

BFRPロッド緊張接着によるRC梁の曲げ補強効果

名城大学 正会員 工博 ○岩下 健太郎
名城大学 金 光男, 佐藤 大地
株式会社ピー・エス 正会員 八木 洋介

Abstract : Fiber reinforced polymer (FRP) composites have been widely used as externally bonded reinforcements to strengthen or rehabilitate different kinds of deteriorated concrete structures. In this paper, the strengthening effects of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) sheets externally prestressed and bonded to RC beams are investigated experimentally and theoretically. First, an experimental program is outlined by focusing upon the cracking and tensile steel yielding load, stiffness, and load-carrying capacity. Second, a theoretical analysis is performed to evaluate the experimental results. It is confirmed that prestressing and bonding BFRP rods caused an increase in the beams cracking and steel yielding load, stiffness, and load-carrying capacity. Moreover, good agreement between the experimental and theoretical results has been proved.

Key words : Basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rod, Prestressed, Bond, Epoxy resin

1. はじめに

RC/PC構造物の維持管理・防災能力を高めるために、補修・補強技術の高度化や構造施設の長寿命化が期待されている。現在、特に海洋周辺におけるRC/PC構造物における鉄筋の腐食問題は深刻であり、鋼板やRCによる増し厚や連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, 以後FRP と呼称する) の表面接着により、鉄筋量を補い腐食抵抗性の改善が図られる補修・補強方法が主流な技術として広く用いられている。また、Blaschko ら¹⁾, Gentile ら²⁾, Carolin ら³⁾, Lorenzis ら⁴⁾, El-Hacha ら⁵⁾, そしてHassan ら⁶⁾により、RC 構造物の表面にかぶり深さ以内の溝を掘り、鉄筋やFRP 製のロッドや板、より線などを埋め込むことで高度な耐腐食性を有するRC 補修技術 (Near surface mounted, 以後NSM と呼称する) における、補強材の付着性能や補強効果に関する研究が実施され、実用化されているものもある。さらに、Nordin ら⁷⁾は緊張補強材にFRP ロッド材を用いて耐腐食性や曲げ構造性能を高め、さらにプレストレスを加えて死荷重抵抗性や既存損傷の回復ができるFRP 埋め込み緊張補強技術を提案し、呉ら⁸⁾は溝の外側にポリマーセメントモルタル等によるかぶり補強をすることにより、かぶり剥離を伴うBFRPケーブル剥離が抑えられ、補強効果が高まることを明らかにした。

しかし、構造物の表面に溝を掘ることには鉄筋の切断の恐れ等から抵抗があり、技術の適用に対する障壁の一つとなっている。また、既設構造物に導入されたプレストレスやFRPによる補強効果はほとんどの場合にFRP とコンクリートの付着強さにより決定されることがより明確になった。以上の背景を踏まえて、本研究では、棒状のBFRPロッドをコンクリート表面に緊張状態で接着する補強技術を提案し、RC梁の4点曲げ試験により補強効果を初歩的に検討する。また、ひび割れ発生荷重、引張鉄筋降伏荷重、そして最大荷重といった曲げ構造性能指標を既往の曲げ理論や評価式を活用して検討する。このとき、事前に実施した両引きせん断試験より得られる付着強さの評価指標である界面剥離破壊エネルギーを適用して、最大荷重直後の破壊モードがBFRPロッドの剥離となったRC梁の最大荷重を算定する。

2. 両引きせん断試験によるFRPロッドの付着性能の検討

BFRPロッド (直径10mm, 繊維含有率 $V_f=50\%$) を両側面にエポキシ樹脂により接着したコンクリート試験体 (図-1) を500kN 油圧サーボ式引張試験機に設置し, 両引きせん断試験を行った。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鋼ボルト ($\phi 24\text{mm}$) 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としては, 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試験体表面にエポキシプライマー (硬化前粘性 $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 程度) を塗布する方法により行った。完全剥離前は曲げの影響は小さく, 両面のロッドに生じるひずみは同程度となっていたが, 片面が完全剥離した後は両面のひずみバランスが崩れたため, 実験を終了した。接着材はすべて7日間, 常温環境下で養生した。測定項目は, 試験機接続の500kN ロードセルで測定される荷重と, 15mm 間隔で設置された検長5mm のひずみゲージで測定されるひずみと検長50mmの変位計で測定される変位である。本研究では, エポキシ系接着材として2液混合型の常温硬化型の熱硬化型エポキシ樹脂を用いた。使用した材料の特性値を表-1に示す。

両引き付着試験より得られたひずみ分布を図-2に示す。コンクリートとFRPロッドの引張側境界部に卓越したひずみが生じており, この境界からある程度離れるとひずみが徐々に小さくなる。また, 隣り合うひずみゲージ間の距離とひずみ差からせん断応力を算出して作成したせん断応力分布

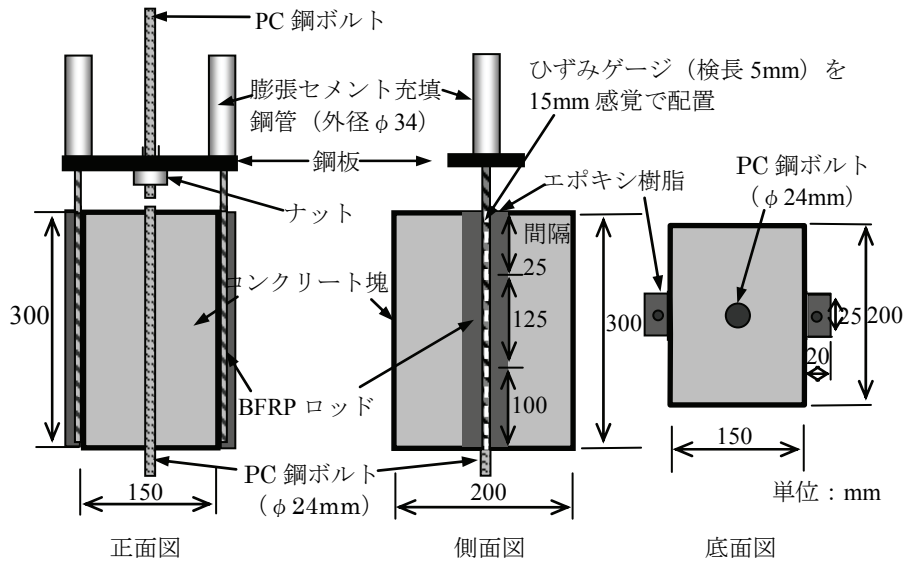


図-1 両引き付着試験体の詳細寸法

表-1 材料の物性値一覧

エポキシ樹脂の引張弾性率 E_{ep} (kN/mm^2)	4.6	
BFRP ロッドの引張弾性率 E_{BF} (kN/mm^2)	91	
BFRP ロッドの断面積 A_{frp} (mm^2)	バサルト繊維分 A_{frpBF}	39.27
	エポキシ樹脂分 A_{frpep}	39.27
エポキシ樹脂の断面積 A_{ep} (mm^2)	421.5	
コンクリート圧縮弾性率 (28日) (kN/mm^2)	18.6	
コンクリート圧縮強度 (28日) (N/mm^2)	20.5	

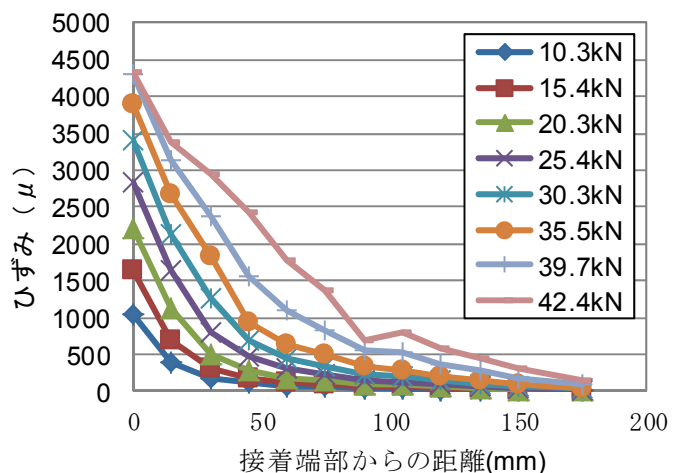


図-2 両引き付着試験より得られたひずみ分布

を図-3に示す。コンクリートとFRPロッドの引張側境界部におけるせん断応力が 12N/mm^2 を超えたあたりから境界部のせん断応力の値は大きくなり、その隣のひずみゲージ箇所でのせん断応力が増加している。これは、コンクリートのせん断強度が 12N/mm^2 程度であり、剥離が進展していると考えられる。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⁹⁾等において、最大せん断応力が生じている箇所からある程度せん断応力が小さくなる箇所までの距離を有効付着長と呼称しているが、本研究における有効付着長は100~125mmであるように見える。さらに、同指針⁹⁾等で連続繊維シートの付着強さに対する評価指標として界面剥離破壊エネルギー G_f が式(1)に示すように定義されている。

$$P_{max} = b\sqrt{G_f E_f t_f} \tag{1}$$

ここで、 G_f : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm), P_{max} : 最大荷重 (N), b : 補強層の幅の平均値 (mm), E_f : 補強層の引張弾性率 (kN/mm^2), t_f : 補強層の換算公称厚さ (mm) (本研究では、BFRPロッドを25mm幅の平板とした場合の厚さとして求めた。) である。両引き付着試験結果について算出すると、 G_f は1.58 N/mmである。前出の指針⁸⁾ではFRPシートを用いた場合に0.5N/mmがある程度の標準値とされており、ある程度の付着強さが得られていることが実験的に示された。

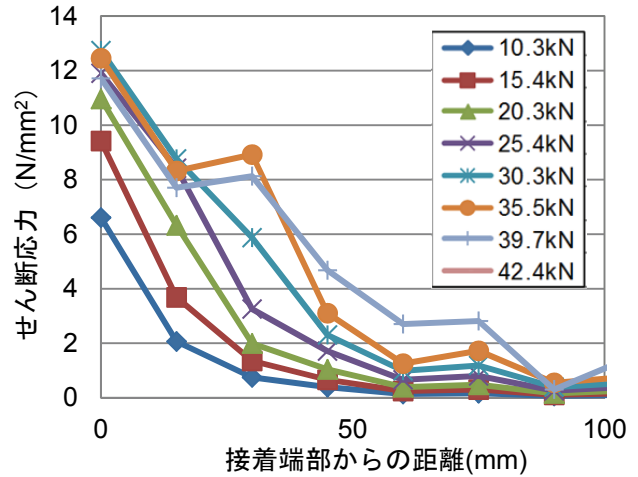


図-3 両引き付着試験より得られたせん断応力分布

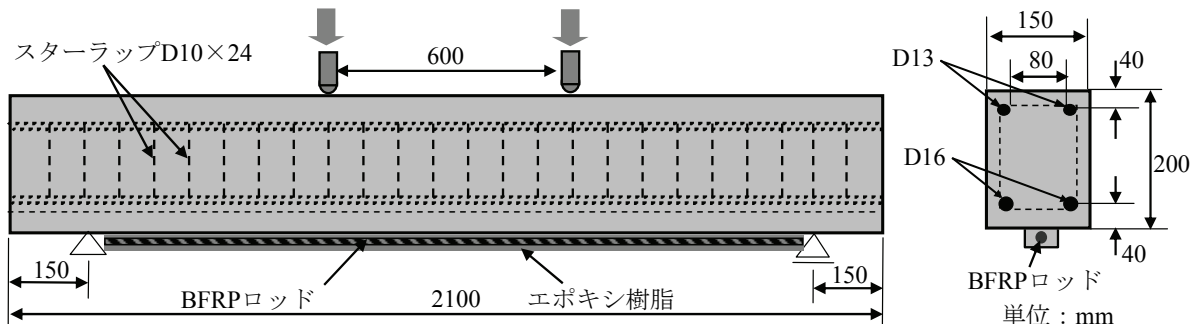


図-4 BFRP ロッド緊張接着補強 RC 梁の詳細寸法

3. FRPロッド緊張接着補強RC梁の4点曲げ試験による曲げ構造的な性能の検討

本研究では、BFRPロッド緊張接着補強RC梁を作製し、4点曲げ試験を実施してBFRPロッド緊張接着によるRC梁の曲げ補強の効果を検討した。RC梁は図-4に示すように

150mm×200mm 矩形断面で引張鉄筋比は1.7%である。全長は2.1mで支点間距離は1.8mとし、載荷点間距離は600mmとした。ここで、BFRPロッドの緊張には反力を受け持つ鋼製フレームの両端に緊張力を導入するための油圧ジャッキおよび荷重測定のためのロードセルを接続した緊張装置(図-5)を用いた。ロッドの両端は膨張セメントを充填した鋼管で緊張装置に固定した。桁構造物の下面にロッドを接着することを想定して、緊張したBFRPロッドの上にRC梁を配置し、ロッドの周囲に離形性のある型枠を設置し、内部に硬化前粘性3000mPa・s程度の高流動性を有するエポキシ樹脂を充填する

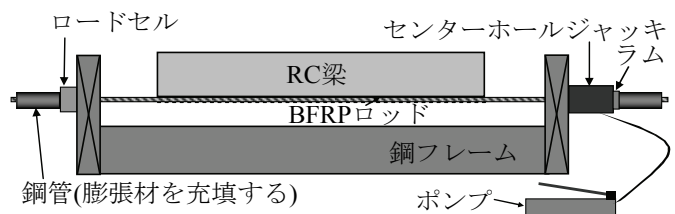


図-5 FRP ロッド緊張装置

ことによりロッドをコンクリート表面に接着した。接着後のBFRPロッド周辺の寸法を図-6に示す。試験体のスパン中央部の両側面に検長50mmの変位計を設置して変位を測定した。

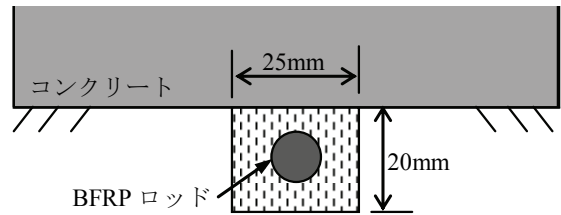


図-6 FRP ロッドの接着状況

4点曲げ載荷試験の結果から、補強形式の種類が異なるケースに関する荷重-変位の関係を図-7に示す。

まず、破壊モードについては、無補強供試体では、荷重が6~8kNでコンクリート引張縁に曲げひび割れが生じ、その後、150mm程度の間隔で曲げひび割れが生じていき、8本程度の分布ひび割れが生じた後、引張鉄筋の降伏が生じた。その後、梁の圧縮縁でのコンクリート圧縮破壊が生じて荷重が増加しなくなったため、実験を終了した。無緊張BFRPロッド接着供試体および緊張BFRPロッド接着供試体（BFRPロッド破断強度の25%にあたる緊張応力を導入した。）では、分布ひび割れ発生後に引張鉄筋降伏が生じ、そのしばらく後でコンクリート表層で剥離が進展して荷重が急激に低下し（図-8）、その直後に梁の圧縮縁でのコンクリート圧縮破壊が生じたため、実験を終了した。鉄筋降伏荷重および最大荷重について供試体間で比較すると、無緊張FRPロッド接着供試体では無補強供試体に対して鉄筋降伏荷重は8%向上、最大荷重は14%向上、緊張FRPロッド接着供試体では無補強供試体に対して鉄筋降伏荷重は31%向上、最大荷重は40%向上した。よって、FRPロッドを緊張状態でコンクリート表面に接着することにより、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重、最大荷重といった曲げ構造性能が飛躍的に向上することが実験的に示された。

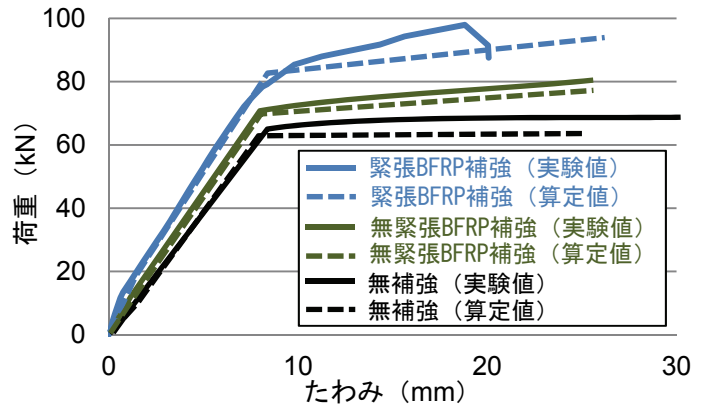


図-7 荷重-たわみ曲線（4点曲げ試験）

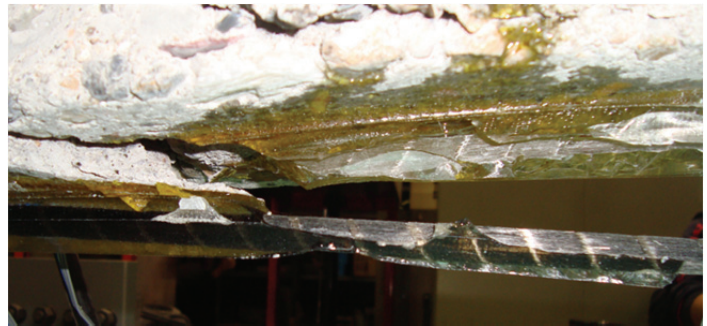


図-8 BFRP ロッドの剥離状況

過去の研究と同様に、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、鉄筋降伏荷重、最大荷重および各荷重状態におけるたわみを算定した。その結果は前出の図-7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、弾性係数比は異形鉄筋では $n_s = E_s / E_c$ 、そして、BFRPロッドでは $n_f = E_f / E_c$ とした。次に、式(2)から中立軸位置 h_c を求める。

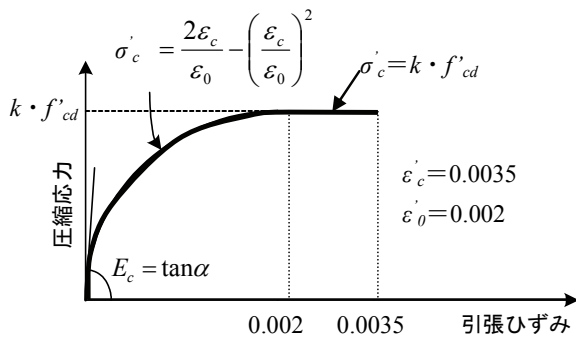
$$h_c = \frac{A_c d_c + A_{s1} d_1 (n_s - 1) + A_{s2} d (n_s - 1)}{A_{total}} \quad (2)$$

ここで、 A_{total} は以下の式(3)から求められる。

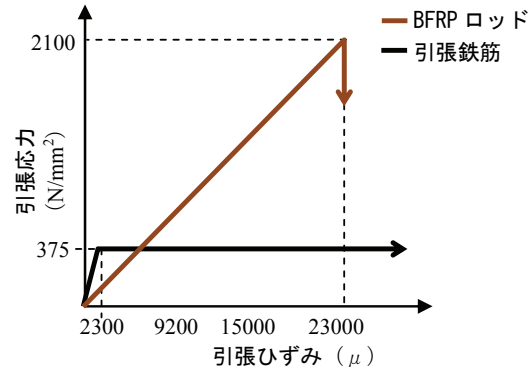
$$A_{total} = A_c + A_{s1} (n_s - 1) + A_{s2} (n_s - 1) + A_f n_f \quad (3)$$

そして、ひび割れ発生荷重 P_{cr} は式(4)から算出される。

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot (f_b + \sigma_{gf})}{L \cdot h_c} \quad (4)$$



(a) コンクリートの圧縮挙動



(b) 異形鉄筋とBFRPロッドの引張挙動

図-9 使用材料の応力-ひずみ関係

ここで、 I_g は中立軸に対する断面2次モーメント、 f_b はコンクリートの引張強度、そして、 σ_{tf} はBFRPロッドへの導入緊張応力により梁の下縁に生じる圧縮応力、そして、 L は支点と載荷点の間隔を意味する。なお、BFRPロッドに導入された緊張力 P_{tf} を用いて σ_{tf} は式(5)のように表される。

$$\sigma_{tf} = \frac{P_{tf}}{A_c} + \frac{P_{tf}}{I_g}(d - h_c) \quad (5)$$

次に、各種材料の応力-ひずみ関係を図-9に示すように、断面諸元を図-10に示すようにそれぞれ仮定する。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 ϵ_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 ϵ_f および ϵ'_c を算出し、図-10における力のつり合い条件から、中立軸位置 h_c を算出した。 C_c の作用位置 y を求める。コンクリートの応力分布に対する断面一次モーメント G_c は、以下の式(6)に示すとおりである。

$$G_c = \int_0^{h_c} f'_c b f(\epsilon'_c) y dy \quad (6)$$

G_c を引張鉄筋への作用力 T_s とBFRPロッドへの作用力 T_f の合力で除することで y が算出される。

以上の算出結果を式(7)に入力することで、引張鉄筋降伏時の最大モーメントが算出され、荷重に換算することで引張鉄筋降伏荷重となる。

$$M_{sy} = T_s(d - y) + T_f(d_f - y) \quad (7)$$

最大荷重については以下の式(8)より得られる ϵ_f を用いて T_f を算定する。 t_f はBFRPロッドを25mm幅の平板とした場合の厚さとして求めた。

$$\epsilon_f = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} + \epsilon_{f1} \quad (8)$$

ϵ_{f1} は載荷点から有効付着長だけ離れた箇所におけるひずみであり、算出手順は紙面の都合によりここでは割愛する(過去の研究⁸⁾を参照)。 G_f には両引き付着試験から得られた値(2を参照)を用いた。一方、たわみについては、式(9)よりひび割れ発生時、鉄筋降伏時、最大荷重時のそれぞれの曲率 ϕ_c 、 ϕ_y 、 ϕ_u を算出する。

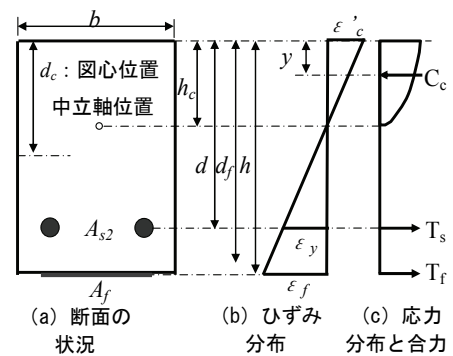


図-10 断面諸元

$$\phi_c = \frac{\varepsilon_c}{h-h_c}, \quad \phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d-h_c}, \quad \phi_u = \frac{\varepsilon_f}{h-h_c} \quad (9)$$

仮想仕事の定理によりひび割れ発生時 δ_c 、鉄筋降伏時 δ_y 、そして最大荷重時 δ_u は梁の支点間距離 L' を用いて式(10)により求めた。

$$\delta_c = \frac{23\phi_c L^2}{216}, \quad \delta_y = \frac{23\phi_y L^2}{216}, \quad \delta_u = \left(\frac{\phi_c}{27} + \frac{5\phi_u}{72} \right) L^2 \quad (10)$$

実験値と算定値は類似しており、BFRPロッドを緊張接着したRC梁のひび割れ発生荷重および引張鉄筋降伏荷重は、既往の曲げ理論を用いた評価方法により、ある程度評価できることがわかった。

4. おわりに

本研究では、BFRPロッド緊張接着補強技術を提案し、曲げ補強効果に関する実験的検討、そして各種曲げ構造性能に関する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) BFRPロッドを緊張状態でコンクリート表面に接着することにより、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重、最大荷重といった曲げ構造性能が飛躍的に向上することが実験的に示された。
- 2) BFRPロッドを緊張接着したRC梁のひび割れ発生荷重および引張鉄筋降伏荷重は、既往の曲げ理論を用いた評価方法により、ある程度評価できることがわかった。また、剥離モードとなったケースでの最大荷重は同様の破壊モードとなった両引きせん断試験の結果を用いた既提案の算定方法によってある程度表現できることがわかった。

BFRPロッドは中国GBF社よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Blaschko, M., Zilch, K.: Rehabilitation of concrete structures with strips glued into slits, Proceedings of 12th International Conference on Composite Materials, Paris, CD-ROM, 1999
- 2) Gentile, C., Rizkalla, S.: Flexural Strengthening of timber beams using FRP, Technical Reputation, ISIS Canada, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1999
- 3) Carolin, A., Nordin, H., Täljsten, B.: Concrete beams strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP, Proceedings of 1st International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2001), Vol. II, Editors: Teng, J.-G., Hong Kong, China, 1059-1066, 2001
- 4) Lorenzis, L.D., Nanni, A., Tegola, A.L.: Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods, Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, Editors: Humar J., Razaqpur A.G., pp. 521-528, 2000
- 5) El-Hacha, R., Rizkalla, S.: Near Surface Mounted FRP Bars Reinforcement for Flexural Strengthening of Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.101, No.5, 717-726, 2004
- 6) Hassan, T., Rizkalla, S., Bond Mechanism of Near Surface Mounted FRP Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.101, No.6, 830-839, 2004
- 7) Nordin, H., Taljsten, B., Carolin, A., Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted reinforcement (NSMR), Proceedings of FRP Composites in Civil Engineering (CICE2001), Vol. II, Editor: Teng, J.G., Hong Kong, China, 1067-1075, 2001
- 8) 呉智深, 岩下健太郎, 孫曉荷, 小林朗: FRPケーブルの埋め込み緊張補強技術の確立, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.630-643, 2010.3
- 9) 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, コンクリートライブラリー 101, 2000