

# 報告 電気化学的測定による補修を施したコンクリートの研究

戸田 勝哉\*1・石関 嘉一\*2・伊藤 学\*3・魚本 健人\*4

**要旨**：本研究内容は、塩害で劣化したコンクリート構造物に補修を施した後、再劣化が起こる原因の究明とその対策を提案することを目的として5年計画で開始したものである。本研究では、コンクリート中の塩化物イオン量、断面修復深さと範囲等の補修形態を要因とした試験体を海洋環境下および内陸環境下に暴露させ、鉄筋の自然電位の変化、分極抵抗、コンクリート抵抗などの電気化学的測定を行い腐食状況の検討を試みた。その結果、塩分の有無、補修形態により電気化学的測定値に差が生じ、鉄筋腐食挙動を数値から推定することが可能であることを示した。

**キーワード**：塩害、補修、再劣化、非破壊検査、電気化学的測定

## 1. はじめに

コンクリート構造物を補修し延命させるためには、適切な補修方法を合理的に選定するためのシステムが必要である。そのためには、コンクリートの状態を適切に調べ、劣化予測することは重要な項目のひとつと考えられる。

本研究では、補修を施した鉄筋コンクリートに関して電気化学的手法を中心に用い、腐食メカニズムの解明を試みてきた<sup>1)2)3)</sup>。補修した箇所周辺における腐食メカニズムの解明を目的に、環境条件、コンクリート中の塩化物イオン量、補修形態、補修材料、補修範囲と深さ、かぶりなどの要因に変化させ、実際の海洋および内陸環境下に5年間暴露試験を行ってきた。今回の報告では、これら暴露試験を実施している試験体よりかぶりコンクリートの性質、分極抵抗および腐食速度の挙動、鉄筋腐食量とひび割れ発生までの期間を今までの計測結果から類推した結果を述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

### (1) コンクリート配合

表-1 にコンクリートの使用材料などを示す。

表-1 コンクリートの使用材料など

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
細骨材	大井川産陸砂
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石 (Gmax. 20mm)
混和剤	標準型AE減水剤、AE剤
塩化物イオン量	0、2.4kg/m <sup>3</sup>
スラブ	12cm
空気量	4.5%
圧縮強度	材齢28日：34.3N/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、加工した鉄筋を用いた。この鉄筋は、鉄筋両端の曲げ加工部からの腐食の発生を防ぐために折曲げ部および端子接続部分にエポキシ樹脂を塗装した。

また、**図-1**中のL型鉄筋は電気化学的測定試験体に用いた鉄筋で、片側の鉄筋を端子接続用に加工し、この鉄筋の両端にもエポキシ樹脂を塗装した。そして、コンクリート梁に用いた各々の鉄筋の質量（基準質量）を事前に測定した。

\*1 石川島播磨重工業（株）基盤技術研究所構造研究部 工修 （正会員）

\*2 (株)ブリヂストン 土木・海洋資材開発部 （正会員）

\*3 日本化成（株） 中央研究所 研究部 （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）

### (3) 試験体形状

試験体の形状は 150×150×530mm の矩形梁で、下鉄筋のかぶり厚は 30mm とした。電気化学的測定に使用した模擬はつり部の範囲、深さは図-1 に示す。はつり深さ、位置を変化させた試験体は A, B, D, E 型試験体である。

### (4) コンクリート試験体の作製

模擬はつり部は、発泡スチロール型枠を設置して確保した。鉄筋の配置やかぶり厚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収まるようにしてコンクリートを打設した。

### (5) 補修方法ならびに補修材料

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、圧搾空気等で埃等を除去した。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き付け施工した。さらに、所定期間養生後、サンダーケレンを行い、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 μm）、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 μm）塗装した。なお、電気化学的測定用試験体の場合には、試験体上面（一部上下面）は被覆しなかった。

## 2.2 暴露条件

海洋暴露は、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、写真-1 に示すように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 10m 程度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、

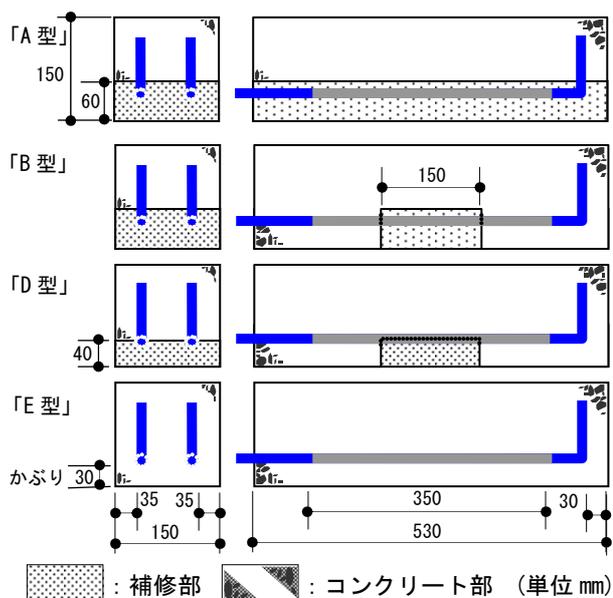


図-1 試験体の形状



写真-1 海洋暴露実験場

約 400～800Clmg/dm<sup>2</sup> であった。

また、近接の網代測候所の 2001 年 12 月～2004 年 11 月までの月平均気温の変動は、6～27℃であり、年間の平均気温は 16.3℃であった。

内陸暴露実験は、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暴露場において実施した。この場所は、海岸より約 3km 内陸に位置し、飛来塩分はほとんど無い。近接の千葉測候所の 2001 年 12 月～2004 年 11 月までの月平均気温の変動は、5～28℃であり、年間の平均気温は 16.1℃であった。

## 2.3 電気化学的測定

自然電位等の測定は、暴露期間中エポキシ樹脂塗装されている約 30 mm 露出している鉄筋を測定前にカップワイヤブラシでケレンし、図-2 に示すようにリード線を接続して、コンクリ

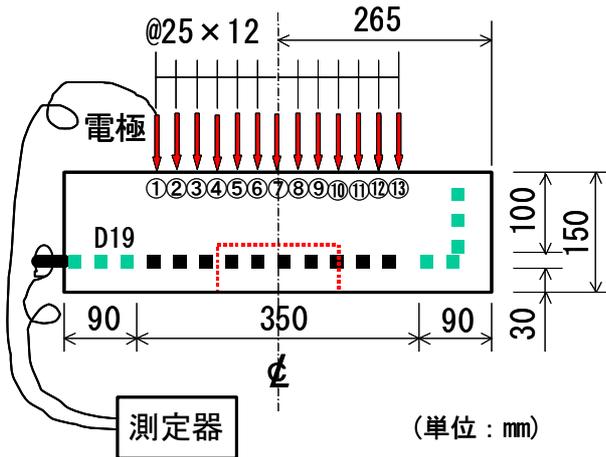


図-2 試験体の鉄筋の配置と測定位置

ート打設面をかぶり 100mm, 反対面をかぶり 30mm として測定した。自然電位の測定間隔は, 暴露開始時および暴露 0.5 年時では, 図中○数字 1, 4, 7, 10, 13 の 75mm 間隔で, 暴露 1 年以降では 25mm 間隔で測定した。この自然電位の測定に用いた照合電極は, 飽和硫酸銅電極 (CSE) および銀塩化銀電極 (Ag/AgCl) の 2 種類である。コンクリート比抵抗, 分極抵抗の測定に関しては, 携帯型腐食診断器 (S 社製) を用いて 75mm 間隔で測定した。なお, 測定時には, 前日より濡れウエスで飽水させて, 表面乾燥飽水状態で測定した。これらの測定時には, 含水状態を確認するために含水率も測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 かぶりコンクリートの性質

図-3 に, 暴露環境 (海洋暴露, 内陸環境) およびかぶりの性質 (E 型: コンクリート, A 型: ポリマーセメントモルタル) のコンクリート比抵抗を比較した結果を示す。かぶりの性質を調べるために, 測定面の表面被覆材は施工されていない。海洋環境のコンクリート比抵抗は, 内陸環境と比較して低く, コンクリート部材はポリマーセメントモルタル部材と比較して低い結果となった。また, 測定位置のコンクリート比抵抗は, 時間の経過に従い高くなる傾向を示した。海洋環境の E 型は, コンクリート表面に 0.2mm のひび割れや錆汁が確認できる激しい腐

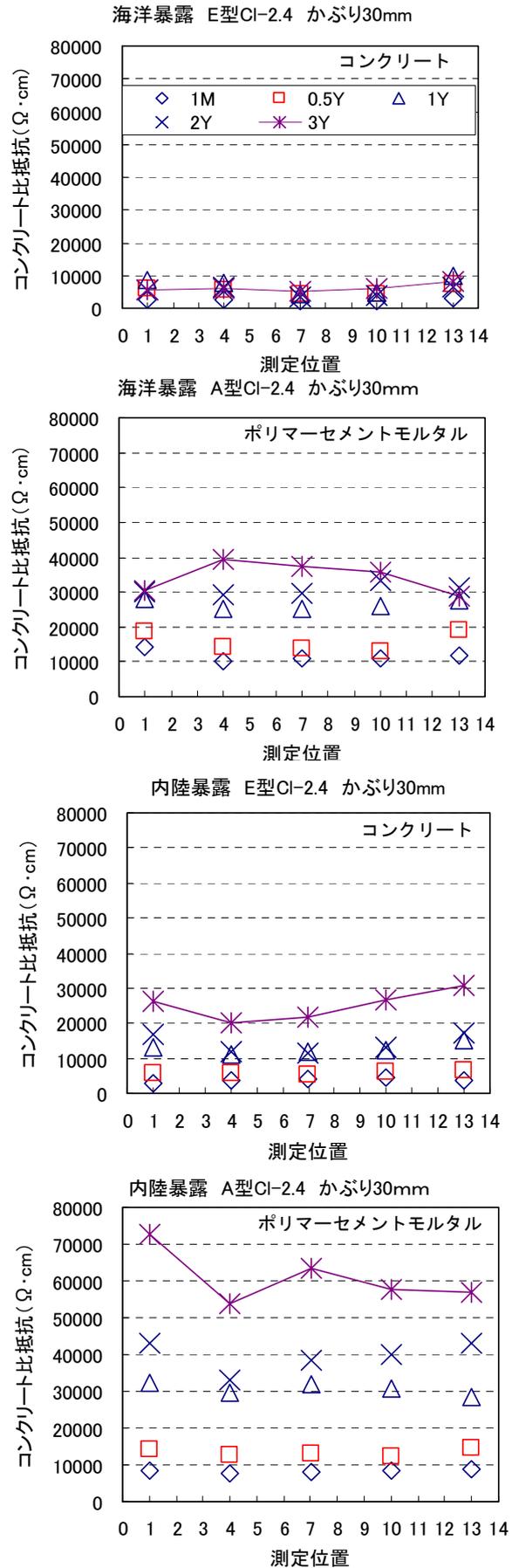


図-3 コンクリート比抵抗の比較

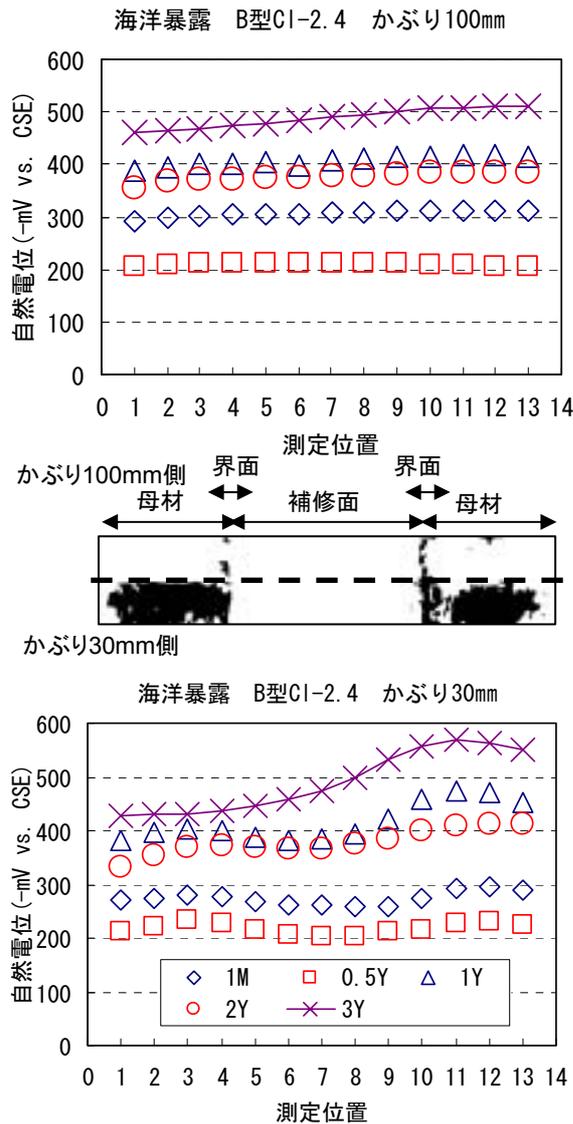


図-4 自然電位と鉄筋腐食状況の比較

食が発生していたのに対して、A型の腐食はほとんど認められなかった。この結果から、ポリマーセメントモルタルは暴露3年では激しい腐食環境下でも高い耐食性を示していることが分かる。

### 3.2 電気化学的測定結果

#### (a) 自然電位と鉄筋腐食状況の比較

図-4に、暴露3年間におけるB型の自然電位と鉄筋腐食状況を比較したものを示す。前報では、時間の経過とともに自然電位は貴にシフトしたが、上下面に被覆がないかぶり30mmの場合は、鉄筋腐食が発生しているため時間の経過とともに卑にシフトした。鉄筋腐食状況と比較すると、母材部分のかぶり30mm側で腐食が顕著

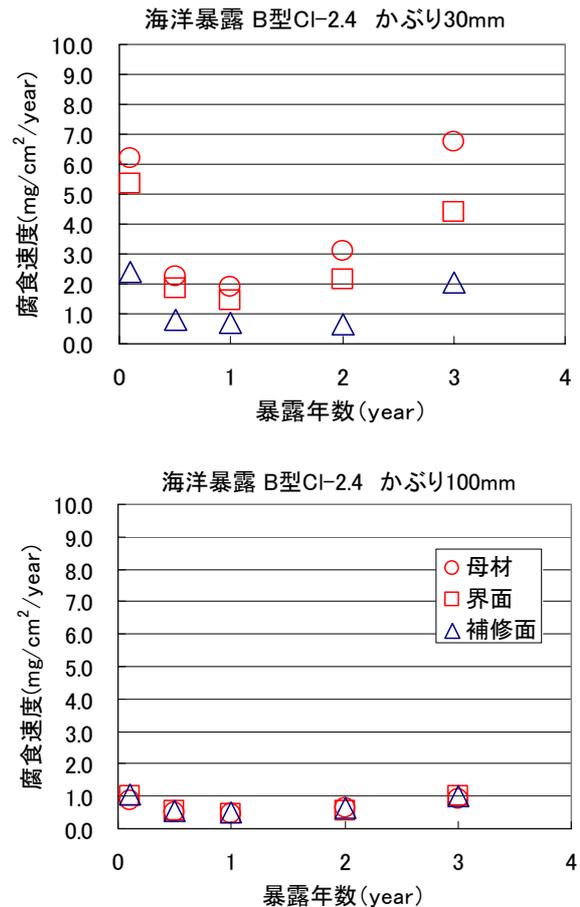


図-5 暴露3年間の腐食速度比較

であることが分かる。かぶり30mm側において自然電位から母材の腐食状況を推測することは可能である。しかし、かぶり100mm側の自然電位は、測定位置によって変化しないため、かぶり30mm側が腐食していても腐食位置の推定は困難であることが分かった。

#### (b) 腐食速度の比較

本研究では、分極抵抗値を腐食速度に換算し、ひび割れ発生までの期間を予測することを検討した。分極抵抗値から腐食速度に換算する式は式(1)に腐食電流密度、式(2)に腐食電流密度から換算した腐食速度を示す。

図-5に、コンクリート部分の母材、断面修復部分のポリマーセメントモルタル、界面の腐食速度を示す。暴露1年まではかぶり30mmにおいて腐食速度が減じたが、それ以降は増大している。しかし、かぶり100mmにおいて腐食速度の挙動の変化は減少した。腐食速度の大きさは、かぶり30mmにおいて母材、界面、補修面の順に

増大しているが、かぶり 100mm では位置による相違は認められなかった。

$$I_{\text{corr}} = k/R_p \quad (1)$$

$I_{\text{corr}}$  : 腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$k$  : 腐食速度定数 (=0.026V)

$R_p$  : 分極抵抗 ( $k\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

$$V = m \cdot I_{\text{corr}} / z / F \quad (2)$$

$V$  : 鉄の腐食速度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ )

$m$  : 鉄の原子量 (=55.8g)

$z$  : 鉄のイオン価数 (=2:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ )

$F$  : ファラデー定数 (=96500A・s クーロン)

### 3.3 ひび割れ発生までの期間予測方法

本研究で求めるコンクリートの変状とは、

「コンクリート表面に鉄筋腐食によるひび割れが発生した現象」と定義する。本検討

項目では、腐食速度からコンクリートの変状が生じるまでの期間を求める。暴露3年

の試験体は、解体し電気化学的測定結果と腐食状況との相関を確認することができた。

しかし、現在継続中である暴露5年の試験体は全てかぶり 30mm 側を被覆してあり、相

関を確認することは不可能である。ただし、現在のところ表面に変状は認められていな

い。暴露期間中は、年に1~2回の割合でかぶり 100mm 側から電気化学的測定を行い、

非破壊で腐食性状の推定を行っている。今回は、海洋および内陸に暴露継続中である

試験体の補修形状 B, D, E 型に関してひび割れ発生までの期間の予測を行

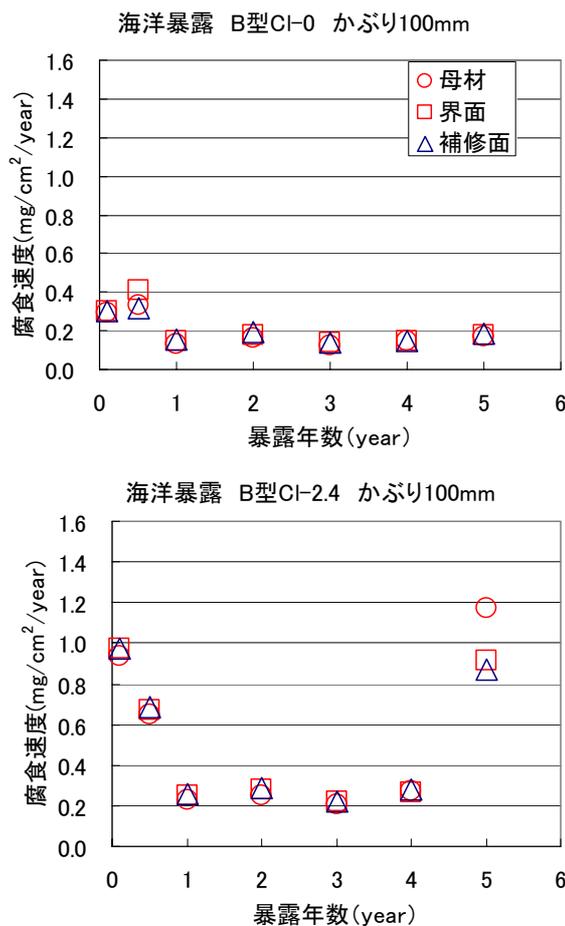
った。なお、ひび割れ発生時の鉄筋腐食量は、コンクリート標準示方書維持管理編に記

載されている  $10\text{mg}/\text{cm}^2$  の値を用いた<sup>4)</sup>。

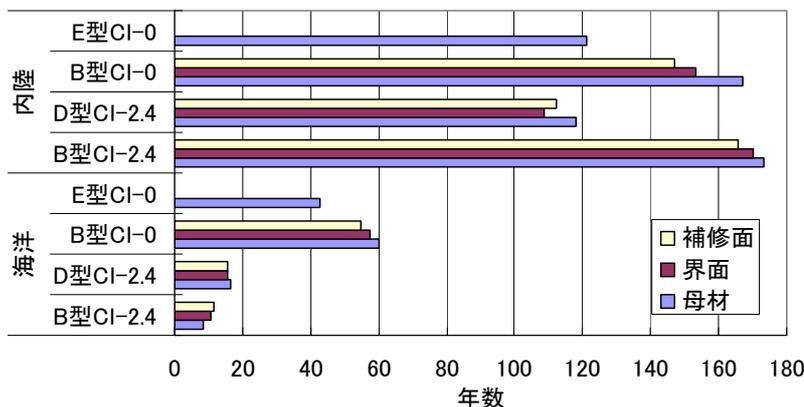
図—6に、現在海洋暴露継続中の補修形状 B 型試験体の腐食速度を示す。塩化物イオンを混入して

いない試験体は、腐食速度の変化は暴露初期から変化しておらず、鉄筋腐食

は発生していないと考えられる。一方、塩化物イオンを  $2.4\text{kg}/\text{m}^3$  混入した試験体は、暴露1年目までは腐食速度が減少しその後一定となったが暴露5年目で腐食速度が上昇した。この現象の原因は、あらかじめ混入された塩化物イオンによる影響か、かぶり 100mm 側から供給される塩化物イオンの影響か現在のところ判断はでき



図—6 暴露5年間の腐食速度の比較



図—7 ひび割れ発生期間の予測年数比較

ない。よって、今後の挙動の変化を注目する必要がある。内陸暴露に関しては、いずれの補修形状でも腐食速度は小さいため腐食は発生していないと推測される。

図—7に、暴露5年目の腐食速度の結果からひび割れ発生期間の予測年数を比較したものを示す。本結果は、暴露環境条件および海洋暴露の塩化物イオンの有無を明確に表している。しかし、内陸暴露では塩化物イオンの有無、補修形状の差異は明確に現れていない。内陸暴露は、海洋暴露に比べて腐食が軽微である。そのため、100mm側からの電気化学的測定は、困難であると推測される。海洋暴露の試験体は、外部からの塩化物イオンの供給が常にあるために、今後鉄筋表面に塩化物イオンが到達することにより腐食速度の挙動が変化すると予想される。鉄筋腐食発生後は、腐食速度が大きくなるので現在の予測値よりもひび割れ発生までの期間が短くなると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、自然電位の測定、コンクリート抵抗の測定、分極抵抗の測定等を行い、補修した箇所での腐食状況の解明およびひび割れ発生までの予測を実施した。以下にまとめる。

- (1) かぶりコンクリートの性質は、コンクリート比抵抗を用いることにより腐食環境か否かを判断できる。コンクリート比抵抗の測定結果から、ポリマーセメントモルタルは海洋環境下で高い耐食性を示している。
- (2) 自然電位を用いることにより、かぶり30mm側の腐食状況、腐食位置を推定することはできるが、かぶり100mm側からの腐食位置を推定することは困難である。しかし、自然電位、コンクリート比抵抗、分極抵抗の結果から腐食の大小を判別することは可能である。
- (3) 腐食が軽微な内陸環境では、補修形態の違いや塩化物イオンの有無によるひび

割れ発生までの期間を予測することが困難である、しかし激しい腐食環境である海洋環境において100mmであっても類推することが可能である。更なる精度を上げるためには、塩化物イオンの浸透結果および実際の腐食量との相関が取れる指標を定める必要がある。

#### 5. 終わりに

本試験は暴露5年目の結果であり、試験は現在も継続している。今後、現在暴露継続中の試験体に関しては、詳細調査を継続する予定である。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団体との共同研究として行っているものである。

東急建設(株)、日本化成(株)、ショーボンド建設(株)、オリエンタル建設(株)、芝浦工業大学、太平洋マテリアル(株)、住友大阪セメント(株)、大日本塗料(株)、西松建設(株)、飛鳥建設(株)、佐藤工業(株)、(株)ブリヂストン、(株)熊谷組、(株)エヌエムビー、電気化学工業(株)、前田建設工業(株)、石川島播磨重工業(株)。

#### 参考文献

- 1) 戸田勝哉ほか：補修を施した鉄筋コンクリートの電気化学的測定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 1971-1976，2004
- 2) 伊藤学ほか：補修を施した鉄筋コンクリートの電気化学的測定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 1，pp. 961-966，2005
- 3) 石関嘉一ほか：補修を施した鉄筋コンクリート供試体の電気化学特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 1，pp. 2057-2062，2006
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp. 104，2001