

論文 吹付けロックウールの CO₂ 固定性能に関する基礎的研究

乙茂内 郁美*1・杉野 雄亮*2・谷辺 徹*3・新 大軌*4

要旨: セメントは製造工程において多くの CO₂ を排出する。耐火被覆材や断熱材、吸音材として用いられる吹付けロックウールは、ロックウールおよびセメントを原料とする材料であるが、同じくセメントを原料とするコンクリートに比べ、これまで炭酸化について検討されていなかった。そこで、本研究では吹付けロックウールの CO₂ 固定量や固定速度を確認し、更なる固定性能の向上方法を検討した。その結果、吹付けロックウールは短期間で CO₂ 固定量が多く、炭酸化反応の促進のための給水処理により固定量も固定速度も更に増大した。吹付けロックウールは優れた CO₂ 固定性能を有するセメント系材料と考えられる。

キーワード: 吹付けロックウール, CO₂ 固定性能, 炭酸化度, カーボンニュートラル, ホワイトカーボン

1. はじめに

1.1 背景

世界各国が CO₂ 排出量の実質ゼロを目標に掲げ、CO₂ の排出量低減方法や活用・固定技術などが開発されている。日本でも 2050 年までにカーボンニュートラルの達成を目指し、各業界で関連技術が検討されている。建設業界の主要な材料であるセメントは、製造過程で多くの CO₂ を排出し、セメント産業は国内の CO₂ 排出量の約 5% を占めると言われている。セメントを主原料とするコンクリートの分野では、コンクリート中のセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物などで置換する技術や、骨材や粉体に CO₂ を固定した材料をコンクリートに混入する技術が開発されている。また、コンクリート中のカルシウムが CO₂ を固定する特性を有することから、グリーンカーボンやブルーカーボンに次ぐ CO₂ を取り込む新たな存在としてホワイトカーボン¹⁾と称され、コンクリートに CO₂ を吸収させる技術も開発されている。一般的に構造部材として施工されたコンクリートは、組織が緻密であるため CO₂ がコンクリート内部に侵入するまでには長い年月を要する。そのため、製造時に CO₂ バブリングや炭酸化養生などを行うことで強制的にセメントや特殊混和材を炭酸化させ、CO₂ 固定量を増大させる方法などが近年では多く検討されている^{例えば 2)}。これらの技術を利用したコンクリートは総称して環境配慮型コンクリートと呼ばれ³⁾、カーボンニュートラルに向けて技術の開発が加速している。

建設業界に欠かせない建設材料の 1 つである吹付けロックウールもセメントを使用する材料である。吹付けロックウールは材料構成上、空隙が多く、かさ密度が小さいという特性を持つ。そのため、一般的な構造部材のコ

ンクリートと比較して供用時に大気中の CO₂ が吹付けロックウールの内部まで侵入しやすく、深さ方向に対して吹付けロックウールを構成するセメント水和物の CO₂ 固定量や固定速度が優れる可能性があると考えられる。また、環境配慮型コンクリートと同様にホワイトカーボンの特徴的な材料としても期待できる。しかし、これまで吹付けロックウールの炭酸化については検討されておらず、CO₂ 固定性能についてほとんど把握されていない。

そこで本検討では、耐火被覆用途に用いられる吹付けロックウールを想定し、CO₂ の固定量や固定速度により CO₂ 固定性能を確認し、更にカーボン・オフセットの創出を目的に CO₂ 固定性能の向上方法について検討した。

1.2 吹付けロックウール

吹付けロックウールは、ロックウール粒状綿、セメント、水で構成され、吹付け工法による耐火被覆材の代表的な材料である。用途としては他にも断熱材や吸音材として使用される。吹付けロックウールは専用の吹付け機により鉄骨などの下地に直接吹付けて、一定の被覆層として形成される。吹付け工法には 2 種類あり、予め工場で作製したロックウール粒状綿とセメントを混合した材料を水と同時に吹付ける乾式工法と、ロックウール粒状綿を現場で作製したセメントスラリーと同時に吹付ける半乾式工法がある。中でも材料分離防止や粉塵低減の利点から半乾式工法が主流となっている。耐火被覆材には鉄骨造の骨組を火災の熱から守るために、優れた耐火性・断熱性が求められる。吹付けロックウールにおいては、それらの性能を確保するため、材料の配合比率（セメントスラリー濃度、ロックウールとセメントスラリーの吐出量）、被覆厚さ、かさ密度が所定の値を満たすことが極めて重要となる。特に被覆厚さとかさ密度は火災時の構造体の

*1 太平洋マテリアル（株）開発研究所（正会員）

*2 太平洋マテリアル（株）開発研究所 博士（理工学）（正会員）

*3 太平洋マテリアル（株）開発研究所 博士（工学）（正会員）

*4 島根大学 学術研究院 環境システム科学系 准教授 博士（工学）（正会員）

耐力を左右する大きな因子であり、要求される耐火性能や構造物の部位によって定められている。かさ密度は絶乾状態で 0.28g/cm^3 以上の範囲で施工されている。

2. 実験概要および計画

2.1 実験概要

図-1に本実験の構成を示す。実験は大きく3つに分けており、検討1および検討2で吹付けロックウールが現状有している CO_2 固定性能について検討している。検討1では1時間耐火の吹付け厚さを想定した 30mm 角の吹付けロックウールサンプル全体の、検討2では深さごとの CO_2 固定性能を確認した。検討3では吹付けロックウールの CO_2 固定性能の向上方法について検討した。コンクリート中のセメント水和物の炭酸化は、温湿度などの環境条件に影響を受けることが知られており^{4,5)}、特に湿度や乾燥は炭酸化の進行速度に影響する。乾燥が進みやすい吹付けロックウールではコンクリート以上に含水状態が炭酸化速度に大きく影響することが考えられた。そこで、検討3は乾燥が進んだ段階で再度水を与える給水处理による CO_2 固定性能への影響を、給水处理なしのサンプルと比較することで確認した。

2.2 サンプルの作製

表-1に試験で使用した普通ポルトランドセメント(OPC)の化学成分を示す。表-2にサンプル作製条件を示す。配合および絶乾かさ密度は耐火被覆材の標準的な仕様とした。サンプルの寸法は実施工での吹付け厚さ(1時間耐火 25mm)や、TG-DTA分析を行う際の試料の全量粉碎に適したサイズを考慮して $30 \times 30 \times 30\text{mm}$ のキューブ状のサンプルとした(写真-1)。作製方法は、サンプル毎の配合比率やかさ密度などのばらつきを極力抑えるためにバッチ式とした。1サンプル分の材料を計量して袋に入れ混合し、内寸 30mm 角の型枠に詰めることでかさ密度を 0.28g/cm^3 に管理した。また、試験ごとのサンプル数はそれぞれ $n=1$ とした。

2.3 養生方法

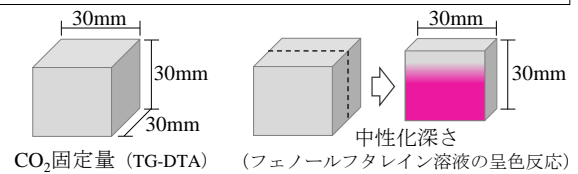
作製したサンプルは測定材齢まで 20°C 、 $60\%RH$ の恒湿室にて上面を一面解放させて養生した。なお、恒湿室の CO_2 濃度を測定したところ日平均は $350 \sim 800\text{ppm}$ であり、一般的な室内の CO_2 濃度 ($450 \sim 700\text{ppm}$) と同程度であった。検討3の給水处理は、材齢2週にサンプル作製時と同量の水を解放面から滴下して行った。

2.4 測定項目および測定方法

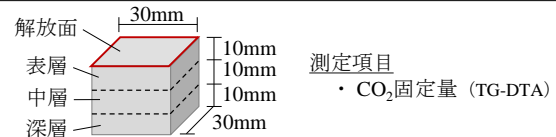
(1) 中性化深さ

炭酸化の進行状況を簡易的に確認する方法として、フェノールフタレイン溶液の呈色反応により中性化深さを測定した。所定の材齢まで養生し、測定の直前に型枠から取り出したキューブサンプルを縦方向に2分割し、断

検討1：吹付けロックウールの CO_2 固定性能の確認



検討2：深さごとの CO_2 固定性能の確認



検討3：給水处理による CO_2 固定性能の向上方法の検討

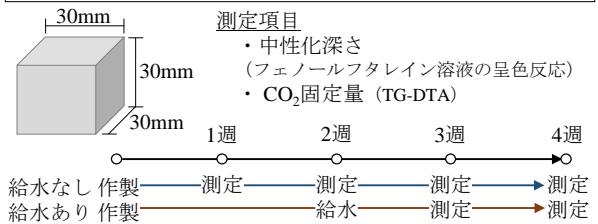


図-1 実験の構成

表-1 OPCの化学成分(%)

MgO	SO ₃	Ig.loss	全アルカリ	塩化物イオン
0.95	1.94	2.45	0.54	0.024

表-2 サンプル作製条件

ロックウール 粒状綿	配合比率		絶乾かさ密度 g/cm ³
	OPC	水	
1.5	1	2	0.28



写真-1 サンプルの作製の様子

面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、呈色反応が落ち着いた段階で解放面からの中性化深さを測定した。

(2) CO_2 固定量

CO_2 固定量については熱重量示差熱分析(TG-DTA)により測定した。分析試料は、検討1および3ではキューブサンプルを全量粉碎し、検討2では解放面から厚さ 10mm ずつの3層に分割してそれぞれを粉碎し調整した。TG-DTAは、粉碎した試料を N_2 ガスフローの環境下にて $20^\circ\text{C}/\text{分}$ で 1000°C まで昇温して行った。その分析結果と以下の式(1)を用いて固定された CO_2 量を算出した。

$$a_{\text{CO}_2} = \frac{W_{600} - W_{800}}{W_{1000}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

a_{CO_2} : CO₂ 固定量 (%)

W_x : TG により得られた温度 x (°C) での重量 (mg)

なお、CaCO₃ の脱炭酸は CaCO₃ の結晶形態によって脱炭酸を生じる温度域が異なり、バテライトは 480°C 以降、カルサイトは 630°C 以降で脱炭酸を生じると報告されている⁶⁾。ただし、500~600°C 付近ではバテライトの脱炭酸とは別の質量減少も生じるため、本検討においては過大評価とならないようカルサイトの脱炭酸を対象とした。また、自由水や結晶水の脱水など他の質量減少量を除外するため、加熱温度 1000°C における質量を基準に算出した。未水和セメント中の少量混合成分に含まれる CaCO₃ については、未水和セメント単体で測定した質量減少量を TG-DTA の結果から差し引いた。ロックウールについては、事前にロックウール単体で TG-DTA 分析を行い、CaCO₃ が含まれていないことを確認した。

3. 吹付けロックウールの CO₂ 固定性能 (検討 1)

(1) 中性化深さ

写真-2 に各材齢の中性化深さ試験の結果を示す。材齢 1 週で既に 11mm まで中性化が進行していた。その後の深さの進行は微増傾向にあり、材齢 4 週では 13mm であったが、呈色部分の色が全体的に薄くなることが確認された。図-2 に吹付けロックウールの中性化深さの実測値と、コンクリートの中性化深さ推定式 \sqrt{t} 則によって求めた吹付けロックウールおよびコンクリートの推定値を示す。吹付けロックウールの推定値は材齢 1 週の中性化深さから式(2)⁷⁾により中性化速度係数を求め算出した。

$$y = b\sqrt{t} \quad (2)$$

ここに、

y : 中性化深さ (mm)

t : 中性化期間 (年)

b : 中性化速度係数 (mm/ \sqrt{t})

コンクリートについては、以下に示す式(3)⁷⁾を用いて、普通ポルトランドセメントのみを使用した水セメント比 60% のコンクリートを想定して算出した。

$$y = \gamma_{cb}(-3.57 + 9.0 \cdot W / (C_p + k \cdot A_d))\sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、

W, C_p, A_d : 単位体積あたりの水および

ポルトランドセメント、混和材の質量

k : 混和材の種類により定まる定数

γ_{cb} : 予測の精度に関する安全係数

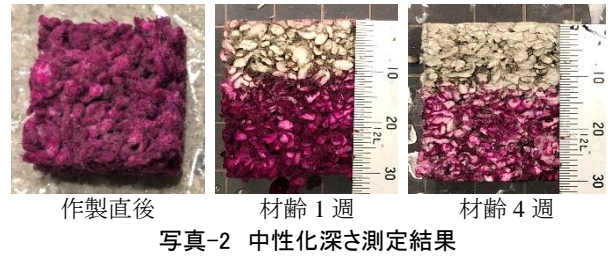


写真-2 中性化深さ測定結果

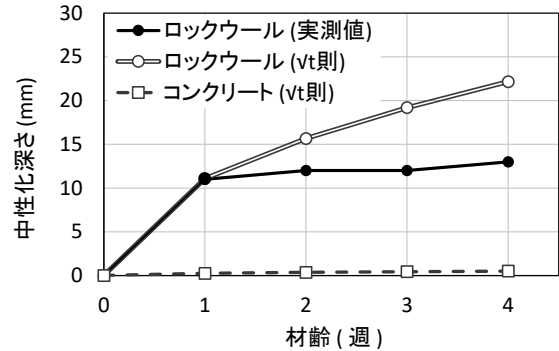
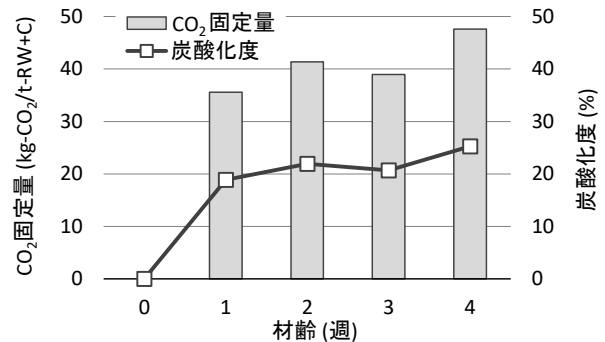


図-2 中性化深さの実測値と推定値



kg-CO₂/t-RW+C : 厚さ 30mm の吹付けロックウール 1t あたりの CO₂ 固定量

図-3 CO₂ 固定量および炭酸化度

材齢 2 週以降、吹付けロックウールの実測値と推定値の差は材齢の経過とともに大きくなり、吹付けロックウールの中性化深さの推定にはコンクリートの推定式は適用できなかった。一方、コンクリートの中性化深さは材齢 1 週で 0.3mm であり、吹付けロックウールが材齢 1 週で達していた 11mm まで中性化が進行するには約 36 年の年月を要すると推定された。以上より、吹付けロックウールの炭酸化速度が極めて早いことを確認した。

(2) CO₂ 固定量

図-3 に各材齢の CO₂ 固定量および炭酸化度を示す。CO₂ 固定量の単位 (kg-CO₂/t-RW+C) は標準配合比率 (セメント : ロックウール = 40 : 60) の厚さ 30mm で施工した吹付けロックウール 1t あたりに固定された CO₂ の質量を表している。また、炭酸化度は、セメント水和物中に含まれる CaO がどの程度 CaCO₃ へと変化したかを示したものであり、コンクリートの CO₂ 固定量の算定の際の指標として用いられる⁸⁾。本検討ではセメント質量の 60% を CaO と仮定し、以下の式(4)にて算出した。

$$b = \frac{a_{CO_2}}{0.4 \cdot m \cdot 0.6} \times 100 \quad (4)$$

ここに、

b : 炭酸化度 (%)

a_{CO_2} : CO₂ 量 (%)

m : 分析試料の質量 (mg)

CO₂ 固定量は、材齢 1 週で 35.6 kg-CO₂/t-RW+C であった。中性化深さの結果と同様に 1 週までの増加量が最も大きく、それ以降の増加量は小さくなる傾向であるが、材齢 4 週では 47.6 kg-CO₂/t-RW+C の CO₂ を固定していた。既往の研究⁹⁾では、20°C-50%RH-80%CO₂ の環境下で炭酸化養生されたセメントペースト（普通ポルトランドセメント使用、W/C=50%）において、フェノールフタレインを噴霧しても呈色しなかった部分のペースト中の CO₂ 量はおよそ 25% という結果が示されている。密度 2.3t/m³ のコンクリートと仮定して、コンクリート中の中性化した部分の CO₂ 固定量を推定すると 55kg-CO₂/t-con となる。ここで、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 50% のコンクリート壁の供用期間 65 年での中性化深さは式(3)より約 7.5mm であり、壁厚を 150mm と想定すると、そのコンクリート壁の CO₂ 固定量は 2.8kg-CO₂/t-con となる。中性化深さの結果に加え CO₂ 固定量の測定結果からも、普通コンクリートと比較して吹付けロックウールは CO₂ 固定速度が早く、短期間での CO₂ 固定量が極めて大きいことが確認された。また、炭酸化度は、材齢 4 週の時点では 25% 程度であり、今後も更に CO₂ 固定量が増加していくと予想される。実際の現場では長期にわたり今回の試験結果以上に CO₂ を固定していると推察され、その状態で耐火被覆など使用用途の役割を果たしている長い実績がある。また、吹付けロックウールは密度が低く、高い強度を負担するものではないこともあり、炭酸化による要求性能への影響やそれによる使用上の問題が発生する可能性は低いと考えられる。

(3) CO₂ 固定性能への乾燥の影響

図-4 に CO₂ 固定量と質量変化率の経時変化を示す。質量変化率の結果より、サンプルは作製してからわずか 1 週間程度でほぼ平衡含水状態に達していた。また、CO₂ 固定量の増加量も材齢 1 週までが最大となっており、吹付けロックウールの CO₂ 固定性能には含水状態などの水分の存在が影響すると考えられる。コンクリートよりも密度の低い吹付けロックウールは含水状態が変動しやすく、養生中の温湿度条件によって CO₂ 固定性能へ影響を受けやすいと推察される。このことから、吹付けロックウールの含水状態に着目した CO₂ 固定性能の向上方法を検討することで、更に優れたホワイトカーボンとして適用できる可能性があると考えられる。

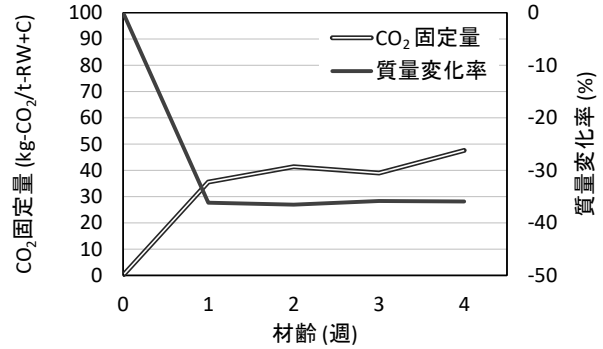


図-4 CO₂ 固定量と質量変化率の経時変化

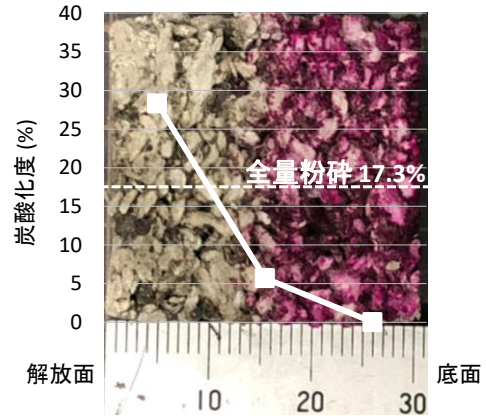


図-5 深さと炭酸化度の関係(材齢 1 週)

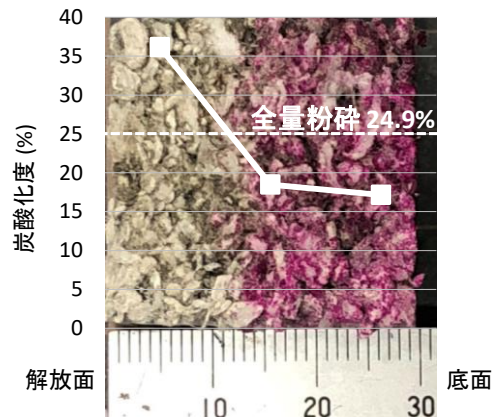


図-6 深さと炭酸化度の関係(材齢 4 週)

4. 深さごとの CO₂ 固定性能 (検討 2)

図-5、図-6 に材齢 1、4 週における解放面からの深さと炭酸化度の関係を示す。2 材齢とも最も CO₂ 固定量が大きかった層は表層であった。中性化試験深さ試験では材齢 1 週の時点で既に表層は全面フェノールフタレインによる呈色は見られなかったが、4 週までの間で炭酸化は更に進行しており、炭酸化度は 36.1% まで増加していた。一方、中層と深層は材齢 1 週の時点ではあまり炭酸化は進んでおらず、深層においては全く炭酸化していなかった。しかし、材齢 2~4 週までの間で両層とも炭酸化が大きく進行しており、1 週では 0% であった深層も 17.1% となり中層 (18.5%) と同程度まで炭酸化していた。材齢 1 週までの間、中層および深層にて炭酸化があまり

進んでいなかった理由として、サンプルに侵入した CO₂ は表層付近で多量に存在する水に溶け込み、炭酸化が活発に反応することで消費され、内部まで侵入する CO₂ 量が少なかったことが考えられる。また、材齢 1 週までは表層で急激に炭酸化が進行し、それ以降は中層および下層でも徐々に進行していく様子は、中性化深さ試験で見られた材齢 2 週目以降の材齢の経過に伴う呈色部分の色が薄くなる現象とも相関があると考えられる。図-7 に表層、中層、深層それぞれの CO₂ 固定量とサンプル全量での CO₂ 固定量の結果を示す。わずか 4 週で表層では CO₂ 固定量が 68.2 kg-CO₂/t-RW+C であり、解放面から 20~30mm の深さにおいても、32.3 kg-CO₂/t-RW+C の CO₂ を固定していた。材齢 4 週の時点で厚さ 30mm のキューブサンプル全体の CO₂ 固定量は 47.6 kg-CO₂/t-RW+C であるが、今後、更に中層および深層の炭酸化が進行し、少なくとも 4 週の表層と同程度まで炭酸化度が達した場合、厚さ 30mm の吹付けロックウールの CO₂ 固定量は約 70 kg-CO₂/t-RW+C になると予想される。

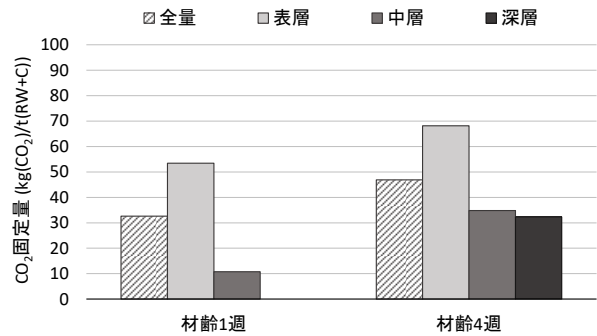


図-7 各深さにおける CO₂ 固定量

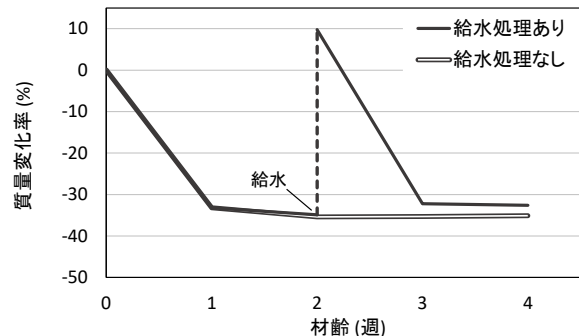


図-8 質量変化率の経時変化

5. 給水処理による CO₂ 固定性能の向上 (検討 3)

図-8 に給水処理を行ったサンプルの質量変化率を示す。給水量はサンプル作製時の配合と同量であり、給水処理後の質量がサンプル作製直後よりも増えているのは、平衡含水状態として保持している水分やセメントの水和生成物として存在する結合水が残っているためと考えられる。給水後はサンプル作製後と同様に 1 週間で平衡含水状態まで質量減少していた。写真-3 に給水処理ありのサンプルと給水処理なしのサンプルの材齢 4 週での中性化深さの結果を示す。給水処理なしのサンプルでは中性化深さは 14mm であったのに対し、給水処理をしたサンプルは 23mm と大きく中性化深さが進行していた。図-9 に各材齢での CO₂ 固定量と炭酸化度を示す。材齢 4 週で CO₂ 固定量は 58.1kg-CO₂/t-RW+C であり、給水なしより 10.5 kg-CO₂/t-RW+C 大きい結果であった。吹付けロックウールは乾燥速度が早く、乾燥が進むにつれ CO₂ 固定速度が低下する傾向にあるが、上記の結果から、給水処理を行うことで固定性能を向上させることが可能であり、より短期間で多くの CO₂ を固定することができることを確認した。給水処理により増加した CO₂ 固定量は、カーボン・オフセットを見込める可能性があると考えられる。



写真-3 中性化深さ測定結果

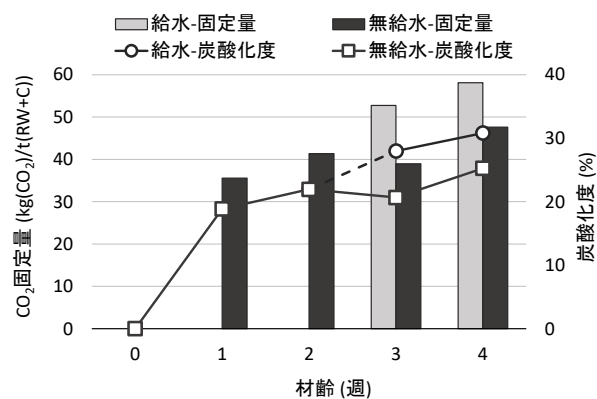


図-9 CO₂ 固定量および炭酸化度

6. 考察

本検討の結果から、吹付けロックウールは短期間で CO₂ の固定量が特に多く、固定速度が大きいことを確認した。これは、材料構成上かさ密度が小さく空隙の多い材料であることから CO₂ が吹付けロックウールの内部まで侵入し易いためと考えられる。この特性は吹付けロ

ックウール特有の CO₂ 固定性能であり、一般のコンクリートとの大きな違いである。コンクリートは解体やリサイクルも含めたライフサイクルの中で長い時間をかけて CO₂ を固定していくホワイトカーボンであるのに対して、吹付けロックウールは供用期間中の短い時間で CO₂ を固定することができる促進型のホワイトカーボンと言える。(図-10) また、吹付けロックウールは鉄骨などの下地に直接吹付けて一定の被覆層として形成される材料であり、

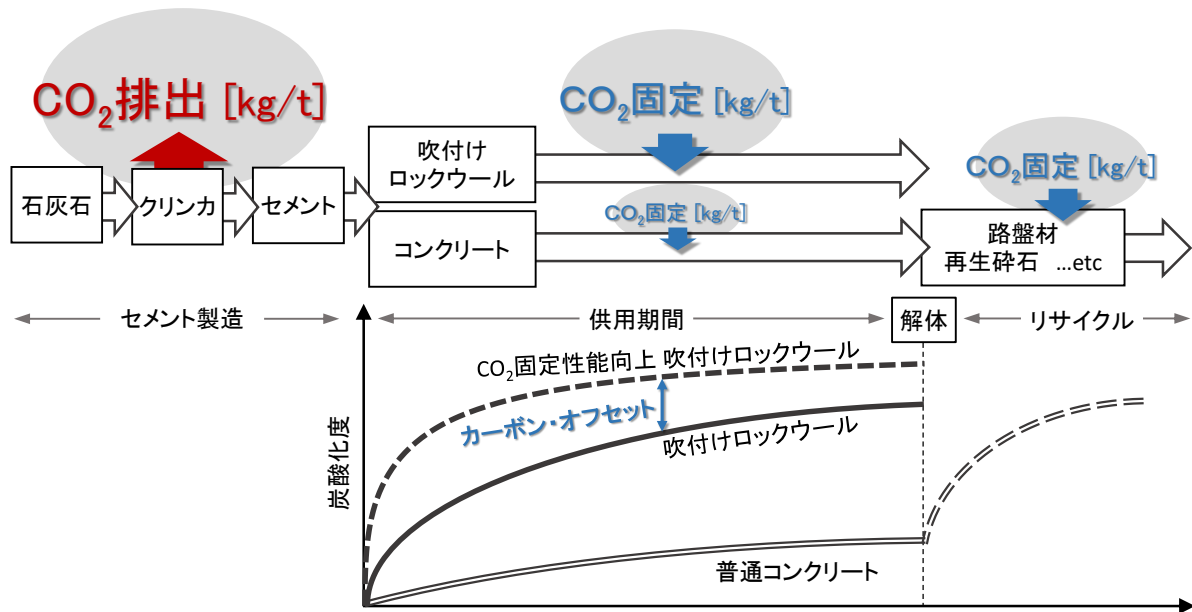


図-10 各種ホワイトカーボンとCO₂固定速度のイメージ

中性化による下地や内部の鋼材の腐食について考慮する必要がないこともホワイトカーボンとしてのメリットとなる。さらに、今回検討した給水処理により短期間でより多くのCO₂の固定が可能であることから、カーボン・オフセットの創出の可能性も期待でき、カーボンニュートラルに貢献し得る材料であると考えられる。

7. まとめ

本検討では、吹付けロックウールのCO₂固定性能の確認と、固定性能の向上方法の検討を目的に実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 吹付けロックウールのCO₂固定性能は、中性化深さにて簡易的に炭酸化の進行具合を、TG-DTAにてCO₂固定量を測定することで評価することが可能である。
- (2) 吹付けロックウールは材料構成上かさ密度が小さく、空隙が多いため、厚さ30mmの場合、材齢4週で47.6 kg-CO₂/t-RW+CのCO₂を固定し、一般的なコンクリート部材として施工されるコンクリートと比較すると短期間での固定量が多い。また、材齢4週の時点で表面から30mmの深層でも炭酸化が進行している。
- (3) 吹付けロックウールのCO₂固定性能には含水状態が影響し、乾燥が進むと固定速度は低下傾向にある。しかし、再度給水することでCO₂固定速度は向上しカーボン・オフセットの創出の可能性が期待できる。
- (4) 吹付けロックウールは短期間で多量のCO₂を固定できる促進型ホワイトカーボンとして、カーボンニュートラルに貢献できる材料となり得る。

参考文献

- 1) WHITE CARBON を本格的に展開 (RR TIMES) :

<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000023.000069731.html> (閲覧日: 2023年3月27日)

- 2) 阿武稔成, 田場祐道, 佐々木幸一, 早川隆之: セメントスラリーを利用したコンクリートへのCO₂固定化技術の開発 その1 CO₂注入・固定化方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp1187-1188, 2022.9
- 3) 久田真, 宮里心一, 坂田昇: 環境配慮型コンクリートの全体像と今後の展望, コンクリート工学, Vol.60, No.10, pp.881-887, 2022.10
- 4) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.85-94, 1990
- 5) 須田裕哉, 富山潤, 斎藤豪, 佐伯竜彦: セメント硬化体の炭酸化収縮と水和物に及ぼす相対湿度の影響, セメント・コンクリート論文集, 73巻, 1号, pp.71-78, 2020
- 6) 西岡由紀子, 池尾陽作, 奈良知幸, 小島正朗: 湿式・乾式炭酸化処理したセメント硬化体微粉のCO₂固定に関する検討, 第76回セメント技術大会講演要旨, pp.178-179, 2022
- 7) 土木学会: 2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】, p121, 2018.10
- 8) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: 炭酸化によるセメント系材料のCO₂吸収固定, 太平洋セメント研究報告書, 第179号, pp.15-30, 2020
- 9) 尚俊成, 関健吾, 取違剛, 渡邊賢三: 消石灰を用いたセメント系材料のCO₂吸収挙動に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1156-1161, 2022