

# 緊張した腐食 PC 鋼材に対するリパッシブ工法の長期補修性能

技術本部

技術部

深川 柊

技術本部

技術部

白水 祐一

**概要：**リパッシブ工法の長期的な補修効果の評価を目的とし、緊張した腐食 PC 鋼材供試体を補修後、約 8 年間屋外暴露し、電気化学的モニタリングを実施した。供試体の自然電位計測結果は、ASTM 基準で「90%以上の確率で腐食なし」を示す値で推移し、高い補修効果が認められた。また PC 鋼材の錆層内イオン分析や PC 鋼材腐食分析も実施したが、リパッシブ工法の適用と従来工法の適用の違いによる大きな差異は見られなかった。PC 鋼材が単線で錆層内塩化物イオン量が従来工法でも腐食抑制可能な程度であれば、リパッシブ工法も従来工法も腐食抑制効果が長期間持続することを確認した。

**Key Words：**リパッシブ工法、長期補修性能、自然電位、亜硝酸リチウム

## 1. はじめに

PC ポストテンション橋の建設は 1960 年代から増加し、1990 年代がピークとなっている。しかし、1990 年代以前に建設・開通された PC ポストテンション橋は、PC グラウト充填不足率が大きいことが調査により判明し、問題となっている<sup>1)</sup>。充填不足の主な原因としては、ブリーディングやグラウトの先流れによるものであり、ポストテンション方式単純 T 桁橋の PC 鋼材上縁定着部の背面や PC 箱桁橋のウェブ曲げ上げ部において空隙が確認されることが多い。グラウト充填不足部においては、PC 鋼材の腐食が確認されている場合もあり、腐食に起因する PC 鋼材破断によって、構造物の耐荷性が低下することが懸念されている。対策としては、PC グラウト再注入による補修工法が一般的である。しかし、従来工法は PC 鋼線束内部までグラウトが充填されにくいため、多量の塩化物イオン（以下、Cl<sup>-</sup>）を含む錆層が付着し、PC 鋼材の腐食を促進するという問題がある<sup>2)</sup>。そこで鴨谷ら<sup>3)</sup>は、この問題を解決するためにリパッシブ工法（以下、本工法）を開発し、グラウト充填不足が確認された凍結防止剤散布地域にある PCT 桁橋において、約 4 年半のモニタリングを行い、良好な補修結果が得られることを確認している。

本工法は、亜硝酸リチウム水溶液を先行で注入し、水溶液を排出した後に亜硝酸リチウム添加補修材を充填する工法であり、シース内への Cl<sup>-</sup>の侵入がある場合でも補修効果が認められている。しかし、緊張力が作用している PC 鋼材が腐食した状態に対する長期的な補修効果は確認できていない。そこで本研究では、約 8 年間屋外暴露した供試体を使用し、本工法の長期補修性能を確認した。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体

供試体概要を、図-1 に示す。緊張架台をセット後、φ7mm の PC 鋼線（SWPR1BL）を使用し、透明な塩化ビニル製シースの中に 1 本ずつ PC 鋼線を挿入した。導入緊張力は、プレストレストコンクリート部材の



深川 柊



白水 祐一

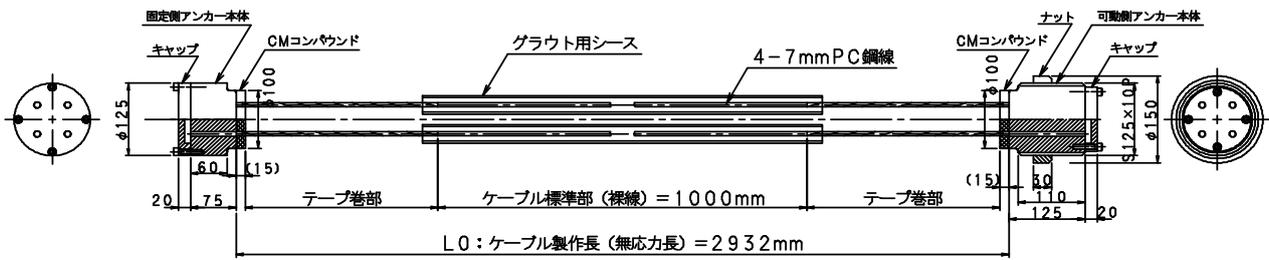


図-1 供試体概要図

耐久性に配慮した場合の PC 鋼材の許容引張応力度 ( $0.6\sigma_{pu}$  または  $0.75\sigma_{py}$  のうち小さい方の値)<sup>4)</sup>を参考にし、 $0.6P_u=152\text{kN}$  とした。緊張後、写真-1 に示すようにシースに削孔した自然電位測定用孔を使用し、5wt%の塩化ナトリウム水溶液を 1 年間噴霧することで促進腐食を行った。促進腐食完了後、本工法によるグラウト充填と、従来のグラウト再注入工法による充填の 2 パターンをそれぞれ実施した。本工法は、亜硝酸リチウム水溶液をシース内に注入し、除去した後亜硝酸リチウム添加補修材により充填を行った。その後、写真-2 に示すように供試体を 2016 年～2024 年の約 8 年間屋外暴露した。



写真-1 促進腐食状況

本試験は、緊張架台 1 台につき  $\phi 7\text{mm}$  の PC 鋼線を 4 本設置し、これを 2 台用意し、合計 8 本の PC 鋼線を使用して試験を実施した。試験区間は図-1 に示すように中央部 1000mm 区間とし、試験区間以外はテープにより被膜した。図-2 に示すよう本工法により補修された供試体が A～D、従来工法により補修された供試体が E～H である。供試体 C に関しては、2018 年に試験区間外での破断が確認されたため、本試験の対象外とした。



写真-2 屋外暴露状況

## 2.2 電気化学的モニタリング

図-3 に自然電位測定図を示す。PC 鋼材の腐食確率を非破壊にて推定するため、JSCE-E 601-2007「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準拠し、PC 鋼線、電圧計およびグラウト表面に湿らせた飽和塩化銀電極（以下、SSE）を接続して、自然電位測定を行った。各供試体には自然電位測定用孔がそれぞれ 5 箇所設けられている。

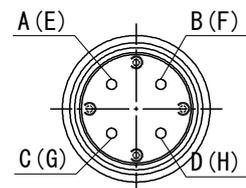


図-2 供試体断面図

照合電極について、通常自然電位を評価する場合は飽和硫酸銅（以下、CSE）基準で示されるため、本試験では式 (1) を用いて SSE から CSE への換算を行った<sup>5)</sup>。

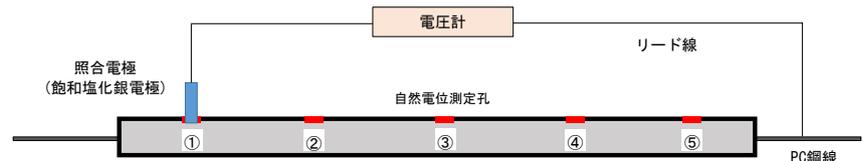


図-3 自然電位測定図

$$E_{Fe_t, CSE} = E_{Fe_t, SSE} - 120.1 - 2.00 (t - 25) \quad (1)$$

ここに、 $E_{Fe_t, CSE}$  : CSE による自然電位 (mV vs CSE)

$E_{Fe_t, SSE}$  : SSE による自然電位 (mV vs SSE)

t : 測定時の気温 (°C)

## 2.3 PC 鋼材腐食分析

緊張力を解放した後、供試体を解体した。全ての PC 鋼線を 10wt%のクエン酸二アンモニウム水溶液に 2 日間浸漬させた後、水洗いとブラッシングにより除錆を行った。除錆後の PC 鋼線は、試験区間内外の境界部において著しく腐食が進行していた。これは雨水のかかる屋外暴露環境下であるため、境界部の PC 鋼線において、試験区間内外で Cl 量が異なることや水分、酸素等の影響により、マクロセル腐食が発生したと推察される。実環境では、このように極端な乾燥および湿潤が繰り返されることによる腐食が発生するとは考えにくいため、断面が極端に細くなっている部分を除外して切断を行った。PC 鋼線の切断後、質量を計測し式 (2) を用いて質量減少率を算出した。

$$\Delta w = (1 - (M / L_{\text{corrosion}} \times U_{\text{mass}})) \quad (2)$$

ここに、 $\Delta w$ ：質量減少率（％），

$M$ ：実験後のPC鋼線全体質量（g）

$L_{\text{corrosion}}$ ：実験後のPC鋼線腐食部分長さ（mm）

$U_{\text{mass}}$ ：健全PC鋼線の単位長さあたり質量，0.298（g）

腐食生成物を除去し断面が細くなっている箇所を切断した後、PC鋼線の形状および断面積を記録するため3Dスキャンを実施した。3Dスキャンの仕様は表-1に示す通りである。

また、亜硝酸イオン（以下、 $\text{NO}_2^-$ ）による腐食抑制効果を確認するため、JIS A 1154 に準拠し、イオンクロマトグラフ法によりPC鋼線表面に発生した錆のイオン分析を行った。

### 2.4 静的引張試験

全ての腐食させたPC鋼線に対して、JIS G 3536 に準拠し、静的引張試験を実施した。測定項目は荷重および伸びとし、チャック間の長さは700mm、つかみ部の長さは150mmとした。また、健全なPC鋼線についても同様に静的引張試験を実施し、チャック間の長さは500mm、つかみ部の長さは50mmとした。

表-1 3D スキャナ仕様

使用機器名	ATOS5
種別	非接触光学式3次元スキャナ
測定方法	ステレオ+単眼方式 (トリプルスキャン方式)
本体寸法 (mm)	550 × 320 × 200
測定範囲 (mm <sup>2</sup> )	170 × 140 - 1000 × 800
画素数	1200万画素数

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 自然電位

自然電位による鋼材腐食の判定は、表-2に示すASTM C876 鉄筋腐食評価に基づいて行った。腐食判定の自然電位の閾値として、-200mV (mV vs CSE)、-350 (mV vs CSE) が設定されている。全供試体における自然電位測定結果（各供試体3測点の平均）の経時変化および気温を図-4に示す。また、各供試体における5測点の自然電位測定結果を図-5に示すが、試験区間の境界部に近い測点①と測点⑤はマクロセル電流により、値がばらついたと推察される。そのため、各供試体の自然電位としては、測点②～測点④の3測点の平均値として評価することが妥当であると考えた。2017/12/1 および 2018/12/19 は冬季に測定を行い、2024/7/26 は夏季に測定を行った。一般に、自然電位は気温が低いと貴な傾向を示し、気温が高いと卑な傾向を示すため、同様な傾向となっているものと考えられる。全ての測点において、90%以上で腐食無しの判定と

表-2 ASTM C876 腐食判定基準

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
-350 > E	90%以上の確率で腐食あり

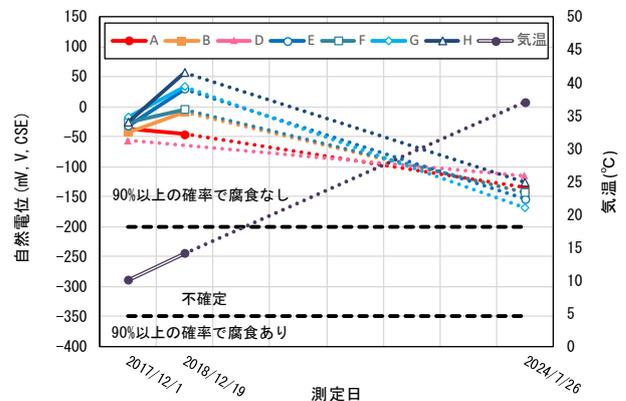


図-4 自然電位測定結果(経時変化)および気温

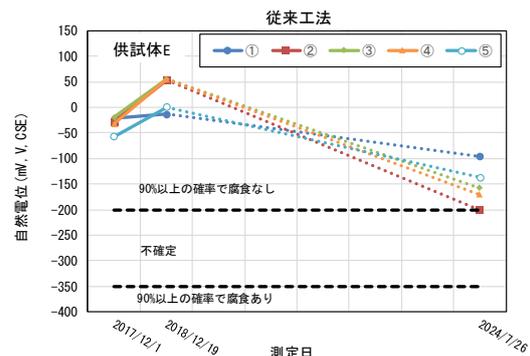
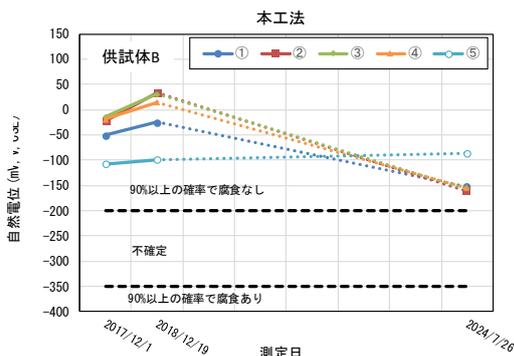


図-5 自然電位測定結果 (供試体 B および E の全 5 測点)

なる-200mV よりも貴な値を示し、グラウト内部の PC 鋼線が腐食環境にはないことを確認した。測定初期に着目すると、本工法を適用した供試体 A, B, D の方が、従来工法を適用した E~H よりも卑な傾向を示している。これは亜硝酸リチウム添加により、グラウトの保水性能が高まり電気抵抗が小さくなったためと推察される。一方で、2024/7/26 の測定結果では、従来工法を適用した供試体 E~H の方が卑な傾向を示している。このことから、試験開始の初期段階にはグラウトの保水性能の影響により本工法を適用した供試体の方が卑な傾向を示すが、長期的には従来工法を適用した供試体の方が卑な傾向を示すことが推察される。

3.2 質量減少率

表-3 に各 PC 鋼線の質量減少率を示す。各供試体の促進腐食完了後の腐食データは不明であるものの、供試体 C が試験区間の境界部付近で破断したことを鑑みれば、PC 鋼線は相当な腐食状態であったと推測される。質量減少率は、多少ばらつきはあるものの供試体 E~H の方が、本工法を適用した供試体 A, B, D よりも平均の質量減少率は大きいことが確認できた。

表-3 質量減少率

供試体	質量減少率 (%)	平均 (%)	標準偏差
A	9.3	13.8	4.18
B	19.3		
D	12.7		
E	15.1	14.7	1.56
F	16.9		
G	12.5		
H	14.4		

3.3 断面減少率

3D スキャンにより PC 鋼線の断面積を算出した結果を表-4 および図-6 に示す。端部の断面減少率は明らかに異常な数値を示していたため、測定結果は軸方向位置 150mm~850mm の範囲で示した。測定結果より、本工法を適用した場合と従来工法を適用した場合で比較して、断面減少率や軸方向でのばらつきに大きな差は見られなかった。図-6 に示すように、供試体 B の 425mm 位置や供試体 E の 750mm 位置といった両側と比較して断面減少率が卓越している箇所については、促進腐食時の塩水噴霧が一樣に行われておらず、補修前に発生していた腐食の可能性も考えられる。

表-4 平均断面減少率

供試体	断面減少率 (%)	平均 (%)	標準偏差
A	12.6	17.4	4.7
B	21.8		3.8
D	17.7		5.1
E	16.6	17.3	6.6
F	17.8		3.0
G	14.8		2.6
H	19.8		1.7

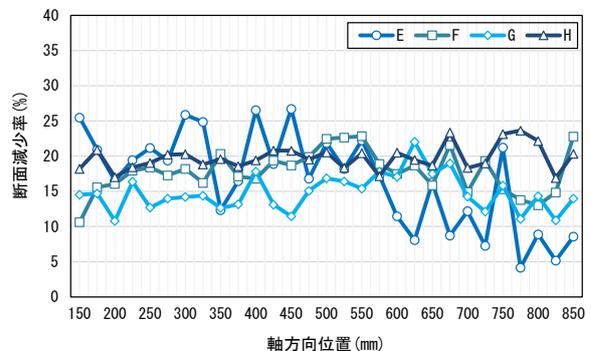
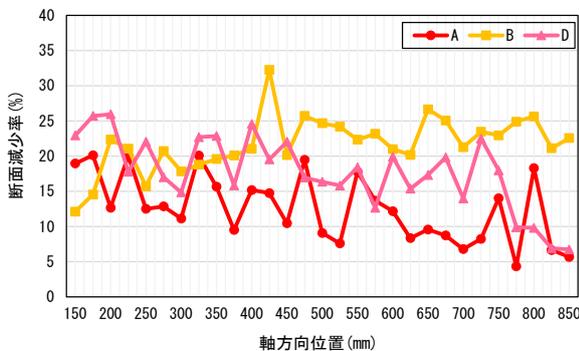


図-6 断面減少率の軸方向分布

3.4 PC 鋼材の錆層内成分

表-5 に PC 鋼線の表面に発生した錆のイオン分析の結果を示す。対象としたイオンは Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, 硫酸イオン (以下, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), ナトリウムイオン (以下, Na<sup>+</sup>), カリウムイオン (以下, K<sup>+</sup>) とした。亜硝酸リチウムの防錆効果は、モル比 (Cl<sup>-</sup>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) < 1.25 となると鋼材は再不動態化され、腐食抑制効果があるとされており<sup>6)</sup>、本工法を適用した供試体 A, B, D 全てにおいてその条件を満たしたため、腐食抑制効果があることを確認した。Cl<sup>-</sup>が全供試体において微量であったのは、自然電位測定用孔より雨水が侵入して錆層内の Cl<sup>-</sup>が洗い流された可能性があるかと推察される。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>については、本工法を適用した供試体 A, B, D と比較して、従来工法を適用した供試体 E~H の方が錆層内に多く存在しており、可溶性 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

表-5 錆層内イオン分析結果

供試体	Cl <sup>-</sup> (wt%)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (wt%)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (wt%)	Na <sup>+</sup> (wt%)	K <sup>+</sup> (wt%)	Cl <sup>-</sup> /NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (モル比)
A	0.002	0.41	0.092	0.038	0.076	0.006
B	0.005	0.26	0.071	0.035	0.055	0.025
D	0.010	0.70	—	—	—	0.019
E	0.003	<0.001	0.19	0.18	0.19	—
F	0.004	<0.001	0.12	0.15	0.13	—
H	0.002	<0.001	—	—	—	—

とバランスを保ってイオン化しやすいと言われる  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  も  $\text{Cl}^-$  も多く存在していることを確認した。

### 3.5 静的引張試験

腐食した PC 鋼線の機械的性能の低下を検討するため、健全な PC 鋼線と腐食した PC 鋼線について静的引張試験を実施した。結果を表-6 および図-7 に示す。腐食した PC 鋼線の破断時伸びおよび最大引張荷重は、ともに JIS 規格と比較して低下している。健全な PC 鋼線と比較して、本工法を適用した腐食した PC 鋼線は、破断時伸びで約 54%~73%の減少、最大引張荷重で約 21%~32%の減少であった。従来工法を適用した腐食した PC 鋼線では、破断時伸びで約 45%~79%の減少、最大引張荷重で約 18%~39%の減少であった。健全な PC 鋼線の伸びが JIS 規格値よりも大きな値を示しているが、これは腐食した PC 鋼線で使用した引張試験機のチャック間長さ 700mm であることに對し、健全な PC 鋼線で使用した引張試験機のチャック間長さ 500mm と 200mm 短いことから伸びが過大評価されている可能性がある。また、引張試験機のチャックつかみ部の長さとして、腐食した PC 鋼線よりも健全な PC 鋼線で使用した引張試験機の方が、100mm 短い 50mm であることから、試験中の滑りの違いにより、健全な PC 鋼線の伸びが過大評価されている可能性がある。

破断付近の腐食性状がより破断に影響を与えることから、3D モデルにより破断場所を推定し、断面積の算出を行うことで破断部断面減少率を算出した。健全な PC 鋼線の最大引張荷重および破断時伸びを 1 とし、図-8 に破断部断面減少率と最大引張荷重残存率の関係を、図-9 に破断部断面減少率と破断時伸び残存率の関係をそれぞれ示す。破断時伸び残存率は、健全時の破断時伸びを 1 とし、腐食時の破断時伸びを比率によって算出したものである。図-8 より破断部断面減少率が大きくなるに従って、1:1 基準線に沿って最大引張荷重残存率が低下する傾向が確認された。また、図-9 より破断部断面減少率が大きくなるに従って、破断時伸び残存率も低下する傾向が確認された。こちらは 1:1 基準線より大幅に低下しているが、これは一般的な腐食による伸び低下が強度低下よりも影響が大きいことに加えて、腐食した PC 鋼線と健全な PC 鋼線において使用した試験機の違いにより、PC 鋼線の破断時伸びが過大評価されているためであると推察される。

## 4. まとめ

本試験では、緊張力を導入した後に促進腐食させた PC 鋼線を、本工法と従来工法のそれぞれで補修を行った。屋外暴露環境下において約 8 年間の長期補修性能を確認した結果を以下の a) ~d) に示す。

a) 電気化学的モニタリングにおいて、本工法は亜硝酸リチウムを添加したグラウトの保水性能により、計測初期は従来工法と比較して卑な傾向を示したが、長期的には貴な傾向へと変化していった。ASTM による腐

表-6 静的引張試験結果

供試体	最大荷重 (kN)	破断時伸び (%)	破断状況
A	51.4	2.4	チャック部
B	45.0	1.9	チャック部
D	52.3	3.3	
E	48.8	2.7	
F	40.8	1.5	チャック内
G	54.3	3.9	
H	53.1	3.7	
健全1	66.1	7.0	チャック部
健全2	66.5	7.3	チャック部

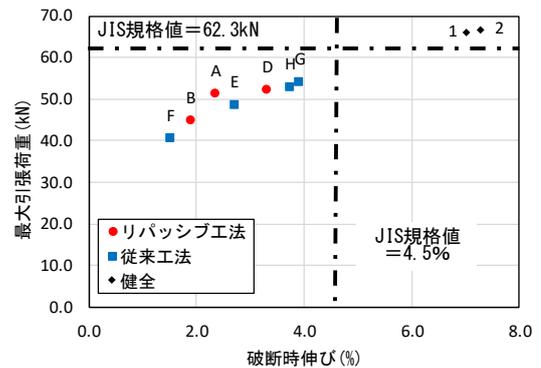


図-7 破断時伸びと最大引張荷重の関係

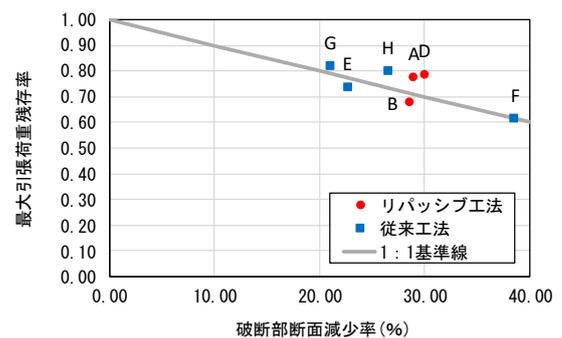


図-8 破断部断面減少率と最大引張荷重残存率の関係

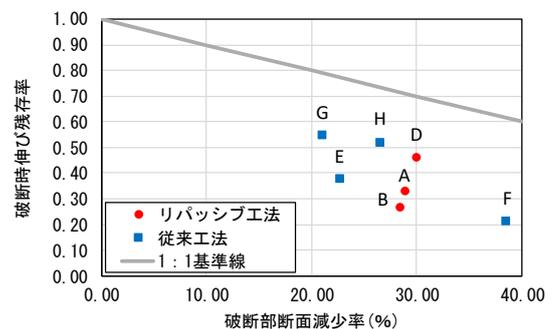


図-9 破断部断面減少率と破断時伸び残存率の関係

食判定基準においても、90%以上の確率で腐食なしとの判定を示す値であり、長期暴露環境下においても補修材内部は良好な腐食抑制環境であることを確認した。

b) 質量減少率および断面減少率について、本工法と従来工法の違いによる大きな差はなかったものの、錆層内のイオン分析結果や試験区間内において PC 鋼線の破断が生じていないことから、本工法による腐食抑制効果が得られた。

c) 静的引張試験では、本工法および従来工法ともに、試験機の違いによって伸びが過大評価されている可能性があるものの、破断部断面減少率が大きくなるに従い、最大引張荷重残存率および破断時伸び残存率は低下する傾向を示した。

d) 今回の供試体で補修対象とした PC 鋼線は単線であり、補修材が PC 鋼線の全周に付着しやすい条件であったため、PC 鋼線の質量減少率が 19%にも達するような状態であっても、本工法だけでなく、従来工法も腐食抑制効果を得ることができた。しかし、実橋梁における PC 鋼線は複数本が束になっていることから、補修材を浸透させることが難しい鋼線束内部の長期補修効果については今後も検討する必要がある。

## 謝辞

本試験は、神戸大学大学院工学研究科の森川英典氏、中西智美氏、ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)の福田圭佑氏、神戸大学大学院の宮代凌成氏、神戸大学の前田結衣氏にご協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：既設 PC ポストテンション橋保全技術指針，pp.226-230，2022.1
- 2) 白川祐太，森川英典，鴨谷知繁：PCT 橋のグラウト充填不良部における鋼線腐食メカニズムに関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.493-498，2011.
- 3) 鴨谷知繁，石井浩司，森川英典，竹本修：亜硝酸リチウム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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，2019.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p.189，2017.11
- 5) 篠田吉央，望月紀保：鉄筋自然電位の測定温度に伴う照合電極間の電位換算について，土木学会第 66 回 年次学術講演会，2011.
- 6) 浜幸雄，千歩修，秋田竜：コンクリート中の鋼材腐食に及ぼす亜硝酸イオンおよび塩化物イオン濃度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000.
- 7) 宮代凌成，森川英典，福田圭祐：グラウト内の可溶性硫酸イオンの存在と PC 鋼材の腐食に及ぼす影響に関する実験的検討，2024 年度関西土木工学交流発表会 第 V 部門，2024.11