

再生骨材の製造工程で生じたコンクリート微粉における CO₂固定化に関する検討

須山裕介・田中俊輔・桐山宏和・山下牧生

廃コンクリート塊から再生骨材を製造する工程で発生する、コンクリート微粉へのCO₂固定化を検討している。本研究では、配合が既知のコンクリートブロックを作製し、所定材齢経過後に最大200°Cで加熱し、摩砕処理にて骨材に付着しているモルタル分を除去する「加熱すりもみ法」を行った。本法により得られる再生骨材および微粉などの回収率と性状を調査し、発生した微粉にCO₂ガスを吹き付ける促進炭酸化によるCO₂の固定化を検討した。その結果、加熱温度を高めるほど再生粗骨材の吸水率は低下、絶乾密度は増加した。また、再生粗骨材の高品質化に伴い、すりもみ過程で微粒化した骨材の影響で微粉中のCaO量の割合は減少した。促進炭酸化後の微粉中に固定されるCO₂量は、全CaO量に対し75%程度であった。

キーワード：半湿式炭酸化、半乾式炭酸化、コンクリート微粉、CO₂固定、再生粗骨材

1 緒言

地球温暖化対策として、温室効果ガスの一つである二酸化炭素(以下、CO₂)の排出削減が求められている。セメント産業ではセメントの中間製品であるクリンカーを製造する際に大量のCO₂が発生することから、早急な対応が必要となっている。

コンクリートに含まれるセメント由来のカルシウムは、CO₂を炭酸カルシウム(以下、CaCO₃)として半永久的に固定できる可能性がある⁽¹⁾。構造物の解体によって生じる廃コンクリートは図1に示すように、年々減少の傾向にあったが、2018年に

は増加している⁽²⁾。廃コンクリートはそのほとんどが路盤材として再利用されており、再利用率は約99%と非常に高い⁽²⁾。しかしながら、今後道路工事等の減少等により、廃コンクリート発生量が路盤材の需要を上回る恐れがある。その場合の新たな廃コンクリートの利用手法として、再生骨材としての利用が期待されている。

廃コンクリートを再生骨材として再利用する場合、骨材に付着するモルタルやセメントペーストを分離する必要がある。再生骨材製造の工程では、副産物としてコンクリート微粉(以下、微粉)が発生する。この微粉はセメント由来のカルシウムを多く含み、比表面積が大きく反応性が高いことから、CO₂の固定化材料としての適性があると考えられる。さらに、CO₂を固定化した微粉をセメントの少量混合成分として使用することで、石灰石微粉末を添加した場合と比較してモルタルの強度が増進するという報告もある⁽³⁾。

再生粗骨材および再生細骨材の品質は、日本産業規格(JIS: Japanese Industrial Standards)によって、品質の高いものから、「再生骨材 H」(JIS A5021:2024)、「再生骨材 M」(JIS A5022:2023 附属書 A) および「再生骨材 L」(JIS A5023:2024 附属書 A) の3水準が定められている。再生粗骨材を使用したコンクリートの品質は、モルタル付着

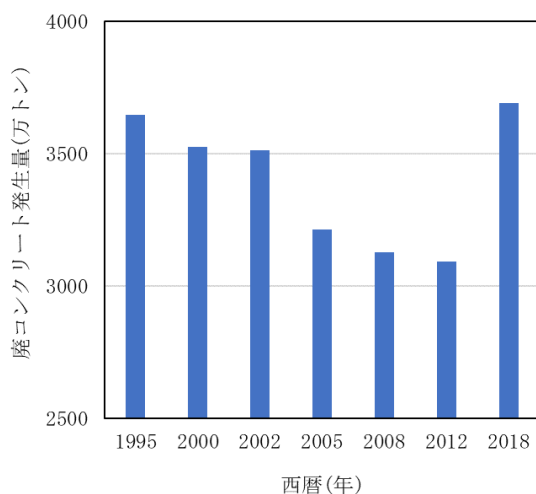


図1 廃コンクリート発生量⁽²⁾

率の他、付着モルタルの性状に影響を受ける⁽⁴⁾。再生粗骨材の品質は、製造法の違いにより差が生じると考えられる。

2 研究の目的

低品質の再生骨材を製造する場合、モルタル分が骨材に多く付着しているため、微粉の発生量は少なくなると考えられる。最近では、低品質な再生骨材にCO₂を吸収させることで、骨材に付着するセメントペーストが緻密化し、再生骨材の品質が改善されるとする報告がある⁽⁵⁾。しかし、再生骨材は、微粉と比べて比表面積が小さいため、単位質量当たりのCO₂固定量は小さく、また、炭酸化により長い時間が必要と考えられる。

このように、廃コンクリートへのCO₂固定化については、CO₂固定の効率や炭酸化合物の利用可能性を含め、どの対象物に炭酸化を進めるべきかはまだ明確ではない。

本研究では、模擬的に作製したコンクリートブロックを最大 200℃で加熱し、摩砕処理にて骨材に付着しているモルタル分を除去する「加熱すりもみ法」により品質の異なる再生骨材を製造し、

加熱の有無、温度の程度が再生粗骨材、再生細骨材および、すりもみ過程で発生する微粉の回収率と成分にどのように影響するかを調査した。また、再生骨材および微粉へのCO₂固定量を調査し、再生骨材製造方法と 1t あたりのコンクリートに固定可能なCO₂量を比較した。

3 実験概要

3.1 使用材料

本研究では、模擬コンクリートブロック(以下、模擬コン)を作製し、加熱および非加熱でのすりもみ法による再生骨材の製造試験に供した。模擬コン材料を表1に、配合、フレッシュ性状、呼び強度を表2に示す。模擬コンは一般的に流通している強度のコンクリートを想定し配合を設定した。

原コンクリートは、打込み後材齢7日までは封緘養生し、その後脱型、試験日まで屋外で養生した。非加熱でのすりもみ試験には材齢127日、加熱でのすりもみ試験には材齢143日の模擬コンを試験に使用した。

3.2 再生骨材製造方法

再生骨材の製造工程を図2に示す。まず、模擬コンを重機によってφ200mm程度まで粗破碎した。次に、粗破碎した模擬コンをジョークラッシャーで細かく砕き、目開き40mmの電動篩を通して、コンクリート塊(以下、RC-40)を調製した。

加熱すりもみ法では、RC-40をロータリーキルンにて加熱した後、磨砕機で処理した。加熱温度の影響を調査するため、2つの温度条件(100℃、200℃)で試験を実施した。非加熱条件(以下、すりもみ法)ではRC-40をそのまま磨砕機にて処理した。摩砕処理の後に、電動篩で粒径5~20mmの再生粗骨材と5mm以下の再生細骨材に分級した。これらの過程で発生する微粉は集塵機で回収した。

3.3 炭酸化試験方法

微粉の炭酸化は半湿式の手法で実施した。炭酸

表1 模擬コンクリート材料

材料	主な物性
セメント	普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm ³
粗骨材	碎石(埼玉県秩父郡皆野町産) 絶乾密度 2.67g/cm ³ 表乾密度 2.69g/cm ³
細骨材①	砕砂(埼玉県秩父郡皆野町産) 絶乾密度 2.63g/cm ³ 表乾密度 2.66g/cm ³
細骨材②	砂(千葉県香取市産) 絶乾密度 2.54g/cm ³ 表乾密度 2.58g/cm ³
混和剤	AE減水剤遅延型I種 マスターポリヒード 15SR

表2 模擬コンクリート配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	呼び強度 (N/mm ²)
	セメント	水	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤		
52.9	339	179	569	244	971	3.39	15	27

化試験の概略図を図3に示す。試料 200g をはかり取った後、含水率が 0.25% となるよう加水した。含水率は過去の検討結果⁽⁶⁾を参考とし、炭酸화가最も進行しやすい条件とした。試料を JIS R5201 に準じたモルタルミキサ内に入れ、低速で攪拌しながら上部から窒素（以下、N₂）ガスを混合して CO₂ 濃度 20% に調整したガスを 2L/min の流量で吹き付けて炭酸化させた。一定時間ごとに試料を取り出し、CO₂ 固定量を評価した。

3.4 試験項目

試験項目を表3に示す。化学分析試験に際して、

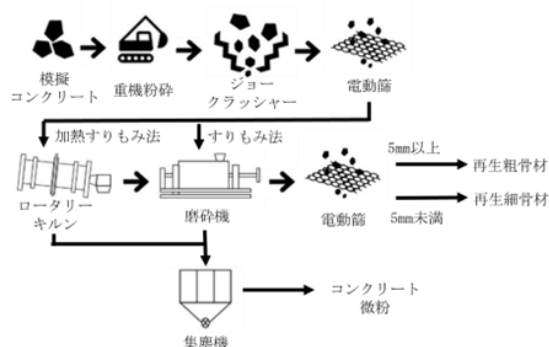


図2 再生骨材の製造工程

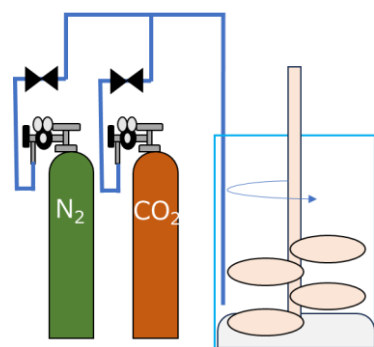


図3 炭酸化試験概略図

表3 試験項目

試験項目/(試験対象)	方法・条件
CaCO ₃ 量 (再生粗骨材、再生細骨材、コンクリート微粉)	TG-DTA (N ₂ 雰囲気、室温～1000℃、昇温速度:10℃/min)
絶乾密度・吸水率 (再生粗骨材)	JIS A 1110:2020 「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準拠
CaO 量 (再生粗骨材、再生細骨材、コンクリート微粉)	蛍光 X 線分析(検量線法)

再生粗骨材および再生細骨材は 90μm ふり全通となるまでディスクミルで粉砕した。CaCO₃ 量は、熱重量差熱分析装置 (TG-DTA) を用いて 600℃～800℃における質量減少量から算出した。

4 試験結果

4.1 再生骨材製造試験

4.1.1 再生粗骨材品質

図4に得られた再生粗骨材の性状を示す。再生粗骨材の絶乾密度と吸水率には負の相関関係が認められた。加熱すりもみ法では再生粗骨材Hが、すりもみ法では再生粗骨材Mが製造された。また、再生粗骨材の品質は加熱温度が高いほど向上した。

4.1.2 各種回収率

再生骨材製造試験で回収された各種製造物の量から回収率を算出した。各製造物の回収率を図5に示す。加熱すりもみ法では加熱温度に関わらず再生粗骨材の回収率は約30%程度であった。微粉の発生量は加熱温度が高いほど多くなった。すりもみ法では再生粗骨材の回収率が約50%、再生細骨材が約40%、微粉は約10%であった。

加熱処理温度が高いほど、モルタル部分が脆弱

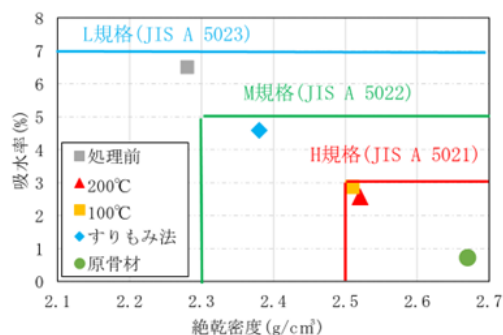


図4 再生粗骨材の絶乾密度及び吸水率

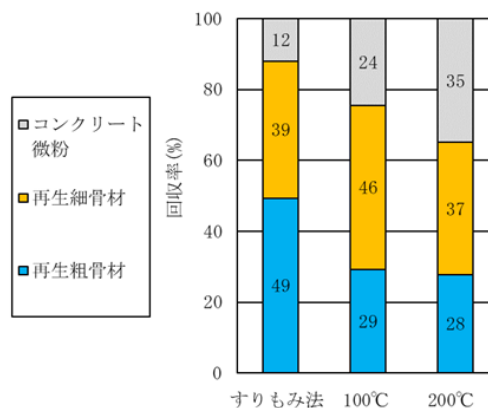


図5 各種製造物の回収率

化し、磨砕処理で骨材表面からの剥離が容易になることが知られている⁽⁷⁾。それに伴い、製造される再生粗骨材の品質が向上し、微粉の発生量が増加したと考えられる。

4.1.3 各種製造物の分析結果

図6に各種製造物のCaO量を示す。製造物のCaO量は、加熱温度が高く、微粉の回収率が大きいほど、小さくなる傾向が見られた。再生骨材に関し

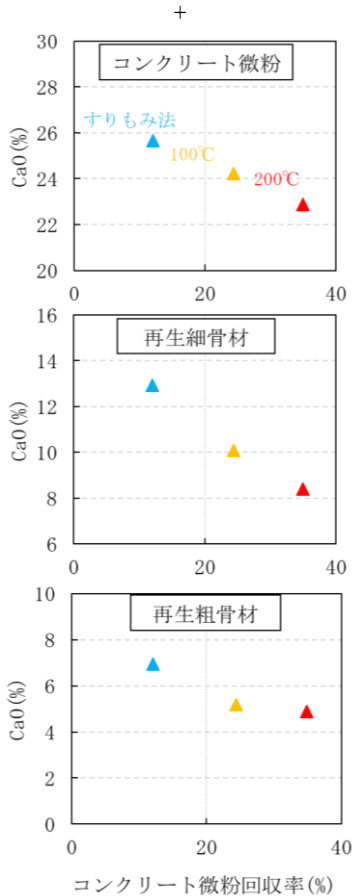


図6 各種製造物のCaO量

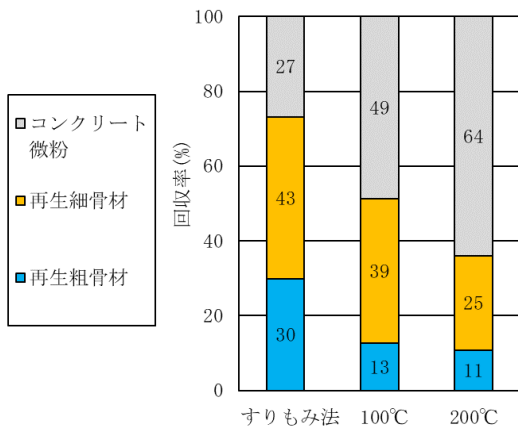


図7 CaOの各種製造物への配分

ては、加熱の影響により、骨材表面に付着するモルタルが磨砕されやすくなったためと考えられる。微粉に関しては、加熱の影響によって磨砕された骨材が微粉に多く混入したためと考えられる。

図7に再生骨材製造試験で得られた各種製造物へのCaO量の配分を示す。加熱温度が高いほど、CaOは微粉に多く集中することが確認できた。加熱の影響による微粉のCaO量減少の効果以上に、微粉の発生量が増加するためである。

4.2 炭酸化によるCO₂固定量

図8に、200°Cでの加熱すりもみ試験およびすりもみ試験で得られた微粉のCO₂固定量を示す。約4時間の処理後、炭酸化は飽和点に達し、その時点でのCO₂固定量は115kg/tおよび94kg/tであった。また、CaOの物質質量に対するCO₂の物質質量の割合を定義した炭酸化度はそれぞれ82%および75%となった。炭酸化度が100%まで進行しない理由としては、主なセメント水和物であるC-S-Hの炭酸化が完全に進まないためと考えられる。

半乾式手法で再生骨材の炭酸化を行っている文献⁽⁹⁾では、7日間の炭酸化養生槽の試験で炭酸化が飽和点に達し、その時点でのCO₂固定量は、再生粗骨材Mが12kg/t、再生細骨材Lが42kg/tとなっている。これらの炭酸化と比較して、微粉の炭酸化は、最大CO₂固定量および炭酸化進行速度が大きい。この理由としては、炭酸化手法、CaO量および粒径の影響が考えられる。半乾式炭酸化と比較して半湿式炭酸化では、試料の周辺の水分の存在により水和物が速く溶解し、炭酸化が促進されているとされている⁽⁸⁾。また、炭酸化の進行は試料の粒子径に反比例すると考えられる。

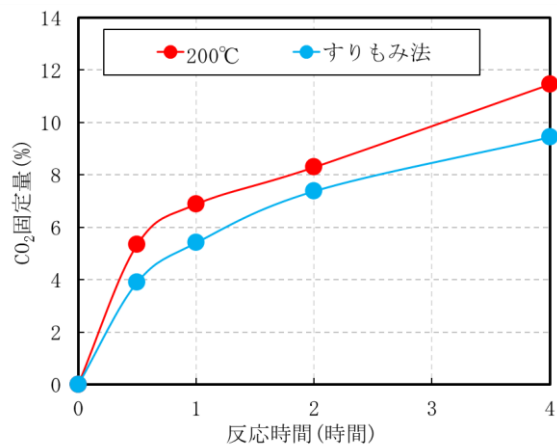


図8 コンクリート微粉のCO₂固定量推移

加熱すりもみ法で発生した微粉は、すりもみ法で発生した微粉と比較してCO₂固定量が大きくなった。これについては現在、原因を調査中ではあるが、すりもみ法で製造した微粉にはCaCO₃が多く含まれていること、加熱すりもみ法で発生した微粉では粒径が小さい部分にCaO量が多い微粉が多く存在していたことなどが仮説として考えられる。

以上より、実験の結果からも再生骨材と比較して微粉の炭酸化は進行しやすいことが確認できた。

4.3 廃コンクリート1tに固定可能なCO₂量について

今回得られた再生骨材製造試験の回収率と各製造物へのCO₂固定可能量を基に、1tの廃コンクリートに固定可能なCO₂量を計算した。その結果を表4に示す。すりもみ試験で得られた再生粗骨材の品質はMであった。加熱すりもみ試験、すりもみ試験で発生した再生細骨材の品質はLであると仮定し、再生粗骨材、再生細骨材へのCO₂固定量は文献値⁵⁾を参考とした。また、微粉への炭酸化は、今後の実用化を考慮して炭酸化時間を4時間とした。以上に加えて、加熱すりもみ試験で製造された再生粗骨材については再生粗骨材Hであったため、CO₂の固定量を0kg/tと想定した。

微粉の発生量が多く、CaOが微粉に集中することから、加熱すりもみ法で再生粗骨材を製造した場合、より多くのCO₂をコンクリート固定できることが分かった。

今回の調査では再生骨材製造や炭酸化に係るエネルギーで生じるCO₂量や、炭酸化させた再生骨材や微粉を再利用した際に削減されるCO₂量を考慮していない。今後は上記についても調査を行い、どの品質の再生粗骨材を製造するのが適切かを調査する。

表4 1tのコンクリートに固定可能なCO₂量

製造方式	CO ₂ 固定可能量(kg/t-concrete)			
	再生粗骨材	微粉	再生細骨材	合計量
加熱すりもみ(200℃)	0.0	40.3	15.5	55.8
すりもみ	5.9	10.3	16.4	32.6

5 結 言

「加熱すりもみ方式」および「すりもみ方式」の製法を適用し、異なる品質の再生粗骨材を製造し、それぞれの方法での1tのコンクリートに固定可能なCO₂量について調査した。

その結果、以下のことが判明した。

- (1) 加熱すりもみ試験では、再生粗骨材Hが製造可能であり、加熱温度が高いほどその品質は向上した。
- (2) 加熱温度が高いほど、再生粗骨材、再生細骨材、微粉のCaO量の割合が減少した。
- (3) 加熱温度が高いほど、微粉の発生量が多くなり、元々のコンクリートに含まれていたCaOの約6割が微粉として回収された。
- (4) 再生粗骨材、再生細骨材の炭酸化と比較して微粉の半湿式炭酸化は、最大CO₂固定量、炭酸化進行速度から優れていた。
- (5) 1tのコンクリートブロックに固定可能なCO₂量は、加熱すりもみ法で再生粗骨材を製造した場合の方が大きくなった。

謝辞

この成果は、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)の委託事業(JPNP21023)の結果から得られたものです。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- (1) 黒田泰弘、菊地俊文：解体コンクリートによる二酸化炭素の固定、コンクリート工学論文集、Vol.20 巻、No.1、pp15-22 (2009)
- (2) 国土交通省：平成 30 年度建設副産物実態調査結果
- (3) 黒田泰弘、片山行雄：廃コンクリート微粉末混合セメントを用いたモルタル・コンクリートの研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.64、No.1、pp537-544 (2010)
- (4) 高橋祐一、梶田佳寛：再生骨材中の付着モルタルが再生コンクリートの性質に及ぼす影響、日本建築学会論文集、Vol.75、No.653、pp.1167-1172 (2010)
- (5) 松田信弘、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)

- (6) 須山裕介、山下牧生：コンクリート微粉の炭酸化検討～水分量と温度の影響～、第 77 回セメント技術大会講演要旨【3121】、pp214-215(2023)
- (7) 島裕和、松橋隆治、吉田好邦、立屋敷久志：加熱すりもみ法による高品質再生骨材のライフサイクル分析、IEEJ Trans、EIS、Vol.123、No.10、pp1680-1687(2003)
- (8) Ning Li, Cise Unluer: Enhancement of the wet carbonation of artificial recycled concrete aggregates in seawater, Cement and Concrete Research, Vol.175, 107387(2024)

須山裕介・すやま ゆうすけ
研究所 セメント研究室
セメントグループ 研究員

田中俊輔・たなか しゅんすけ
研究所 コンクリート研究室
コンクリートグループ 研究員

桐山宏和・きりやま ひろかず
研究所 コンクリート研究室
コンクリートグループ 主幹

山下牧生・やました まきお
研究所 セメント研究室 室長