

論文 腐食促進試験による表面含浸材の腐食抑制効果の検証

尾崎 勇太*1・今本 啓一*2・田中 章夫*3・澁井 雄斗*4

要旨：鉄筋コンクリート供試体を用いた実験室内における腐食促進試験において、補修効果の適切な評価が可能か検討を行った。腐食促進環境は乾湿繰り返しとし、補修材料として表面含浸材に着目し、けい酸塩系含浸材やシラン系含浸材、防水塗料を対象に試験を行った。自然電位やひび割れ幅などから腐食の程度を測定するとともに、含水率や相対湿度などから水分状況の測定も行った。その結果、シラン系含浸材と防水塗料において腐食抑制効果を確認し、腐食促進試験で適切な補修効果の評価が可能であることがわかった。

キーワード：塩害、促進試験、鋼材腐食、補修、表面含浸材

1. はじめに

環境に応じて適切な補修材料を採用することは、建物を長期的に活用していく観点で必要不可欠である。塩害に対するコンクリートの補修効果の評価については、これまで多くの研究が行われている^{例えは1)}。しかし、長期間を要する屋外暴露試験や、短期間の促進試験であってもコンクリート供試体を用いた検討のみにとどまっており、鉄筋コンクリート供試体を用いた実験室内での腐食促進試験による検討は事例が少なく、また確立された評価手法がないのが現状である。

そこで著者らは、実験環境に対応する腐食促進試験方法の提案を行うことを最終目的とし、長崎県端島のような深刻な塩害環境を再現するため、実験室内において腐食促進試験による検討を行ってきた²⁾。本稿では、補修材料として表面含浸材に着目し、補修材の違いによる腐食抑制効果について、検討している腐食促進試験で評価が可能かどうか検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本試験の供試体として、図-1 に示すような鉄筋コンクリート供試体を用意した。鉄筋(SS400 相当磨き丸鋼、直径 13mm)は、供試体中央かぶり 20mm の位置に 1 本設置した(写真-1)。試験面を除く 5 面はシーリング材を用いて保護した。鉄筋片端に自然電位測定のためのねじを接続させた。コンクリートの調合を表-1 に示す。塩化物イオン 5.0kg/m^3 を塩化ナトリウムとして、外割添加した。また、使用した補修材料の概要を表-2 に示す。なお、塗布量は各種メーカーの施工マニュアルに示された標準使用量である。補修材料は、表面含浸材としてけい酸塩系(けい酸ナトリウムとけい酸リチウムを主成分とする反応型)とシラン系(アルキルアルコキシシラン

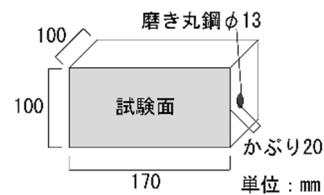


図-1 鉄筋コンクリート
供試体概要



写真-1 供試体

表-1 調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
60.0	46.0	180	300	811	973

W: 水(上水道水)

C: セメント(普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3)

S: 細骨材(大井川水系陸砂 表乾密度 2.59g/cm^3)

G: 粗骨材(青梅産 硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm^3)

表-2 補修材料の塗布量

補修材料	主成分	塗布量	塗布回数
無塗布	—	—	—
けい酸塩系	Na+Li(反応型)	240g/m ²	2回
シラン系	アルキルアルコキシシラン B	528g/m ²	
防水塗料	1成分ウレタン樹脂	1.2kg/m ²	

B) を用意し、また、コンクリート剥落防止用塗料として使用されている 1 成分ウレタン樹脂を主成分とする透明な防水塗料も用意した。比較のため、無塗布の供試体を用意し、各補修材料による腐食抑制効果の評価を行った。

2.2 試験方法

本試験の腐食促進環境は、乾湿繰り返しとした。濃度 3% の塩水に 3 日間浸漬させたのち、4 日間乾燥させる、7 日間を 1 サイクルとして、13 サイクルまで繰り返し行った。この間、温度は電気乾燥炉を用いて常に 60°C (自

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻(学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 日本工業大学 建築学部建築学科准教授 博士(工学)(正会員)

*4 日本建築総合試験所 材料部材料試験室(正会員)

然対流式) で一定とし、湿度の制御は行わず環境に依存した状態で試験を実施した。浸漬の際は、供試体の試験面を下にしてかぶりまで塩水に浸るようにした。

2.3 測定項目

表-3 に測定項目の一覧を示す。

(1) 視覚変化および撥水性

腐食促進試験を開始する前に、色差および光沢度の測定を行った。色差は色彩色差計(拡散照明垂直受光方式)を用いて式(1)より無塗布との色差として算出し、試験面において3箇所測定してその平均値を採用した。

$$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

ここに、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* : それぞれ2つの色の明度差、色相と彩度を示す色度差

光沢度はJIS Z 8741-1997の規格に準拠したハンディ光沢度計で測定を行い、試験面において3箇所測定してその平均値を採用した。

また、撥水性を評価するために試験面に垂らした水滴をデジタルカメラで撮影し、画像編集ソフト上で接触角の測定を行った。

(2) 含水状態

腐食促進試験中の供試体の含水状態を把握するため、質量変化率および表面含水率を測定した。

質量変化率は、式(2)より算出した。測定は、各サイクルの浸漬と乾燥の切り替え作業時に行った。

$$x = \frac{m' - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

x: 質量変化率(%)

m_0 : 開始時の質量(g)

m' : 各測定時の質量(g)

表面含水率は、高周波容量式水分計を用いて、試験面において3箇所測定し、その平均値を採用した。各サイクルの乾燥後に温度補正をして測定を行った。

(3) コンクリート内部の水分分布

腐食促進試験中における供試体内部の水分状況を観察するために、1サイクルにおいて内部含水率と相対湿度の測定を行った。各測定は供試体について前述の乾湿繰り返し条件で実施した。

内部含水率の測定は図-2に示すように、挿入式電気抵抗含水率計により、 $\phi 100 \times 200$ mm 円柱コンクリート供試体を用いて行った。供試体のコンクリートは表-1で示したコンクリートの調合と同一とした。試験面を除く面はシーリング材を用いて被覆した。測定時にブラシセンサーを挿し込むために、試験面に30mm間隔で、 $\phi 6.5$ mmの孔を2箇所あけた。測定は試験面から深さ方向に、10mm、20mmおよび30mmの3箇所で行った。浸漬後と乾燥後に測定を行い、各測定時に孔をあけ直した。

相対湿度の測定は図-3に示すように、温湿度センサ

表-3 測定項目

測定期間	測定項目	
腐食促進 開始前	視覚変化	色差, 光沢度
	撥水性	接触角
腐食促進 期間中	含水状態	質量変化率, 表面含水率,
	内部水分 分布	挿入式電気抵抗含水率, 相対湿度
	鉄筋腐食	自然電位, 腐食電流密度, 最大ひび割れ幅
腐食促進 終了後		鉄筋質量減少率
	塩分浸透	全塩化物イオン量

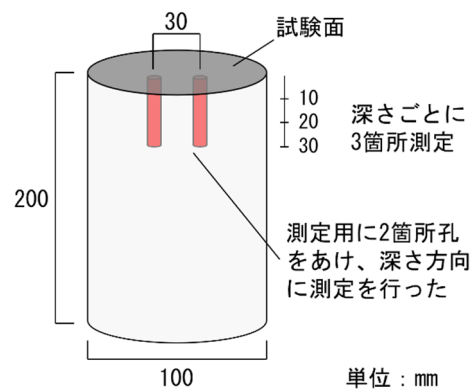


図-2 内部含水率測定用供試体

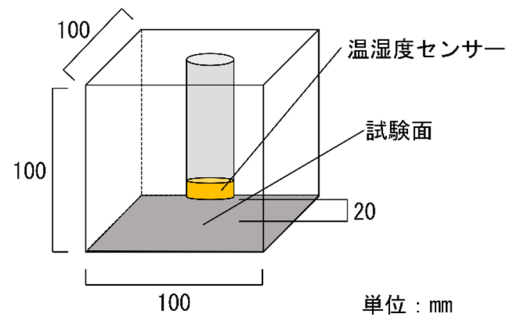


図-3 相対湿度測定用供試体

ーにより、100×100×100mm 角柱コンクリート供試体を用いて行った。供試体のコンクリートは表-1で示したコンクリートの調合と同一とした。試験面を除く5面はシーリング材を用いて被覆した。供試体は試験面の反対側の面から深さ方向に $\phi 30$ mmの孔をあけ、鉄筋コンクリート供試体での鉄筋位置に合わせて試験面から20mmの位置に温湿度センサーを埋設した。埋設後は孔を発砲プラスチック保温材で塞ぎ、上からアルミテープを貼ることで、孔からの熱の伝達および水分の侵入を防止した。

(4) 鉄筋腐食

腐食促進試験中の鉄筋腐食状況を確認するために、自然電位および腐食電流密度を測定した。測定は、各サイクルの浸漬と乾燥の切り替え作業時に行った。

自然電位の照合電極には、硫酸銅電極を用いて測定した。照合電極の先端に十分に湿らせたスポンジをつけて

コンクリート面との導通を確保した。試験面において 3 箇所測定をし、その最小値を採用した。

腐食電流密度の測定は、図-4 に示す腐食メータを用いて、試験面をよく湿潤させた状態で 1 箇所測定を行った。腐食メータは、参照電極に硫酸銅電極を用い、中央の対電極とガードリングの両方に印加される電流を制御し、黄色いリング内を分極領域として、直線分極抵抗法で腐食電流密度の測定を行うものである。

最大ひび割れ幅は、任意の 3 箇所においてクラックスケールを用いて目視で測定し、その最大値を採用した。

腐食促進試験終了後において、ひび割れが発生した供試体から取り出した鉄筋の質量減少率の測定を行った。取り出した鉄筋は除錆液に 4 日間浸漬し、その間 1 日おきに付着した錆をブラシでこすり落とすことで錆を取り除いた。除錆液は、クエン酸水素二アンモニウム 10%水溶液を使用した。鉄筋の溶出防止のために、2-ベンゾチアゾール 1%アルコール溶液をクエン酸水素二アンモニウム水溶液 1000ml に対して 15ml 添加した。除錆した鉄筋は質量を測定し、式(3)より質量減少率を算出した。

$$y = \frac{m_s - m'_s}{m_s} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

y : 鉄筋質量減少率(%)

m_s : 腐食前の鉄筋質量(g)

m'_s : 腐食後の鉄筋質量(g)

(5) 塩分浸透

鉄筋を取り出した供試体のコンクリート部分について、試験面から深さ 0~20mm, 20~40mm および 40~60mm の 3 箇所て試料を採取して分析に用いた。採取した試料中の全塩化物イオン濃度を、JIS A 1154 に準拠し、電位差滴定法により測定した。

3. 試験結果

3.1 塗布後の視覚変化および撥水性

含浸材および塗料の塗布前のコンクリート表面と仮定して、無塗布を基準とした色差の測定結果を図-5 に示す。シラン系が最も小さい値となっている。光沢度の測定結果を図-6 に示す。無塗布を基準として、けい酸塩系およびシラン系は塗布後の光沢度の変化が小さかった。以上のことから、本試験の範囲内においては、シラン系が最も視覚変化が小さい結果となった。

接触角の測定結果を図-7 に示す。シラン系において高い撥水性があることがわかる。けい酸塩系と防水塗料では接触角が小さくなっており、撥水性能を持っていないことが確認できる。

3.2 腐食促進試験

(1) 含水状態

供試体質量変化率の測定結果を図-8 に示す。乾湿を

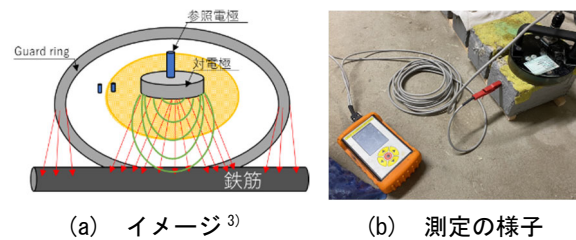


図-4 腐食メータ

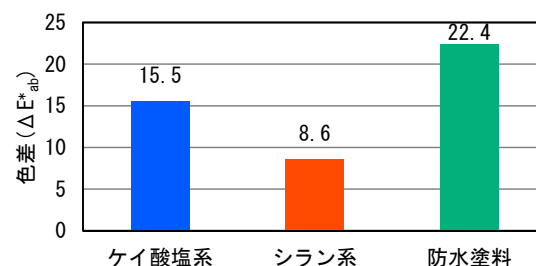


図-5 色差

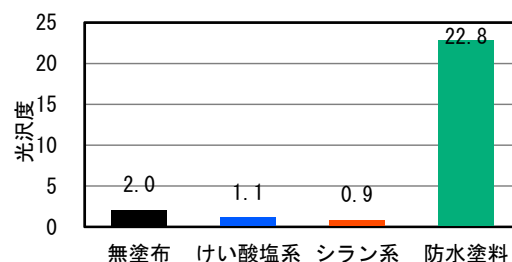


図-6 光沢度

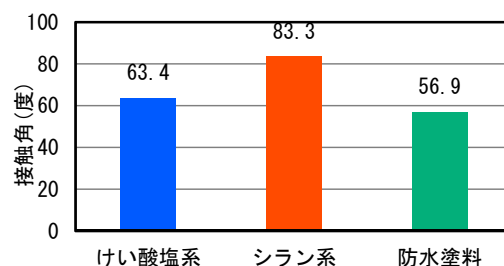


図-7 接触角

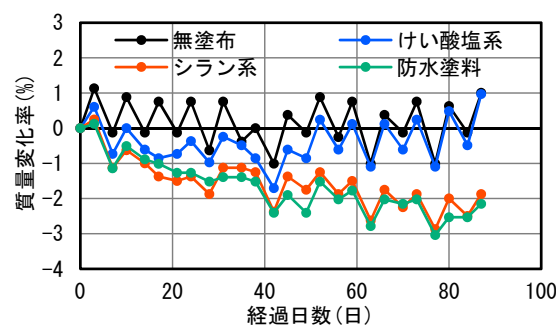


図-8 質量変化率

繰り返すことで、水分量が変化し、質量の増減を繰り返していることがわかる。けい酸塩系において無塗布と似た傾向を示している。一方、シラン系や防水塗料では増

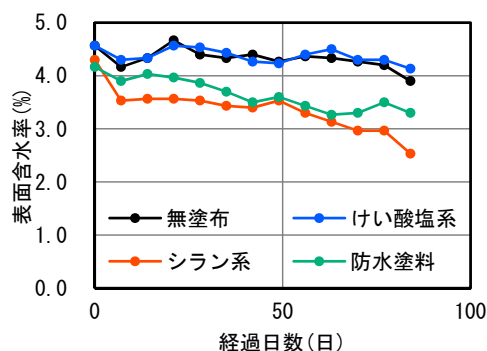


図-9 表面含水率

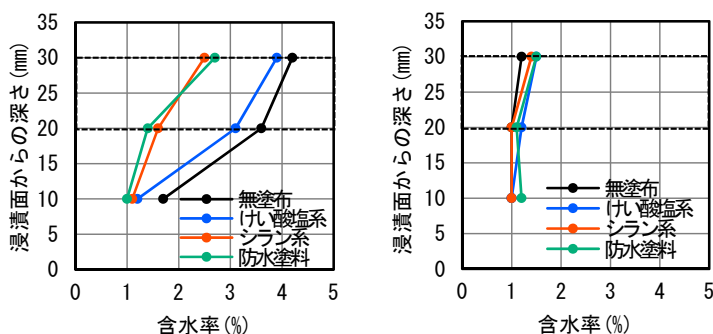


図-10 浸漬後(左)と乾燥後(右)の内部含水率

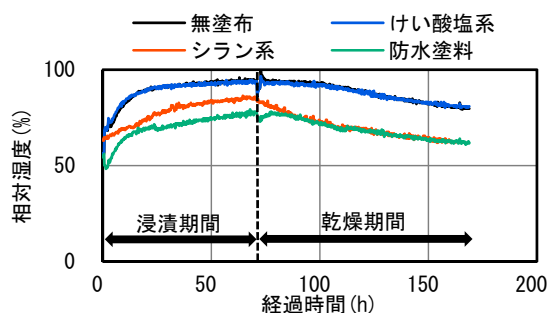


図-11 相対湿度

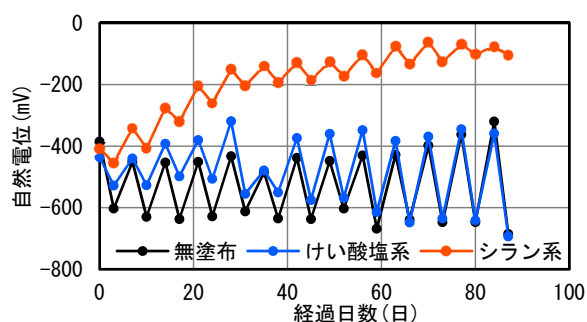


図-12 自然電位

減を繰り返しながら、全体的に質量が減少傾向にある。

表面含水率の測定結果を図-9に示す。シラン系と防水塗料では無塗布と比較して値が小さく抑えられている。一方、けい酸塩系では無塗布と比較して同等の値で推移している。質量変化率の測定結果と同様に、本試験の範囲内においては、けい酸塩系では水分浸透抑制効果が明確にみられなかった。また、全体的に表面含水率は減少傾向にあり、特にシラン系および防水塗料はその傾向が顕著である。これは、図-8に示す質量変化率が減少傾向にあったことと重なる。このことからシラン系および防水塗料では浸漬期間に水分浸透を抑制し、乾燥期間には内部の水分が逸散していることが考えられる。

(2) コンクリート内部の水分分布

1サイクルにおける内部含水率の測定結果を図-10に示す。なお、測定器の仕様で1%未満では値が表示されなかったため、1%未満の箇所はデータ上1%として示した。浸漬後では試験面から深くなるにつれ、含水率が高くなる傾向がみられた。無塗布とけい酸塩系の鉄筋位置での含水率が浸漬後は3~4%、乾燥後は1~1.5%程度となっており、鉄筋位置まで水分が浸透し、乾湿が繰り返されている。シラン系と防水塗料では、鉄筋位置での含水率が浸漬後は1.5~2.5%、乾燥後は1~1.5%程度で推移しており、無塗布に比べて乾湿の影響を受けにくい状態であり、水分浸透抑制効果がある。

1サイクルにおけるコンクリート内部の相対湿度の測定結果を図-11に示す。浸漬期間で湿度が上昇し、乾燥

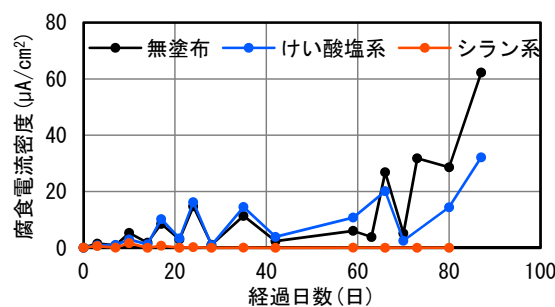


図-13 腐食電流密度

期間で下降している様子を確認できる。無塗布とけい酸塩系ではほぼ同じ推移をしており、浸漬期間に90%RH、乾燥期間に80%RH程度となっており、高湿度で推移している。シラン系は浸漬期間に85%RH、乾燥期間に60%RH程度となっており、80%RHを跨ぐように変化している。防水塗料は浸漬期間でも80%RH以下の相対湿度になっており、サイクル期間中の相対湿度は他の表面含浸材に比べて低く推移している。

(3) 鉄筋腐食

自然電位の測定結果を図-12に示す。なお、防水塗料は防水層の影響で測定不可であった。浸漬後の測定では値が小さくなり、乾燥後の測定では値が大きくなる傾向がある。シラン系では試験開始後から自然電位の値が増加しており、鉄筋腐食が抑制されていることがわかる。一方、けい酸塩系では自然電位の値が無塗布と同様の傾向を示している。

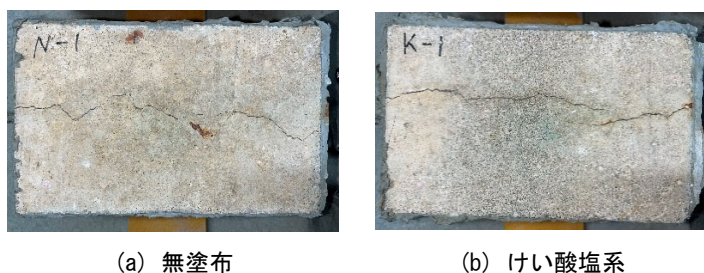


写真-2 無塗布とけい酸塩系のひび割れの様子

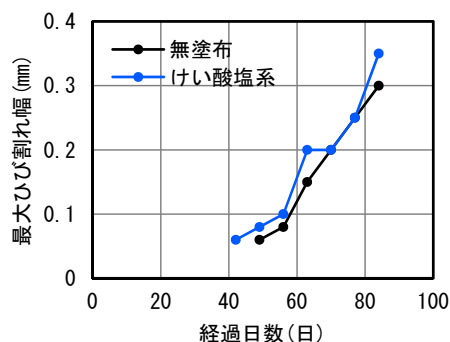


図-14 最大ひび割れ幅

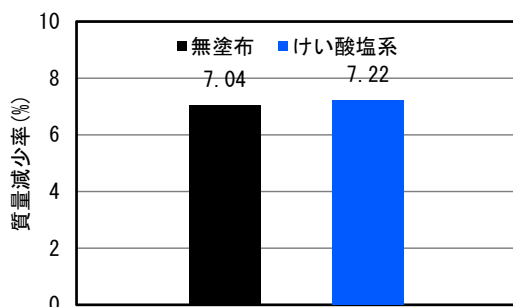


図-15 鉄筋質量減少率

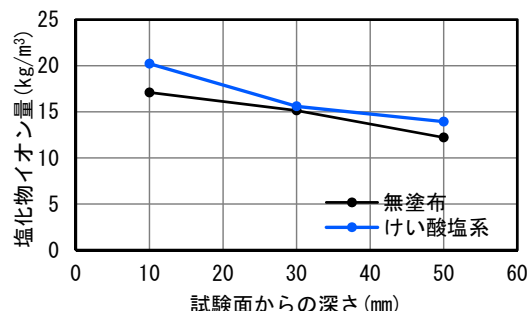


図-16 腐食促進試験の全塩化物イオン量

腐食電流密度の測定結果を図-13に示す。自然電位と同様、防水塗料では測定不可であった。無塗布とけい酸塩系では値が大きく変動している。シラン系では、 $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満で推移していて、無塗布とけい酸塩系に比べて、鉄筋腐食が抑制できていることがわかる。

13 サイクルの乾湿繰り返しによる腐食促進試験が終了したのち、供試体のひび割れの様子を写真-2に示す。13 サイクルでひび割れが確認できたのは無塗布とけい酸塩系の2つであり、シラン系と防水塗料はひび割れが確認できていない。最大ひび割れ幅の測定結果を図-14に示す。また、これらのひび割れが発生した供試体から取り出した鉄筋の質量減少率を図-15に示す。無塗布とけい酸塩系での大きな差はみられず、鉄筋腐食状況の差はほとんどなかったといえる。

なお、本実験では含浸材を塗布した試験面において自然電位や腐食電流密度の測定を実施しているため、今後は、含浸材がこれらの電気化学的測定に及ぼす影響について、試験体側面や試験面の反対面などに測定窓を設けて計測を行い、検討を行う予定である。

(4) 塩分浸透

ひび割れが発生した無塗布およびけい酸塩系において、鉄筋を取り出したのち、コンクリート部分における試験面から深さごとの全塩化物イオン量の滴定結果を図-16に示す。試験面からの深さが浅いほど多くの塩分を含んでいる。既往研究⁴⁾において、内在塩分を含まないモル

タル供試体の乾湿繰り返し後の全塩化物イオン量の測定結果が報告されている。これによると、乾湿繰り返しのサイクル数が増加することで、内部への塩分浸透が進行することがわかる。1日浸漬3日乾燥のサイクルを20サイクルほど繰り返すことで、表層部付近の全塩化物イオン量が $20\text{kg}/\text{m}^3$ ほどにまで到達することも示されており、本試験における測定結果とも矛盾しない。

無塗布とけい酸塩系での違いはほとんどみられず、けい酸塩系の方がやや塩分濃度が高いという結果となった。供試体作製時の内在塩化物イオン量は $5.0\text{kg}/\text{m}^3$ であるが、本試験結果では、コンクリート内部まで高い全塩化物イオン量となっており、塩分の浸透に及ぼすひび割れ幅の影響については今後の検討が必要である。

4. 考察

4.1 腐食促進試験による補修材評価

本研究の腐食促進試験では、シラン系と防水塗料において腐食が抑制できていることが確認できた。シラン系では含浸材塗布によって付与された撥水性能により、水分浸透が抑えられ、結果として腐食が抑制できた。防水塗料では、表層部分の防水層自体に撥水性能はないものの、防水材として水分浸透を抑えられており、その水分浸透抑制効果はシラン系を上回ることも考えられる結果を得られた。

けい酸塩系は、コンクリートに塩分を多量に混入させている特殊な条件の本試験の範囲内では、腐食抑制効果が明確に確認できなかった。けい酸塩系の含浸材は、け

い酸塩がセメント中のカルシウムと反応し、C-S-H 結晶の生成によりコンクリート中の空隙を充填し、表層部を緻密化することで、外部因子の侵入を防ぐというものである。中性化進行の抑制は多くの研究で確認されているほか、既往研究⁵⁾において、けい酸塩系含浸材で補修したモルタル供試体の、塩水噴霧槽を用いた塩分浸透試験について報告されている。内在塩分を含まない供試体に塩分が浸透した深さを測定した結果、けい酸塩系含浸材による塩化物イオンの浸透抑制が確認されている。よって、内在塩分を含まない供試体を用いた塩水噴霧試験においては、けい酸塩系含浸材は効果を発揮できるということがわかる。以上より、本試験においてけい酸塩系が効果を示さなかった原因として、内在塩分や塩水への浸漬などが考えられる。けい酸塩系含浸材の効果を適切に評価する試験条件については今後の検討が必要である。

4.2 端島での暴露試験との比較

3 章で得られた結果を実際の端島での暴露試験データと比較する。端島での測定環境下は既往研究⁶⁾に示されているように $25\sim30\text{mg/dm}^2/\text{day}$ と推定される。既往研究¹⁾において、端島での内在塩分を含む鉄筋コンクリート供試体の暴露試験による補修効果の検証について報告されている。本実験で使用した表-2 に示すシラン系およびけい酸塩系と同一材料、同一塗布量で補修されている試験体の結果を見てみると、シラン系含浸材で補修した供試体で十分な腐食抑制効果を確認できた一方、けい酸塩系含浸材で補修した供試体では腐食抑制効果を得られていない。これは腐食促進試験の結果と一致しており、本試験において実環境に対応した適切な補修効果の評価ができたといえる。

また、この端島での暴露試験¹⁾について、暴露 5 年目の屋外暴露供試体の全塩化物イオン量測定結果を図-17 に示す。ここで示したけい酸塩系のデータは、本腐食促進試験と同一材料の含浸材を用いたものである。表層部付近で塩化物イオン量が低くなっており、中性化による塩分濃縮が起きていることがわかる。これと比較すると、腐食促進試験として実環境よりも過酷な環境に設定されていることがわかる。よって、本試験での全塩化物イオン量の浸透の評価にはある程度の妥当性があるといえる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 腐食促進試験において、けい酸塩系含浸材、シラン系含浸材、防水塗料の初期状態としての補修効果について、塩水での乾湿繰り返しを通した試験での評価が可能であることを示した。
- (2) 本腐食促進試験では、塩分を内在する鉄筋コンクリ

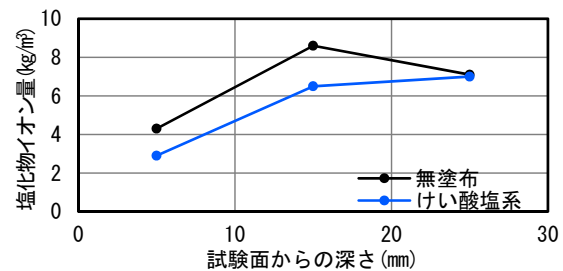


図-17 屋外暴露試験の全塩化物イオン量

ート供試体の補修材料として、シラン系含浸材と防水塗料にて腐食抑制効果を確認できた。一方、けい酸塩系含浸材では腐食抑制効果を確認できなかった。

- (3) 本研究における試験条件下では効果が限定的であった、けい酸塩系の含浸材については、既往研究との比較から、効果を発揮するための条件が存在すると推測できる。今後の更なる検討が必要である。

今後も引き続き試験を行い、端島での暴露試験データとの比較検討を行うとともに、けい酸塩系の含浸材は、適切に効果を発揮するための条件が存在すると推測されるため、試験条件等を検討する予定である。

参考文献

- 1) 澁井雄斗，今本啓一，濱崎仁，下澤和幸：厳しい塩害環境下における RC 部材の補修効果検証のための屋外暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1432-1437，2020
- 2) 尾崎勇太，今本啓一，田中章夫，澁井雄斗：端島共通試験を踏まえた腐食促進試験方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.673-678，2024
- 3) C. Andrade ほか： Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, RILEMTC154-EMC, Materials and Structures, Vol.37, pp.623-643, 2004
- 4) 池田伊輝，加藤佳孝，直町聡子，江口康平：水分移動を伴う塩化物イオンの浸透性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.763-768，2017
- 5) 近藤拓也，樋口和朗，宮里心一，横井克則：けい酸塩系表面含浸材の Cl⁻侵入阻止効果を示す指標に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1645-11650，2017
- 6) 清水俊，崎原康平，山田義智，濱崎仁：長崎県軍艦島における飛来塩分輸送状況の推定に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.763-768，2015