

カーボンネガティブを最大化したコンクリートの実現に向けたCO₂排出量削減の試算正会員 ○笠井 浩¹ 同 関田 徹志¹ 同 依田 和久¹
同 親本 俊憲¹ 同 全 振換¹ 同 百瀬 晴基¹環境配慮型コンクリート CO₂削減 γ -C₂S
再生炭酸カルシウム微粉末 スラッジ再生セメント

1. はじめに

コンクリートは、焼成時に大量のCO₂が排出されるセメントを使用することから、地球温暖化の面より大きな問題となっている。これを解決する方法として、炭素を活用する技術(活性炭技術)である、コンクリートにCO₂を吸収して硬化させるCO₂吸収型コンクリート¹⁾が注目されている。この技術を用いれば、CO₂の排出量よりも固定量を上回らせることができ、いわゆるカーボンネガティブが実現できる。本報告では、この技術の他にカーボンネガティブの実現の可能性のある材料について文献調査を行い、最大どの程度のCO₂固定量が可能であるかの試算を行った。

2. カーボンネガティブコンクリート用材料関連の調査

既往の文献を参考に、カーボンネガティブが可能なコンクリート材料をまとめたのが表-1である。

① 再生炭酸カルシウム微粉末混和材

戻りコンクリートや残コンクリート等の未利用スラッジ水をさらに水で希釈し、固体・液体に分離後、その液体分を晶析槽でCO₂と反応させて炭酸カルシウムCaCO₃を生成して固定化する技術²⁾が開発され、その炭酸カルシウムの微粉末が既に商品化されている。

この絶乾密度は2.5 g/cm³程度で、比表面積は約3000~4000 cm²/gである。この微粉末は、その組成に基づき1tあたり約440 kgのCO₂を固定しているが、1t製造時のCO₂排出量が約50 kgであるため、正味の固定CO₂量は約390 kg-CO₂/tである。

② スラッジ再生セメント

戻りコンクリート等の未利用スラッジ水を脱水、スラッジケーキとし、その後、乾燥機で処理した乾燥スラッジを微粉碎して再生セメント用混和材とする技術³⁾が開発されている。この再生混和材の絶乾密度は2.8 g/cm³程度、比表面積は約6300~6800 cm²/gで、CO₂排出原単位は95.8kg-CO₂/tである。再生混和材95%と普通ポルトランド(N)セメント5%(769kg-CO₂/t)を混合したスラッジ再生セメントのCO₂排出原単位は130kg-CO₂/tである。

なお、このセメントが余剰な場合には、CO₂ガスを吹き込むことで、乾式の再生炭酸カルシウム微粉末を製造できると考えられる。

③ ECMセメント(高炉スラグセメントC種相当)

ECMセメントは、Nセメントに対して産業副産物である高炉スラグ微粉末(BFS)を60~70%置換し、これに少量混合成分である石膏の種類と量の最適化を行ったもの⁴⁾である。このセメントはセメント会社でプレミックスした場合と生コン工場の計量機で、Nセメントと石膏を含んだBFSを所定の割合で計量して使用する場合(混和材方式)とがある。このセメントの絶乾密度は2.96g/cm³、比表面積は約3500~4500 cm²/gで、CO₂排出原単位は、約269 kg-CO₂/tである。ECMセメントを用いたコンクリートはCO₂排出量を60~70%削減できる材料起源の低炭素型コンクリートである。一般に高炉スラグ微粉末の置換率を高めると経時によるスランプロスの低下が課題となるが、この抑制が可能な新たな化学混和剤を開発し、この課題を解決している。

その他、様々な機関から高炉スラグ微粉末系の環境配慮型コンクリートが開発^(例えば5) 6)されている。

④ CO₂吸着骨材

解体コンクリート等硬化したコンクリートから取り出した再生骨材にCO₂ガスを吹き付けて、骨材に付着しているモルタルやセメントペーストを炭酸化させ、再生骨材自体を改質する技術が開発⁷⁾されている。未水和モルタルが炭酸化反応することで、その空隙等が緻密化するため、改質前のJIS A 5022の再生骨材Mよりも改質再生骨材の絶乾密度は増加(平均0.5%程度)し、吸水率は減少(平均14%程度)して品質が向上しており、再生骨材M相当である。

この改質再生骨材のCO₂排出原単位は既往の文献⁷⁾では明確ではないが、一般に再生粗骨材MのCO₂排出原単位は、4.56kg-CO₂/tで、再生細骨材の場合は3.3kg-CO₂/tであることから、ほぼ同程度と思われる。なお、従来、再生骨材の製造で課題であったのが再生微粉の処理であるが、余剰となる再生微粉にCO₂ガスを吹き込むことで、新たな再生炭酸カルシウム微粉末を製造できると考えられる。

その他、海外では米国において再生炭酸カルシウムを主原料とし、砂または軽石を核にその周囲を再生炭酸カルシウムでコーティングしながら、軽量骨材を造粒している。製造の詳細は不明であるが、この軽量骨材は1tあたり440 kgのCO₂を固定化できる⁸⁾と言われている。

表-1 カーボンネガティブを可能とするコンクリート用材料

材料名	種類	文献番号	主原料	製造方法	絶乾密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	特長	課題等
ダイカルシウムシリケートγ相 (γC ₂ S)	混和材	1)	副生消石灰	カルシウムカーバイド (CaC ₂) からアセチレン (C ₂ H ₂) を発生するプロセスで副生する消石灰 (CaOH ₂) が原料。これをキルンで焼成しγC ₂ Sが得られる	3.0程度	1500~3000	-375 (製造時124.5kg CO ₂ との反応で500kg固定)	γC ₂ Sは水硬性がなく、CO ₂ ガスと反応し硬化。炭酸カルシウムとしてコンクリート固定	炭酸ガスを積極的に進めるためには炭酸化養生装置が必要。炭酸化養生に適した部材の選択が必要
再生炭酸カルシウム微粉末 (RLS)	混和材	2)	戻りコン、残コンのスラッジ	①貯留槽のスラッジ水を溶出槽で更に水希釈後、②固液分離機で分離 ③分離後の液体分を晶析槽で排ガス中のCO ₂ でバブリング	2.5程度	3000~4000	-390 (製造時50kg その組成より440kg固定)	セメントスラッジ再利用	再生材料のため、品質管理が課題
スラッジ再生セメント (SRy)	セメント	3)	戻りコン、残コンのスラッジ	①スラッジ水を ②脱水してスラッジケーキ ③乾燥機で乾燥処理し乾燥スラッジ④微粉碎 ⑤SR材95%と普通 (N) セメント5%混合	2.8程度	6300~6800	95.8 (SR材のみ) SR : N = 95:5 SRy = 130	セメントスラッジ再利用 アルカリ性を保持 乾燥し扱いがよい	スラッジ再生セメントに CO ₂ を吹込み、再生炭酸カルシウム製造の可能性あり
ECMセメント (高炉セメントC種相当)	セメント	4)	高炉スラッジ微粉末、普通セメント、石膏	Case 1:高炉セメントC種相当の割合で、セメント会社でプレミックス化 Case 2:同上の割合で生コン工場の計量機で計量	2.96	3500~4500	269	CO ₂ 排出量を60~70%削減可能コンクリート・専用混和剤で品質改善	高炉セメントC種相当コンクリートの普及が課題 将来の高炉スラッジの供給不足
CO ₂ 吸着再生骨材	骨材	7)	解体コンクリート	再生骨材にCO ₂ ガスを吹き付け、骨材に付着してモルタルやペーストを炭酸化させ、再生骨材自体を改質	2.4~2.5	—	明確でない 再生粗骨材M 4.56 再生細骨材M 3.3	付着モルタルの空隙が充填され、吸水率や乾燥収縮など品質向上	再生骨材は微粉末の処理が課題 CO ₂ を吹込み、再生炭酸カルシウムとして有効利用の可能性有

3. CO₂ 排出量削減の最大化コンクリートの試算

CO₂ 排出量削減 (以下 CO₂ 削減) の最大化コンクリートの調合例を表-2 に示す。比較用は、スラップ 18cm 普通セメント (NC) コンクリートである。CO₂ 削減最大化コンクリートの調合は、坂田ら⁹⁾ が考案した石灰石微粉末を 313kg 使用の高流動コンクリートを参考にした。使用材料は表-1 に示すようにスラッジ再生セメント (SRy)、γC₂S と再生炭酸カルシウム微粉末 (RLS) で、これらを用いた粉体系高流動コンクリートである。打込み後は、強制炭酸化養生を行い炭酸ガスと反応させ、固定化するものとした。図-1 は、CO₂ 削減最大化コンクリートの試算結果である。両調合の骨材量の差による CO₂ 削減量は 1 kg/m³ で無視した。普通コンクリートと比較して、SRy の使用で約 217 kg/m³、RLS で約 122 kg/m³ および CO₂ 吸収で約 55 kg/m³ の CO₂ 削減もしくは固定化が可能な試算となり、普通コンクリートに対して 394 kg/m³ の CO₂ を削減するものである。なお、CO₂ 固定量 177 kg/m³ は、高さ 20m の杉の木 12 本が 1 年間に吸収する CO₂ に相当する。

4. おわりに

カーボンネガティブを可能とするコンクリート用材料の文献を調査し、現在国内で入手できる材料や複合技術を用いることで CO₂ 削減・固定量の最大化コンクリートは、

表-2 CO₂ 排出量削減の最大化コンクリートの調合例

コンクリート種類	W/B (%)	スラップまたはフロー (cm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	NC		—	S	G
					SRy	γC ₂ S			
普通コン	55	18	49.9	170	309	0	894	897	
CO ₂ 削減最大	55	60	46.8	170	161	148	313	690	800
各材料のCO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)				769	—	—	3.7	2.9	
上段：普通コン，下段：CO ₂ 削減最大				130	-375	-390	3.7	2.9	

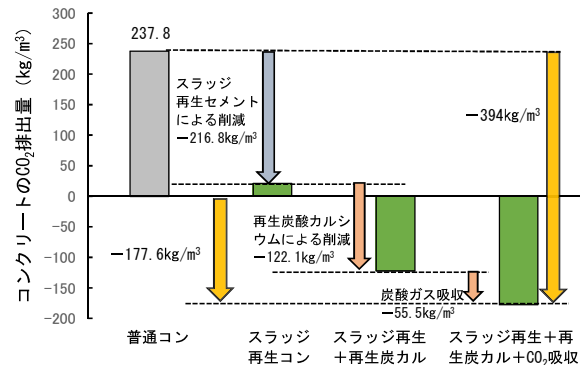


図-1 CO₂ 排出量削減の最大化コンクリートの試算

通常のコンクリートに対し約 400 kg/m³ の CO₂ 削減の可能性があることがわかった。これに CO₂ 吸着骨材を用いると更なる CO₂ 削減に繋がり、今後その開発が期待される。

参考文献

- 1) 取達剛ら：「CO₂ 排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリート CO₂-SUICOM」, セメントコンクリート, Vol.786, pp.26-31, 2012
- 2) 八木利之ら：エコタンカル CO₂ を原料とした環境にやさしい軽質炭酸カルシウム, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.87-90, 2021.11
- 3) 大川憲ら：戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の諸特性と CO₂ 排出原単位, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1372-1377, 2020
- 4) 小島正朗ら：エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.9
- 5) 小林利充：脱炭素社会に向けた低炭素型のコンクリートに関する取組み, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.770-775, 2021.9
- 6) 岡本礼子ら：高炉スラッジ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの物性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1981-1986, 2013
- 7) 伊与田岳史：CO₂ 吸着による再生骨材改質とコンクリートへの適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.807-812, 2021.9
- 8) 山岸弘大：総合商社のカーボンサイクルへの取組みと海外技術の紹介, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.764-769, 2021.9
- 9) 坂田昇ら：高流動コンクリートの充填性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp. 301-306, 1990