

## 報告 補修条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究

伊藤 正憲<sup>\*1</sup>・宇野 祐一<sup>\*2</sup>・弘中 義昭<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

**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5年計画で行っている。前報<sup>1)</sup>では、研究背景や目的、全体計画、および海洋曝露1年目の鉄筋腐食状況について、腐食面積率のデータを基に考察を加えた。本稿は、その後、腐食減量や塩分分析の結果が出たので、前報の結果と関連づけて検討を行った結果をまとめたものである。その結果、内在塩化物量の大小が腐食量と関連が深いこと、塩分やEPMAの分析からコンクリート側から断面修復材側への塩分の移動現象があり、酸素の供給とともに腐食に影響していることなどが明らかとなった。

**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きている。これは一度劣化したコンクリート構造物を補修した後、どのような現象が起こっているのかを正確に把握してないことが原因と考えられ、これを解決することにより将来的には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、特に、道路橋床版の塩害による再劣化を想定し、コンクリート中の塩分量、補修範囲と深さ、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、実際の海洋環境下や比較として内陸環境下に長期間曝露している。

本報では、これらの曝露試験の中から海洋曝露試験体を対象とし、1年後に試験体から取り出した鉄筋の腐食面積率と腐食減量を調査した。さらに、内部の塩分の分布状況をEPMAの面分

析により調査し、条件を変えた場合の補修後の鉄筋腐食に影響する要因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) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの使用材料等を示す。

表-1 コンクリートの使用材料等

水セメント比	W/C65%
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>
スラブ	12.0cm
空気量	4.50%
圧縮強度	材齢28日:34.3N/mm <sup>2</sup> 、材齢1年:47.5N/mm <sup>2</sup>

##### (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SD345、D19を使用し、加工時の影響を考慮して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質量を測定して基準質量とした。

\*1 東急建設(株) 技術研究所土木研究室 工修 (正会員)

\*2 ショーボンド建設(株) 営業本部 部長 工博 (正会員)

\*3 佐藤工業(株) 中央研究所 所長 (正会員)

\*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

### (3) 対象とした試験体

図-1に試験体の形状と寸法を示す。試験体は150×150×530mm、鉄筋のかぶり厚は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)のものを作製した。

なお、コンクリート試験体の打設は、模擬はつり部(補修部)に発泡スチロールを設置し、また、鉄筋は発泡スチロールやスペーサー等を使用して所定の位置に固定して行った。

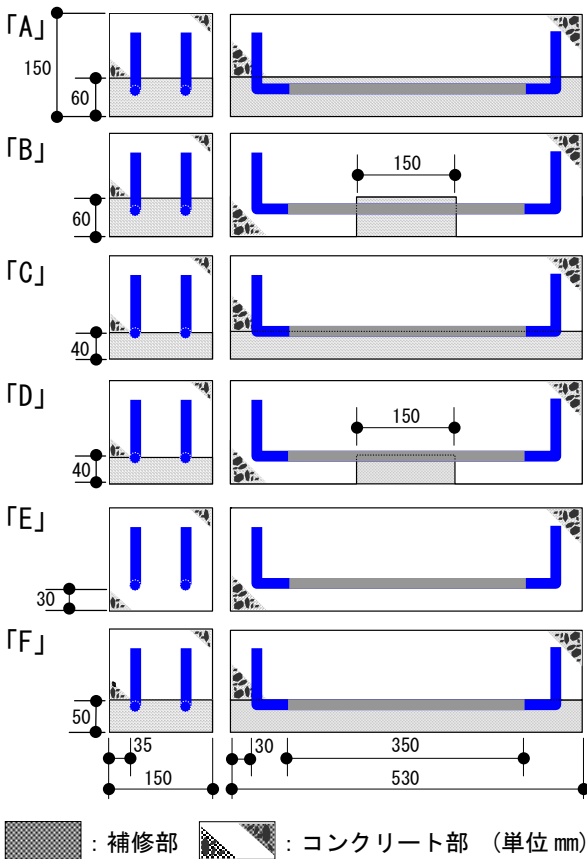


図-1 試験体の形状と寸法

### (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タンスを取り除き、圧搾空気です埃を除去した。

その後、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。さらに、試験体は所定期間養生後、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320 $\mu$ m)、柔軟型ウレタン樹脂上塗り材を最終的に1層(乾燥膜厚30 $\mu$ m)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。

表-2に断面修復材の主な基本物性値を示す。

表-2 断面修復材の基本物性

項目	材齢	試験結果
曲げ強度	7日	8.78N/mm <sup>2</sup>
	28日	9.75N/mm <sup>2</sup>
圧縮強度	7日	48.3N/mm <sup>2</sup>
	28日	59.3N/mm <sup>2</sup>
静弾性係数	28日	22.8kN/mm <sup>2</sup>

### 2.2 補修条件

表-3に設定した補修条件を示す。本実験では、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、主な要因ははつり深さと範囲、母材コンクリート側に練混ぜ時に混入した塩化物イオン量である。

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。鉄筋に対するはつり深さの要因は、塩化物イオンの再拡散の影響、ならびに鉄筋周囲の塩分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に入れ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、混入塩分量の水準(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(A~F)-上面被覆の有無を示している。

表-3 設定した試験体の補修条件

記号*	はつり		Cl量 (kg/m <sup>3</sup> )	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		全面塗布
2-D-無	部分			
2-A-有	全面	鉄筋裏		
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	全面塗布
3-B-有	部分			
3-C-有	全面	鉄筋半分		
3-D-有	部分			

\*:塩分量の水準-試験体タイプ-上面被覆の有無

### 2.3 曝露条件

海洋曝露は、静岡県伊豆半島東海岸（伊豆海洋公園内：静岡県伊東市富戸 841-1）の曝露場において実施した。この海洋曝露場は波打ち際に設置されており、ここで曝露される試験体は、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に常時海水飛沫を受ける極めて厳しい環境である(写真-1)。なお、この環境条件を把握するため、曝露場より約 10m 内陸寄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 400～800Clmg/dm<sup>2</sup>であった。また、試験体の曝露は、実際の床版を想定してかぶり側が下になるように設置した。



写真-1 海洋曝露試験場の状況

### 2.4 試験項目および方法

#### (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、曝露後 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。

#### (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℃ 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曝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、試験体を解体し、2 本の鉄筋の間の長さ 50mm の部分を採取し、かぶりから上面までのサンプルを切り出して分析した。

#### (4) EPMA 分析

図-2 で示した 2 本の鉄筋間の中央部分からサンプルを採取し、塩分の分布状況を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。

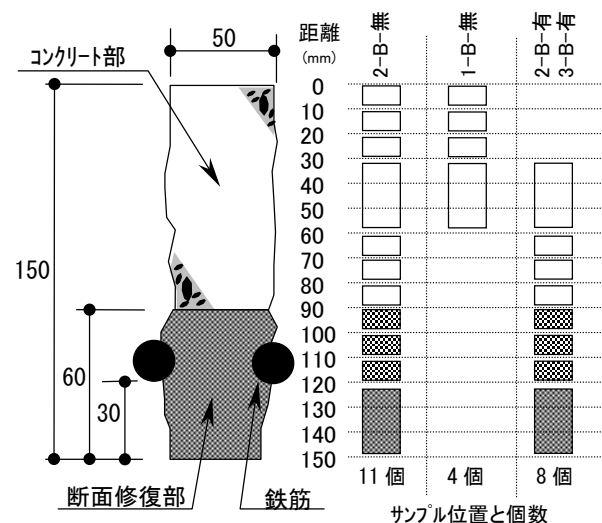


図-2 塩分測定サンプルの採取方法

### 3. 結果および考察

#### 3.1 鉄筋の腐食状況

##### (1) 全面補修した場合(A, C, F 試験体)

図-3に全面的に補修したA, C, F試験体の鉄筋腐食状況を、図-4に初期塩分量  $2.4\text{kg/m}^3$ 、被覆有りの条件における試験体タイプ別の腐食面積率を示す。なお、図-3では取り出した2本の鉄筋のうち代表的な1本の状況を示し、一点鎖線より上半分が反かぶり側、下半分がかぶり側を表している。ここで、E試験体は腐食がほとんど認められなかった。

図-3, 4よりA, C, F試験体では、いずれも反かぶり側で腐食が卓越して発生していた。A試験体の場合、鉄筋裏10mmまで完全にはつり取って補修することを想定しており、比較的組織が緻密と考えられる断面修復材で覆われている。従って、この結果は内在塩分量が多い場合には、従来適切と考えられていた補修を行っても期待される補修効果が発揮できない場合があることを示している。

また、上面被覆の影響は、コンクリートに塩化物イオンを  $2.4\text{kg/m}^3$  混入した試験体では、上面を被覆することによって腐食が抑制されていた(図-3中の②と③, ⑤と⑥)。これは、上面被覆が酸素等の腐食因子の浸入を抑制したことによるものと考えられる。しかし、コンクリートに  $4.8\text{kg/m}^3$  程度の塩分量が内在する場合には、そのことよりも塩分の影響が卓越し、腐食が進行したものと考えられる(④, ⑦)。

一方、F試験体は、はつり深さを除く条件が同じA, C試験体と比較して腐食面積率が大きくなっている。ここで、F試験体は、図-1に示すように鉄筋背面に沿って模擬はつりの界面が存在していることから、試験体作製時に発生した鉄筋の錆を完全に除去できていなかったこと、および補修材料が完全に充填されなかったことなどが影響したものと考えられる。実際の補修工事においてもF試験体のような条件での施工は避けるべきであると考えられる。

さらに、図-5に初期に混入した塩分量と腐

食減量の関係を示すが、腐食面積率の結果と同じく、内在塩分量が多くなるに従い、腐食減量は大きくなり、明らかにコンクリートの内在塩分量が鉄筋腐食に影響していると考えられる。

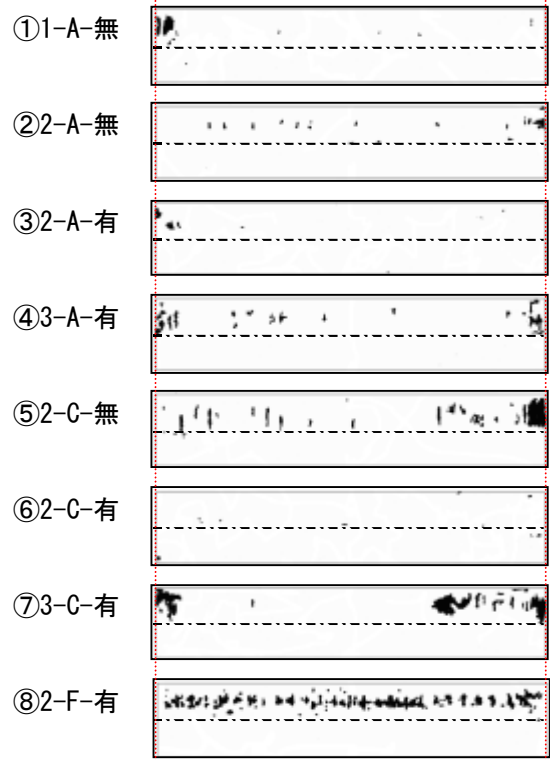


図-3 鉄筋腐食の状況(全面補修)

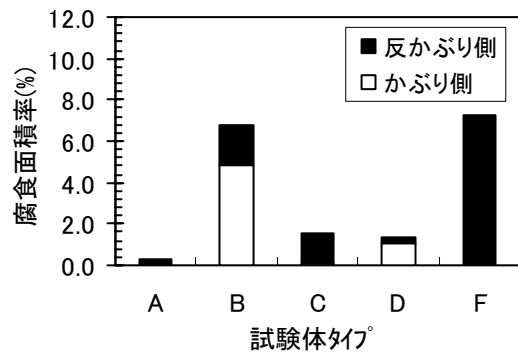


図-4 補修条件別の腐食面積率

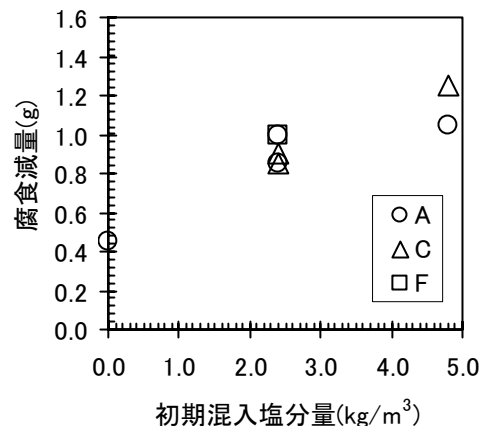


図-5 初期塩分量と腐食減量の関係

## (2) 部分補修した場合(B, D 試験体)

図-6に部分的に補修した B, D 試験体の鉄筋の腐食状況を示す。B 試験体は鉄筋裏 10mm まで、D 試験体は鉄筋半分まではつった状況を想定している。

補修を部分的に行った場合、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考えられる腐食が発生していた。B 試験体では、境界部の鉄筋のほぼ全周にわたり腐食が発生し、D 試験体では、鉄筋の半分位置にコンクリートと断面修復材の境界があるためかぶり側のコンクリート部により多くの腐食が発生していた。このように補修時の処理方法によって腐食の発生状況が異なっていた。なお、マクロセルによる鉄筋の腐食は練混ぜ時に塩分を混入していない試験体(9)でも観察され、一般的に言われているように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も確認された。

図-7に B, D 試験体について初期混入塩分量と腐食減量の関係を示す。部分補修を想定した試験体についても全面補修した場合と同様に初

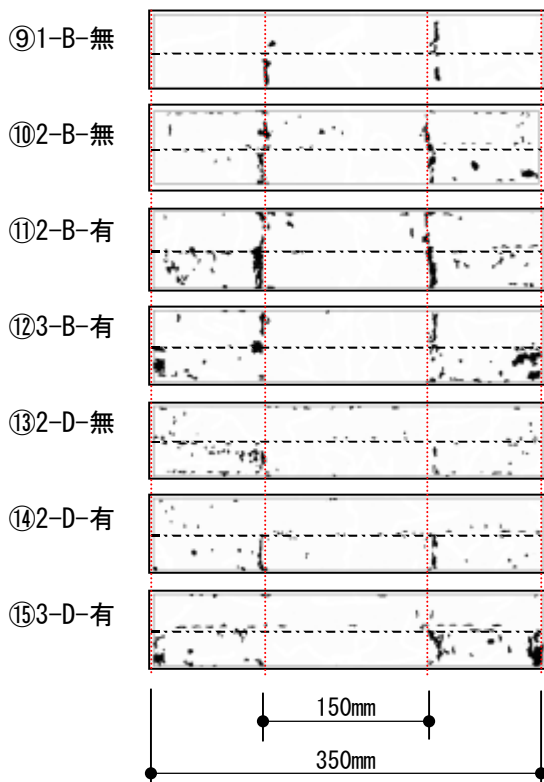


図-6 鉄筋腐食の状況(部分補修)

期に混入した塩分量が多くなるに従い鉄筋の腐食減量は多くなる傾向にあり、補修しなかった部分の腐食とともにマクロセル腐食に対しても内在する塩分がなんらかの影響を及ぼしているものと考えられた。

なお、上面被覆の有無については、海洋曝露1年までの部分補修試験体では顕著な差は見られなかった。

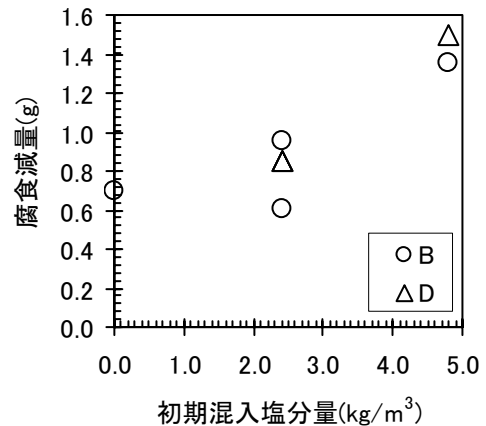


図-7 初期塩分量と腐食減量の関係

## 3.2 塩分分析と EPMA 分析

図-8に曝露表面からの距離と JCI-SC4 に準拠して測定した塩化物イオン量の関係を示す。

海洋曝露1年間で表面被覆材が無く、塩分を混入しなかった試験体(1-B-無)でコンクリート側から塩化物イオンが約 50mm 浸透していた。また、初期に塩分を 2.4kg/m³ 混入した試験体(2-B-無)においても混入した分だけ多くなっているが、塩化物イオンの浸透傾向は同等であった。

ここで、コンクリートの単位容積質量を 2.35t/m³ と仮定した場合、曝露面付近の塩化物イオン量は 1-B-無で 9.2kg, 2-B-無で 11.1kg となる。

図-9は図-8の結果をコンクリートと断面修復材の境界付近について拡大して示したものである。ここで、かぶり側は表面被覆材が塗られているため塩分の浸透は無いので、測定された断面修復材中心付近(105mm)の塩化物イオン量は 0.01%以下であった。

しかし、これより 10mm 境界面寄り(95mm)の塩化物イオン量は若干多くなる傾向にあった。これはコンクリート中の塩分が断面修復材側へ移

動したことを示していると考えられ、前述したように鉄筋の腐食にこの塩分の移動現象が何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられた。

写真-2, 3にコンクリートと断面修復材との境界付近の EPMA の塩分分析結果の一部を示す。なお、EPMA の面分析結果では白色が最も塩分濃度が高いことを示している。

2枚の写真に示すように2-B-有で1mm程度、3-B-有で5mm程度と内在塩分量が多くなるに従いより深く塩分が断面修復材内に分布している状況が確認でき、塩分分析と同じ現象をEPMAの面分析画像としても確認することができた。

なお、この塩分の移動現象については、今後も長期の曝露試験を継続し、詳細に検討する予定である。

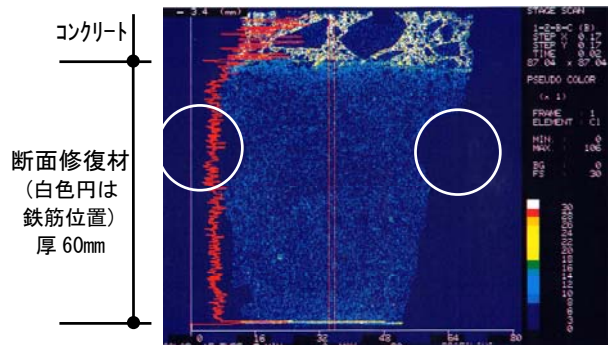


写真-2 EPMA 面分析結果 (2-B-有)

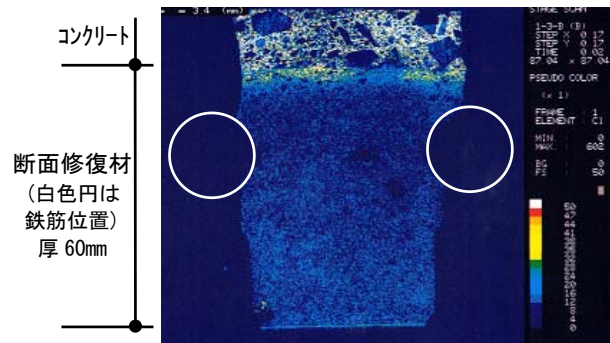


写真-3 EPMA 面分析結果 (3-B-有)

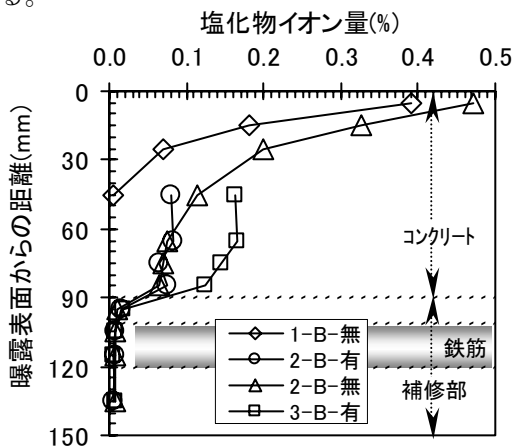


図-8 表面からの距離と塩化物イオン量の関係

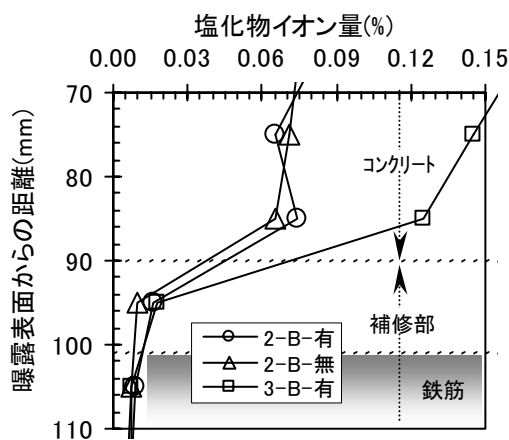


図-9 表面からの距離と塩化物イオン量の関係 (境界部分の拡大図)

#### 4. まとめ

補修条件の異なる試験体を1年間海洋環境下に曝露し、鉄筋の腐食に影響する要因について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) コンクリート側から断面修復材側への塩分の移動現象が確認できた。
- (2) 全面補修の場合、反かぶり側で腐食が卓越していた。これは内在塩分とその移動現象、および酸素の供給等によるものと考えられた。
- (3) 全面補修と部分補修では腐食形態が異なり、部分補修の場合、塩分を混入していなくてもマクロセルによる腐食が進行していた。

#### 謝辞

本研究は、東京大学生産技術研究所における共同研究「劣化したコンクリート構造物の補修工法に関する共同研究」の成果であり、関係各位のご協力に深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 宇野祐一ほか: 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報告集, Vol.25, No.1, pp.1559-1564, 2003