

CCU 材料を用いた環境配慮型高流動コンクリートの配合検討に関する一考察

—GI 基金事業「CUCO」開発成果—

鉄建建設(株) 正会員 ○岩城圭介 唐沢智之

鹿島建設(株) フェロー会員 坂井吾郎 正会員 関 健吾 境 美緒

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、CCU(Carbon Capture and Utilization)技術のひとつである CO₂ の鉱物化(炭酸塩化)技術が注目され、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)でも2兆円規模の「グリーンイノベーション(GI)基金」が造成された。筆者らもコンソーシアム「CUCO(Carbon Utilized COncrete)」の一員として研究開発を進めている。コンクリート材料分野においては、プレキャストコンクリートのスラッジから燃焼排気中に含まれる CO₂ と反応させて生成する軽質炭酸カルシウム微粉末(以下、PCC)¹⁾が、有望な CCU 材料として注目されている。一方、製造時に大量の CO₂ を排出するポルトランドセメントの使用量低減を目的に、高炉スラグ微粉末(以下、BFS)やフライアッシュなどの混和材を大量にセメント置換で使用するコンクリートが実用化されつつある。本報では、BFS をセメントの70%置換した環境配慮型高流動コンクリートを基本に、CCU 材料として PCC を使用した配合検討について報告する。

2. 実験概要

(1) 使用材料 使用材料を表-1 に示す。PCC は、CaCO₃ 純度が 97-99%²⁾ であり、粒径が約 30-40 μm の単粒である一方、BET 比表面積が約 5.0 m²/g と非常に大きい特徴があり¹⁾、多孔質が想定される。また高性能 AE 減水剤に類する SP は、3 種類 SP1、SP2、SP3 を粉体の組合せ N、N+BF、N+BF+PCC に応じて使用した。一部の配合では、高流動コンクリートのスランプフローの保持性改善で使用実績のあるこわばり低減剤 TR³⁾を使用した。なお、細骨材 S2、粗骨材 G2 は、栃木県佐野市産の石灰石骨材である。

(2) 試験配合 試験配合を表-2 に示す。配合 N は、普通ポルトランドセメント OPC を用いた粉体系(単位量 505 kg/m³)、自己充填性ランク 2 相当の高流動コンクリートである。配合 BF は、配合 N

に対して OPC の 70%を BFS で置換した配合、配合 PCC は、配合 BF の結合材(OPC+BFS)の一部を PCC に置換した配合とし、PCC 単位量を4水準(配合 PCC1、2、3、4)設定した。配合 PCC4 については、TR を使用量2水準(配合 PCC4-T1、T2)で添加し、無添加との比較で経時変化を検討した。また、PCC1 と同一の粉体構成比で粉体量を 505 kg/m³ から 370 kg/m³ に低減した低粉体量の配合 PCC1-L を設定した。なお、全ての配合で粗骨材絶対容積は 0.315 m³/m³ とした。

(3) 試験方法 フレッシュ試験では、スランプフロー、空気量、U 形充填試験(R2)の各試験を実施した。PCC4、PCC4-T1、T2 の3 配合については、30 分、60 分経過後の経時変化を測定した。PCC1-L については、30 分経過後に TR 0.5 kg/m³ を

キーワード:CUCO, 高流動コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 軽質炭酸カルシウム, CO₂ 含有量

連絡先:〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1 鉄建建設 研究開発センター TEL 0476-36-2340

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	物性・主成分
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント	密度 3.15 g/cm ³
	BFS	高炉スラグ微粉末	密度 2.89 g/cm ³ , 4000 ブレーン, 石膏添加品
混和材	PCC	軽質炭酸カルシウム	密度 2.57 g/cm ³ , 純度 97-99%
	S1	鹿嶋市産砂	表乾密度 2.60 g/cm ³ , 吸水率 1.29%, 粗粒率 2.40
細骨材	S2	佐野市産 石灰石砕砂	表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 0.89%, 粗粒率 3.20
	G1	笠間市産砕石 2005	表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 0.84%, 実積率 60.1%
粗骨材	G2	佐野市産 石灰石砕石 2005	表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 0.64%, 実積率 60.2%
	SP1	高性能 AE 減水剤 一般品	ポリカルボン酸系化合物
混和剤	SP2	高性能 AE 減水剤 BF 高含有用	ポリカルボン酸系化合物リグニンスルホン酸塩
	SP3	セメント・軽質炭酸カルシウム分散剤	特殊ポリカルボン酸系ポリマー
	TR	こわばり低減剤	グリコールエーテル系誘導体オキシカルボン酸塩

表-2 試験配合

配合 No.	W/C (%)	W/B (%)	PCC/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)												
					W	P			S		G		Ad				TR
						OPC	BFS	PCC	S1	S2	G1	G2	SP1	SP2	SP3		
N	34.7	34.7	—	49.1	175	505	—	—	559	239	422	422	6.06	—	—	—	
BF	115.1	34.7	—	48.3	175	152	353	—	540	232	422	422	—	6.31	—	—	
PCC1	143.4	43.2	19.8	47.8	175	122	283	100	531	227	422	422	—	—	5.05	—	
PCC2	152.2	46.1	24.8	47.8	175	115	265	125	529	227	422	422	—	—	5.61	—	
PCC3	163.6	49.3	29.7	47.6	175	107	248	150	526	226	422	422	—	—	6.40	—	
PCC4	175.0	53.0	34.7	47.5	175	100	230	175	524	224	422	422	—	—	6.46	—	
PCC4-T1	175.0	53.0	34.7	47.5	175	100	230	175	524	224	422	422	—	—	5.71	0.50	
PCC4-T2	175.0	53.0	34.7	47.5	175	100	230	175	524	224	422	422	—	—	5.20	0.75	
PCC1-L	198.9	59.3	20.3	49.3	175	88	207	75	589	253	442	442	—	—	4.81	—	

後添加した。また、一部を除き圧縮強度試験を実施した。

配合 BF, 配合 PCC1-3 の 4 配合は, 材齢 91 日超の標準養生試料を用いて示差熱重量分析を行い, CaCO_3 の熱分解に対応する 600-800℃間の重量変化⁴⁾ から CO_2 含有量を算定した。なお, PCC による CO_2 含有量を算定するために, 配合 BF から求めた石灰石骨材の CaCO_3 純度 84.5%を用いて石灰石骨材由来の CO_2 を除外した。また, 配合から推定される CO_2 固定量では, PCC の純度の範囲²⁾ を参考に CaCO_3 純度 98%を用いた。

3. 実験結果

(1) フレッシュ試験 練上り時フレッシュ試験結果を表-3 に示す。スランプフローの大小はあるものの, 各配合とも自己充填性ランク 2 を満足した。配合 PCC 系は, 50 cm フロー到達時間が比較的大きく, 粘性が高かった。スランプフローと U 形充填高さの関係を図-1 に示す。配合 PCC 系ではスランプフローが大きいほど充填高さが高い傾向が認められ, スランプフロー 75 cm 程度であっても材料分離を生じず高い自己充填性を有する。しかし, 配合 N, 配合 BF に比べて同等のスランプフローに対する充填高さが小さい傾向であり, 自己充填性が比較的低いことに留意する必要がある。これは, PCC の粉体性質から想定される多孔質に起因すると考えられる。

スランプフローの経時変化を図-2 に示す。配合 PCC4 では, 経時 30 分で 30cm 超のフロー低下を示したが, こわばり低減剤 TR を添加した配合 PCC4-T1, T2 では TR 使用量に応じて保持性が改善された。また, 配合 PCC1-L では, 30 分経過後のスランプフローロスを生じたコンクリートに TR を後添加することで, スランプフローの回復が可能であった。以上より, TR の凝集抑制作用が PCC にも効果を有する可能性があると考えられる。

(2) 圧縮強度試験 結合材水比 B/W と材齢 7 日, 28 日の圧縮強度の関係を図-3 に示す。配合 PCC 系の圧縮強度は, 結合材水比で説明できると考えられる。

(3) CO_2 含有量 配合 BF, 配合 PCC1-3 の PCC による CO_2 含有量の熱分析結果を図-4 に示す。図中には, 配合上の PCC 単位量と PCC 純度から推定した CO_2 含有量も示した。配合間の序列は符合するものの, 各配合の熱分析結果と配合からの推定値には乖離がみられた。これは, 石灰石骨材を用いる場合の補正や試料調整方法を含む分析方法が有する誤差の影響が考えられ, 今後の課題である。

4. まとめ

PCC と BFS を用いた高流動コンクリートは, 混和剤の選定や目標性能に応じた配合調整により実現可能と考えられる。また低粉体量高流動コンクリートは, CO_2 低減効果も高いため, 今後のさらなる検討が期待される。

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で得られた成果である。

【参考文献】

- 1) 八木利之ら: コンクリートスラッジから生成した軽質炭酸カルシウム微粉末の諸物性, 土木学会第 77 回年次学術講演会, V-520, 2022.
- 2) 日本コンクリート工業 HP: <https://www.ncic.co.jp/products/environment/ecocaco3.html>
- 3) 鈴木裕隆ら: 大規模ターミナル駅改良工事におけるコンクリート打込み, セメント・コンクリート No.873, pp.11-16, 2019.11
- 4) 関健吾ら: CO_2 ガスを用いた養生における気相・固相中の CO_2 収支, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1234-1239, 2022.

表-3 フレッシュ試験結果 (練上り時)

配合 No.	スランプフロー (cm)	50cm フロー到達時間 (sec)	空気量 (%)	U 形充填高さ (mm)
N	57.0	4.8	4.8	355
BF	66.5	6.4	3.4	363
PCC1	56.5	8.1	3.3	314
PCC2	63.5	7.2	3.3	345
PCC3	69.5	7.7	3.1	352
PCC4	73.0	6.7	3.1	362
PCC4-T1	74.0	7.1	3.5	369
PCC4-T2	75.5	7.2	3.0	370
PCC1-L	63.0	4.6	3.2	337

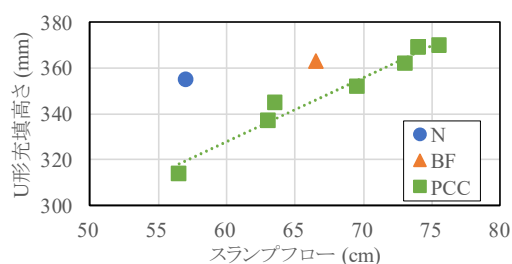


図-1 スランプフローと充填高さの関係

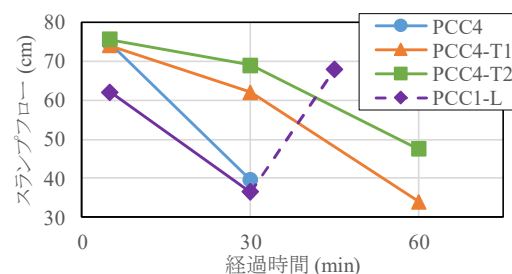


図-2 スランプフローの経時変化

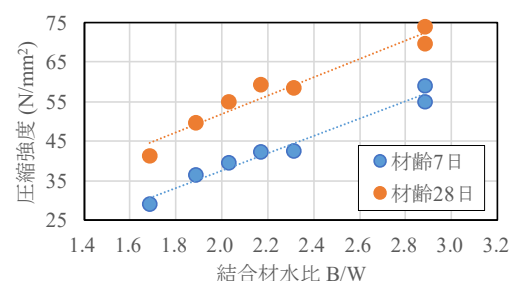


図-3 圧縮強度試験結果

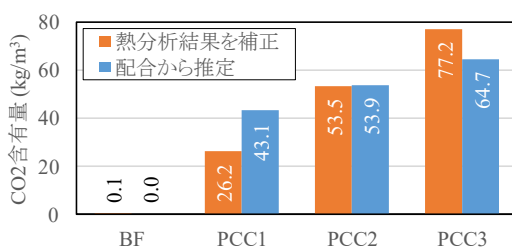


図-4 CO_2 含有量の測定結果