

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1294 December 2014

埋設型センサによる栈橋上部工R C部材の
鉄筋腐食モニタリングに関する研究

岡崎慎一郎
加藤 絵万
川端雄一郎
岩波 光保

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 研究の目的	5
3. 腐食判定に用いる指標と腐食判定基準	5
4. 実験概要	5
4.1 試験体の概要	6
4.2 試験体の曝露・測定項目・データ取得時間の間隔	6
5. 小型試験体の自然電位モニタリング	6
5.1 自然電位のモニタリング結果	6
5.2 腐食判定のための自然電位取得時刻の検討	9
6. 大型試験体を対象とした自然電位モニタリング	10
6.1 自然電位のモニタリングの結果	10
6.2 部材中のすべての鉄筋の腐食推定	12
6.3 等電位線図による鉄筋の腐食推定	15
6.4 腐食推定の信頼性に関する検討	15
7. 分極抵抗による腐食判定	18
7.1 小型試験体のモニタリング結果と腐食判定	18
7.2 自然電位と分極抵抗の組み合わせによる腐食判定の検討	20
7.3 大型試験体のモニタリング結果と腐食判定	22
8. まとめ	22
9. あとがき	23
参考文献	24
付録	25

Steel Corrosion Monitoring for RC Deck of Open Type Wharf by embedded sensor

Shinichiro OKAZAKI*

Ema KATO**

Yuichiro KAWABATA*

Mitsuyasu IWANAMI***

Synopsis

Port facilities are generally located in severe environments. Therefore, their structural performance is often easily degraded owing to material deterioration and corrosion. To keep their performance above the required level, effective and efficient maintenance should be carried out. In this study, focusing on upgrading and optimizing maintenance of port concrete facilities, we tried developing the deterioration judgment method used by electrochemical properties of reinforced concrete (RC) members. The RC specimens, in which corrosion sensors were installed, were exposed to sea water splashing environment. The corrosion sensor can detect the initiation of corrosion and corrosion rate by monitoring half-cell potential and polarization resistance.

Analyzing the 2-year monitoring data, the following concluding remarks can be obtained; the lowest value of Half-cell potential during a measurement term with judgment criteria of ASTM standard can detect the corrosion initiation. Mean value of half-cell potential population can be estimated by the measured half-cell potential values. To evaluate the corrosion initiation accurately, it was necessary to measure both of half-cell potential and polarization resistance.

Key Words: Reinforced concrete, Electrochemical property, Half-cell potential, Polarization resistance, Steel bar corrosion

* Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Field
** Group Leader, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Field
*** Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Field
**** Professor, Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-841-0255 e-mail: okazaki-s@pari.go.jp

埋設型センサによる栈橋上部工 RC 部材の 鉄筋腐食モニタリングに関する研究

岡崎 慎一郎*・加藤 絵万**・川端 雄一郎***・岩波 光保****

要 旨

港湾施設は一般に厳しい塩害環境下にあつて、劣化や変状が進行しやすいことから、効果的かつ効率的な維持管理が求められている。維持管理にあたっては、部材の保有性能の定量的評価と将来予測が必要であり、そのためには、構造物や部材の劣化程度に関する情報の取得が不可欠である。栈橋上部工などの鉄筋コンクリート部材における鉄筋腐食に関しては、コンクリート表層に変状が現れてから初めて、腐食の発生を目視により把握できる。そのため、鉄筋が腐食して劣化が顕在化する以前の、鉄筋腐食が発生した時点を、非破壊により把握する手法の確立が必要とされている。本研究では、埋設センサを活用した自然電位および分極抵抗のモニタリングにより、部材中の鉄筋腐食の判定手法について検討を行った。

小型試験体および、大型試験体中の鉄筋に埋設センサを設置し、1日2度の海水噴霧環境下における自然電位の長期的な推移を追跡した。小型試験体での検討の結果、本研究の曝露環境下においては、海水噴霧終了後に自然電位は最も卑になることを確認した。また、この時刻における自然電位により、ASTM 基準に準じた腐食の判定が妥当であることを確認した。大型試験体による検討においては、局所的に配置したセンサによる自然電位の測定値群が、センサ設置鉄筋のすべての箇所自然電位を正規母集団から取り出されたとみなせることを確認した。この結果、測定値群から、すべての鉄筋上の自然電位の母集団の平均値を推定することができ、鉄筋上の半数の箇所が腐食に至る時刻を概ね推定できることを確認するとともに、センサ数が推定の信頼性に与える影響について検討を行った。また、自然電位と分極抵抗を組み合わせることで、自然電位または分極抵抗のみの場合よりも腐食判定の精度が向上することを確認した。

キーワード：鉄筋コンクリート、電気化学的特性値、鉄筋腐食、自然電位、分極抵抗

* 構造研究領域構造研究チーム 研究官

** 構造研究領域構造研究チーム チームリーダー

*** 構造研究領域構造研究チーム 主任研究官

**** 東京工業大学大学院理工学研究科 土木工学専攻 教授

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:okazaki-s@pari.go.jp

1. まえがき

港湾のコンクリート構造物は一般に厳しい塩害環境下において、劣化や変状が発生し進行しやすい。特に、栈橋上部工は、鉄筋コンクリート部材(以下 RC 部材)中の鉄筋の腐食により、供用期間中に要求性能を満たさなくなる状態に至った事例がこれまで数多く報告されており、計画的かつ適切な維持管理が必要とされる部材である。

適切な維持管理のためには、点検および診断によって、劣化や変状を的確に把握しなくてはならない。現状、栈橋上部工の一般点検診断は目視により行われる。栈橋上部工の RC 部材では、図-1.1 に示すような塩害による劣化過程を経る。目視では、内部の鉄筋の腐食により、錆汁や腐食ひび割れがコンクリート表面に現れてから、はじめて、鉄筋の腐食が判定される。目視により腐食判定された時点においては、鉄筋腐食は進行しており、部材の性能は加速度的に劣化するため、可及的速やかな対応が求められる。計画的かつ適切な維持管理の実現のためには、劣化が顕在化する以前の、鉄筋腐食が発生した時点、非破壊により推定できる技術の確立が必要である。

非破壊によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する推定には、RC 部材の自然電位や分極抵抗などの電気化学的特性値が一般に用いられる。非破壊検査や埋設センサによってこれらの値を取得し、適切な判定基準を用いて、鉄筋腐食の有無を推定できる手法がよくとられる。特に埋設センサによる場合、常時モニタリングが可能であるため、鉄筋腐食の発生時期の検知が可能である。

塩分の浸透性状が局所的に異なる RC 部材においては、部材中の鉄筋腐食は一律ではなく、さらに施工面および費用面の制約から、密なセンサ設置が現実的ではないため、個数の限られたセンサで、腐食を検知したいすべて鉄筋を対象とした腐食評価手法の確立が必要である。現在のところ、この手法に関する検討例はない。

電気化学的特性値の局所的なモニタリングデータを用いて、すべての鉄筋上の電気化学的特性値を推定するには、統計的手法を用いるのが有効と思われる。統計的手法に基づいた検討の一例を図-1.2 に示す。部材中のすべての鉄筋上の電気化学的特性値を母集団とし、局所データを母集団に対する空間標本としたとき、局所データが母集団より取り出されたことを検証することができれば、局所データから母集団の分布の推定が可能となる。部材ごとに設定される維持管理計画は異なるため、予定供用期間中に鉄筋腐食を許容しない場合や、鉄筋腐食をある程度許容するが適時適切な対策を要する場合など、ケースは様々ではあるが、電気化学的特性値の母集団の分布

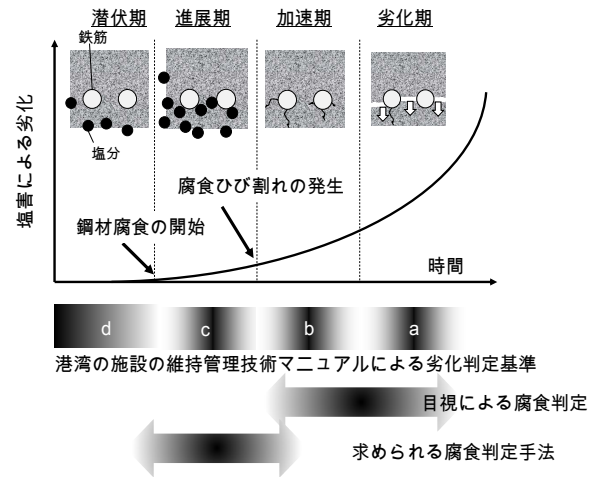


図-1.1 栈橋上部工 RC 部材の劣化状態と劣化度

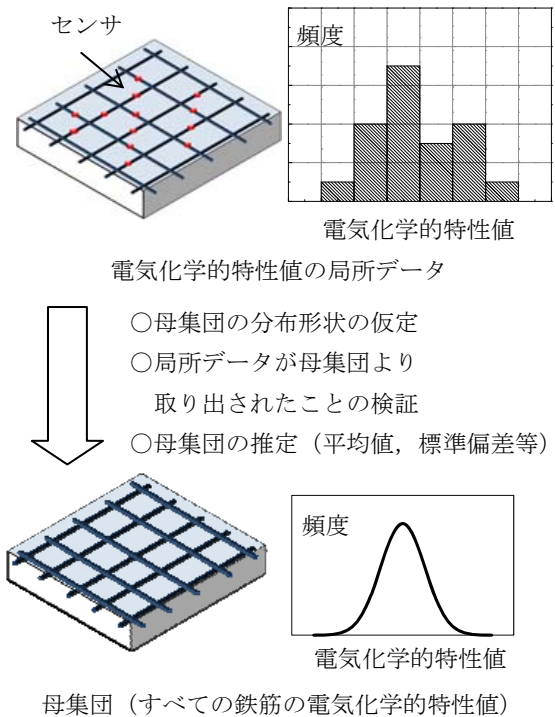


図-1.2 局所データから部材全体への評価手法

が推定できると、適切な腐食判定基準を用いて部材中のすべての鉄筋腐食発生や、鉄筋に占める腐食箇所割合を推定できるため、維持管理レベルに応じた維持補修等の対策の判断材料となりうる。

電気化学的特性値の局所的なデータから、母集団を精度よく推定するためには、部材に設置するセンサの個数と腐食判定に関する信頼性の定量化、腐食判定に適切なデータの測定時間間隔、これらのデータによる腐食判定法の確立が必要であろう。

2. 研究の目的

本研究では、港湾施設の栈橋上部工などの RC 部材を対象に、埋設センサを用いた場合の埋設箇所近傍の鉄筋腐食判定手法の確立と、局所的に設置されたセンサによる、かぶり表層に最も近い部材中のすべての鉄筋を対象とした腐食判定手法の確立、さらに部材中のセンサ個数が腐食判定の信頼性に与える影響を評価するものである。

小型試験体および、大型試験体中の 2 種類の試験体の鉄筋に、それぞれ埋設センサを設置した。これらの試験体を海水噴霧環境下に曝露し、電気化学的特性値の長期的な推移を追跡した。はじめに、小型試験体を対象に、鉄筋腐食性状がほぼ一様とみなせる場合での、腐食判定基準の妥当性検証を行った。さらに、鉄筋腐食性状が部材内でばらつくことが予想される大型試験体において、局所的に設置したセンサによる、すべての鉄筋上における腐食評価の妥当性の検討と信頼性の検証を行った。

3. 腐食判定に用いる指標と腐食判定基準

鉄筋腐食現象は、電気化学的プロセスを経る。RC部材の自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗等の電気化学的特性値を追跡することで、部材中の鉄筋腐食の検知や鉄筋腐食速度の推定が可能であると考えられている。

自然電位とは、腐食により変化する鋼材表面の電位を指している。自然電位は、鋼材が腐食している箇所つまり、アノード部の電位は（一，卑）側に変化することが多いという特徴がある。腐食状況に応じて変動する鋼材の自然電位は、環境によらず電位が一定である照合電極と、計測値との電位差から推定するのが一般的である。

自然電位は、部材中の水分に影響を受ける。そのため、計測時には、部材を水で濡らすなど、測定のために水分状態を一定にさせる処理が必要である。自然電位のみで鉄筋の腐食速度を推定することはできない一方で、自然電位は測定原理が非常に単純であり、分極抵抗の測定のように特殊な機器を必要とせず、テスターと照合電極があれば容易に測定できるという特徴がある。

分極抵抗は、外部電極によりコンクリート中の鉄筋に微弱な電位差を負荷したときに生じる電流量変化量から、腐食速度（腐食電流密度）と反比例の関係にある分極抵抗を求め、以下の式により鉄筋の腐食速度を推定する手法である。

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

表-3.1 自然電位による腐食判定基準

鉄筋腐食の可能性	自然電位 E (mV vs 海水 Ag/AgCl)
90%以上の確率で腐食なし	$-135 \leq E$
不確定	$-285 < E \leq -135$
90%以上の確率で腐食あり	$E < -285$

表-3.2 分極抵抗による腐食速度判定基準

腐食の程度	分極抵抗 R_p ($k\Omega \text{ cm}^2$)
腐食無し	$130 < R_p$
低 ~ 中程度	$52 < R_p \leq 130$
中 ~ 高程度	$26 < R_p \leq 52$
激しい腐食	$R_p \leq 26$

ここに、 I_{corr} ：腐食電流密度 (A/cm^2)、 K ：比例定数でありコンクリート中の鉄筋の場合 $0.026V$ 、 R_p ：分極抵抗 ($\Omega \text{ cm}^2$)である。

分極抵抗法の測定は、交流インピーダンス法が主流である。高低2周波の交流電圧を印加し、周波数により電流経路が異なるという回路の電気的特性を利用して腐食反応抵抗を求める。高周波の電流を印加した場合はコンクリート抵抗が測定され、低周波の電流を印加した場合はコンクリート抵抗と鉄筋の分極抵抗を合わせた抵抗が測定されるため、両者の差から鉄筋の分極抵抗を推定できる。本手法では腐食速度が推定できる一方で、上述のとおり種々の周波数をもつ交流電圧を印加できる装置が必要である。

自然電位による腐食判定基準については、表-3.1に示す判定基準がASTM (1999)により、分極抵抗による腐食判定基準は、表-3.2に示す判定基準がCEB (1998)により示されている。

4. 実験概要

本研究では、埋設センサによる鉄筋腐食検知手法および、局所的に配置されたセンサにより、かぶり表層に最も近いすべての鉄筋の腐食性状を評価・判定する手法の確立を目標とした。はじめに小型試験体を対象に埋設センサによる表-3.1および表-3.2の判定基準の適用性と、データ取得時間間隔の検討を行った。この検討結果を踏まえて、大型試験体を対象に、かぶり表層から最も近いすべての鉄筋に対する腐食推定手法の検討を行った。

4.1 試験体の概要

小型試験体として直方体のRC試験体，大型試験体として，版状のRC試験体を作製した．試験体の概要を表-4.1および図-4.1，図-4.2に示す．小型試験体では，鉄筋のかぶりを10mmおよび70mmとし，電気化学的モニタリングのため，写真-4.1に示すセンサ(下澤，田村，永山(1993, 1994, 1998))を，かぶり10mmの面の鉄筋には3個，かぶり70mmの面の鉄筋には2個設置した．なお，センサと鉄筋の距離は1mmである．大型試験体では，鉄筋のかぶりを20mmとし，試験体内の鉄筋直交部は，溶接よりすべての電氣的に導通させた．埋設センサは図-4.2のように24個設置するとともに，鉄筋端部4箇所リード線を接続した．

表-4.1 試験体の概要

試験体名	小型試験体	大型版試験体	
寸法(mm)	200×300×200	2000×2400×150	
配合条件	水セメント比	0.55	
	セメント種類	普通ポルトランドセメント	
	スランブ(cm)	8.0±2.5	12.0±2.5
	空気量(%)	4.0±1.0	4.0±1.5
	粗骨材最大寸法(mm)	20	20
かぶり(mm)	10, 70	20	
練混ぜ時の塩化物イオン濃度(kg/m ³)	0.0	0.0, 5.0	
曝露環境	1日2度4時間の海水噴霧		

4.2 試験体の曝露・測定項目・データ取得時間の間隔

写真-4.2に試験体の曝露状況を示す．曝露試験は，港湾空港技術研究所内で海水を1日4時間計2回噴霧する海水噴霧曝露試験場にて行った．

測定項目は自然電位および分極抵抗である．測定結果の記録にはデジタルマルチメータを用いて，環境作用や測定位置による自然電位の変化を把握した．測定された電位は，以下の式により海水Ag/AgCl電極に対する電位に換算し自然電位とした．

$$V_{HP} = V_m - 150 \quad (2)$$

ここに， V_{HP} ：自然電位 (mV)， V_m ：センサにより測定された電位 (mV) である．小型試験体では，自然電位を1時間ごと，大型試験体については自然電位を，2時間毎に自動計測した．

分極抵抗は，印加電圧を10mV，交流の周波数を10kHzおよび20mHzとして測定した．分極抵抗 ($k\Omega \text{ cm}^2$) は，電極と鉄筋の距離を1mm，測定対象面積を1000mm²として算出した．小型試験体においては，1時間ごとに計測し，大型試験体ではモニタリング開始から135日，237日，322日，397日，503日，600日時点でのみ分極抵抗を計測した．

5. 小型試験体を対象とした自然電位モニタリング

5.1 自然電位のモニタリング結果

かぶりが10mmであるP1位置でのモニタリング結果の一例を図-5.1に示す．図中の網掛けは，海水噴霧を実施した時間帯である．海水噴霧終了直後において，自然電位は卑に推移した．自然電位は図-5.2に示すように，鉄の不動態被膜の状態を表すアノード分極特性と酸素の

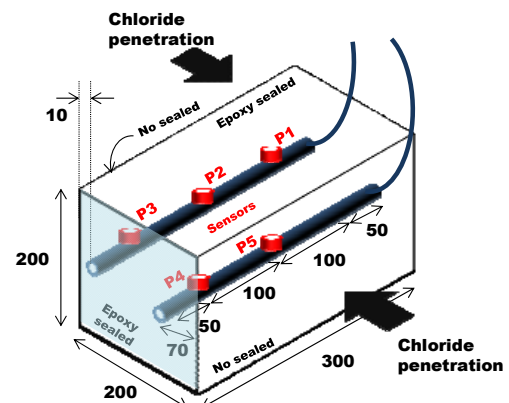


図-4.1 小型試験体

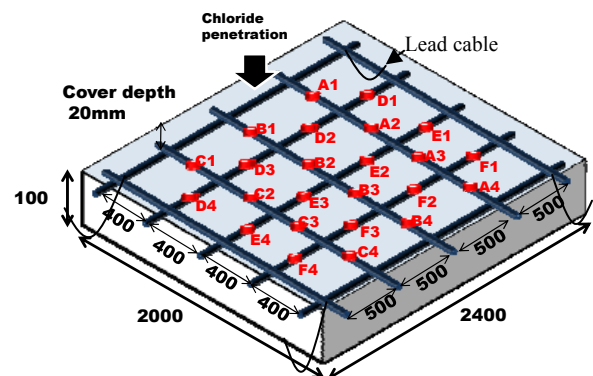


図-4.2 大型試験体

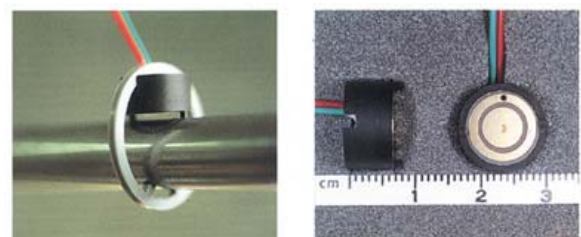


写真-4.1 自然電位測定用センサ

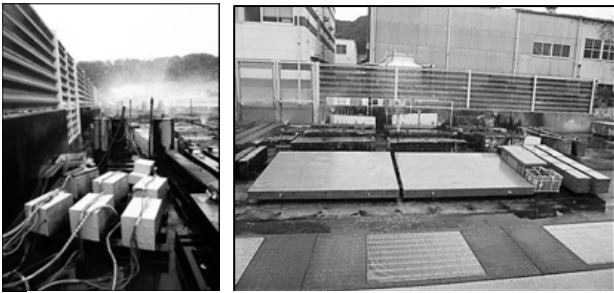


写真-4.2 試験体の曝露環境 (左: 小型試験体, 右: 大型試験体)

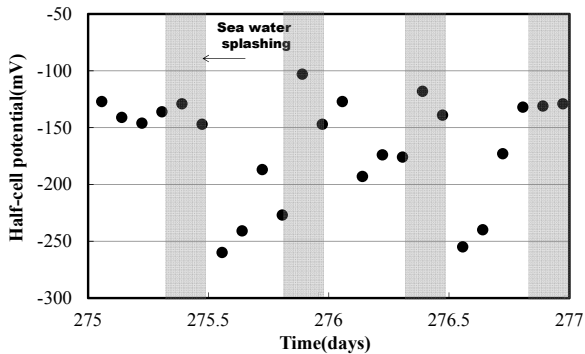


図-5.1 自然電位の推移の一例

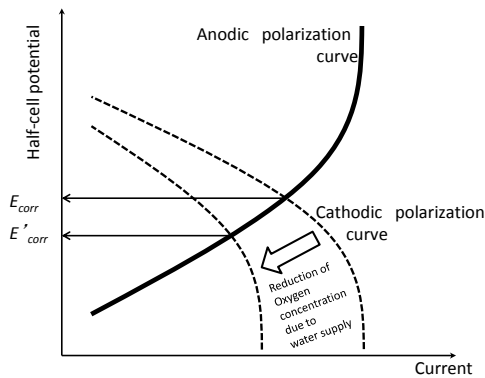


図-5.2 水分供給による自然電位低下

供給量を表すカソード分極特性から決定される。水分が供給されると鉄筋周囲の酸素量が減少し、カソード分極曲線が図中の白抜き矢印方向へ変化し、自然電位が E_{corr} から E'_{corr} に低下する。図-5.1で認められた自然電位の卑への推移は、供試体の表面が水分で覆われ、鉄筋へ供給される酸素量が低下したことに起因したと考えられる。なお、海水がコンクリート中の鉄筋に到達するまでには時間がかかるため、噴霧開始直後に卑には推移せず、概ね噴霧終了後に卑に推移したと考えられる。再び海水噴霧開始後までは乾燥の影響によって自然電位が貴方向に推移した。海水噴霧の影響により、自然電位は図中の時間内で最大150mV程度変動した。したがって、鉄筋近傍の埋設センサで取得された自然電位は、従来の知見どおり(たとえば小林(1993))、水分の影響を大きく受ける

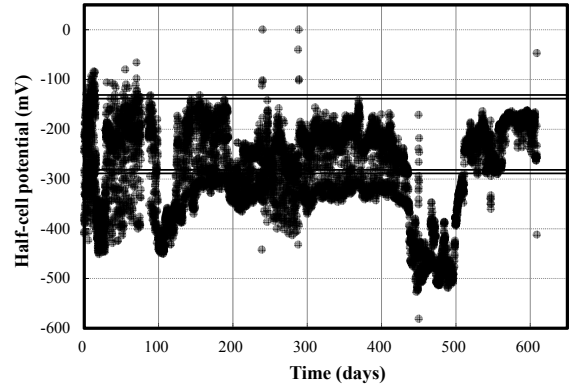


図-5.3 P1位置における自然電位の推移

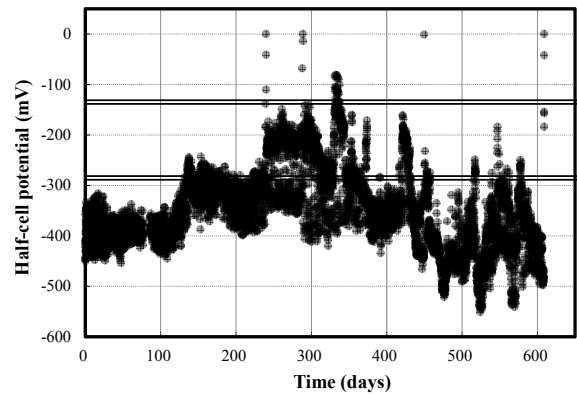


図-5.4 P2位置における自然電位の推移

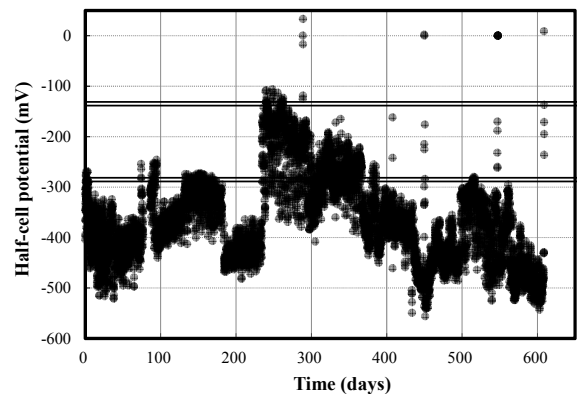


図-5.5 P3位置における自然電位の推移

ことが確認された。なお、本研究と同一の試験体を用いた西田ら(2012)は、本研究における試験条件下では、温度が自然電位に与える影響は水分の影響と比較して小さいことを報告しているので、本研究では温度の影響は考慮しないこととする。

水分の影響により150mV程度の変動が発生する場合、表-3.1による腐食判定基準によると、取得された自然電位の値によっては、90%以上の確率で腐食なしと判断されたり、腐食ありと判断されたりする。このため、腐食判定に用いる自然電位は、コンクリート中の水分状態が概ね同じとなる時刻に取得することが重要と考えられる。

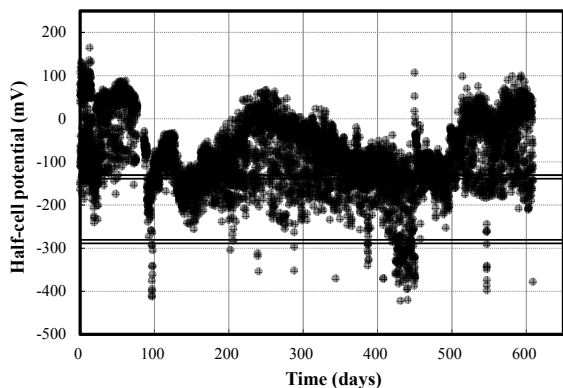


図-5.6 P4位置における自然電位の推移

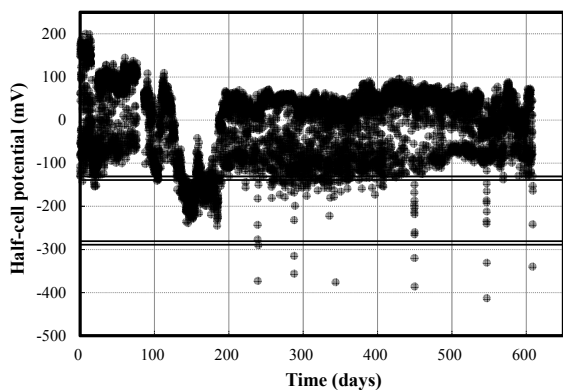


図-5.7 P5位置における自然電位の推移

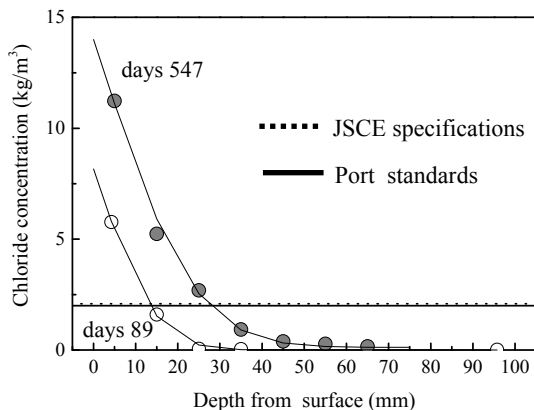


図-5.8 塩化物イオン濃度分布

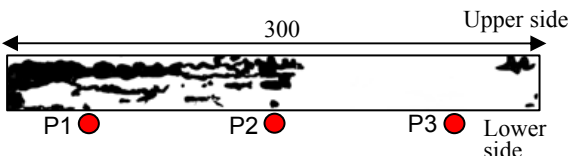


図-5.9 かぶり 10mm の鉄筋の腐食分布(展開図)

かぶり 10mmでの自然電位のモニタリング結果を図-5.3～5.5に示す。なお、図中に示す番号は、図-4.1に示すセンサ位置番号と対応している。また、図中の2重線は、表-3.1に示す基準による腐食の有無が不確定とされる下限値-285mVおよび上限値-135mVの値を示している。

いずれのセンサ位置においても、上述の海水噴霧の影響により、全期間にわたって最大で300mVの日変動を呈

した。また、P1では400日程度経過後に急激に自然電位が卑に推移し、その後、貴に回復した。P2では、300日程度まで若干貴に推移ののちに卑へ推移した。P3においては、200日経過後卑に推移して停滞し、その後250日時点で貴に推移し、その後、また卑に推移した。

P1で見られた自然電位の貴方向への推移は、中村ら(2008)が実施した実構造物を対象とした自然電位の測定結果や、永井・宮里ら(2011)が開発した埋設腐食センサによる検討結果においても確認されている。

貴方向への推移はマクロセル腐食の形成に伴うアノード分極が原因と解釈できる(伊藤(1969))。腐食し自然電位が卑にあるはずであっても、マクロセル腐食が生じアノード部が分極すると、この箇所の自然電位は貴方向に推移する。後述するが、解体後、目視によりP1位置付近での鉄筋腐食が確認されたため、P1位置においては、アノード分極の影響によって、卑側にあった自然電位が貴方向に推移したと考えられる。

次にかぶりが70mmにおけるP4、P5位置の自然電位モニタリング結果を図-5.6、図-5.7に示す。かぶりが10mmの場合と比較して貴側にあり、かぶりが10mmの場合と同様に、最大で300mVの日変動を呈した。大局的な変動としては、200日経過までは卑方向へ推移したのちに貴側に推移したが、その後変動は小さくなった。

かぶり厚さの相違により、自然電位の値の相違が生じたのは、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食が主たる要因であると考えられる。図-5.8に、小型試験体近辺に設置した管理供試体中の、89日、547日時点での塩化物イオン濃度分布を示す。なお、図中の直線は、港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)で示される塩化物イオンの腐食発生限界濃度である 2.0 kg/m^3 、示し、図中の点線は土木学会コンクリート標準示方書(2013)で算出された設計値 2.09 kg/m^3 を示している。かぶり10mmの場合においては、89日経過時において既に示方書による計算値を超過している一方で、かぶり70mmにおいては、547日経過後であっても、いずれの値に達していない。いずれも設計に用いられる塩化物イオン濃度であり、実際の鉄筋腐食がこれらの値で必ず発生するとは限らないが、かぶり10mmにおいては、89日経過以前にすでに鉄筋腐食していた可能性が高い。

モニタリング終了後、試験体を解体し、鉄筋の腐食発生性状を確認した。図-5.9に、かぶり10mmにおける鉄筋表面の腐食分布の展開図を示す。なお、腐食箇所は黒色で示した。腐食面積率は27.3%であった。センサ位置P3直下においては、腐食は見られないものの、周辺には腐食箇所が存在した。したがって、P1-P3いずれの箇所にお

る腐食の判定は妥当であると考えられる。また、かぶり70mmにおける鉄筋においては腐食しておらず、ASTM基準における90%腐食なしと判定される領域で推移していた。したがって、埋設センサで取得された自然電位による、ASTM基準での腐食判定は概ね妥当であるといえる。しかし、腐食判定に用いる自然電位は、最大300mV程度日変動を呈しているため、自然電位が取得された時刻によっては、コンクリート中の水分状態の相違が、腐食判定結果に大いに影響を与える。

5.2 腐食判定のための自然電位取得時刻の検討

腐食判定に用いる自然電位は、コンクリート中の水分状態が概ね同じとなる時に取得する必要がある。本研究では、一日2度の海水噴霧のうち、海水噴霧の前後で比較的温度の変動が小さい日没後のタイミングを対象として、日変動の中で最も自然電位が貴にある、海水噴霧開始直後の時刻と、日変動の中で最も卑にある海水噴霧終了後での測定結果を用いて、腐食判定基準の適用性について検討を行った。

図-5.10～図-5.14に、センサ位置P1～P5における、海水噴霧開始直後と、海水噴霧終了直後の抽出結果を示す。なお、塗り潰したプロットは海水噴霧開始直後であり、白抜きのプロットは海水噴霧終了直後を示している。

ここで、図-5.8に示した塩化物イオン濃度分布の結果より、かぶり10mmにおける鉄筋は、モニタリング開始後100日程度経過時に既に腐食し、かぶり70mmにおける鉄筋は、モニタリング期間にわたって鉄筋腐食は発生していないと推測される。このため、かぶり10mmの場合にはモニタリング開始から100日程度で自然電位が-285mVより卑に、かぶり70mmの場合にはモニタリング期間にわたって-135mVより貴にあるとの測定結果が得られれば、ASTM基準に従った鉄筋腐食判定が精度よく行えたと判断できる。図-5.10～図-5.14に示す試験結果で検討した結果、海水噴霧終了直後の値を用いて腐食判定を行った場合が、上記の条件を概ね充足した。

以上、鉄筋腐食の発生性状がほぼ一様とみなせる小型試験体において、本研究における自然電位モニタリングの結果では、海水噴霧終了直後の値を用いた場合にASTM基準を用いた鉄筋腐食推定が概ね可能であった。これより、ASTM基準を用いた鉄筋腐食判定を行う場合は、部材が十分に湿潤状態にあるときに取得された自然電位を用いることが適切と考えられる。以上の知見をもとに、大型試験体を対象とした検討を行う。

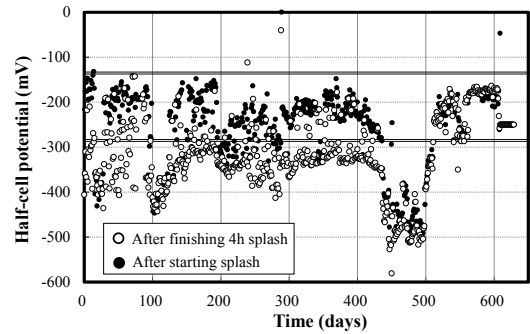


図-5.10 P1における自然電位の推移

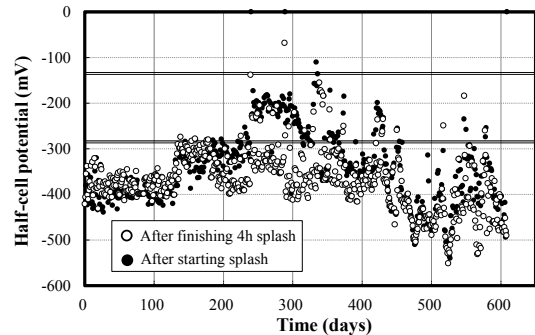


図-5.11 P2における自然電位の推移

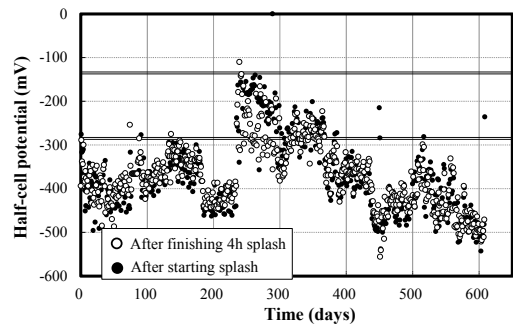


図-5.12 P3における自然電位の推移

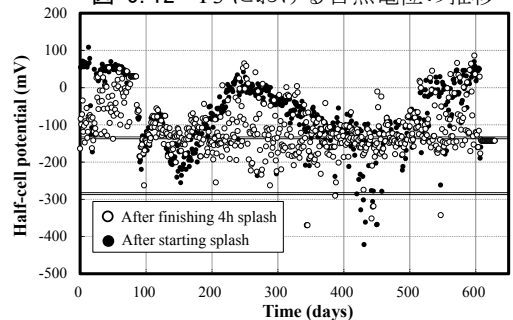


図-5.13 P4における自然電位の推移

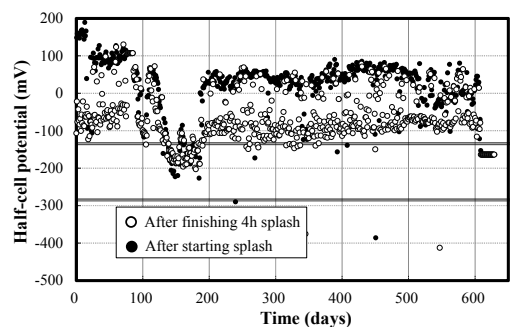


図-5.14 P5における自然電位の推移

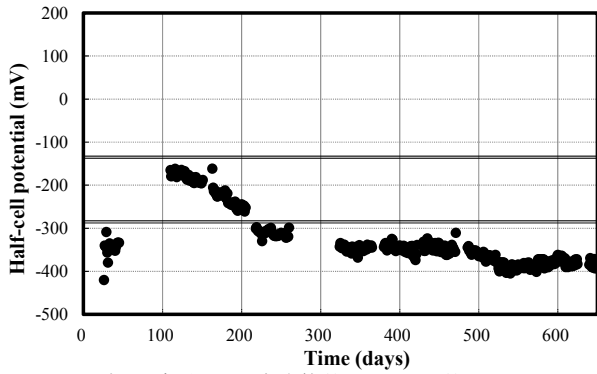


図-6.1 初期塩分あり試験体位置センサ位置 E4 における自然電位の推移

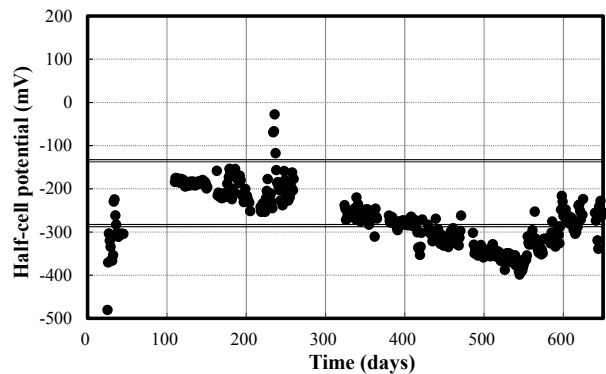


図-6.2 初期塩分あり試験体位置センサ位置 D4 における自然電位の推移

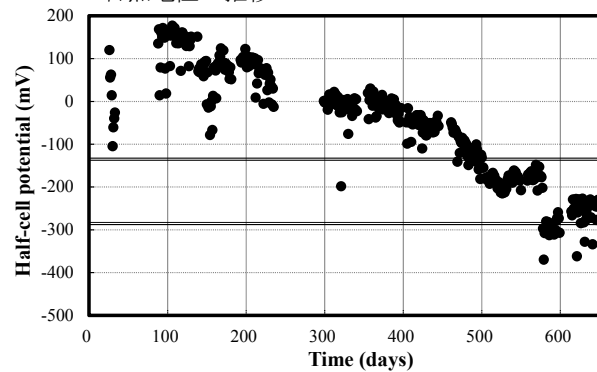


図-6.3 初期塩分なし試験体位置センサ位置 E3 における自然電位の推移

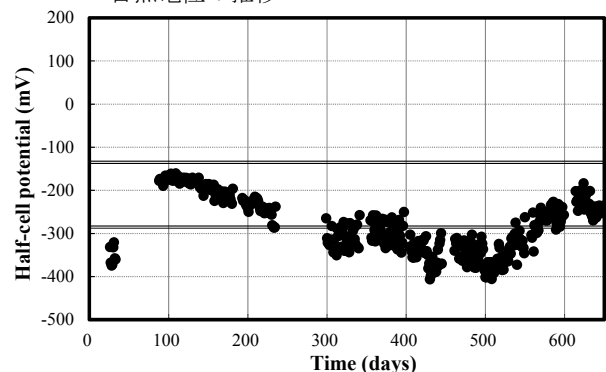


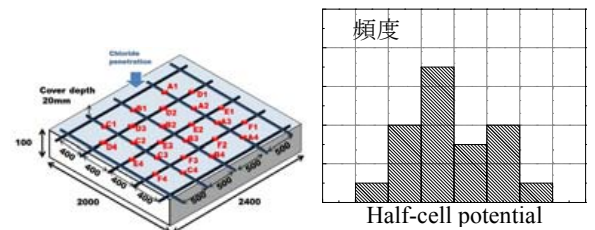
図-6.4 初期塩分なし試験体位置センサ位置 F1 における自然電位の推移

6. 大型試験体を対象とした自然電位モニタリング

大型試験体の腐食判定に関する検討を行う。前章で検討した時刻に取得された自然電位によって、部材中のすべての鉄筋上の腐食性状の推定手法について検討する。大型試験体では、コンクリート練り混ぜ時に、コンクリート中の塩化物イオン濃度換算で 5.0kg/m^3 相当の塩化ナトリウムを添加したものと、無添加のものとの2種類作製した。以下、塩化ナトリウム添加試験体を初期塩分あり試験体、無添加の試験体を初期塩分なし試験体と称した。

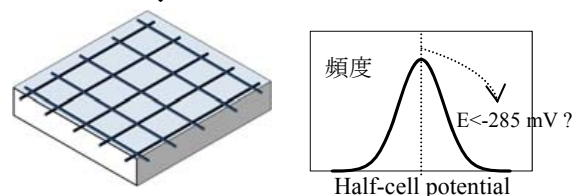
6.1 自然電位のモニタリングの結果

初期塩分あり試験体において、図-4.2に示すA1~F4のセンサ位置のうち、センサ位置E4、D4での2例をそれぞれ図-6.1、図-6.2に示す。また、初期塩分なし試験体において、センサ位置E3、F1での2例を図-6.3、図-6.4に示す。なお、自然電位は、日没後の海水噴霧終了直後の値を抽出している。また、機器の不具合により時刻の一部の値が欠損している。すべてのセンサ位置における結果については付録に示す。図中の点線は、表-2.1に示すASTMによる腐食の有無が不確定とされる下限値 -285mV および上限値 -135mV である。



(最大) 24 個の自然電位の局所データ

- 母集団の分布形状の仮定
- 局所データが母集団より取り出されたことの検証
- 母集団の平均値の推定



母集団 (すべての鉄筋上における鉄筋の自然電位) の平均値による腐食判定

図-6.5 大型試験体での検討の概要

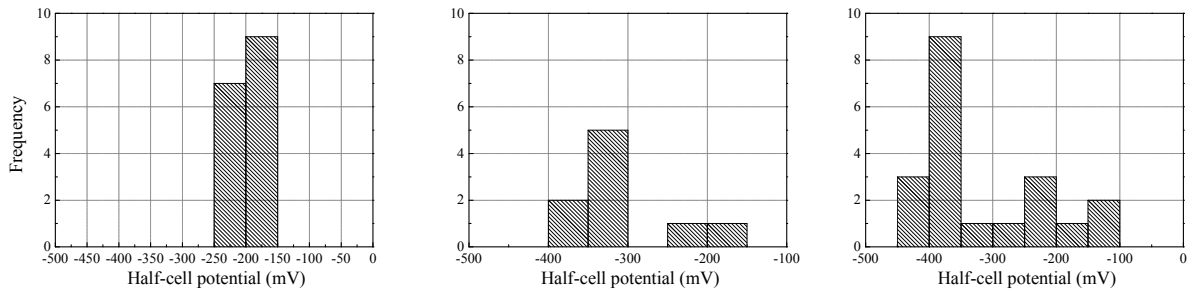


図-6.6 初期塩分あり試験体の自然電位のヒストグラム(左：111日，中央：325日，右：600日)

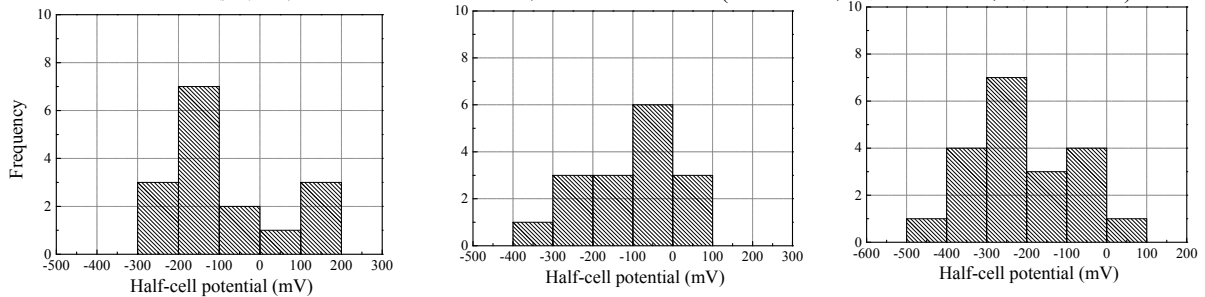


図-6.7 初期塩分なし試験体の自然電位のヒストグラム(左：100日，中央：300日，右：600日)

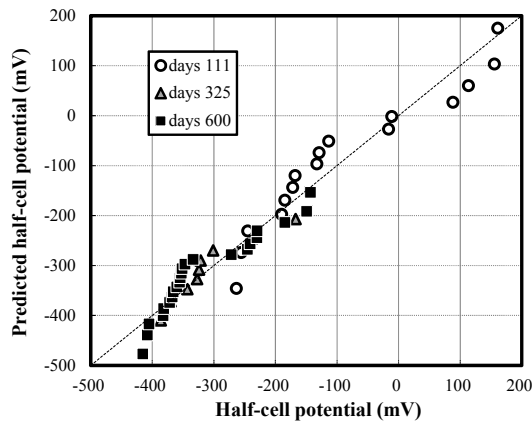


図-6.8 初期塩分あり試験体の Q-Q プロット

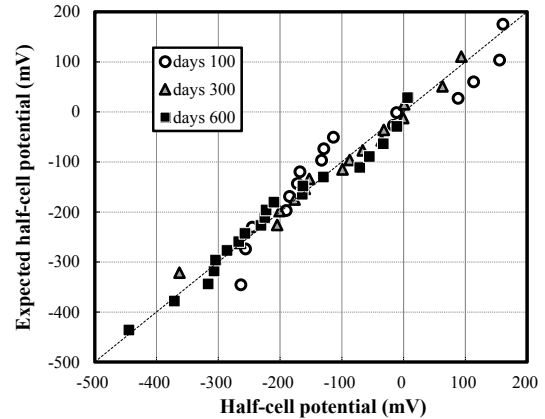


図-6.9 初期塩分あり試験体の Q-Q プロット

表-6.1 初期塩分あり試験体の正規性検定の結果

Days	n	Significance p	Result
111	16	0.404	†
219	23	0.076	†
325	16	0.183	†
400	10	0.807	†
500	12	0.017	††
600	20	0.674	†

† Failure to reject the null hypothesis

†† Reject the null hypothesis

表-6.2 初期塩分なし試験体の正規性検定の結果

Days	n	Significance p	Result
100	16	0.973	†
200	23	0.460	†
300	16	0.451	†
405	10	0.050	†
500	12	0.097	†
600	20	0.520	†

† Failure to reject the null hypothesis

†† Reject the null hypothesis

初期塩分あり試験体，初期塩分なし試験体の両者とも，図-6.1と図-6.3の例のように，モニタリング開始直後に貴方向に変化し，その後単調に卑方向に推移したもの，図-6.2と図-6.4の例のように，モニタリング開始直後に貴方向に変化したのちに，前述のアノード分極の影響により卑方向への推移し，さらに貴方向に転じて推移したものが確認された．各箇所の自然電位を確認し，それぞ

れの値による局所的な腐食判定は有効であるが，例えば設置できるセンサ個数が限られている場合に，局所的になされた腐食判定結果が，すべての鉄筋上の腐食性状を代表しているとは限らない．局所的なデータ群が，部材中のもっとも表層付近に存在する鉄筋すべての自然電位を母集団とする分布から取り出されたと見なせることが検証できれば，局所的なデータ群から，母集団の平均値

などが推定でき、個々のデータを確認せずとも、すべての鉄筋状の腐食性状について評価できると考えられる。

6.2 部材中のすべての鉄筋の腐食推定

本節では統計的手法に基づき、局所的な自然電位による、すべての鉄筋上の腐食判定手法について検討した。検討の概要を図-6.5に示す。すべての鉄筋上での自然電位を母集団としたときの平均値、すなわち、鉄筋の半数の箇所での腐食を呈した時の判定手法について検討するものである。

大型試験体では、初期塩分ありとなしで、それぞれ最大で24箇所自然電位を測定した。かぶり表面にもっとも近いすべての鉄筋における自然電位値を母集団としたとき、これらのセンサ設置箇所での測定値を母集団に対する空間標本として、空間標本による母集団の分布の平均値からすべての鉄筋上の腐食判定を試みた。

はじめに、母集団の分布形状を仮定する必要がある。自然電位のばらつきと集団の分布形状について検討した例が中村ら(2012)により報告されている。既往の報告では、負の値を取り得る自然電位値に対し、母集団の分布形状の妥当性を正規分布のみならず、正の値しか許容しない対数正規分布、ワイブル分布等への適用法と、各分布への適合性の検証を行っている。本研究では、取り扱いの簡便性を考慮して、母集団が特に正規分布に従うものとし、その適合性について検討した。

図-6.6に初期塩分あり試験体における、111日、325日、600日時点の自然電位のヒストグラムを、図-6.7に初期塩分なし試験体における、100日、300日、600日時点の自然電位のヒストグラムをそれぞれ示す。また図-6.8、図-6.9に、塩分あり試験体および塩分なし試験体におけるQ-Qプロットをそれぞれ示す。なおQ-Qプロットとは、横軸の測定値に対し、縦軸に、この測定値が正規分布に従う仮定したときの期待値を示しており、各プロットが図中の直線に近いほど、測定値が正規分布に近いことを示す。

ヒストグラムでは両試験体の結果とも概ね正規分布の形状となっており、Q-Qプロットでは両試験体ともに、直線上付近にプロットが集中したことから、取得された自然電位値群は概ね正規分布に従っていると考えられる。

次に、空間標本から推定される母集団が、正規分布に従うことを確認するため、母集団に対する正規性検定を行った。帰無仮説「母分布は正規分布である。」に対する対立仮説「母分布は正規分布ではない」において、有意水準5%での両側検定を、各試験体それぞれ、概ね100日ごと、600日までの時点で検定を行った。初期塩分あり試験体および初期塩分なし試験体の結果をそれぞれ、表-6.1、

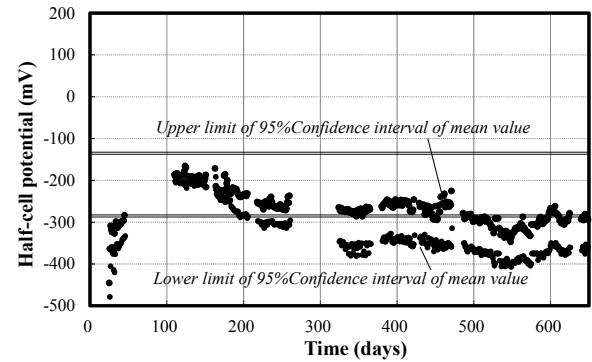


図-6.10 初期塩分あり試験体における自然電位の平均値の95%信頼区間の推移

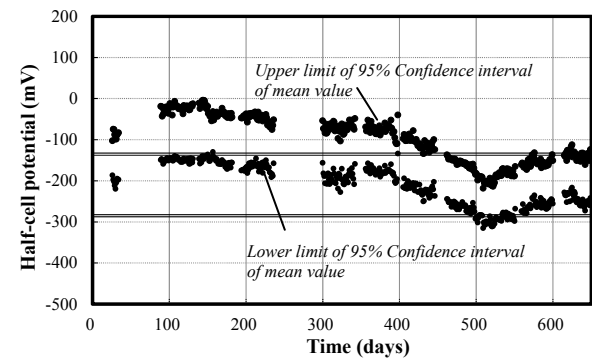


図-6.11 初期塩分なし試験体における自然電位の平均値の95%信頼区間の推移

表-6.2に示す。なお、空間標本の数 n がセンサ個数24以下であるのは、データが欠損したためである。初期塩分あり試験体の500日経過時を除き、いずれも有意水準5%で正規性を棄却できないという結果を得た。したがって、局所的に配置された埋設センサによる自然電位測定値を用いて、すべての鉄筋の自然電位値である母集団を推定できるとして検討を進める。

ここで、試験体中の鉄筋のすべての箇所の自然電位が正規分布に従う場合に、例えば、自然電位の平均値が -285mV より卑にある場合、かぶり直下にある鉄筋の、50%の箇所が、ASTM基準により90%以上の確率で腐食していると推定される。本研究では、部材中の鉄筋腐食が50%となる場合を対象にしたが、施設の維持管理レベルに応じて、任意の割合（たとえば部材中の鉄筋において腐食を許容しないは1%など小さい値）を設定することが可能である。なお、母集団での自然電位の平均値は推定値であって、誤差を生じるため、平均値の推定で得られるのは、平均値に対する信頼区間であって値には区間を有する。以下、推定された平均値の区間と腐食判定に関する検討を行う。

図-6.10に初期塩分あり試験体の自然電位の平均値の95%信頼区間の上限値と下限値の推移を、図-6.11に初期塩分なし試験体のそれらの推移を示す。なお、計測値が

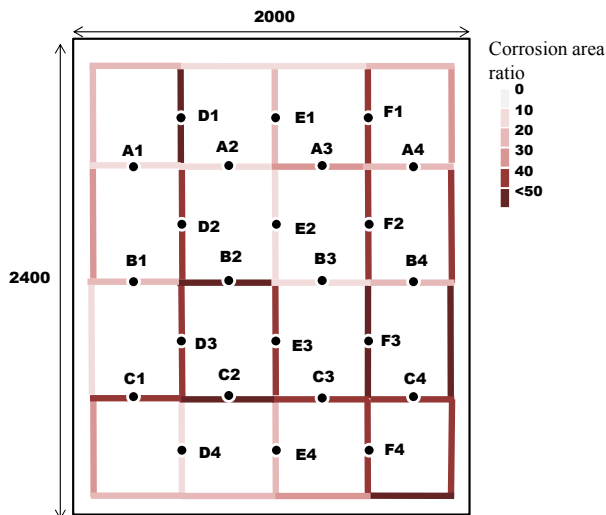


図-6.12 初期塩分あり試験体中の腐食分布

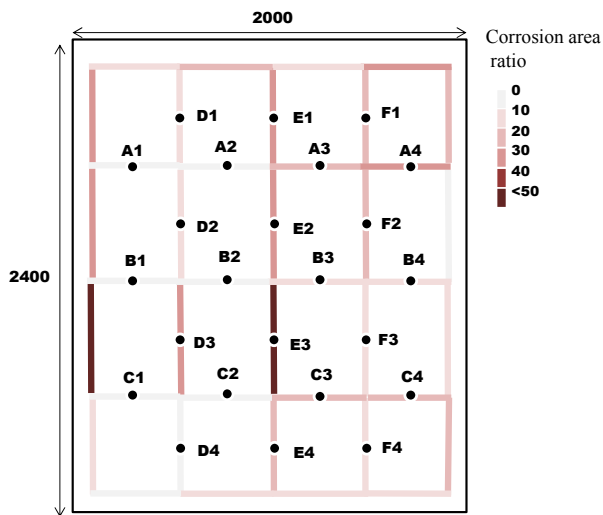


図-6.13 初期塩分なし試験体中の腐食分布

最大で24個であり、標本の規模が小さいため、母集団を t 分布として、この平均値を推定した。95%信頼区間の上限値および下限値は以下の式で算出した。

$$\bar{X} \pm t_{(\alpha/2, v)} \sqrt{V/n} \quad (3)$$

ここに、 \bar{X} ：自然電位の標本平均、 $t_{(\alpha/2, v)}$ ：自由度 v の t 分布の上側 $\alpha/2$ 点の値、 V ：標本の不偏分散、 n ：標本数である。

初期塩分あり試験体の場合、信頼区間の上限と下限ともにモニタリング開始直後より-285mVより卑にあり、概ね半数の位置で腐食している確率が90%以上と判定され、その後、信頼区間の上限と下限はそれぞれ100日経過後に貴方向に推移したのちに、卑方向に推移し、300日経過後

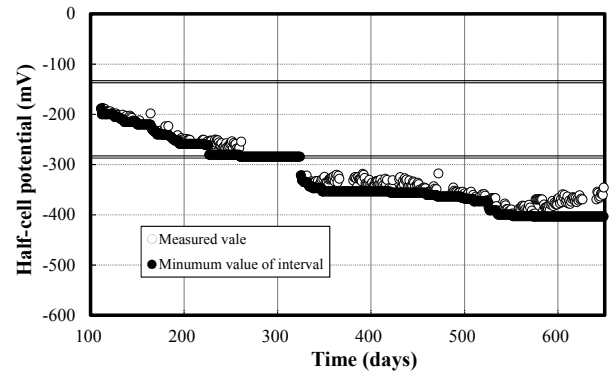


図-6.14 初期塩分あり試験体センサ位置 D1 における自然電位

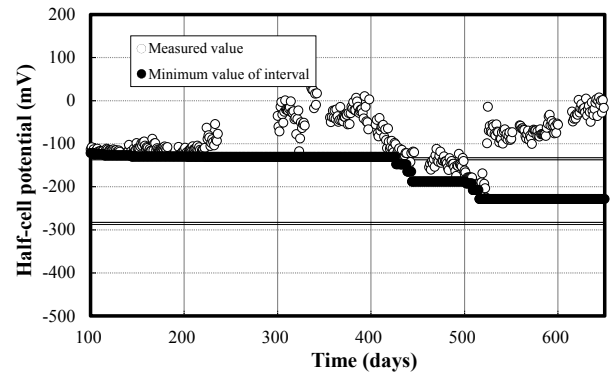


図-6.15 初期塩分なし試験体センサ位置 C1 における自然電位

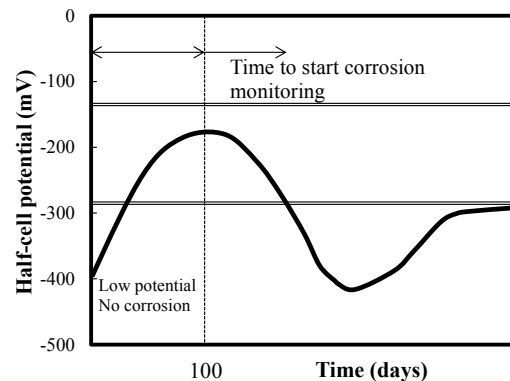


図-6.16 自然電位の推移の模式図

には信頼区間のほとんどで-285mVより卑側にあった。

初期塩分なし試験体の場合、400日まで90%以上の確率で腐食なしと判定される-135mVよりわずかに貴に位置し、そこから卑方向へ推移し、-285mVに至る前に、わずかに貴方向に回復している。

この理由としては、鉄筋腐食後のアノード分極の影響が要因と考えられる。図-6.2、図-6.4で示した例のように、個々の自然電位の推移を確認すると、いくつかの測定値においては、卑への変化のちに貴へ推移している。自然電位の貴側への推移により、鉄筋腐食の判定に関しては、危険側の評価となるため、できる限りこの影響を

表-6.3 初期塩分あり試験体での区間最小値の正規性に関する検定結果

Days	n	Significance p	Result
111	23	0.404	†
219	23	0.404	†
325	23	0.884	†
400	23	0.884	†
500	23	0.188	†
600	23	0.240	†
† Failure to reject the null hypothesis			
†† Reject the null hypothesis			

表-6.4 初期塩分なし試験体での区間最小値の正規性に関する検定結果

Days	n	Significance p	Result
100	16	0.981	†
200	16	0.460	†
300	16	0.481	†
405	16	0.050	†
500	20	0.097	†
600	20	0.520	†
† Failure to reject the null hypothesis			
†† Reject the null hypothesis			

排除する必要がある。

自然電位の貴化がアノード分極によることを確認するため、モニタリング終了後、各試験体を解体し、取り出された鉄筋が腐食していることを目視で確認するとともに、鉄筋表面の腐食面積率を求めた。図-6.12、図-6.13に、それぞれ初期塩分あり試験体、初期塩分なし試験体の腐食面積分布を示す。図には格子状に配置された鉄筋のグリッド毎の平均的な腐食面積率を示している。各試験体の鉄筋の平均的な腐食面積率はそれぞれ29.4%、15.0%であり、両試験体とも概ねすべての鉄筋が腐食していた。したがって、両試験体の、卑側から貴側への推移は、腐食によるアノード分極による可能性が高いと考えられる。

次に、鉄筋が腐食し、一旦卑側にあつて貴側への推移する影響を排除するため、各センサの自然電位の測定開始からデータ取得時までの区間最小値を用いて、母集団の平均値により腐食判定を行うこととした。自然電位の区間最小値推移の一例として、初期塩分あり試験体の自然電位D1位置における区間最小値推移を図-6.14に、初期塩分なしとした版試験体のC1位置の結果を図-6.15に示す。アノード分極に対する自然電位の貴化の影響を排除できている。なお、本研究では、最小値群を取得するための区間として、100日以降を採用した。モニタリング開

始から100日以前では初期塩分ありの試験体、初期塩分なしの試験体ともに概ねすべての測定結果において、自然電位は著しく卑にあった。これは、コンクリート試験体の製作から間もないために、コンクリート中に水分が潤沢に存在しており、図-5.2に示した水分の影響によるものと考えられる。また、コンクリート中に水分が潤沢に存在し、鉄筋への酸素の供給が非常に少なくなる環境下では、鉄筋の腐食は発生し得ない状況にある。このため、モニタリング開始から100日までの期間においては、自然電位が卑側にあつたとしても、自然電位に腐食の影響は反映されていないと考えられる。また、100日経過後は、コンクリート内部が徐々に乾燥することにより自然電位は貴に推移し、その後、塩化物イオンおよび酸素の供給によって鉄筋腐食が開始し、自然電位が卑に推移したと思われる。

以上の検討より、モニタリングで得られた自然電位データによる腐食判定には、100日後からの区間最小値を検討の対象とすることとした。

ここで、自然電位の区間最小値が正規性を有し、前述とおりに母集団を推定できることを確認するため、再び検定を実施した。表-6.3、表-6.4に概ね100日ごとの、600日までの時点での区間最小値群に対する母集団の正規性に関する検定結果を、初期塩分あり試験体、初期塩分なし試験体それぞれ示す。両者ともに、いずれの時間であっても、区間最小値の母集団の正規性を棄却できないという結果を得たため、自然電位の区間最小値に関する母集団は、これまでと同様に正規分布に従うものとみなす。

図-6.17と図-6.18に区間最小値に対する母平均の95%信頼区間の推移を示す。初期塩分あり試験体の場合には、平均値の信頼区間の下限値が-285mVより卑になるのは約190日で、上限値は約220日であった。初期塩分なし試験体の場合には、下限値が-285mVより卑になるのは約300日で、上限値は-285mVに到達しない。したがって、初期塩分あり試験体は初期塩分なし試験体と比較して卑側にあるといえる。鉄筋腐食面積率は、初期塩分あり試験体では、初期塩分なし試験体よりも大きいことから、腐食開始時期は初期塩分あり試験体のほうが早いと考えられる。自然電位の母集団の平均値の推定値も、結果として、この傾向が追跡できている。

ここで、母集団の平均値に対する推定値により、腐食発生時期の検討を行うため、初期塩分なし試験体を対象として、塩化物イオン濃度分布による腐食開始時期の推定を行った。自然電位の測定終了後、試験体より全17箇所の塩化物イオン濃度分布を測定した。その結果を図-6.19に示す。コンクリートの表層から1cmまでの位置(プ

ロットは0.5cm)の塩化物イオン濃度は、7.0kg/m³程度の相違が確認された。

17箇所の塩化物イオン濃度分布に対し、拡散方程式に基づいた回帰分析を実施し、かぶり位置である20mmでの塩化物イオンが2.0kg/m³に到達した時刻を推定した。図-6.20に結果を示す。推定された鉄筋腐食開始時期は、最小で168日、最大で226日であり、17箇所の平均値は約190日であった。図-6.18では、平均値の下限值が-285mVより卑側となるのが約300日であり、下限値を腐食の判定に用いるのであれば、概ね100日程度の相違があった。設定した腐食開始塩化物イオン濃度2.0kg/m³は設計値であり、本試験体における鉄筋腐食に関する値とは必ずしも一致しない。しかし、母集団の推定された自然電位の平均値の95%信頼区間の下限値が-285mVより卑にある時点を確認することで、概ね鉄筋腐食開始時期を推定できると考えられる。なお、平均値の信頼区間の下限値であるため、腐食開始の推定に関しては安全寄りの評価となっている。

6.3 等電位線図による鉄筋の腐食箇所の推定

自然電位測定においては、局所的な測定値を用いて、測定外の箇所の任意の点に対して自然電位を内挿および外挿し、測定時における自然電位の分布を等電位線図により表すのが一般的である。この手法では、アノード分極の影響により正確な判定が妨げられるとの指摘が中村(2012)より指摘がなされている。

そこで本研究では、自然電位の区間最小値を用いた試験体の等電位線図を作成した。図-6.21に初期塩分あり試験体の、111日、325日、600日時点での等電位線図を、図-6.22に初期塩分なし試験体の100日、300日、600日時点での等電位線図を示す。なお、モニタリング期間にわたって区間最小値を取得できた全16センサの結果を示した。時刻の経過に伴い、両者ともに全体として卑側に推移していることが確認できる。また、図-6.12、図-6.13での腐食面積率の分布図と比較を行うと、自然電位が卑にある箇所と図-6.12および図-6.13での腐食面積率が大きい箇所とは必ずしも一致はしていない。その一方で、等高線の勾配が局所的に大きい箇所の卑側にある位置で、腐食面積が大きい傾向にあることが確認された(例えば図-6.13の、それぞれセンサ位置D3、E1、E2、E3、E4直下の鉄筋など)。周辺との電位差が大きいため、比較的大きな腐食電流が発生し腐食が著しかったためと考えられる。

以上のことから、本研究で提案する区間最小値を用いた等電位線図は、明確に局所的に腐食が発生している箇所を特定できる可能性があることが分かった。

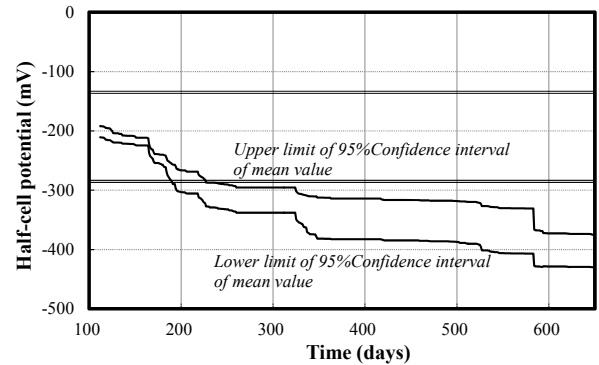


図-6.17 初期塩分あり試験体の自然電位の母集団の平均値に対する推定値の推移

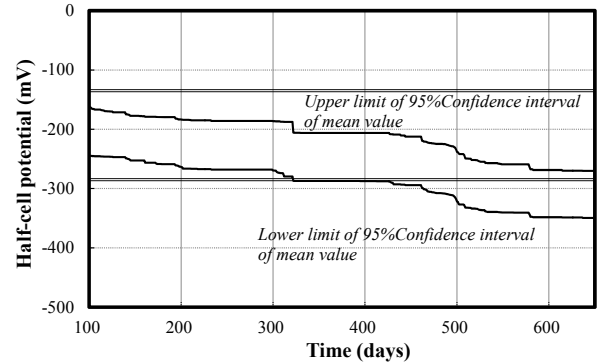


図-6.18 初期塩分なし試験体の自然電位の母集団の平均値に対する推定値の推移

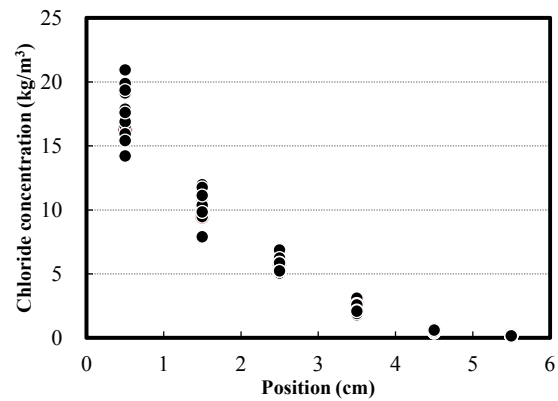


図-6.19 初期塩分なし試験体の塩化物イオン濃度分布

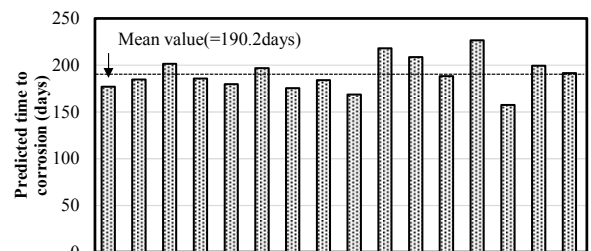


図-6.20 塩化物イオン濃度分布より推定された鉄筋腐食開始時刻

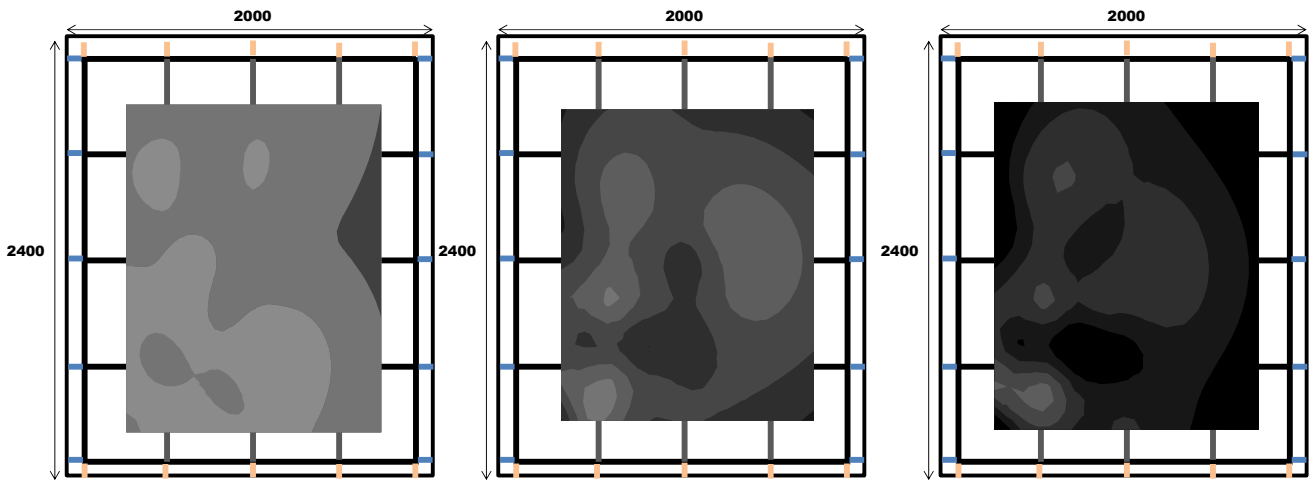


図-6.21 初期塩分あり試験体の自然電位の分布図（左：111日時，中央：325日時，右：600日時）

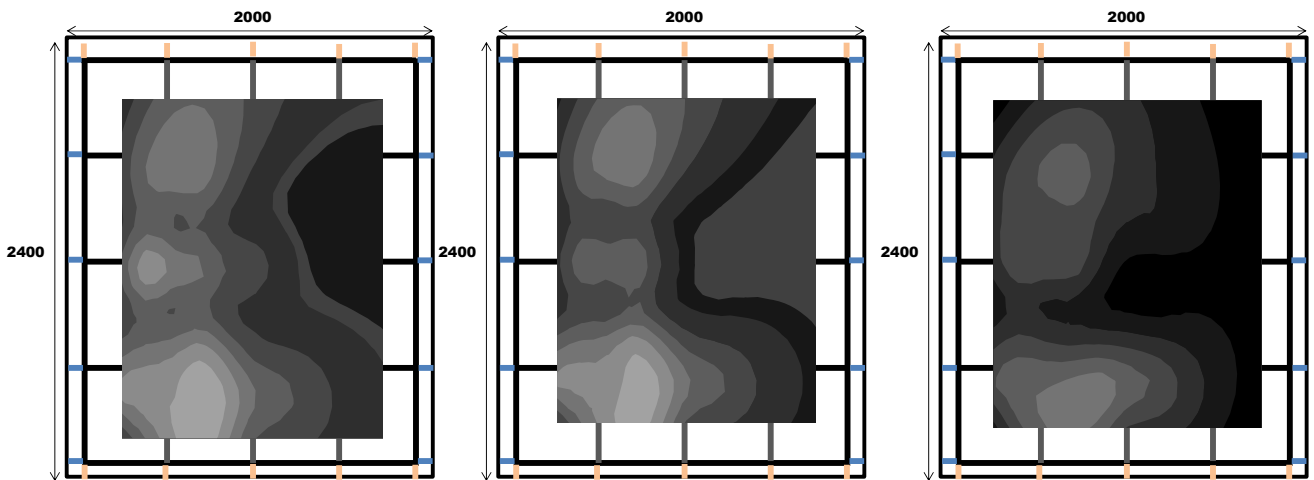
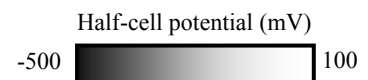


図-6.22 初期塩分なし試験体の自然電位の分布図
（左：100日時，中央：300日時，右：600日時）



6.4 腐食推定の信頼性に関する検討

2m×2.4mの版状試験体に設置した24個のセンサにより取得した自然電位データを用いて、自然電位の母集団の平均値の推定が可能であること、また、区間最小値を用いた等電位線図により部材中の腐食箇所の視覚化および局所的な腐食箇所の特定が可能となることを示した。しかし、センサを実構造体に適用する際には、施工性およびコストの観点から、可能な限り少ないセンサで部材全体の腐食情報を取得することが望ましい。本節では、部材中に設置したセンサ個数と腐食判定に関する信頼性について検討するものである。

信頼性の評価指標として、測定の不確かさを採用する。測定の不確かさは式(4)で示す、推定された母集団の平均値の95%信頼区間の幅により評価する。

$$w = (\bar{X} + t_{(\alpha/2, v)}\sqrt{V/n}) - (\bar{X} - t_{(\alpha/2, v)}\sqrt{V/n}) \quad (4)$$

$$= 2t_{(\alpha/2, v)}\sqrt{V/n}$$

この信頼区間の幅を採用した理由として、例えば、推定された母集団の平均値の95%信頼区間の幅が、腐食判定の不確定領域を超過する場合、つまり150mVを超過する場合、図-6.23の右図の模式図に示すように、95%信頼区間内に、表-2.1に示す基準で腐食ありという判定と、腐食なしという、相反する2つの判断が存在することになり、測定の不確かさは大きいと判断される。この不確かさを低減させるためには、センサ個数を増やすこととなる。

センサを設置した24箇所の測定位置のなかで、データの欠損があったため、区間最小値が取得できたのは

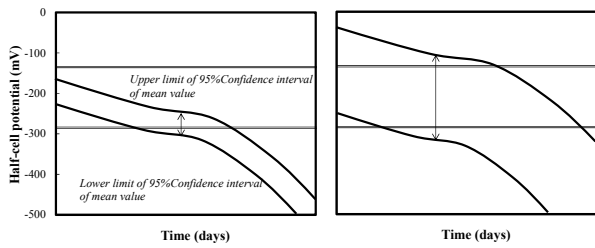


図-6.23 母集団の平均の信頼区間幅に関する模式図
(左：母集団の平均値に関する信頼区間が腐食判定基準の2つのしきい値を跨がない場合、右：しきい値を跨ぐ場合)

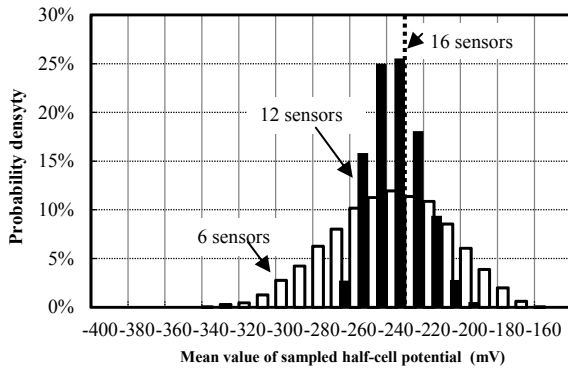


図-6.24 センサ数と自然電位の平均値の確率密度分布

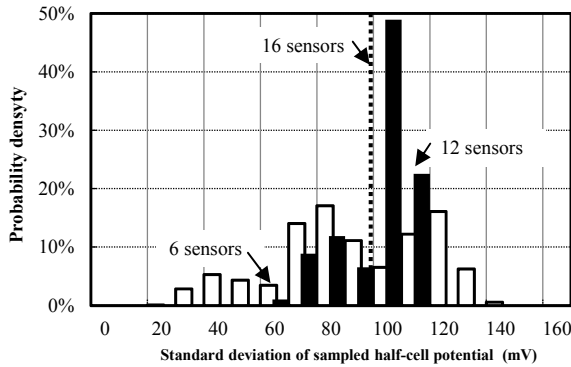


図-6.25 センサ数と自然電位の標準偏差の確率密度分布

箇所であった。はじめに、300日経過時点において、16箇所、12箇所および6箇所抽出した場合の標本の平均値を図-6.24に、標準偏差を図-6.25に示す。16箇所の場合、平均値は約-240mVであるが、12箇所抽出の場合、平均値は300日時点で概ね-280mV~-200mVに分布しており、6箇所抽出の場合には、平均値は-340mV~-160mVに分布しており、12箇所の場合に比較して平均値は広く分布した。また、標本の標準偏差は12箇所の場合に40~110mVで分布し、6箇所の場合では10~140mVに分布し、平均値と同様に広く分布した。

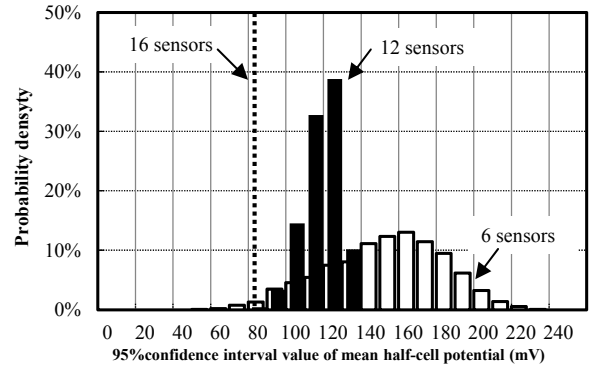


図-6.26 母集団の平均の信頼区間幅に関する確率密度分布(100日時)

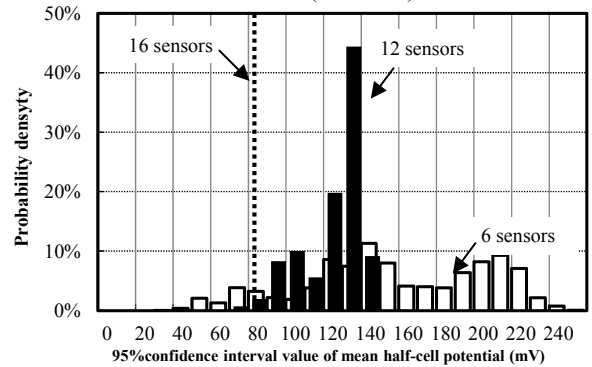


図-6.27 母集団の平均の信頼区間幅に関する確率密度分布(300日時)

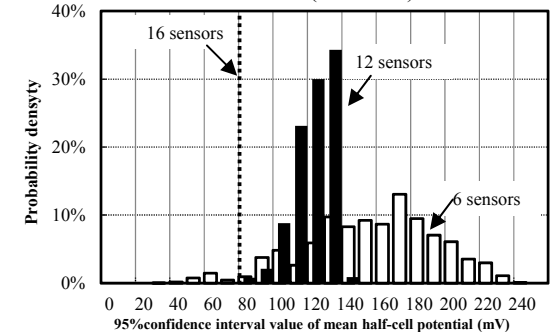


図-6.28 母集団の平均の信頼区間幅に関する確率密度分布(600日時)

次に、センサ設置箇所数を16, 12, 6とした場合において、100日, 300日, 600日時点での、推定された母集団の平均値の95%信頼区間の幅wを図-6.26~図-6.28に示す。いずれの場合においても、12箇所の場合のwの最頻値は16箇所での場合よりも大きくなっており、さらに、6箇所の場合は、12箇所の場合よりも大きくなった。また、センサ個数の低減によりwの分布は広がる傾向にあった。

次に、センサ設置箇所数を16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 3とした場合において、100日, 300日, 600日時点での、wの累積密度が95%以上となる時の自然電位の値を図

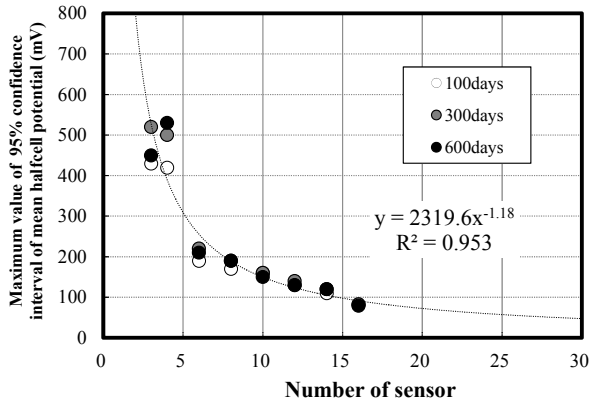


図-6.29 センサ個数と母集団の平均の信頼区間幅の関係(累積密度95%以上となる場合)

-6.29に示す。例えばセンサ設置個数が3個で100日時点の場合、概ね95%の確率で w は430mV以下となることを示している。図のプロットから類推するに、センサ個数と w は指数関数的な関係にあることがわかる。センサ個数が5個より少ない場合には、累積密度95%以上となる場合の母集団の平均値の信頼区間幅は400mVを超過し、信頼区間は図-6.23の右図のように2つの判定基準を含む可能性が高い一方、5個より多い場合、信頼区間幅は200mVと大幅に減少するものの、センサ数を増加させたとしても、区間幅の低減には大きく寄与しない。

本研究における結果を、一般的なコンクリート部材に適用できると仮定した場合、例えばかぶり表層に最も近い部材中の鉄筋の総延長が本研究で使用した試験体と同じく13.2mである場合、 w を150mVと程度としたい場合のセンサ個数は、10個、75mVとしたい場合は20個が目安となる。今回はかぶり20mmの場合での検討のため、実構造物の鉄筋腐食判定のための最適なセンサ設置個数とその設置箇所については、今後さらなる検討が必要である。しかし、本研究で示したセンサ設置に関する考え方としては、今後の港湾コンクリート構造物の効率的かつ効果的な維持管理の実現に貢献すると思われる。

7. 分極抵抗による腐食判定

7.1 小型試験体におけるモニタリング結果と腐食判定

図-4.1に示す小型試験体を対象に、分極抵抗による腐食判定に関する検討を行った。はじめに、例としてP1位置における304日～308日における分極抵抗の推移を図-7.1に示す。また、この時刻における本試験体周辺の温度履歴を図-7.2に示す。

気温の上昇時刻と、分極抵抗の増加時刻は概ね一致し、また、シャワー後の時刻にも増加しているように確認で

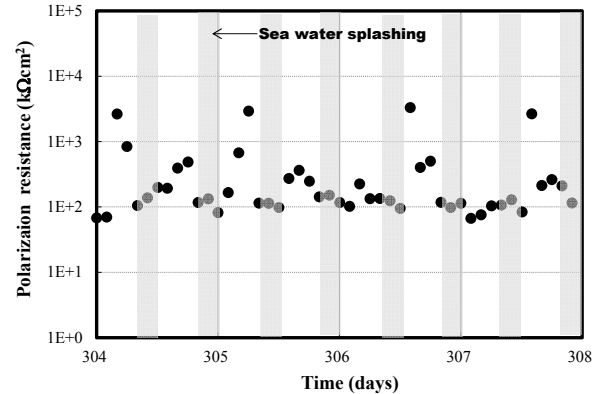


図-7.1 P1位置における分極抵抗の推移の一例

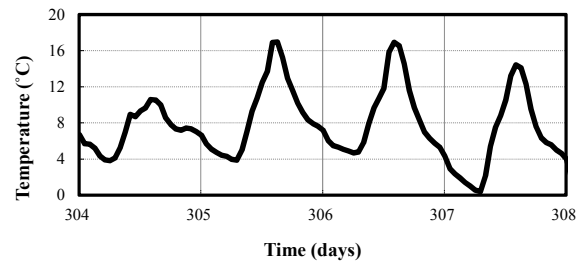


図-7.2 周辺温度の履歴(304日～308日の間)

きる。ここで、西田(2012)による、同一試験体での検討では、分極抵抗は温度の上昇により分極抵抗は小さくなり、また、水分量の上昇により分極抵抗は増加するものの、その影響は温度と比較して小さいとしている。図-7.1での分極抵抗の増加が、温度の上昇の影響とすると上述の報告とは矛盾するため、分極抵抗の影響は、水分の影響を受けて低下し、気温の上昇による影響は直ちには反映されず、かぶり内部の鉄筋にまで温度が伝達する時刻分、その影響が遅れて反映されたと考えられる。

本実験では水分の影響が大きくなった理由として、水分供給の相違が原因と考えられる。既往の報告においては、相対湿度を60%および95%とすることで水分量の相違を設定したが、本研究では、海水が直接試験体に噴霧されている状況と乾燥している状況での比較であって、試験体内部の水分状態が報告での実験と比較して高い状態にあったと考えられる。コンクリート中の水分状態が高い場合、図-5.2のとおりカソード分極曲線が下方にシフトするため、アノード分極曲線との交点が、横軸方向負の方向にシフトする。横軸は電流の量を示しており、これが低下することは分極抵抗が上昇していることに他ならない。またコンクリートの乾燥に従い、カソード分極曲線が正の方向にシフトするため、分極抵抗が減少する。分極抵抗の増減の幅は水分状態に支配されている。したがって、既往の報告とは異なり、本実験においては海水が試験体に噴霧され、その後乾燥することで、コンクリート中の水分状態が著しく変化し、その影響で分極抵抗

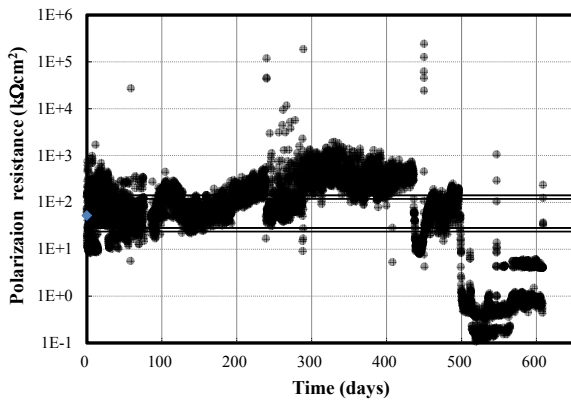


図-7.3 P1位置における分極抵抗の推移

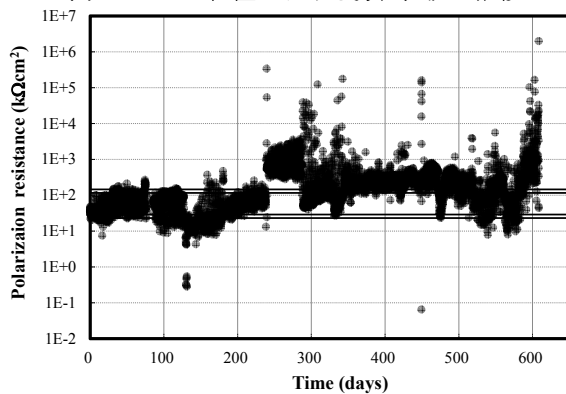


図-7.4 P2位置における分極抵抗の推移

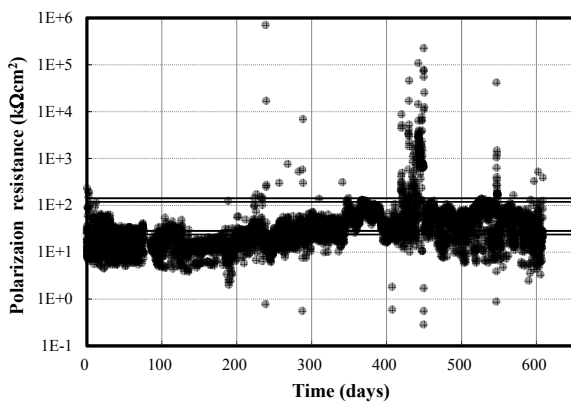


図-7.5 P3位置における分極抵抗の推移

が変化したと考えられる。

次に、かぶりが10mmの面における分極抵抗のモニタリングの結果を図-7.3～図-7.5に示す。なお、図中の2重線は、表-2.2に示すCEB基準による腐食速度判定の、激しい腐食速度と判定される領域の上限値26 kΩcm²および、不動態状態で腐食無と判定される領域の下限値130kΩcm²を示す。

モニタリング開始直後から概ね400日程度まで、分極抵抗は、10,000kΩcm²以上になった時刻があるが、概ねの傾向としては、1オーダー程度の増減を繰り返しつつも、大局的には増加傾向かもしくは一定である。その一方で、

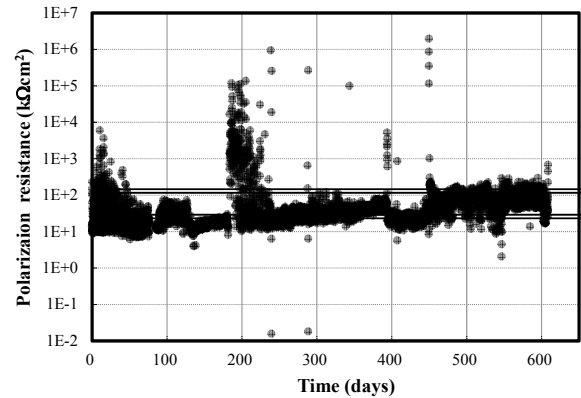


図-7.6 P4位置における分極抵抗の推移

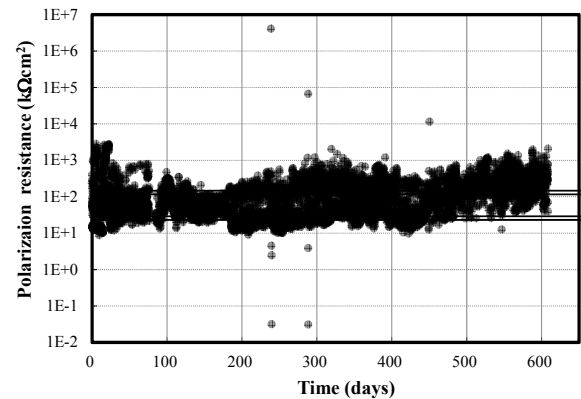


図-7.7 P5位置における分極抵抗の推移

P1位置では、450日付近から、急激な分極抵抗の低下し、500日経過後においては10 kΩcm²以下の領域を推移した。自然電位の場合には、腐食発生箇所であってもアノード分極と思われる現象により、P1位置での自然電位は貴に回復したが、同じ箇所での分極抵抗は増加しなかった。P2, P3位置における分極抵抗は概ね、短期的な変動で腐食なしの130kΩcm²以上領域から激しい腐食と腐食なしと判定される26kΩcm²以下の領域を推移しており、判定は概ね妥当であると考えられる。

次に、かぶりが70mmの面における分極抵抗のモニタリング結果を図-7.6、図-7.7に示す。P4での分極抵抗は、かぶり10mmの場合と同様に1オーダー程度の増減を繰り返しつつも、概ね値に変動はなく、P5の場合は僅かに増加傾向にあった。P2, P3位置でのかぶりが10mmの結果と比較して、値自体はほとんど相違がなく、本試験体においては、分極抵抗値のみでは、腐食の発生の検知は十分ではなかった。一方で、アノード分極が発生したとしても、分極抵抗は影響を受けない。このため、アノード分極を生じる自然電位と、分極抵抗の両者による腐食判定が有効であると考えられる。

7.2 自然電位と分極抵抗の組み合わせによる腐食判定の検討

分極抵抗の測定の目的は、腐食速度に関連した指標を求めることであり、自然電位と分極抵抗を組み合わせることにより、分極抵抗における腐食の判定精度の向上が期待できる（中川防蝕工業（1989））。本節では、これについて検討を行う。

P1~P5 位置の自然電位と分極抵抗の測定値について、横軸に自然電位を、縦軸に分極抵抗をとり、値をプロットしたものを図-7.8~図-7.12 に示す。なお、図中の縦線は自然電位での腐食判定基準における、90%以上の確率で腐食していると判断される領域と腐食が不確定と判断される領域の境界である -285mV 、および、90%以上の確率で腐食していないと判断される領域と腐食が不確定の領域の境界である -285mV であり、横線は、分極抵抗での腐食判定基準である、腐食無と判定される領域と、腐食が軽微と判定される領域の境界である $130\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 、腐食が非常に激しいと判定される領域と、腐食が激しいと判定される領域の $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ を示している。

P1 では、モニタリング開始から -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の領域を推移したのち、自然電位が -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下の象限に存在することが確認される。その後、アノード分極の影響により、自然電位は貴に推移し、 -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下の領域に移動した。P2 では、モニタリング開始から -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の領域を推移したのちに、 -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の領域を推移した。P3 では、概ね P2 と同様の推移を呈したが、分極抵抗が若干 P2 よりも小さい領域で推移し、 $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下を推移した時刻もあった。P4 では、P2、P3 と比較して分極抵抗については概ね相違がないものの、自然電位の値が大きく異なったため、概ね全期間にわたって、自然電位が -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の領域を推移し、一部 -285mV を下回ったものの、自然電位が -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下の領域を推移することはほとんどなかった。P5 での結果も P4 と概ね同様であり、P4 と比較して、さらに自然電位が貴側にあった。

以上の結果より、鉄筋腐食が確認された P1~P3 での結果と、鉄筋腐食が確認されなかった P4、P5 での結果の相違は、P1~P3 位置では、自然電位と分極抵抗の関係で、図-7.13 の着色領域を推移した一方、P4、P5 では概ね図-7.13 の無着色領域を推移した点である。自然電位が -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下であれば、

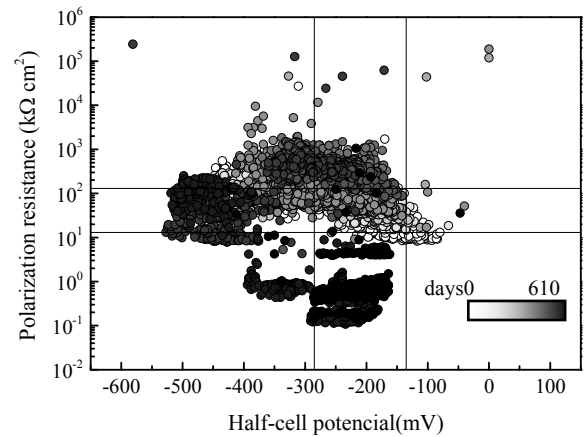


図-7.8 P1 位置における自然電位と分極抵抗の関係

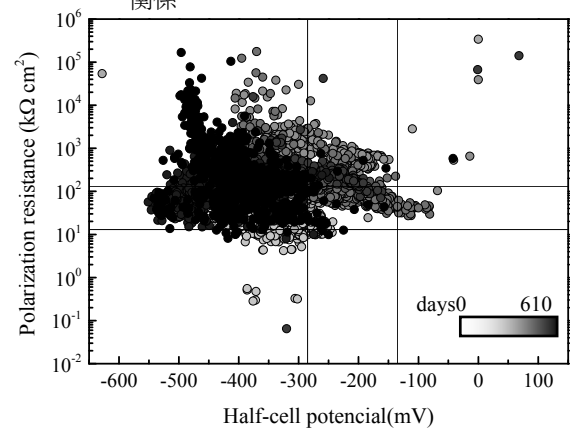


図-7.9 P2 位置における自然電位と分極抵抗の関係

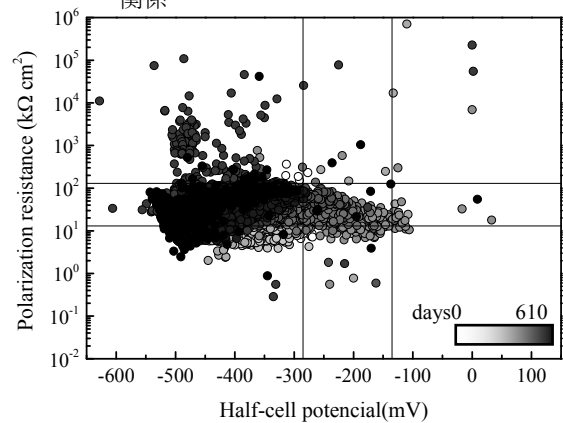


図-7.10 P3 位置における自然電位と分極抵抗の関係

おおよそ確実に腐食していると考えられるが、自然電位が -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下、自然電位が -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以上であったとしても腐食したと判断できる。これは、 -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{ k}\Omega\text{cm}^2$ 以下に推移する場合、P1 の場合のように、アノード分極の影響が考えられるため、この領域にプロットがある場合には、腐食ありと判定し

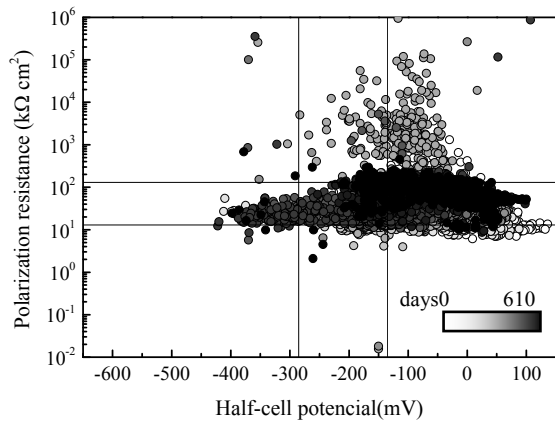


図-7.11 P4位置における自然電位と分極抵抗の関係

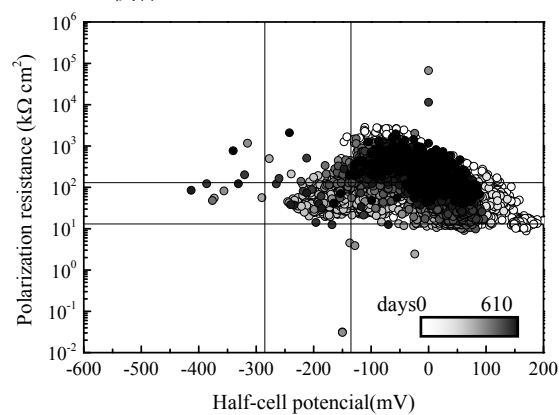


図-7.12 P5位置における自然電位と分極抵抗の関係

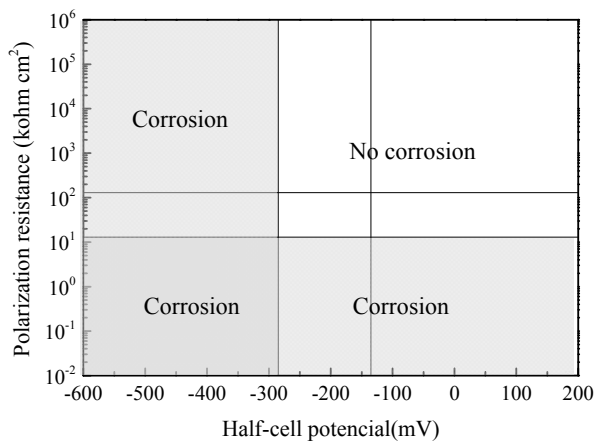


図-7.13 自然電位と分極抵抗による腐食判定基準

てよいと考えられる。なお、アノード分極の影響ではないものの、この領域にプロットがなされた場合、分極抵抗は非常に小さいのでこの場合であっても腐食と判断するのがよいと考えている。

自然電位が -285mV 以下かつ、分極抵抗が $26\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の場合、センサ P2, P3 の結果から分極抵抗としては比較的高い値にある場合であるものの、試験体解体の結

果、鉄筋は腐食していたため、この領域にある場合には腐食していると判定してもよいと考えられる。

なお、自然電位が -285mV 以上かつ、分極抵抗が $26\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 以上の場合、P4, P5 の場合に該当し、腐食がなかったため、この領域にプロットがなされると、腐食の懸念はほとんどないと考えられる。

以上、分極抵抗が測定可能な場合には、分極抵抗と自然電位の組み合わせによる判定を、図-7.13 により行えばセンサ設置箇所の腐食判定を精度よく行える。

7.3 大型試験体のモニタリング結果と腐食判定

分極抵抗による大型試験体の検討として、自然電位と同様の検討を行う。分極抵抗値の変動は数桁にまたがるため、分極抵抗値の測定値を対数にとったものは正規分布に従うように思われる。図-7.14, 図-7.15 に、初期塩分あり試験体および初期塩分なし試験体の分極抵抗の測定値に関する Q-Q プロットを示す。縦軸と横軸が同じ値を示す等値線上にプロットが集中したため、概ね空間標本は対数正規分布に従っているように思われる。

自然電位と同様に、帰無仮説「母分布は対数正規分布である。」に対する対立仮説「母分布は対数正規分布ではない」において、有意水準 5%での両側検定を、各試験体それぞれ、概ね 100 日ごと、600 日までの時点で検定を行った。初期塩分あり試験体および初期塩分なし試験体の結果をそれぞれ、表-7.1, 表-7.2 に示す。初期塩分あり試験体においては、135 日以外で、母集団が対数正規分布であることを棄却できないという結果を得たが、初期塩分なし試験体の場合には、135 日, 397 日の結果のみ、対数正規分布であることを棄却できないと得た。したがって、本研究で使用したセンサにより得られた分極抵抗では、必ずしも母集団を対数正規分布とみなすことができなかったため、母集団の平均値の推定は実施しないこととした。分極抵抗の母集団を適切に表現できる関数の提案は今後の課題である。

次に、自然電位と分極抵抗によるセンサ位置での局所的な腐食判定を実施した。

図-7.16 に初期塩分あり試験体の、図-7.17 に初期塩分なし試験体の自然電位と分極抵抗の関係を示す。600 日経過時点で、初期塩分あり試験体は、初期塩分なし試験体と比較して図-7.12 に示す腐食判定表の腐食ありの領域にプロットが多く存在しており、腐食がより進行している初期塩分あり試験体の腐食性状を定性的には表現できている。また、図-6.16 に示す自然電位の母集団の平均値の、95%信頼区間の下限值が -285mV より卑となるのは概ね 190 日程度、図-6.17 に示す場合では 300 日程度

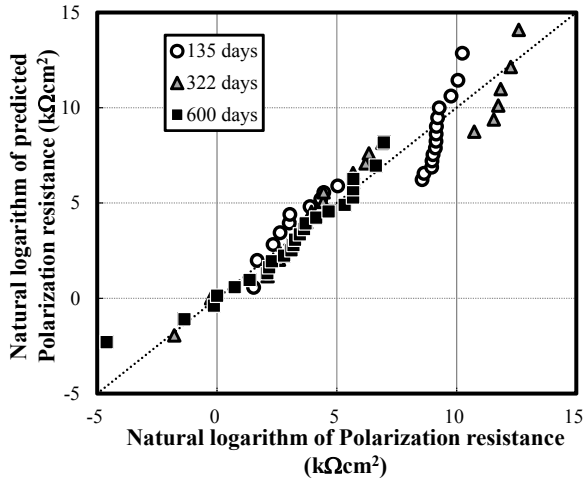


図-7.14 初期塩分あり試験体の Q-Q プロット

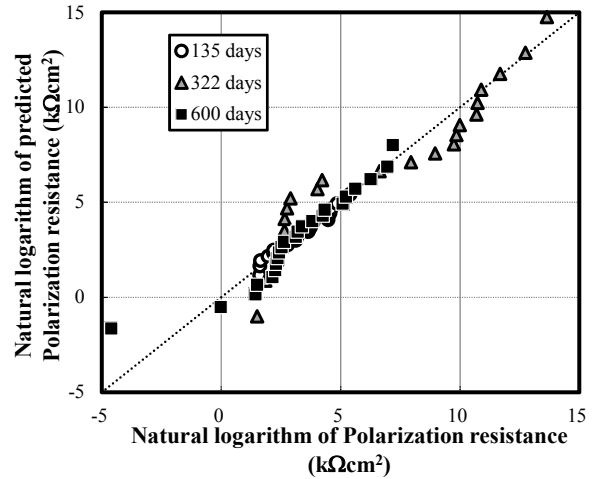


図-7.15 初期塩分なし試験体の Q-Q プロット

表-7.1 初期塩分あり試験体の正規性検定の結果

Days	n	Significance p	Result
135	24	0.0004	††
237	21	0.114	†
322	21	0.114	†
397	19	0.959	†
503	18	0.964	†
600	24	0.218	†

† Failure to reject the null hypothesis
†† Reject the null hypothesis

表-7.2 初期塩分なし試験体の正規性検定の結果

Days	n	Significance p	Result
135	24	0.451	†
237	22	0.015	††
322	22	0.012	††
397	21	0.110	†
503	22	0.002	††
600	23	0.039	††

† Failure to reject the null hypothesis
†† Reject the null hypothesis

であり、この時点で部材中の鉄筋の半数が腐食していると判定した。検定の結果、分極抵抗を用いて母集団は推定できないものの、参考として、初期塩分あり試験体においては、235日時点で分極抵抗値が取得できた21箇所のうち12箇所が腐食領域にあり、半数以上のセンサ位置で腐食していると判断され、自然電位による母集団の推定結果とほぼ相違ない結果を得た。また、初期塩分なし試験体においては、135日時点で24箇所のうち、6箇所、397日時点で22箇所のうち6箇所、600日時点で22箇所のうち10箇所が腐食領域にあると推定され、600日経過も半数が腐食したとは判定されず、自然電位による推定結果とは、若干の乖離があるものの、自然電位と分極抵抗を組み合わせた判定により、特段のデータの加工を必要とせずに腐食判定ができることが分かった。

8. まとめ

小型試験体および、大型試験体中の鉄筋に埋設センサを設置し、1日2度の海水噴霧環境下における自然電位の長期的な推移を追跡した。小型試験体を用いた検討の結果、本研究の曝露環境下においては、海水噴霧終了後に自然電位は最も卑になることを確認するとともに、

この時刻における自然電位により、ASTM基準に準じた腐食の判定が可能であることを確認した。

大型試験体による検討において、センサを設置した場合における自然電位の測定値群は、部材内のかぶり直下の鉄筋のすべての箇所の自然電位である正規母集団から取り出されものとしてよいことを確認した。この結果、測定値群から自然電位の母集団の平均値を推定できること、自然電位の母集団の平均値の95%信頼区間の下限値に着目し、ASTM基準を用いることにより、かぶり直下の鉄筋すべての箇所の50%が腐食した時刻を評価することが概ね可能であることを確認した。また、区間最小値による等電位線により局所的な腐食箇所を視覚的に捉えられることを確認した。さらに、部材中に設置されたセンサ個数と、推定の信頼性の関係を、推定の不確かさを指標として算出した。

最後に、自然電位と分極抵抗を組み合わせた鉄筋腐食判定は概ね正確であることを確認した。

9. あとがき

本研究の成果により、栈橋RC上部工の腐食モニタリングを行うための端緒についたと言える。今後、以下に示

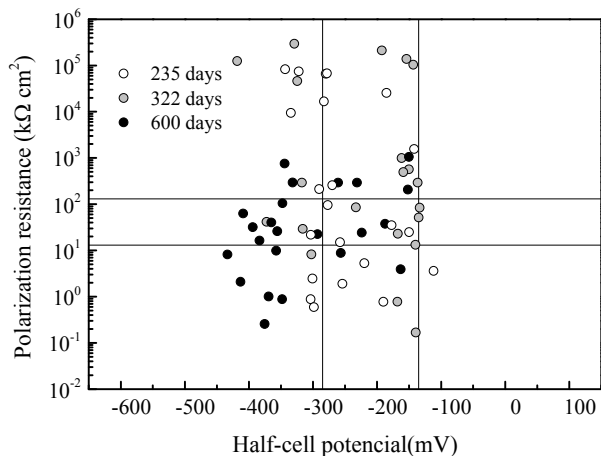


図-7.16 初期塩分あり試験体の自然電位と分極抵抗の関係

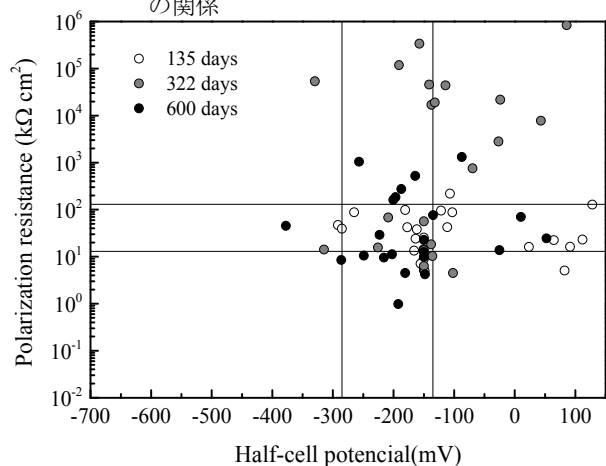


図-7.17 初期塩分なし試験体の自然電位と分極抵抗の関係

す課題の検討が必要であると考える。

(1)本研究において腐食を確認した鉄筋のかぶり厚は、小型試験体で10mm、版試験体で20mmであり、港湾施設における鉄筋コンクリートの最小かぶり厚の70mmとは大きく異なる。かぶり表層より海水が侵入すると、かぶり厚さが小さい場合、モニタリング開始から間もなく、水分および塩分が鉄筋位置にまで到達し、さらに、乾燥時には外気より酸素の供給が鉄筋位置まで容易に供給され、きわめて腐食しやすい環境であると考えられる。この一方で、かぶり厚が70mm以上ある場合、かぶり厚が10mm、20mmの場合と比較して水分、塩分、酸素の鉄筋位置までの供給に時間を要すると考えられ、腐食の発生の様相や、進行の速度が大きく異なると考えられる。実験においては、かぶり厚を70mm以上とし、曝露期間をより長く設定した検討や、実構造物を対象としたモニタリング実証実験による検証が今後必要である。

(2)今回の曝露環境においては、シャワーによる海水が試験体に噴霧され、かぶり表面に概ね一様に海水が付着する環境であった。実構造物においては、波や飛沫のかぶり表面への付着性状が同一部材中で異なると予想される。この結果、鉄筋位置に至るまでの塩分侵入時刻が部分的に異なり、腐食分布が本研究結果と比較して、より局所化すると思われる。この場合に、自然電位の測定結果から母集団への推定結果の精度が、本研究結果と比較して低下する可能性があり、センサの配置や、自然電位の取得時刻について再検討が必要である。今後の実験においては、かぶり面への海水の供給性状を一様にはさせない工夫を施すことや、実構造物を対象とした実証実験が今後必要である。

(3)今回対象とした試験体では、格子状に鉄筋を配置し、かつ、部材内の鉄筋のかぶり厚さがすべて20mmとなるように製作した。床板の実構造物においては、格子状に鉄筋が配置されるが、交わる鉄筋の一方は必ず他方よりも、かぶり表層側に配置されるため、配筋状態が若干異なる。また、はり部材にセンサを設置する場合は、コンクリート表層に最も近いスターラップに設置するのがよいと思われる。この場合においてもセンサ設置状況が版試験体とは異なっているため、実構造物に近い配筋を有する部材を対象とした実験が必要である。

(4)モニタリング初期で、特にコンクリートが打設されて間もない時期においては、鉄筋腐食がなくとも自然電位は、比較的卑側にあるため、腐食判定を開始すべき時刻は今回100日後としたが、かぶり厚の大きさや、部材への海水の供給性状、モニタリング開始時期が異なる場合には、100日後とは限らない。例えば、初期欠陥などが要因で、モニタリング当初から腐食した場合においては、自然電位の値による鉄筋腐食の判定が不能となる。分極抵抗との併用や、自然電位のみでの測定の場合は、初期より腐食した場合には貴に推移しないと思われるため、他のセンサの動向を伺いつつ、腐食の判定を行えばよいと思われるが、検証が必要である。

(5)局所的に配置したセンサにより、コンクリート表層から最も近い部分に配置された部材中のすべての鉄筋の分極抵抗を推定するには、母集団の適切な分布を与えなくてはならない。本研究で検討した範囲では適切な分布を提案することができなかったが、今後種々の分布形状での検討を加え、母集団の平均値の推定が可能となれば、自然電位と分極抵抗を組み合わせた検討も可能となる。

参考文献

- 伊藤伍郎 (1969) : 腐食科学と防食技術, コロナ社, p.77
- 公益社団法人土木学会 (2013) : コンクリート標準示方書
[設計編]
- 社団法人日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 独立行政法人港湾空港技術研究所 (2007) : 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, p.42
- 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三 (1993) : コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断, p.86
- 永井一徳, 宮里心一, 江里口玲, 佐藤達三(2011) : コンクリート中鉄筋の腐食検知センサの実用化に向けた開発研究, 社団法人日本材料学会, 学術講演会講演論文集, No.60, pp.283-284
- 田村博, 永山勝, 下澤和幸 (1993) : 偽参照電極使用埋設二極プローブによる鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論報告集, Vol.15, No.1, pp.777-782.
- 中村一貴, 古谷宏一, 横田弘, 橋本勝文 (2013) : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.844-849.
- 中村英佑, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村雅之, 井川一弘 (2008) : 塩害環境下にあるコンクリート構造物への自然電位法の適用に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.64, No.1, pp.263-275.
- 下澤和幸, 田村博, 永山勝 (1994) : 小型埋設センサーによる鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.793-795.
- 中川防蝕工業 (1989) : 塩害環境にあるコンクリート構造物の鉄筋腐食診断システム (RC-NICE System), 中川防蝕技報, No.37
- 西田 孝弘, 岩波 光保, 原田 健二, 加藤 絵万 (2012) : 電気化学的腐食モニタリングによる鉄筋コンクリート部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.862-867
- CEB Working Party (1998), Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion, CEB Bulletin No.243
- Nagayama, M. Tamura, H. and Tanigawa, Y. (1998), WATER-SOLUTION EXPERIMENTS ON FUNDAMENTAL PERFORMANCE OF A MINI SENSOR FOR CORROSION MONITORING OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE, Journal of

Structural and Construction Engineering, No.510, pp.23-28
ASTM C876-91(1999), Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462

付録A1

大型試験体：初期塩分ありの場合の自然電位の推移

(センサ位置記号は図-4.2 参照のこと。センサ位置 A1 のデータはすべて欠損)

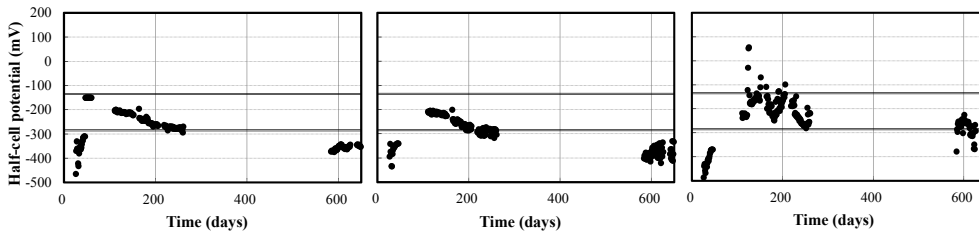


図-A.1 自然電位の推移(A2) 図-A.2 自然電位の推移(A3) 図-A.3 自然電位の推移(A4)

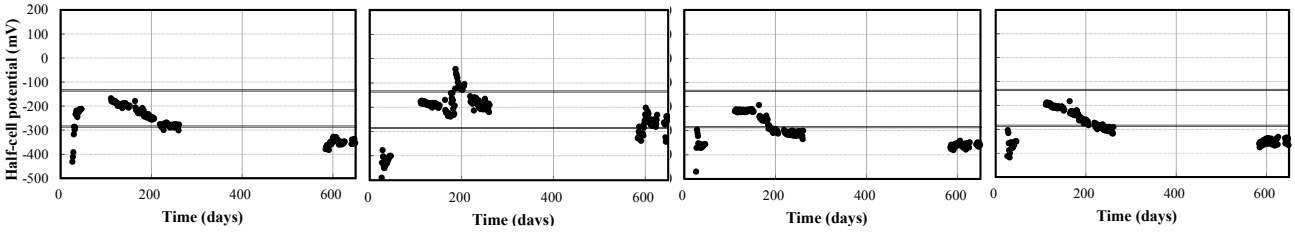


図-A.4 自然電位の推移(B1) 図-A.5 自然電位の推移(B2) 図-A.6 自然電位の推移(B3) 図-A.7 自然電位の推移(B4)

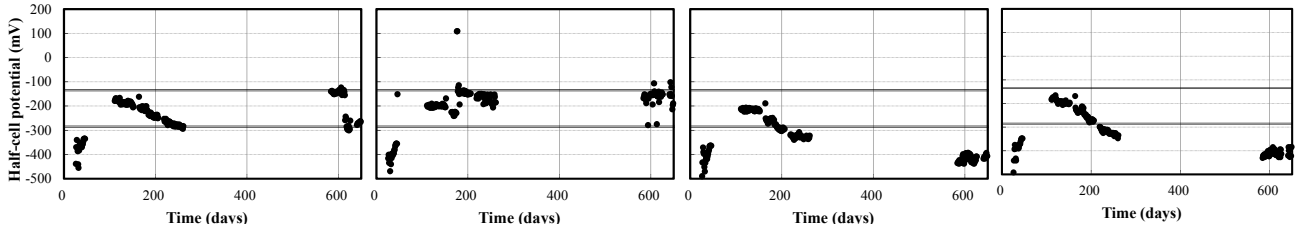


図-A.8 自然電位の推移(C1) 図-A.9 自然電位の推移(C2) 図-A.10 自然電位の推移(C3) 図-A.11 自然電位の推移(C4)

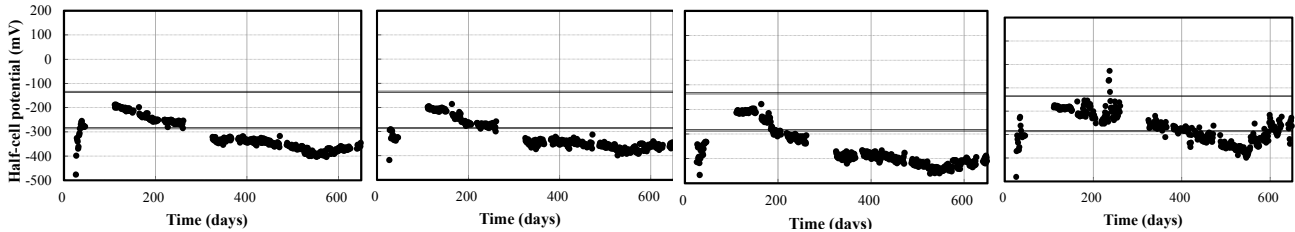


図-A.12 自然電位の推移(D1) 図-A.13 自然電位の推移(D2) 図-A.14 自然電位の推移(D3) 図-A.15 自然電位の推移(D4)

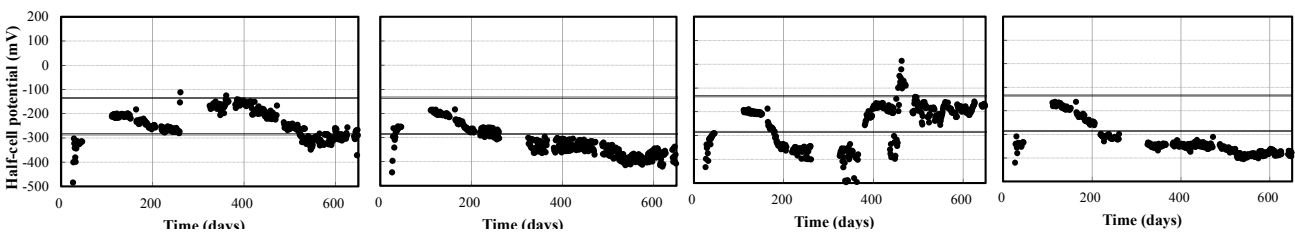


図-A.16 自然電位の推移(E1) 図-A.17 自然電位の推移(E2) 図-A.18 自然電位の推移(E3) 図-A.19 自然電位の推移(E4)

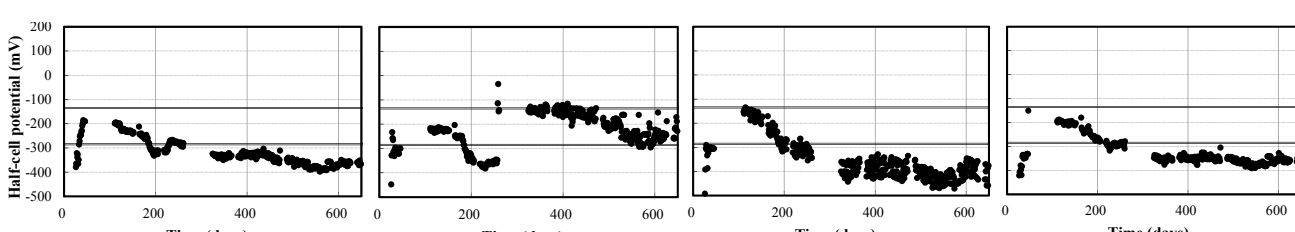


図-A.20 自然電位の推移(F1) 図-A.21 自然電位の推移(F2) 図-A.22 自然電位の推移(F3) 図-A.23 自然電位の推移(F4)

大型試験体：初期塩分なしの場合の自然電位の推移

(センサ位置記号は図-4.2 参照のこと。センサ位置 B1~B4 のデータはすべて欠損)

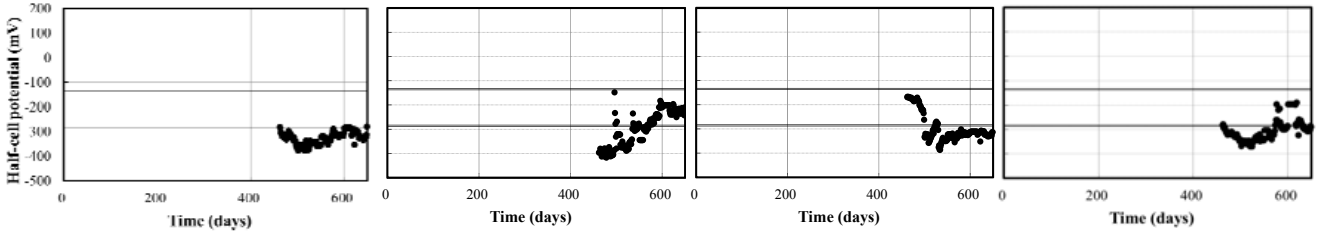


図-A.25 自然電位の推移(A1) 図-A.26 自然電位の推移(A2) 図-A.27 自然電位の推移(A3) 図-A.28 自然電位の推移(A4)

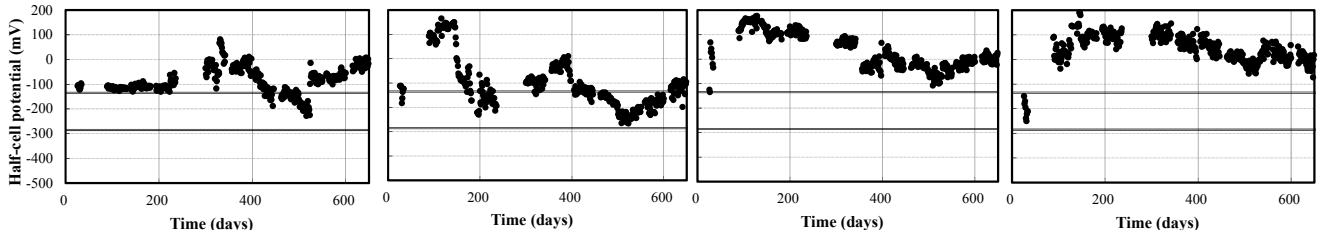


図-A.29 自然電位の推移(C1) 図-A.30 自然電位の推移(C2) 図-A.31 自然電位の推移(C3) 図-A.32 自然電位の推移(C4)

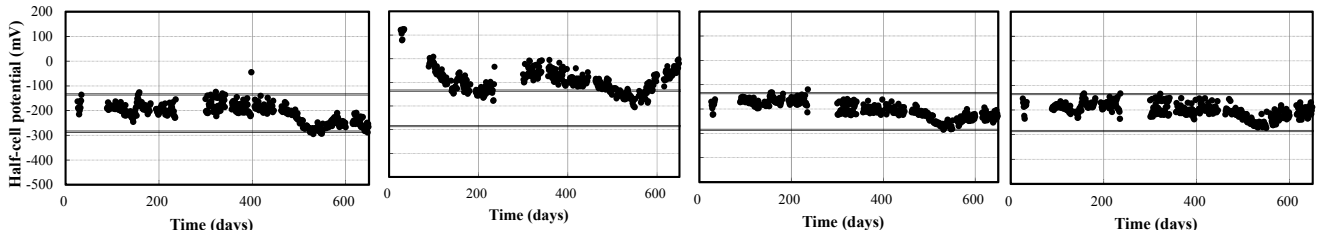


図-A.33 自然電位の推移(D1) 図-A.34 自然電位の推移(D2) 図-A.35 自然電位の推移(D3) 図-A.36 自然電位の推移(D4)

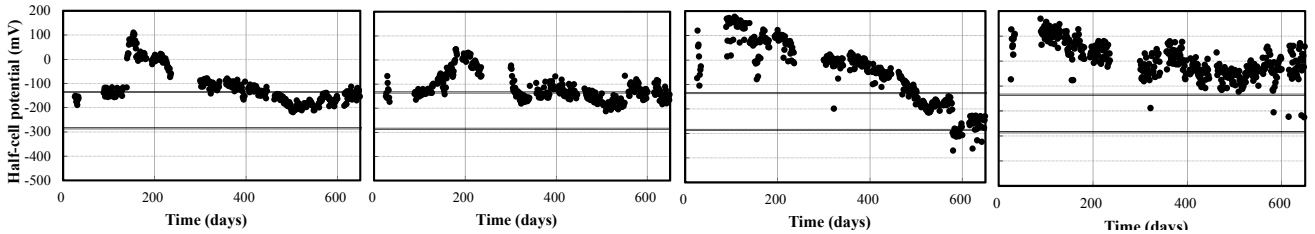


図-A.37 自然電位の推移(E1) 図-A.38 自然電位の推移(E2) 図-A.39 自然電位の推移(E3) 図-A.40 自然電位の推移(E4)

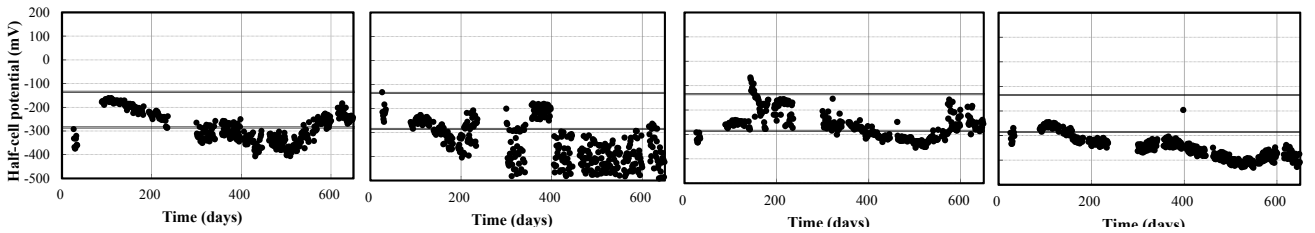


図-A.41 自然電位の推移(F1) 図-A.42 自然電位の推移(F2) 図-A.43 自然電位の推移(F3) 図-A.44 自然電位の推移(F4)

港湾空港技術研究所資料 No.1294

2014. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社ワコー

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。