断面修復材による鉄筋腐食補修工法の評価に関する実験

EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR PERFORMANCE ON CORROSION OF REINFORCING BAR WITH SECTION RECOVERY MATERIAL

松林裕二 — *1 梶田佳寛 — *2

Yuji MATSUBAYASHI — *1 Yoshihiro MASUDA — *2

キーワード：
塩化物イオン, 鉄筋腐食, 補修工法, はつり, 鉄筋防錆材, 断面修復材

Keywords:
Chloride ion, Corrosion of reinforcing bar, Repairing system, Chipping, Primer, Section recovery material

This paper reports the results of accelerated test and outdoor exposure test on the repair performance on corrosion of reinforcing bar in salt containing concrete by various repairing materials. The results are following;

- The surface covering material has the protection effect of a reinforcing bar corrosion, with the part that is not repairing.
- The repair performance reduces it, if it does not do chipping the concrete of the periphery of reinforcing bar corrosion.
- The primer has a repair performance in a section recovery area.
- The repair performance differs by the type of a repair material, and the repair performance of polymer cement differs by the physical properties and the addition of inhibitor.
- The primer and section recovery material recommend that uses the repair material of the same type.
- The accelerated test is able to estimate the result in 1/12.4 periods of the outdoor exposure test.

1. 序

社会資本である建築物は、解体・建設を繰返すフローの時代から補修・改修によって維持保全するストックの時代へと変化している。このストックを有効利用するためには、構造躯体の劣化状況を把握して適切な状態に保つことが必要であり、構造躯体の診断、補修及び補強が極めて重要である。

鉄筋が腐食してコンクリートに浮き、剥落等の損傷が見られる場合には、劣化部位をはつり取った後に、鉄筋防錆材及び断面修復材による補修が行われる。しかし、用いられる鉄筋防錆材及び断面修復材の補修効果については、既往の研究が報告^{1), 2)}され、日本建築学会から「鉄筋コンクリート造の耐久性調査、診断および補修指針案・同解説」³⁾が刊行されたが、まだ不明な点が多い。著者らは、これまでに、劣化が顕在化した状態を再現した鉄筋コンクリート試験体に各種の補修材料・工法を施し、促進劣化試験及び屋外暴露試験を行ってきた^{5), 6), 7), 8)}。本報告は、これらの実験成果を取りまとめると共に、促進試験と屋外暴露試験との関係を検討したものである。

2. 実験方法

2.1 実験計画

(1) 対象とする劣化症状と劣化要因

本研究で対象とする劣化症状は、塩化物イオンによって鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートの浮き、剥落、鉄筋露出等の損傷が見られる場合である。実験の要因と水準を表-1に示す。

(2) 補修材料・工法の選定

一般に実施されている鉄筋腐食補修工法はシステム化されており、その工程は、劣化部位をはつり出した後、露出鉄筋にペースト状の鉄筋防錆材を塗布し、断面欠損部を断面修復材で埋め戻し、更に外部からの腐食要因の遮断及び美観を目的に各種の仕上塗材が施工される。また、鉄筋防錆材及び断面修復材の組合せとしては、①エポキシ樹脂+エポキシ樹脂モルタル、②エポキシ樹脂+ポリマーセメントモルタル、③ポリマーセメントペースト+ポリマーセメントモルタルがある。本実験では、上記の組合せを基に、一般的な鉄筋防錆材及び断面修復材を用いた補修工法を選定し、表-2に示す補修材料・工法と劣化要因（塩化物量）を組合せとした。また、鉄筋の腐食速度が大きいことが予想される塩化物量 3.0 kg/m^3 については、外部からの腐食要因の遮断を目的として表面被覆材（複層仕上一般形及び防水形）を施したものを水準に取り入れている。なお、実験に用いた補修材料（埋戻し材）の基礎物性試験結果を表-3に示す。

(3) 実験手順

実験の手順は、鉄筋コンクリート試験基材を製作・養生し、鉄筋防錆材及び断面修復材による補修を施した後、促進試験及び屋外暴露試験を行い、所定材齢において評価を行った。

表-1. 実験の要因と水準

実験の要因	実験の水準
かぶり厚さ	20mm
塩化物量(Cl^-)	0.5, 1.5, 3.0 kg/m^3
はつり深さ	鉄筋の裏側まで、鉄筋の中心まで
はつり範囲	健全部が現われるまで、腐食が残る程度まで

本報告は、参考文献5), 6), 7), 8) において発表したものをもとに、加筆・修正を加えたものである。

*1 宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程 社会人大学院
(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

*2 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*1 Graduate Student, Doctor's Degree, Graduate School of Eng., Utsunomiya Univ.

*2 Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

表-2 塩化物量と補修工法の組合せ

補修工法の種類				塩化物量(kg/m ³)			
鉄筋防錆材	断面修復材	被覆材	記号	0.5	1.5	3.0	
なし	LPCM(SBR)	なし	0-LP-0	○	○	—	
		E	0-LP-E	—	—	○	
		F	0-LP-F	—	—	○	
	PCM(SBR-I)	なし	0-LPI-0	○	○	—	
		LEPM	なし	0-LE-0	○	○	—
			E	0-LE-E	—	—	○
PCP(SBR)	PCM(SBR)	F	0-LE-F	—	—	○	
		なし	P-P-0	○	○	○	
			E	P-P-E	—	—	○
	F		P-P-F	—	—	○	
	LPCM(SBR)	なし	P-LP-0	○	○	—	
		E	P-LE-0	—	—	—	
PCP(EVA)	PCM(EVA)	なし	PEV-PEV-0	—	○	—	
PCP(アクリル)	PCM(アクリル)	なし	PA-PA-0	—	○	—	
PCP(Fアクリル)	PCM(Fアクリル)	なし	PF-PF-0	—	○	○	
PCP(SBR-I)	PCM(SBR-I)	なし	PI-PI-0	—	○	○	
EP	PCM(アクリル)	なし	E-PA-0	—	○	—	
	PCM(エポキシ)	なし	E-PEP-0	—	○	—	
	LEPM	なし	E-LE-0	○	○	—	
	EPM	なし	E-E-0	○	○	○	
		E	E-E-E	—	—	—	
		F	E-E-F	—	—	—	
なし(比較試験体)			N	○	○	○	

注) 1) PCP; ポリマーセメントペースト, 2) PCM; ポリマーセメントモルタル, 3) LPCM; 軽量ポリマーセメントモルタル, 4) F アクリル; 弾性アクリル系, 5) SBR-I; 防錆剤入り SBR 系, 6) EP; エポキシ, 7) EPM; 床補修用現場調合エポキシモルタル, 8) LEPM; 軽量エポキシモルタル, 9) 被覆材 E; 一般形複層仕上塗料, 10) 被覆材 F; 防水形複層仕上塗料, 11) 塩化物量; Cl⁻(kg/m³)

表-3 補修材料(埋戻し材)の基礎物性試験結果

種類	圧縮強さ	ヤング係数	曲げ強さ	吸水率	熱膨張率	乾燥収縮	透気性
CM	43.7	2.72	10.0	169	12.2	8.9	0.5
PCM(SBR)	39.8	1.17	11.5	137	11.6	7.7	0.0
PCM(EVA)	39.8	1.74	12.1	154	18.2	11.4	0.0
PCM(アクリル)	57.5	2.67	14.6	144	14.6	4.7	0.0
PCM(Fアクリル)	14.9	0.96	5.8	140	12.3	8.9	0.5
PCM(エポキシ)	29.2	1.34	3.1	153	19.0	17.2	0.0
LPCM(SBR)	9.0	0.37	3.9	238	14.5	17.3	0.0
EPM	32.8	0.87	14.4	102	46.3	2.1	2.5
LEPM	14.9	0.18	11.6	12	78.6	5.2	0.0

注) 曲げ及び圧縮強さ; N/mm², ヤング係数; $\times 10^4$ N/mm², 吸水率(JIS A 6203); g/l, 熱膨張率; $\times 10^{-4}$, 乾燥収縮; $\times 10^{-4}$, 透気性(20℃, 60%RH, CO₂5%, 30d); mm

図-1 試験体の形状・寸法

2. 2 試験体の製作

試験体は、図-1に示すようなコンクリート試験体であり、鉄筋を3本埋め込んで製作した。コンクリートの使用材料は表-4、コンクリートの調合及び性質は表-5に示す通りである。塩化物は、所定の塩化物イオン量となるように、NaClを加えて調整した。鉄筋は、JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)のSR24(製作当時の呼び名)に適合する酸化皮膜(黒皮)付きφ13mmの丸鋼を用いた。はつりの範囲及び深さが異なる状況となるように、鉄筋1は鉄筋の軸方向に腐食部分を僅かに残してはつり取ったように黒皮を除去し、鉄筋2は鉄筋の軸方向の腐食部分を十分にはつり取ったように黒皮を除去し

表-4 コンクリートの使用材料

種類	材料
セメント	普通ポルトランドセメント(小野田セメント社製)
細骨材	大井川産川砂(絶乾密度2.60 g/cm ³ , 吸水率1.33%, 粗粒率2.63)
粗骨材	青梅産碎石(絶乾密度2.62 g/cm ³ , 吸水率0.72%, 粗粒率6.72)
練混水	水道水
混和材	AE剤
NaCl	一級試薬(塩化物量調整用)

表-5 コンクリートの調合及び性質

塩化物量(kg/m ³)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位セメント量(kg/m ³)	単位水量(kg/m ³)	スラング(cm)	空気量(%)	圧縮強度σ ₂₈ (N/mm ²)
0.5	65	48	285	185	17.5	4.7	27.2
1.5					17.5	4.7	28.0
3.0					16.5	4.6	30.4

ている。また、鉄筋3は、鉄筋2と同様に黒皮を除去しているが、鉄筋深さ方向1/2まではつり取った状況とした。

試験体は材齢2週まで湿布散水養生し、4週まで恒温室内に放置した後、上下、両端及び裏面をエポキシ樹脂でシールした。更に表-2に示す補修材料・工法を施した。

2. 3 促進試験及び暴露試験

促進試験条件は、吸湿・乾燥の状況、作業性等を考慮して、60℃95%RH以上2.5日間と気乾放置2.5日間の繰返しを1サイクルとした。促進試験期間は、塩化物量0.5kg/m³が40、80及び130サイクル、塩化物量1.5kg/m³が20、60及び150サイクル、塩化物量3.0kg/m³が10、30及び83サイクルとした。

屋外暴露は、建設省建築研究所の屋外暴露試験場(茨城県つくば市)で行った。促進試験期間は、塩化物量0.5kg/m³が8年、塩化物量1.5kg/m³が3年2ヵ月、塩化物量3.0kg/m³が2年5ヵ月とした。

試験体数は、促進試験・屋外暴露試験ともに、各材齢1体とした。

2. 4 評価項目及び方法

鉄筋腐食度の評価項目は、発錆面積率とした。

鉄筋の発錆面積率は、鉄筋を取り出し、図-1に示す無補修部、境界部及び補修部毎にトレーシングペーパーに錆の状況を複写し、錆部分を黒く塗りつぶして面積の自動測定機を用いて発錆面積を測定し、発錆面積率を測定した。なお、境界部及び無補修部の発錆面積率は、左右対称の各部の平均値とした。

3. 実験結果

3. 1 鉄筋の発錆面積率

鉄筋の発錆面積率と促進劣化期間及び屋外暴露期間の関係を図-2から図-4に示す。促進劣化期間の増加に伴い発錆面積率は増加し、その増加傾向は、補修部を除いて塩化物量が多いほど大きい。

塩化物量が多い(3.0kg/m³)場合には、表面被覆材の効果を実験要因として取りあげたが、この場合、鉄筋防錆材及び断面修復材がP-P及びE-Eの無補修部の鉄筋の発錆面積率は、被覆材を施した方が施さなかったものよりも小さいという結果になった。また、補修部及び境界部では、被覆材の有無による差異は見られない。これは、無補修部では、被覆材を施すことにより鉄筋腐食の要因となる酸素や

図-2 鉄筋の発錆面積率と促進劣化期間及び屋外暴露期間の関係、その1 (塩化物量 3.0kg/m^3)

水分の供給が低減されたためと考えられる。なお、この傾向は促進劣化試験も屋外暴露試験も同様である。これらの結果は、鉄筋腐食要因が内在し劣化が顕在化していない部分では被覆材が鉄筋腐食の抑制するとの既往研究⁴⁾と一致している。これらのことから、無補修部では、被覆材が鉄筋腐食の抑制に有効であることがわかる。

被覆材を施さなかった無補修部の発錆面積率を見ると、塩化物量が多いほど鉄筋の発錆面積率は大きい、同じ塩化物量では、補修工法、はつり深さ及び範囲には関係なく概ね同程度である。一方、補修部や境界部の発錆面積率は、補修工法やはつり方法による差異が見受けられる。この発錆面積率の差を見るために、促進劣化期間(t)

図-3 鉄筋の発錆面積率と促進劣化期間及び屋外暴露期間の関係, その2 (塩化物量 1.5kg/m^3)

○:補修部 △:境界部 ×:無補修部

と発錆面積率(Acr)との関係において、発錆面積率が100%に達した時までを次式の直線式で近似し、その係数Aを発錆面積速度係数と定義し、実験要因ごとの検討を行うこととした。

$$Acr = A \times t \dots\dots\dots (式1)$$

3.2 鉄筋のはつり出しが補修効果に及ぼす影響

図-5は、鉄筋を裏側まで且つ腐食部分を僅かに残してはつりとした状況をシュミレートした鉄筋1と、鉄筋の裏側まで且つ腐食部分まで十分にはつり取った鉄筋2の境界部の発錆面積速度係数を比較したものと、鉄筋2と鉄筋が1/2埋まっている状況をシュミレートした鉄筋3の補修部の発錆面積速度係数を比較したものである。境界部の発錆面積速度係数は、鉄筋2よりも鉄筋1の方が大きく、

補修部分では鉄筋2よりも鉄筋3の方が著しく大きいことがわかる。このことから、鉄筋のはつり出しは、腐食部分まで十分に行うことが、補修を行う際には重要であることがわかる。また、補修を施した鉄筋の発錆面積速度係数は、比較試験体(N)と比べて大きい。これらは、補修を施すことにより、境界部に塩化物量の濃淡が生じることによるマクロセルとなったためと考えられる。

3.3 鉄筋防錆材の有無が補修効果に及ぼす影響

図-6は、各部位ごとに、ポリマーセメント系及びエポキシ系補修材の鉄筋2の発錆面積速度係数と塩化物量の関係を示したものである。補修部の発錆面積速度係数は、鉄筋防錆材を施したものよりも施さなかったものの方がやや大きく、鉄筋防錆材の補修効果がみら

図-4 鉄筋の発錆面積率と促進劣化期間及び屋外暴露期間の関係, その3 (塩化物量 0.5kg/m^3)

図-5 はつり状態が異なる試験体の鉄筋の発錆面積率

れる。しかし、境界部及び無補修部の発錆面積速度係数は、塩化物量が 1.5kg/m^3 の場合には、逆に鉄筋防錆材をほどこさなかったものの方が小さい。塩化物量が多い場合には、補修部の鉄筋腐食を完全に抑制しようとする、逆に無補修部での腐食が大きくなるおそれがあることを示していると考えられる。なお、塩化物量が 0.5kg/m^3 の場合、境界部及び無補修部は鉄筋の腐食量が小さいこともあり、その差異はほとんどない。

3.4 補修材の種類による違いが補修効果に及ぼす影響

図-7は、鉄筋防錆材と断面修復材にポリマーセメント系とエポキシ系補修材とを組合せた試験体の発錆面積速度係数を示したものである。各材料にポリマーセメント系を用いたものの発錆面積速度係数は、エポキシ系を用いたものよりも僅かに小さい。また、鉄筋防錆材にエポキシ樹脂、断面修復材にポリマーセメントモルタルを用いたものの発錆面積速度係数は、各材料を同一系の補修材で補修したものよりも、著しく大きい。このことから、鉄筋防錆材と断面修復材は、同一系の補修材を用いることが適切であると考えられる。

なお、断面修復材としてエポキシモルタル（記号；*E-*）は、全般に発錆面積率が大きい、これは比較のために用いた床用補修用であり、かなりポーラスな材料であったためである。

3.5 ポリマーセメント系補修材の種類による違いが補修効果に及ぼす影響

図-8は、各種ポリマーセメント系補修材を施したものの発錆面積速度係数を示したものである。いずれも補修部の発錆面積速度係数は著しく小さく、鉄筋腐食はほとんど進行していないが、境界部及び無補修部ではその種類によって異なっていることがわかる。図-9は、SBR系ポリマーセメントモルタル及びSBR系軽量ポリマーセメントモルタルを断面修復材に用いた発錆面積速度係数を示したもので

図-6 鉄筋防錆材を施した試験体の発錆面積速度係数 (鉄筋 2)

図-7 代表的な試験体の発錆面積速度係数 (塩化物量 1.5kg/m³, 鉄筋 2)

図-8 ポリマーセメント系補修材の発錆面積速度係数, その 1
(塩化物量 1.5kg/m³, 鉄筋 2) 図-9 ポリマーセメント系補修材の発錆面積速度係数, その 2
(塩化物量 1.5kg/m³, 鉄筋 2) 図-10 ポリマーセメント系補修材の発錆面積速度係数, その 3
(塩化物量 1.5kg/m³, 鉄筋 2) 図-11 促進劣化試験による発錆面積速度係数と屋外暴露試験による
発錆面積速度係数

ある。補修部ではいずれも小さな値を示しているが、境界部及び無補修部では、ポリマーセメントモルタルを用いたものの発錆面積速度係数は、軽量ポリマーセメントモルタルを用いたものよりも小さく、モルタルの物性が異なると補修効果も異なることがわかる。図-10 は、防錆剤を混入した SBR 系ポリマーセメントモルタルを用いたものの発錆面積速度係数を示したものである。防錆剤を混入したものの発錆面積速度係数は、混入しないものに比べて僅かであるが境界部分で小さい値を示し、他の工法とは異なる補修効果があるように見える。

く、モルタルの物性が異なると補修効果も異なることがわかる。図-10 は、防錆剤を混入した SBR 系ポリマーセメントモルタルを用いたものの発錆面積速度係数を示したものである。防錆剤を混入したものの発錆面積速度係数は、混入しないものに比べて僅かであるが境界部分で小さい値を示し、他の工法とは異なる補修効果があるように見える。

3.6 促進劣化試験と屋外暴露試験との関係

図-11 は、促進劣化試験による発錆面積速度係数と屋外暴露試験による発錆面積速度係数との関係を示したものである。各データは補修部、境界部及び無補修部の平均であり、促進劣化試験の発錆面積速度係数は 1 サイクルを 5 日として年あたりに換算した。これらの関係を求めるために、全データを最小二乗法により原点を通る一次関数で近似したものが、図中の直線及び一次式である。屋外暴露試験による発錆面積速度係数は、促進劣化試験の 0.0809 倍となる一次式の係数から、促進劣化試験によって屋外暴露試験の 1/12.4 の期間で、鉄筋腐食補修工法の評価が推定できる。

5. 結 論

本実験の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 被覆材は、劣化が顕在化していない部分の鉄筋の腐食保護効果がある。
- (2) 腐食部分のコンクリートを十分には取り取らないと、補修効果が低減する。特に、塩化物量が多い場合に顕著である。
- (3) 鉄筋防錆材は、断面修復部分でその劣化補修効果がある。
- (4) 補修材料の種類により補修効果は異なり、ポリマーセメント系では、モルタルの物性や防錆剤の有無により補修効果は異なる。
- (5) 鉄筋防錆材と断面修復材とは、同一系の補修材料を用いることが適切である。
- (6) 60℃95%RH 以上 2.5 日間と気乾放置 2.5 日間の促進劣化試験によって、鉄筋腐食補修工法の評価を屋外暴露試験の 1/12.4 の期間で推定できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法委員会報告，1992，10
- 2) 藤井和俊ほか 4 名：初期内在塩化物により劣化した鉄筋コンクリート造建築物の補修効果の評価に及ぼす補修方法の影響，日本建築学会構造系論文報告集，第 529 号，pp21-28，2000. 3
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造の耐久性調査、診断および補修指針案・同解説，1997. 2
- 4) 梶田佳寛ほか 6 名：表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリートの塩害劣化抑制効果に関する実験，日本建築学会構造系論文報告集，第 433 号，pp1-10，1992. 3
- 5) 花榮浩ほか 5 名：鉄筋防錆材及び断面修復による鉄筋コンクリート造の塩害劣化補修効果に関する研究（その 1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp143-146，1990. 9
- 6) 花榮浩ほか 4 名：鉄筋防錆材及び断面修復による鉄筋腐食補修工法の評価に関する実験（その 1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp189-192，1991. 9
- 7) 庄司広和ほか 4 名：鉄筋防錆材及び断面修復材による鉄筋コンクリート造の塩害劣化補修効果に関する屋外暴露試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp289-290，1996. 9
- 8) 松林裕二，梶田佳寛：鉄筋防錆材および断面修復材による鉄筋腐食補修工法の評価に関する屋外暴露実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp275-276，2000. 9

[2000年10月20日原稿受理 2001年2月22日採用決定]