

論文 FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性能に及ぼす FRP 補強材の引張軸剛性と接着樹脂の影響

鹿嶋 辰紀^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 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、伸び性能の高い水中硬化型接着樹脂や、従来よりも引張軸剛性の大きい FRP 板を用いた水中接着曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を行った。その結果、1) 伸び性能に優れる水中硬化型接着樹脂を用いることにより曲げ耐荷性能が多少向上するものの、その補強効果は気中接着の場合よりも小さいこと、2) 水中接着補強する場合における補強材の剥離を抑制するためには、FRP 板の弾性係数もしくは補強量を大きく設定して引張軸剛性を大きくすることが有効であること、などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, FRP 板, 引張軸剛性, 水中接着曲げ補強, 水中硬化型接着樹脂

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚を対象に、耐震設計法の改定に伴う補強工事が盛んに行われている。また、その補強工法の 1 つとして連続繊維シート (以後、FRP シート) 接着工法が数多く採用されている。一方、耐震補強を必要とする構造物には当然のことながら河川橋脚も含まれている。しかしながら、河川橋脚の場合には、橋脚基部周辺の仮締切工事を行い、施工部を乾燥状態にするのが一般的である。そのため、陸上での補強工事と比較して膨大なコストが必要となることから、河川橋脚の補強工事はほとんど行われていないのが現状である。

従って、水中での施工が可能な FRP シート接着工法を開発することにより、河川橋脚の補強工事費用の大幅な削減が可能となり、その補強工事の推進が期待できるものと考えられる。著者らはこのことに着目し、予めアラミド繊維シート (以後、AFRP シート) にエポキシ系樹脂を含浸硬化した AFRP 板を水中硬化型接着樹脂を用いて接着補強する工法を考案した。

これまで、提案の水中接着補強工法の補強効果や AFRP 板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¹⁾。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、気中接着の場合に比較して AFRP 板が早期に剥離するため、その補強効果は小さいものとなることを明らかにしている。

その原因としては、1) 水中硬化型接着樹脂の伸び率 (終局ひずみ) が 0.77% と AFRP 板のそれよりも小さいため、AFRP 板ひずみの増大に伴って接着界面の樹脂が損傷することや、2) 水中接着の場合には、気中接着の場合と異なりコンクリート面のプライマー処理を施せないため、AFRP 板とコンクリートとの付着性能を十分に向上させることが困難であること、などが考えられる。

ここでは、上記の原因 1) に着目し提案の水中接着補強工法における FRP 板の付着性能の改善策として、i) 水中硬化型接着樹脂の伸び性能の改善、および ii) 引張軸剛性 $E \cdot t$ (E : 弾性係数, t : FRP 補強材厚) の大きい FRP 補強材の適用による発生ひずみの低減、に着目して検討を行うこととした。なお、FRP 補強材の引張軸剛性を大きくするためには、弾性係数の大きい補強材を用いることや補強量を増加させる方法が考えられるが、ここでは弾性係数の大きい補強材を用いることとした。

このような背景より、本研究では、従来よりも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、伸び性能の高い水中硬化型接着樹脂および AFRP 板よりも引張軸剛性の大きい炭素繊維板 (以後、CFRP 板) を用いた水中接着曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を行った。また、比較のため AFRP シートを気中接着する場合についても検討した。

表 - 1 試験体一覧

試験体名	FRP 補強材の種類	使用樹脂の種類	施工・養生環境
A-A		汎用含浸接着樹脂	気中
W-A-1	AFRP 補強材	水中硬化型接着樹脂 1	水中
W-A-2		水中硬化型接着樹脂 2	
W-C-1	CFRP 補強材	水中硬化型接着樹脂 1	

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。試験体名の内、第 1 項目は施工・養生環境 (A: 気中, W:

*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) 技術研究開発本部 技術開発センター 副センター長 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)

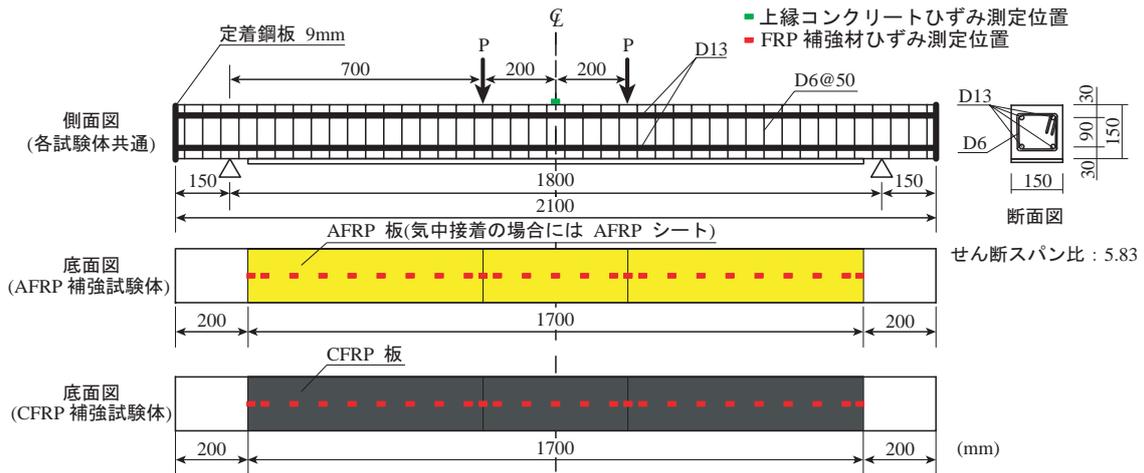


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表-2 FRP 補強材の力学的特性値の一覧 (公称値)

FRP 補強材の種類	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	引張軸剛性 (kN/mm)	破断ひずみ (%)
AFRP 補強材	392	0.193	2.06	118	22.8	1.75
CFRP 補強材	400	0.163	2.45	436	71.1	0.56

表-3 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

接着樹脂の種類	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び率 (%)
水中硬化型接着樹脂 1	44.4	22.5	9.3	0.77
水中硬化型接着樹脂 2	35.0	17.1	6.1	1.20

水中、第2項目は使用したFRP補強材の種類(A: AFRP補強材, C: CFRP補強材)、第3項目は水中硬化型接着樹脂の種類(1: 従来の水中硬化型接着樹脂, 2: 伸び性能の高い水中硬化型接着樹脂)を示している。なお、気中接着の場合には、AFRPシートを汎用の含浸接着樹脂を用いて接着している。また、ここで使用した樹脂は水中接着の場合においてFRP板製作時においても使用している。

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。本実験に用いた試験体は、断面寸法150×150mm、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。スターループには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補強材、もしくは400kN/mのCFRP補強材を接着している。FRP補強材の幅は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。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度はA-AおよびW-A-1試験体の場合は $f'_c = 28.2$ MPa、W-A-2およびW-C-1試験体の場合は $f'_c = 29.2$ MPaであり、軸方向鉄筋の降伏

強度は $f_y = 395$ MPaであった。表-2には、FRP補強材の力学的特性値の一覧を示している。表より、AFRP補強材およびCFRP補強材の保証耐力はほぼ同等であるものの、引張軸剛性はCFRP補強材が、AFRP補強材の3倍以上大きいことがわかる。

なお、水中接着する場合において、FRP板は1枚のFRPシートを用いて製作した。また、FRP板には既往の研究結果に基づき接着界面の付着性能向上を目的に粗面処理として砂付き処理を行った。FRP板の砂付き処理は、板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 250 g/m^2 程度である。また、コンクリートの接着界面処理としてはブラスト処理を行った。ブラスト処理は専用のブラストマシンを用いて深さ1mm程度の処理とした。

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、いずれも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²⁾」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水中硬化型接着樹脂1および2の場合でそれぞれ2.6および3.1MPaであった。これらの値は、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、

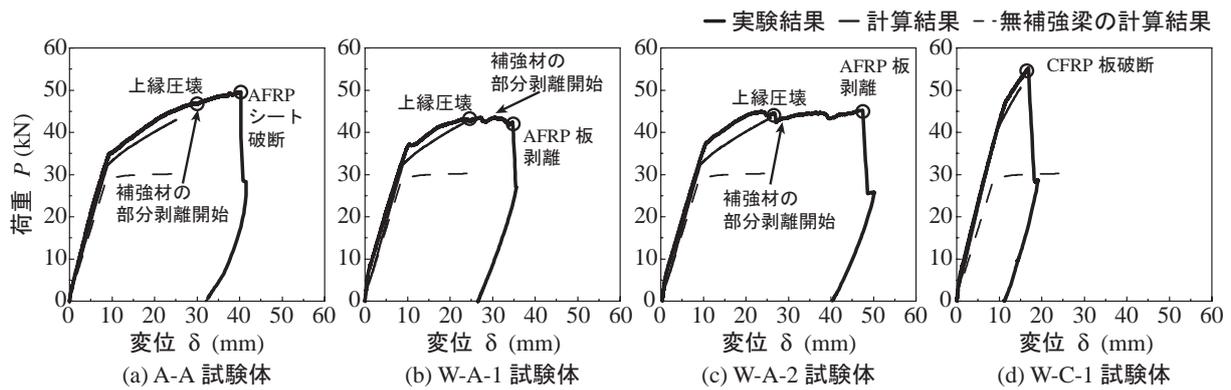


図-2 各試験体における荷重-変位関係の実験結果と計算結果の比較

表-4 実験結果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 P_{yc} (kN)	実験値 P_{ye} (kN)	荷重比 P_{ye} / P_{yc}	計算値 P_{uc} (kN)	実験値 P_{ue} (kN)	荷重比 P_{ue} / P_{uc}	
A-A	32.2	35.2	1.09	42.9	49.6	1.16	上縁圧壊後破断
W-A-1		37.2	1.16		43.6	1.02	
W-A-2		37.7	1.17		43.4	45.2	1.04
W-C-1	39.6	47.8	1.21	50.5	55.2	1.09	破断

本実験に用いた水中硬化型接着樹脂 1, 2 は接着材料としての性能を満足しているものと言える。

2.3 RC 梁の水中接着補強方法および実験方法

RC 梁の水中接着補強は、大型の水槽を用いて RC 梁を水没させた状態で行った。

水中接着補強における施工手順は以下の通りである。

- 1) 水中硬化型接着樹脂を混合し、厚さ 4 mm 程度に成形する。
- 2) 気中で FRP 板を所定の位置に配置し、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) 水槽内に設置された RC 梁の接着面に 2) を配置し圧着する。
- 4) 圧着した状態で 5 日間程度水中養生する。

なお、圧着は、専用の圧着装置を用いて、接着樹脂の厚さが 3 mm 程度になるように施工した。

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。本実験の測定項目は、荷重、スパン中央点変位 (以後、変位) および FRP 補強材各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 梁のひび割れやシートの剥離状況を連続的に撮影し、実験終了後には、RC 梁のひび割れを撮影した。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変位関係

図-2 には、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。計算結果は、土木学

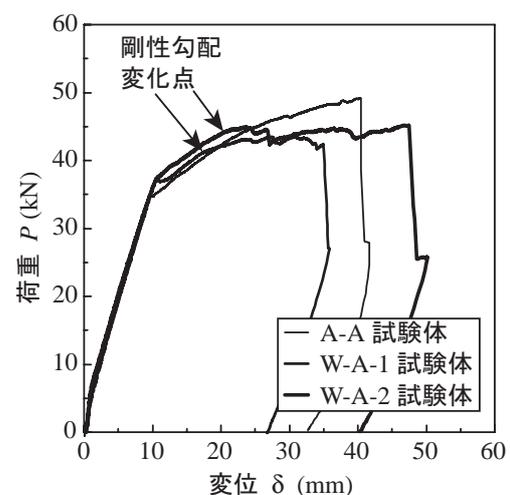


図-3 AFRP 補強 RC 梁に関する荷重-変位関係の比較

会コンクリート標準示方書³⁾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 FRP 補強材とコンクリートの完全付着を仮定している。また、水中硬化型接着樹脂の厚さや力学的特性は考慮していない。表-4 には参考のために、降伏時および終局時における各耐力の実験結果および計算結果を一覧にして示している。なお、実験値の降伏荷重は、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。

A-A 試験体の実験結果は、計算終局時まで計算結果とよく対応しており、また計算耐力、計算終局変位を大きく上回った時点で AFRP シートの破断により終局に至っている。実験では、計算耐力を 7 kN 程度上回る荷重レベ

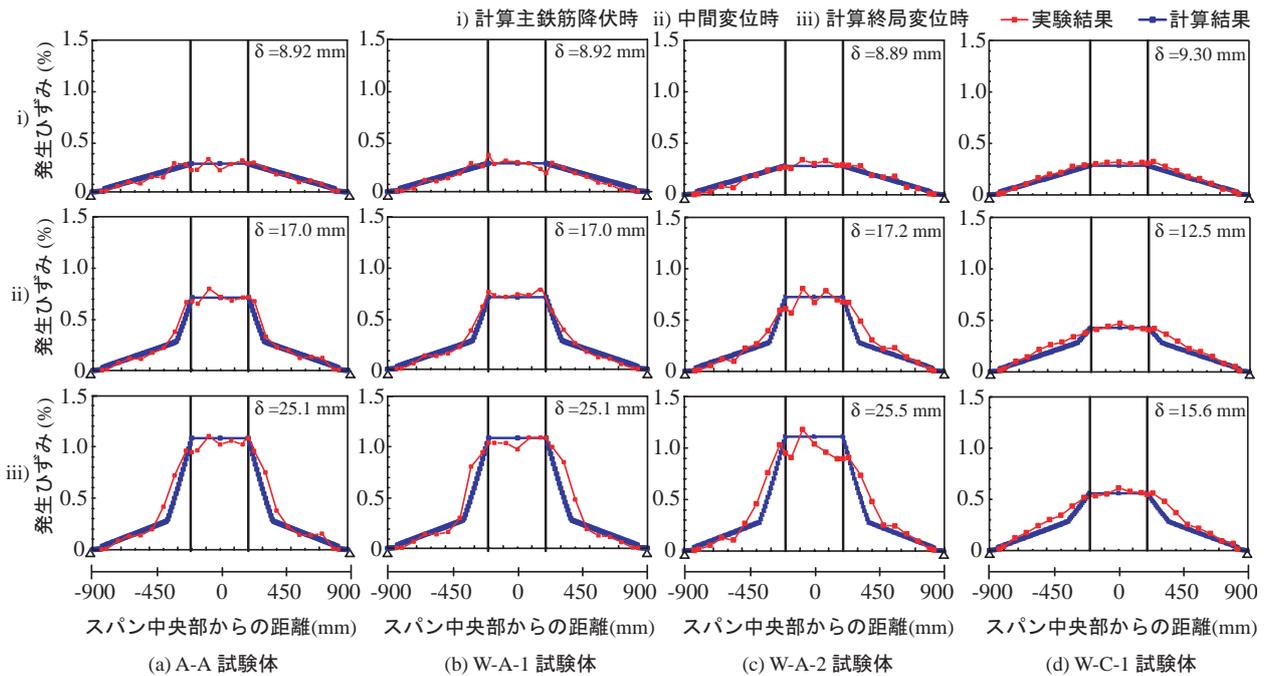


図-4 FRP 補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果および計算結果の比較

ルで上縁コンクリートが圧壊し、その後 AFRP シートの部分剥離を生じるものの、最終的にはシート破断により終局に至った。

W-A-1/2 試験体の実験結果は、ともに計算終局変位時まで計算結果とよく対応している。ただし、上縁コンクリートの圧壊は計算終局変位時近傍で発生しているものの、気中接着の場合よりも小さな荷重および変位レベルで発生している。また、上縁コンクリートの圧壊直後に AFRP 板の部分剥離が顕在化し、変位の増大に伴って剥離領域が拡大して最終的には全面剥離に至った。

W-C-1 試験体の実験結果は、計算終局変位時まで計算結果とよく対応している。その後、計算結果を 5 kN 程度上回る荷重レベルで CFRP 板の破断により終局に至っている。

図-3 には、AFRP 補強材を用いて気中もしくは水中接着した試験体の荷重-変位関係の実験結果を比較して示している。図より、気中接着した A-A 試験体の場合が水中接着した W-A-1/2 試験体の場合に比較して耐荷性能に優れていることがわかる。また、水中接着した試験体の結果を比較すると、W-A-1 試験体よりも W-A-2 試験体の方が最大荷重が大きいことがわかる。

なお、両試験体ともに主鉄筋降伏時に剛性勾配が大きく低下し、その後さらに勾配が低下している(図中、矢印)。これは、シートの部分剥離が発生していることを示しているものと考えられる。この剛性勾配の低下は、W-A-2 試験体の方が W-A-1 試験体よりも若干大きな荷重および変位で発生していることより、W-A-2 試験体の方が AFRP 板とコンクリート面との付着性能が高いものと判断される。

従って、水中硬化型接着樹脂の伸び性能を改善することにより、水中接着時における AFRP 板の付着性能を改善可能であることが明らかになった。

3.2 FRP 補強材の軸方向ひずみ分布性状

図-4 には、計算主鉄筋降伏時、中間変位時および計算終局変位時における FRP 補強材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、中間変位とは、計算主鉄筋降伏時と計算終局変位時の中間の変位である。また、計算結果は FRP 補強材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。

図より、いずれの試験体においても実験結果は計算結果とほぼ対応していることがわかる。従って、FRP 補強材とコンクリートとの付着は計算終局変位時までには確保されているものと判断される。特に、W-C-1 試験体の場合には、CFRP 補強材の引張軸剛性が大きいいため、発生ひずみが他の試験体の場合よりも小さくかつ等曲げ区間から支点側に緩やかに低下している。従って、部分剥離等の変状もほとんどなく完全付着に極めて近い状態にあるものと考えられる。

図-5 には、AFRP 補強材を用いて気中および水中接着した試験体を対象に AFRP 補強材の軸方向ひずみ分布の実験結果を比較して示している。ここでは、主鉄筋降伏時、中間変位時、計算終局変位時、および変位 $\delta = 30, 35, 40$ mm 時の結果に着目して示している。図より、計算終局時までにはいずれの試験体もほぼ同様の分布性状を示していることがわかる。しかしながら、 $\delta = 30, 35$ mm 時には、W-A-1 試験体の等曲げ区間におけるひずみが低下するとともに左側等せん断力区間における大きなひず

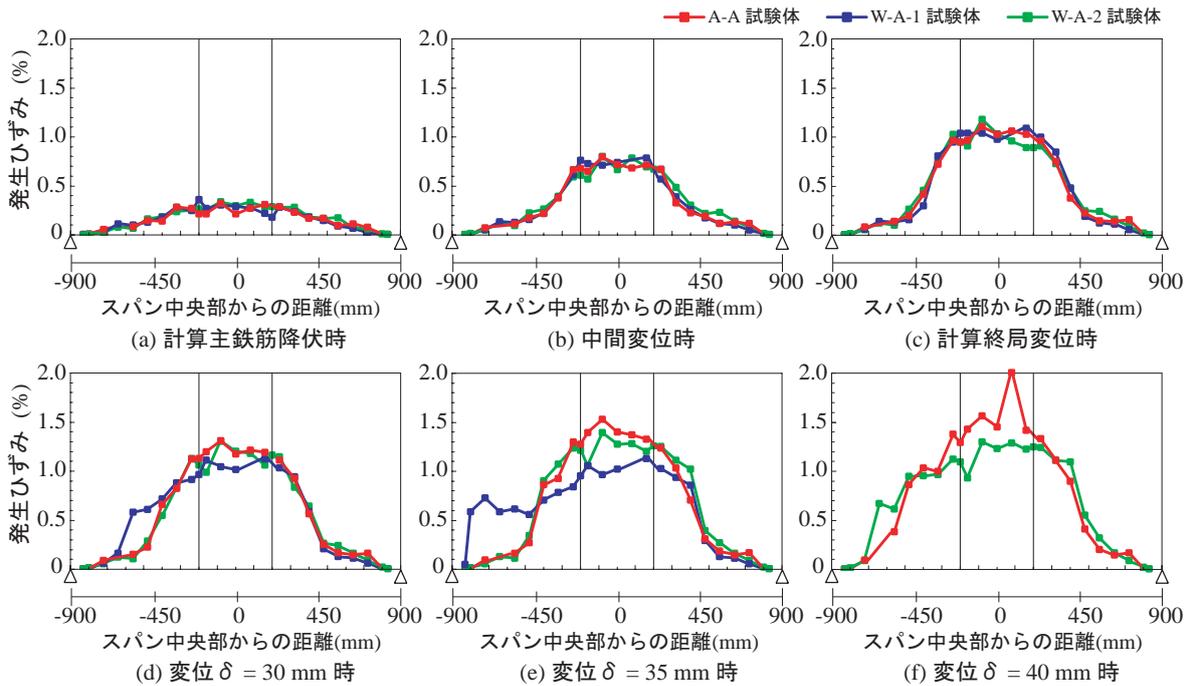


図-5 AFRP補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果の各変位時の比較

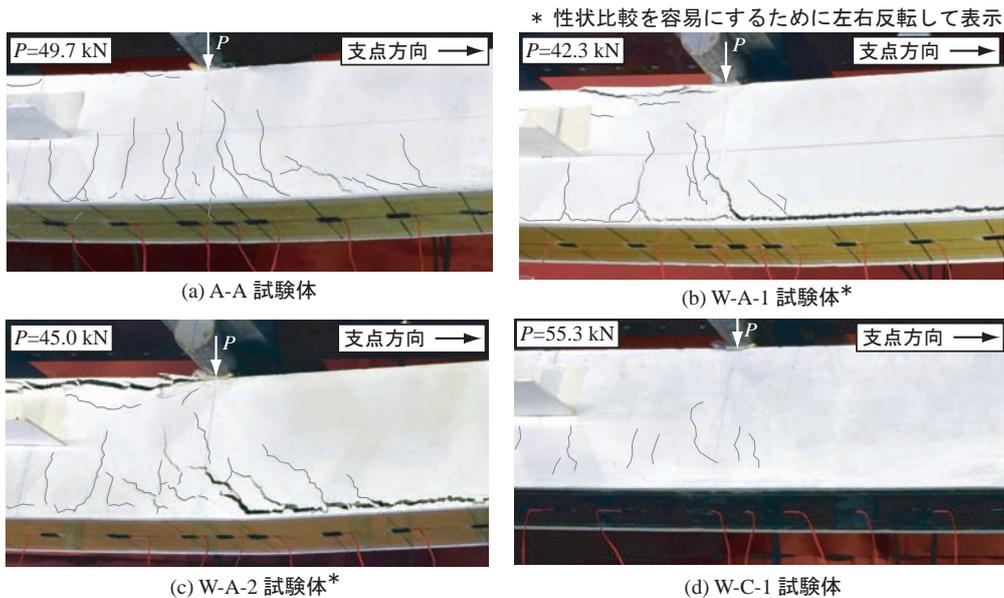


写真-1 各試験体の補強材剥離および破断直前のひび割れ性状

みの分布範囲が支点側に徐々に拡大していることがわかる。これは、W-A-1試験体が最も早期にシートの剥離を生じたことを示している。また、 $\delta = 35, 40$ mm における A-A および W-A-2 試験体の結果を見ると、 $\delta = 35$ mm において W-A-2 試験体の等曲げ区間のひずみが A-A 試験体よりも若干小さく、また等せん断力区間のひずみが若干大きく示されており、 $\delta = 40$ mm の場合にはその傾向がより顕著となっている。

以上のことより、AFRP補強材の剥離はW-A-1試験体の場合に最も早期に発生し、次いでW-A-2、A-Aの順であることが明らかになった。また、AFRP補強材の剥離開

始時には、等せん断力区間のひずみが増加する傾向がある。これは、後述するように、下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れがシートを下方へ押し出して引き剥がすピーリング作用によって発生することによるものと考えられる。

3.3 ひび割れ性状

写真-1には、各試験体の補強材剥離および破断直前のひび割れ性状の比較を示している。写真より、A-A試験体は等曲げ区間では上縁コンクリートの圧壊、荷重点近傍の下縁かぶりコンクリート部では斜めひび割れがシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用の兆候

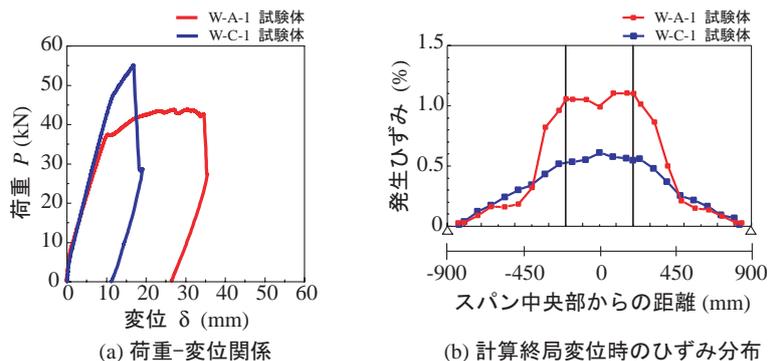


図-6 W-A/C-1 試験体の荷重-変位関係および計算終局変位時の軸方向ひずみ分布に関する実験結果の比較

が見られる。ただし、いずれも損傷は軽微である。

W-A-1/2 試験体は、ともに等曲げ区間における上縁コンクリートの圧壊、下縁かぶりコンクリート部におけるピーリング作用によるシートの部分剥離が A-A 試験体よりも顕在化していることがわかる。これは、A-A 試験体よりも早期に AFRP 板の剥離や上縁コンクリートの圧壊が生じたことによるものである。なお、W-A-1 試験体の場合が W-A-2 試験体の場合よりもピーリング作用に起因する斜めひび割れの本数が少ない。これは、W-A-1 試験体の場合には斜めひび割れが増加する前に下縁コンクリートと水中硬化型接着樹脂の接着界面に剥離が生じたためと考えられる。また、等曲げ区間のコンクリートと水中硬化型接着樹脂の接着界面近傍には水平ひび割れの発生が見られる。このような傾向は W-A-1 試験体の場合で強く現れている。このことは、W-A-1 試験体が曲げ耐荷性能が低いことと関連しているものと考えられる。

W-C-1 試験体の場合には、曲げひび割れの発生が認められるものの、極めて軽微である。これは、CFRP 板の引張軸剛性が大きいため終局時における梁のたわみ量が小さいことによるものである。

3.4 引張軸剛性の大きい補強材を用いる場合の耐荷挙動

前節までの検討において、AFRP 板よりも引張軸剛性が大きい FRP 板として CFRP 板を用いて補強した W-C-1 試験体の場合には、AFRP 板を用いる場合に比べて梁に発生するひび割れが軽微であり、かつ CFRP 板は破断に至るまで剥離の兆候を全く示していないことが明らかになっている。

これは、本実験に用いた CFRP 板の引張軸剛性が AFRP 板の場合よりも 3 倍以上大きいため、CFRP 板を用いる場合には、1) 梁の曲げ剛性が大きくなるため、たわみが抑制され、2) その結果、剥離に影響を及ぼすひび割れの発生も軽減され、3) さらに、補強材の発生ひずみが水中硬化型接着樹脂の終局ひずみよりも小さい、ことによるものと推察される。

図-6 には、参考のために W-A-1 および W-C-1 試験体に関する荷重-変位関係および計算終局変位時の補強材

の軸方向ひずみ分布に関する実験結果を比較して示している。図より、W-C-1 試験体の場合が W-A-1 試験体の場合よりも梁の変位量や FRP 補強材の発生ひずみが小さいことがわかる。

以上のことより、水中接着補強時における補強材の剥離を抑制するためには、補強材の引張軸剛性を大きくすることが有効であるものと判断される。なお、本実験では、弾性係数が大きい CFRP 補強材を用いることにより引張軸剛性を大きくしているが、従来の AFRP 板の補強量を増加させて引張軸剛性を大きくする場合においても同様の改善効果が得られるものと考えられる。

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、伸び性能の高い水中硬化型接着樹脂および引張軸剛性の大きい FRP 板を用いた水中接着曲げ補強 RC 梁の静荷重実験を行った。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) 伸び性能に優れる水中硬化型接着樹脂を用いることにより曲げ耐荷性能が多少向上するものの、その補強効果は気中接着の場合よりも小さい。
- 2) 水中接着補強する場合における補強材の剥離を抑制するためには、弾性係数が大きい補強材を用いるか、もしくは補強量を増加させてその引張軸剛性を大きくすることが有効である。

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 梁の静荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, pp. 1327-1332, 2010.
- 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], 土木学会, 2007.