

(18) VaRTM法により成形接着された鋼・CFRPダブルストラップ接着強度に及ぼす表面処理方法の影響

樋口 彰悟¹・宮阪 裕一¹・山崎 陽祐¹
三枝 玄希²・松井 孝洋³・松本 幸大⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学 工学研究科 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: {higuchi.shogo.rr, miyasaka.yuichi.yz, yamazaki.yosuke.cg} @tut.jp

²正会員 呉工業高等専門学校 建築学分野 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2丁目2-11)

E-mail: g-mieda@kure-nct.jp

³正会員 東レ(株) ACM技術部 主席部員 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

⁴正会員 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: matsumoto.yukihiko.jp@tut.jp

近年、鋼構造物の補修・補強工法として、鋼材と同等以上の弾性係数、強度を有し、軽量のCFRPの接着補強の工法が提案されている。その中でも、多積層・広範囲成形が容易であり、高い繊維体積含有率と安定した成形品の機械的性質が望め、施工期間の短縮化が期待できるVaRTM法を応用したCFRP材の成形接着による補強法の研究開発が行われている。断面欠損部を有する鋼材にVaRTM接着成形による補強法を適用した場合、鋼材の塑性変形に対してCFRP材の変形が追従できずに剥離が発生・進展し、鋼材の断面欠損部まで剥離が進展すると破断に至る。そのため、CFRP材の剥離が遅延できると、補強性能が向上すると考えられる。本論文では、表面処理方法、接着層、および、定着長を変数としてVaRTM法により成形接着された鋼・CFRPダブルストラップ接合部の引張試験を行い、接着層の強度・延性評価、および、接着層の特性が力学挙動に及ぼす影響について考察した。

Key Words: CFRP, VaRTM, Double-strap, Bonding strength, Steel surface treatments

1. 研究背景・目的

近年、高度経済成長期に建設された橋梁などの老朽化が進み、これらの延命化・長寿命化が望まれている^{1,2)}。そこで、炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 以下、CFRP)の接着補強の工法が提案されている。CFRPは軽量でありながら鋼材と同等以上の弾性係数・強度であるという特性を持つことから、構造物の重量増加を抑制した補強が可能である。また、CFRPを用いた補修・補強方法として、多積層・広範囲成形が容易であり、高い繊維体積含有率と安定した機械的性質が期待できる真空樹脂含浸成形法(Vacuum assisted Resin Transfer Molding: 以下、VaRTM法)を応用したCFRPの成形接着

による補強法の研究開発が行われている^{3,4)}。断面欠損を有する鋼材にCFRPの接着補強を行い、断面欠損部で十分に補強が可能であると、終局時には非補強部の鋼材の降伏、及び塑性変形が生じ、CFRPが鋼材の塑性化に追従できずCFRPは端部から剥離が生じる。そして、定着端部からの剥離が進展し、鋼材の断面欠損部に達すると鋼材の破断が生じる。そのため、CFRPの剥離を遅延可能であると、耐力の向上だけでなく構造物の塑性変形能力や靱性の向上といった補強効果に期待ができる。こうしたことから、鋼材とCFRPとの接着層がCFRPの剥離に与える影響について研究が行われており、接着層に高強度接着剤を使用することで接着強度が安定し、塑性変形による剥離の遅延が可能であることが示されている⁵⁾。

CFRP を用いて鋼材の接着補強を行う際、鋼材表面のブラスト等の下地処理が必要である。表面処理には、現場において適応可能なディスクグラインダや簡易なブラスト処理が可能であるブラスト面形成動力工具が使用されていることが想定される。既往研究では、ブラスト面形成動力工具を使用した表面処理によって、CFRP の接着強度の評価が行われてきた^{3,6)}。しかし、従来使用されてきた、ワイヤー式ブラスト面形成動力工具(以下、ワイヤー式)に加え、処理ユニットにブレードを搭載したブレード式ブラスト面形成動力工具(以下、ブレード式)が開発され、表面処理方法の選択肢が増えている。表面処理工具により、マクロ的・ミクロ的に表面処理動態は変化すると考えられるが、それらが接着強度に及ぼす影響は接着接合による補修補強において極めて重要であることから、表面観察や表面状態の定量化、強度評価結果データの蓄積が必要であると考えられる。

本研究では、鋼材の表面処理方法、及び、接着層がCFRP を成形接着した鋼材の補強性能・延性性能に与える影響を明らかにすることを目的として、VaRTM 法により成形接着された鋼・CFRP ダブルストラップ接合部の引張試験を行った。その結果から、接着層の強度・延性評価、及び、接着層の特性が力学挙動に及ぼす影響について考察した。本論文ではその結果について報告する。

2. 試験概要

本研究では、図-1 に示すように既往研究と同様、VaRTM 法により成形接着された鋼・CFRP ダブルストラップ接合部の引張試験を実施した。幅 32mm×厚さ 9mm の鋼材に事前に直径 26.5mm の孔部を設けており、CFRP の成形接着後に孔部側面を切断することで、ダブルストラップ接合としている。孔部は試験体成形時に障害となるため、成形前にエポキシ樹脂を充填する。孔部中心部周辺 30mm はマスキング処理を施し、CFRP が接着せず、任意の定着長となるようにしている。また、鋼材と

CFRP の軸剛性が 1:0.5 となるように幅 25mm の中弾性炭素繊維を片側当たり、6層積層した。なお、CFRP 端部の応力集中を緩和させるため定着長 40mm、80mm の試験体では 5mm/layer とし、定着長 150mm の試験体では 10mm/layer となるようにテーパを設けた。試験体を使用した鋼材、及び、炭素繊維の物性を表-1、表-2に示す。含浸接着樹脂にはエポキシ樹脂(AUP40T1)を用いている。

試験体変数は表-3 に示すように、表面処理方法 2 種類、接着層樹脂 2 種類、定着長 3 種類の計 12 種類である。接着層樹脂にはプライマーとして特殊ゴムを配合し、延性に優れたエポキシ樹脂系高強度接着剤 (E258R) を使用し、プライマーの有無を変数としている。また、接着層基材として、チョップドガラス繊維マット(以下、GCM)を使用している。表面処理方法についてはワイヤー式、及び、ブレード式とし、これらを変数とした。ワイヤー式の実験データは既往研究⁹⁾の結果を引用する。定着長については、本研究では、鋼材の降伏前の剥離、及び、降伏後の塑性変形による剥離に関して評価を行うため 3 種類の定着長を用意した。定着長は片側(図-1 の左側)のみ変更しており、反対側の定着長は 150mm で統一した。

既往研究において、ワイヤー式を用いた接着層の評価が行われている。よって、本研究ではブレード式を用いた試験体を各 2 体作成した。

表-1 鋼材の物性値(実験値)

鋼種類	降伏点[MPa]	引張強さ[MPa]
SS400	314	441

表-2 炭素繊維の物性値(カタログ値)

	目付量 [g/m ²]	厚さ [mm]	弾性係数 [GPa]	引張強さ [GPa]
UM46-40P	400	0.217	440	2.5

表-3 試験変数

接着層樹脂	表面処理方法	定着長[mm]
(1) AUP40T1	(1) ワイヤー式 ⁹⁾	(1) 40
(2) E258R	(2) ブレード式	(2) 80
		(3) 150

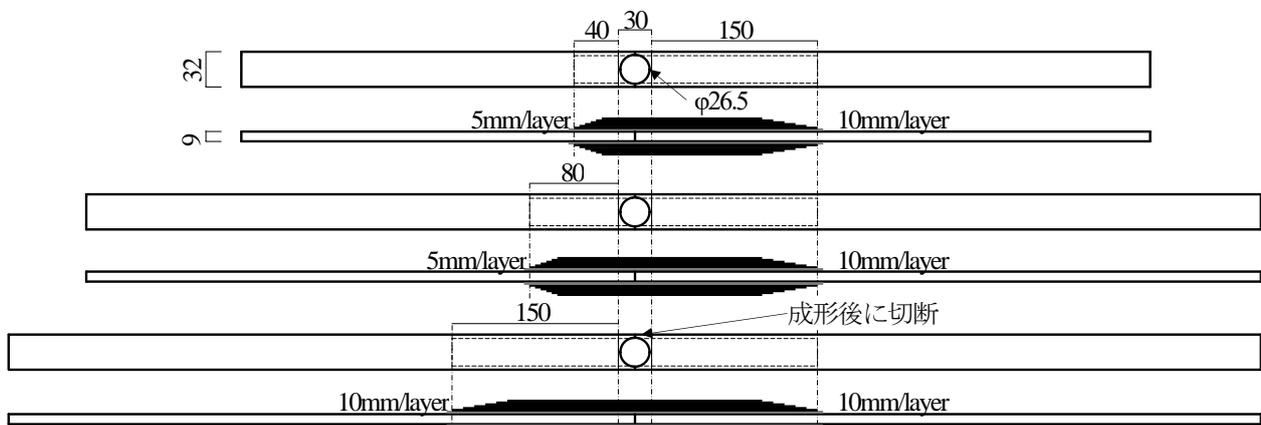


図-1 試験体概要[単位：mm]

図-2 に試験名称を示す。AGAB40-1 は接着層樹脂に AUP40T1, 接着層基材に GCM, 含浸樹脂に AUP40T1, 表面処理にはブレード式を使用した, 定着長が 40mm である試験体である。

図-3 には各接着層樹脂の試験体作成手順を示している。なお, VaRTM 成形接着による補強法の性能の安定性を確認するために, 図-4 に示すように各試験変数で 1 体ずつ(計 12 体)を同時に作成した。

試験は万能試験機による準静的载荷とした。

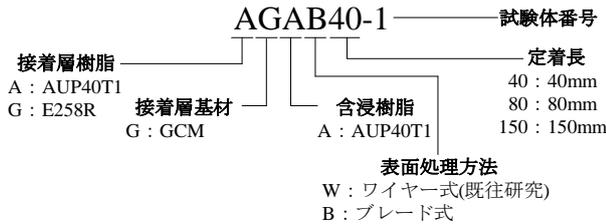


図-2 試験体名称

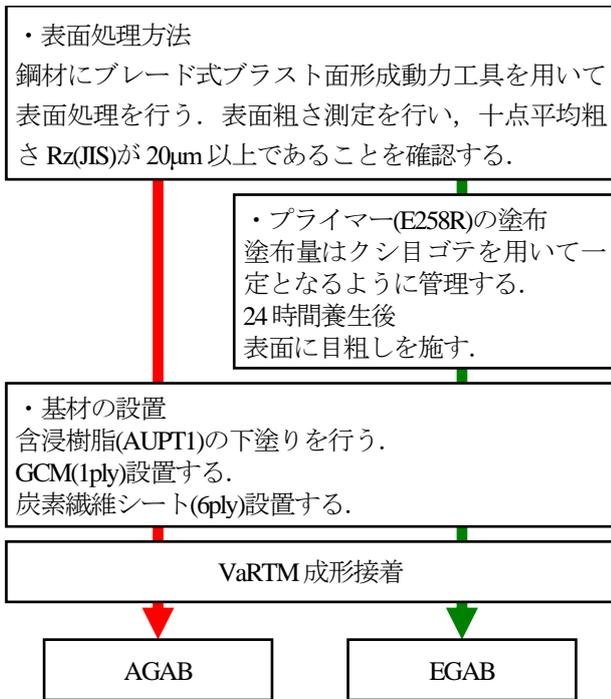


図-3 試験体作成手順



図-4 試験体作成の様子

3. 表面処理方法

本研究では, 図-5 に示すようなワイヤー式, 又は, ブレード式の工具を用いて表面処理を行う。各工具によって処理された面の拡大写真を図-5 に併せて示している。ワイヤー式は回転するワイヤーがアクセラバーによって, 一度受け止められ, 加速度をつけて処理面に衝突する仕組みとなっており, 図-5(d) (e)からもわかるように処理面にワイヤーによる細長い傷がつく⁹⁾。一方ブレード式は主軸と副軸で構成されている。副軸には鋸刃様の形状をしたブレードが複数枚搭載されており, 副軸との間には遊びが設けられている。主軸でユニット全体を回転させながら副軸のブレードの遠心力を最大限高めることで効率よく衝撃力が作用し, 鋼材表面の処理を行う。また, ブレード式の凹凸は図-5(d) (e)からもわかるようにワイヤー式に比べ一つ一つの凹凸が大きい。

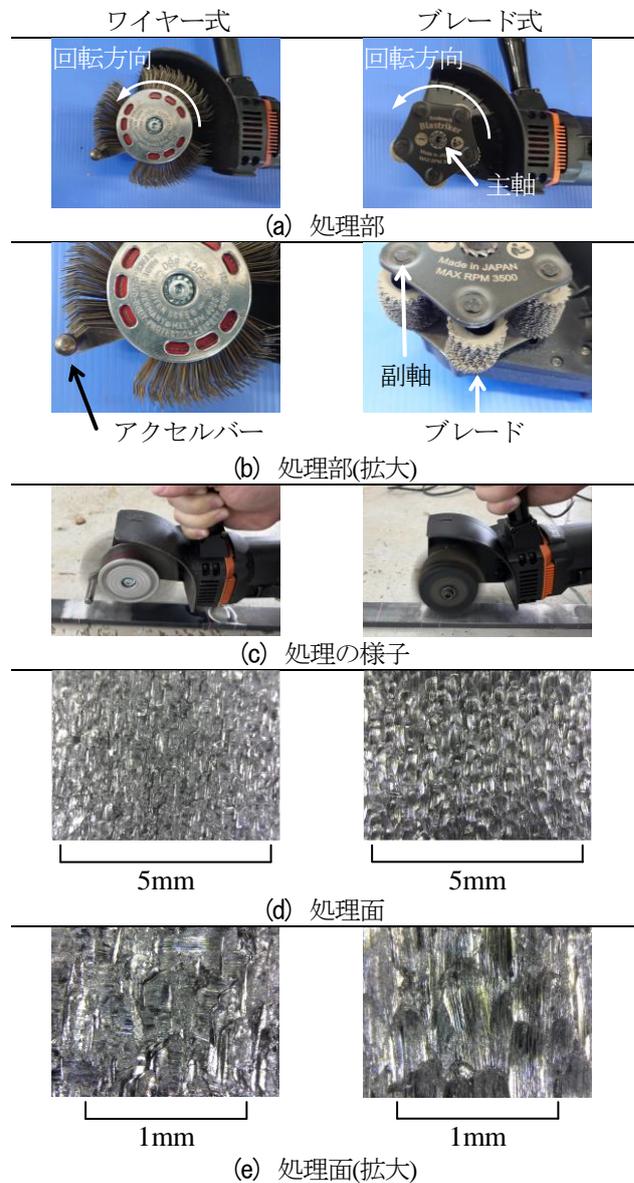


図-5 使用した工具

次に、表面処理後の鋼材の表面形状を得るために計測用顕微鏡を用いて三次元表面形状解析を行った。表面の測定範囲は4.56[mm](x軸)×3.42[mm](y軸)であり、計測ピッチは1.29[μm]、計測点は3535×2661である。図-6(a)~(c)に各表面処理における3次元、及び、2次元の鋼材表面形状を示している。図-5に示した処理面の写真からもわかるように、ワイヤー式の処理面は急峻な表面形状となっており、対してブレード式は緩やかな傾斜をもつ表面形状となっている。また、ワイヤー式はy軸方向の凹凸が支配的であり、ワイヤーの回転方向と対応している。図-6(b)(c)をみると軸方向によって断面曲線の起伏の密度が異なる。また、断面曲線の最大点と最小点の差はワイヤー式は67.04[μm]であり、ブレード式は68.77[μm]である。したがって、これらの処理方法による凹凸の深さはおおむね等しい。

次に、三次元表面形状解析の結果から十点平均粗さRz(JIS)を評価したものを図-6(d)に示す。両処理方法において、y軸に比べてx軸のほうがRz(JIS)が大きい。度数分布の形状から、ピークで最も度数が高くなり、両端に向けて左右対称に減少する傾向となった。x軸方向をみると両者47.5~50[μm]にピークが存在する。また、ワイヤー式に比べ、ブレード式は頻度分布の幅が大きく、Rz(JIS)が分散する。Rz(JIS)では表面処理による断面曲線の高さの評価であり、表面処理の尖り度は評価できない。そこで、尖り度も含めて評価可能であるウェンゼル粗さ係数(r)による評価を行う。ウェンゼル粗さ係数とは公称表面積(A₀)に対する実表面積(A₁)の比率であり、接着強度とウェンゼル粗さ係数(r)は強い相関があることが示されている⁷⁾。各処理方法におけるウェンゼル粗さ係数の頻度分布を図-6(e)に示す。図-5(a)より、ワイヤー式による処理面は急峻な表面形状となっていることからわかるようにウェンゼル粗さ係数はブレード式に比べ、ワイヤー式のほうが大きく示している。よって、ブレード式に比べワイヤー式のほうが高い接着強度を有することが推測される。ただし、ウェンゼル粗さ係数は面としての評価であり、方向による差異を考慮していない。そこで、各軸の切断面における公称辺長さ(l₀)に対する断面曲線総長さ(l₁)の比率を断面曲線係数(n)と呼称し評価を行う。断面曲線係数は、ウェンゼル粗さ係数と同様、断面曲線の尖り度も含めて可能であると考えられる。各処理方法における表面曲線係数の頻度分布を図-6(f)に示す。ワイヤー式は軸方向によってピークが異なり、分布の幅が大きい。対して、ブレード式は両軸方向1.01付近に高いピークが存在するこれらのことから、ワイヤー式の断面曲線係数は高いが、処理方向によってばらつきが生じ、ブレード式の断面曲線係数は低いものの、軸方向によるばらつきが小さい。

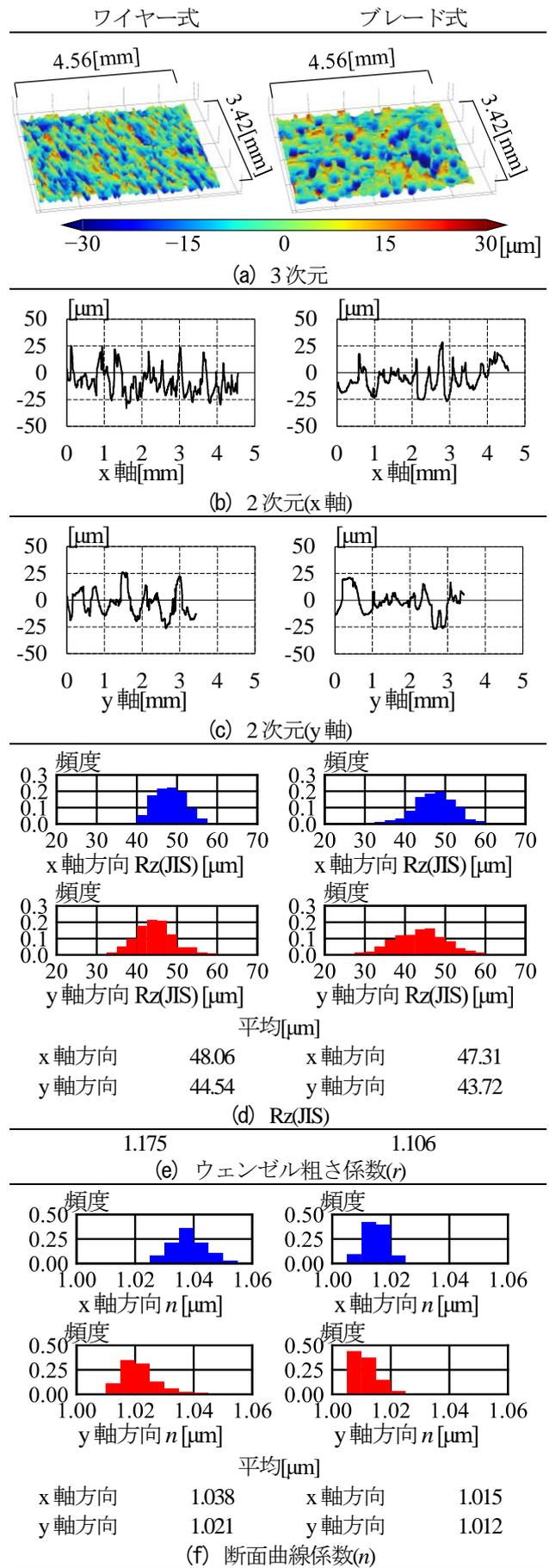


図-6 三次元表面形状解析結果

4. 実験結果

(1) 荷重-クロスヘッド変位関係

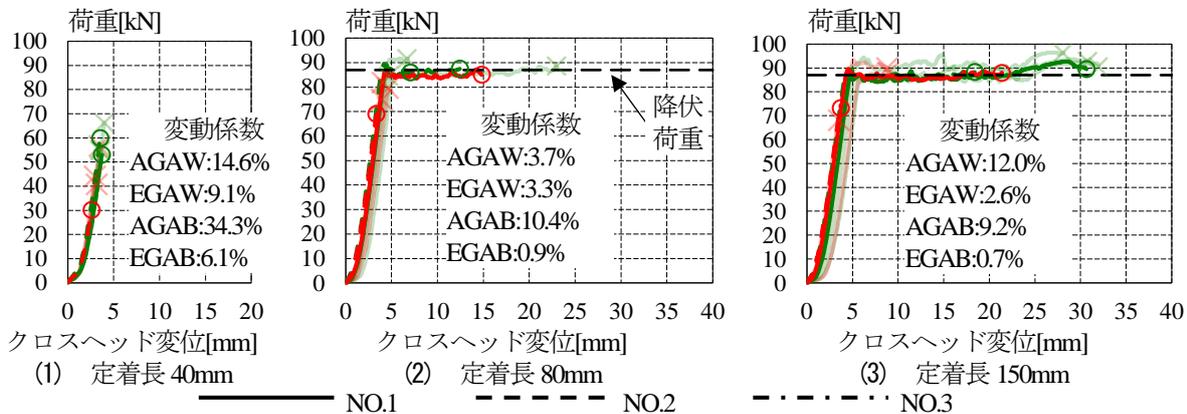
図-7(a)に引張試験から得られた荷重-クロスヘッド変位を定着長ごとに示す。図中の×はワイヤー式試験体、○はブレード式試験体の破断点を示す。また、EGAB40-1はクロスヘッド変位の計測が行えていない。定着長80mm、及び、150mm 図中には、鋼材の降伏荷重を示している。図中には試験変数ごとの破断荷重の変動係数を示している。

定着長40mmのすべての試験体では、破断荷重が鋼材の降伏荷重より低い。これは、接着耐力が小さいため、早期に剥離が生じる脆性的な破壊形態である。対して、定着長80mm、150mmの試験体においては、降伏荷重付近(85~90kN)で荷重が向上せず、変形のみが進展している試験体が存在する。これは、非補強部の鋼材が降伏していることを示している。塑性変形が生じた後に破断した試験体は、接着耐力は十分であるが、鋼材の塑性変形に接着層が追従できず剥離が生じる破壊形態である。また、これらの破壊形態は両表面処理方法で確認でき、本研究においては表面処理方法による破壊形態の大きな違いがないことがうかがえる。

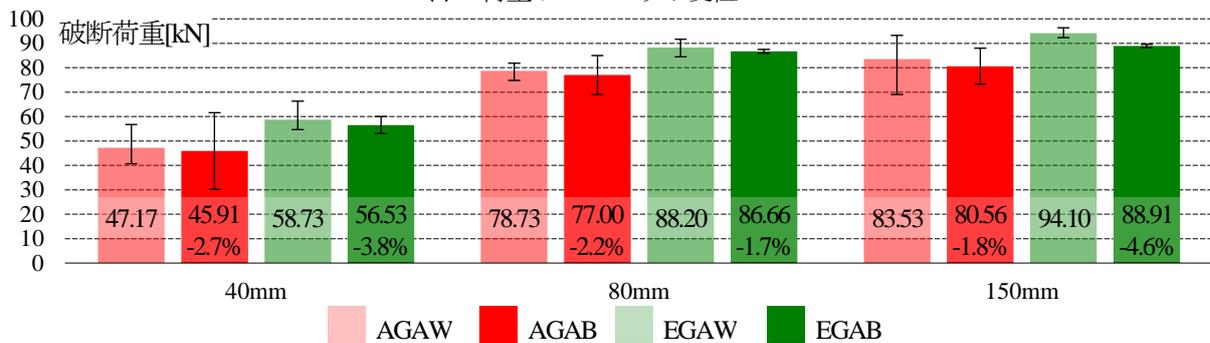
破断荷重の変動係数を見ると、定着長40mmの試験体が最も大きく、定着長が大きくなるにつれて破断荷重の変動係数は小さくなる。また、非補強部の鋼材が降伏した試験体では、荷重が降伏荷重付近で停滞するため、変動係数が低く安定した破断荷重となっている。高強度接着剤をプライマーとして塗布した試験体は、塗布しない試験体と比べて、破断荷重が大きく、変動係数が低く安定している。これらの変動係数の傾向は両表面処理方法で確認できる傾向であり、本研究における表面処理方法による影響がないことがうかがえる。

また、AGAW80ではすべての試験体で降伏荷重を迎える前に剥離が生じたが、AGAB80では降伏荷重を迎えた後、剥離が生じた試験体が存在する。AGAW150の塑性変形による破壊形態となった試験体では降伏後すぐに剥離が生じる傾向があったが、AGAB150では、降伏後早期に破断せず、鋼材の塑性変形に追従して破断に至った。また、EGAW150では、すべてが鋼材の塑性変形による破壊形態となったが、これは、EGAB150でも同様の結果となった。

図-7(b)に引張試験から得られた破断荷重の平均値、及び、相対誤差を示す。ワイヤー式と比べてブレード式は、剥離荷重が低い。これは、図-6(e)に示したようにワイヤー式と比べてブレード式は、ウェンゼル粗さ係数が低いことが要因の一つだと考えられる。しかし、相対誤差はいずれも5%以下であり、剥離荷重は大きく減少しない。



(a) 荷重-クロスヘッド変位



(b) 剥離荷重
図-7 試験結果

(2) 破断後の接着層

図-8 に各試験体の破断後の接着層の様子を示す。すべての試験体で鋼材と CFRP の剥離によって接合部が破断した。試験後の接着層の様子から、AGA については、GCM 層の層間剥離、及び、鋼材と GCM 層の界面剥離が、EGA については、GCM 層の層間剥離、及び、プライマーと GCM 層の界面剥離が生じた。これらの破断後の接着層の傾向はワイヤー式の試験体でも同様の結果が得られたため、本研究における表面処理方法による破断後の接着層の影響がないことがうかがえる。

EGAB80-2 では、鋼材が降伏しており、図-1 の右側の定着長 150mm 側からも剥離が進展しているため、このような破壊が生じたと考えられる。

(3) 荷重-ひずみ関係

図-9 にひずみを計測した位置と得られた荷重-ひずみ関係を定着長ごとに示す。AGAB, EGAB の試験体番号 1 にのみ、ひずみゲージを設置した。ひずみを計測した位置は、孔上部の CFRP、孔部中心から 35mm の位置の CFRP、及び、鋼材側面、定着端部から 175mm の位置の鋼材軸部である。孔部中心から 35mm の位置において、CFRP と鋼材のひずみを測定したため、それらを合わせて示している。また、図中には対応する剛性の計算値を示している。

孔上部の荷重-ひずみ関係は全ての定着長でおおむね計算値と一致している。また、孔部中心から 35mm の位置では CFRP は計算値より大きなひずみを示し、鋼材は計算値より小さなひずみを示している。これは、孔部からの定着長が短いため、ダブルストラップ接合部の CFRP から鋼材に応力伝達が十分できておらず合成断面になっていないためである。ブレード式はワイヤー式に比べ、鋼材の負担割合が大きく合成断面に近い。CFRP、及び、鋼材のひずみは荷重が大きくなるにつれて大きくなり、ピークを迎えた後鋼材のひずみは徐々に減少し、CFRP のひずみは徐々に増加することがわかる。これは、CFRP の剥離によって、CFRP の応力負担が増加し、鋼材の応力負担が減少するためである。また、鋼材部のひずみが最大となる点で CFRP の剥離が開始すると考えると、ワイヤー式の試験体では高強度接着剤を塗布することで、剥離開始荷重が定着長 80mm では 59kN から 76kN へ (28.7%) 向上し、定着長 150mm では 62kN から 79kN へ (27.9%) 向上した。対して、ブレード式では、定着長 150mm では、剥離開始荷重が 69kN から 86kN へ (24.6%) 向上したが、定着長 80mm では剥離開始荷重がともに 78kN であり剥離荷重の向上効果は確認できなかった。剥離開始荷重を比較すると、ブレード式がワイヤー式に比べ、剥離開始荷重が向上している。

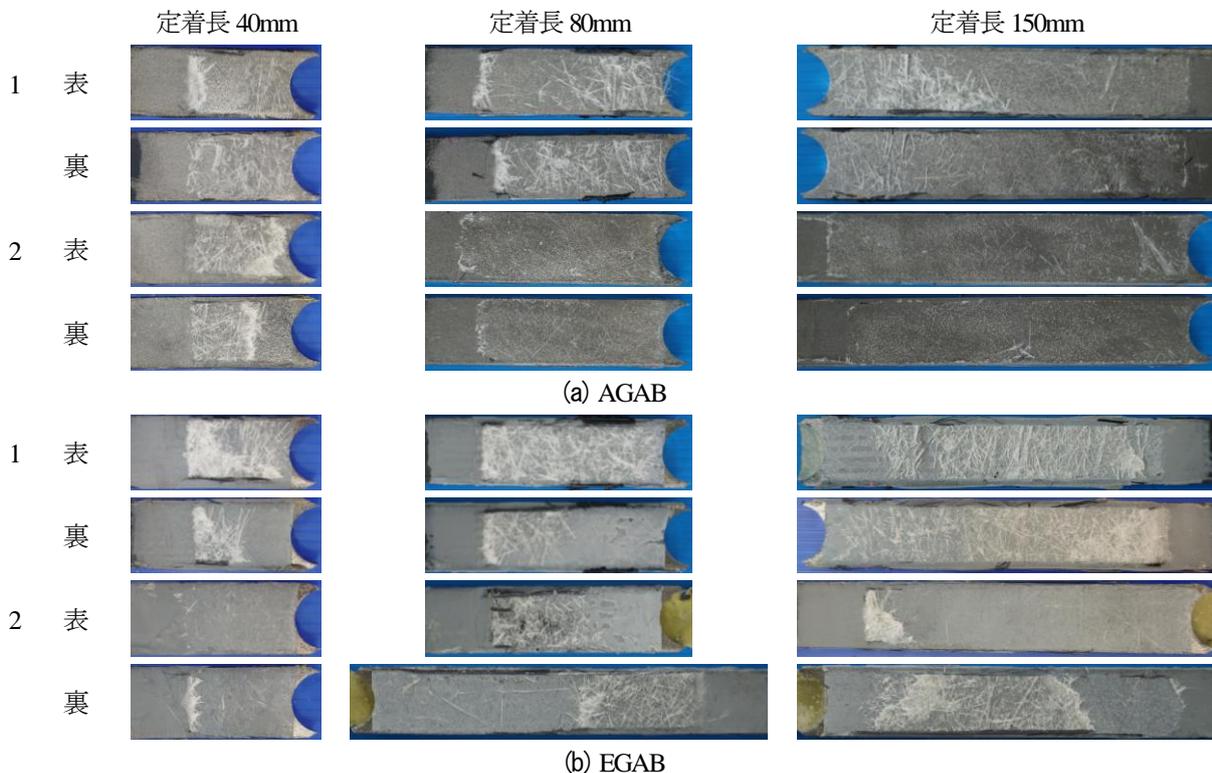


図-8 試験後の接着層

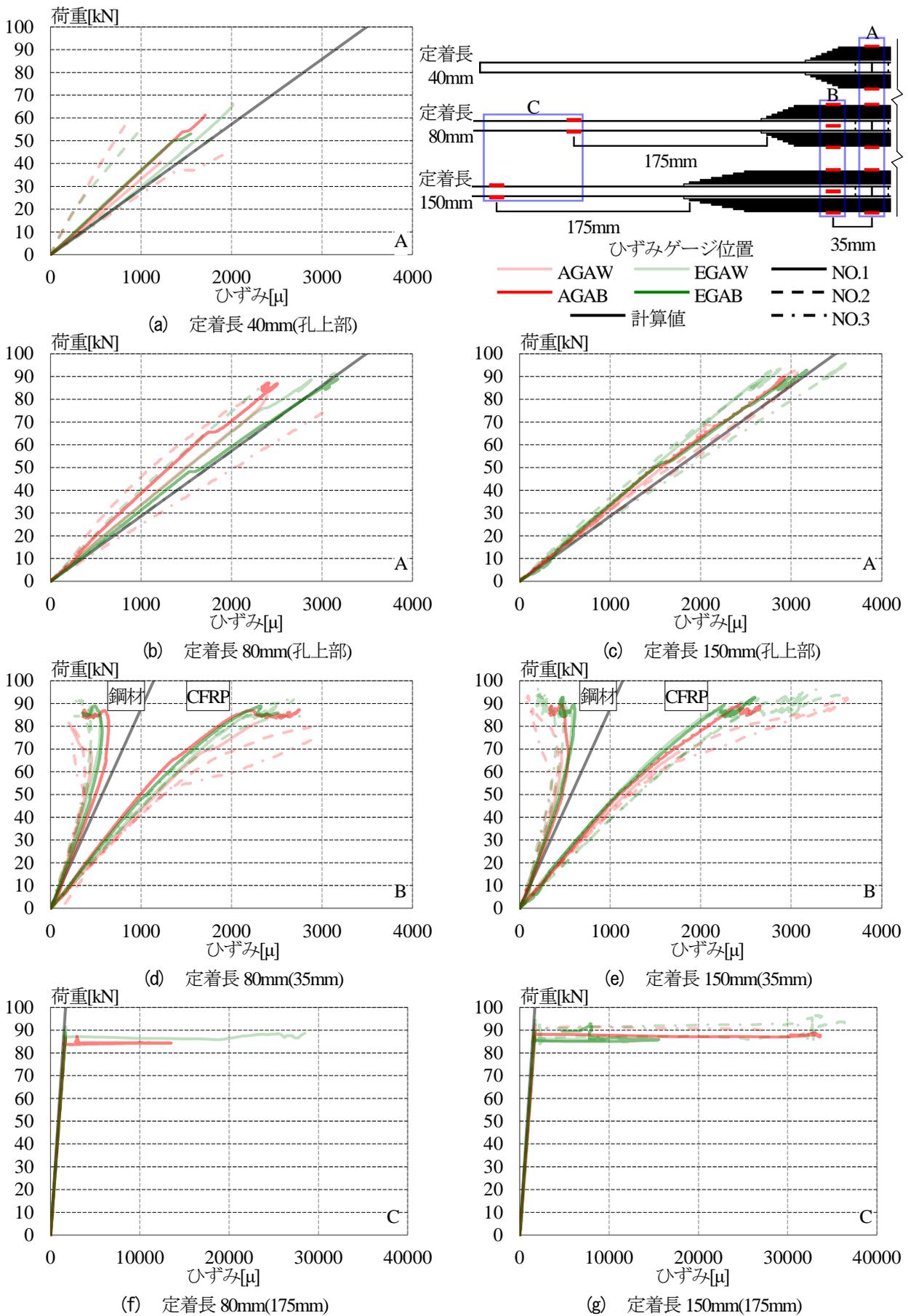


図-9 荷重-ひずみ関係

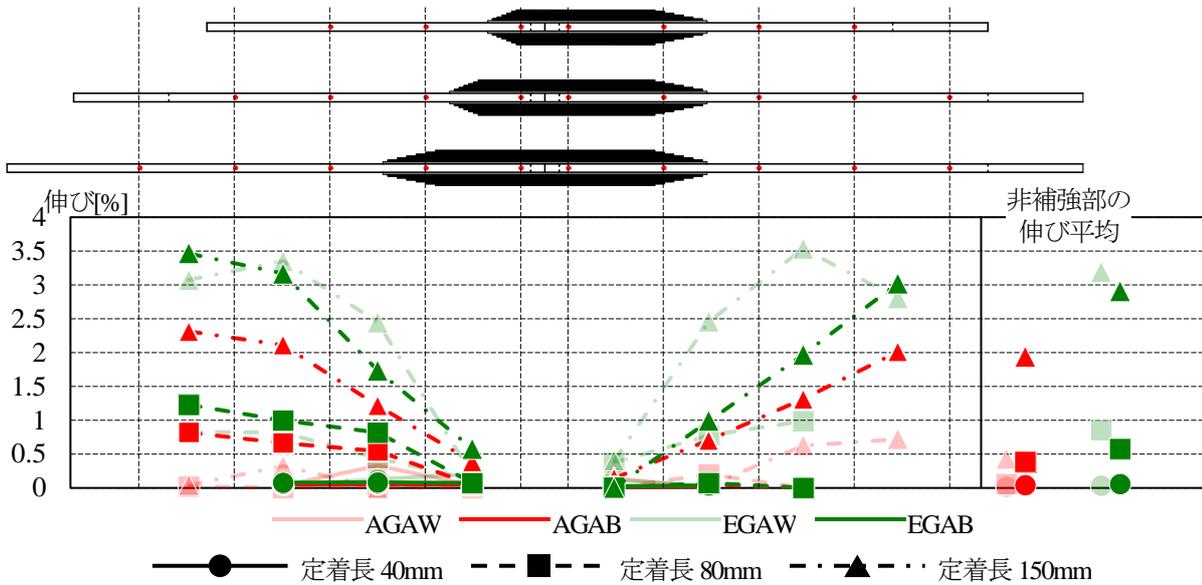


図-10 各標点間の伸び

(4) 試験後の伸び

図-10に各試験変数の試験前と試験後に測定した標点間距離の差から算出した各標点間距離の伸びの平均を示す。また、非補強部の鋼材の伸びの平均値を合わせて示している。図-10から、表面処理方法によらず、定着長さが伸びることで、試験後の伸びが大きくなる傾向が確認できる。また、定着長40mmの試験体では、降伏荷重に達していないこともあり、試験後の伸びはほとんど生じていない。

定着長80mmでは、図-1の右側の定着長150mm側の伸びは生じておらず、定着長80mm側のみで伸びが生じた。定着長150mmの試験体では、両定着長側で伸びが生じた。また、定着長80mm,150mmでは、高強度接着剤をプライマーとして塗布することでCFRPが鋼材の塑性変形による剥離を遅延することがわかる。

鋼材の伸び平均をみると、定着長が長くなることで鋼材の伸び平均が大きくなる。AGAB150では、降伏後早期に剥離せず、鋼材の塑性変形に追従したため、AGAW150に比べ鋼材の伸びが大きくなっている。接着耐力が十分確保されている状態では、ブレード式による表面処理方法であると、高強度接着剤をプライマーとして塗布していない状態は鋼材の塑性変形が2%程度で、高強度接着剤を塗布した場合、3%程度で接着層の剥離が開始すると考えられる。

5. 強度評価

図-11に実験結果から算出した各接着層の強度評価を示す。破壊形態として、接着耐力の不足により生じる場合と鋼材の塑性変形に追従できず剥離する場合の2種類

の破壊形態があるため、接着耐力を向上させても、破断耐力は降伏荷重以上にはならないことが考えられる。そこで既往研究では前者の破壊形態で破断が生じた試験体の破断荷重を最小二乗法による直線で近似し、降伏が荷重に達した時点で一定となる強度評価を行っている。本研究においても同様の評価を行い、表面処理方法が与える影響について調べる。

破線が既往研究によるワイヤー式の評価であり、実線がブレード式による評価である。表面処理方法によらず、プライマーとして高強度接着剤を塗布することで、接着強度が向上する。また、ブレード式を使用することで、高強度接着剤を塗布する試験体の接着強度が約14%向上し、塗布しない試験体では約4%減少する結果となった。これは、EGAB80はすべて塑性変形後の剥離により破断し、強度評価の対象となっていない。対してEGAW80のうち1体は接着耐力不足により破断が生じ、強度評価の対象となっている。よって、定着長80mmの試験体の破壊形態によって強度評価が変化する。EGAB40の破断荷重の平均がEGAW40より小さく、大きな差がないことから、表面処理方法による強度評価の影響がないと考えられる。

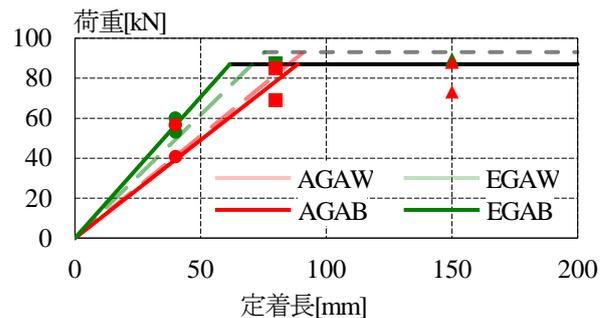


図-11 強度評価

6. まとめ

本研究では、VaRTM法により成形接着された鋼・CFRPダブルストラップ接合部の引張試験を行い、接着層の強度・延性評価、及び、鋼材の表面処理が力学的特性に及ぼす影響について考察した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 同程度のRz(JIS)を示している場合であっても、表面処理方法が異なれば、実表面積が変化する。
- 2) 表面処理が異なる場合でも、Rz(JIS)を十分に確保したとき、接着強度、及び、破壊形態に大きな影響を与えない。
- 3) 接着強度を確保し、高強度接着剤をプライマーとして塗布した場合、表面処理方法によらず、非補強部の鋼材の塑性伸びが約3%でCFRPの剥離が生じる。

今後の課題として、ブレード式の試験体数がワイヤー式に比べ少ないため、試験体数を増やす必要がある。また、各表面処理には新品の刃を使用したがる、劣化した刃を用いた各表面処理方法の評価を今後の展望とする。

謝辞： 本研究の一部は、知の拠点あいち重点研究プロジェクトの支援によって行われた。三次元表面形状解析には、あいち産業科学技術総合センター 杉本貴紀氏の協力を得た。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造レポート09 FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術, 2013.
- 2) 土木学会：複合構造シリーズ09 FRP接着による構造物の補修・補強指針(案), 2018.
- 3) 小林洗貴, 近藤諒翼, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛：真空含浸工法を応用したCFRP接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.5, pp.11_20-II_31, 2017.
- 4) 三枝玄希, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大：真空樹脂含浸工法によって成形接着されたCFRPの接着強度評価, 日本建築学会 構造工学論文集, Vol.66B, pp.195-200, 2020.
- 5) 濱崎瑞生, 三枝玄希, 中本大暉, 松井孝洋, 松本幸大：VaRTM法により成形接着された鋼・CFRPダブルストラップ接合部の力学挙動に及ぼす接着層の影響, 第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 2021.
- 6) 辻良尚, 阿部米雄, 中野正：プリストルブラスターによる素地調整, 日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会 技術資料, 2010.
- 7) Jialing Ou, Yongbo Shao, Chao Huang, Xin Bi: Bond behavior of CFRP sheets-to-steel shear joints with different steel surface treatments, Composite Structures, Vol.322, pp1-16, 2023

(Received August 25, 2023)

EFFECTS OF STEEL SURFACE TREATMENTS FOR BONDED STEEL-CFRP DOUBLE-STRAP CONNECTION WITH VARTM TECHNIQUE

Shogo HIGUCHI, Yuichi MIYASAKA, Yosuke YAMAZAKI,
Genki MIEDA, Takahiro MATSUI and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, the bonding method of CFRP has been proposed as a method of repair and reinforcement of steel structures. CFRP is light weight and has the corresponding stiffness and strength as steel. Therefore, it is possible to reinforce the structure without increasing its weight. In addition, research and development of a reinforcing method by molding and bonding CFRP has been carried out by applying the vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM) method. This method is expected to shorten the construction period due to the ease of molding multiple layers and wide areas, the high fiber volume content, and the stable mechanical properties of the molded products. In this study, tensile tests were carried out on steel-CFRP double joints by the VaRTM method to clarify the effect of the steel surface treatment method on the adhesive strength.

As the result, the micro shapes and their quantitative evaluation of the treated surfaces are shown which are made by the two types of surface treatment machines. On the other hand, the bonding strength is not significantly affected by the machines if the roughness level is controlled certainly.