

表面含浸工法による既設コンクリート構造物の鉄筋腐食抑制効果の基礎的評価

遠藤 裕丈¹・田口 史雄¹・山脇 剛²

¹(独)土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3)

²北海道開発局 稚内開発建設部 浜頓別道路事務所 (〒098-5738 北海道枝幸郡浜頓別町緑ヶ丘6)

計画的かつ経済的な既設コンクリート構造物の維持管理・延命化の重要性に鑑み、シラン系表面含浸材（シラン）および含浸性防錆材（アミン）による鉄筋腐食の進行抑制効果について基礎的な評価を行った。室内実験および実構造物での追跡調査の結果、シランは高い腐食抑制効果が期待されることが確認された。アミンは遅効的な材料で、室内実験に比べて環境条件が穏やかな実構造物では速効性こそ小さいものの、長期的には効果が期待されることが示された。

キーワード コンクリート、維持管理、シラン系表面含浸材、含浸性防錆材、鉄筋腐食

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くの道路構造物は、現在も人々の生活と安全を支える重要な役割を担っている。厳しい財政事情の下での計画的かつ効率的な構造物の維持管理が求められる今般、効果に優れる適切で経済的な劣化抑制対策工を選定し、構造物の供用に費やされるライフサイクルコストの縮減に努めることが重要となる。

寒冷地の道路構造物において特に懸念される被害の一つに、凍害と塩害の複合作用による鉄筋の早期腐食が挙げられる。近年、劣化の進行抑制が期待される簡易的な対策工として、材工費が比較的安価で施工性に優れるシラン系表面含浸材および含浸性防錆材が注目されている。この工法は、吸水抑制および防錆といった所定の効果を発揮する材料をコンクリート表面に塗布し、表層および鉄筋位置まで含浸させることで部材の耐久性を高める工法である。材料が無色透明で、塗布後もコンクリートの質感が保持されるため、目視による日常点検が可能であることや、水蒸気透過性を有するため、コンクリート内部に滞留する水分に起因する劣化の抑制が期待できる等の長所を有している。

昨今は上記の背景に鑑み、道路構造物へのこれらの材料の適用・普及が図られつつあり^{1), 2), 3)}、北海道開発局等でシラン系表面含浸材の選定目安・施工要領⁴⁾が整備されて現在に至っている。しかし、実際の環境下での効果の持続性については十分明らかになっておらず、塗布後の性能の保持性を定量的に予測・評価する手法の確立までには至っていない。また、これらの材料は既設部材

での効果が不明確である理由から、適用範囲が事実上、新設・打換え部材に限定されている現状にある⁴⁾が、前述の社会ニーズに対応した維持管理を戦略的に進めるには、既設構造物への適用拡大に向けた検討も望まれる。

そこで本研究では表層に吸水抑制機能を付与するシラン系表面含浸材と、鉄筋表面に化学的な保護被膜を形成する機能を有する含浸性防錆材に着目し、腐食抑制効果と適用範囲の明確化に関する実験的な検討を行った。さらに実構造物での評価を行うため、稚内開発建設部管内の既設道路橋のコンクリート主桁で試験施工を実施した。

2. 室内実験での基礎的評価

(1) 実験概要

a) 配合・使用材料

表-1にコンクリート配合を示す。水セメント比は55%に設定した。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は苫小牧産海砂（表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.18%、除塩処理済）、粗骨材は小樽産砕石（表乾密度 2.64g/cm^3 、吸水率1.99%、最大粒径25mm）を使用した。

練混ぜの際、内在塩分に見立てた塩化物イオンを外割で混入した。混入量は0, 1, 2, 3, 4, 6kg/m^3 の6水準とした。

b) 供試体

図-1に供試体を示す。寸法は $220\times 200\times 100\text{mm}$ とした。供試体にはD16鉄筋をかぶり厚が30mmとなるように2本埋設した。打設の翌日に脱型して材齢3日まで湿った麻

表-1 コンクリート配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				CI (kg/m ³)
			W	C	S	G	
普通	55	45	154	280	895	1113	0,1,2,3,4,6

【備考】 W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，W：水，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，CI：塩化物イオン（混入量は6水準）

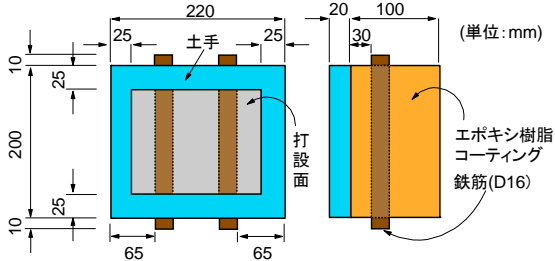


図-1 供試体（左：上面図，右：側面図）

布で覆い，以降は温度20℃，湿度60%の恒温恒湿室に静置した．乾湿繰り返し実験（詳細は後述）で実験水を張るために幅25mm，高さ20mmの土手を打設面に設置した．

c) 実験条件

表-2に実験条件を示す．乾湿繰り返し実験における実験水は塩水（濃度3%の塩化ナトリウム水溶液）と淡水の2種類とした．シラン系表面含浸材（以下，シランと記す）は北海道開発局道路設計要領⁴⁾に記載されている選定目安を満たす製品の中から，過年度に行った暴露実験⁵⁾および試験施工⁶⁾で良好な結果を示した無溶剤系の材料を1種類選定した．含浸性防錆材は選定目安が未整備である関係で，米国での実績を有するアミン系気化性防錆皮膜形成材（以下，アミンと記す）を任意に選定した．

塩化物イオン量が 0kg/m³で，実験水が塩水のシリーズは，断面補修が終了し，実環境下に再び供用される場面を模擬したものである．既設部材で鉄筋腐食が進行している状態を想定し，ここでは通常の鉄筋に加え，意図的に腐食させた鉄筋（写真-1）も実験に用いた．腐食鉄筋は，朝と夕方に塩水を通常の鉄筋に数回噴霧する作業を7日間行い，作成した．コンクリート表面に塗布する材料はアミンのみ，アミンとシランの併用，シランのみの3種類とした．また，アミンをコンクリートではなく，鉄筋に直接塗布するシリーズも一部設けた．

塩化物イオン量が0，1，2，3，4，6kg/m³で，実験水が淡水のシリーズは，塩化物イオン量を一定に保った状態で乾湿繰り返しを与え，適用範囲（内在する塩化物イオン量の上限）の明確化を図ることを目的に行う実験である．塗布材料はアミンのみ，アミンとシランの併用の2種類とした．なお，このシリーズでは，一部の供試体においてアムスラー型圧縮強度測定機による繰り返し載荷を行い，既設部材の劣化（凍害等）を模擬した微細ひびわれを発生させた．ここでは，凍害に対する耐久限界以下まで劣化したコンクリートは塗布による耐久性の向上は困難という名和ら⁷⁾の知見をもとに，耐凍害性の閾値（相対動弾性係数60～85%⁸⁾）を参考に閾値上限の85%

表-2 実験条件

CI	0	1	2	3	4	6
実験水	塩水	淡水				
無塗布	○●	○○	○○	○○	○○	○○
アミン	○●	○○	○○	○○	○○	○○
アミン/アミン	○●	○○	○○	○○	○○	○○
シラン	○●					
アミン(鉄)	○●					

【備考】 CI：塩化物イオン量(kg/m³)，アミン(鉄)：アミンを鉄筋に塗布（コンクリートには塗布せず），○：通常鉄筋（D16）使用，●：腐食鉄筋（D16）使用，◎：通常鉄筋（D16）使用かつひび割れ導入

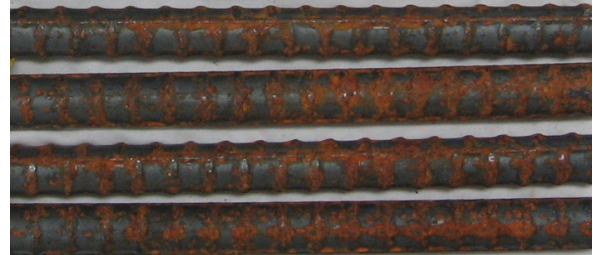


写真-1 実験に用いた腐食鉄筋

表-3 腐食速度の判定基準¹⁾

評価	腐食速度(mm/年)	腐食速度の判定
I	0.0023未満	不動態状態（腐食なし）
II	0.0023～0.0058	低～中程度の腐食速度
III	0.0058～0.0116	中～高程度の腐食速度
IV	0.0116より大	激しい，高い腐食速度

まで相対動弾性係数を低下させることを目標に微細ひび割れを導入した．導入方法は過年度の研究⁹⁾を参考に，供試体の両端面（200×100mm面）に測定機のヘッドを当て，圧縮強度の9割に相当する荷重を10回繰り返し載荷することで微細ひび割れを発生させた．

材料の塗布は材齢 28 日に行った．塗布量は材料の仕様に基づいてシランは 0.4kg/m²，アミンは 0.3kg/m²とし，ともに刷毛で打設面に塗布した．アミンとシランを併用する供試体は先にアミンを塗布してから7日後にシランを塗布した．微細ひび割れを導入する供試体については，ひび割れを発生させた後に塗布を行った．塗布後は材齢 42 日まで供試体を恒温恒湿室に静置した．

静置終了後（材齢 42 日）にシランおよびアミンの含浸深さの測定を行い，シランは深さ約 6～10mm まで含浸していること，アミンは材料の骨格を成すアンモニア成分が最深位置である深さ 90～100mm 層で検出され，供試体全体に行き渡っていることを確認した．

d) 乾湿繰り返し実験・腐食速度測定

乾湿繰り返しは外岡ら¹⁰⁾の実験方法を参考に，実験水を張って 40℃の環境下で 3 日間湿潤，実験水を除去して 20℃の環境下で 4 日間乾燥させる 7 日間 1 サイクルの乾湿繰り返しを 20 サイクル行った．

腐食速度は分極抵抗に分類される交流インピーダンス法により評価した．測定される腐食電流密度(μA/cm²)を式(1)¹¹⁾により腐食速度(mm/年)に換算し，表-3¹¹⁾に示す基



写真-2 乾湿繰り返し実験状況 写真-3 腐食速度測定状況

準と照合して評価を行った。

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2=11.6\times 10^3\text{mm}/\text{年} \quad (1)$$

写真-2 に実験室内での乾湿繰り返し実験の状況、写真-3 に腐食速度の測定状況を示す。腐食速度の測定は、供試体の底面に電極板をあてて行っている。

(2) 実験結果・考察

a) 断面補修後の再供用を想定した評価

図-2に通常鉄筋を用いた場合の腐食速度の測定結果を示す。吸水抑制機能を発揮するシランを用いた場合は全サイクルを通して判定はIとなり、高い腐食抑制効果が期待されることが示された。一方、アミンのみ用いた場合は、コンクリートに塗布した供試体では無塗布に比べると腐食速度は低下してはいるものの、20サイクル終了時の判定はIVであったのに対し、鉄筋に直接塗布した供試体では値の変動がやや大きかったものの、判定は全体的には概ねII～IIIで前者に比べると良好な結果を示した。

図-3は腐食鉄筋を用いた場合の腐食速度の測定結果である。シランを用いた場合の判定は図-2よりも1ランク高いIIではあるが、吸水抑制効果によって腐食速度は経時的に減少し、段階的にIに近づいている傾向が見受けられた。アミンのみ用いた場合は、コンクリートに塗布した供試体は実験開始直後からIVとなっているのに対し、鉄筋に直接塗布した供試体はIIで、防錆効果が発揮されていることが確認された。

以上の結果から、シランの効果は極めて高いことが明らかとなった。アミンの効果は鉄筋に固着するアミンの量・程度に依存することが示され、断面補修を行う場合は鉄筋にアミンを直接塗布する対応をとった方が望ましいことがわかった。

図-4は図-2の結果をもとに整理した腐食の進行遅延効果の評価の一例である。この図では、判定IVに達するまでの期間を効果保持期間としている。アミンを鉄筋に塗布した供試体は18サイクルで一時的にIVに達したことから、安全側の評価を行う観点から効果保持期間は18サイクルとした。室内実験の範囲では、本研究で用いたアミンをコンクリートに塗布した場合は無塗布に比べると腐食速度は2.5倍(5/2)、鉄筋に直接塗布した場合は9倍(18/2)遅延化されることが実験的に確認された。本研究で用いたシランを塗布した場合はIVに達せず、腐食速度の遅延効果は10倍(20/2)以上であることが本研究の範囲で示さ

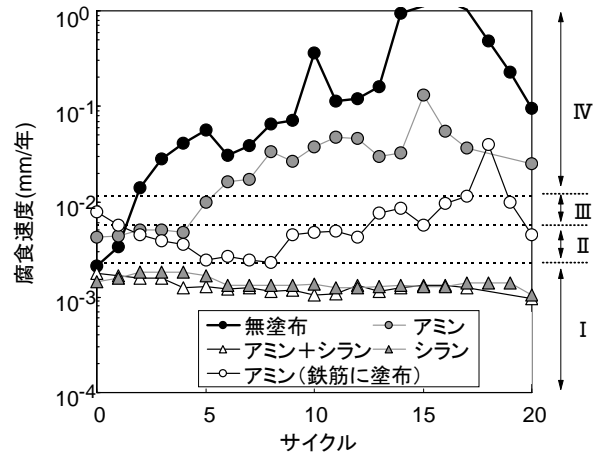


図-2 腐食速度の測定結果 (実験水：塩水, 塩化物イオン量 0kg/m³, 通常鉄筋使用)

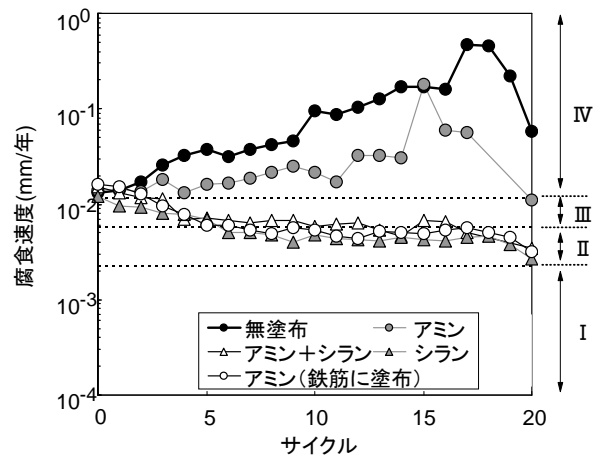


図-3 腐食速度の測定結果 (実験水：塩水, 塩化物イオン量 0kg/m³, 腐食鉄筋使用)

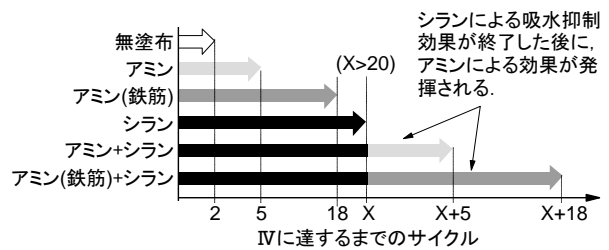


図-4 腐食の進行遅延効果の一評価 (図-2をもとに整理)

れた。一方、アミンとシランを併用した場合、シランの効果が消失した後からアミンの効果が発揮されると仮定すると、アミンとシランをコンクリートに塗布した時は12.5倍((20+5)/2)以上、アミンを断面補修前に鉄筋に塗布し、断面補修後にシランを塗布した時は19倍((20+18)/2)以上の腐食遅延効果が期待されると考えられる。

b) 適用範囲に関する評価

図-5、6に腐食速度に及ぼす塩化物イオン量の影響について調べた結果を示す。

実験開始前は、シランとアミンを併用した塩化物イオン量1kg/m³は電極板に不具合が生じた影響でデータを取ることができなかったが、これを除くと、ひび割れなしでは腐

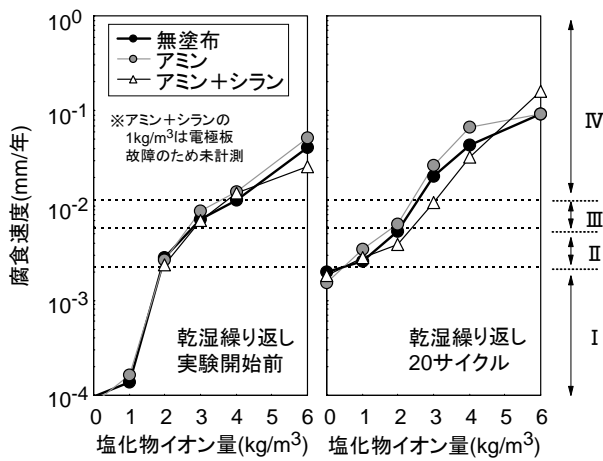


図-5 腐食速度に及ぼす塩化物イオン量の影響
(実験水：淡水、ひび割れなし)

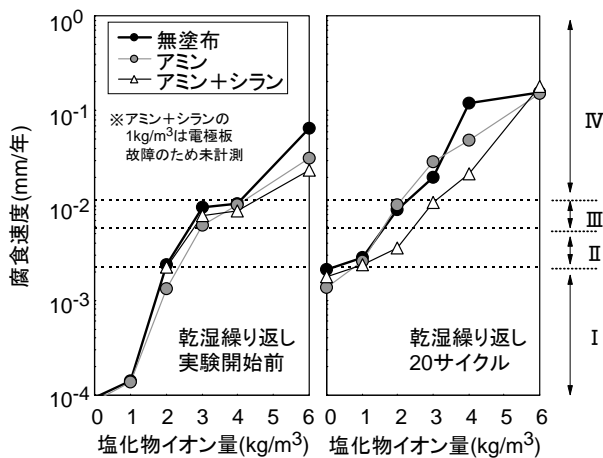


図-6 腐食速度に及ぼす塩化物イオン量の影響
(実験水：淡水、ひび割れ導入)

食速度に及ぼす塗布有無の影響は明確に表れず、塩化物イオン量が多いほど腐食速度が大きい傾向が示された。これに対して、ひび割れを導入した場合は、腐食速度と塩化物イオン量の関係は同様であったが、2~6kg/m³では塗布した方が無塗布に比べると僅かながら腐食速度は低下していた。これは材料がひび割れを経由して内部に多く含浸し、腐食速度の減少に効果的に作用したことを示している。

20サイクル後の結果をみると、腐食速度は全体的に実験開始前に比べると大きくなっている。シランとアミンを併用した場合の腐食速度は、塩化物イオン量が0~4kg/m³の範囲において無塗布を下回る値が示された。2, 3kg/m³においては、無塗布の判定がⅢ~Ⅳであるのに対し、併用した場合はⅡ~Ⅲで1ランク下の判定に留まった。6kg/m³は無塗布と同程度もしくはそれよりも高い腐食速度を示した。このことは、6kg/m³以上になると塩化物イオンの影響が卓越することを示し、シランとアミンによる腐食速度の減少効果を期待する場合、鉄筋位置の塩化物イオン含有量が4kg/m³が適用上限であることがわかった。なお、アミンのみ塗布した場合は腐食速度の減少効果が小さかった。これについては前述a)の実験と同



図-7 試験施工橋の位置 (浜頓別町)



写真-4 試験施工橋の桁の状況

様の結果であった。

3. 試験施工による実証的評価

次に、室内実験で得た知見の妥当性を検証する目的で、寒冷地の既設道路橋のコンクリート主桁において試験施工を実施し、実証的・臨床的な評価を行った。

(1) 試験施工概要

a) 試験施工橋

試験施工は、北海道浜頓別町内の一般国道に架かるコンクリート橋の主桁において行った。図-7に位置を示す。2008年11月~2009年3月のアメダス¹²⁾によると、浜頓別町の冬期の日最低気温は平均-5.6℃、最小値は-16.8℃である。また、最低気温がコンクリートの凍結温度とされる-2℃¹³⁾以下で、最高気温が-2℃より高い日を凍結融解1日とすると凍結融解日数は計72日、最低・最高気温がともに-2℃以下の凍結持続日は計43日である。

本橋は1958年11月に架設された橋長30m、幅員6.5mの既設のPCT橋で、海岸線からは約200mの位置にある。主桁の設計基準強度は29.4N/mm²である。写真-4に主桁下面の外観を示す。外観上、著しい損傷は見受けられないが、1桁あたり1~2本のひび割れが軸方向に生じている。過年度に行われた橋梁点検では、ひび割れ幅は1997年、1999年の調査では0.2~0.3mm、2001年は0.1~1.0mm、2007年は最大1.0mm程度との報告がなされ、2001年以降はひび割れ幅に大きな変動はなく、ひび割れは進行していない状況にある。主桁の塩化物イオン量については、表層(深さ0~20mm)が1.3~1.8kg/m³であるが、鉄筋の近傍部(深さ20~40mm)は0.2~0.3kg/m³で発錆限界の1.2kg/m³には達していない。

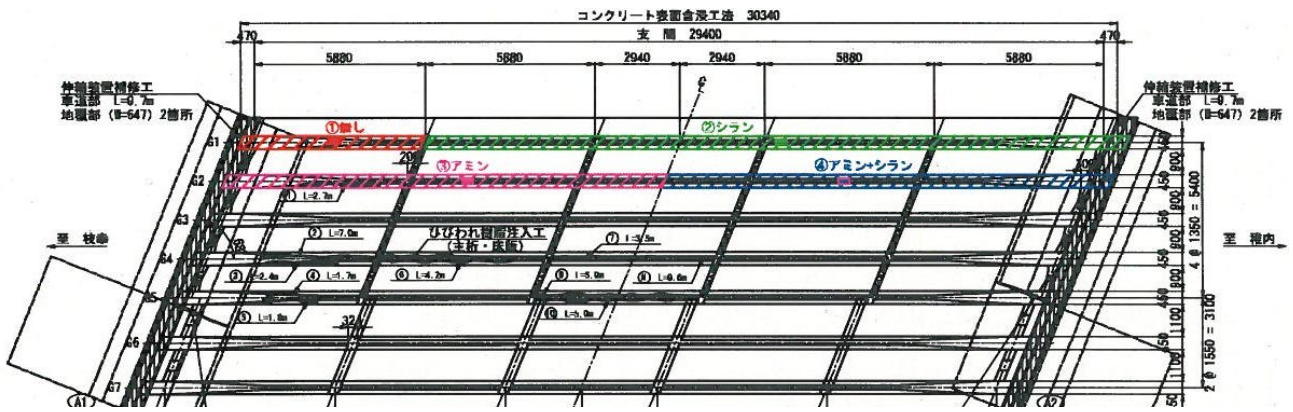


図-8 塗布一般図 (G1桁: 無塗布とシラン, G2桁: アミンとアミン+シラン)



写真-5 塗布状況



写真-6 測定状況

2007年7月5日に道路事務所より「劣化が進行していない今のうちに主桁の予防保全を施し、本橋の長寿命化を図りたい」旨の技術相談が研究所に寄せられ、ひび割れは生じているものの塩化物イオン量が少なく、図-6より腐食速度の減少効果が期待されると予測し、今回の試験施工・モニタリングの実施に至ったところである。

b) 塗布・追跡調査

図-8に塗布一般図を示す。本橋では床版防水工とひび割れ補修工が施された後、1973年に拡張されたG5～G7を除くG1～G4を対象に補修が実施されることとなっており、試験施工はG1, G2を対象に行った。G1の枝幸側から5mの範囲を無塗布区間（比較対象用）に設定し、①無塗布、②シランのみ、③アミンのみ、④シランとアミンの併用の4条件を設定し、塗布を行った。桁表面の油脂分を高圧洗浄・ケレン等で除去した後、塗布作業を行った。写真-5に塗布状況を示す。G3, G4は今回の調査対象ではないが、実際の工事ではシランの全面塗布が施されている。

塗布後、前章の室内実験で使用した機材と同じものを用いて腐食速度の経年変化を調べた。写真-6に測定状況を示す。調査は継続中で今後も行う予定であるが、本研究では塗布前と塗布7日後、1.5年後、2.5年後に行った測定の結果について述べる。

(2) 追跡調査結果・考察

図-9に腐食速度の追跡調査結果を示す。塗布前の腐食速度は0.013～0.026mm/年で、いずれの区間もIV（激しい、高い腐食速度）と判定される0.0116 mm/年（表-

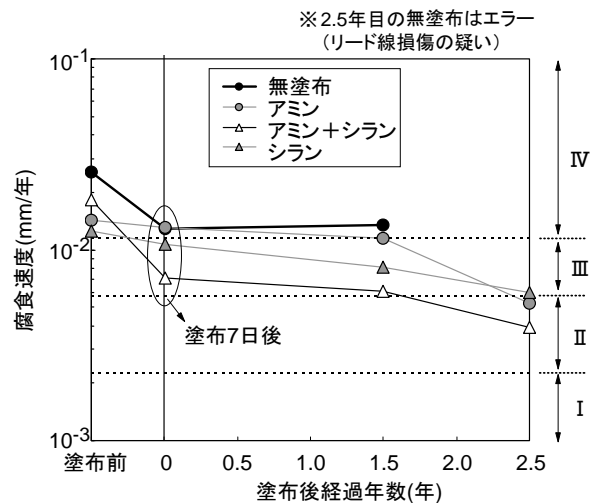


図-9 腐食速度の追跡調査結果

3) よりも高い値を示していた。塗布7日後の調査では、無塗布を含めていずれの区間も腐食速度は塗布前に比べて低下していることが確認された。シランならびにアミンはコンクリート表面が乾燥状態でないと塗布ができないため、実務では無塗布を含めて桁全体を防寒シートで囲い、コンクリートの水分率を低下させる保温作業が実施されている。この作業によってカソード反応を促す水分が減少し、コンクリート全体の電気抵抗が一時的に高まったことで全体的に腐食速度が低下したものと考えられる。

塗布7日後から1.5年後にかけての腐食速度の経時変化をみると、無塗布は0.001mm/年増加していたのに対し、塗布したものは0.001～0.003mm/年減少し、判定基準がIVからIIIに改善されていることが確認された。腐食速度の減少率はシランのみ塗布した桁が最も大きく、シランの効果が極めて高かった前章の室内実験の結果と良く対応していた。

塗布1.5年後から2.5年後にかけての腐食速度の経時変化をみると、塗布したものは腐食速度が更に減少し、鉄筋周りの環境状態はII～IIIのレベルまで改善されており、塗布効果がさらに明確に表れていることが確認された。ここで特筆すべき点として、室内実験では効

果がやや小さかったアミンのみ塗布した場合の桁の腐食速度が大きく減少していることが挙げられる。この結果は、速効性に富むシランに対し、アミンは遅効的な材料であり、短期材齢から水中浸漬下で乾湿繰り返しを受ける厳しい室内実験に比べると環境がやや穏やかな構造物では速効性こそ小さいものの、長期的には効果が期待されることを示唆している。無塗布の桁については計測画面にエラーが表示され、数値を得ることができなかった。桁に設置したリード線に何らかの損傷が生じている可能性があり、後日、リード線を取り替え、再測定を行う予定である。

本研究で行った調査の範囲では、表面含浸工法による既設コンクリート構造物の鉄筋腐食抑制効果は高いことが確認された。しかしながら調査期間が2年半程度と短いことから、塗布後の効果持続性の明確化に向け、今後もモニタリングを継続し、腐食抑制効果の持続性を調査していく必要がある。

4. まとめ

本研究では、計画的かつ経済的な既設コンクリート構造物の維持管理・延命化の重要性に鑑み、材工費が比較的安価で施工性に優れるシラン系表面含浸材（シラン）および含浸性防錆材（アミン）による鉄筋腐食の進行抑制効果について基礎的な評価を行った。本研究の範囲で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) シランを塗布すると、腐食速度は経時的に減少する傾向にあり、高い腐食抑制効果が期待される。
- 2) 断面補修を行う場合、アミンはコンクリートではなく、補修前に鉄筋に直接塗布した方が腐食速度の減少効果がより期待される。
- 3) シランとアミンの併用による鉄筋腐食速度の減少効果を期待する場合、鉄筋位置の塩化物イオン量の上限は 4kg/m^3 である。
- 4) 既設の実橋のコンクリート主桁で試験施工を行い、腐食速度の減少効果を調べたところ、塗布後 1.5 年

目まではシランによる効果が高く、室内実験の結果と対応していた。

- 5) 4) の関係で、塗布後 1.5 年目から 2.5 年目にかけては、アミンのみ塗布した桁において腐食速度の大きな減少が確認された。この結果は、アミンは遅効的な材料で、室内実験に比べて環境が穏やかな実構造物では速効性こそ小さいものの、長期的には効果が期待されることを示している。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状，コンクリート技術シリーズ No.58, 2004.2
- 2) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119, 2005.4
- 3) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，コンクリート技術シリーズ No.68, 2006.4
- 4) 北海道開発局道路設計要領，第3集橋梁，第2編コンクリート，参考資料 B (http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_doro/download/03_hashi.html)
- 5) 遠藤裕丈，田口史雄，小野俊博，登靖博：シラン系表面含浸材で保護されたコンクリートの塩化物イオン浸透予測—暴露試験 2 年目の評価—，寒地土木研究所月報，No.662, pp.2-10, 2008.7
- 6) 遠藤裕丈，田口史雄，河上聖典，藤田裕司，村中智幸：シラン系表面含浸材による道路橋地覆コンクリートのスケールリング抑制効果—追跡調査 3 年目の評価—，寒地土木研究所月報，No.668, pp.11-19, 2009.1
- 7) 名和豊春，鈴木美樹，長沼洋：高浸透性コンクリート表面改質剤，ファインケミカル，Vol.35, No.4, pp.5-12, シーエムシー出版，2006.4
- 8) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書，設計編，p.123, 2008.3
- 9) 遠藤裕丈，田口史雄，吉田行：ケイ酸塩系表面含浸材によるコンクリートの品質向上効果の基礎的評価，寒地土木研究所月報，No.675, pp.2-7, 2009.8
- 10) 外岡広紀，久保善司，若尾純也，村下剛：含浸処理による水分制御が腐食抑制効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, pp.529-534, 2007.
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 02[基礎編]，pp.164-167, 2002.1
- 12) 気象庁：2008.11～2009.3 アメダスデータ
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 99, p.155, 1999.9