

論文 促進試験および暴露試験による断面修復工法の補修効果の評価

西村 眞治¹・榊田 佳寛²・鹿毛 忠継³・松林 裕二⁴

要旨：塩害により劣化した鉄筋コンクリート造の補修後の効果を評価するには、促進試験や暴露試験が主に用いられている。本論文は、様々な種類の断面修復工法を用いた鉄筋コンクリート造の試験体に対し、促進試験と約20年間にわたる屋外暴露試験を実施した結果を比較したうえで、断面修復工法の補修効果の評価を行った。その結果、防錆材・表面被覆材の有無やはつり方および断面修復材の種類による補修効果の違いが明らかになった。

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

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物において、塩害や中性化によって鉄筋が腐食し、コンクリートにひび割れ、浮き、剥落等の損傷が生じた際の補修工法としては、コンクリート劣化部位をはつり取った後に断面修復を行う方法が一般的に行われている¹⁾。この工法における補修後の鉄筋腐食抑制効果については、促進試験や短期的な暴露試験によって、ある程度既報^{2),3),4)}で検証されているものの、長期屋外暴露試験によって検証した報告は、現段階ではまだまだ少ないと言える。本研究は、コンクリート中に各種濃度の塩化物イオンが含まれるという劣化要因が内在し、部分的に鉄筋が露出するという劣化が顕在化した状況を再現した鉄筋コンクリート試験体に各種補修材料・工法を施した条件での促進試験と長期屋外暴露試験⁵⁾の結果から補修効果を実験的に評価したものである。

リート耐久性向上研究会」との共同研究において作製された試験体を用いた。試験体は、図-1に示すように、埋め込み方法を変化させて3本の鉄筋を埋め込み、試験（暴露）面以外は、エポキシ樹脂でコーティングしたもので、あらかじめ試験体中央部分に鉄筋位置まで切欠き部を設け、各種の断面修復材を施してある。本研究に用いた防錆処理材、断面修復材ならびに表面被覆材は、表-1に示すとおりであり、断面修復材の品質は、既報²⁾に示したとおりである。

2. 実験概要

2.1 試験体

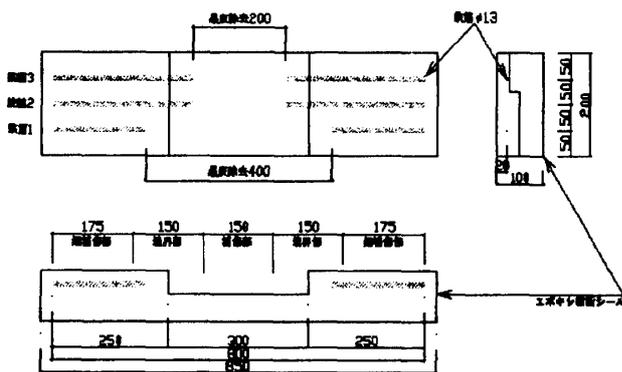


図-1 試験体の形状・寸法

本実験では、昭和61年から平成2年に建設省建築研究所（当時）と日本建築仕上材工業会に設置された「コンク

表-1 選定した補修工法

防錆処理材	断面修復材	表面被覆材	塩化量の級 (Cp/F)	使用記号
なし	軽量PCM ^{※1} (SER)	なし	0.5	O-LP0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
	軽量PCM ^{※1} (防錆材入SER)	なし	0.5	O-LP+0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
PCM ^{※2} (SER)	PCM ^{※2} (SER)	なし	0.5	P-P0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
	軽量PCM ^{※1} (SER)	なし	0.5	P-P+0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
PCM ^{※2} (EVA)	PCM ^{※2} (EVA)	なし	1.5	PEV-PEV-0
PCM ^{※2} (アクリル)	PCM ^{※2} (アクリル)	なし	1.5	PA-PA-0
PCM ^{※2} (養生アクリル)	PCM ^{※2} (養生アクリル)	なし	1.5	PF-PF-0
PCM ^{※2} (防錆材入SER)	PCM ^{※2} (防錆材入SER)	なし	1.5	P-F+0
		薄層仕上材 (一般形)	3.0	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
エポキシ樹脂	軽量EPM ^{※4}	なし	0.5	E-E0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
	EPM ^{※5}	なし	0.5	E-E0
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	
なし (比較用)	なし (比較用)	なし	0.5	N
		薄層仕上材 (一般形)	1.5	
		薄層仕上材 (防水形)	3.0	

使用記号は、防錆処理材・断面修復材・表面被覆材の略号を示し、0は、なしを示す

※1 RCP 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 軽量PCM 軽量ポリマーセメントモルタル

※4 軽量EPM 軽量エポキシ樹脂モルタル

※5 EPM 現成混合エポキシ樹脂モルタル

*1 関東職業能力開発大学校 応用課程建築施工システム技術科助教授 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

*3 (独) 建築研究所 博士 (学術) (正会員)

*4 太平洋マテリアル(株) 工博 (正会員)

防錆処理材とは、コンクリートをはつり取った後に、錆を落とした鉄筋およびコンクリートはつり面に塗布する材料であり、また、断面修復材は、欠損部を充填する材料であるが、具体的な成分は、原則として防錆処理材と同じである。実験計画では、防錆処理材を施さなかった工法や防錆処理材と断面修復材の成分を違えた補修工法を選定した。劣化因子およびはつり方についての実験要因と水準を、表-2に示す。鉄筋1と鉄筋2は、鉄筋の裏側までコンクリートをはつり取った状態を再現するために、切欠き部では完全にコンクリートから露出しており、鉄筋3は、はつり深さが鉄筋の中心部まではつり取った状態を再現するために、切欠き部の裏面ほぼ半分がコンクリート中にある。また、鉄筋1と鉄筋2では、黒皮を除去した範囲が異なるが、これは鉄筋1が、腐食部分を十分にはつり取らなかった事を想定したものである。次にコンクリートの調合および性質を表-3に示す。

コンクリート中の塩化物量の調整には、NaCl（一般試薬）を用い、細骨材絶乾質量に対して0.1、0.3および0.6%を添加した。セメントおよび水から混入される塩化物イオン量を加えると、NaCl/細骨材が0.1%の場合に塩化物イオン量が約0.55kg/m³、0.3%の場合には塩化物イオン量が1.58kg/m³、0.6%の場合には約3.14kg/m³となるので、これらをそれぞれ「0.5kg/m³の級」、「1.5kg/m³の級」および「3.0kg/m³の級」とした。また、鉄筋には黒皮付きの丸鋼φ13mm（電炉JIS製品）を用いた。

表-2 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 ⁻)の級	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	健全部が現れるまで, 腐食が残る程度まで

表-3 コンクリートの調合および性質

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					16.6	4.6	30.4

2.2 促進試験条件

温度 60℃、湿度 95%RH 以上の雰囲気にて 2.5 日間、促進試験槽を開放して気乾放置の状態にて 2.5 日間置くという計 5 日間の繰り返しを 1 サイクルとした条件で行った。

促進試験期間は、塩化物量の級 0.5kg/m³が、40・80 サイクルおよび 130 サイクル、塩化物量の級 1.5kg/m³が、20・60 サイクルおよび 150 サイクル、塩化物量の級 3.0kg/m³が、10・30 サイクルおよび 83 サイクルとし、

試験体数は、各材齢 1 体とした。

2.3 屋外暴露試験条件

屋外暴露試験は、茨城県つくば市の（独）建築研究所の屋外暴露試験場（平均気温 13.8℃、平均湿度 80%RH、年間降水量 1096.7mm、日照時間 1866.29 h、全天日射量 4101.82MJ/m²）で実施した。試験材齢は、塩化物量の級が 0.5kg/m³の試験体は、8 年と 19.9 年（19 年 11 ヶ月）、1.5kg/m³の試験体は、3.2 年（3 年 2 ヶ月）と 19.9 年（19 年 11 ヶ月）、3.0kg/m³の試験体は、2.4 年（2 年 5 ヶ月）と 19.9 年（19 年 11 ヶ月）とし、試験体数は、各材齢 1 体とした。



写真-1 屋外暴露試験状況

2.4 評価項目および評価方法

補修効果の評価項目は、鉄筋に生じた錆の面方向への広がり度を指標とする発錆面積率とし、評価方法については、試験体から取り出した 3 本の鉄筋を図-1に示すように、それぞれ「補修部」、左右の「境界部」、左右の「無補修部」の 5 つの部位に分割のうえ、発錆面積率の算定を行った。なお、対称となる「境界部」と「無補修部」については、平均値にて算出した。発錆面積率の算定は、式 (1) による。

$$\text{発錆面積率 (\%)} = \frac{\text{発錆面積 (mm}^2\text{)}}{\text{測定面積 (mm}^2\text{)}} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果と考察

各塩化物量の級毎に、促進試験と屋外暴露試験の発錆面積率とその割合を年当りの時間数で除した発錆面積速度係数 (%/年) を補修工法別に「境界部」、「補修部」、「無補修部」の値をグラフ化したもの（ただし、促進試験では 1 サイクルを 5 日として算定）および最小二乗法により算定した促進試験と屋外暴露試験による発錆面積速度係数（促進試験においては、1 サイクルを 5 日として年あたりに換算）を示したうえで、選定した断面修復工法による補修効果および促進試験と屋外暴露試験の関係を考察し、評価も行った。

表-4 発錆面積率（塩化物量の級 0.5kg/m³）の場合

試験体	鉄筋No.	促進期間:40サイクル			促進期間:80サイクル			促進期間:130サイクル			暴露期間:8年			暴露期間:16年11ヶ月		
		境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部
O-LP-0	1	8%	3%	0%	4%	0%	0%	11%	3%	1%	6%	0%	0%	9%	6%	0%
	2	3%	0%	0%	2%	0%	0%	6%	4%	1%	1%	0%	0%	1%	0%	
	3	1%	4%	0%	1%	2%	0%	3%	8%	1%	1%	6%	0%	6%	1%	0%
O-LPI-0	1	3%	0%	1%	4%	0%	0%	9%	5%	1%	4%	0%	0%	3%	3%	0%
	2	4%	0%	1%	2%	0%	0%	7%	11%	2%	9%	46%	0%	1%	1%	0%
	3	2%	4%	1%	6%	14%	3%	5%	15%	2%	6%	33%	0%	3%	1%	0%
O-LE-0	1	21%	0%	0%	22%	16%	0%	49%	61%	1%	37%	3%	0%	36%	18%	1%
	2	2%	1%	0%	17%	35%	0%	10%	11%	1%	35%	17%	0%	16%	16%	8%
	3	7%	10%	0%	3%	20%	0%	4%	27%	1%	22%	33%	0%	61%	2%	6%
P-P-0	1	8%	1%	0%	17%	1%	1%	17%	2%	0%	6%	0%	0%	1%	1%	0%
	2	2%	0%	0%	1%	0%	0%	5%	6%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
	3	3%	5%	1%	2%	1%	1%	5%	11%	1%	0%	1%	0%	2%	0%	0%
P-LP-0	1	5%	0%	0%	4%	0%	0%	10%	9%	2%	4%	0%	0%	2%	2%	0%
	2	5%	0%	0%	1%	0%	0%	6%	12%	2%	2%	1%	0%	0%	0%	0%
	3	2%	8%	0%	0%	4%	1%	4%	9%	3%	1%	2%	0%	0%	0%	0%
E-LE-0	1	16%	0%	0%	26%	1%	1%	27%	30%	1%	44%	54%	0%	71%	26%	49%
	2	2%	0%	0%	2%	0%	0%	8%	35%	1%	9%	1%	0%	66%	24%	49%
	3	1%	3%	0%	7%	19%	0%	7%	27%	1%	19%	15%	0%	35%	7%	15%
E-E-0	1	45%	100%	0%	57%	100%	2%	62%	100%	2%	23%	1%	0%	22%	20%	1%
	2	14%	64%	0%	31%	100%	0%	35%	100%	1%	21%	9%	0%	18%	5%	3%
	3	17%	43%	0%	17%	55%	0%	18%	54%	2%	21%	47%	0%	71%	6%	31%
N	1~3平均		1%		1%			1%			0%			0%		

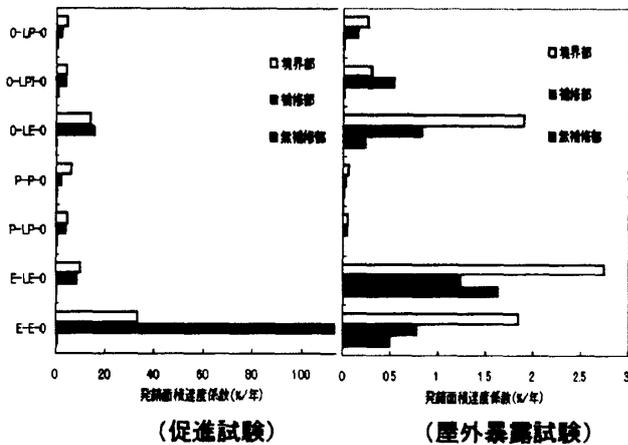


図-2 発錆面積速度係数（塩化物量の級 0.5kg/m³）の場合

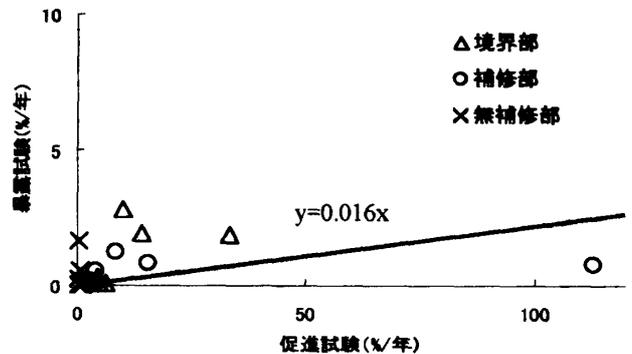


図-3 促進試験・屋外暴露試験による発錆面積速度係数（塩化物量の級 0.5kg/m³）の場合

3.1 塩化物量の級 0.5kg/m³の場合の補修効果

(1) 断面修復工法による補修効果

表-4 に塩化物量の級が 0.5kg/m³の場合の発錆面積率を示す。図-2 に示すとおり、補修材料別では、明らかにポリマーセメント系を用いたものの補修効果が高く、特に断面修復材にポリマーセメントモルタル（SBR）を用いたものは、軽量ポリマーセメントモルタル（防錆材入りSBR）に比べても効果が顕著である。次に、部位別では、エポキシ樹脂系の境界部において発錆面積速度係数の値が大きく、補修効果は期待できない結果となっている。なお、E-E-0 の断面修復材（EPM）は、床用のものであり、一般的な壁の補修用としては使用されないことから、評価の対象からはずした方がよいと考えられる。

(2) 促進試験と屋外暴露試験の関係

図-2 の結果より、ポリマーセメント系による値は、いずれも同じような傾向を示すが、エポキシ樹脂系は、促進試験における発錆面積速度係数の値が、屋外暴露試

験に比べて小さい傾向にあり、補修効果の評価をするのには、適さないことがわかる。また、図-3 の結果より、この塩化物量の級における屋外暴露試験の発錆面積速度係数は、促進試験の 0.016 倍となる関係が成り立つ。

3.2 塩化物量の級 1.5kg/m³の場合の補修効果

(1) 断面修復工法による補修効果

表-5 に塩化物量の級が 1.5kg/m³の場合の発錆面積率を示す。図-4 に示すとおり、補修材料別では、塩化物量の級 0.5kg/m³と同様に、明らかにポリマーセメント系を用いたものの補修効果が高く、次に部位別では、断面修復材の種類を問わず、境界部における発錆面積速度係数の値が大きく、補修効果は期待できない結果となっている。また、防錆材入りとそうでないものを比較すると、ポリマーセメント系では、防錆材の効果が若干見受けられるが、エポキシ樹脂系では、防錆材入りの発錆面積速度係数の値が大きく、そうでないものは、それより小さな値となっており、補修効果は全く期待できない。

表-5 発錆面積率（塩化物量の級 1.5kg/m³）の場合

試験体	鉄筋No.	促進期間:20サイクル			促進期間:60サイクル			促進期間:150サイクル			暴露期間:3年2ヶ月			暴露期間:19年11ヶ月		
		境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部
O-LP-0	1	13%	0%	2%	28%	2%	4%	10%	8%	23%	14%	14%	3%	27%	21%	1%
	2	8%	0%	1%	20%	0%	1%	23%	11%	19%	8%	11%	3%	14%	13%	15%
	3	4%	6%	8%	6%	18%	3%	22%	28%	21%	10%	23%	1%	20%	2%	20%
O-LPI-0	1	8%	0%	1%	30%	0%	28%	24%	4%	22%	15%	11%	5%	12%	15%	0%
	2	3%	0%	4%	5%	0%	32%	18%	8%	41%	15%	14%	3%	8%	3%	1%
	3	5%	24%	1%	17%	4%	7%	5%	16%	26%	10%	14%	4%	8%	8%	2%
O-LE-0	1	28%	1%	1%	39%	0%	1%	52%	32%	39%	28%	14%	2%	34%	30%	1%
	2	11%	0%	4%	15%	1%	1%	47%	34%	21%	23%	21%	2%	22%	20%	0%
	3	11%	4%	2%	5%	24%	9%	37%	45%	30%	21%	48%	1%	62%	3%	8%
P-P-0	1	24%	1%	1%	34%	0%	3%	43%	5%	34%	12%	8%	1%	13%	8%	0%
	2	8%	0%	1%	9%	0%	22%	35%	10%	35%	7%	19%	1%	4%	1%	0%
	3	10%	14%	1%	12%	6%	17%	33%	4%	53%	6%	21%	2%	4%	2%	5%
P-LP-0	1	35%	0%	8%	35%	0%	13%	28%	5%	23%	16%	19%	3%	7%	4%	0%
	2	14%	0%	9%	18%	0%	23%	37%	3%	36%	9%	10%	3%	7%	9%	5%
	3	14%	36%	10%	19%	8%	28%	26%	14%	35%	8%	26%	1%	13%	2%	4%
PEV-PEV-0	1	23%	0%	1%	24%	0%	7%	35%	18%	17%	15%	15%	2%	5%	13%	2%
	2	13%	0%	0%	30%	0%	3%	42%	6%	31%	14%	14%	1%	4%	5%	2%
	3	17%	46%	1%	18%	5%	19%	38%	49%	3%	16%	17%	2%	20%	11%	6%
PA-PA-0	1	19%	0%	1%	11%	0%	10%	34%	6%	22%	19%	15%	9%	4%	19%	0%
	2	9%	0%	1%	14%	0%	4%	38%	9%	29%	11%	20%	7%	6%	19%	6%
	3	5%	2%	6%	20%	15%	21%	21%	16%	37%	22%	45%	4%	6%	17%	5%
PF-PF-0	1	16%	1%	9%	24%	1%	10%	30%	8%	42%	12%	5%	3%	18%	8%	0%
	2	11%	0%	5%	11%	0%	26%	39%	8%	47%	17%	10%	4%	11%	8%	2%
	3	13%	14%	6%	17%	15%	23%	41%	4%	47%	12%	23%	5%	22%	12%	1%
PI-PI-0	1	16%	0%	2%	29%	0%	17%	26%	5%	18%	13%	7%	6%	4%	6%	0%
	2	2%	4%	2%	16%	1%	33%	18%	4%	21%	6%	7%	9%	6%	3%	0%
	3	10%	14%	6%	16%	9%	11%	25%	9%	38%	8%	19%	6%	8%	11%	0%
E-LE-0	1	28%	0%	5%	27%	1%	15%	71%	35%	50%	39%	20%	2%	37%	31%	1%
	2	14%	0%	1%	3%	8%	22%	63%	17%	56%	18%	9%	6%	33%	32%	3%
	3	15%	31%	3%	8%	17%	31%	53%	62%	61%	12%	22%	4%	78%	14%	16%
E-PA-0	1	62%	39%	16%	50%	9%	22%	71%	47%	56%	31%	25%	1%	15%	13%	0%
	2	25%	20%	15%	19%	8%	26%	55%	15%	52%	20%	11%	1%	8%	2%	0%
	3	11%	23%	13%	32%	47%	19%	40%	35%	62%	5%	22%	1%	38%	5%	3%
E-PEP-0	1	7%	0%	25%	9%	22%	21%	56%	7%	44%	37%	8%	1%	20%	8%	1%
	2	17%	0%	44%	29%	18%	14%	52%	16%	58%	12%	9%	1%	7%	7%	1%
	3	33%	39%	27%	53%	27%	23%	44%	55%	49%	9%	19%	3%	21%	10%	8%
E-E-0	1	57%	100%	1%	80%	100%	12%	74%	100%	50%	34%	13%	4%	41%	40%	38%
	2	46%	100%	10%	50%	100%	17%	91%	100%	64%	25%	20%	2%	79%	6%	17%
	3	26%	67%	7%	28%	46%	31%	54%	63%	61%	11%	21%	6%	53%	18%	28%
N	1~3平均		2%		19%			34%			2%			1%		

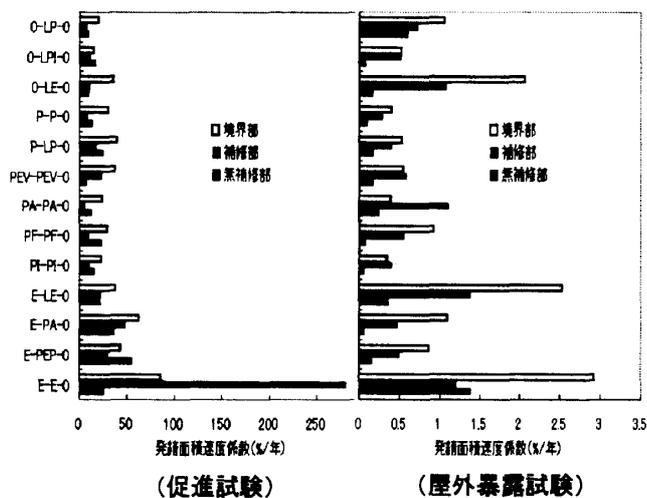


図-4 発錆面積速度係数（塩化物量の級 1.5kg/m³）の場合

(2) 促進試験と屋外暴露試験の関係

図-4の結果より、ポリマーセメント系による値は、いずれも同じような傾向を示しているが、エポキシ樹脂系については、発錆面積速度係数の値が屋外暴露試験に比べて小さい傾向にあり、塩化物量の級 0.5kg/m³と同様に、補修効果の評価をするのには適さないことがわかる。また、図-5の結果より、この塩化物量の級における屋外暴露試験の発錆面積速度係数は、促進試験の 0.011 倍となる関係が成り立つ。

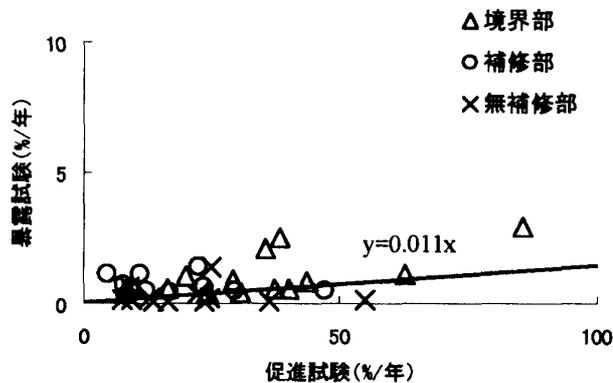


図-5 促進試験・屋外暴露試験による発錆面積速度係数（塩化物量の級 1.5kg/m³）の場合

3.3 塩化物量の級 3.0 kg/m³の場合の補修効果

(1) 断面修復工法による補修効果

表-6に塩化物量の級が 3.0kg/m³の場合の発錆面積率を示す。図-6に示すとおり、補修材料別では、塩化物量の級 1.5kg/m³と同様に、明らかにポリマーセメント系における補修効果が顕著であり、部位別に見てみるとエポキシ樹脂系の境界部とポリマーセメント系の補修部において、発錆面積速度係数の値が大きく、補修効果が期待できないことがわかる。

表-6 発錆面積率 (塩化物量の級 3.0kg/m³) の場合

試験体	試験回数	促進期間:10サイクル			促進期間:30サイクル			促進期間:83サイクル			暴露期間:2年5ヶ月			暴露期間:19年11ヶ月		
		境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部	境界部	補修部	無補修部
O-LP-E	1	21%	0%	8%	27%	0%	7%	43%	3%	50%	25%	10%	9%	18%	38%	7%
	2	18%	0%	15%	29%	0%	22%	49%	1%	61%	18%	8%	5%	19%	28%	3%
	3	31%	24%	11%	8%	17%	19%	41%	16%	53%	30%	26%	7%	28%	22%	6%
O-LP-F	1	30%	9%	12%	32%	1%	16%	58%	0%	63%	23%	6%	6%	19%	25%	6%
	2	26%	1%	7%	41%	4%	22%	53%	0%	76%	17%	8%	4%	11%	14%	1%
	3	17%	39%	17%	36%	22%	21%	72%	39%	73%	15%	12%	9%	37%	9%	15%
O-LE-E	1	34%	0%	2%	32%	0%	32%	64%	2%	41%	41%	10%	1%	31%	49%	17%
	2	23%	0%	8%	33%	1%	19%	75%	0%	69%	18%	9%	1%	81%	32%	28%
	3	30%	36%	1%	46%	44%	47%	99%	100%	40%	21%	40%	3%	87%	29%	16%
O-LE-F	1	34%	4%	13%	44%	4%	14%	63%	0%	56%	29%	33%	12%	79%	25%	27%
	2	15%	1%	5%	28%	0%	24%	50%	0%	69%	27%	0%	11%	50%	15%	13%
	3	30%	36%	10%	47%	71%	28%	49%	37%	44%	43%	7%	3%	83%	20%	26%
P-P-O	1	37%	1%	17%	36%	1%	38%	37%	0%	47%	29%	12%	25%	17%	25%	2%
	2	23%	0%	16%	34%	0%	47%	35%	0%	79%	24%	7%	19%	15%	36%	3%
	3	21%	27%	9%	16%	10%	49%	77%	28%	70%	31%	2%	27%	27%	47%	16%
P-P-E	1	38%	11%	6%	35%	1%	22%	59%	58%	30%	21%	15%	27%	16%	34%	5%
	2	25%	2%	13%	21%	0%	33%	26%	0%	50%	21%	15%	19%	11%	26%	5%
	3	11%	21%	4%	20%	29%	23%	44%	0%	16%	37%	4%	14%	18%	29%	8%
P-P-F	1	29%	0%	12%	34%	0%	31%	56%	0%	21%	15%	47%	4%	13%	19%	3%
	2	18%	4%	9%	38%	1%	43%	36%	2%	49%	12%	4%	11%	12%	15%	1%
	3	25%	20%	24%	44%	4%	38%	22%	19%	65%	23%	2%	8%	34%	29%	18%
PF-PF-O	1	31%	9%	8%	33%	7%	13%	40%	2%	45%	18%	24%	19%	15%	31%	1%
	2	35%	12%	19%	32%	3%	26%	39%	0%	62%	18%	11%	24%	9%	25%	7%
	3	33%	71%	20%	40%	62%	23%	44%	22%	77%	36%	12%	10%	27%	30%	6%
PI-PI-O	1	37%	4%	15%	41%	0%	29%	36%	1%	51%	27%	2%	9%	17%	16%	1%
	2	10%	0%	29%	28%	0%	42%	54%	7%	80%	25%	3%	3%	15%	11%	14%
	3	18%	28%	7%	27%	9%	50%	40%	0%	80%	35%	13%	11%	16%	25%	9%
E-E-O	1	68%	6%	12%	85%	94%	25%	100%	98%	79%	32%	4%	32%	98%	85%	54%
	2	54%	58%	19%	75%	100%	38%	78%	100%	62%	30%	10%	29%	96%	68%	54%
	3	25%	65%	25%	33%	65%	31%	59%	100%	74%	49%	50%	34%	98%	67%	53%
E-E-E	1	84%	91%	31%	90%	100%	19%	100%	100%	52%	55%	69%	9%	93%	54%	56%
	2	65%	81%	36%	70%	100%	31%	86%	100%	37%	54%	97%	5%	95%	71%	55%
	3	45%	63%	22%	58%	56%	45%	80%	89%	56%	33%	57%	12%	85%	49%	17%
E-E-F	1	53%	60%	17%	89%	100%	12%	99%	100%	70%	32%	45%	5%	63%	30%	23%
	2	44%	50%	24%	65%	100%	35%	74%	100%	46%	34%	53%	6%	83%	30%	50%
	3	22%	56%	17%	56%	77%	39%	92%	100%	46%	49%	47%	9%	74%	15%	7%
N	1~3平均		7%		24%			51%		6%			21%			

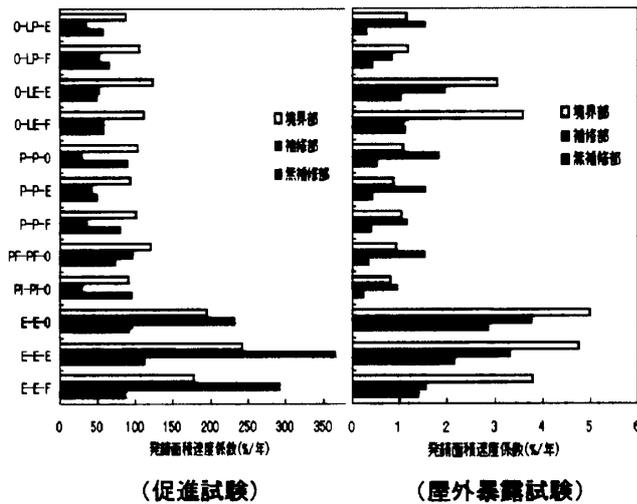


図-6 発錆面積速度係数 (塩化物量の級 3.0kg/m³) の場合

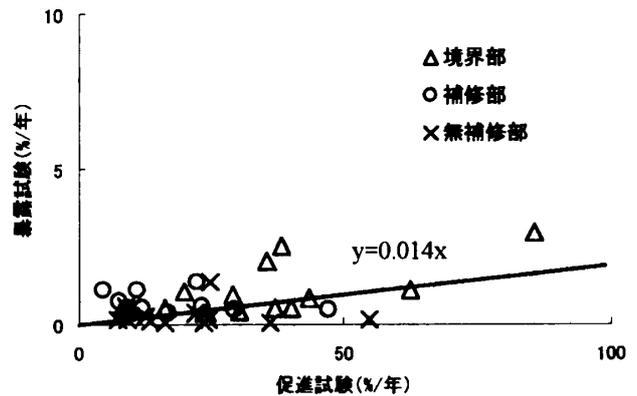


図-7 促進試験・屋外暴露試験による発錆面積速度係数 (塩化物量の級 3.0kg/m³) の場合

また、表面被覆材を施したものとそうでないものを比較すると、ポリマーセメント系では、防錆材の効果が若干見受けられるが、エポキシ樹脂系における補修効果は、全く期待できない。

(2) 促進試験と屋外暴露試験の関係

図-6の結果より、ポリマーセメント系による値は、いずれも同じような傾向を示しているが、エポキシ樹脂系については、発錆面積速度係数の値が屋外暴露試験に比べて小さい傾向にあり、塩化物量の級 0.5・1.5kg/m³と同様に、補修効果の評価をするのには適さないことがわかる。また、図-7の結果より、この塩化物量の級における屋外暴露試験の発錆面積速度係数は、促進試験の

0.014倍となる関係が成り立つ。

3.4 総合的考察

促進試験と屋外暴露試験の結果、すべての塩化物量の級で、エポキシ樹脂系断面修復工法における発錆面積速度係数の傾向が異なっている。このことは、促進試験では見られなかった補修材と母材コンクリートとの肌分れの傾向が、屋外暴露試験のエポキシ樹脂系で見られたことから、それに起因するものと考えられる。ただし、今回は、肌分れ深さについての明確な測定が出来なかったため、補修材の収縮が補修効果に及ぼす影響については今後の課題となるが、実験結果を踏まえると、屋外暴露試験にて補修効果の評価を行うことが望ましいと考えら

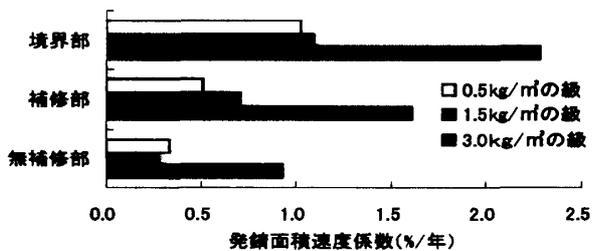


図-8 屋外暴露試験による部位別発錆面積速度係数

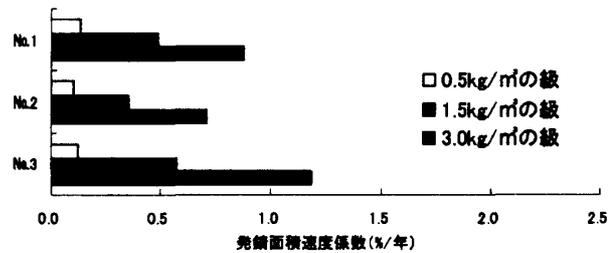


図-10 ポリマーセメント系断面修復材による鉄筋No.別発錆面積速度係数(屋外暴露試験)

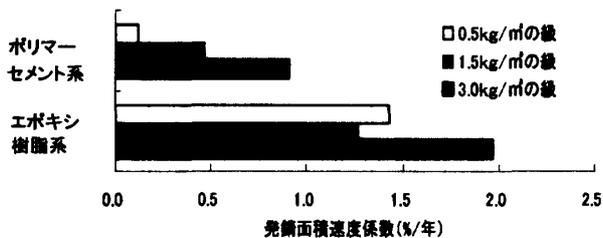


図-9 屋外暴露試験による断面修復材別発錆面積速度係数

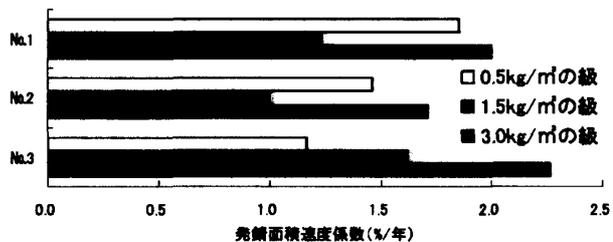


図-11 エポキシ樹脂系断面修復材による鉄筋No.別発錆面積速度係数(屋外暴露試験)

れることから、図-8～11にて塩化物量の級毎に部位別、断面修復材別および鉄筋No.別の発錆面積速度係数をグラフで示した。なお、図-9・図-11には、断面修復材にEPM(現場調合エポキシ樹脂モルタル)を使用した試験体は含んでいない。塩化物量の級別に見ると、ポリマーセメント系において3.0kg/m³の級は、0.5kg/m³、1.5kg/m³の級に比べて急激に発錆面積速度係数が大きくなっており、補修効果が期待できない。また、断面修復部分の補修を行った場合、図-8からもわかるように、補修後の鉄筋腐食は、境界部分で著しく進行する傾向⁶⁾が見られることからその対策が重要である。そのひとつとして断面修復の際、塩化物量が多い場合は、No.3, No.1, No.2の順番で発錆面積率が大きくなることから、鉄筋の裏側まではつり取らないと、防錆材、断面修復材、表面被覆材の効果が期待できなくなることが、図-10および図-11から読み取れる。また、実験結果と考察においても示したとおり、鉄筋防錆処理材を施すことで、鉄筋腐食の補修効果が向上するが、ポリマーセメント系を使用する方が効果的であることもわかった。更に、断面修復材に表面被覆材を併用すると、鉄筋腐食の抑制効果が若干期待できる傾向が見られることもわかった。しかしながら断面修復材の選定にあたっては、図-9～11に示すとおり、エポキシ樹脂系の補修効果は低く、ポリマーセメント系を使用することが望ましいといえる。

4. 結論

コンクリート中に各種濃度の塩化物イオンが含まれるという劣化要因が内在し、部分的に鉄筋が露出するという劣化が顕在化した鉄筋コンクリート躯体の補修工法の

選定には、内在する塩化物量や経年期間によって発錆速度が異なる。特にコンクリート中の塩化物量の級が3.0kg/m³になると、補修工法による鉄筋腐食の抑制効果は、期待できないことが結論づけられる。また、屋外暴露試験による発錆面積速度係数は、促進試験の0.011～0.016倍となることがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針案・同解説，日本建築学会，pp.116-126，1997
- 2) 松林裕二，榊田佳寛：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，日本建築学会技術報告集，第13号，pp.33-38，2001.7
- 3) 花柴浩ほか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，A-1，pp.189-192，1991.9
- 4) 松林裕二，榊田佳寛：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，A-1，pp.275-276，2000.9
- 5) 西村真治ほか3名：鉄筋防錆材および断面修復材による塩害劣化補修工法の長期暴露実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.1225-1226，2007.8
- 6) 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，pp.21-28，2000.3