

報告 補修した構造物の塩分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究

槇島 修^{*1}・伊藤 正憲^{*2}・榊原 弘幸^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：本研究は、塩害で劣化したコンクリート構造物を補修した後、再劣化が起こる原因の究明と対策の提案を目的として実施している。前報¹⁾では、各種の補修条件で作製した試験体の海洋暴露1年時における補修後の鉄筋腐食の進行状況を報告した。本稿は、海洋暴露3年でのコンクリートから断面修復材への塩化物イオンの移動状況および鉄筋腐食との関連について報告する。調査の結果、塩化物イオンの移動は、表面被覆の有無によって異なることが認められた。なお、鉄筋の腐食の進行は、コンクリートに含まれる塩化物イオン量と関係が認められたが、いずれの場合も鉄筋位置の塩化物イオンはほとんど認められなかった。

キーワード：補修、海洋環境下、塩害、再劣化、鉄筋腐食、EPMA

1. はじめに

近年、補修したコンクリート構造物が早期に再劣化する事例が報告されるようになってきた。特に、塩害による再劣化事例の報告が増えている。これは、劣化したコンクリート構造物の補修後の劣化過程の把握が十分でなく、再劣化を考慮した補修対策がとられていないことが原因と考えられる。そのため、補修後の劣化原因を明確にすることは、将来的な費用対効果に優れる補修工法が合理的に選定できるシステムの構築も可能になると考えられる。

そこで本研究では、塩害による補修後の再劣化メカニズムの解明と適正な対策の提案を目的として、各種の検討を実施中である。特に、道路橋床版の再劣化を想定し、コンクリート中の塩化物イオン量、補修範囲、表面被覆の有無等を要因として補修条件の異なる鉄筋コンクリート試験体を作製し、海洋および内陸環境下に長期間の暴露実験を実施している。

本報では、これらの暴露試験の中から海洋暴露試験体を対象とし、暴露期間1年および3年の鉄筋の腐食面積率と腐食減量を調査した結果

と、内部の塩化物イオンの分布状況を EPMA の面分析および塩分分析試験により調査した結果をもとに、各種の補修条件において塩化物イオンの浸透が鉄筋腐食に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) コンクリート

表-1にコンクリートの概要を示す。鉄筋背面のコンクリートに残存する塩化物イオンの影響を評価するために、コンクリートの塩化物イオン量を3水準設定した。

表-1 コンクリートの概要

水セメント比	65%
セメント種別	普通ポルトランドセメント
スランブ	12cm
空気量	4.50%
塩化物イオン量	0,2.4,4.8kg/m ³
圧縮強度	材齢28日:34.3N/mm ²

(2) 試験体形状

図-1に試験体の形状と寸法を示す。試験体は150×150×530mm、鉄筋(SD345,D19)のかぶ

*1 飛島建設(株) 土木設計部 設計第三課 主任(正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所土木研究室 工修 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所関連製品研究グループ 主任研究員(正会員)

*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

りは 30mm とし、模擬はつり部(補修部)の範囲および深さにより 6 タイプ(A～F)作製した。

(3) 補修方法および補修材料

模擬はつり部には、断面修復材として再乳化形のポリマー(ベオバ系)を主成分とするポリマーセメントモルタルを共通材料として吹付け充填した。さらに、補修条件に応じて、柔軟形エポキシ樹脂系の表面被覆材を塗布した。なお、上面被覆または、上下面被覆を行わない試験体は、該当する面以外に被覆を施した。

2.2 補修条件

表-2 に設定した補修条件を示す。本件では、補修条件の違いが補修後の再劣化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としており、はつり深さと範囲、母材コンクリートの塩化物イオン量および表面被覆の有無を要因とした。

補修条件としたはつりの範囲は、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、はつり深さを要因とし、塩化物イオンの再拡散の影響、ならびに鉄筋周囲の塩化物イオンの存在状態が再劣化に及ぼす影響を検討することを目的とした。なお、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。

試験体の記号は、混入塩化物イオン量の水準(0,2.4,4.8kg/m³)－試験体形状(A～F)－上面被覆の有無を示している。

2.3 暴露条件

海洋暴露は、静岡県伊豆半島東海岸の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、常時海水飛沫を受ける極めて厳しい塩害環境である。試験体は、床版を想定してかぶり側が下になるように設置した。

2.4 試験項目および方法

(1) 鉄筋の腐食面積率の測定

腐食面積率は、試験体から取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付け、発錆部分を写し取り、画像解析装置を用いて測定した。

(2) 鉄筋の腐食減量の測定

当初の鉄筋の質量から、解体時の鉄筋の質量

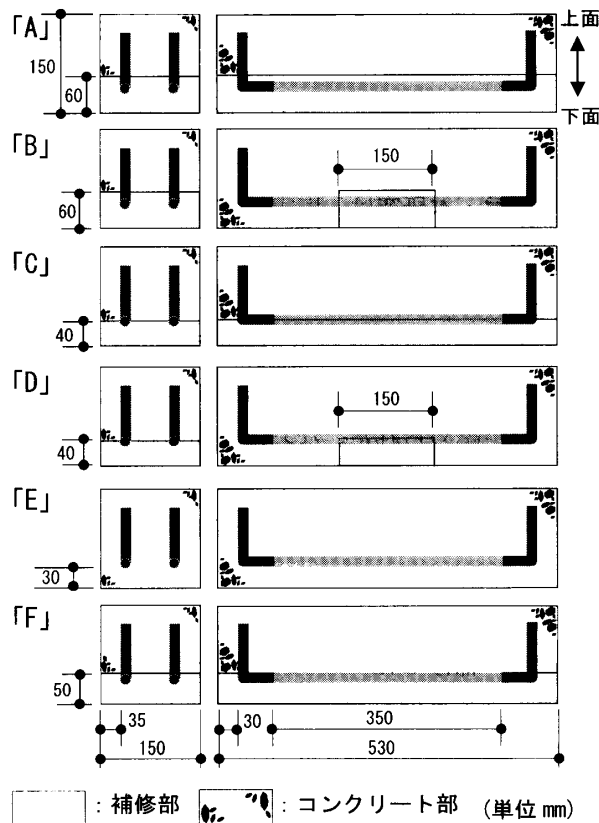


図-1 試験体の形状と寸法

表-2 設定した試験体の補修条件

記号*	はつり		Cl ⁻ 量 (kg/m ³)	表面被覆
	範囲	深さ		
1-A-無	全面	鉄筋裏	0	上面無し
1-B-無	部分			
1-E-無	補修無し			全面塗布
1-E-有				
2-A-無	全面	鉄筋裏	2.4	上面無し
2-B-無	部分			
2-C-無	全面	鉄筋半分		
2-D-無	部分			
2-A-有	全面	鉄筋裏		全面塗布
2-B-有	部分			
2-C-有	全面	鉄筋半分		
2-D-有	部分			
2-F-有	全面	鉄筋表面		
3-A-有	全面	鉄筋裏	4.8	
3-B-有	部分			
3-C-有	全面	鉄筋半分		
3-D-有	部分			
2-A-上下無	全面	鉄筋裏	2.4	上下面 無し
2-B-上下無	部分	鉄筋裏		
2-E-上下無	補修無し			上面無し
2-E-無				
2-E-有				

*: 塩化物イオン量の水準-試験体タイプ-上面被覆の有無

減少を腐食減量とした。錆の除去は、20℃のクエン酸二アンモニウム 10%水溶液に 24 時間浸漬し、ブラシを用いて行った。なお、黒皮の減量分については、コンクリートに埋め込まずに保管した鉄筋を同一処理して減量分を差し引いた。

(3) 塩化物イオン含有量の測定

JCI-SC4 で定める塩分分析法に従って全塩分を測定した。図-2に対象とした試料の採取位置を示す。分析は、2-B-無、2-B-有、1-A-無、3-B-有、2-E-上下無、2-A-上下無を対象とした。

(4) 塩化物イオン浸透状況の分析

図-2で示した2本の鉄筋間の中央部分を試料とし、塩化物イオンの分布状況をEPMA面分析によって調べた。

3. 結果および考察

3.1 塩化物イオンの移動

(1) 塩化物イオン含有量

図-3に塩化物イオン量の測定結果を示す。図-3に示すように、上面の表面被覆の無い、1-A-無と2-B-無では、コンクリート表面から塩化物イオンの浸透が見られる。コンクリートの塩化物イオン量 0kg/m^3 の場合(1-A-無)では、外部から侵入した塩化物イオンが端面から50mmまで達している。図-4にコンクリートと断面修復材の境界部の拡大図を示す。2-B-無、2-B-有、3-B-有では、境界部において、コンクリート側の塩化物イオン量の低下と断面修復材側の塩化物イオン量の増加が認められ、材料間で塩化物イオンの移動が確認された。また、2年間の暴露期間の違いによって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の増加傾向は認められるが、その程度はわずかである。さらに、上下面に被覆のない2-A-上下無しでは、外部から断面修復材への塩化物イオンの浸透が顕著であり、母材コンクリートからの塩化物イオンの移動に比べて大きい。

今回の測定結果では、いずれの場合も断面修復材中に存在している鉄筋位置での塩化物イオンの増加は認められない。

(2) 塩化物イオン浸透状況

EPMAによる面分析結果を図-5～8に示す。図-5に示すように、2-B-無では、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は、暴露期間1年では3mm、3年では5mmとなり、

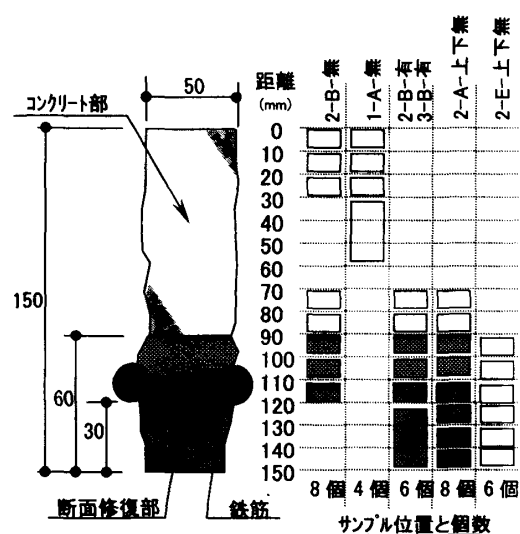


図-2 試料の採取位置

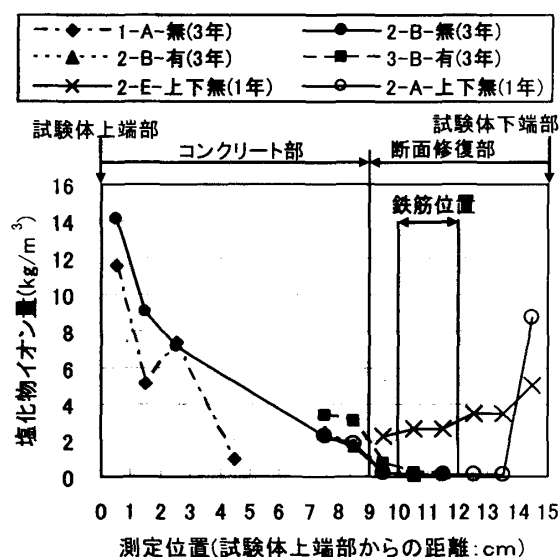


図-3 塩化物イオン量測定結果

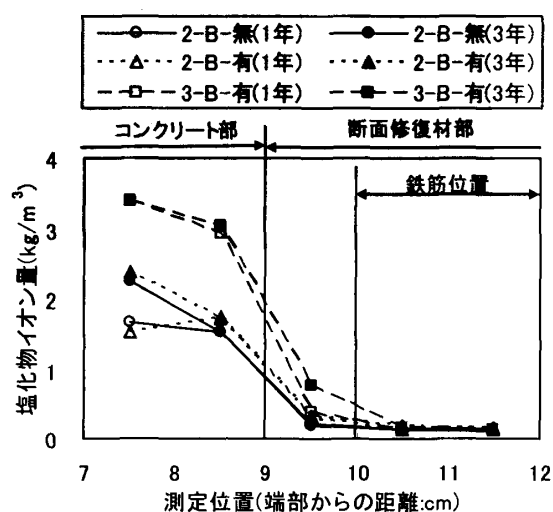


図-4 境界部の塩化物イオン量

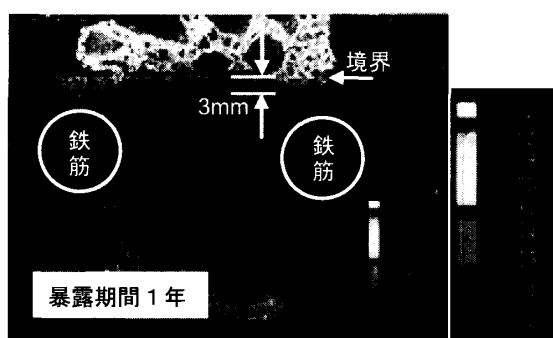


図-5 EPMA 分析結果 (2-B-無 境界部)

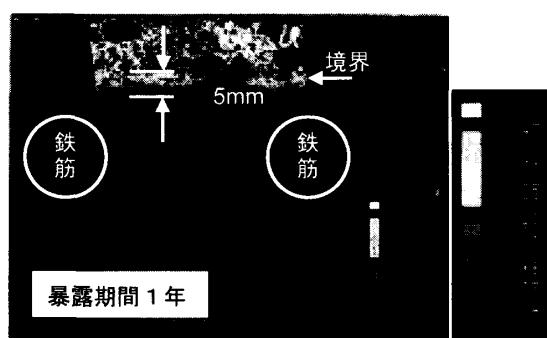


図-7 EPMA 分析結果 (3-B-有 境界部)

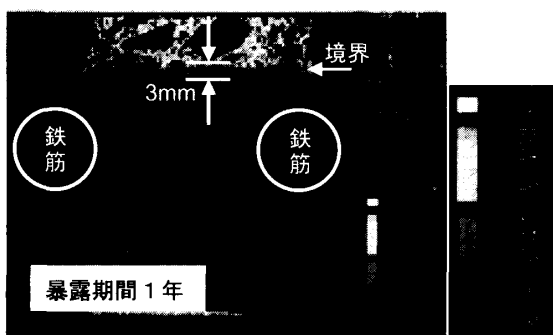
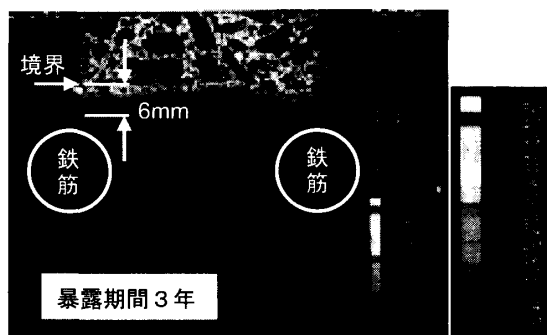
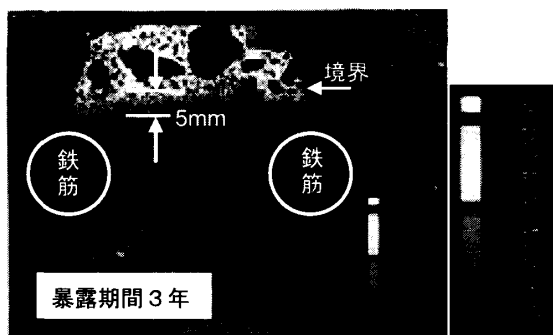


図-6 EPMA 分析結果 (2-B-有 境界部)

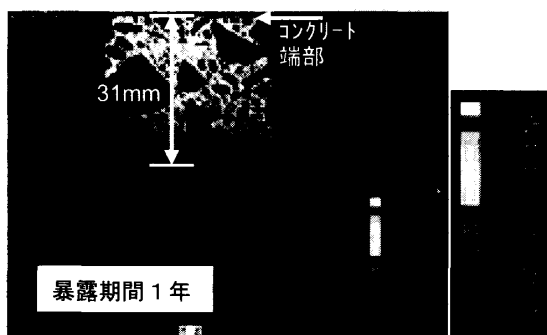
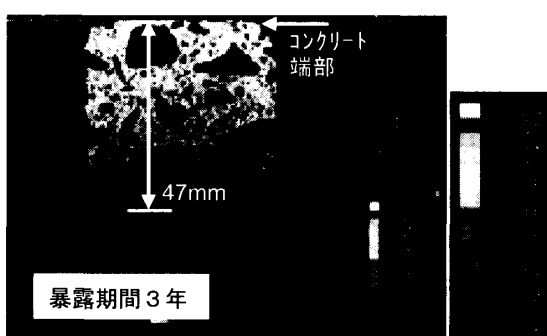
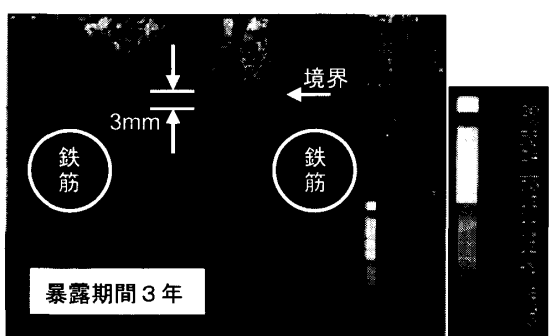


図-8 EPMA 分析結果 (1-A-無 コンクリート端部)



塩化物イオンの移動状況が確認された。なお、図-6, 7 に示すように、全面に被覆の施された 2-B-有では、暴露期間 1 年および 3 年で 3mm と変化が見られず、3-B-有では、暴露期間 1 年で 5mm, 3 年で 6mm となっており、上面の被覆無しに比べて塩化物イオンの移動は少ない。この

ように、上面の被覆の有無は、上端部から水分の移動に差異が生じるため、内在塩化物イオンの移動にも影響しているものと考えられる。また、図-8 に示すように、外部からコンクリート部への塩化物イオンの浸透は、暴露期間 1 年で 31mm, 3 年で、47mm に達している。

表－３ 腐食減量および腐食面積率測定結果

記 号	腐食減量(g)		腐食面積率(%)	
	暴露 1 年	暴露 3 年	暴露 1 年	暴露 3 年
1-A-無	0.2	0.6	0.4	3.9
1-B-無	0.6	0.0	0.8	4.0
1-E-無	0.0	0.4	0.0	0.1
1-E-有	0.5	0.5	0.1	0.8
2-A-無	0.3	1.0	0.4	17.3
2-B-無	1.0	1.2	2.2	17.6
2-C-無	0.1	1.5	3.2	5.6
2-D-無	0.8	1.0	1.1	14.2
2-A-有	0.9	0.8	0.2	6.5
2-B-有	1.0	1.0	3.3	14.1
2-C-有	0.0	1.0	0.8	0.8
2-D-有	0.0	0.8	0.6	8.0
2-F-有	0.5	1.1	3.6	11.6
3-A-有	0.8	1.2	1.5	21.6
3-B-有	1.7	1.9	2.7	37.2
3-C-有	0.9	1.0	4.8	24.9
3-D-有	1.3	1.8	3.2	78.5
2-A-上下無	0.3	—	3.8	—
2-B-上下無	0.7	—	11.1	—
2-E-上下無	2.6	—	28.6	—
2-E-無	0.0	—	1.5	—
2-E-有	0.0	—	8.4	—

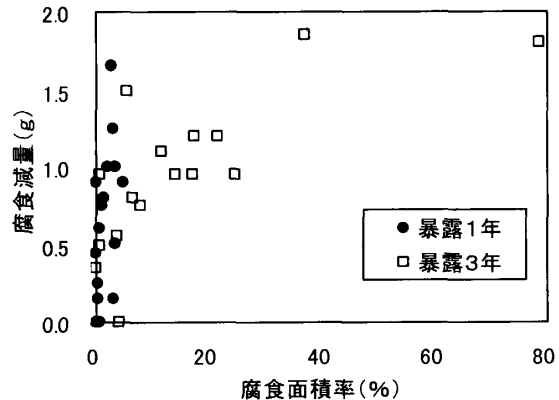
本件のように、材料間で生じる局所的な塩化物イオンの移動を評価する場合には、塩化物イオン含有量の分析に比べて EPMA による面分析の有効性が認められる。

3.2 鉄筋の腐食

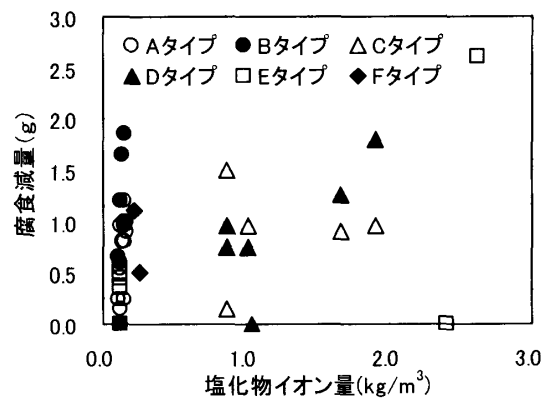
表－３に鉄筋の腐食減量および腐食面積率の測定結果を示す。また、腐食面積率と腐食減量の関係を図－９に示す。図－９に示すように、暴露期間 1 年から 3 年の経過によって、腐食減量および腐食面積率の増加が見られ、腐食の進行が認められる。暴露期間 1 年では、腐食面積率の変化は少なく評価が難しかったが、材齢 3 年では、両者に相関が見られるようになっている。ただし、腐食減量の多いもの(3-B-有：1.9g)でも腐食減量率では、0.14%に過ぎず、腐食減量はわずかである。

3.3 塩化物イオンの移動と鉄筋腐食

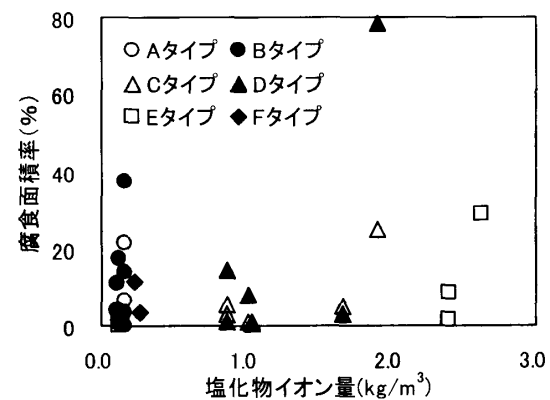
図－１０に鉄筋位置の塩化物イオン量と腐食減量の関係を、図－１１に鉄筋位置の塩化物イオン量と腐食面積率の関係を示す。図－１０に示すように、いずれのタイプも塩化物イオン量の増加に伴い腐食が進行している傾向が見られる。ただし、補修範囲を鉄筋の背面 10mm まで行ったタイプ A, B では、鉄筋位置の塩化物イオ



図－９ 腐食面積率と腐食減量の関係



図－１０ 塩化物イオン量と腐食減量の関係



図－１１ 塩化物イオン量と腐食面積率の関係

ン量が 0.11～0.16kg/m³ とわずかであるにもかかわらず、腐食が進んでいる。また、鉄筋の中央まで補修したタイプ C, D では、塩化物イオン量は比較的多いがタイプ A, B に比べて腐食の進行は少ない。また、鉄筋背面まで補修したタイプ F は、A, B と C, D の中間に位置している。このように、補修形状によって鉄筋の腐食に差異が生じており、理想的な補修と考えられたタイプ A

でも鉄筋位置での塩化物イオン量が少ないにも関わらず腐食の進行が確認された。

図-12に鉄筋の腐食状況を示す。図-12に示すように、鉄筋位置における塩化物イオン量の少ないタイプ A(2-A-無,2-A-有,3-A-有)では、反かぶり側に腐食がみられる。また、同様の塩化物イオン量で、部分補修を施したタイプ B(2-B-無,2-B-有,3-B-有)では、断面修復材内で同様の傾向が見られるが、さらに、鉄筋がコンクリートと断面修復材をまたぐ部位では、マクロセル腐食と見られる腐食も確認できる。

なお、先のように断面修復材中に存在する鉄筋部位の塩化物イオン量はほとんど確認できなかったが、2-A-有と3-A-有および2-B-有と3-B-有を比較すると、コンクリート中の塩化物イオン量が多いほど腐食量が多くなっている。このことは、塩化物イオン量の違いを起因とした電気化学的な腐食メカニズムが生じている可能性も考えられる。

今後、塩化物イオンの移動と鉄筋腐食の進展を継続調査し、原因を特定していきたい。

4. まとめ

補修条件の異なる試験体を3年間海洋環境下に暴露し、塩化物イオンの浸透と鉄筋腐食に関して以下のことが確認された。

- (1)試験体内部の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、表面被覆材の有無によって移動量に差異が生じることが認められた。
- (2)塩化物イオンの移動は、外部から表面被覆のない断面修復材への移動量に比べて、母材コンクリートからの移動量は少ない。
- (3)鉄筋位置の塩化物イオン量の増加に伴って鉄筋腐食の増加がみられるが、補修形態によってその程度は異なる。
- (4)断面修復材内部の鉄筋腐食は、母材コンクリートの塩化物イオン量に影響を受けるが、鉄筋位置の塩化物イオン量との関係は明確にみられない。

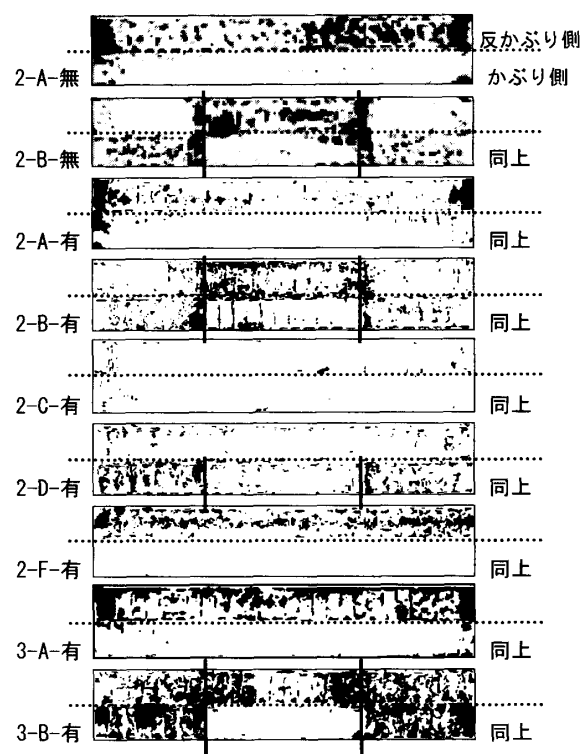


図-12 鉄筋腐食状況（暴露3年）

おわりに

本研究は、暴露実験の期間を5年間としており、暴露実験の継続調査により、再劣化のメカニズムについての検討を進める予定である。

なお、本研究は、東京大学生産技術研究所 魚本研究室と以下に示す産学17団体(東急建設㈱, ショーボンド建設㈱, オリエンタル建設㈱, 芝浦工業大学, 太平洋マテリアル㈱, 住友大阪セメント㈱, 大日本塗料㈱, 石川島播磨重工業㈱, 西松建設㈱, 飛島建設㈱, 日本化成㈱, 佐藤工業㈱, ブリヂストン㈱, 熊谷組㈱, ㈱エヌエムビー, 電気化学工業㈱, 前田建設工業㈱)との共同研究「劣化したコンクリート構造物の補修工法に関する研究」として開始されているものである。

参考文献

- 1)伊藤正憲, 宇野祐一, 弘中義昭, 魚本健人: 補修条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1701-1706, 2004