

炭酸化養生によるコンクリートへのCO₂固定に関する研究

Study on CO₂ Absorption to Concrete by Carbonation Curing

取達 剛 Takeshi Torichigai

1. はじめに

CO₂排出削減という世界規模の環境問題に対し、建設業界と関わりの深い電力産業、鉄鋼業、セメント産業が、日本の主要なCO₂排出産業となっている。そのような中、昨今、排出されたCO₂を回収して再利用するという観点で、カーボンリサイクルやCCU (Carbon Capture and Utilization) という言葉が使われるようになり、コンクリート分野におけるカーボンリサイクルの一つの技術として、コンクリートの炭酸化が着目されている。これは、コンクリートの主要材料であるセメントあるいは混和材に含まれるCaとCO₂を反応させ、CaCO₃としてコンクリート中にCO₂を化学的に固定させることを指している。

本研究は、コンクリートを「CO₂固定可能な資材」として捉え、各種の混和材を用いたコンクリートを、高濃度のCO₂雰囲気下にてコンクリートと接触（以下、炭酸化養生と称する）した際のCO₂固定量を定量的に評価すること、ならびにコンクリートの炭酸化養生条件が炭酸化速度ならびに硬化物性に及ぼす影響の評価を行った。

2. コンクリートへのCO₂固定量の評価事例

コンクリートにおけるCO₂固定量を評価する上では、CO₂がどのような形で固定されているかが重要である。一般的な知見としては、C₃SとC₂Sのシリケート相から生成されるCa(OH)₂やC-S-H、およびC₃AやC₄AFのアルミネート相から生成されるエトリングサイトやモノサルフェートに含まれるCa成分がCO₂と反応してCaCO₃となる反応が起こると整理されている。

この反応を踏まえ、コンクリートにおけるCO₂固定量の評価方法としてよく使用されるのが、高温下におけるCaCO₃の脱炭酸を利用した熱分析である。この方法は、CaCO₃の化学結合が600~850℃付近の領域でCaOとCO₂に分離される現象に着目し、当該温度域における質量減少量をCO₂含有量として求めるものである。熱分析におけるCO₂固定量の評価温度は、Table 1に示すように論文によって多少異なる。いずれの実験においても、Table 1に示す評価温度帯における質量減少率の変化が大きいことから、この温度帯をCaCO₃の脱炭酸領域と設定している。これは、ほかの水和物の影響で

Table 1 熱分析におけるCO₂固定量の評価温度範囲 (Temperature Range of CO₂ Amount at Thermal Analysis)

著者	発表年	評価温度	対象
Chang and Chen	2006	550-950℃	セメント水和物
Huntzinger et al.	2009	500-850℃	セメントキルンダスト
Huijgen et al.	2005	>500℃	高炉セメント水和物
Cole and Kroone	1960	600-750℃	セメント水和物
Pane and Hansen	2005	600-780℃	混合セメント水和物
黒田・菊池	2009	600-800℃	セメント水和物
曾根・神田	2011	600-1000℃	セメント水和物
Neves Jr et al.	2013	500-750℃	セメント水和物
Park and Kim	2014	700-770℃	ジオポリマー

CaCO₃の分離する温度帯が変化した可能性、あるいは、CaCO₃以外の水和物の分解等による質量減少も含めて評価されている可能性がある。このほか、密閉された容器内に封入したCO₂ガスの濃度変化を測定することでCO₂固定量を評価する方法や、試験体の質量変化から類推する方法、固定燃焼装置付き全有機体炭素計によって無機炭素量としてCO₂固定量が評価された例もあるが、統一的な試験方法は定められていない。すなわち、コンクリートの炭酸化反応によって固定されたCO₂の量を定量的に評価する手法が確立されていないというのが現状である。

3. 各種混和材を用いたセメントペーストの炭酸化養生によるCO₂固定量の検証

セメントならびに各種混和材のCO₂固定能力を、セメントペーストを用いて評価した。水粉体比 W/P=45%の普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストをベースに、セメントの一部を高炉スラグ微粉末 (BFS)、CO₂と反応して硬化する性質を有するγ-2CaO・SiO₂ (以下、γC₂S)、および石灰石微粉末 (LS) に置き換えたセメントペーストを作製して、温度60℃、湿度50%RH、CO₂濃度20%の環境で7日間、炭酸化養生を行った。養生終了後、無機炭素分析という手法にて、それぞれのセメントペーストの炭酸化部におけるCO₂固定量を評価した。混和材置換率とCO₂固定量の関係を整理

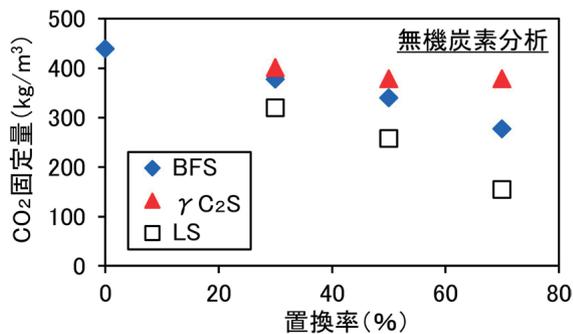


Fig.1 無機炭素分析による各種混和材置換率とCO₂固定量の関係
(Relationship between Admixture Replacement Ratio and CO₂ Absorption Evaluated by Inorganic Carbon Analysis)

した結果を Fig.1 に示す。CO₂ 固定能力のない石灰石微粉末を用いた場合、置換率とともに CO₂ 固定量は低下するが、BFS や γ C₂S は CO₂ 固定量の変化が小さく、BFS や γ C₂S が CO₂ 固定能力を有することを確認した。また、検討に用いた混和材では、 γ C₂S の CO₂ 固定能力が最も高いことを明らかにした。さらに、同試験において、異なる 2 種類の CO₂ 固定量評価手法を用いて検討した結果、Fig.2 に示すように、分析手法によって CO₂ 固定量に 1.4 倍近く差が生じた。この差についてはさらなる研究の進展が望まれる。

4. コンクリートとしての CO₂ 排出量と固定量評価

普通ポルトランドセメントの 70% を、高炉スラグ微粉末および γ C₂S で置換した三成分セメントを用いた水結合材比 W/B=60% のコンクリートにて ϕ 50mm × 100mm の円柱供試体を作製し、温度 50°C、湿度 40%RH、CO₂ 濃度 20% にて炭酸化養生した。炭酸化養生 2 週、および 4 週において、コンクリート表面からの CO₂ 固定量の分布を計測した結果、Fig.3 に示すように、 ϕ 50mm の試験体の全断面において、使用材料起因の CO₂ 排出量を上回る CO₂ をコンクリートに固定できることを確認した。さらに、同一配合のコンクリートを用いて、火力発電所の排気ガス (CO₂ 濃度約 15%) を用いた炭酸化養生を行った結果、Fig.4 に示すように、材料起因の CO₂ 排出量 (85.3kg/m³) を上回る量 (103.0kg/m³) の CO₂ をコンクリートに固定でき、カーボンネガティブなコンクリートを製造できることを明らかにした。なお、本検討で用いたコンクリートの圧縮強度、塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性などは一般的なコンクリートと同等であることを確認しており、耐摩耗性については、同一強度レベルのコンクリートに比べて 1.3 倍程度向上することを確認した。

5. おわりに

2050 年にカーボンニュートラル社会の実現を目指す日本

キーワード: CO₂ 固定量, 炭酸化, 高炉スラグ, γ C₂S

Keywords: CO₂ absorption, carbonation, blast furnace slag, γ C₂S

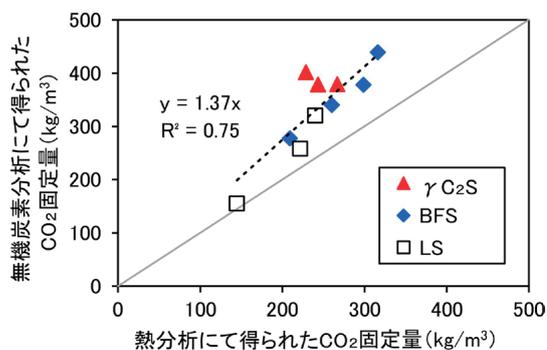


Fig.2 分析手法が CO₂ 固定量に及ぼす影響
(Effect of Analytical Method on CO₂ Absorption)

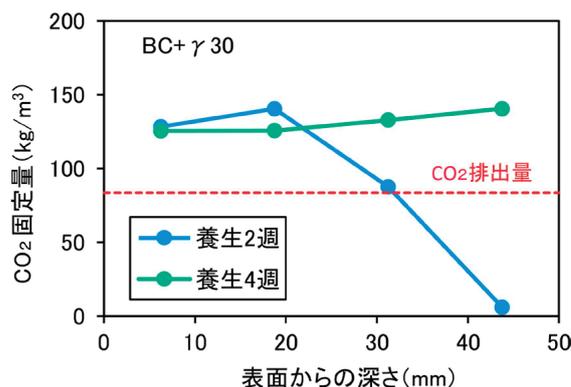


Fig.3 コンクリート表面からの CO₂ 固定量の分布
(Distribution of CO₂ Absorption from the Concrete Surface)

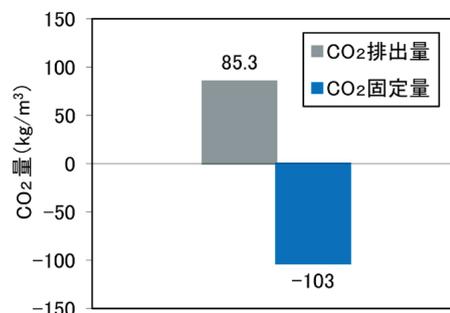


Fig.4 排気ガスで養生したコンクリートの CO₂ 固定量
(CO₂ Absorption in Concrete Cured by Exhaust Gas)

において、コンクリートの炭酸化による CO₂ 固定技術は、カーボンネガティブに資するものとして今後も大きな進展が期待されている。また、コンクリートへの CO₂ 固定が環境価値として取り上げられるようになるためには、CO₂ 固定量評価手法の標準化が期待される。本研究が起爆剤となり、国の援助等も含めてこれらの検討が推進されることを期待する次第である。