

高炉スラグ微粉末の置換率が異なるコンクリートの耐凍害性に及ぼす中性化の影響

その他（別言語等）のタイトル	Influence of Carbonation on Frost Resistance of Concrete with Different Blast Furnace Slag Replacement Ratios
著者	佐藤 亮太, 野口 巧巳, 金 準鎬, 濱 幸雄
雑誌名	コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS
巻	18
ページ	431-436
発行年	2018-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010346

論文

高炉スラグ微粉末の置換率が異なるコンクリートの耐凍害性に及ぼす中性化の影響

佐藤 亮太^{*1}, 野口 巧巳^{*1}, 金 準鎬^{*2}, 濱 幸雄^{*3}

Influence of Carbonation on Frost Resistance of Concrete with Different Blast Furnace Slag Replacement Ratios

Ryota SATO^{*1}, Takumi NOGUCHI^{*1}, Junho KIM^{*2} and Yukio HAMA^{*3}

要旨：本研究では、高炉スラグ微粉末置換率の異なるコンクリートの中性化と凍害の複合劣化について検討した。その結果、AE コンクリートにおいては、中性化することで、耐久性指数は高炉スラグ微粉末置換率によらず向上し、スケーリング量も抑制されることが分かった。一方、non-AE コンクリートにおいては、高炉セメント A 種、B 種および C 種では中性化することで耐久性指数は 20 以下まで低下し、高炉スラグ微粉末置換率による差は小さくなった。また、高炉スラグ微粉末置換率が増加するほど促進中性化後の凍結融解試験によるスケーリングは抑制された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、複合劣化、中性化、耐凍害性、BFS 置換率

1. はじめに

高炉スラグ微粉末 (BFS) は、環境負荷低減や産業副産物の有効利用の観点から、更なる利用拡大が求められている。高炉セメントは、BFS を普通ポルトランドセメント (OPC) に置換したものであり、セメント量の低減やセメント由来の CO₂削減・省資源に寄与している。JIS 規格では、BFS の置換率により A 種 (5 を超え 30%以下)、B 種 (30 を超え 60%以下)、C 種 (60 を超え 70%以下) の 3 種類に分類されている。高炉セメントは、OPC に比べ、低発熱性を有し、長期強度が大きいなどの長所がある一方で、温度依存性が高く、中性化抵抗性が低いなどの特徴がある^{1),2)}など。

寒冷地のコンクリートでは、凍害は代表的な劣化現象である。近年では、コンクリートの凍害と塩害、塩害とアルカリシリカ反応 (ASR)、凍害と ASR などの複合劣化に関する研究が着目されている。一方、実構造物では当然年間を通して中性化が進行している。寒冷期には凍結融解作用を受け、中性化が凍害に影響を及ぼすことが懸念される。竹田ら³⁾は OPC では、中性化と凍害の相互に及ぼす影響が小さいことを報告したが、中性化抵抗性に劣る高炉セメントについて、中性化と凍害の複合劣化に関する検討は殆どなされていない。

そこで著者ら⁴⁾は、BFS 置換率の異なるモルタルを対象に中性化と凍害の複合劣化を検討してきた。

これまでに、凍害は中性化抵抗性を低下させるが影響は小さく、中性化は耐凍害性を変化させ、BFS 置換率によって傾向が大きく異なることを把握した。

本研究では、モルタル実験の結果を踏まえて、BFS 置換率が異なる AE および non-AE コンクリートを対象として、耐凍害性に及ぼす中性化の影響を検討することを目的とする。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

表-1 に実験計画を示す。空気量の異なるコンクリートを対象に、中性化による耐凍害性の変化を検討するため、促進中性化と同一期間水中養生した供試体を用いて水中凍結融解試験、CIF 試験を行った。

2.2 使用材料および調査

表-2 に使用した材料の物性を示す。結合材は OPC および BFS を使用し、細骨材は白老産陸砂、粗骨材

表-1 実験計画

目標 Air (%)	目標 SL (cm)	初期養生	環境条件	測定項目
4.5±1.5 (AE)	18.0±2.0	水中 4 週	気中養生 13 週	圧縮強度 促進中性化 凍結融解 CIF
1.0±1.0 (non-AE)			促進中性化 13 週	

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科環境創生工学系専攻 博士前期課程

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 博士研究員

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 教授

には敷生川水系安山岩を用いた。結合材の BFS 置換率は、0% (OPC : N), 15% (高炉セメント A 種相当 : BA), 45% (高炉セメント B 種相当 : BB), 65% (高炉セメント C 種相当 : BC) とした。

表-3 にコンクリートの調合とフレッシュ性状を示す。N, BA, BB, BC の 4 種類の結合材を用いて、W/B55%, 細骨材率 (s/a) 45%, 目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の AE コンクリート, 目標空気量 $1.0 \pm 1.0\%$ の non-AE コンクリートを混練した。目標スランプはどちらも 18cm とした。ここで non-AE コンクリートを用いた理由は、凍結融解試験で確実に劣化させることを意図したためである。スランプ、空気量のフレッシュ性状は、目標値を満足している。

2.3 実験項目および方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて、標準水中養生・材齢 4 週で、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準じて測定を行った。なお、同一条件の供試体数は 3 本とした。

(2) 促進中性化試験

促進中性化試験は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じ、 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH} \cdot \text{CO}_2$ 濃度 5% の条件下で促進中性化を行い、促進材齢 13 週で割断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。なお、同一条件の供試体数は 1 本とした。

(3) 凍結融解試験

水中凍結融解試験は、 $75 \times 75 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体を用い、JIS A 1148 A 法「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて測定を行い、CIF 試験は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用い、RILEM 法に準拠して測定を行った。

水中凍結融解試験は、内面に突起部を有するゴム製の容器に供試体を入れ、供試体の上面より 5~10mm 程度の高さまで注水し、一定の温度条件 (-

$18^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$) において常時水中で凍結融解繰り返しを行う。また、促進中性化による凍結融解時の内部劣化の抵抗性を評価するために供試体全面を中性化させたものを用いた。

CIF 試験は、試験容器の中で供試体の下面 5 mm が水に浸された状態で、一定の温度条件 ($-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$) において一面凍結融解の繰り返しを行う。そこで、一面のみを中性化させた $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用い、表面のみから受ける劣化を評価した。これら両試験の比較対象には、促進中性化させずに $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ での気中養生を行ったものを用意し、同一条件の供試体数は 2 本とした。

表-2 使用材料

材料種類	記号	分類および物性
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度 : $3.17(\text{g}/\text{cm}^3)$ 比表面積 : $3500(\text{cm}^2/\text{g})$
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末 4000Blaine 密度 : $2.91(\text{g}/\text{cm}^3)$ 比表面積 : $3930(\text{cm}^2/\text{g})$
細骨材	S	白老産陸砂 表乾密度 : $2.67(\text{g}/\text{cm}^3)$ 密度 : $2.63(\text{g}/\text{cm}^3)$ 粗粒率 : 2.76(%) 吸水率 : 1.57(%)
粗骨材	G	敷生川水系安山岩 最大寸法 : 20(mm) 表乾密度 : $2.57(\text{g}/\text{cm}^3)$ 絶乾密度 : $2.49(\text{g}/\text{cm}^3)$ 粗粒率 : 6.53(%) 吸水率 : 2.98(%)
化学混和剤	AE	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体) 密度 : $1.23 \sim 1.27(\text{g}/\text{cm}^3)$

表-3 調合表およびフレッシュ性状

供試体 記号	W/B (%)	s/a (%)	結合材構成比率 (%)		単位質量(kg/m^3)					AE 減水剤	フレッシュ性状	
			OPC	BFS	W	OPC	BFS	S	G	(ml/m^3)	Air(%)	SL(cm)
AE-N	55	45	100	0	184	335	0	761	973	836	4.1	19.0
AE-BA			85	15	180	278	49	771	975	818	4.5	18.3
AE-BB			55	45	178	178	146	772	975	809	4.6	18.6
AE-BC			35	65	176	112	208	774	977	800	3.8	18.2
non-N			100	0	204	371	0	769	988	0	2.0	19.6
non-BA			85	15	202	312	55	770	990		1.8	18.7
non-BB			55	45	200	200	164	770	990		1.5	18.4
non-BC			35	65	198	126	234	772	992		1.4	17.6

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリート供試体の基礎性状

(1) 中性化深さおよび中性化速度係数

図-1 に BFS 置換率と AE および non-AE の促進中性化 13 週と 20°C・60%RH 気中養生 13 週での中性化深さの関係を示す。AE および non-AE において、促進中性化、気中養生のいずれの環境でも BFS 置換率が高いほど中性化深さは大きくなっており、BFS 置換率が高くなるほど中性化抵抗性が低下するという報告りに一致する。また、N, BA の AE と non-AE を比べると、AE では N, BA の中性化深さが増加した。これは、AE 減水剤による連行空気の影響で連続空隙が増加することでガスの透気性が向上し、N, BA においては中性化が進行したことが理由だと考えられる。

図-2 に BFS 置換率と材齢 4 週の圧縮強度の関係を示す。AE および non-AE 共通して、圧縮強度は BFS 置換率が高くなるほど低下する傾向を示した。これは、BFS 置換率が高くなるにつれて強度発現が遅延するためと考えられる。

図-3 に材齢 4 週の圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。促進中性化試験における中性化速度係数と圧縮強度には相関関係が林ら⁵⁾によっても認められており、本実験でも圧縮強度が低いほど中性化速度係数が大きくなった。これは BFS 置換率が高いほど水と反応が遅く、同一養生期間では十分に組織の緻密化が進まないことや、元々の高炉セメント中の OPC の割合が低いこと、BFS の潜在水硬性により水酸化カルシウムが消費されたこと⁶⁾が原因であり、セメント硬化体の pH が低くなるだけでなく、緻密化してない毛細管空隙から CO₂ がコンクリート内部に侵入したため中性化が助長されたと考えられる。

(2) BFS 置換率が異なるコンクリートの耐凍害性

図-4 に水中凍結融解試験における AE での相対動弾性係数の変化を示す。a) 水中 4 週の変化をみると、BFS 置換率によらず、300 サイクル経過後も相対動

弾性係数が 80%を維持しており、連行空気の高い耐凍害性向上効果を確認した。

図-5 に水中凍結融解試験における non-AE での相

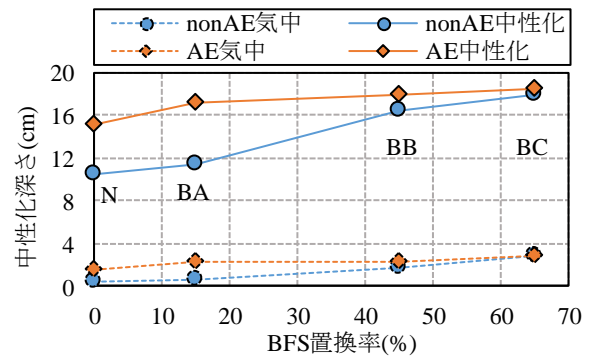


図-1 BFS 置換率と中性化深さの関係

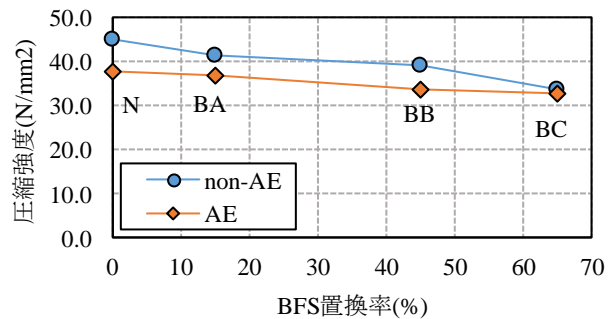


図-2 BFS 置換率と材齢 4 週圧縮強度の関係

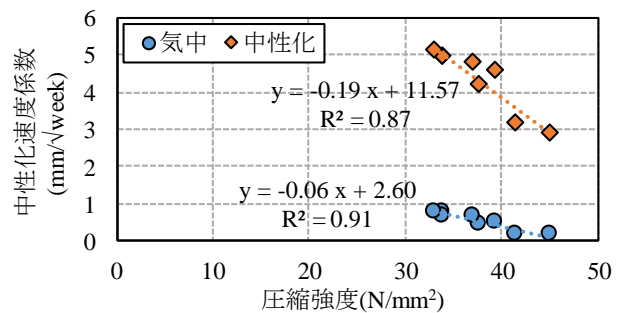


図-3 材齢 4 週圧縮強度と中性化速度係数の関係

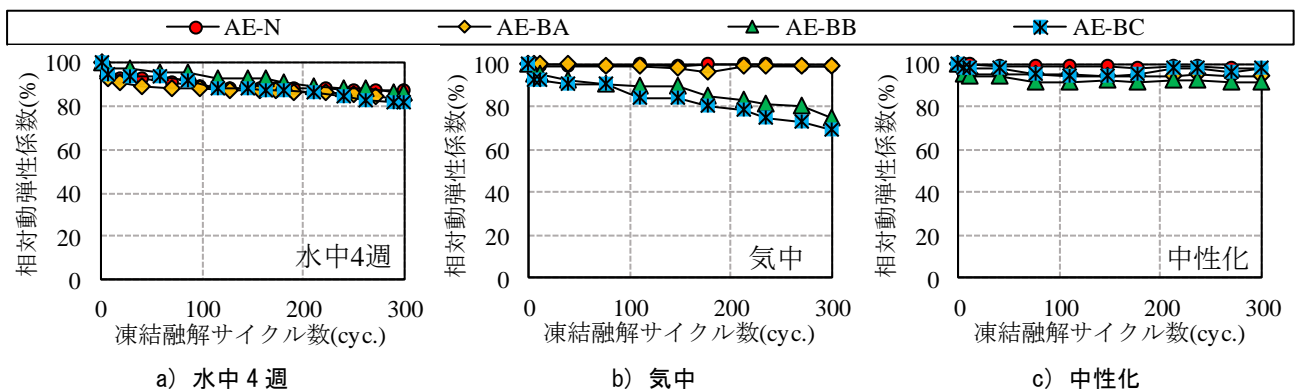


図-4 水中凍結融解試験における相対動弾性係数の変化 (AE)

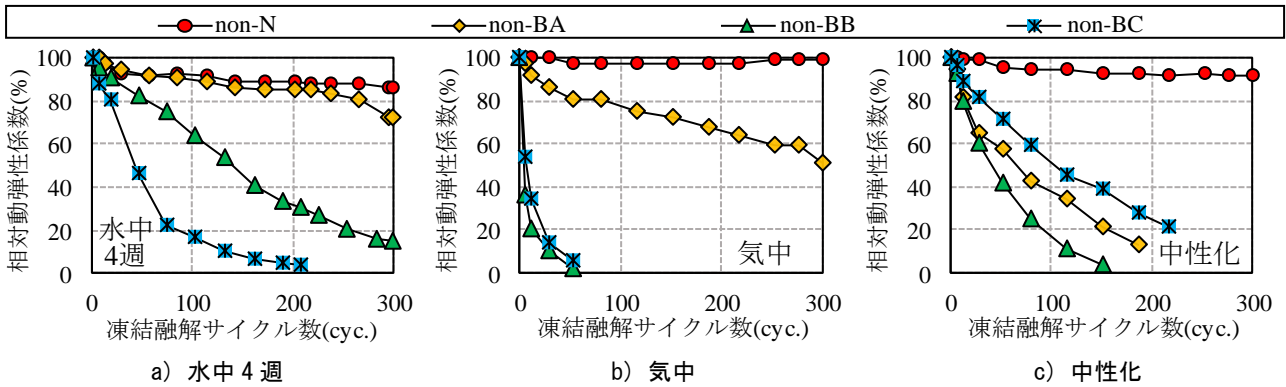


図-5 水中凍結融解試験における相対動弾性係数の変化 (non-AE)

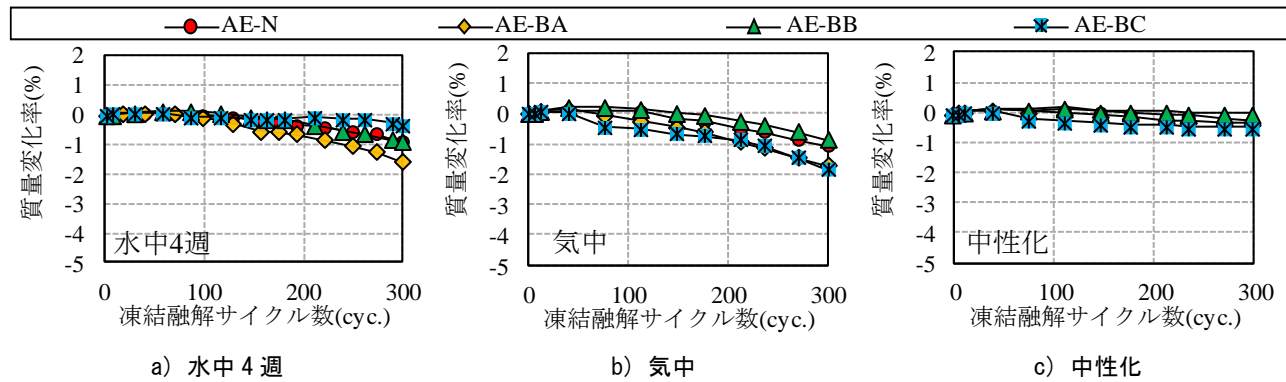


図-6 水中凍結融解試験における質量変化率 (AE)

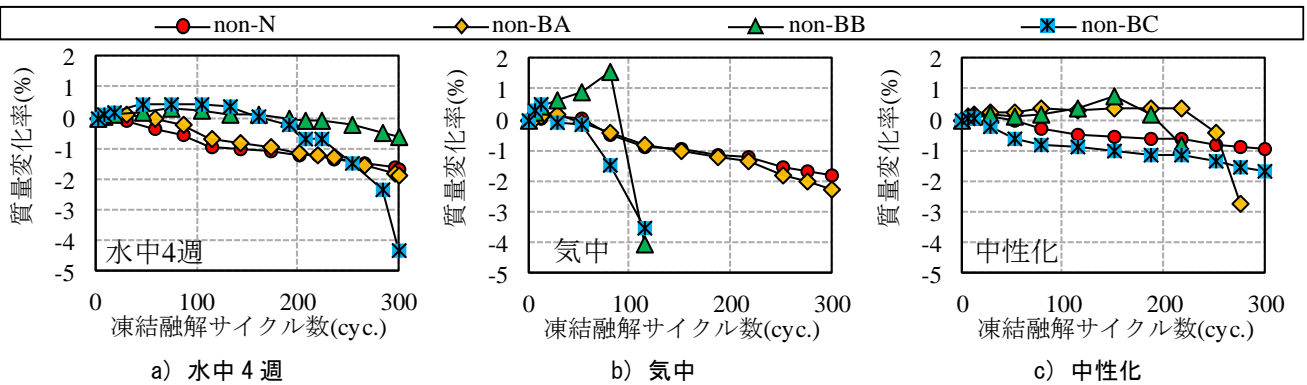


図-7 水中凍結融解試験における質量変化率 (non-AE)

対動弾性係数の変化を示す。a)水中4週の変化をみると、Nでは300サイクル後も80%以上と高い値を示した。しかしBAにおいては、200サイクル前後まではNと類似した傾向を示したものの、300サイクル経過までに80%を下回った。さらにBB、BCにおいては、凍結融解開始時から相対動弾性係数は急激に低下する傾向を示し、100サイクル前後までに60%以下となった。以上より、BFS置換率が高いほど劣化が進行する傾向を確認したが、その原因は未だ不明であり、今後さらに考察が必要である。

3.2 中性化による耐凍害性の変化

図-4において、AEかつ凍結融解試験前の養生が

b)気中養生の場合、N、BAではほとんど劣化していないことがわかるが、BB、BCにおいては、相対動弾性係数が80%以下まで低下している。次に、凍結融解試験前の養生がc)促進中性化の場合には、N、BA、BBおよびBCで相対動弾性係数が90%程度にとどまった。一方、図-5において、non-AEにおけるb)気中養生の結果をみると、Nは300サイクルにおいてもほとんど劣化していないのに対し、BAでは緩やかな劣化傾向を示し、BB、BCでは6サイクルの段階で急激に劣化した。次に、c)促進中性化の場合には、Nでは変化はほとんどなく、BA、BBおよびBCでは、劣化傾向を示した。また、BAでは気中

時よりも劣化が進行し、BB, BC では、わずかに劣化が抑制されていることがわかる。

図-6 に水中凍結融解試験における AE での質量変化率を示す。全ての水準において質量変化率は 2% 以下にとどまっております。特に c) 促進中性化させた場合、質量変化の抑制が顕著にみられた。

図-7 に水中凍結融解試験における non-AE での質量変化率を示す。a) 水中 4 週および b) 気中養生での N, BA では凍結融解サイクル数の増加とともに供試体表面層のスケーリングによる質量減少がみられる。BB, BC では a) 水中 4 週および b) 気中養生において、凍結融解試験の進行に伴いコンクリート内部にひび割れが発生し、そこに水分が侵入することで質量の増加が見られた。さらにその後、スケーリングによって質量減少に転じており、特徴的な凍害劣化挙動が確認できた。特に BB, BC の b) 気中養生時には、質量減少に転じるのが早いことも確認できる。また、c) 促進中性化の場合には、相対動弾性係数の低下が著しい BA, BB において質量増加がみられたが、N, BC では質量変化は a) 水中 4 週および b) 気中養生に比べて抑制されている。

図-8 に AE における BFS 置換率と耐久性指数の関係を示す。耐久性指数の変化をみると、水中 4 週では耐久性指数は N, BA, BB および BC で 80 を超えた。しかし、気中養生したものについては、N, BA では高い値を示したが、BB, BC においては低下傾向を示した。また、促進中性化の場合には、水中 4 週に比べ N, BA, BB および BC において耐久性指数が向上する傾向を得た。

図-9 に non-AE における BFS 置換率と耐久性指数の関係を示す。水中 4 週、気中養生ともに、BFS 置換率増加に伴って耐久性指数は直線的に低下する傾向を示し、水中 4 週に比べ気中養生において顕著であった。促進中性化の場合には、BA, BB および BC において耐久性指数は 20 以下にまで低下し、BFS 置換率による差は小さくなった。この原因として、細孔構造の変化が考えられる。

図-10, 図-11 に CIF 試験における non-AE での吸水率の変化を示す。凍結融解前の 1 週間の下面吸水では、気中養生および促進中性化でセメント種別による吸水挙動に大きな差は認められないが、その後の凍結融解では、マイクロアイスレンズポンプ効果⁷⁾による吸水率の増加があるものの、促進中性化したものでは吸水率が抑制されている。

図-12, 図-13 に BFS 置換率と CIF 試験におけるスケーリング量の関係を AE, non-AE それぞれ示す。AE, non-AE ともに、水中 4 週では BFS 置換率増加に伴いスケーリング量は増加する傾向がみられる。

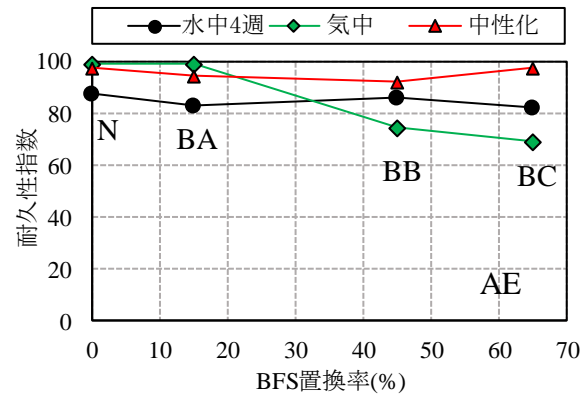


図-8 BFS 置換率と耐久性指数の関係 (AE)

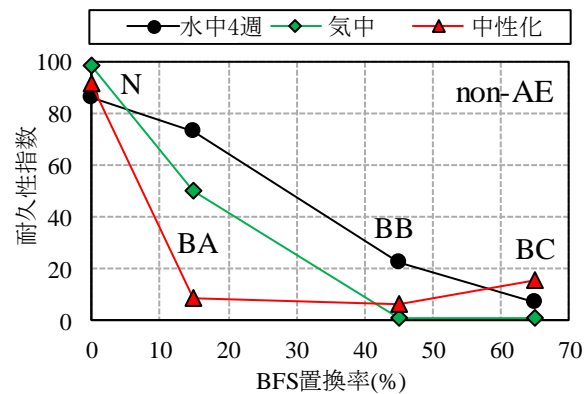


図-9 BFS 置換率と耐久性指数の関係 (non-AE)

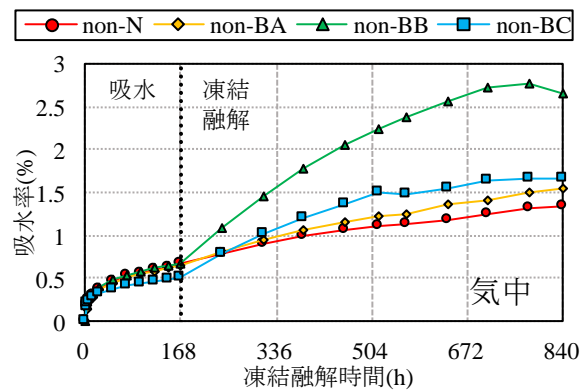


図-10 CIF 試験における吸水率の変化 (non-AE, 気中)

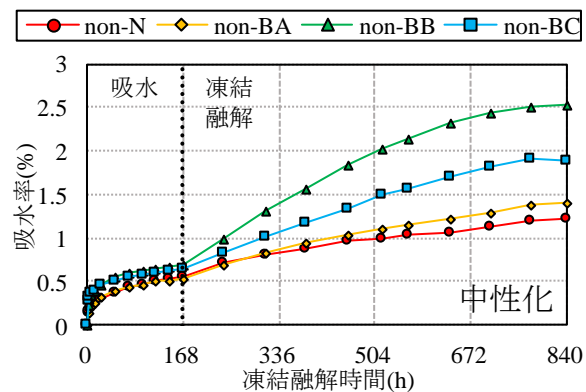


図-11 CIF 試験における吸水率の変化 (non-AE, 中性化)

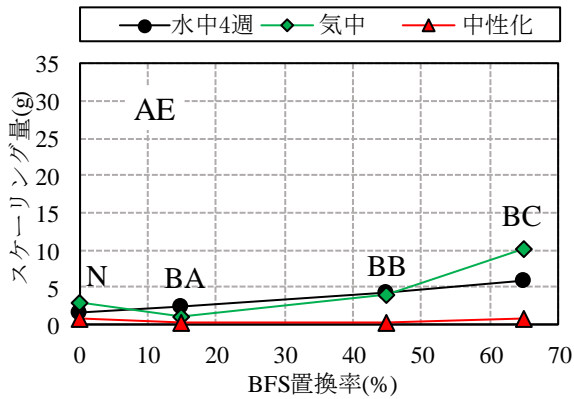


図-12 BFS置換率とスケーリング量の関係 (AE)

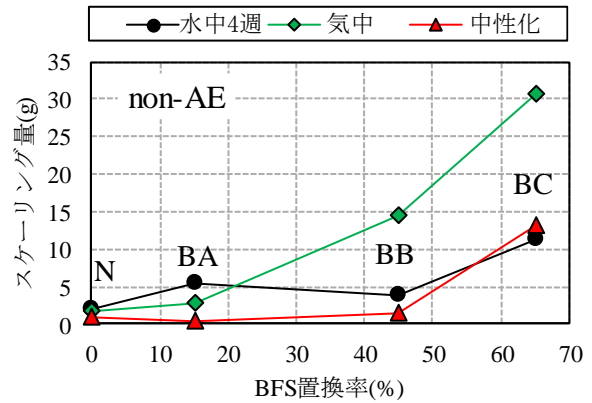


図-13 BFS置換率とスケーリング量の関係 (non-AE)

また、気中養生においては、水中4週と同様の傾向がより顕著に表れることを確認した。一方、促進中性化によりN, BA, BB および BC でスケーリングは気中養生に比べ減少しており、BC でのスケーリング抑制効果は極めて高いことがわかる。このことから、BFS置換率が増加するほど、促進中性化後の凍結融解試験によるスケーリングは抑制されるといえる。

4. まとめ

本研究では、BFS置換率の異なるAE, non-AEコンクリートを対象として、中性化と凍害の複合劣化について検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) AEコンクリートでは、BFS置換率によらず、中性化により耐久性指数が向上し、スケーリング量も低減した。
- (2) non-AEコンクリートでは、BFS置換率が増加するほど水中4週後の耐久性指数が低下した。また、BFSを置換したコンクリートでは、中性化により大幅に耐久性指数が低下し、BFS置換率による耐久性指数の差は見られなくなった。
- (3) non-AEコンクリートでは、気中養生の場合にBFS置換率が増加するほどスケーリング量が大幅に増加した。一方、中性化後はスケーリングが抑制される傾向が認められた。

謝辞

本研究は、日本スラグセメント・コンクリート技術研究会より助成を受けて実施した。また、実験の実施に際しては、本学卒業生・田内伸一氏（現株式会社フジタ）および同大学院修了生・三輪真也氏（現鹿島建設株式会社）の協力を得た。記して、謝意を

表す。

参考文献

- 1) 松家武樹, 鈴木康範, 塚孝司, 福留和人: 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, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp. 295-302, 2010
- 2) 近松竜一, 山本康彦, 長合友造: 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, Vol.11, pp. 355-360, 1989
- 3) 竹田宣典, 十河茂幸: 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, Vol.24, pp. 735-740, 2002
- 4) 長谷川諒, 塚本康誉, 佐川孝広, 濱幸雄: 高炉スラグ微粉末の置換率と少量混合分量がモルタルの凍結融解および中性化の複合劣化に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 38, pp. 1089-1094, 2016
- 5) 林瑞紀, 兼松学, 関田徹志, 百瀬晴基: 高炉セメント・コンクリートの中性化評価に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 405-406, 2013
- 6) Borges, P. H. R. et al. : Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 284-292, 2010
- 7) Setzer, M. J. : Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, pp. 193-201, 2001