

# 論文 CO<sub>2</sub> を注入した水酸化カルシウム溶液を練混ぜ水として用いたコンクリートの基礎的性質

新杉 匡史\*1・桜井 邦昭\*2・西澤 彩\*1・河合 研至\*3

**要旨:** あらかじめ水酸化カルシウムを添加した溶液に CO<sub>2</sub> を注入し、溶液中に炭酸カルシウムを生成させたものを練混ぜ水として用いたコンクリートの各種の品質を調べた。その結果、練混ぜ水に上水道水を用いた場合と比べて、圧縮強度は増加するが曲げおよび割裂引張強度は同等であること、長さ変化率や中性化、塩分浸透および凍結融解に対する抵抗性も同等ないしはそれ以上であることを確認した。また、CO<sub>2</sub> を注入した水酸化カルシウム溶液を練混ぜ水に用いることで、上水道水を用いた場合に比べて、コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を約 14kg/m<sup>3</sup> 削減できると試算された。

**キーワード:** 水酸化カルシウム, CO<sub>2</sub> 固定, 練混ぜ水, 強度特性, 耐久性

## 1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルの実現に向け、コンクリート分野においても CO<sub>2</sub> 排出量の削減に資する様々な技術開発が進められている。具体的な対応策のひとつとして、環境負荷の小さい材料を用いる手法があり、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を混和材として大量に使用し、単位セメント量の使用量を削減する技術<sup>2)</sup>などがある。また、セメントの炭酸化反応に着目し、製造後のコンクリート部材に炭酸化養生を施すことで、コンクリート中に CO<sub>2</sub> を固定化する研究<sup>3)</sup>も行われている。しかし、前者は産業副産物の貯蔵・計量、後者は炭酸化養生のための設備が必要となる課題もある。

そのため、レディーミクストコンクリート工場や現場プラントで製造する一般的なコンクリートを対象として、大がかりな設備を追加することなく、CO<sub>2</sub> 排出量を削減する手法を検討することも重要である。その手法のひとつとして練混ぜ時にミキサ内部で液化 CO<sub>2</sub> を噴射する取り組み<sup>4)</sup>等もなされているが、研究事例は少ない。

一方で、著者らは前報にて、あらかじめ粉体の Ca(OH)<sub>2</sub> を添加した溶液に CO<sub>2</sub> を注入し、CaCO<sub>3</sub> として CO<sub>2</sub> を固定した溶液を練混ぜ水(以下、CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水)に用いたセメントペーストに関する実験を行い、CO<sub>2</sub> 固定量が大きくなること、硬化組織が緻密化され空隙率が小さくなったことにより、圧縮強度が大きくなることを報告した<sup>5) 6)</sup>。

そこで本研究では、前報の知見を踏まえ、図-1 に示すフローで製造する CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いたコンクリートの強度特性や耐久性などの基礎的性質について検討した。

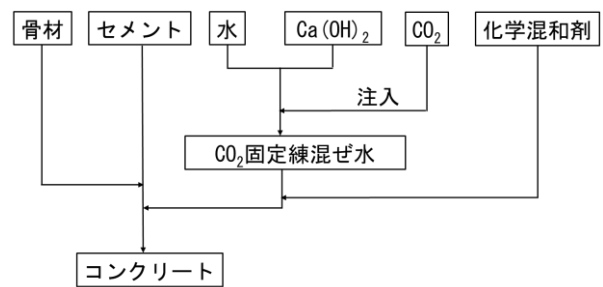


図-1 練混ぜ水およびコンクリートの製造フロー

## 2. 試験概要

### 2.1 試験ケースと使用材料

試験ケースおよびコンクリートの配合を表-1、使用材料を表-2 に示す。練混ぜ水には、上水道水もしくは CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた。

コンクリートの配合は、試験ケース No.1, No.2 では、W<sub>mix</sub>/C を 55.0%とした。ここで、W<sub>mix</sub>とは練混ぜ水の質量であり、No.2 は溶液中の CaCO<sub>3</sub> 粒子を含んだ質量である。このため、No.2 はセメントと CaCO<sub>3</sub> 粒子を合計した粉体に対する上水道水の質量比(W/P)が、No.1 と相違することになる。そこで、試験ケース No.3 では、No.1 と同じ W/P=55.0%とした。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水の作製

Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液は、Ca(OH)<sub>2</sub> 試薬を上水道水に添加することで作製した。Ca(OH)<sub>2</sub> 試薬の添加量は、前報<sup>5) 6)</sup>で検討した範囲を参考にし、濃度 1mol/L となるよう調製した。Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液に対し、CO<sub>2</sub> ガスシリンダーを用い、写真-1 に示す市販の炭酸水メーカーにより CO<sub>2</sub> を注入して CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を作製した。CO<sub>2</sub> 注入量は、溶液の質量が 44g/L(1mol の CO<sub>2</sub>)増加することで確認した。

\*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 修士 (工学) (正会員)

\*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 社会基盤環境工学プログラム 教授 工学博士 (正会員)

表-1 試験ケースおよびコンクリートの配合

| No. | 練混ぜ水の種類                | W <sub>mix</sub> */C (%) | W/P** (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |                   |     |     |      |
|-----|------------------------|--------------------------|-----------|---------|-------------------------|-------------------|-----|-----|------|
|     |                        |                          |           |         | W                       | CaCO <sub>3</sub> | C   | S   | G    |
| 1   | 上水道水                   | 55.0                     | 55.0      | 46.0    | 160                     | 0                 | 291 | 831 | 1032 |
| 2   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水 | 55.0                     | 47.0      |         | 144                     | 16                | 291 | 843 | 1047 |
| 3   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水 | 65.1                     | 55.0      |         | 160                     | 18                | 273 | 830 | 1031 |

\*W<sub>mix</sub>(練混ぜ水) = W+ CaCO<sub>3</sub>    \*\*P(粉体) = C+ CaCO<sub>3</sub>

表-2 使用材料

| 種類       | 記号                  | 摘要  |
|----------|---------------------|---|
| 水        | W                   | 上水道水  |
| 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>            |
| 水酸化カルシウム | Ca(OH) <sub>2</sub> | 試薬(特級)  |
| 炭酸カルシウム  | CaCO <sub>3</sub>   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水に含まれる<br>CaCO <sub>3</sub> 粒子 |
| 細骨材      | S                   | 掛川産陸砂, 表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup>                   |
| 粗骨材      | G                   | 碎石 2005, 表乾密度 2.72g/cm <sup>3</sup>                 |
| 化学混和剤    | SP                  | 高性能 AE 減水剤  |
|          | HWR                 | AE 減水剤(高性能タイプ)                                      |
|          | AE                  | 空気量調整剤(100倍希釈溶液で使用)                                 |



写真-1 CO<sub>2</sub>ガスシリンダーと炭酸水メーカー

### 2.3 コンクリートの作製

前節で調製したCO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いてコンクリートを作製した。練混ぜには強制二軸練りミキサを用い、1バッチの練混ぜ量は50Lとした。練混ぜ方法は、セメントおよび骨材を投入して10秒間練り混ぜた後、あらかじめ化学混和剤を溶解した練混ぜ水を投入して90秒間練り混ぜる方法とした。練混ぜ水は十分に攪拌しながら投入した。化学混和剤の添加量は目標値(スランプ: 12±2.5cm, 空気量: 4.5±1.5%)となるよう適宜調整した。練混ぜは20℃の試験室内で行った。

### 2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。本研究では、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いて作製したコンクリートの基礎的性質を把握するためにフレッシュ性状、強度特性(圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度)、耐久性(耐凍害性、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性)、断熱温度上昇特性、長さ変化について検討した。

#### (1) フレッシュ試験

練上がり3分後のコンクリートを練り舟内に排出し、

スコップで十分に練り返した後、スランプはJIS A 1101、空気量はJIS A 1128、コンクリート温度はJIS A 1156に準拠してそれぞれ測定した。

#### (2) 強度試験

材齢7, 28, 91日に、圧縮強度はJIS A 1108、曲げ強度はJIS A 1106、割裂引張強度はJIS A 1113に準拠してそれぞれ試験に供した。供試体の寸法は、圧縮強度試験および割裂引張試験用でφ100×200mm、曲げ強度試験用で100×100×400mmとし、試料採取の翌日に脱型し、所定の材齢まで20℃で水中養生した。

#### (3) 凍結融解試験

材齢28日の供試体についてJIS A 1148 A法(水中凍結融解試験方法)に準拠して行った。供試体寸法は、100×100×400mmとした。凍結融解の温度管理は、供試体中心部の温度によって行い、各サイクルにおける最高温度は5±2℃、最低温度は-18±2℃の範囲内、1サイクルに要する時間は3時間以上4時間以内とし、300サイクルまで行った。測定項目は、たわみ振動の一次共鳴振動数と供試体の質量とした。

#### (4) 促進中性化試験

材齢28日まで20℃水中養生した後、材齢56日まで20℃気中養生した供試体について、JIS A 1153に準拠して促進中性化試験を行った。供試体寸法は、100×100×400mmとした。打込み面以外の5面をアルミテープでシールした供試体をCO<sub>2</sub>濃度5%、温度20℃、相対湿度60%の条件で養生した。促進中性化期間は7, 28日とし、

表-3 試験項目および試験方法

| 試験項目     | 試験方法              | 備考  |
|----------|-------------------|---|
| スランプ試験   | JIS A 1101        | 練上がり 3分後  |
| 空気量      | JIS A 1128        |   |
| コンクリート温度 | JIS A 1156        |   |
| 圧縮強度試験   | JIS A 1108        | 材齢 7, 28, 91 日  |
| 曲げ強度試験   | JIS A 1106        |   |
| 割裂引張強度試験 | JIS A 1113        |   |
| 凍結融解試験   | JIS A 1148<br>A 法 | 材齢 28 日で試験開始  |
| 促進中性化試験  | JIS A 1153        | 促進期間：7, 28 日<br>促進条件：CO <sub>2</sub> 濃度 5%, 温度 20°C, 相対湿度 60% |
| 塩分浸漬試験   | JSCE-G572         | 浸漬期間：91 日<br>浸漬条件：10%NaCl 溶液                                  |
| 断熱温度上昇試験 | —                 | 空気循環式断熱温度上昇試験装置で測定  |
| 長さ変化試験   | JIS A 1129        | 材齢 7 日で試験開始   |

供試体断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで、中性化深さを測定した。

#### (5) 塩分浸漬試験

材齢 28 日まで 20°C 水中養生した後、JSCE-G572 に準拠して塩分浸漬試験を実施した。供試体寸法は、φ100×150mm とした。打込み面以外をエポキシ樹脂で塗布してシールした。10%NaCl 溶液で 91 日間浸漬を行い、供試体断面に硝酸銀溶液を噴霧することで、塩分浸透深さを測定した。

#### (6) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇特性の測定は、空気循環式断熱温度上昇試験装置を用い、材齢 14 日まで行った。

#### (7) 長さ変化試験

材齢 7 日まで水中養生した後、JIS A 1129 に準拠した長さ変化試験を行った。供試体寸法は、100×100×400mm とした。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

スランプおよび空気量の試験結果を表-4 に示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた場合でも、化学混和剤に高性能 AE 減水剤を使用し、適宜添加量を調整することで、目標とするスランプおよび空気量を確保することが可能

表-4 スランプおよび空気量の試験結果

| No. | 練混ぜ水の種類                | W/P (%) | 化学混和剤 (C×%) |     |       | スランプ (cm) | 空気量 (%) |
|-----|------------------------|---------|-------------|-----|-------|-----------|---------|
|     |                        |         | SP          | HWR | AE    |           |         |
| 1   | 上水道水                   | 55.0    | —           | 1.0 | 0.002 | 12.0      | 5.0     |
| 2   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水 | 47.0    | 1.2         | —   | 0.002 | 11.0      | 4.3     |
| 3   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水 | 55.0    | 1.0         | —   | 0.002 | 11.5      | 5.8     |

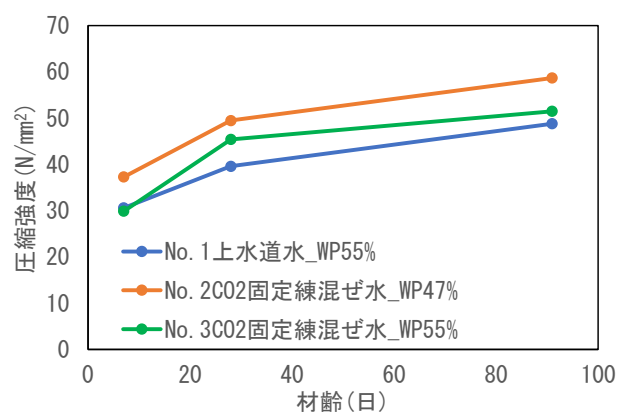


図-2 圧縮強度

であった。

#### 3.2 強度特性

圧縮強度の試験結果を図-2 に示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いたコンクリートの圧縮強度は、同じ W/P の上水道水を用いた場合と比べて、材齢 7 日で同等であり、材齢 28 日以降で大きくなった。このことは、Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液に CO<sub>2</sub> を注入することで生成した CaCO<sub>3</sub> 粒子は圧縮強度の増加に寄与することを示しており、前報<sup>5)</sup>で得られた知見と一致した。言い換えると、CaCO<sub>3</sub> の生成により、単位セメント量を低減することが可能であると考えられる。著者らはセメントペーストの検討において、CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた場合、カルシウムアルミネート系水和物の生成量が増大したことにより、硬化組織が緻密化され空隙率が小さくなることを報告している<sup>6)</sup>。コンクリートでの検討を行った本研究においても、同様の理由により、圧縮強度の増加に寄与したと考えられる。

本研究の結果を踏まえると、CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いることで、所定の圧縮強度の確保に必要な単位セメント量は No.3 の配合よりもさらに低減することも可能と考えられ、さらなる CO<sub>2</sub> 削減に繋がることも期待できる。

曲げ強度を図-3、割裂引張強度を図-4 にそれぞれ示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いたコンクリートの曲げ強度および割裂引張強度は、上水道水を用いた場合と比べて、いずれの材齢においてもほぼ同等の値を示した。曲

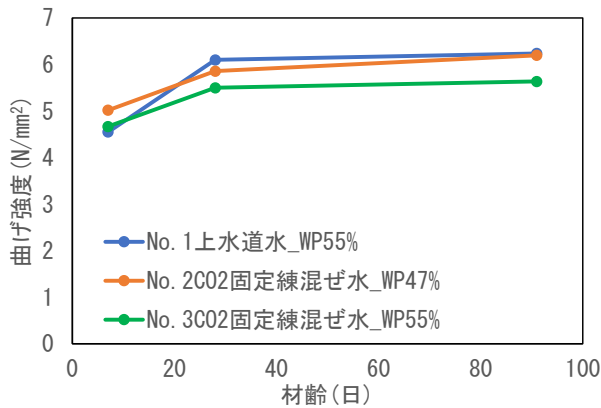


図-3 曲げ強度

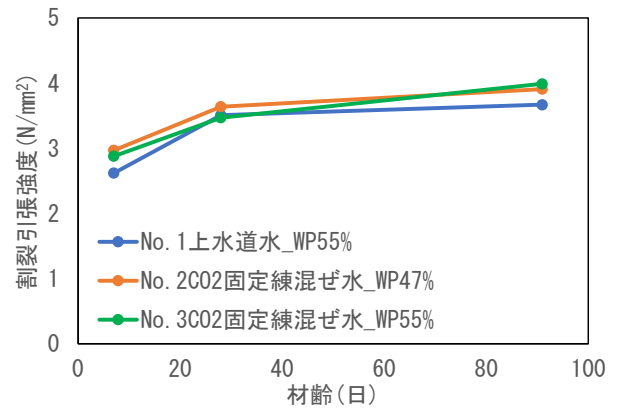
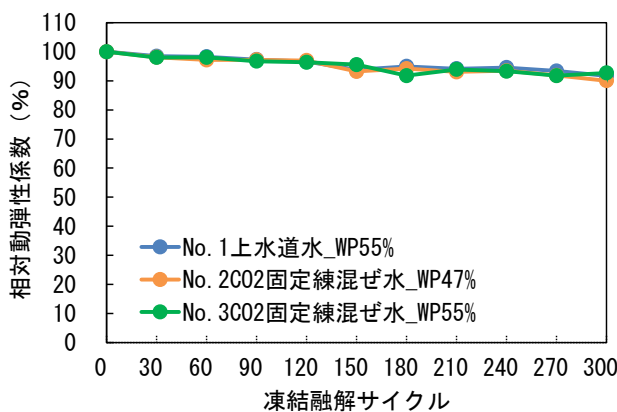
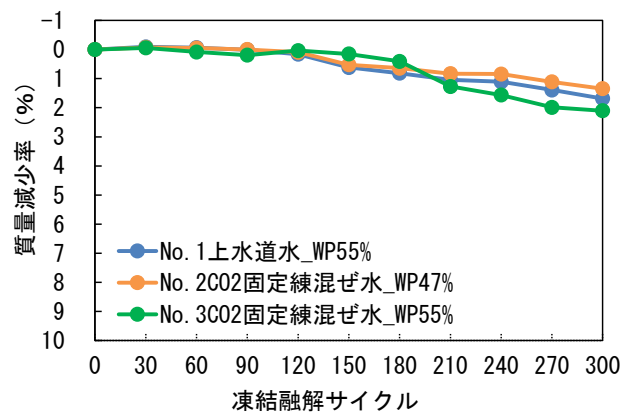


図-4 割裂引張強度



(a) 相対動弾性係数



(b) 質量減少率

図-5 凍結融解試験結果

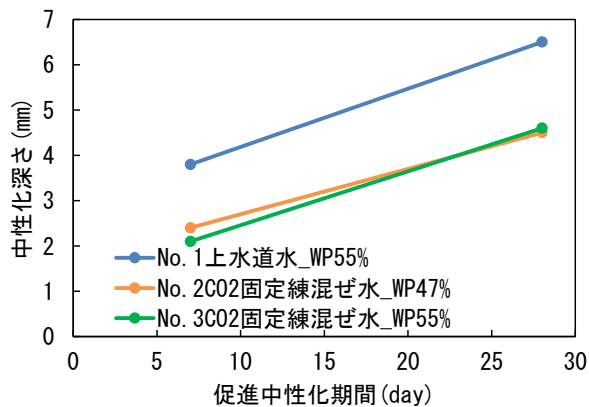


図-6 促進中性化試験結果

げ強度および割裂引張強度は、セメントペーストの空隙率ではなく、その硬化組織自体の強度に依存すると推測される。このため、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いることは、硬化組織自体の強度を大きく変化させる効果はないと考えられる。

### 3.3 凍結融解抵抗性

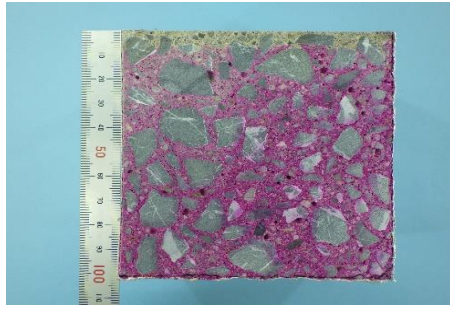
凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の試験結果を図-5にそれぞれ示す。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ

水を用いた場合でも、凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数は90%を確保しており、上水道水を用いた場合とほぼ同等であった。また、質量減少率もほぼ同等の値を示しており、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いることが、凍結融解抵抗性に及ぼす影響は小さいと推察される。

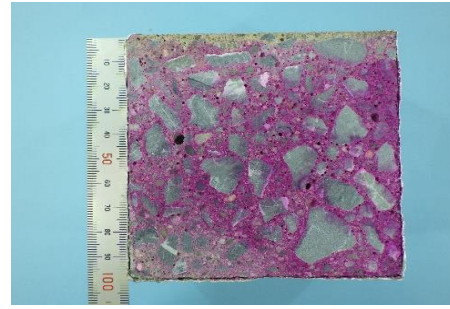
### 3.4 中性化に対する抵抗性

促進中性化試験の結果を図-6に示す。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたコンクリートの中性化深さは、上水道水を用いた場合に比べて小さくなっており、中性化に対する抵抗性が向上する結果が得られた。圧縮強度が増加した理由と同様、CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いることで、硬化組織が緻密化したため、中性化に対する抵抗性が大きくなったと推測される。

促進中性化期間28日の供試体に対しフェノールフタレインを噴霧した際の呈色状況を写真-2に示す。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いた場合でも、上水道水の場合と同様に、未炭酸化領域ではフェノールフタレインによる全体的な呈色が認められた。本研究で用いた程度のCa(OH)<sub>2</sub>濃度であれば、練混ぜ水中に生成するCaCO<sub>3</sub>の量によって、フェノールフタレイン噴霧による未呈色域を示す



(a) 上水道水\_WP55% (試験ケース No. 1)



(b) CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水\_WP47% (試験ケース No. 2)

写真-2 促進中性化期間 28 日の供試体に対しフェノールフタレインを噴霧した際の呈色状況

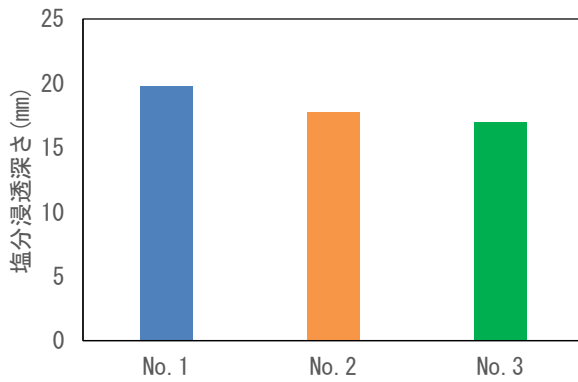


図-7 塩分浸漬試験結果

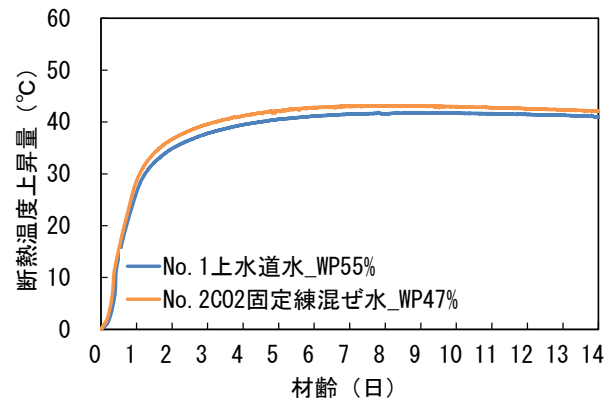


図-8 断熱温度上昇試験結果

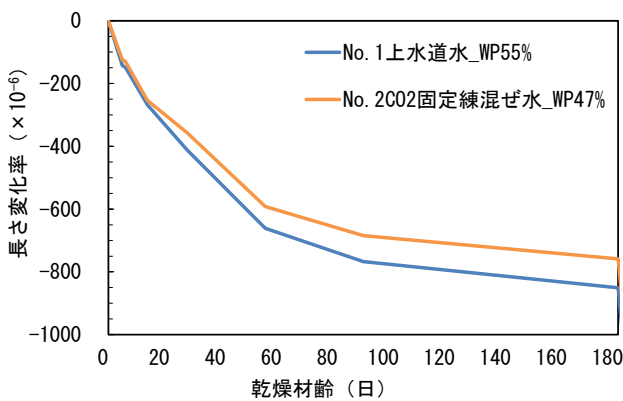


図-9 長さ変化率の測定結果

結果とならなかった。すなわち、鉄筋腐食を促進するような過度のコンクリートの中性化を引き起こすものではないことが確認できた。

### 3.5 塩分浸透抵抗性

浸漬期間 91 日の塩分浸漬試験結果を図-7 に示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた場合(試験ケース No.2)の塩分浸透深さは 17.8mm であり、上水道水を用いた場合の 19.8mm と比べて小さい値を示した。促進中性化試験の結果と同様、硬化組織が緻密になったため、塩分浸透抵抗性が大きくなったと推測される。

### 3.6 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験の測定結果を図-8 に示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた場合(試験ケース No.2)の温度上昇量は 43.1°C であり、上水道水を用いた場合(No.1)の 41.9°C とほぼ同等の結果を示した。試験ケース No.1 と No.2 は、単位セメント量が同じであり、本研究の範囲では、練混ぜ水中に含まれる CaCO<sub>3</sub> が断熱温度上昇に与える影響は小さいと考えられる。

### 3.7 長さ変化率

長さ変化率の測定結果を図-9 に示す。CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いた場合(試験ケース No.2)の長さ変化率は、上水道水を用いた場合(No.1)に比べて低減できる結果であった。No.2 は、No.1 に比べて、コンクリート中に含まれる純粋な水の量が少ないことから、長さ変化率が小さくなったと考えられる。

以上より、CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いたコンクリートの強度特性および耐久性は、通常の上水道水を用いたコンクリートと比べて同等ないしはそれ以上であり、品質として問題ないことが確認できた。

## 4. CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の試算

CO<sub>2</sub> 固定練混ぜ水を用いたコンクリートの CO<sub>2</sub> 削減効果について試算した。対象とした配合は本研究の検討で

表-5 各材料のCO<sub>2</sub>排出量の原単位

| CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /t) |       |                     |     |     |
|--|-------|---------------------|-----|-----|
| W  | C     | Ca(OH) <sub>2</sub> | S   | G   |
| 0  | 757.9 | 578                 | 3.5 | 2.8 |

表-6 CO<sub>2</sub>排出量の削減効果の試算結果(単位: kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-con)

| No. | 試験ケース                        | CO <sub>2</sub> 固定量 | CO <sub>2</sub> 排出量 |       |                     |     |     | 合計    |
|-----|------------------------------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|-----|-----|-------|
|     |                              |                     | W                   | C     | Ca(OH) <sub>2</sub> | S   | G   |       |
| 1   | 上水道水 WP55%                   | 0                   | 0                   | 220.5 | 0                   | 2.9 | 2.9 | 226.3 |
| 3   | CO <sub>2</sub> 固定練混ぜ水 WP55% | △7.9                | 0                   | 206.9 | 7.7                 | 2.9 | 2.9 | 212.5 |

同等の品質が確認できた試験ケース No.1 と No.3 とした。

水、セメントおよび骨材を製造する際のCO<sub>2</sub>排出量は既往の文献<sup>7)</sup>を参考に表-5 に示す値とした。消石灰(粉体のCa(OH)<sub>2</sub>)のCO<sub>2</sub>排出量は、資料<sup>8)</sup>に示される消石灰および生石灰製造時のCO<sub>2</sub>原単位である428kg-CO<sub>2</sub>/t-石灰石を用いた。モル質量の観点から消石灰1tの製造には原料の石灰石を1.35t消費することを考慮して、CO<sub>2</sub>原単位を1.35倍した578kg-CO<sub>2</sub>/t-消石灰とした。

これら材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量に対し、コンクリート製造時の単位量を乗じてコンクリート1m<sup>3</sup>あたりの材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量を算出した。ただし、コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCa(OH)<sub>2</sub>量(CH<sub>con</sub>)およびCO<sub>2</sub>固定量(CO<sub>2con</sub>)は、式(1)および式(2)により練混ぜ水中で生成したCaCO<sub>3</sub>をそれぞれ換算することで求めた。

$$CH_{con} = Cc_{con} \times Ca(OH)_2 / CaCO_3 \quad (1)$$

$$CO_{2con} = Cc_{con} \times CO_2 / CaCO_3 \quad (2)$$

ここに、Cc<sub>con</sub>: CaCO<sub>3</sub>量(18kg/m<sup>3</sup>-con), Ca(OH)<sub>2</sub>: Ca(OH)<sub>2</sub>の分子量74.08g/mol, CO<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub>の分子量44.01g/mol, CaCO<sub>3</sub>: CaCO<sub>3</sub>の分子量100.09g/mol

コンクリート1m<sup>3</sup>あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、材料ごとのCO<sub>2</sub>排出量の積算からCO<sub>2</sub>固定量を差し引くことで求めた。なお、本検討では使用材料の製造時に排出されるCO<sub>2</sub>のみを対象とし、練混ぜ水へのCO<sub>2</sub>注入、練混ぜ、運搬、施工過程で排出されるCO<sub>2</sub>は試算に含めていない。

CO<sub>2</sub>排出量の試算結果を表-6 に示す。CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたコンクリートは、CO<sub>2</sub>排出量を約14kg/m<sup>3</sup>削減できると試算された。消石灰製造時のCO<sub>2</sub>排出量は練混ぜ水に固定するCO<sub>2</sub>とほぼ同等であり、単位セメント量を少なくした分、CO<sub>2</sub>排出量を削減することができた。

## 5. まとめ

CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたコンクリートの基礎的性質について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたコンクリートは、上水道水の場合と比べて材齢28日以降の圧縮強度が増加し、曲げ強度および割裂引張強度は同等であった。
- (2) CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いたコンクリートの凍結融解、中性化、塩分浸透に対する抵抗性や長さ変化率な

どは、上水道水の場合と比べて同等ないしはそれ以上であった。

- (3) CO<sub>2</sub>固定練混ぜ水を用いることで、上水道水を用いた通常のコンクリートと同等の品質を確保したうえでCO<sub>2</sub>排出量を約14kg/m<sup>3</sup>削減可能と試算された。今後は、建設現場で発生するスラッジ水にCO<sub>2</sub>を注入したものを練混ぜ水として活用する方法や、実工事への適用を想定して、CO<sub>2</sub>を注入した練混ぜ水の製造設備などの検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 首相官邸HP: 第203回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説, [https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html), (閲覧日: 2023年10月31日)
- 2) 溝渕麻子, 小林利充, 近松竜一, 一瀬賢一: 環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.215-220, 2011
- 3) 取違剛, 横関康祐, 吉岡一郎, 盛岡実: 炭酸化養生を行ったコンクリートのCO<sub>2</sub>収支ならびに品質評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1450-1455, 2012
- 4) 松元淳一, 橋本理, 坂本淳, 丸屋剛: コンクリート製造時に二酸化炭素を固定させる技術, コンクリート工学, Vol.61, No.2, pp.138-144, 2023
- 5) 新杉匡史, 桜井邦昭, 石関嘉一, 河合研至: CO<sub>2</sub>を注入した水酸化カルシウム溶液の練混ぜ水としての適用に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1186-1191, 2023
- 6) 新杉匡史, 桜井邦昭, 石関嘉一: CO<sub>2</sub>を固定した練混ぜ水を用いたセメントペーストに関する基礎的検討, 大林組技術研究所報, No.87, pp.1-6, 2023
- 7) 日本建築学会: 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説, p.218, 2017
- 8) 環境省HP: [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology\\_2A2\\_2020.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology_2A2_2020.pdf), (閲覧日: 2023年11月12日)