

論文 エポキシ樹脂およびラテックス改質超速硬コンクリートを用いた断面修復工法によるマクロセル腐食対策

薬師寺 輝*1・宮口 克一*2・篠田 吉央*3・郭 度連*4

要旨: 母材コンクリートに塩化物イオンが 10kg/m^3 混入している場合の断面修復工法において、打継面の処理方法および断面修復材の種類を変えた場合の打継界面付近の鋼材に生じるマクロセル腐食の抑制効果を電気化学的測定、内部鋼材のはつり出しにより検証した。その結果、打継面にエポキシ樹脂を使用した場合、および断面修復材にラテックス改質超速硬コンクリートを使用した場合に、マクロセル腐食電流は低く抑えられていることが明らかとなった。これらの組合せによるマクロセル腐食対策が、鋼材のマクロセル腐食を抑制する効果が高いことが示された。

キーワード: マクロセル腐食, 断面修復工法, エポキシ樹脂, ラテックス改質超速硬コンクリート

1. はじめに

塩害等を受けた鉄筋コンクリート構造物を対象に、コンクリートの浮き・はく離箇所等の脆弱部をはつり取り、新たな断面修復材料で埋め戻す断面修復工法が適用されてきた。近年では、道路橋の鉄筋コンクリート (RC) 床版において、交通荷重による疲労、塩害・凍害による材料劣化等に起因する複合劣化が問題となっており、RC床版上面に対して速硬系セメント材料で埋め戻して断面修復する対処法が適用されている¹⁾。しかし、既設コンクリートに塩化物イオンが残存すると、塩化物イオンのない断面修復材との間で、既設部鉄筋をアノード、断面修復部鉄筋をカソードとするマクロセル腐食を起こす場合が多い。マクロセル腐食の発生要因は各種あるが本報では塩害に着目した。塩害によるマクロセル腐食は自然腐食と比較して進行速度が速く、断面修復から数年後に鉄筋腐食による再劣化が報告²⁾されている。

塩化物イオン含有量が異なるコンクリート間に形成されるマクロセル腐食を低減する方法として遮蔽型マクロセル腐食対策が提案されており、アノードとカソードの間の電気抵抗を高め、マクロセル回路の形成を困難にする方法、カソード反応に必要な酸素の供給量を低減する方法が示されている³⁾。アノードとカソードの間の電気抵抗を高める方法としては打継面に電気抵抗性の高い材料を塗布する方法、カソード反応に必要な酸素の供給量

を低減する方法としては物質浸透抵抗性の高い断面修復材を使用する方法がある。電気抵抗性の高い材料としてエポキシ樹脂⁴⁾、物質浸透抵抗性の高い材料として床版上面の断面修復工法に適用されるラテックス改質超速硬コンクリート⁵⁾が知られている。しかし、これらを組み合わせた遮蔽型マクロセル腐食対策による鋼材腐食を検討した事例は少ない。

そこで本研究では、これらを組み合わせた断面修復工法におけるマクロセル腐食対策の鋼材腐食抑制効果を検証することを目的として試験を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験体と環境条件

試験体の概要を図-1に示す。はじめに $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の寸法で表-1に示す配合で母材コンクリートを打ち込んだ。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は花崗岩砕砂、粗骨材は硬質砂岩砕石とし、粗骨材の最大寸法は 20mm 、AE減水剤はポリカルボン酸塩系のものを使用した。また、塩化物イオン量換算で 10kg/m^3 となるように塩化ナトリウムを外割で混和した。

母材コンクリート打込みから28日後に、打継面をディスクサンダーで下地処理を行い、表-2に示す水準の打継用プライマーを塗布し、断面修復材を $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の寸法で打継いだ。表-3に本実験

表-1 母材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
		W	C	S	G	Ad	NaCl(外割)
57	46.7	170	298	826	998	2.7	16

*1 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所 主査 博士 (工学) (正会員)

*3 ショーボンド建設 (株) 技術本部 技術部 主幹 (正会員)

*4 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所 グループリーダー 博士 (工学) (正会員)

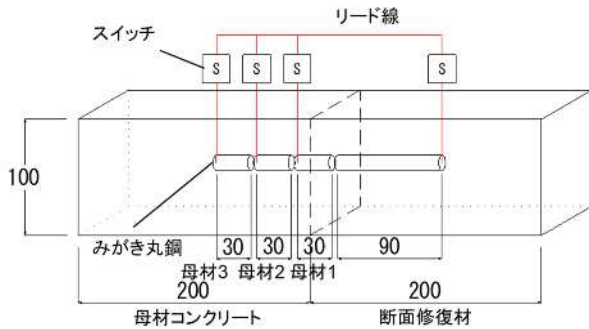


図-1 試験体概要

表-2 試験体水準

記号	打継用プライマーの種類	塗布量 (kg/m ²)	断面修復材の種類
N-P	無塗布	—	ポリマーセメントモルタル
A-P	アクリル系ポリマーディスパージョン	0.12	
E1-P	エポキシ樹脂	0.3	
E2-P	エポキシ樹脂	0.45	
E3-P	エポキシ樹脂	0.68	
N-L	無塗布	—	ラテックス改質超速硬コンクリート
E-L	エポキシ樹脂	1.2	

表-3 ポリマーセメントモルタルの配合

単位量(kg/m ³)	
プレミックス材料	水
1725	297

表-4 ラテックス改質超速硬コンクリートの配合

W/B (%)	単位量(kg/m ³)			
	W	B	S	G
33.5	170	507	677	1041

で使用したポリマーセメントモルタルの配合を示す。表中のプレミックス材料はセメント、細骨材、特殊粉末樹脂、特殊短繊維がプレミックスされたものである。

表-4 に本実験で使用したラテックス改質超速硬コンクリートの配合を示す。

ラテックスはSBR（スチレン・ブタジエンゴム）ラテックスを用いており、平均粒子径 200nm のものであり、練混ぜ水の約 70%をラテックスで置換した。結合材は普通ポルトランドセメントと特殊カルシウムアルミネート系の速硬性混和材をプレミックスした粉体を用いた。粗骨材は表乾密度 2.72g/cm³の硬質砂岩砕石を、細骨材は表乾密度 2.58g/cm³の花崗岩砕砂を用いた。

本研究で使用したポリマーセメントモルタル用のエポキシ樹脂の標準塗布量は 0.45kg/m² であるが、塗布量の違いがマクロセル腐食抑制効果に与える影響を検討す

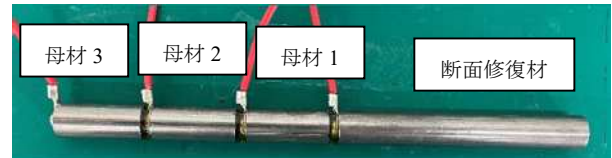


写真-1 埋設した分割鉄筋

るために、標準塗布量より少ない水準 (0.3kg/m²) および標準塗布量より多い水準 (0.68kg/m²) とした。

次に埋設した鋼材を写真-1 に示す。埋設した鋼材はφ13mmのみがき丸鋼を分割したものを使用し、打継面を中心として母材コンクリート側に長さ 30mmの分割鉄筋を 3本、断面修復材側に長さ 90mmの鉄筋を配筋した。なお、分割鉄筋要素間はエポキシ樹脂で接続した。鉄筋には図-1 に示すようにリード線とスイッチを設置し、スイッチがオンの状態で分割鉄筋要素間に電流が流れ、オフの状態で遮断できるようにした。断面修復材の打込み後、試験体は温度 23℃、湿度 60%の恒温恒湿室内にスイッチをオンにした状態で静置し、各種測定を行った。

さらに、温度および湿度の環境変化によるマクロセル腐食電流量への影響を検証するため、試験開始 63 日後に温度 23℃、湿度 90%の環境条件に変化させ、さらに試験開始 77 日後には温度 35℃、湿度 90%に環境条件を変化させた。

2.2 電気化学的測定

(1) 分割鉄筋要素間の電流計測

分割鉄筋要素間の電流を経時的に計測した。スイッチオンの状態で無抵抗電流計を接続した後、スイッチをオフにして電流を計測した。なお、鉄筋からコンクリートへ流出する電流を+（アノード電流）、コンクリートから鉄筋へ流入する電流を-（カソード電流）とした。

(2) 分割鉄筋のアノード分極曲線測定

分割鉄筋間の接続を切断した後、各分割鉄筋要素の分極曲線を測定した。照合電極は飽和銀塩化銀電極 (SSE) を、対極はカーボンシートを使用し、東方技研製 PPS1 ポテンショスタットにて自然電位から +200mV まで 20mV/min.でのアノード分極曲線を測定した。測定電位 E' (mV vs. SSE) は IR 補正し、式(1)により飽和硫酸銅照合電極での電位 E (mV vs. CSE) に換算し温度補正を行った。なお、tは測定時の気温 (°C) である。

$$E = E' - 120.1 - 2 \times (t - 25) \quad (1)$$

2.3 内部鋼材のはつり出し

断面修復材の打込みから 7 か月で試験体から内部鋼材をはつり出し、外観観察を行った。また、取り出した鋼材は JIS Z 2371 に準拠して 20%くえん酸水素二アンモニウム溶液に 90℃で 20 分間浸漬した後、ワイヤブラシ等で腐食生成物を除去した。腐食生成物を除去した後、式(2)により質量減少率 ΔW (%) を算出した。なお、W₀は

腐食生成物除去前の質量 (g), W_1 は腐食生成物除去後の質量 (g) である。

$$\Delta W = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

3. 試験結果

3.1 電流密度

図-2 に断面修復材の打込み後 7 日での電流密度の測定結果を示す。鉄筋位置は打継面を 0cm とし、+側が断面修復材側、-側が母材コンクリート側を示す。全ての水準で断面修復材側がカソード側となることが確認された。アノード部は母材コンクリート側の 1.5cm あるいは 4.5cm の位置となった。また、7.5cm の位置でカソード側となっていることから、本条件では母材と断面修復材間のマクロセルの他に、母材間同士のマクロセルも形成されたと考えられる。これは、母材側のコンクリートに 10kg/m^3 と多量の塩化物イオンを含有するためであると考えられる。すなわち、母材側のアノード電流密度には、断面修復材と母材のマクロセル電流と、母材同士のマクロセル電流を含むため、遮蔽型マクロセル腐食対策の効果は断面修復材側のカソード電流密度で評価することとした。

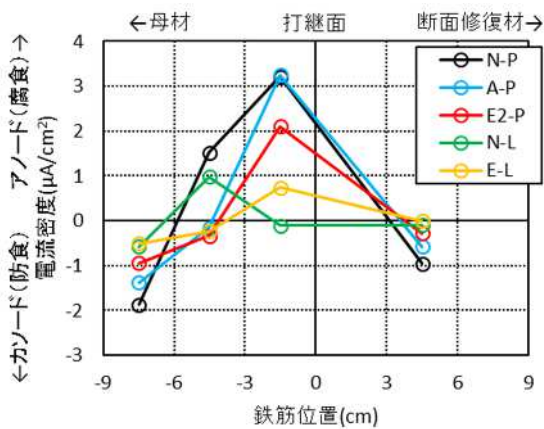


図-2 断面修復材打込み後 7 日での電流密度

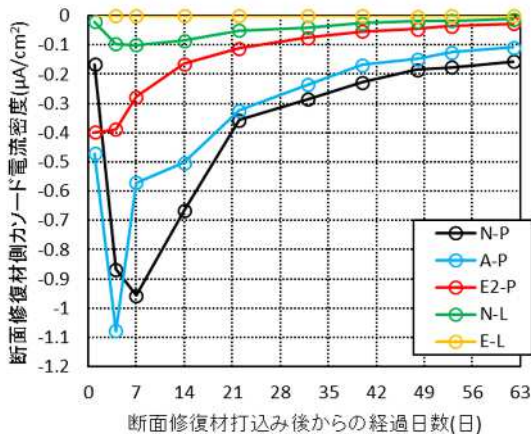


図-3 断面修復材側電流密度の経時変化

図-3 に断面修復材側カソード電流密度の経時変化を示す。試験体水準に関わらず、カソード電流密度は断面修復材の打込み直後に最も大きい値を示し、時間経過とともに減少する傾向を示した。これは、試験体が時間経過とともに乾燥し、電気抵抗が増大したことによるものと考えられる。カソード電流密度は N-P と A-P がほぼ同程度の大きさで推移しており、E2-P, N-L, E-L の順で小さくなっている。このことから、打継用プライマーにアクリル系ポリマーディスパージョンを使用した場合、マクロセル電流の抑制効果はほとんど無く、エポキシ樹脂を使用することによりマクロセル電流を抑制することができると考えられる。

さらに、ラテックス改質超速硬コンクリートで打ち継いだ場合、打継面にエポキシ樹脂を塗布しない場合でもポリマーセメントモルタルと比較してマクロセル電流は非常に低く抑えられており、ラテックス改質超速硬コンクリートのマクロセル腐食抑制効果は大きいと考えられる。これは、ラテックス改質超速硬コンクリートは物質浸透抵抗性と電気抵抗の高さによるものと考えられる。打継面へのエポキシ樹脂の塗布と併用するとマクロセル電流はほぼ流れておらず、マクロセル腐食抑制に非常に効果があると考えられる。

次に、図-4 にエポキシ樹脂の塗布量をパラメータとした断面修復材側カソード電流密度の経時変化を示す。

今回の条件では、塗布量 0.3kg/m^2 と 0.45kg/m^2 ではマクロセル電流に明確な差はみられなかったが、塗布量 0.68kg/m^2 ではマクロセル電流は低下した。これは、図-6 に示すようにエポキシ樹脂の塗布量 0.3kg/m^2 および 0.45kg/m^2 では、打継面の凹凸に対して塗りムラが生じる塗布量であり、樹脂の層が薄い箇所(写真-2の赤線で囲む箇所)が生じ、塗布量 0.68kg/m^2 と比較してマクロセル電流が流れやすい状態であったためと考えられる。一方、塗布量 0.68kg/m^2 では塗りムラはほとんど生じなかったため、効果的にマクロセル電流を抑制できたと考え

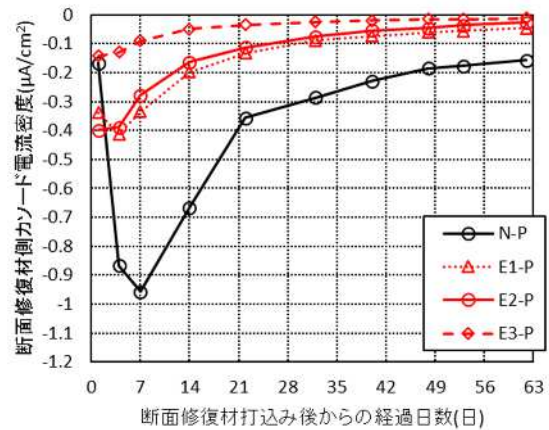


図-4 断面修復材側電流密度の経時変化 (E シリーズ)

られる。

図-5 に暴露環境条件を温度 20℃、湿度 60%から温度 20℃、湿度 90%に変化させた場合（環境変化 1 回目）と温度 20℃、湿度 90%から温度 35℃、湿度 90%に変化させた場合（環境変化 2 回目）の前後の断面修復材側のマクロセル電流密度を示す。なお、20℃60%の測定値は環境変化 1 日前、20℃90%および 35℃90%の測定値は環境変化後 7 日経過時の測定値を示す。

環境変化 1 回目前後のマクロセル電流密度を比較すると、環境変化後に全ての試験水準で増加がみられた。湿度の上昇により試験体の電気抵抗が小さくなり、マクロ

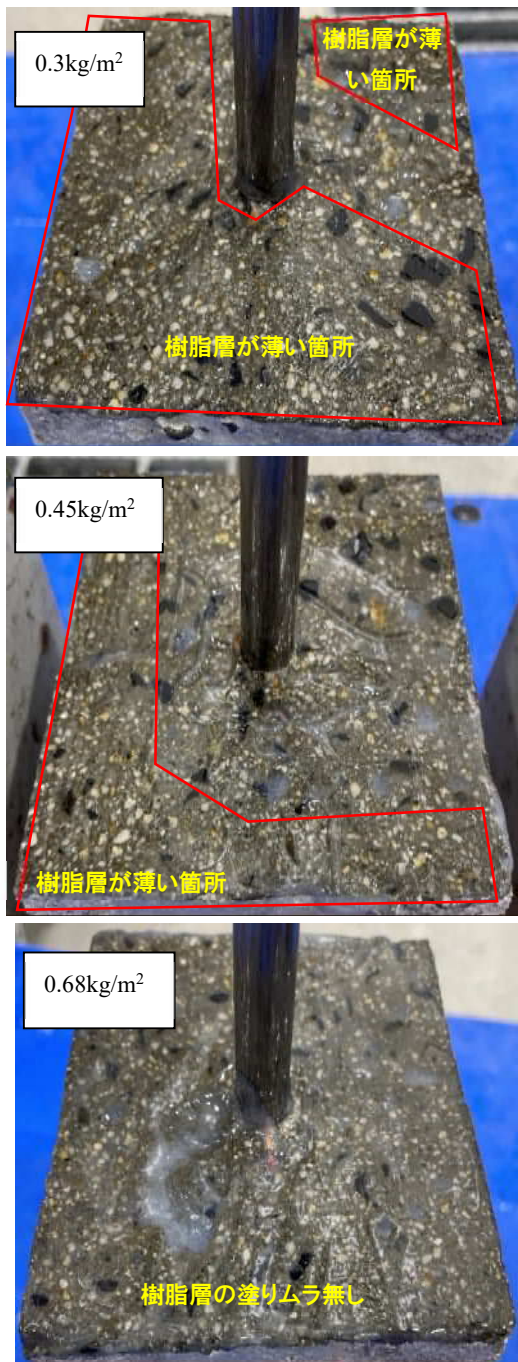


写真-2 エポキシ樹脂の塗布状況

セル電流が流れやすくなったことによるものと考えられる。

環境変化 2 回目前後のマクロセル電流密度についても全ての試験水準で増加がみられた。これは、温度の上昇により腐食反応が促進されたためと考えられる。加えて、空気中の水蒸気量も増加しているため、試験体の電気抵抗がさらに小さくなっていると考えられ、マクロセル電流がより流れやすくなったためと考えられる。

3.2 アノード分極曲線

図-6 に断面修復材側鉄筋のアノード分極曲線を示す。ターフェル勾配は各水準の自然電位から+50~+100mVの範囲における直線の勾配と定義した。全ての水準について、同様にその直線と自然電位との交点を鉄筋腐食電流密度 I_{corr} (mA/m²) とした。

I_{corr} はいずれの試験体でも 1.0mA/m²以下となり、CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度の判定基準⁹より不動態状態と判定される。これは、腐食電流の計測結果から断面修復材側の鉄筋は試験体水準に関わらずカソード側となることと合致する結果である。

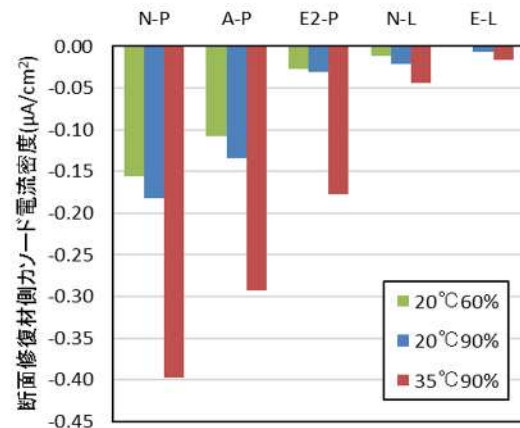


図-5 環境条件変化前後の断面修復材側電流密度

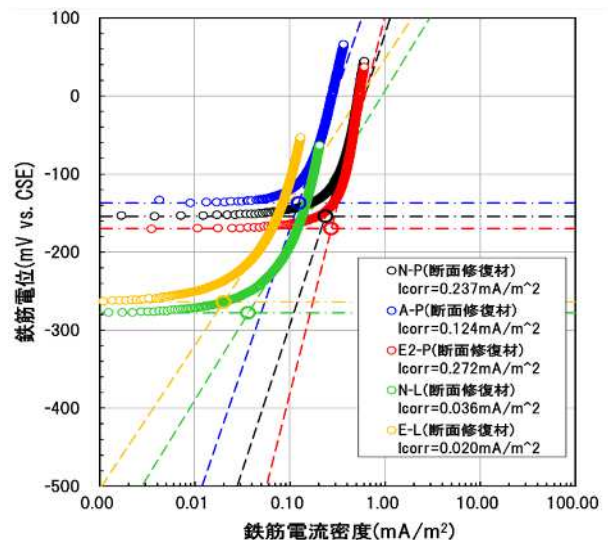


図-6 断面修復材側鉄筋のアノード分極曲線

N-L および E-L の鉄筋腐食電流密度はその他の水準と比較して概ね一桁小さい結果となった。一方、N-L および E-L の鉄筋電位はポリマーセメントモルタルと比較して卑な（低い）値を示し、ASTM の腐食不確定域にある⁶⁾。既往の研究によると鉄筋周囲の溶存酸素の供給速度が小さいと腐食反応の進行により酸素不足の状態になり、鉄筋電位は卑化するためと考えられる⁷⁾。したがって、ラテックス改質超速硬コンクリートは物質浸透抵抗性が高いため、鉄筋周囲の溶存酸素濃度が低くなり自然電位が卑な傾向にあるにも関わらず、電気抵抗は高いため鉄筋腐食電流密度は極めて小さく不動態化していると考えられる。

図-7 に母材側鉄筋のアノード分極曲線を示す。なお、母材側の3本の分割鉄筋のうち、最も自然電位が低い（卑な）鉄筋の分極曲線を示し、凡例の () 内にその鉄筋を示す。いずれの試験体でも、自然電位は ASTM の腐食有り確率 90%域にあり、鉄筋腐食電流密度は概ね 2.0mA/m² 以上となり CEB による腐食速度の判定基準より腐食状態であると判定される。

この結果より、母材コンクリートに塩化物イオン 10kg/m³ が混入している場合、断面修復方法に関わらず母材側の鉄筋は腐食状態となった。これは、母材コンクリート中のマイクロセル腐食および母材間で形成されるマクロセル腐食によるものと考えられる。

3.3 内部鋼材の外観観察と質量減少率

写真-3 に母材側鉄筋の腐食状況を、表-5 に質量減少率と図-7 より求めた鉄筋腐食電流密度 I_{corr} を示す。なお、打継面の位置に近い方から順番に母材 1 (1.5cm)、母材 2 (4.5cm)、母材 3 (7.5cm) とする。アノード分極曲線の測定結果から考えられる通り、母材側鉄筋は全ての試験体で腐食がみられた。質量減少率の結果から母材側の鉄筋は一様に腐食しているのではなく、腐食箇所により偏りがみられた。これは、母材内でアノード部とカソード部が混在し、母材側鉄筋間同士でもマクロセルが形成され、あるいは1つの分割鉄筋内にもマクロセルやマイクロセルが形成されているためと考えられる。また、図-7 で高電流密度側に分布する N-L、E-L は質量減少率が他より小さい結果となった。ただし、図-7 は自然電位が最卑鉄筋の分極挙動で、A-P を除くとターフェル法で求め

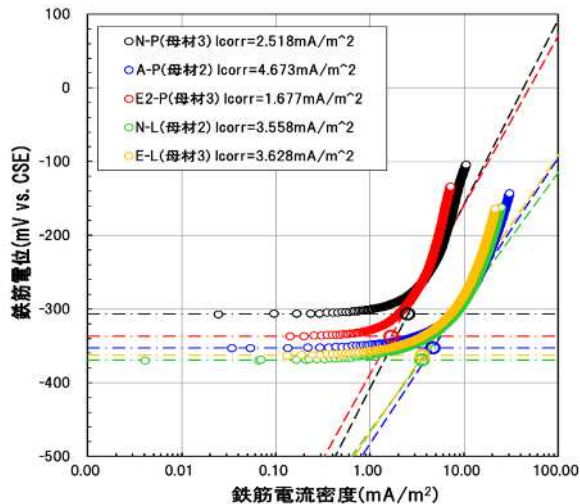


図-7 母材側鉄筋のアノード分極曲線

ド部が混在し、母材側鉄筋間同士でもマクロセルが形成され、あるいは1つの分割鉄筋内にもマクロセルやマイクロセルが形成されているためと考えられる。また、図-7 で高電流密度側に分布する N-L、E-L は質量減少率が他より小さい結果となった。ただし、図-7 は自然電位が最卑鉄筋の分極挙動で、A-P を除くとターフェル法で求め

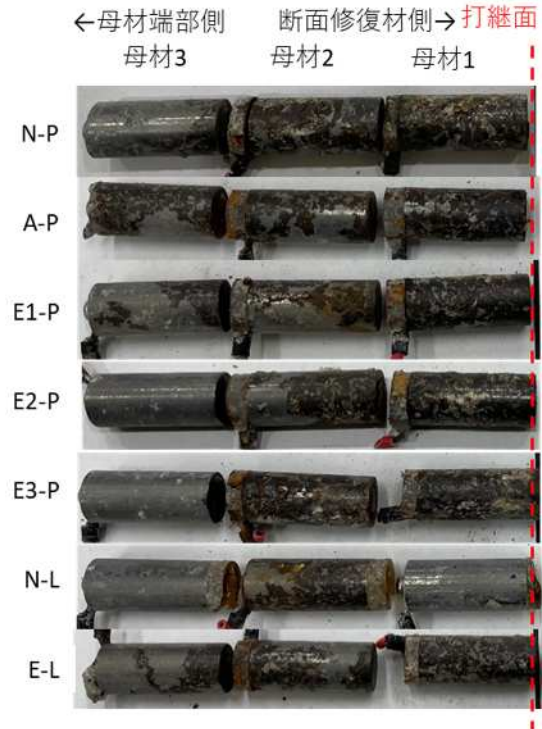


写真-3 母材側鉄筋の腐食状況

表-5 母材側鉄筋の質量減少率と鉄筋腐食電流密度

試験体水準		質量減少率(%)		I_{corr} (mA/m ²)
		個別	平均	
N-P	母材1	1.80	1.30	—
	母材2	1.60		—
	母材3	0.49		2.518
A-P	母材1	1.05	0.86	—
	母材2	0.42		4.673
	母材3	1.11		—
E1-P	母材1	1.11	0.81	—
	母材2	0.98		—
	母材3	0.33		—
E2-P	母材1	1.08	0.75	—
	母材2	0.92		—
	母材3	0.26		1.677
E3-P	母材1	1.01	0.96	—
	母材2	1.57		—
	母材3	0.29		—
N-L	母材1	0.00	0.32	—
	母材2	0.95		3.558
	母材3	0.00		—
E-L	母材1	0.78	0.61	—
	母材2	0.33		—
	母材3	0.72		3.628

た腐食電流密度と質量減少率は概ね相関があった。A-Pは母材同士のマクロカソードの可能性もあり潜在的には腐食が大きくなる可能性も考えられる。

次に、図-8に母材側鉄筋の電流密度の経時変化を示す。鉄筋電流密度が本研究の計測期間を通してほぼ-（カソード）となるのはN-P母材3、A-P母材2、E1-P母材3、E2-P母材2、3、E3-P母材3、N-L母材1、3、E-L母材2、3となる。表-5に示すようにこのカソードとみなせる鉄筋の質量減少率は低い結果となっている。

一方、+（アノード）の電流密度となる鉄筋は質量減少率が高い結果となっている。これは、母材側鉄筋間においてもアノード部とカソード部が形成されており、母材側鉄筋のアノード部がカソード部と比較して腐食の進行が早くなることが示唆される結果である。

試験体水準ごとの鉄筋の質量減少率の平均値について、N-Pと比較すると、すべての試験体で母材の鉄筋の質量減少率は低い結果となり、特にN-L、E-Lは質量減少率が低い。このことから、特に断面修復材としてラテックス改質超速硬コンクリートを使用したものが母材側鉄筋

の腐食抑制にも効果があることが示唆される結果となった。これは、図-8に示すように断面修復材としてラテックス改質超速硬コンクリートを使用したものは、断面修復材の打込み直後から母材側鉄筋のマクロセル電流を抑制できたことによるものと考えられる。

4. まとめ

以下に本研究により得られた結論を示す。

- (1) 断面修復材の打込み直後に母材側をアノード、断面修復材側をカソードとするマクロセル回路を形成し、マクロセル電流が流れるが、マクロセル腐食対策として、打継用プライマーにエポキシ樹脂、断面修復材にラテックス改質超速硬コンクリートを使用することマクロセル電流量が低下することを確認した。
- (2) 打継用プライマーの有無、断面修復材の種類に関わらず、母材と断面修復材間のマクロセル回路とは別に母材側鉄筋同士でもマクロセルやマイクロセルを形成すると示唆された。
- (3) マクロセル腐食対策として、断面修復材にラテックス改質超速硬コンクリートを用いることにより、母材側鉄筋の腐食抑制にも効果があることが示唆された。

参考文献

- 1) 小野秀一, 渡邊晋也, 松本政徳, 谷倉泉, 長谷俊彦: 鉄筋コンクリート床版上面の断面修復技術に関する研究, 橋梁と基礎, Vol.54, No.8, pp.43-46, 2020.8
- 2) 濱田秀則, 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, 1992.7
- 3) 宮里心一: 断面修復部における遮蔽型マクロセル腐食対策, コンクリート工学, Vol.59, No.5, pp.452-455, 2021.5
- 4) 畑中達郎, 宮里心一: エポキシ樹脂の塗布による断面修復後のマクロセル腐食対策, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.70, No.5, pp.1179-1180, 2015.9
- 5) 郭度連, 宮口克一, 山川錦上: 低弾性ラテックス改質超速硬コンクリートの基礎物性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Vol.20, pp.7-10, 2020.10
- 6) 例えば公益社団法人日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'22[基礎編], pp.193-200, 2022.3
- 7) 篠田吉央, 望月紀保, 高久豊広, 小林浩之: 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1, pp.1157-1162, 2011.7

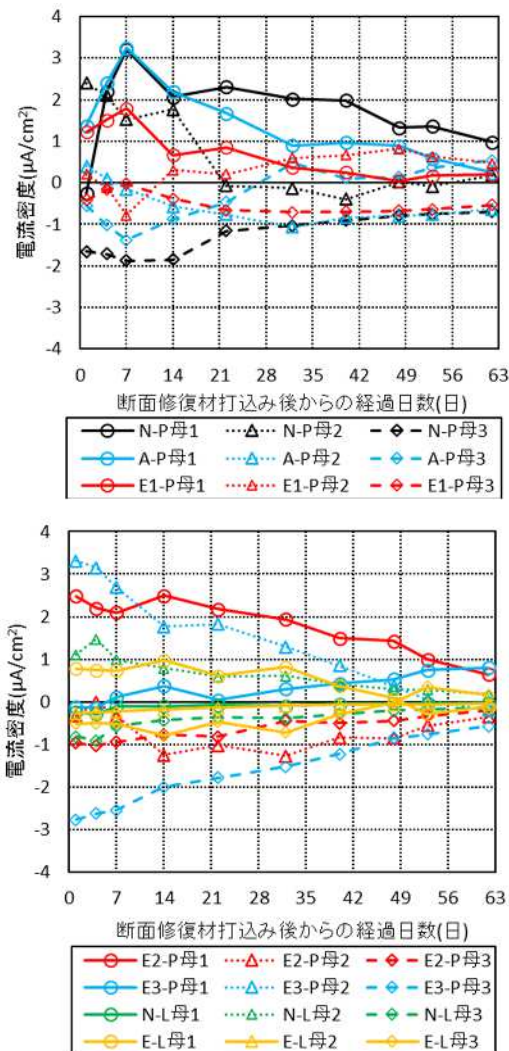


図-8 母材側鉄筋の電流密度の経時変化