

# 廃石膏ボードを原料として CO<sub>2</sub> を固定した 合成炭酸カルシウムを用いるコンクリート製品の製造

CO<sub>2</sub> を固定した合成炭酸カルシウムを国土交通省工事に初適用

近藤 祥太<sup>\*1</sup>・松元 淳一<sup>\*2</sup>・宮原 茂禎<sup>\*1</sup>・畑 明仁<sup>\*1</sup>・小西 正芳<sup>\*3</sup>

Keywords : carbon neutral, CCU, calcium carbonate, waste plaster, blast furnace slag, concrete products

カーボンニュートラル, CCU, 炭酸カルシウム, 廃石膏, 高炉スラグ, コンクリート製品

## 1. はじめに

「2050 年カーボンニュートラル」の実現に向け、主要な建設資材であるコンクリートについても CO<sub>2</sub> 排出量の削減が求められる。このため、セメント・コンクリートセクターにおいても CO<sub>2</sub> 削減を目指した多くの検討がなされており、近年は分離・回収した CO<sub>2</sub> をセメント原料やコンクリート材料等として活用する CCU (Carbon dioxide capture and utilization) 技術による CO<sub>2</sub> 削減に期待が寄せられている<sup>1)</sup>。

著者らはセメント・コンクリートセクターにおける CO<sub>2</sub> 削減のため、排ガス等の CO<sub>2</sub> を、産業副産物や廃棄物から抽出したカルシウムに吸収・固定して炭酸カルシウム（以下、合成炭酸カルシウム）を製造する CCU 技術と、それをセメントやコンクリートに活用する T-eConcrete/Carbon-Recycle やその他の配合を含めた技術開発に取り組んでいる<sup>2,3)</sup>。従来の炭酸カルシウムと合

成炭酸カルシウムの製造手順の違いを図-1 に示した。従来から、炭酸カルシウムは鉱山から採掘した石灰石としてセメント原料に用いるほか、粉碎分級した石灰石微粉末や石灰石骨材としてセメント原料やコンクリート材料に用いられてきた。これらを CCU 材料である合成炭酸カルシウムで代替することで、CO<sub>2</sub> 削減効果に加え、天然資源の保護や地相改変の抑制にも貢献する。

他方、合成炭酸カルシウムを用いたセメントの品質がコンクリートに及ぼす影響については、これまで検討事例が少なく、室内試験による物性や耐久性の検討が開始されている<sup>4,5)</sup>。合成炭酸カルシウムを用いたコンクリートの早期の普及には、室内試験に加え、コンクリート製品や構造物に適用する際の製造性や品質、供用環境での耐久性について評価する必要がある。

そこで著者らのグループでは、合成炭酸カルシウムのセメントやコンクリートへの適用性を評価するにあ

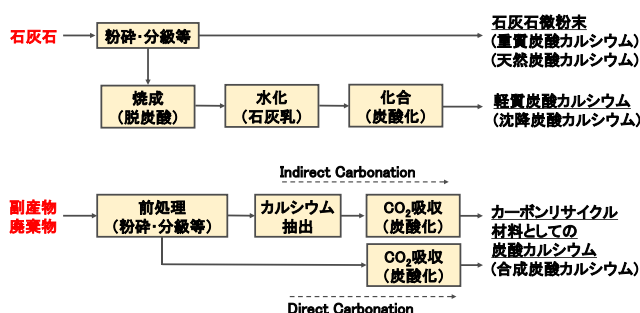


図-1 各種炭酸カルシウムの製造手順の違い  
Fig.1 Differences in calcium carbonate production procedures

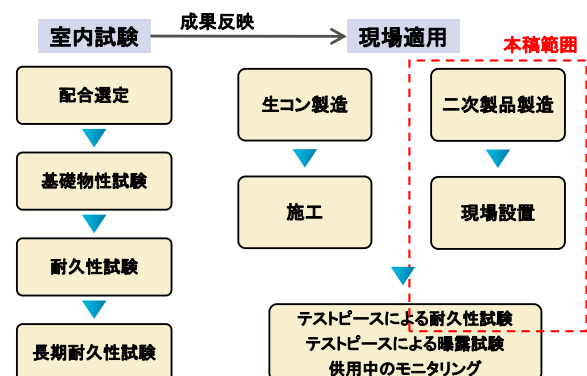


図-2 合成炭酸カルシウムのコンクリート検討フロー  
Fig.2 Concrete Study Flow for Synthetic Calcium Carbonate

\*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

\*2 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

\*3 住友大阪セメント（株）



写真-1 落蓋式 U 形側溝  
Photo.1 U-shaped gutters with falling lid



写真-2 縦壁付矩形水路  
Photo.2 Rectangular conduit with vertical wall

たり、室内における基礎物性・耐久性の検討と併行して、現場における適用を精力的に進めている<sup>6)9)</sup>。

ここでは、廃棄された石膏ボードを原料として製造した合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートにより、2種類のコンクリート製品を製作し、国土交通省発注工事に初適用した事例を紹介する。

## 2. 製造した製品と適用現場

### 2.1 落蓋式 U 形側溝

写真-1 に示す落蓋式 U 形側溝を成瀬ダム建設の原石山工事に適用した。舗装止めの機能をもった落蓋形式の鉄筋コンクリート製品であり、蓋部分を除く U 形側溝を製造した。成瀬ダムは秋田県東成瀬村に位置し、雄物川水系成瀬川の治水・利水を目的とする国内最大級の CSG ダムである。落蓋式 U 形側溝は、工事用道路整備に伴う切り盛り境の排水溝に適用した。

### 2.2 縦壁付矩形水路

本水路は写真-2 に示すとおり管水路に縦壁を一体化させた形状を持つ鉄筋コンクリート製品であり、トンネル内の非常用駐車帯の 6m の区間に設置した。設置したトンネルは長野県松本市と福井県福井市を結ぶ中部縦貫自動車道の一部を構成する大野油坂道路に位置す

る荒島第 2 トンネルであり、延長は 4988m、幅員は 12.0m である。

## 3. 落蓋式 U 形側溝への適用

### 3.1 使用材料および配合

合成炭酸カルシウムは、廃石膏ボード ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) を粉砕し、水中で炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) と混合して石膏を  $\text{CaCO}_3$  に転化する手法 (石膏転化法)<sup>10)</sup>により製造した。現時点において合成炭酸カルシウムをコンクリートに使用する場合の品質規格はないが、JIS R5210 「ポルトランドセメント」におけるセメントの少量混合成分に関わる規格と JIS A 5041 「コンクリート用砕石粉」を参照し、いずれの項目も満足することを確認した (表-1)。

表-1 炭酸カルシウムの品質  
Table 1 Quality of Calcium Carbonate

項目	試験方法	規格値	試験値
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	JIS A	2.5 以上	2.60
活性度指数 (%)	5041	60 以上	72
$\text{CaCO}_3$ 純度 (%)	JIS R	90 以上	93.9
酸化アルミニウム (%)	5210	1.0 以下	0.40

表-2 落蓋式 U 形側溝に使用したコンクリートの配合  
Table 2 Mix proportion of concrete used for U-shaped gutters with falling lid

配合 No.	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	合成炭酸 カルシウム添加率 (粉体内 割%)	単位量 (kg/m³)						
					水 W	粉体：P			細骨材	粗骨材	高性能 減水剤 P×%
						結合材：B		合成炭 酸カル シウム			
						普通ポルト ランドセメント	高炉スラ グ＋刺激 材				
①	38.3	36.4	39.0	5	158	412	－	22	662	1059	0.84
②	44.1	30.9		30	160	362	－	155	624	999	1.05
③	51.0	29.0		43	174	341	－	260	576	922	1.62
④	45.8	27.2		41	174	－	380	260	547	874	1.70



練混ぜ



打込み



蒸気養生



脱型後

写真-3 落蓋式 U 形側溝の製造状況

Photo.3 Manufacturing status of U-shaped gutters with falling lid

表-3 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

Table 3 Fresh properties and compressive strength test results

試験項目		配合①	配合②	配合③	配合④
空気量 (%)	実測値	6.8	6.2	6.5	6.8
	目標値	6.0±1.5			
スランプ (cm) : ※ スランプフロー (mm) : #	実測値	21.0 <sup>*</sup>	20.0 <sup>*</sup>	642 <sup>#</sup>	449 <sup>#</sup>
	目標値	21±1.5 <sup>*</sup>		600±100 <sup>#</sup>	450±75 <sup>#</sup>
σ16 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値	50.2	55.1	44.7	36.5
σ28 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値	64.4	65.6	55.2	45.6

4種類の配合(表-2)でU形側溝を製造した。配合①は合成炭酸カルシウムを5%(粉体内割)添加し、普通ポルトランドセメント(以下、セメント)の少量混合成分として使用することを想定した。配合②は添加率を30%とし、EN197の石灰石フィラーセメント相当とした。配合③は添加率をさらに高くしてCO<sub>2</sub>固定量の増加を意図した。配合④では添加率を配合③程度としたうえで、セメントの代わりに高炉スラグと刺激材を使用してCO<sub>2</sub>排出量の更なる削減を進めた<sup>1)</sup>。

それぞれの配合について、コンクリートのフレッシュ性状、製品の製造性、硬化後の品質、設置環境における耐久性の観点から配合を定めた(表-2)。二次製品工場にて試し練りを実施し、表-3の目標を満足する化学混和剤の添加量とW/Bを決定した。事前の試し練りにより、炭酸カルシウムの添加量が増加し粉体量が多くなるほどフレッシュコンクリートの粘性は増加傾向であったことから、粉体量が少ない配合①、②はスランプによる管理、粉体量が多い配合③、④はスランプフローによる管理とし、流動性の管理値も各配合の粘性に応じて施工に適する範囲で可能な限り小さい値に設定した。落蓋式U形側溝のコンクリートの圧縮強度はJIS A 5372 附属書Eでは27N/mm<sup>2</sup>以上と規定されるが、出荷時に脱型強度を確保するために工場が設定する既存製品の出荷時強度45N/mm<sup>2</sup>を目安に、W/Bを選定した。また、設置現場は寒冷地であることから耐凍害性の向上を目的に空気量を6.0%に設定した。

### 3.2 製造および現場設置

落蓋式U形側溝(JIS A 5372 : 3種, 400A)は長さ2m, 0.25m<sup>3</sup>/体であり、配合①で11体、配合②~④で1体ずつ製造した。U形側溝の製造は既存製品と同様の方法で行った。写真-3に示すように、工場のバッチャープラントにて練り混ぜ、フレッシュ性状を確認したのち、ホッパーに排出して振動締固めを行いながら打ち込んだ。蒸気養生は、水蒸気を用いて20℃/hで昇温し、40℃到達後に3時間保持して自然降温した。材齢2日に脱型し、気中で保管した。材齢16日にJIS A5372に準拠して外観、寸法、出荷強度、曲げ耐力の検査を行い、現場に出荷した。練上り性状および強度試験の結果を表-3に示す。いずれの配合もフレッシュ性状の目標値とJIS A 5372 附属書Eに規定される圧縮強度(27N/mm<sup>2</sup>)を満足したが、工場が定める出荷時の目標強度につい



写真-4 落蓋式 U 形側溝 現場設置状況

Photo.4 Installation of U-shaped gutters with falling lid on site



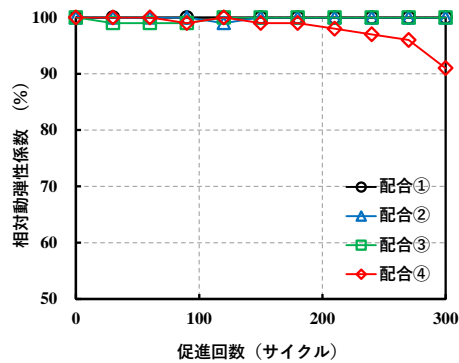


図-3 凍結融解試験結果  
Fig.3 Freeze-thaw test results

ては配合④のみ満足しなかった。出荷時強度は脱型強度を確保する観点から製品工場が設計基準強度よりも高い値を設定している。今回は脱型に異常がなく設計基準強度を満足したことから適用に問題はないと判断したが、今後安定して製造するためには、出荷時の目標強度を満足する配合を検討する必要がある。

また、外観や寸法、曲げ耐力に異常はなく要求性能を満足した。現場への運搬、設置作業も既存製品と同様に実施し、ひび割れや角掛などの欠陥が生じることなく、設置を完了した（写真-4）。炭酸カルシウムを大量に使用したため従来のコンクリートより白色が強く、美観の向上も期待できる。

### 3.3 凍結融解抵抗性

落蓋式 U 形側溝の設置現場が秋田県の寒冷地であったため、凍害抵抗性を凍結融解試験（JIS A 1148（A 法に準拠））により評価した。また、リニアトラバース法により硬化後の気泡間隔係数を求めた。試験結果を図-3、図-4 に示す。配合①～③は促進回数 300 サイクルまで相対動弾性係数に変化がみられず、配合④についても 300 サイクル後も相対動弾性係数 90 %以上を維持した。これを土木学会「コンクリート標準示方書」に照

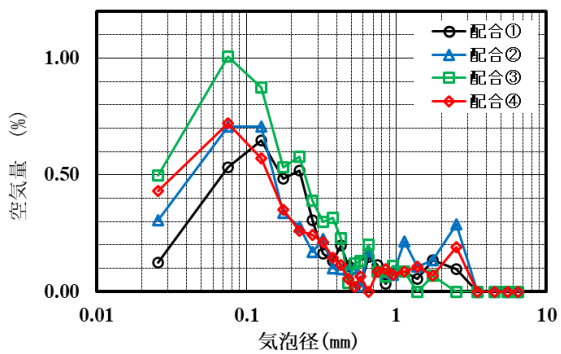


図-4 気泡の分布  
Fig.4 Bubble distribution

表-4 気泡間隔係数

Table 4 Air volume and bubble spacing coefficient after hardening

	配合①	配合②	配合③	配合④
気泡間隔係数	215 $\mu$ m	180 $\mu$ m	149 $\mu$ m	172 $\mu$ m

らすと“凍害に対する照査不要”と判断できることから<sup>12)</sup>、4種の配合とも凍害に対して良好な抵抗性を持つことが示された。硬化後の気泡の分布は、いずれの配合においても 0.1mm 以下の微細な空気が観察され、エントレインドエアが連行できていた。また気泡間隔係数も一般に凍結融解抵抗性の観点から推奨される 250 $\mu$ m 以下であった。

### 3.4 耐摩耗性

落蓋式 U 形側溝には流水に伴う摩耗が生じると想定され、耐摩耗性を評価するため、スチールロッド式摩耗試験を実施した。

スチールロッド式摩耗試験は、コンクリートの摩擦力に対する抵抗性を確認する試験の一つで、図-5 に示す回転するドラムの内側に 6 つの供試体（135×150×300mm、摩耗面の面積 360cm<sup>2</sup>）を設置し、摩耗材（ス

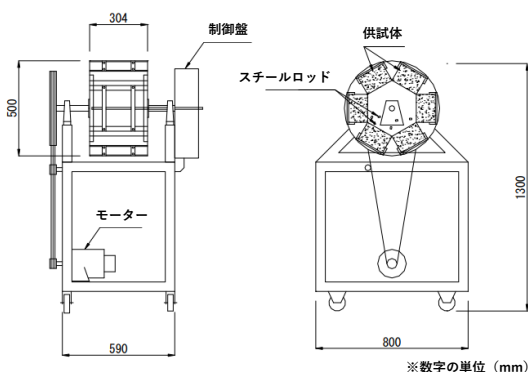


図-5 スチールロッド式摩耗試験機  
Fig.5 Steel Rod Abrasion Tester

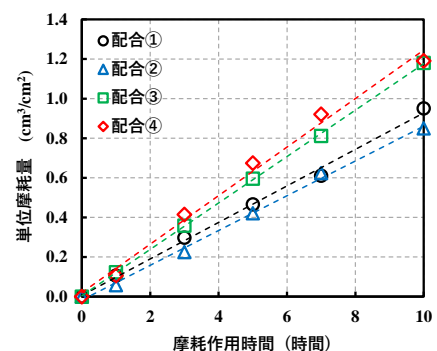


図-6 スチールロッド式摩耗試験結果  
Fig.6 Steel Rod Wear Test Results

チールロッドφ19×ℓ40mm×25 本、総質量約 2.2kg) を入れ、流量 0.5m<sup>3</sup>/h の水を流しながら、ドラムを 50rpm の速度で回転し、供試体を摩耗させるものである。摩耗作用 10 時間までの試験結果を、供試体摩耗面における単位面積あたりのコンクリートの摩耗量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>) の経時変化として図-6 に示す。耐摩耗性は、配合②>配合①>配合③>配合④となった。材齢 28 日における圧縮強度と単位摩耗量の関係として図-7 にまとめると、圧縮強度が高いほど耐摩耗性が向上する傾向となった。炭酸カルシウムを大量に添加した配合③や、セメントを高炉スラグと刺激材で代替した配合④についても、強度レベルの調整により配合①や②の同等の耐摩耗性を付与できることが推察できる。

4. 縦壁付矩形水路への適用

4.1 使用材料および配合

使用した合成炭酸カルシウムは落蓋式 U 形側溝に採用したもの(表-1)と同じ石膏転化法により製造したもので、製造ロットは異なるが品質に大きな差異はみられなかった(表-5)。表-6 に示す 4 種類のコンクリートを用いて縦壁付矩形水路を製造した。各配合に対する合成炭酸カルシウムの添加の考え方は落蓋式 U 形側溝への適用時と同様である。U 形側溝の場合と同様に対象の製品を製造する工場において試し練りを実施し、表-7 の目標を満足する化学混和剤の添加量と W/B を決定した(表-6)。落蓋式 U 形側溝に比べて要求される圧縮強度が高く、いずれの配合も W/B が小さくなったため、配合①をスランプによる管理、配合②~④はスランプフローによる管理とし、流動性の管理値も各配合の粘性に応じて施工に適する範囲で可能な限り小さい値とした。縦壁付矩形水路のコンクリートの設計基準強度は、JIS 等の規格では明確に規定されていないが、製品工場は独自に 40 N/mm<sup>2</sup> に設定し

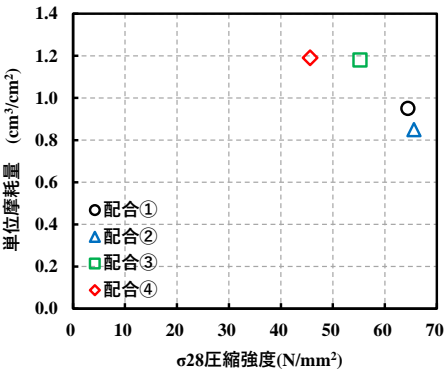


図-7 圧縮強度と摩耗作用 10 時間における単位摩耗量の関係

Fig.7 Relationship between compressive strength and unit wear in 10 hours of abrasion action

ている。また、別途脱型強度を確保するために設定されている既存製品の出荷時強度 55N/mm<sup>2</sup> を目安に、W/B を選定した。また、設置現場はトンネル内環境であり凍害の懸念はないことから、コンクリートの空気量は標準的な 4.5% に設定した。

4.2 製造および現場設置

縦壁付矩形水路の容積は 0.3m<sup>3</sup>/体であり、配合①を 4 体、配合②~④を 1 体ずつ、計 7 体、2.1m<sup>3</sup> 分を製造した。縦壁付矩形水路の製造は既存製品と同様に行った。写真-5 に示すように、工場のバッチャープラントで練り混ぜ、フレッシュ性状を確認したのち、ホッパーに排出して振動締め固めを行いながら打ち込んだ。蒸気養生は 20℃/h で昇温、40℃到達後 6 時間保持、自然降温

表-5 炭酸カルシウムの品質  
Table 5 Quality of Calcium Carbonate

項目	試験方法	規格値	試験値
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	JIS A	2.5 以上	2.61
活性度指数 (%)	5041	60 以上	73
CaCO <sub>3</sub> 純度 (%)	JIS R	90 以上	94.5
酸化アルミニウム (%)	5210	1.0 以下	0.42

表-6 縦壁付矩形水路に使用したコンクリートの配合  
Table 6 Mix proportion of concrete used for Rectangular conduit with vertical wall

配合 No.	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	合成炭酸カルシウム添加率 (粉体内割%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					水 W	粉体 : P			細骨材	粗骨材	高性能減水剤 P×%
						結合材 : B		合成炭酸カルシウム			
						普通ポルトランドセメント	高炉スラグ+刺激材				
①	35.7	33.9	38	5	158	443	—	23	647	1071	0.85
②	40.1	28.1	38	30	169	421	—	181	563	985	1.21
③	41.6	25.7	38	43	174	418	—	260	529	927	1.57
④	39.9	25.0	37	37	174	—	436	260	524	958	1.80



練混ぜ



打込み



締固め



脱型後

写真-5 縦壁付矩形水路の製造状況

Photo.5 Manufacturing status of Rectangular conduit with vertical wall

表-7 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

Table 7 Fresh properties and compressive strength test results

試験項目		配合①	配合②	配合③	配合④
空気量 (%)	実測値	4.0	5.8	4.2	3.2
	目標値	4.5±1.5			
スランプ (cm) : ※	実測値	19.5*	415 <sup>#</sup>	655 <sup>#</sup>	670 <sup>#</sup>
スランプフロー (mm) : #	目標値	21±1.5*	450±75 <sup>#</sup>	600±100 <sup>#</sup>	
σ14 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値	63.0	55.1	57.4	32.7
σ28 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値	77.2	77.7	76.0	40.7

の順で行い、配合①～③は材齢 1 日、配合④は材齢 2 日で脱型して気中で保管した。材齢 14 日に同型の従来型の製品と同様に、外観、寸法、出荷強度の検査を行い、現場に出荷した。練上り性状および強度試験の結果を表-7 に示す。いずれの配合もフレッシュ性状の目標値を満足し、配合①～③においては材齢 14 日時点で工場が定める設計基準強度 (40N/mm<sup>2</sup>) を満足し、配合④においては材齢 28 日時点で満足した。また、外観や寸法に異常はなく要求性能を満足した。現場への運搬、設置作業も既存製品と同様に実施し、ひび割れや角欠けなどの欠陥を生じることなく設置を完了した (写真-6)。なお、配合④は機会が得られず現場に設置していない。



写真-6 縦壁付矩形水路 現場設置状況

Photo.6 Installation of Rectangular conduit with vertical wall

4.3 中性化抵抗性

縦壁付矩形水路が設置されたトンネル内は常時乾燥状態であることから中性化が進みやすい環境であるため (例えば 13,14)、適用したコンクリートの中性化に対する抵抗性を、促進中性化試験 (JIS A 1153) によって評価した。促進条件を温度 20℃、相対湿度 60%、CO<sub>2</sub> 濃度 5%とし、促進期間 26 週までの中性化深さを測定した。初めに試験結果として、促進試験における中性化速度係数と材齢 28 日における圧縮強度の関係を図-8 に示す。配合①～③の材齢 28 日における圧縮強度は同等であるが、中性化速度係数は配合③>配合②>配合①の順に大きくなった。図-9 に示す通り W/B は配合③>配合②>配合①であり、石灰石微粉末を用いた過去の検討においても、W/B と中性化速度係数の間に強い相

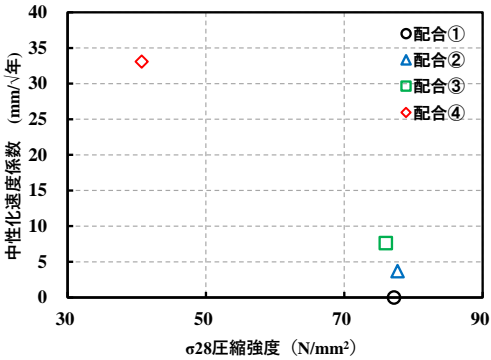


図-8 促進試験における中性化速度係数と σ28 圧縮強度の関係

Fig.8 Relation between the neutralization rate coefficient in accelerated tests and σ28 compressive strength.

関が報告されていることから<sup>15)</sup>、各配合間の W/B の差異も中性化速度係数の大小に影響を及ぼした一因であると推察している。そのため、配合②や③は W/B を低くすることで中性化をさらに抑制できる可能性があると考えられる。現状では取得データ数が少ないため、今後も合成炭酸カルシウムを用いたコンクリートの中性化速度に関するデータを蓄積する必要がある。

一方、セメントの代わりに高炉スラグを大量に使用した配合④の中性化速度係数は、配合①～③と比較すると大きくなった。この試験結果を、同様に高炉スラグを大量に使用する配合が扱われ、社会実装が先行する「混和材を大量に使用したコンクリート」<sup>16)</sup>の場合と比較して図-10 に示す。配合④の値は黒丸で示されたセメントのみを結合材に用いたコンクリートより大きい、混和材を大量に使用したコンクリートの中性化速度係数の分布範囲の中では比較的小さな値であった。配合④はセメントを使用せず、炭酸カルシウムを多量に含むが、社会実装が進められている土木学会の指針（案）に示される「混和材を大量に使用したコンクリート」<sup>16)</sup>と同様に扱うことができることが示唆された。

## 5. おわりに

廃石膏ボードを原料とし製造した合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いて 2 種類のコンクリート製品（落蓋式 U 形側溝および縦壁付矩形水路）を製造し、国土交通省発注工事に初適用した事例を紹介した。

合成炭酸カルシウムをセメントの少量混合成分からコンクリートの混和材に相当する量まで使用したコンクリートは、既存の工場設備で製造でき、従来製品と同等の要求性能を満足するものであった。

また、各製品の設置環境における劣化因子を想定した耐久性試験を実施した結果、凍結融解抵抗性は合成炭酸カルシウムの添加量によらず良好であった。耐摩耗性や中性化抵抗性は、合成炭酸カルシウムの添加量や粉体構成によって異なる挙動が確認されたが、従来のコンクリート同様に圧縮強度や水結合材比と相関があることが明らかとなった。

合成炭酸カルシウムを用いたコンクリートの早期普及を促進すべく、引き続き、室内における評価に加えコンクリート製品や生コン利用等の社会実装を積極的に進めていきたい。

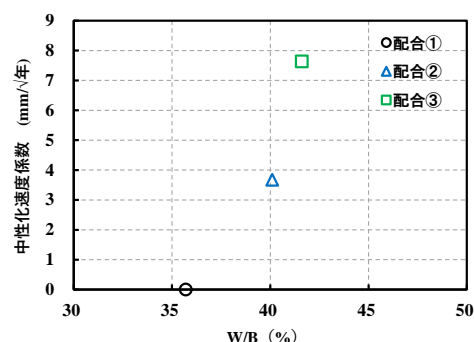


図-9 配合①～③の促進試験における中性化速度係数と W/B の関係

Fig.9 Relationship between neutralization rate coefficient and W/B in accelerated tests for formulations ① to ③

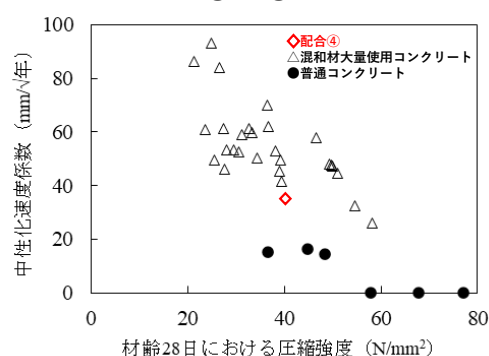


図-10 配合④の促進試験における中性化速度係数（文献 16 に加筆）

Fig.10 Neutralization rate coefficients in accelerated tests for Formulation ④ (Addition to Ref. 16)

## 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) 野口貴文：2050 年カーボンニュートラルに対するコンクリートの挑戦，JICE Report，2023.
- 2) 大泉理紗，菊池定人，小西正芳：CO<sub>2</sub>を再資源化した人工石灰石を用いたモルタルの水和特性評価，第 77 回セメント技術大会講演要旨，2023.
- 3) 荻野正貴，大脇英司：炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・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.



- 4) 梅津真見子ほか，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.
- 5) 梅津真見子ほか：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.
- 6) 荻野正貴ほか：T-eConcrete<sup>®</sup>/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.
- 7) 近藤祥太ほか：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.
- 8) 荻野正貴ほか：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.
- 9) 畑明仁ほか：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.
- 10) 三宅信午：セッコウと炭酸ソーダ水溶液との反応，工業化学雑誌，第 61 巻，第 12 号，1958.
- 11) 大脇英司，荻野正貴，大沼寛知：T-eConcrete<sup>®</sup>/Carbon-Recycle の特徴と社会実装例，電力土木，No.421，pp.70-74，2022.
- 12) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書，設計編，土木学会，pp. 84-85，2022.
- 13) 白川敏夫，鳥添洋治，麻生実：コンクリートの中性化と湿度の関係に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 18, No. 1, pp. 85-94, 1990.
- 14) 松田芳範ほか：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, 2010.
- 15) 星野清一，小川邦英，後藤孝治：石灰石微粉末を添加したモルタルの中性化速度に関する一考察，コンクリート工学論文集，第 11 巻，第 3，2000.
- 16) 土木学会コンクリート委員会：「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」，土木学会，コンクリートライブラリー152, 2018.