

BFRPロッド緊張接着補強RC/PC梁の曲げ復元力特性に関する研究

(株)富士ピー・エス 正会員 ○吉田 光秀
 (株)富士ピー・エス 正会員 八木 洋介
 名城大学 正会員 工博 岩下 健太郎
 名城大学大学院 梶浦 拓馬

The procedure for upgrading concrete beams with bonded prestressed basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rods has been established. In the procedure, epoxy resin of high viscosity is used for bonding FRP rod to concrete. It is workable because it is not dripped from downwardly concrete surface. The practical prestressing system of high workability is also developed. The procedure and the prestressing system are used on this study, and the higher usability is confirmed. The strengthening effect on cracking load, steel yielding load, maximum load, crack resistance and restoring force capacity of RC/PC beams with using prestressed BFRP rods are investigated experimentally. From the results, it is confirmed that those capacity of RC/PC beams is increased comprehensively by bonding prestressed BFRP rods.

Key words : Basalt fiber reinforced polymers, Prestressed, Bond, RC/PC beam, Restoring force capacity

1. はじめに

RC 構造物に対する補強技術として、鋼板巻き立てやRC 増し厚、連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, FRP) の表面接着による補修・補強技術などが広く用いられている。著者らは、導入するプレストレス量は限定的ながら、構造物を極力傷つけずに補強するPC補強技術として、玄武岩 (Basalt) 繊維を用いたFRP 棒材 (以降BFRP ロッドと呼称) の緊張接着補強技術の開発を進めてきた^{1)・2)・3)}。その過程において、BFRPロッドの接着過程における施工性について、とくに改善の必要が認められた。また、PC構造物に対し、BFRPロッドの緊張接着により導入されるプレストレスが元来の構造物が有する曲げ性能や、復元力特性に与える影響に関する検討は実施されていない。さらに、実施工を見据えた緊張装置の開発も必要とされた。

以上の背景から、本研究では、実施工時を念頭においた構造形式の緊張装置を新たに開発し、それによりRC/PC 梁にBFRPロッドを緊張接着することにより、その優位性を確認した。また、従来用いてきた低粘度タイプのエポキシ樹脂に代わり、高粘度タイプのエポキシ樹脂 (以後、高粘度エポキシ樹脂と呼称) を用いることとし、それによる施工性の向上効果を確認した。さらに、BFRPロッドを緊張接着したRC/PC梁を新たに作製し、段階的に荷重載荷と除荷を繰り返す、繰返し1点集中載荷試験を行った。そして、最大変位と回復変位の関係に着目して、復元力特性に対する補強効果を検証した。

2. BFRPロッド緊張装置と緊張接着工程の考案

2. 1 BFRPロッド緊張装置の開発

開発を進めているBFRPロッド緊張接着補強技術において、現状では10mスパン以内程度規模の橋桁などを補強対象とし、計100kN程度の限



写真-1 BFRPロッドの緊張接着の状況

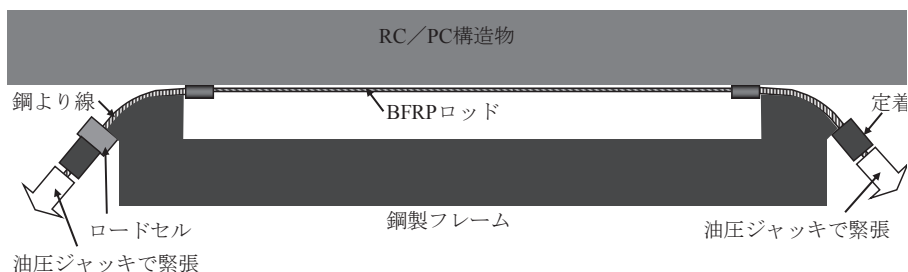


図-1 BFRP ロッドの緊張装置の概念図

定的なプレストレス導入量を考えているため、写真-1および図-1に示すような、BFRPロッドと鋼より線を繋いだものを鋼製フレームの両端に固定し、油圧ジャッキにより緊張力を加える形式の、簡便な接着が可能となる緊張装置を試験的に作製した。鋼より線を面外に折り曲げることにより、直線配置の場合に比べてBFRPロッドの接着端部と構造物の支点がより近づき、接着端部に生じる曲げモーメントの影響がより低減されると考えた。ここで、鋼より線の定着具と緊張装置の間に200kNロードセルが設置してあり、導入緊張力を随時確認することができる。BFRPロッドの緊張が完了次第、緊張装置を補強対象構造物に密着させ、接着作業を行う。

2. 2 BFRPロッドの緊張接着工程

RC/PC桁の下面補強を想定した場合の、BFRPロッドを緊張接着する主な工程を図-2に示す。まず、コンクリートの表面をディスクサンダーなどで削って骨材を露出させたうえで、 0.4kg/m^2 を目安とした量のエポキシ樹脂を塗布する方法により、表面処理を行う。次に、このエポキシ樹脂が硬化する前に、BFRPロッドの接着端部になる箇所に、BFRPシートを同様のエポキシ樹脂により接着する。それらの外部に、桁の幅方向における中央部、長手方向に、補強材を接着する溝を残し、ポリマーセメントモルタル（以後、PCMと呼称）を山形に成形する。その溝内に、溝深さの半分程度まで高粘度エポキシ樹脂を下塗りし、前出の緊張装置にBFRPロッドを設置し、緊張力を導入したうえで構造物に密着させる。このとき、BFRPロッドは溝内に収まるように、緊張装置の位置を微調整する。溝内の残りの部分に高粘度エポキシ樹脂を充填する。高粘度エポキシ樹脂は、上向き施工においても垂れが生じにくく、施工性が高まることに期待できる。接着端部には、定着用いBFRPシートをU字型に巻き立てる。そして、エポキシ樹脂の養生期間として3日程度を経て、BFRPロッドに導入された緊張力を解放し、BFRPロッドの両端部を切断し、完成となる。以上の工程により接着されたBFRPロッドの端部定着量については、過去の研究で構築された評価方法⁴⁾により評価可能である。

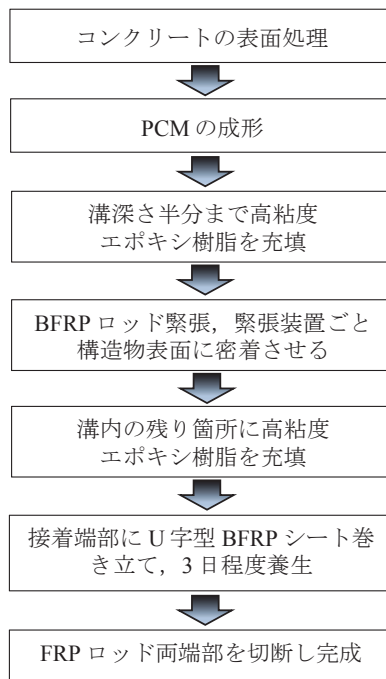


図-2 BFRP ロッドの緊張接着工程

3. BFRPロッドを緊張接着したRC/PC梁の曲げ復元力特性の検証

3. 1 RC/PC梁の作製

図-3に示すように、引張鉄筋比1.0%程度にあたる鉄筋（D10×引張側2本、圧縮側2本、SD295A）

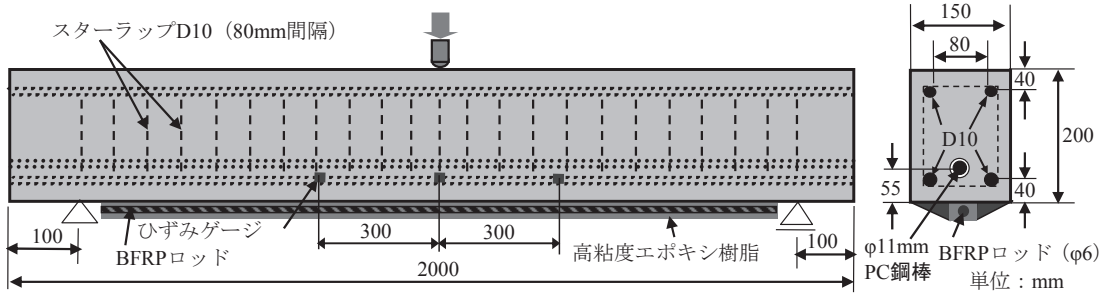


図-3 BFRP ロッド緊張接着補強供試体の詳細寸法

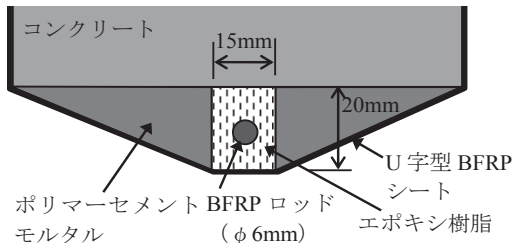


図-4 BFRP ロッドの接着状況

表-1 材料の物性値一覧

BFRP ロッドの引張強度 (N/mm ²)	1300
玄武岩繊維の引張弾性率 E_f (kN/mm ²)	55
BFRP ロッドの断面積 A_f (mm ²)	28.3
BFRP における玄武岩繊維含有率 V_f (%)	55
高粘度エポキシ樹脂の引張弾性率 E_a (kN/mm ²)	4程度
コンクリートの材齢 28 日圧縮強度 (N/mm ²)	25.5
コンクリートの材齢 28 日割裂引張強度 (N/mm ²)	2.8
鉄筋の種類	SD295A
PC 鋼棒の種類	SBPR 1080/1230

を配したRC梁と、同様の形状で梁下面から55mm位置にPC鋼棒 (φ11mm, SBPR 1080/1230) を配したPC梁を、それぞれ2体作製した。150mm×200mmの矩形断面で全長は2.0mであり、用いたコンクリートの設計基準強度は24N/mm²である。主な材料の物性値を表-1に示す。PC鋼棒に導入する緊張力は、自重により梁下縁に生じる引張応力をほぼゼロにするレベルとして、23.8kN (PC鋼棒に導入する引張応力は250N/mm²) とした。RC梁, PC梁それぞれの内1

体の底面には、BFRPロッドに破断強度の25%程度にあたる、6.3kNの緊張力を導入した状態で接着・補強した。このとき、BFRPロッドの接着に用いた高粘度エポキシ樹脂は、上向き施工ながら垂れることが無く、施工性は良好であった。RC梁, PC梁にBFRPロッドを緊張接着した後の状況を図-4に示す。残りの梁はそのまま載荷した。段階式の繰り返し曲げ試験は、試験装置等の制約から支点間隔1.8mの1点集中載荷にて行った。

3. 2 実験方法

段階式繰り返し載荷試験は載荷速度を10kN/minを目安に行い、除荷時の下限値は試験装置に用いた油圧ポンプの精度の制約から1.5kN程度とした。10kN増加するごとに除荷、再載荷を行うこととし、最大荷重以後は25mmの変位が生じるまで数回の除荷と再載荷を行った。以上の実験に際し、ロードセルおよびRC供試体のスパン中央付近、両側面に設置した変位計を用いて荷重と変位を測定した。

3. 3 実験結果

RC供試体の段階式繰り返し載荷試験において測定された荷重-変位関係をひび割れ発生前後に分けて、図-5および図-6に、また、ひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重 (D10引張鉄筋の引張降伏荷重)、最大荷重、ひび割れ間隔、そして破壊モードを表-2に示す。なお、繰り返し載荷における下限荷重の1.5kNを下回る荷重時において、使用した油圧ポンプの精度の関係から荷重が不安定となるため、

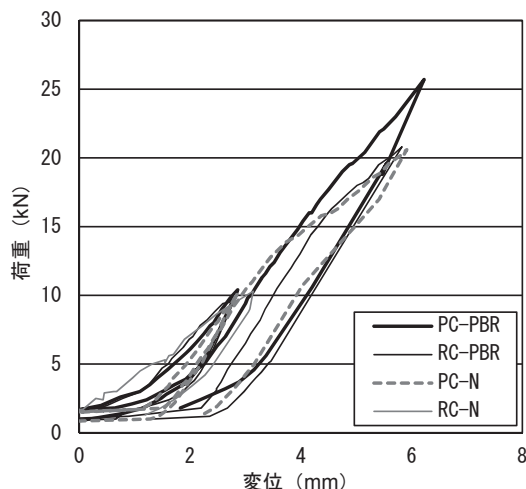


図-5 荷重-変位関係 (引張鉄筋降伏前)

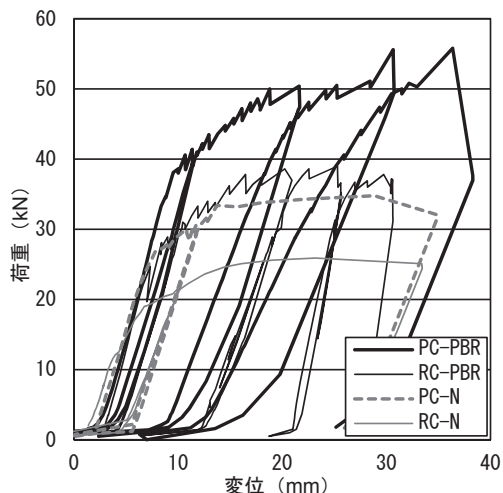
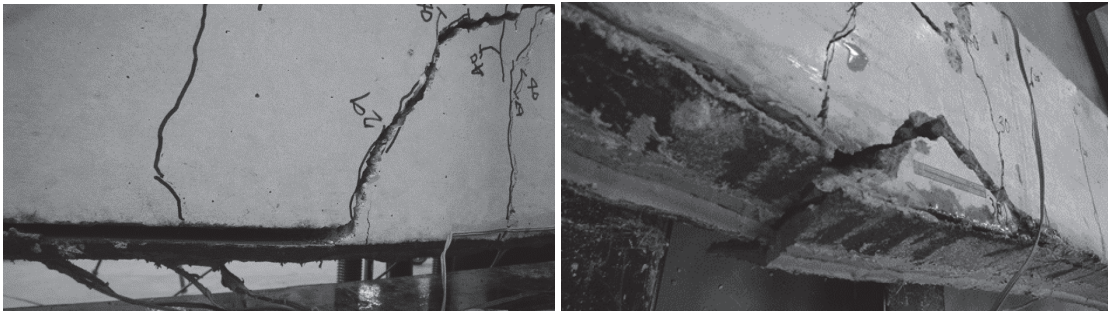


図-6 荷重-変位関係 (鉄筋降伏後)

表-2 各荷重値および破壊モード一覧

供試体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	平均ひび割れ間隔 (mm)	破壊モード
RC-N	4.5	19.1	25.9	134	コンクリート圧縮破壊
PC-N	10.6	26.8	34.8	100	コンクリート圧縮破壊
RC-PBR	7.8	27.4	39.0	89	BFRPロッド剥離進展 +コンクリート圧縮破壊
PC-PBR	16.0	38.1	55.6	90	BFRPロッドの部分剥離 ⇒BFRPロッド破断破壊 +コンクリート圧縮破壊

1.5kN荷重負荷時に変位をキャンセルした。RC-N, PC-N供試体では、それぞれ4.5kNおよび15.8kNでスパン中央付近の梁の引張縁に曲げひび割れが生じ、荷重の増加とともに梁の長手方向134mmおよび100mmの平均間隔で分布ひび割れが生じた後、D10引張鉄筋が降伏し、梁の圧縮縁でコンクリート圧縮破壊が生じ、荷重には大きな変動がない状態で大きく変位が増加するものであった。RC-PBR供試体では主鉄筋降伏後までの挙動は同様であり、コンクリートの圧縮破壊前にBFRPロッドを含む補強層の剥離が生じたが、BFRPロッドの両端がBFRPシートで定着されているため、荷重は横ばいとなった。除荷時の荷重-変位関係は、いずれの供試体でも鉄筋降伏前でもやや下に凸の曲線となっているが、これは、鉄筋降伏前でも複数本のひび割れが生じたことや、荷重除荷の速度が比較早かったため、梁の復元のタイミングがやや遅れたためと思われる。RC-PBR供試体およびPC-PBR供試体の破壊状況を写真-2に示す。実験後の観察の結果、剥離はコンクリートの表層部で生じていた。さらに、PC-PBR供試体においては、主鉄筋降伏後、補強層の部分剥離が生じるまでの挙動は同様だが、その後、BFRPロッドが破断し、その直後にコンクリートの圧縮破壊が生じた。実験後に補強層を剥がして観察



(a) RC-PBR

(b) PC-PBR

写真-2 破壊状況の写真

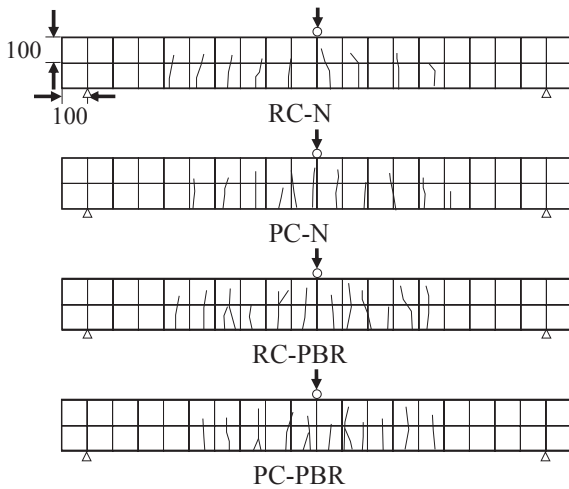


図-7 ひび割れ分布図

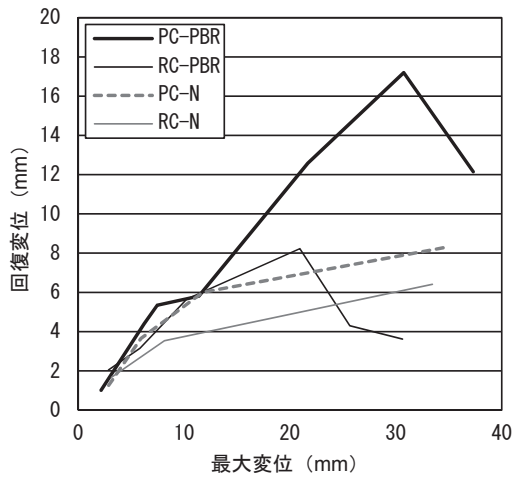


図-8 回復変位-最大変位関係

したところ、高粘度エポキシ樹脂とコンクリートの接着部はコンクリートの表層で剥離していたが、PCMとコンクリートの接着部では剥離状況が大きく異なっており、RC-PBR供試体ではPCMとプライマーの界面で剥離が生じていたのに対し、PC-PBR供試体ではコンクリートの深い部分で剥離が生じていた。よって、RC-PBR供試体とPC-PBR供試体で破壊状況が異なる理由として、PCMとコンクリートの接着が影響していると推測され、接着の改善のために、プライマー塗布後、すぐにPCMを設置する等の対策が必要であると考えられる。

段階的繰り返し載荷試験におけるひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、そして最大荷重について、RC-N供試体を比較対象として、RC-PBR供試体では73.3%、43.5%、50.6%、PC-N供試体を比較対象として、PC-PBR供試体では50.9%、42.2%、59.8%それぞれ向上しており、BFRPロッドを緊張接着することによる、総合的な曲げ補強効果が確認された。

ひび割れの分布状況を図-7に、平均ひび割れ間隔を表-2にそれぞれ示す。RC-N供試体では、ほかの供試体に比べ、ひび割れ本数が少なく、平均ひび割れ間隔も広い。RC-N供試体以外ではひび割れ本数および平均ひび割れ間隔は同程度であることから、BFRPロッドの緊張接着によりひび割れがより分散されたことが実験的に示された。

各載荷ステップでの最大変位 δ_{max} と残留変位 δ_x の差を算出し、それを回復変位(= $\delta_{max}-\delta_x$)として、これと δ_{max} の関係を図-8にしめす。RC-N供試体、PC-N供試体を比較すると、PC-N供試体における回復変位はRC-N供試体より大きい。また、RC-PBR供試体では、変位20mmまでで比較すると、RC-N供試

体およびPC-N供試体より回復変位が大きいですが、補強層の剥離が生じたと考えられる箇所において、急激に回復変位が低下している。また、最終的には、コンクリートの圧縮破壊がより大きく生じたためと考えられるが、変位30mmの場合で比較すると、回復変位はRC-N供試体を下回っている。よって、補強層における、とくにPCMの接着確保の重要性がより明確となった。PC-PBR供試体では、導入プレストレスが最も大きいためと考えられるが、その回復変位は他のいずれの供試体に比べても大きい。また、BFRPロッドの破断後も、破断部以外のBFRPロッドは付着しているため、破断が生じた変位30mm以後もPC-N供試体より回復変位が大きい傾向が見られた。

4. おわりに

本研究では、BFRPロッドを緊張接着する実用的な工程および緊張装置の考案および開発を進めた。その結果として提案された工程に従い、RC梁およびPC梁に対し、BFRPロッドを緊張接着し、それらの段階式繰り返し載荷試験を行い、曲げ特性や復元力特性に対する補強効果を検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) BFRPロッドと鋼より線を繋いだものを鋼製フレームの両端に固定し、油圧ジャッキにより緊張力を加える形式の、簡便な接着が可能となる緊張装置を試験的に作製し、それによりRC/PC梁にBFRPロッドを緊張接着することにより、その優位性を確認した。鋼より線を面外に折り曲げることにより、直線配置の場合に比べてBFRPロッドの接着端部と構造物の支点がより近づき、接着端部に生じる曲げモーメントの影響がより低減されると考えた。
- 2) BFRPロッドの緊張接着により、RC梁およびPC梁のひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大荷重が総合的に向上するとともに、ひび割れがより分散され、本数が増加し、それらの平均間隔はより小さくなることが実験的に示された。
- 3) BFRPロッドの緊張接着による復元力特性の向上効果が、主鉄筋降伏後にとくに顕著に得られることが実験的に明確となった。しかし、BFRPロッドおよび高粘度エポキシ樹脂とともに補強層を形成するPCMに早期剥離が生じた場合、復元力特性が大きく低下することが明確となり、プライマー塗布後、すぐにPCMを設置する等の対策の重要性が示された。

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）」と、JSPS 科研費 24760352 の助成を受けて実施したものである。また、中国 GBF 社より BFRP ロッドをご提供いただいた。株式会社東邦アーステックよりエポキシ樹脂をご提供いただいた。名城大学大学院理工学研究科の唐澤棟氏には実験に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岩下健太郎, 金光男, 佐藤大地, 八木洋介: BFRP ロッド緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果, 第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.327-332, 2011
- 2) 佐藤大地, 田中竜蔵, 岩下健太郎, 八木洋介: 玄武岩繊維ロッド緊張接着による RC 梁の復元力特性に対する補強効果, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 567-572, 2012
- 3) 佐藤大地, 岩下健太郎, 八木洋介, 吉田光秀: エポキシ樹脂充填鋼管を用いた FRP ロッドの接着継手の強度に関する研究, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 495-498, 2013
- 4) 岩下健太郎, 森祐樹, 八木洋介, 吉田光秀: 緊張状態で接着された BFRP ロッドの接着端部に集中するせん断応力の評価, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 583-588, 2014