

# 論文 部分断面修復としてポリマーセメントモルタルと表面含浸材の併用による防錆効果に関する研究

西嶋 大貴\*1・樋原 弘貴\*2・添田 政司\*3・三浦 明\*1

**要旨**：部分的に補修を行った場合、既存部と修復部との間に電位差が生じ、マクロセルが形成され易く再劣化の要因の一つとされている。その対策として、断面修復材であるポリマーセメントモルタルに亜硝酸塩を添加した防錆モルタルおよび表面含浸材の効果について検討を行った。その結果、界面部における腐食は、亜硝酸塩の既存コンクリートへの拡散によって抑制できることが分かったが、補修部の鉄筋が腐食している状態で補修した場合には、マクロセル腐食を助長させる可能性が示唆された。また、実験に用いたかぶり 10mm の供試体においては、シラン系表面含浸材を塗布した場合に、界面部の腐食が抑制されており、併用する場合には、亜硝酸カルシウムを添加したものに適していることが分かった。

**キーワード**：亜硝酸塩、断面修復、鉄筋腐食、ポリマーセメントモルタル

## 1. はじめに

中性化や塩害等によってコンクリートの鉄筋が腐食した際には、断面修復工法が適用される場合が多い。断面修復工法とは、コンクリート劣化部を除去した断面を当初の断面寸法に復旧するものだが、部分的に補修を行った場合には、既存部と補修部との間に電位差が生じるため、マクロセルが形成されやすく再劣化の要因の一つと言われている<sup>1)2)</sup>。その対策として、全面的に断面修復を行うことや電気的な防食工法を適用する等が挙げられるがコストが非常に高い。

そのため近年では、亜硝酸塩を断面修復材に添加した防錆モルタルの適用が検討されている。これまでに亜硝酸塩を断面修復材であるポリマーセメントモルタルに混合した場合には、塩化物イオンに対して高い鉄筋防錆効果が発揮され<sup>3~6)</sup>、その他にもモルタル自体の強度増進や劣化因子に対する抵抗性が高まる<sup>7)</sup>ことが分かっている。そこで、亜硝酸塩の高い防錆性能を期待して、修復部の防錆のみならず、さらに亜硝酸イオンを既存部のコンクリートに拡散させることで、再劣化の要因の一つである境界部でのマクロセル腐食を抑制させ、再劣化のリスクを低減することを狙ったものである。しかし、これまでの所、防錆モルタルの部分断面修復への適用性については、知見が少ないのが現状である。

一方で、部分断面修復後に表面含浸工法を適用する<sup>8)9)</sup>事例が散見されてきている。既往の研究により、シラン系表面含浸材およびけい酸塩系表面含浸材のいずれにおいてもポリマーセメントモルタルに塗布することで劣化因子の浸入抑制効果は期待できるが<sup>9)</sup>、近年では、マクロセル電流を抑制することを期待して適用される場合が

表-1 実験に用いた断面修復材の配合

配合	W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		練混ぜ水			PC(A)	PC(B)
		W	Li	Ca		
PCM(A)-Li	20	138	138	-	1380	-
PCM(A)-Ca		207		69	1380	-
PCM(B)	14	153	-	-	--	1122

ある。しかし、その効果についても明らかになっていない。

そこで本研究は、部分断面修復を想定した試験体を作製し、亜硝酸塩を添加した防錆モルタルによって補修した後の既存部との境界部におけるマクロセル腐食の抑制効果について評価を行うと共に、表面含浸材を併用した場合の効果についても検討を行ったものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体および実験方法

表-1 は、部分断面修復に用いたポリマーセメントモルタルの配合を示す。部分断面修復部に用いた亜硝酸塩を添加した防錆モルタルは、再乳化型のポリマーセメントに、細骨材やガラスおよびビニロン繊維が予め混合されたプレミックスのものである。このポリマーセメントモルタル材(略号 PCM(A)：密度 1.86g/cm<sup>3</sup>：セメントに対するポリマー含有量 4%)に濃度 20%の亜硝酸リチウム含有水溶液(略号 Li：密度 1.17g/cm<sup>3</sup>)あるいは濃度 20%の亜硝酸カルシウム含有水溶液(略号 Ca：密度 1.30g/cm<sup>3</sup>)を練混ぜ水の一部に置換した PCM(A)-Li および

\*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (学生会員)

\*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 福岡大学大学院 工学部資源循環工学 博士 (工学) (正会員)

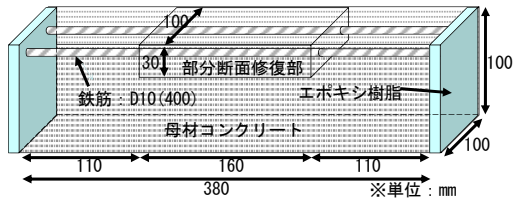


図-1 実験に用いた供試体の概要

表-2 母材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤量(kg/m <sup>3</sup> )	
		W	C	S	G	AE	AE減
60	48	165	275	870	975	0.043	0.25

PCM(A)-Ca を作製した。また、比較用として、一般的なポリマーセメントモルタル材(略号 PCM (B) : 密度 1.32g/cm<sup>3</sup> : セメントに対するポリマー含有量 8%)を用いた。PCM(A)の圧縮強度は、材齢 28 日にて PCM(B)よりも低いが、亜硝酸塩を加えることで強度が増進するため<sup>7)</sup>、PCM(A)に亜硝酸塩を添加した場合には、35N/mm<sup>2</sup>程度と両者の圧縮強度は、材齢 28 日での気中養生でほぼ同等となっている。

図-1 は、部分断面修復を模擬した供試体の形状を示している。かぶり 10mm の位置に D10 の長さ 380mm の異形鉄筋を埋設した 100mm×380mm×100mm の形状の供試体で、修復部は、図-1 に示した通り、供試体中央部の 100mm×160mm×30mm の範囲とした。母材コンクリートは、表-2 に示す配合の水セメント比 60%の普通コンクリートであり、細骨材には海砂、粗骨材に碎石をそれぞれ使用している。表-3 には、各種供試体の水準を示す。実験ケース I では、部分断面修復部以外の母材コンクリートは、依然として高い腐食環境下にある場合を想定し、そのため母材コンクリートに 6.0kg/m<sup>3</sup>の塩化物量を予め添加している。加えて、断面修復後に鉄筋の防錆および劣化因子の浸入抑制を目的として表面含浸材が塗布されている実状を鑑み、その上から撥水性のあるシラン系およびコンクリートを緻密化する働きのあるけい酸塩系表面含浸材を供試体全面に塗布したのもも設けた。いずれもポリマーセメントモルタルに塗布した場合でも所定の効果が得られることを事前の検討で確認している<sup>9)</sup>。

一方の、実験ケース II においては、亜硝酸塩の高い防錆効果を期待して鉄筋の錆を除去せずに修復している。また、母材コンクリートには、軽度の腐食環境であることを想定し 1.2kg/m<sup>3</sup>の塩化物量を添加している。埋設した鉄筋は、図-2 に示す様に予め修復する範囲の中央部から±4cm の計 8cm に希塩酸を含ませた吸水シートを 1 週間巻きつけて腐食させたものを用いた。

表-3 試験供試体の水準

ケース	修復材	含浸材	腐食	塩化物量 母材
I	PCM(B)	無塗布	無	6.0kg/m <sup>3</sup>
		シラン系		
		けい酸塩		
	PCM(A) -Li	無塗布		
		シラン系		
		けい酸塩		
PCM(A) -Ca	無塗布			
	シラン系			
	けい酸塩			
II	PCM(A) -Li	無塗布	有	1.2kg/m <sup>3</sup>
	PCM(A) -Ca			
	PCM(B)			



図-2 実験ケース II で用いた鉄筋

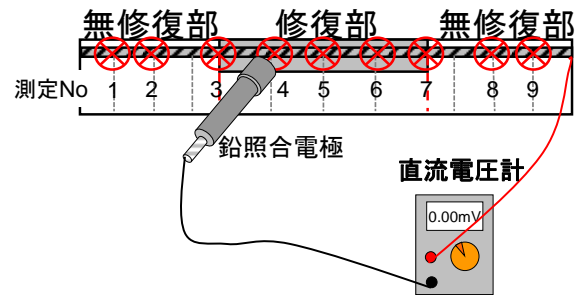


図-3 自然電位の測定箇所

測定項目は、温度 40°C、相対湿度 85%の環境下に静置した状態で図-3 に示す様に 1 つの鉄筋につき 9 箇所自然電位を週 1 回測定し、所定の促進期間にて供試体を解体して鉄筋の腐食面積率および腐食量を算出した。促進期間は、ケース I においては、自然電位の経時変化からシラン系を塗布したものは 90 週、その他の供試体はいずれも 60 週でそれぞれ解体を行った。一方のケース II においては、促進期間を 90 週としている。腐食面積率は、鉄筋にテープを巻きつけてスケッチしたものを画像処理によって算出し、鉄筋腐食重量は、鉄筋を所定の長さ 40~50mm にカットし、10%のクエン酸水素二アンモニウ

ム水溶液に浸漬させ、鉄筋の錆が完全に除去されたことを確認した後に浸漬前との重量差を鉄筋長さで除して算出した。なお、試験結果は、いずれの測定結果も鉄筋 2 本の平均値で表している。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 実験ケース I

図-4 は、PCM(B)における自然電位分布の経時変化を示す。なお、自然電位は、変動の少なかった期間を平均して示している。この結果、試験開始初期に修復部と既存部の間に微量の電位差が生じており、修復部がカソード、既存部がアノードとなっているのが分かる。促進期間 10~15 週目になると、自然電位の変化は、全体的に貴な方向にシフトしている。初期の電位分布とは異なり、修復部がアノード、既存部がカソードとなっている。また、修復部と既存部との間に電位差が生じており、試験期間が経過するに従って、全体的に卑な方向へシフトし、電位差は小さくなる傾向を示した。

図-5 は、PCM(A)-Li における自然電位分布の経時変化を示す。亜硝酸リチウムを添加した場合には、初期電位は鉄筋位置ごとに明確な差はなく、修復部および既存部に関らずほぼ一定となっている。しかし、促進期間に伴って徐々に電位差が生じ、10 週目以降になると明確に補修部と既存部との間に電位差が生じている。PCM(B)と同様に補修部がアノード、既存部がカソードとなる結果を示した。また、さらに促進が進むと既存部の自然電位には、大きな変化はないが、補修部において電位が貴な方向にシフトする傾向を示した。

図-6 は、PCM(A)-Ca における自然電位分布の経時変化を示す。この結果、初期の自然電位は、境界部付近の既存コンクリート側で周囲に比べて卑になっており、マクロセル腐食の発生状況にあると思われる。しかし、促進期間が 10~15 週になると、自然電位は他の修復材と同様に修復部がアノードとなっている。さらに 30 週目以降になると、測定箇所ごとの差は見られなくなり、-300mV 程度で安定している。

図-7 は、測定箇所 No2 と No4 の間に生じた電位差の経時変化を示したものである。いずれの場合も試験開始初期から電位差が生じ、10 週目までは大きくなる傾向を示している。その後は、電位差が徐々に小さくなる傾向を示し、50 週目辺りからは修復材の種類による明確な差は確認されなかった。亜硝酸塩添加による明確な違いを期待したが明確な差は見られなかった。そのため、いずれにおいても電位差が小さくなった促進期間 60 週でコンクリートを解体し鉄筋の腐食状況の調査を行った。

図-8 は、促進 60 週目における断面修復材に PCM(B)、PCM(A)-Li、PCM(A)-Ca を用いた場合の鉄筋位置ごとの腐食面積率を示す。いずれの場合においても、腐食面積

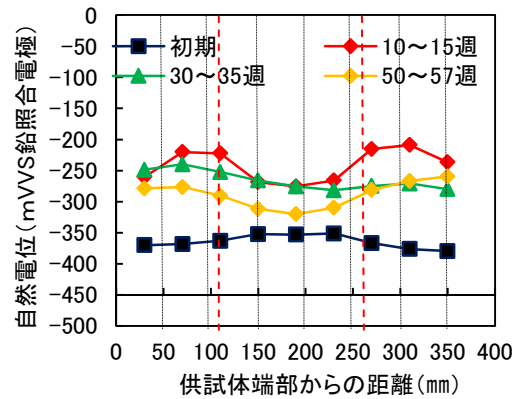


図-4 自然電位の経時変化 (PCM(B))

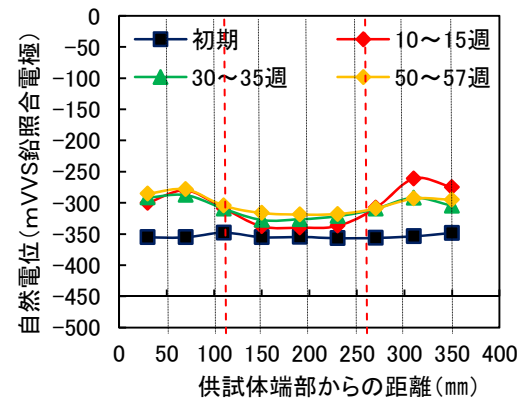


図-5 自然電位の経時変化 (PCM(A)-Li)

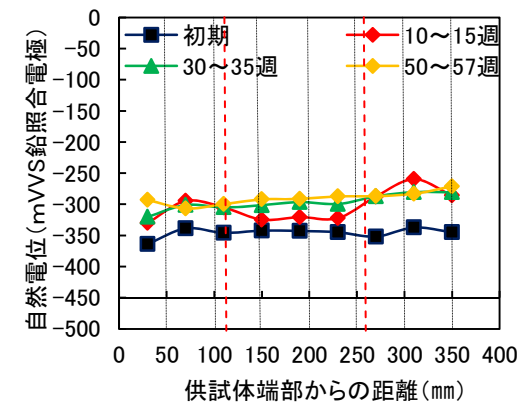


図-6 自然電位の経時変化 (PCM(A)-Ca)

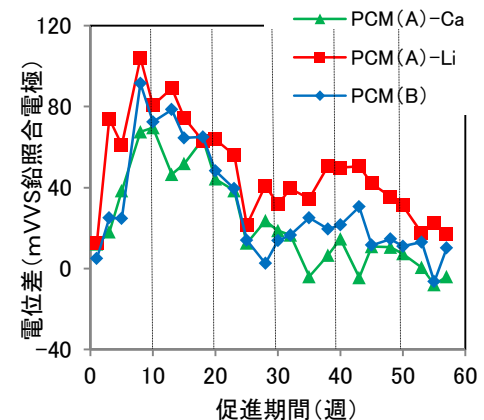


図-7 電位差の経時変化

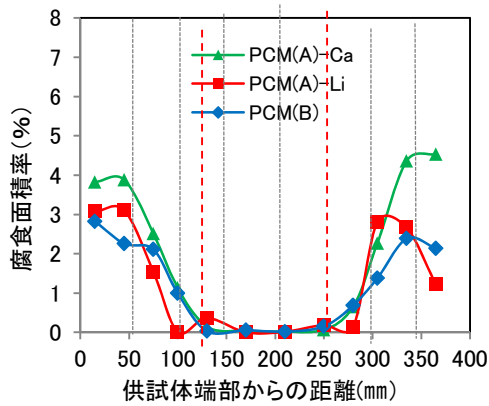


図-8 鉄筋位置ごとの腐食面積率

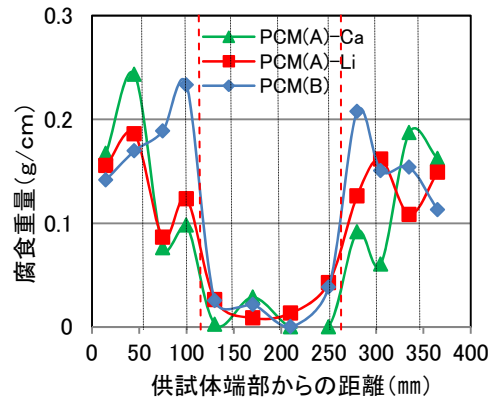


図-9 鉄筋位置ごとの腐食重量

率に明確な差は確認されなかった。PCM(A)-Li においては、補修部と既存の境界に腐食が確認された。

図-9 には、各種断面修復材の鉄筋位置ごとの腐食重量を示す。PCM(B)を用いた場合には、境界部から既存部側の20mmまでの範囲で腐食重量が最も大きくなっており、マクロセル腐食による局所的な腐食発生が確認できた。一方の、PCM(A)-Caの場合には、境界部の腐食重量はPCM(B)に比べて明らかに小さく腐食が抑制されているが、端部になるに従って腐食重量は大きくなり、境界部から約70mm 既存側離れた位置で最大となっている。一方の、PCM(A)-Li は、PCM(A)-Caと同様に界面部での腐食が抑制され、境界部から既存部方向へ50~70mm 付近で腐食重量が最大となっているが、その量はPCM(B)と同程度であった。亜硝酸塩を添加したことによって、亜硝酸イオンが既存部側へ拡散することで境界部でのマクロセル腐食を抑制したものと考えられる。

図-10 は、境界部周囲の亜硝酸イオン量分布を示したものである。測定は、深さごとの粉体試料をコンクリートドリルで採取し、粉体試料0.3gと超純水29.7gを混合し、濾過したものをイオンクロマトグラフィーによって測定する方法で行った。この結果、PCM(A)-Li、PCM(A)-Caのいずれにおいても亜硝酸イオンは、母材コンクリート側へ35mm 付近まで拡散していることを確認した。また、亜硝酸塩の種類による明確な違いは見られていない。以上のことから、亜硝酸イオンが拡散することによって、界面部のマクロセル腐食の発生を抑制できることが分かった。ただし、亜硝酸イオンが拡散していない箇所において局所的な腐食が発生する可能性が示唆された。

次に、表面含浸材が境界部の腐食抑制に与える影響について検討した結果を示す。図-11 には、PCM(B)およびそれにシラン系表面含浸材およびけい酸塩系表面含浸材を塗布した場合の鉄筋腐食面積率を示す。促進期間は、供試体種類で異なっており、シラン系を塗布したものは

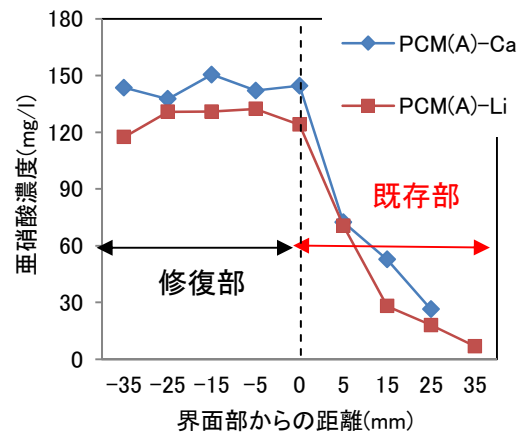


図-10 コンクリート中の亜硝酸イオン量

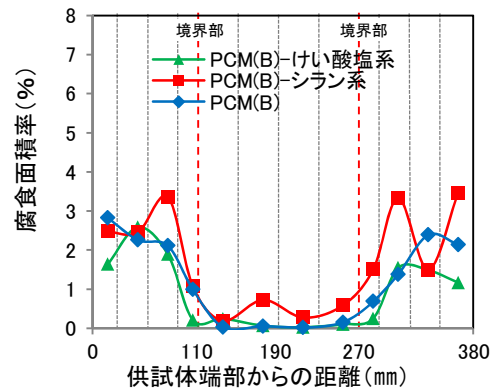


図-11 腐食面積率

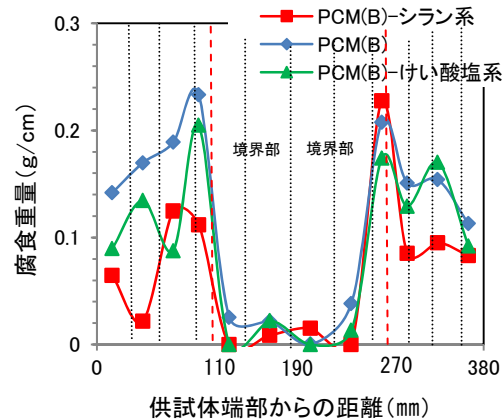


図-12 腐食重量 (PCM(B))

90 週間、その他のものは 60 週間行っている。かぶり 10mm であるため、表面含浸材の効果が発揮されやすいものと予想されたが、けい酸塩系用面含浸材においては、境界部で腐食の発生が抑制されているが、それ以外の鉄筋箇所においては PCM(B)と大差がなかった。一方の、シラン系表面含浸材では、促進期間が PCM(B)よりも長期であったのにも関わらず、いずれの箇所においても同程度の腐食面積率を示している。

図-12 は、PCM(B)にシラン系表面含浸材およびけい酸塩系表面含浸材を塗布した場合の腐食重量を示す。腐食重量は、いずれの表面含浸材においても PCM(B)に比べて抑制する傾向を示している。表面含浸材種類の違いについて見ると、シラン系表面含浸材を塗布したものが、他のものよりも促進期間が長期であるにも関わらず、最境界面部やその他の端部において抑制する結果を示した。これは、シラン系表面含浸材の撥水効果により、供試体内部への水分の侵入を抑制したことで、他のものよりも低い含水状態にあったものと思われ、結果としてコンクリートの抵抗値が他よりも高くなったことによってマクロセル電流を抑制できたものと考えられる。一方の、けい酸塩系表面含浸材を塗布した場合の腐食重量は、PCM(B)と大差がなく、端部において僅かながら腐食を抑制する結果となっている。

図-13 には、一例として、PCM(B)、PCM(A)-Li、PCM(A)-Ca にシラン系表面含浸材を塗布した場合の腐食重量を示す。いずれも促進期間は 90 週である。この結果、界面部の腐食重量は、PCM(A)-Li、PCM(B)、PCM(A)-Ca の順で大きい結果を示した。断面修復材のみでは、最も腐食抑制が見られた PCM(A)-Li が予想に反し大きくなっている。亜硝酸塩をモルタルに添加した場合には、高い保水性と吸水性が発揮されるとの報告があり、その効果は亜硝酸リチウムの方がカルシウムよりも大きい<sup>3)</sup>。シラン系の撥水効果がいずれの供試体においても同様に発揮されたとすると、PCM(A)-Li、PCM(A)-Ca、PCM(B)の順で修復部の含水率が高かったものと予想できる。この含水状態の影響によって腐食抑制が PCM(B)よりもなされなかったものとする。

以上のことから、今回かぶり 10mm の供試体を用いて検討を行った結果、断面修復材としては、亜硝酸リチウムを添加したものがマクロセルに対して効果が高いことが分かった。また、表面含浸材においてはシラン系に腐食抑制が確認された。シラン系表面含浸材を塗布する場合には、亜硝酸リチウムよりもカルシウムの方が適していることが分かった。

### 3.2 実験ケース II

図-14 には、図-2 に示した部分断面修復部の中央部が腐食した鉄筋用いた場合の PCM(B)、PCM(A)-Li、

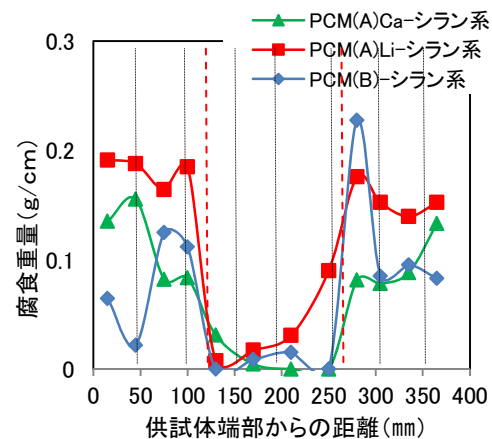


図-13 腐食重量(シラン系)

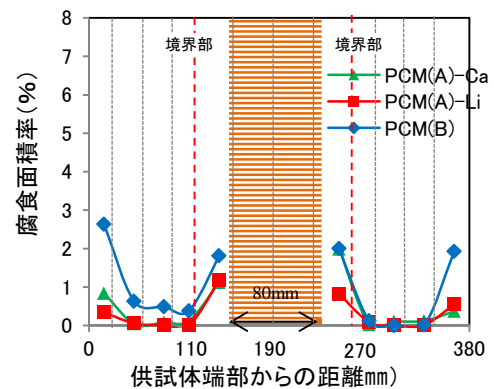


図-14 腐食面積率(無塗布-腐食有り)

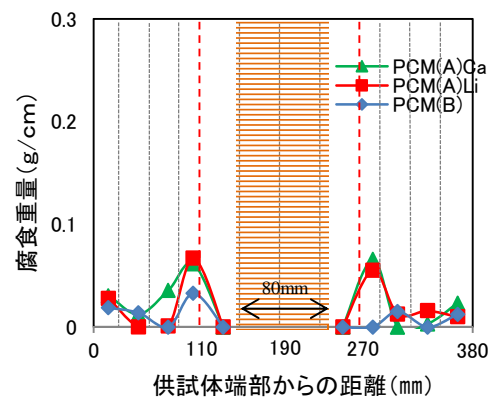


図-15 腐食重量(無塗布-腐食有り)

PCM(A)-Ca における鉄筋腐食面積率を示す。なお、既存部のコンクリートには、 $1.2\text{kg/m}^3$  の塩化物を予め添加している。この結果、予め腐食させていない補修部内の端部において、いずれも場合も腐食の発生が確認された。この箇所においては、PCM(B)の腐食面積率が最も大きく、PCM(A)-Li、PCM(A)-Ca においては同程度であった。

図-15 は、各種供試体における腐食重量を示す。この結果、腐食面積率がもっとも大きかった PCM(B)のもの

が最も腐食が抑制されており，亜硝酸塩を添加したPCM(A)-Li およびPCM(A)-Ca は，むしろ既存側の境界部での腐食が大きくなっている。この点について今後の課題であるが基材部と打継部の割合によっては，マクロセル腐食を助長することも示唆されており，今回行った実験のケースにおいてもマクロセル腐食を助長したものとされる結果を示した。

#### 4.まとめ

本論文は，部分断面修復を対象として亜硝酸塩を添加した防錆モルタルおよび表面含浸材を用いた場合の境界部の防錆評価を行ったものである。その結果，以下のようなことを明らかにした。

- (1) 部分断面修復に亜硝酸塩を添加したポリマーセメントモルタルを用いた場合，界面部におけるマクロセル腐食を抑制でき，特に亜硝酸リチウムの場合は防錆効果が高い。
- (2) 断面修復後に表面含浸材を塗布することで，マクロセル腐食を抑制でき，特に撥水効果のあるシラン系が良好な結果を示した。
- (3) 防錆モルタルとシラン系表面含浸材を併用する場合には，亜硝酸リチウムよりもカルシウムの方が適している。
- (4) 補修部の鉄筋に腐食が残存しているような場合には，亜硝酸塩を添加した防錆モルタルでは，マクロセル腐食を助長させる可能性が示唆された。

なお本研究は，平成 25 年度文部科学省科学研究費，基盤研究 C「防錆性能を有する断面修復材の開発に関する研究，代表：添田政司，課題番号：25420469」の補助を受け実施したことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 飯野将広，渡辺宗幸，斉藤俊克，出村克宣：異なる長さの棒鋼を埋め込んだ供試体の打継部の長さおよび比率がマクロセル腐食の発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35 ,No1,pp.1105-1110, 2013.7
- 2) 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
- 3) 松本涼，樋原弘貴，添田政司：亜硝酸塩の濃度や種類の違いがモルタル中への塩化物イオンの浸透および鉄筋防錆に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36 ,No1,pp.1222-1227,1197
- 4) 山城博隆，太田和宏，岡田一興，鳥取誠一：水溶液とコンクリート細孔溶液における鉄筋防錆剤の防食に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23 No.1 ,pp.367-372,2001
- 5) 浜幸雄，千歩修，秋田竜：コンクリート中の鋼材腐食に及ぼす亜硝酸イオンおよび塩化物イオン濃度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22,No.2,pp.55-60,2000 01
- 6) 高倉誠，堀孝廣，中村裕二：高濃度亜硝酸塩含有モルタルの防錆効果に関する研究，セメント協会，セメント技術年報 Vol.42,No.1,pp.379-382,1988.12
- 7) 行徳圭洋，樋原弘貴，添田政司，大和竹史：亜硝酸塩がポリマーセメントに与える影響に関する研究，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.34,pp.1684-1689, 2012.7
- 8) 土木学会：表面保護工法，設計施工指針(案)，
- 9) 樋原弘貴，添田政司，大和竹史，林亮太：各種表面保護工法の併用が補修効果に与える影響に関する研究，土木学会全国大会年次学術講演会 Vo-27,pp53-54,2011.9