

分離回収 CO₂ および CO₂ 透過パイプを用いた鉄筋コンクリート構造物への CO₂ 固定

中国電力(株) 正会員 ○田中慎也 井上丈揮 河内友一 福本 直
鹿島建設(株) 正会員 関 健吾 田口翔也 水野 健 取違 剛

1. はじめに

地球温暖化対策として CO₂ 排出量の削減が世界的に求められており、我が国でも 2050 年のカーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが各方面でなされている。経済産業省からは、カーボンリサイクル技術ロードマップが示され、コンクリート中への CO₂ 固定、すなわち CO₂ の鉱物化にも大きな期待が寄せられている。そのような背景の下、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、大崎上島内に研究拠点を整備し、分離回収した CO₂ を用いて各種研究開発を推進している¹⁾。筆者らは、当該研究拠点において CO₂ を有効利用したコンクリートの研究開発を行っており、実規模の鉄筋コンクリート構造物を対象とし、強制炭酸化による養生などを中心に、効率的にコンクリート中への CO₂ を固定できる手法などを検討している。

ここでは、世界で初めて CO₂ ガスを透過可能なパイプを埋め込んだ実規模鉄筋コンクリート試験体（以下、実証試験体）を対象に、硬化過程で強制的な炭酸化を行った際の力学特性や CO₂ 固定量の評価結果などについて述べる。

2. 実験概要

評価対象とする実証試験体は、逆 T 擁壁のフーチング（長さ 5.0m、幅 2.0m、高さ 0.6m）部分とした（写真－1）。鉄筋組立後に、所定の位置に CO₂ 透過パイプ（φ25mm、写真－1 参照）を設置し、打込み中に位置がずれないように架台に固縛した。コンクリートは、予めフレコンパックに袋詰めされたドライミックスタイプとし、拠点内で移動式ミキサを用いて練り混ぜた。使用材料を表－1 に示す。高炉スラグ微粉末および産業副産物から製造したダイカルシウムシリケート γ 相を主とする特殊混和材をセメントの代替材として用いた。ダイカルシウムシリケート γ 相は CO₂ と反応して硬化する性質を有する。コンクリートの配合を表－2 に示す。設計基準強度は一般的な土木構造物を参考に 24N/mm² とした。打込みは、コンクリート標準示方書【施工編】²⁾ に示される基準や目安に準じて行った。翌日にリバウンドハンマーで実証試験体の推定圧縮強度を測定し、5.0N/mm² を確認したため型枠を取り外した。その後、CO₂ を圧入する準備を行い、材齢 2 日の時点で分離回収 CO₂ による強制炭酸化を開始した。CO₂ の供給圧は 0.8MPa とし、31 日間の炭酸化養生を行った。

試験項目を表－3 に示す。強制炭酸化終了後はワイヤソーを用いて実証試験体を切断し、1%フェノールフタレイン溶



写真－1 実証試験体および CO₂ 透過パイプ

表－1 コンクリートの使用材料

項目	記号	摘要
水	W	水道水，密度 1.00g/cm ³
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm ³
	BFS	高炉スラグ微粉末，密度 2.92g/cm ³
混和材	γ	ダイカルシウムシリケート γ 相を主とする特殊混和材，密度 2.95g/cm ³
細骨材	S	砕砂，表乾密度 2.58g/cm ³
粗骨材	G	砕石，表乾密度 2.72g/cm ³ ，Gmax 20mm
混和剤	Ad	AE 減水剤，リゲコンスルホン酸化合物とポリオール複合体

表－2 コンクリートの配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	OPC	BFS	γ	S	G	Ad
55.0	49.4	169	123	169	15	872	940	2.5

W/P：水粉体重量比，P=OPC+BFS+γ
目標スランプ：12±2.5cm，目標空気量：4.5±1.5%

表－3 試験項目

項目	養生	摘要
炭酸化深さ	炭酸化 31 日※	切断面に 1%フェノールフタレイン噴霧
推定圧縮強度		リバウンドハンマーにて測定
CO ₂ 固定量		コアの炭酸化部・未炭酸化部で全炭素量を測定

※ 材齢 2 日で炭酸化を開始してからの日数

キーワード 環境配慮型コンクリート，CO₂ 吸収コンクリート，カーボンネガティブ，分離回収 CO₂，NEDO

連絡先 〒739-0046 広島県東広島市鏡山 3-9-1 中国電力(株) エネルギア総合研究所 TEL 082-420-0700

液を用いて実証試験体の炭酸化深さを確認するとともに、実証試験体の側面でリバウンドハンマーを用いた強度測定を行った。また、φ100mmのコアを採取してCO₂固定量の測定を行った。CO₂固定量は、コアの炭酸化部および未炭酸化部から試料を採取し、全有機炭素計（島津製 TOC-L CSH および SSM-5000A）による全炭素量の測定を行った。

3. 実験結果および考察

強制炭酸化の終了後に実証試験体を切断し、フェノールフタレイン溶液を噴霧して確認した炭酸化状況を図-1に示す。CO₂ガスの透過パイプは実証試験体の上下にそれぞれ配置していたものの、高さ方向の中央を境に、上半分がほぼ炭酸化し、下半分は未炭酸化の状況であった。強制炭酸化中のCO₂圧力は最大で0.82MPaであり、平均は0.72MPaであった。CO₂透過パイプはそれぞれの終端に圧力計を取り付けてCO₂の供給確認と圧力確認をしていたが、上下で圧力の違いは見られなかったことから、上下方向における炭酸化のしやすさに関しては今後もさらなる検討が必要である。炭酸化深さの測定結果から、炭酸化した範囲の面積率を算出したところ43.2%であった。

炭酸化していた実証試験体の側面で測定した推定圧縮強度を図-2に示す。図中には、同一配合を用いて炭酸化させていない実証試験体で測定した結果を併記した。図より、炭酸化させた実証試験体の推定圧縮強度は30.2N/mm²であり設計基準強度を満足した。一方で、炭酸化させていない実証試験体の推定圧縮強度は、材齢が経過しているものの24.4N/mm²であった。このことから、実証試験体は強制的に炭酸化させることでダイカルシウムシリケートⅡ相が反応し、強度発現に寄与した可能性がある。ただし、ダイカルシウムシリケートⅡ相の使用量は多くないため、今後さらなる検証が必要と考えられる。

CO₂固定量の評価結果を表-4に示す。表中には、使用材料に含まれるCO₂量を別途測定した結果を併記した。全炭素分析から得られたCO₂含有量は炭酸化部で74.0kg/m³、未炭酸化部で13.0kg/m³であった。使用材料中にもともと含まれるCO₂量は2.5kg/m³であったことから、炭酸化部だけでなくフェノールフタレイン法にて未炭酸化部と判定された領域でもCO₂を吸収・固定した可能性がある。図-1より算出した炭酸化部および未炭酸化部の面積率を考慮すると、本研究における実証試験体全体に固定されたCO₂は平均で36.9kg/m³となった。

4. まとめ

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、火力発電所の排ガスから分離回収されたCO₂およびCO₂透過パイプを用いて世界で初めて鉄筋コンクリートの実規模試験体の強制炭酸化に関する実験を行った。その結果、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度を満足するとともに、1m³あたり36.9kg/m³のCO₂を固定していることを確認した。

（この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP16002）の結果得られたものです）

参考文献

1) NEDO HP ; <https://osakikamijima-carbon-recycling.nedo.go.jp/> (2023年3月13日確認)
2) 土木学会 ; コンクリート標準示方書【施工編】，pp.119-128，1992.

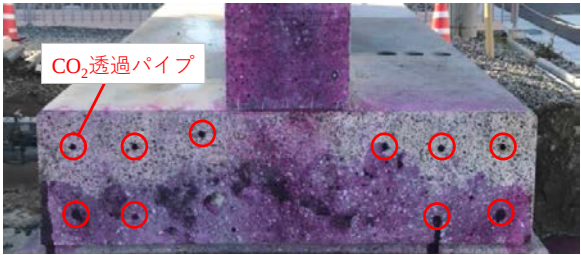


図-1 切断面の炭酸化状況

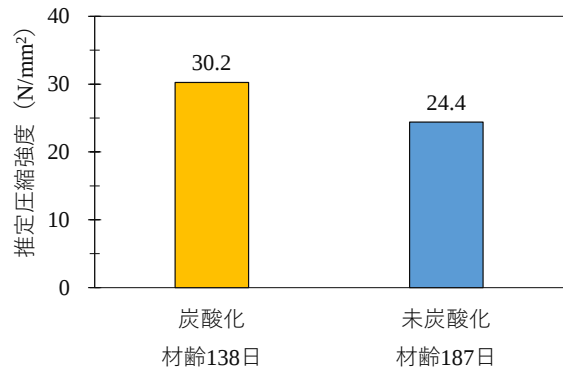


図-2 炭酸化の有無による推定圧縮強度の比較

表-4 CO₂固定量の評価結果

部位	単位	炭酸化部	未炭酸化部
CO ₂ 含有量 (全炭素量より)	kg/m ³	74.0	13.0
使用材料に 含まれるCO ₂ 量	kg/m ³	2.5	
CO ₂ 固定量	kg/m ³	71.5	10.5
面積率	%	43.2	56.8
全体での CO ₂ 固定量	kg/m ³	36.9	