

環境負荷を低減する汎用型高炉セメントの創生： コンクリートの強度発現性と耐久性の評価

著者	濱 幸雄, 佐川 孝広, 塚本 康誉
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	26
ページ	9-14
発行年	2016-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008960

環境負荷を低減する汎用型高炉セメントの創生： コンクリートの強度発現性と耐久性の評価

著者	濱 幸雄, 佐川 孝広, 塚本 康誉
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	26
ページ	9-14
発行年	2016-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008960

環境負荷を低減する汎用型高炉セメントの創生 —コンクリートの強度発現性と耐久性の評価—

濱 幸雄*1, 佐川 孝広*2, 塚本 康誉*3

1 はじめに

環境負荷低減や産業副産物の有効利用の観点から高炉スラグ微粉末 (BFS) をコンクリート用混和材として利用する高炉セメントの研究が進められている¹⁾。高炉セメントは BFS を 40~45%程度混合した B 種が主に土木分野で使用されており、全セメント使用量の 20%程度を推移している。高炉セメント B 種の長所としては、普通ポルトランドセメント (OPC) と比較して低発熱であること、長期強度増大や初期の湿潤養生を十分に行うと優れた耐凍害性を有する²⁾などがある。一方で置換率の増大に伴い中性化抵抗性の低下³⁾、初期の強度発現が遅く強度発現の温度依存性が大きいことなど報告されている。今後も BFS の利用拡大が望まれているが、初期強度発現性や中性化抵抗性の観点から、高炉セメント B 種を OPC と同様に用いることは難しく、現状ではさらなる利用拡大は困難である。

そこで BFS を広く薄く使用するため、BFS 混合率を 5~30%程度とした高炉セメント A 種の研究が行われている⁴⁾⁷⁾。高炉セメント A 種は OPC と同様の用途で用いることができると言われているが、B 種と同様に初期強度や中性化抵抗性が劣ることが指摘されている。既往研究で谷田貝らは、化学成分を調整した高炉セメント A 種相当のコンクリートを用いた場合、水セメント比を 2-3%程度低下させることにより、OPC と同等の中性化速度とすることができることを示している⁷⁾。

しかしながら寒冷地では、中性化抵抗性のみならず耐凍害性が懸念される。中性化と凍害の複合劣化は、それぞれ単独の場合とは異なり、凍害によるひび割れが中性化を促進させる可能性や、中性化による細孔構造の変化が耐凍害性に影響を及ぼす可能性がある。中性化と凍害の複合劣化については、竹田らによって OPC の場合の結果が報告されているが⁸⁾、高炉セメントを用いた研究は少なく、より詳細な検討が必要である。

そこで本研究では、高炉セメントにおける BFS 置換率が中性化と凍害の複合劣化に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験検討を行なった。

2 実験概要

2.1 使用材料および試験体条件

表 1 に実験計画とフレッシュ性状を、表 2 に使用材料を示す。結合材として、研究用普通ポルトランドセメント (少量混合成分を含まない普通ポルトランドセメント : OPC) および高炉スラグ微粉末 (BFS) を、少量混合成分として石灰石微粉末 (LSP) と無水石膏 (CS) を、細骨材に白老産陸砂を用い、水結合材比 (W/B) 55%、結合材 : 砂を 1 : 3 としたモルタルを混練し、40×40×160mm の角柱試験体を作製した。試験体種類は、混和材を含まない N、BFS を 15%、45%置換した BA (A 種相当)、BB (B 種相当)、および BA に LSP および CS を添加した BA1、BA2、BA3 の 6 種類とした。LSP と CS の添加率は、既往研究で BFS15%の条件で最も強度発現性に優れた LSP4%、CS2%添加を基準とした⁹⁾。なお、化学混和剤を使用していないが、フレッシュ性状は、空気量が 4.2±1.0%、フローが 180±10mm の範囲にある。

*1 : 室蘭工業大学 暮らし環境系領域建築ユニット・教授

*2 : 前橋工科大学・准教授(元 日鉄住金セメント株式会社)

*3 : 室蘭工業大学 大学院博士前期課程環境創生工学系専攻

表 1 実験計画

試験体名	W/B (%)	B:S	結合材構成比率(%)				測定項目	フレッシュ性状	
			OPC	BFS	少量混合成分量			空気量 (%)	フロー (mm)
					LSP	CS			
N	55	1:3	100	-	-	-	フレッシュ性状	5.1	176
BA			85	15	-	-	一次共鳴振動数	5.0	177
BB			55	45	-	-	中性化深さ	3.4	189
BA1			79	15	4	2	圧縮強度	4.1	188
BA2			83		-	2	細孔径分布	4.2	181
BA3			81		4	-	全空隙率	4.2	189

表 2 使用材料

2.2 試験項目および方法

試験項目はフレッシュ性状（フロー，空気量），圧縮強度，凍結融解試験，促進中性化試験および空隙構造（全空隙量，水銀圧入法による細孔構造測定）である。

圧縮強度試験は，標準水中養生 4 週で JIS R 5201 に準じて行った。

凍結融解試験は，JIS A 1148A 法（水中凍結水中融解試験）に準じて行い，一次共鳴振動数を測定し動弾性係数を算出した。促進中性化試験は，JIS A 1153（CO₂ 濃度 5%，室温 20℃，相対湿度 60%RH）に準じて行い，中性化促進材齢 13 週までの中性化深さから中性化速度係数を算出した。

空隙構造の測定は，標準水中養生 4 週および凍結融解 60cyc 後の試験体から 5mm 角の立方体試料を切り出し，エタノール置換による水和停止を 1 週間行なった後 D-dry 乾燥を行った試料を用いて，水銀圧入法による細孔構造の測定とアルキメデス法により，全空隙率の測定を行った。

2.3 複合劣化試験

表 3 に複合劣化試験の条件を示す。複合劣化試験は，JIS A 1148A 法による凍結融解作用を 12, 30, 60 サイクル与えた凍害劣化の程度の異なる試験体を用いて促進中性化試験を行うシリーズ 1 と，促進中性化を 7 週間行った後に凍結融解試験を行うシリーズ 2 のふたつの条件とした。なお，比較のために，凍結融解試験および促進中性化試験単独の条件も加えている。

種類	物性
セメント	研究用普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	白老産陸砂(表乾密度 2.66g/cm ³)
混和材	高炉スラグ微粉末 4000Blaine (密度 2.91g/cm ³)
	石灰石微粉末(密度 2.73g/cm ³)
	無水石膏(密度 2.96g/cm ³)

表 3 促進劣化の条件

		劣化付与条件		
シリーズ 1	凍結融解	なし	➡	促進中性化
		12cyc.		
		30cyc.		
		60cyc.		
シリーズ 2	促進中性化	7w	➡	凍結融解
	気中養生	7w		

3 実験結果および考察

3.1 基礎性状

図 1 に圧縮強度試験結果を示す。N,BA,BB と BFS 置換率の増加とともに圧縮強度は低下している。また，少量混合成分として LSP と CS を添加した場合には，

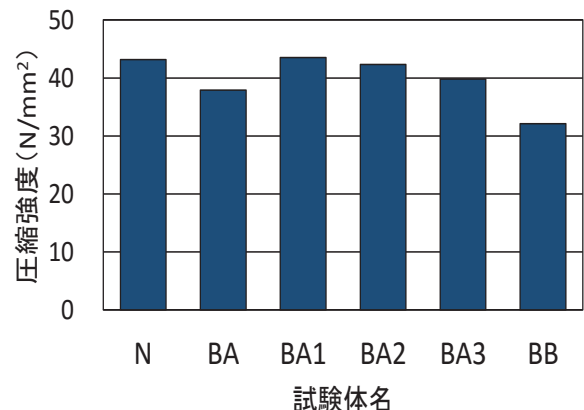


図 1 圧縮強度

既往研究⁹⁾と同様に、Nと同程度まで圧縮強度が改善している。

図2に中性化単独の場合の結合材種類による中性化速度係数を比較して示す。BFS置換率が増加するほど中性化速度係数が大きくなっている。また、図3に直径0.05-10 μ mの毛細管空隙量と中性化速度係数の関係を示す。一般に、高炉セメントの中性化抵抗性が劣る理由として、BFSの反応速度が遅く、BFS置換率が高くなると中性化試験を開始する材齢では水和組織の緻

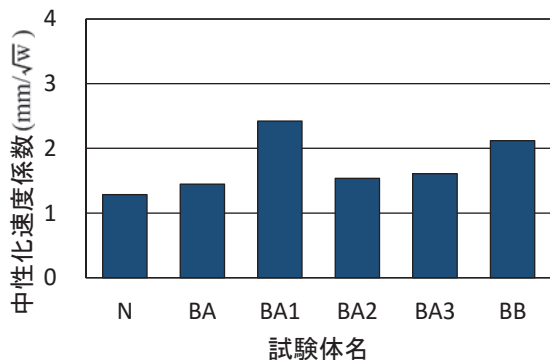


図2 中性化速度係数

密化が十分に進行していないことや、直径0.05-0.1 μ m以上の毛細管空隙量が多いほど中性化が進行しやすい¹⁰⁾ことが指摘されているが、図3ではBFS置換率の増加にともない0.05-10 μ m以上の毛細管空隙は減少しており、上記の指摘とは対応しておらず、中性化速度係数の差を細孔構造の緻密化の差では説明できない。また、アルカリ源としてのOPC量の低下とBFSの潜在

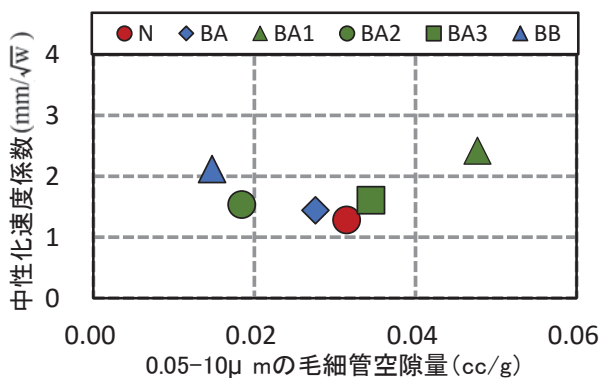


図3 直径0.05-10 μ m毛細管空隙量と中性化速度係数の関係

水硬性の進行によってもCH量が減少することやBFS置換率が増加した場合の生成されるC-S-HのCa/Si比が低くなることも、BFS置換率の増加にともなう中性化速度の増加の一因と考えられる。

さらに、高炉A種相当の条件では、最も圧縮強度の高いBA1が最も中性化速度係数が高くなっているが、これはLSPとCSの添加によりBFSの反応が促進され、CHの消費とBFSの自己中性化が生じたためと考えられる。

図4に凍結融解単独の場合の耐久性指数を比較して示す。全ての試験体で耐久性指数60%を下回る結果となった。また、BFS置換率が増加するほど耐久性指数も低下している。また、少量混合成分の混入条件により耐久性指数に大きな差が見られ、CSのみを混入したBA2がLSPを混入したBA1、BA3よりも耐久性指数は高く、Nと同程度の値を示している

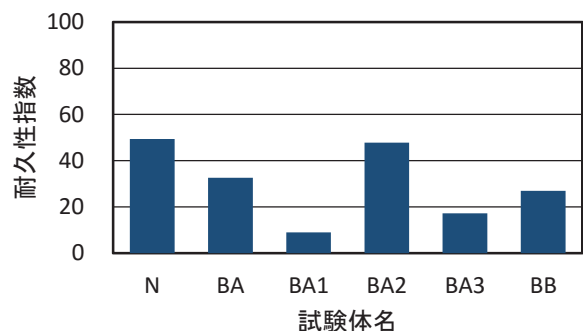


図4 耐久性指数

図5に空気量と耐久性指数の関係を示す。本研究では、化学混和剤を用いておらず、空気量は4.2 \pm 1.0% (コンクリート換算で2.5%程度のnon-AE)の条件であるが、空気量が多いほど耐久性指数が高くなる傾向が見られる。しかしながら、少量混合成分の混入条件の異なるBA1、BA2、BA3は空気量がほぼ同じであるにもかかわらず、耐久性指数に差が見られた。コンクリートの耐凍害性は細孔構造の影響が大きいことは良く知られており、直径40-2000nmの細孔量が増加すると耐凍害性が低下するといわれている¹¹⁾。そこで、上記の高炉A種相当で少量混合成分の混入条件の異なるBA1、BA2、BA3およびBAの直径40-2000nmの細

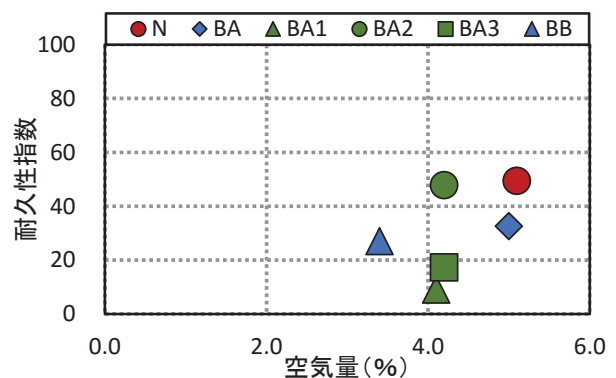


図5 空気量と耐久性指数の関係

孔量と耐久性指数の関係を図 6 に、累積細孔量を図 7 に比較して示す。この場合においても、直径 40-2000nm の細孔量が増加するほど耐久性指数が低下しており、耐久性指数の低い BA1, BA3 は累積細孔量の立ち上がりも小径側にシフトしつつ、総細孔量が増大しており、細孔構造の粗大化が耐凍害性低下の一因であると考えられる。

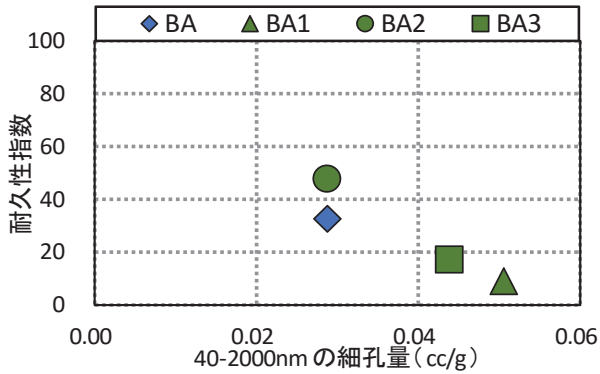


図 6 直径 40-2000nm の細孔量と耐久性指数の関係

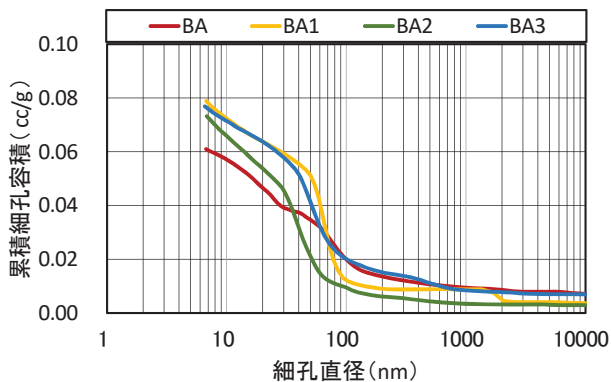


図 7 累積細孔容積

3.2 凍害劣化程度が中性化抵抗性に及ぼす影響

図 8 に凍害劣化の有無による中性化速度係数の変化を示す。N, BB を除いて凍害劣化を受けることで中性

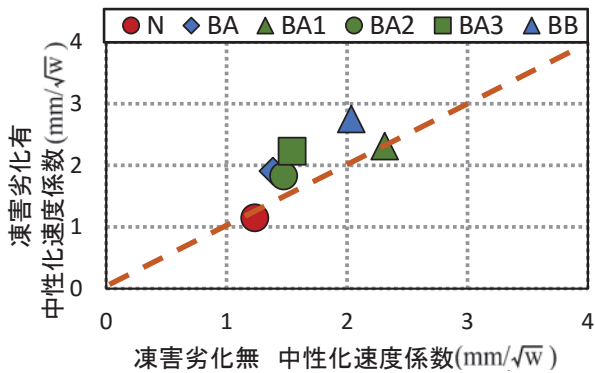


図 8 凍害劣化の有無による中性化速度係数の変化

化速度係数は大きくなる傾向を示している。図 9 に相対動弾性係数と中性化速度係数の関係を示す。OPC を対象とした既往の研究では、凍結融解作用による劣化が進行すると、内部に微小なひび割れが発生するため中性化進行が早くなる場合があるが、同時に相対動弾性係数が 80%以上では凍結融解繰り返しによる劣化が中性化の進行に及ぼす影響は小さい⁸⁾ という報告がある。本実験においても、凍結融解による劣化程度が BA3 を除いて相対動弾性係数 75~90%程度であり、中性化速度係数に大きな変化は認められず、相対動弾性係数が 50%以下まで劣化した BA3 においても同様である。

凍結融解による全空隙量の変化について、凍結融解回数 0 と 60 サイクル時の全空隙量を図 10 に、インクボトル細孔量を図 11 に示す。全ての試験体において凍結融解作用による全空隙量の変化は顕著ではない。しかしながら、凍結融解によって中性化速度係数が増加した N, BB 以外の試験体で凍結融解後にインクボトル

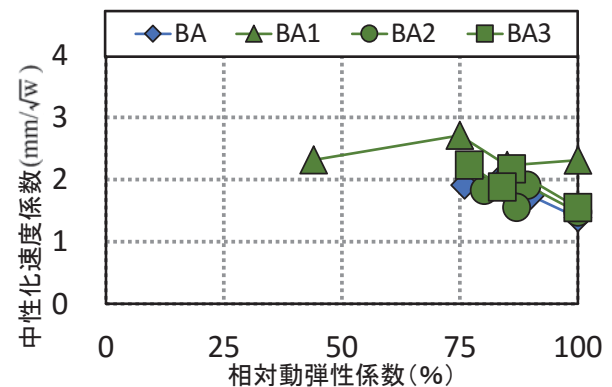
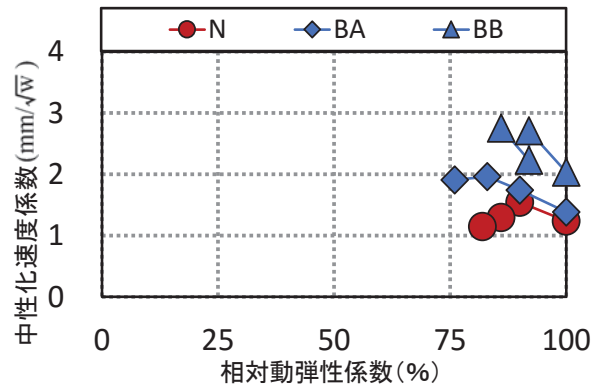


図 9 相対動弾性係数と中性化速度係数の関係

細孔量が減少する傾向を示している。凍結融解作用中にインクボトル細孔に浸入、蓄積された水は、促進中性化環境においても乾燥しにくく、二酸化炭素の進入を阻害すると思われる。N, BB 以外の試験体は、凍結融解作用によってインクボトル細孔量が減少したため、わずかではあるが中性化速度係数が増加したと考

えられる。

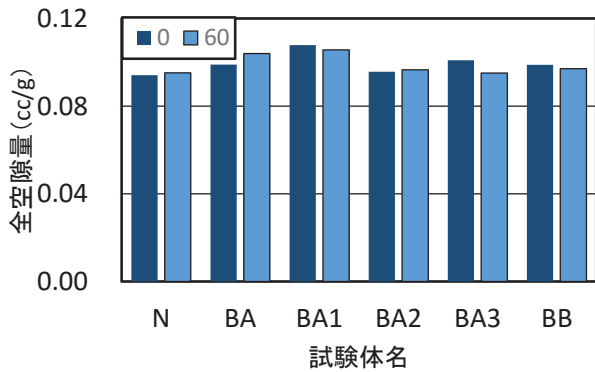


図 10 凍害融解作用による全空隙量の変化

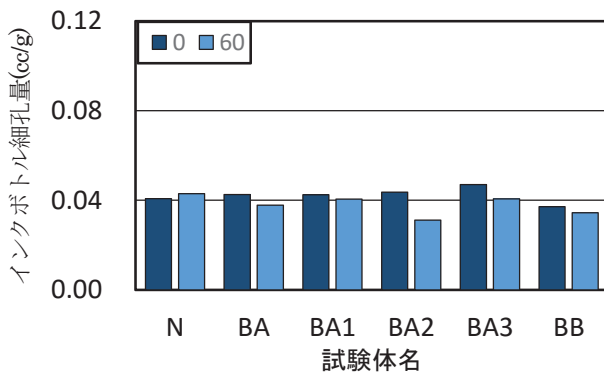


図 11 凍結融解作用によるインクボトル細孔量の変化

3.3 中性化の有無による耐凍害性への影響

中性化の有無による耐久性指数の変化を図 12 に、凍結融解による質量変化を図 13 に示す。中性化による耐久性指数の変化には一定の傾向を認めることができなかった。一方、質量変化率は中性化によって減少する傾向が認められた。

一般に、中性化により細孔構造は緻密化するといわれており、細孔構造の緻密化は耐凍害性の向上に寄与

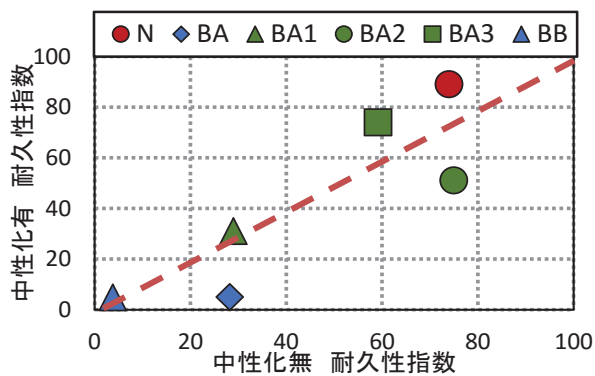


図 12 中性化の有無による耐久性指数

すると考えられる。そこで、耐凍害性に影響の大きいといわれている直径 40-2000nm の細孔量と耐久性指数の関係を中性化の有無で比較して図 14 に示す。全ての試験体で中性化によって直径 40-2000nm の細孔量は減少しており、中性化による細孔構造の緻密化が確認できた。N, BA3 のように中性化によって耐久性指数が向上し、質量減少率が低下する場合には、中性化による細孔構造の緻密化でその理由を説明できるが、BA, BA2, BA3 のように耐凍害性に影響する直径 40-2000nm の細孔量が減少しているにもかかわらず耐久性指数が

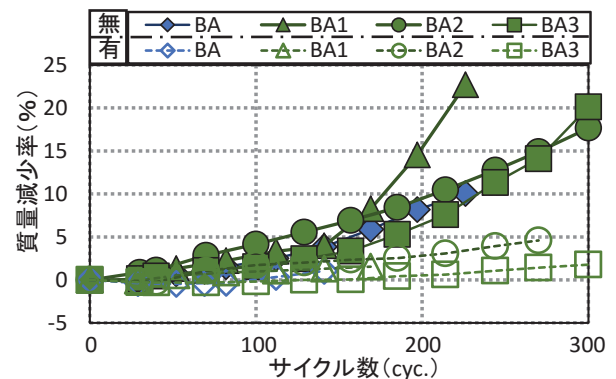
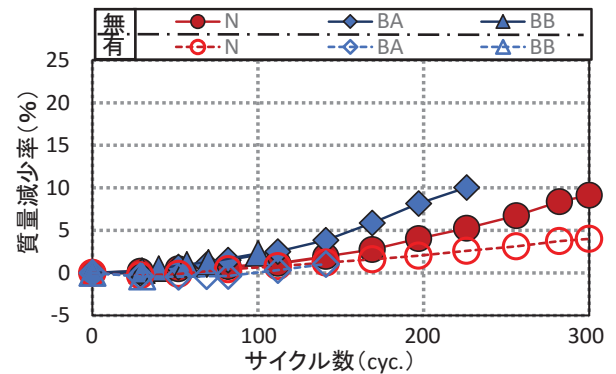


図 13 凍結融解による質量減少率

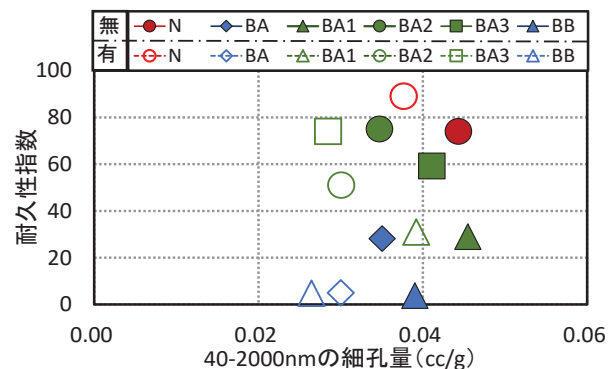


図 14 直径 40-2000nm の細孔量と耐久性指数の関係

低下している理由については現段階では説明することができない。

4 まとめ

本研究では、環境負荷低減を目指して BFS 置換率と少量混合成分の混入条件を変化させた高炉セメントの強度増進性状と耐久性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) BFS 置換率が多くなるほど圧縮強度、中性化抵抗し、耐凍害性は低下するが、少量混合成分の適切な添加により改善できる可能性がある。
- 2) 凍害劣化は中性化抵抗性を低下させるが、その影響程度はそれほど大きくない。また、凍結融解作用によるインクボトル細孔量の減少が、中性化抵抗性低下に影響している。
- 3) 中性化によって耐凍害性に影響する直径 40-2000nm の細孔量は減少し細孔構造の緻密化するが、中性化による耐久性指数の変化には一定の関係が認められなかったが、中性化により質量減少率が低下する傾向は確認できた。

文 献

- 1) 鐵鋼スラグ協会:鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, 平成 25 年度
- 2) 近松竜一ほか: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.355-360, 1989
- 3) 松家武樹ほか: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートに関する基礎的研究, Cement Science and Concrete Technology, No.64, pp.295-302, 2010
- 4) 伊代田岳史ほか: 耐久性向上と環境負荷低減を目的とした高炉セメント A 種への少量混合材の適用検討, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, pp125-134, 2014
- 5) 百瀬晴基, 関田徹志, 石関浩輔, 今本啓一, 清原千鶴: 低収縮高炉セメントコンクリートに関する研究, 鹿島技術研究年報, 第 62 号, 2014.9
- 6) 谷田貝敦ほか: 化学成分を調整した高炉セメント A 種のコンクリートの性質, JCI 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp.63-68, 2011
- 7) 谷田貝敦ほか: 鉱物組成を調整したクリンカーを用いた高炉セメント A 種の特性, セメント・コンクリート論文集, No.66, 2013
- 8) 竹田宣典ほか: 凍結融解と中性化の複合劣化作用を受けるコンクリートの耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 24-1, 735-740, 2002
- 9) 塚本康誉ほか: 高炉セメント A 種の材料設計と強度発現, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp347-348, 2014.9
- 10) 橋田浩: 細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の

形成機構に関する検討,清水建設研究報告, 第 63 号, pp1-10, 平成 8 年

- 11) 鎌田英治: コンクリートの凍害と細孔構造, コンクリート工学年次論文報告集, 10-1, 51-60, 1988 福山智子: 2013 年度日本建築学会大会(北海道)の概要報告, 建築雑誌, Vol.129, No.1654, p.43 (2014)