

電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数と実効拡散係数の関係

東北大学 学生会員 ○西博貴
東北大学 正会員 皆川浩, 久田真
電源開発(株) 正会員 佐藤道生

1. はじめに

コンクリートの電気抵抗率は塩化物イオン浸透性と相関関係があると言われており、塩化物イオン拡散係数を電気抵抗率から推計する方法も提案されている。しかし、推計された拡散係数と他の拡散係数との関連性については不明点が多い。本研究では、混和材、養生方法、曝露環境の異なる供試体を用い、電気抵抗率から推計される推計拡散係数（以下、 D_{cl} ）と電気泳動セル試験から算出される実効拡散係数（以下、 D_e ）の相互関連性を実験的に把握することを目的とした。

2. 実験概要

本研究では、北海道室蘭市に1年間曝露した Ser. I と日本国内6地点に2年間曝露した Ser. II のコンクリート供試体を用いて混和材、養生方法、曝露環境を変化させて検討を行った。以下に実験概要を記す。

2. 1 供試体の概要

(1) Ser. I : 養生方法の異なる供試体

示方配合を表-1に示す。結合材は普通ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を45%の重量内割で置換したもの（以下、OPC, BFSと称す）を用いた。なお、空気量およびスランブの管理値はそれぞれ $5.0 \pm 1.5\%$ 、 $8.0 \pm 2.5\text{ cm}$ である。内寸法 $100 \times 100 \times 400\text{ mm}$ の鋼製型枠にコンクリートを打設し、打設から約24時間後に脱型を行い、 20°C , R. H. 60%の恒温室内で材齢28日まで養生を行った。養生条件を表-2に示す。養生を終えた供試体は、材齢1年まで北海道室蘭市仲町で屋外気中曝露した。その後、試験室内にてコンクリートコアを採取して試験用供試体とした。

(2) Ser. II : 曝露環境の異なる供試体

示方配合を表-3に示す。結合材の種類はOPCおよびOPCにフライアッシュを20, 30%の重量内割で置換したもの（以下、FAと称す）を用いた。空気量およびスランブの管理値は $5.0 \pm 1.5\%$ 、 $12 \pm 2.5\text{ cm}$ である。

表-1 示方配合 (Ser. I)

記号	Gmax (mm)	W/B (%)	空気量 (%)	スランブ (cm)	置換率 (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	BFS	S	G
OPC40	20	40	5.0	8.0	-	165	413	-	798	971
OPC55	20	55	5.0	8.0	-	165	300	-	965	971
BFS40	20	40	5.0	8.0	45	165	227	186	784	971
BFS55	20	55	5.0	8.0	45	165	165	135	880	971

表-2 養生条件 (Ser. I)

供試体名	結合材種類	W/B (%)	養生条件	
			水中養生	気中養生
気中28日	BFS	45, 55	-	材齢28日まで
水中5日	BFS, OPC		材齢5日まで	材齢28日まで
水中7日	BFS		材齢7日まで	材齢28日まで
水中28日	BFS, OPC		材齢28日まで	-

表-3 示方配合 (Ser. II)

記号	W/B (%)	空気量 (%)	スランブ (cm)	置換率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	FA	S	G
OPC	55	5.0	12.0	-	159	289	-	779	1144
FA20	55	5.0	12.0	20	151	220	55	785	1154
FA30	55	5.0	12.0	30	146	186	80	790	1161

表-4 養生条件 (Ser. II)

地点名	環境の特徴
北海道本別町	寒冷地, 内陸部
青森県大間町	寒冷地, 海洋環境
神奈川県茅ヶ崎市	温帯地域, 内陸部標準的環境
福岡県北九州市	温帯地域海洋環境
沖縄県うるま市	亜熱帯地域海洋環境

コンクリートは練混ぜ後、木製型枠内に打設し、 $770 \times 540 \times 300\text{ mm}$ の供試体を作製した。コンクリート打設後の供試体には乾燥防止のため濡れむしろを掛け、散水養生を1週間実施した後に脱型を行った。脱型後は材齢4週に至るまで温度変化の少ない室内に静置し、材齢4週以降に屋外曝露を開始した。

曝露箇所を表-4に示す。本研究では、曝露開始から二年が経過した時点でコンクリートコアを採取し、曝露面から約15~20 cmの部位を実験に使用した。

2. 2 測定項目

(1) 四電極法による電気抵抗率

JSCE K-562-2008に準拠し四電極法により電気抵抗率を測定した。また、供試体の寸法は $\phi 74 \times 50\text{ mm}$ とした。

キーワード 拡散係数, 電気抵抗率, 塩分浸透性, 物質透過性

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院土木工学専攻 TEL 022-795-7430

(2) 空隙率およびコンクリート中のイオン濃度¹⁾

重量差法によって供試体の空隙率および真密度を測定した。空隙水中の各種イオン濃度は、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 OH^- に着目し、このうち、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、および SO_4^{2-} の濃度は抽出した試料溶液をイオンクロマトグラフ法にて定量した。 Ca^{2+} および OH^- の濃度は、測定した Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の濃度を用い、溶解度積および電気的中性条件より算出できると仮定して求めた。

(3) 塩化物イオン実効拡散係数

JSCE-G571-2010に準拠し、電気泳動試験により D_e を評価した。なお、供試体の寸法は $\phi 74 \times 50 \text{ mm}$ とした。

3. 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係式¹⁾

既往の研究に準じて、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係は式(1)のようになる。

$$D_{Cl} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{k \cdot T \cdot \left(1 - \ln 10 \times C_{Cl} \cdot \frac{0.51 \cdot Z_{Cl}^2}{4\sqrt{I} \cdot (1 + \sqrt{I})^2}\right)}{F \cdot e \cdot \sum_n \left(Z_n^2 \cdot \frac{B_n}{B_{Cl}} \cdot C_n\right)} \quad (1)$$

ここに、 D_{Cl} ：塩化物イオン拡散係数 (m^2/s)、 ρ ：電気抵抗率 ($\Omega \text{ m}$)、 k ：ボルツマン定数 ($= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、 T ：絶対温度 (K)、 C ：イオン濃度 (mol/m^3)、 Z ：イオンの価数、 I ：イオン強度、 F ：ファラデー定数 ($= 9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$)、 e ：電気素量 ($= 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)、 n ：イオンの種類、 B ：工学的絶対移動度 ($\text{m N}^{-1} \text{ s}^{-1}$)である。なお、電気抵抗率を計測した供試体は電気泳動セル試験に用いたものと同一であり、2日間の脱気処理後に測定を実施した。

4. 実験結果及び考察

図-1に D_{Cl} と D_e の関係を示す。両者の関係はほぼ同等であるが、混和材を使用した供試体で拡散係数が低いものの、特にFAでは、 D_{Cl} よりも D_e の方が大きくなる傾向であることがわかる。

ここで、図-2に脱気処理した供試体の電気抵抗率と空隙率の関係について、既往の実験値¹⁾と本研究の実験値の比較結果を示す。同一空隙率で比較すると、本研究で測定した電気抵抗率は既往の実験結果よりも大きく、特にFAを使用した供試体において顕著であることがわかる。このように電気抵抗率が異なる理由のひとつとしては、電気抵抗率の含水率依存性²⁾が考えられる。既往の研究で用いられた供試体は水中養生直後に脱気処理されており、空隙はほぼ水で飽和していたと考えられる。一方、本研究で用いた供試体は屋外気中暴露されたもので、大気への水分逸散や水和反応による自己乾燥などにより供試体内部の含水率は低下していたと考えられる。

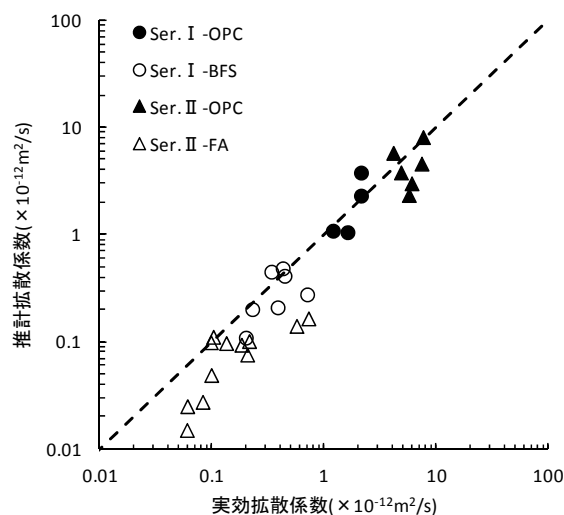


図-1 推計拡散係数と実効拡散係数の関係

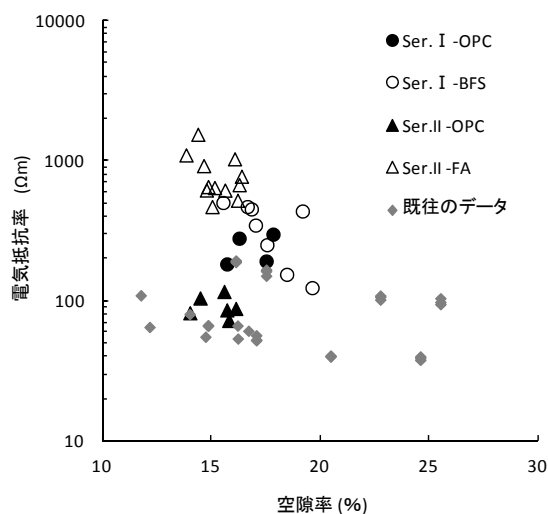


図-2 電気抵抗率と空隙率の関係

このため、二日間の脱気処理をしても空隙が水で十分に満たされず、電気抵抗率が過大評価され、従って、 D_{Cl} が過小評価された可能性がある。一方、電気泳動セル試験の供試体は試験期間中にセル内の溶液から徐々に水分が供給されて含水率が増加した結果、 D_e が過大評価された可能性がある。これらの現象が作用して、図-1のような結果が得られたと考えられる。

5. 結論

D_{Cl} と D_e はほぼ同等となる可能性が高い。しかし、その関係は供試体中の含水率に支配される可能性があることが示唆されたため、今後も検証を進める必要がある。

参考文献

- 1) 皆川ら：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.119-131, 2010.3
- 2) 皆川ら：電気抵抗率から推計した塩化物イオン拡散係数の含水率依存性，第64回セメント技術大会講演要旨，pp.20-21, 2010.5