

寒冷環境下に暴露したコンクリートの水和反応解析

正会員 ○佐川 孝広*
同 谷口 円**
同 桂 修***
同 濱 幸雄****

暴露試験 コンクリート リートベルト法
セメント鉱物 反応率 細孔径分布

1. はじめに

コンクリートの硬化特性は、結合材であるセメントの水和反応に強く依存し、そのセメントの水和反応は温度、相対湿度、材齢等の養生条件に大きく影響を受ける。コンクリートの履歴した養生条件と硬化特性との関係については、これまで数多くの研究が行われている。しかし、実環境下のコンクリートが履歴した養生条件とセメント鉱物の反応率や水和生成物量との関係といった、定量的な観点から検討を行った例は少ない。

一方、粉末 X 線回折リートベルト法による硬化セメントペーストを対象とした水和反応解析が行われている¹⁾。セメントの水和反応解析は、通常はセメントペーストを対象とする場合がほとんどであるが、筆者らは、大正・昭和初期のコンクリート構造物から採取したコア試料の分析にリートベルト法を適用し、未反応セメント鉱物、水和生成物の定量が可能であることを示した²⁾。

本研究では、北海道内 2 都市においてコンクリートの暴露試験を行い、コンクリートの部材種や表面からの深さの差異が、セメント鉱物の反応や細孔径分布に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 暴露試験

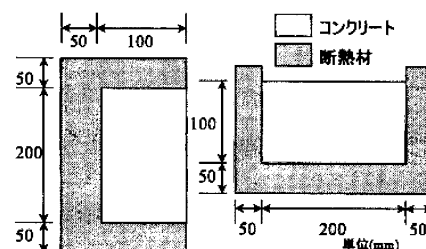
コンクリートに用いたセメントは、混合材を含まない普通セメントとし、表 1 に示す調合とした。暴露試験体は、図 1 に示すような壁(垂直)、基礎(水平)およびスラブ(水平)を想定した 200×200×100mm のコンクリートとし、旭川市および札幌市に暴露した。壁部材は南向きとし、基礎部材は外気に接しないように細骨材を敷設した上にコンクリート打設面を下面にして暴露した。スラブ部材は、雨水や雪解け水が滞留するようにした。

2.2 試料の採取および実験項目

材齢約 2 年経過した暴露試験体を表層部、深さ 8.5mm、50mm の位置から水平方向にそれぞれ 5mm 程度の厚さでコンクリートカッターにて切断した。さらに 5mm 角程度に切断した試料を多量のアセトンにより水和を停止させ、d-dry 乾燥を行った後、細孔径分布の測定を行った。また、5mm 角程度の試料は遊星ミルにて微粉砕を行い、XRD、強熱減量(1000℃)、不溶残分の測定に用いた。

表 1 コンクリートの調合

スラブ (cm)	目標空気 量(%)	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)			
				C	W	細骨材	粗骨材
18	1.0	50	46	411	206	802	952



(a) 壁および基礎モデル (b) スラブモデル

図 1 暴露試験体形状

細孔径分布の測定は水銀圧入法により行い、測定範囲は直径 7.5nm-150 μ m とし、不溶残分より求めた骨材量の補正を行い単位ペースト質量あたりの空隙量として求めた。不溶残分は、セメント協会 F-18 法に従い測定した。XRD の測定は、内部標準物質としてコランダムを内割 10% 添加し行った。リートベルト解析は SIROQUANT Ver.3 にて行い、定量対象鉱物は C₃S、C₂S、C₄AF、水和生成物の水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、骨材鉱物の珪石、長石、リン珪石、シソ輝石とした。

3. 実験結果および考察

図 2 にリートベルト解析結果の例を示す。XRD 測定値と計算値の残差は小さく、本研究でのリートベルト解析は、十分なフィッティングが得られた。

図 3 には、旭川市暴露試験体のリートベルト法により求めた骨材量と不溶残分から求めた値との関係を示す。両手法により求めた骨材量はほぼ等しかった。

図 4 には旭川市暴露試験体のリートベルト法により求めた骨材量を示す。表層部は骨材割合が少なく、コンクリート深さ方向での不均一性が示された。

表 2 には、各試料中の C₃S、C₂S の反応率および生成水酸化カルシウム(CH)、炭酸カルシウム量をそれぞれ示す。反応率は未水和セメント鉱物量との比により算出し、生成物量は内部標準物質、強熱減量および骨材量を補正し、単位セメント質量あたりの CaO 量として求めた。

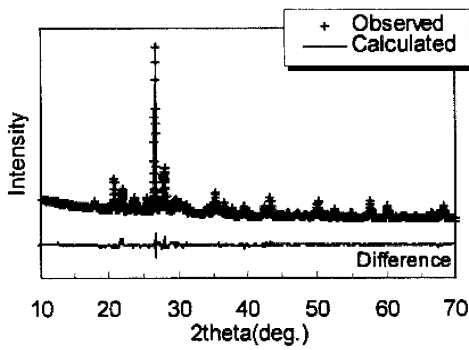


図2 コンクリート試料のリートベルト解析例

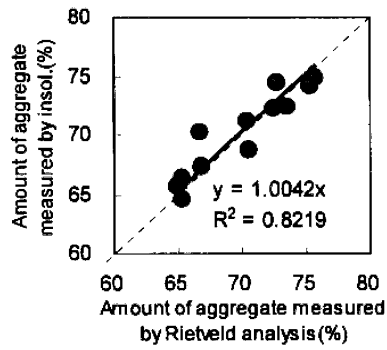


図3 リートベルト法にて求めた骨材量と不溶残分から求めた骨材量との関係

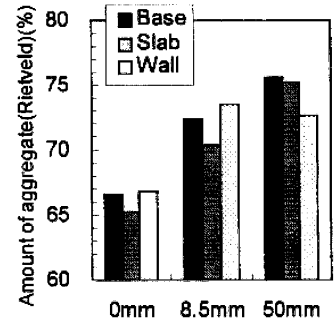


図4 旭川市暴露試験体の骨材割合

C₃S、C₂Sの反応率はそれぞれ95%、50%程度であり、表層部は炭酸化による炭酸カルシウムの生成が認められ、炭酸化によりC₂Sの反応が促進していた³⁾。またC₃S、C₂Sの反応率と生成CH量との関係は必ずしも対応していなかった。本研究では、XRD測定試料は骨材を取り除く試料調製を行っていないが、骨材を取り除きペースト割合を高めた試料を用いることで、反応率および水和生成物量の測定精度はさらに向上すると考えられる。

図5には、旭川市暴露試験体の細孔径分布を示す。外気に接していない基礎部材は、深さ方向での差異はほとんど認められなかった。スラブ、壁部材は表層での細孔量が多く、炭酸化による多孔化の影響が考えられる³⁾。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1)コンクリート試料を対象としたリートベルト解析が可能であった。リートベルト法により求めた骨材量と不溶残分から求めた値はほぼ一致した。
- (2)C₃SおよびC₂Sの反応率はそれぞれ95%、50%程度であり、表層部は炭酸化が認められた。
- (3)コンクリートの表層部の細孔量は内部に比較して多く、炭酸化による多孔化の影響が考えられた。

謝辞:本研究は北方建築総合研究所、北海道大学、室蘭工業大学、北海道電力総合研究所、日鐵セメントの共同により行われた結果の一部である。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1)佐川孝広ほか:粒度分布を考慮したセメント鉱物の反応率と強度発現、セメント・コンクリート論文集、No.59, pp.45-52, 2005
- 2)原田彩加ほか:大正・昭和初期の歴史的コンクリートの

表2 各部材のC₃S、C₂S反応率と水和生成物量

旭川					札幌						
部材	深さ	C ₃ S	C ₂ S	生成物(%)	部材	深さ	C ₃ S	C ₂ S	生成物(%)		
				CH Calcite					CH Calcite		
基礎	0	96	68	6.5	基礎	0	96	55	7.7		
	8.5	95	54	8.2		8.5	95	50	7.3		
	50	96	53	7.5		50	94	36	8.5		
スラブ	0	96	93	6.3	4.0	スラブ	0	97	71	4.9	6.6
	8.5	95	51	8.7	8.5		94	45	8.9		
	50	94	43	8.3	50		93	50	6.8		
壁	0	97	74	4.2	7.9	壁	0	97	69	4.7	8.1
	8.5	95	50	8.9	8.5		95	45	8.5		
	50	93	44	7.5	50		94	45	8.6		

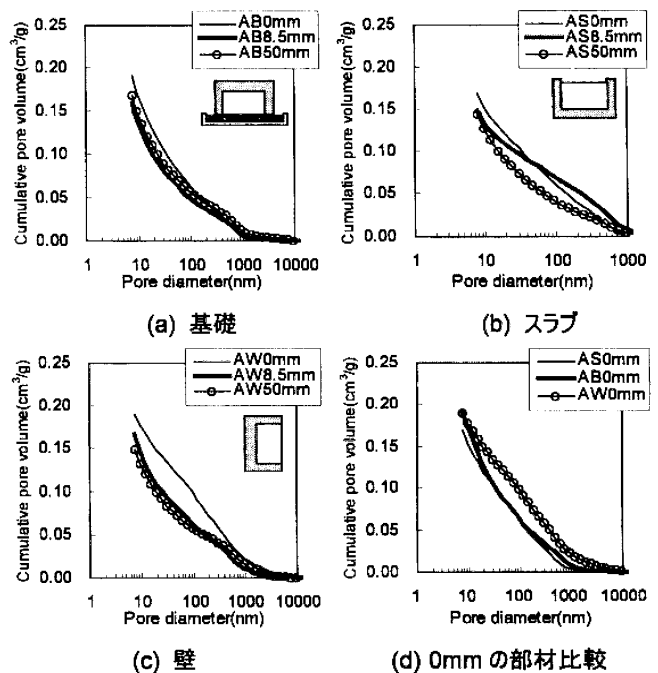


図5 旭川暴露試験体の各部材、深さの累積細孔量

- 物性および化学成分分析、建築学会北海道支部研究報告論文集、pp.21-24, 2005
- 3)坂井悦郎ほか:低熱ポルトランドセメント硬化体の炭酸化反応、Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.107, No.6, pp.561-566, 1999

*日鐵セメント株式会社 研究開発部

**北海道立北方建築総合研究所 生産技術部 修士(工学)

***北海道立北方建築総合研究所 生産技術部 博士(工学)

****室蘭工業大学 建設システム工学科 博士(工学)

*Nittetsu Cement Co., Ltd.

**Hokkaido Northern Regional Building Research Inst., M.Eng.

*** Hokkaido Northern Regional Building Research Inst., Dr.Eng.

****Muroran Institute of Technology, Dr.Eng.