

論文 棧橋上部工中铁筋の電気化学的特性に及ぼす下部工に適用された流電陽極の影響に関する実験的検討

原 将之^{*1}・橋本 永手^{*2}・山路 徹^{*3}・濱田 秀則^{*4}

要旨：上部工が鉄筋コンクリート部材、下部工が鋼部材で構成される棧橋を模擬した試験体を海水が干満する水槽に設置し、海中部の鋼材に適用した流電陽極方式の電気防食が上部工のコンクリート中铁筋に及ぼす影響を調査した。試験の結果、潮位の上昇とともに流電陽極から生じた電流（防食電流）のコンクリート中铁筋への流入が認められ、潮位変動と連動してコンクリート中铁筋の電位と流入電流が経時的に変化した。また、電気防食効果を評価する復極量試験では、マクロセルの有無や干満1サイクルあたりの海水浸漬時間の違いから、鉄筋の位置する深度によって異なる復極挙動が認められた。

キーワード：湿潤環境、コンクリート、干満部、流電陽極、電気防食、マクロセル、復極量

1. はじめに

港湾鋼構造物では、海中部の鋼部材の防食対策として電気防食工法が広く適用されている。電気防食工法は、流電陽極方式と外部電源方式の二つに大別されるが、港湾鋼構造物には維持管理が容易なアルミニウム合金陽極（以下、流電陽極とする）を用いた、流電陽極方式の電気防食工法が適用されるのが一般的である¹⁾。港湾施設には用途や目的、環境条件によって様々な形式の構造物が存在するが、上部工コンクリートの下端レベルがH.W.L.付近またはH.W.L.以下に位置する構造物も存在する。このような構造物の場合、潮位変動によって干満部のコンクリート部材が一時的に海水中へ没するため、海中部に設置した流電陽極の防食電流がコンクリート内部の鉄筋へ流入することがある²⁾。下部工の鋼材に電気防食を適用する場合、干満部のコンクリート中铁筋は電気防食設計では防食対象外としているが、構造上、海中部の鋼材と上部工コンクリート中铁筋の電氣的絶縁を確保することが困難である。一方で、上部工コンクリートの塩害劣化対策として電気防食工法を適用する場合もあり、電気防食設計上の観点から、海中部の鋼材に適用した流電陽極がコンクリート中铁筋へ及ぼす影響を加味することは合理的であると考えられる。防食電流の流入によるコンクリート中铁筋近傍の溶存酸素濃度低下や電気防食による副次的効果（コンクリートのpH上昇、塩化物イオン濃度の減少）などを適切に把握し、上部工に適用する電気防食システムの回路構成、陽極配置、通電条件など、電気防食設計を最適化することができれば、電気防食工法のコスト低減も期待できる。以上のことから、上部工コンクリートに対して最適な電気防食設計を検討する場

合、海中部に設置された流電陽極がコンクリート中铁筋へ及ぼす電気防食効果を評価することは重要であると考えられるが、その報告例は少ないのが現状である²⁾。また、鋼材が海水とコンクリートに接し、さらに乾湿繰返しや電気防食の影響を受ける場合、コンクリート中で鉄筋が位置する環境区分や深度（海面からの高さ）によって劣化因子の拡散性状が異なるため、鉄筋の腐食特性に差異が生じる可能性がある。干満部のように、鉄筋周囲の環境変化が大きな場合はマクロセルの形成も懸念されるため、潮位に応じて各深度の鉄筋腐食の評価が必要である。本研究では、鉄筋コンクリート部材と鋼部材の複合構造となる棧橋を模擬した試験体を海水が干満する水槽に暴露し、海中部の鋼材に対する流電陽極方式の電気防食試験を行った。そして、潮位と鉄筋の設置深度毎に、鉄筋の電位と流出入する電流の関係を整理することで、流電陽極の防食電流がコンクリート中铁筋および海中部の鋼材へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

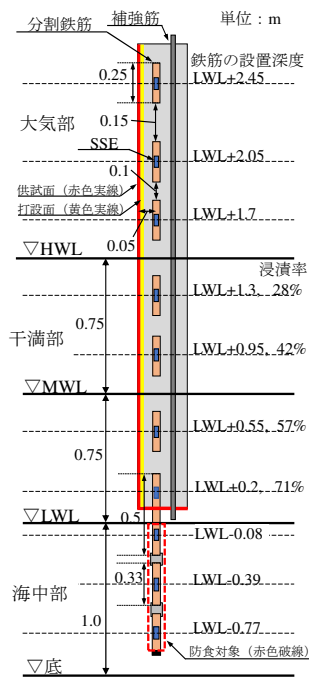
試験体の概要を図-1に示す。試験体は港湾環境にある棧橋を想定しており、鉄筋コンクリートと裸鉄筋の複合構造とした。コンクリート部の高さは約2600mm、横幅は約100mm、奥行きは約150mm、裸鉄筋部の高さは約1000mmである。セメントは港湾構造物で広く用いられる高炉セメントB種とした。細骨材には天然砂、粗骨材には碎石（最大寸法20mm）を用いた。また、水セメント比は0.50、目標スランプは10±2.5cm、空気量は4.5±1.5%とした。コンクリートは打設時に所定量の塩化ナ

*1 (株) ナカボーテック 技術開発センター (港湾空港技術研究所 材料研究グループ 依頼研修員) (学生会員)

*2 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 材料研究グループ 博士(工学) (正会員)

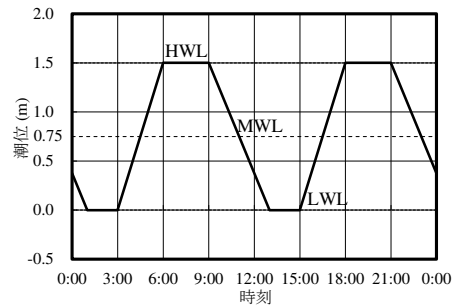
*3 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 材料研究グループ長 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門教授 博士(工学) (フェロー会員)



図－1 試験体概要

トリウムを練混ぜ水に溶解させることで、 10 kg/m^3 の塩化物イオンを含有させた。試験片は各環境区分における鉄筋の電気化学的特性を評価するため、分割鉄筋（材質 SS400）を使用した。分割鉄筋はサンドブラスト処理により表面の黒皮を取り除いた後、海水を週に 1 回噴霧し、屋内大気中で 2 週間暴露することで、予め発錆処理を行った。コンクリート中には $\phi 19 \times 250 \text{ mm}$ （6 本）、コンクリート／裸鉄筋部は $\phi 19 \times 500 \text{ mm}$ （1 本）、裸鉄筋部は $\phi 19 \times 330 \text{ mm}$ （2 本）の分割鉄筋を設置した。試験期間中、鉄筋に流出入する電流を計測するため、各鉄筋の測定線にシャント抵抗（ 1Ω ）を接続し、端子電圧をデータロガーで 10 分毎に自動計測した。そしてシャント抵抗両端の電位差を、シャント抵抗の抵抗値で除して電流値に換算した。鉄筋電位の計測は、内部溶液が飽和 KCl 溶液の銀塩化銀電極（SSE）を使用し、SSE を鉄筋近傍に設置することで電流と同様に自動計測した（以後、本論文に記載する SSE の内部溶液は全て飽和 KCl 溶液とする）。なお、全ての鉄筋は測定線を介して短絡することで導通させている。コンクリートを打設・脱型後、28 日間養生した後、打設面と試験体設置時の底面を除く 4 面をエポキシ樹脂にて被覆した。図－1 中に打設面を黄色実線、供試面を赤色実線で示す。図中の HWL は暴露した水槽での最高潮位、LWL は最低潮位、MWL は HWL と LWL の中間の潮位であり、鉄筋の設置深度は全て LWL 基準として表記した。干満部に位置する鉄筋の電気化学的特性は海水の浸漬時間が関与すると予想されるため、干満部の鉄筋には浸漬率という指標を採用した。浸漬率の定義は式(1)のとおりである。



図－2 干満サイクル

$$\text{浸漬率}(\%) = \frac{\text{水位が鉄筋の電位計測点よりも高いときの合計時間}}{24 \text{ 時間}} \times 100 \quad (1)$$

式(1)より、LWL+1.3 m、+0.95 m、+0.55 m、+0.2 m に位置する鉄筋の浸漬率はそれぞれ 28, 42, 57, 71% となる。

2.2 暴露環境

試験体は港湾空港技術研究所の屋外にある水槽に暴露した。水槽は隣接する久里浜湾（神奈川県横須賀市）の自然海水を利用し、1 日に 2 回干満が繰り返される環境である。干満サイクルを図－2 に示す。LWL から水槽の底までの深さは 1 m、干満の潮位差は 1.5 m である。

2.3 試験条件

電気防食試験の電流供給方式は流電陽極方式とし、流電陽極にはアルミニウム合金陽極を用いた。本試験では、現場で広く適用される電気防食設計条件での電気防食効果を検証するために、現行の設計方針に準拠した¹⁾。防食対象は海中部の鉄筋（LWL 以下の鉄筋、図－1 中の赤色破線部）のみとし、防食電流密度は清浄海域の海水中で採用される 100 mA/m^2 とした。なお、実際の電気防食設計では陽極形状によって発生電流を決定するが、本試験では陽極と測定線との間に接続した可変抵抗器によって発生電流を調整した。可変抵抗器の設定値は、陽極電位（ -1000 mV vs. SSE ）と陰極電位（ -750 mV vs. SSE ）との電位差（ 250 mV ）を所要防食電流（ $100 \text{ mA/m}^2 \times 0.043 \text{ m}^2 = 4.3 \text{ mA}$ ）で除した値（約 58Ω ）とした。

3. 結果と考察

3.1 電気防食設計条件の確認

流電陽極方式による電気防食系は式 (2) で表すことができる。

$$\begin{aligned} E_c - E_a &= I \cdot R_s \\ &= i_c \cdot S_c \cdot R_s \end{aligned} \quad (2)$$

E_c : 鉄筋電位 (mV) E_a : 陽極電位 (mV)
 I : 陽極発生電流 (mA) i_c : 鉄筋電流密度 (mA/m^2)
 S_c : LWL 以下の鉄筋表面積 (m^2)
 R_s : 可変抵抗器の設定値 (Ω)

防食対象である LWL 以下の鉄筋表面積 S_c は一定であり、陽極電位 E_a も通電開始直後は大きな変動が無いため一定であると見做すと、式 (2) は鉄筋電位 E_c と鉄筋電流密度 i_c を変数とする線形関数であり、二次元での直交座

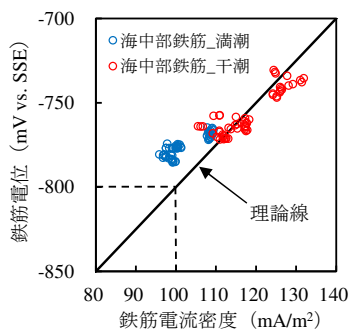


図-3 海中部の鉄筋電位と鉄筋電流密度の関係

標系で表すと図-3 に示す理論線となる。

満潮時に流電陽極による通電を開始後、干満 1~3 サイクル目における干潮位のための鉄筋電位、鉄筋電流密度のデータを図-3 にプロットすると、多少のばらつきは認められるものの理論線上を推移することが確認された。これは電気防食系が設計どおりに機能していることを示唆するものである。同様に、干満 1~3 サイクル目における満潮位のためのデータは図-3 に示すとおりであり、理論線を逸脱するプロットが多く認められた。理論線よりも貴側にプロットが位置し、同一の電位に対する鉄筋電流密度が減少していることから、防食電流の一部が防食対象外（コンクリート中鉄筋）に流れていると読み取ることができる。

3.2 通電開始後の鉄筋電位・電流密度

海中部に設置した流電陽極による通電開始から 20 日間における鉄筋電位と鉄筋電流密度の経時変化を図-4、図-5 に示す。なお、本報告では、鉄筋へ流入する電流（カソード電流）はプラス、鉄筋から流出する電流（アノード電流）はマイナスの符号を付けて示した。鉄筋電位および鉄筋電流密度は、全鉄筋で干満サイクルと連動して、周期的に変動を繰り返した。図-4 より、鉄筋電位の経時的な挙動は二つのタイプに分かれており、LWL+1.3m 以上の鉄筋では、干潮時と満潮時の電位差が終始一定で推移した。これに対し、LWL+0.95 m 以下の鉄筋では、電位差が減少しながら徐々に電位が卑化し、一定の電位に収束する傾向がみられた。これは、浸漬率 42%以上の鉄筋は流電陽極からの電流の流入時間が長く、経時的にカソード分極が進行したため、電位が卑化したと考えられる。図-5 の鉄筋電流密度のうち、海中部の鉄筋には通電開始直後に防食電流密度 (100 mA/m²) 以上の電流が流入しているものの、時間経過とともに鉄筋へ流入する電流密度が徐々に低減し、通電開始後 20 日時点では 100 mA/m² 以下まで低減した。このときの海中部の鉄筋電位は約 -800 mV vs. SSE であり、海水中の鋼の防食電位である -725 mV vs. SSE を満足した。海中部以外の鉄筋電流密度については、通電開始直後に若干の変動はあるものの、通電開始から 20 日後まで概ね同じ電流密

凡例表記：環境区分 LWL 基準での鉄筋設置深度 (m) - 浸漬率 (干満部のみ)

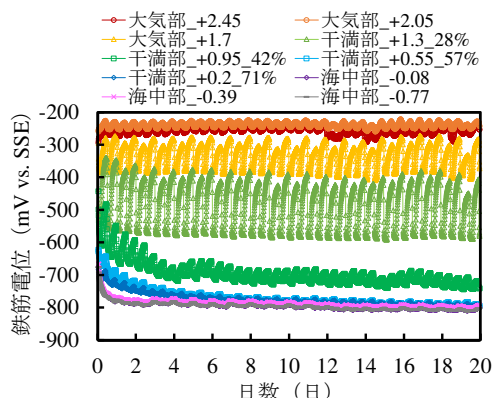


図-4 通電開始後の鉄筋電位の経時変化

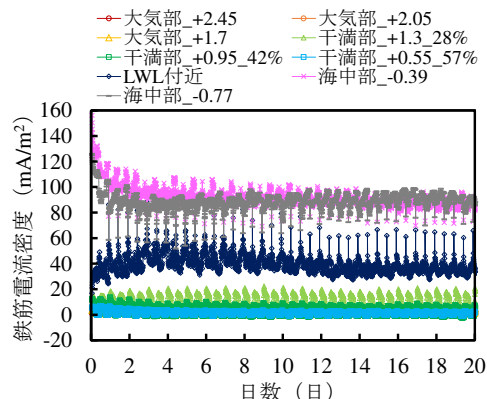


図-5 通電開始後の鉄筋電流密度の経時変化

度で推移した。

通電開始から 18 日目の 24 時間における鉄筋電位の経時変化を図-6、大気部・干満部の鉄筋電流密度、LWL 付近・海中部の鉄筋電流密度の経時変化をそれぞれ図-7、図-8 に示す。また、同時期の鉄筋電位と鉄筋電流密度の深度分布をそれぞれ図-9、図-10 に示す。なお、満潮時の鉄筋電位および鉄筋電流密度の深度分布は 19 時 30 分時点、干潮時は 2 時時点のデータを用いた。図-6、図-9 より、鉄筋電位について見ると、干満部の HWL~MWL において、潮位変動に伴う電位変化が大きく、満潮時は卑化し、干潮時は貴化する挙動を示した。このときの鉄筋電流密度は図-7、図-10 より、干潮時に比べて満潮時のカソード電流密度が増加した。これは、満潮時に干満部のコンクリートが水没したことにより、流電陽極から生じた電流が HWL~MWL の鉄筋へ多く流入する一方、干潮時は電流の流入が抑制されたためと考えられる。LWL+1.3 m の鉄筋は、潮位変動に伴う電位変化が最大となった。この理由は次のように考える。図-6、図-9 より、HWL 以下の領域で満潮時に最も貴電位を示す鉄筋は LWL+1.3 m であった。陽極発生電流量が式(2)に従うとすれば、満潮時は HWL 以下の鉄筋で流電陽極との電位差が最大となる LWL+1.3 m の鉄筋へ多くの防食電流が流入したため、鉄筋電位および電流密度の変化が顕

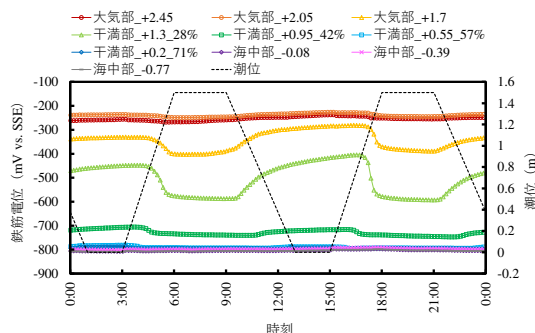


図-6 24時間での鉄筋電位の経時変化

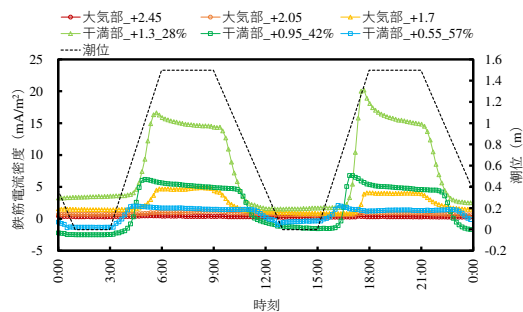


図-7 24時間での鉄筋電流密度の経時変化
(大気部・干満部)

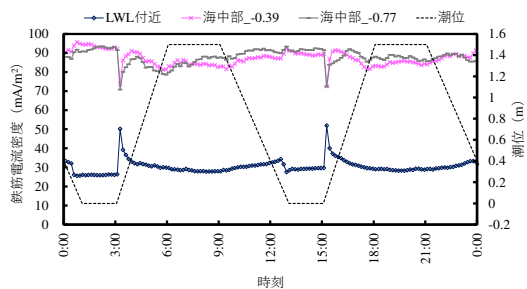


図-8 24時間での鉄筋電流密度の経時変化
(LWL 付近・海中部)

著に現れたものと推察される。図-6, 図-9 より, LWL+1.7m の鉄筋は大気部であるが, 干満に伴う電位変化量が干満部における LWL+1.3 m の鉄筋に次ぐ大きさであった。鉄筋の電位は短絡させる他の鉄筋の電位によって変化するため, 電位変化量が大きな LWL+1.3 m の鉄筋の影響を受けて, LWL+1.7 m の鉄筋も電位が変化したものとする。

図-8 より, 海中部の鉄筋は干潮位から潮位が上昇するときに LWL-0.39 m の鉄筋と LWL-0.77 m の鉄筋へ流入する電流密度が 20 mA/m² 程度減少し, LWL 付近の鉄筋へ流入する電流密度が増加する。これは潮位が上昇することで, 海水へ浸漬する面積が増えた LWL 付近の鉄筋への防食電流の流入が瞬間的に増加したためである。図-7, 図-10 より, 満潮時には全ての鉄筋で電流の流入傾向を示した。しかし, 干潮時には LWL+0.95 m, +0.55 m の鉄筋で電流の流出傾向を示し, コンクリート中鉄筋間でのマクロセルの形成が認められた。本試験と同様に実構造物においてもマクロセル腐食が生じる場合は対策が

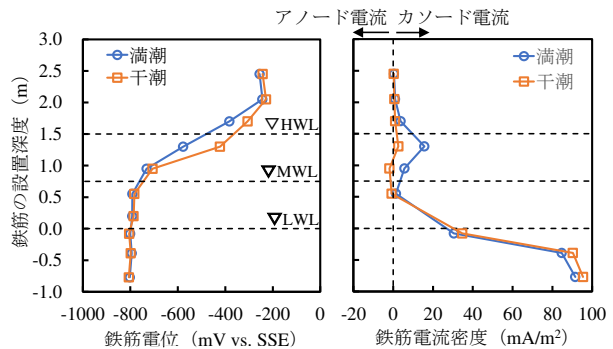


図-9 鉄筋電位の深度分布
(通电時)

図-10 鉄筋電流密度
の深度分布
(通电時)

必要であるため, マクロセルが生じる原因の解明については今後の課題としたい。

3.3 電気防食効果の評価

(1) 復極量

海中部の流電陽極がコンクリート中鉄筋の防食効果に及ぼす影響を評価するため, 復極量試験を実施した。コンクリート中鉄筋の電気防食における設計施工指針では, 防食効果を判定する管理指標として復極量を用いることを定めている³⁾。復極量とは, 式 (3) に示すように通电時の鉄筋のインスタントオフ電位 (IR ドロップを除いた真の電位, 通电停止から 0.3 ms 後に計測) と通电停止後の鉄筋のオフ電位との差で表され, 100 mV 以上であれば防食効果ありと判定される。

$$\Delta E = E_{of} - E_{io} \quad (3)$$

ΔE : 復極量 (mV) E_{of} : 鉄筋のオフ電位 (mV)
 E_{io} : 鉄筋のインスタントオフ電位 (mV)

オフ電位の計測は, 一般には通电停止から 24 時間後を基準としているが, 本試験ではインスタントオフ電位の計測後に自動計測した鉄筋電位をオフ電位とした。実構造物では, 海中部の流電陽極の通电を任意に停止することができないため, 満潮時 (没水時) の防食効果を復極量で判定するのは困難であるが, 本試験は干満部のコンクリート中鉄筋の復極挙動を把握することを目的とするため, 満潮時に鉄筋のインスタントオフ電位を測定後, 通电を停止してオフ電位の経時変化をモニタリングした。復極中の満潮時と干潮時に測定した鉄筋電位の深度分布を図-11, 鉄筋電流密度の深度分布を図-12 に示す。データは流電陽極の通电停止から 10 分 (満潮位), 6 時間 (干潮位), 12 時間 (満潮位), 18 時間 (干潮位) 経過後のものである。図-11 より, 潮位に関わらず大部分の鉄筋電位が経時的に貴化する傾向を示し, その変化量は HWL 付近と LWL 以下の領域で顕著であった。また, 図-12 より, 深度によって電流の流出および流入傾向を示す鉄筋がみられ, 海中部と干満部にマクロセルの形成が認められた。12 時間後 (満潮位), 18 時間後 (干潮位)

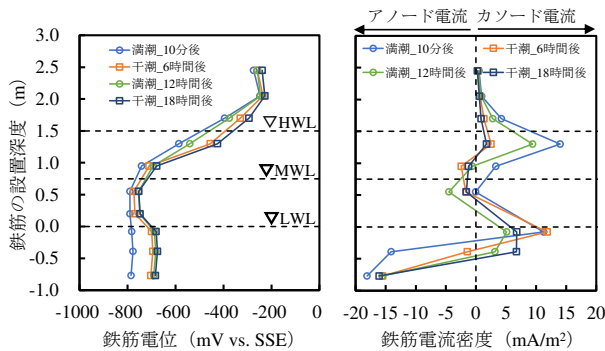


図-11 鉄筋電位の
深度分布
(復極時)

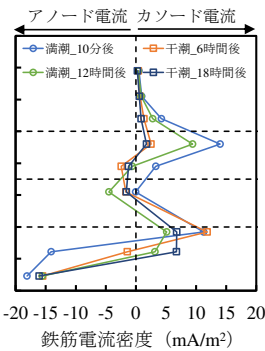


図-12 鉄筋電流密度
の深度分布
(復極時)

のデータでは、潮位によらず LWL+0.95 m, +0.55 m, -0.77 m の鉄筋がアノード部、LWL+1.3 m 付近、LWL 付近の鉄筋がカソード部となる傾向であった。満潮時には LWL 付近の鉄筋のカソード電流密度が減少し、干満部の鉄筋のカソード電流密度が増加する傾向を示した。以上の結果から、通電停止後の復極中は全鉄筋で電位の貴化が認められるが、同時にマクロセルも生じているため、各鉄筋で復極過程が異なると考えられる。

通電停止から 48 時間までのコンクリート中鉄筋の復極量の経時変化を観測した。図-13 が大気部、図-14 が干満部のデータである。図-13 より、大気部に位置する LWL+2.45 m, +2.05 m の鉄筋 2 深度は、干満による若干の電位変動は認められるものの、計測期間中の復極量の増減はほぼ横ばいであった。この領域は満潮時に防食電流の流入量が少なく、カソード分極量が小さいためと考えられる。

LWL+1.7 m, +1.3 m における鉄筋は、干満と同期して

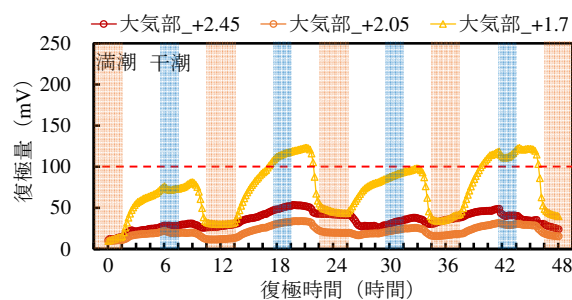


図-13 復極量の経時変化 (大気部)

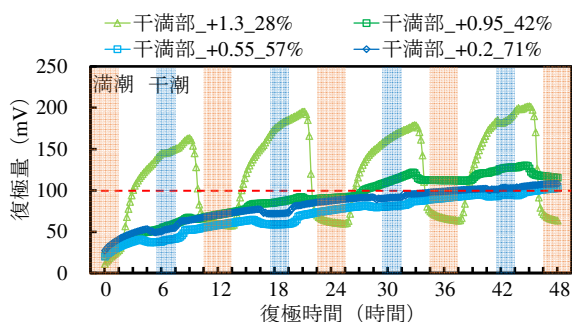


図-14 復極量の経時変化 (干満部)

復極量が変動した。この復極量の変動は、鉄筋間で生じるマクロセルの影響によるものと考えられる。LWL+1.3 m の鉄筋は満潮時に海中部の鉄筋をアノード部とするマクロセル電流の流入量が最大となるため、潮位の上昇に伴ってカソード反応が進行し、鉄筋電位が大幅に卑化する。その結果、復極量は干潮時に増加し、満潮時に減少する挙動を繰り返すものとする。復極量に対するマクロセルの影響を排除するために、鉄筋の短絡を解除した試験を行った。流電陽極による通電停止と同時に、鉄筋同士の測定線の短絡を全て解除したときの鉄筋電位、鉄筋電流密度の経時変化を図-15 に示す。なお、干満はモニタリングを行った全期間で稼働させている。LWL+1.7 m, +1.3 m の鉄筋における復極挙動に着目すると、図-13、図-14 に示すように鉄筋間を短絡した場合は干満と同期した電位変動が認められたが、図-15 の上図では短絡解除を境に干満と同期した電位変動が観測されず、鉄筋電位が一律に貴化する傾向を示した。これは復極中に生じる干満と同期した鉄筋の電位変動が、深度方向の鉄筋間で生じるマクロセルの影響であることを示唆するものである。

図-14 より、LWL+0.95 m 以下 (浸漬率 42%以上) の鉄筋は、干満による電位変動は小さいものの、復極量は緩やかに増大する傾向を示した。この領域は浸漬率が高く、コンクリート中は高含水状態であると想定され、復極速度が緩やかになったものと考えられる^{3),4)}。図-13 の LWL+2.45 m, +2.05 m に位置する大気部の鉄筋では、24 時間以降に復極量の増加が認められなかったが、LWL+0.95 m 以下の鉄筋は通電停止後 48 時間までは右肩上がりで増加する傾向であった。したがって、コンクリ

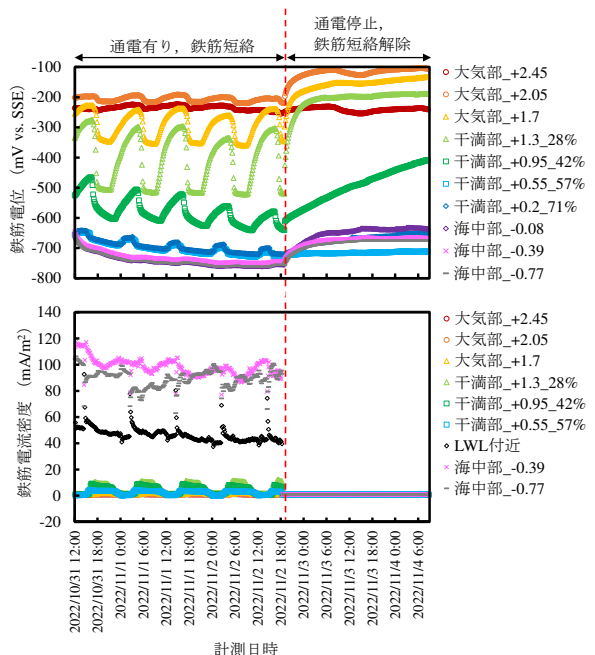


図-15 鉄筋間の短絡を解除したときの鉄筋電位
(上)・鉄筋電流密度 (下) の経時変化

ート中であっても浸漬率が高い鉄筋では、満潮時の防食電流流入により、ある程度の防食効果があるものと推察される。

図-13、図-14より、本試験では、潮位および復極時間によって復極量基準（100 mV）を満たす時間帯と満たさない時間帯が確認された。復極量からコンクリート中鉄筋の防食状態を判定するには、マクロセルの影響とコンクリートの含水状態による復極速度の変化を考慮した評価が望ましいと考えられるため、今後更なる検討が必要である。

(2) コンクリート中での防食電位

電気防食が適用された湿潤環境下にあるコンクリート中鉄筋に対し、電位の復極速度が極めて緩やかで長時間を要しても復極量が 100 mV に到達しない場合には、復極量とは異なる別の防食管理指標を設定しても良いとされており³⁾、その一つとして防食電位がある。コンクリート内部に存在する鋼材の防食電位として-790 mV vs. CSE が定められており³⁾、温度 25℃における SSE[sat. KCl aq.]基準に換算すると⁵⁾、-670 mV vs. SSE となる。これより、満潮時におけるコンクリート中鉄筋の防食効果を防食電位によって判定した。通電開始から 20 日経過時点の満潮時に計測したインスタントオフ電位と、電気防食試験を開始する前の干潮時と満潮時に計測した自然電位を図-16に示す。図-16より、コンクリート中の全鉄筋のインスタントオフ電位は、試験開始前の自然電位に比べて卑電位を示し、その傾向は HWL 以下の領域において顕著であった。通電前後で電位変化が最も大きかったのは、LWL+0.95 m の鉄筋であり、最大 270 mV 程度のカソード分極が確認された。鉄筋の設置深度（浸漬率）が大きいほど卑電位となる傾向であり、最も卑電位を示したのは LWL+0.2 m の鉄筋で-820 mV vs. SSE を示した。防食管理指標である-670 mV vs. SSE 以下を満足したのは、LWL+0.95 m 以深（浸漬率 42%以上）の 3 深度の鉄筋であり、LWL+0.95 m より上部にある鉄筋は基準値を満足しなかった。浸漬率が高い鉄筋は、海中部の鉄筋に適用した流電陽極からの防食電流の流入時間が長く、且つコンクリートの大気露出で防食電流の流入が無くなることで、鉄筋電位が復極する時間も短い。それに加え、高含水条件下でコンクリート中の溶存酸素濃度が低下しやすい環境であり、鉄筋電位は卑化しやすい条件となるため、防食管理指標を満足したものとする。

4. まとめ

鉄筋コンクリート（高炉セメント B 種、コンクリート部の下端が LWL 付近に位置）と裸鉄筋から成る試験体を干満環境に設置し、海中部の鉄筋に対して流電陽極方式の電気防食試験を実施した。本試験で得られた主な知

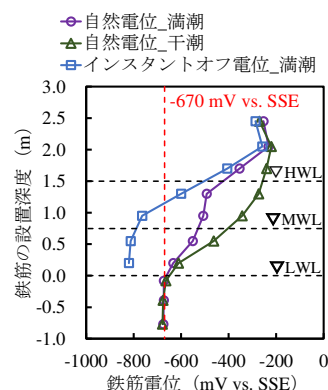


図-16 インスタントオフ電位の深度分布

見を以下に示す。

- (1) 潮位変動と同期して鉄筋電位と鉄筋電流密度が経時的に変化した。満潮時には流電陽極からの防食電流がコンクリート中鉄筋に流入することが確認された。
- (2) 通電停止後は、潮位によってアノード部とカソード部の位置が異なるマクロセルの形成が認められた。マクロセルの特性は潮位に大きく依存するため、復極量試験で防食判定をする場合は、経時的な復極挙動を確認する必要がある。
- (3) 鉄筋の位置する深度に応じて電位の復極挙動に差異が生じており、浸漬率が低い鉄筋は復極速度が速く、浸漬率が高い鉄筋は復極速度が遅くなる傾向が認められた。
- (4) コンクリート中鉄筋を防食電位によって評価した結果、設置深度（浸漬率）が大きい鉄筋ほどインスタントオフ電位は卑電位となる傾向となった。LWL+0.95 m 以深（浸漬率 42%以上）のコンクリート中鉄筋は防食管理指標である-670 mV vs. SSE を満足した。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2022 年版），2022
- 2) 浮島文香ほか：下部鋼構造物の流電陽極方式電気防食が上部鉄筋コンクリート構造物に及ぼす影響，材料と環境講演集，Vol.2011，pp.39-42，2011.5
- 3) (公社)土木学会：コンクリートライブラリー157 電気化学的防食工法指針，2020
- 4) 山本悟ほか：湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関する検討，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.3，pp.1-11，2011.9
- 5) 篠田吉央，望月紀保：鉄筋自然電位の測定温度に伴う照合電極間の電位換算について，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.66，VI-224，pp.447-448，2011.8