

論文 海洋干満帯に暴露したコンクリート大型試験体の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係

齊藤 佑貴^{*1}・植村 翔太^{*2}・皆川 浩^{*3}・久田 真^{*4}

要旨: 塩害に対する耐久性の評価において電気抵抗率は有用な指標の一つである。本研究では、海洋干満帯に暴露したコンクリート試験体を用い、電気抵抗率に及ぼす測定時の気温や干満などの環境や相対含水率および吸水処理の影響を検討し、さらに電気抵抗率から算出される塩化物イオン拡散係数と見かけの拡散係数の関係を検討した。その結果、相対含水率が高く、気温が高いほど電気抵抗率が小さくなること、相対含水率が低いほど吸水処理に伴う電気抵抗率の低下程度が大きいこと、電気抵抗率から算出される塩化物イオン拡散係数と見かけの拡散係数には強い相関があることが明らかとなった。

キーワード: 物質透過性, 塩化物イオン, 拡散係数, 電気抵抗率, 4プローブ法, 含水率

1. はじめに

コンクリートの塩害に対する耐久性能を照査するために塩化物イオンの拡散係数の評価は不可欠であり、コンクリート構造物における塩化物イオン拡散係数の非破壊評価指標の一つとして電気抵抗率が注目されている。現在まで、コンクリートの電気抵抗率に関する研究は数多くなされ、多数の研究^{1)~5)}が報告されている。著者らは、電気抵抗率と塩化物イオンの拡散係数の関係式を理論的に導出し、関係式に基づいた推計手法⁴⁾を提案している。さらには電気抵抗率の含水率依存性の検討⁵⁾も行っている。しかしながら、実構造物のコンクリート中における深さ方向の含水率の分布、干満の影響および測定時の気温に着目し、4プローブ法において電極間隔を変えながら電気抵抗率を測定し、電気抵抗率と塩化物イオンの拡散係数の関係を検討した例は少ない。

以上の背景から、本研究では、実構造物の評価を想定し、海洋干満帯に暴露したコンクリート大型試験体を対象として、4プローブ法において電気抵抗率を測定し、塩化物イオンの拡散係数との関係を整理した。

2. 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係

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⁴⁾。

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

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。

また、イオン強度は式(2)を用いて評価した。

$$I_s = \sum_n (Z_n^2 \cdot C_n) / 2 \quad (2)$$

なお、本研究では、式(1)で求められる D_{Cl} をCl推計拡散係数と称する。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

本研究で使用した試験体の配筋図を図-1に示す。寸法及び形状は $300 \times 1000 \times 1000$ mmの角柱コンクリート試験体である。早強セメントで作製した $W/C=39$ %, 最大粗骨材寸法 20 mmの試験体(以下、HPC)および高炉セメントB種で作製した $W/C=37$ %, 最大粗骨材寸法 25 mmの試験体(以下、BB)、計2体の測定を行った。

3.2 環境条件

試験体の暴露箇所は千葉県市原市の海洋干満帯(写真-1, 2)であり、時期を変えて2回測定を行った。第1回目の測定は気温約 14 °C, 相対湿度約 50 %であり、第2回目の測定は気温約 32 °C, 相対湿度約 70 %であった。

3.3 測定項目

(1) 電気抵抗率

電気抵抗率の測定は4プローブ法により測定した。

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 修(工) (正会員)

*2 東北大学 工学部建築・社会環境工学科

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)



写真-1 供試体の暴露状況

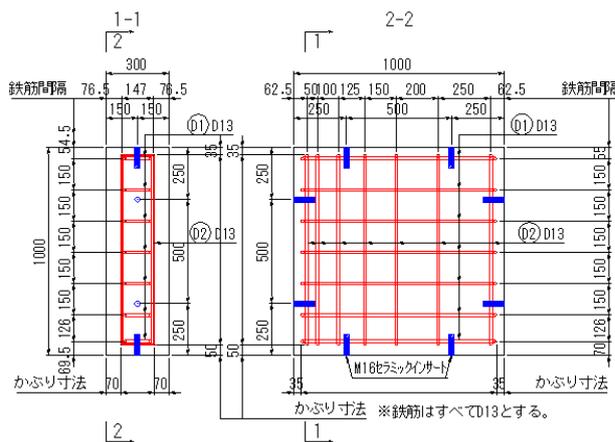


図-1 試験体配筋図



写真-2 コア採取状況

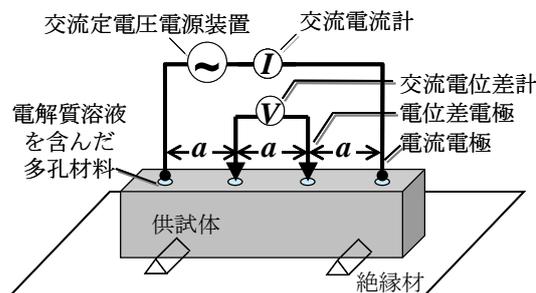


図-2 4プローブ法の測定概念

4プローブ法の測定概念図を図-2に示す。電流電極に100V、周波数73.3Hzの交流電流を印加し、その時に得られる電位差電極間の電圧と試験体に流れる電流を測定し、式(3)を用いて電気抵抗率 ρ を評価した。

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (3)$$

ここに、 a ：電極間隔(m)， V ：電位差電極間の電圧(V)， I ：印加電流(A)，である。

電気抵抗率の測定は1点につき3回計測を行い、さらに測定点を1cm程度ずらして3点計測し、それらの平均値を測定値とした。また、各電極の先端には電解質として塩化ナトリウムとカルボキシメチルセルロースを水溶させたゲル状物質を含浸させたガーゼ塊を取り付けて測定を行った。

(2) 空隙水中の各種イオン濃度

空隙水中の各種イオン濃度として、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 OH^- に着目し、 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)」、 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

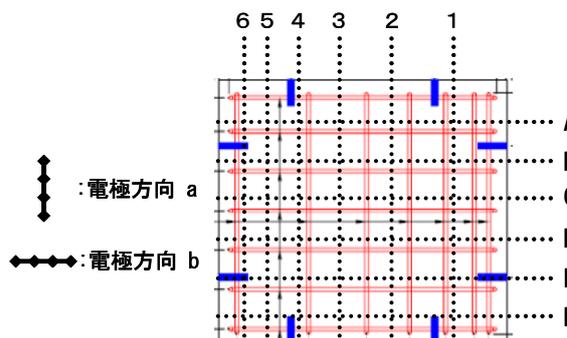


図-3 測定位置の記号及び電極の設置方向

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³⁾。

(3) 塩化物イオンの見かけの拡散係数

塩化物イオンの見かけの拡散係数(以下、 Cl^- 見かけの拡散係数)は、試験体から採取したコア試料を用いて測定した。試験体から採取したコア試料を Cl^- 浸透深さ方向に約10mm間隔で切断して分析用試料を採取した。そして、分析用試料中の全塩化物イオン濃度を「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154)」にて測定し、得られる塩化物イオン濃度分布より Cl^- 見かけの拡散係数を算出した。

(4) 空隙率及び相対含水率

空隙率及び相対含水率は試験体から採取したコア試料を用いて測定した。試験体から採取したコア試料を深さ方向に約10mm間隔で切断して分析用試料を採取し、

深さ方向ごとに算出した。なお、空隙率は式(4)、相対含水率は式(5)を用いて算出した。

$$\varepsilon = \frac{(W_2 - W_1) / \rho_w}{(W_2 - W_3) / \rho_w} \times 100 \quad (4)$$

$$w = \frac{(W_2 - W_1) - (W_2 - W_4)}{(W_2 - W_1)} \quad (5)$$

ここで、 ε : 空隙率(%), W_1 : 絶乾状態における試料の気中質量(g), W_2 : 表乾状態における試料の気中質量(g), W_3 : 表乾状態における試料の水中質量(g), ρ_w : 水の密度(g/cm^3), w : 相対含水率, W_4 : 測定時における試料の気中質量(g), である。

3.4 電気抵抗率の測定方法

図-3 に測定位置の記号及び電極の設置方向を示す。図-3 のように鉛直方向の測定位置を1~6, 水平方向の測定位置をA~F とし, 電極の設置方向については鉛直方向を電極方向 a, 水平方向を電極方向 b とした。なお, 電極設置位置が1とAの交点であり, 電極方向がaである場合, これを位置(1, A, a)と示すこととする。また, 以下に測定に際しての実験要因と測定位置の関係について示す。

(1) 電気抵抗率に及ぼす測定位置及び測定時における気温の影響

測定位置の影響を検討するために電極間隔を4 cm, 電極方向を a に固定し, 測定位置1~6 と A ~F の交点の電気抵抗率を測定した。また, 測定時期を変えて2回測定することにより, 電気抵抗率の測定時における気温の影響を検討した。

(2) 電気抵抗率に及ぼす吸水条件の影響

試験体を吸水させたときの影響を検討するために, 吸水前, 試験体表面に散水し十分に湿らせたウエスで覆って吸水させた後 30 分後及び一晩後に電気抵抗率を測定した。測定位置は(1, A, b), (1, C, b)及び(1, E, b)である。電極間隔を2, 3, 4 および 5 cm と変化させ電気抵抗率の測定を行い吸水前後の電気抵抗率を比較した。

3.5 実験手順

本実験は海洋干満帯に暴露した大型試験体を用いて測定を行った。測定は時期を変えて2回行い, 第1回目では3.4(1)の検討のみ。第2回目では3.4(1), (2)の検討および試験体よりコア試料の採取をし, 3.3(2), (3), (4)の測定を行い, 深さ方向の相対含水率分布の影響及びCI推計拡散係数とCI見かけの拡散係数の関係の検討を行った。

試験体は暴露地点から引き上げ後, すぐに封緘養生をし, 約1週間後に電気抵抗率の測定を行った。電気抵抗率の測定を行った後, 試験体から空隙率及び相対含水率測定用のコア試料を図-3のA, C, Eの行より採取した。さらに, 試験体に吸水処理を施した後, 電気抵抗率を再

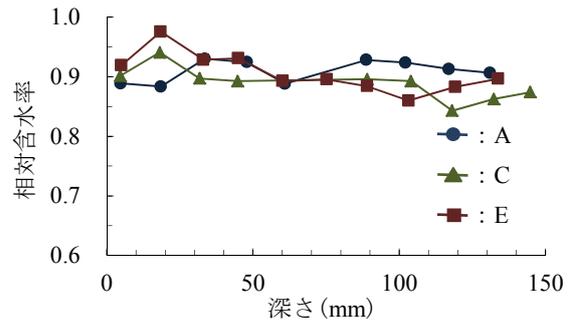


図-4 HPC 供試体の相対含水率分布

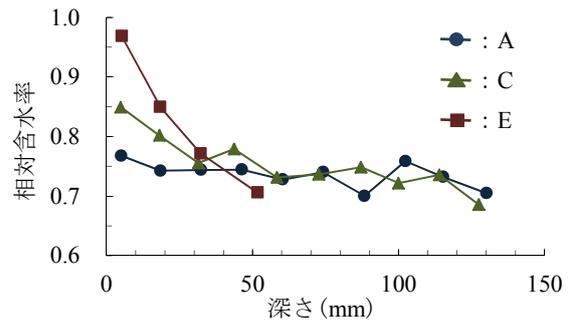


図-5 BB 供試体の相対含水率分布

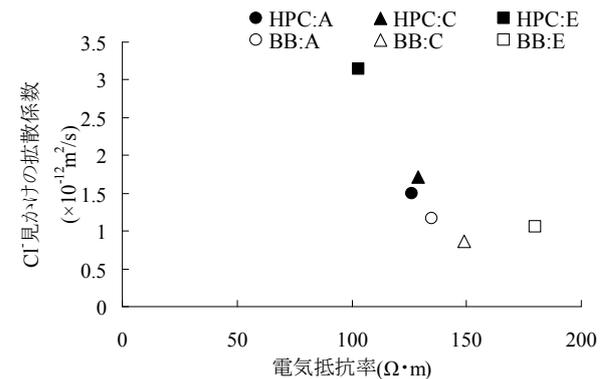


図-6 電気抵抗率とCI-見かけの拡散係数の関係

測定し, その後, CI見かけの拡散係数算出用のコア試料を図-3のA, C, Eの行より採取した。

4. 結果と考察

4.1 相対含水率の分布

図-4 および図-5 に HPC 及び BB の測定した行ごとの相対含水率の深さ方向の分布を示す。図-4 より, HPC の場合, 相対含水率は試験体の位置に関わらず 0.9 ± 0.08 であり, 深さ方向の含水率の分布はほぼ一様であると言える。一方, 図-5 より, BB の場合は表層からの深さが 25 mm までの位置において, 相対含水率が試験体の下側ほど高く試験体の上側ほど低いことがわかる。表層から 25 mm 以深の部位では相対含水率は 0.7 ± 0.08 でほぼ一定値となった。

4.2 電気抵抗率とCI-見かけの拡散係数の関係

図-6 に吸水一晩後における電極間隔 3 cm の電気抵抗率とCI見かけの拡散係数の関係を示す。図-6 より, HPC

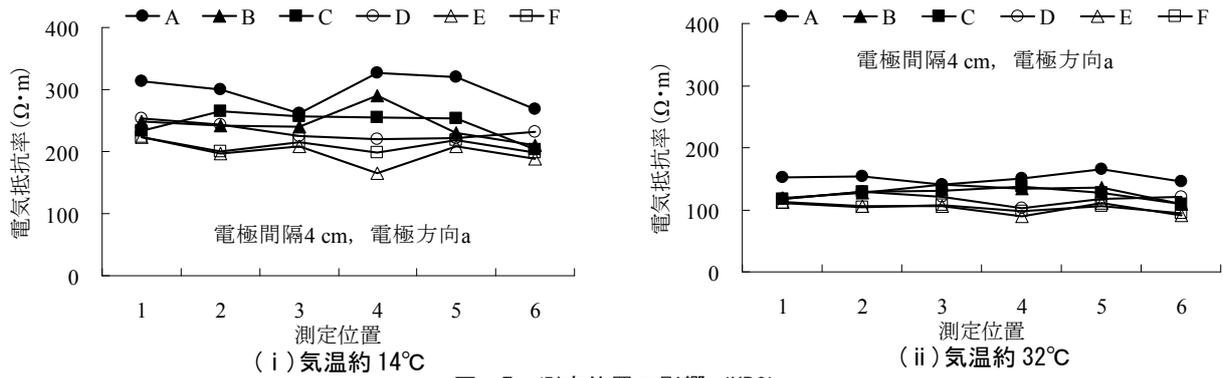


図-7 測定位置の影響 (HPC)

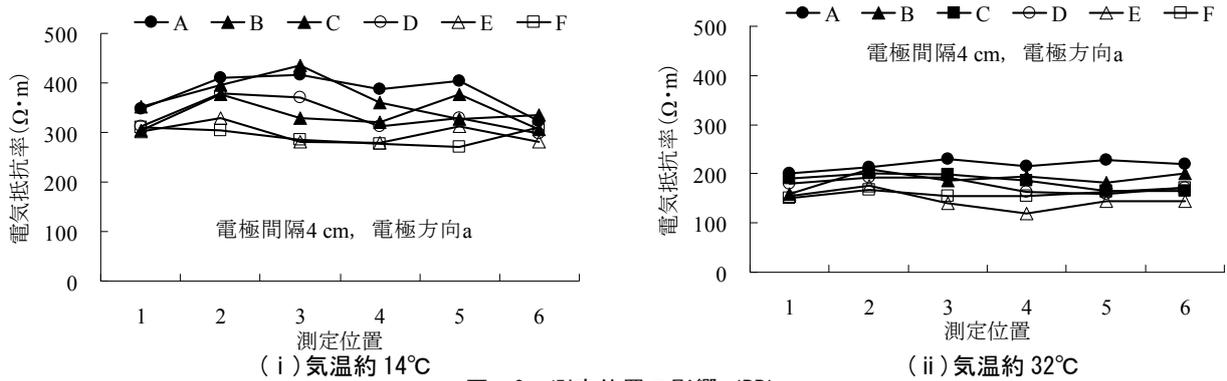


図-8 測定位置の影響 (BB)

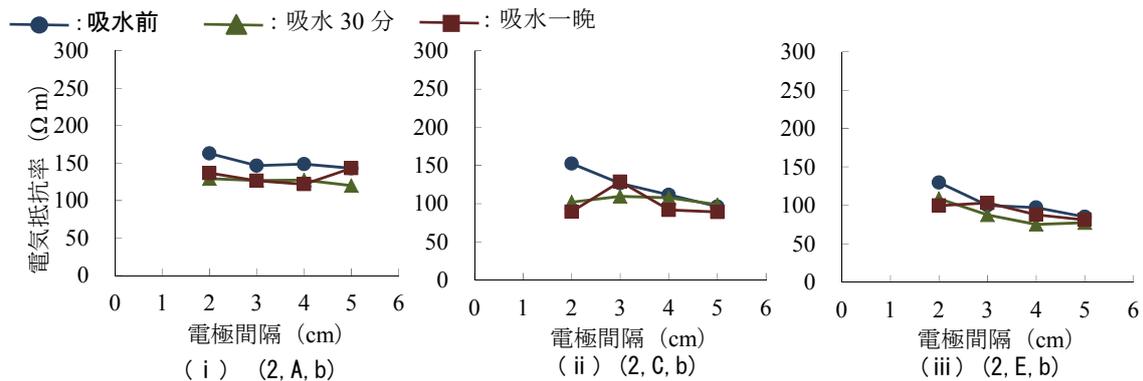


図-9 吸水条件による影響 (HPC)

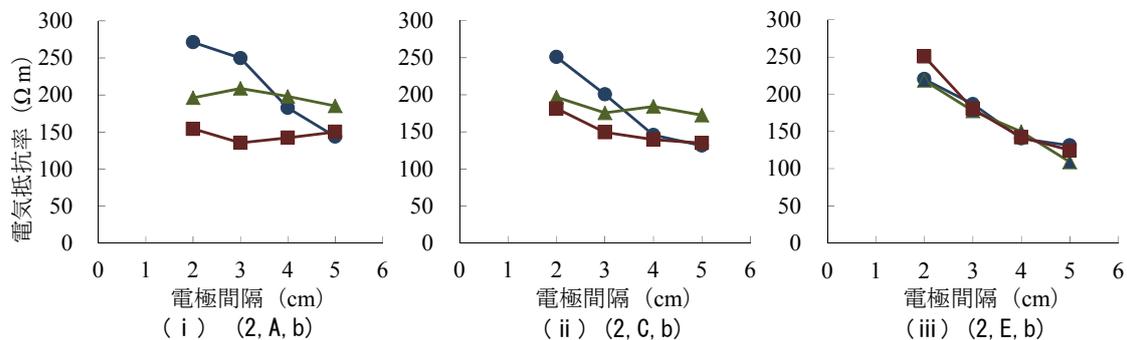


図-10 吸水条件による影響 (BB)

の場合、電気抵抗率が小さいほどCl見かけの拡散係数が大きくなることからわかる。これは、深部まで塩分が浸透したためであると考えられる。一方、BBの場合、電気抵抗率とCl見かけの拡散係数の関係に相関がないことが確認できる。

4.3 電気抵抗率に及ぼす測定位置の影響

図-7、図-8にHPC及びBBにおける測定位置および測定時の気温の影響を示す。図-7および図-8より、セメント種類、測定時の気温に関わらず、試験体上側と比較して試験体の下側ほど電気抵抗率が小さい傾向で

あることがわかる。

図-6より、HPCの場合、試験体の下側においてCl⁻見かけの拡散係数が大きくなっており、コンクリート表層部の塩化物イオン濃度が高いことがわかる。一方で、電気抵抗率を変化させるもう一つの要因である含水率は試験体の位置に関わらずほぼ一定である。つまり、HPCの場合、電気抵抗率が位置ごとに異なった主要な原因は、電気抵抗率を低下させる電解質が供試体の下側ほど多いためと考えられる。

一方でBBの場合、図-5より、試験体の上側と比較して試験体の下側において表層部の含水率が高い。また、図-6よりCl⁻見かけの拡散係数はほぼ一定値であり、塩化物イオンの濃度分布に位置の差異はさほど生じていない。以上より、電気抵抗率が試験体の上側と下側で異なったのは、電解質の多寡よりも干満による試験体の面的な含水率の分布に影響を受けたためと考えられる。

4.4 電気抵抗率に及ぼす測定時の気温の影響

図-7および図-8より、セメント種類、測定位置に関わらず測定時の気温が高い時と比較して、測定時の気温が低い時の電気抵抗率が大きいことがわかる。これは、既往の知見²⁾と一致する。実環境においてコンクリート構造物の遮塩性能を評価する際には、標準温度を設定し、標準温度の電気抵抗率に換算するような補正係数の提案が必要である。

4.5 電気抵抗率に及ぼす吸水条件の影響

図-9、図-10にHPC及びBBにおける吸水条件の影響を示す。

図-9より、HPCの場合、吸水処理を実施すると、電気抵抗率は若干低下することがわかる。しかし、その程度はBBと比較して小さい。これは、図-4に示されるように、HPCの吸水処理前の含水率が高く、かつ、一様に分布しているため、吸水処理により供試体中の含水状態が大きくは変化していないためと考えられる。

一方、BBの場合、試験体の上側では図-10(i)より、電極間隔が2cmおよび3cmと比較的小さい時、電気抵抗率は吸水前、吸水30分、吸水一晚と、吸水時間が長いほど電気抵抗率が小さくなることがわかる。これは、図-5より、試験体の上側において吸水前の相対含水率が低かったためであると考えられる。つまり、相対含水率が低く、吸水処理を施しても試験体の内部が飽水状態になるまでに時間を要したためと考えられる。すなわち、吸水30分では試験体が飽水状態にはならなかったが、吸水一晚では試験体が飽水状態に近づき、電気抵抗率が小さくなったと考えられる。

一方、試験体の下側では、図-10(iii)より、吸水時間を長くしても電気抵抗率の測定値が変わらないことがわかる。これは、図-5より試験体の下側において、

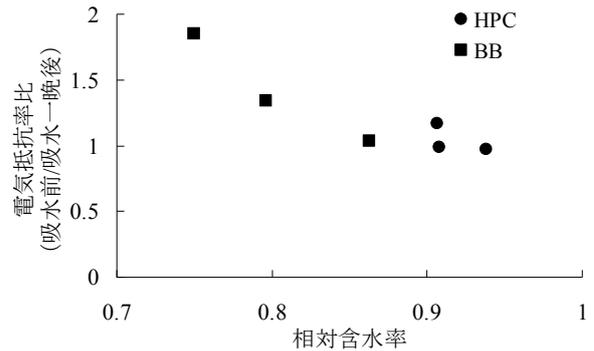


図-11 吸水前後の電気抵抗率比と相対含水率の関係

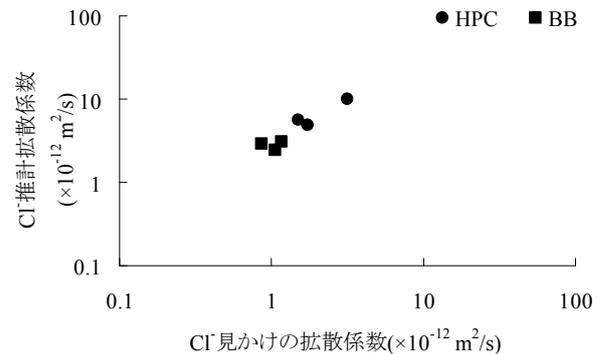


図-12 Cl⁻推計拡散係数とCl⁻見かけの拡散係数の関係

吸水前の表層部の相対含水率が高かったために、吸水処理を施しても試験体の深さ方向の含水率分布が変わらなかったためであると考えられる。つまり、BBの電気抵抗率は各測定位置における深さ方向の含水率分布の勾配の変化に影響を受けていると考えられる。

図-11に、電極間隔3cmにおける吸水前および吸水一晚後の電気抵抗率の比と表層から50mm未満の相対含水率の平均値との関係を示す。なお、本研究の供試体中の含水率分布は深さ方向に変化しており、このような含水状態が不均質なコンクリートにおいて電気抵抗率と含水率を直接比較することは困難である。そこで本研究では、既往の研究⁵⁾より電流の多くが流れると考えられる領域の含水率の平均値を代表指標として比較に用いた。

図-11より、相対含水率が小さいほど電気抵抗率比が大きく、相対含水率が大きくなるほど電気抵抗率比が小さくなることがわかる。このことから、試験体が乾燥しているほど、つまり相対含水率が低いほど水の浸透量の影響で電気抵抗率が変化すると言える。

4.6 Cl⁻推計拡散係数とCl⁻見かけの拡散係数の関係

図-12にCl⁻見かけの拡散係数と吸水一晚後の電極間隔3cmで測定した電気抵抗率より算出したCl⁻推計拡散係数の関係を示す。なお、吸水一晚の電極間隔3cmの電気抵抗率の値を採用したのは、飽水時に近い電気抵抗率

が得られること、電極間隔 2 cm では電気抵抗率の測定値が粗骨材の影響を受ける可能性がある⁵⁾こと、電極間隔が広すぎると鉄筋が電気抵抗率の測定値に影響を及ぼすこと、が考えられるためである。

図-12 より CI 推計拡散係数は CI 見かけの拡散係数と比較して 2.3~3.7 倍程度の値となった。しかしながら、両者には強い相関関係が確認でき、電気抵抗率から算出される CI 推計拡散係数により CI 見かけの拡散係数を定量的に評価できる可能性が示唆された。

5. 結論

本研究では、実構造物における電気抵抗率によるコンクリートの遮塩性能評価手法の確立に向けて海洋干満帯に暴露した大型コンクリート試験体を用いた検討を行った。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値はコンクリート表層部の相対含水率および塩化物イオン濃度の影響を受ける。表層の相対含水率が高いほど、塩化物イオン濃度が高いほど電気抵抗率が小さくなる傾向がある。
- (2) 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値は温度の影響を受け、測定時の気温が高いほど電気抵抗率が小さくなる。
- (3) 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値は吸水処理の時間が長いほど小さくなる傾向がある。また、吸水処理前後の電気抵抗率の比は吸水前の相対含水率が低いほど大きくなる。
- (4) 実環境に曝されたコンクリートにおいて、CI 推計拡散係数により CI 見かけの拡散係数を定量的に評価

できる可能性があることを示した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、三井造船(株)、ドーピー建設工業(株)、(株)三造試験センターにご協力いただきました。ここに、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 守屋進, 川俣孝治: セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法に関する検討, 土木技術資料, V49, 2007
- 2) 親本俊憲, 横関康祐, 平石剛紀, 宮里心一: モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 907-912, 2005
- 3) 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 市川聖芳, 井上浩男: 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
- 4) 皆川浩, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 久田真: 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
- 5) 皆川浩, 齊藤佑貴, 榎原彩野, 久田真: 電極の設置条件が 4 プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1087-1092, 2009