長期暴露試験体の鉄筋質量減少率に基づく 断面修復工法の補修効果の評価

EVALUATION OF EFFECT ON REPAIR OF SECTION REPAIR METHOD OF CONSTRUCTION BASED ON REINFORCING BARS MASS DECREASE RATE OF THE LONG-TERM EXPOSURE TEST BODY

西村 眞治*, 梶田 佳寛**, 鹿毛 忠継***, 松林 裕二****

*Shinji NISHIMURA, Yoshihiro MASUDA, Tadatsugu KAGE
and Yuji MATSUBAYASHI*

This paper reports the results of outdoor exposure test on the repair performance on corrosion of reinforcing bar in salt containing concrete by various repairing materials. When there is much chlorination amount of material in the concrete, effect on repression of the reinforcing bars corrosion by the repair method of construction can't be expected very much. When the repair of the section repair part is done, that countermeasure is important from showing a tendency of progressing in the part of the boundary remarkably as for the reinforcing bars corrosion after the repair. If chipping isn't taken to the back of the reinforcing bars, the effect of rust is prevented material, section repair material, When chlorination amount of material increases, corrosion spreads out in surface direction and depth direction as well.

Keywords: chloride ion, corrosion of reinforcing bar, chipping, primer, section recovery material, mass decrease rate

塩化物イオン, 鉄筋腐食, はつり, 鉄筋防錆材, 断面修復材, 質量減少率

1. はじめに

中性化や塩害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場合の補修工法として、コンクリートの劣化部分をはつり取り、鉄筋の錆落としをして防錆処理を施し、はつり取ったコンクリート部分を埋め戻す、いわゆる断面修復工法が一般的に行われている。この工法の補修効果について、筆者らは、断面修復工法を施した状況を模擬した試験体の長期にわたる暴露試験後の鉄筋の発錆面積率による評価を行って報告¹⁾した。

しかし、鉄筋腐食度の評価は、表面的な発錆面積率だけでなく、深さ方向への進行状況についても評価し得る質量減少率によることがより重要であると考えられる。また、断面修復工法の補修効果の評価では、後でコンクリートをはつり取って補修した部分（補修部）以外のところで腐食が進行することがあるので、外観上は健全でコンクリートをはつり取らず補修しなかった部分（以下、無補修部）および両者の境界部分（以下、境界部）についても、各々質量減少率を測定し、評価することが重要であると考えられる。そのためには、補修部、無補修部および境界部における元の鉄筋の質量を評価することが重要である。しかし鉄筋の径は長さ方向に一様でないため、単位長さあたりの質量もばらつきをもっている。また補修

部、無補修部および境界部における鉄筋の単位長さあたりの質量も同じとは限らないため、切断したときのそれぞれの部分における元の質量の評価が困難である。さらに、質量減少率の評価のために、不動態皮膜（以下、黒皮）を除去したみがき鉄筋を使用する場合は、そのまま質量減少率を評価できるが、実際の状況を模擬するために黒皮付きの鉄筋を使用する場合は、錆落としをした場合における黒皮の質量の補正をどうするかが問題である。

今回、全ての鉄筋について単位長さ当りの質量を計測し、その変動の分布から、補修部、無補修部および境界部のそれぞれの長さから元の質量を、その変動の幅を含めたうえで質量減少率を評価し、補修効果の評価を試みた。本論文はそうように求めた質量減少率による補修効果の評価について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図1に示すようにコンクリートのはつり範囲およびはつり深さを変化させることを想定して埋め込み方法を変化させた3本の鉄筋を埋め込み、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、試験（暴露）面以外は、

本報告は、参考文献2), 3)を元にそのデータを見直し、解析し直して加筆・修正したものである。

* 関東職業能力開発大学校 准教授・博士(工学)

** 宇都宮大学工学研究科 教授・工博

*** 独立行政法人建築研究所 博士(学術)

**** 太平洋マテリアル(株) 博士(工学)

Assoc. Prof., Kanto Polytechnic College, Dr. Eng.

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

Building Research Institute, Ph. D.

Taiheiyō Material Corporation, Dr. Eng.

図 1 試験体の形状・寸法

エポキシ樹脂でコーティングしたものである。なお、黒皮除去は、コンクリートをはつり取った部分では、鉄筋の錆落としをした状態を、またコンクリート中に埋まった部分は、鉄筋が錆びて黒皮がなくなり、その不動態皮膜による保護効果がない状態を想定したものである。そして、鉄筋 2 は、黒皮を除去した部分はすべて補修材料に接する状況、すなわち健全な部分が現れるまでコンクリートをはつり取ったことを、鉄筋 1 は、黒皮を除去した部分が一部コンクリート中に埋まっている状況、すなわち錆びた部分をコンクリート中に残した状態を想定している。鉄筋 3 は、錆びた部分がコンクリート中に半分埋まり、上半分はコンクリートをはつり取ったことを模擬している。また、黒皮除去の方法は研磨布を用いて行った。劣化、

表 1 実験の要因と水準

実験の要因	水準
塩化物量(Cl ⁻)の級	0.5kg/m ³ , 1.5kg/m ³ , 3.0kg/m ³
はつり深さ	鉄筋の裏側まで、鉄筋の上半分深さまで
はつり範囲	健全部が現れるまで、腐食が残る程度まで

表 2 選定した補修工法

防錆処理材	断面修復材	表面被覆材	塩化物量の級kg/m ³	使用記号
なし	軽量PCM ^{※3} (SBR)	なし	0.5	0-LP-0
		複層仕上塗材 (一般形)	1.5	
		複層仕上塗材 (防水形)	3.0	0-LP-F
	軽量PCM ^{※3} (防錆剤入SBR)	なし	0.5	0-LPI-0
		なし	1.5	
		なし	3.0	0-LPI-F
PCP ^{※1} (SBR)	PCM ^{※2} (SBR)	なし	0.5	P-P-0
		なし	1.5	
		複層仕上塗材 (一般形)	3.0	P-P-E
	軽量PCM ^{※3} (SBR)	なし	0.5	P-LP-0
		なし	1.5	
		複層仕上塗材 (防水形)	3.0	P-LP-F
PCP ^{※1} (EVA)	PCM ^{※2} (EVA)	なし	1.5	PEV-PEV-0
PCP ^{※1} (アクリル)	PCM ^{※2} (アクリル)	なし	1.5	PA-PA-0
PCP ^{※1} (弾性アクリル)	PCM ^{※2} (弾性アクリル)	なし	1.5	PF-PF-0
			3.0	
PCP ^{※1} (防錆剤入SBR)	PCM ^{※2} (防錆剤入SBR)	なし	1.5	PI-PI-0
			3.0	
エポキシ樹脂	軽量EPM ^{※4}	なし	0.5	E-LE-0
		なし	1.5	
		PCM ^{※2} (アクリル)	1.5	E-PA-0
	PCM ^{※2} (エポキシ)	なし	1.5	E-PEP-0
		なし	3.0	
		なし	3.0	E-E-0
	EPM ^{※5}	なし	0.5	E-E-0
		なし	1.5	
		複層仕上塗材 (一般形)	3.0	E-E-E
なし (比較用)		複層仕上塗材 (防水形)	3.0	E-E-F
		なし	0.5	N
		なし	1.5	
			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 PCP ポリマーセメントペースト

※4 軽量EPM 軽量エポキシ樹脂モルタル

※2 PCM ポリマーセメントモルタル

※5 EPM 現場調合エポキシ樹脂モルタル

※3 軽量PCM 軽量ポリマーセメントモルタル

因子およびはつり方についての実験要因と水準を、表 1 に示す。コンクリート、鉄筋などの使用材料は既報¹⁾のとおりである。また、試験体の補修面を下にしてコンクリートを打込んでおり、打込み底面から鉄筋位置までは、20mm と非常に小さく、ブリーディングの影響による鉄筋位置での塩化物イオン濃度の差はないと考えられる。

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の種類は、表 2 に、また、本研究に用いた断面修復材の基本物性は、表 3 に示すとおりである。

表 3 補修材料（断面修復材）の基本物性

補修材の種類	圧縮強さ N/mm ²	ヤング係数 ×10 ⁴ N/mm ²	曲げ強さ N/mm ²	吸水率 g/l	熱膨張率 ×10 ⁻⁴	乾燥収縮 ×10 ⁻⁴	透気性 mm
軽量PCM (SBR)	9.0	0.37	3.9	238	14.5	17.3	0.0
軽量EPM	14.9	0.18	11.6	12	78.6	5.2	0.0
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 (弾性アクリル)	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
EPM	32.8	0.87	14.4	102	46.3	2.1	2.5

(注) 吸水率 (JISA6203)、乾燥収縮 (20℃, 60%RH, CO₂ 5%, 30dによる中性化深さ)

2.2 埋め込む前の鉄筋の一様性の評価

暴露試験に供した試験体に使用した全ての鉄筋 210 本について、その質量を長さで除して単位長さ当たりの質量を求め、その確率分布を求めた。その結果を表 4 に示す。今回使用した鉄筋における単位長さあたりの質量の変動は 0.45% であり、以下では、これだけの変動があるものとして解析する。

表 4 鉄筋単位長さあたりの単位質量の一様性

本数	210 (本)
最大値	1.0188 (g/mm)
最小値	1.0017 (g/mm)
平均値	1.0086 (g/mm)
標準偏差	0.0045 (g/mm)
変動係数	0.45 (%)

2.3 黒皮除去部の質量評価

今回の実験では、コンクリートに埋め込む前に補修時の錆落としを想定して、部分的に鉄筋の黒皮を除去している。その除去した黒皮分の質量については、除去後の質量を元の質量から差し引いて単位長さ当たりの黒皮の質量減を調べた。その結果を表 5 に示す。

表 5 元の鉄筋の単位質量に対する黒皮の単位質量の比

	平均値	標準偏差
200mm 除去	0.0147	0.0103
400mm 除去	0.0199	0.0079
全体	0.0164	0.0099

表 5 の値は、鉄筋の錆落としを想定して部分的に磨いた後の黒皮における元の鉄筋に対する質量比であり、おおよそ 1.64% の減少であり、後述する薬品浸漬による黒皮除去よりも多く削り取ったことになるが、極端に細くなっていないと考えられる。

2.4 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で実施した。屋外暴露試験場の気象条件は、既報¹⁾に示したとおりである。試験材齢は、短期暴露が塩化物量の級 3.0kg/m³

の場合 2.4 年（2 年 5 ヶ月）、同 1.5kg/m³の場合 3.2 年（3 年 2 ヶ月）および同 0.5kg/m³の場合 8 年であり、長期暴露がいずれも 19.9 年（19 年 11 ヶ月）である。また、試験体数は各材齢 1 体とした。

2.5 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やの抑制を指標とする発錆面積率と鉄筋の深さ方向への進行の抑制を指標とする質量減少率とし、その両者の関係から評価した。

補修部、無補修部および境界部の各における鉄筋のコンクリートに埋め込む前の質量は、元の鉄筋の長さを L (mm)、質量を W_0 (g)、黒皮除去部の長さを ℓ (mm)、黒皮を部分的に除去した質量を W_0' (g)、暴露試験後に切断した鉄筋の補修部の長さを ℓ_1 (mm)、境界部における両側の長さの和を ℓ_2 (mm)、両側無補修部の長さの和を ℓ_3 (mm)、切断したときの切代を d (mm) として、次のように推定した（図2参照）。ただし切代はすべて同じ幅と仮定した。また、 $L = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + 4d$ である。

$$\text{補修部} : \left(\frac{W_0}{L} - \frac{W_0 - W_0'}{\ell} \right) \times \ell_1$$

$$\text{無補修部} : \frac{W_0}{L} \times \ell_3$$

$$\text{境界部の黒皮部分} : \frac{W_0}{L} \times (L - \ell - \ell_3 - 2 \times d)$$

$$\text{境界部の黒皮除去部分} : \left(\frac{W_0}{L} - \frac{W_0 - W_0'}{\ell} \right) \times (\ell - \ell_1 - 2 \times d)$$

暴露試験後の質量減少率の評価は、錆落としをして質量を計測し、元の鉄筋の鉄筋から差し引いて質量減少量を求め、質量減少率を計算した。補修部は、黒皮をあらかじめ除去してあるので、式（1）に示すように質量減少率は、最初の鉄筋の質量から暴露試験後に錆

図2 各部の鉄筋の長さおよび質量の評価

表6 短期暴露期間における鉄筋の質量減少率（％）

塩化物物 量の級 (kg/m ³)	部位および 鉄筋 補修工法	境界部			補修部			無補修部		
		No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
0.5	0-LP-0	1.00	0.17	0.19	1.21	0.40	0.42	-0.65	0.04	0.19
	0-LPI-0	0.42	0.20	0.06	0.64	0.52	0.33	0.13	0.09	0.03
	0-LE-0	0.59	0.41	0.27	0.49	0.34	0.31	-0.01	0.02	-0.05
	P-P-0	0.35	0.19	0.07	0.66	0.63	0.34	0.14	0.06	0.00
	P-LP-0	0.33	0.14	0.15	0.51	0.54	0.54	0.12	0.00	0.08
	E-LE-0	0.61	0.32	0.28	0.35	0.56	0.41	-0.02	-0.10	-0.04
	E-E-0	0.44	0.29	0.26	0.35	0.45	0.42	0.09	0.07	-0.09
	N	0.26	0.03			0.41			0.03	
	0-LP-0	0.15	-0.28	0.04	0.41	0.32	0.10	-0.15	-0.14	-0.22
1.5	0-LPI-0	-0.17	0.09	0.03	0.04	0.25	0.32	-0.43	-0.16	-0.07
	0-LE-0	0.09	-0.18	-0.06	0.33	0.02	0.05	-0.24	-0.37	-0.38
	P-P-0	0.08	0.02	-0.21	0.20	-0.15	0.12	-0.29	-0.28	-0.22
	P-LP-0	0.20	0.05	-0.05	0.32	0.15	0.20	-0.31	-0.18	-0.14
	PEV-PEV-0	0.08	0.10	0.24	0.17	0.24	0.22	-0.27	-0.17	-0.02
	PA-PA-0	0.31	-0.16	0.15	0.48	0.88	0.17	-0.01	-0.21	-0.13
	PF-PF-0	0.08	0.09	-0.20	0.17	0.15	0.10	-0.28	-0.11	-0.31
	PI-PI-0	0.10	-0.03	0.00	0.19	0.29	0.40	-0.31	-0.09	-0.17
	E-LE-0	0.27	-0.07	0.18	0.19	0.14	0.14	-0.23	-0.21	-0.07
	E-PA-0	0.20	-0.19	-0.11	0.45	0.32	0.03	-0.25	-0.22	-0.25
	E-PEP-0	0.04	-0.11	-0.14	0.30	0.32	0.07	-0.18	-0.25	-0.28
	E-E-0	0.14	0.10	0.06	0.26	-0.02	0.40	-0.24	-0.22	-0.15
3.0	N	-0.05	0.22			-0.41			-0.18	
	0-LP-E	0.64	0.26	0.46	0.35	0.29	0.35	0.18	0.00	-0.03
	0-LP-F	0.55	0.23	0.21	0.45	0.18	0.20	-0.05	0.05	0.01
	0-LE-E	0.46	0.35	0.20	0.55	0.28	0.42	-0.04	-0.13	0.05
	0-LE-F	0.42	0.35	1.80	0.90	0.18	-3.31	0.07	0.10	0.14
	P-P-0	0.56	0.32	1.68	0.76	0.37	-3.09	0.40	0.19	0.31
	P-P-E	0.37	0.22	2.51	1.04	0.36	-4.34	0.31	0.15	0.08
	P-P-F	0.19	0.16	0.65	1.04	0.44	-1.00	-0.08	0.19	-0.08
	PF-PF-0	0.17	0.36	0.84	1.16	0.41	-1.14	0.19	0.36	0.00
	PI-PI-0	0.37	0.48	0.48	0.40	0.36	0.41	0.09	0.17	0.16
	E-E-0	0.25	0.26	0.62	0.33	0.19	0.42	0.31	0.26	0.08
	E-E-E	0.55	0.78	0.57	0.69	1.09	0.80	0.05	-0.02	0.06
	E-E-F	0.21	0.32	1.39	1.12	0.42	-1.97	-0.11	-0.06	0.03
	N	0.11	0.34			-0.07			0.15	

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。

P: ポリマーセメント系、PEV: ポリマーセメント系 (EVA)、PA: ポリマーセメント系 (アクリル)、PF: ポリマーセメント系 (弾性アクリル)

PI: ポリマーセメント系 (防錆剤入SBR)、PEP: ポリマーセメント系 (エポキシ)、LP: 軽量ポリマーセメント系 (SBR)

LPI: 軽量ポリマーセメント系 (防錆剤入SBR)、E: エポキシ樹脂系、LE: 軽量エポキシ樹脂系

表面被覆材 E: 複層仕上塗材 (一般形)、表面被覆材 F: 複層仕上塗材 (防水形)

表7 長期暴露期間における鉄筋の質量減少率 (%)

塩化物物 量の級 (kg/m ³)	部位および 補修工法 鉄筋	境界部			補修部			無補修部		
		No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
0.5	0-LP-0	0.31	0.12	0.16	0.34	0.58	0.21	-0.17	0.01	0.05
	0-LPI-0	0.05	0.00	0.05	1.00	0.50	0.44	0.08	0.10	0.08
	0-LE-0	1.27	1.12	1.05	0.66	0.52	1.36	0.34	0.14	0.25
	P-P-0	0.21	0.04	0.05	0.40	0.62	0.58	-0.03	-0.08	-0.15
	P-LP-0	0.37	-0.05	0.09	0.27	0.61	0.42	-0.09	-0.13	-0.05
	E-LE-0	1.13	0.76	0.55	0.95	0.75	0.42	0.06	0.04	-0.02
	E-E-0	0.44	0.29	0.36	0.49	0.28	0.63	-0.04	0.01	0.04
	N	0.19	0.06		0.44		0.28		-0.14	
1.5	0-LP-0	0.49	0.35	0.31	0.77	0.45	0.52	0.14	0.30	0.14
	0-LPI-0	0.54	0.03	0.11	0.43	0.57	0.21	0.19	0.21	0.22
	0-LE-0	1.18	0.91	1.25	0.87	0.54	1.67	0.36	0.34	0.17
	P-P-0	0.33	0.16	0.10	0.56	0.31	0.38	0.01	-0.03	-0.15
	P-LP-0	0.43	0.25	0.35	0.11	0.32	0.31	-0.13	-0.04	-0.18
	PEV-PEV-0	1.46	0.31	0.21	0.00	0.56	0.08	0.00	-0.05	0.30
	PA-PA-0	0.56	0.59	0.06	0.56	-0.35	0.50	0.28	0.25	0.20
	PF-PF-0	0.52	0.23	0.53	0.50	0.50	0.28	-0.01	0.07	0.11
	PI-PI-0	0.38	-0.70	0.15	0.45	1.01	0.53	0.16	0.57	0.00
	E-LE-0	1.14	0.94	0.72	1.08	0.32	0.60	0.00	0.03	0.08
	E-PA-0	0.44	0.23	0.35	0.49	0.47	0.38	-0.06	-0.07	0.04
	E-PEP-0	0.45	0.22	0.30	0.57	0.42	0.59	0.06	0.18	0.20
	E-E-0	0.66	0.92	0.60	0.49	1.37	0.75	0.26	0.15	0.10
	N	0.28	0.12		0.29		0.28		0.02	
3.0	0-LP-E	0.91	0.95	0.86	0.78	0.49	0.66	0.97	0.88	0.63
	0-LP-F	0.97	0.59	0.48	0.88	0.65	1.06	0.73	0.45	0.34
	0-LE-E	1.65	1.63	1.52	1.21	1.58	1.56	0.87	0.73	0.64
	0-LE-F	1.35	0.79	0.96	0.66	0.50	1.29	0.02	0.05	0.31
	P-P-0	0.62	0.59	0.67	0.62	0.45	0.54	0.66	0.81	1.58
	P-P-E	0.64	0.65	0.66	0.54	0.66	0.35	0.88	0.73	0.80
	P-P-F	0.67	0.44	0.84	0.57	0.26	0.54	0.21	0.35	0.53
	PF-PF-0	0.76	0.72	0.74	0.63	0.76	0.57	0.71	1.01	1.10
	PI-PI-0	0.70	0.95	0.82	0.72	0.65	0.62	0.36	0.32	0.97
	E-E-0	2.11	1.87	3.96	1.24	0.46	5.61	1.11	-0.01	2.25
	E-E-E	3.02	2.36	1.75	4.35	1.49	2.91	1.13	1.46	1.92
	E-E-F	1.79	1.85	1.64	2.25	3.09	2.46	0.06	0.36	0.35
	N	0.64	0.73		0.72		0.72		0.69	

落としをした鉄筋の質量を差し引いて、最初の鉄筋質量に対する百分率で表した。また、無補修部は、あらかじめ黒皮を除去していないため、錆落としをするときに同時に健全な黒皮も除去されてしまう。そのため錆がない部分の黒皮の質量分を補正する必要がある、その質量減少率の計算式は、式(2)によって求めた。

$$\Delta w_1 = \frac{W_1 - W}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta w_2 = \frac{W_2 - W}{W_2} \times 100 - W_s \times \frac{100 - S}{100} \quad (2)$$

ここで Δw_1 : 黒皮除去部分の質量減少率 (%) W_1 : 黒皮を除去した鉄筋の想定される最初の質量 (g) 、 W : 暴露試験後に錆落としをした鉄筋質量 (g) 、 Δw_2 : 黒皮付き部分の質量減少率 (%)、 W_2 : 黒皮付きの鉄筋の想定される最初の質量 (g) 、 W_s : 黒皮の質量百分率 (%)、 S : 発錆面積率 (%)。

なお、黒皮の質量百分率は、無補修部の鉄筋で発錆面積率が0%のものをういてクエン酸2アンモニウム液に浸漬して黒皮を除去し、求められた値の平均値0.83%を用いることとした。また、境界部については、式(1)と式(2)で計算される値を黒皮部分の全体に対する長さ比で配分して求めた。

3. 実験結果

屋外暴露試験期間別に鉄筋質量減少率の測定結果を表6～7に示す。表6の短期(2.4, 3.2, 8年)の補修部の鉄筋3において、-3.0%を

超える質量減少率が見られる。表4によれば、鉄筋の単位長さ当たりの質量の変動における標準偏差 σ は、0.45%であり、 3σ では1.35%である。従って-1.35%を超える質量減少率は、ほとんどあり得ないと考えられる。補修部においては最初に黒皮を除去しており、その際に部分的に大きく削り取ったことも考えられる。短期暴露期間のデータについて、特に塩化物量の級が3.0kg/m³の測定の際には質量減少率の解析方法が確定しておらず、生データのままで保存していたことがあり、長期暴露においては測定し直しなどの措置が講じられているが、短期暴露においては測定結果の見直しが不可能なこともあり、-1.35%を下回るデータについては合理性が疑われるので4つのデータ(表6:3.0kg/m³の補修部で鉄筋No.3の塗り潰し箇所)は削除し、以下の解析では使用しないこととする。

Nについては、No.1, No.2, No.3とで黒皮除去部分が異なるため、境界部では、No.1とNo.2・3とで別々に質量減少率を算定し、補修部、無補修部では、各々黒皮を除去した部分と黒皮を残した部分の環境による差はないため、鉄筋No.による区別はしていない。なお、Nで黒皮を除去した補修部と黒皮を残した無補修部とを比較すると、質量減少率は補修部の方が大きく、不動態皮膜である黒皮の腐食に対する保護効果が認められる。また、表7より、塩化物の級が大きくなると、質量減少率が大きくなる傾向にあることがみとめられる。

4. 考察

4.1 塩化物量の違いによる補修効果

図3は、塩化物量の級別に短期および長期暴露試験における境界部、補修部および無補修部における質量減少率を小さい方から順次

図3 塩化物量の違いによる質量減少率累積確率

累積していった場合の累積確率を示している。短期暴露において、塩化物の級が 0.5kg/m^3 および 1.5kg/m^3 では、質量減少率が 1.0% 以上となる確率はほとんど見られず、一方 3.0kg/m^3 の場合は、 1.0% 以上となる確率が 9% 程度ある。また長期暴露においては、塩化物の級が 0.5kg/m^3 および 1.5kg/m^3 では、質量減少率が 1.0% 以上となる確率は、ともに 7% 程度であるが、塩化物量の級が 3.0kg/m^3 になると、質量減少率が 1.0% 以上となる確率は 36% あり、さらに、ひび割れが発生するとされる 3.0% 以上となる確率は 6% がある。これらのことから塩化物量の級が 0.5kg/m^3 および 1.5kg/m^3 では断面修復工法によって全体的に鉄筋腐食が抑制されているが、 3.0kg/m^3 になると全体的に腐食の進行が大きくなり、断面修復工法による補修効果が期待できなくなることがわかる。

4.2 鉄筋のはつり出し方法が補修効果に及ぼす影響

図4は、鉄筋腐食部分を、すなわち健全である黒皮が現れるまで十分にはつり取りを行わなかった事を想定している鉄筋1と、鉄筋腐食部分を十分にはつり取った事を想定している鉄筋2の各部位別の質量減少率を比較したものである。また、図5は、鉄筋2と切欠き部の裏面のほぼ半分がコンクリート中にある鉄筋3の各部位別の質量減少率を比較したものである。各図中の実線は、(鉄筋1または鉄筋3ー鉄筋2)の質量減少率における差の平均値を示したものである。この結果、鉄筋1と2を比較すると、境界部および補修部における差については、鉄筋1の方がそれぞれ全体の平均で 0.19% 、 0.15% 上回っていることから、鉄筋1の腐食が進んでいることがわかる。また鉄筋2と3を比較すると、境界部において、鉄筋3の方

図4 鉄筋1と鉄筋2によるはつり方の違いによる質量減少率

図5 鉄筋2と鉄筋3によるはつり方の違いによる質量減少率

が平均で 0.15%上回っており、補修部では鉄筋 3 の方が、0.06%、無補修部でも 0.05%上回っている。以上のことから、はつりの際、健全な鉄筋が現れるまでコンクリートをはつり取ることが重要であるといえる。

4.3 鉄筋防錆材の有無が補修効果に及ぼす影響

図 6 は、短期および長期暴露において補修効果が比較できる代表的なものとして塩化物量の級が 0.5kg/m³および 1.5kg/m³の試験体

図 6 防錆材のあり・なしの違いによる質量減少率

図 7 表面被覆材の違いによる比較

図 8 塩化物量の違いによる発錆面積率と質量減少率の関係（長期暴露）

において、ポリマーセメント系およびエポキシ樹脂系の鉄筋防錆材を施したものと施していないものを比較した図である。各図中の実線は、「防錆材なしー防錆材あり」の質量減少率における差の平均値を示したものであり、防錆材なしの方がポリマーセメント系の平均で 0.08%、エポキシ樹脂系の平均で 0.09%上回っていることから、ポリマーセメント系およびエポキシ樹脂系ともに防錆材を施さなかった場合より防錆材の効果が若干あるといえる。

4.4 表面被覆材の有無が補修効果に及ぼす影響

図 7 は、短期および長期暴露において塩化物量の級が 3.0kg/m³の場合にポリマーセメント系およびエポキシ樹脂系の補修材を施したのに対して、表面被覆材の補修効果が比較できる代表的な試験体にそれぞれ一般形と防水形の複層仕上塗材を施したものと、仕上塗材を施さなかったものを全ての平均値で比較した図である。この結果、短期、長期暴露およびポリマーセメント系、エポキシ樹脂系ともに、表面被覆材を施さないものに比べて、防水形複層仕上塗材を施した効果がみられることがわかる。

4.5 発錆面積率と質量減少率の関係

図 8 は、塩化物量の級別に、各部位（境界部、補修部、無補修部）毎に発錆面積率と質量減少率との関係を示した図である。これらを見ると、塩化物量の級が 0.5kg/m³と 1.5kg/m³では、発錆面積率の増加に対する質量減少率の増加傾向は小さく、腐食が表面的に広がる傾向にあることが見てとれる。また、ポリマーセメント系とエポキシ樹脂系とを比較すると、エポキシ樹脂系における発錆面積率の方が大きい傾向にある。塩化物量の級が 3.0kg/m³になると、発錆面積率の増加に対する質量減少率の増加傾向は大きく、腐食が表面的な広がりだけでなく深さ方向にも進行している傾向にあることがわかる。また、エポキシ樹脂系の方がポリマーセメント系よりも発錆面積率、質量減少率とも大きいことがわかる。この理由として、エポキシ樹脂系の方が水分や酸素などの物質の透過性が小さく、境界部分における腐食環境の違いが大きくなることから腐食が促進され、防錆処理材と鉄筋との間で腐食が進行することが考えられる。なお、定量的な検討は、今後の課題である。特に境界部および補修部において発錆面積率、質量減少率ともに腐食の進行が顕著である。

4.6 鉄筋の質量減少率の増加傾向

既報¹⁾の発錆面積率と同様に、質量減少率についても、 $\Delta w = at^b$ とおき、実測値と回帰式の差の二乗和が最小になるいわゆる最

小二乗法によって b の値を検討することとした。すなわち、式（3）において b の値を一時固定して各 j について最小二乗法で a_j を決定し、そのときの Δ を求める。次に b の値を変化させ、 Δ が最小となる b の値を小数点以下第 1 位まで求めた。その結果を表 8 に示す。ただし、0.1 未満は、0.1 とした。

$$\Delta = \sum_j \sum_{i=1}^2 (\Delta w_i - a_j t_i^b)^2 \rightarrow \min \quad \cdots (3)$$

表 8 によれば、ポリマーセメント系では、 b の値が境界部、補修部ともに塩化物量の級が 1.5kg/m³以外の 0.5kg/m³および 3.0kg/m³で 0.1 未満となっており、これは補修後のごく短期間に少し腐食が進むものの、長期的には安定して腐食の進行がないことを意味している。一方、無補修部では、0.8 および 1.0 であり、時間の経過とともに腐食が進行する傾向にあることがみとめられる。また、エポキシ樹脂系では、いずれも b の値は、0.6 から 1.0 となっており、補修後も腐食が進行する傾向にあることがわかる。

表 8 質量減少率増加傾向値の一覧 (b の値)

材料系	ポリマーセメント系			エポキシ樹脂系		
塩化物量の級 (kg/m ³)	0.5	1.5	3.0	0.5	1.5	3.0
境界部	0.1	1.0	0.1	0.9	1.0	0.6
補修部	0.1	0.4	0.1	0.7	0.9	0.8
無補修部	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0
全体	0.2			0.8		

5. 結論

約 20 年におよぶ長期屋外暴露試験の結果は、次のようにまとめられる。

- (1) コンクリート中の塩化物量の級が 0.5kg/m³および 1.5kg/m³では断面修復工法によって鉄筋腐食が抑制されているが、3.0kg/m³になると全体的に腐食の進行が大きくなり、断面修復工法による補修の効果が期待できなくなることがわかる。
- (2) 断面修復の際、鉄筋3は、鉄筋1・2に比べて質量減少率が大きく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。
- (3) 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、エポキシ樹脂系の材料に比べて、ポリマーセメント系材料の方がより効果が認められる。
- (4) 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。
- (5) 塩化物量の級が 3.0kg/m³になると、発錆面積率が増加するにつれて質量減少率も増加する傾向にあり、腐食が表面的な広がりだけでなく深さ方向にも広がっていくことがわかる。
- (6) ポリマーセメント系は、短期暴露期間に質量減少率が増加し、その後長期暴露期間にわたって増加はあまり見られないが、エポキシ樹脂系では、進行がとまらないという傾向が見られる。

参考文献

- 1) 西村眞治ほか 3 名:断面修復工法による鉄筋腐食補修効果の評価に関する長期暴露実験,日本建築学会構造系論文集第 633 号,pp1913-1920.2008.11

図 9 質量減少率増加傾向の概念図

- 2) 西村眞治ほか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,pp1225-1226.2007.8
- 3) 西村眞治ほか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(その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp1225-1226.2008.8
- 4) 西村眞治ほか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(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp1225-1226.2009.9
- 5) 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,pp33-38.2001.7
- 6) 花栄浩ほか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 A-1,pp143-46.1990.9
- 7) 花栄浩ほか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,pp189-192.1991.9
- 8) 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,pp275-276.2000.9
- 9) 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
- 10) 浜田秀則ほか2名:塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察,コンクリート工学論文集,第3巻,第2号, pp85-95.1992.7
- 11) 榊田佳寛ほか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

(2010年1月10日原稿受理, 2010年5月31日採用決定)