

# CO<sub>2</sub>を固定したスラッジ水を練混ぜ水として用いたセメントペーストの各種物性に関する基礎的検討

新 杉 匡 史 桜 井 邦 昭

## Fundamental Study on Various Physical Properties of Cement Paste Using CO<sub>2</sub>-Fixed Sludge Water as Mixing Water

Masashi Shinsugi Kuniaki Sakurai

### Abstract

This study investigates the effects of the manufacturing conditions of sludge water on the CO<sub>2</sub> fixation rate and the properties of cement paste using sludge-water-fixed CO<sub>2</sub> as the mixing water. As a result, it was found that, within the sludge concentration range of 3~15%, the CO<sub>2</sub> fixation rate was approximately 60%. The compressive strength of the cement paste using sludge water fixed CO<sub>2</sub> was equal to or greater than that of the cement paste using tap water with the same water-powder ratio. By using sludge-water-fixed CO<sub>2</sub> as the mixing water, it was estimated that CO<sub>2</sub> emissions could be reduced by approximately 42 kg/m<sup>3</sup>, while maintaining the same compressive strength as conventional concrete.

### 概 要

スラッジ水の製造条件がそのCO<sub>2</sub>固定率に及ぼす影響や、CO<sub>2</sub>を固定したスラッジ水を練混ぜ水として用いたセメントペーストの各種物性を基礎的に検討した。その結果、スラッジ水の濃度が3~15%の範囲では、スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率は60%程度であること、スラッジ水が作製されてからCO<sub>2</sub>を注入するまでの時間間隔を3時間以上とすると、スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率は増加することが明らかになった。また、CO<sub>2</sub>を固定したスラッジ水を練混ぜ水としたセメントペーストの圧縮強度は、水粉体比の等しい上水道水を用いたセメントペーストと同等ないしはそれ以上となり、炭酸化したスラッジ粒子が強度増加に寄与していると推察した。さらに、CO<sub>2</sub>を固定したスラッジ水を練混ぜ水として用いることで、汎用的なコンクリートと同等の圧縮強度を確保しつつCO<sub>2</sub>排出量を約42kg/m<sup>3</sup>削減できると試算した。

### 1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルの実現<sup>1)</sup>に向け、コンクリート分野においてもCO<sub>2</sub>排出量の削減に資する様々な技術開発が進められている。具体的な対応策のひとつとして、環境負荷の小さい材料を用いる手法があり、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を混和材として大量に使用し、単位セメント量を削減する技術などがある<sup>2)</sup>。また、セメントの炭酸化反応に着目し、製造後のコンクリート部材に炭酸化養生を施すことで、コンクリート中にCO<sub>2</sub>を固定化する研究も行われている<sup>3)</sup>。しかし、前者は産業副産物の貯蔵・計量、後者は炭酸化養生のための設備が必要となる課題もある。

したがって、レディーミクストコンクリート工場や現場プラントで製造する一般的なコンクリートを対象として、大がかりな設備を追加することなく、CO<sub>2</sub>排出量を削減する手法を確立することが重要である。そこで、著者らは、あらかじめ粉体の水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)を添加した溶液にCO<sub>2</sub>を注入し、炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)を生成してCO<sub>2</sub>を固定した溶液を練混ぜ水として用いる方法を検討した。既報にて、上記練混ぜ水を用いたセメント

ペーストは、CO<sub>2</sub>固定量が大きくなること、硬化組織が緻密化して空隙率が小さくなることにより、圧縮強度が大きくなることを報告した<sup>4)</sup>。さらに、上記練混ぜ水を用いたコンクリートの各種強度特性および耐久性は、通常のコンクリートと比較して同等ないしはそれ以上であることを報告した<sup>5), 6)</sup>。

一方、コンクリート製造時のトラックアジャデータのドラムや、練混ぜミキサに付着したモルタルおよび残コンクリートや戻りコンクリートから回収されるスラッジ水の大半は、脱水処理を施した後、産業廃棄物として処分される現状にある。循環型社会の形成のためには、スラッジ水を再利用することも重要である。スラッジ水の活用に関する研究には、凝結遲延成分をスラッジ水に混和して水和反応を抑制し、その固形分を結合材として利用する研究<sup>7)</sup>、スラッジ水を機械脱水した脱水ケーキを粉碎し、CO<sub>2</sub>を固定させた粉体をコンクリート用混和材として使用する研究<sup>8)</sup>等がある。しかし、CO<sub>2</sub>を固定したスラッジ水を練混ぜ水として利用する検討は少ない。

本研究では、Fig. 1に示すように、水にセメントを添加することで模擬的に作製したスラッジ水（以下、模擬スラッジ水と呼ぶ）にCO<sub>2</sub>を注入することで主にCaCO<sub>3</sub>と

してCO<sub>2</sub>を固定した(以下、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水と呼ぶ)。その時の模擬スラッジ水の濃度(以下、スラッジ濃度と呼ぶ)や、作製直後から攪拌し続けた模擬スラッジ水にCO<sub>2</sub>を注入するまでの時間間隔(以下、プレ水和時間と呼ぶ)がCO<sub>2</sub>固定率に及ぼす影響を調べた。また、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いたセメントペーストの各種物性を基礎的に検討した。

## 2. 模擬スラッジ水へのCO<sub>2</sub>注入試験

### 2.1 試験ケースと使用材料

模擬スラッジ水へのCO<sub>2</sub>注入試験についての試験ケースをTable 1に示す。レディーミクストコンクリート工場等から回収されるスラッジ水は、スラッジ濃度や水和反応の進行度によって水和生成物の種類や生成量にばらつきが生じると考えられる。既往の研究では、実際のレディーミクストコンクリート工場へ戻ってきたトラックアジテータのドラム内に付着したモルタルおよび残コンクリートの洗浄水を回収して、スラッジ濃度(C/(C+W))15～20%となったスラッジ水を濃度調整することで、コンクリートに使用した検討を行っている<sup>7)</sup>。そこで、本研究では効率良くCO<sub>2</sub>を固定できるスラッジ水の製造条件を検討することにした。検討要因は、スラッジ濃度(C/W=3, 5, 8, 10, 15, および20%)とプレ水和時間(0, 3, 16, 48および72h)とした。スラッジ濃度の検討では、プレ水和時間0h、プレ水和時間の検討ではスラッジ濃度5%で実施した。また、比較としてCa(OH)<sub>2</sub>溶液(濃度3%, プレ水和時間0h)のCO<sub>2</sub>注入試験も実施した。使用材料をTable 2に示す。本研究で用いたセメントのCaO含有率は64.14%であった(JIS R 5204により測定)。

### 2.2 試験方法

模擬スラッジ水は上水道水10LにTable 1に示す所定のスラッジ濃度になるようセメントを添加して作製した。プレ水和時間の検討では、所定のプレ水和時間まで500rpmで攪拌した。CO<sub>2</sub>注入試験の模式図をFig. 2に示す。CO<sub>2</sub>ガスは流量10L/min、ノズル径1.2mmで注入し、CO<sub>2</sub>注入時は常時500rpmで攪拌した。CO<sub>2</sub>固定量はCO<sub>2</sub>注入による模擬スラッジ水の質量増加量から求め、模擬スラッジ水の質量増加が収束した時点をCO<sub>2</sub>注入完了とした。

CO<sub>2</sub>注入試験における試験項目は、模擬スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率、pHおよび温度とした。CO<sub>2</sub>固定率は溶液に含まれる粉体(スラッジ固形分、Ca(OH)<sub>2</sub>)中のCaOが完全に炭酸化した場合を100%として式(1)により求めた。

$$a_{CO_2} = \frac{W_{CO_2}}{W_p \times CaO \times M_{CO_2} / M_{CaO}} \times 100 \quad (1)$$

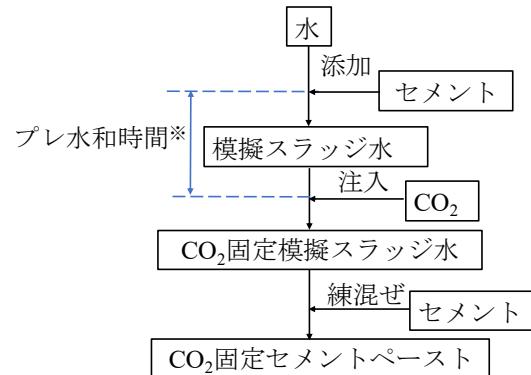
ここに、

$a_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub>固定率(%)

$W_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub>固定量(CO<sub>2</sub>注入による質量増加量)(g)

$W_p$  : 溶液中の粉体(セメント、Ca(OH)<sub>2</sub>)量(g)

CaO : 粉体中のCaO含有率(セメント；64.14%)



※プレ水和時間とは、模擬スラッジ水を作製してからCO<sub>2</sub>を注入するまでの時間間隔を示す

Fig. 1 CO<sub>2</sub>を固定したセメントペーストの製造フロー  
Manufacturing Flow of Cement Paste Fixed CO<sub>2</sub>

Table 1 模擬スラッジ水へのCO<sub>2</sub>注入試験の試験ケース  
Test Case of CO<sub>2</sub> Injection Test into Simulated Sludge Water

検討要因	試験ケース
スラッジ濃度	スラッジ濃度：3, 5, 8, 10, 15, 20%
プレ水和時間	プレ水和時間：0h
プレ水和時間	プレ水和時間：0, 3, 16, 48, 72h
	スラッジ濃度：5%

Table 2 模擬スラッジ水へのCO<sub>2</sub>注入試験の使用材料  
Materials Used in CO<sub>2</sub> Injection Test into Simulated Sludge Water

種類	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント CaO含有率：64.14%
水酸化カルシウム	Ca(OH) <sub>2</sub>	消石灰 CaO含有率：74.43%
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	濃度100%CO <sub>2</sub> ガス

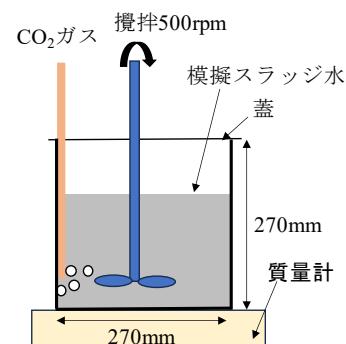


Fig. 2 CO<sub>2</sub>注入試験の模式図  
Schematic Diagram of CO<sub>2</sub> Injection Test

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  : 74.43%)

$M_{\text{CO}_2}$  : CO<sub>2</sub>の分子量(44g/mol)

$M_{\text{CaO}}$  : CaO の分子量(56g/mol)

また、模擬スラッジ水へCO<sub>2</sub>を注入したCO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中の固形分の相組成の変化も調べた。CO<sub>2</sub>の注入が完了した模擬スラッジ水(スラッジ濃度5%)を吸引ろ過により固液分離し、固形分をアセトンに30分間浸漬することで水和を停止させた。その後、吸引ろ過によりアセトンを除去し、減圧下で1日乾燥させた。乾燥後の試料を粉碎し、X線回折(XRD)により相組成を測定した。比較として、模擬スラッジ水(スラッジ濃度5%)がCO<sub>2</sub>を注入完了するのに要する時間と同じ時間だけ水和させた場合、およびCa(OH)<sub>2</sub>溶液(濃度3%)にCO<sub>2</sub>を注入させた場合の固形分も同様に測定した。

## 2.3 試験結果および考察

**2.3.1 スラッジ濃度による影響** 濃度を種々に変化させた模擬スラッジ水へCO<sub>2</sub>を注入した時の注入時間とCO<sub>2</sub>固定率の関係をFig. 3に示す。また、縦軸をCO<sub>2</sub>固定量で表した場合をFig. 4に示す。図中には、Ca(OH)<sub>2</sub>溶液(濃度3%)へのCO<sub>2</sub>注入試験の結果も併記した。なお、これら模擬スラッジ水のプレ水和時間は0hである。

Ca(OH)<sub>2</sub>溶液は、CO<sub>2</sub>の注入によりCO<sub>2</sub>固定率がほぼ100%となった。模擬スラッジ水の場合は、スラッジ濃度3~15%の範囲であれば、スラッジ濃度によらず、CO<sub>2</sub>固定率は60~65%程度で収束した。模擬スラッジ水には、未水和セメントと水和生成物であるCa(OH)<sub>2</sub>とC-S-Hが含まれている。既往の研究において、C-S-HはCa(OH)<sub>2</sub>に比べ炭酸化速度が遅いことや、炭酸化が進行しpHがほぼ平衡状態に至るまで低下してもその一部が残存することが指摘されている<sup>9)</sup>。本研究でも同様の理由により模擬スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率が小さくなないと推測されるが、未反応セメントの炭酸化速度の影響や水中における炭酸化条件の影響など今後詳細な検討が必要である。

Fig. 3にて、スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率が収束する傾向を示したことから、Fig. 4のCO<sub>2</sub>固定量との関係においても、同様に収束することが確認された。

また、Fig. 4より、Ca(OH)<sub>2</sub>溶液におけるCO<sub>2</sub>注入時間とCO<sub>2</sub>固定量の関係の傾きは、スラッジ濃度3~15%の模擬スラッジ水の場合と同等である。このため、これらのCO<sub>2</sub>固定速度はほぼ同等であると推測される。一方、スラッジ濃度20%ではCO<sub>2</sub>注入時間とCO<sub>2</sub>固定量の関係の傾きが小さくなってしまい、CO<sub>2</sub>固定率も46%と小さく、スラッジ濃度15%の場合よりCO<sub>2</sub>固定量が小さくなっている。本研究では、CO<sub>2</sub>注入と同時に攪拌を行うことで、スラッジ粒子を分散させCO<sub>2</sub>と効率良く反応できるような条件で試験しているが、スラッジ濃度が20%と大きくなると、水和の進行に伴いCO<sub>2</sub>と反応する前にスラッジ粒子の分散性が小さくなり、凝集体を形成したと考えられる。これに伴い、スラッジ粒子とCO<sub>2</sub>との接触面積が減少し、CO<sub>2</sub>固定効率が低下したと推測される。もうひとつの

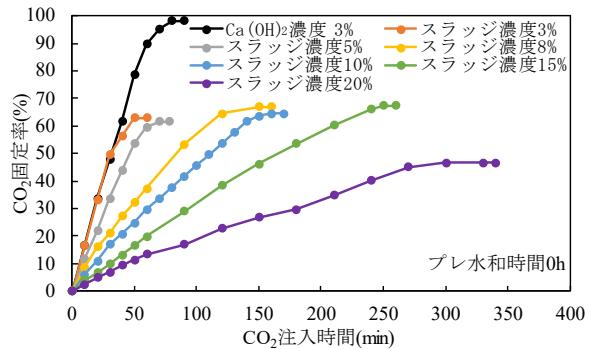


Fig. 3 スラッジ濃度の違いによるCO<sub>2</sub>注入時間とCO<sub>2</sub>固定率の関係

Relationship between CO<sub>2</sub> Injection Time and CO<sub>2</sub> Fixation Rate Depending on Sludge Water Concentration

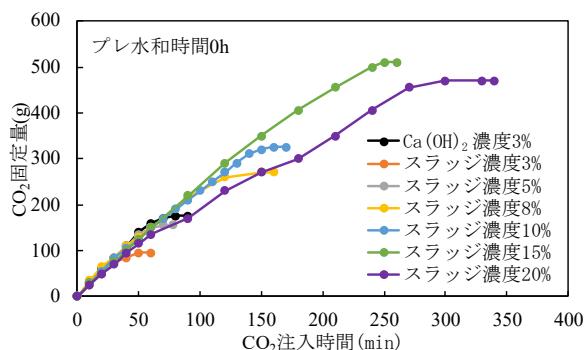


Fig. 4 スラッジ濃度の違いによるCO<sub>2</sub>注入時間とCO<sub>2</sub>固定量の関係

Relationship between CO<sub>2</sub> Injection Time and Fixed Amount of CO<sub>2</sub> Depending on Sludge Water Concentration

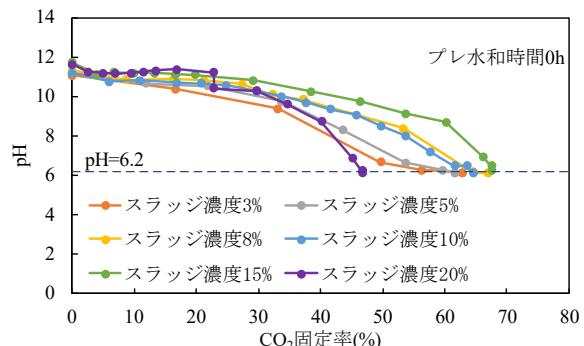


Fig. 5 スラッジ濃度の違いによるCO<sub>2</sub>固定率とpHの関係  
Relationship between CO<sub>2</sub> Fixation Rate and pH  
Depending on Sludge Water Concentration

要因として、本研究における攪拌方法では、スラッジ粒子の分散性を十分に確保できなかった可能性が考えられる。今後は、スラッジ水にCO<sub>2</sub>を効率良く固定するためのCO<sub>2</sub>注入方法や攪拌方法の検討が必要である。

CO<sub>2</sub>注入に伴う模擬スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定率とpHの関係をFig. 5に示す。スラッジ濃度3~15%の範囲では、CO<sub>2</sub>固定率60~65%程度、スラッジ濃度20%程度ではCO<sub>2</sub>固定

率46%でpHが6.2程度まで低下していた。いずれもCO<sub>2</sub>固定率が収束する付近において模擬スラッジ水が炭酸化されていることを示す結果と考えられる。液相中のCO<sub>2</sub>はpHによって、炭酸種の存在比率が異なることが報告されている<sup>10)</sup>。高pHの領域においては炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)や重炭酸イオン(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)に電離する一方で、pH6.2程度の中性化領域においては、溶存CO<sub>2</sub>の存在比率が増加する。炭酸イオン等は、スラッジ由来のCaイオンと反応し、CaCO<sub>3</sub>が生成することでCO<sub>2</sub>が固定化される。しかし、溶存CO<sub>2</sub>はCaイオンとの直接的な反応性が乏しいため、中性化領域ではCO<sub>2</sub>固定率の増加に寄与しなかったと推察される。

CO<sub>2</sub>注入に伴う模擬スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定量と温度上昇量の関係をFig. 6に示す。CO<sub>2</sub>固定量が大きくなるにつれて、模擬スラッジ水の温度上昇量は大きくなつた。これは炭酸化に伴う発熱反応によるものと考えられる。なお、CO<sub>2</sub>の注入が完了した付近における温度低下は、炭酸化に伴う発熱反応が収束し、模擬スラッジ水が室温に近づいたためと考えられる。

以上より、スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定量が収束する時点ではpHが6.2程度まで低下すること、CO<sub>2</sub>固定量は模擬スラッジ水の温度上昇量と相関があることが示された。このため、実施工において、スラッジ水へCO<sub>2</sub>を注入する際には、pHや温度上昇量を炭酸化の管理指標として利用できると考えられる。

### 2.3.2 プレ水和時間による影響

スラッジ濃度5%の模擬スラッジ水にCO<sub>2</sub>を注入した際におけるプレ水和時間とCO<sub>2</sub>固定率の関係をFig. 7に示す。プレ水和時間を3hないしはそれ以上とした場合、CO<sub>2</sub>固定率は70%程度となり、プレ水和時間0hの場合(約60%)に比べて増加した。水和が進行することで炭酸化されやすいCa(OH)<sub>2</sub>が多量に生成されたためと推測される。本研究の範囲においては、プレ水和時間72hとした場合でも、プレ水和時間3hの場合と同様のCO<sub>2</sub>固定率が得られた。実施工では、スラッジ水を回収してからCO<sub>2</sub>を注入するまでにある程度の時間が必要と想定されるが、本研究の結果を踏まえると、スラッジ水を攪拌し続ければ、少なくとも3~72h後においても、CO<sub>2</sub>固定能力が維持されると考えられる。

### 2.3.3 CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水の固形分の相組成

CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中の固形分のXRDパターンの測定結果をFig. 8に示す。比較として、CO<sub>2</sub>を注入していない模擬スラッジ水と、CO<sub>2</sub>を注入したCa(OH)<sub>2</sub>溶液(Ca(OH)<sub>2</sub>溶液+CO<sub>2</sub>)の固形分の結果も併記した。

CO<sub>2</sub>を注入したCa(OH)<sub>2</sub>溶液の固形分は、カルサイト(Calcite)のピークのみが確認された。Ca(OH)<sub>2</sub>は水中でCO<sub>2</sub>と反応して全てCaCO<sub>3</sub>になったためと考えられる。それに対して、模擬スラッジ水の固形分ではC<sub>3</sub>SやCa(OH)<sub>2</sub>のピーク、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水の固形分ではカルサイトだけでなくC<sub>3</sub>Sの小さなピークが認められた。模擬スラッジ水ではCa(OH)<sub>2</sub>が優先的に炭酸化される一方、未水和セメントであるC<sub>3</sub>Sの炭酸化速度は遅く、残存したと推察される。

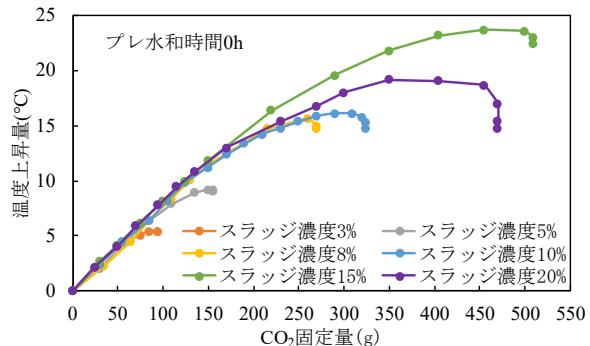


Fig. 6 スラッジ濃度の違いによるCO<sub>2</sub>固定量と温度上昇量の関係

Relationship between Fixed Amount of CO<sub>2</sub> and Temperature Increase Depending on Sludge Water Concentration

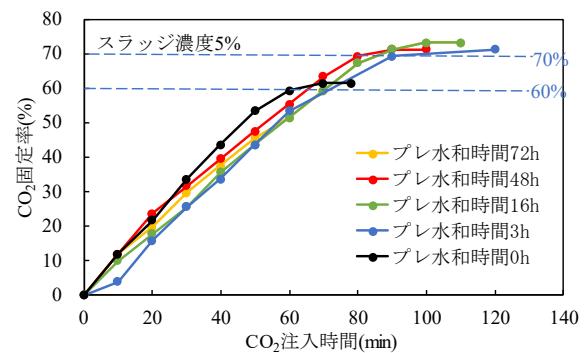


Fig. 7 プレ水和時間の違いによるCO<sub>2</sub>注入時間とCO<sub>2</sub>固定率の関係

Relationship between CO<sub>2</sub> Injection Time and Fixed Amount of CO<sub>2</sub> Depending on Pre-hydration Time

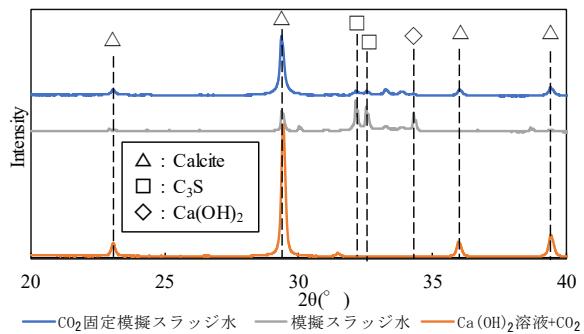


Fig. 8 CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水の固形分のXRDパターン  
XRD Patterns of Solids in Sludge Water Fixed CO<sub>2</sub>

## 3. CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いた検討

### 3.1 セメントベーストの配合

セメントベーストの配合をTable 3に示す。本研究では、上水道水、CO<sub>2</sub>を注入したCa(OH)<sub>2</sub>溶液、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水(スラッジ濃度5, 10%)を練混ぜ水として用いた。

Table 3 セメントペーストの配合とフレッシュ試験結果  
Mix Proportions of Cement Paste and Fresh Test Results

No.	練混ぜ水の種類	Wmix*/C (%)	W/P** (%)	AE剤 (C×%)	セメントペースト質量比			フレッシュ試験結果	
					Wmix			C	フロー(mm)
					W	CaCO <sub>3</sub>	CSP		
1	上水道水	40.0	40.0	—	40.0	—	—	100	170
2		45.0	45.0		45.0				212
3		50.0	50.0		50.0				234
4		55.0	55.0		55.0				275
5	Ca(OH) <sub>2</sub> 溶液+CO <sub>2</sub> (Ca(OH) <sub>2</sub> 濃度3%)	45.0	42.9	—	43.5	1.4	—	100	159
6		50.0	47.6		48.5	1.6			192
7		55.0	52.3		53.3	1.8			223
8	CO <sub>2</sub> 固定模擬	45.0	41.1	—	42.2	—	2.8	100	164
9		50.0	45.5		46.9		3.1		220
10		(スラッジ濃度5%)	55.0		51.6		3.4		249
11	CO <sub>2</sub> 固定模擬	45.0	37.7	0.002	39.7	—	5.3	100	145
12		50.0	41.7		44.2		5.8		170
13	(スラッジ濃度10%)	55.0	45.6	—	48.6	—	6.4	100	187

\*Wmix(CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水)=W+ CaCO<sub>3</sub>+ CSP(炭酸化したスラッジ粒子)    \*\*P(粉体)=C+ CaCO<sub>3</sub>+ CSP

なお、模擬スラッジ水のプレ水和時間は0hとし、CO<sub>2</sub>の注入は質量増加が収束するまで行った。セメントペーストの配合はWmix/C=40～55%とした。ここで、WmixとはCO<sub>2</sub>を固定した練混ぜ水(以下、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水と呼ぶ)の質量であり、CO<sub>2</sub>を注入したCa(OH)<sub>2</sub>溶液の場合はCaCO<sub>3</sub>粒子、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水の場合は炭酸化したスラッジ粒子(以下、CSPと呼ぶ)をそれぞれ含んだ質量である。そのため、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水は同じWmix/Cの上水道水の場合とは純粋な水の量が相違することになる。そこで、粉体(P)をセメント(C)とCaCO<sub>3</sub>とCSPの合量とし、水粉体比(W/P)で整理した値もTable 3に表記した。CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中のCSP量は前章で得られたCO<sub>2</sub>固定率を考慮して算出した。

### 3.2 セメントペーストの作製方法

CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を作製してから1日後にセメントペーストを作製した。練混ぜ方法はJIS R 5201に準拠して行った。ホバートミキサを用いて低速で60秒間練り混ぜた後、高速で30秒間練り混ぜた。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水は十分に攪拌しながら投入した。1バッチの練混ぜ量は3Lとした。練混ぜは20°Cの試験室内で行った。試験ケースNo.11, No.12は、事前の検討で空気量0.2%以下と小さくなつたため、AE剤をセメントに対して0.002%添加することで、ほかの試験ケースと同等の空気量に調整した。

### 3.3 試験項目

試験項目は、フレッシュ性状(フロー、空気量)、CO<sub>2</sub>

Table 4 セメントペーストのCO<sub>2</sub>固定量

Fixed Amount of CO<sub>2</sub> in Cement Paste

No.	練混ぜ水の種類	CO <sub>2</sub> 固定量の測定値(%)	練混ぜ水由来のCO <sub>2</sub> 固定量の増加量(%)	
			測定値	計算値
3	上水道水	2.320	—	—
9	CO <sub>2</sub> 固定模擬 スラッジ水(5%)	2.997	0.677	0.706

固定量、圧縮強度とした。フローはJIS R 5201に準拠して行い、空気量の測定には、モルタルエアーメータを用いた。CO<sub>2</sub>固定量は、固体試料燃焼装置を備えた全有機炭素計(島津製作所社製、SSM-5000A、TOC-LCPH)を用いて測定した。材齢7日の供試体をアセトンに1時間浸漬することで水和を停止させて、その後減圧下で乾燥した。乾燥後の供試体は、既報<sup>11</sup>に準拠して前処理を行い、CO<sub>2</sub>固定量の測定に供した。別途、強熱減量(Ig.loss)を求め、CO<sub>2</sub>固定量を無水物換算での定量値になるよう補正した。圧縮強度は、材齢7日および28日にJIS A 1108に準拠して試験した。供試体寸法はΦ50×100mmとし、供試体採取の翌日に脱型し、所定の材齢まで20°C水中養生を行った。

### 3.4 試験結果および考察

3.4.1 フレッシュ性状 セメントペーストのフローと空気量の測定結果をTable 3の右欄に示す。練混ぜ水の種類によらず、W/Pが大きくなるにつれてフローが大きくなる傾向となった。空気量はいずれの試験ケースにお

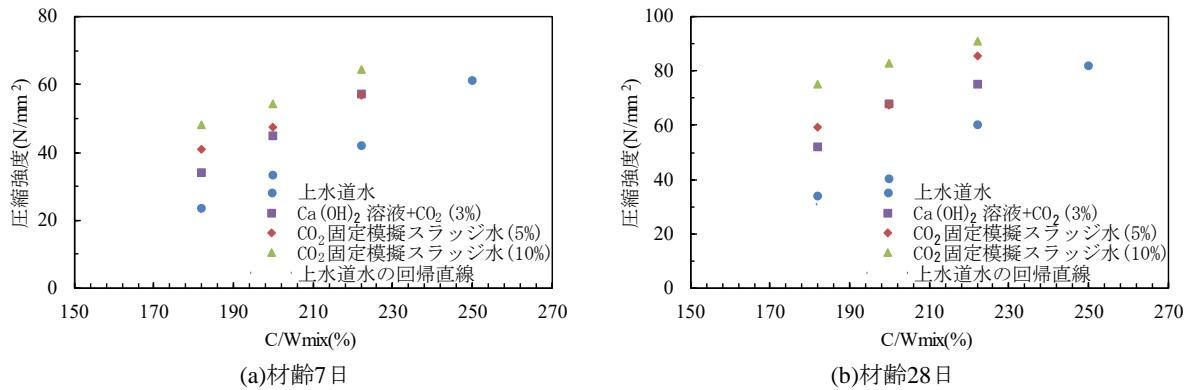


Fig. 9 C/Wmix と圧縮強度の関係  
Relationship between C/Wmix and Compressive Strength

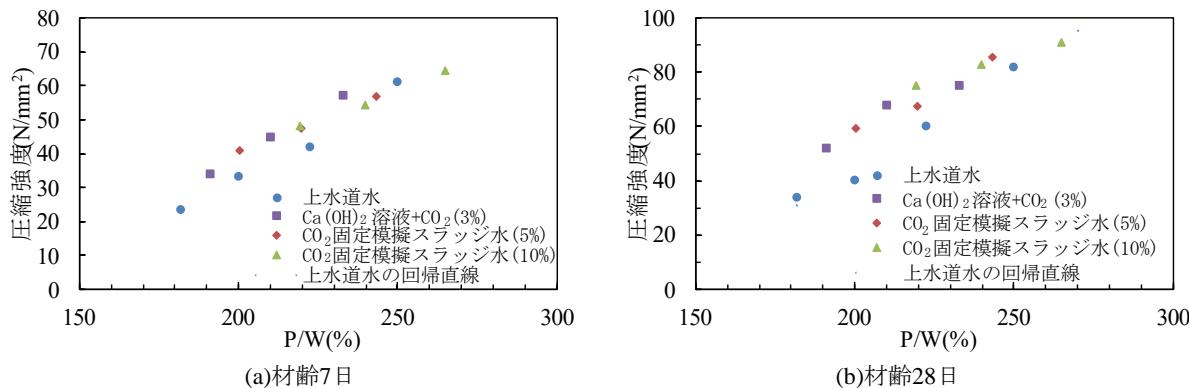


Fig. 10 P/W と圧縮強度の関係  
Relationship between P/W and Compressive Strength

いても1.0%程度であることを確認した。

**3.4.2 CO<sub>2</sub>固定量** W<sub>mix</sub>/Cを50%としたセメントベーストのCO<sub>2</sub>固定量の測定結果をTable 4に示す。本研究では、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水に用いたことによるCO<sub>2</sub>固定量の増加量の把握を目的として、上水道水(No.3)とCO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水(濃度5%, No.9)を比較した。CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水に用いた場合のCO<sub>2</sub>固定量は2.997%で、上水道水の場合の2.320%と比べて増加した。両者の差分が練混ぜ水由来のCO<sub>2</sub>固定量の増加量と考えられ、その値は0.677%であった。

一方で、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いたことによるCO<sub>2</sub>固定量の増加量は、模擬スラッジ水由来のセメントが固定したCO<sub>2</sub>量に相当することから、式(2)により算出できると考えられる。

$$b_{CO_2} = \frac{W_{W,p} \times W_{sl,W} \times CaO \times M_{CO_2} / M_{CaO} \times a_{CO_2}}{W_{C,p}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、

b<sub>CO<sub>2</sub></sub> : 単位セメント量当たりの練混ぜ水由来のCO<sub>2</sub>固定量の増加量の計算値(%)

W<sub>W,p</sub> : セメントベースト中の練混ぜ水量 (スラッジ固形分は含まない) (g)

W<sub>sl,W</sub> : 練混ぜ水(模擬スラッジ水)中のスラッジ濃度(5%)

W<sub>C,p</sub> : セメントベースト中のセメント量(g)

CaO : セメント中のCaO含有率(64.14%)

M<sub>CO<sub>2</sub></sub> : CO<sub>2</sub>の分子量(44g/mol)

M<sub>CaO</sub> : CaOの分子量(56g/mol)

a<sub>CO<sub>2</sub></sub> : CO<sub>2</sub>固定率(%)

式(2)より、CO<sub>2</sub>固定量の増加量の計算値は0.706%と算出された。なお、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を用いた場合のセメントベースト中のセメント(W<sub>C,p</sub>)には模擬スラッジ水由来のセメントも含まれるため、厳密には、無水物換算のベースが異なることになる。しかし、その影響はごくわずかと考えられることから、ここでは無視することとした。測定値と計算値がほぼ同等の値を示したことを踏まえると、模擬スラッジ水に固定したCO<sub>2</sub>はセメントベーストにも含有されていると示唆される。

**3.4.3 圧縮強度** 材齢7日および28日のセメントベーストの圧縮強度をFig.9およびFig.10に示す。上水道水の回帰直線を図中の点線で示した。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたセメントベーストの圧縮強度は、同じセメントCO<sub>2</sub>固定練混ぜ水比(C/Wmix)の上水道水を用いた場合と比べて大きくなった。同じ粉体水比(P/W)の上水道水を用いた場合と同等ないしはそれ以上の圧縮強度を確保し、特にP/Wが230%以下の低P/Wの範囲では圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

Table 5 CO<sub>2</sub>排出量の試算対象としたコンクリート配合  
Mix Proportions of Concrete for Estimating Amount of CO<sub>2</sub> Emission

No.	配合	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	CSP	S	G
2	上水道水	45.0	46.0	175	389	-	776	964
10	CO <sub>2</sub> 固定模擬スラッジ水(濃度5%)	49.9		175	339	11	790	981

Table 6 CO<sub>2</sub>排出量の削減効果の試算結果(単位: kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-con)  
Estimated Results of CO<sub>2</sub> Emission Reduction Effects

No.	練混ぜ水の種類	CO <sub>2</sub> 固定量(A)	CO <sub>2</sub> 排出量(B)					合計(B)-(A)
			W	SI	C	S	G	
2	上水道水	0	0.0	-	294.7	2.7	2.7	300.2
10	CO <sub>2</sub> 固定模擬スラッジ水(濃度5%)	2.7	-	△1.9	257.1	2.8	2.7	258.0

※CO<sub>2</sub>排出量…水: 0kg/t, セメント: 757.9kg/t, 細骨材: 3.5kg/t, 粗骨材: 2.8kg/t, スラッジ処理: 216.1kg/t

Fig. 8より、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中のCSPの大半はCaCO<sub>3</sub>粒子であると考えられる。著者らは、練混ぜ水に含まれるCaCO<sub>3</sub>粒子は圧縮強度の増加に寄与し、その要因は、アルミニート系水和物の組織や生成量が変化し、硬化組織が緻密になったことで空隙率が小さくなつたためと考察している<sup>4)</sup>。本研究でも同様にCSPに含まれるCaCO<sub>3</sub>粒子が圧縮強度の増加に寄与したと推察される。

一方で、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中のCSPには、C<sub>3</sub>S等の少量の未反応セメント鉱物も含まれており、これらが水和反応することで、強度発現に寄与したとも考えられる。圧縮強度の増加に関する水和反応を含めた詳細な検討は今後の課題とする。

本研究の結果を踏まえると、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いることで、所定の圧縮強度の確保に必要な単位セメント量を低減することも可能と考えられ、さらなるCO<sub>2</sub>削減に繋がることも期待できる。

#### 4. CO<sub>2</sub>排出量の削減効果

CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水(スラッジ濃度5%)を用いた配合No.10(W/P=49.9%)の材齢28日の圧縮強度は59.3N/mm<sup>2</sup>であり、上水道水を用いた配合No.2(W/P=45.0%)の場合(60.3N/mm<sup>2</sup>)とほぼ等しい。そこで、この結果をもとに、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を用いることによるCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を試算した。試算に用いたコンクリート配合をTable 5に示す。汎用的なコンクリートを想定して、単位水量175kg/m<sup>3</sup>、s/a=46.0%、空気量4.5%とした。

コンクリートに使用する各材料を製造する際のCO<sub>2</sub>排出量は、既往の文献<sup>12)</sup>を参考に、水が0kg-CO<sub>2</sub>/t、セメントが757.9kg-CO<sub>2</sub>/t、細骨材が3.5 kg-CO<sub>2</sub>/t、粗骨材が2.8 kg-CO<sub>2</sub>/tとした。また、スラッジ水を練混ぜ水として利用す

ることでスラッジの処理に係るCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。スラッジ(SI)の運搬、埋立などの廃棄物処理に係るCO<sub>2</sub>排出量は、環境省が公表するデータベース<sup>13)</sup>を参考に216.1kg-CO<sub>2</sub>/tとした。

これらの材料(セメント、細骨材、粗骨材)ごとのCO<sub>2</sub>排出量に対し、コンクリート製造時の単位量に乗じてコンクリート1m<sup>3</sup>あたりの材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量を算出した(Table 6)。ただし、コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>固定量( $W_{co2-fix\_con}$ )およびスラッジ処理に係るCO<sub>2</sub>排出量( $W_{co2-sl.treated\_con}$ )の削減量は式(3)および式(4)により求めた。

$$W_{co2-fix\_con} = W_{W\_con} \times W_{sl\_W} \times CaO \times M_{CO2}/M_{CaO} \times a_{co2} \quad (3)$$

$$W_{co2-sl.treated\_con} = W_{W\_con} \times W_{sl\_W} \times W_{co2-sl.treated} \quad (4)$$

ここに、

$W_{W\_con}$ : コンクリート中の練混ぜ水量(スラッジ固形分は含まない)(175kg/m<sup>3</sup>)

$W_{sl\_W}$ : 練混ぜ水(模擬スラッジ水)中のスラッジ濃度(5%)

$CaO$ : セメント中のCaO含有率(64.14%)

$M_{CO2}$ : CO<sub>2</sub>の分子量(44g/mol)

$M_{CaO}$ : CaOの分子量(56g/mol)

$a_{co2}$ : CO<sub>2</sub>固定率(%)

$W_{CO2-sl.treated}$ : スラッジ処理に係るCO<sub>2</sub>排出量(0.2161kg-CO<sub>2</sub>/kg-sludge)

コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、コンクリート1m<sup>3</sup>あたりの材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量の総和からCO<sub>2</sub>固定量およびスラッジ処理に係るCO<sub>2</sub>排出量の削減量を差し引くことで求めた。なお、本検討では練混ぜ水へのCO<sub>2</sub>注入、練混ぜ、運搬、施工過程で排出されるCO<sub>2</sub>は試算に含めていない。

CO<sub>2</sub>排出量の試算結果をTable 6右欄に示す。CO<sub>2</sub>固定

模擬スラッジ水を練混ぜ水に用いたコンクリートは、汎用的なコンクリートと同等の圧縮強度を確保したうえで、CO<sub>2</sub>排出量は約42kg/m<sup>3</sup>削減できると試算した。これは、単位セメント量を約50kg/m<sup>3</sup>低減できたことが大きな要因である。

さらに、本技術はスラッジ水を使用材料として利用していることから、スラッジ水の資源化を推進し、循環型社会の形成に貢献することも期待できる。

## 5. まとめ

本研究では、模擬スラッジ水のスラッジ濃度およびスラッジ水を作製してからCO<sub>2</sub>を注入するまでの時間間隔（プレ水和時間）がCO<sub>2</sub>固定率に及ぼす影響を調べた。また、CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水に用いたセメントペーストの各種物性を基礎的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) プレ水和時間0hの模擬スラッジ水のスラッジ濃度を3～15%としてCO<sub>2</sub>を注入した条件では、CO<sub>2</sub>固定率は60～65%程度で収束する。
- 2) スラッジ濃度5%の模擬スラッジ水のプレ水和時間を3～72hとしてCO<sub>2</sub>を注入した条件では、CO<sub>2</sub>固定率は70%程度に増加する。
- 3) CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いたセメントペーストのCO<sub>2</sub>固定量は、上水道水の場合に比べて増加する。その増加量はCO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水中に固定されたCO<sub>2</sub>量とほぼ同等であることを確認した。
- 4) CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いることで、同じ粉体水比(P/W)の上水道水の場合と同等ないしはそれ以上の圧縮強度が確保できる。
- 5) CO<sub>2</sub>固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いることで、汎用的なコンクリートと同等の圧縮強度を確保したうえで、CO<sub>2</sub>排出量を約42kg/m<sup>3</sup>削減できると試算される。

今後は、スラッジ水にCO<sub>2</sub>を効率良く固定するためのCO<sub>2</sub>注入方法や、実工事への適用を想定して、スラッジ水～CO<sub>2</sub>を注入する製造設備などの検討を行っていく予定である。また、本検討では濃度100%CO<sub>2</sub>ガスを模擬スラッジ水へ注入している。実際の運用では、建機由来の排ガスを建設現場で発生するスラッジ水へ注入することを想定しているため、建機由来の排ガスを模擬した注入試験も行っていく予定である。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、共同研究先である広島大学の河合研至教授より貴重なご意見を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 総理官邸：第203回国会・菅内閣総理大臣所信表明演説，2020.10
- 2) 溝渕麻子、小林利充、近松竜一、一瀬賢一：環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1, pp.215-220, 2011
- 3) 取違剛、横関康祐、吉岡一郎、盛岡実：炭酸化養生を行ったコンクリートのCO<sub>2</sub>收支ならびに品質評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.1, pp.1450-1455, 2012
- 4) 新杉匡史、桜井邦昭、石関嘉一：CO<sub>2</sub>を固定した練混ぜ水を用いたセメントペーストに関する基礎的検討、大林組技術研究所報、No.87, pp.1-6, 2023
- 5) 平田隆祥、西澤彩、田中寛人、新杉匡史：脱炭素社会に向けたコンクリート技術の開発、大林組技術研究所報、No.88, pp.1-10, 2024
- 6) 新杉匡史、桜井邦昭、西澤彩、河合研至：CO<sub>2</sub>を注入した水酸化カルシウム溶液を練混ぜ水として用いたコンクリートの基礎的性質、コンクリート工学年次論文集、Vol.46, No.1, pp.1387-1392, 2024
- 7) 勝部英一、新大軌、砂田栄治、橋田浩幸：異なる環境温度で製造したスラッジ水高度利用コンクリートの評価、セメント・コンクリート論文集、Vol.75, pp.380-387, 2021
- 8) 神代泰道、田中寛人、井上裕太：スラッジ起源のCU粉体を用いた低炭素型のコンクリートに関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.46, No.1, pp.1369-1374, 2024
- 9) 石田剛朗、市場大伍、河合研至：C-S-Hの炭酸化に及ぼす二酸化炭素ガス濃度の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.63, pp.347-353, 2009
- 10) 石田剛朗、河合研至、市場大伍、佐藤良一：速度論に基づく高pH溶液中への二酸化炭素ガス溶解モデル、土木学会論文集E, Vol.66, No.1, pp.80-93, 2010
- 11) 新杉匡史、桜井邦昭、西澤彩、河合研至：セメント水和物を模擬したカルシウム化合物中のCO<sub>2</sub>固定量のTOC法による測定方法に関する基礎的検討、セメント・コンクリート論文集、Vol.78, pp.187-195, 2024
- 12) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造の設計・施工指針（案）・同解説、p.218, 2017
- 13) 環境省HP：排出量データベース「①サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出量などの算定のための排出量単位データベース」Ver3.5, [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/estimate\\_05.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_05.html), (参照 2025-05-29)