# 段差を有する鋼構造接合部へのCFRPによる VaRTM成形接着補強に関する基礎検討

久保川 裕喜1・中本 大暉1・鈴木 公平2・佐藤 壮大3・松井 孝洋4・ 前田 浩徳5・松本 幸大6

> <sup>1</sup>豊橋技術科学大学大学院生 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1) E-mail: kubokawa.yuki.vo@tut.jp, nakamoto.daiki.md@tut.jp

<sup>2</sup>(株) コンステック 技術開発本部 構造ソリューション部 部長 (〒140-0001 東京都品川区北品川 1-8-11 Daiwa 品川 North ビル) E-mail: suzuki-kohei@cons-hd.co.jp

<sup>3</sup>(株) コンステック 技術開発本部 工法技術部 主任
 (〒140-0001 東京都品川区北品川 1-8-11 Daiwa 品川 North ビル)
 E-mail: sato-sota@cons-hd.co.jp

<sup>4</sup>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 日本橋三井タワー) E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

<sup>5</sup>東レ(株) 産業材料部(〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1 日本橋三井タワー) E-mail: hironori.maeda.u8@mail.toray

> <sup>6</sup>正会員 豊橋技術科学大学大学院准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1) E-mail: matsumoto.yukihiro.lp@tut.jp

耐震改修促進法が施行されて以降,今日に至るまで既存建物に対し耐震補強工事が多数施されてきてい る. その一つにブレース材接合部の補強があげられ,接合部が保有耐力接合になっておらず,ブレース材 の塑性変形性能を十分に発揮できないことを改善する補強が多数行われている. 軽量性・施工の簡便性か ら CFRP の接着による鋼構造物の補強法の研究開発が盛んに行われているが,ガセットプレートとブレー ス境界のように段差を有する鋼材面への補強の検討は数少ない. そこで,本研究では,段差を有する鋼材 面に VaRTM 成形接着法によって補強する手法を構築することを目的として,段差を有する鋼材表面を模 擬した 2 面接着剪断試験体を用いて,その接着耐力や接着耐力の向上法を検討した. 結果として,CFRP によって段差を解消するための基材を VaRTM 成形接着により一括成形することで,優れた接着耐力を発 揮できること,また,2 方向基材を用いて接着面積を拡幅することで有意な接着耐力上昇が期待できるこ とを明らかとした.

Key Words: CFRP, VaRTM, seismic retrofit, adhesive joint, brace

#### 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震による甚大な被害を 受け、建築物の耐震改修の促進に関する法律が施行され て以降、今日に至るまで既存構造物に対し耐震補強工事 が施されてきている<sup>1)</sup>. 耐震要素の一つに山形鋼などを 使用したブレース材があげられ、鉄骨構造物では多数の ブレース材が構面内に用いられているが、ブレース材の 接合部が保有耐力接合になっておらず、ボルト孔による 断面欠損部で早期に破断し、ブレース材の塑性性能を十 分に発揮できていない事例が、2011年に発生した東北地 方太平洋沖地震においても報告されている<sup>9</sup>.このよう な断面欠損に対する補修・補強法として、繊維強化樹脂

(Fiber Reinforced Plastic:以下 FRP)の接着が提案されて おり、研究開発が活発に行われている<sup>3</sup>.また、その強 化繊維には鋼部材と同等以上の弾性率、強度を有し軽量 な、炭素繊維を用いた炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic:以下CFRP)を用いることにより、固定 荷重をほとんど増加させることなく補強が可能となるう え、溶接などの火器使用の削減に繋がる<sup>3,4)</sup>.

これまで CFRP の接着補強には、現場でのハンドレイ アップ成形接着法や CFRP プレートの接着が広く用いら れている.しかし、ハンドレイアップ成形法では施工者 の技能により性能が左右され、積層数が多くなると工期 が長期化してしまうなどの課題を抱えている.また、 CFRP プレートの接着は補強面が平坦な面に限定されて しまうといった課題がある.これに対し、近年、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(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<sup>59</sup>.

以上を踏まえ、本研究では、段差を有する鋼材面に対 する CFRP の VaRTM 成形接着補強法の確立を目的とし て、CFRP による段差の解消を含めた CFRP 一括成形に より、基礎検討として段差を有する鋼材面を模擬した平 板を使用して接着耐力分析を行った.特に、ブレースと ガセットプレート接合部においては、ガセットプレート 側には十分な定着長が設定できない場合も考慮し、接着 面を拡幅することで接着耐力を向上させる手法について も検討を行った.

### 2. 補強設計

#### (1) 段差修正用基材

本研究で適用を想定する鋼材段差部の概要を図-1に示 す.段差部には応力伝達に寄与しない CFRP を配するこ とで部材同士の段差を最小化するとともに、その外側に 応力伝達を行う CFRP により補強を行うものである.段 差修正用 CFRP と応力伝達用 CFRP は、VaRTM 成形接着 法により、一括して成形される.なお、鋼材と CFRP と の間には、チョップドストランドマット(以下、CM) 層を配している.

本研究では,段差修正用基材として,400gsmの1方向 中弾性炭素繊維シート(UM46-40P:以下,UM)および 200gsmの2方向高強度炭素繊維クロス(BT70-20:以下, BT)の2種を使用した.表-1に使用した炭素繊維シート の物性を示す.

まず,段差修正用基材の積層数は式(1)によって求め



**図-1** 段差部概要

表-1 炭素繊維シートの物性

品番	厚さ	引張強度	ヤング係数
	[mm]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]
UM46-40P	0.217	2.4	440
BT70-20	タテ:0.056	タテ : 2.9	タテ:230
	ヨコ:0.056	ヨコ : 2.9	ヨコ:230

た.

UM : 
$$n_{step} = \frac{h_{step}}{t_{cf} / V_f}$$
  
BT :  $n_{step} = \frac{h_{step}}{(t_{cf} / V_f) + (t_{CM} / 10)}$ 
(1)

ここで,

nstep:段差修正用炭素繊維シートの積層数[ply]

hstep: 段差の高さ[mm]

t<sub>f</sub>: 炭素繊維シート1枚あたりの厚さ[mm/ply]

Vf: 繊維含有率(=0.40)

tcm: CM層の厚さ[mm]

である.

BT を段差修正用基材として用いる場合,樹脂の含浸 性を考慮して,10ply 毎に CM 層を1ply 挿入するように 積層数を決定した.成形時に段差修正用基材の総厚が段 差の高さ hsepを上回ることのないようにするため,式(1) の繊維含有率 V<sub>f</sub>は 0.40 と仮定し, nsep は小数点以下切り 捨てとした.

段差修正後に生じる段差の高さ e は式(2)で求めた.

UM :  $e = h_{step} - n_{step} \cdot t_{cf} / 0.50$ 

BT: 
$$e = h_{step} - \left(\frac{n_{step} \cdot t_{cf}}{0.50} + t_{CM} \cdot \left\lfloor \frac{n_{step}}{10} \right\rfloor \right)$$
 (2)

ここで, *e*:段差修正後に生じる段差[mm] である.

式(1)および式(2)において、段差の高さhan-4mm、6mm の 2 パターンを仮定し, CM 層の厚さ tcm はどちらも 0.6mm として段差修正用基材の積層数 nstp と、対応する 段差修正後にも残存する段差 e を求めた.計算結果を表 -2に示す.

#### (2) 応力伝達用基材

応力伝達用基材には、UM を使用した. 前説で仮定し た段差修正に伴って生じる段差による、軸力と偏心曲げ による曲げ応力を受ける応力伝達用 CFRP の必要な片側 厚さは、式(3)によって求められる.

$$P \leq \frac{2F_{TScf} \cdot V_{f}}{\frac{1}{b_{CFRP} \cdot t_{CFRP}} + \frac{6e}{b_{CFRP} \cdot t_{CFRP}^{2}}}$$
(3)

ここで,

P: 目標耐力[kN]Frsf:補強用 CFRP の引張強さ[kN/mm<sup>2</sup>]

bCFRP: CFRP の幅[mm]

tCFRP: CFRPの片側厚さ[mm]

である.

本実験では、鉄骨造建物において使用事例が見られる 板厚 6mm のガセットプレートに等辺山形鋼(以下,ア ングル) L-50x4 が接合されたブレースに対して, 段差修 正し補強を行うことを想定して設計した.従って,式 (3)において、目標耐力Pはアングルブレースの全断面積 に鋼材の引張強さの下限値 400N/mm<sup>2</sup>をかけた 156kN と し, bCFRP=38mm, V=0.50, e=1.226mm を代入すると, CFRPの片側厚さtcFRP ≧4.5mm を得る.得られた CFRPの 片側厚さより、応力伝達用CFRPの積層数11plyを得た. この積層数における、鋼材と CFRP(段差修正用および 上貼り補強用を除く)との剛性比は1:0.51である.

接着幅拡幅のための上貼り補強用 BT は幅方向への応 力伝達を考慮し、±45 度方向に積層した.積層数は、 拡幅分の BT の接着耐力を BT の材料強度が上回るよう 3plyとした.

## 試験体と試験方法

図-2 に試験体に用いた鋼板を示す. 鋼材は SS400 材 PL9からプラズマによって幅100mmで切り出し、ダブル ストラップ形式とするため、鋼材の中ほどにスリットを 設けた. スリット位置両側の未切断の部分は成形後にノ コギリを用いて切断した.

補強の手順は、以下の手順とした.

(1) 鋼材にロータリー式ブラスターを用いて、粗さ測 定器によって測定される十点平均粗さ R<sub>z</sub>(JIS)が全 体的に20um以上となるよう表面処理を実施

	表-2 段差修正の計算結果			
hstep	n <sub>step</sub>	е		
4mm	UM : 7ply BT : 11ply	UM : 0.962mm BT : 0.936mm		
6mm	UM:11ply BT:17ply	UM : 1.226mm BT : 1.592mm		



図-2 使用した鋼板



図-3 成形時の様子

表-3 試験体の繊維体積含有率

試験体 -	$V_{f}$ [%]		17.11/1	亦動反粉
	No.1	No.2	Vf+++>[%0]	爱到术叙
CU	46.75	46.49	46.62	0.02856
CUU	49.30	46.81	48.06	0.03944
CUUB	50.76	48.35	49.56	0.02671
CBCBU	51.99	49.51	50.75	0.03327

- (2)スリット内部にエポキシ系メンディング材を充 填·硬化
- (3) アセトンにより脱脂したのちエポキシ系接着剤 E258R を塗布・硬化
- (4) E258R 塗布後 24 時間以内にエポキシ樹脂 AUP40T1 を下塗りし、基材を設置して同樹脂で VaRTM 成形 接着

なお, 基材は事前に必要な大きさに切断した後, 熱可 塑性樹脂の粉末を塗布しアイロンで加熱・一体化させた. 試験体は補強部の積層順序で識別し、CM→UM(応力 伝達用)の順に積層した CU 試験体, CM→UM(段差修 正用)→UM(応力伝達用)の順に積層したCUU試験体, CM→UM(段差修正用)→UM(応力伝達用)→BT(接 着幅拡幅用)の順に積層した CUUB 試験体および CM→ BT(段差修正用)→CM→BT(段差修正用)→UM(応 力伝達用)の順に積層した CBCBU 試験体の計 4 パラメ ータを設定し、各種2体ずつの合計8試験体を作成した. なお,段差修正用基材は,鋼材のスリット位置で切断さ れており、応力伝達が無いように配慮している.図-3に 成形時の様子を、図-4に作成した試験体一覧と補強部の 断面詳細を示す. 試験体の成形・脱型後, 膜厚計によっ



て補強部の CFRP の全厚を各試験体とも3 点測定し、繊 維体積含有率 Vfと各種6点における変動係数を得た.

表-3に CFRP の繊維体積含有率を示す.いずれの試験 体においても、安定して高い繊維体積含有率が得られて いた.

図-5に成形後の試験体の様子、図-6に試験時の様子を 示す. 試験は 1000kN 万能試験機を用いて準静的引張試 験とした.分析対象は、図-4に示す試験体図の下側であ るため、上側には剥離破壊を防止する目的で鋼製のあて 板と万力を用いて圧縮力を加えた.





図-6 試験時の様子





(c)CU-2表



(e)CUU-1 表



(g)CUU-2表



(i)CUUB-1 表









(n)CBCBU-2表 図-7 試験後の破壊面





(d)CU-2 裏



(f)CUU-1 裏



(h)CUU-2 裏



(j)CUUB-1 裏







(o)CBCBU-2裏

試験体		破壊モード	耐力[kN]	平均剪断強度[N/mm²]	単位幅あたり耐力[kN/mm]
CU-1	表	CM層材料破壊	100.15	20.02	2.00
	裏	CM層材料破壊	180.15		
CU-2 表 裏	表	CM層材料破壊	107.50	20.84	2.08
	裏	CM層材料破壊	187.58		
CUU-1 表 裏	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	102.54	20.20	2.04	
	裏	CM層材料破壊	183.54	20.39	2.04
CUU-2 <u>表</u> 裏	表	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	- 202.50	22.51	2.25
	裏	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	202.59		
CUUB-1 表 裏	表	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	- 225.29	26.14	2.61
	裏	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	255.28		
CUUB-2 表 裏	表	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊 <sup>※</sup>	- 226.96	26.32	2.63
	裏	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	230.80		
CBCBU-1 事	表	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊		24.02	2.40
	裏	段差修正用 UM-応力伝達用 UM 層間破壊	216.17		
CBCBU-2	表	応力伝達用 UM 第1 層材料破壊	250.72	29.94	2.89
	裏	含浸促進用 CM 層材料破壊	259.72	28.86	

表-4 耐力一覧と破壊形式

#### 4. 試験結果

#### (1) 耐力および破壊モード

**図-7**に試験後の破壊面,表-4に耐力と破壊モードの一覧を示す.

CU 試験体および CUU 試験体では,CM 層の材料破壊 または段差調整用基材と応力伝達用基材の層間破壊で耐 力が決定されており,安定した破壊モードを示した. CU 試験体と CUU 試験体の耐力の比較から,CFRP によ って段差調整を行ったとしても,耐力が低下することは ないといえる.

CUUB 試験体および CBCBU 試験体では,段差調整用 基材と応力伝達用基材の層間で破壊しており,こちらも 安定した破壊モードを示した. CUUB-2 試験体のみ図-4 の上側での破壊が起きてしまったものの, CUUB-1 と同 等の耐力を得られていた.

CUU 試験体と CUUB 試験体の比較から, BT 上貼りに よって拡幅することにより, 耐力が約 30%高くなっていた.

先行研究<sup>7,10,11</sup>との接着耐力の比較を,平均剪断強度 および単位幅あたり耐力で行う.平均剪断強度は,得ら れた耐力の半分を,CFRPの幅*b*<sub>CFRP</sub>に接着長さ100mmを かけた面積で除して求めた.単位幅あたり耐力は,得ら れた耐力の半分をCFRPの幅で除して求めた.**表**-4に本 実験で算出された平均剪断強度を示す.文献 7)では VaRTM 法によって接着成形補強された突合せ鋼鈑にお いて,強化基材の設置前に鋼材の接着面に樹脂を事前に 塗布しておくことにより平均剪断強度の安定性につなが

る試験体を採用しており、耐力、平均剪断強度および試 験体寸法が示されている. この結果から平均剪断強度 16.8N/mm<sup>2</sup>, 単位幅あたり耐力 2.69kN/mm が得られ, 本 実験の試験体と比較すると単位幅あたり耐力は文献7)の ほうが高いものの、平均剪断耐力ではいずれの試験体に おいても高い値となっている. 文献 10)では, ハンドレ イアップ法によって成形接着補強された突合せ鋼板にお いて、定着長を長くすることで接着強度の安定性につな がる試験体を採用しており、平均剪断強度の平均値およ び試験体寸法が示されている. この結果から, 平均剪断 強度 9.31N/mm<sup>2</sup>, 単位幅あたり耐力 1.87 kN/mm が得られ, 本実験の試験体と比較すると平均剪断強度および単位幅 あたり耐力の双方とも本実験の試験体の方が高い値とな っていた. 文献 11)では、鋼板がエポキシ系接着剤で接 着された突合せ鋼板の場合として接着幅および接着長さ を実験変数とし、耐力と試験体寸法が示されている。こ の結果から、平均剪断強度 8.2~15.3N/mm<sup>2</sup>、単位幅あた り耐力1.2~1.9kN/mmが得られ、本実験のものと比較する と平均剪断強度および単位幅あたり耐力の双方とも本実 験の試験体の方が高い値となっていた.以上のことから, 本工法は従来の工法と同等以上の接着耐力を発揮するこ とができるといえる.

※上側で破壊したものを示す

#### (2) 荷重-クリップゲージ変位(CG1-CG2 平均変位)関係

図-8 に各試験体の荷重-クリップゲージ変位関係を示す. 各試験体とも 10kN 時のクリップゲージ変位が等しくなるようオフセットしている. 図-8より,いずれの試験体においても剛性に顕著な差は確認されなかった. こ

れより,4mm 相当の段差修正用基材を用いても接着接 合部の剛性低下は生じないと考えられる.

## (3)荷重-CFRP表面ひずみ(SG1-SG2平均ひずみ)関係

図-9 に各試験体の荷重-CFRP 表面ひずみ関係を示す. いずれの試験体においても、ひずみの大きさは鋼/CFRP 合成断面の理論値と応力伝達用 CFRP の理論値の間とな っていた.このことから、補強部鋼材端部から 30mm の 位置においては、鋼/CFRP 合成断面となっておらず CFRP の荷重負担の割合が大きいものの、完全に応力伝 達用 CFRP が荷重を負担しているわけではないことがわ かる.また、CU 試験体と比較して CUU 試験体および CUUB 試験体、CBCBU 試験体のひずみが小さくなって いるのは、段差調整用に配置した炭素繊維シートの影響 により、応力伝達用 CFRP への荷重伝達の遅れが生じる ためであると考えられる.

#### (4) 荷重-鋼材側面ひずみ(SG3-SG4 平均ひずみ)関係

図-10 に各試験体の荷重-鋼材側面ひずみ関係を示す. 100kN 時において CBCBU 試験体の鋼材側面ひずみが最 も大きくなっており,段差修正用炭素繊維シートに BT を用いることで,鋼材幅方向に荷重を伝達することがで きると考えられる.これは,段差調整用基材に用いた UM と BT の積層方向による剪断弾性率の違いが要因で あると考えられる.

### 5. まとめ

本研究では鋼構造ボルト接合部周辺などへの CFRP に よる補強を想定し,段差面に適用可能な VaRTM 成形接 着法とその耐力に関する基礎検討を行った.その結果, 以下のことを示した.

- (1) 本研究で実施した VaRTM 成形接着法は既往の接着法と比較して高い接着耐力が発揮できる.
- (2) 1 方向炭素繊維シートにより段差修正を行った結果,接着耐力および接合部剛性に有意な差は生じない.
- (3) 段差修正を行った試験体では、段差修正用基材と 補強用基材の層間での破壊が主な破壊形式となる.
- (4) 定着部幅方向に±45度方向の2方向炭素繊維クロスによる補強を行うことで、接着耐力の向上が期待できる.
- (5) 段差修正用基材に2方向クロス炭素繊維シートを ±45度方向に積層したものを用いることで、鋼材 に効率よく荷重を伝達することができる.



図-8 荷重-クリップゲージ変位関係 (CG1-CG2 平均)



図-9 荷重-CFRP 表面ひずみ関係 (SG1-SG2 平均)



図-10 荷重-鋼材側面ひずみ関係 (SG3-SG4 平均)

#### 参考文献

- 日本建築防災協会:2011 年改訂版 耐震改修促進法 のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震 改修指針・同解説,2011
- 日本建築学会:2011 年東北地方太平洋沖地震災害 調査速報,2011
- 3) 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

- 石川敏之,中村一史,大垣賀津雄:特集 異材接 合技術の最新動向 鋼構造物の CFRP 接着補修・補 強,日本機械学会誌 Vol.122, 2019
- 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),複合構造論文集第4巻(論文), Vol.73, No. 5, p.II 20-II 31, 2017.5
- 小林洸貴, 近藤諒翼, タイウィサル, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による鋼桁端部の補強に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 複合構造論文集第5巻(論文), Vol.74, No. 5, p.II 44-II 55, 2018.5
- 三枝玄希,松本幸大,松井孝洋,中村一史: VaRTM 法を応用した鋼/CFRP 成形接着工法の接着剪断強度 評価,日本建築学会 技術報告集,第 25 巻 第 59 号, pp.189-192,2019.2.
- 8) Genki Mieda, Hitoshi Nakamura, Takahiro Matsui,

Yutaka Ochi, Yukihiro Matsumoto: Mechanical behavior of CFRP on steel surface molded and bonded by vacuum assisted resin transfer molding technology, SN Applied Sciences, Volume 1, Issue 6, 2019.5

- 9) 三枝玄希,中村一史,松井孝洋,松本幸大:真 空樹脂含浸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
- 三枝玄希,松本幸大,藤本信介:鋼/CFRP 接着 接合強度に影響する各種因子の考察,日本建 築学会大会学術講演梗概集(九州),Vol.B3, pp.1479-1480,2016.8
- 清水優,石川敏之,堀井久一,服部篤史,河野 広隆:当て板接着された突合せ鋼板のはく離強 度の評価,鋼構造論文集,第22巻 第86号, 2015.6

(Received August 28, 2020)

# FUNDAMENTAL STUDY ON STRENGTHENING METHOD FOR STEPPED STEEL SURFACE BY CFRP BONDED AND MOLDED BY VARTM

## Yuki KUBOKAWA, Daiki NAKANO, Kohei SUZUKI, Sota SATO, Takahiro MATSUI, Hironori MAEDA and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, seismic retrofitting have been rapidly performed by the enforcement of Act on Promotion of Seismic Retrofitting of Buildings. In case of steel structures, brace members and its connection should resist the full plastic axial tension to provide the plastic deformation performance and plastic energy absorption. But some braces do not satisfy the requirement. So, reinforcement of the brace and gusset plate connection is often required by the decreasing of net section by the bolt holes.

By the way, CFRP have been widely used to the repair and strengthening for existing structures, because of its high-strength, -elastic modulus and light-weight characteristics. And a lot of researches on CFRP application of the new repair and strengthening method have been proposed recently. But almost methods are targeted the flat surface to apply the CFRP. In this paper, we investigate the applicability of CFRP strengthening to the connection of brace and gusset plate having difference of surface level by VaRTM bonding and molding technique. The distance is eliminated by the alternative CFRP layers to straighten the structural CFRP to transfer the axial stress effectively. The alternative CFRP and structural CFRP can be molded on steel surface of connection at the same time. Furthermore, we investigate the effects of widening of CFRP to increase the bonding strength, because almost gusset plates are wider than braces. Eventually, it is made clear that the alternative CFRP to eliminate surface distance is not affects the bonding strength and widening CFRP can extremely increase the bonding strength.