

論文 断面修復により補修した RC 構造物の断面修復材の違いが防食性に及ぼす影響

正田 詩織*1・審良 善和*2・山口 明伸*3・川上 隆*4

要旨：部分断面修復後の環境差による電位差を駆動力としたマクロセル腐食による再劣化の防止のため、修復材は母材の材料特性と類似したポリマーセメントモルタルの使用が望ましい。しかし修復材中のポリマーが腐食に与える影響は不明瞭であり、含有量に明確な基準が設けられていないことから、防食性が最良のポリマー含有量を明らかにするため実験的検討を行った。加えて修復時に鉄筋に塗布する鉄筋防錆材の種類が防食性に与える影響についても検討した。その結果、ポリマーセメント比が 5%程度の断面修復材の防錆性が高いことが確認された。また、防錆材は塩分吸着系の防錆性が高いことが明らかとなった。

キーワード：塩害、断面修復工法、マクロセル腐食、ポリマーセメントモルタル、鉄筋防錆材

1. はじめに

国内のインフラ構造物の多くは供用開始から 50 年が経過し、老朽化が深刻化している。持続可能な社会の実現のため、インフラ整備は新設の時代から維持管理の時代へと変遷し、予防保全型インフラメンテナンスによる老朽化対策が進められている。これに伴って様々な補修工法の研究・開発が進み、構造物の高齢化社会への対応が活発化してきている。

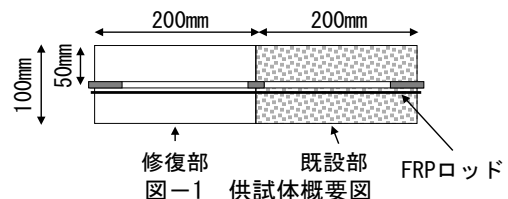
塩害によって劣化した RC 構造物に対しては、補修工法の一つである断面修復工法による補修が多く適用されている。ここで、断面修復工法とは、コンクリート構造物の劣化部となる変状部（ひび割れ、浮き、剥離、鉄筋露出などの変状）および塩化物イオンなどの劣化要因が許容限度を超えて残存している部分などを除去した後に、断面修復材を用いて断面欠損部を修復する工法である。この工法を適用することにより、劣化コンクリート部分の性能回復が期待される。断面修復材には、一般的に施工性、一体性および劣化因子の浸入抑制等の性能の向上が期待されるポリマーセメント系材料が使用される。また、施工では、劣化部を全て取り除いて断面修復されるのが基本であるが、経済的制約等もあり腐食発生限界塩化物イオン量を超える既設コンクリートを残した状態での部分断面修復が行われることもある。その場合は、既設コンクリート部と断面補修部との境界部で局所的なマクロセル腐食が発生する可能性が高く、早期の再劣化が懸念される。既往の研究により、このマクロセル腐食の発生メカニズムは明確になっているもの¹⁾²⁾、使用する断面修復材の違いによる腐食への影響は定量化されていないのが現状である。修復に用いられる材料について、

ポリマー含有量がマクロセル腐食に及ぼす影響に関する検討が行われ、ポリマーを含有することによって電気抵抗が増加し腐食抑制に効果がある可能性が示唆された³⁾。一方で、含有されるポリマーの量の変化に伴い腐食性状には差がみられた³⁾。マクロセル腐食の発生は既設部-断面修復部間の鉄筋の環境差による電位差、すなわち塩化物イオン濃度および溶存酸素量の差異などに起因すると考えられる。そのため、現在では既設部-断面修復部間の導電性の差異が小さい断面修復材が選定される⁴⁾。しかしながら、一般に用いられる断面修復材はプレミクス材料であり、使用材料および配合等の情報は不明である。加えて、断面修復を実施する際には内部鉄筋に防錆材を塗布することも少なくない。断面修復部に塗布される鉄筋防錆材はマクロセル腐食の解消および延命化を期待したものと予想されるが、その効果は十分に明らかになっていない。そこで、本研究では断面修復材に含有されるポリマー量に加え内部鉄筋に塗布された防錆材に着目し、補修後の鉄筋腐食に及ぼす影響を定量的に評価することを目的として実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体概要図を図-1 に、供試体の種類を表-1 に示す。供試体寸法は 100mm × 100mm × 400mm である。部



*1 鹿児島大学 大学院 理工学研究科 工学専攻 海洋土木 PG (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 博士 (工学) (正会員)

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

断面修復を模擬するため、供試体中央から半分を断面修復部、残り半分を既設部とした供試体を各水準3体ずつ作製した。供試体中にはφ16の黒皮を除去した丸鋼を断面図心に埋設した。なお、各水準の供試体1体には電気化学的測定によるモニタリング（電位、電流等）を実施するため既設部-断面修復部の境界で丸鋼を分割し、両端にケーブルを結線した。また、暴露試験中に曲げによるひび割れが発生しないように、引張側のかぶり50mm位置にφ7.4mmのアラミド系FRPロッドを埋設した。

既設部を模擬したコンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比(W/C)を50%とし、目標スランプを10±2.0cmとなるようにAE減水剤を使用して調整した。また、塩害によって劣化した状態を模擬するため、コンクリート中の塩化物イオン量が2.0kg/m³および5.0kg/m³となるようNaClを外割で添加した。材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)を、細骨材に海砂(密度:2.61g/cm³,吸水率:2.3%)を、粗骨材に最大粗骨材寸法20mmの鹿児島県福山産砕石(密度:2.63g/cm³,吸水率:1.71%)を用いた。

断面修復材の配合を表-3に示す。単位水量は230kg/m³一定で、W/Cを40%とし、ポリマー含有量が鋼材腐食に及ぼす影響を確認するためにポリマーセメント比(P/C)を0%、3%、5%、8%、10%および15%と変化させた。材料は、アクリル系粉体ポリマー、セメントに普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)、細骨材に粒度調整のため4種類のけい砂(密度:2.54g/cm³)を用いた。ポリマーは細骨材の一部に置換し混入させた。

供試体の作製方法は、まず既設部のコンクリートを打設し、1日封かん養生後、塩害環境下での部分断面修復を模擬するため、飛来塩分量が4.9mg/dm²/year程度の海洋暴露場の護岸に24時間静置させた。その後、P/C=5%の供試体の一部の鉄筋に防錆材を塗布し、断面修復を行い材齢28日まで封緘養生した。なお、試験面は4面とし、端部2面をエポキシ樹脂によって被覆した。

2.2 暴露試験概要

暴露試験は、鹿児島大学内の日射および降雨を受ける校舎屋上で行った。一般屋外環境であり、飛来塩化物イオンの影響はない環境である。暴露状況を写真-1に示す。暴露期間は6か月である。

2.3 検討項目

(1) 自然電位および分極曲線

自然電位の測定は、分割鉄筋を用いて、既設部および断面修復部の自然電位を計測した。計測は、セル鉄筋間を電氣的に切断し24時間後の電位を自然電位とした。また、直線分極試験を暴露から3か月経過後に実施した。試験条件は、掃引速度20mV/minとし、自然電位からマイナス方向、プラス方向ともに200mVまで分極させた。

表-1 供試体種類

既設部 塩化物イオン量 (kg/m ³)	断面修復部		
	ポリマーセメント比 (P/C)	防錆材	単位ポリマー量 (kg/m ³)
2.0	0%	無	0
2.0	3%	無	17.3
2.0	5%	無	28.8
2.0	8%	無	46.0
2.0	10%	無	57.5
2.0	15%	無	86.3
2.0	5%	塩分吸着系	28.8
2.0	5%	亜硝酸系	28.8
2.0	5%	樹脂系	28.8
5.0	0%	無	0
5.0	3%	無	17.3
5.0	5%	無	28.8
5.0	8%	無	46.0
5.0	10%	無	57.5
5.0	15%	無	86.3
5.0	5%	塩分吸着系	28.8
5.0	5%	亜硝酸系	28.8
5.0	5%	樹脂系	28.8

表-2 既設部のコンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
50	41.7	175	350	714	1033

表-3 断面修復材の配合

P/C (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	P	S
0	40	230	575	0	1554
3		230	575	17.3	1467
5		230	575	28.8	1410
8		230	575	46.0	1324
10		230	575	57.5	1266
15		230	575	86.3	1122



写真-1 供試体暴露状況

(2) 電流密度モニタリング

既設部-断面修復部間に発生するマクロセル電流をシャント抵抗(1Ω)を用いて電圧降下法により測定し、鉄筋表面積を除すことによって電流密度を算出した。計測間隔は1時間である。

(3) 腐食面積率

暴露6か月後、供試体を解体し、防錆材を除去後、鉄筋の腐食箇所をトレースし腐食面積を算出した。これを、鉄筋の表面積で除すことによって腐食面積率を求めた。

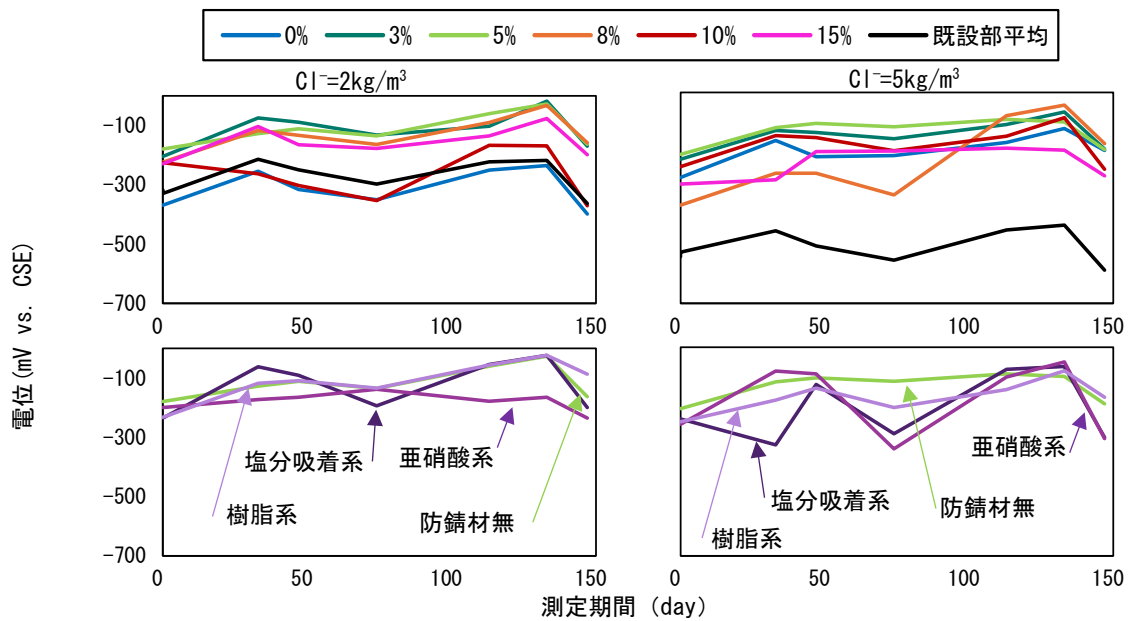


図-2 自然電位の経時変化

3. 結果および考察

3.1 自然電位

図-2 に暴露開始からの断面修復部および既設部の自然電位の経時変化を示す。なお、全供試体の既設部の自然電位は平均化し図中に示した。塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 のときの既設部の自然電位は 300mV vs. CSE 程度であり、断面修復部の自然電位と同程度の値を示していた。対して塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 のときの既設部の自然電位は断面修復部と比較して卑な値を示した。これは、塩化物イオン量の違いによる鋼材の腐食環境の違いによる。一方で、断面修復部の自然電位は、ポリマー量の違いにより異なる電位を示していることが分かる。塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 の場合では、既設部の自然電位が卑であるため、いずれの断面修復部の鉄筋もカソードを示すと予想される。一方で、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 では、P/C が 0% および 10% の場合、既設部の鉄筋よりも卑な電位が計測されており、本来カソードとなる断面修復部がアノードとなる可能性が認められた。原因についてはポリマー・鉄筋周辺の水分量の違いなどが考えられるが、不明な部分が多く今後の課題とする。

図-3 にモニタリング期間で計測された自然電位の平均値から算出した既設部-断面修復部間の有効電位差を示す。塩化物イオン量の違いでは、塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 の有効電位差が明らかに大きくなる傾向にあり、これは既設部の腐食性の高さに起因する。一方、ポリマー量の違いによる変化をみると、 5.0kg/m^3 の場合は、P/C=3%のときが最大で、P/C が大きくなるにしたがい有効電位差は低下する傾向を示した。対して、 2.0kg/m^3 の場合では、P/C=0%のときは正極・負極が逆転する状況となり、P/C が大きくなるにしたがい有効電位差は増加す

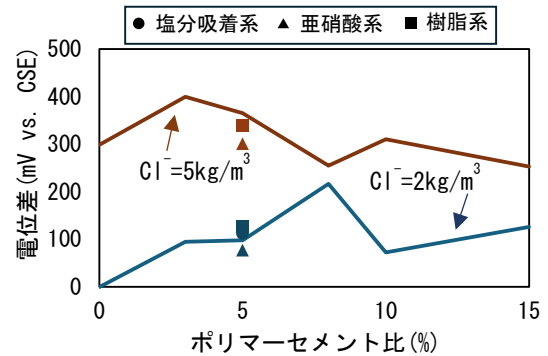


図-3 断面間の有効電位差

る傾向を示した。このように、既設部の腐食環境の違いにより既設部-断面修復部間のマクロセル環境は異なる可能性が高い。いずれにしても、ほとんどの場合は断面修復部がカソードとなるマクロセル腐食環境を形成することは明らかである。加えて、既設部では経時変化に伴う電位の変化はほとんど見られなかったのに対し、断面修復部では既設部の塩化物イオン量に関わらず電位がやや貴化する傾向が認められた。これは既設部のコンクリートと比較し、断面修復部のモルタルでは含水率が低下することによって乾燥状態となった³⁾ことが一因である。より貴化した場合には既設部・断面修復部間の電位差が拡大しマクロセル腐食速度が大きくなる可能性もある。

鉄筋防錆材を併用した場合の自然電位については、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 のとき防錆材の有無にかかわらずおおむね同程度の自然電位が得られた。塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 のとき、 2.0kg/m^3 の時と比較して自然電位の経時的な変化が大きくなる傾向が認められた。これについての原因は不明である。

3.2 分極曲線

既設部のカソード分極曲線を図-4 に示す。塩化物イ

オン量が 10.0kg/m^3 の場合の結果については、既往の研究³⁾を参考とした。グラフより、既設部は塩化物イオン濃度が低いほど、分極曲線が左上方向にシフトしており、塩化物イオン量の増加によって内部鋼材はより腐食しやすい環境にあるといえる。特に塩化物イオン量が 10.0kg/m^3 のときは、電流密度、分極曲線の曲率ともに大きくなっていったことから、酸素拡散限界に近い激しい腐食環境にある。なお、 2.0kg/m^3 および 5.0kg/m^3 の内部分極曲線は同一線上にあると推察され、アノードの変化により分極挙動が異なっていると考えられる。

次に、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 の各供試体の断面修復部におけるカソード分極曲線を図-5 に示す。既設部分の分極曲線と比較すると、ほとんど供試体において電流密度が小さな位置に描かれたため、断面修復に伴って鉄筋表面は腐食が進行し難い環境となっており、断面修復工法は塩害劣化した構造物の鉄筋防錆に効果的な補修工法であるといえる。分極曲線は $\text{P/C}=0\%$ のとき電流密度、腐食速度が最大となり、 $\text{P/C}=3\%$ から 8% では曲線は左上にシフトして描かれたが、ポリマー量を増加した $\text{P/C}=10\%$ のとき電位が単化し、腐食速度も増大した。断面修復材に含有されるポリマー量が過剰な時、およびポリマー無混和の場合には、十分な不動態が形成されていない可能性が高いと考えられる。これは、供試体作製時に塩害雰囲気中に1日間静置させたことで断面修復部に付着した塩化物イオンおよび、セメントの水和反応と同時に形成したポリマーフィルムが鉄筋表面に付着したことによる影響⁴⁾ が考えられる。

防錆材の有無に伴うカソード分極曲線の変化に着目すると、亜硝酸系防錆材の電位が卑な位置に曲線が描かれた。亜硝酸イオンによる防錆効果により電位は貴化すると予想されたが、3か月程度の期間では十分な効果が得られていない可能性が高い。今後、アノード分極挙動を確かめることで評価したい。塩分吸着系防錆材を用いた鉄筋の腐食速度は減少した。これは、付着した塩化物イオンが無害化された効果であると推察される。したがって、断面修復を施工する際に構造物の鉄筋に塩化物イオンが付着する環境にある場合、塩分吸着系防錆材を用いることにより、防錆材の塩分固定化が有効に働き、修復後の防錆に効果的と考えられる。

3.3 マクロセル電流

暴露開始から6か月までの P/C ごとの電流密度の経時変化を図-6 に示す。すべての供試体において、塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 のとき電流は既設部の鉄筋の腐食が進行する電流（グラフ正方向）が計測され、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 のときはほとんどの供試体で断面修復部の鉄筋の腐食が進行する電流（グラフ負方向）が計測された。また、正負は逆になるが、既設部-断面修復部間に

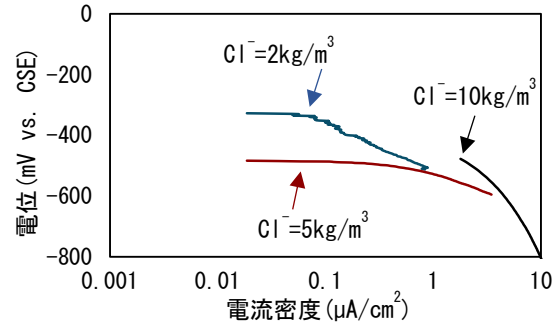


図-4 既設部カソード分極曲線

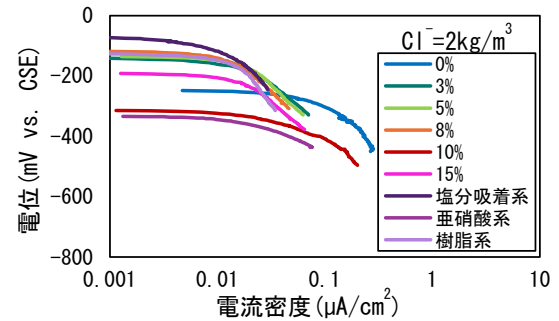


図-5 修復部カソード分極曲線

流れる電流は既設部の塩化物イオン量が多いほうが増加する傾向を示した。これは、自然電位から考察された通り既設部-断面修復部間の有効電位差の拡大がマクロセル腐食電流の増加に影響を及ぼしていると考えられる。

図-7 に計測された電流から求めた暴露6か月までの積算マクロセル電流と P/C の関係を示す。既設部側のマクロセル電流が大きかったのは $\text{P/C}=3\%$ および 8% の供試体であった。両供試体は継続的にマクロセル電流が計測されていた。図-3 に示す有効電位差の結果から、 $\text{P/C}=3\%$ の場合は最も有効電位差が大きくマクロセル腐食を起こしやすい状態にあったと考えられる。 $\text{P/C}=8\%$ については、現時点で明確な判断はできないが既報⁴⁾ で示した通りポリマーが影響した可能性が高い。

断面修復部側のマクロセル腐食電流で特に大きな電流が計測されたのが、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 のときの $\text{P/C}=10\%$ の場合であり、次いで $\text{P/C}=0\%$ の場合であった。初期の電流が大きく、徐々に電流は低減する傾向にある。これは、いずれも暴露前に鉄筋に付着した塩化物イオンの影響で大きなマクロセルを形成したことが影響していると予想される。しかし、徐々に電流は低減する傾向にあり、これは塩化物イオンの拡散によるものと予想される。

防錆材を塗布した鉄筋の場合、無被覆の $\text{P/C}=5\%$ の供試体と比較すると、塩分吸着系および樹脂系の防錆材の電流は小さくなる傾向にある。一方、亜硝酸塩系の電流は同程度か若干多くなる傾向にあり、マクロセル腐食を抑制しにくい環境にあると予想される。

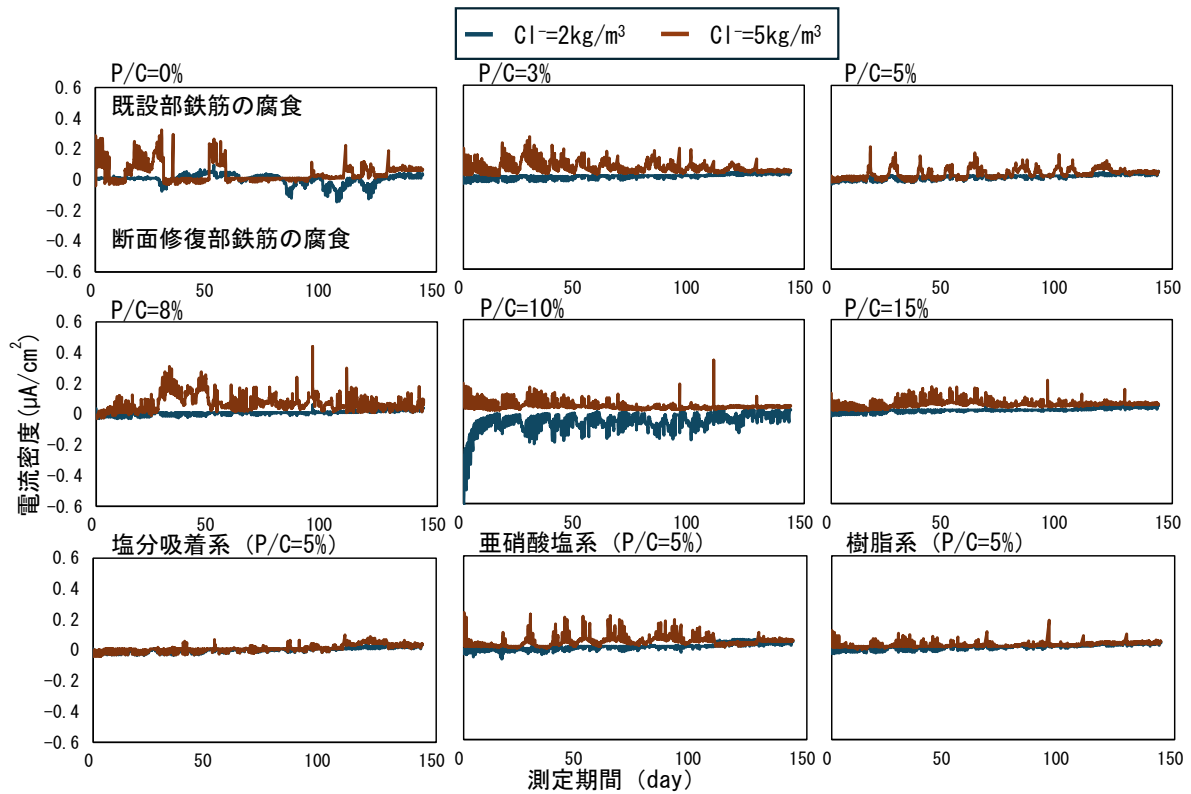


図-6 電流密度経時変化

3.4 腐食面積

暴露開始から6か月経過後の供試体を各水準1体ずつ解体し鉄筋の腐食状況の観察および腐食面積率を算出した。取り出した鉄筋の腐食状況を写真-2に示す。断面修復部に埋設されていた丸鋼はいずれも金属光沢が確認され、激しい腐食は見られなかった。ただし、P/C=0%の供試体には断面修復部に腐食が確認された。これは、自然電位およびマクロセル電流の経時変化からもわかるように、電位の逆転現象が起こることによる断面修復部側へのマクロセルが生じていたためであると考えられる。おそらく、供試体作製時に海上大気中に静置したことによる鉄筋表面の塩化物イオンの付着が影響していると推察される。一方で、既設部に埋設されていた丸鋼はほとんどの供試体で激しい腐食が確認された。これは、既設部-断面修復部間のマクロセル腐食に加え、既設部内でのマクロセル腐食も進行したためであると考えられる。

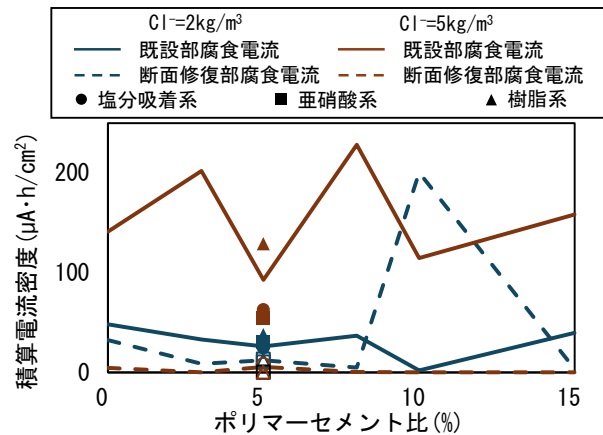


図-7 積算電流とP/Cの関係

鉄筋防錆材を塗布した鉄筋の腐食状況は、塩分吸着系および樹脂系の既設部側の鉄筋の腐食程度が少し小さくなる傾向にあった。また、亜硝酸塩系および樹脂系の断面修復部側の鉄筋表面は黒変しており、安定な錆層の形

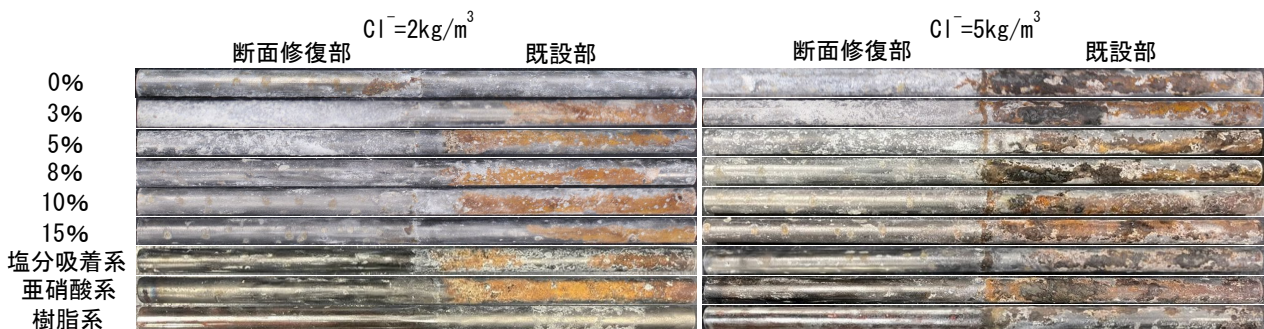


写真-2 鉄筋腐食状況

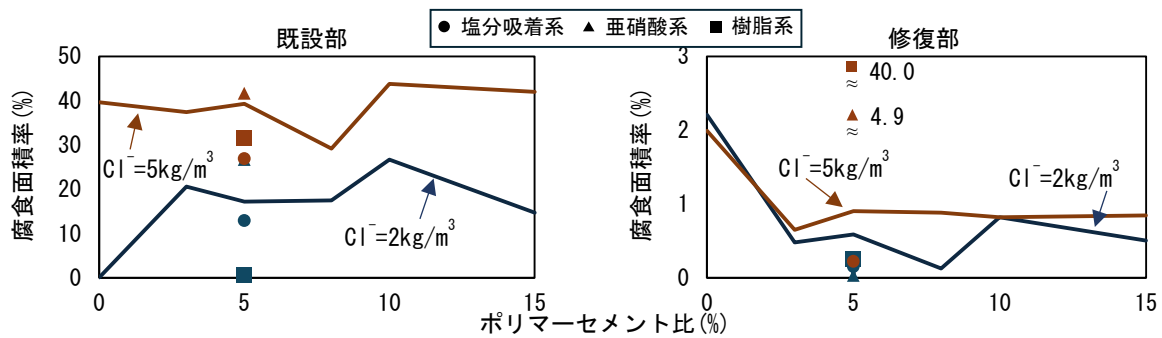


図-8 試験水準別腐食面積率

成が進んでいる可能性が高い。

鉄筋の腐食面積率と P/C の関係を図-8 に示す。既設部の腐食面積率に関して、塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 の腐食面積率は概ね一定となった。一方、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 の腐食面積率は P/C=0%のみ腐食の発生が認められず、カソードとして作用していたと考えられる。それ以外のポリマーを混和した場合には概ね一定の腐食面積率となった。マクロセル電流では P/C の違いにより電流密度は変化した、あまりその影響を受けていない状況である。腐食面積はあくまで腐食範囲を評価するものであるため、影響程度の定量については長期的な暴露試験により腐食減量の測定を行うことで評価したい。今後の課題である。

一方、断面修復部側の腐食に関しては、ポリマー無混入の鉄筋の腐食面積率が大きく、ポリマーセメントによる断面修復による防錆効果を確認することができる。ただし、ポリマー量に違いによる影響は現時点では不明である。こちらについても、今後の課題とする。

防錆材を塗布した場合には、既設部の鉄筋の腐食面積率は防錆材無塗布の場合と比較して亜硝酸塩系を塗布したもので若干大きくなる傾向を示し、塩分吸着系および樹脂系を塗布したものは腐食を抑制する傾向が認められた。メカニズムは定かでないが、防錆材の種類によりマクロセル腐食に対する抵抗性については差が生じる可能性が認められた。

4. まとめ

本研究では、断面修復材中のポリマーに着目し、実環境に近い環境で修復後の既設コンクリート部および断面修復部中鋼材の腐食抵抗性を明らかにすることに加え、使用される塗布型防錆材との組み合わせによる影響の把握を目的とした検討を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 既設部-断面修復部間の電位差は既設部の塩化物イオン量の増加とともに増大する。マクロセル腐食を促進する可能性があるため、腐食の観点から長期供用

を考えた場合、環境差腐食が起こりにくい材料選定が必要であると考えられる。

- (2) P/C によって分極曲線の挙動は異なり、ポリマーの添加に伴う環境改善効果がみられたが、P/C=10%以上で腐食速度が大きくなる場合があった。腐食抵抗性の観点から、断面修復材に含有されるポリマー量は 5%程度が適当であると考えられる。
- (3) ポリマーを含有させた断面修復材中の鉄筋で腐食面積率の低下がみられたことから、ポリマーセメントモルタルによる補修後の断面では腐食進行抑制効果が期待される。
- (4) 断面修復を行う際に塗布する防錆材の種類によってマクロセル腐食への抵抗性に差がみられ、特に塩分吸着系防錆材と樹脂系防錆材で高い防錆性が期待される。

参考文献

- (1) 長滝重義, 大即信明, 守分敦朗, 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研究, 土木学会論文集, Vol.32/ No.544, pp.109-119,1996
- (2) 守分敦朗, 長滝重義, 大即信明, 宮里心一: 断面修復が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.7-14,1994
- (3) Shohei Yokawa, et all. : INFLUENCE OF POLYMER CONTENT IN PCM ON MACRO-CELL CORROSION AFTER CROSS-SECTION REPAIR, ConMat'20, pp.1288-1296, 2020
- (4) 正田詩織, 審良善和, 山口明伸, 小池賢太郎: 断面修復部に含有されるポリマー量が鉄筋腐食に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.45/No. 1, pp.1540-1545, 2023
- (5) 土木学会: 表面保護工法設計施工指針 (案) 工種別マニュアル編 2005