

論文 棧橋上部工の空間的位置の違いが塩化物イオン浸透性状および鉄筋の腐食速度に与える影響

網野 貴彦^{*1}・大即 信明^{*2}・斎藤 豪^{*3}・羽瀧 貴士^{*4}

要旨: 本稿では、同一材料かつ配合の複数体のコンクリート試験体を棧橋上部工の下部の空間的位置の異なる位置に2年間曝露し、フィックの拡散方程式の解に近似して得られた曝露位置ごとの表面塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数を比較した。また、塩化物イオンを4.0kg/m³内在させたRC試験体を同様に曝露し、鉄筋の腐食速度を測定した。その結果、海側、陸側寄りに曝露した試験体の表面塩化物イオン濃度、見かけの拡散係数が大きくなること、また、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が同じ場合でも、表面塩化物イオン濃度が大きかった位置では、冬から夏にかけての鉄筋の腐食速度の増加が大きいことを確認した。

キーワード: 棧橋上部工, 表面塩化物イオン濃度, 拡散係数, 腐食速度, 空間的位置

1. はじめに

港湾RC構造物の中で塩害が問題となる構造物として棧橋上部工がある。棧橋上部工は海上の苛酷な環境に建設されるため、塩害劣化の進行が速いとされている^{1), 2)}。また、立地条件や使用状況、部材ごとの相対的な位置関係、かぶりやコンクリートの品質などの施工要因の不確実性によって、部材ごとに変状の現れ方やその発生時期が大きく異なる。そのため、予防保全的な維持管理を達成するうえでは、供用開始の早期の段階における部材ごとの腐食環境の把握が重要と考えられる。

そこで、横須賀市に立地する供用中の棧橋上部工の下部空間を利用して、空間的位置の異なる位置に同一材料かつ配合の複数のコンクリート試験体を2年間曝露し、それらのデータを分析することで、棧橋上部工内の腐食環境(塩化物イオン浸透性状および鉄筋の腐食速度)として厳しい部位を早期に把握する方法の検討を試みた。具体的には、次に示す2シリーズの実験を行った。

まず、シリーズ1では、同一材料かつ配合のコンクリート試験体を所定の位置に各2体ずつ2年間曝露し、各試験体中の塩化物イオン濃度の深さ方向分布を測定した。また、その分布をフィックの拡散方程式の解に近似して得た曝露位置ごとの表面塩化物イオン濃度(以下、C₀値)、見かけの拡散係数(以下、D値)を比較した。

シリーズ2では、塩化物イオン4.0kg/m³を内在させたRC試験体を棧橋上部工の梁底面の異なる位置に各1体曝露し、主として温度、湿度変化による季節の影響、さらにはシリーズ1にて得られた曝露位置ごとのC₀値の大小に着目して、曝露位置の違いが鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を考察した。また、曝露開始から約3年後に回収

した試験体を用い、室内にてアノード・カソード分極曲線、鉄筋の腐食面積率、質量減少率を測定した。

2. 実験概要

2.1 曝露試験体

シリーズ1, 2に用いた曝露試験体を図-1に示す。両シリーズとも高炉セメントB種(JIS R 5211に適合)を使用し、表-1に示す配合とした。

シリーズ1試験体は、直径10cm、高さ10cmの円柱であり、曝露面以外の面を全てエポキシ樹脂または塩ビパイプにより被覆した。

シリーズ2試験体は10×10×40cmの角柱にかぶり4cmとなるようにD16の炭素鋼鉄筋(JIS G 3112)を埋設した。また、棧橋上部工の空間的位置の違いのみを比較するため、全ての試験体に対し、表-1の配合に4.0kg/m³の塩化物イオンを内在させ、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度が同じ条件となるようにした。

なお、両シリーズとも、コンクリート打込み後、温度20°C、湿度80%で約1ヶ月間養生し、図-1に示した曝露面を海水面側に向けて曝露した。

2.2 曝露環境

曝露地点は、横須賀市に位置する棧橋上部工の下部空間であり、図-2に示す位置である。なお、波の主方向は棧橋法線に対し海側から陸側に向かってほぼ直角に進入する条件であった。また、図-2中の記号の頭文字S, B, A, Tは、各々表-2に示す環境に対応している。

2.3 測定項目

(1) 塩化物イオン濃度

シリーズ1においては、曝露2年後に回収した試験体

*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授 工博(正会員)

*3 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループリーダー 博(工) (正会員)

を、曝露面から1cmピッチで乾式カッターにてスライスし、各スライス片中に含有した全塩化物イオン濃度をJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法（硝酸銀滴定法）」³に準じて測定した。

(2) 交流インピーダンス法による鉄筋の腐食速度

シリーズ2試験体に対しては、二重対極センサーによる交流インピーダンス法により鉄筋の分極抵抗、コンク

リート抵抗を測定した。また、分極抵抗の測定値から、式(1)により、鉄筋の腐食速度を算出した。ここに、 I_{corr} ：腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 R_p ：分極抵抗 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)を表す。

$$I_{corr} = 0.026 / R_p \quad (1)$$

(3) アノード・カソード分極曲線

シリーズ2では、約3年間曝露した後に試験体を回収

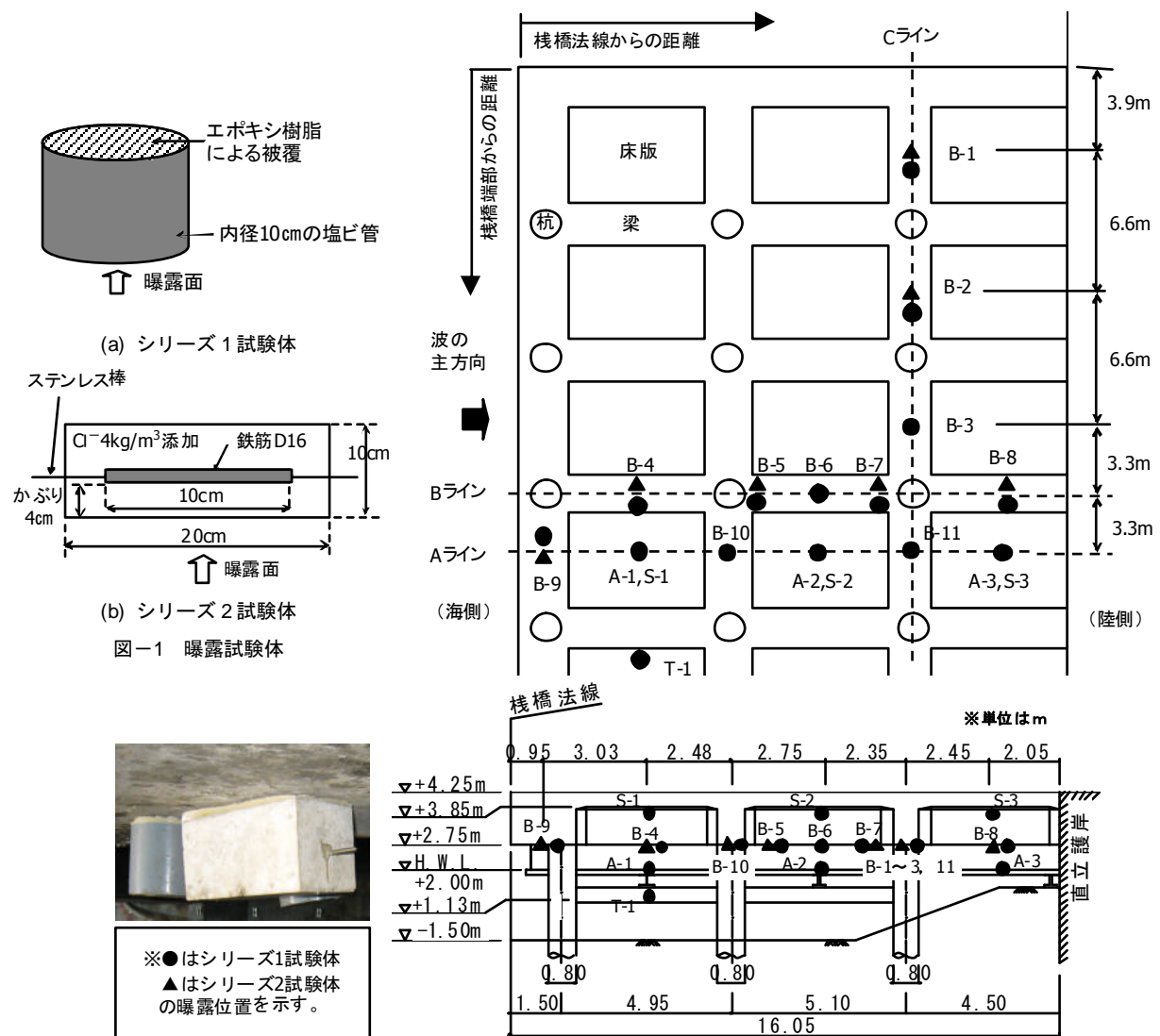
表-1 曝露試験体の配合

W/C	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				
		水	セメント	砂	砕石	混和剤
0.55	4.5	164	294	788	1056	2.94

※高炉セメントB種，AE減水剤標準形I種を使用

表-2 図-2中の記号の頭文字と曝露環境の関連

S	床版下面の海上大気中。空気に含まれた塩化物イオンが飛来する環境（海水は直接作用せず，曝露面は乾燥状態）。
B	梁下面の飛沫帯。砕波の影響により粒径の大きな海水が稀に飛沫する環境（1日に数回程度）。
A	干満帯の満潮面（H.W.L.）。年間に数回，高潮などで海水に浸漬する環境（海水が飛沫する頻度は多い）。
T	干満帯の平均水位（M.W.L.）。一日のうち半分の期間が海水に浸漬される環境。



し、室内にてポテンショ・ガルバノスタットを用いてアノード・カソード分極曲線を測定した。なお、本測定では、銅硫酸銅電極を使用し、0.01V/secの条件で鉄筋に電圧を印加し、鉄筋電位を自然電位から-2.0 (V vs CSE) まで強制的にシフトさせ、さらに 0.01V/sec の条件で鉄筋の電位を 2.0 (V vs CSE) まで貴側にシフトさせることにより、アノード・カソード分極曲線を計測した。

(4) 鉄筋の腐食面積率および腐食減量

シリーズ 2 の試験体では、分極曲線測定後に鉄筋を取り出し、腐食面積率および腐食減量を測定した。なお、腐食面積率および腐食減量は「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」⁴⁾ に準じて測定した。

3. 空間的位置の違いが塩化物イオン浸透性状に及ぼす影響 (シリーズ 1)

3.1 塩化物イオンの浸透分布

図-3 に、A ラインの海側寄りに曝露した B-9、陸側寄りに曝露した B-11、その中間に曝露した B-10 における試験体中の全塩化物イオン濃度の深さ方向分布を一例として示す。なお、本図の結果は、各位置に曝露した 2 体の測定結果を平均して示している。また図中には、式(2)に示すフィックの拡散方程式の解⁵⁾による近似線も付記した。ここに、 $C(x, t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) を表す。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (2)$$

図-3 によると、海側寄りに曝露した B-9、陸側寄りに曝露した B-11、その中間に曝露した B-10 の順で表層部 (曝露面から 0~10mm の範囲) の全塩化物イオン濃度が大きくなっていった。なお、曝露年数が 2 年と短かったこともあり、曝露面から 10mm 以上の深さでは塩化物イオンの浸透はほとんど見られなかった。この傾向は、他の曝露試験体も同様であった。

3.2 C_0 値の空間的分布

図-4 に飛沫帯に曝露した試験体の A・B ライン (法線直角方向) における C_0 値の分布を、図-5 に C ライン (法線平行方向) における分布を示す。なお C_0 値は、全塩化物イオン濃度の深さ方向分布に式(2)を近似させて得た値である。図-4 を見ると、海側寄りに曝露した B-9、陸側寄りに曝露した B-7、B-11、B-8 の C_0 値は、その中間部に曝露した B-4、B-10、B-5、B-6 に比べて大きくなっていった。これは、栈橋の構造として、満潮面 (H.W.L.) 基準とした水深が 3.5m と浅いことによる砕波や、背面護岸からの跳ね返りによる海水飛沫の程度が曝露位置

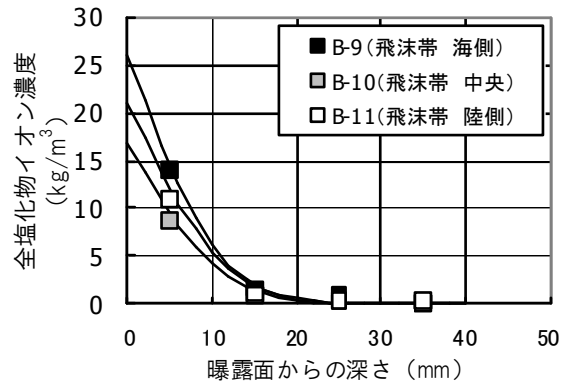


図-3 塩化物イオン濃度の深さ方向分布例 (A ライン)

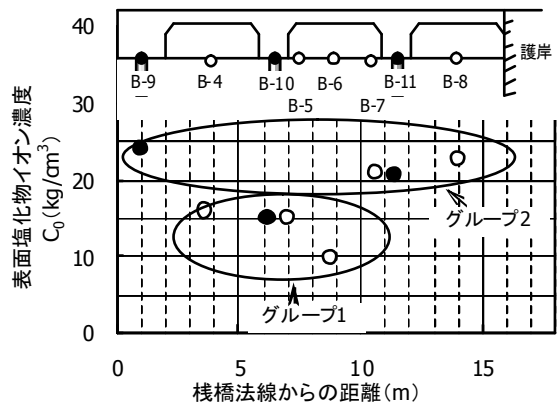


図-4 C_0 値の法線直角方向の分布 (A・B ライン)

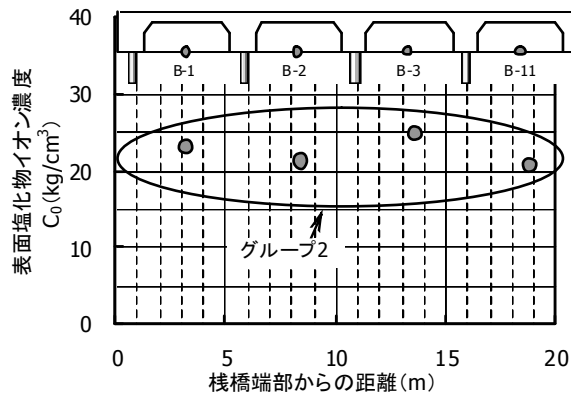


図-5 C_0 値の法線平行方向の分布 (C ライン)

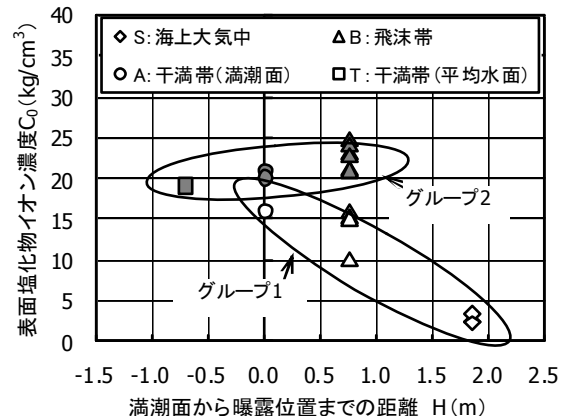


図-6 C_0 値の高さ方向の分布

ごとで異なっていたためと考えられ、飛沫程度の違いの結果が、 C_0 値の違いとして表れたものと推測される。また、図-5によれば、栈橋端部からの距離によらず、 C_0 値はほぼ同じ値を示していた。これは、図-2に示したように、本栈橋では波の主方向が栈橋法線に対しほぼ直角であったためと考えられ、波の作用方向が C_0 値の空間的分布に影響することを示唆していると思われる。

図-6に、 C_0 値と満潮面から曝露位置までの距離（以下、H）の関係を示す。なお本図では、図-4にて示したように、Hが同じ場合でも平面的な曝露位置の違いにより、 C_0 値が小さい位置（グループ1：図中白抜き）と大きい位置（グループ2：図中灰色）の2つが存在したことから、これらを区別して表記した。これによると、グループ1に属したデータは C_0 値と H の間に概ね比例関係が見られた。一方、グループ2に属したデータは干満帯（ $H=0.7\text{m}$ ）より飛沫帯（ $H=0.75\text{m}$ ）の C_0 値が大きい傾向が見られた。これは、文献6)にあるように、飛沫帯における乾湿繰返しの影響による表層部の塩化物イオンの濃縮が影響しているものと考えられる。

以上の結果を総括すると、比較的短期である2年程度の試験体曝露によっても栈橋上部工の C_0 値の空間的分布を把握でき、 C_0 値の大小から腐食環境が厳しいと思われる部位を推測できる可能性があることがわかった。

3.3 D 値の空間的分布

図-7に梁底面に曝露した試験体の A・Bライン（法線直角方向）における D 値の分布を、図-8に Cライン（法線平行方向）における分布を示す。なお D 値は、 C_0 値と同様、式(1)による近似値である。これらによると、D 値は B-1にて大きな値を示したが、その他の位置では若干のばらつきが見られるものの、曝露位置による違いはほとんど見られなかった。

図-9に、D 値と H の関係を示す。これによると、海水の浸漬時間の長い T-1（干満帯：平均水面）および B-1における D 値が大きいが、その他は、高さ方向にほとんど影響されていない結果であった。

3.4 C_0 値と D 値の関係

図-10に、 C_0 値と D 値の関係を示す。なお本図においても、図-6と同様、グループ1、グループ2に属するものを区別して示した。これによると、グループ1では C_0 値の大小によらず、D 値はほぼ同じ値を示したが、グループ2では D 値が大きめに近似されるものが幾つか見られ、D 値のばらつきが大きい様子が伺えた。

このことから、同一材料かつ配合のコンクリートを同じ期間曝露した場合であっても、フィックの拡散方程式の解に近似して得られる C_0 値が大きい場合ほど、近似して得られる D 値も大きめに推定され、ばらつきも大きくなる傾向にあることがわかった。

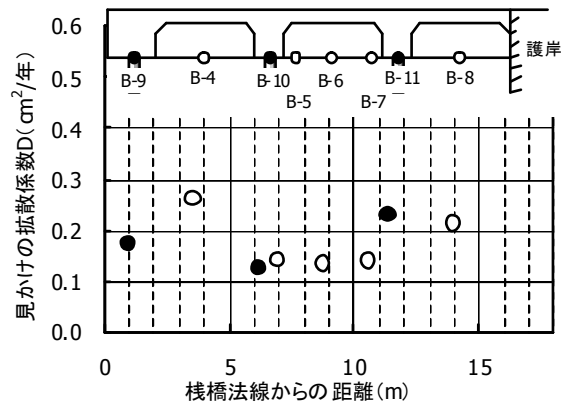


図-7 D 値の法線直角方向の分布 (A・Bライン)

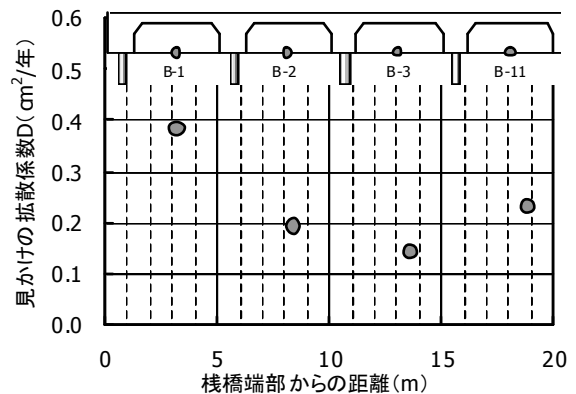


図-8 D 値の法線平行方向の分布 (Cライン)

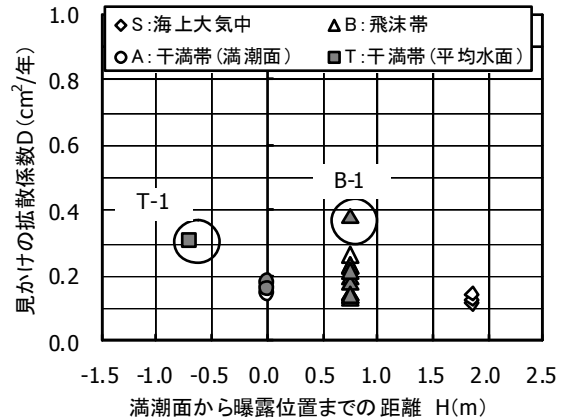


図-9 D 値の高さ方向の分布

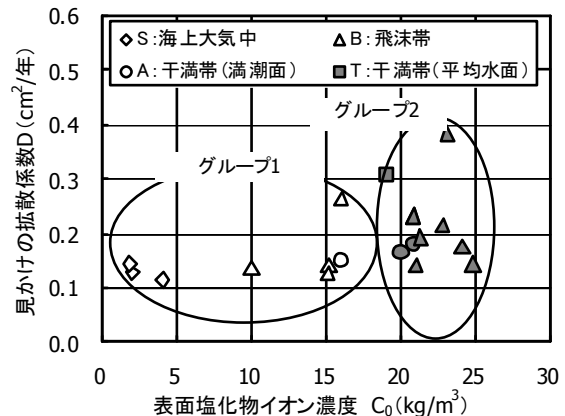


図-10 C_0 値と D 値の関係

4. 空間的位置の違いが鉄筋の腐食速度に及ぼす影響(シリーズ 2)

4.1 季節ごとの腐食速度の変化

図-11に、A・Bライン(法線直角方向)の季節ごとの鉄筋の腐食速度の測定結果を、図-12にCライン(法線平行方向)の測定結果を示す。これらの結果によると、冬に腐食速度が最も小さくなり、春・夏・秋のいずれかにおいて腐食速度が大きくなる傾向が見られた。特に、3.2で述べたように、 C_0 値の大きかった陸側寄りのB-1、B-2、B-8、海側寄りのB-9において、季節変化に伴う腐食速度の増加が顕著であった。なお、当該地点の外気温、相対湿度の平均値は約20℃、約70%、冬と夏の気温差、湿度差は約20℃、約20%であった。

以上より、鉄筋の腐食速度は冬から夏にかけての気温や湿度の増加により増加し、さらに、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が同じであっても、 C_0 値の大きい位置において、腐食速度の増加が顕著になることがわかった。

4.2 アノード・カソード分極曲線の比較(曝露3年後)

図-13に、Bラインの海側寄りに曝露したB-4、陸側寄りに曝露したB-8、それらの中間に曝露したB-5のアノード・カソード分極曲線の測定結果を示す。これを見ると、B-5の分極曲線の電流密度は他のものより小さくなっていった。なおB-5は、図-2に示したように、波の進行方向に対して杭の陰になる位置であった。また、図-14に、交流インピーダンス法により測定したコンクリート抵抗を示すが、B-5においてコンクリート抵抗が最も大きくなる様子が確認された。このことから、B-5に曝露した試験体は他の位置に曝露したものより乾燥しやすい環境であった可能性が考えられ、このことが、図-13に示したB-5の分極曲線において、電流密度が小さくなった一因と考えられた。

また、図-13におけるB-4とB-8を比較すると、B-8の電流密度のほうが大きくなった(図-11に示した交流インピーダンス法による腐食速度の測定結果と一致)。なお、図-4に示したように、B-8の C_0 値がB-4より大きかった点と照合すると、 C_0 値が大きい位置ほど、鉄筋の腐食速度も大きくなっていく可能性が考えられる。

上記の結果から、 C_0 値が大きくなった位置ほど、アノードおよびカソードの両反応とも活性化され、腐食速度も大きくなっていることがわかった。

5. C_0 値と腐食速度の関係について

4章の結果によれば、 C_0 値の大小は鉄筋の腐食速度の大小にも影響している可能性が考えられた。そこで本章では、フィックの拡散方程式の解に近似して得られた C_0 値が、鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を考察した。

図-15に、 C_0 値とコンクリート抵抗の関係を示す。

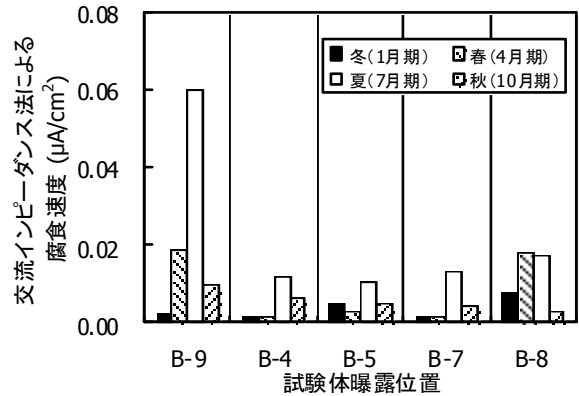


図-11 季節ごとの鉄筋の腐食速度の変化(A・Bライン)

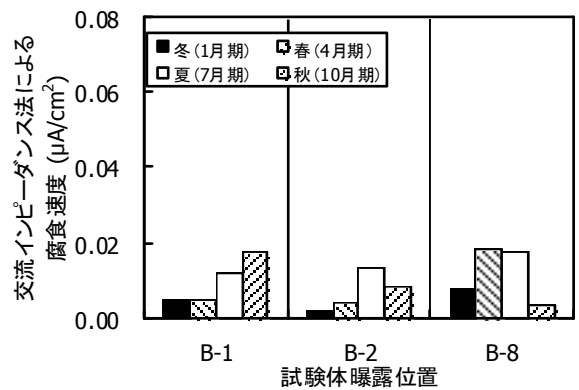


図-12 季節ごとの腐食速度の変化(Cライン)

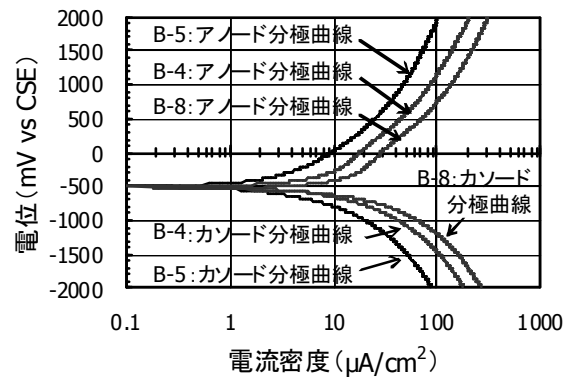


図-13 アノード・カソード分極曲線(例)(Bライン)

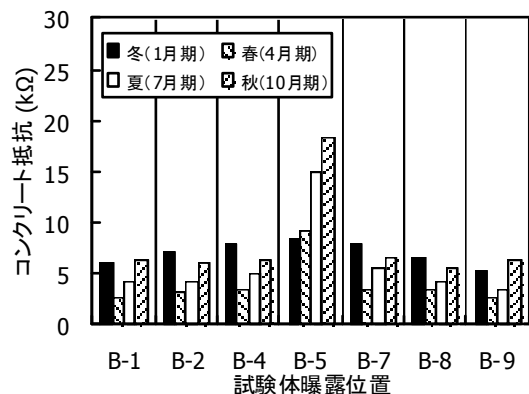


図-14 コンクリート抵抗の比較

これによると、 C_0 値が小さいほど、また冬であるほど、コンクリート抵抗は大きくなっている。一方、図-16に C_0 値と交流インピーダンス法により測定した腐食速度の関係を示すが、特に夏において、 C_0 値の増加に伴う腐食速度の増加が顕著になっている様子が伺える。具体的には、 C_0 値が 15kg/m^3 程度の場合は冬から夏にかけて腐食速度は約 5.5 倍、 C_0 値が 25kg/m^3 付近では約 7~20 倍になっている。また、図-17 に、 C_0 値と曝露 3 年後における鉄筋の腐食面積率および質量減少率の関係を示す。これを見ても、 C_0 値が大きい位置ほど、鉄筋の腐食進行も速くなっている状況が伺えた。

以上をまとめると、季節ごとの腐食速度の変化の主要因は“湿度変化に伴うコンクリート抵抗の変化と温度変化の影響”であるが、その腐食速度の変化量（または幅）は C_0 値の大きい位置ほど顕著になるものと考えられる。つまり、鉄筋腐食に関しても、試験体曝露による C_0 値の空間的分布の把握により、腐食が著しい部位とそうでない部位を識別できる可能性があるものと思われる。

6. まとめ

本稿のまとめを以下に示す。

- (1) 2 年程度の試験体曝露によって、栈橋上部工の C_0 値の空間的分布を把握でき、それらの大小から腐食環境が厳しいと思われる部位を推測できる可能性があることがわかった。
- (2) 本検討の範囲では、フィックの拡散方程式の解に近似して得られた D 値は、空間的位置によらず、ほぼ同じ値を示した。ただし、 C_0 値が大きい位置では D 値も大きめに推定されるものが見られ、ばらつきも大きい傾向が見られた。
- (3) 鉄筋の腐食速度は夏における気温や湿度増加により増加し、さらに C_0 値が大きい位置において、その増加が顕著であることがわかった。
- (4) C_0 値が大きくなる位置では、アノードおよびカソード反応とも活性化されることがわかった。
- (5) C_0 値が大きくなる位置では、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が同じであっても、鉄筋の腐食面積率、質量減少率とも大きくなることわかった。

参考文献

- 1) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技研資料 (運輸省港湾技術研究所), No.617, 1988.6
- 2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技研資料 (運輸省港湾技術研究所), No.627, 1988.9

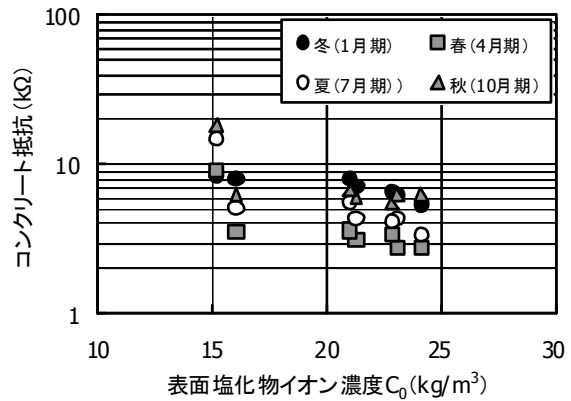


図-15 コンクリート抵抗と C_0 値の関係

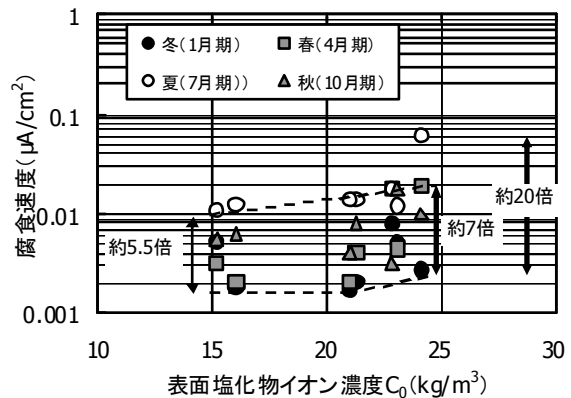


図-16 腐食速度と C_0 値の関係

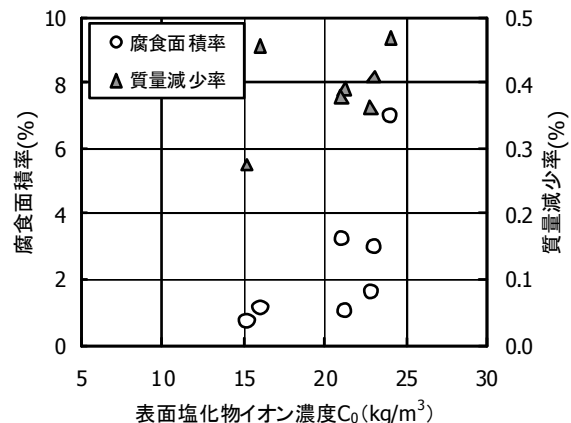


図-17 腐食面積率、質量減少率と C_0 値の関係

- 3) (社) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集 (1977~2002 年度), pp.106-114, 2004.4
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集 (1977~2002 年度), pp.91-92, 2004.4
- 5) (社) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編, p.112, 2008.3
- 6) 丸屋剛, Tangtermsirikul Sonmuk, 松岡康訓: コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.79-95, 1998.2