

(40) 高伸度弾性パテが鋼材とCFRPの 継手強度に与える影響

下前 照¹・清水 大輝²・大垣 賀津雄³・西野 晶弘⁴・秀熊 佑哉⁴
宮下 剛⁵・奥山 雄介⁶・小森 篤也⁴

¹ 学生会員 ものづくり大学 大学院（〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333）

E-mail: g01921004@iot.ac.jp

² 学生会員 ものづくり大学 建設学科（〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333）

E-mail: b01612059@iot.ac.jp

³ 正会員 ものづくり大学 建設学科 教授（〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333）

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

⁴ 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一丁目 13 番 1 号）

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

⁵ 正会員 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 准教授（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

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

⁶ 正会員 長野工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授（〒381-8550 長野市徳間 716）

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

炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強に関して、鋼材と CFRP の継手強度に関する知見や実験データは十分でない。そこで本研究では、鋼部材を炭素繊維シートで接合することを前提に、シングルラップ、ダブルストラップ接合部の引張試験を行い、解析的な検討を加えて継手強度の評価を試みた。また施工条件の違いを考慮し、エポキシプライマーと高伸度弾性パテの有無による継手強度についての比較・検討を行い、高伸度弾性パテを用いることにより接着強度が向上することを明らかにした。さらに FEM 解析により、継手試験のシミュレーションを行い、応力状態や偏心曲げモーメントが継手強度に与える影響について考察を加え、炭素繊維シートによる継手の基本性能を明らかにした。

Key Words: CFRP, Adhesive bonding, Joint strength, Peeling

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー（以下 CFRP と呼ぶ）は軽量かつ高強度であり、施工においても人力での運搬が可能で、大掛かりな機械を必要としないことから、近年、構造物の補修・補強材料として注目されている。また、施工後の重量負荷が小さく耐食性も優れるため、今後、CFRP を構造物の主要な部分に用いることが期待されている。

このような状況の中で、近年、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⁾や、FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）²⁾等が、関係各所で発刊され、実用化の段階にある。

一方で、鋼部材の継手においては、従来のボルト接合や溶接では、断面欠損や熱影響を受ける恐れがあるが、CFRP による継手が可能になれば、このような影響がな

くなり、優れた工法となることが予想される。しかしながら、鋼部材と CFRP の接着部についての研究は、各種行われているが³⁾、鋼部材の CFRP による接合継手の研究については十分行われておらず、確立に至っていない。

本研究では、鋼部材の CFRP による継手における接着接合部の強度を評価するために、参考文献²⁾で示されている B 法（ダブルストラップ接合の引張試験）と、D 法（シングルラップ接合の引張試験）を行うこととした。また、接着樹脂に関して施工条件の違いを考慮し、CFRP シートのはく離を防ぐ効果のある高伸度弾性パテ（以下パテと呼ぶ）やエポキシプライマーの有無をパラメータとして継手強度について試験による比較を行い、さらに FEM 解析により試験のシミュレーションを行い、応力状態や偏心曲げモーメントが継手強度に与える影響について考察した。

2. 試験概要

(1) 供試体製作

今回の試験に使用した材料の諸元を表-1に示す。使用したCFRPシートは高弾性炭素繊維を束ねた炭素繊維シートと、エポキシ樹脂で固めたストランドをシート状にした炭素繊維ストランドシート（以下、ストランドシートと呼ぶ）を用いている。また、供試体パラメータを表-2に示す。鋼板とCFRPを用いてダブルストラップ接合とシングルラップ接合の供試体を1つのパラメータに対し3体ずつ製作して試験を行った。

(a) ダブルストラップ接合供試体

SS400で長さ400mm、幅100mm、厚さ9mmの鋼板に、エポキシプライマーもしくは高伸度弾性パテを塗布し、その鋼板を図-1のように10mmの隙間を開けて2枚配置して、隙間をスチレンボードで埋めたのちに、ハンドレイアップでCFRPシートを貼付けた。

(b) シングルラップ接合供試体

図-2にシングルラップ（D法）供試体を示す。まずPPフィルムの上でCFRPの板をハンドレイアップで製作

表-1 材料諸元

項目	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)
鋼板 (SS400)	9	400	2.1×10^5
炭素繊維シート	0.143	2485	6.4×10^5
ストランドシート	0.429	3080	6.4×10^5
高伸度パテ材 (FU-Z)	—	8	55~75
エポキシ樹脂 (FR-E9P)	—	29	—

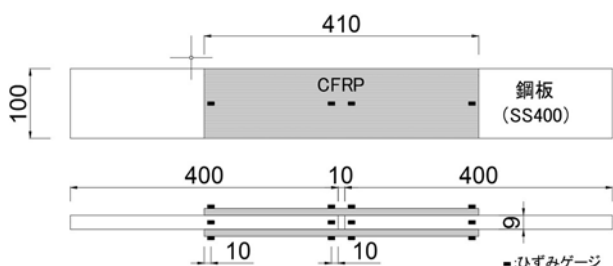


図-1 ダブルストラップ供試体

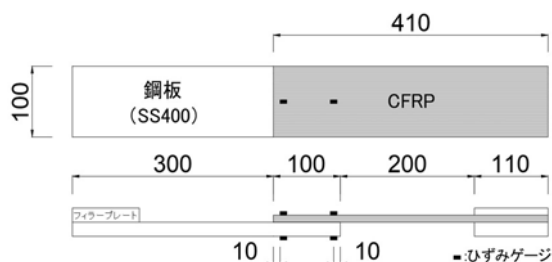


図-2 シングルラップ供試体

する。鋼板にはあらかじめプライマーもしくはパテを塗布し、PPフィルムからはがしたCFRPと鋼板を含浸樹脂によって接着した。

(2) 荷重方法

両端100mmをチャックで挟み、2,000kN万能試験機で荷重を単調増加させ、シートのはく離が確認できるまで荷重を行った。シングルラップ接合は端部にフィラープレートを取り付けてチャックで挟むことで真つすぐ引っ張るようにした。荷重状況を図-3に示す。

(3) 測定位置

(a) ひずみ測定

荷重中の応力性状等を確認するために、1軸ひずみゲージを設置した。ダブルストラップ接合供試体は図-1に示すように、軸方向の鋼板端部から10mm、シートの端部から10mmの位置において、鋼板の厚みの中央とシートの幅方向中央の軸方向ひずみを計測するようにゲージを貼付けた。シングルラップ接合供試体は図-2に示すように、シートと鋼板それぞれの端部から10mmの位置で鋼板とシート両方の幅方向中央に、軸方向ひずみを計測するようにゲージを貼付けた。

(b) 変位測定

供試体全体の伸びを測定するため、図-3に示すように供試体の前後の2点で鉛直方向に変位計を設置し、供試体軸方向の変位を計測した。

表-2 供試体パラメータ

供試体名	試験法	シート種類	プライマー	パテ	予備試験N数	本試験N数
B-TE	B法	炭素繊維シート	○	×	1	3
B-TP			×	○	-	3
B-SE		ストランドシート	○	×	-	3
B-SP			×	○	-	3
D-TE	D法	炭素繊維シート	○	×	1	3
D-TP			×	○	-	3
D-SE		ストランドシート	○	×	-	3
D-SP			×	○	-	3



図-3 荷重状況

3. 予備試験

供試体の鋼板に貼付ける CFRP シートの適切な枚数を確認するために、以前に行った同様の試験を参考に、表-3 に示す通りに、ダブルストラップ接合とシングルラップ接合についてそれぞれ1体ずつ、プライマー有りでパテ無しの供試体を製作し、予備試験として引張試験を行った。この2体の予備試験の荷重と軸方向変位の関係について図-4 に示す。

(1) ダブルストラップ接合

図-5 にダブルストラップ接合（B 法）で予備試験を行った供試体の破壊状況を示す。鋼材の降伏点は 287N/mm^2 であり、降伏荷重は 258kN であるが、図-4 のグラフから鋼材が降伏に至る前に荷重が落ちている。また、CFRP が表-3 に示した破壊荷重計算値よりも低い値で、図-5 に示すように供試体中央において CFRP が破断した。

そこでこれらの原因を探るために FEM 解析を行った。解析に用いた材料諸元を表-4 に示す。モデルは平面要素で、実際の供試体の板厚を入力した。鋼材と CFRP の

間に入るプライマーやパテは考慮せず、同一の節点を与えることで接合した。支持条件は試験同様に端部 100mm を固定し、片側の軸方向を自由として、強制変位によって荷重をかけて解析を行った。CFRP シートの引張強度、設計厚さ、積層数、CFRP の厚みから簡易的に計算した CFRP の引張強度は 1066N/mm^2 であり、それを越えた時点で終局を迎えると判断した。その時点でのミーゼス応力コンター図を図-6 に、荷重-軸方向変位を図-7 に示す。同図から、供試体中央の CFRP が隙間に入り込むように曲げ変形が生じており、隙間があることによる偏心曲げの影響が生じていることがわかる。

また、鋼材の降伏で変形が大きくなるほぼ直前に CFRP の引張強度に達している。これは試験結果と一致しているため、今回の予備試験で CFRP が破断したのは曲げの影響だと判断することとした。CFRP は軸方向に対しては高い強度を発揮するが、曲げの影響を受けた鋼材に近い層の繊維が破断して鋼材の降伏までの強度は得られなかったと考えられる。

表-3 予備試験供試体パラメータ

供試体名	試験法	プライマー	パテ	シート積層数	CFRP 破壊荷重計算値 (kN)
B-TE-1	B 法	○	×	6(片面)	426.4(12 層)
D-TE-1	D 法	○	×	6	213.2

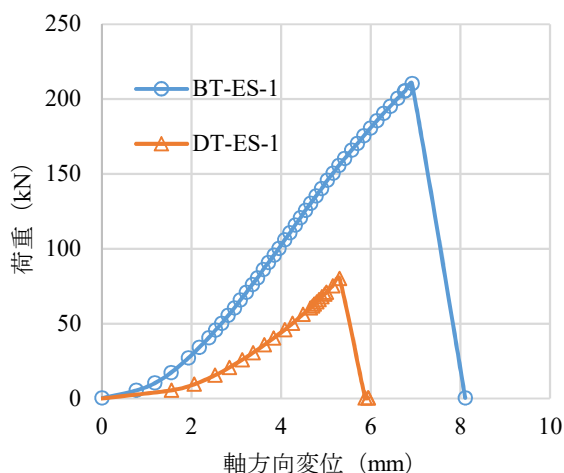


図-4 荷重-軸方向変位の関係（予備試験）



図-5 ダブルストラップ供試体 予備試験の破壊状況

表-4 解析に用いた材料諸元

部材	要素	材料	降伏点 (N/mm ²)	板厚 (mm)	高さ (mm)	断面積 (mm ²)
鋼材	平面要素	等方性	287	100	9	900
CFRP		直交異方性	—	100	4	400

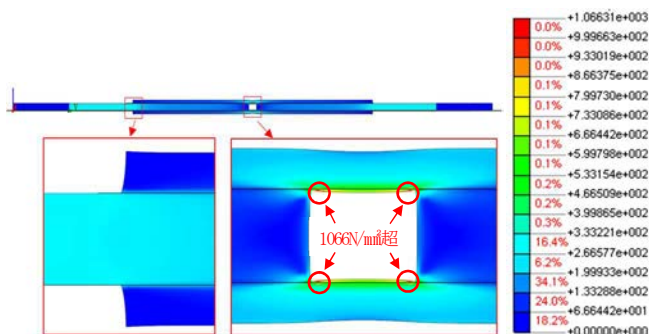


図-6 ダブルストラップ解析（ミーゼス応力）

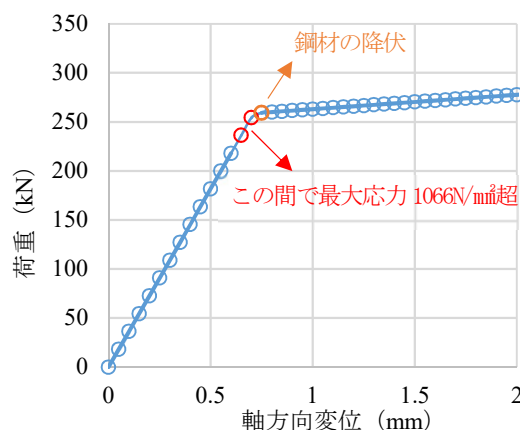


図-7 ダブルストラップの解析（軸方向変位）

(2) シングルラップ接合

予備試験を行ったシングルラップ供試体の破壊状況を図-8 に示す。シングルラップ接合においてもダブルストラップ接合と同じく CFRP が破断してしまった。

そこで同様の解析を行い、予備試験で CFRP が破断した原因を探ることとした。解析によって得られた最大応力が CFRP の引張強度 533N/mm^2 を超えた時点でのミーゼス応力コンター図を図-9 に、荷重軸方向変位を図-10 に示す。コンター図の右側が CFRP であり、鋼材の端部付近の CFRP で 533N/mm^2 を超える結果となった。解析結果から、CFRP と鋼材に板曲げ変形が見られ、また供試体も鋼材の端部で CFRP が破断していることから、シングルラップ接合の引張試験は偏心曲げの影響がダブルストラップよりかなり大きいといえる。

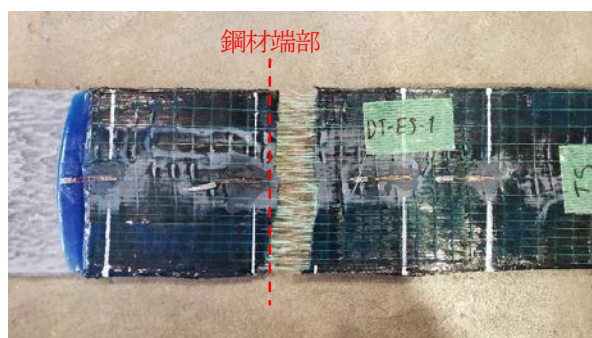


図-8 シングルラップ供試体 予備試験の破壊状況

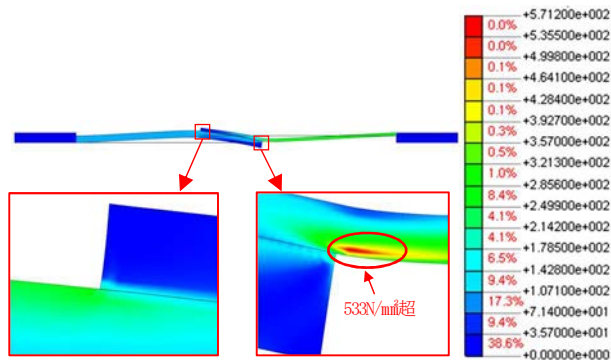


図-9 シングルラップの解析（ミーゼス応力）

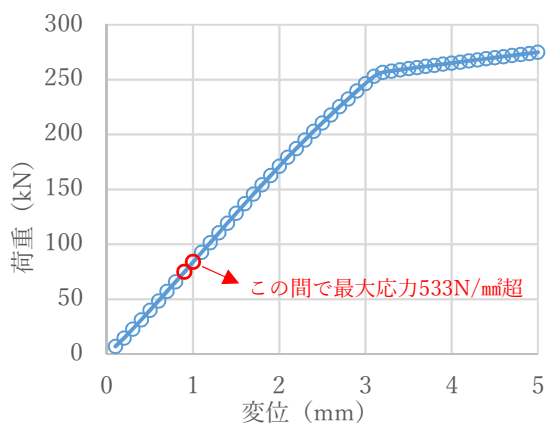


図-10 シングルラップの解析（軸方向変位）

4. 本試験

予備試験の結果を受けて供試体のパラメータおよび、試験方法を見直して本試験を行った。2つの試験法について表-5 の供試体パラメータに示すようにシートの積層数を増やし、強度を上げることで CFRP を破断させないようにした。シングルラップ接合の引張試験については、図-11, 12 に示すように曲げの影響を緩和させるため、CFRP と鋼材の曲げ変形が大きい部分に万力を用いて鋼板を添えることで対策を行った。曲げ補強に用いた鋼板は、供試体と同じ SS400 の板厚 9mm であり、接着接合部には触れないように 10mm の間隔を空けて配置した。

表-5 本試験供試体パラメータ

供試体名	試験法	シート種類	プライマー	パテ	シート積層数
B-TE	B法	炭素繊維シート	○	×	11 (片面)
B-TP			×	○	
B-SE		ストランドシート	○	×	4
B-SP			×	○	
D-TE	D法	炭素繊維シート	○	×	12
D-TP			×	○	
D-SE		ストランドシート	○	×	4
D-SP			×	○	

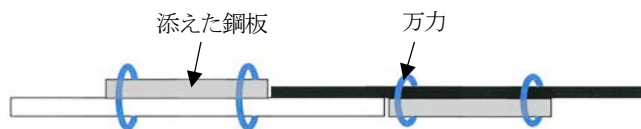


図-11 本試験 シングルラップ引張試験 概要図



図-12 本試験 シングルラップ引張試験状況

5. 試験結果

表-6 に本試験の結果を示す。同表には最大荷重とはく離箇所を示している。図-13 には、供試体のパテ無しとパテ有りの厚さ方向の積層構成を示す。表-6 のはく離箇所を示している、S、EP、PP、PU、および CFRP の記号は、図-13 に示す積層された材料の名称記号である。例えば S-EP は、鋼板 S とエポキシプライマー EP の間ではく離したことを意味する。また表-6 において、はく離箇所の当て板端部と鋼板端部は図-14 に示す通りである。表-6 で各種端部のはく離状況を記載している。

(1) 最大荷重

表-6 のダブルストラップ (B 法) の最大荷重より、ストランドシートのパテ無しは最大荷重が小さく、ばらつきが大きい。一方、パテ有りは炭素繊維シートもストラ

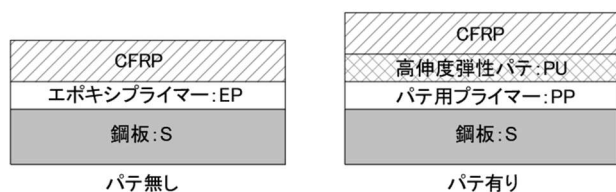


図-13 供試体 接着層の断面

ンドシートも最大荷重が大きく、安定した結果である。また、シングルラップ (D 法) については、パテの有無で最大荷重に優位な差がないことがわかる。

(2) はく離箇所

表-6 よりストランドシートを用いた場合、鋼板端部で CFRP の層間破壊が生じるケースが見られる。そのため、最大荷重にばらつきが生じていると考えられる。特にパテ無しのストランドシートの場合に最大荷重が低くなる傾向が伺える。

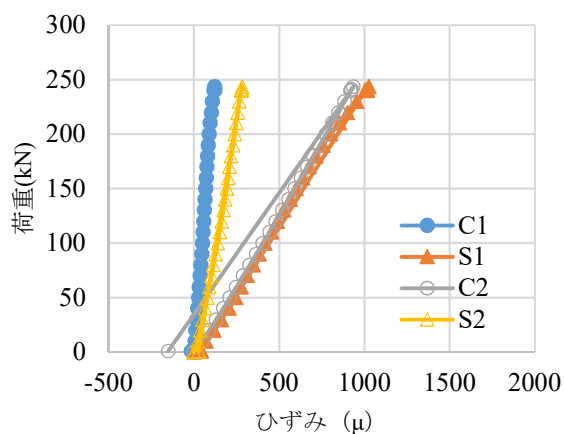
ダブルストラップ接合の引張試験においては、鋼板突合せ端部の破壊が先行することが望ましい。²⁾ しかしながら、パテ無しの場合は鋼板 S とエポキシプライマー EP の間ではく離が当て板端部で発生するケースが多く、破壊状況としては問題点があるといえる。



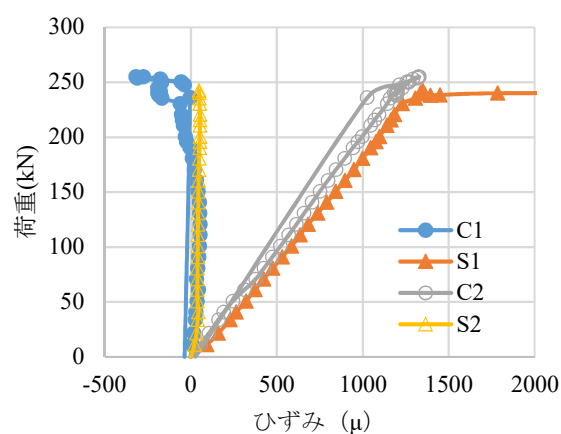
図-14 はく離箇所の表記とひずみ計測点

表-6 試験結果

供試体名	炭素繊維シート	プライマー	パテ	積層数	最大荷重 (kN)	最大荷重 平均値 (kN)	はく離箇所	
							当て板端部	鋼板端部
B-TE-1	炭素繊維シート	○	×	11	244.0	243.9	S-EP	
B-TE-2					245.0		S-EP	
B-TE-3					242.8		S-EP	
B-TP-1	炭素繊維シート	×	○	11	255.2	242.7	PP-PU	PU 層間破壊
B-TP-2					246.4		CFRP 層間破壊	PP-PU
B-TP-3					226.6		PP-PU	PU 層間破壊
B-SE-1	ストランドシート	○	×	4	134.4	165.3	S-EP	CFRP 層間破壊
B-SE-2					198.4		S-EP	CFRP 層間破壊
B-SE-3					163.2		S-EP	CFRP 層間破壊
B-SP-1	ストランドシート	×	○	4	237.8	224.7	PP-PU	CFRP 層間破壊
B-SP-2					232.2		PP-PU	CFRP 層間破壊
B-SP-3					204.2		CFRP 層間破壊	
D-TE-1	炭素繊維シート	○	×	12	105.0	95.2	S-EP	
D-TE-2					81.1		S-EP	
D-TE-3					99.6		S-EP/CFRP 層間破壊	
D-TP-1	炭素繊維シート	×	○	12	76.8	83.3	PP-PU/PU 層間破壊	
D-TP-2					79.6		PP-PU/CFRP 層間破壊	
D-TP-3					93.4		PP-PU/CFRP 層間破壊	
D-SE-1	ストランドシート	○	×	4	67.6	67.1	S-EP/CFRP 層間破壊	
D-SE-2					53.4		S-EP	
D-SE-3					80.4		S-EP/CFRP 層間破壊	
D-SP-1	ストランドシート	×	○	4	90.0	73.9	PP-PU/PU 層間破壊	
D-SP-2					66.2		CFRP 層間破壊	
D-SP-3					65.4		CFRP 層間破壊	



(a) B-TE-1 パテ無し



(b) B-TP-1 パテ有り

図-15 ダブルストラップ パテの有無によるひずみ比較

(3) ひずみ挙動

ダブルストラップにおける炭素繊維シート (B-TE-1 と B-TP-1) について、ひずみ挙動を図-15 に示す。同図 (a) はパテ無し、(b)はパテ有りである。ひずみ計測は図-14 に示している、C1、C2、S1、S2 であり、C1 は当て板端部の CFRP 表面、C2 は鋼板端部の CFRP 表面、S1 は当て板端部の鋼板側面、S2 は鋼板端部の側面である。

当然のことながら、パテの有無にかかわらず、C1 と S2 はひずみがほとんど発生していない。また、同図 (b) のパテ有りの S1 については、降伏ひずみ ($1,400\mu$) 付近でひずみが急激に増加していることから、鋼板が降伏しても CFRP がはく離していないことがわかる。図には示されていないが、鋼板ひずみ $15,000\mu$ 程度まで CFRP にはく離も破壊も生じていなかった。一方、同図 (a) のパテ無しの S1 については $1,000\mu$ 程度で鋼板とエポキシプライマーの間ではく離が生じており、接合部の機能として十分でないことがわかる。

6. 結論

本研究では、鋼材と CFRP の接着接合部における継手強度を評価するために、ダブルストラップ接合の引張試験とシングルストラップ接合の引張試験を行った。予備試験の結果を受けて FEM 解析を行い、本試験では試験法を

見直した。それによって得られた結果から、高伸度弾性パテの有無による、はく離箇所やひずみ挙動の違いが確認できた。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼板を CFRP で接着接合したダブルストラップ接合の引張試験とシングルストラップ接合において、偏心曲げの影響が顕著であり、十分なシート層数の設定や、添え板による補強が必要である。
- (2) 本試験結果の最大荷重から、パテ無しよりもパテ有りの方が安定して高い強度を出すことができ、はく離箇所やはく離状況においてもばらつきが少なく安定している。
- (3) ひずみ挙動の比較では、パテを挿入することによって、鋼板の降伏ひずみを超えても CFRP のはく離や破壊が発生しなくなることがわかった。

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) 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
- 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最新技術，丸善出版，2013

(Received August 30, 2019)

EVALUATION OF JOINT STRENGTH BETWEEN STEEL AND CFRP WITH HIGH ELONGATION ELASTIC PUTTY.

Teru SHIMOMAE, Daiki SHIMIZU, Kazuo OHGAKI, Akihiro NISHINO, Yuya HIDEKUMA, Takeshi MIYASHITA, Yusuke OKUYAMA and Atsuya KOMORI

In this study, in order to evaluate the joint strength at the adhesive joint between steel and CFRP, a double strap joint tensile test and a single lap joint tensile test were conducted. FEM analysis was performed based on the results of the preliminary test, and a final test was conducted with the test method reconsidered. From the results obtained, it was confirmed that there was a difference in the separation site and strain behavior depending on the presence or absence of the high elongation elastic putty.