

論文 高炉セメントを用いたコンクリートへの湿式炭酸化物の適用

石井 祐輔*1・田場 祐道*2・菅沼 椋友*3・黒川 大亮*4

要旨:本研究では、湿式炭酸化法により CO₂ を吸収させたセメントおよびコンクリートスラッジの乾燥物を、高炉セメントと混合し、モルタルおよびコンクリートを作製して、その特性について検討した。その結果、湿式炭酸化物をセメントの 25% 内割置換した際の材齢 7~28 日までの強度は、石灰石微粉末や軽質炭酸カルシウムを置換した場合よりも高く、湿式炭酸化物が無混合の場合の強度と同等以上であった。また湿式炭酸化物のセメント置換により、高炉セメントを用いたコンクリートの中性化深さは大きくなるものの、塩化物イオンの浸透深さは小さくなる傾向が確認できた。

キーワード: 湿式炭酸化, CO₂ 固定, コンクリートスラッジ, 高炉セメント, 強度発現性, 耐久性

1. はじめに

近年の気候変動を受けて、その原因とされる温室効果ガスの削減が求められている。我が国においても温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指す取組みが進められている。セメント産業では、例えば工場のキルン排ガスから CO₂ を分離・回収する技術¹⁾や CO₂ 回収型セメント製造設備²⁾に関する実証試験が実施されている。ここで回収した CO₂ は地中深くに貯留・圧入する CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) や、有効利用する CCU (Carbon dioxide Capture, Utilization) に適用することが想定されている。

筆者らは CCU 技術の 1 つとして、湿式炭酸化によりセメント工場のキルン排ガスに含まれる CO₂ をセメントに効率よく固定化するシステムを開発した³⁾。湿式炭酸化物をコンクリートの構成材料の一部とすることで、コンクリート中への回収 CO₂ の固定が可能となる。これまでの知見として、セメントの湿式炭酸化物の物性や CO₂ 固定量を評価してきた⁴⁾⁵⁾。また、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに炭酸化物を混合した場合の炭酸化物混合量と強度発現性の関係を評価し、セメントの内割 10~20% 程度の混合では無混合と同程度の強度となることを確認している。さらに、炭酸化物を混合することによりコンクリートの材料分離抵抗性が向上することを確認してきた⁶⁾。

一方で、この湿式炭酸化技術はセメントのみならずセメントを含む材料であれば CO₂ を固定化することが可能であり、例えば廃棄物であるコンクリートスラッジ（以下、スラッジ）も対象となる。スラッジは産業廃棄物の汚泥として処分されるため、その（輸送分を含まない）製造における CO₂ 排出原単位は 0kg/t とされている⁷⁾。

ゆえに、（工場等から排出される CO₂ を固定した）炭酸化スラッジの製造工程における CO₂ 排出原単位は、固定した CO₂ 分をマイナス換算できる可能性がある。

本検討では、高炉セメントを用いたモルタルおよびコンクリートを対象に、セメントおよびスラッジの湿式炭酸化物を混合し、強度発現性及び耐久性について評価した。

2. 湿式炭酸化物の作製

2.1 湿式炭酸化による CO₂ 吸収の方法

セメントおよびセメントを含む廃棄物等に CO₂ を吸収させる湿式炭酸化設備の概要を図-1 に示す。設備は、密閉型の反応槽内に CO₂ を連続的に供給し、反応槽にセメントあるいはスラッジを含むスラリーを循環させることで CO₂ を吸収させることができる。CO₂ はセメント工場のキルン排ガスから分離・回収したものを使用した¹⁾。セメントを湿式炭酸化する場合は、水セメント比が 300% のセメントスラリーを使用した。スラッジを湿式炭酸化する場合は、炭酸化設備を生コン工場内に設置し、工場から排出されたスラッジの脱水ケーキに水を加えることで、水固形分比が 300% のスラリーに調整して使用した。

2.2 炭酸化前後のセメントおよびスラッジの物性

湿式炭酸化後のセメントおよび湿式炭酸化前後のスラッジは直ちにアセトンを用いて水和停止した後、N₂ ガス雰囲気下で乾燥を行い、固形物を採取して各種分析を行った。炭酸化前後のセメントおよびスラッジの分析項目は、密度 (JIS Z 8837)、BET 比表面積 (JIS R 1626)、強熱減量、不溶残分 (JIS R 5202) および CO₂ 吸収量とした。不溶残分の測定には塩酸を用いたが、ここで使用したスラッジには可溶成分となる石灰石骨材は含まれていないため、不溶残分量を骨材量とした。試料中の CO₂ 吸

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士 (工学) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士 (工学) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士 (工学)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 チームリーダー 博士 (工学)

収量は、熱重量示差熱分析（TG-DTA）における 550～850℃の重量減少とした。湿式炭酸化後の試料中の CO₂ 吸収量は、湿式炭酸化前の試料が含有する CO₂ 量を差し引いた。結合水量は、強熱減量から CO₂ 量を差し引いた。また、式(1)を用いて炭酸化前の試料に対する湿式炭酸化による CO₂ 吸収量を算出した。炭酸化後の試料に対する CO₂ 吸収量は、式(1)の分子のみを用いて算出した。

$$W_{CO_2} = \frac{T_{CO_2A} - \{T_{CO_2N} \times (100 - L_A) / (100 - L_N)\}}{(100 - L_A) / (100 - L_N)} \times (1000 / 100) \quad (1)$$

ここで、 W_{CO_2} : 炭酸化前の試料 1t あたりの
湿式炭酸化による CO₂ 吸収量(kg/t)

T_{CO_2A} : 炭酸化後の試料中の CO₂ 量(%)

T_{CO_2N} : 炭酸化前の試料中の CO₂ 量(%)

L_A : 炭酸化後の試料の強熱減量(%)

L_N : 炭酸化前の試料の強熱減量(%)

炭酸化前後の試料の物性を表-1 に示す。セメントの BET 比表面積に対して、スラッジの比表面積は大きく、炭酸化後にはさらに大きくなった。これはスラッジ中のセメントの水和反応の進行による水和物生成によるものと、湿式炭酸化による微細な炭酸カルシウムの生成によるもの⁵⁾であると推察される。また、別途試料を XRD にて分析した結果、生成した炭酸カルシウムはほぼ全てがカルサイトであった。スラッジの炭酸化前後を比較すると、湿式炭酸化処理により CO₂ 吸収量は増加し、結合水量は低下した。これは、スラッジ中のセメント水和物の炭酸化による結合水の脱水に起因していると考えられる。

湿式炭酸化による、セメントの炭酸化前の試料 1t あたりの CO₂ 吸収量は 364kg であり、スラッジの炭酸化前の試料 1t あたりの CO₂ 吸収量は 208kg であった。セメントよりもスラッジの方が炭酸化前の試料あたりの CO₂ 吸収量が少ないのは、スラッジ中に CO₂ を吸収しない骨材微粉分が含まれている事に加え、炭酸化前の試料に結合水と CO₂ が含まれていることが影響している。なお、試料中の不溶残分（すなわち残存する骨材分量）は炭酸化前の試料あたり 5.6%、炭酸化後の試料あたり 4.8%であった。一方、本材料製造の CO₂ 排出原単位は、原料であるスラッジの 0 から CO₂ 吸収分を差し引くことで、-178kg/t と試算された。ただしここでは、湿式炭酸化設備の稼働等、使用電力に由来する CO₂ 排出量は考慮していない。

3. 湿式炭酸化物を混合したモルタルの物性

湿式炭酸化物を混合したモルタルの基礎検討として、表-1 で示したセメントの湿式炭酸化物を用いて評価を

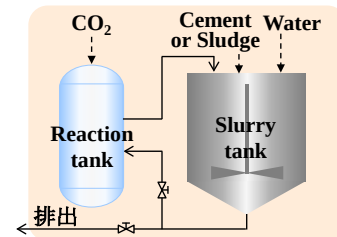


図-1 湿式炭酸化設備の概要

表-1 炭酸化前後のセメントおよびスラッジの物性

試料	炭酸化	密度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	BET 比表面積 (m ² /g)	結合水量 (%)	CO ₂ 吸収量 (kg/t-試料)	
						炭酸化 前ベース	炭酸化 後ベース
セメント	前	3.16	2.4	3.2	0.4	20	—
	後	2.58	31.6	46.6	4.7	364	255
スラッジ	前	2.10	18.3	27.6	13.6	47	—
	後	2.59	30.1	68.0	8.3	208	178

表-2 使用材料

材料名	記号			備考
上水道水	W			—
普通 ポルトランドセメント	B	C	N	3 社混合品
高炉スラグ 微粉末			GGBS	フーレン 4390(cm ² /g) 石こう添加品
セメント炭酸化物		CC	CS _C	BET 比表面積 46.6(m ² /g)
石灰石微粉末			HCC	BET 比表面積 2.4(m ² /g)
軽質炭酸カルシウム			LCC	BET 比表面積 5.6(m ² /g)
標準砂	S			JIS R 5201 に規定

表-3 モルタルの配合条件

配合名	W/B(%)	GGBS/C(%)	CC 種類	CC/B(%)
N	50	—	—	—
N-CS _C 25		—	CS _C	25
N-HCC25		—	HCC	25
N-LCC25		—	LCC	25
BB		40	—	—
BB-CS _C 25		40	CS _C	25
BB-HCC25		40	HCC	25
BB-LCC25		40	LCC	25

行った。セメントの湿式炭酸化物は作製から 6 ヶ月後までスラリー状で保管し、その後 105℃環境下で恒量まで乾燥させて粉体として使用した。なお、当該スラリーの保管期間においては、特段の固結等は確認されなかった。

3.1 試験概要

(1) 使用材料

使用材料を表-2 に示す。セメントは、3 つの異なる製造業者の普通ポルトランドセメントを等量混合したものとした。高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 に示される高炉

スラグ微粉末 4000 に相当する石こう添加品を使用した。セメント炭酸化物の主成分は炭酸カルシウム⁵⁾であるが、比較の炭酸カルシウムとして、石灰石微粉末(HCC)と軽質炭酸カルシウム(LCC)についても評価した。

(2) 配合条件

モルタルの配合条件を表-3に示す。配合条件は、JIS R 5201に規定されるモルタル配合を参考とした。ただしセメントは、普通ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を40%内割置換したものの2種類とし、それぞれN, BBとした。いずれの配合もW/B=50%, 試料のセメント内割置換率(CC/B)を25%とした。モルタル1バッチあたりの計量値は、Wが225g, Bが450g, Sが1350gで同一とした。

(3) 試験項目および試験方法

モルタルの練混ぜ、フロー試験、供試体の作製および圧縮強度試験はJIS R 5201に準拠した。ただし、圧縮強度試験の実施は材齢1, 7, 14, 28, 91日とした。フロー試験の結果より、CC無混合の基準モルタルのフロー値に対する比率としてフロー値比を算出した。また圧縮強度試験の結果より、CC無混合の基準モルタルの圧縮強度に対する比率として相対強度を算出した。

3.2 試験結果

フロー値比の結果を表-4に示す。N, BBのいずれもフロー値比は概ね同程度であり、CS_c25はHCC25, LCC25と比較して最も小さい値となった。セメント炭酸化物は石灰石微粉末や軽質炭酸カルシウムと比較して特に比表面積が大きいため、これに拘束される水が増加し、モルタルの流動性が低下したと考えられる。

モルタルの圧縮強度の結果を図-2および図-3に示す。材齢初期ではNはBBより強度が高いが、長期材齢では、BBがNと同等以上の強度となっており、高炉スラグの潜在水硬性によるものと考えられる。

炭酸化物無混合の配合に対する相対強度の結果を図-4に示す。材齢28日までの相対強度は、いずれの配合においても材齢7日が最大となり、HCCでは65~75程度、LCCでは80~90程度であった。一方CS_cの相対強度は、Nの材齢7~28日において95前後であり、BBの材齢7~14日では110~120程度、材齢28日では95程度と、HCCやLCCの場合より高い値を示した。セメント炭酸化物中に生成した炭酸カルシウムなどの微細粒子による水和反応の促進や充てん性の向上が影響したと推察される。また、セメント炭酸化物は炭酸カルシウム以外の成分としてセメント鉱物由来のシリカゲルが含有されており⁵⁾、このポゾラン反応が初期の活性を向上させた可能性が考えられる。NよりもBBの方がセメント炭酸化物を混合した場合の初期強度が高いことに関しては、シリカゲルのポゾラン反応によるスラグとの相互作用の

表-4 モルタルのフロー値比

	CS _c 25	HCC25	LCC25
N	73	96	86
BB	70	93	81

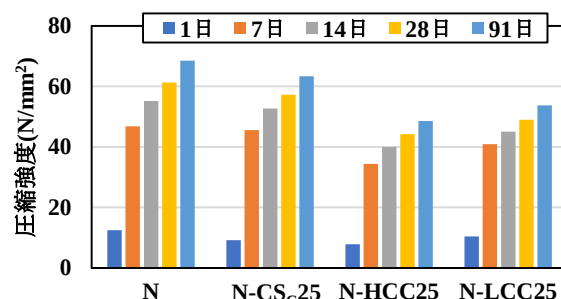


図-2 モルタルの圧縮強度 (N)

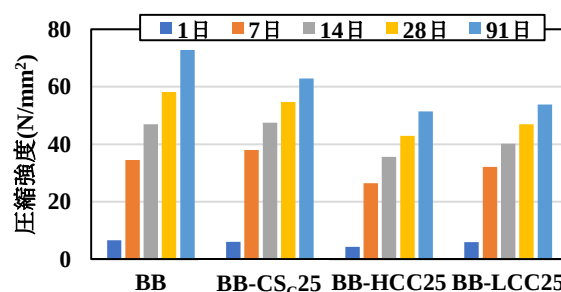


図-3 モルタルの圧縮強度 (BB)

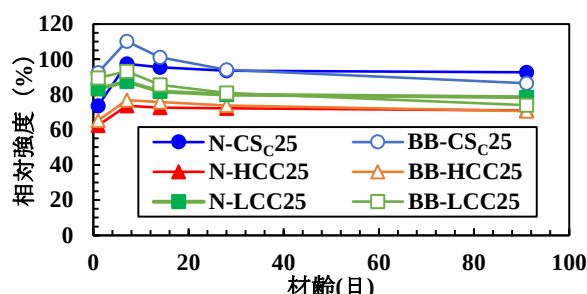


図-4 炭酸化物無混合に対する相対強度

影響や、生成される水和物の違い等を踏まえて更なる検討が必要である。材齢91日時点では、BBの相対強度はNよりやや低下する傾向であるが、CC無混合では、CC混合よりも高炉スラグの潜在水硬性による材齢28日以降の強度増加が比較的大きいためであると考えられる。

4. 高炉セメントを用いたコンクリートへのスラグ炭酸化物の適用

3.の結果からセメント炭酸化物を混合した場合の反応性について、特に材齢28日までは普通ポルトランドセメントよりも高炉セメントの方が高いことが確認された。また2.で示すように、スラグ炭酸化物の混合によりコ

ンクリート材料のCO₂排出原単位を大幅に削減できる可能性がある。ここでは、高炉セメントを使用したコンクリートにスラッジ炭酸化物を混合して検討を行った。スラッジ炭酸化物は作製から2ヶ月後まではスラリー状態で保管し、前処理として105℃環境下で恒量まで乾燥することで、粉体状で試験に供した。

4.1 試験概要

(1) 使用材料

使用材料を表-5に示す。セメントは普通ポルトランドセメントとした。高炉スラグ微粉末はJIS A 6206の高炉スラグ微粉末4000に相当する石こう添加品とした。スラッジ炭酸化物は表-1で示したものとした。細骨材は山砂、粗骨材は砕石2005とし、混和剤は配合に応じてAE減水剤あるいは高性能AE減水剤を使用した。

(2) 配合条件

コンクリートの配合条件とCO₂排出量を表-6に示す。各材料のCO₂排出原単位は既往の文献⁸⁹⁾および2.で算定した値を参照し、コンクリートのCO₂排出量を試算した。また、CS_sの単位量から、スラッジ炭酸化物の混合によるコンクリートへのCO₂固定量を算出した。

W/Bは65%と50%の2種類とし、単位水量は175kg/m³、s/aは48%とした。W/B65%に関しては、ベースとなるセメントは、普通ポルトランドセメントに対して高炉スラグ微粉末を42.5%内割置換とし、スラッジ炭酸化物のセメント内割置換率(CS_s/B)を0~30%とした。W/B50%に関しては、ベースのセメントを普通ポルトランドセメントと、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を42.5%、65%内割置換したものの3種類とし、それぞれ50N、50BB、50BCとした。さらに、50BCと同程度のコンクリートのCO₂排出量となる配合として、高炉スラグ微粉末の置換率が42.5%のセメントに対して、スラッジ炭酸化物を25%内割置換し、50BB-CS_s25とした。スラッジ炭酸化物を混合した配合のコンクリートへのCO₂固定量は、W/B65%では5.6~16.8kg/m³、W/B50%では18.3kg/m³であった。スランブは18±2.5cm、空気量は4.5±1.5%に設定し、混和剤とAE剤の量により調整した。

(3) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を表-7に示す。CS_sを混合した配合はコンクリートの粘性が増加する傾向であったため、CS_s無混合に対して練混ぜ時間を30秒長くした。練混ぜは20±2℃に制御した室内で行い、その後のコンクリートの試験に関しても同温度環境下にて実施した。

(4) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-8に示す。フレッシュコンクリートの試験および圧縮強度は全配合を対象とした。凝結時間およびブリーディングは、W/B65%のCS_s無混合とCS_s20%内割置換を対象とし、スラッジ炭酸化物

表-5 使用材料

材料名	記号		密度 (g/cm ³)	備考
上水道水	W		1	—
普通ポルトランドセメント	B	N	3.16	—
高炉スラグ微粉末		GBS	2.89	ブレン 4390(cm ² /g) 石こう添加品
スラッジ炭酸化物		CS _s	2.59	BET比表面積 68.0(m ² /g)
細骨材	S		2.59*	山砂
粗骨材	G		2.62*	砕石 2005
AE減水剤	Ad		—	リグニンスルホン酸化合物 ポリカルボン酸エーテル
高性能 AE減水剤	SP		—	ポリカルボン酸エーテル系 (標準形)
	SPR		—	ポリカルボン酸エーテル系 (遅延形)

*表乾状態

表-6 コンクリートの配合条件とCO₂排出量・固定量

配合名	W/B (%)	GBS/C (%)	CS _s /B (%)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	CO ₂ 固定量 (kg/m ³)
65BB	65	42.5	0	126	—
65BB-CS _s 10		42.5	10	110	5.6
65BB-CS _s 20		42.5	20	92	11.2
65BB-CS _s 30		42.5	30	76	16.8
50N	50	0	0	270	—
50BB		42.5	0	161	—
50BC		65.0	0	105	—
50BB-CS _s 25		42.5	25	107	18.3

表-7 コンクリートの練混ぜ方法

CS _s 無混合	(G+S+C)→練混ぜ15秒→(W+Ad or SP) →練混ぜ120秒→排出
CS _s 混合	(G+S+C)→練混ぜ15秒→CS _s →練混ぜ60秒 →(W+SPR)→練混ぜ90秒→排出

表-8 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	内容	対象配合
スランブ	JIS A 1101	—	全配合
空気量	JIS A 1128	—	全配合
凝結時間	JIS A 1147	—	65BB 65BB-CS _s 20
ブリーディング	JIS A 1123	—	
圧縮強度	JIS A 1108	材齢3, 7, 28日	全配合
促進中性化	JIS A 1153	—	W/B50%
塩化物イオンの浸透	硝酸銀溶液噴霧	□100mm試験体 10%NaCl溶液浸漬	W/B50%

の混合の影響を評価した。促進中性化と塩化物イオンの浸透については、W/B50%の配合で検討を行った。塩化物イオンの浸透試験は、100×100×400mmの試験体を材齢28日まで水中養生した後、JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方

法」の供試体の前処置を参考に、打設面と底面および 100×100mm の面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂の硬化後、試験体を濃度 10% の NaCl 水溶液中に浸漬した。所定の浸漬期間で試験体の 100×100mm の破断面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧し、白色化した境界面を読んだ値を塩化物イオンの浸透深さとした。試験体の破断方法、浸透深さの測定位置および破断面の被覆等は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」と同様とした。

4.2 試験結果

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-9 に示す。いずれの W/B においても、スラッジ炭酸化物を混合した場合はコンクリートの粘性が高くなり、経時変化によるスランプロスは大きくなる傾向であったため、高性能 AE 減水剤の遅延形を使用した。W/B65% において、炭酸化物の混合量が増加すると混和剤の添加率は増加する傾向であった。3. でも示したように、比表面積の大きい炭酸化物が増加することで、これに拘束される水が増加した影響と考えられる。また W/B50% では W/B65% よりも単位粉体量が多く、CS_s の単位量も増えることでコンクリートの粘性は高くなり、混和剤の添加率はさらに増加した。

(2) ブリーディングおよび凝結特性

コンクリートのブリーディングおよび凝結時間の結果を表-10 に示す。スラッジ炭酸化物の混合により、ブリーディング水は大幅に少なくなった。前述の通り、拘束水の増加による影響と考えられる。また凝結時間は、スラッジ炭酸化物を混合した場合、始発、終結ともに数時間短縮された。スラッジ炭酸化物中の微細な炭酸カルシウムによるセメントの初期水和促進などの影響が推察される。一般的には、高炉セメントを使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントの場合よりも凝結が遅延する傾向であるが¹⁰⁾、スラッジ炭酸化物を混合することで凝結時間が短縮可能と考えられた。

(3) 強度発現性

コンクリートの圧縮強度の結果を図-5 および図-6 に示す。W/B65% では、CS_s 混合の配合の圧縮強度は材齢 3 日から 28 日のいずれにおいても、CS_s 無混合と同等以上であり、特に CS_s が 10% および 20% 置換の配合の強度が高かった。W/B50% では、スラッグの置換率の増加に伴い材齢 28 日までの強度は小さくなるが、CS_s 混合の BB の強度に関しては、材齢 7 日から 28 日において CS_s 無混合の BB と同等以上の値を示した。これらのスラッジ炭酸化物混合による強度への影響は、3. のモルタルの結果の傾向と概ね整合している。さらにコンクリートの場合は、スラッジ炭酸化物混合によるブリーディング水の減少に起因する骨材界面の脆弱部形成の抑制が影響した可能性が考えられる。

表-9 フレッシュコンクリートの試験結果

配合名	Ad (B×%)	SP (B×%)	SPR (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
65BB	0.6	—	—	20.0	4.6
65BB-CS _s 10	—	—	0.8	20.0	4.9
65BB-CS _s 20	—	—	1.0	16.0	4.9
65BB-CS _s 30	—	—	1.4	19.0	5.0
50N	—	0.7	—	19.0	4.0
50BB	—	0.5	—	16.5	4.8
50BC	—	0.5	—	18.0	4.7
50BB-CS _s 25	—	—	2.4	19.5	4.7

表-10 コンクリートのブリーディングおよび凝結時間

配合名	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	凝結時間	
		始発	終結
65BB	0.36	8 時間 15 分	14 時間 0 分
65BB-CS _s 20	0.01	6 時間 0 分	12 時間 25 分

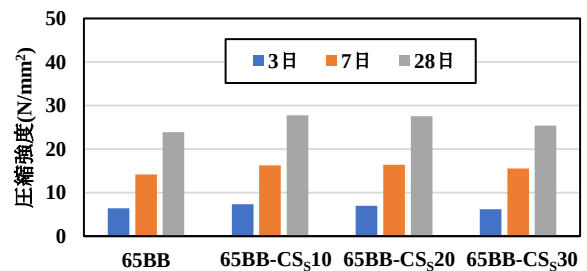


図-5 コンクリートの圧縮強度 (W/B65%)

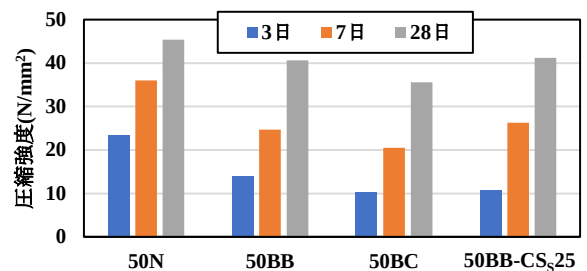


図-6 コンクリートの圧縮強度 (W/B50%)

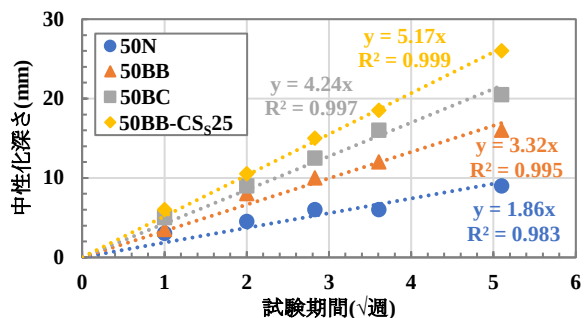


図-7 コンクリートの中性化深さの変化

(4) 中性化深さ

コンクリートの中性化深さの変化を図-7 に示す。い

表－11 コンクリートへの塩化物イオン浸透深さ

配合名	塩化物イオンの浸透深さ(mm)				
	1 週	4 週	8 週	13 週	26 週
50N	7.3	13.8	18.4	21.5	28.1
50BB	4.1	8.0	11.1	12.3	16.6
50BC	3.2	6.3	7.8	8.9	11.2
50BB-CS _s 25	4.1	7.9	9.1	9.9	12.1

ずれの配合においても、一般的にいわれるように中性化深さと経過時間の平方根は概ね比例関係であった。また配合間で比較すると、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い中性化深さは大きくなる傾向であり、CS_s混合のBBについてはBCよりも中性化深さが大きくなった。高炉スラグ微粉末の置換により、コンクリート中に生成される水酸化カルシウムが減少する事に加え、スラッジ炭酸化物の混合により、普通ポルトランドセメントの量が減少する事で比較的早い段階で中性化が進行したと考えられる。また、前述の様にスラッジ炭酸化物には約5%の骨材が含有されており、実質的なW/Bが若干増加していることも影響していると考えられる。

(5) 塩化物イオンの浸透

コンクリートへの塩化物イオンの浸透深さを表－11に示す。高炉スラグ微粉末で置換率した場合には塩化物イオンの浸透深さは小さく、一般的にいわれるように塩化物イオンを固定する水和物の生成や組織の緻密性によるものと考えられる。一方で浸漬8週以降では、CS_s混合のBBはCS_s無混合のBBよりも浸透深さが小さく、BCに近い値であった。炭酸化スラッジの混合による塩化物イオンの浸透深さの低下の要因に関しては、空隙構造や生成する水和物の違いから更なる議論が必要である。

5. まとめ

高炉セメントを使用したコンクリートにスラッジ炭酸化物を混合して検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) コンクリートスラッジを湿式炭酸化させることでCO₂を固定化した。このスラッジ炭酸化物は、炭酸化前の試料1tあたりのCO₂吸収量は208kg、炭酸化後の試料1tあたりのCO₂吸収量は178kgであった。
- (2) セメント炭酸化物をセメントの25%内割置換したモルタルは、石灰石微粉末や軽質炭酸カルシウムを置換した場合よりも、材齢7～28日までの強度が高かった。この傾向は、普通ポルトランドセメントより高炉セメントを使用した場合で顕著であった。
- (3) スラッジ炭酸化物を高炉セメントの25%内割置換したコンクリートの材齢7～28日の強度は、炭酸化物が無混合の場合の強度と同等以上であった。
- (4) スラッジ炭酸化物をコンクリートに混合することで、

ブリーディング水は大幅に少なくなった。また、高炉セメントを用いたコンクリートに適用することで凝結時間の短縮が可能と考えられた。

- (5) スラッジ炭酸化物を高炉セメントの25%内割置換したコンクリートはスラッジ炭酸化物無混合の場合より、中性化深さが大きくなる傾向であったが、塩化物イオンの浸透深さは小さくなった。

参考文献

- 1) 中村充志, 川之上太志, 中居直人, 一坪幸輝: 化学吸着方によるセメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収技術の開発, 太平洋セメント研究報告, 第183号, pp.11-17, 2022
- 2) CO₂回収型セメント製造設備(C2SPキルン®)の実証試験を開始, TAIHEIYO CEMENT NEWS LETTER, 2024.4 参照: <https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/240403.pdf> (閲覧日: 2025年3月24日)
- 3) CO₂をフレッシュコンクリートに固定化する製造システム「カーボキャッチ™」の開発に成功, TAIHEIYO CEMENT NEWS LETTER, 2023.3 参照: https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/230315_1.pdf (閲覧日: 2025年3月24日)
- 4) 早川隆之ほか: コンクリートへのCO₂固定化技術の開発－NEDO助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」成果報告－, 太平洋セメント研究報告, 第183号, pp.30-42, 2022
- 5) 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CO₂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集, 第88巻, 第803号, pp.38-46, 2023.1
- 6) 石井祐輔, 黒川大亮, 田場祐道, 早川隆之: 炭酸化スラリーを用いたコンクリートの基本性能とCO₂の削減効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, 2024
- 7) サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース 参照: https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_05.html (閲覧日: 2025年3月24日)
- 8) 一般社団法人セメント協会: セメントのLCIデータの概要, p.8, 2024.1
- 9) 公益社団法人土木学会: コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて, コンクリートライブラリー165, p.66, 2023.10
- 10) 森山容州ほか: 高炉スラグ微粉末コンクリートの配合及び強度発現性について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.81-88, 1987.3