

論文 塩分を含んだ RC への表面処理施工による鉄筋防食効果の検討

野村 裕太*1・近藤 拓也*2・横井 克則*3・森下 将樹*4

要旨: 本研究では、塩分を含むコンクリートに対して、シラン系表面含浸材と表面被覆材を使用し、コンクリート床版における舗装面から含浸材塗布面への水分流入を模した吸水環境を設定した。供試体を最大 12 ヶ月間存置し、Cl⁻濃度分布と防食効果を定期的に測定した。その結果、表面被覆材の塗布面付近に水が蓄積するような傾向が確認された。また、表面含浸工を行った場合、鉄筋付近への塩分の拡散が抑えられることが確認され、表面処理工法の適用による防食効果が確認された。

キーワード: シラン系表面含浸材, 表面被覆材, 透湿性, 含水率, Cl⁻濃度, 腐食速度

1. はじめに

シラン系表面含浸工は日本において、性能評価が多く行われている¹⁾²⁾。本材料は撥水性を付与するため、塩分侵入阻止を目的として既設構造物への適用を想定されることが多い。しかし、沿岸部等の既設構造物においては、既にコンクリート中に塩分を含んでいる可能性がある。さらに橋梁床版等では、降雨により水が舗装面から浸入し、コンクリート中から含浸材塗布面へ向けて水の流れに伴う塩分移動が起こる可能性もある。そのため、塩分侵入阻止を目的として表面含浸工を適用しても、それによりコンクリート中の塩分拡散挙動が複雑になることが予想される。場合によっては、表面含浸工適用前よりも適用後の方が鉄筋腐食に対して不利になる可能性も考えられる。そのため、コンクリート中に塩分が含まれる場合の表面含浸工適用後の塩分拡散挙動について、ある程度正確な理論を確立させる必要がある。

本研究では、コンクリート中に塩分を含んだ供試体にシラン系表面含浸工および表面被覆工を実施し、反対面から水分を供給することにより、実環境を模擬した水分環境を設定した。これによる塩分移動状況および防食効果の検討を目的とし、実験を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

シラン系表面含浸材は主成分がアルコキシシラン (主成分濃度: 90%以上) のものを使用した。シラン系表面含浸材の種類を表-1 に示す。なお、以降本文中では「シラン」と略す。表面被覆材は主成分がエポキシ樹脂のものを使用した。表面被覆材の種類を表-2 に示す。なお、以降本文中では「被覆材」と略す。塗布量及び塗布回数はメーカーの水準を目安とした。

2.2 供試体概要

コンクリートの配合表を表-3 に示す。試験要因および水準を表-4 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、コンクリートの水セメント比は 60%とした。また、NaCl を細骨材と 10kg/m³ 置換して、養生方法は 7 日間の湿潤養生とした。存置環境への設置の前日 (材齢 90 日) にシランおよび被覆材の塗布を行った。図-1 に示すように打込み面を含む 4 面にエポキシ被覆を行った。その後、エポキシ被覆をしていない 2 面のうち、かぶりが小さい面にシランもしくは被覆材を塗布した。また、その反対面を吸水面とした。これは橋梁床版下面に表面処理工法が適用された状態で、塗布面の反対側からの水の浸入を模擬したためである。供試体寸法は、100mm×

表-1 シラン系表面含浸材の種類

種類	含浸材
主成分	アルコキシシランおよび ポリアルキルアルコキシシロキサン
主成分濃度	90%以上
塗布量 (g/m ²)	200(1回塗布)
外観	ジェル状

表-2 表面被覆材の種類

種類	被覆材	
主成分	エポキシ樹脂	
構成材料	エポキシ樹脂系 プライマー	柔軟型 エポキシ樹脂系塗料
塗布量 (g/m ²)	100(2回塗布)	700(2回塗布)
外観	液状	高粘度白色液体

*1 高知工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 (正会員)

*4 高知工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

表-3 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 AE減水剤 (g/m ³)
				W	C	S	G	NaCl	
25	60	10±1.5	4.5±1.5	183	305	871	880	10.0	76.2

100mm×100mmとした。鉄筋の長さは分極測定時の回路接続のため、140mm のものを配置した。シランおよび被覆材塗布後は、乾燥条件下 (20℃, 60%R.H. 一定), 吸水条件下 (図-2 に示すように、吸水面が水に浸る程度の水中条件下) で存置した。

2.3 試験方法

供試体の含水率はコンクリートモルタル水分計を用いて測定を行った。含水率測定機は削孔式電気抵抗式を用い、図-1 に示すように塗布面の中央に3箇所の削孔位置とし、削孔箇所はそれぞれが30mmの間隔となるようにした。1箇所につき深さ25mmまで削孔し、削孔箇所2点間の電気抵抗により含水率を測定した。Cl⁻量については、シランおよび被覆材塗布面から10mmごとにドリルを使用して粉末サンプルを収集し、電量滴定法を用いて測定を行った。分極抵抗の測定には携帯型鉄筋腐食診断機を用いた。被覆材塗布面からの測定はできないため、測定面は吸水面もしくは乾燥面とした。この測定器は一般的な高および低2周波数 AC インピーダンス値から分極抵抗 (Rp) を測定する。その結果から式(1)、式(2)を用いて腐食速度を算出した³⁾⁴⁾。

$$I_{corr} = K \cdot 1/R_p \quad (1)$$

$$1 [\mu A/cm^2] = 1 [mg/cm^2/year] \quad (2)$$

ここで、I_{corr}: 単位面積当たりの腐食電流密度(A/cm²), K: 値(V) (0.026)

鉄筋の腐食測定については、供試体を3ヶ月ごとに解

表-4 試験要因および水準

試験要因	水準
端部条件	吸水条件, 乾燥条件
存置環境	無塗布, シラン, 被覆材

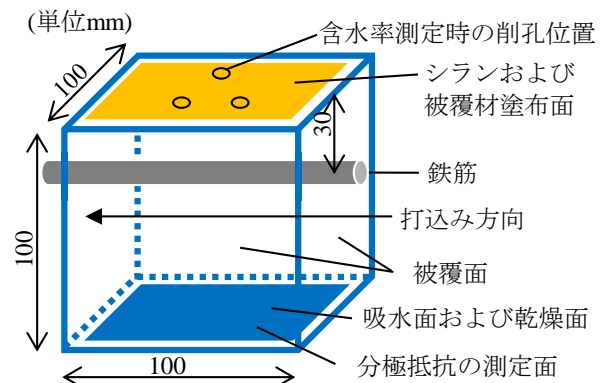


図-1 供試体概要

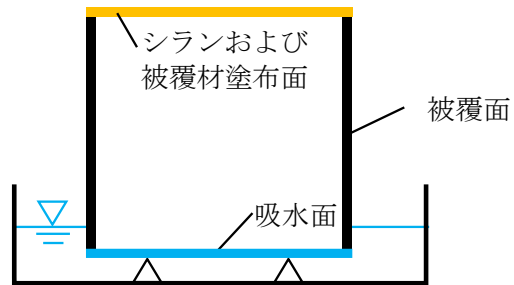


図-2 吸水条件概要

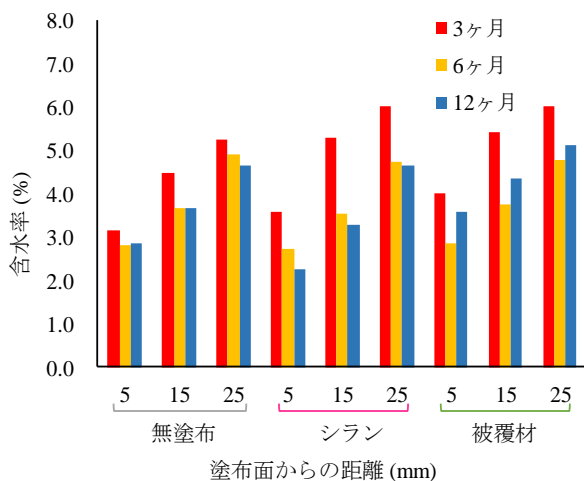


図-3 含水率(吸水条件)

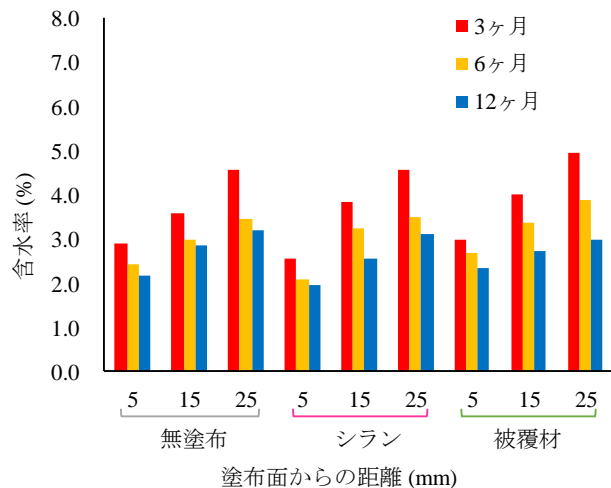


図-4 含水率(乾燥条件)

体し、鉄筋の直径と質量を測定した。なお、コンクリートとの付着部 100mm のうち、長さ 10mm ごとに直径を測定し、その結果から式(3)を用いて変動係数を算出した。

$$CV = \sigma / \mu \quad (3)$$

ここで、 CV : 変動係数、 σ : 10ヶ所の直径の標準偏差(mm)、 μ : 直径の平均(mm)である。

3. 試験結果と考察

3.1 含水率

含水率の測定結果を図-3 および図-4 に示す。測定範囲はコンクリート表面もしくは施工面から 5mm, 15mm, 25mm とした。図-3, 図-4 より、吸水、乾燥両条件において 3ヶ月から 6ヶ月にかけて含水率が減少する傾向を示した。さらに、乾燥条件では 6ヶ月以降も含水率が減少する傾向を示した。吸水条件では、被覆材は 6ヶ月以降に含水率が上昇する傾向を示した。また、無塗布やシランと比較しても、6ヶ月以降の含水率が大きくなる傾向を示した。このことから既往の研究⁹⁾より、シランは塗布面から水分が放出されており、一方で被覆材は塗布面付近で水分が蓄積されている可能性があると考えられる。また、両条件において、シランおよび被覆材塗布面に近いほど含水率が小さい傾向を示した。これは、コンクリート表面に近いほど乾燥しやすいためと考えられる。

3.2 Cl⁻濃度

Cl⁻濃度の測定結果を図-5 から図-10 に示す。本試験では、ブリーディングによる塩化物イオン濃度のばらつきを抑えるために、コンクリートの打ち込み方向を図中に示すような向きとした。X軸をシランおよび被覆材塗布面、もしくは無塗布面からの距離としており、30mm は鉄筋位置、100mm が吸水面または乾燥面である。本試験には 10kg/m³ の NaCl を事前に混入したが、縦軸を Cl⁻濃度表記としているため、Cl⁻濃度 6kg/m³ が標準量になると

考えられる。また、図-5 から図-10 より、線形回帰によって求めた Cl⁻濃度勾配の傾きを図-11 および図-12 示す。吸水面および乾燥面へ向けて Cl⁻濃度が大きくなるような右肩上がりの勾配を正、シランおよび被覆材塗布面へ向けて Cl⁻濃度が大きくなるような右肩下がり勾配を負とした。

吸水条件の無塗布では図-5 および図-11 に示すように、Cl⁻濃度の勾配が経時的に増加し、10mm 付近で Cl⁻濃度が大きくなる傾向を示した。これは、吸水面から反対面へ向けて、水分移動に伴う NaCl の移動⁹⁾によって、表面付近に Cl⁻が蓄積されたためと考えられる。一方、図-7, 図-9, 図-11 に示すように、表面処理工法が適用された試験体は無塗布の供試体に比べて、経時的な Cl⁻濃度勾配の変化が小さくなる傾向を示した。これは、端部条件ごとに透水性が異なるためと考えられる。無塗布では水分を通すため、水分移動に伴い Cl⁻の移動が生じると考えられる。被覆材に関しては、3.1 で述べたように、遮湿性により水分が蓄積されている可能性があることから、コンクリート内の含水率が一定となり、水の流れが生じにくくなっていると考えられる。これにより、Cl⁻濃度勾配が小さくなっていると考えられる。また、吸水条件では、鉄筋位置では各条件ともに同程度の Cl⁻濃度であった。しかし、図-11 に示すように、Cl⁻の移動方向を考慮すると、塗布面からの距離 10mm から 30mm の Cl⁻濃度は、鉄筋位置を通過した塩化物イオン濃度となる。そのため、図-5, 図-7, 図-9 より、無塗布供試体の鉄筋が最も塩化物イオンの影響を受けたと考えられる。

また、特にシランに関して、水蒸気を通すため透湿性があることから、3.1 で述べたように、塗布面から水分が放出されたと推察される。そのため、吸水面からシラン塗布面への水分移動が生じていると考えられる。しかし図-5 と図-7 を比較すると、無塗布とは異なり、Cl⁻濃度

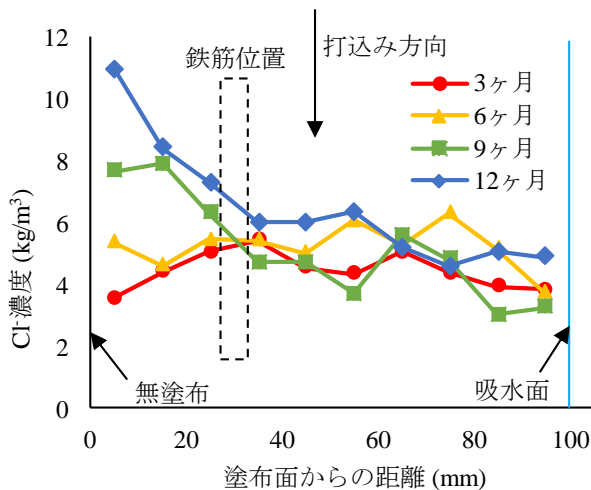


図-5 Cl⁻濃度分布(無塗布, 吸水条件)

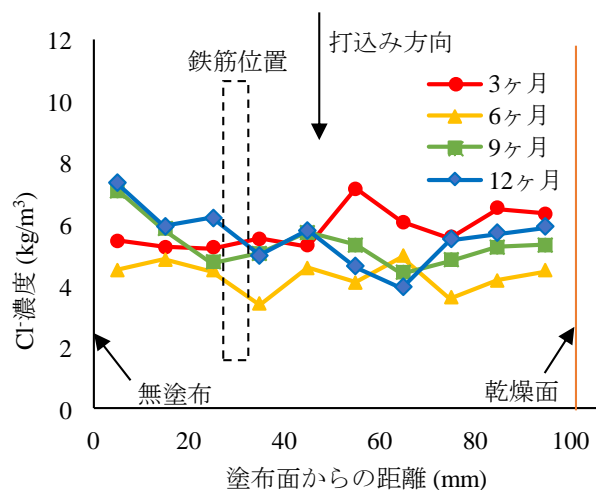


図-6 Cl⁻濃度分布(無塗布, 乾燥条件)

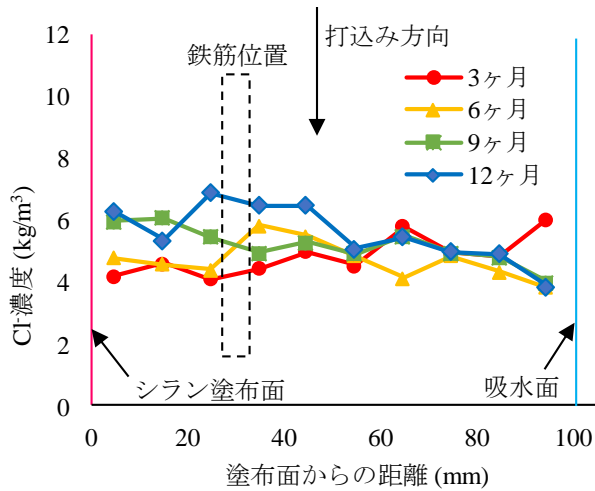


図-7 Cl⁻濃度分布(シラン, 吸水条件)

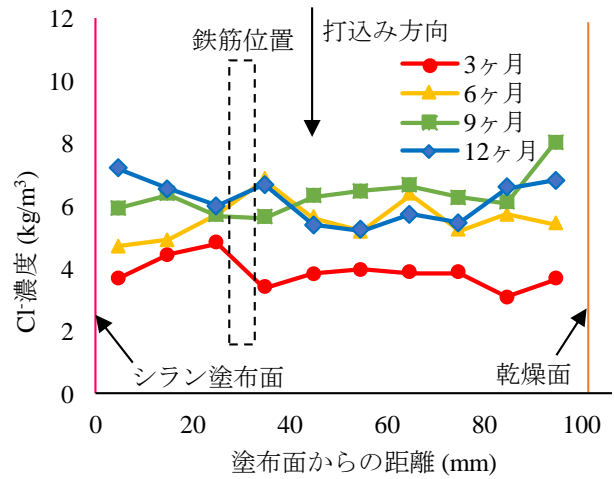


図-8 Cl⁻濃度分布(シラン, 乾燥条件)

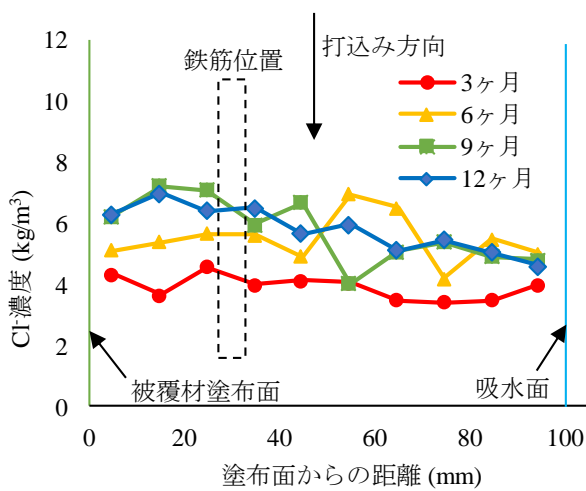


図-9 Cl⁻濃度分布(被覆材, 吸水条件)

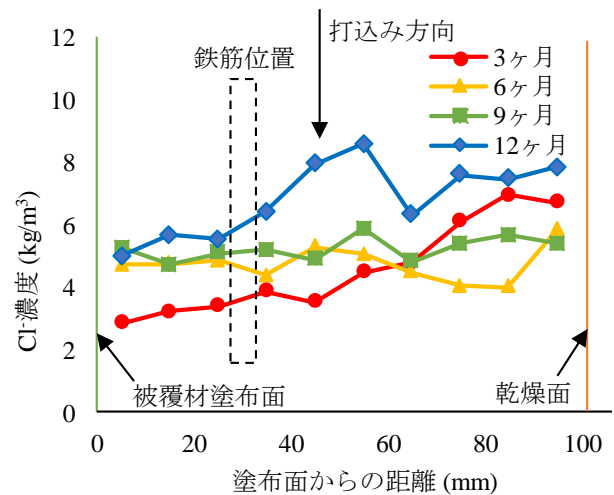


図-10 Cl⁻濃度分布(被覆材, 乾燥条件)

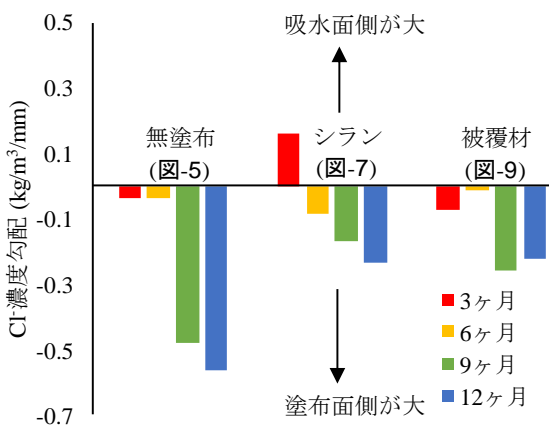


図-11 Cl⁻濃度勾配(吸水条件)

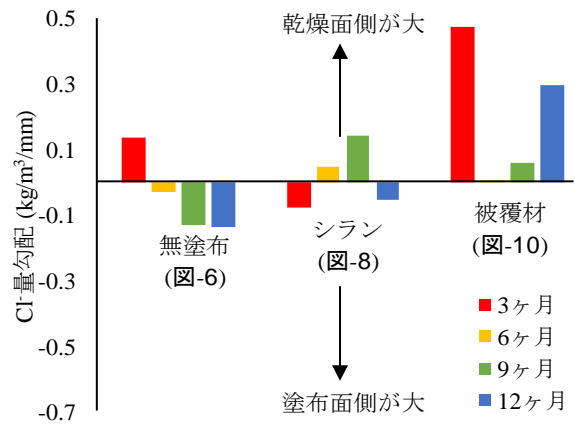


図-12 Cl⁻濃度勾配(乾燥条件)

の深さによる変化は小さい傾向が確認された。これは、撥水層が形成されるため、吸水面からの水の浸透が抑制されたため、無塗布と比較すると水分移動が生じにくくなったと考えられる。また、シランの塗布に伴う撥水効

果によって、塩分の通過量が減少する可能性があると考えられる。これにより、12ヶ月以降もCl⁻が移動することにより、吸水防止層の境界で塩分が蓄積し、鉄筋位置でのCl⁻濃度が増加する可能性が示唆される。さらに、無

塗布について Cl 移動に伴い塩分がコンクリート表面に溶出すると考えられることから、12 ヶ月以降、鉄筋位置においてシランは無塗布よりも Cl 濃度が増加する可能性が示唆される。

乾燥条件では、無施工とシランは図-12 に示すように Cl 濃度勾配の変化が小さい結果となった。これは両面が乾燥しているため、両面から水分が放出することによって、Cl 濃度勾配が小さくなったと考えられる。一方で被覆材は図-10 および図-12 に示すように、被覆材塗布面から乾燥面方向への Cl 濃度勾配が大きくなる結果となった。これは、被覆面側が遮湿性のため、水分の放出する流れが一方方向となり Cl の移動が生じた可能性が考えられる。

3.3 腐食速度

分極抵抗の測定結果から、算定した腐食速度の経時変化を図-13 および図-14 に示す。吸水条件では図-13 に示すように、腐食速度が経時的に大きくなる傾向を示した。しかし、無塗布に比べてシランや被覆材は、腐食速

度が 1/2 程度の結果が得られた。さらに、シランは被覆材に比べて 0.1mm/年程度小さくなる傾向を示した。しかし図-14 と比較すると、1 年間を通して乾燥条件と比べると吸水条件の方が、無塗布、シラン、被覆材それぞれ 44 倍、3 倍、27 倍程度大きくなるという結果が得られた。

3.4 質量減少率および直径の変動係数

吸水条件における直径の変動係数および質量減少率を図-15 および図-16 に示す。塩害による鉄筋腐食は孔食を伴うため、鉄筋の長手方向の位置による直径減少量のばらつきが大きくなることが前原らの論文⁷⁾などに示されている。そのため、直径のばらつきの指標である変動係数で評価を行った。吸水条件では、図-15 および図-16 に示すように、変動係数と質量減少率共に無塗布が大きいという結果が得られた。また両図とも、シランは被覆材に比べてやや小さくなるという結果が得られた。この大小関係は、3.3 の図-13 との相関性があるものと考察する。これらのことから、表面処理工法による腐食抑制効果が発揮されていると考えられる。

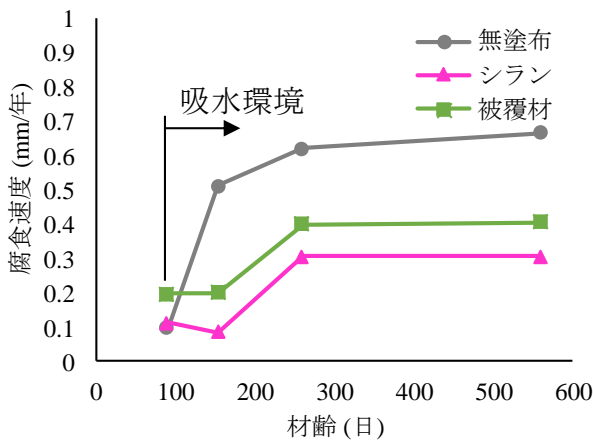


図-13 腐食速度(吸水条件)

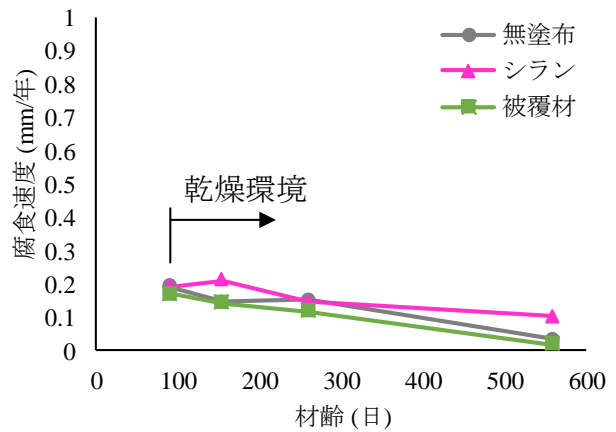


図-14 腐食速度(乾燥条件)

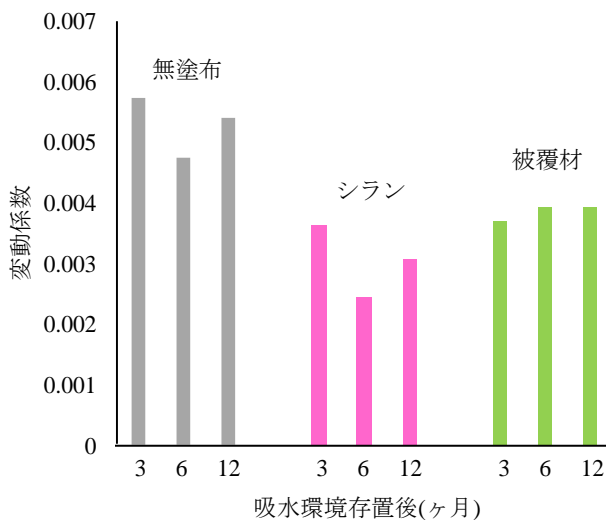


図-15 直径の変動係数(吸水条件)

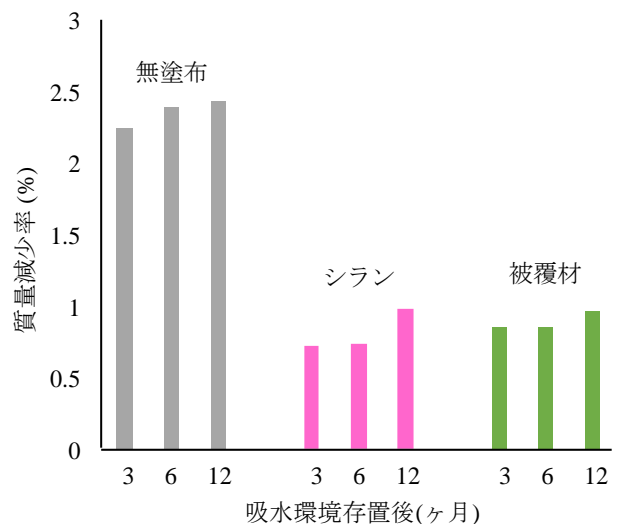


図-16 質量減少率(吸水条件)

4. 防食効果

シランと被覆材は無塗布に比べて透水性が小さいことから、図-5と比較して、図-7、図-9、図-11に示すように吸水条件において、1年を通してCl濃度勾配が抑えられるという結果となった。またこれは、鉄筋上を塩化物イオンが通過する量を抑制する結果となった。そのため、表面処理工法を適用した場合、図-5に対する図-7および図-9との比較、ならびに図-11、図-13、図-15、図-16に示すように、腐食抑制効果が見られたと考えられる。これらより、表面処理工法を適用した場合、12ヶ月までは腐食抑制効果を発揮すると言える。

しかし、3.1で述べたように、被覆材では、水分が蓄積するような傾向が確認された。そのため12ヶ月以降、水分が無塗布よりも増大する可能性がある。また、3.2で述べたように、シランについては、吸水防止層の境界で塩化物イオンが蓄積する可能性が考えられる。そのため12ヶ月以降、鉄筋位置における塩化物イオンが徐々に増大する可能性がある。これらを考慮すると、シランおよび被覆材を施工したRCにおいても12ヶ月以降、何らかの影響を与える可能性があるため、今後も継続して測定を行う。

5. 結論

本研究では、コンクリート中に塩分を含んだ供試体に表面処理工法を適用し、反対面から水分を供給することによる塩分移動状況および防食効果の検討を目的とし、12ヶ月間実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 含水率分布について、両条件において3ヶ月から6ヶ月にかけて含水率が減少し、乾燥条件では6ヶ月以降も含水率が減少する結果となった。吸水条件では、被覆材は6ヶ月以降に含水率が上昇する傾向を示し、無塗布とシランに比べ被覆材は、6ヶ月以降の含水率が大きくなる傾向を示した。
- (2) 含水率分布について、両条件において、シランおよび被覆材塗布面に近いほど含水率が小さいという結果が得られた。
- (3) Cl濃度分布について、吸水条件では、無塗布はCl濃度勾配が経時的に増加し、塗布面付近で濃度が大きいという結果となった。一方、表面処理工法が適用された供試体は無塗布の供試体に比べて、経時的なCl濃度勾配の変化が小さいという結果が得られた。
- (4) Cl濃度分布について、乾燥条件では、無施工とシランはCl濃度勾配の変化が小さく、一方で被覆材は、Cl濃度勾配の変化が大きいという結果が得られた。
- (5) 腐食速度について、吸水条件では、腐食速度が経時的に大きくなる傾向を示した。また、無塗布に比べてシ

ランや被覆材は、経時的な変化量が抑えられているという結果が得られた。さらに、シランは被覆材に比べて0.1mm/年程度小さくなるという傾向を示した。しかし、1年間を通して乾燥条件と比べると、吸水条件の方が3倍以上大きいという結果が得られた。

- (6) 変動係数と質量減少率について両方とも、無塗布が大きいという結果が得られた。また、シランは被覆材に比べてやや小さくなるという結果が得られた。
- (7) (6)の結果は概ね、腐食速度の累積値との相関があることが確認され、表面処理工法による腐食抑制効果が発揮されている事が確認された。
- (8) 表面処理工法を適用した場合、12ヶ月までは腐食抑制効果が確認された。しかし、12ヶ月以降、腐食が促進される可能性が示唆される。

謝辞

供試体作製にあたり、同研究室の門田悠伽氏、小松桃子氏、森岡海星氏に協力頂いた。また、材料提供は大岡塗料に頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 遠藤裕丈：表面含浸工法による劣化抑止対策の現状と課題，コンクリート工学，Vol.48，No.5，pp.97-100，2010.5
- 2) 竹田宣典，十河茂幸，迫田恵三：各種表面保護工を用いたコンクリートの耐久性向上効果の評価，コンクリート年次論文集，Vol.26，No.1，pp.753-758，2004.7
- 3) 細田暁，今野拓也，松田芳範，小林薫：シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.64 No.2，pp.323-334，2008.5
- 4) 土木学会：2017年制定土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕，2017.3
- 5) 田中博一，堀耕次，服部篤史，宮川豊章：シラン系はっ水材の分子構造がコンクリートのはっ水性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.789-794，1995.7
- 6) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文，集 Vol. 36，No.1，pp.904-909，2014.7
- 7) 前原聡，伊代田岳史：塩害と中性化における劣化機構の違いが鉄筋の腐食形態に及ぼす影響，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. 16，pp.147-152，2016.10