

## 報告 曝露条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究

森本 丈太郎<sup>\*1</sup>・元売 正美<sup>\*2</sup>・槇島 修<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その対策を目的として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。本稿では，海洋および内陸の曝露条件の違いが試験体の鉄筋の腐食状況等に及ぼす影響について報告する。曝露期間1年においては，内陸および海洋の曝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く，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ことが明らかとなった。

キーワード：塩害，補修，曝露条件，再劣化，塩化物イオン量，鉄筋腐食，EPMA

### 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っておく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，部分的に断面修復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，海洋曝露および内陸曝露の試験を行った。

本報では，曝露期間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

塩害の補修工法は多種多様な工法が提案されているが，本研究では，断面修復と表面被覆による補修工法に限定して検討を行っている。

表 - 1 に実験の目的，再劣化の要因，補修工法および曝露条件を示す。実験は，異なる補修条件や補修工法（材料）を組合せた試験体を海洋環境下ならびに内陸環境下に曝露し，定期的に調査を実施して行うものとし，実験1では，代表的な補修工法1工法を選定して補修時の条件を変化させた試験体を作製し，実験2では，補修時の条件を1つに固定して種々の補修工法を施した試験体を作製した。

表 - 1 実験の目的と再劣化要因

| 実験    | 1                                                                                      | 2                        |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 目的    | 補修条件の違いが再劣化に及ぼす影響の把握                                                                   | 補修工法(材料)の違いが再劣化に及ぼす影響の把握 |
| 再劣化要因 | 塩化物イオンの再拡散<br>鉄筋周囲の残存塩化物イオン量<br>部分的断面修復によるマクロセル腐食<br>床版上面からの腐食因子の浸入<br>補修部分からの腐食因子の再浸入 | 補修工法(材料)の性能              |
| 暴露場所  | 海洋      内陸                                                                             | 海洋      内陸               |

\*1 電気化学工業（株）特殊混和材事業部特混技術課 技術課長 博士(工学)（正会員）

\*2 （株）エムエヌビー 中央研究所CS開発グループ 主任研究員

\*3 飛島建設（株）土木設計部設計第三課 主任（正会員）

\*4 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教授 工博（正会員）

## 2.1 曝露条件

海洋曝露実験は、静岡県伊豆東海岸（伊豆海洋公園内：静岡県伊東市富戸 841-1）に設置した曝露場において実施した(図 - 1)。この海洋曝露場は波打ち際に設置されており、ここで曝露されている試験体は、満潮時には波で洗われ、

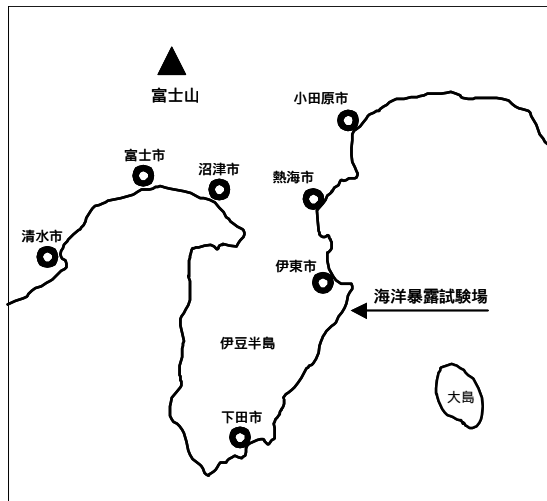


図 - 1 海洋曝露実験場の位置



写真-1 海洋曝露実験場



写真-2 内陸曝露実験場

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(写真 - 1)。この曝露場の環境条件を把握するために、曝露場より約 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  $400 \sim 800 \text{ Clmg/dm}^2$  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  $7 \sim 24$  であり、年間の平均気温は  $18.4$  であった。

内陸曝露実験は、東京大学生産技術研究所・千葉実験所（千葉市稲毛区弥生町 1-8）構内の一角に設置した曝露場において実施した(写真 - 2)。この内陸曝露場は、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  $6 \sim 25$  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

表 - 2 に試験体のコンクリートに使用した材料とコンクリートの物性について示す。

表 - 2 コンクリートの使用材料と物性

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| セメント    | 普通ポルトランドセメント( $3.16 \text{ g/cm}^3$ )                            |
| 細骨材     | 大井川産陸砂( $2.58 \text{ g/cm}^3$ )                                  |
| 粗骨材     | 青梅産硬質砂岩碎石( $G_{\text{max}} 20 \text{ mm}, 2.64 \text{ g/cm}^3$ ) |
| 混和剤     | AE減水剤標準型, AE剤                                                    |
| 塩化物イオン量 | $0, 2.4, 4.8 \text{ kg/m}^3$                                     |
| スランブ    | $12.0 \text{ cm}$                                                |
| 空気量     | $4.5\%$                                                          |
| 水セメント比  | $65\%$                                                           |
| 圧縮強度    | 材齢28日: $34.7 \text{ N/mm}^2$ , 材齢1年: $43.9 \text{ N/mm}^2$       |

### (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、折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。エポキシ樹脂塗装後、各鉄筋の質量を測定して基準質量とした。

### (3) 試験体

図 - 2 に試験体の形状と寸法を示す。試験体は  $150 \times 150 \times 530 \text{ mm}$  の短形梁とし、鉄筋かぶり が  $30 \text{ mm}$  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  $150 \text{ mm}$ 、深さ  $60 \text{ mm}$  の模擬はつ

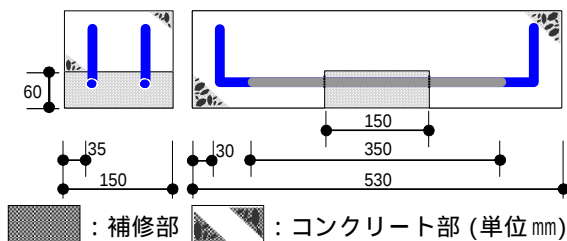


図 - 2 試験体の形状と寸法

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，鉄筋は発泡スチロール，スペーサー，水系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ランスを取り除き，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 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。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 - 3 に試験体の補修条件，表 - 4 に各種補修工法で使用している防錆材，断面修復材および表面被覆材の種類を示す。表 - 3 の実験1では鉄筋裏 10mm まで部分的に補修した試験体に対して，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。

表 - 3 試験体の補修条件

| 実験 | 番号*          | Cl <sup>-</sup> 量<br>(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      |                                           |     |     |      |
| 2  | 2-2-B-無<br>～ | 2.4                                       |     |     | 上面無し |

\*実験-塩分量-タイプ-上面被覆の有無

表 - 4 各種補修工法(材料)

| No. | 防錆材                        | 断面修復材              | 表面被覆材           |
|-----|----------------------------|--------------------|-----------------|
| 1   | PCP<br>(亜硝酸塩)              | PCM(SBR)           | アクリル樹脂          |
| 2   | PCP<br>(亜硝酸塩)              | PCM(SBR)<br>(亜硝酸塩) | 柔軟型<br>PCM      |
| 3   | PCP<br>(亜硝酸塩)              | PCM(Veo)           | ウレタン樹脂          |
| 4   | PCP<br>(亜硝酸塩)              | PCM(SBR)           | 柔軟型<br>エポキシ樹脂   |
| 5   | エポキシ樹脂                     | エポキシ樹脂パテ           | 柔軟型<br>エポキシ樹脂   |
| 6   | 亜硝酸塩 Li 塗布<br>+PCP(亜硝酸 Li) | PCM(SBR)<br>(亜硝酸塩) | 柔軟型<br>PCM      |
| 7   | 錆転換型                       | PCM(Acr)           | 柔軟型<br>PCM      |
| 8   | フタル酸樹脂<br>(亜硝酸塩)           | PCM(SBR)           | ウレタン樹脂          |
| 9   | PCP<br>(亜硝酸塩)              | PCM(Veo)           | 柔軟型<br>アクリルウレタン |

\*PCP:ポリマーセメントペースト

\*PCM(SBR): SBR系ポリマーセメントモルタル

\*PCM(Veo): ベオバ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

## 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、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-3に対象とした分析試料を示す。分析対象は1-B-無、2-B-無、2-B-有、3-B-有であり、曝露1年後に試験体を解体し、2本の鉄筋の間の長さ50mmの部分をかぶりから上面まで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分析試料を採取し、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。

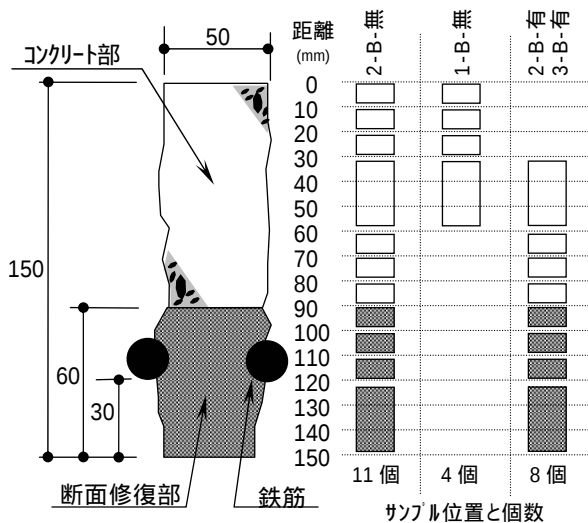


図-3 塩分測定試料の採取方法

## 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-4に内陸曝露、図-5に海洋曝露における部分補修した試験体の曝露1年後の腐食状況を示す。なお、図-4,5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反かぶり側、下半分がかぶり側を表している。

腐食は鉄筋の反かぶり側よりかぶり側で多く発生する傾向にあり、部分補修した試験体の場合、既設コンクリートと断面修復材の境界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

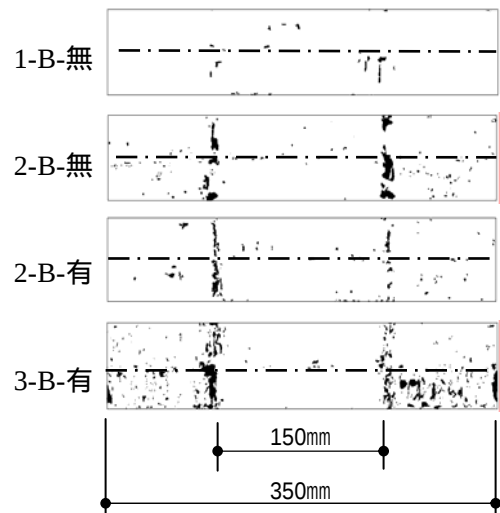


図-4 部分補修した鉄筋の腐食状況(内陸)

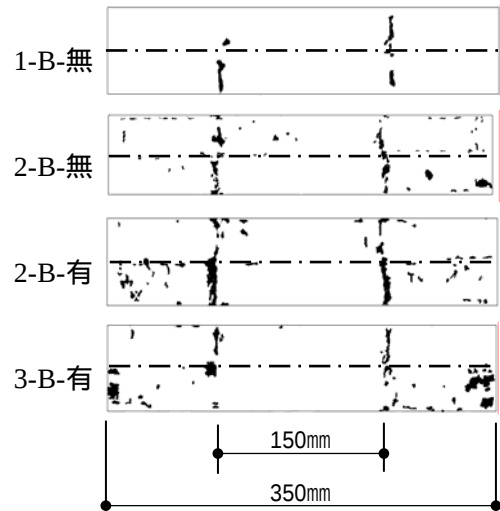


図-5 部分補修した鉄筋の腐食状況(海洋)

オンを混入していない試験体 と 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 - 6 に試験体についての初期混入塩化物イオン量と腐食減少量の関係を示す。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、内陸と海洋の曝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 - 7 に内陸曝露，図— 8 に海洋曝露における各種補修工法で部分補修した試験体の曝露 1 年後の腐食状況を示す。内陸および海洋曝露にほぼ共通して，腐食は鉄筋の反かぶり側よりかぶり側で多く発生する傾向にあり，腐食状態は補修材料により異なる傾向が観察された。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 ， ， ， )と，軽微または殆ど認められない工法(2-2-B-無 ， ， )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。内陸と海洋の曝露条件の違いについては，鉄筋の腐食減量が海洋では内陸よりやや多い傾向にあった。なお，樹脂系防錆材(2-2-B-無 ， ， )を鉄筋に塗布した場合には，鉄筋の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。

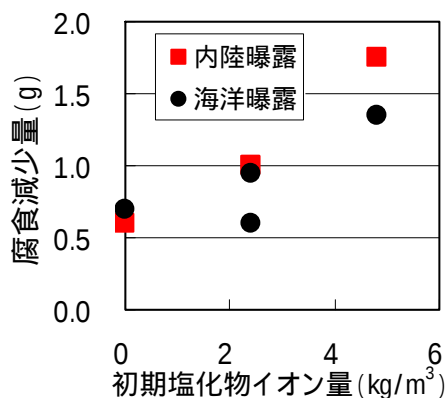


図 - 6 試験体の塩化物イオン量と腐食減少量

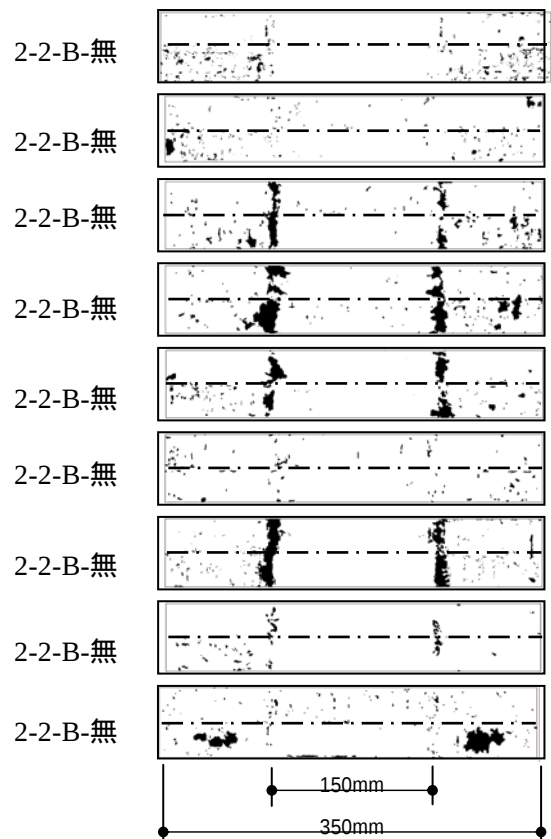


図 - 7 各種工法別の鉄筋の腐食状況(内陸)

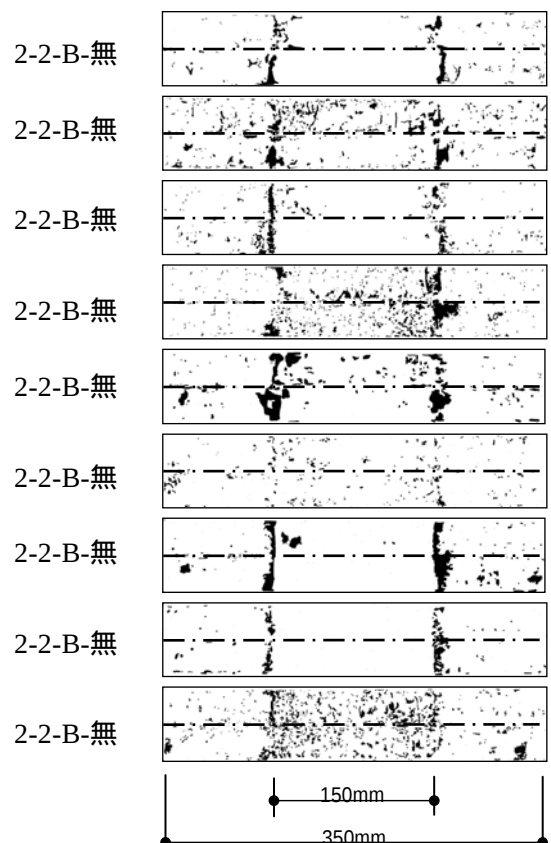


図 - 8 各種工法別の鉄筋の腐食状況(海洋)

なお、海洋および内陸の曝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としては、曝露期間が短い、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

次に実験1の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-9に内陸曝露、図-10に海洋曝露における曝露表面（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。

図-9の内陸曝露においては曝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とほぼ同じ値を示した。塩化物イオン量は  $2.4\text{kg/m}^3$  で約0.1%、 $4.8\text{kg/m}^3$  で約0.2%である。図-10の海洋曝露においては表面被覆材の無い試験体(1-B-無および2-B-無)は海洋からの飛沫により曝露1年間で塩化物イオンが約50mm浸透して

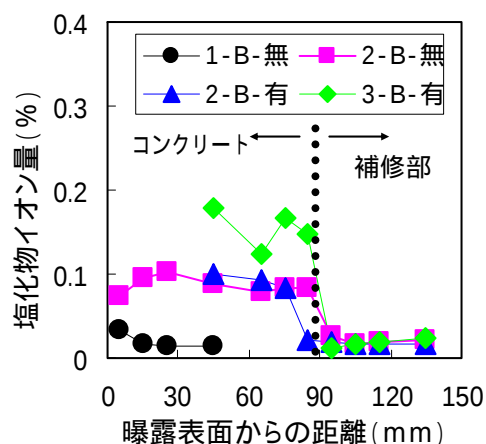


図-9 表面距離と塩化物イオン量の分布(内陸)

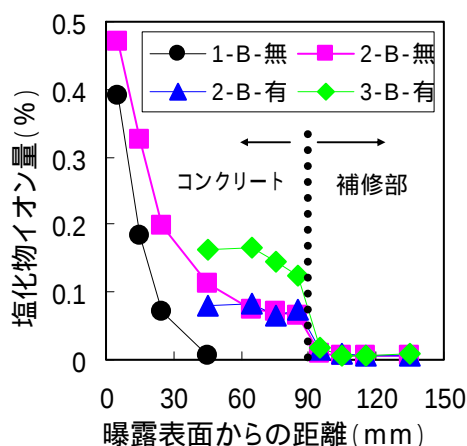


図-10 表面距離と塩化物イオン量の分布(海洋)

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、EPMAによる塩素の面分析結果からも、断面修復材の内部にはコンクリートとの境界から、内陸曝露では約3mm、海洋曝露では約5mmの範囲まで塩素が分布していることが確認でき、塩化物イオンが断面修復材側に移動したことが裏付けられている。

### 4. まとめ

部分補修した試験体を1年間、海洋および内陸曝露し、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、曝露期間が1年では海洋および内陸の曝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結果となった。

### 5. 終わりに

本稿は曝露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魚本研究室と産学18団体が共同研究として行っているものである。

### 参考文献

- 1) 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