

論文 分極曲線測定を用いた長期暴露後のコンクリート中の鉄筋腐食性状に関する検討

中嶋 桜*1・久保 善司*2・佃 洋一*3・徳納 新也*4

要旨: 海洋に囲まれた地理的特徴から塩害はコンクリート構造物の代表的な劣化の1つである。我が国は広範な気候区分を有し、構造物が置かれた環境条件は鉄筋腐食の発生・進行に影響を与え、その補修効果も環境によって異なる。本研究では、環境条件の異なる長期暴露後のコンクリート中の鉄筋の分極特性に着目し、環境条件およびシラン系含浸材を用いた含浸処理がコンクリート中の鉄筋腐食性状に与える影響を検討することとした。

キーワード: 塩害, 鉄筋腐食, 気象条件, 暴露試験, 表面含浸材

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化問題には、塩害、中性化、アルカリシリカ反応、および凍害等が挙げられる。我が国は海洋に囲まれた地理的特徴から、塩害劣化の影響を受けるコンクリート構造物は膨大な数となる。構造物の長寿命化に伴い、対策を要する構造物は多く、ライフサイクルコストを考慮し、かつ費用対効果の高い対策手法の確立が必要とされている。

これらの対策の一つとして、シラン系表面含浸工法が挙げられる。シラン系含浸材は外部からの水分の侵入を抑制するだけでなく、コンクリート内部の水分を逸散する効果を有し、コンクリートを低含水状態に保つことが可能である。そのため、多量の塩化物イオンが存在する場合には腐食の進行を抑止することは困難であるものの、外部からの塩分浸透の抑制と水分逸散によって腐食進行の抑制が期待されている。

一方、我が国は広範な気候区分を有するため、環境作用が異なり、それらが鉄筋の腐食発生および進行に影響を与える。コンクリート中の鉄筋腐食の発生条件については、コンクリートの品質およびかぶりが同一の場合には、コンクリート内部の塩化物イオン濃度、含水状態、温度が支配的な要因となる。室内試験を中心とした知見が蓄積されており、温度が与える影響については、腐食速度はアレニウス則に従うことが知られ¹⁾、異なるコンクリート温度における腐食速度を検討した結果、コンクリート温度 20℃の腐食速度に対して、40℃の腐食速度は 1.3 倍程度、60℃では 2 倍程度になることが報告されている²⁾。含水率の影響については、含水状態が低くなるほど腐食速度が低下するとの報告もされている³⁾。

異なる気象条件の影響については、著者等は気象・環境条件の異なる長期塩害暴露試験における電気化学的腐食モニタリング結果に基づき、異なる気象・環境条件が腐食発生および進行に影響を与えること、さらには、シラン系表面含浸工法の腐食抑制効果が異なることを報告している⁴⁾。シラン系表面含浸工法については、中性化による腐食が懸念されており、暴露約 18 年後においては、シラン系表面含浸処理によって中性化は促進されるものの、含浸処理による効果は中性化の影響を上回ることを報告している⁵⁾。

これらの検討においては、分極抵抗に基づき暴露開始以降の鉄筋腐食状態を把握し、気象・環境条件等が腐食発生と進行に与える影響を報告した。しかし、鉄筋近傍の腐食環境から決まるアノード反応およびカソード反応の詳細については不明である。

本研究では、異なる環境条件における長期塩害暴露下におけるコンクリート中の鉄筋腐食性状について、分極曲線の測定を実施し、モニタリング結果との整合性についての検証を行うとともに、環境条件およびシラン系表面処理がコンクリート中の鉄筋腐食性状に与える影響を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) コンクリート配合

表-1 配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (cc/m ³)	AE助剤 (cc/m ³)
		W	C	S	G		
65	46	175	272	828	968	1020	1088

*1 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 (学生会員)
 *2 金沢大学 理工学域地球社会基盤学系 准教授 (正会員)
 *3 (一財)日本塗料検査協会 西支部 (第2種団体会員)
 *4 (一社)コンクリートメンテナンス協会 技術委員会 (正会員)

供試体の配合表を表-1 に示す。セメントとして普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用い、細骨材（吸水率：1.33%，密度：2.62g/cm³）および粗骨材（吸水率：1.91%，密度：2.61g/cm³，Gmax：20mm）は手取川産の骨材を用いた。風化等の劣化を受けコンクリートの緻密性が低下している既設構造物を想定し、水セメント比（W/C）を若干高めめの65%とした。

(2) 含浸材

耐久性の改善や向上を目的として開発され、揮発性の低いシロキサと浸透性に優れたシランを混合した市販のシラン・シロキサン系含浸材⁶⁾を標準適用量である200g/m²を使用した。

(3) 塩化物イオン量

飛来塩分の影響を受ける新設構造物を想定した塩化物イオン無混入のものと、暴露試験開始当時は腐食発生限界しきい値が1.2kg/m³から2.4kg/m³程度とされ、それを参考に0.7，1.5，および2.2kg/m³の塩化物イオンを混入させたものを用意した。

(4) 供試体作製

供試体は、大型供試体（W322×H3223×D302mm，暴露面：322×322mm）および小型供試体（W200×H100×D100mm，暴露面：200×100mm）を用意した。大型供試体は表面含浸処理仕様として、表面含浸処理および比較用の無処理の2仕様を用意した。

大型供試体は打設1日後脱型し、湿封養生を5日間行った。さらに、十分な含浸が得られるよう、養生後1ヶ月程度、表面水分率が5.5%程度以下となるまで気中で乾燥させた。含浸材塗布後、含浸養生期間とし2週間気中に静置した。暴露面以外からの水分の逸散・吸水等が生じないように永久型枠（ポリマー含浸コンクリート）を用いた。かぶり（暴露面）3cmとし、直径9mmの丸鋼（SR2235）を2本埋設した。大型供試体の概要図を図-1に示す。小型供試体は室内（23℃・50%R.H.程度）にて同様に作製し、暴露面以外の5面にエポキシ処理による防水処理を施した。供試体の暴露は2006年1月に開始した。

2.2 暴露環境

(1) 暴露条件

波浪の影響を直接は受けないものの、飛来塩分の影響を受ける沿岸地区を対象とし、暴露面を海岸線に直交する方向へ向け設置した。なお、親不知地区では、高架下に暴露されているため、降水および日射の影響を受けにくい環境であった。海岸からの距離は御前崎地区100m，親不知地区30m，江田島地区40mであった。

暴露地は太平洋側気候である静岡県御前崎地区，日本海側気候である新潟県親不知地区および瀬戸内海式気候である岡山県水島地区を選定した。水島地区に設置した

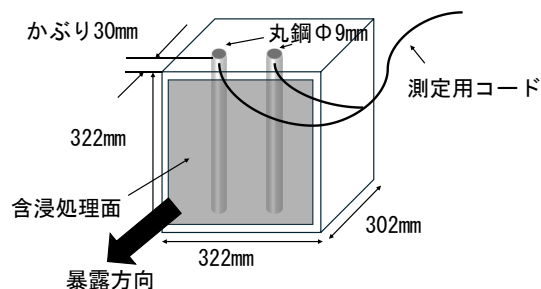


図-1 供試体概要図

供試体は、暴露開始16年目に瀬戸内海式気候である広島県江田島地区に移設した。これ以降は江田島地区と称する。

(2) 気象条件

気象庁のホームページ⁷⁾より、暴露開始時の2006年の1月から2024年12月までの気象データ入手した。観測所は暴露地点から最も近い場所（御前崎地区：御前崎，親不知地区：糸魚川，水島地区：倉敷，江田島地区：呉）を選定した。

2.3 測定項目

(1) 電気化学的測定

電気化学計測システムを用いて分極曲線の測定を行った。電位走査速度20mV/minで自然電位から、御前崎・親不知地区は±100mVまで、江田島地区は±50mVまで走査し、アノード・カソード反応の電流値を計測した。また、溶液抵抗も測定し、IR降下の影響も考慮した。分極曲線の測定は暴露19年目の夏季に行った。

また、携帯型腐食診断機（照合電極：Ag/AgCl）を用いて、各供試体の異なる2本の鉄筋について分極抵抗の測定を行った。分極抵抗の測定には2つの周波数の矩形交流を用い、測定周波数を高周波400Hz，低周波0.1Hzとし、印加電圧は10mVとした。分極抵抗と同時にコンクリート抵抗の測定を行った。

(2) 中性化深さ

JISA 1152に準拠し、暴露17年目の小型供試体の中性化深さを測定し、結果を報告している⁵⁾。コンクリートカッターを用いて2箇所切断しフェノールフタレイン溶液を噴霧し、各断面4点ずつ中性化深さを測定した。またそれに従い、√t則を用い、中性化速度係数を算出し、中性化深さの進行予測を行った。

(3) 塩分浸透

暴露11年および17年において塩分浸透調査（ドリル法）を行い、既報において拡散予測結果を報告している⁸⁾。それらの結果に基づき暴露19年後のかぶり位置の塩化物イオン濃度予測を行った。

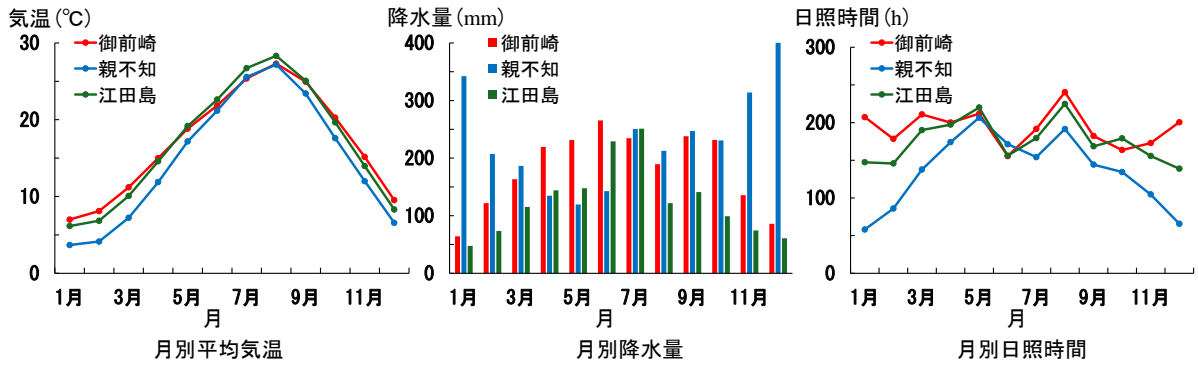


図-2 気象条件（月別）

表-2 各地点の平均値

	年平均気温(°C)	年間平均降水量(mm)	年間日照時間(h)
御前崎	17.0	2180.2	2315.4
親不知	14.8	2800.7	1628.6
江田島	16.8	1504.8	2103.3

3. 結果および考察

3.1 気象・環境条件

各地点の月別の気象条件を図-2に示す。また、各地区の気温、降水量、日照時間の暴露開始（2006年）から現在（2024年）までの平均値を表-2に示す。なお、江田島地区では、移設前の気象データは倉敷観測所のものを用い、移設後は呉地区のものを用いて気象データの整理を行った。3地区の中で平均気温は御前崎地区が最も高く、親不知地区は最も低い。降水量は親不知地区が最も多く、江田島地区が最も少ない。日照時間は御前崎地区が最も多く、江田島地区が最も少ない。

親不知地区の特徴として、年間を通じて降水量も多く、冬季には日照時間も短い。コンクリートが最も乾燥しにくい環境にあるものと考えられる。これに対して、年間を通じて降水量も少なく、夏季は他の地区よりも高温となる江田島地区は最も乾燥しやすい環境にあり、御前崎地区は日照時間は最も多いものの、江田島地区よりも降水量は多いため、江田島地区よりも乾燥しにくい環境にあるものと推察される。なお、親不知地区の供試体は、高架下に暴露されているため、日射や降雨等の影響が緩和されるため、乾燥しにくいものの、乾湿作用も緩和されているものと考えられる。

3.2 中性化深さおよび塩分浸透

中性化深さの予測結果を図-3に示す。暴露19年においては、無処理のものでは、中性化が最も大きい江田島地区においても5mm未満の予測結果であった。親不知地区は最も小さくなった。中性化の進行は、気象・環境条件から推測された乾燥しやすさと一致した。また、含浸処理における中性化の進行の程度は、無処理と同様に、

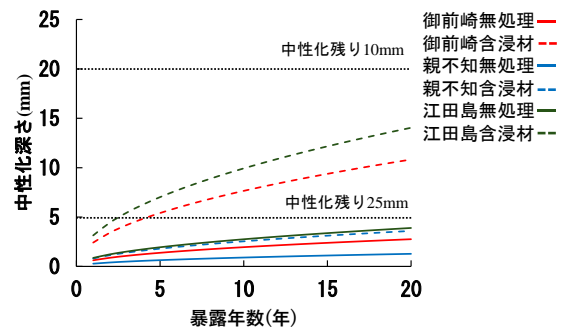


図-3 中性化予測

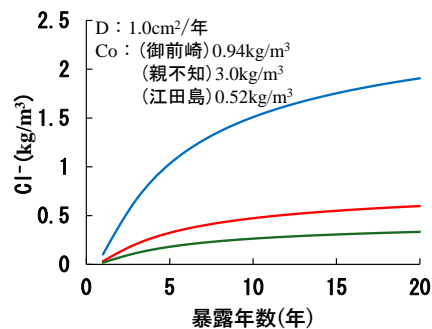


図-4 塩分浸透予測

江田島地区が最も大きく、親不知地区が最も小さい予測結果となった。

コンクリート標準示方書（設計編）⁹⁾では、一般環境下では中性化残り10mmまでは腐食が生じないとされ、塩化物イオンが存在する場合の安全側の閾値を25mmとしている。無処理の場合、中性化残りは25mmを上回っており、中性化による腐食への影響は顕著でないと考えられる。含浸処理の場合には、江田島および御前崎地区では、中性化残り25mmを下回り、暴露19年後において中性化深さはそれぞれ16mmおよび19mm程度と予測された。塩化物イオンを含む供試体中の鉄筋については、中性化の影響が懸念される。

かぶり深さ3cmの初期塩化物イオン無混和の塩化物イオン濃度の予測結果を図-4に示す。暴露19年後のかぶ

り深さ 3cm の塩化物イオン濃度は、親不知地区では 1.88kg/m³、御前崎地区では 0.59 kg/m³、江田島地区では 0.33kg/m³となった。なお、初期塩分を混入したものの塩化物イオン濃度は、初期塩化物イオン濃度に予測した濃度を加えたものとした。親不知地区は飛来塩分による鉄筋腐食が発生する環境であった。他の地区では飛来塩分の影響のみでは暴露 20 年後においても腐食発生を生じる塩化物イオン濃度には達しない環境であった。また、含浸処理については、暴露約 18 年後の親不知地区のかぶり深さの塩化物イオン濃度は 0.4kg/m³未滿と既報で報告している⁵⁾。含浸処理されたものの塩分浸透はきわめて小さく、概ね初期塩化物イオン濃度に等しいとして以下の考察を行った。

3.3 水分逸散環境の評価

暴露環境におけるかぶり近傍の乾燥しやすさを小型供試体のコンクリート抵抗から検討することとした。塩化物イオン無混和のコンクリート抵抗の経時変化を図-5 に示す。コンクリート抵抗は分極抵抗測定の際に得られたものであり、コンクリート表面と鉄筋間のかぶり近傍の抵抗を示す。無処理のものではいずれのものも暴露年数の経過とともにコンクリート抵抗は大きくなった。江田島および御前崎地区は親不知地区のものより増加速度は大きく、乾燥しやすい環境にあったものと考えられる。これに対して、乾湿作用が緩和されたものの、乾燥しにくい環境にあった親不知地区では徐々に乾燥が進行したものと考えられる。暴露長期においては暴露地区による相違は小さくなった。暴露地区によって乾燥の進行速度は異なるものの、かぶり近傍の乾燥状態は同程度に近づいたものと考えられる。

含浸処理のものでは、暴露初期の段階から高いコンクリート抵抗を示した。含浸層の高い抵抗の影響もあるが、暴露初期の段階においても暴露地区による相違が認められ、江田島地区が最も大きく、親不知地区が最も小さい。無処理と同様に、乾燥しやすい地区ほど抵抗は大きい。

江田島地区では暴露 10 年程度から徐々に低下傾向を示した。この低下は中性化の影響を受けたものと考えられる。御前崎地区も暴露 14 年以降、江田島地区同様の傾向が認められた。鉄筋腐食への影響は不明であるものの、中性化によって液相の pH が低下し、コンクリート抵抗が小さくなった可能性が高いものと考えられる。

3.4 鉄筋の分極特性

(1) 塩化物イオン濃度の影響

初期塩化物イオン濃度の異なる無処理供試体で得られた分極曲線（ターフェル直線）を図-6 に示す。なお、親不知地区の初期塩化物イオン 2.2kg/m³について測定困難となったため、適宜 1.5kg/m³で代用した。いずれの地区においても、アノードターフェル直線は、初期塩化物イオン濃度が高いものほど、腐食電流密度、すなわち、腐食速度が大きくなる上側に推移した。アノードターフェル直線は、塩化物イオン濃度が高くなるほど、腐食速度が大きくなる方向に推移することが知られており、いずれの地域においても既往の知見と同様の傾向が確認された。同一暴露地区であれば、気象条件を含め環境条件の影響は同一であるため、鉄筋近傍の含水状態および酸素の供給状態が同一であるものと考えられる。すなわち、水および酸素の反応に関わるカソード反応、すなわち、カソードターフェル直線に変化はないものと予想される。

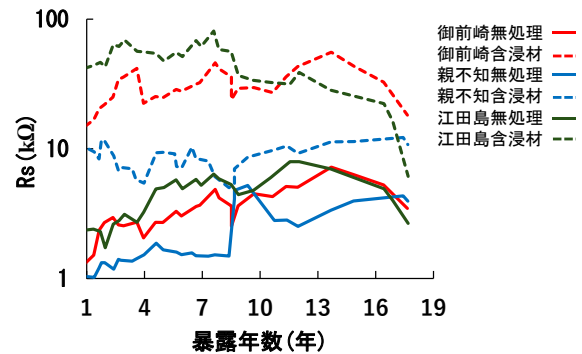


図-5 コンクリート抵抗

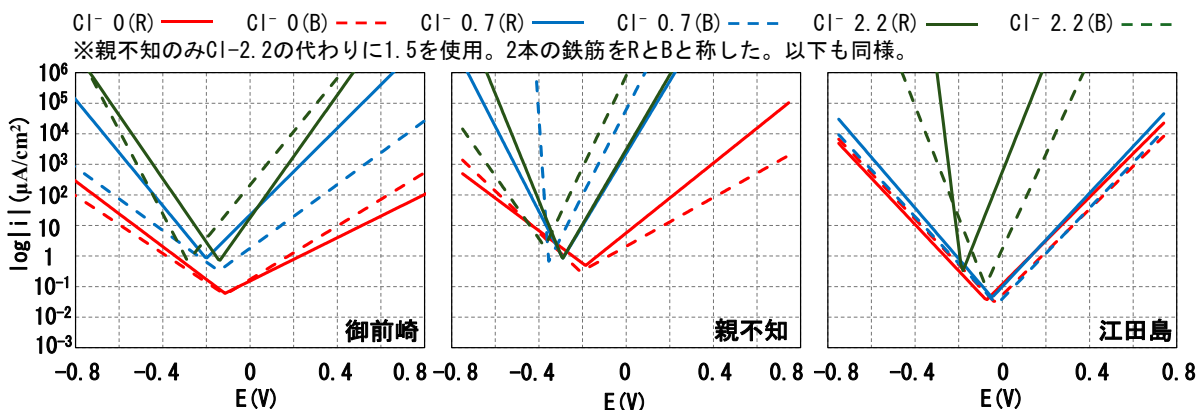


図-6 分極曲線（塩化物イオン濃度（無処理））

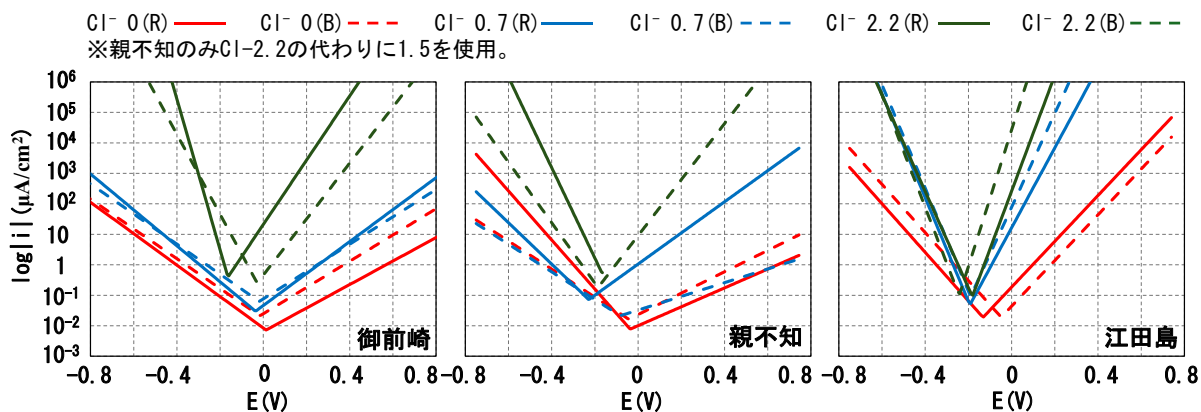


図-7 分極曲線（塩化物イオン濃度（含浸処理））

しかし、いずれの地区においても、塩化物イオン濃度が高いものほど、傾きが大きくなり、上側に推移する傾向が認められた。水および酸素以外の要因としては、塩化物イオン濃度が異なることにより鉄筋の腐食状態あるいは腐食生成等が異なったものと考えられる。既往の研究では、腐食生成物によってカソード電流が変化することが報告¹⁰⁾されており、腐食の有無または腐食生成プロセスがカソードターフェル直線に影響を与えたものと推察される。

初期塩化物イオン濃度の異なる含浸処理された供試体で得られた分極曲線（ターフェル直線）を図-7に示す。暴露地区にかかわらず、塩化物イオン濃度に対するアノードおよびカソード直線の変化の傾向は、無処理供試体と同様の傾向を示した。含浸処理された場合にも、塩化物イオン濃度に対する分極曲線の変化の傾向には顕著な相違はないものと考えられる。ただし、同一地区のもので無処理と含浸処理のものを比較すると、分極曲線の交点を示す腐食速度は含浸処理のものの方が小さく、塩分浸透および水分浸透抑制によって腐食速度が小さくなった。

(2) 環境条件の影響

環境条件が鉄筋腐食性状に与える影響を検討するため、腐食が発生し、かつかぶり位置の塩化物イオン濃度が同一となるものを比較することとした。2.3(3)の拡散予測の結果から、親不知地区の初期塩化物イオン濃度0.7kg/m³のもの、御前崎および江田島地区の2.2kg/m³のものを選定した。これらのかぶり近傍の塩化物イオン濃度は2.5kg/m³程度と予測された。なお、鉄筋近傍の状態は短期の気象条件に大きく左右されるものでないとし、考察を行った。

選定した供試体で得られた分極曲線（ターフェル直線）を図-8に示す。アノードターフェル直線については、御前崎地区のものは親不知地区のものより、下側に位置し、腐食電流が小さくなるような直線を示した。江田島地区のものは、御前崎地区より若干傾きは大きく、御前

崎地区と親不知地区の中間の領域となった。塩化物イオン濃度は概ね同じであるため、アノード反応に影響を与える要因として含水状態が考えられる。御前崎地区は親不知地区よりも乾燥が進行し、鉄筋近傍の含水状態が低く、アノード反応を生じるサイト（水分）が少なくなり、腐食速度が小さくなるアノードターフェル直線となったと考えられる。江田島地区は御前崎地区よりも乾燥しやすいため、腐食速度が小さくなる直線を示すと予想されたが、温度および日射等のその他の影響を受けたものと推察される。これらの結果から少なくともアノード反応においては、塩化物イオン濃度以外に、含水状態が強く関与する可能性が示唆される。

カソードターフェル直線については、アノードターフェル直線が示す傾向ほど顕著ではないが、親不知地区のもの傾きが小さく、江田島の傾きが大きく、御前崎地区はその中間程度のものとなった。カソードターフェル直線の傾きが小さくなるほど、腐食速度は大きくなった。上記で述べた通り、親不知地区は最も乾燥しにくく、江田島地区は最も乾燥しやすい環境であり、鉄筋近傍の含水状態と対応した結果が得られたものと考えられる。ただし、カソードターフェル直線の傾向にはばらつきも認められるため、さらなる検討によってその詳細を明らかにする必要がある。

環境条件が含浸処理された供試体中の鉄筋腐食に与える影響を検討するため、初期塩化物イオン無混和のもので得られた分極曲線を図-9に示す。また、腐食発生が生じ得る初期塩化物イオン2.2kg/m³で得られた分極曲線を図-10に示す。

初期塩化物イオン無混和のアノードターフェル直線については、江田島地区のものは他のものより上側に位置し、腐食速度が大きくなる直線を示した。交点を示す腐食速度は非腐食の値であるものの、中性化の影響によって腐食側にシフトしたものと考えられる。カソードターフェル直線については、暴露地区による相違は顕著でな

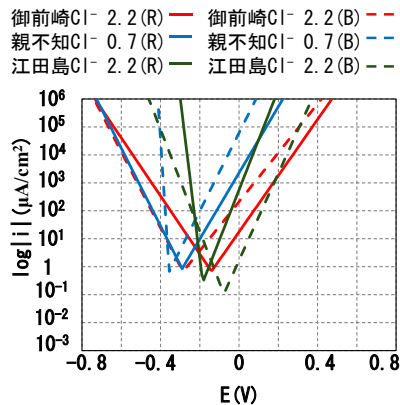


図-8 環境条件(無処理)

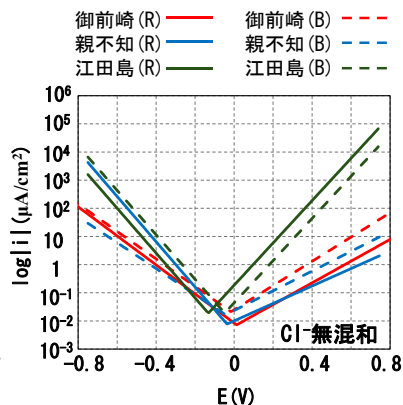


図-9 含浸処理(Cl⁻無混和)

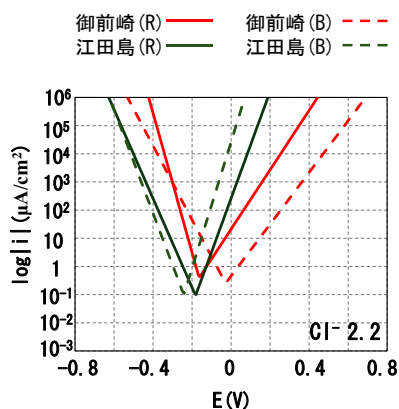


図-10 含浸処理(Cl⁻ 2.2)

く、同様の直線を示した。長期間の乾燥によっていずれもかぶり近傍の乾燥が進行し、同様のカソードターフェル直線を示したものと考えられる。

2.2kg/m³程度の塩化物イオン濃度のアノードターフェル直線については、江田島地区のものが上側に位置するもののその傾きも大きくなった。上側のシフトは上記と同様、中性化による影響によるものと考えられる。傾きが大きいと腐食速度が小さくなる。傾きの変化は乾燥の進行、あるいは水分供給が最も少ない環境によるものと推察される。カソードターフェル直線については、御前崎地区が上側に、江田島地区が下側に位置した。長期暴露後の乾燥によっていずれもかぶり近傍の乾燥は進行しているものと考えられる。江田島地区は水分供給の少ない環境であるため、より腐食しにくい下側に位置したものと考えられる。

以上の結果から分極曲線から長期暴露後のコンクリート中の鉄筋腐食性状について把握できるものと考えられる。なお、室内環境と異なり、かつ、長期暴露経過後の現地での測定であるため、測定結果には不確実性も含まれる可能性もあるため、得られた結果の妥当性については今後のさらなる検証が必要であろう。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 塩化物イオン濃度が大きくなるとアノードターフェル直線は腐食しやすい直線へと推移するとともに、カソードターフェル直線にも影響を与えた。
- (2) アノードターフェル直線においては含水状態が強く関与する可能性が示唆され、含水状態が低いものほど腐食しにくい直線へと推移した。
- (3) 含浸処理されたものにおいて、カソードターフェル直線に乾湿作用の影響が認められた。
- (4) 中性化が進行した含浸処理のものでは、アノードターフェル直線は腐食側へと推移した。

参考文献

- 1) 大即信明ら：中性化したコンクリート部材中の鉄筋の腐食速度に及ぼす温度の影響，材料，Vol.53，No.1，pp.108-112，2004
- 2) 飯島亨ら：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.11-16，2009.6
- 3) 山本佳城ら：コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.535-540，2001.7
- 4) 飯塚弘道ら：シラン含浸コンクリートの中性化と鉄筋腐食に関する研究：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.133-136，2018.10
- 5) 久保善司ら：気象条件の異なる長期塩害暴露試験に基づくシラン系表面含浸の処理効果に関する検討：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.24，pp.275-280，2024.10
- 6) 林大介ら：シラン・シロキサン系表面含浸材の開発および長期耐久性の実証，コンクリート工学，Vol.57，No.10，pp.777-784，2019.10
- 7) 気象庁 HP 過去の気象データ検索：
<https://www.data.jma.go.jp/stats/etn/index.php>（閲覧日：2025年1月4日）
- 8) 木角有希ら：長期塩害暴露による気象条件がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.847-852，2024.7
- 9) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書，設計編，pp161-163
- 10) 高谷哲ら：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集，Vol.71，No.3，pp.235-247，2015.7