

シラン系表面含浸材による鉄筋コンクリートのマクロセル腐食抑制効果に関する研究

国立研究開発法土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
国立研究開発法土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 吉田 行

塩害を受けたコンクリート構造物での断面修復において、修復後、断面修復部と残存する既設部との電位差に起因し、既設部で鉄筋腐食が促進されるマクロセル腐食に関して、断面修復部の施工前に、既設部の打継ぎ面へシラン系表面含浸材を塗布し、打継ぎ面の電気抵抗を高めることでマクロセル腐食の進行を抑える技術の効果を評価した。また、断面修復部と既設部の付着に及ぼす塗布の影響にも着目し、マクロセル腐食抑制と付着確保を両立させる施工方法を検討した。その結果、打継ぎ面へのシラン系表面含浸材の塗布によりマクロセル腐食が抑制されることと、既設部と断面修復部の付着はエポキシ樹脂の使用によって確保できる知見を得た。

キーワード：鉄筋コンクリート、マクロセル腐食、シラン系表面含浸材、エポキシ樹脂

1. はじめに

北海道の沿岸地域や凍結防止剤散布地域で供用されているコンクリート構造物は、凍結融解と塩化物イオンの複合作用を受ける厳しい環境に置かれている。そのため、コンクリートの凍害劣化や鉄筋腐食が発生しやすい。鉄筋腐食が発生したコンクリート構造物の補修工事では、コンクリートをはり取り、腐食した鉄筋を露出し、腐食物の除去など鉄筋の補修を行い、その後、断面修復が施される。

しかし、断面修復を部分的に行うと、はり取りを行わなかった既設部は塩化物イオン（以降、Cl⁻と記す）や水分が存在しているために電位が低く、これに起因して、電位の高い断面修復部との間で電位差が発生し、やがて、大きな電気回路（マクロセル回路）が形成される。これによって、既設部で鉄筋腐食が促進されるマクロセル腐食が発生し、再劣化に至ることがある。

写真-1は、断面修復部に隣接する既設部で発生したマクロセル腐食の事例である。この事例は、図-1に示すように、Cl⁻が残存する既設部の鉄筋が陽極（アノード）、断面修復部の鉄筋が陰極（カソード）となって、既設部の鉄筋が鉄イオンに変化し、この変化によって発生した電子が断面修復部の鉄筋へ移動する一方、断面修復部では移動してきた電子と水分および酸素との反応によって水酸化物イオンが生成され、この水酸化物イオンが陽極へ移動し、鉄イオンと反応して腐食物が生成させ、再劣化に至ったものと考えられる。

一方、写真-2は、断面修復部の背面側の既設部で発生したマクロセル腐食の事例である。断面修復部にひび割れと鏽汁が集中していることがわかる。この事例は、図



写真-1 断面修復部に隣接する既設部で発生したマクロセル腐食 (道南地方の道路橋)

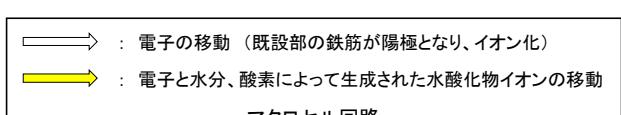
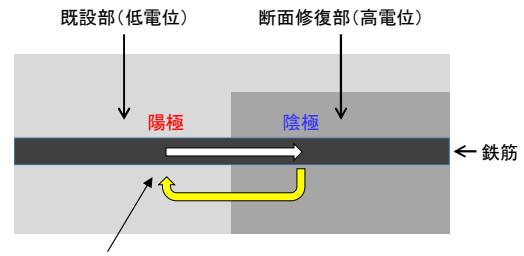


図-1 断面修復部に隣接する既設部で発生するマクロセル腐食のメカニズム



写真-2 断面修復部の背面側の既設部で発生したマクロセル腐食 (道南地方の道路橋)

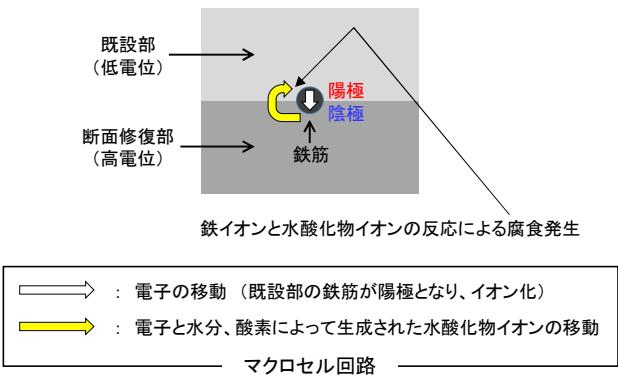


図-2 断面修復部の背面側の既設部で発生するマクロセル腐食のメカニズム

-2に示すように、断面修復部の背面に存在する断面修復部と既設部との間で電位差が発生し、既設部側の鉄筋に腐食が発生し、その後、腐食が進行したことで、再劣化に至ったものと考えられる。

鉄筋腐食の進行形態は、図-1や図-2で示したように、陽極と陰極の位置が明らかに離れており、大きな電気回路が形成されることで、陽極の鉄筋が局所的に腐食するマクロセル腐食と、陽極と陰極の位置が極めて近く、微小な電気回路（ミクロセル回路）が鉄筋表面の随所に一樣に形成され、鉄筋表面の腐食が全体的に進行していくミクロセル腐食に大別される。断面修復において懸念されるマクロセル腐食は、ミクロセル腐食に比べると腐食速度が大きいとされており¹⁾、マクロセル腐食の抑制は、再劣化防止の観点から重要と言える。

マクロセル腐食の抑制対策の一つに、鉄よりもイオン化傾向が高い亜鉛の性質を利用し、断面修復時に亜鉛製の犠牲陽極を鉄筋に取り付け、鉄筋に代わって犠牲陽極を腐食させることで鉄筋を保護する方法がある²⁾。しかし、犠牲陽極には耐用年数があり、環境によっては、犠牲陽極の取り付けから5~6年が経過した時点で、残存効

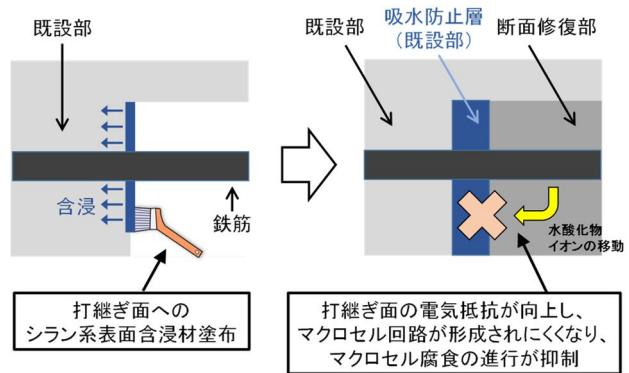


図-3 打継ぎ面へのシラン系表面含浸材によるマクロセル腐食抑制技術の概念

果が2年程度であったとの報告もある³⁾。亜鉛が完全に消耗した場合は、断面修復部を再度はり、犠牲陽極を交換する必要がある。しかし、近年は人員不足が課題となっており、交換作業への影響が将来的に懸念される。

一方、近年は図-3に示すように、断面修復前に既設部側の打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布し、打継ぎ面から深さ数mm範囲に吸水防止層を設けて電気抵抗を高め、マクロセル回路の形成を防ぐことで、マクロセル腐食の進行を抑える技術が開発されている^{4), 5)}。

この技術の適用性に関して、著者らは既往の実験⁶⁾で、既設部のCl⁻量が2.5kg/m³の場合、既設部でミクロセル腐食は進行したものとの、マクロセル腐食の進行を一定程度抑える効果があることを確認した。また、既設部のCl⁻量が10.0kg/m³と高濃度の場合、犠牲陽極のみ取り付けたケースでは、断面修復部と既設部の境界付近でマクロセル腐食が発生したのに対し、打継ぎ面へのシラン系表面含浸材の塗布と犠牲陽極の取り付けを併用したケースでは、既設部でミクロセル腐食とマクロセル腐食がともに抑制され、マクロセル腐食抑制効果の長期持続、犠牲陽極の交換インターバルの延長、ひいては、交換時期の平準化が期待されることを確認した。

しかし、打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布すると、断面修復部と既設部との付着に影響が及ぶことが懸念される。そこで、図-3で示した技術の適用性の検討の一環として、マクロセル腐食の抑制と付着の確保を両立できる施工方法について検討を行った。

2. マクロセル腐食の抑制に関する検討

はじめに、付着を確保する観点から、打継ぎ面の一部を無塗布とし、シラン系表面含浸材の塗布範囲を縮小させた場合のマクロセル腐食抑制効果について検討した。

(1) 実験概要

a) コンクリート配合

表-1に断面修復部と既設部のコンクリート配合を示す。マクロセル回路の形成に及ぼす使用材料の影響を除外す

表-1 断面修復部と既設部のコンクリート配合

水セメント比	使用セメント	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55%	普通	155	282	861	1035

※既設部のコンクリートに塩化物イオンを2.5kg/m³混入

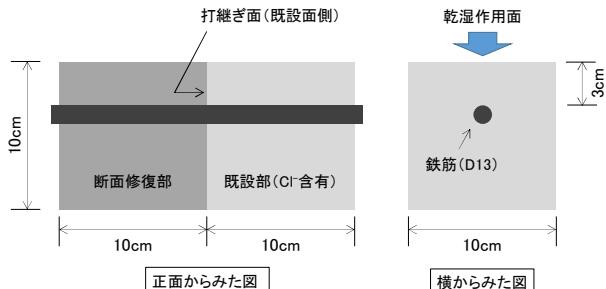


図-4 供試体1 (既設部でのマクロセル腐食抑制効果の評価)

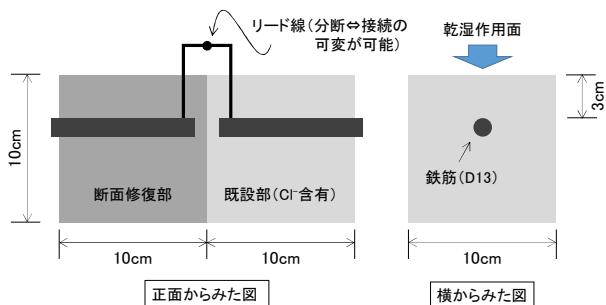


図-5 供試体2 (マクロセル回路の形成状況の把握)

るため、配合は統一した。水セメント比は55%とし、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は表乾密度2.71g/cm³、吸水率0.77%、除塩処理済の苦小牧錦岡産海砂、粗骨材は表乾密度2.67g/cm³、吸水率1.75%、最大寸法20mmの小樽見晴産の碎石を用いた。スランプは12±2.5cm、空気量は5.0±1.5%を目標に、AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体）とAE助剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）で調整した。実測スランプは平均12.0cm、実測空気量は平均5.1%であった。既設部の作製に使用するコンクリートは、Cl⁻が残存する状態を模擬するため、練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入した。Cl⁻量は、マクロセル腐食の進行抑制が確認された既往⁶の実験条件に鑑みて2.5kg/m³とし、この水準に合うように塩化ナトリウム混入量を定めた。

b) 供試体およびシラン系表面含浸材の塗布

供試体は、既設部でのマクロセル腐食抑制効果を評価するため、断面修復部と既設部の鉄筋が連続する図-4に示す供試体1と、マクロセル回路の形成状況の把握のため、宮里ら⁷の研究を参考に断面修復部と既設部で鉄筋を分断し、分断と接続の可変が可能となるよう、鉄筋同士をリード線で繋いだ図-5に示す供試体2を準備した。供試体の寸法は、断面修復部と既設部をあわせて10cm×10cm×20cmとした。かぶりは3cmとし、乾湿作用面からのかぶりが3cmとなるようにD13の鉄筋を配置した。はじめに既設部を打設し、材齢7日目まで湿潤養生を施した。次に、材齢13日目にはつた状態を模擬するため、打継

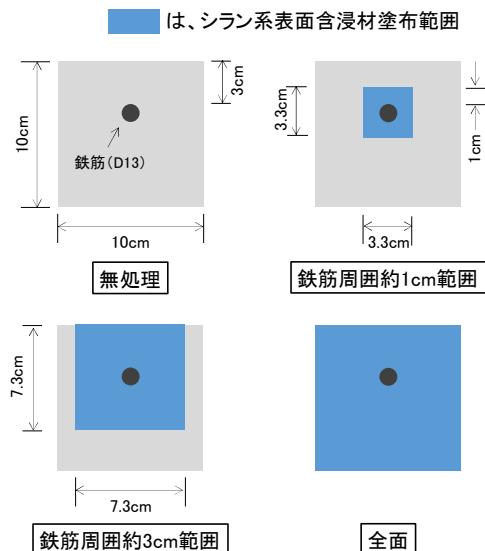


図-6 打継ぎ面におけるシラン系表面含浸材の塗布範囲



写真-3 乾湿繰返し試験の様子

ぎ面をニードルスケラーでチッピングし、凹凸をつけた。そして乾燥状態の打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布した。シラン系表面含浸材は、シラン・シロキサンを主成分とする製品を使用した。標準塗布量は200g/m²である。

図-6は、打継ぎ面におけるシラン系表面含浸材の塗布範囲を示している。ここでは全面塗布と、比較のための無処理に加えて、断面修復部と既設部の付着を確保するねらいで無処理の範囲を一部残し、鉄筋周囲約1cm範囲への塗布と、塗布範囲を広げた鉄筋周囲約3cm範囲への塗布の計4水準を準備した。鉄筋が存在しない供試体2の打継ぎ面については図-6の概念に準じ、全面塗布と無処理、および、鉄筋先端の延長線上と打継ぎ面が交差する箇所の周囲1cmもしくは3cm範囲に塗布を行った。

シラン系表面含浸材の塗布から7日後に断面修復部を打設した。なお、後述する乾湿繰返し試験での乾湿作用面を1面に限定するため、残りの5面はエポキシ樹脂でコーティングした。また、水酸化物イオンが極力、断面修復部でのみ発生するよう、既設部の乾湿作用面には水の浸入を防ぐためにシラン系表面含浸材を塗布した。

c) 乾湿繰返し試験

写真-3は乾湿繰返し試験の様子を示している。試験はJCI-SC3を参考に温度70°C、相対湿度90%以上の高温高湿作用を3日間、20°Cで相対湿度70%以下の乾燥作用を4日間、7日間1サイクルの作用を20サイクル与えることとし

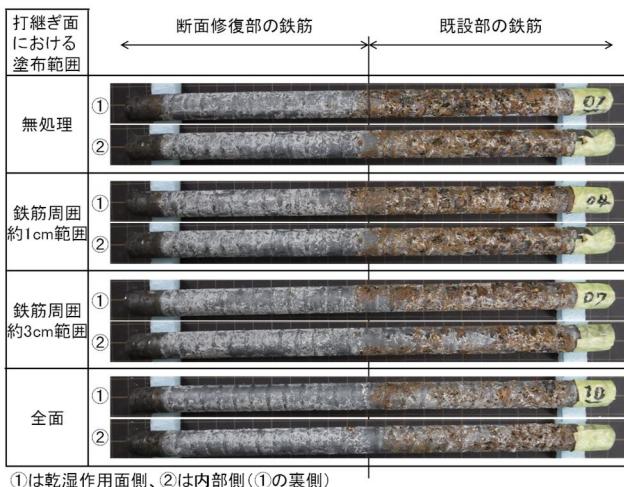


写真-4 乾湿繰返し試験終了後の鉄筋の様子 (供試体1)

表-2 既設部の鉄筋における鉄筋腐食面積率 (供試体1)

打継ぎ面における塗布範囲	無処理	鉄筋周囲約1cm範囲	鉄筋周囲約3cm範囲	全面
既設部の鉄筋腐食面積率(%)	82.2	95.5	76.9	61.9

た。供試体2は、マクロセル回路の形成を促すため、乾湿繰返し試験中はリード線を接続させた。

d) 鉄筋の腐食状況

乾湿繰返し試験終了後に鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食状況の観察を行った。その後、鉄筋に付着しているモルタル片を精密グラインダーで除去し、鉄筋の表面積に占める腐食面積の割合（鉄筋腐食面積率）の測定を行った。

e) 自然電位測定

断面修復部と既設部の間で発生する電位差を把握するため、乾湿繰返し試験中は1サイクルおきにJSCE-E 601に準じた自然電位の測定を行った。測定の際、断面修復部および既設部の表面にあてる照合電極として、飽和硫酸銅電極を使用した。測定は中央1点で行った。

(2) 実験結果・考察

乾湿繰返し試験終了後の供試体1の鉄筋の様子を写真-4、既設部の鉄筋における鉄筋腐食面積率（鉄筋の表面積に占める腐食範囲の面積の割合）を表-2に示す。既設部の鉄筋をみると、打継ぎ面の全面および鉄筋周囲約3cm範囲にシラン系表面含浸材を塗布したケースは、無処理に比べると黒色や褐色の腐食物が少ない範囲がみられ、鉄筋腐食面積率も無処理より少なかった。

図-7は供試体2において、断面修復部で測定した自然電位から、既設部で測定した自然電位を差し引いて求めた断面修復部と既設部の電位差である。リード線を分割したときの電位差 (ΔV_b) と接続したときの電位差 (ΔV_s) を比較すると、リード線を接続させて測定した方が、断面修復部と既設部の電位差は大きくなる傾向にあった。これは、接続によって電位の低い既設部の鉄筋から、電位の高い断面修復部の鉄筋へ向けて、リード線を介して電子の移動が発生しているためと考えられる。

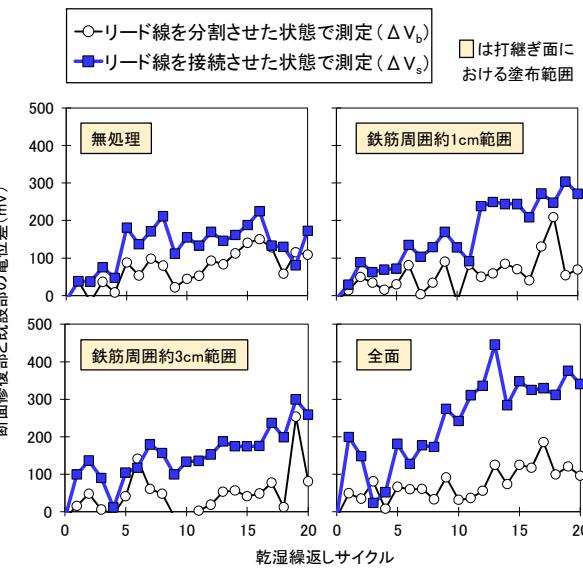


図-7 断面修復部と既設部の電位差の推移 (供試体2で測定)

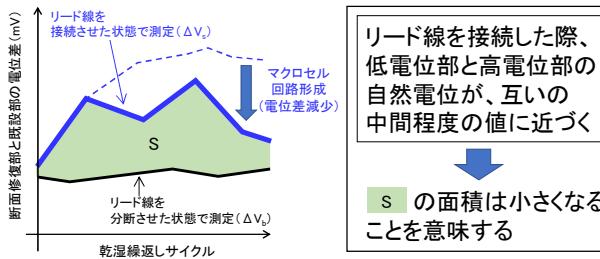


図-8 マクロセル回路の形成に関する考察の概念

丸屋ら⁸⁾は、鉄筋（リード線）を接続したときにマクロセル回路が形成されると、低電位部と高電位部の自然電位は、互いの中間程度の値にそれぞれ近づくと述べている。これは、リード線を接続すると、低電位部（既設部）と高電位部（断面修復部）の電位差は小さくなることを示唆する。すなわち、図-8に示すように、緑で着色したS ($\Delta V_s - \Delta V_b$) の領域の面積が小さくなることを意味する。

そこで、図-8に示すSの面積と、表-2で示した既設部の鉄筋における鉄筋腐食面積率の関係を調べることとした。Sの面積は、式(1)により求めた。

$$\begin{aligned}
 S\text{の面積} = & (1\text{サイクル目の}\Delta V_s - \Delta V_b) \\
 & + (2\text{サイクル目の}\Delta V_s - \Delta V_b) \\
 & + \dots \\
 & + (20\text{サイクル目の}\Delta V_s - \Delta V_b) \quad (1)
 \end{aligned}$$

図-9にSの面積と、既設部の鉄筋腐食面積率の関係を示す。ばらつきはあるが、Sの面積が減少すると、既設部の鉄筋腐食面積率は減少する傾向にあった。このことから、無処理に対し、打継ぎ面の全面および鉄筋周囲約3cm範囲にシラン系表面含浸材を塗布した既設部の鉄筋表面に黒色や褐色の腐食物が少なかった（写真-4、表-2）理由は、打継ぎ面の電気抵抗の向上によってマクロセル

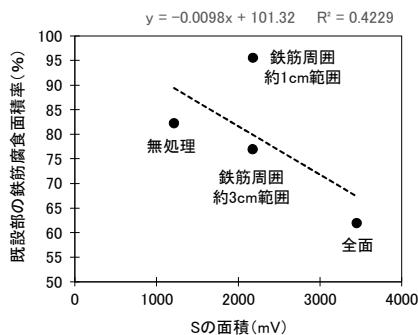


図-9 Sの面積(図-8)と既設部の鉄筋腐食面積率の関係
(図中に併記した文字は打継ぎ面における塗布範囲)

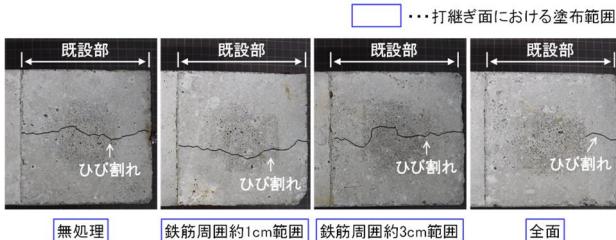


写真-5 既設部の乾湿作用面に生じたひび割れのスケッチ
(乾湿繰返し20サイクル後)

腐食の進行が抑制されたためと考えられる。

一方で、写真-4をみると、打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布したケースにおいても、無処理ほどではないが、既設側の鉄筋に腐食がみられる。

コンクリート標準示方書【設計編】には、普通ポルトランドセメントが使用されている場合の腐食発生限界Cl⁻量について、式(2)が示されている⁹⁾。

$$C_{lm} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (2)$$

ここに、 C_{lm} は腐食発生限界Cl⁻量(kg/m³)、W/Cは水セメント比である。

既設部の水セメント比を55%としているため、腐食発生限界Cl⁻量は1.75kg/m³となる。既設部にはこれを上回る2.5kg/m³のCl⁻が存在するから、この腐食は、既設部に元来存在する水蒸気に起因し、既設部の鉄筋表面の随所で、陽極と陰極の位置が極めて近いミクロセル回路が形成されたことで発生したミクロセル腐食と考えられる。

このことから、打継ぎ面へのシラン系表面含浸材の塗布は、既設部で発生するミクロセル腐食の抑制は難しいものの、マクロセル腐食の抑制効果があることがわかった。写真-5は乾湿繰返し20サイクル目の既設部の乾湿作用面におけるひび割れのスケッチである。打継ぎ面の鉄筋周囲約3cm範囲に塗布したケースは、既設部の鉄筋腐食面積率は無処理よりも少ないものの76.9%であり、既設部の乾湿作用面全体に鉄筋に沿ったひび割れが確認された。このことから、マクロセル腐食の抑制を期待するには、打継ぎ面の広範にシラン系表面含浸材を塗布する必要があることもあわせてわかった。

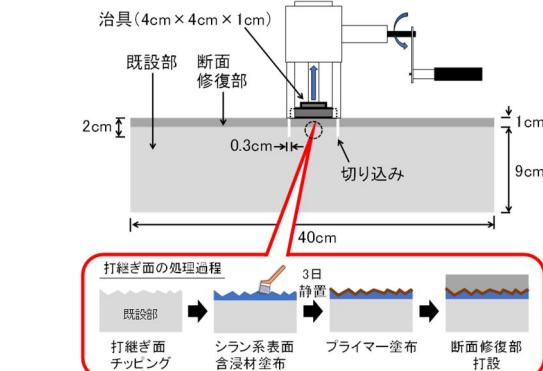


図-10 供試体と打継ぎ面の処理過程および付着強度試験概要

表-3 打継ぎ面の処理過程に関する実験記号 (空欄は未実施)

断面修復部	プライマー	不使用	エポキシ樹脂A	エポキシ樹脂B	エポキシ樹脂C
モルタル	Nモ	Aモ	Bモ	Cモ	
無収縮モルタル		A無	B無	C無	
ポリマーセメントモルタル		Aボ ⁹	Bボ ⁹	Cボ ⁹	

表-4 プライマー塗布時の仕様

項目	プライマー	エポキシ樹脂A	エポキシ樹脂B	エポキシ樹脂C
	塗布量 (g/m ²)	250	300	250
プライマー塗布終了後から断面修復部打設開始までの時間 (分)		25	60	40

表-5 断面修復部の配合

断面修復部	単位量 (kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
モルタル	253	461	1407
無収縮モルタル	224	2075 (プレミックス)	
ポリマーセメントモルタル	291	1712 (プレミックス)	

3. 断面修復部と既設部の付着確保に関する検討

2章より、マクロセル腐食の抑制を期待するには、打継ぎ面の広範にシラン系表面含浸材を塗布する必要があることが示された。そこで3章では、打継ぎ面の全面にシラン系表面含浸材を塗布する条件下で、断面修復部と既設部の付着確保に関する検討を行った。

(1) 実験概要

図-10に供試体の概要と打継ぎ面の処理過程を示す。供試体の寸法は既設部と断面修復部をあわせて10cm×10cm×40cmとし、断面修復部の厚さは1cmとした。先に既設部を打設し、2章と同じ方法の養生を施した後、既設部の打継ぎ面をチッピングしてシラン系表面含浸材を塗布し、その3日後にプライマーを塗布し、断面修復を行った。ここでは表-3に示すように、プライマーおよび断面修復部で使用する材料の違いが付着に及ぼす影響を調べるために、プライマーは市販の3種類のエポキシ樹脂を使用した。表-4にプライマー塗布時の仕様を示す。断面修復部はモルタル、および、砂とセメントがプレミックスされた市販の無収縮モルタルとポリマーセメントモルタルの3種類とした。表-5にそれぞれの配合を示す。

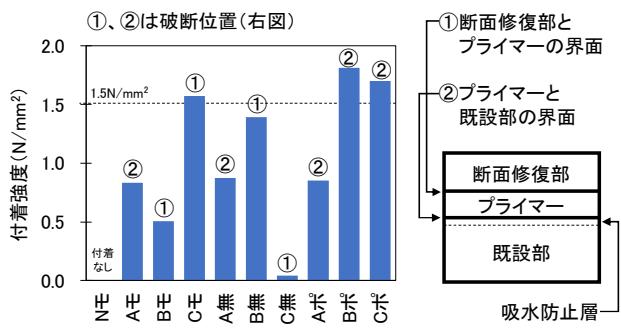


図-11 付着強度の測定結果

断面修復部の施工から7日後に付着強度試験を行った。図-10に示すように、ディスクサンダーで幅0.3cm、深さ2cmの切り込みを入れ、4cm×4cmの治具を接着し、建研式の接着力試験機を使用し、0.02N/mm²/s以下の引張載荷速度で治具を引き上げ、既設部と断面修復部との付着強度を測定した。付着強度は3回の測定値の平均とした。

(2) 実験結果・考察

図-11に付着強度の測定結果を示す。比較のために行ったプライマー不使用のNモは、切り込みを入れた直後に断面修復部が剥がれ、付着は確認されなかった。これは、モルタルを打設した際、打継ぎ面に固着するシラン系表面含浸材に含まれる疎水基が、水分を含むモルタルと打継ぎ面との付着を阻害したためと考えられる。一方、打継ぎ面にプライマーを塗布した場合、C無を除いて、明確な付着が確認された。シラン系表面含浸材は、コンクリートに撥水機能を付与するが、コンクリートの空隙は充填しないことから、打継ぎ面に存在する空隙内へエポキシ樹脂が入り込むとともに、エポキシ樹脂が断面修復材とも付着したことにより、断面修復部と既設部の付着が総合的に図られたものと考えられる。このことから、打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布した場合であっても、プライマーとしてエポキシ樹脂を使用することにより、既設部と断面修復部の付着を確保することは可能であることがわかった。

今回の実験では、プライマーとしてAを使用した場合、いずれのケースにおいても、密着していると評価される1.5N/mm²¹⁰⁾には達しなかった。これに対して、Cモ、Bモ、Cポでは、密着していると評価される1.5N/mm²以上の付着強度が確認された。B無に関しても、1.5N/mm²に近い値が記録されており、ばらつきはあるが、選定するプライマーの種類の影響が示唆される結果となった。

一方、C無は付着強度が極めて小さい結果となった。C無は、断面修復部とプライマーの境界で破断が発生していることから、プライマーとシラン系表面含浸材を塗布した打継ぎ面の付着は確保されていると考えられる。同じCを使用したCモとCポの付着強度が1.5N/mm²を上回っていることから、プライマーの塗布を終了し、断面修復部の打設を開始するまでの間にプライマーの硬化が開始したことで、断面修復部とプライマーの付着が確保さ

れなかった可能性もあるが、理由の特定に至らなかった。

4.まとめ

本研究では、塩害が発生したコンクリート構造物で行われる断面修復において、断面修復部と残存する既設部の間で発生する電位差に起因し、既設部の鉄筋の腐食が促進されるマクロセル腐食について、断面修復部を施工する前に、既設部の打継ぎ面へシラン系表面含浸材を塗布することでマクロセル腐食の進行を抑える技術に着目し、その効果を評価するとともに、断面修復部と既設部の付着に及ぼすシラン系表面含浸材の塗布の影響についても着目し、マクロセル腐食の抑制と付着の確保を両立できる施工方法について検討を行った。

本研究で得られた知見を整理すると、以下のようになる。

- (1)マクロセル腐食の抑制を期待するには、打継ぎ面の広範にシラン系表面含浸材を塗布する必要がある。
- (2)打継ぎ面にシラン系表面含浸材を塗布した場合においても、プライマーとしてエポキシ樹脂を使用することにより、既設部と断面修復部の付着を確保することは可能である。

参考文献

- 1) 原将之：桟橋式構造物における鋼材の電気化学的特性に関する実験的および解析的研究、九州大学博士学位論文、2023.11
- 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、管理II、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ト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) 岸上弘宣、宮里心一、松田哲夫、神野真一郎：コンクリート橋断面修復部のマクロセル腐食対策の施工試験とモニタリングについて、土木学会第62回年次学術講演概要集、VI-302、2007.9
- 6) 遠藤裕丈、三原慎弘：表面含浸材と犠牲陽極を併用した断面修復後の鉄筋コンクリート構造物のマクロセル腐食抑制効果に関する研究、寒地土木研究所月報「寒地土木技術研究」、No.876、pp.2-11、2025.12
- 7) 宮里心一、大即信明、小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、2001.6
- 8) 丸屋剛、武田均、堀口賢一、小山哲：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する再現実験と数値解析、土木学会論文集、Vol.64、No.4、pp.500-514、2008.10
- 9) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書【設計編】、pp.164-169、2023.3
- 10) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル2022年版、p. (III-18)、2022.12