

論文 建設後 40 年経過したコンクリート中の鉄筋の自然電位と腐食電流密度のばらつき評価

中村 一貴*1・古谷 宏一*2・横田 弘*3・橋本 勝文*4

要旨: 本研究では、建設後 40 年経過した栈橋コンクリート上部工から切り出した床版中の鉄筋の自然電位と腐食電流密度を測定した。これにより、同一部材内における腐食性状の非一様性を得た。また、KS 検定を行うことにより、自然電位と腐食電流密度の分布形がワイブル分布に近似できることが確認された。さらに、劣化度の進展に伴い、自然電位のばらつきは小さくなり、腐食電流密度のばらつきは大きくなることが明らかとなった。なお、塩分浸透性状および自然電位は平均値を最頻値として採用できるが、腐食電流密度は誤差が大きくなると考えられる。

キーワード: 鉄筋腐食, ばらつき, 非破壊検査, 自然電位, 腐食電流密度, 腐食速度, KS 検定

1. はじめに

塩害などにより、コンクリート構造物の劣化問題が顕在化していることは広く知られているところである。コンクリート構造物の劣化性状は、様々な不確定要因により、同一構造物や部材内においても非一様である¹⁾。これに関して、劣化にかかわる不確定要因を工学的に処理することで、既設構造物の性能評価や将来予測の精度向上に繋げる必要がある。

これまでに著者らは、実際の栈橋コンクリート上部工から切り出した床版の塩分浸透性状のばらつきを確率統計的手法により、評価してきた²⁾。その際、暴露面からコアを 30 本採取し、求めた塩化物イオン量から、塩分浸透性状として、表面塩化物イオン量 (以下、 C_0) および見かけの拡散係数 (以下、 D_{ap}) の確率分布形を検討した。さらに、各コアから得られた測定データに基づき、塩分浸透性状を評価する上で、 C_0 および D_{ap} のばらつきを考慮した適切なコア採取本数および採取場所に関する提案を行った。その結果、得られた主な知見は次のとおりである。

- (1) 一つの部材から多数のサンプルを採取した場合、 C_0 は正規分布、 D_{ap} は対数正規分布に近似できる。
- (2) コアを 2 本採取する場合と比べ、4 本採取する場合は、 C_0 および $\ln D_{ap}$ の誤差が約 3 割低下する。
- (3) コア採取の場所を部材内の限られた区域に限定すると、部材全体から均等に採取する場合と比べて、 C_0 および $\ln D_{ap}$ の誤差は約 4 割小さくなる。

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の非破壊調査に用いられる携帯型鉄筋腐食診断機を用いて、上述の栈橋コンクリート上部工から切り出した床版中の鉄筋の自然電位と腐食電流密度を高低 2 周波の交流インピーダンス

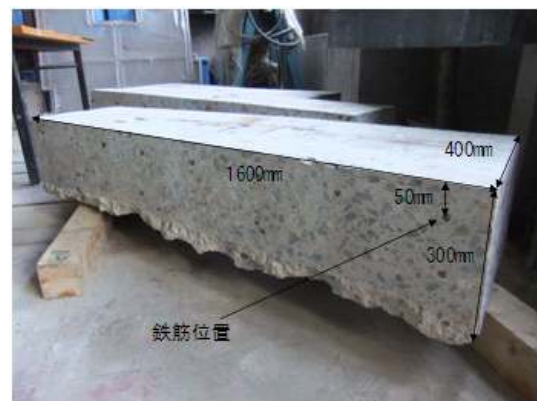


図-1 調査対象とした部材

値から分極抵抗を求めて測定した。なお、測定前日には桁に散水し、湿布で覆った。測定中も随時散水し、コンクリートを湿潤にした状態で測定を行った。また、これまでの研究で用いた確率統計的手法を適用して、鉄筋の自然電位と腐食電流密度のばらつきを評価し、 C_0 や D_{ap} のばらつきとの比較を行うことを目的とした。

2. 対象構造物の調査部材

調査対象とした部材 (幅約 400mm × 長さ約 1600mm × 厚さ約 300mm) は、鉄筋のかぶり高が 50mm、供用期間が 40 年になる栈橋コンクリート上部工から切り出した床版の一部である (図-1)。本研究では、表-1 に示す栈橋上部工の一般点検診断の項目と目視による劣化度判定基準³⁾に基づき、劣化度 c および d と判定された 2 つの部材を対象とした。劣化度 c の供試体では、鉄筋腐食および錆汁の発生が確認されたが、劣化度 d の供試体では変状が認められなかった。

*1 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

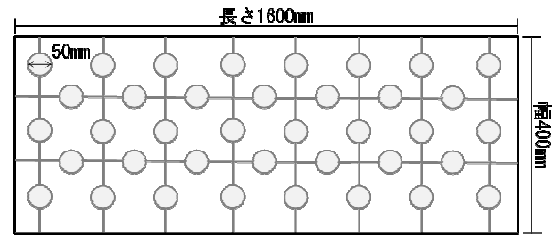
*2 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 教授 博士 (工) (正会員)

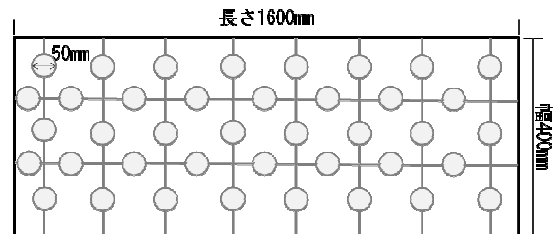
*4 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 助教 博士 (工) (正会員)

表一 1 棧橋上部工（スラブ下面部）の一般点検診断の項目と判定基準

判定基準	
a	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%以上である。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。
b	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。
c	<input type="checkbox"/> 一方向のひび割れ若しくは帯状又は線上のゲル吐出析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。
d	<input type="checkbox"/> 変状なし



a) 劣化度 c



b) 劣化度 d

図一 2 自然電位および腐食電流密度の測定箇所（平面図）

3. 実験方法

本研究では、高低 2 周波数の交流インピーダンス値から分極抵抗を求めてコンクリート中の鉄筋の自然電位 E (mV) および腐食電流密度 I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) を測定した。なお、図一 2 に示すように、劣化度 c の供試体では 38 箇所、劣化度 d の供試体では 40 箇所においてこれらを測定した。

求めた自然電位および腐食電流密度の度数分布に関して、ワイブル分布、ガンベル分布、正規分布および対数正規分布を仮定して、コルモゴロフスミルノフ検定により、最も適合度の高い分布形を決定した。

4. 実験結果

劣化度 c および d の自然電位と腐食電流密度を図一 3 および図一 4 にそれぞれ示す。ここで、ASTM 規格による自然電位の鉄筋腐食性評価を表一 2 に示す⁴⁾。また、CEB による腐食速度の判定基準を表一 3 に示す⁵⁾。

図一 3 より、劣化度 c の自然電位が -425mV vs Ag/AgCl 付近に集中して分布しているのに対し、劣化度 d の自然電位は -425mV vs Ag/AgCl より卑の電位に広く分布している状況が見られた。また、表一 2 より、劣化度 c および d とともに部材中の鉄筋は 90%以上の確率で腐食ありと判定された。これより、変状が認められず、劣化度 d と判定された試験体においても鉄筋腐食が生じている可能性が高いことがわかった。

図一 4 より、劣化度 c の腐食電流密度は $0.15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近に集中し、 $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上にも分布しているのに対し、劣化度 d の腐食電流密度は $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近に集中して分布しており、腐食電流密度が増加するにつれて、度数は

減少した。また、表一 3 より、劣化度 d と比較して、劣化度 c の腐食電流密度は低～中程度の腐食速度と判定される箇所が増加することがわかった。

5. コルモゴロフスミルノフ検定による分布形の決定

以上より、劣化度 c および d の自然電位と腐食電流密度の分布にはばらつきが認められ、劣化度により分布の特徴が異なることがわかった。そのため、コルモゴロフスミルノフ (KS) 検定⁶⁾を行い、これらの分布形を決定し、確率統計的に劣化度ごとのばらつきを評価する²⁾。なお、本研究では、検定に用いる分布をワイブル分布、ガンベル分布、正規分布、対数正規分布とした⁷⁾。

5.1 KS 検定の概要

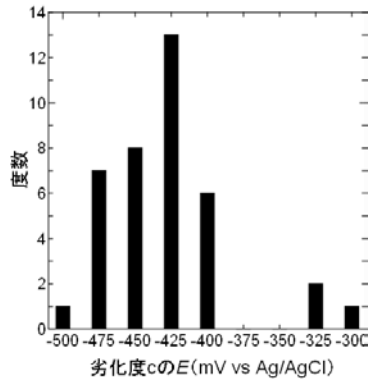
基本的な手法は累積度数の実験値と仮定した理論分布関数を比較することであり、両者の差が与えられた標本サイズから予想されるものより大きければ、理論モデルを棄却する。

まず、大きさ n の標本を、観測値の小さい方から順に並べ直す。このようにして順序づけた標本から、式(1)に従って階段状の累積度数関数を作成する。

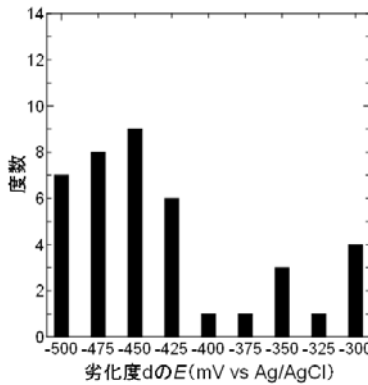
$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & (x < x_1) \\ \frac{k}{n} & (x_k \leq x < x_{k+1}) \\ 1 & (x \geq x_n) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 x_1, x_2, \dots, x_n は順序づけた標本値、 n は標本サイズである。また、 k/n はデータのランク（順序統計量に対する累積分布の値）である。

KS 検定では、 x の全領域における $S_n(x)$ と累積分布関数 $F(x)$ の差の最大値をもって、理論モデルと観測データの

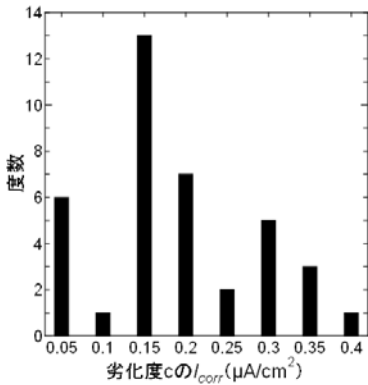


a) 劣化度 c

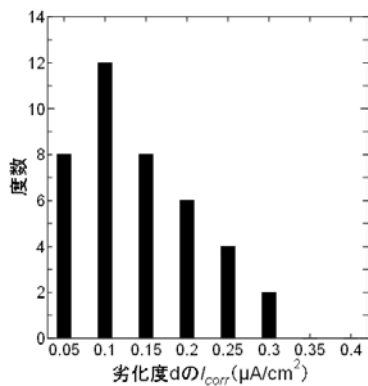


b) 劣化度 d

図-3 自然電位



a) 劣化度 c



b) 劣化度 d

図-4 腐食電流密度

表-2 自然電位による鉄筋腐食性評価 (ASTM-C876)

自然電位 E (mV vs Ag/AgCl)	鉄筋腐食の可能性
$-80 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-230 < E \leq -80$	不確定
$E \leq -230$	90%以上の確率で腐食あり

表-3 CEBの腐食速度判定基準

腐食電流密度 I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定
0.2 未満	不動態状態 (腐食なし) または極めて遅い腐食速度
0.2 以上 0.5 未満	低～中程度の腐食速度
0.5 以上 1 以下	中～高程度の腐食速度
1 より大	激しい, 高い腐食速度

隔たりを表す指標とする。この差の最大値を式(2)で表す。

$$D_n = \max|F(x) - S_n(x)| \quad (2)$$

与えられた有意水準 α に対して、KS 検定では、式(3)で与えられる差の最大値の観測値と式(3)で定義される限界値 D_n^α を比較する。

$$P(D_n \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \quad (3)$$

観測値 D_n が限界値 D_n^α より小さい場合には、提案された理論分布は定められた有意水準 α で合格であり、その他の場合には、この仮定の分布は棄却される。また、限界値 D_n^α は、式(4)で表される。

$$D_n^\alpha = \frac{1.07}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

5.2 ワイブル分布

ワイブル分布の確率密度関数 $f(x)$ は、式(5)で表される。

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (5)$$

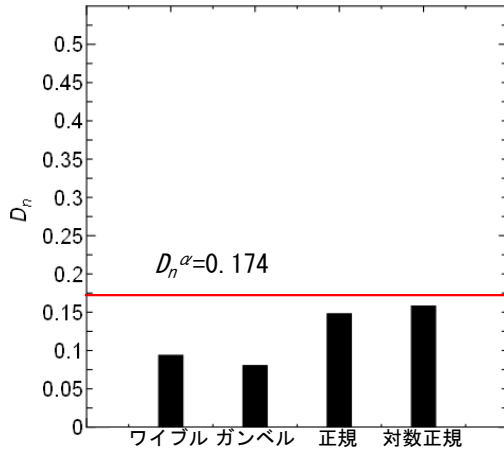
ただし、 x は半無限区間 $x \geq 0$ で定義された連続分布である。また、 α はワイブル係数、 β は尺度パラメータであり、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ である。

5.3 ガンベル分布

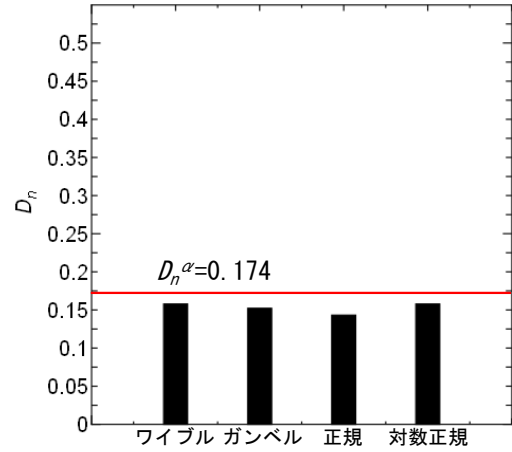
ガンベル分布の確率密度関数 $f(x)$ は、式(6)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right] \quad (6)$$

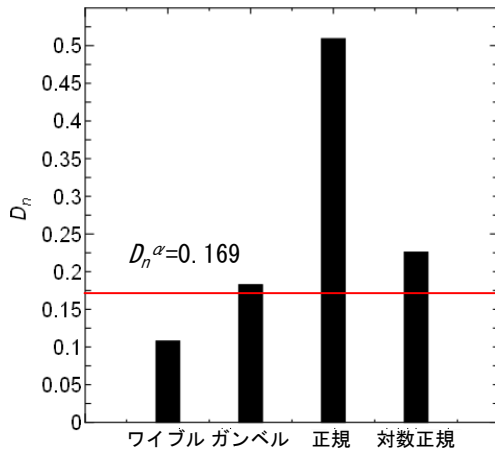
ただし、 x は無限区間で定義された連続分布である。また、 α は尺度パラメータ、 β は位置パラメータであり、 $\beta > 0$ である。



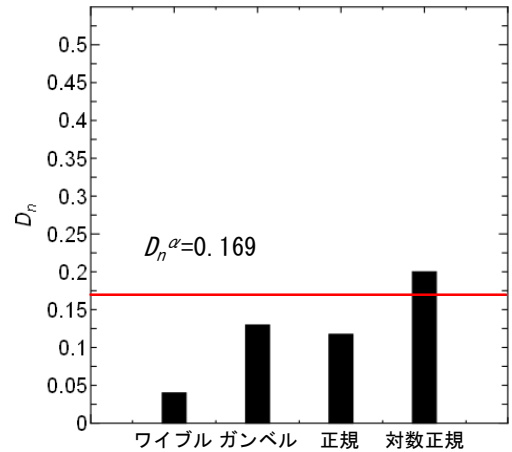
a) 劣化度 c



a) 劣化度 c



b) 劣化度 d



b) 劣化度 d

図-5 自然電位 E (mV vs Ag/AgCl) の D_n と D_n^α

図-6 腐食電流密度 i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) の D_n と D_n^α

5.4 正規分布

正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は、式(7)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

ただし、 x は無限区間で定義された連続分布である。また、 m は平均、 σ は標準偏差である。

5.5 対数正規分布

対数正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は、式(8)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

ただし、半無限区間 $x > 0$ で定義された連続分布である。また、 μ 、 σ は正規分布における平均、標準偏差である。

5.6 KS 検定の結果

本研究では、劣化度 c の供試体での自然電位と腐食電流密度の標本サイズを $n=38$ 、劣化度 d の供試体での自然

電位と腐食電流密度の標本サイズを $n=40$ 、有意水準 α は劣化度 c、d とともに 20% とした。その結果、劣化度 c および d の D_n^α はそれぞれ 0.174 および 0.169 となった。

劣化度 c および d の自然電位の度数分布に関して各分布形を仮定した場合の D_n を図-5、劣化度 c および d の腐食電流密度の度数分布に関して各分布形を仮定した場合の D_n を図-6 に示す。

図-5 a) においては、全ての分布の D_n が $D_n^\alpha (=0.174)$ より小さく、棄却されない。図-5 b) においては、ガンベル分布、正規分布、対数正規分布の D_n は $D_n^\alpha (=0.169)$ より大きく、棄却される。ワイブル分布の D_n は $D_n^\alpha (=0.169)$ より小さく、棄却されない。図-6 a) においては、全ての分布の D_n が $D_n^\alpha (=0.174)$ より小さく、棄却されない。図-6 b) においては、対数正規分布は $D_n^\alpha (=0.169)$ より大きく、棄却される。ワイブル分布、ガンベル分布、正規分布の D_n は $D_n^\alpha (=0.169)$ より小さく、棄却されない。

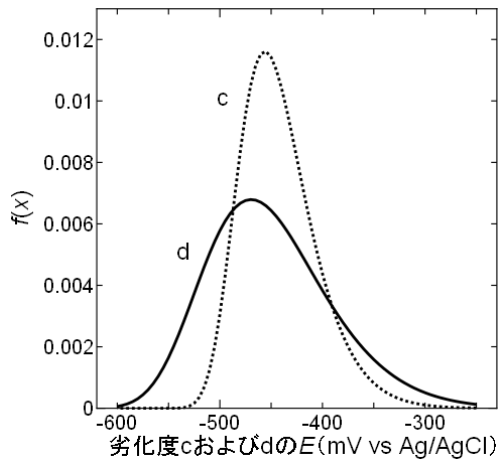


図-7 自然電位の $f(x)$

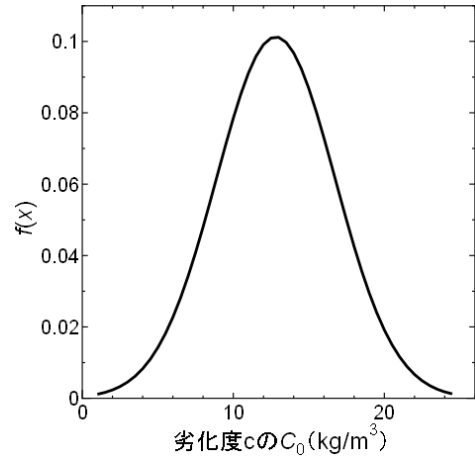


図-9 劣化度 c の表面塩化物イオン量の $f(x)$

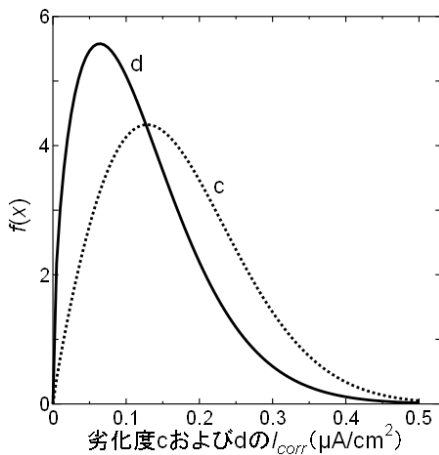


図-8 腐食電流密度の $f(x)$

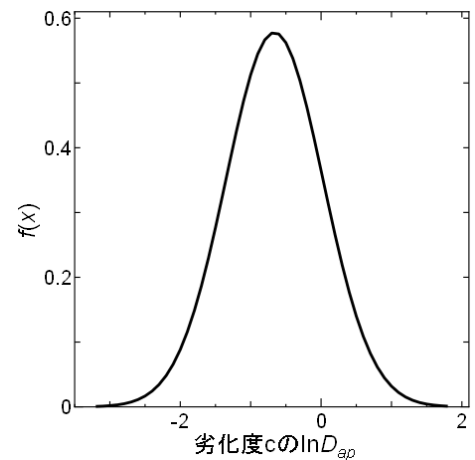


図-10 劣化度 c の見かけの拡散係数の $f(x)$

以上の結果より、ワイブル分布を仮定した場合、全ての標本において棄却されないことがわかった。また、全ての標本において、ワイブル分布の D_n が最小となった。したがって、本研究では、劣化度 c および d のばらつきを有する自然電位と腐食電流密度の分布は、ワイブル分布に近似できるという結果が得られた。

5.7 ワイブル分布による分布形

自然電位と腐食電流密度の分布はワイブル分布に近似できることから、式(5)により求められた劣化度 c および d の自然電位と腐食電流密度の確率密度関数 $f(x)$ を図-7 および図-8 にそれぞれ示す。

なお、劣化度 c の場合、自然電位のワイブル係数 α は 14.4、尺度パラメータ β は 458 となり、劣化度 d の場合、自然電位の α は 8.73、 β は 476 である。また、劣化度 c の場合、腐食電流密度のワイブル係数 α は 1.89、尺度パラメータ β は 0.19 となり、劣化度 d の場合腐食電流密度の α は 1.50、 β は 0.13 である。

図-7 より、ワイブル分布を仮定することで得られた自然電位の分布形は、実測により得られた度数分布 (図-3 参照) を再現している。すなわち、劣化度 c の分布

では、自然電位の値が $-425 \sim -450 \text{ mV vs Ag/AgCl}$ 付近に集中しており、劣化度 d の分布と比較してばらつきは小さい。図-8 より、自然電位と同様にワイブル分布を仮定することで得られた腐食電流密度の分布形は、実測により得られた度数分布 (図-4 参照) を再現している。すなわち、劣化度 d では $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近に集中し、劣化度 c では $0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近に集中している。また、劣化度 c では $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上にも分布しており、ばらつきは大きい。さらに、以上の結果、劣化の進展 (劣化度 d から劣化度 c へ) に伴い、自然電位のばらつきは小さくなり、腐食電流密度のばらつきは大きくなる。

5.8 劣化度 c の供試体における塩分浸透性状と腐食性状のばらつきの比較

既報の知見に基づく C_0 および D_{ap} のばらつき²⁾と上記で得られた自然電位および腐食電流密度のばらつきを劣化度 c の供試体について比較して得られた知見を以下に示す。なお、 C_0 は正規分布、 D_{ap} は対数正規分布に近似できることを確認している (図-9 および図-10 参照)。すなわち、適切なコア採取本数に基づき塩分浸透性状を評価する場合、 C_0 および D_{ap} はコア採取による平均値を

最頻値として採用できる。一方で、これまで述べたように、自然電位および腐食電流密度はワイブル分布に近似できることを確認している。図-7 より、劣化の進展に伴い、自然電位は-425~-450mV vs Ag/AgCl 付近に集中することから、平均値を最頻値として採用できることが推察される。しかしながら、図-8 より、腐食電流密度は $0.15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近に集中しているものの、 $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上にも分布しており、ばらつきは大きく、平均値を最頻値として採用できない場合があることに留意するべきである。

今後、塩分浸透性状と同様に、腐食性状の測定方法(測定箇所数)により代表値を決定する際の誤差を定量化する必要がある。また、コンクリート部材の配合条件や暴露されていた環境条件などにより、部材の塩分浸透性状および腐食性状の分布特性が異なる可能性がある。そのため、これを今後の課題として検討する予定である。

6. まとめ

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 劣化度 c および d のコンクリート中鉄筋の腐食性状のばらつきを定量的に評価することができた。また、自然電位と腐食電流密度の度数分布はワイブル分布に近似できる。
- (2) 劣化の進展に伴い、自然電位のばらつきは小さくなり、腐食電流密度のばらつきは大きくなる。
- (3) 劣化度 c の場合、塩分浸透性状および自然電位は平均値を最頻値として採用できるが、腐食電流密度は平均値を最頻値として採用できない場合がある。

謝辞

本研究の対象とした栈橋上部工床版は、港湾空港技術研究所の加藤絵万主任研究官より提供していただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘: 建設後 30 年以上経過した栈橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能, 港湾空港技術研究所資料, No.1140, 2006.
- 2) 中村一貴, 横田弘, 橋本勝文, 古谷宏一: コンクリートコア採取による塩分浸透性状評価とその信頼性向上に関する研究, 第 66 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, V ol.66, V-144, 2011.
- 3) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘: 栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第 48 巻, 第 2 号, p.24, 2009.
- 4) ASTM C 876 : Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1999.
- 5) コンクリート診断技術編集委員会: コンクリート診断技術 '10 基礎編, 社団法人日本コンクリート工学協会, pp.160-169, 2010.
- 6) 伊藤學, 亀田弘行: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善株式会社, pp.274-275, 1977.
- 7) 社団法人腐食防食協会: 装置材料の寿命予測入門—極値統計の腐食への適用—, 丸善株式会社, pp.63-122, 1984.