

論文 AFRP 版を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の耐荷性状に及ぼす補強材表面処理の影響

池下 雄哉^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 本研究では、AFRP 版と水中硬化型接着樹脂を用いた水中接着補強工法の補強効果向上を目的に、表面を砂付き処理により異形化した AFRP 版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) 砂付き処理を施した AFRP 版を用いて RC 梁の水中接着曲げ補強することにより、RC 梁の曲げ耐力向上効果を改善可能である、2) ただし、水中接着の場合にはプライマー処理を施すことが出来ないため、気中接着の場合よりも付着性能が低い、3) 砂付き処理の有無や施工条件により、剥離を生じる接着界面が異なるものの、補強材の剥離はいずれの場合もピーリング作用により発生する、ことなどが明らかになった。

キーワード: AFRP 版, 水中接着曲げ補強, RC 梁, 表面処理

1. はじめに

1995 年に発生した阪神淡路大地震を契機に我が国の耐震補強設計法が大きく改訂された^{1),2)}。現在では、大地震発生時における緊急輸送道路の確保に不可欠な橋脚から優先して、上記の耐震補強設計法に準拠した補強工事が行われている。しかしながら、河川橋脚の場合には、仮締切工事を行い、施工部を乾燥状態にするのが一般的であるため、陸上での補強工事に比較して膨大なコストが必要となる。そのため、耐震補強がほとんど実施されていないのが現状である。

著者らは、このような状況を打破するため、アラミド繊維 (AFRP) シートにエポキシ系接着樹脂を含浸硬化した AFRP 版を水中硬化型接着樹脂を介して圧着することにより接着補強する方法を考案した。この工法が確立されると、水中での耐震補強工事が可能となるため、大規模な仮締切工事が不要となり、補強工事費が大幅に削減可能になるものと考えられる。

著者らは、これまで提案の水中接着補強工法の補強効果や AFRP 版の付着性状を検討することを目的に、本工法で曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行っている³⁾。その結果、既往の水中接着補強工法では、RC 梁の曲げ耐力を向上可能であるものの、その補強効果は気中接着補強した場合よりも小さいものとなっている。これらの実験では、AFRP 版が水中硬化型接着樹脂との界面で剥離して終局に至っていることより、AFRP 版の表面を異形化することによって AFRP 版と水中硬化型接着樹脂との付着性能が改善され、補強効果が向上するものと考えられる。

このような観点より、本研究では、より補強効果の高い水中接着補強工法を確立することを目的に、表面を異形化した AFRP 版を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁

に関する 4 点曲げ静載荷実験を実施した。

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、気中接着補強試験体の他、AFRP 版表面の異形化の有無を変化させた水中接着補強試験体の全 3 体である。なお、AFRP 版表面の異形化は、砂付き処理により行った。具体的には AFRP 版表面に汎用の含浸接着樹脂を塗布し、その上に 5 号珪砂を振り掛けて行った。なお、珪砂の使用量は 500 g/m² 程度である。表中の試験体名の内、第 1 項目は施工・養生環境 (A: 気中, W: 水

表-1 試験体一覧

試験体名	接着界面処理	使用樹脂の種類	施工・養生環境
A	-	汎用含浸接着樹脂	気中
W	-	水中硬化型接着樹脂	水中
W-S	砂付き		

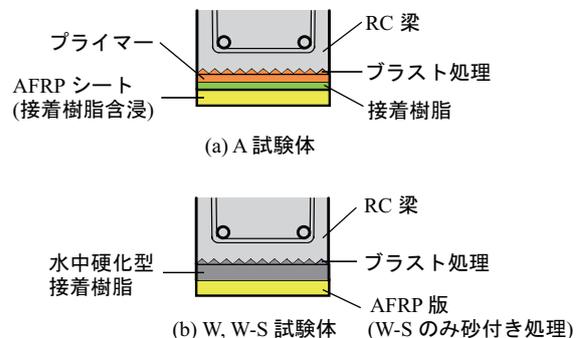


図-1 各試験体の接着概要

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術開発研究本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

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

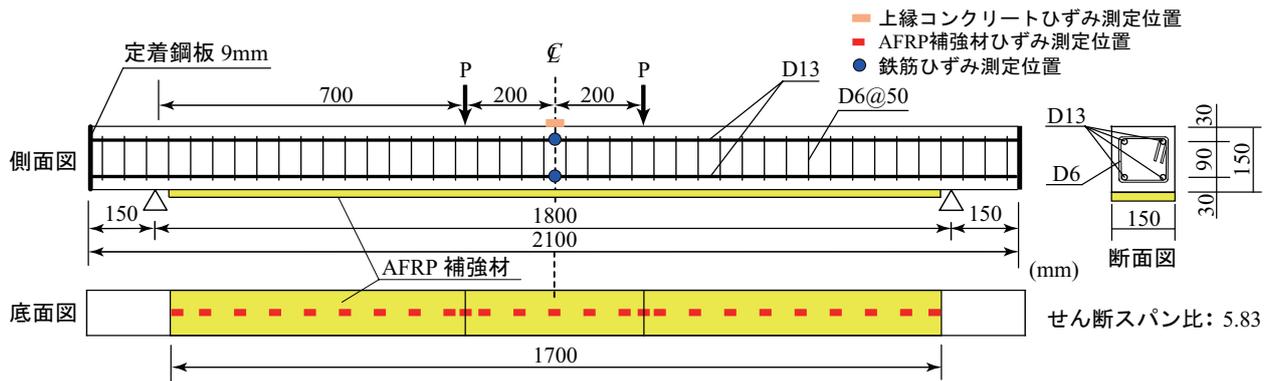


図-2 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

中)、第2項目はAFRP版の表面処理を示しており砂付き処理を施した場合にSと付した。

図-1には、各試験体の接着概要に関する断面図を示している。本実験では、いずれの試験体においても接着面であるRC梁底面には、ブラスト処理(深さ1mm程度)を施し、レイタンス除去および付着性能の向上を図っている。

気中接着の場合には、ブラスト処理後、通常の施工と同様にプライマー処理を施し指触乾燥状態となったことを確認した後、AFRPシートを含浸接着した。また、水中接着の場合には、水中でのプライマー処理が不可能であるため、AFRP版を水中硬化型樹脂を用いてRC梁に直接接着した。なお、水中接着の場合における詳細な施工方法については、2.3節で述べることにする。

図-2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。試験体は、断面寸法150×150mm、純スパン長1.8mの複鉄筋矩形断面RC梁である。上下端鉄筋にはSD345D13を2本ずつ配置している。スターラップにはSD345D6を用い50mm間隔で配置している。梁の下面には、保証耐力392kN/mのAFRP版を接着している。AFRP版の幅は梁幅と同様の150mm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50mm手前までとしている。

補強試験体は、通常のAFRPシート曲げ補強RC梁の場合に、「曲げ圧壊型」となるように設計した。すなわち、実測耐力が平面保持を仮定した断面分割法による計算耐力を上回り、上縁コンクリート圧壊後にAFRPシートが剥離する破壊形式となるように設計した。設計では、著者らの既往の研究^{4),5)}において提案したAFRPシート曲げ補強RC梁の破壊形式予測式を用いた。すなわち、断面分割法により降伏曲げモーメント M_y と終局曲げモーメント M_u を算出し、 M_y/M_u が0.7以上となるように設計している。なお、後述する各材料の力学的特性値を用いて計算した結果、補強試験体の M_y/M_u は0.74となっている。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は28.0MPaであり、軸方向鉄筋の降伏強度は395MPaであった。表-2

表-2 AFRPシートの力学的特性値(公称値)

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(%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75

表-3 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値(公称値)

	物性値(MPa)	測定方法
圧縮強度	53.0	JIS K - 6911
曲げ強度	32.4	JIS K - 6911
引張強度	15.0	JIS K - 6911

には、AFRP版の力学的特性値の一覧を示している。

2.2 水中硬化型接着樹脂の力学的特性および接着性能

本研究に用いた水中硬化型接着樹脂は、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。表-3には、水中硬化型接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。また、水中硬化型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」⁶⁾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)」に準拠して評価した。

その結果、試験は母材コンクリートの引張破壊で終了し、破壊時の強度の平均値は2.6MPaであった。この値は、既設コンクリートの補修補強用接着材料に関する一般的な照査値(1.5MPa)を上回っている。従って、本実験に用いた水中硬化型接着樹脂は接着材料としての性能を満足しているものと判断される。

2.3 RC梁の水中接着補強方法

本実験における水中接着補強の施工手順は以下の通りである。すなわち、

- 1) AFRPシートを汎用の接着樹脂を用いて含浸硬化・成形しAFRP版を製作する。また、必要に応じて前述の砂付き処理を行う。
- 2) RC梁の補強範囲にブラスト処理を施した後、RC梁を水槽内に設置する。

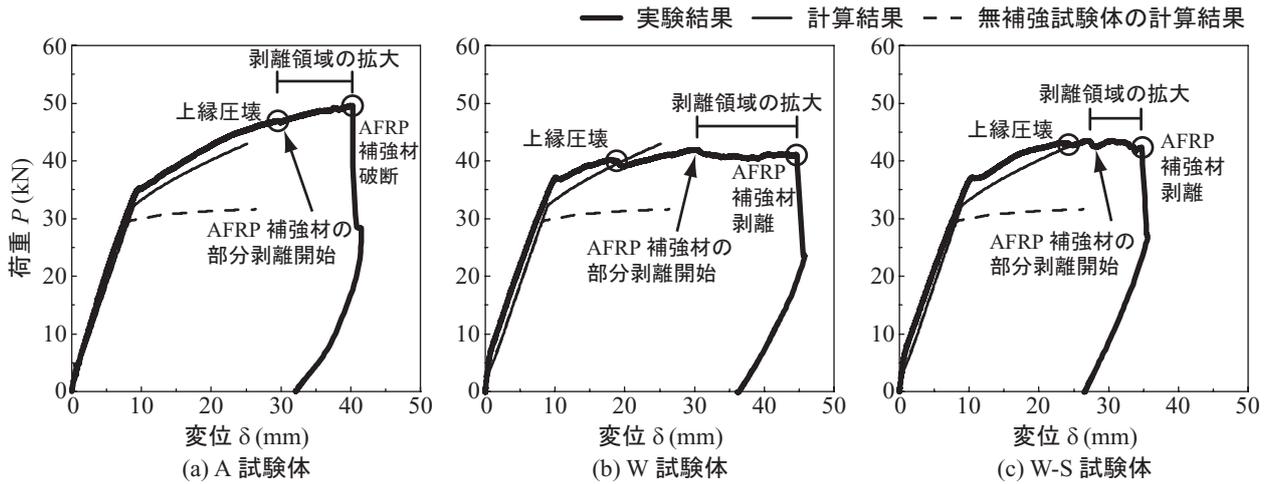


図-3 各試験体における荷重-変位関係の実験結果と計算結果の比較

表-4 実験および計算結果の一覧

試験体名	降伏荷重			最大荷重			実験結果の破壊性状
	計算値	実験値	荷重比	計算値	実験値	荷重比	
	P_{yc} (kN)	P_{ye} (kN)	P_{ye} / P_{yc}	P_{uc} (kN)	P_{ue} (kN)	P_{ue} / P_{uc}	
A		35.2	1.09		49.6	1.16	上縁コンクリート圧壊後補強材破断
W	32.2	37.2	1.16	42.9	42.0	0.98	上縁コンクリート圧壊後
W-S		37.2	1.16		43.6	1.02	補強材剥離

- 3) 水中硬化型接着樹脂を混合し、厚さ4 mm程度に成形する、
- 4) 気中でAFRP版を作業台の上に配置し、その上に成形した接着樹脂を敷き並べて一体化させる、
- 5) 水槽内に設置されたRC梁の接着面に4)を配置し、圧着する、
- 6) 圧着した状態で1週間程度水中養生する、

である。なお、圧着は、水中硬化型接着樹脂がブラスト処理されたコンクリート面の凹凸に十分に充填されるように配慮して行った。

なお、以後AFRPシートとAFRP版を総称してAFRP補強材と呼ぶこととする。

2.4 実験方法

実験は、RC梁を単純支持状態で設置し、容量500 kNの油圧ジャッキと鋼製の載荷治具(載荷点間隔400 mm)を用いて4点曲げ載荷試験法により実施した。

本実験の測定項目は、荷重、載荷点変位(以後、変位)および軸方向鉄筋ひずみであり、それぞれ、静荷重測定用ロードセル、非接触型レーザ式変位計およびひずみゲージにより測定している。これらの計測機器からの出力データは、デジタルメモリに一括収録している。また、実験時には、梁側面のひび割れ進展状況をデジタルカメラで撮影している。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変位関係

図-3には、各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果および計算結果を示している。また、無補強に関する計算結果も併せて示している。計算結果は、コンクリート標準示方書⁷⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。なお、計算ではAFRP補強材とコンクリートの完全接着を仮定している。また、水中硬化型接着樹脂の厚さや力学性能は考慮していない。表-4には参考のために、降伏時および終局時における実験および計算結果を一覧にして示している。なお、実測の降伏荷重は、荷重-変位関係の剛性勾配変化点の荷重として評価している。

図-3より、各補強試験体の計算結果は、無補強の場合と異なり主鉄筋降伏後も荷重が増加しており、いずれの場合も上縁コンクリートの圧壊により計算上の終局に至っていることが分かる。

A試験体の実験結果は、計算終局時までほぼ計算結果と対応している。また、計算終局変位を5 mm程度上回った時点で上縁コンクリートが圧壊し、同時にAFRP補強材の部分剥離が生じた。なお、AFRP補強材の部分剥離は、等せん断力区間の下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの先端部がAFRP補強材を押し下げて引き剥がすピーリング作用により発生した。その後、変位量の増大に伴って剥離領域が支点側に進展しているが、最終的に

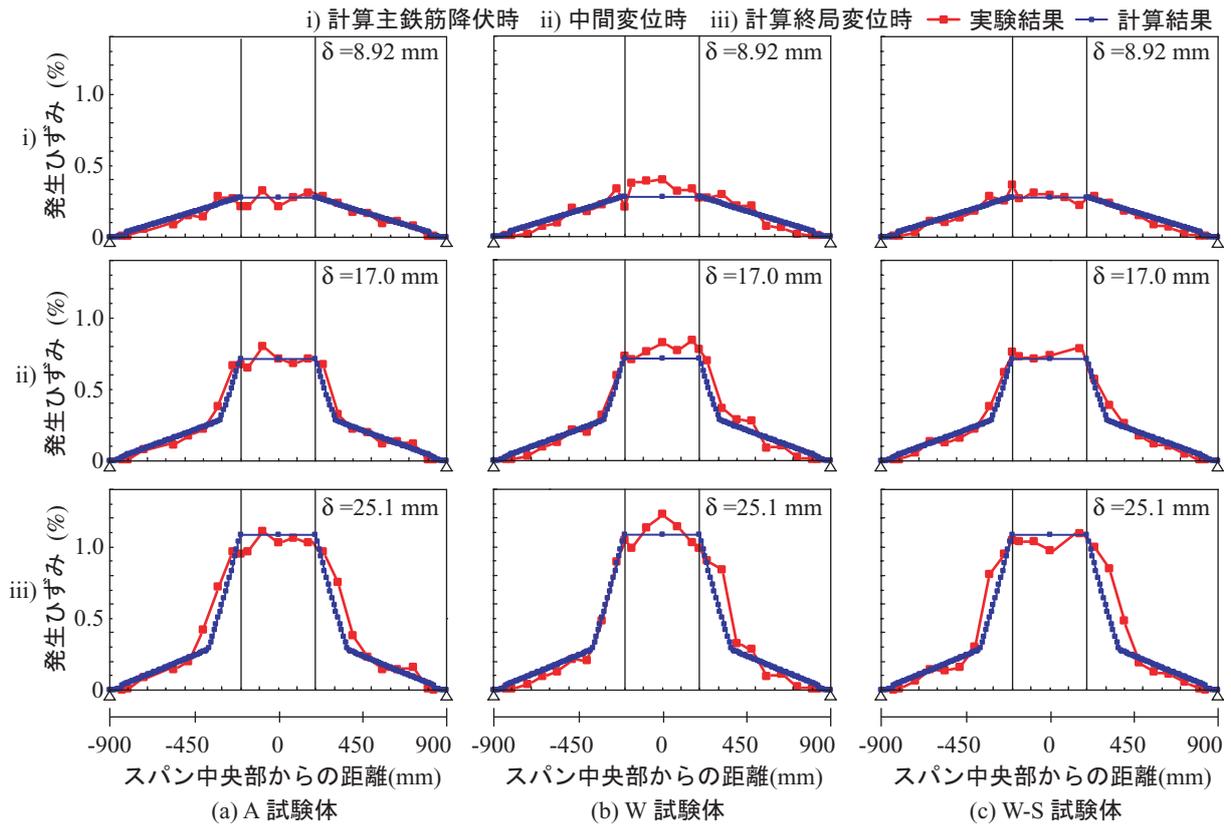


図-4 AFRP補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果および計算結果の比較

はAFRP補強材の破断により荷重が急激に低下している。

W試験体の実験結果は、計算主鉄筋降伏時までは計算結果と良く対応している。なお、主鉄筋降伏荷重の実測値は計算値よりも5kN程度大きい。これは、水中硬化型接着樹脂の引張性能が影響を及ぼしていることによるものと推察される。また、主鉄筋降伏後において、実験結果は、変位 $\delta = 18$ mm程度で上縁コンクリートの圧壊に伴い剛性勾配が低下し、その後AFRP補強材の部分剥離および剥離領域の拡大が顕在化し、最終的にはAFRP補強材の全面剥離により荷重が急激に低下した。なお、実測耐力は計算耐力を下回っている。

W-S試験体の実験結果は、計算終局時まで計算結果とほぼ対応している。また、計算終局変位近傍で上縁コンクリートの圧壊を生じている。その後AFRP補強材の部分剥離および剥離範囲の拡大が顕在化し、最終的には変位 $\delta = 35$ mmでAFRP補強材の全面剥離に至っている。この結果より、AFRP補強材表面に砂付き処理を施すことにより、AFRP補強材と水中硬化型接着樹脂との付着性能が改善され、AFRP補強材とコンクリートの完全接着を仮定した計算結果と同等の曲げ補強効果を発揮することが明らかになった。

なお、W-S試験体は主鉄筋降伏後、気中接着したA試験体よりも小さな荷重および変位レベルで剛性勾配が低下しており、最大荷重も小さい。これは、AFRP版に砂付き処理を施す場合においても、提案の水中接着補強工法

の付着性能は気中接着の場合よりも低いことによるものと考えられる。

3.2 AFRP版のひずみ分布性状

図-4には、主鉄筋降伏時、中間変位時および終局変位時におけるAFRP版の軸方向ひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。ここで、中間変位とは、主鉄筋降伏時と終局時の中間の変位である。また、計算結果はAFRP版とコンクリートの完全接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。

図より、AおよびW-S試験体の場合には、実測ひずみが計算主鉄筋降伏時から計算終局時まで計算ひずみとほぼ対応していることが分かる。このことより、両試験体のAFRP補強材の付着は計算終局時まで概ね確保されているものと考えられる。一方、W試験体の場合には、主鉄筋降伏時において等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみよりも1,000 μ 程度大きく示されている。これは、曲げひび割れの開口の影響を強く受けていることによるものと推察される。中間変位時においては、等曲げ区間のみならず右側等せん断力区間においても実測ひずみが計算ひずみを上回っており、かつその分布性状が乱れている。また、計算終局変位時ではこれらの性状が顕在化する傾向を示している。これは、右側等せん断力区間において、補強材が部分剥離を生じたことによるものと考えられる。

これらの結果より、W試験体は、AおよびW-S試験体に比較して曲げひび割れの開口や補強材の部分剥離を早

* 性状比較を容易にするため左右反転して表示

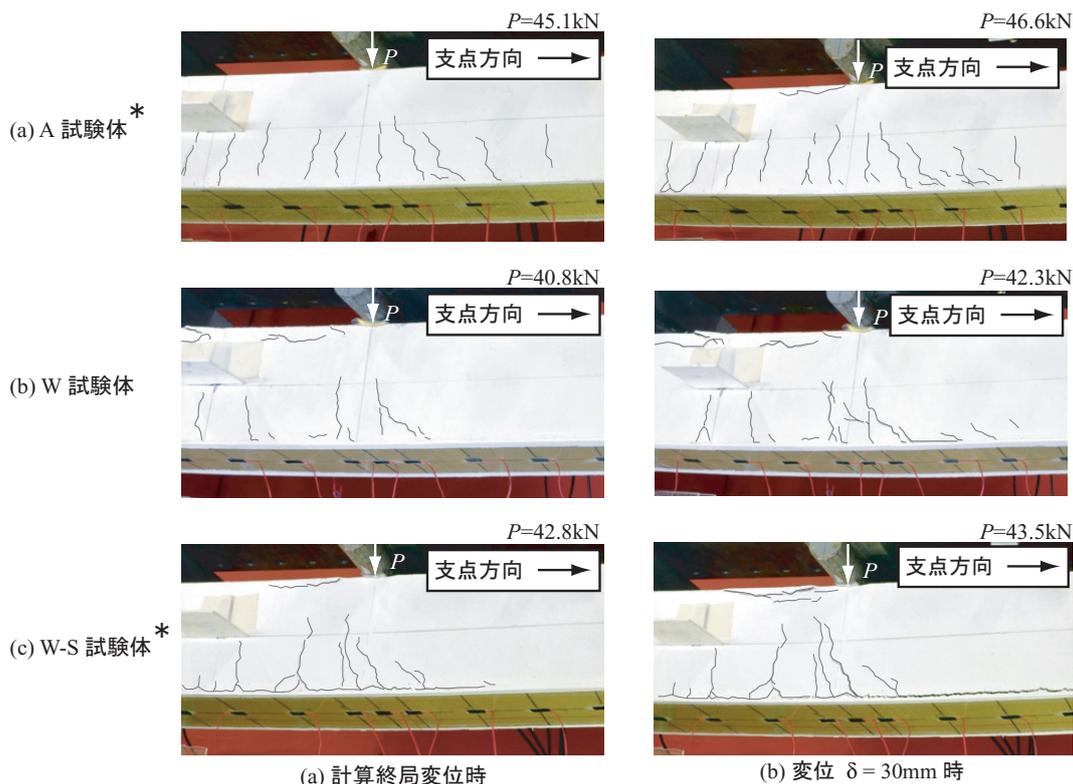


写真-1 各試験体の剥離直前におけるひび割れおよび剥離性状

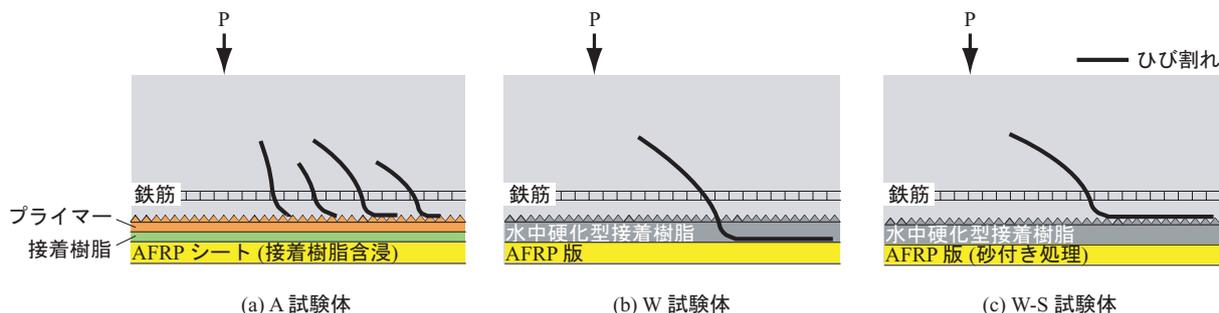


図-5 各試験体の等せん断力区間における AFRP 補強材の剥離挙動

期に生じる傾向にあることが分かる。

3.3 ひび割れ性状

写真-1には、計算終局変位時および変位 $\delta = 30 \text{ mm}$ 時における梁側面のひび割れおよび AFRP 版の剥離性状を示している。計算終局変位時の結果より、いずれの試験体においても等曲げ区間には曲げひび割れ、等せん断力区間には斜めひび割れが発生していることが分かる。これらのひび割れの本数は、A 試験体で最も多く、次いで W-S 試験体、W 試験体の順となっている。これは、A 試験体の場合には、AFRP 補強材とコンクリートとの付着が十分に確保されているのに対し、W、W-S 試験体の場合には A 試験体よりも早期に部分的な付着切れなどを生じていることによるものと推察される。

$\delta = 30 \text{ mm}$ 時のひび割れ性状より、いずれの試験体も等曲げ区間では上縁コンクリートが著しく圧壊していることが分かる。また、等せん断力区間の下縁かぶりコンク

リート部では斜めひび割れ先端部が AFRP 補強材を下方に押し出して引き剥がすピーリング作用により AFRP 補強材が部分剥離を生じていることが分かる。

3.4 AFRP 補強材の剥離進展メカニズム

ここでは、前節までの実験結果に基づき、各試験体の等せん断力区間における AFRP 補強材の剥離挙動の模式図(図-5)に示し、そのメカニズムについて考察する。写真-2には、W および W-S 試験体底面に関する接着界面の状況を示している。

図-5に示しているように、A 試験体の場合には、AFRP 補強材の剥離は下縁かぶりコンクリートの著しい損傷を伴って発生している。これは、コンクリート表面がプライマーで保護されており、かつプライマーと AFRP 補強材の付着性能も高いため、部分剥離発生後も急激な剥離破壊には至らないことによるものと考えられる。ここで、コンクリートのせん断強度を τ_c 、コンクリート- AFRP

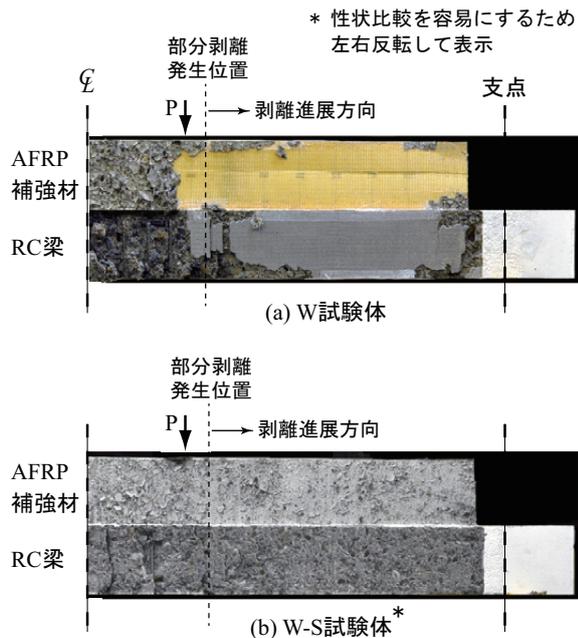


写真-2 実験終了後における AFRP 版および RC 梁底面の接着界面の状況

補強材界面のせん断付着強度を τ_a とすると、両者の大小関係は以下のように示される。

A 試験体の場合；

$$\tau_a > \tau_c \quad (1)$$

W 試験体の場合には、水中硬化型接着樹脂- AFRP 版界面で剥離が生じている (写真-2 参照)。これは、この界面の付着性能が水中硬化型接着樹脂-コンクリート界面の付着性能やコンクリートのせん断強度よりも低いためであると考えられる。ここで、水中硬化型接着樹脂- AFRP 版界面の付着強度を τ_{w1} 、水中硬化型接着樹脂-コンクリート界面の付着強度を τ_{w2} とすると、各強度の大小関係は以下のように示される。

W 試験体の場合；

$$\tau_{w1} < \tau_{w2} < \tau_c \quad (2)$$

一方、W-S 試験体の場合には、水中硬化型接着樹脂-コンクリート界面で剥離を生じている。これは、砂付き処理を施すことにより τ_{w1} が改善され、 τ_{w2} を上回ったことによるものと考えられる。しかしながら、A 試験体と比較すると、かぶりコンクリートの損傷に伴う剥離には至っておらず、写真-2 に示すようにコンクリートの表層数 mm を付着した状態での剥離となっている。これは、コンクリート表面にプライマー処理が施されていないためであると考えられる。従って、各強度の大小関係は以下のように示される。

W-S 試験体の場合；

$$\tau_{w2} < \tau_{w1} < \tau_c \quad (3)$$

なお、ピーリング作用による剥離は、法線方向 (引張) と接線方向 (せん断) の作用力によって発生するものである。しかしながら、ここでは問題を単純化するために、剥離開始後に着目し接線方向力が卓越するものとして、模式的に検討を行った。今後は、法線方向と接線方向の合力が作用する場合について、詳細に検討したいと考えている。

4. まとめ

本研究では、水中接着補強工法による RC 梁の曲げ補強効果の改善を目的に、砂付き処理により表面を異形化した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まとめると、以下の通りである。

- 1) 砂付き処理を施した AFRP 版を用いて RC 梁の水中接着曲げ補強することにより、RC 梁の曲げ耐力向上効果を改善可能である。
- 2) ただし、水中接着の場合にはプライマー処理を施すことが困難であるため、気中接着の場合よりも付着性能が低い。
- 3) 砂付き処理の有無や施工条件により、剥離を生じる接着界面が異なるものの、補強材の剥離はいずれの場合もピーリング作用により発生する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋協会示方書・同解説，V 耐震補強編，1996.
- 2) 日本道路協会：道路橋協会示方書・同解説，V 耐震補強編，2002.
- 3) 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.1327-1332，2010.6
- 4) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.47-64，2001.8
- 5) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp. 91-109，2002.8
- 6) 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.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2007.