

研 究 報 告

令和 8 年 3 月 3 1 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 九州大学 大学院工学研究院

氏 名 : 楊 沐野

研究課題名 : 炭素繊維補強した鋼部材の接着界面における劣化挙動評価と高耐久化設計

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

炭素繊維補強した鋼部材の接着界面における

劣化挙動評価と高耐久化設計

High-durability design for carbon fiber reinforced steel components
with interfacial degradation evaluation

九州大学大学院工学研究院 准教授 楊 沐野

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景・目的

鋼構造物は長期供用に伴い腐食が進行し、部材断面の減少や力学性能の低下を招く。腐食部位に対しては素地調整の後にタッチアップ塗装や塗り替え塗装が施されるほか、近年では炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 接着補強が軽量性・施工性に優れる手法として注目されている¹⁾。しかし、素地調整後の鋼素地にさびや塩類が残留した場合、塗膜下腐食の早期進行や CFRP-鋼接着界面の強度低下を引き起こすため、適切な素地調整が信頼性確保の根幹となる。

鋼構造物における既存の素地調整法にはそれぞれ限界がある。物理的工法のうちブラスト処理は最も高い清浄度が得られるが、大型設備を要し粉塵・騒音の発生や大量の固体廃棄物が課題となる。電動グラインダ等の動力工具は狭隘部や小面積の補修に広く用いられるが、孔食ピット底部の緻密な腐食生成物を原理的に除去できない。また、化学的工法としては塩酸や硫酸等の強酸系除せい剤による酸洗処理があるが、低 pH ゆえに鋼素地への過度な損傷を引き起こすこと、および廃酸液が特別管理産業廃棄物に分類されることが課題である。

これらの課題を解決するため、著者らはクエン酸水素二アンモニウム (以下、DHC) とセルロースナノファイバー水分散体 (以下、CNF) を組み合わせた環境配慮型除せい剤を提案し、電動工具研磨と併用するハイブリッド素地調整法 (Hybrid-Acid pickling de-rusting method, 以下 HA 工法) を開発してきた²⁾。本研究では、HA 工法の実用化を見据えた体系的な評価として、(i) 電気化学試験による CNF 添加型除せい剤の腐食抑制性能の評価³⁾、(ii) 腐食鋼板への HA 工法の適用性の検証、および (iii) 施工費モデルに基づく経済性と環境負荷低減効果の定量的評価を実施した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試鋼材は JIS G3106 SM490A (寸法: 150 × 70 × 6 mm) を用いた。炭素繊維シートには高強度グレードの一方向織物 (厚さ: 111 μm, MRK-M2-20, 三菱ケミカル社製) を、含浸樹脂には 2 液型熱硬化性エポキシ樹脂 XL-800 (エポサーム®レジン, 三菱ケミカル社製, 主剤:硬化剤 = 4:1) を用いた。

除せい剤は DHC10 溶液 (DHC: DHC 10 wt% + 純水 90 wt%) と CNF 添加型除せい剤 CC10 (DHC 10 wt% + CNF 水分散体 50 wt% + 純水 40 wt%) の 2 種類とした。CNF は植物由来のナノサイズ繊維状物質であり、水中で三次元ネットワーク構造を形成することで除せい剤にペースト状の高粘度を付与する⁴⁾。この特性により、重力方向に逆らう天井面・オーバーヘッド部位を含む全方向施工が可能となる。

2.1 供試体の作製

ブラスト処理により黒皮を除去した鋼板に対し，促進腐食試験機（JIS K 5600-7-9 サイクル D）を用いて 120 サイクルの複合サイクル腐食試験を実施し，腐食鋼板を作製した．素地調整は以下の 3 ステップで行った（図 1）：

Step 1：電動グラインダによる 3 min 回転研磨（以下，CB 処理）．

Step 2：CB 処理後の鋼板を除せい剤（DHC10 または CC10）に浸漬し，大気開放条件（室温 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相対湿度 $50\pm 10\%$ ）のもとで 24 時間の酸洗．

Step 3：電動グラインダによる 1.5 min 仕上げ研磨．

CFRP-鋼複合試験体は，素地調整後の鋼板にエポキシ樹脂を塗布し，炭素繊維シートを 3 層で接着，恒温恒湿槽（ 35°C ，50%RH）で 7 日間養生して作製した．



図 1 HA 工法の 3 ステップ処理手順図

2.3 試験方法

電気化学試験として，ポテンショスタット（VersaSTAT 4，Ametek 社製）を用いた EIS 測定および分極曲線測定を実施した．鋼電極は SM490A 鋼を $10\times 10\text{ mm}$ 断面に加工し，低温硬化型エポキシ樹脂で固定した．対極には Pt 板，参照電極には Ag/AgCl/sat.KCl を用いた．また，EIS 測定は振幅 10 mV，周波数範囲 0.01 Hz～10 kHz の条件で行い，電荷移動抵抗（ R_{ct} ）を評価した．

素地調整後の鋼板表面は，共焦点レーザー顕微鏡（LSCM）による線粗さ測定，および SEM-EDX（IT700HR，加速電圧 15 kV）による元素分析を実施した．

力学試験として，JIS K 5600-5-7 に準拠したプルオフ法による鋼素地の付着引張試験，および ASTM D5868-01 に準拠した CFRP-鋼複合試験体のせん断試験（図 2）を実施した．付着引張試験の載荷速度は 0.5 mm/min とした．せん断試験は MTS 試験機を用いて載荷速度 0.01 mm/s の変位制御にて単調引張載荷を実施した．

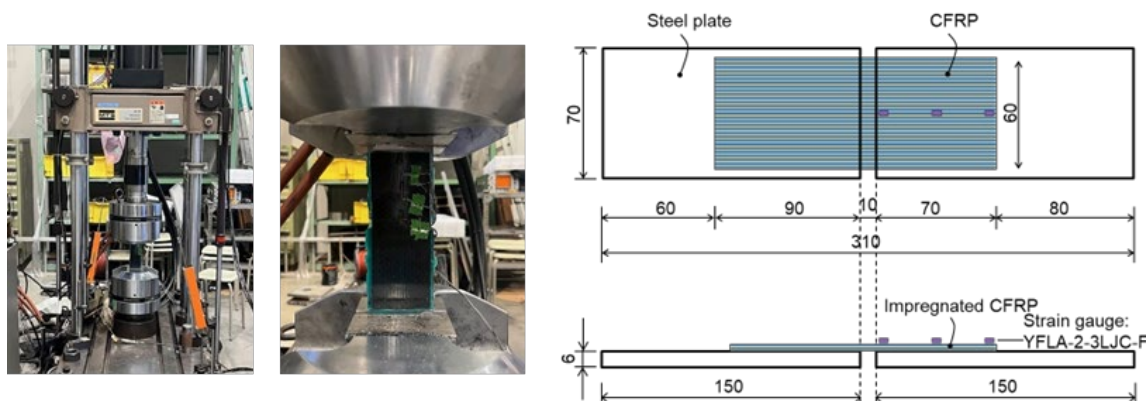


図 2 複合試験体の寸法図とせん断試験

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 実験結果

3.1 除せい剤の粘度特性と施工性

B 型粘度計を用いて常温下で測定した CC10 (DHC 10 wt%+CNF 水分散体 50 wt%+純水 40 wt%) の見掛け粘度値は $9,880 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ であり、ペースト状を示した。CNF 水分散体の流動特性は非ニュートン性であり、せん断細化特性によって刷毛塗り時には低粘度化、静置後は速やかに粘度回復する。したがって、実際の塗布作業が容易であるとともに、施工直後に粘度が速やかに回復するため、塗布後の垂れ落ち（流掛り）が効果的に抑制される。

天井面への塗布保持性能を検証するため、CC10 を腐食鋼板表面に 5 mm 厚で塗布し、塗布面を下向き（天井面を想定）にして 24 時間静置した結果、除せい剤の垂れ落ちは確認されなかった（図 3）。このことは、CC10 が鋼橋の天井面やオーバーヘッド箇所などの重力に逆らう施工環境においても、十分な保持性を有することを示している。

3.2 電気化学試験による腐食評価

CC10 ペースト、DHC10 溶液、および 3.5 wt% NaCl 水溶液の 3 種の溶液環境で EIS 測定を実施した。EIS 測定によりナイキストプロットを図 4 に示す、DHC10 と CC10 の電荷移動抵抗 (R_{ct}) はそれぞれ 155Ω と 168Ω である。 R_{ct} は腐食電流密度と反比例の関係にあることから、除せい初期段階における DHC10 より低下と推定される。

さらに、CC10 の電気化学的挙動を詳細に評価するため、動電位分極曲線測定を実施した（図 4b）。CC10 のアノード分極曲線においては、自然電位 (E_{corr}) に対して約 +100 mV の電位域にアノード電流密度の停滞領域（プラトー）が認められた。これは、クエン酸イオン (Cit^{3-}) が鋼表面に選択的に吸着し、アノード溶解反応の活性サイトを被覆することで、正味のアノード反応速度が抑制されたことを示唆する。カソード側については、低過電位域では水素発生反応（HER）が活性化過電圧支配を示したが、高過電位域においてはターフェル直線からの逸脱が観察され、活性化-拡散混合制御への漸移が確認された。この挙動は、CNF の三次

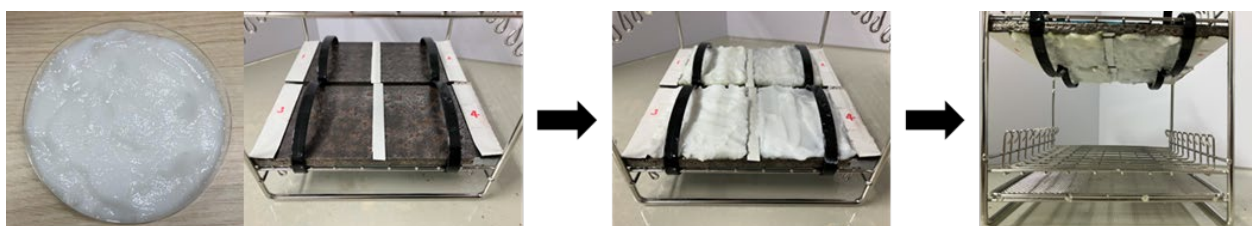


図 3 CC10 の塗布保持性能（天井面想定）

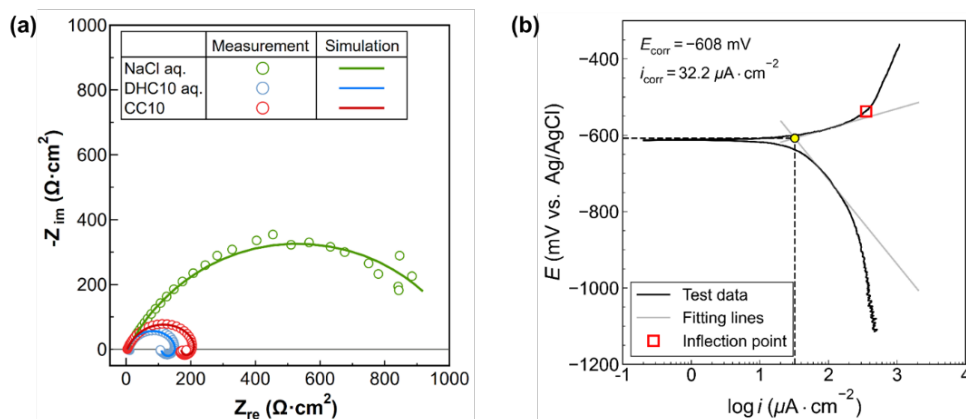


図 4 ナイキストプロット（Nyquist plot）と分極曲線

元ネットワーク構造が溶液の見かけ粘度を増大させ、液相中の反応種（ H^+ ，溶存酸素）の有効拡散係数を低下させた結果、カソード反応が拡散律速成分を帯びるようになったことに起因すると解釈される．なお、CC10 の電流密度は自然電位近傍を含む全測定電位範囲において DHC10 を下回り、CNF 添加が腐食電流密度の低減に有効であることが確認された．

3.3 腐食鋼板に対する HA 工法の除せい効果

3.3.1 表面性状評価

腐食鋼板に対し、3 条件の素地調整（CB，DHC10，CC10）を施した後、鋼板中央部において LSCM による線粗さ測定および SEM-EDX による元素分析を実施した．その結果を表 1 に示す．SEM-EDX 観察結果（図 5）によれば、CB 処理のみでは孔食部に腐食生成物が顕著に残存していた．これは CB 処理が鋼板表面の凸部を機械的に切削するにとどまり、ピット底部に強固に付着した緻密な酸化物層への到達が原理的に困難であることによる．一方、DHC10 および CC10 による酸洗を併用した試験体では、さび残存量が大幅に低減した．EDX 分析より、DHC10 および CC10 における Cl 量は CB の約 55%，O 量は約 19%にまで減少した．また、DHC10 と CC10 の間で除せい効果に有意差は認められなかった．

素地調整後の鋼板表面の付着引張強度を図 6 に示す．CB に対して DHC10 および CC10 では垂直方向付着強度が約 2.3～2.5 倍に向上した．破断面観察より、CB では腐食生成物層内での剥離が確認された一方、DHC10 および CC10 では清浄化されたピット内に接着剤が充填され、アンカー効果が発現した．

表 1 素地調整後鋼板の線粗さおよび SEM-EDX 元素比率

Specimen ID	Rz (μm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rsm (μm)	Roughness factor	Cl (at%)	O (at%)	Fe (at%)
CB	16.7	3.08	3.79	259	1.10	0.11	20.8	67.7
DHC10	39.6	6.75	8.75	274	1.39	0.07	3.93	86.1
CC10	33.0	6.16	7.89	256	1.27	0.05	3.89	85.6

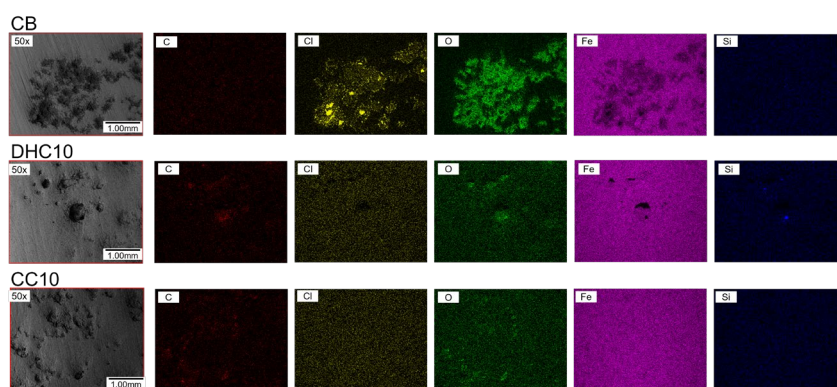


図 5 促進腐食鋼板：SEM-EDX 表面観察画像

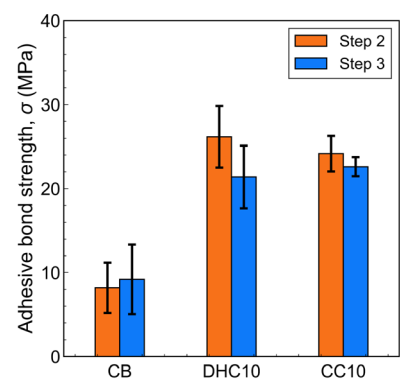


図 6 付着引張試験結果

3.3.2 CFRP-鋼複合試験体のせん断試験

CFRP-鋼複合試験体のせん断試験結果を図 7 に示す．せん断強度を図 7a，荷重-変位曲線を図 7b，および破断面写真を図 7c に示す．CB に対して DHC10 のせん断強度は 1.52 倍となり，さらに CC10 では CB の 2.23 倍（DHC10 の 1.47 倍）に達した．この強度の段階的向上は、酸洗による清浄化に加え、CNF 添加による界面状態のさらなる改善と整合している．破

壊形態に関しては、DHC10 では界面剥離が主であったのに対し、CC10 では鋼素地側に CFRP と樹脂の残留が確認され、破壊が界面剥離型から接着層内破壊型へ遷移した。

この破壊形態の遷移は、CC10 において鋼-接着剤界面強度が接着層の凝集強度を上回ったことを意味する。DHC10 と CC10 の間には、表 1 に示すように表面粗さパラメータ (R_a , R_z) に力学性能の差を説明し得るほどの有意差は認められず、単純な 2 次元粗面化の違いでは説明できない。CC10 特有の性能向上の機構については、開放体系において酸素濃淡電池の形成と水分の蒸発作用が協調的に進行し、DHC10 溶液処理では得られない三次元的表面テクスチャが形成されたことに起因する。荷重-変位曲線においても、CC10 では変位約 1 mm 付近にプラトー領域が確認され、界面の靱性向上が示唆された。

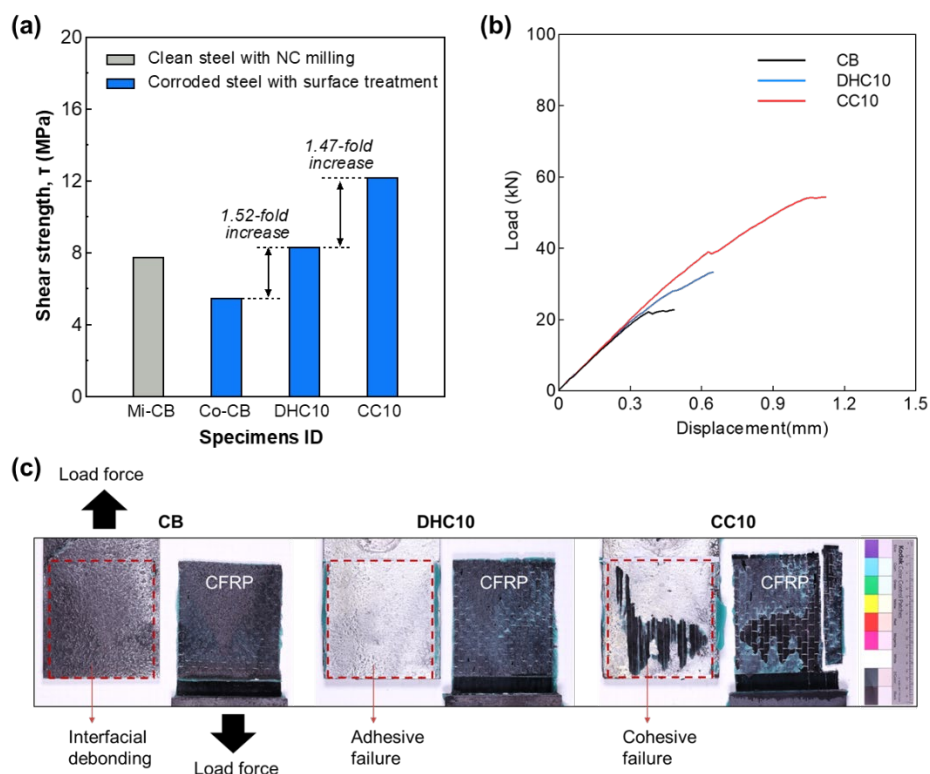


図 7 複合試験体のせん断試験結果

4. 考察

DHC10 と CC10 は除せい度 ($Cl \cdot O$ 残留率) および表面粗さパラメータにおいて有意差を示さなかったにもかかわらず、CFRP-鋼せん断強度には 1.47 倍の差が生じた。これは以下の二機構に起因すると考えられる。

(1) 酸素濃淡電池による電気化学的底切効果：CNF 凝ゲル内では、ゲル-大気界面（富酸素域）とピット底部（貧酸素域）の間に急峻な酸素濃度勾配が形成される。ピット底の鉄基体が陽極、ゲル表層が大面積陰極として機能することで、 $Fe_3O_4 \cdot FeOOH$ 層の下方から金属基体を選択的に溶解する底切効果（undercutting）が生じる。なお、この機構は CNF 体系でのみ機能し、DHC10 溶液環境では安定した酸素濃度勾配を維持できない。

(2) 蒸発毛細管ポンピングによる物質移動強化：CNF ナノ多孔質ネットワークからの水分蒸発が毛細管負圧を生成し、ピット底部の鉄錯体廃液・ $Cl^- \cdot SO_4^{2-}$ を強制的に上方へ輸送する対流を駆動する。これにより、反応生成物が蓄積されることなく新鮮な酸洗液がピッ

ト底に継続的に供給される．この対流伝質は DHC10 の純拡散支配に比べて大幅に効率的であり、ピット底部の塩分残留量を効果的に低減する．

上記二機構の協調作用により、CB 処理では到達不可能なピット深部に口部より内部が広がった三次元的凹坑が形成される．この凹坑に液状エポキシ樹脂が浸透・硬化すること、強力な機械的互鎖（マイクロアンカー効果）が発現する．

5. 結論

本研究では、HA 工法の実用化を見据え、CNF 添加型除せい剤（CC10）の腐食抑制性能・施工性・除せい効果および CFRP-鋼接着界面強度に対する影響を体系的に評価した．得られた主な知見を以下に示す．

- 1) EIS 測定および動電位分極曲線測定の結果、CC10 は同濃度の DHC 単体溶液（DHC10）と比較して高い R_{ct} を示し、クエン酸イオン吸着によるアノード溶解の抑制と CNF ネットワークの拡散障壁効果の相乗作用により、鋼素地に対する腐食抑制性能が向上することが確認された．
- 2) CNF 添加により除せい剤の見かけ粘度が大幅に増大し、5 mm 厚塗布での天井面（下向き面）への 24 時間保持試験において垂れ落ちが生じないことが確認された．これにより、オーバーヘッド部位を含む全方向施工への適用性が実証された．
- 3) 腐食鋼板において、HA 工法は電動工具処理単独と比較して Cl、O 含有率をそれぞれ約 50%、80%低減した．CC10 処理の CFRP-鋼せん断強度は CB の 2.23 倍（DHC10 比 1.47 倍）に達し、破壊形態が界面剥離型から接着層内破壊型へ遷移した．

今後の課題として、実環境腐食鋼板への適用検証と最適酸洗時間の確立、および鋼構造物の延命化効果を含むライフサイクルアセスメント（LCA）の実施が挙げられる．

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科学研究費補助金 若手研究（23K13396）、および前田記念工学振興財団令和 7 年度研究助成の援助を受けた．ここに謝意を表する．

（ 発 表 論 文 ）

1. M. Yang, S. Kainuma, J. Xie, W. Liu and Y. Liu: Bond Behavior between CFRP and Corroded Steel Plate Associations with Surface Treatments. *Composites Part B: Engineering*, Vol.246, 110280, 2022. (IF: 14.2)
2. M. Yang, A. Hiramatsu, L. Cai, S. Kainuma: Hybrid-acid pickling method for enhancing adhesion and durability at CFRP-steel bonded interface. *Composites Part B: Engineering*, Vol.296, 112221, 2025. (IF: 14.2)
3. 有川尚喜, 楊沐野*, 貝沼重信, 周秋傑. 鋼構造物の腐食部位に対する環境配慮型ハイブリッド素地調整法の開発. 鋼構造年次論文報告集, 2025, Vol.33, pp.115-121.
4. J. Tang, M. Yang*, S. Kainuma. Cellulose nanofiber (CNF) hydrogel as a functional electrolyte carrier for Mg-based sacrificial anode protection of steel crevices. *Progress in Organic Coatings*, 2026, 215: 110108. (IF: 7.3)