

炭酸カルシウムの種類による CO<sub>2</sub> 由来炭酸塩原料使用型コンクリートの諸性能

Performance of concrete using CO<sub>2</sub>-origin carbonate material by depending on the type of calcium carbonate

高木 雄介\* 山本 泰介\*  
Yusuke Takagi Taisuke Yamamoto

要 約

コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を削減させる目的で、セメントの 9 割を高炉スラグ微粉末で置換し、3 種類の炭酸カルシウムを多量に混和させたコンクリートの性能をまとめた。3 種の材料を比較した結果、コンクリート硬化体の耐久性能に大きな差は生じず、主に圧縮強度の差による影響であった。一方で、フレッシュコンクリートの性状や混和剤の添加量においては、粉体の粒径・形状が大きな影響を与えていると考えられ、比表面積の大きい炭酸カルシウムの方が増加する傾向にある。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 使用材料および試験概要
- § 3. 試験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub> 排出量削減の取り組みが世界各国で進められている。これまで、日本の建設分野では、主要な建設資材であるポルトランドセメントの CO<sub>2</sub> 排出原単位に着目し、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどをセメント代替として積極的に用いたコンクリートが研究されている。

さらには、さまざまな分野での廃棄物由来のカルシウムを元に、排気ガスや大気中などの CO<sub>2</sub> を吸着させることで、安定的な軽質炭酸カルシウムを CCU 材料 (Carbon Capture and Utilization) として利用することが研究され<sup>1)2)</sup>、筆者らも同様の取り組みを行ってきた<sup>3)</sup>。

一方で、このような CCU 材料は、その使用背景から、材料を運搬する際にエネルギーを消費することは望ましくなく、CCU 材料の地産地消が基本となる。そのため、このようなコンクリートを全国的に活用するとなると、その地域で供給可能な CCU 材料を活用することとなり、コンクリートの諸性能がその都度変化する可能性が高い。

本研究では、既報<sup>3)</sup>も含めた異なる性質をもった 3 種の軽質炭酸カルシウムである CCU 材料をコンクリートに練り混ぜた際の硬化体性能をまとめた。また、低温・

高温環境下における基本的性能を確認し、今後の配合設計に活用できるように諸性能をまとめた。

§ 2. 使用材料および試験概要

2-1 使用材料

表一1 に使用材料を示す。結合材として、セメントには早強ポルトランドセメントおよびせつこうが添加された高炉スラグ微粉末 4000 (以下、BFS と記載) を用い、SO<sub>3</sub> 換算で 2.0% の製品を使用した。また、比較用の配合に関しては、普通ポルトランドセメントを使用した。使用した

表一1 使用材料

| 記号  | 使用材料                  | 物性値                                                  | CO <sub>2</sub> 原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t) |
|-----|-----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| W   | 水                     | 上水道水                                                 | 0.203 <sup>4)</sup>                         |
| HC  | 早強ポルトランドセメント          | 密度 3.14g/cm <sup>3</sup>                             | 741.3 <sup>5)</sup>                         |
| C   | 普通ポルトランドセメント          | 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>                             | 741.3 <sup>5)</sup>                         |
| BFS | 高炉スラグ微粉末 4000 (せつこう有) | 密度 2.89g/cm <sup>3</sup>                             | 26.5 <sup>6)</sup>                          |
| Ca1 | 軽質炭酸カルシウム             | CaCO <sub>3</sub> 純度 97%<br>密度 2.66g/cm <sup>3</sup> | -427 <sup>*</sup>                           |
| Ca2 | 廃棄物由来炭酸カルシウム          | CaCO <sub>3</sub> 純度 75%<br>密度 2.52g/cm <sup>3</sup> | -248                                        |
| Ca3 | 廃棄物由来炭酸カルシウム          | CaCO <sub>3</sub> 純度 93%<br>密度 2.65g/cm <sup>3</sup> | -409 <sup>*</sup>                           |
| S   | 陸砂 (大井川産)             | 表乾密度 2.58 g/cm <sup>3</sup><br>吸水率 2.14 %            | 3.7 <sup>6)</sup>                           |
| G   | 碎石 2005 (青梅産)         | 表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup><br>吸水率 0.67 %            | 2.9 <sup>6)</sup>                           |

\* 技術研究所 土木技術グループ

※製造時のエネルギーを考慮せず、カルシウム純度より換算した値

炭酸カルシウムは3種類とし、表一2に炭酸カルシウムの諸性能を示す。Ca1として市販されている高純度の炭酸カルシウムを、CCU材料を模擬した材料として使用した。また、比較を行うCCU材料として、鉱業副産物由来のカルシウム源より、CO<sub>2</sub>と反応させ生成した炭酸カルシウムとしてCa2を使用した。Ca3については、コンクリート製品工場内のアルカリ廃水を原料とし、CO<sub>2</sub>を固定化させた炭酸カルシウムである。Ca2の炭酸カルシウムに固定されるCO<sub>2</sub>量は、熱分析の結果より材料品質を調整するエネルギーを差し引き、248kg-CO<sub>2</sub>/tと推定した<sup>3)</sup>。なお、Ca1、Ca3のCO<sub>2</sub>原単位は参考値とし、純度がそれぞれ97%、93%なことから、固定量は427、409 kg-CO<sub>2</sub>/tとし、製造時のエネルギーを無視して試算を行った。

## 2-2 配合

検討を行った配合は12ケースとし、表一3に配合を示す。なお、本論では、筆者が過去に同様の試験を行ったデータ<sup>3)7)</sup>を含めまとめた。炭酸カルシウムを混和した配合はそれぞれの炭酸カルシウムを1m<sup>3</sup>あたり150-370kg混和させた。BFSの置換率を結合材の70-90%とし、各配合における諸性能を比較した。

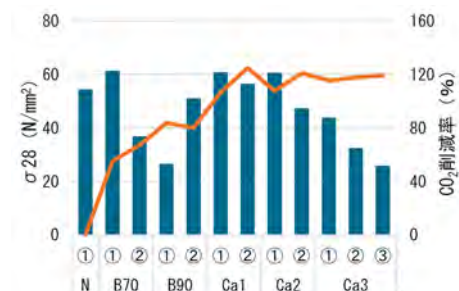
表一2 炭酸カルシウム諸性能

|                                            | 単位                   | Ca1   | Ca2  | Ca3  |
|--------------------------------------------|----------------------|-------|------|------|
| 密度                                         | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.66  | 2.52 | 2.65 |
| 比表面積                                       | (m <sup>2</sup> /g)  | 19.65 | 4.63 | 1.76 |
| 平均粒径                                       | (μm)                 | 約10   | 約30  | 約30  |
| 強熱減量 (ig.loss)                             | (%)                  | 44.3  | 36.6 | 41.8 |
| 二酸化けい素 (SiO <sub>2</sub> )                 | (%)                  | 0     | 6.04 | 0.56 |
| 酸化鉄 (Ⅲ) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  | (%)                  | 0.03  | 0.74 | 0.13 |
| 酸化アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | (%)                  | 0.03  | 3.18 | 0.18 |
| 酸化カルシウム (CaO)                              | (%)                  | 54.6  | 48.9 | 53.8 |
| 酸化マグネシウム (MgO)                             | (%)                  | 0.43  | 0.54 | 0.04 |

## 2-3 試験方法

本研究での各配合における試験項目は表一3に、試験は下記に示す試験方法に準拠した。圧縮強度試験に関しては、JIS A 1108に準拠し、φ100×200mmの円柱供試体を作製後3日まで封緘養生を行い、以降は20℃での水中養生を行った。また、静弾性係数はJIS A 1149に準拠して行い、コンプレッソメータにて計測を行った。長さ変化および質量変化率試験に関しては、100×100×400mmの供試体を用い、JIS A 1129-3に準拠し、ダイヤルゲージを用いて行った。20℃・60% R.H.の恒温恒湿室に静置し、長さ変化および質量変化率を測定した。なお、基長は材齢7日とし、乾燥期間6ヶ月までの長さ変化率および質量変化率を求めた。中性化促進試験に関しては、100×100×400mmの供試体を用い、材齢4週まで20℃の水中養生を行い、その後、20℃・60% R.H.の恒温恒湿室に材齢8週まで静置して試験を行った。なお、中性化を促進させるための二酸化炭素濃度は5%とした。

環境温度を変化させた試験では、使用する骨材や混和材の材料温度が均一になるよう、可変チャンバー室内で1日静置した。練り混ぜはチャンバー室内で実施し、環境温度はそれぞれ10、20、30℃とした環境下でフレッシュ試験を行い、圧縮強度試験用の円柱供試体を作製した。



図一1 材齢28日強度およびCO<sub>2</sub>削減率

表一3 配合表および試験内容

|                     | W/B | W/P | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |                   |     |     |     |     | 試験項目 |     |          |          |     |          |
|---------------------|-----|-----|--------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|----------|----------|-----|----------|
|                     |     |     | 水                        | B                 |     | S   |     | G   | 圧縮   | 静弾性 | 長さ<br>変化 | 質量<br>変化 | 中性化 | 環境<br>温度 |
|                     |     |     | W                        | HC                | BFS | Ca  | S   |     |      |     |          |          |     |          |
| N_① <sup>*1</sup>   | 50% | 50% | 170                      | 340 <sup>*3</sup> | —   | —   | 857 | 918 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| B70_① <sup>*1</sup> | 36% | 36% | 165                      | 137               | 321 | —   | 704 | 963 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| B70_② <sup>*2</sup> | 50% | 50% | 163                      | 98                | 228 | —   | 811 | 982 | ○    | —   | —        | —        | ○   | —        |
| B90_① <sup>*1</sup> | 47% | 47% | 175                      | 37                | 338 | —   | 772 | 935 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| B90_② <sup>*2</sup> | 35% | 35% | 165                      | 47                | 424 | —   | 835 | 835 | ○    | —   | —        | —        | ○   | —        |
| Ca1_①               | 41% | 30% | 175                      | 42                | 383 | 150 | 601 | 920 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| Ca1_② <sup>*1</sup> | 47% | 28% | 175                      | 37                | 338 | 250 | 552 | 918 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| Ca2_① <sup>*1</sup> | 47% | 28% | 175                      | 37                | 338 | 250 | 515 | 935 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| Ca2_②               | 95% | 32% | 175                      | 37                | 148 | 370 | 562 | 935 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | —        |
| Ca3_①               | 48% | 31% | 175                      | 36                | 329 | 200 | 645 | 880 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | ○        |
| Ca3_②               | 58% | 35% | 175                      | 30                | 272 | 200 | 699 | 880 | ○    | ○   | —        | —        | —   | —        |
| Ca3_③               | 68% | 38% | 175                      | 26                | 231 | 200 | 741 | 880 | ○    | ○   | ○        | ○        | ○   | ○        |

※1 参考論文<sup>3)</sup>より引用 ※2 参考論文<sup>7)</sup>より引用 ※3 普通ポルトランドセメント

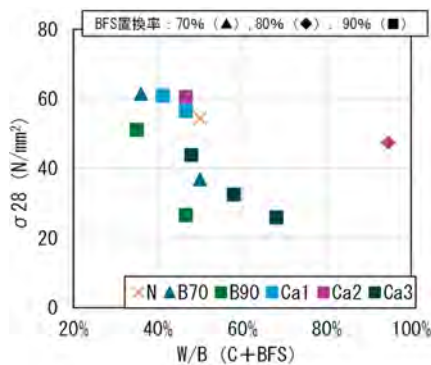


図-2 圧縮強度と水結合材比の関係

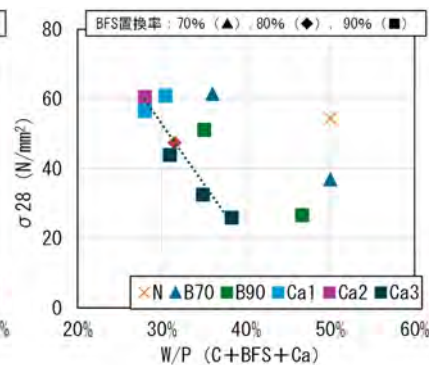


図-3 圧縮強度と水粉体比の関係

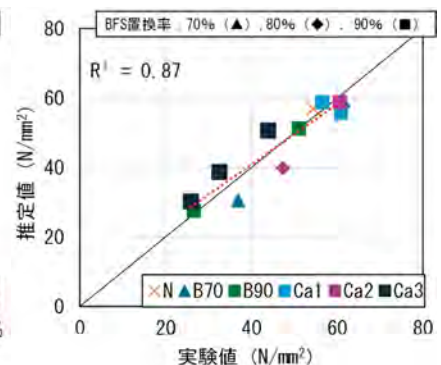


図-4 推定値と実験値の関係

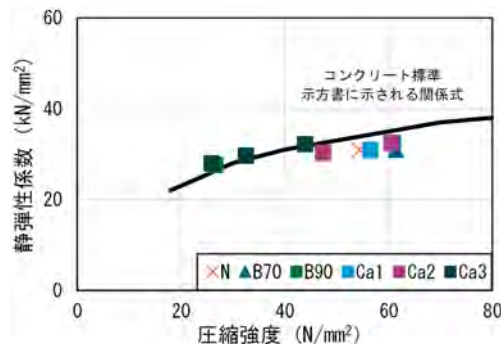


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

一般的に用いられる結合材水比での強度式(式1)で推定を行えるように、試験結果から最小二乗法を用いて各係数を決定した。なお、上記の結果より、結合材ではなく炭酸カルシウムを含めた粉体として強度を推定し、粉体中の各材料には有効係数をかけ合わせた有効粉体量 $P'$ として考え、各係数の推定を行った。決定した各係数を以下に示す。

$$\sigma_{28} = a \times (B/W) - b \quad (\text{式1})$$

$$B = P' : (C \times \alpha + BFS \times \beta + Ca \times \gamma)$$

$$\text{推定結果 } \alpha: 1, \beta: 0.62, \gamma: 0.44, a: 50.2, b: 43.4$$

### § 3. 試験結果

#### 3-1 圧縮強度の推定

図-1に各配合における、材齢28日(以下、 $\sigma_{28}$ と記載)での圧縮強度試験結果を示す。また、図中の折れ線は、“N\_①”配合と比較したCO<sub>2</sub>排出量の削減率を表す。CO<sub>2</sub>排出量の算定に関しては明確な算出方法が定まっていなかったが、参考値として材料由来のCO<sub>2</sub>排出量を積み上げて計算し、コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量として試算した。使用した各材料のCO<sub>2</sub>原単位は表-1に記載した数値<sup>4) 5) 6)</sup>を用いた。Caを添加した配合においては、削減率が100%を超え、CO<sub>2</sub>排出量がマイナスとなるカーボンネガティブコンクリートを想定している。

図-2に各配合の圧縮強度と水結合材比の関係を示す。既往の報告や<sup>8) 9) 10)</sup>、過去の試験<sup>3)</sup>からも炭酸カルシウムが強度に大きく寄与することが確認されている。そのため、水と結合材との比では強度の推定が困難であることが分かる。次に、図-3に炭酸カルシウムを総粉体量 $P$ に含めた水粉体比を示す。水粉体比で整理を行った結果、炭酸カルシウムを混和させた配合パターンにおいては、炭酸カルシウムの種類による影響は少なく、おおよそ直線関係にあることが分かる(図-3点線)。一方で、炭酸カルシウムを添加しない“B90”と、同じBFS置換率である炭酸カルシウムを添加された配合を比較すると、強度発現性には異なる傾向があり、炭酸カルシウムは高炉スラグ微粉末よりも強度に寄与する影響は小さいと考えられる。

そこで、表-3に示した配合と圧縮試験結果より、一

上記に示す推定式より求めた材齢28日における圧縮強度の推定値と実験値を図-4に示す。実際には、骨材量やセメント、材料種類や空気量等によって圧縮強度は変動するため、各種パラメータを振った試験データ蓄積による推定式の調整は必要となるが、本試験の範囲では、比較的良好な推定が可能であることが確認された。

#### 3-2 静弾性係数

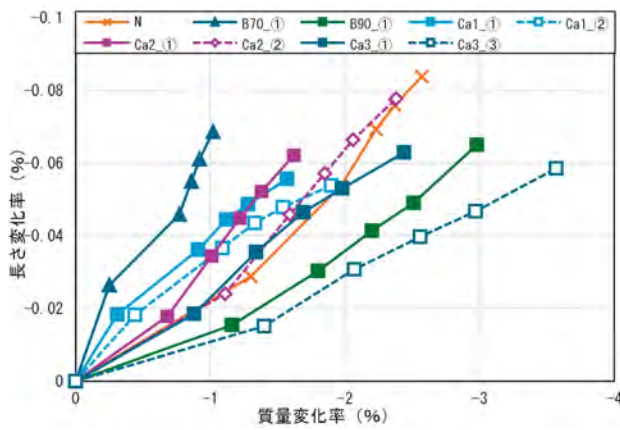
図-5に材齢28日の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数に関しては、コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>に記載されている数値を参考として併記したが、一部の配合において、一般的な値よりも若干下回る結果となった。これらは、炭酸カルシウムや高炉スラグ微粉末を添加しない配合にもその傾向がみられるため、骨材の影響によるものと考え、少なくとも炭酸カルシウム等を混和させたことによる影響は少ないものと考えた。また、CCU材の種類による影響については、本試験結果からは有意な差は確認されなかった。

#### 3-3 長さ変化率および質量変化率試験

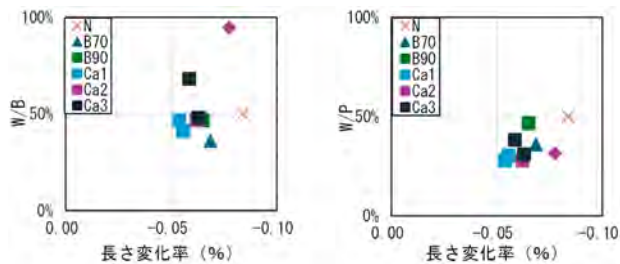
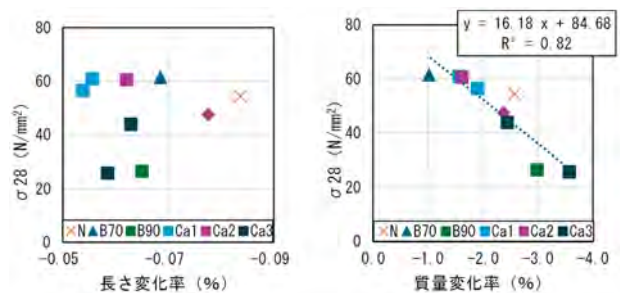
図-6に各配合の長さ変化率と質量減少率の関係を示し、図-7に水結合材比および水粉体比と長さ変化率の各関係、図-8に長さ変化率および質量変化率と圧縮強度との各関係を示す。

図-6, 7より、長さ変化率に関しては、普通ポルトランドセメントを使用した“N\_①”配合が最も収縮量が高





図－6 長さ変化率と質量変化率の関係

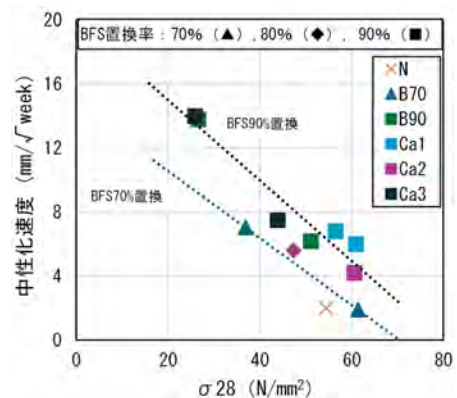
図－7 水結合材比および水粉体比との関係  
(左：結合材比，右：粉体比)

図－8 圧縮強度との関係 (左：長さ，右：質量)

い結果となった。炭酸カルシウムを混和させた配合に関しては，“B90\_①”配合と同程度の水結合材比である，“Ca1\_②”や“Ca2\_①”，“Ca3\_①”配合はそれぞれ同程度の収縮量となっており，6ヶ月後の長さ変化率は0.06%程度であった。“B90\_①”配合と大きな差はなく，炭酸カルシウムを混和したことによる著しい変化は確認されなかった。これは，炭酸カルシウムの強度増進のメカニズムとして水を消費しないことにより，基本的には自由水の逸散による収縮が支配的であるためと考えられる。また，炭酸カルシウムを多量に混和した“Ca2\_②”配合では，他の炭酸カルシウムを混和させた配合よりも比較的収縮量が高い傾向にある。これは前述したとおり，他の配合よりも水結合材比が高いことにより，乾燥収縮量が多くなったためと考えられる。このように，CO<sub>2</sub>排出量を下げる目的で結合材を減らすことや，ワーカビリティ確保のため単位水量を増加させることは，自由水を多く含み，結果的に収縮量が增大することに留意する必要がある。

表－4 各配合の促進中性化速度

|       | 中性化速度<br>(mm/√week) | σ28<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|---------------------|-----------------------------|
| N     | 2.0                 | 54.4                        |
| B70_① | 1.9                 | 61.4                        |
| B70_② | 7.0                 | 36.9                        |
| B90_① | 13.8                | 26.6                        |
| B90_② | 6.2                 | 51.1                        |
| Ca1_① | 6.0                 | 60.9                        |
| Ca1_② | 6.8                 | 56.5                        |
| Ca2_① | 4.2                 | 60.6                        |
| Ca2_② | 5.6                 | 47.4                        |
| Ca3_① | 7.5                 | 43.9                        |
| Ca3_③ | 14.0                | 25.9                        |



図－9 圧縮強度と中性化速度の関係

図－6，8より，質量変化率では，一般的に水結合材比が低いほど質量変化は少ないと考えられ，本試験においても“B70”配合が最も質量変化が低い結果となった。前述の通り，“Ca2\_②”配合は最も水結合材比が高く，自由水が多いため質量減少も大きいと考えられたが，2%ほどの減少にとどまった。これは，図－8に示したように，高い水結合材比であっても強度が十分にあり，緻密化されているため，水分が逸散しにくかったものと考えられる。

また，図中の点線より，異なる種類のCCU材を用いても，強度と質量変化率には相関があることが確認され，炭酸カルシウムの種類による影響は少ないと考えた。

### 3-4 促進中性化試験

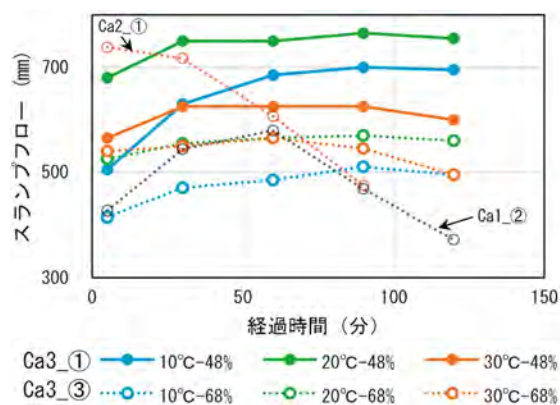
表－4に促進中性化試験結果，図－9に圧縮強度との関係性を示す。

促進中性化に関しては，同じスラグ置換量のパターンにおいて，強度との相関性が高いことが分かる。例えば，“B90”と“Ca”配合を比較すると同一線上に近い結果となっている。これより，中性化に関しては，炭酸カルシウムを混和することによる悪影響は少ないものと考えられる。また，中性化が強度と相関性が高いことから，炭酸カルシウムを添加することによって強度が増加するため，間接的に中性化抵抗性が増加すると言える。

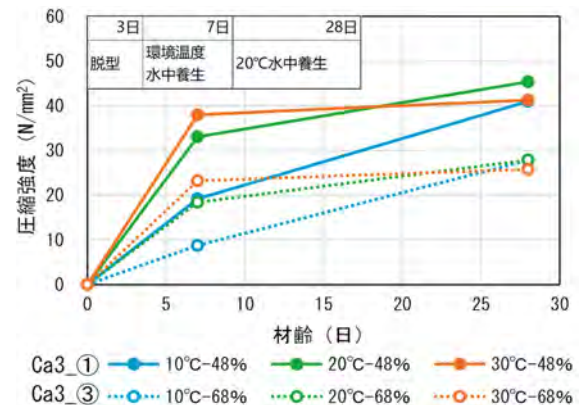
表一五 環境温度変化試験

|                     | 環境温度<br>(℃) | W/B<br>(%) | W/P<br>(%) | 粉体量 P<br>(kg) | 混和剤使用量   |      |      | スランプフロー<br>(mm) | 空気量<br>(%) | コンクリート温度<br>(℃) |
|---------------------|-------------|------------|------------|---------------|----------|------|------|-----------------|------------|-----------------|
|                     |             |            |            |               | 総量 (P×%) | A 剤  | B 剤  |                 |            |                 |
| Ca3_①               | 10          | 48         | 31.0       | 565           | 1.15     | 0.92 | 0.23 | 505             | 2.6        | 12              |
| Ca3_③               |             | 68         | 38.3       | 457           | 1.15     | 0.92 | 0.23 | 415             | 4.4        | 12              |
| Ca3_①               | 20          | 48         | 31.0       | 565           | 1.20     | 0.96 | 0.24 | 680             | 3.1        | 20              |
| Ca3_③               |             | 68         | 38.3       | 457           | 1.20     | 0.96 | 0.24 | 525             | 5.2        | 19              |
| Ca3_①               | 30          | 48         | 31.0       | 565           | 1.15     | 0.92 | 0.23 | 565             | 3.4        | 31              |
| Ca3_③               |             | 68         | 38.3       | 457           | 1.20     | 0.96 | 0.24 | 540             | 3.0        | 31              |
| Ca1_② <sup>3)</sup> | 20          | 47         | 28         | 625           | 2.40     | 1.68 | 0.72 | 430             | 4.4        | 20              |
| Ca2_① <sup>3)</sup> |             |            |            |               | 1.30     | 0.91 | 0.39 | 740             | 1.3        | 20              |

※ A 剤：試作高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系化合物）、B 剤：試作高性能減水剤（ポリカルボン酸系化合物）



図一〇 経時変化試験（環境温度変化時）



図一一 圧縮強度試験結果（環境温度変化時）

CCU 材の種類による影響は、“Ca1” 配合が僅かに中性化速度が高い傾向にあるが、有意な差であると断言はできない。CCU 材の諸性能よりも、結果的に圧縮強度が増加することによって中性化への抵抗性が変化すると考えられる。

### 3-5 環境温度変化試験

表一五に環境温度を変化させた試験の概要を示す。“Ca3” 配合での検討を行い、減水剤として、試作品高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系化合物）を使用した。Ca 配合は粉体量が多く、“Ca3\_①” では高流動コンクリート、“Ca3\_③” では締固めを必要とする高流動コンクリートを想定して試験を行った。

10℃ 環境下での混和剤の添加率に関しては、両配合において 1.15% となっている。他の環境温度においても、添加率は 1.15% もしくは 1.20% となっており、添加率の高い配合は初期のスランプフローが高い傾向もあることから、同じスランプフローを得るための混和剤添加量は、どの環境温度においても一定である。

図一〇にスランプフローの経時変化を示す。スランプフローの経時変化量は低温の方が高く、練り混ぜ 90 分後程度までスランプフローが後伸びする傾向がある。一般的に低温時は、高性能 AE 減水剤を使用した際に、減水剤がセメント粒子に吸着されるのが遅延するため、このようにスランプフローが後伸びする現象が発生する。

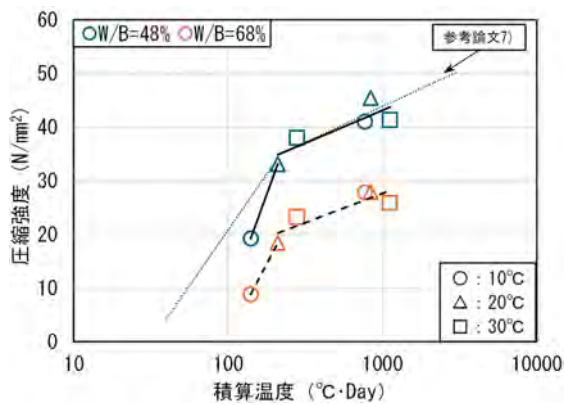
本配合のような、炭酸カルシウムを含んだ低結合材量の配合においても同様の現象が発生することが確認された。

また、既報<sup>3)</sup>では“Ca1\_②”、“Ca2\_①” 配合に対して、それぞれ 2.4%、1.3% 量の試作品の減水剤を添加し、練り混ぜを行っている。使用している混和剤内の 2 剤のバランスが異なるが、表一五から、初期の分散性能を司る B 剤の添加量は、Ca1>Ca2>Ca3 の順に添加量が増加することが分かる。これは、表一五に記載してある通り、Ca の粉体そのものの比表面積や粒径が異なることが要因として考えられ、同一の流動性を得るための添加量は、比表面積の大きい Ca1 の方が増加するためである<sup>2) 12)</sup>。

図一一に環境温度を変化させた際の圧縮強度試験結果を示す。供試体は、3 日目に脱型を行い、7 日まで環境温度での水中養生を行った。その後は、一律 20℃ での水中養生を 28 日まで行った。

材齢 7 日時点では、30℃ 養生を行ったパターンが最も強度が高い傾向が表れた。一方で、材齢 28 日になると、初期に 20℃ で養生を行ったパターンが最も強度が高くなった。これは、既往の研究<sup>7)</sup>でも同様に確認されており、材齢初期段階で強度を増進させると、強度が長期的に漸増しなくなるためである。

積算温度と圧縮強度の関係を図一二に示す。図中には“B90\_②”と同様の配合から得られた積算温度との関係式<sup>7)</sup>を示す。この図から炭酸カルシウムを多量に混和させたコンクリートにおいても、積算温度よりコンクリー



図ー12 積算温度と圧縮強度の関係 (Ca3 配合)

ト強度の推定が可能であると考えられる。また，“B90\_②”と“Ca3\_①”配合は非常に近い積算温度と圧縮強度の関係を示している。これらの2配合は、3ー1に示した有効粉体量を水との比で示すとどちらも W/P' が53%となっている。このように炭酸カルシウムを混和させた配合において、既往の高炉スラグ微粉末のみを用いた同置換率の配合の知見を活用できる可能性があるため、今後さらなる検討を行う。

#### §4. まとめ

本研究は、3種類の炭酸カルシウムをそれぞれコンクリートに多量に混和させ、さらに高炉スラグ微粉末でセメントの大部分を置換した際のコンクリートの諸性能について検討を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 粉体中の各材料には有効係数をかけ合わせた有効粉体量 P' としてまとめることにより、既往の推定式によって精度よく強度の推定が可能である。
- (2) 静弾性係数と圧縮強度の関係性は、他の配合と同様の傾向を示し、炭酸カルシウムを混和させたことによる影響は確認されず、炭酸カルシウムの種類によって大きな差はなかった。
- (3) 炭酸カルシウムは基本的に水和反応を行わないため、CO<sub>2</sub> 排出量を下げる目的で結合材を減らすことや、ワーカビリティ確保のため単位水量を増加させることは、自由水を多く含み、結果的に収縮量が增大することに留意する必要がある。
- (4) 中性化に関しては、炭酸カルシウムを混和することによって、強度が増加するため、間接的に中性化抵抗性も増加すると言える。
- (5) 3種のCCU材料の比較を行った結果、多少の誤差は生じるが、コンクリート硬化体の性能に大きな差は生じなかった。一方で、フレッシュコンクリートの性状や混和剤の添加量においては、粉体の粒径・形状が大きな影響を与えていると考えられ、比表面積の大きい Ca1 の方が増加する傾向にある。

- (6) 炭酸カルシウムを多量に混和させたコンクリートにおいても、積算温度よりコンクリート強度の推定が可能であると考えられ、有効粉体量を用いることによって、高炉スラグ微粉末のみを用いた同置換率の配合の知見を活用できる可能性が見出した。

**謝辞.** 本試験の実施にあたり、共同研究者である戸田建設株式会社には多大なご協力を頂いた。また、混和剤の検討として、山宗化学株式会社にご協力をいただいた。ここに記して心より謝意を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 佐々木猛，八木利之：エコタンカル CO<sub>2</sub> を原料とした環境にやさしい形質炭酸カルシウム，土木施工，Vol.62，No.11，pp.87-90，2021
- 2) 古川雄太ほか：軽質炭酸カルシウムおよび酸化カルシウムが高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1375-1380，2024
- 3) 高木雄介ほか：炭酸カルシウムを多量に混和した高炉スラグ微粉末高含有 コンクリートの 基礎的性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.456-461，2025
- 4) 東京都水道局：水道事業ガイドライン業務指標算出結果の一覧（令和4年度～令和6年度），[https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/waterworks/104012007022-guideline\\_result06](https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/waterworks/104012007022-guideline_result06)，（参照 2026-03-27）
- 5) セメント協会：セメントの LCI データの概要，2025.5
- 6) 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
- 7) 国立研究開発法人土木研究所，戸田建設株式会社，西松建設株式会社：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（V），2016.1
- 8) 一般社団法人セメント協会：石灰石微粉末専門委員会報告書，pp.7，2001.10
- 9) 久我龍一郎ほか：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量が異なるセメントの強度改善に及ぼす高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末の影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 V，pp.903-904，2009
- 10) 井元晴丈ほか：混合セメントの水和反応解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.41-46，2003
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.45，2022
- 12) 太田晃，魚本健人：微粉末粒子に対するポリカルボン酸系分散剤の分散効果に関する検討，コンクリート工学論文集，第10巻第2号，1999.5