

骨材量が電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響

東北大学 学生会員 ○齊藤 佑貴  
 東北大学 学生会員 榎原 彩野  
 東北大学 正会員 皆川 浩  
 東北大学 正会員 久田 真

1. 研究の背景と目的

電気抵抗率は、測定が比較的簡便、非破壊であることから、セメント硬化体の塩分浸透性の評価指標として注目されている。電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数（以下、CI推計拡散係数、 $D_{Cl}$ ）が導出され<sup>1)</sup>、 $D_{Cl}$ と塩水浸せき試験により得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数（以下、見掛けのCI拡散係数、 $D_{ap}$ ）には相関がある<sup>1)</sup>と言われているが、骨材量がこれらに及ぼす影響はいまだ不明確である。本研究では、骨材量を変化させたセメントペースト、モルタル、コンクリート供試体を用い、骨材量が $D_{Cl}$ と $D_{ap}$ の関係に及ぼす影響を検討した。

2. 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係式

直流電流が印加されるセメント硬化体中において、導電物質は細孔溶液中のイオンのみ、拡散によるイオン移動は無視可能と仮定し、オームの法則とNernst-Planck式を組み合わせると、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<sup>1)</sup>。

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

ここに、 $D_{Cl}$ ：塩化物イオン拡散係数 ( $m^2/s$ )、 $\rho$ ：電気抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ )、 $k$ ：ボルツマン定数 ( $= 1.38 \times 10^{-23} J/K$ )、 $T$ ：絶対温度 (K)、 $C$ ：イオン濃度 ( $mol/m^3$ )、 $Z$ ：イオンの価数、 $I_s$ ：イオン強度、 $F$ ：ファラデー定数 ( $= 9.65 \times 10^4 C/mol$ )、 $e$ ：電気素量 ( $= 1.60 \times 10^{-19} C$ )、 $n$ ：イオンの種類、 $B$ ：工学的絶対移動度 ( $m N^{-1} s^{-1}$ )である。また、式(1)中の $B_n/B_{Cl}$ は理想溶液中の絶対移動度の比を用いた。

3. 実験概要

3.1 供試体の配合と作製方法

表-1に実験に用いた供試体の示方配合を示す。供試体は骨材量を段階的に変化させ、結合材の種類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

表-1 示方配合

供試体 No.	S/B	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	F	S	G	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	
OPC 1	0	-	612	1223	-	0	-	24.47	0.122	-	
OPC 2	1	100	417	834	-	834	-	16.68	0.083	-	
OPC 3	2	100	316	633	-	1265	-	12.65	0.063	-	
OPC 4	2	75	260	519	-	1039	382	-	-	0.260	
OPC 5	2	55	217	435	-	869	764	-	-	0.217	
OPC 6	2	40	175	350	-	699	1146	-	-	0.175	
BFS 1	0	-	603	603	603	0	-	24.11	0.121	-	
BFS 2	1	100	411	411	411	834	-	16.44	0.082	-	
BFS 3	2	100	312	312	312	1265	-	12.47	0.062	-	
BFS 4	2	75	259	257	257	1029	382	-	-	0.257	
BFS 5	2	55	216	215	215	861	764	-	-	0.215	
BFS 6	2	40	174	173	173	693	1146	-	-	0.173	

A<sub>1</sub>：増粘剤 A<sub>2</sub>：消泡剤 A<sub>3</sub>：AE剤

に高炉スラグ微粉末を 50%の重量内割で置換したもの（以下、OPC、BFS と称す）を用いた。また、水結合材比は全て 50%とし、砂結合材比は 0, 1, 2 とした。なお、コンクリートに関しては砂結合材比を 2 とし、細骨材率はそれぞれ 75, 55, 40%とした。

使用した結合材は普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm<sup>3</sup>，比表面積：3290 cm<sup>2</sup>/g）、高炉スラグ微粉末（密度：2.92 g/cm<sup>3</sup>，比表面積：8240 cm<sup>2</sup>/g，ガラス化率 98%）の 2 種類であり、細骨材は宮城県大和町鶴巣産の山砂（表乾密度：2.62 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.76%，粗粒率：2.69）を使用し、粗骨材は宮城県丸森町産砕石（表乾密度：2.85 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：0.98%，粗粒率：7.01，最大寸法：20 mm）を使用した。また、セメントペーストとモルタルにはブリーディングを防ぐために増粘剤（アルキルアリルスルホン酸塩-アルキルアンモニウム塩系）および消泡剤を使用し、またコンクリートにはAE剤（アニオン系界面活性剤）を添加した。

供試体の寸法はコンクリートを 100×100×400 mm とし、それ以外のものは 40×40×160 mm とした。

打設後 24±2 時間で脱型を行い、供試体は 91 日間、

キーワード 電気抵抗率，拡散係数，骨材，イオン強度，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

20℃の水中で養生した。

### 3. 2 測定項目

#### (1) 電気抵抗率

電気抵抗率はほぼ飽水状態の供試体を用いて、四電極法 (JSCE K-562-2008) により測定した。

#### (2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

$D_{ap}$ はJSCE-G 572-2007 に準拠して測定した。なお、塩水浸せき期間は70日とした。

#### (3) イオン濃度<sup>1)</sup>

空隙水中の各種イオン濃度として、細孔溶液中のイオンのうち、 $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$  に着目し、このうち、 $Na^+$ および $K^+$ の濃度は「建設省総合技術開発プロジェクトのコンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析法 (案)」で、 $Cl^-$ , および $SO_4^{2-}$  の濃度はJCI-SC4「可溶性塩分定量方法」に準拠し、抽出した試料溶液をイオンクロマトグラフ法により測定することで定量した。 $Ca^{2+}$  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。

### 4. 実験結果及び考察

図-1 に $D_{Cl}$ と $D_{ap}$ の関係を示す。 $D_{Cl}$ は $D_{ap}$ と比較して、5.0倍~23.5倍程度の値となった。これは、電流が流れる経路と塩化物イオンが拡散する経路の違い、すなわち、屈曲度の違いなどが原因であると考えられる。さらに、 $D_{ap}$ は固定化される塩分量も対象として算出される値であるのに対して、 $D_{Cl}$ は式(1)の導出過程において固定塩分を考慮していないことが影響しているためだと考えられる。しかし、両者には強い相関が見られることから、 $D_{Cl}$ から $D_{ap}$ を推定できる可能性がある。

さらに、 $D_{Cl}$ と $D_{ap}$ の比を拡散係数比とし、両者の差異の要因を検討する。拡散係数比を式(2)で表し、空隙率およびイオン強度との比較を行う。

$$\alpha = D_{ap} / D_{Cl} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ : 拡散係数比である。

図-2 および図-3 に拡散係数比と空隙率およびイオン強度の関係をそれぞれ示す。図-2 より、OPCにおいて、拡散係数比と空隙率は反比例の関係を示していることがわかる。また、図-3 より、骨材量および結合材種に関わらず、イオン強度が大きくなるほど拡散係数比も大きくなり、既往の研究と同様の傾向が確認できた。なお、拡散係数比がOPCシリーズよりもBFSシリーズで小さいこと、および拡散係数比が空隙率に対して反比例

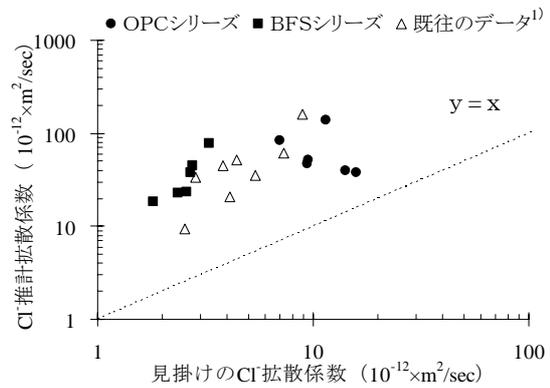


図-1 Cl<sup>-</sup>推計拡散係数と見掛けのCl<sup>-</sup>拡散係数の関係

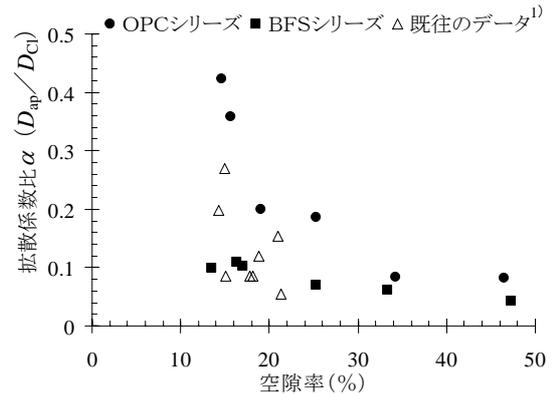


図-2 拡散係数比と空隙率の関係

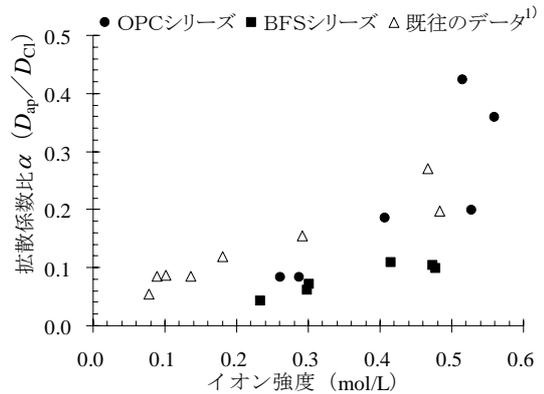


図-3 拡散係数比とイオン強度の関係

の関係を持つことは、見掛けの拡散係数とJSCE G 572により得られる実効拡散係数の比と同様の傾向である。

### 5. 結論

骨材量が変化しても、 $D_{Cl}$ から $D_{ap}$ を推定できる可能性を示した。また、拡散係数比は空隙率、イオン強度と相関があることを示した。

### 参考文献

- 1) 榎原彩野ら：電気抵抗率により推計される塩化物イオン拡散係数に関する一考察，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，Vol.63, No.2, pp.427-428, 2008