

論文 BFRP, AFRP シート接着補強 RC 梁の曲げ挙動に関する研究

山内 匡*1・岩下 健太郎*2・高見 肇*3・松永 秀暁*4

要旨: 本研究では、特に高伸度性に優れる BFRP および AFRP シートに着目し、両引き付着試験によりコンクリートとの付着強さを評価したうえで、凍結融解作用を考慮して RC 梁に対する曲げ補強効果を曲げ試験により検証した。その結果、両引き付着試験においては両者とも高い付着強度が得られること、凍結融解作用の有無を考慮した曲げ試験においては、両者で同等の補強効果が得られることや、本研究で実施した程度の凍結融解の影響はほぼ影響しないこと、そして薄目付の BFRP を用いた曲げ試験において、剛性はやや低いものの、通常目付量の BFRP と同程度の最大荷重や高い靱性が得られる傾向が確認された。

キーワード: BFRP, AFRP, 界面剥離破壊エネルギー, RC, 曲げ補強

1. はじめに

RC 構造物の補修や補強を行う上で、軽量で比強度や耐薬品性に優れる FRP の補修・補強材としての重要性は高く、特に直近の 20 年以上に渡り、FRP をコンクリート表面に接着する補修・補強工法に関する研究開発や実施工が盛んに行われてきた。そうした中で、特に CFRP を中心に、主に補強材自身の物性や接着界面、補修・補強した構造物の曲げやせん断挙動、振動特性など、多岐に渡って知見が蓄積され、その付着強さや曲げせん断補強効果の評価方法の構築が進められてきた。しかしながら、AFRP やバサルト繊維を用いた BFRP といった、主に高伸度性に優れる FRP については研究が少なく、実用化に向けた取り組みが進められる中、これまで構築されてきた評価方法の適用性の検討が必要であり、知見の蓄積が期待されている。また、寒冷地域にあり凍結融解作用による劣化損傷を受けたような RC 構造物を、破断伸度に優れる高伸度 FRP で補修・補強する例は数多くあるが、補強前に凍結融解作用を受けた構造物への補強効果を対象とした研究は数少ない。そこで本研究では、BFRP, AFRP シートとコンクリートの両引き付着試験を行い、付着強さに関する既存の評価式の適用性を検討したうえで、これらにより補強した RC 梁の曲げ試験を試験前の凍結融解作用の有無を考慮して行い、補強効果の評価ならびに凍結融解作用の影響について実験的に検証した。

2. 実験方法

2.1 供試体の詳細

両引き付着試験については、連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)(日本コンクリート工学会)¹⁾ および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(土木学会)²⁾ に示されている実験方法(案)

を適用した。すなわち、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 体を付け合わせて並べ、その両側面に幅 50mm の連続繊維シートに接着材を含浸させつつ、接着したものである。ここで、コンクリートの内部には、試験装置との接続に用いる鋼棒が予め埋め込まれており、この鋼棒の両端を試験装置に接続し、相対する方向に引っ張ることにより、FRP とコンクリートの間にせん断応力が生じる機構となっている。ここで、コンクリートの設計圧縮強度 30N/mm²、スランプ 8cm として配合し、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。FRP とコンクリートの物性値は表-1、表-2 に示す。なお、FRP には一方向 FRP シートを用いた。公称厚さは目付量を比重で除して求めた。一方の RC 梁の曲げ試験については、断面 100mm × 100mm、全長 400mm の直方体形状の RC 梁を作製した。引張鉄筋には D6 鉄筋 (SD295A) 1 本、圧縮鉄筋には 2 本を用いており、引張鉄筋比は 0.4% 程度である。また、これらの梁には D10 帯鉄筋 (SD295A) を 50mm 間隔で配置しており、十分なせん断耐力を確保し、曲げ破壊が先行するように設計した。使用材料については前述の両

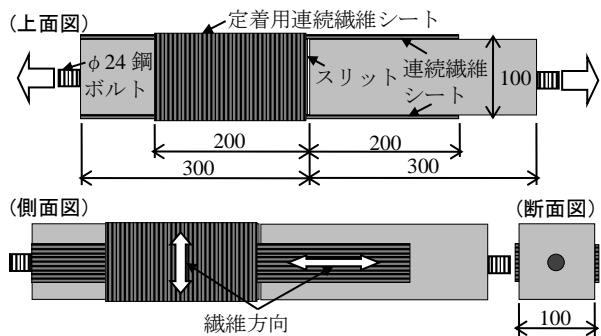


図-1 両引き付着試験供試体の詳細

*1 日本国土開発(株) 土木事業本部技術部 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准教授 博(工)(正会員)

*3 榎屋ティスコ(株) 第1技術開発部

*4 名城大学 大学院理工学研究科博士前期課程建設システム工学専攻

表-1 FRPの物性値一覧

| 特性 | BFRP | AFRP |
|--|------------------|-------|
| 引張強度 σ_f (N/mm ² , メーカー値) | 1,900 | 2,060 |
| ヤング係数 E_f (kN/mm ² , メーカー値) | 90 | 118 |
| 目付量 (g/m ²) | 1088 (400) | 830 |
| 1層あたり公称厚さ t_f (mm) | 0.414 (0.152) | 0.576 |
| 補強量 $E_f t_f$ (kN/mm) | 37.3 (13.7) | 68.0 |
| 補強量 $\sigma_f t_f$ (N/mm) | 787 (289) | 1187 |

※ () 内には薄目付のBFRPの値を表す。

表-2 コンクリートの物性値一覧 (3体の平均値)

| 特性 | コンクリート |
|-----------------------------|--------|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 42.7 |
| 割裂引張強度 (N/mm ²) | 3.40 |

引き付着試験に用いたものと同様であるが、BFRPの繊維目付を従来の40%程度に当たる400g/m²とした薄目付のケースについても検討を行った。

2.2 供試体の表面処理と接着の手順

供試体の表面処理手順としては、まず、ダイヤモンドサンダーで骨材が露出するまでコンクリート表面を削り取り、メチルエチルケトン (MEK) を含ませた布で拭き取った上で0.25kg/m²相当量のエポキシプライマーを塗布する手順によりコンクリートの表面処理を行った。その後、6時間程度経過後、2.0kg/m²相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を用いてFRPシートを接着した。

2.3 実験ケースと手順

両引き付着試験については、BFRP、AFRPを接着した供試体、各3体の実験を行った。各々の供試体をBF-B-1~3、AF-B-1~3と呼称する。FRPの表面には50mm間隔で検長5mmのひずみゲージを設置し、ひずみ分布を測定するとともに、検長2.5mmのπ型変位計をスリット部に跨るように50mm間隔で設置し、変位量を測定した。試験は1mm/min程度の速度で行い、FRPのいずれかの1面の試験側全面が剥離するまで実験を継続した。

一方のRC梁曲げ試験については1ケース3体の実験を行い、1) FRPの種類、2) 事前の凍結融解有無、3) 繊維目付を考慮した。なお、1)については事前の凍結融解は行わず、BFRP、AFRP、FRPなしの各々をBF-RCN-1~3、AF-RCN-1~3、NF-RC-1~3と呼称する。また、2)に

表-3 RC梁供試体一覧

| No. | FRP種類 (目付 (g/m ²)) | 凍結融解の有無 |
|---------------|-----------------------------------|---------|
| BF-RCN-1~3 | BFRP (1088) | 無 |
| AF-RCN-1~3 | AFRP (830) | 無 |
| NF-RCN-1~3 | 無 | 無 |
| BF-RCF-1~3 | BFRP (1088) | 有 |
| AF-RCF-1~3 | AFRP (830) | 有 |
| NF-RCF-1~3 | 無 | 有 |
| BF-RCN400-1~3 | BFRP (400) | 無 |

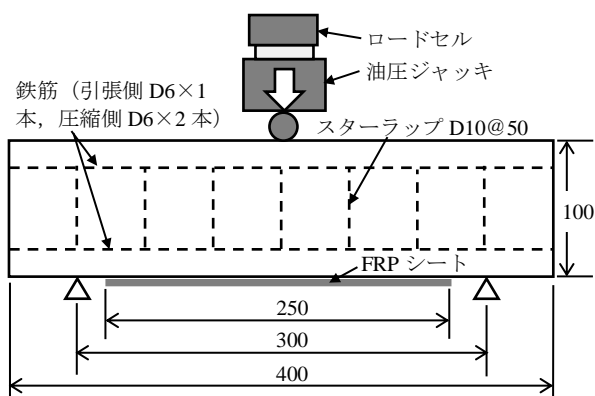


図-2 RC梁供試体の詳細

ついて、事前に凍結融解を行った供試体は、BFRP、AFRP、FRPなしの各々をBF-RCF-1~3、AF-RCF-1~3、NF-RCF-1~3と呼称する。さらに3)についてはBFRP供試体についてのみ行い、400g/m²のBFRPシートを用いた供試体をBF-RCN400-1~3と呼称する。これらの一覧を表-3に示す。FRPの表面には25mm間隔で検長5mmのひずみゲージを設置し、ひずみ分布を測定するとともに、供試体長手方向の中央部、両側面にストローク50mmの変位計を設置し、たわみ量を変位として測定し、さらに供試体長手方向の中央側面の引張鉄筋深さ位置に検長2.5mmのπ型変位計を100mm間隔で設置してひび割れ幅の計測を行った。試験は1mm/min程度の速度で行い、変位が5mmに達するまで実験を継続した。

凍結融解手順は、JIS A 1148のA法 (水中凍結融解試験方法) に準拠し、サイクル温度を-18°C⇄5°C、1サイクルを4時間として300サイクル実施した。なお、凍結融解試験後におけるRC梁の相対動弾性係数を測定し、耐久性指数を算出した結果97.9%であり、鉄筋が密に配置

表-4 最大荷重と界面剥離破壊エネルギーの一覧

| No. | 最大荷重 (kN) | 界面剥離破壊エネルギー (N/mm) |
|--------|-----------|--------------------|
| BF-B-1 | 40.2 | 2.17 |
| BF-B-2 | 43.8 | 2.58 |
| BF-B-3 | 41.0 | 2.26 |
| AF-B-1 | 45.1 | 1.49 |
| AF-B-2 | 40.1 | 1.18 |
| AF-B-3 | 43.5 | 1.39 |

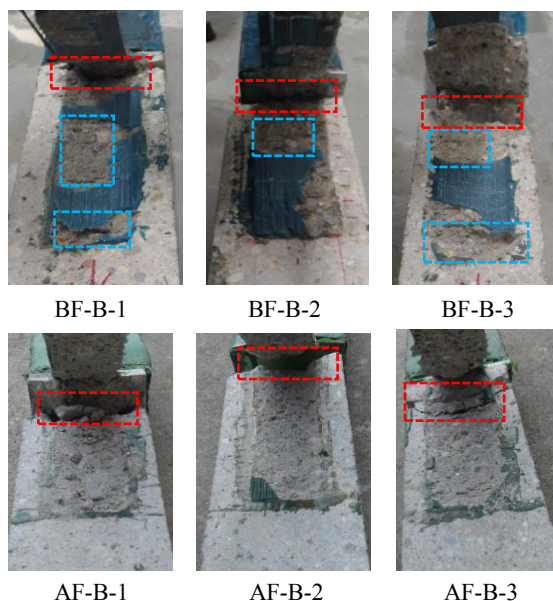


図-3 両引き付着試験における FRP 剥離状況

されているためコンクリート自身の劣化が測定できていない可能性はあるものの、本研究における凍結融解作用は RC 梁の構造性能に大きな影響を与えるものではないと思われる。

3. 実験結果と考察

3.1 両引き付着試験結果と考察

両引き付着試験により測定された最大荷重と、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 (土木学会)²⁾ に示されている下記の式 (1) より算出された界面剥離破壊エネルギー (G_f) を表-4 に一覧として示す。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b_c^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot n} \quad (1)$$

ここで、式 (1) の記号はそれぞれ、 P_{max} は実験における最大荷重、FRP シート幅 $b_c=50\text{mm}$ 、FRP シート弾性率 E_f 、FRP シートの公称厚さ t_f 、FRP シートの層数 n である。同指針には、実験によらない場合、 G_f は 0.5N/mm を用いてよいとされており、また、過去の著

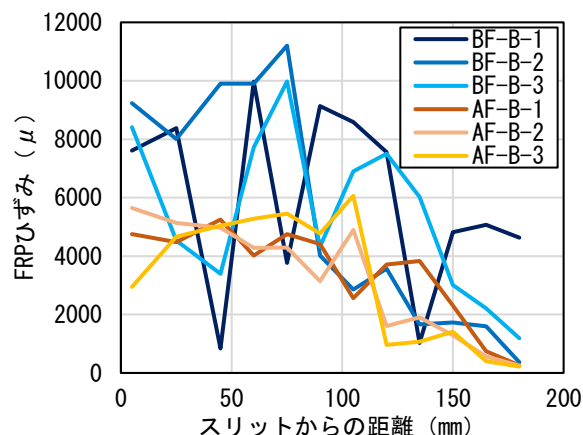


図-4 両引き付着試験における FRP の剥離直前における FRP ひずみ分布

名な研究^{3)~8)}と著者らの研究結果⁹⁾において、補強に適したレベルの補強量にある FRP を用いた両引き付着試験において、 G_f は $0.4\sim 1.8\text{ N/mm}$ 程度に分布することが示されている。これらの値と比べると、BF-B-1~3 と AF-B-1~3 の G_f はいずれも高いレベルにあることがわかる。次に、FRP の剥離状況を図-3 に示す。いずれの供試体においても図-3 の赤枠部のようにスリット部から $30\sim 75\text{mm}$ の範囲でコンクリートの深い層から剥離していることがわかる。これは、スリット部にせん断応力が集中したことによるものと考えられる。また、BF-B-1~3 においては、AF-B-1~3 より図-3 の青枠部のように骨材の噛み合わせが考えられる深い層からの部分的な剥離や、接着材の残留が確認された。これは、深い層から剥離した箇所に骨材の噛み合わせが生じ、これが外れ、剥離が急速に進展した瞬間に比較的大きな衝撃力が発生し、これによりピーリング現象を引き起こしたと思われる。さらに、FRP の剥離直前における FRP ひずみ分布を図-4 に示す。スリット部から $75\text{mm}\sim 120\text{mm}$ の範囲で FRP ひずみが卓越しており、連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書 (II) (日本コンクリート工学会)¹⁾ に示されるようにスリット部と同等のひずみが発生している箇所は FRP の剥離が進展した範囲であると思われる。この範囲において FRP ひずみが低い箇所が数か所見受けられるが、これは、スリット部周辺において剥離したコンクリート塊と FRP が付着していた箇所があり、コンクリート塊が部分的にひずみを分担したためと考えられる。また、同図から有効付着長を読み取ると、表-5 に示すように $45\text{mm}\sim 105\text{mm}$ の範囲に分布している。なお、前述のようにコンクリート塊が FRP に付着したことに伴い FRP ひずみが急減している箇所があるため、有効付着長の実験値は判断可能な最小値と最大値で示した。前記の調査結果⁹⁾において、佐藤ら⁷⁾の有効付着長の評価式 (式(2))ならびに Wu ら¹⁰⁾の有効付着長の評価式 (式

表-5 有効付着長の一覧

| No. | 実験値 (mm) | 式(2) 算定値 (mm) | 式(3) 算定値 (mm) |
|--------|----------|---------------|---------------|
| BF-B-1 | 45~75 | 127 | 75 |
| BF-B-2 | 65~105 | | |
| BF-B-3 | 60~105 | | |
| AF-B-1 | 45~105 | 162 | 102 |
| AF-B-2 | 60~105 | | |
| AF-B-3 | 60~105 | | |

(3) は実験値をよく表現できていることが示されている。

$$L_e = 1.89(tE_{CFS})^{0.4} \quad (2)$$

ここで、 E_{CFS} は FRP シートのヤング率 (N/mm^2)、 t は FRP シートの総厚さ (mm) である。

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{frp} t_{frp}}{\sqrt{f'_c}}} \quad (3)$$

ここで、 E_{frp} は FRP シートのヤング率 (N/mm^2)、 t_{frp} は FRP シートの総厚さ (mm)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) である。

これらの式を用いて有効付着長を算出すると、式(2)を用いると実験値の 1.2~3.6 倍大きい算定値が、式(3)を用いると実験値と同程度の値が算定される傾向が見られた。

3.2 RC 梁の曲げ試験結果と考察

(1) FRP の種類に関する考察

FRP の種類に関する RC 供試体の荷重-変位曲線を図-5 に示す。いずれの供試体においても 7kN 程度でひび割れが発生しており、その後はひび割れ幅の増加と複数本のひび割れの発生が進み、NF-RCN 供試体においては引張鉄筋の降伏後、荷重はほとんど増加せず、変位のみが増加していく傾向が見られた。FRP 補強供試体においては、最大荷重となったところで FRP の剥離が進展して荷重が大きく低下し、全面が剥離した時点で NF-RCN 供試体と同様の挙動となる傾向が見られた。ここで、BF-RCN-3 供試体および AF-RCN-1 供試体では FRP 剥離後も NF-RCN 供試体より 10kN 程度高い荷重を維持しているが、これは、FRP 剥離の起点となるひび割れが載荷点から遠い位置にあり、長手方向片側の剥離進展後にそのひび割れ近傍に変位が集中するため、もう一方の剥離が進展できず、載荷点付近の FRP が剥離せずに残留し、その補強効果が表れているものと考えられる。

BF-RCN 供試体と AF-RCN 供試体の両者とも NF-RCN 供試体より剛性ならびに最大荷重が 60%程度高く、高い

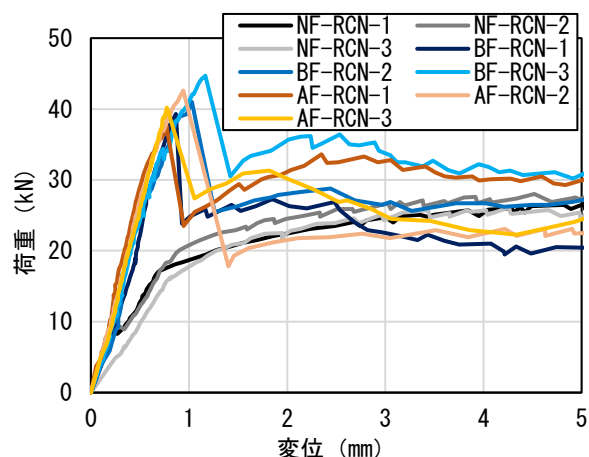


図-5 RC 梁の曲げ試験における荷重-変位曲線 (FRP の種類)

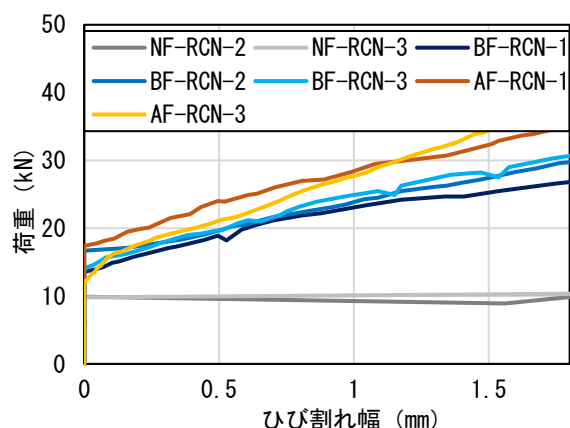


図-6 RC 梁の曲げ試験における荷重-ひび割れ幅曲線 (FRP の種類)

補強効果が得られることが確認された。また、BFRP 供試体の補強量は AFRP 補強量の 55%程度であるが、FRP の剥離が端部まで進展する直前に記録される最大荷重は概ね両者で同程度であった。これは、両引き付着試験において示されたように、BFRP シートの剥離時に骨材の噛み合わせが生じたことに起因していると思われる。

次に、FRP の種類に関する RC 供試体の荷重-ひび割れ幅曲線を図-6 に示す。ひび割れ発生時のひび割れ幅をイニシャルしてゼロとした。また、NF-RCN-1 と AF-RCN-2 については、ひび割れ幅を測定している π 型変位計が測定途中で測定不能になったため示されていない。NF-RCN 供試体については、10kN において急速にひび割れ幅が増加しているが、BF-RCN 供試体と AF-RCN 供試体では、両者とも 13kN~18kN においてひび割れが発生し、その後もひび割れ幅が抑制されている傾向がみられる。BF-RCN 供試体と AF-RCN 供試体では同様の傾向であり、両者のひび割れ抑制効果は同程度であることが実験的に示された。

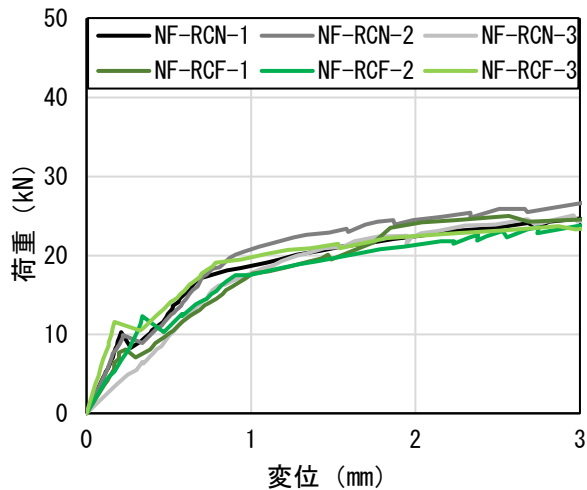


図-7 RC 梁の曲げ試験における荷重-変位曲線
(凍結融解作用の影響：NF 供試体)

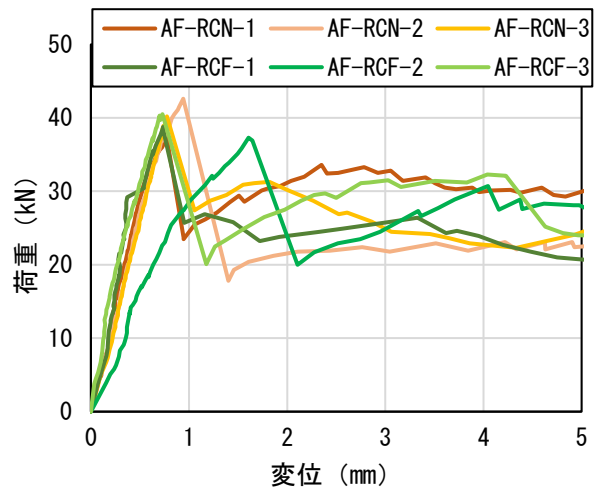


図-9 RC 梁の曲げ試験における荷重-変位曲線
(凍結融解作用の影響：AF 供試体)

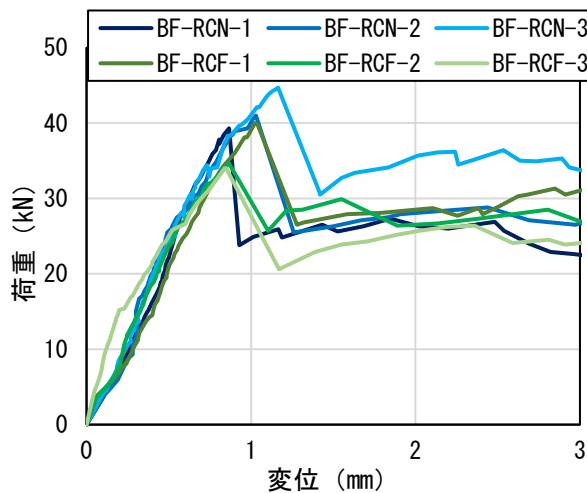


図-8 RC 梁の曲げ試験における荷重-変位曲線
(凍結融解作用の影響：BF 供試体)

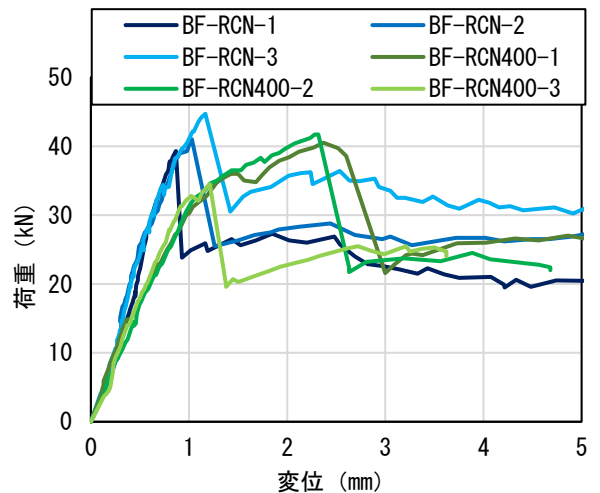


図-10 RC 梁の曲げ試験における荷重-変位曲線
(FRP 目付量の影響)

(2) 凍結融解作用の影響に関する考察

凍結融解作用の有無に関する RC 供試体の荷重-変位曲線を図-7～図-9 に示す。FRP 補強の無い NF-RCN 供試体と NF-RCF 供試体と比較して同様の挙動であり、FRP 接着の無い RC 供試体に対し、凍結融解作用の影響がほぼ見受けられないことが実験的に示された。また、BF-RCN 供試体と BF-RCF についても最大荷重前の挙動は両者で同様の挙動であり、最大荷重についても供試体の個体差の範疇でばらつく程度であり、凍結融解作用の影響は確認されなかった。

(3) FRP 目付量の影響に関する考察

FRP 目付量に関する RC 供試体の荷重-変位曲線を図-10 に示す。BF-RCN400 供試体では BF-RCN 供試体に比べ 37%の補強量であり、FRP 剥離発生前の剛性（グラフの傾き）は 40%程度低いが、最大荷重は同程度である。

表-6 RC 梁供試体一覧

| No. | BFRP 最大ひずみ (μ) |
|-------------|-------------------------|
| BF-RCN-1 | 4465 |
| BF-RCN-2 | 5152 |
| BF-RCN-3 | 4803 |
| BF-RCN400-1 | 17321 |
| BF-RCN400-2 | (15653) 加载中にひずみゲージ破損 |
| BF-RCN400-3 | (9209) 加载中にひずみゲージ破損 |

さらに、最大荷重までの荷重変位曲線と変位軸に囲まれた面積が曲げ靱性を意味するとした場合に、BF-RCN400

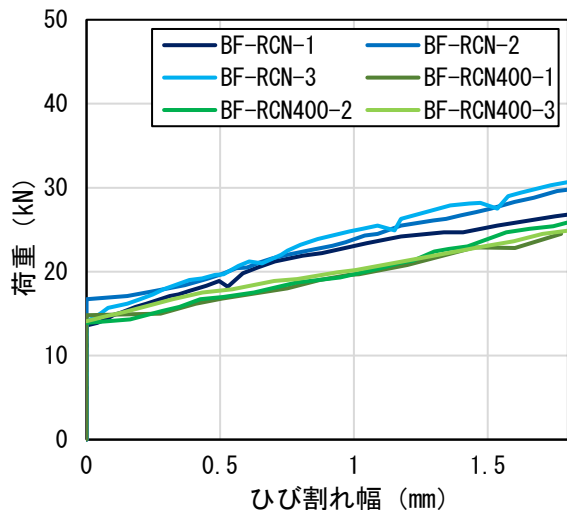


図-11 RC梁の曲げ試験における荷重-ひび割れ幅曲線 (FRP目付量の影響)

供試体の靱性はBF-RCN供試体のその4倍以上に達しているものがある。表-6に示すようにBFRPの最大ひび割れ幅はBF-RCN400供試体においてBF-RCN供試体より3倍以上に達していることから、BFRPの高い伸度がより有効に活用されたために、最大荷重が同程度、靱性が飛躍的に高まる結果になったと考えられる。ただし、BF-RCN400-3供試体では他の2体の供試体に比べて8%程度低い荷重でBFRPの剥離が生じており、薄目付のBFRPを用いた場合に付着力が不安定化しているように見える。薄目付BFRPを用いた場合の接着品質の確保については、今後の課題としたい。次に、FRPの目付量に関するRC供試体の荷重-ひび割れ幅曲線を図-11に示す。BF-RCN400供試体においても、BF-RCN供試体には及ばないものの、ひび割れ抑制効果が得られることが確認された。

4. 結論

本研究の実施により得られた主な知見を以下に纏める。

- (1) 両引き付着試験を行った結果、BFRP供試体とAFRP供試体の両者とも強固な付着が確保されていることが確認された。
- (2) RC梁の曲げ試験を行った結果、BFRP供試体およびAFRP供試体では、両者とも剛性ならびに最大荷重が60%程度向上しており、高い補強効果が確認された。また、前者は後者の補強量の約55%にもかかわらず同程度の曲げ補強効果やひび割れ抑制効果が得られることが実験的に示された。これは、コンクリート表層部に剥離が進展した際の骨材の噛み合わせによるものと思われる。
- (3) 事前の凍結融解作用の影響を考慮したRC梁の曲げ

試験の結果、本研究で実施した凍結融解試験の範囲では、その影響は見られないことが確認された。

- (4) FRP目付量の影響を考慮したRC梁曲げ試験の結果、薄目付のBFRP供試体では、通常のBFRP供試体に比べてFRP剥離発生前の剛性は40%程度低いものの、最大荷重とひび割れ抑制効果は同程度、靱性は飛躍的に高まった。これは、薄目付のBFRP供試体において、BFRPの高い伸度がより有効に活用されたためであると考えられる。

参考文献

- 1) (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
- 2) (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
- 3) 土木学会複合構造委員会 FRPによるコンクリート構造の補強設計研究小委員会編：FRPによるコンクリート構造の補強設計の現状と課題，複合構造シリーズ12，2014
- 4) Z.S. Wu and H. Yoshizawa: Analytical/experimental study on composite behavior in strengthening structures with bonded carbon fiber sheets, Journal of Reinforced plastics and composites, Vol.18, No.12, pp.1131-1143, 1999
- 5) 呉智深，岩下健太郎：連続繊維シート接着界面の付着・はく離挙動に及ぼす寸法効果の影響，材料，日本材料学会，Vol.57, No.3, pp. 269-276, 2008
- 6) 岳尾弘洋，松下博通，牧角龍憲，長島玄太郎：CFRP接着工法における炭素繊維シートの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997
- 7) 佐藤靖彦，浅野靖幸，上田多門：炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究，土木学会論文集，No.648/V-47, pp.71-87, 2007
- 8) 上原子品久，下村匠，丸山久一，西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634/V-45, pp.197-208, 1999
- 9) 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協会，Vol.36, No.1, pp.1912-1917, 2014
- 10) Wu, Z.S., Niu, H.D.: 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