

# 論文 $\beta$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物とした CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメント系材料を用いた コンクリートの力学特性および炭酸化性状

茨木 泰介\*1・橋本 真幸\*2・石田 征男\*3・曾根 涼太\*2

**要旨:**  $\beta$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物とした CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントは、CO<sub>2</sub> と反応し空隙を充填することで強度を発現する。本検討では、コンクリート製品への適用を想定し、蒸気養生後に炭酸化養生した水セメント比が 40~50% のコンクリートについて、圧縮強度と CO<sub>2</sub> 固定量を測定した。CO<sub>2</sub> 固定量の増加にともなって圧縮強度も増加し、材齢 14 日の圧縮強度は 46~49N/mm<sup>2</sup> であり、コンクリート 1m<sup>3</sup> あたりの CO<sub>2</sub> 固定量は 85~117kg/m<sup>3</sup> であった。また、所要の圧縮強度を満足するための CO<sub>2</sub> 削減効果は、水セメント比が高い方が大きい結果であった。

**キーワード:** カーボンニュートラル, CO<sub>2</sub>, セメント, コンクリート製品, 炭酸化養生, CO<sub>2</sub> 固定量

## 1. はじめに

地球温暖化の原因は二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) やメタン, 代替フロンなどの温室効果ガスといわれており, このうち温室効果ガスの多くを占める CO<sub>2</sub> の削減に向けた取組みが世界中の各産業分野で行われている。我が国では 2020 年 10 月の政府によるカーボンニュートラル宣言<sup>1)</sup>以降, 各産業分野における CO<sub>2</sub> 排出削減に向けた動きが本格化している。

コンクリート分野における CO<sub>2</sub> の排出削減対策の一つとして, 高濃度の CO<sub>2</sub> 環境で養生を行うこと (以下, 炭酸化養生) により, コンクリートに CO<sub>2</sub> を固定化させるカーボンネガティブコンクリートが開発されており, コンクリート製品を中心に実用化<sup>2)</sup>が進んでいる。この技術は,  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物とする混和材を用いることで CO<sub>2</sub> と反応して硬化することを特長としており, 従来のコンクリートと比較してセメントの使用量を削減可能であることに加え, 硬化時に CO<sub>2</sub> を固定化することで, CO<sub>2</sub> を大幅に削減できるとしている。

一方で, セメント産業は, その製造工程において大量の廃棄物を原料, 燃料としてリサイクルしており, 循環

型社会の構築に大きく貢献している<sup>3)</sup>。このような中, CO<sub>2</sub> 排出量の削減と廃棄物活用を両立した普通ポルトランドセメント (OPC) と同様の鉱物で構成され CO<sub>2</sub> を吸収し, 硬化するセメント (CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメント) を開発した<sup>4)</sup>。このセメントは, 前述の CO<sub>2</sub> 固定硬化型の材料とは異なり,  $\beta$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物とし, かつ OPC と同様の鉱物で構成されることで, 炭酸化と水和の両者によって硬化する。また, この CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントは, OPC よりも CaO 含有率が低く, 低温度でクリンカを焼成できるため, 製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少なく, さらに炭酸化養生を行うことで CO<sub>2</sub> と反応し短期間で強度発現する特長を有する。これまでに, CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントを使用したインターロッキングブロックを作製し, 炭酸化養生を行った製品が規格強度を満足し, CO<sub>2</sub> 削減に貢献することが確認されている<sup>5)</sup>。

本稿では,  $\beta$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物とする CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントを広範なコンクリート製品に適用することを想定し, 本セメントを用いて, 蒸気養生を行った後に強制的に炭酸化させたコンクリートの力学特性および CO<sub>2</sub> 固定量について報告する。

表-1 使用材料

材料名	種類	記号	摘要
水	—	W	上水道水
セメント	CO <sub>2</sub> 吸収・硬化セメント	C	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , プレーン比表面積: 3300cm <sup>2</sup> /g
細骨材	山砂	S	表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.91%, F.M.2.75
粗骨材	碎石 2005	G	岩種: 砂岩, 表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 60.8%
化学混和剤	AE 減水剤	AD	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
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE 剤	AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

\*1 太平洋セメント株式会社 中央研究所 (正会員)

\*2 太平洋セメント株式会社 中央研究所

\*3 太平洋セメント株式会社 中央研究所 博士(工学) (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-1 に示す。セメントは  $\beta$ -C<sub>2</sub>S を主要鉱物としてアルミネート相を含む CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントを使用した。なお、CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントの密度およびブレン比表面積は一般的な普通ポルトランドセメントと同等である。骨材は細骨材として山砂、粗骨材には碎石 2005 を使用した。化学混和剤として AE 減水剤、高性能 AE 減水剤および AE 剤を使用した。本検討では、水セメント比が 40% では高性能 AE 減水剤を、45% および 50% では AE 減水剤を使用した。

コンクリート配合を表-2 に示す。水セメント比（以下、W/C）は 40%、45% および 50% の 3 水準とし、単位水量は、W/C によらず一定の 165kg/m<sup>3</sup> とした。スランブの目標値は、W/C40% の場合で 18.0±2.5cm、W/C45% および 50% においては 12.0±2.5cm とし、AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤の使用量により調整した。また、空気量の目標値は W/C によらず 4.5±1.5% とし AE 剤の使用量により調整した。

### 2.2 コンクリートの作製方法

コンクリートの練混ぜは、二軸形強制練ミキサ（公称容量 60L）を使用して行った。使用材料は試験前日より 20°C に管理された恒温室内で温度管理を行い、コンクリートの練混ぜ、フレッシュ試験および供試体作製は温度 20°C、湿度 80%RH の恒温室内で実施した。

### 2.3 養生方法および環境条件

本検討においては幅広いコンクリート製品に適用することを想定し、蒸気養生を行った後に炭酸化養生を実施した。蒸気養生における温度条件を図-1 に示す。炭酸化養生は、温度 30°C、湿度 60%RH、CO<sub>2</sub> 濃度 80vol.% に管理された炭酸化養生槽内で行った。また、炭酸化による力学特性への影響を検証することを目的として、蒸気養生後、温度 30°C、相対湿度 60%環境にて気中養生（CO<sub>2</sub> 濃度 450ppm；以下、恒温恒湿養生）した水準も併せて行った。供試体の成形後、型枠上面をラップフィルムで封緘し、温度 20°C の恒温室内で 4 時間養生を行った

表-2 コンクリート配合

配合条件			単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)
W/C (%)	混和剤 種類	s/a (%)	W	C	S	G		
40	SP	48	165	413	823	892	18±2.5	4.5 ±1.5
45	AD	46	165	367	800	953	12±2.5	
50	AD	47	165	330	831	952		

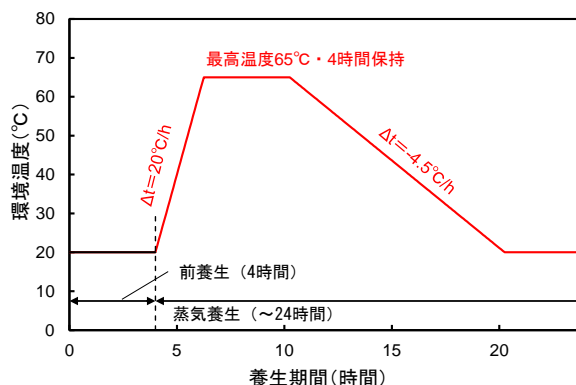


図-1 蒸気養生の温度条件

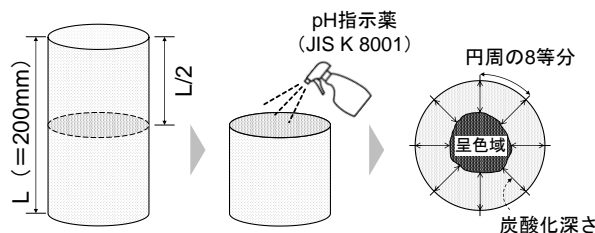


図-2 炭酸化深さの測定方法

後に、図-1 に示す温度履歴により蒸気養生を行った。その後、注水後 24 時間が経過した時点で脱型し、炭酸化養生槽および恒温恒湿養生槽へそれぞれ移行し、材齢 14 日まで養生を行った。

### 2.4 評価項目および試験方法

表-3 に評価項目および試験方法を示す。フレッシュコンクリートの性状は、スランブ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）および温度測定（JIS A 1156）を実施した。コンクリートの硬化特性は圧縮強度試験（JIS A

表-3 評価項目および試験方法

	測定項目	試験方法
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」
	空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」
	コンクリート温度	JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
	静弾性係数	JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」
	細孔径分布	水銀圧入式ポロシメーターによる測定
炭酸化	炭酸化深さ	JIS A 1152 「コンクリートの中性化深さの測定方法」 参考
	CO <sub>2</sub> 固定量	全炭素分析による測定

1108), 静弾性係数試験 (JIS A 1149) および硬化体の細孔径分布について評価を行った。圧縮強度および静弾性係数に用いた供試体は、寸法がφ10×20cmの円柱供試体とし、蒸気養生を材齢24時間まで行った後、炭酸化養生および恒温恒湿養生を材齢2日、4日、7日および14日まで実施した。細孔径分布は、水銀圧入式ポロシメーターにより細孔径3nm~2mmの範囲で測定した。測定は、炭酸化養生を行った材齢14日の円柱供試体(φ10×20cm)を湿式コンクリートカッターにて中心より円盤状に切り出し、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して呈色した箇所と呈色しなかった箇所を炭酸化部、未炭酸化部と定義し、それぞれについて粗骨材部分を除去したモルタル部を試料として採取した。採取したモルタル試料は、直径2.5~5mm程度となるまで粗砕し、アセトンに浸漬して水和停止を行った後、D-Dry法による乾燥処理を施した。炭酸化性状は炭酸化深さの測定(JISA 1152)およびCO<sub>2</sub>固定量の評価を行った。炭酸化深さの測定は圧縮試験後の供試体を用いて高さの1/2の位置で湿式コンクリートカッターにより切断し、切断面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して図-2に示すように8か所で測定した平均値とした。CO<sub>2</sub>固定量の評価は全炭素分析(TC)によって測定した。コンクリート試料は円柱供試体(φ10×20cm)を全量粉碎し、縮分した後に微粉碎した。TCは炭素・硫黄分析装置で測定し、酸素気流中で試料を燃焼(燃焼温度:1250℃)させ、発生したCO<sub>2</sub>を赤外線吸収方式にて定量した。コンクリートの使用材料についても個別にTCで測定を行い、コンクリート試験体に固定化されたCO<sub>2</sub>量について以下のように計算した。

- I. 脱型直後の試験体質量より、試験体中に含まれる構成材料の質量を推定する。なお、蒸気養生中は封緘状態であることから試験体から水分の逸散は無いと仮定している。各材料単位量あたりのCO<sub>2</sub>量から、脱型直後の試験体に含まれるCO<sub>2</sub>量を算出する。
- II. 炭酸化養生後の試験体のCO<sub>2</sub>量を測定する。ここで、IとIIは同一の試験体とする。
- III. IIで求めた炭酸化養生後の試験体に含まれるCO<sub>2</sub>量から、Iで求めた脱型直後の試験体に含まれるCO<sub>2</sub>量を差し引くことで、炭酸化養生によって試験体に固定化したCO<sub>2</sub>量(CO<sub>2</sub>固定量)を算出する。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートのフレッシュ性状

練上り直後におけるコンクリートのフレッシュ性状試験結果を表-4に示す。スランブおよび空気量は、いずれのW/Cでも標準的な添加率の範囲で目標値を満足しており、従来のポルトランドセメントと同様に、混和剤の添加量を調整することで、所要のフレッシュ性状を得ることが可能であった。

#### 3.2 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度を図-3に示す。また、炭酸化による強度増進量を評価する目的で炭酸化養生による強度増進量から恒温恒湿養生中の強度増進量を差し引いた結果を図-4に示す。蒸気養生24時間時点および恒温恒湿養生を行った全ての材齢におけるコンクリートの圧縮強度は、W/Cが小さいほど大きく、従来のポルトランドセメントと同様の傾向を示した。また、コンクリートの圧縮強度は、炭酸化養生を行うことで増進し、その期間が長いほど効果が大きいことを確認した。本検討の結

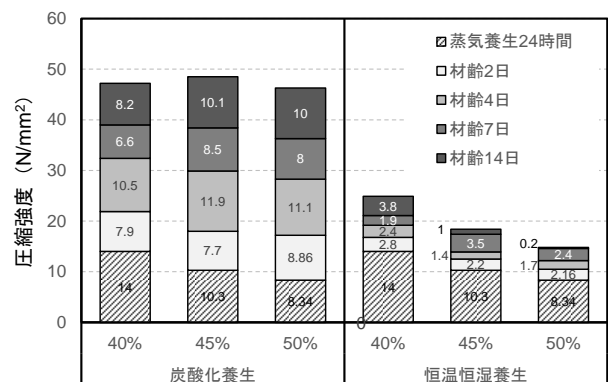


図-3 コンクリートの圧縮強度

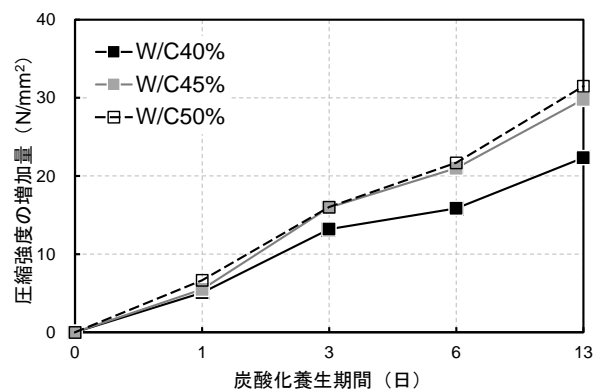


図-4 炭酸化養生による圧縮強度の増加量

表-4 コンクリートのフレッシュ性状試験結果

W/C (%)	SP, AD 添加率 (C×%)	AE 添加率 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
40	SP	0.004	17.0	3.5	23
45	AD	0.003	11.0	4.3	22
50		0.003	10.0	3.8	22

果では、炭酸化養生 1 日（材齢 2 日）で  $10\sim 20\text{N/mm}^2$ 、炭酸化養生 3 日（材齢 4 日）で  $30\text{N/mm}^2$  程度であり、対象とする製品によっては養生期間の短縮ができると考えられる。一方で、炭酸化による強度増進効果は W/C が大きいほど大きく、50%と 45%の差は小さいものの、40%の場合は顕著に小さくなった。また、材齢 14 日時点における圧縮強度は、W/C による関係性は確認されず、W/C によらず  $46\sim 49\text{N/mm}^2$  と概ね同等の圧縮強度となった。これらの結果について、蒸気養生および恒温恒湿養生における強度増進の主な要因がセメント鉱物の水和進行によるものであるのに対し、炭酸化養生を行った場合には、セメントの水和進行と同時に  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  の炭酸化反応により硬化が進み、強度増進につながったと考えられる<sup>9)</sup>。W/C が 40%の場合が 45%および 50%の場合よりも炭酸化養生による強度増進が小さかったことについて、コンクリートの炭酸化は、コンクリート中への  $\text{CO}_2$  の拡散速度に影響されるため、コンクリートの組織が緻密である場合には、炭酸化の進行速度が低下し、強度増進が停滞すると考えられる。炭酸化養生中は、水和反応および炭酸化の進行による強度増進と、強度増加にともなう組織の緻密化による炭酸化の停滞が同時に作用すると考えられる。すなわち、高 W/C の場合は、低 W/C の場合よりも水和反応による強度増進は小さいものの、炭酸化が進みやすいため、低 W/C の場合と同等の強度を確保できたと考えられる。

### 3.3 静弾性係数

炭酸化養生および恒温恒湿養生を施したコンクリートの静弾性係数の経時変化を図-5 に示す。静弾性係数は、炭酸化養生を行うことによって大きくなり、炭酸化養生期間が長くなるほど恒温恒湿養生を行った場合との差が大きくなった。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6 に示す。図中には JASS5<sup>7)</sup>で採用されている静弾性係数の推定式 (New-RC 式) を併記している。コンクリートの静弾性係数は、材齢、配合条件および養生条件によらず、圧縮強度と同一の関係で表現できることを確認した。同一強度におけるコンクリートの静弾性係数は、New-

RC 式 ( $k_1=1.0, k_2=1.0, \gamma=2.3$ ) と比較して、わずかに下回る傾向が認められた。この傾向は、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  を使用した  $\text{CO}_2$  固定・硬化コンクリートでも同様の傾向が認められているが<sup>8)</sup>、本検討で使用した  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  を主要鉱物とするセメントを使用した場合は、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$  を使用した場合よりも高い値であった。

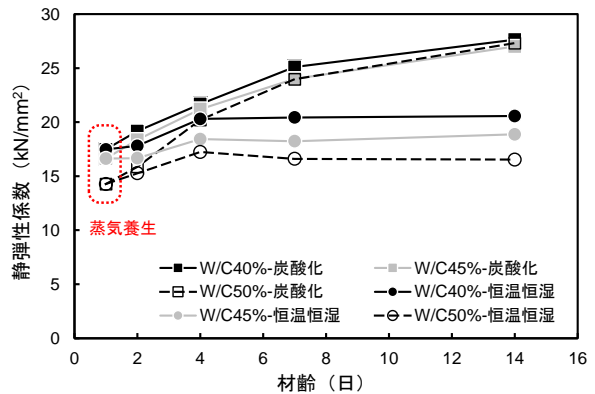


図-5 静弾性係数の経時変化

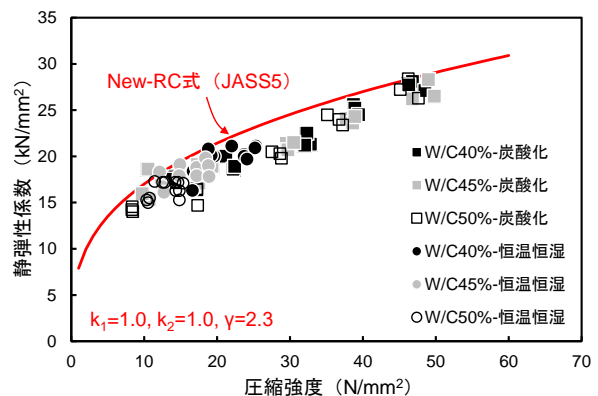


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-5 材齢 14 日における炭酸化部と未炭酸化部の空隙量

W/C (%)		40	45	50
総空隙量 (%)	炭酸化部	12.3	13.3	14.4
	未炭酸化部	18.5	19.8	20.7

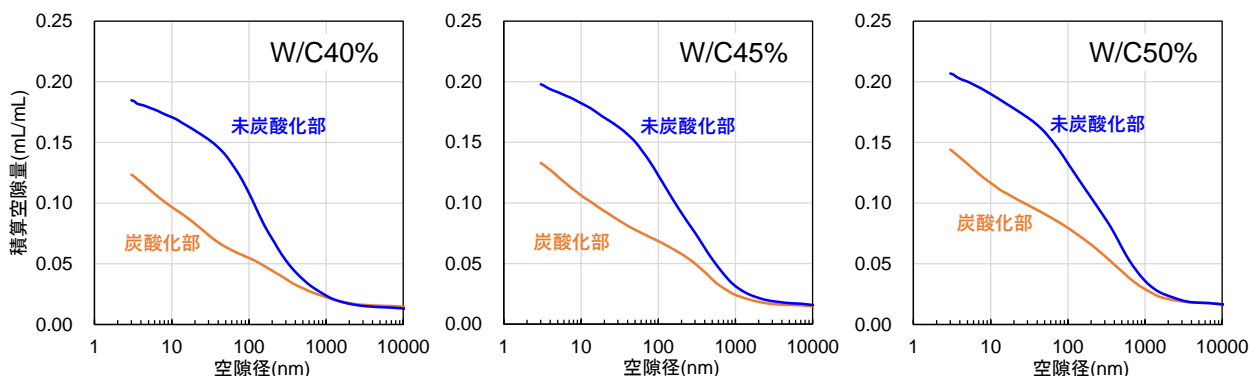


図-7 材齢 14 日におけるコンクリート試験体の細孔径分布

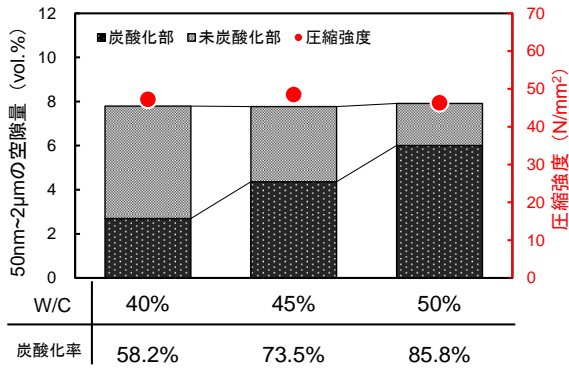


図-8 材齢 14 日における空隙量および強度

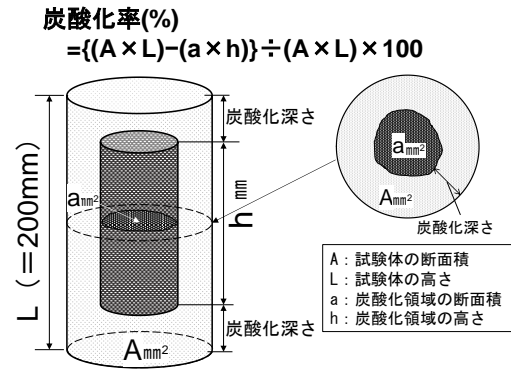


図-9 炭酸化比率の求め方

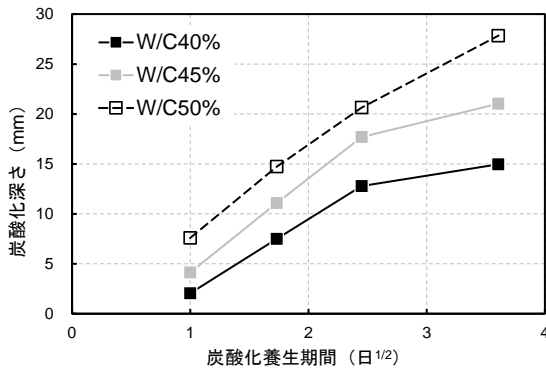


図-10 コンクリートの炭酸化深さ

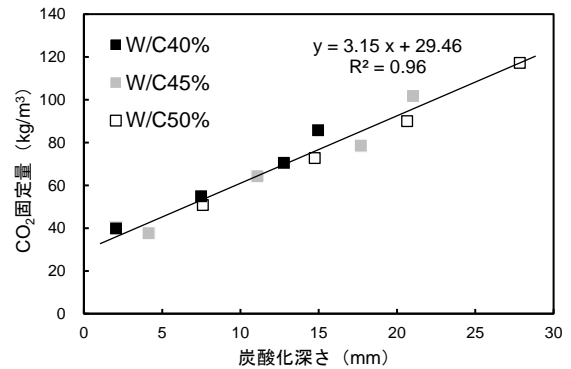


図-11 炭酸化深さと CO<sub>2</sub> 固定量の関係

### 3.4 細孔径分布

図-7 に細孔径分布の測定結果を示す。炭酸化部の細孔径分布は、未炭酸化部と比較して数十 nm~1000nm 程度の空隙量の顕著な減少が確認された。この傾向は、既往の研究<sup>9)</sup>と同様であるが、既往の研究で認められた 1000nm 以上の粗大な空隙の増加は認められなかった。毛細管空隙量はその量が少ないほど硬化体の耐久性は高いとされる<sup>10)</sup>。いずれも W/C によらず炭酸化部の空隙量は未炭酸化部に比べ全体的に減少する傾向が認められており、炭酸化によって組織が緻密化されたことが示唆された<sup>11)</sup>。

表-5 に材齢 14 日における炭酸化部と未炭酸化部の空隙量を示す。空隙量は、W/C が高いほど大きく、炭酸化部は未炭酸化部よりも小さいことが確認できる。

図-8 に材齢 14 日における空隙量と圧縮強度を示す。コンクリートの空隙率は、図-9 により求めた炭酸化養生を行った材齢 14 日における供試体の炭酸化部の体積比率（以下、炭酸化率）と炭酸化部および未炭酸化部の空隙率より、供試体全体の見かけの空隙率を算出した。炭酸化養生を行った材齢 14 日の圧縮強度が W/C によらず概ね同じ値であったのに対して、見かけの空隙率も概ね同様となることから、上記手法により炭酸化養生を行ったコンクリートの空隙率を十分に評価できていると推察される。

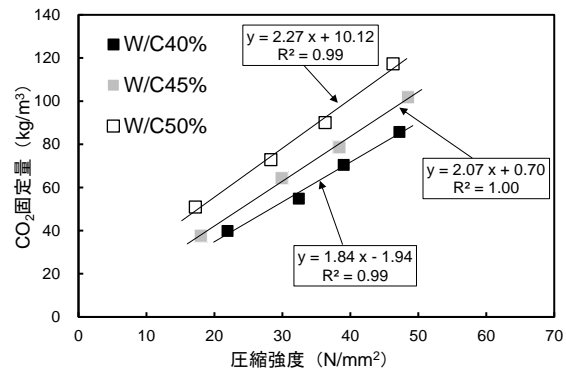


図-12 圧縮強度と CO<sub>2</sub> 固定量の関係

### 3.5 炭酸化深さ

炭酸化養生期間の平方根とコンクリートの炭酸化深さの関係を図-10 に示す。コンクリートの炭酸化深さは、既往の研究<sup>12)</sup>と同様に W/C に大きく影響し、W/C が高いほど大きくなった。また、炭酸化の進行速度は炭酸化養生期間の平方根 2.45 日<sup>1/2</sup>（炭酸化養生期間 6 日）までは概ね一定であるが、それ以降は速度が鈍化した。その傾向は W/C が小さいほど顕著であった。既往の研究<sup>13)</sup>においても、コンクリート中の総粉体量が多くなると、炭酸化の進行が鈍くなることを確認されている。その理由として、炭酸化養生初期に表面が緻密化し、その後の内部への炭酸化が阻害される可能性を示唆している。本研究においても炭酸化養生によってコンクリート表面が

緻密化したことが考えられ、W/C が小さいほどその影響が顕著になったと推察する。

### 3.6 CO<sub>2</sub> 固定量

炭酸化深さと CO<sub>2</sub> 固定量の関係を図-11 に示す。CO<sub>2</sub> 固定量は、W/C によらず炭酸化が進行するほど大きくなり、材齢 14 日時点の CO<sub>2</sub> 固定量は 85~117kg/m<sup>3</sup> であった。また、同一養生期間で比較すると W/C が高いほど大きい結果となった。

圧縮強度と CO<sub>2</sub> 固定量の関係を図-12 に示す。CO<sub>2</sub> 固定量と圧縮強度の関係は、W/C ごとに直線関係を示しており、CO<sub>2</sub> 固定量の増加にともなって圧縮強度も増加した。また、今回の試験の範囲では、圧縮強度に対する CO<sub>2</sub> 固定量は、W/C が大きいほど多くなり、所要の圧縮強度を満足するための CO<sub>2</sub> 削減効果は、W/C が高い方が大きいと言える。

## 4. まとめ

CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメントを用いた W/C40~50% 程度のコンクリートについて、基本性状および CO<sub>2</sub> 固定量の評価を行った。本稿において、得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートのフレッシュ性状は、従来のポルトランドセメントと同様に、混和剤の添加量を調整することにより、所要のフレッシュ性状を得ることが可能であった。
- (2) 炭酸化による圧縮強度の増加量は、W/C が高いほど大きく、40% の場合は顕著に小さくなった。材齢 14 日時点における圧縮強度は、W/C によらず概ね 46~49N/mm<sup>2</sup> と優れた強度であった。
- (3) 同一強度におけるコンクリートの静弾性係数は、New-RC 式と比較して、わずかに小さくなった。
- (4) 炭酸化部の細孔径分布は、未炭酸化部と比較して数十 nm~1000nm 程度の空隙量の顕著な減少が確認され、炭酸化によって組織が緻密化されたことが示唆された。
- (5) コンクリートの炭酸化深さは、W/C が低いほど小さく、炭酸化の進行速度は炭酸化養生期間 6 日以降で鈍化した。
- (6) CO<sub>2</sub> 固定量の増加にともなって圧縮強度も増加し、圧縮強度に対する CO<sub>2</sub> 固定量は、W/C が大きいほど多くなった。
- (7) 材齢 14 日時点の CO<sub>2</sub> 固定量は 87~117kg/m<sup>3</sup> と大量の CO<sub>2</sub> をコンクリートに固定化することを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 日本政府：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略，令和 3 年 6 月 18 日

[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/pdf/green\\_honbun.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf)（閲覧日：2024 年 1 月 8 日）

- 2) 取違剛，森泰一郎，河内友一，藤木昭宏：CO<sub>2</sub> 固定型カーボンネガティブコンクリート：CO<sub>2</sub>-SUICOM の開発と今後の展開．セメント・コンクリート，No.900，pp.64-69，2022.2
- 3) 一般社団法人 セメント協会 Web ページ：循環型社会構築に向けた取り組み。  
<https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html>（閲覧日：2024 年 1 月 5 日）
- 4) 橋本真幸，小林和揮，扇嘉史，細川佳史：CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメント「カーボフィクス®セメント」の開発，セメント・コンクリート，No.906，pp.10-16，2022
- 5) 小林和揮，馬場智也，橋本真幸，細川佳史ほか：低炭素型セメントを用いた炭酸化養生コンクリートの硬化性状と CO<sub>2</sub> 低減効果，無機マテリアル学会第 143 回学術講演会講演要旨集，No.580，pp.58-59，2021.11
- 6) 坂井悦郎，盛岡実，山本耕三，大門正機ほか：低熱ポルトランドセメント硬化体の炭酸化反応，Journal of the Ceramic Society of Japan，Vol.107，No.1246，pp.561-566，1999
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート 2022
- 8) 北島君則，金輪岳男，取違剛，山野泰明：炭酸化反応によるコンクリートへの CO<sub>2</sub> 固定技術のプレキャスト製品への適用，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，V-34，2023
- 9) 原沢蓉子，本多和博，伊与田岳史：異なる炭酸化環境が空隙特性および炭酸化生成物に与える影響，コンクリート工学年次論文集，vol.36，No.1，pp.808-813，2014
- 10) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，わかりやすいセメント科学，セメント協会，pp.78-104，1993
- 11) 扇嘉史，小林和揮，橋本真幸，細川佳史：CO<sub>2</sub> 吸収・硬化セメント「カーボフィクス®セメント」の強度発現および CO<sub>2</sub> 固定化，太平洋セメント研究報告，第 183 号，pp.43-54，2022
- 12) 渡邊賢三：炭酸化反応によるセメント系材料の耐久性向上技術，学位論文平成 24 年度，東京工業大学，p40，2012.10
- 13) 田口翔大，横田慎也，坂井吾郎，取違剛ほか：CO<sub>2</sub> 固定化を目指した普通コンクリート舗装の配合に関する要素検討—GI 基金事業『CUCO』開発成果—，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，V-183，2023