

論文 AFRP 補強材を用いた水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼす補強材幅の影響

工藤 雅史^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 本研究では、AFRP 補強材を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす補強材幅の影響を検討することを目的に、AFRP 補強材の断面積一定の下、曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。その結果、1) AFRP 補強材を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状は補強材幅によらず上縁コンクリート圧壊時までほぼ同様である、2) 施工条件や AFRP 補強材幅に関わらず AFRP 補強材とコンクリートとの付着は計算終局時まで十分に確保されている、3) 施工条件や補強材幅によらず AFRP 補強材はピーリング作用によって部分剥離が生じる傾向にある、ことなどが明らかになった。

キーワード: RC 梁, 水中接着補強, AFRP 補強材, 補強材幅

1. はじめに

近年、既設 RC 構造物の補修・補強工法として連続繊維シート（以後、FRP シート）接着工法の適用事例が増加しており、橋脚等の耐震補強にも数多く採用されている。一方、耐震補強を要する橋脚には河川橋脚も含まれているものの、FRP シート接着工法を適用するためには、仮締切工事を行って橋脚を乾燥状態にする必要があり、陸上での補強工事と比較して膨大な費用が必要となる。そのため、河川橋脚に関しては、その耐震補強がほとんど実施されていないのが現状である。これより、水中においても施工可能な FRP シート接着工法を開発することにより、河川橋脚の耐震補強工事費用を大幅に削減可能であるものと考えられる。

このような観点から、著者らは、事前にアラミド連続繊維シート（以後、AFRP シート）をエポキシ系樹脂で含浸硬化（FRP 化）させたアラミド連続繊維製版（以後、AFRP 版）を水中硬化型接着樹脂を用いて接着補強する工法（以後、水中接着補強工法）を考案している。既往の研究¹⁾では、提案の水中接着補強工法を適用することにより、RC 梁の曲げ耐力を一般的な気中接着補強工法の場

合同程度まで向上可能であることを明らかにしている。一方、水中接着補強に用いる接着材料やその施工・養生環境（以後、施工条件）は、気中接着補強の場合と全く異なるため、補強材の幅や厚さ等の条件が補強効果や付着性状に及ぼす影響も大きく異なる可能性があるものと考えられる。特に、補強材幅が小さい場合には接着面積が小さくなるため、付着性能が低下することなどが懸念される。

このようなことから、本研究では、AFRP シートもしくは AFRP 版（以後、総称して AFRP 補強材）を用いて気中もしくは水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす補強材幅の影響を検討することを目的に、AFRP 補強材の断面積一定条件下で、AFRP 補強材幅および厚さを変化させて曲げ補強した 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、本実験に用いた補強試験体の一覧を示している。補強試験体数は、AFRP 補強材の断面積一定条件下で、幅および厚さを変化させて気中もしくは水中接着曲げ補強した全 4 体である。なお、本実験では比較のた

表-1 補強試験体一覧

試験体名	補強材の種類	AFRP 補強材			断面積 (mm ²)	使用樹脂の種類	施工・養生環境
		目付量 (g/m ²)	設計厚 (mm)	幅 (mm)			
W15-W	AFRP 版	280	0.193	150	30.0	水中硬化型接着樹脂	水中
W10-W		415	0.286	100	28.6		
W15-A	AFRP シート	280	0.193	150	30.0	汎用含浸接着樹脂	気中
W10-A		415	0.286	100	28.6		

*1 北海道旅客鉄道(株) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 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講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博(工) (正会員)

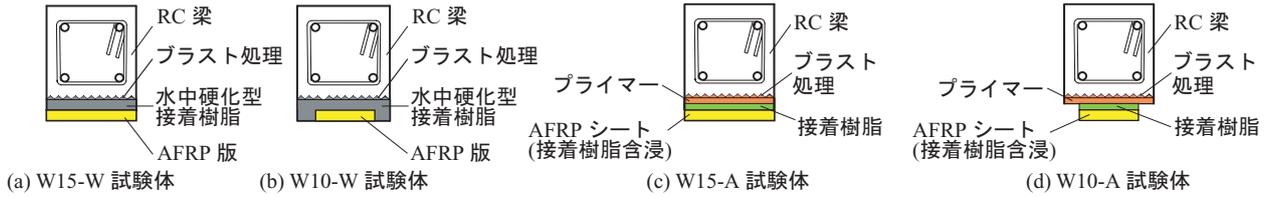


図-1 各試験体の接着概要

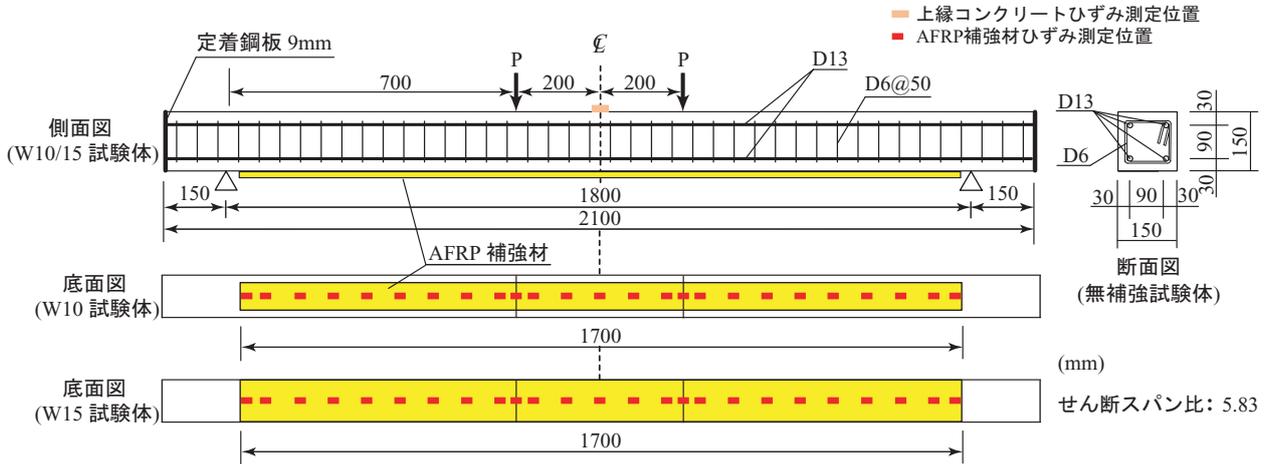


図-2 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

め無補強試験体についても実験を行っている。表中、試験体名の第1項目のWに付随する数値はAFRP補強材幅(cm)を示し、第2項目は施工・養生環境(A:気中, W:水中)を示している。また、水中接着補強の場合にはAFRP版と水中硬化型接着樹脂を用い、気中接着補強の場合にはAFRPシートと汎用の含浸接着樹脂を用いている。

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。各RC梁底面には、レイトンス除去および付着性能の向上を目的にブラスト処理(深さ1mm程度)を施している。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梁に直接接着している。なお、補強材幅が小さい場合には、AFRP版が水中硬化型接着樹脂に埋設される状態となっている。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節で述べることとする。

また、気中接着の場合には、ブラスト処理後、プライマー処理を施し指触乾燥状態に至った後、AFRPシートを含浸接着した。なお、ブラストおよびプライマー処理は、AFRP補強材幅が梁幅よりも小さい場合においても梁の全幅に施している。

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、断面寸法が150×150mmの矩形断面であり、純スパン長1.8mの複鉄筋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。梁軸方向の補強範囲はスパン中央部から両支点

表-2 AFRP材の力学的特性値(公称値)

目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (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
415	588	0.286			

の50mm手前までとしている。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、気中および水中接着補強試験体の場合で、それぞれ28.5、26.1MPaである。軸方向鉄筋の降伏強度は394MPaであった。表-2には、AFRP補強材の力学的特性値の一覧を示している。

表-3および表-4には、それぞれ本研究に用いた水中硬化型接着樹脂の材料組成および性状、力学的特性値の一覧を示している。なお、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。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」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)」²⁾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2.60MPaであった。この値は、本実験に用いたコンクリートの引張強度2.02MPaよりも十分大きいことより、面外方向への引張に対しては、十分な接着性能を有しているものと判断される。

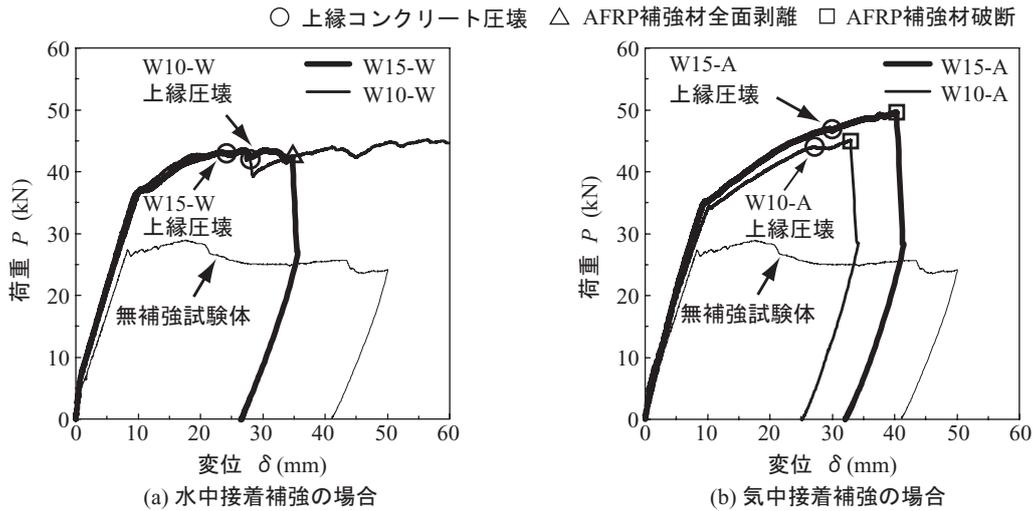


図-3 各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果の比較

表-3 水中硬化型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
概観	白色パテ状	暗灰色パテ状
比重	1.85	1.78
配合比	1:1	
可使時間	30分 (at. 25°C)	
硬化時間	2時間 (at. 25°C)	

表-4 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

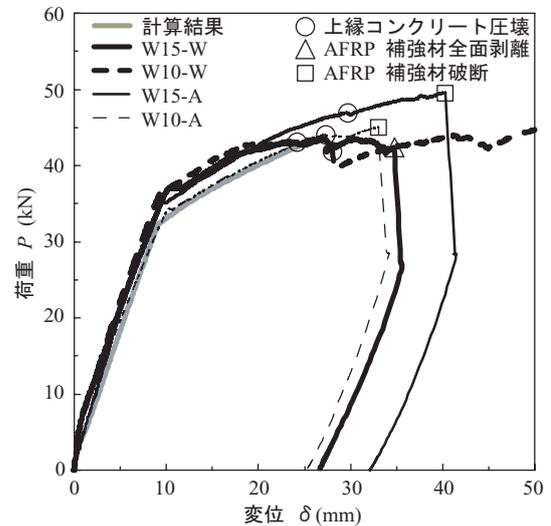


図-4 各試験体の荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較

2.2 RC 梁の水中接着補強方法および実験方法

RC 梁への AFRP 版の水中接着は下記の手順で行った。なお、AFRP 版と水中硬化型接着樹脂との付着性能を向上させるため、AFRP 版には 5 号珪砂を用いた砂付き処理を施している。

- 1) 水中硬化型接着樹脂の主剤および硬化剤を混合し、厚さ 4 mm 程度に成形する、
- 2) 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、
- 3) それを水槽内に設置された RC 梁の接着面に 2) を配置し、接着する、
- 4) その状態で 5 日間水中養生する、

である。また、気中接着補強の場合には、コンクリート表面にブラスト処理およびプライマー処理を施した後、含浸接着樹脂を用いて AFRP シートを接着している。

載荷実験は、RC 梁を単純支持状態で設置し、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて 4 点載荷法により行った。本実験の測定項目は、載荷荷重、スパン中央点変位 (以後、変位) および AFRP 補強材各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 梁のひび割れや補強材の剥離状況を撮影している。

3. 実験結果および考察

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を、補強材幅の影響に着目し、比較して示している。なお、本実験では上縁コンクリート圧壊後においても、変位の増加に伴って荷重が漸増するケースが見られた。従って、実測最大荷重の定義は、目視により上縁コンクリートの圧壊が確認され、かつ荷重の一時的な低下が見られた時点とした。

表-5 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
	計算結果 P_{yc} (kN)	実験結果 P_{ye} (kN)	荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算結果 P_{uc} (kN)	実験結果 P_{ue} (kN)	荷重比 P_{ue} / P_{uc}	
W15-W	32.2	37.1	1.15	42.6	42.9	1.01	上縁圧壊後剥離
W10-W		36.9	1.15	42.6	42.8	1.00	上縁圧壊後剥離
W15-A		35.2	1.09	43.0	46.8	1.09	上縁圧壊後破断
W10-A		34.3	1.07	43.0	44.0	1.02	上縁圧壊後破断

計算結果の破壊性状は全てコンクリート圧壊

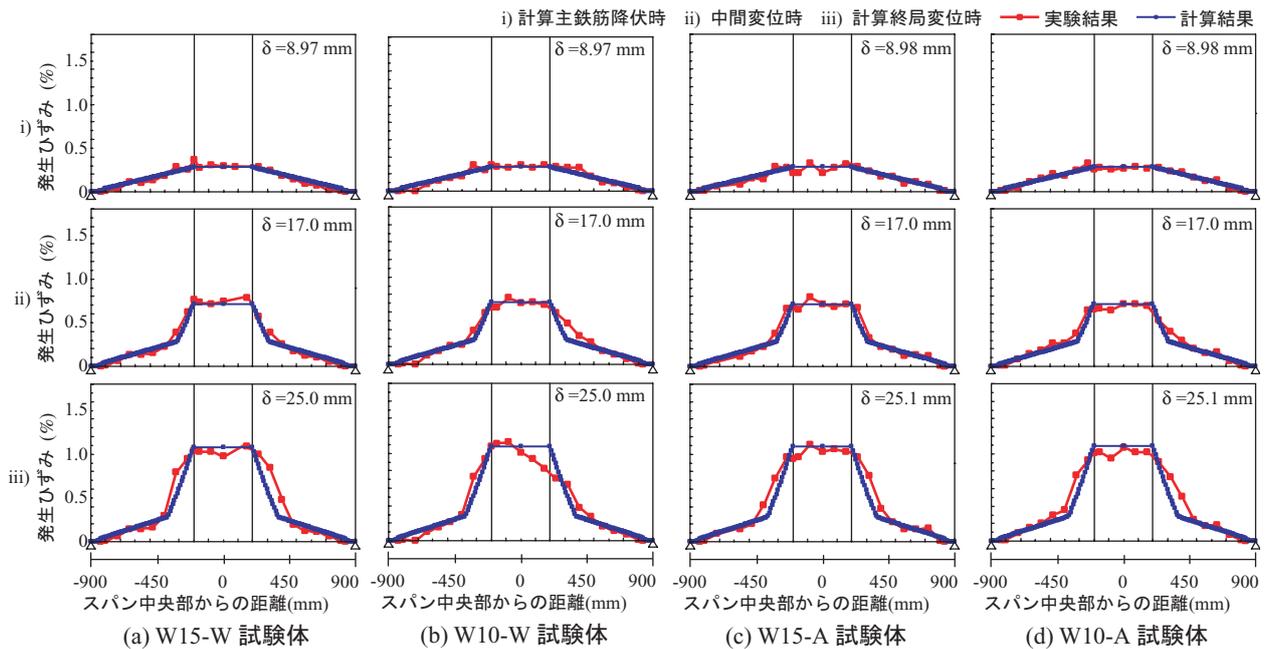


図-5 AFRP補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験および計算結果の比較

図より、水中接着補強の場合には、補強材幅によらず上縁コンクリートの圧壊までほぼ同様の耐荷性状を示していることが分かる。また、補強材幅の広いW15-W試験体では、上縁コンクリート圧壊後も荷重が低下せず、変位が $\delta = 35$ mmに到達した時点でシートの全面剥離により、荷重が急激に低下していることが分かる。

補強材幅の狭いW10-W試験体では、上縁コンクリートの圧壊に伴って荷重が5 kN程度低下するものの、変位の増加に対応して再度増大し、変位 $\delta = 66$ mmに到達した時点でシートの全面剥離により荷重が急激に低下した。なお、変位 $\delta = 50$ mm以降において、荷重はほぼ一定の値を示していることより、図には $\delta = 50$ mm以降の結果は示していない。

気中接着補強の結果より、載荷荷重は、補強材幅によらず上縁コンクリートの圧壊によりわずかに低下するものの再度増大し、最終的にはシート破断により急激に低下していることが分かる。なお、補強材幅の広い場合においてシート破断時の荷重および変位は大きい。

図-4には、荷重-変位関係に関する全試験体の実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に準拠し、かつAFRP補強材とコンクリートの完全付着を仮定して算出したものである。なお、計算では水中硬化型接着樹脂の剛性は考慮していない。また、表-5には、参考のために実験結果および計算結果の一覧を示している。ここで、実験結果の降伏荷重は、荷重-変位関係を参考にして、剛性勾配の急変部($\delta = 10$ mm)で主鉄筋が降伏しているものとして評価した。

図より、いずれの実験結果も計算終局時まで計算結果とほぼ同様の耐荷性状を示していることが分かる。また、全試験体において実測耐力が計算耐力を上回っていることより、計算結果は実験結果を安全側に評価しているものと判断される。なお、水中接着補強試験体は上縁圧壊後にシート剥離して荷重が急激に低下したのに対して、気中接着補強試験体はいずれも上縁圧壊後にシート破断によって荷重が急激に低下した。

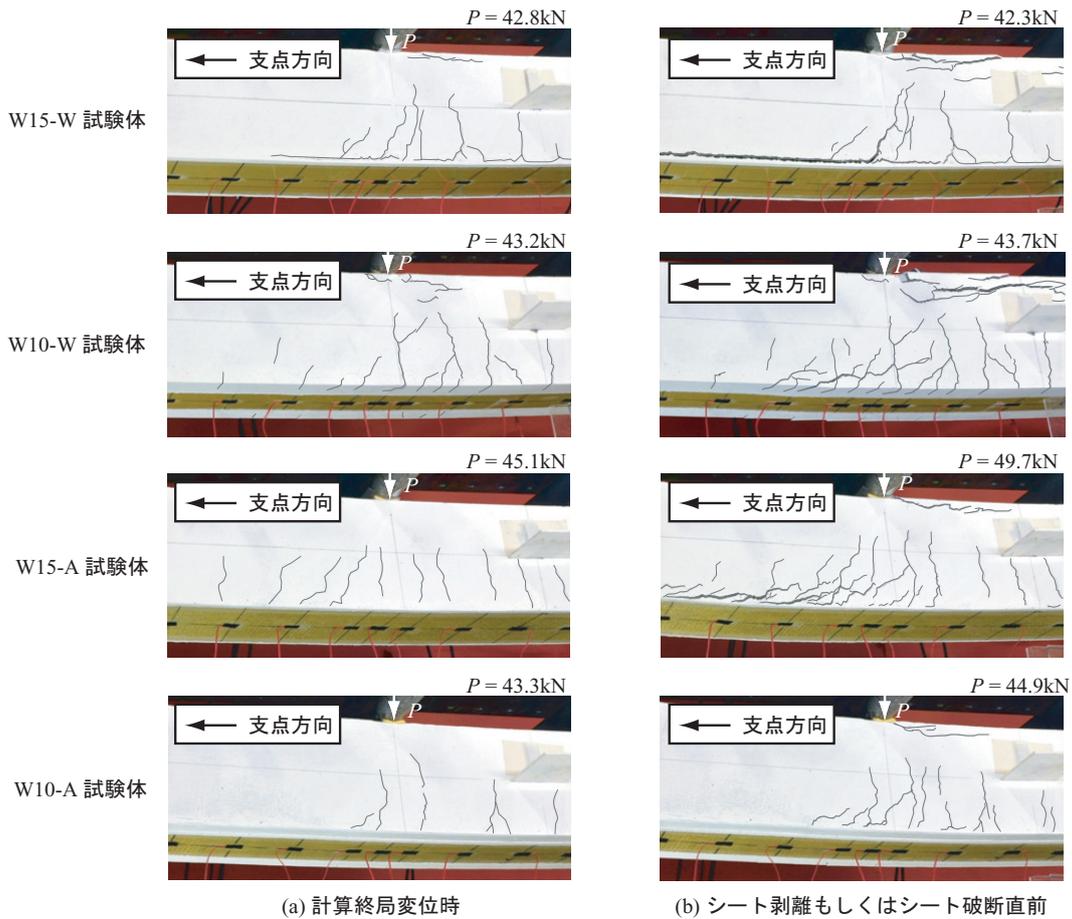


写真-1 計算終局時および破壊直前におけるひび割れ性状

3.2 AFRP 補強材のひずみ分布

図-5には、各変位時における AFRP 補強材の軸方向ひずみ分布に関する実験結果を計算結果と比較して示している。上段は計算主鉄筋降伏時、中段は中間変位時、下段は計算終局変位時のひずみ分布である。計算結果は前述した断面分割法の結果を基に算出した。なお、中間変位は計算主鉄筋降伏時および計算終局時の中間の値である。

図より、計算主鉄筋降伏時および中間変位時における実測ひずみ分布は、いずれの試験体においても計算ひずみ分布と概ね対応していることが分かる。計算終局変位時には、W15-W、W10/15-A 試験体の等せん断力区間において、一部の实測ひずみが計算ひずみよりも最大で3,000 μ 程度大きく示されている。また、W10-W 試験体の右側荷点近傍では、実測ひずみが計算ひずみよりも2,000 μ 程度小さく示されている。しかしながら、実測および計算ひずみは、全スパンに渡ってほぼ対応していることから、各試験体に接着された AFRP 補強材とコンクリートとの付着は、計算終局変位時まで十分に確保されているものと判断される。

3.3 梁側面のひび割れ性状

写真-1には、各試験体の計算終局変位時およびシート剥離もしくは破断直前におけるひび割れ分布性状を示

している。計算終局変位時の写真より、W15-W 試験体の場合には、梁側面に曲げおよび斜めひび割れの他、接着界面に水平ひび割れが見られる。また、W10-W 試験体の場合には、左側荷点周辺に発生した曲げおよび斜めひび割れが梁底面の AFRP 版近傍まで到達している。このように、水中接着試験体の場合には、計算終局時において AFRP 版の部分剥離が見られる。これに対して、気中接着した W10/15-A 試験体の場合には、水中接着試験体に見られた剥離の兆候は見られない。

AFRP 補強材の剥離もしくは破断直前の写真より、いずれの試験体の場合も、上縁コンクリートが著しく圧壊し、AFRP 補強材は下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れ先端部が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、部分剥離していることが分かる。最終的には、前述したように AFRP 補強材幅によらず、水中接着補強の場合には補強材の全面剥離、気中接着補強の場合には補強材の破断により荷重が大きく低下した。

3.4 AFRP 補強材の剥離抵抗性

前節までの検討では、各試験体の曲げ耐荷性状は上縁コンクリート圧壊時までほぼ同様であり、それらの実測曲げ耐力は断面分割法による計算曲げ耐力を上回ることを明らかにしている。しかしながら、上縁コンクリート圧

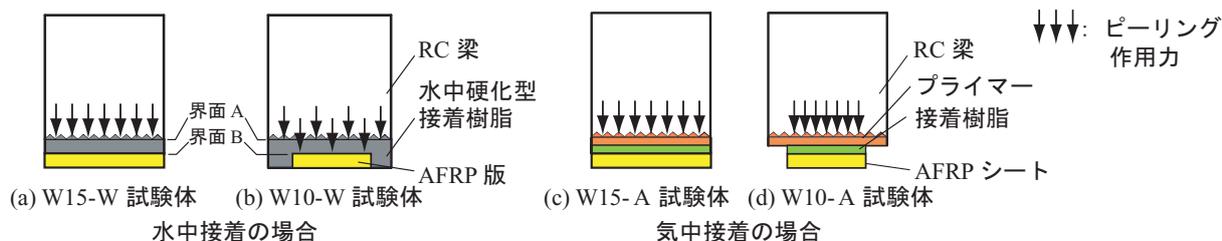


図-6 各試験体断面におけるピーリング作用力に関するモデル図

壊後においては、いずれの試験体もピーリング作用による部分剥離を示すものの、それらの変形性能や最終的な破壊形式は、補強材幅や施工環境によって大きく異なっている。ここでは、前節までの実験結果に基づき、各試験体における AFRP 補強材の剥離抵抗性について検討する。

図-6には、各試験体断面におけるピーリング作用力に関する模式図を示している。水中接着補強の場合において、補強材幅が梁幅と同等である W15-W 試験体の場合には、下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れは、写真-1 に示しているように、水中硬化型接着樹脂-コンクリート界面（以後、界面 A）に沿うようにして水平に支点方向に進展する。従って、この場合のピーリング作用力は、図-6(a) に示しているように主として界面 A に作用しているものと考えられる。

これに対して、補強材幅が小さい W10-W 試験体の場合には、写真-1 に示しているように、ひび割れが水中硬化型接着樹脂下面まで進展している。従って、この場合のピーリング作用力は、図-6(b) に示すように界面 A のみならず水中硬化型接着樹脂- AFRP 補強材界面（以後、界面 B）にも分散して作用しているものと推察される。

また、補強材幅が小さい場合には、水中接着施工時において AFRP 版の側端面が接着樹脂で被覆されており、直接水に曝されない状態になっている。これらのことより、補強材幅が小さい AFRP 版を用いて水中接着曲げ補強した RC 梁の場合には、補強材幅が大きい場合よりも AFRP 版の剥離抵抗性が高く、RC 梁の変形性能が大きく示されたものと判断される。

一方、気中接着補強の場合には、図-6(c), (d) に示しているように、補強材幅が小さい場合には接着面積が小さい。そのため、補強材幅が小さい場合のシート剥離に対する抵抗性は、補強材幅が大きい場合よりも低いものと考えられる。実験結果においても、補強材幅の小さい試験体において、主鉄筋降伏後の剛性勾配が小さく示されている。なお、前述のように気中接着補強した RC 梁の曲げ耐力は水中接着補強の場合よりも大きい。これは、気中接着補強の場合には、プライマー処理によりコンクリート表面が強化されていることなどによるものと推察される。

以上のことより、水中接着補強において AFRP 補強材

幅が小さい場合には、界面 A および B でピーリング作用力に抵抗するため、剥離抵抗性が向上し RC 梁の変形性能が大きくなるのに対し、気中接着補強の補強材幅が小さい場合には接着面積も小さくなるため、RC 梁の曲げ耐力性能も低下する傾向にあることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、AFRP 補強材を用いて気中もしくは水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐力性状に及ぼす補強材幅の影響を検討することを目的に、AFRP 補強材の断面積が一定の下、AFRP 補強材の目付量と幅を変化させ接着補強した 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) AFRP 補強材を用いて気中および水中接着曲げ補強した RC 梁の曲げ耐力性状は上縁コンクリート圧壊時までほぼ同様であり、圧壊後においては、気中接着の場合で荷重が数 kN 程度増大する傾向にある。
- 2) 施工条件や AFRP 補強材幅にかかわらず AFRP 補強材とコンクリートとの付着は計算終局時まで十分に確保されている。
- 3) 施工条件や補強材幅にかかわらず AFRP 補強材にはピーリング作用による部分剥離が生じる。なお、この部分剥離は気中接着補強試験体よりも水中接着補強試験体で早期に生じる傾向にある。
- 4) 水中接着補強と気中接着補強では補強材幅の剥離抵抗性におよぼす影響が異なり、水中接着補強では補強材幅の小さいことが剥離抵抗性を低下させる要因とはならない場合がある。

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, pp1327-1332, 2010.6
- 2) 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.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007