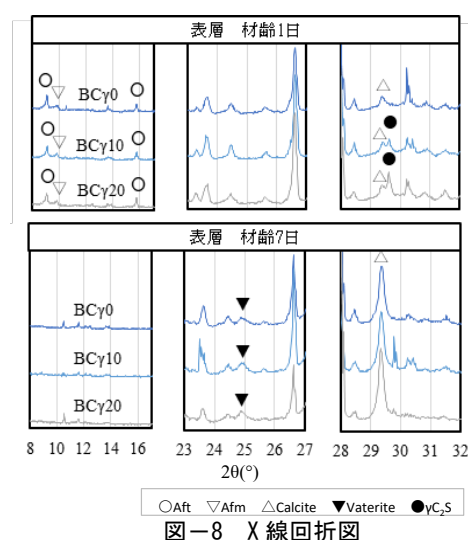
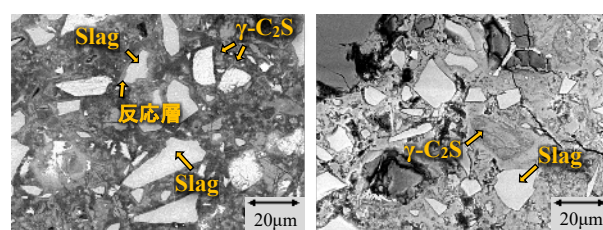


図-8 X線回折図



(a) BC γ 20 内部：未炭酸化 (b) BC γ 20 表層：炭酸化部
図-9 反射電子像

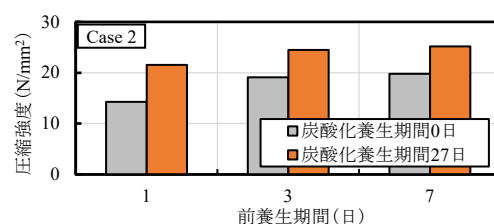


図-10 前養生期間を変化させた圧縮強度

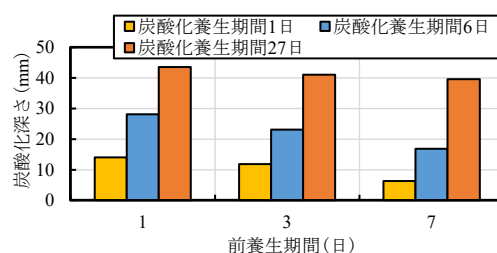


図-11 前養生期間を変化させた炭酸化深さ

炭酸化深さは、図-11 に示したように炭酸化養生期間が同じ場合、前養生期間が長い水準ほど炭酸化深さが小さく、炭酸化養生期間 27 日の前養生期間による炭酸化深さへの影響は小さくなる傾向を示した。

(2) 前養生期間による水和組織への影響

炭酸化養生期間 0 日の表層における細孔径分布を図-12(a)に、炭酸化養生期間 27 日の表層における細孔径分布を図-12(b)に示す。図-12(a)より、炭酸化養生期間 0 日の表層(1 層目)の細孔径分布は、いずれの水準も 30nm と 300nm 付近にピークが見られた。また、30nm 付

近のピークは、前養生期間 BC γ 0 σ 3 が最も高く、BC γ 0 σ 7 が低い値を示し、前養生期間の違いによる緻密さに傾向は見られなかった。300nm 付近のピークについては、前養生期間が長いほど減少する傾向を示した。図-12(b)より、炭酸化養生期間 27 日は、いずれの水準でも同様の細孔径分布を示したが、BC γ 0 σ 1 は僅かに 1000nm のピークが高くなった。また、炭酸化養生期間 0 日と比較して、促進炭酸化後の細孔径分布は、前養生期間による影響が小さくなることがわかった。

SEM 観察によって得られた BC γ 0 σ 1, σ 7 の前養生終了時における反射電子像を図-13 に示す。図-13(a) に示した前養生期間 1 日では、高炉スラグ粒子の界面に内部水和による明確なリム状の反応層を確認できなかった。一方で、図-13(b)に示した前養生期間 7 日では、高炉スラグ粒子の反応層を確認することができた。SEM 観察により、前養生期間を設けることで、高炉スラグ粒子の水和反応が進行していることが確認でき、圧縮強度の増加につながったものと考えられる。

3.3 環境性

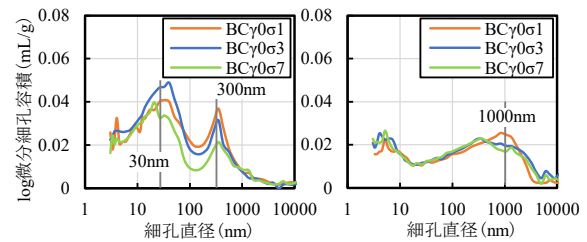
(1) CO₂ 含有量

材齢 28 日において熱分析で測定した脱炭酸量から求めた、Case1, 2 の水準の CO₂ 含有量を図-14 に示す。測定を行った水準において、未炭酸化部 10 層目の CO₂ 含有量が約 2.7%~4.0%見られた。これは材料に起因する炭酸カルシウムの影響や試料調整過程の大気環境下で CO₂ と反応したものと推察される。

BC γ 0 気中の表層(1 層目)は、試料の CO₂ 含有量が 4.1%であった。これは 10 層目の CO₂ 含有量が 2.7%であることから、気中養生においても、極表層の炭酸化が進行していることが確認された。一方、炭酸化部の表層(1 層目)、BC γ 0 において CO₂ 含有量は、14.2%となり、BC γ 10 では 15.4%、BC γ 20 では 17.9%となった。以上の結果から、 γ -C₂S の添加量の増加により CO₂ 含有量が増加した。このことは、ペーストで行われている既往の研究⁶⁾と同様の傾向であった。ただし、内部では、炭酸化が深くまで進行せず CO₂ 含有量が小さな値を示した。また、BC γ 0 σ 3, σ 7 は BC γ 0 σ 1 の水準に比べ炭酸化部の CO₂ 含有量が増加する傾向が見られた。既往の研究⁶⁾から高炉スラグ微粉末を配合した水準ではスラグの水和反応が進行するほど CO₂ の固定量が増加することが報告されており、前養生を行うことで高炉スラグ微粉末やセメントの水和が進行したため、CO₂ の含有量が増加したと考えられる。

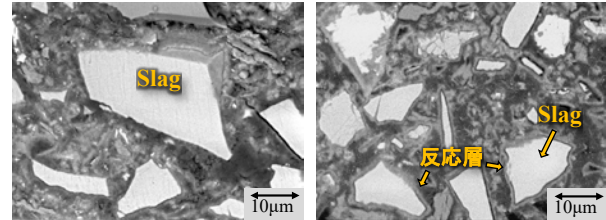
(2) CO₂ 収支

Case1, 2 で用いたコンクリートの CO₂ 収支の試算を行った。各材料の CO₂ 排出量は、土木学会：コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて¹⁾



(a) 炭酸化養生期間 0 日 (b) 炭酸化養生期間 27 日

図-12 表層の細孔径分布



(a) 前養生期間 1 日 (b) 前養生期間 7 日

図-13 反射電子像

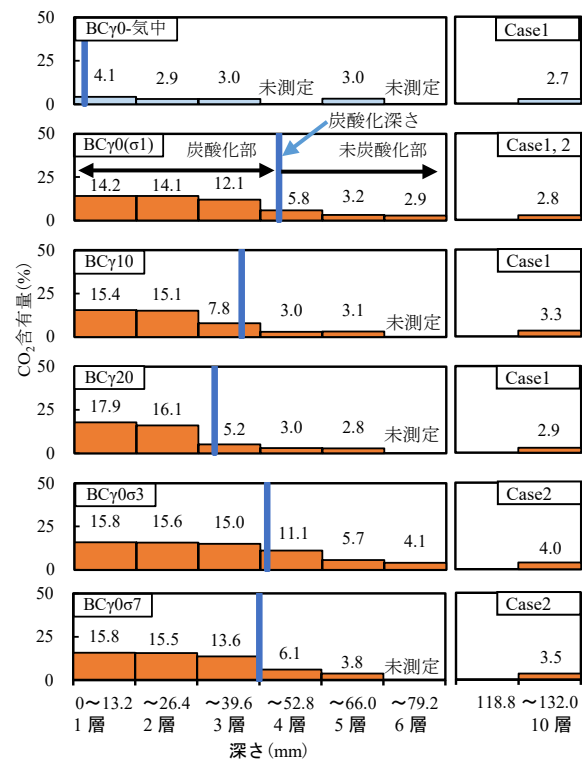


図-14 CO₂ 含有量

を参考にした。また、 γ -C₂S の CO₂ 排出量については、既往の文献⁷⁾を参考にした。各材料の CO₂ の排出量を表-3 に示す。コンクリートの CO₂ 排出量の試算は、表-2 の調(配)合と表-3 の各材料の CO₂ 排出量を元に算出した。また、CO₂ の固定量は、熱分析によって測定した脱炭酸量から、原料と試料調整由来の CO₂ 含有量 4%を減じ、それぞれ 1 層目の CO₂ 含有量から算出した。各コンクリートの CO₂ 収支を図-15 に示す。BC γ 0, 10, 20 において γ -C₂S 添加量が多い程 CO₂ 固定量は増加し、CO₂ 収支はそれぞれ 55, 51, 40kg/m³ となり、小さくなる傾向を示した。また、BC γ 0 σ 1, σ 3, σ 7 での CO₂ 収支は、

それぞれ、55, 49, 49kg/m³であったが、前養生期間を長くした BC γ 0 σ 3, σ 7 の方が BC γ 0 σ 1 に比べ、CO₂の固定量が多く、CO₂収支も小さくなることがわかった。これらの結果から CO₂収支は、 γ -C₂S を 20%添加することで 15kg/m³、前養生期間を延ばすことで 6kg/m³改善した。CO₂固定量を向上させる手法として、 γ -C₂S の添加量の増加と前養生期間を設け高炉スラグ微粉末の水和反応を進行させることが有効であると考えられる。

3.4 本検討における最適な γ -C₂S 添加量と前養生期間

これまでの試験結果から、 γ -C₂S の添加量が増加するほど、炭酸化部における CO₂の固定量が多く、CO₂収支が小さくなった。また、圧縮強度の観点からも γ -C₂S の添加量が多い程、圧縮強度は向上する傾向が見られたため、 γ -C₂S の最適な添加量は 20%であると考えられる。前養生は期間を延ばすことで、高炉スラグ微粉末の水和反応が進行したことにより、圧縮強度は向上し、炭酸化部における CO₂の固定量が多くなったため、本検討の範囲において、最適な前養生期間は、3 日以上であると考えられる。

以上のことから、 γ -C₂S を 20%添加し、前養生期間を 3 日以上確保することにより、さらに圧縮強度と CO₂の固定量を改善することができると考えられる。

4. まとめ

炭酸化混和材の量および前養生期間が、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの硬化特性に及ぼす影響と CO₂固定量について基礎的な検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) γ -C₂S の粒子周辺の空隙をバテライトやカルサイトが充填した。
- 2) γ -C₂S の添加量が多いほど、炭酸化養生後の圧縮強度は増加傾向を示し、炭酸化部の CO₂の固定量は増加した。
- 3) 前養生期間を延ばすことで、高炉スラグ微粉末の水和反応が進行し、圧縮強度と CO₂の固定量が増加した。
- 4) 圧縮強度と CO₂の固定量の観点から、前養生期間は、3 日以上確保することが有効であった。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21014) を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術および評価技術の開発プロジェクトで得られたものである。関係各位に感謝いたします。

表-3 各材料の CO₂ 排出量

材料	CO ₂ 排出量(kg/t)
ポルトランドセメント ¹⁾	766.6
高炉スラグ微粉末 ¹⁾	26.5
γ -C ₂ S ⁷⁾	159.3
細骨材 ¹⁾	3.7
粗骨材 ¹⁾	2.9

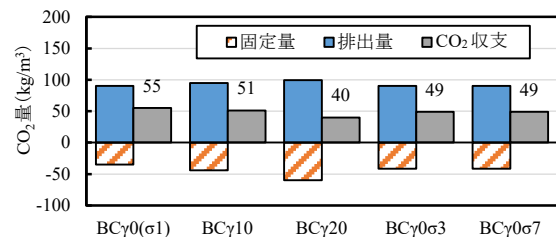


図-15 CO₂ 収支

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートライブラリー，2023.10
- 2) 小島正朗，辻大二郎，依田和久，橋本学：エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用，コンクリート工学，Vol.59，No.9，pp.776-781，2021
- 3) 渡邊賢三，横関康祐，芦澤良一，坂田昇： γ -C₂S を用いたコンクリートの力学特性と耐久性能，コンクリート工学年次論文集 Vol.27，No.1，pp.811-816，2005
- 4) 江口康平，西岡由紀子，辻大二郎，小島正朗： γ -C₂S を主成分とする炭酸化混和材と CCU 材料を併用したコンクリートの強度特性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1417-1422，2024
- 5) 山口健輔，藤田和希，金沢智彦，辻大二郎：加熱と炭酸化養生を施した γ -C₂S を含む高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの強度発現性と耐凍害性に関する検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.46，No.1，pp.1483-1488，2024
- 6) 石川英理香，伊代田岳史，江口康平，小島正朗：高炉スラグ微粉末及び γ -C₂S を添加したセメント硬化体の CO₂ 固定性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.88-93，2023
- 7) 盛岡実，山本賢司，取違剛，横関康祐：工業原料を用いた γ -2CaO・SiO₂ の製造とその二酸化炭素排出量の評価，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.29-33，2010