報告 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

伊藤 学*1・星野 富夫*2・戸田 勝哉*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⁾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,コンクリート抵抗,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,塩分の有無,補修形態および暴露環境が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²⁾。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量、補修範囲と深さなどを要因として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。本報では、これら暴露試験で実施している自然電位・コンクリート抵抗・分極抵抗より、鉄筋の腐食挙動の推定を行った結果を報告する。

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、断面修復工と表面被覆工による補修工法に限定して検討した。

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。 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 0, 2.4kg/m^3 の 2 水準設定した。

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	$0.2.4 \text{kg/m}^3$
スランプ	12cm
空気量	4.5%
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」

^{*1} 日本化成㈱中央研究所研究部 (正会員)

^{*2} 東京大学生産技術研究所 技術専門官 (正会員)

^{*3} 石川島播磨重工業㈱基盤技術研究所構造研究部 工修 (正会員)

^{*4} 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

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 $150 \times 150 \times 530$ mm の矩形梁 とし、鉄筋のかぶりは 30mm とした。模擬はつり部の範囲、深さは図-2に示すような補修形態とし、6 種類の試験体を作製した。なお、電気化学的測定に使用した試験体は、鉄筋位置までのはつり深さを変化させたことを模擬した B、D、E型試験体である $^{3)}$ 。

(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剤を2層塗布し(乾燥膜厚320 μ m)、柔軟型ウレタン樹脂上塗り剤を最終的に1層(乾燥膜厚30 μ m)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

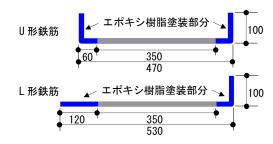
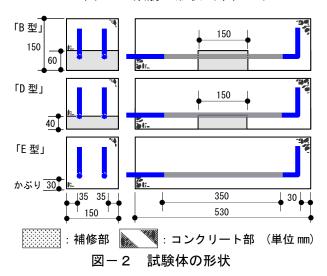


図-1 鉄筋の形状(単位 mm)



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、約400~800Clmg/dm²であった40。

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



写真-1 海洋暴露実験場

あり、年間の平均気温は16.3℃であった。

内陸暴露実験は,写真-2に示すように東京 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露出してある鉄筋を 測定前にカップワイヤブラシでケレンし、図-3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, 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(SSCE)の2種類である。コンクリート抵抗, 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 を確認するために含水率も測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 照合電極による自然電位の検討

海洋暴露試験体における D型試験体の暴露 1年 および 2 年目の飽和硫酸銅電極および銀塩化銀電極の自然電位を図ー4に示す。暴露 2 年目の測定結果も 1 年目の結果と同様に飽和硫酸銅電極の電位の変動個所に対応して,銀塩化銀電極も変動していることが分かる。本研究においては,両電極の比較測定を実施しており,大多数のデータは約 100~120mV の差に収まり,測定結果の信頼性は高いと考えられる。



写真-2 内陸暴露実験場

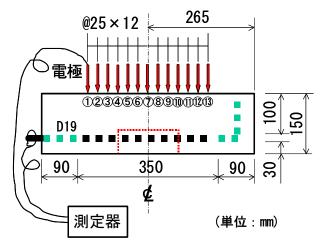


図-3 試験体の鉄筋の配置と測定位置



写真-3 電気化学的測定

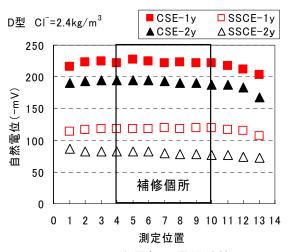


図-4 照合電極の電位差検討

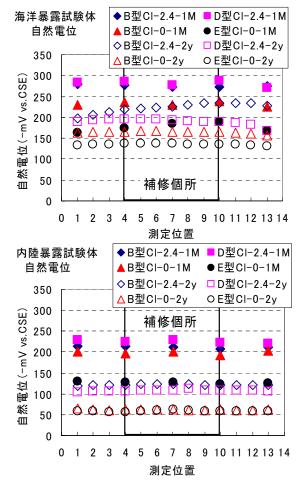


図-5 暴露初期および暴露2年 における自然電位測定結果

3.2 コンクリート梁の自然電位

図-5に暴露初期(1ヶ月)および暴露2年 における自然電位の結果を示す。図中の試験体 記号は、試験体形状 (B, D, E型) -塩化物イオ ン量(0, 2.4kg/m³)を示している。海洋暴露お よび内陸暴露のいずれの試験体も,暴露期間の 経過に伴い、自然電位は貴側へ移行している。 この傾向は、内陸暴露の方がより顕著である。 暴露 2 年での海洋暴露においては、B 型 Cl-2.4 >D型 Cl-2.4>B型 Cl-0>E型 Cl-0の順で卑に なっており、補修形態による違いが見られた。 これに対して内陸暴露は, B型 Cl-2.4, D型 Cl-2.4>B型 Cl-0, E型 Cl-0 と 2極化しており, 補修形態の違いは確認できなかった。内陸暴露 の場合には,外部からの塩分の供給がないこと から、初期に内在する塩化物イオンの方が鉄筋 腐食に大きく影響していると推測できる。これ

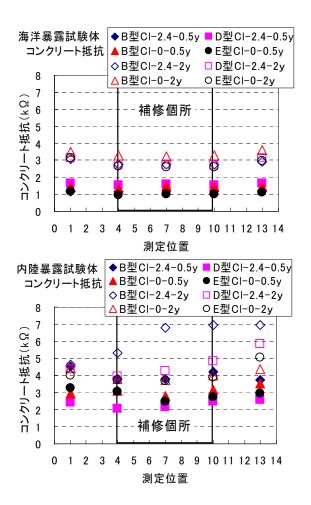
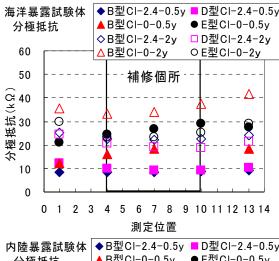


図-6 暴露初期および暴露 2 年 におけるコンクリート抵抗測定結果

に対して、海洋暴露の場合には、外部からの塩 化物イオンがコンクリート内部へ浸透するため、 内在塩化物量のみならず、補修形態の違いも鉄 筋腐食へ影響を与えてきていると考えられる。

3.3 コンクリート梁のコンクリート抵抗

図ー6に暴露初期(6ヶ月)および2年におけるコンクリート抵抗の測定結果を示す。ここで示すコンクリート抵抗(分極抵抗)は、かぶりや面積を考慮していない見かけの値を用いている。暴露期間の経過に伴い、海洋および内陸暴露いずれの試験体も自然電位と概ね対応して高くなり、内陸暴露の方が、より抵抗値が高くなる傾向を示した。これは、コンクリートの水和反応の進行による組織の緻密化が原因と考えられる。海洋暴露においては、補修形態による差異は見られなかった。1年目の結果と同様に海洋環境がもたらす塩化物イオンの浸透による



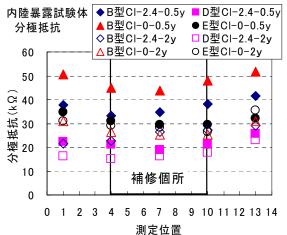
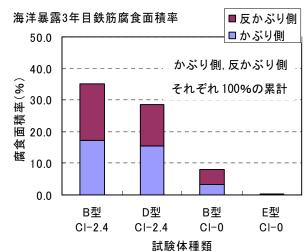


図-7 暴露初期および暴露 2 年における 分極抵抗測定結果

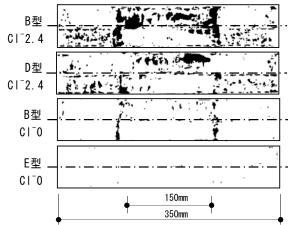
影響がコンクリート抵抗を低く抑える方向に働き補修形態の違いや内在塩化物イオン量の影響を不明瞭にしていると考えられる。内陸暴露のB型 Cl-2.4 において、コンクリート抵抗が大きく特異な傾向を示した。原因については、今後の継続測定結果と併せて検討する予定である。

3.4 コンクリート梁中の鉄筋の分極抵抗

図-7に暴露初期(6ヶ月)および2年における分極抵抗の測定結果を示す。暴露期間の経過に伴い、分極抵抗は、海洋暴露では高く、内陸暴露では低くなる傾向を示した。2年目の測定結果において、海洋および内陸暴露で D型 Cl-2.4の分極抵抗が一番小さい値を示した。また、塩化物イオンの内在しないB型 Cl-0、E型 Cl-0 は比較的分極抵抗が高く、腐食しにくい状態にある事がわかる。そして、いずれの試験体においても補修部(E型試験体は中央部)におい



海洋暴露 3 年目における鉄筋腐食



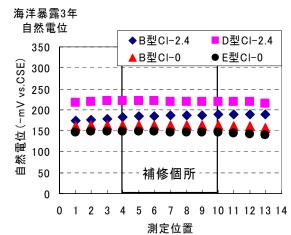


図-8 海洋暴露 3 年目における鉄筋腐食 状況と自然電位測定結果

て分極抵抗が小さく未補修部 (E 型試験体は両端部)で分極抵抗が大きくなる傾向を示した。

これらの電気化学的測定結果をみると、暴露2年程度ではあるが、暴露材齢の経過に伴って、全体的に暴露初期よりも腐食しにくい傾向を示している。補修を施していないE型CI-0は、暴露期間の経過に伴う変動が一番小さく、腐食し

にくいと言え、緻密で丈夫なコンクリートを打設する事および適切な補修を実施する事の重要性が再認識できる。そして、内在塩分量や補修形態の違いによって自然電位や分極抵抗に違いが一部見られ始めていることは、今後の材齢の経過によるさらなる電気化学的特性値への影響が予測される。

3.5 鉄筋腐食と自然電位

図-8に海洋暴露3年目に電気化学的測定を 実施している試験体と同種の試験体の解体実験 で実施した鉄筋の腐食確認の試験結果とそのと きの自然電位の測定結果を示す。鉄筋腐食面積 率はB型Cl-2.4で約35%, D型Cl-2.4で約28%, B型 Cl-0 で約 8%, E型 Cl-0 は, ほとんど腐食 していなかった。この結果より内在する塩化物 イオンの影響が大きいことが分かり、これに対 応する自然電位は,塩化物が内在する B型 Cl-2.4 および D型 Cl-2.4 は、初期内在塩化物イ オンがない B型 Cl-0 および E型 Cl-0 よりも卑 にあり、概ね鉄筋の腐食の傾向を反映している ことが確認できた。また、部分補修の界面付近 でマクロセル腐食が発生していたが、これに対 応する自然電位の測定結果は、補修界面での自 然電位の変動等もなく,明確には検出すること はできなかった。これは、腐食が全体的に発生 していることやかぶり深さの影響などが考えら れ、継続して検討を行う予定である。

4. まとめ

今回,飽和硫酸銅電極と銀塩化銀電極による 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,補修した箇所の腐食状 況の解明を試みた。以下にまとめる。

- (1) 暴露期間の経過に伴い,補修形態および 内在塩化物量の違いによって電気化学的特 性値に与える影響が確認された。特に内在 塩化物イオンが与える自然電位への影響は, 内陸暴露で顕著である。
- (2) 暴露期間の経過とともに、電気化学的特性値は概ね腐食を抑制する傾向を示した。

補修も塩化物も内在しないE型試験体がその傾向が高く一番腐食し難いことが確認できた。

(3) かぶりが 100mm と深い場合においても鉄筋腐食面積率と自然電位において、概ね相関が見られ、ある程度の鉄筋腐食状況の推測が可能であると考える。

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

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) 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
- 3) 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
- 4) 星野富夫, 魚本健人, 守屋正裕:海洋暴露 環境の評価に関する検討, 土木学会年次学 術講演概要集, V-336, pp.732-733, 1997