

FRP 板の材料特性を変化させた水中接着曲げ補強 RC 梁の曲げ耐荷性状

Flexural load-carrying behavior of RC beam strengthened with various materials by means of submerged FRP plate bonding method

三井住友建設 (株) ○ フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

室蘭工業大学 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

室蘭工業大学 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)

釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、地震規模の拡大や走行車両の大型化などに起因する既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐力不足に伴い、その補修補強工事が盛んに行われている。補修補強を要する構造物には、河川橋脚等の水中構造物も含まれており、この種の構造物は、事前に補修補強対象部位を乾燥状態にするための仮締切工事を行う必要がある。このように、水中構造物の補修補強工事には陸上に比べ多大な費用を要するため、施工が十分に進捗していないのが現状である。従って、仮締切が不要で水中での施工が可能な補修補強工法を開発することが急務となっている。著者らはこのことに着目し、予め連続繊維シート (以後、FRP シート) にエポキシ系樹脂を含浸硬化した FRP 板を水中接着樹脂を用いて接着補強する工法を考案した。

既往の研究では、本工法による RC 梁の曲げおよびせん断補強効果を確認している¹⁾。特に、曲げ補強する場合には、コンクリート面をブラスト処理し、FRP 板に砂付き処理を施すことにより、付着性能が向上することを確認している。また、コンクリート面に溝 (幅 10 mm、深さ 5 mm 程度) を適切な間隔で設けることにより、さらに付着性能が向上することを明らかにしている²⁾。

しかしながら、これらの研究では FRP 材として主にアラミド繊維 (AFRP) を用いており、材料特性の異なる場合については十分に検討されていないのが現状である。提案工法の汎用性向上のためには、補強効果に及ぼす FRP 材料の力学特性の影響についても検討することが重要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、FRP 板水中接着工法による RC 梁の曲げ補強効果に及ぼす FRP 板の材料特性値の影響を検討することを目的に、繊維目付量の異なる AFRP および CFRP 板を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強試験体の他、補強材種類および繊維目付量をそれぞれ2種類に変化させた全5体である。試験体名は、補強材種類 (A: アラミド繊維, C: 炭素繊維) および目付量 (g/m²) の組み合わせで示している。なお、繊維目付量は、AFRP および CFRP 板の引張軸剛性が概ね対応するように設定している。

図-1 には、試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。本実験で使用した試験体は、断面寸法

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材種類	目付量 (g/m ²)
N	-	-
A415	AFRP 板	415
A830		830
C300	CFRP 板	300
C600		600

表-2 各 FRP 板の力学的特性値 (公称値)

補強材種類	繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)	引張軸剛性 (kN/mm)
アラミド	415	588	0.286	2.06	118	1.75	33.7
	830	1176	0.572				67.5
炭素	300	568	0.167	3.40	245	1.39	40.1

表-3 水中接着樹脂の力学的特性値

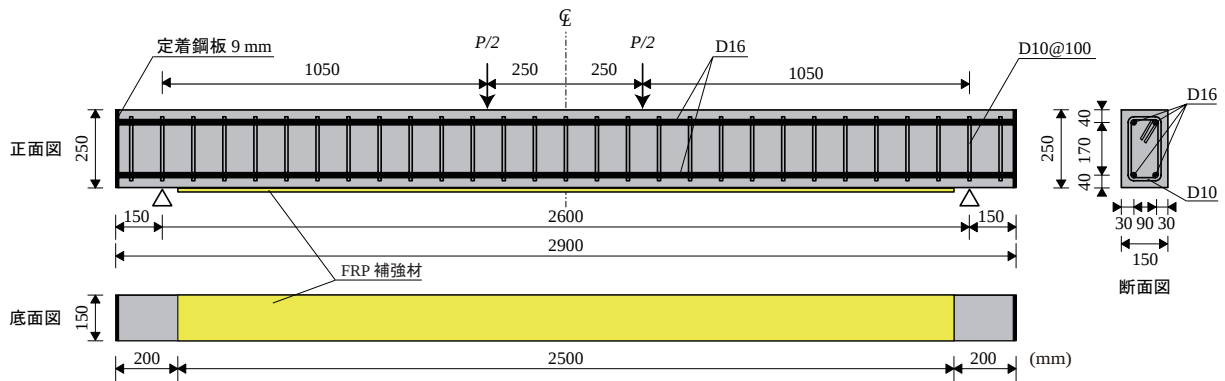
圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	伸び率 (%)
74.4	33.1	16.4	1627	1.0

150 × 250 mm、純スパン長 2.6 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には SD345D16 を 2 本ずつ配置した。スターラップには SD345D10 を用い 100 mm 間隔で配置している。表-2 には、各 FRP 板の力学的特性値を示す。CFRP シートには高強度タイプを用いている。C600 試験体は、目付量 300 g/m² の CFRP シートを 2 枚重ねて、エポキシ系樹脂を含浸硬化させ、1 枚の板状に成形したものを接着補強している。各 FRP 板の幅は 150 mm であり、梁軸方向の補強範囲はスパン中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。

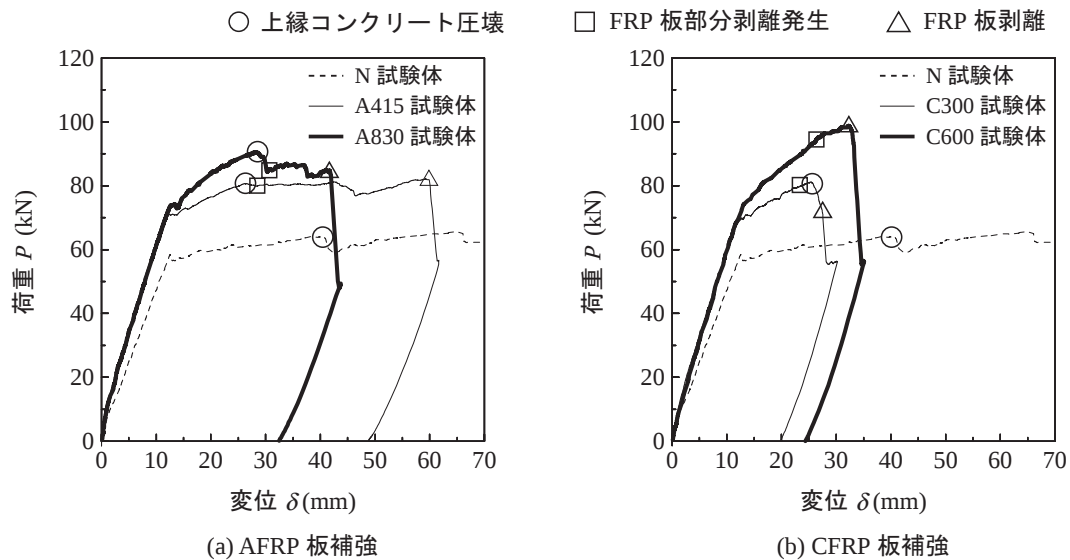
表-3 には、使用した水中接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。本研究に用いた水中接着樹脂は、2 種混合型のエポキシ系接着樹脂であり、主剤、硬化剤ともにパテ状である。また、水中接着樹脂の接着性能は、土木学会「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」³⁾における「連続繊維シートとコンクリートの接着試験方法 (案)」に準拠して評価しており、接着材料としての性能を満足していることを確認している²⁾。

2.2 RC 梁の水中接着補強方法および実験方法

水中接着補強は、気中で FRP 板と水中接着樹脂を一体化させ、大型水槽内に設置した RC 梁の所定の位置に配置し、圧着した状態で 5 日間程度水中養生する工程で実施



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要



図－2 荷重－変位関係に関する実験結果の比較

した。なお、FRP板の接着面には、5号珪砂による砂付処理を施した。また、コンクリート表面にはショットブラスト処理(処理深さ1 mm程度)を施している。

載荷実験は、RC梁を単純支持状態で設置し、容量200 kNの油圧ジャッキを用いて4点曲げ載荷試験法により行った。なお、載荷試験は、試験体を水槽から引き上げた後ひずみゲージを添付し、直ちに行うこととしている。本実験の測定項目は、荷重、スパン中央点変位(以後、変位)、FRP板の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC梁のひび割れやFRP板の剥離状況を連続的に撮影し、実験終了後には、ひび割れの発生状況を撮影した。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重－変位関係

図－2には、AFRPおよびCFRP板を用いて曲げ補強した試験体の荷重－変位曲線が無補強の結果と比較して示している。図より、無補強試験体の場合には、主鉄筋降伏後、変位 δ の増加に伴って荷重が多少増加し、 $\delta = 40$ mm程度で上縁コンクリートが圧壊している。

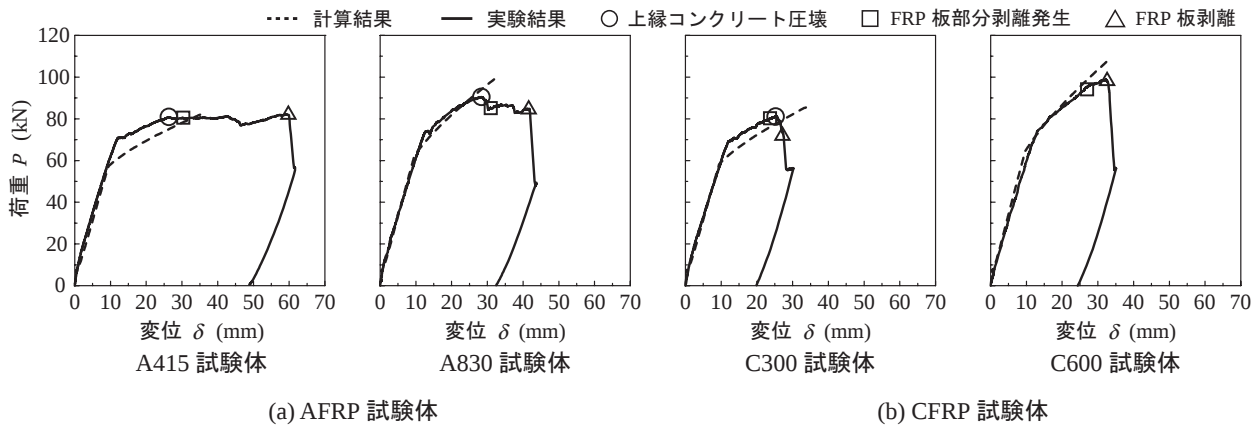
一方、補強試験体の場合には、補強材料によらず主鉄筋降伏後も荷重が増加し、無補強試験体の実測耐力の1.3～1.5倍程度以上の荷重で上縁コンクリートの圧壊もしく

はFRP板の剥離により終局に至っている。また、主鉄筋降伏後の剛性勾配や実測耐力は、繊維目付量が多い場合ほど大きくなる傾向にある。

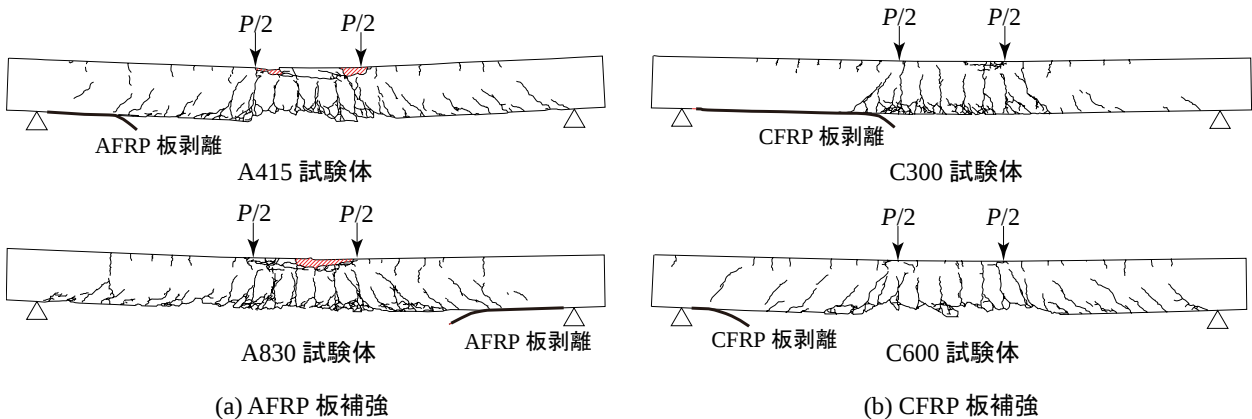
なお、AFRPおよびCFRP板補強した場合におけるRC梁の耐荷性状を比較すると、最大荷重は目付量が少ない場合(A415/C300)には補強材料によらずほぼ同等であるものの、目付量が多い場合(A830/C600)にはCFRP補強の場合が大きことが分かる。また、FRP板が全面剥離に至るまでの変形量は全般的にAFRP板補強の場合が大き。

図－3には、各補強試験体の荷重－変位関係に関する実験結果を計算結果と比較して示している。計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。また、計算ではFRP板とコンクリートの完全付着を仮定している。なお、水中硬化型接着樹脂は考慮していない。

図より、いずれの試験体においても、計算主鉄筋降伏時までは実験結果と計算結果は良く対応していることが分かる。主鉄筋降伏時の荷重は、実験結果の場合が計算結果を上回っている。この傾向は、特に目付量の少ない場合で顕著である。これは、計算結果において水中接着樹脂が考慮されていないことなどが影響しているものと考えられる。主鉄筋降伏後、実測荷重は計算結果と概ね



図－3 各試験体における荷重－変位関係の実験結果と計算結果の比較



図－4 ひび割れ分布性状

同等の勾配で増加している。

A415 試験体の場合には、計算耐力と同程度の荷重で上縁コンクリートが圧壊し、その後 FRP 板の部分剥離を生じ、最終的には変位 $\delta = 60$ mm 程度で FRP 板が剥離している。一方、A830/C300/C600 試験体の場合には、計算耐力を下回る荷重で FRP 板が剥離して終局に至っている。ただし、A830 試験体の場合には、上縁コンクリート圧壊後、FRP 板の部分剥離を生じ、変形量が 20 mm 程度増加した後、終局に至っている。これに対し、C300/600 試験体は、FRP 板の部分剥離を生じた直後に全面剥離し終局に至っている。

また、AFRP 板補強の場合には、繊維目付量が大きい場合ほど計算耐力を下回る荷重で圧壊が生じ FRP 板の剥離により終局に至る傾向にある。これに対し、CFRP 板補強の場合には、繊維目付量によらず計算耐力を下回る荷重で FRP 板が剥離し終局に至るものの、繊維目付量が大きい場合は計算耐力に近い荷重レベルまで FRP 板が付着を確保している。

以後の検討では、AFRP および CFRP 板水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす繊維目付量の影響について、RC 梁の損傷状況を比較する形で検討する。

3.2 ひび割れ性状

図－4 には、各補強試験体の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。図より、AFRP 板補強試験体の場合には、繊維目付量によらず上縁コンクリートが著し

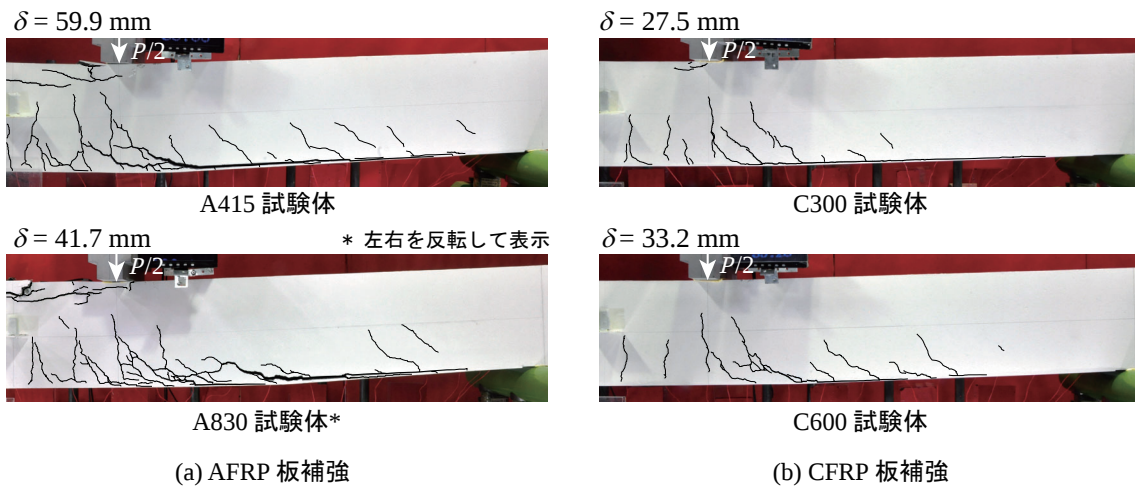
く損傷しており、かつ下縁かぶりコンクリートには微細なひび割れが多数発生し一部でコンクリートの剥落も見られる。これは、後述するようにピーリング作用による FRP 板の部分剥離発生後、RC 梁のたわみ量の増加に伴って剥離領域が徐々に両支点側に進展したことによるものである。

これに対し、CFRP 板補強の場合には、AFRP 板補強の場合に比較して上縁コンクリートの損傷が軽微であり、また下縁かぶりコンクリートのひび割れも少ない。これは、部分剥離発生直後に FRP 板が全面的に剥離して終局に至ったことによるものと考えられる。

写真－1 には、各補強試験体の FRP 板剥離直前におけるひび割れ性状を示している。写真より、いずれの試験体においても、斜めひび割れの先端部がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用により FRP 板が部分剥離を生じていることが分かる。

AFRP 板補強試験体の場合には、ピーリング作用の起点となる下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れが大きく開口するとともに、部分剥離領域が支点部に向かって進展していることが分かる。また、これに伴い上縁コンクリートが著しく圧壊している。

これに対し、CFRP 板補強試験体の場合には、AFRP 板補強の場合よりも FRP 板剥離時のたわみ量が小さく、下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れはほとんど開口していない。これは、CFRP 板の面外変形に対する抵抗性



写真－1 FRP 板全面剥離直前における各試験体のひび割れ性状

がAFRP板よりも大きいことが影響しているものと考えられる。しかしながら、ピーリング作用による部分剥離発生後には接着界面により大きな剥離応力が生じるため、一気に全面剥離に至るものと推察される。このような傾向は、AFRPおよびCFRPシートを用いて気中接着補強したRC梁の荷重実験においても確認されている⁵⁾。

また、前述の荷重－変位関係の実験結果に見られるように、C600試験体の場合がC300試験体に比較してFRP板の付着性能が高いのは、CFRP板の目付量が大きい場合には面外変形に対する抵抗性も大きいため、部分剥離の開始が抑制されたことによるものと推察される。ただし、この点については、今後も検討する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、FRP板水中接着工法によるRC梁の曲げ補強効果に及ぼすFRP板の材料特性値の影響を検討することを目的に、繊維目付量の異なるAFRPおよびCFRP板を用いて水中接着曲げ補強したRC梁の静荷重実験を行った。本実験の知見を整理すると以下の通りである。

- 1) FRP板の材料特性によらず、FRP板水中接着工法によりRC梁の曲げ耐力を向上可能であり、その効果は繊維目付量が大きい場合ほど高い。
- 2) AFRP板補強の場合には、繊維目付量が大きい場合ほど実測耐力が計算耐力を下回る荷重で圧壊しFRP板の剥離により終局に至る傾向にある。一方、CFRP板

補強の場合には、繊維目付量が小さい場合ほど実測耐力が計算耐力を下回る傾向が強く現れる。

- 3) AFRP板補強の場合は、CFRP板補強の場合よりも部分剥離発生後の変形性能が大きい。一方、CFRP板補強の場合に目付量を大きくすることで、部分剥離の開始を抑制できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介: 水中硬化型接着樹脂とAFRP版を用いて水中補強したRC梁の静荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.1327-1332, 2010.
- 2) 栗橋祐介, 三上 浩, 鹿嶋辰紀, 岸 徳光: AFRP板水中接着曲げ補強RC梁の耐荷性状に及ぼすせん断キー配置間隔の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013
- 3) 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.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2012.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: FRPシート曲げ補強RC梁の定荷重繰り返し荷重時における耐荷挙動, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, pp.1309-1320, 2005.3