

論文 10年間暴露における塩害により劣化した鉄筋コンクリートの補修方法に関する研究

中込 清章*1・梶田 佳寛*2・藤井 和俊*3・枝広 英俊*4

要旨: 本研究は、塩害によって劣化した鉄筋コンクリートの適切な補修方法を提案するために、3種類の補修材料について塩害劣化抑制効果を比較検討したものである。補修方法として断面修復と表面被覆を施し、10年間屋外で自然暴露した後に鉄筋腐食面積率および鉄筋腐食減量率について比較を行った。

その結果、断面修復においては防錆剤入りのSBR系ポリマーセメントモルタルを用いて鉄筋の裏側まで行う補修が、表面被覆においては混入塩化物量が多い場合、腐食の進行を抑制するのに有効であった。

キーワード: 塩害、断面修復、表面被覆、鉄筋腐食、補修材料

1. はじめに

塩害により劣化したコンクリート構造物の補修については、従来から断面修復材や表面被覆材を用いた方法が行われている。しかし補修用材料については、樹脂などの新しい材料が多く用いられており、種類も多いため基準類がまだ整理されていない。そのため他の基準類から仮に転用しているのが実状である¹⁾。また、海砂等の使用を想定した初期のコンクリート中に混入された塩化物の影響を調べた研究は、海洋構造物等を想定した飛来塩化物の影響を調べた研究に比べて数少ない^{2), 3), 4)}。

前報^{5), 6)}では、代表的な3種類の補修材料を用いて、塩化物を混入した小型試験体に断面修復又は表面被覆の補修を施した後、12, 24, 90サイクルの促進劣化試験(1サイクルは7日間とし、50±3℃, 95%RH以上の雰囲気で3日間、40±3℃, 40±5%RHの雰囲気で4日間という繰返し条件で行った。)を行い、補修材料の塩害劣化抑制効果について比較検討した。

前報に引き続き本研究では、同様の要因と水

準の試験体を用いて10年間屋外暴露試験を行い、実環境における補修材料の塩害劣化抑制効果について比較検討し評価を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。本実験では補修方法を2つに分け、断面修復の試験体をシリーズ1、表面被覆の試験体をシリーズ2とした。シリーズ1では試験体中にかぶり厚さ20mmの鉄筋を2本配置し、片方は鉄筋の裏側10mmまではつた後補修を行った場合を、もう片方は鉄筋径の1/2の深さまではつた後補修を行った場合をそれぞれ想定した。またシリーズ2では試験体中にかぶり厚10mmと30mmの鉄筋を配置して、それぞれ補修した場合を想定した。

2.2 試験体

シリーズ1, 2の試験体の形状・寸法を図-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。試験体は各水準に応じて、予めコンクリートに塩化物を混入して製作した。

*1 三菱建設(株) 技術研究所 材料研究室 研究員 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

*3 三菱建設(株) 技術研究所 材料研究室長 博士(工学) (正会員)

*4 芝浦工業大学助教授 工学部 建築学科 (正会員)

表-1 実験の要因と水準

要因	試験体			補修材料				備考
	かぶり厚さ (mm)	水セメント比 (%)	コンクリート中の塩化物物量 (kg/m ³)	SBR ¹	LSBR ²	EPM ³	NR ⁴	
シリーズ I 断面修復	20	60	0.6	○	○	○	○	a)鉄筋径の1/2まで補修
			1.8	○	○	○	○	
			3.0	○	○	○	○	
	70	60	4.2	○	○	○	○	b)鉄筋の裏側まで補修
			0.3	○	○	—	○	
			0.6	○	○	—	○	
図-1参照								
シリーズ II 表面被覆	10, 30	60	1.8	○	○	○	○	c)かぶり厚さ10mm
			3.0	○	○	○	○	
			4.2	○	○	○	○	
	70	60	0.6	○	○	○	○	d)かぶり厚さ30mm
			1.8	○	○	○	○	
			3.0	○	○	○	○	
図-1参照								

- *1 SBRスチレンブタジエンゴム系ポリマーセメントモルタル
- *2 LSBRスチレンブタジエンゴム系ポリマーセメントモルタルに防錆剤(亜硝酸リチウム)を加えた試験体
- *3 EPMエポキシ樹脂系ポリマーモルタル
- *4 NR補修を行っていない試験体

表-2 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	1m ³ 当りの所要量(kg)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (C×%)
60	48	180	300	849	947	0.1
70	51	189	270	900	894	0.1

セメント:普通ポルトランドセメント(比重:3.15)
 細骨材:鬼怒川産川砂(比重:2.58, 吸水率:2.24%)
 粗骨材:八王子産砕石(比重:2.66, 吸水率:0.62%, 最大寸法:20mm)
 混和剤:AE減水剤, AE助剤

コンクリートの目標スランプは 18±2cm, 目標空気量は 4±1%とし, 鉄筋は丸鋼φ13mmのみがき棒鋼を使用した。また, 劣化が生じていない箇所を想定した比較モニター用の試験体(以下NR)を製作した。

試験体は, 脱型後最初に4週間 20±3℃の室内で湿布養生した後, シリーズ1では20±3℃, 60±10%RHの室内に1週間保存し, シリーズ2では20℃の水中に1週間浸漬した。その後試験面の補修を実施し, 試験面以外は厚膜エポキシ樹脂でライニングした。ライニング厚は, 底面(試験面の反対側)が1回塗り 1.0mm, 小口面が1回塗り 0.5mmとした。なお, シリーズ2の表面被覆は塗厚10mmとした。

2.3 補修材料

補修材料を表-3に, 補修材料の基本性能を表-4に示す。補修材料はスチレンブタジエンゴム系ポリマーセメントモルタル(以下SBR), これに防錆剤(亜硝酸リチウム)を加え

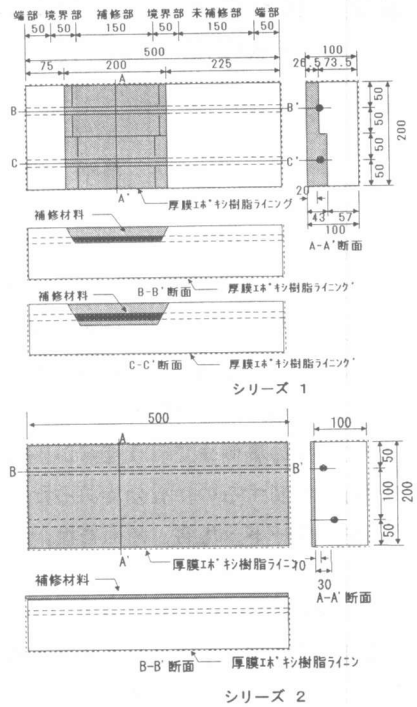


図-1 試験体の形状・寸法(単位:mm)

たもの(以下LSBR), およびエポキシ樹脂系ポリマーモルタル(以下EPM)を使用した。

表-3 補修材料

シリーズ	材料の種類	SBR	LSBR	EPM
I	防錆処理剤	防錆剤 [*] 混入SBR系ポリマーセメントペースト	防錆剤 [*] 混入SBR系ポリマーセメントペースト	ジソックリッチ塗料
	プライマー	同上	同上	エポキシ樹脂
	断面修復材	SBR系ポリマーセメントモルタル	防錆剤 [*] 混入SBR系ポリマーセメントモルタル	エポキシ樹脂系ポリマーモルタル
II	プライマー	- - -	- - -	エポキシ樹脂
	表面被覆材	SBR系ポリマーセメントモルタル	防錆剤 [*] 混入SBR系ポリマーセメントモルタル	エポキシ樹脂系ポリマーモルタル

* 亜硝酸リチウム

表-4 補修材料の基本性能

材料	圧縮強さ (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	付着強さ (N/mm ²)	乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)	吸水率 (%)
防錆剤混入SBR系ポリマーセメントペースト	33.3	10.5	2.2	-	1.09
SBR系ポリマーセメントモルタル	50.0	10.9	2.3	0.9	2.38
防錆剤混入SBR系ポリマーセメントモルタル	58.1	13.3	2.4	4.8	0.61
エポキシ樹脂系ポリマーモルタル	33.0	18.0	3.8	0.8	0.02

2.4 暴露試験状況

暴露試験状況を写真-1に示す。暴露試験は、1988年から1998年までの約10年間、つくば市の建設省建築研究所内の屋外暴露試験場で実施した。なお、試験体は外壁を想定し、補修部を南側に向けた状態で暴露した。

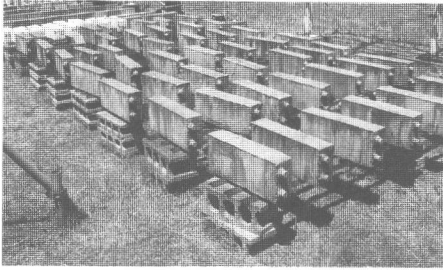


写真-1 暴露試験状況

2.5 測定項目と方法

測定項目とその方法を以下に示す。

(1) 試験体補修面の外観観察

ひび割れ、浮き等の発生を調べるため、試験体補修面の外観観察と打音調査を行った。

(2) 鉄筋腐食面積率

鉄筋の腐食部分をビニールシートに描き写し、イメージスキャナーで読み取った後、パソコンを用いた画像解析により腐食面積を測定し、腐食面積率を算定した。

(3) 鉄筋腐食減量率

煮沸したクエン酸-アンモニウム水溶液に腐食した鉄筋を浸漬し錆を除去した。その後鉄筋重量を測定し、次式から鉄筋腐食減量率を算定した。

$$\text{鉄筋腐食減量率} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 (\%)$$

W_0 : みがき鉄筋の初期鉄筋重量 (g)

W_1 : クエン酸処理後の鉄筋重量 (g)

3. 実験結果および考察

3.1 内部塩化物イオンが鉄筋の腐食に及ぼす影響

水セメント比60%のNRの試験体における、かぶり厚さごとの鉄筋腐食面積率とコンクリー

ト中の塩化物量との関係を図-2に示す。かぶり厚さが10mmでは、塩化物量が 1.8 kg/m^3 より大きくなった場合、20、30mmでは塩化物量が 3.0 kg/m^3 より大きくなった場合は、鉄筋腐食面積率が増加する傾向であった。

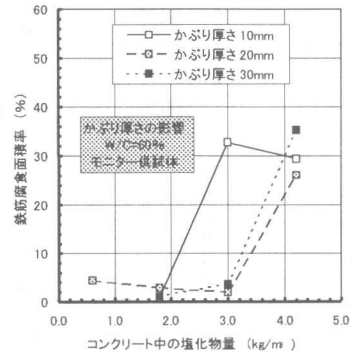


図-2 NRの試験体の鉄筋腐食面積率と塩化物イオン量との関係

3.2 シリーズ1：断面修復

(1) 試験体補修面の外観観察

水セメント比60%で、塩化物量 3.0 kg/m^3 のSBR、 4.2 kg/m^3 のSBR、LSBR、EPMの試験体補修面には、補修部と未補修部の境界に肌分かれが生じていた。

また、促進劣化試験時には未補修部に鉄筋に沿ってひび割れが生じた試験体があったが、暴露試験では同様のひび割れは生じなかった。

(2) 鉄筋腐食面積率

断面修復した試験体の、各要因と水準毎の未補修部、境界部、補修部の鉄筋腐食面積率を図-3に示す。どの部分も水セメント比が60%、70%の時、補修方法、補修材料に関らず塩化物量が多くなるにつれて、鉄筋腐食面積率は増加する傾向にあり、特に水セメント比60%では、 3.0 kg/m^3 、 4.2 kg/m^3 と多くなった時に腐食面積率が増大した。

次に、補修方法の違いからみると、水セメント比が60%の時は、鉄筋の裏側10mmまで補修した場合の方が、鉄筋の1/2の深さまで補修した場合よりも補修部の鉄筋腐食面積率は小さく

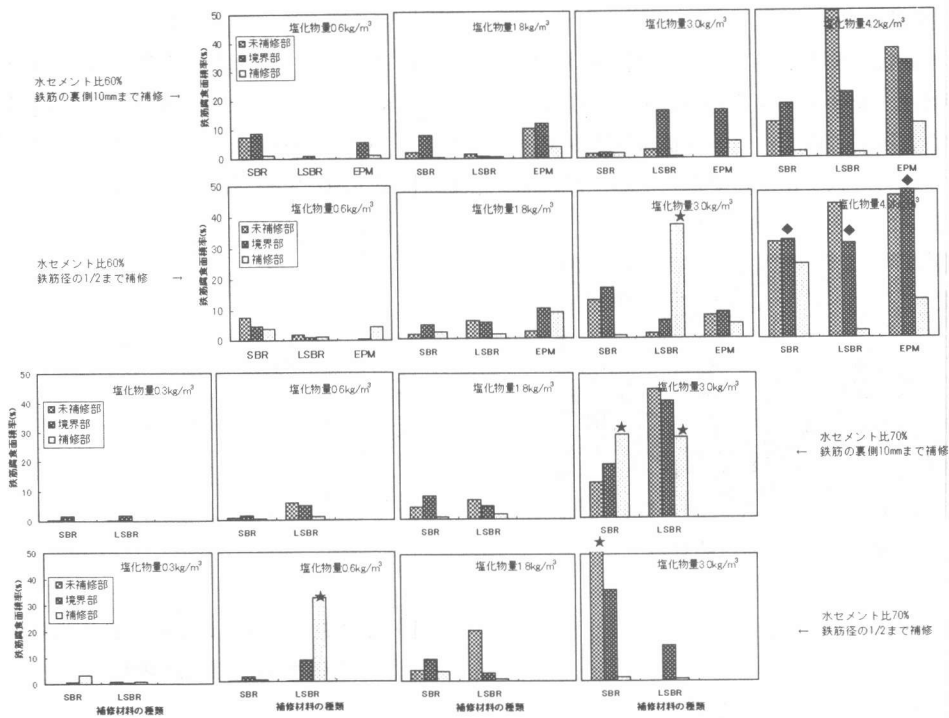


図-3 断面修復した試験体の各部の鉄筋腐食面積率

なった。しかし、水セメント比 70%の時は、修部の鉄筋腐食面積率に明確な差は認められなかった。

補修材料の違いでは、水セメント比 60%の時、補修部の鉄筋腐食面積率は各水準でLSBRが最も小さく、次いでSBR、EPMの順であった。これは、促進劣化試験⁶⁾と同様の傾向となっている。LSBRがSBRよりも小さい値であることから、亜硝酸リチウムを鉄筋に塗布するだけでなく断面修復材に混入することで鉄筋の防錆効果が増大したものと考えられる。

さらに、境界部の鉄筋腐食面積率でも、LSBRがSBRよりも小さく、亜硝酸リチウムが補修部から周囲に浸透することで、補修部だけでなく隣接する境界部の腐食防止にも効果があるといえる。

ただし、境界部の 4.2kg/m^3 については補修面の外観観察で肌分かれが認められており、それが原因で鉄筋の腐食が増大したと考えられる。水セメント比 60%、70%での、NRの試験体

とSBR、LSBR、EPMで断面修復した試験体の未補修部との鉄筋腐食面積率の関係を図-4に示す。断面修復した試験体の未補修部の鉄筋腐食面積率は、NRの試験体の鉄筋腐食面積率より大きいものが多い。

促進劣化試験⁶⁾でも同様の傾向になっており、部分的な補修が未補修部の鉄筋腐食を促進する

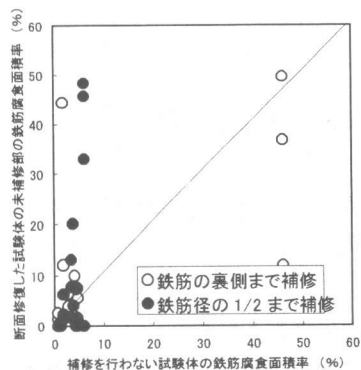


図-4 NRの試験体と補修した試験体の未補修部との鉄筋腐食面積率の関係

要因の一つになっている。なお、図-3中で鉄筋の裏側まで補修した場合が補修を行わなかった場合よりも、鉄筋腐食面積率が45%と大きかった試験体は、補修面の長辺方向端部のコンクリートと厚膜エポキシ樹脂ライニングとの間に肌分かれが認められており、それが影響しているものと考えられる。

3.3 シリーズ2：表面被覆

(1) 補修面の外観観察

補修面の外観観察では、腐食に影響を与えるようなひび割れや浮きは認められなかった。

(2) 鉄筋腐食面積率

補修材料毎の、表面被覆した試験体の鉄筋腐食面積率を図-5に示す。各補修材料とも水セメント比60%では、混入塩化物量が增加するにつれて、鉄筋腐食面積率も増加する傾向にあり、特に3.0kg/m³から4.2kg/m³と多くなった時に増大した。しかし、水セメント比70%では、はっきりとした傾向の評価には至らなかった。

次に、補修材料の違いでは、SBR、LSBR、EPMを使用した試験体の間に大きな差は出なかった。しかし、NRの試験体と比較すると、どの補修材料を使用した試験体も鉄筋腐食面積率が小さくなっていった。

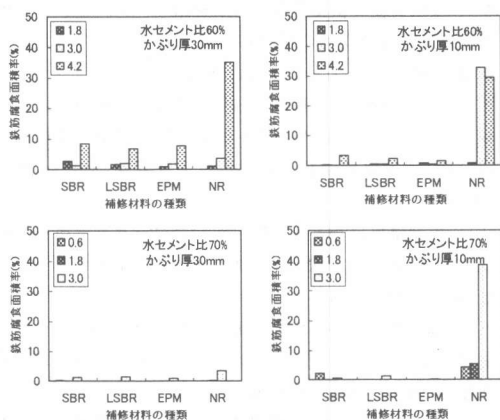


図-5 表面被覆した試験体の鉄筋腐食面積率

特に、混入塩化物量が4.2kg/m³と多い時には、表面被覆を行った試験体と行わなかった試

験体の鉄筋腐食面積率の差は大きかった。このことから、混入塩化物量が多い場合、表面被覆を行うことにより鉄筋腐食の増加を押さえ、劣化抑制効果を高めることができるといえる。

3.4 補修方法及び補修材料の比較

水セメント比60%、混入塩化物量1.8, 3.0kg/m³での補修方法及び補修材料の比較を図-6に示す。補修方法については、塩化物量に関係なく、鉄筋の裏側10mmまで断面修復した場合が、腐食を抑制する効果が高かった。

また補修材料については、断面修復ではLSBRが最も効果があり、次いでSBR、EPMの順であったが、表面被覆では補修材料による大きな差は見られなかった。

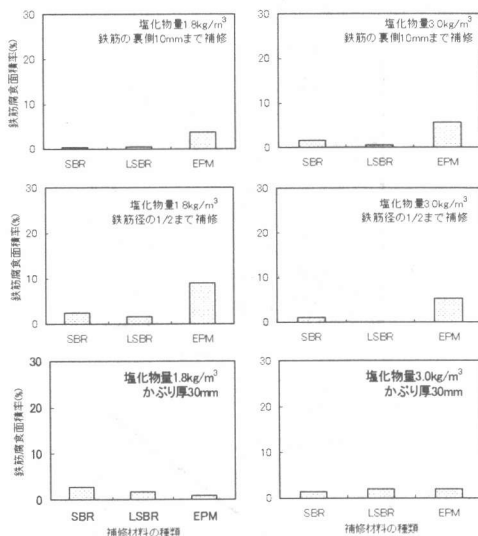
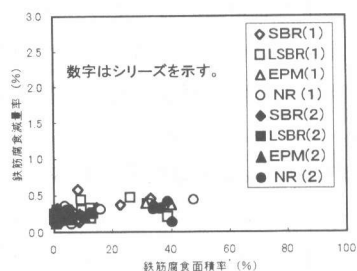


図-6 補修方法および補修材料の比較

3.4 鉄筋腐食面積率と鉄筋腐食減量率の比較

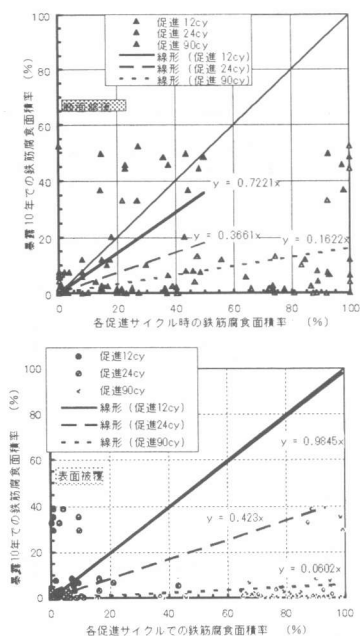
鉄筋腐食面積率と鉄筋腐食減量率の関係を図-7に示す。鉄筋腐食面積率が増えるに従って、鉄筋腐食減量率もゆるやかに増加していた。今回の屋外暴露試験では鉄筋腐食面積率が60%以内で、鉄筋腐食減量率も最大で0.58%であった。その範囲内の分布は腐食グレードⅡ⁷⁾とほぼ同等であり、鉄筋腐食は面方向の広がりにとどまっていた。



図一七 鉄筋腐食面積率と鉄筋腐食減量率の関係

4. 促進劣化試験との比較

促進劣化試験と暴露 10 年の比較を図一八に示す。この図より、今回の暴露 10 年における鉄筋の腐食は、断面修復の場合は促進 10 サイクル程度、表面被覆の場合は促進 12 サイクルに相当すると考えられる。



図一八 促進劣化試験と暴露 10 年の比較

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 断面修復

補修部では、LSBRを用いて鉄筋の裏側まで補修する方法が最も腐食を抑制した。また、境界部では、防錆剤が補修部から浸透すること

で腐食の進行が抑制された。

(2) 表面被覆

混入塩化物イオン量が多い場合、表面被覆による腐食抑制効果があり、補修材料による違いは認められなかった。

(3) 鉄筋腐食の面積率と減量率の比較

鉄筋腐食面積率と鉄筋腐食減量率との関係は、腐食グレードⅡ⁷⁾とほぼ同等であった。

(4) 促進劣化試験との比較

10 年間の暴露試験は、断面修復の場合は促進劣化試験 10 サイクル程度、表面被覆の場合は促進劣化試験 12 サイクルに相当する。

今後は、促進および暴露試験結果について重回帰分析を行い、各要因が鉄筋腐食面積率と鉄筋腐食減量率に及ぼす影響を定量的に評価する予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、建設省建築研究所無機材料研究室長 阿部道彦氏に便宜をはかって頂きました。足利工業大学 毛見虎雄教授に御指導を頂きました。三菱マテリアル㈱セメント研究所 地頭菌博氏、小島利広氏及び高原幸之助氏には御指導・御協力を頂きました。コニシ浦和研究所、足利工業大学及び芝浦工業大学の学生の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，土木学会，1997
- 2) 枝広英俊・依田彰彦：海砂を用いたコンクリート中の鉄筋の発錆と防食に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 287-288，1996. 9
- 3) 庄司広和ほか：鉄筋防錆材およ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，A-1，pp. 289-290，1996. 9
- 4) 笹淵優樹ほか：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 423-424，1998. 9
- 5) 藤井和俊ほか：塩害により劣化した鉄筋コンクリートの補修方法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp. 641-642，1989. 10
- 6) 宇仁菅康行ほか：塩害により劣化した鉄筋コンクリートの補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，pp. 1165-1170，1997. 6
- 7) 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. 67，1997