

論文 残コン・戻りコン由来の再生骨材を対象に二酸化炭素を固定したコンクリートの基本的性質

川戸 陸也*1・山本 武志*1

要旨: セメント・コンクリート分野でのカーボンニュートラルの一助として、残コン・戻りコンから製造した再生骨材に CO₂ を固定させた炭酸化再生骨材を用いて各種試験を実施した。CO₂ 濃度 20% の環境に 1 週間暴露すると、粗骨材 1t あたり 54.2kg、細骨材 1t あたり 41.6kg の CO₂ を固定化させることが可能であるとわかった。また、CO₂ を固定することで密度と吸水率がわずかに改善した。炭酸化前と炭酸化後の再生骨材を用いたコンクリートの比較では、炭酸化後の骨材を用いた場合、圧縮強度は 1 割程度増加し、乾燥収縮ひずみは低減した。一方、自己収縮ひずみは増加し、乾燥による質量減少が多い結果であった。

キーワード: 残コン, 戻りコン, 再生骨材, 二酸化炭素, カーボンニュートラル

1. はじめに

セメントの製造においては、製品 1t あたり約 760kg の CO₂ を排出しており、日本の総排出量の 4.5% を占める¹⁾。我が国では 1996 年度をピークに減少傾向を示しているセメント生産も世界に目を向ければ増加傾向にあり 2021 年の世界の CO₂ 総排出量の約 7% を占めるとされている²⁾。コンクリートでは 1m³ あたり約 270kg もの CO₂ を排出するとされている³⁾。コンクリート・セメント分野でのカーボンニュートラルは今最も関心の高い課題の一つとなっている。

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) のグリーンイノベーション基金 (GI 基金) は 2050 年のカーボンニュートラル (ネットゼロ) を後押しすべく設立され、コンクリート・セメント分野においてもカーボンリサイクルと関連する技術開発として 4 つの課題に対する支援が行われている⁴⁾。日本コンクリート工学会 (JCI) においても上記 NEDO 事業と連携したカーボンリサイクル評価方法の規準化に向けた検討が進められている。

コンクリートに対する CO₂ の固定は中性化という現象として広く知られている^(例えば:5)6)。中性化は大気中の CO₂ がセメント水和物の水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) やケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) と反応する現象である。これが鉄筋の腐食を招くことから劣化現象の一つとして考えられている。

建設現場で発生している未使用生コンクリートの通称「残コン・戻りコン」は、生コン総出荷量に対して約 3~5% といわれ、単純計算で年間約 2.5~4.1 百万 m³ 発生していると推定される⁷⁾。残コン・戻りコンの発生量を削減する取り組みとして、有償化が行われてきているが、発生量の削減への効果は限定的である。また、一度に発生する量や品質が異なるためコンクリートとしての

有効利用が進んでおらず、捨てコン・均しコンやプレキャスト製品に再利用されているがその割合は僅少にとどまっている。

そこで、本研究ではカーボンニュートラルと残コン・戻りコンの有効利用の双方の課題解決をするべく、残コン・戻りコンから製造した再生骨材に CO₂ を固定化させた骨材を用いたコンクリートの各種特性を評価した。CO₂ 固定量については熱分析を用いた手法を適用した。

2. 残コン・戻りコンから製造した再生骨材の試験項目

2018 年度の国土交通省の発表によると、コンクリート塊の搬出量は 3,690 万 t で再資源化量は 3665 万 t (99.3%) とされている⁸⁾。うち、再生コンクリート砂が 202 万 t 製造されているが、コンクリートとして利用されたのは再生骨材コンクリート H が 6.4 万 t、再生骨材コンクリート M が 5.0 万 t、再生骨材コンクリート L が 0.5 万 t であり、合計 11.9 万 t であった (再生骨材コンクリートには再生骨材以外のコンクリート構成材料も含む)。

再生骨材に CO₂ を作用させると骨材としての品質が向上することが知られている⁹⁾。そのメカニズムはコンクリート中の水和生成物である Ca(OH)₂ が炭酸化することで、炭酸カルシウム (CaCO₃) が生成し、微細空隙を埋めることで緻密化すると考えられている。

再生骨材コンクリートでは、再生骨材の物性によって H, M, L と 3 段階に分かれた JIS 規格が存在する。一般的に流通している再生骨材は、コンクリートガラを破碎したものを加熱すりもみ法やスクリュエー磨砕法などを用いて骨材周囲に付着しているモルタル部分を除去している。そうすることで前述の JIS 規格に対応させている。しかし、その処理工程で発生する CO₂ 排出量や除去したモルタル中の水和生成物による CO₂ 固定量の逸失に鑑み、本研究では、残コン・戻りコンを生コン工場内のヤードに

*1 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造耐震工学研究部門 (正会員)

表-1 骨材試験の項目一覧

評価項目	規格・手法
微粒分量	JIS A 1103
単位容積質量	JIS A 1104
実積率	JIS A 1104
密度	JIS A 1109, JIS A 1110
吸水率	JIS A 1109, JIS A 1110
鉱物組成	粉末XRD
顕微鏡観察	FE-SEM

表-2 再生骨材の試験結果

	RS	RG
	再生細骨材	再生粗骨材
粗粒率	2.60	6.67
表乾密度(g/cm ³)	2.22	2.30
絶乾密度(g/cm ³)	1.94	2.11
吸水率(%)	14.11	9.13
微粒分量(%)	8.7	0.5
単位容積質量(kg/L)	1.43	1.37
実積率(%)	73.4	64.8
CO ₂ 含有量(%)	12.42	6.78

表-3 炭酸化再生骨材の試験結果

	CRS	CRG
	炭酸化再生細骨材	炭酸化再生粗骨材
表乾密度(g/cm ³)	2.22	2.32
絶乾密度(g/cm ³)	1.95	2.14
吸水率(%)	13.71	7.94
CO ₂ 含有量(%)	16.58	12.20

暴露し、硬化後に破砕した骨材（以下、再生骨材）を製作し各種骨材試験に供した。試験項目を表-1に示す。XRDの測定条件は、ターゲットCuKα、管電流45kV、管電流40mA、走査範囲5-60deg.2θ、ステップ幅0.02deg.とした。

3. CO₂固定方法

促進中性化槽を用いてCO₂固定を行った。CO₂固定の条件は温度20°C、相対湿度60%、CO₂濃度20%とした。CO₂固定の期間は、事前検討において最大4週間までのCO₂固定量を確認し、1週間で4週間の90%以上となることを確認したため、1週間とした。

アセトン浸漬後にD-dry乾燥処理を行い、示差熱重量同時分析(TG-DTA)で550-850°Cにおける質量減少量を炭酸カルシウムの分解による減量とみなし、CO₂固定量として評価した。

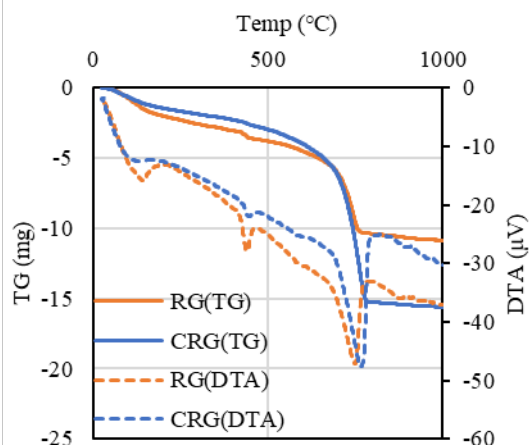


図-1 粗骨材のTG曲線およびDTA曲線

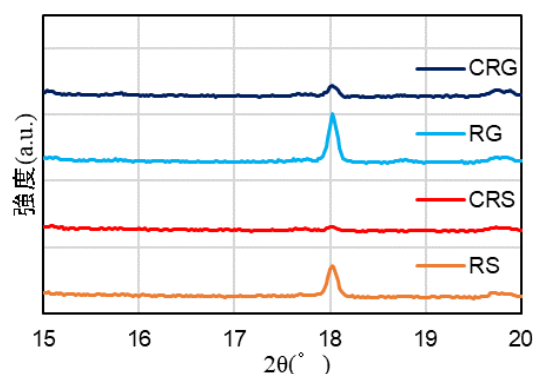


図-2 Ca(OH)₂のXRDプロファイル(2θ=18°付近)

4. 骨材試験の結果

残コン・戻りコンから作製した再生骨材の物性を表-2に示す。本研究では2か所の生コン工場から発生した残コン・戻りコンを使用した再生骨材を用いた。JIS A 5023 再生骨材コンクリートLの附属書Aによると、再生粗骨材Lは吸水率7.0%以下、微粒分量3.0%以下、再生細骨材Lは吸水率13.0%以下、微粒分量10.0%以下であることが規定されている。本研究で用いた再生骨材はRGおよびRSともに微粒分量ではL規格に収まるが吸水率が範囲外となった。その他の物性値では密度が小さい値であったが、それ以外の特筆すべき特徴はなかった。

次に再生骨材に前述の条件にてCO₂を固定させた骨材の密度と吸水率の結果を表-3に示す。密度および吸水率以外の物性については、CO₂固定による影響が微小であると考え実施しなかった。CGおよびCSともにCO₂を固定させることで、吸水率が低下することが確認できた。

CO₂固定前の骨材においてもCO₂固定量が存在するが、これは、再生骨材の原コンクリート中の細骨材の3割程度が石灰石骨材を用いていることや再生骨材製造時に大気中のCO₂を吸収したものに起因すると考えられる。現時点ではこれらのCO₂起源による分離が困難であること

表-4 コンクリート配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						混和剤 (C×%)		
			C	W	CRS	RS	CRG	RG	SP	AE	D
45-RA	45	42	389	175	-	610	-	876	2	0.0045	0.002
45-CRA					613	-	884	-	1.3	0.0190	0.002
55-RA	55	44	318		-	661	-	874	2.2	0.0040	0.002
55-CRA					664	-	882	-	1.2	0.0070	0.002
65-RA	65	46	269		-	707	-	863	2.4	0.0035	0.002
65-CRA					710	-	870	-	1.3	0.0030	0.002

表-5 フレッシュ性状

	45-RA	45-CRA	55-RA	55-CRA	65-RA	65-CRA
スランブ (cm)	12.0	13.0	13.0	14.5	13.5	16.0
空気量 (%)	5.5	5.7	5.5	5.7	5.5	5.8

表-6 硬化コンクリートの試験項目

評価項目	規格・標準	測定期間
圧縮強度	JIS A 1108	材齢7,28日
静弾性係数	JIS A 1149	材齢7,28日
割裂引張強度	JIS A 1113	材齢7,28日
自己収縮ひずみ	JCI-SAS2	材齢28日まで
長さ変化率	JISA1129-3	乾燥期間0,1,3,7,14,28日

から本研究ではコンクリート構成材料由来および大気中からのCO₂吸収を計上しないように、強制炭酸化によるCO₂の固定のみを固定量とした。CO₂固定量はTG-DTAを用いて550-850℃における強制炭酸化後の質量減少量から強制炭酸化前の質量減少量を減じた量とした。

その結果、CGのCO₂固定量は54.2kg/t、CSのCO₂固定量は41.6kg/tであった。なお、CO₂固定後の乾燥試料の質量に対する質量比としてCO₂固定量を評価した。図-1のDTA曲線に着目すると450℃付近の水酸化カルシウムの分解¹⁰⁾による吸熱反応が、CGではRGに比べ小さくなっていることが判る。これはCSとRSのDTA曲線でも同様の傾向であった。これは骨材へのCO₂固定によりCa(OH)₂がCaCO₃へと変化したことによる。XRDによる結晶相分析の結果でも炭酸化前後ではCa(OH)₂のピークが減少することが確認できた(図-2)。

5. 配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合を表-4に示す。ここに、C:普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、W:水道水(密度:1.00g/cm³)、SP:ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤、AE:AE剤(I種)、D:空気量調整剤とする。本研究では実験的に粗骨材と細骨材の100%を再生骨材で置換した配合について各種試験を行った。単体量を175kg一定とし、水セメント比を45%、55%、65%の3

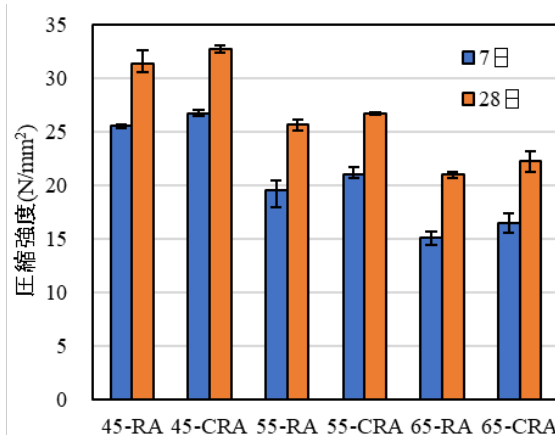


図-3 圧縮強度試験の結果

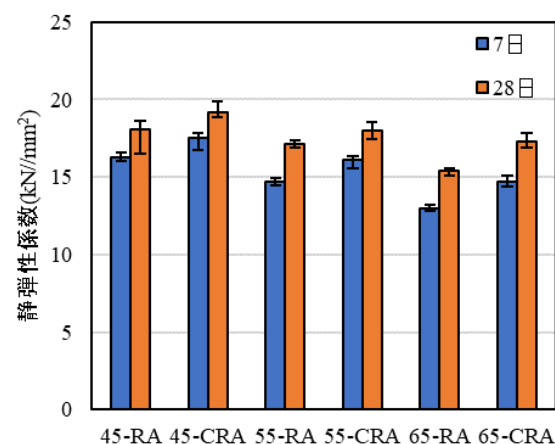


図-4 静弾性係数試験の結果

水準とした。フレッシュ性状の目標値はスランブ14cm±2.5cm、空気量5.5±0.5%とした。空気量は別途実施する凍結融解試験のため高めの値を設定した。水セメント比45%、55%、65%で73.4kg/m³、75.4kg/m³、76.7kg/m³のCO₂を固定した配合となっている。

フレッシュ性状を表-5に示す。同程度のスランブを得るために使用したSPの混和量は水セメント比によらずCRAの方がRAよりも少ない量であった。本研究では使用骨材以外は統一していることから、これはCO₂固定による骨材性質の変化に起因すると考える。

6. 試験項目

硬化コンクリートに対し行った試験の一覧を表-6に示す。長さ変化測定は材齢7日まで20℃水中養生した後20℃60%RHの環境で乾燥させた。

7. 試験結果

7.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-3に示す。試験は再生骨材が均一な骨材ではないことから実験結果にバラツキが生

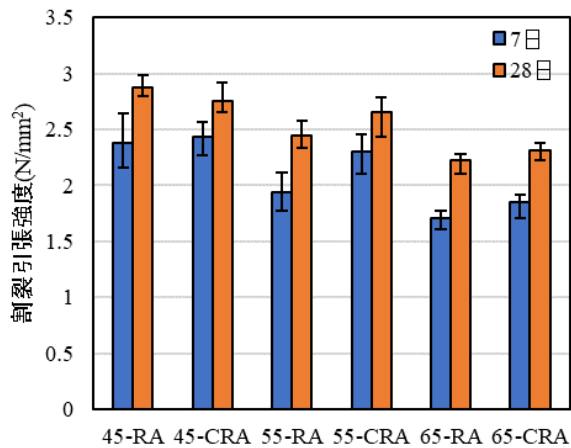


図-5 割裂引張強度試験の結果

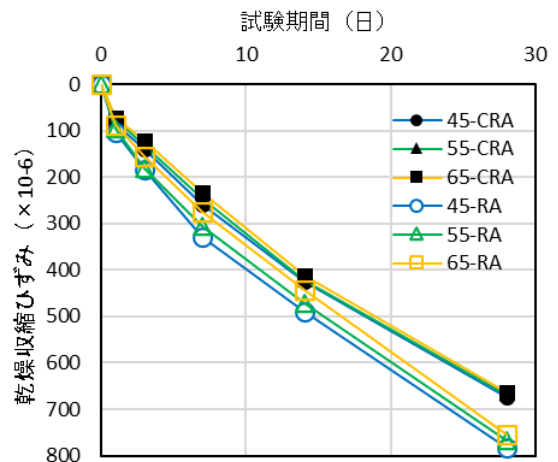


図-6 長さ変化試験の結果 (乾燥収縮ひずみ)

表-7 自己収縮ひずみ量

配合	45-RA	45-CRA	55-RA	55-CRA	65-RA	65-CRA
ひずみ (x 10⁻⁶)	117	109	91	126	83	121

じる恐れがあるため1条件あたり5本とした。図には5本全ての平均値と最大値と最小値をエラーバーで示した。

圧縮強度はすべての水セメント比の系において CRA > RA となった。CO₂ 固定による圧縮強度の増加は 4~9%であった。CRA 配合ではわずかに材齢 28 日での強度増加が小さい結果であった。再生骨材を炭酸化させることで若材齢での強度発現性が向上することが確認できた。

7.2 静弾性係数試験

静弾性係数試験の結果を図-4 に示す。図には圧縮強度と同様に 5 本の平均値と最大値と最小値をエラーバーで示した。静弾性係数は圧縮強度と同様に CRA > RA であり、CRA 配合では 7 日から 28 の増加量が RA に比べ小さい値となった。

7.3 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験の結果を図-5 に示す。図には 5 体の平均値と最大値および最小値をエラーバーで示した。水セメント比 55%および 65%では CRA > RA であったが、水セメント比 45%の 28 日強度では CRA < RA となった。

再生コンクリートの割裂引張強度では粗骨材とモルタルの界面または原骨材と付着モルタルの界面が弱部であり支配的となることが考えられる。本件で用いた再生骨材では原骨材を含まないペーストやモルタルのみで構成された細骨材や粗骨材が存在する。これらの骨材は製造過程の都合上、空隙が多く内包しており、吸水率が高く強度は低い。低水セメント比では界面の破壊よりも骨材での破壊が卓越したため CRA 配合の強度低下に繋がったと考える。

7.4 自己収縮ひずみ測定

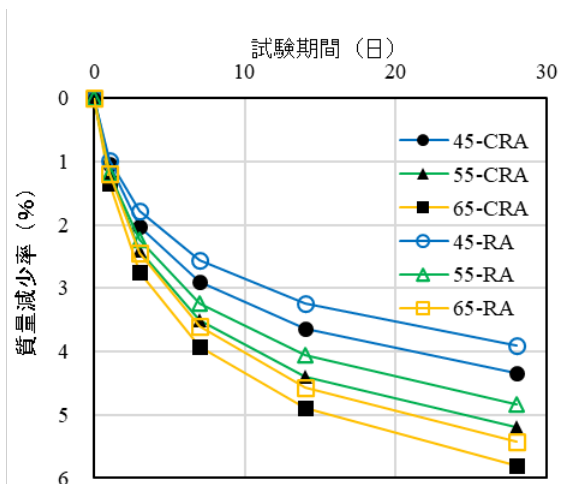


図-7 長さ変化試験の結果 (質量減少率)

自己収縮ひずみの測定結果を表-7 に示す。自己収縮ひずみの大小はセメントの水和反応と密接に関係している。本研究で用いた再生骨材は若材齢で破碎して作製しているため骨材中に未水和セメントが残存すると考えられる。その未水和セメントがコンクリート作製時に水と反応することによる自己収縮量の増加を懸念していたが、炭酸化処理した CRA 配合の方が RA 配合よりも自己収縮ひずみが大きい結果であった。軽量骨材などの高吸水率の骨材を用いた場合に骨材中の含水がセメントペーストへ供給されることで水による自己乾燥を防ぐことが報告されており¹¹⁾、再生骨材でも同様の現象が発生したと考えられる。また、炭酸化させたことで吸水率が低下したことで骨材からの水分供給が減少したことで収縮量が増加したと考える。一方で、水セメント比 45%の系では炭酸化させた骨材を用いたほうが自己収縮ひずみが小さい結果であった。この結果が再生骨材によって引き起こされたのかは追加での検証が必要と考える。

7.5 長さ変化試験

長さ変化試験の結果を図-6 および図-7 に示す。RA

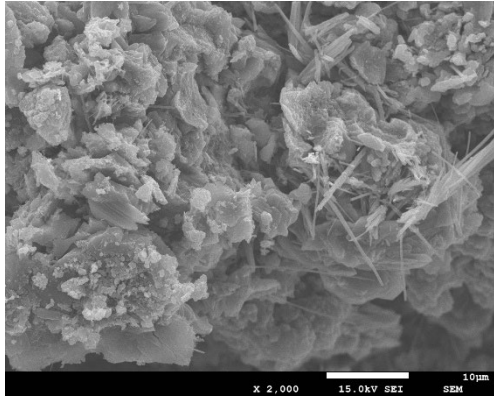


図-8 RGの未炭酸化部（×2000 SEM像）

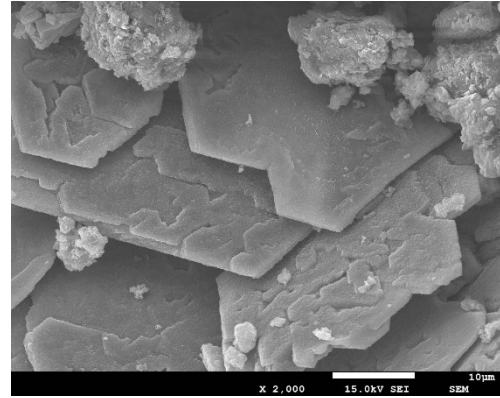


図-10 CRG（×2000 SEM像）

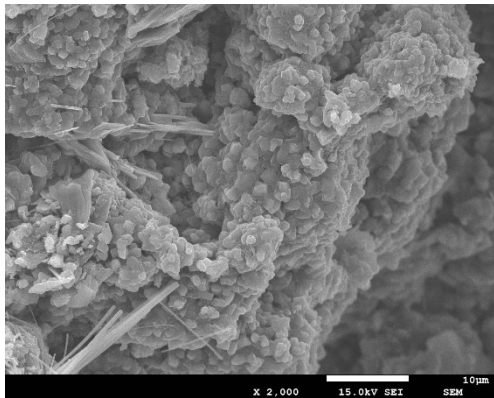


図-9 RGの炭酸化部（×2000 SEM像）

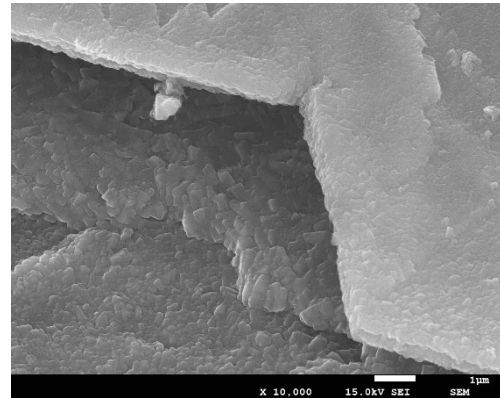


図-11 CRG（×10000 SEM像）

配合および CRA 配合ともに水セメント比が小さいほど乾燥収縮ひずみは大きく、質量減少量は小さくなった。また、同水セメント比で比較すると RA 配合よりも CRA 配合のほうが乾燥収縮ひずみが小さい結果となった。一方で質量減少率は RA 配合よりも CRA 配合の方が大きい結果となった。RA 骨材および CRA 骨材は骨材試験の結果からわかるように多孔質な骨材となっている。長さ変化試験での質量減少は水分逸散によるものであり、吸水率の高い骨材を用いることで骨材中の粗大空隙が内包していた水分を放出することで質量減少率が普通コンクリートに比べ大きくなることが確認されている¹¹⁾¹²⁾。それに対して、乾燥収縮ひずみは毛細管空隙からの水分逸散により生ずる収縮応力と水和物の層間水の離脱による収縮が原因とされている¹³⁾。RA 骨材に CO₂ を固定させ CRA 骨材としたことで、骨材中の水和物が炭酸化により減少し、毛細管空隙に相当する空隙径が炭酸カルシウムの析出による体積膨張で減少した可能性がある。本現象のメカニズムの解明には追加検討が必要だと考える。

7.6 SEM観察

図-8 および図-9 に RG の SEM 画像、図-10 および図-11 に CRG の SEM 画像を示す。CO₂ を固定させる前の RG では図-8 のように C-S-H や Ca(OH)₂、針状のエトリンライトが見られる部分がある。これらが CO₂ 固定

代となる Ca 源となる。一方、図-9 のように粒状の結晶が表面を覆っている箇所も確認された。これは C-S-H が CaCO₃ のカルサイトの結晶に変化している様子である。CaCO₃ が析出した原因は残コン・戻りコンから骨材を製造する過程で大気中の CO₂ を固定したことに起因すると考える。図-10 および図-11 の CRG では板状結晶の Ca(OH)₂ が炭酸化により CaCO₃ へ変化している過程の様子が確認できた。平滑な板状の結晶である Ca(OH)₂ が炭酸化により崩壊し小さな粒状の結晶へと変化している様子が判る。

8. まとめ

建設業界で問題となっている残コン・戻りコンの有効活用と世界的な環境問題の対策として打ち出されたカーボンニュートラルの一助とするために、残コン・戻りコンから作製した再生骨材に CO₂ を固定した炭酸化再生骨材を用いて環境負荷低減型コンクリートに向けた実験的研究を行った。残コン・戻りコンから製造した再生骨材は促進中性化槽で温度 20°C、相対湿度 60%RH、CO₂ 濃度 20%の環境に 1 週間暴露すると粗骨材で 54.2kg/t、細骨材で 41.6kg/t の CO₂ 量が固定できた。これらの炭酸化再生骨材を用いてコンクリートを作製した結果、以下の結果を得た。

- 1) 圧縮強度は、再生骨材に CO₂ を固定させると 4～9%増加した。
 - 2) 割裂引張強度は、高水セメント比では強度増加するが、低水セメント比では一部逆転した。
 - 3) 自己収縮ひずみは、再生骨材に CO₂ を固定させると吸水率が小さくなり水分の供給源としての働きが弱まり大きくなった。
 - 4) 乾燥収縮ひずみは、再生骨材に CO₂ を固定させると小さくなった。一方で質量減少率は増加した。
- 今後、様々な耐久性について検討を進め、CO₂ 排出量と CO₂ 固定量がイコールとなるカーボンニュートラルなコンクリートの作製を目指して検討を進めていく。

謝辞

本研究は NEDO の業務委託（JPNP21023）の一環として実施しました。東京都立大学上野准教授には考察に関するご助言を頂きました。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：セメントの LCI データの概要，一般社団法人セメント協会，2023 年 2 月 16 日
- 2) 一般社団法人日本建設業連合会：低炭素型コンクリートの普及促進にむけて-低炭素社会・循環型社会の構築への貢献-，2016.04
- 3) Low-carbon concrete could bring a ‘radical change’ to the industry:
<https://www.japantimes.co.jp/news/2023/05/19/business/low-carbon-concrete-radical-change-potential/> (閲覧日：2023 年 12 月 21 日)
- 4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発

- 機構 HP, 「グリーンイノベーション基金事業で、コンクリートやセメント分野のカーボンリサイクル技術の開発に着手」：
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101510.html
(閲覧日：2023 年 12 月 21 日)
- 5) 日本コンクリート工学会 HP, コンクリートの基礎知識 中性化:<https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/kiso/Carbonation.html> (閲覧日：2023 年 12 月 21 日)
 - 6) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会 HP, (1) 中性化とは:<https://www.j-cma.jp/?cn=102637> (閲覧日：2023 年 12 月 21 日)
 - 7) 一般社団法人生コン・残コンソリューション技術研究会 HP, 残コン戻りコン処理：<https://rrcs-association.or.jp/cn4/domain3.html> (閲覧日：2023 年 12 月 21 日)
 - 8) 国土交通省，平成 30 年度建設副産物実態調査結果（確定値），2020 年 1 月 24 日
 - 9) 松田信広，伊代田岳史：炭酸化による低品質再生骨材の改質技術の提案と改質再生骨材がコンクリートに与える影響，コンクリート工学論文集，第 30 巻，pp. 65-76，2019
 - 10) 高田良章，魚本健人：中性化の進行に伴うコンクリートの品質変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.14, No.1, pp. 901-904，1992
 - 11) 岡本享久，石川雄康，榎木隆，笹嶋昌男：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，37 巻，4 号，1999
 - 12) 後藤幸正，藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，第 247 号，97-108，1978.03
 - 13) 中山英明：コンクリートの構成材料に基づく乾燥収縮予測方法に関する研究，東京大学博士論文，2017