

論文 高炉スラグ微粉末を多量置換した高耐久コンクリートの遮塩性評価

熊本 凌太*1・温品 達也*2

要旨： 構造物の長寿命化が重要となる現代において、耐塩害性能が高いと言われる高炉スラグ微粉末(以下、BFS)を多量置換した高耐久コンクリートの実用化が注目されている。本稿では、耐久性照査に必要な塩化物イオンの拡散係数を非定常電気泳動実験と実塩害環境下での暴露実験により検討し、それぞれの拡散係数を比較して補正係数 $k_1 \cdot k_2$ を検討した。その結果、BFS の高い遮塩性能を確認し、BFS 置換率の増大や水結合材比の低減に伴い、実効拡散係数は低減されることを確認した。また実効拡散係数から見掛けの拡散係数への補正係数 $k_1 \cdot k_2$ も算出することで、示方書設計式や新材料の実用化に貢献できる可能性を論じた。

キーワード： 高炉スラグ微粉末, 高炉セメントC種, 塩害, 実効拡散係数, 非定常電気泳動実験, 暴露実験

1. はじめに

コンクリートにおいては、その生産過程で様々な産業副産物を構成材料の一部に置換し、資源を有効的に活用してきた。中でも、高炉スラグ微粉末(以下、BFS)は最も活用量が多く、コンクリートの耐久性の向上にも貢献している。日本においては、沿岸部や山間部での塩害によるコンクリート構造物の早期劣化が深刻化しており、これまでに塩害抑制のために蓄積された多くの研究から、BFSは塩害対策として有効であることが確認されている。以上を踏まえて、新設コンクリート構造物の長寿命化が重要となる現代において、BFSを多量置換した高耐久コンクリートの実用化が注目されている。

現状のコンクリート標準示方書の体系に従う場合、実績の乏しい新材料の実用展開のためには、その塩分浸透特性値等を確認し、コンクリート標準示方書に従った性能照査によって、新材料に応じた設計用値の設定を行う必要がある¹⁾。そこで、本研究ではBFS多量置換コンクリートとして、BFSを70%置換したセメントを用いた高炉セメントC種コンクリート(以下、BCコンクリート)を対象とし、非定常電気泳動実験と暴露実験の両方からBFSの置換率と水結合材比の変化による遮塩性の評価を行い、塩害照査に必要な塩化物イオン拡散係数を実験的に取得する。また、それらの結果を比較して、実効拡散係数から見掛けの拡散係数への補正係数を算出し、BCコンクリートの実用化に必要なデータや知見の収集に資することを目的とした。

2. 非定常電気泳動実験

本章では、緻密な空隙構造を有する BC コンクリートの特性上、その暴露データの取得には相当に長い期間がかかることを想定し、近年 NORDTEST において NT BU ILD 492²⁾として規格化され、国内においても土木学会に

よって土研法³⁾として規格化が提案されている非定常電気泳動試験によって、実効拡散係数を短期間で取得することとした。この実効拡散係数を実際の暴露実験で得られる見掛けの拡散係数と関連付けることで、短期に実験可能な非定常電気泳動実験の結果から、実暴露における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を同定することを目的に実験を展開した。

2.1 実験条件

(1) 材料・配合

試験体に用いた材料と配合を表-1、表-2に示す。結合材は普通ポルトランドセメント(以下、OPC)のみを使用したものを N、OPC に BFS を 50%置換したものを BB、

表-1 使用材料と物性

材料	記号	摘要
練り混ぜ水	W	上水道水
普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3360cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BFS	密度：2.91g/cm ³ 比表面積：3960 cm ² /g
無水セッコウ	Gyp	密度：2.9g/cm ³ 比表面積：3780 cm ² /g
砕砂	S1	表乾密度：2.67g/cm ³ 粗粒率：2.95
石灰砕砂	S2	表乾密度：2.67g/cm ³ 粗粒率：2.63
碎石	G	表乾密度：2.73g/cm ³ 粗粒率：6.63
高機能 AE 減水剤	AD	-
AE 剤	AE	-
高性能 AE 減水剤	SP	-

*1 徳山工業高等専門学校 環境建設工学科 (学生会員)

*2 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)										スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	BFS	G _{yp}	S1	S2	G	AD	AE	SP		
N	50.0	47.2	173	346	0	0	424	424	969	C×1.35%	9.0A	-	13.0	4.8
BB	50.0	47.2	173	173	173	6	421	421	963	C×1.20%	10.0A	-	11.5	4.5
BC	50.0	47.2	168	101	235	17	425	425	972	C×1.15%	14.0A	-	10.5	4.7
	45.0	46.1	168	112	242	19	407	407	974	C×1.15%	15A	-	13.0	3.5
	40.0	44.0	168	126	273	21	380	380	988	C×1.20%	18A	-	15.5	4.6
	30.0	40.0	168	168	364	28	320	320	981	-	14A	C×0.6%	16.5	2.0

70%置換したものを BC, 以上の3 ケースとした。BFS の多量置換による遮塩性評価に重点をおいて検討するため, N・BB は水結合材比(W/B)が50%のみを比較対象とし, BC については, 実用的範囲として W/B を 50・45・40%とした。これは, 将来的に W/B を要因として拡散係数の算出式を検討することも想定した実験要因である。さらに, プレキャストコンクリートでの適用も想定して W/B30%も追加し, BC は計4 パターンの配合を用いた。また, BC コンクリートの実用化にあたって懸念される初期強度や中性化抵抗性の低下を解決するために, 鉄筋コンクリート構造物の標準的な W/B が 55%に対し, BC 配合は 5%低減させて 50%を基準とした。石膏量(G_{yp})について, BB は結合材全量に対して2%添加し, BC は BFS に対しての石膏量が不足になる可能性を考慮し, 結合材全量に対して 3.5%添加した。水中養生期間については, 一般的な材齢 28 日まで加えて, 養生が長期的に行われて高炉セメントコンクリートのポテンシャルがより高まる可能性のある材齢 91 日までを追加した。なお, これ以降の実験ケースの呼称は, 結合材種類と W/B の組合せによる略記とし, 例えば OPC の W/B が 50%では N50 とする。

(2) 実験手順

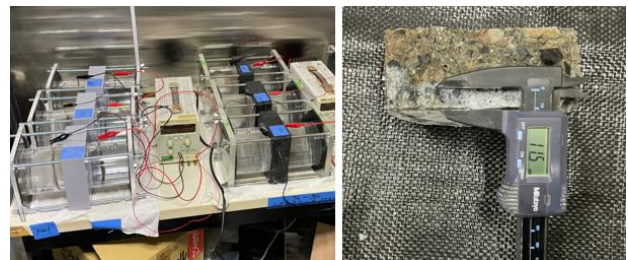
表-2 の配合により作製した Φ100×200mm の試験体の中央部から Φ100×50mm の寸法で3 体切り出して試験片として使用した。試験装置は, 定常状態における電気泳動セル⁴⁾と同様のものを作製した。印加時間は先行研究⁵⁾の値を参考に配合に応じて3 パターンの時間を選定した。通電終了後の測定についても, 先行研究⁵⁾を参考に, 試験片を割裂後, 割裂面に硝酸銀水溶液(0.1N)を噴霧し, 試験片の両端 10mm を除いて, 白色に呈色した部分を7 点測定して, その平均値を塩化物イオン浸透深さとした。実験条件を表-3, 実験の様子を写真-1 に示す。

(3) 実効拡散係数の算出方法

2.1 の(2)で得られた結果をもとに, NT BUILD 492 の下式(1)²⁾と土研法の下式(2)³⁾から実効拡散係数を算出した。

表-3 非定常電気泳動試験の条件

種別	W/B (%)	材齢 (日)	印加電圧 (V)	印加時間 (時間)	試験体数 (個)
N	50	28	30	6・24・36	各時間につき 1
BB	50			6・24・48	
BC	50	91		6・24・48	
	45			6・24・48	
	40			24・84・120	
	30			24・84・120	



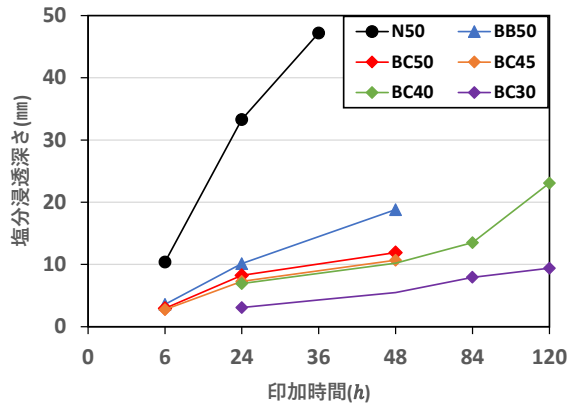
(a) 印加時 (b) 測定時
写真-1 非定常電気泳動実験の様子

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \cdot (273+t) \cdot L}{(U-2) \cdot T} \cdot \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+t) \cdot L \cdot X_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

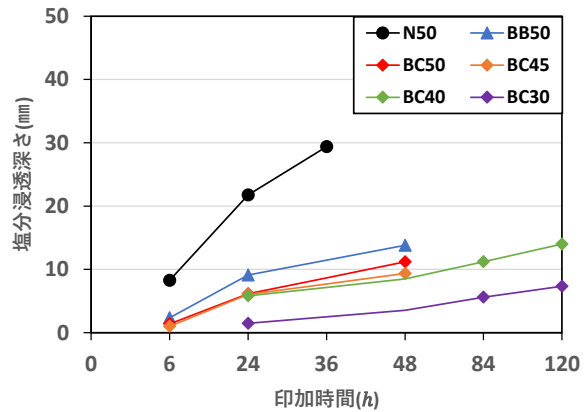
ここに, D_{nssm}:実効拡散係数(×10⁻¹²m²/s), U:印加電圧(V), t:温度(°C), L:試験体厚さ(mm), X_d:塩分浸透深さ(mm), T:試験時間(hr)である。

$$D_{nssm} = k \cdot \frac{R(273+t)}{zF} \cdot \frac{L}{\Delta\phi} \quad (2)$$

ここに, R:気体定数(=8, 134J/K・mol), z:塩化物イオンの過数の絶対値(=1), F:ファラデー定数(=9.648×10⁴J/V・mol), Δφ:印加電圧(V)である。浸透速度 k は通電時間と塩分浸透深さの関係において, 原点を通る近似曲線の傾きから算出した。なお, 以降の実効拡散係数の単位については, (cm²/year)に単位換算した値を示す。NT BUILD 492 での算出では, 1 回の印加時間によって推定するこ

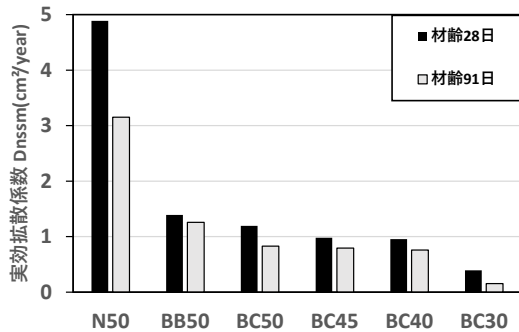


(a) 材齢 28 日

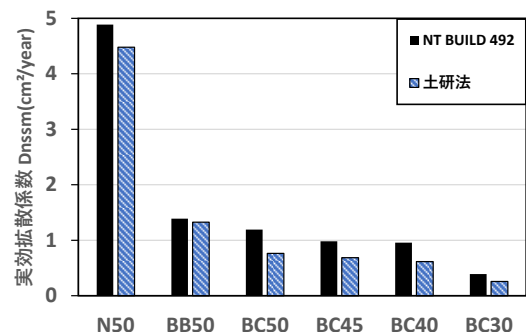


(b) 材齢 91 日

図-1 塩分浸透深さ結果



(a) 配合と材齢の比較



(b) 配合と拡散係数算出法の比較

図-2 実効拡散係数の結果

とができ、運用しやすいものの、印加時間の経過にともない塩分浸透度が低下して結果に影響する可能性を確認するため、本研究では2つの式から実効拡散係数を算出し、それらの結果を比較することで拡散係数の算出方法の影響を検討した。なお、NT BUILD 492 での算出においては、印加時間 24 時間の結果を用いた。

2.2 実験結果・考察

(1) 塩分浸透深さ

図-1 に材齢 28 日・91 日ケースの印加時間と塩分浸透深さの関係を示す。どの配合においても、材齢に関わらず、同一印加時間での塩分浸透深さは、N50, BB50, BC50, BC45, BC40, BC30 の順に大きな傾向を示した。また、N は材齢 28 日に対して 91 日で顕著に塩分浸透深さが低下したものの、BB と BC は材齢 28 日と 91 日で顕著な差はなかった。材齢 28 日における塩分浸透深さの結果は、既往の研究⁹⁾と合致していた。

(2) 実効拡散係数

(a) 材齢による影響

図-2 の (a) では、各実験ケースより式(1)で算出した実効拡散係数をまとめた。これより、塩分浸透深さと同様、N50 のみ材齢進行による低減があったものの、BB と BC

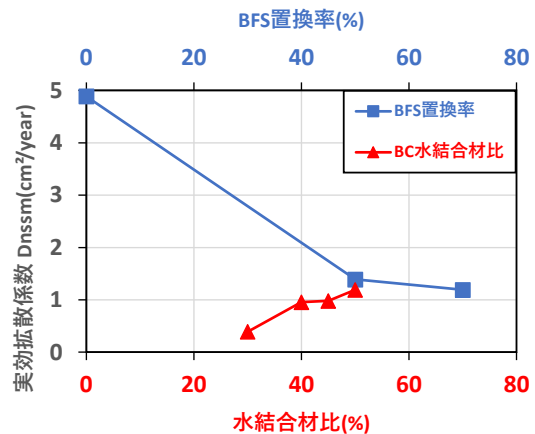


図-3 BFS 置換率と BC の水結合材比における実効拡散係数の関係

(上軸:BFS 置換率, 下軸:水結合材比)

は材齢による影響はかなり小さく、材齢 28 日時点で非常電気泳動実験を行っても、その配合の塩分浸透特性を把握するための実効拡散係数を確認できるといえる。

(b) 拡散係数の算出法による影響

図-2 の (b) に NT BUILD 492 と土研法によって算出した実効拡散係数を示す。どの要因においても、式(1)で求めた実効拡散係数は式(2)で求めた実効拡散係数よりも

大きくなっていったもののその差は小さいといえる。そのため、1点の印加時間で実効拡散係数を求められるNT BUILD 492に準拠して実効拡散係数を検討して問題ないと考え、これ以降の実効拡散係数は式(1)で算出したもので論じる。

(c) BFSの置換率による影響

図-3に材齢28日におけるBFSの置換率(上軸)とBC配合の水結合材比(下軸)の変化が、実効拡散係数に及ぼす影響についてまとめた。BFSの置換率が大きくなるほど実効拡散係数は小さくなった。これは、BFS置換に起因する塩分固定化能力や水密性の向上によって、その置換率が大きくなるほどコンクリートの遮塩性が向上しているものと考えられる。

(d) BC配合における水結合材比による影響

図-3より、BC配合の水結合材比が大きくなるほど、実効拡散係数は大きくなった。これは、BC配合においても、水結合材比が小さいほどそのコンクリートのセメント量が増加し、空隙構造が緻密になることで遮塩性が向上したためと考えられる。

3. 海岸暴露実験

示方書設計編における見掛けの拡散係数は、実暴露データも用いてW/Bとの算定式を構築しており、新しい材料や配合においては算定式を構築する実データが乏しくなる。今回のBC配合においても、実塩害環境下における長期暴露のデータが少ないため、本章では、BC配合の塩分浸透予測に資する暴露データの取得を目的とした。

3.1 実験条件

(1) 材料・配合

将来的に、非定常電気泳動実験より取得した実効拡散係数から実暴露における見掛けの拡散係数を算出することを目的としているため、暴露試験も表-1、表-2に示す非定常電気泳動実験と同一の材料・配合で試験体を作製した。

(2) 実験手順

表-1の配合により作製したコンクリートを100×100×400mmの鋼製型枠に打ち込み、それぞれ材齢28日まで水中養生を行った後に試験体を100mm立方体4体に切断し、1側面以外の5面をエポキシ樹脂で被覆した後に、瀬戸内海に面した干満帯の砂浜に試験体を暴露した。試

験体数はそれぞれ12体とし、長期暴露データを収集するため、暴露期間は、1・3・5・10年、10年以上の5パターンとした。本稿においては、暴露約1年(暴露300日後)に試験体を回収し、エポキシシーリングを除去し、試験体を深度21mmまで3mmピッチでハンドグライダーを用いて研削し、電位差滴定法によりJCI-SC5⁶⁾に準拠して深さ方向の全塩分量を測定した。本実験の全体スケジュールを図-4に示す。

(3) 暴露地点

暴露地点について、常時海中の場合は酸素の供給が乏しく、鉄筋腐食への検討という観点から適していないと考えられる。できる限り、不飽和条件に近い方が望ましいとして、暴露可能場所を検討した結果、比較的、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が高くなることを見込め、設置可能性や経過観察の着実性などを考慮して山口県南部の瀬戸内海港湾の干満帯とした。同地点では、12時間おきに干潮と満潮を繰り返すため、1日2回の干満が



(a) 干潮時 (b) 満潮時
写真-2 海岸暴露実験の様子

訪れる。暴露地点の全景等を写真-2で示す。

(4) 見掛けの拡散係数の算出方法

見掛けの拡散係数の算出については、各深さ位置で測定された全塩化物イオンの値をフィックの第2法則に基づいた下式(3)⁶⁾の拡散方程式に代入することによって回帰分析することで求めた。

$$C(x, t) - C_0 = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} \quad (3)$$

ここに、 x は試験体上面からの深さ(mm)、 t は浸透期間(year)、 $C(x, t)$ は深さ x (mm)、浸透期間(year)において測定されたコンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 は表面全塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D_{ap} は見掛けの拡散係数(cm^2/year)である。初期に含有されるコ

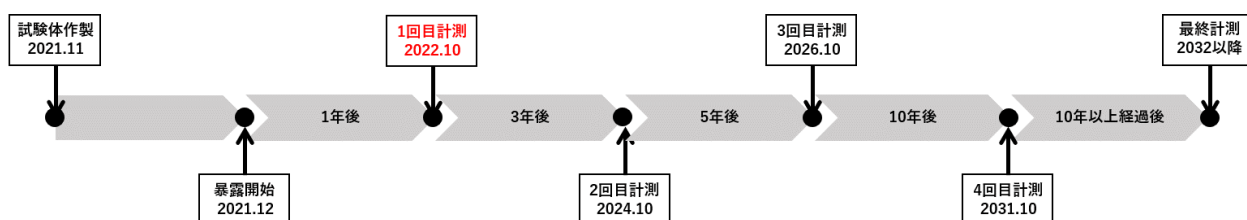
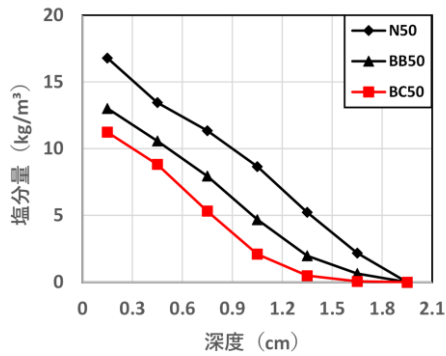
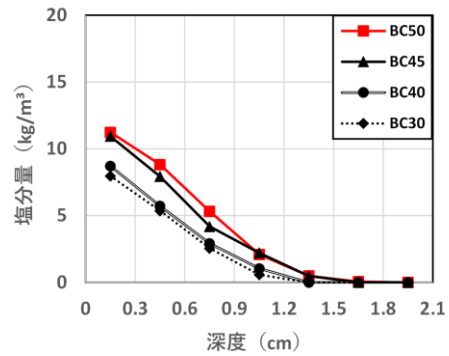


図-4 海岸暴露実験の全体スケジュール



(a) BFS 置換率による比較



(b) 水結合材比による比較

図-5 1年後の塩害暴露結果

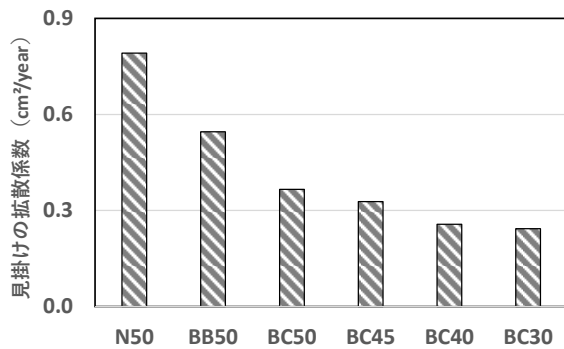


図-6 見掛けの拡散係数

ンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン(kg/m³)は本研究では0であり、erfは誤差関数である。

3.2 実験結果・考察

(1) 全塩分量

塩分滴定によって求めた深度ごとの全塩分量を図-5に示す。図-5の(a)より、表層部の塩分量と塩分浸透深さは、N50、BB50、BC50の順に大きな傾向を示した。これより、実環境下においても、BFS置換率を大きくすることで、遮塩性が向上したといえる。また、図-5の(b)より、BFSを多量置換した場合、水結合材比が小さいほど、表層部の塩分量は小さくなり、N50、BB50を含めたすべての要因の中でBC30が最も小さな値を示した。塩分浸透深さについては、暴露開始から約1年程度では、明確な違いを確認できなかったものの、実塩害環境下においても、水結合材比の低減によって空隙構造が緻密化され遮塩性が向上したことが考えられる。

(2) 見掛けの拡散係数

図-6に深度と塩分量の結果から算出した、各配合の見掛けの拡散係数を示す。セメント種別で比較すると、N50の見掛けの拡散係数が最も大きくなり、BC50はN50の約半分程度となった。BC配合における水結合材比の変化をみると、水結合材比が小さくなることで見掛けの拡散係数も低減されることが確認された。いずれも非定常電気泳動実験によって求めた実効拡散係数と同様の傾

向が確認された。

4. 拡散係数の換算

図-7に非定常電気泳動実験によって求めた実効拡散係数と暴露実験によって求めた見掛けの拡散係数の比較を示す。図-7より、見掛けの拡散係数は実効拡散係数よりも小さくなった。実効拡散係数は短期間で取得することができるものの、実際の設計用値としてそのまま用いることができないため、見掛けの拡散係数へと換算する必要がある。そのため、土木学会の「実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算法(案)」に示される下式(4)に準拠して、補正項 $k_1 \cdot k_2$ を求めた。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (4)$$

ここに、 D_{ae} :非定常電気泳動実験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数(cm²/year)、 D_e :非定常電気泳動実験による実効拡散係数(cm²/year)である。表-4に各要因における算出した $k_1 \cdot k_2$ を示す。表より本実験の範囲内で、Nの場合は0.16、BBは0.40、BCはBC30のみ0.61と大きな値を示したが、BC40は0.27、BC45は0.33、BC50は0.33となり、BC30を除くとBC配合の $k_1 \cdot k_2$ は約0.3程度となった。既往の研究⁷⁾では、非定常電気泳動実験によって求めた実効拡散係数と浸漬法によって得られる見掛けの拡散係数を比較しており、 $k_1 \cdot k_2$ を

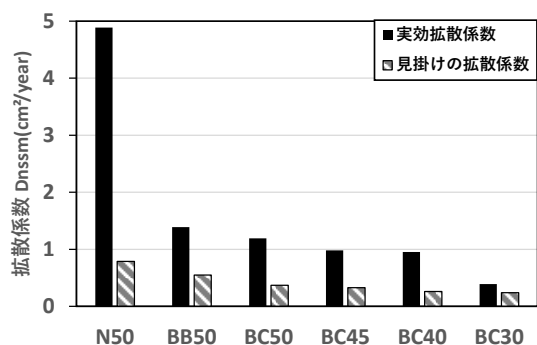


図-7 実効拡散係数と見掛けの拡散係数の比較

表-4 補正項 $k_1 \cdot k_2$

配合名	実効拡散係数 $D_{nssm}(cm^2/year)$	見掛けの拡散係数 $D_{ap}(cm^2/year)$	$k_1 \cdot k_2$
N50	4.89	0.79	0.16
BB50	1.39	0.55	0.40
BC50	1.19	0.37	0.31
BC45	0.98	0.33	0.33
BC40	0.96	0.26	0.27
BC30	0.39	0.24	0.61

プロットから独自に算出した結果、N が約 0.60、BB が約 0.40、BC が約 0.50 となった。BB については、本研究によって算出した $k_1 \cdot k_2$ と同程度となったものの、N と BC については既往の研究よりも小さな値となった。土木学会では定常状態の電気泳動実験で得られる実効拡散係数から見掛けの拡散係数を算出する示方書式⁴⁾は存在するものの、非定常電気泳動実験によって得られる拡散係数の補正係数についての研究は少ない。今後、本研究で得られる長期暴露データと照合しながら、 $k_1 \cdot k_2$ のばらつきの有無を確認し、非定常電気泳動実験によって短期間で求めた実効拡散係数によって設計に必要な実塩害環境下での見掛けの拡散係数を、BC 配合においても算出できるものと考えられる。

5. 結論

5.1 非定常電気泳動実験

本研究では、最初に BFS を多量置換した BC コンクリートの遮塩性を非定常電気泳動実験により定量的に評価することによって、以下の知見が得られた。

- (1) NT BUILD 492 と土研法の 2 つの算出方法によって求めた実効拡散係数を比較したところ、値に大きな差はなく 1 点の印加電圧から拡散係数を算出することのできる NT BUILD 492 を用いて簡易に実効拡散係数を算出可能であることを確認した。
- (2) 材齢 28 日と 91 日の試験体を使用して非定常電気泳動実験を実施したところ、OPC 配合に関しては材齢の経過によって実効拡散係数が顕著に低減した。BC 配合は材齢 28 日と 91 日での実効拡散係数に大きな差がなく、材齢 28 日時点での実効拡散係数取得は妥当であった。
- (3) BFS の置換率が大きいほど、実効拡散係数が低減されることを確認した。
- (4) BC 配合は、W/B が小さいほど実効拡散係数が低減されることを確認した。

5.2 暴露実験

BC コンクリートの実塩害環境下における遮塩性を暴露実験開始から約 1 年経過後の計測によって評価し、室

内試験と暴露実験のデータを比較・考察することで以下の知見が得られた。

- (5) 実塩害環境においても BFS の置換率が大きいほど、表面の塩分量や塩分浸透深さは小さくなり、見掛けの拡散係数が低減されることを確認した。
- (6) BC 配合は、W/B を小さくすることで見掛けの拡散係数は低減した。1 年程度の暴露では、塩分浸透深さについて顕著な差異は認められなかった。
- (7) 実効拡散係数は見掛けの拡散係数よりも大きな値を示し、それぞれの補正係数 $k_1 \cdot k_2$ は本実験の範囲内では OPC 配合で 0.16、BB 配合が 0.40、BC 配合は W/B が 50~40% の範囲で 0.30 程度となり、W/B が 30% では 0.61 となった。
- (8) 今後、本研究で得られる長期暴露データと照合し、見掛けの拡散係数の経時変化と補正係数 $k_1 \cdot k_2$ のばらつきの有無を確認していくことで、BFS を多量置換したコンクリートの非定常電気泳動実験によって得られる実効拡散係数から実用上の見掛けの拡散係数を同定できる手段の道筋を示した。

謝辞

本研究は鉄鋼スラグ協会の助成を受けたものである。また、非定常電気泳動実験と暴露実験においては、土木学会 360 委員会のメンバーに多くのご助言や参考文献のご提供をいただいた。ここに謝意を表する

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]
- 2) Nordtest NT BUILD 492, “Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiment,” Nordtest, 1999
- 3) 渡辺豊, 河野広隆, 渡辺博志：コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.663-668, 2002
- 4) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, コンクリート技術シリーズ 55, 2003
- 5) 伊代田岳史, 原沢蓉子, 亀山敬宏：非定常電気泳動試験を用いた高炉コンクリートの養生影響評価, Cement Science and Concrete Technology, Vol.68, pp.275-282, 2014
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案), p.375, 2013
- 7) 中村英佑ほか：通電後の塩化物イオン浸透深さを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp304-322, 2016