

各種水和物が形成する空隙特性の違いが物質移動特性へ与える影響

芝浦工業大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻
芝浦工業大学 工学部 先進国際課程 兼務 土木工学科

○白石 真由奈
伊代田 岳史

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象は、劣化因子がコンクリート内部の空隙を移動経路として侵入することで鉄筋腐食が生じ、進行する。そのためコンクリートの空隙やその物質移動特性を評価することが重要視されている。しかし、セメント硬化体は使用材料により水和生成物に変化し、それぞれの水和生成物によって複雑な内部構造が形成されることが知られており、総空隙量が同等であった場合でも、物質移動特性も同様の傾向を示すとは限らない。そのため物質移動特性の評価には水和物の分析も重要であると考え、本研究では、水和生成物を変化させた硬化体を作製し、その中から総空隙率が同等の硬化体を選出し、物質移動試験や水和物分析を実施することにより、水和物と物質移動特性の関係を整理することを目的とした。

また近年、環境負荷低減を目的として高炉スラグ微粉末 (BFS) が多く利用されているが、普通ポルトランドセメント (OPC) に対して BFS が高置換の場合に懸念される初期強度低下などの問題点が、BFS に含まれる SO_3 量を増加させることにより改善されることが既往研究^{1),2)}において明らかとなっている。これは硬化体内に生成された水和物に変化したためであると考えられることから、本研究では、硬化体の水和生成物を変化させる手段として、結合材の SO_3 含有量を調整し、硬化体を作製した。

2. 試験概要

2. 1 使用材料および配合

本研究では、水和生成物が異なる一方、総空隙率が同等の試験体を作製するため、OPC (SO_3 2.01%)、BFS (石こう無添加)、無水石こう (SO_3 55.4%) を使用した。OPC に対する BFS 置換率を 0、20、50、70、85% とし、さらに BFS に対して無水石こうを SO_3 換算で 2、5、8% 内割添加することで、結合材の SO_3 含有量が異なるセメント硬化体を作製した。そしてアルキメデス法による総空隙率の算出を行い、表-1 のように空隙率が同等である A ~ E の 5 グループを選出した。それぞれのグループでは、使用材料が異なるものや、混和材置換率が同値であるが結合材の SO_3 含有量が異なるもの、材齢が異なるものな

表-1 総空隙率が同等である配合のグループ分け

			BFS中 SO ₃ (%)	結合材中 SO ₃ (%)	質量割合(%)			養生 日数 (日)	空隙率 (%)
					OPC	混和材			
						BFS	石こう		
A		B50	5	3.36	50	45.8	4.3	7	15.42
		N	—	2.01	100	—	—	28	15.39
B		B20	8	3.11	80	17.3	2.7	7	16.18
		B50	5	3.36	50	45.8	4.3	28	16.03
C		B50	8	4.77	50	43.2	6.8	7	17.84
		B20	5	2.55	80	18.3	1.7	7	17.71
D		B50	2	1.95	50	48.3	1.7	7	18.26
		B85	8	6.71	15	73.4	11.6	7	18.25
E		B85	2	1.90	15	82.1	2.9	7	21.54
		B85	5	4.30	15	77.8	7.2	7	21.28

どが確認された。本研究では、この 5 グループについて以下の試験を実施した。

2. 2 検討した試験項目

本研究では物質移動特性の評価方法として、気体を透過させる透気試験と、水分を浸透させる水分浸透速度係数試験を、モルタル試験体を作製することにより実施した。そして水和物の分析では、セメントペーストによる粉末 X 線回折を実施した。

(1) 粉末 X 線回折

試料は、50×70mm のチャック付ポリ袋にセメントペーストを打設し作製した。養生終了後、アセトンを用いて水和停止処理を行い、40°C、RH30%環境下に静置し、質量が恒量となった後に微粉砕し測定試料とした。

(2) 透気試験

試験体はφ100×25mm とし、20°C、RH60%環境下で封緘養生を施した後に、40°C、RH30%環境下に質量が恒量となるまで静置することで作製した。そして 0.1MPa の一定圧力で空気を透過させ、水上置換法により空気の透過量を計測し、透気係数を算出した。

(3) 水分浸透速度係数試験

試験体はφ50×100mm とし、JSCE-G 582-2018 に準拠し試験を実施した。浸漬後、一定時間経過した時点での浸透深さは、試験体を割裂し、水分検知剤を噴霧することで行った。

3. 試験結果および考察

3. 1 水和物分析結果

図-1に粉末X線回折結果を示す。ここでは、使用材料が異なるAグループと、BFS置換率が同一であるが結合材のSO₃含有量が異なるEグループの結果を示す。図より、それぞれのグループにおいて確認された大きな違いとして、Aグループでは使用材料が異なることから、BFSを使用した配合(△)とBFSを使用しないN配合(●)ではエトリンガイト(Aft)の有無が挙げられる。一方、Eグループでは、同一置換率であるが、結合材のSO₃含有量が多い配合(△)の方がAft生成量が多いという点が挙げられることが明らかとなった。

3. 2 物質移動試験結果

図-2に水分浸透深さと透気係数の関係を示す。水分浸透深さは、水分浸透速度係数試験において、試験体を水に浸漬後、48時間での計測結果を用いた。図-1において水和物分析結果を示したAグループ(△●)を見ると、透気係数は同程度であるが、Aftの生成が確認された配合(△)の方が水分浸透深さが小さく、Aftが水分の浸透抑制に寄与したのではないかと考えられる。一方、Eグループ(○△)では、水分浸透深さが同程度であるが、Aft生成量が多い配合(△)の方が透気係数が小さく、Aftが空気移動を阻害したと考えられる。

しかし、Eグループと同様に、同一置換率であるが結合材のSO₃含有量が異なる配合に着目すると、B20、B50では、それぞれ結合材のSO₃含有量が多い配合(□□)の方が透気係数が大きく、空気移動に対する抵抗が少ない結果となった。

以上のことから、BFSを使用することで水分の浸透は抑制されることが明らかとなった。一方、空気の透過に関しては、B20、B50のようなBA、BB相当では結合材のSO₃含有量が少ないほど空気の透過を抑制し、B85のようにBFS高置換の場合にはSO₃含有量が多いほど空気の透過を抑制するため、BFS置換率に依存することが確認された。セメント中のC₃AやAl₂O₃とSO₃の反応によりAftが生成され、SO₃が全て消費されるとモノサルフェート(AFm)が生成される。このことから考えると、BA、BB相当ではBFS高置換の場合と比較してAl₂O₃量が少なく、消費できるSO₃量が少ない。したがって石こうの残存やAftの消失により形成される空隙の増加により、SO₃含有量が増加するほど空気の移動に対する抵抗が小さくなり、一方でBFS高置換の場合ではAl₂O₃が多く、SO₃含有量が増加するほどAftが残存するため、空気の移動を阻害する傾向が確認されたと考えられる。

したがってBFSを使用する配合では、水分の浸透を抑制することが可能になる一方、空気の移動抵抗性を向上させる場合には、Al₂O₃含有量を考慮することが重要であると考えられる。

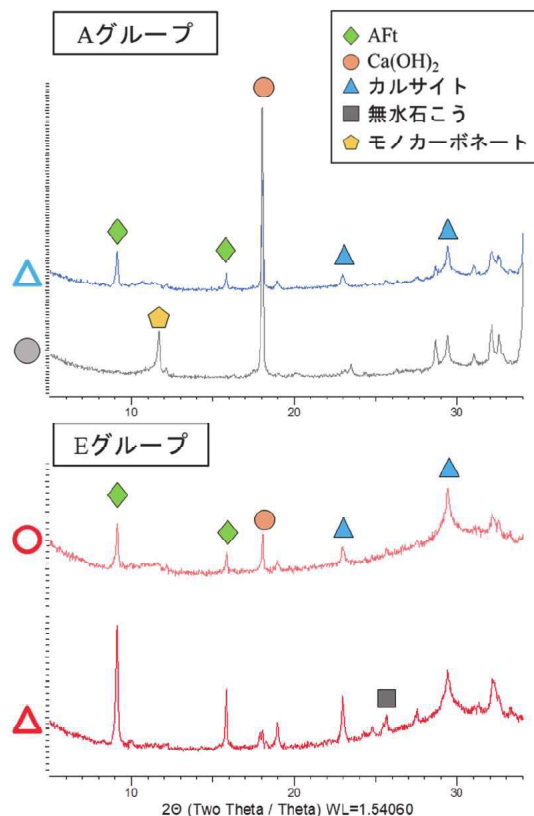


図-1 粉末X線回折結果 (A、Eグループ)

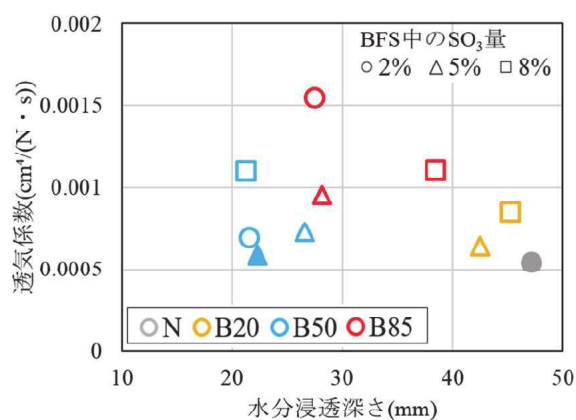


図-2 物質移動試験結果 (A~Eグループ)

謝辞

本研究は、2020年度セメント協会研究奨励金、ならびに日本スラグセメント・コンクリート技術研究会の助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 二戸信和ほか：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度とSO₃の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.121-126 (2008)
- 2) 辻大二郎：高炉スラグ高含有セメント系材料を用いた低炭素型コンクリートの開発、博士論文、東京大学 (2021)