

表面含浸材を使用したマクロセル腐食抑制に関する研究

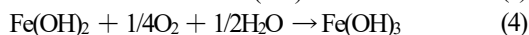
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

鉄筋腐食が発生したコンクリート部材の断面修復では、塩化物イオンが残存する既設コンクリートと断面修復部の間で形成されるマクロセル回路により、断面修復部に近い既設コンクリート内の鉄筋が局所的に腐食する「マクロセル腐食」を抑制する対策が求められる。本研究では断面修復の際、打継ぎ面に表面含浸材を塗布して絶縁化を図り、マクロセル回路の形成を防ぐことによるマクロセル腐食の抑制効果について調べた。表面含浸材は、コンクリート組織を疎水化させるシラン系と、乾燥によって不溶性の水ガラスに変化してコンクリートの空隙を充填させる固化型のけい酸塩系の2種類を使用した。いずれもマクロセル腐食抑制が確認された。

キーワード：コンクリート、断面修復、マクロセル腐食、表面含浸材

1. はじめに

塩害による鉄筋腐食が発生したコンクリート構造物で、腐食箇所のコンクリートを研り取って鉄筋の防錆処理を行い、モルタルやコンクリートで復元する断面修復を行った場合、図-1に示すように、塩化物イオンが残存する既設コンクリートと断面修復部との間で、電位差に起因するマクロセル回路が形成される。これにより、既設コンクリート内では式(1)に示すアノード反応、断面修復部では式(2)に示すカソード反応が起こり、式(1)と式(2)が組み合わさった式(3)による $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の生成と、式(4)による $\text{Fe}(\text{OH})_3$ （赤錆）の生成が、断面修復部に近い既設コンクリート内の鉄筋で局所的に進行するマクロセル腐食が懸念される¹⁾。写真-1は、北海道内の道路橋主桁で確認されたマクロセル腐食の事例である。



現在、北海道ではマクロセル腐食を抑える対策として、犠牲陽極材の使用実績がある²⁾。犠牲陽極材は亜鉛をバックフィル材で包んだ構造となっており、断面修復の際、鉄筋に結束させ、鉄に比べてイオン化傾向が高く錆びやすい亜鉛の性質を利用して、鉄筋の代わりに亜鉛を腐食させることで鉄筋の腐食を抑える仕組みとなっており、一般的に10年以上の効果持続を見込んでいる。しかし、武藤ら³⁾は、犠牲陽極材を設置して5～6年経過したコンクリート構造物で調査を行い、マクロセル腐食の抑制効果は確認された一方で、取り出した犠牲陽極材の亜鉛量

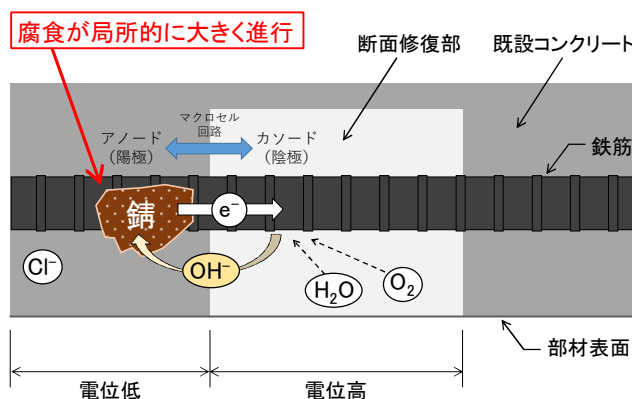


図-1 マクロセル腐食の概念



写真-1 マクロセル腐食が発生した道路橋主桁

をもとに効果の残存時間を調べたところ、箇所によってはあと2年程度であったことを報告している。マクロセル腐食を長期的に抑えるには犠牲陽極材の定期的な交換が必要となるが、交換のタイミングが十分明らかではな

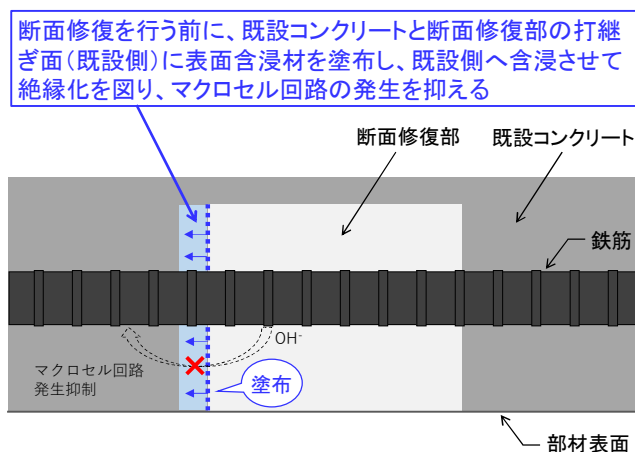


図-2 表面含浸材によるマクロセル腐食抑制の概念

いことや、消耗した犠牲陽極材の処理など課題もある。特に、北海道のコンクリート構造物は凍結融解と塩化物の複合作用を受ける厳しい環境に曝されており、亜鉛の消耗速度に及ぼす影響も懸念される。

一方、近年、コンクリートを研って鉄筋処理を行った後、断面修復前に、既設側の打継ぎ面に表面含浸材を塗布し、打継ぎ面の電気抵抗を高めてマクロセル回路の形成を防ぐことにより、マクロセル腐食を抑制する考え方も示されている⁴⁾。図-2はこの概念を示している。この方法を補助的に用いてマクロセル腐食の発生を長く抑制できれば、犠牲陽極材の亜鉛の消耗速度の減少、犠牲陽極材の交換インターバルの延伸、ひいてはライフサイクルコストの縮減につながる事が期待される。

そこで、本研究では図-2の現場普及に向けての一環として、打継ぎ面への表面含浸材の塗布によるマクロセル腐食抑制の効果を調べるための基礎実験を行った。

2. 実験概要

(1) コンクリートの配合・材料

コンクリート配合を表-1に示す。コンクリートは既設を模擬した部分と、断面修復部を模擬した部分の2種類を作製した。なお、マクロセル回路の形成に及ぼすコンクリート材料の違いの影響を除外するため、使用材料と配合は揃えることとした。水セメント比は55%とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材には表乾密度2.65g/cm³、吸水率1.41%、除塩処理済の苫小牧市錦岡産の海砂を使用し、粗骨材には表乾密度2.68g/cm³、吸水率1.77%、最大寸法20mmの小樽市見晴産の砕石を使用した。また、ここでは既設と断面修復部の間に電位差をつけるため、既設を模擬したコンクリートに塩化物イオンを混入することとした。混入量は、塩化物イオンを含ませたコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布して防食効果を調べた既往の実験において、塩化

表-1 コンクリート配合

種別	W/C (%)	使用セメント	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S	G	Cl ⁻	NaCl
既設コンクリート	55	普通ポルト	155	282	848	1046	5.0	8.3
断面修復部							0	0

【記号】W：水、C：セメント、S：細骨材、G：粗骨材、Cl⁻：塩化物イオン（NaClは塩化物イオン混入のために使用した塩化ナトリウムの量）

物イオン量が0～4kg/m³の範囲では防食効果が確認された既往の実験結果⁵⁾をもとに、ここでは劣化を促進させるため、これよりも高い5.0kg/m³に設定した。

(2) 供試体・塗布

図-3に供試体の作製手順を示す。供試体の全体寸法は10cm×10cm×20cmに設定した。供試体内部に配置する鉄筋はD13とし、かぶりは3cmとした。鉄筋の長さは、供試体の長手方向の寸法20cmに加えて、後述の自然電位測定のために供試体から1cm突出させることを考慮し、21cmとした。

はじめに、半分の10cm×10cm×10cmのスペースに、既設を模した塩化物イオン量を5.0kg/m³含ませたコンクリートを打設した。打設13日後、断面修復を行うために既設を研った状態を模擬するため、打継ぎ面をニードルスケラーでチッピングして凹凸をつけた。

次に、既設側の打継ぎ面に表面含浸材を塗布した。写真-2に塗布状況を示す。表-2は、使用した表面含浸材を示している。表面含浸材は、コンクリートの空隙壁面に疎水基を固着させ、吸水抑制機能を付与するシラン系と、コンクリートの水酸化カルシウムと反応してC-S-Hを生成し、未反応の成分は乾燥して固形物に変化し、コンクリートの空隙を充填させるけい酸塩系の2種類に大別される⁶⁾。ここでは、シラン系は疎水化によって、けい酸塩系は未反応成分の乾燥により生成された水ガラス⁷⁾主体の固化物によって、いずれもコンクリート組織の絶縁化が図れると考え、それぞれ使用するケースを設定した。けい酸塩系は、けい酸カリウムやけい酸ナトリウムを主成分とし、水が供給されると未反応の乾燥固化物は再溶解し、水酸化カルシウムと再び反応できる状態となる反応型と、けい酸リチウムを主成分とし、乾燥固化物は難溶性となる固化型の2種類がある⁸⁾。ここでは、空隙に生成された水ガラス主体の未反応の乾燥固化物を再溶解させず、安定した状態にしたい理由から、固化型を選択することとした。塗布量は、製造会社指定の標準量とした。また、比較のため、表面含浸材を使用しないケースも設けた。

塗布7日後、残りの10cm×10cm×10cmのスペースに、断面修復部を模擬したコンクリートを打設した。そして、

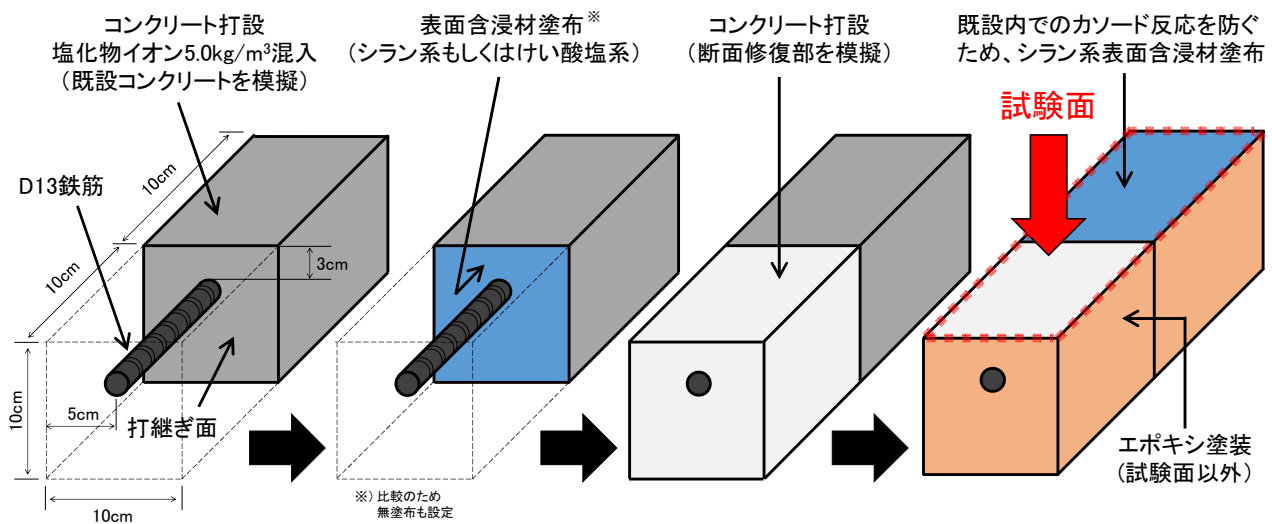


図-3 供試体作製の流れ



写真-2 既設側の打継ぎ面への表面含浸材の塗布状況

表-2 打継ぎ面に塗布した表面含浸材

表面含浸材の種別	主成分	塗布量(g/m ²)
シラン系	シラン・シロキサン	350
けい酸塩系(固化型)	けい酸リチウム	200

この5日後、後述の乾湿繰返し試験の試験面以外の5面をエポキシ樹脂で塗装した。また、マクロセル回路を形成させるため、既設コンクリート内でのカソード反応の発生を防ぐ理由から、既設コンクリート側の試験面には水分浸入を抑えるためのシラン系表面含浸材（主成分や塗布量については表-2に同じ）を塗布した。ただし、自然電位の測定において電極をあてる部分（3cm×3cm）には塗布していない。

(3) 乾湿繰返し試験・鉄筋および供試体観察

エポキシ樹脂塗装から2日後に乾湿繰返し試験を開始した。乾湿繰返し試験は、JCI-SC3⁹⁾を参考に、温度が70℃で相対湿度が90%以上の高温高湿作用を3日間、常温で相対湿度が70%以下の乾燥作用を4日間、計7日間1サイクルの乾湿繰返しを20サイクル行った。写真-3は試験で使用した乾湿繰返し試験装置を示している。試験装置は、厚さ25mmのポリスチレンフォームを使用して作



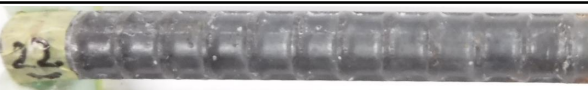
写真-3 乾湿繰返し試験装置

製した幅105cm、奥行き60cm、高さ120cmの試験槽に、水蒸気発生装置（200V、3.8kW）と、常温～350℃の範囲で温度を1℃単位で設定できる熱風発生装置（200V、5kW）を取り付けた構造となっている。シラン系表面含浸材を塗布している既設コンクリート側の試験面は、自然電位の測定において電極をあてる3cm×3cm部分にシラン系表面含浸材を塗布していないが、乾湿繰返し試験期間中は防水のため、この部分を養生テープで保護している。また、自然電位の測定のために供試体から1cm突出させた鉄筋部分も、腐食を防止するための保護キャップを取り付けている。

乾湿繰返し 20 サイクル後、鉄筋の腐食状況および供試体のひび割れ発生状況を目視で調べた。

(4) 自然電位

鉄筋の状態変化の把握の参考とするため、1サイクルおきにASTM C 876¹⁰⁾に準じた自然電位の測定を行った。試験面にあてる照合電極には飽和硫酸銅電極を使用した。

打継ぎ面処理	鉄筋の外観	
	断面修復部	既設コンクリート(塩化物イオン5.0kg/m ³ 混入)
無塗布		
シラン系塗布		
けい酸塩系塗布		

↑ 打継ぎ面

写真4 乾湿繰返し20サイクル後の鉄筋の外観

3. 実験結果・考察

(1) 20サイクル後の鉄筋および供試体観察

写真-4に乾湿繰返し20サイクル後の鉄筋の外観を示す。断面修復部内の鉄筋には、いずれのケースも錆は確認されなかった。一方、既設コンクリート内の鉄筋をみると、打継ぎ面に表面含浸材を塗布していないケースは、鉄筋の表面広範に錆が発生していることに加えて、打継ぎ面の近くでは局所的に腐食が大きく進行していることが確認された。これに対して、打継ぎ面に表面含浸材を塗布したケースは、鉄筋の表面随所に錆はみられるものの、打継ぎ面の近くで腐食が局所的に大きく進行した形跡は見受けられなかった。

写真-5に乾湿繰返し20サイクル後の試験面の外観を示す。いずれのケースにおいても、既設コンクリート側の試験面には鉄筋位置に沿った形でひび割れが発生した。これについては、塩化物イオン量が4kg/m³を超えるとシラン系表面含浸材による防食効果が小さくなる既往の実験結果⁹⁾と、打継ぎ面に表面含浸材を塗布した供試体の鉄筋にマクロセル腐食は見られなかったものの、鉄筋の表面随所に錆がみられること(写真-4)から、塩化物イオン量が5.0kg/m³と多いことに起因して鉄筋の不動態被膜が大きく破壊し、コンクリートに存在するわずかな水蒸気によっても腐食が進みやすい状況にあったためと推察される。

なお、特筆すべき傾向として、打継ぎ面に表面含浸材を塗布した供試体は、既設コンクリート側の試験面にひび割れが1本だけ発生しているのに対し、打継ぎ面に表面含浸材を塗布しなかった供試体は、既設コンクリート側の打継ぎ部付近の試験面にひび割れが「>」の形で2本発生している。この位置は、局所的に大きく腐食が進行した箇所(写真-4)とほぼ対応している。また、この付近の最大ひび割れ幅は1.0mmで、打継ぎ面に表面含浸材を塗布した供試体の最大ひび割れ幅に比べるとやや大

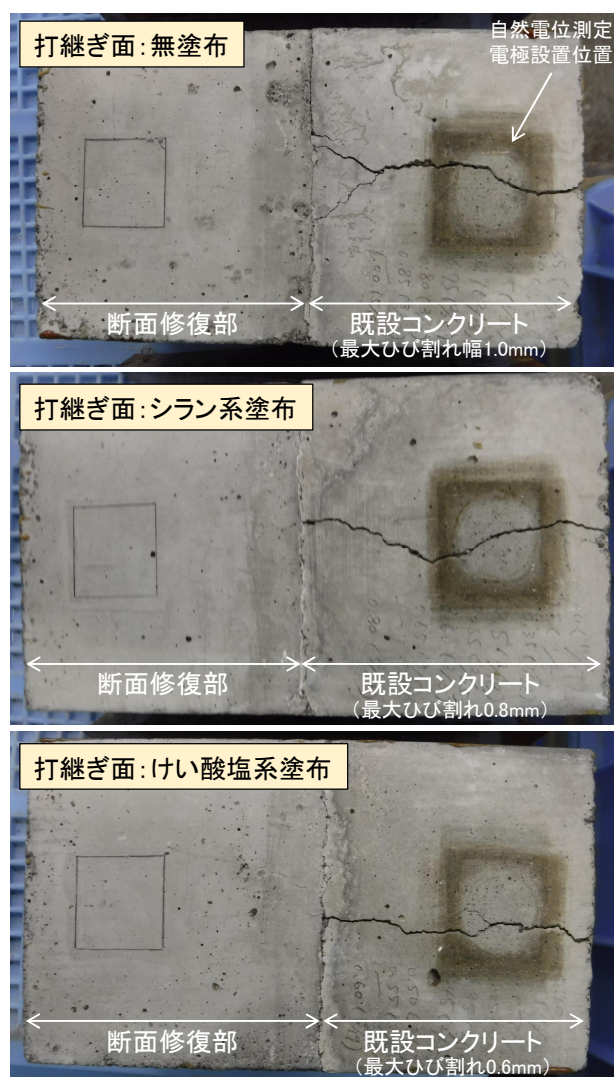


写真5 乾湿繰返し20サイクル後の試験面の外観

きく、腐食が局所的に進行したことが示唆される。

観察の結果、打継ぎ面に表面含浸材を塗布しなかったケースではマクロセル腐食が発生し、打継ぎ面に表面含浸材を塗布したケースではマクロセル腐食が抑えられたことが確認された。

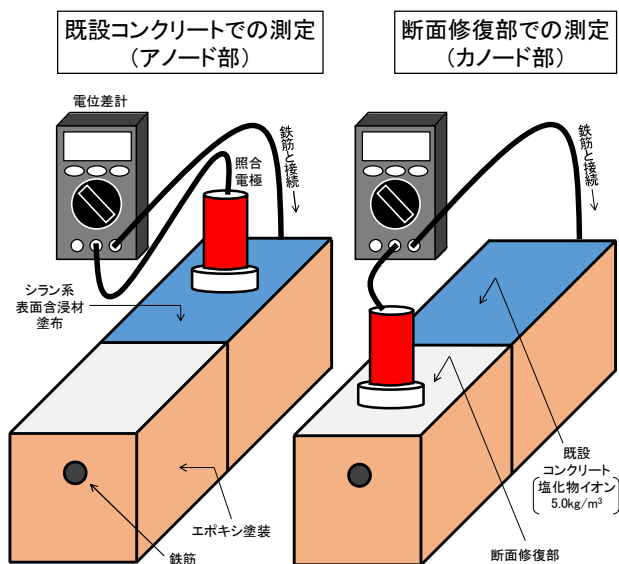


図4 自然電位の測定要領

(2) 自然電位

次に、鉄筋の状態変化の把握の参考とするために行った自然電位の測定結果について述べる。自然電位は図4に示すように、電位差計のプラス端子を鉄筋に接続し、既設コンクリートの試験面に電極をあててアノード部の測定、および、断面修復部の試験面に電極をあててカソード部の測定をそれぞれ行った。

図5に測定結果を示す。参考までに、ASTM C 876¹⁰⁾における自然電位の評価基準も表3にあわせて示す。

打継ぎ面に表面含浸材を塗布しなかった場合、乾湿繰返し 0～5 サイクルにおいて断面修復部で高い自然電位、既設コンクリートで低い自然電位を呈し、マクロセル回路形成の兆候が現れた。その後、さらに乾湿繰返しを与えたところ、断面修復部の自然電位が大きく低下に転じた。写真4で示したように、断面修復部の鉄筋に錆は見受けられないが、自然電位は90%以上の確率で腐食ありと評価される $-500\sim-400\text{mV}$ の値で長期的に推移した。これは5サイクル以降、既設コンクリート側の打継ぎ面付近ではマクロセル腐食が局所的に進行して自然電位が低下し、打継ぎ面が絶縁化されていないこともあって、この局所的な低電位が断面修復部の試験面に据え付けた電極の測定値に影響を及ぼしたように思われる。

打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布した場合、乾湿繰返し試験開始直後に断面修復部で高い自然電位、既設コンクリートで低い自然電位を呈し、その後も乾湿繰返し試験を続けても、断面修復部の自然電位は高い状態のまま推移した。また、既設コンクリート内の鉄筋の表面随所に錆がみられることもあって（写真4）既設コンクリートの自然電位は -350mV 以下の値となっているものの、自然電位が経時的に上昇する傾向が示された。これは、打継ぎ面が疎水化されて絶縁状態にあることからマクロセル回路の形成に至らず、マクロセル腐食の発生が

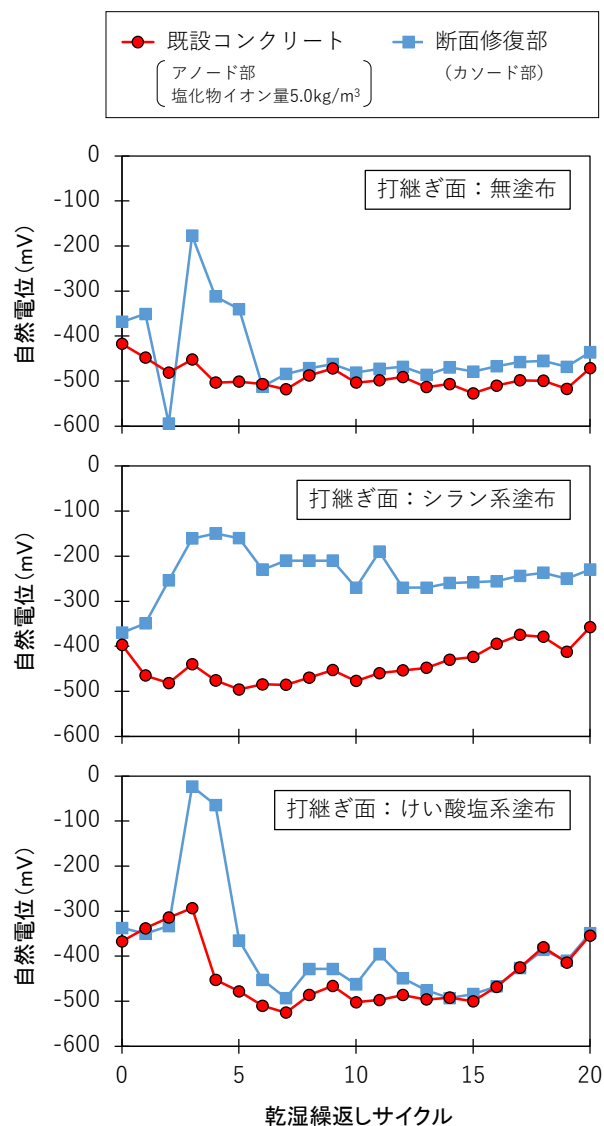


図5 自然電位の測定結果

表3 ASTM C 876における評価基準¹⁰⁾

自然電位 E (mV)	鉄筋腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

抑えられたために、マクロセル腐食が発生した前述の無塗布のケースのような大きな自然電位の低下にまでは至らなかったことと、既設コンクリートは試験面と打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布しているために乾燥しやすく、電気抵抗が経時的に高まりやすい環境下にあることも要因と考えられる。

打継ぎ面に固化型のけい酸塩系表面含浸材を塗布した場合、乾湿繰返し4サイクルあたりまでの間、断面修復部で高い電位、既設コンクリートで低い電位を呈した。さらに乾湿繰返しを与えたところ、断面修復部の自然電位が低下に転じたものの、無塗布のケースとは対照的に、既設コンクリートとの間で電位差が保たれた状態で推移

した。また、15サイクル以降、断面修復部と既設コンクリートのいずれにおいても自然電位が経時的に上昇し、20サイクル終了時は-350mVまで上昇した。これは、緩やかではあるもののガラス化⁷⁾による打継ぎ面近傍の絶縁化が進んだことでマクロセル回路の形成に至らず、マクロセル腐食が抑えられたことで自然電位の局所的な低下が発生しなかったことと、既設コンクリートにおいても打継ぎ面のガラス化と表面の撥水作用によって水分が徐々に減少し、電気抵抗も経時的に増加したと考えられる。断面修復部の自然電位が4サイクルを過ぎたあたりから低下しているのは、この段階では打継ぎ面近傍のガラス化が十分進んでおらず、既設コンクリート内の鉄筋随所に発生した錆に起因する自然電位低下の影響を受けた可能性が高い。それでも、既設コンクリートとの電位差が保たれていることと、鉄筋にマクロセル腐食が確認されなかったこと（写真4）を総合すると、固化型のけい酸塩系表面含浸材による打継ぎ面近傍のガラス化もマクロセル腐食の抑制に寄与すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、打継ぎ面への表面含浸材の塗布によるマクロセル腐食抑制の効果を調べるための基礎実験を行った。本研究の範囲で得られた知見をまとめると、下記のようになる。

- (1) 打継ぎ面へシラン系表面含浸材を塗布すると、打継ぎ面が疎水化されて絶縁状態となってマクロセル回路の形成に至らず、マクロセル腐食が抑えられる。
- (2) 打継ぎ面に固化型のけい酸塩系表面含浸材を塗布すると、緩やかではあるものの打継ぎ面近傍のガラス化によって絶縁化が進行し、その結果、マクロセル回路の形成に至らず、マクロセル腐食が抑えられる。

5. 今後の課題

本研究では、既設コンクリート内に含まれる塩化物イオン量を 5.0kg/m^3 に設定して実験を行った。実験の結果、打継ぎ面への表面含浸材の塗布は、マクロセル腐食抑制

に効果的であることがわかった。その一方で、塩化物イオン量を 5.0kg/m^3 と高く設定したこともあり、既設コンクリート内の鉄筋随所に錆がみられた（写真4）。既設コンクリートにおける塩化物イオン濃度が高い場合、高濃度のコンクリート範囲を研り取る、または別工法との併用などの検討が必要であることもあわせてわかった。

今後は既設コンクリートの塩化物イオン量を 5.0kg/m^3 未満に設定して表面含浸材の単独使用によるマクロセル腐食の抑制効果、また、 5.0kg/m^3 以上の範囲で犠牲陽極材など別工法との併用による効果について検討していく予定である。また、既設コンクリートと断面補修材の付着保持に配慮した打継ぎ面への表面含浸材の適切な塗布範囲や、寒冷環境下での本方法の効果についても明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，第4131号，2009.1
- 2) 河手雅行，廣瀬篤，中津稔：塩害を受けたPC橋の長寿命化に向けた取り組み報告～『日の出大橋の補修事例』～，第64回(2020年度)北海道開発技術研究発表会，2021.2
- 3) 武藤義彦，野本一美，小椋紀彦：犠牲陽極材を用いた塩害対策補修の実績と今後の課題，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.562-567，2021.7
- 4) 一般社団法人建設コンサルタンツ協会九州支部 道路技術委員会：材料・工法の選定に関する参考資料(案)，p.74，2016.8
- 5) 遠藤裕丈，島多昭典：塩化物イオンを含む鉄筋コンクリートへのシラン系表面含浸材の適用による腐食抑制効果と適用限界，第21回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，pp.197-202，2021.10
- 6) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)〔工種別マニュアル編〕，コンクリートライブラリー119，p.146，2005.4
- 7) 金堀雄伍，樋原弘貴，添田政司，西嶋大貴：けい酸塩系表面含浸材とカルシウム溶液を併用したコンクリートの品質改善に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1657-1662，2015.7
- 8) 土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー137，p.12，2012.7
- 9) JCI-SC3：塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法 ―乾湿繰返し法―
- 10) ASTM C 876：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete