

# 論文 軽質炭酸カルシウムを用いた CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの埋設型枠としての適用性に関する検討

山野 泰明\*1・取違 剛\*2・関 健吾\*3・坂井 吾郎\*4

**要旨:** 炭酸化養生によって強制的に CO<sub>2</sub> を吸収させた環境配慮型コンクリート (CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート) に、あらかじめ CO<sub>2</sub> を固定させた軽質炭酸カルシウムを添加することで、製造過程における CO<sub>2</sub> 固定量増大の可能性について検討した。また、ガラス繊維を補強材として用いた際の力学特性を評価し、埋設型枠に求められる性能を満足するかについて検討した。その結果、軽質炭酸カルシウムを 10kg/m<sup>3</sup> 程度まで添加した CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートは、良好な施工性を確保しつつ、CO<sub>2</sub> 収支をマイナスにできることを確認した。また、ガラス繊維を用いた CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートが、埋設型枠として実際の現場に適用できることを確認した。

**キーワード:** 環境配慮型コンクリート, 軽質炭酸カルシウム, 炭酸化, 埋設型枠, ガラス繊維

## 1. はじめに

我が国は、2030 年までに 2013 年比で温室効果ガスの排出量を 46%削減し、2050 年にはカーボンニュートラルとすることを目標としている<sup>1)</sup>。このカーボンニュートラルという非常に野心的な目標を達成するためには、温室効果ガスのひとつである CO<sub>2</sub> の排出量を削減するだけでは実現できず、CO<sub>2</sub> を吸収・固定するものが求められている。建設産業の主材料であるコンクリートにおいて、構成材料のひとつであるセメントは多くの CO<sub>2</sub> を排出するため、コンクリートは CO<sub>2</sub> を多量に排出するものとされてきた。筆者らは、埋設型枠などのコンクリート二次製品を対象として、若材齢のコンクリートを強制的に炭酸化させて、CO<sub>2</sub> を固定することにより、製造過程における CO<sub>2</sub> 排出量がマイナス、すなわちカーボンネガティブとなるコンクリートについて研究している<sup>2)</sup>。

一方、プレキャスト工場で発生したスラッジ水に CO<sub>2</sub> を吹き込み、液体中のカルシウムと反応させて軽質炭酸カルシウムを生成し、CO<sub>2</sub> を固定させる技術も着目されている<sup>3)</sup>。この軽質炭酸カルシウムは、製造における CO<sub>2</sub> 収支が-390kg-CO<sub>2</sub>/t と試算されており、コンクリートに練り混ぜることでコンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量を低減することが可能と考えられる。また、混合セメントと組み合わせることによってカーボンネガティブなコンクリートをつくることのできるの試算を行っている研究事例もある<sup>4)</sup>。

そこで、本稿では埋設型枠を対象として、強制的に炭酸化させる環境配慮型コンクリート (以下、CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート) に軽質炭酸カルシウムを加えることにより、さらなる CO<sub>2</sub> 固定量の増大の可能性について検討し、CO<sub>2</sub> 固定量を測定して製造における CO<sub>2</sub> 排出量の算定を

行った。また、ガラス繊維を補強材として用いた際のモルタルの各種品質評価を行った。さらに、埋設型枠を製造し、施工現場への適用を通じて製造性、施工性、品質について評価を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 対象とする埋設型枠の緒言

対象とした埋設型枠の寸法は 1200×600×40mm、基本配合は既往の検討<sup>5)</sup> の配合を参考に、W/B=35%、空気量 7.0%とした。フレッシュ性状は既存の埋設型枠を製造時の性状を参考に、モルタルフローで 100mm (0 打)、150mm (15 打) とした。

製造過程において、材齢 1 日で脱型して埋設型枠を吊

表-1 使用材料

種別	記号	種類	物性
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> フロー: 3240cm <sup>2</sup> /g
	BFS	高炉スラグ微粉末	密度: 2.92g/cm <sup>3</sup> フロー: 4340cm <sup>2</sup> /g
	γ-C <sub>2</sub> S	γ-カルシウムシリケートγ相	密度: 2.85g/cm <sup>3</sup> フロー: 2010cm <sup>2</sup> /g
	EX	石灰系膨張材	密度: 3.14g/cm <sup>3</sup> フロー: 3760cm <sup>2</sup> /g
混和材	PCC	軽質炭酸カルシウム	密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> BET: 6690cm <sup>2</sup> /g
	水	水 (水道水)	
細骨材	S1	砕砂 (粗目)	表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> FM: 3.17
	S2	山砂 (細目)	表乾密度: 2.63g/cm <sup>3</sup> FM: 1.65
混和剤	SP	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
繊維	FB	AR ガラス	繊維長: 13mm ファイバ径: 18μm

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 副主任研究員 修士 (農学) (正会員)

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士 (工学) (正会員)

\*4 鹿島建設(株)技術研究所 主席研究員 博士 (工学) (正会員)

り上げる必要があり、ひび割れや破損を生じない程度の強度として 10~12N/mm<sup>2</sup> 程度の強度が必要<sup>6)</sup> となることから、材齢 1 日における目標圧縮強度を 12N/mm<sup>2</sup> とした。また、最終的な目標圧縮強度は、埋設型枠を現場で固定する際に内部支保工を接続するインサートの引抜き耐力の観点から 60N/mm<sup>2</sup> とした。

## 2.2 使用材料

使用材料を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材はセメント量の低減を目的として高炉スラグ微粉末および  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を使用した。さらに、乾燥・自己収縮によるひび割れ発生を防ぐために膨張材を用いるとともに、CO<sub>2</sub> を固定した軽質炭酸カルシウムを使用した。 $\gamma$ -C<sub>2</sub>S は副生の水酸化カルシウムと、ケイ石を原料としてキルンにて 1450°C 程度の温度で焼成し、徐冷したものを使用した<sup>7)</sup>。

埋設型枠は、運搬やコンクリート施工時の作用荷重による変形に伴うひび割れ抵抗性が必要なため、繊維を用いることが多い。CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートは炭酸化により pH が中性に近くなり、ガラス繊維のアルカリによる劣化の可能性が低いことから、繊維補強材として安価なガラス繊維(写真-1)を用いることとした<sup>8)</sup>。

## 2.3 実験方法

本稿では 3 つの実験を行った。実験 1 では CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの基本配合<sup>5)</sup> に軽質炭酸カルシウムを結合材の外割に添加することにより、モルタルのフレッシュ性状へ及ぼす影響を確認した。実験 2 では養生条件と初期強度の関係を把握し、所要の初期強度を満たしつつ、炭酸化速度が最大となる養生条件について検討した。また、選定した配合について CO<sub>2</sub> 固定量を測定した。実験 3 ではガラス繊維を用いたガラス繊維補強モルタルのひび割れ発生強度について評価した。それぞれの実験における配合を表-2 に、試験一覧を表-3 に示す。普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、 $\gamma$ -C<sub>2</sub>S の構成割合は既往の配合<sup>9)</sup> を参考とし、3 : 4 : 3 とした。また、膨張材

は上記の割合のうち、普通セメントに含めることとした。

### (1) 軽質炭酸カルシウムのフレッシュへの影響の確認(実験 1)

軽質炭酸カルシウムを添加したことによるフレッシュへの影響を確認した。表-2 に示す配合のモルタルを 10L ホバートミキサにて練り混ぜ、JIS R 5201 に準じて 0 打および 15 打におけるモルタルフローを測定した。

### (2) 最適な初期養生条件の選定と炭酸化速度の取得(実験 2)

材齢 1 日における強度が 12 N/mm<sup>2</sup> を満たす初期養生条件を選定した。表-2 に示す配合のモルタルを練り混



写真-1 ガラス繊維

表-3 試験一覧

記号	試験種類
実験 1	モルタルフロー試験
実験 2	炭酸化深さ (40×40×160mm) 圧縮強度試験 (φ50×100mm) 熱分析 無機炭素分析
実験 3	モルタルフロー試験 曲げ強度試験 (40×40×160mm)

表-4 養生条件

ケース	条件
1	常時 20°C
2	40°C で 1 時間保持したのち自然冷却
3	60°C で 1 時間保持したのち自然冷却
4	60°C で 3 時間保持したのち自然冷却

条件 2~4 はいずれも昇温速度を 20 °C/時間

表-2 配合一覧

実験	W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
			W	B				PCC	SI	S2	SP B <sup>※2</sup> ×%	FB vol%
				C	BFS	$\gamma$ -C <sub>2</sub> S	EX					
実験 1	35	7	258	184	295	221	37	0	976	133	0.2	-
								5	972	132		
								10	968	131		
実験 2 <sup>※1</sup>	35	7	258	184	295	221	37	5	972	133	0.2	-
実験 3	35	7	258	184	295	221	37	5	972	133	0.2	0.0
											0.4	1.0
											0.5	2.0

※1 実験 2 は常時 20°C, 40°C1 時間保持, 60°C1 時間保持, 60°C3 時間保持したのち自然冷却の 4 つの養生条件

※2 B= C+BFS+ $\gamma$ -C<sub>2</sub>S+EX

ぜ、φ50×100mm の型枠に詰めて 2 時間以上静置した。静置した供試体を表-4 に示す 4 つの条件で初期養生を実施した。材齢 1 日における圧縮強度を JIS A 1108 に準じて取得した。また、初期養生終了後、供試体を脱型、温度 50°C、相対湿度 50%、CO<sub>2</sub> 濃度 80% 雰囲気の中で炭酸化養生を行い、各材齢で圧縮強度試験を実施した。

さらに、40×40×160mm の供試体を作製して条件 1～4 のとおりに初期養生を行ったうえで、脱型後、上記環境にて炭酸化養生を行い、JIS A 1152 に準じて、炭酸化深さを測定した。なお、供試体の 40×160mm の 2 面から炭酸化が進むように側面 4 面をアルミテープで覆った。

全面炭酸化した供試体について、CO<sub>2</sub> 固定量を熱分析と無機炭素分析の 2 つの方法で測定した。供試体を 5mm 程度に粉砕した後、アセトンにより水和停止を行い、メノウ乳鉢で粉砕して試料を作製した。熱分析は示唆熱・熱重量分析 TG-DTA により、1,000°C までの試料の質量減少率を求めた。無機炭素分析は全炭酸濃度測定装置にて、硬化体中の CO<sub>2</sub> 含有率を定量した<sup>10)</sup>。

### (3) ガラス繊維による補強に関する検討 (実験 3)

実験 1, 2 で選定した配合について、ガラス繊維を添加し、フレッシュ性状およびひび割れ発生強度に及ぼす影響を確認した。40×40×160mm の供試体を作製し、材齢 1 日で脱型した後、温度 50°C、相対湿度 50%、CO<sub>2</sub> 濃度 80% 雰囲気の中で炭酸化養生を行った。そのうち、JIS A 1106 に準じて三等分点荷重試験を実施し、ひび割れ発生強度を測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 軽質炭酸カルシウムのフレッシュ性状への影響

図-1 に軽質炭酸カルシウムを入れたモルタルのモルタルフローを示す。軽質炭酸カルシウムが無添加のものに対して、5kg/m<sup>3</sup>、10kg/m<sup>3</sup> 添加したものは、高性能 AE 減水剤が同量で、同等のフレッシュ性状が得られた。表-1 に示すとおり、軽質炭酸カルシウムは比表面積が大きく、フレッシュ性状に及ぼす影響が懸念されたが、本検討の範囲では、10kg/m<sup>3</sup> 程度の添加であればフレッシュ性状に及ぼす影響は小さいと考えられた。

### 3.2 初期養生が圧縮強度に及ぼす影響

図-2 に養生条件ごとの材齢 1 日における圧縮強度試験結果を示す。20°C における材齢 1 日強度は 6N/mm<sup>2</sup> 程度であり、12N/mm<sup>2</sup> を満たさなかった。40°C 1 時間保持より高い温度履歴を与えると 12N/mm<sup>2</sup> を満たすことが分かった。また、測定した養生温度から積算温度と圧縮強度の関係を図-3 に示す。積算温度と圧縮強度の関係は比例関係にあった。入江ら<sup>11)</sup> は普通ポルトランドセメントを対象とした試験により、蒸気養生における材齢 1 日の圧縮強度が積算温度に比例することを確認しており、

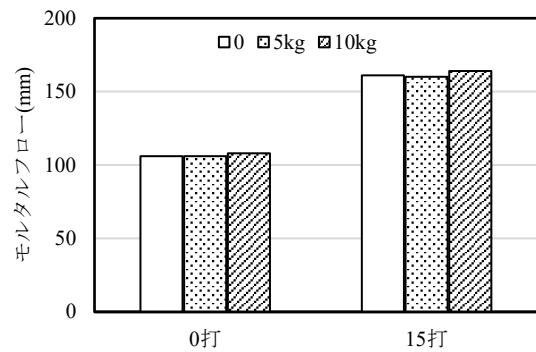


図-1 軽質炭酸カルシウムがモルタルフローに及ぼす影響

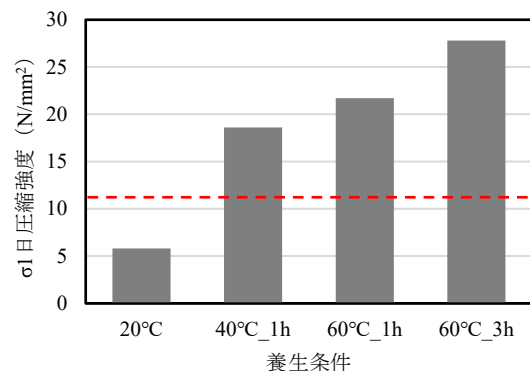


図-2 初期養生条件と圧縮強度の関係

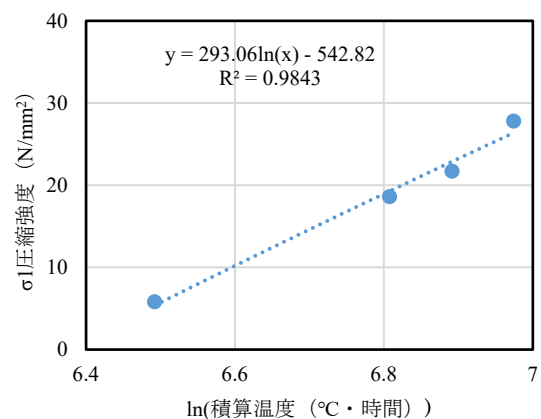


図-3 積算温度と圧縮強度の関係

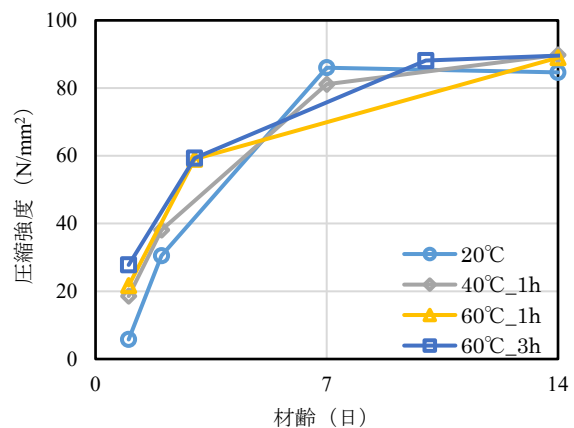


図-4 材齢と圧縮強度の関係

高炉スラグ微粉末を大量に用いた本試験でも、同じ傾向を示した。

### 3.3 初期強度と炭酸化速度の関係

各種初期養生を行った後、温度 50°C、相対湿度 50%、CO<sub>2</sub> 濃度 80% で養生した供試体における材齢と圧縮強度の関係の結果を図-4 に示す。初期養生条件によらず、いずれの供試体も材齢 14 日における強度は 90N/mm<sup>2</sup> 程度となり、60N/mm<sup>2</sup> を大きく上回った。

次に、材齢と炭酸化深さの関係を図-5 に示す。図示するように、初期養生 20°C と 40°C では、材齢に伴う炭酸化の進行は同程度であったが、初期養生温度を 60°C とすると、その後の炭酸化の進行が遅くなる結果となった。また、60°C の初期養生において、同温度を与える時間の長い方が、炭酸化の進行が遅くなる傾向がみられた。

これらを踏まえて、図-5 に示した結果をもとに炭酸化速度係数を求め、材齢 1 日の圧縮強度との関係を整理した。初期強度が小さい 20°C のもので炭酸化速度は 5.06mm/√日、初期強度が大きい 60°C\_3h の供試体で 2.01mm/√日という結果が得られた。炭酸化養生開始 (σ<sub>1</sub>) 時の圧縮強度と、図-5 から得られた炭酸化速度係数の関係を図-6 に示す。既往の研究<sup>12)</sup>と同様に、初期強度が大きいほど炭酸化速度が小さくなる傾向が得られた。これは、初期強度が大きいほどコンクリートが緻密化し、CO<sub>2</sub> が内部まで拡散しにくくなるためと考えられる。したがって、養生期間を短縮しつつ CO<sub>2</sub> 固定量を最大にするためには、埋設型枠の取回しに必要な強度を満足しつつも、できるだけ炭酸化養生開始時の強度を小さくする必要がある。本検討の結果より、後述する埋設型枠の製造においては、40°C で 1 時間初期養生を行うこととした。

### 3.4 CO<sub>2</sub> 固定量の測定

実験 2 のケース 2 の供試体について、熱分析における温度と質量減少率の結果を図-7 に示す。600°C~750°C 付近にかけて炭酸カルシウムが脱炭酸分解による質量減少が確認できた。ここで、炭酸カルシウムの脱炭酸分解が生じる温度範囲を 600°C から 800°C とすると、炭酸カルシウムの脱炭酸分解による質量減少率は 8.3% であった。一方、無機炭素分析にて得られた CO<sub>2</sub> 含有率は 11.8% であった。それぞれの CO<sub>2</sub> 固定量を単位容積質量に CO<sub>2</sub> 含有率を乗じて算出すると、熱分析による CO<sub>2</sub> 固定量は 189kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>、無機炭素分析による CO<sub>2</sub> 固定量は 268kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> となり、無機炭素分析による CO<sub>2</sub> 固定量の方が大きい結果となった (図-8)。1 点のみのデータであるものの、無機炭素分析の方が熱分析で測定した場合に比べて大きいことが分かった。これは、安田らの研究<sup>10)</sup>でも同様の傾向が報告されており、熱分析では炭酸カルシウムが脱炭酸分解するとされる温度帯の範囲の設定によって異なることと、無機炭素分析では炭酸カルシウムだけ

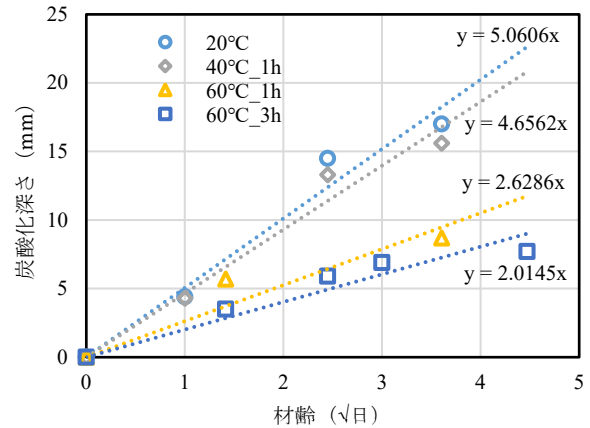


図-5 初期強度が炭酸化深さに与える影響

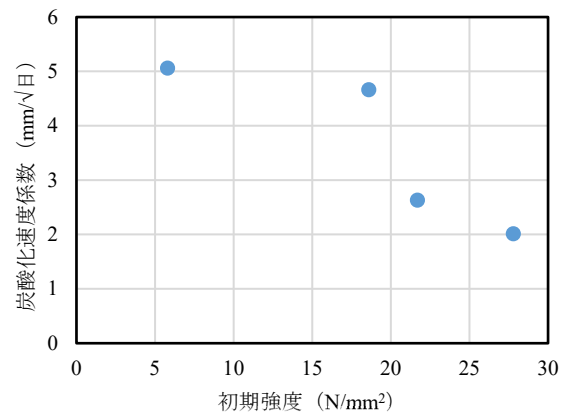


図-6 養生開始時の強度と炭酸化速度係数の関係

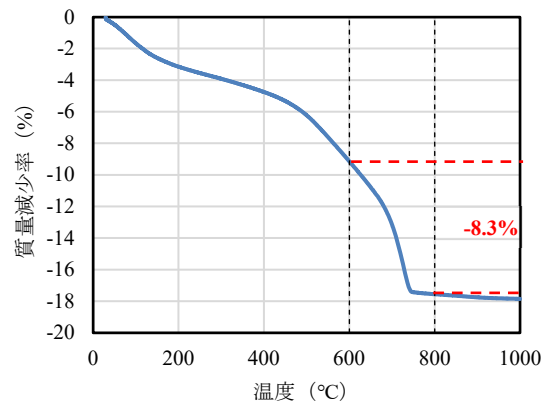


図-7 温度と質量減少率の関係

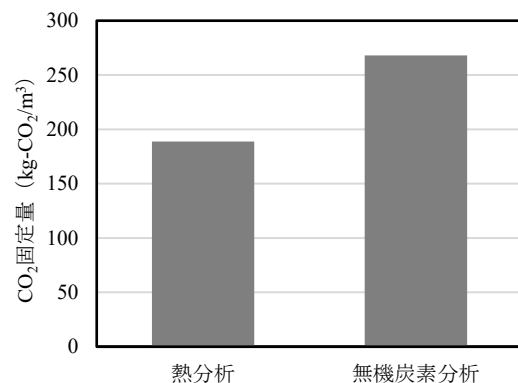


図-8 温度と質量減少率の関係

ではなく、ゲル状水和物に固定されている CO<sub>2</sub> を測定されたためと考えられる。

### 3.5 CO<sub>2</sub> 排出量の算定

前述のとおり、CO<sub>2</sub> は CaCO<sub>3</sub> 以外の形態でも固定されていると考えられ、無機炭素分析の方が正確な CO<sub>2</sub> 固定量を示すと考えられることから、無機炭素分析の試験結果を用いて、今回選定した配合の CO<sub>2</sub> 排出量を算出した結果を図-9 に示す。表-5 に示す各材料の CO<sub>2</sub> 排出量原単位を用いて材料自体の CO<sub>2</sub> 排出量を算出すると 206kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> となる。無機炭素分析の試験結果 268kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> を差し引くと、CO<sub>2</sub> 収支は-62kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> となった。

### 3.6 ガラス繊維による補強に関する検討

ガラス繊維を添加した際のフレッシュ性状への影響について評価した。ガラス繊維を 1vol% および 2vol% 添加し、所要のモルタルフローを得るための高性能減水剤の添加率試験によって求めたところ、それぞれ単位結合材量に対する添加率が 0.4%、0.5% となった。ここで、ガラス繊維を 1vol% および 2vol% 添加したモルタルのモルタルフロー試験後の状況を写真-2 に示す。ガラス繊維を 2vol% 添加した場合、所要のモルタルフローを得るには、高性能減水剤の添加量が過剰となり、写真-2 のように分離気味となった。これにより、2vol% では埋設型枠製造の際にガラス繊維が不均一に分布したり、炭酸化の進行が不均一になるなどの不具合が生じる可能性があると考えられた。また、コテで均す際の仕上げの良否も考慮すると、ガラス繊維の添加量は 1vol% が適量であると判断した。

ガラス繊維を添加していない供試体と、1vol% 添加した供試体の材齢 7 日（炭酸化 6 日）ひび割れ発生強度を図-10 に示す。繊維無しではひび割れ発生強度が 9.6N/mm<sup>2</sup> であったのに対して、1vol% のガラス繊維を添加することにより、10.9N/mm<sup>2</sup> となり、1.3N/mm<sup>2</sup> の強度増加が得られることを確認した。

## 4. 現場適用

これまでに選定した配合について、実際に埋設型枠を作製し、打込み性能や仕上がりが良好であること、運搬時にひび割れが生じないことを確認し、不具合なく製造

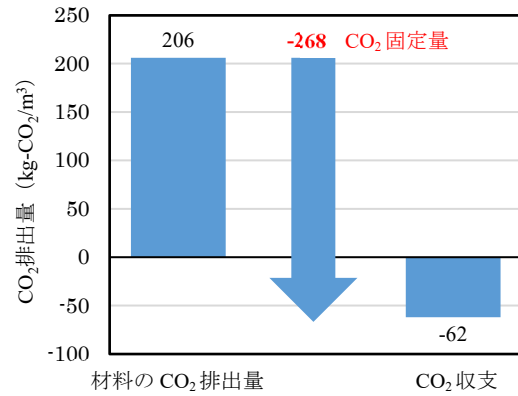


図-9 CO<sub>2</sub> 総排出量



写真-2 ガラス繊維を添加した際のフレッシュ性状

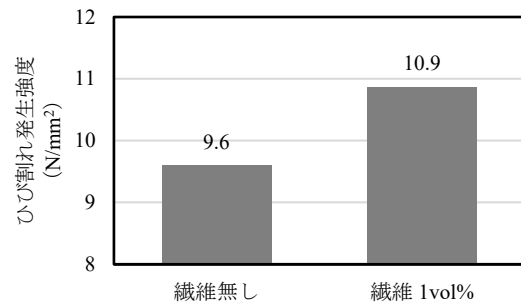


図-10 繊維の有無によるひび割れ発生強度

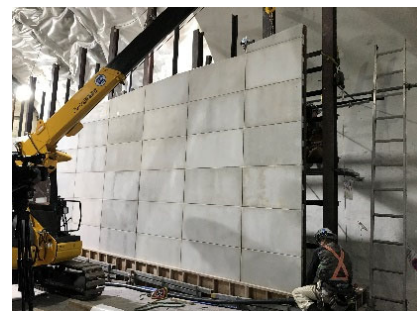


写真-3 埋設型枠建込みの様子

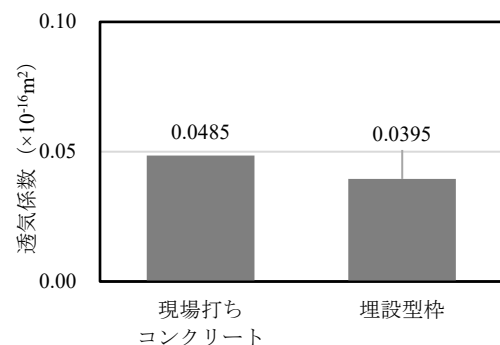


図-11 現場打ちコンクリートと埋設型枠の透気係数

表-5 各材料の CO<sub>2</sub> 排出量原単位

材料	CO <sub>2</sub> 排出量原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
普通ポルトランドセメント <sup>13)</sup> 、膨張材 <sup>※</sup>	762.7
高炉スラグ微粉末 <sup>14)</sup>	26.5
γ-C <sub>2</sub> S <sup>7)</sup>	124.5
軽質炭酸カルシウム <sup>3)</sup>	-390
細骨材 <sup>15)</sup>	3.5

※膨張材はデータがないため普通ポルトランドセメントと同値とした

ができることを確認した。また、製造した埋設型枠を、鋼材を介して複数枚接合して建込みを行い（写真-3）、十分に埋設型枠として適用できることを確認した。現場打ちコンクリートと埋設型枠についてトレント法<sup>15)</sup>による透気係数を測定し比較を行った結果を図-11に示す。現場打ちコンクリートが $0.0485 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に対して、埋設型枠は $0.0395 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と小さかった。トレント法における評価は両者ともに良であり、埋設型枠は現場打ちコンクリートと同等以上であることが示された。

## 5. おわりに

埋設型枠を対象として、CO<sub>2</sub>吸収コンクリートに軽質炭酸カルシウムを加えることにより、さらなるカーボンネガティブの可能性について検討した。また、ガラス繊維を補強材として用いた際のモルタルの各種品質を評価した。さらに、実際に埋設型枠を製造し、施工現場に適用してコンクリートの品質について評価した。その結果、下記のことがわかった。

- 1) 本検討の範囲では10kg/m<sup>3</sup>程度であれば、軽質炭酸カルシウムを添加しても、フレッシュ性状には影響は小さい。
- 2) 軽質炭酸カルシウムを用いたCO<sub>2</sub>吸収コンクリートにおける材料起因のCO<sub>2</sub>排出量とCO<sub>2</sub>固定量の収支を試算した結果、CO<sub>2</sub>排出量は-62kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>となった。
- 3) ガラス繊維を1%添加することによって、ひび割れ発生強度が向上し、補強効果が得られた。
- 4) ガラス繊維を補強材として用いたモルタルは、埋設型枠としての製造性や施工性を確保でき、一般的なコンクリートと同等以上の品質を有することを確認した。

**謝辞：**本成果は、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（JPNP21014）を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果である。また、埋設型枠を適用するにあたり、国土交通省高知河川国道事務所ならびに日下川新規放水路（呑口側）工事の皆様には多大なるご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 内閣府：地球温暖化対策計画, 2022
- 2) 取違剛ほか：CO<sub>2</sub>吸収型カーボンネガティブコンクリート CO<sub>2</sub>-SUICOM, 土木施工, Vol.62, pp.79-82, 2021

- 3) 佐々木猛ほか：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.58~62, 2022
- 4) 坂井吾郎ほか：CCU 材料の炭酸カルシウム微粉末を用いたコンクリートのCO<sub>2</sub>固定量, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会V-519, 2022
- 5) 関健吾ほか：強制炭酸化したガラス繊維補強モルタルの収縮特性, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-350, 2021
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事, p.75, 2013
- 7) 庄司慎ほか：副生の水酸化カルシウムを用いたC<sub>2</sub>Sの製造とCO<sub>2</sub>排出量原単位, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.553-558, 2013
- 8) 取違剛ほか：炭酸化させたガラス繊維補強モルタルの施工性および曲げ強度に関する検討, 平成29年度土木学会全国大会第72回年次学術講演会, V-350, 2017
- 9) 取違剛ほか：炭酸化したセメント系材料におけるCO<sub>2</sub>固定量の評価手法および物性変化に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.2, pp.37-54, 2021
- 10) 安田僚介ほか：炭酸化を受けたセメント系材料中のCO<sub>2</sub>含有率評価に向けた分析方法の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.442-447, 2021
- 11) 入江正明ほか：高温蒸気養生履歴を受けるモルタルの脱型強度の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 12) Torichigai, et al. : PHYSICAL PROPERTIES AND MANUFACTURING METHOD OF THE CONCRETE EXTREMELY REDUCING CO<sub>2</sub> EMISSIONS BY USING C<sub>2</sub>S AND CARBONATION CURING, CO2STO2019, pp.204-212, 2019
- 13) セメント協会：セメントの LCI データの概要 2021.4.12 公表  
[https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jgli\\_01.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jgli_01.pdf)
- 14) 河合研至：コンクリートの環境負荷評価 ①コンクリートに関わる環境負荷, コンクリート工学 Vol.50, No. 6, pp. 554-561, 2012
- 15) 河合研至：コンクリートの環境負荷評価 ②コンクリートに関わる環境負荷, コンクリート工学 Vol.50, No.7, pp.635-639, 2012
- 16) 水野健ほか：ガラス繊維補強モルタル製埋設型枠と後打ちコンクリートの界面の耐久性に関する一検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-128, 2021