

# 論文 BFRP シート接着による RC 梁の曲げひび割れ幅抑制効果に関する研究

岩下 健太郎\*1, 田中 芳弥\*2, 外山 美里\*2

**要旨:** CFRP シートの表面接着により RC 構造物を補強した場合、曲げひび割れが拘束され、その幅が小さくなるのが吉澤らの研究<sup>1)</sup>により明らかにされ、土木学会指針<sup>2), 3)</sup>において、0.4~0.7 倍程度に小さくなるが示されている。しかし、バサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）のように高伸度性を有する補強材を用いた場合の研究は少ない。また、高伸度 FRP はヤング係数が小さく、その拘束効果が小さいことも考えられる。そこで、新たに BFRP シート補強 RC 梁を BFRP シートの補強量を考慮して作製し、曲げ試験により BFRP シートによるひび割れ幅の抑制効果を検証した。

**キーワード:** BFRP シート, RC 梁, 曲げ試験, 曲げひび割れ幅, ひび割れ発生荷重, 有効付着長, 補強量

## 1. はじめに

CFRP シートを RC 構造物の引張縁表面に接着し、補強した場合には、荷重負荷により生じる曲げひび割れが拘束され、ひび割れの間隔および開口幅が大幅に小さくなるのが吉澤らの研究<sup>1)</sup>により明らかにされており、土木学会指針<sup>2), 3)</sup>において、0.4~0.7 倍程度に小さくなるが示されている。しかし、この研究は高強度で高弾性である CFRP シートを対象としたものであり、バサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）のように高伸度性を有する FRP 補強材を用いた場合の研究は少ない。また、このような補強材は CFRP シートに比べればヤング係数は半分程度と小さいため、曲げひび割れの抑制効果に限界がある可能性も考えられる。

そこで本研究では、引張縁に BFRP シートを接着した RC 梁を、BFRP シートの補強量を考慮して新たに作製し、曲げ試験を行って、曲げひび割れ幅の抑制効果を実験的に検証した。

## 2. BFRP シート補強 RC 梁の曲げ試験方法

### 2.1 BFRP シート補強 RC 梁の作製

断面 100mm×100mm、全長 400mm の直方体形状の RC 梁を 12 体作製した。図-1 に示すように、引張側にかぶり 25mm で D13 鉄筋 (SD295) 2 本を配筋した。引張鉄筋比は 3.4% 程度である。これらの梁には帯鉄筋は配置しておらず、せん断スパン比は 2.0 であるため、せん断引張破壊あるいはせん断圧縮破壊が想定される。コンクリートの設計強度は 30N/mm<sup>2</sup>、水セメント比は 48%、スランプ 15cm、空気量 4% として配合されたレディーミクストコンクリートを用いた。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。養生は 20℃ の水中養生により行い、材齢 28 日における平均圧縮強度と平均引張強度はそれぞれ 44.9N/mm<sup>2</sup>、3.10N/mm<sup>2</sup> であった。

BFRP シートと接着材の物性値一覧を表-1 に示す。1 ケース 3 体の実験を行い、1) BFRP シート補強の有無、2) BFRP シートの補強量 (BFRP シート 1 層, 2 層, 3 層) を考慮した。ここで、供試体 No. は BFRP シート補強供試体を BF、無補強を NBF とし、その後に補強量を示した。また、同一ケースにおける 3 体の別については実験順をその後に示した。すなわち、例えば BFRP シート 2 層で補強した供試体の 1 体目は BF2L-1 である。なお、BFRP シートには供試体軸に対し 0°、90° に各々 0.057mm 厚/1 層の 2 方向シートを使用した。

FRP シートは長手方向に 250mm の長さで RC 梁の中央下面に接着しており、梁スパン中央から両接着端部まで 125mm である。BFRP シートの有効付着長は、より大きな補強量とした過去の研究<sup>4)</sup>においても、45mm~105mm の範囲に分布しているため、十分な接着長さが確保されていると考えられる。

BFRP シート接着面の表面処理は、コンクリート表面をダイヤモンドサンダーにより研削し、エタノールを含

表-1 物性値一覧

材料特性	BFRP シート	接着材
引張強度 $\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	1,900	45
ヤング係数 $E_f$ (kN/mm <sup>2</sup> )	90	1.5
破断伸度 $\epsilon_f (= \sigma_f / E_f)$ ( $\mu$ )	21,111	30,000

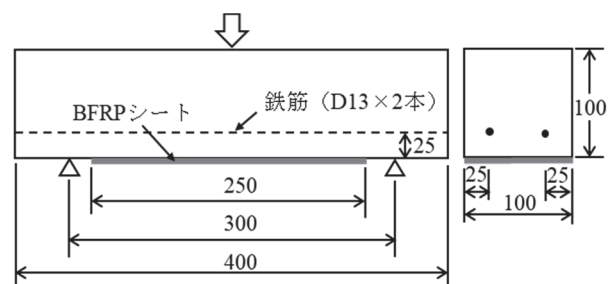


図-1 BFRP シート接着 RC 梁供試体の詳細

\*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 博 (工) (正会員)

\*2 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科

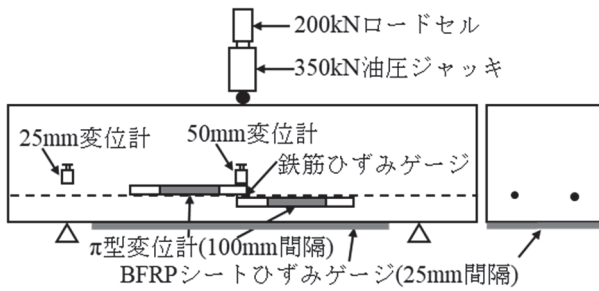


図-2 RC 梁の曲げ試験における計測の詳細

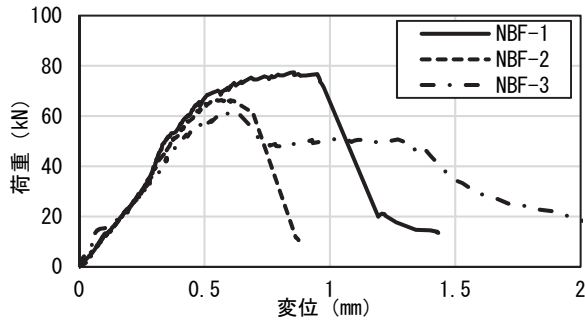


図-3 荷重と変位の関係 (NBF)

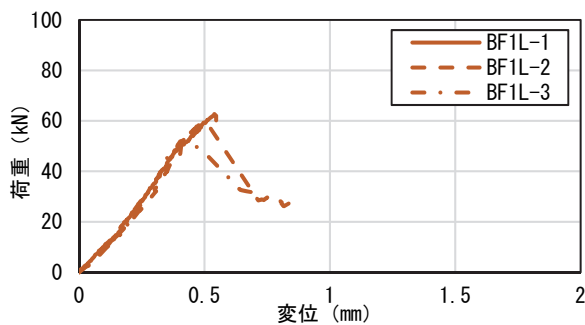


図-4 荷重と変位の関係 (BF1L)

ませた布で表面の払拭作業を行い、乾燥させた上で、 $250\text{g}/\text{m}^2$ のエポキシプライマーを塗布することで行った。12時間程度  $26\pm 2^\circ\text{C}$ 環境にある室温で養生し、指触硬化の状態になったらバサルト繊維シートに  $500\text{g}/\text{m}^2$ のエポキシ樹脂を含浸させ、コンクリート表面に密着、脱泡し、1週間以上室温養生して硬化させた。

## 2.2 RC 梁曲げ試験の装置、手順、計測の詳細

RC 梁の曲げ試験における計測の詳細を図-2 に示す。載荷は鋼製フレームを組み立てた載荷フレーム上に、支点間隔  $300\text{mm}$  として RC 供試体を静置し、供試体長手方向の中央部、RC 供試体の中央部直上に  $350\text{kN}$  油圧ジャッキを置き、3点曲げの形式で行った。

計測としては、油圧ジャッキの上に設置した  $200\text{kN}$  ロードセルによる荷重測定、BFRP シートの幅方向中央、長手方向  $25\text{mm}$  間隔の箇所に設置した検長  $5\text{mm}$  のひずみゲージによる BFRP シートひずみ、コンクリート側面、長手方向中央部に設置した検長  $60\text{mm}$  のひずみゲージに

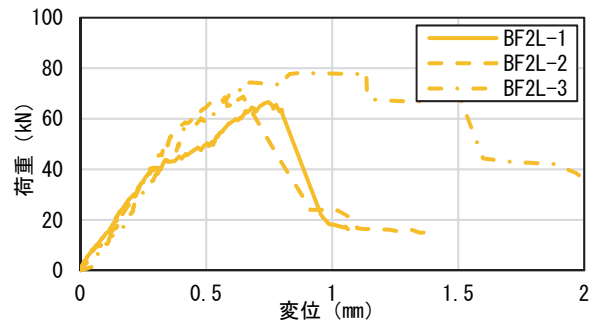


図-5 荷重と変位の関係 (BF2L)

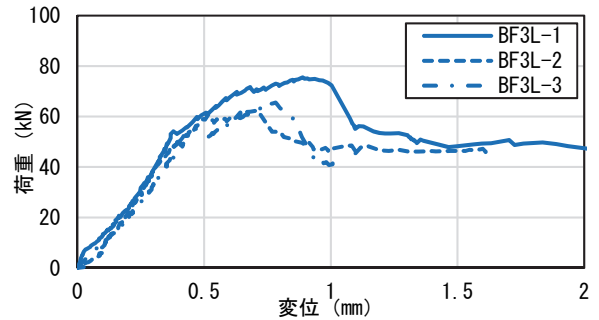


図-6 荷重と変位の関係 (BF3L)

よる、梁上縁および下縁におけるひずみ測定を行った。ここで、上縁ひずみは主に圧縮破壊、下縁ひずみは主にひび割れ発生に判定に用いた。また、供試体長手方向の中央部、両側面にストローク  $50\text{mm}$  の変位計を、支点部にストローク  $25\text{mm}$  の変位計をそれぞれ設置し、測定された両たわみ量の差を変位とした。さらに、供試体長手方向の中央付近側面の鉄筋深さ位置に、検長  $50\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$  間隔の  $\pi$  型変位計 2 本を設置してひび割れ幅の計測を行った。ひび割れ発生前のコンクリートの弾性変形はひび割れ発生前までの値を全体の値から差し引くことでゼロ調整した。

ひび割れ発生後である  $20\text{kN}$  以降、 $10\text{kN}$  毎にひび割れの発生状況の確認を行いつつ荷重を漸次増加させていき、せん断ひび割れが開口し、 $20\text{kN}$  程度まで荷重低下した場合には荷重を除荷して実験を終了した。せん断ひび割れ開口に伴う荷重低下後も  $40\text{kN}$  程度の荷重を保持している場合には、しばらく荷重負荷を継続した。

## 3. BFRP シート補強 RC 梁の曲げ試験結果と考察

### 3.1 BFRP シート補強 RC 梁のひび割れ発生荷重

RC 梁の曲げ試験結果から、荷重と変位の関係を補強量毎に図-3~図-6 に示す。いずれのケースでも  $15\text{kN}$  程度で曲げひび割れが発生し、その後、複数本の曲げひび割れが発生した後に、変位  $0.5\text{mm}$  程度、荷重  $50\sim 60\text{kN}$  程度で支点付近と載荷点付近を結ぶ斜めひび割れが発生した。その後は斜めひび割れが開口して  $20\sim 30\text{kN}$  程度まで急速に荷重低下するせん断引張破壊に至るケースと、

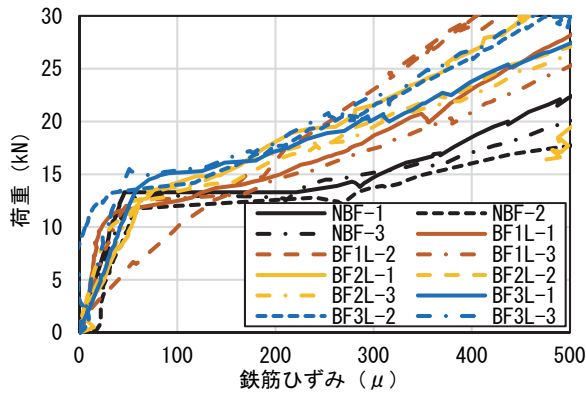


図-7 荷重と鉄筋ひずみの関係

表-2 ひび割れ発生荷重の一覧

供試体 No.	ひび割れ発生荷重 (kN)		
	実験値	算定値 (f <sub>t</sub> 使用)	算定値* (f <sub>bck</sub> 使用)
NBF-1	13.5	12.6	17.8
NBF-2	11.8	12.6	17.8
NBF-3	13.0	12.6	17.8
BF1L-1	11.3-13.1	12.8	18.0
BF1L-2	12.4-13.1	12.8	18.0
BF1L-3	12.0-13.1	12.8	18.0
BF2L-1	12.6-14.8	12.9	18.2
BF2L-2	13.1-14.2	12.9	18.2
BF2L-3	13.1-14.0	12.9	18.2
BF3L-1	13.7-15.3	13.1	18.4
BF3L-2	13.2-14.2	13.1	18.4
BF3L-3	14.8-15.3	13.1	18.4

\* f<sub>bck</sub>の算出に用いる部材高さ h に関する条件 (>0.2m) を本実験では満たさないため、本算定値は参考値とする。

その後も緩やかながら荷重増加して引張鉄筋の降伏を経て梁上縁における圧縮破壊に至るケースが見られた。

まず、ひび割れ発生荷重について検討を行う。曲げ試験結果より荷重と鉄筋ひずみの関係を図-7に示す。鉄筋ひずみは 50 μ 程度から NBF 供試体で 300 μ 程度まで、BF1L, BF2L, BF3F 供試体では 100 μ ~ 150 μ 程度まで、若干の荷重増加とともにひずみが急激に増加した。その後はグラフの傾きがより大きくなる傾向が見られた。

コンクリートと鉄筋の付着すべりについては島らの研究<sup>4)</sup>において詳述されており、鉄筋の局所付着応力-すべり関係が示されている。これを参考にすると、前記の鉄筋ひずみが急増する箇所では、曲げひび割れの発生箇所近傍において、局所的に鉄筋の付着すべりが生じたためであると思われる。NBF 供試体より BF1L, BF2L, BF3F 供試体の付着すべり箇所における鉄筋ひずみの増加量が小さいのは、BFRP シートによりひび割れの開口が抑制され、鉄筋の付着すべりが制御されたためであると考えられる。その後は鉄筋の付着すべりの進行が止まり、グラフの傾きがより大きくなったと考えられる。

前記の鉄筋ひずみ 50 μ 程度から NBF 供試体で 300 μ 程

表-3 ひび割れ発生荷重算定に用いた主な係数一覧

係数	意味	数値と単位
f <sub>ck</sub>	コンクリートの設計強度	30.0 N/mm <sup>2</sup>
f <sub>c</sub>	コンクリートの圧縮強度 (実験値)	44.9 N/mm <sup>2</sup>
f <sub>t</sub>	コンクリートの引張強度 (実験値)	3.1 N/mm <sup>2</sup>
E <sub>c</sub>	コンクリートのヤング係数	31980 N/mm <sup>2</sup>
A <sub>c</sub>	コンクリートの断面積	100 mm <sup>2</sup>
E <sub>s</sub>	鉄筋のヤング係数	200000 N/mm <sup>2</sup>
A <sub>s</sub>	鉄筋の断面積	126.7 mm <sup>2</sup> /本
E <sub>f</sub>	BFRP シートのヤング係数	90000 N/mm <sup>2</sup>
t <sub>f</sub>	BFRP シートの厚み	0.114 mm/層
A <sub>f</sub>	BFRP シートの断面積	11.4 mm <sup>2</sup> /層

度まで、BF1L, BF2L, BF3F 供試体では 100 μ ~ 150 μ 程度までの範囲における荷重の範囲をひび割れ発生荷重の実験値として表-2に示す。BFRP シートの断面積が鉄筋やコンクリートに比べ、より小さいため、ひび割れ発生荷重に対する補強効果は限定的である。次に、コンクリートの引張強度の実験値 (f<sub>t</sub>=3.10 N/mm<sup>2</sup>) および土木学会標準示方書 [設計編]<sup>5)</sup>に示されるコンクリートの曲げひび割れ強度 (f<sub>bck</sub>) を用いてひび割れ発生荷重を算出した。なお、f<sub>bck</sub>は式 (1) から求められる。

$$f_{bck} = k_{0b} k_{1b} f_t \quad (1)$$

ここで、k<sub>0b</sub>はコンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を表す係数を意味し、式 (2) から算出される。k<sub>1b</sub>は乾燥、水と熱等、その他の原因による曲げひび割れ強度の低下を表す係数であり、本研究ではすべての供試体を同様の方法で養生しているため考慮しないものとする。

$$k_{0b} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h/l_{ch})} \quad (2)$$

また、hは部材高さ (m) で 0.2m より大きいものを対象としているため、本研究の部材は対象外である。よって算出された値は参考値として取り扱うこととする。l<sub>ch</sub>は特性長さ (m) を意味し、式 (3) から求められる。

$$l_{ch} = G_F E_c / f_t^2 \quad (3)$$

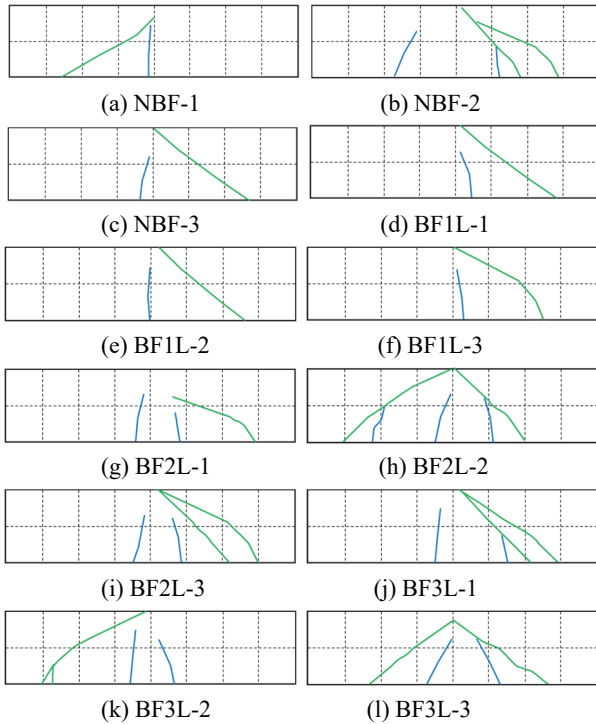
G<sub>F</sub>は破壊エネルギー (N/m) を意味し、コンクリートの設計強度 f<sub>ck</sub>を用いて式 (4) から求められる。

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (4)$$

d<sub>max</sub>は粗骨材の最大寸法を意味しており、本研究では 20mm である。E<sub>c</sub>はコンクリートのヤング係数を意味し、コンクリートの圧縮強度の実験値 f<sub>c</sub>を用いて式 (5) から求められる。

$$E_c = \left( 3.1 + \frac{f_c - 40}{50} \right) \times 10^4 \quad (5)$$

ひび割れ発生荷重の算定において、鉄筋とコンクリートの付着があると見なせるため、同示方書<sup>5)</sup>に基づき、



\*青線は曲げひび割れ，緑線はせん断ひび割れ

図-8 ひび割れの分布状況

高さ方向の各箇所におけるひずみは部材断面の中立軸からの距離に比例するものとして、式(6)を用いてひび割れ発生荷重 ( $P_{cr}$ ) の算定を行った。

$$P_{cr} = \frac{4If_{0t}}{Lx} \quad (6)$$

ここで、 $I$ は断面二次モーメント、 $L$ は支点間距離、 $x$ は中立軸位置を意味し、 $f_{0t}$ には $f_t$ あるいは $f_{bck}$ を用いた。

以上の算定に用いた主な係数を表-3に示す。また、算定値も表-2に示した。実験値と比較すると、 $f_t$ を用いた算定値は実験値の範囲における最小の値と同程度であり、曲げひび割れにより局所的に発生する鉄筋の局所付着すべりの開始点が算定される傾向にあることがわかる。

一方、 $f_{bck}$ を用いた算定値は実験値の範囲より大きな値となっているが、本実験に用いた供試体は部材高さに関する条件 ( $>0.2m$ ) を満たしておらず参考値としている。部材高さが小さいほど係数 $k_{ob}$ および $f_{bck}$ は大きくなるため、部材高さが条件より小さい本実験の供試体を対象とした場合には $f_{bck}$ がかなり大きくなる傾向にあった。そこで、コンクリートの引張強度およびひび割れ発生荷重の算定に対する部材寸法の影響については、今後研究を進めていきたい。

### 3.2 BFRP シート補強 RC 梁のひび割れ発生状況

各供試体のひび割れ発生状況を図-8に示す。青線は曲げひび割れ、緑線はせん断ひび割れを意味する。曲げひび割れ本数に着目すると、NBF 供試体では平均 1 本、BF1L 供試体では平均 1.3 本、BF2L 供試体では平均 2.3

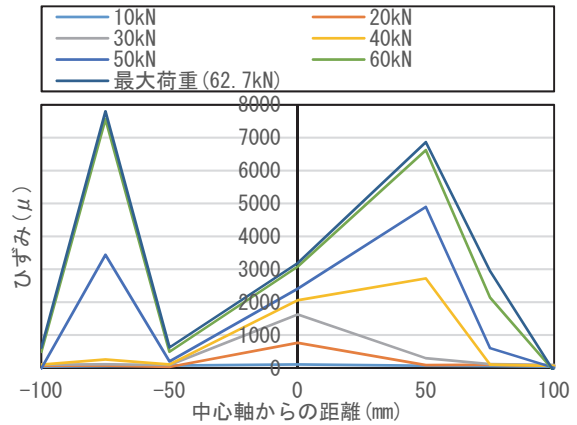


図-9 BFRP シートのひずみ分布の例 (BF1L-1)

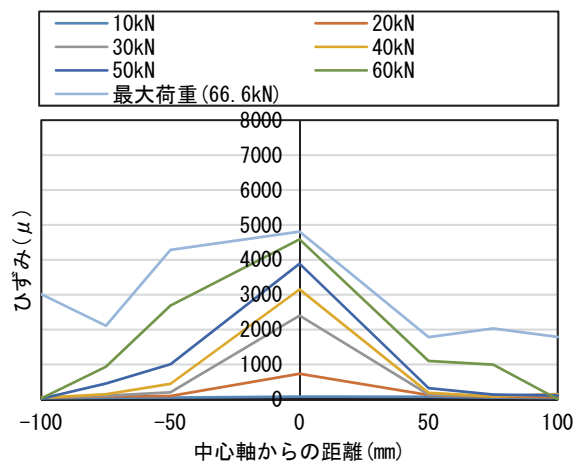


図-10 BFRP シートのひずみ分布の例 (BF2L-1)

本、そして BF3L 供試体では平均 2.0 本であった。よって、曲げひび割れ本数は、BFRP シート 1 層補強の場合には無補強の場合と同様に 1 本のみであるが、BFRP シート 2 層の場合には 2 倍程度に増加する傾向が見られた。また、BFRP シート 3 層の場合には 2 層の場合と同程度であった。したがって、 $300g/m^2$  目付の BFRP シートで補強する場合には、1 層で補強してもひび割れ本数はほとんど増加しないが、2 層以上で補強するとひび割れ本数が 2 倍程度に増加する傾向にあることが実験的に示された。

次に、有効付着長の実験値と既存の知見に基づき算定した値を比較することで、本研究における BFRP シートの接着長が十分な長さを確保できていたかを検証する。なお、確保できていない場合には、BFRP シートの接着長が不足した分だけ、曲げひび割れ近傍において BFRP シートにかかる荷重が増加し、場合により早期剥離に至る可能性がある。

有効付着長は吉澤らの研究<sup>1)</sup>において、FRP シートに生じるひずみ分布における最大ひずみが生じている位置から 97%のひずみが減少した位置までの距離を意味す

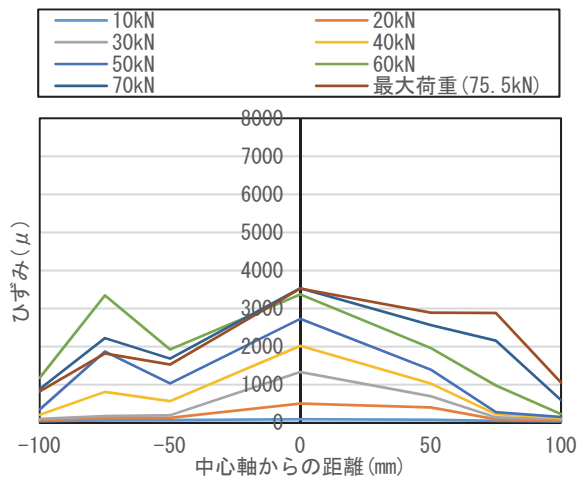


図-11 BFRP シートのひずみ分布の例 (BF3L-1)

表-4 有効付着長の一覧

供試体 No.	有効付着長 (mm)		
	実験値	平均実験値	算定値
BF1L-1	50	58	46
BF1L-2	75		46
BF1L-3	50		46
BF2L-1	75	55	65
BF2L-2	60		65
BF2L-3	30		65
BF3L-1	60	70	79
BF3L-2	70		79
BF3L-3	80		79

ると定義されている。曲げひび割れ近傍における BFRP シートの接着界面に、局所的に大きなせん断応力が発生し、それが有効に働く範囲を有効付着長と呼称している。そこで、BFRP シートひずみ分布を図-9～図-11 に示し、有効付着長を読み取った。それらの値を表-4 に示す。なお、紙面の都合により各ケース 1 体のデータを示した。ばらつきは大きいものの、有効付着長の実験値は BFRP シートの補強量によらず、60mm 前後の値であった。本研究の曲げ試験において、支点間の中央から支点までの距離および BFRP シートの接着端部までの距離は、それぞれ 150mm および 125mm であり、有効付着長に対して十分に余裕のある距離を確保できていることが示された。

また、呉らの研究<sup>6)</sup>において、有効付着長  $L_e$  の評価式は式 (7) のように示されている。

$$L_e = \frac{0.649 \sqrt{E_f \cdot t_f}}{f_c^{0.095}} \quad (7)$$

算出した有効付着長の算定値も表-4 に示す。算定値は補強量が 1 層多いごとに、 $\sqrt{t_f}$  にあたる十数 mm 長く、実験値も概ね同様の傾向にある。よって、有効付着長は既存の式により概ね類似した値が算定される傾向にあり、

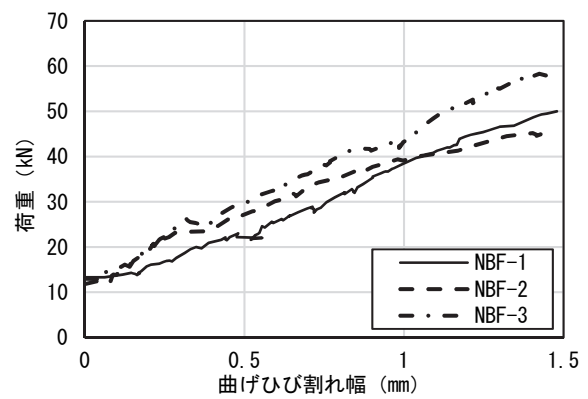


図-12 荷重と曲げひび割れ幅の関係 (NBF)

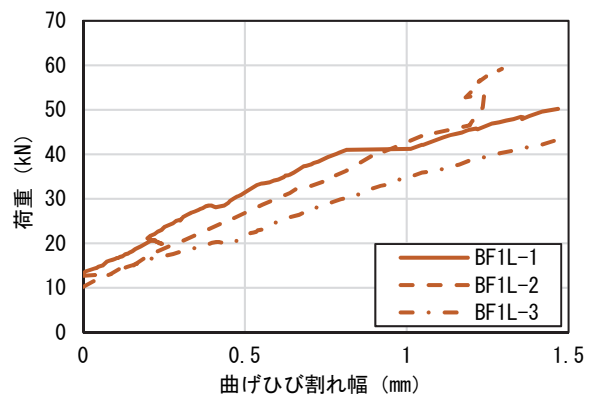


図-13 荷重と曲げひび割れ幅の関係 (BF1L)

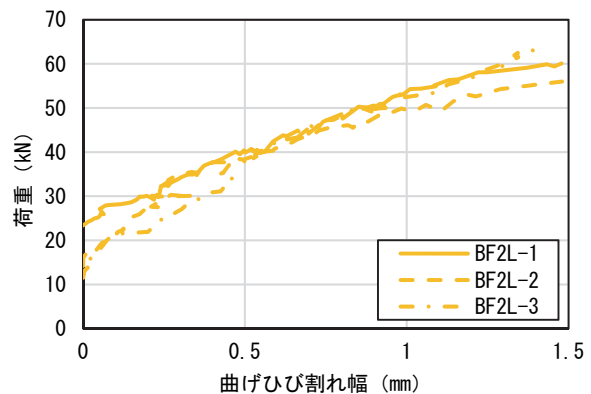


図-14 荷重と曲げひび割れ幅の関係 (BF2L)

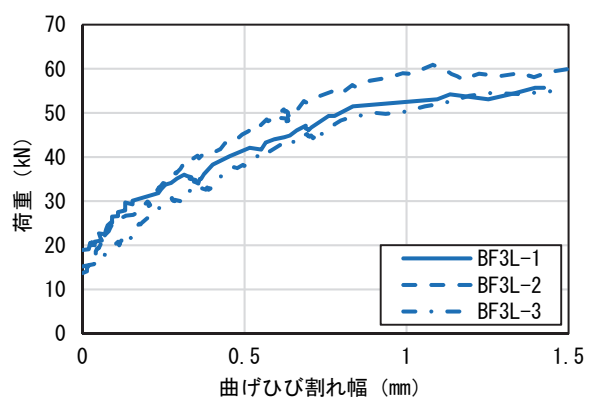


図-15 荷重と曲げひび割れ幅の関係 (BF3L)

BFRP シートのヤング係数に厚みを乗じた値の平方根に比例することが明確となった。

過去の研究<sup>7)</sup>を参照すると、RC 梁の長さがより長く確保されていれば、有効付着長と同程度の間隔でより多くのひび割れ幅が発生し、BFRP シートによるひび割れの分散効果がより明確になると考えられる。今後、部材寸法の影響に関する研究を進めていきたい。

### 3.3 BFRP シート補強 RC 梁のひび割れ幅の抑制状況

荷重と曲げひび割れ幅の関係を図-12～図-15 に示す。ここで、ひび割れ発生以前の $\pi$ 型変位計の測定値、すなわちコンクリートの弾性変形にあたる値を全体から差し引くことで、ひび割れ幅のゼロ調整を行った。いずれのグラフにおいても、概ねひび割れ幅 0.2mm および 0.8mm において変曲点が見られることから、BF1L, BF2L, BF3L のグラフをひび割れ幅 0mm～0.2mm および 0mm～0.8mm の範囲において直線近似し、その傾きで NBF の値の傾きを除することにより、BFRP シートによるひび割れ抑制効果の低減係数（それぞれ  $\alpha_{0.2}$ ,  $\alpha_{0.8}$ ）として算出し、表-5 に示した。ひび割れ幅の低減係数は BF1L では  $\alpha_{0.2}$  が 0.68～1.00,  $\alpha_{0.8}$  が 0.88～1.00 とひび割れ抑制効果が限定的であるが、BF2L では  $\alpha_{0.2}$  が 0.41～0.79,  $\alpha_{0.8}$  が 0.48～0.98, そして BF3L では  $\alpha_{0.2}$  が 0.29～0.47,  $\alpha_{0.8}$  が 0.49～0.71 であり、BFRP シートの補強量が大きいほどひび割れ幅が抑制されている傾向が実験的に明確となった。

以上のように、300g/m<sup>2</sup> 目付の BFRP シートで補強する場合に、1 層で補強してもひび割れ幅の抑制効果は限定的であるが、2 層以上で補強すると、CFRP シートを用いた既存研究と概ね同程度にひび割れ幅が抑制される傾向にあった。

## 4. 結言

本研究では BFRP シート接着補強 RC 梁の曲げひび割れ抑制効果について曲げ試験を行い、実験的に検証した。得られた知見を以下に纏める。

- 1) BFRP シートの断面積が鉄筋やコンクリートに比べ、より小さいため、ひび割れ発生荷重に対する補強効果は限定的であったが、BFRP シートによりひび割れの開口が抑制され、鉄筋の付着すべりにより生じる鉄筋ひずみの増加が抑制される傾向が実験において見られた。
- 2) 300g/m<sup>2</sup> 目付の BFRP シートで補強する場合に、1 層で補強してもひび割れ本数はほとんど増加しないが、2 層以上で補強するとひび割れ本数が 2 倍程度に増加する傾向にあることが実験的に示された。

表-5 BFRP シートによる曲げひび割れ幅低減の係数

供試体 No.	低減係数 $\alpha_{0.2}$ (ひび割れ幅 0.2mm までの範囲)	低減係数 $\alpha_{0.8}$ (ひび割れ幅 0.8mm までの範囲)
BF1L-1	0.68	0.88
BF1L-2	1.00*	1.00*
BF1L-3	0.90	1.00*
BF2L-1	0.79	0.98
BF2L-2	0.41	0.66
BF2L-3	0.44	0.48
BF3L-1	0.29	0.49
BF3L-2	0.36	0.57
BF3L-3	0.47	0.71

\*NBF の実験値を BF1L の値が上回ったため、1.00 と表示した。

- 3) BFRP シートの有効付着長は既存の式により概ね類似した値が算定される傾向にあり、BFRP シートのヤング係数に厚みを乗じた値の平方根に比例することが明確となった。
- 4) 300g/m<sup>2</sup> 目付の BFRP シートで補強する場合に、1 層で補強してもひび割れ幅の抑制効果は限定的であるが、2 層以上で補強すると、CFRP シートを用いた既存研究や土木学会指針に示されるひび割れ幅の抑制効果と、概ね同程度に得られる傾向にあった。

## 参考文献

- 1) 吉澤弘之, 呉智深: 炭素繊維シート補強による RC 引張部材のひび割れ特性に関する研究, 土木学会論文集, V-42, No. 613, pp.249-262, 1999.2
- 2) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 2000.7
- 3) 土木学会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案), 複合構造シリーズ 09, 2018.8
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, V-6, No. 378, pp.249-262, 1987.2
- 5) 土木学会コンクリート委員会: 2022 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2023.3
- 6) Zhishen Wu, Hedong Niu: Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE Journal of Materials, Concrete Structures, and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, 2007.12
- 7) 岩下健太郎, 石川靖晃: 環境温度変化による初期応力と高温環境が FRP シート補強 RC 梁に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No.1, pp.1619-1624, 2019.6