

# 各種要因が補修した鉄筋コンクリート構造物の劣化に 及ぼす影響に関する研究 (3)

— 暴露条件の影響 —

Influence of Various Factors on Deterioration of Repaired Concrete Structures (3)

— Influence of Exposure Conditions of Reinforced Concrete —

森本 丈太郎\*・槇島 修\*・元 売 正 美\*・伊 藤 学\*・  
松 林 裕 二\*・渡 部 正\*・加 藤 佳 孝\*・魚 本 健 人\*

Jotaro MORIMOTO, Osamu MAKISHIMA, Masami MOTOURI, Manabu ITOH,  
Yuuji MATSUBAYASHI, Tadashi WATANABE, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

近年、劣化したコンクリート構造物の補修事例が増えているが、それに伴って、補修後、比較的早期に再劣化に至る事例報告も増大している。このような再劣化の進行は、補修材料の良し悪しだけでなく、補修時の構造物の損傷度、補修の方法や施工の適切さなどに大きく左右されると考えられるが、その原因やメカニズムについては、ほとんど解明されていない。今後、構造物の適切な維持管理計画を策定するためには、補修後の再劣化について検討を行うことが重要であると考えられる。

そこで本研究では、道路橋床版を対象とした塩害による補修後の再劣化の原因の解明と適切な対策を提案することを目的とし、部分補修した試験体に対して、コンクリート中の塩分量、表面被覆の有無、補修工法（材料）等を要因として、海洋暴露および内陸暴露の試験を行った。前報等<sup>1,2)</sup>では、研究背景や目的、全体計画について報告した。本報では、暴露期間1年における試験体の鉄筋の腐食状況や内部塩分の分布状況について調査した結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 暴露条件

海洋暴露実験は、静岡県伊豆東海岸に設置した暴露場において実施した。この海洋暴露場は波打ち際に設置されており、ここで暴露されている試験体は、満潮時には波で洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるため常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下にある。この暴露場の環境条件を把握するために、暴露場より約10m内陸よりの岩場に設置した飛来塩分測定器（土研式）により、1993年9月～1996年8月まで測定した年間飛来塩分量は約400～800 Clmg/dm<sup>2</sup>であった。また、近接の網代測候所で記録

された月平均気温の変動は7～24℃であり、年間の平均気温は18.4℃であった<sup>3)</sup>。

内陸暴露実験は、東京大学生産技術研究所・千葉実験所構内の一角に設置した暴露場において実施した。この内陸暴露場は、海岸より約3km内陸に位置し、飛来塩分はほとんど無い。近接の千葉測候所で調べた1993年9月～1996年8月までの月平均気温の変動は6～25℃であり、年間の平均気温は18.1℃であった。

### 2.2 試験体概要

#### (1) コンクリートの配合

表1にコンクリートの使用材料等を示す。

#### (2) 鉄筋

鉄筋はJIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定するSD 345, D 19を使用し、折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。なお、エポキシ樹脂塗装後の翌日に各鉄筋の

表1 コンクリートの使用材料等

セメント	普通ポルトランドセメント(3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	大井川産陸砂(2.58g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石(Gmax20mm, 2.64g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	AE減水剤標準型, AE剤
塩化物イオン量	0, 2.4, 4.8kg/m <sup>3</sup>
スランブ	12.0cm
空気量	4.5%
水セメント比	65%
圧縮強度	材齢28日:34.7N/mm <sup>2</sup> , 材齢1年:43.9N/mm <sup>2</sup>

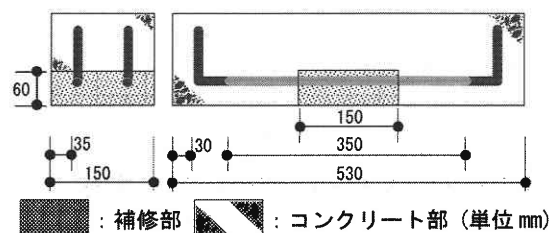


図1 試験体の形状と寸法 (タイプB)

\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

研究速報

質量を測定して基準質量とした。

(3) 試験体

図1に試験体の形状と寸法を示す。試験体は150×150×530mmの短形梁とし、鉄筋かぶりが30mmになるように、SD345、D19の鉄筋を2本埋め込んだ。試験体中央部分には、部分補修を想定して長さ150mm、深さ60mmの模擬はつり部を設けた。なお、模擬はつり部(補修部)には、発泡スチロールを設置し、鉄筋の配置は発泡スチロール、スペーサー、水糸を使用して所定の位置に収まるようにコンクリートを打設した。

(4) 補修方法および補修材料

模擬はつり部のコンクリート下地は、ワイヤーブラシ等を用い表面の汚れやレイトンスを取り除き、圧搾空気です埃を除去した。その後、実験1の試験体はポリマーセメントペースト(ベオバ系粉体ポリマー)をコンクリート部分にのみプライマーとして塗布し、断面修復材は同種のポリマーを主成分とするポリマーセメントモルタルを吹付け施工した。その後、所定期間養生後、表面の目粗しを行い、エポキシ樹脂系プライマーを塗布して、エポキシ樹脂パテ材でパテ処理を行った。引き続き、柔軟型エポキシ樹脂中塗り材を2層塗布し(乾燥膜厚320μm)、柔軟型ウレタン樹脂上塗り材を最終的に1層(乾燥膜厚30μm)塗装した。なお、上面被覆を行わない試験体は、上面(コンクリート打設面)以外の5面について被覆を施した。実験2の試験体は使用する材料で推奨されている方法で断面修復および表面被覆の施工を行った。

2.3 補修条件

表2に試験体の補修条件、表3に各種補修工法で使用する防錆材、断面修復材および表面被覆材の種類を示す。表2の実験1では鉄筋裏10mmまで部分的に補修したB試験体に対して、母材コンクリート中の塩化物イオン量、表面被覆の有無を要因とした。試験体は部分的に断面修復を行った場合を想定しており、マクロセル腐食の発生を想定したものである。また、上面の被覆材の有無は、床版上面の防水の有無を想定したものである。従来補修では、床版下面の劣化部分に対して直接施工されるのが一般的であり、既存床版防水の健全性を考慮して設計が行われることは少ない。しかしながら、床版防水が適切に行われていない場合には、塩分、酸素等の腐食因子が床版上面から侵入することが考えられる。なお、試験体番号は混入塩化物イオン量の水準(1:0kg/m<sup>3</sup>, 2:2.4kg/m<sup>3</sup>, 3:4.8kg/m<sup>3</sup>)—試験体のタイプ(B)—上面被覆の有無を示している。

2.4 評価項目および評価方法

(1) 鉄筋の腐食面積率の測定

鉄筋腐食状況と腐食面積率測定は、暴露後1年時に試験体から取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付けて、発錆部分を写し取り(中央350mm分)、腐食の状況を観察するとともに、画像解析装置を用いて腐食面積率を測定した。

表2 試験体の補修条件

実験	番号*	Cl <sup>-</sup> 量 (kg/m <sup>3</sup> )	はつり		表面被覆
			位置	深さ	
1	1-1-B-無	0	部分	鉄筋裏	上面無し
	1-2-B-無	2.4			全面塗布
	1-2-B-有				
	1-3-B-有	4.8			
2	2-2-B-無 ①~⑨	2.4			上面無し

\*実験-塩分量-タイプ-上面被覆の有無

表3 各種補修工法(材料)

No.	防錆材	断面修復材	表面被覆材
①	PCP(亜硝酸塩)	PCM(SBR)	アクリル樹脂
②	PCP(亜硝酸塩)	PCM(SBR, 防錆剤)	柔軟型PCM
③	PCP(亜硝酸塩)	PCM(Veo)	ウレタン樹脂
④	PCP(亜硝酸塩)	PCM(SBR)	柔軟型エポキシ樹脂
⑤	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂モルタル	柔軟型エポキシ樹脂
⑥	亜硝酸塩Li塗布+PCP(亜硝酸Li)	PCM(SBR, 防錆剤)	柔軟型PCM
⑦	錆転換型	PCM(Acr)	柔軟型PCM
⑧	フタル酸樹脂(亜硝酸塩)	PCM(SBR)	クロップレンゴム
⑨	PCP(亜硝酸塩)	PCM(Veo)	柔軟型アクリルウレタン

\* PCP:ポリマーセメントペースト

\* PCM(Veo):ベオバ系ポリマーセメントモルタル

\* PCM(SBR):SBR系ポリマーセメントモルタル

\* PCM(Acr):アクリル系ポリマーセメントモルタル

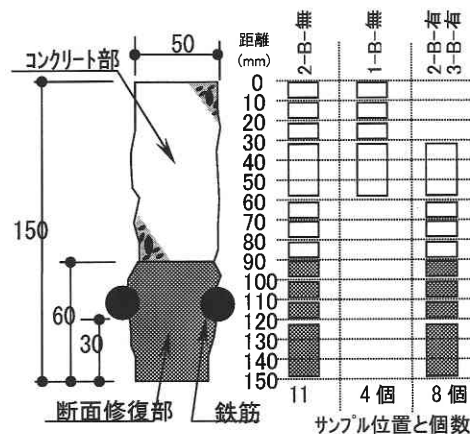


図2 塩分測定サンプルの採取方法

(2) 鉄筋の腐食量の測定

コンクリートに埋設する前の鉄筋の質量を予め測定しておき、解体時に取り出した鉄筋の質量減少から、腐食量を求めた。錆の除去は60°Cのクエン酸二アンモニウム10%水溶液に鉄筋を24時間浸漬し、ワイヤーブラシを用いて行った。なお、黒皮分を補正するために暴露しなかった鉄筋についても同様の作業を行った。

(3) 塩分分析

塩分分析は、JCI-SC4で定める方法に従って全塩分を測定した。図2に対象としたサンプルを示す。分析対象は1-B-無、2-B-無、2-B-有、3-B-有であり、暴露1年後に試験体を解体し、2本の鉄筋の間の長さ50mmの部分を取り出し、かぶりから上面までの部位を切り出して分析した。

(4) EPMA分析

図3で示した2本の鉄筋間の中央部分からサンプルを採

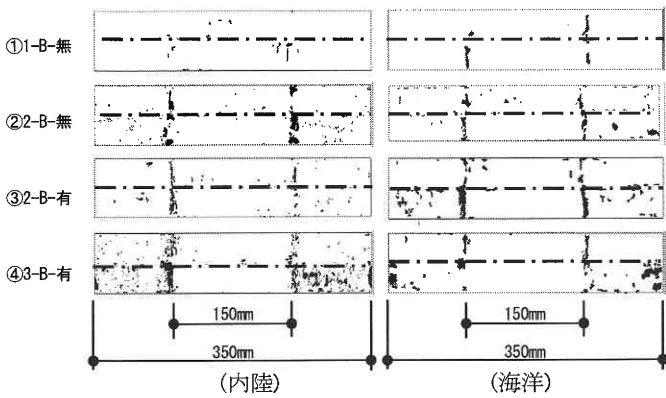


図3 部分補修した鉄筋の腐食状況

取し、塩分の分布状況を塩素のマッピングによって調べた。なお、EPMA分析は塩分分析を行った4試験体を対象とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鉄筋の腐食状況

##### (1) 実験1について

図3に部分補修した試験体の暴露1年後の腐食状況を示す。なお、図3では取り出した2本の鉄筋のうち代表的な1本の腐食状況を示し、一点鎖線より上半分がかぶり側、下半分がかぶり側を表している。

部分補修した場合、既設コンクリートと断面修復材界面のコンクリート側にマクロセルが原因と思われる腐食が境界部の鉄筋のほぼ全周に渡って発生していた。このマクロセルによる腐食は、塩化物イオンを混入していない試験体①でも観察され、部分補修がマクロセル腐食を発生させる要因であることが確認された。

図4にB試験体についての初期混入塩化物イオン量と腐食減量の関係を示す。初期に混入した塩化物イオン量が多くなると鉄筋の腐食量が多くなる傾向にあり、マクロセル腐食に対してもコンクリート中に内在する塩化物量が影響を及ぼしていると考えられる。なお、内陸と海洋の暴露条件の違いによる明らかな差は認められなかった。

##### (2) 実験2について

図5に内陸暴露と海洋暴露における各種補修工法で部分補修した試験体の暴露1年後の腐食状況を示す。内陸および海洋暴露にほぼ共通して、鉄筋の腐食状態は補修材料により異なる傾向が観察され、マクロセル腐食と思われる腐食が卓越する工法(2-2-B-無③, ④, ⑤, ⑦, ⑧)と、軽微または殆ど認められない工法(2-2-B-無⑥, ⑨)とが存在した。この結果は補修工法(材料)により、マクロセル腐食を軽減できる可能性を示唆するものである。なお、腐食は鉄筋の下半分のかぶり側(断面修復した側)により多く発生していた。

また、樹脂系防錆材を鉄筋に塗布した場合には、鉄筋の

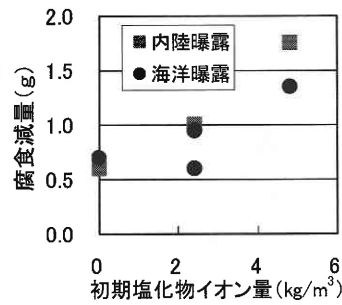


図4 B試験体の塩化物イオン量と腐食減量

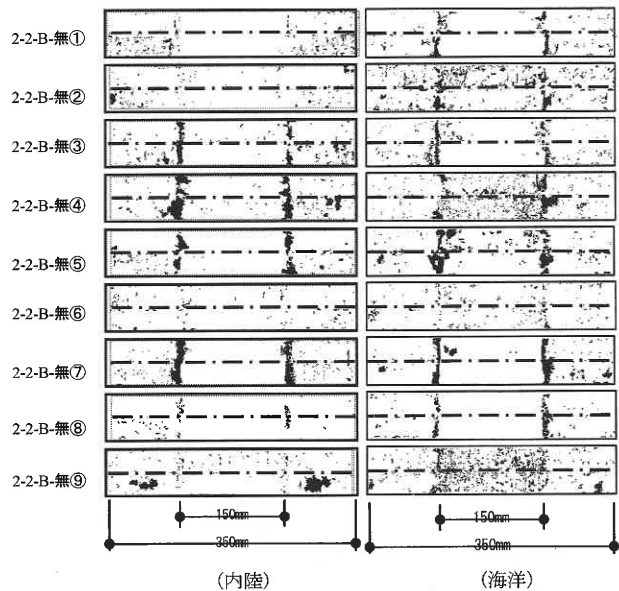


図5 各種工法別の鉄筋の腐食状況

表面に錆と同色の皮膜を形成するものがあり、腐食の確認が難しい場合があった。

図6に内陸暴露および海洋暴露における各種補修工法別の腐食減量を示す。腐食減量の絶対量は少ないが、海洋暴露は内陸暴露よりも腐食減量が少し多く、暴露環境による違いが現れている。なお、内陸および海洋の暴露条件の違いが試験体の鉄筋の腐食に及ぼす影響が小さい理由については、暴露期間が短い、コンクリート側のかぶりが厚いなどが考えられる。

#### 3.2 塩化物イオンの分布

##### (1) 塩分分析

次に実験1のB試験体の塩化物イオンの分布について測定した結果を報告する。図7に内陸暴露と海洋暴露における暴露表面(コンクリート面)からの距離と塩化物イオン量の関係を示す。内陸暴露においては暴露表面からの塩化物の浸透がないため、表面被覆材の有無に関わらず塩化物イオンは初期の混入量をほぼ同じ値を示した。塩化物イオン量は2.4 kg/m³で約0.1%、4.8 kg/m³で約0.2%である。海洋暴露においては表面被覆材の無い試験体(1-B-無および

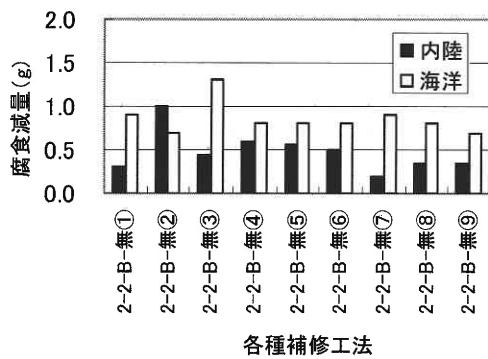


図6 各種工法別の腐食減量

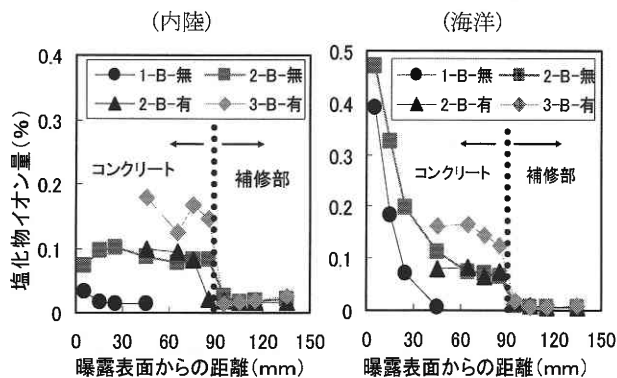
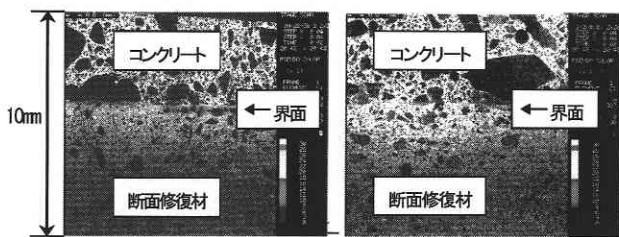


図7 表面からの距離と塩化物イオン量の分布



(1-3-B 内陸) (1-3-B 海洋)

写真1 EPMA塩素の面分析(1-3-B内陸)

び2-B-無)は海洋からの飛沫により暴露1年間で塩化物イオンが約50mm浸透していた。

また、試験体(2-B-無)は初期に塩化物イオンを混入した量だけ、塩化物イオン量が多くなっているが、塩化物イオンの浸透傾向は無混入の場合とほぼ同等であった。

断面修復材に関しては、かぶり側に表面被覆材が塗られているため、かぶり側からの塩化物イオンの浸透は無く、断面修復材中の塩化物イオン量は0.01%以下であった。

しかし、塩化物イオンを混入したコンクリート側の断面修復材は、コンクリートとの境界部で塩化物イオン量が増加する傾向にあり、コンクリート中の塩化物イオンが断面修復材側に移動した可能性を示唆している。なお、内陸と海洋の暴露条件の違いによる、明らかな差は認められなかった。

## (2) EPMA

写真1に内陸暴露と海洋暴露における試験体3-B-有のコンクリートと断面修復材との境界付近のEPMAによる塩素の分析結果の一部を示す。なお、EPMAによる塩素の面分析結果では白色が最も塩素濃度が高いことを示している。内陸暴露では約3mm、海洋暴露では約5mmの塩素が断面修復材内に分布している状況が確認でき、前述の塩化物イオンの分析結果と同様に塩化物イオンが断面修復材側に移動していることが、EPMAの面分析画像としても確認することができた。

## 4. ま と め

部分補修した試験体を1年間、内陸および海洋暴露し、コンクリート中の塩分量、表面被覆の有無、補修工法(材料)を要因として検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 暴露期間1年では、内陸および海洋の暴露条件の違いが試験体の鉄筋の腐食に及ぼす影響は小さい。
- (2) 塩化物イオン量および補修工法(材料)によって鉄筋の発錆状況に差異がある。
- (3) 部分補修の場合、塩化物イオンがない状態においてもマクロセル腐食が進行する。
- (4) コンクリート側から断面修復材側への塩化物イオンの移動現象が確認された。

## 5. 終 わ り に

本稿は暴露1年目の結果であり、試験は現在も継続している。今後、継続調査を行い、試験結果の報告を行う予定である。なお、本研究は、東京大学生産技術研究所と以下に示す産学18団体との共同研究として行っているものである。芝浦工業大学、石川島播磨重工業(株)、(株)エヌエムビー、オリエンタル建設(株)、(株)熊谷組、コニシ(株)、佐藤工業(株)、ショーボンド建設(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋マテリアル(株)、大日本塗料(株)、電気化学工業(株)、東急建設(株)、飛鳥建設(株)、西松建設(株)、日本化成(株)、(株)ブリヂストン、前田建設工業(株)。

(2004年3月11日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 榎島修, 宇野祐一, 元売正美, 松田敏, 弘中義昭, 魚本健人:各種要因が補修した鉄筋コンクリート構造物の劣化に及ぼす影響に関する研究(1)―研究概要一, 生産研究, 第55巻, 第4号, pp.57-60, 2003
- 2) 宇野祐一, 魚本健人, 元売正美, 松田敏:各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1559-1564, 2003
- 3) 星野富夫, 魚本健人, 守屋正裕:海洋暴露環境の評価に関する検討, 土木学会年次学術講演概要集, V-336, pp.732-733, 1997