

廃石膏ボードを原料として CO₂ を固定した 合成炭酸カルシウムを用いるコンクリートの基本的な品質評価

梅津 真見子^{*1}・宮原 茂禎^{*1}・畠 明仁^{*1}・小西 正芳^{*2}Keywords : synthetic calcium carbonate, waste plasterboard, CCU, concrete, CO₂ reduction, resource circulation合成炭酸カルシウム, 廃石膏ボード, CCU, コンクリート, CO₂削減, 資源循環

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、排ガスなどの CO₂ を回収し、廃棄物や副産物由来のカルシウムと反応させて鉱物固定した、CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料である合成炭酸カルシウム（以降、合成炭カル）の製造開発が盛んに行われている¹⁻³⁾。CCU 材料である合成炭カルの持続的な生産による CO₂ 削減と資源循環のためには用途の確保が必須であり、長期に安定して CO₂ を固定し、解体後の再利用が可能なコンクリート材料としての活用が期待される。

大成建設では、CCU 材料の合成炭カルを大量に使用し、カーボンネガティブを達成した T-eConcrete/Carbon-Recycle^{4, 5)}の開発と実用化を進めている。しかし、合成炭カルをコンクリートに使用した例はまだ少なく、利用時に参照できる品質規格も無いのが現状である。

筆者らのグループでは、CCU 材料の合成炭カルを使用したセメント・コンクリートの規準や規格化による

普及拡大を目指して、廃石膏ボード由来のカルシウムに CO₂ を固定した合成炭カルの製造^{6, 7)}と、これを增量材として使用したコンクリートの品質確認試験⁸⁻¹⁴⁾を NEDO 事業³⁾の一環として進めている（図-1）。

石膏ボードは建築物の内装材料として使用され、新築や解体工事から廃材が発生する。その年間排出量は増大し続け、2047 年には 300 万 t を超えることが想定されている（図-2）¹⁵⁾。新築での廃材は石膏ボード原料として再利用されるが、解体による廃材は一部がセメント原料等に利用されるものの、大部分は埋立処分される。また、硫化水素発生の懸念から管理型処分が義務化され、再資源化の促進が求められている¹⁵⁾。

本報では、廃石膏ボードを原料とした合成炭カルの製造方法や品質を紹介するとともに、普通ポルトランドセメント（以降、OPC）に対して内割で合成炭カルを 5~25%置換したコンクリート（添加量 16~100kg/m³）のフレッシュ性状・物性・耐久性などの基本的な品質を従来の普通コンクリートと比較して報告する。

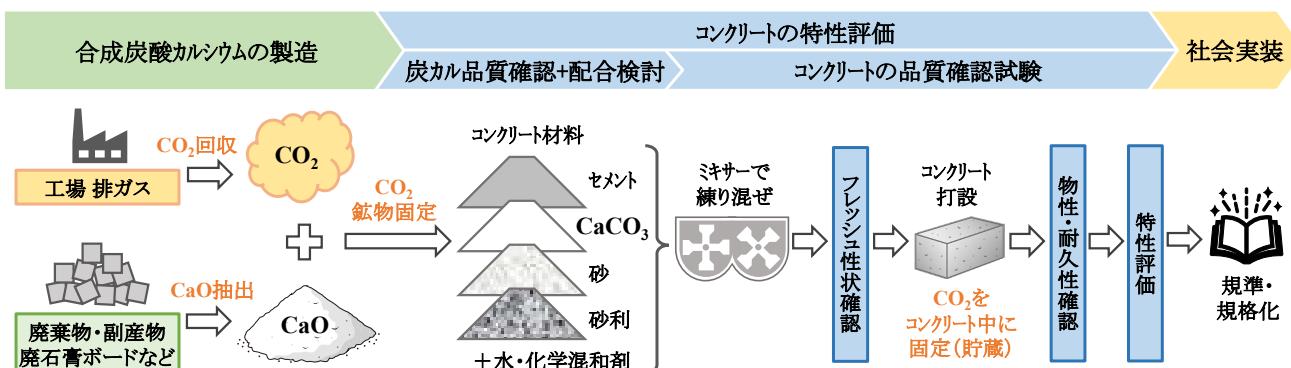


図-1 合成炭酸カルシウムの製造とコンクリートへの利用
Fig. 1 Production of synthetic calcium carbonate and its utilization in concrete

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

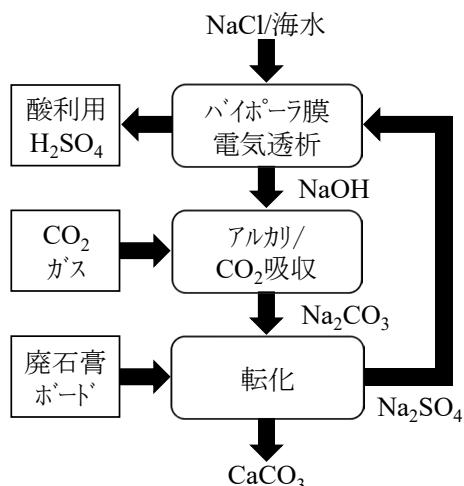
*2 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所



図-2 廃石膏ボードの年間排出量推計(2014年版)

(文献15を再構成)

Fig. 2 Estimated annual emission of waste plasterboard (2014) (Reconstruction of Ref.15)

図-3 合成炭酸カルシウムの製造フロー
(文献7を再構成)Fig. 3 Synthetic calcium carbonate production flow
(Reconstruction of Ref.7)

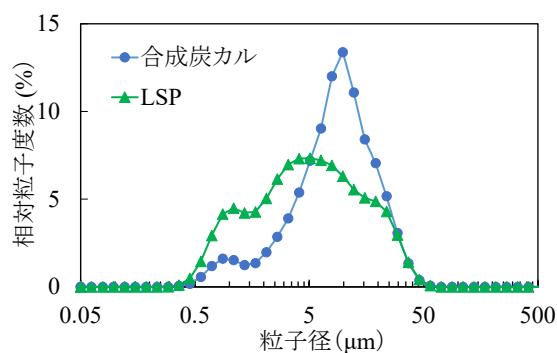
2. 炭酸カルシウムの品質

2.1 炭酸カルシウムの品質規格

従来、セメント・コンクリート材料として使用されてきた炭カルは天然の石灰石を粉碎した石灰石微粉末（以降、LSP）であり、重質炭酸カルシウムとも呼ばれている。その品質はJIS R 5210「ポルトランドセメント」の少量混合成分、JCI-SLP「コンクリート用石灰石微粉末品質規格（案）」¹⁶⁾、JIS A 5041「コンクリート用碎石粉」などの規格値により管理されている。LSPはセメントの少量混合成分（置換率5%以下）や高流動コンクリートの混和材として、さらに欧州では石灰石フィラーセメント（EN-197：置換率5～35%）として広く使用されており、流動性や材料分離抵抗性の改善、ブリーディングや水和熱の抑制効果などをもたらす^{16, 17)}。

表-1 合成炭酸カルシウムの品質
Table Quality of synthetic calcium carbonate

項目	試験方法	規格値	試験値
ブレーン比表面積 (cm ² /g)	JIS R 5210	—	8,690
CaCO ₃ 純度 (%)		90以上	93.9
酸化アルミニウム (%)		1.0以下	0.40
湿分 (%)	JIS A 5041	1.0以下	0.38
密度 (g/cm ³)		2.5以上	2.60
フロー値比		90以上	101
活性度指数 (%)		60以上	72
150μm ふるい残分 (%)		5以下	0
メソプローブ吸着量 (mg/g)	JCAS I-61	1.0以下	0.53

図-4 粉体の粒度分布
Fig. 4 Particle size distribution of powders

2.2 合成炭酸カルシウムの製造方法と品質

一般的に、化学的製法による沈降炭カルは、重質炭カルと比べてかさ高く見かけ比容 (ml/g) が大きいことから、軽質炭酸カルシウムと呼ばれている¹⁸⁾。しかし近年、炭カルの製造方法は多岐に及び、再分類が必要と考えられるため、本報では合成炭カルと呼ぶ。

研究対象とした合成炭カルは、反応式[1]と図-3に示すように、廃石膏ボード粉 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を水中で炭酸ソーダ (Na_2CO_3) と混合させて、 CaCO_3 に転化したものである⁷⁾。炭酸ソーダは、転化処理後の廃液である Na_2SO_4 をバイポーラ膜電気透析法により苛性ソーダ (NaOH) に変換し、排ガスなどの CO_2 ガスを通すことによって得られる⁷⁾。



表-1に合成炭カルの品質を示す。合成炭カルに関する品質規格は無いが、JIS R 5210の少量混合成分のほか、JCI-SLP、JIS A 5041の該当項目の規格値を満足していることを確認した。図-4と写真-1に、レーザー回折式

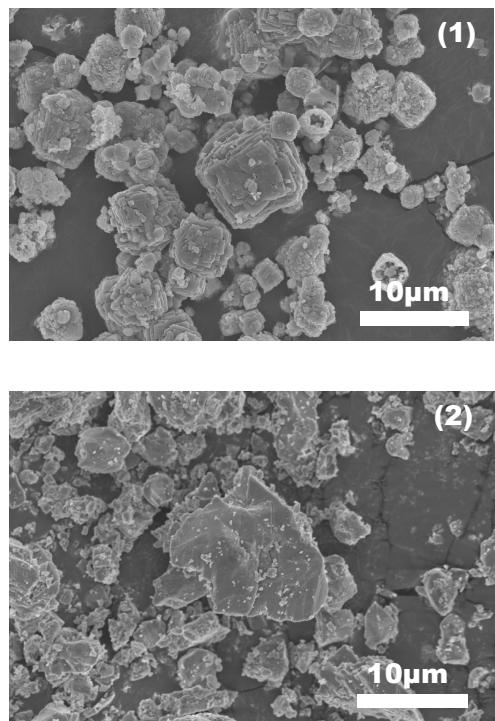


写真-1 SEM写真

(1) 合成炭酸カルシウム, (2) 石灰石微粉末(LSP)

Photo.1 SEM images

(1) synthetic calcium carbonate, (2) limestone powder (LSP)

粒度分析装置で測定した合成炭カルの粒度分布と SEM 観察による粒子の写真を LSP (ブレーン比表面積 4,980cm²/g) と比較して示す。合成炭カルは液相中で析出するため、ブレーン比表面積が 8,690 cm²/g と大きく、粒度分布が狭いことを特徴とする。粒子形状はブロック状で凝集している。一方、LSP は天然の石灰石を粉碎して製造するため、粒度分布が広く、粒子形状は不定形である。粉末 X 線回折法 (XRD) では、どちらの炭カルも結晶相としてカルサイトが同定された。

3. コンクリートの特性評価

3.1 品質確認試験の手順

コンクリートの品質確認試験では、合成炭カルの置換率が異なるコンクリートを同等の圧縮強度 (材齢 28 日) に調整したうえで、耐久性などの品質を普通コンクリートと比較した。このため、まず配合選定試験として、それぞれの合成炭カルの置換率について水粉体比 (以降、W/P) を変化させて、フレッシュ性状の確認と圧縮強度試験を行った。次に、得られた材齢 28 日の圧縮強度とセメント水比 (以降、C/W) との関係から、圧縮強度が 45N/mm² になるよう水セメント比 (以降、W/C) を決定した。この W/C を用いて圧縮強度、

表-2 使用材料

Table 2 Materials

名称・規格	記号	仕様・物性など
水	W	上水道水
普通ポルトランドセメント JIS R 5210	OPC	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,330cm ² /g, 少量混合成分として石灰石微粉末を 5% 以下含む
合成炭カル	CC	表-1に記載
細骨材 JIS A 5308	S	大井川水系陸砂, 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.14%
粗骨材 JIS A 5005	G	青梅産混合碎石 2005, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.67%
	Ad1	AE 減水剤, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Ad2	AE 剤, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
化学混和剤 JIS A 6204	Ad3	AE 剤, 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤
	Ad4	消泡剤

ヤング率、ポアソン比を、耐久性試験として凍結融解、中性化、塩分浸透に対する抵抗性を評価した。

3.2 配合選定試験

3.2.1 材料と試験方法

表-2 に使用材料を示す。配合選定試験では、合成炭カルを OPC に対して内割で 0, 5, 10, 25%置換し、それぞれ単位水量を 165kg/m³, W/P を 40, 50, 60%に変化させた配合でコンクリートを製造した (表-3)。使用した OPC には予め少量混合成分として LSP が 5%以下含まれており、これを踏まえて置換率 0 と 5%は OPC の少量混合成分相当、10 と 25%は石灰石フィラーセメント相当の置換率とした。

コンクリートは容量 100L の強制二軸式ミキサを用いて混練した。フレッシュ性状の目標値は、スランプが 12±2.5cm, 空気量が 4.5±1.5%とし、これを満足するよう化学混和剤の添加量を適宜調整した。フレッシュ性状試験は、0, 30, 60 分後に実施し、凝結試験 (JIS A 1147) も併せて行った。コンクリートは φ100×200mm の型枠に打設し、材齢 2 日で脱型したのち、所定の材齢まで 20°Cで水中養生し、圧縮強度試験 (JIS A 1108) を行った。

3.2.2 試験結果と考察

目標のスランプを得るために必要な AE 減水剤の添加量は、合成炭カルの置換率 0 と 5%で粉体に対し 1.0%, 置換率 10%で 1.0~1.2%, 置換率 25%では 1.4%であった (表-3)。一般的に、LSP を粉体に対し内割置換した配合のスランプ・流動性は置換率の増加に伴い大きくなると報告されている^{16, 17)}。しかし、本研究の範囲で

表-3 コンクリートの配合

Table 3 Mix proportion of concrete

CC/P (%)	W/P (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	粉体:P		骨材		Ad1 (P×%)	
				OPC	CC	S	G		
0	40.0	40.0	165	413	0	766	965	1.0	
	50.0	50.0	165	330	0	831	967	1.0	
	60.0	60.0	165	275	0	889	954	1.0	
5	40.0	42.1	165	392	20.6	764	963	1.0	
	50.0	52.5	165	314	16.5	830	965	1.0	
	60.0	63.2	165	261	13.8	888	953	1.0	
10	40.0	44.5	165	371	41.3	763	961	1.2	
	50.0	56.6	165	297	33.0	829	964	1.0	
	60.0	66.5	165	248	27.5	887	951	1.1	
25	40.0	53.4	165	309	103.1	758	955	1.4	
	50.0	66.5	165	248	82.5	825	959	1.4	
	60.0	80.1	165	206	68.8	883	948	1.4	

表-4 スランプと空気量の経時変化 (W/P 50%)

Table 4 Slump and air volume change over time

CC/P (%)	スランプ(cm)			空気量(%)		
	0分	30分	60分	0分	30分	60分
0	12.0	9.0	7.5	4.9	4.5	4.0
5	11.5	8.0	7.0	3.0	2.4	2.5
10	10.5	7.5	6.0	3.1	2.5	2.2
25	13.0	9.0	7.0	5.8	5.6	5.2

は、合成炭カルの置換率（炭カル単位量）の増加に伴いスランプ・流動性が低下し、AE 減水剤の添加量がやや増加した。これは LSP と比較してプレーン比表面積が大きく、粒子径が揃った合成炭カルを添加したことにより、拘束水や化学混和剤の吸着量が増加したためと考えられるが、粒子形状や夾雑物の影響も含めてより詳細な検討が必要である。

W/P が 50% の場合のスランプと空気量の経時変化を表-4 に示す。経時によるスランププロスは、合成炭カルの置換率 0~10% でほぼ同等、置換率 25% でやや増加する傾向を示した。空気量に関しては、経時 0 分では 3.0~5.8% とばらつきがあるものの、経時 60 分の低下量は 0.5~0.9% とほぼ同等であった。スランプと空気量は合成炭カルの置換率によらず、混和剂量を調整することで従来の普通コンクリートと同様に制御可能であった。

W/P が 50% の場合の凝結試験の結果を図-5 に示す。凝結の始発は合成炭カルの置換率 10% までは基準とし

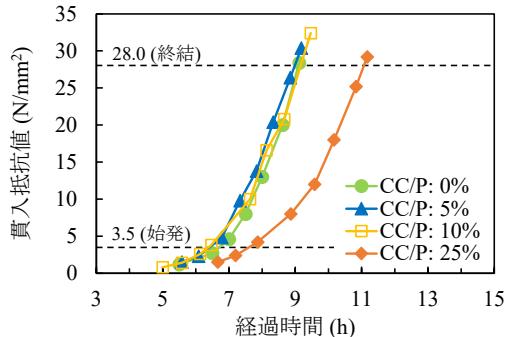


図-5 凝結時間 (W/P 50%)

Fig.5 Setting time

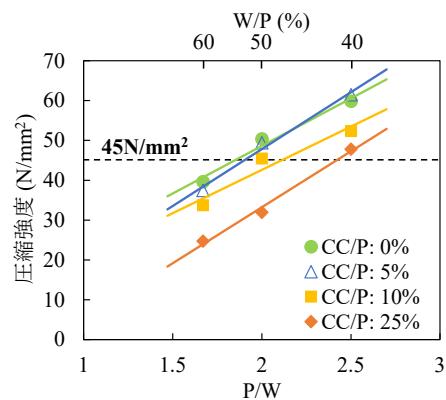


図-6 P/W と材齢 28 日の圧縮強度との関係

Fig.6 Relationship between P/W and compressive strength at 28 days

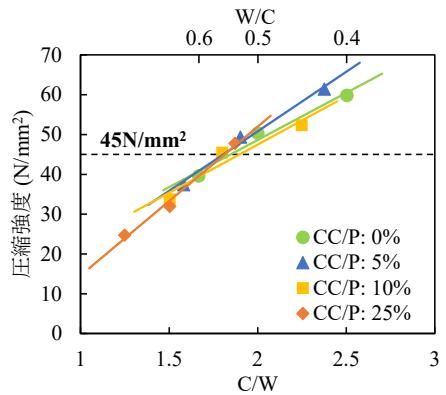


図-7 C/W と材齢 28 日の圧縮強度との関係

Fig.7 Relationship between C/W and compressive strength at 28 days

た普通コンクリート（置換率 0%）とほぼ同等であり、置換率 25% で 1 時間程度遅れる傾向にあった。この凝結時間の遅れは、AE 減水剤の添加量の増加が影響したものと推定されるが、実施工において問題のない範囲と考えられる。

粉体水比（以降、P/W）および C/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図-6 と図-7 に示す。P/W で圧縮強度を整

表-5 コンクリートの配合
Table 5 Mix proportion of concrete

CC/P (%)	W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	P		骨材		Ad1 (P×%)
				OPC	CC	S	G	
0	54.1	54.1	165	305	0	859	959	1.0
5	52.6	55.4	165	298	16	836	972	1.0
10	47.4	52.7	165	313	35	822	955	1.0
25	41.4	55.1	165	299	100	763	962	1.4

表-6 スランプと空気量の経時変化

Table 6 Slump and air volume change over time

CC/P (%)	スランプ (cm)			空気量 (%)		
	0 分	30 分	60 分	0 分	30 分	60 分
0	12.0	9.0	7.0	4.8	4.4	4.1
5	13.0	10.0	8.5	5.8	5.3	4.6
10	12.5	8.0	7.0	5.6	4.9	4.1
25	10.0	4.0	3.5	4.5	3.5	3.3

理すると、圧縮強度は合成炭カルの置換率 0 と 5%ではほぼ同等であり、置換率 10 と 25%では置換率の増加に伴い低下した(図-6)。この強度低下は、合成炭カルの置換率の増加に伴うセメント量の減少により、W/C が相対的に大きくなつたためと考えられる。一方、C/W で圧縮強度を整理した場合には、合成炭カルの置換率に関わらず、基準とした普通コンクリート(置換率 0%)とほぼ同一線上に分布した(図-7)。本研究の範囲では、材齢 28 日の圧縮強度と C/W は線形関係にあり、従来の普通コンクリートと同様に C/W と圧縮強度の関係で配合を選定できる。

次章の品質評価試験に用いるコンクリートは、国土交通省が土木コンクリート構造物の品質確保のために定めた W/C の上限値である 55%を考慮して¹⁹⁾、材齢 28 日での圧縮強度が 45N/mm²となる配合とした(図-6 と 図-7)。決定した W/C は、それぞれ置換率 0%が 54.1%、置換率 5%が 55.4%，置換率 10%が 52.7%，置換率 25%が 55.1%である。

3.3 同一強度における品質評価試験

3.3.1 フレッシュ性状試験

材齢 28 日で同一強度(45N/mm²)となる W/C を調整した配合を表-5 に示す。使用材料と試験方法、およびフレッシュ性状の目標値は、配合選定試験と同様である。

スランプの目標値を満足するために必要な AE 減水剤の添加量は、合成炭カルの置換率 0~10%で粉体に対し 1.0%，置換率 25%で 1.4%と増加した(表-5)。表-6 にスラ



CC/P: 0% (スランプ 12.0cm) CC/P: 5% (スランプ 13.0cm)



CC/P: 10% (スランプ 12.5cm) CC/P: 25% (スランプ 10.0cm)

写真-2 経時 0 分のスランプ試験

Photo.2 Slump test at 0 minutes over time

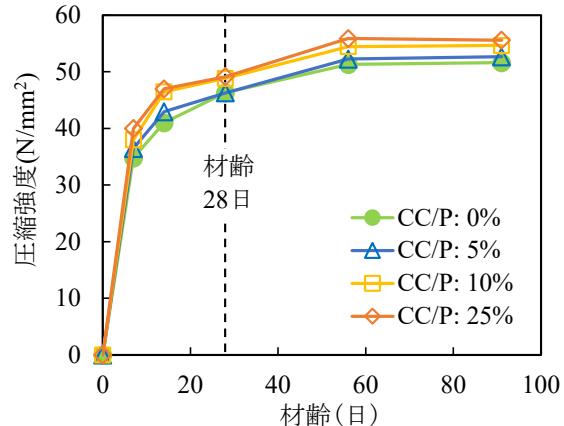


Fig.8 Compressive strength change over time

ンプと空気量の経時変化を、写真-2 に経時 0 分でのスランプ試験の写真を示す。経時によるスランププロセスは合成炭カルの置換率 0~10%ではほぼ同等、置換率 25%ではやや増加した。一方、空気量の経時 60 分の低下量は 0.7~1.5%とすべての置換率でほぼ同等となった。

コンクリートは試験方法に応じて φ100×200mm もしくは 100×100×400mm の型枠に打設し、材齢 2 日で脱型した後、所定の材齢まで 20°Cで水中養生を行った。

3.3.2 物性試験

材齢 7, 14, 28, 56, 91 日の供試体において、圧縮強度とヤング係数 (JIS A 1149)，およびポアソン比 (JIS A 1113) を測定した。圧縮強度の経時変化を図-8 に示す。材齢 28 日の圧縮強度はすべての配合で 45N/mm²相当であり、材齢 28 日で強度一定のコンクリートを製造する

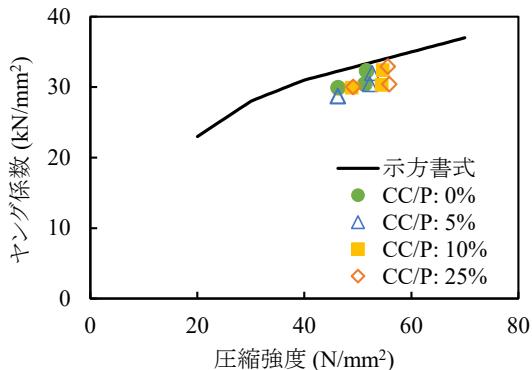


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係

Fig.9 Relationship between compressive strength and young's modulus

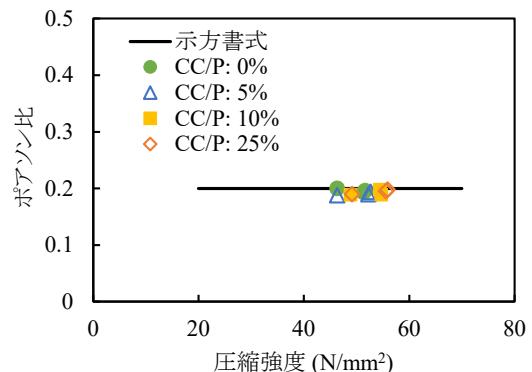


図-10 圧縮強度とポアソン比の関係

Fig.10 Relationship between compressive strength and poisson's ratio

ことができた。強度はすべての配合で材齢 56 日まで増加し、これ以降では緩やかになった。

圧縮強度とヤング係数およびポアソン比との関係を図-9 と図-10 に示す。ポアソン比はすべての配合で土木学会「2022 年版コンクリート標準示方書 [設計編]」²⁰⁾（以下、示方書）と同様の約 0.2 であった。一方、ヤング係数は示方書式よりやや低い値を示したが、基準とした合成炭カルの置換率 0% と同等であることから骨材の影響と推察され、設計上は従来の普通コンクリートと同様に扱えるものと考えられる。

3.3.3 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 (A 法) に準拠した。材齢 28 日まで水中養生した 100×100×400mm 角柱供試体を、-18~5°C の範囲で所定の温度履歴を与えて実施した。

凍結融解試験における相対動弾性係数と質量変化率を図-11 に示す。合成炭カルの置換率 0~10% では、相対動弾性係数が 300 サイクルまで 95% を示した。置換率 25% では、相対動弾性係数が 210 サイクル以降にやや低下するものの、300 サイクル終了時点では 91% を示した。いずれの置換率においても凍結融解に関する照査

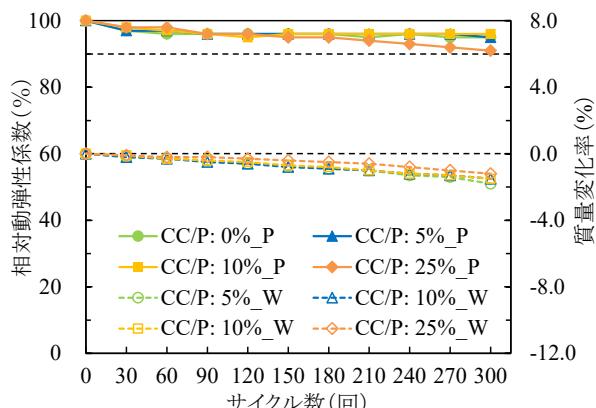


図-11 相対動弾性係数(P)と質量変化率(W)

Fig.11 Relative dynamic modulus of elasticity (P) and rate of mass change (W)

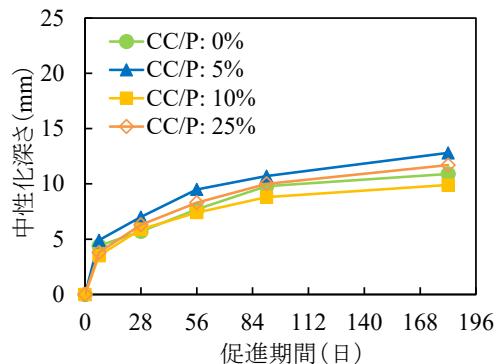


図-12 中性化深さ

Fig.12 Neutralization depth

を省略できる品質を有していた。また、300 サイクル終了時点での質量変化率はすべての配合で -1.8 ~ -1.2% と小さい値を示し、供試体の表面損傷（スケーリング）は軽微であったことから、すべての配合において凍害環境で問題なく使用できると考えられる。

3.3.4 中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。材齢 28 日まで水中養生した 100×100×400mm 角柱供試体を、温度 20°C、相対湿度 60% で材齢 56 日まで養生した。材齢 7 ~ 8 週に供試体の打込み面、底面および両端面をアルミニウム箔テープで被覆した。その後、温度 20°C、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の条件で促進養生を行い、所定の材齢で中性化深さを測定した。

中性化深さは、合成炭カルの置換率によらず基準とした普通コンクリートとほぼ同等であった（図-12）。既存の OPC を用いたコンクリートを対象とした材齢 28 日の圧縮強度と、促進中性化試験から求めた中性化速度係数との関係を示した図²¹⁾に、本研究のデータを加筆したものを図-13 に示す。本研究の結果は、すべての配合で既存の試験データの分布範囲と一致しており、

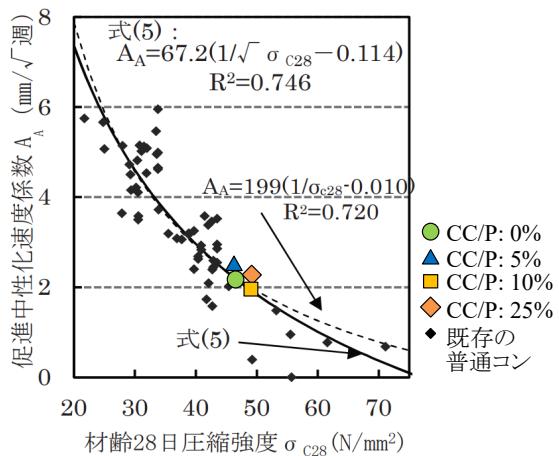


図-13 圧縮強度と促進中性化速度係数との関係
(文献 21 に加筆)

Fig.13 Relationship between compressive strength and accelerated neutralization rate coefficient (Additions to Ref.21)

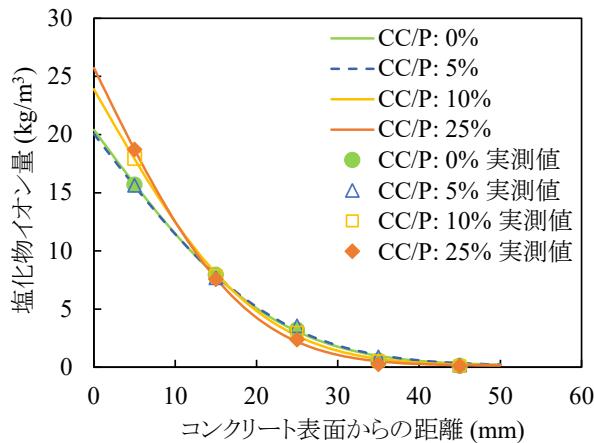


図-14 塩化物イオン含有量
Fig.14 Chloride ion content

従来の普通コンクリートと同様に圧縮強度から中性化速度を推定できると考えられる。

3.3.5 塩水浸漬試験

塩化物イオンの拡散係数試験は土木学会規準 JSCE-G572-2018 に準拠した。水中養生した材齢 28 日の $\varphi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体の両端を切除して長さを 150mm にした後、柱面と底面をエポキシ樹脂で披露した。樹脂の硬化後、水中に一日浸漬し、20°Cで濃度 10%の NaCl 溶液中に移動、182 日後に浸漬面から 5mm 間隔で切断して全塩化物イオン濃度を測定した。

実験値を Fick の拡散則に基づいて回帰し、図-14 にあわせて示す。見掛けの拡散係数は合成炭カルの置換率 0% で $2.97 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、置換率 5% で $3.12 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、置換率 10% で $2.45 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、置換率 25% で $2.06 \text{ cm}^2/\text{年}$ であった。既存の普通コンクリートを対象とした W/C と塩化物イオン拡散係数との関係を示した図²²⁾に、本研究のデータ

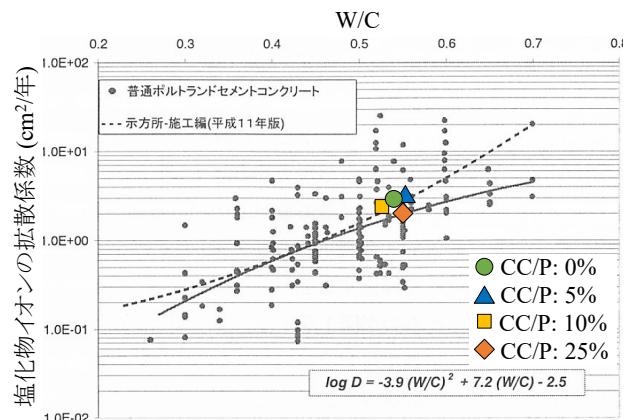


図-15 W/C と塩化物イオンの拡散係数との関係
(文献 22 に加筆)

Fig.15 Relationship between W/C and diffusion coefficient of chloride ions (Additions to Ref.22)

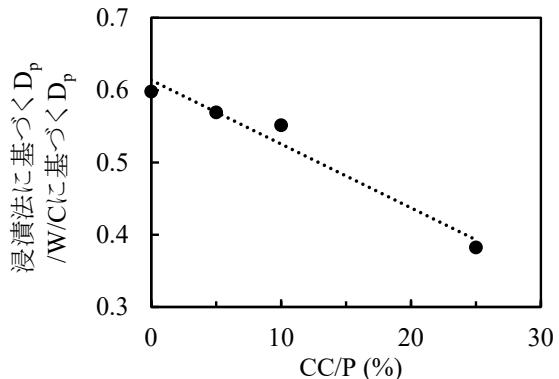


図-16 合成炭酸カルシウムの置換率(CC/P)と塩化物イオン拡散係数の予測値(D_p)の比との関係

Fig.16 Relationship between synthetic calcium carbonate replacement rate (CC/P) and of predicted chloride ion diffusion coefficient (D_p)

を加筆したものを図-15 に示す。本研究の結果はすべての配合で既存の試験データの分布範囲と一致しており、従来の普通コンクリート同様に W/C から塩化物イオン拡散係数を設定できるものと考えられる。また、示方書²⁰⁾に基づき、設計耐久年数 100 年とした時の塩化物イオン拡散係数の予測値 (D_p) を、(1) W/C により計算する方法と、(2) 浸漬法に基づく見掛けの拡散係数より計算する方法から求め、それらの比と合成炭カルの置換率との関係を図-16 に示す。塩化物イオン係数の予測値の比 ((2)/(1)) は合成炭カルの置換率の増加に伴い低下している。したがって、同一強度のコンクリートで比較した場合、合成炭カルの置換率の増加は塩化物イオンの浸透抵抗性を高める効果をもたらす可能性がある。これはブレーン比表面積が大きい合成炭カルを添加したことにより、塩化物イオンの移動経路長が

増加した影響と考えられるが、さらに詳細な検討が必要である。

4. おわりに

本稿では、廃石膏ボードを原料として CO₂ を固定した合成炭カルの製法や品質を示すとともに、OPC に対して内割で合成炭カルを 5~25%置換したコンクリート（炭カル添加量 16~100kg/m³）のフレッシュ性状・物性・耐久性について、従来の普通コンクリートと比較して評価した。

この結果、天然の石灰石である LSP の品質規格を満足した良質な合成炭カルを使用した場合では、フレッシュ性状と強度を従来の普通コンクリートと同様に調整することができた。また、凍結融解・中性化・塩分浸透抵抗性も同一強度の普通コンクリートと同等であり、普通コンクリートと同じ耐久性の照査方法を使用できる可能性がある。

一方、CCU 材料である合成炭カルは、多様な原料と製法から製造されるため品質に幅があることが予想され、この品質の違いがコンクリートの品質に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、廃石膏ボードではない他の原料（廃棄物や副産物：焼却灰、廃コンクリート、生コンスラッジなど）や製法から合成した炭カルや、より大量の合成炭カルを添加した低炭素化コンクリート（炭カル添加量 250kg/m³ 以上）の結果も併せて規準や規格の策定や改正を行い、CCU 材料の合成炭カルを使用したコンクリートの社会実装に貢献していく所存である。

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）の委託業務（JPNP21023）の結果から得られたものであり、関係各位に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省: 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021.6.18.
https://www.meti.go.jp/policy/emergy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf (参照 2024-7-1)
- 2) ICEF: Carbon Mineralization Roadmap, November 2021,
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf (参照 2024-7-1)
- 3) NEDO: ニュースリリース 事業概要資料, 2022.1.28.
<https://www.nedo.go.jp/content/100941899.pdf> (参照 2024-7-1)
- 4) 萩野正貴, 大脇英司: 炭酸カルシウムを利用したカーボンサイクル・コンクリートの基本性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, 2023.
- 5) 萩野正貴, 宮原茂禎, 大脇英司, 岡本修一, 畑山昌之, 加藤優志, 渡邊悟士, 今井和正 : T-eConcrete®/Carbon-Recycle の適用事例, 大成建設技術センター報, No. 56, pp. 04-1~04-8, 2023.
- 6) 小西正芳, 宮原茂禎, 菊池定人, 畑 明仁: 鉱物化とセメント・コンクリートへの活用, セメント・コンクリート, No. 928, pp. 52-58, 2024
- 7) 鈴木怜和, 森川卓子, 菊池定人, 水田 懐: 石膏転化プロセスによる人工石灰石を用いた試製セメントの水和評価, 第 78 回セメント技術大会講演要旨, pp. 6-7, 2024
- 8) 梅津真見子, 宮原茂禎, 橋本 理, 松元淳一, 小西正芳: リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本性状, 第 78 回土木学会年次学術講演会, V-588, 2023
- 9) 梅津真見子, 宮原茂禎, 畑 明仁, 小西正芳: 廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024
- 10) 梅津真見子, 宮原茂禎, 畑 明仁, 小西正芳: 廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを大量に添加したコンクリートの基本的品質, 第 79 回土木学会年次学術講演会, V-705, 2024
- 11) 萩野正貴, 松元淳一, 宮原茂禎, 近藤祥太, 畑 明仁, 明渡翔太, 池田千博, 本田和也, 小西正芳: リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造 (その 1), 第 78 回土木学会年次学術講演会, V-589, 2023
- 12) 畑 明仁, 松元淳一, 橋本 理, 宮原茂禎, 近藤祥太, 天野元輝, 本田和也, 小西正芳: リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造 (その 2), 第 78 回土木学会年次学術講演会, V-590, 2023
- 13) 近藤祥太, 松元淳一, 宮原茂禎, 小西正芳: 廃石膏から合成した炭酸カルシウムを添加したコンクリート製品の製造と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024
- 14) 近藤祥太, 松元淳一, 宮原茂禎, 畑 明仁, 小西正芳: 廃石膏から合成した炭酸カルシウムを使用したコンクリート製品の耐久性, 第 79 回土木学会年次学術講演会, V-171, 2024
- 15) 石膏ボード工業会編, 石膏ボードハンドブック, 2016, p.200
- 16) 石灰石微粉末研究委員会: 石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, 1998.5
- 17) 石灰石微粉末専門委員会: 石灰石微粉末専門委員会報告書, セメント協会, 2001.10
- 18) 長谷川博: 軽質および極微細炭酸カルシウム工業の現状, Gypsum & Lime, No. 122, pp. 33-41, 1973
- 19) 国官技第 61 号: 土木コンクリート構造物の品質確保について, 2001.3
- 20) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編 (2022 年制定), pp. 170-173, 2022.3
- 21) 田沼毅彦, 杉山 央: 実建築物におけるコンクリートの中性化進行の分析およびその予測手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 720, pp. 167-177, 2016.2
- 22) 土木学会: 2002 年版 コンクリート標準示方書 改訂資料, コンクリートライブラー 108, pp. 84, 2002.3