

FRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性能に及ぼす FRP 補強材および接着樹脂の材料特性の影響

Effects of material properties of FRP sheet and adhesive on load-carrying capacity of flexural reinforced RC beam
with submerged FRP plate bonding method

室蘭工業大学大学院 博士前期課程○ 学生員 鹿嶋 辰紀 (Tatsunori Kashima)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

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、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こと、などが考えられる。

ここでは、上記の 1) に着目し提案の水中接着補強工法における AFRP 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率の改善、および ii) 高弾性 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。

このようなことより、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、伸び性能の高い水中硬化型接着樹脂および AFRP 板よりも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。

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	AFRP	汎用含浸接着樹脂	気中
W-A-1		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	水中硬化型接着樹脂 1	

表-2 FRP 補強材の力学的特性値 (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)	軸剛性 (kN/mm)	破断ひずみ (%)
AFRP	392	0.193	2.06	118	22.8	1.75
CFRP	400	0.163	2.45	436	71.1	0.56

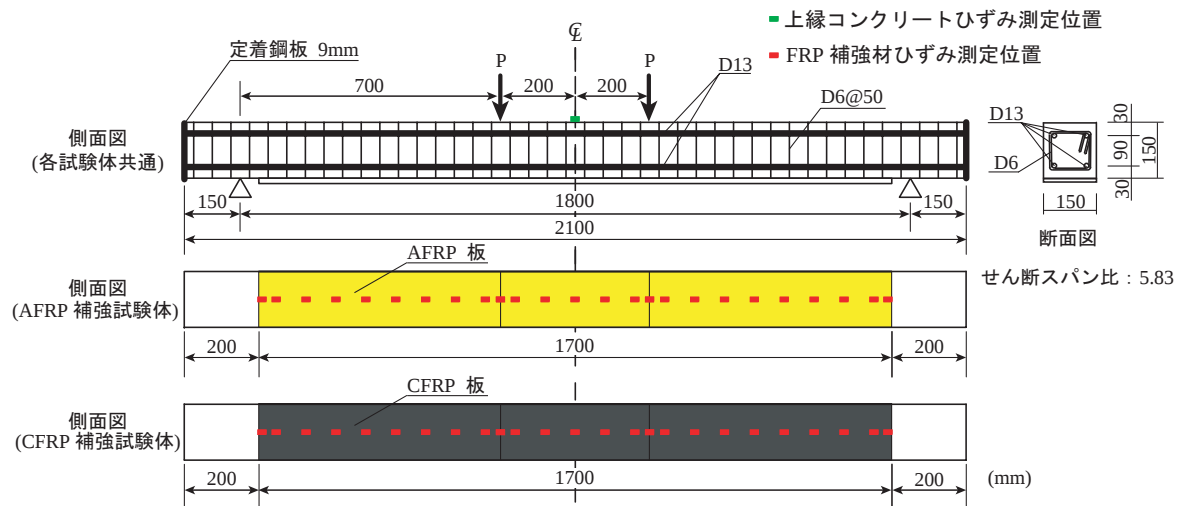
2. 実験概要

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: 水中)、第2項目は使用した FRP 補強材の種類 (A: AFRP 板, C: CFRP 板)、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。

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 1.8 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 392 kN/m の AFRP 板、もしくは 400 kN/m の CFRP 板を接着している。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。

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 試験体は 28.2 MPa、W-A-2 および W-C-1 試験体は 29.2 MPa であり、軸方向鉄筋の降伏強度は 394.5 MPa であった。表-2 には、FRP 板の力学的特性値の一覧を示している。表より、AFRP および CFRP の保証耐力はほぼ



図－１ 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

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	1.2

同等であるものの、軸剛性は CFRP の場合が、AFRP の場合の 3 倍以上大きいことがわかる。

FRP 板には既往の研究結果に基づき接着界面の付着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 1 mm 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 は 2.6 MPa、水中硬化型接着樹脂 2 は 3.1 MPa 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 (1.5 MPa) 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 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 板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撮影し、実験終了後には、RC 梁のひび割れや接着界面を撮影した。

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、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 板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実験結果および計算結果を示している。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。

図より、無補強試験体の場合の計算結果と実験結果を比較すると、各 FRP シート補強により RC 梁の曲げ耐力が向上していることがわかる。

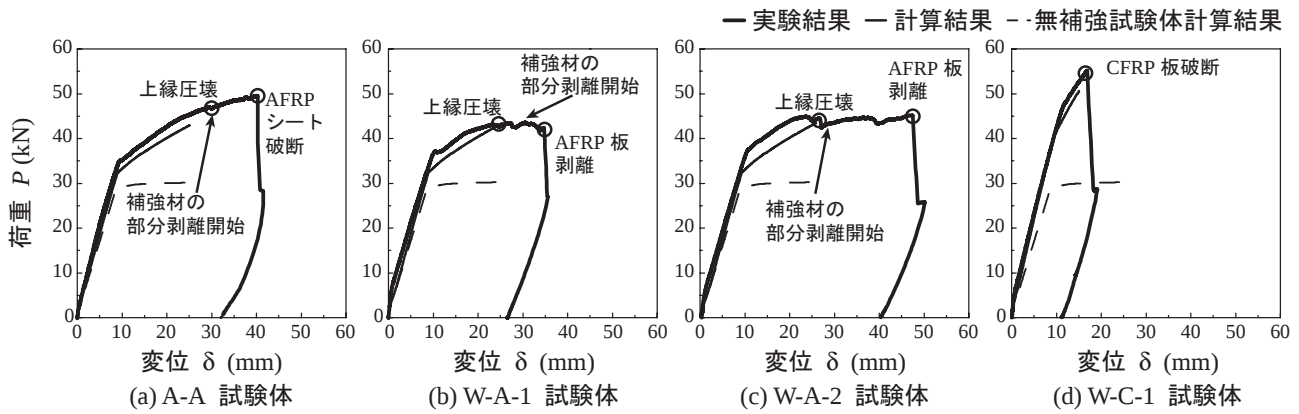


図-2 各試験体における荷重-変位関係の実験結果と計算結果の比較

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		
	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
W-A-1		37.2	1.16		43.6	1.02
W-A-2	32.3	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

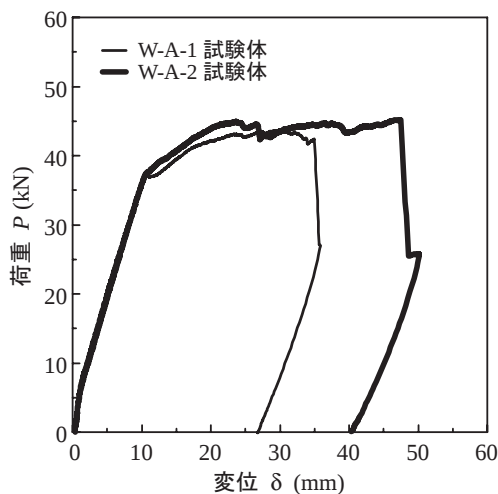


図-3 材料物性の異なる水中硬化型接着樹脂を用いた場合の荷重-変位関係の比較

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 および W-A-2 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。ただし、上縁コンクリートの圧壊は計算終局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、材料物性の異なる水中硬化型接着樹脂を用いた AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の荷重-変位関係を比較して示している。図より、水中硬化型接着樹脂 1 よりも水中硬化型接着樹脂 2 を用いる場合において最大荷重が 3 kN 程度大きいことがわかる。ただし、前述のようにいずれの場合も気中接着補強の場合よりも最大荷重が小さい。

従って、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補強効果が多少向上するものの、その効果は気中接着の場合よりも小さいことが明らかになった。従って、AFRP 板の付着性能を大きく改善するためには、コンクリート面のプライマー処理に相当する付着性能改善策を検討する必要があるものと考えられる。

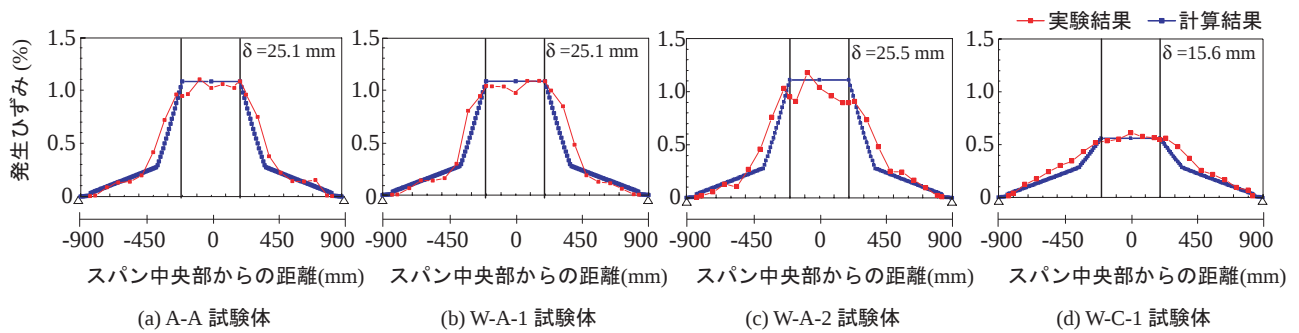
3.2 FRP 板の軸方向ひずみ分布性状

図-4 には、計算終局変位時における 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。また、計算結果は FRP 板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。

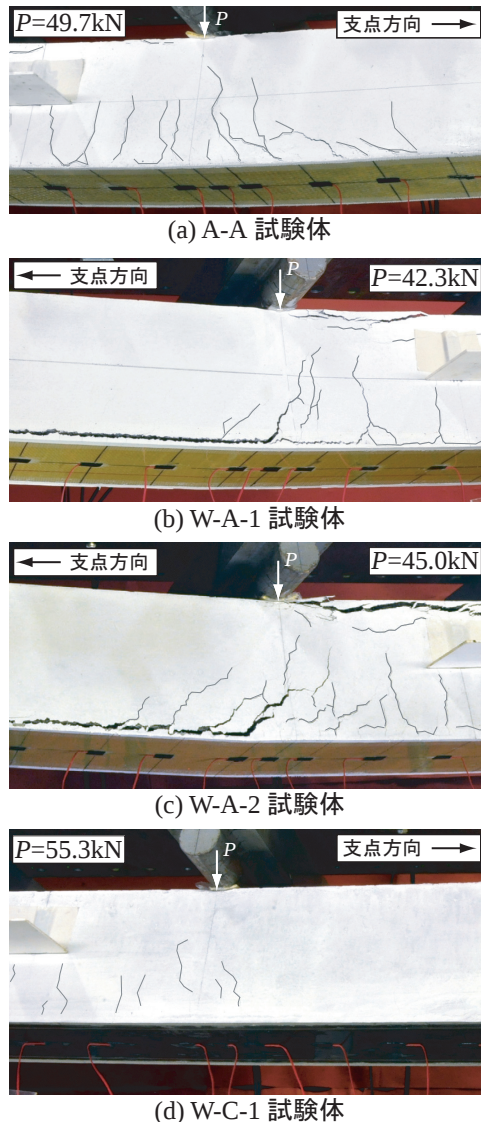
図より、いずれの試験体においても実験結果は計算結果とほぼ対応していることがわかる。従って、AFRP 補強材とコンクリートの付着は計算終局変位時までは確保されているものと判断される。なお、W-C-1 試験体の場合には、最大発生ひずみが $6,000 \mu$ 程度であり他の試験体に比べて小さく、かつ水中硬化型接着樹脂の伸び率 ($7,700 \mu$) よりも小さい。また、後述するように実験時において、CFRP 板の部分剥離等の兆候は全く見られていないことより、水中接着補強に用いる FRP 補強材の剥離を抑制するためには、その発生ひずみを小さく抑えることが有効であるものと考えられる。

3.3 ひび割れ性状

写真-1 には、各試験体の剥離および破断直前のひび割



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



写真－1 各試験体の剥離および破断直前のひび割れ性状

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 試験体の場合には、共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

るピーリング作用によるシートの部分剥離が A-A 試験体の場合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、等曲げ区間のシートとコンクリート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おり、このことは、W-A-1 試験体の方が曲げ耐荷性能が低いことと関連している。

W-C-1 試験体の場合は、荷重荷重レベルが他の試験体よりも大きいにもかかわらず、損傷が明らかに軽微である。そのため、CFRP 板の剥離は生じず最終的には CFRP 板の破断によって終局に至っている。このことより、FRP 板水中接着補強工法により RC 部材を曲げ補強する場合には、FRP 板の軸剛性を大きくして発生ひずみを低減することで早期剥離を抑制でき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軸剛性の大きい CFRP 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) 保証耐力が同程度で、軸剛性の大きい CFRP 板を用いる場合には、CFRP 板の部分剥離等の変状は終局時まで全く見られない。従って、FRP 補強材の軸剛性を大きくして発生ひずみを低減することで早期剥離を抑制できるものと考えられる。

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。