

# 論文 保存期間および CO<sub>2</sub> 供給方法が炭酸化させたスラッジ水の各種性状に与える影響

黒岩 笑海歌\*1・本田 和也\*2・小西 正芳\*3・安本 礼持\*4

**要旨:** 本研究では、模擬スラッジ水に CO<sub>2</sub> を注入して炭酸化させた不活性化スラッジ水および不活性化スラッジ水を用いたモルタルに関する検討を行った。その結果、炭酸化を行わないスラッジ水では保存中に固形分の鉱物組成が変化する一方、不活性化スラッジ水では炭酸化によりスラッジ固形分の鉱物組成が変化した後、以降の鉱物組成の変化が極めて小さいことを確認した。また、不活性化スラッジ水を練混ぜ水として用いたモルタルは、スラッジ水の保存期間の経過によるフローおよび圧縮強度への影響を緩和できることを確認した。

**キーワード:** スラッジ水, CO<sub>2</sub>, 保存期間, 鉱物組成, フロー, 圧縮強度

## 1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、様々な産業でCO<sub>2</sub>固定・排出量削減等に関する研究開発が進められている。セメント・コンクリート分野でも、CO<sub>2</sub>をコンクリートや再生骨材に含まれるCaと結合させ、炭酸塩を生成するCO<sub>2</sub>の鉱物固定技術に関する開発が行われている<sup>1)2)</sup>。

レディーミクストコンクリート工場で発生するスラッジ水にも豊富なCaが含まれているが、多くのレディーミクストコンクリート工場ではスラッジ水から上澄み水を分離回収した後、Caを多く含む残渣をスラッジケーキやコンクリートくずとして廃棄処分している。これに伴い、近年特に都心部において、スラッジケーキやコンクリートくずの廃棄処分場の確保が困難となっている。

スラッジ水はJIS A 5308において、安定化剤などを用いない場合、固形分率3.0%以下に調整・管理することにより練混ぜ水としての使用が認められている。しかし、現状ではスラッジ水を練混ぜ水として再利用している工場は4%程度との報告<sup>3)</sup>もある。練混ぜ水としてのスラッジ水の利用が進まない要因の一つとして、スラッジ水の保存日数により、フレッシュ性状や強度発現性が変化し、コンクリートの品質管理が困難になることがあげられる。既往研究において、時間の経過とともにスラッジ固形分の成分が変化すること<sup>4)</sup>やスラッジ水を用いたコンクリートのスランプはスラッジ水の保存日数の増加に伴い低下すること<sup>5)</sup>が報告されている。

筆者らは、既報において、スラッジ水にCO<sub>2</sub>を吹き込むことで、スラッジ水中のC<sub>3</sub>SやC<sub>2</sub>Sが炭酸化しCaCO<sub>3</sub>となり、未反応のクリンカ成分が減少すること<sup>6)</sup>を唆している。

そこで本研究では、スラッジ水へのCaの鉱物固定化および練混ぜ水への活用によるスラッジケーキ発生量の削減を目的に、スラッジ水へのCO<sub>2</sub>注入の有無、注入方法の違いおよび保存期間によるスラッジ固形分の成分変化について分析する(検討1)と共に、練混ぜ水としてCO<sub>2</sub>を吹き込む炭酸化処理を施した不活性化スラッジ水を用いたモルタルの流動性および圧縮強度を測定(検討2)した。

## 2. 実験概要

### 2.1 スラッジ水およびCO<sub>2</sub>の供給方法

本研究で使用したスラッジ水は、水道水に普通ポルトランドセメントを所定の濃度になるように加えた模擬スラッジ水を使用した。模擬スラッジ水およびこれにCO<sub>2</sub>を注入した不活性化スラッジ水の濃度は、水和反応やCO<sub>2</sub>との反応に伴い模擬スラッジ水作製時の濃度から変化することから、モルタルを練混ぜる前に、JIS A 5308 附属書JCに準じて、スラッジ濃度を算出し、所定の濃度になるように調整した。

CO<sub>2</sub>の供給は、i) 加速炭酸化装置を用いる方法(加速炭酸化)、ii) ホースから直接CO<sub>2</sub>をスラッジ水にバブリングする方法(バブリング)の2通りの方法で実施した。**図-1**に本実験で使用した加速炭酸化装置を示す。加速炭酸化装置はドラム缶から配管へ圧送されたスラッジ水に対して、直径14mmの注入管からCO<sub>2</sub>を供給した後、スタティックミキサーを通過させ、スラッジ水中のCO<sub>2</sub>の気泡にせん断力を与えマイクロバブルサイズ(1~100 μm)にすることでCO<sub>2</sub>との反応効率を高めている。

**図-2**に不活性化スラッジ水の作製手順を示す。加速炭酸化装置を用いる方法では、既報<sup>7)</sup>を参考に、150Lの

\*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修士(工学)(正会員)

\*2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 博士(工学)(正会員)

\*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 シニア・フェロー 修士(工学)

\*4 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 所長 修士(工学)(正会員)

濃度 5.0wt.%のスラッジ水を流量 25L/min で装置内を循環させ、これに濃度 100%の CO<sub>2</sub> をスラッジ水中の Ca と十分反応すると考えられる流量 20NL/min で注入する作業を 50 分間継続した。筆者らは既報<sup>7)</sup>において、加速炭酸化装置を用いない方法に比べて、加速炭酸化装置を用いる場合の方が、CO<sub>2</sub> とスラッジ水中の Ca の反応効率が良いことを報告している。そこで、今回のバブリングによる方法では既往研究<sup>7)</sup>を参考にスラッジ水の pH をモニタリングし、十分に炭酸化したと考えられる pH である 6.5 程度になるまで CO<sub>2</sub> を注入した。

## 2.2 検討 1：スラッジ固形分の分析

### (1) 分析用スラッジ水の作製手順

表-1 に固形分の成分分析および粒度測定に用いたスラッジ水を、図-3 に各スラッジ水の試料の作製手順を示す。なお、保存中のスラッジ水はマグネットスタラで攪拌を継続すると共に、水分の逸散および大気中の CO<sub>2</sub> との反応を防ぐためにラップで封緘状態とした。スラッジ水の pH は pH メーターを用いて測定した。

### (2) スラッジ固形分の分析方法

表-2 に実験要因と検討項目を示す。分析用のスラッジ固形分は、スラッジ水を吸引る過後、アセトンに 1 時間浸漬、40℃乾燥を行って水和停止した。スラッジ固形分中の結晶質の定量評価は粉末 X 線回折装置 (XRD : PANalytical 製) により測定した値を用いてリートベルト解析により算出した。XRD の測定は、管電圧 : 45kV、管電流 : 40mA、測定範囲 (2θ) : 5~70°、走査速度 : 0.05°/秒、発散スリット : 20mm、散乱スリット : 2° の条件で行った。CO<sub>2</sub> の鉱物固定量は示差熱分析装置 (TG-DTA : NETZSCH 製) を用いて、600~800℃の質量減少率を CaCO<sub>3</sub> の脱炭酸領域<sup>10)</sup>として評価した。粒度分布は粒子分布測定装置 (マイクロトラック・ベル(株)製) を用いて測定した。試料の外観観察は走査型電子顕微鏡 (SEM : 株式会社日立ハイテクノロジーズ製) により実施し、エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS : アメテック(株)製) により観察した粒子の推定を行った。

## 2.3 検討 2：不活性化スラッジ水を使用したモルタルの基礎物性

### (1) 使用材料

練混ぜ水には、水道水に普通ポルトランドセメントを所定の濃度になるように加えた模擬スラッジ水 (炭酸化なし)、模擬スラッジ水を加速炭酸化装置により炭酸化した不活性化スラッジ水 (加速炭酸化)、模擬スラッジ水をバブリングにより炭酸化させた不活性化スラッジ水 (バブリング) を使用した。スラッジ水の保存日数は 0 日 (0d)、1 日 (1d)、3 日 (3d) とした。なお、模擬スラッジ水は、別途実施した実験において、保存日数 0 日では、炭酸化前が BET 比表面積 : 1.54m<sup>2</sup>/g、密度 : 2.92g/cm<sup>3</sup>、炭酸化

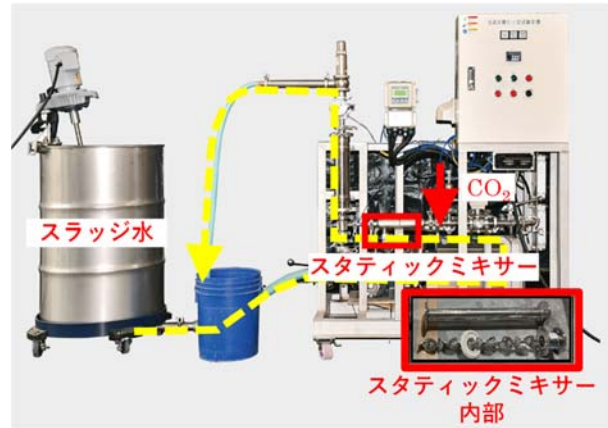


図-1 加速炭酸化装置

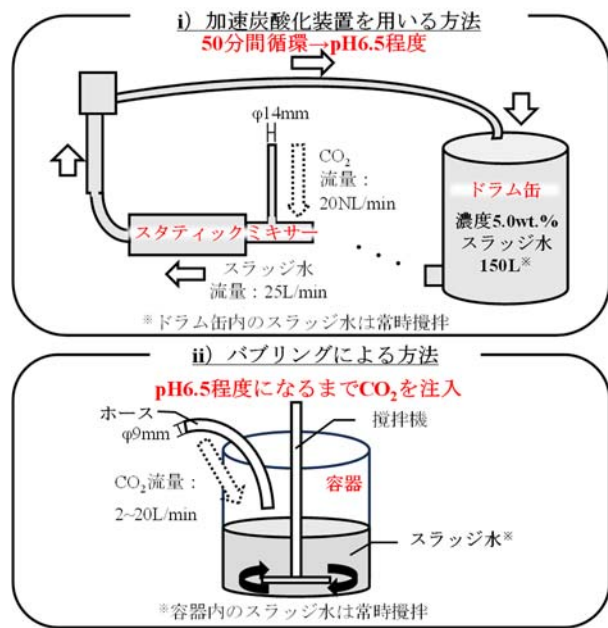


図-2 不活性化スラッジ水の作製手順

表-1 分析用スラッジ水

分類	試料名	炭酸化処理	保存期間
模擬スラッジ水	炭酸化なし 0d	なし	0 日
	炭酸化なし 1d		1 日
不活性化スラッジ水	バブリング 0d	バブリング	0 日
	加速炭酸化 0d	加速炭酸化	0 日
	加速炭酸化 1d		1 日

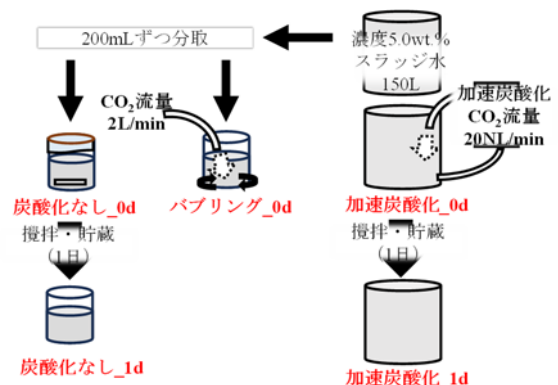


図-3 スラッジ水の分析に用いた試料の作製手順

後が BET 比表面積 : 28.8m<sup>2</sup>/g, 密度 : 2.63g/cm<sup>3</sup>であることを確認している。セメントとして、普通ポルトランドセメント (密度 : 3.15g/cm<sup>3</sup>), 細骨材として山砂 (F.M. : 2.75, 表乾密度 : 2.60g/cm<sup>3</sup>), 混和剤として空気量を調整するために消泡剤を用いた。

### (2) モルタル配合

モルタル配合は、水セメント比を 50%, セメント砂比を 1/2.5 とし、スラッジ固形分を 3wt.%, 6.8wt.%, 10wt.%, 12wt.%, 14wt.% となるようにした。なお、スラッジ水中の固形分はセメントや水の質量に含めず、その体積分は外割とした。また、セメントに対して添加率 0.03% で消泡剤を使用した。

### (3) 測定項目

表-2 に実験要因と検討項目を示す。測定項目は、フローおよび圧縮強度とした。フローは、JIS R 5201 に準じて 15 打フローを測定した。圧縮強度はφ50×100mm の円柱供試体を測定直前まで封緘養生した試験体を用い、材齢 1 週と 4 週に強度を測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 保存期間の経過および CO<sub>2</sub> 供給方法がスラッジ水に及ぼす影響

#### (1) 鉱物組成に及ぼす影響

図-4 にリートベルト解析により測定したスラッジ固形分の鉱物組成量を示す。ここでは、水と接触する前の固形分、すなわちセメント分を 100 とした場合の各構成量を示している。

炭酸化なし\_0d に対し加速炭酸化\_0d, バブリング\_0d を比較した結果、炭酸化処理を施したスラッジ水はいずれの方法の場合においても、C<sub>3</sub>S や C<sub>2</sub>S が大幅に減少し、非晶質 (Amorphous) が増加していることが確認された。一方で、炭酸化処理による C<sub>3</sub>A や C<sub>4</sub>AF への影響は小さかった。C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S と C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF の変化に差が生じた原因として、C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S は水中に Ca が溶出することで注入した CO<sub>2</sub> と反応するが、C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 中の Ca は生成した CaCO<sub>3</sub> に阻害され溶出せず、CO<sub>2</sub> や水と反応しなかった可能性が考えられる。

炭酸化なし\_0d と炭酸化なし\_1d を比較した結果、保存期間の経過により、C<sub>3</sub>S や C<sub>3</sub>A 量が減少し、C<sub>3</sub>S や C<sub>3</sub>A の水和反応によるポルトランドイト (CH) やエトリンガイト (AFt) の生成や Amorphous が増加しており、セメントの水和反応の進行が確認された。

加速炭酸化\_0d と加速炭酸化\_1d を比較した結果、炭酸化処理を施したスラッジ水は、保存期間の経過により C<sub>3</sub>S の若干の減少は認められるものの、その他の鉱物の変化はみられなかった。また、炭酸化なし\_1d で認められた CH も加速炭酸化\_1d では認められなかった。これ

表-2 実験要因と検討項目

試料	実験要因	水準	検討項目
スラッジ固形分 (検討1)	CO <sub>2</sub> 供給方法	なし 加速炭酸化 バブリング	鉱物組成 CO <sub>2</sub> 鉱物固定量 粒度分布 試料の外観観察
	スラッジ水保存期間	0 日, 1 日	
モルタル (検討2)	CO <sub>2</sub> 供給方法	なし 加速炭酸化 バブリング	15 打フロー 圧縮強度
	スラッジ水保存期間	0 日, 1 日, 3 日	
	スラッジ固形分	3wt.%, 6.8wt.%, 10wt.%, 12wt.%, 14wt.%	

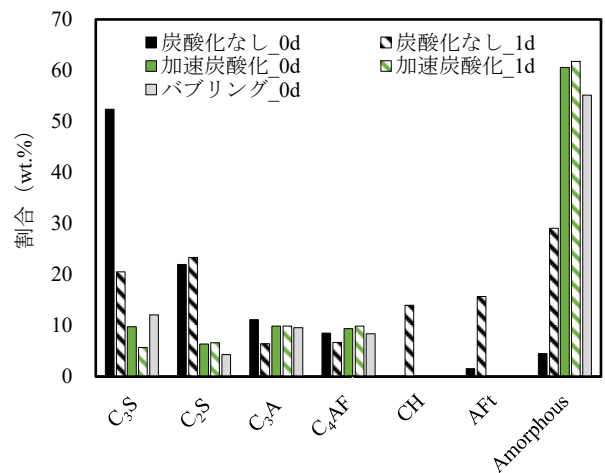


図-4 リートベルト解析により測定したスラッジ固形分の鉱物組成量

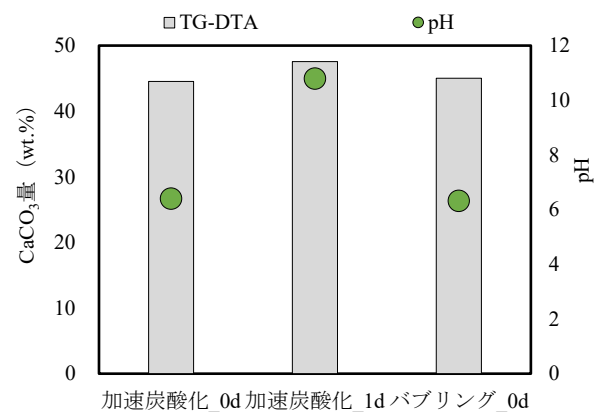


図-5 スラッジ水の pH およびスラッジ固形分の CaCO<sub>3</sub>

らにより、CO<sub>2</sub> の注入による反応後、鉱物組成の経時変化は大幅に抑制されていることが確認された。

加速炭酸化\_0d とバブリング\_0d を比較すると鉱物量はほとんど変わっておらず、CO<sub>2</sub> の供給方法の違いによる固形分の成分への影響は認められなかった。

#### (2) CO<sub>2</sub> 鉱物固定量に及ぼす影響

図-5 に分析用の前処理直前のスラッジ水の pH および TG-DTA によるスラッジ固形分の CaCO<sub>3</sub> 量を示す。こ

ここでは、炭酸化後のスラッジ固形分を 100 とした場合の値を示している。なお、全水準の  $\text{CaCO}_3$  量は炭酸化なし\_0d の  $\text{CaCO}_3$  量を差し引いた値を示しており、炭酸化なし\_0d と炭酸化なし\_1d の  $\text{CaCO}_3$  量は同程度であることから、スラッジ水の貯蔵時に大気中の  $\text{CO}_2$  との反応はほとんどないものと考えた。不活性化スラッジ水作製時の  $\text{CO}_2$  供給方法が異なる加速炭酸化\_0d とバブリング\_0d を比較すると、TG-DTA による  $\text{CaCO}_3$  量はほとんど変わらないことを確認した。一方で、加速炭酸化\_0d とこれを 1 日間攪拌しながら貯蔵した加速炭酸化\_1d を比較すると、加速炭酸化\_1d の方が  $\text{CaCO}_3$  量は若干多いことが分かった。この要因として、スラッジ水の pH は加速炭酸化\_1d の方が高くなっていったことから水に溶解した  $\text{CO}_2$  が保存期間中にスラッジ水中の固形分と反応した可能性が考えられる。 $\text{CO}_2$  の供給方法の違いによっては、保存期間が同じ場合を比較すると、TG-DTA による  $\text{CaCO}_3$  量はほとんど変わらないことを確認した。

### (3) 粒度分布および粒子径に及ぼす影響

図-6 にスラッジ固形分の粒度分布を示す。炭酸化させていないスラッジ固形分は保存期間の経過により、数  $\mu\text{m}$  程度の微細な径のものが減少し、数十  $\mu\text{m}$  の粒形のものが増加した。一方で、加速炭酸化装置により炭酸化させた不活性化スラッジ水は、保存期間の経過に伴う粒度分布に大きな違いは確認できなかった。 $\text{CO}_2$  の供給方法による違いを比較してみると、加速炭酸化装置により炭酸化させたスラッジの方がバブリングにより炭酸化させたスラッジ固形分と比べ、D10, D50, D90 いずれにおいても細かい粒径となった。一般的に、液相中で生成される  $\text{CaCO}_3$  の形状を変化させる要因は、溶媒、温度、過飽和度、添加物による媒晶作用等であると考えられている<sup>11)</sup>。蘇ら<sup>12)</sup>は、水酸化カルシウム水溶液に  $\text{CO}_2$  を吹き込んで  $\text{CaCO}_3$  を生成させた際、 $\text{CO}_2$  吹き込み流量により、生成する  $\text{CaCO}_3$  の粒子径が変化し、流量が小さいほど粒子が大きくなることを示唆している。本研究において、加速炭酸化により炭酸化（約 150L のスラッジ水を流量 20NL/min の  $\text{CO}_2$  で 50 分かけて炭酸化）させた方が、バブリングにより炭酸化（200mL のスラッジ水を流量 2L/min の  $\text{CO}_2$  で 20 分かけて炭酸化）させた場合より、スラッジ水量に対する  $\text{CO}_2$  吹き込み量が小さいため、加速炭酸化の方が大きい粒径の  $\text{CaCO}_3$  が生成するものと予測された。しかし、実際の粒度分布の結果では、バブリングにより炭酸化させたスラッジ固形分と比べ、加速炭酸化装置により炭酸化させたスラッジ固形分の方が小さくなっており、細かい粒径の  $\text{CaCO}_3$  が生成したと考えられる。この要因として、加速炭酸化装置により吹き込んだ  $\text{CO}_2$  はマイクロバブルサイズ（1~100 $\mu\text{m}$  程度）であるのに対して、バブリングの場合、内径 9mm のホ

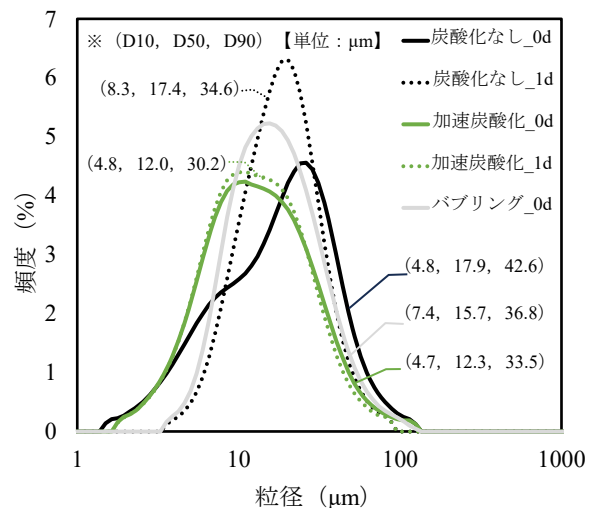


図-6 スラッジ固形分の粒度分布

ースにより  $\text{CO}_2$  を吹き込んだことにより、スラッジ水に吹き込まれた  $\text{CO}_2$  の気泡径が異なり、これにより生成した  $\text{CaCO}_3$  の粒子径が変化したものと推察される。あるいは、加速炭酸化装置により吹き込まれる  $\text{CO}_2$  はマイクロバブル状になると考えられるが、一部マイクロバブル化される前に炭酸化され生成した  $\text{CaCO}_3$  がスタティックミキサーを通過することで解砕されたことにより微細なものになった可能性も考えられる。

図-7 に SEM により観察したスラッジ固形分の様子を示す。炭酸化なし\_0d と炭酸化なし\_1d (図-7 (a), (b)) を比較すると、固形分の様子が異なっており、保存期間中におけるスラッジ水の水和反応の進行による影響が観察される。炭酸化なし\_0d と炭酸化なし\_1d (図-7 (e), (f)) を比較すると、材齢 1d では、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  や C-S-H, AFt などの水和物と考えられる六角形の板状結晶や針状結晶が生成すると共に、粒子径が大きくなっていることが確認された。一方で、加速炭酸化\_0d と加速炭酸化\_1d (図-7 (c), (d)) を比較すると、保存期間の経過に伴う粒子の変化はほとんど認められなかった。また、 $\text{CO}_2$  の供給方法が異なる加速炭酸化\_0d とバブリング\_0d (図-7 (c), (g)) を比較すると、粒度分布での結果同様、加速炭酸化装置を用いた場合に比べ、バブリングによる炭酸化の方が、粒径の大きい粒子が確認された。そして、別途測定した EDS の結果より、炭酸化させた試料において観察画面全体に広く存在する粒子は  $\text{CaCO}_3$  と推定された。さらに、この生成した  $\text{CaCO}_3$  を拡大して観察 (図-7 (h)) すると、 $\text{CaCO}_3$  の細かな粒子が凝集していた。これらは  $\text{C}_3\text{S}$  や  $\text{C}_2\text{S}$  などから溶出した Ca が炭酸化により  $\text{CaCO}_3$  として生成したものと推測される。なお、これらの炭酸化により生成した  $\text{CaCO}_3$  は、粒径は異なるもの  $\text{CO}_2$  の供給方法や保存期間によらず、同様の形態での存在が確認された。

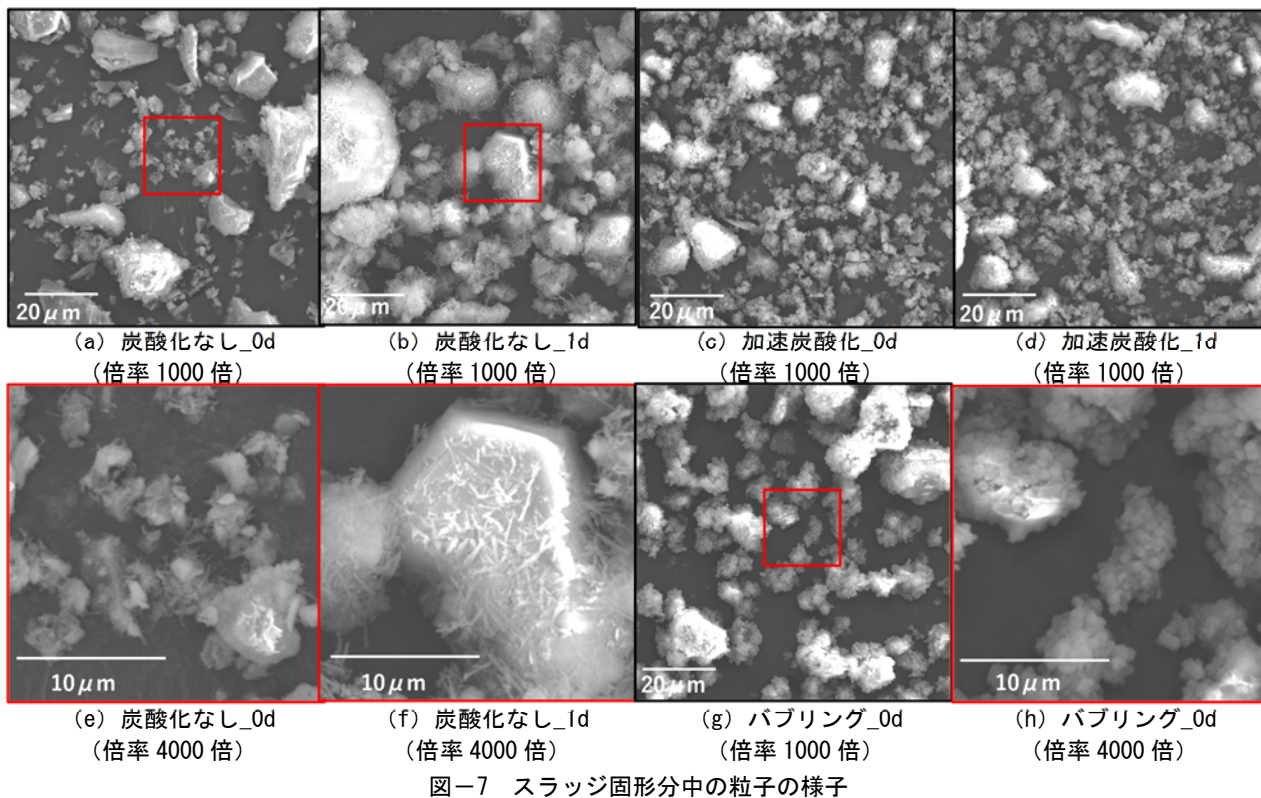


図-7 スラッジ固形分中の粒子の様子

### 3.2 保存期間の経過が練混ぜ水としてスラッジ水を用いたモルタルに及ぼす影響

前述の結果より、炭酸化処理していないスラッジ固分は保存期間の経過に伴い、鉱物組成およびその量、粒度分布が変化するが、炭酸化処理して不活性化させたスラッジ固形分は、炭酸化直後の鉱物組成、粒度に大きな変化が生じるものの、保存期間の経過に伴う鉱物組成量、粒度分布の変化は小さくなった。そこで、保存期間が異なるスラッジ水を用いてモルタルを混練し、スラッジ固形分の不活性化がモルタルのフローおよび圧縮強度に及ぼす影響を検討した。なお、不活性化スラッジ水はパブリングにより炭酸化処理したものをを用い、一部加速炭酸化装置により不活性化させたスラッジ水も使用した。

#### (1) モルタルのフローに及ぼす影響

図-8 にスラッジ水の保存期間 0 日のフロー値を基準として 0 日から 1 日 (0d→1d) および 0 日から 3 日 (0d→3d) に変化させた際のフローの変化率とスラッジ固形分率の関係を示す。同一スラッジ固形分率で比較した場合、炭酸化処理を施していないスラッジ水に比べ、炭酸化処理を施した不活性化スラッジ水は、フローの低下が概ね小さくなった。この要因として、炭酸化処理することで、スラッジ水中のスラッジ固形分の未反応セメントが減少し、保存期間の経過に伴う水和反応の進行が小さくなり、スラッジ固形分の成分および粒度分布の変化がほとんど生じなくなったことによるものと推察される。なお、一例として、0d のスラッジ固形分率 3.0wt.%、

10wt.%、12wt.% の場合を比較すると、いずれのスラッジ固形分率においても炭酸化によりフローは低下する傾向であった。また、その程度は異なるものの炭酸化の有無関わらず、スラッジ固形分率増加に伴い、フローは低下することを確認した。この要因として炭酸化によるスラッジ固形分の比表面積の変化が影響しているものと推察される。

#### (2) モルタルの圧縮強度に及ぼす影響

図-9 にスラッジ水の保存期間 0 日の圧縮強度の値を基準として 0 日から 1 日 (0d→1d) および 0 日から 3 日 (0d→3d) に変化させた際の圧縮強度の変化率とスラッジ固形分率の関係を示す。同一スラッジ固形分率で比較した場合、炭酸化処理を施していないスラッジ水に比べ、炭酸化処理を施した不活性化スラッジ水は、保存期間の経過に伴う圧縮強度の低下が概ね小さくなった。この要因として、炭酸化処理を施すことで、スラッジ水中のスラッジ固形分の未反応セメントが減少し、保存期間の経過に伴う水和反応の進行が小さくなり、鉱物組成量の変化が小さくなった不活性化によるものと考えられる。なお、一例として、0d のスラッジ固形分率 3.0wt.%、10wt.%、12wt.% の場合を比較すると、炭酸化の有無による圧縮強度に及ぼす影響は小さい傾向を確認した。

## 4. まとめ

レディーミクストコンクリート工場が発生するスラッジ水を想定した模擬スラッジ水に CO<sub>2</sub> を注入して炭酸化

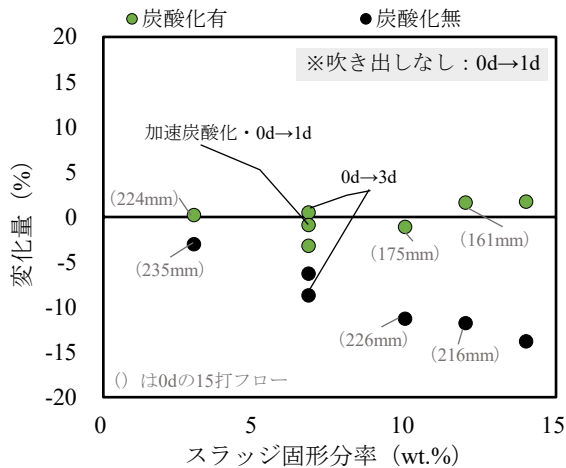


図-8 保存期間を変化させたスラッジ水のフローの変化率とスラッジ固形分率の関係

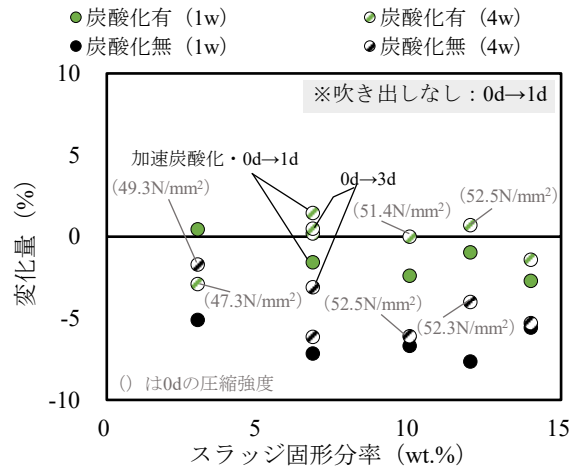


図-9 貯蔵保存期間を変化させたスラッジ水の圧縮強度の変化率とスラッジ固形分率の関係

させた不活性化スラッジ水およびこれを用いたモルタルに関する検討を行った。以下に本研究の範囲内において得られた知見を示す。

- (1) 炭酸化処理を施していないスラッジ水は未反応セメントの水和反応に伴う、鉱物組成の変化が生じる一方、CO<sub>2</sub>の注入によりスラッジ水を炭酸化させた不活性化スラッジ水では、CO<sub>2</sub>の注入により鉱物組成の変化が生じるが、その後の保存期間中の変化は非常に小さかった。
- (2) スラッジ水へのCO<sub>2</sub>の供給方法により、生成したCaCO<sub>3</sub>量および形態は同様であるが、その粒度分布は異なっていた。
- (3) 不活性化スラッジ水を用いたモルタルは、スラッジ水の保存期間の経過に伴うフローおよび圧縮強度の変化率が、炭酸化処理を施していないスラッジ水に対して小さくなることを確認した。

#### 謝辞

この成果は、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) の委託事業 (JPNP21023) の結果から得られたものです。

#### 参考文献

- 1) 神谷寛一, 東本守, 矢田誠, 那須弘行: コンクリート廃材の炭酸化反応によるカルシウム源のリサイクルと二酸化炭素の固定, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol.106, pp.719-723, 1998
- 2) 西岡由紀子, 池尾陽作, 奈良知幸, 小島正朗: 湿式・乾式手法によるセメント硬化体微粉と再生微粉の炭酸化処理とCO<sub>2</sub>固定量の評価手法に関する検討, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.76, pp.503-511, 2022

- 3) セメント新聞社: 月刊コンクリートテクノ, Vol.39, No.5, pp.10-11, 14-15, 2020
- 4) 笠井芳夫, 齊藤鶴義: スラッジ混入コンクリート, *コンクリート工学*, Vol.13, No.9, pp.31-42, 1975
- 5) 福島和将, 清水哲史, 大川裕, 岡沢智: スラッジの有効利用に関する実験的研究, *エヌエムビー中央研究所研究所報*, No.13, pp.26-34, 2000
- 6) 本田和也, 上河内貴, 小西正芳: スラッジの炭酸化によるセメント鉱物と水和生成への影響, *月刊コンクリートテクノ*, Vol.43, No.1, pp.50-52, 2023
- 7) 黒岩笑海歌, 瀧川瑞季, 本田和也, 小西正芳: スラッジ水のマイクロバブルを用いたCO<sub>2</sub>鉱物固定に関する基礎的研究, 第78回セメント技術大会講演要旨, pp.22-23, 2024
- 8) 早川隆之, 黒川大亮, 田場祐道, 野口貴文: 異なる条件下で炭酸化したセメントスラリー固形物の形態および固形物を混合したセメント組成物の流動性に関する考察, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.77, pp.483-491, 2023
- 9) 阿武稔也ほか: セメントスラリーを利用したコンクリートへのCO<sub>2</sub>固定化技術に関する基礎的検討, *日本建築学会構造系論文*, Vol.88, pp.38-46, 2023
- 10) 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*, Vol.20, pp.15-22, 2009
- 11) 荒井康夫, 安江任: 炭酸カルシウムの形態制御, *石膏と石灰*, Vol.228, pp.291-302, 1990
- 12) 蘇台燮, 崔禹植: 合成沈降性炭酸カルシウムの粒度分布および粒子形状におよぼす実験操作因子の影響—水酸化カルシウム初期濃度の影響, *粉体工学会誌*, Vol.37, pp.649-657, 2000