

論文 CO₂ を固定した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に関する基礎的検討

新杉 匡史*1・桜井 邦昭*2・河合 研至*3

要旨：スラッジ水の作製条件が CO₂ 固定率に及ぼす影響や、CO₂ 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、スラッジ濃度が 3～15%の範囲では、スラッジ水の CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 固定率が増加することが明らかになった。また、CO₂ 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された。

キーワード：スラッジ水、CO₂ 固定、練混ぜ水、圧縮強度

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルの実現に向け、コンクリート分野においても CO₂ 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て、ポルトランドセメントの使用量を削減する技術¹⁾などがある。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 CO₂ を固定化する研究²⁾も行われている。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。

そのため、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、CO₂ 排出量を削減する手法を確立することも重要である。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)₂)を添加した溶液に CO₂ を注入し、CaCO₃ として CO₂ を固定した溶液を練混ぜ水として用いる検討を行ってきた。前報にて、上記練混ぜ水を用いたセメントペーストは、CO₂ 固定量が大きくなること、硬化組織が緻密化され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³⁾。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⁴⁾。しかし、これまでの検討で用いてきた Ca(OH)₂ の主原料は石灰石であり、その製造時に多量の CO₂ が排出される。消石灰(Ca(OH)₂ の工業的名称)の CO₂ 排出量は 578kg/t と試算され⁵⁾、練混ぜ水に CO₂ を固定する材料として、より環境負荷が小さい材料が必要である。

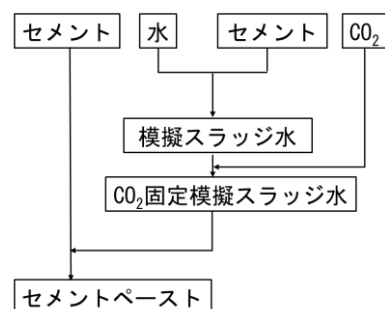


図-1 模擬スラッジ水およびセメントペーストの製造フロー

一方、コンクリート製造時のトラックアジテータのドラムや練混ぜミキサー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ている現状にある。残コンクリートおよび戻りコンクリートの年間発生量は 116 万 m³ と試算されており⁶⁾、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、凝結遅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検討⁷⁾、スラッジ水を機械脱水した脱水ケーキに CO₂ を固定させた粉体をコンクリート用混和材として使用した検討⁸⁾、⁹⁾等がある。しかし、CO₂ を固定したスラッジ水を練混ぜ水として利用した検討は少ない。

本研究では、図-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 CO₂ を注入することで CO₂ を固定した模擬スラッジ水(以下、CO₂ 固定模擬スラッジ水と呼ぶ)を作製した。そして、模擬スラッジ水の濃度や、

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 修士(工学)(正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主席技師 博士(工学)(正会員)

*3 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 社会基盤環境工学プログラム 教授 工学博士(正会員)

作製直後から攪拌し続けた模擬スラッジ水にCO₂を注入するまでの時間間隔(以下、接水時間と呼ぶ)がCO₂固定率に及ぼす影響を調べた。また、CO₂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CO₂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CO₂注入試験の試験ケースを表-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などにばらつきが生じると考えられる。既往の研究では、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、スラッジ濃度約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ている⁷⁾。そこで、本研究では効率良くCO₂を固定できるスラッジ水の作製条件を把握することにした。検討要因は、スラッジ濃度(C/W=3, 5, 8, 10, 15 および 20%)と接水時間(0, 3, 16, 48 および 72h)とした。スラッジ濃度の検討では接水時間 0h、接水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)₂溶液(濃度3%, 接水時間0h)のCO₂注入試験も実施した。使用材料を表-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。

2.2 試験方法

模擬スラッジ水は、上水道水 10L に表-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。接水時間の検討では、所定の接水時間まで 500rpm で攪拌した。CO₂注入試験の模式図を図-2に示す。CO₂ガスは流量 10L/min、ノズル径 1.2mm で注入し、CO₂注入時は常時 500rpm で攪拌した。CO₂固定量はCO₂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までCO₂注入完了とした。

CO₂注入試験における試験項目は、CO₂固定率、pH、温度とした。CO₂固定率は、溶液に含まれる粉体(スラッジ固形分、Ca(OH)₂)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} : CO₂固定率(%)

W_{CO_2} : CO₂固定量(CO₂注入による質量増加量)(g)

W_p : 溶液中の粉体(スラッジ固形分、Ca(OH)₂)量(g)

CaO : 粉体中の CaO 含有率(スラッジ固形分 ; 64.14%,
Ca(OH)₂ ; 74.43%)

M_{CO_2} : CO₂の分子量(44g/mol)

表-1 模擬スラッジ水へのCO₂注入試験の試験ケース

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% 接水時間 : 0h
接水時間	接水時間 : 0, 3, 16, 48, 72h スラッジ濃度 : 5%

表-2 使用材料

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) ₂	消石灰 CaO 含有率 : 74.43%
二酸化炭素	CO ₂	濃度 100%CO ₂ ガス

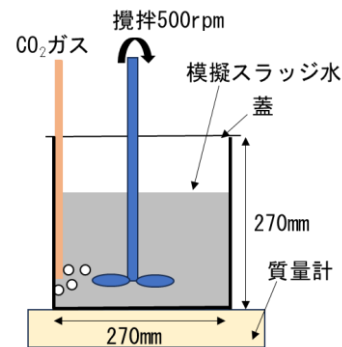


図-2 CO₂注入試験の模式図

M_{CaO} : CaOの分子量(56g/mol)

また、模擬スラッジ水へのCO₂注入によるCO₂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。CO₂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。乾燥後の試料を粉砕し、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CO₂注入完了するのに要する時間と同じ時間だけ接水させた場合、およびCa(OH)₂溶液(濃度3%)にCO₂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

(1) スラッジ濃度による影響

スラッジ濃度を種々に変化させた模擬スラッジ水へCO₂を注入した時の注入時間とCO₂固定率の関係を図-3に示す。また、縦軸をCO₂固定量で表した場合を図-4に示す。図中には、Ca(OH)₂溶液(濃度3%)へのCO₂注入試験の結果も併記した。なお、これら模擬スラッジ水

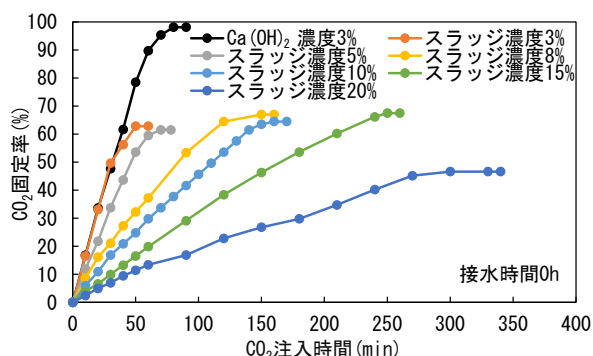


図-3 スラッジ濃度とCO₂固定率の関係

の接水時間は0hである。

Ca(OH)₂溶液は、CO₂の注入によりCO₂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CO₂固定率は60%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)₂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)₂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¹⁰⁾。本研究でも同様の理由により模擬スラッジ水のCO₂固定率が小さくなったと推測されるが、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。

また、Ca(OH)₂溶液およびスラッジ濃度3～15%の模擬スラッジ水は、図-4中において傾きが同等となっており、CO₂固定速度もほぼ同じであると推測される。一方で、スラッジ濃度20%ではCO₂固定率が46%と小さくなり、CO₂固定速度も小さくなった。本研究では、CO₂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CO₂と効率良く反応できるような条件で試験している。スラッジ濃度が20%と大きくなると、スラッジ粒子の分散性が小さくなり、CO₂と反応する前に水和の進行に伴いスラッジ粒子が凝集体を形成したと考えられ、接触面積の減少により、CO₂固定効率が小さくなったと推測される。

CO₂注入に伴う模擬スラッジ水のCO₂固定率とpHの関係を図-5に示す。スラッジ濃度3～15%の範囲ではCO₂固定率60%程度、スラッジ濃度20%ではCO₂固定率46%でpHが6.2程度まで低下していた。いずれもCO₂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。

CO₂注入に伴う模擬スラッジ水のCO₂固定量と温度上昇量の関係を図-6に示す。CO₂固定量が大きくなるとつれて、模擬スラッジ水の温度上昇量は大きくなった。これは、炭酸化に伴う反応熱によるものと考えられる。

以上より、スラッジ水へのCO₂の注入完了にはpHが

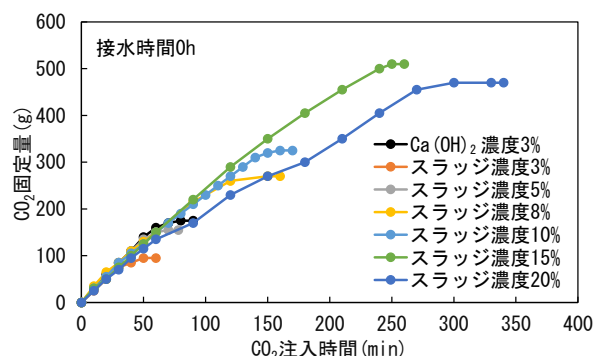


図-4 スラッジ濃度とCO₂固定量の関係

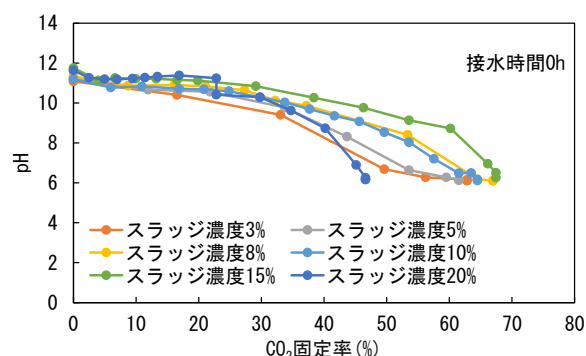


図-5 CO₂固定率とpHの関係

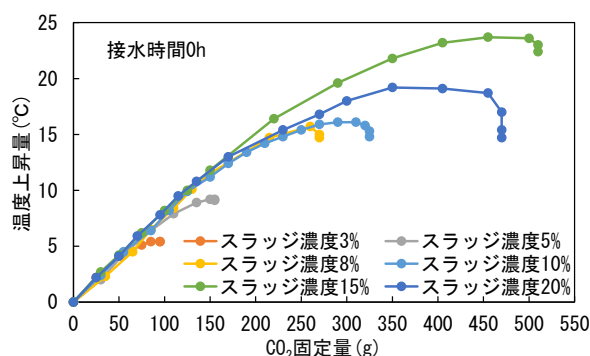


図-6 CO₂固定量と温度上昇量の関係

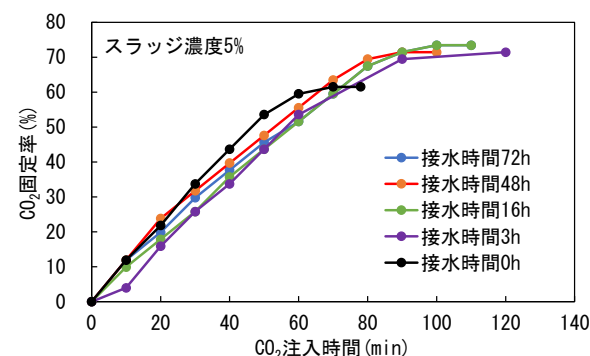


図-7 接水時間とCO₂固定率の関係

6.2程度まで低下すること、CO₂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CO₂を注入する際には、

表-3 セメントペーストの配合とフレッシュ試験結果

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			C	フレッシュ試験結果	
					Wmix				フロー(mm)	空気量(%)
					W	CaCO ₃	CSP			
1	上水道水	40.0	40.0	—	40.0	—	—	100	170	1.0
2		45.0	45.0		45.0				212	1.2
3		50.0	50.0		50.0				234	1.0
4		55.0	55.0		55.0				275	1.0
5	Ca(OH) ₂ 溶液+CO ₂ (Ca(OH) ₂ 濃度 3%)	45.0	42.9		43.5	1.4	—		159	0.7
6		50.0	47.6		48.5	1.6			192	1.1
7		55.0	52.3		53.3	1.8			223	1.2
8	CO ₂ 固定模擬スラ	45.0	41.1		42.2	—	2.8		164	0.8
9	ッジ水(スラッジ濃	50.0	45.5		46.9		3.1		220	1.0
10	度 5%)	55.0	49.9		51.6		3.4		249	1.3
11	CO ₂ 固定模擬スラ	45.0	37.7	0.002	39.7		5.3		145	0.7
12	ッジ水(スラッジ濃	50.0	41.7		44.2		5.8		170	1.5
13	度 10%)	55.0	45.6		—		48.6		6.4	187

*Wmix(CO₂ 固定練混ぜ水)=W+ CaCO₃+ CSP(炭酸化したスラッジ粒子)

**P(粉体)=C+ CaCO₃+ CSP

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) 接水時間による影響

スラッジ濃度 5%の模擬スラッジ水に CO₂ を注入した
際における接水時間と CO₂ 固定率の関係を図-7 に示す。
接水時間を 3h ないしはそれ以上とした場合、CO₂ 固定
率は 70%程度となり、接水時間 0h の場合(約 60%)に比
べて増加した。接水により水和が進行することで炭酸化さ
れやすい Ca(OH)₂ 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、接水時間 72h とした場合でも、
接水時間 3h の場合と同様の CO₂ 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 CO₂ 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ていれば、少なく
とも 72h 後においても、CO₂ を固定できるものと考えら
れる。

(3) CO₂ 固定模擬スラッジ水の固形分の相組成

CO₂ 固定模擬スラッジ水中の固形分の XRD パターンの
測定結果を図-8 に示す。比較として、模擬スラッジ
水に CO₂ を注入していない場合と Ca(OH)₂ 溶液に CO₂ を
注入した場合の固形分の結果も併記した。

Ca(OH)₂ 溶液に CO₂ を注入した場合の固形分は、カル
サイトのピークのみが確認された。Ca(OH)₂ は水中で
CO₂ と反応して全て CaCO₃ になったためと考えられる。
一方で、模擬スラッジ水の固形分では C₃S や Ca(OH)₂ の
ピークが認められ、CO₂ 固定模擬スラッジ水の固形分で

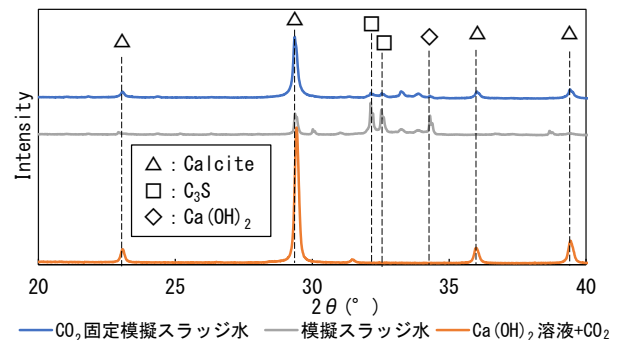


図-8 CO₂ 固定模擬スラッジ水の固形分の XRD パターン

はカルサイトだけでなく C₃S の小さなピークも認められ
た。模擬スラッジ水では、Ca(OH)₂ が優先的に炭酸化さ
れ、未水和セメントである C₃S の炭酸化速度が遅いため
と推察される。

3. CO₂ 固定模擬スラッジ水を練混ぜ水として用いた検討

3.1 セメントペーストの配合

セメントペーストの配合を表-3 に示す。本研究では、
上水道水、CO₂ を注入した Ca(OH)₂ 溶液、CO₂ 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。なお、模擬スラッジ水の接水時間は 0h とし、CO₂
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 CO₂ を固定した練混ぜ水(以下、CO₂ 固定練混ぜ水

表－4 セメントペーストのCO₂固定量

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

と呼ぶ)の質量であり、CO₂を注入したCa(OH)₂溶液の場合はCaCO₃粒子、CO₂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、CO₂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CaCO₃とCSPの含量とし、水粉体比(W/P)で整理した値も表－3に表記した。CO₂固定模擬スラッジ水中のCSP量は、前章で得られたCO₂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

CO₂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。モルタルミキサーを用いて低速で60秒間練り混ぜた後、高速で30秒間練り混ぜた。CO₂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℃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%以下と小さくなったため、AE剤をセメントに対し0.002%添加することで、他の試験ケースと同等の空気量に調整した。

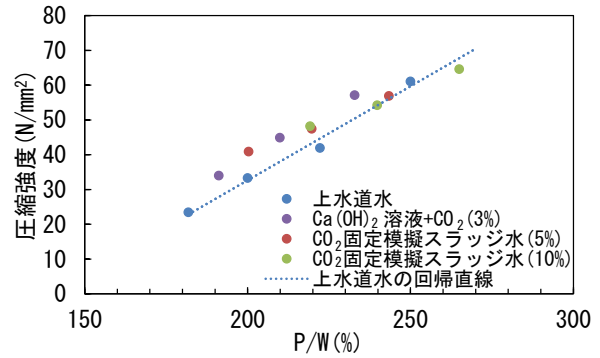
3.3 試験項目

試験項目は、フレッシュ性状(フロー、空気量)、CO₂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、モルタルエアメータを用いた。CO₂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。乾燥後の供試体を粉砕し測定に供した。別途、強熱減量(Ig.loss)を求め、CO₂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、試料採取の翌日に脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生した。

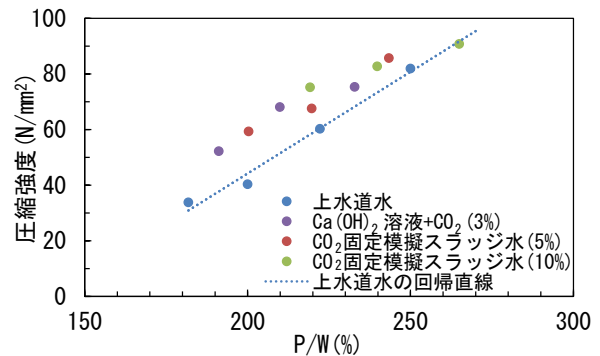
3.4 試験結果および考察

(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表－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いても1.0%程度である



(a) 材齢 7 日



(b) 材齢 28 日

図－9 セメントペーストの圧縮強度

ことを確認した。

(2) CO₂固定量

Wmix/Cを50%としたセメントペーストのCO₂固定量の測定結果を表－4に示す。本研究では、CO₂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CO₂固定量の増加量の把握を目的として、上水道水(No.3)とCO₂固定模擬スラッジ水(濃度5%, No.9)を比較した。CO₂固定模擬スラッジ水を練混ぜ水に用いた場合のCO₂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CO₂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、CO₂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CO₂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CO₂量に相当することから、式(2)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_{CO_2} : 練混ぜ水由来のCO₂固定量の増加量(%)

$W_{W.p}$: セメントペースト中の練混ぜ水量
(スラッジ固形分は含まない)(g)

$W_{sl.W}$: 練混ぜ水(模擬スラッジ水)中のセメント量(5%)

$W_{C.p}$: セメントペースト中のセメント量(g)

式(2)より、CO₂固定量の増加量の計算値は 0.706%と算出された。なお、CO₂固定模擬スラッジ水を用いた場合のセメントペースト中のセメント $W_{c,p}$ 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CO₂はセメントペーストにも含有されていると考えられる。

(3) 圧縮強度

材齢 7 および 28 日のセメントペーストの圧縮強度を図-9 に示す。上水道水の回帰直線を図中の点線で示した。CO₂固定練混ぜ水を用いたセメントペーストは、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 の範囲で圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

図-8 より、CO₂固定模擬スラッジ水中の CSP の大半は CaCO₃ 粒子であると考えられる。前報にて、練混ぜ水に含まれる CaCO₃ 粒子は圧縮強度の増加に寄与する結果が得られている⁴⁾が、本研究においても同様に CSP に含まれる CaCO₃ 粒子が圧縮強度の増加に寄与したと推察される。

一方で、CO₂固定模擬スラッジ水中の CSP には、C₃S 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、CO₂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 CO₂削減に繋がることも期待できる。

今後は、スラッジ水にCO₂を効率よく固定するためのCO₂注入方法や、実工事への適用を想定して、CO₂を注入した練混ぜ水の製造設備などの検討を行う予定である。

4. まとめ

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CO₂を注入するまでの時間間隔(接水時間)がCO₂固定率に及ぼす影響を調べた。また、CO₂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) 接水時間 0h の模擬スラッジ水のスラッジ濃度を3~15%としてCO₂を注入した場合、CO₂固定率は60%程度で収束する。
- (2) スラッジ濃度 5%の模擬スラッジ水の接水時間を3~72h としてCO₂を注入した場合、CO₂固定率は70%とやや大きくなる。

- (3) CO₂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CO₂固定量は、上水道水の場合に比べて増加した。その増加量はCO₂固定模擬スラッジ水中に固定されたCO₂とほぼ同等である。
- (4) CO₂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。

参考文献

- 1) 首相官邸 HP：第 203 回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説，https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html，（閲覧日：2024 年 12 月 15 日）
- 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CO₂収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，河合研至：CO₂を注入した水酸化カルシウム溶液の練混ぜ水としての適用に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.77，pp.516-523，2023
- 5) 新杉匡史，桜井邦昭，西澤彩，河合研至：CO₂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
- 6) 岩永豊司：スラッジ水の有効利用と環境への配慮，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.87-90，2010
- 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CCU 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) 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
- 10) 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，No.63，pp.347-353，2009