

論文 ニッケル被覆炭素繊維シートを用いた電気防食の電位分布特性に関する実験的検討

小林 俊秋^{*1}・中村 雅之^{*2}・堀越 直樹^{*3}

要旨：本稿では，ニッケル被覆炭素繊維シート陽極を用いた電気防食の電位分布特性について報告する。RC 供試体に二つの陽極を配置し，通電実験を行い，陽極配置や鋼材の電位変化量について検討した。その結果，電位分布の均一性は，電流密度の増加につれて向上し，塩化物イオン濃度の増加または陽極・陽極中心間距離が大きくなるほど低下した。このことから，電気防食効果を均一化させるために，相反する関係にある電流密度，陽極配置，塩化物イオン濃度の各要因を考慮して通電する必要があることがわかった。

キーワード：電位変化量，電流密度，陽極・陽極中心間距離，塩化物イオン濃度

1. はじめに

現在，塩害劣化したコンクリート構造物を電気防食する際に用いられる最も一般的な方法は，構造物に対し線形状のチタンや炭素などを陽極として，一定間隔に配置して外部から電流を流す外部電源方式である。この方法は，不均一な電位分布を引き起こす要因があり，それによる防食不良や過防食など様々な問題が生じる場合がある¹⁾。これは，陽極を一定間隔に配置した場合，一般的な構造物では陽極と鋼材の相互配置関係や鋼材の腐食状況により，コンクリート側の電圧降下や鋼材の分極抵抗が異なり，一様な流れが生じないためと考えられる。しかし，電位の分布現象はこれまでも十分に解明されておらず，電気防食を効果的に機能させるためには，これを解明する必要がある。筆者らは，これまでにニッケル被覆炭素繊維シート（以下 NICFS と記す）をバックフィル内に配置し，その高いイオン伝導性により，高性能な陽極ユニットを開発実用化している^{2), 3)}。

本実験では，均一な電位分布が得られる効率的な陽極配置の設計に役立てることを目的として，RC 供試体に 2 つの NICFS 陽極を配置し，通電および電位・電流分布測定を行い，防食効果の分布特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

要因と水準を表 - 1 に示す。陽極・陽極中心間距離（以下陽極中心間距離と記す）と電流密度（コンクリート表面積当たり）およびコンクリート中の塩化物イオン濃度を要因とし，環境温度を一定にする条件下で行った。腐食速度がコンクリート中の塩化物イオン濃度に依存するため，腐食が生じる限界濃度 0.4%～2.2%（セメント質量 %）⁴⁾を参考に 0.6%を基準にその 2, 3 倍の値とした。

電位分布が陽極中心間距離に依存するため，線状陽極の配置間隔 300mm⁵⁾を参考とした。

表 - 1 要因と水準

要因	水準
電流密度	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10mA/m ²
陽極中心間距離	300, 575, 850mm
塩化物イオン濃度	0.6, 1.2, 1.8(セメント質量%)

2.2 通電供試体

図 - 1 に示すように，コンクリート表面に 2 つの陽極を配置した供試体を製作した。供試体は，塩化物イオン濃度毎に 1 体，計 3 体製作し，600×1000×150mm の寸法形状とした。上段に D16×10 本@100mm と下段に D16×4 本@150mm で構成され，接触部に塩ビ管を挿入し互いに他の部分から電氣的に絶縁した。鋼材へ通過する電流を測定するための導線を各鋼材に接続した。

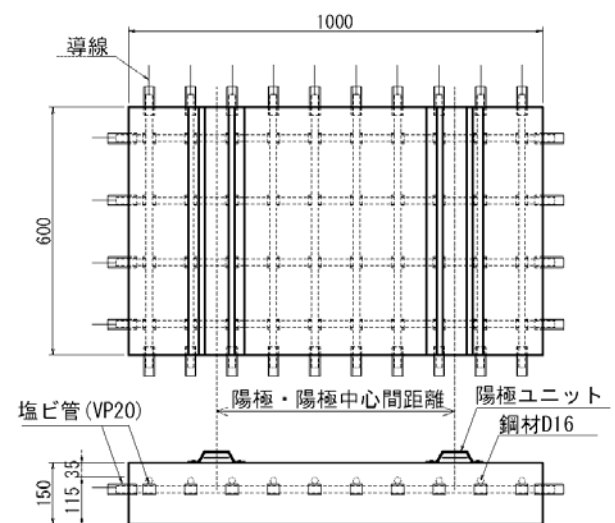


図 - 1 通電供試体

*1 オリエンタル白石（株）本社技術研究所 主任研究員（正会員）

*2 オリエンタル白石（株）本社技術研究所 主任研究員（現：極東鋼弦コンクリート振興（株）技術部）（正会員）

*3 オリエンタル白石（株）本社技術研究所 主任研究員（正会員）

コンクリートの材料を表 - 2 , 配合を表 - 3 に示す。養生は、打設後 10 日間は、型枠のまま封緘養生し、10 日後に脱型、気中養生を 120 日間行い、その後陽極ユニットの設置を行った。陽極ユニットの構造を図 - 2、構成材料および成分を表 - 4 に示す。陽極には、ニッケル被覆炭素繊維シートを使用した。電解質は、高吸水性高分子の粉末とアルカリ性水溶液を混合して調整した。陽極ユニット用保護カバーは、陽極の保護および気密性の確保を目的とし FRP で製作した。ニッケル炭素繊維シート陽極の周囲をバックフィルで囲ってイオン伝導性を保持し、保護カバー内側に充てんし、通電供試体に固定した。陽極ユニットの大きさは、幅 136mm × 高さ 25mm × 奥行き 600mm であり、実用型と同じものである。

表 - 2 コンクリートの材料

種 類	物 性
セメント	早強ポルトランドセメント (密度=3.14g/cm ³)
細骨材	砕砂 (F.M.=2.86, 表乾密度=2.61g/cm ³)
粗骨材	砕石 (F.M.=6.74, 表乾密度=2.63g/cm ³)
混和剤	高性能 AE 減水剤標準形 (種)

表 - 3 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
48	46	160	333	882	1043	2

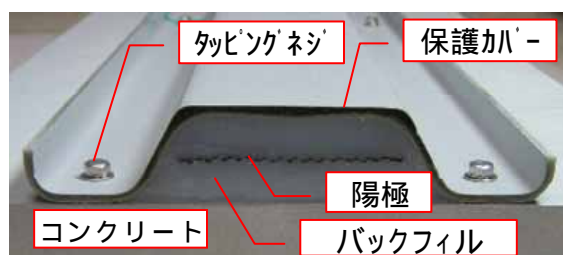


図 - 2 陽極ユニットの構造

表 - 4 陽極ユニットの構成材料および成分

材 料	特徴, 成分
ニッケル被覆炭素繊維シート	記号: Ni/CFS, 原料: PAN 系, Ni 被膜厚: 0.25μm, 体積抵抗率: $7.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$
保護カバー	基材の FRP はガラス繊維とビニルエステル樹脂の複合材料, 厚さ 2.0mm
水酸化リチウム	化学式: LiOH, 分子量: 23.95g/mol, 密度: 2.54g/cm ³ , pH: アルカリ性
高吸水性高分子	化学名: アクリル酸系供重合体, 形状: 微粉末, 色: 白色, 密度: 1.4g/cm ³

2.3 測定方法

電位測定は、電圧計 (入力抵抗 $10^{11} \Omega$) と接続した銀塩化銀電極を計測電極として用い、先端に吸水性樹脂で導通処理を施した。測定点は、通電供試体側面上を鋼材直上に供試体の長辺方向に水平に 100mm 間隔で 10 点とした。オン電位は、通電時の電位を測定した。インスタントオフ電位は、通電を停止して 1 秒以内の電位を測定した。オフ電位は、通電試験において、通電を停止し、24 時間以上の十分な時間が経過した後の電位を測定した。オフ電位からインスタントオフ電位を差し引いた値を電位変化量とした。以下オン電位を E_{on} 、インスタントオフ電位を E_{io} 、オフ電位を E_{of} と記す。電流分布測定は、無抵抗電流計を用いて、各鋼材と電源装置との間の電流量を測定した。測定状況を写真 - 1 に示す。

陽極直下の鋼材から水平方向への電位の分布度を陽極直下の鋼材電位変化量に対する陽極・陽極間の鋼材電位変化量に対する割合とし、これを電位変化量効率と定義する。通過電流効率も同様とする。

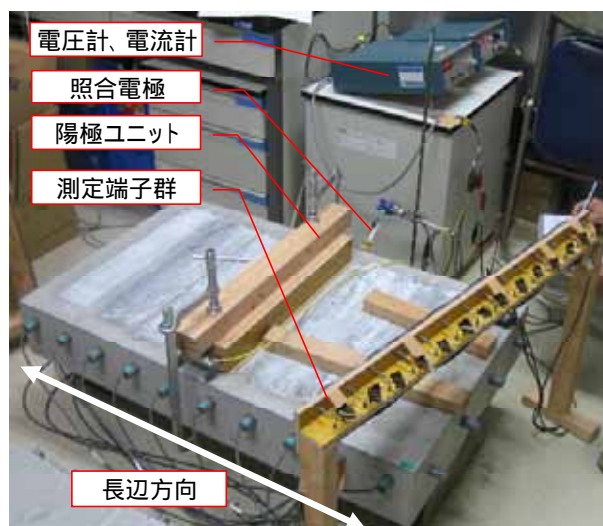


写真 - 1 測定状況

2.4 通電方法

初期塩化物イオン濃度の異なる通電供試体に対して通電調整試験を行い、電位と電流密度の対数のグラフを作成する。このグラフより、100mV の電位変化量に対応する防食電流量を求める。本研究で、通電調整試験により防食電流量を求めた理由は、過防食を避け、適正な防食電流量における電位変化をとらえるためである。通電実験では、一定の電流を印加し、通電開始から 10 分後に通過電流、 E_{on} 、 E_{io} を測定した。測定時間は 30 分、通電保持時間は 40 分である。小さい電流値から設定を順次上げていき 1 日に 4 種類の電流密度を実施した。通電実験を行った供試体は、7 日間空けて次の通電実験を実施した。

3. 実験結果

3.1 通電調整試験

通電供試体の各塩化物イオン濃度に対する水平方向の鋼材自然電位分布を図 - 3、防食電流密度の対数と陽極・鋼材の電位変化量の関係を図 - 4 に示す。図 - 3 より鋼材の自然電位は、塩化物イオン濃度が増加するに従い、卑方向に変化するが、1.2%を超えると変化量は低下する。また、供試体内部で水平方向に対する電位値はほぼ同じ値を示している。図 - 4 より鋼材に対して陽極の電位変化量の方が大きいことがわかる。鋼材電位変化量は、どの電流値においても塩化物イオン濃度の増加に伴って低下しており、その低下率は電流密度が大きくなるに従い大きくなっている。電位変化量 100mV の条件で、塩化物イオン濃度 0.6%, 1.2%, 1.8% の場合の電流密度は 0.5mA/m^2 , 3.0mA/m^2 , 7.0mA/m^2 であり、その差は 6mA/m^2 以上もある等、より高塩化物イオン濃度で通電するほど電位変化量が低下することがわかる。このことから、電気防食効果を安定させるために、塩化物イオン濃度に応じた電流密度で通電する必要があると考えられる。

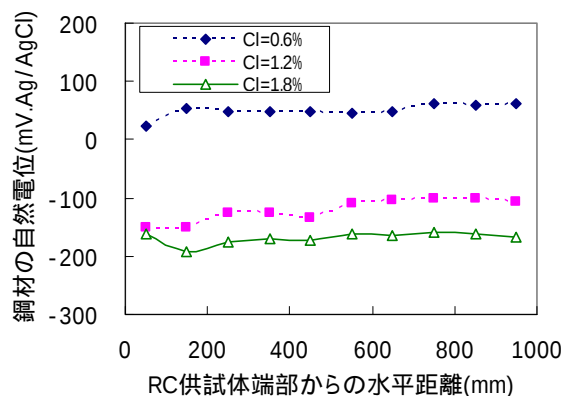


図 - 3 鋼材の自然電位分布
(塩化物イオン濃度を変化)

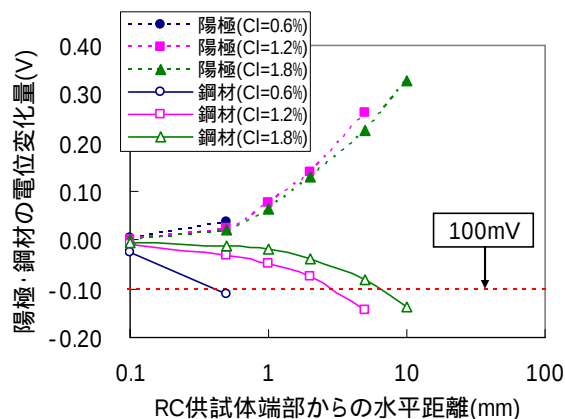


図 - 4 電流密度と陽極・鋼材の電位変化量の関係
(塩化物イオン濃度を変化)

3.2 電流密度依存性

塩化物イオン濃度 1.2%, 陽極中心間距離 575mm の条件における各電流密度に対する鋼材の電位変化量分布を図 - 5、鋼材の通過電流量分布を図 - 6 に示す。図 - 5 より陽極位置による電位変化量のピークが主に陽極直下に現れている。さらに電流密度が増加するにつれて、変動は増加していることがわかる。このように、鋼材の自然電位が等しいにも関わらず電位変化量に大きな差がでる原因は陽極・鋼材間の距離が異なるためである。コンクリートの電気抵抗は、電流経路の距離に依存する。陽極・鋼材間の距離が大きいと、電気抵抗が大きくなり電流の通過を妨害すると考えられる。電流密度を上げると陽極・陽極間領域の電位変化量は上がり、分布特性は改善される。しかし電流密度を上げると陽極直下領域の電位変化量はより増加して、過防食となる。均一な電位変化量分布を得るためには、過防食とならない範囲で、電流密度を大きくして、全体のバランスを考慮する必要がある。図 - 6 より、通過電流では陽極位置による通過電流の変動は大きくなり、さらに電流密度の増加により、変動は増加していることがわかる。

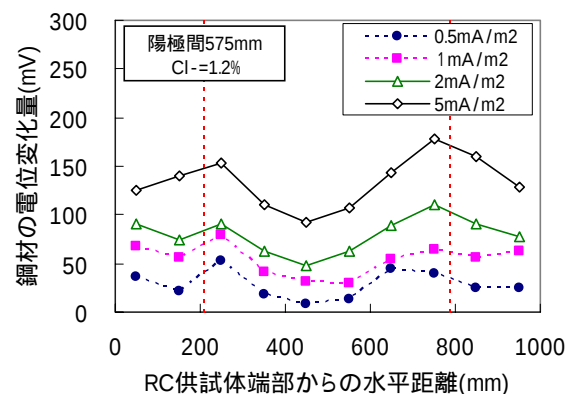


図 - 5 電位変化量分布
(電流密度を変化)

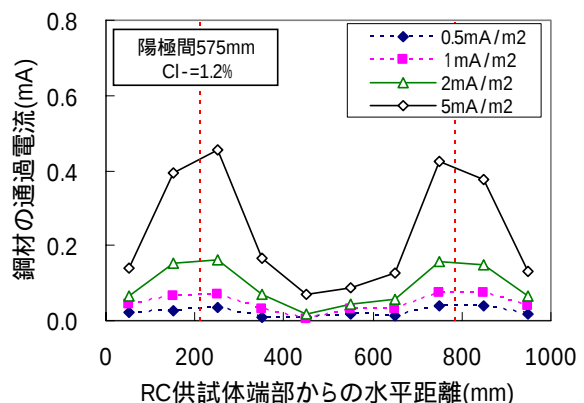


図 - 6 通過電流量分布
(電流密度を変化)

塩化物イオン濃度 0.6%, 1.2%, 1.8%, 陽極中心間距離 575mm の条件における各電流密度に対する鋼材の電位変化量効率を図 - 7, 鋼材の通過電流量効率を図 - 8 に示す。図 - 7 から電流密度が高いほど、さらに塩化物イオン濃度が低いほど電位変化量効率の向上することが分かる。環境条件, コンクリートの水セメント比および表面からの距離が同じ場合、鋼材の腐食電流は、塩化物イオン量に依存する。同一の供試体内では、鋼材の腐食電流は同じである。電流密度の増加による電位変化を分担する電流が増加して電位変化量効率が向上したと考えられる。電位変化量 100mV の条件で、塩化物イオン量 1.2% の場合、電流密度は 3.0mA/m^2 であり、電位変化量効率は 55% 程度なので、陽極間領域の電位変化量は 100mV 以下で不十分である。陽極直下領域の電位変化量を 50% 程度増加させることにより陽極間領域の電位変化量を 100mV 以上にすることができる。図 - 8 より、電流密度に対して鋼材の通過電流量効率は各供試体ともに同じ程度の値を示し、この条件では、特に影響のないことが分かる。

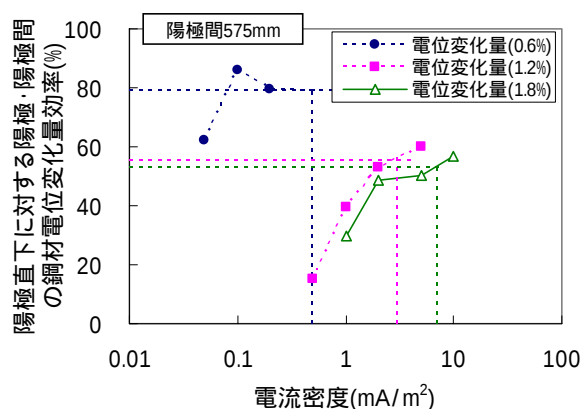


図 - 7 電流密度と電位変化量効率の関係
(塩化物イオン濃度を变化)

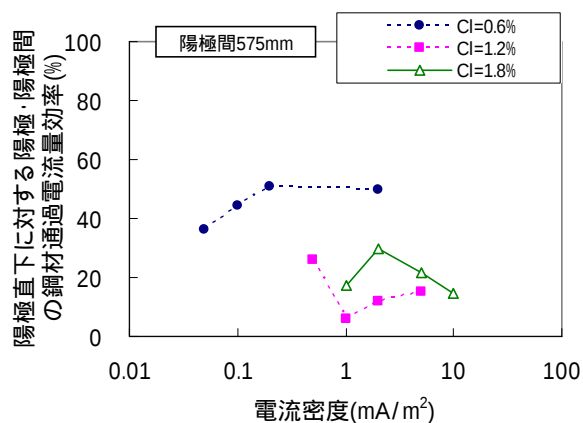


図 - 8 電流密度と電流量効率の関係
(塩化物イオン濃度を变化)

3.3 塩化物イオン濃度依存性

電流密度 2.0mA/m^2 , 陽極中心間距離 575mm の条件における各塩化物イオン濃度に対する鋼材の電位変化量分布を図 - 9, 鋼材の通過電流量分布を図 - 10 に示す。図 - 9 から電位変化量は、塩化物イオン濃度 0.6% の鋼材が最も大きく、塩化物イオン濃度の増加に伴い減少した。これは塩化物イオン濃度の低下に伴い鋼材の不動態皮膜が保持され腐食電流が低下するためである⁶⁾。腐食電流の低下による電位変化を分担する電流が増加して電位変化量効率が向上したと考えられる。従って、均一な電位変化量を得るためには、過防食とならない範囲で出来るだけ電流密度を高くする、または陽極中心間距離を小さくする必要がある。図 - 10 より、電位変化量分布に違いがあったにもかかわらず、電流分布は各供試体ともに同じ値を示し、この条件では、通過電流量分布は塩化物イオン濃度に影響のないことが判った。これは、電流経路における抵抗の差に通過電流分布は依存するので、影響がないと考えられる。つまり電流分布は、電極の相互配置のみで決まることを示している。

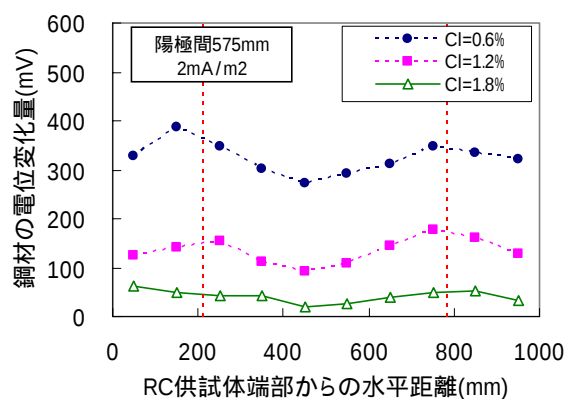


図 - 9 電位変化量分布
(塩化物イオン濃度を变化)

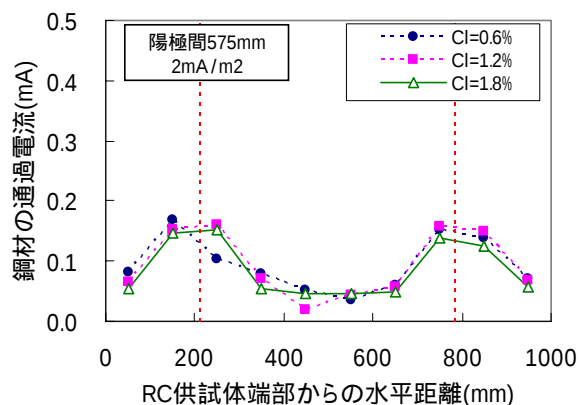


図 - 10 通過電流量分布
(塩化物イオン濃度を变化)

電流密度 2mA/m^2 の場合、各陽極中心間距離における塩化物イオン濃度と電位変化量効率の関係を図 - 11、電流量効率の関係を図 - 12 に示す。図 - 11 から各陽極中心間距離においても塩化物イオン濃度が増加するほど、電位変化量効率が低下することがわかる。さらに陽極中心間距離が大きいほど、塩化物イオン濃度による電位変化量効率がより低下している。これは、コンクリート側の電圧降下、鋼材の分極抵抗等、電位変化に寄与する電流の減少によるものと考えられる。電位変化量 100mV の条件で、塩化物イオン量 1.2% の場合、電流密度は 3.0mA/m^2 であり、陽極中心間距離 300mm 、 575mm 、 850mm で電位変化量効率は 100% 、 55% 、 25% 程度なので、陽極・陽極間の電位変化量は 100mV 以下で不十分である。陽極直下の電位変化量を $50\sim 70\%$ 程度増加させることにより陽極・陽極間の電位変化量を十分にすることができる。このことから、電気防食効果を安定させるために、陽極中心間距離に応じた電流密度で通電する必要があると考えられる。図 - 12 より、通過電流量効率は各供試体ともばらついており、この条件では、通過電流量効率は特に塩化物イオン濃度に影響のないことが判った。

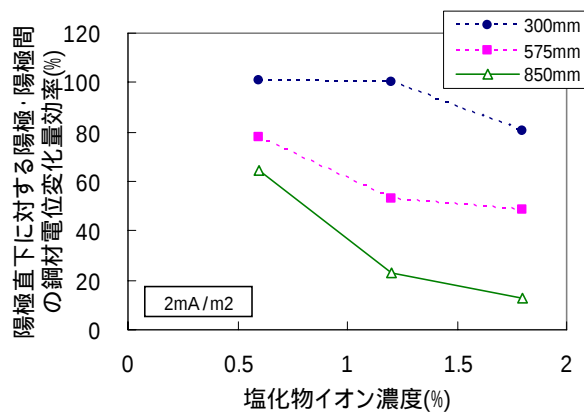


図 - 11 塩化物イオン濃度と電位変化量効率の関係
(陽極・陽極中心間距離を变化)

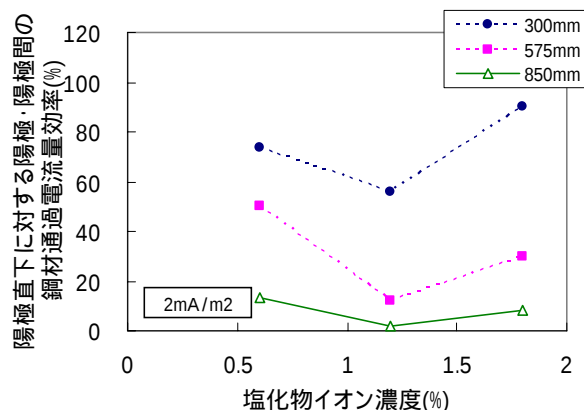


図 - 12 塩化物イオン濃度と通過電流量効率の関係
(陽極・陽極中心間距離を变化)

3.4 陽極配置依存性

電流密度 2.0mA/m^2 、塩化物イオン濃度 1.2% の条件における各陽極中心間距離に対する鋼材の電位変化量分布を図 - 13、鋼材の通過電流量分布を図 - 14 に示す。図 - 13 から陽極中心間距離が増加するにつれて、陽極間領域の電位変化量が陽極直下領域に比べて低下すること、さらに陽極直下領域自体の電位変化量が低下することが分かった。これは、陽極中心間距離が大きいほど電流が拡散して、電位変化量が低下すると考えられる。陽極中心間距離 300mm 、 575mm 、 850mm の条件で、電位変化量は、陽極直下で 208mV 、 154mV 、 123mV 陽極間で 198mV 、 92mV 、 28mV であり、その差は 10mV 、 62mV 、 95mV である等、より陽極・陽極中心間距離が大きくなるほど鋼材の電位変化量分布の均一性が低下することがわかる。従って、均一性の高い電位変化量を得るためには、過防食とならない範囲で出来るだけ陽極配置間隔を小さくする必要がある。図 - 14 より、電位分布に対して電流分布の方が同じ形状であるがより、鋭角となり、陽極配置の影響が大きいことがわかる。

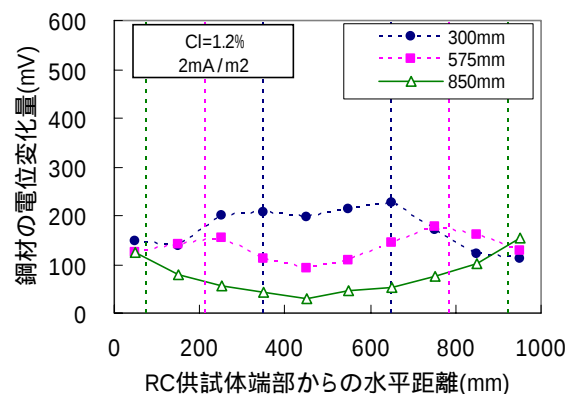


図 - 13 電位変化量分布
(陽極・陽極中心間距離を变化)

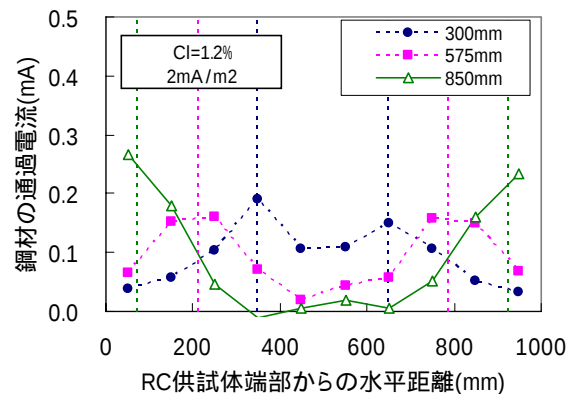


図 - 14 通過電流量分布
(陽極・陽極中心間距離を变化)

塩化物イオン濃度 1.2% の場合、各電流密度における陽極中心間距離と電位変化量効率の関係を図 - 15、電流量効率の関係を図 - 16 に示す。図 - 15 より、各電流密度においても陽極中心間距離が小さいほど、電位変化量効率の向上すること、さらに陽極中心間距離 575mm の条件だけ、電流密度の増加に伴い電位変化量効率の向上することがわかった。これは、陽極中心間距離 300mm では、陽極間領域の電流密度が過剰であるため、また、陽極中心間距離 850mm では、陽極間領域までの距離が大きいため、電流密度の増加に対して大きく影響しないものと考えられる。つまり、陽極中心間距離が大き過ぎても小さ過ぎても電流密度が増える割合に電位変化量効率に有効に働いていないことがわかる。電流密度 5.0mA/m^2 、塩化物イオン量 1.2%、陽極中心間距離 575mm の場合、電位変化量効率は 60% 程度であり、電位変化量は陽極直下で 154mV、陽極・陽極間で 90mV であった。

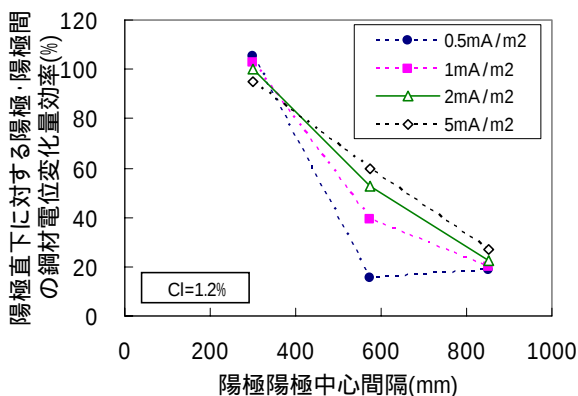


図 - 15 陽極中心間距離と電位変化量効率の関係
(電流密度を変化)

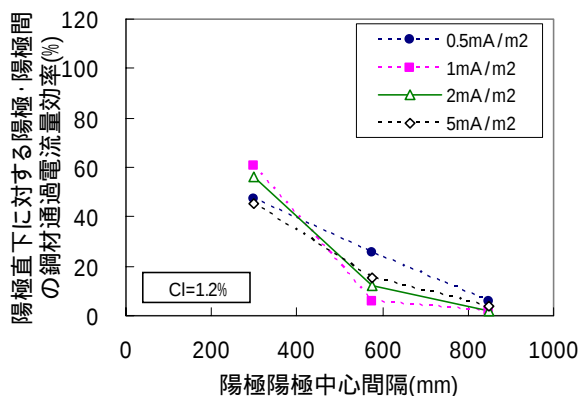


図 - 16 陽極中心間距離と電流量効率の関係
(電流密度を変化)

電気防食効果を安定させるために、陽極・陽極中心間距離および塩化物イオン量の増加にともなう電位変化量の均一性の低下と、電流密度の増加による電位変化量の均一性の増加を考慮することが重要であると思われる。図 - 16 より、各陽極中心間距離、各電流密度において全体的に電位変化量効率に対して電流変化量効率の方が低いことがわかる。

4. まとめ

電気防食において、陽極配置による電位・電流分布特性を評価するため、通電実験を実施し、電位変化量効率と電流密度、塩化物イオン濃度、陽極中心間隔について検討した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 電位変化量分布の指標となる電位変化量効率については、電流密度の増加によって増加するが、塩化物イオン濃度の増加または陽極中心間隔が大きくなるほど低下する。
- (2) 電流量分布の指標となる通過電流量効率については、電流密度の増加によって増加するが、塩化物イオン濃度に影響のないこと、陽極中心間隔が大きくなるほど低下する。
- (3) 電気防食効果を安定させるために、陽極中心間距離および塩化物イオン量の増加にともなう電位変化量の均一性の低下と、電流密度の増加による電位変化量の均一性の増加を考慮することが重要である。

参考文献

- 1) 稲葉泰男，森博一，橘康弘，守分敦郎：部分的に電気防食を行なった場合の防食効果について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.853-858（1997）
- 2) 小林俊秋，呉承寧：ニッケル被覆炭素繊維シートの電気防食における通電性能に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1534-1536（2005）
- 3) 小林俊秋，中村雅之，堀越直樹，井川一弘：RC大型実験供試体に設置した電気防食に用いるニッケル被覆炭素繊維シート陽極，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1(2007)
- 4) 腐食・防食協会：腐食・防食ハンドブック，丸善，p.216-217，2000
- 5) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），p.100，2001
- 6) H.H.ユーリック：腐食反応とその制御，産業図書，p.76-77，1997