

27 年間干満帯に暴露した海水練りコンクリートの電気抵抗率に基づく塩化物イオン拡散係数の評価

東北大学 学生会員 ○杉本 記載, 正会員 皆川 浩, 宮本 慎太郎, 久田 真
 (独)港湾空港技術研究所 正会員 山路 徹
 東京工業大学 正会員 大即 信明

1. 研究の背景と目的

離島での護岸工事など, 真水が得られにくい施工条件では, 練混ぜ水として海水の利用が考えられる. しかし, 海水練りコンクリートの物性については, 過去にも多くの報告があるが, 長期の暴露後に評価した例は少ない. また, 海岸部などの塩害環境下に曝されるコンクリート構造物は, 塩分浸透性の把握が重要である. そこで, 本研究では, 海洋干満帯に 27 年間暴露した練混ぜ水に水道水または海水を用いたコンクリートについて, 電気抵抗率に基づく塩化物イオン拡散係数の評価を行った.

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すると, Nernst-Planck 式とオームの法則等から電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係が式(1)のように導出される¹⁾.

$$D_{Cl} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{k \cdot T \cdot (1 - \ln 10 \times C_{Cl} \cdot \frac{0.51 \cdot Z_{Cl}^4}{4\sqrt{T} \cdot (1 + \sqrt{T})}) \cdot \bar{B}_{Cl}}{F \cdot e \cdot \sum_n (Z_n^2 \cdot \bar{B}_n \cdot C_n)} \quad (1)$$

ここに, D_{Cl} : 塩化物イオン拡散係数 (m^2/s), ρ : 電気抵抗率 (Ωm), k : ボルツマン定数 ($= 1.38 \times 10^{-23} J/K$), T : 絶対温度 (K), C : コンクリート単位体積あたりのイオン濃度 (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, \bar{B} : 理想溶液中の絶対移動度 ($m N^{-1} s^{-1}$)である. 本研究では, D_{Cl} を電気抵抗率から評価される拡散係数として用い, これを推計塩化物イオン拡散係数と呼称する.

3. 実験概要

3.1 供試体および暴露条件²⁾

本研究で使用したコンクリートの配合と供試体の寸法は, 既往の研究²⁾における無筋コンクリートのものと同様であり, セメントの種類は表-1に示す通りである.

表-1 セメントの種類と供試体の記号

記号	種類
OPC	普通ポルトランドセメント
S-A	高炉セメント A 種
S-B	高炉セメント B 種
S-C	高炉セメント C 種
F-B	フライアッシュセメント B 種

※ 図-1~図-4 中の記号の右側の数字はW/Cを示す.

また, W/C は 45, 55 % の 2 水準である.

暴露環境は, 鹿児島県にある港湾空港技術研究所所有の暴露施設の干満帯であり, L.WL+1.3 m の位置に 1985 年から暴露を開始した. 供試体同士は密着し, 表面に生物が多量に付着していた. また, 供試体上部が蓋 (PC はり) で覆われているため乾燥しにくく, 高湿潤状態のコンクリートである.

3.2 測定項目

円柱供試体から $\phi 45 \times 90 mm$ のコア試料を 3 本採取し, 真空脱気装置を用いて相対含水率が 96 % 以上になるように含水状態を調整してから, JSCE-K 562-2013 に準拠して電気抵抗率を測定した. 脱気処理の期間は 14 日間である. 電気抵抗率を測定後, このコア試料を用い, 空隙水中のイオンのうち, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , OH^- に着目し, Na^+ , 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)」, Cl^- , SO_4^{2-} の濃度は JCI-SC4「可溶性塩分定量方法」に準拠し, 抽出した溶液をイオンクロマトグラフ法により測定し, 定量した. Ca^{2+} , OH^- の濃度は測定した Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} の濃度を用い, 溶解度積及び電気的中性条件より算出できると仮定して求めた¹⁾.

空隙率と真密度は, 円柱供試体端部から $20 \times 50 \times 90 mm$ 程度の角柱を 2 試料採取し, 重量差法により測定した. また, イオン強度は式(2)により評価した後, 空隙率と真密度によりコンクリート単位体積あたりの見かけのイオン強度に換算した.

キーワード 練混ぜ水, 海水, 電気抵抗率, 空隙率, イオン強度, 塩化物イオン拡散係数

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 TEL022-795-7427

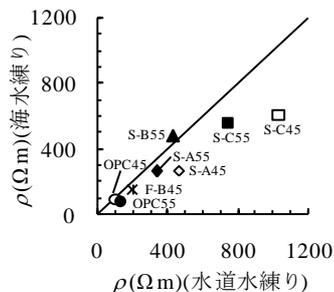


図-1 練混ぜ水が電気抵抗率ρに及ぼす影響

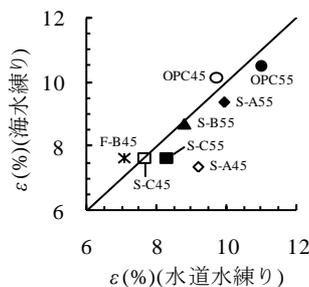


図-2 練混ぜ水が空隙率εに及ぼす影響

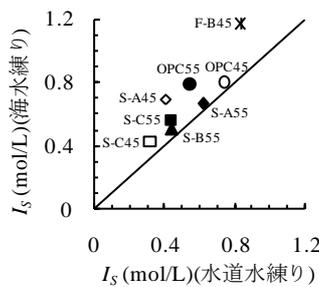


図-3 練混ぜ水が見かけのイオン強度I_sに及ぼす影響

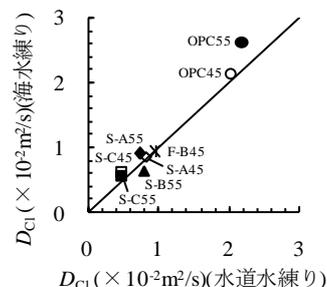


図-4 練混ぜ水が推計塩化物イオン拡散係数D_Clに及ぼす影響

$$I_s = \sum_n (Z_n^2 \cdot C_n) / 2 \tag{2}$$

ここに、Z: イオンの価数、C': 細孔溶液中のイオン濃度(mol/L)である。

4. 実験結果および考察

図-1に、練混ぜ水が電気抵抗率に及ぼす影響を示す。概ね、海水練りの方が、水道水練りの電気抵抗率より小さい傾向を示した。また、練混ぜ水によらず、同W/Cにおいて混合セメントを使用すると電気抵抗率は大きくなり、高炉セメントでは高炉スラグの混合率の増加に伴い電気抵抗率は大きくなった。また、S-A、S-Cは練混ぜ水による電気抵抗率の差が大きい傾向を示した。

図-2に、練混ぜ水が空隙率に及ぼす影響を示す。空隙率は、W/C=45%のS-Aでは、水道水練りの方が、海水練りよりも大きくなる傾向を示したが、その他の供試体については、練混ぜ水による明確な差は認められなかった。このことから、練混ぜ水に海水を用いると、空隙量は同等あるいは低下すると考えられる。一般に、空隙率が小さくなり組織が密になると電気抵抗率は大きくなる。図-1より電気抵抗率は海水練りの方が小さくなる傾向があったため、練混ぜ水が電気抵抗率に及ぼす影響の原因は、空隙率ではないと考えられる。

図-3に、練混ぜ水が見かけのイオン強度に及ぼす影響を示す。見かけのイオン強度は、概ね海水練りの方が、水道水練りよりも大きくなる傾向を示した。これは、練混ぜ水に含まれる初期内在塩分の影響によると考えられる。一般に、空隙構造が同等である場合、式(3)で示されるように、コンクリート中イオン濃度が高くなるほど電気抵抗率は低下する¹⁾。

$$\rho = \frac{1}{F \cdot e \cdot \sum_n (Z_n^2 \cdot B_n \cdot C_n)} \tag{3}$$

この電気抵抗率のイオン濃度依存性が、図-1に示す電気抵抗率の違いを生じさせた理由の一つであると考え

られる。なお、見かけのイオン強度が大きい普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメントでは、外来塩分が多量に浸透し、コンクリート中の塩化物イオン濃度が飽和状態に近く、イオン濃度が電気抵抗率に及ぼす影響は相対的に小さくなったと考えられる。一方、見かけのイオン強度が小さい高炉セメントでは、遮塩性能が高いために外来塩分は浸透段階であること、および、イオン濃度が相対的に小さく、イオン濃度が電気抵抗率に及ぼす影響も大きくなると考えられることから、練混ぜ水が電気抵抗率に及ぼす影響が大きくなったと考えられる。

図-4に、推計塩化物イオン拡散係数の練混ぜ水による比較を示す。電気抵抗率に及ぼすイオン強度の影響は相殺され、推計塩化物イオン拡散係数は、水道水練り、海水練りではほぼ同等の傾向を示した。これより、練混ぜ水に海水を用いても、遮塩性能は水道水練りとはほぼ同等であることが示唆された。

5. 結論

27年間干満帯に暴露した供試体の分析の結果、コンクリートの電気抵抗率は練混ぜ水に含まれるイオンの影響を受けるが、イオン濃度の影響を考慮した推計式に基づく塩化物イオン拡散係数から遮塩性能を評価すると、海水練りコンクリートは水道水練りとはほぼ同等の品質であることが確認された。また、塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響は練混ぜ水よりもセメント種類の方が支配的であり、混合セメントの使用は遮塩性向上に寄与することがあらためて確認された。

参考文献

- 1) 皆川浩ら：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) 山路徹ら：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメントの種類, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.577-582, 2001.