

環境配慮型コンクリート「Kcrete」の開発

Development of Environmentally Friendly Concrete“Kcrete”

為石 昌宏 ^{*1}	高馬 崇 ^{*1}	岡田 和成 ^{*2}	金澤 優樹 ^{*1}	山下 紘太郎 ^{*1}
Masahiro Tameishi	Takashi Koma	Kazunari Okada	Yuki Kanazawa	Kotaro Yamashita
	竹中 夏子 ^{*3}	世羅 敦史 ^{*4}	金輪 岳男 ^{*5}	尾中 享光 ^{*5}
	Natsuko Takenaka	Atsushi Sera	Takeo Kanawa	Yukimitsu Onaka

要旨

2050 年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、コンクリート分野においても CO₂ 排出量の削減は重要な課題である。そこで著者らは、単位セメントの使用量を低減した低炭素型コンクリートや、排ガス由来の CO₂ をカルシウム源に固定化した CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization: CO₂ 回収・有効利用) 材料である軽質炭酸カルシウム粉末を混和材として使用することで、CO₂ を間接的にコンクリートに吸収させる CO₂ 吸収コンクリートの検討を行い、プレキャストコンクリート製品への適用を経て早期の社会実装を目指している。

本報告では、市販の軽質炭酸カルシウム粉末と高炉スラグ微粉末を用いて、軽質炭酸カルシウムの混合割合と高炉スラグ微粉末置換率を変化させたときの強度特性を報告する。次に、新たに開発されたカーバイドスラリーと排ガス CO₂ を原料とした CCU 材料である軽質炭酸カルシウム (カーバイド軽カル) を混和した CO₂ 吸収コンクリート等の配合試験の結果、ならびに実際にプレキャスト製品へ適用し、安定した品質を確認するために実施した表層透気試験結果について報告する。

キーワード：環境配慮型コンクリート カーボンニュートラル カーボンネガティブ CCU 材料 表層透気係数

1. はじめに

現在、地球温暖化進行に起因する気候変動により、生態系などの自然環境への影響や、海面上昇や豪雨災害が発生し社会が脅かされつつある。その主要因とされる温室炭酸ガスの削減は、全世界が取り組むべき課題として、日本でも 2050 年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、官民一体となりその取組が進められている。建設業界においても、特に CO₂ 排出量の多いコンクリート分野における排出量の削減は、重要な課題の一つである。

そこで著者らは、低炭素型コンクリート、および CO₂ 吸収コンクリートの 2 種類の環境配慮型コンクリート「Kcrete (ケイクリート)」の研究開発を進めており、プレキャストコンクリート製品への適用を経て社会実装を目指している。なお、本報告ではコンクリート分類について図 1 に示すように定義する。低炭素型コンクリート「Kcrete L (ケイクリート L)」は、セメントを高炉スラグ微粉末などの材料に置き換えて単位セメント量を低減した配合である。また、CO₂ 吸収コンクリート「Kcrete N (ケイクリート N)」は、排ガス由来の CO₂ をカルシウム源に固定化した CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization: CO₂ 回収・有効利用) 材料である軽質炭酸カルシウム粉末を混和材として使用した配合である。そして、CCU 材料を多く混和する

ことで、コンクリート材料に由来する CO₂ 排出量がゼロとなるカーボンニュートラル、およびマイナスとなるカーボンネガティブコンクリートに分類される。

本報告では、高炉スラグ微粉末と既に市販されている CCU 材料である軽質炭酸カルシウム粉末を用いた配合の強度特性、また、新たに開発されたカーバイドスラリーと排ガス CO₂ を原料とした CCU 材料である軽質炭酸カルシウム¹⁾ (以下、カーバイド軽カル) を使用した CO₂ 吸収コンクリート等の配合試験の結果、ならびに実際にプレキャスト製品へ適用し、安定した品質を確認するために実施した表層透気試験結果について報告する。

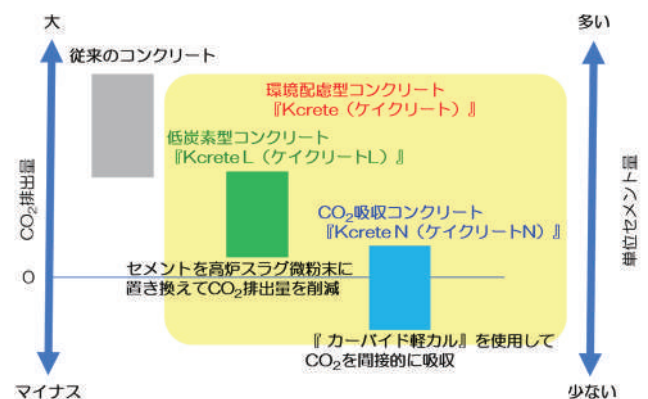


図1 環境配慮型コンクリートの分類

*1 技術研究所 *2 技術本部 技術企画部 *3 環境エンジニアリング本部 環境技術部

*4 環境エンジニアリング本部 環境企画部 *5 ケイコン株式会社

2. 市販の軽質炭酸カルシウムと高炉スラグ微粉末を混和した環境配慮型コンクリートの強度特性

高炉スラグ微粉末（以下、スラグ）と市販の軽質炭酸カルシウム（以下、軽カル）とを混和材として使用し、CO₂排出原単位の多いセメントの使用量を大幅に低減した環境配慮型コンクリートを実現するためには、一般コンクリート部材に適用可能な強度を有する、軽カルとの混和割合、スラグ置換率を、適切に把握する必要がある。ここでは、コンクリートの圧縮強度に関する基本特性を把握するため、モルタルでの試験を実施した。

2.1 モルタル試験の概要

試験に使用した材料の一覧を表1に示す。市販の軽カルには、廃コンクリートやスラッジなどの高アルカリ廃水に排ガス由来CO₂を反応させて製造された材料³⁾を使用した。試験の配合（コンクリートとした場合）は、水粉体比 39.8%、細骨材率 41.0%、単位水量 175 kg/m³、単位粉体量（セメント＋スラグ＋軽カル）440 kg/m³に固定し、セメント、スラグおよび軽カルの割合を変化させた。高性能減水剤についてはモルタルフロー値が 300±100mm になるよう調整し、その添加率を決定した。

表1 モルタル試験の使用材料

使用材料	摘要	CO ₂ 排出 原単位 ^{※1} [kg-CO ₂ /t]
水	水道水	0.235
セメント	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16 g/cm ³ 、ブレン値 3200 cm ² /g	766.6
スラグ	高炉スラグ微粉末： 密度 2.88 g/cm ³ 、ブレン値 4000 cm ² /g	26.5
軽カル	軽質炭酸カルシウム ³⁾ ： 比表面積 2500 cm ² /g以上	-390 ³⁾
細骨材	山砂：京都府城陽市産、密度 2.56 g/cm ³ 石灰岩砕砂：滋賀県米原市産、密度 2.68g/cm ³	3.70
高性能減水剤	ポリカルボン酸系	350

※1：輸送時や施工時などのCO₂排出量は含まない 原料や製造時のCO₂排出量を基にした値

表2に軽カル割合とスラグ置換率を変化させた各試験ケースと、各配合（コンクリート換算）のCO₂排出量を示す。軽カル割合（軽カル量／粉体量）は0%、25%、50%、65%、75%、および95%の6ケースとし、それぞれの軽カル割合において、結合材（セメント＋スラグ）のスラグ置換率（スラグ量／結合材量）を0%、20%、40%、60%、80%、および95%の

6ケースに変化させた合計36ケースの試験を行った。なお、軽カル配合コンクリートの圧縮強度特性との比較のため、スラグ置換率60%において、石粉である重質炭酸カルシウム（以下、重カル）を混和したケースも同様に試験を実施した。

試験は練り混ぜ後、モルタルフローと空気量を確認して、供試体（φ50×100）を作製し、材齢1日で脱型したのち、材齢14日まで水中養生（20℃）を実施して圧縮強度試験に供した。

表2 各試験ケースのCO₂排出量

CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /m ³]		軽カル割合					
		0%	25%	50%	65%	75%	95%
スラグ置換率	0%	344	216	90	15	-35	-131
	20%	278	167	57	-8	-52	-135
	40%	213	119	25	-31	-69	-139
	60%	148	70	-8	-54	-84	-143
	80%	83	21	-40	-77	-100	-147
	95%	34	-16	-65	-94	-113	-149

■ カーボンネガティブ

2.2 圧縮強度試験の結果

表3に各試験ケースの圧縮強度結果の一覧を、図2に軽カル割合と圧縮強度の関係を示す。また、表4に各試験ケースの圧縮強度比の一覧を、図3に軽カル割合と圧縮強度比の関係を示す。

スラグ置換率0%、20%、40%、および60%において、軽カル割合が25%を超えると圧縮強度の低下が大きくなる傾向が見られる。一方、スラグ置換率80%および95%においては軽カル割合が50%以下では強度低下がゆるやかであり、50%を超えると強度低下が大きくなる傾向が見られ、スラグ割合により傾向が異なる。

スラグ置換率20%、40%、および60%では、全ての軽カル割合においてスラグ置換率0%の圧縮強度を上回った。同様に、スラグ置換率80%では軽カル割合が50%、65%、75%、および95%で、また、スラグ置換率95%では軽カル割合75%で、スラグ置換率0%の圧縮強度を上回った。

このように混和材として軽カルを使用する場合、セメント単体と軽カルを組み合わせるより、結合材としてスラグを混合し混合セメントとした方が、圧縮強度が増加するケースが多くみられた。この理由としては、軽カルを混和することでスラグの潜在水硬性反応が促進され、強度増加した可能性があると考えられる。

なおスラグ置換率60%の重カル配合モルタルと軽カル配合を比較すると、軽カル配合の圧縮強度比が1.55～3.70倍程度、高くなっており、この結果からも重カルと異なり軽カルが強度増加に寄与する性質を有しているものと考えられる。

図4にスラグ置換率と圧縮強度の関係を示す。軽カル割合0%および25%では、スラグ置換率が60%以上となると圧縮強度の低下が大きくなる傾向が見られた。同様に、軽カル割合50%では、スラグ置換率が80%以上となると圧縮強度の低下が大きくなる傾向が見られた。また、軽カル割合0%ではスラグ置換率60%に、軽カル割合25%、50%、65%、および95%ではスラグ置換率40%に、軽カル割合75%ではスラグ置換率80%に、圧縮強度がピークとなる傾向が見られた。

図4において点線より下の水色で着色した範囲はCO₂排出量が0以下（カーボンネガティブコンクリート）となる配合割合である。この配合割合と圧縮強度との関係から、設計基準強度に応じてカーボンニュートラルやカーボンネガティブとなる最適な配合割合を決定できると考えられる。今回の試験条件では、圧縮強度30N/mm²程度で、カーボンニュートラルコンクリートおよびカーボンネガティブコンクリートを一般的なコンクリート部材に適用することを想定した場合、軽カル割合50%程度、スラグ置換率60%~80%とした配合が最適であると考えられる。

表3 各試験ケースの圧縮強度

スラグ置換率	圧縮強度 [N/mm ²]	軽カル割合					
		0%	25%	50%	65%	75%	95%
0%		50.3	45.1	29.0	14.3	8.2	0.1
20%		51.0	48.7	33.2	16.1	10.0	0.4
40%		51.1	50.2	35.7	19.9	12.2	1.2
60%		52.3	48.5	35.0	19.4	12.5	0.8
80%		39.3	35.0	33.3	18.5	14.2	0.3
95%		27.1	21.9	19.8	13.7	10.7	0.1

■ カーボンネガティブ

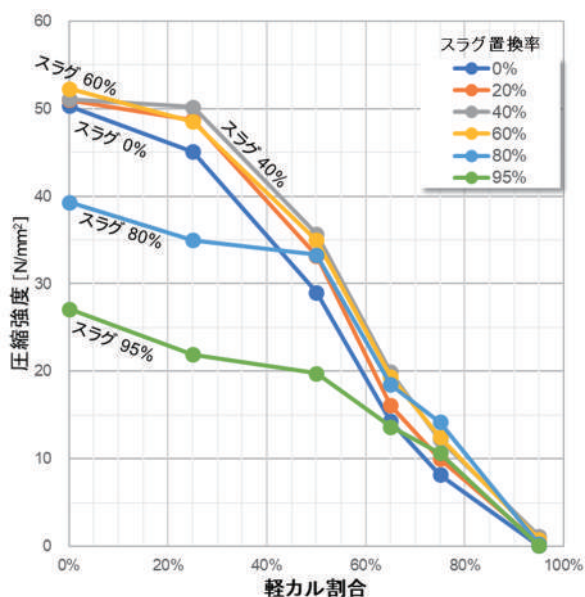


図2 軽カル割合-圧縮強度

表4 各試験ケースの圧縮強度比

圧縮強度比	スラグ置換率	軽カル割合					
		0%	25%	50%	65%	75%	95%
スラグ置換率	0%	1.00	0.90	0.58	0.28	0.16	0.01未満
	20%	1.00	0.95	0.65	0.32	0.20	0.01未満
	40%	1.00	0.98	0.70	0.39	0.24	0.02
	60%	1.00	0.93	0.67	0.37	0.24	0.02
	80%	1.00	0.89	0.85	0.47	0.36	0.01未満
	95%	1.00	0.81	0.73	0.51	0.39	0.01未満
(参考) 重カル割合							
60%		1.00	0.60	0.24	0.10	固化しない	固化しない

圧縮強度比：各スラグ置換率における軽カル割合0%の圧縮強度を基準にした比
■ カーボンネガティブ

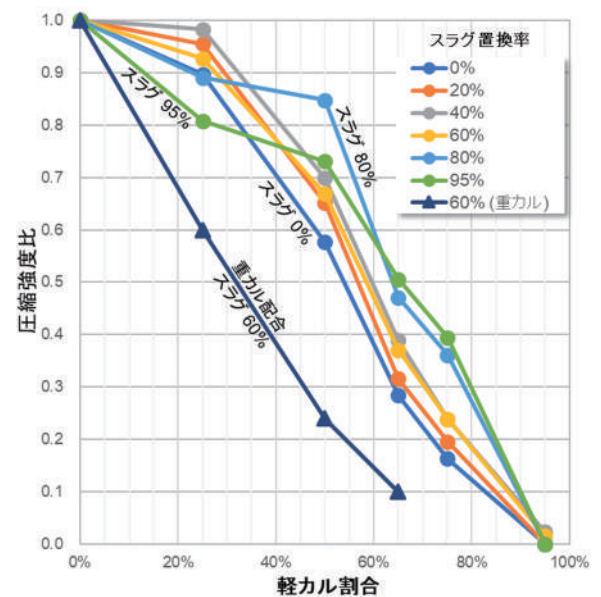


図3 軽カル割合-圧縮強度比

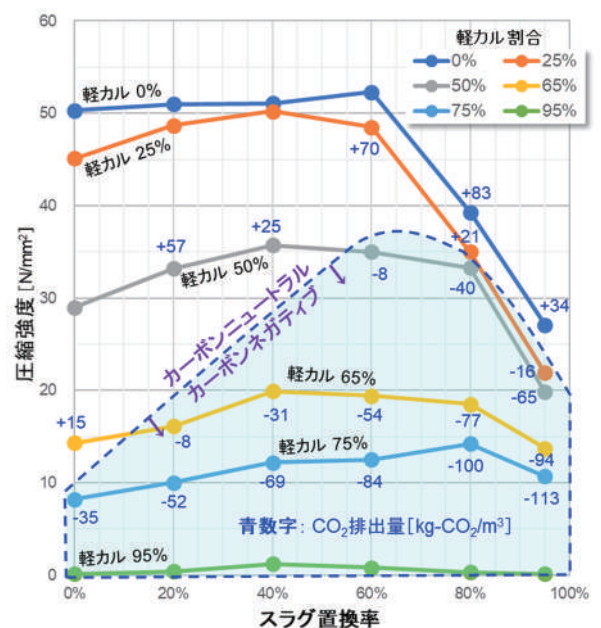


図4 スラグ置換率-圧縮強度

3. カーバイドスラリーと排ガス CO₂ を用いた軽質炭酸カルシウム¹⁾

3.1 カーバイド軽カルの概要

鴻池組らは、カーバイドスラリーと排ガス由来の CO₂ を原料にした軽質炭酸カルシウムの製造技術に関する開発にも取り組んでいる¹⁾。

アセチレンガス (C₂H₂) は、カーバイド (CaC₂) と水 (H₂O) の反応により製造される⁴⁾。その製造時の副生成物であるカーバイドスラリーは主成分が水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) であり、従来は酸洗浄廃液の中和処理などに活用されてきた。他方で、生石灰製造時に排出される二酸化炭素 (CO₂) に対しては、新炉導入や低炭素燃料の利用など排出量削減に向けた様々な取り組みが模索されているが、現時点での実用には至っていない⁵⁾。そこでカーバイドスラリーと排ガス CO₂ を原料とした CCU 材料である軽質炭酸カルシウム (カーバイド軽カル) の製造技術をラボスケールからスタートし、スケールアップについての検討を経て、2023 年秋にパイロットプラントでのカーバイド軽カル 10 トンの製造に成功した¹⁾。

図 5 に、カーバイド軽カルを用いたカーボンリサイクルのサプライチェーンを示す。本技術は排ガス CO₂ を資源と捉え、カーバイドスラリーと排ガス CO₂ を反応させ、炭酸カルシウム (CaCO₃) として固定・鉱物化することで、大気

中への CO₂ 排出を抑制するカーボンリサイクルのひとつであり、カーバイド軽カル製造だけに留まらず、カーバイド軽カルを使用したプレキャストコンクリート製造や地盤改良材への活用といった用途開発を通じて、建設分野における脱炭素に貢献するサプライチェーンの構築を図っている。

3.2 カーバイド軽カルの特徴

カーバイド軽カルの主な特徴として、以下のことがあげられる⁷⁾。

- ①原料のカーバイドスラリーは主成分が Ca(OH)₂ であり、CO₂ との反応性が高く、導入する排ガス CO₂ の 70% 以上を吸収することが可能となり、カーバイド軽カルを 1 トン製造したときの CO₂ の固定化量は約 440kg となる。
- ②カーバイド軽カル 1 トン製造に伴い生じる副産物は 50kg 以下 (5% 以下) で極めて少ないことが特長であり、生コンスラッジ・廃コンクリート・鉄鋼スラグなどをカルシウム源として炭酸カルシウムを製造するプロセスと比較しても副産物の発生量が極めて少ないプロセスである。

次章においてカーバイド軽カルを用いたプレキャストコンクリート配合について述べる。

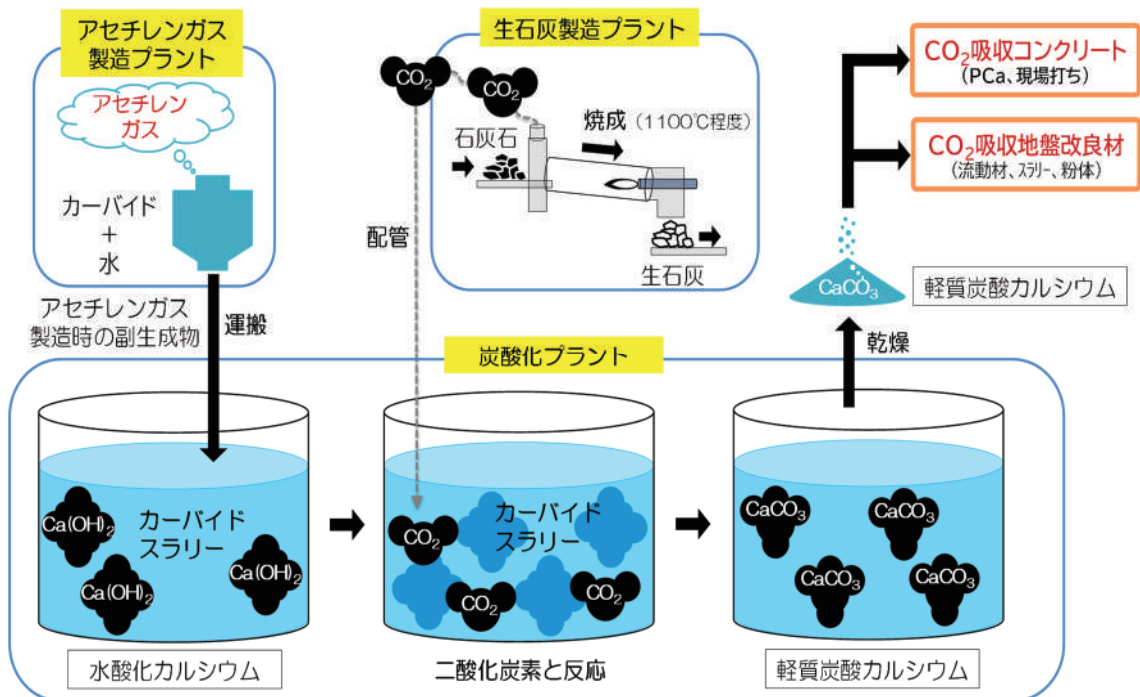


図 5 カーバイド軽カルを用いたカーボンリサイクルのサプライチェーン⁶⁾

4. 低炭素・CO₂吸収コンクリートのプレキャストコンクリートへの適用

2章で示した試験結果を基に、単位セメントの使用量を低減した低炭素型コンクリートおよび前述のカーバイド軽カルを混和材として使用したCO₂吸収コンクリートを使用したプレキャストコンクリート用の配合検討を行った。そして、実際に、両コンクリートを用いたプレキャスト製品を製造し、品質を確認するために表層透気試験を実施した結果について示す。

4.1 コンクリートの配合

表5に配合条件を示す。配合はプレキャスト製品用として、部材厚が50mm以下と薄い製品への充填性を考慮し、最大骨材寸法を15mmとし、かつスランプフロー値を600±100mmとした。表6に使用材料、表7に各コンクリートの配合を示す。低炭素型コンクリートおよびCO₂吸収コンクリートともに結合材には、普通ポルトランドセメントとスラグを使用し、結合材におけるスラグ置換率を80%とすることで、CO₂排出量の大きいセメントの使用量を低減した。また、CO₂吸収コンクリートに関しては、適切なフレッシュ性状が得られる範囲でカーバイド軽カルの混和量が大きくなるように配合を決定した。

表5 配合条件

項目	条件
最大骨材寸法	15mm
設計基準強度	材齢14日 30N/mm ² (製品同一養生)
スランプフロー	600±100mm
空気量	2.0±1.5%
塩化物含有量	0.30kg/m ³ 以下

表6 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類、物性
水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度:3.16g/cm ³
高炉スラグ微粉末	BS	ブレン値:4000cm ² /g、 密度:2.88g/cm ³
CCU粉末	CP	軽質炭酸カルシウム、 密度:2.4~2.8g/cm ³ 、純度:90%以上、 ブレン値:2500cm ² /g以上
細骨材	S1	山砂、絶乾密度:2.52 g/cm ³
	S2	石灰石砕砂、絶乾密度:2.57 g/cm ³
粗骨材	G	砕石、絶乾密度:2.67 g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表7 コンクリートの配合

No.	種別	W/P* (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
					W	C	BS	CP	S1	S2	G	SP
1	低炭素型 コンクリート	33.0	33.0	44.0	170	103	412	—	499	225	959	2.7
2	CO ₂ 吸収 コンクリート	33.0	62.5	43.0	175	56	224	250	671	—	940	5.3

* W/P: 水粉体比

表8に各配合の試験練り結果を一覧にして示す。なお、表中、圧縮強度の製品同一養生とは、実際のプレキャスト製品を製造する際と同一の条件（前置き20℃・2h→（20℃/hで昇温）45℃・5h→材齢18h脱型→20℃気中）で養生したものである。圧縮強度に関し、CO₂吸収コンクリート配合においては、水結合材比(W/B)が62.5%と通常のレディーミクストコンクリートの配合では呼び強度24以下の配合に相当するが、製品同一養生および標準養生ともに設計基準強度30N/mm²を十分満たしており、混和材として大量に使用したカーバイド軽カルが圧縮強度増加に寄与していると考えられる。

表8 試験練り結果

No.	種別	フレッシュ性状			圧縮強度(N/mm ²)		
		温度 (℃)	スランプ フロー (mm)	空気 量 (%)	製品同一養生		標準 養生
					σ18h	σ14d	
1	低炭素型 コンクリート	23.1	625× 615	2.2	41.1	54.5	68.0
2	CO ₂ 吸収 コンクリート	21.3	670× 665	1.6	21.3	37.5	44.6

4.2 CO₂排出量について

表9に各配合におけるコンクリート材料に由来するCO₂排出量を示す。なお、CCU材料であるカーバイド軽カルは、純度94.5%であり416 kg-CO₂/tのCO₂が固定されている。また、X線回折分析の結果、炭酸化後は水酸化カルシウムCa(OH)₂が含まれていないことが確認されており、ほぼ全量が炭酸化されていると考えられる。よって、製造時のCO₂排出量50 kg-CO₂/tを差し引くと、正味のCO₂排出原単位は-416+50=-366 kg-CO₂/tとなる。また、表中のNo.0標準(BB)は、No.1低炭素型コンクリートの結合材におけるスラグを高炉セメントB種相当である40%としたものである。低炭素型コンクリートのCO₂排出量は標準(BB)より半分以上であり61%の削減が図れる。また、CO₂吸収コンクリートのCO₂排出量は-36kg/m³とカーボンネガティブとなり、標準(BB)より114%の削減が図れるとともに排気ガス由来のCO₂を110kg/m³固定化できる試算となる。

表 9 各配合の CO₂ 排出量

No.	種別	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	標準(BB)を基準としたときの削減率(%)	標準(BB)を基準としたときの削減量 (kg/m ³)	CO ₂ 固定量 (kg/m ³)
0	標準(BB)	249	0	0	0
1	低炭素型コンクリート	96	61	153	0
2	CO ₂ 吸収コンクリート	-36	114	285	110

4.3 プレキャスト製品の製造および表層透気係数

4.3.1 プレキャスト製品の製造

低炭素型コンクリートおよび CO₂ 吸収コンクリートについて、ベンチフリーム 2 種 300 (U 字溝) および L 形側溝 500B (エプロン) の 2 種類のプレキャスト製品を実際のプレキャスト製造工場において製造した。ミキサは強制二軸式 (容量 2.75m³) を使用し、粗骨材を除くモルタルを 180 秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入し 90 秒間練り混ぜを行った。打込みには、軽便バイブレータを使用し、締め固めを行った。養生は、打込み完了後 2 時間経過した後、約 45℃で 5 時間蒸気養生を実施し、その後、翌朝まで徐冷し、材齢 18 時間で脱型を行った。脱型後の各製品の状況を写真 1 および写真 2 に示す。外観上各製品ともに、ひび割れ、充填不良や欠け等の不具合はなく、通常配合で製造する製品と同等の品質であることを確認した。



写真 1 U 字溝



写真 2 エプロン

4.3.2 表層透気試験結果

前述の各プレキャスト製品は、実験のため屋外ヤードに置き、直射日光および降雨の影響を受ける環境下において約 1 か月静置した後、Torrent 法により表層透気係数 (k_T 値) を測定した。表 10 に測定結果を一覧にして示す。低炭素型の表層透気係数 (×10⁻¹⁶m²) は 0.0003~0.0001 未満、CO₂ 吸収では 0.0024~0.0007 と、どちらのコンクリートも 5 段階評価で最も高いグレードである「優」となった。なお、低炭素型の表層透気係数の方が小さい数値であったのは、水結合材比および圧縮強度の違いが影響しているものと考えられる。

表 10 表層透気試験結果

部材	部位	配合					
		低炭素型コンクリート			CO ₂ 吸収コンクリート		
		水分率 (%)	表層透気係数 (×10 ⁻¹⁶ m ²)		水分率 (%)	表層透気係数 (×10 ⁻¹⁶ m ²)	
			k _{T6}	グレード		k _{T6}	グレード
エプロン	排水部上面	4.6	0.0003	優	4.3	0.0024	優
	縁石部側面	4.5	0.0001 未満	優	4.2	0.0021	優
U 字溝	底板上面	4.5	0.0001 未満	優	4.5	0.0007	優

5. まとめ

本開発において、CCU 材料である軽カル、カーバイド軽カルを使用することで、カーボンニュートラルさらにはカーボンネガティブコンクリートとしてプレキャストコンクリートへ適用できることを確認した。本開発の CO₂ 吸収コンクリートを使用し作製したプレキャスト製品 (U 字溝等) を、現在施工中の 2025 年日本国際博覧会小催事場に適用することを予定している。今後は、長期耐久性の更なる検討を行い、擁壁等の大型プレキャストコンクリート部材や場所打ちコンクリート配合への検討を進め、脱炭素社会実現に向けて建設工事における更なる CO₂ 排出量の削減へ取り組んでいく所存である。

なお、本開発に関して、高圧ガス工業株式会社、白石工業株式会社および吉澤石灰工業株式会社の関係各位の皆様方の多大なるご協力ならびにご指導を頂いたことに心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) ㈱鴻池組: アセチレンガス製造時の副生成物「カーバイドスラリー」と排ガス由来の CO₂ を原料にした CCU 材料の製造技術を共同開発、<https://www.konoike.co.jp/news/2024/202403183319.html> (2024. 3. 18 参照)
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)、コンクリートライブラリー125、2005
- 3) 佐々木猛、八木利之: エコタンカル® (軽質炭酸カルシウム) とその可能性、セメント・コンクリート、No. 900、pp. 58-61、2022. 02
- 4) 高圧ガス工業㈱: ガス製品概要アセチレン、<https://www.koatsugas.co.jp/product/gas/industrial01/> (2024. 3. 21 参照)
- 5) 経団連: 2050 年カーボンニュートラルに向けた石灰製造工業会のビジョン、https://www.keidanren.or.jp/policy/2022/095_kobetsu11.pdf (2024. 1. 18 参照)
- 6) ㈱鴻池組: 鴻池組サステナビリティレポート 2024、p. 17、2024
- 7) 世羅敦史ら: カーバイドスラリーと排ガス CO₂ を用いた CCU 材料の製造技術の開発、令和 6 年度土木学会全国大会 (投稿中)、2024