

# 論文 CCU 材料を混合したモルタルの高濃度 CO<sub>2</sub> での強制炭酸化による物理特性および CO<sub>2</sub> 固定量の変化に関する一考察

森 香奈子\*1・クマル アワド\*2・取違 剛\*3・渡邊 賢三\*4

**要旨** : CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料を細骨材の一部に置換したモルタルについて、80%の高濃度 CO<sub>2</sub> 環境下で強制炭酸化することによる物理特性の変化および CO<sub>2</sub> 固定量の検討を行った。その結果、炭酸化期間が長くなっても 50nm 以下の細孔はほぼ変化せず、50nm 以上の細孔が減少することにより総細孔量は減少した。CCU 材料の混合により炭酸化の進行は遅くなり、圧縮強度の発現も遅くなる傾向にあった。一方、完全炭酸化時の CO<sub>2</sub> 固定量は CCU 材料を混合したモルタルで多くなり、CCU 材料による材料由来の CO<sub>2</sub> 削減効果とあわせて、炭酸化した普通モルタルに比べて約 90kg/m<sup>3</sup> の CO<sub>2</sub> を削減できる試算となった。

**キーワード** : CCU 材料, 炭酸化養生, 炭酸化深さ, 圧縮強度, 細孔径分布, 細孔量, CO<sub>2</sub> 固定量

## 1. はじめに

2050 年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにし、カーボンニュートラルな社会を実現するための取組みとして、建設分野において環境配慮型コンクリートの開発と利用が進められている。近年では、環境配慮型コンクリート製造の技術として、①高炉スラグ微粉末などの使用によるセメントの使用量削減、②強制炭酸化によるコンクリートへの CO<sub>2</sub> 固定、③CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料の使用、について研究開発が行われている。②の強制炭酸化を行うコンクリートには、CO<sub>2</sub> と反応して硬化する特殊混和材が使われる。また、③の CCU 材料とは CO<sub>2</sub> を吸収・固定した粉体や骨材などを指し、コンクリートに混合することで材料由来の CO<sub>2</sub> 排出量を削減する効果がある。最近では上記 3 つの技術の組合せにより、セメントの一部を高炉スラグ微粉末や特殊混和材で置換した結合材と CCU 材料を用いたコンクリートの強制炭酸化が検討されている<sup>2),3)</sup>。これらの実験結果には高炉スラグ微粉末と特殊混和材の炭酸化による物性の変化も含まれるため、CCU 材料を混合したコンクリートを強制炭酸化した場合の CO<sub>2</sub> の拡散や CO<sub>2</sub> 固定量について、CCU 材料による影響に関しては基礎的な検

討が十分ではない。現時点では、多くの CCU 材料が研究開発段階ではあるものの、将来的には様々な CCU 材料が実用化され、環境配慮型コンクリートへの適用が進むと期待される。

そこで、本研究では、CCU 材料と高濃度 CO<sub>2</sub> での強制炭酸化の組み合わせがセメント系硬化体に及ぼす影響について基礎的な検討を行う目的で、CCU 材料で細骨材の一部を置換し、結合材はセメントのみとしたモルタルを用いて、強制炭酸化後の物理特性や CO<sub>2</sub> 固定量を評価した。本報では、以降、強制炭酸化を単に炭酸化と記す。

## 2. 実験概要

### 2.1 材料および配合

使用した材料を表-1 に示す。セメントには、少量混合成分を含まない研究用セメントを用いた。CCU 材料には、固液分離したコンクリートスラッジ排水に排気ガスを吹き込むことにより製造された軽質炭酸カルシウム<sup>4)</sup>を使用した。骨材はコンクリート用細骨材である山砂と砕砂の混合砂を使用し、モルタルフローと空気量の調整のために市販の高性能 AE 減水剤と消泡剤も使用した。

モルタルの配合を表-2 に示す。水セメント比 50%、

表-1 使用材料

名称	記号	種類・物性
練混ぜ水	W	上水道水, 密度: 1.0 g/cm <sup>3</sup>
セメント	C	研究用セメント, 密度: 3.16 g/cm <sup>3</sup> , ブレーン比表面積: 3390 cm <sup>2</sup> /g, CaO: 63.86%
CCU 材料	CCU	軽質炭酸カルシウム, 密度: 2.59 g/cm <sup>3</sup> , BET 比表面積: 6.59 m <sup>2</sup> /g, CaO: 52.62%
細骨材	S	砕砂と山砂の混合砂, 表乾密度: 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.18%, 実績率: 67.3%
高性能 AE 減水剤	SP	低空気連行タイプ, 主成分: ポリカルボン酸エーテル化合物
空気量調整剤	DF	消泡剤, 主成分: ポリアルキレングリコール誘導体

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士 (工学) (正会員)

\*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*4 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ グループ長 博士 (工学) (正会員)

単位水量 165kg/m<sup>3</sup> のコンクリート配合をベースに、粗骨材体積分を練混ぜ水、セメントおよび細骨材の体積比率に応じて各単位量に割り戻した。また、CCU 材料はコンクリート換算で 100kg/m<sup>3</sup> となるように細骨材の一部に置換することとし、いずれの配合も単位水量と単位セメント量は一定とした。表中の各モルタル配合の CaCO<sub>3</sub> 含有量は、使用した粉体材料および細骨材の熱分析から CaCO<sub>3</sub> 含有量を求め、各単位量から算出した。

## 2.2 試験体作製および養生

公称容量 10L のモルタルミキサに C, CCU および S を投入し 10 秒混合した後、W, SP および DF を投入し 90 秒練り混ぜた。ミキサから排出したモルタルは、フレッシュ性状の試験後に φ50×100mm の円柱型枠に打ち込んだ。試験体は、打込み後から翌日まで 20℃ の試験室で封緘養生し、脱型後は所定の材齢まで炭酸化養生または水中養生を実施した。養生のパターンと試験材齢を図-1 に示す。炭酸化養生は温度 50℃、湿度 50%RH、CO<sub>2</sub> 濃度 80% の条件とし、比較として 20℃ で水中養生を行った。

## 2.3 実験項目および方法

CCU 材料を混合したモルタルの基本物性評価として、フレッシュ性状と圧縮強度を評価した。圧縮強度は、炭酸化養生の影響を評価するために、水中養生の結果との比較も行った。また、炭酸化したモルタルは、炭酸化深さ、細孔構造および CO<sub>2</sub> 固定量についても評価した。各実験項目の評価方法は、以下のとおりである。

### (1) フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状の評価として、練混ぜ直後のモルタルのフロー、空気量および温度を測定した。フローは、JIS R 5201 のフロー試験を参考に、0 打および 15 打で測定した。空気量は、エアメータによる圧力法で測定した。

圧縮強度は φ50mm の円柱試験体を用いて評価した。試験材齢は材齢 1 日（脱型時）以降、炭酸化養生の場合は材齢 4 日（炭酸化期間 3 日）、材齢 8 日（炭酸化期間 7 日）とし、水中養生の場合は材齢 7 日、材齢 28 日とした。載荷速度などの条件は、JIS A 1108 に準拠した。

### (2) 炭酸化深さ

JIS A 1152 に準拠して、炭酸化養生後の試験体を割裂し、割裂面に 1% フェノールフタレイン溶液を噴霧して、0.1mm 単位で炭酸化深さを測定した。測定面は円柱試験体側面の 2 面とし、測定値の平均値で評価した。本研究では、フェノールフタレイン溶液を噴霧した後、鮮明な赤紫色を示した部分を未炭酸化部、薄赤紫色を示した部分および呈色しなかった部分を炭酸化部と呼ぶ。

### (3) 細孔径分布

水銀圧入式ポロシメータにより、モルタルの細孔分布および細孔量を測定した。測定には、図-2 に示す円柱試験体の②中心位置から切り出した約 5mm 角の試料を

表-2 モルタル配合

配合名	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位体積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	CaCO <sub>3</sub> 含有量 (kg/m <sup>3</sup> )
		W	C	CCU	S		
N	50	274	548	0	1402	2224	15.5
CCU	50	274	548	166	1237	2227	162.1

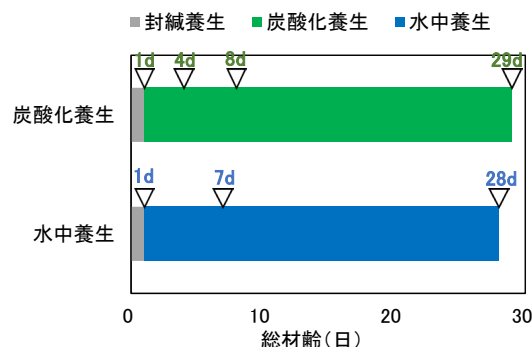


図-1 養生パターンと試験材齢

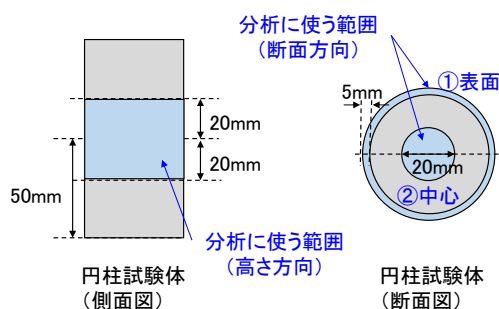


図-2 分析試料の採取位置

用いた。試料は、前処理として、試験体から切り出した直後にアセトン浸漬して水和停止を行った後、真空乾燥を実施した。

### (4) CaCO<sub>3</sub> 含有量・CO<sub>2</sub> 固定量

示差熱・熱重量同時測定装置 (TG-DTA) を用いて、熱分析により炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) 含有量を評価した。試料は、図-2 に示した①表面と②中心の 2 か所から採取した。TG-DTA の測定は、アセトンによる水和停止と真空乾燥後に粉碎した約 20mg の試料を、窒素雰囲気下で室温から 1000℃ まで 20℃/min の昇温速度で加熱することにより実施した。本研究では、600~800℃ の重量減少量を CaCO<sub>3</sub> の脱炭酸に起因するとして、CaCO<sub>3</sub> 量を求めた。また、各式量について、CaCO<sub>3</sub> を 100, CaO を 56, CO<sub>2</sub> を 44 として計算した。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ性状を表-3 に示す。CCU 材料を混合した場合、モルタルの流動性が低下したため高性能 AE 減水剤を添加することで試験体の成形に必要な流動性を確保した。また、いずれの配合においても、消泡剤を用いて空気量を 2~3% の範囲に調整した。

表-3 モルタルのフレッシュ性状

配合名	SP (P×%)*	DF (P×%)*	フロー(mm)		Air (%)	温度 (°C)
			0打	15打		
N	0	0.06	116	208	3.0	21
CCU	1.2	0.06	193	238	2.1	21

\*P=C+CCU

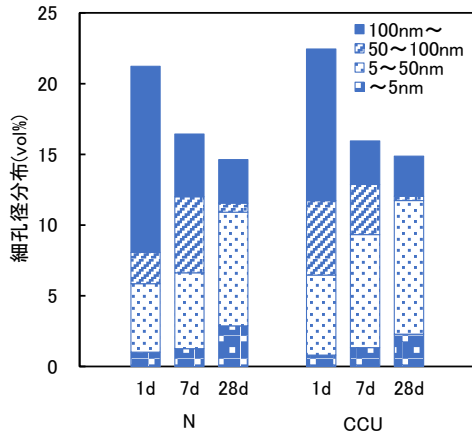


図-3 モルタルの細孔径分布 (水中養生)

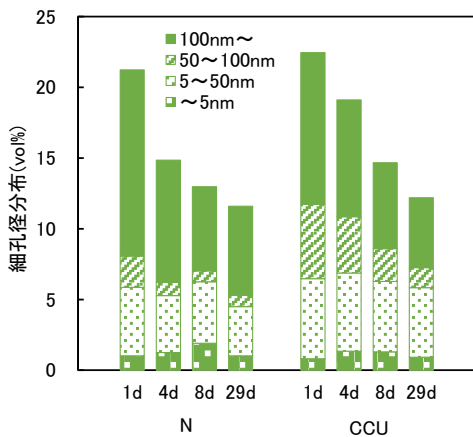


図-4 モルタルの細孔径分布 (炭酸化養生)

### 3.2 細孔構造

モルタル中心部の試料について、細孔径分布の測定結果を図-3 および図-4 に示す。ここでは、細孔を 5nm 以下、5~50nm、50~100nm、100nm 以上の 4 つのサイズに分けて図示した。図より、配合および養生方法によらず、材齢の経過に伴って細孔量が減少した。しかし、細孔径の分布は養生方法による違いが認められた。

図-3 より、水中養生の場合、材齢の経過に伴って 50nm 以下の細孔が増加し、材齢 28 日には 5~50nm の細孔の割合が最大となり、その傾向は CCU 配合で顕著であった。また、100nm 以上の細孔は材齢 1 日から 7 日で、50~100nm の細孔は材齢 7 日から 28 日で大幅に減少しており、材齢 1 日から 28 日での 50nm 以上の細孔減少率は、N 配合で約 76%、CCU 配合で約 80%であった。これより、CCU 材料を混合した場合においても、既往の研究<sup>9)</sup>と同様に、材齢経過に伴う細孔径の小径側へのシフトが認められた。

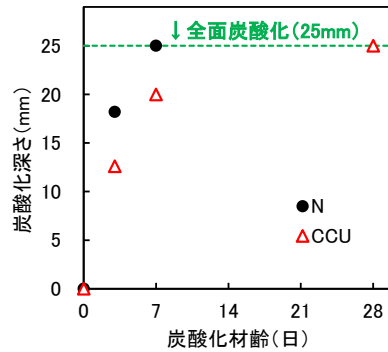


図-5 モルタルの炭酸化深さ

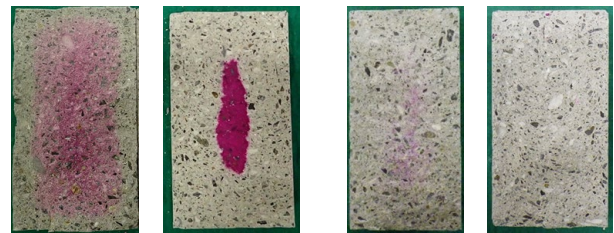


写真-1 炭酸化 7 日 写真-2 炭酸化 28 日

図-4 に示した炭酸化養生の場合、50nm 以下の細孔量は材齢によらず同等の値を示した。しかし、粗大な細孔は材齢経過に伴って減少し、材齢 1 日から 29 日での 50nm 以上の細孔減少率は、N 配合で約 54%、CCU 配合で約 60%となった。特に、CCU 配合では、材齢経過に伴う 50~100nm の細孔の減少が確認できた。モルタルを 20%CO<sub>2</sub> 環境で炭酸化した既往の研究<sup>9)</sup>では、炭酸化により 50~100nm の細孔は減少した一方で 10nm 以下の細孔量は変化しなかった。よって、CCU 材料を混合した場合でも、炭酸化により CaCO<sub>3</sub> が粗大な細孔を充填することで総細孔量は減少したものの、水中養生に比べて細孔径の小径側へのシフトはわずかであったと考える。

### 3.3 炭酸化深さ

炭酸化養生を行った試験体は、所定の材齢で炭酸化深さを測定した。測定結果を図-5 に、材齢 8 日 (炭酸化 7 日) および 29 日 (炭酸化 28 日) の試験体の写真を写真-1、写真-2 に示す。図-5 の横軸は、炭酸化材齢とした。N 配合は、炭酸化 7 日の時点で全面炭酸化していた。一方、CCU 配合は、炭酸化 7 日の炭酸化深さは 20mm であり、中心部に未炭酸化部が残っていた。その後、炭酸化 28 日では全面炭酸化が確認できた。

図-4 に示した炭酸化養生開始前の材齢 1 日における 100nm 以上の細孔量は、N 配合で 13.2vol.%、CCU 配合で 11.5vol.%であった。既往の研究<sup>7)</sup>では、132nm 以上の細孔量と透気・透水性に相関があると示されている。これより、炭酸化開始時の粗大な細孔の多さが、N 配合の炭酸化すなわち CO<sub>2</sub> の拡散を早めたと考える。後述する脱型時の圧縮強度の結果からも、CCU 材料の細骨材置換により、硬化体が緻密になったと推察する。このことは、

炭酸化養生を想定した硬化体の場合には、CO<sub>2</sub>の拡散を抑制する可能性があることに留意が必要と考える。

### 3.4 圧縮強度

#### (1) 各養生条件における圧縮強度

モルタルの圧縮強度を図-6に示す。20℃水中養生の場合、材齢7日、28日の圧縮強度はN配合に比べてCCU配合が大きい結果となった。軽質炭酸カルシウムを骨材の一部として混合したコンクリートに関する既往の研究<sup>8)</sup>では、材齢28日まで封緘養生したところ、軽質炭酸カルシウムの混合量の増加に伴い同一材齢での圧縮強度が増加した結果が示されている。この理由として、軽質炭酸カルシウムのフィラー効果によるセメントの反応促進、カーボネート水和物の生成が起こったためと推察している。これは、石灰石微粉末のフィラー効果<sup>9)</sup>と同じ考え方である。図-6の水中養生の結果より、本研究でも同様にCCU材料が強度増進に寄与した可能性がある。

50℃炭酸化養生の場合、材齢4日、8日の圧縮強度はCCU配合に比べてN配合が大きい結果となった。これは、図-5に示した各材齢での炭酸化深さが影響したと考える。材齢8日時点でN配合は全面炭酸化した一方で、CCU配合は中心部に未炭酸化部が残っていた。つまり、N配合は試験体中心部までCO<sub>2</sub>が拡散してセメントおよび水和物と反応したものの、CCU配合ではCO<sub>2</sub>が拡散しにくく、炭酸化反応が起こりにくかったことが強度の差の要因であると考えられる。したがって、水中養生の結果に見られたCCU材料による強度増進の効果は、水分供給がない環境では発揮されにくかった、あるいはセメント水和物の炭酸化反応による強度発現効果に比べて小さいものであったと推察する。なお、本研究では材齢29日での強度試験を実施していないため、CCU配合が全面炭酸化した場合の強度発現については今後検討したい。

#### (2) 細孔量と圧縮強度の関係

既往の研究<sup>5)</sup>において、50nm以上の細孔量と圧縮強度に相関があると示されていることを踏まえて、図-7に50nm以上の細孔量と圧縮強度の関係を示す。なお、既往の研究<sup>5)</sup>は20℃水中養生の結果である。図-7より、養生条件や配合によらず50nm以上の細孔量と圧縮強度には高い相関(相関係数 $r > 0.9$ )が認められた。しかしながら、50nm以上の細孔量が等しい場合、炭酸化養生を行ったモルタルの圧縮強度の方が大きく、養生条件が異なる場合には関係式が異なることがわかった。既往の研究<sup>10)</sup>では、20~80℃の異なる温度条件で水中養生を行ったモルタルについて、温度条件によらず細孔量から圧縮強度を推定できると報告されているものの、本検討の範囲では養生条件ごとに整理が必要な結果となった。前述のとおり、高濃度CO<sub>2</sub>環境下での炭酸化養生と水中養生では、モルタルの細孔径分布が異なった。また、炭酸化モ

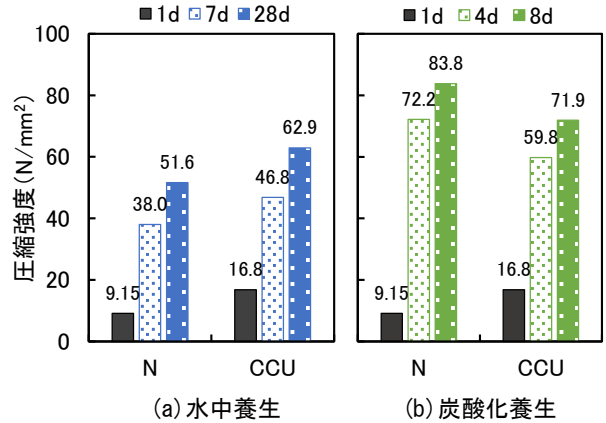


図-6 モルタルの圧縮強度

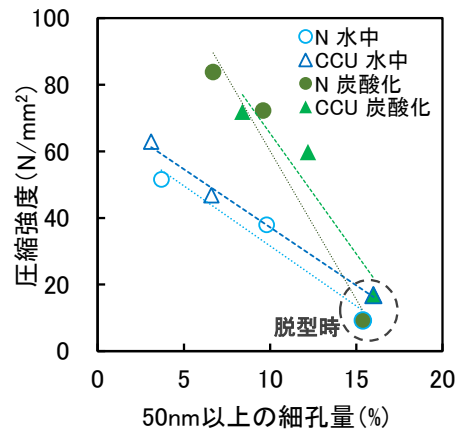


図-7 50nm以上の細孔量と圧縮強度の関係

表-4 炭酸化養生モルタルのCaCO<sub>3</sub>含有量(%)

総材齢	N		CCU	
	中心	表面	中心	表面
1d	4.02	3.17	9.16	9.88
4d	6.17	16.38	10.08	24.20
8d	12.43	16.96	20.39	22.91
29d	15.14	17.08	25.39	25.34

ルタルでは炭酸化部と未炭酸化部での反応生成物や細孔量が異なり、さらに50%RHでの養生により水中養生に比べ強度試験時に試験体の乾燥が進んでいたと推測する。

以上のことより、炭酸化養生を行った硬化体については、評価材齢での炭酸化の程度、細孔径分布および総細孔量の断面内での均一性、さらに試験時の試験体の乾燥度合いなどを考慮した評価が今後必要になると考える。

### 3.5 CaCO<sub>3</sub>量とCO<sub>2</sub>固定量

#### (1) 炭酸化養生によるCaCO<sub>3</sub>量の増加

炭酸化養生を行ったモルタルのTG-DTAでの測定結果よりCaCO<sub>3</sub>含有量(%)を求めた。結果を表-4に示す。材齢1日は封緘養生後の試料であり、CaCO<sub>3</sub>含有量は材料由来の値となるため、中心と表面は同等となると予測した。しかし実際は、中心と表面で1%弱の差があった。また、表-2より、モルタルのCaCO<sub>3</sub>含有量(kg/m<sup>3</sup>)を単位

体積重量で除した CaCO<sub>3</sub> 含有量(%)は, N 配合で 0.70%, CCU 配合で 7.28%となり, 表-4 に示した材齢 1 日の測定結果の方が 2~3%高い値となった。これは, 円柱試験体から分析試料を採取し, 水和停止や乾燥, 粉碎などの作業を行う過程で炭酸化が進んだためと考える。そこで, 炭酸化養生による CaCO<sub>3</sub> の増加量は, 材料分析とモルタル配合から計算した値ではなく, 各材齢での CaCO<sub>3</sub> 量から表-4 の材齢 1 日における中心と表面の平均値を差し引いた値を用いることとした。各炭酸化材齢での CaCO<sub>3</sub> 増加量を図-8 に示す。

試験体の表面は CO<sub>2</sub> との反応がすぐに起こるため, 炭酸化 3 日で CaCO<sub>3</sub> の増加量が 12%以上となった。一方, 中心は CO<sub>2</sub> が拡散するのに時間がかかるため, 炭酸化 3 日ではほとんど CaCO<sub>3</sub> が増加しなかった。炭酸化 7 日の中心の CaCO<sub>3</sub> 増加量は, 全面炭酸化した N 配合に比べて, 全面炭酸化しなかった CCU 配合の方が大きくなった。これは, 中心の試料採取範囲が, CCU 配合の炭酸化部と未炭酸化部の両方を含んでいたこと, フェノールフタレイン溶液で赤紫色を示した位置でも実際には炭酸化反応が起こっていたためと推察する。さらに, 炭酸化 28 日での CCU 配合の CaCO<sub>3</sub> 増加量は約 16%となり, N よりも大きな値となった。CCU 配合において, CaCO<sub>3</sub> 増加量が高くなった事由について, 以下に考察を加える。

セメントの主要鉱物であるカルシウムシリケート化合物 (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S) は, 反応水がある状態で炭酸化反応が進行するが, C<sub>2</sub>S に比べて C<sub>3</sub>S は時間経過に伴い反応速度が低下する<sup>11)</sup>。本研究においても 80%CO<sub>2</sub> 環境下で炭酸化したことにより, いずれの配合においても, 水和物の炭酸化とともにカルシウムシリケート化合物の炭酸化も進行したと考える。ここで, 本研究では CCU 材料を細骨材置換しているため N 配合と CCU 配合の単位セメント量は等しいものの, CCU 配合の炭酸化 28 日における CaCO<sub>3</sub> 増加量が N 配合より大きくなったのは, カルシウムシリケート化合物の炭酸化とは別の要因も影響したと考える。3.4 圧縮強度の結果で述べたとおり, 水中養生の場合には CCU 配合で強度が大きくなったことから, CCU 材料が材齢初期に C<sub>3</sub>S の反応を促進することで水和生成物が増加し, 炭酸化養生時に CaCO<sub>3</sub> に変化する Ca(OH)<sub>2</sub> や C-S-H の割合が多かった可能性がある。

## (2) 炭酸化養生後のモルタルの CO<sub>2</sub> 排出量の収支

各材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位とモルタルの CO<sub>2</sub> 固定量より, モルタル材料由来の CO<sub>2</sub> 収支を評価した。CO<sub>2</sub> 排出原単位は既往の研究<sup>3)</sup>を参考に表-5 の値を使用した。消泡剤については添加量が非常に少なく, 無視できる範囲であると考えて計算に含めなかった。モルタル配合および材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位から計算した CO<sub>2</sub> 排出量は, N 配合が 425.3 kg/m<sup>3</sup>, CCU 配合が 361.2 kg/m<sup>3</sup> となった。

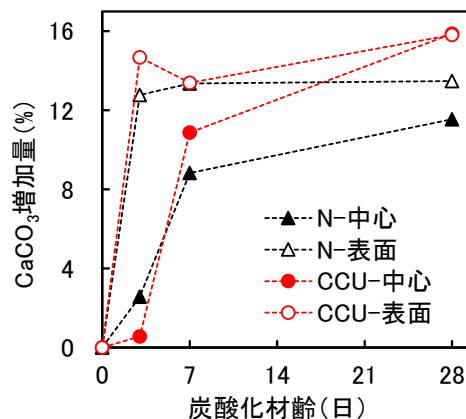


図-8 炭酸化材齢と CaCO<sub>3</sub> 増加量の関係

表-5 材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位

材料種類	排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /ton)
セメント	766.6
CCU 材料	-390
細骨材	3.7
高性能 AE 減水剤	150

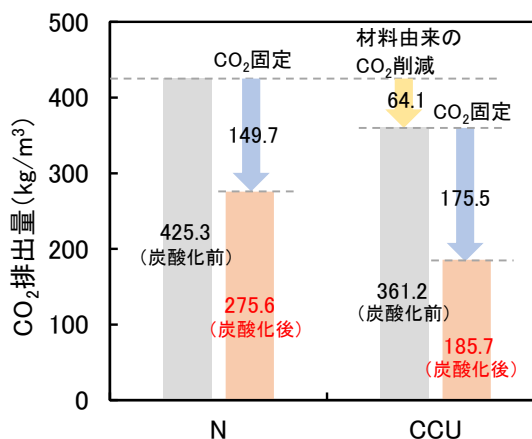


図-9 モルタルの CO<sub>2</sub> 排出量

CO<sub>2</sub> 固定量(kg/m<sup>3</sup>)は次の通り計算した。表-4 より, 材齢 29 日におけるモルタル中心と表面の CaCO<sub>3</sub> 含有量の平均値は, N 配合で 16.11%, CCU 配合で 25.37%となった。また, 水銀圧入式ポロシメータで測定した材齢 29 日の試料密度は, N 配合で 2,208kg/m<sup>3</sup>, CCU 配合で 2,211kg/m<sup>3</sup>であった。これらの数値の積から炭酸化養生後のモルタル 1m<sup>3</sup>当たりの CaCO<sub>3</sub> 量を計算すると, N 配合は 355.7kg/m<sup>3</sup>, CCU 配合は 560.9kg/m<sup>3</sup>となった。この CaCO<sub>3</sub> 量には材料由来の CaCO<sub>3</sub> が含まれるため, 表-2 に示した初期の CaCO<sub>3</sub> を計算結果から引くことにより, 炭酸化養生後の CaCO<sub>3</sub> 増加量は, N 配合で 340.2kg/m<sup>3</sup>, CCU 配合で 398.8kg/m<sup>3</sup>と求められた。CaCO<sub>3</sub> 増加量は, 炭酸化による CO<sub>2</sub> 固定量と考えられるため, N 配合の CO<sub>2</sub> 固定量は 149.7 kg/m<sup>3</sup>, CCU 配合の CO<sub>2</sub> 固定量は 175.5 kg/m<sup>3</sup>と計算した。

以上の計算結果より求めた CO<sub>2</sub> 収支を図-9 に示す。CCU 配合は、材料由来の CO<sub>2</sub> 排出量が 64.1kg 削減でき、モルタルへの CO<sub>2</sub> 固定量が 25.8kg 多くなったことから、炭酸化養生した N 配合に比べて CO<sub>2</sub> 排出量を約 90kg 削減できる試算となった。つまり、本研究の範囲において、CCU 材料を細骨材の一部に置換することにより、材料由来の CO<sub>2</sub> 削減効果に加えて、炭酸化養生過程での CO<sub>2</sub> 固定の効果も得られた。

#### 4. まとめ

本研究では、CCU 材料と高濃度 CO<sub>2</sub> での強制炭酸化の組合せがセメント系硬化体に及ぼす影響について基礎的なデータを取得する目的で、CCU 材料を細骨材の一部に置換した φ50×100mm のモルタルを用いて、80%CO<sub>2</sub> 環境での炭酸化養生による物理特性や CO<sub>2</sub> 固定量の変化を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 炭酸化期間の経過に伴い、硬化体の細孔量は減少した。これは、50nm 以上の細孔の減少によるものであり、50nm 以下の細孔量は炭酸化 28 日後もほぼ変化しなかった。一方、20°C 水中養生の場合は 50nm 以上の細孔の減少と 50nm 以下の増加が顕著であった。
- (2) CCU 材料を混合しない場合、炭酸化 7 日で全面炭酸化した。しかし、CCU 材料を混合した場合は炭酸化 7 日時点ではモルタル中心部に未炭酸化部が残っており、CCU 材料の混合により、炭酸化速度は遅くなることが確認できた。これは、CCU 材料の細骨材置換により、硬化体が緻密になったことが一因と考える。
- (3) 炭酸化養生の場合、CCU 材料を混合していないモルタルの圧縮強度が大きくなった。一方、水中養生の場合、CCU 材料を混合したモルタルの圧縮強度が大きくなった。炭酸化養生のケースは、炭酸化 7 日までの評価結果であるため、炭酸化度が強度の値に影響した可能性がある。また、養生条件や配合によらず 50nm 以上の細孔量と高い相関が認められた。
- (4) 炭酸化養生したモルタルの CO<sub>2</sub> 固定量を試算した結果、CCU 材料を混合したモルタルの CO<sub>2</sub> 固定量が約 26kg/m<sup>3</sup> 大きい値となった。CCU 材料の混合による材料由来の CO<sub>2</sub> 削減量は約 64kg/m<sup>3</sup> となったことから、合計で約 90 kg/m<sup>3</sup> の CO<sub>2</sub> を削減できる試算となった。これより、CCU 材料と高濃度 CO<sub>2</sub> での強制炭酸化の組合せが、CO<sub>2</sub> 削減効果を高める可能性が示唆された。

#### 謝辞

本成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務 (JPNP21023) を受け、

革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果を活用したものである。

#### 参考文献

- 1) 久田真, 宮里心一: カーボンネガティブコンクリートの社会実装に向けて—CO<sub>2</sub> の受け皿となるコンクリートを目指す—, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.22-25, 2021.11
- 2) 山野泰明, 取違 剛, 関 健吾, 坂井吾郎: 軽質炭酸カルシウムを用いた CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの埋設型枠としての適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1204-1209, 2023.7
- 3) 境 美緒ほか: 製造・施工まで含めてカーボンネガティブを達成した消波ブロックの製造実証, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演原稿, VI-848, 2024.9
- 4) 佐々木猛, 八木利之: エコタンカル CO<sub>2</sub> を原料とした環境にやさしい軽質炭酸カルシウム, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.87-90, 2021.10
- 5) 内川 浩, 羽原俊祐, 沢木大輔: 混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.330-335, 1990.12
- 6) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂田 昇, 坂井吾郎: γ-C<sub>2</sub>S・SiO<sub>2</sub> および各種ポゾランを添加した硬化体の炭酸化反応による空隙充てん機構, 土木学会論文集, Vol.68, No.1, pp.83-92, 2012
- 7) P. K. Metha and D. Manmohan: Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International congress on the Chemistry of Cements, Vol.3, 1980
- 8) Rosyad Mohammad et al, Effect of High-Volume Precipitated Calcium Carbonate Using CO<sub>2</sub> on Concrete(その 2), 2024 年度日本建築学会大会 (関東), pp.523-524, 2024.8
- 9) 坂井悦郎, 市川牧彦, 大門正機: 石灰石微粉末の特性とその利用, コンクリート工学, Vol.36, No.6, pp.3-9, 1998.6
- 10) 松沢晃一, 橋高義典, 塚越雅幸, 船越貴恵: 異なる温度養生の影響を受けたモルタルの細孔構造からの強度推定式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.347-352, 2011.7
- 11) 後藤誠史, 中村明則, 井奥洪二: カルシウムシリケート化合物の炭酸化による硬化, 無機マテリアル, Vol.5, pp.22-27, 1998