

種々の応力を受ける鋼材とCFRP接着部の強度評価

西野 晶弘¹・大垣 賀津雄²・秀熊 佑哉³・宮下 剛⁴・奥山 雄介⁵

¹正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 (〒103-0027 東京都中央区日本橋1-13-1)

E-mail: nishino.65t.akihiro@nscm.nipponsteel.com

²正会員 ものつくり大学 教授 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 (〒103-0027 東京都中央区日本橋1-13-1)

E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁴正会員 長岡技術科学大学 准教授 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 長野工業高等専門学校 准教授 環境都市工学科 (〒381-8550 長野県長野市徳間716)

E-mail: y_okuyama@nagano-nct.ac.jp

鋼構造物の長寿命化・老朽化対策の観点から、炭素繊維シート接着による鋼部材の補修・補強の適用事例は年々増加している。特に接着層に低弾性・高伸度のポリウレア樹脂層を設ける手法は、鋼材とCFRPがはく離するのを防止する手段として、多様な応力状態におかれた鋼部材へCFRPシート接着工法を適用可能にすることに寄与した。しかしながら、CFRPシート接着による個々の部材へ有効な補修補強方法の検証が進められてきた一方、CFRPの接着部の強度について応力状態別に評価したデータは十分にまとめられていない。そこで著者らは、CFRPを接着し補強した鋼板に引張応力や曲げ応力を与え、CFRPシートや接着層の種類による接着強度の違いを評価してきた。本論文では引張力や曲げモーメントなど種々の応力状態におかれた鋼板とCFRPの接着部について、接着強度や継手強度、接着層種類が強度に与える影響についてまとめた。

Key Words : CFRP sheet, Adhesive strength, Joint strength, Poly-urea putty, Energy release rate

1. 背景

橋梁をはじめとする鋼構造物の補修・補強工法として、鋼材にCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を接着する手法がある。この工法についてまとめられた「炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法、設計・施工マニュアル」¹⁾では、積層したシート端部での応力集中を緩和することを目的とし、接着層に低弾性・高伸度のポリウレア樹脂を入れることが定められている。

一方で、鋼板への当て板を接着する際の応力によるはく離の指標として、接着層のエネルギー解放率が知られており、対象の形状に影響されない数値であることから、事前にはく離を照査する上での有効な指標として用いることができる。既往の研究では、鋼板を当て板とした実験によるエネルギー解放率の算出²⁾やCFRPを当て板とした鋼板のエネルギー解放率算出のシミュレーション³⁾

が行われている。しかしながら、CFRP接着鋼板について、エポキシプライマーの有無や応力緩和のためのポリウレア樹脂層を用いた際の検討など、実施に準じた条件の供試体を用いてエネルギー解放率を算出する際の知見は少ない。

以上を踏まえ、著者らは土木学会の「FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)」⁴⁾に示される鋼板と当て板のはく離評価試験を参考に、CFRPを当て板とした接着強度に関する実験を実施してきた⁵⁾。本論文ではこれらの試験に加え、継手強度に関する試験である「ダブルストラップ接合部の引張試験」「シングルストラップ接合部の引張試験」の実験結果をまとめ、種々の応力状態におけるCFRP接着鋼板の接着強度やエネルギー解放率、接着層種類が強度に与える影響について明らかにする。

2. 実験内容

(1) 供試体

FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)⁴⁾に示される試験法A～Dの4種類のはく離評価試験方法を参考に、図-1に示す供試体形状ではく離評価を行った。またこれらの供試体においては施工条件として6種類の条件を設定しており、これを表-1に示す。使用した材料の種類や諸元は表-2および表-3に示すとおりである。

施工手順は、鋼材のケレン、エポキシプライマー塗布、ポリウレア用プライマー塗布、ポリウレア塗布、含浸樹脂による炭素繊維シート接着の順番で実施するよう工法で定められており、試験法A, B, Cについてはこの施工手順をとった。ただし試験法Dについては炭素繊維シートの大部分が鋼材に面していないため、通常の施工手順をとることができない。このため、あらかじめ離形の容易な樹脂フィルム上で炭素繊維シートに樹脂を含浸・硬化させてCFRP硬化板を作成したうえで、同じ含浸樹脂で鋼材の施工面に後から接着するという方法をとった。

(2) 試験方法

载荷については試験法Aではジャッキを動かすことによる手動で行い、载荷部の裏側に設置したロードセルで荷重を測定した。試験法B, C, Dでは载荷容量2,000 kNのアムスラー式万能試験機を用いた変位制御で試験を行った。全ての試験で各施工グレードについてN=3で行い、試験中にはく離が発生した荷重を記録した。さらに試験法A, Cについては、はく離が発生した時点でCFRP端部付近の鋼材に貼り付けたひずみゲージの値を記録した。

また試験時の注意として、試験法CではCFRP片側端部付近を万力で固定することで、常に固定していない方

の端部ではく離が発生するようにした。さらに試験法Dでは、当初フィラープレートの長さを100 mmとし、CFRP単体部分の長さを200 mm程度確保していたものの、

表-1 施工条件の種類

施工条件 (接着層-シート)	エポキシ プライマー	ポリウレア層	炭素繊維 シート
E-T	あり	なし	トウシート
P-T	なし	あり	トウシート
EP-T	あり	あり	トウシート
E-S	あり	なし	ストランド
P-S	なし	あり	ストランド
EP-S	あり	あり	ストランド

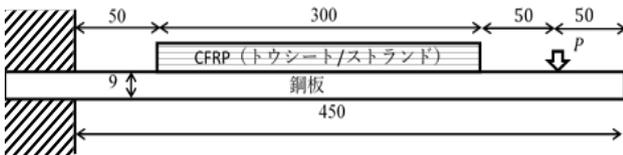
表-2 使用した鋼材と炭素繊維シート種類

試験法	鋼種	炭素繊維シート種類
A	SM490Y	高弾性トウシート 6層
		高弾性ストランドシート 2層
B	SS400	高弾性トウシート 11層
		高弾性ストランドシート 4層
C	SM490Y	高弾性トウシート 6層
		高弾性ストランドシート 2層
D	SS400	高弾性トウシート 6層
		高弾性ストランドシート 2層

表-3 供試体材料の諸元

	材料	弾性係数	1層の設計厚
鋼材	SM490Y	221GPa	—
	SS400	206GPa	—
炭素繊維 シート	高弾性トウシート	654GPa	0.143mm
	高弾性ストランド	686GPa	0.429mm
ポリウレア樹脂		60MPa	—
含浸樹脂	トウシート用	3.8GPa	—
	ストランド用	3.1GPa	—

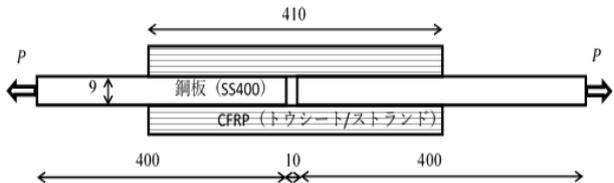
試験法A：片側にCFRPが接着された鋼板の曲げ試験



試験法C：両側にCFRPが接着された鋼板の引張試験



試験法B：ダブルストラップ接合部の引張試験



試験法D：シングルストラップ接合部の引張試験

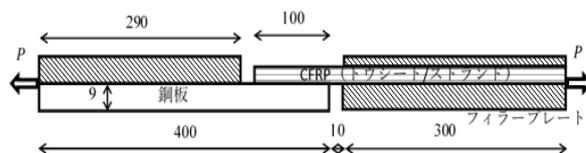


図-1 各試験の概要図⁴⁾

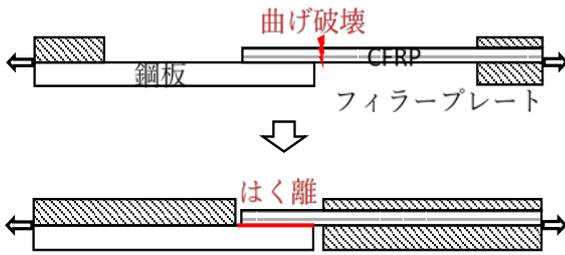


図-2 試験法Dの破壊モード

破壊形態が接着部分のはく離ではなくCFRP単体部分の曲げ破壊となり、はく離の評価ができなかった。このため図-2に示すように試験体の大部分をフィラープレートで覆い、曲げモーメントの発生を抑えることとした。

3. 各種試験値の計算

(1) はく離・降伏ひずみ比

はく離時はCFRP端部の接着層で発生するが、CFRP接着端部付近の鋼板に貼り付けたひずみゲージの読みからはく離時の鋼材ひずみ ε_s を得る。これと鋼材の降伏ひずみ ε_y の比として与えられる値 $\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y}$ をはく離・降伏ひずみ比とする。この値が1よりも大きい場合は鋼材の塑性域ではく離が発生、1より小さい場合は鋼材の弾性域ではく離が発生することを意味する。

(2) 接着層のせん断応力、垂直応力、主応力、応力比

接着層に加わる各応力および応力比の計算は、土木学会の指針⁴⁾に従って計算を行った。

(3) エネルギー解放率

はく離時の荷重を P として、各試験法でのエネルギー解放率は下記のように計算できる。

$$\text{試験法 A } G_{Me} = \frac{1}{2b_f E_s} \left(\frac{1}{I_s} - \frac{1}{I_v} \right) M_e^2 \quad (1)$$

$$\text{試験法 B } G_{Ne} = \frac{\xi_0^2}{4b_f E_s A_s (1 - \xi_0)} P^2 \quad (2)$$

$$\text{試験法 C } G_{Ne} = \frac{1 - \xi_0}{4b_f E_s A_s} P^2 \quad (3)$$

$$\text{試験法 D } G_{Se} = \frac{1}{2b_s E_s} \left\{ \left(\frac{M_{cr}^2}{I_s} - \frac{M'_{cr}{}^2}{I_v} \right) + \left(\frac{1}{I_s} - \frac{1}{I_v} \right) P^2 \right\} \quad (4)$$

ここで、

E_s, E_f : 鋼板のヤング係数および当て板のヤング係数
(試験成績書より)

I_s, I_f : 鋼板および当て板の断面二次モーメント

I_v : 鋼板と当て板の鋼換算断面二次モーメント

$$I_v = I_s + \frac{E_f}{E_s} I_f + \frac{E_f A_s A_f}{E_s A_v} \left(\frac{t_s + t_f}{2} + h \right)^2 \quad (5)$$

A_s, A_f : 鋼板および当て板の断面積*

A_v : 鋼板と当て板の鋼換算断面積*

b_s, b_f : 鋼板および当て板の接着幅*

t_s, t_f : 鋼板および当て板の厚さ*

h : 接着用樹脂材料の厚さ。

(i) ポリウレア層有の場合はポリウレア厚み*

(ii) ポリウレア層無しの場合は、文献⁹⁾にもとづ

き、プライマー厚み+CFRP厚みの1/3とした

M_e : はく離時当て板端部に生じる曲げモーメント

$$M_e = P l_e$$

l_e : 載荷位置から当て板端部までの距離*

ξ_0 : $\frac{1}{1 + 2E_f A_f / (E_s A_s)}$ で与えられる剛性比

M_{cr} : 破壊荷重において破壊が生じる鋼板端部に作用する曲げモーメント

M'_{cr} : 破壊荷重において破壊が生じる鋼板端部に作用する曲げモーメント (合成断面部)

である。記号の説明の※印の値は実測値を用いた。

4. 実験結果

実験結果から得られた各試験値を表-4および表-5に示す。ここで、試験法Dについては曲げモーメントをフィラープレートにより意図的に抑えたことで応力やエネルギー解放率を正確に求めることができなかったため、はく離荷重のみを示す。

(1) はく離荷重およびエネルギー解放率

鋼板とCFRPの接着層の3種類の施工条件、E (エポキシプライマーのみ)、P (ポリウレア層のみ)、EP (エポキシプライマー+ポリウレア) についてははく離荷重を比較する。接着強度評価に関する試験法A, Cについては、施工条件Eよりも施工条件P, EPのほうが高いはく離荷重となっており、これはポリウレア層の存在によりCFRP端部の応力が緩和された結果と考えられる。この傾向はトウシートやストランドシートといった炭素繊維シートの種類によらず見られる傾向である。一方で、継手強度評価に関する試験法B, Dについては、施工条件によるはく離荷重への顕著な影響は見られなかった。

また試験法A, Cのはく離・降伏ひずみ比は、接着層の条件がEの場合はほとんど1.0未満、P, EPの場合には1.0以上と明確に差が出ている。このことは、接着層にポリウレア樹脂が存在しない場合ははく離が鋼材の弾性域で発生し、ポリウレア樹脂が存在する場合は鋼材の塑性域で

発生することを意味する。

エネルギー解放率については、はく離が鋼材の弾性域で発生したときのみ有効な値が計算可能であるため、ポリウレア樹脂の効果により塑性域ではく離が発生する場合や、そもそもはく離の発生が確認できない場合には値を出すことができない。このため接着層の条件傾向をつかむことは難しい。ただし同じ接着層の条件においては試験法の違いによりエネルギー解放率の計算値に差が出ることが確認された。

(2) 応力比

各試験法について、接着層に生じるせん断方向と垂直方向の応力をグラフ化したものを図-3に示す。材料の長

手方向に引張が加わる試験法B, Cではせん断応力が卓越するのに対し、材料に曲げが加わる試験法Aではせん断応力と垂直応力が同等程度となっている。

また、各試験法において接着層の条件別に応力比の値を比較すると、ポリウレア樹脂なしの条件Eよりもポリウレア樹脂ありの条件P, EPのほうが応力比の絶対値が小さくなっている。これはポリウレアの応力緩和効果が特にせん断方向の応力に対し作用することを意味している。

さらに、土木学会の指針⁴⁾には各試験法において応力比の取りうる範囲が示されており、この範囲と今回実施した試験の応力比の範囲を比較したものを表-6に示す。

試験法A, Bでは本実験の結果が概ね指針に示される範囲内にあるが、試験法Cについては指針の範囲0.44~0.80に

表-4 CFRP 当て板の接着強度に関する試験（試験法 A, C）試験結果

供試体番号 (試験法-施工条件)	はく離荷	はく離・降伏ひずみ	せん断応力	垂直応力	主応力	応力比	エネルギー解放率	
	P [kN]	$\varepsilon_s/\varepsilon_y$	τ_e [N]	σ_{ye} [N]	σ_{pe} [N]	σ_{ye}/τ_e	G_{Me}, G_{Ne} [N/mm]	
A-E-T	N1	1.27	0.777	40.3	38.6	64.0	0.957	0.800
	N2	1.33	0.792	42.2	40.4	67.0	0.957	0.878
	N3	1.45	0.918	46.0	44.0	73.1	0.957	1.043
A-P-T	N1	はく離せず						
	N2	はく離せず						
	N3	はく離せず						
A-EP-T	N1	2.21	1.560	15.2	10.6	21.4	0.699	—
	N2	2.08	1.310	14.3	10.0	20.2	0.699	—
	N3	1.99	1.271	13.7	9.6	19.3	0.699	—
A-E-S	N1	0.91	0.544	26.5	28.7	44.4	1.082	0.423
	N2	0.89	0.544	25.9	28.0	43.5	1.082	0.405
	N3	0.93	0.543	27.1	29.3	45.4	1.082	0.442
A-P-S	N1	はく離せず						
	N2	はく離せず						
	N3	はく離せず						
A-EP-S	N1	2.22	1.61	17.4	15.0	26.4	0.861	—
	N2	2.16	1.53	16.9	14.5	25.7	0.861	—
	N3	2.12	1.55	16.6	14.3	25.2	0.861	—
C-E-T	N1	360.4	2.38	34.8	7.53	38.8	0.216	—
	N2	368.2	2.69	35.6	7.69	39.6	0.216	—
C-P-T	N1	465.1	7.70	8.20	0.374	8.39	0.0454	—
	N2	424.8	5.53	7.56	0.346	7.73	0.0454	—
	N3	432.5	7.25	7.76	0.357	7.94	0.0454	—
C-EP-T	N1	380.4	5.72	6.79	0.306	6.94	0.0449	—
	N2	380.8	4.93	6.85	0.310	7.01	0.0449	—
	N3	365.3	5.96	6.62	0.301	6.78	0.0449	—
C-E-S	N1	203.4	0.53	18.0	3.32	19.7	0.184	0.189
	N2	177	0.44	15.7	2.89	17.2	0.184	0.143
	N3	179	0.43	15.9	2.92	17.4	0.184	0.147
C-P-S	N1	428.6	9.43	7.39	0.311	7.55	0.0419	—
	N2	429.6	1.43	7.47	0.316	7.63	0.0419	—
	N3	417.9	4.84	7.33	0.311	7.48	0.0419	—
C-EP-S	N1	399.7	6.76	7.99	0.269	8.13	0.0335	—
	N2	395.8	2.03	7.98	0.270	8.12	0.0335	—
	N3	404.7	4.97	8.23	0.279	8.37	0.0335	—

表-5 鋼材とCFRPの継手強度に関する試験（試験法B,D）試験結果

供試体番号 (試験法-施工条件)	はく離荷	せん断応力	垂直応力	主応力	応力比	エネルギー解放率	
	P [kN]	τ_e [N]	σ_{ye} [N]	σ_{pe} [N]	σ_{ye}/τ_e	G_{No}, G_{Se} [N/mm]	
B-E-T	N1	244.0	14.06	-3.831	12.28	-0.272	0.333
	N2	198.4	11.41	-3.108	9.97	-0.272	0.221
	N3	242.8	13.96	-3.798	12.19	-0.272	0.330
B-P-T	N1	255.2	5.20	-1.010	4.72	-0.194	0.366
	N2	246.4	4.91	-0.946	4.46	-0.193	0.339
	N3	226.6	4.75	-0.931	4.30	-0.196	0.287
B-EP-T	N1	222.0	4.36	-0.835	3.96	-0.191	0.275
	N2	241.8	5.44	-1.097	4.92	-0.202	0.327
	N3	229.2	4.39	-0.833	3.99	-0.190	0.293
B-E-S	N1	134.4	5.31	-1.384	4.66	-0.261	0.075
	N2	245.0	9.75	-2.549	8.55	-0.262	0.251
	N3	163.2	6.46	-1.688	5.67	-0.261	0.111
B-P-S	N1	237.8	4.18	-0.827	3.78	-0.198	0.234
	N2	232.2	4.96	-1.055	4.46	-0.213	0.223
	N3	204.2	4.29	-0.907	3.86	-0.211	0.173
B-EP-S	N1	232.8	3.79	-0.730	3.44	-0.192	0.225
	N2	236.2	4.07	-0.801	3.69	-0.197	0.232
	N3	239.2	4.42	-0.891	4.00	-0.202	0.239
D-E-T	N1	105	—	—	—	—	—
	N2	81.18	—	—	—	—	—
D-P-T	N1	99.6	—	—	—	—	—
	N2	76.8	—	—	—	—	—
	N3	79.6	—	—	—	—	—
D-EP-T	N1	93.4	—	—	—	—	—
	N2	60.2	—	—	—	—	—
	N3	56.6	—	—	—	—	—
D-E-S	N1	50.8	—	—	—	—	—
	N2	67.6	—	—	—	—	—
	N3	53.4	—	—	—	—	—
D-P-S	N1	80.4	—	—	—	—	—
	N2	90	—	—	—	—	—
	N3	66.2	—	—	—	—	—
D-EP-S	N1	65.4	—	—	—	—	—
	N2	49.8	—	—	—	—	—
	N3	40.6	—	—	—	—	—

対し実験結果0.03~0.18と垂直応力がせん断応力に比べて小さい値を示している。この原因として、指針では鋼材同士の接着層の評価を想定しているのに対し本実験では鋼材とCFRPの接着を行っており、さらにCFRP当て板の厚みが指針の当て板厚みと比較して薄いため当て板の曲げ剛性が低くなっていることが挙げられる。このことにより、CFRPが曲げによる垂直方向変位に比較的追従しやすく接着層の垂直応力は小さくなる。しかしながら、継手強度に関する試験法B, Dにおいては、CFRP単体部分に曲げ変形が集中しやすくなってしまふ。当初の形状の試験法Dの実験でははく離でなく曲げによる破壊が発生したのはこのためと考えられる。

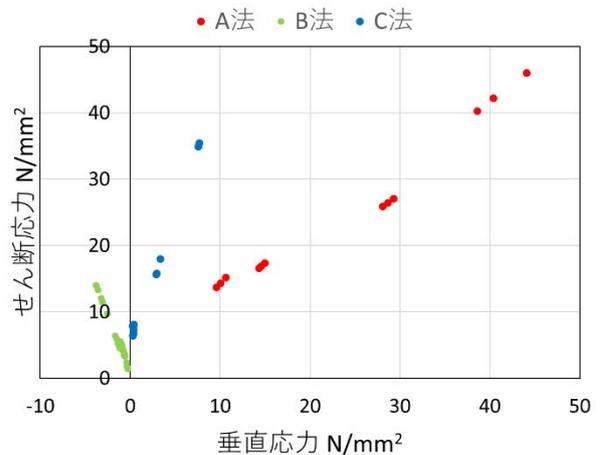


図-3 各試験法における応力比の値

表-6 本実験および土木学会指針⁴⁾の評価手法の比較

試験法		厚み[mm]			接着長さ [mm]	鋼板の基準降伏 強度[N/mm ²]	接着樹脂の主応力 σ_{pe} [N/mm ²]	応力比 σ_{ye}/τ_e
		鋼板	当て板	接着樹脂				
A	実験値	9	3.5~4.3	0.4~1.3	300	373	19.3~73.1	0.70~1.08
	指針の評価方法	9	9~16	0.3~1.0	50~300	365	30~110	0.70~4.26
B	実験値	9	13.3~16.3	0.5~5.6	200	284	3.4~12.3	-0.27~-0.19
	指針の評価方法	9	9~16	0.3~1.0	50~300	365	30~110	-0.30~-0.21
C	実験値	9	3.5~4.3	0.4~1.3	300	373	17.2~83.9	0.03~0.18
	指針の評価方法	9	9~16	0.3~1.0	50~300	365	30~110	0.44~0.80
D	実験値	9	9.1~9.7	0.5~3.3	100	284	—	—
	指針の評価方法	9	9~16	0.3~1.0	25~100	365	30~110	0.60~1.44

5. 結論

本研究では接着層の種類をパラメータとして鋼板とCFRPの接着強度や継手強度に関する4種類の実験を行い、はく離荷重やエネルギー解放率、応力比などの値を求めた。得られた知見を下記に示す。

- ① 鋼板とCFRPのはく離強度の評価試験では接着層にポリウレア樹脂が存在することによりはく離強度が上昇する。ポリウレア樹脂がない場合には鋼材の弾性域で、ポリウレアがある場合には鋼材の塑性域ではく離が生じた。一方、継手強度ではポリウレア樹脂の有無ははく離荷重にほとんど影響をもたない。
- ② ポリウレア樹脂ありの場合は接着層に生じる垂直方向とせん断方向の応力比が比較的小さくなっており、ポリウレアによりせん断方向の応力が主に緩和されていることが確認された。
- ③ 土木学会指針のはく離評価方法に示される供試体形状や応力比は鋼板同士の接着を想定したものであり、鋼板とCFRPのはく離評価を行う際はCFRP

の曲げ破壊や応力比の想定からのずれが起こる可能性を考慮することが望ましい。

参考文献

- 1) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル，2013.10
- 2) Shimizu, M., Ishikawa, T., Hattori, A. and Kawano, H., Failure Criteria for Debonding of Patch Plate Bonded onto Steel Members Subjected to Bending, Journal of JSCE, Vol.2, pp.310-322, 2014.12
- 3) 清水優，大倉慎也，石川敏之，服部篤史，河野広隆，鋼部材に接着された当て板のはく離によるエネルギー解放率，土木学会論文集A2, Vol.69, No.2, L_701-710, 2013.3
- 4) 土木学会複合構造委員会：FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)，丸善出版，2018.7
- 5) 西野晶弘，大垣賀津雄，秀熊佑哉，宮下剛，奥山雄介，小森篤也：鋼材とCFRPの接着強度に関する実験的研究，第13回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2019.11
- 6) 白井瑛人，北根安雄，石川敏之，伊藤義人：軸力が作用するCFRP接着補修鋼板に対するCFRP板のせん断変形を考慮した理論解析，構造工学論文集，Vol.61A, pp.798-807, 2015.4

(Received August 28, 2020)

ADHESIVE STRENGTH BETWEEN STEEL AND CFRP UNDER VARIOUS STRESS STATES

Akihiro NISHINO, Kazuo OHGAKI, Yuya HIDEKUMA,
Takeshi MIYASHITA and Yusuke OKUYAMA

The application cases of repair and reinforcement of steel structures by bonding CFRP sheets are increasing. Under these circumstances, experimental research on CFRP bonded steel under various stress states has been conducted. However, there is little data on the effectiveness of reinforcement evaluated from the viewpoint of the bonding strength of CFRP. Therefore, the authors have conducted a single patch bending test and double patch tensile test to evaluate the bonding strength, stress ratio of tensile and shear directions, and the energy release rate of the adhesive layer. In addition, in this study single lap tensile test and double lap tensile test is performed to evaluate the joint strength of CFRP and steel. From the results of these experiments, the dependencies on the type of CFRP sheet, stress state, and adhesive layer conditions were examined.