

報告 補修を施した鉄筋コンクリート供試体の電気化学的特性に関する研究

石関 嘉一^{*1}・伊藤 学^{*2}・伊藤 正憲^{*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に補修を施した後、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。前報¹⁾²⁾では、海洋および内陸暴露の電気化学的測定結果より、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。本稿は、その後実施した鉄筋の自然電位の変化、分極抵抗などの電気化学的測定結果から、さらなる鉄筋腐食状況の検討を試みた。その結果、補修材料を変化させることにより電気化学的特性値に影響していることが明らかになった。

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

近年、補修したコンクリート構造物が比較的早期に劣化する事例の報告が増えてきている。補修後の劣化の進行は、補修材料の性能のみならず、補修時の構造物の損傷度、補修方法や施工の適切さ等に影響されると考えられるが、その原因やメカニズムはほとんど解明されていない。コンクリート中に塩化物イオンなどの劣化因子が進入すると、欠陥部分の鉄筋表面に腐食電流が流れ、電位差が生じ腐食が発生する。

近年、コンクリートの分野においても電気化学的測定が適用され、その優位性は認知され始めている³⁾。本研究では、電気化学的手法を用いて、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として、コンクリート中の塩化物物量、補修形態、補修材料、補修範囲と深さなどの要因を変化させ、実際の海洋および内陸環境下に長期間暴露を行っている。本報は、これら暴露試験を実施している試験体より、自然電位・分極抵抗および鉄筋腐食面積を測定し鉄筋の腐食挙動の推定を行い、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) コンクリート配合

表-1に補修部材を模擬したコンクリートの使用材料および物性を示す。補修部のコンクリートに残存する塩化物イオンの影響を確認するために塩化物イオン量を 2.4kg/m^3 混入した。一般的⁴⁾に鋼材腐食発生限界は 1.2kg/m^3 であるが、腐食を促進させるために2倍の混入量とした。

表-1 使用材料および物性

セメント	普通ポルトランドセメント (3.16g/cm^3)
細骨材	大井川産陸砂 (2.58g/cm^3)
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石 (2.64g/cm^3)
混和剤	AE減水剤標準型, AE剤
塩化物イオン量	2.4kg/m^3 (塩化加ソム)
W/C	65%
圧縮強度	材齢28日 34.3N/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、図-1に示すように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両端にエポキシ樹脂を塗装した。

また、図中のL型鉄筋は電気化学的測定試験

*1(株)ブリヂストン 土木・海洋資材開発部 (正会員)

*2 日本化成(株) 中央研究所 研究部 (正会員)

*3 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 工修 (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)

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。

(3) 試験体形状

試験体の形状は 150×150×530mm の矩形梁とし、鉄筋のかぶり厚は 3cm とした。模擬はつりの範囲、深さは図 - 2 に示すような形態とした。

(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

表 - 2 に本研究で使用した 9 種類の補修工法の防錆材、断面修復材および表面被覆材の種類を示す。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、補修部を上向きに設置し 9 体の試験体にそれぞれ違った断面補修材を施工して、所定期間養生を行った。なお、No.1 および 3 の断面修復材は吹付け工法、それ以外は全てコテによる断面修復工法とした。表面被覆は養生終了後、コンクリート表面の目粗しを行い各表面被覆材を用いて塗装した。被覆部分のかぶり厚 10cm 側を除く 5 面とした。

2.2 暴露条件

海洋暴露は、図 - 3 に示す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、約 400～800Clmg/dm²であった⁵⁾。

また、近接の網代測候所の 2001 年 12 月～2004

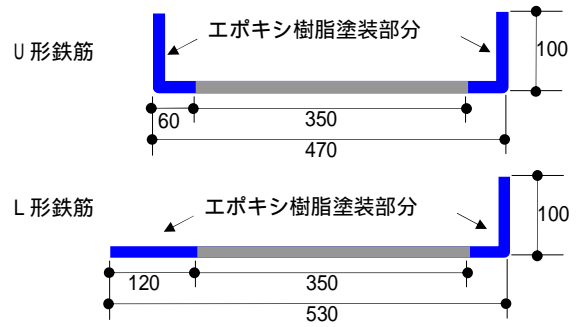


図 - 1 鉄筋の形状 (単位 mm)

かぶり 10cm 側被覆なし

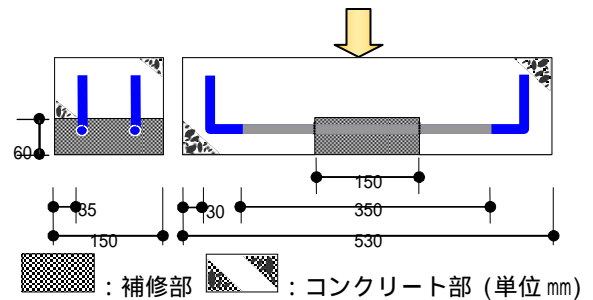


図 - 2 試験体の形状

表 - 2 断面修復材および表面被覆材

No.	プライマー	断面修復材	表面被覆材
1	エポキシ (EVA)	PCM (SBR)	アクリル樹脂
2	アルカリ性付与材, 防錆材	PCM (SBR, 防錆材)	柔軟型 PCM
3	PCP (Veolac)	PCM (Veolac)	ウレタン樹脂
4	水性エポキシ樹脂	PCM (SBR)	柔軟型エポキシ樹脂
5	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂/ウレタン	柔軟型エポキシ樹脂
6	エポキシ (Acr)	PCM (SBR, 防錆材)	柔軟型 PCM
7	浸透性固化材	PCM (Acr)	柔軟型 PCM
8	PCP (SBR)	PCM (SBR)	ウレタン
9	PCP (Acr, 防錆材)	PCM (Veolac)	柔軟型アクリルウレタン

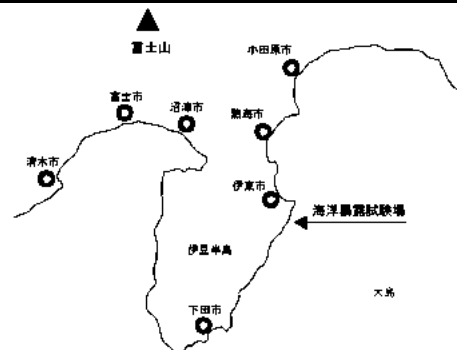


図 - 3 海洋暴露位置

表 - 3 気象データ

場所	月平均気温,		相対湿度, %RH	降雨量, mm	日射時間, 時間
	平均	最低～最高			
網代	16.3	6～27	69.7	185.5	152.2

年 11 月までの気象データを表-3 に示す。

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 露出してある鉄筋を測定前にカップワイヤブラシでケレンし，図-4 に示すようにリード線を接続して，コンクリート打設面を開放面とした方向より測定した。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，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)である。なお，測定は写真-2 に示すように行った。また，鉄筋腐食を測定するために試験体を解体する際に，かぶり 3cm 側の被覆材を除去して，自然電位を測定した。

分極抵抗の測定に関しては，写真-3 に示すように携帯型腐食診断器（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，表面乾燥飽水状態として測定した。これらの測定時には，含水状態を確認するために K 社製の水分計を用いて含水率も測定した。

2.4 鉄筋の腐食面積率

各補修材料において曝露 1 年および 3 年経過後の試験体の外観を観察した後，試験体を写真-4 に示すように，割裂して取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付け，発錆部分を写し取った(中央 350mm)。腐食面積は画像解析装置を用いて測定した。



写真-1 海洋暴露実験場

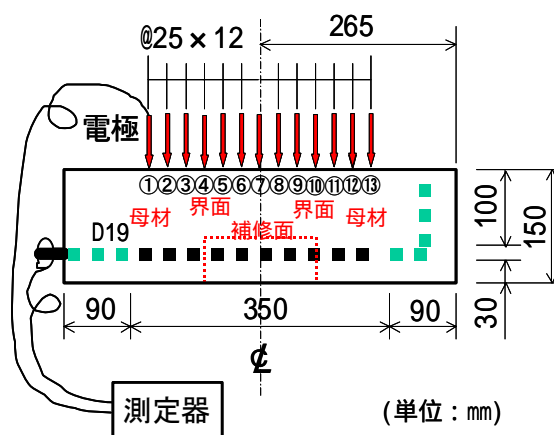


図-4 試験体の鉄筋の配置と測定位置

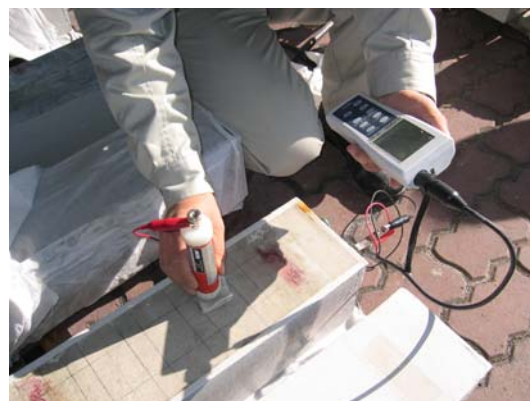


写真-2 CSE 測定状況



写真-4 鉄筋取り出し状況



写真-3 腐食診断機

3.実験結果および考察

3.1 試験体の外観

3年間曝露した各試験体の表面には、鉄筋の腐食による鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れや被覆材の亀裂は生じておらず、再劣化は顕在化していなかった。

3.2 試験体の自然電位

図-5~7に1,2,3年における各試験体の自然電位を示し、図-8に測点7における各試験体の自然電位経時変化を示す。なお、自然電位は内在塩分量と含水率を考慮して、式(1)を用いて補正した⁶⁾。

$$Z1 = -20X + 150 \quad (1)$$

Z1: 電位変動分 (mV)

X: 含水率 (%)

1年目および2年目の自然電位は全ての値で、 $-200\text{mV} < E^0$ であり腐食していない範囲にあった。しかし3年目において試験体4が $-350\text{mV} < E < -200\text{mV}$ の腐食が不確定⁶⁾な範囲に存在した。各試験体の自然電位の順位は1年目において $3>1>9>8>7>5>2>4>6$ 、2年目において $9>3>7>2>6>5>1>4>8$ 、3年目において $7>6>3>9>2>1>5>4>8$ であった。3,9は常に貴側に存在し1,2,6,7は貴側にシフトしている。また、5は卑側にあり4,8は貴側から卑側に大きくシフトしている。加えて、曝露開始からの自然電位の変化は4,8を除き、全体的に時間の経過とともに貴側にシフトしている。

各試験体間の電位の差は、各補修材料の塩分

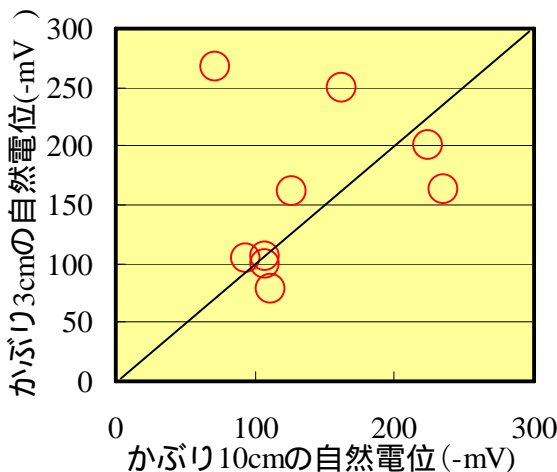


図-9 かぶり深さの曝露3年自然電位

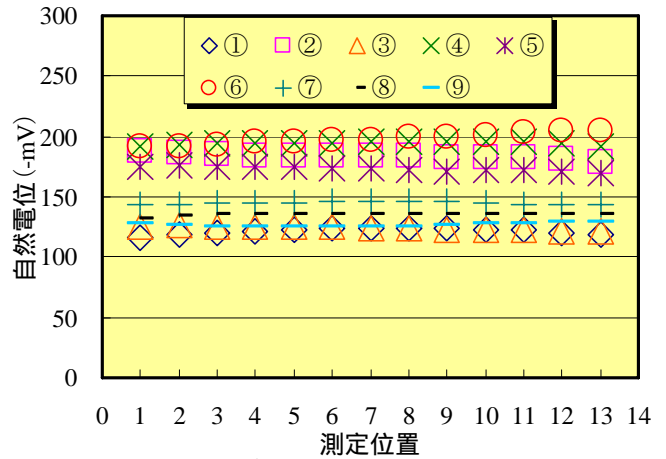


図-5 1年目各試験体の自然電位

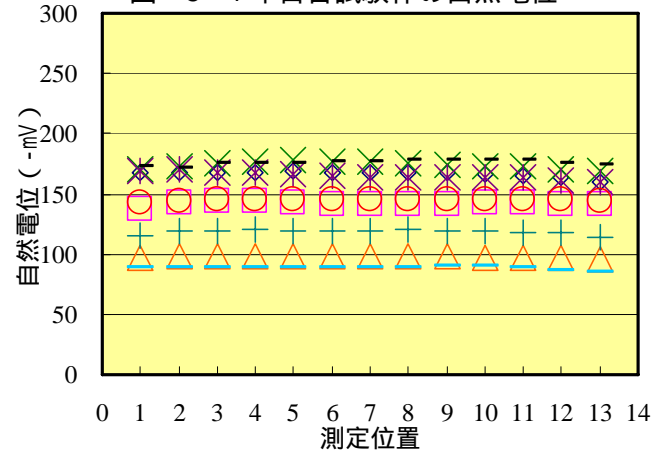


図-6 2年目各試験体の自然電位

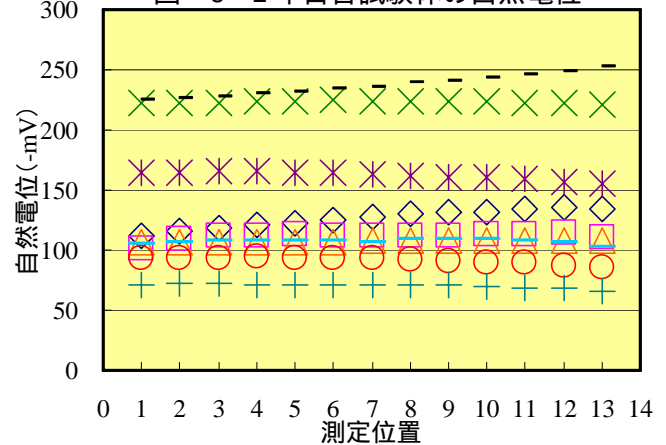


図-7 3年目各試験体の自然電位

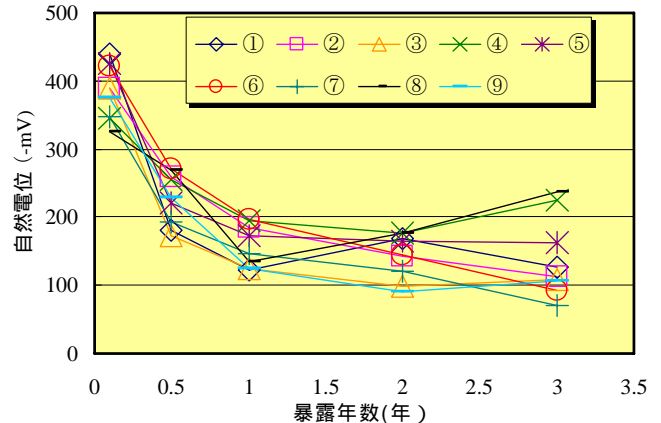


図-8 測点7の自然電位経時変化

浸透の違い，通电の違いによって生じたと考えられ，実際の鉄筋腐食と照合し検討する必要がある。

図 - 9 に測点 7 におけるかぶり深さ 3cm，10cm の暴露 3 年自然電位を示す。多少のばらつきはあるが，概ね一致する結果となった。

3.3 分極抵抗と腐食速度

腐食評価^{6,7)}をする目的で，試験体の分極抵抗から式(2)を用いて腐食速度を算出した。

$$V = 11.6 \times 10^{-3} \times 55.8m/Rp / 2F \quad (2)$$

$$1 \mu A/cm^2 = 11.6 \times 10^{-3} mm/year$$

V：鉄の腐食速度 (g/cm²/s)
 Rp：分極抵抗 (kmΩ)
 F：ファラデーの定数 (96500 A・s)

図 - 10，11 に 1 年目，3 年目の各試験体の腐食速度を示し，図 - 12 に測点 7 における腐食速度の経時変化を示す。1 年目において全ての試験体で，母材 < 界面 < 補修面の順で腐食速度が速くなっている。しかし，3 年目では部材間の腐食速度の大きな差は確認できなかった。また，各試験体の腐食速度の経時変化は，時間経過に伴い暴露初期よりも腐食速度が遅くなる傾向を示している。これらはコンクリートが水和反応により緻密になり，補修材料がより硬化したことが原因だと考えられる。加えて，自然電位との相関性を検討したが，大きな相違点は見いだせなかった。今後，補修材料別による塩分の浸透など，電気化学的測定結果に影響を及ぼすと推測される要因を検討しなければならない。

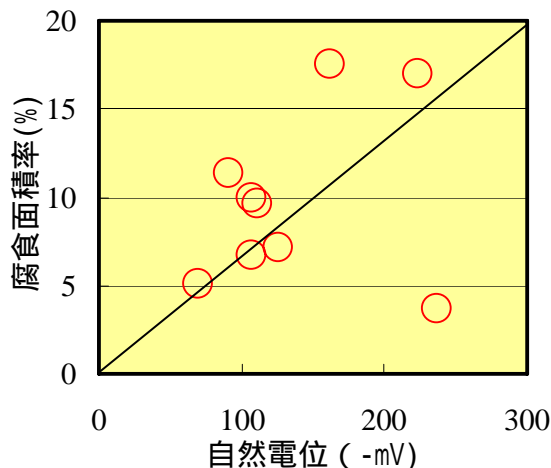


図 - 14 暴露 3 年腐食面積率と自然電位

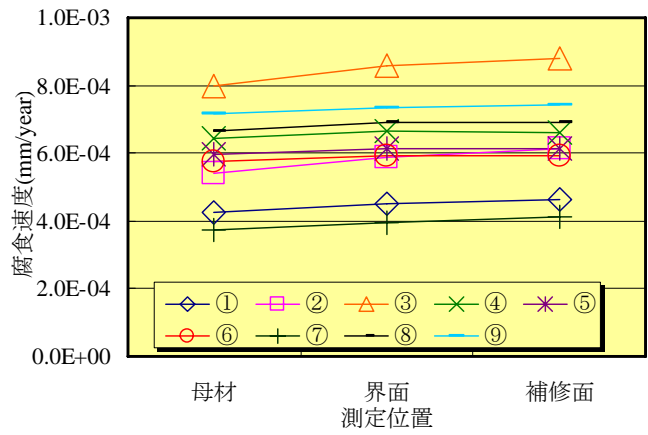


図 - 10 1 年目各試験体の腐食速度

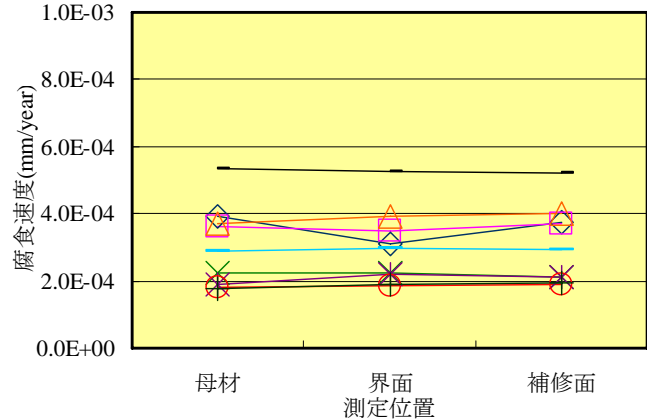


図 - 11 3 年目各試験体の腐食速度

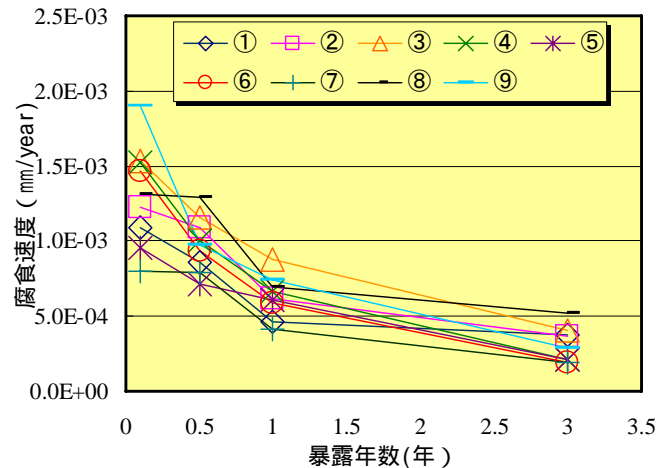


図 - 12 測点 7 の腐食速度経時変化

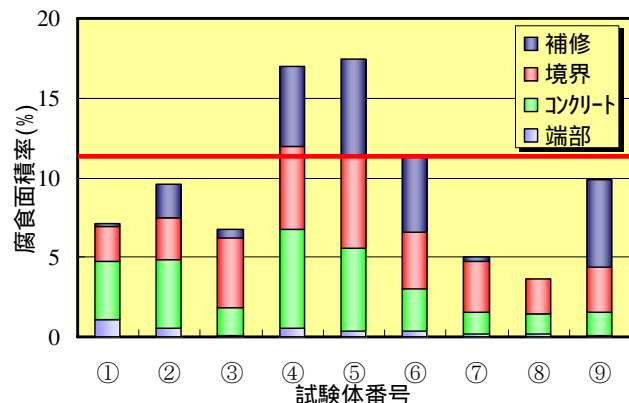


図 - 13 暴露 3 年各試験体の腐食面積率

3.4 腐食面積

図 - 13 に暴露 3 年各試験体の腐食面積率を示し、図 - 14 に暴露 3 年腐食面積と自然電位を示す。各試験体において界面の腐食面積は 2～6%の範囲にあり、腐食面積の大きな割合を占めていることが確認できた。また、全体的に腐食面積の増加に伴い補修部、コンクリート部の腐食が増加していることが確認できる。

自然電位と腐食面積率を比較した場合、界面部の腐食割合は他部の腐食割合より大きい、各試験体における界面部と他部の自然電位の差を確認できず、10cm のかぶりを隔てた測定では腐食部分の特定は不可能であることが確認できた。しかし、自然電位が-150mV より卑側の試験体は 8 を除き、腐食面積率が 11%以上であり、自然電位が-150mV より貴側の場合は腐食面積率が 11%以下である結果が得られた。また、自然電位と腐食面積率の関係は、概ね自然電位が卑であるほど腐食面積は高くなる傾向にあった。これらの結果より一般的に 10cm のかぶりを隔てた鉄筋に対して自然電位を測定することは難しいと考えられているが、今回の測定の場合、腐食の大小を判別することは可能であることが判明した。

4. まとめ

海洋暴露 3 年における飽和硫酸銅電極による自然電位の測定、分極抵抗の測定および腐食面積率の測定を行い、補修した箇所の腐食状況の解明を試みた。これらの結果を以下にまとめる。

- (1) 暴露期間の経過に伴い、補修材料の違いによって、貴側、卑側にシフトすることが判明した。また、かぶり 10cm と 3cm の自然電位は、ほぼ一致することが確認できた。
- (2) 暴露初期は部材間に腐食速度の違いがあったが、暴露期間が経過することにより差は小さくなることが確認できた。また、時間の経過に伴い、腐食速度は小さくなった。
- (3) かぶり 10cm 側から自然電位を測定することにより、腐食の部位は特定できないものの、腐食の大小を判別することは可能であ

ることを確認できた。

5. おわりに

本試験は暴露 3 年目の結果であり、試験は現在も継続している。今後、さらに継続調査を行い、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)、石川島播磨重工業(株)、飛鳥建設(株)、佐藤工業(株)、ブリヂストン(株)、熊谷組(株)、(株)エヌエムビー、電気化学工業(株)、前田建設工業(株)

参考文献

- 1) 戸田勝哉, 星野富夫, 榊原弘幸, 魚本健人: 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, 星野富夫, 戸田勝哉, 魚本 健人: 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.1971-1976, 2005
- 3) コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000), 2000
- 4) 土木学会:【平成 11 年版】コンクリート標準仕様書 [施工編], pp.11, 2000
- 5) 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
- 6) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, 土木学会コンクリート技術シリーズ No.26, pp.125-140, 1997
- 7) 横田優: 電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, コンクリート年次論文集, Vol.12, No.1, pp.545-550, 1990