

論文 吹付けロックウールの CO₂ 固定量の実態調査と CO₂ 固定性能評価

杉野 雄亮*1・乙茂内 郁美*2・谷辺 徹*3・新 大軌*4

要旨: 吹付けロックウールの CO₂ 固定量の実態を把握するために供用中の建物からサンプルを採取し、CO₂ 固定量の実態を調査した。また、ラボ試験にて吹付けロックウールの材齢 1 年までの基本的な CO₂ 固定性能を評価した。CO₂ 固定量は、吹付けロックウール (RW+C) 1t あたりに固定された CO₂ 固定量として求めた。その結果、供用期間 4~44 年の吹付けロックウールの CO₂ 固定量は平均 124kg-CO₂/t- (RW+C) であり、供用中に多くの CO₂ を固定していた。ラボ試験では乾燥が進んだ後も炭酸化反応が継続しており、特別な条件やエネルギーを必要とせず、大気中から効率的に CO₂ を吸収固定 (DAC) 可能な建設材料であると考えられる。

キーワード: 吹付けロックウール, CO₂ 固定, 炭酸化, 中性化深さ, カーボンニュートラル

1. はじめに

我が国は、2050 年のカーボンニュートラル実現を目指しており、カーボンリサイクル技術のロードマップ¹⁾が示され、CCS (二酸化炭素の回収・貯留技術) や CCUS (二酸化炭素の回収・有効利用・貯留) に関する技術開発が本格化している。また、CO₂ 排出量削減にあたっては、CO₂ 排出量を統一した方法でカウントすることが必要であり、CO₂ 排出量をはじめとする材料の各種環境負荷を定量的に示す取り組みが各国で検討されている。その一例として、JIS Q 14025:2008 (ISO14025:2006) 「環境ラベル及び宣言-タイプⅢ環境宣言-原則及び手順」に制定されたタイプⅢ環境ラベルは、製品のライフサイクルの環境負荷情報をライフサイクルアセスメント (LCA) により定量的に算出し、環境負荷を定量的に把握するための環境ラベルである。ISO21930:2017 「建物および土木工事における持続可能性」には上記認証において建材の各種環境負荷を定量的に計算するためのルールが示されている。LCA の一環として建物全体の CO₂ 排出量を計算する際には、各種材料の CO₂ 排出量のインベントリデータが必要になると考えられる。

セメントは製造時に原料および燃料由来の CO₂ を排出する。一方、セメントに含まれる Ca は大気中の CO₂ を吸収・固定する性質があり、コンクリート分野においては、練混ぜ時に CO₂ を注入したり、炭酸化養生したりして、早期に CO₂ を固定化する研究^{2),3)}が行われている。

筆者らは、前報⁴⁾にて吹付けロックウールの基本的な CO₂ 固定性能を評価し、促進環境ではなく通常の大気中で短期間に多くの CO₂ を固定することを確認した。本報では、供用中の吹付けロックウールを採取し、CO₂ 固定量の実態を調査した。また、CO₂ 固定性能の基礎データを拡充するため、ラボ試験にて材齢 1 年までの CO₂ 固定

性能を評価した。さらに、給水処理による CO₂ 固定性能向上方法の検討については、前報⁴⁾では材齢 4 週のデータを示しており、本報は材齢 1 年のデータまで評価した。

2. 吹付けロックウール

吹付けロックウールは、高炉スラグや鉱物を原料とする人造鉱物繊維であるロックウール粒状綿、セメントおよび水で構成される、耐火被覆材の代表的な材料である。耐火被覆材以外に、不燃断熱材、吸音材等にも用いられている。吹付け工法は 2 種類あり、あらかじめ工場で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セメントスラリーと同時に吹付ける半乾式工法がある。吹付けロックウールで被覆した部材の耐火性能は、耐火時間や構造部位により厚さおよびかさ密度が定められている。かさ密度は絶乾状態で 0.28g/cm³ 以上の範囲で施工されている。

3. CO₂ 固定性能の評価方法

3.1 中性化深さ

炭酸化の進行状況を簡易に確認するため、中性化深さを測定した。中性化深さは、フェノールフタレイン溶液の呈色域により確認した。測定は所定の材齢まで養生したサンプルを深さ方向に 2 分割し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。フェノールフタレイン溶液の反応が落ち着いた段階で開放面からの中性化深さを測定した。

3.2 熱分析による CO₂ 固定量の定量方法

熱重量示差熱分析 (以下、TG-DTA) に用いた試料は所定の材齢にて D 乾燥で 24 時間調湿し、ディスクミルまたは乳鉢にて粉碎する前処理を行った。TG-DTA は前処

*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 博士 (理工学) (正会員)

*2 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 (正会員)

*3 ロックウール工業会 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)

理した試料を N₂ ガスフロー環境下にて 20℃/分で 1000℃まで昇温して測定した。その分析結果と式(1)により CO₂ 固定率を算出した。さらに、CO₂ 固定量を CO₂ 固定率から吹付けロックウール 1t あたりに固定された CO₂ 固定量として式(2)により求めた。なお、CO₂ 固定量の単位は kg-CO₂/t- (RW+C) であるが、文章中では以降 kg/t と記載する。

$$X_{CO_2} = \frac{W_{600} - W_{850}}{W_{1000}} - r_c \times \frac{W'_{600} - W'_{850}}{W'_{1000}} \quad (1)$$

$$q_{CO_2} = X_{CO_2} \times (RW + C) \quad (2)$$

X_{CO₂} : CO₂ 固定率

W_T : TG-DTA により得られた温度 T℃での質量 mg

W'_T : 未水和セメント単体で測定した TG-DTA により得られた温度 T℃での質量 mg

r_c : 分析試料中のセメント含有率 (%)

q_{CO₂} : CO₂ 固定量 kg-CO₂/t- (RW+C)

RW+C : 吹付けロックウール t

CaCO₃ の脱炭酸は 600～850℃の質量減少を対象とした⁵⁾。また、自由水や結晶水の脱水等、他の質量減少の影響を除外するため、1000℃における質量を基準にした。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率をサンプルの TG-DTA の結果から差し引いた。また、ロックウールについても、別途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。

3.3 炭酸化度の推定方法

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 へ変化したかを示すもので、コンクリートの CO₂ 固定量の算定の指標として用いられる⁶⁾。本報ではセメント質量の 60%を CaO と仮定し、式(3)により炭酸化度を算出した。セメント質量は、水の影響を除外するため、1000℃における分析試料の質量から求めた。

$$Y = \frac{X_{CO_2}}{r_c \cdot 0.6 \cdot 44 / 56} \times 100 \quad (3)$$

Y : 炭酸化度 (%)

X_{CO₂} : CO₂ 固定率

r_c : 分析試料中のセメント含有率 (%)

CO₂ の分子量 44

CaO の分子量 56

4. CO₂ 固定量の実態調査

図-1 に実態調査の概要を示す。実態調査は、耐火被覆材として供用中の吹付けロックウールの CO₂ 固定量を

確認することを目的とした。耐火被覆材として用いられる吹付けロックウールは、表-1 を標準配合として施工管理されている。サンプルは供用中の吹付けロックウールからコア (φ35 or 80mm) を深さ方向に全量採取した。採取箇所は、建物屋内の耐火被覆用途の吹付ロックウールを被覆した H 型鋼梁部材とした。実態調査では CO₂ 固定量を評価した。コア採取したサンプルが形状を保っている場合は、中性化深さを測定した。中性化深さを測定する場合はコアを深さ方向にカットして 2 分割し、一方を中性化深さ測定用とし、もう一方をすべて粉砕して TG-DTA 測定用の試料とした。中性化深さを測定しない場合は、コアサンプルを全量粉砕して TG-DTA 測定用の試料とした。なお、コアを 2 分割する条件と全量用いる条件では試料の量が異なるが、TG-DTA 測定用の試料量としては十分な量であり、これらのサンプリング条件が TG-DTA の測定結果に及ぼす影響は小さいと考えた。

5. CO₂ 固定性能のラボ評価

5.1 サンプル全量評価 (シリーズ 1-1)

図-2 にシリーズ 1-1 の試験概要を示し、表-1 にラボ試験サンプルの配合を示す。ラボ試験は、配合および密度を精度良く管理するため、計量したロックウールとセメントを手混合し、さらに霧吹きで水を所定量噴霧しながら混合した。混合した材料は、30×30×30mm の型枠に

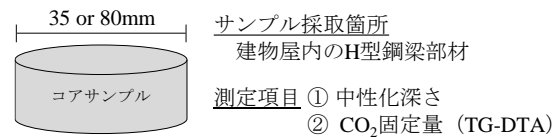


図-1 実態調査概要

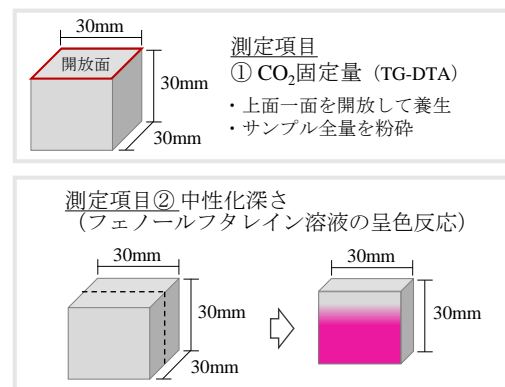


図-2 ラボ試験評価概要 (シリーズ 1-1)

表-1 ラボ試験サンプルの配合

配合比率			絶乾かさ密度 (g/cm ³)
ロックウール	セメント	水	
60	40	80	0.28

成型し、n数は1とした。ラボ試験のサンプル形状は、1時間耐火を想定した厚さと測定に必要な試料量を考慮して設定した。成型したサンプルは、上面1面を開放して20°C60%RHの試験室に養生した。試験室のCO₂濃度は日平均300~800ppmであり、一般的な室内のCO₂濃度(450~700ppm)と同程度であった。試験は材齢1年まで実施し、中性化深さ、CO₂固定量、炭酸化度を評価した。TG-DTA測定はサンプル全量を粉砕して試料とした。

5.2 深さごとの分割評価 (シリーズ1-2)

図-3にシリーズ1-2の試験概要を示す。シリーズ1-2は、一定深さごとのCO₂固定性能を評価することを目的とした。サンプルの作製方法、養生方法および試験材齢は、シリーズ1-1と同様であり、配合は表-1と同じである。サンプルは深さ方向に10mmごとに3分割し、表層、中層および深層のCO₂固定量と炭酸化度を評価した。

5.3 CO₂固定性能の向上検討 (シリーズ2)

図-4にシリーズ2の試験概要を示す。シリーズ2は、給水処理によるCO₂固定性能の向上効果を調べることを目的とした。前報⁴⁾では、材齢4週まで評価したが、本報は材齢1年までの評価を行う。サンプルの作製方法、養生方法および試験材齢はシリーズ1-1と同様であり、配合は表-1と同じである。また、給水処理は材齢2週で行い、試験体作製時と同じ量の水を試験体上面から滴下した。試験は、中性化深さおよびCO₂固定量を評価し、

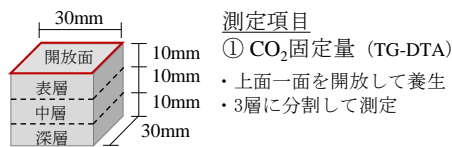


図-3 ラボ試験評価概要 (シリーズ1-2)

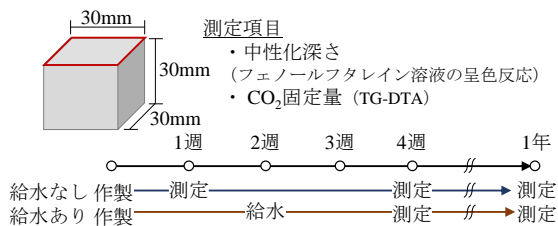


図-4 ラボ試験評価概要 (シリーズ2)

表-2 実態調査のサンプル情報

No.	竣工年	所在地 (東京都)	供用期間	採取月
1	2018	墨田区	4年	2022.11
2	1990	中央区	33年	2023.06
3	1996	中央区	27年	2023.06
4	1989	中央区	34年	2023.07
5	1979	中央区	44年	2023.07
6	2006	江東区	17年	2023.07

給水処理を行わない条件と比較した。

6. CO₂固定量の実態調査結果

表-2に供用中の吹付けロックウールから採取したサンプル情報を示す。コアサンプルは、東京都内の建物屋内の梁部材から2個ずつ採取した。これらのサンプルはいずれも同様な気象環境のエリアであった。気象庁のデータベースより、図-5に東京都(観測所名:東京(北の丸公園))の過去30年(1991~2020年)の各月の平均気温および湿度を参考情報として示す。建物の供用期間は短いもので4年、長いもので44年である。写真-1にNo.1-1のサンプルの中性化深さを示す。中性化深さの測定はコア採取後に形状を保持していたNo.1-1のみ実施した。中性化は、深さ方向に底面付近まで進んでおり、ほとんど呈色域がみられなかった。表-3にCO₂固定量および炭酸化度を示す。炭酸化度は、コアサンプルのロックウールとセメント質量比を標準配合である60:40と

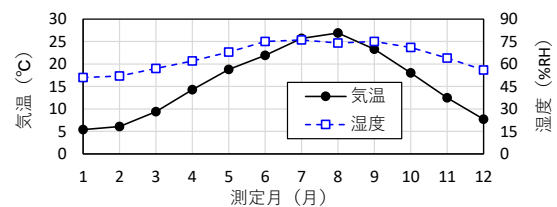


図-5 東京都の年間気温および湿度



写真-1 コアサンプルの中性化深さ

表-3 CO₂固定量および炭酸化度

No.	CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t- (RW+C))	炭酸化度 (%)
1-1	132	70
1-2	136	72
2-1	91	48
2-2	102	54
3-1	129	68
3-2	125	66
4-1	90	48
4-2	107	57
5-1	117	62
5-2	137	72
6-1	157	83
6-2	170	90
平均	124	66

仮定して求めた。同じ建物から採取したコアのCO₂固定量および推定炭酸化度は近い値を示した。また、各サンプルのCO₂固定量は、90~170kg/tであり、平均値は124kg/tであった。推定炭酸化度は、48~90%であり、平均して66%であった。図-6に供用期間とCO₂固定量の関係を示す。図より、供用期間4年のサンプルで既に平均値と同等以上のCO₂固定量となっており、数年程度の短期間の供用でもそのCO₂固定性能を十分に発揮する可能性がある。一方、各サンプルのCO₂固定量にはバラツキがあり、供用環境の影響など、さらに検討の余地がある。実態調査の結果、CO₂固定量の平均値は124kg/tであり、施工された吹付けロックウールは、特別な条件やエネルギーを必要とせず、そのライフサイクルを通して、全体の平均として少なくとも100kg/t程度の固定量を見込める可能性があり、CO₂排出量からオフセット(マイナスカウント)できる可能性があると考えられた。今後、実態調査のデータをさらに蓄積していくことでデータの信頼性をさらに高めていきたい。

7. CO₂固定性能のラボ評価結果

7.1 サンプル全量評価 (シリーズ1-1)

写真-2にサンプルの中性化深さを示す。中性化深さは材齢1週で11mmであった。材齢1週以降、中性化深さはあまり変わらないが、呈色した部分の色は材齢の経過により薄くなる傾向を示した。なお、材齢1年は材齢16週と比べると呈色が濃くなったが、材齢1年の測定はフェノールフタレイン溶液のロットが異なるものを使用しており、呈色の程度に差が生じた可能性がある。図-7に中性化深さと質量変化率を示す。サンプルは材齢1週で乾燥が進み、材齢2週以降の質量変化率はほとんど変わらず、平衡含水状態にあると考えられる。中性化深さも材齢1週まで急速に進み、材齢2週以降は緩やかに進行した。図-8にCO₂固定量と炭酸化度を示す。中性化深さと同様、CO₂固定量は材齢1週で急速に増加し、材齢1週以降はCO₂固定量が徐々に増加した。さらに材齢1年(52週)までCO₂固定量の増加傾向は続き、材齢1年のCO₂固定量は97kg/t、炭酸化度は52%になった。

7.2 深さごとの分割評価 (シリーズ1-2)

図-9に中性化深さとCO₂固定量の関係を示す。図中の深さ5,15,25mmの位置に表層、中層、深層のデータをプロットした。表層は炭酸化が進み、フェノールフタレインによる呈色は材齢1週の時点でほとんど見られなくなったが、材齢1週以降もCO₂固定量は増加した。フェノールフタレインの呈色域はpH値が8.5~10以上の範囲のため、炭酸化反応により吹付けロックウールが中性化して呈色が確認できない場合も、炭酸化反応が進む余地があり、CO₂を固定する能力を残していることが確認

できた。図-10に各層のCO₂固定量と炭酸化度を示す。材齢1年の表層のCO₂固定量は110kg/t、炭酸化度は58%に増加した。また、材齢1週の時点では中層および深層はあまり炭酸化が進んでいなかったが、材齢1週以降は、中層と深層のCO₂固定量も増加し、炭酸化が内部まで進んだ結果であると考えられる。

7.3 CO₂固定性能の向上検討 (シリーズ2)

写真-3に給水処理を実施したときの中性化深さ測定結果を示す。給水処理を行った場合、材齢4週(給水処理後2週)の時点で給水なしに比べて中性化深さが大きくなることを確認した。また、その傾向は材齢1年においても同様であった。なお、材齢1年は材齢16週と比べ

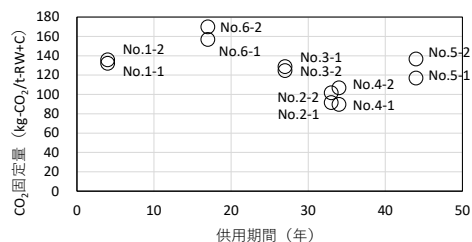


図-6 供用期間とCO₂固定量

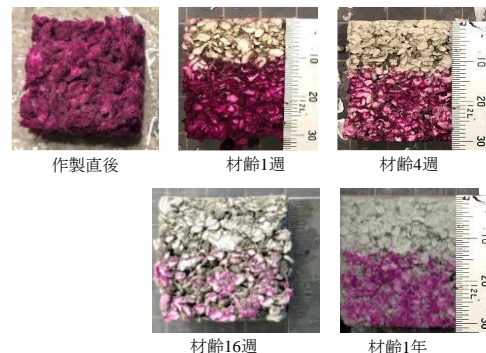


写真-2 中性化深さ測定結果 (シリーズ1-1)

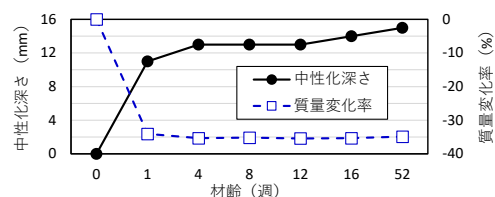


図-7 中性化深さと質量変化率 (シリーズ1-1)

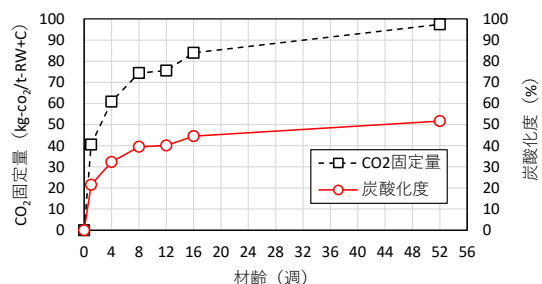


図-8 CO₂固定量と炭酸化度 (シリーズ1-1)

ると呈色がやや濃くなった。材齢1年の測定はフェノールフタレイン溶液のロットが異なるものを使用しており、呈色の程度に差が生じた可能性がある。図-11に各材齢の中性化深さを示す。材齢4週で給水处理なしの中性化深さは13mmであるのに対し、給水处理ありのサンプルは24mmであった。また、材齢1年の時点で給水处理ありのサンプルの中性化深さは15mmであるのに対し、給水处理ありのサンプルは25mmであり、給水ありとなしとの中性化深さの差は、材齢4週と1年であまり変わらなかった。図-12に給水处理ありとなしのサンプルのCO₂固定量と炭酸化度を示す。給水处理を行うと材齢4週時点でCO₂固定性能の向上効果がみられた。また、材齢1年でもCO₂固定性能の向上効果がみられ、給水处理ありのサンプルのCO₂固定量は108kg/tであり、給水处理なしと比べて10kg/t大きいことを確認した。また、そのときの炭酸化度は57%であった。図-7より、吹付けロックウールは材齢1週で乾燥が進んでおり、乾燥後はCO₂の固定速度が緩やかになるが、給水处理により炭酸化反応を促進させ、より早期にCO₂を固定できることを確認した。また、給水处理を行った場合も給水後のサンプルは1週間程度で乾燥することを前報にて確認している

が、乾燥が進んだ状態でも炭酸化は徐々に進み、材齢1年までCO₂固定量が増加し続けた。

8. CO₂固定性能に関する考察

吹付けロックウールは空隙が多く、CO₂が内部まで進入しやすい構造のため、炭酸化が進みやすいと考えられる。本報は、供用期間4~44年の吹付けロックウールからサンプルを採取し、供用中のCO₂固定性能の実態を調査した。その結果、CO₂固定量は平均で124kg/t、炭酸化度は66%と優れたCO₂固定性能を有することが確認できた。また、供用期間4年のサンプルで既に平均値と同等以上のCO₂を固定していることから、数年程度の短期間の供用でもそのCO₂固定性能を十分に発揮している可能性がある。また、ラボ試験評価においては材齢1年のCO₂固定量は97kg/t、炭酸化度は52%であり、短期間で優れたCO₂固定性能を有することを確認できた。一方、ラボ試験結果の材齢1年の炭酸化度は、給水なしで52%、給水ありで57%であり、実態調査の炭酸化度の平均値に届いていなかった。その理由として、実態調査よりも材齢が短いことや供用中の温湿度環境が異なることが影響した可能性がある。鉄筋コンクリート建築物の耐久設計

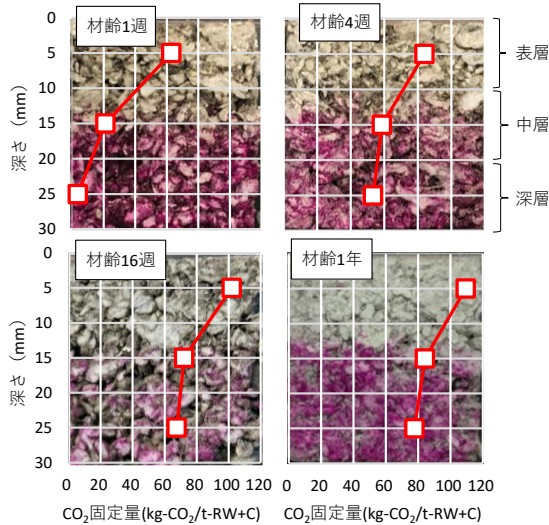


図-9 中性化深さとCO₂固定量の関係(シリーズ1-2)

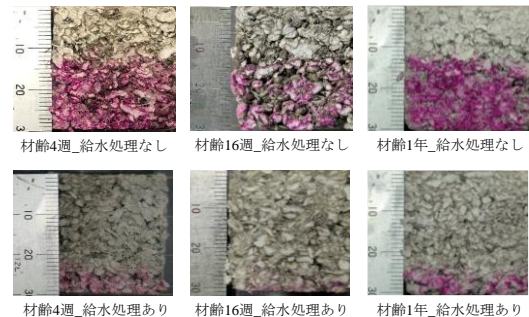


写真-3 中性化深さ測定結果(シリーズ2)

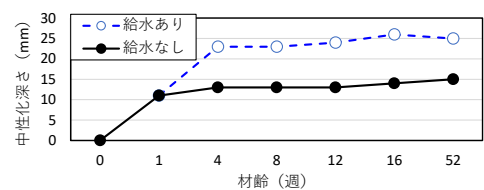


図-11 各材齢の中性化深さ(シリーズ2)

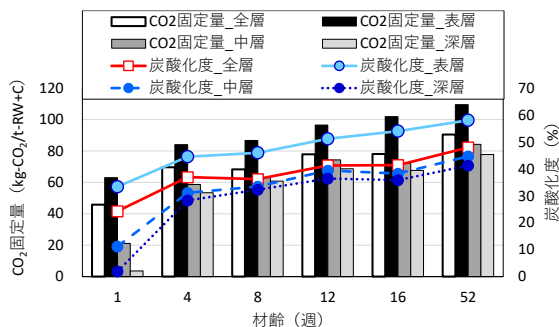


図-10 各層のCO₂固定量と炭酸化度(シリーズ1-2)

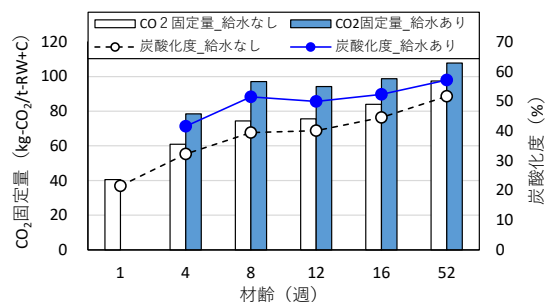


図-12 CO₂固定量と炭酸化度(シリーズ2)

施工指針・同解説⁷⁾の中性化速度式は、気温による係数と湿度および作用する水分の影響による係数が考慮されており、温湿度条件はコンクリート中のCO₂の拡散係数や炭酸化反応速度に影響を及ぼすとされる。しかしながら、コンクリートと吹付けロックウール硬化体の空隙構造は大きく異なっており、CO₂固定性能と温湿度環境の関係については、さらに検討の余地があると考えている。

吹付けロックウールは鉄骨やコンクリート下地等に被覆する形態であり、コンクリートの様に中性化による内部鉄筋の腐食等の炭酸化の影響を考慮する必要がないと考えられる。また、本報で確認したとおり、供用中の吹付けロックウールはCO₂を多く固定しており、その状態で耐火被覆用途として問題無く適用されている長い実績がある。また、低密度で高い強度を要求するものではないため、炭酸化が要求性能に影響し使用上の問題が発生する可能性は小さいと考えられる。なお、CO₂を固定した吹付けロックウールの耐火性能については今後確認していく予定である。これらの内容を総合すると、吹付けロックウールは特別な条件やエネルギーを必要とせず、大気中から効率的にCO₂を吸収固定(DAC)可能な建設材料であると考えられる。近年、建築物全体のLCA計算に関する各種検討⁸⁾がなされており、これらの仕組みにCO₂固定性能が組み込まれることにも期待したい。

9. まとめ

本論文では、供用中の吹付けロックウールを採取し、CO₂固定性能の実態を調査した。さらに、ラボ試験評価を行い、CO₂固定性能について材齢1年まで評価した。また、給水処理によるCO₂固定性能の向上効果を材齢1年の時点で確認した。これらの検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 供用期間4~44年の供用中サンプルのCO₂固定量は、90~170 kg/tであり、平均して124kg/t、最小で90kg/tであった。また、推定炭酸化度は平均66%であった。これらの結果より、吹付けロックウールは短期間の供用でもそのCO₂固定性能を十分に発揮し、そのライフサイクルを通じて100kg/t程度のCO₂固定量分をCO₂排出量からオフセット(マイナスカウント)できる可能性があると考えられる。
- (2) ラボ試験評価ではサンプルを20°C60%RHに養生し、材齢1年のCO₂固定量は97 kg/tであり、炭酸化度は52%であった。CO₂固定量の増加傾向は材齢1年まで続き、炭酸化反応が継続したと考えられる。
- (3) 深さごとにCO₂固定量を評価すると、材齢1週は表層の固定量が大きく、材齢4週以降は、中層および深

層の固定量も増加し、材齢の経過により内部まで炭酸化が進んだと考えられる。また、中性化後も、炭酸化反応が進む余地があることが確認できた。

- (4) 給水処理を行うとCO₂固定量が増加した。材齢1年時点で給水処理ありのCO₂固定量は108kg/tであり、給水処理のない場合に比べてCO₂固定量が10kg/t増加する効果がみられた。
- (5) 吹付けロックウールは実供用環境において100kg/t程度のCO₂を固定し、ラボ試験でも材齢1年で同程度のCO₂を固定していた。吹付けロックウールは特別な条件やエネルギーを必要とせず、大気中から効率的にCO₂を吸収固定(DAC)可能な建設材料であると考えられる。

謝辞

吹付けロックウールのCO₂固定量の実態調査において株式会社ニチアスセムクリート様、ナイガイ株式会社様に多大なご協力を頂きましたことを御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省：カーボンリサイクルロードマップ、2023.6
- 2) 早川隆之、阿武稔也、小林芳宙、佐々木幸一、田場祐道、長谷部翔、岡田明也：コンクリートへのCO₂固定化技術の開発、太平洋セメント研究報告、第183号、pp.30-42、2022
- 3) 小島正朗、池尾陽作、西岡由紀子、川尻聡：再生骨材にCO₂を固定させたCCU材料の製造とCO₂固定量の評価事例、コンクリート工学、Vol.61、No.9、pp.859-864、2023.9
- 4) 乙茂内郁美、杉野雄亮、谷辺徹、新大軌：吹付けロックウールのCO₂固定性能に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.45、No.1、pp.1042-1047、2023
- 5) 鈴木好幸、山本武志、小山拓、野口貴文：湿式分析とTG-DTAによるCO₂含有率評価に関する検討、コンクリート工学年次論文集、pp.1258-1263、Vol.45、No.1、2023
- 6) 兵頭彦次、星野清一、平尾宙：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、第179号、pp.15-30、2020
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説、2016.7
- 8) 加藤晃敏、中村恵、池沢真琴：補正係数を利用した積み上げ式CO₂算定手法の構築、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、pp.1455-1456、2023.9