

論文 亜硝酸リチウム水溶液先行注入型補修材充填工法により補修した既設 PCT 橋の自然電位モニタリング

鴨谷 知繁*1・石井 浩司*2・森川 英典*3・竹本 修*4

要旨：凍結防止剤散布地域にありグラウト充填不足部が確認された既設 PCT 桁橋に対し、亜硝酸リチウム水溶液の先行注入型補修材充填工法を適用後、補修部、既設部およびそれらの境界部の PC 鋼材近傍にセンサー設置し、自然電位モニタリングを約 4 年半実施した。その結果、シース内への塩化物イオンの侵入や PC 鋼材の腐食がある場合でも、自然電位は概ね-200 (mV_{vs,CSE}) より貴な値を示し、実橋における良好な補修効果が認められるとともに、補修部、境界部、既設部のいずれも相対的に卑な電位を継続することはなく、マクロセル腐食によりいずれかにおいて局所的な腐食を生じ続けるような状況にはなっていないと推察された。

キーワード：亜硝酸リチウム、自然電位、グラウト、PC 橋、再注入

1. はじめに

近年、既設 PC 橋の長寿命化が求められており、著者らはグラウト充填不足部において塩化物イオン（以下、Cl⁻）の侵入より腐食した PC 鋼材に対して、亜硝酸リチウム水溶液（以下、水溶液）を前処理として注入して再不動態化を図り、同水溶液の除去後、亜硝酸リチウム添加補修材を再充填し、躯体と PC 鋼材との付着を改善し耐久性を確保する補修工法（以下、本工法）について検討を行ってきた。本工法は、従来工法であるグラウト再注入と比較して高い腐食抑制効果が得られることが明らか^{例えぱ 1}となり、多数の実橋梁の補修に適用されている。

特に昨今は、補修工法の効果や耐久性を、事前の実験的もしくは解析的検討だけでなく実構造物において検証することが求められており^{例えぱ 2}、本工法による補修を実施した既設 PCT 桁橋^{3, 4}において補修した PC 鋼材の自然電位をモニタリングし、補修直後から 3~4 年間 ASTM 基準⁵で「90%以上の確率で腐食なし」を示す値で推移したことから本工法の実橋梁における補修効果を確認した。ただし、モニタリング対象数が少ないことから、本工法の信頼性向上においては、さらなるモニタリングデータの蓄積が望ましいと考えられる。

そこで、兵庫県内の山間部の凍結防止剤散布地域にあり、既報^{3, 4}と比較しても著しい PC 鋼材の腐食が確認された既設 PCT 桁橋（以下、M 橋⁶）に対し、①PC 鋼材の劣化状態と本工法による補修効果との関係を把握すること、さらには②補修後に既設グラウト部（以下、既設部）と元グラウト充填不足部である補修部との間でマクロセル腐食が生じた場合、PC 鋼材の腐食が局所的に促進されることが懸念されるマクロアノード部の位置を推

定することを目的に、センサーの設置箇所を、既報⁵と同様の補修部のほか既設部およびそれらの境界部（以下、境界部）とした自然電位モニタリングを実施した。本稿は、約 4 年半の測定データに基づき、本工法の実構造物における補修効果や、補修後のマクロセル腐食に関する知見を記すものである。

2. M 橋の概要と詳細調査結果

2.1 M 橋の概要

M 橋の補修前の外観を図-1 に示す。M 橋は兵庫県内の山間部にある単純ポストテンション方式 PCT 桁橋である。目視点検で主ケーブルに沿ったひび割れやエフロレッセンスが確認され、平成 22 年度に詳細調査が実施された。耳桁である G6 桁を対象としたグラウト充填状況調査において、グラウト充填不足や、Cl⁻による PC 鋼材の腐食が確認され、平成 26 年に本工法を用いた補修が実施された。主ケーブルは、図-2 に示すように 1 主桁あたり 7 本の 12φ7mm が配置されており、内 4 本が床版内に定着具を有する上縁定着ケーブルである。

2.2 シース内部の Cl⁻ 調査

上縁定着部から侵入した雨水がグラウト充填不足部へ侵入したことが、PC 鋼材に腐食が生じた主要因と考えられたため、雨水が通常の雨水なのか、あるいは凍結防止剤を含む雨水なのか判別することを目的に、水溶液の注入に先立ち PC 鋼線束表面鍍層の Cl⁻を調査した。調査は、図-3 に示すように、精製水を浸み込ませた綿棒による φ80mm コア孔内部の PC 鋼材全域への拭き取りと、精製水への Cl⁻の溶出を数度繰り返して検水を作成し、それに含まれる Cl⁻濃度を、市販の検知管等を用いて測定す

*1 (株)ピーエス三菱 大阪支店開発営業部開発営業グループ 博(工) (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 技術本部技術部 博(工) (正会員)

*3 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*4 兵庫県県土整備部 土木局道路保全課保全班 主幹 修(工)



図-1 M橋の外観（補修前）

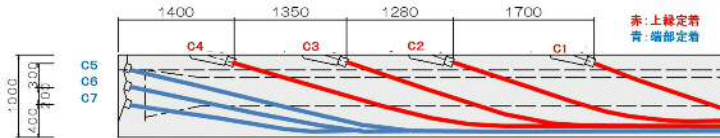


図-2 M橋のケーブル配置



図-3 Cl⁻調査（拭き取り法）

表-1 Cl⁻調査判定グレード

| Cl ⁻ の調査判定グレード | 検水の[Cl ⁻] (ppm) |
|---------------------------|-----------------------------|
| 無 | 1未満 |
| 微少 | 1以上～10未満 |
| 有 | 10以上 |

表-2 各ケーブルのCl⁻調査結果および水溶液注入時の安定電位

| 桁No. | 起点側/終点側 | | 終点側 | | | | 起点側 | | | |
|------|----------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 項目 | ケーブルNo. | C4 | C3 | C2 | C1 | C1 | C2 | C3 | C4 |
| G6 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -433 | -416 | -341 | -89 | -152 | -502 | -532 | -469 |
| | 測点 | | | | No.6 | | | No.5 | | |
| G5 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 有 | 微少 | 有 | 有 | 微少 | 微少 | 微少 | 無 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -530 | -396 | -483 | -402 | -142 | -353 | -276 | -283 |
| | 測点 | | | | | | No.3 | No.2 | | |
| G4 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 微少 | 有 | 無 | 有 | 有 | 有 | 有 | 微少 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -158 | -480 | -176 | -475 | -499 | -538 | -494 | -354 |
| | 測点 | | | | | | | | | |
| G3 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 無 | 無 | 無 | 有 | 有 | 微少 | 有 | 有 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -205 | -254 | -75 | -492 | -416 | -268 | -517 | -348 |
| | 測点 | | | | | | | | | |
| G2 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 無 | 有 | 有 | 無 | 有 | 有 | 有 | 有 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -278 | -268 | -387 | -144 | -397 | -479 | -500 | -556 |
| | 測点 | | No.1 | | | | No.4 | | | |
| G1 | Cl ⁻ 調査結果 | 凡例：無、微少、有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | 無 | 有 |
| | 水溶液注入時安定電位 | 単位：(mV, vs. CSE) | -387 | -489 | -499 | -455 | -423 | -481 | -325 | -478 |
| | 測点 | | | | | | | | | |

Cl⁻の調査結果

- 無 : 17%
- 微少 : 15%
- 有 : 68%

■ モニタリング実施ケーブル

表-3 水溶液注入時安定電位のまとめ

| Cl ⁻ の調査判定グレード | 水溶液注入時の安定電位 (mV, vs. CSE) | | |
|---------------------------|---------------------------|------|------|
| | 最小値 | 平均値 | 最大値 |
| 無 | -325 | -223 | -75 |
| 微少 | -396 | -278 | -142 |
| 有 | -556 | -437 | -89 |

る簡易的な方法である拭き取り法により行った。錆層のCl⁻を定量的に評価するほどの精度は期待できないため、一般的な雨水に含まれるCl⁻濃度(10ppm程度)を閾値として表-1に示す3グレードにより測定結果を分類した。

表-2に上縁定着ケーブルにおけるCl⁻調査結果を示す。測点は、ケーブルごとに起点側および終点側の2点とし、いずれもウェブ内部である。調査結果は桁ごとにばらつきを有しており、特に耳桁のG1,G6ではCl⁻有の割合が高い。全体的には68%の測点でCl⁻有と判定された。これらの要因として、M橋は凍結防止剤散布地域にあり、本工法による補修の直後まで橋面防水が施工されていない状態であったため、定着部からグラウト充填不足部へCl⁻が侵入しやすい状態であったこと、舗装面や床版面の勾配や、水道となる定着部背面の後打ちコンクリートのひび割れや打継ぎ不良などにより、シース内への漏水状態にばらつきが生じていたことなどが考えられる。

2.3 水溶液注入時の安定電位

水溶液と液絡した状態で注入孔近傍に設置した可搬式照合電極により測定した各測点の水溶液注入時の安定電位を表-2に、Cl⁻調査結果判定グレードごとの安定電位の最小値、平均値および最大値を表-3に示す。これらの値は、主に水溶液注入時のグラウト充填不足部にあるPC鋼材全表面の混成電位と推察される。同判定グレードが無→微少→有になるに従い、安定電位は概ね卑化する傾向を示した。

3. M橋における自然電位モニタリングの概要

表-4にM橋のモニタリング対象の一覧を示す。PC

鋼材の劣化状態と本工法の補修効果との関係を把握するため、CI調査結果判定グレードや鋼材の腐食状況の異なる No.1～6 の 6 測点とした。これらは表-2 内の黄色着色部に該当しており、No.1 は CI 調査で無と判定され、削孔調査で PC 鋼材に腐食が確認されなかった測点、No.2 および No.3 は CI 調査で微少と判定され、削孔調査で PC 鋼材の表面に腐食が確認された測点、No.4、No.5 および No.6 は CI 調査で有と判定され、削孔調査で PC 鋼材の表面に局部腐食を含む著しい腐食が確認された測点である。

また、補修後にマクロセル腐食が生じた場合、局所的に PC 鋼材の腐食が促進されるマクロアノード部の位置を推定するため、センサーの設置箇所は測点ごとに、既報⁵⁾と同様の補修部のほかに、既設部および境界部を追加し、1 測点あたり 3 箇所とした。センサー設置位置は、補修材注入口となる φ80mm のコア削孔部から外径 2.5mm のチューブを挿入してグラウト充填不足長を調査し、それに基づいて決定した。センサーは図-4 に示す既報⁵⁾と同様のものを使用し、本工法による補修を完了した後シーすまで削孔し、シーすを開削後、削孔最奥部の PC 鋼材近傍に設置した。測定される自然電位は、センサー設置位置近傍、具体的な範囲としてはセンサーから 5cm～最大 20cm 程度の混成電位⁷⁾と推察されるため、各部で測定される自然電位は隣接部の影響が皆無であるとは言えないものの、少なくとも各部近傍の PC 鋼材の自然電位として評価できる程度の精度はあるものと考えられる。

なお、グラウト充填不足長はいずれも、350～650mm 程度であった。この結果から、境界部はウェブ内に位置し、下フランジ部については既設グラウトが充填されていることが明らかとなり、M 橋においてグラウト充填不足が発生した主要因は、ブリーディングであると推察された。

モニタリング項目である各測点の自然電位は、各センサーから終点側アバットに設けた測定用ブルボックスまで配線・配管を行い測定した。測定時には、同ブルボックス近傍に温湿度計を設置し、外気温および相対湿度を測定した。

表-4 モニタリング対象箇所

| 測点 | 桁 | ケーブル No. | 起点側/終点側 | 既設部、境界部、補修部のPC鋼材の腐食状況および各部の位置関係 | | | CI調査結果 | グラウト充填不足長 (mm) |
|------|----|----------|---------|---------------------------------|--------|--------|--------|----------------|
| | | | | 既設部(下) | 境界部(中) | 補修部(上) | | |
| No.1 | G2 | C4 | 終点側 | 未撮影 | 未撮影 | | 無 | 350 |
| No.2 | G5 | C3 | 起点側 | 未撮影 | 未撮影 | | 微少 | 400 |
| No.3 | G5 | C2 | 起点側 | 未撮影 | 未撮影 | | 微少 | 650 |
| No.4 | G2 | C1 | 起点側 | 補修部(上) | 境界部(中) | 既設部(下) | 有 | 500 |
| | | | | 各部の位置関係 | | | | |
| | | | | | | | | |
| No.5 | G6 | C2 | 起点側 | 補修部(上) | 境界部(中) | 既設部(下) | 有 | 600 |
| | | | | 各部の位置関係 | | | | |
| | | | | | | | | |
| No.6 | G6 | C2 | 終点側 | 既設部(下) | 境界部(中) | 補修部(上) | 有 | 350 |
| | | | | 各部の位置関係 | | | | |
| | | | | | | | | |

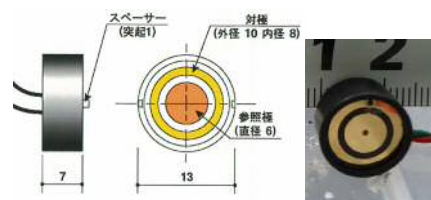


図-4 センサーの概要

4. モニタリング結果

M 橋の自然電位、外気温および相対湿度の経時変化を図-5 に、比較対象として東北地方の H 橋と中部地方の S 橋の調査結果⁵⁾を表-5 に、自然電位の経時変化⁵⁾を図-6 に示す。なお、図-6 に示す H 橋および S 橋の自然電位は補修直後以降、年 1 回温度上昇により腐食反応が活性化されると考えられる夏季に測定された値である。

4.1 補修部の補修効果に関する考察

M 橋の補修部の自然電位は、2014 年～2015 年にかけて

てはばらつきが大きいものの、その後は多少の変動はあるものの、安定した値を示した。No.1~No.6 の全ての測点で、No.3 の 252 日目を除き、表-3 の水溶液注入時の安定電位よりも貴な-200~0(mV,vs,CSE)程度の値となっていることから、表-5 に示す ASTM 基準⁸⁾を指標に考察すると、図-6 に示す H 橋と S 橋と同様に鉄筋腐食の可能性:90%以上の確率で腐食なしと判定される。また、少なくとも CI 調査で無と判定され、削孔調査で PC 鋼材に腐食が確認されなかった測点である No.1 については、防錆剤として亜硝酸リチウムを用いなくても、定着部端部まで確実な再グラウトが実施されることでアルカリ雰囲気が形成されれば高い腐食抑制効果が発揮されると考えられ、本工法による確実な補修効果が期待できること、さらには PC 鋼材の腐食や CI の侵入の影響がある No.2

~No.6 の自然電位が、No.1 と比較して必ずしも卑な値を示していないことから、CI 調査で有と判定され削孔調査で PC 鋼材の表面に局部腐食を含む著しい腐食が確認された測点 No.4~No.6 においても、No.1 と同様の補修効果が得られているものと推察される。以上より、M 橋において本工法は、良好な補修効果を発揮しているものと考えられる。

なお、M 橋の値は H 橋や S 橋の値と比較して卑な値となっているが、PC 鋼材に顕著な腐食がなく CI の侵入も認められない点で共通する H 橋の C2 と M 橋の No.1 との比較においても、M 橋の方が卑な値を示していることから、

この要因については橋梁の周辺環境の差によるものと推察される。また、補修部の自然電位と外気温および相対湿度との相関関係については明確な傾向は得ることができなかった。精度の良い評価のためには、センサー位置近傍に熱電対等を設置することが必要である可能性が考えられる。

4.2 マクロアノード部の位置推定

図-5 に示す M 橋の自然電位測定データのうち、温度上昇により腐食反応が活性化されると考えられる夏季に測定されたものを抜粋し、補修部、既設部および境界部で比較したものを図-7 に示す。CI 調査で無と判定され、削孔調査で PC 鋼材に腐食が確認されなかったため、マクロセル腐食が生じにくいと考えられる No.1 と CI 調査で有と判定され、削孔調査で PC 鋼材の表面に局部腐食

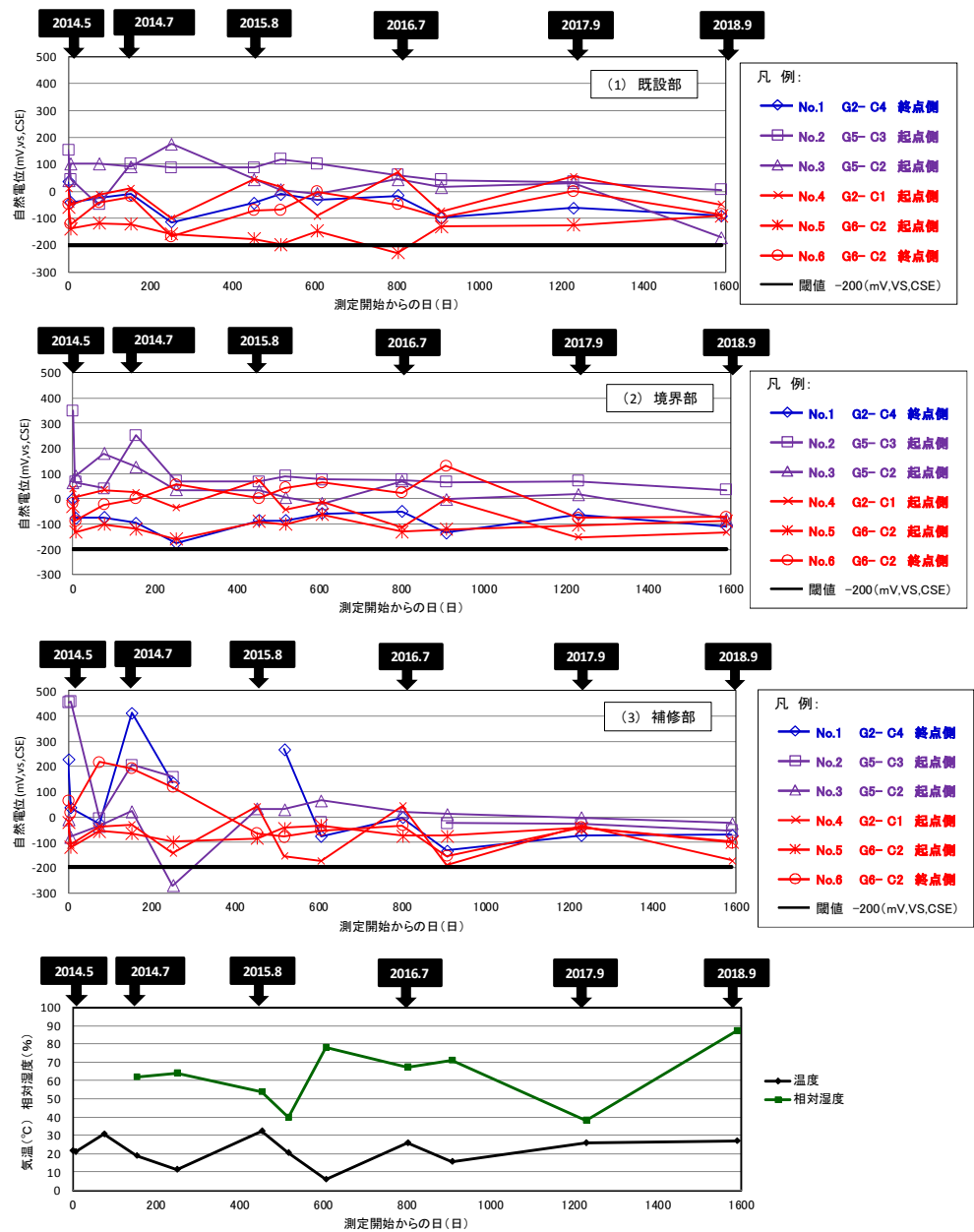


図-5 自然電位および気温、相対湿度の経時変化 (M 橋)

表-5 H橋およびS橋の調査結果⁵⁾ (表記を本文に合わせて修正)

| 橋梁 | 測点 | 補修前の状況 | シーす内部へのCl ⁻ の侵入 | 橋梁 | 測点 | 補修前の状況 | シーす内部へのCl ⁻ の侵入 |
|----|------------------------|--------|--|----|------------------------|--------|----------------------------|
| H橋 | G1桁 C2ケーブル (終点側) | 腐食軽微 | 無しまたは微少 (既設グラウト中の 塩化物イオン量 0.19kg/m ³) | S橋 | G1桁 C3ケーブル (終点側) | 著しい腐食 | 有 (本橋と同様の方法による。) |
| | G1桁 C3ケーブル (終点側) | 著しい腐食 | 有り (既設グラウト中の 塩化物イオン量 1.90kg/m ³) | | G1桁 C4ケーブル (終点側) | 著しい腐食 | 有 (本橋と同様の方法による。) |

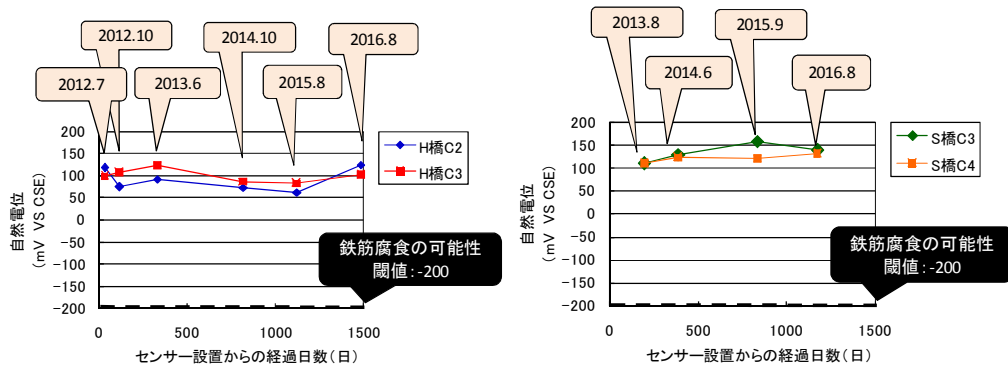


図-6 H橋(左)およびS橋(右)の自然電位測定結果⁵⁾

を含む著しい腐食が確認され、補修部～境界部～既設部の範囲でマクロセル腐食が発生する可能性が相対的に高いと考えられる No.4～No.6 について示している。

No.1 では、境界部の自然電位が相対的にやや卑な値を維持しておりマクロアノード部と推察されるものの、各部間の電位差は 50mV 程度以下と小さいこと、一般にグラウト内部にあり腐食を生じていない鋼材は不動態化状態であり僅かなアノード電流で大きく分極することを考慮すると、境界部をマクロアノード部とするマクロセル腐食電流量は非常に小さいものと推定される。

一方、No.4～No.6 については、各部間の電位差は測定時期や測点によってばらつきはあるものの No.1 と比較して大きくなっており、補修部～境界部～既設部間のマクロセル腐食電流量は No.1 より大きい可能性が考えられる。ただし、図-5 に示すように補修部のみならず、境界部や既設部の自然電位は表-6 に示す ASTM 基準⁸⁾ を指標とした場合、鉄筋腐食の可能性：90%以上の確率で腐食なしと判定され、腐食抑制状態と考えられること、水溶液の注入により補修部の PC 鋼材のアノードおよびカソード分極抵抗が増大する^{11) 12)}こと、さらには本工法の補修材の体積抵抗率が他の PC グラウト材と比較して大きい¹⁰⁾ことが実験的に確認されていることなどから、補修部～境界部～既設部間のマクロセル腐食電流は小さ

表-6 ASTM 基準

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

いものと推察される。

また、既設部、境界部、補修部の各自然電位は、図-5 に示すように ASTM 基準⁸⁾で鉄筋腐食の可能性：90%以上の確率で腐食なしの範囲で変動を有しており、その結果、No.1 のようにいずれかの自然電位が相対的に卑な値を維持するような傾向は確認できないため、補修部～境界部～既設部間のマクロセル腐食電流量が No.1 と比較して大きい場合においても、補修部、境界部、既設部のいずれかだけが継続してマクロアノード部となることで、マクロセル腐食により局所的な腐食を生じ続けるような状況にはなっていないと推察される。

5. まとめ

既設 PC 橋のグラウト充填不足部に対して、亜硝酸リチウム水溶液を前処理として注入し、亜硝酸リチウム添加補修材を再充填する補修工法の補修効果について実橋データの蓄積、PC 鋼材の劣化状態と本工法の補修効果との関係の把握、マクロセル腐食が生じた場合に局所的に

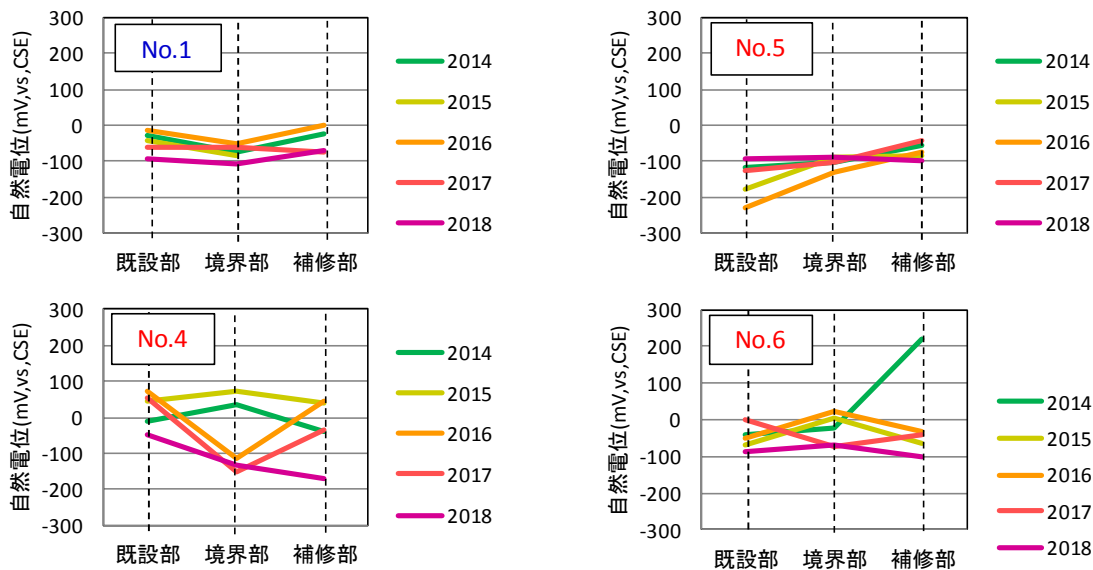


図-7 既設部、境界部および補修部の比較（各年 夏季測定データ抜粋）

腐食が促進されるマクロアノード部の位置の推定を目的に、兵庫県内の凍結防止剤散布地域にあり、著しいPC鋼材の腐食が確認された既設PCT桁橋(M橋)に対し、約4年5カ月間の自然電位モニタリングを行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) シース内へのCl⁻の侵入やPC鋼材の腐食程度に関わらず、補修部、境界部および既設部の自然電位は概ね-200 (mV vs. CSE) より貴な値を示し、ASTM基準を指標に考察した結果、M橋において本工法は、良好な補修効果を発揮しているものと考えられる。
- 2) Cl⁻調査で有と判定され削孔調査でPC鋼材の表面に局部腐食を含む著しい腐食が確認されたケーブルは、Cl⁻調査で無と判定され削孔調査でPC鋼材に腐食が確認されなかったケーブルと比較すると、マクロセル腐食電流量が大きくなる可能性が確認されたが、補修部、境界部、既設部のいずれも相対的に卑な電位を継続することはなく、マクロセル腐食によりいずれかにおいて局所的な腐食を生じ続けるような状況にはなっていないと推察される。

謝辞：モニタリングの実施に際しては、神戸大学大学院工学研究科の中西智美技術職員、同市民工学専攻の学生諸氏、神戸大学工学部市民工学科の学生諸氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鴨谷 知繁, 青山 敏幸, 石井 浩司, 森川 英典：凍結防止剤が侵入したグラウト充てん不足部のPC鋼材腐食に対する亜硝酸リチウムを用いた補修の性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1006-1011, 2012

- 2) 国土交通省：社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第2回）資料3 モニタリング技術に対するニーズについて
<http://www.mlit.go.jp/common/001023297.pdf>
- 3) 鴨谷 知繁, 蝦名 崇宏, 青山 敏幸, 森川 英典：亜硝酸リチウムを用いたPCグラウト充てん不足部の新しい補修方法の腐食抑制効果と実橋への適用事例, コンクリート工学, Vol.50, No.12, pp.1084-1091, 2012
- 4) 鴨谷 知繁, 岡林 秀勝, 飯塚 崇史, 飯田 明弘：グラウト充てん不足を有するPC橋の長寿命化-亜硝酸リチウム水溶液を用いた新技術の適用-, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.1, pp.17-22, 2014
- 5) 鴨谷 知繁, 石井 浩司, 森川 英典：亜硝酸リチウムを用いたグラウト再注入を行ったPC橋の鋼材腐食抑制効果, PC工学会 第26回シンポジウム論文集, pp.317-322, 2017
- 6) 鴨谷 知繁, 中司 和宏, 石井 浩司, 森川 英典：グラウト充てん不足部の亜硝酸リチウム水溶液注入補修の品質管理に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.907-912, 2015
- 7) 山本 大道, 森川 英典, 鴨谷 知繁：既設PC道路橋のグラウト充填不足部におけるLiNO₂水溶液注入後の補修効果モニタリングに関する実験的検討, 平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2016
- 8) ASTM C 876-91 : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- 9) 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁：亜硝酸リチウム水溶液を用いたグラウト充てん不足部のPC鋼線への補修におけるカソード分極特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1069-1074, 2013
- 10) 武智 愛, 山村 智, 鴨谷 知繁：PCグラウト再注入用補修材の体積抵抗率に関する基礎的検討, PC工学会 第27回シンポジウム論文集, pp.87-90, 2018