

## 緊張状態で接着されたBFRPロッドの接着端部に集中するせん断応力の評価

名城大学 正会員 工博 ○岩下 健太郎  
 名城大学大学院 森 祐樹  
 (株)富士ピー・エス 正会員 八木 洋介  
 (株)富士ピー・エス 正会員 吉田 光秀

Abstract : On the strengthening of the concrete structures by externally bonding prestressed basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rod, the prestressing force into the rod causes an interfacial shear stress concentration at the ends of it. This concentrated stress may cause BFRP debonding, and this is an important problem. In order to avoid a premature debonding of BFRP, the shear stress caused by FRP prestressing should not exceed the interfacial strength. In this study, the mechanical properties of the adhesive interface at the ends of FRP rod bonded to concrete was evaluated by the experiments considering different test methods such as a double pull-pull test and single push-push test. Moreover, the effect to decrease the shear stress by bonding the wide BFRP sheets to the surface of concrete before bonding prestressed BFRP rod.

Key words : Basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rod, Premature debonding, Shear stress

## 1. はじめに

バサルト繊維複合ロッド材 (BFRPロッド) を緊張状態で、コンクリート表面にエポキシ樹脂を用いて接着し、RC/PC構造物にプレストレスを導入する補強技術の開発を行っている<sup>1)</sup>。通常の連続繊維シートをコンクリート表面に接着する際には、低粘度のエポキシ樹脂を含浸させつつ、コンクリート表面に密着させる手順で施工されるが、本技術では、高粘度のエポキシ樹脂でBFRPロッドをコンクリート表面に接着するか、BFRPロッドの周囲に型枠を設置して、低粘度のエポキシ樹脂を注入することでコンクリート表面に接着するかといった方法での施工を考えている。BFRPロッドに導入した緊張力は、接着材の硬化後、速やかに解放されるが、このとき、**図-1**に示すように接着端部に卓越したせん断応力が生じて早期剥離に至る恐れがあるため、このせん断応力の評価ならびに付着強さを向上させることは重要な課題となっている。しかし、このせん断応力の評価に際し、RC構造物を作製し、外部にFRPを緊張状態で接着する実験を行うとすると、供試体寸法が大きくなることや、実験用の緊張装置を準備する必要があるなど、大掛かりになってしまう。そこで、本研究では、BFRPロッドの接着端部に引張あるいは押し込みの方向が異なる力を負荷する実験を行い、比較検討して、**図-2**に示すように、接着端部を引張る実験の適用性を検証する。また、既提案のFRPシートとコンクリートの接着界面の付着挙動に関する知見を基に、新たに接着端部に剥離を生じさせないための条件式を提案する。さらに、BFRPロッドの接着前に接着端部に事前にBFRPシートを接着して、補強層を拡幅することによる付着強さの向上効果について、実験的に検討する。

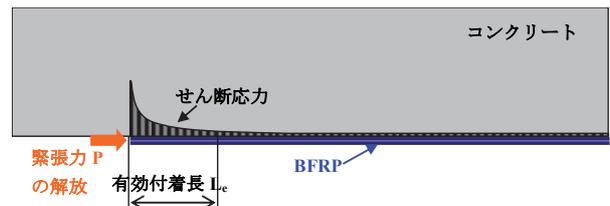


図-1 接着端部のせん断応力分布



図-2 FRPシートとコンクリートの付着試験の様子

2. 導入緊張応力により接着端部に剥離が生じないための条件式の提案

FRPシートをコンクリート表面に接着し、図-2に示すように、FRPシートを引き剥がす試験において、Wuらの研究<sup>2)</sup>を参照して、せん断応力 $\tau$ とすべり量 $\delta$ の関係が図-3に示した弾性-剥離モデルのように表すとき、このモデル曲線と $\delta$ 軸に囲まれた部分の面積は、界面剥離破壊エネルギー $G_f$ と呼称される。ここで、図-3においてグラフの傾き(断面剛性と呼称する。)を $k_s$ 、そして最大せん断応力を $\tau_u$ とすると、式(1)が成り立つ。

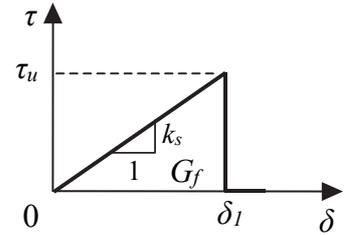


図-3 せん断応力-すべり量の関係(弾性-剥離モデル)

$$\tau_u = \sqrt{2G_f k_s} \tag{1}$$

一方、図-1に示したように、緊張力の導入によりFRPの接着端部に押し込む力が生じる場合に、導入緊張応力 $\sigma_p$ により接着端部に生じる最大せん断応力 $\tau_{max}$ は、Niuらの研究<sup>3)</sup>を参照して式(2)から求められる。

$$\tau_{max} = \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \tag{2}$$

ここで、 $t_f$ はFRPシートの厚み、 $E_f$ はFRPシートのヤング率である。

接着端部に剥離が生じないための $\sigma_p$ の条件としては、式(1)の $\tau_u$ より式(2)の $\tau_{max}$ が小さいことが条件となり、条件式を整理すると、式(3)のようになる。

$$\tau_u > \tau_{max} \rightarrow \sqrt{2G_f k_s} > \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \rightarrow \sigma_p < \sqrt{\frac{2G_f E_f}{t_f}} \tag{3}$$

この式(3)においては、両式に $k_s$ の項が含まれることになるため、事前に $k_s$ を仮定しても比較に影響しないことがわかる。ここで、FRPの厚みの項があるが、FRPロッドをエポキシ樹脂で接着する場合のFRPの厚みは、FRPロッドを内包した成形したエポキシ樹脂の全断面積を接着幅で除して算出することにした。

3. 両引きせん断試験と緊張力導入試験における接着端部に集中するせん断応力の理論的検討

FRPとコンクリートの接着界面のせん断付着強度の算定手法として、一般に片引き付着試験や両引き付着試験といった接着端部を引っ張る試験方法が採用されており、数多くの研究事例がある。しかしながら、連続繊維シート緊張接着補強技術においては接着端部を押し込む方向に応力が働くため、接着端部に作用する荷重の方向が逆である。そこで、ここではFRPの接着端部を引っ張る試験と押し込む試験それぞれにおけるせん断応力分布の理論式を比較して、部材実験の適用性を検証する。まず、Niuらの研究

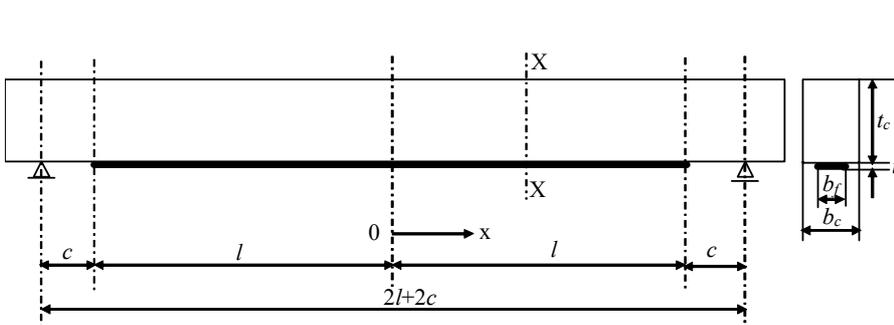


図-4 連続繊維シート緊張接着補強技術で補強されたRC梁(例)

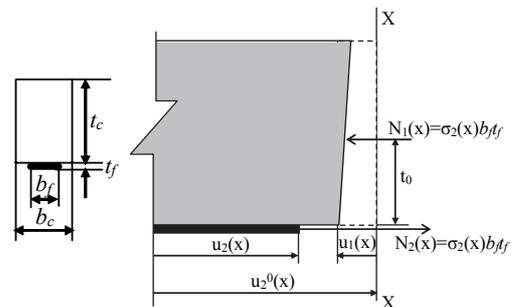


図-5 導入緊張力による構造物の変形

3) で提案された FRP を緊張接着した梁 (図-4) の X-X 断面における構造物の変形状況図を図-5 に示す。なお、X-X 断面は所定の緊張応力が完全に導入される直前を意味しており、緊張力の導入によりコンクリートが圧縮されて縮んでおり、FRP はより大きく縮んでいる。そのため、X-X 断面から縮んだコンクリートの下端と縮んだ後の FRP の間には相対的な差が生じる。これをすべり量  $\delta$  と呼び、 $\delta$  とせん断応力  $\tau$  の関係から、Niu らの研究<sup>3)</sup> では FRP の接着端部に生じるせん断応力分布  $\tau(x)$  は式 (4)、最大せん断応力  $\tau_{max}$  は式 (6) のように示されている。

$$\tau(x) = \sigma_p \sqrt{\frac{\tau_{max}^2 t_f}{2G_f E_f (1 + \alpha t_f)}} \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{E_f b_f}{E_c} \left( \frac{1}{b_c t_c} + \frac{t_n^2}{I_c} \right), \quad \beta_1 = \sqrt{\frac{k_s}{E_f t_f}} \quad (5)$$

$$\sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} = \tau_{max} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_p$ : 導入緊張応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_f$ : 最大せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $t_f$ : FRP の公称厚さ (mm)、 $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)、 $E_f$ : FRP の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $l$ : FRP の接着端部からスパン中央までの距離 (mm)、 $b_f$ : FRP の幅 (mm)、 $E_c$ : コンクリートの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $b_c$ : 構造物断面の幅 (mm)、 $t_c$ : 構造物断面の高さ (mm)、 $t_n$ : 構造物断面の中立軸-下縁間距離 (mm)、 $I_c$ : 構造物断面における断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>) である。ここで、 $\alpha$  は連続繊維シートと構造物の断面剛性の比および緊張力導入により生じる曲げモーメントを考慮した数値であり、構造物断面が十分に大きい場合には  $\alpha \approx 0$  である。よって、式 (4) は式 (7) と書き換えることができる。

$$\tau(x) = \sigma_p \sqrt{\frac{\tau_{max}^2 t_f}{2G_f E_f}} \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} = \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} \quad \left( \beta_1 = \sqrt{\frac{k_s}{E_f t_f}} \right) \quad (7)$$

$$\tau(x) = \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 x)} \cdot \frac{\cosh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} = \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \tanh(\beta_1 x) \cdot \frac{\cosh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} \quad (8)$$

さらに、式 (6) から、

$$\tau(x) = \tau_{max} \tanh(\beta_1 x) \frac{\cosh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 l)} \quad (9)$$

一方、Wu らの研究<sup>4)</sup> では、FRP の接着端部に引張荷重を加えた場合 (両引き付着試験のケース) のせん断応力分布  $\tau'(x)$  は、理論的に式 (10) のように表されている。

$$\tau'(x) = \tau_{max} \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda l)} \quad \left( \lambda = \sqrt{\frac{k_s}{E_f t_f}} \right) \quad (10)$$

よって、FRP の接着端部に引張力が生じる場合と押し込む力が生じた場合のせん断応力分布は、 $\alpha \approx 0$  を条件として、式 (11) が成り立つ。

$$\tau(x) = \tanh(\beta_1 x) \tau'(x) \quad (11)$$

したがって、両引き付着試験において接着端部に生じるせん断応力  $\tau'(x)$  に  $\tanh(\beta_1 x)$  を乗じたものと、緊張力導入実験において接着端部に生じるせん断応力  $\tau(x)$  は類似することが示され、両引き付着試験により緊張力導入時に接着端部に生じるせん断応力を評価できることが理論的に示された。

表-1 材料の物性値一覧

エポキシ樹脂の引張弾性率 $E_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	4600	
バサルト繊維の引張弾性率 $E_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	90000	
BFRP ロッドの引張強度 $\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> ) (算定値)	1251	
BFRP ロッドにおける繊維含有率 (%)	65	
BFRP ロッド1本の断面積 $A_f$ (mm <sup>2</sup> )	バサルト繊維分 $A_{ff}$	51.0
	エポキシ樹脂分 $A_{fa}$	27.5
BFRP ロッド以外の部分の成形されたエポキシ樹脂の断面積 $A_a$ (mm <sup>2</sup> )	緊張力導入実験	949.0
	両引き付着試験	398.0
コンクリート圧縮弾性率 (28日) (kN/mm <sup>2</sup> )	18.6	
コンクリート圧縮強度 (28日) (N/mm <sup>2</sup> )	20.5	

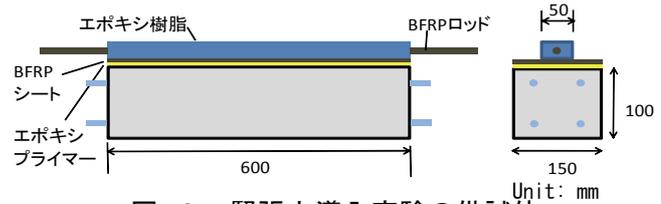


図-6 緊張力導入実験の供試体

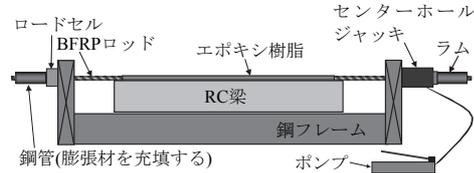


図-7 緊張力導入実験の様子

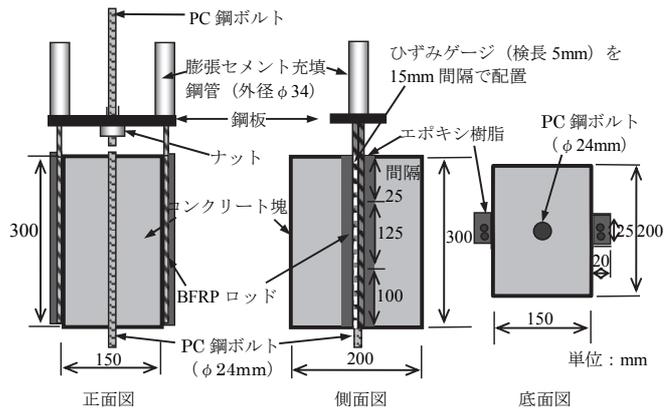


図-8 両引き付着試験体の詳細寸法

#### 4. 両引きせん断試験と緊張力導入試験における接着端部に集中するせん断応力の実験的検討

##### 4.1 試験体の詳細および実験方法

前章において理論的に検討した、両引き付着試験と緊張力導入実験における接着端部に集中するせん断応力について、本章では実験的に検討を行う。RC梁に対する緊張力導入実験の供試体は、図-6に示すように100mm×150mmの断面で長さ600mmの寸法で、緊張力を導入してもひび割れが生じないように4本のD6鉄筋を配筋した。まず、コンクリートの表面を削って骨材を露出させ、接着界面を均すために供試体表面にエポキシプライマーを塗布した。その上に緊張させた直径10mmのBFRPロッドを置き、周囲を高さ20mm、幅50mm、長さ600mmの型枠で囲い、エポキシ樹脂を充填することで長方形に成形しつつ接着した。BFRPロッドやコンクリートの物性値を表-1に示す。緊張装置と緊張の様子を図-7に示す。一方、両引き付着試験の供試体は、図-8に示すように150mm×200mmの断面で、長さ300mmの寸法で、上記と同様のBFRPロッド2本をコンクリート供試体の両側面にエポキシ樹脂により接着したものである。なお、エポキシ樹脂は高さ20mm、幅25mmに成形した。コンクリートの中央部に完全に埋め込み十分な付着を確保したφ24mmの鋼ボルトと、BFRPロッドの片側端部に膨張セメントによって定着した鋼管を相反する方向に引っ張ることで、BFRPロッドが引っ張られ、BFRPロッドとコンクリートの接着界面にせん断力が生じる機構である。コンクリートの表面処理方法は前記の方法と同様である。なお、前章における  $\tanh(\beta_{1x})$  をBFRPロッドのヤング率と厚み(断面積を接着幅で除して厚みとして換算)、断面剛性  $k_s$  (ここでは、Wuらの研究<sup>2)</sup>を参照して160N/mm<sup>3</sup>とする。)、そして  $x$  (=300mm) から算出すると0.99999であり、本研究の緊張力導入試験と両引き付着試験における最大せん断応力は、理論的に同程度になるケースである。さらに、BFRPロッドの接着面に、事前に100mm幅のBFRPシート(厚さ0.166mm)を繊維方向を断面方向に向けて、エポキシ樹脂で接着したケースについても実験を行う(図-6参照)。これにより、接着端部における接着幅を拡幅することによる付着強さの向上効果について検証する。

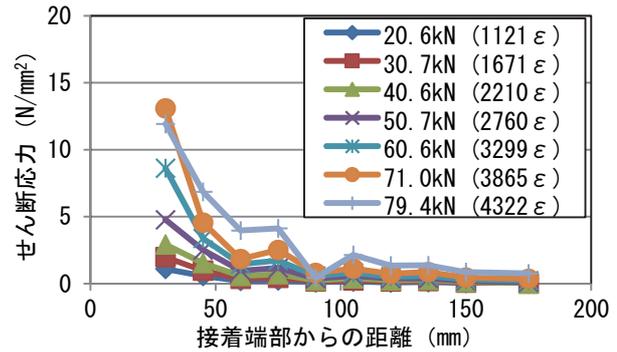
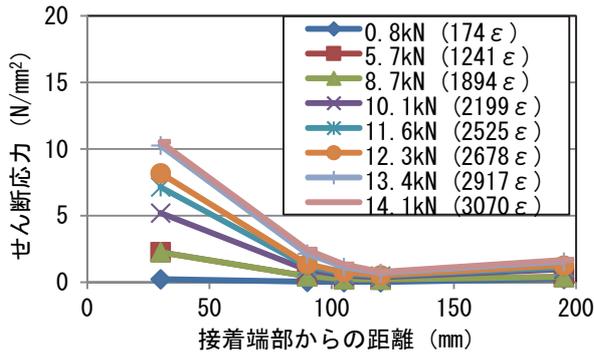


図-9 せん断応力分布 (RC 梁への緊張力導入実験) 図-10 せん断応力分布 (両引き付着試験)

#### 4. 2 実験結果と考察

まず、せん断応力分布を図-9と図-10に示す。最終的には剥離が生じたが、その状況としては、RC 梁への緊張力導入実験では、接着端部からコンクリート表層と接着層が一体化した状態でめくれ上がるようなピーリング剥離が生じたため実験を終了し、両引き付着試験では、接着端部付近のコンクリート表層部に亀裂が生じて剥離が進展し、荷重が急速に低下したため、実験を終了した。最大せん断応力は、緊張力導入試験の場合に両引き付着試験の場合の 0.80 倍となっている。これは、緊張力導入実験における最大せん断応力は、剥離直前における予亀裂近傍の 2 点のひずみ測定値の差から算出しているため、ばらつきが生じたことが影響していると思われる。

一方、前出の式 (4) において、実験による導出が必要となる界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  について、前記の実験により検証した。ひずみ分布の面積に補強材のヤング率を乗じてすべり量を算出し、せん断応力との関係を作成した。そのうえで、荷重レベル毎にせん断応力とすべり量の関係のラインと  $\delta$  軸とに囲まれる箇所の面積を  $G_f$  として算出した。その結果、RC 梁への緊張力導入実験における  $G_f$  は 0.37N/mm、両引き付着試験における  $G_f$  は 0.39N/mm であった。このように、 $G_f$  の比較においては、緊張力導入試験の場合に両引き付着試験の場合の 0.95 倍となっており、最大せん断応力に比べて両者の差はかなり小さい。これは、最大せん断応力は、剥離直前における、予亀裂近傍の 2 点のひずみゲージにより測定されるひずみ差から算出されるため、算出値にばらつきが生じやすいのに対し、 $G_f$  は多くのひずみゲージより得られるひずみ分布から算出されるため、算出値が比較的安定するものと考えられる。したがって、両引き付着試験より得られる界面剥離破壊エネルギーを用いることにより、比較的安定的に、緊張力導入時に接着端部に生じるせん断応力を実験的に評価できることが示唆された。

以上から、両引き付着試験により接着端部に生じるせん断応力の設計を行う場合には、式 (11) から  $\tanh(\beta_1 x)$  を考慮し、安全係数  $k_1$  を考慮した式 (12) によることが考えられる。

$$\tau_u > \tau_{\max} \rightarrow \tanh(\beta_1 x) k_1 \sqrt{2G_f k_s} > \sigma_p \sqrt{\frac{k_s t_f}{E_f}} \rightarrow \sigma_p < \frac{\tanh(\beta_1 x)}{k_1} \sqrt{\frac{2G_f E_f}{t_f}} \quad (12)$$

このとき、BFRP の厚みは、エポキシ樹脂の断面積を、エポキシ樹脂とバサルト繊維材のヤング率比  $n_{fa}$  ( $=E_a/E_f$ ) を用いてバサルト繊維材に換算し、接着幅  $b_f$  で除して算出することにする。よって、式 (12) は式 (13) のように書き換えることができる。

$$\sigma_p < \frac{\tanh(\beta_1 x)}{k_1} \sqrt{\frac{2G_f E_f b_f}{A_{ff} + n_{fa}(A_{fa} + A_a)}}, \quad n_{fa} = \frac{E_a}{E_f} \quad (13)$$

一例として、本研究で実施した両引き付着試験の結果を式 (13) に入力すると、安全係数  $k_1$  を 1.0 とした場合に、導入緊張応力  $\sigma_p$  の上限は 135N/mm<sup>2</sup> (BFRP ロッドの引張強度  $\sigma_f$  の 10.8%) と算定され

る。一方、緊張力導入実験における最大引張応力（実験値）は  $180\text{N/mm}^2$ （BFRP ロッドの引張強度  $\sigma_f$  の 14.4%）であり、式（13）による算定値は実験値とほぼ同程度となった。

#### 4. 3 先貼 BFRP シートによる接着端部に集中するせん断応力の低減効果に関する実験的検討

先貼 BFRP シートを接着した実験においては、BFRP シート接着面のコンクリート表層において、接着端部から剥離が進展した。このとき、BFRP ロッドと周囲のエポキシ樹脂成型部およびこれと BFRP シートの界面の剥離は生じなかった。先貼 BFRP シートを接着しない場合（図-9）の最大荷重は 14.1kN であるのに対し、先貼 BFRP シートを接着した場合、25.5kN（1.81 倍）に向上した。前章の式（13）を用いて先貼 BFRP シートを接着した場合における  $\sigma_p$  を算出すると、 $332\text{N/mm}^2$ （BFRP ロッドの引張強度  $\sigma_f$  の 26.6%）となり、導入緊張応力  $\sigma_p$  の上限は、先貼 BFRP シートを接着することにより 2.46 倍に向上した。ここで、この算定にあたって用いる  $G_f$  には、著者らの過去の研究<sup>5)</sup>において BFRP シートをエポキシ樹脂で接着した際の  $G_f$  の実験値（ $=0.87\text{N/mm}$ ）を採用した。また、緊張力導入実験における最大引張応力（実験値）は  $326\text{N/mm}^2$ （BFRP ロッドの引張強度  $\sigma_f$  の 26.0%）であり、式（13）による算定値は実験値とほぼ同程度となった。

#### 5. 結論

本研究では、BFRP ロッドをコンクリート表面に緊張状態で接着した場合に、接着端部に生じる卓越したせん断応力を評価する方法として、RC 梁に BFRP ロッドを緊張状態で接着し、緊張力を導入する実験および両引き付着試験により、理論的および実験的に比較検討した。また、BFRP シートを接着端部周辺に接着することにより接着幅を拡幅し、付着力の向上させる試みも行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 両引き付着試験において接着端部に生じるせん断応力にある係数を乗じたものと、緊張力導入実験において接着端部に生じるせん断応力は類似することが示され、両引き付着試験により緊張力導入時に接着端部に生じるせん断応力を評価できることが理論的に示された。
- 2) 緊張力導入時に接着端部に生じる最大せん断応力の上限値を、比較的簡便な両引き付着試験により設計する場合の設計式を提案した。実験値との比較検討を行い、緊張力導入実験で得られる結果と同程度の最大せん断応力が、安全係数を 1.0 とした場合に算定されることが実験的に明確となった。
- 3) 先貼 BFRP シートの接着により接着幅が拡幅され、最大せん断応力が 2.46 倍に向上した。また、上記の算定式による算定値と、最大せん断応力の実験値はほぼ同程度となることが実験的に示された。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成 24 年度に私立大学戦略的基盤研究形成支援事業として採択、設置された「名城大学 自然災害リスク軽減研究センター（代表者：小高 猛司）」と、JSPS 科研費 24760352 の助成を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 岩下健太郎, 金光男, 佐藤大地, 八木洋介: BFRP ロッド緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果, 第 20 回プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, pp.327-332, 2011
- 2) Z.S. Wu, H.D. Niu: Study on Debonding Failure Load of RC Beams Strengthened with FRP Sheets, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol. 46A, 1431, 2000
- 3) Niu, H.D., Wu Z.S., Interfacial shear transfer in strengthened structure with FRP prestressing technique, CJCJCC-5, Kunming, 2002
- 4) Z.S. Wu, H. Yuan, H.D. Niu: Stress transfer and fracture propagation in different kinds of adhesive joints, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.128, No.5, pp.562-573, 2002
- 5) 岩下健太郎, 佐藤大地, 馬場進, 松本信行: バサル繊維シートとコンクリートの付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1912-1917, 2014