

## (28) 鋼製梁を補強したCFRPシートの接着限界に関する実験研究

菊地 新平<sup>1</sup>・大垣 賀津雄<sup>2</sup>・飯塚 正貴<sup>1</sup>・小林 朗<sup>3</sup>・  
秀熊 佑哉<sup>3</sup>・宮下 剛<sup>4</sup>・奥山 雄介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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: g01721004@iot.ac.jp, b014012009@iot.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 ものづくり大学 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)  
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 (〒104-0061 東京都中央区銀座7-16-3日鐵木挽ビル5階)  
E-mail: kobayashi.hr7.akira@nsmat.nssmc.com, hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

<sup>4</sup>正会員 長岡技術科学大学 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

<sup>5</sup>正会員 長野工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒381-8550 長野県長野市大字徳間716)  
E-mail: y\_okuyama@nagano-nct.ac.jp

薄肉鋼構造物の補強は主応力度を低減させることだけが有効ではなく、鋼板の曲げ剛性を大きくして座屈耐荷力を向上させることが有効と考えられる。したがって、板パネル全体にCFRPシートをずらさずに貼り付けて補強する工法についても検討中である。本研究では、4点曲げ試験にて鋼製梁をCFRPシートを貼り付けて補強し、接着限界と応力低減効果について検討した。また、補強の際は、CFRPシートと鋼材の間に高伸度弾性パテ材を挿入した場合と、鋼材表面に直接エポキシ樹脂により含浸接着した場合にわけて比較した。その結果では、パテ材を挿入した場合は、所定の接着効果を発揮することを示した。さらに、CFRPシートの剥がれ限界ひずみや応力低減効果についても明らかにしている。

**Key Words :** CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer), bonding limit, steel beam, bending test,

### 1. はじめに

現在、我が国の鋼橋部材は経年劣化に伴う鋼板の減肉や設計活荷重増加により作用応力が大きくなっている。このため、鋼部材の耐荷力不足が懸念される。これらの補強工法には、当て板をボルトや溶接によって接合する工法などがあるが、施工時に重機などの機材が必要となるため、施工性に優れない。このため、軽量で施工が容易な炭素繊維シート (CFRP シート) を鋼部材に貼付して、補修・補強を行う工法が多数研究されている。

しかし、この工法には主な課題として剥離がある。従来のCFRPシート接着工法では、剥離対策に1層ごとに端部をずらして貼付した場合 (以下、ずらし貼りと呼ぶ) は、剥離抑制はできるが十分とはいえない<sup>1)</sup>。また、CFRP板端部を鋼板でボルト止めする工法を検討し

ている研究<sup>2)</sup>もあるが剥離防止はできるものの、施工が困難であると考えられる。さらに特殊な成形法を用いた鋼部材のCFRPによる補修・補強の研究事例<sup>3)</sup>もあるが剥離の問題は解決されていない。そのため、高伸度弾性パテ材 (以下、パテ材と呼ぶ) の利用とずらし貼りの両方の対策をとった研究<sup>4)</sup>を行ってきている。現行の工法<sup>5)</sup>では、パテ材とずらし貼り両方の対策をとっている。しかし、パテ材単独使用の場合の確認実験を十分に行わないまま、ずらし貼りを前提として検討を行っており、大きさが制限される箇所では、施工性に欠けている。

そこで本研究では、CFRPシートと鋼材の間にパテ材を挿入した場合と、鋼材表面に直接エポキシ樹脂により含浸接着した場合の剥離限界および応力低減効率を確認するため、鋼製梁にCFRPシートのずらし量をとらずに積層し、4点曲げの確認試験を行うこととした。

## 2. 実験概要

### (a) 実験供試体

本実験供試体は、長さ5,200mm、桁高さ418mmのH形断面であり、その鋼製梁の上下フランジに対してCFRP補強を施したものである。繊維方向は、鋼製梁の部材軸方向とした。供試体および荷重要領を図-1に示す。鋼製梁の断面寸法および材料諸元について表-1に示す。この鋼製梁に表-2に示すCFRPシートを5層エポキシ樹脂により積層接着した。供試体長さ方向の中央より左側（P側）では、CFRPを貼付する際に鋼部材とCFRPの間にパテ材を挿入しており、上（U）下（L）フランジパネル

1～4と腹板パネルにCFRPシートを貼付した。右側（N側）では、パテ材を挿入せずにP側と同じようにCFRPシートを貼付した。また、本供試体では、層ごとにずらし貼りはせず、同じ大きさのCFRPシートを5層積層した。CFRPシートの貼付図を図-2に示す。

### (b) 実験方法

荷重は、万能試験機から荷重梁を介して、供試体に荷重を伝達している。

計測位置を図-3に示す。計測点の名前は、図-1に示すパネル名と図-3に示す、アルファベットにより与えている。腹板のFとBは、表と裏を意味する。

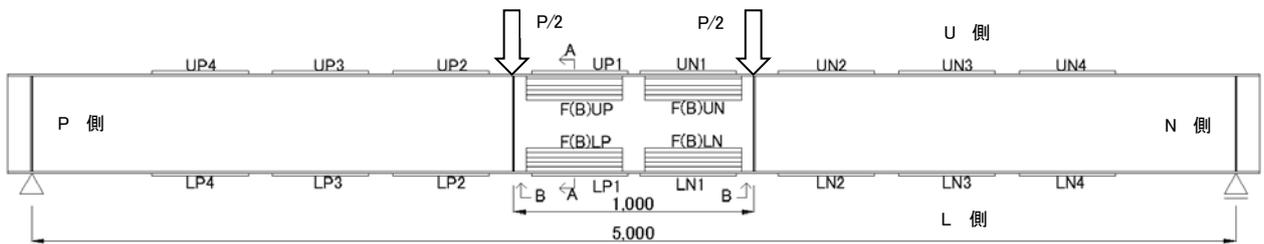


図-1 供試体および荷重要領

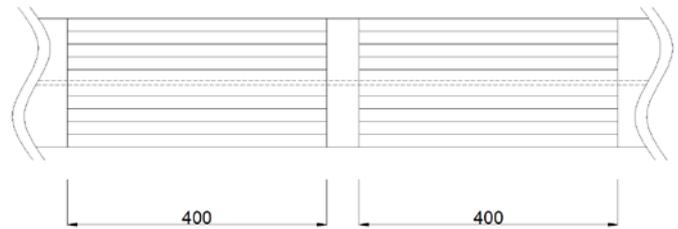
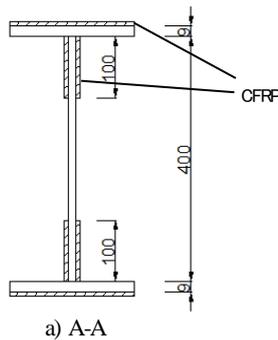


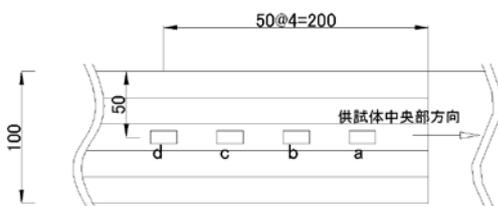
図-2 CFRP貼付図

表-1 鋼製梁の断面寸法および材料諸元

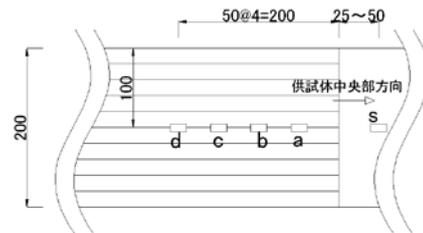
鋼種	断面寸法(mm)		弾性係数(GPa)	降伏応力(MPa)
	上下フランジ	腹板		
SS400	200×9	400×6	205	359

表-2 炭素繊維シート、樹脂の材料特性

項目	設計厚・塗布厚(mm)	目付量(g/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(GPa)	引張強度(MPa)
CFRPシート	0.143	305	644	2660
高伸度弾性パテ材	0.82	—	0.073	9
エポキシ樹脂	0.51	—	2.6	64



a) ウェブパネル



b) フランジパネル

図-3 計測位置  
28-2

### 3. 実験結果

#### (a) ひずみ伝達

図4, 図5 にそれぞれのパネルのひずみ分布図を示す。図は 100kN 載荷時のひずみを各計測点で示したものである。縦軸は, CFRP 上の各測定点のひずみ  $\epsilon_{cf}$  をパネル付近の鋼材のひずみ  $\epsilon_s$  で除したものである。腹板パネルは無補強時中央部ゲージ軸線上の鋼材ひずみの計算値で同じように CFRP 上のひずみを除したものである。ひずみ値は便宜上, 絶対値としている。これらの結果より以下のことがわかる。

1) P 側は, N 側と比べ端部近傍 a 点のひずみ値は鋼材ひずみの 30~40%と低く, 鋼材からのひずみが伝達されていくことがわかる。一方, N側 a 点

のひずみ値は, 鋼材ひずみに対して 55~80%で, 高い値である。

- 2) N側 a~d 点のひずみ値は 55~80%程度でほぼ一定であるが, P側 a~d 点のひずみ値は 25~80%と徐々に増加しており, CFRP 端部の a 点から d 点に向かい, N 側に近い値になることがわかる。これは, パテ材を鋼材と CFRP の間に挿入したことにより, N 側よりもひずみ伝達が遅れることがと考えられる。P 側の d 点におけるひずみの平均値は, 上フランジで 72.0%, 下フランジで 62.5%と N 側とほぼ同等にひずみ伝達がなされている。
- 3) N側では, 上フランジ, 下フランジともに同程度でひずみ伝達されているが, P 側では上フランジの圧縮側の方が 10%程度大きくひずみ伝達されている傾向を示している。

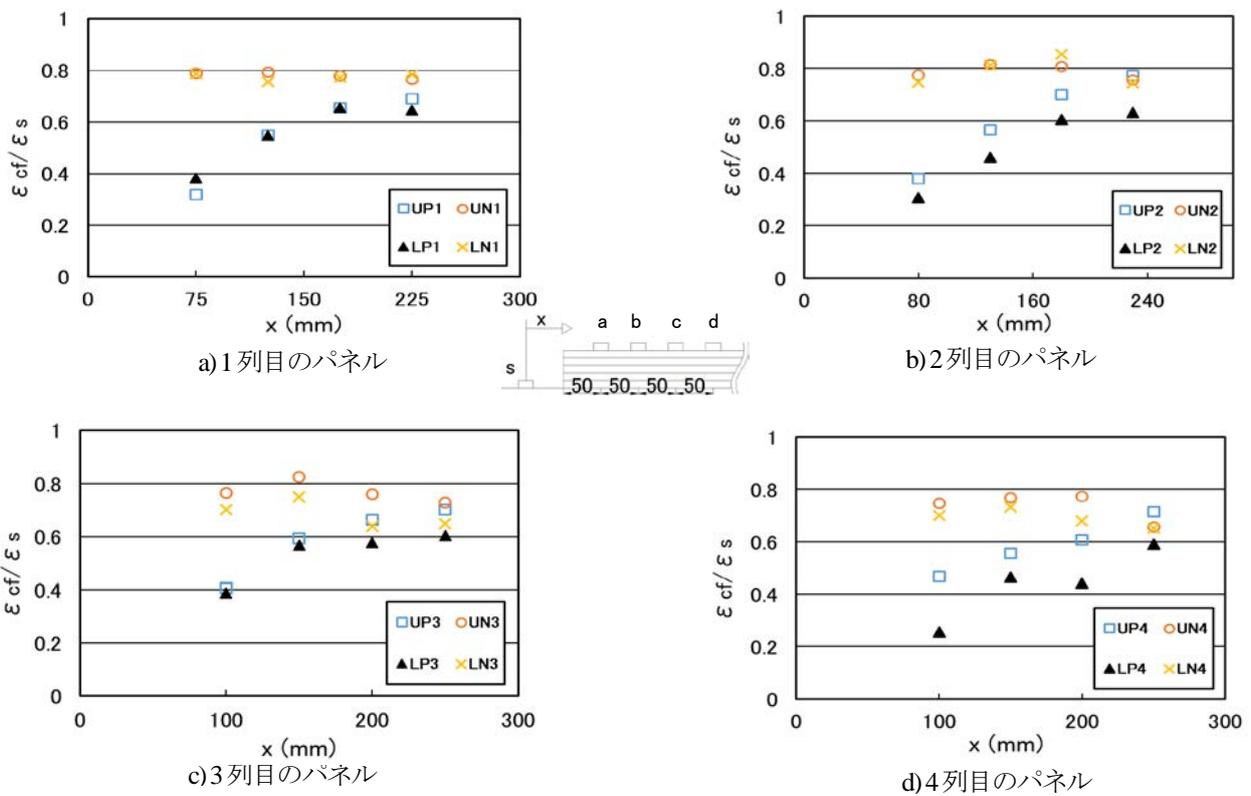


図4 フランジパネルのひずみ分布

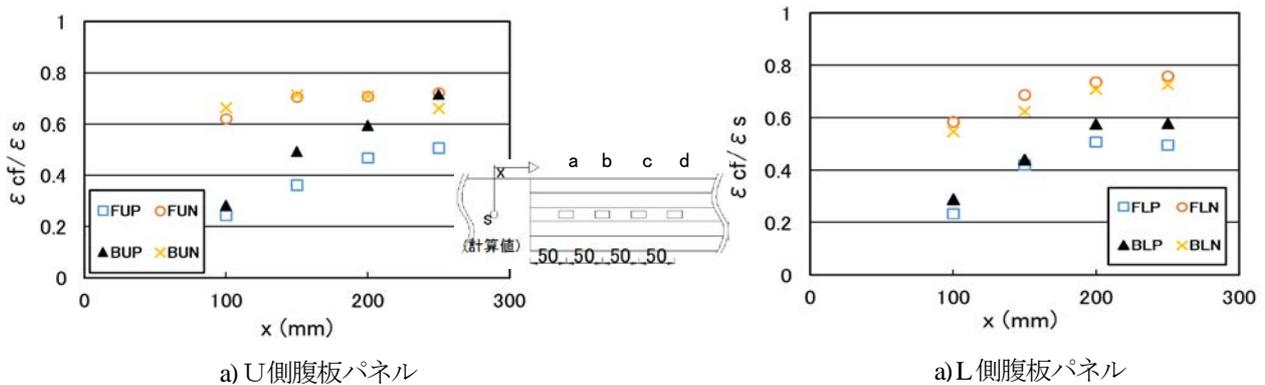


図5 腹板パネルのひずみ分布

## (b)剥離荷重

供試体のフランジパネル鋼材部と CFRP の荷重-ひずみ線図を図-6、図-7 に、供試体中央部ウェブパネルの CFRP 上の荷重-ひずみ線図を図-8、図-9 に示す. 表-3 に剥離荷重, 剥離ひずみを示す. 剥離点は, CFRP 上のひずみの急減点を剥離点とした. CFRP が剥離した場合, CFRP は剥離したのみで CFRP 自体は破壊には至っておらず, 鋼材からひずみが伝達されなくなり, ひずみ値が急減したと考えられるためである.

- 1) 図-6のa), b), d)よりUP1, UN1, UN2でひずみが急減しており, 剥離が生じているのがわかる. UN1, UN2の剥離はピーク荷重に達する前に発生

している. 一方, UP1 の剥離はピーク荷重を過ぎた後に発生しており, UN1 よりも鋼材部のひずみが大きい点で剥離している. このことから, N側パネルよりも鋼材の変形に追従していたことがわかる. P側では, 鋼材と CFRP の間に挿入したパテ材が有効に働き, 端部に生じるせん断応力を緩和し, 剥離荷重が上昇したのと考えられる.

- 2) 図-7の b), d), f)より, LN1~3で剥離が生じているのがわかる. N側では, 鋼材が弾性範囲内で剥離しており, 補強という観点で, 機能しなくなる可能性が高い. P側では, ピーク荷重を過ぎた後も剥離が見られないまま, 載荷を終えた.

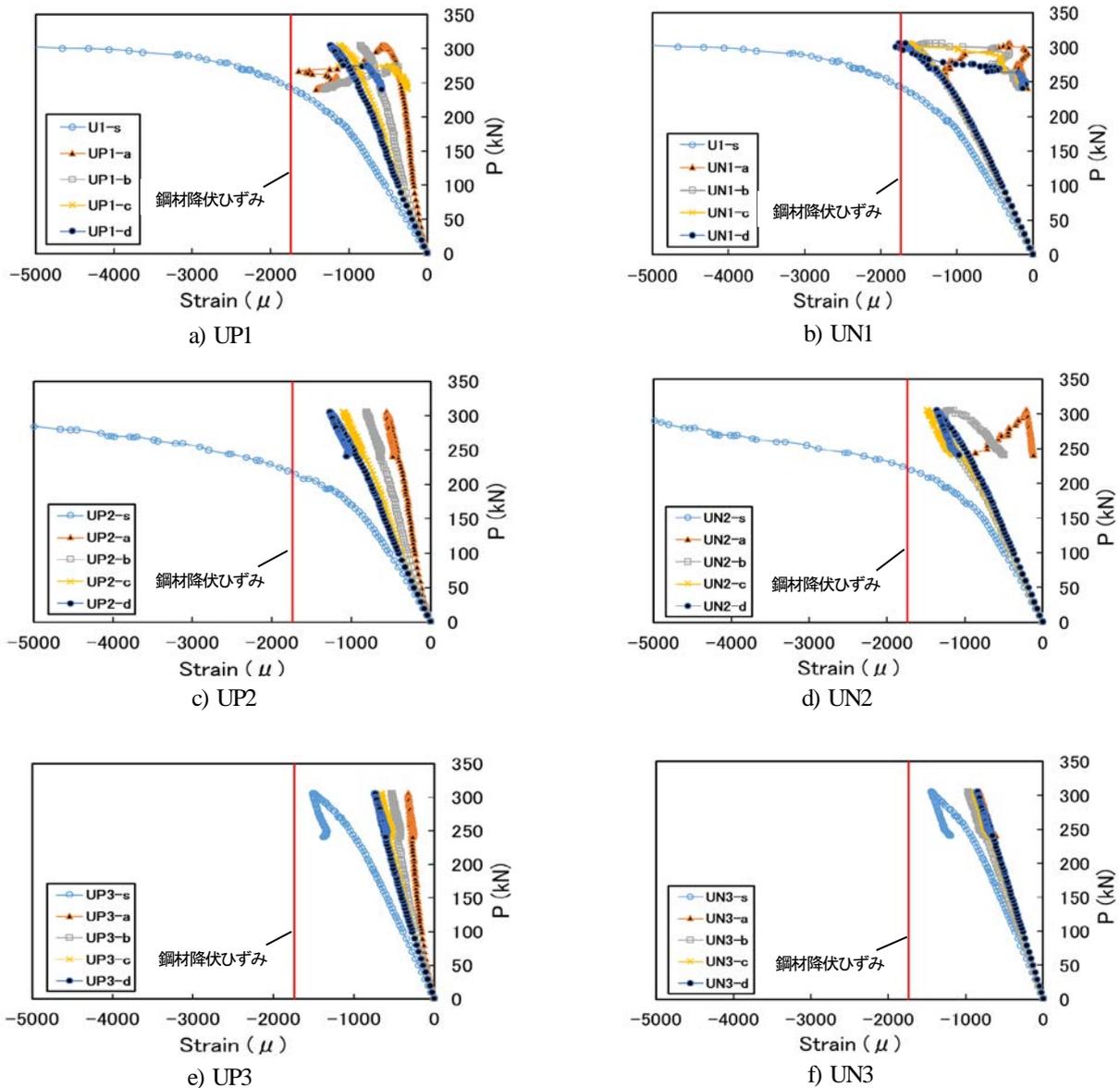
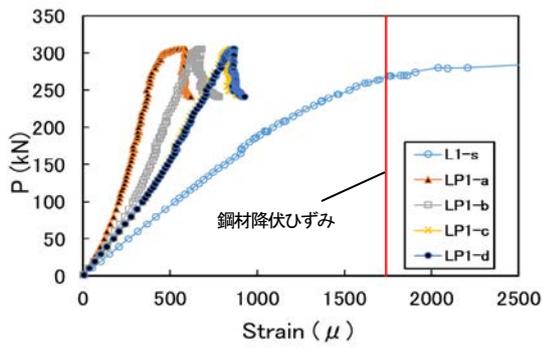
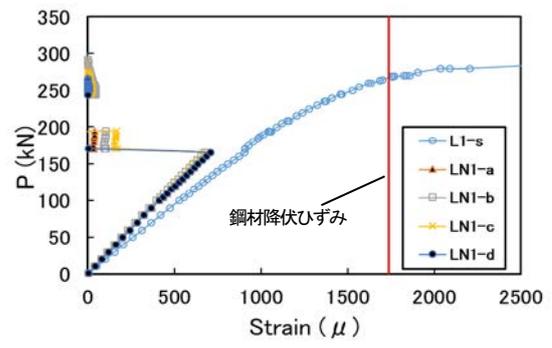


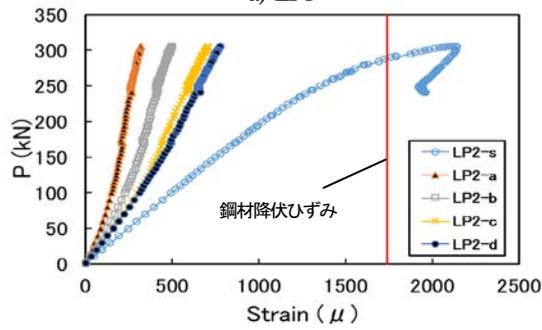
図-6 U側フランジパネルの荷重-ひずみ線図



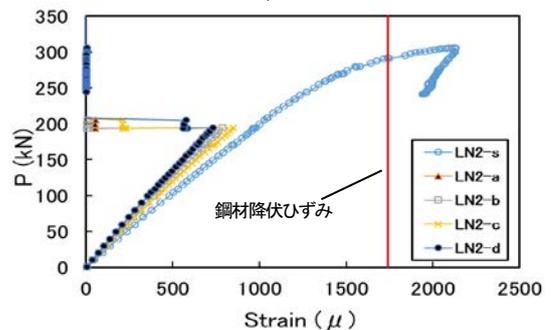
a) LP1



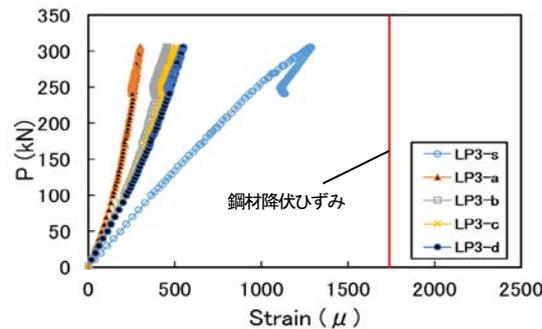
b) LN1



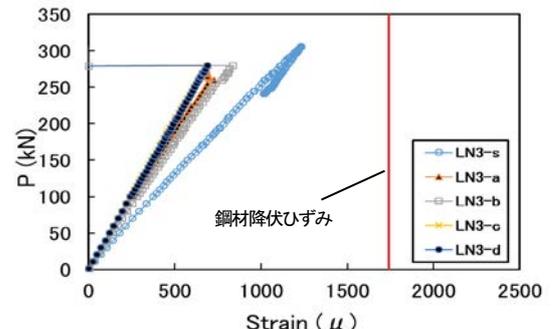
c) LP2



d) LN2

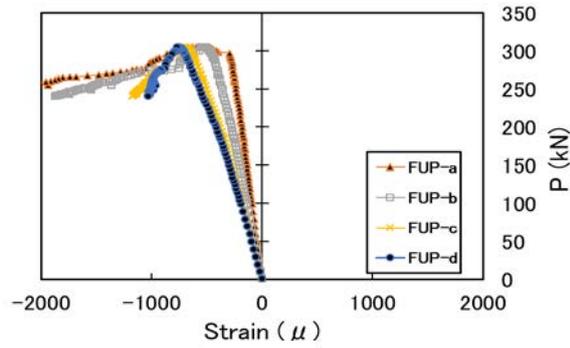


e) LP3

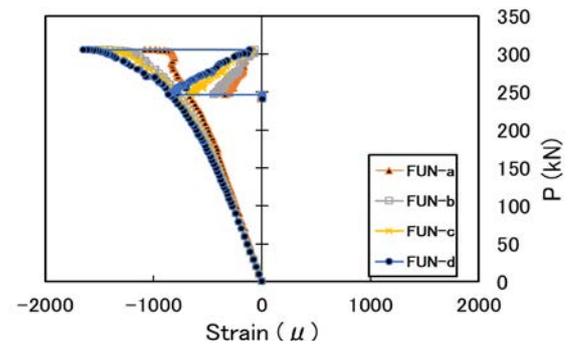


f) LN3

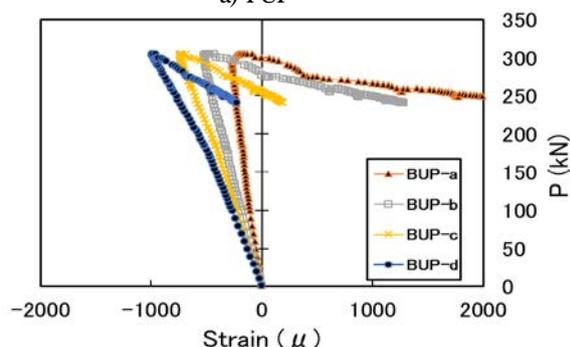
図-7 L側フランジパネルの荷重-ひずみ線図



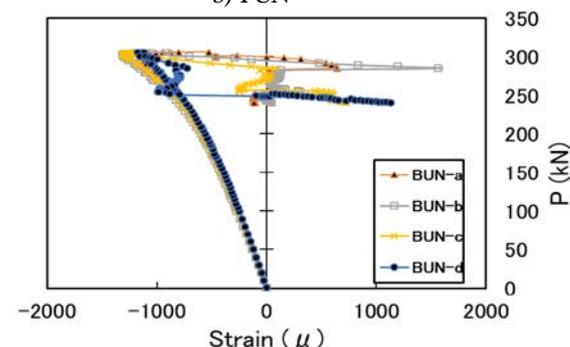
a) FUP



b) FUN



c) BUP



d) BUN

図-8 U側腹板パネルの荷重-ひずみ線図

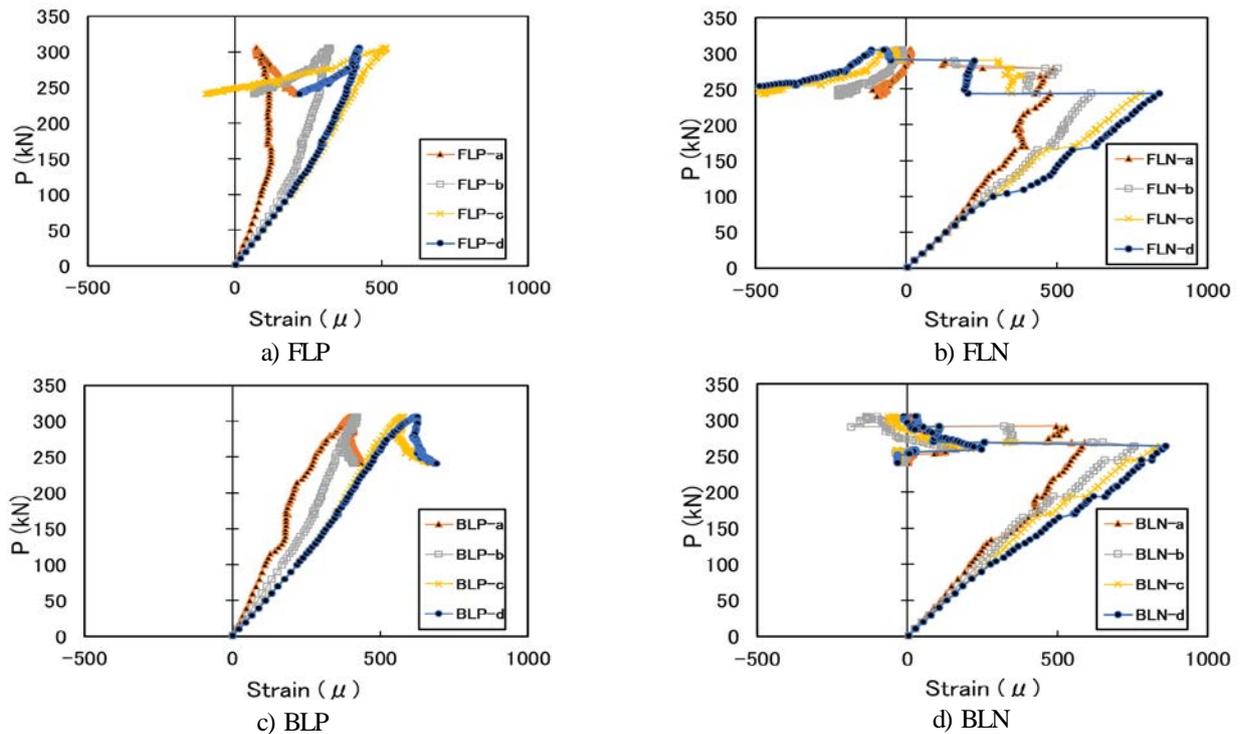


図-9 L側腹板パネルの荷重-ひずみ線図

表-3 剥離荷重, 剥離ひずみ

パネル	完全剥離荷重 kN	完全剥離ひずみ(鋼材)μ
UN1	260	-2062
UN2	254	-1940
LN1	165	905
LN2	194	963
LN3	274	1024
FUN	305(ピーク荷重時)	-1162*
BUN	244(ピーク荷重以降)	—
FLN	244	979*
BLN	264	1059*

注) 表中の※印は線形弾性計算値である。

- 3) 図-8, 図-9 から P側の腹板パネルについては, ピーク荷重まで剥離が生じていないことがわかる. 一方, N側については, フランジと同様に剥離が生じている. また, L側では低い荷重から a~d 点のひずみ値に差が生じており, P側と同様に端部から中央部に向かってひずみが伝達されている.
- 4) 表-3 より, 引張力を受ける場合, 鋼材ひずみが 900~1100μ (降伏点の 50~65%) で剥離が生じ, 圧縮力を受ける場合は, 約-2000μ (降伏後) で剥離が生じることがわかる.

#### 4. まとめ

以上の通り, 本論文では CFRP の剥離限界ひずみについて言及し, パテ材の有用性を実験により明らかにした. 以下に本実験により得られた知見を示す.

- パテ材を使用した場合, 応力低減効果は挿入しない場合に比べて低くなるものの, 端部より 250mm 程度離れると, パテありとパテなしのひずみはほぼ同等となる.
- パテ材は, 剥離抑制効果を十分に発揮しているが, パ

テナシの引張側は鋼材降伏ひずみの 50~65%のひずみで剥離する。

- パテナシの圧縮側は、降伏後であるが剥離することがわかった。
- パテがある場合では、引張側も圧縮側も最大荷重まで剥離は生じない。

今後の課題としては、パテ挿入の応力伝達状況を含めた FEA によるシミュレーション手法の検討を行い、鋼部材の補強効果を検証できるようにすることである。また、本研究の成果を用いて鋼部材の座屈耐荷力向上の適用性研究を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.11
- 2) 杉浦江, 稲葉尚文, 小林朗, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 鋼部材補修における炭素繊維シートの剥離挙動に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 16 巻, 第 63 号, pp.87-98, 2009.9
- 3) 越智内土, 松村政秀, 久部修弘: 鋼 I 桁フランジに貼付する

高弾性 CFRP 板の剥離防止方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.114-124, 2011

- 4) 近藤諒翼, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大: VaRTM 成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する実験的検討, 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, Vol.11, pp.192-210, 2015.11
- 5) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.710-720, 2012.3
- 6) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F, Vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.4
- 7) 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修, 土木学会論文集 F, Vol.71, No.5, pp. II\_23-II\_38, 2015.5
- 8) 下里哲弘, 長坂康史, 矢吹哲哉, 有住康則: 腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的実験, 構造工学論文集, Vol.62A, pp. 559-569, 2016.3
- 9) (株)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

## EXPERIMENTAL STUDY ON BONDING LIMIT OF REINFORCING CFRP CHEETS ON STEEL GIRDER

Shimpei KIKUCHI, Kazuo OHGAKI, Masaki IIZUKA, Akira KOBAYASHI, Yuya HIDEKUMA, Takeshi MIYASHITA, Yusuke OKUYAMA

In this paper, the applicability of CFRP sheets for the reinforcement of thin-walled steel structures is investigated. A steel beam was reinforced by CFRP sheets, and four-point bending test was carried out to figure out bonding limit and stress reduction effect as well as the effect of a high-elongation low-elastic putty to prevent delamination. As a result, it was confirmed that the high-elongation low-elastic putty was able to provide its function properly. Furthermore, the bonding limit of CFRP sheets and the stress reduction effect were also made clear.