

論文 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

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・栗橋 祐介^{*3}

要旨: 本実験では、水中硬化型接着樹脂と AFRP 版を用いた水中接着補強工法による RC 梁の曲げ補強効果を検討することを目的に、提案の水中接着補強工法で曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。その結果、1) 提案の方法で水中接着補強した場合における AFRP 版とコンクリートの接着強度は、コンクリートの引張強度よりも大きい、2) 提案の水中接着補強工法により RC 梁の曲げ耐力を向上可能である、3) 終局時には、水中硬化型接着樹脂とコンクリートの界面剥離が起因となって荷重低下に至る、ことなどが明らかになった。

キーワード: AFRP 版, 水中接着補強, RC 梁, ピーリング作用

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、道路事業においては、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、耐震補強工事に先立って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、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。インドネシア周辺諸国で頻発する大地震や、我が国では首都直下型地震の発生が危惧され、また社会資本整備予算の削減も予定されていることから、河川橋脚の簡易かつ合理的な耐震補強工法の開発は喫緊の課題となっている。

近年、水中においても硬化し、十分な付着性能を發揮できる接着樹脂(以下、水中硬化型接着樹脂)が開発され、一部で実用段階に至っている。著者らは、このことに着目し、事前にエポキシ系樹脂で含浸硬化(FRP 化)したアラミド繊維製版(以後、AFRP 版)を上記の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)を用いた河川橋脚の耐震補強工法を考案した。この補強工法の大きなメリットは、水中での施工が可能であるため、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であるところにある。

なお、過去の研究では、芦野ら^{3)~5)}や根元ら^{6),7)}により炭素繊維を格子状に成形した CFRP グリッドを水中適用型エポキシ樹脂を用いて接着する補強工法が提案されている。しかしながら、この場合には、補強材が格子状であるため耐震補強で要求される大きな補強量に対応することが困難な場合があるものと考えられる。一方、本研

究における提案工法では補強材が面状であるため、積層化によって耐震補強レベルの補強量にも比較的容易に対応可能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、水中硬化型接着樹脂と AFRP 版を用いた水中接着補強工法による RC 梁の曲げ補強効果を検討することを目的に、提案の水中接着補強工法で曲げ補強した 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、無補強の他、AFRP 補強材の種類および施工・養生環境を変化させた全 4 体である。試験体名の内、第 1 項目は補強材の種類(S: シート, P: FRP 版)、第 2 項目は施工環境(A: 気中, W: 水中)を示している。

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。試験体は、断面寸法 150 × 150 mm、純スパン長 2.1 m 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 50 mm 間隔で配置している。梁の下面には、保証耐力 588 kN/m の AFRP シートもしくは AFRP 版を接着している。なお、本研究では、AFRP シートおよび AFRP 版を総称して AFRP 補強材と呼ぶこととする。こ

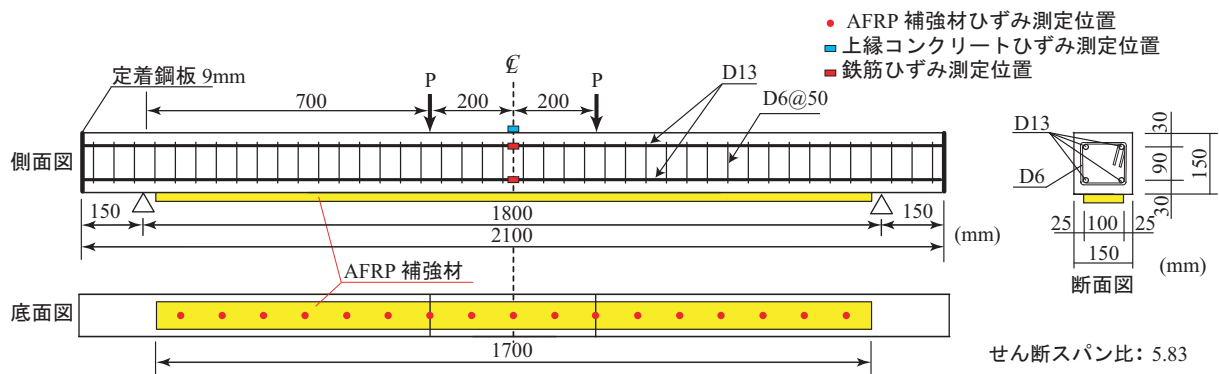
表-1 試験体一覧

試験体名	補強材の種類	使用樹脂の種類	施工・養生環境
N	無補強	-	-
S-A	AFRP シート	気中用接着樹脂	気中
P-A	AFRP 版	気中用接着樹脂	気中
P-W	AFRP 版	水中硬化型接着樹脂	水中

*1 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)

*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 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 AFRP 補強材の力学的特性値 (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 (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

これらのAFRP補強材の幅は100mm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、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補強材が剥離する曲げ圧壊型となるように設計した。設計では、著者らの既往の研究⁸⁾において提案したFRP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26.9MPaであり、軸方向鉄筋の降伏強度は380MPa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。

2.2 実験方法

実験ではRC梁を単純支持状態で設置し、容量500kNの油圧ジャッキと鋼製の荷重治具(荷重点間隔400mm)を用いてスパン中央部に荷重した。

本実験の測定項目は、荷重、荷重点変位(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。

2.3 AFRP 補強材の接着方法

AFRP補強材の接着に先立ち、RC梁底面におけるコン

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	
可使用時間	30分(at. 25℃)	
硬化時間	2時間(at. 25℃)	

表－4 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値

	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

クリート表面のレイタンスをコンクリートサンダーを用いて除去した。また、AFRP版の製作の際には、一般に用いられている気中施工用の含浸接着樹脂を用いて、所定の寸法に裁断したAFRPシートに樹脂を含浸硬化した。

気中補強の場合には、プライマー処理を施した後、上記と同種の含浸接着樹脂を用いてAFRPシートもしくはAFRP版を接着した。

水中接着補強の場合には、大型の水槽を用いRC梁を水没させた状態で施工を行った。RC梁はAFRP版接着面である底面を上側にして設置した。なお、現在のところ水中におけるプライマー処理は不可能であるため、プライマー処理は施していない。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、外観は主剤および硬化剤ともにパテ状である。表－3および表－4には、それぞれ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。水中接着補強における施工手順は以下の通りである。すなわち、

- 1) 水中硬化型接着樹脂の主剤および硬化剤を混合する、
- 2) 均一に混合された接着樹脂を厚さ4mm程度でかつRC梁底面の補強材接着面寸法と同程度となるように

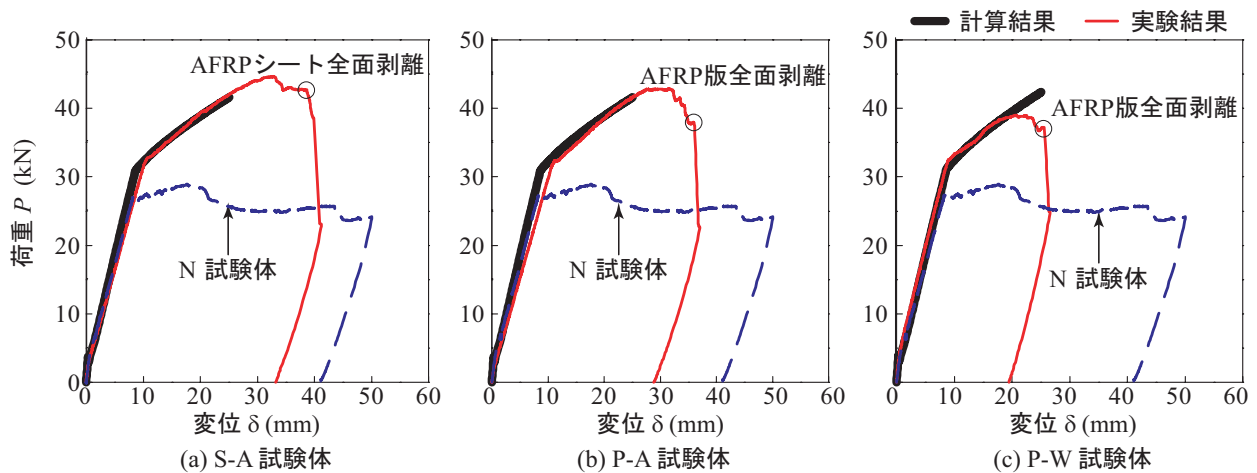


図-2 各補強試験体の荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較

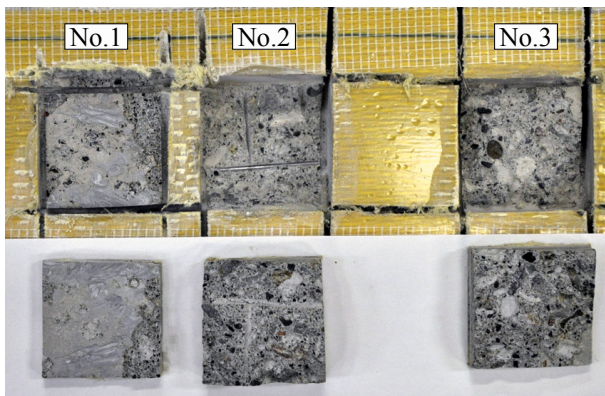


写真-1 試験終了後における破壊面の状況

表-5 接着試験結果

	No.1	No.2	No.3	平均
接着強度 (MPa)	2.0	3.0	2.8	2.6

成形する、

- 水槽内に設置されたRC梁の接着面に成形後の接着樹脂を敷設しコンクリート面に圧着する、
- AFRP版をRC梁底面の所定の位置に敷設し接着樹脂に圧着する、
- 圧着した状態で1週間程度水中養生する、である。

2.4 水中硬化型接着樹脂の接着性能

前節の水中接着補強で使用した水中硬化型接着樹脂とAFRP版およびコンクリート面との接着性能を確認するため、市販のコンクリート版を用いて接着試験を行った。接着試験は土木学会「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」⁹⁾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)」に準拠して実施した。すなわち、

- 1) 予め水中に浸漬したコンクリート版に水中硬化型接

- 着樹脂を用いてAFRP版を接着し1週間程度水中養生した後、コンクリート版を気中に引き上げる、
- 2) AFRP版表面に鋼製治具(接着面寸法40×40mm)を接着し、接着樹脂硬化後に鋼製治具の周囲を切断する、
- 3) 専用の接着試験装置を用いて鋼製治具を接着面と垂直方向に引き上げる、である。

写真-1および表-5には、接着試験後の破壊面の状況および接着強度の一覧を示している。写真-1より、No.1においては水中接着樹脂の引張破壊が見られるものの、No.2およびNo.3においては、接着面全面に渡りコンクリートの引張破壊となっていることが分かる。表-5に示すように、接着強度の平均値は2.6MPaである。この値は、一般的なコンクリート(圧縮強度 $f'_c=24$ MPa程度)の引張強度よりも高いことより、本実験に用いた水中硬化型接着樹脂は垂直方向の引張に対しては、十分な接着性能を有しているものと判断される。

3. RC梁の静載荷実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各補強試験体の実験結果を計算結果および無補強試験体の実験結果と比較して示している。なお、水中接着補強試験体は水中養生後、気中に引き上げてひずみゲージなどを貼り付けた後、同日中に実験装置にセットして載荷実験を行った。また、表-6には実験および計算結果の一覧を示している。ここで、計算結果は前述の実験時におけるコンクリートの圧縮強度、鉄筋の引張試験結果およびAFRP補強材の公称の力学的特性を適用し、AFRP補強材とコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法により曲げモーメント-曲率関係を求めることによって評価している。断面分割は要素長を約5mmとし、変位はスパン方向の分割を一要素長100mmとし、線

表-6 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	実験結果	荷重比	計算結果	実験結果	荷重比	
	P_{yc} (kN)	P_{ye} (kN)	P_{ye} / P_{yc}	P_{uc} (kN)	P_{ue} (kN)	P_{ue} / P_{uc}	
S-A	31.3	32.4	1.04	42.8	44.7	1.04	上縁コンクリート圧壊後 補強材剥離
P-A		32.1	1.03		42.9	1.00	
P-W	31.6	32.5	1.03	43.6	39.0	0.89	補強材剥離

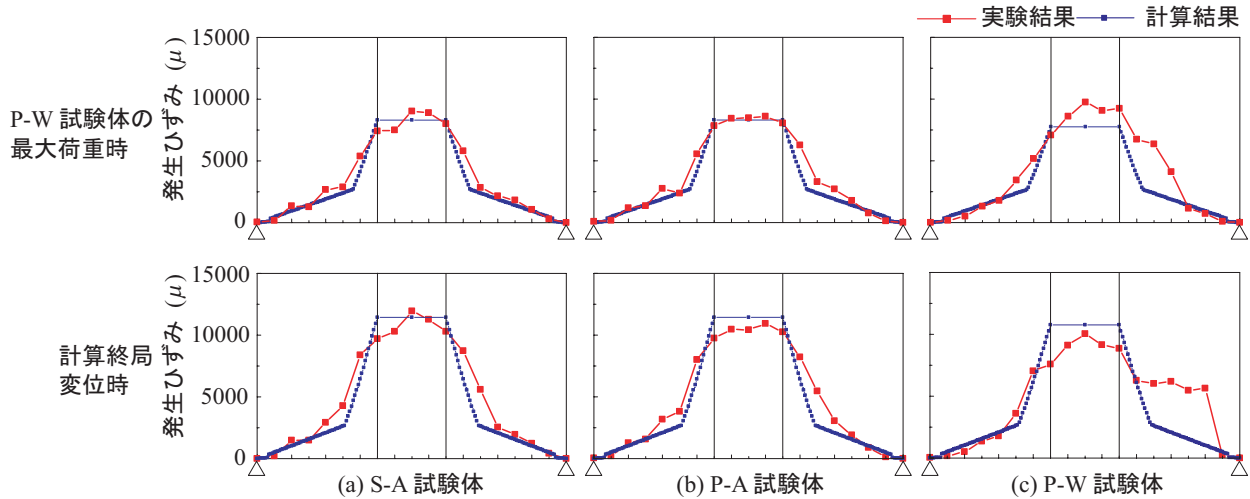


図-3 AFRP 補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果および計算結果の比較

形な曲率変化を仮定して算定している。なお、P-W 試験体の場合には、水中硬化型接着樹脂の厚さが 4 mm 程度であったことより、梁の断面高さが他の試験体よりも 4 mm 大きいものと仮定して計算した。各試験体の荷重-変位曲線の計算は、上縁コンクリートが終局圧縮ひずみ $\epsilon_{cu} = 3,500 \mu$ に至った時点で終了している。

図より、いずれの試験体も AFRP 補強材を用いて曲げ補強することにより、主鉄筋降伏後も荷重が増加し、無補強試験体に比較して曲げ耐荷性能が向上していることが分かる。気中で補強した S/P-A 試験体の場合には、AFRP 補強材の種類にかかわらず実測耐力が計算耐力を上回り、上縁コンクリートが圧壊した後補強材の剥離に至っている。従って、これらの試験体の破壊形式は、前述の破壊形式予測式による結果と同様であり、曲げ圧壊型であると判断できる。

これに対し、水中で補強した P-W 試験体の場合には、実測耐力が計算耐力に到達する前に AFRP 版が剥離している。また、上縁コンクリートも圧壊には至っていない。従って、P-W 試験体の場合には、S/P-A 試験体の場合と異なり、AFRP 版の剥離が先行する剥離破壊型であると判断できる。なお、表-6 に示すように P-W 試験体の最大荷重の実測値と計算値の比（荷重比）は 0.89 であった。

3.2 AFRP 補強材のひずみ分布性状

図-3 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。なお、計算結果は前述した断面分割法の結果を基にスパン方向に 10 mm 間隔で AFRP 補強材のひずみを算出して得られたものである。なお、ここでは、P-W 試験体の最大荷重時 ($P_{ue} = 39 \text{ kN}$) と計算終局変位時の結果について示している。

図より、気中接着した S/P-A 試験体の場合には、計算終局変位時まで実験結果が計算結果とほぼ対応していることが分かる。従って、AFRP 補強材とコンクリート面との付着は、計算終局変位時まで十分に確保されているものと考えられる。

一方、水中接着した P-W 試験体の場合には、最大荷重時において等曲げ区間および右側等せん断力区間の実験結果が計算結果を大きく上回っていることが分かる。これは、等曲げ区間において水中硬化型接着樹脂に曲げひび割れが発生・開口したことで局部的に実測ひずみが増加したためと考えられる。すなわち、前述のように水中硬化型接着樹脂の引張強度はコンクリートの引張強度の 5 倍程度以上大きいため、水中硬化型接着樹脂のひび割れ近傍における AFRP 補強材に局部的にひずみが集中し

i) P-W 試験体の最大荷重時, ii) 計算終局変位時, iii) 全面剥離直前

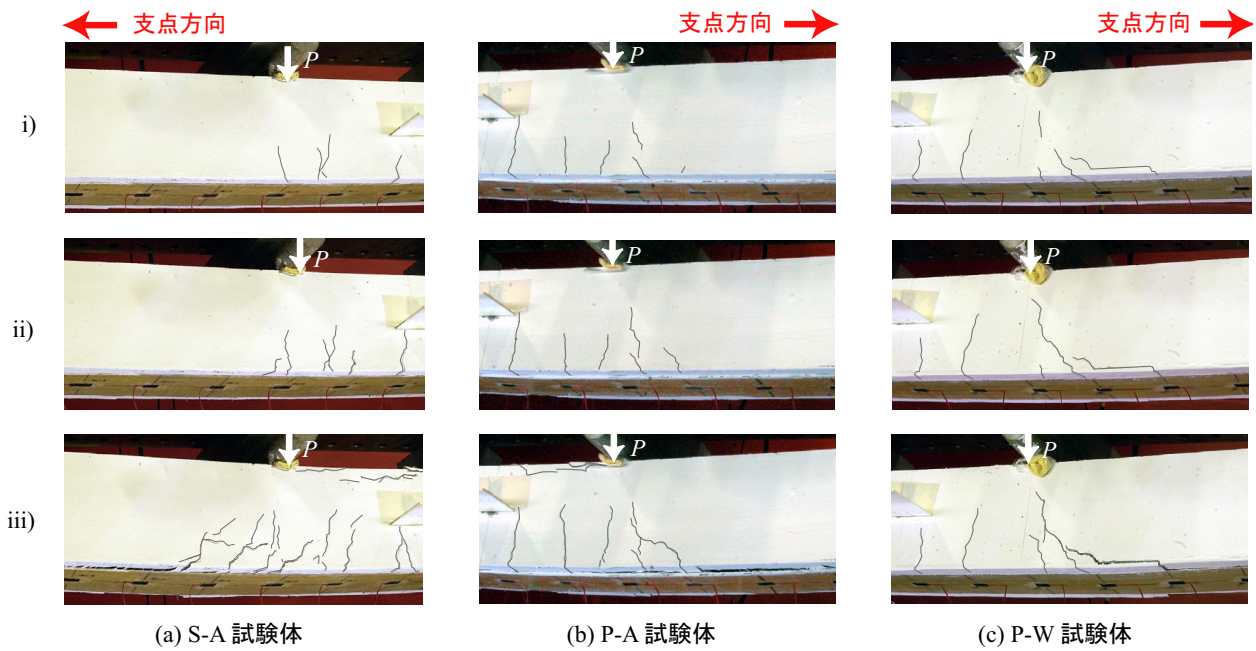


写真-2 梁側面のひび割れおよび下面における補強材の剥離性状

たものと推察される。

また、右側等せん断力区間においては、AFRP 補強材がコンクリート面から部分的に剥離していることを示しているものと考えられる。後述のとおり、実験においては下縁かぶりコンクリート部に生じた斜めひび割れの先端部が、補強材を下方に押し出して引き剥がすピーリング作用が発生していることを確認している。この傾向は、計算終局変位時においてより顕在化しており、AFRP 補強材の剥離範囲がより支点方向に進展していることが分かる。

3.3 AFRP 補強材の剥離性状

写真-2には、実験時における梁側面のひび割れおよび AFRP 補強材の剥離性状を示している。ここでは、i) P-W 試験体の最大荷重 ($P_{ue} = 39 \text{ kN}$) 時, ii) 計算終局変位時, iii) 全面剥離直前について示している。

写真より、S/P-A 試験体の場合には、等曲げ区間および 載荷点近傍に曲げひび割れの発生が見られるものの、計算終局時まで AFRP 補強材の剥離の兆候は認められない。全面剥離直前においては、両試験体ともに等曲げ区間では上縁コンクリートが圧壊しており、等せん断力区間における下縁かぶりコンクリート部には斜めひび割れの先端部が 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、部分剥離を生じていることが分かる。

これに対し、P-W 試験体の場合には、同試験体の最大荷重時において下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れが開口し、斜めひび割れの先端部から支点方向に水平ひび割れが進展していることが分かる。また、水平ひび割れの先端部は、斜め下方に進展し、水中硬化

型接着樹脂と AFRP 版との接着界面に進展している。これらのことは、P-W 試験体における補強材の剥離は、1) ピーリング作用によりコンクリートと水中硬化型接着樹脂との界面において発生し、2) その後水中硬化型接着樹脂と AFRP 版との界面に進展することを示している。このような AFRP 版の剥離性状は、計算終局変位時、全面剥離直前と徐々に顕在化していることが分かる。

剥離がコンクリートと水中硬化型接着樹脂との界面から進展した原因の一つとして、コンクリート表面にプライマー処理が施されていないことが考えられる。しかしながら、現状では水中におけるプライマー処理は困難である。従って、コンクリートと水中硬化型接着樹脂の界面の付着性能を高めるためには、コンクリート表面の異形化等の処理を行う必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、水中硬化型接着樹脂と AFRP 版を用いた水中接着補強工法による RC 梁の曲げ補強効果を検討することを目的に、水中接着補強工法で曲げ補強した 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) 水中硬化型樹脂を用いて接着した AFRP 版とコンクリートの接着強度は 2.6 MPa であり、通常のコンクリートの引張強度よりも大きい。
- 2) 提案の水中接着補強工法は RC 梁の曲げ耐力を向上可能であり、水中接着補強 RC 梁の荷重比 (実測耐力/計算耐力) は 0.89 であった。

- 3) ただし、気中で補強した場合よりも小さな荷重レベルでコンクリートと水中硬化型接着樹脂の界面において剥離が生じた。これは、コンクリート表面がプライマー処理されていないことが原因の一つであると考えられる。
- 4) コンクリートと水中硬化型接着樹脂界面の付着性能を高めるためには、コンクリート表面に異形化等の処理を施す必要があると考えられる。

今後は、コンクリート表面処理の影響や水中硬化型接着樹脂の改良も含めてさらなる検討を実施する予定である。

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) 芦野孝行，川瀬義行，呉 智深，岩下健太郎：水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1123-1128，2001.7
- 4) 芦野孝行，川瀬義行，呉 智深，上原 陽：水中適用型 FRP グリッド接着工法のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1555-1560，2002.6
- 5) 芦野孝行，呉 智深，根本正幸，中島広三：水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の圧縮補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1879-1884，2003.7
- 6) 根本正幸，川瀬義行，呉 智深，岩下健太郎：水中適用型高流動エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1633-1638，2008.7
- 7) 根本正幸，坂本宏司，呉 智深，岩下健太郎：水中適用型エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能に及ぼす補強量の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1459-1464，2009.6
- 8) 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
- 9) 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.