

報告 汎用型 CO₂ 固定設備で炭酸化させた異なる骨材における CO₂ 固定量に関する一考察

岩渕 崇宏*¹・三留 啓奨*¹・船尾 孝好*²・山内 和宏*³

要旨： 残コンクリート・戻りコンクリート由来の再生粗骨材と、粒状化再生粗骨材の 2 種類の骨材を同一の条件下で炭酸化し、それぞれ骨材物性値の変化と CO₂ 固定量を比較した。また、サンプル採取において、骨材を混合攪拌して採取する方法と、混合攪拌せずに採取する簡易な方法にて採取を行った場合の CO₂ 固定量の分析結果への影響を確認した。実験の結果、CO₂ 固定量は今回の炭酸化方法においては 2 種類の骨材ともに大きく変わらない結果となった。また、サンプル採取方法の違いによる CO₂ 固定量の分析結果においては、簡易な方法ではばらつきが大きくなることが確認された。

キーワード： 脱炭素 CO₂ ガス、粒状化再生粗骨材、再生粗骨材、CO₂ 固定設備、CO₂ 固定量

1. はじめに

近年、脱炭素社会の構築に向けて様々な取り組みが推進されているが、全国地球温暖化防止活動推進センターの調査¹⁾によると、2021 年の世界全体の二酸化炭素(CO₂)排出量の合計は約 332 億 t であり、日本は 3%の約 10 億 t の CO₂ となっている。この排出量は、全世界で 5 番目となっており、我が国では CO₂ 排出量削減へ取り組むことが急務となっている。また、国内の温室効果ガスの排出量を 2050 年までに実質的にゼロとする、「2050 年カーボンニュートラル」宣言により、多種多様な分野で温室効果ガス削減に向けた取組も加速している。

そのような中、建設分野では、コンクリートに使用されるセメントが製造段階で CO₂ を多量に排出することが問題視されており、コンクリート製造時における CO₂ の発生は、主に石灰石を 1400℃ 近くの高温で焼成する為のエネルギーと、石灰石が熱分解して酸化カルシウムになる時に発生する CO₂ などがある。それらを合計した時、セメント製造によって排出される CO₂ は日本の総 CO₂ 排出量の 3.7%と報告されている²⁾。これは国内の産業部門において第 4 位の排出量であり、セメント・コンクリート分野における CO₂ 排出量の削減に向けた取り組みが進められている。セメント・コンクリートに含まれる水酸化カルシウム (以下、Ca(OH)₂) や C-S-H は炭酸化することで Calcite などの化学的に安定した炭酸カルシウム (以下、CaCO₃) を生成することから、CO₂ の固定材料として注目されている。このような CO₂ を吸収する特性について国内のみならず、米国や欧州において研究開発・実証実験が進められている。また、コンクリートを原料とした再生骨材は、建設工事中に発生した残コンクリートや戻りコンクリート、解体工事などで発生した解体ガラを

破碎・粉砕して製造された一般的な「再生骨材」と、残コンクリートや戻りコンクリートに粒状化材料を投入して硬化させた「粒状化骨材」に大別され、これらの骨材を使用することで付着したセメントペーストへの CO₂ 固定による脱炭素化への貢献に加え、構造物の解体・改修時に発生する廃コンクリートの再利用の観点からの循環型社会の形成への貢献も期待されている。

このような背景のもと、本報告では汎用型 CO₂ 固定設備を用いて、製造方法の異なる「再生骨材」と「粒状化再生骨材」の炭酸化を行い、両者の CO₂ 固定量や物性値の違いについての把握を試みた。なお本報告では舗装用ポーラスコンクリートへ適用する 1505 の粗骨材を対象とし、1505 に骨材径を調整した試料をそれぞれ「再生粗骨材」、「粒状化再生粗骨材」と称した。ポーラスコンクリートの場合、物質移動抵抗性が低いため、打ち込み後の CO₂ 固定も容易と考えられる。一方で、今回対象とした舗装の場合、炭酸化設備や供給用の CO₂ を打ち込み箇所ごとに用意することは合理的ではないため、本検討では製造した骨材に対して CO₂ 固定を実施した。

2. 試験概要

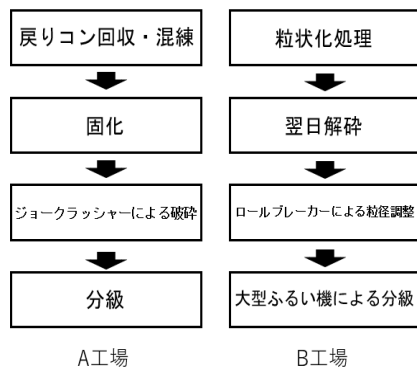
2.1 使用材料

図-1 に再生粗骨材と粒状化再生粗骨材の製造フローを示す。使用した 2 種類の骨材はそれぞれ異なる工場で製造した。また、本報告で使用した 2 種類の骨材はどちらも JIS A 5023:2018 附属書 A コンクリート用材再生骨材 L の製造方法に準じて製造されていないが、同書に規定された吸水率、微粒分量の品質(吸水率 7.0 以下、微粒分量 3.0 以下)を満足していたため、本報告では再生骨材として扱った。

*1 (株)安藤・間 (正会員)

*2 大阪兵庫生コンクリート工業組合 (正会員)

*3 灰孝小野田レミコン(株) (正会員)



図ー1 粒状化再生粗骨材、再生粗骨材製造フロー

(1) 再生粗骨材 (A 工場)

写真ー1 に製造した再生粗骨材を示す。再生粗骨材 (1505) は、現場から戻ってきた残コンクリート・戻りコンクリートを使用し、A 工場で普段再生砕石(RC)として出荷しているものを 1505 に分級して製造した。したがって、原コンクリートの配合、材齢は不明である。なお、A 工場ではコンクリート塊の破碎に大型のジョークラッシャーを使用している。

(2) 粒状化再生粗骨材 (B 工場)

表ー1, 2 に粒状化再生粗骨材の製造に使用した原コンクリートの配合と使用材料を示す。また、写真ー2, 3 に粒状化再生粗骨材の製造状況と、製造した骨材の写真を示す。粒状化再生骨材の製造に使用した生コンクリートは、表ー1, 2 に示す条件で新規に練り混ぜたものを使用した。配合は B 工場でもっとも多く出荷されている呼び強度 24, スランプ 12cm, 粗骨材最大寸法 20mm とした。

製造方法は、新規に練り混ぜた生コンクリートにアクリル-炭酸塩系コンクリート処理材(粒状化材)を 1 m³あたり 1kg で添加し、0.45m³ スケルトンバケットを装着したバックホウで十分に混合した後、厚さ 150mm で集積し、翌朝再度バックホウを用いて解したものをロールブレイカーで破碎、その後、1505 に分級して製造した。なお炭酸化までの材齢は不明である。

2. 2 CO₂ 固定設備・実験条件について

骨材の炭酸化においては、2 種類の骨材共に共通の汎用型 CO₂ 固定設備を用いて炭酸化を行った。

骨材への CO₂ 固定化において、既往の研究³⁾ではラボスケールにて骨材に吸水率を超えない範囲で水を供給し、高濃度 CO₂ 雰囲気下において乾湿を繰り返す方法により、3 サイクルで最大 36.8kg/t の CO₂ を固定化している。また、既往の研究⁴⁾ではラボスケールの実験³⁾をスケールアップさせた汎用型の CO₂ 固定設備を作製し、湿乾 1 サイクルで最大 28.9kg/t の CO₂ を固定化している。本報告では、既往の研究の装置⁴⁾と同様の CO₂ 固定設備を作製し、2 種類の骨材の炭酸化を行った。

表ー1 原コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S	G	Ad
24	172	299	887	950	2.99

表ー2 原コンクリートの使用材料

材料	記号	種類・仕様
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	① 石灰砕砂(米原市産) 表乾密度=2.68g/cm ³ 粗粒率 (F.M.)=2.60 ② 砕砂(米原市産) 表乾密度=2.63g/cm ³ 粗粒率 (F.M.)=2.95 ※混合割合① : ②=80:20
粗骨材	G	砕石 2005 (土山産) 表乾密度=2.67g/cm ³ 実積率=59.0
混和剤	Ad	AE 減水剤(リグニンスルホン酸-ポリカルボン酸エーテル系)



写真ー1 再生骨材(1505)



写真ー2 粒状化再生粗骨材製造状況



写真-3 製造した粒状化再生粗骨材 (1505)

図-2 に作製した汎用型 CO₂設備の概要を示す。高濃度 CO₂雰囲気下で骨材を湿潤状態から乾燥状態に変化させるため、2つの水槽とブロワをホースで連結し密閉した状態で CO₂を供給する機構となっており、1m³の水槽に表乾状態に調整した骨材、2m³の水槽に除湿機（30L/日）を設置した。CO₂は工業用の液化炭酸ガスボンベから供給速度：30L/min で供給した。また、ブロワは吸引・吐出能力：4.2m³/min のものを使用し、通風時間は21時間とした。

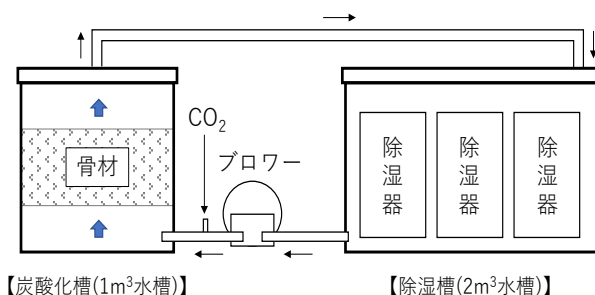


図-2 汎用型 CO₂固定設備概要

2.3 分析試料サンプリング方法

骨材のサンプリングは、下記の(1)と(2)に示す A 工場でのサンプリング方法と、B 工場でのサンプリング方法の2つの方法で実施した。

(1)A 工場でのサンプリング方法

A 工場でのサンプリング方法においては、分析値の誤差を極力少なくするために下記に記すサンプリング方法を実施した。A 工場のサンプリングの方法では、最初に対象バッチの骨材群（約 25m³）を一括してホイールローダーで5回程度混合攪拌を行った後、作為的に離れた箇所10箇所から約 20kg ずつ分けた状態で分析用試料（骨材）を採取した（以下、「方法 A」）。

なお、方法 A を用いて採取を行ったのは工場 A で製造された再生粗骨材のみである。

(2) B 工場でのサンプリング方法

B 工場でのサンプリング方法においては、実装時の作業手間を考慮し、方法 A よりも簡素なサンプリング方法を実施した。写真-4 に B 工場でのサンプリング方法における採取箇所のイメージを示す。

B 工場のサンプリングの方法では、対象バッチの骨材群（約 50m³）に対し、方法 A に示すホイールローダーを用いた混合攪拌は行わず、そのまま任意の5か所（骨材群の表層部分）から約 10kg ずつ分けた状態で採取した（以下、「方法 B」）。

この方法は骨材の方法 A のように骨材群に対する混合攪拌を行わないため、方法 A の結果よりも分析値の変動が大きくなることが想定されたが、実装時のサンプリング作業の省力化を志向して実施した。なお、方法 B を用いて採取を行ったのは工場 B で製造された粒状化再生粗骨材のみである。



写真-4 B 工場のサンプリング方法の採取イメージ

2.4 骨材試験項目及び方法

表-3 に骨材試験項目の一覧を示す。各試験項目は表-3 に示す試験方法に基づいて定量した。

表-3 骨材試験項目一覧

項目	試験方法
付着ペースト量	JISA 5022:2024 「再生骨材コンクリート M 附属書 C（規定）再生骨材コンクリート M のアルカリシリカ反応抑制対策の方法 C.8 再生骨材中のアルカリ含有量の定量方法」
絶乾密度・吸水率	JISA1110 「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」
粗粒率	JISA 1102：2014 「骨材のふるい分け試験方法」
微粒分量	JISA 1103：2014 「骨材の微粒分量試験方法」

2.5 CO₂固定量の分析及び算出方法

(1) CO₂固定量の分析方法

CO₂固定量の分析には示差熱重量分析（以下、TG-DTA）を用いた。試料はアセトンで水和停止した後、真空乾燥

後に骨材を全量粉碎・混合したものを約 20mg 用いた。また、定量温度範囲を室温から 1000℃とし、昇温速度を 20℃/min として実施した。Ca(OH)₂ の含有量は 450℃付近の脱水反応による質量変化から式(1)を用いて算出した。脱水反応による質量変化は、DTA（示差熱）曲線上における 450℃付近の吸熱・発熱前後に引いた接線の交点を、それぞれ反応開始温度 T1、反応終了温度 T2 とし、TG(熱重量)曲線上で求められる T1、T2 間の差を Ca(OH)₂ の脱水量とした(図-3)。

CO₂ 含有率は、既往の研究⁵⁾を参考に CaCO₃ の脱炭素温度域を 550℃から 850℃として算出した。また、この温度区間内で変化した質量変化分を用いて式(2)により CaCO₃ 含有率を算出した。

$$CH = M_{CH} \times \frac{Ca(OH)_2}{H_2O} \quad (1)$$

$$CC = M_{CC} \times \frac{CaCO_3}{CO_2} \quad (2)$$

ここに、CH：Ca(OH)₂ 含有率(%), M_{CH}：Ca(OH)₂ の脱水による質量変化量(%), Ca(OH)₂：Ca(OH)₂ の分子量 74.1g/mol, H₂O：H₂O の分子量 18.02 g/mol, CC：CaCO₃ 含有率(%), M_{CC}：550 から 850℃付近の脱 CO₂ による質量変化量(%), CaCO₃：CaCO₃ の分子量 100.09 g/mol, CO₂：CO₂ の分子量 44.01 g/mol,

(2) CO₂ 固定量の算出方法

強制炭酸化による CO₂ 固定量は、CaCO₃ の脱炭素温度域の質量変化より求めた CO₂ 含有率を用いて、式(3)により炭酸化前と炭酸化後の CO₂ 含有率の差から炭酸化前の 1t 当たりに固定した量を算出した。

$$CO_{2k} = \left(CO_{2b} \times \frac{(100 - CO_{2c})}{(100 - CO_{2b})} - CO_{2c} \right) / 100 \times 1000 \quad (3)$$

ここに、CO_{2k}：炭酸化前の乾燥試料 1t あたりの固定量 (Kg/t) CO_{2b}：炭酸化後の CO₂ 含有率(%), CO_{2c}：炭酸化前の CO₂ 含有率(%)

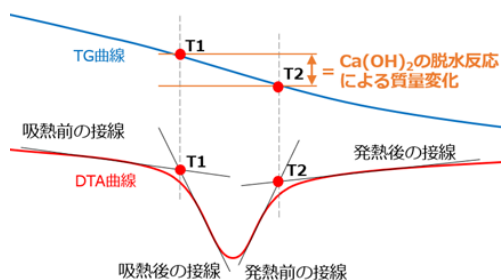


図-3 Ca(OH)₂脱水反応の質量変化の測定概要

3. 結果および考察

3.1 骨材物性値について

表-4 に 2 種類の骨材の炭酸化前後の骨材物性値の変化の結果を示す。

炭酸化前の付着ペースト量は再生粗骨材が 32.9%、粒状化再生粗骨材が 46.1%となり、粒状化再生骨材の方が高い結果となった。これは骨材の製造工程の違いによるものと考えられる。A 工場で製造された再生粗骨材は、ブレーカー仕様のバックホウで大片状に破碎したガラ（30～50cm 程度）にしたものをジョークラッシャーで分級できる程度の大きさまで破碎して製造され、B 工場で製造された粒状化再生粗骨材は、粒状化後の翌日の解砕で 5cm 以下になったコンクリート塊をロールブレーカーで分級できる程度まで破碎して製造された。まず、ジョークラッシャーまたはロールブレーカーによる破碎前のコンクリート塊の大きさが異なる点が、付着ペースト量の違いに影響していると考えられるが、今回の実験では破碎前のコンクリート塊の製造方法や破碎方法が異なっているため、破碎性状に及ぼす影響の特定には及ばなかった。一方で、破碎前の試料の条件が同じだった場合、擦り潰すように破碎するジョークラッシャーよりも、歯車の凹凸の距離調整で一定の粒径に骨材を破碎するロールブレーカーのほうが破碎による付着ペースト分の保持においては有利と考えられるが、本報告の実験でそれらの差異を明らかにすることはできなかった。

炭酸化後の付着ペースト量は再生粗骨材が 29.5%、粒状化再生粗骨材が 35.6%となり、粒状化再生粗骨材のほうが高い結果となった。一方で、双方ともに炭酸化前に比べると付着ペースト量が減少し、減少量としては粒状化再生粗骨材のほうが大きい結果となった。炭酸化後に付着ペースト量が減少した理由としては、製造時の骨材の移動や、製造工程の中で付着ペーストが少しずつ削られ減少していったためだと考えられる。また、粒状化再生粗骨材の減少量が大きくなった理由としては、製造時のコンクリート養生期間の違いが挙げられる。再生粗骨材は残コンクリート・戻りコンクリートを 4 日以上養生した後に破碎して製造されるが、粒状化再生粗骨材は粒状化して翌日には 5cm 程度まで解砕され、弱材齢時の水分逸散が大きいと、水和反応が進展せず、圧縮強度が再生粗骨材よりも小さくなり、付着ペーストの剥離が顕在化したと考えられる。

次に絶乾密度と吸水率においては、再生粗骨材、粒状化再生粗骨材ともに炭酸化後に絶乾密度が増加、吸水率は減少する結果となり、炭酸化による再生骨材の改質⁶⁾を確認した。これは炭酸化により付着ペーストの細孔中で CaCO₃ が生成され、緻密化したためと考えられる。一方で、絶乾密度と吸水率の変化量はどちらも粒状化再生

粗骨材のほうが多くなる結果となった。これは粒状化再生粗骨材の付着ペーストが多かったためだと考えられる。

粗粒率については、再生粗骨材、粒状化再生粗骨材ともに炭酸化後に粒径が大きい方へ若干偏っていたが、炭酸化前に微粒分として骨材に混ざっていたセメントペーストを核に CaCO_3 が生成されて微粒分径が若干大きくなったことなどが考えられる。

3.2 CO_2 固定量について

各種サンプルの Ca(OH)_2 量と CaCO_3 量の分析結果を図-4、図-5 に示す。また、分析結果より式(3)を用いて算出した CO_2 固定量の分析結果を図-6 に示す。

図-4 より、再生粗骨材が 0.3%、粒状化再生粗骨材が 0.5~0.8%炭酸化後に Ca(OH)_2 量が減少していることが分かる。これは Ca(OH)_2 が CO_2 と反応し、 CaCO_3 が生成されたためだと考えられる。一方で、炭酸化前の Ca(OH)_2 量は再生粗骨材が 4.6%、粒状化再生粗骨材が 1.3%という結果となり、再生粗骨材の方が約 3 倍程度大きい結果となった。これは前述した製造工程の違いにより、粒状化再生粗骨材のほうが、付着ペースト中の未水和セメント量が多かった可能性や、骨材製造中に大気中の CO_2 によって炭酸化が進んだ可能性が考えられる。

図-5 より、 CaCO_3 量の増加は再生粗骨材は 6.2%、粒状化再生粗骨材は 5.9%~8.2%となり、2 種類の骨材の CaCO_3 増加量に大きな差は出ない結果となった。炭酸化前の Ca(OH)_2 量に大きな差があるにもかかわらず炭酸化後の CaCO_3 の増加量に差がなかった要因としては、今回の実験においては Ca(OH)_2 ではなく C-S-H が主に CO_2 と反応して CaCO_3 が生成されていたためだと考えられる。伊代田らの研究⁷⁾によると、環境条件が一定の場合に CO_2 の供給速度が十分に大きい場合では C-S-H は瞬時に反応するが、 Ca(OH)_2 は CO_2 供給速度が十分であっても、反応に長い時間を要するとされている。したがって、本実験のように高濃度の CO_2 を短期間に供給した場合では、C-S-H の炭酸化が優位になり、 Ca(OH)_2 の含有量の差による CO_2 固定量への影響がでなかったと推測される。なお、いずれも炭酸化前から CaCO_3 量が多いようにみえるが、これは原コンクリート中に含まれる石灰砕砂の影響や骨材製造中に炭酸化が進行した可能性が考えられる。しかしながら、A 工場においては原コンクリートの配合が不明であるため、石灰砕砂による影響が定かではなく、また、何れの骨材においても前述の骨材製造中の炭酸化の影響を把握できていないため、本検討では要因の断定には至らなかった。今後の検討課題としたい。

図-6 より、 CO_2 固定量は再生粗骨材が 29.9kg/t、粒状化再生粗骨材が最大 39.9kg/t、平均 33.3kg/t となり、粒状化再生粗骨材のほうが若干多くの CO_2 を固定する結果となった。再生粗骨材が若干 CO_2 固定量が小さかった理由

としては、原コンクリートの W/B の違いによる可能性が考えられる。B 工場では実験用に呼び強度 24N のコンクリート作製し使用したが、A 工場においては原コンクリートの配合は不明であり、A 工場の製造時の原コンクリートの呼び強度が B 工場よりも高かったことにより、炭酸化の進行が抑制された可能性も考えられる。

表-4 骨材試験結果

	再生粗骨材		粒状化再生粗骨材	
	炭酸化前	炭酸化後	炭酸化前	炭酸化後
付着ペースト量%	32.9	29.5	46.1	35.6
絶乾密度(g/cm ³)	2.26	2.27	2.33	2.42
吸水率%	5.27	5.06	5.26	4.01
粗粒率(F.M)	6.2	6.37	5.85	5.9
微粒分量%	0.6	0.3	0.8	0.6

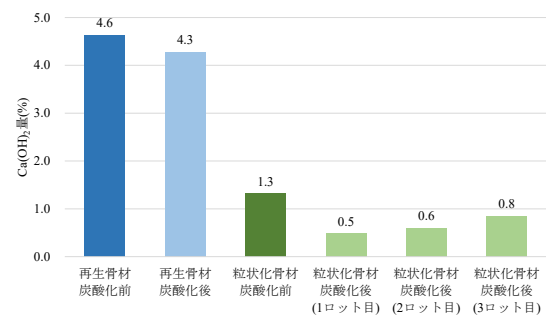


図-4 各種サンプルの Ca(OH)_2 量

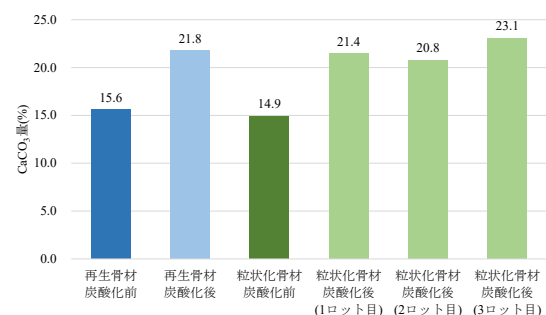


図-5 各種サンプルの CaCO_3 量

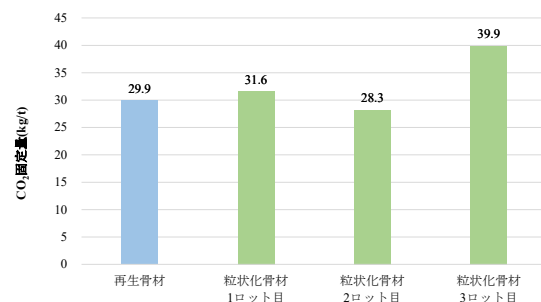


図-6 各種サンプルの CO_2 固定量

3.3 採取方法による CO₂ 固定量のばらつきについて

各種サンプルの CO₂ 固定量の分析値における平均値、標準偏差、変動係数の値を表-5 に示す。

結果は、標準偏差、変動係数ともに方法 A が方法 B よりも大幅に小さくなった。理由として、方法 B ではバッチ毎の骨材群の混合攪拌を行わなかったのに対して、方法 A ではサンプリング前にホイールローダーを用いて材料を混合攪拌していたことと、サンプリング数、およびその量がともに方法 B の 2 倍であったことが挙げられる。一方で、方法 A でのサンプリング方法の誤差は少なくなったが、作業時の労力が方法 B に比して非常に大きいため、CO₂ 固定量を日常管理することを想定するとより省力化できる方法が望まれる。したがって、今後はサンプリング方法による誤差のばらつきと作業時の省力化の両方を鑑みた方法を考案していく必要があると考える。

表-5 CO₂ 含有量の平均値、標準偏差等

	採取方法	平均 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
再生粗骨材炭酸化前	方法 A	6.86	0.158	2.3
再生粗骨材炭酸化後	方法 A	9.56	0.407	4.3
粒状化再生粗骨材炭酸化前	方法 B	6.07	1.520	25.0
粒状化再生粗骨材炭酸化後 (1 ロット目)	方法 B	9.43	1.170	12.4
粒状化再生粗骨材炭酸化後 (2 ロット目)	方法 B	9.14	1.539	16.8
粒状化再生粗骨材炭酸化後 (3 ロット目)	方法 B	10.15	1.608	15.8

4. まとめ

再生粗骨材と、粒状化再生粗骨材を同一の条件下で炭酸化し、2 種類の骨材サンプリング方法を実施しつつ、骨材物性値の変化と CO₂ 固定量を分析した結果、以下の結論を得た。

- (1) 再生粗骨材、粒状化再生粗骨材ともに炭酸化後に絶乾密度が増加、吸水率は減少する結果となり、炭酸化による改質を確認した。一方で、炭酸化前の Ca(OH)₂ 量に大きな差があるにもかかわらず炭酸化

後の CaCO₃ の増加量に大きく差がなかった。要因としては、今回の CO₂ 固定化方法においては C-S-H が主に CO₂ と反応して CaCO₃ が生成されていたと考えられる。

- (2) 今回の実験において CO₂ 固定量は、再生粗骨材が平均 29.9kg/t、粒状化再生粗骨材が平均 33.3kg/t となり、粒状化再生粗骨材のほうが若干大きくなった。これは原コンクリートの W/B の影響による可能性が考えられるが、今回の実験では把握をしていないため、今後の検討項目としたい。
- (3) 2 種類の骨材サンプリング方法を実施し、採取前の骨材山に対するホイールローダーによる混合攪拌を行わない簡易的な方法ではばらつきが大きくなるため、適切なサンプリング方法の検討が重要であることが示唆された。

謝辞：本研究は、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）の業務委託（JPNP21023）の一環として行ったものです。ご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

1) 全国地球温暖化防止活動推進センター(JCCEA) : <https://www.jccca.org/> (閲覧日: 2024 年 12 月 13 日)

2) 細谷俊夫:セメント産業における CO₂ 排出削減の取り組み, コンクリート工学会誌, Vol.48, 2019.9

3) 吉野玲, 安部弘康, 鈴木好幸, 野口貴文: 再生骨材への効果的な CO₂ 固定方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol45, No.1, pp.34-39, 2023.7

4) 岩渕崇宏, 鈴木好幸, 山内和宏: 高濃度 CO₂ ガスを用いた汎用型炭酸化設備による粒状化再生骨材への CO₂ 固定化実験, 土木学会全国大会年次学術講演会, Vol79, No.414, 2024

5) 鈴木好幸, 山本武志, 小山拓, 野口貴文: 湿式分析と TG-GTA による CO₂ 含有率に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol45, No.1, pp.1258-1263 2023.7

6) 松田信弘, 伊代田 岳史: 炭酸化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, Vol.30, pp.65-76, 2019.1

7) 伊代田 岳史, 後藤 誠史, 中村 絢也: セメント硬化体の炭酸化機構の解明-自然環境と促進環境の違い-, セメント・コンクリート, No.887, pp.39-43, 2021.1