

# カーボンニュートラル社会の実現に向けた コンクリート材料の開発

「クリーンクリート<sup>®</sup>」, 「クリーンクリートN<sup>®</sup>」

田中寛人・神代泰道・並木憲司

カーボンニュートラルの実現に向けて、CO<sub>2</sub>排出量を削減したコンクリートの開発が望まれている。2010年には、セメントの大部分をCO<sub>2</sub>排出量が少ない高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置き換えることで、一般的なコンクリートに対して、CO<sub>2</sub>排出量を最大80%程度削減できる低炭素型のコンクリートを開発し、多くの建設現場で適用している。2022年には、CO<sub>2</sub>排出量を最大120%程度削減できるコンクリートも開発した。CO<sub>2</sub>を吸収し固定化した粉体（CCU粉体）を低炭素型のコンクリートに混ぜ合わせ、混入量によってCO<sub>2</sub>の排出量を差し引きゼロから、さらにマイナスにできる。実証実験を実施し、2023年には初適用を予定している。本稿では、これらの技術について報告する。

キーワード：コンクリート、カーボンニュートラル、カーボンネガティブ、CCU粉体、低炭素

## 1. はじめに

近年、世界的に地球温暖化対策に関する取り組みが加速しており、地球温暖化に影響を及ぼす温室効果ガス、特に、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の低減は、全世界に課せられた重要な課題である。我が国においては、2020年10月の臨時国会にて、2050年までに温室効果ガスの排出量を全体としてゼロ、すなわちカーボンニュートラルによる脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された。

建設業界においては、エネルギーの消費量やCO<sub>2</sub>の排出量が大きく、コンクリート関連産業は国内全体のCO<sub>2</sub>排出量の約4%を占めるとされる<sup>1)</sup>。そのため、セメント・コンクリート分野のCO<sub>2</sub>排出量の削減は、国内における総CO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく貢献すると考えられる。

こうした中、カーボンニュートラルの実現に貢献するコンクリート技術の開発が期待されている。近年、環境負荷低減を目的として、セメント量を削減した低炭素型のコンクリートが開発されるようになってきた。2010年に、筆者らは、セメントの大部分をCO<sub>2</sub>排出量が少ない高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置き換えたコンクリート「クリーンクリート<sup>®</sup>」（以下、従来の環境配慮型コンクリート）を開発した<sup>2)</sup>。また、2022年には、更なるカーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術として、従来の環境配慮型コンクリートよりCO<sub>2</sub>排出量を削減した「クリーン

クリートN<sup>®</sup>」（以下、新規の環境配慮型コンクリート）を開発した<sup>3)</sup>。本稿では、これらのコンクリートの特徴や適用事例などについて報告する。

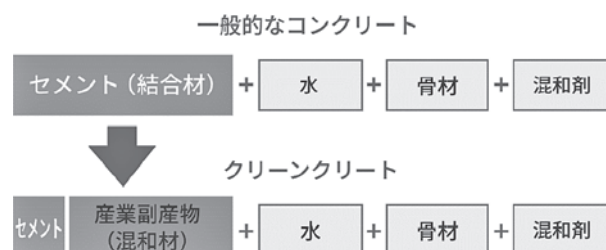
## 2. 従来の環境配慮型コンクリート

### (1) 概要

従来の環境配慮型コンクリートは、結合材のうち、セメントの混合割合を40%以下とし、その他をCO<sub>2</sub>排出量が少ない産業副産物などで多量に置き換えたコンクリートである（図—1）。一般的なコンクリートに比べて、CO<sub>2</sub>排出量を最大80%程度低減できる。

### (2) CO<sub>2</sub>排出量

従来の環境配慮型コンクリートの大きな特徴として、CO<sub>2</sub>排出量が少ないことが挙げられる。コンクリートの材料に起因するCO<sub>2</sub>排出量は、セメントによるものが最も大きい（表—1）。そのため、CO<sub>2</sub>排出量を削減する観点からは、結合材に占めるセメントの混



図—1 従来の環境配慮型コンクリートの材料構成

表一 1 コンクリートを構成する材料のCO<sub>2</sub>排出量<sup>4)</sup>

材料	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
ポルトランドセメント	7.72 × 10 <sup>2</sup>
高炉スラグ微粉末	35.6
フライアッシュ	29.0
水	0
砂利・砂	4.90
碎石・砕砂	3.90
混和剤 (ポリカルボン酸系)	3.50 × 10 <sup>2</sup>

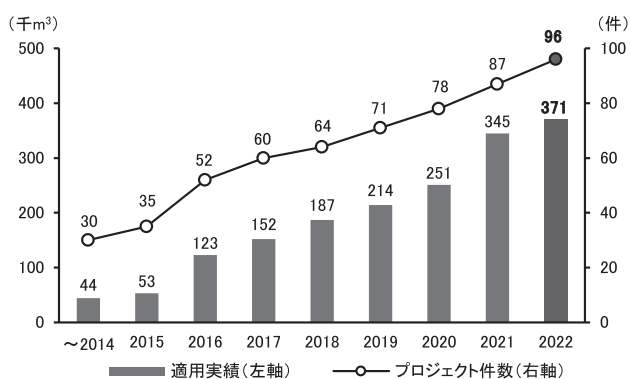
合割合をできるだけ減らすことが重要である。

従来の環境配慮型コンクリートは、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末などの産業副産物を、結合材の60%以上使用している。産業副産物としては、JIS A 6206に適合する高炉スラグ微粉末4000を主に使用する。製造・施工性能や、材料特性などを考慮すると、高炉スラグ微粉末の割合を75%程度とした調査を最も多く適用している。なお、このときのCO<sub>2</sub>排出量の削減効果は、呼び強度によって多少の差異はあるものの、結合材にセメントを100%使用した一般的なコンクリートに対して65%程度である<sup>5)</sup>。

### (3) 適用事例

従来の環境配慮型コンクリートの圧縮強度などの物性は一般的なコンクリートと同等である。そのため、建築・土木に関わらず、一般的なコンクリート構造物に広く用いることができ、コンクリート製品および現場打ちコンクリートのどちらにも適用可能である。

2023年1月末までの適用件数は約100件であり(図一2)、適用実績のうち、8割以上を建築物の基礎、基礎梁およびマットスラブに適用している。主な理由としては、部材断面が大きく、温度ひび割れ発生対策の必要な部材に、低発熱型セメントを使用したコンクリートの代替として適用できるためである。さらに、適用によってコストへの影響を小さくすることも期待



図一2 適用実績

できる。また、中性化の進行が速くなる傾向<sup>6)</sup>があるが、基礎等の部材は、土に接する面積が大きく中性化のおそれも小さいため適用しやすい。最近では、温度ひび割れ対策として、一般的な低発熱型のセメントが流通していない地域の大型の建設工事にも約9万m<sup>3</sup>適用している<sup>7)</sup>。

一方、今までは、中性化の進行が速くなるため、地上構造物へ適用する場合は、中性化の進行を考慮して、かぶり厚さを設計値よりも大きくするという対策が必要であった。そのため、地上構造物への適用は進んでいなかった。しかし、地上構造物への普及拡大を目指し、耐久性に優れるクリヤ塗料<sup>8)</sup>により中性化抵抗性を付与することで、最近では、コンクリート打放し壁部材にも適用できるようになった<sup>9)</sup>(写真一1,2)。

## 3. 新規の環境配慮型コンクリート

### (1) 概要

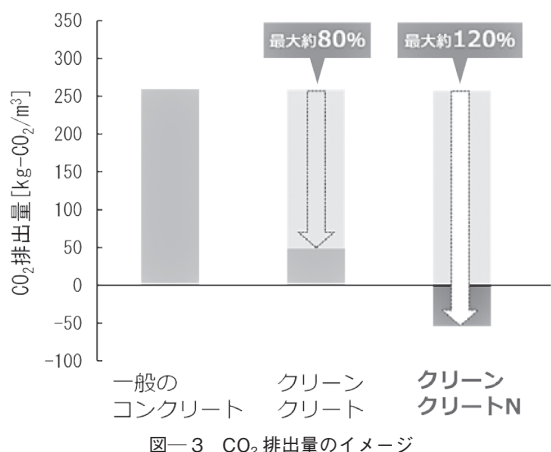
新規の環境配慮型コンクリートは、CCU粉体(Carbon dioxide Capture and Utilization: CO<sub>2</sub>を回収・利用した粉体)を従来の環境配慮型コンクリートに混ぜ合わせたコンクリートである。CCU粉体の混入量によってCO<sub>2</sub>の排出量を差し引きゼロ(カーボンニュート



写真一1 地上構造物への打込み状況



写真一2 地上構造物への適用事例



図一三 CO<sub>2</sub> 排出量のイメージ

ラル) から, さらにマイナス (カーボンネガティブ) にできる (図一三)。

### (2) 開発の経緯

カーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術として, 現在は, 結合材に占めるセメントの混合割合を減らした低炭素型のコンクリートが広く使用されている。しかし, 低炭素型のコンクリートはCO<sub>2</sub>を排出する材料のみで構成されているため, それのみでは, カーボンニュートラルを達成することはできない。そこで, 結合材中の混和材または細骨材の一部を, CO<sub>2</sub>を吸収・固定したCCU粉体に置き換えることで, カーボンネガティブまで達成が可能なコンクリートを開発した。

### (3) CO<sub>2</sub> 排出量

現在使用しているCCU粉体は, 遠心成形品の製造工場において排出されるスラッジ水に, 同工場における蒸気養生の際に発生する排気ガスを吹き込んで生成させた軽質炭酸カルシウム<sup>10)</sup>である(写真一三)。既に実用化されているものであり, CO<sub>2</sub>固定量は390 kg-CO<sub>2</sub>/tと試算されている。呼び強度にもよる



写真一三 CCU粉体

が, このCCU粉体を細骨材の代わりに200~250 kg/m<sup>3</sup>程度混入することで, カーボンニュートラルを達成できる。また, このCCU粉体はコンクリート産業から発生するセメント系廃棄物を原料としている。そのため, CO<sub>2</sub>の排出量の削減と同時に廃棄物の削減にも貢献できる。

### (4) 適用に向けて

新規の環境配慮型コンクリートは従来の環境配慮型コンクリートと同等以上の圧縮強度を有している。また, コンクリート製品だけでなく, コンクリートプラントでの練混ぜや現場打設ができ, コンクリート構造物の材料として適用可能である。加えて, 高流動コンクリートとすることで打込み作業の省力化も図れる。

一方, このようなCCU粉体を用いたコンクリートの規格はまだ整備されておらず, 構造物として適用するのは難しい。そこで, 現在は非構造部材での適用を進めている。既に, コンクリートプラントにて練混ぜを行い, 大型の版状・壁状の試験体の打設や, コンクリート製品のモックアップ試験体を作製し, 製造, 施工性能, 品質などを確認している。ここでは, その実証実験を紹介する。

#### (a) その1 壁試験体

品質や施工性を確認するため, 実機試験にて壁状のモックアップ試験体(1,000×1,200×厚さ200 mm)(以下, 壁試験体)を作製した。コンクリートの使用材料を表一2に, 調合を表一3に示す。呼び強度30の従

表一2 コンクリートの使用材料(その1)

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3.16 g/cm <sup>3</sup> )
混和材	BS	高炉スラグ微粉末4000(密度2.89 g/cm <sup>3</sup> )
	CP	CCU粉体(密度2.46 g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	混合砂(山砂:砕砂=70:30(質量比)) (混合密度2.62 g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G	碎石2005(石灰石, 表乾密度2.70 g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	SP	高性能AE減水剤

表一3 コンクリートの調合(その1)

記号	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (B×%)
		W	B		CP	S	G	
			C	BS				
CP-0	43.2	175	101	304	-	789	923	1.5
CP-200	43.2	175	101	304	200	616	923	3.0

CP-0: 目標スランプフロー: 50 cm, 目標空気量: 4.5%

CP-200: 目標スランプフロー: 50 cm, 目標空気量: 3.0%



来の環境配慮型コンクリート（記号：CP-0）をベースとし、ベースに細骨材置換としてCCU粉体を200 kg/m<sup>3</sup>混入した新規の環境配慮型コンクリート（記号：CP-200）を検討した。文献<sup>4)</sup>、<sup>10)</sup>より算定した結果、CO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ98.6 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>、21.9 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>である。市中のレディーミクストコンクリート工場の実機ミキサ（二軸強制練りミキサ、公称容量6 m<sup>3</sup>）にてコンクリートを練り混ぜ、トラックアジテータにて打込み場所へ運搬した。CP-200は粘性が非常に高く、練混ぜが困難と予想されたが、問題なく行えた。コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す（写真-4）。所要の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。壁試験体への打込みはバケツ打ち（計3層）とし、層ごとに内部振動機を用いて締め固めた。打込みは問題なく行うことができ（写真-5）、仕上げ処理も通常の高強度コンクリートと同様に行うことができた。脱型後の壁試験体を写真-6に示す。表層にひび割れは確認されなかった。また、品質の一つとして、圧縮強度試験の結果を図-4に示す。CCU粉体を混入した場合、無混入時に比べて圧縮強度が増加する傾向を示した。これより、CCU粉体の混入量に応じて結合材量を低減でき、CO<sub>2</sub>排出量をさらに削減できる可能性が示唆された。

(b) その2 コンクリート製品のモックアップ試験体  
コンクリート製品での適用を目的として、コンクリート製品工場にてモックアップ試験体(1,800×4,050

表-4 フレッシュ性状・圧縮強度の結果（その1）

記号	スランプフロー (cm)	500 mm フロー到達時間 (秒)	フローの流動停止時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	材齢28日圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
CP-0	56.0	4.1	19.0	4.9	17	49.0
CP-200	48.5	-	21.0	3.9	21	66.7

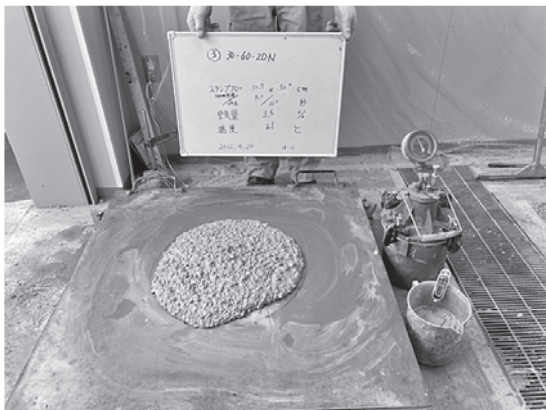


写真-4 フレッシュ性状（その1）

×厚さ200 mm)を作製した。コンクリートの使用材料を表-5に、調合を表-6に示す。文献<sup>4)</sup>、<sup>10)</sup>より算定した結果、CO<sub>2</sub>排出量は-4.0 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>である。コンクリートの練混ぜには実機ミキサ（二軸強制練りミキサ、公称容量1.67 m<sup>3</sup>）を用い、2バッチ練り混ぜた。コンクリートのフレッシュ性状を表-7に示す。所要の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。打込みはバケツ打ちとし、バッチ毎に内部振動機を用いて締め固めた（写真-7）。前述の壁試験体と同様に打込みや仕上げ処理



写真-5 打込み状況（その1）

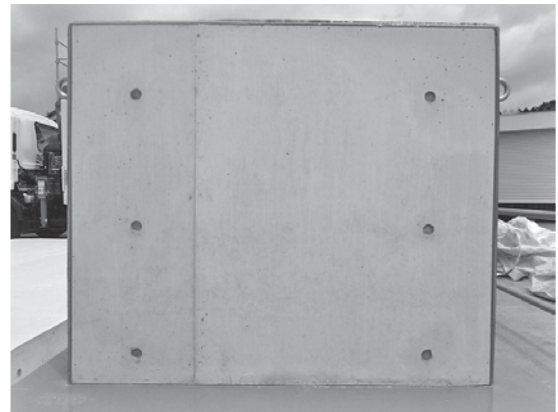


写真-6 脱型後の状況（その1）

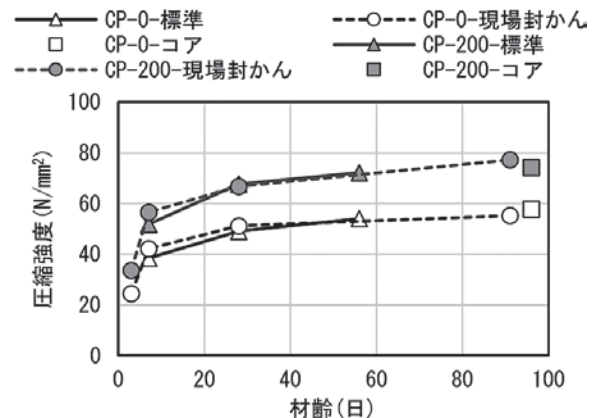


図-4 圧縮強度（その1）

表-5 コンクリートの使用材料 (その2)

材料	記号	種類と備考
水	W	地下水
セメント	C	早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> )
混和材	BS	高炉スラグ微粉末 4000 (密度 2.89g/cm <sup>3</sup> )
	CP	CCU 粉体 (密度 2.46 g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	砕砂 (硬質砂岩, 密度 2.67 g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G	砕石 2005 (硬質砂岩, 表乾密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤

表-6 コンクリートの調合 (その2)

記号	W/B (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (B × %)
		W	B		CP	S	G	
			C	BS				
CP-220	50.0	163	82	245	220	668	915	2.9

目標スランプフロー: 60 cm, 目標空気量: 4.5%

表-7 フレッシュ性・圧縮強度の結果 (その2)

記号	スランプフロー (cm)	500mm フロー到達時間 (秒)	フローの流動停止時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
CP-220	66.5	14.1	76.3	4.2	23	55.5

1 バッチ目の結果



写真-7 打込み状況 (その2)

は問題なく行うことができた。また、脱型後の状況を写真-8に示す。壁試験体と同様にひび割れなどもなく、強度発現性も同様であった。

2023年3月には、建設現場への初適用を計画しており、これらの実証実験を通して十分なデータを取得することができた。

#### 4. おわりに

本稿では、カーボンニュートラル社会の実現に貢献するコンクリート技術を紹介した。



写真-8 脱型後の状況 (その2)

現在開発されているコンクリート技術は、既に実構造物へ適用できる技術と、今後、規格が必要な技術に分けられる。カーボンニュートラルを達成しうるコンクリート、例えばCO<sub>2</sub>を固定化した材料を混入したコンクリートなどに対しては、十分な規格がなく、直ちに構造物として適用するのは難しい。そのため、これらの制度を早期に整えることが望まれる。

また、コンクリート技術において、カーボンニュートラルを達成するには、従来のコンクリート技術だけではなく、CO<sub>2</sub>を固定化した材料やコンクリートにCO<sub>2</sub>を固定化させる技術などの開発が必要不可欠となる。これらは様々な種類が考えられ、性能やコストもそれぞれ異なると予想される。今後、コンクリート分野だけでなく、異業種とも連携を行い、技術開発を進めていくことが、カーボンニュートラル社会の実現に向けて重要であると考えられる。

J[CMA]

#### 《参考文献》

- 1) コンクリート工学編集委員会: カーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.729, 2021.9
- 2) 小林利充, 溝淵麻子, 近松竜一, 瀬賢一: 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011
- 3) 大林組 HP: 製造工程でのカーボンネガティブを実現する「クリーンクリート N™」を開発, 2022.4  
[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220415\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220415_1.html)  
(参照 2023-3-8)
- 4) 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, pp.155-168, 2017
- 5) 並木憲司: 環境配慮型コンクリートの建築物基礎への適用 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート®」の事例, 月刊基礎工, Vol.50, No.8, pp.46-49, 2022.8
- 6) 小林利充, 溝淵麻子, 近松竜一, 瀬賢一: 混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.118-123, 2012
- 7) 竹中秀文, 黒田陽史, 石黒陽佑, 並木憲司: 大規模スタジアム建設における鉄筋コンクリート造ゲーター架構の構築, コンクリート工学, Vol.60, No.11, pp.1014-1019, 2022.11
- 8) 植松俊幸, 小林利充, 神代泰道: 仕上げ材による中性化抑制効果およびその持続性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集,

Vol.42, No.1, pp.443-448, 2020

- 9) 神代泰道, 並木憲司, 植松俊幸, 田中寛人: 流動性を高めた低炭素型のコンクリートの地上構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1210-1215, 2022
- 10) 佐々木猛, 八木利之: エコタンカル (軽質炭酸カルシウム) とその可能性, セメント・コンクリート, No.900, pp.58-62, 2022.2

[筆者紹介]

田中 寛人 (たなか ひろと)  
 (株)大林組  
 技術本部 技術研究所 生産技術研究部  
 研究員



神代 泰道 (こうしろ やすみち)  
 (株)大林組  
 技術本部 技術研究所 生産技術研究部  
 上級主席技師



並木 憲司 (なみき けんじ)  
 (株)大林組  
 東京本店 建築事業部品品質管理部  
 鉄筋・コンクリート品質管理課  
 担当課長

