

論文 再生骨材への効果的な CO₂ 固定方法に関する検討

吉野 玲*1・安部 弘康*1・鈴木 好幸*2・野口 貴文*3

要旨: セメントはその製造過程において多大な CO₂ を排出する。一方で、セメント硬化体は CO₂ を吸収・固定するポテンシャルが非常に高いことが知られており、脱炭素社会への貢献が期待される。本研究では、戻りコンクリート・残コンクリートを硬化後に破碎して製造した再生粗骨材に着目し、付着するセメント硬化体に CO₂ を効果的に固定する方法を検討した。その結果、再生粗骨材へ CO₂ を固定するには適度なマイクロバブル水の供給と、乾燥過程で CO₂ が多量に吸収可能な高濃度の CO₂ 環境下が必要であることが分かり、適切な条件下では最大で約 37kg/t の CO₂ が固定できることが示唆された。

キーワード: 再生骨材, CO₂ 固定, 炭酸化, マイクロバブル水, 示差熱-熱重量同時分析

1. はじめに

近年、脱炭素社会の構築に向けた様々な取り組みが地球規模で進められている。全国地球温暖化防止活動推進センターの調査によると、2019 年において世界全体の二酸化炭素 (CO₂) 排出量の合計は約 335 億 t であり、日本はそのうち 3.2% の約 10.5 億 t の CO₂ を排出している。この排出量は、中国、アメリカ、インド、ロシアに次いで 5 番目に多く、日本は世界有数の CO₂ 排出国となっており、CO₂ 排出量削減へ取り組むべき課題が多いことを示している。また、2020 年に、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」が宣言され、多種多様な分野で温室効果ガス削減に向けた技術開発がさらに加速している。

建設分野においては、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いる。セメント製造時の CO₂ 排出は燃焼に使用されるエネルギー源に依るものと、石灰石の脱炭酸等の原料に依るものに分かれるが、両者を合計するとセメント製造によって排出される CO₂ は年間 4000 万 t を超えることが報告されている²⁾。これは国内の産業部門において第 4 位の排出量となっており、セメント・コンクリート分野は、有効な CO₂ 排出量の削減に向けた解決策を早急に打ち出す必要がある。

一方で、セメント・コンクリートは CO₂ を固定するポテンシャルが非常に高く、生成物が化学的に安定している。このことから CO₂ を大量に吸収することが期待されており、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。コンクリートへの 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から製造される再生骨材を利用することで、循環型社会の形成への貢献も期待される。

さらに、再生骨材に付着するセメント硬化体にも CO₂ を固定することで更なる固定量の増大が期待できる。

以上の背景から、本報では再生骨材を CO₂ 固定可能な建材と捉え、効率的な固定方法の検討を目的として実験を行った結果を報告する。

2. 使用した再生骨材

2.1 材料の選定

本報では、CO₂ 固定の対象を粒度 5~20mm の再生粗骨材とした。再生粗骨材はその品質によって H, M, L に等級分けされているが、より多くの CO₂ 固定化を期待し、CO₂ を固定するためのセメント硬化体の付着量が多い再生粗骨材 L、再生粗骨材 L と同等以下の低品質な再生粗骨材 3 種類を選定した。

2.2 材料の概要および物性

表-1 に使用した再生粗骨材 3 種類の概要を、表-2 に使用した再生粗骨材の物性を示す。試験は、不純物を除去した代表的な試料を用い、絶乾密度・吸水率試験は JIS A 1110、微粒分量試験は JIS A 1103、粗粒率は JIS A 1102、破碎値試験は JIS A 5023 附属書 C に従い、100kN まで加圧することで行った。付着するセメントペースト量の測定は 50 倍に希釈した希塩酸を用いて行った。

表-1 使用した再生粗骨材の概要

記号	原コンクリート	製造概要
A	解体ガラ (供用期間不明)	コンクリート用再生粗骨材 L として製造された骨材を 5~20mm に粒度調整。
B	解体ガラ (供用期間不明)	再生路盤材 RC40 として製造された骨材を 5~20mm に粒度調整。
C	戻りコン・残コン (硬質砂岩砕砂, 石灰砕砂, 硬質砂岩砕石を使用する工場で製造されたコンクリート)	戻りコン・残コン硬化させた後に粗粉碎し、再生路盤材 RC40 として製造された骨材を 5~20mm に粒度調整。

*1 (株)安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 (正会員)

*2 (株)安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 工博 (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 教授 工博 (正会員)

再生骨材は、構造物の解体によって発生する解体コンクリート（以下、解体ガラ）から製造されるものと、戻りコンクリート・残コンクリート（以下、戻りコンまたは残コン）を硬化させた後、破碎して製造されるものに分けられる。使用した再生粗骨材は A、B が解体ガラ由来であり、C が戻りコン・残コン由来である。A、B の元となった構造物の供用期間は不明である。A は 40mm 以下のコンクリート用再生粗骨材 L を製造するプラントで製造された骨材であり、それらを 5~20mm に分級したものをを用いた。B および C は、再生路盤材 RC40 を製造するプラントで製造された骨材であり、A と同様に 5~20mm に分級し、試験に使用した。このことから、B、C は吸水率や粒度分布の一部で JIS A 5023 附属書 A コンクリート用再生粗骨材 L の規格を満たさない項目があったが、本報では解体ガラや戻りコン・残コンなどの産業廃棄物から製造される骨材を対象に、効率的な CO₂ 固定方法の確立を目的としたため、コンクリート用骨材の物性の規定値は重要視せず、B、C は再生粗骨材 L と同等以下の品質を持つ、低品質な再生粗骨材と位置づけて検討を進めることとした。なお、本報で行った試験で使用した 3 種類の再生粗骨材は、それぞれ同じロットで採取されたものであるため、製造条件・骨材の物性はいずれの試験においても同条件である。

3. 再生粗骨材への CO₂ 固定化試験

試験は 3 つのシリーズに分けて行った。表-3 に各シリーズの検討内容を示す。セメント水和物の炭酸化の進行は水分に大きく影響されることから³⁾、水への浸漬、乾湿繰返しなどを行い、効果的な CO₂ 固定化方法を検討した。実験に用いた水は CO₂ を 100 μm 以下の気泡（マイクロナノバブル）として水中に保持した溶液（以下、MNB 水）を用いた。金ら⁴⁾は、CO₂ ナノバブルを含む溶液にモルタルサンプルを繰返し浸漬させることで、効果的に炭酸化による空隙充填効果が得られることを報告している。また、極微小な気泡によって水の表面張力が低下し⁵⁾、効果的にセメント硬化体へ CO₂ を浸透させることも期待できることから、本研究においても MNB 水を使用することとした。また、CO₂ を固定化した再生粗骨材の実製造を見据え、短期間で CO₂ を固定する手法に関する検討も実施した。

MNB 水は二相流旋回方式のノズルを有する発生装置を介して製造し、必要とする CO₂ 流量は 1L/min、水量は 20L/min である。各実験シリーズで使用した MNB 水の pH および CO₂ 濃度を表-4 に示す。

各シリーズ終了後は表-5 に示す手順で試料調製を行い、熱分析によって CO₂ 固定量の確認および Ca(OH)₂ 量の推定を行った。昇温速度は 20°C/min で、1000°C まで計

測した。

CO₂ 含有率の推定は既往の文献を参考⁶⁾に、TG 曲線の 550~900°C の間の質量変化を CaCO₃ の脱炭酸量として読み取ることで行った。また、Ca(OH)₂ の測定は 450°C 付近の脱水反応による質量変化を読み取った。DTA（示差熱）曲線上における 450°C 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 の脱水による質量変化とした（図-1）。この

表-2 使用した再生粗骨材の物性

項目	再生粗骨材種類			JIS A 5023 規格値
	A	B	C	
表乾密度 (g/cm ³)	2.40	2.46	2.28	-
吸水率 (%)	6.91	5.11	8.99	7.0%以下
絶乾密度 (g/cm ³)	2.25	2.35	2.09	-
微粒分量 (%)	1.30	1.60	0.50	3.0%以下
粗粒率 (%)	6.61	6.37	6.37	-
付着ペースト量 (%)	26.40	17.5	32.2	50 倍の希塩酸によって溶解

表-3 実験シリーズの概要

シリーズ	概要
X	MNB 水への浸漬、中性化促進槽内での静置、乾湿繰返しを実施
Y	吸水率を超えない範囲で MNB 水を供給し、高濃度 CO ₂ 雰囲気化で養生を実施
Z	高濃度 CO ₂ 雰囲気下において、短期間で効率的に CO ₂ を固定化させる方法を検討

表-4 使用した MNB 水の pH および CO₂ 濃度の平均値

シリーズ	pH	CO ₂ 濃度 (ppm)
X	6.2	1576
Y	5.8	1532
Z	5.1	1508

表-5 試料調整手順

手順	
1	1mm 以下程度まで微粉砕*
2	アセトンに 6 時間以上浸漬し、自由水除去
3	真空デシケーターにて 6 時間以上存置
4	約 100 μm 程度までボールミルで細粉砕
5	真空凍結乾燥し、分析まで密封容器で保管
6	熱分析

*試料は全量粉砕した。

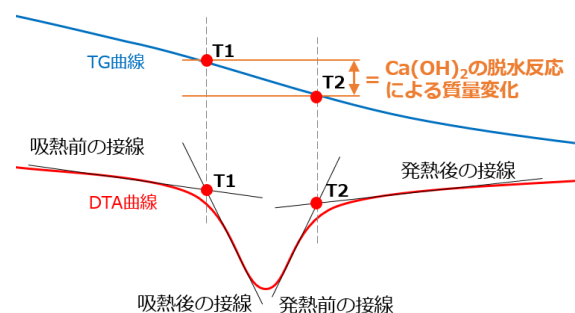


図-1 Ca(OH)₂ 脱水反応の質量変化の測定概要

質量変化を基に化学反応式から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を推定した。なお、 CO_2 固定量および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の算出は、アセトン置換後の真空乾燥による絶乾状態として行っている。

試験を開始するにあたり、3つの再生粗骨材の CO_2 含有率を熱分析によって確認した。結果を表-6に示す。 CO_2 含有率はAが最も大きい値であった。また、Aは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水による吸発熱変化が確認できなかったため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を0%とした。BはAに次いで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が少ない。A、Bは解体ガラから製造された骨材であるため、構造物の供用期間中あるいは再生粗骨材の製造過程で多くの CO_2 を吸収・固定しており、特に、Aにおいてその傾向が著しいことが分かった。A、Bは残コン・戻りコンから製造されたCと比べると人為的に新たな CO_2 を固定するポテンシャルが低いと考えられる。また、Cは原コンクリートの製造工場が石灰砕砂を使用しているため、熱分析の結果に天然由来の CaCO_3 が含まれている可能性がある。しかしながら、 CO_2 固定量は試験前後の CO_2 含有率の差し引きから評価しているため、本報では石灰砕砂の影響は考慮されていないと考える。各試験で用いた3種類の再生粗骨材は、それぞれ同一のロットで製造されたものであるため、この結果を次節以降で行う試験のベースとして用いることとした。

3.1 シリーズX

3.1.1 試験方法

シリーズXでは3種類の再生粗骨材に3つの方法で CO_2 を固定する方法を試みた。各試験の内容を表-7に示す。試験X-1では、MNB水へ再生粗骨材を浸漬する方法を検討した。再生粗骨材とMNB水を1:5の割合でバケツに投入し、24時間以上静置後、MNB水から再生粗骨材を取り出すまでを1サイクルとした。24時間の浸漬中にMNB水の CO_2 濃度が低下するため、次サイクルは飽和状態のMNB水で浸漬を開始し、次のサイクル開始までの時間間隔は1時間以内とした。 CO_2 固定量の確認は1, 3, 7サイクルで行った。試験X-2では、温度 20°C 、60%RH、 CO_2 濃度5%の中性化促進槽内で再生粗骨材を養生する方法を検討した。試験X-3では、再生粗骨材とMNB水を1:5の割合でバケツに投入し6時間以上静置後、MNB水から再生粗骨材を取り出し、 105°C の乾燥炉で一晩乾燥する手順を1サイクルとして繰り返し行った。どの試験においても、初期の再生粗骨材の状態は表乾状態とし、試験終了後は 105°C の乾燥炉に一晩入れ、絶乾状態とした後に表-5の手順で試料調製を行った。

3.1.2 分析結果

表-8~10、図-2に、熱分析によって確認した各試験の CO_2 含有率および固定量の推移を示す。本報では、 CO_2 の固定量を、1tの再生粗骨材あたりに固定された CO_2 と

表-6 試験前の各再生粗骨材の熱分析結果

再生粗骨材種類	CO_2 含有率 (%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量 (%)	CaCO_3 量 (%)
A	7.53	0.00	17.11
B	3.54	1.26	8.05
C	7.00	2.81	15.90

表-7 シリーズX 各試験の詳細

試験X-1 MNB水浸漬試験	再生粗骨材:MNB水=1:5の割合でMNB水に24時間以上浸漬し、取り出すまでを1サイクルとする。次サイクル開始時は飽和状態のMNB水で浸漬を行う。 浸漬中は 20°C 、60%RHの恒温恒湿室に静置。 1, 3, 7サイクル実施後に試料を採取。
試験X-2 中性化促進試験	20°C 、60%RH、 CO_2 濃度5%の中性化促進槽に静置。MNB水の供給は行わない。 1, 3, 7日間養生後に試料を採取。
試験X-3 乾湿繰り返し試験	MNB水へ6時間以上浸漬後、 105°C の乾燥炉で一晩乾燥を1サイクルとし、5サイクル実施。 各サイクル終了時に試料を採取。

表-8 試験X-1 CO_2 含有率および固定量

サイクル数	CO_2 含有率 (%)			CO_2 固定量 (kg/t)		
	再生粗骨材種類			再生粗骨材種類		
	A	B	C	A	B	C
0	7.53	3.54	7.00	0		
1	6.76	3.37	6.64	-7.65	-1.69	-3.51
3	7.15	3.40	7.09	-3.79	-1.41	0.96
7	6.38	3.38	6.48	-11.44	-1.62	-5.14

表-9 試験X-2 CO_2 含有率および固定量

養生日数	CO_2 含有率 (%)			CO_2 固定量 (kg/t)		
	再生粗骨材種類			再生粗骨材種類		
	A	B	C	A	B	C
0	7.53	3.54	7.00	0		
1	6.87	3.73	8.01	-6.55	1.84	10.13
3	7.87	3.94	8.86	3.46	3.94	18.63
7	7.69	4.36	8.79	1.58	8.21	17.97

表-10 試験X-3 CO_2 含有率および固定量

サイクル数	CO_2 含有率 (%)			CO_2 固定量 (kg/t)		
	再生粗骨材種類			再生粗骨材種類		
	A	B	C	A	B	C
0	7.53	3.54	7.00	0		
1	7.25	3.48	6.71	-2.75	-0.63	-2.85
2	6.73	3.77	7.07	-8.01	2.28	0.76
3	6.80	3.81	6.89	-7.33	2.66	-1.03
4	6.36	3.64	7.14	-11.67	1.00	1.44
5	6.99	3.72	7.59	-5.38	1.75	5.91

して式(1)によって算出した。

$$\text{CO}_{2\text{Fix}} = 1000 \times \frac{(\text{CO}_2' - \text{CO}_2)}{100} \quad (1)$$

ここに、 $\text{CO}_{2\text{Fix}}$: CO_2 固定量(kg/t)、 CO_2' : 試験後の CO_2 含有率(%), CO_2 : 試験前の CO_2 含有率(%)

本来は、試験を行うことで人為的に固定された CO_2 の質量増加を考慮して固定量を計算する必要があるが、本報ではその影響が小さいため、除外することとした。

試験X-1では多くの水準で CO_2 の固定量がマイナスとなり、試験X-3においても、固定量がマイナスとなる水準が見られた。図-3に、各試験における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量

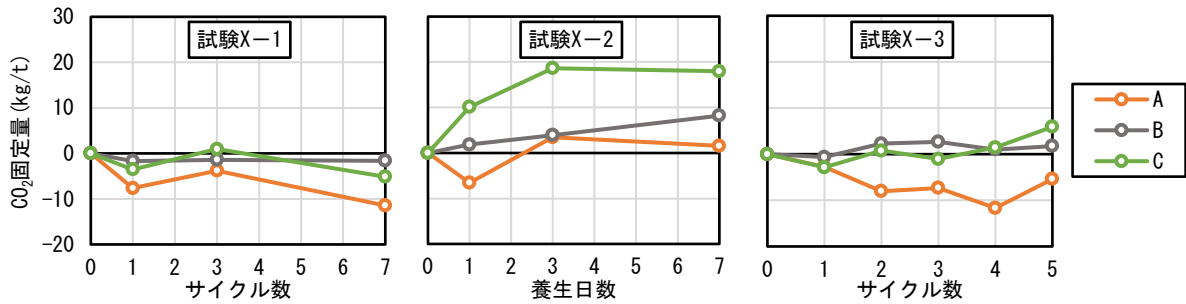


図-2 試験 X-1~3 の CO₂ 固定量の推移

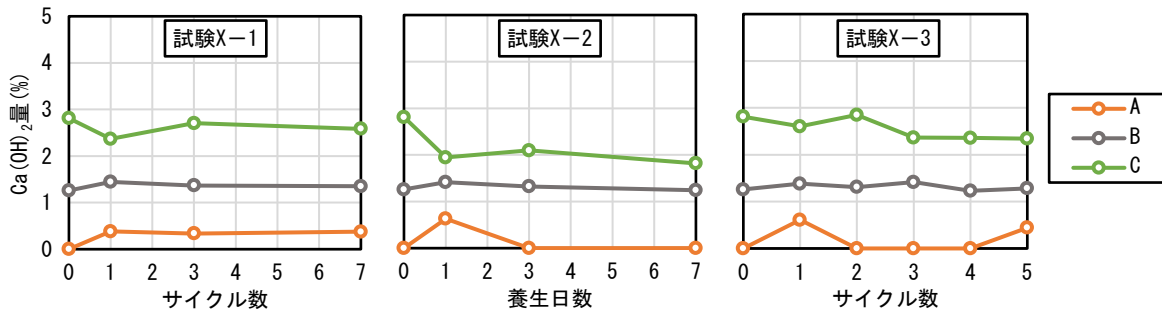


図-3 試験 X-1~3 の Ca(OH)₂ 量の推移

の推移を示す。試験 X-1, 3 では Ca(OH)₂ 量の増減はほとんど見られないことから、MNB 水中では Ca(OH)₂ の CaCO₃ への反応はほとんど生じていないことが推察される。このことから、再生粗骨材を MNB 水に浸漬したことで、セメント硬化体内部での CaCO₃ の結晶が安定せず、むしろ低 pH の MNB 水に曝されることによって CaCO₃ が重炭酸カルシウムに変化し、水中に溶出した可能性が考えられる。中性化促進槽で養生を行った試験 X-2 では、養生日数の増加に伴って CO₂ 固定量が増える傾向を確認できた。特に、残コン・戻りコンから製造された再生粗骨材 C が養生日数 7 日で約 18kg/t の CO₂ を固定していた。解体ガラから製造された再生粗骨材 A, B は固定量が小さく、前述したように、供用期間中や再生粗骨材の製造過程で多くの CO₂ を固定していることから、人為的な CO₂ 固定化のポテンシャルが低いことが示された。また、養生日数が 3 日を超えると反応が停滞する現象を再生粗骨材 A, C において確認した。中性化促進槽内は CO₂ 濃度を均一に保つための送風が行われており、槽内で再生粗骨材が徐々に乾燥したことで炭酸化に必要な水分が不足して炭酸化反応が停滞した可能性が考えられる。

シリーズ X では、再生粗骨材に対して多量の MNB 水の供給は骨材への CO₂ 固定化を阻害すること、CO₂ 濃度 5% の雰囲気下では CO₂ 固定化が進行するが、養生期間 3 日を超えると反応が停滞することを確認した。また、残コン・戻りコンから製造され、セメント硬化体の付着量が多い再生粗骨材 C が、人為的な CO₂ 固定のポテンシャルが高いことが示唆されたため、シリーズ Y, Z では再生粗骨材 C に着目することとした。

3.2 シリーズ Y

3.2.1 試験方法

シリーズ X において、多量の MNB 水の供給が CO₂ 固定化を阻害することが分かった。しかしながら、既往の研究から、セメント硬化体への CO₂ 固定の効率化を図るには適切な含水状況の維持が有効であるとされ、W/C で最適値は異なるが、W/C 0.34 のコンクリートでは含水率 70% 程度で CO₂ 固定効率が大幅に向上することが報告されている⁷⁾。一方、従来中性化速度に及ぼす環境条件の影響で明らかかなように、空隙内が水で満たされるような含水状態では CO₂ の硬化体内部への拡散が阻害され、著しく炭酸化の進行が遅くなることが分かっている。

このことから、シリーズ Y では再生粗骨材 C に対して、表-2 の吸水率 (約 9%) を超えない程度の MNB 水を供給し、高濃度 CO₂ 雰囲気下で養生を行う方法を検討した。表-11 に水準、表-12 に試験手順を示す。水の供給は噴霧器で行い、スプーンで再生粗骨材を攪拌しながら試料全体に水が掛かるように行った。噴霧の際、最も

表-11 シリーズ Y の水準

記号	MNB 水噴霧量	備考
MNB 水 0%	噴霧なし	1, 3 サイクル終了時に試料採取 (N=3). 試験前および各サイクル終了後の含水率を計測.
MNB 水 9%	骨材質量の 9%	
MNB 水 6%	骨材質量の 6%	
MNB 水 3%	骨材質量の 3%	

表-12 試験手順

手順	備考
1	水の供給
	攪拌しながら噴霧器で所定の水量を全体的に噴霧する.
2	炭酸化
	20°C, 60%RH, CO ₂ 濃度 17% の中性化促進槽に静置する.

1~2 を 1 日 1 サイクルとし、所定のサイクル数でサンプルを採取して分析を行う。

噴霧量が多い MNB 水 9%において、骨材に吸水されなかった余剰水が容器に残る様子を確認したが、その他の水準では余剰水は見られなかった。MNB 水を噴霧後、20℃、60%RH、CO₂濃度 17%の中性化促進槽に静置した。この手順を 1 日 1 サイクルで実施し、1, 3 サイクル経過時に熱分析によって CO₂ 固定量の推移を確認した。試料はサイクルごとに 3 つ採取し、分析結果は 3 つの値を平均した値によって評価した。シリーズ X では骨材の含水状態を表乾状態に調整して試験を開始したが、シリーズ Y では気乾状態で試験を開始した。試験前後の含水状態を把握することで、含水状態と CO₂ 固定の関係性を調査することとした。

3.2.2 試験結果

(1) 含水率の推移

表-13 に含水率の推移を示す。N=3 で含水率の測定を行い、平均値を示した。試験開始前は 4.4~5.5%程度の含水率であったが、各サイクル終了時は水の供給の有無に関わらず、1.4~2.5%となっており、中性化促進槽内で乾燥が進んでいることを確認した。

(2) CO₂ 固定量の推移

表-14、図-4 に、熱分析によって確認した CO₂ 含有率と固定量の推移を示す。また、図-5 に Ca(OH)₂ 量の推移を示す。水の有無に関して、1 サイクル時点では固定量に与える影響を確認することが出来なかったが、MNB 水 0%は 1~3 サイクル目にかけて固定量の増進が顕著に滞っている様子が確認できた。中性化促進槽へ入れる前の含水率は 4.4%であったため、1 サイクル目では炭酸化の反応が促進されたが、1 サイクル目終了時点で 1.5%まで乾燥が進行しており、炭酸化に寄与する水分が減少したことから、以降のサイクルでは反応が停滞したと考えられる。Ca(OH)₂ 量の推移からも、1~3 サイクル目では Ca(OH)₂ 量の低下が見られないことから、炭酸化がほとんど進行していないことが確認できる。

MNB 水の供給量について、MNB 水 9%が全サイクルを通じて最も多量に CO₂ を固定し、3 サイクルで約 37kg/t の CO₂ を固定した。MNB 水 6%と MNB 水 3%は 1 サイクル目では同程度の固定量であったが、3 サイクル目以降はどちらの条件でも乾燥が進み、MNB 水が足りなかったため CO₂ 固定量に差が見られなかった。Ca(OH)₂ 量の推移を見ると、すべての水準において 3 サイクル終了時に未反応の Ca(OH)₂ 量が 1%以上残存していることから、槽内で再生粗骨材が乾燥状態となる時間をより短かくすれば、効率的な CO₂ 固定化に繋がると考えられる。また、CaCO₃ の増加と Ca(OH)₂ の減少に相関が見られないが、C-S-H などその他水和物の炭酸化が影響していると考えられる。

表-13 含水率の推移

サイクル数	含水率(%)			
	MNB 水 0%	MNB 水 9%	MNB 水 6%	MNB 水 3%
0	4.38	4.38	5.47	5.47
1	1.47	1.96	2.02	2.48
3	1.40	1.95	1.90	1.87

表-14 CO₂ 含有率および固定量の推移

サイクル数	CO ₂ 含有率(%)			
	MNB 水 0%	MNB 水 9%	MNB 水 6%	MNB 水 3%
1	8.9	9.3	8.7	8.7
3	9.2	10.3	9.1	9.5
サイクル数	CO ₂ 固定量(kg/t)			
	MNB 水 0%	MNB 水 9%	MNB 水 6%	MNB 水 3%
1	22.8	27.0	20.6	21.4
3	25.8	36.8	25.2	29.3

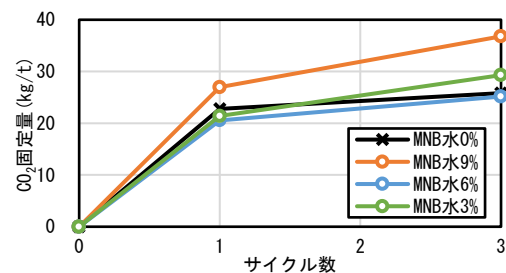


図-4 CO₂ 固定量の推移

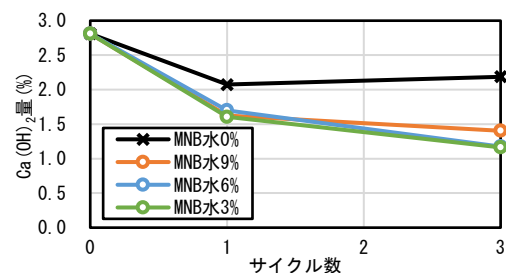


図-5 Ca(OH)₂ 量の推移

表-15 シリーズ Z の水準

記号	MNB 水噴霧量	備考
MNB 水 9%	骨材質量の 9%	2, 4, 6 サイクル終了時に試料採取 (N=2). 試験開始前, 2, 4, 6 サイクル終了後の含水率を確認. MNB 水 9%のみ, MNB 水噴霧直後の含水率を確認.
MNB 水 3%	骨材質量の 3%	

3.3 シリーズ Z

3.3.1 試験方法

シリーズ Z は、シリーズ Y の結果を反映させるとともに、実製造を見据え、より効率的な CO₂ 固定化方法を検討した。具体的にはシリーズ Y で行った試験を 1 日 2 サイクルとし、MNB 水の供給と高濃度 CO₂ 雰囲気下での養生を 3 日間で 6 サイクル行った。表-15 に水準を示す。CO₂ 固定量の確認は 2, 4, 6 サイクルで実施した。試料はサイクルごとに 2 つ採取し、分析結果は 2 つの値を平均した値によって評価した。含水率の計測は試験前と各サイクル終了時に行い、MNB 水 9%のみ、2, 4, 6 サイクルに MNB 水を供給した直後の含水率も計測した。

3.3.2 試験結果

(1) 含水率の推移

表-16 に含水率の推移を示す。MNB 水供給直後の含水率を調査した MNB 水 9%は、MNB 水供給時は7~9.5%程度、各サイクル終了後は 3%程度の含水率であった。MNB 水 3%も各サイクル終了後の含水率は 3~4%程度であり、シリーズ Y と同様に中性化促進槽内における養生中の乾燥を確認したが、養生時間を短かくしたことで、シリーズ Y と比較すると大きい含水率であった。

(2) CO₂固定量の推移

図-6 に、熱分析によって確認した CO₂ の含有率と固定量の推移を示す。CO₂ 固定量は、MNB 水 9%と MNB 水 3%が 4 サイクル目まではほとんど同等の固定量で推移していたが、4~6 サイクル目ではシリーズ Y と異なり、MNB 水 9%の反応が停滞し、MNB 水 3%の反応が進んだ結果となった。炭酸化時間を短期間としたため、乾燥が充分に進んでいない状態の再生粗骨材に水分を供給したこととなり、結果として過剰な水分供給となったと考えられる。一方で、供給水量の小さい MNB 水 3%は再生粗骨材中の水分量と供給した MNB 水が炭酸化に適当な関係となり、CO₂ 固定量が安定して増加したと考えられる。

シリーズ Y とシリーズ Z で再生粗骨材に固定した CO₂ 量の最大値を比較すると、シリーズ Z の方が約 10kg/t 小さい結果となった。原因としては、1 日 2 サイクルとしたことによって、中性化促進槽内で試料が炭酸化に最適な再生粗骨材の水分量まで骨材中の水分が乾燥しなかったこと、試料への水の供給時間や中性化促進槽の運転停止・再開等によるロス時間が増え、結果として炭酸化時間が短くなったことが挙げられる。

シリーズ X~Z の結果から、今回試験に用いた再生粗骨材では内部空隙が 100%飽和ではない状態を保つことで CO₂ 固定量が増進することを確認した。しかしながら、CO₂ 固定に最適な含水状態の把握までは至らなかった。

4. まとめ

本報では、再生粗骨材への効果的な CO₂ 固定化を目的とし、実験的検討を行った。MNB 水を再生粗骨材の吸水率を超えない範囲で供給し、高濃度 CO₂ 雰囲気下で養生および乾燥を繰り返すことで、CO₂ 固定量の増進が促進できることを確認した。この方法を用いることで、本報で使用した残コン・戻りコンを硬化後に破碎して製造した再生粗骨材に約 37kg/t の CO₂ を固定できたが、更なる効率化を目指すための最適な再生粗骨材の含水状態の把握が必要であり、引き続き検討を進める。また、CO₂ 固定設備の実装等を目指し、MNB 水供給量の調整や温湿度条件を変えた検討が必要と考えている。

表-16 含水率の推移

サイクル数	(1) MNB 水 9%	(2) MNB 水 3%
0	4.40	4.40
2 サイクル MNB 水供給後	9.51	-
2 サイクル終了後	3.01	4.26
4 サイクル MNB 水供給後	7.26	-
4 サイクル終了後	3.13	3.33
6 サイクル MNB 水供給後	9.12	-
6 サイクル終了後	2.94	3.19

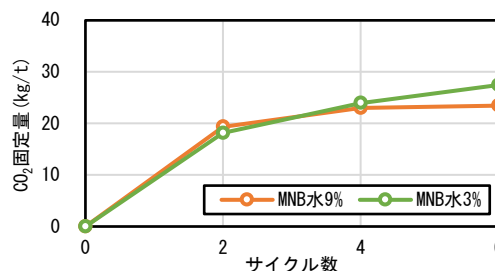


図-6 CO₂固定量の推移

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。東京都立大学の上野敦准教授には、考察に関するご助言を頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センターHP 参照：
<https://www.jccca.org/> (閲覧日：2023年1月6日)
- 2) 一般社団法人セメント協会 HP 参照：
https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/220324_01.pdf
(閲覧日：2023年1月6日)
- 3) コンクリートの炭酸化に関する研究の現状，炭酸化研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1993.6
- 4) 金 志訓，北垣 亮馬，割田 聖洋：CO₂ ナノバブルを用いた炭酸化反応による空隙充填効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1543-1548, 2015
- 5) 柘植 秀樹：マイクロバブル・ナノバブルの基礎，日本海水学会誌，Vol.64, No.1, pp.4-10, 2010
- 6) 安田 遼介，島崎 大樹，七澤 章，森 泰一郎：炭酸化を受けたセメント系材料中の CO₂ 含有率評価に向けた分析方法の検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.75, No.1, pp.442-447, 2021
- 7) Ke-yu Chen et al: An overview on the influence of various parameters on the fabrication and engineering properties of CO₂-cured cement-based composites, Journal of Cleaner Production, p.8, 2022.9