

海水練りコンクリート構造物に対する電気防食の運用に関する研究

大谷, 俊介
株式会社ナカボーテック

Yamamoto, Daisuke
Department of Civil and Structural Engineering, Kyushu University

濱田, 秀則
Department of Civil and Structural Engineering, Kyushu University

Harahap, Sabrina
元九州大学大学院

他

<https://hdl.handle.net/2324/4482061>

出版情報 : 第40回防錆防食技術発表大会予稿集, pp.75-80, 2020-07-02. JAPAN ASSOCIATION OF CORROSION CONTROL

バージョン :

権利関係 :



海水練りコンクリート構造物に対する 電気防食の運用に関する研究

○株式会社ナカボーテック 大谷俊介 九州大学 山本大介
九州大学大学院 濱田秀則 元九州大学大学院 Sabrina Harahap
株式会社オリエンタルコンサルタンツ（元九州大学）吉田幸司

1. はじめに

コンクリート構造物は、コンクリートと鉄筋を組み合わせるため、コンクリートの製造では、鉄筋腐食を抑制する観点から水道水などの淡水を用いることが原則となっている。その一方で、中東地域や離島などでは、淡水の確保が容易ではない場合があり、この問題を解決するために淡水の代わりに海水を使用して製造する海水練りコンクリートの活用が期待されている。過去には海水練りコンクリートを使用して建設された構造物があり、長期間に亘り供用を続けているものも存在する¹⁾。しかし、建設初期から塩化物イオンを含むため潜在的には鉄筋腐食の可能性が残り、重要構造物への適用は少ない。そこで本研究では、海水練りコンクリートに対して建設初期から電気防食を適用することを想定して、効率的な電気防食の運用方法を検討した。試験では、2種類のセメントを使用して作製した小型の海水練りコンクリート供試体と複数本の鉄筋を分割して埋設した海水練りコンクリート供試体の2種類の供試体に対して電気防食を行った。

2. 試験方法

2. 1 小型海水練りコンクリート供試体

小型コンクリート供試体の形状と種類を図1と表1にそれぞれ示す。セメントは普通ポルトランドセメント（OPC）と高炉セメントB種（BB）の2種類を用い、練混ぜ水に天然海水を使用して水セメント比50%の海水練りコンクリートとした。供試体は、リード線を取り付けたφ19mmの鉄筋（みがき鋼SS400、供試面積41.8cm²）とリボンメッシュ（MMO）電極（長さ150mm、幅13mm）をコンクリート表面からそれぞれ40mmと15mmの位置に埋設して3体を電気防食用、3体を無防食用の供試体とした。また、電気抵抗率測定用に鉄筋とMMO電極を埋設しない供試体3体ずつを同一形状で別途作製した。各供試体は打設後24時間で脱型し、材齢7日まで海水湿布養生、その後7日間の大気養生期間中に供試面の1面を除きエポキシ樹脂で被覆して試験に供した。試験では、底に水を張った蓋付きの容器に供試体を個別に入れ、40℃の恒温室に静置することで高温高湿度の環境で鉄筋腐食を促進させた。なお、供試体は水に触れないよう嵩上げした。電気防食供試体は、初期に鉄筋が100mV程度分極する電流密度で通電を行った。なお、鉄筋電位は、カロメル電極（SCE）をコンクリート表面に当てて測定した。

事業開発本部 技術開発センター 〒362-0052 埼玉県上尾市中新井 417-16
TEL : 048-781-5431 E-mail : s.otani@nakabohtec.co.jp

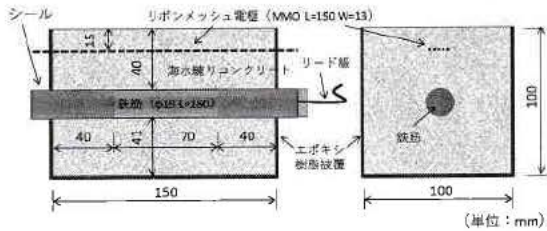


図 1 小型コンクリート供試体の形状

表 1 供試体の種類（小型供試体）

セメントの種類	電気防食用	無防食用	電気抵抗率用
普通（OPC）	3 体	3 体	3 体
高炉（BB）	3 体	3 体	3 体

2. 2 分割鉄筋海水練りコンクリート供試体

分割鉄筋供試体の形状と種類を図 2 と表 2 にそれぞれ示す。セメントに高炉セメント B 種（BB）、練混ぜ水に天然海水を使用して水セメント比 50% の海水練りコンクリートとした。分割鉄筋供試体は、100mm 間隔でリード線を取り付けた $\phi 19\text{mm}$ の鉄筋（みがき鋼 SS400、供試面積 41.8cm^2 ）を 3 本、5 本、9 本埋設した 3 種類の形状とした。鉄筋のかぶりは 40mm とし、それぞれの供試体の中央部にはコンクリート表面から 15mm の深さにリボンメッシュ（MMO）電極（長さ 150mm、幅 13mm）を埋設した。各供試体は打設後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで海水湿布養生、その後 7 日間の大気養生期間中に供試面の 1 面を除きエポキシ樹脂で被覆し、試験に供した。通電条件の決定にあたっては、海水練りコンクリート中の鉄筋は、建設した初期の時点では腐食の進行はなく、小さな防食電流でも腐食を抑制できることを想定した。そのため、電気防食基準によらずコンクリート面積当り $1\text{mA}/\text{m}^2$ に相当する小さな電流密度（MMO 電極を 4 本/ m^2 設置することを想定、印加電流は $37.5\mu\text{A}$ ）の定電流で通電を行うこととした。なお、腐食が生じていない鉄筋は小さな防食電流でも大きく分極する（分極抵抗が大きい）ため、標準とする陽極設置間隔（3 本鉄筋供試体）よりも設置間隔を広げた（5 本、9 本鉄筋供試体）場合の防食効果を検討した。試験は 2. 1 と同様に高温高湿度環境で行った。鉄筋電位は、カロメル電極（SCE）をコンクリート表面に当てて測定した。

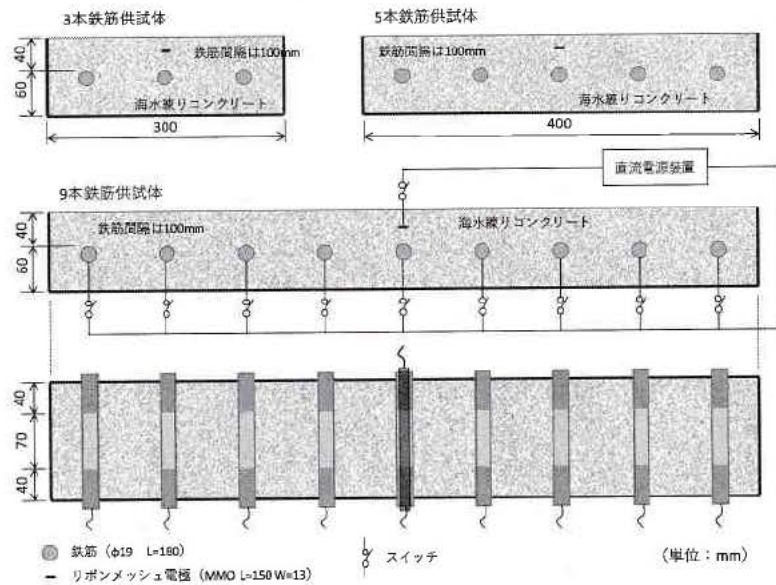


図 2 分割鉄筋供試体の形状

3. 試験結果

3. 1 小型海水練りコンクリート供試体

セメント種類別の海水練りコンクリート供試体の鉄筋面積当たりの防食電流密度と鉄筋の復極量の経時変化を図 3 と図 4 にそれぞれ示す。初期の分極量（復極量の 0 日目）を完全には一致させてはいないものの、OPC に比べて BB を用いた供試体は小さな防食電流密

表 2 供試体種類（分割鉄筋供試体）

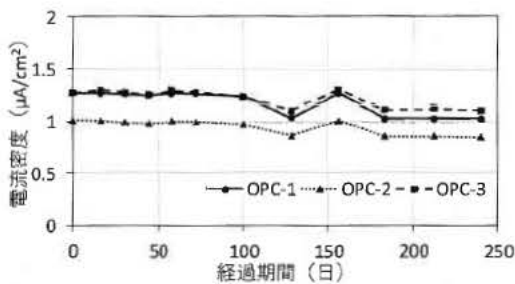
分類	通電条件	供試体種類
無防食	—	3 本鉄筋供試体×1 体
電気防食	37.5 μ A ※) の定電流通電	3 本鉄筋供試体×1 体 5 本鉄筋供試体×1 体 9 本鉄筋供試体×1 体

※) 1m² のコンクリートに対して 4 本 (4m) の MMO 電極を均等配置する場合を想定。

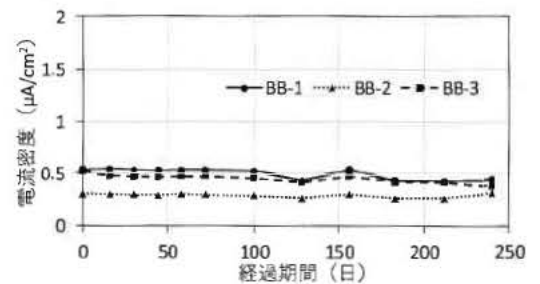
MMO 電極の単位長さ当りの電流 : 1mA/m² = 1mA/4m = 0.0375mA/15cm

度でも同程度の復極量（分極量）が得られた。240 日目に測定した OPC-1 と BB-1 供試体中の鉄筋のカソード分極曲線を図 5 に示す。この結果からも BB は OPC に比べて鉄筋のカソード分極抵抗を大きくすることが分かった。なお、両試験体ともに経時的に復極量が大きくなる傾向にあった。

BB を使用した電気防食と無防食供試体を例に鉄筋の自然電位（オフ電位）の経時変化を図 6 に示す。電気防食の有無にかかわらず、鉄筋の自然電位は経時的に貴化した。これは、試験期間中にセメントの水和反応が鉄筋の不働態化に影響したものと考えられる。しかし、電気防食供試体は無防食供試体に比べてオフ電位の貴化が早かった。これは、電気防食の副次的な効果（環境改善効果）によって再不働態化が促進されたものと考えられる。なお、OPC を使用した電気防食供試体においても同様にオフ電位の貴化が早いことを確認している。

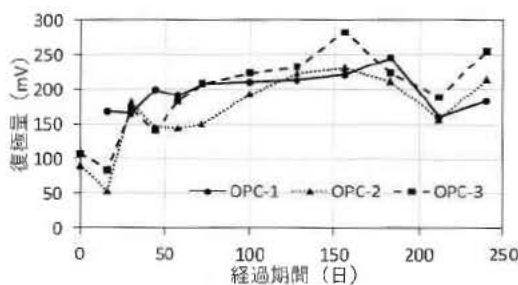


(a) OPC 供試体

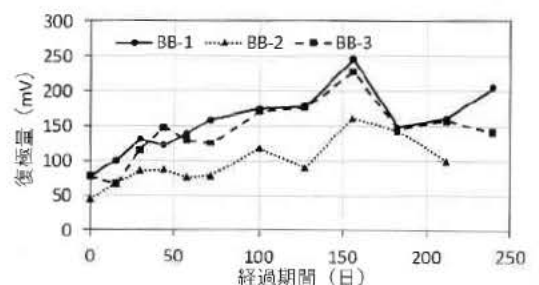


(b) BB 供試体

図 3 防食電流密度の経時変化



(a) OPC 供試体



(b) BB 供試体

図 4 復極量の経時変化

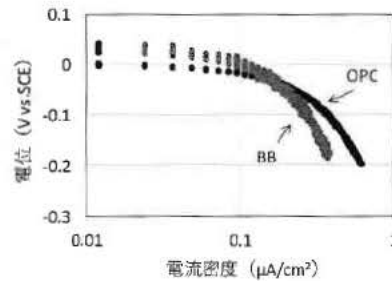
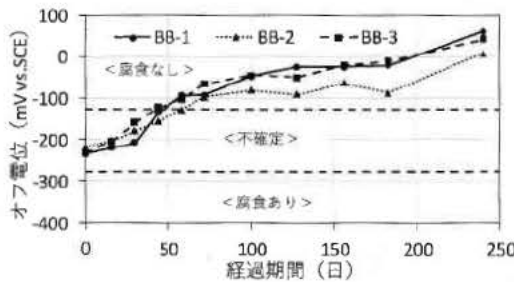
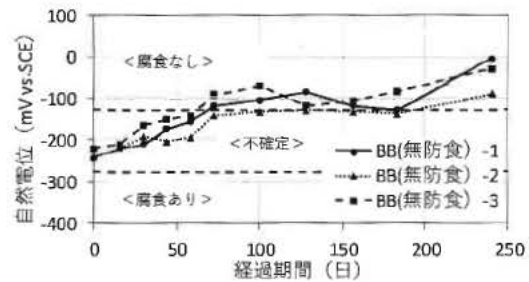


図5 鉄筋のカソード分極挙動 (240日目)



(a) 電気防食供試体 (BB)



(b) 無防食供試体 (BB) (自然電位)

図6 鉄筋のオフ電位の経時変化

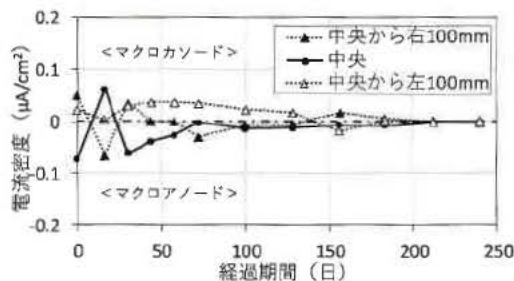


図7 無防食供試体のマクロセル電流密度

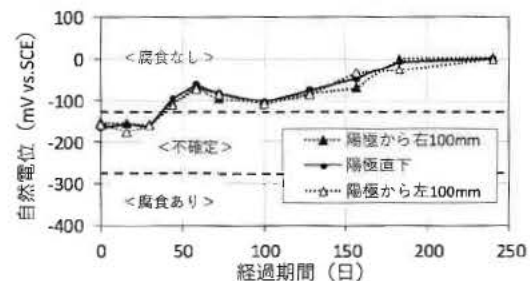


図8 無防食供試体の自然電位

3. 2 分割鉄筋供試体

(1) 無防食供試体

無防食の海水練りコンクリート供試体の鉄筋面積当たりのマクロセル電流密度と自然電位の経時変化を図7と図8にそれぞれ示す。図7のプラス値は鉄筋に電流が流入している状態(マクロカソード)であり、マイナス値は鉄筋から電流が流出している状態(マクロアノード)を表している。試験初期は、3本の鉄筋間でマクロセル電流の流入出があったが、次第に収束して200日を超えた頃にはほぼ観察されなくなった。また、図8から本供試体でも自然電位が経時的に貴化したのが分かる。

OPCとBB供試体の電気抵抗率を四電極法(JSCE-G 581-2018)で測定した結果を図9に示す。分割鉄筋供試体には、セメントにBBを使用した方が、BBはOPCに比べて電気抵抗率が大きく、その値は経時的に大きくなった。つまり、無防食供試体のマクロセル電流密

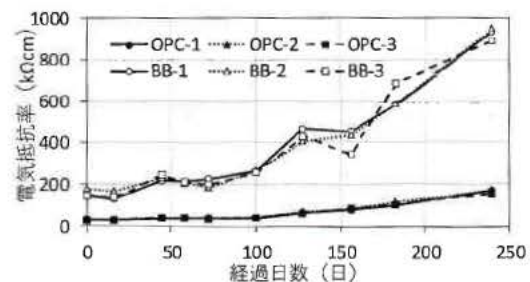
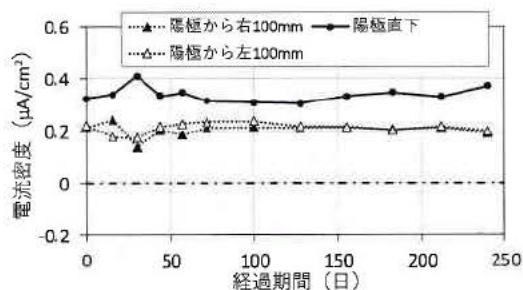


図9 海水練りコンクリートの電気抵抗率

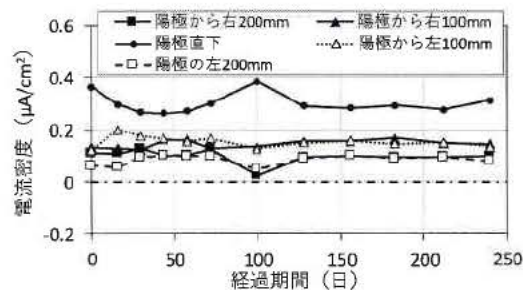
度が小さくなったのは、鉄筋が経時的に不働態化したこととコンクリートの電気抵抗率が大きくなった影響が考えられる。このことは、BBをセメントに使うことで海水を練り混ぜ水に使用して建設しても経時的に鉄筋腐食の進展が生じにくくなることを示唆するものと考えられる。

(2) 電気防食供試体

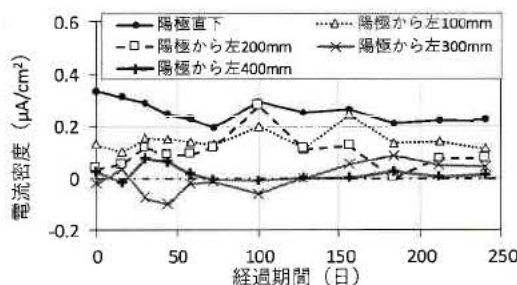
電気防食供試体の鉄筋に流出入する鉄筋面積当たりの電流密度を図10に示す。いずれの供試体においても陽極から離れた鉄筋ほど防食電流の流入量が少なくなったが、5本鉄筋供試体の結果から陽極から200mm離れた鉄筋にも防食電流が流入しており、その値は100mm離れた鉄筋と大きな違いはなかった。9本鉄筋供試体の結果（便宜上、5本の鉄筋の計測値を記載）から、初期の時点では陽極から300mm以上離れると防食電流が流入しない鉄筋があったが、時間の経過とともにいずれの鉄筋にも防食電流が流入するようになった。9本鉄筋供試体のオフ電位と復極量の経時変化を図11と図12にそれぞれ示す。いずれの鉄筋も経時的にオフ電位が貴化し、陽極から400mm離れた鉄筋でも数十mV程度の復極量が得られることがあった。



(a) 3本鉄筋供試体



(b) 5本鉄筋供試体



(c) 9本鉄筋供試体

図10 分割鉄筋に流入する電流密度

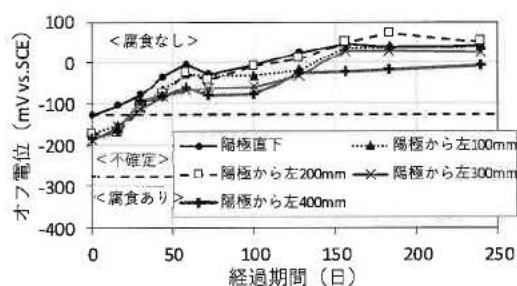


図11 9本鉄筋供試体のオフ電位

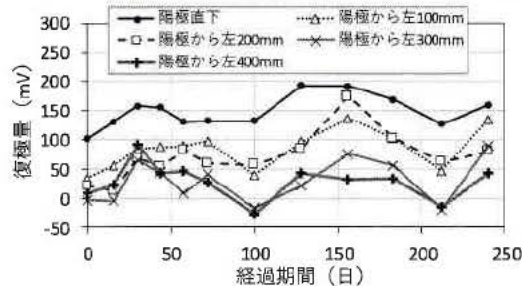


図12 9本鉄筋供試体の復極量

4. 結果の考察

外部電源方式の電気防食系では、防食電流は $I = (V_{ex} - E_a + E_c) / R_s$ の関係式で表される。ここに、 V_{ex} ：電源電圧、 E_a ：陽極のインスタントオフ電位、 E_c ：鉄筋のインスタントオフ電位、 R_s ：コンクリート抵抗である。9 本鉄筋供試体の結果から、陽極から離れた鉄筋にも経時的に防食電流が流入するようになったのは、 E_c が貴電位に変化した影響が大きいと考えられる。この結果から海水練りコンクリート構造物に対して、少ない陽極量で効率良く電気防食を行うためには、鉄筋電位を貴電位に保つために不働態化を維持することが必要となる。不働態化には、カソード反応により鉄筋周りを高 pH に保ち、電気泳動により塩化物イオン濃度を低くする環境改善効果が必要である。そこで、既往の文献²⁾を参考にして電流密度に対応した電気防食時の鉄筋周辺の pH の定常値および塩化物イオン濃度の減少率を求めた。得られた結果を図 13 と図 14 にそれぞれ示す。海水練りコンクリートに BB を使用する場合は、概ね鉄筋面積当りの電流密度で $0.1 \mu A/cm^2$ の防食電流密度で通電を行うことで高 pH になる結果となった。また、塩化物イオン濃度は、 $0.05 \mu A/cm^2$ 程度の電流密度で通電を行うことでゼロに近づく結果となった。9 本鉄筋供試体では、陽極から 200mm 離れた鉄筋へ流入する防食電流密度が概ね $0.1 \mu A/cm^2$ であった。当該鉄筋は、オフ電位の貴化が早く、復極量が大きいことから本考察を支持するものと考えられる。以上より、海水練りコンクリート中の鉄筋に対して建設初期から電気防食を適用する場合は、鉄筋面積当たり $0.1 \mu A/cm^2$ 程度のごく小さな防食電流を流せるように陽極を配置することで鉄筋腐食の進行を抑えられることが考えられた。

5. まとめ

海水練りコンクリート構造物に対して建設初期から電気防食を適用する場合を想定して海水練りコンクリート供試体を用いた電気防食試験を行った。その結果、高炉セメントを用いる場合は、鉄筋面積当たり $0.1 \mu A/cm^2$ 程度のごく小さな防食電流により鉄筋腐食の進行を抑えられる可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 濱田秀則, ダリア・パタ, サプリナ・ハラハップ: コンクリートの練混ぜ水としての海水の適用性について, 材料と環境, 68, pp.274~279 (2019)
- 2) 板屋隼人, 大谷俊介, 篠田吉央, 望月紀保: 大気暴露コンクリート中鉄筋が低分極特性を示す要因特性とその際の電気防食維持管理法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1179~1184 (2016)

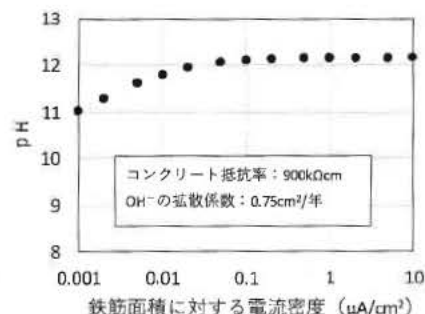


図 13 pH の定常値と電流密度の関係

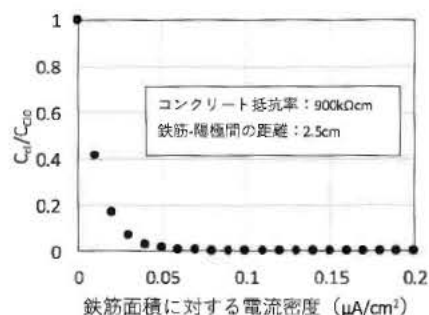


図 14 塩化物イオンの減少率と電流密度の関係