

二酸化炭素濃度の違いがセメントペーストの炭酸化進行に及ぼす影響

東急建設(株) 技術研究所
芝浦工業大学 工学部

○前原聡
伊代田岳史

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の代表的な劣化として中性化があげられる。中性化は、コンクリート中のアルカリ性が低下し、鉄筋の不動態被膜を破壊し、鉄筋腐食を引き起こす。この現象は、コンクリートに浸透した二酸化炭素とセメント水和物である水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とが反応し、炭酸カルシウム CaCO_3 を生成するとされており、炭酸化といわれている。この炭酸化の進行は、一般大気中の二酸化炭素濃度 0.05%程度環境下においては、二酸化炭素がコンクリート中へ浸透するのに著しく時間がかかることが知られている。そこで、JIS A 1153 では促進中性化試験が規格化され、コンクリートの耐久性を判断する手法として一般的に用いられている。促進中性化試験の二酸化炭素濃度は5%と、一般大気の100倍濃度に設定されており、中性化の進行も著しく速い。しかし、図1に示すように一般環境下での中性化進行が同程度にあっても、セメント種類によっては促進中性化における進行に違いが見られるとの報告¹⁾もされている。

そこで、本研究では二酸化炭素濃度の異なる環境での高炉セメントと普通ポルトランドセメントの中性化進行に及ぼす影響を実験的に検討した。具体的には、全断面が中性化したセメントペースト供試体を用いて、示差熱分析、X線回折および細孔径分布を求め、異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化の進行特性を把握することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は、普通ポルトランドセメント(OPC)とこれに高炉スラグ微粉末を50%置換した試製高炉セメントB種(BB)を用いてセメントペーストを作製した。水セメント比は、一般的に用いられるコンクリートと同程度の50%とし、図2に示すように全断面が中性化を受けるよう10×5×100mmの供試体を作製した。材齢28日までは封緘養生を行った。

2.2 炭酸化環境条件

養生後に供試体を二酸化炭素濃度0%、0.05%、5%の三種類の環境下に10×100mmの両面を開放して炭酸化を

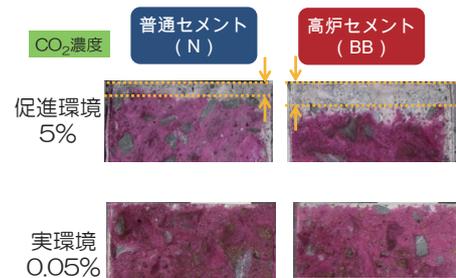


図1 促進中性化試験と一般環境下での中性化深さ

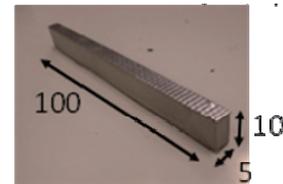


図2 セメントペースト供試体の寸法(単位:mm)

促した。全断面が炭酸化したかを確認するために、所定の材齢にて試験片を割裂し、フェノールフタレイン溶液を噴霧して炭酸化の進行を確認した。供試体作製から1年以上経過したところで0.05%および5%の濃度に静置した供試体がフェノールフタレイン溶液の噴霧により発色しないことを確認し、その後、各分析に用いた。

2.3 炭酸化生成物の定量、定性分析

炭酸化開始前の材齢28日における時点と炭酸化させた供試体の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの生成量を示差熱分析により求めた。また、X線回折にて炭酸カルシウムの結晶構造(バテライト、カルサイト)を定性的に把握するため、回折ピーク(回折角度、カルサイト: 29.4° 、バテライト: 27.03°)から積分強度を算出した。供試体は角柱を粉碎した粉体を用いてそれぞれの分析に供した。

2.4 細孔径分布

分析用試料は、供試体を数mm角に割裂して、試料をアセトンに浸漬し、水分を除去、真空乾燥器中での脱気・乾燥により作製した。その分析用試料を水銀圧入法により6~6000nmの範囲における細孔径の容積を測定した。測定は、炭酸化が終了した時点における各二酸化炭素濃度環境下の供試体を対象に実施した。

3. 実験結果および考察

3. 1 示差熱分析

図3に示差熱分析による水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの測定結果を示す。炭酸カルシウムの生成量は、二酸化炭素濃度0.05%と5%を比較すると OPC および BB とも 5%のほうが大きくなり、炭酸化の進行が早いことがわかる。炭酸カルシウムの生成量は、OPC と BB を比較すると二酸化炭素濃度 0.05%、5%とも OPC のほうが大きくなった。ただし、二酸化炭素濃度 0.05%における水酸化カルシウムの減少程度は、材齢 28 日の生成量に対する減少割合で OPC および BB とも 0.6 程度と同様の傾向を示した。また、二酸化炭素濃度 5%における BB では炭酸化により水酸化カルシウムがすべて消費されたと考えられ、水酸化カルシウムが析出されなかった。

3. 2 X線回折

図4にX線回折による炭酸カルシウムにおけるカルサイトとバテライトの生成割合を示す。二酸化炭素濃度 0.05%において OPC ではバテライトの生成がみられないが、BB では炭酸カルシウムのうちバテライトが 40%程度を占める生成量が確認された。二酸化炭素濃度 5%では OPC よりも BB のほうが、バテライトの占める割合が大きくなった。

バテライトは、Ca/Si 比の低い C-S-H やモノサルフェートから生成される²⁾と言われており、BB や OPC の二酸化炭素濃度 5%では細孔溶液中の水酸化カルシウムに起因する炭酸カルシウムの生成だけではなく、セメントペーストの組織を形成する C-S-H から Ca イオンが溶解し、その Ca イオンと二酸化炭素が反応して炭酸カルシウムを生成する反応が起きているものと考えられる。水和反応として生成される初期の水酸化カルシウム量は BB のほうが少ないことから、OPC よりも初期の段階で炭酸化により水酸化カルシウムが消費され、ある一定量以下になると C-S-H の分解に伴う炭酸化が開始され、特に、二酸化炭素濃度 5%の BB においてはバテライトの生成割合が大きくなったのものであると考えられる。

3. 3 細孔径分布

図5に水銀圧入法による細孔径分布を示す。OPC および BB とも二酸化炭素濃度 0%では 10nm 以下の細孔径の量が多いが炭酸化することで、OPC の二酸化炭素濃度 5%と BB の二酸化炭素濃度 0.05%、5%において 10nm 以下の細孔径が減少し、20nm 付近の細孔径が多くなる傾向を示した。セメントペースト中の 3~6nm の範囲の細孔径は、C-S-H 内部のゲル空隙に相当する³⁾と考えられており、X線回折の結果と同様に炭酸化の進行により、C-S-H の分解が示唆されている。

4. まとめ

BB は、OPC と比較すると二酸化炭素濃度 5%におい

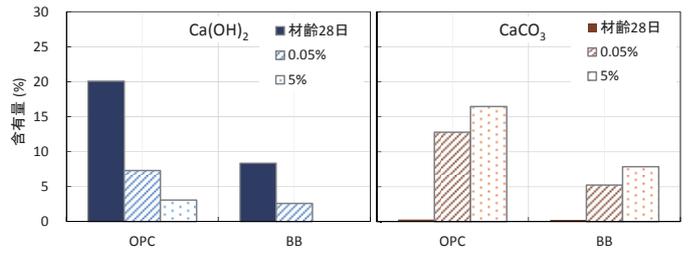


図3 示差熱分析による生成物の測定結果

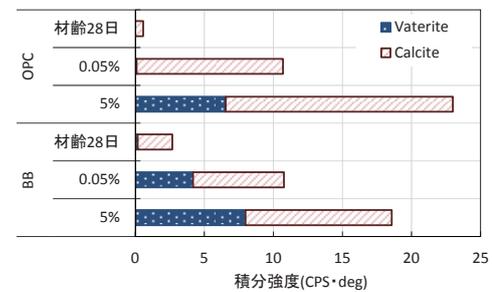


図4 X線回折による炭酸カルシウムの測定結果

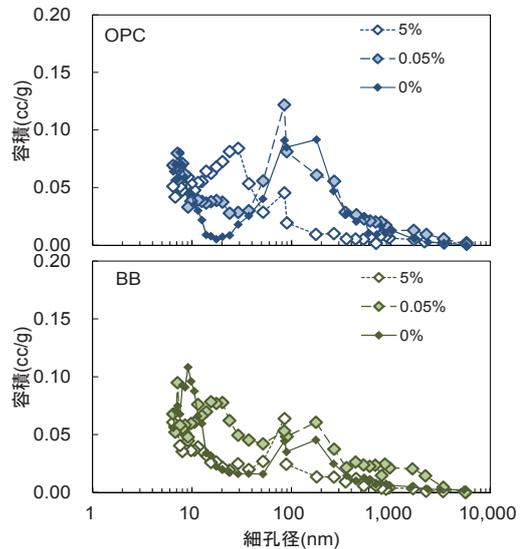


図5 水銀圧入法による細孔径分布

て初期の段階で水酸化カルシウムに起因する炭酸化が終了し、C-S-H の分解によりバテライトが多く生成されるものと考えられる。

なお、本研究の一部は 2013 年度セメント協会研究奨励金にて実施したものである。

【参考文献】

- 1) 松田芳範ほか：実構造物調査に基づく炭酸化に与えるセメントおよび水分の影響、コンクリート工学論文集、Vol.32、No.1、pp.629-634 (2010)
- 2) 太田利隆：十勝大橋コンクリートの特性、北見工業大学共同研究センター研究成果報告書第7号(2000)
- 3) セメント化学専門委員会：セメント硬化体の炭酸化、セメント・コンクリート、No.574、pp.26-32 (1994)