

# 論文 塩害環境下に 6.5 年間暴露させた全量高炉スラグ系副産物を使用したコンクリートの諸特性

小澤 生空\*1・今本 啓一\*2・清原 千鶴\*3・CHEN JUNYI\*4

**要旨:** 本研究は、塩害環境下に 6.5 年間暴露させた全量高炉スラグ系副産物を使用したセメントフリーコンクリートの鉄筋腐食抑制効果について検討を行うことを目的とする。室内実験および暴露実験の結果から、セメントフリーコンクリートの塩分浸透抵抗性および鉄筋腐食抑制効果について検討を行った。その結果、セメントフリーコンクリートでは普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べて暴露実験、室内実験ともに塩分浸透抑制効果があり、6.5 年間の暴露期間では鉄筋腐食が生じていないことを確認した。

**キーワード:** 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ骨材, 塩害, 拡散係数

## 1. はじめに

コンクリートの製造過程では多量の CO<sub>2</sub>が排出される。そこで近年、地球環境保護や産業副産物の有効利用の観点から、銑鉄の製造過程で生成される高炉スラグ微粉末を混和材とすることで CO<sub>2</sub>排出量を抑えるコンクリートの研究が進められている<sup>1)</sup>。また、飛来塩分の影響を受ける海岸地域においては塩害を受ける可能性が高い。鉄筋コンクリート構造物の内部に塩分が浸透することにより鉄筋腐食が進行すると、早期劣化やコンクリートの剥落などの問題にもつながる。

そこで筆者らは、セメントと天然骨材の代わりに全量高炉スラグ系副産物を用いたセメントフリーコンクリートを呼び強度 24 相当 (目標強度 31.7N/mm<sup>2</sup>) の汎用的なコンクリートとして塩害環境下における建築物への適用を目的に実験的に検討<sup>2)</sup>を行ってきた。本論文では、6.5 年間塩害環境下に暴露させた全量高炉スラグ系副産物のセメントフリーコンクリートの鉄筋腐食抑制効果

を確認するために、室内実験および暴露実験より、表面吸水速度、表層透気係数および塩化物イオン浸透性の関係について検討を行った。また表面含浸材による水分浸透抑制効果についても検討するため、セメントフリーコンクリートにシラン系含浸材 (以下、含浸材) を塗布した供試体の撥水効果および水分浸透抑制効果についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 調合および使用材料

表-1 に室内実験および暴露実験で使用するコンクリートの調合を示す。また、表-2 に使用材料の特性を、表-3 に結合材の化学成分を示す。高炉スラグ系副産物を使用したセメントフリーコンクリート供試体 (以下、ALL-BFS) と比較用の普通コンクリート供試体 (以下、

表-1 調合

調合記号	W/B (%)	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]								AE (B×%)	SP (B×%)
		W	C	BF	CH	S	BFSS	G	BFSG		
ALL-BFS	30	170	-	547	20	-	729	-	813	-	0.5
OC	50	178	356	-	-	805	-	933	-	0.7	-

表-3 結合材の化学成分

結合材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	強熱減量 (%)
普通ポルトランドセメント	3.16	3340	0.98	1.98	2.38
高炉スラグ微粉末	2.85	4290	7.32	2.11	1.32

刺激剤	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Ca (OH) <sub>2</sub> (%)	Cl (%)	SO <sub>4</sub> (%)	As (ppm)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	Na (%)	Pb (%)
消石灰 (CH)	2.07	95.0 以上	0.02 以下	0.05 以下	0.5 以下	0.02 以下	0.05 以下	1.0 以下	0.05 以下	0.004 以下

表-2 使用材料

種類	記号	品質
結合材	高炉スラグ微粉末	BFS 密度 2.91g/cm <sup>3</sup> 比表面積 4290cm <sup>2</sup> /g
	普通ポルトランドセメント	C 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
	消石灰	CH 密度 2.07g/cm <sup>3</sup>
細骨材	高炉スラグ細骨材	BFSS 最大寸法 5mm 表乾密度 2.75g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.71% 粗粒率 2.58
	陸砂	S 最大寸法 5mm 表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.45% 粗粒率 2.68
粗骨材	高炉スラグ粗骨材	BFSG 最大寸法 25mm 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.98% 実積率 56.9%
	碎石	G 最大寸法 25mm 表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.68% 実積率 61.5%
混和剤	AE 減水剤標準形 (I種)	AE リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩
	高性能 AE 減水剤標準形 (I種)	SP ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩

\*1 東京理科大学 工学部建築学科 (学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 東京理科大学 プロジェクト研究員 博士(工学) (正会員)

\*4 日鉄高炉セメント(株) 技術開発センター 修士(工学) (正会員)

OC) を作製した。

既往研究<sup>3)</sup>を参考に呼び強度 24 相当を有するものとして ALL-BFS の水結合材比 (W/B) を 30%とした。なお、ここでの結合材とは普通ポルトランドセメントあるいは、高炉スラグ微粉末と刺激剤をあわせたものと定義する。また、刺激剤には OC と同等の強度発現性が得られる消石灰を用いた。比較用の OC においては、ALL-BFS と同等の強度を有するものとして、W/B を 50%とした。

練り混ぜには 1 軸強制攪拌ミキサーを使用し、結合材と細骨材を投入し 30 秒間の空練りを実施した後、水と混和剤を投入し練り混ぜを行った。ここで、普通ポルトランドセメントを使用した場合は 30 秒、高炉スラグ微粉末を使用した場合は 90 秒練り混ぜを行い、粗骨材を投入後、30 秒練り混ぜを行った。なお、実験の都合上、暴露実験と室内実験では練り混ぜ日時が異なっている。室内実験および暴露実験で使用した供試体は、材齢 3 日で脱型したのち、供試体の水分を逸散させるため温度 40℃ の環境下で気中養生を 28 日間行った。なお、圧縮強度供試体は材齢 28 日まで封かん養生とした。作製したコンクリートのフレッシュ性状および材齢 28 日の圧縮強度を表-4 に示す。

## 2.2 試験体概要

図-1 および図-2 に室内実験および暴露実験で用いた鉄筋なし供試体および鉄筋あり供試体の形状および寸法を示す。鉄筋あり供試体は暴露実験のみとし、かぶり厚さは 25mm とした。また表-5 に供試体個数を示す。既往の研究<sup>4)</sup>においてコンクリートの含水率が低い状態に保たれていれば鉄筋腐食の進行は緩やかになることが示されている。そこで本研究では、コンクリートへの水分浸透抑制効果の付与が期待できる表面含浸工法に着目し、ALL-BFS においては表面含浸材を塗布した供試体 (以下、ALL-BFS 含浸) も作製した。使用した表面含浸材は、シラン系含浸材 (標準使用量 : 0.6l/m<sup>2</sup>, 有効成

分 : 95%以上, 外観 : 淡黄色透明液体) である。

ALL-BFS 含浸については 28 日間気中養生を行った後に表面含浸材を塗布し、含浸材塗布後 14 日間において暴露面以外にシリコン樹脂とアルミ箔テープを塗り、暴露面以外からの劣化を防いだ。

## 2.3 実験方法および測定項目

表-6 に測定項目および測定方法を示す。

### (1) 室内実験 (乾湿繰り返し)

室内実験では既往の研究<sup>5)</sup>を参考にし、塩水乾湿繰り返し実験を実施した。ここでは、中性化の進行による塩分浸透抑制効果を確認するために、温度 20℃, NaCl 濃

表-4 フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度

調合	室内実験			暴露実験		
	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
OC	21.0	4.6	35.7	22.0	3.5	39.4
ALL-BFS	20.0	3.4	35.8	18.0	3.7	34.6

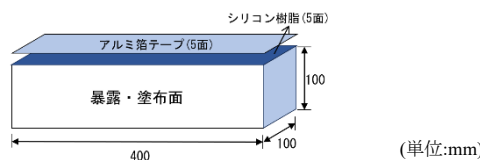


図-1 室内実験の供試体形状および寸法

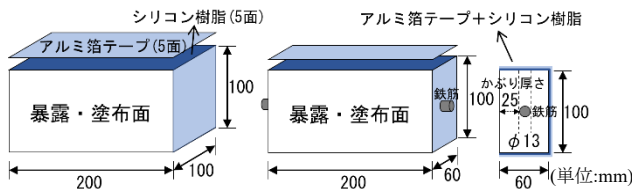


図-2 暴露実験の供試体形状および寸法

表-5 供試体個数

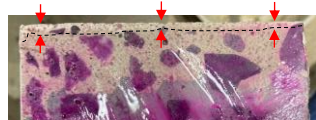
調合	含浸材有無	鉄筋有	鉄筋無
OC	×	3	1
ALL-BFS	×	3	1
	○	3	1

表-6 測定項目および測定方法

室内実験	暴露実験	試験体	目的	測定項目	方法
○	○	鉄筋無 鉄筋有	含浸材の浸透性	含浸深さ	供試体を1分間水に浸漬して取り出し、割裂面の撥水領域の含浸面からの深さを表面含浸材の含浸深さとして測定
-	○		外観変化	色差	暴露面の色彩を色彩色差計で測定し、JIS K 5600-4-6 に準じて算出
-	○			光沢度	JIS Z 8741 に準拠したハンディ光沢計を用いて計測
○	○	表層品質	表層透気係数	ダブルチャンバー法	ダブルチャンバー法によってコンクリート表層の透気性を評価
-	○			接触角	供試体表面に落とした水滴を撮影し、その接触角を測定
○	○	撥水性	表面吸水速度	SWAT 試験機	SWAT 試験機を用いて、10 分間のコンクリート表層部の吸水挙動を計測
○	○			含水率	質量含水率
○	○	劣化因子	中性化深さ	フェノールフタレイン	供試体を割裂した後、割裂面にフェノールフタレイン試験薬を噴霧して赤紫色に呈色した部分までの距離を測定間隔 10mm で測定
○	○			鉄筋無 鉄筋有	塩化物イオン量
-	○	鉄筋有	鉄筋腐食		鉄筋腐食面積率



写真-1 供試体の暴露状況および暴露地点



含浸深さ：3.52mm

写真-2 含浸深さ(室内実験)

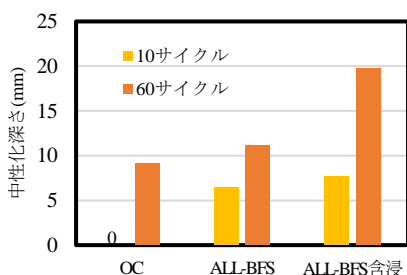


図-3 中性化深さ(室内実験)

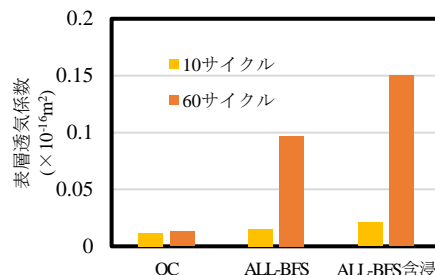


図-4 表層透気係数(室内実験)

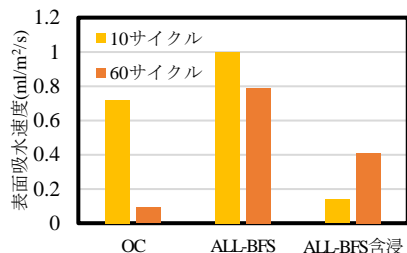


図-5 表面吸水速度(室内実験)

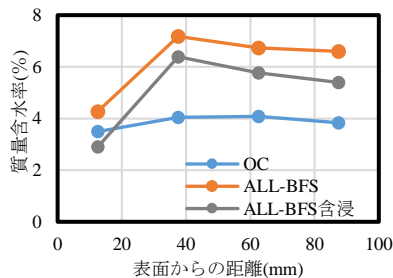


図-6 質量含水率  
(室内実験・60サイクル)

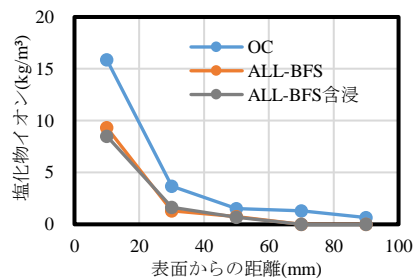


図-7 全塩化物イオン量  
(室内実験・60サイクル)

度 3.5%の水溶液中で1日浸漬し、温度 20℃、相対湿度 60%R.H.、CO<sub>2</sub>濃度 5%の環境で3日間乾燥させた。この計4日間を1サイクルとして60サイクルまで実施した。

### (2) 暴露実験

OC、ALL-BFS および ALL-BFS 含浸の供試体を沖縄県の暴露試験場(国頭群国頭村辺野喜)にて約 6.5 年間静置した。この地域は高温多湿で、飛来塩分濃度が高いため、塩害環境下での耐久性を評価するのに適している。写真-1 に供試体の暴露状況および暴露地点を示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 室内実験

#### (1) 含浸深さ

写真-2 に 60 サイクルにおける含浸深さの測定結果を示す。含浸深さは 3.52mm であった。

#### (2) 中性化深さ、表層透気係数

図-3 に中性化深さの測定結果を示す。ALL-BFS が OC より値が大きく、含浸材を塗布することでさらに大きくなっている。図-4 の表層透気係数の結果より、ALL-BFS の表層透気係数がサイクルの進行に伴い大きくなって

表-7 見かけの拡散係数(室内実験)

60 サイクル	OC	ALL-BFS	ALL-BFS含浸
表面塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	24.53	16.46	13.92
見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{サイクル}$ )	0.039	0.025	0.032

いる。既往研究<sup>9)</sup>によると高炉スラグ高置換コンクリートは中性化の進行により表層の気体透過性が大きくなることが示されており、ALL-BFS においても同様な傾向が示唆される。

#### (3) 表面吸水速度

図-5 に 10min 表面吸水速度を示す。サイクル数によってばらつきはあるが、OC と比較して ALL-BFS の表面吸水速度が速いが、含浸材を塗布することで遅くなっており、含浸材の水分浸透抑制効果が確認できる。

#### (4) 質量含水率

図-6 に 60 サイクルにおける質量含水率の測定結果を示す。OC は表面からの距離によらず 4.0% の値で推移しているのに対して、ALL-BFS は含水率が高い結果となった。原因は不明であるが、高炉スラグ微粉末を高置換

したコンクリートは中性化すると細孔組織が粗になり、水分浸透深さが大きくなることが報告<sup>7)</sup>されており、この影響が大きいことが推察される。また、含浸材を塗布することで質量含水率が低下しており、**図-3**においてALL-BFS含浸の中性化深さが大きくなったのは含水率が低下したことにより二酸化炭素が侵入しやすくなったためと考えられる。

### (5) 全塩化物イオン量

60 サイクルにおける全塩化物イオン量の測定結果を**図-7**に示す。これらの結果を基に、式(1)による回帰分析を行い、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を算出した。算出結果を**表-7**に示す。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right) + C(x, 0) \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$ ：浸漬期間  $t$  における深さ  $x$  (cm) の塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C(x, 0)$ ：初期塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )

$x$ ：表面からの距離 (cm)， $t$ ：浸漬期間、

$D_{ap}$ ：見掛けの拡散係数、

$C_0$ ：表面塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )

室内実験においては、浸漬期間  $t$  は 1 サイクルとして設定した。**図-7**より、ALL-BFSの高い塩分浸透抑制効果が確認できた。今回の測定では中性化がそれほど進んでいないため、塩化物イオンの濃縮については考慮していないが、その進行に伴い今後検討する必要があるものとする。

## 3.2 暴露実験

### (1) 含浸深さ

**写真-3**に含浸深さ測定状況を示す。含浸深さは4.05mmであり、前項の室内実験と同等であった。

### (2) 外観変化

**図-8**に暴露前の各供試体に対する暴露後の色差を、**図-9**に光沢度保持率を示す。いずれの供試体も暴露期間に伴い色差が大きく、光沢度保持率が小さくなっており、汚れが付着している状況であった。

### (3) 中性化深さ、表層透気係数

**図-10**に中性化深さを示す。暴露6.5年でALL-BFSの中性化深さは7.5mm、ALL-BFS含浸は13.0mmほど進行しており、室内実験と同様に含浸材を塗布することで表層の含水率が小さくなり中性化の進行が早くなったと考えられる。



含浸深さ：4.05mm

写真-3 含浸深さ(暴露実験)

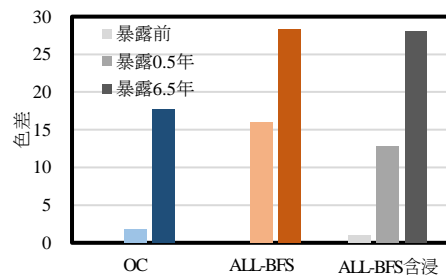


図-8 色差(暴露実験)

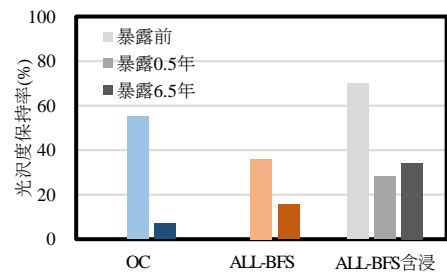


図-9 光沢度保持率(暴露実験)

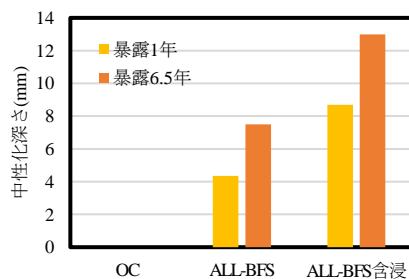


図-10 中性化深さ(暴露実験)

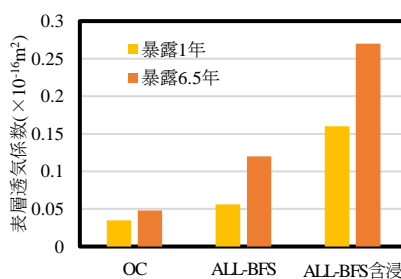


図-11 表層透気係数(暴露実験)

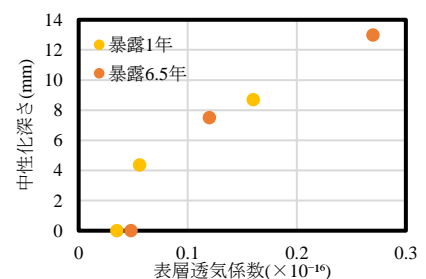


図-12 表層透気係数と中性化深さの関係

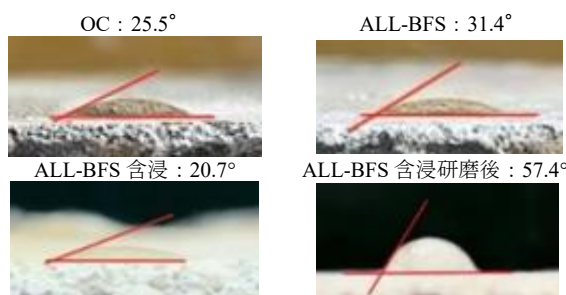


写真-4 接触角

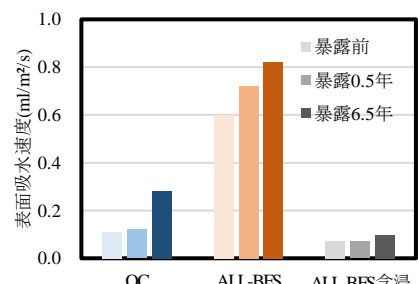


図-13 表面吸水速度(暴露実験)

図-11 に表層透気係数を示す。OC の値が最も小さく、ALL-BFS は含浸材を塗布した供試体の表層透気係数が大きい。

図-12 に表層透気係数と中性化深さの関係を示す。両者の間には相関が見られた。ALL-BFS においては、中性化の進行により粗大空隙の割合が上昇するため<sup>9)</sup>、表層透気係数も大きくなっていると考えられる。

#### (4) 撥水性

写真-4 に暴露 6.5 年時において計測した接触角を示す。OC, ALL-BFS, ALL-BFS 含浸で接触角に大きな違いは見られなかった。しかし、ALL-BFS 含浸供試体の表面をやすりで研磨した後の測定では、研磨面の接触角は 57.4°と大きくなり、含浸材の撥水性が確認された。このことから、既往研究<sup>8)</sup>と同様に極表層の撥水性は失われていたものの、コンクリート内部には含浸材の撥水効果が保持されていることが確認できた。

図-13 に表面吸水速度の測定結果を示す。暴露実験においても、表面吸水速度は OC と比較して ALL-BFS が大きい。しかし、含浸材を塗布することで、ALL-BFS の表面吸水速度は OC と同程度に抑えられた。含浸材の水分浸透抑制効果が確認できた。

#### (5) 質量含水率

図-14 に暴露 6.5 年における表面からの距離と質量含水率を示す。室内実験と同様に OC よりも ALL-BFS の方が質量含水率は高いが、含浸材を塗布した供試体では表層 0~20mm の範囲の質量含水率が OC と同程度まで小さくなっている。

図-15 に暴露 6.5 年における表面からの距離と相対質量含水率 ((乾燥前の質量-乾燥後の質量)/(水中浸漬後の質量-乾燥後の質量)×100) を示す。相対質量含水率とは、飽水状態時の水分量に対する含有水分量の比率である。表層 0~20mm の範囲の相対質量含水率は全ての供試体で同程度であったが、内部の相対質量含水率は OC よりも ALL-BFS の方が高い結果となった。

ALL-BFS の含浸材の有無ではほとんど差は出なかった。

#### (6) 塩化物イオン量

図-16 に塩化物イオン量の分布を示す。塩化物イオン量は OC が最も大きく、ALL-BFS の塩分浸透抑制効果が確認できた。塩化物イオン量の測定結果を基に式(1)を用いて算出した見かけの拡散係数を表-8 に示す。式(1)の浸漬期間は t(年)として設定した。OC が最も拡散係数が大きく、暴露実験においても ALL-BFS の塩分浸透抑制効果ができたが、含浸材の有無による大きな違いは見られなかった。BFS の塩分浸透抑制効果が卓越したと考えられるが引き続き検討したい。

#### (7) 鉄筋腐食

写真-5 に取り出した鉄筋の様子を示す。OC のみ鉄筋

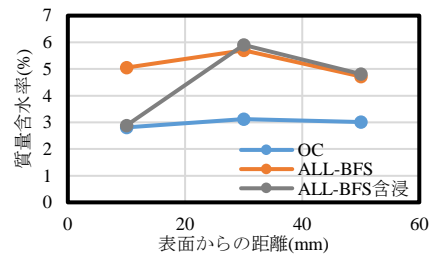


図-14 質量含水率(暴露実験)

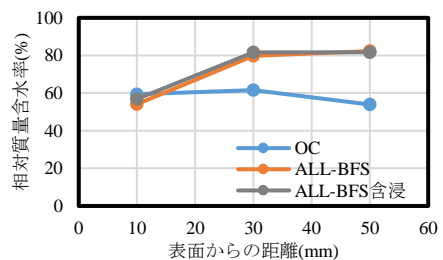


図-15 相対質量含水率(暴露実験)

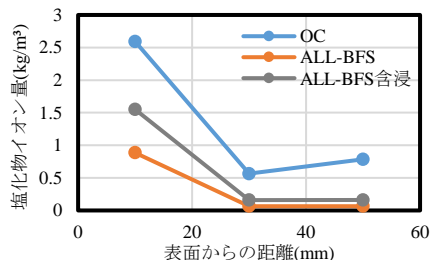


図-16 塩化物イオン量の分布(暴露実験)

表-8 見かけの拡散係数(暴露実験)

	OC	ALL-BFS	ALL-BFS含浸
表面塩化物イオン量(kg/m³)	3.56	1.81	2.93
見かけの拡散係数(cm²/年)	0.54	0.16	0.19

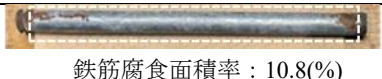
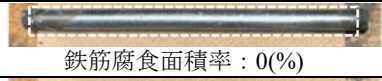
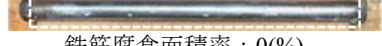
OC		↑ 暴露面
ALL-BFS		
ALL-BFS含浸		

写真-5 鉄筋腐食状況 [ ] : 測定範囲

腐食が確認でき、鉄筋腐食面積率は 10.8%であった。ALL-BFS と ALL-BFS 含浸は変色している部分はあったものの腐食は見られなかった。

#### 4. 暴露実験と室内実験の考察

図-17 に室内および暴露実験で得られた表層透気係数と表面吸水速度の関係を示す。ばらつきはあるが、含浸材を塗布していない ALL-BFS 供試体は表層透気係数の増加とともに表面吸水速度が増大しているのに対し、含浸材を塗布した ALL-BFS 含浸供試体は、表層透気係

数が大きくなっても表面吸水速度は低い傾向があり、含浸材の水分浸透抑制効果が得られている。

図-18 に表面吸水速度と見かけの拡散係数の関係を示す。図中には既往の研究<sup>9)</sup> (W/C:65%, OC, 端島暴露6年間)で測定された結果も併せて示している。ALL-BFS は表面吸水速度がかなり大きいものの、見かけの拡散係数は抑えられており、高い塩分浸透抑制効果が見られる。OC と ALL-BFS 含浸は、既往研究の結果と近い分布となった。

以上のことより、ALL-BFS は同一程度の強度を有する OC に比べて中性化が進行しやすく、ALL-BFS においては中性化の進行により表層の透気係数が大きくなり、表面吸水速度も速くなる傾向が見られるが、塩害に対しては高い塩分浸透抑制効果がある。また、ALL-BFS に撥水効果のある含浸材を塗布することで、水分浸透抑制効果が得られることが確認できた。なお、本実験の範囲内においては、塩分浸透抑制効果ならびに鉄筋腐食抑制効果において含浸材塗布の有無による影響は明確に現れなかった。

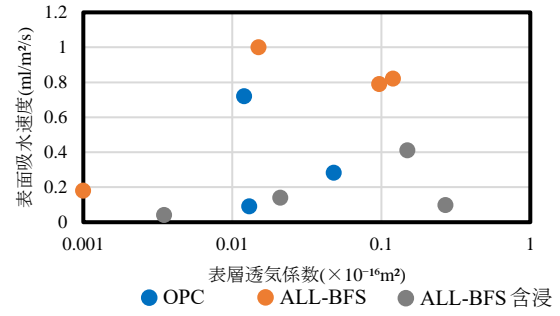


図-17 表層透気係数と表面吸水速度

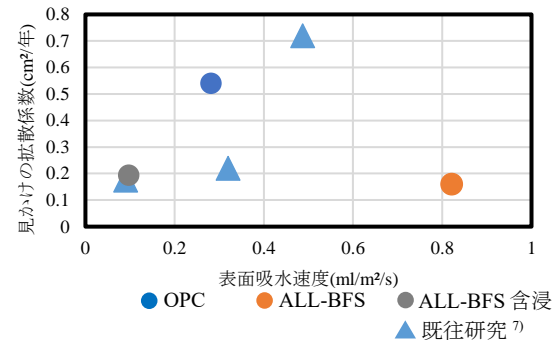


図-18 表面吸水速度と見かけの拡散係数

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 塩水乾湿繰り返し実験において、ALL-BFS は中性化の進行によって表層透気係数と表面吸水速度が劣化しても、OC より高い塩分浸透抑制効果を示している。
- 2) 沖縄暴露実験において、ALL-BFS が高い塩分浸透抑制効果を示した。また暴露開始から 6.5 年経過しても表面含浸材による内部の撥水効果および水分浸透抑制効果は継続していた。
- 3) ALL-BFS において表層透気係数が大きいほど表面吸水速度も大きくなるが、含浸材の撥水効果により表層透気係数が大きくなっても表面吸水速度を低い値に維持することができる。

## 謝辞

本研究にあたり、鉄鋼スラグ協会のご協力を得ました。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 松元淳一, 堀口賢一: 環境配慮コンクリートセメント・ゼロ型の物性・耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1180-1185, 2023
- 2) CHEN Junyi ほか: 全量高炉スラグ系副産物としたクリンカーフリーコンクリートの基本物性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1174-1179, 2022

- 3) 江詩唯ほか: 全量産業副産物としたクリンカーフリーコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.69-74, 2018
- 4) 篠原佳代子ほか: 端島の RC 造建築物に対する表面含浸工法の適用性に関する研究 その 1 現地調査および曝露実験におけるコンクリートの含水状態, 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.2018, pp.303-304, 2018
- 5) 金子樹ほか: コンクリートへの塩化物イオン浸透における促進試験方法の検討に関する実験的研究 総合研究所・都市減災研究センター(UDM)研究報告書(平成 23 年度)テーマ 3 小課題番号 3.1
- 6) 大村志織ほか: 高炉スラグ高置換コンクリートの各種特性と乾燥と中性化が物質の移動に対する抵抗性に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.239-244, 2019
- 7) CHEN Junyi ほか: 全量高炉スラグ系副産物を使用したコンクリートの水分浸透特性に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, Vol.2022, pp.231-232, 2022
- 8) 岡田明也ほか: シラン系及び無機系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 12.5 年後の性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1663-1668, 2017
- 9) 平田真佑子ほか: 表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透抑制に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1661-1666, 2019