

# 論文 塩分浸透停滞現象の表現を可能とする拡散係数経時変化モデル

井口 重信\*1・岸 利治\*2

**要旨:** 筆者らは、これまでコンクリート中への塩化物イオン浸透現象を Fick の拡散則で近似した場合、拡散係数が浸漬時間の累乗で近似が可能であり、拡散係数の時間依存性を便宜的かつ大胆に考慮することでフライアッシュや高炉スラグなどの混和材を添加したコンクリートの塩分浸透予測を含めた塩分浸透予測を簡便に再現できることを述べてきた。拡散係数の時間依存性を表す係数は、水結合材比や結合材全量に占める混和材比などと関連が深く、これらを説明変数とする式から算出することで、浸漬時間に応じた拡散係数を求めることが可能となり、既往の観測結果による塩分浸透状況を精度よく再現することを確認した。

**キーワード:** 塩化物イオン, 拡散係数, 混和材, 水結合材比

## 1. はじめに

フライアッシュ (以下, FA) や高炉スラグ (以下, BFS) などの混和材を添加したコンクリートでは、塩化物イオンの浸透が停滞する現象が報告されている<sup>1)</sup>。一方で、混和材を添加したコンクリートにおいて、普通ポルトランドセメント (以下, OPC) のみを用いたコンクリートよりも塩化物イオンの浸透が抑制される現象については、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では Fick の第二法則による拡散方程式において拡散係数  $D_a$  の値を小さくすることで一定程度考慮できる方法は提案されているが、塩分の浸透が停滞する現象までは再現されていない。

そこで筆者らは、結合材全量に占める FA や BFS などの混和材の比率 (以下, 混和材比) や水結合材比などをパラメータとした塩水浸漬試験の結果<sup>3),4),5)</sup>をもとに、各浸漬時間における塩化物イオン濃度と浸漬深さの計測結果から、式(1)に示す Fick の第二法則による拡散則を満足する拡散係数  $D_a$  と表面塩化物イオン濃度  $C_0$  を算出した。

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

ここに、 $x$ : 浸漬面から全塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離(cm)

$t$ : 供用期間(年) (ここでは、浸漬期間(年))

$C(x,t)$ : 距離  $x$ (年), 供用期間  $t$ (年)において測定された全塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$ : コンクリートの表面における全塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_i$ : 初期含有全塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$D_a$ : コンクリートの見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

$\operatorname{erf}(\ )$ : 誤差関数

浸漬期間と拡散係数  $D_a$  は式(2)に示すように浸漬期間の累乗に比例して減少するように、表面塩化物イオン濃

度  $C_0$  は式(3)に示すように一定値に漸近するように近似が可能である。

$$D_a(t) = D_0 \cdot t^{-k_D} \quad (2)$$

ここに、 $D_a(t)$ : 浸漬時間による変化を考慮した見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

$D_0, k_D$ : 拡散係数  $D_a$  の時間依存性を表す係数

$$C_0(t) = C_i + C_u(1 - e^{-k_C t}) \quad (3)$$

ここに、 $C_0(t)$ : 浸漬時間による変化を考慮した表面塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_i$ : 初期含有全塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_u, k_C$ : 表面塩化物イオン濃度の時間依存性を表す係数

以上では、拡散係数  $D_a$  および表面塩化物イオン濃度  $C_0$  の経時変化を表す近似式の導出過程を示してきたが、反対に式(2), (3)を用いて浸漬期間 (供用期間) に応じた拡散係数  $D_a$  や表面塩化物イオン濃度  $C_0$  が算出できれば、式(1)により塩化物イオン濃度を算出し塩分浸透予測が可能になる。この際、拡散係数  $D_a$  の経時変化を表す係数  $k_D$  を 1.0 に設定できれば、従来の設計に用いる Fick の拡散方程式によって塩分が停滞する現象も理論上再現できることになる。

そこで、式(2)中の拡散係数  $D_a$  の経時変化を表す係数  $D_0, k_D$  と混和材比や水結合材比との関係を分析し、これらを説明変数とする算出式を導出することで、汎用的に塩分浸透予測が可能手法を検討したので、以下にその概要を記す。なお、表面塩化物イオン濃度  $C_0$  については、約 1 年程度で一定値に漸近し、年単位以上の塩分浸透予測の際には影響が少ないため、以下では漸近後の一定値で取扱い、経時変化については考慮しないものとする。

## 2. 係数 $D_0, k_D$ の説明変数の分析

表-1 に本論文で分析の対象とした塩水浸漬試験結果の概要と、図-1 に示すフローで算出した係数  $D_0, k_D$  の

\*1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務 修士(工学) (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 分析対象データの係数 D<sub>0</sub> および k<sub>D</sub>

No.	配合区分	試験体諸元				養生方法・期間	その他	塩水浸漬試験結果			出展文献
		試験体番号		水結合材比	混和材比			拡散係数D <sub>a</sub>		係数D <sub>0</sub> , k <sub>D</sub> の相関関係式	
		シリーズ	名称					係数D <sub>0</sub>	係数k <sub>D</sub>		
1	OPC	I	N1	37.8%	0.0%	湿潤1日+気中約2.2年		109	0.81	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.07) / 0.19\}$	3
2	OPC	I	N3	37.8%	0.0%	湿潤3日+気中約2.2年		1214	1.14	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.33) / 0.21\}$	3
3	OPC	I	N7	37.8%	0.0%	湿潤7日+気中約2.2年		325	1.10	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.10) / 0.21\}$	3
4	BFS	I	B1	37.8%	45.0%	湿潤1日+気中約2.2年	高炉セメントB種(混和材比は推定値)	207	0.91	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.17) / 0.20\}$	3
5	FA	I	F1	36.7%	20.0%	湿潤1日+気中約2.2年		165	1.01	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.02) / 0.20\}$	3
6	FA	I	F3	36.7%	20.0%	湿潤3日+気中約2.2年		117	0.86	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.03) / 0.19\}$	3
7	FA	I	F7R	36.7%	20.0%	湿潤7日+気中約2.2年	気中のうち最初28日目までは封緘	119	1.07	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.22) / 0.18\}$	3
8	FA	II	1	48.5%	19.9%	水中28日		494	1.04	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.26) / 0.21\}$	3
9	FA	II	2	48.5%	19.9%	水中28日		1261	1.27	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.23) / 0.21\}$	3
10	FA	II	3	48.5%	19.9%	水中28日(10℃)		278	0.92	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.25) / 0.21\}$	3
11	FA	II	4	48.5%	19.9%	水中28日(30℃)		310	0.97	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.24) / 0.21\}$	3
12	FA	II	5	48.5%	19.9%	水中7日		72	0.63	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.34) / 0.21\}$	3
13	FA	II	6	48.5%	19.9%	水中14日		830	1.17	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.27) / 0.21\}$	3
14	FA	II	7	48.5%	19.9%	水中28日		1773	1.32	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.25) / 0.21\}$	3
15	FA	II	8	48.5%	19.9%	水中28日		175	0.87	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.22) / 0.21\}$	3
16	FA	II	9	50.0%	10.1%	水中28日		297	1.13	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.07) / 0.19\}$	3
17	FA	II	11	38.5%	40.0%	水中28日		4120	1.58	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.03) / 0.19\}$	3
18	OPC	II	12	51.0%	0.0%	水中28日		124	0.76	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.29) / 0.22\}$	3
19	FA	II	15	38.1%	28.5%	水中28日		7625	1.69	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.10) / 0.20\}$	3
20	OPC	III	1	47.1%	0.0%	水中7日+気中28日		75	0.72	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.08) / 0.19\}$	3
21	BFS	III	2	42.7%	55.6%	水中7日+気中28日	ブレーション値4000	22	0.80	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.23) / 0.18\}$	3
22	BFS	III	3	36.7%	83.3%	水中7日+気中28日	ブレーション値4000	223	1.19	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.19) / 0.18\}$	3
23	OPC	III	5	47.1%	0.0%	水中3日+気中28日		81	0.65	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.17) / 0.19\}$	3
24	BFS	III	6	42.7%	55.6%	水中3日+気中28日	ブレーション値4000	6	0.56	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.23) / 0.18\}$	3
25	BFS	III	7	36.7%	83.3%	水中3日+気中28日	ブレーション値4000	48	0.95	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.18) / 0.20\}$	3
26	BFS	III	9	36.7%	83.3%	水中3日+気中28日	ブレーション値6000	59	1.00	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.25) / 0.18\}$	3
27	BFS	III	10	36.7%	83.3%	水中3日(30℃)+気中28日	ブレーション値4000	78	1.06	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.26) / 0.18\}$	3
28	BFS	III	11	36.7%	83.3%	水中3日+気中28日	ブレーション値4000	97	1.06	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.23) / 0.18\}$	3
29	BFS	III	12	36.7%	83.3%	水中3日+気中28日	ブレーション値4000	25	0.81	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.22) / 0.18\}$	3
30	OPC	III	13	47.1%	0.0%	水中3日+気中91日		45	0.56	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.13) / 0.18\}$	3
31	OPC	III	14	47.1%	0.0%	水中3日+気中182日		23	0.44	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.12) / 0.18\}$	3
32	BFS	III	15	42.7%	55.6%	水中3日+気中91日	ブレーション値4000	42	0.95	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.24) / 0.19\}$	3
33	BFS	III	16	42.7%	55.6%	水中3日+気中182日	ブレーション値4000	11	0.64	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.21) / 0.18\}$	3
34	BFS	III	17	36.7%	83.3%	水中3日+気中91日	ブレーション値4000	20	0.79	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.25) / 0.18\}$	3
35	BFS	III	18	36.7%	83.3%	水中3日+気中182日	ブレーション値4000	20	0.80	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.25) / 0.18\}$	3
36	FA	III	21	35.2%	32.6%	水中3日+気中28日		31	0.84	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.19) / 0.19\}$	3
37	FA	III	22	35.2%	32.6%	水中3日+気中91日		16	0.75	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.23) / 0.19\}$	3
38	FA	III	23	35.2%	32.6%	水中3日+気中182日		13	0.74	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.27) / 0.18\}$	3
39	OPC	鎌田	N40A	40.0%	0.0%	気中91日		70	0.68	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.30) / 0.23\}$	4
40	OPC	鎌田	N50A	50.0%	0.0%	気中91日		145	0.65	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.49) / 0.23\}$	4
41	OPC	鎌田	N60A	59.9%	0.0%	気中91日		2967	1.23	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.61) / 0.23\}$	4
42	OPC	鎌田	N40S	40.0%	0.0%	封緘91日		5	0.24	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.13) / 0.23\}$	4
43	OPC	鎌田	N50S	50.0%	0.0%	封緘91日		163	0.77	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.40) / 0.23\}$	4
44	OPC	鎌田	N60S	59.9%	0.0%	封緘91日		409	0.80	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.58) / 0.23\}$	4
45	OPC	鎌田	N40A-乾湿	40.0%	0.0%	気中91日後乾湿過程		992	1.27	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.32) / 0.23\}$	4
46	OPC	鎌田	N50A-乾湿	50.0%	0.0%	気中91日後乾湿過程		347	0.86	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.49) / 0.23\}$	4
47	OPC	鎌田	N60A-乾湿	59.9%	0.0%	気中91日後乾湿過程		499	0.75	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.68) / 0.23\}$	4
48	OPC	鎌田	N40S-乾湿	40.0%	0.0%	封緘91日後乾湿過程		43	0.73	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.14) / 0.23\}$	4
49	OPC	鎌田	N50S-乾湿	50.0%	0.0%	封緘91日後乾湿過程		45	0.48	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.39) / 0.23\}$	4
50	OPC	鎌田	N60S-乾湿	59.9%	0.0%	封緘91日後乾湿過程		147	0.57	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.58) / 0.23\}$	4
51	BFS	鎌田	BB50A	50.0%	50.0%	気中91日		1983	1.36	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.39) / 0.23\}$	4
52	BFS	鎌田	BB50S	50.0%	50.0%	封緘91日		19	0.64	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.04) / 0.23\}$	4
53	FA	鎌田	FA50A	50.0%	20.0%	気中91日		215	0.95	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.29) / 0.23\}$	4
54	FA	鎌田	FA50S	50.0%	20.0%	封緘91日		34	0.70	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.11) / 0.23\}$	4
55	OPC	小柳	20%	20.0%	0.0%	水中28日		4	0.54	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.29) / 0.18\}$	5
56	OPC	小柳	30%	30.0%	0.0%	水中28日		7	0.45	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.12) / 0.18\}$	5
57	OPC	小柳	40%	40.0%	0.0%	水中28日		3	0.22	$D_0 = \exp\{(k_D - 0.01) / 0.18\}$	5
58	OPC	小柳	50%	50.1%	0.0%	水中28日		15	0.43	$D_0 = \exp\{(k_D + 0.05) / 0.18\}$	5

注: シリーズI~IIIの試験体については、参考文献3)にない試験結果も追加している。また、一部、浸漬期間の長いデータも追加して係数D<sub>0</sub>, k<sub>D</sub>を算出している。

算出手順を示す。なお、表-1には、後述する係数 D<sub>0</sub> と k<sub>D</sub> の相関関係式も合わせて記載する。各試験体の塩化物イオン濃度分布などの試験結果は、参考文献 3)、4)、5)を参照されたい。

図-2、図-3に係数 D<sub>0</sub> と k<sub>D</sub> の関係を示す。FA や BFS などの混和材が添加されたものほど係数 k<sub>D</sub> の値が大きくなり、水結合材比が小さいものほど係数 k<sub>D</sub> が大きく、係数 D<sub>0</sub> が小さいところに分布することが分かる。このことか

ら係数 D<sub>0</sub>, k<sub>D</sub> は混和材比や水結合材比などと関係が深いと考えられる。

係数 D<sub>0</sub>, k<sub>D</sub> に対する混和材比および水結合材比の説明変数としての寄与度を調べるため、これらを説明変数とした場合の回帰分析を実施した。回帰分析の結果の概要を表-2に示す。重相関 R, 補正 R<sup>2</sup> ともに小さい値であることからばらつきの多いデータではあるが、有意 F の値が 0.05 以下であることから回帰モデルとしては有意

と言える。係数  $D_0$  については、FA では水結合材比と混和材比の両方ともにおいて  $t$  値が 2 以上となり両者ともに意味のある説明変数と言えるが、BFS については水結合材比のみ  $t$  値が 2 以上となったことから、水結合材比のみが説明変数としては意味があるという結果となった。係数  $k_D$  については、FA および BFS ともに、混和材比のみが  $t$  値が 2 以上となり説明変数として優位と言える、という結果となった。以上から、係数  $k_D$  については混和材比を説明変数とし、係数  $D_0$  については水結合材比と混和材比の両者を説明変数と考えて定式化を試みる。

### 3. 係数 $D_0$ , $k_D$ の相関関係

係数  $D_0$  と  $k_D$  は、図-1 の STEP2 に示すように浸漬期間  $t$  における拡散係数  $D_a$  の算出結果を与えて、回帰分析により算出する。そのため、決定係数  $R^2$  の低下を許容すれば図-4 に示すように近い近似式が無数に存在する。図-4 に示した、係数  $D_0$  と  $k_D$  の相関を図示すると図-5 のようになり、決定係数  $R^2$  の低下を許容しても、係数  $D_0$  と  $k_D$  はお互いに関係性を持ちながら、この対数近似式上の値を取るようになる。既往の研究成果<sup>3)</sup>より、図-5 に示す係数  $D_0$  と  $k_D$  の関係図上でプロットが右上に位置するほど比較的短い時間で深部まで塩化物イオンは浸透するがその後は浸透が進まず一定位置で停滞する挙動を示し、プロットが左下に位置するほど浸透速度が遅いため浅い部分での浸透挙動だが浸透速度が遅くならず継続して浸透する挙動を示すが、塩化物イオン濃度分布では両者の差異は小さい。また、今回の分析で対象としたデータは、 $n=1$  で行われた塩水浸漬試験結果がほとんどであることと、塩水浸漬試験の精度を考慮すると、この対数近似式上の値であれば、塩分浸透予測精度に与える影響は小さいと考えられる。よって、以下では各試験体における係数  $D_0$  と  $k_D$  の相関関係を考慮しながら、係数  $D_0$  と  $k_D$  の算出式を検討することとする。なお、各試験体の係数  $D_0$  と  $k_D$  の相関関係式は、表-1 に示した通りである。

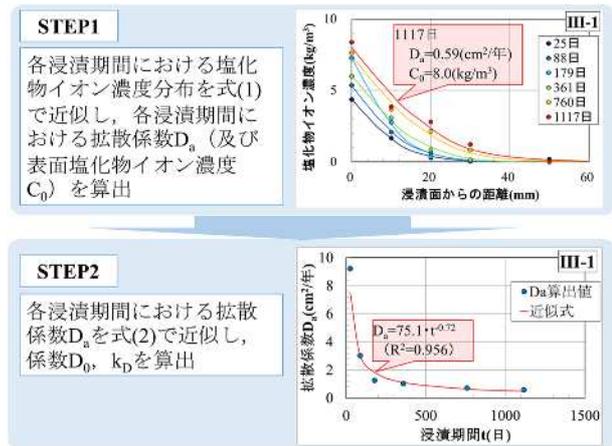


図-1 係数  $D_0$  および  $k_D$  の算出手順

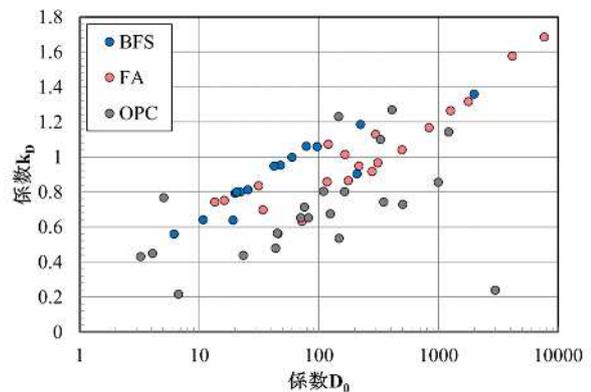


図-2 係数  $D_0$  と  $k_D$  の関係 (混和材有無別)

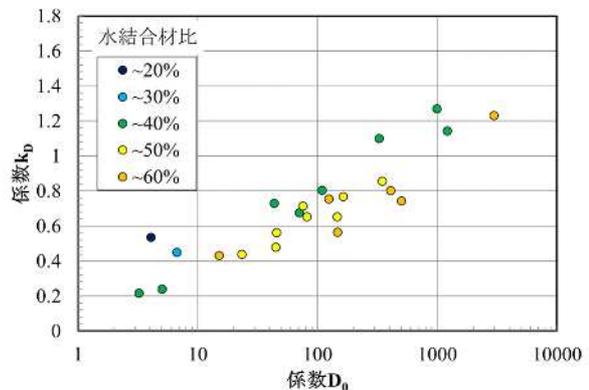


図-3 係数  $D_0$  と  $k_D$  の関係 (水結合材比別(OPCのみ))

### 4. 係数 $D_0$ および $k_D$ の算出式の導出

#### 4.1 係数 $k_D$ の算出式

2. の分析結果より、係数  $k_D$  は混和材比を説明変数として考える。図-6、図-7 に、係数  $k_D$  と混和材比の関係を示す。なお、FA、BFS の分析のどちらにおいても、OPC の結果を混和材比率 0% として用いた。FA では混和材比 20% 程度で、BFS では混和材比が 90% 程度で係数  $k_D$  が 1.0 を超える結果となった。係数  $k_D$  と混和材比の線形回帰の過程では、塩水浸漬試験結果のばらつきから係数  $k_D$  が 1 を上回るものと下回るもの両者が存在するはずであるので、係数  $k_D$  の制限は設けずに導出した。ただし、

表-2 係数  $D_0$  と  $k_D$  の説明変数の回帰分析

	FA		BFS		
	$\log_{10}D_0$	$k_D$	$\log_{10}D_0$	$k_D$	
重相関 R	0.512	0.524	0.462	0.400	
重決定 $R^2$	0.262	0.275	0.214	0.160	
補正 $R^2$	0.225	0.239	0.170	0.113	
標準誤差	0.705	0.281	0.669	0.256	
観測数	43	43	39	39	
有意 F	0.002	0.002	0.013	0.043	
t 値	水結合材比	3.317	0.952	2.923	0.797
	混和材比	2.492	3.895	0.053	2.613

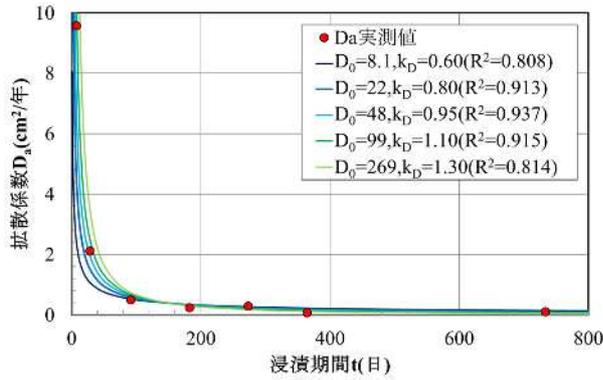


図-4 拡散係数  $D_a$  の経時変化

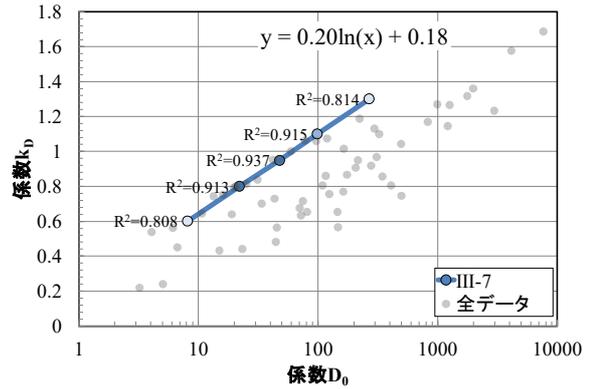


図-5 係数  $D_0$  と  $k_D$  の相関関係式

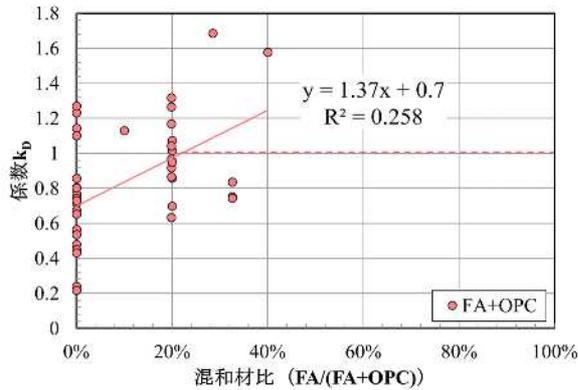


図-6 係数  $k_D$  と混和材比の関係(FA)

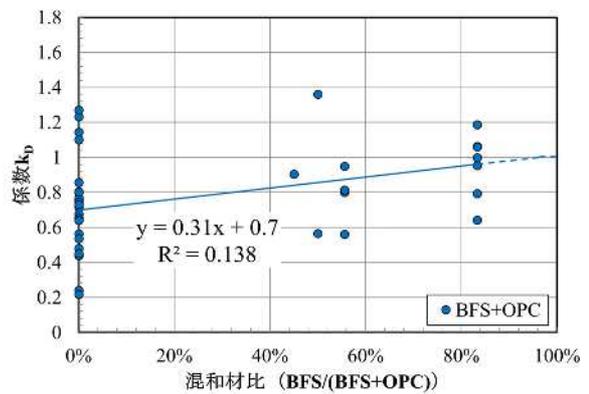


図-7 係数  $k_D$  と混和材比の関係(BFS)

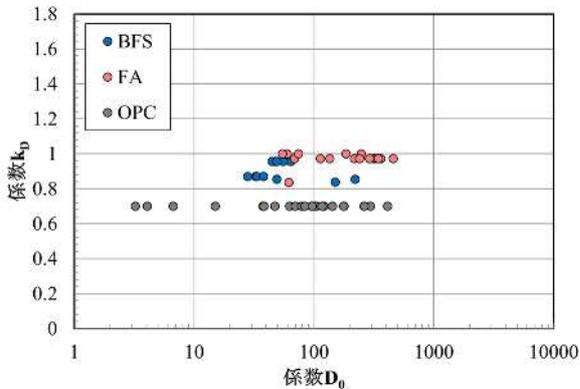


図-8 係数  $D_0$  と  $k_D$  の関係(相関移動後)

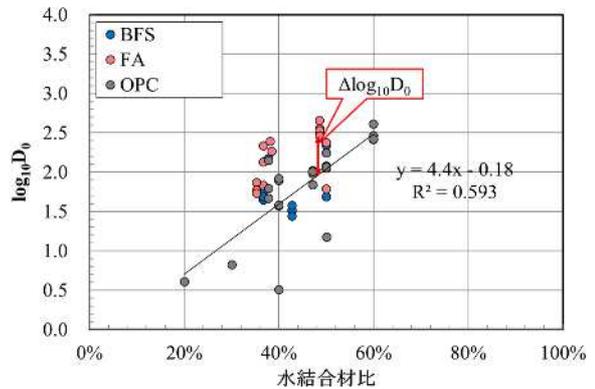


図-9 係数  $D_0$  と水結合材比の関係(相関移動後)

係数  $k_D$  が 1.0 を超えると、例えば 100 年後の深さ方向の塩分濃度分布が 10 年後の塩分濃度分布よりも手前側に来ることを表すことになり、実現象と合わないため  $k_D \leq 1.0$  という制限を設けた。係数  $k_D$  の算出式は、式(4)、(5)のようになる。

FA の場合；

$$k_D = 1.37 \cdot \frac{FA}{OPC+FA} + 0.7 \leq 1.0 \quad (4)$$

BFS の場合；

$$k_D = 0.31 \cdot \frac{BFS}{OPC+BFS} + 0.7 \leq 1.0 \quad (5)$$

ここに、FA, BFS, OPC: コンクリート配合における FA,

BFS, OPC の量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

#### 4.2 係数 $D_0$ の算出式

式(4)、式(5)により、各試験体の混和材比をもとに算出した係数  $k_D$  の値から、各試験体の相関関係式(表-1)によって係数  $D_0$  を求めると図-8 のようになる。混和材が含まれない OPC については  $k_D=0.7$  のラインに分布し、水結合材比の違いにより  $D_0$  が異なることを表している。また、混和材が含まれる FA, BFS についても同一の  $k_D$  あっても、水結合材比および混和材比の違いにより  $D_0$  が分散していることが分かる。図-9 に  $D_0$  と水結合材比の関係を示す。混和材の影響が含まれない OPC については、係数  $k_D$  は水結合材比の関数として、式(6)で近似でき

る。

$$\log_{10}D_0 = 4.4 \cdot W/B - 0.18 \quad (6)$$

ここに、W/B：水結合材比

同じ水結合材比でも、FA の試験体は式(6)による近似直線よりもグラフ上側に位置し、混和材比の影響があると考えられる。そこで、式(6)で算出される OPC の場合の係数  $D_0$  の計算値を  $D_{0cal}$  とし、FA および BFS における係数  $D_0$  と  $D_{0cal}$  の差分  $\Delta D_0$  を算出し、混和材比率との関係を見ると図-10、図-11 のようになる。FA、BFS については、混和材比に応じて  $\Delta D_0$  が大きくなる傾向が見られ、 $D_0$  が水結合材比だけでなく混和材の影響も受けることが分かる。以上より、FA、BFS については、OPC の場合の係数  $D_0$  の算出式(6)に、混和材比の影響を加味して、式(7)、(8)により係数  $D_0$  が算出できる。

FA の場合；

$$\log_{10}D_0 = 2.1 \cdot \frac{FA}{OPC+FA} + 4.4 \cdot W/B - 0.18 \quad (7)$$

BFS の場合；

$$\log_{10}D_0 = 0.18 \cdot \frac{BFS}{OPC+BFS} + 4.4 \cdot W/B - 0.18 \quad (8)$$

### 5.塩分浸透予測精度の検証

4.の検討により、混和材比および水結合材比が分かれば式(4)、(5)および式(7)、(8)により係数  $k_D$  および  $D_0$  が算出可能となり、これにより浸漬期間に応じた拡散係数  $D_a$  が求まり、塩化物イオンの浸透予測が可能となった。そこで、既往の研究<sup>1)</sup>に示されている経年 1.5 年、3.5 年、8.75 年における塩害環境下におかれたコンクリート中の塩化物イオン量の実測結果の再現を試みる。再現を試みた 3 ケースの水結合材比、混和材比などの概要を表-3 に、全塩化物イオン量の測定結果を図-12 に示す。なお、表-3 には、全塩化物イオン量の分布を式(1)により近似した際に推定される表面塩化物イオン濃度  $C_0$  の算出結果も合わせて示す。

表-3 の水結合材比、混和材比を式(4)、(5)および式(7)、(8)に代入し、B0-low、F1-low、F2-low の係数  $D_0$ 、 $k_D$  を求めると以下のとおりとなる。

$$B0-Low : D_0=192, k_D=0.70$$

$$F1-Low : D_0=506, k_D=0.97$$

$$F2-Low : D_0=213, k_D=0.99$$

この結果を式(2)に代入し、1.5 年、3.5 年、8.75 年時の拡散係数を求め、式(1)により各年の塩化物イオン濃度分布を算出すると、図-13 のようになる。なお、表面塩化物イオン濃度  $C_0$  については、実測値から推測される値の平均値を用いて算出している。各図には、10 年、50 年、100 年時の予測値も合わせて示す。塩分の浸透が停滞していると思われる位置でみると、B0-low では 70mm 程度、F1-

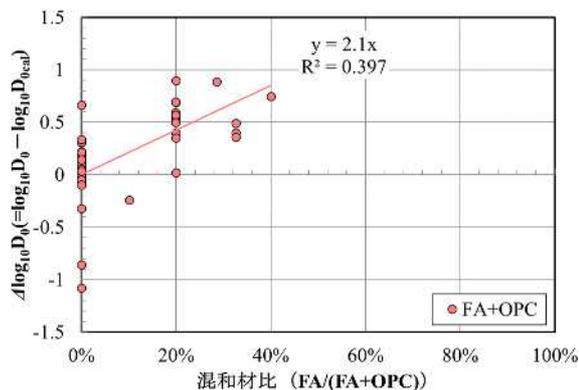


図-10  $\Delta \log_{10}D_0$  と混和材比の関係(FA)

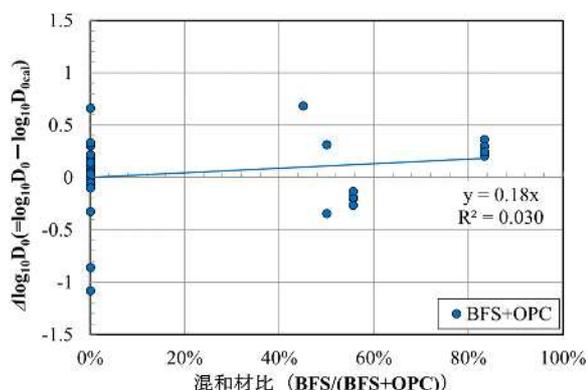


図-11  $\Delta \log_{10}D_0$  と混和材比の関係(BFS)

表-3 検証用データの諸元

配合区分		B0	F1	F2						
採取位置		low	low	low						
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	水 W	169	172	175						
	セメント C	302	245	295						
	フライアッシュ F	—	60	80						
	細骨材 S	860	852	688						
	粗骨材 G	979	955	1052						
水結合材比		56%	56%	47%						
混和材比		0%	20%	21%						
表面塩化物イオン濃度 $C_0$ (推計値) (kg/m <sup>3</sup> )		1.5年	3.5年	8.75年	1.5年	3.5年	8.75年	1.5年	3.5年	8.75年
		14.6	9.1	10.4	23.2	26.3	22.4	24.1	25.2	26.6
		平均		11.4	平均		24.0	平均		25.3

low では 50mm 程度、F2-low では 30mm 程度となり、概ね実際と近い現象が再現されている。B0-low については実測結果が 1.5 年～8.75 年という期間であり塩分の浸透が停滞しているかどうかを判断するのは難しいが、8.75 年までの塩化物イオン濃度分布の曲線では、精度よく再現できている。

本方法は、実際の塩化物イオン濃度分布を Fick の拡散則で近似して算出した拡散係数が時間経過とともに小さくなり、特に  $k_D=1$  とした場合には、便宜的に塩分の浸透が停滞する現象を再現することに着目して提案したも

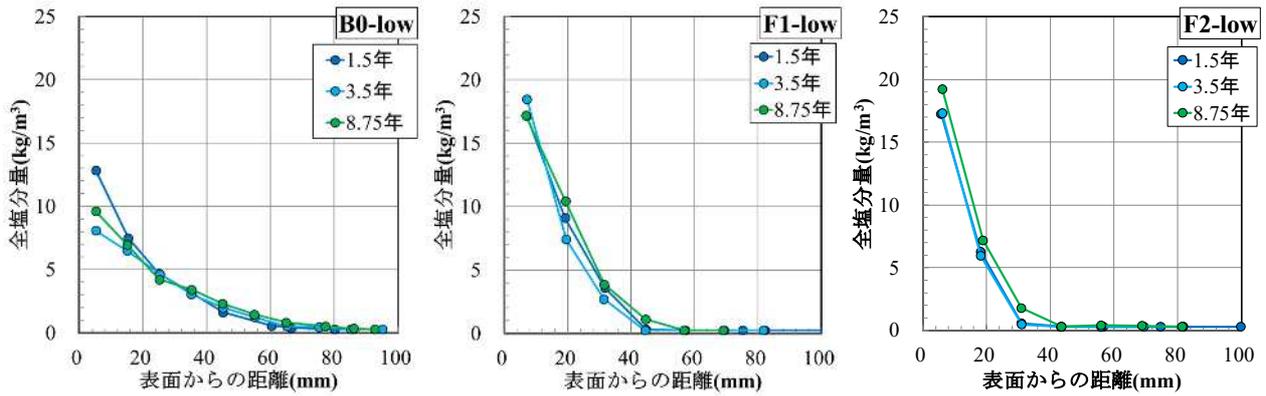


図-12 塩化物イオン濃度の実測値

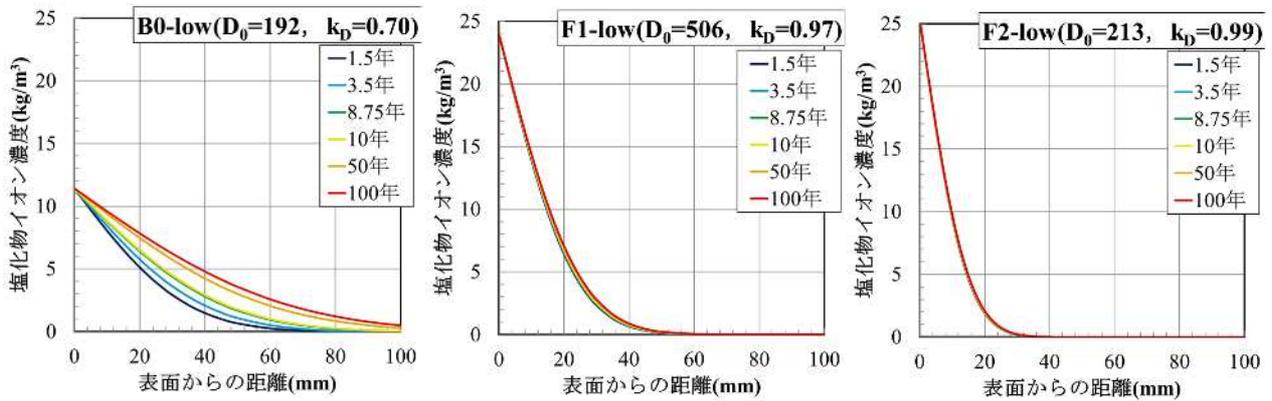


図-13 塩化物イオン濃度の計算値

のである。実構造物では、液状水の浸入がコンクリート表層のみに限定されたり、混和材の効果により不飽和領域での微小空隙中のイオンの拡散が電気二重層の影響で抑制されたりすることにより、結果的に塩分の浸透が停滞する現象が生じることがあると考えられる。そのため、式(2)中の拡散係数の時間変化を表す項で、 $k_D=1$ となることを許すことにより、便宜的に塩分浸透が停滞する現象を再現することを可能とした。

## 6.まとめ

設計計算の簡便性を主眼とし、塩分浸透予測に広く設計で用いられている Fick の拡散則の適用を前提として、拡散係数  $D_a$  に時間依存性を考慮することで、混和材を添加したコンクリート等の塩分浸透停滞現象を再現することを目的として分析を行い、以下の結論を得た。

(1) 混和材比や水結合材比をパラメータとした既往の塩水浸漬試験結果から、拡散係数  $D_a$  の経時変化を表す係数  $D_0$ 、 $k_D$  を算出する式を、式(4)、(5)、(7)、(8)の通り導出した。

(2) 塩害環境下に 1.5 年から 8.75 年まで暴露されたコンクリートの塩分浸透予測を式(4)、(5)および式(7)、(8)を用いて行ったところ、FA が添加されたコンクリートについては塩分の停滞現象が再現された。また FA、OPC の両方の試験体において、精度よく塩化物イオン濃度分布が

再現された。今後は、係数  $D_0$ 、 $k_D$  の算出精度を向上させるため多くのデータで分析を行うとともに、実測データ等の再現を行い精度の検証をしていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 高橋 佑弥, 井上 翔, 秋山 仁志, 岸 利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.803-808, 2010
- 2) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.148-157, 2012
- 3) 井口 重信: 混和材を添加したコンクリートにおける塩化物イオン浸透に関する時間依存性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.735-740, 2018
- 4) 鎌田 和久: コンクリート中の塩分浸透の停滞現象とその支配機構に関する包括的研究, 東京大学博士論文, 2016
- 5) 小柳 翔平, 高橋 佑弥, 石田 哲也: 高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015