

高炉スラグ微粉末のスケーリング劣化抑制とカルシウム溶脱の関係

日本大学大学院 学生会員 ○岩倉麻悠美
日本大学理工学部 正会員 佐藤 正己
日本大学理工学部 正会員 梅村 靖弘

1. はじめに

わが国では、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の凍結融解と塩分浸透によるスケーリング劣化が問題視されており、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが浸透することでこの劣化を著しく促進させている。既往の研究から、高炉スラグ微粉末(以下、BS)の混和による塩分浸透抑制効果は認められているが、スケーリング劣化低減効果には未だ不明確な点が多い¹⁾。本研究では、粗骨材の影響を無くしたウェットスクリーニング(以下、WS)モルタルを用いたスケーリング劣化試験結果より、凍結融解と塩分浸透の複合劣化作用におけるBSの抑制効果について検討を行った。

2. 研究方法

本研究の使用材料を表-1、配合表を表-2に示す。配合NSは普通ポルトランドセメントのみ、配合BBはセメントをBSで内割り45%置換(高炉セメントB種相当)したコンクリートとした。設計基準強度は27.0MPa相当、単位水量は160kg/m³、水結合比は55%、スランプは10±2.5cm、目標空気量はJIS A 5308 規定の凍害種別B「一般の凍害環境」²⁾に区分された4.5%とした。WSモルタルの圧縮強度をJIS A 1132とRILEM CIF/CDF試験³⁾に準拠した。試験体は打込み後、室内で24時間静置し、水温20℃で6日間水中養生、湿度65%、温度20℃で21日間養生した。スケーリング量はWSモルタルを用いてRILEM CIF/CDF試験³⁾に準拠し、図-1のように試験体をイオン交換水(以下、純水)と3%NaCl水溶液(以下、塩水)に浸漬させて測定した。なお、底面のみの劣化を測定するため、側面と上面に防水剤とエポキシ樹脂を塗布した。また、図-2に示す凍結融解サイクル4または5回毎のCaが溶出した試験液を用いてCa溶脱量を測定した。さらに、Caの溶脱と組織の変化との関

係を検討するため、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定と粉末X線回折(XRD)による水和生成物の同定を行った。試料は凍結融解サイクル60回終了後の塩水浸漬させた試験体の硝酸銀溶液噴霧法によって塩分浸透が確認された部位(以下、塩分浸透部)と浸透していない部位(以下、健全部)から採取した。

表-1 使用材料

材料名	記号	材料の種類	備考	
水	W	水道水		
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³	ブレン値: 3260cm ² /g
細骨材	S1	山砂	表乾密度: 2.63g/cm ³	FM: 2.05
	S2	碎石	表乾密度: 2.67g/cm ³	FM: 3.46
粗骨材	G	石灰岩碎石	表乾密度: 2.69g/cm ³	FM: 6.34
混和材	BS	高炉スラグ微粉末	密度: 2.89g/cm ³	ブレン値: 4380cm ² /g
混和剤	P	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体	
	AE	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	

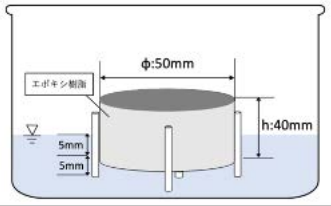


図-1 試験体概略図

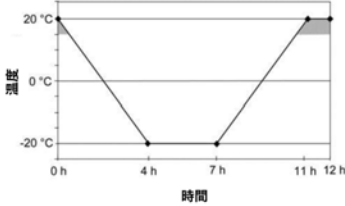


図-2 凍結融解サイクル

3. 実験結果

WSモルタルの圧縮強度は配合NSで33.5MPa、配合BSで31.1MPaとなり、コンクリートの設計基準強度27.0MPaを上回る圧縮強度が得られた。スケーリング量の結果を図-3に示す。なお、凡例記号中の「W」は純水浸漬、「N」は塩水浸漬とした。純水浸漬においてBBはNSとほぼ同じスケーリング量となった。塩水浸漬においてBBはNSの約80%となりNS>BBとなった。

表-2 配合表

配合名	W/B	単位量(kg/m ³)						混和剤		実測値		
		W	B		S1	S2	G	P	AE	スランプ (cm)	コンクリート 空気量 (%)	WSモルタル 空気量 (%)
			C	BS								
NS	55	160	291		584	224	1068	B×0.5(%)	B×0.6(%)	8.0	4.9	6.8
BB	55	160	160	131	553	213	1100	B×1.2(%)	B×0.3(%)	12.0	5.1	6.4

キーワード：高炉スラグ微粉末、凍結融解、スケーリング、溶脱、塩分浸透

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 TEL 03-3259-0687

Ca 溶脱量の結果を図-4 に示す。純水浸漬において BB は NS とほぼ同じ溶脱量となった。塩水浸漬において BB は NS の約 75% となり NS>BB となった。

細孔径分布を図-5 に示す。なお、凡例記号中の「normal」と「salt」は各々、健全部と塩分浸透部とした。健全部では、BB は NS と比較し、細孔径 0.1~1 μ m 範囲の細孔量のピーク値が少なく細孔量が減少したが、0.01~0.05 μ m の細孔量が多くなった。塩分浸透部では、BB は NS と比較し、細孔径分布は同様な分布状態となり、細孔径 0.1~1 μ m 範囲の細孔量のピーク値は同程度となったが、1 μ m 前後の細孔量が増加した。塩分浸透により、NS, BB ともに細孔量は減少したが、BB は NS と比較して粗大な空隙へシフトした。

XRD 回折パターンを図-6 に示す。エトリングタイトのピーク(回折角 9.1°)は NS, BB ともに確認されたが、モノサルフェート(回折角 9.9°)はいずれも確認されなかった。NS, BB ともにモノカーボネートのピーク(回折角 11.6°)は塩分浸透部で確認され、ヘミカーボネートのピーク(回折角 10.7°)は健全部でピークが確認された。また、NS と BB の塩分浸透部でのフリーデル氏塩のピーク値はほぼ同じになった。

4. 考察

高炉スラグ微粉末を用いた場合の緻密化が認められている⁴⁾。図-5 において細孔径 0.05~1 μ m 範囲の空隙量が BB は NS と比較して減少している。この空隙領域はセメント硬化体と細骨材の遷移帯領域で水酸化カルシウム(以下, CH)が多く存在しており⁵⁾、この CH と BS のポゾラン反応によってケイ酸カルシウム(C-S-H)が生成され、空隙が緻密化したことが推察された⁶⁾。その結果、塩分浸透が抑制され⁷⁾、スケーリング量が低減されたと考えられる。一方、塩分浸透部の細孔径 0.05~1 μ m 範囲の空隙量のピーク高さは健全部のそれと比較して NS で大きく減少し、BB のピークは変わらず、大きな細孔径へ若干シフトした。その結果、空隙量は NS=BB となった。これは塩分が浸透し易い NS は CH の Ca が溶脱し⁸⁾、空隙が増加したためと考えられる。

また、BB は NS と比較して空隙の緻密化のほかにフリーデル氏塩による塩化物イオンの固定化量が多くなったことも影響し、塩分が浸透し難くなったと考えられた⁷⁾。しかし、図-6 において BB のフリーデル氏塩のピーク高さは NS とほぼ同等になった。このことより、BB は NS と比較して主に塩分浸透前の空隙が緻密化していたことで塩分浸透が抑制され、遷移帯領域の CH からの Ca の溶脱が抑制されたと考えられる。その結果、スケーリング量が低減されたと推察される。

5. まとめ

高炉スラグ微粉末による空隙の緻密化が凍結融解と塩分浸透の複合劣化作用における抑制効果に大きく寄与していることが確認された。

【参考文献】

- 1) 檀康弘ら：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性，土木

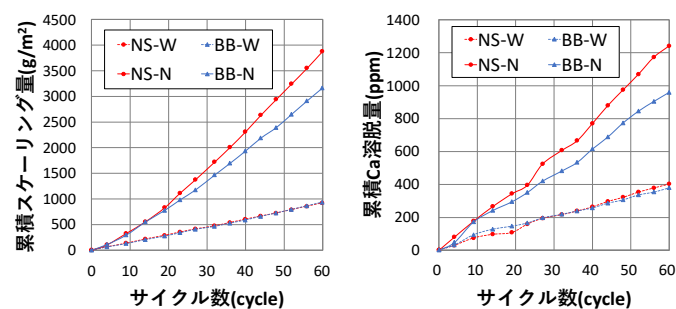


図-3 累積スケーリング量

図-4 累積 Ca 溶脱量

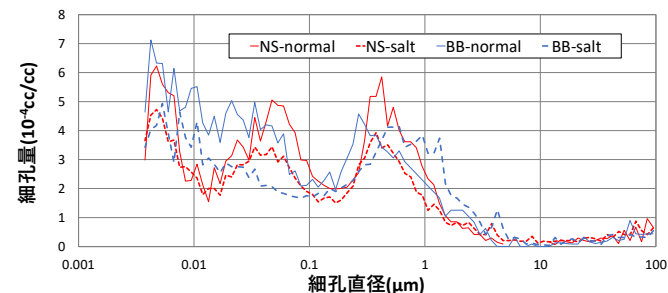


図-5 細孔径分布

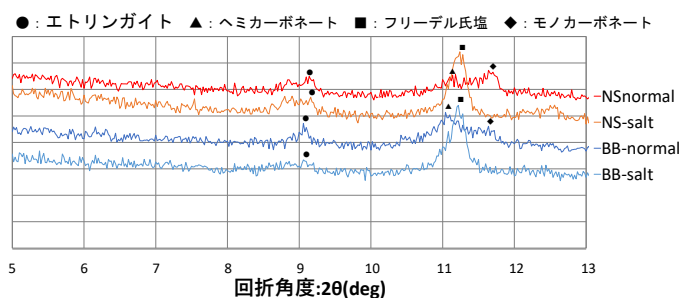


図-6 XRD 回折パターン

- 学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.291-299, 2009
- 2) 国土交通省 東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)改訂版 2019
- 3) Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B, Vol.37, pp.743-753, 2004
- 4) 吉田亮ら：高炉スラグ細骨材・微粉末による空隙構造の緻密化の相違とコンクリート硬化体物性への関与，コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.73-78, 2017
- 5) 羽原俊祐ら：硬化コンクリートの空隙構造とその物性, Gypsum & Lime, No.240, pp.28-37, 1992
- 6) 浅賀喜与志ら：セメントペースト硬化体とシリカフュームまたは高炉スラグ微粉末のポゾラン反応に伴う水和組織の変化, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.2-8, 2012
- 7) 梅村靖弘ら：モルタル硬化体中の塩化物イオンの透過性と固定化に及ぼす混和材の影響，コンクリート工学論文集, Vol.9, No.1, pp.143-152, 1998
- 8) 今野克幸ら：凍結防止剤による硬化セメントペーストのカルシウム溶脱の促進作用, Cement Science and Concrete Technology, Vol.69, No.1 pp.440-447, 2015