

# BFRPシートを接着したコンクリート梁の 高速荷重下での曲げ挙動

岩下健太郎<sup>1</sup>・森 祐樹<sup>2</sup>・馬場 進<sup>3</sup>・松本信行<sup>4</sup>・神崎豊裕<sup>4</sup>・高見 肇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 名城大学准教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: iwak@meijo-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 名城大学 大学院理工学研究科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: 143437007@ccalumni.meijo-u.ac.jp

<sup>3</sup>アイレック技建株式会社 (〒111-0034 東京都台東区雷門1-4-4ネクストサイト浅草ビル)

E-mail: baba@airec.co.jp

<sup>4</sup>榎屋ティスコ株式会社 (〒472-0007 愛知県知立市牛田町裏新切43番地1)

E-mail: NobuyukiMatsumoto@tsuchiya-group.co.jp

本研究では、バサルト繊維シート (BFRPシート) とコンクリートの付着強さに及ぼす荷重速度の影響を、高速荷重下での両引き付着試験により検証した。また、BFRPシートを接着補強した無筋コンクリート梁の曲げ試験を高速荷重下で行い、ひび割れ発生荷重およびBFRPシートの剥離破壊が生じる際の荷重に及ぼす荷重速度の影響を検証した。さらに、曲げ理論に基づき、ひび割れ発生荷重およびBFRPシートとコンクリートの付着強さやコンクリートの物性に及ぼす荷重速度の関係を考慮した、BFRPシートの剥離時荷重の算定を行い、評価を試みた。

**Key Words :** Basalt fiber sheets, concrete beam, externally bond, flexural behavior, high-speed loading

## 1. はじめに

天然に存在する玄武岩を溶融・紡糸したバサルト繊維を一方に並べ、シート状にしたバサルト繊維シートを、コンクリート構造物の補修・補強材として用いる試みが盛んに進められている。これまでに、コンクリート表面にエポキシ樹脂等の接着材で含浸・接着したバサルト繊維シート (BFRP) の静的な付着挙動に関する研究を行い、アラミド繊維シートと同様の付着挙動が得られることを実験的に示した<sup>1)</sup>。しかし、BFRPシートで補強されたコンクリート構造物に対し、大地震や津波等により高速の荷重が生じる場合については、研究が少ないのが現状である。そこで、本研究では、BFRPシートとコンクリートの付着強さを荷重速度を考慮した両引き付着試験により検証したうえで、BFRPシートを接着補強した無筋コンクリート梁の曲げ試験を高速荷重下で行い、ひび割れ発生荷重およびBFRPシートの剥離破壊が生じる際の荷重に及ぼす荷重速度の影響を実験及び曲げ理論に基づく算定により評価を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 両引き付着試験方法

#### a) 供試体の形状と寸法

日本コンクリート工学会、連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書 (Ⅱ)<sup>2)</sup> および土木学会、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<sup>3)</sup> において、連続繊維シートのコンクリートに対する付着強さ

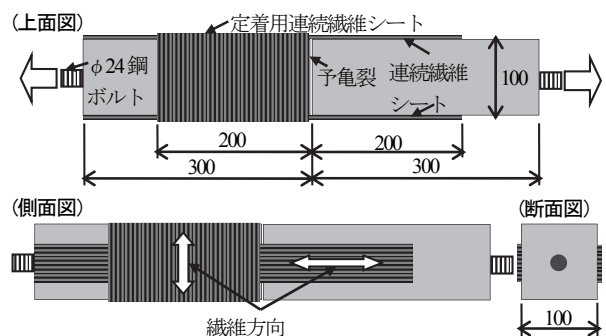


図-1 両引き試験供試体の詳細寸法

の評価を目的とした両引き試験方法案が提案されている。この実験案において提案されている供試体は、図-1に示すように、幅100mm×高さ100mm×長さ300mmのコンクリート塊2体を長手方向に並べ、その両側面に、幅50mmのバサルト繊維シートに接着材を含浸させつつ、長手方向に接着した形状である。ここで、コンクリートの内部には、試験機との接続に用いる鋼棒が埋め込まれており、この鋼棒の両端を試験機と接続し、相対する方向に引っ張ることにより荷重を負荷した。

表-1 バサルト繊維シートの物性値一覧（両引き付着試験）

|                                                |       |
|------------------------------------------------|-------|
| 引張強度 $\sigma_f$<br>(N/mm <sup>2</sup> , メーカー値) | 1900  |
| 引張弾性率 $E_f$<br>(kN/mm <sup>2</sup> , メーカー値)    | 90    |
| 破断伸度 $\varepsilon_f(=\sigma_f/E_f)$ (μ)        | 21111 |
| 目付量 (g/m <sup>2</sup> )                        | 580   |
| 1層あたり換算厚さ $t_f$<br>(mm)                        | 0.22  |
| $E_f \cdot t_f$ (kN/mm) (長手方向のみ, 1層あたり)        | 19.8  |

表-2 接着材の物性値一覧

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| 引張強度 $\sigma_r$<br>(N/mm <sup>2</sup> , メーカー値) | 30         |
| 可使時間<br>(分, 20℃)                               | 45         |
| 硬化時間<br>(20℃)                                  | 15時間       |
| 粘度 (mPa・s)                                     | 1800 (20℃) |

表-3 実験供試体一覧

| 供試体名       | 荷重速度（予亀裂近傍における BFRPシートひずみで表して μ/s） |
|------------|------------------------------------|
| DS-57μ/s   | 57                                 |
| DS-3221μ/s | 3221                               |
| DS-8098μ/s | 8098                               |

#### b) 使用材料と供試体の諸元

本研究の実験に使用したBFRPシートは、表-1に示すように高い伸度を有し、ある程度高い引張強度やヤング率も有している。この連続繊維シートの含浸・接着材お

よびプライマーには、コンクリートの補強に関する施工実績のある、常温硬化型の熱硬化性エポキシ樹脂（硬化材には環状ポリアミドアミンを使用）を用いた。表-2に示すように、その硬化時間はエポキシ樹脂については15時間程度である。実験までは、エポキシ樹脂の塗布から1週間後を目途に実験を行った。また、コンクリートの設計基準強度は21N/mm<sup>2</sup>とした。なお、コンクリートの圧縮強度については、円柱供試体（φ50×100mm）3本の圧縮試験を行い、平均値は23N/mm<sup>2</sup>であった。荷重速度としては、BFRPシートの予亀裂近傍に生じるひずみで表して、静的試験として57μ/s、高速試験として3221μ/sおよび8098μ/sの3種類を考慮した。実験供試体の一覧を表-3に示す。

#### c) バサルト繊維シートの含浸・接着手順

コンクリートの表面処理は、コンクリートの表面をディスクサンダーにより骨材が現れる程度の深さまで研削し、アセトンを含浸させた布でその面を洗浄した上で、エポキシプライマーを塗布する手順で行った。ここで、エポキシプライマーには含浸・接着材と同種の接着剤を用い、その塗布量はメーカーの推奨値である0.5kg/m<sup>2</sup>とした。その後、12時間程度経過して、プライマーの表面が硬化した時点で、常温硬化型接着材で2層のバサルト繊維シートを含浸し、プライマーの表面に密着させ、脱泡ローラーで気泡を抜く手順で接着させた。そして、温度が24～28℃、湿度が50～70%となる室内で、7日間程度で養生したうえで両引き付着試験を実施した。バサルト繊維シートと含浸材の体積比である繊維含有率（V<sub>f</sub>）が引張特性に大きく影響することが一般に知られているため、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<sup>3)</sup>を参考に50%程度になるように接着材の塗布量を調整した。

#### d) 実験手順および測定項目

供試体両端部の鋼ボルトを2000kN万能試験機に接続し、5kN/min程度の割合で荷重を増加させる引張試験を行った。試験時の環境温度および湿度は空調管理されており、24～25℃、50～60%であった。実験に際して計測する項目（測定機器）は、荷重（試験機より出力）、FRPシート表面ひずみ（検長5mmのひずみゲージを予亀裂位置から順に5, 50, 100, 125, 150, 175, 195mm離れた箇所に設置）、そして予亀裂の拡張量（検長50mmのπ型変位計）とした。

#### (2) BFRPシート接着補強コンクリート梁の曲げ試験方法

##### a) 供試体の形状と寸法

BFRPシートを接着したコンクリートの曲げ試験体の寸法図を図-2に示す。供試体母材は断面150mm×200mm、全長2000mmの直方体形状のコンクリート塊で

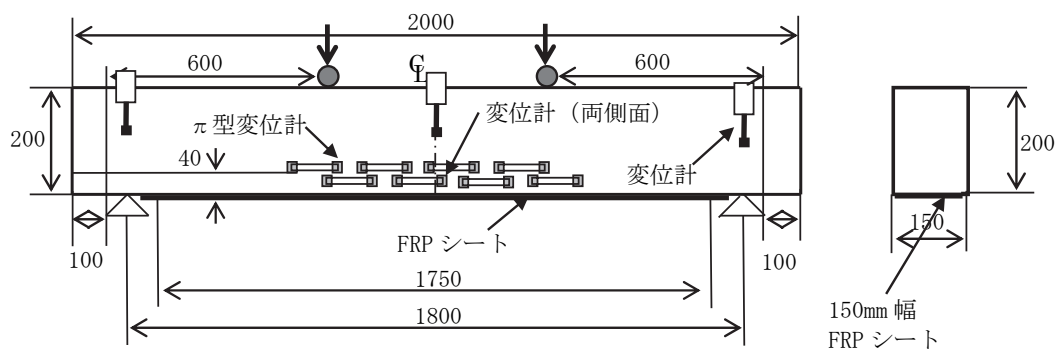


図-2 曲げ試験供試体の寸法図

あり、コンクリートの設計圧縮強度は両引き付着試験と同様の $21\text{N/mm}^2$ とした。その底面に $150\text{mm}$ 幅のFRPシートを $1750\text{mm}$ 長さで接着した。曲げ試験における支点間隔は $1800\text{mm}$ であり、載荷点間隔は $600\text{mm}$ とし、3等分点の4点曲げ試験を行った。コンクリートの表面処理は前節に述べた方法と同様に行った。その上で、幅 $150\text{mm}$ 、全長 $1750\text{mm}$ 、1層のバサルト繊維シートをコンクリート梁下面の表面にエポキシ樹脂で接着した。用いたバサルト繊維シートの物性を表-4に示す。その後、7日間常温で放置して樹脂を硬化させてから実験を行った。

は、荷重（ロードセル）、たわみ（供試体の長手方向の中央部、供試体断面方向の両側面に設置した変位計2点の平均値から両支点における変形量を差し引いた値）、FRPシート表面ひずみ（検長 $5\text{mm}$ のひずみゲージ（設置位置はFRPシートの端部から $75\text{mm}$ 、 $175\text{mm}$ 、 $275\text{mm}$ 、 $375\text{mm}$ 、 $475\text{mm}$ 、 $575\text{mm}$ 、 $725\text{mm}$ 、 $875\text{mm}$ 、 $1025\text{mm}$ 、 $1175\text{mm}$ 、 $1275\text{mm}$ 、 $1375\text{mm}$ 、 $1475\text{mm}$ 、 $1575\text{mm}$ 、 $1675\text{mm}$ である。）、そしてひび割れ幅（検長 $100\text{mm}$ の $\pi$ 型変位計 $\times 8$ 本、ひび割れが生じた個所における $\pi$ 型変位計の値の平均値）とした。

表-4 バサルト繊維シートの物性値一覧（梁の曲げ試験）

| 特性                                                | 値     |
|---------------------------------------------------|-------|
| 引張強度 $\sigma_f$<br>( $\text{N/mm}^2$ , メーカー値)     | 1900  |
| 引張弾性率 $E_f$<br>( $\text{kN/mm}^2$ , メーカー値)        | 90    |
| 破断伸度 $\varepsilon_f (= \sigma_f / E_f)$ ( $\mu$ ) | 21111 |
| 目付量 ( $\text{g/m}^2$ )                            | 670   |
| 1層あたり換算厚さ $t_f$<br>( $\text{mm}$ )                | 0.256 |
| $E_f \cdot t_f$ ( $\text{kN/mm}$ )（長手方向のみ、1層あたり）  | 23.0  |

表-5 実験供試体一覧

| 供試体名  | 荷重速度（最大BFRPシートひずみで表して $\mu\text{s}$ ） |
|-------|---------------------------------------|
| NRC   | 50                                    |
| BF-S1 | 50                                    |
| BF-S2 | 50                                    |
| BF-S3 | 50                                    |
| BF-H  | 1949                                  |

#### b) 実験手順および測定項目

350kN油圧ジャッキと載荷フレームを用い、静的載荷試験（荷重増加時に、最大BFRPシートひずみで $50\mu\text{s}$ ）および高速載荷試験（最大BFRPシートひずみで $1949\mu\text{s}$ ）を行った。実験供試体の一覧を表-5に示す。

静的試験においては、約 $10\text{kN}$ ごとの漸増載荷とし、その都度ひび割れの目視確認を行った。試験時の環境温度および湿度は空調管理されており、 $25\sim 27^\circ\text{C}$ 、 $50\sim 60\%$ であった。実験に際して計測する項目（測定機器）



(1) DS-57 $\mu\text{s}$

(2) DS-8098 $\mu\text{s}$

図-3 BFRPシート剥離の様子

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 両引き付着試験結果と考察

両引き付着試験において、予亀裂近傍から接着端部に向かってBFRPシートの剥離が進展する様子がいずれの供試体についても確認された。ただし、ひずみ速度が大きいほどコンクリートの深い箇所において剥離が進展している様子が図-3に示すように見られた。一方、最大荷重とBFRPシートの剥離直前における最大ひずみは、表-6に示すように、ひずみ速度が大きいほど大きくなる傾向が見られた。その傾向を明確化するために、ひずみ速度 $\Delta\epsilon$ とBFRPシートの最大ひずみ $\epsilon_{max}$ の関係を図-4に示す。この関係を単回帰近似すると、下記の式 (1) のように表される。

$$\epsilon_{max} = 750 \log \Delta\epsilon + 9525 \quad (\mu) \quad (1)$$

この結果を次節におけるBFRPシート剥離時荷重の算定に用いる。

#### (2) BFRPシート接着補強コンクリート梁の曲げ試験結果と考察

##### a) 荷重-変位関係と破壊モード

荷重-変位の関係を図-5に示す。NRCについては、載荷点直下にひび割れが発生し、2分したため、実験を終了した。BF-S1～S3については、ひび割れ発生直後に荷重-変位関係が大きく変化している。これは、供試体の引張縁における引張応力のコンクリート負担分がひび割れとともにBFRPシートに再分配されたためと考えられる。その後、複数本のひび割れが生じた後、図-6に示すように、載荷点直下に生じた曲げひび割れから接着端部に向かって剥離が進展し、完全に剥離した後、実験を終了した。BF-Hについては、BF-S1～S3と同様の挙動を示した。

次に、ひび割れ発生荷重および最大荷重を比較すると、いずれの値も1.2倍程度に向上している。これは、荷重速度が大きいほどコンクリートの圧縮強度やヤング率、引張強度が高まったためであると考えられる。これについて、次項で梁の曲げ耐力を検討するうえで、CEB-FIPモデルに基づき考慮する。

##### b) ひび割れ幅と分布状況

荷重-ひび割れ幅の関係を図-7に示す。NRCよりBF-S1～S3ではよりひび割れ幅が小さくなっており、BF-Hではさらにひび割れ幅が小さくなっている。前者については、土木学会編、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<sup>3)</sup>において述べられているように、連続繊維シートによる拘束効果により、ひび割れ幅が0.6倍程度に抑制されるという知見とよく一致している。一方、後者については、荷重速度が大きいほど、コンクリートのヤング率が高まるため、コンクリートの変形が

表-6 両引き付着試験結果一覧

| 供試体名             | 最大荷重 (kN) | BFRPシート最大ひずみ ( $\mu$ ) |
|------------------|-----------|------------------------|
| DS-57 $\mu$ /s   | 27.5      | 12662                  |
| DS-3221 $\mu$ /s | 26.5      | 15032                  |
| DS-8098 $\mu$ /s | 33.9      | 16729                  |

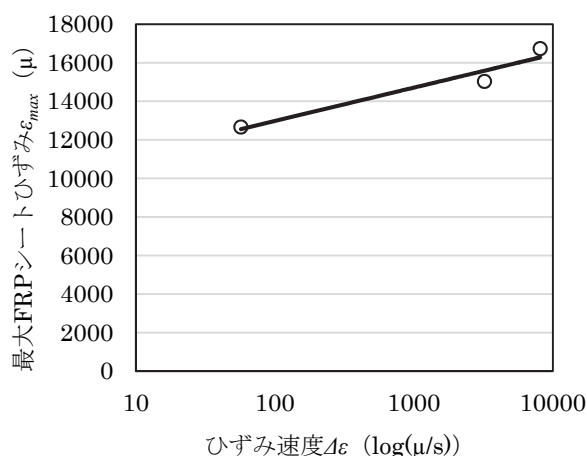


図-4 ひずみ速度とBFRPシート最大ひずみの関係

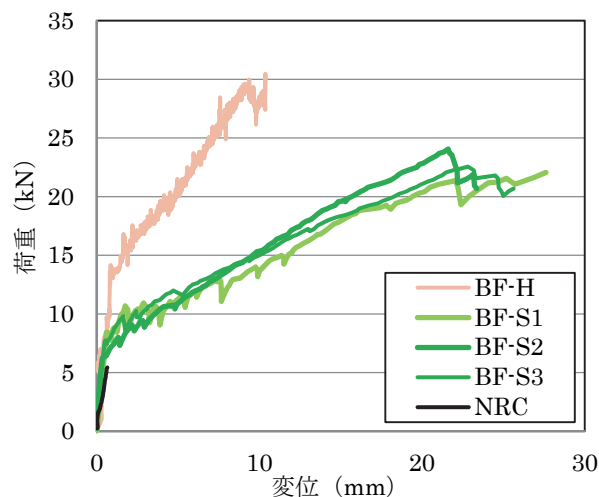
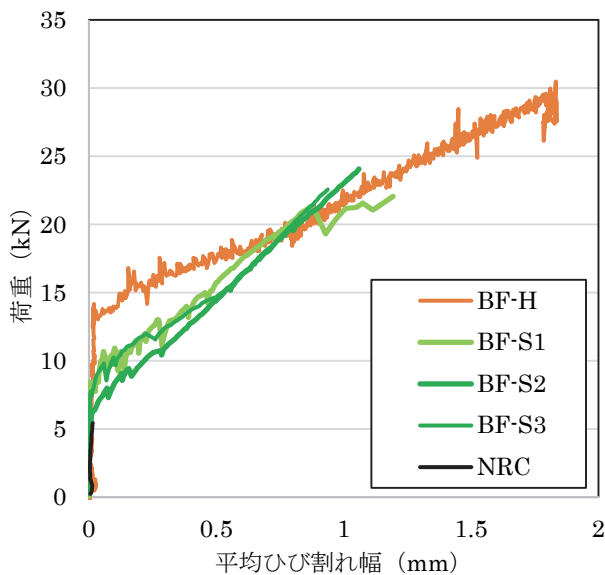


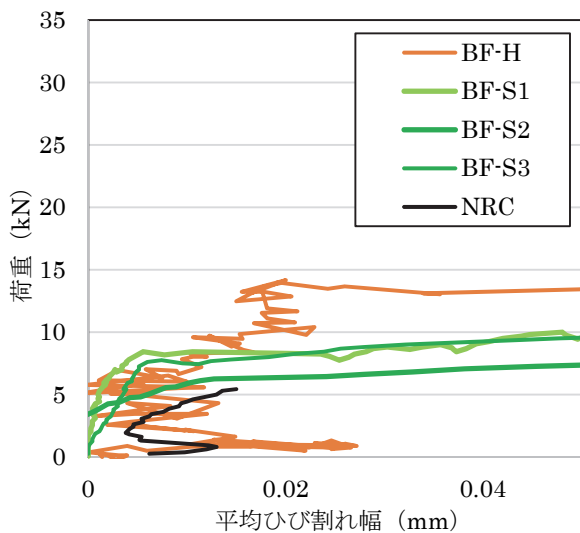
図-5 荷重-変位関係



図-6 BFRPシート剥離の様子



(1) 全体図

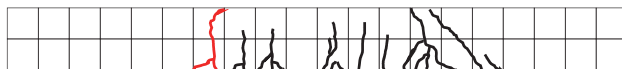


(2) 拡大図

図-7 荷重－ひび割れ幅の関係



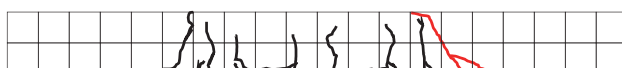
(1) NRC



(2) BF-S1



(3) BF-S2



(4) BF-S3



(5) BF-H

図-8 ひび割れ分布

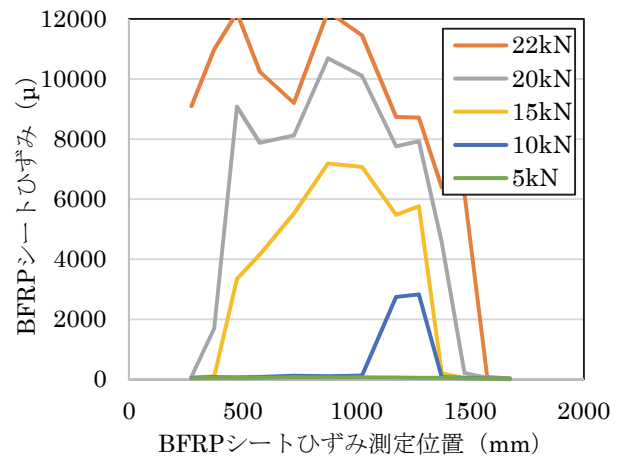


図-9 BFRPシートひずみ分布 (BF-S1)

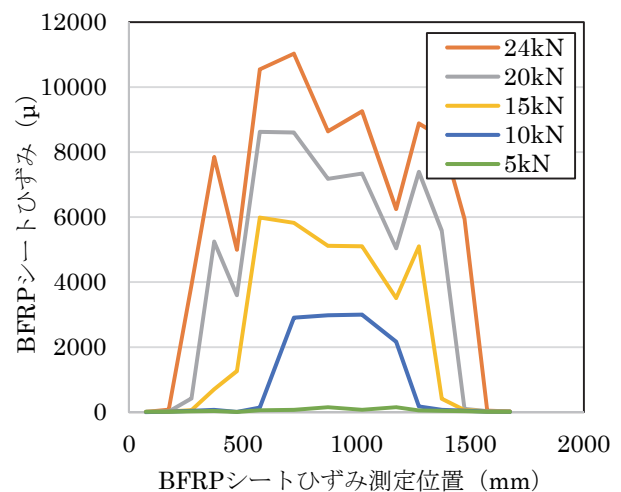


図-10 BFRPシートひずみ分布 (BF-S2)

抑制されるためであると考えられる。一方、ひび割れ分布を図-8に示す。NRCを除くすべての供試体で平均ひび割れ幅は110mm程度であった。また、ひび割れは載荷点間に集中しており、BFRPシート剥離の起点となるひび割れは、載荷点近傍の曲げひび割れであった。ひび割れ分布については、ひずみ速度の影響は見られなかった。

#### c) BFRPシートひずみ

BFRPシートひずみ分布を図-9～図-12に示す。いずれの供試体においても、載荷点近傍において卓越したひずみが生じ、支点方向に100mm程度までひずみが生じていることがわかる。BFRPシート剥離直前においては、剥離の起点となるひび割れの下端付近で卓越している。

#### d) 圧縮縁コンクリートひずみ

荷重-コンクリート圧縮縁ひずみの関係を図-13に示す。BF-Hについて、BF-S1～S3よりひび割れ発生荷重が高まったため、ひび割れ発生に伴う変曲点の荷重が高まっているが、その前後のラインの傾きは類似している。最大

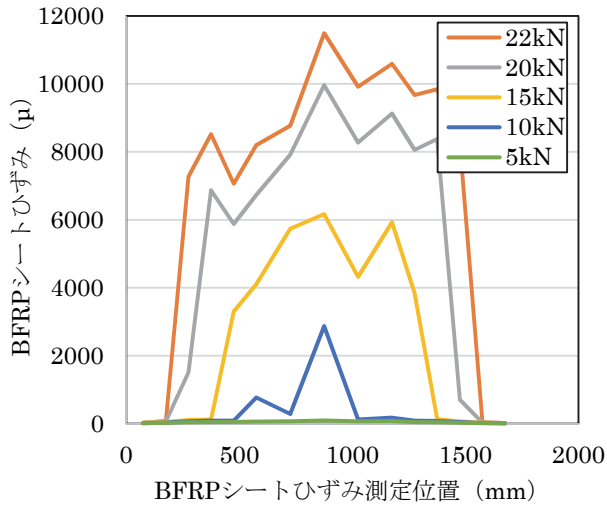


図-11 BFRPシートひずみ分布 (BF-S3)

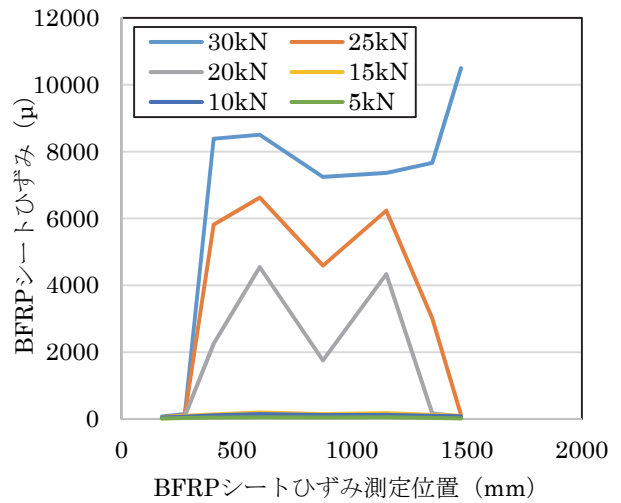


図-12 BFRPシートひずみ分布 (BF-H)

ひずみは-852μ～-1218μであり、BFRPシート剥離時でもコンクリートの圧縮破壊には至っていないことがわかる。

## (2) BFRPシート接着補強コンクリート梁の曲げ挙動に関する算定評価

### a) ひび割れ発生荷重

既往の曲げ理論を活用した簡易算定方法により、ひび割れ発生荷重と最大荷重を算定した。その結果はに示す。まず、弾性係数比を各種材料の断面積に乘じ、コンクリートに換算する。ここで、BFRPシートとコンクリートの弾性係数比は  $n_f = E_f / E_c$  とした。次に、式 (2) から中立軸位置  $h_c$  を求める。

$$h_c = \frac{A_c d_c + A_f h(n_f - 1)}{A_{total}} \quad (2)$$

ここで、 $A_c$  はコンクリートの断面積、 $h_c$  はコンクリート圧縮縁における応力の図心位置までの距離、 $A_f$  は BFRPシートの断面積、そして  $h$  は梁せいとする。なお、 $A_{total}$  は以下の式 (3) から求められる。

$$A_{total} = A_c + A_f n_f \quad (3)$$

そして、ひび割れ発生荷重  $P_{cr}$  は式 (4) から算出される。

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot f_t}{L \cdot h_c} \quad (4)$$

ここで、 $I_g$  は断面二次モーメント、 $f_t$  はコンクリートの引張強度、そして  $L$  は支点と載荷点の間隔とする。

BF-Hの算定にあたっては、高速荷重の影響によるコンクリートのヤング率と引張強度の増倍を考慮する。CEB-FIPコード<sup>4)</sup>において、ひずみ速度とコンクリートのヤング率や引張強度の関係がモデル化されている。

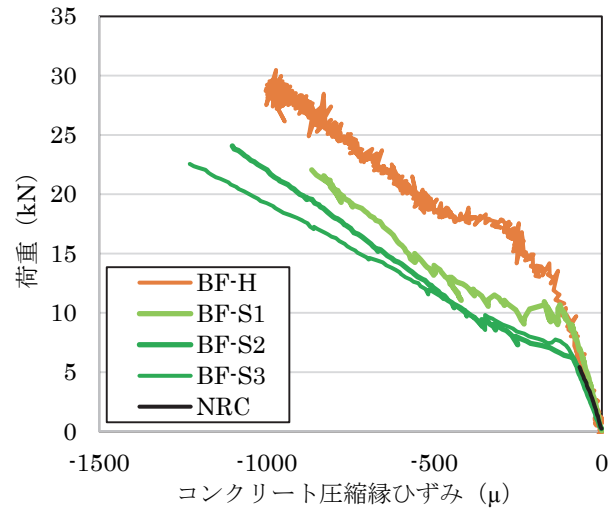


図-13 荷重－コンクリート圧縮縁ひずみの関係

本研究では、高速荷重による増倍率を、コンクリートのヤング率については式 (5)、引張強度については式 (6) に基づき算出する。

$$\frac{E_{c,imp}}{E_{ci}} = \left( \frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_{co}} \right)^{0.026} \quad (5)$$

ここで、 $E_{c,imp}$  は高速荷重負荷時の縦弾性係数、 $E_{ci}$  はコンクリートの静的縦弾性係数、 $\epsilon'_c$  はひずみ速度 ( $s^{-1}$ )、そして  $\epsilon'_{co}$  は  $30 \times 10^{-6} s^{-1}$  とする。

$$\frac{f_{ct,imp}}{f_{ctm}} = \beta_s \left( \frac{\epsilon'_{ct}}{\epsilon'_{cto}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\log \beta_s = 7.112 \delta_s - 2.33 \quad (7)$$

$$\delta_s = \frac{1}{10 + 6 f_{cm} / f_{cmo}} \quad (8)$$

ここで、 $f_{cimp}$ は高速荷重負荷時の引張強度、 $f_{cm}$ はコンクリートの静的引張強度、 $f_{mo}$ は $10\text{N/mm}^2$ 、 $\dot{\epsilon}_d$ はひずみ速度( $\text{s}^{-1}$ )、そして $\dot{\epsilon}_{col}$ は $3 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ とする。

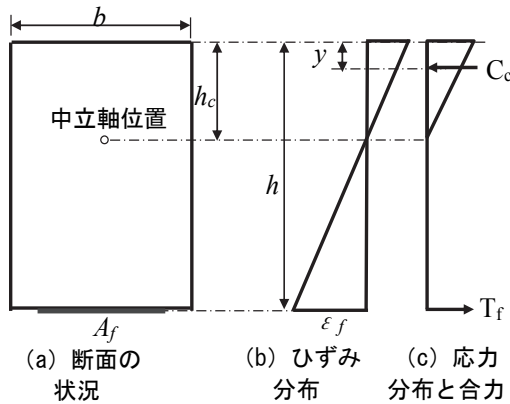


図-14 コンクリート梁の断面諸元

表-7 算定結果一覧

| 供試体名  | ひび割れ発生荷重 (kN) |      | BFRP シート剥離直前の荷重 (kN) |      |
|-------|---------------|------|----------------------|------|
|       | 実験値           | 算定値  | 実験値                  | 算定値  |
| NRC   | 5.4           | 6.2  | —                    | —    |
| BF-S1 | 6.2           | 6.3  | 21.4                 | 23.2 |
| BF-S2 | 6.3           | 6.3  | 24.1                 | 23.2 |
| BF-S3 | 7.4           | 6.3  | 22.6                 | 23.2 |
| BF-H  | 13.9          | 11.8 | 30.0                 | 27.5 |

#### b) BFRPシート剥離直前の荷重

梁の断面諸元を図-14に示すように仮定する。平面保持の仮定のもと、ひずみ分布は線形分布とした。まず、引張鉄筋のひずみは引張降伏ひずみ $\epsilon_y$ であるため、相似則からBFRPロッドおよび圧縮縁ひずみのひずみ $\epsilon_c$ および $\epsilon'_c$ を算出し、力のつり合い条件から中立軸位置 $h_c$ を算出した。また、コンクリートの応力分布は3角形分布とし、 $C_c$ の作用位置 $y$ を求める。以上の算出結果を式 (9) に入力することで、BFRPシート剥離直前における最大モーメントが算出され、荷重に換算することでBFRPシート剥離直前の荷重が算出される。

$$M_{sy} = \epsilon_f E_f A_f (h - y) \quad (9)$$

ここで、 $\epsilon_d$ はBFRPシートの剥離直前のひずみであり、前出の図-4に示したBFRPシートの剥離ひずみと荷重速度の関係から読み取ったうえで用いた。また、 $E_f$ はBFRPシートのヤング率である。

#### c) 算定評価結果に関する考察

ひび割れ幅およびBFRPシート剥離直前の荷重の算定結果をに示す。両者とも、実験値と算定値が類似していることから、本研究で実施した曲げ理論に基づく算定により、実験結果を評価することができることが明確となった。

#### 4. まとめ

本研究では、BFRPシートで接着補強したコンクリート梁の高速荷重下における曲げ挙動を実験的に検証するとともに、簡易な評価法について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 荷重速度を考慮した両引き付着試験を実施し、ひずみ速度とBFRPシートの最大ひずみの関係を明確化した。
- 2) BFRPシートで補強したコンクリート梁の曲げ試験を実施し、ひび割れ発生荷重および最大荷重は、静的曲げ試験の場合に比べて、高速荷重負荷時に1.2倍程度に向上することが明確となった。
- 3) ひび割れ発生荷重およびBFRPシート剥離直前の荷重を、高速荷重を受ける場合にCEB-FIPモデルに基づきコンクリートの諸元を定め、BFRPシートの剥離ひずみに両引き付着試験結果を適用することで、曲げ理論に基づく算定により評価できることが明らかになった。

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）」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，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，日本コンクリート工学会，Vol.36, No.1, pp.1912-1917, 2014.7
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)，1998.5
- 3) (社)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
- 4) CEB-FIP MODEL CODE 1990, Design code, 1990

# FLEXURAL BEHAVIOR OF CONCRETE BEAM STRENGTHENED WITH BASALT FIBER SHEETS UNDER HIGH-SPEED LOADING

Kentaro IWASHITA, Yuki MORI, Susumu BABA, Nobuyuki MATSUMOTO,  
Toyohiro KANZAKI and Hajime TAKAMI

In this study, first, an experimental study on the double-lap shear tests under high-speed loading were presented, and the test results clarify the relationship between maximum strain of BFRP sheets and strain rate. Second, the flexural behavior of concrete beam with externally bonded BFRP sheets under high-speed loading is investigated experimentally. Cracking load and ultimate load are increased under high-speed loading. Moreover, a theoretical analysis is performed to evaluate the experimental results, and good agreement between the experimental and theoretical results has been proved.