

論文 断面補修材に含有されるポリマー量が鉄筋腐食に及ぼす影響

正田 詩織*1, 審良 善和*2, 山口 明伸*3, 小池賢太郎*4

要旨: 劣化した RC 構造物の延命化を図るために、補修工法として断面修復工法が広く用いられている。しかし、経済的制約等の理由から部分断面修復を施した場合、補修後の再劣化が問題となる。本研究では、断面修復材に含有されるポリマーに着目し、ポリマー量が補修後の鉄筋腐食に及ぼす影響を定量評価することを目的に、ポリマー量の異なる供試体を作製し暴露試験を実施した。その結果、ポリマー含有の有無に関わらず境界部のマクロセル腐食が確認されたが、ポリマーセメント比 (P/C) が 5%程度の断面修復材が腐食を抑制していることが明らかとなった。

キーワード: 塩害, 補修, 断面修復工法, ポリマーセメントモルタル, 鉄筋腐食

1.はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の供用年数は 50 年を超え、その多くは劣化の一途をたどっている。持続可能な社会、国土強靱化の実現のため、インフラ整備は新設の時代から維持管理の時代へ移行し、現在、予防保全型インフラメンテナンスへの転換に向けた老朽化対策が進められている。このような中、維持管理技術に関する研究開発も進み、多くの補修・補強技術もまた開発・改良がなされている。

鉄筋コンクリート構造物の補修工法の一つである断面修復工法は、老朽化したインフラ構造物において広く適用されている。断面修復工法とは、既設コンクリート構造物の変状が顕在化した部分（ひび割れ、浮き、剥離、鉄筋露出などの変状箇所）および塩化物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、断面修復材を用いて断面欠損部を修復する工法である。この工法の効果として、劣化コンクリート部分の性能回復や浸透した劣化因子の除去などが挙げられる。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、通常、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。さらに、断面修復材の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⁾。マクロセル腐食の発生は断面修復部-既設部間の鉄筋の電位差、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ている。そのため、現在では断面修復部-既設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。そこで、本研究では、断面修復材に含有されるポリマーに着目し、ポリマー量が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に、ポリマーセメント比 (P/C) を変化させた供試体を作製し暴露試験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

供試体概要図を図-1に示す。供試体寸法は 900mm×150mm×100mm である。部分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。コンクリート中に埋設する鋼材は鉄筋の代わりに厚さ 0.8mm の薄板とした。また、マクロセル電流を計測するため、セル鋼板として供試体中央から 10mm, 20mm, および 50mm ピッチで分割した。いずれの鋼板も結線し並列に接続することで電氣的に同一の鋼材となるようにした。なお、結線部はエポキシ樹脂で絶縁処理を施した。セル鋼板のかぶりは 3cm である。また、かぶりを一定にすること、および測定対象となる鋼材の範囲をかぶり側のみとするために、セル鋼板はアクリル板に接着させ絶縁処理した。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、下縁から 30mm 位置に φ7.4mm の FRP ロッドを埋設した。

*1 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 (学生会員)

*2 鹿児島大学 理工学域工学系 理工学研究科 工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 鹿児島大学 理工学域工学系 理工学研究科 工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 鹿児島大学 理工学域工学系 理工学研究科 工学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

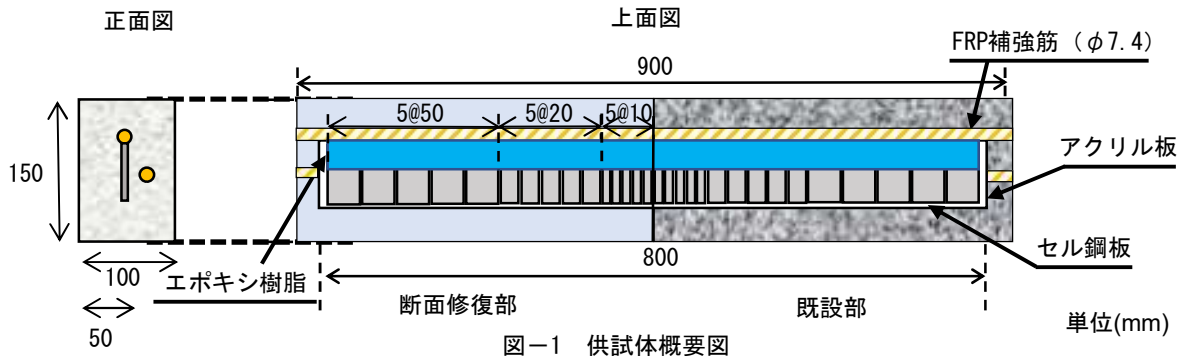


表-1 コンクリートの示方配合

供試体名	Cl-濃度 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AE減水材 (%)
OPC	10	50	42	4	174	350	714	1033	0.31

表-2 断面修復材の配合

供試体名	W/C (%)	S/C (%)	P/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	P	S
OPCM	40	2	0	271	678	0	1356
5PCM			5	271	678	34	1322
10PCM			10	271	678	68	1288
15PCM			15	271	678	102	1254

既設部を模擬したコンクリートの配合を表-1 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、既設コンクリートの腐食環境を模擬するため、あらかじめ塩化物イオン濃度が 10kg/m³ となるように練り混ぜ時に外割りで添加した。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、細骨材に川砂 (密度: 2.61 g/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: 2.63 g/cm³, 吸水率: 1.71%) を用いた。

断面修復材の配合を表-2 に示す。W/C を 40% とし、ポリマーセメント比 (P/C) を 0%, 5%, 10% および 15% と変化させた。単位水量は 271kg/m³ 一定である。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: 2.54 g/cm³) を用いた。

供試体は、まず既設部のコンクリートを打込み、1 日養生後、断面修復部のポリマーセメントモルタル (PCM) を打込んだ。その後、材齢 28 日まで封緘養生し試験に供した。

2.2 暴露試験の概要

暴露試験は、鹿児島大学内の日射および降雨を受ける場所で行った。一般屋外環境であり、飛来塩化物イオン



写真-1 供試体暴露状況

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 3 年である。

2.3 検討項目

(1) コンクリート抵抗および表面含水率

暴露中のコンクリートおよび PCM の状態を確認するために、測定機器として LCR メーター (100Hz, 5V) を利用し、四電極法による電気抵抗値の計測を行った。加えて、表面含水率の測定を行った。測定には高周波容量式の水分計を用いた。なお、気象による影響を確認するため、晴天日および降雨後 24 時間以内の測定を行った。

(2) 自然電位および分極曲線

暴露3か月後にケーブルを切断し、48時間後の電位を自然電位とした。また、同時に自然電位状態に復極させた既設部と断面修復部のセル鋼板のカソード分極曲線を測定した。測定対象のセル鋼板は、断面修復部、既設部ともに端部から2枚目の幅50mmとし、セルを切断して単独の状態にて計測した。なお、計測は、コンクリート表面に導電ゲルを介し、ステンレス板を対極、飽和銀塩化銀電極を照合電極として設置して行った。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に200mVまで分極させた。また、コンクリート抵抗を測定し、IRを除去した。

(3) 電流モニタリング

各セル鋼板に流入出する電流を電圧降下法（シャント抵抗10Ω）により測定し、各セル鋼板の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。

(4) 腐食面積率および腐食減量

暴露3年後、供試体を解体し、セル鋼板を取り出した。アクリル板との接着面に若干の黒さびが確認されたが、微量であったため、試験面となる表面のみを対象とした。腐食面積率は、さびをトレースしさび面積を測定後、鋼板の表面積で除して求めた。腐食減量は、セル鋼板に付着した腐食生成物をJIS Z 2383「腐食生成物を除去する化学的方法」に準拠してさびを除去後、セル鋼板の質量を測定し、初期質量との差によって算出した。なお、初期質量は鋼材の密度（7.8g/cm³）から推定した。

3. 結果および考察

(1) 電気抵抗値および表面含水率

図-2に電気抵抗値および表面含水率を示す。電気抵抗値はポリマーを混和することで大きくなり、その後、ポリマー量の増加に伴い若干上昇する傾向にある。また、雨天時よりも晴天時のほうが電気抵抗値は高くなる。一方、表面含水率は、P/Cの増加に伴い概ね一定の割合で減少する傾向が認められた。また、雨天時に比べ晴天時の表面含水率は低下する傾向にある。以上のことから、晴天時はPCM中の含水率が低下することで、電気抵抗値が上昇すると考えられる。いずれにしても作製したPCMの電気抵抗値はポリマー無混和のモルタルに比べ15kΩ程度大きくなる結果となった。したがって、既設部のコンクリートとの導電性にはポリマー混和量ごとに若干差異のある環境になると想定される。ただし、マクロセル腐食回路を考えると液抵抗成分の増加につながることも考えられる。

(2) 自然電位

図-3に電位分布を、表-3にPCMごとの既設部・断

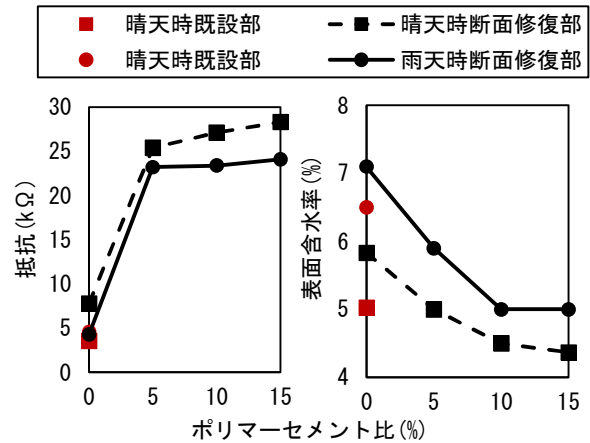


図-2 表面含水率と抵抗

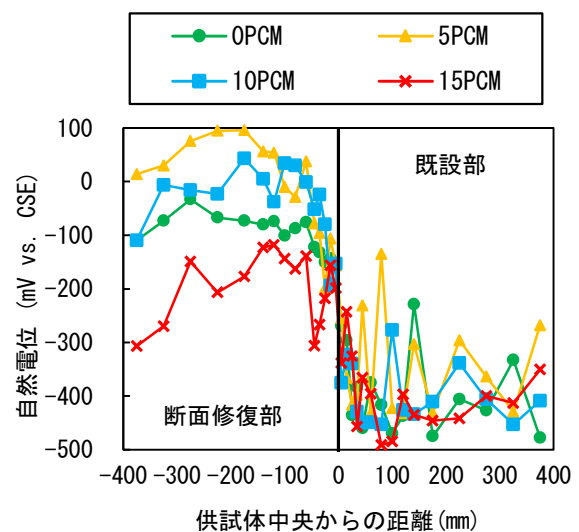


図-3 自然電位

表-3 断面修復部と既設部の電位差

	電位差 (mV)
OPCM	288
5PCM	336
10PCM	359
15PCM	206

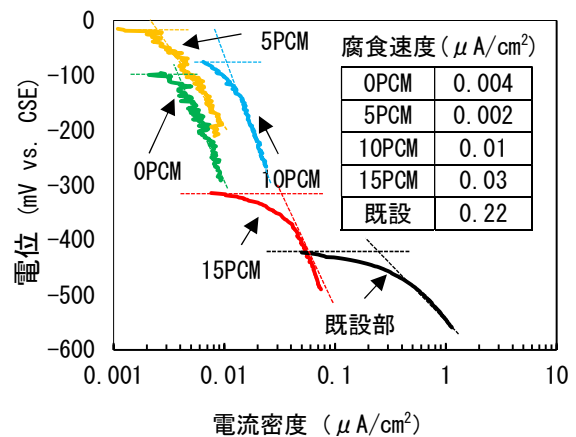


図-4 分極曲線

面修復部間の自然電位平均の差を示す。電位分布より、既設部の鋼板は卑な電位を示しており、腐食環境にあると推定される。また、ばらつきは大きい、いずれの供試体も平均すると同程度の値であった。一方、断面修復部は既設部に比べて明らかに貴な電位を示した。これは、断面修復による腐食環境の改善によるものと考えられる。ただし、個別にみるとその電位は大きく異なり、0PCM から 10PCM の電位は-100mV vs. CSE より高い貴な値を示した。一方、15PCM についてはその他の PCM の電位を比較すると卑な電位を示し、鋼材表面の環境が他の供試体と異なる状態にあると予想される。なお、マクロセル腐食に関わる断面修復部と既設部の電位差は表-3 に示すように概ね 300mV 程度であるが、P/C が 10%までは大きくなる傾向にあり、それ以降急激に低下する。PCM の電気抵抗値は、ポリマーを混和することで大きくなるが、一方で、P/C が 10%までは極間の有効電位差が大きくなる傾向にあり、鋼材の腐食に何らかの影響を及ぼすものと推察される。

(3) 分極曲線

図-4 に断面修復部および既設部中のセル鋼板のカソード分極曲線を示す。既設部のカソード分極曲線は電流密度が大きくかつ電位が卑な位置に描かれ、腐食速度も $0.22\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と腐食状態にあることが確認できる。一方、断面修復部のカソード分極曲線は、いずれも既設部に比べて電流密度は非常に小さく、電位は貴な位置に描かれている。また、いずれの腐食速度も $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下であり、不動態または極めて小さい腐食速度であることがわ

かる。これは、断面修復による環境改善の効果である。ただし、P/C の違いによってカソード分極曲線は異なり、ポリマー量が増加するに従い電流密度が大きい方向にシフトする傾向が得られた。これは、P/C が 10%以下の場合、図-2 の表面含水率で示したとおりポリマー量が増加するにしたがって含水率は低下する傾向にあり、PCM 中が乾燥傾向になったことで鋼板表面への酸素の拡散を容易にしたためであると推察される。また、腐食速度もポリマー量の増加とともに大きくなる傾向にあった。PCM 中の鋼板はいずれも不動態状態にあると考えられるため、この腐食速度の増加は不動態維持電流の増加であると推察できる。したがって、0PCM および 5PCM は非常に良好な不動態状態にあると推察される。一方で、15PCM の不動態は少し不安定な状態と考えることができる。これはポリマーを多く混和させたことで鋼板表面

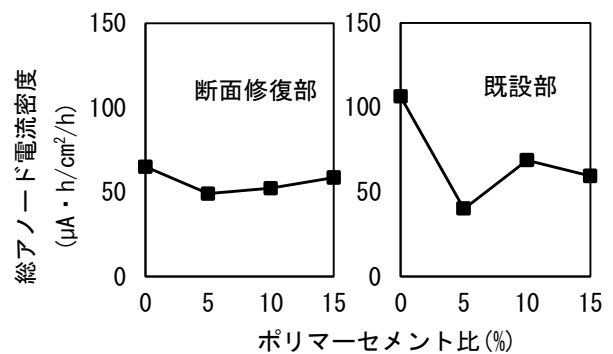


図-6 断面修復部と既設部の総アノード電流密度

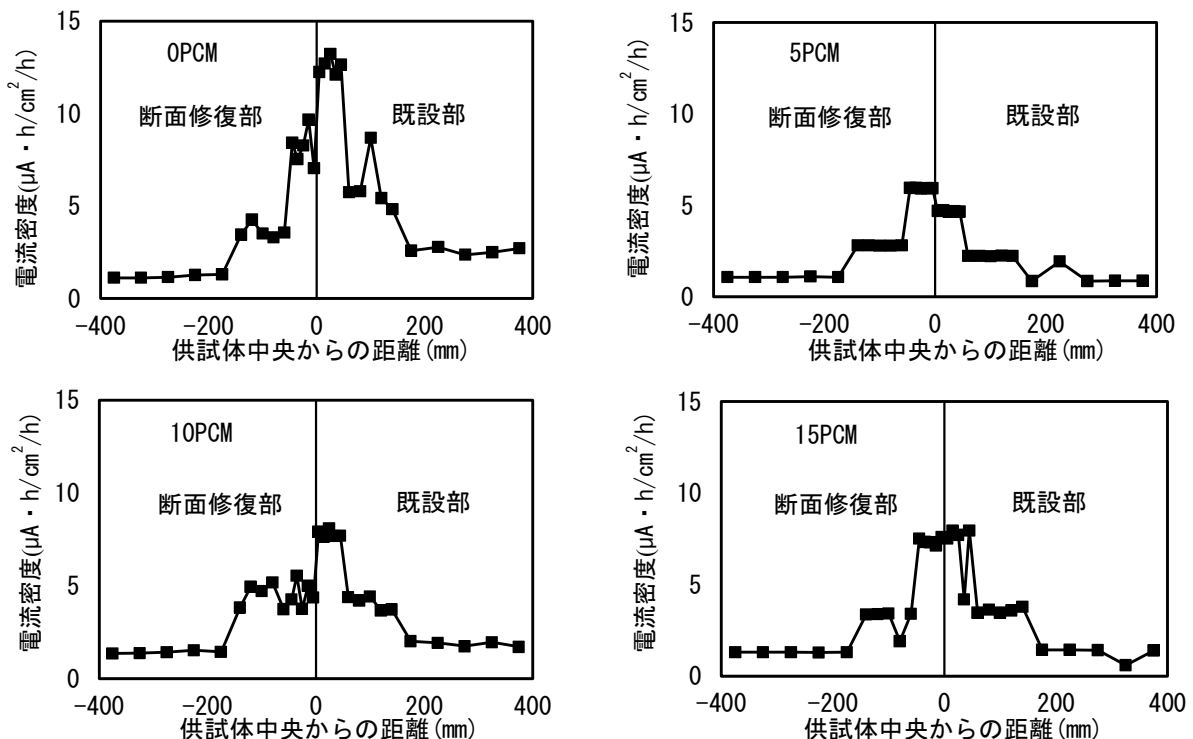


図-5 各供試体のアノード電流密度

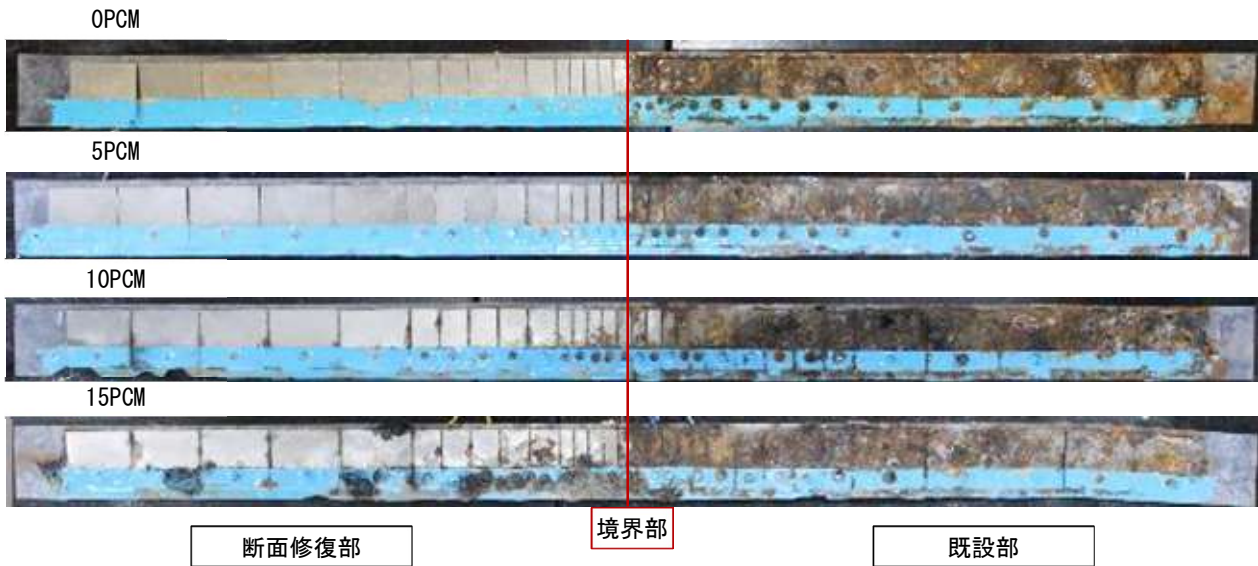


写真-2 鋼板腐食状況

にもポリマーの被膜が形成されることによって鋼材表面への酸素の供給が著しく低下したため、不動態被膜の成長が阻害されたと推察される。自然電位も-300mV vs. CSE程度と卑な電位であることから腐食環境になっている可能性は高い。おそらく樹脂モルタルを用いた断面修復後の早期劣化はこれが原因と思われる。

(4) 電流モニタリング

図-5 に各供試体に埋設されたセル鋼板のアノード電流密度分布を示す。いずれも断面修復部と既設部の境界の電流密度が高く、境界から離れるにつれ電流密度が小さくなる傾向にある。これは、図-3 で示した電位分布のとおり断面修復の境界で分極されたことによるマクロセル腐食が計測された結果であると考えられる。この結果、いずれの PCM で断面修復した場合においても、マクロセル腐食の影響範囲は 200mm 程度であることがわかる。また、境界部の腐食速度が最も大きく、これが実構造物で確認される再劣化の境界部からの錆汁の原因であると推察される。ただし、今回の結果では、カソードとなると予想される断面修復部においてもアノード電流が計測されている。これについては、不明な点もあるが、おそらく既設部からの塩化物イオンの移動および腐食生成物の生成に伴う付着の低下が一因であると推察される。

図-6 に断面修復部と既設部の総アノード電流密度を示す。既設部の総アノード電流密度は、0PCM が最も大きく、ポリマーを混和することで電流密度は低下する傾向を示した。また、5PCM が最も電流密度が小さい結果となった。これは、0PCM の場合、液抵抗成分となるコンクリート抵抗が PCM に比べ低く、起電力となる断面修復部と既設部との鋼板の電位差も高い状態であったことから境界部付近の腐食電流密度が大きくなったことが原因と推察される。一方、5PCM の電流密度が小さくな

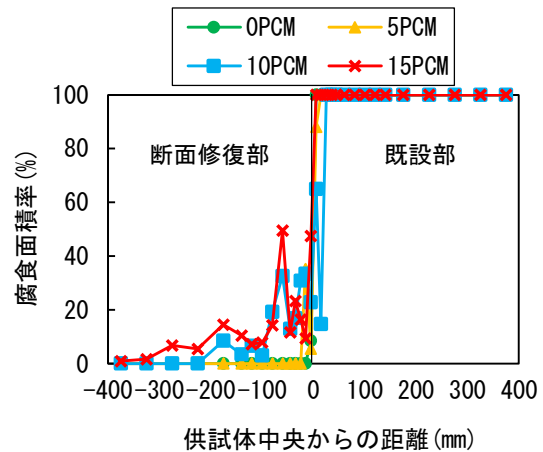


図-7 各供試体の腐食面積率

った原因としては、カソード分極曲線の違いが影響していると推察される。なお、断面修復部の総電流密度は、いずれの供試体も同程度であった。

(5) 腐食面積率

写真-2 に供試体に埋設したセル鋼板の腐食状況を示す。また、図-7 に腐食面積率分布を示す。既設部の鋼板はいずれも激しい腐食の進行が確認され、腐食面積率も 100%となった。これは、既設部の内在塩化物イオン濃度を $10\text{kg}/\text{m}^3$ としたこと、から、厳しい腐食環境での暴露となり全面腐食が発生したと考えられる。

一方、断面修復部では、既設部に比べ明らかに腐食面積率は小さく、金属光沢が残る状態であった。このことから、断面修復部と既設部の界面でのマクロセル腐食の進行により、断面修復部はカソードとして存在していたことは明らかである。ただし、10PCM および 15PCM においては、局部腐食が確認される。これは、図-4 で示した分極曲線の結果からも不安定な不動態の状態下であったことで局所的な腐食が生じたと推察される。

(6) 腐食減量

図-8 に供試体に埋設したセル鋼板の単位面積当たりの腐食減量の分布を示す。また、図-9 に既設部および断面修復部の単位面積当たりの平均腐食減量を示す。

既設部の腐食減量については、図-5 で示したような断面修復部と既設部の境界部で最大となる腐食傾向は認められず、全面腐食が概ね均一に進行している状態であった。ただし、平均化させた腐食減量をみると若干ではあるがポリマー量が増加するに従い大きくなる傾向も認められる。既設コンクリートの品質は同一であることを考えれば、断面修復部をカソードとしたマクロセル腐食による影響による変化であると推察できる。このことから、ポリマー量の増加に伴いマクロセル腐食の影響が大きくなる可能性は否めない。ただし、電流モニタリングの図-6 の結果とは相反する傾向であるため、供試体誤差によるとも考えられる。今回の結果では明確に判断できないため、今後の課題とする。

一方、断面修復部の腐食減量はポリマー量の違いにより大きな差が生じた。特に、15PCM では、境界から200mmの範囲まで明らかな質量減が確認され、境界部では0.3g/cm²程度の激しい腐食も確認できる。これは、カソード分極曲線の結果からも特に不安定な不動態状態にあったことが影響しているものと推察される。それ以外の0, 5 および 10PCM の腐食減量は小さく、概ね同程度と考えるとよいと言える。

4. まとめ

本研究では、断面修復材に含有されるポリマーに着目し、ポリマー量が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部分断面修復を模擬した供試体の野外暴露試験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) P/C の違いによってカソード分極曲線は異なり、増加するに従い腐食速度と電流密度がともに大きい方向にシフトする傾向が得られたことから、それぞれの PCM で不動態被膜の状態が変化しているとみられる。
- (2) P/C が 0%, 5%の PCM を用いると、断面修復部では腐食面積率は 0%に近い値が得られた。対して、10%, 15%の PCM を用いると断面修復部の境界において20%程度の腐食面積が確認された。
- (3) P/C が 15%の PCM を用いると、断面修復部の腐食減量が顕著に大きくなった。さらに、既設部の腐食減量も最大であった。
- (4) P/C が 5%程度の PCM を用いるとき、腐食に対する抵抗性が最も良好であると考えられる。

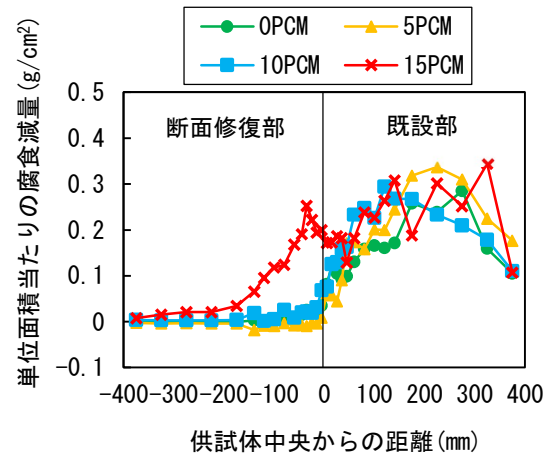


図-8 各供試体の腐食減量

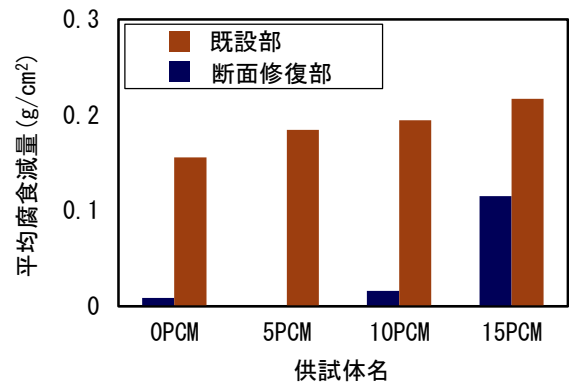


図-9 平均腐食減量

謝辞

本論文の作成にあたり、住友大阪セメント株式会社の山本氏には多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

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, No.544/V-32, pp.109-119, 1996
- (2) 長滝重義, 大即信明, 守分敦朗, 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.
- (3) Shohei Yokawa, Koji Takewaka, Toshinobu Yamaguchi, Yoshikazu Akira, Kentaro Koike, Masaki Kawabata: INFLUENCE OF POLYMER CONTENT IN PCM ON MACRO-CELL CORROSION AFTER CROSS-SECTION REPAIR, ConMat'20, 2020
- (4) 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