

脱炭素社会に向けたコンクリート技術の開発

平田 隆 祥 西澤 彩
田中 寛 人 新杉 匡 史

Development of Concrete Technologies for a Decarbonized Society

Takayoshi Hirata Aya Nishizawa
Hiroto Tanaka Masashi Shinsugi

Abstract

This paper summarizes domestic trends regarding reduction in GHG emissions to realize a carbon-free society, as well as the countermeasure four technologies by the Obayashi Corporation for the concrete sector that has a large amount of CO₂ emissions in the industrial sector. Technologies for reducing GHG emissions in the construction industry are comprehensively evaluated in terms of the environment, cost, ease of social acceptance, and amount of GHG reduction; therefore, various methods need to be considered. Reduction technology by the Obayashi Corporation has already been applied at many construction sites. This paper introduces four GHG emission reduction technologies by the Obayashi Corporation for concrete from different perspectives. In future, we plan to expand the use of these technologies to many sites and contribute to the goal of carbon neutrality.

概 要

脱炭素社会に向け温室効果ガスの削減に関する国内の動向と、産業界でCO₂排出量の多いコンクリート分野の削減技術について大林組の取組みを紹介する。建設分野の温室効果ガスの排出量削減技術は、環境や社会の受け入れ易さ、温室効果ガスの削減量、コスト等が総合的に評価されるため、様々なアプローチで検討する必要がある。また、既に多くの現場に適用されている大林組の削減技術もある。本稿は、現在、大林組がコンクリート分野で取り組んでいる、観点の異なる4種類のCO₂排出量の削減技術を紹介する。今後、これらの削減技術を多くの現場に普及・拡大し、カーボンニュートラルを目指して貢献していく。

1. はじめに

菅前内閣総理大臣は、2020年10月の所信表明演説でカーボンニュートラル（以下、CN；Carbon Neutral）の目標を示し、2050年までに温室効果ガス（以下、GHG；Greenhouse Gas）の排出量を、国内全体でゼロにすることを宣言した。さらに、2021年4月に、2050年のCNと整合する野心的な目標として、2013年度を基準として、2030年度のGHG排出量を46%削減としていくが、これを超えて50%の高みに向けて挑戦を続けることを表明²⁾した。一方、民間部門も、近年の環境・社会・企業統治（ESG；Environment Social Governance）に連動する投資の増加の後押しもあり、科学的根拠に基づくGHG削減目標（SBT；Science Based Target）を示し、財務情報と環境リスク等の事例を開示する気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD；Task Force on Climate-related Financial Disclosures）といった国際的なイニシアティブに取り組んだ。

本稿は、このような背景のもと、建設資材の中で使用量が多く、かつ温室効果ガスのうちCO₂排出量が多いコンクリートについて、現在、大林組が取り組んでいる技術のうち4種類のCO₂排出量削減技術について述べる。

2. コンクリートのCO₂排出量と大林組の取組み2.1 コンクリートのCO₂排出量

水セメント比（以下、W/C）50%の普通コンクリートに使用する材料のCO₂排出量の計算例をTable 1に示す。この例では、コンクリート1m³当たりのCO₂排出量は256kg-CO₂/m³である。この内、セメント由来のCO₂排出量の比率は約98%を占め、セメントの使用によりCO₂排出量が増加する現状にあることが分かる。実工事では、このような材料カウントに加えて、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）でのコンクリート製造に要するCO₂排出量や、輸送のCO₂排出量も加算される。

Table 1 コンクリート材料のCO₂排出量と排出比率
CO₂ Emission Ratio of Concrete Materials

| 種類 | セメント C | 水・空気 W・Air | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 Ad. |
|--|-----------|---------------|----------|----------|------------|
| 単位数 (kg/m ³) | 330 | 165 | 800 | 1000 | 2 |
| CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³) | 250 | 0.1 | 2.7 | 2.8 | 0.3 |
| 排出比率 (%) | 97.7 | 0.1以下 | 1.1 | 1.1 | 0.1以下 |

2.2 CO₂排出量の削減方法

前述のように、コンクリート系の材料は、セメントの使用がCO₂排出量を多くする主要因となっている。このCO₂排出量の削減対策にはTable 2に分類する方法があり、複数の方法を併用する場合もある。

a)は、コンクリートの強度に余裕がある場合は可能となるが、セメントの使用量の削減には限度がある。b)は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの産業副産物でセメントの一部を置換し、2成分や3成分のセメント系材料として利用する方法である。大林組で最も適用実績が多い「クリーンクリート[®]」³⁾はこれにあたる。c)は、大気や排気ガス中のCO₂を吸収・固定化した材料を使用する方法³⁾である。自然の力を利用した木質バイオマス素材などもここに含まれている。d)は、コンクリート自体が中性化によりCO₂を吸収・固定化するが、より促進的にCO₂を吸収・固定化する材料や配(調)合を用いる方法である。e)は、ジオポリマーに代表されるように、セメントを使用しない硬化材料を用いる方法である。f)は、コンクリート製造時のエネルギー使用量の削減や、CO₂を固定するシステムを利用してCO₂排出量を削減する方法である。そのほかにもg)のように、セメントの製造エネルギーを低減する方法などである。

2.3 大林組におけるCO₂排出量削減の取組み

次章から現在、大林組が取り組んでいる4種類のコンクリート技術について述べる。

3章の技術は、Table 2に示すb)とc)との方法を併用している。生コン工場において発生する脱水ケーキは、主成分がセメント成分であるため、CO₂を吸収・固定化して炭酸カルシウム(CaCO₃)を生成し、CCU粉体としての利用が期待でき、コンクリートに利用することで、CO₂排出量と廃棄物の削減が両立できる方法である。

4章の技術は、Table 2に示すc)の方法を用いている。紙の原料であるパルプを製造する工程で発生する樹脂のリグニン⁴⁾は、木材の約3割を占める主要成分である。これらの木質バイオマスは、燃料としての使用や、廃棄後の腐朽により、樹木が固定したCO₂が大気に戻ってしまうが、コンクリートに混ぜてCO₂を長期間固定化することで、環境負荷を低減できる方法である。

5章の技術は、Table 2に示すa)とd)の方法を併用してい

る。汎用的な設備、材料でコンクリートの環境負荷を低減する手法を確立することを目的として、コンクリート中の空隙を増大させてCO₂排出量を削減するコンクリートの配(調)合設計技術である。

6章の技術は、Table 2に示すf)の方法を用いている。コンクリートの製造において、あらかじめ粉体のCa(OH)₂を添加した溶液にCO₂を注入し、CO₂を固定した溶液を用いてコンクリートを製造するシステムである。

3. コンクリートスラッジ起源のCCU粉体を混入するコンクリート技術

3.1 概要

生コン工場ではコンクリートの製造の過程で、廃棄物として脱水ケーキが発生する。脱水ケーキは、生コン工場におけるコンクリートの洗い水などのスラッジ水を濃縮し、流動性が無くなったスラッジを、機械脱水などによりケーキ状に固化したものである。廃棄物削減の観点から、脱水ケーキの利活用が検討され^(例えば4)、その一つとして、CO₂を吸収・固定したCCU粉体(CCU; Carbon dioxide Capture and Utilization)としての利用が考えられる。脱水ケーキの主成分のセメント成分にはカルシウム(Ca)が含まれており、CO₂と反応することで、CO₂を吸収・固定化した炭酸カルシウム(CaCO₃)が生成される。このように、脱水ケーキをCCU粉体として利用できれば、CO₂排出量と廃棄物の削減を両立できる。

本章では、コンクリートスラッジ起源のCCU粉体を混和材料として用いた場合のコンクリートの性状について検討した結果について報告する。

3.2 CCU粉体の概要

今回使用したCCU粉体(以下、CP)(Photo 1)は、市中の生コン工場が発生した脱水ケーキ微粉末を原料として、大気からCO₂を直接回収する技術(DAC; Direct Air Capture)によって製造したものである。具体的には、CO₂を吸収・固定化させる特殊な装置は使用せず、粉碎した脱水ケーキ微粉末を大気中に曝露することで、できるだけエネルギーを消費せず、CCU粉体を製造した。

CPのCO₂固定量は、示差熱質量分析(以下、TG-DTA)

Table 2 コンクリートのCO₂排出量削減方法
Methods to Reduce CO₂ Emissions from Concrete

| 記号 | 方法 |
|----|--|
| a) | セメントの使用量を一部削減する |
| b) | セメントをCO ₂ 排出量の小さい材料で置換する |
| c) | CO ₂ を吸収・固定化した材料を使用する |
| d) | CO ₂ を吸収・固定化する材料・配(調)合を使用する |
| e) | セメントを使用しない |
| f) | CO ₂ 排出量の小さいシステムで製造する |
| g) | その他(セメント製造エネルギーの低減など) |



Photo 1 CCU粉体の外観
Appearance of CCU Powder

の結果より166.0kg/tであった。なお、CaCO₃量は600～800°CにおけるTG-DTAの質量減少量より算出し⁵⁾、CO₂固定量はCaCO₃より算出した。その際、100°Cの質量を基準とした⁵⁾。また、CPの原料の基になるコンクリートの骨材には石灰石（主成分：CaCO₃）が使用されていないため、測定で得られたCaCO₃には、コンクリートの骨材由来が含まれていないと推察される。

3.3 試験概要

室内試験にてCPの混入量がコンクリートの性状に及ぼす影響を検討した。試験計画をTable 3に示す。コンクリートは、呼び強度30を想定し、目標スランプ18cmとした「C-18」、目標スランプフロー50cmとした「C-50」、低炭素型のコンクリートとして、結合材の質量比で普通ポルトランドセメントを25%、高炉スラグ微粉末を75%使用し、目標スランプフロー50cmとした「CB-50」の計3シリーズとした。なお、スランプフローを50cmにしたのは、CPが材料分離抵抗性に寄与する粘性の増加効果を期待した。また、低炭素型のコンクリートは、更なるCO₂削減効果を期待して実験水準に加えた。CPの混入量は0、50、100kg/m³とし、それぞれ細骨材に容積置換した。確

Table 3 試験計画の概要
Outline of Experimental Plan

| 項目 | 内容 |
|-----------|---|
| コンクリートの種類 | (1) C-18 : W/B=48.4%, C : BS=100 : 0 (質量比), 目標スランプ18±2.5cm (2) C-50 : W/B=48.4%, C : BS=100 : 0 (質量比), 目標スランプフロー50±7.5cm (3) CB-50 : W/B=40.7%, C : BS=25 : 75 (質量比), 目標スランプフロー50±7.5cm |
| CCU粉体の混入量 | (1) 0kg/m ³ , (2) 50kg/m ³ , (3) 100kg/m ³ ※C-18, C-50, CB-50にそれぞれ0, 50, 100kg/m ³ を細骨材の容積置換として混入 |
| コンクリートの品質 | (1) フレッシュ性状 ¹⁾ (スランプ, スランプフロー, 空気量, 単位容積質量, Oロート流下時間) (2) 力学特性 ²⁾ (圧縮強度 ³⁾ , ヤング係数 ⁴⁾) |

*1 : 試験方法は以下とした。スランプ : JIS A 1101, スランプフロー : JIS A 1150, 空気量 : JIS A 1128, 単位容積質量 : JIS A 1116, Oロート流下時間 : JSCE-F 512

*2 : 試験方法は以下とした。圧縮強度 : JIS A 1108, ヤング係数 : JIS A 1149

*3 : 養生方法は標準養生, 試験材齢は3, 7, 28, 91日

*4 : 養生方法は標準養生, 試験材齢は28, 91日

Table 4 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

| 材料 | 記号 | 種類と備考 |
|------|-----|---|
| 水 | W | 地下水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³) |
| 混和材 | BS | 高炉スラグ微粉末4000 (密度2.89g/cm ³) |
| | CP | CCU粉体 (密度2.10g/cm ³) |
| 細骨材 | S1 | 川砂 (表乾密度2.60g/cm ³) |
| | S2 | 砕砂 (表乾密度2.60g/cm ³) |
| 粗骨材 | G | 川砂利 (表乾密度2.64g/cm ³) |
| 混和剤 | SP1 | 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系化合物) |
| | SP2 | 高性能AE減水剤 (非ポリカルボン酸系化合物) |

認したコンクリートの品質はフレッシュ性状および力学特性であり、試験項目および試験方法はTable 3に示す通りである。

コンクリートの使用材料をTable 4, 配(調)合をTable 5に示す。CPの混入量が50, 100kg/m³の場合のCO₂固定量は順に, 8.3, 16.6kg-CO₂/m³となる。最もCO₂排出量が少いのは低炭素型のコンクリートにCPを100kg/m³混入したCB-50-100であり, その際のCO₂排出量は84.9kg-CO₂/m³となる。なお, CO₂排出量は既往の文献⁶⁾を参考にした。

3.4 試験結果および考察

3.4.1 フレッシュ性状 コンクリートのフレッシュ性状をTable 6に示す。いずれも目標のスランプ・スランプフローおよび空気量が得られ, 材料分離は確認されなかった。CPの混入量とSPの添加量の関係をFig. 1に, CPの混入量とOロート流下時間の関係をFig. 2に示す。なお, Oロート流下時間はコンクリートの見かけ上の粘性を評価するものである。CPの混入量の増加に伴い, 所定の流動性を得るために必要なSPの添加量は増大した。また, Oロート流下時間が長くなり, 粘性も高くなる傾向を示した。これは, CPの粒度が1~100μmと細かく, CPがSPを物理的に吸着したことや, 微粒分の増加に伴う粘性の増加によるものと推察される。これより, CPが材料分離抵抗性に寄与することが分かった。

Table 5 コンクリートの配(調)合
Mix Proportions of Concrete

| 記号 | W/B (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | SP1 (B ×%) | SP2 (B ×%) |
|-------------------------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|------------|
| | | W | B | | CP | S1 | S2 | G | | |
| | | | C | BS | | | | | | |
| C-18-0 ^{*1} | 48.4 | 170 | 352 | — | 0 | 710 | 125 | 932 | 0.35 | — |
| C-18-50 ^{*2} | 48.4 | 170 | 352 | — | 50 | 655 | 117 | 932 | 0.69 | — |
| C-18-100 ^{*1} | 48.4 | 170 | 352 | — | 100 | 603 | 107 | 932 | 1.86 | — |
| C-50-0 ^{*2} | 48.4 | 170 | 352 | — | 0 | 738 | 130 | 898 | 0.60 | — |
| C-50-50 ^{*2} | 48.4 | 170 | 352 | — | 50 | 686 | 120 | 898 | 1.08 | — |
| C-50-100 ^{*2} | 48.4 | 170 | 352 | — | 100 | 632 | 112 | 898 | 2.12 | — |
| CB-50-0 ^{*2} | 40.7 | 175 | 108 | 323 | 0 | 650 | 114 | 898 | — | 0.30 |
| CB-50-50 ^{*2} | 40.7 | 175 | 108 | 323 | 50 | 598 | 104 | 898 | — | 0.73 |
| CB-50-100 ^{*2} | 40.7 | 175 | 108 | 323 | 100 | 543 | 96 | 898 | — | 1.48 |

*1 : 目標スランプ : 21±2cm, 目標空気量 : 4.5±1.5%

*2 : 目標スランプフロー : 50±7.5cm, 目標空気量 : 4.5±1.5%

Table 6 フレッシュ性状
Properties of Fresh Concrete

| 記号 | スランプ (cm) | スランプフロー (cm) | 空気量 (%) |
|-----------|-----------|--------------|---------|
| C-18-0 | 20.0 | 33.5 | 3.8 |
| C-18-50 | 20.0 | 31.5 | 4.2 |
| C-18-100 | 19.0 | 29.5 | 4.2 |
| C-50-0 | — | 51.5 | 4.9 |
| C-50-50 | — | 50.5 | 5.8 |
| C-50-100 | — | 54.0 | 3.6 |
| CB-50-0 | — | 47.0 | 5.7 |
| CB-50-50 | — | 56.5 | 3.2 |
| CB-50-100 | — | 56.0 | 4.4 |

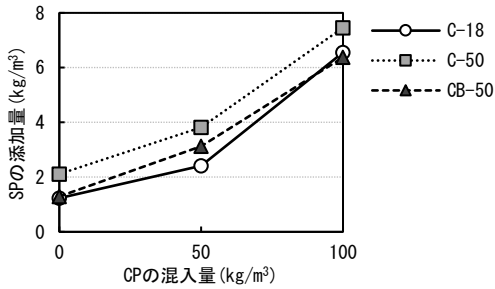


Fig. 1 CPの混入量とSPの添加量の関係
Relationship between Amount of CP and Amount of SP Addition

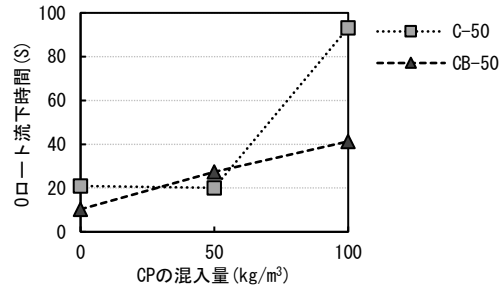


Fig. 2 CPの混入量とOロート流下時間の関係
Relationship between Amount of CP and O-funnel Flow Down Time

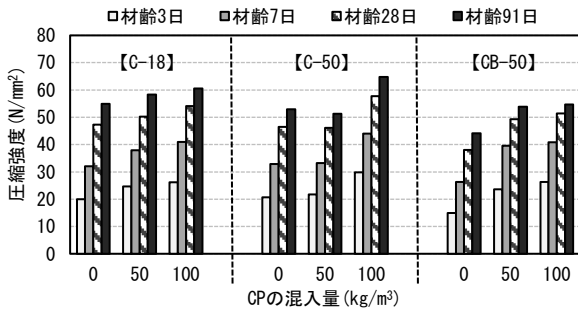


Fig. 3 CPの混入量と圧縮強度の関係
Relationship between Amount of CP and Compressive Strength of Concrete

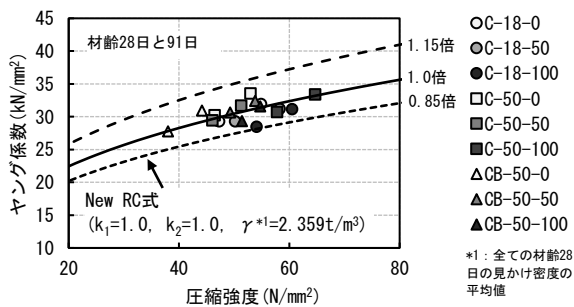


Fig. 4 圧縮強度とヤング係数の関係
Relationship between Compressive Strength and Young's Modulus

3.4.2 圧縮強度 圧縮強度をFig. 3に示す。各シリーズにおいて、CPの混入量の増加に伴い圧縮強度が増大する傾向を示した。特に、若材齢時ほどCPの混入による圧縮強度の増進が認められた。この理由として、CPが微粒子のため物理的に細骨材粒子間の空隙を充填・間詰するマイクロファイラー効果や、水和生成物の析出サイトとして寄与することでC₃Sの水和が促進されたこと^{7,8)}などが推察できる。特に高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいて、圧縮強度の増進が大きかった。これは、CPが高炉スラグ微粉末の反応を促進した⁹⁾可能性が示唆された。

3.4.3 ヤング係数 圧縮強度とヤング係数の関係をFig. 4に示す。図には、一般的にコンクリートのヤング係数を算出する際に用いるNew RC式の推定値も示した。

CPを混入した際のヤング係数は、CP無混入時と概ね同程度であり、圧縮強度のように増加する傾向はなかった。また、CPの混入量に関わらず、ヤング係数は圧縮強度の増加に伴い増加する傾向を示した。これより、CPの混入によるヤング係数への大きな影響はなかった。

3.5 まとめ

本章では、脱水ケーキにCO₂を固定化させたCCU粉体(CP)を混入したコンクリートの性状を検討した。本検討の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) CPの混入量が増加するにつれて、高性能AE減水剤の添加量は増加し、粘性は高くなった。
- 2) CPの混入量に伴って圧縮強度は増大した。特に高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは圧縮強度の増進が大きくなった。
- 3) CPの混入によるヤング係数への大きな影響はなかった。
- 4) CPを混入することで、CO₂排出量の削減効果が期待できる。

4. 木質バイオマスの利用によるコンクリートへのCO₂固定化技術

4.1 概要

本コンクリート技術は、脱炭素化を目的として、木質バイオマスを使用している。木質バイオマスの1種であるリグニン粉末(Photo 2)は、木の生長過程で大気中のCO₂を固定している。

本章では、リグニン粉末を添加したコンクリートの性状を確認するとともに、この粉末の添加で、長期間CO₂を固定化するコンクリート二次製品の製造技術について述べる。また、木質バイオマスは「使う・植える・育てる」というサーキュラーエコノミー(循環型経済)の観点から、再生可能な資源としても注目されている。

4.2 試験概要

試験に使用した材料をTable 7に、配(調)合をTable 8に示す。リグニン粉末は、細骨材に置換して使用した。



Photo 2 リグニン粉末の外観
Appearance of Lignin Powder

Table 7 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

| 材料 | 記号 | 種類と備考 |
|------|----|--|
| 水 | W | 上水道水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³) |
| 混和材 | Li | リグニン粉末 (密度1.45g/cm ³ ,含水率33.2%) |
| 細骨材 | S | 山砂 (密度2.57g/cm ³) |
| 粗骨材 | G | 砕石2005 (密度2.65g/cm ³) |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤・標準形 |

Table 8 コンクリートの配(調)合
Mix Proportions of Concrete

| 記号 | W/C (%) | s/a (%) | 単位置 (kg/m ³) | | | | | SP (C×%) |
|--------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------|----------|
| | | | W | C | Li | S | G | |
| Li-75 | 45 | 37.1 | 165 | 367 | 75 | 594 | 1036 | 1.8 |
| Li-100 | 45 | 35.4 | 165 | 367 | 100 | 550 | 1036 | 2.0 |

4.3 試験結果および考察

4.3.1 品質試験結果 リグニン粉末を添加したコンクリートの試験結果をTable 9に示す。

JIS A 1101とJIS A 1128にて測定したスランブ (SL) , 空気量 (Air) およびJIS A 1108にて測定した圧縮強度の結果から, リグニン粉末の添加により空気量がやや増加し, 圧縮強度は低下傾向であったが, コンクリート製品の品質を確保できることを確認した。また, この粉末の添加により, コンクリートの表面色は淡茶色となった。

リグニン粉末のCO₂固定量は, 水分を乾燥した後の炭素含有量の分析値から換算した試算値として, 粉末1kgあたり約2.4kgであった。

4.3.2 二次製品の製造 このコンクリートを用いて二次製品を製造した結果, Photo 3に示すように打込みや仕上げ作業は良好で, 表面色は淡茶色となった。

今後, 汎用性の高いコンクリート二次製品への適用を進めるためには, 使用実績を積み重ねるとともに, 部材のライフサイクルを通して, 長期間安定してコンクリート中にCO₂を固定できることを確認する必要があると考える。

4.4 まとめ

本章では, 脱炭素社会や環境負荷低減を目指し, リグ

Table 9 試験結果

| 記号 | SL (cm) | Air (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | | |
|--------|---------|---------|---------------------------|------|------|
| | | | 7d | 28d | 56d |
| | | | Li-75 | 13.1 | 5.2 |
| Li-100 | 11.7 | 5.2 | 14.1 | 20.6 | 22.8 |

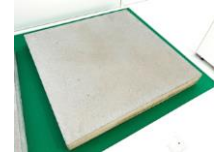
※目標スランブ: 12±2.5cm, 目標空気量: 4.5±1.5%



(1) 打込み
Concrete Placing



(2) 断面
Cross-section



(3) 平板
Flat Panel

Photo 3 コンクリート製品の製造
Manufacture of Concrete Products

ニン粉末を添加することでコンクリートにCO₂を固定化して二次製品を製造できることを確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリートの細骨材の一部を, リグニン粉末に置き換えてコンクリートを製造できることを確認した。天然資源保全の観点から, 環境負荷の低減に貢献できる。
- 2) リグニン粉末を添加したコンクリートを用いて, コンクリート製品を製造できることを確認した。
- 3) リグニン粉末を75~100kg/m³を添加すると, CO₂を180~240kg-CO₂/m³を固定できる。

5. CO₂排出量削減のために空気量を増大したコンクリート技術

5.1 概要

汎用的な設備と材料でコンクリートの環境負荷を低減する手法を確立することを目的として, コンクリート中の空隙を増大させてCO₂排出量を削減する検討を行っている。これまで, セメントペースト中の空気量を増大することで, 物質透過性が向上し中性化の進行が促進され, CO₂固定量が増大できることを明らかにした¹⁰⁾。

空気量を増大すると, フレッシュコンクリートにおいては空気泡がボールベアリングの効果を果たすことにより流動性を向上できる一方で, 硬化コンクリートの圧縮強度は低下する¹¹⁾。このため, 空気量の増加に伴う流動性の向上と圧縮強度の低下をバランスよく考慮できれば, 一般的な空気量の普通コンクリートと同等の流動性と強

度特性を有しつつ、CO₂排出量を削減するコンクリートを製造できる可能性がある。

本章では、まず、普通コンクリートと同等の圧縮強度および流動性を確保できる範囲で、空気量を増大させ、W/Cおよび単位水量を低減したコンクリート（以下、空気量増大コンクリート）の配合を検討した。次に、空気量増大コンクリートの発熱および収縮の低減効果を調べるとともに、製造時のCO₂排出量の削減効果を試算した。

5.2 試験概要

5.2.1 使用材料と配(調)合 使用材料をTable 10に、配(調)合をTable 11に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には陸砂を、粗骨材には最大寸法20mmの碎石を用いた。混和剤には高性能AE減水剤またはAE減水剤を用いた。空気量調整剤は、普通コンクリートにはAE剤を、空気量増大コンクリートにはエアモ

Table 10 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

| 種類 | 記号 | 種類, 性質 |
|------|----|---|
| 水 | W | 上水道水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³ |
| 細骨材 | S | 陸砂, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.93%, 粗粒率2.64, 実積率62.9% |
| 粗骨材 | G | 碎石, 表乾密度2.72g/cm ³ , 吸水率0.59%, 粗粒率6.60, 実積率59.6% |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系) |
| | WR | AE減水剤 |
| | AE | 空気量調整剤 |
| | FA | 起泡剤 (特殊陰イオン界面活性剤) |



Photo 4 セメントペーストの練混ぜ状況
(左: 水と起泡剤の攪拌状況, 中央: 左の攪拌後, 右: セメントペースト練上がり状況)

Cement Paste Mixing Situation

(Left: Mixing of Water and Foaming Agent;
Center: After Mixing Left; Right: Cement Paste)

ルタル用の起泡剤を用いた。

比較する普通コンクリートの配合は、空気量4.5%、W/C60%、単位水量162kg/m³および細骨材率 (s/a) を46%とした。空気量増大コンクリートは、空気量を3倍の13.5%とし、普通コンクリートと同等の圧縮強度および流動性が得られる配合を選定した。

5.2.2 練混ぜ方法および試験体の作製 普通コンクリートの練混ぜは、JIS A 1138に準拠した。強制二軸式ミキサ (容量60L) を用い、1バッチの練混ぜ量は60Lとした。空気量増大コンクリートの練混ぜは、まず、水および起泡剤を投入してハンドミキサで30秒間攪拌した後、セメントとともにホバートミキサ (容量50L) に投入して、90秒間練り混ぜてセメントペーストを製造した (Photo 4) その後、セメントペーストと骨材を強制二軸練りミキサに投入して、60秒間練り混ぜた。

コンクリートの練混ぜ後、フレッシュ性状、圧縮強度、断熱温度上昇量および乾燥収縮ひずみを把握するための試験体を作製した。

5.3 試験結果および考察

5.3.1 フレッシュ性状 空気量増大コンクリートは、W/Cを45%に低減することで、W/C60%の普通コンクリートと概ね同等の圧縮強度を確保できた (Table 11)。また、高性能AE減水剤の使用や細骨材率を小さくすることにより、普通コンクリートに比べて単位水量を60kg/m³、単位セメント量を43kg/m³それぞれ低減できた。スランプ試験の状況をPhoto 5 に示す。細骨材率を調整したことによる材料分離は認められず、良好な状態であった。また、

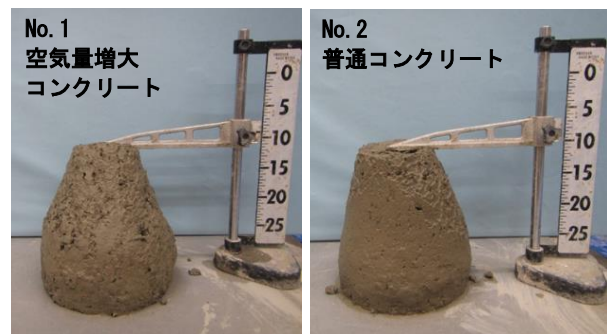


Photo 5 スランプ試験状況
Slump Test

Table 11 コンクリートの配(調)合
Mix Proportions of Concrete

| コンクリート種類 | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 混和剤添加量 (C×%) | | | | 試験結果 | | | | |
|-------------|-------------|-----------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|--------------|------|-------|------|-----------|---------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|
| | | | | | W | C | S | G | SP | WR | AE | FA | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 単位容積質量 (kg/m ³) | 凝結時間 (始発-終結) (h) | 圧縮強度標準養生28日材齢 (N/mm ²) |
| 空気量増大コンクリート | 8±2.5 | 13.5±1.5 | 45.0 | 38.0 | 102 | 227 | 683 | 1166 | 1.80 | - | - | 0.08 | 9.0 | 13.7 | 2172 | 6.5-9.1 | 34.0 |
| 普通コンクリート | 8±2.5 | 4.5±1.5 | 60.0 | 46.0 | 162 | 270 | 846 | 1039 | - | 0.25 | 0.004 | - | 8.5 | 4.5 | 2325 | 6.0-8.4 | 37.0 |

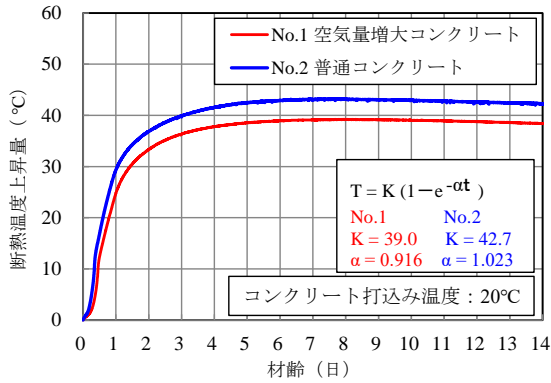


Fig. 5 断熱温度上昇量
Adiabatic Temperature Rise

凝結時間も同程度であった。

5.3.2 断熱温度上昇量 断熱温度上昇量の測定結果をFig. 5に示す。空気量増大コンクリートの断熱温度上昇量は、普通コンクリートに比べて約4°C（10%程度）低減した。一般に、単位セメント量を10kg/m³低減すると断熱温度上昇量は約1°C低くなるといわれており¹²⁾、試験結果は妥当と考えられる。空気量増大コンクリートは、マスコンクリートの施工時における温度ひび割れ抑制にも効果的と考えられる。

5.3.3 乾燥収縮ひずみ 乾燥収縮ひずみの測定結果をFig. 6に示す。試験は、JIS A 1129-3に準じて行った。空気量増大コンクリートの長さ変化率は普通コンクリートと比較して70μ（15%程度）小さくなった。単位水量が小さいため、コンクリートからの水の逸散量も少なくなったためと考えられる。空気量増大コンクリートは、長期的な収縮ひび割れの抑制にも効果的であることを示す結果である。

5.4 CO₂排出量削減効果の試算

コンクリート製造時のCO₂排出量の大半はセメントに由来するものであるため¹³⁾、その削減量は、単位セメント量を低減した量から試算できる。空気量増大コンクリートは、普通コンクリートと比較して単位セメント量を43kg/m³低減したことから、セメント1kgあたりのCO₂排出量原単位¹⁴⁾755g-CO₂/kgを用いると、CO₂排出量を約32kg-CO₂/m³削減できると試算される。

今後、製造時のCO₂排出量のみならず、供用中の中性化によるCO₂固定量を考慮したライフサイクルCO₂の算定方法の確立を目指す。さらに、空気量を増大することで所定の強度と流動性を有しつつ、ライフサイクルCO₂を最小にできるコンクリートの配合設計方法を検討する予定である。

5.5 まとめ

本章では、特別な設備や材料を用いることなくCO₂排出量を削減できる手法を開発するため、空気量を増大させたコンクリートについて基礎的な検討を行った。得ら

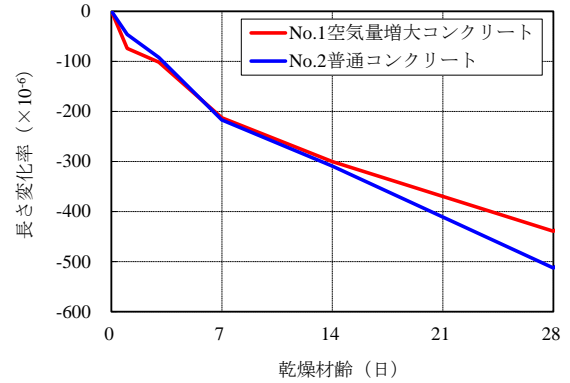


Fig. 6 長さ変化率
Length Change Rate

れた知見を以下に示す。

- 1) 水セメント比60%の普通コンクリートに対して、空気量を3倍にして水セメント比を15%低減することで、同等の圧縮強度を有する空気量増大コンクリートが得られた。
- 2) 空気量増大コンクリートは、高性能AE減水剤の使用や細骨材率の調整により、普通コンクリートと同等の流動性を確保できた。
- 3) 空気量を増大した効果により、単位水量を60kg/m³、単位セメント量を42kg/m³低減でき、コンクリートの製造時のCO₂排出量を32kg-CO₂/m³削減できた。
- 4) 単位水量およびセメント量を低減することで、収縮ひずみおよび水和反応に伴う発熱を低減できた。

6. CO₂を固定した練混ぜ水を用いたコンクリート技術

6.1 概要

生コン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、大掛かりな設備を追加することなく、CO₂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CO₂を噴射する取組み等も検討されている¹⁵⁾が、研究事例は少ない。練混ぜ水にCO₂を取り込む手法も有効と考えられるが、単に炭酸水を練混ぜ水に用いるだけではCO₂が大気中へ容易に放出するため、コンクリート中にCO₂を固定化するのは困難である。一方で、水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) 溶液は、CO₂と反応しCaCO₃を生成するため、溶液中にCO₂を安定した状態で固定できる。

そこで、著者らは前報¹⁰⁾にて、あらかじめ粉体のCa(OH)₂を添加した溶液にCO₂を注入し、CO₂を固定した溶液を練混ぜ水（以下、CO₂固定練混ぜ水）に用いたセメントペーストに関する試験を行い（Fig.7中の点線部分）、CO₂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。

本章では、前報の知見を踏まえ、Fig. 7に示すフローで

製造するCO₂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やCO₂排出量削減効果の試算結果について報告する。

6.2 試験概要

使用材料をTable 12に、コンクリートの配(調)合をTable 13に示す。練混ぜ水には、上水道水もしくはCO₂固定練混ぜ水を用いた。No.1は一般的な土木工事で用いられるコンクリートを想定した配(調)合とした。なお、CO₂固定練混ぜ水にはCaCO₃粒子が含まれているため、セメントとCaCO₃粒子を合計した粉体に対する上水道水の質量比(以下、W/P)が、No.1の上水道水のみを用いた場合と同じになるように設定した。

CO₂固定練混ぜ水の作製方法は次に示す通りである。まず、上水道水に濃度1mol/LとなるようにCa(OH)₂試薬を添加してCa(OH)₂溶液を作製した。その後、CO₂ガスシリンダーを用い、市販の炭酸水メーカーによりCO₂を注入してCO₂固定練混ぜ水を作製した。CO₂注入量は、溶液の質量が44g/L(1molのCO₂)増加することで確認した。

練混ぜには強制二軸ミキサを用いた。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。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。

コンクリート練混ぜ後、強度特性(圧縮強度)、耐久性(凍結融解抵抗性、塩分浸透抵抗性)を検討するための供試体採取した。試料採取の翌日に脱型し、所定の材齢まで20°Cで水中養生とした。

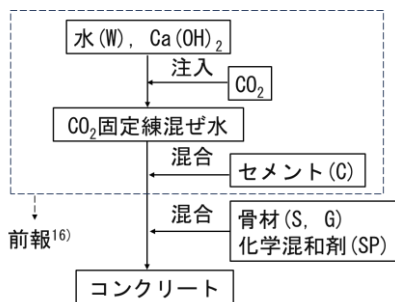


Fig. 7 CO₂固定練混ぜ水を用いたコンクリートの製造フロー

Manufacturing Flow of Concrete Using Mixing Water with Carbon Dioxide Absorption

6.3 試験結果および考察

6.3.1 圧縮強度

圧縮強度の試験結果をFig. 8に示す。CO₂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)₂溶液にCO₂を注入することで生成したCaCO₃粒子が圧縮強度の増加に寄与することを示しており、前報で得られた知見と一致した。言い換えると、CaCO₃粒子の生成により、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。前報のセメントペーストでの検討において、圧縮強度増加の要因はCO₂固定練混ぜ水を用いることで、カルシウムアルミネート系水和物の生成量が増大し、硬化組織が緻密化され空隙率が小さくなるためと報告している¹⁶⁾。今回のコンクリートの試験結果も、同様の理由によるものと考えられる。

今回の試験結果を踏まえると、CO₂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セメント量はNo.2の配合よりもさらに低減することが可能と考えられ、さらなるCO₂削減に繋がることも期待できる。

Table 12 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

| 材料 | 記号 | 種類と備考 |
|----------|---------------------|---|
| 水 | W | 上水道水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³) |
| 水酸化カルシウム | Ca(OH) ₂ | 試薬(特級) |
| 炭酸カルシウム | CaCO ₃ | CO ₂ 固定練混ぜ水に含まれるCaCO ₃ 粒子 |
| 細骨材 | S | 陸砂(密度2.57g/cm ³) |
| 粗骨材 | G | 碎石2005(密度2.72g/cm ³) |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤またはAE減水剤 |

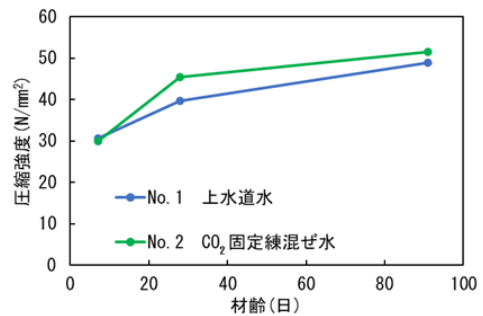
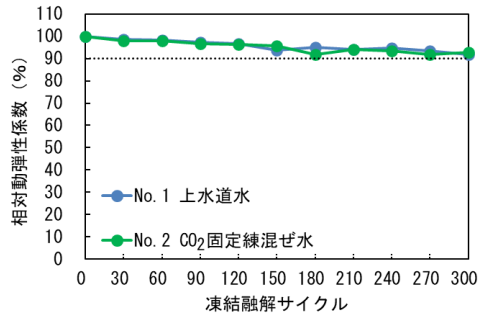


Fig. 8 圧縮強度
Compressive Strength of Concrete

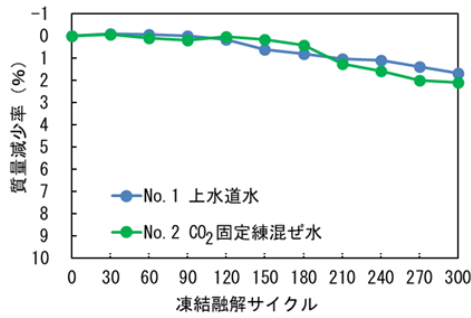
Table 13 コンクリートの配(調)合
Mix Proportions of Concrete

| No. | 練混ぜ水の種類 | W/P* (%) | s/a* (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | |
|-----|------------------------|----------|----------|-------------------------|-------------------|-----|-----|------|
| | | | | W | CaCO ₃ | C | S | G |
| 1 | 上水道水 | 50.0 | 46.0 | 160 | 0 | 291 | 831 | 1032 |
| 2 | CO ₂ 固定練混ぜ水 | | | 160 | 18 | 273 | 830 | 1031 |

*P(粉体) = C + CaCO₃ s/a=細骨材率



a) 相対動弾性係数



b) 質量減少率

Fig. 9 凍結融解試験結果

Freeze and Thaw Test Results

6.3.2 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Fig. 9にそれぞれ示す。CO₂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た。したがって、先述のように、CO₂固定練混ぜ水を用いることで、硬化組織が緻密化できていることから、凍結融解抵抗性も良好な結果が得られたと推察される。

6.3.3 塩分浸透抵抗性

濃度10%のNaCl溶液に91日間浸漬させた後の塩分浸透試験結果をFig. 10に示す。CO₂固定練混ぜ水を用いた場合の塩分浸透深さは17.0mm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。圧縮強度が増加した理由と同様、CO₂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、塩分浸透抵抗性が大きくなったと推測される。

以上より、CO₂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を確認できた。

6.4 CO₂排出量削減効果の試算

今回検討したTable 13に示すCO₂固定練混ぜ水を用いたコンクリートのCO₂削減効果を試算した。水、セメント、骨材および消石灰(粉体のCa(OH)₂)を製造する際のCO₂排出量は既往の文献^{16),17)}を参考にした。CO₂固定練混ぜ水を用いたコンクリートのCO₂排出量は、消石灰の使用に伴い約8kg-CO₂/m³増えるが、CO₂固定量およびセメ

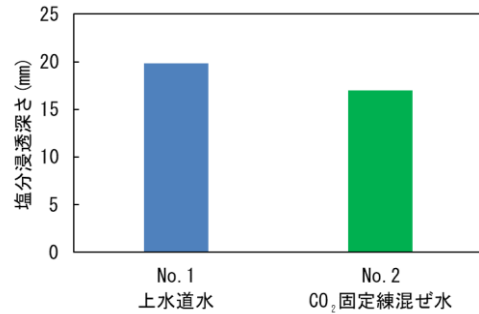


Fig. 10 塩分浸透試験結果

Salt Permeation Test Results

ント量の削減により約22kg-CO₂/m³低減できるため、結果として上水道水を用いた普通コンクリートに対して約14kg-CO₂/m³削減できると試算された。なお、本検討では使用材料の製造時に排出されるCO₂のみを対象とし、練混ぜ水へのCO₂注入、練混ぜ、運搬、施工過程で排出されるCO₂は試算に含めない。

今後は、建設現場で発生するスラッジ水にCO₂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、CO₂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。

6.5 まとめ

本章では、CO₂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) CO₂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、凍結融解、塩分浸透に対する抵抗性は同等ないしはそれ以上であった。
- 2) CO₂固定練混ぜ水を用いることで、上水道水を用いた普通コンクリートと同等の品質を確保したうえで、CO₂排出量を約14kg-CO₂/m³削減できると試算した。

7. おわりに

本稿は、脱炭素社会の実現に貢献するため、建設資材でGHG排出量の多いコンクリート材料のCO₂排出量を削減する4種類の方法について報告した。この分野の様々な技術手法は、今後評価が確立されると考える。各技術をTable 14に整理した。

最初に、①生コン工場から発生する脱水ケーキにCO₂を固定化したCCU粉体を利用する技術を報告した。本技術は、CO₂排出量と廃棄物の削減を両立できる。次に、②パルプの製造工程で発生する木質バイオマスであるリグニンを利用し、コンクリート中へのCO₂固定と、細骨材使用低減による環境負荷低減、サーキュラーエコノミー(循環型経済)に貢献する技術を報告した。また、適用が容易な技術として、③コンクリート中の空気量を増大させ

Table 14 4種類のCO₂排出量削減技術
Four Types of CO₂ Emission Reduction Technologies

| 削減技術 | 特長 | CO ₂ 削減量 |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| コンクリートスラッジ起源のCCU粉体の混入 | CO ₂ 排出量と廃棄物の削減を両立 | 16kg-CO ₂ /m ³ |
| 木質バイオマスの添加によるCO ₂ 固定化 | 環境負荷低減, サークュラーエコノミーに貢献 | 65kg-CO ₂ /m ³ |
| CO ₂ 排出量削減を目的とした空気量の増大 | 汎用設備で環境負荷を低減 | 32kg-CO ₂ /m ³ |
| CO ₂ を固定した練混ぜ水の使用 | 簡易設備で練混ぜ水を製造しCO ₂ 排出量を低減 | 14kg-CO ₂ /m ³ |

ることで、コンクリート製造時のCO₂排出量を削減できるコンクリート配(調)合技術を報告した。

最後に、④大掛かりなコンクリートプラント設備を必要とせず、CO₂を固定した練混ぜ水を用いたコンクリート技術により、CO₂を削減できることを報告した。

今後、様々な観点のコンクリート技術やその組合せ技術を駆使し、多くの関係者の皆様と連携しながら、より良い脱炭素社会の実現に向けて貢献していく。

謝辞

CCU粉体の技術は「静岡DACプロジェクト」(タケ・サイト(株), (株)大林組, 鈴与商事(株), MUCC商事(株), 静岡市)の一環として実施しました。リグニン技術は(株)フローリック, 日本製紙(株)の皆様にご協力いただきました。空気量を増大させたコンクリート技術と、CO₂を固定した練混ぜ水をコンクリートに用いる技術は、共同研究先の広島大学河合研至教授よりご指導を賜りました。

関係の皆様は、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 総理官邸:第203回国会・菅内閣総理大臣所信表明演説, 2020.10
- 2) 総理官邸:第45回地球温暖化対策推進本部, 議事要旨, 2021.4
- 3) 平田隆祥, 新村亮, 杉本英夫:持続可能な社会発展を環境配慮材料の使用で貢献するセメント・コンクリート系材料の取り組み, 土木施工, pp.112-115, 2022.11
- 4) 佐藤嘉昭, 劉嘉銘, 清原千鶴, 末本千廣:微粉碎乾

燥スラッジ(PDS)を用いた高流動コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.217-222, 2001

- 5) 池尾陽作, 竹内勇斗, 片村祥吾, 奈良知幸:コンクリート塊から発生した微粉によるCO₂固定およびCO₂固定微粉を用いたモルタルの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1150-1155, 2022
- 6) 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の設計・施工指針(案)・同解説, p.218, 2017
- 7) 日本コンクリート工学協会:コンクリートスラッジの有効利用に関するシンポジウム, 1996.5
- 8) 村上里渚子:石灰石微粉末, セメント・コンクリート, No.880, pp.53-56, 2020.6
- 9) 太田健司, 吉田亮, 齊藤和秀, 吉澤千秋:副産物石灰石微粉末を外割添加したコンクリートのブリーディング性状および各種硬化物性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1573-1578, 2013
- 10) 西澤彩, 桜井邦昭, 新杉匡史, 河合研至:コンクリート中の空気量が供用時のCO₂固定量に与える影響, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1603-1608, 2024
- 11) 濱幸雄, 緒方英彦, 林大介, 阿波稔, 湯浅昇, 新大軌:コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, コンクリート年次論文集, Vol.38, No.1, pp1-10, 2016
- 12) 土木学会:2022年度制定コンクリート標準示方書設計編, pp.339-348, 2022
- 13) 日本建設業連合会:低炭素型コンクリートの普及に向けて, No.0237, pp.1-6, 2016.4
- 14) セメント協会:セメントのLCIデータの概要, p.8, 2024.4
- 15) 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
- 16) 新杉匡史, 桜井邦昭, 石関嘉一:CO₂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
- 17) 環境省HP: https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghgmr/methodology/material/methodology_2A2_2020.pdf, (参照 2023-11-12)