

報告 資源循環と CO₂ 固定量の最大化を両立するコンクリートを用いたプレキャスト製品の製造

齋藤 淳*1・鈴木 好幸*2・高木 亮一*3・坂本 守*4

要旨：資源循環と CO₂ 固定量の最大化を両立するコンクリートの開発の一環で、再生骨材と模擬スラッジ固形分に CO₂ を固定化させ、コンクリート材料として利用するとともに、硬化後のコンクリートにも CO₂ を固定化させるプレキャスト製品を製造した。スランプロスが大きいことや、強度のばらつきが大きいことを考慮しつつ、CO₂ 収支 (CO₂ 排出量 - CO₂ 固定量) ができる限り小さくなるように配 (調) 合を設計した。プレキャスト工場の設備で要求性能を満足したコンクリートを出荷でき、打設や脱型なども予定通りの工程で実施できた。

キーワード：高炉スラグ微粉末, 再生骨材, スラッジ固形分, 炭酸化, CO₂ ナノバブル

1. はじめに

日本は、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロにする目標を掲げた。この宣言により、あらゆる分野で脱炭素化の取り組みが加速している。

建設分野において、コンクリートは、その構成材料であるセメントが製造過程で多量の CO₂ を排出するため、CO₂ 排出削減が求められている代表的な建材の一つである。コンクリートは供用段階で CO₂ を吸収し細孔溶液中の pH が低下する中性化と呼ばれる現象が進行する。鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋腐食の原因となるため、従来は中性化抑制対策が取られてきた。しかし、中性化はコンクリート自体の強度や耐久性に対する悪影響は小さい上、コンクリート中の水分が希薄な状態では中性化による鉄筋腐食も生じにくい。また、鉄筋コンクリート構造物の供用期間中に、中性化によってコンクリートに固定化できる CO₂ 量は、セメントの製造工程で排出する CO₂ 量の 9~23%にも達するという研究結果¹⁾が報告されている。

このような背景から、近年、CO₂ 排出削減技術として中性化が注目されており、筆者らは資源循環と CO₂ 固定量の最大化を両立するコンクリートの開発に取り組んでいる。本報告では、再生骨材と模擬スラッジ固形分に CO₂ を固定化させ、コンクリート材料として利用するとともに、硬化後のコンクリートにも CO₂ を固定化させるプレキャスト製品をプレキャスト工場で製造した事例を報告する。なお、これ以降、「CO₂ の固定化」を「炭酸化」と称す。

2. プレキャスト製品の製造

2.1 製造の対象物

製造するプレキャスト製品は、図-1 に示す高さ 450mm のベンチであり、平面形状が異なるスツールおよび R 部材の 2 種類とした。

2.2 製造の手順

まず、資源循環材料の炭酸化を行った。今回は、再生細骨材、再生粗骨材および模擬スラッジ水を資源循環材料と位置付けた。ここで、模擬スラッジ水は普通ポルトランドセメントと水を混合したセメントペーストとした。次に、配 (調) 合設計を行い、試験練り結果を踏まえて決定した配 (調) 合でコンクリート打設を実施した。最後に、硬化コンクリートを炭酸化した。

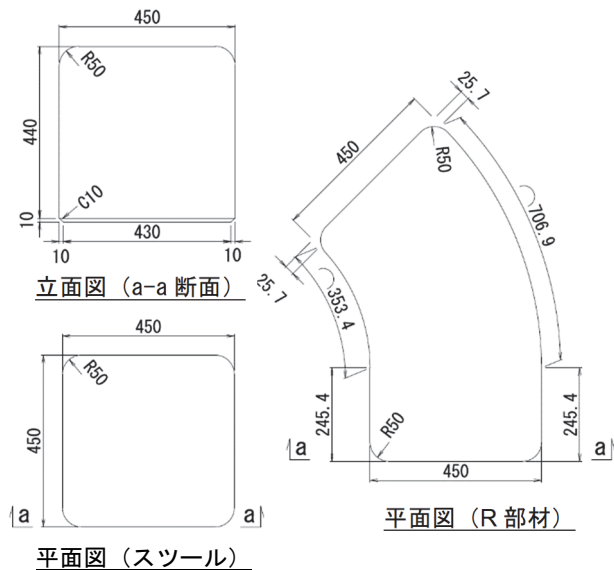


図-1 製造するプレキャスト製品 (ベンチ)

*1 (株) 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部 グループ長 博士 (工学) (正会員)
 *2 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 担当課長 博士 (工学) (正会員)
 *3 (株) 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部 主任研究員 修士 (工学) (正会員)
 *4 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 部長 博士 (工学) (正会員)



写真-1 炭酸カリウム水溶液浸漬方式の実施状況

表-1 炭酸カリウム水溶液浸漬方式の浸漬条件

| 項目 | 条件 |
|----------|----------------------------------|
| 炭酸カリウム濃度 | 30wt% |
| 浸漬時間 | 20 時間以上 |
| 骨材溶液比 | 骨材：溶液=1：1 (骨材 500kg：溶液 500kg) |

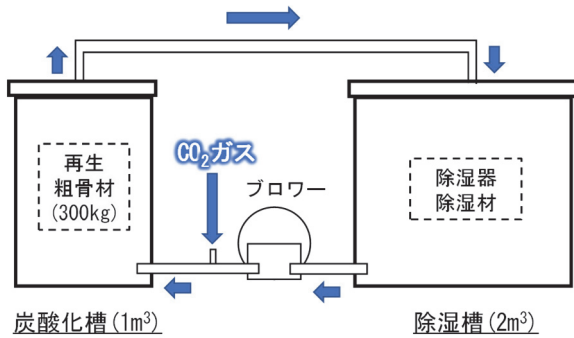


図-2 高濃度 CO₂ ガス循環方式の設備概要



写真-2 高濃度 CO₂ ガス循環方式の設備外観



散水状況



攪拌状況

写真-3 「DAC+水噴霧」方式の実施状況

2.3 資源循環材料の炭酸化

(1) 再生細骨材の炭酸化

再生細骨材の炭酸化は、炭酸カリウム水溶液浸漬方式²⁾で行った。写真-1 に示すように、水切り用フレコンバックに入れた再生細骨材を、炭酸カリウム水溶液を貯めたタンクに表-1 に示す条件で浸漬した。浸漬後に約 500kg の水道水で水洗いを 2 回実施して炭酸化完了とした。週当たり 5,000kg の再生細骨材の炭酸化を実施した。

(2) 再生粗骨材の炭酸化

再生粗骨材は、高濃度 CO₂ ガス循環方式³⁾で炭酸化した後、さらに、以下に述べる「DAC (Direct Air Capture) + 水噴霧」方式を適用し CO₂ 固定量の増大を図った。

高濃度 CO₂ ガス循環方式における炭酸化設備の概要を図-2 に、設備の外観を写真-2 に示す。炭酸化槽に表乾状態に調整した再生粗骨材を入れ、濃度 99.5vol% の CO₂ ガスを 30L/min の流量で供給しつつ、除湿槽で循環気体を除湿することで、骨材の炭酸化を促進した。炭酸化時間は 20 時間とし、日当たり 1,500kg の再生粗骨材の炭酸化を実施した。

「DAC (Direct Air Capture) + 水噴霧」方式では、骨材への散水と攪拌を繰り返し、湿潤状態から乾燥状態への変化を繰り返し生じさせ大気中の CO₂ による炭酸化を促進した。散水および攪拌の実施状況を写真-3 に示す。

(3) 模擬スラッジ水の炭酸化

模擬スラッジ水の炭酸化はスプレードライで行った。スプレードライとは、スラリーを熱風中に噴霧して、液滴の比表面積を増加させ、短時間で瞬時に水分を蒸発し、乾燥粉末を得る技術であり、概略の構成図を図-3 に示す。まず、イオン交換水 640kg と普通ポルトランドセメント 160kg を混合し、セメント濃度 20% のセメントスラリーを製造した。スラリーの製造後、4 時間以上の攪拌を行ったものを模擬スラッジ水と位置付けた。この模擬スラッジ水を攪拌しながら、CO₂ ナノバブルをセメント 1kg 当たり 3.0L/min の流量で 4 時間供給し、スラリーを炭酸化した。CO₂ ナノバブルの供給終了後も攪拌を継続

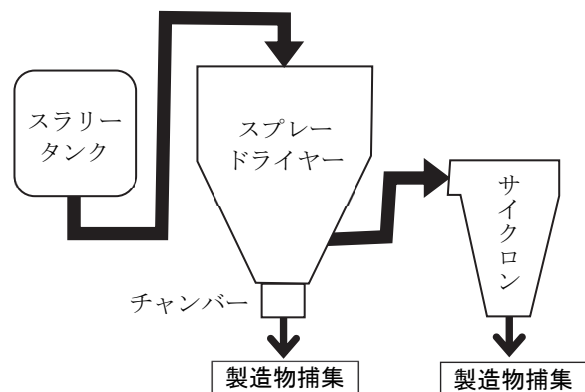


図-3 スプレードライの概略構成図

表-2 コンクリートの要求性能

| 項目 | | 条件 |
|------|---------------|-----------------------|
| 圧縮強度 | 脱型時（現場封緘養生） | 8.0N/mm ² |
| | 材齢 28 日（標準養生） | 24.0N/mm ² |
| スランプ | 練上り後 30 分 | 12.0cm 以上 |
| 空気量 | 練上り直後 | 2.0±1.0% |

表-3 再生骨材の炭酸化前後における物性値の比較

| 種類 | | 表乾密度 | 絶乾密度 | 吸水率 |
|-------|------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 再生細骨材 | 炭酸化前 | 2.25g/cm ³ | 2.01g/cm ³ | 12.2% |
| | 炭酸化後 | 2.25g/cm ³ | 2.02g/cm ³ | 11.6% |
| 再生粗骨材 | 炭酸化前 | 2.31g/cm ³ | 2.09g/cm ³ | 10.4% |
| | 炭酸化後 | 2.33g/cm ³ | 2.14g/cm ³ | 9.0% |

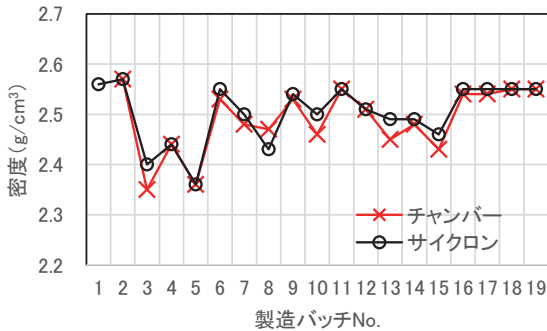


図-4 炭酸化模擬スラッジ固形分の密度

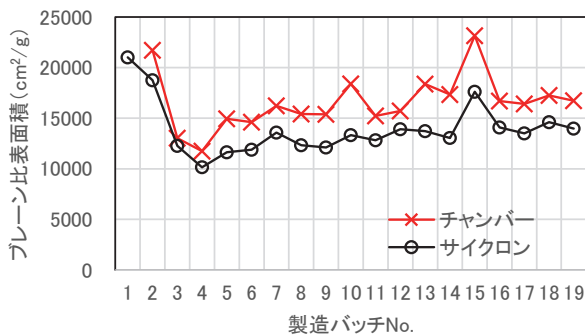


図-5 炭酸化模擬スラッジ固形分のブレン比表面積

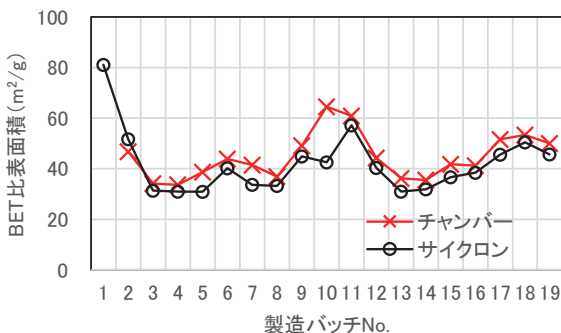


図-6 炭酸化模擬スラッジ固形分の BET 比表面積

した炭酸化スラリーをスプレードライにより粉体化することで、日当たり約 190kg の炭酸化模擬スラッジ固形分を製造した。

2.4 配（調）合設計

(1) コンクリートの要求性能

通常のプレキャスト製品における要求性能を参考に表-2 のように設定した。

(2) 使用材料

再生骨材の炭酸化前後の表乾密度、絶乾密度および吸水率を表-3 に示す。細骨材および粗骨材ともに、炭酸化することで、密度は大きくなり、吸収率は小さくなる傾向を示した。

炭酸化模擬スラッジ固形分は 19 バッチで製造した。第 1 バッチは全ての製造物をサイクロン部から捕集したが、第 2 バッチ以降は、チャンバー部とサイクロン部の 2 点から別々に捕集した。各バッチの密度、ブレン比表面積および BET 比表面積を図-4～図-6 に示す。

チャンバー部からの捕集品は、サイクロン部からの捕集品と比べて、密度は小さい傾向を、比表面積は大きい傾向を示した。また、密度の値は 2.35～2.57g/cm³ であり、普通ポルトランドセメントの 3.16g/cm³ や高炉スラグ微粉末の 2.88g/cm³ より小さかった。一方、ブレン比表面積は 10160～23160cm²/g であり、普通ポルトランドセ

表-4 使用材料

| 種類 | 記号 | 物性の代表値ほか |
|----------------------|---------------|--|
| 上水道水 | W | — |
| 結合材 B | 普通ポルトランドセメント | N 密度：3.16g/cm ³ |
| | 高炉スラグ微粉末 4000 | BS 密度：2.88g/cm ³ 比表面積：4120cm ² /g |
| | 膨張材 | EX 製品用 密度：3.16g/cm ³ |
| | 炭酸化模擬スラッジ固形分 | CSP 密度：2.55g/cm ³ |
| 炭酸化再生細骨材 | CRS | 表乾密度：2.25g/cm ³ , 吸水率：11.6%, 粗粒率：3.63 |
| 炭酸化再生粗骨材 (最大寸法 15mm) | CRG | 表乾密度：2.33g/cm ³ , 吸水率：9.0%, 粗粒率：5.96 |
| 高性能 AE 減水剤 | SP1 | ポリカルボン酸系化合物 |
| | SP2 | 低水セメント比用 ポリカルボン酸系化合物 |
| 遅延剤 | R1 | ポリカルボン酸系化合物 |
| | R2 | リグニルスルホン酸系化合物 |
| | R3 | 糖類とキシカルボン酸塩 |
| | R4 | 変性リグニルスルホン酸系化合物とキシカルボン酸塩 |

表-5 コンクリートの配(調)合 [スランプロス低減策]

| 配(調)合 No. | W/B (%) | CSP 置換率 B×% | 高性能 AE 減水剤 B×% | 遅延剤 B×% | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-----------|---------|-------------|----------------|-----------|--------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| | | | | | W | B | | | | CRS | CRG |
| | | | | | | N | BS | EX | CSP | | |
| 0 | 40 | 20 | SP1 : 3.0 | — | 180 | 108 | 252 | — | 90 | 638 | 832 |
| 1 | 50 | 20 | SP1 : 2.5 | R1 : 1.0 | 180 | 86 | 202 | — | 72 | 697 | 841 |
| 2 | | | SP1 : 2.8 | R2 : 0.25 | | | | | | | |
| 3 | | | SP1 : 2.8 | R3 : 0.20 | | | | | | | |
| 4 | | | SP1 : 2.8 | R4 : 0.20 | | | | | | | |

ントの 3400 cm²/g や高炉スラグ微粉末の 4120 cm²/g より大きい値であり、粉体粒子の表面には炭酸カルシウムの結晶が付着していた。使用材料を表-4 に示す。ここに示した物性値は各材料の代表的な値であり、以降に示す配(調)合の単位量の計算に用いた。

(3) スランプロス低減策

普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末および炭酸化模擬スラッジ固形分を結合材と位置付けた。結合材質量の 20% を炭酸化模擬スラッジ固形分とし、残りの結合材の 30% を普通ポルトランドセメント、70% を高炉スラグ微粉末として、試験練りを行った。

検討したコンクリートの配(調)合を表-5 に、試験練りの結果を表-6 に示す。配(調)合 No.0 に示すように、高性能 AE 減水剤 SP1 を比較的多く使用し、練上り直後のスランプを 17.5cm としても、スランプロスが大きく 30 分後には 2.0cm まで低下してしまった。そこで、スランプロスを低減するために、4 種類の遅延剤を標準使用量で添加して比較した。配(調)合 No.1 の遅延剤 R1 は、15 分で 9cm もスランプが低下しており、遅延効果が得られなかった。一方、配(調)合 No.2~4 に示すように、遅延剤 R2~R4 には遅延効果が認められ、練上り直後から 30 分までのスランプの低下量が最も少ないものは R4 であった。以上の結果から、遅延剤 R4 を用いることとした。また、高性能 AE 減水剤は、SP1 の使用量が多いことから、同シリーズの製品で粉体量の多い配(調)合に適している SP2 を用いることとした。

(4) 配(調)合選定

製造の工程を厳守するためには、材齢 1 日で脱型を行う必要があった。特殊な材料を使用しているため、品質のばらつきが大きくなる可能性があったことから、脱型時強度の目標値を要求性能の 1.5 倍である 12N/mm² と設定して配(調)合選定を行うこととした。結合材質量の 20% あるいは 15% を炭酸化模擬スラッジ固形分とし、残りの結合材の 30% を普通ポルトランドセメント、70% を高炉スラグ微粉末とした。さらに、強度発現促進効果を

表-6 試験練りの結果 [スランプロス低減策]

| 配(調)合 No. | フレッシュ性状 | | | | |
|-----------|-------------|---------|-----------|------|------|
| | Con 温度 (°C) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | | |
| | | | 練上り | 15 分 | 30 分 |
| 0 | 20.9 | 3.6 | 17.5 | 9.0 | 2.0 |
| 1 | 22.0 | 2.6 | 19.0 | 10.0 | 5.5 |
| 2 | 22.0 | 2.4 | 19.5 | 18.0 | 8.0 |
| 3 | 20.6 | 1.8 | 20.0 | 17.5 | 10.5 |
| 4 | 20.4 | 2.2 | 19.5 | 18.0 | 11.0 |

有する製品用膨張材をセメント置換で 20kg/m³ 添加するケースも検討した。

検討したコンクリートの配(調)合を表-7 に、試験練りの結果を表-8 に示す。フレッシュ性状は全配(調)合が要求性能を満たしており、標準養生による圧縮強度は材齢 14 日時点で要求性能である 24.0N/mm² を概ね満足していた。一方で、脱型時強度の目標値 12.0N/mm² を満足したのは、配(調)合 No.6, 8, 9, 10 ならびに 11 の 5 配(調)合であった。これらの配(調)合の CO₂ 収支を次項に示す方法で算出し、CO₂ 収支が最も少ない配(調)合 No.6 を採用することとした。なお、膨張材入りの配(調)合は、練上りから 45 分経過しても十分な流動性を有しておりスランプロスを低減する効果も得られた。

(5) CO₂ 収支の設計値

決定配(調)合の CO₂ 収支の設計値を以下のように算出した。各使用材料の CO₂ 排出量算定のためのインベントリデータは「セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書」⁴⁾を参考にした。各炭酸化材料の CO₂ 固定量は、固体全有機炭素分析装置(熱分解-赤外線吸収法)を用いて、製造ロット毎に炭酸化前後の CO₂ 含有量を測定し、その差分から算定した。CO₂ 収支は表-9 に示す全ロットの平均値で計算した。なお、炭酸化材料の CO₂ 固定量の詳細は別の機会に報告したい。

以上より、決定配(調)合の CO₂ 収支の設計値は表-

表-7 コンクリートの配(調)合 [配(調)合選定]

| 配(調)合 No. | W/B (%) | CSP 置換率 B×% | 高性能 AE 減水剤 B×% | 遅延剤 B×% | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-----------|---------|-------------|----------------|----------|--------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| | | | | | W | B | | | | CRS | CRG |
| | | | | | | N | BS | EX | CSP | | |
| 5 | 45 | 20 | SP2 : 1.3 | R4 : 1.0 | 180 | 96 | 224 | — | 80 | 684 | 832 |
| 6 | | | SP2 : 1.8 | R4 : 1.0 | | 76 | 224 | 20 | 80 | 684 | 832 |
| 7 | | 15 | SP2 : 1.3 | R4 : 1.0 | | 102 | 238 | — | 60 | 684 | 832 |
| 8 | | | SP2 : 1.3 | R4 : 1.0 | | 82 | 238 | 20 | 60 | 684 | 832 |
| 9 | 40 | 20 | SP2 : 1.3 | R4 : 1.0 | | 108 | 252 | — | 90 | 650 | 825 |
| 10 | | | SP2 : 1.8 | R4 : 1.0 | | 88 | 252 | 20 | 90 | 650 | 825 |
| 11 | | 15 | SP2 : 1.2 | R4 : 1.0 | | 115 | 268 | — | 67 | 653 | 827 |
| 12 | | | SP2 : 1.3 | R4 : 1.0 | | 95 | 268 | 20 | 67 | 653 | 827 |

表-8 試験練りの結果 [配(調)合選定]

| 配(調)合 No. | フレッシュ性状 | | | | | | 圧縮強度 (N/mm ²) | | | |
|-----------|-------------|---------|-----------|------|------|------|---------------------------|------------------------|---------------|----|
| | Con 温度 (°C) | 空気量 (%) | スランブ (cm) | | | | 合否 | 脱型時強度 [材齢 1日] (現場封緘養生) | 材齢 14日 (標準養生) | 合否 |
| | | | 練上り | 15分 | 30分 | 45分 | | | | |
| 5 | 24 | 1.1 | 23.0 | 23.0 | 18.5 | 4.5 | 合 | 11.0 | 23.4 | 否 |
| 6 | 26 | 1.5 | 21.5 | 19.0 | 14.0 | 11.0 | 合 | 12.6 | 24.7 | 合 |
| 7 | 25 | 1.5 | 23.0 | 23.0 | 22.0 | 19.0 | 合 | 10.3 | 26.0 | 否 |
| 8 | 26 | 1.3 | 23.0 | 22.0 | 19.0 | 13.0 | 合 | 13.2 | 25.4 | 合 |
| 9 | 25 | 1.2 | 24.0 | 23.0 | 16.0 | 1.0 | 合 | 12.0 | 25.3 | 合 |
| 10 | 26 | 1.9 | 23.5 | 23.5 | 21.5 | 19.5 | 合 | 14.6 | 29.2 | 合 |
| 11 | 26 | 1.0 | 24.0 | 22.0 | 12.0 | 3.5 | 合 | 12.4 | 25.6 | 合 |
| 12 | 25 | 1.5 | 20.5 | 19.0 | 16.5 | 13.0 | 合 | 10.0 | 30.3 | 否 |

10 に示すように 42kg-CO₂/m³ と算出された。

2.5 コンクリート打設

1 回の打設量は 1.5m³ とした。プレキャスト工場の 2.5m³ 二軸強制練りミキサでコンクリートを練り混ぜた。炭酸化模擬スラッジ固形分と膨張材はあらかじめ計量しておき、人力でミキサに投入し、その他の材料は自動計量した。なお、練上りスランブが配(調)合選定時の 21.5cm 以上となるように、高性能 AE 減水剤の使用量を増減させた。打設状況を写真-4 に示す。10 回打設を行い、ツール 70 個および R 部材 40 個を製造した。

コンクリートの品質管理結果を表-11 に示す。フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度(標準養生)は、要求性能を満足していた。また、材齢 1 日の脱型時強度は配(調)合選定時よりも大きい傾向にあった。打設を実施した時期は、配(調)合選定時よりも外気温が高い時期であった。一方で、外気温が急激に低下した打設 No.6 の脱型時強度は 8.93N/mm² と低かった。このことは、強度

表-9 炭酸化材料の CO₂ 固定量

| 材料名 | CSP | CRS | CRG |
|---------------------------|-------|------|------|
| CO ₂ 固定量(kg/t) | 202.6 | 23.6 | 20.3 |

表-10 決定配(調)合の CO₂ 収支の設計値

| 配(調)合 No. | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | 計 (kg-CO ₂ /m ³) |
|------------------------------|--------------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|---|
| | W | B | | | | CRS | CRG | |
| | | N | BS | EX | CSP | | | |
| 6 | 180 | 76 | 224 | 20 | 80 | 684 | 832 | |
| 排出量 | 0.036 | 61 | 9.0 | 16 | 0 | 2.4 | 2.9 | 91 |
| 固定量 | — | — | — | — | 16 | 16 | 17 | 49 |
| CO ₂ 収支 (排出量-固定量) | | | | | | | | 42 |

※EX の CO₂ 排出原単位は N と同じと仮定
CSP は副産物を想定して環境負荷を 0
炭酸化処理にかかる CO₂ 排出量を算定対象外

表-11 品質管理結果

| 打設 No. | フレッシュ性状 | | | | 圧縮強度 (N/mm ²) | | | |
|--------|-------------|---------|-----------|----|----------------------------|------------------|----------------|----|
| | Con 温度 (°C) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 合否 | 脱型時強度 [無印:材齢 1 日] (現場封緘養生) | 材齢 14 日 (現場気中養生) | 材齢 28 日 (標準養生) | 合否 |
| 1 | 34 | 2.3 | 21.5 | 合 | 21.6 | 28.3 | 30.4 | 合 |
| 2 | 35 | 2.8 | 24.0 | 合 | 29.3 | 36.3 | 40.5 | 合 |
| 3 | 34 | 1.5 | 24.5 | 合 | 32.1[材齢 3 日] | 34.8 | 40.2 | 合 |
| 4 | 34 | 1.5 | 25.0 | 合 | 23.5 | 30.7 | 41.2 | 合 |
| 5 | 34 | 1.3 | 25.0 | 合 | 26.7 | 35.3 | 40.7 | 合 |
| 6 | 28 | 1.5 | 23.5 | 合 | 8.93 | 31.7 | 35.9 | 合 |
| 7 | 30 | 1.6 | 25.0 | 合 | 30.4[材齢 3 日] | 35.1 | 39.9 | 合 |
| 8 | 29 | 1.5 | 25.0 | 合 | 12.5 | 33.1 | 36.3 | 合 |
| 9 | 30 | 1.4 | 24.0 | 合 | 19.4 | 34.0 | 38.6 | 合 |
| 10 | 30 | 1.4 | 24.0 | 合 | 14.0 | 31.5 | 37.2 | 合 |

発現速度が温度の影響を受けやすいことを示唆しており、より詳細な検討が必要だと考えられた。

2.6 硬化コンクリートの炭酸化

硬化コンクリートの炭酸化は以下のように行った。テントの中に製造したベンチを配置してテントの隙間をできる限り密閉し、濃度 99.5vol%の CO₂ ガスを 30L/min の流量で供給した。CO₂ ガスの供給期間は 14 日間および 28 日間の 2 パターンとした。これによる CO₂ 固定量は分析中であるため、別の機会での報告としたい。



写真-4 プレキャスト工場での打設状況

3. おわりに

以上のように、資源循環と CO₂ 固定量の最大化を両立するコンクリートを用いて、プレキャスト製品の製造を行った。製造にあたっては、スランプロスが大きいことや、強度のばらつきが大きいことを考慮しつつ、CO₂ 収支ができる限り小さくなるように配（調）合設計を行った。プレキャスト工場の設備を使用して打設を 10 回行ったが、いずれの打設でもフレッシュ性状や強度などの要求性能を満足したコンクリートを出荷でき、打込み、締固めおよび脱型も予定した工程で実施できた。コンクリート材料の CO₂ 収支は資源循環材料の使用および資源循環材料への CO₂ 固定により 42kg-CO₂/m³であった。今後は CO₂ 固定量のさらなる向上と品質の安定化を図り、普及を進めたい。

謝辞

本成果は NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21023）の結果得られたものです。東京大学野口貴文教授には、考察に関

する助言をいただきました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: ライフサイクルを通じたコンクリートの CO₂ 吸収量算定に関する研究, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.74, pp.333-340, 2021.3
- 2) 福留和人, 坂本守, 谷田貝敦, 鈴木好幸, 斎藤豪: 再生細骨材の炭酸カリウム水溶液への浸漬条件が CO₂ 含有量に及ぼす影響, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, V-430, 2024.8
- 3) 吉野玲, 安部弘康, 鈴木好幸, 野口貴文: 再生骨材への効果的な CO₂ 固定方法に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 45, pp.34-39, 2023.7
- 4) 日本コンクリート工学会編: セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2024.9