

論文 塩害劣化コンクリートに対するフライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復による補修効果に関する検討

上田 隆雄*1・横山 直哉*2・江良 和徳*3・中村 定明*4

要旨：塩害により劣化した鉄筋コンクリートの補修を行う際に一般に用いられる断面修復材であるポリマーセメントモルタルに対して、フライアッシュおよび亜硝酸リチウムを混和した場合の補修効果について、実験的検討を行った。この結果、特にフライアッシュと亜硝酸リチウムを併用したポリマーセメントモルタルを用いた場合に、電気化学的腐食指標の測定値から、マクロセル腐食を含む鉄筋腐食抑制効果が見られた。また、鉄筋腐食促進環境に 420 日間保管した断面修復供試体について分析を行った結果、亜硝酸イオンとリチウムイオンの母材コンクリートへの拡散状況と整合する分割鉄筋腐食面積率の分布が確認された。

キーワード：断面修復工法, フライアッシュ, 亜硝酸リチウム, 打継供試体, マクロセル腐食

1. はじめに

塩害によりコンクリート中の鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート（以下 RC とする）構造物の補修工法として断面修復工法が適用される場合が多い。この場合、補修材としては母材コンクリートとの接着性や外部からの塩化物イオン（以下 Cl^- とする）等の劣化因子の再浸透抵抗性が高いことなどから一般にポリマーセメントモルタル（以下 PCM とする）が用いられる¹⁾。

これに対して、母材コンクリートに Cl^- が残存した場合や、補修材と母材コンクリートとの電気的性質の違いが顕著な場合に、打継部分付近でマクロセル腐食による再劣化が発生しやすいことが指摘されている^{1), 2)}。このような再劣化による鉄筋腐食抑制を目的として、補修材に亜硝酸リチウム（以下 LiNO_2 とする）を添加することが検討³⁾され、亜硝酸イオン（以下 NO_2^- とする）の母材コンクリートへの拡散とともに、マクロセル腐食抑制が可能であることが報告されている⁴⁾。一方で、有機系材料であるポリマーを使用する PCM を用いた場合に、母材コンクリートと補修材との界面部分において電気的性質の不連続性が高くなり、マクロセル腐食を誘発する可能性があることから、補修材に無機系の混和材を添加することで母材コンクリートとの電気的親和性を高めることができるものと考えられる。

そこで、著者らは既往の検討⁵⁾において、 LiNO_2 とフライアッシュを PCM に添加した断面修復材の適用可能性について検討を行い、短期的な電気化学的鉄筋腐食指標の測定値から、フライアッシュと LiNO_2 を併用することで補修後の防食効果が向上する可能性を示した。本研究では、様々な補修材料を用いて作製した断面修復供試

体を鉄筋腐食促進環境に 420 日間保管しながら、電気化学的鉄筋腐食指標の測定を継続し、補修効果の持続性について検討を加えるとともに、促進劣化終了後の供試体内部における鉄筋の腐食状態を母材コンクリートへの NO_2^- とリチウムイオン（以下 Li^+ とする）の拡散状況とともに確認することで、補修効果を検証することとした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合

本実験で用いたコンクリートの配合およびスランプ、圧縮強度を表-1 に示す。水セメント比 (W/C) を 60% とした母材コンクリートには、初期混入 Cl^- 量が 8.0 kg/m^3 となるようにあらかじめ NaCl を練混ぜ水に溶解させて混入した。セメントは普通ポルトランドセメント（密度： 3.16 g/cm^3 ，比表面積： $3280 \text{ cm}^2/\text{g}$ ， R_2O ： 0.56% ），細骨材 S は、徳島県阿波市市場町砕砂（表乾密度： 2.57 g/cm^3 ，F.M.： 2.79 ），粗骨材 G は、徳島県板野町大坂砕石（表乾密度 2.57 g/cm^3 ， G_{max} ： 15 mm ）を用いた。

断面修復を模擬した打継供試体作製に用いた補修材 7 配合とそのフローおよび圧縮強度は表-2 に示す。配合名の FA はフライアッシュを混和した普通モルタルで、(J)は日本の JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ、(T)は台湾産のフライアッシュの混和を示す。P は断面修復用の PAE 系 PCM で、ドライモルタルの形で市販されているものである。セメント：ポリマー：細骨材の質量割合を 14：1：29 とし各材料の W/B が 42% となるように配合設計した。PFA は P にフライアッシュを混和した配合で、ドライモルタル質量の 8.5%（セメント代替で混和したと考えると 15%内割置換）のフライアッシュ

*1 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 工博（正会員）

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 建設創造システムコース（学生会員）

*3 極東興和(株) 営業本部補修技術課課長 工博（正会員）

*4 (株)IHI インフラ建設 開発部長 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	28 日圧縮強度 (N/mm ²)
			C	W	S	G	NaCl	WRA*	AEA*		
60	48	15	300	180	820	903	13.2	0.5	0.0095	9.5	36.9

*WRA: AE 減水剤, AEA: AE 剤

表-2 補修材の配合および基礎物性

配合名	W/B	P/C	単位量 (kg/m ³)							モルタル フロー(mm)	91 日圧縮強度 (N/mm ²)
			ドライモルタル			W	II 種 FA	台湾 FA	40% LiNO ₂ 溶液		
			C	P	S						
FA(J)	42%	0%	544	—	1120	269	96	—	—	182	63.4
FA(T)		0%	544	—	1120	269	—	91	—	185	61.8
P		7%	1775			238	—	—	—	133	65.0
PFA(J)		7%	1624			256	92	—	—	154	55.9
PFA(T)		7%	1624			256	—	88	—	149	58.2
PFA(J)Li		7%	1624			192	92	—	64	123	60.6
PFA(T)Li		7%	1624			192	—	88	64	127	59.6

表-3 フライアッシュの物性値

種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	ガラス化 率(%)	強熱減 量(%)	化学組成 (%)						
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq
II 種	2.33	3240	71.4	2.80	61.6	22.3	1.91	4.53	0.71	1.41	1.64
台湾産	2.25	2530	75.3	2.82	60.7	20.7	2.71	5.70	1.18	1.24	2.00

を混和している。W/B 計算は II 種フライアッシュで行い、台湾産フライアッシュは II 種フライアッシュと同体積となるように混和した。2 種類のフライアッシュの物性を表-3 に示す。化学成分は JIS M 8852 により定量し、ガラス化率はリートベルト法を用いた X 線回折法により結晶相を求め、それらの和を全体から除くことにより求めた。台湾産フライアッシュは II 種フライアッシュより密度および比表面積は小さいが、活性度に寄与する CaO 含有率は高い特徴を有する。PFALi は PFA に LiNO₂ を添加した配合で、40%LiNO₂ 溶液を練混ぜ水置換で混入した。添加量は、母材コンクリートの Cl⁻濃度に対して、練混ぜた NO₂⁻の 70%がコンクリートに浸透して NO₂⁻/Cl⁻モル比が 1.5 となるように決定した。

2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した鉄筋コンクリート供試体は、図-1 に示すような母材コンクリートと補修材の打継供試体とし、各補修材に対し 2 体ずつ作製した。図-1 上段は、左右打継供試体とし、母材コンクリート N と補修材を打ち継いだ角柱の正方形断面中央位置に長さ 380 mm の丸鋼鉄筋 φ13 (SR235) を 1 本配置した。図-1 中段は、左右打継分割鉄筋供試体とし、打継部分周辺のマクロセル電流を測定するために、分割鉄筋を埋め込んだ⁶⁾。各

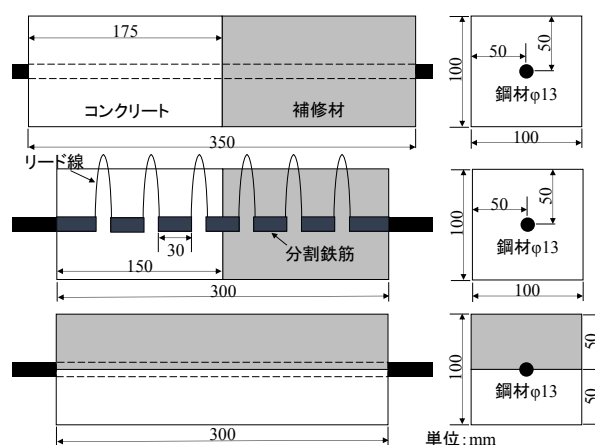


図-1 打継供試体の概要

分割鉄筋長さ 30 mm とし、両端部鉄筋を含めて 7 つの要素に分割した。各鉄筋にはリード線を接続し、鉄筋要素間の流入および流出電流量を測定した。図-1 下段は、上下打継供試体とし、打ち継いだ角柱の正方形断面中央位置に左右打継供試体と同様に丸鋼鉄筋を配置した。

母材コンクリート打設翌日に、打継部分表層のペースト部分をワイヤーブラシで除去することで、打設表面の骨材の凹凸部分を露出させた後、補修材を打ち継いだ。

これらの供試体は補修材打設翌日に脱型し、20℃の恒温室中で28日間の封緘養生を行った。養生終了後、鉄筋突出部を含む供試体端面は、エポキシ樹脂で被覆することで防食処理を行った。

2.3 促進保管期間中の各種試験

養生が終了した打継供試体は、湿布で包み、ジップ付きのビニール袋に入れて40℃恒温環境で保管しながら、電気化学的鉄筋腐食評価指標の測定を定期的実施した。測定の前日には、供試体を20℃恒温室に移動した。

保管期間中の測定項目は、コンクリート中鉄筋の自然電位、分極抵抗、かぶり部分の電気抵抗と、分割鉄筋供試体を用いたマクロセル電流量とした。電気化学的測定は、矩形波電流分極法で、高低2周波数(800 Hzおよび0.1 Hz)の矩形波電流の重畳パルスを印加し、両周波数のインピーダンス値の差から分極抵抗を、高周波数側のインピーダンス値から電気抵抗を求めた。なお、今回の印加電流は100 μ Aで一定とした。これらの電気化学的測定に関して、照合電極には飽和Ag/AgCl電極、対極にはチタンメッシュ(20×20 mm)を使用し、左右打継供試体は、打継部分を中心として7 cmの測定間隔で水道水で湿らせたスポンジを介して照合電極と対極を供試体表面に附着させながら供試体中の分布を測定した。マクロセル電流量は、リード線が無抵抗電流計に接続し、分割鉄筋要素間を流れる電流量を測定した。

2.4 促進保管期間終了後の各種試験

420日間の40℃湿空保管期間終了後、左右打継供試体を用いてJIS A 1106に準じた3等分点曲げ載荷試験を実施し、曲げ荷重と打継ぎ界面部における水平変位を測定した。ひび割れ幅は容量2 mm、精度0.001 mmの π 型ゲージを供試体の下縁から20 mm、打継ぎ界面を跨ぐようにして貼付けることにより測定した。また、すべての打継供試体を解体し、取り出した鉄筋については画像処理ソフトを用いて腐食面積率を測定した。さらに、打継ぎ界面からの母材コンクリート中におけるLi⁺濃度分布をICP発行分光分析法、NO₂⁻濃度分布を水抽出後のイオンクロマトグラフ法により10 mm間隔で測定した。

3. 左右打継供試体の曲げ載荷による附着性状の評価

420日間の40℃湿空保管を行った左右打継供試体に対し曲げ載荷試験を行った結果得られた、界面部変位0.01 mm時の曲げ応力と最大曲げ応力を、建研式接着強度試験機を用いて得られた補修材の附着強度(材齢91日)の値と併せて図-2に示す。この曲げ載荷試験において、いずれの供試体でも打継界面部分にひび割れが発生し、そのまま曲げ破壊に至った。なお、台湾産フライアッシュを用いた補修材については附着強度の測定を行っていない。図-2より、材齢は異なるものの建研式試験機

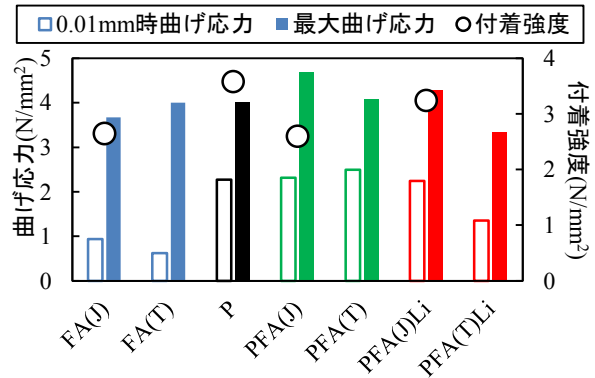


図-2 左右打継供試体曲げ応力と附着強度

で得られた附着強度と、曲げ載荷試験の結果得られた最大曲げ応力は概ね同様の傾向が得られている。ただし、PFAについては附着強度が他の配合よりも小さかったにも関わらず、最大曲げ応力が最も大きくなっている。これは40℃保管期間中のフライアッシュのポゾラン反応による補修材強度の増進が寄与したものと考えられる。

一方で、界面部変位0.01 mm時の曲げ応力に着目すると、フライアッシュ混和普通モルタルであるFAは、他のPCM配合よりも小さい曲げ応力を示している。これは、FAの場合には、ポリマー成分を含まないために、曲げ応力が小さい荷重初期から母材コンクリートと補修材の界面部に剥離が生じていることを示している。これより、今回実施した左右打継供試体の曲げ載荷試験を利用することで、打継ぎ部分の剥離開始時における断面修復材の附着性状が評価できるものと考えられる。

4. 上下打継供試体の測定結果

4.1 電気化学的鉄筋腐食モニタリング

養生終了後に420日間40℃湿空保管を行った上下打継供試体について、電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化を図-4に示す。なお、この供試体は、台湾産フライアッシュを用いたものは作製していない。鉄筋自然電位と分極抵抗は、コンクリート側表面に電極を設置して測定し、補修材電気抵抗は補修材側に電極を設置して測定した。

自然電位の測定値については、補修材種類によらず、ASTM C876-91の判定基準における腐食領域($E < -0.23$ V vs Ag/AgCl)を推移している。これは、母材コンクリートが鋼材発錆限界Cl⁻濃度を大きく上回る8.0 kg/m³の初期混入Cl⁻を含有しているためである。ただし、PFALiを打継いだ場合の鉄筋自然電位の値は他の場合よりも貴な値であり、LiNO₂の母材方向への拡散により、鉄筋腐食環境が緩和された可能性がある。また、値の逆数が鉄筋腐食速度に比例する分極抵抗に関してはPFALiとFAの値がPやPFAを用いた場合より大きくなっていることから、これら2種類の補修材を用いた場合に鉄筋腐

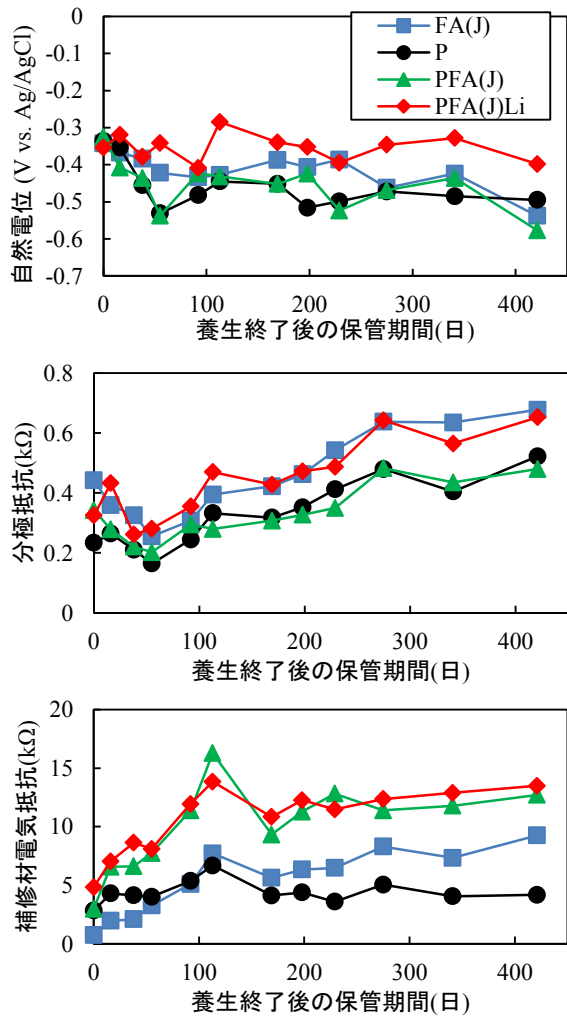


図-4 上下打継供試体の電気化学的指標経時変化

食速度が抑制されていると考えられる。

一方、補修材の電気抵抗に関しては、Pの電気抵抗の経時変化は小さいのに対して、フライアッシュを混和した各種補修材は40℃湿空保管期間中のポズラン反応の進行によって経時的な電気抵抗の増大が見られる。4種類の補修材の中で電気抵抗が大きいのはPCMとフライアッシュを組み合わせたPFAとPFALiであるが、分極抵抗値から鉄筋腐食速度抑制効果が大きいのはFAとPFALiであり、整合しない部分が見られた。PCMが含有するポリマー成分は電気抵抗の大きい絶縁性物質であるが、ドライモルタル中2.3 wt.%と配合量が少ない上に水和反応はせず、補修材内での電気抵抗値のばらつきが発生している可能性がある。これに対して比較的混和量の多いフライアッシュを添加した場合には、補修材の細孔構造全体が緻密化し、特に母材コンクリートとの物性親和性の大きいFAの場合には、腐食速度抑制に効果的であったと思われる。PFAの場合には、フライアッシュの効果で緻密化はするものの、ポリマー成分の混入によって、補修材内の電気的連続性が失われ、腐食速度の抑

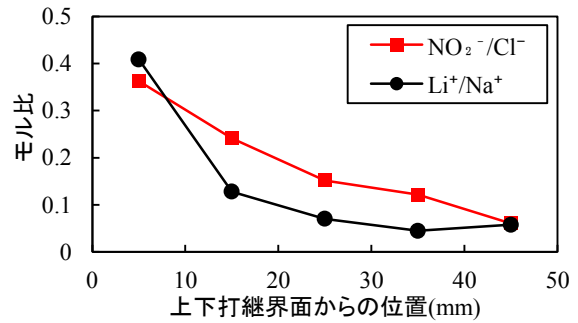


図-5 上下打継供試体母材コンクリート中のNO₂⁻/Cl⁻およびLi⁺/Na⁺モル比分布

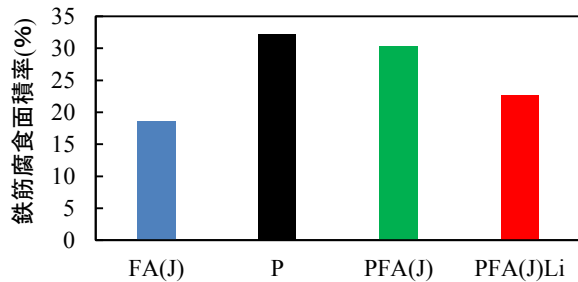


図-6 上下打継供試体の母材側鉄筋腐食面積率

制効果は低下した可能性がある。特に上下打継供試体では、鉄筋軸にそって補修材とコンクリートとの打継部分が続くため、このような母材コンクリートとの物性親和性や電気抵抗率のばらつきの影響が強く出たものと考えられる。PFALiは添加したLiNO₂の母材への拡散が腐食速度抑制に寄与したものと考えられる。

4.2 コンクリート中のイオン濃度分布と鉄筋腐食面積率

40℃湿空保管期間終了後の上下打継供試体(PFALi)の母材コンクリート中におけるNO₂⁻/Cl⁻モル比およびLi⁺/Na⁺モル比分布を図-5に、同じ供試体の母材コンクリートに接している鉄筋半面部分の鉄筋腐食面積率を図-6に示す。なお、図-5のモル比を計算するにあたってCl⁻とNa⁺濃度については初期添加したNaClが均一に分布しているものとし、これらのイオンの補修材方向への拡散や、各種イオンの固定化は考慮していない。また、すべての供試体において、補修材側の鉄筋腐食はほとんど認められなかった。

図-5より、PFALiに添加されたLiNO₂は、420日間の40℃湿空保管により、NO₂⁻およびLi⁺として母材コンクリート中に拡散浸透していることがわかる。また、イオン分布の形状から、本実験条件ではLi⁺よりNO₂⁻の方が大きな拡散速度を示している。既往の検討³⁾より、鉄筋防食効果が得られるNO₂⁻/Cl⁻モル比は、0.6~1.5程度と考えられている。図-5において、打継ぎ界面に最も近い測定点の値は0.4程度なので、若干小さいものの、今回の上下打継供試体は鉄筋断面内に打継面が形成さ

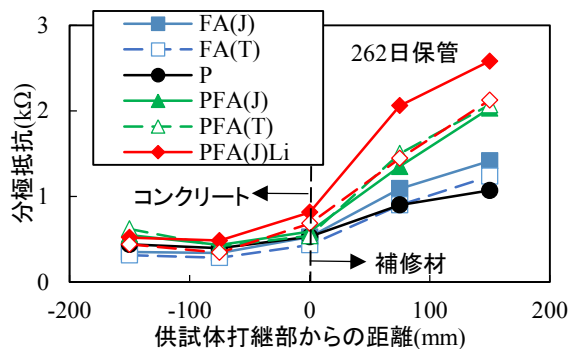


図-7 左右打継供試体中の分極抵抗分布

れているため、鉄筋に直接接する母材コンクリート部分の $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は 0.6 を超えていた可能性がある。実際に、図-6 によると、PFALi の鉄筋腐食面積率の値は P や PFA よりも小さく、 NO_2^- 浸透による防錆効果が示されている。さらに、補修材として FA を打継いだ場合も PFALi と同程度以下まで鉄筋腐食面積率が抑制されていることから、図-4 の分極抵抗経時変化で示された傾向と整合する鉄筋腐食状況が確認できた。

Li^+ はコンクリート中に一定濃度以上存在することで ASR の抑制効果が期待できる。既往の研究⁷⁾では、ASR 膨張の抑制には Li^+/Na^+ モル比で 0.4~0.8 程度必要との指摘もある。図-5 によると、打継ぎ界面に最も近い測定点の Li^+/Na^+ モル比は 0.4 程度であるが、打継ぎ界面からの距離が大きくなるとモル比の値は大きく低下している。これより、今回の実験条件では塩害と ASR の複合劣化コンクリートに適用した場合に Li^+ 浸透による ASR 膨張抑制効果は小さいと考えられるが、今後このような複合劣化コンクリートに対する補修効果の検証も行っていく予定である。

5. 左右打継供試体の測定結果

5.1 電気化学的鉄筋腐食モニタリング

40℃湿空保管を 262 日間行った左右打継供試体について、分極抵抗の供試体中における分布を図-7 に示す。なお、この種類の打継供試体については、電気的接触不良により 262 日以降の測定ができなかった。図-7 によると、いずれの場合も補修材側で大きく、母材コンクリート側で小さい分極抵抗値の分布を示しており、母材コンクリート側では初期混入塩分による鉄筋腐食が進行していることがわかる。ただし、打継ぎ界面部分の分極抵抗値については、補修材の影響を受けて若干上昇しており、特に PFALi を打継いだ場合には大きな分極抵抗値を示している。これは母材コンクリートへの LiNO_2 の拡散・浸透によるものと考えられる。フライアッシュの種類に関しては、全体的に II 種フライアッシュを使用した補修材において大きな分極抵抗値が測定されている。

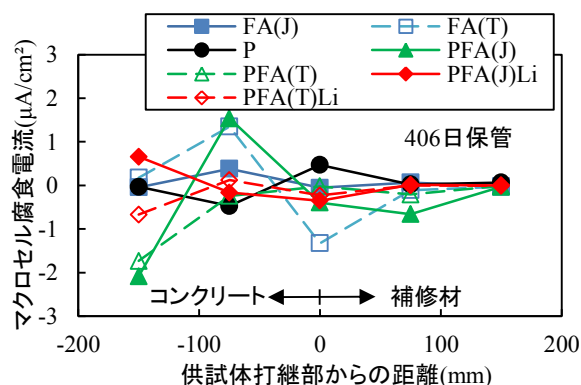


図-8 左右打継分割鉄筋供試体中のマクロセル腐食電流分布

これは、日本の II 種フライアッシュは表-3 に示したように台湾産フライアッシュよりも比表面積が大きいため、フィラー効果やポズラン反応による補修材細孔構造の緻密化への寄与が大きく、鉄筋腐食速度の支配要因である酸素供給量が抑制されたものと推定される。

40℃湿空保管を 406 日間行った左右打継分割鉄筋供試体について、マクロセル腐食電流密度の供試体中における分布を図-8 に示す。著者らの既報⁵⁾で示した 92 日保管時点の測定結果では、PCM を用いた P および PFA を補修材とした打継いだ場合に、打継ぎ界面に近い母材コンクリート側にアノードが形成され、 $4 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 程度の大きなマクロセル腐食電流密度が検出された。これに対して、図-8 に示した 406 日間保管時の分布では、全体的にマクロセル腐食電流密度の値は小さくなっている。これは、保管期間中に各種補修材のセメントや混和材の反応が進行し、電気抵抗が増大したことが原因と考えられる。また、PFALi を補修材として打継いだ場合には、92 日保管の場合もマクロセル腐食は抑制されていたが、図-8 に示した 406 日間保管時の分布でも抑制効果は持続している。これは、補修材から母材コンクリート側に拡散浸透した NO_2^- の効果でアノード反応が抑制されたことが原因と考えられる。一方で、PFA を補修材として打継いだ場合には、比較的大きなマクロセル腐食電流が見られる。これは、上下打継供試体の場合と同様に、補修材内の電気抵抗値のばらつきが一因となっているものと推察される。

5.2 コンクリート中のイオン濃度分布と鉄筋腐食面積率

40℃湿空保管期間終了後の左右打継供試体 (PFALi) の母材コンクリート中における $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比および Li^+/Na^+ モル比分布を図-9 に、同じ供試体の母材側鉄筋腐食面積率を図-10 に、分割鉄筋供試体の腐食面積率分布を図-11 に示す。

図-9 によると、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比分布、 Li^+/Na^+ モル比分布ともに、図-5 に示したモル比分布と同様の傾向

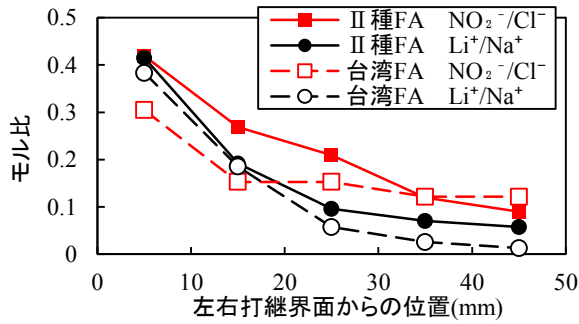


図-9 左右打継供試体母材コンクリート中の NO₂⁻/Cl⁻および Li⁺/Na⁺モル比分布

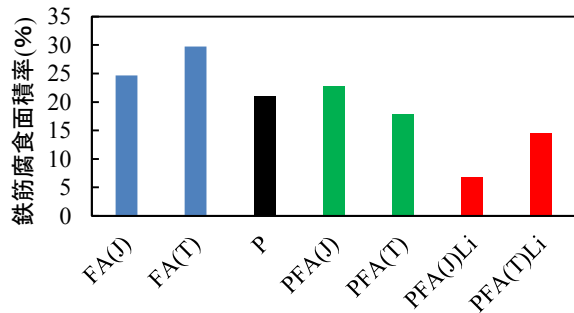


図-10 左右打継供試体の母材側鉄筋腐食面積率

を示しており、打継方法の違いの影響は小さい。また、フライアッシュ種類に関しては、台湾産フライアッシュを用いた場合の方が、若干 NO₂⁻と Li⁺の拡散浸透を抑制している。この原因の詳細は不明であるが、表-3 に示した化学組成の違いが影響している可能性がある。

図-10 より、母材コンクリートは高濃度の初期混入 Cl⁻を含有するため、補修材種類によらず鉄筋は腐食しているが、PFA(J)Li を補修材として打継いだ場合に他の場合よりも腐食面積率が小さくなっている。この傾向は、図-7 に示した左右打継供試体内における分極抵抗分布の傾向とも整合している。また図-11 より、分割鉄筋要素の中でも、打継ぎ界面に最も近い母材コンクリート内の要素で最も大きい腐食面積率が測定される場合が多く、マクロセル腐食の影響が強く出ているものと考えられる。この場合も、PFA(J)Li を補修材として打継いだ場合の腐食面積率が全体的に小さくなっており、図-9 に示された NO₂⁻の拡散浸透によるマクロセル腐食抑制効果が示されたと言える。ただし、NO₂⁻の浸透が小さいと考えられる打継ぎ界面から遠い部分の鉄筋腐食抑制メカニズムについては、今後さらに検討が必要である。

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 左右打継供試体を用いて曲げ試験を行うことにより、打継ぎ界面における剥離初期段階での付着挙動を評

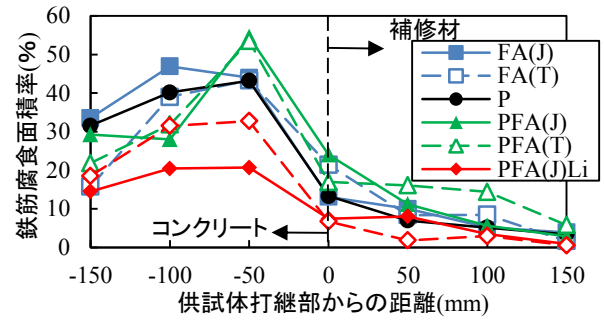


図-11 左右打継分割鉄筋供試体中 分割鉄筋の腐食面積率分布

価することができた。

- (2) 420 日間の鉄筋腐食促進期間終了後にフライアッシュと LiNO₂を併用した PCM である PFALi を補修材として打継いだ打継供試体の化学分析を行った結果、打継ぎ界面部分を中心に NO₂⁻と Li⁺の母材コンクリートへの拡散がそれぞれ確認された。
- (3) PFALi を補修材として打継いだ場合に、Cl⁻を含有する母材コンクリート中の鉄筋腐食抑制効果が高い傾向が確認された。このような傾向は、電気化学的鉄筋腐食指標の測定結果とも整合した。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、四国電力（株）からフライアッシュのご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 2) 宮崎悠太，宮里心一，網野貴彦，花岡大伸：断面修復材の種類と母材コンクリートの塩分含有量が鉄筋腐食に及ぼす影響，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-409，pp.817-818，2016.9
- 3) 堀 孝廣，山崎 聡，榊田佳寛：防錆モルタルに関する研究，コンクリート工学論文集，Vol. 5，No. 1，pp.89-98，1994.1
- 4) 行徳圭洋，檀原弘貴，添田政司，大和竹史：亜硝酸塩がポリマーセメントモルタルに与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp.1684-1689，2012.7
- 5) 横山直哉，上田隆雄，高玉荃，塚越雅幸：フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材料の適用性に関する検討コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No.1，pp.1905-1910，2016.7
- 6) 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.547-552，2001.7
- 7) 齊藤満，北川明雄，柳場重正：亜硝酸リチウムによるアルカリ骨材膨張の抑制効果，材料，Vol. 41，No. 468，pp.1375-1381，1992.9