

論文 断面修復したコンクリート中の塩化物イオンに起因するマクロセル腐食に関する検討

杉野 雄亮*1・佐竹 紳也*2・渡邊 晋也*3・久保 善司*4

要旨: RC床版上面の断面修復部を想定し、塩化物イオンを含有するコンクリートに断面修復材を打ち継いだ供試体のマクロセル腐食を評価した。分割した鉄筋要素間に生じるマクロセル電流を経時的に多数点測定した結果、コンクリート中に塩化物イオンが含まれるとき、打設直後からコンクリート側打継部近傍の鉄筋にマクロセル電流が生じ、断面修復材側には殆ど生じなかった。また、コンクリート中の塩化物イオン量が多いほど、アノード電流の発生頻度は増加し、期間を通してアノード電流密度は増加した。環境温度が5~60℃に変化すると、アノード電流密度の最大値は増加し、断面修復材の種類により、その増加傾向は異なった。

キーワード: マクロセル腐食, RC床版, 断面修復, 塩化物イオン, 環境温度, 乾湿繰返し

1. はじめに

RC床版は疲労により劣化しやすい部材であり、床版上面の補修方法として、通常、断面修復工法が適用される。しかし、既設床版コンクリート中に塩化物イオンが残留している場合、断面修復部と既設コンクリート間にマクロセル電流が生じ、打継部に鉄筋腐食が生じて再劣化する可能性が考えられる。特に海岸付近や凍結地域にある橋梁では、飛来塩分や凍結防止剤に起因する外来塩分が多いため、マクロセル腐食が生じる可能性が高い。断面修復部におけるマクロセル腐食に関しては、既にその形成条件や腐食状況に関する実験的検討がなされている。打継部のマクロセル形成について、鉄筋を切断後、電氣的に1体となるように加工した鉄筋間に流れる電流を評価する方法が提案されており、塩化物イオンの含有量、断面修復材の比抵抗や酸素透過量、環境温度および相対湿度が腐食速度に影響することが確認されている^{1),2),3)}。また、実構造物に近い形態におけるマクロセル形成に関する検討に関しては、RC床版を模擬した供試体の一部を断面修復し、RC床版内部の交差した鉄筋に生じるマクロセル形成と電流密度の経時変化について評価されている⁴⁾。しかしながら、既往の研究は、ある時点の電流密度について検討した事例が多く、電流密度を経時的に多数点測定し、マクロセル電流の発生状況や外部環境の変化が及ぼす影響を評価したデータは少ない。そこで、本論文では、マクロセル電流密度を1時間毎に測定し、鉄筋の腐食面積と相関が認められているアノード電流密度に関し、材齢初期におけるアノード電流密度の発生状況、環境温度および乾湿繰返し条件がアノード電流密度に及ぼす影響を検討した結果を報告する。

表-1 コンクリートの配合

| W/C (%) | s/a | 単位セメント量 (kg/m ³) | 塩化物イオン量 (kg/m ³) | 28日圧縮強度 (N/mm ²) |
|---------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 54.5 | 47 | 285 | 0 | 35.3 |
| | | | 5 | 30.8 |
| | | | 10 | 28.0 |

表-2 断面修復材の種類

| 名称 | 配合 | 7日圧縮強度 (N/mm ²) |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 超速硬コンクリート | パウダー20kg 粗骨材 15kg, 水 2.3kg | 50.5 |
| ポリマーセメントモルタル | パウダー25kg SBR エマルジョン 3.0kg | 46.2 |
| 樹脂モルタル | エポキシ樹脂を主成分 主剤 6kg, 硬化剤 3kg | 21.8 |

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリート中の塩化物イオン量(以下、Cl⁻)が、0, 5, 10kg/m³となるよう、塩化ナトリウムを添加した。使用した断面修復材を表-2に示す。断面修復材は、一般にRC床版上面の断面修復に用いる材料から選定した。超速硬コンクリートおよびポリマーセメントモルタルは、速硬性を有するセメント系の断面修復材である。一方、樹脂モルタルは、速硬性の有機系断面修復材である。

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 混和材料グループ 研究員 工修 (正会員)

*2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 混和材料グループ リーダー 工修

*3 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 准教授 博士(工学) (正会員)

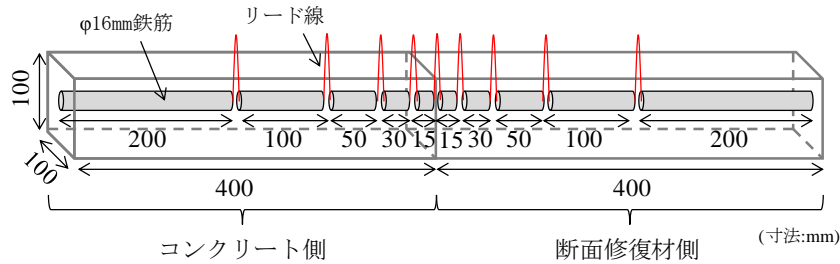


図-1 供試体の寸法形状

2.2 測定方法

供試体の寸法形状を図-1に示す。供試体に埋設する鉄筋は、図に示す長さに切断後、リード線を各鉄筋の両端に接続してエポキシ樹脂で被覆し、電氣的に一体となる様にした。なお、打継部付近の鉄筋は、既往の研究より、マクロセル電流を定量的に評価できる鉄筋要素の長さとして15mmとした⁵⁾。さらに、各鉄筋をつなぐリード線の途中に無抵抗電流計を設置し、鉄筋要素間に流れる電流を1時間毎に測定した。また、鉄筋のかぶり厚さは42mmとした。供試体は、100×100×400mmの部分にコンクリートを打設して7日経過した後、断面修復材を残り部分に打設して作製した。打継部は4側面全てをエポキシ樹脂でシールし、打継目から水や酸素が浸入しないようにした。試験体の外観を写真-1に示す。既往の研究では、分割した鉄筋を電氣的に接続し、鉄筋要素間に流れる電流を測定することで、鉄筋に生じるマクロセルの電流密度として算出できることを示しており¹⁾²⁾、本論文でもこの方法を用いた。電流の測定は、断面修復材を打設した直後から開始した。マクロセルの電流密度は、鉄筋要素に流出する電流と流入する電流の差を鉄筋面積で除して算出した。電流密度の算出方法を式(1)および図-2に示す。アノード反応による電流の測定値はマイナス値、カソード反応による電流の測定値はプラス値として現れる。



写真-1 供試体の外観

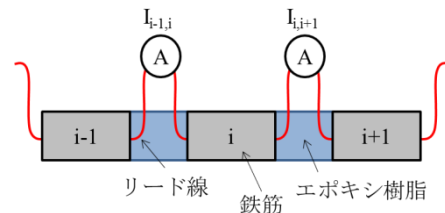


図-2 マクロセル電流密度の測定方法

表-3 供試体の環境条件

| 環境条件 | I | II | III |
|-----------|----|---------------|-------------|
| 環境温度 (°C) | 23 | 5, 23, 35, 60 | 50 |
| 相対湿度 (%) | 90 | 供試体周囲に散水 | 30, 90 |
| 養生期間 (日) | 28 | 7, 7, 7, 7 | 4, 3 |
| | | | 1サイクル×4回繰返し |

の条件下で、相対湿度 30%を4日間、相対湿度 90%を3日間とする乾湿繰り返しを1サイクルとし、合計4サイクル行った(環境条件III)。

2.3 環境条件

環境条件を表-3に示す。供試体は、環境温度 23°C、相対湿度 90%にて補修材の材齢 28 日まで養生した(環境条件 I)。さらに、環境条件 Iにて養生した後、供試体周囲に散水しながら、環境温度を 5, 23, 35, 60°Cの順に7日置きに上昇させた(環境条件 II)。その後、環境温度 50°C

3. 実験結果

3.1 アノード電流の発生状況

環境条件 Iにて養生終了時点のマクロセル電流密度を図-3に示す。鉄筋位置は、鉄筋要素の中心部と打継部間

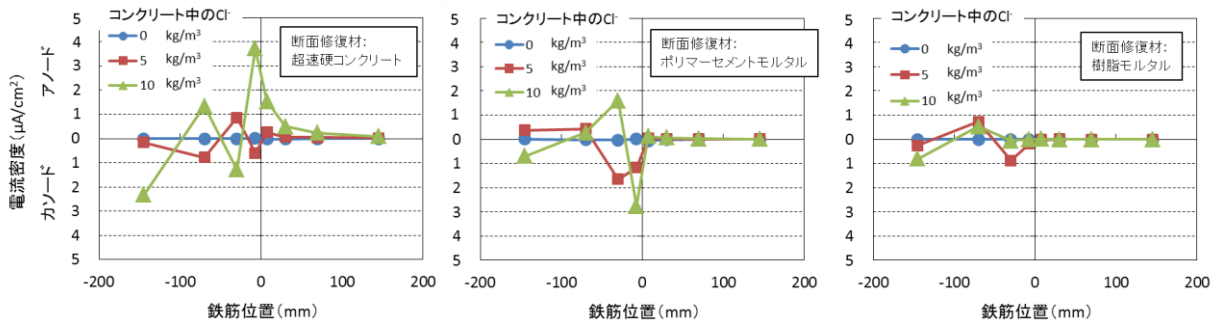


図-3 環境条件 I にて養生終了時点のマクロセル電流密度

表-4 データ区間とアノード電流密度の範囲

| データ区間 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7< |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| アノード電流密度 a (μA/cm ²) | 0 < a ≤ 1 | 1 < a ≤ 2 | 2 < a ≤ 3 | 3 < a ≤ 4 | 4 < a ≤ 5 | 5 < a ≤ 6 | 6 < a ≤ 7 | 7 < a |

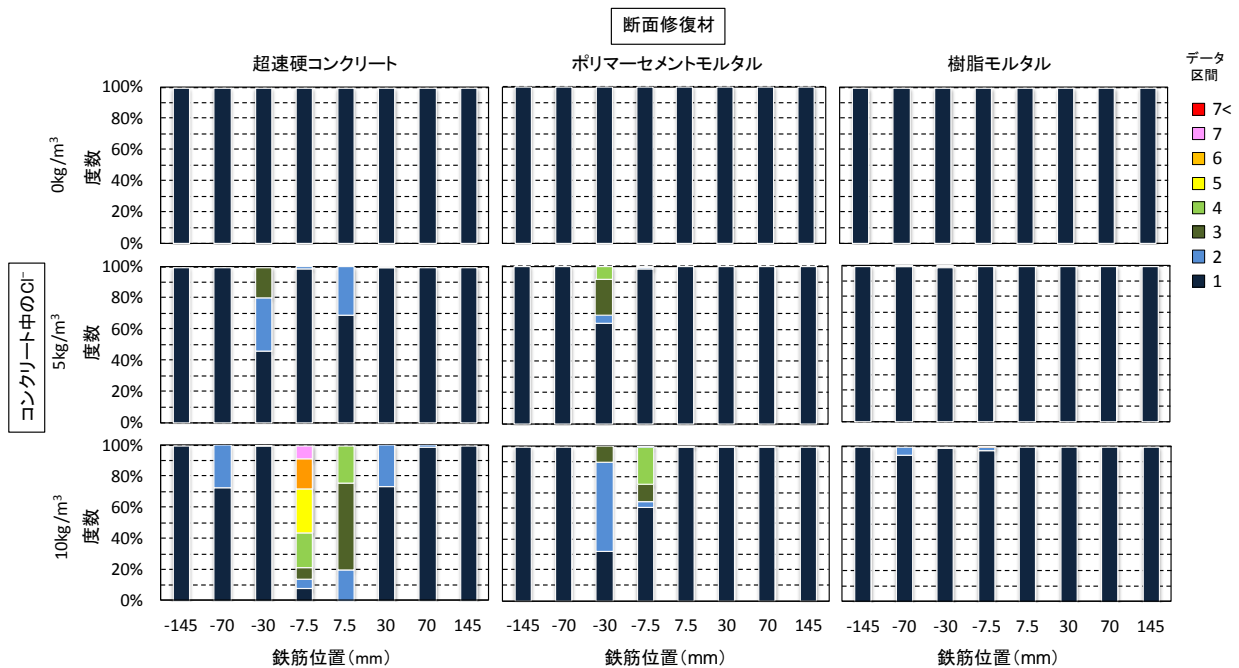


図-4 環境条件 I にて養生時に発生するアノード電流密度の頻度分布

の長さであり、打継部を 0 とし、マイナス値をコンクリート側、プラス値を断面修復材側とした。いずれの断面修復材においても、コンクリート中の Cl⁻ が多いほど、コンクリート側に生じるマクロセル電流密度が大きくなる事が分かる。また、その発生箇所は、コンクリート側打継部付近の鉄筋に集中して生じた。ただし、コンクリートに添加した Cl⁻ が 0 kg/m³ のときは、いずれの断面修復材においてもマクロセル電流は生じていない。一方、コンクリート中の Cl⁻ が 10 kg/m³ のとき、アノード電流密度は、断面修復材が超速硬コンクリート、ポリマーセメントモルタル、樹脂モルタルの順に大きくなることを確認できる。一般に、打継部に生じるマクロセルは、コンクリート側がアノード、断面修復材側がカソードになることが報告されている⁶⁾が、本実験においては、断面修

復材側にカソード電流は生じていない。コンクリートと断面修復材内部の鉄筋に電位差は生じるが、断面修復材側に流れる電流は小さく、その原因として断面修復材の比抵抗が大きいことが推察される。したがって、コンクリートと断面修復材の間でマクロセルが形成され難く、電位差の影響を受けやすいコンクリート側の打継部付近にマクロセルが形成されたと考えられる¹⁾。続いて、分割した各鉄筋に生じるアノード電流密度の発生回数およびその大きさを調べた。ただし、アノード電流密度の発生回数およびその大きさは、連続する電流値を 1 時間毎に測定したデータの集合から求めたものである。673 回の測定データを階級別に振り分けた。データ区間と対応するアノード電流密度の範囲を表-4 に、環境条件 I にて養生時のアノード電流密度の頻度分布を図-4 に示す。

表-5 最頻出するデータ区間と鉄筋位置

| 断面修復材 | コンクリート中のCl ⁻ (kg/m ³) | 環境温度 (°C) | 鉄筋位置 (mm) | | | | | | | |
|--------------|--|-----------|------------|-----|-----|------|-----|----|----|-----|
| | | | -145 | -70 | -30 | -7.5 | 7.5 | 30 | 70 | 145 |
| | | | 最頻出するデータ区間 | | | | | | | |
| 超速硬コンクリート | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 2 | 1 | 7 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 6 | 1 | 7< | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ポリマーセメントモルタル | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 樹脂モルタル | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 35 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 60 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |

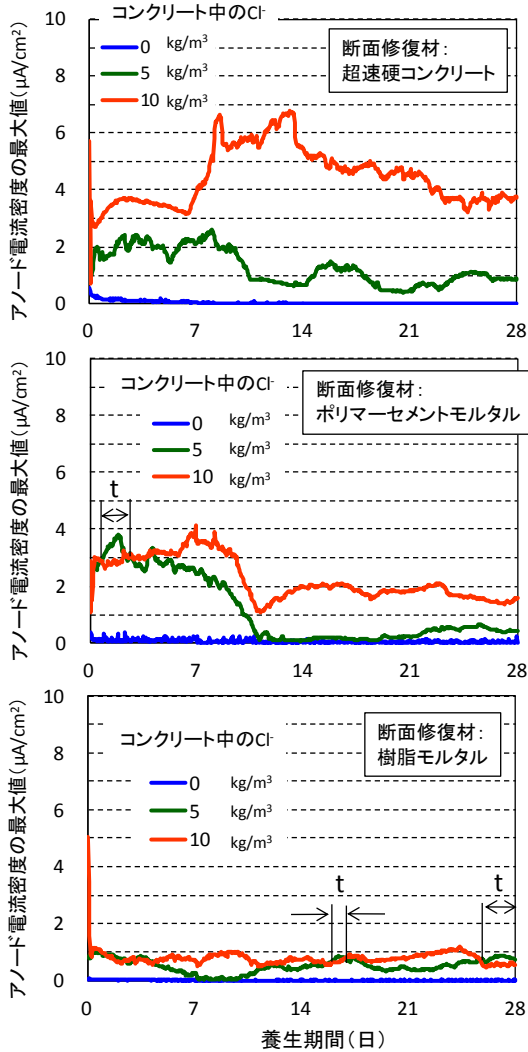


図-5 アノード電流密度の最大値 (環境条件 I)

度数は、全体に対する割合として表示した。図より、断面修復材を超速硬コンクリートおよびポリマーセメントモルタルとした水準では、コンクリート中のCl⁻が増えると、打継付近の鉄筋に生じるアノード電流密度は、より大きなデータ区間の占める割合が増加する。すなわち、より大きなアノード電流密度が発生する頻度が高くなること分かる。また、コンクリート中のCl⁻が同条件のとき、断面修復材が超速硬コンクリート、ポリマーセメントモルタル、樹脂モルタルの順にアノード電流密度の大きなデータ区間の占める割合が多く、大きなアノード電流密度の発生頻度が増加している。つぎに、環境条件Iにて養生時のアノード電流密度の最大値の推移を図-5に示す。アノード電流密度の最大値は、分割した鉄筋すべての測定値から最大となるものを選んだ。図より、コンクリート中にCl⁻を含む水準は、いずれも測定直後からアノード電流が生じている。断面修復材を超速硬コンクリートとした水準では、コンクリート中のCl⁻が大きくなると、アノード電流密度の最大値が大きくなること分

かる。一方、断面修復材をポリマーセメントモルタルおよび樹脂モルタルとした水準は、コンクリート中のCl⁻5 kg/m³の方が、10 kg/m³の場合よりもアノード電流密度の最大値が大きくなる期間(図中の期間 t)が認められる。したがって、断面修復材をポリマーセメントモルタルおよび樹脂モルタルとした水準では、ある時点をピンポイントに測定した場合、コンクリート中のCl⁻とアノード電流の最大値をパラメータとしたとき、正の相関を示さない期間が存在することが分かる。また、セメント系材料は、材齢の経過とともにアノード電流密度の変動する幅が大きい。その原因として、水和反応の進行に伴う物質透過性の低下やセメント水和生成物の変化による固定塩化物イオン量の変化が考えられる。一方、樹脂モルタルは硬化反応が早期に終了するため、材齢初期からアノード電流密度の変動が小さいと推察される。

3.2 環境温度がアノード電流密度に及ぼす影響

環境条件IIにおいて、アノード電流を測定した。最頻出したデータ区間とその鉄筋位置を表-5に示す。デー

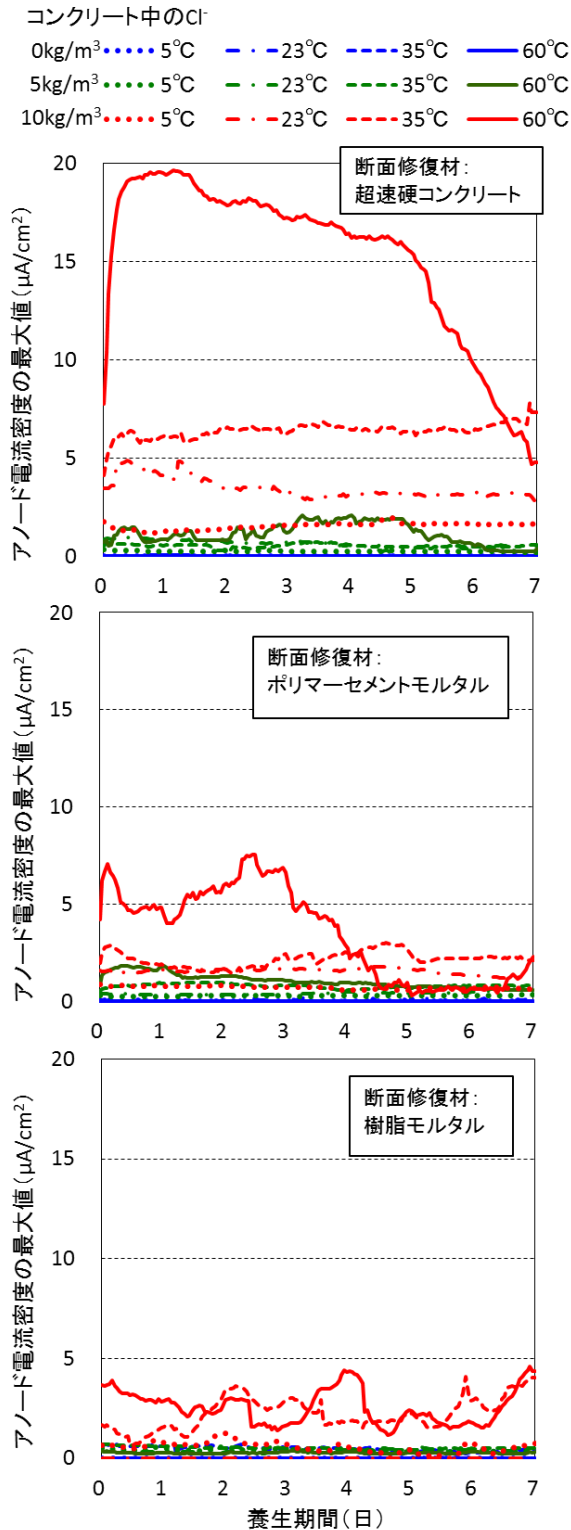


図-6 環境温度とアノード電流密度の最大値

タ区間と対応するアノード電流密度の範囲は、表-4と同様である。なお、同一条件におけるデータ区間をそれぞれの鉄筋位置にて比較し、最大となるものは表中マスに色付けしている。環境温度を変化させた場合、コンクリート中にCl⁻が含まれると、環境温度が上昇するに伴い、データ区間が大きくなる傾向が認められる。つまり、

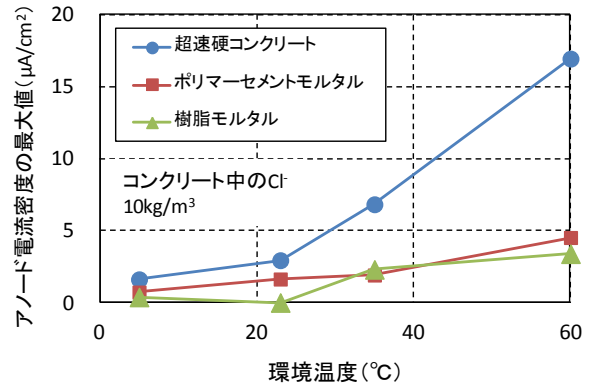


図-7 養生 3.5 日におけるアノード電流密度の最大値

より大きなアノード電流密度が生じることが分かる。また、大きなアノード電流は、主にコンクリート側の打継部付近に発生しており、環境温度が変化してもその発生位置は変わっていない。環境温度が異なる条件で養生した場合のアノード電流密度の最大値の推移を図-6に示す。いずれの断面修復材においても、コンクリート中に添加したCl⁻が0kg/m³のとき、環境温度が5°Cから60°Cに上昇しても、アノード電流密度の最大値は0~0.1μA/cm²の範囲に留まり、時間的な変動も小さい。一方、コンクリート中のCl⁻が5kg/m³および10kg/m³のときは、環境温度が上昇するに伴い、アノード電流密度の最大値が増加する。また、Cl⁻が10kg/m³にて環境温度60°Cのとき、アノード電流密度の最大値の時間的な変動幅が特に大きなことが分かる。加藤らの実験では、コンクリート中の鉄筋交差部で著しいアノード反応が生じた後、鉄筋表面の錆層や周囲の酸素濃度が低下する等の理由で腐食反応が妨げられると、鉄筋交差部がアノードからカソード化している⁴⁾。本条件においても、温度上昇により化学反応速度が増加し、はじめアノード電流密度が大幅に増加したが、時間経過とともに腐食反応が妨げられ、アノード電流が小さくなった可能性が考えられる。超硬コンクリートとポリマーセメントモルタルにおいて、その傾向が大きい。養生期間 3.5 日時点に着目した場合のアノード電流密度の最大値を図-7に示す。図中の水準におけるコンクリート中のCl⁻は10kg/m³である。図より、いずれの断面修復材も、環境温度の上昇により、アノード電流密度の最大値が増加することが分かる。また、断面修復材の違いにより、温度上昇に伴うアノード電流密度の増加量は異なることが分かる。ただし、着目する期間により、アノード電流密度の最大値と環境温度の相関性は変化することに留意しなければならない。

3.3 乾湿繰返しがアノード電流密度に及ぼす影響

環境条件Ⅲにて養生したときのアノード電流密度の最大値を図-8に示す。図より、乾湿繰返しがアノード電

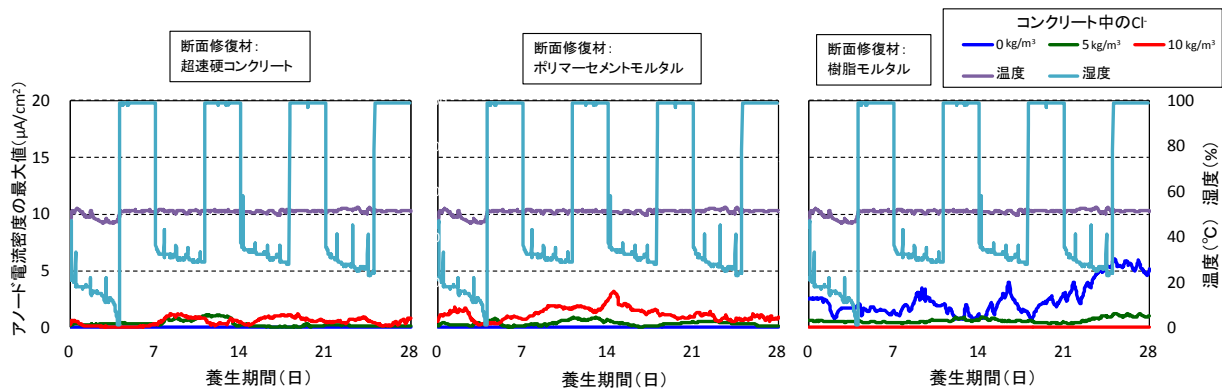


図-8 乾湿繰り返し時のアノード電流密度の最大値

流密度の最大値に及ぼす変化は認められない。また、いずれの水準においても、アノード電流密度の最大値は環境条件ⅠおよびⅡのときと比べ、小さいことが分かる。この原因として、長滝らは、相対湿度 50%のときにアノード電流が小さくなり、材料の比抵抗が増加して腐食速度が抑制されたことを確認しており¹⁾、今回の乾湿繰り返し条件においても、供試体が乾燥したことが考えられる。なお、断面修復材を樹脂モルタルとし、コンクリート中の Cl が 0 kg/m^3 の水準は、Cl を含む水準よりもアノード電流密度の最大値が大きく、時間的な変動幅も大きくなった。しかし、Cl を含む同断面修復材の水準と挙動が大きく異なり、打継界面の剥離や材料のひび割れにより腐食環境が変化した可能性が考えられる。

4. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 環境条件Ⅰにて養生した場合、マクロセル電流は、打設直後からコンクリート側打継部近傍の鉄筋に集中して発生し、コンクリート中の Cl が多いほどその値は増加する。一方、断面修復材側の鉄筋に発生するマクロセル電流は小さい。
- (2) 環境条件Ⅰにて養生した場合、アノード電流の最大値は、ほとんどの期間においてコンクリート中の Cl が多いほど大きな値を示すが、Cl とアノード電流が正の相関を示さない期間も一部存在する。
- (3) 環境条件Ⅱにて養生した場合、コンクリート中に Cl が含まれるとき、環境温度の上昇に伴い、アノード電流密度の最大値は増加する。断面修復材の種類と着目する期間により、アノード電流密度の最大値と環境温度の相関性は異なる。
- (4) 環境条件Ⅲにて養生した場合、環境状態ⅠおよびⅡの場合に比べ、アノード電流密度の最大値は小さくなる。その原因として、乾湿繰り返しにより供試体が乾燥し、材料の比抵抗が増加した可能性がある。

本論文は、鉄筋要素間のアノード電流を測定し、マクロセル腐食を評価した。その結果、アノード電流密度の発生位置や大きさは、コンクリート中の Cl、断面修復材の種類、環境温度および相対湿度の影響を受けることを確認した。アノード電流密度の時間および位置的な挙動をより詳細に把握するためには、今後、鉄筋要素内の電流密度分布、鉄筋の自然電位、材料の比抵抗および物質透過性からのアプローチが必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 長瀧重義, 大即信明, 守分敏郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.544, V-32, pp.109-119, 1996.8
- 2) 長瀧重義, 大即信明, 守分敏郎, 鎌田敏郎, 宮里心一: 断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.31-42, 1997.11
- 3) 大即信明, 久田真, 木村勇人, 宮里心一: 欠陥部がモルタル中铁筋の塩化物によるマクロセル腐食の形態に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.52, 1998
- 4) 加藤絵万, 審良善和, 岩波光保, 横田弘: 断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.399-412, 2010
- 5) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.399-412, 2001
- 6) 浜田秀則, 福手勤, 阿部正美: 塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.2, pp.85-95, 1992