

(20) 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

濱崎 瑞生¹・三枝 玄希²・中本 大暉¹・松井 孝洋³・松本 幸大⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学 大学院 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: {hamasaki.mizuki.ay, nakamoto.daiki.md} @tut.jp

²正会員 呉工業高等専門学校 助教 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 准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.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率、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、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 connectin, Bonding strength, Debonding

1. はじめに

近年、鋼構造物の補修・補強工法として、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: 以下、CFRPとする) の接着補強の工法が提案されている^{1,2)}。CFRPは軽量ありながら鋼材と同等以上の剛性・強度である特性を有していることから、補強後の構造体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真空樹脂含浸成形法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding: 以下、VaRTM法とする) 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^{3,4)}。断面欠損部を有す

る鋼材にCFRP材の接着成形による補強を適用した場合、断面欠損部の耐力が十分補強できれば、非補強部鋼材の降伏、および、塑性変形が生じ、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ことが考えられる。そのため、CFRPの剥離を遅延させることができると、さらなる補強性能が期待できる。

そこで本研究では、CFRP材を成形接着した鋼材の補強性能・延性評価を明らかにすることを目的とし、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、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。本論文ではその結果について報告する。

2. 試験体概要

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実施した。試験体概要を図-1に示す。32mm×9mm鋼材に事前に直径26.5mmの孔部を設けており、CFRP材を成形接着した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。また、孔部中心部の30mmはマスキング処理を施しており、CFRP材が接着しないようにしている。CFRP材の積層数は片側6ply（鋼材とCFRP材の軸剛性比が1：0.5）、補強幅は25mmとした。なお、CFRP材の端部は応力集中が発生することが考えられるため、定着長40mm、80mmの試験体は端部で5mm毎に、定着長150mmの試験体は10mm毎に1plyずつ減少するテーパを設けている。試験体作成に使用した鋼材、および、炭素繊維の物性を表-1、表-2に示す。含浸樹脂はエポキシ樹脂（AUP40T1）を使用している。試験体は各試験変数で3

表-1 鋼材の物性値（ミルシート値）

鋼ロット	鋼種	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)
A	SS400	327	427
B		349	447

表-2 炭素繊維の物性値（カタログ値）

	目付量 (g/mm 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（接着層樹脂+接着層基材）	定着長(mm)
1) AUP40T1+GCM	1) 40
2) E258R+GCM	2) 80
3) E258R	3) 150

体ずつ作成しており、2体はAの鋼材を、1体はBの鋼材を使用している。

試験変数は表-3に示すように、接着層3種類と定着長3種類の計9種類である。接着層は接着層樹脂、および、接着層基材からなる。接着層樹脂にはプライマーとして、鋼構造の接着接合に用いられる²⁾エポキシ樹脂系接着剤（E258R）を、接着層基材としてチョップドガラス繊維シート（以下、GCMとする）を使用し、この組み合わせを試験変数としている。定着長については、本研究では鋼材の降伏前の剥離、および、降伏後の塑性変形による剥離に関してそれぞれ評価を行うため、3種類の定着長を設定した。試験変数の定着長は片側（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。定着長40mm、および、80mmの試験体では図-1の左側で剥離破壊が生じることを想定している。試験体名称は図-2に示すように、それぞれ接着層樹脂、接着層基材、含浸樹脂、および、定着長を示しており、AGA40は接着層樹脂にAUP40T1、接着層基材にGCM、含浸樹脂にAUP40T1を使用し、定着長が40mmの試験体である。

図-3に接着層ごとの試験体作成手順を示す。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1体ずつ（9体）を同時に成形し、それを3回に分けて行うことで各試験変数に対して3体の試験体を作成した。

試験は万能試験機による準静的載荷とした。

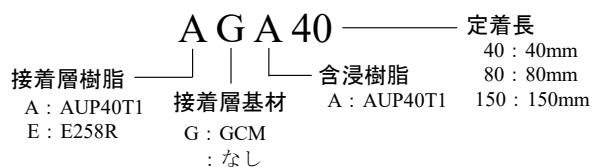


図-2 試験体名称の説明

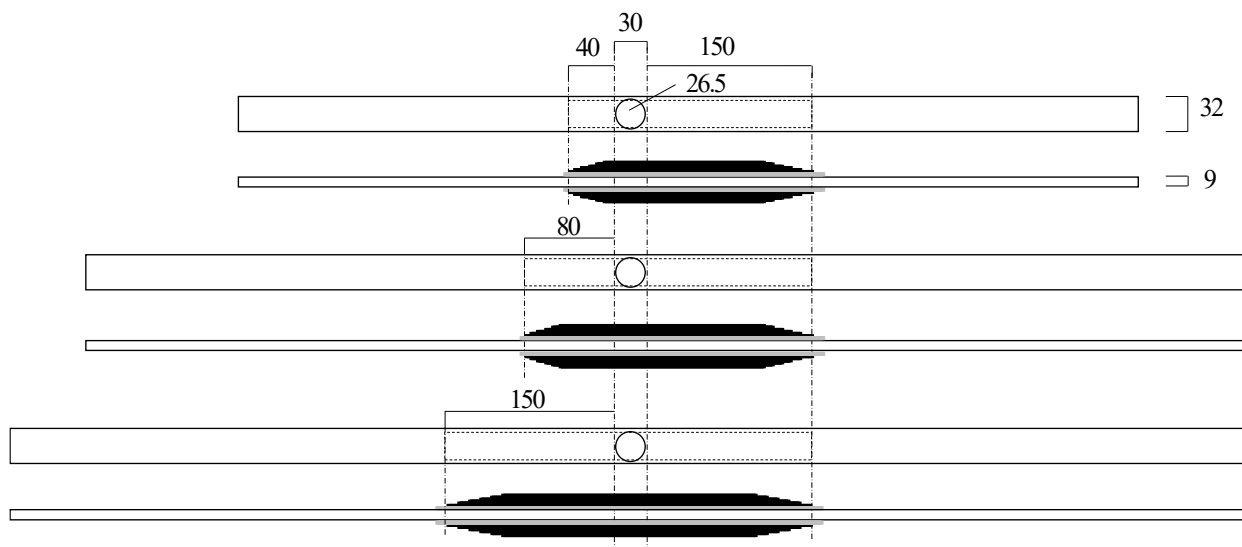


図-1 試験体概要 [単位:mm]

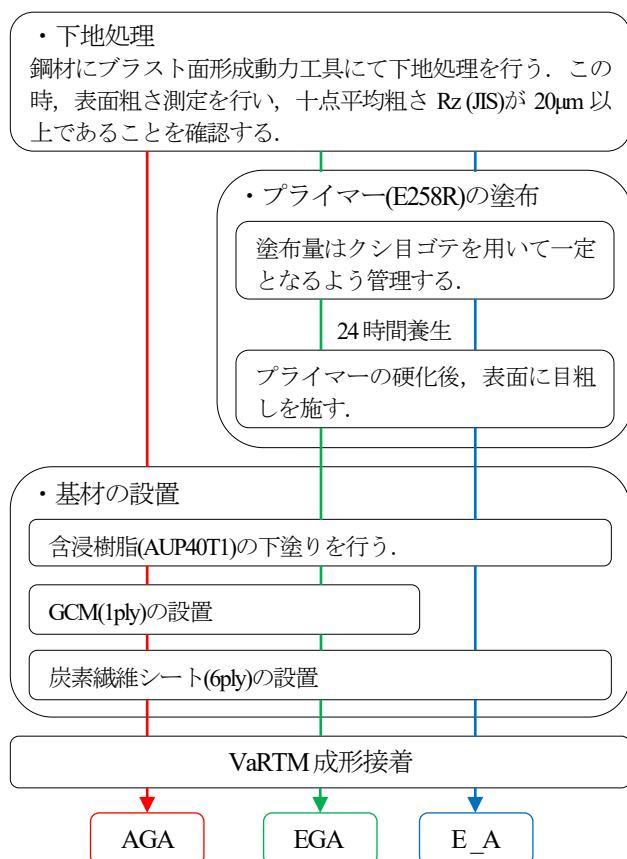


図-3 試験体の作成手順

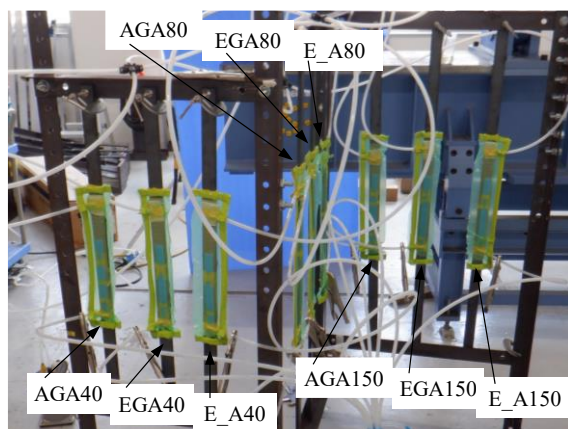


図-4 試験体の作成状況

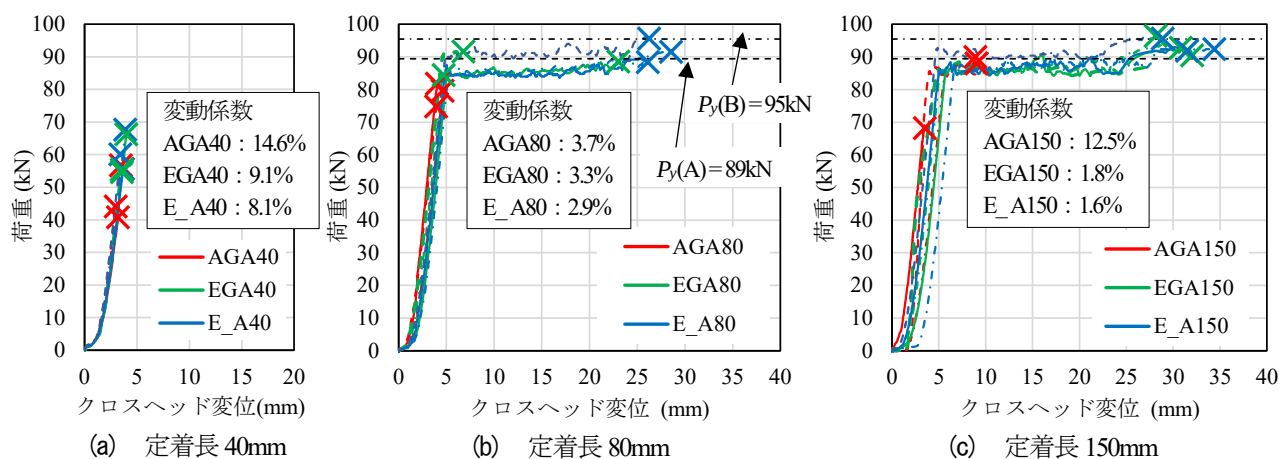


図-5 荷重-クロスヘッド変位関係

3. 実験結果

(1) 荷重-クロスヘッド変位関係

すべての試験体で鋼材とCFRP材の剥離によって接合部が破断した。図-5に引張試験から得られた荷重-クロスヘッド変位関係を定着長ごとに示す。図中の×印は各試験体の破断点を示している。また、試験変数ごとに算出した破断荷重の変動係数を図中に示している。定着長80mm, および, 150mmの図中には, 鋼材の降伏応力と実測寸法から算出した降伏荷重 P_y (鋼ロット)をそれぞれ示している。

定着長40mmの試験体では, すべての試験体で破断荷重が鋼材の降伏耐力より低いことがわかる。これは, 接着耐力が小さいために破断が生じる脆性的な破壊形態である。対して, 定着長80mm, および, 150mmの試験体において降伏荷重付近(85~90kN)で荷重が上昇せず, 変形のみ生じている試験体があるが, 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に剥離が生じ, 破断に至る破壊形態であった。

定着長40mmの試験体では破断荷重の変動係数が大きく, 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傾向がみられる。特に非補強部の鋼材の降伏後に破断が生じた試験体については破断荷重が降伏荷重に達しており, 荷重が上昇していないため破断荷重が特に安定している。AGA150については早期に破断した試験体があり, 変動係数が大きくなっている。また, AGA, EGA, E_Aの順に変動係数が低くなっており, 破断荷重が安定している傾向も確認できる。

表-4に各試験体の破断荷重, および, 接着強度を示す。接着強度については定着長40mm, 80mmの試験体を対象に破断荷重の半分をCFRP材の接着面積(補強幅×定着長)で除することで算出している。EGA80, および, E_A80では塑性変形による破壊形態であるため, 接着強

度は過小評価しているが、参考のため括弧内に示している。また、表-4には各試験変数ごとに破断荷重の平均値を示している。鋼材の異なる試験体があるが、比較のために平均値を算出している。

破断荷重に多少のばらつきはあるが、成形ロットごとの破断荷重に偏りがないことからVaRTM成形接着による補強法では安定した耐力を有していることがわかる。

接着強度は接着層の種類に関わらず、定着長が長くなるにつれて低くなる傾向が確認できる。また、定着長40mm、80mmのいずれも接着強度はE_Aが最も大きく、EGA、AGAの順に小さくなっており、AGAとEGAの接着強度の差はEGAとE_Aの接着強度の差に比べて大きいことからE258Rをプライマーとして塗布することにより接着強度が向上していることがうかがえる。

定着長が40mmの試験体では、破断時の荷重はAGA40、EGA40、E_A40の順に大きくなっていることがわかる。定着長80mmの試験体については接着層の種類で破壊形態の傾向が異なる結果となった。AGA80の破壊形態は、定着長40mmの試験体と同様に接着耐力の不足によるものである。EGA80では破断時のクロスヘッド変位のばらつきが大きく、降伏荷重まで達していない試験体と塑性変形が生じた後に破断が生じた試験体が混合していることから、EGAでは定着長が80mm付近で接着耐力不足による破壊形態と鋼材の塑性変形による破壊形態の境界があると考えられる。E_A80では、3体すべてが鋼材の塑性変形による破壊形態となった。定着長150mmの試験体では、ほとんどの試験体で鋼材が降伏しているが、AGA150では1体のみ低い荷重で破断し、鋼材は降伏していない。また、EGA150、および、E_A150では同程度の塑性変形時に破断が生じているのに対して、AGA150では降伏後早期に破断が生じている傾向がみられた。

(2) 破断後の接着層

図-6に各試験体の破断後の接着層の様子を示す。図-6の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、および、鋼材とGCM層の界面剥離が、EGAについてはGCM層の層間剥離、および、鋼材とプライマー層の界面剥離が、E_Aについては、CFRP層の層間剥離、プライマー層とCFRP層の界面剥離、および、鋼材とプライマー層の界面剥離がそれぞれ確認できる。破断荷重が低いAGA150-1のみ鋼材とGCM層の界面剥離となっていることがわかる。また、定着長80mmの試験体のうち、E_A80-2のみ試験変数の定着長と反対側の定着長150mm側が剥離していることがわかる。これについてはE_A80-2では鋼材が降伏しており、図-1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-7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。ひずみを計測した位置は孔上部のCFRP材、孔部中心から35mmの位置のCFRP材、および、鋼材側面、定着長端部から175mmの位置の鋼材軸部である。孔部中心から35mmの位置ではCFRP材と鋼材のひずみをそれぞれ測定したため、それらを合わせて示している。また、図中にはそれぞれの位置に対応する剛性の計算値を合わせて示している。

孔上部の荷重-ひずみ関係はすべての定着長でおおむね計算値を捉えている。また、孔部中心から35mmの位置では、グラフの形状が鋼材部とCFRP材部で左右に分かれていることがわかる。これは、孔部からの定着長が短い場合ダブルストラップ接合部のCFRP材から鋼材に応力が十分伝達できておらず合成断面になっていないためである。鋼材部のひずみは、荷重の増加とともに大きくなり、ピークを迎えた後、徐々に減少する挙動が確認できる。これはCFRP材の剥離によって鋼材に応力が伝達されなくなるため起こる。他方、CFRP材のひずみは剥離によって応力の負担割合が増えるため急激にひずみが増加している。鋼材部のひずみが最大となる位置でCFRP材の剥離が始まったと考えると、AGAでは定着長80mm、150mmの試験体のいずれもEGA、E_Aと比べて剥離開始の荷重が低いことがわかる。対して、EGAとE_Aでは降伏荷重付近で剥離が発生していることから鋼材の塑性変形による剥離であることがわかる。このことから、プライマーとしてE258Rを塗布することで剥離荷重を向上させていることがうかがえる。

EGA80では大きい変形が生じた後に破壊が生じた試験体があるが、鋼材軸部の位置の荷重-ひずみ関係から、鋼材部が降伏している試験体があることが確認できる。また、E_Aについては定着長80mm、150mmのいずれもすべての試験体で鋼材部が降伏していることが確認できる。対して、AGA150では、荷重-クロスヘッド変位関係では降伏荷重付近まで達しているが、定着長端部から175mmの位置では降伏していない試験体があることもわかる。

(4) 試験後の伸び

図-8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を示す。伸びの値は試験を実施した3体の平均としている。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-8から定着長が増え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、大きな伸びが確認された試験体においても、CFRP材で接着されている区間の伸びは剥離後すぐに破断するため小さくなることがわかる。

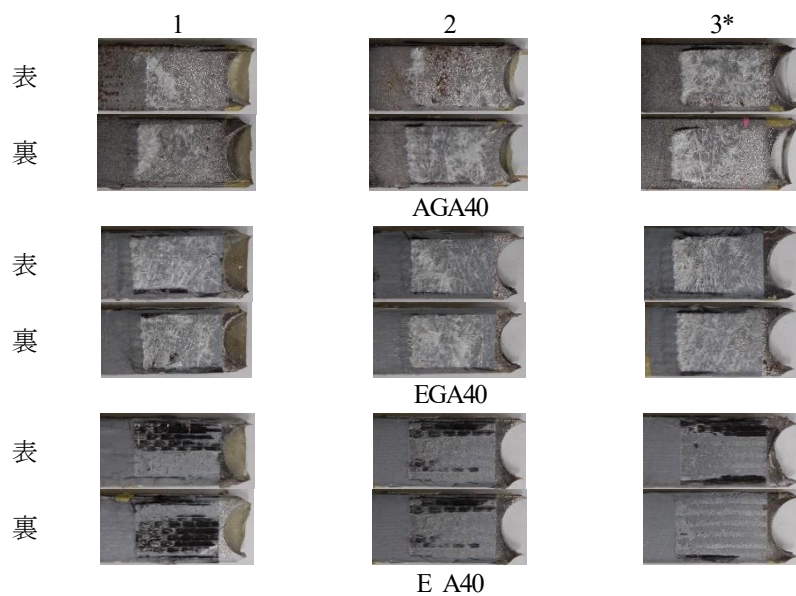


表-4 実験結果一覧

	No.	破断荷重 (kN)	接着強度 (MPa)	平均 (kN)
AGA40	1	40.7	20.4	47.2
	2	56.7	28.3	
	3*	44.1	22.0	
EGA40	1	66.3	33.1	58.7
	2	54.6	27.3	
	3*	55.3	27.7	
E_A40	1	55.6	27.8	61.1
	2	67.6	33.8	
	3*	60.1	30.0	
AGA80	1	81.8	20.5	78.8
	2	79.6	19.9	
	3*	74.8	18.7	
EGA80	1	88.6	(22.2)	88.2
	2	84.4	21.1	
	3*	91.6	(22.9)	
E_A80	1	89.6	(22.4)	92.5
	2	91.8	(23.0)	
	3*	96.0	(24.0)	
AGA150	1	69.0	-	83.5
	2	88.4	-	
	3*	93.2	-	
EGA150	1	92.3	-	94.1
	2	93.6	-	
	3*	96.4	-	
E_A150	1	93.0	-	93.9
	2	92.8	-	
	3*	96.0	-	

NO.に*がついている試験体はBの鋼材を使用している。

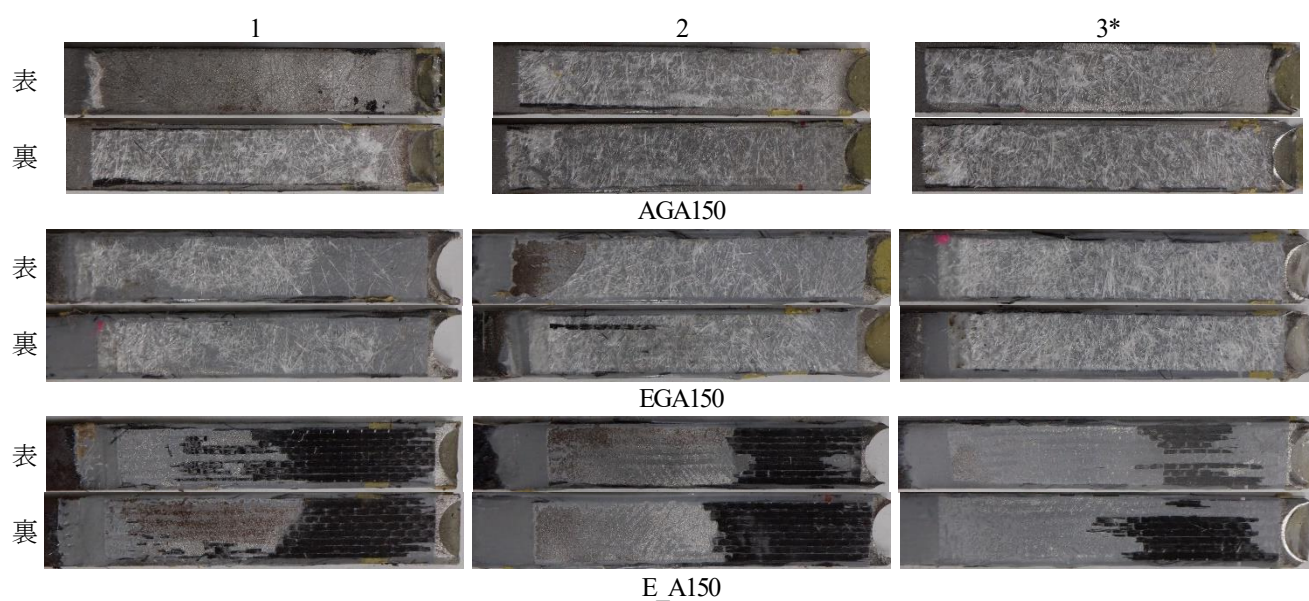
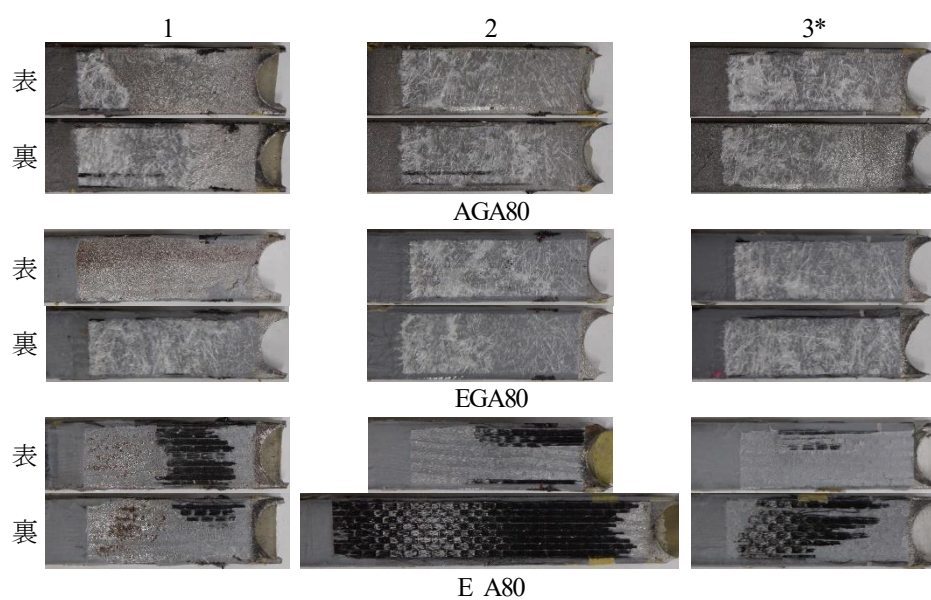
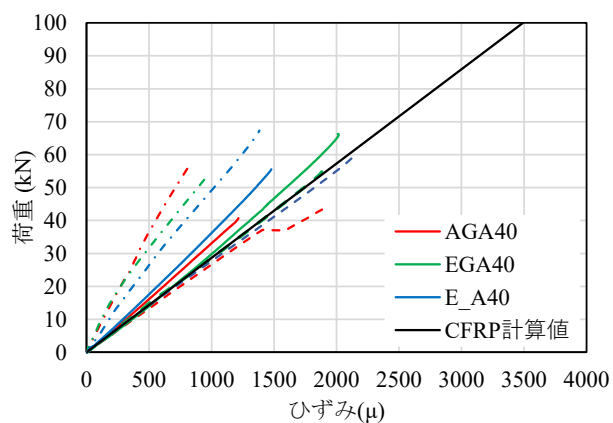
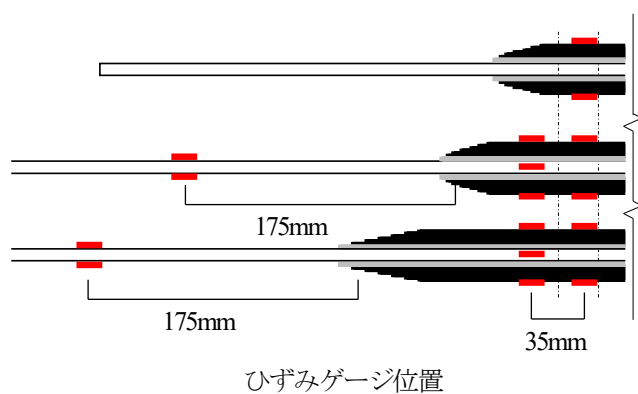


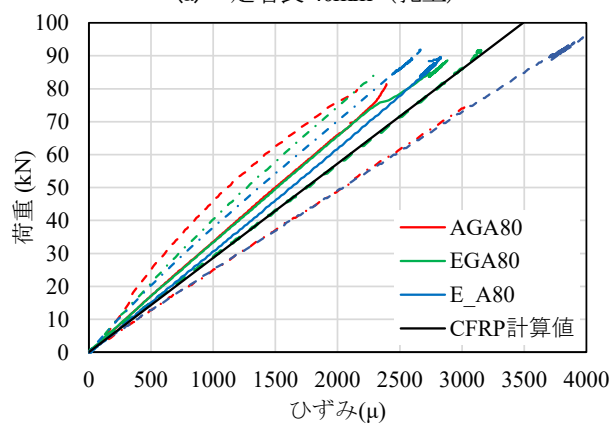
図-6 試験後の接着層



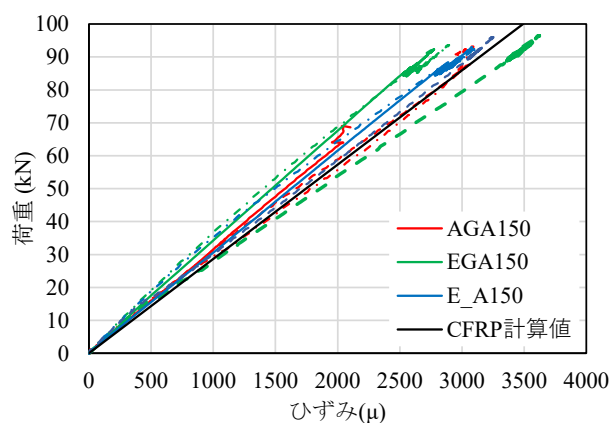
(a) 定着長 40mm (孔上)



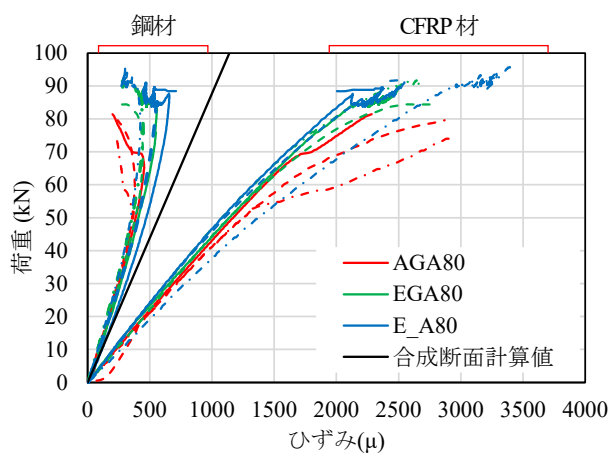
ひずみゲージ位置



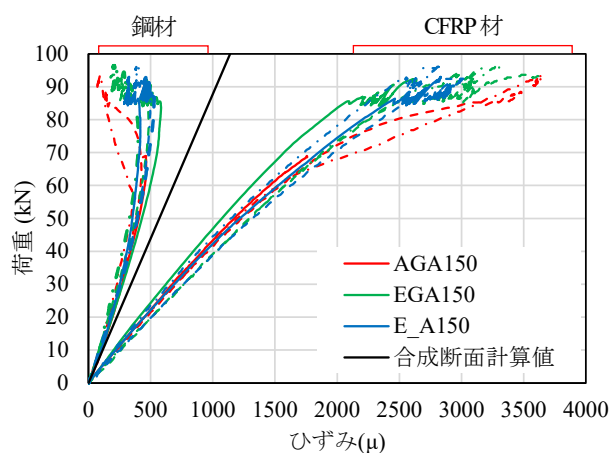
(b) 定着長 80mm (孔上)



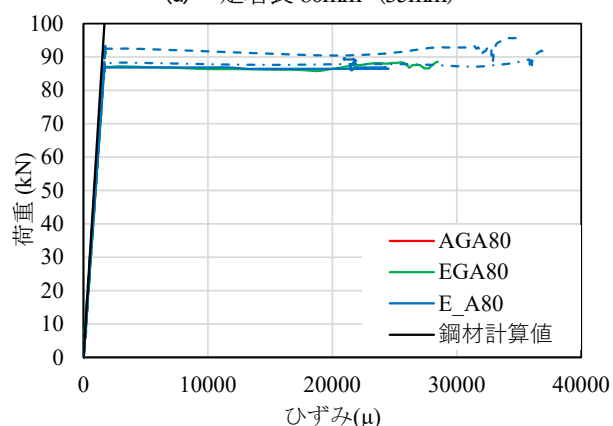
(c) 定着長 150mm (孔上)



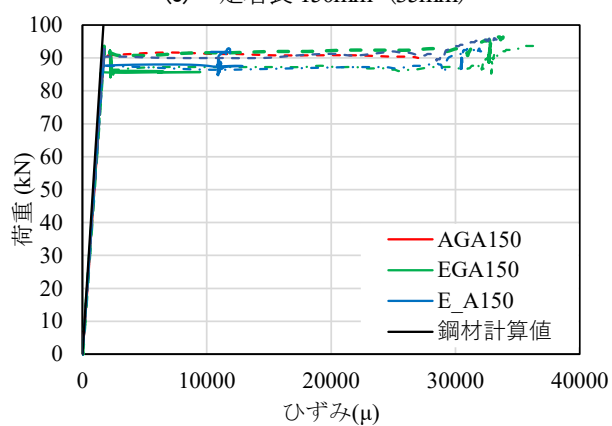
(d) 定着長 80mm (35mm)



(e) 定着長 150mm (35mm)



(f) 定着長 80mm (175mm)



(g) 定着長 150mm (175mm)

図-7 荷重-ひずみ関係

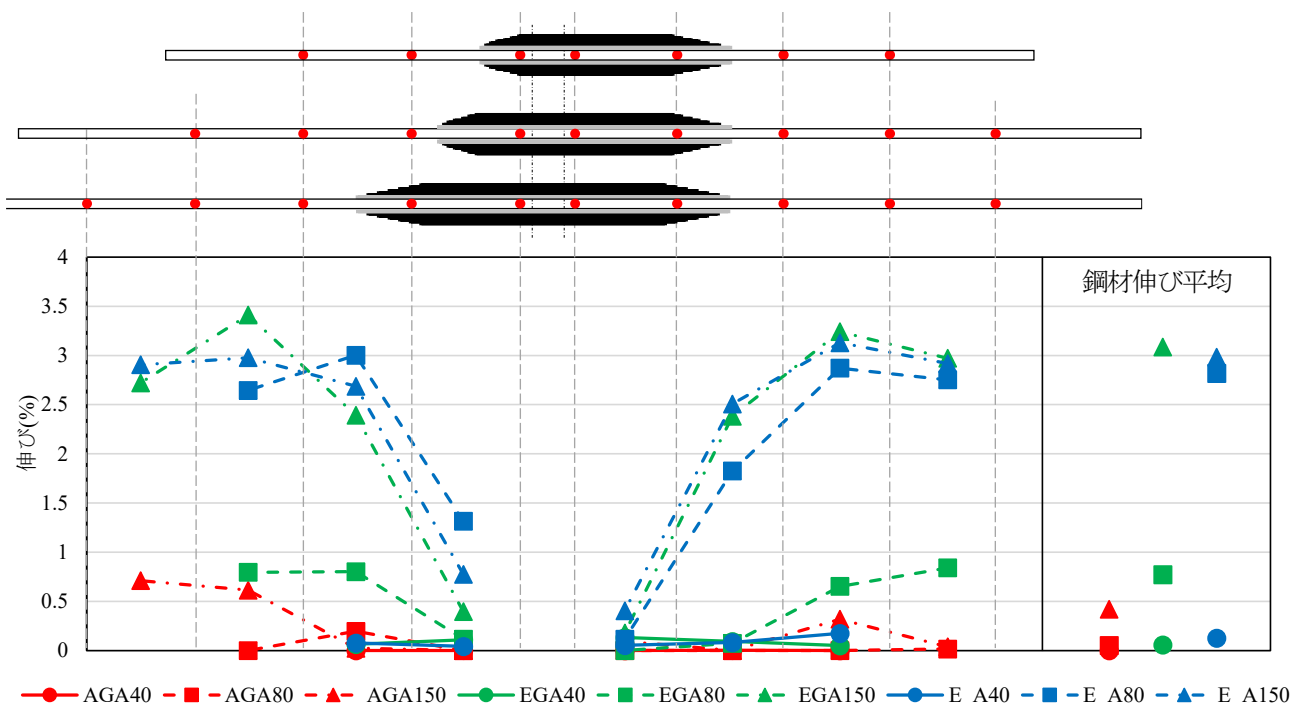


図-8 各標点間の伸び

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、接着層の種類にかかわらず試験後の伸びはほとんど生じていない。定着長80mmの試験体では、試験後の伸びはAGA80が最も小さく、EGA80、E_A80の順に大きくなっていることがわかる。定着長150mmの試験体では、AGA150の伸びは小さく、EGA150、および、E_A150では同程度の伸びが生じていることがわかる。AGA150では、荷重-クロスヘッド変位関係では降伏荷重に達していたが、鋼材の変形量としてはわずかであった。

AGA150とEGA150を比較すると、EGAの方が試験後の伸びが大きいことから、E258Rをプライマーとして塗布することでCFRP材が鋼材の塑性変形による剥離を遅延できることがわかる。また、EGA150とE_A150に明確な差がみられないことから、E258Rをプライマーとして塗布した場合、接着層にGCMを挿入することで剥離が生じる変形に差異はないことがうかがえる。

非補強部の鋼材の伸びについて、AGA150では0.5%程度の伸びが生じている。EGA150、E_A80、および、E_A150ではそれぞれ鋼材部分で3%程度の伸びが生じていることから、接着耐力が十分確保できている状態では、E258Rをプライマーとして塗布していない場合は鋼材の塑性変形が0.5%程度で、E258Rを塗布した場合は3%程度で接着層の剥離が始まっていると考えられる。

4. 強度評価

図-9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、鋼材の塑性変形による剥離により生じる場合の2種類の破壊形態があるため、接着耐力を向上させても、破断荷重は鋼材の降伏荷重以上にはならないことが考えられる。そこで、今回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、降伏荷重に達した時点で一定になるような強度評価を行った。降伏荷重についてはAとBの鋼材の平均値としている。

各接着層の定着長と荷重の関係の傾きは、AGAが最も小さく、EGA、E_Aの順に大きくなっており、E_Aが最も短い定着長で高い接着荷重を発揮することができる。また、降伏荷重による評価についてはいずれの試験体も降伏荷重付近で破断が生じており、おおむね実験での破断荷重を捉えている。

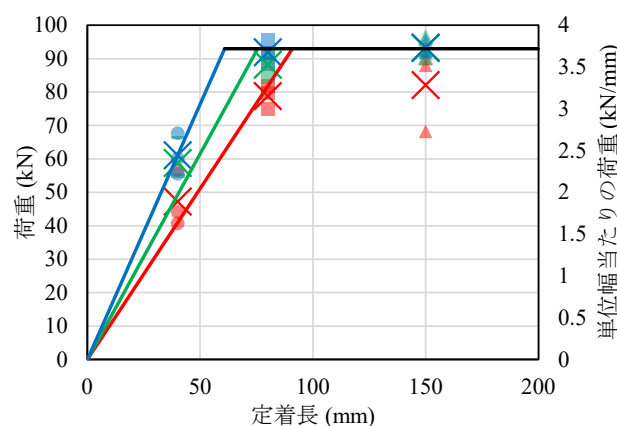


図-9 強度評価

5. 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、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。得られた知見を以下に示す。

- 1) VaRTM成形接着前にプライマーとして高強度接着剤を塗布することで、剥離荷重を向上させることができる、接着強度が安定する、および、塑性変形による剥離の遅延が可能である。
- 2) 接着耐力を十分確保し、プライマーとして高強度接着剤を塗布した場合、非補強部の鋼材の塑性伸びが3%程度でCFRP材の剥離が生じる。

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) 小林洸貴，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.II_20-II_31, 2017.5
- 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, 2020.3
- 5) タイウィサル，中村一史，林 帆，堀井久一：当て板がエポキシ樹脂で接着された鋼板の接着接合部の疲労強度の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.74, No.5, pp.II_56-II_66, 2018.5

(Received September 10, 2021)

EFFECTS OF ADHESIVE LAYER FOR BONDED STEEL-CFRP DOUBLE-STRAP CONNECTION WITH VARTM TECHNIQUE

Mizuki HAMASAKI, Genki MIEDA, Daiki NAKAMOTO, Takahiro MATSUI, 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 same 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 forming 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 forming multiple layers and wide areas, the high fibre volume content and the stable mechanical properties of the moulded products. In this study, tensile tests were carried out on steel-CFRP double pipe joints joined by the VaRTM method in order to clarify the reinforcing performance and ductility evaluation of CFRP-formed steel.

As a results, the effect of the adhesive layer on the strength was evaluated. And, it was shown that the delamination of the adhesive layer could be delayed by using an epoxy resin adhesive as a primer.