

粒状化再生骨材とスラッジ微粉末を使用した 環境配慮型コンクリートの室内実験

○船尾 孝好*1 庄野 功*1 栗延 正成*1 山本 佳秀*1 大崎 政人*1

要旨: 戻りコンクリートを粒状に改質した粒状化再生骨材や、生コン工場で発生するスラッジケーキを微粉砕したものをコンクリートの原材料に用いることで、資源循環に寄与するとともに、これらの製造工程および養生期間中においては CO₂ の固定化が見込まれる。今回の室内実験では、粒状化再生骨材とスラッジ微粉末の物性値および CO₂ 固定量を測定するとともに、それを使用したコンクリートの試し練りを実施した。フレッシュコンクリートの性状や圧縮強度の低下に課題は残るものの、環境配慮型コンクリートとしての適用性を見いだすことができた。

キーワード: 環境配慮型コンクリート、再生骨材コンクリート、粒状化再生骨材、スラッジ微粉末

1. はじめに

近年、2050 年カーボンニュートラル社会の実現に向けて世界的にさまざまな分野において、脱炭素化の技術開発が進んでいる。コンクリート分野においてもポルトランドセメントの使用量を低減させた低炭素型コンクリートや CO₂ を吸収・固定するコンクリートの研究開発が活発に行われ、実用されているものもある¹⁾²⁾。一方、それらの技術の多くは、通常の生コンクリートの製造に比べ別途設備が必要なものや特殊材料の保管・管理が必要となり、特別な管理が生じることとなり、生コンクリート（以下、生コン）工場によっては対応が困難な場合もある。

この様な背景から大阪兵庫生コンクリート工業組合は、NEDO グリーンイノベーション基金事業 CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発 「CO₂ を高度利用した CARBON POOL コンクリートの開発と舗装および構造物への実装」のコンソーシアムに参画し、2022 年度から地域内循環技術開発として「簡易型 CP コンクリート」の研究開発に取組み、生コン工場の産業廃棄物を再利用し、尚且つ導入しやすい技術や設備の検討を進めている。

本報では、①生コン工場で発生する戻りコンクリート（以下、戻りコン）を骨材状に改質した粒状化再生骨材、②アジテータ車やプラントミキサの洗浄で発生するスラッジ水から上澄み水を回収した後に残るスラッジケーキを粉砕して回収したスラッジ微粉末について、それぞれの物性値や CO₂ 固定量を確認するとともに、それらを材料として使用したコンクリートのフレッシュコンクリートの性状、圧縮強度の試験結果および CO₂ の削減効果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験における使用材料およびそれぞれの品質規格を表-1 に示す。セメント、水、普通骨材および化学混和剤は静岡県の実験工場が標準化しているものを使用した。なお、セメントには低炭素化を目的に高炉セメント B 種を使用した。

*1 大阪兵庫生コンクリート工業組合

表－1 使用材料および品質規格

材料	記号	種類	生産者又は産地	品質規格
セメント	BB	高炉セメントB種	T社	JIS R 5211
混和材	SFP	スラッジ微粉末	岡山県産	JIS A 5041
水	W	回収水(上澄み水)	実験工場	JIS A 5308 附属書 JC
普通骨材	NS①	砂	神奈川県柄上郡山北町産	JIS A 5308 附属書 JA
	NS②	砂	山梨県南巨摩郡南部町産	
	NG	砂利25～5		
粒状化再生骨材	RS	粒状化再生細骨材	静岡県産(実験工場)	JIS A 5023 附属書 A A.3.2
	RG	粒状化再生粗骨材		
化学混和剤	AE	AE減水剤	F社	JIS A 6204
	SP	高性能AE減水剤	C社	

本実験で使用した粒状化再生骨材の品質を表－2 に示す。粒状化再生骨材は、実験工場において実際に発生した戻りコンを工場内のピットに排出後、粒状化材料を添加し、スケルトンバケット式のバックホウにて攪拌したものを専用の骨材ヤードで天日乾燥させた後に、20mm の網目の振動ふるいと 5mm の網目のトロンメルによって細・粗骨材に分級したものをを用いた。なお、粒状化再生細・粗骨材の品質は、再生骨材Lの物性値を目標品質としたが、どちらも吸水率が目標品質を満足しないことがわかる。試し練りに使用した粒状化再生細・粗骨材は十分に吸水させた後に表乾状態に調整することとした。

表－2 粒状化再生骨材の品質

試験項目	RS		RG		試験方法
	目標品質	試験値	目標品質	試験値	
表乾密度 (g/cm ³)	—	2.03	—	2.35	JIS A 5023 附属書A A.5.3
絶乾密度 (g/cm ³)	—	1.65	—	2.16	
吸水率 (%)	13.0 以下	22.8	7.0 以下	8.9	JIS A 1103
微粒分量 (%)	10.0 以下	5.6	3.0 以下	0.9	
粗粒率	—	3.06	—	6.94	JIS A 1102
CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t)	—	26.9	—	13.2	燃焼-赤外線吸収法

表－3 スラッジ微粉末の品質

試験項目	目標品質	試験結果	試験方法
湿分 (%)	1.0 以下	25.3	JIS A 6201 8.2
密度 (g/cm ³)	2.5 以上	1.85	JIS R 5201 7
フロー値比 (%)	90 以上	85	JIS A 6201 附属書C C.5.3
活性度指数 (%)	60 以上	54	JIS A 6201 附属書C C.5.4
150 μ m ふるい残分 (%)	5 以下	33.8	JIS R 5201 8.2
CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t)	—	63.8	燃焼-赤外線吸収法

本実験で使用したスラッジ微粉末の品質を表－3 に示す。スラッジ微粉末は、岡山県の生コン工場が、自工場で発生するスラッジ脱水ケーキを天日乾燥させた後に、インパクトクラッシャで粉砕したものを集塵機により回収したものをを用いた。なお、スラッジ微粉末の品質は、コンクリート用砕石粉を参考に目標品質を設定したが、全ての試験項目において目標品質を満足しないことがわかる。

粒状化再生骨材とスラッジ微粉末の CO₂ 固定量は、全炭素分析による測定結果から計算によって求めた。いずれも、製造工程や養生期間中にセメント水和物の水酸化カルシウム等と大気中の CO₂ が反応し炭酸カルシウムに変化したと考えられる。

2. 2 コンクリートの配合

試し練りに用いたコンクリートの配合を表－4 に示す。水セメント比は 55, 45, 35%, スランプ又はスランプフローを 12, 18, 55cm とし、配合設計を行った。単位水量は、スランプ 12 および 18cm では 161 または 170kg/m³ とし、スランプフロー55cm では 175kg/m³ に設定した。なお、目標品質が得られるように、単位粗骨材かさ容積または化学混和剤の使用量を調整することとした。

配合記号 NN12 は、実験工場が標準化している普通 24-12-25BB AE 減水剤の配合とした。配合記号 NS12, NS18, NS55 は普通骨材を使用し、細骨材の一部にスラッジ微粉末を置換した。配合記号 RS12, RS18, RS55 は骨材に粒状化再生骨材を全量使用し、粒状化再生細骨材の一部にスラッジ微粉末を置換した。配合記号 RN12, RN18, RN55 は骨材に粒状化再生骨材を全量使用した。

表－4 コンクリートの配合

配合 記号	W/C (%)	スランプ又は スランプフロー (cm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
				BB	SFP	W	NS①	NS②	RS	NG	RG	AE	SP
NN12	55	12	47.4	293	—	161	433	437	—	975	—	2.93	—
NS12	55	12	45.4	309	100	170	354	358	—	991	—	3.09	—
RS12	55	12	42.4	309	100	170	—	—	571	—	906	2.47	—
RN12	55	12	45.4	293	—	161	—	—	652	—	879	2.34	—
NS18	45	18	43.8	378	100	170	392	331	—	983	—	—	2.64
RS18	45	18	39.8	378	100	170	—	—	463	—	915	—	2.27
RN18	45	18	41.8	378	—	170	—	—	556	—	886	—	2.08
NS55	35	55	40.6	500	100	175	277	279	—	970	—	—	5.00
RS55	35	55	36.6	500	100	175	—	—	385	—	899	—	4.75
RN55	35	55	38.6	500	—	175	—	—	488	—	869	—	3.75

2. 3 コンクリートの試験項目と方法

コンクリートの試験項目、目標品質および試験方法を表－5 に示す。スランプは再生骨材コンクリートⅠを参考にし、目標スランプからの許容差を±3.0cm とした。スランプフローは JIS A 5308 のスランプフローで評価を行うコンクリートを参考にし、目標スランプフローからの許容差を±7.5cm とした。空気量はスランプと同様に再生骨材コンクリートⅠを参考にし、目標空気量からの許容差を±2.0%とした。圧縮強度は標準養生の材齢 3, 7, 28 日で試験を実施することとした。

表－5 コンクリートの試験項目

試験項目	目標品質	試験方法
スランプ (cm)	12, 18 ± 3.0	JIS A 1101
スランプフロー (cm)	55 ± 7.5	JIS A 1150
空気量 (%)	4.5 ± 2.0	JIS A 1128
コンクリート温度 (°C)	—	JIS A 1156
圧縮強度 (N/mm ²)	—	JIS A 1132 JIS A 1108

表－6 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 記号	測定値			
	スランプ又は スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	気温 (°C)
NN12	15.0	3.9	17	14
NS12	13.0	5.6	17	15
RS12	10.0	3.4	17	16
RN12	13.5	3.7	17	15
NS18	21.0	5.3	18	19
RS18	15.0	4.7	18	20
RN18	20.5	4.8	18	19
NS55	60.5	3.8	21	19
RS55	57.0	5.9	19	19
RN55	48.5	5.2	21	19

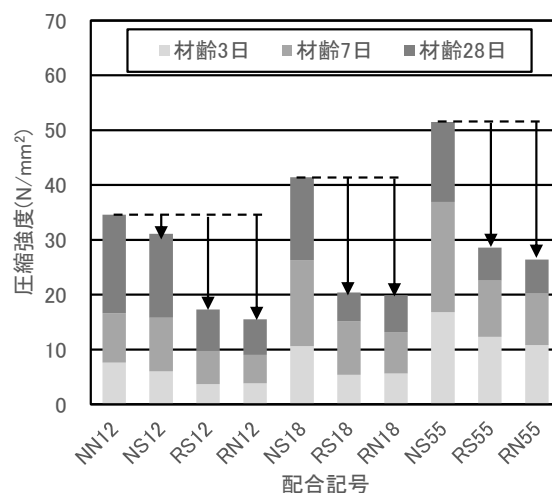
3. 試験結果

3. 1 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表－6 に示す。全ての試験項目において目標値を満足した。スランプは、RS12, RS18 と粒状化再生骨材とスラッジ微粉末を使用すると小さくなる傾向が認められる。スランプフローは RN55 のスラッジ微粉末を使用しないものが小さくなる傾向が認められる。

3. 2 圧縮強度の試験結果

圧縮強度の試験結果を図－1 に示す。粒状化再生骨材使用した配合は、普通骨材を使用した配合と比べ圧縮強度が約 50%低下する傾向が認められる。また、普通骨材とスラッジ微粉末を使用した NS12 は、普通骨材のみの NS12 より圧縮強度が低下し、粒状化再生骨材とスラッジ微粉末を使用した RS12・RS18・RS55 では、粒状化再生骨材のみを使用した RN12・RN18・RN55 より圧縮強度が増加した。スラッジ微粉末を使用すると普通骨材では圧縮強度が低下し、粒状化再生骨材では圧縮強度が増加する傾向が認められる。



図－1 圧縮強度の試験結果

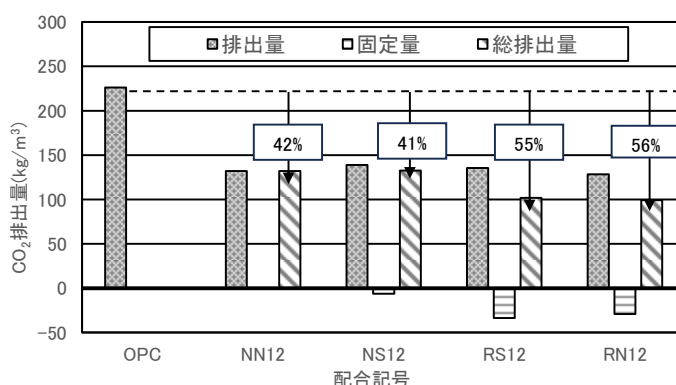
4. CO₂削減効果

表－7 に CO₂ 排出量の計算に用いた使用材料のインベントリデータ³⁾⁴⁾を示す。スラッジ微粉末や粒状化再生骨材のインベントリデータは整備されていないため排出量は計算に含めないこととした。

図－2 に W/C55%配合における、CO₂ 排出量、CO₂ 固定量および CO₂ 総排出量の計算結果を示す。図中の配合記号 OPC は、CO₂ 削減率の比較として実験工場の普通 24-12-20 N AE 減水剤配合（W/C54.7%，単位セメント量：294kg/m³）の計算結果を表したものである。高炉セメント B 種を使用することで普通骨材を使用した NN12・NS12 でも約 40%の CO₂ 削減効果が得られることが分かる。また、高炉セメント B 種と粒状化再生骨材を使用することで約 55%の CO₂ 削減効果が得られることが分かる。今回の実験では、スラッジ微粉末を使用することで単位水量が大きくなり単位セメント量が増加したことで、スラッジ微粉末による CO₂ 削減効果は小さい傾向となった。

表－7 インベントリデータ (kg-CO₂/t)

記号	CO ₂ 排出量	CO ₂ 固定量
N	755.5	—
BB	437.2	—
SFP	—	63.8
NS①	2.0	—
NS②	2.0	—
RS	—	26.9
NG	2.0	—
RG	—	13.2
AE	123.0	—
SP	350.0	—



図－2 W/C55%配合の CO₂ 総排出量

5. まとめ

今回の実験で使用した粒状化再生骨材およびスラッジ微粉末は目標品質を満足しない結果となったが、コンクリート用材料として普通骨材と置換えて使用してもフレッシュコンクリートは目標品質を満足することが分かった。なお、粒状化再生骨材を使用すると圧縮強度は約 50%低下する傾向が認められ品質要求の高いコンクリートへの適用は難しいと考える。しかし、高炉セメント B 種を用い粒状化再生骨材とスラッジ微粉末を用いた配合は、普通ポルトランドセメントを使用した配合のコンクリートよりも約 55%の CO₂ 削減効果が得られることが分かり、環境配慮型コンクリートとしての適用性を見いだすことができた。

謝辞 本成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21023）の結果得られたものです。ご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 取違剛，関健吾，渡邊賢三，坂井吾郎：炭酸化養生による CO₂ 吸収型カーボンネガティブコンクリートの開発と今後の展開，コンクリート工学，Vol.59，No.9，pp818-818，2021
- 2) 扇嘉史，細川佳史：β-C₂S の炭酸化によって固定された CO₂ に関する研究，セメント・コンクリート論文集（Cement Science and Concrete Technology），Vol.77，pp.53-61，2023
- 3) 一般社団法人セメント協会，セメントの LCI データの概要，2024.4.1
- 4) 公益社団法人土木学会，コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），2005.11