

論文 中性化と内的塩害により複合劣化した RC 部材への流電陽極方式電気防食の適用性に関する検討

吉田 隆浩*1・徳納 新也*2・大谷 俊介*3・宮川 豊章*4

要旨：内陸構造物の代表的な劣化機構の一つである中性化と内的塩害の複合劣化を考慮した供試体に流電陽極方式で用いられる犠牲陽極材を断面修復部とコンクリート部の境界部に設置し、コンクリート中の鉄筋に与える防食効果を評価した。その結果、通電密度が比較的大きい陽極材に近接した分割鉄筋では、湿度の変化にかかわらず継続的にカソード電流が供給されることでアノード分極抵抗が増加し、自然電位は貴化することを確認した。また、通電停止 24 時間後のマクロセル電流密度の評価から、断面修復部とコンクリート部の境界部に犠牲陽極材を設置することで断面修復部周囲のマクロセル腐食は抑制されることを確認した。

キーワード：中性化, 内的塩害, 断面修復, 流電陽極方式電気防食, 電流密度, 復極量, 分極曲線

1. はじめに

中性化と内的塩害の複合劣化が作用した場合のコンクリート中の鉄筋の腐食速度は、中性化および内的塩害の単独劣化が作用する場合と比較して加速される。このような鉄筋の腐食に対して、欠損したコンクリート断面や劣化因子を含むコンクリート部分を除去し、当初の性能に復旧するために用いられる断面修復工法は有効な補修工法の一つであるが、断面修復後の鉄筋にマクロセル腐食が生じる場合があることも近年良く知られている。断面修復部周囲の鉄筋のマクロセル腐食は、補修を施したにもかかわらず、その周辺部の劣化を助長することとなり、コンクリート構造物の長期耐久性を考慮すると望ましいことではない。これを防止するためには、コンクリートのアルカリ性を回復することや母材コンクリート中の塩化物イオンを除去することが有効であるが、コンクリート中の劣化因子を完全に除去することが難しい場合には電気防食工法が有効と考えられる。

電気防食工法は、外部電源方式と流電陽極方式に大別される。流電陽極方式は、犠牲陽極作用によってコンクリート中の鋼材を防食するため、通電量の調整が不要で過防食の心配がない等の維持管理面での利点が挙げられる。しかし、流電陽極方式は、海中部や湿潤状態にあるコンクリート構造物などのようにコンクリートの電導度が高い場合でないと適用が困難であるとの指摘もあり、その適用性に課題を有しているものと考えられる。コンクリートの電気抵抗に着目した流電陽極方式に関する既往の研究では、寒冷環境における防食特性の評価²⁾等があるが、研究事例が少ないのが現状と考えられる。本稿では、内陸構造物の代表的な劣化機構の一つである中性

化と内的塩害の複合劣化を考慮した供試体に流電陽極方式で用いられる犠牲陽極材を断面修復部とコンクリート部の境界部に設置し、環境湿度の影響を受けてコンクリートの電気抵抗が変化しやすい陽極材周囲のコンクリート中の鉄筋に与える防食効果を評価した。また、断面修復部周囲のマクロセル腐食抑制効果を評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

供試体の概略図を図-1 に示す。供試体は、100×100×800mm の角柱供試体で、部分断面修復を模擬した供試体である。供試体内部の鉄筋は分割鉄筋とし、かぶり

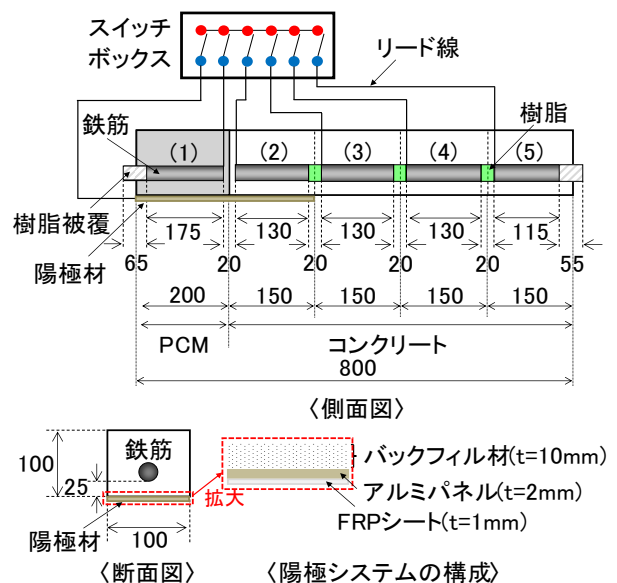


図-1 供試体概略図 (単位: mm)

*1 西日本旅客鉄道 (株) 鉄道本部施設部土木技術課主査 修士(工学) (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

*3 (株) ナカボーテック 技術研究所 博士(工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工学博士 (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				AE 減水剤 (g/m ³)
					W	C	S	G	
15	70	15	4.5	65	215	307	1084	598	768

25mmの位置に直径28mmのみがき丸鋼を配置している。隣接する分割鉄筋間は鉄筋に取り付けたリード線を紹介して電氣的に接続されている。ここでは、概略図左から分割鉄筋に番号を(1)~(5)まで付している。陽極材にはアルミニウムを使用し、幅 100mm、長さ 350mm、厚さ 2mmで、断面修復部とコンクリート部の境界部のみに設置している。なお、陽極材の表面には厚さ 1mm の FRP シートが貼付されており、陽極材とコンクリート間には厚さ 10mm のバックフィル材 (以下、BF 材) が充填されている。BF 材は、高い保水性を有し、長期間低い抵抗率を維持することが可能な材料である。断面修復材には電気防食用に開発された電気抵抗率の低い材料ではなく、市販のポリマーセメントモルタル (以下、PCM) を使用した。これは、部分断面修復した後に再劣化する構造物への電気防食の適用を考慮したためである。コンクリートの水セメント比は既往の研究³⁾で対象とした最大値である 70%とした。主な使用材料を表-1 に、コンクリートの示方配合を表-2 に示す。

2.2 試験要因

供試体の一覧を表-3 に示す。試験要因は、コンクリート中の塩化物イオン量と中性化深さ、陽極材の設置有無である。コンクリート中の塩化物イオンは、海砂に起因した内的塩害を模擬するため、塩化ナトリウム(NaCl)を細骨材の内割りで添加し、3 kg/m³ (NaCl 換算で 4.9kg/m³)、15kg/m³(NaCl 換算で 24.7kg/m³)の 2 水準を設定した。設定した塩化物イオン量は、既往の研究⁴⁾から、3 kg/m³を基準とし、より腐食性が厳しくなる 15 kg/m³の 2 水準を設定した。中性化深さは、中性化と内的塩害による複合劣化を受けた場合、鉄筋腐食度が II a~ II b 程度になる構造物が徐々に増加するとされている中性化残り 15mm³⁾ (本研究では中性化深さ 10mm) と鉄筋位置に初期塩化物イオンが移動濃縮し、最も厳しい腐食環境と想定される中性化残り 0mm (本研究では中性化深さ 25mm) となるように 2 水準を設定した。中性化と塩化物イオン量の関係について、塩化物イオン量 3kg/m³の測定結果を図-2 に示す。図に示すとおり、中性化 25mm の供試体は鉄筋位置に塩化物イオンが移動濃縮していることがわかる。以下、陽極材を設置した供試体を防食供試体、設置していない供試体を無防食供試体と称す。

2.3 供試体の作製方法および養生方法

供試体の作製方法としては、まず、100×100×600mm の寸法でコンクリートを打設した。打設翌日に脱型し、

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	滋賀県野洲産川砂
粗骨材	土山産砕石 (6号砕石)
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物
PCM	Veova 系, P/C6.0%
陽極材	主成分: アルミニウム, 比重: 2.7
BF 材	保水性材料, 抵抗率: 150Ω・cm 以下

表-3 供試体一覧

供試体名	塩化物イオン量 (kg/m ³)	中性化深さ (mm)	陽極材の有無
AL03C10	3	10	有
AL15C10	15		
NP03C10	3		無
NP15C10	15		
AL03C25	3	25	有
AL15C25	15		
NP03C25	3		無
NP15C25	15		

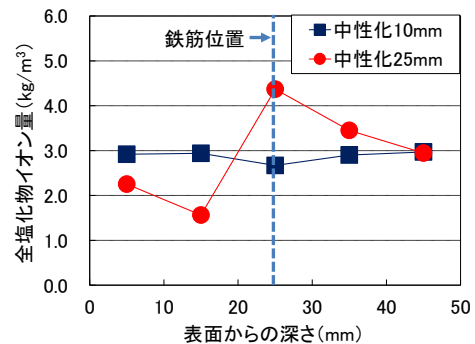


図-2 中性化と塩化物イオン量の関係

材齢 28 日まで温度 20℃の恒温室内で湿布養生した。その後、かぶり面以外をエポキシ樹脂等で保護し、促進中性化槽にて中性化深さが 10mm、あるいは 25mm となるまで静置した。目標とする中性化深さに達した段階で、促進中性化槽から供試体を取り出し、100×100×200mm の寸法で PCM を打設した。PCM の打設時期は、中性化の進行状況により異なり、中性化 10mm の供試体はコンクリートの材齢 65 日、中性化 25mm の供試体はコンクリートの材齢 238 日であった。PCM 打設後 2 週間、温度

20℃の恒温室内にて気中養生した後、陽極材を所定の位置に設置した。

2.4 測定項目

測定項目は、インスタントオフ電位（以下、Eio）、陽極材と絶縁して24時間後に計測した鉄筋の電位（以下、Eof）、無防食供試体における自然電位（以下、Ecorr）、各分割鉄筋に流入する電流密度、各分割鉄筋のアノードおよびカソード分極曲線である。各分割鉄筋の電位は、防食供試体のかぶり側に陽極材が設置されているため、全て供試体側面から飽和銀塩化銀電極（SSE）を用いて計測し、測定結果の評価では飽和硫酸銅電極基準（CSE）に換算した。復極量はEofとEioの差より算出した。各鉄筋の分極試験では、Eof測定後、分割鉄筋間の短絡を切り、供試体表面に設置した仮設陽極材を対極としてガルバナスタットにより通電した。分極試験では、孔食電位に至らないようにアノードおよびカソード電流密度を段階的に流し、各電流密度を3分間保持した後にEioを測定した。なお、試験中の環境温度は一定の20℃、湿度は変動し測定期間の平均湿度は55%であった。各供試体の評価期間は、中性化の進行状況により異なり、中性化深さ10mmの供試体は陽極材設置後約1年間、中性化深さ25mmの供試体は陽極材設置後約6ヶ月間である。

2.5 電気抵抗率

本研究で使用したコンクリートおよびPCMの電気抵抗率を表-4に示す。電気抵抗率は温度20℃、湿度60%あるいは温度20℃、湿度90%の恒温恒湿槽に測定前7日間それぞれ静置した後に2電極法⁵⁾により測定した。表より、湿度が90%から60%に低下することでコンクリートおよびPCMの電気抵抗率は約1.8~2.8倍増加した。恒温室内の湿度の変化を考慮することで、コンクリートの電気抵抗の違いが電気防食効果に与える影響を評価することができるものと考えられる。また、PCMの電気抵抗率と比較して、塩化物イオン量が3kg/m³のコンクリートの電気抵抗率は約40~60%、塩化物イオン量が15kg/m³のコンクリートの電気抵抗率は10%程度の値を示し、PCMの電気抵抗率が大きい結果を得た。

表-4 電気抵抗率

材質	塩化物イオン量 (kg/m ³)	設置環境	
		20℃ 60%	20℃ 90%
コンクリート	3	59.9	21.7
	15	14.8	6.5
PCM	—	101.3	55.2

(単位：kΩ・cm)

3. 試験結果

3.1 電流密度

防食供試体の各分割鉄筋における通電流密度について、防食開始後の経時変化を図-3に示す。図には、恒温室内の湿度の変化を併せて示している。図より、分割鉄筋(1)を除き、陽極材から離れるにしたがって通電流密度は低下しているが、湿度の変化にかかわらず、いずれの分割鉄筋にもカソード電流が流入していた。分割鉄筋(1)に流入する電流密度が小さい要因は、PCMの電気抵抗率が高いためと考えられる。また、材齢200~350日で電流密度が増加しているのは恒温室内の湿度が上昇したことによる影響と考えられる。ただし、原因は不明であるが、AL15C25の分割鉄筋(2)については、湿度との相関は認められなかった。試験要因について考察すると、コンクリート中の塩化物イオン量が多いほど、また、中性化深さが大きいほど通電流密度が大きい傾向が認められる。これは、鉄筋の腐食速度に応じて通電流密度が増減する流電陽極方式電気防食の特徴を示すものと考えられる。

次に、無防食供試体の各分割鉄筋に流入するマクロセル電流密度について、PCM打継ぎ後の経時変化を図-4に示す。ここで、図中の正の値はアノード電流密度、負の値はカソード電流密度を表している。図より、分割鉄筋によってマクロアノードの状態かマクロカソードの状態となるかは異なり、さらに、材齢の経過や湿度の変化によって電流密度の大きさや状態が変化していることがわかる。以上より、犠牲陽極材を設置した供試体では、陽極材から離れた分割鉄筋においても材齢や湿度の変化

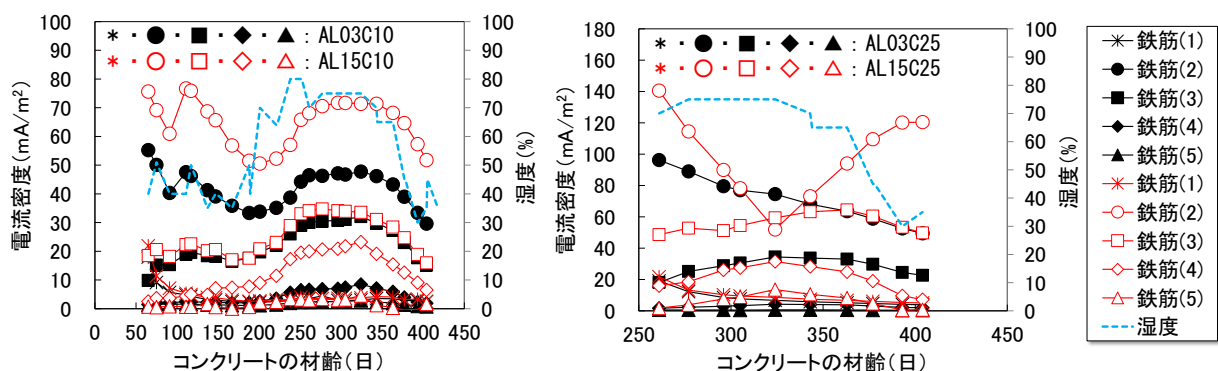


図-3 防食供試体の各分割鉄筋における通電流密度の経時変化

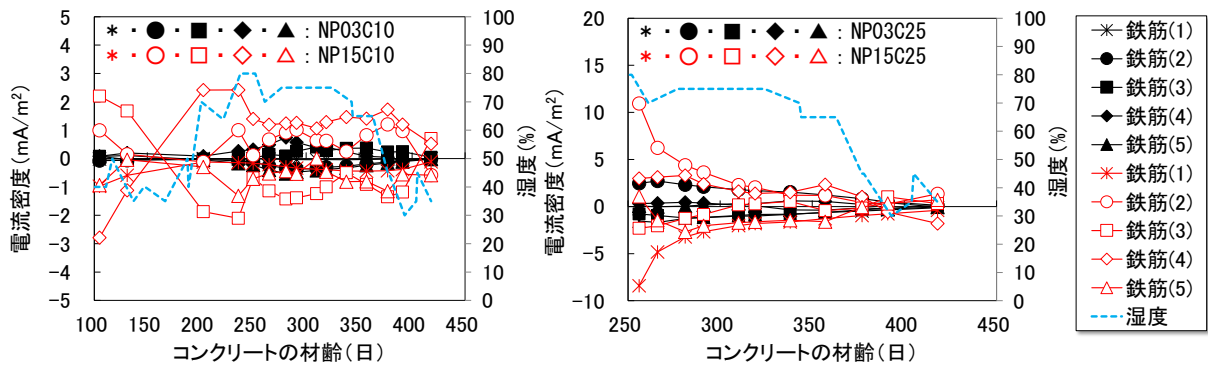


図-4 無防食供試体の各分割鉄筋におけるマクロセル電流密度の経時変化

にかかわらずマクロカソードの状態を示したことから、湿度が低下し、コンクリートの電気抵抗率が比較的高い状態であっても流電陽極方式電気防食による腐食抑制は可能であると考えられる。次に、分割鉄筋(2)における防食供試体の Eof 測定時のマクロセル電流密度と無防食供試体の Ecorr 測定時のマクロセル電流密度を比較した。これらは、自然電位の状態における測定結果を比較したものであり、断面修復部周囲のマクロセル腐食抑制効果を評価できるものと考えられる。ここで、図-4 より、中性化深さ 25mm の供試体に、比較的大きなマクロセル電流密度が認められたため、これらの供試体について評価することとした。測定結果を図-5 に示す。図より、NP03C25, NP15C25 のマクロセル電流密度は経時的に低下しているが、いずれもマクロアノードの状態を示している。一方、AL03C25, AL15C25 のマクロセル電流密度は、防食後はマクロカソードの状態を維持していることから、犠牲陽極材を断面修復部とコンクリート部の境界部に設置することでマクロセル腐食を抑制できているものと考えられる。

3.2 鉄筋電位、復極量

各分割鉄筋の Eio, Eof, Ecorr, 復極量の経時変化をそれぞれ図-6, 図-7, 図-8, 図-9 に示す。図-6 より、分割鉄筋(1)を除き、陽極材に近いほど Eio は卑な値を示した。これは、陽極材に近いほど通電流密度が大きいためと考えられる。また、経時変化に着目すると、陽極材から離れた位置では通電流密度が小さいため、湿度の影響を受けて材齢約 350 日以降貴化傾向を示した。次に、図-7 より、Eof は防食前の自然電位と比較して貴化し、その傾向は陽極材に近いほど顕著であった。また、前述の Eio と同様に、陽極材から離れるほど通電流密度が小さいため、湿度の影響を受けて材齢約 350 日以降、湿度の低下とともに貴化傾向を示した。一方で、Ecorr についても貴化傾向を示したが、Eof の経時変化と異なり、湿度が上昇した材齢 200~350 日の期間に卑化し、その後、湿度の低下に伴って貴化する挙動を示した。これより、

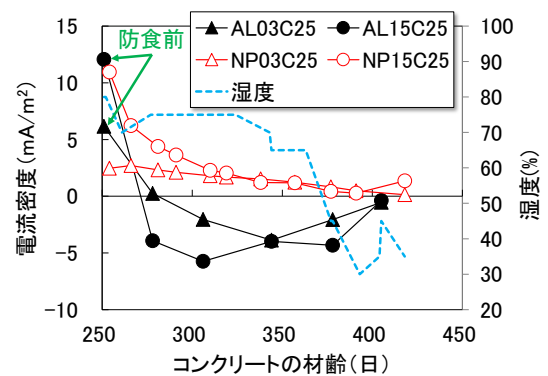


図-5 分割鉄筋(2)における電流密度の経時変化

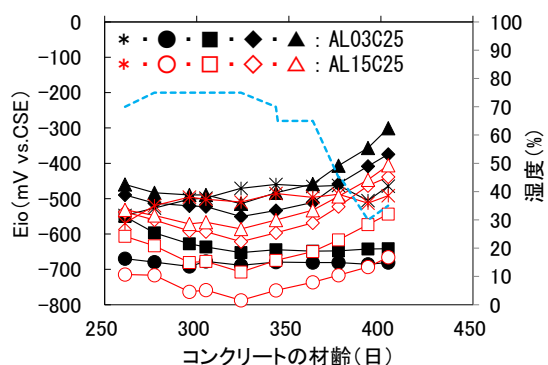
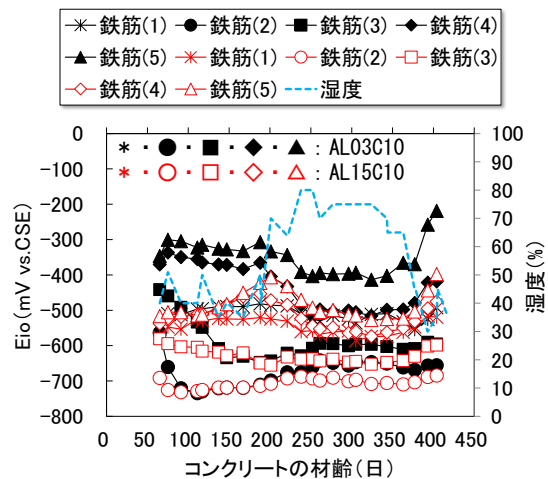


図-6 Eio の経時変化

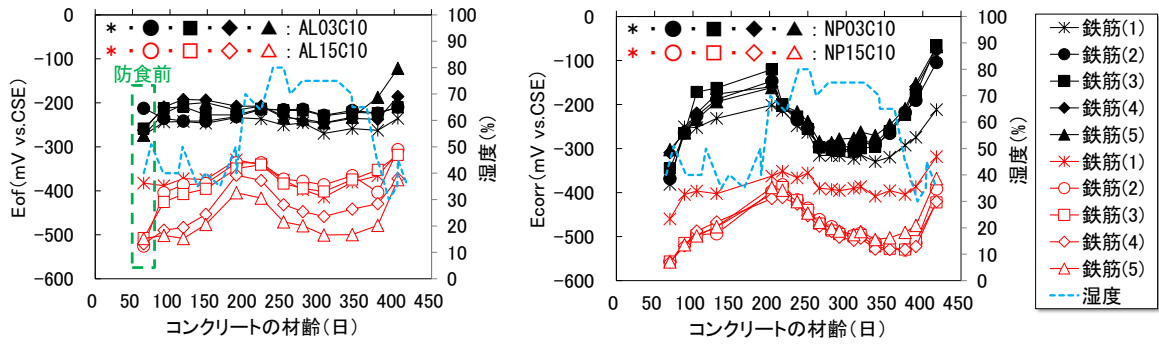


図-7 中性化 10mm の供試体における各分割鉄筋の Eof, Ecorr の経時変化

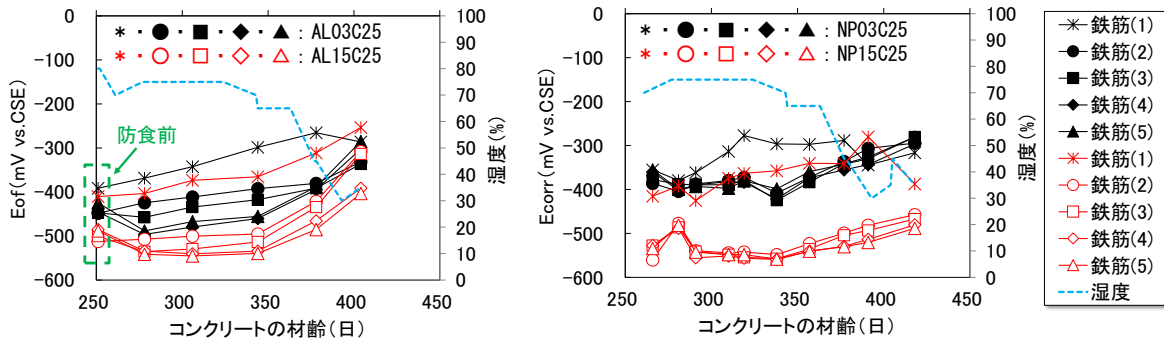


図-8 中性化 25mm の供試体における各分割鉄筋の Eof, Ecorr の経時変化

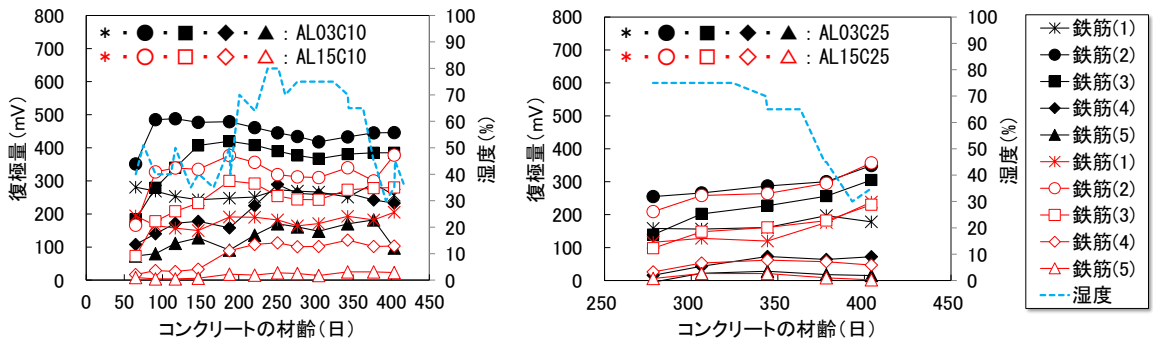


図-9 復極量の経時変化

無防食供試体ではいずれの分割鉄筋も乾湿の影響を受けて自然電位が変化したものと考えられる。防食供試体において、通電密度が比較的大きい陽極材に近接した分割鉄筋では湿度が上昇したにもかかわらず、無防食供試体の E_{corr} と比較して、 E_{of} が卑化しなかった。これは、継続的にカソード電流が供給されたことによって鋼材周囲のアルカリ化（環境改質作用）が進みアノード分極抵抗が増加したことによる影響と推察される。これについては、後述する AL15C10 の分極挙動の変化で考察した。図-8 に示す中性化 25mm の供試体においても、 E_{of} , E_{corr} いずれも貴化傾向を示したが、今後、湿度の変化と併せて評価する必要があると考えられる。次に、図-9 より、陽極材に近接した分割鉄筋ほど復極量は大きな値を示し、AL03C10 ではいずれの分割鉄筋においても、海水中の構造物等を除いて防食基準として一般に用いられている 100mV 以上を示した。また、陽極材から離れた分

割鉄筋ほど復極量は小さな値を示したが、経時的に増加傾向を示した。

3.3 分極曲線

AL15C10 の各分割鉄筋におけるアノード分極曲線およびカソード分極曲線を図-10 に示す。図には、通電開始前（材齢 57 日、湿度約 40%）、通電して約 6 ヶ月後（材齢 252 日、湿度約 80%）、通電して約 1 年後（材齢 418 日、湿度約 30%）について、分極曲線の経時変化を示している。図中凡例の A はアノード、C はカソードを表している。図より、アノード分極曲線に着目すると、分割鉄筋(2)および(3)では、湿度の変化にかかわらず、経時的に自然電位が貴化し、分極曲線の勾配が大きくなっていることから、電気防食によって鉄筋のアノード分極抵抗が改善されたものと考えられる。分割鉄筋(4)および(5)についても、カソード電流が流入しており、防食前と比較して腐食が抑制されているものと考えられるが、湿度

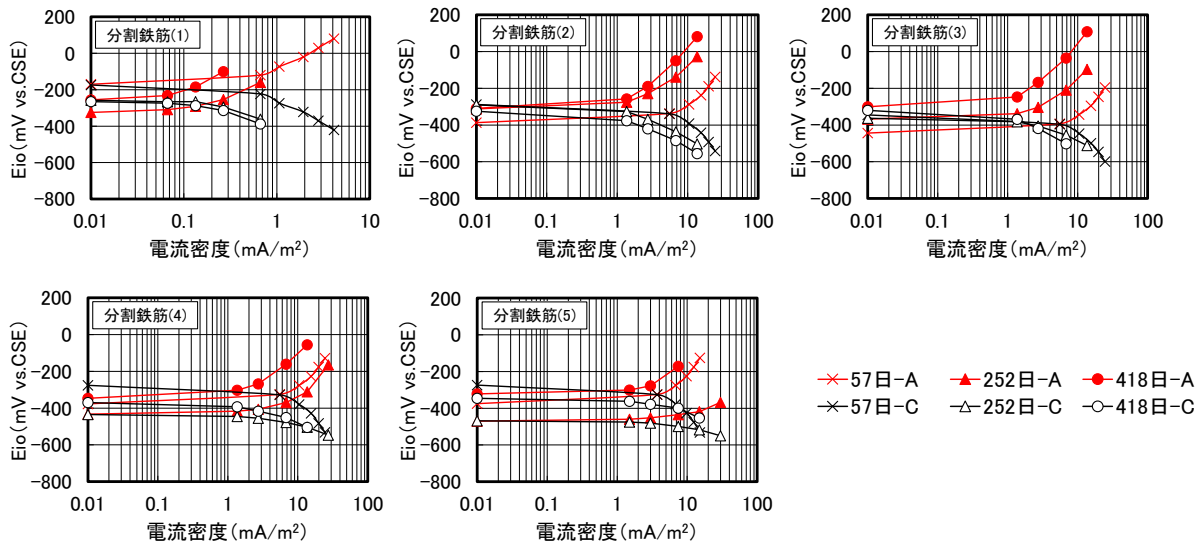


図-10 AL15C10の各分割鉄筋における分極挙動の経時変化

が上昇すると自然電位は卑化し、分極曲線の勾配が小さくなる傾向が認められた。また、カソード分極曲線に着目すると、分割鉄筋(2)および(3)では、アノード分極抵抗が増大することで Eof 近傍のカソード分極曲線の電位変化量が大きくなり、より小さな電流密度でカソード分極が容易な状態に変化していると考えられる。

3.4 通電流密度と復極量の関係

分割鉄筋(1)を除く各分割鉄筋で測定した通電流密度と復極量の関係を図-11に示す。図には、凡例と同色の線形近似曲線を併せて示している。図より、復極量100mVに必要な電流密度は、塩化物イオン量や中性化深さによって大きく異なり、塩化物イオン量が多いほど、また、中性化深さが大きいほど、防食に必要な電流密度は大きい。コンクリート中の塩化物イオン量が少ないほど、また、中性化深さが小さいほど、カソード側の腐食性が低くなるため、より小さな電流密度で防食することが可能であり、犠牲陽極材の耐久性も考慮した効率的な電気防食が可能と考えられる。また、AL15C10と比較してAL03C25の近似曲線の傾きが小さく、中性化と内的塩害の複合劣化における中性化の進行が腐食に与える影響が大きい結果となった。

4. おわりに

本稿では、流電陽極方式で用いられる犠牲陽極材を部分的に設置し、コンクリート中の鉄筋に与える防食効果を評価した。以下に、本論文で得た主な結果を示す。

- (1) 通電流密度が比較的大きい陽極材に近接した分割鉄筋では、湿度の変化にかかわらず継続的にカソード電流が供給されることでアノード分極抵抗が増加し、自然電位は貴化した。
- (2) 犠牲陽極材を断面修復部とコンクリートの境界部に設置することで断面修復部周囲のマクロセル腐食は

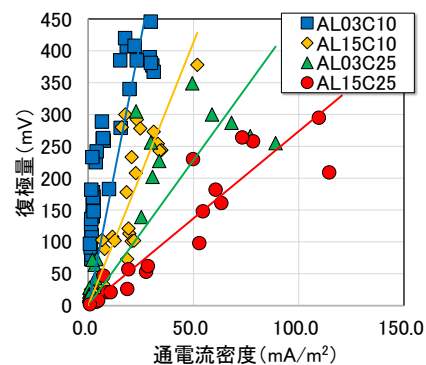


図-11 通電流密度と復極量の関係

抑制された。

- (3) カソード側の腐食性が低ければ、より小さな電流密度で防食することが可能であるため、犠牲陽極材の耐久性も考慮した効率的な電気防食が可能である。

参考文献

- 1) 北後征雄：鉄筋コンクリート鉄道構造物の鉄筋腐食に関する実証的研究，京都大学博士論文 2000.11
- 2) 堺孝司，千葉丈夫：寒冷環境における鉄筋およびプレレストコンクリート構造物の流電陽極方式による電気防食特性，コンクリート工学論文集，第7巻，第2号，1996.7
- 3) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，V-69，No.802，pp.181-196，2005.11
- 4) 荒巻智：中性化と内的塩害を受けた鉄筋コンクリート鉄道構造物の鉄筋腐食に関する研究，京都大学博士論文 2006.3
- 5) 電気学会・電食防止研究委員会編：電食防止・電気防食ハンドブック，オーム社，2011