

論文 電気化学的測定による補修を施した海洋暴露10年のコンクリートの研究

戸田 勝哉^{*1}・三坂 岳広^{*2}・伊藤 学^{*3}・岸 利治^{*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開始したものである。本論文では、海洋環境下に10年間暴露させ、自然電位法、コンクリート抵抗、分極抵抗などを行い経時的に測定した結果を述べる。今回は、今までの測定結果の報告に加え、試験体を解体して、塩化物イオンの分布、腐食状態などを調査した結果を報告する。非破壊検査と破壊検査の整合性を調査した結果、塩化物イオン濃度や腐食状況を電気化学的測定により、劣化状態を推測可能で有ることが分かった。特に、初期塩分の有無により鉄筋コンクリートの寿命が大きく異なることが明らかとなった。

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

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^{1), 2)}。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濃度、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10年間暴露試験を行ってきた。今回の報告では、非破壊検査である自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗などの電気化学的測定結果と、破壊検査である塩分濃度の分布、腐食状況とを比較し、再劣化のメカニズムの検証を試みた。

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。

(2) 鉄筋

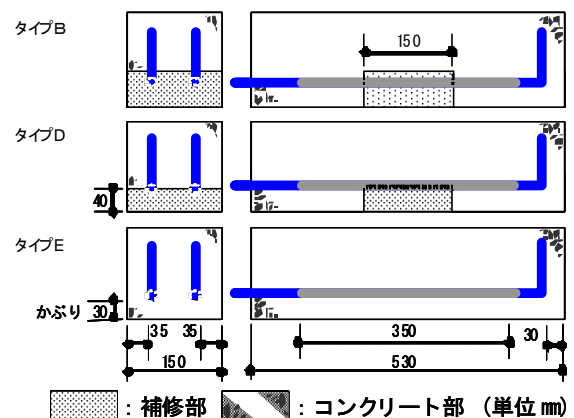
鉄筋は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定するSD345, D19を使用し、加工した鉄筋を用いた。この鉄筋は、鉄筋両端の曲げ加工部からの腐食の発生を防ぐために折曲げ部および端子接続部分にエポキシ樹脂

を塗装した。

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	青梅産硬質砂岩碎石 (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 ³
スランプ	12cm
空気量	4.5%
圧縮強度	材齢28日：34.3N/mm ²

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



注：一部の表面被覆材は露出したものである

図-1 試験体の形状

*1 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部研究開発課 博士 (工学) (正会員)

*2 佐藤工業株式会社 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*3 日本化成プロダクト株式会社 中央研究所開発課 (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授 博士 (工学) (正会員)

測定した。

(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。かぶり厚 100mm 側は開放されており、その面より塩化物イオンが浸入するようになっている。タイプ B は塩分の影響を調べるため、無混入および 2.4kg/m³ の量の塩化物イオンを混入している。この数値は、床版内部にあることによって再劣化を起こす量として想定されたものである。他に、4.8kg/m³ の値を混入した試験体を作製し、暴露試験を実施して、塩分の拡散状況を確認している¹⁾。タイプ B、タイプ D およびタイプ E は補修形態による影響を調べるために作製した。タイプ B は、鉄筋の裏側まで劣化した部分をはつり、補修を施したものである。タイプ D は鉄筋の途中まで劣化した部分をはつり、補修を施したものである。タイプ E は全く補修をしなかったものである。それぞれ、補修を施した深さをパラメータとして試験を行った。

(4) 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、表面の汚れやレイトランスを取り除き、圧搾空気等で埃等を除去した。その後、写真-1 に示すように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、エポキシ樹脂系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。



写真-1 断面修復施工状況

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-2 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。



写真-2 海洋暴露試験場

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ーブラシでケレンし、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、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。測定状況を写真-3 に示す。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。また、自然電位に関しては、CSE と Ag/AgCl の電位差がおおよそ 120mV であることを確認している。

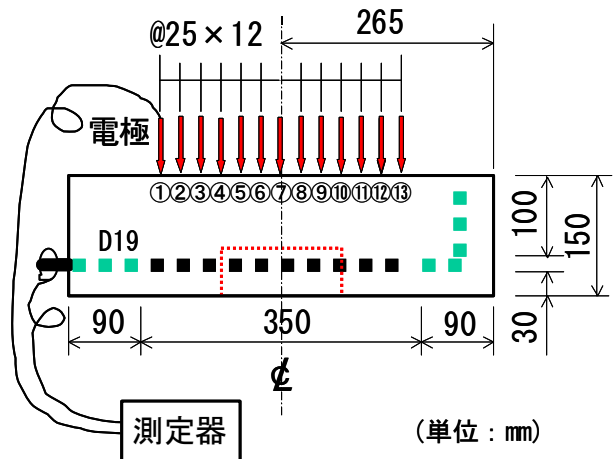


図-2 試験体の鉄筋の位置と測定位置



写真-3 電気化学的測定状況

3. 実験結果および考察

3.1 自然電位の測定結果

図-3に、暴露1, 5, 10年における自然電位の測定結果を示す。補修タイプの前の数字は、塩化物イオンが 2.4kg/m^3 のものは2.4, 無混入のものは0と表記した。暴露1年では、塩化物イオンの混入量及び補修形態による電位の差異は認められなかった。しかし、暴露5年目以降では塩化物イオンが 2.4kg/m^3 混入したケースに関して、電位が卑にシフトした。暴露10年では、初期にコンクリート中に塩化物イオンが 2.4kg/m^3 であるケースに関して、自然電位の値が -400mV よりも卑であるため、試験体の全面で腐食している可能性が高いと考えられる。

なお、10年目までの測定結果からでは、補修形態による数値の差異は観測されなかった。

図-4に、試験体の中心部である測定位置7における、自然電位の経時変化を示す。塩化物イオンが 2.4kg/m^3 であるケースに関しては、暴露5~6年目で自然電位は卑にシフトする傾向を示した。一方、初期に塩化物イオンを混入されていないケースに関しては、暴露10年経過しても自然電位は暴露初期よりも貴にシフトしていることが確認された。これらの傾向は、他の測定位置でも同様であることが確認された。これらの傾向から、暴露5~6年目で鉄筋表面の不動態皮膜が破壊に至ったことを示している。

3.2 コンクリート抵抗の測定結果

図-5に、暴露10年におけるコンクリート抵抗の測定結果を示す。本来ならば、既発表と比較するため³⁾、コンクリート比抵抗で比較するべきであるが、本論文ではかぶり厚が 10cm と大きい条件下での評価であるので、コンクリート抵抗で行なうこととする。塩化物イオンが混入されていないケースに関しては、補修位置でコンク

リート位置に比べて1から $2\text{k}\Omega$ 数値が小さくなったことが確認された。一方、塩化物イオンが 2.4kg/m^3 であるケ

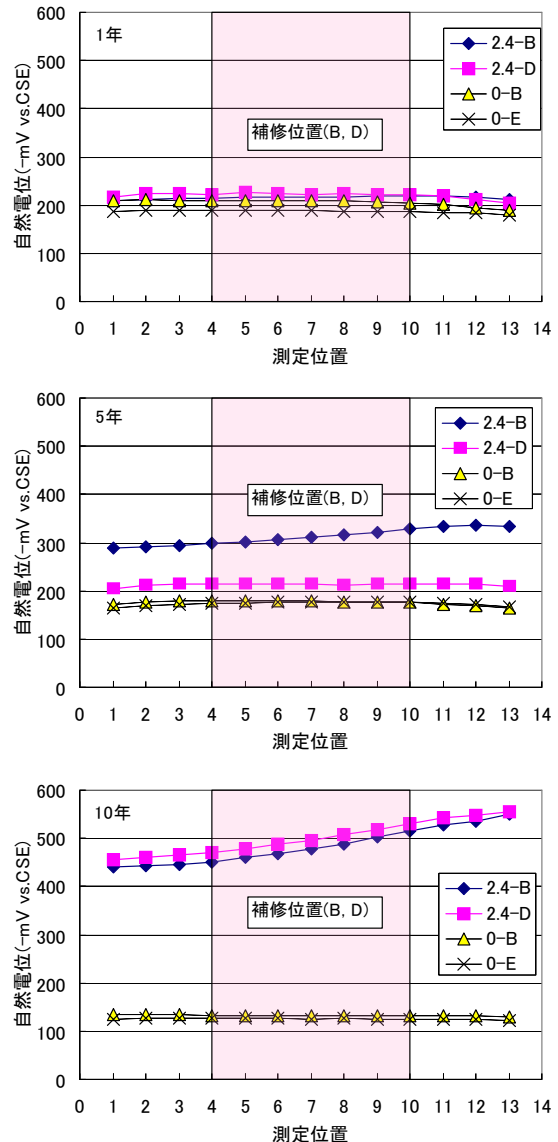


図-3 暴露1, 5, 10年における自然電位の測定結果

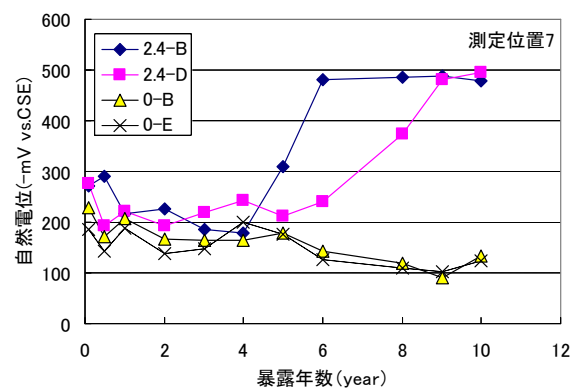


図-4 測定位置7における自然電位の経時変化

ースは、塩化物イオンが混入されていないケースよりも全体的に $5k\Omega$ 以上数値が低くなった。補修位置でのコンクリート抵抗が大きくならなかった理由は、かぶりコンクリートが大きいいため、その品質に影響を受けたためと考えられる。

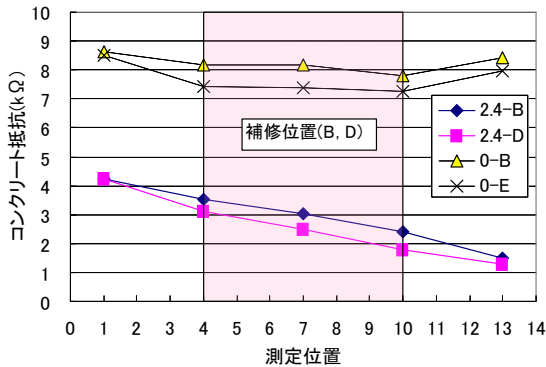


図-5 暴露 10 年におけるコンクリート抵抗の測定結果

図-6 に、測定位置 7 におけるコンクリート抵抗の経時変化を示す。暴露 4 年目までは、いずれも試験体もコンクリート抵抗は増大する傾向を見せた。しかし、暴露 5 年目に、一度コンクリート抵抗は今までの傾向と逆に、小さくなり暴露 6 年目にはまた大きくなる傾向を示した。その後、減少に転じて最後の 10 年目に増大するなど不安定な挙動を示している。ただ、初期塩分の有無による差異ははっきりと現れており、2 極化されたことが確認された。よって、塩化物イオンが $2.4kg/m^3$ のケースは暴露年数を経るに連れ、不動態皮膜の安定性が無混入のものに比べて無くなってきたと言える。

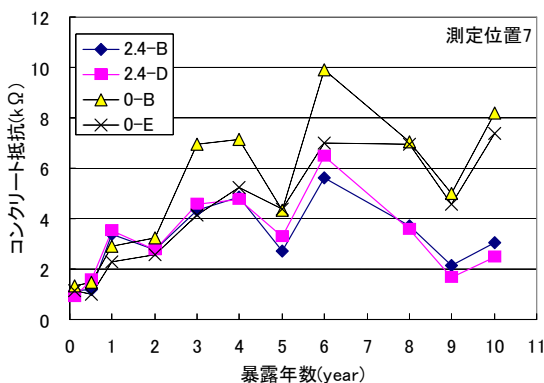


図-6 測定位置 7 におけるコンクリート抵抗の経時変化

3.3 腐食速度の測定結果

図-7 に、暴露 10 年における分極抵抗の測定結果を示す。これらの結果に関しても、コンクリート抵抗と同様に塩化物イオンが $2.4kg/m^3$ 混入したケースと無混入のケースで分かれた。

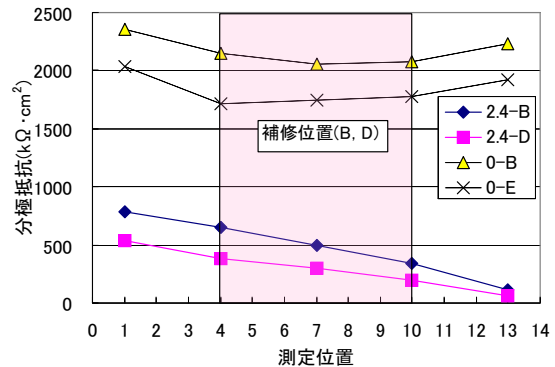


図-7 暴露 10 年における分極抵抗の測定結果

図-8 に、測定位置 7 における分極抵抗の経時変化を示す。塩化物イオンを $2.4kg/m^3$ 混入したケースは、暴露 4 年までその値は大きくなったが、以降は減少する傾向を示した。一方、混入されていないケースは、暴露 4 年目までは増大する傾向を示したが、それ以降は不安定な挙動を示した。更に詳細に調べると、暴露 6 年目以降は塩化物イオンを $2.4kg/m^3$ 混入したケースは $500k\Omega \cdot cm^2$ 以下に推移し、腐食の傾向を示し始めた。しかし、既往の研究と比較すると⁴⁾、不動態状態では $130 k\Omega \cdot cm^2$ より大の数値であり、今回の計測値は最小値でも $163 k\Omega \cdot cm^2$ であるため、腐食の程度としては極めて小さいことが分かる。8 年目、9 年目では、塩化物イオンを $2.4kg/m^3$ を混入したケースは、分極抵抗が低下傾向を示した。このことから、腐食発生と思われたが数値は既往の研究と比べて大きいので、完全には破壊されず、不動態皮膜の安定性は失いつつあると言える。

自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗の結果から考察すると、暴露 4 年目まではコンクリート内部の塩分の影響は小さく、コンクリートの水和と共に安定した傾向を示していたが、暴露 5 年目以降は初期塩分の有無の影響が現れ始め、不安定な挙動を示し始めた。

塩化物イオンを混入していないケースは、海洋環境下

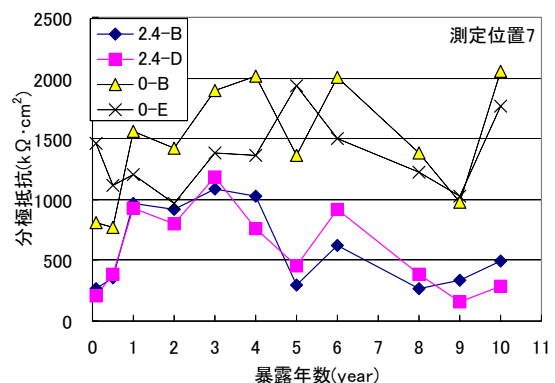


図-8 測定位置 7 における分極抵抗の経時変化

であるにもかかわらず、かぶりが 10cm と大きいため、高い防食性を有していたと言える。しかし、既発表のかぶり 3cm のケースでは、暴露 0.5 年程度で腐食が発生していたことが確認されていた。コンクリートの耐久性には、かぶりの大きさの影響が重要であることが確認された。

3.4 塩化物イオン濃度の測定結果

図-9 に、塩化物イオンを 2.4kg/m^3 混入したタイプ B および無混入のタイプ E、暴露 10 年目におけるコンクリート中への塩化物拡散状況を示す。塩化物イオンを混入しないケースでは、表面より 5cm 以上塩化物イオンが浸透していたことが分かった。この結果は、既発表の暴露 3 年目までの結果よりも、深く浸透し、表面付近の塩化物イオン濃度の数値も大きくなっていくことが分かる⁵⁾。一方、塩化物イオンを 2.4kg/m^3 混入したタイプ B は、かぶり 9cm 程度で初期に混入していた数値よりも高く、コンクリート側から補修材へ浸透していることが確認された。

全ての電気化学的測定に関しては、全てかぶり 10cm 側からの測定であり、測定の際かぶりコンクリートの品質に大きく影響を受けると考えられる。特に、鉄筋の表面に塩化物イオンの存在の有無により、それらの数値が大きく異なると言える。無混入のケースでは、塩化物イオンが鉄筋に到達していないため、かぶりコンクリートに塩化物イオンがあったとしても、電気化学的測定結果は腐食の傾向を示していない。 2.4kg/m^3 混入したケースに関しては、鉄筋表面まで塩化物イオンが到達していないが、鉄筋表面の不動態皮膜の健全性は失いつつあると言える。

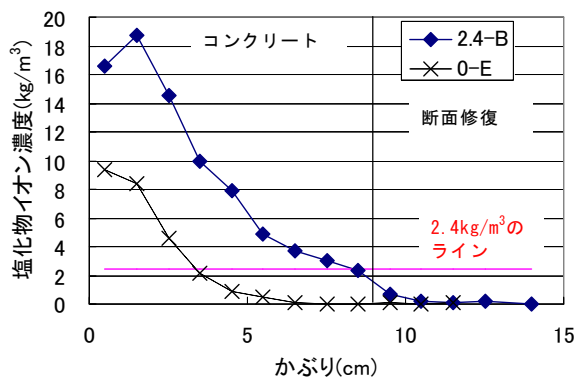


図-9 暴露 10 年目におけるコンクリート中の塩化物イオン拡散状況

3.5 腐食面積率の測定結果

図-10 に、暴露 10 年目の試験体の腐食面積率の測定結果を示す。ここでの腐食は、鉄筋の発錆箇所を目視にて確認できる範囲で印を付け、画像処理にて 2 値化されたものである。補修タイプの横の数字は、試験体中の

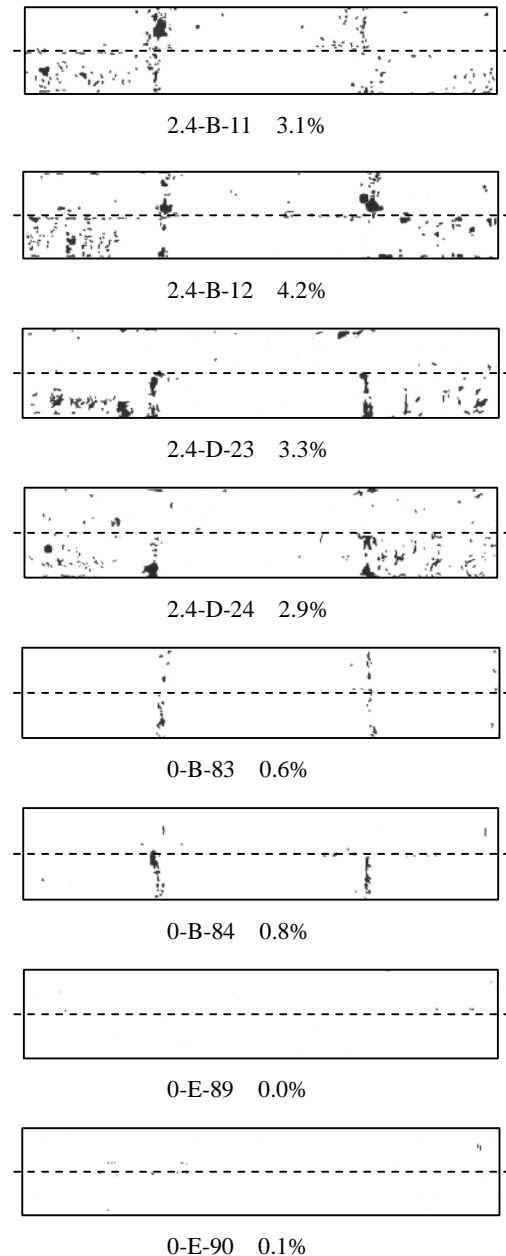


図-10 腐食面積率測定結果

鉄筋ナンバーである。各試験体 2 本で測定を行った。なお、図中の鉄筋に描いた点線は、上側がかぶり 10cm 側である。いずれの試験体も、腐食は軽微であるが、塩化物イオンの有無で腐食面積率が異なった。今回の結果でも、既往の報告の通り、腐食はコンクリートと断面修復箇所の界面で顕著に起こった事が確認された⁶⁾。また、腐食が起きている箇所は、ほとんどがコンクリート部分であり、断面修復部分での腐食はほとんど無い。

電気化学的測定結果からみると、暴露 10 年目の自然電位は、腐食が起きていると判定されるが、実際は軽微な程度であることが確認された。鉄筋表面は不動態となっているが、実際に腐食が激しく起きるのは塩化物イオ

ンが鉄筋に到着し、その後ある程度の濃度に達してからと考えられる。

自然電位は、塩化物イオンの存在による鉄筋周囲の環境による影響を受ける。しかし、不動態皮膜の健全性などは、目視では確認できないので、腐食面積率の結果とは相違が見られる。実際の腐食の発生を判定するためには、自然電位のみでの判定ではなく、分極抵抗などの複数の測定結果による評価が必要である。また、暴露5年目以降に、電気化学的測定は不動態とは言えない傾向を見せたが、実際の腐食は軽微であった。不動態皮膜の健全性は失われたかもしれないが、腐食を激しく起こすまでには至らなかったと、これらの結果からは言える。

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、暴露10年間での補修した箇所の腐食状況の解明および電気化学的測定による予測方法の検討を行った。補修したコンクリートが再劣化する要因は、塩化物イオンの再拡散が考えられる。それらの挙動を把握して際劣化を予測するには、電気化学的測定が有効であると考えられる。今回の一連の研究で、その有効性を示すことが出来たとと言える。以下にまとめる。

- (1) 本測定結果から、かぶりが10cmと厚い鉄筋コンクリートでありながら、電気化学的により全体的な腐食特性を予測することが可能であると言える。
- (2) 自然電位や分極抵抗では、暴露6年目付近でこれまでの測定結果と異なり腐食傾向を示した。それらは、塩化物イオンの存在する量によって、挙動が異なることを示している。よって、補修する箇所でも、その位置での塩化物イオンの量により腐食挙動が異なることが予測される。
- (3) 自然電位では腐食している可能性が高い数値を示したが、実際の腐食の状態は軽微であった。コンクリート抵抗、分極抵抗、塩化物イオン濃度等の複数の測定により、状態を判定する必要がある。特に、分極抵抗の数値が低くなってきた場合は注意を要する。
- (4) 分極抵抗の結果から、今回報告される試験体は、

暴露10年目であっても既往の研究による数値と比べて、腐食の程度としては軽微であると言える。ただ、塩化物イオンが鉄筋に到達するよりも先に、電気化学的測定の数値は不動態であることを示さなくなる。

5. 終わりに

本論文は海洋暴露10年目の結果のまとめであり、一連の研究に関しては、内陸環境の調査を持って終了される予定である。今後、電気化学的測定および解体調査を行なうことで、報告は随時行なう。

本研究は、東京大学生産技術研究所と以下に示す産学19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)、日本化成プロダクト(株)、ショーボンド建設(株)、オリエンタル白石(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)BASF ポゾリス、電気化学工業(株)、前田建設工業(株)、(株)IHI、ニチエー吉田(株)、コニシ(株)。

参考文献

- 1) 星野富夫, 松林裕二, 戸田勝哉, 魚本健人: 劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法に関する研究, コンクリート工学, Vol.47, No.6, pp.28-35, 2009.6
- 2) 戸田勝哉, 星野富夫, 伊藤学, 魚本健人: 補修した鉄筋コンクリートの電気化学的測定による鉄筋腐食推定に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.508-521, 2009.11
- 3) 戸田勝哉, 石関嘉一, 伊藤学, 魚本健人: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.757-762, 2007
- 4) 横田優: 2.最新非破壊検査技術, 2-3: 電気化学的方法講習会「コンクリート構造物の診断技術」, 社団法人日本材料学会, pp.26-36, 2001.10
- 5) 里隆幸, 二井谷教治, 星野富夫, 魚本健人: 補修を施した海洋暴露試験体の塩分拡散に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.7, pp.1113-1118, 2007
- 6) 渡部正, 松林裕二, 槇島修, 魚本健人: 部分断面修復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.29, No.1, pp.1059-1064, 2007