

(32) 鋼材とCFRPの接着強度に関する実験的研究

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・小森 篤也⁶

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

⁶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: komori.8fs.atsuya@nscm.nipponsteel.com

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。このような状況から、様々な応力状態におかれた CFRP 接着鋼部材に関する研究がされてきた。しかしながら、CFRP の接着強度の面から評価したデータは十分にまとめられていない。そこで本研究では、CFRP 接着鋼板の曲げ試験および引張試験を行うことにより CFRP の接着強度について、基礎データの取得を行った。また、引張・せん断方向の応力比や接着層のエネルギー解放率を算出し、CFRP シートの種類や接着条件による違いを評価した。

Key Words: CFRP sheet, Adhesive bonding, Debonding, Energy release rate

1. 背景

炭素繊維シートによる鋼材補強に関して、低弾性高伸度のポリウレタ樹脂層の導入により炭素繊維シートの剥離発生を抑制できることが確認されている。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、所定のずらし量をもって積層することが求められている。しかしながら橋梁などの実構造物において狭隘な箇所の補強を考える際、設計上ずらし量を確保できない場合も存在する。このようにずらし貼りができない場合に、どの程度炭素繊維シートによる補強効果が得られるかという点に関する検討は、現状不十分である。

また鋼板への当て板を接着する際の応力による剥離の指標として、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

剥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タ樹脂層を用いた際の検討など、実施工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、本研究では、土木学会の「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」⁴⁾に示される炭素繊維シートによって補強した鋼材の曲げや引張による剥離評価試験を行い、剥離発生時に鋼材や接着樹脂にはたらく応力とひずみを定量的に評価する。また同指針に基づき、剥離評価の指標である接着用樹脂のエネルギー解放率を算出する。

2. 試験内容

土木学会の「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」⁴⁾において、鋼板と当て板の接着接合部における強度の評価方法として A 法から D 法まで 4 つの試験法が示されている。本試験ではこのうち、FRP により鋼材の厚みを増す補強の際の剥離評価に注目し、A 法（片面に当て板が接着された鋼板の曲げ試験）と C 法（両面に当て板が接着された鋼板の引張試験）に沿った実験を実施した。

(1) 剥離発生条件に関する事前検討

本試験の実施に先立ち、剥離評価試験の C 法について当て板として用いる CFRP の厚さに関する検討を行った。鋼材と CFRP の剛性の差が大きいほど、早い段階で剥離が発生しやすいと予想される。CFRP による鋼材の補強では、鋼材の弾性域で剥離が発生することは望ましくないとされるが、試験結果からエネルギー解放率を算出するうえでは弾性域で剥離が発生することが必要となる。そのためここでは、積層数を増加していき、弾性域で剥離が発生する条件を確認した。

図-1 に示される断面をもつ CFRP 補強鋼板の引張試験を行った。SS400 の鋼板を炭素繊維シートで補強し、引張応力 400MPa まで载荷を行い弾性域で剥離が起こるか否か確認した。また試験パラメータとして、応力緩和層のはたらきをもつ高伸度パテであるポリウレタ層の有無や、炭素繊維シートの種類としてトウシートとストランドシートの 2 種類を設定した。試験に用いた炭素繊維シートの性能は表-1 に示すとおりであり、トウシート 3 層分の剛性とストランドシート 1 層分の剛性が等価となる。

実験パラメータと CFRP 剥離の有無を表-2 に示す。ポリウレタ層なしの供試体（供試体パターン 1, 3）、トウシートを両面 6 層ずつ積層した場合に鋼材弾性域で剥離

が発生した。またトウシート 6 層と剛性等価のストランドシート 2 層の場合でも弾性域での剥離が確認された。一方、ポリウレタ層ありの供試体（供試体パターン 2, 4）では、トウシート両面 18 層ずつ、ストランドシート両面 6 層ずつまで積層枚数を増やしても鋼材弾性域での剥離は発生しなかった。

この結果から、今回検討した形状においては、エネルギー解放率の評価を可能とするには、ポリウレタ層なしの場合に鋼材弾性域で剥離の発生する条件であるトウシート 6 層相当以上の炭素繊維シートを積層することが必要となると考えられる。ただしポリウレタ層ありの場合では炭素繊維シートの積層枚数を増やしても弾性域で剥離の発生には至らないため、本試験ではエネルギー解放率を算出することはできない。そのため、接着面の剥離条件を評価するという観点から、剥離強度を定めることが難しい鋼材の塑性域で剥離が起こる際には剥離時のひずみを用いて評価するものとした。以降の剥離評価試験では、弾性域で剥離が起こらない場合も降伏後剥離が発生するまで引張を行い、剥離ひずみ ε_s と降伏ひずみ ε_y の比を算出する。

(2) 供試体形状・施工種類および試験方法

事前検討試験の結果を受け、本試験供試体の形状や炭素繊維シート積層数を設定した。

表-1 炭素繊維シートの種類と性能

物性値	トウシート	ストランドシート
グレード	高弾性	高弾性
目付量 [g/m ²]	300	900
引張強度 [N/mm ²]	1.9×10^3	1.9×10^3
弾性係数 [N/mm ²]	6.4×10^5	6.4×10^5
1 層の厚み [mm]	0.143	0.429



図-1 当て板厚みに関する検討用供試体断面

表-2 CFRP 積層数と剥離発生有無

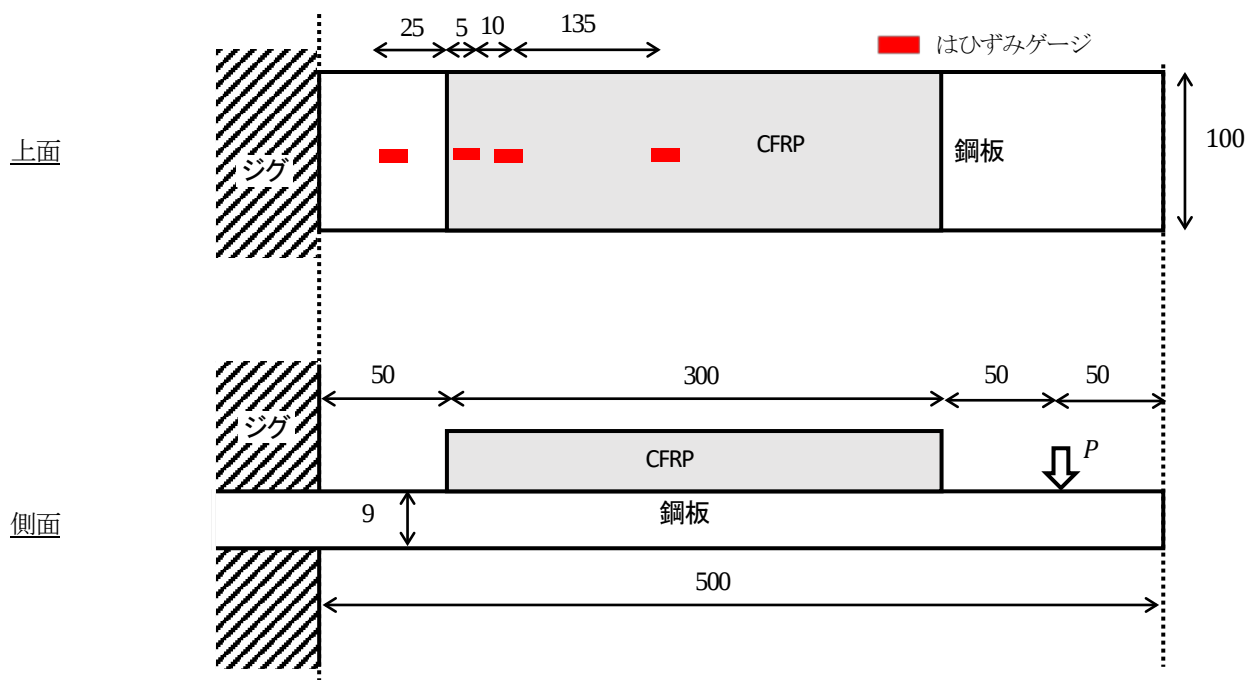
供試体パターン	エポキシプライマー	ポリウレタ層	含浸樹脂	炭素繊維シート	鋼材弾性域での剥離有無
1	あり	—	耐熱型	トウシート	6 層積層で剥離 : 371MPa
2	あり	あり	耐熱型	トウシート	6 層, 9 層, 18 層 : 剥離せず
3	あり	—	耐熱型	ストランドシート	2 層積層で剥離 : 260MPa
4	あり	あり	耐熱型	ストランドシート	2 層, 3 層, 6 層 : 剥離せず

基本的な断面形状は予備試験と同じものとし、供試体幅のみ25mmから100mmに変更した。さらに炭素繊維シート（CFRP）の積層条件は、事前検討でポリウレア樹脂層なしの場合に剥離が発生した条件である、高弾性トウシート6層および高弾性ストランドシート2層の2パターンに決定した。供試体の概要を図-2に示す。

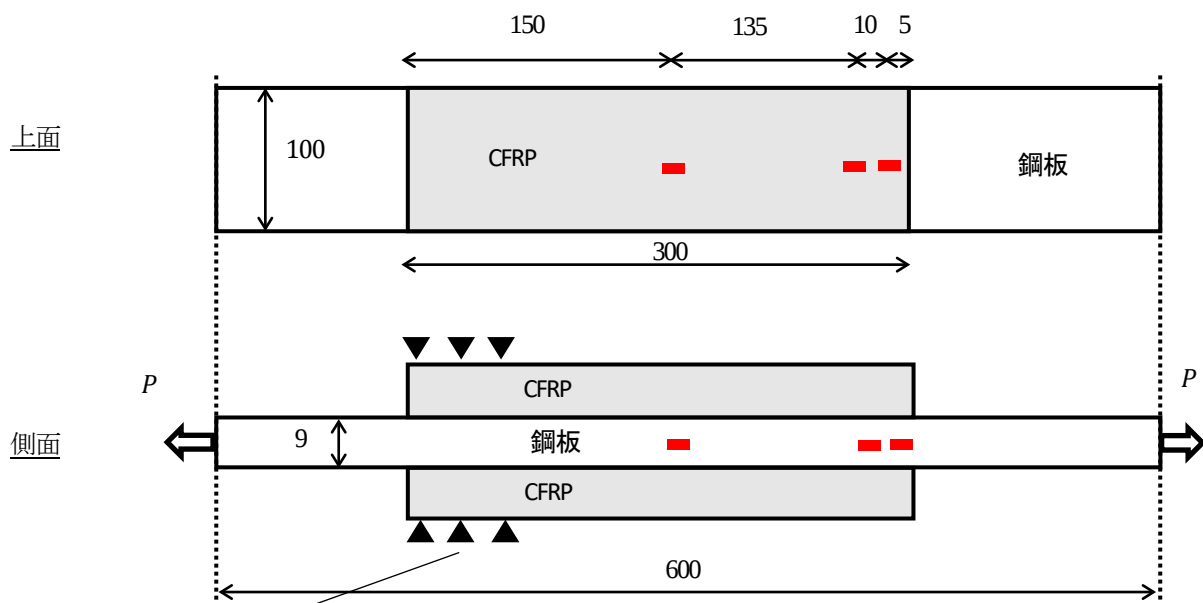
施工の種類としては、実際の施工で適用されうるパターンとして（E）エポキシプライマーあり、ポリウレア層あり、（P）エポキシプライマーなし、ポリウレア層あり、

（EP）エポキシプライマーあり、ポリウレア層あり、の3種類を設定した。供試体名称と施工種類を表-3に示す。

試験状況を図-3に示す。事前検討で実施したCFRP接着鋼板に軸方向引張が作用するC法に加え、曲げモーメントが作用するA法の試験を行った。载荷についてはA法ではジャッキを動かすことによる手動、C法では载荷容量2000kNのアムスラー式万能試験機を用いた変位制御とし、試験はN=3で行った。



(i) A法：片面に当て板が接着された鋼板の曲げ試験



片側当て板端部は万力で固定

(ii) C法：両面に当て板が接着された鋼板の引張試験

図-2 剥離評価試験 A法・C法供試体（単位:mm）

表-3 剥離評価試験供試体一覧

試験法	供試体番号	エポキシプライマー	ポリウレア層	含浸樹脂	炭素繊維シート	積層数	N数
A法	A-E-T	あり	なし	耐熱型	トウシート	6	3
	A-P-T	なし	あり	耐熱型	トウシート	6	3
	A-EP-T	あり	あり	耐熱型	トウシート	6	3
	A-E-S	あり	なし	耐熱型	ストランドシート	2	3
	A-P-S	なし	あり	耐熱型	ストランドシート	2	3
	A-EP-S	あり	あり	耐熱型	ストランドシート	2	3
C法	C-E-T	あり	なし	耐熱型	トウシート	6	3
	C-P-T	なし	あり	耐熱型	トウシート	6	3
	C-EP-T	あり	あり	耐熱型	トウシート	6	3
	C-E-S	あり	なし	耐熱型	ストランドシート	2	3
	C-P-S	なし	あり	耐熱型	ストランドシート	2	3
	C-EP-S	あり	あり	耐熱型	ストランドシート	2	3

表-4 供試体材料の物性値

(i) 鋼材		(ii) 炭素繊維シート		
名称	SM490Y	名称	トウシート	ストランドシート
弾性係数	221GPa	弾性係数	654GPa	686GPa
降伏応力	373MPa	強度	2485MPa	3370MPa
(iii) 樹脂				
名称	ポリウレア	トウシート含浸樹脂	ストランド含浸樹脂	
弾性係数	59.0MPa	3815MPa	3191MPa	
せん断弾性係数	19.8MPa	1363MPa	1140MPa	



(i) A法



(ii) C法

図-3 試験実施状況

3. エネルギー解放率の計算

剥離時の荷重を P として、エネルギー解放率は次のように表される。

$$\text{A法} \cdots G_{Me} = \frac{1}{2b_f E_s} \left(\frac{1}{l_s} - \frac{1}{l_v} \right) M_e^2$$

$$\text{C法} \cdots G_{Ne} = \frac{1-\xi_0}{4b_f E_s A_s} P^2$$

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

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

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

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_f : 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 : 剥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

である。記号の説明の※印の値は実測値を用いた。また鋼材、炭素繊維シート、接着層樹脂の材料物性を表-4に示す。

4. 試験結果

剥離荷重, 剥離・降伏ひずみ比および各種計算値の結果を表-5に示す. 同表に示すせん断応力 τ_e , 垂直応力 σ_{ye} , 主応力 σ_{pe} は剥離が起きた際の接着層に加わる応力の値であり, いずれも「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」⁴をもとに算出した. またエネルギー解放率 G は, 鋼材弾性域で剥離が起きたとき, つまり剥離・降伏ひずみ比 $\varepsilon_s/\varepsilon_y < 1$ の場合のみ有効な指標である.

剥離荷重と剥離ひずみは, ポリウレア層の有無によって大きな違いが見られた. ポリウレア層なしの場合(供試体名 A-E および C-E)は, C 法の一部で鋼材塑性域で

の剥離が見られるものの, 基本的に弾性域で剥離が発生している. 一方ポリウレア層ありの場合はいずれの供試体でも弾性域での破壊発生はなく, またポリウレア層なしの場合と比較して剥離荷重・剥離ひずみともに大きくなる傾向が見られた.

接着層に作用するせん断応力と垂直応力の関係を図-4に表す. エポキシプライマーの有無や炭素繊維シートの種類の違いでは応力値に大きな開きは見られなかった. ポリウレア層の有無に関しては, ありの場合にはなしの場合と比較して全体的に応力値が低くなる傾向が見られ, 垂直方向応力に関しては特に低い応力値を示した. この傾向は鋼材に軸方向応力のみを与える C 法で特に顕著であり, 応力比の値はポリウレア層の有無で大きな差が見

表-5 A 法・C 法試験結果

供試体番号		剥離荷重	剥離・降伏ひずみ比	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}
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	剥離せず						
	N2	剥離せず						
	N3	剥離せず						
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	剥離せず						
	N2	剥離せず						
	N3	剥離せず						
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	0.1843	0.189
	N2	177	0.44	15.7	2.89	17.2	0.1843	0.143
	N3	179	0.43	15.9	2.92	17.4	0.1843	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	—

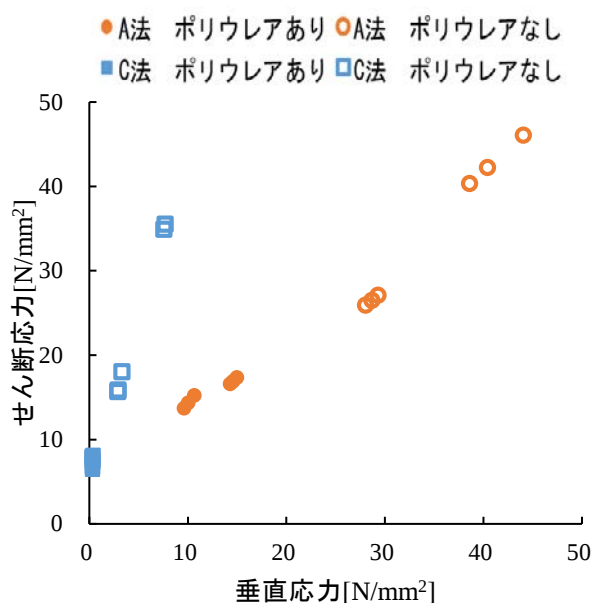


図-4 垂直応力・せん断応力の関係

られた。高伸度低弾性のポリウレタは、接着層に用いることで応力が加わった際に変形を許容することができるため応力の局部集中を防ぐことができ、結果的に材料全体の耐荷重は大きくなる。本試験において、接着部の応力が小さくなるにも関わらず剥離荷重が大きくなるのはこのためであると考えられる。

5. 結論

本研究では、炭素繊維シートをずらし無しで積層した鋼材の引張試験および曲げ試験を実施し、CFRP 補強鋼材における炭素繊維シートの剥離評価を行った。試験結果からエポキシプライマーやポリウレタ樹脂層の有無による剥離挙動の違いを確認し、剥離発生の指標としてエネルギー解放率や剥離・降伏ひずみ比を算出した。得られた知見を以下に記す。

- (1) 実施工に即した施工パラメータを設定した CFRP 接着鋼板について引張試験と曲げ試験を行い、剥離荷重、剥離・降伏ひずみ比をはじめとする各種試験データを明らかにした。また鋼材弾性域で剥離が発生した供試体については接着層のエネルギー解放率を算出した。
- (2) ポリウレタ層ありの場合、引張に関しても曲げに関しても剥離荷重、剥離ひずみが大きくなり、鋼材弾性域での剥離は起こらなかった。ポリウレタ層の変形による応力集中緩和の有効性が改めて確認されたといえる。
- (3) 接着層に作用するせん断応力と垂直応力の応力比は、鋼材に軸方向引張を与える場合と曲げモーメントを与える場合で傾向が変わり、またポリウレタ層が存在する場合は垂直方向応力の値が特に低下することが示された。

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。
- 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.
- 3) 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, I_701-710, 2013.
- 4) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，丸善出版，2018
- 5) 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.

(Received August 30, 2019)

EXPERIMENTAL STUDY ON ADHESIVE BONDING BETWEEN STEEL AND CFRP

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

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 effectiveness of reinforcement evaluated from the viewpoint of the bonding strength of CFRP. Therefore, in this study, basic data on the bond strength of CFRP is obtained by performing tensile and bending test of CFRP bonded steel. In addition, the stress ratio of the tensile and shear directions and the energy release rate of the adhesive layer were calculated, and the differences depending on the type of CFRP sheet and adhesive layer conditions were evaluated.