

論文・報告

かみのせき

上関大橋補修・補強工事の施工報告

～シラン系鉄筋腐食抑制材の適用に関する検討と確認～

The Effect of Silane-based Corrosion Inhibitor

山口 泰弘 *1
Yasuhiro YAMAGUCHI岡本 安則 *1
Yasunori OKAMOTO大久保 孝 *2
Takashi OOKUBO林 大均 *3
Degyun IMU

本工事は、山口県の主要道光上関線の海上部に架かる上関大橋の補修・補強を行うものである。上関大橋は建設後 44 年が経過し、架橋位置の環境条件より飛来塩分の影響を受けた塩害と経年による中性化の複合劣化が生じていた。本工事では、補修工事として断面修復工・含浸剤塗布工を実施し、補強工事として炭素繊維シート補強工・外ケーブル補強工を実施した。

本文では、塩害劣化の補修工事として行ったシラン系含浸材塗布について、施工前に実施した効果の確認等について報告する。

キーワード：シラン系鉄筋腐食抑制材，含浸深さ，効果確認，付着性能，再劣化防止

1. はじめに

上関大橋は、3 径間連続有ヒンジラーメン箱桁橋(中央スパン 140m)であり、建設後 44 年を経過する海上橋である。本工事は、海上に吊り足場を設置し、既設橋の外観調査後に補修・補強を行う内容であった。補修工事としては、断面修復工・含浸剤塗布工があり、塩害および中性化の複合劣化を生じた主桁断面の補修を行った。補強工事としては、現況の耐力を評価した後、B 活荷重対応と耐震補強を考慮した、炭素繊維補強工・外ケーブル補強工を実施した。

本文では、塩害劣化の補修工事として実施したシラン系含浸材塗布について、施工に先立ち実施した効果の確認等について報告する。



写真1 上関大橋全景

2. 工事概要

工事名：主要県道光上関線 橋梁補修
(一括交付金)工事第 1 工区

工事場所：山口県熊毛郡上関町室津地内

発注者：山口県柳井土木建築事務所

施工者：川田建設株式会社

工期：2011 年 8 月 23 日

～2013 年 3 月 29 日

構造形式：3 径間連続有ヒンジラーメン箱桁橋

橋長：220.000 m

支間長：39.990 + 140.000 + 39.990 m

施工範囲：断面修復：6.0 m³

含浸材塗布：2 903 m

炭素繊維シート補強：798 m²

外ケーブル補強：20 ケーブル

本橋の補修・補強工事は、2007年度から分割して発注され、当社の工事範囲も過年度からの引継ぎ工事であった。

断面補修における足場(写真1)は、風速の激しい渡海部、桁高変化による高低差、外表面の激しい劣化・損傷などの要因が重なり、設置作業が非常に困難であった。特に、後施工アンカーは、劣化が生じている主桁コンクリートに設置することから、耐荷力の確認が課題であった。このため、実橋での引抜き試験を行い、耐荷力を確認し、安全性を検証した上で施工した。

*1 川田建設(株)西日本統括支店事業推進部工事課 工事長

*2 川田建設(株)西日本統括支店事業推進部技術課 課長

*3 川田建設(株)西日本統括支店事業推進部工事課

3. 断面修復工

足場設置後、桁外面調査を実施し、その結果に基づき補修材・補修方法の選定を行った。調査方法は、点検棒及びテストハンマーによるたたき点検および、有識者による近接目視点検とした。



写真2 外面調査劣化・損傷状態

調査結果より、既設橋外面の剥離・露出・腐食が全体的に多く認められた(写真2)。特に、ブロック施工の目地付近や、斜鋼棒定着付近が顕著であった。要因としては、かぶり不足による塩害腐食劣化・斜鋼棒を水の浸入経路とするシーブ・定着体の鋼材腐食劣化などが考えられる。

また、ひび割れも橋軸方向に多数認められた。ひび割れ自体は、活荷重により開閉しておらず挙動は安定していた。断面修復基準については、コンクリート構造物のひび割れ抑制対策資料(山口県土木建築部)および、コンクリートひび割れ・調査、補修・補強指針-2009-(社団法人 日本コンクリート工学協会)に準拠した。

断面修復の補修材・補修方法は、コンクリートとの付着性に優れ、高強度を発現し、長さ変化率が少ないポリマー系セメントモルタル材エマコS96CPを採用した。断面修復は、すべて左官工法にて行い、ひび割れ補修は、注入工法にて行った。

4. 含浸材塗布 シラン系鉄筋腐食抑制材の適用

高度成長期に建設された多くの橋梁が補修や補強を必要としている。特に塩害環境下での鉄筋の腐食は内在塩分はもとより、飛来塩分および塩化物系の凍結防止剤によって引き起こされる。これがコンクリートの剥落などの原因となりコンクリート構造物の耐荷性・耐久性の低下につながっている。そこで、塩害を受けたコンクリート構造物の劣化要因である鉄筋腐食を止めることが大きな課題となる。塩害対策の例を挙げると、電気防食工法、

脱塩工法、塩化物イオン濃度の高い部位を除去した後に施す断面修復工法、コンクリートや鉄筋に直接塗布をする亜硝酸塗布工法、コンクリート表面で劣化因子の浸入を阻止する表面保護性能と鉄筋に保護層を形成する腐食抑制を併せ持つ工法等がある。

昨今は、劣化・損傷した橋梁の補修方法の検討に際し、長寿命化対策としてシラン系鉄筋腐食抑制材(アルキルアルコキシシランを主成分とした、鉄筋腐食抑制タイプRC 構造物用含浸系表面保護材)をコンクリート表面に塗布する工法が注目されている。これは、外観を変えることなく塩化物イオンの浸入を阻止する吸水防止層とコンクリート中に深く浸透し鉄筋の保護層を形成する特徴を併せ持った工法で、電気防食工法などに比べ、経済性或補修後のマクロセル腐食による再劣化対策の観点から、着目されている工法である。

しかし、本橋への適用に対しては解決すべき課題もあることから、以下の点について検討することとした。

【検討：1】シラン系鉄筋腐食抑制材の効果確認

【検討：2】吊足場アンカー部への含浸方法の検討

【検討：3】炭素繊維補強部との付着性確認

(1) 検討方法

a) シラン系鉄筋腐食抑制材の効果確認

鉄筋の腐食は電気的な測定をしていることが多く、本工事でも腐食抑制効果の確認を自然電位および2つの周波数の交流インピーダンス法による分極抵抗を求めコンクリート中の鉄筋の腐食速度測定を行うこととした。

本工事では、携帯型鉄筋腐食診断機(写真3)を用いて自然電位と腐食速度を測定した。自然電位による腐食基準の判定は、飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)による測定値から飽和硫酸銅電極(CSE)による測定値に変換し、表1を用いて実施した。腐食速度は、表2に示す腐食速度の判定と照らし合わせて確認することとした。



写真3 鉄筋腐食診断機

表1 自然電位判定（銅／硫酸銅照合電極）基準¹⁾

自然電位 (E)	腐食判断基準
$-350\text{mV} \geq E$	90%以上の確率で腐食あり
$-200\text{mV} \geq E > -350\text{mV}$	不確定
$E > -200\text{mV}$	90%以上の確率で腐食なし

表2 腐食速度の判定基準²⁾

腐食速度測定値 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定
0.2未満	不動態状態(腐食なし)
0.2~0.5	低~中程度の腐食速度
0.5~1.0	中~高程度の腐食速度
1.0より大	激しい、高い腐食速度

注) 腐食速度と腐食速度の判定

確認手順の方法は、鉄筋探査機にて鉄筋の位置および鉄筋かぶり深さの調査を行った後、既設鉄筋を露出し、鉄筋の錆状況を写真4のように目視確認した。その後通電用のリード線設置を行うこととした。



写真4 既設鉄筋確認

測定位置をマーキングし、コンクリート表層部のサンダーケレン処理を施した後、測定面を湿潤状態にした上で自然電位および腐食速度の初期値の測定を行った。コンクリートの含水率8%以下を確認後、シラン系鉄筋腐食抑制材（BASF 販売）を $0.6 \text{ l} / \text{m}^2$ となるよう数回に分けて塗布を行った。（写真5）



写真5 塗布状況

b) 吊足場アンカー部への含浸方法の検討

今回の補修にあたり、吊足場のアンカーは工期短縮と費用を検討した結果、ハードエッジアンカーを使用することとした。ハードエッジアンカーは、ネジ切りが施された本体を外径より少し小さな下穴に打ち込むだけで施工ができる点が特徴である。ただし、橋梁全体で1000本と数が多いことから、施工性等を考慮しアンカー削孔部へのシラン系鉄筋腐食抑制材の含浸深さの検討を行うこととした。シラン系鉄筋腐食抑制材の塗布は、吊足場設置時の削孔後、アンカー打ち込み後および吊足場解体時に実施することとし、1回当たりの噴霧量を変更（1回または2回）することにより、浸透深さの比較を行う方法とした。

c) 炭素繊維補強部との付着性確認

一般的なシラン系含浸材はコンクリート表面に塗布するとコンクリート中の水分と早期に反応しコンクリート表面に撥水性が残ってしまうため、シラン系含浸材を塗布した上に塗装や剥落防止対策をする際、コンクリート表面のケレンや撥水性を除去する材料が必要となる。今回使用するシラン系鉄筋腐食抑制材は、アルキルアルコキシシランにアミノ基を化学結合させることにより、コンクリート表面での反応を遅らせ、コンクリート内部で反応することから、コンクリート表面には撥水性が残らず、塗装や剥落防止対策の材料とも付着性に悪影響を及ぼさないのが特徴である。

付着性の確認は二次製品のコンクリート歩道板にサンダーケレン後、シラン系鉄筋腐食抑制材を $0.6 \text{ l} / \text{m}^2$ となるよう5回に分けて塗布を行った。2日間養生後炭素繊維シート用プライマーとパテを使用した。シラン系鉄筋腐食抑制材塗布後の状態としては、ケレン無、サンダーケレン、#120 サンドペーパーケレン、#80 サンドペーパーケレンの4種類により検討を行った。

(2) 確認・検討結果

a) シラン系鉄筋腐食抑制効果の確認

自然電位および腐食速度を鉄筋位置とかぶりを鉄筋探査機にて測定した。測定結果より、鉄筋のかぶり深さは50~100 mmであった。また、測定に際し既設鉄筋と通電用リード線を結線する必要があるため、目視により腐食状態を確認した。確認結果は腐食度：Bの腐食グレードIII（表3）程度であった。

自然電位および腐食速度を測定した結果を、表4、図1、2に示す。自然電位の測定結果では90%以上の可能性で鉄筋腐食の可能性がないことが確認できた。

腐食速度の測定結果では、シラン系鉄筋腐食抑制材を塗布する前 $0.03 \sim 0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ で不動態状態・低~中程

度の腐食速度であったものが、塗布1ヶ月後の測定では0.001 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ~0.022 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と腐食速度の変化が確認された。塗布15ヶ月後においても安定した状態であることが確認できた。

表3 腐食グレード

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損を生じている。

表4 自然電位腐食速度測定結果

試験体番号	鉄筋径	かぶり (mm)	自然電位 (mV) CSE	腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)					
				(塗布前) (10.09.01)	(塗布前) (10.09.01)	(1ヶ月後) (10.09.30)	(3ヶ月後) (10.12.07)	(6ヶ月後) (11.02.23)	(15ヶ月後) (11.11.30)
No. 1	中央 径間	D16	50	-70	0.14	0.022	0.017	0.016	0.017
No. 2		D16	100	-60	0.12	0.006	0.005	0.006	0.004
No. 3		D16	100	-60	0.13	0.004	0.003	0.006	0.006
No. 4	側 径間	D16	60	-110	0.25	0.053	0.021	0.04	0.03
No. 5		D16	80	-40	0.03	0.008	0.004	0.009	0.007
No. 6		D16	80	-70	0.06	0.001	0.003	0.009	0.006

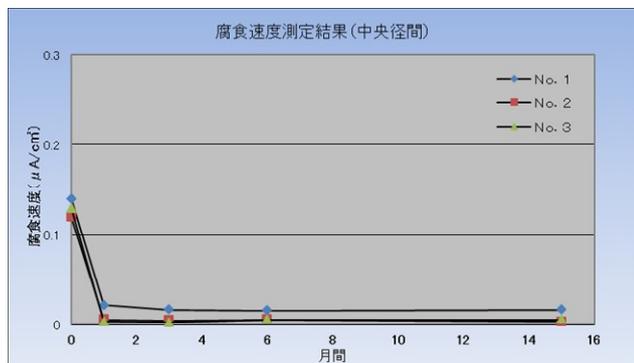


図1 腐食速度測定結果（中央径間）

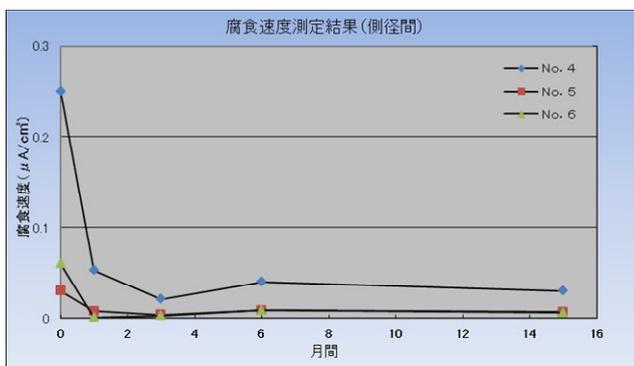


図2 腐食速度測定結果（側径間）

今回測定した側径間および中央径間においては、既設鉄筋腐食の目視確認でも、腐食度：B・腐食グレードⅢと全体的に腐食しているものの、鉄筋かぶりもしっかり確保されている箇所は錆が少ないことが確認できた。同様に自然電位（CSE）においても -200 mV 未満（-110 mV~-40 mV）と90%以上の確率で腐食なしの結果であった。

腐食速度においては側径間部のNo.4が0.25 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と低~中程度の腐食速度であったものが、塗布1ヶ月後の測定では0.053 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、塗布15ヶ月後の測定で0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と不動態状態に腐食速度の変化が確認された。全ての測定箇所でもシラン系鉄筋腐食抑制材を塗布する事により腐食速度が非常に小さくなっていることが確認できた。

以上のことから、コンクリート強度の高いPC橋においても、シラン系鉄筋腐食抑制材を塗布することにより、塩化物イオン量が鉄筋発錆限界を超えた環境下の鉄筋に対し腐食の抑制効果があることが確認できた。

b) 吊足場アンカー部への含浸方法の検討

含浸材の塗布は孔内塗布回数1回とボルト撤去時に塗布を行う2回の両方で含浸深さを確認した。現場と同条件とするため、上向きに設置したコンクリート歩道板（300×300×60 mm）を試験体とした。まず、表面ケレンを行った後、ハンマードリルを用いて所定の径で孔を明け、圧搾空気です孔内の切粉を除去した後、シラン系鉄筋腐食抑制材を1回塗布し、ハードエッジアンカーを固定した。アンカー固定後、コンクリート歩道板にシラン系鉄筋腐食抑制材を再度塗布し乾燥させた。最後にアンカー解体後にシラン系鉄筋腐食抑制材を再度塗布した。

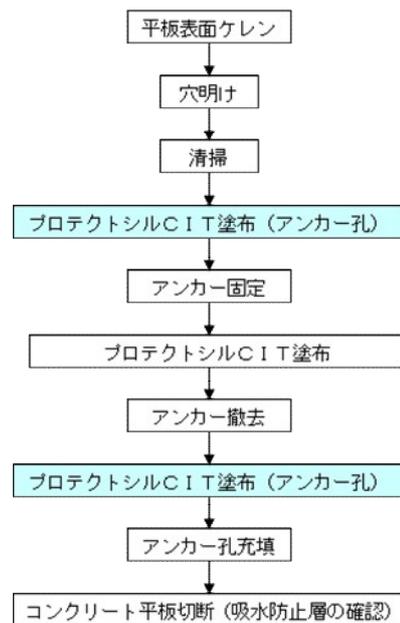


図3 足場含浸深さの検討施工手順

アンカー孔を含むコンクリート歩道板を切断し、シラン系鉄筋腐食抑制材の平面部分と孔内部分の浸透深さの比較を行った。測定方法はコンクリート歩道板を6分割しそれぞれの浸透深さを測定した。アンカー孔においてはアンカー両サイド、底部含む3点×2本計6箇所の浸透深さを測定した。測定結果と測定状況を、表5および写真6に示す。

アンカー孔内の浸透深さは噴霧回数1回よりも2回の方が深く浸透した。

表5 浸透深さ目視確認結果

アンカー孔塗布回数	平面部含浸深さ (mm)		アンカー部含浸深さ (mm)					
塗布回数1回	1-1	9	平均	10	①-1	6	平均	8
	1-2	12			①-2	8		
	1-3	9			①-3	10		
	1-4	9			①-4	6		
	1-5	10			①-5	6		
	1-6	11			①-6	6		
塗布回数2回	2-1	13	平均	13.8	②-1	9	平均	9.2
	2-2	15			②-2	8		
	2-3	12			②-3	10		
	2-4	16			②-4	11		
	2-5	13			②-5	8		
	2-6	14			②-6	9		



写真6 含浸深さ測定状況

c) 炭素繊維補強部との付着性確認

炭素繊維補強部との付着性確認結果を表6に示す。

全数が規格値の1.9 N/mm²以上の下地/プライマー間との接着強度を示した。シラン系鉄筋腐食抑制材塗布による付着性の阻害は無く、下地のケレン方法による違いも無く全て躯体凝集破壊であったため、シラン系鉄筋腐食抑制材が炭素繊維の付着性に影響を及ぼさないことが確認できた。

表6 炭素繊維補強部との付着性確認結果

試験体	No.	接着力実測値 kN	接着強度 N/mm ²	破壊モード	判定*
プライマ塗布面ケレンなし	1	4.85	3.0	躯体凝集破壊	合格
	2	5.19	3.2	躯体凝集破壊	合格
	3	4.29	2.7	躯体凝集破壊	合格
同ダイヤモンドディスクケレン	1	4.15	2.6	躯体凝集破壊	合格
	2	7.21	4.5	躯体凝集破壊	合格
	3	5.45	3.4	躯体凝集破壊	合格
同#120サンドペーパーがけ	1	7.89	4.9	躯体凝集破壊	合格
	2	8.28	5.2	躯体凝集破壊	合格
	3	5.32	3.3	躯体凝集破壊	合格
同#80サンドペーパーがけ	1	7.1	4.4	躯体凝集破壊	合格
	2	5.79	3.6	躯体凝集破壊	合格
	3	7.2	4.5	躯体凝集破壊	合格

5. おわりに

以上、本工事において実施したシラン系鉄筋腐食抑制材の適用に関する確認・検討について述べた。

塩害劣化損傷箇所の断面修復工では、従来、修復用コンクリートやポリマーセメントモルタル等で打ち替えることが多かった。この時、修復部分と打替部継ぎ目付近の塩化物イオン濃度差によりマクロセルが形成され、再劣化が問題となっている。これに対しては、犠牲陽極を用いる工法や亜硝酸リチウムイオンの混入などの手法が用いられる場合が多かった。

一方、本工事で採用したシラン系鉄筋腐食抑制材は、塗布含浸系の抑制材でコンクリート表面と鉄筋表面で劣化因子の浸入を二重にブロックし、鉄筋腐食を抑制する比較的新しい工法である。断面修復工法との併用により、長期的に効果が期待できマクロセル再劣化も抑制する。また、水性系で環境に優しく、施工面に塗布するだけで簡単であることから、MSDS(化学物質安全性データシート)に配慮を要する亜硝酸リチウムや犠牲陽極の埋め込み等が不要で、安全且つ施工性も良い。

今回の適用検討において、高強度コンクリートを使用するPC上部工においても、その効果の確認が行えた。本稿が今後の類似工事の参考となれば幸いである。

最後に、本工事の関係各位に紙面を借りて謝意を表します。

参考資料

- 1) ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価
- 2) CEBによる腐食速度の判定基準