

論文 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*1・馬場 進*2・神崎 豊裕*3・高見 肇*3

要旨：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 シートの剥離直前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。

キーワード：バサルト繊維シート、コンクリート梁、接着補強、曲げ挙動、高速荷重、ひずみ速度

1. はじめに

天然に存在する玄武岩を溶融・紡糸して造られるバサルト繊維よりなる FRP 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強さが得られることが実験的に示された¹⁾。また、付着試験における剥離は、既存の多くの研究と同様に、コンクリートの層内で生じており、コンクリートの強度が高いほど付着強さが向上する傾向が確認された。一方、コンクリートの強度と荷重速度の関係が CEB-FIP モデルコード²⁾において提案されているが、FRP 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に関する研究はほとんど実施されていない。そこで、本研究では、荷重速度を考慮した両引き付着試験により BFRP シートとコンクリートの付着強さと荷重速度の関係を検証したうえで、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 シートの剥離が生じる際の荷重に及ぼす荷重速度の影響を、実験およ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

2.1 両引き付着試験方法

(1) 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）³⁾ 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⁴⁾において、連続繊維シートとコンクリートの付着強さを評価するための両引き試験方法案が提案されている。この実

験案における供試体の形状は、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エポキシ樹脂を含浸させつつ、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。

(2) 使用材料と供試体の諸元

本研究の実験に使用した BFRP シートの物性値を表-1 に示す。このシートの含浸・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/mm² 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（φ100×200mm）3 本の圧縮試験を

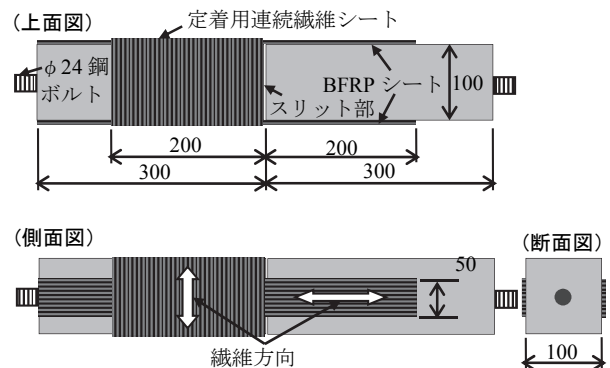


図-1 両引き付着試験供試体の外観

*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 工博（正会員）

*2 アイレック技建（株）

*3 榎屋ティスコ（株）

表-1 BFRP シートの物性値一覧 (両引き付着試験)

引張強度 σ_f (N/mm ² , メーカー値)	1900
引張弾性率 E_f (kN/mm ² , メーカー値)	90
破断伸度 $\varepsilon_f(=\sigma_f/E_f)$ (μ)	21111
目付量 (g/m ²)	580
1層あたり換算厚さ t_f (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 含浸・接着材の物性値一覧

引張強度 σ_r (N/mm ² , メーカー値)	30
可使時間 (分, 20°C)	45
硬化時間 (20°C)	15 時間
粘度 (mPa・s)	1800 (20°C)

表-3 実験供試体一覧 (両引き付着試験)

供試体名	荷重速度 (スリット部近傍における BFRP シートひずみで表して μ/s)
DS-57 μ/s	57
DS-3221 μ/s	3221
DS-8098 μ/s	8098

行い、平均値は 23N/mm² であった。荷重速度としては、BFRP シートのスリット部近傍に生じるひずみに対応したものとし、静的試験として 57 μ/s 、中速試験として 3221 μ/s 、そして高速試験として 8098 μ/s とした。この荷重速度のレベルは、試験装置の制限により、大規模地震や物体の衝突には対応しないが、本研究では、荷重速度の影響評価を行うことに主眼を置くこととする。実験供試体の一覧を表-3 に示す。

(3) 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、アセトンに浸透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・接着材と同種のものを用い、その塗布量はメーカーの推奨値である 0.5kg/m² 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、常温硬化型エポキシ樹脂で 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°C、湿度が 50~70% となる室内で、7 日間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・接着材の体積比である繊維含有率 (V_f) が引張特性に大きく影響することがわかっているため、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⁴⁾ を参考に、 V_f を 50% とすることを目安とした。

(4) 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、前述の荷重速度で引張試験を行った。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°C、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 のひずみゲージをスリット部位置から順に 5, 50, 100, 125, 150, 175, 195mm 離れた箇所に設置)、そしてスリット部の拡張量 (検長 50mm の π 型変位計) とした。

2.2 BFRP シート接着コンクリート梁の曲げ試験方法

(1) 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 21N/mm² とした。その底面に 150mm 幅の FRP シートを 1750mm 長さで接着した。曲げ試験における支点間隔は 1800mm であり、載荷点間隔は 600mm 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 150mm、全長 1750mm、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、エポキシ樹脂が硬化したうえで実験を行った。

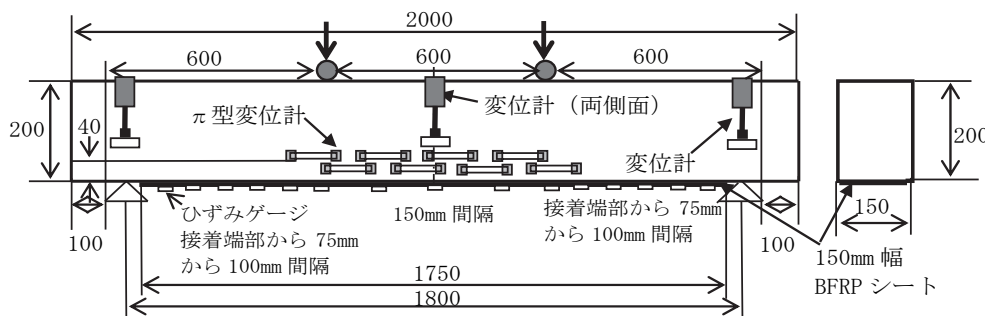


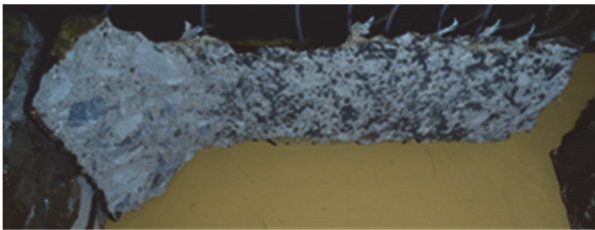
図-2 曲げ試験供試体の寸法図

表-4 BFRP シートの物性値一覧 (梁の曲げ試験)

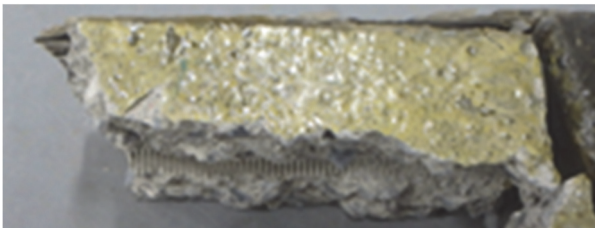
特性	値
引張強度 σ_f (N/mm ² , メーカー値)	1900
引張弾性率 E_f (kN/mm ² , メーカー値)	90
破断伸度 $\epsilon_f (= \sigma_f / E_f)$ (μ)	21111
目付量 (g/m ²)	670
1層あたり換算厚さ t_f (mm)	0.256
$E_f \cdot t_f$ (kN/mm) (長手方向のみ, 1層あたり)	23.0

表-5 実験供試体一覧 (梁の曲げ試験)

供試体名	荷重速度 (最大 BFRP シートひずみで表して μ/s)
N	50
BF-S1	50
BF-S2	50
BF-S3	50
BF-H	1949



(1) DS-57 μ/s



(2) DS-8098 μ/s

写真-1 BFRP シート剥離後の様子

(2) 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 μ/s) および高速載荷試験 (最大 BFRP シートひずみで 1949 μ/s) を行った。この荷重速度のレベルは大規模地震や物体の衝突には対応しないが、本研究では、荷重速度の影響評価を行うことに主眼を置くこととする。実験供試体の一覧を表-5 に示す。静的試験においては、約 10kN ほどの漸増載荷とし、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、25~27 $^{\circ}C$ 、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 (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

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 (μ)
DS-57 μ/s	27.5	12662
DS-3221 μ/s	26.5	15032
DS-8098 μ/s	33.9	16729

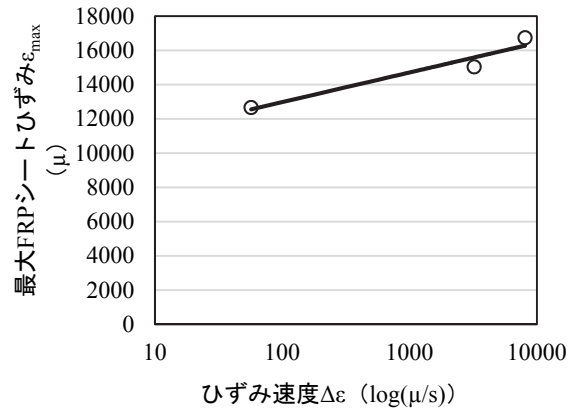


図-3 ひずみ速度と BFRP シート最大ひずみの関係

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 5mm のひずみゲージ 15 本), そしてひび割れ幅 (検長 100mm の π 型変位計 8 本, ひび割れ個所における π 型変位計の値の平均値) とした。

3. 実験結果と考察

3.1 両引き付着試験結果と考察

両引き付着試験において、スリット部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写真-1 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 ϵ_{max} の関係を図-3 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。

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

この結果を次節における BFRP シート剥離直前における荷重の算定に用いる。

3.2 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

(1) 荷重-変位関係と破壊モード

荷重-変位の関係を図-4 に示す。N 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

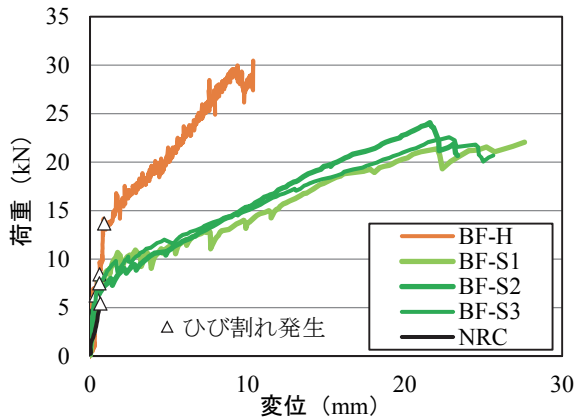


図-4 荷重-変位関係

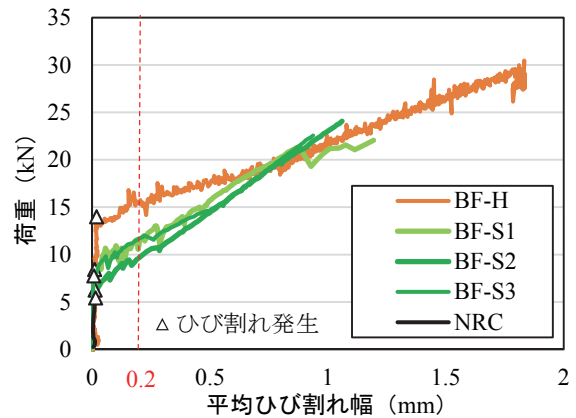


図-5 荷重-ひび割れ幅の関係



写真-2 BFRP シート剥離の様子 (BF-H)

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、写真-2 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について比較すると、BF-H のいずれの値も BF-S1~S3 の値に対して 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²⁾に基づき考慮する。

(2) ひび割れ幅と分布状況

荷重-ひび割れ幅の関係を図-5 に示す。例えばひび割れ幅が 0.2mm のときの BF-S1~S3 と BF-H の荷重を比較すると、BF-S1~S3 より BF-H の方が荷重が 1.5 倍となっている。よって、荷重速度が大きいほど、同等のひび割れ幅で比較したときの荷重が高くなっている。これは、荷重速度が大きいほど、コンクリートおよび BFRP シートのヤング率が高まるため、コンクリートの変形が抑制されるとともに、BFRP シートによる拘束力が高まるためであると考えられる。一方、ひび割れ分布を図-6 に示す。N を除くすべての供試体で平均ひび割れ間隔は 110mm 程度であった。また、赤線で示したひび割れは、BFRP シート剥離の起点となったものであり、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

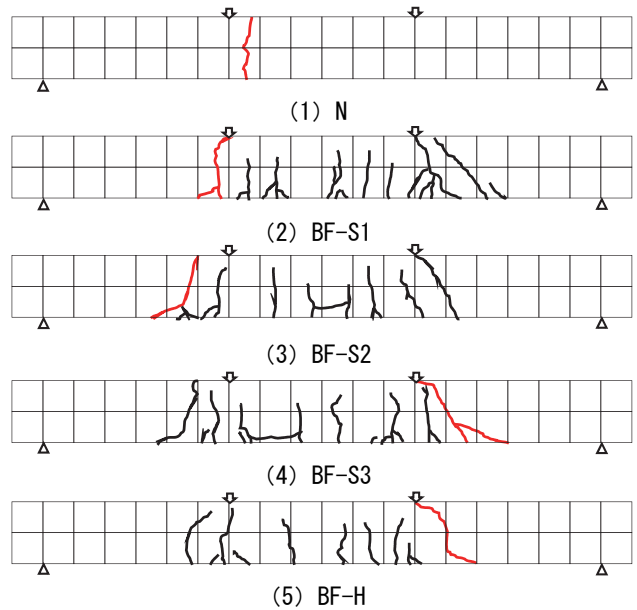


図-6 ひび割れ分布

割れであることがわかる。以上のように、ひび割れ分布に対するひずみ速度の影響は確認されなかった。

(3) BFRP シートひずみ

BFRP シートひずみ分布を図-7~図-10 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ているが、支点方向に 100mm 程度離れた箇所では百 μ 以下に収束している。BF-H においては、ひび割れ発生荷重が BF-S1~S3 より高く、ひび割れ発生直後の 15kN でも、BFRP シートに生じるひずみは小さい。

(4) 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-11 に示す。ひび割れ発生前後で傾きが小さくなる挙動は BF-H と BF-S1~S3 で類似しているが、BF-H では、BF-S1~S3 より全体的に荷重が高くなっている。最大ひずみは -1218 μ であり、コンクリートの最大圧縮ひずみには至っていないことから、BFRP シートの剥離の進展が、コンクリートの圧縮破壊より先行していることがわかる。

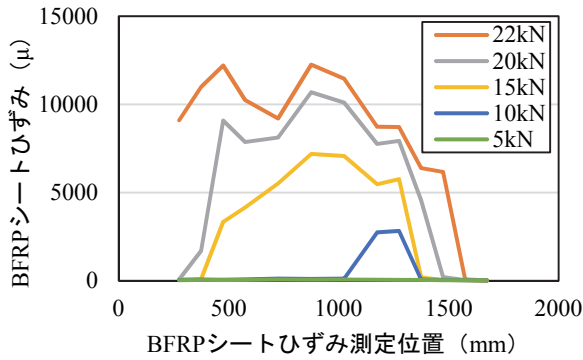


図-7 BFRP シートひずみ分布 (BF-S1)

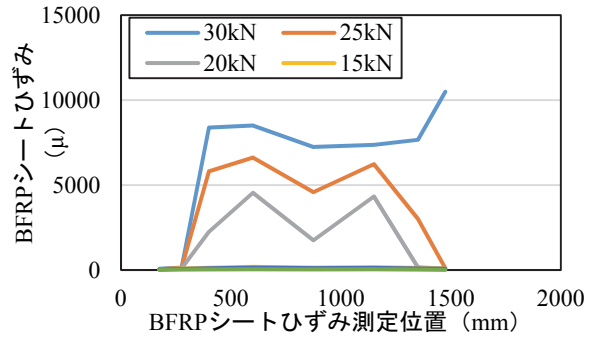


図-10 BFRP シートひずみ分布 (BF-H)

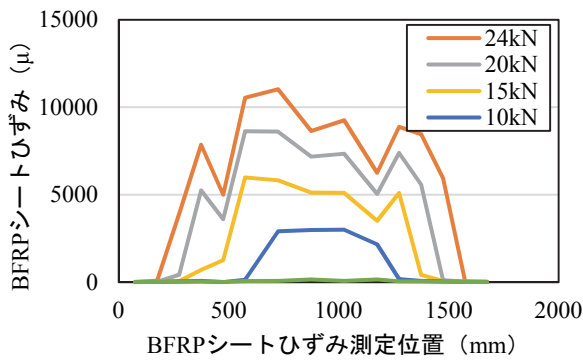


図-8 BFRP シートひずみ分布 (BF-S2)

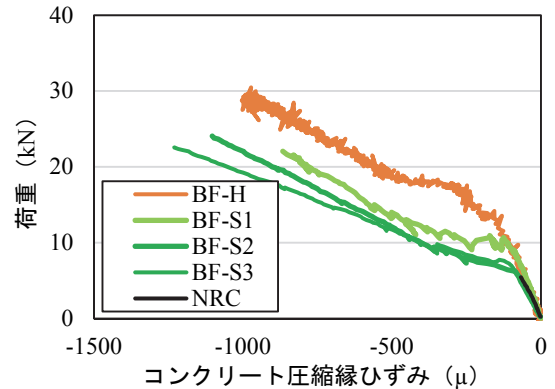


図-11 荷重-コンクリート圧縮縁ひずみの関係

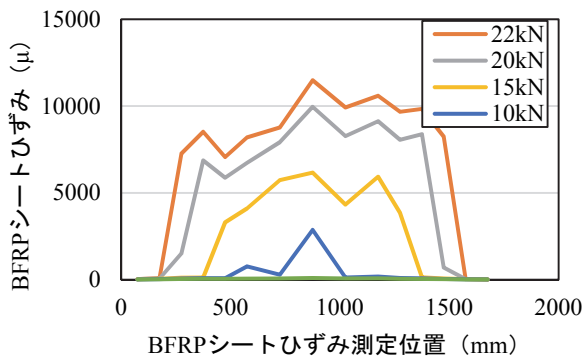


図-9 BFRP シートひずみ分布 (BF-S3)

表-7 算定に用いた値の一覧

係数	値	単位
f_t	1.91	N/mm ²
A_c	30,000	mm ²
A_f	38.4	mm ²
ε'_{co}	-30×10^{-6}	s ⁻¹
f_{cmo}	10	N/mm ²

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²⁾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。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。

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

3.3 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

(1) 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する。算定手順としては、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。

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

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}

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、 ε'_c はひずみ速度 (s^{-1})、そして ε'_{co} は $-30 \times 10^{-6} s^{-1}$ とする。

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

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

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

ここで、 $f_{ct,imp}$ は高速荷重負荷時の引張強度、 f_{ctm} はコンクリートの静的引張強度 (= f_t)、 f_{cmo} は 10 N/mm^2 とする。

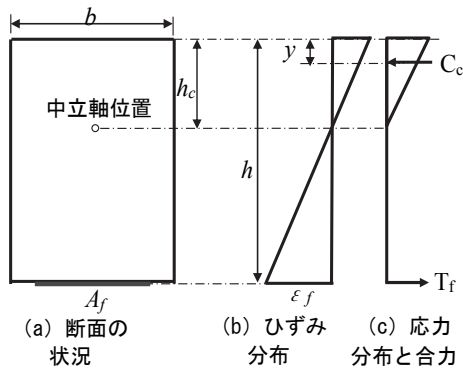


図-12 コンクリート梁の断面諸元

表-8 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
N	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

(2) BFRP シート剥離直前の荷重

梁の断面諸元を図-12 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、前出の図-3 に示した BFRP シートの剥離ひずみと荷重速度の関係から、BFRP シートの剥離直前におけるひずみ ε_f を読み取り、相似則に基づき圧縮縁ひずみ ε'_c を算出した。次に、これらのひずみ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 を求めた。以上の算出結果を式(9)に入力して、BFRP シート剥離直前における最大モーメントを算出し、荷重に換算することで BFRP シート剥離直前の荷重を算出した。

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

ここで、 ε_f は BFRP シートの剥離直前のひずみであり、つたうえで用いた。また、 E_f は BFRP シートのヤング率である。

(3) 算定評価結果に関する考察

前出の表-4 および表-7 に示した値を用い、ひび割れ発生荷重および BFRP シート剥離直前の荷重の算定を行った。その結果を表-8 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により、ひずみ速度と BFRP シート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: バサルト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) CEB-FIP MODEL CODE 1990, Design code, 1990
- 3) (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
- 4) (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