

# 炭素繊維補強した腐食部材の接合特性とその界面劣化機構に関する研究

楊沐野<sup>1</sup>, 貝沼重信<sup>2</sup>, 謝嘉靖<sup>3</sup>

<sup>1&2</sup> 九州大学大学院 工学研究院、<sup>3</sup> 九州大学大学院 工学府

近年、炭素繊維補強した鋼部材の接着界面における早期劣化が報告されている。しかし、その劣化機構に関する研究は国内外でまだ行われておらず、効果的な対策が提案されていない。本研究では、炭素繊維シートを含浸させて補強した鋼部材の接着界面の力学性能に及ぼす鋼素地の表面特性の影響を解明した上で、大気環境因子（水分、高温など）が接合部の劣化機構に及ぼす影響を学際的視点で評価した。

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）は、軽量かつ高弾性・高強度の特性を有している<sup>1</sup>。そのため、CFRPを鋼構造部材に接着することで、高い断面補強効果が得られる<sup>2,3</sup>。近年、鋼構造物の補修・補強工法の一つとして、連続炭素繊維シート接着工法が注目されている<sup>4</sup>。炭素繊維シートは柔軟性に優れており、鋼構造物の狭隘部などに接着施工することが容易であり、従来の鋼板の当板などの補修方法に比して、経済性や施工性など優れている<sup>5</sup>。しかし、炭素繊維補強した鋼部材の接着界面における早期劣化が報告されている。

鋼部材の素地調整が不十分な場合、接着剤の界面剥離や樹脂下での腐食が発生・進行することが懸念される。炭素繊維シートによる鋼部材の補修・補強部の力学性能を長期間維持するためには、現場状況に応じた素地調整法を適切に選定する必要があるが、その基礎的な知見がほとんど得られていない。本研究では、ブラストや動力工具による素地調整後の普通鋼板の表面特性に着目し、それらの素地調整法が接着性能に及ぼす影響を解明した。また、鋼素地の表面特性がCFRP-鋼の接着挙動を実験的に検討する上で、大気環境因子（水分、高温、乾湿サイクルなど）が接合部および樹脂材の劣化機構に及ぼす影響を学際的視点で評価した。

この研究は未腐食鋼板に焦点を当てており、今後腐食鋼板を研究対象とした場合には、劣化機構の考察において既存の結果を裏付けとして参考にする必要があるでしょう。腐食鋼板の場合は、素地調整法が鋼板表面の物理的および化学的特性に著しく影響を及ぼすため、その接着性能と界面耐久性はさらに低下する恐れがある。特に、重度腐食した鋼部材のさびと塩類の残留が接着界面の剥離・力学低下に及ぼす影響については、多数のパラメータが相互干渉するため非常に複雑であり、今後の研究で検討する予定である。

## 2. 試験体

### 2.1 供試材

試験体に用いた供試鋼材は、溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106 SM490A を用いた。鋼板の寸法は 120mm×60mm×6mm である。

炭素繊維シートには、高強度グレードの一向織物（MRK-M2-20、三菱ケミカル社製）を使用し、繊維シートの厚さは 0.111mm である。また、炭素繊維シート用含浸エポキシ接着剤は、二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）であり、主剤と硬化剤の配合重量比は 4:1 とした。これらの材料を用いて CFRP-鋼の複合材試験体を製作した。

なお、鋼材、炭素繊維シート、および含浸樹脂の材料特性については、表-1 に示されている。

表 1 供試材の材料特性

Materials	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Modulus of elasticity $E$ (GPa)	Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Steel plate	568	206	7.85
Pitch-based carbon fiber	5,000	235	1.82
Carbon fiber fabric	3,400	230	/
Adhesive, epoxy resin XL-800	30	N/A	1.10~1.30

### 2.2 複合材試験体

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) 素地調整した鋼板表面を有機溶剤で洗浄し、乾燥させる。炭素繊維シートを指定寸法 120 mm×60mm に裁断する。

2) 含浸樹脂（XL-800）を鋼板と炭素繊維シートにローラー刷毛で塗布し、浸透させる。しばらく放置してから、炭素繊維シートの両面を完全に含浸させる。

3) 炭素繊維シートを鋼板表面に敷設し、必要な積層数を繰り返して仕上げる。

4) ワイパーで樹脂の塗布量を調整しながら気泡を取り除き、ポリエステルフィルムを炭素繊維シートの上に被せ、ガラス板で試験体を平坦に仕上げる。

5) 試験体をオープンに移し、ガラス板の上に重りを載せ、35°Cの恒温環境で5日間以上養生することで硬化させる。

この製作手順は現場の連続繊維シート接着工法に一致している。

### 3. 試験方法

#### 3.1 鋼素地調整方法

鋼橋の製作時における構造部材の素地調整法には、一般的にブラスト処理が採用されるが、既設橋梁の維持管理の際には、手工具や動力工具が併用されることもある。そこで、本研究では、鋼板表面に適用する計3種類の素地調整方法を検討した。

試験に用いる鋼板は、うねりや表面粗さの不整が検討結果に及ぼす影響を排除するために、NC旋盤で0.1 mmの切削加工を施した。加工面の算術平均粗さRaが1 $\mu$ m以下の鋼板のみを試験に使用し、Ra値は触針式表面粗さ測定機で測定を行った。その後、鋼素地で表面処理が行い、これらの素地調整程度は、鋼構造物の補強における使用実績から決定した。施工条件を以下に示す。

①ディスクサンダー処理（以下、DS）：電動回転グラインダを用いて、砥石（ペーパーサンダーディスク#120、直径：100 mm）を回転させて、約2~3分間連続研磨した。

②ワイヤブラシ処理（以下、WB）：電動回転グラインダを用いて、砥石（回転カップワイヤブラシ、ワイヤの直径は3 mm）による2~3分間に高速動力研磨した。

③グリッドブラスト処理（以下、ABT）：研磨力が高いの投射材、スチールグリット（モース硬度：10、JIS粒度指数：52.6、比重7.4）を採用し、投射の圧力、距離および角度は、実構造物の一般施工の条件に基づき、それぞれ0.7 MPa、300 mmおよび60°とした。これらの下地調整程度はISO 8501-1に規定されるSa2.5（1種ケレンと同等）に準じて実施した。

各素地調整後には、約1.2MPaの圧縮空気で試験体表面に残留した粉塵を除去した。

#### 3.2 表面性状の測定

鋼板の表面性状を定量的に評価するため、走査型レーザー顕微鏡LSCM（OLS4500、オリンパス社製、平面分解能：0.12 $\mu$ m）を用いて、表

面凹凸の3次元データを計測した。対物レンズは20倍、測定ピッチを1.8 $\mu$ mで設定した。計測結果に基づいて、表面粗さに関する主なパラメータを計算した。計算方法については、鋼板中央における0.6mm $\times$ 10mmの領域から、幅方向に等間隔の11ラインのデータを抽出し、その平均値は線粗さパラメータとして算出した。

#### 3.3 引張付着試験

引張付着試験はJIS K5600-5-7に定められるプルオフ法に基づいて行われた。ドリリーを試験面に対して垂直に引き抜くことで垂直引張荷重を計測した。引張付着試験には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、引張速度は0.5 mm/minとした。機械的性能の試験は、いずれも室温23 $\pm$ 2°C、湿度約50%RHで実行された。

引張試験時にジグとドリリーが2点接触するようにした。ドリリーの材料には、Al合金（JIS H4000 A2017）を使用し、径20mmのドリリーを機械切削して製作した。また、ドリリーの接着面を均一な粗さを確保するため、サンドペーパー（#120）で一方向に研磨した。次に、必要最小限の量の接着剤を均等に塗布した後、ドリリーを試験体の対象面に接着させ、0.9MPaの垂直圧力を加えて、室内環境下で30分間初期硬化させた。その後、ドリリー垂直方向の圧力を解放し、試験体をオープンに移して、35°Cで48h以上恒温養生させた。

引張試験には、素地調整した鋼板とCFRP-鋼の複合材試験体、の2種類を対象に実施した。予想された引張破断モードは図1に示されている。鋼素地試験体には、接着強度と粘度が異なる2種類の二液常温硬化型エポキシ樹脂接着剤TB2087NとTB2082C（スリーボンド社製）を使用し、鋼素地表面の接着性能を相互に検証した。一方、ドリリーと複合材の接着面ではく離が発生すると、複合材試験体の接着性能は評価できなくなるため、接着力の高いTB2087NのみをドリリーとCFRP表面の接着剤として使用する。また、付着不良を防ぐため、CFRP表面のドリリー接着部位もサンドペーパー（#120）を用いて粗化处理した。

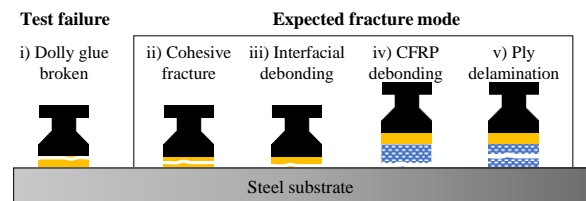


図1 破断モード

接着剤が硬化したら、ドリリー円筒周囲の接着面及び CFRP を貫通して素地に達する切り込みを行う。試験体の引張接着強度は、同条件で試験を 3 回繰り返し行い、測定した破断強度の平均値と定義した。

### 3.4 複合材試験体の劣化試験

CFRP-鋼の接合部に対する水分と温度の影響を考慮し、劣化促進試験を実施した。劣化試験に先立って、複合材試験体のコア領域の周りに鋼素地が露出するまで、円形の溝をあけた。これは、接着界面劣化を促進するため、回転ドリルを用いて、CFRP 層に滑らかな断面カットをできて、切削溝の幅は約 2~3mm で制御した。

劣化促進試験の流れは 2 日間の初期状態調節した後、30 日間の劣化試験を行う。初期状態調節として、複合材試験体を室温環境の 3.5wt% NaCl 溶液に浸漬した。そして、室温浸漬劣化 (IM) と高温乾湿劣化 (WD) 試験では、それぞれ 3.5wt% NaCl 溶液連続浸漬、および乾湿サイクルで行った。WD 劣化条件は JIS K6857 接着剤の耐水性試験方法にしたがって、8 時間 60°C の乾燥過程および 16 時間室温 23±2°C の浸漬過程を繰り返して 30 サイクルに供した。

劣化試験後、複合材試験体の円形コア領域にアルミドリリーを接着し、プルオフ法で引張試験を行った。各試験体の引張付着試験手順を 図 2 に示している。

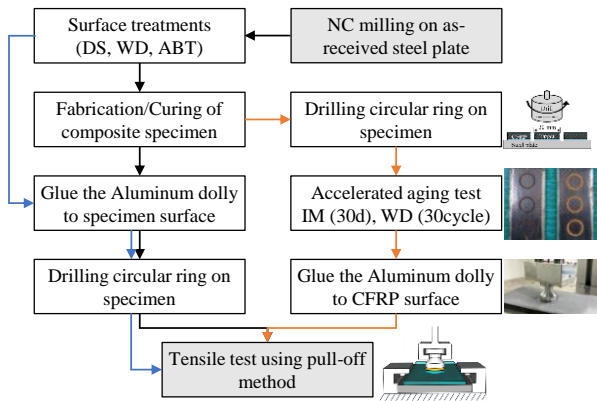


図 2 各試験体の引張付着試験手順

### 3.5 含浸樹脂の劣化試験

樹脂単体に対する IM と WD の劣化試験による影響を検討するために、図 3 に示すように、ダンベル形樹脂試験片を対象に IM と WD の劣化試験を行った。含浸材 XL-800 の樹脂試験片は、ハードシリコンモールドを用いて、NF ISO527-2 規格に基づき製作した。試験片の標準断面積を 10×4 mm に設定した。なお、樹脂試験片に対し

ては、塩分による腐食の影響を考慮する必要がないため、IM および WD の劣化条件で使用される溶液をイオン交換水に置き換えた。

劣化後の引張試験は前述した卓上引張圧縮試験機で引張試験を行った、引張速度は 5 mm/min とした。引張試験に先立って、樹脂サンプル方面の中央に 2 軸直交塑性域ひずみゲージ (YFLCAB-2-3LJB-F, 東京測器研究所社製) を貼付した。なお、試験片 3 個を一組にして、実断面積により各試験片の引張強度を算出した。

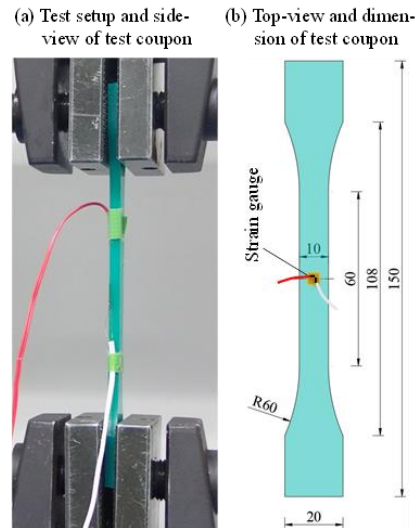


図 3 ダンベル型樹脂試験体の形状・寸法および引張試験 (単位: mm)

### 3.6 SEM-EDX

走査電子顕微鏡 SEM-EDX ((株)日立ハイテク製, SU3500) を用い、各試験体の引張破断面における微細な表面構造を観察する。SEM 観察では、加速電圧と真空度をそれぞれ 15kV, 30Pa と設定して行った。なお、EDX による元素 (Fe, O, Cl, および C) を面マッピングし、腐食部位の元素分布および塩類物質の滲入を分析した。

## 4. 試験結果

### 4.1 鋼素地の表面特性

各種の素地調整法を用いて処理された鋼素地の表面状態をマイクロ顕微鏡で観察し、その結果を図 4 に示す。それぞれの素地調整法によって、鋼素地表面の色相・明度が異なっている。試験体 DS は光沢のシルバー色、WB はメタリックの銀黒色、ABT はマットなグレー系色になっている。表面の傷跡やテクスチャーも全く異なり、DS は浅くて細かく、WB は深くて粗く、ABT は研削材の機械的な衝撃により、鋼板表面に高度な複雑性と不規則性が生じている。



図4 鋼素地の光学顕微写真

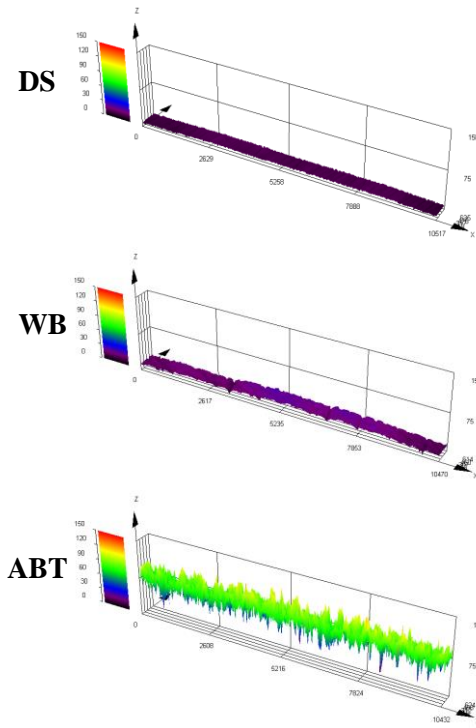


図5 表面凹凸の3次元計測データ (Height scale: 0~150µm)

LSCM で計測された領域は 10460µm×600µm であり、この領域内の 3D 粗度度データを図5に示されている。深さ方向のうねりと表面粗さについて、ABTは他の2つの電動工具に比べて著しく大きいことが明らかになった。

過去の研究によれば、異なる素地調整法で処理した鋼板の高さ方向の線粗さ指標である Ra, Rzなどは、処理面の接着強度と強い正の相関があることが確かめた<sup>9)</sup>。一方、田村らの研究<sup>7)</sup>によれば、ブラスト処理面の接合強度には高さ方向の指標に加えて、算術平均傾斜などの表面凹凸を表現する指標が影響しており、接合強度に対して強い相関性を有することが確認されてきた。本研究では、JIS B 0601-2001に基づき、基準長さ ln=10460µmにおける輪郭曲線の算術平均粗さ(Ra)、および高さと幅の複合指標である局部傾斜の二乗平均平方根(RΔq)を、それぞれ式(1)および式(2)で算出した。

計測された表面プロファイルの点数がN点存在するとき、輪郭曲線の山高さ Z(x)を用いて、算術平均粗さは次式に示す。

$$Ra = \frac{1}{N} \int_0^N Z(x) dx \quad (1)$$

局部傾斜 dz/dx の二乗平均平方根は次式のように表される。

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{N} \int_0^N \left( \frac{d}{dx} Z(x) \right)^2 dx} \quad (2)$$

LSCM の計測結果から、固体の実際表面積の計測値を A<sub>t</sub>、公称面積を A<sub>0</sub>とした場合、Wenzel 表面粗さ係数 r は、以下の式(3)で計算される。

$$r = \frac{A_t}{A_0} \quad (3)$$

上記の計算方法に基づき、各パラメータの計算値の比較結果を表2に示された。

(1) 算術平均粗さ Ra と Wenzel 粗さ係数 r: DS < WB < ABT

Wenzel 粗さ係数と高さ方向の粗さパラメータを比較すると、DS と WB の差異はわずかであり、ABTは他の方法よりも明らかに大きくなっている。つまり、公称表面積に対するブラスト処理後の実際の接着面積が最も大きくなり、ABT 鋼素地の表面状態は最も粗いと言える。

(2) 二乗平均平方根傾斜 RΔq: WB < DS < ABT

電動工具の DS と WB に対する RΔq は同程度であり、一方で ABT は電動工具の 4 倍程度になっている。表面処理によって形成される表面凹凸の傾斜が大きい場合、荷重(引張・せん断方向の荷重)をかける際には、各凹凸から樹脂が抜けにくくなる。そのため、より大きな局所傾斜値が期待されている。

表2 鋼素地の表面粗さパラメータの計算結果

Surface treatment	Wenzel roughness factor r	Line roughness parameter	
		Ra (µm)	RΔq (deg.)
DS	1.028	0.70	11.686
WB	1.034	1.43	10.241
ABT	1.266	10.03	40.518

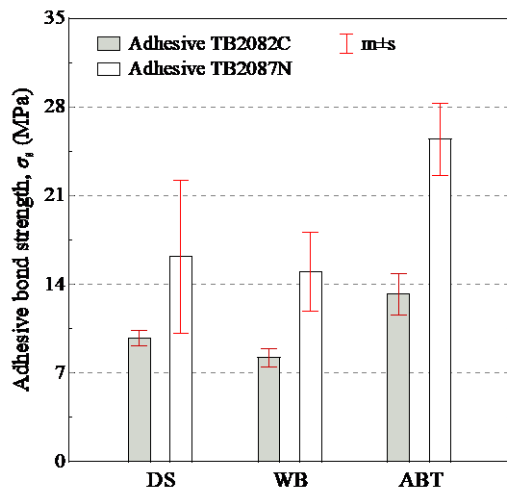
## 4.2 鋼素地の引張付着強度

鋼素地試験体の引張付着試験の結果を図6(a)に示す。破断面の観察から、支配的な破壊モードは鋼板と接着剤の界面剥離破壊であることが確認された。

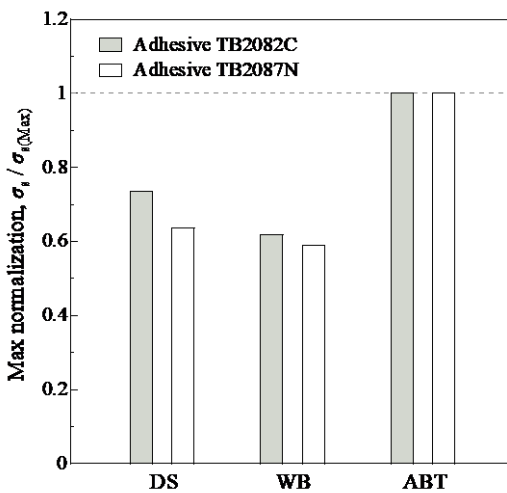
接着剤自体の接着強度が異なるため、同じ鋼素地でも接着剤によって破断強度に大きな差が生じる。ただし、接着剤によらず、ABT 表面へ

の付着性が最も優れていることが確認されている。Gent と Lai<sup>9)</sup>は、粗さが実接着表面積を減少させない限り、表面積と接着力には線形増加の傾向があることを示している。ここで、動力工具で処理した鋼板の実表面積と公称面積はほぼ等しいのに対して、ABT の実表面積が公称面積の 1.2 倍以上になった。ABT の公称面積当たりの接着面積が大きくなるため、接着強度が高くなったと考えられる。また、清浄な鋼板表面の接着強度は、その幾何学的特徴に大きく依存するため、ABT 独自の機械的なインターロック機構やフラクタル特徴によって、表面の密着性が大幅に向上することが期待される<sup>8)</sup>。

異なる接着剤で得られたデータを比較するために、各組のデータの最大値を「1」としてスケールリングし、接着強度の結果を正規化した。図 6(b) に示すように、接着剤 TB2082C と TB2087N 両方とも ABT > DS > WB の順になっており、2 組のデータ分布は非常に一致している。



(a) 引張付着強度



(b) 正規化結果

図 6 素地調整法による鋼素地の引張接着強度

動力工具 DS と WB で処理した鋼板の表面粗さはほぼ同程度であるが、WB の接着強度は DS に比してわずかに低下していることが見られる。原因としては、WB 表面処理により鋼板表面の化学組成が変化すると推察された。SEM-EDX を使用して、WB の破断面での元素分析結果を図 7 に示す。C の元素量が 18.12 at% であることから、鋼板表面に少量の樹脂が残っていることが示された。さらに、O の元素量は 7.74 at% であり、明確な点状酸化領域が観察された。この点状領域は鋼素地に均一に分布しており、他の試験体には見られない WB 特有の現象である。

WB 処理において、カップワイヤーと鋼板の接触面積が相対的に小さいため、接触時に摩擦熱と衝撃が大きくなり、素地調整過程で生成された金属酸化層が点状分布であると判断した。この摩擦熱と衝撃作用により、鋼素地表面で局部的に高温酸化が起こり、疎水性の黒色系の酸化層が生成されるためと考えられる。

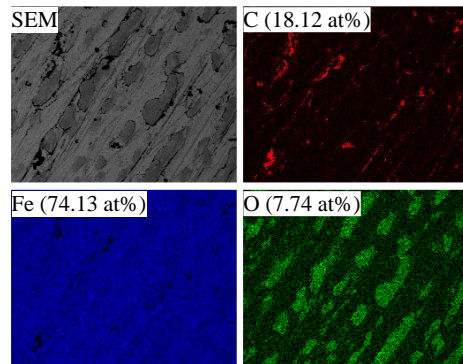


図 7 ドリー接着破断後 WD 鋼素地における SEM-EDX の元素分析結果

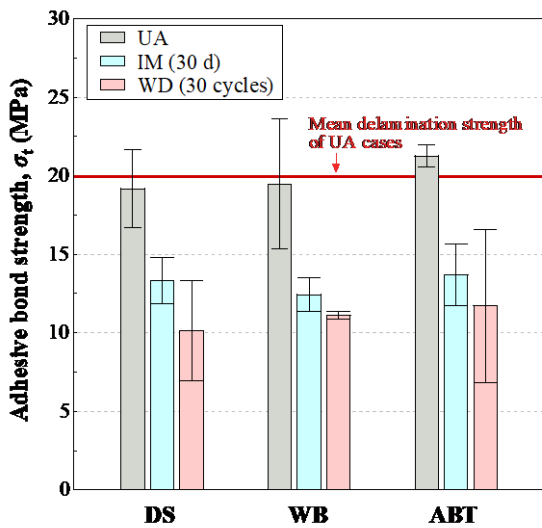
### 4.3 複合材試験体の劣化分析

劣化促進試験に用いた試験体はすべて積層数 1 の複合材試験体である。ここで、UA (未劣化)、IM (浸漬)、および WD (乾湿サイクル)、3 グループの複合材試験体の引張破断強度の結果を図 8(a) に示す。異なる素地調整を行った UA 試験体の平均引張破断強度  $\sigma_t$  は 19.98MPa である。この値を単位ベースとし、劣化後の破断強度を正規化された結果を図 8(b) に示している。同じ条件下で異なる表面処理を施した試験体の強度平均値を比較することで、IM 浸漬劣化後の  $\sigma_t$  は UA に比べて 34.2% 低下し、WD 劣化後の  $\sigma_t$  は UA に比べて 55.1% 低下した。横軸に示されたケールについて、同じグループ内で素地調整方法による  $\sigma_t$  の差異は 6.2 から 10.5% の範囲内で、大きな差異は見られなかった。つまり、機械的特性の低下は主に環境条件に依存し、鋼素

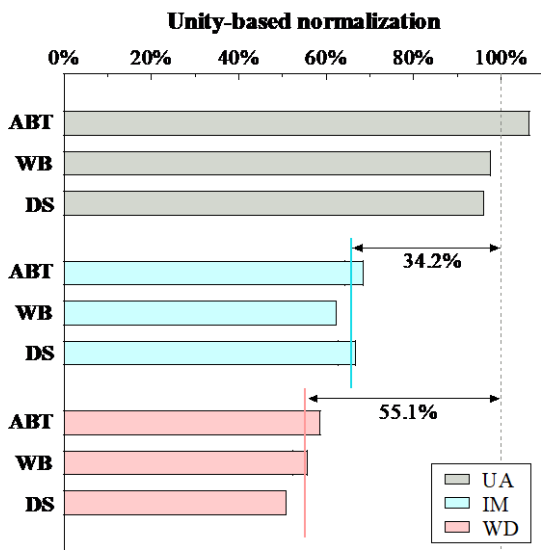
地の表面処理状態が劣化後の付着強度に与える影響は比較的小さいと考えられる。

しかしながら、引張試験後の破断面写真から、鋼素地の表面処理方法によって破断モードに若干の差異が見られている。UA および IM グループの試験体では CFRP の層間破壊が支配的な破壊モードであったが、一部の WD 試験体では樹脂と鋼素地の界面剥離が生じた。したがって、CFRP 聚合物複合材料と鋼の接着強度の低下は、接着界面の剥離や水分侵入、樹脂含浸材の化学的水解などの要因が共同作用して引き起こされる<sup>10), 11)</sup>。

IM 劣化条件下、含浸材が水分を吸収し、樹脂の劣化や樹脂と繊維の界面劣化につながり層間強度が大幅に低下した。一方、WD 劣化条件下



(a) 複合材試験体の接着強度



(b) 相対的な強度降下率

図 8 IM/WD 劣化促進後の複合材試験体のプルオフ引張試験結果

では、DS と WB 試験体には CFRP 層間破壊と界面破壊の混合破壊が発生した。これは、エポキシ樹脂と金属の熱膨張率に差異があるため、環境温度変化や樹脂の吸水膨張により、樹脂・鋼素地の接着界面にひずみ（せん断応力）が生じると推察した。粗い金属表面（例：ABT）では、二種類の材料が機構的にインターロックしているため、接着界面での熱膨張応力がアンカー効果で樹脂と CFRP 層に伝達されると考えられる。ただし、表面粗さが比較的小さい場合は、激しい温度変化によりせん断応力が切断端部に集中し、エポキシ樹脂・鋼素地の界面剥離が境界部から発生しやすくなると考えられる。全体的に、WD 試験体は IM 試験体に比べて強度が低下した。これは、水分と熱の総合的な作用によって、界面劣化が加速されたためと考えられる。

試験体 WB-(WD)の破断面に鋼の露出部位における、SEM-EDX で測定した C, Cl, Fe, O の元素分布を図 9 に示した。CFRP 接着領域の境界線付近に大きな腐食領域が観察された。この領域には、多くの Cl が存在し、厚く層状に堆積したさびが観察された。この腐食領域には、塩分の浸入だけでなく、腐食によるさびの体積膨張が起こり、界面劣化の進行を促進する可能性がある。

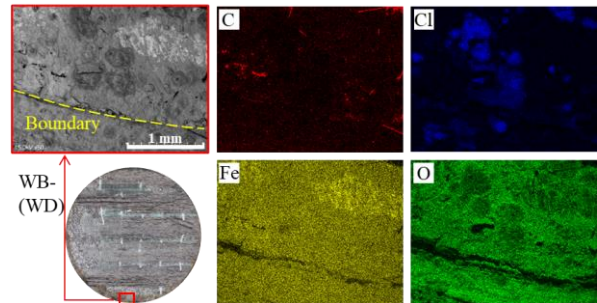


図 9 試験体 WB-(WD)の破断面における SEM-EDX の元素分析

著者らの先行研究<sup>9)</sup>によれば、WD 条件下で接着界面での水分吸着過程は、劣化試験の初期段階で発生することが証明されている。また、WD 条件下で接着端部には高温で増大する界面せん断力が生じ、微小な裂け目や界面損傷が生じやすくなっている。この高温濡れ段階には、水や塩分などの腐食要因物質が切断溝から剥離界面に侵入することで、厳しい腐食を引き起こす可能性が高まる。一方、IM 劣化条件下では、浸漬環境に酸素拡散が制限されているため、界面劣化の初期段階では、この水分浸透領域で腐食がすぐに発生するわけではないと推測された。これらの理由から、IM に比べて WD 劣化条件

下で試験体の接着界面の劣化がより発生しやすいと推測された。

水分が CFRP-金属の接合部に与える影響は、通常、吸着と吸収の2つの過程によるものとされる。吸着の過程では、水分は樹脂接着剤と金属の接着界面を通じて透過し、界面劣化やその後の機械的性能の低下を引き起こす。一方、吸収の過程では、水分が接着剤や含浸材に浸透し、樹脂内部に拡散することで、樹脂材の性能低下が起こす。したがって、本章で述べた界面劣化に加え、樹脂の吸水過程による CFRP-鋼接合部の劣化メカニズムも検討する必要がある。次章では、樹脂劣化による複合材試験体の層間強度低下への影響を考察するため、同様の劣化条件下で樹脂材料の性能低下を詳しく分析する。

#### 4.4 含浸樹脂材の劣化分析

ダンベル型の樹脂試験片を用いて、IM、WD 劣化試験後に単軸引張試験を実施した。測定した F- $\delta$  曲線およびひずみデータから計算した引張強度、ヤング率、およびポアソン比を表 3 に示す。すべての試験片が脆性破壊を起こしたため、引張強度は破断強度に等しいと見なされる。

各試験体の引張強さ  $\sigma_u$  および破断時の最大変形量  $\delta_u$  は、図 10(a) に示されている。また、各グループに代表的な1枚試験片の応力-ひずみ曲線を図 10(b) に示している。未劣化 UA に比べ、WD 劣化が樹脂強度に与える影響はほとんどなかった。これに対して、IM 劣化は樹脂の引張強度を 31.8% 低下させることが見られた。破断時の樹脂試験片の最大変形量  $\delta_u$  については、UA に比べ、WD と IM はそれぞれ 26.2% と 62.4% 増加した。つまり、WD と IM 劣化過程は、樹脂の変形能力を向上させることが分かった。なお、劣化前後の樹脂のポアソン比を比較すると、いずれの劣化条件でも変化量は 10% 以下であり、ほぼ変わっていないと言える。

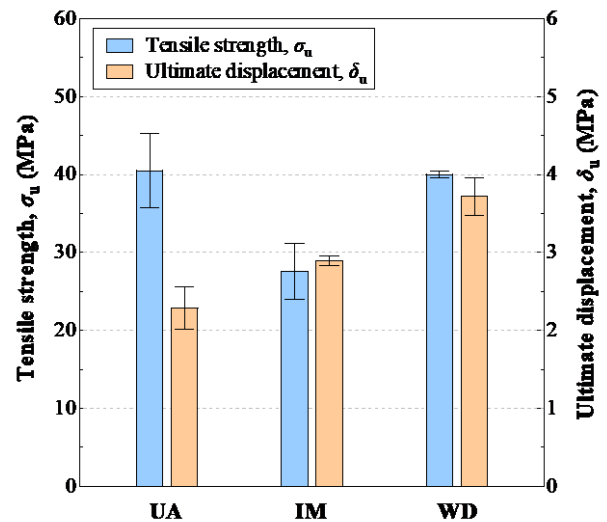
ヤング率は、樹脂材の剛性を表す指標である。劣化前後のヤング率を比較することで、WD と IM は両方ともヤング率の低下を引き起こし、UA よりそれぞれ 18.0% と 31.9% 低下した。IM 浸漬条件においては、樹脂の水分吸収が起こり、それによって樹脂の剛性やヤング率が著しく低下することを確かめた。水分の影響と関連するヤング率 E の降下現象は、樹脂内で水分子が可塑化作用を発揮することが原因と考えられている<sup>12)</sup>。

本稿の WD サイクル条件については、浸漬期間が 16h、乾燥期間が 8h であり、水分は樹脂内部に浸透する前に乾燥したのため、水分が樹脂

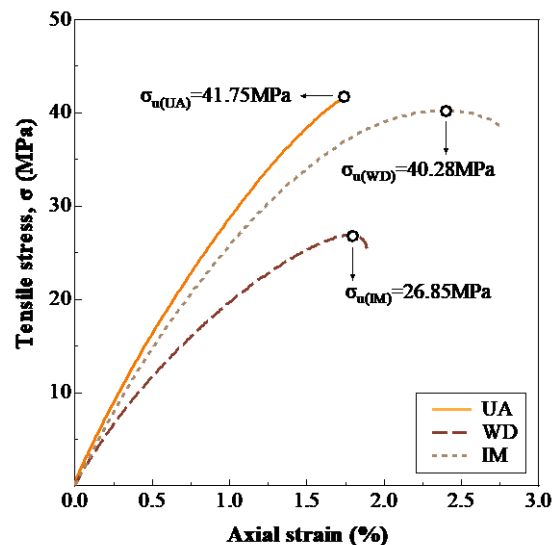
の力学的性質には顕著な損傷を与えられずと考慮した。IM 条件下では連続で 720h 浸漬する場合は、樹脂内の吸水量は持続的に増加できる。したがって、水分による材料特性の変化が、樹脂の破断強度低下の要因であると推測された。一方、WD の高温乾燥の影響については、周囲温度が樹脂材料のガラス転移温度を超えると軟化は発生する恐れがあるが、常温に移すと材料

表 3 劣化前後の含浸材 XL-800 の機械的性質

Specimen ID	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio
UA	40.5±4.8	3,192±318	0.372
IM	27.6±3.6	2,175±138	0.398
WD	40.0±0.4	2,619±195	0.355



(a) 引張強さと破断時の最大変形量



(b) 応力-ひずみ曲線

図 10 含浸樹脂材の引張試験結果

の引張強度が回復し、同時に変形耐性も向上した。Fernando ら<sup>13)</sup>は、CFRP-鋼接合界面に関する実験的研究結果により、接着強度が界面破壊エネルギーに強く依存することを示している。また、弾性率は低いがひずみ容量が大きい非線形接着剤は、引張強度が同等またはそれ以上の線形接着剤よりもはるかに高い界面破壊エネルギーを有することが明確になる。したがって、高温サイクルによる樹脂の変形能力の向上は、材料特性の観点では有益と言える。

## 5. 結論

本研究では、炭素繊維シートと鋼板の接合部に着目し、3種類の素地調整法が鋼板の表面性状およびCFRP-鋼の接着挙動に与える影響を実験的に検討した。さらに、大気環境因子(水分、高温、乾湿サイクルなど)が接合部および樹脂材の劣化メカニズムに与える影響を学際的な視点で評価した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

1) 接着剤の種類に関係なく、本研究で検討した素地調整法は、ABT表面への付着性が最も優れていることが確認された。これは、ABTの実接着面積や局所傾斜値が動力工具よりも大きく、荷重をかける際に各凹凸から樹脂が抜けにくくなっているためである。また、動力工具DSとWBで処理した鋼板の表面粗さはほぼ同程度であるが、WBの接着強度はDSに比してわずかに低下している。原因としては、WB表面処理により鋼板表面の化学組成が変化すると推察された。WB処理において、摩擦熱と衝撃作用により、点状酸化物が生成されることを観察した。

2) UA(未劣化)、IM(浸漬)、およびWD(乾湿サイクル)条件下の複合材試験体の引張試験結果から、UAおよびIM試験体ではCFRPの層間破壊が支配的な破壊モードであり、IM劣化により接着強度が約3分の1に低下した。一方、一部のWD試験体では樹脂と鋼の界面で剥離が生じ、その接着強度はIMに比べてさらに低下した。したがって、CFRP複合材と鋼の接着強度の低下は、接着界面の剥離や水分侵入、樹脂含浸材の化学的水解などの要因が共同作用して引き起こされると推察した。

3) 長期間の浸漬により、樹脂の水分吸収が起こり、それによって樹脂の剛性やヤング率が著しく低下することを確かめた。一方、高温乾湿サイクルによる樹脂の引張強度に与える影響はほとんどないが、破断まで最大変形量を向上させることが明らかにした。

## 6. 謝辞

本研究は、九州建設技術管理協会(研究代表者:楊沐野)およびJSPS科研費JP19K15074(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) 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.
- 6) Muye Yang\*, Jiajing Xie, Shigenobu Kainuma, Weijie Liu. Improvement in bond behavior and thermal properties of carbon fiber-reinforced polymer strengthened steel structures, *Composite Structures*, 278, pp: 114704, 2021.
- 7) 田村勇太, 木村文信, 山口英二, 名倉尚丈, 梶原優介. プラスト処理を利用した金属/樹脂直接接合における処理面性状と接合強度の相関, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2016, 2016S巻, 2016年度精密工学会春季大会, セッションID P45, p: 903-904.
- 8) Kim, A., Kainuma, S., Yang, M.: Surface characteristics and corrosion behavior of steel substrate treated by abrasive blasting. *Metals*, Vol.11, pp: 2065, 2021.
- 9) Gent, A. N. and Lai, S. M.: Adhesion and autohesion of rubber compounds: effect of surface roughness, *Rubber Chemistry and Technology*, 68(1), pp: 13-25, 1995.
- 10) Heshmati M, Haghani R, Al-Emrani M.: Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art. *Composites Part B: Engineering*, 81, pp: 259-275, 2015.
- 11) Xie, JJ., Yang, M. and Kainuma, S.: Effect of epoxy resin degradation on the adhesion strength of CFRP-steel joint. 鋼構造年次論文報告集, Vol.30, pp: 181-188, 2022.
- 12) Oliveira, MS., da Luz, F. S., Pereira, A. C., et al.: Water immersion aging of epoxy resin and fique fabric composites: dynamic-mechanical and morphological analysis. *Polymers*, 14(17), pp: 3650, 2022.
- 13) Yu, T., Fernando, D., Teng, J. G., Zhao, X. L.: Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), pp: 2279-2289, 2012.