

論文 材料特性の異なる FRP 板で水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状

三上 浩^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・小室 雅人^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 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。その結果、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こと、2) 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 板補強の場合は繊維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あること、などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP 板, CFRP 板, 水中接着曲げ補強, ピーリング作用

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、その場合に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 150 × 250 mm, スパン長 2.6 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には D16(SD345) を2本ずつ配置した。スターラップには D10(SD345) 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している。CFRP シートには高強度タイプを用いた。なお、樹脂を含浸する前のアラミド繊維シートはしなやかで布生地のような性状を示す。一方、炭素繊維シートは弾性係数が高いため、アラミド繊維よりも弾力性に富む性状を示す。ただし、折りたたむと折損する脆的な特性を有している。

なお、C600 試験体の場合は、繊維目付量 300 g/m² の

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材種類	繊維目付量 (g/m ²)	補強材引張剛性 (kN/mm)
N	-	-	-
A415	AFRP 板	415	33.7
A830		830	67.5
C300	CFRP 板	300	40.9
C600		600	81.8

*1 三井住友建設 (株) 技術研究開発本部 技術開発センター 上席研究員 博 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (正会員)

*3 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博 (工) (正会員)

*4 (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

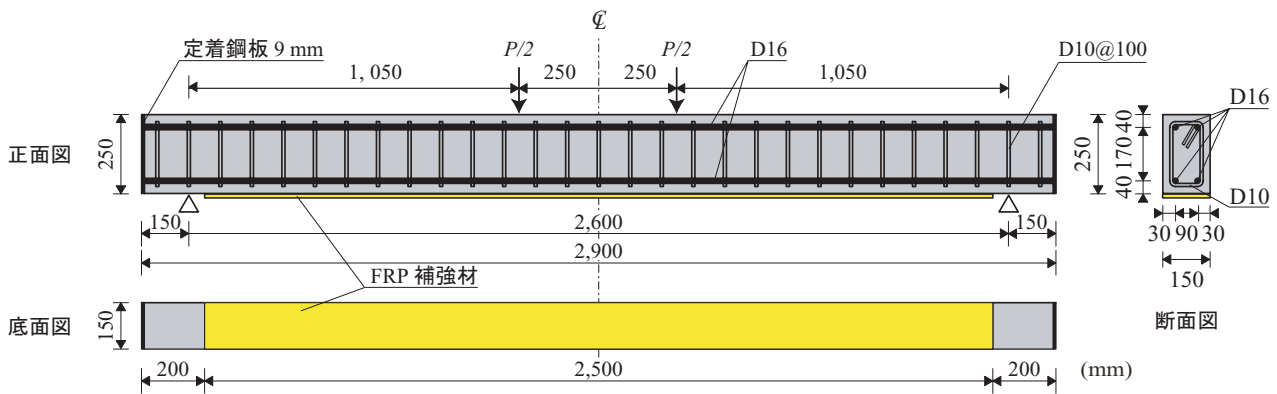


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

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 (%)	引張剛性 (kN/mm)
アラミド	415	588	0.286	2.06	118	1.75	33.7
	830	1,176	0.572				67.5
炭素	300	568	0.167	3.40	245	1.39	40.9

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	1,627	1.0

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た。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。なお、各試験体の実験時におけるコンクリート圧縮強度は $f'_c = 31.3$ MPa であり、軸方向鉄筋の降伏強度は $f_y = 390$ MPa であった。

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、表-4 に示す材料特性および性状を有する 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

図-2 には、FRP 板の接着概要を示している。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、大型水槽内に水没させた 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した。な

表-4 水中接着樹脂の材料組成および性状

	主剤	硬化剤
主成分	変成エポキシ樹脂	変成ポリアミドアミン
外観	白色パテ状	暗灰色パテ状
比重	1.85	1.78
配合比	主剤：硬化剤 = 1：1 (重量比)	
可使用時間	30 分 (at. 25 °C)	

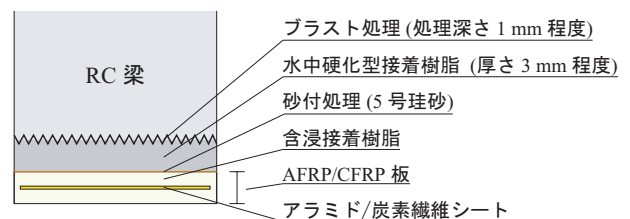


図-2 FRP 板の接着概要

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貼付し、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

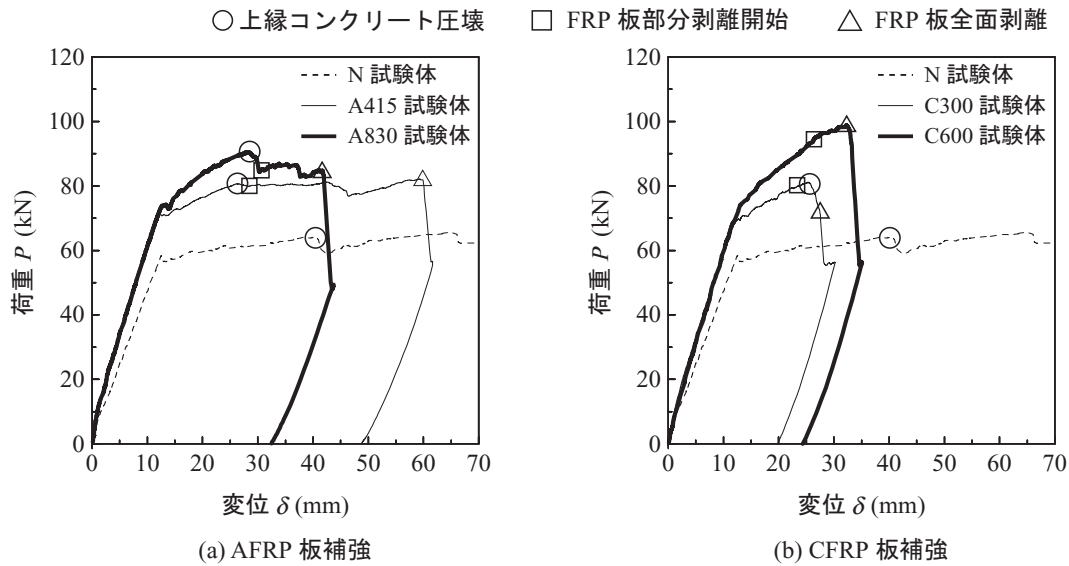


図-3 荷重-変位関係に関する実験結果の比較

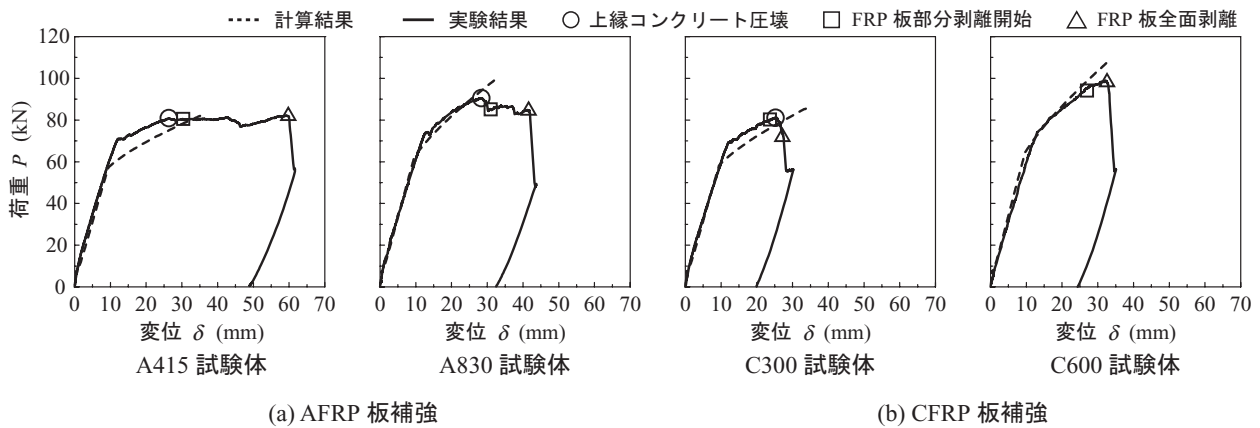


図-4 各試験体における荷重-変位関係の実験結果と計算結果の比較

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-3には、AFRPおよびCFRP板を用いて曲げ補強した試験体の荷重-変位関係を無補強の結果と比較して示している。図-3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RC梁の耐荷性状を比較すると、最大荷重は繊維目付量が少ない場合

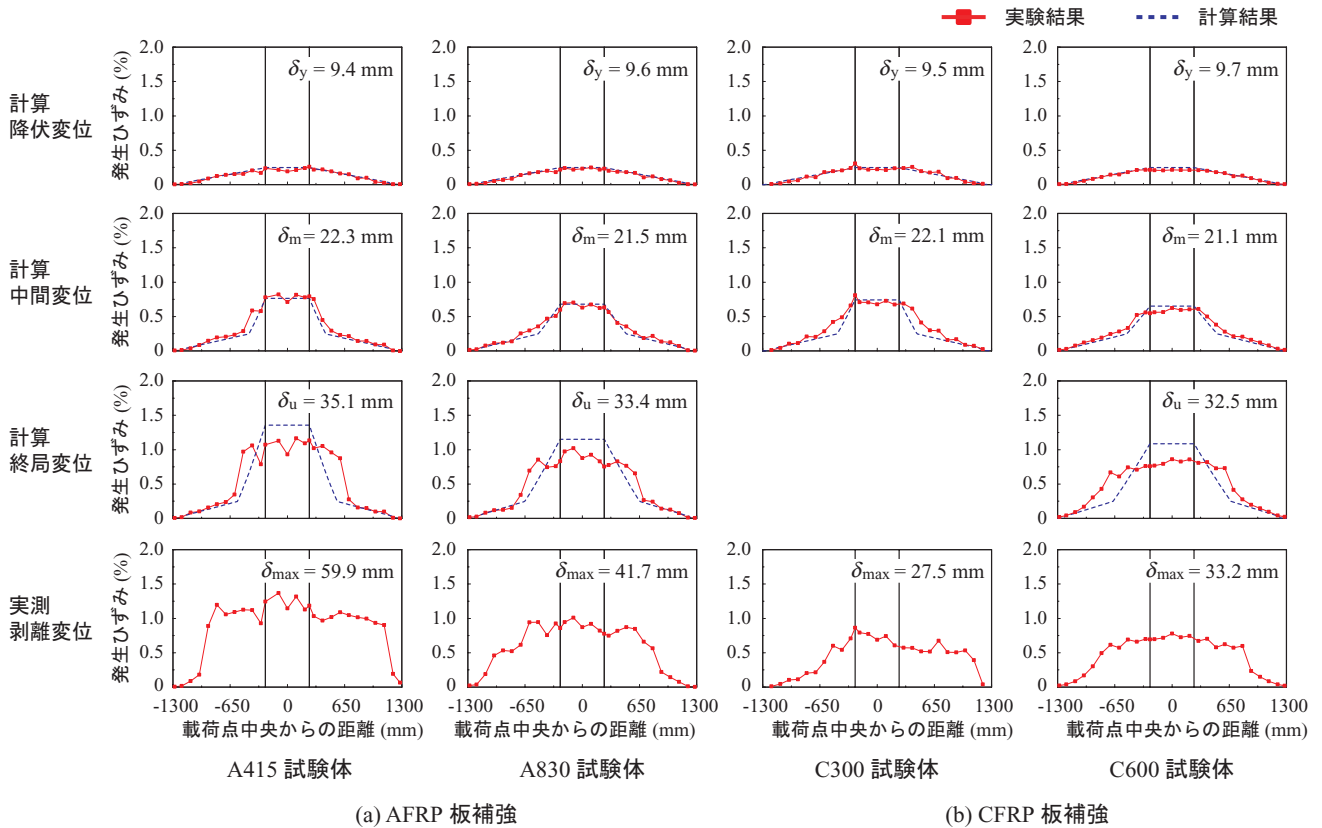
(A415/C300)には補強材料によらずほぼ同等であるものの、繊維目付量が多い場合(A830/C600)にはCFRP板補強の方が大きいことが分かる。一方、FRP板が全面剥離に至るまでの変形量は全般的にAFRP板補強の場合が大きい。

図-4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、棒部材の耐力を求めることから、コンクリート標準示方書⁴⁾の一般的なコンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ曲線を用い、断面分割法によって算出した。また、計算ではFRP板とコンクリートの完全付着を仮定し、コンクリートひずみが $3,500 \mu$ に至った時点を押縮破壊としている。なお、水中硬化型接着樹脂は考慮せずに計算を行った。また、表-5に実験結果と計算結果を一覧にして示した。

図-4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。また、主鉄筋降伏時の荷重は、実験結果の方が計算結果を上回る傾向にある。この傾向は繊維目付量の少ない場合に特に顕著である。これは、計算において水

表－5 計算値および実験値一覧

試験体名	降伏荷重 (kN)		降伏荷重時変位 (mm)		最大荷重 (kN)		最大荷重時変位 (mm)		実測剥離変位 (mm)
	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	
N	53.6	57.9	9.4	12.7	55.9	65.6	31.4	64.9	-
A415	58.8	71.1	9.4	12.4	83.4	82.1	35.1	59.2	59.9
A830	63.9	73.7	9.6	12.9	102.5	90.4	33.4	28.3	41.7
C300	59.9	69.3	9.5	12.1	88.0	81.2	34.8	25.3	27.5
C600	66.0	74.2	9.7	13.1	109.1	98.8	32.5	32.2	33.2



図－5 FRP 板の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果および計算結果の比較

中樹脂を考慮していないことから、計算主鉄筋降伏耐力が小さく評価されたためと考えられる。また、水中樹脂の厚さは繊維目付量に関わらず同様なため、繊維目付量が小さい場合に、より顕著にその影響が出現したものと推察される。主鉄筋降伏後、実測荷重は計算結果と概ね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（コンクリートと FRP 板の界面で部分的に剥がれること）を生じ、最終的には変位 $\delta = 60$ mm 程度で FRP 板が剥離して終局に至っている。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。

これらは、補強材料の引張剛性と剥離応力（付着せん断応力）および破壊モードに関連するものと考えられる。AFRP 板は CFRP 板に比べて引張剛性が小さく、付着せん断応力も小さいことから、破壊モードは圧壊となりやすい。特に繊維目付量が大きい場合には圧壊が先行して生じるため、計算値との乖離が大きくなる。一方、CFRP 板

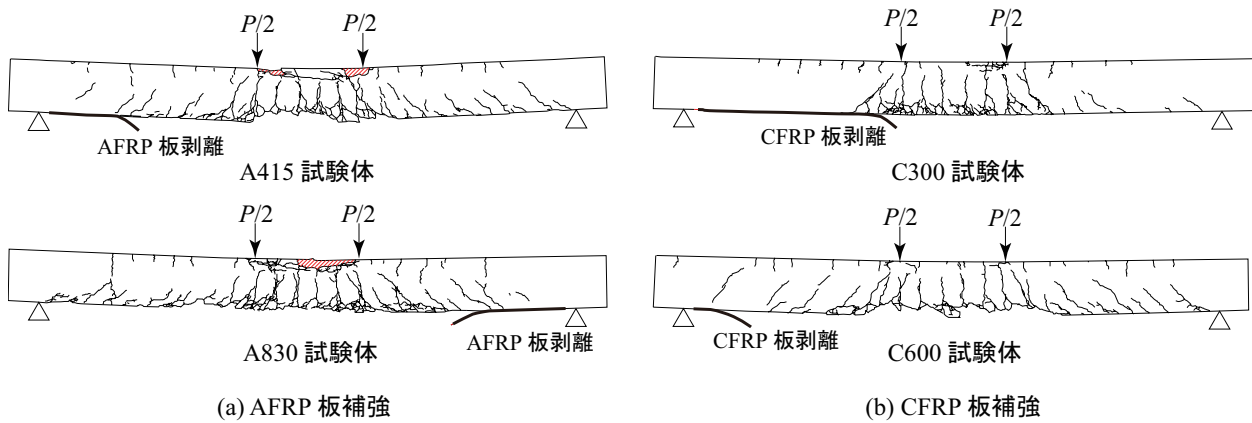


図-6 ひび割れ分布性状

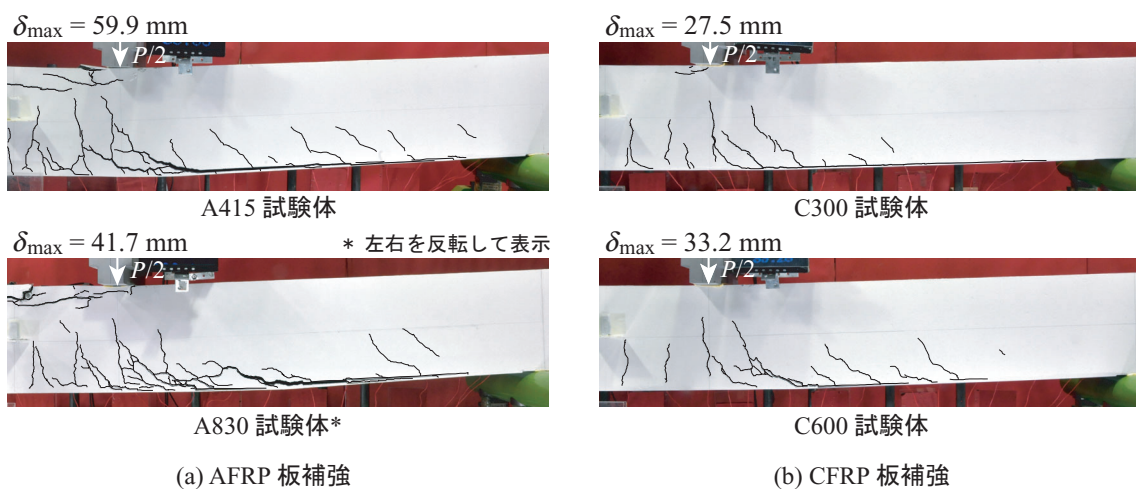


写真-1 実測剥離変位 δ_{max} 時における各試験体のひび割れ性状

の場合は AFRP 板に比べて引張剛性が大きいために剥離破壊が先行しやすい。特に繊維目付量が小さい場合には面外変形に対する抵抗が小さいため、より早期に部分剥離が始まり、直後に全面剥離することに関連するものと推察される。

3.2 FRP 板の軸方向ひずみ分布性状

図-5 には、計算主鉄筋降伏 δ_y 時、計算中間変位 δ_m 時、計算終局変位 δ_u 時および実測剥離変位 δ_{max} 時における FRP 板の軸方向ひずみ分布性状の実験結果を計算結果と比較して示している。ここで、中間変位 δ_m とは、 δ_y と δ_u の中間の変位であり、実測剥離変位 δ_{max} とは実験において FRP 板が全面剥離に至ったときの変位である。計算結果は FRP 板とコンクリートの完全付着を仮定して算出した断面分割法の結果に基づいて算出したものである。なお、C300 試験体は計算終局変位到達前に剥離破壊したことから、終局変位時の結果は図示してない。

図-5 より、A415/A830/C600 試験体の場合は、計算降伏変位 δ_y 時および中間変位 δ_m 時における実験結果が計算結果と比較的良好に対応していることが分かる。従って、FRP 板とコンクリートとの付着は δ_m 時まで確保さ

れているものと判断される。しかしながら、 δ_u 時では A415/A830/C600 試験体の実験結果は等せん断力区間の荷点近傍において計算結果を大きく上回り、一方で等曲げ区間のひずみは小さい値を示している。これは、後述するように荷点近傍の下縁コンクリート部に発生した斜めひび割れが FRP 板を下方に押し出して引き剥がすピーリング作用により、部分剥離が発生したことによるものと考えられる。

一方、C300 試験体の場合には、計算降伏変位 δ_y 時の実験結果は、計算結果と良く対応していることが分かる。しかしながら、中間変位 δ_m 時の C300 試験体の実測ひずみは、等せん断力区間の荷点近傍において計算結果より大きな値を示している。また、FRP 板の接着は計算終局時まで確保されていない。このように、C300 試験体では、他の補強試験体よりも早期にピーリング作用による FRP 板の部分剥離が発生したことから、計算終局変位到達前に剥離破壊したものと考えられる。

各試験体の実測剥離変位 δ_{max} 時のひずみ分布を見ると、いずれの試験体も大きなひずみの発生領域が両支点部に進展していることが分かる。これらのひずみの大きさは、

測定位置によらずほぼ同等であることから、FRP 板の部分剥離領域が拡大していることが分かる。なお、A415/830 試験体の実測剥離変位 δ_{max} は、C300/600 試験体の場合よりも 1.3～2.2 倍程度大きい。このことから、本実験の条件下においては、AFRP 板補強は CFRP 板補強の場合よりも、部分剥離発生後における全面剥離に対する抵抗性が高いものと推察される。

3.3 ひび割れ性状

図-6 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-6 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、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、各補強試験体の実測剥離変位 δ_{max} 時におけるひび割れ性状を示している。写真-1 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 板に部分剥離が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。

一方、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 板の引張剛性が 2 割ほど AFRP 板よりも大きく、面外変形に対する抵抗性が 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(付着せん断応力)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 梁の載荷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 試験体の方が C300 試験体に比較して FRP 板の部分剥離開始時の荷重および変位が大きいのは、CFRP 板の繊維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 梁の静載荷実験を行った。本実験により得られた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時から全面剥離時までの変位増分が大きい。一方、CFRP 板補強の場合は繊維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ある。

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 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.1327-1332, 2010.7
- 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, 2013.7
- 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載荷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