

GGBS 及び γ -C₂S 含有のモルタルの炭酸化養生時の CO₂ 固定量の比較検討

芝浦工業大学 工学部 土木工学科 マテリアルデザイン研究室
 芝浦工業大学 工学部 先進国際課程 兼務 土木工学科
 株式会社竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ

○石川 英理香
 伊代田 岳史
 江口 康平

1. はじめに

昨今、気候変動問題の主要原因である CO₂ の排出削減は地球規模で急務の課題となっており、我が国においても 2050 年カーボンニュートラル宣言を機に、各業界で脱炭素社会形成へ向けた取り組みが活性化している。

コンクリート業界においては、セメントの主原料であるクリンカ製造時の CO₂ 排出が大半を占めており、製造段階で削減するための革新的な技術や、クリンカ使用量を削減するために ECM セメントのような混合材を高置換したセメントを用いたコンクリートの開発が進められている。その一方で、コンクリートの中酸化現象がコンクリート中のアルカリ性を担う水酸化カルシウムと大気中の CO₂ の結合で生じる現象であることから、排出された CO₂ の固定先として国の政策において着目されており、CO₂ をより多くコンクリートに固定させる手法の検討が進められている。これらを組み合わせることで CO₂ の排出量と吸収量の総和量を最小限化し、カーボンニュートラルなコンクリートの実現が望まれている。

本研究においては、材齢初期に炭酸化養生をすることを念頭に、セメントと多量置換が可能な高炉スラグ微粉末(GGBS)と、CO₂ と反応性があるといわれている γ -C₂S が主成分の特殊混和材 LEEF を組み合わせ、所定期間の炭酸化養生後の CO₂ 固定量について評価を行った。

2. 試験概要

2. 1 使用材料及び配(調)合

表 1 に配(調)合を示す。本研究では、SO₃2%の普通ポルトランドセメント(OPC)に対して、SO₃換算で 4%の無

水石こうを内割添加した GGBS を各割合で置換した。さらに γ -C₂S を添加するものは粉体置換で混合した。粉体と細骨材(以下 S、混合砂、表乾密度 2.59g/cm³、吸水率 2.31%、粗粒率 2.57)の割合は 1:3(質量比)、また、W/B=50%として、モルタルミキサーで練り混ぜ後、40×40×160mm の型枠に打設した。

2. 2 炭酸化条件

材齢 2 日まで型枠のまま静置し、脱型後、全面を開放したまま材齢 56 日まで炭酸化養生(温度 20°C、湿度 60%RH、CO₂ 濃度 5%)を施した。

2. 3 CO₂ 固定量の測定

CO₂ 固定量は示差熱分析にて測定した。試料は中性化箇所を対象とするため、各試験体を割裂後、フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さの測定を行った。表 1 に示す通り、BA、BB、BC は全面が中性化していたため全試料を用いた。N はフェノールフタレイン溶液で呈色しなかった中性化部分を湿式でカットして用いた。試料は粗砕後、水和停止を行うためアセトンに 4 時間浸漬し、その後真空ポンプを用いて 3 時間乾燥を行い、細骨材を含んだままミルにて微粉碎したものを使用した。

測定条件は室温から 1000°C まで昇温速度 20°C/min、N₂ フロー環境下で行った。なお、CO₂ 固定量は、図 1 の通り 1000°C 加熱後の試料の質量に対する脱炭酸割合 (dry %) の炭酸化養生前後の差分とした。

3. 試験結果及び考察

3. 1 CO₂ 固定量

図 2 に各配(調)合の中性化箇所の CO₂ 固定量を示す。

表 1 モルタルの調(配)合及び諸性能

	W/B [%]	P:S	GGBS 置換率 [%]	γ -C ₂ S 無				γ -C ₂ S 有				
				結合材割合 [weight %]		圧縮強度 [N/mm ²]	中性化深さ [mm]	結合材割合 [weight %]			圧縮強度 [N/mm ²]	中性化深さ [mm]
				OPC	GGBS			OPC	GGBS	γ -C ₂ S		
N	50	1:3	0	100	-	57.6	9.6	80	-	20	63.1	13.5
BA			30	70	30	58.5	20.0	56	24	20	61.6	20.0
BB			50	50	50	39.6	20.0	40	40	20	47.6	20.0
BC			70	30	70	23.0	20.0	24	56	20	38.2	20.0

なお、どの試料においても水酸化カルシウムは残存していなかった。GGBS を添加した場合は、 γ -C2S を添加している方が CO_2 固定量は高くなり、また、置換率が低く OPC 率が高いほど CO_2 固定量は高くなる結果を示した。一方で N においては、 γ -C2S の添加による差はほとんどなく、 CO_2 固定量は BA より低い結果となった。

3. 2 CaO 含有率と CO_2 固定量の関係

図 3 に結合材中の CaO 含有率と CO_2 固定量の関係を示す。参考値として同一結合材割合で W/B45%として、 $40 \times 48 \times 1.5 \text{mm}$ に打設したセメントペースト(CP)を同一環境下で材齢 28 日まで炭酸化させた時の CO_2 固定量を、1:3 モルタルベースに換算した CO_2 固定量の試算値を赤で記した。CP においては点線の通り、CaO 量と CO_2 固定量に正の相関があった。

GGBS を添加した CaO 含有率 60%以下の場合は、CP と同様に CaO 量と CO_2 固定量に相関あり、かつ、CaO 量が大きくなるほど CP から求めた試算値よりも高い CO_2 固定量を示した。一方で、N においては CP から求めた試算値と同程度となった。今回、CP 試験体は薄型であり乾燥しやすい状況であった一方で、モルタルにおいては厚みがあることで炭酸化反応中も乾燥しにくい内部において水和が生じていた可能性がある。よって、全面が中性化した試料は深さ方向で水和度が異なり、内部ほどより多くの水酸化カルシウムが生成し、炭酸化した可能性がある。一方で、N は側面の試料を用いたことで前養生終了後の水和度と同程度の試料のみを対象にしたため、CP の結果と同程度になった可能性が考えられる。

3. 3 CO_2 収支

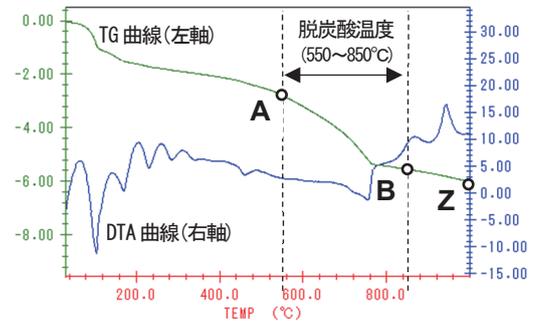
図 4 に本検討結果から試算した、結合材 1kg 当たりの CO_2 収支を示す。なお、算出は既往の文献¹²⁾の CO_2 排出量と図 2 の結果を基に行った。GGBS と γ -C2S の添加により CO_2 収支は小さくなる傾向を示した。

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・施工技術及び評価技術の開発プロジェクトで得られた成果である。

【参考文献】

- 1) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)、(2018)
- 2) 盛岡実ほか：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)



試料重量：【測定前】X [mg]、【測定後】X-Z [mg]
 脱炭酸割合：C=(B-A)/(X-Z) [dry %]
 * CO_2 固定量 (dry %) = 炭酸化後の C' - 炭酸化前の C

図 1 CO_2 固定量の算出方法

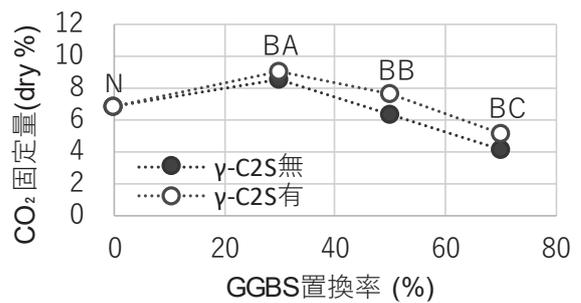


図 2 GGBS 置換率と CO_2 固定量

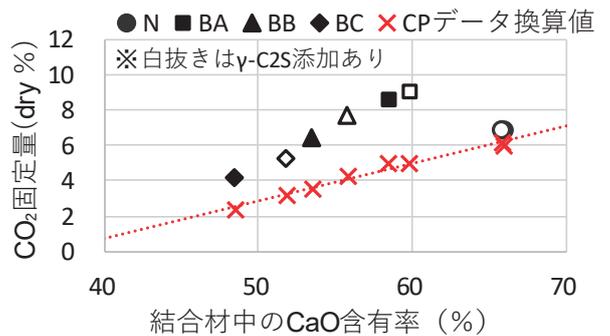


図 3 CaO 含有率と CO_2 固定量の関係

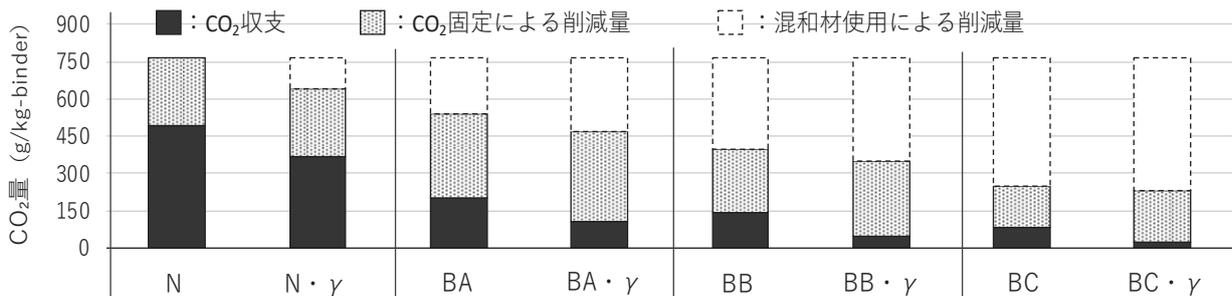


図 4 結合材 1kg 当たりの CO_2 収支