

腐食鋼部材と炭素繊維シートの接着界面劣化機構に基づく

素地調整法の開発

楊沐野¹, 貝沼重信², 段欣邑³

^{1&2} 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

³ 九州大学大学院 工学府 土木工学専攻

鋼構造物の重度腐食部では、CFRP 接着による補強が行われるが、素地調整が不十分だと塩類やさびが残留し、接着強度低下や早期剥離が懸念される。本研究では、電動工具の除せい効果を向上させるため、化学洗浄と電動工具研削を組み合わせた新しい Hybrid-Acid pickling de rusting method (略称: HA 工法)を開発した。また、腐食鋼板に対する素地調整後の除せい効果や CFRP との接着強度を検討した。

1. はじめに

鋼構造物では重度腐食部に対して、タッチアップや塗替え塗装などによる防食性能回復が行われる。また、部材の腐食による減耗が局所的に大きい場合には、防食性能回復に加えて、力学性能の回復が炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）接着により行われる場合がある¹⁾。CFRP は、軽量かつ高弾性・高強度の特性を有しているため、CFRP を鋼構造物部材に接着することで、部材に断面減少などのダメージを与えることなく、高い断面補強効果が得られる^{2),3)}。

近年、鋼構造物の補修・補強工法の1つとして、連続炭素繊維シート接着工法が注目されている⁴⁾。重度腐食した鋼部材に対して、エポキシ樹脂で含浸積層成形した炭素繊維シートを接着することで、力学性能を回復する工法が提案されている^{5),6),7)}。柔軟性に優れる炭素繊維シートについては、鋼構造物の狭隘部などへの接着施工が容易であり、従来の鋼板当板などの補修方法に比して、経済性や施工性などの点で優れている⁸⁾。しかし、鋼部材の素地調整が不適切な場合には、接着剤の劣化や CFRP の界面剥離などが早期に発生することが懸念される。特に、重度腐食部では素地調整時に塩類やさびが残留しやすいため、鋼素地と塗膜や CFRP との界面の接着性能が低下し、これらが早期剥離することがある。先行研究では、電動工具などで腐食部材を素地調整しても長期的に十分な付着強度が維持できず、CFRP が剥離する損傷が報告されている⁹⁾。

本研究では、電動工具の除せい効果を向上させるため、化学洗浄と電動工具研削を組み合わせた新しい Hybrid-Acid pickling de rusting method (略称: HA 工法)を開発した。また、ブラスト処理や電動工具等の従来の素地調整法と開発し

た HA 工法の除せい効果を比較するため、鋼板表面の付着性評価、表面粗さ分析、元素分析、フラッシュさびの発生度などを検討した。最後に、炭素繊維シートを用いた鋼部材補強工法において HA 工法の適用性について基礎的研究を行った。

2. 試験体

2.1 供試材

試験体に用いた供試鋼材は JIS G3106 SM490A であり、その寸法は $6 \times 70 \times 150$ mm である。CFRP と鋼板の複合試験体の作製には、三菱化学インフラテック（株）製の一方向炭素繊維シート(REPLARK® MRK-M2-20)およびエポキシ含浸剤樹脂(Epo-therm® XL800)を用いた。表1にメーカーから提供された材料とその機械的特性の一覧を示す。

表1 材料の機械的特性

Materials	Tensile strength σ (MPa)	Modulus of elasticity E (GPa)	Density ρ (g/cm ³)
Steel plate	568	206	7.85
Carbon fiber fabric	3,400	230	Areal weight of 0.02
Epoxy matrix	30	N/A	1.10~1.30
BiNFi-s CNF	3	140	1.5

また、本研究で開発した酸洗方法は、超高純度試薬であるクエン酸水素二アンモニウム（以下 DHC とする、min.99.0 % (NH₄)₂HC₆H₅O₇) とセルロースナノファイバー（以下、CNF）を用いた。CNF は、BiNFi-s セルローススラリーと称された市販製品で、CNF 濃度 10wt%の水分散液である。繊維の平均直径は約 10~50 nm、粘度は 110,000 mPa・s、比表面積は 120 m²/g である。

2.2 鋼板試験体

表面処理の影響を評価するため、2 種類の初期状態鋼板（ミリング鋼板および腐食鋼板）を作製した。ミリング鋼板は、鋼板基材の変質や磨耗を評価する目的で、NC 旋盤により片面を 0.1 mm 切削し、表面粗さ Ra が $1\mu\text{m}$ 以下のものを選定した。一方、腐食鋼板は、さび除去効果を評価する目的で、ブラスト処理後、JIS K 5600-7-9 に基づく塩水噴霧試験（サイクル D）に 1 ヶ月間暴露し、JIS Z 0313 におけるさび度 D 相当の腐食状態を得た。さび厚は電磁式膜厚計により測定し、平均で $100\sim 200\mu\text{m}$ の範囲にあり、安定した腐食層が形成されていることが確認された。

2.3 複合材試験体

複合材試験体は現場施工を想定して、ハンドレイアップ成形法で製作した。研究対象となる複合材試験体の作製は、以下の手順で行った。

- 1) 比較のため異なる表面状態の鋼板試験体を準備した。
- 2) 1 層の炭素繊維シートに含浸樹脂 XL-800 をローラで浸透・含浸後、鋼素地に貼付した。
- 3) CFRP 表面をフラット状態にしてドリルを接着するために、ポリエステルフィルムで炭素繊維シート表面を覆い、ワイパーで塗布量を調整しながら、樹脂内に生じた気泡を極力除去した。
- 4) 試験体をオープン内で (35°C , 30%RH) で 7 日間圧着養生 ($1.74\times 10^{-3}\text{ MPa}$) した。

3. 試験方法

3.1 素地調整方法

本研究では、まず 2 種類の従来の表面処理について議論した。ブラストは一般的に新設および補修現場で使用され、動力工具処理は一般的に局所的な補修に使用される。対応する施工工程は以下の通りである：

(a) ブラスト処理（以下、Blast）を図 1(a)に示す。ブラスト処理中の表面温度は変化していない。ブラスト処理後の表面清浄度は、国際規格 ISO8501-1 によると Sa2.5 程度である¹⁰⁾。

(b) 電動工具による研削処理（以下、CB）を図 1(b)に示す。これは、ScotchBrit™ の CNS ベベルディスクを電動グラインダに装着し、鋼板表面を手作業で均一に研磨したものである。ディスクは粗目の CNS 原料を使用し、炭化ケイ素砥粒を塗布したナイロン不織布製である。各サンプルは約 3.5 分間、脱せい速度 2 s/cm^2 で研磨

され、摩擦熱で表面温度は 55°C 以上に上昇した。光沢の変化が見られなくなるまで研削を行い、十分な研削強度を確認した。

先行研究の調査結果に基づき、本研究では電動工具による除せい効果をさらに向上させることを目的として、化学洗浄と電動工具研削を組み合わせた HA 工法を新たに開発した。

この素地調整法では、電動工具（CB）による処理と調製した CNF-クエン酸塩さび溶解剤（以下、CC 剤）による酸洗（Acid pickling）を併用して行うことから、以下は CBA 処理と呼ぶ。CBA 処理は主に以下の 3 つの処理段階に分かれる。図 2 示すように、CBA 処理は主に以下の 3 つの処理段階に分かれる。

Step1：腐食鋼板に対して、表面の厚いさび層を除去し鋼素地を露出するために、Co-CB と同様に電動工具で 2～3 分間の研磨を行った。この段階では主にさび層の除去を目的とする。

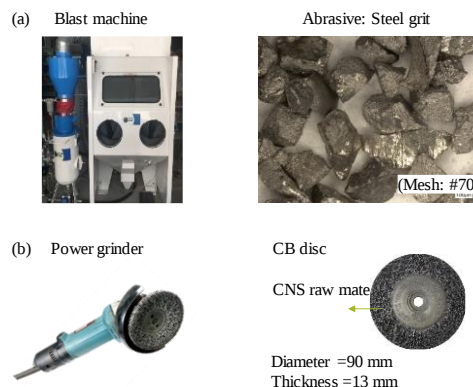


図 1 従来の 2 種類の素地調整方法：(a) スチール砥粒を用いたブラスト処理，(b) CNS ベベルディスクを用いた電動工具処理

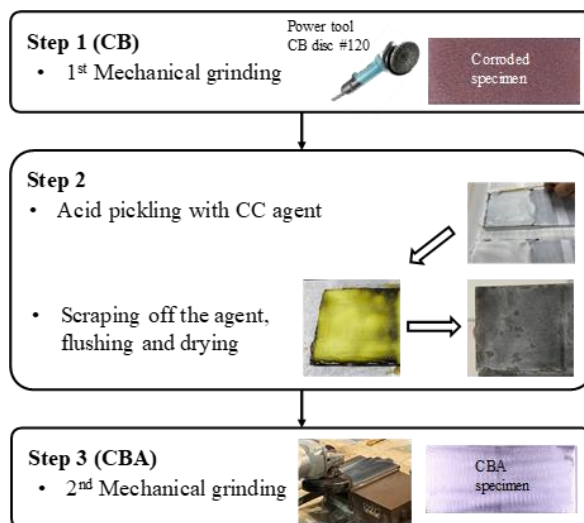


図 2 HA 工法の処理工程とそれに対応する 3 段階

Step2: Step1 で処理した鋼素地に CC 剤を厚さ約 3 mm で塗布し、室内環境 (23±2 °C, 50±10% RH) で 3 日間静置して乾燥させた。その後、所定の酸洗時間後に CC 剤を除去し、鋼板表面をイオン交換水で洗浄・乾燥した。

ここで、CC 剤はセルロースナノファイバー (CNF) 水分散体、DHC 粉末、イオン交換水を質量比 50:10:40 で調製した。DHC 粉末をイオン交換水に十分に溶解後、CNF を DHC 水溶液に混合させることで製作した。このうち、CNF は現場施工に適した粘性を付与する能力があり、DHC はさび除去に有効な成分である。完成した混合剤は白色の粘性ゲル状で、環境負荷や危険性はほとんどない。

Step3: 鋼板表面を清潔な CB ディスクで機械研磨する。この段階が終了した試験体を CBA step3 とする。

3.2 引張付着試験

本研究では、鋼素地と複合材試験体の引張付着強度を評価するため、JIS K5600-5-7 に基づくプルオフ法 (図 3) を使用した引張付着試験を実施しました。

1) 鋼素地の引張付着試験

試験は室内環境 (23±2 °C, 約 50%RH) 下で、卓上引張圧縮試験機 (MSC-10/500-2, 東京衡機試験機社製) を用い、ドリーを試験面に垂直に引張ることで行った。引張速度は 0.5 mm/min とした。

引張試験中に生じるドリー曲げによる試験結果のばらつきを極力減少させるために、ドリー (径 20 mm) を機械切削して製作した¹¹⁾。ドリーの製作材料には、Al 合金 (JIS H4000 A2017) を用いた。接着面にはサンドペーパー (#120) で一方向研磨を行い、アセトンで洗浄した。研磨面の CSR 測定による平均線粗さ R_{sm} , R_a および R_{zjis} は、それぞれ 220 μ m, 2 μ m および 14 μ m であった。ドリーと鋼素地の接着には、24h でほぼ完全硬化に達する 2 液性エポキシ樹脂接着剤 (3M™ Scotch-Weld™ DP420) を用い、接着剤樹脂をドリー全面に塗布後、試験体の対象面にドリーを接着し、0.9MPa の面圧を加えて室内環境 (約 24±1 °C, 50%RH) で 30min 初期硬化させた。続いて面圧を解放し、35 °C と 30%RH 下で約 48h 養生した。

養生が完了した試験体は、室内環境に戻してから卓上ボール盤に電着ダイヤモンドコアドリル (DC-25, 新潟精機社製) を装着して、ドリー外縁部の接着剤を研削除去した。引張付着強度 σ (MPa) を以下の式で算出する。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

ここで、 P : 引張破断強度 (N), A : 直径 20 mm のドリーの表面積 (mm^2)。

2) 複合材試験体の引張強度試験

複合材試験体の引張接着強度は、前述のプルオフ法で CFRP と鋼板の接着界面に垂直荷重を載荷する試験を行うことで評価した。なお、接着剤樹脂 DP420 を用いて、ドリーは複合材試験体の CFRP 表面に接着した。

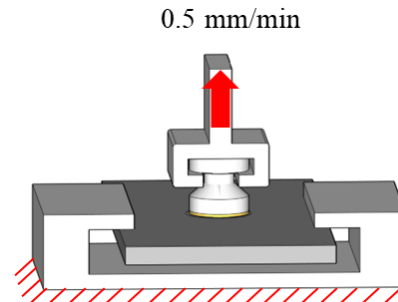


図3 引張試験の試験方法

また、CFRP 表面の付着不良を予防するため、CFRP 表面をサンドペーパー (#120) を用いて粗面形成した。接着剤が硬化後、径 20mm のドリー接着面積を確保し、接着面積を 3.14 cm^2 にするため、ドリー外周の CFRP と接着層をホールソーで鋼素地に到達するまで切断した。

すべての試験体の引張付着強度は、同条件で行った 3 回の引張破断強度の平均値と定義した。

3.3 表面粗さ分析

鋼素地の表面粗さ分析には、レーザー走査型共焦点顕微鏡 (OLS4500, オリパス社製) を用いて測定した。この 3D レーザー顕微鏡 (以下、LSCM) の測定には、20 倍の対物レンズを用い、測定ピッチを 1.8 μ m, 測定領域を 0.6×10 mm とした。この領域内で等間隔に 11 line の測定データを抽出し、その平均値を粗さと定義した。JIS B 0601 に規定される線粗さ係数を算出し、 R_a , R_{sm} の算出式は以下である。

(a) 算術平均高さ R_a : 基準点からの高さを R_n , 要素数を N とする。

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |R_n| \quad (2)$$

(b) 要素の平均長さ R_{sm} : 1 つの輪郭線要素に対する長さを X_{si} , 要素数を m とする。

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (3)$$

3.4 元素分析

本研究は SEM-EDX (SU3500, 日立ハイテク社製) を用いて, 鋼素地, 断面サンプル, 複合試験体の引張破断面の微細な表面構造を観察した. SEM 観察は, 加速電圧 15 kV, 真空度 30 Pa, BSE モードで実施した. EDX では Fe, O, Cl, C, Si の元素マッピングを行い, 腐食部位の元素分布を分析した. 鋼素地断面においては, 図 4 に示す断面サンプルを作成して断面を研磨し, 観察した. 断面サンプルは試験体を 20 mm × 5 mm × 6 mm 程度に切断し, 周囲に樹脂を流し込んで硬化後に観測断面を研磨して露出させた.

また, 使用後の除錆剤 (以下, CC 剤) に含まれる汚染物質の定量分析には, XRF 分析 (EDX-7000, 島津製作所社製) を行った. XRF 測定中の雰囲気ガスは He とした.

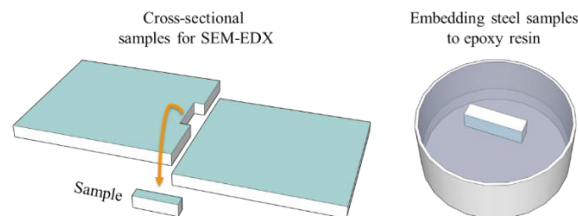


図 4 断面サンプルの製作方法

4. 試験結果

4.1 従来の素地調整方法

4.1.1 表面性状分析

鋼板試験体にはミリング鋼板 (Mi-) と腐食鋼板 (Co-) の 2 種類を用いて, Blast と CB 処理による素地調整を行った. 鋼素地の表面状態を光学顕微鏡 (以下, OM) で観察し, 外観写真を図 5 に示す.

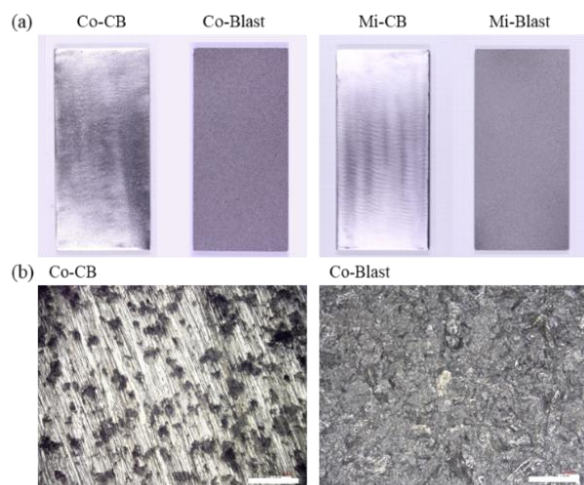


図 5 ブラストと電動工具による素地調整後の鋼板表面 : (a) 外観写真, (b) 光学顕微鏡の画像 (100×)

ブラスト鋼板の色は光沢のないマットグレーであり, CB 鋼板は反射性の明るい銀色の光沢を示した. どちらの素地調整方法においても, 初期の腐食状態では表面の黒ずみが確認できる. 100 倍率の OM 写真では, Co-Blast 表面は少量の黄褐色のさびの残留で不均一に荒れているのに対し, Co-CB 表面は多数の黒点が均一に分布している. また, 電動工具を用いた場合, 研磨ディスクを回転させて鋼板を研削するため, 一方向に研磨線が生じる.

500 倍率の SEM 写真から, Co-Blast の鋼素地は, 不規則に衝撃を受けていることや, 研削剤の一部が埋め込まれていることが観察される. 一方, Co-CB の SEM 写真において, 鋼板表面は平坦で, 腐食孔領域に充填されて平坦化したさび層である残留さびの面積が大きい. これは, 電動工具を鋼板に押し付けて研磨することで垂直圧力を受け, 鋼素地の腐食孔に腐食生成物が圧縮される形で固着した. ブラスト処理を施した腐食鋼板は, 3 次元的に良好な除さび能力を示したが, 電動工具は 2 次元平面で良好な除さび能力を示した.

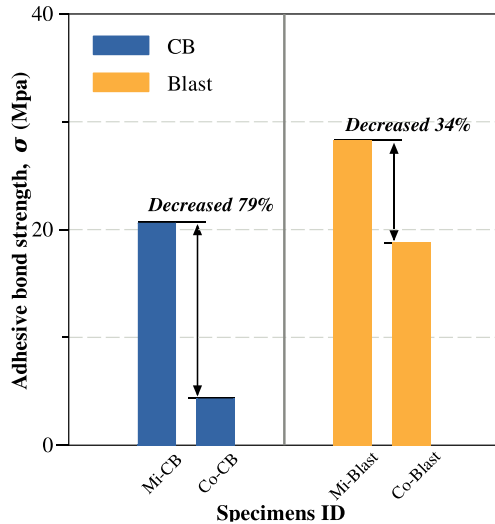
4.1.2 引張付着強度

各種表面処理後の鋼素地の引張付着強度は, 表面性状に関連する物理的および化学的パラメータの寄与に大きく依存する. 4 種類の試験体における引張付着強度を表 2 に示す.

ミリング鋼板において CB と Blast はともに付着強度が 20MPa 以上となり十分な付着強度が得られた. 一方, 腐食鋼板において CB と Blast の付着強度はミリング鋼板に比して減少する傾向を示した. Co-CB の付着強度は Mi-CB に比して 79% の減少であるのに対して, Co-Blast の付着強度は Mi-Blast に比して 34% 減少した. これは図 6(b) に示すように, 樹脂接着剤と腐食鋼板の接着面において, 付着力に対して有効な表面積が減少することに起因する. ミリング鋼板において表面に腐食生成物はほとんど存在せず, 接着剤は主に鋼素地に接着する. 一方, 腐食鋼板では, 表面に腐食生成物が存在し, 接着剤は鋼素地および腐食生成物の両方に接着する. この場合, 腐食生成物の存在する領域は表面付着性能が低く, 接着剤が剥離する前に腐食生成物が鋼素地から剥離すると推察される. その結果, 接着強度に寄与する有効な接着面積が減少し, 腐食鋼板において引張付着強度が低下したと考えられる.

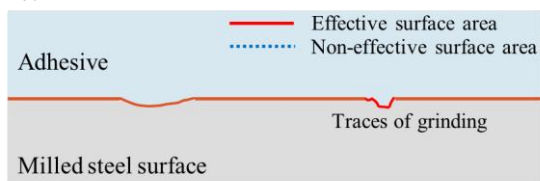
表 2 各試験体の引張付着強度

Initial state of steel plate	Specimens ID	Adhesive bond strength, σ (MPa)
Milled	Mi-CB	20.57
	Mi-Blast	28.22
Corroded	Co-CB	4.28
	Co-Blast	18.71

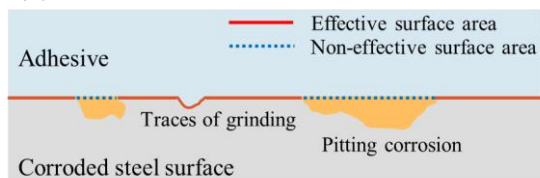


(a) 引張付着強度

(i)



(ii)



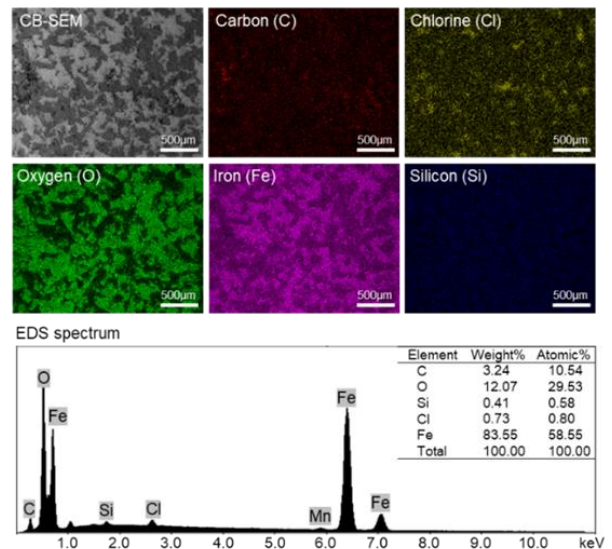
(b) 鋼素地と樹脂の接着界面

図 6 各表面処理後の鋼素地の引張付着強度

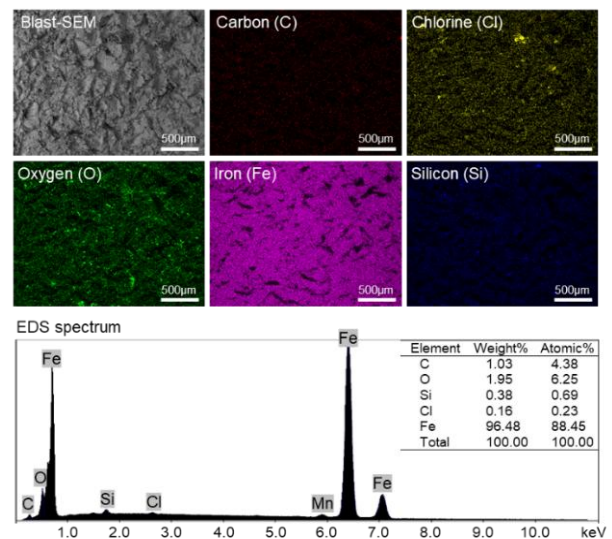
4.1.3 元素分析

元素濃度に関する EDX マッピングにおいて、Co-Blast と Co-CB の残留物の違いを検証した。

図 7(a)に示すように、Co-CB 鋼素地の表面には、腐食生成物の構成元素である酸素は 12 wt% と表面に多量に残留した。また、腐食促進要因となる塩分も 0.73 wt%存在した。酸化物が広い面積で存在していることが確認できる。また、高濃度の塩化物イオンと酸化物が処理面全体に分布し、腐食ピットがさびと塩分で満たされていることが確認できた。



(a) Co-CB



(b) Co-Blast

図 7 鋼板表面における各元素の EDX マッピング、スペクトルおよび割合 (wt%)

図 7(b)に Co-Blast 表面の元素分析を示す。Co-CB と比較して、表面に残留する Cl と O の元素が小さく分散していると推察される。また、研磨材の違いにより、Co-CB 表面の炭素 C 含有量はやや多いが、Si 含有量は両ケースとも概ね同等である。

Mi-CB, Co-CB, Mi-Blast および Co-Blast について、LSCM により分析した領域において 1 線を抽出し、10mm における基準長さにおいて粗さ形状を算出した。また、腐食鋼板試験体に関して断面を切断し、OM により断面形状を撮影した。撮影した断面サンプルの一部領域において、SEM-EDX により元素分析を実施した。

Co-CB において LSCM による粗さ性状から断面はほとんど水平であり、ミリング鋼板と同程

度の粗さを示した．OM 撮影写真において，局部腐食による穴が確認できたが，LSCM による粗さ性状において穴は確認できなかった．これは断面の酸素の EDX マッピングから腐食生成物が穴に存在しており，電動工具で除去できなかった腐食生成物が圧縮されたと考えられる．

Co-Blast の断面性状は CB に比して鋼表面は鋸歯状であり，粗さが著しく大きい．Blast に関してもミリング鋼板と腐食鋼板による断面性状に差異は観察されなかった．ブラスト鋼板の高粗面が及ぼすアンカー効果により，CB に比してミリング鋼板と腐食鋼板の付着強度の差異が小さいと推察される．EDX マッピングから Co-Blast 表面にも腐食生成物(O)は一部のみ存在した．Co-Blast において表面に腐食生成物はほとんど観察されず，鋼素地内部に残留していることを確認した．

鋼部材の局所的な補修や補強工事では，電動工具のエネルギー効率が高く，経済的である．2つの代表的な表面処理方法として，ブラストと電動工具をミリング鋼板表面に適用すると，両者において優れた接着特性を得られる．一方，腐食鋼板からさびを除去する手段としてこれらを使用する場合，電動工具は効果がない．電動工具の除せい効率を最適化するためには，腐食鋼板表面の洗浄度をいかに向上させ，良好な機械的性能と表面活性を有する鋼素地を形成するかが重要な課題である．

4.2 新素地調整法の開発

4.2.1 HA 工法の各段階

3.1 章で述べた HA 工法の処理工程に基づき，各段階における鋼素地の写真を図 8 に示す．

図 8(a)示すようにミリング鋼板の表面写真から，CBA step1 と step3 の金属光沢の差は顕著ではない．腐食鋼板の場合，CBA step3 の後，Co-CB 表面の黒色固体酸化物の層は大幅に除去され，鋼素地は目視観察で概ね銀白色となった．

図 8(b)は，HA 工法の各段階における鋼素地の SEM 写真による表面形態を示している．鋼板表面は研磨され，Step2 が鋼素地に表面侵食を引き起こすことが推察されるが，損傷量は Step3 の機械的研削よりも少ない．フライス加工で生じた傷は，Step3 以降ではほとんど除去されている．

CBA step1 (Co-CB) の鋼表面は，腐食によって生じた孔部に大量の残留さびが埋まっている．Step2 実施後，残留さびの小片は溶解し，鋼素地が露出した．一方，さびの大きな塊は腐食孔の中で剥離が容易となり，Step3 で除去できる．

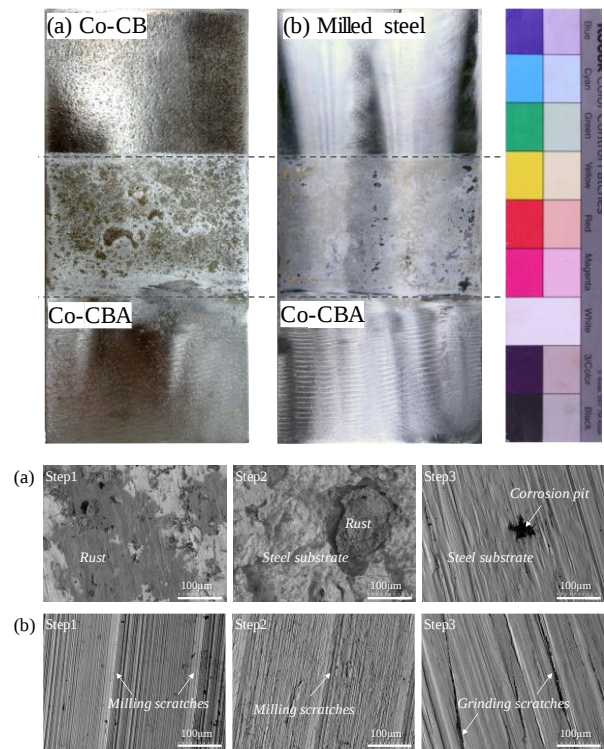


図 8 HA 工法の各段階における鋼素地の写真：(a) 腐食鋼板，(b) ミリング鋼板

4.2.2 表面性状分析

LSCM により計測された鋼素地の実際の計測表面積を A ，公称表面積を A_0 としたとき，Wenzel 粗さ係数 r_1 は以下の式で計算される．

$$r_1 = \frac{A}{A_0} \quad (4)$$

LSCM データから 2 つの主要パラメータ Ra と Rsm を算出した．平均粗さ Ra は，基準長さにおける高さの絶対値の平均値を示す．要素の平均長さ Rsm は，基準長さにおける輪郭曲線要素の長さの平均である．そのほか，腐食ピット密度 r_2 を定義した：

$$r_2 = 1000 \cdot \frac{Ra}{Rsm} \quad (5)$$

先行研究⁹⁾は有効接着面積の概念を導入し，腐食鋼表面の付着強度は表面形状，粗さ，有効接着面積に大きく依存すると示唆している．本研究では，鋼板表面の有効接着面積 A_e を推定するための式(6)を提案する．

$$A_e = A_0 \cdot (1 - a) \cdot r_1 \quad (6)$$

表面特性パラメータの計算結果を表 3 に示す． Rsm は CBA4 で最大値となり，CBA4~24 まで一定である．一方， Ra は CBA8 で最大値となり，深さ方向の他の代表的な粗さパラメータも Ra と同じ傾向で変化している．

表 3 除せいた腐食鋼板の表面性状パラメータの計算結果

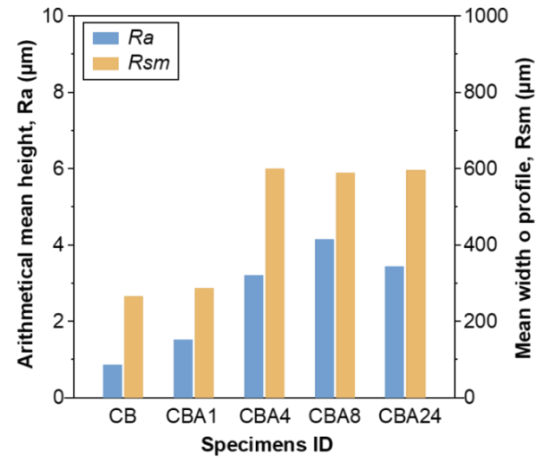
Specimen ID	r_1	r_2	A_e (cm ²)	Bond strength σ (MPa)
Co-CB	1.015	3.25	1.28	4.28
CBA1	1.028	5.31	3.07	18.33
CBA4	1.031	5.34	3.09	18.24
CBA8	1.065	7.04	3.21	17.51
CBA24	1.036	5.79	3.21	20.50

*According to ISO4288, set cut off value $\lambda_c = 0.8\text{mm}$ for the range $0.1 < Ra \leq 2\mu\text{m}$, and set $\lambda_c = 2.5\text{mm}$ when $2 < Ra \leq 10\mu\text{m}$.

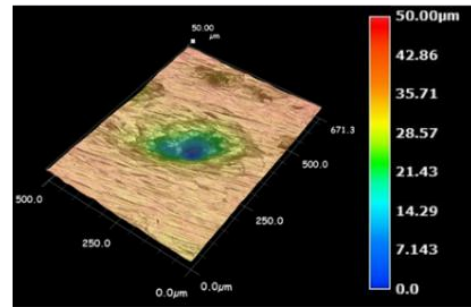
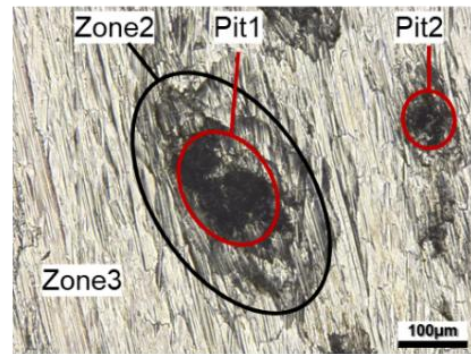
オープンソースの R プログラミング言語プロジェクトは、相関が統計的に有意であるかどうかを評価するのに役立つピアソン相関係数 (r 値) と p 値を計算するために使用した¹²⁾. Ra と Rsm , r_1 と r_2 , (1-a) と A_e は、同様の指向性を持つ 3 組のペアパラメータとみなすことができる. これは、すべてのペアパラメータが強い正の相関 r 値 > 0.9 , 統計的に有意な p 値 < 0.05 であることを示した. 鋼素地に存在する腐食の影響により、接着強さは (1-a) および A_e の 2 つのパラメータのみと非常に有意な強い正の相関を示し、どちらも r 値 > 0.99 , p 値 < 0.01 を満たしている.

未腐食の鋼表面における Wenzel 粗さ係数 r_1 は通常、接着強度と強い正の相関がある¹³⁾. 腐食した鋼表面では、腐食ピットが実際の接着可能面積を大きく減少させるため、 r_1 は引張付着強度と最も弱い相関関係を示した. 同じ理由で、引張付着強度はすべての線粗さパラメータと弱い相関を示した. それにもかかわらず、腐食ピット密度 r_2 は σ と相関する可能性があり (r 値 > 0.8 , p 値 < 0.1), これは鋼表面の腐食ピット形状の一種のスケーリングパラメータを示している. r_2 の値が大きいほど、ピット分布は密で深い.

粗さパラメータ Ra と Rsm の関係と CBA8 の鋼表面を図 9 に示す. Ra は 8h まで増加傾向を示し、8h を超えると減少に転じた. Rsm は 4h まで急増し、それ以降はほとんど一定の値を示した. CBA8 における OM 撮影画像から、鋼表面に Zone2 と Zone3, すなわち平坦な鋼素地とピットの明確な区別が形成され始めたことを示している. 酸洗時間が長くなるにつれて、ピット内のさびは徐々に溶け出し、一部の深い腐食ピット (Pit1) は 8h で最大深さに達し、その後はほとんど変化しなくなる. CBA8 と CBA24 の表面全体の最大高低差はほぼ同じである. しかし、CBA24 の Ra 値は低下しており、その理由は小さな腐食ピット (Pit2) の数が減少したためと推定される.



(a) 線粗さパラメータ Ra と Rsm



(b) CBA8 の鋼素地の OM 写真 (500×)

図 9 線粗さパラメータ Ra と Rsm の関係と CBA8 の鋼表面

4.2.3 元素分析

様々な処理を施した鋼板表面の元素組成を、EDX 半定量分析によって評価した. 各試験体について、表面組成の不均一性による誤差を避けるため、表面上の 2 点を無作為に検査し、結果を互いに検証した.

腐食鋼板に対して CBA 各段階における EDX による鋼板表面の元素マッピングを図 10 に示す. Step1 において Cl が点分布している. 一方、Step2 においては点在した Cl が確認されず、酸洗により多くが除去されたと考えられる.

SEM により観察される黒色の物質は面マッピングの O の分布と一致する. これは鋼素地に残留する腐食生成物であり、Step1 では腐食生成

物が表面に多量に存在する．ここで存在する腐食生成物は Fe_2O_3 あるいは Fe_3O_4 であると推察される．O は Step2 において局部的に存在し，SEM 画像において黒色で観察されない表面においても少量ながら腐食生成物として残留していることが確認できる．O の分布は Step2, Step3 と段階が進むにつれて減少していき，Step3 に残留する腐食生成物は鋼素地に残る穴部のみに存在した．

図 11 は，元素 O が Step1 から Step3 まで減少し続け，酸化物除去に対する Step2 と Step3 の寄与は同程度であることを示している．また，Cl は主に Step2 で多量に除去された．これは，Step2 の酸洗工程で，CC 剤が腐食表面の薄い酸化被膜の一部と付着塩を溶解することを示している．その後，鋼素地上で緩んだ酸化物の一部は機械的研磨によって除去される．また，本研究で開発した HA 法は，従来のブラスト処理よりも徹底した除錆効果を示し，特に残留塩分は Co-Blast の 3 分の 1 以下であった．

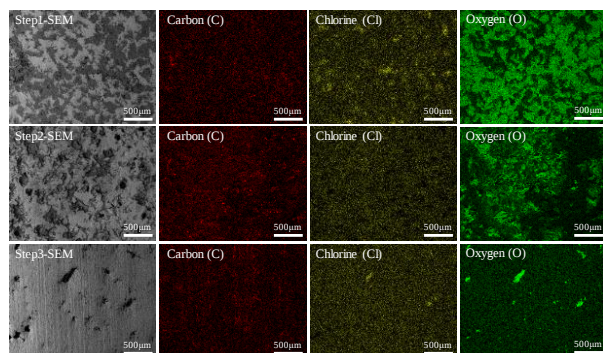


図 10 腐食鋼板に対して HA 工法の各段階の SEM-EDX 分析写真

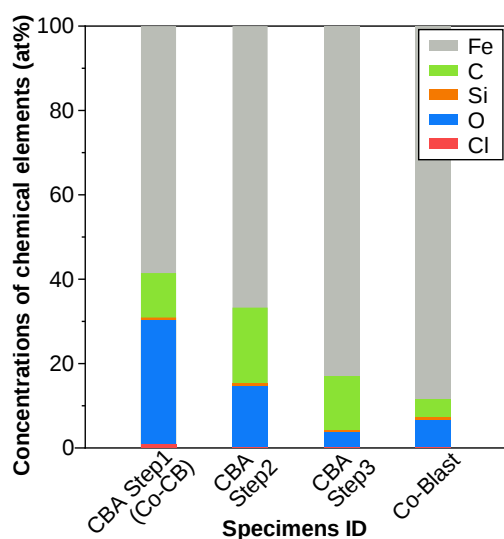
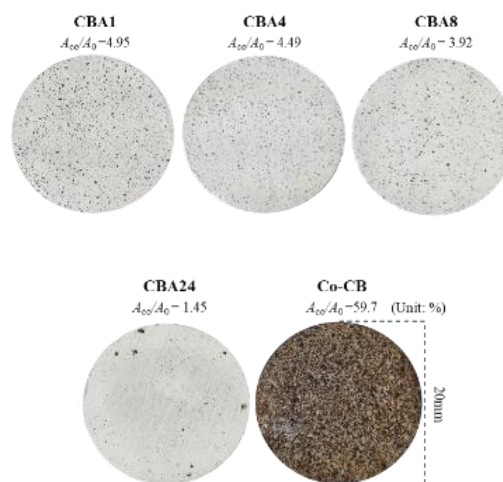


図 11 異なる表面処理後の鋼板表面における構成元素の原子百分率

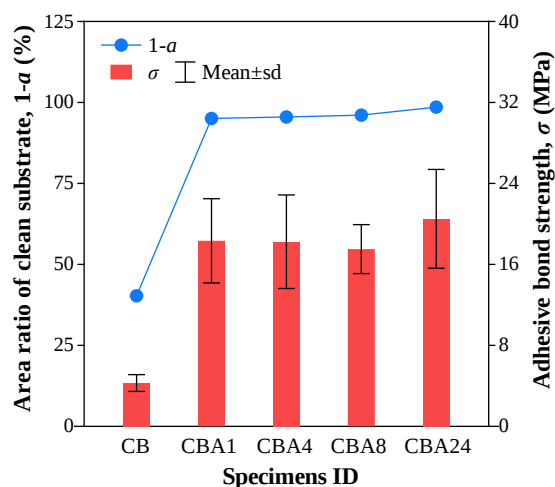
4.3 引張付着強度の比較

4.3.1 鋼素地の表面付着強度

CC 剤による酸洗時間を 1h, 4h, 8h, 24h とした CBA 鋼板について，引張付着試験を行った．すべての引張付着試験の破壊モードは界面破壊となったことから，鋼素地上の残留物（さびまたはその他の汚染物）は，鋼素地に残らずそのほとんどがドリー側の接着剤に付着する．デジタルマイクロスコプを用いてドリーの破断面を撮影し，ドリー破断全面について，さび付着した面積 A_{co} (mm^2) を Image J を用いて画像を 2 値化して算出した．変数 α は，ドリー側の破断面から測定したさび面積率に等しく，ドリーの公称接着面積 A_0 (314 mm^2)，に対するさび残留面積 A_{co} の比率，すなわち $\alpha = A_{co} / A_0 \cdot 100\%$ を視覚的に表すために用いた．したがって，さびが残留していない鋼素地の面積割合は， $(1-\alpha)100\%$ に等しい．



(a) ドリリー破断面のさび分布



(b) 引張付着強度と変数 α

図 12 引張付着試験結果

引張付着強度とドリリー破断面のさび分布を図12に示す。図12(a)はドリリー側の破断面を示しており、CBにおいて、鋼素地の半分以上にさびが残留した。全てのCBA試験体のさび面積率 α は5%以下となった。CBA24の残留さび面積は最小であるが、ピット分布は最も不均一であると考えられる。

また、CBの引張付着強度の平均値は約4.28 MPaである一方で、CBA試験体の酸洗時間によらず引張付着強度の平均値は約18MPa程度と4倍以上の値を示した。CBA24は最も標準偏差が大きく、単一のデータで最も大きな値を示した。図12(b)の(1-a)と σ は互いに同様の増加傾向を示しており、接着剤と鋼素地の接着面積が増加するほど引張付着強度は増加すると推察される。

4.3.2 複合材試験体の引張強度

鋼-CFRP 複合試験体を作製し、引張付着強度と破壊モードを表4に示す。破壊モードを下記のように定義する。

- 1) Mode A：界面破壊
- 2) Mode B：CFRPの層内破壊

表4 引張付着試験結果

Surface treatment	Specimen ID*	Unaged group	
		σ_{ua} (MPa)	Failure mode
Abrasive blast	Mi-Blast	21.3	B
	Co-Blast	15.2	B
Power tool	Mi-CB	19.2	B
	Co-CB	5.20	A
HA method	CBA4	13.4	A (B)
	CBA24	8.92	A

*Mi-：初期腐食なし；Co-：初期腐食あり。

異なる表面状態の複合試験体では、主に2つの劣化モードがある。Mi-Blast、Co-BlastおよびMi-CBはMode Bが支配的であり、引張付着強度はいずれも15 MPa以上であることから、鋼板と樹脂接着剤の界面接着強さが1層のCFRPの層内破壊強度よりも高いことがわかる。一方、

(Co-CB、CBA4、CBA24)はMode Aが支配的であり、鋼板表面接着力が相対的に低いことを示している。CBA4の破壊モードはAが支配的な混合A(B)モードであり、その引張付着強度はCo-Blastの88%に達している。

5. 結論

本研究では腐食鋼部材の接着性能の改善について従来の素地調整方法とHA工法を比較することにより検討した。また、炭素繊維シートを

用いた鋼部材補強工法においてHA工法の適用性について基礎的研究を行った。

(1) 電動工具とブラスト2つの代表的な表面処理方法として、ブラストと電動工具をミリング鋼板表面に適用すると、両者において優れた接着特性を得られる。一方、腐食鋼板からさびを除去する手段として、電動工具を用いた場合には多量に腐食生成物が残留し、鋼表面の凹凸に腐食生成物が埋め込まれる形で存在した。その結果、鋼素地の有効接着表面積が減少し、十分な付着強度が得られなかった。一方、ブラスト法を用いた場合、腐食鋼板の表面において腐食生成物はほとんど観察されず、鋼素地内部に残留していることを確認した。その付着強度は電動工具に比して著しく大きい値を示した。

(2) 電動工具とCC剤を用いた酸洗いを併用したHA工法を開発した。製作したCC剤は、粘性付加により腐食高部材に対して除せい効果を維持し、現場で酸洗の実施が可能である。HA工法の酸洗過程において、CC剤のクエン酸塩がさびや溶出した鉄イオンとキレートを生成し、腐食孔食部のさびも溶出・除去された。24hで鋼素地の溶出量は10 μ m程度であり減肉の影響が極めて小さい。また、CC剤の初期pHは5程度であるが、化学反応の進行により水酸化物イオンが発生し、鋼板付近は中性に近い液性に変化し、乾燥によって固形物となることから廃棄が容易である。

(3) HA工法により、酸洗を1時間以上行うことで表面に残留したさびや塩分は70wt%以上除去され、4hで腐食孔のさびが溶出し、鋼素地の粗さが著しく増加した。電動工具のみの場合に比して、HA工法により鋼素地の付着強度は4倍以上となり、その付着強度はブラスト法と同程度の値を示した。また、酸洗4hで孔食部のさびが溶出し、除せい効果、付着強度および効率的の観点から、酸洗4hが最も良いことが明らかとなった。

以上の結果より、HA工法の優位性について明らかとなった知見を以下に示す。

i) HA工法により素地調整した腐食部位における残留したさびや塩分が少ない、その酸洗過程による鋼材減肉が極めて小さい。

ii) 電動工具とCC剤という少ない機材・材料で、鋼構造物の狭隘部にも適用可能である。

iii) ブラストとほぼ同程度付着強度を得られる。

iv) CC剤の液性変化により廃棄が容易となり、環境負荷が極めて小さい。

6. 謝辞

本研究は、九州建設技術管理協会令和6年度「建設技術研究開発助成」(研究代表者:楊沐野)およびJSPS科研費23K13396(研究代表者:楊沐野)の助成を受けたものです。また、炭素繊維シート材料と含浸樹脂は三菱ケミカルから御提供頂いた。ここに記して、感謝の意を表する。

7. 参考文献

- 1) Tafsirojjaman, T., Dogar, A. U. R., Liu, Y., Manalo, A., and Thambiratnam, D. P.: Performance and Design of Steel Structures Reinforced with FRP Composites: A state-of-the-art review, *Engineering Failure Analysis*, pp: 106371, 2022.
- 2) 土木学会: FRP 部材の接合及び鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 複合構造レポート 09, 2013.
- 3) 桑城志帆, 中尾臨, 松田聡, 岸肇: 炭素繊維強化アクリル樹脂複合材料の曲げ疲労特性, *日本接着学会誌*, 53 巻 3 号, pp: 83-88, 2017.
- 4) 杉浦江, 小林朗, 稲葉尚文, 本間淳史, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案, *土木学会論文集 F*, 65 巻 1 号, pp: 106-118, 2009.
- 5) 松村政秀, 北田俊行, 徳林宗孝, 池田啓士, 岡田崇: 炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究, *土木学会論文集*, 2004 巻 766 号, pp: 17-31, 2004.
- 6) Ahn, J. H., Kainuma, S., Yasuo, F. and Takehiro, I.:

Repair method and residual bearing strength evaluation of a locally corroded plate girder at support, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 33, pp. 398-418, 2013.

- 7) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, *土木学会論文集 A*, 64 巻 4 号, pp.806-813, 2008.

- 8) 井比亨, 北根安雄, 三ツ木幸子: 腐食した鋼桁端部に対する当て板補修の性能回復機構に関する研究, *構造工学論文集 A*, 65A 巻, pp. 466-478, 2019.

- 9) Yang, M., Kainuma, S., Xie, J., Liu, W., and Liu, Y.: Bond behavior between CFRP and corroded steel plate associations with surface treatments, *Composites Part B: Engineering*, Vol.246, 110280, 2022.

- 10) Kim, A., Kainuma, S. and Yang, M.: Surface characteristics and corrosion behavior of steel substrate treated by abrasive blasting, *Metals*, Vol. 11, pp. 2065, 2021.

- 11) 楊昊軒, 貝沼重信, 鈴木啓介, 楊沐野, 豊田雄介: Al と Zn の溶射皮膜と重防食塗装の重ね皮膜部における耐久・防食特性に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, 79 巻 6 号, 22-00288, pp.1-17, 2023.

- 12) Cai, L., Yang, M., Kainuma, S., Liu, Y.: Investigation on bonding behavior between CFRP patch and corrosion-damaged steel associated with surface preparation techniques, *Construction and Building Materials*, Vol. 411, 134279, 2024.

- 13) Yang, M., Xie, J., Kainuma, S. and Liu, W.: Improvement in bond behavior and thermal properties of carbon fiber-reinforced polymer strengthened steel structures, *Composite Structures*, Vol. 278, No. 114704, 2021.

受理日: 令和7年4月25日