

論文 RC 構造物における断面修復を伴う電気防食工法のモニタリング位置の違いが防食効果に及ぼす影響

川畑 雅樹*1・審良 善和*2・武若 耕司*3・山口 明伸*4

要旨 : RC 構造物に適用される外部電源方式電気防食工法では、鋼材近傍に設置された照合電極を用いて鋼材電位をモニタリングし、防食対象範囲全体の防食状態を評価することになる。本研究では、断面修復を伴う電気防食を想定し、電位モニタリング位置を断面修復部もしくは既設コンクリート部とした場合の防食効果について実験的に検討を行った。その結果、既設コンクリート部を電位モニタリング位置とすることで防食対象範囲全体における防食効果が改善されることが明らかとなった。

キーワード : 鉄筋腐食, 電気防食, 電位シフト管理, モニタリング位置, 断面修復

1. はじめに

近年、塩害による劣化を受けた RC 構造物の補修工法として、電気防食工法が広く認知され、多くの構造物に適用されている。このうち、外部電源方式電気防食工法は、不溶性電極をコンクリート表面に設置し、外部電源を用いて不溶性電極を陽極、コンクリート中鋼材を陰極として鋼材の電位を卑な方向へ分極させることで、鉄筋腐食の進行を直接的に制御させることができる工法である¹⁾。塩害劣化を受けた RC 構造物に対して電気防食工法を適用する場合、ひび割れや浮き、鉄筋露出などの変状が確認された箇所は均一な防食電流を供給させるために断面修復を行う必要がある。ここで、モニタリングを行う照合電極を鉄筋近傍に設置することを目的に断面修復部に照合電極を埋設することがある。もしくは、写真-1に示すようにコンクリートを鉄筋裏まではつり取り、照合電極設置後に断面修復する場合がある²⁾。いずれにしても、照合電極が埋設される断面修復部は周辺の既設コンクリートの腐食環境と異なり、除塩されることで不動態化している可能性が高い。このように、電気防食工法では、防食範囲内に異なる腐食環境が存在する場合もある中で適切な防食管理が必要となる。しかしながら、



写真-1 照合電極の埋設

現行の電気防食指針のモニタリング回路の設計³⁾においては、通電時のモニタリング位置について明確な表記はなされていない。そこで、本研究では、断面修復を伴う電気防食を行う際のモニタリング位置に着目し、既設部または断面修復部に照合電極を埋設した場合の電気防食効果について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体

図-1に供試体概要図を示す。供試体寸法は、W150×L1200×H100 (mm) とし、コンクリート中鉄筋に流入する防食電流の変化を把握するためφ9×100mm (鉄筋長さ 90mm+絶縁部分 10mm) の黒皮丸鋼をコンクリートかぶり厚 30mm となるように 10 本配置した。また、不溶性陽極 (MMO 電極) も鉄筋と同様に分割したものを使用し、長さ 90mm、計 10 本の分割陽極を、各分割鉄筋の直上にくるように配置した。各分割鉄筋と各分割陽極にはリード線を接続し、接続部分は樹脂で被覆し絶縁状態とした。分割鉄筋および分割陽極のリード線を並列に接続することで電氣的に 1 本の鉄筋および陽極となるようにした。また、実構造物の断面修復箇所 (以下、断面修復部) および既設コンクリート部 (以下、既設部) を模擬するために供試体の中央から半分は一般的に電気防食で使用される断面修復材 (ポリマーを含み電気抵抗率の低い断面修復モルタル) を用い、残り半分は塩化物イオン量が外割で 10kg/m³ となるように練り混ぜたコンクリートを用いた。既設部に用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は W/C=40, 50, 60%とした。ここで、表-2に供試体の種類を示す。水セメント

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (学生会員)

*2 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 教授 工博 (正会員)

*4 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 教授 博士(工学) (正会員)

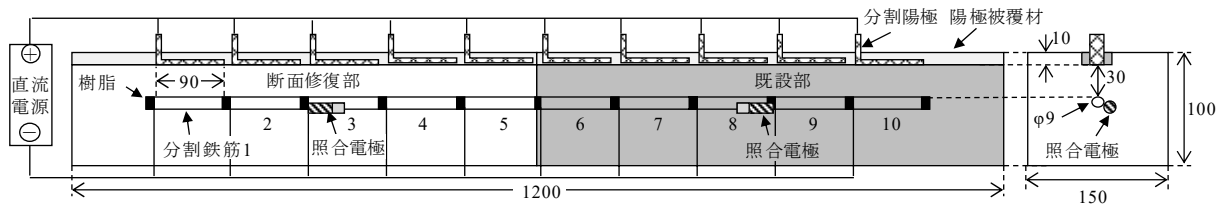


図-1 供試体概要図

比ごとに断面修復部または既設部をモニタリング位置とした供試体（断面修復部管理および既設部管理）を作製し、計6本の梁供試体を試験に使用した。照合電極は鉛照合電極を使用し、断面修復部管理の場合は分割鉄筋3の近傍に、既設部管理の場合は分割鉄筋8の近傍に設置した。いずれの供試体も既設部のコンクリートを打設し、1日養生後、断面修復部の打設を行い、28日間封緘養生を行った。その後、分割陽極をコンクリート表面に設置し、陽極被覆材で被覆した後、7日間湿布養生を行った。供試体作製後、写真-2に示すように塩害の影響を受けない一般大気環境に屋外暴露し3ヶ月程度経過した後、試験に供した。

2.2 電気防食試験の方法

電気防食試験では、分割鉄筋1~10を並列に接続した状態で定電流方式による通電を実施し、モニタリング位置における電位変化量が100mVとなるよう通電電流密度を調整した。なお、通電初期のみ目標復極量を100mVまたは200mVと設定し、防食状態の確認を行った。

2.3 検討項目

(1) カソード分極試験

カソード分極試験は、供試体暴露開始から3ヶ月程度経過した後、電気防食試験の開始前に実施した。試験方法は、電位制御とし、自然電位からマイナス方向に300mVまで陰分極させた。掃引速度は20mV/minである。なお、分割鉄筋1~10を全て並列に接続させた状態における分極曲線（以下、混成分極曲線）を測定し、さらに、断面修復部および既設部のそれぞれの鋼材の分極特性を把握するため、回路を切断し分割鉄筋が単独の状態での分極曲線（以下、単独分極曲線）も測定した。なお、単独分極曲線は照合電極の近傍の分割鉄筋（断面修復部管理は分割鉄筋3、既設部管理は分割鉄筋8）を測定した。

(2) 電位・復極量

定期的に通電停止直後の電位（以下、インスタントオフ電位（ E_{ims} ）および通電停止24時間後の電位（以下、オフ電位（ E_{on} ））を測定し、オフ電位からインスタントオフ電位の差を復極量とした。なお、カソード分極試験と同様に、分割鉄筋を並列に接続した状態での復極量（以下、混成復極量）および回路を切断し分割鉄筋を単独の状態にさせた場合の復極量（以下、単独復極量）を測定した。

表-1 既設部に用いたコンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (ml/m ³)
		W	C	S	G	
40	40	175	438	652	1024	1094
50	41	175	350	697	1051	1050
60	44	175	292	769	1024	1122

表-2 供試体の種類

供試体名	既設部のW/C (%)	モニタリング位置
0.4R	40	断面修復部
0.4E		既設部
0.5R	50	断面修復部
0.5E		既設部
0.6R	60	断面修復部
0.6E		既設部

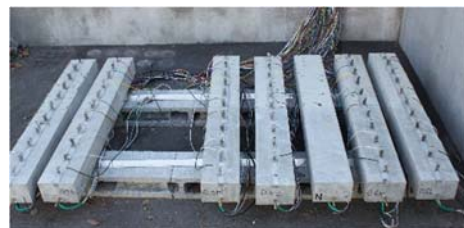


写真-2 試験の状況

(3) 電流密度

各分割鉄筋に接続する回路に設置したシャント抵抗器（10Ω）両端の電圧降下を測定することで、各分割鉄筋に流入した電流値を算出した。電流値を鉄筋表面積で除し、各分割鉄筋の電流密度とした。

3. 試験結果および考察

3.1 カソード分極試験

図-2に単独分極曲線ならびに混成分極曲線の結果を既設部の水セメント比ごとに示す。まず、単独分極曲線の結果に着目すると、いずれの供試体においても、断面修復部の単独分極曲線は電流密度が小さく電位の貴な位置に描かれ、さらに、0.1~1.0mA/m²程度の範囲で、電流の応答にばらつきを持ちながら電位が卑化する傾向にあった。これは不動態被膜が影響していることから、断面

修復部の鉄筋は不動態状態にあると考えられる。一方、既設部の単独分極曲線は、電流密度が大きく電位が卑な位置に描かれており、既設部の鉄筋は腐食状態にあると考えられる。なお、この傾向は既設コンクリートの W/C が高くなるほど顕著であり、断面修復部の鋼材電位との電位差や腐食速度が大きくなる傾向にあった。

次に、混成分極曲線の結果に着目すると、モニタリング位置を断面修復部と既設部とに変えることで異なる曲線が描かれることが分かる。いずれの W/C においても、既設部をモニタリング位置とした分極曲線の方が電位が卑な位置に描かれ、その傾向は W/C が大きくなるにつれて顕著となった。したがって、維持管理時はモニタリング位置における電位変化量によって電気防食管理が行われるため、モニタリング位置の違いが防食効果に影響を及ぼす可能性が示唆される。

3.2 電位挙動

図-3 に各供試体における分割鉄筋の通電前の自然電

位および通電 24 時間後のインスタントオフ電位を個別に測定した結果を示す。まず、自然電位に着目すると、いずれの供試体においても、断面修復部の鉄筋（分割鉄筋 1~5）は-200mV vs. CSE 程度の貴な電位を示しており不動態化していると推察される。一方、既設部の鉄筋（分割鉄筋 6~10）は卑な電位を示し、腐食状態にあると考えられる。このように断面修復部と既設部で自然電位に大きな差が生じていることから、電氣的に接続した場合、マクロセル腐食が進行することになる。しかしながら、電気防食適用後の各分割鉄筋のインスタントオフ電位の値はいずれの供試体においても概ね一定であり、目標混成復極量を 100mV 以上と設定することで、本実験の範囲内では、断面修復部と既設部間のマクロセル腐食は停止していると考えられる。また、図-4 に一例として、既設部の W/C が 60%の供試体の自然電位またはオフ電位の経時変化を示す。なお、断面修復部（分割鉄筋 1~5）の自然電位は概ね-200mV vs. CSE 程度の値であった。

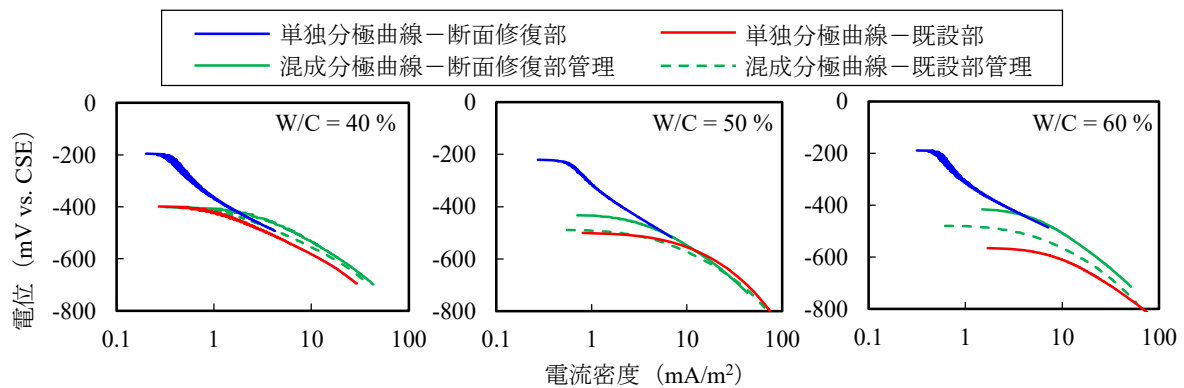


図-2 カソード分極曲線

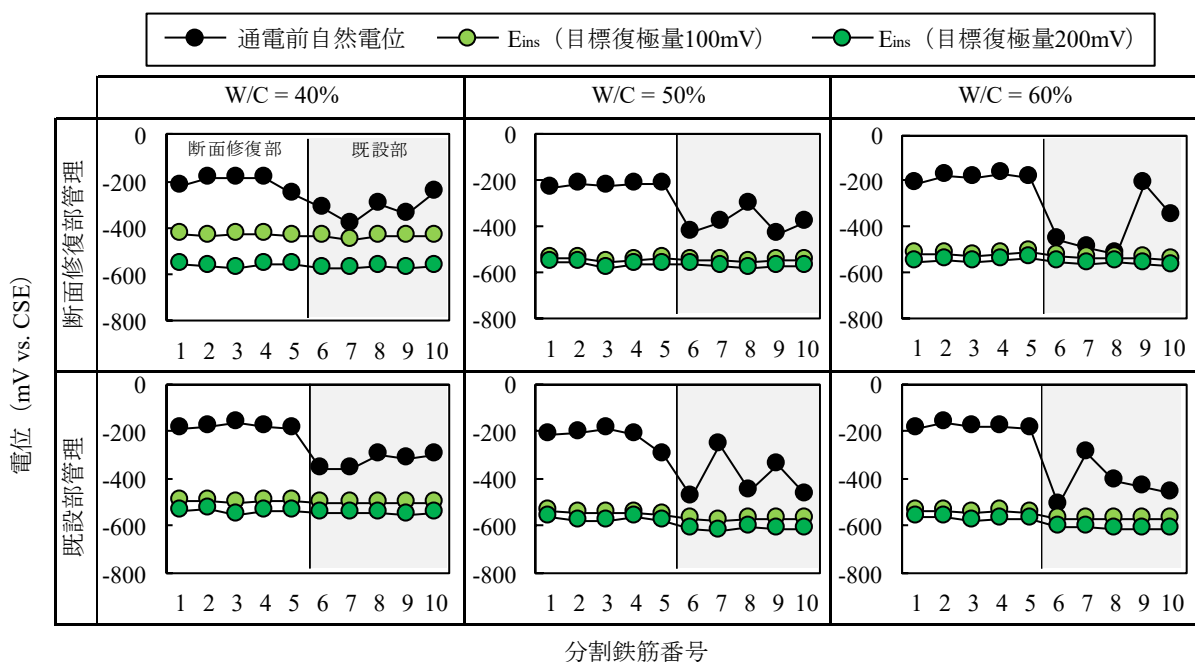


図-3 電位分布

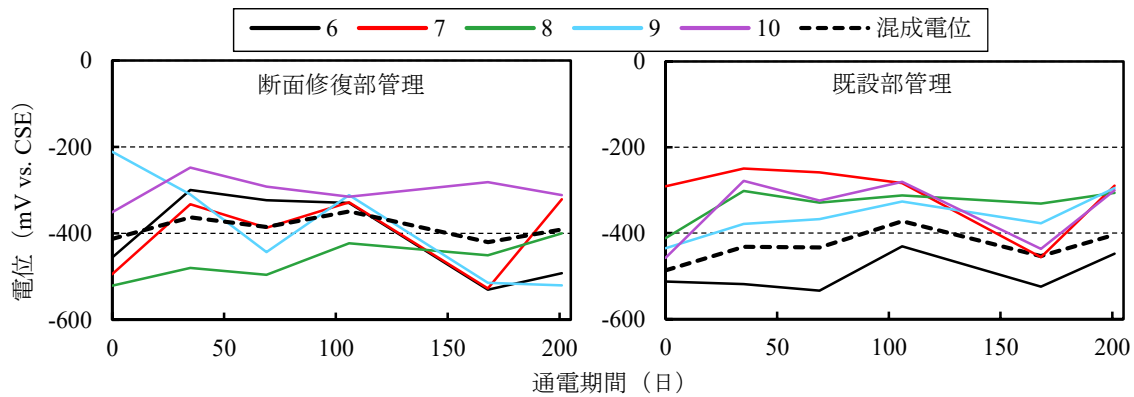


図-4 自然電位またはオフ電位の経時変化 (既設部 W/C = 60%)

既設部 (分割鉄筋 6~10) の各分割鉄筋の電位と混成電位の結果を比較すると、概ね同様の電位変化を生じているが、いずれの管理方法においても混成電位との電位の差が大きいたことが確認された。今回の結果では、断面修復部管理の場合には概ね平均的な位置に混成電位が、既設部管理の場合には卑側の位置に混成電位が計測される傾向にあった。また、断面修復部管理と既設部管理の混成電位を比較すると、既設部管理の方が卑な値となっており、モニタリング位置の違いによるものであると推察される。なお、既設部の電位は多少ばらつきがあるものの、ほぼ横ばいの値となっている。このことから、通电 200 日程度であれば、一部の鉄筋は電気防食による環境改善⁴⁾が生じているが、既設部全体として大きな環境改善は生じていないと考えられる。

3.3 復極量

図-5 に通电 24 時間後の混成復極量ならびに単独復極

量の結果を示す。ここで、現行の防食基準³⁾である復極量 100mV を参考に防食状態の評価を行うと、断面修復部 (分割鉄筋 1~5) の単独復極量はいずれの場合においても概ね 300mV 以上となっており、十分な防食効果が得られていると考えられる。一方、既設部 (分割鉄筋 6~10) の防食状態に着目すると、まず、断面修復部管理において、目標混成復極量を 100mV とした場合、単独復極量が 100mV に満たない箇所が確認され、十分な防食がなされていないと考えられる。また、目標混成復極量を 200mV とした場合においては、混成復極量の増加に伴って既設部の単独復極量が全体的に改善される傾向が確認されたものの、既設部の W/C が 60% の場合、単独復極量が 100mV に満たない箇所が確認された。一方、既設部管理の場合は、全体的な傾向として概ね防食基準を満たしているものの、断面修復部との境界の復極量が小さい傾向にある。この位置は断面修復部とのマクロセルを

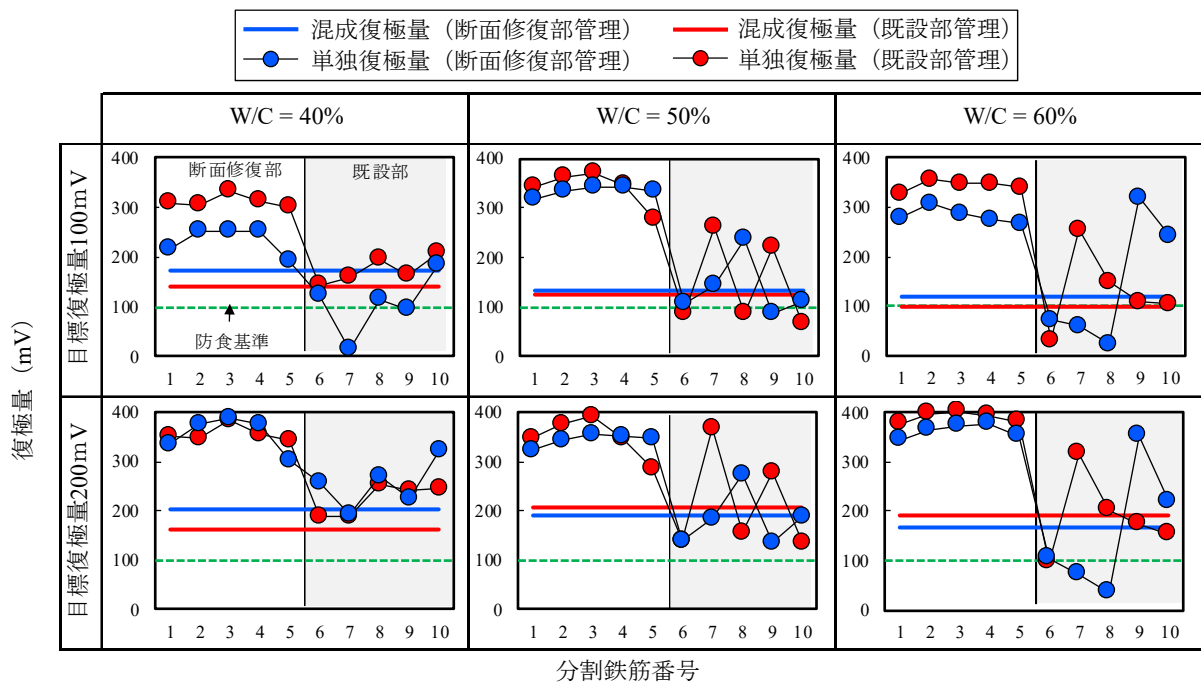


図-5 混成復極量および単独復極量

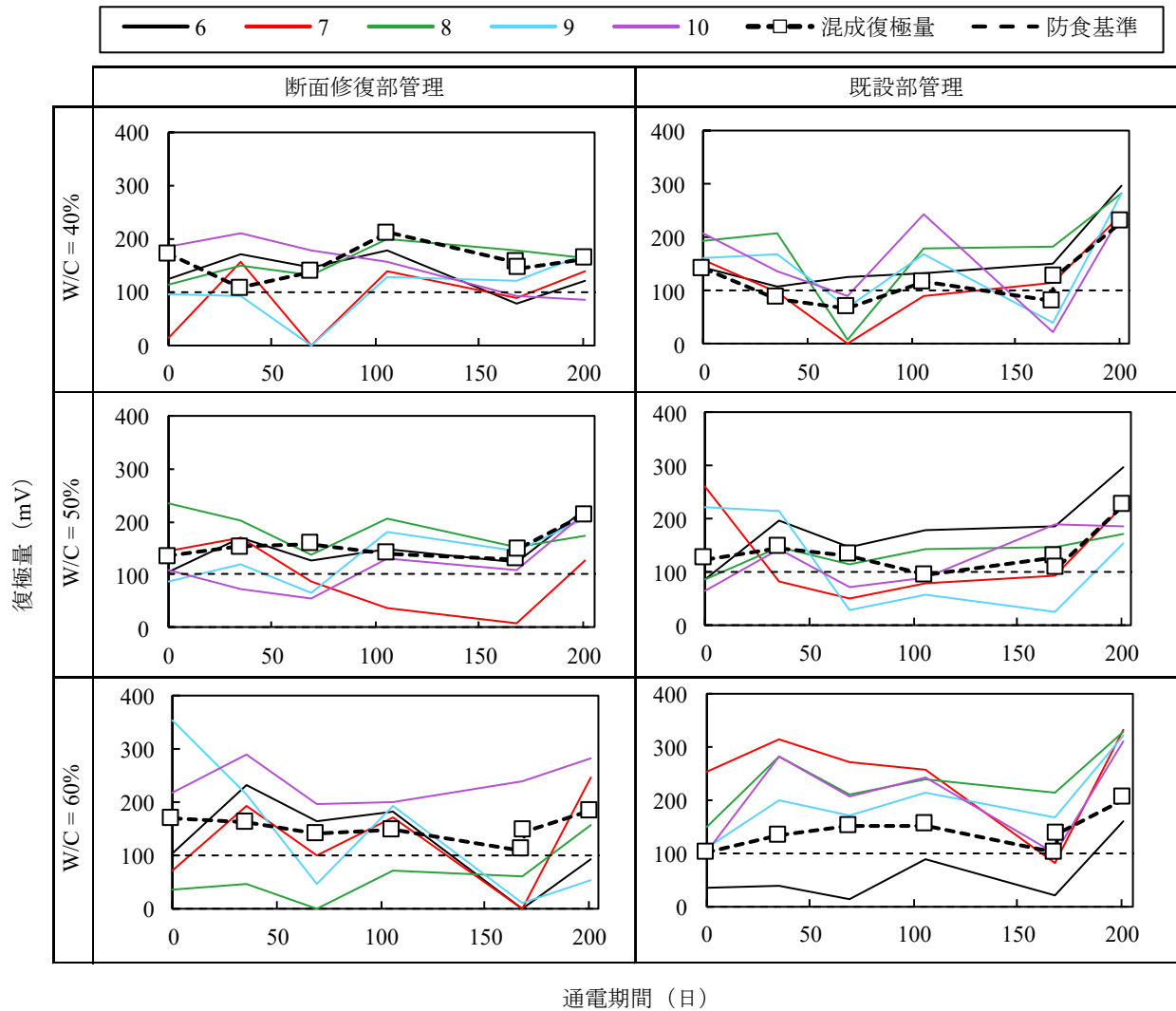


図-6 混成復極量および既設部の単独復極量の経時変化

形成している位置であり、特に腐食が激しい箇所となる。おそらく、高 W/C の場合、目標混成復極量が 100mV では防食状態が十分でないと考えられる。

また、図-6 に各供試体の混成復極量および既設部(分割鉄筋 6~10)の単独復極量の経時変化の結果を示す。なお、断面修復部の単独復極量(分割鉄筋 1~5)は概ね 200mV 以上の値であった。混成復極量と単独復極量の関係に着目すると、断面修復部管理の場合、単独復極量が混成復極量よりも低い値となっている箇所が多く見受けられる。これに対し、既設部管理においては、混成復極量が単独復極量の平均的な値または低い値を示しており、さらに、混成復極量を 200mV 程度に増加させることで全ての分割鉄筋が防食基準を満足していることが確認できた。これは、モニタリング位置が影響していると考えられ、断面修復部で管理した場合には、断面修復部の貴な電位の影響を受けるため既設部の復極量が得られにくい状態にあると考えられる。

3.4 電流密度

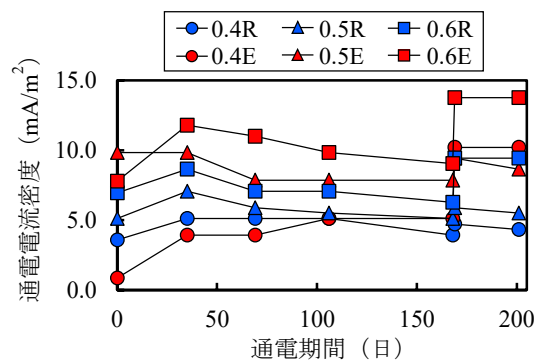


図-7 各供試体の通電電流密度

図-7 に通電期間における各供試体の通電電流密度を示す。高 W/C になるほど 100mV シフトに必要な電流密度が大きくなっており、これは既設コンクリートの品質によるものと考えられる。また、一部を除き、100mV シフトに必要な通電電流密度は時間とともに減少する傾向となっており、電気防食で一般的にみられる傾向が確認できた。次に、図-8 に通電期間 169~201 日目におけ

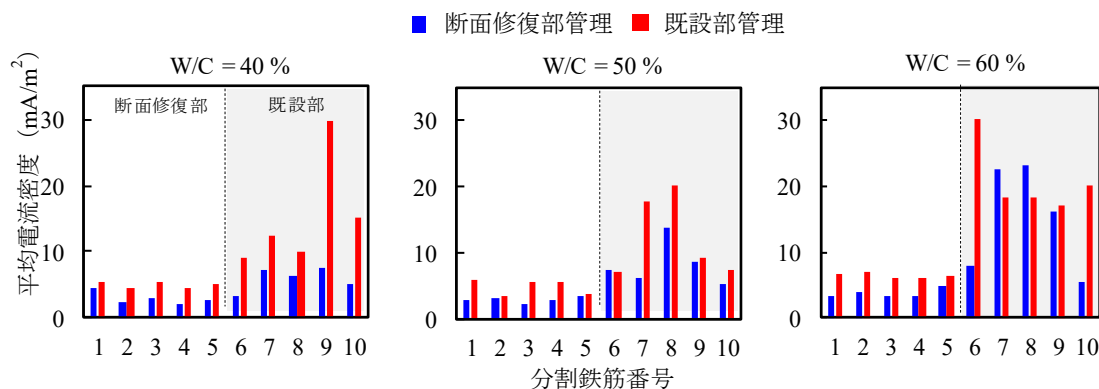


図-8 各分割鉄筋の平均電流密度

る、各供試体の分割鉄筋に流入した平均電流密度を、図-9に、一例として、通電期間169~201日における既設部のW/Cが60%の供試体の各分割鉄筋の電流密度の経時変化を示す。図-8より、いずれの場合も、断面修復部に比べ既設部に多くの電流が流入していることが確認できる。ただし、流入電流密度は既設部で管理した方が全体的に大きくなる傾向にある。また、図-9より、電流密度には日変動が認められ、また、既設部において局所的に30mA/m²を超える電流密度も確認された。平均的に電流が分配されるわけではなく、ばらつきが大きいことが分かる。ここで、復極量の結果と比較すると、既設部管理の分割鉄筋6は防食電流が多く供給されているものの復極量の値は著しく低くなっている。一方、分割鉄筋9は分割鉄筋6に比べ電流密度は1/2程度であるが、復極量は150mV以上を満足しており、鉄筋の腐食程度の違いが防食効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。

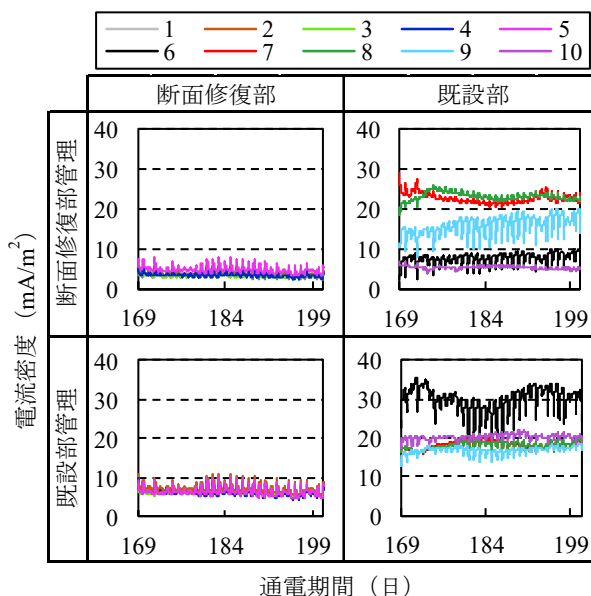


図-9 各分割鉄筋の電流密度 (既設部 W/C = 60%)

4. まとめ

本論文では、断面修復を伴う電気防食工法におけるモニタリング位置が防食効果に及ぼす影響について検討を行った。以下に、今回得られた結果についてまとめる。

- (1) 断面修復を伴う電気防食において、モニタリング位置に関わらず復極量が100mV程度で断面修復部とのマクロセル腐食は解消される。しかしながら、適切な位置でモニタリングしない場合には、既設コンクリート部で十分な防食ができていない可能性がある。
- (2) 照合電極を既設コンクリート部(特に腐食が激しい箇所)に設置し、モニタリングを行うことが望ましいと考えられる。なお、現状のインスタントオフ電位での相対的な管理であれば鋼材直近に設置する必要もなく、鋼材表面の環境を害さない位置への照合電極の設置などが有効であると予想される。

謝辞

本論文は、日本エルガード協会との共同研究の成果の一部であることをここに付記する。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書・シンポジウム論文集，p.280，2015.9
- 2) 日本コンクリート工学会：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，pp.234-235，2018.9
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー107，電気化学的防食工法設計施工指針(案)，pp.67-73，2001.11
- 4) 日本コンクリート工学会：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，pp.240-242，2018.9