

# 論文 高炉スラグ微粉末と CO<sub>2</sub> 吸収軽質炭酸カルシウムを混和した環境配慮型コンクリートの特性について

金澤 優樹<sup>\*1</sup>・為石 昌宏<sup>\*1</sup>・山下 紘太郎<sup>\*2</sup>・金輪 岳男<sup>\*3</sup>

**要旨:** 筆者らは、脱炭素社会の達成に貢献するため、環境配慮型コンクリートの社会実装を目指している。新たに開発した環境配慮型コンクリートは、副生成物であるカーバイドスラリーと排ガス CO<sub>2</sub> を原料とした CCU 材料である CO<sub>2</sub> 吸収軽質炭酸カルシウムを使用するもので、そのフレッシュ性状、強度特性および収縮特性への影響について検討した。その結果、軽質炭酸カルシウムを混和することで従来のコンクリートと比べ粘性は高くなるものの、圧縮強度は同じ水結合材比のコンクリートと比べ 6 割～7 割程度高い結果であった。また、自己収縮は既存コンクリートと比較して収縮量は大きく、乾燥収縮は小さくなることが明らかとなった。

**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、CCU 材料、軽質炭酸カルシウム

## 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、豪雨災害が発生し、社会が脅かされつつある。これらの主要因とされる温室効果ガスの削減は、全世界が取り組むべき課題のひとつとして挙げられている。温室効果ガス内、特に二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）については、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、官民一体となり削減への取り組みが進められている。建設業界においても、特に CO<sub>2</sub> 排出量の多いコンクリート分野における排出の削減は、重要な課題のひとつである。

そこで筆者らは、環境配慮型コンクリートの研究を進めており、社会実装を目指している。なお、本論文では環境配慮型コンクリートの分類について図-1 に示すように呼称する<sup>1)</sup>。低炭素型コンクリートは、従来のコンクリート配合からさらに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コンクリートである。また、本論文での CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートは、低炭素型コンクリートに排ガス CO<sub>2</sub> をカルシウム源に固定化した CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization: CO<sub>2</sub> 回収・有効利用）材料である CO<sub>2</sub> 吸収軽質炭酸カルシウム<sup>2)</sup>を混和材として使用したコンクリートである。そして、CCU 材料である CO<sub>2</sub> 吸収軽質炭酸カルシウムを多く混和することで、コンクリート材料に由来する CO<sub>2</sub> 排出量がゼロとなるカーボンニュートラルコンクリートやマイナスとなるカーボンネガティブコンクリートの製造が可能となる。

本研究では、セメントを高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型コンクリートと、高炉スラグ微粉末で置換しさらに、排ガス由来 CO<sub>2</sub> を原料とした CCU 材料である CO<sub>2</sub> 吸

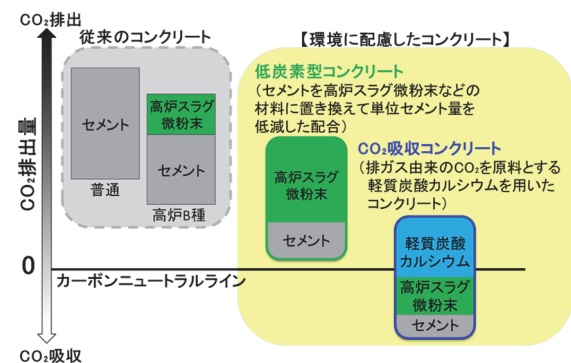


図-1 環境配慮型コンクリートの分類<sup>1)</sup>

収軽質炭酸カルシウム（以下、軽質炭酸カルシウム）を混和した CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートのフレッシュ性状、凝結時間試験、圧縮強度試験、自己収縮および乾燥収縮試験の結果を示すとともに、実際にプレキャストコンクリート製品を製作し、表層透気試験を実施した結果について報告する。

## 2. 軽質炭酸カルシウムの概要

### 2.1 軽質炭酸カルシウムの特徴

筆者らは、軽質炭酸カルシウムを混和したコンクリートに関する研究に取り組んでいる<sup>2)</sup>。

従来の軽質炭酸カルシウムは、石灰石を焼成して作った生石灰を水和させて消石灰とし、それに生石灰製造時に排出される CO<sub>2</sub> を反応させて作られており、カーボンマイナスな材料ではない。一方、本論文で使用する軽質炭酸カルシウムの原料であるカーバイドスラリーは、カーバイド（CaC<sub>2</sub>）と水（H<sub>2</sub>O）の反応により生成されるアセチレンガス（C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>）の製造過程で発生する副生成物であり<sup>3)</sup>、排ガス CO<sub>2</sub> などと反応させることでカーボンマイ

\*1 (株)鴻池組 技術研究所 大阪テクノセンター (正会員)

\*2 (株)鴻池組 技術研究所 つくばテクノセンター 博士(工学) (正会員)

\*3 ケイコン(株) 技術部 (正会員)

ナスな材料である。カーバイドスラリーは主成分が水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) であり、従来は酸性廃液の中和処理などに活用されてきた。この副生成物であるカーバイドスラリーを用いた軽質炭酸カルシウムの製造の流れを図-2に示す。本技術は、排ガス  $\text{CO}_2$  を資源と捉え、カーバイドスラリーと排ガス  $\text{CO}_2$  を炭酸化プラントで反応させ、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) として固定・鉱物化することで、大気中への  $\text{CO}_2$  排出を抑制するカーボンリサイクルのひとつである。本論文では、試作製造した軽質炭酸カルシウム<sup>4)</sup>を用いて環境配慮型プレキャストコンクリートの特性について研究を行った成果を報告する。

## 2.2 軽質炭酸カルシウムの特性

軽質炭酸カルシウムの主な特徴として、以下が挙げられる<sup>4)</sup>。

- (1) 各用途の要求に合わせた粒子制御によって、コンクリートの強度向上や練混ぜ性能向上などの効果がある。
- (2) 原料のカーバイドスラリーは主成分が  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  であり、 $\text{CO}_2$  との反応性が高く、導入する排ガス  $\text{CO}_2$  の70%以上を吸収することが可能となり、 $\text{CaCO}_3$  の純度が100%と仮定した場合、軽質炭酸カルシウムを1トン製造したときの  $\text{CO}_2$  固定化量は約440kgとなる。
- (3) 軽質炭酸カルシウム1トンの製造に伴い生じる副産物(固形分=カーバイドに含まれる不純物)は、50kg以下(5%以下)で極めて少なく、コンクリートスラッジや廃コンクリート、鉄鋼スラグなどをカルシウム源として製造するプロセスと比較して、カーバイドスラリーを原料とするプロセスは、 $\text{CO}_2$  固定量が最も多く、副産物量が極めて少ないプロセスである。

表-1に軽質炭酸カルシウムの特性値を示す。軽質炭

表-1 軽質炭酸カルシウムの特性値

| 試験項目                                | 試験結果  |
|-------------------------------------|-------|
| ブレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )  | 18040 |
| $\text{CaCO}_3$ (%)                 | 96.6  |
| $\text{MgO}$ (%)                    | 0.03  |
| $\text{SO}_3$ (%)                   | 0.25  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)         | 0.37  |
| 湿分 (%)                              | 0.30  |
| メチレンブルー吸着量 ( $\text{mg}/\text{g}$ ) | 0.03  |
| 密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )       | 2.51  |

表-2 配合条件

| 項目      | 条件                                                                        |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|
| 最大骨材寸法  | Gmax=15mm                                                                 |
| 目標強度    | 低炭素型<br>コンクリート<br>材齢14日<br>Fc=42N/mm <sup>2</sup><br>(製品同一養生)             |
|         | $\text{CO}_2$ 吸収<br>コンクリート<br>材齢14日<br>Fc=30N/mm <sup>2</sup><br>(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 <sup>3</sup> 以下                                                  |

酸カルシウムの密度は  $2.51\text{g}/\text{cm}^3$  で、セメントや高炉スラグ微粉末より軽く、ブレン法による比表面積は  $18000\text{cm}^2/\text{g}$  程度と非常に大きいといった特徴を持つ。

## 3. 試験概要

### 3.1 使用材料および配合

本研究では、セメントを高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型コンクリートと、軽質炭酸カルシウムを混和した  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートを製造した。表-2にその配合条件を示す。プレキャストコンクリート製品用として、低炭素型コンクリートの目標強度を  $42\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの目標強度を  $30\text{N}/\text{mm}^2$ 、部材厚が50mm以下の薄い製品への充填性を考慮し、粗骨材の最大寸法を15mm、かつスランプフロー目標値を  $600\pm 100\text{mm}$  とした。空気量は、 $2.0\pm 1.5\%$  を目標値とした。

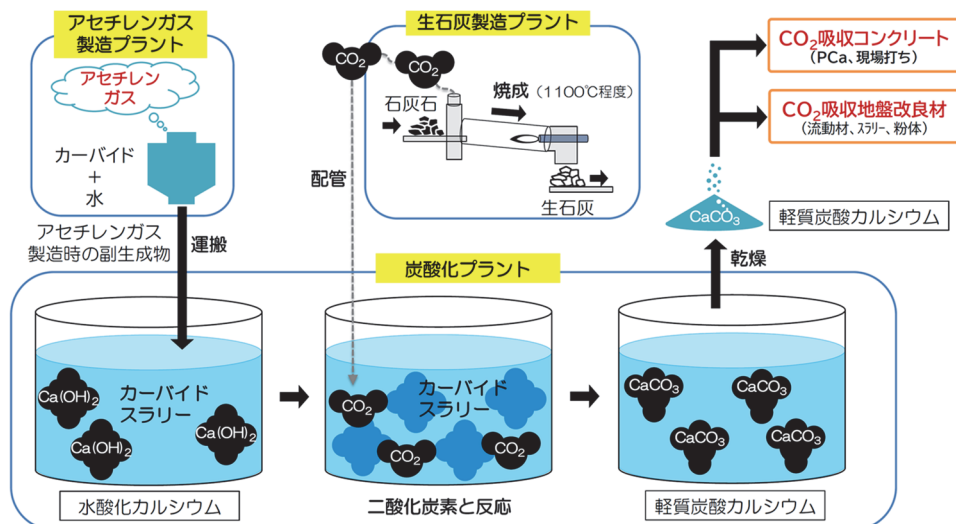


図-2 CCU 材料である  $\text{CO}_2$  吸収軽質炭酸カルシウムの製造の流れ

表－3 に使用材料，表－4 に比較検討したコンクリートの配合を示す。結合材には，低炭素型コンクリート，CO<sub>2</sub>吸収コンクリートともに，普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した。使用した配合は，結合材における高炉スラグ微粉末の混和率が 60%の「BB60」と，80%の「BC80」とした。また，軽質炭酸カルシウムを 250kg/m<sup>3</sup> 混和した「BC80-CP250」と，300 kg/m<sup>3</sup> 混和した「BC80-CP300」とした。本研究では高流動コンクリート配合のため，目標とする流動性を得るためにプレキャスト工場の過去の実績より低炭素型コンクリート配合は，単位粉体量 P=C+BF=515 kg/m<sup>3</sup> を基本とし，単位水量 W=170 kg/m<sup>3</sup> を定めた結果，W/B (W/P) =33.0%とした。CO<sub>2</sub>吸収コンクリート「BC80-CP250」は，予備試験によりカーボンネガティブとなる配合，かつ必要な流動性および強度から単位粉体量 P(C+BF+CP) と単位結合材量 B(C+BF)，単位水量 (W) を定めた結果，W/P=33.0%とした。「BC80-CP300」は，練り混ぜが可能な範囲で軽質炭酸カルシウムを混和した結果，W/P=30.2%とした。化学混和剤量は，適切なフレッシュ性状が得られる範囲で決定した。

表－2 において，養生条件である製品同一養生とは，実際のプレキャストコンクリート製品を製造する際と同一の条件（練混ぜ後，前置き 20℃で 2h → 20℃/h で昇温 → 45℃で 5h 保持 → 5℃/h で翌朝まで徐冷 → 材齢 18h 経過後，脱型 → 所定材齢まで 20℃気中）で養生したものである。

### 3.2 フレッシュ性状

コンクリートの練混ぜは公称容量 600 の強制 2 軸ミキサを用い，1 バッチ 300 練り混ぜを行った。各材料の投入手順は，粉体 P および骨材を投入し，30 秒の空練りを行

った後，化学混和剤入りの水を投入し，90 秒本練りをした。フレッシュ性状の確認は，練上がり直後の試料を練り舟内に排出し，十分に練り返した後，計測した。スランプフローは JIS A 1150，空気量は JIS A 1128，コンクリート温度は JIS A 1156 に準拠して実施した。

### 3.3 凝結試験

凝結試験は，JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法に準拠して実施した。プロクター貫入抵抗試験装置および貫入針（断面積 100，50，25，12.5mm<sup>2</sup>）を用い，試験前に型枠内の試料表面にブリーディング水がある場合はそれを取り除いて実施した。貫入に要した力を貫入針の断面積で除し，貫入抵抗 (N/mm<sup>2</sup>) を求め，貫入抵抗が 3.5N/mm<sup>2</sup> となった時間を始発時間，28.0N/mm<sup>2</sup> となった時間を終結時間とした。

### 3.4 圧縮強度試験

圧縮強度試験は，JIS A 1108 に準拠して実施した。試験体寸法は，Φ100×200mm の円柱供試体を用いた。試験材齢は，標準養生で材齢 14，28，91 日，製品同一養生で材齢 14 日について測定した。供試体の本数は，各材齢 3 本とした。

### 3.5 収縮性状

#### (1) 自己収縮試験

自己収縮試験は，JCI 超流動コンクリート研究委員会報告書 (Ⅱ) [付録 1] (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法<sup>7)</sup> を参考に実施した。供試体寸法は 100×100×400mm，本数は 3 本/配合とした。

#### (2) 長さ変化試験

長さ変化試験は，材齢 7 日まで水中養生した後，JIS A 1129-2 に準拠して実施した。供試体寸法は，100×100×400mm，本数は 3 本/配合とした。

表－3 使用材料

| 材料              | 記号 | 種類，物性                                                                        | CO <sub>2</sub> 排出原単位 <sup>※1</sup><br>(kg-CO <sub>2</sub> /t) <sup>5)</sup> |
|-----------------|----|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 水               | W  | 地下水                                                                          | 0.235                                                                        |
| 普通ポルトランドセメント    | C  | 普通ポルトランドセメント<br>密度：3.16g/cm <sup>3</sup>                                     | 766.6                                                                        |
| 高炉スラグ微粉末        | BS | ブレン値：4000cm <sup>2</sup> /g，密度：2.88g/cm <sup>3</sup>                         | 26.5                                                                         |
| 混和材<br>(CCU 材料) | CP | 軽質炭酸カルシウム，密度：2.51g/cm <sup>3</sup> ，純度：96.6%<br>ブレン値：18040cm <sup>2</sup> /g | -366 <sup>6)</sup>                                                           |
| 細骨材             | S1 | 山砂，絶乾密度：2.52 g/cm <sup>3</sup>                                               | 3.7                                                                          |
|                 | S2 | 石灰岩砕砂，絶乾密度：2.57 g/cm <sup>3</sup>                                            | 3.7                                                                          |
| 粗骨材             | G  | 碎石，絶乾密度：2.67 g/cm <sup>3</sup>                                               | 2.9                                                                          |
| 化学混和剤           | SP | 高性能減水剤ポリカルボン酸系                                                               | 350                                                                          |

※1：輸送や施工等の CO<sub>2</sub> 排出量は含まない原料や製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を基にした値

表－4 コンクリート配合

| 配合 No.     | 種別                           | Fc <sup>※1</sup><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | W/P <sup>※2</sup><br>(%) | W/B <sup>※3</sup><br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |     |     |     | CO <sub>2</sub> 排出量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------|
|            |                              |                                          |                          |                          |            | W                        | C   | BS  | CP  | S1  | S2  | G   | SP  |                                             |
| BB60       | 低炭素型<br>コンクリート               | 42                                       | 33.0                     | 33.0                     | 44.0       | 170                      | 206 | 309 | —   | 504 | 225 | 964 | 2.3 | 172.4                                       |
| BC80       |                              |                                          | 33.0                     | 33.0                     | 44.0       | 170                      | 103 | 412 | —   | 499 | 225 | 959 | 2.7 | 96.3                                        |
| BC80-CP250 | CO <sub>2</sub> 吸収<br>コンクリート | 30                                       | 33.0                     | 62.5                     | 43.0       | 175                      | 56  | 224 | 250 | 671 | —   | 940 | 4.2 | -38.2                                       |
| BC80-CP300 |                              |                                          | 30.2                     | 62.5                     | 41.0       | 175                      | 56  | 224 | 300 | 620 | —   | 940 | 5.2 | -56.8                                       |

※1：Fc=目標強度，※2：粉体量 P=C+BS+CP，※3：結合材量 B=C+BS

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状測定結果を表-5 に示す。フレッシュ性状は、セメントを高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型コンクリート「BB60」、「BC80」および軽質炭酸カルシウムを混和した CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート「BC80-CP250」、「BC80-CP300」のすべてで、化学混和剤の添加量を調整することで、目標のスランプフローである 600±100mm および空気量 2.0±1.5%を確保することができた。軽質炭酸カルシウムを混和することで粘性が高くなるが、混和量 300kg/m<sup>3</sup> までであれば化学混和剤を適切に調整することで、良好なフレッシュ性状が確保できることを確認した。

### 4.2 凝結時間試験

凝結時間試験結果を表-6 および図-3 に示す。凝結時間試験の結果、低炭素型コンクリート「BB60」および「BC80」の貫入抵抗値は、4～5h 後から徐々に緩やかな曲線を描いて上昇しており、注水後 6 時間程度から急激に上昇している。一方、「BC80-CP250」および「BC80-CP300」の CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートでは、注水後からの貫入抵抗値は直線的に増加し始め、終結を迎えている。高炉スラグ微粉末を用いることでコンクリートの凝結が遅くなることは知られており<sup>8)</sup>、高炉スラグ微粉末の混和率の多い「BC80」が「BC60」より始発、終結ともに遅くなっていることが確認できる。CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートでは、軽質炭酸カルシウムの混和により始発時間が速くなっていることが確認できた。これは、軽質炭酸カルシウムの吸水により見掛け上の水分が減少したことが原因ではないかと考えられる。また、終結時間も早くなっているが、軽質炭酸カルシウムを混和したことにより高炉スラグ微粉末を刺激し潜在水硬性により反応が促進された可能性があると考えられる。

### 4.3 強度特性

圧縮強度試験結果を図-4 に示す。製品同一養生を実施した材齢 14 日の圧縮強度試験結果に着目すると、低炭素型コンクリート「BB60」は 72.6N/mm<sup>2</sup>、「BC80」は 61.4N/mm<sup>2</sup>であった。CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート「BC80-CP250」は 43.8N/mm<sup>2</sup>、「BC80-CP300」は 44.4N/mm<sup>2</sup>であり、低炭素型コンクリートおよび CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートのすべての配合において目標強度を上回る結果が得られた。ここで、CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートに着目すると、軽質炭酸カルシウム 250kg/m<sup>3</sup> と 300kg/m<sup>3</sup> の混和量では違いは見られなかった。また、CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの W/B に着目すると、W/B=62.5%であり、通常のレディーミクストコンクリートでは呼び強度 21 程度<sup>9)</sup>（配合強度 28N/mm<sup>2</sup> 程度<sup>10)</sup>）の配合に相当するが、CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの水中養生および製品同一養生ともに目標強度 30N/mm<sup>2</sup> を十分満

表-5 フレッシュ性状

| 配合 No.     | 種別                           | フレッシュ性状 |         |         |
|------------|------------------------------|---------|---------|---------|
|            |                              | 温度 (°C) | SF (mm) | Air (%) |
| BB60       | 低炭素型<br>コンクリート               | 19.6    | 595×575 | 1.4     |
| BC80       |                              | 18.6    | 650×630 | 2.1     |
| BC80-CP250 | CO <sub>2</sub> 吸収<br>コンクリート | 18.5    | 615×600 | 3.5     |
| BC80-CP300 |                              | 19.3    | 600×590 | 3.2     |

表-6 凝結時間試験結果

| 配合 No.     | 種別                           | 始発時間<br>(h : min) | 終結時間<br>(h : min) |
|------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| BB60       | 低炭素型<br>コンクリート               | 5 : 27            | 7 : 34            |
| BC80       |                              | 6 : 03            | 8 : 59            |
| BC80-CP250 | CO <sub>2</sub> 吸収<br>コンクリート | 1 : 59            | 7 : 16            |
| BC80-CP300 |                              | 2 : 43            | 7 : 16            |

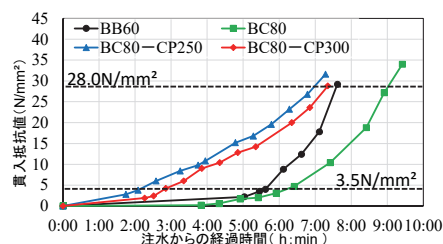


図-3 凝結時間

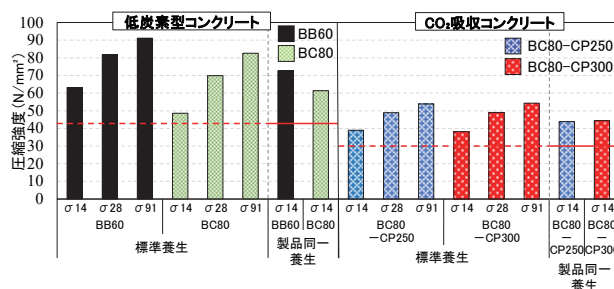


図-4 圧縮強度

たしている。さらに、高炉スラグ微粉末 80%混和したことに着目すると、普通ポルトランドセメント 100%と比較し、材齢 28 日強度が 3 割程度低下することが知られているが<sup>11)</sup>、軽質炭酸カルシウムとの共存下においては強度が増加することが確認できた。

本検討範囲内ではあるが、呼び強度 21 程度（配合強度 28N/mm<sup>2</sup> 程度）の通常のレディーミクストコンクリートと比較して、高炉スラグ微粉末 80%混和、かつ軽質炭酸カルシウムを混和することで製品同一養生では 44N/mm<sup>2</sup> 程度（材齢 14 日）、標準養生では 49N/mm<sup>2</sup> 程度と圧縮強度が約 6 割～7 割程度高くなることが確認できた。

著者らは、スラッジ由来の軽質炭酸カルシウムを用いたモルタルでの検討において、軽質炭酸カルシウムと高炉スラグ微粉末が共存下にあると強度が向上することを報告している<sup>12)</sup>。これは、軽質炭酸カルシウムのフィラー効果や、軽質炭酸カルシウムが高炉スラグ微粉末を刺激し潜在水硬性により強度増進に寄与したと考えられる。また、軽質炭酸カルシウム自体の吸水により見掛け上の W/B が小さくなることにより強度が増進していると考えられるが、メカニズムの解明には至っていない。今後、より詳細な分析を実施する予定である。

#### 4.4 収縮特性

##### (1) 自己収縮

自己収縮ひずみ測定結果を図-5 に示す。自己収縮の測定結果において、低炭素型コンクリート「BB60」および「BC80」では、高炉スラグ微粉末の置換率の違いに関わらず、 $-500\mu$  程度の値であった。一方、 $\text{CO}_2$  吸収コンクリート「BC80-CP250」は $-670\mu$  程度、「BC80-CP300」は $-600\mu$  程度と、低炭素型コンクリートより  $100\mu \sim 170\mu$  程度大きな値となった。また、材齢初期に着目すると、材齢 3 日程度までの収縮速度が低炭素型コンクリートと比べて顕著に大きいことが確認される。土木学会式<sup>13)</sup>からは一般的に水セメント（結合材）比が小さい程、自己収縮量は大きくなることが知られている。本結果の範囲内では、 $\text{W/B}=62.5\%$  の  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの方が低炭素型コンクリートに比べ大きな値となった。材齢 28 日以降の自己収縮ひずみに着目すると、低炭素型コンクリートと  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの自己収縮ひずみの収縮速度はほぼ同様である。このことより、軽質炭酸カルシウムを混和したことにより水和反応あるいは高炉スラグ微粉末を刺激し潜在水硬性の材齢初期段階の反応過程において影響を及ぼしたことで、初期材齢時の収縮速度および収縮量が大きくなり、自己収縮ひずみが大きくなっている原因であると考えられる。

##### (2) 長さ変化試験

長さ変化（乾燥収縮ひずみ）の測定結果を図-6 に、質量変化率の測定結果を図-7 に示す。長さ変化測定結果において、低炭素型コンクリートでは、高炉スラグ微粉末の置換率の大きい「BC80」のコンクリートの方が「BB60」に比べ、やや大きく $-580\mu$  程度となった。一方、 $\text{CO}_2$  吸収コンクリートでは、「BC80-CP250」、「BC80-CP300」とともに $-500\mu$  程度であり、低炭素型コンクリートと比較すると概ね  $80\mu$  程度小さくなった。土木学会式<sup>14)</sup>からは一般に  $\text{W/C}$  ( $\text{W/B}$ ) 比が小さい程、また、単位水量が小さいほど乾燥収縮ひずみは小さくなることが知られている。本結果の範囲内では、 $\text{W/B}$  が  $62.5\%$  と大きな  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの方が小さな値となった。質量変化率に着目すると  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの方が質量変化率は大きく、水分の散逸が大きい結果となったと考えられる。このことは、軽質炭酸カルシウム自体が練り混ぜ時の水分を吸水し、経時変化とともに水分を散逸したことにより質量変化率が大きくなった可能性があると考えられる。

#### 5. プレキャスト製品の製造および表層透気係数

##### 5.1 プレキャスト製品の製造

低炭素型コンクリート「BC80」および  $\text{CO}_2$  吸収コンクリート「BC80-CP250」を採用して、U 字溝および L 形側溝の 2 種類のプレキャスト製品をプレキャスト製造

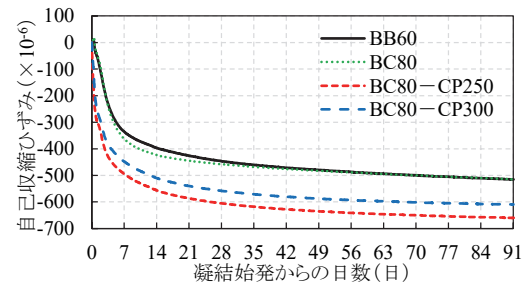


図-5 自己収縮ひずみ

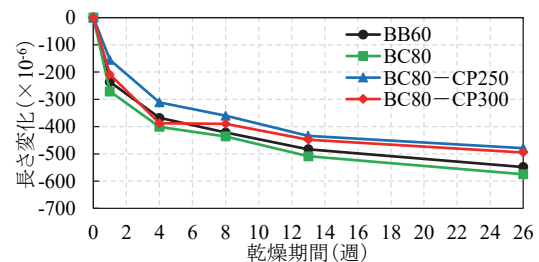


図-6 長さ変化（乾燥収縮ひずみ）

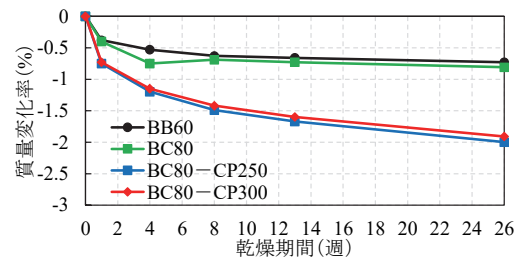


図-7 質量変化率



写真-1 製品（左：L型側溝、右：U字溝）

工場で製造した。ミキサは強制二軸式（容量  $2.75\text{m}^3$ ）を使用し、粗骨材を除く材料を投入し 180 秒間モルタルを練混ぜた後、粗骨材を投入し 90 秒間練混ぜを行った。打込みには、軽便バイブレータを使用し、締固めを行った。養生方法は、打込み完了後 2 時間前置きし、製品同一養生を実施した。脱型後の各製品の状況を写真-1 に示す。外観上両製品ともに、ひび割れや充填不良、欠け等の不具合はなく、標準的な製品と同等の品質を確認した。

##### 5.2 表層透気試験結果

実際に製造したプレキャスト製品の品質を直接確認するために、前述の各プレキャスト製品を屋外ヤードに置き、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（ $kT$  値）を型枠面で測定した。コンクリート表層の水分率測定には非破壊式コンクリート水分計を用い、表層の

水分率が 5.5%以下であることを確認した後に透気試験を実施した。表-7 に測定結果一覧を示す。低炭素型コンクリート「BC80」の表層透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ) は 0.0003 ~ 0.0001 未満,  $\text{CO}_2$  吸収コンクリート「BC80-CP300」では 0.0024 ~ 0.0007 と, すべてのプレキャストコンクリートで 5 段階評価の中で最も高いグレードである「優」となった。なお, 「BC80」の表層透気係数の方が小さい数値であったのは, W/B 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-7 表層透気試験結果

| 配合         | 部材    | 測定部位 <sup>※1</sup> | 水分率 (%) | 表層透気係数 ( $10^{-16} \text{m}^2$ ) |      |
|------------|-------|--------------------|---------|----------------------------------|------|
|            |       |                    |         | kT6                              | グレード |
| BC80       | U 字溝  | 底版上面               | 4.6     | 0.0003                           | 優    |
|            | L 型側溝 | 排水部上面              | 4.5     | 0.0001 未満                        | 優    |
|            |       | 縁石部上面              | 4.5     | 0.0001 未満                        | 優    |
| BC80       | U 字溝  | 底版上面               | 4.3     | 0.0024                           | 優    |
| —<br>CP250 | L 型側溝 | 排水部上面              | 4.2     | 0.0021                           | 優    |
|            |       | 縁石部上面              | 4.5     | 0.0007                           | 優    |

6. まとめ

- 本研究で得られた知見を以下に示す。
- (1) 軽質炭酸カルシウムを混和することで粘性は高くなるが, 化学混和剤の添加量を適切に調整することで, 従来のコンクリートと同等の良好なフレッシュ性を確保することができる。
  - (2) 凝結時間について, 高炉スラグ微粉末の影響により, 混和率の多い「BC80」が「BC60」より凝結時間が遅くなる。 $\text{CO}_2$  吸収コンクリートの始発時間は, 軽質炭酸カルシウムの吸水により見掛け上の水分が少なくなったことが原因で速くなり, 終結時間は, 軽質炭酸カルシウムが高炉スラグ微粉末を刺激し潜在水硬性により反応が促進されたため早くなったと考えられる。
  - (3) 圧縮強度は, 本検討範囲内ではあるが, 呼び強度 21 程度 (配合強度  $28 \text{N/mm}^2$  程度) の通常のレディーミクストコンクリートと比較して, 高炉スラグ微粉末 80% 混和, かつ軽質炭酸カルシウムを混和することで製品同一養生では  $44 \text{N/mm}^2$  程度 (材齢 14 日), 標準養生では  $49 \text{N/mm}^2$  程度と圧縮強度が約 6 割 ~ 7 割程度高くなることが確認できた。
  - (4) 自己収縮は, 低炭素型コンクリートに比べて,  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートは  $100 \mu \sim 170 \mu$  大きな値であった。また, 初期材齢において収縮速度が低炭素型コンクリートと比べて顕著に大きいことが確認された。
  - (5) 乾燥収縮は, 低炭素型コンクリートに比べ,  $\text{CO}_2$  吸収コンクリートでは概ね  $80 \mu$  程度小さくなった。質量変化率は, 軽質炭酸カルシウム自体が練り混ぜ

時の水分を吸水し, 経時変化とともに水分を散逸したことにより質量変化率が大きくなった可能性があると考えられる。

- (6) 表層透気係数は, 低炭素型および  $\text{CO}_2$  吸収型コンクリートともに最高グレードである「優」となり, 表層が緻密なコンクリートであることが確認された。

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) の助成事業 (JPNP16002) の結果得られたものです。

謝辞：本研究の実施にあたり, 高压ガス工業株式会社, 白石工業株式会社, 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：環境配慮型コンクリート『Kcrete (ケイクリート)』を用いたプレキャストコンクリート製品の製造技術を共同開発, <https://www.konoike.co.jp/news/2024/202409253372.html> (閲覧日：2025 年 1 月 8 日)
- 2) 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  $\text{CO}_2$  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> (閲覧日：2025 年 1 月 8 日)
- 3) ガス製品概要アセチレン： <https://www.koatsugas.co.jp/product/gas/industrial01/> (閲覧日：2025 年 1 月 8 日)
- 4) 世羅敏史ほか：カーバイドスラリーと排ガス  $\text{CO}_2$  を用いた CCU 材料の製造技術の開発, 土木学会全国大会第 79 回年次講演会, V-423, 2024
- 5) 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
- 6) 為石昌宏ほか：カーボンネガティブプレキャストコンクリートの表層透気係数について, 土木学会全国大会第 79 回年次講演会, V-428, 2024
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), 1994 年 5 月
- 8) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, コンクリートライブラリー151, pp8, 2018
- 9) 大阪広域生コンクリート協同組合：【配合】普通コンクリート標準配合表 (旧 AE 減水剤配合) 2024.9.1
- 10) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書 (施工編), pp58-60, 2023
- 11) 遠藤祐悦ほか：高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度におよぼす影響について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- 12) 高馬崇ほか：軽質炭酸カルシウムを混和したコンクリートにおける圧縮強度の特性について, 土木学会全国大会第 79 回年次講演会, V-426, 2024
- 13) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書 (設計編), pp339-341, 2022
- 14) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書 (設計編), pp113, 2022