

# 表面含浸材と含浸性防錆材の併用による既設コンクリート構造物の鉄筋腐食の進行抑制に関する基礎的検討

寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈  
寒地土木研究所 耐寒材料チーム 田口 史雄  
稚内開発建設部 浜頓別道路事務所 山脇 剛

シラン系表面含浸材とアミン系含浸性防錆材による既設コンクリートの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。本研究の範囲では、鉄筋位置における塩化物イオンの含有量が $4\text{kg/m}^3$ 以下であれば腐食速度の低減効果が期待されること等がわかった。また、実証的・臨床的な評価を行うため、昭和33年に建造された一般国道238号浜頓別町頓別橋のコンクリート主桁で試験施工を実施し、腐食速度の追跡調査を行った。施工から約1.5年後に調査を行ったところ、緩やかではあるが腐食速度は低減していることが確認された。

キーワード：コンクリート、鉄筋腐食、表面含浸材、含浸性防錆材、試験施工

## 1. まえがき

厳しい財政事情ならびに急速な少子高齢化の進展に伴い、社会基盤の整備・維持管理に投じられる予算は年々減少の一途を辿ることが予想される。一方で、これまで整備された社会基盤のストックは、現在も我が国の産業ならびに人々の生活を支える重要な役割を担っており、今後は予防保全的な維持管理を効率的に行い、ライフサイクルコストの最小化を図りながら既存のストックを長く使いこなしていく姿勢が強く求められる。これを受けて近年、補修材料・工法の開発・提案が数多くなされている。しかし、効果の持続性に関する情報が乏しく、選定に苦慮しているのが現状である。

寒冷地のコンクリート構造物が受けやすい代表的な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。この劣化の抑制が期待される簡易的な対策工の一つに表面含浸工法がある。この工法は、吸水の抑制といった所定の効果を発揮する材料をコンクリートの表層に含浸させることでコンクリートの耐久性を高める工法で、①材工費が比較的安価で施工性に優れる、②材料が無色透明で、施工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・維持管理が可能、③水蒸気透過性を有し、コンクリートの内部に滞留する水分によって生じる劣化の抑制が期待できる、などの長所を有している。なお、表面含浸工法は既設部材への適用効果が不明確である理由から、基本的には新設もしくは打換え部材に適用範囲が限定されている<sup>1)</sup>のが現状である。しかし、損傷がさほど進行していない既設部材も数多く存在しており、予防保全の重要性を鑑みると既設への適用を一律に規制することは必ずしも合理的とは言え

表-1 コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )			
			W	C	S	G
普通	55	45	154	280	895	1113

【備考】W/Cは水セメント比、s/aは細骨材率、Wは水、Cはセメント、Sは細骨材、Gは粗骨材を表す。練混ぜの際、内在塩分に見立てた塩化物イオンを外割で0、1、2、3、4、 $6\text{kg/m}^3$ 混入(6水準)。

ず、前述した社会的なニーズに応えていくには、既設構造物への表面含浸工法の適用拡大に向けた検討が望まれる。

本研究では、水や塩分の浸透を抑制する効果を発揮するシラン系表面含浸材と、鉄筋表面に防錆皮膜を形成する機能を有する含浸性防錆材に着目し、既設コンクリート構造物の鉄筋腐食進行抑制効果ならびに適用範囲の明確化に関する実験的検討を行った。さらに、実構造物において実証的・臨床的な評価を行う目的で、稚内開発建設部管内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た。

## 2. 室内実験の概要

### (1) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は55%に設定した。細骨材は苫小牧産海砂(表乾密度 $2.68\text{g/cm}^3$ 、吸水率1.18%、除塩処理済)、粗骨材は小樽産碎石(表乾密度 $2.64\text{g/cm}^3$ 、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量を外割で混入した。混入量は0、1、2、3、4、 $6\text{kg/m}^3$ の6水準とした。

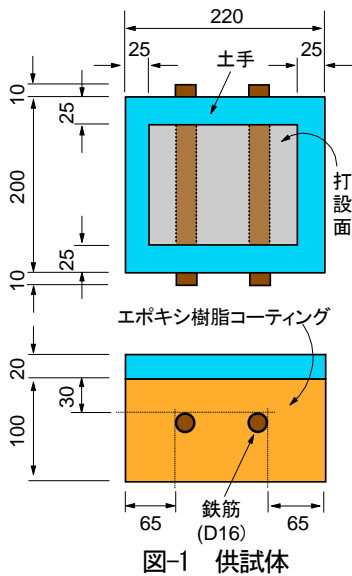


図-1 供試体

(2) 供試体

図-1に供試体を示す。寸法は220×200×100mmとし、打設面からのかぶり厚が30mmとなるようD16鉄筋を2本埋設した。打設の翌日に脱型し、材齢3日までは湿った麻布で供試体を覆い、それ以降は材齢28日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に静置した。その後、後述する乾湿繰り返し試験において試験水を張るため、幅25mm、高さ20mmの土手を打設面に築いた。また、打設面と底面を除く側面の4面をエポキシ樹脂でコーティングした。

(3) 微細ひび割れの導入

材齢 28 日到達後、一部の供試体においてアムスラー型圧縮試験機による繰り返し載荷を行い、既設コンクリート構造物の劣化を模擬させた微細ひび割れを発生させた。微細ひび割れを導入する供試体の劣化程度は、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<sup>2)</sup>の知見を踏まえ、ここでは耐凍害性の閾値（相対動弾性係数が 60～85%<sup>3)</sup>）を参考に、閾値の上限（85%）まで相対動弾性係数を低下させることを目標とした。ひび割れの導入方法は過年度の研究<sup>4)</sup>を参考に、供試体の両端面にアムスラーのヘッドを当て、圧縮強度の 9 割の荷重を 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。

(4) 塗布作業

塗布作業は材齢 28 日に行った。なお、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。塗布材については、シラン系表面含浸材（以下、表面含浸材と記す）は北海道開発局の道路設計要領<sup>1)</sup>の目安を満たす材料の中から、過年度の試験施工<sup>5)</sup>において比較的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の目安が整備されていないため、ここでは米国での実績を有するアミン系の気化性防錆皮膜形成材を任意で選定した。

塗布方法は、①含浸性防錆材を塗布した後に表面含浸材を塗布するパターンと、②含浸性防錆材のみ塗布する



写真-1 腐食速度の測定状況

表-2 腐食速度の判定基準<sup>8)</sup>

	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

パターン<sup>2)</sup>の2ケース行った。なお、工法として評価を行う理由から仕様は設けず、メーカーの担当者に塗布作業を全て一任した。塗布量は、含浸性防錆材は0.3%<sup>2)</sup>、表面含浸材は0.4kg/m<sup>2</sup>である。ともに刷毛で打設面に塗布した。①については、含浸性防錆材を塗布してから7日後に表面含浸材を塗布した。塗布後は材齢42日まで供試体を恒温恒湿室に静置した。

(5) 乾湿繰り返し試験・腐食速度の測定

乾湿繰り返し試験の方法は外岡ら<sup>7)</sup>の実験を参考に設定した。打設面に淡水を張って 40℃の環境下で 3 日間湿潤、淡水を除去して 20℃の環境下で 4 日間乾燥させる 7 日 1 サイクルの試験を 20 サイクル行った。

鉄筋の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。測定は試験前と 20 サイクル終了時の 2 回行った。写真-1 に測定状況を示す。電極板の寸法が大きい関係で土手を設置した打設面に電極板を当てることが難しい理由から、ここでは供試体の底面に電極板をあてて腐食電流密度(μA/cm<sup>2</sup>)を測定した。その値を腐食速度(mm/年)に換算し、表-2<sup>8)</sup>に示す基準と照合して評価を行った。腐食速度への換算は式(1)<sup>8)</sup>の関係を利用して行った。

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

測定は 1 本の鉄筋につき 3 回、計 6 回行い、全データの平均を腐食速度とした。

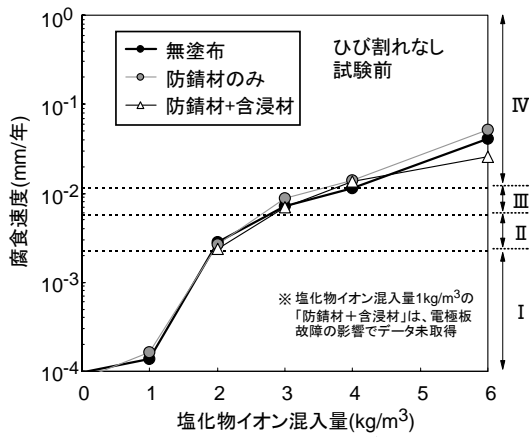


図-2 腐食速度 (試験前、ひび割れなし)

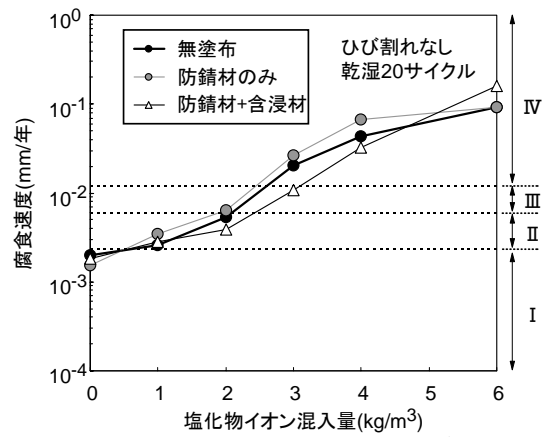


図-4 腐食速度 (20 サイクル終了時、ひび割れなし)

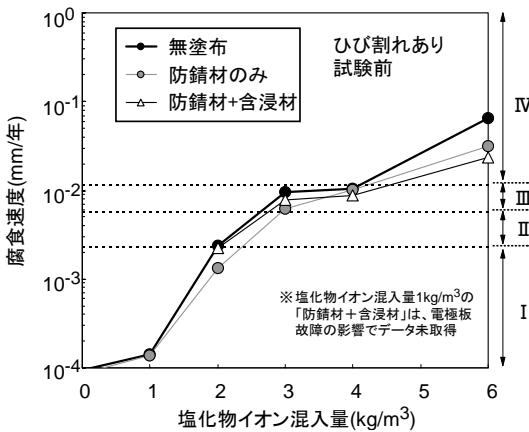


図-3 腐食速度 (試験前、ひび割れあり)

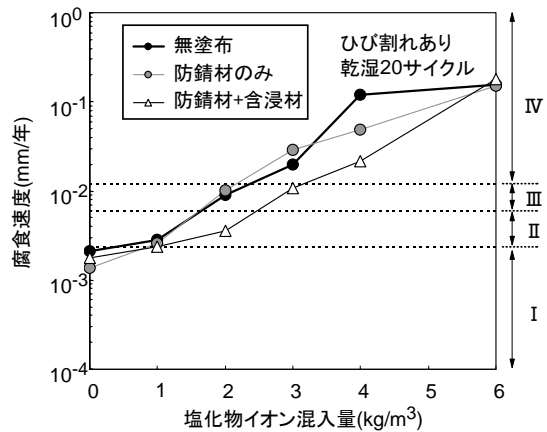


図-5 腐食速度 (20 サイクル終了時、ひび割れあり)

### 3. 室内実験の結果

#### (1) 乾湿繰り返し試験前の腐食速度

図-2、3に乾湿繰り返し試験前における腐食速度の測定結果を示す。腐食速度は対数で表示している。表面含浸材と含浸性防錆材の両方を塗布した塩化物イオン混入量 $1\text{kg/m}^3$ は電極板に故障が生じた影響で、データを取得することができなかった。これを除いてみると、ひび割れを導入しなかった供試体では腐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を示した。これに対してひび割れを導入した供試体は、腐食速度と塩化物イオン量の間には前述と同様であったが、塩化物イオン混入量 $2\sim 6\text{kg/m}^3$ においては、若干ではあるが塗布した供試体の方が無塗布に比べて腐食速度は小さい結果が得られた。これは、腐食抑制効果を発揮する塗布材がひび割れを経由して内部に多く含浸し、腐食速度の低減により効果的に作用したことを示している。

#### (2) 乾湿繰り返し試験後の腐食速度

図-4、5に20サイクル後の腐食速度の測定結果を示す。全体的に腐食速度は塩化物イオン量が多いほど大きく、また、試験前に比べると速度は大きくなっていることが確認された。表面含浸材と含浸性防錆材の両方を塗布した供試体の腐食速度は、塩化物イオン混入量 $0\sim 4\text{kg/m}^3$

の範囲において無塗布の腐食速度よりも小さい値が示された。 $2, 3\text{kg/m}^3$ については、無塗布の腐食速度のグレードはIII~IVであるのに対し、塗布の腐食速度はII~IIIで1ランク下のグレードに留まっていることが確認された。なお、 $6\text{kg/m}^3$ では無塗布とほぼ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、塩化物イオン量が $6\text{kg/m}^3$ 以上の場合、腐食速度の増幅に及ぼす塩化物イオンの影響の強さが塗布による抑制作用を卓越することを示し、塗布のみで腐食速度を低減させることは難しいと言える。本研究の範囲では、表面含浸材と含浸性防錆材の併用によって腐食速度の低減を期待する場合、鉄筋位置における塩化物イオン含有量は $4\text{kg/m}^3$ が適用の上限であることがわかった。また、無塗布と塗布における腐食速度の差は、ひび割れを導入した方が大きいことが確認された。これは、ひび割れを介して多く浸透した塗布材による腐食速度の低減効果と、無塗布の腐食速度がひび割れなしに比べて大きいことから、無塗布における腐食速度の増幅の2つの作用が相乗したことによる結果と考えられる。

一方、含浸性防錆材のみ塗布した場合の腐食速度に着目すると、ひび割れを導入しなかった場合、塩化物イオンを混入しなかったものは無塗布を下回っていたものの、 $1\text{kg/m}^3$ 以上においては塗布有無の影響が明確に表れなかった。これは試験前の傾向と全く同じであった。一方、

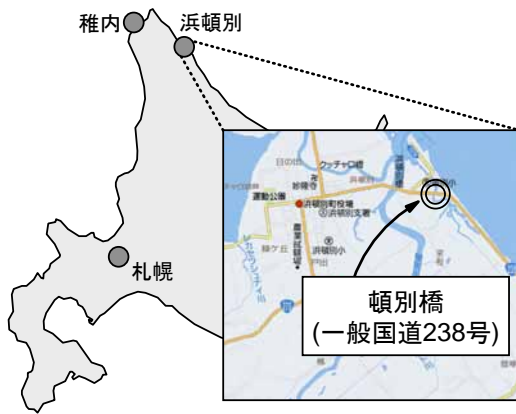


図-6 試験施工箇所的位置図



写真-2 主桁の状態

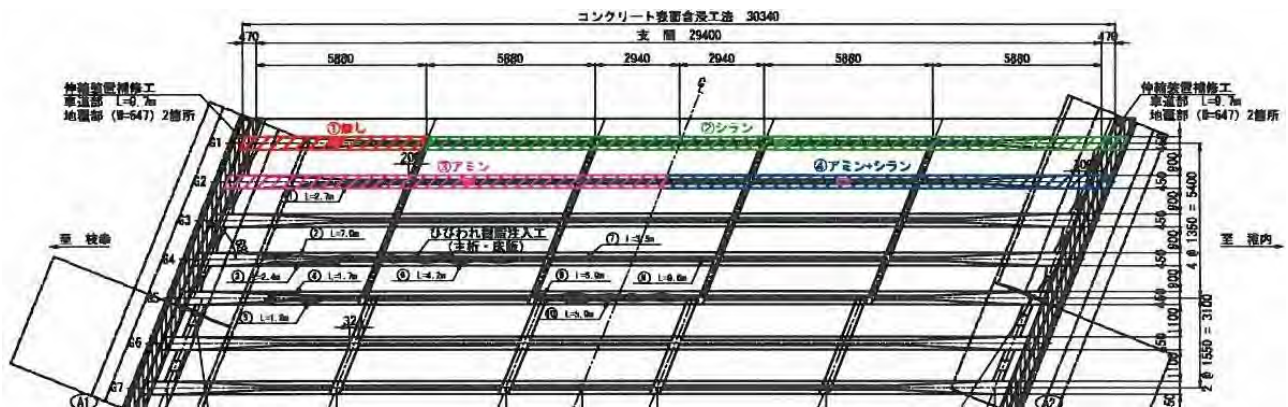


図-7 施工平面図

ひび割れを導入した場合の腐食速度は、試験前は全体的に無塗布を下回っていたが、20サイクル終了後は、 $3\text{kg/m}^3$ においては無塗布を上回る値が、 $1$ 、 $6\text{kg/m}^3$ においては無塗布と遜色ない値が示された。これは、塩化物イオンと乾湿の相乗作用によって鉄筋の周りに形成された防錆被膜が分解され、効果の消失に至ったと考えられる。

今回の室内実験では含浸性防錆材と、腐食物の一種である $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の形成を促すカソード反応の原因である水分の浸透を抑制する効果を発揮する表面含浸材を併用したシリーズでは腐食速度の低減が認められた。含浸性防錆材のみ塗布したシリーズは、乾湿後における腐食速度の低減効果は前者に比べると小さかったが、試験前の段階では腐食速度の低減が確認されていることから効果の持続性は実環境下での乾湿の程度も大きく依存すると考えられ、今後は実際の環境下でデータを取得して詳細な評価を行っていく必要がある。また、形成される防錆皮膜の安定性は材料によっても異なると考えられ、防錆材の種類を増やした検討も行っていく必要がある。

#### 4. 試験施工の概要

次に、前章で得た知見の検証を行う目的で、既設道

路橋のコンクリート主桁において試験施工を行い、実証的・臨床的な評価を実施した。

##### (1) 施工橋梁

試験施工は一般国道238号浜頓別町頓別橋の主桁（設計基準強度 $29.4\text{N/mm}^2$ ）において行った。図-6に位置図を示す。頓別橋は昭和33年11月に架設された橋長30m、幅員6.5mの既設のポステンPCT橋である。写真-2に主桁下面の外観を示す。著しい損傷は見受けられないが、1桁あたり1~2本のクラックが軸方向に生じている。過年度の橋梁点検結果によると、クラック幅は平成9、11年の調査では $0.2\sim 0.3\text{mm}$ 、平成13年は $0.1\sim 1.0\text{mm}$ 、平成19年は最大 $1.0\text{mm}$ 程度との報告がなされており、平成13年以降はひび割れが大きく進行していない状況にある。

主桁の塩化物イオン量は表層（深さ $0\sim 20\text{mm}$ ）が $1.3\sim 1.8\text{kg/m}^3$ であるが、鉄筋の近傍部（深さ $20\sim 40\text{mm}$ ）は $0.2\sim 0.3\text{kg/m}^3$ で発錆限界の $1.2\text{kg/m}^3$ には達していない。また、2008年11月~2009年3月のアメダス<sup>9)</sup>より浜頓別町の冬期環境を調べたところ、最低気温は平均値が $-5.6^\circ\text{C}$ 、最小値が $-16.8^\circ\text{C}$ 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 $-2^\circ\text{C}$ <sup>10)</sup>以下で、最高気温が $-2^\circ\text{C}$ より高い日を凍結融解1日として凍結融解日数の合計を求めたところ72日であった。また、最低・最高気温がともに $-2^\circ\text{C}$ 以下である凍結持続日の合計は43日であった。

2007年7月5日、浜頓別道路事務所より「劣化が進行

表-3 試験施工の内容

施工位置	塗布材の種類
G1 (枝幸側)	無塗布 (比較対象用)
G1 (稚内側)	表面含浸材のみ塗布
G2 (枝幸側)	含浸性防錆材のみ塗布
G2 (稚内側)	表面含浸材と含浸性防錆材を併用

していない今のうちに予防保全を施し、頓別橋の長寿命化を図りたい」との技術相談が耐寒材料チームに寄せられた。主桁にはひび割れが生じているが塩化物イオン量が少ないことから、図-5の結果より塗布によって腐食速度の低減が図れると予想し、今回の頓別橋での試験施工・効果の持続性のモニタリングの実施に至った。

### (2) 施工方法

図-7に施工平面図を示す。床版防水工とひび割れ補修工が施された後、昭和48年に拡幅されたG5～G7を除くG1～G4を対象に補修が実施された。試験施工はG1、G2で行った。G3、G4は今回の評価対象ではないが、表面含浸材の全面塗布が施されている。

表-3に試験施工の内容を示す。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表面含浸材のみ塗布、②含浸性防錆材のみ塗布、③表面含浸材と含浸性防錆材の併用の3ケース行った。桁表面の油脂分を高压洗浄・ケレンなどで除去した後、各種材料の塗布作業を行った。写真-3に施工状況を示す。

### (3) 追跡調査

追跡調査では、鉄筋の腐食速度の経年変化を調べた。ここでは、前章で述べた室内実験で用いた機材と同じものを使用して行った。測定は、塗布前と塗布後および試験施工から1.5年経過後の3回行った。追跡調査は今後も継続的に行う予定であるが、本論文では追跡1.5年目までの結果について報告する。

## 5. 追跡調査の結果

図-8に腐食速度の追跡調査の結果を示す。塗布前の腐食速度は0.013～0.026mm/年で、いずれの区間も「激しい、高い腐食速度」と判定される0.0116mm/年(表-2)よりも高い値であった。塗布後に測定を行ったところ、無塗布を含めていずれの区間も腐食速度は塗布前よりも低下していた。表面含浸材ならびに含浸性防錆材は、コンクリートの表面が乾燥状態でないと施工ができないため、試験施工では無塗布の桁を含めて桁全体を囲いで覆い、コンクリートの水分率を低下させる保温作業を行っている。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腐食速度が低下したものと考えられる。



写真-3 施工状況 (G2、含浸性防錆材の塗布)

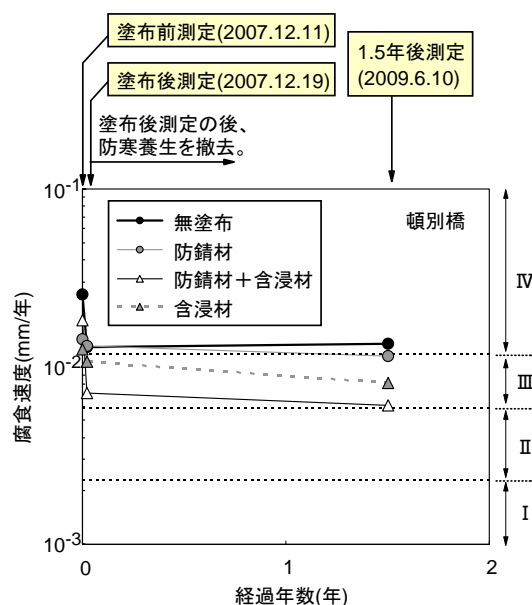


図-8 腐食速度の追跡調査の結果

試験施工から1.5年経過後に追跡調査を行い、塗布後の値 (2007.12.19) と比較したところ、腐食速度の増減量は現時点ではさほど大きくはないが、無塗布の桁は0.001mm/年増加し、塗布したものは0.001～0.003mm/年減少していることが確認された。腐食速度の減少量は、表面含浸材のみ塗布した区間が最も大きく (0.003mm/年減少)、次いで表面含浸剤と含浸性防錆材の併用 (0.002mm/年減少)、含浸性防錆材のみ塗布 (0.001mm/年減少) の順となり、含浸性防錆材のみ塗布に比べて表面含浸剤と含浸性防錆材の併用による効果が大きかった室内実験の結果と対応していた。しかし、調査期間が短い関係もあってデータは未だ少なく、今後も調査を継続し、腐食速度の経年変化をみながら効果の持続性を総合的に評価していく必要がある。

## 6. まとめ

本研究では構造物の予防保全・延命化の重要性を鑑

み、既設構造物への表面含浸材の適用拡大に向け、その一環として、水や塩分の浸透を抑制する効果を発揮する表面含浸材と、鉄筋表面に防錆皮膜を形成する機能を有する含浸性防錆材による既設コンクリート構造物の鉄筋腐食進行抑制効果の評価を行った。本研究の範囲で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- 1) 塗布直後における腐食速度の低減効果は、ひび割れを導入した供試体の方が大きかった。
- 2) 乾湿の繰り返しを 20 サイクル行ったところ、腐食速度の低減効果は表面含浸材と含浸性防錆材を併用したシリーズが最も大きかった。
- 3) 本工法によって腐食測度の低減を図る場合、鉄筋位置における塩化物イオン量は  $4\text{kg/m}^3$  が適用上限と言える。
- 4) 実橋の桁コンクリートに施工し、1.5 年後に追跡調査を行ったところ、無塗布の腐食速度は  $0.001\text{mm/年}$  増加したのに対し、塗布したものは  $0.001\sim 0.003\text{mm/年}$  低下していた。しかし、データは未だ少ないため、今後も調査を継続し、腐食速度の経年変化をみながら効果の持続性を総合的に評価していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 平成 20 年度北海道開発局道路設計要領, 第 3 集第 2 編, pp.3 B1-3 B13
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 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) 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.
- 8) 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
- 9) 気象庁: 2008.11~2009.3 アメダスデータ
- 10) 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