

論文 再生骨材の製造工程における CO₂ 固定量に関する研究

吉野 玲*1・鈴木 好幸*2・伊藤 淳*3・野中 英*4

要旨：解体後のコンクリート構造物から製造される再生骨材は、建物供用中に加え、再資源化の過程で多くの CO₂ を固定することが期待される。本研究では、再生骨材の実製造プロセスにおける CO₂ 固定量を調査することを目的とし、原コンクリートの諸元が既知のコンクリートブロックを用いて再生骨材を製造し、その製造工程および製造後の保管期間における CO₂ 固定量を調査した。その結果、再生骨材の製造工程では CO₂ の固定量の増加はほとんど確認できなかったが、製造後 4 週間の保管期間において、再生細骨材 L で最大 41.9kg/t、再生粗骨材 L、再生細骨材 M および再生粗骨材 M で約 10kg/t の CO₂ を固定することが確認できた。

キーワード：再生骨材, CO₂ 固定, 付着ペースト量, 示差熱同時分析, 全有機体炭素測定, XRD

1. はじめに

近年、コンクリート構造物のライフサイクル CO₂ (LCCO₂) 評価の観点から、供用中もしくは解体後の CO₂ 固定量を正しく評価することの重要性について関心が高まっている。コンクリート構造物の LCCO₂ 削減において、供用中の中性化は極力抑制しつつ、長寿命化を目指すことが重要かつ効果的である。供用中の CO₂ 固定化に期待し、その固定量を高めようとする取組みは、構造物としての耐用年数の減少や修繕・改修等の増加に繋がる懸念もあることから慎重な制度設計が必要である。

一方で、コンクリートは再資源化のために破砕することで比表面積の増大や、内部の未炭酸化部が大気に接するため、再資源化の過程で相当量の CO₂ 固定が期待できることが報告されている(例えば 1), 2)。

そこで、本研究では、再生骨材の実製造プロセスにおける CO₂ 固定量を調査することを目的として実験を行った。具体的には、調合と使用材料が既知のコンクリートブロックの再資源化における破砕工程ならびに場内保管時に固定化した CO₂ 量と水和物等の組成変化について検

討した。

なお、本研究は表-1 に示す 13 社で構成された「再生骨材を用いた CELBIC (C 種クラス) の実用化に関する研究会」において実施したものである。

2. 実験の概要

2.1 原コンクリート

本検討では、調合、使用材料および供用環境が既知のコンクリートブロックを原コンクリートとして使用して再生骨材を製造した。原コンクリートの諸元を表-2 に、保管状況を写真-1 に示す。

原コンクリートは製造時期と水セメント比が異なる 3 体の 1m×1m×0.87m のコンクリートブロックで、同一の生コン工場から出荷されたコンクリートで作製された。所定の期間、屋内で保管後に中間処理・再生骨材製造工場へ運搬し、受け入れ後に人頭大程度に粗粉碎し混合し



写真-1 原コンクリート保管状況

表-1 共同研究への参加会社

青木あすなる建設	○浅沼組	○安藤ハザマ
奥村組	熊谷組	鴻池組
◎五洋建設	鉄建建設	東急建設
東京テクノ	東洋建設	長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順, ◎:主査, ○:幹事)	

表-2 原コンクリートの諸元

No.	供用期間 (製造から破砕まで)	保管環境	呼び方	W/C (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位 セメント量 (kg/m ³)	使用材料		
							セメント	細骨材	粗骨材
1	176 日	打設 1 週間後 脱型・ 屋内保管	24-12-20N	59.5	171	287	普通ポルト ランドセメ ント	陸砂 茨城県行方市 麻生産	砂岩碎石 茨城県笠間市 片庭産
2	147 日		27-12-20N	55.0	171	311			
3	37 日		27-12-20N	55.0	171	311			

*1 (株) 安藤ハザマ 技術研究所構造・材料研究部 (正会員)

*2 (株) 安藤ハザマ 技術研究所脱炭素技術開発部 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) 奥村組 技術研究所建築研究グループ

*4 (株) 熊谷組 技術本部技術研究所技術ソリューション部 博士 (工学) (正会員)

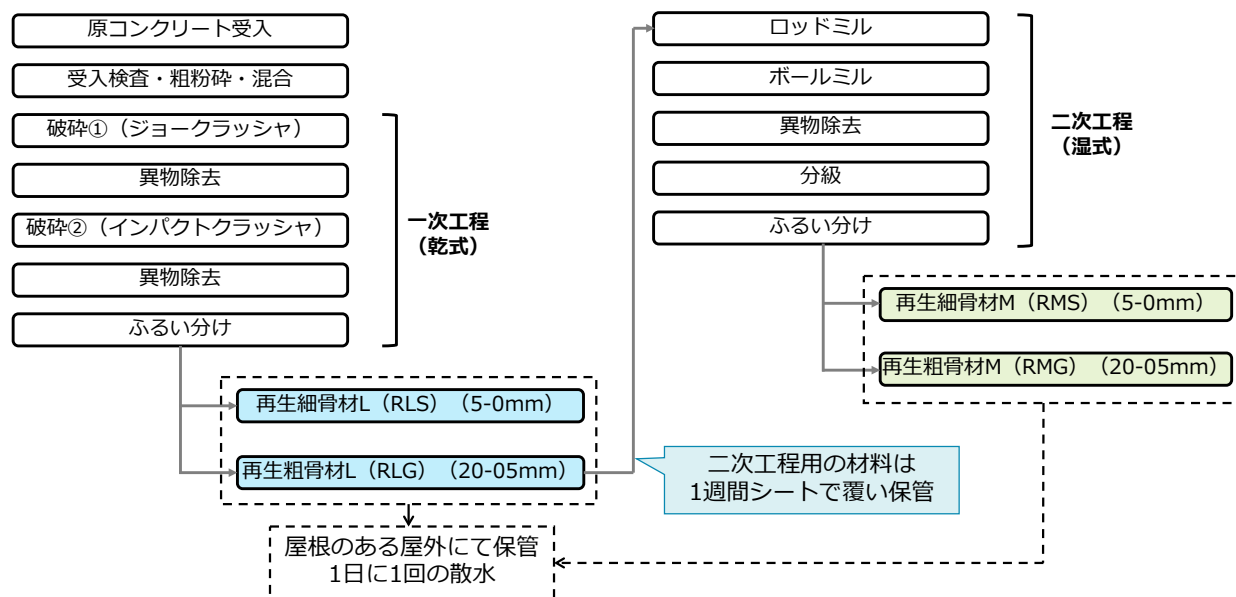


図-1 再生骨材の製造方法

た。

再資源化までの期間が比較的短いため、内部までの炭酸化はほとんど生じていないものと推察される。

2.2 再生骨材の製造と保管

本検討における再生骨材の製造方法を図-1 に示す。再生骨材は、原コンクリートを受入れ後、粗粉碎・混合したコンクリート塊を一次工程として乾式破碎し、振動ふるい機でふるい分け、再生細骨材 L (5-0mm, 以下, RLS) と再生粗骨材 L (20-05mm, 以下, RLG) を製造した。その後、製造した RLG の一部を使用し、二次工程により各種ミルで磨砕、ふるい分けして再生細骨材 M (5-0mm, 以下, RMS), 再生粗骨材 M (20-05mm, 以下, RMG) を製造した。工場の稼働状況により、RLG の一部から RMS, RMG を製造するまでに 1 週間のブランクがあったが、その間はシートで覆って保管した。各種再生骨材は製造直後に、製造工程における CO₂ 固定量を分析するためのサンプリングを行い、残りを屋根が設置されている屋外で敷き均して保管した。保管期間中は、実際の保管時と同様の湿潤管理を再現するため、1 日に 1 回程度、骨材表面が湿るまで散水を行った。保管時の経時変化を確認するため、保管期間 1 週および 4 週経過時点で分析用のサンプリングを行った。

2.3 骨材試験・分析項目と方法

表-3 に実施した骨材試験と分析項目と方法を示す。また、分析に供した試料の試料調製手順を表-4 に示す。CO₂ 含有量は、示差熱重量分析装置 (以下, TG-DTA) における脱炭酸反応における質量減少および全有機体炭素分析装置 (以下, TOC) による無機炭素 (IC) の定量により測定した。CO₂ 固定量は、原コンクリート塊の受入時点を基準値 (以下, blank) として、blank と各工程で採取した試料の CO₂ 含有率の測定結果の差分により算出し

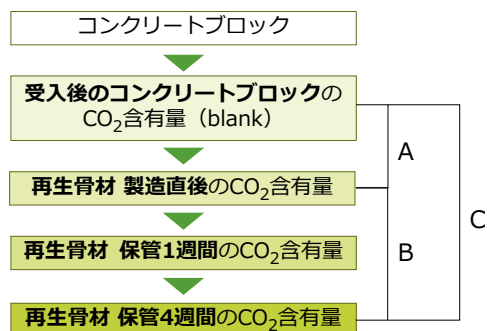
表-3 骨材試験・分析項目と方法

項目	方法・備考	
密度・吸水率	JIS A 1109, JIS A 1110	
ふるい分け	JIS A 1102	
微粒分量	JIS A 1103	
骨材試験	不溶残分 ³⁾	<ul style="list-style-type: none"> 分析装置: 誘導結合プラズマ発光分光分析装置 ICP AES Optima8300 PerkinElmer 条件: 高周波出力: 1.3kW, プラズマガス流量 10 L/min, キャリアガス流量 0.55 L/min, 試料導入流量: 1.0 mL/min
	付着ペースト量	<ul style="list-style-type: none"> 塩酸溶解法 付着セメントペーストが溶解し、かつ溶け残る原骨材が変質しない程度の濃度の希塩酸 (塩酸 (34~36%) 4 倍液希釈程度) を使用、目視でセメントペーストが十分に溶解できていることを確認しながら複数回繰返し、セメントペースト除去後、水洗いし、75 μm 以上に残る試料を原骨材とした。
分析	TG-DTA	<ul style="list-style-type: none"> 測定雰囲気 窒素ガス流量 120~150ml/min 加熱温度 室温~1000℃ 昇温スピード 10℃/min CO₂ 含有率: 温度範囲 550~850℃の質量減量率
	TOC	<ul style="list-style-type: none"> IC 反应用酸: リン酸 (2 倍希釈) IC 炉内加熱温度: 200℃ SSM キャリアガス: 酸素 (500ml/min)
	XRD/リートベルト	<ul style="list-style-type: none"> X 線源: セラミック X 線管球 (封入管), 走査速度: 5°/min, 走査範囲: 5°から 65° 内部標準: α-Al₂O₃ を内割りで 10% 添加 採取した試料を全量粉碎して使用

表-4 試料調製手順

手順	備考
1. 採取試料を全量粗粉碎	5mm 程度
2. アセトン浸漬	6 時間以内
3. 真空デシケータにて減圧乾燥	
4. ディスクミル・ボールミルにて微粉碎	100 μm 程度
5. 真空凍結乾燥し、分析まで密封容器で保管	

た。CO₂固定量の算出の概要を図-2に示す。各工程でのコンクリートブロックあるいは各再生骨材のCO₂含有率を調査することで、各再生骨材製造工程におけるCO₂固定量(A)、場内保管した場合のCO₂固定量(B)および各再生骨材の製造工程と場内保管でのCO₂固定量(C)を算定した。ここで、blank測定用の供試体は、コンクリートブロック製造時に作製した封かん供試体を用いた。なお、blank用の供試体と、各再生骨材では試料中の構成材料比が異なることが想定されるため、それぞれの試料の骨材量を不溶残分により推定し、各種再生骨材の骨材量との差異を確認した。



A: 再生骨材の製造工程におけるCO₂固定量
 B: 再生骨材の場内保管期間におけるCO₂固定量
 C: 再生骨材製造工程+場内保管期間のCO₂固定量

図-2 CO₂固定量の算出の概要

3. 骨材試験結果

3.1 物性試験結果

表-5に、表乾および絶乾密度、吸水率、微粒分量、粗粒率の結果を示す。RLS-4週のみ、吸水率が13.3%であり、JIS A 5023 附属書Aの規格値(吸水率13.0%以下)を上回ったが、それ以外はいずれもJIS A 5022, JIS A 5023 附属書Aの規格値を満足している。保管期間による各物性値の変化には、とくに傾向はみられなかった。

3.2 不溶残分量試験結果

表-6に各試料の不溶残分(insol.)を示す。blankは封かん供試体(φ10×20cm)を全量粉碎した試料の結果である。不溶残分が試料中の骨材量と仮定すると、RLSが最も骨材量が少なく、ペースト量が多いことが確認できる。次にblank, RLG, RMS, RMGの順にペースト量が多いことが推察される。

3.3 付着ペースト量試験結果

表-7に各試料の付着ペースト量試験の結果を示す。付着ペースト量は、RLSが34.4~36.1%となっており、RMSの17.6~18.5%と比較して大きい値となっている。一方、RMGとRLGは同程度の値となっている。通常は、付着ペースト量と骨材の吸水率には相関があり、RMGとRLGが同程度の付着ペースト量となることは考えにくい。写真-2に溶解後のRMGとRLGの試料の状況を示す。RLGは原骨材として均一な硬質砂岩の骨材が残っているのに対して、RMGは、本来原コンクリートには含まれていないはずの異なる岩種の骨材が混ざっていることが確認できた。これは、RMGの製造工程において、ミル中の残留骨材が混ざったことによる影響と推察される。混入した骨材をXRDで分析した結果、石灰石の主成分鉱物である方解石(calcite-CaCO₃)は検出されなかったが、灰長石(anorthite-CaAl₂Si₂O₈)などのCaが含まれる鉱物が検出された。よって、それらの混入骨材が付着ペースト試験結果に影響を及ぼした可能性が示唆される。

表-5 骨材の物性試験結果

記号 -保管期間	表乾 密度 (g/cm ³)	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒 分量 (%)	粗粒率 (F.M.)
RLS-0週	2.22	1.98	12.2	3.00	3.41
RLS-1週	2.23	1.98	12.5	2.30	3.48
RLS-4週	2.20	1.95	13.3	2.40	3.46
RLG-0週	2.41	2.29	5.55	0.40	6.61
RLG-1週	2.43	2.31	5.16	0.40	6.67
RLG-4週	2.43	2.30	5.20	0.40	6.59
RMS-0週	2.56	2.48	3.48	2.50	2.83
RMS-1週	2.57	2.49	3.08	2.50	2.89
RMS-4週	2.55	2.46	3.50	2.70	2.88
RMG-0週	2.56	2.50	2.80	0.10	6.55
RMG-1週	2.57	2.51	2.64	0.10	6.63
RMG-4週	2.57	2.51	2.65	0.10	6.62

表-6 不溶残分量試験結果

記号	insol.(%)	シリカゲル量(%)
blank	75.1	0.35
RLS	69.5	0.34
RLG	82.0	0.42
RMS	84.1	0.65
RMG	86.1	0.65

表-7 付着ペースト量試験結果

記号-保管期間	付着ペースト量(%)
RLS-0週	34.4
RLS-1週	34.8
RLS-4週	36.1
RLG-0週	15.6
RLG-1週	15.9
RLG-4週	16.1
RMS-0週	18.5
RMS-1週	17.6
RMS-4週	18.5
RMG-0週	15.8
RMG-1週	14.8
RMG-4週	14.9

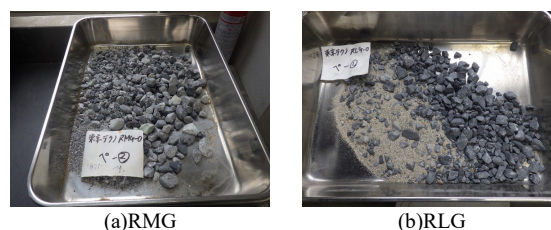


写真-2 付着ペースト量試験による溶解後の試料の状態

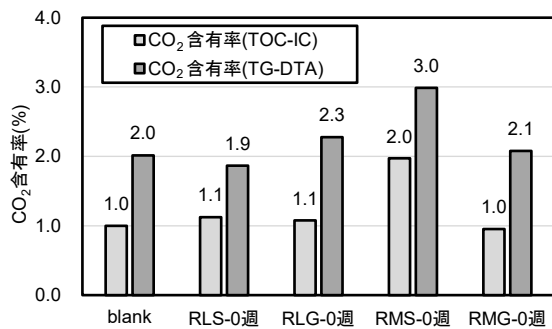


図-3 blank と各再生骨材の製造直後の CO₂ 含有率

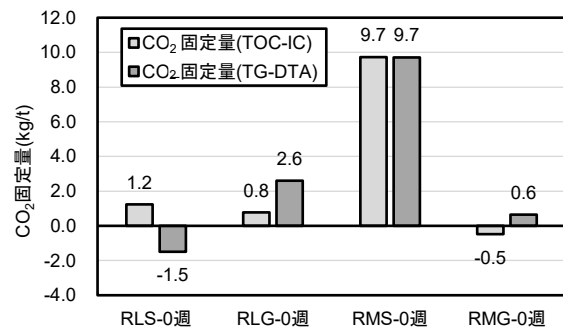


図-4 各再生骨材の製造工程での CO₂ 固定量

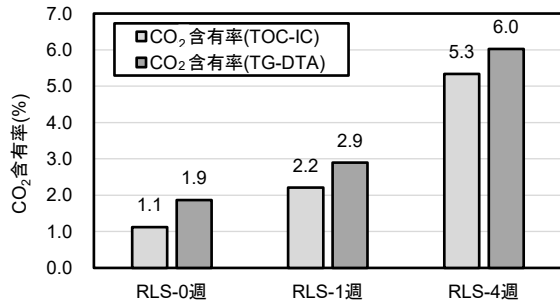


図-5 RLS の各保管期間における CO₂ 含有率

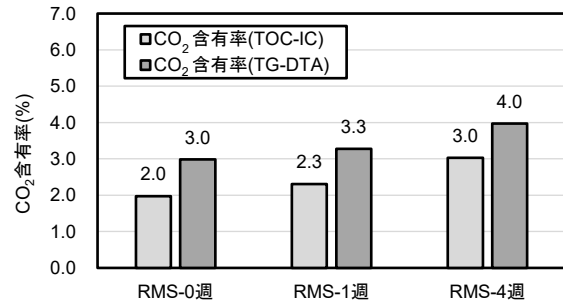


図-6 RLG の各保管期間における CO₂ 含有率

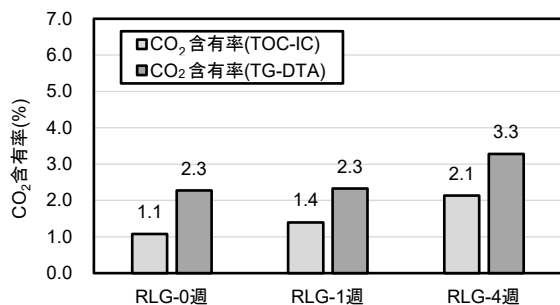


図-7 RMS の保管期間ごとの CO₂ 含有率

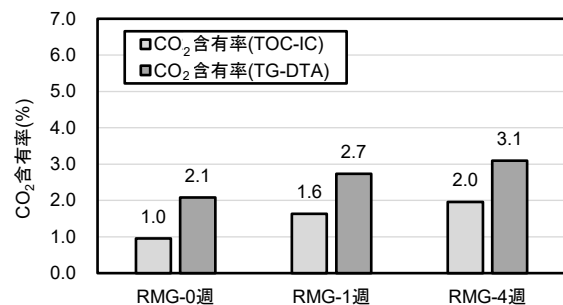


図-8 RMG の保管期間ごとの CO₂ 含有率

4. CO₂ 固定量分析結果

4.1 再生骨材の製造工程での CO₂ 固定量

図-3 に、blank と各再生骨材の製造直後（保管 0 週）の CO₂ 含有率の結果を示す。CO₂ 含有率は、TOC 装置による無機炭素 (TOC-IC) と TG-DTA による脱炭酸に伴う質量減少から求めた。TOC-IC よりも TG-DTA のほうが CO₂ 含有率は全体的に大きいが、試料ごとの傾向は同様であり、RMS-0 週が最も大きくなっている。

図-4 に、各再生骨材の製造工程の CO₂ 固定量 (blank からの増加量) を示す。RMS のみ、製造工程により 9.7kg/t 程度の固定化が確認されたが、その他の再生骨材では明確な固定化は確認されなかった。この理由については、本再生骨材の製造では、原コンクリートから 1 次工程により RLS, RLG を製造した後に、RLG (25-05mm) を使用して RMS, RMG を製造しているが、今回の製造では工場の稼働状況から RLG を製造してから RMS, RMG を製造するまでに 1 週間経過している。その期間中に RLG のペースト表層部に固定化した CO₂ が、その後の 2 次工

程での磨砕処理により全て RMS に含まれたことが影響していると推察される。一方、RLS, RLG は製造直後にサンプリングしたため破砕後に大気に曝される時間が短いこと、RMG は磨砕処理により表層の付着ペースト分が取り除かれたことから、CO₂ の固定化がほぼ認められなかったものとする。表-6 で示したとおり、blank 供試体と各再生骨材では試料中の骨材量に差があるため、その影響があることも考えられる。

4.2 再生骨材の保管による CO₂ 固定量

図-5~8 に再生骨材の保管期間ごとの CO₂ 含有率を示す。TOC-IC と TG-DTA の傾向は同じで、全ての再生骨材で保管期間が長くなるほど CO₂ 含有率が増えていることが分かる。

表-8 に製造工程と保管期間ごとの CO₂ 含有率の差分から求めた、保管期間ごとの CO₂ 固定量を示す。RLS が顕著に大きく TOC-IC, TG-DTA とともに 40kg/t の CO₂ 固定量となった。その他の再生骨材では数 kg/t~10kg/t 程度の CO₂ 固定量であった。

4.3 再生骨材の製造工程と保管での CO₂ 固定量

表-9 に、TOC-IC と TG-DTA で分析した再生骨材の製造工程と保管での CO₂ 固定量を示す。今回の TOC-IC と TG-DTA の傾向に違いがなかったことから、表-10 に、それぞれの結果の平均値を示す。今回の実験結果では、RLS の CO₂ 固定量が最も大きく、製造工程および保管期間 4 週により 41.8kg/t となった。RLS は不溶残分の結果からも付着ペースト量が最も多く、比表面積が大きい細粒分へのセメント水和物の偏在により CO₂ を固定化できるポテンシャルが大きいと推察される。次に RMS が 19.9kg/t で、RLG と RMG はそれぞれ 11.7kg/t, 10.2kg/t と同程度であった。表-10 には既往の文献 2), 4) による参考値を示すが、再資源化を模擬した室内試験による保管のみの結果である文献 2) と比較すると RMS を除いて本研究結果のほうが大きい値であり、実際の処理工場の結果である文献 4) と比較すると、RLS では本結果のほうが大きく、RLG では同程度であった。原コンクリートの特性や製造方法により CO₂ 固定量は異なるものと推察されるが、実際の再生骨材の製造工程において、既往文献や本研究で示した程度の水準での CO₂ 固定量が得られているものと評価できる。

4.4 XRD/リートベルト分析結果

表-11 に XRD/リートベルト解析による各鉱物の定量

結果を示す。骨材量は、表-3 に示した不溶残分の結果を用いて補正している。また、C-S-H 量は、XRD でピークとして検出されない非晶質を C-S-H と仮定した数値であり、この中にはシリカゲルも含まれているが、シリカゲル量は不溶残分試験時に表-3 に示すように定量しており、その影響は少ないことを確認している。

XRD/リートベルト解析による各鉱物の定量結果から、blank 時に存在していた Portlandite (Ca(OH)₂) は、RLS-4 週で 0.1%、RLG-4 週で 0.6% となっており、RMS-4 週と RMG-4 週では検出されなかった。よって、いずれの試料も保管期間 4 週の間、Ca(OH)₂ が全て消費されて CaCO₃ になっていることが示唆される。一方で、C-S-H は保管期間 4 週間後も一定量残っていることが確認されたこと

表-8 再生骨材の保管期間ごとの CO₂ 固定量

記号-保管期間	CO ₂ 固定量(kg/t)	
	TOC-IC	TG-DTA
RLS-1 週	10.9	10.4
RLS-4 週	42.2	41.6
RLG-1 週	3.2	0.5
RLG-4 週	10.6	9.5
RMS-1 週	3.4	2.9
RMS-4 週	10.6	9.9
RMG-1 週	6.8	6.5
RMG-4 週	10.1	10.2

表-9 再生骨材の製造工程と保管での CO₂ 固定量

記号	CO ₂ 固定量(kg/t)							
	TOC-IC				TG-DTA			
	0 週 (製造工程)	1 週	4 週	製造工程 +4 週	0 週 (製造工程)	1 週	4 週	製造工程 +4 週
RLS	1.2	10.9	42.2	43.4	-1.5	10.4	41.6	40.1
RLG	0.8	3.2	10.6	11.3	2.6	0.5	9.5	12.1
RMS	9.7	3.4	10.6	20.3	9.7	2.9	9.9	19.6
RMG	-0.5	6.8	10.1	9.6	0.6	6.5	10.2	10.8

表-10 再生骨材の製造工程と保管での CO₂ 固定量の平均値および既往の文献との比較

記号	CO ₂ 固定量(kg/t)					
	0 週 (製造工程)	1 週	4 週	製造工程+4 週	文献 2) 参考 ^{※1}	文献 4) 参考 ^{※2}
RLS	-0.1	10.6	41.9	41.8	25.6	32.6
RLG	1.7	1.9	10.0	11.7	6.41	12.7
RMS	9.7	3.2	10.2	19.9	14.1	-
RMG	0.1	6.7	10.1	10.2	4.09	-

※1：保管のみ（室内，乾湿繰返し 4 週）

※2：製造工程+保管（屋外屋根付，水噴霧 1 日 1 回，4 週）

表-11 XRD/リートベルト解析による各鉱物の定量結果

記号- 保管期間	セメントペースト				骨材						
	Portlandite	Monocarbonate	Calcite	C-S-H	石英	Albite	Anorthite	カリ長石	雲母	緑泥石	角閃石
blank	2.5	2.2	2.3	17.9	38.8	15.2	2.4	3.9	9.7	4.3	0.7
RLS-4 週	0.1	0.8	13.1	16.6	36.7	12.2	7.1	5.0	6.7	1.8	0.1
RLG-4 週	0.6	0.9	5.3	11.1	45.1	18.2	1.7	4.6	9.5	2.8	0.0
RMS-4 週	—	—	9.1	6.8	38.9	20.6	6.4	5.6	8.3	3.6	0.7
RMG-4 週	—	0.3	2.9	10.7	38.1	19.6	9.0	5.9	8.4	4.0	1.1

から、C-S-H 中の Ca については、まだ炭酸化できるポテンシャルが残っているといえる。C-S-H の Ca/Si 比が明確ではないため正しく評価することは難しいが、既に CaCO₃ となった分と C-S-H の残量を考慮すると、今回製造した骨材種類では RLS>RLG・RMS>RMG の順で CO₂ 固定ポテンシャルが高いことが推察できる。

5. まとめ

本研究では、製造プロセスを考慮した再生骨材の CO₂ 固定量を調査するため、調合と使用材料が既知のコンクリートブロックを用いて、再生骨材の製造工程ならびに保管期間に固定化した CO₂ 量と水和物等の組成変化について検討し、以下の結果を確認した。

- 1) 本実験での再生骨材の製造工程における CO₂ 固定量は、粉砕直後にサンプリングした場合、ほとんど認められなかった。一方で、1次工程で粉砕した後、2次工程で処理するまでの間に保管された場合には、その最中に表層部が炭酸化することで RMS の CO₂ 固定量が増加する可能性が示唆された。
- 2) 本実験で製造した再生骨材における保管での CO₂ 固定量は、今回のように骨材を敷き均し、散水による乾湿繰返しを4週間作用させることで、RLS で最大 41.9kg/t、RLG、RMS および RMG で約 10kg/t であることが明らかとなった。

- 3) XRD/リートベルト解析の結果から、保管期間4週中にいずれの試料も Ca(OH)₂ はほぼ全て消費し、CaCO₃ となっていることが確認された。一方で、C-S-H は一定量残っており、既に CaCO₃ となった分と C-S-H の残量を考慮すると、今回製造した骨材種類では RLS>RLG・RMS>RMG の順で CO₂ 固定ポテンシャルが高いことが推察できる。

参考文献

- 1) 黒田泰弘, 菊地俊文: コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究, 清水建設研究報告, 第86号, pp.29-36, 2007
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発, 第5章 ライフサイクルをとおした CO₂ 収支量の定量的把握手法の開発, 国総研プロジェクト研究報告 第63, pp.53-58, 2019
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会 炭酸化研究委員会: 炭酸化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル, 1993年3月 pp.33-35
- 4) 松田信広, 伊代田岳史: 再生骨材コンクリートによる CO₂ 削減効果の可能性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1093-1098, 2024.6