

報告 再生粗骨材の CO₂固定量の分析・調査に関する一考察

李 曉赫^{*1}・高橋 祐一^{*2}

要旨：本検討では、再生粗骨材を対象として、TG-DTA による再生粗骨材の CO₂ 含有率の分析の省力化を目的として、再生粗骨材に含まれるモルタル塊を対象とした方法の有用性について検討を行った。さらに、複数種類の再生粗骨材を対象に、それぞれから抽出したモルタル塊を用いて、原コンクリートの種類、保管期間中の乾湿条件、CO₂ 濃度および保管期間が CO₂ 固定量に及ぼす影響について検討した。その結果、保管期間中における再生粗骨材の CO₂ 固定量は、原コンクリートの種類や各保管条件で異なり、とくに、保管前の CO₂ 含有量が小さいと、大きくなる傾向がみられた。

キーワード：再生骨材, CO₂ 固定量, モルタル塊, 保管条件, 示差熱重量分析

1. はじめに

2050 年までのカーボンニュートラルの達成に向けて、各業界における脱炭素化の取組みが加速している。建設業界では、コンクリートの低炭素化とともに、CO₂ のストック先として CCU 材料を活用することが検討されている。CCU 材料としては、CO₂ を固定するモルタル（セメントペースト）を含む再生砕石や再生骨材が挙げられており、その活用が期待されている（例えば 1),2)）。

再生砕石を対象とした既往の研究^{3),4)}によると、その CO₂ 固定能力は 8~26kg-CO₂/t であると報告されている。しかし、このように既往の研究では路盤材に使用される再生砕石を対象としたものが多く、コンクリート用として製造されている再生骨材を対象とした検討例は少ない。

再生骨材の CO₂ 含有率は示差熱重量分析（TG-DTA）の測定結果を用いて求めることが多いが、分析に用いる試料の調製の一環として、原骨材を含む再生骨材を全量粉碎し、アセトン浸漬と真空乾燥といった作業が行われている（例えば 5),6)）。しかし、このような手順で行う試料調製は、作業量が多いため、分析結果を得られるまでに時間がかかってしまう。

一方、解体ガラを起源とした再生骨材は破碎後、空気との接触面積が大きくなり、炭酸化していない破断面も現れるので、製造直後から出荷までの保管期間中に CO₂ 固定量が増えることが知られている。したがって、乾湿繰り返しの有無や CO₂ 濃度などの保管環境を工夫することや保管期間を適度に延長することで、再生骨材の CO₂ 固定量をさらに増やすことも考えられるが、これらの保管条件が再生骨材の CO₂ 固定量に及ぼす影響についての検討例は少ない。

そこで、本検討では、再生粗骨材を対象として、TG-DTA による再生粗骨材の CO₂ 含有率の分析の省力化を

目的として、再生粗骨材に含まれるモルタル塊（骨材に付着しているモルタルではなく、単独で塊で存在しているモルタル）を対象とした方法の有用性について検討を行った。さらに、複数種類の再生粗骨材を対象に、それぞれから抽出したモルタル塊を用いて、保管条件が CO₂ 固定量に及ぼす影響について検討した。本報ではこれらの結果について報告する。なお、本報では、保管前後の再生粗骨材やモルタル塊の試料から測定された CO₂ の質量を CO₂ 含有量、試料の質量に対する CO₂ 含有量の割合を CO₂ 含有率、保管期間中に試料が固定した CO₂ の質量を CO₂ 固定量、試料の質量に対して CO₂ 固定量の割合を CO₂ 固定率とする。

2. 試料調製に関する検討

2.1 実験概要

(1) 使用材料

本実験に使用した再生粗骨材の概要を表-1 に示す。再生粗骨材は RC40 として製造された再生砕石を 5mm~20mm に分級したもので、原コンクリートは、プレキャスト製品の解体ガラである。なお、原コンクリートには石灰石を使用していないことを確認している。再生粗骨材の絶乾密度および吸水率試験は JIS A 1110、微粒分量

表-1 使用した再生粗骨材の概要

記号	原コンクリートの種類	品質区分	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粗粒率 (FM)	モルタル混入率 ^{*1} (%)
O	O	L	2.26	5.39	0.2	6.60	54.2

^{*1} 5mm ふるいに残る試料の質量が安定するまで、濃度 5% の希塩酸に再生粗骨材を浸漬して、浸漬前と 5mm ふるいに残る試料の質量の差より求めた。

^{*1} 五洋建設（株） 技術研究所建築技術開発部主任 博士（工学）（正会員）

^{*2} 五洋建設（株） 技術研究所建築技術開発部グループ長 博士（工学）（正会員）

（宇都宮大学 地域デザイン科学部建築都市デザイン学科 客員教授）



写真-1 再生粗骨材の保管状況



写真-2 再生粗骨材と抽出したモルタル塊

試験は JIS A 1103, 粗粒率は JIS A 1102 にしたがって実施した。

(2) 再生粗骨材の保管環境および期間

再生粗骨材は、あらかじめ所要の質量に縮分し、写真-1 に示すように容器に入れ、CO₂ 濃度 5%, 温度 20℃, 相対湿度 60%の促進中性化槽内にて保管した。なお、保管期間は 1 週間とした。

(3) 試料の調製

本実験における試料の各調製方法を表-2 に示す。

パターン 1

再生粗骨材を約 500g に縮分し、縮分した試料の全量をジョークラッシャ、ブラウン粉砕機および磁乳鉢を用いて 150 μm 未満に粉砕し、その後、12 時間以上のアセトン浸漬および 24 時間以上の真空乾燥を行った。

パターン 2

調製手順の簡素化を目的として、パターン 1 にて実施したアセトン浸漬および真空乾燥の手順を省略した。

パターン 3

粉砕作業のさらなる省力化を目的として、パターン 2 に対して粉砕の対象を再生粗骨材から抽出したモルタル塊（写真-2）に、粉砕量を 100g に変更した。

なお、粉砕作業においては、試料の温度が上昇しないように、かつ試料が空气中に暴露する時間ができる限り短くなるように注意した。

(4) CO₂ 含有率の測定

本実験では、試料に含まれる CO₂ と試料の質量比を CO₂ 含有率とし、示差熱重量分析装置を用いて測定した。測定条件は、窒素雰囲気下（流量 300ml/分）において、昇温速度 10℃/分で室温から 1000℃まで昇温とした。試料の CO₂ 含有率は、各試料の 600℃～800℃の間の質量減少量を試料中の炭酸カルシウムの脱炭酸量とみなして求めた。測定対象は各調製方法により調製した保管前後の試料とした。なお、測定回数は同一試料に対して 1 回とした。

表-2 試料の各調製方法

パターン	調製方法
1	採取した再生粗骨材を 500g に縮分 →全量を 150 μm 未満に粉砕 →アセトン浸漬(12 時間以上) →真空乾燥(24 時間以上)
2	採取した再生粗骨材を 500g に縮分 →全量を 150 μm 未満に粉砕
3	採取した再生粗骨材を 1kg に縮分 →100g のモルタル塊を抽出 →150 μm 未満に粉砕

2.2 CO₂ 含有量および固定量の算出方法

(1) CO₂ 含有量

本実験では、保管前および保管後の 1 トンあたりの再生粗骨材含まれる CO₂ の質量を CO₂ 含有量とし、試料をパターン 1 および 2 の方法で調製した場合は、式(1)または式(2)により、パターン 3 では式(3)および式(4)により求めた。

$$MCO_{2A} = 1000 \times \frac{CO_{2A}}{100} \quad (1)$$

$$MCO_{2A'} = 1000 \times \frac{CO_{2A'}}{100} \quad (2)$$

$$MCO_{2A} = 1000 \times \frac{M_m}{100} \times \frac{CO_{2M}}{100} \quad (3)$$

$$MCO_{2A'} = 1000 \times \frac{M_m}{100} \times \frac{CO_{2M'}}{100} \quad (4)$$

ここに、MCO_{2A}：保管前の再生粗骨材 1 トンあたりの CO₂ 含有量(kg-CO₂/t)

CO_{2A}：保管前の再生粗骨材の CO₂ 含有率(%)

MCO_{2A'}：保管後の再生粗骨材 1 トンあたりの CO₂ 含有量(kg-CO₂/t)

CO_{2A'}：保管後の再生粗骨材の CO₂

含有率(%)

M_m : モルタル混入率(%)

CO_{2M} : 保管前のモルタル塊の CO_2
含有率(%)

$CO_{2M'}$: 保管後のモルタル塊の CO_2
含有率(%)

(2) CO_2 固定量

本実験では 1 トンあたりの再生粗骨材が保管期間中に固定した CO_2 の質量を CO_2 固定量とし、保管前後の試料をパターン 1 および 2 の方法で調製した場合は、式(5)により、パターン 3 では式(6)および式(7)により求めた。

$$MCO_{2ASP} = 1000 \times \frac{CO_{2A'} - CO_{2A}}{100} \quad (5)$$

$$CO_{2MSP} = CO_{2M'} - CO_{2M} \quad (6)$$

$$MCO_{2ASP} = 1000 \times \frac{M_m}{100} \times \frac{CO_{2MSP}}{100} \quad (7)$$

ここに、 MCO_{2ASP} : 保管期間中における再生粗骨材再生粗骨材 1 トンあたりの CO_2 固定量(kg- CO_2 /t)

CO_{2MSP} : 保管期間中におけるモルタル塊の CO_2 固定率(%)

2.3 実験結果および考察

各方法で調製した試料を用いて求めた再生粗骨材の CO_2 含有量を図-1 に示す。再生粗骨材の CO_2 含有量は保管前後ともに、パターン 1 と 2 ではほぼ同程度であった。本実験では、1 種類の再生粗骨材を対象としているため、一概に言うことはできないが、アセトン浸漬および真空乾燥が再生粗骨材の CO_2 含有率の測定結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、モルタル塊を対象としたパターン 3 では 1 と 2 よりも小さい結果となった。この理由としては、対象をモルタル塊のみとしている

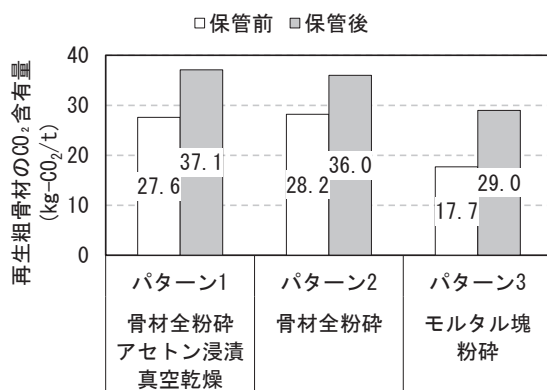


図-1 各方法で調製した試料により求めた再生粗骨材の CO_2 含有量

るため、原粗骨材に存在する $CaCO_3$ に由来した CO_2 が含まれていないことが影響したと考えられる。

各パターンで調製した試料を用いて求めた再生粗骨材の保管期間中における CO_2 固定量を図-2 に示す。再生粗骨材の CO_2 固定量は、パターン 1 で 9.5kg- CO_2 /t、パターン 2 で 7.8kg- CO_2 /t、パターン 3 で 11.3kg- CO_2 /t であった。一般に用いられている方法で分析したパターン 1 と比較すると、試料調整を省略したパターン 2 および対象をモルタル塊としたパターン 3 では同程度の差であった。このことから、パターン 3 は再生粗骨材を全量粉碎し、試料調整を省略したパターン 2 と同様に多少の誤差はあるものの、保管期間中の CO_2 固定量を把握することはできると考えられる。

以上より、試験数が少なく課題はあるものの、保管期間中の CO_2 固定量の把握を目的とした場合、パターン 3 には有用性があるものと判断し、以降は再生粗骨材全量ではなく、モルタル塊を対象とし、アセトン浸漬および真空乾燥を省略した方法で検討を進めることとした。

3. 各種再生粗骨材の CO_2 固定量に関する調査

3.1 実験概要

(1) 使用材料

本実験に使用した再生粗骨材の概要を表-3 に示す。再生粗骨材の粒度は 5mm~20mm である。原コンクリー

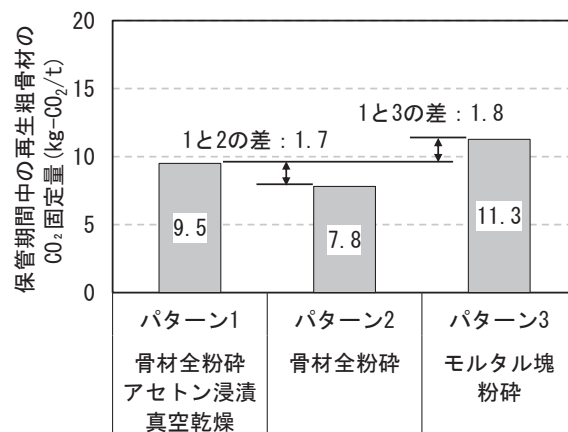


図-2 各方法で調製した試料により求めた保管期間中の再生粗骨材の CO_2 固定量

表-3 使用した再生粗骨材の概要

記号	原コンクリートの種類	品質区分	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	粗粒率 (FM)	モルタル混入率*1 (%)
A-M	A	M	2.47	3.22	0.3	6.65	24.7
B-M	B	M	2.51	2.77	0.1	6.43	23.9
C-L	C	L	2.26	6.72	0.3	6.69	40.8
D-L	D	L	2.31	5.51	0.7	6.75	41.4

*1 塩酸浸漬法により求めた。

表-4 再生粗骨材の種類と保管条件の組合せ

再生粗骨材の種類	保管環境 (記号)	保管期間		
		0 日 (保管前)	3 日	28 日
A-M	気中乾湿* ¹ (AW)	○	—	○
B-M	気中乾湿* ¹ (AW)	○	—	○
C-L	気中乾燥* ² (AD)	○	—	○
C-L	気中乾湿* ¹ (AW)		—	○
D-L	促進炭酸化乾燥* ³ (CD)	○	○	○

*1 温度 20℃, 相対湿度 60%の環境下, 週 2 回試料質量 15%程度の蒸留水を給水

*2 温度 20℃, 相対湿度 60%の環境下

*3 CO₂ 濃度 5%, 温度 20℃, 相対湿度 60%の促進中性化槽にて保管

トは 4 種類であり, いずれの構造物も供用期間は不明である。また, 原コンクリートに石灰石が含まれていないことを目視検査により確認した。再生粗骨材の品質区分は 2 種類が M, 2 種類が L であった。なお, 再生粗骨材の物性値は「2.1 (1)」に示した方法で測定した。

(2) 保管条件

再生粗骨材の種類と保管条件の組合せを表-4 に示す。対象とした試料は, 再生粗骨材から抽出したモルタル塊とし, 「写真-1」に示したように容器に入れ, 各保管環境で所定の期間を保管した。保管環境は, 乾湿繰り返しの有無が再生粗骨材の CO₂ 固定量に及ぼす影響を確認するために, 試料に給水しない「気中乾燥」と乾湿が繰り返されるように給水する「気中乾湿」の 2 種類とした。なお, 気中乾湿における給水頻度, 方法および量は既往の研究⁵⁾を参考に設定し, 給水後, 蒸留水をモルタル塊の全体に均等に行き渡るようにかき混ぜた。また, 周囲の CO₂ 濃度が CO₂ 固定量に及ぼす影響を確認するために, CO₂ 濃度 5%で促進炭酸化させる条件を設定した。

各試料の保管期間は, 当該再生骨材製造工場の実情に合わせて最大 28 日とした。

(3) 試料の調製および CO₂ 含有率の測定

試料の調製は「2.1 (3)」に示したパターン 3 の (モルタル塊による) 方法とした。なお, 粉碎作業は保管後から CO₂ 含有率の測定前の間に行った。CO₂ 含有率の測定に用いた装置, 測定方法および条件は「2.1 (4)」と同様とした。測定は表-4 に示す各試料に対して 1 回実施した。

3.2 実験結果および考察

(1) 原コンクリートの違いがモルタル塊の CO₂ 固定率に及ぼす影響

原コンクリートが異なるモルタル塊の気中乾湿条件

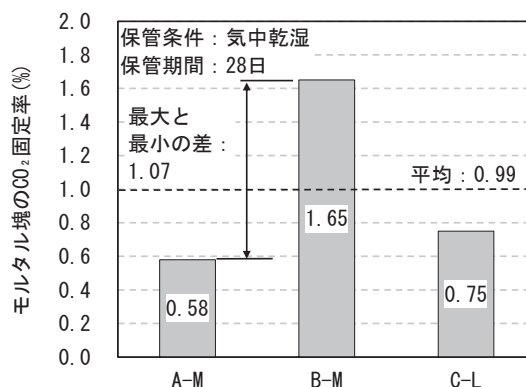


図-3 原コンクリートが異なるモルタル塊の CO₂ 固定率

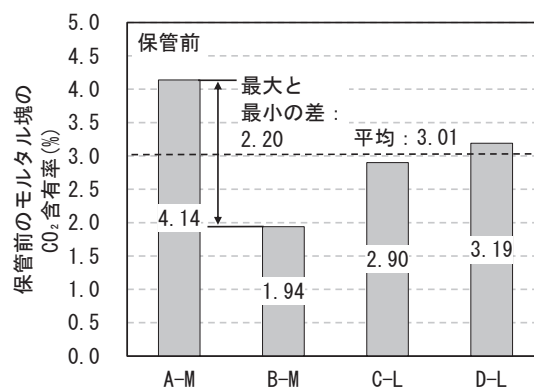


図-4 保管前のモルタル塊の CO₂ 含有率

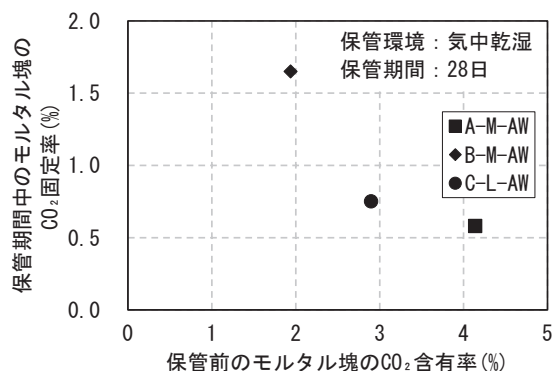


図-5 モルタル塊の保管前の CO₂ 含有率と保管期間中の CO₂ 固定率の関係

で 28 日間保管した場合の CO₂ 固定率を図-3 に示す。モルタル塊の固定率は最大で 1.65% (B-M), 最小で 0.58% (A-M) であり, その差は最大で 1.07%であった。これは, 再生粗骨材の品質区分よりも, 原コンクリートの調合や部位, 供用期間, 解体から再生粗骨材の製造までの期間などの違いにより生じた炭酸化の程度による差と考えられる。

図-4 に示すように保管前のモルタル塊の CO₂ 含有率が最大で 4.14% (A-M), 最小で 1.94% (B-M), その差は最大で 2.20%であった。また, 図-5 に示すように, 保管前の CO₂ 含有率が小さいほど, 同一環境における保管期

間中のモルタル塊のCO₂固定率が大きくなる傾向にあった。

これらのことから、再生粗骨材の品質区分にかかわらず、保管前のモルタル塊の炭酸化が進んでいるほど、CO₂を固定するポテンシャルが低くなり、保管期間中のCO₂固定率が小さくなる傾向にあると考えられる。

(2) 乾湿繰り返しの有無およびCO₂濃度がモルタル塊のCO₂固定率に及ぼす影響

保管中の乾湿繰り返し条件が異なるモルタル塊のCO₂固定率を図-6に示す。乾湿条件にかかわらず、モルタル塊のCO₂固定率はほとんど変わらなかった。既往の研究⁵⁾において、粒度が0mm～2mmのモルタル片および0mm～10mmのコンクリート片の炭酸化速度は、乾燥条件よりも乾湿繰り返しの方が大きいと報告されている。また、乾湿繰り返し条件における炭酸化速度は、コンクリートコンクリート塊の粒径が小さいほど大きいことが報告されている。

本実験において乾湿繰り返しの有無による差がみられなかった理由として、対象としたモルタル塊を粒度が5mm～20mmの再生粗骨材から抽出したものであり、既往の研究に比べて粒径が大きいいため、乾湿繰り返しの影響がモルタル塊の表面部分に留まったことが考えられる。

CO₂濃度が異なる環境で28日保管したモルタル塊のCO₂固定率を図-7に示す。気中で保管したモルタル塊

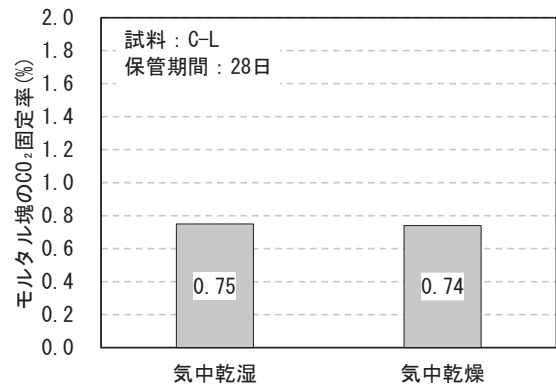


図-6 保管期間中の乾湿条件が異なるモルタル塊のCO₂固定率

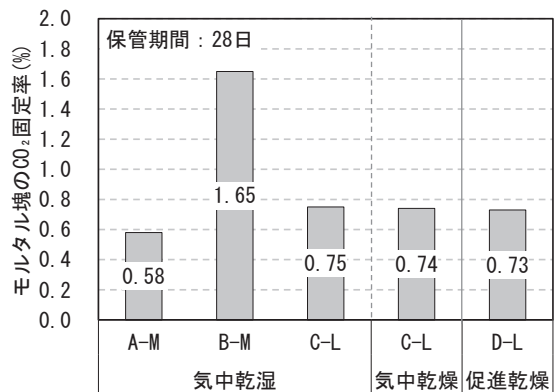


図-7 CO₂濃度が異なる環境で28日保管したモルタル塊のCO₂固定率

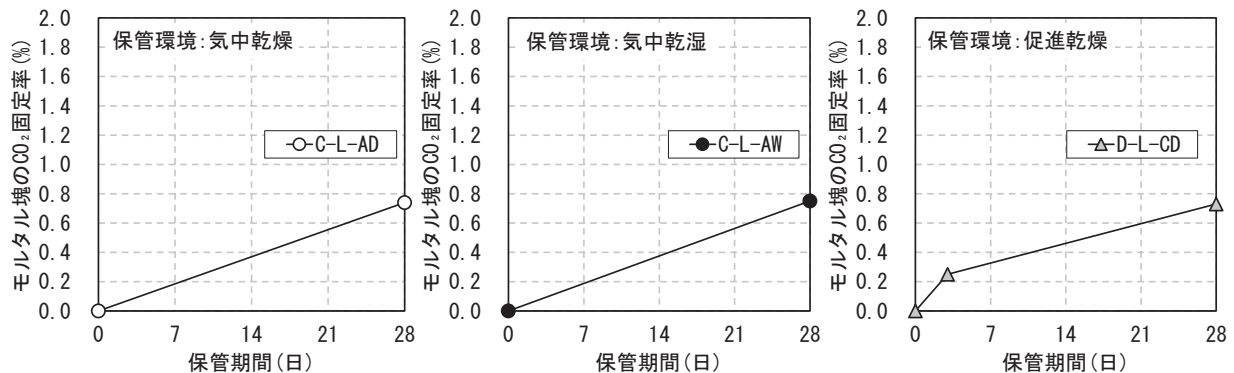


図-8 保管期間とモルタル塊のCO₂固定率の関係 (左：気中乾燥 中：気中乾湿 右：促進炭酸化乾燥)

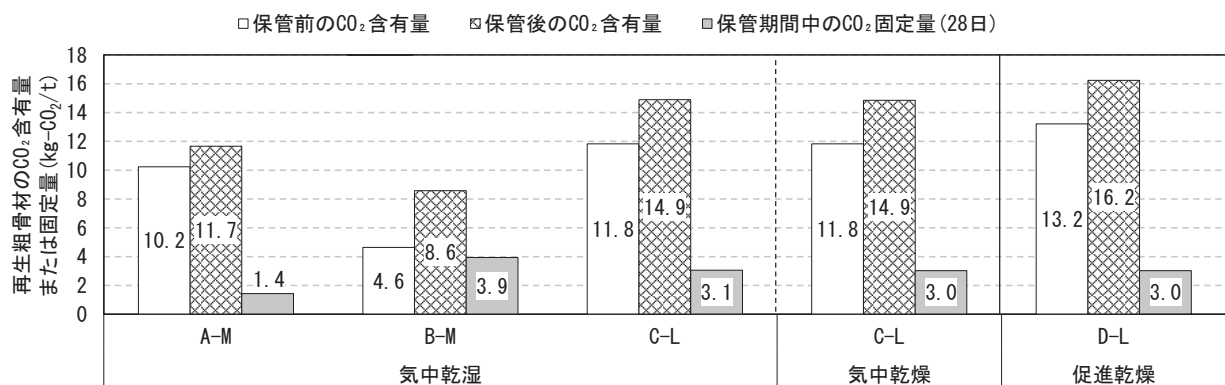


図-9 保管前後の再生粗骨材のCO₂含有量および保管期間中のCO₂固定量

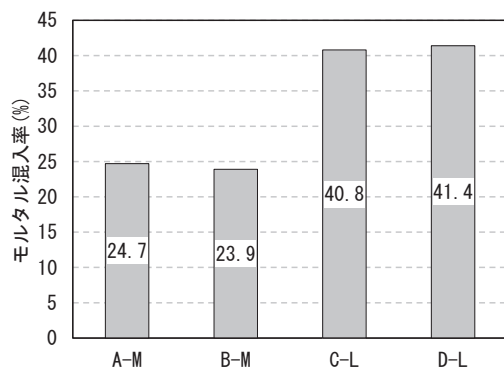


図-10 原コンクリートが異なる再生粗骨材のモルタル混入率

のCO₂固定率は最大で1.65%、最小で0.58%であった。一方、CO₂濃度5%の促進炭酸化条件で保管したD-Lは原コンクリートが気中で保管したモルタル塊と異なるものの、CO₂固定率が0.73%であり、気中乾燥条件下で保管したC-Lとほぼ同程度であった。本実験の試料数が少なく、気中保管と促進炭酸化保管に使用したモルタル塊の原コンクリートが異なるため、一概に言うことはできないが、モルタル塊のCO₂固定率に及ぼす保管期間中のCO₂濃度の影響は小さいと考えられる。

(3) 保管期間がモルタル塊のCO₂固定率に及ぼす影響

保管期間とモルタル塊のCO₂固定率の関係を図-8に示す。モルタル塊のCO₂固定率は、乾湿繰り返しの有無および保管期間中のCO₂濃度にかかわらず、保管期間が長いほど大きくなる傾向にあった。

(4) 再生粗骨材のCO₂含有量および固定量

保管前後の再生粗骨材のCO₂含有量および保管期間中のCO₂固定量を図-9に示す。保管前の再生粗骨材のCO₂含有量はMで4.6~10.2kg-CO₂/t、Lで11.8~13.2kg-CO₂/tであり、Lの方がやや大きくなった。

保管後の再生粗骨材のCO₂含有量は、Mで8.6~11.7kg-CO₂/t、Lで気中保管の場合で14.9~16.2kg-CO₂/tであった。

保管期間中における再生粗骨材MのCO₂固定量はA-Mで1.4kg-CO₂/t、B-Mで3.9kg-CO₂/tとなり、保管前のCO₂含有量が小さいB-Mの方が大きかった。また、A-MとB-Mのモルタル混入率は図-10に示すようにほぼ同程度である。また、再生粗骨材Lに該当するC-LおよびD-Lでは、モルタル混入率がA-MおよびB-Mよりも大きいにもかかわらず、CO₂固定量はB-Mと同等であった。これはC-LおよびD-LがB-Mよりも保管前のCO₂含有量が大きく、保管期間中のCO₂を固定するポテンシャルが低いことが影響したと考えられる。

4. まとめ

本実験では、保管期間中における再生粗骨材のCO₂固

定量の分析に用いる試料の調製方法および各種再生粗骨材のCO₂固定量について検討を行った。その結果、本実験の範囲において以下の知見が得られた。

- 1) 保管期間中における再生粗骨材のCO₂固定量を把握するための分析に用いる試料の調製には、再生粗骨材から抽出したモルタル塊を利用する方法が有用である可能性が示唆された。
- 2) 保管前のモルタル塊のCO₂含有率が小さいほど、保管期間中におけるCO₂固定率が大きくなる傾向にある。
- 3) 保管期間中における乾湿条件にかかわらず、再生粗骨材から抽出したモルタル塊のCO₂固定率がほとんど変わらない。
- 4) 保管期間中のCO₂濃度はモルタル塊のCO₂固定率に及ぼす影響が小さい。
- 5) モルタル塊のCO₂固定率は、保管期間中のCO₂濃度、乾湿条件にかかわらず、保管期間が長いほど大きくなる傾向にある。
- 6) 保管期間中における再生粗骨材のCO₂固定量は1.4~3.9kg-CO₂/tである。

本検討で用いた再生粗骨材は、原コンクリートが4種類と少ない。今後、本方法の汎用性を確認していくため、さらに試験数を増やして検討を進めていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 高橋祐一，新田稔，鈴木好幸，松田信広：高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートの実用化に向けた基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.934-939，2023
- 2) 松浦忠孝，小林保之，青山裕之，尾崎公則：強制炭酸化した再生骨材および電柱破砕材の品質に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.1246-1251，2023
- 3) 神田太郎，曾根真理，岸田弘之：コンクリートの供用および再資源化による二酸化炭素の固定に関する全国調査，コンクリート工学，Vol.49，No.8，pp.9-16，2011.8
- 4) 長濱庸介，神田太郎，角湯克典：コンクリート用再生骨材等の再資源化の過程における二酸化炭素固定量，土木技術資料，pp.26-29，2014.7
- 5) 黒田泰弘，菊池俊文：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，第20巻，第1号，pp.15-22，2009.1
- 6) 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，Vol.45，No.1，pp.34-39，2023