

AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性状におよぼすコンクリート表面処理法の影響

Effects of concrete surface treatment on load-carrying behavior of flexural reinforced RC beams
by means of submerged AFRP plate bonding method

室蘭工業大学大学院 博士前期課程 ○ 学生員 池下 雄哉 (Yuya Ikeshita)
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) 構造物の補強工法の一つとして連続繊維 (FRP) シート接着工法が数多く採用されている。しかしながら、海洋構造物や河川橋脚など水中に供用される構造物 (以後、水中構造物) の場合には、補強工事に先立って仮締切工事を行い、補強対象構造物周辺を乾燥状態にする必要がある。そのため、膨大な施工コストを要することから、この種の構造物の補強工事は十分に進捗していないのが現状である。著者らはこのような課題を解決するため、仮締切工事を必要としない水中接着補強工法を提案し、その実用化に向けた検討を行ってきた。この工法は、アラミド繊維シートにエポキシ系接着樹脂を含浸硬化して製作したアラミド繊維板 (以後、AFRP 板) を水中硬化型接着樹脂を用いて接着補強する工法である。

これまでの研究では、提案工法を用いて曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行っている¹⁾。その結果、提案工法により 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する場合よりも小さいことが明らかになっている。これは、気中接着補強の場合にはコンクリート表面にプライマー処理を施した後 FRP シートを接着するのに対し、水中接着補強の場合にはプライマー処理を施すことが不可能であるため、FRP 板とコンクリートとの付着性能が気中接着補強の場合に比べて劣ることが要因の一つであると推察される。付着性能の改善策としては、最も簡易な方法としてせん断キーを設ける手法が考えられる。このようなことから、本研究では、提案の水中接着補強工法における付着性能改善策の提案を目的として、コンクリート表面に等間隔にせん断キーを設け、その効果について静載荷実験により検討を行った。本研究ではせん断キーの間隔を 2 種類設定し、気中接着、せん断キーなどの水中接着補強の場合と比較検討を行った。

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、気中接着補強試験体およびコンクリート表面処理を 3 種類に変化させた水中接着補強試験体の全 4 体である。表中の試験体名のうち、第 1 項目は施工・養生環境 (A: 気中, W: 水中)、第 2 項目の英文字 G に付随する数値はせん断キーの配置間隔 (mm) 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、

表-1 試験体一覧

試験体名	施工・養生環境	せん断キー配置間隔 (mm)
A	気中	-
W	水中	-
W-G60		60
W-G30		30

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

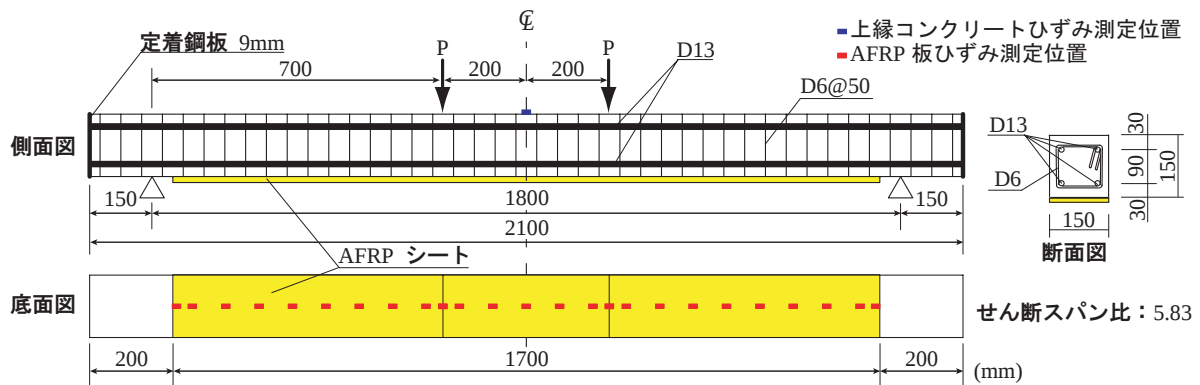
表-3 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

	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

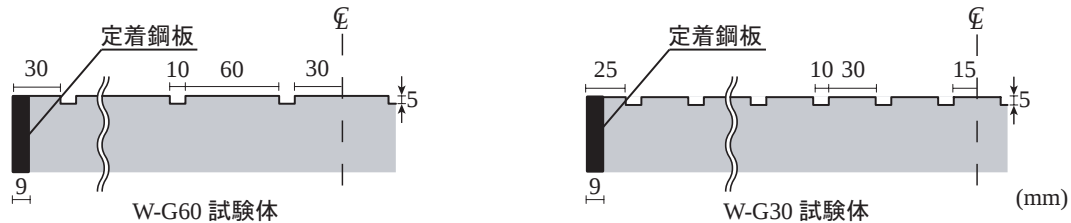
純スパン長 1.8 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には SD345D13 を 2 本ずつ配置している。スターラップには SD345D6 を用い 50 mm 間隔で配置している。梁の下面には、保証耐力 392 kN/m の AFRP 板を接着している。AFRP 板の幅は 150 mm であり、梁軸方向の補強範囲はスパン中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。図-2 には、コンクリート表面のせん断キー配置状況を示している。せん断キーの幅および深さはそれぞれ 10、5 mm と設定した。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 38.3 MPa であり、軸方向鉄筋の降伏強度は 378 MPa であった。表-2 には、AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している。また、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。なお、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。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



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要



図－2 せん断キー配置状況

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		
	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	31.5	33.6	1.07	45.6	51.3	1.13
W		34.0	1.08		44.9	0.98
W-G60		39.0	1.24		50.3	1.10
W-G30		34.9	1.11		43.4	0.95

し、接着強度の平均値は2.0 MPa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(1.5 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。

2.2 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 RC 梁を水没させた状態で行った。なお、AFRP 板にはあらかじめ、AFRP 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260 g/m²程度振り掛けて粗面化を行っている。コンクリート表面には、専用のブラストマシンを用いて深さ1mm程度のブラスト処理を行った。また、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を混合し、板状に成形する、
- 2) 気中で AFRP 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、

である。なお、3) の工程では専用の圧着装置を用いて、水中硬化型接着樹脂の厚さが3 mm 程度となるように施工した。

また、気中補強の場合には、ブラスト処理およびプライマー処理を施した後、汎用含浸接着樹脂を用いて AFRP シートを接着した。

荷重実験は、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 AFRP 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。

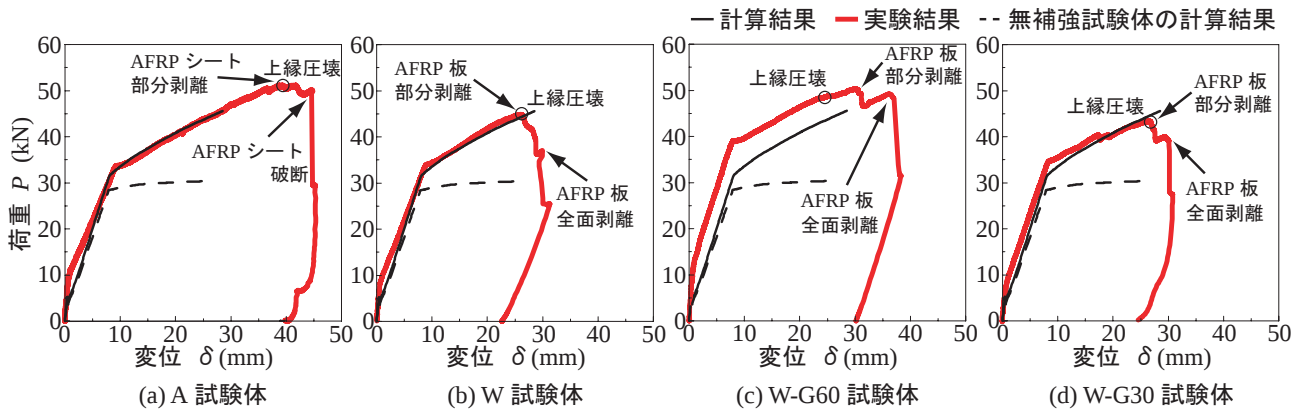
3. 実験結果と考察

3.1 荷重－変位関係

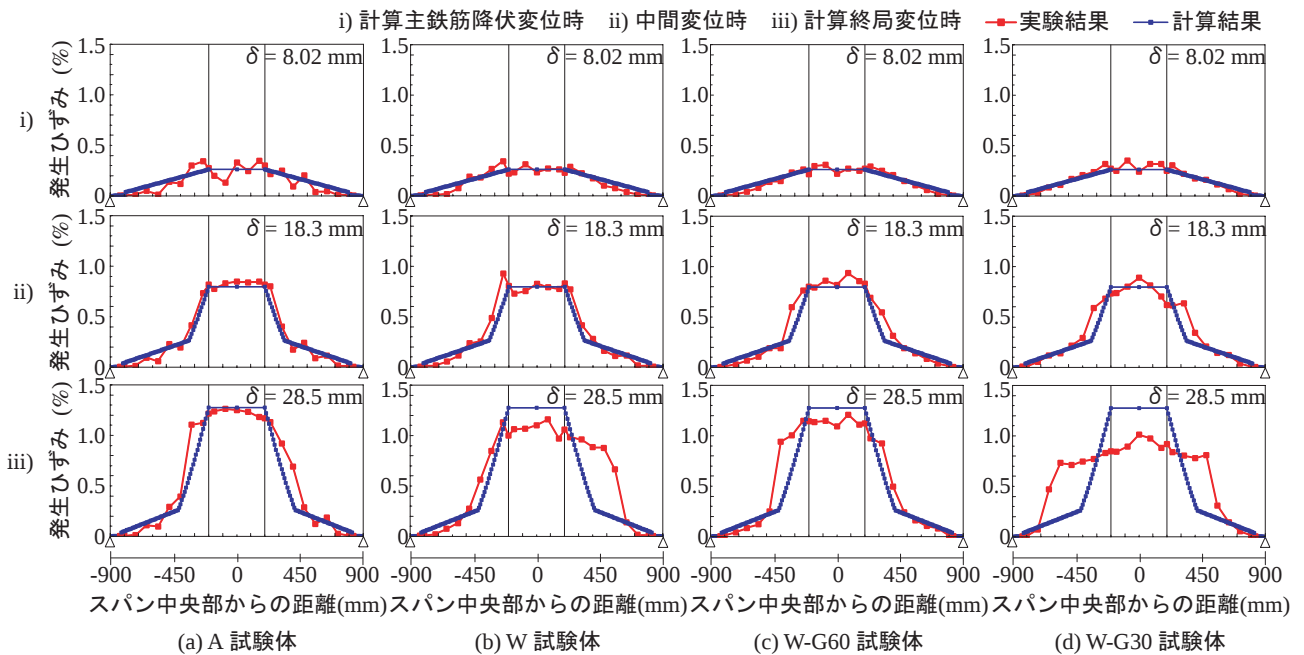
図－3には、各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果および計算結果を示している。計算結果は、コンクリート標準示方書³⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。なお、計算では AFRP 板とコンクリートの完全接着を仮定している。表－4には参考のために、降伏時および終局時における実験および計算結果を示している。

図より、A 試験体の場合には、実験結果は計算終局変位時まで計算結果とほぼ同様の性状を示しており、その後も最大荷重到達時までほぼ一定の剛性勾配を保持していることが分かる。最大荷重近傍では、上縁コンクリートの圧壊後、AFRP シートの部分剥離が発生するものの、最終的にはシート破断により終局に至った。

W 試験体の実験結果は、計算終局変位近傍まで計算結果とほぼ同様の耐荷性状を示しているものの、最終的には計算耐力よりも若干低い荷重レベルで AFRP 板の部分剥離が発生した。その後、上縁コンクリートが圧壊し、さらに AFRP 板の部分剥離領域が進展して全面剥離に至った。W-G60 試験体の場合には、曲げひび割れ発生後同一変位時における実測荷重が計算荷重を7 kN 程度上回っていることが分かる。また、実験結果では最大荷重近傍において上縁コンクリートが圧壊し、その後、AFRP 板の部分剥



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



図－4 AFRP 板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

離を生じ、最終的には全面剥離により終局に至っている。W-G30 試験体の実験結果は、計算終局変位時まで計算結果とほぼ同様の耐荷性状を示しているものの、最終的には計算耐力よりも若干低い荷重レベルで AFRP 板の部分剥離が発生した。その後、上縁コンクリートが圧壊し、さらに AFRP 板の部分剥離領域が進展して全面剥離に至った。

これらの結果より、水中接着補強の場合には、せん断キーの配置間隔が大きい場合には RC 梁の耐荷性能が向上するものの、小さい場合にはせん断キー配置による効果が顕著には発揮されないことが明らかになった。

3.2 AFRP 板のひずみ分布性状

図－4 には、計算主鉄筋降伏変位時、中間変位時および計算終局変位時における AFRP 板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、計算主鉄筋降伏変位時と計算終局時の中間の変位である。また、計算結果は AFRP 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、いずれの試験体も中間変位時までは実験結果が計算結果と良く対応していることが分かる。従って、この時点までは、AFRP 補強材

の付着が確保されているものと考えられる。また、計算終局変位時には、A および W-G60 試験体の場合には実験結果が計算結果とほぼ対応しており、AFRP 補強材の付着が確保されていることが分かる。一方、W および W-G30 試験体の場合には、等曲げ区間の実験結果が計算結果を下回り、かつ等曲げ区間および等せん断力区間の一部においてひずみが均等化された領域が見られる。このことから、この領域において AFRP 板が部分剥離していることが推察される。

3.3 ひび割れ性状

写真－1 には、各試験体の終局直前における梁側面のひび割れ性状および AFRP 板の剥離性状を示している。

写真より、いずれの試験体も上縁コンクリートが圧壊し、かつ載荷点近傍の下縁かぶり部に生じた斜めひび割れが AFRP 板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 板が部分的に剥離していることが分かる。A 試験体の場合には、AFRP シートの部分剥離は下縁かぶりコンクリートを付着した状態で発生している。このことから、シートとコンクリートとの付着性能がコンクリートの引張強度を上回っているものと考えられる。W

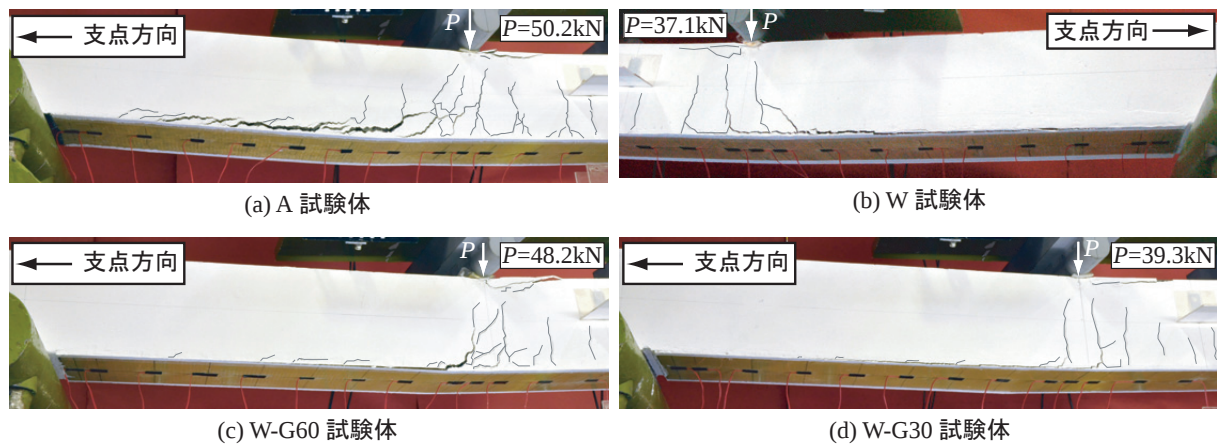


写真-1 各試験体の終局直前におけるひび割れおよび剥離性状

試験体の場合には、AFRP 板の部分剥離は梁下縁コンクリート表層部で生じている。これは、水中接着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ないため、コンクリート表層部において剥離破壊したためと考えられる。

一方、W-G60/30 試験体の場合には、AFRP 板の部分剥離は、AFRP 板と水中硬化型接着樹脂の界面で発生している。これは、せん断キーの配置によりコンクリートと水中硬化型接着樹脂の付着性能が改善されたため、剥離面が AFRP 板と水中硬化型接着樹脂の界面に移行したためと推察される。また、W-G60 試験体の場合には、下縁かぶりコンクリート部における斜めひび割れの開口や AFRP 板の引き剥がれが顕在化した後においても全面剥離に至らない粘り強い性状を示しているのに対し、W-G30 試験体の場合には、これらの性状が顕在化する前に全面剥離に至っている。

以上のことから、コンクリート表面にせん断キーを配置することによりコンクリートと水中硬化型接着樹脂の付着性能は向上するものの、樹脂と AFRP 板の界面における剥離が先行する可能性のあることが明らかになった。

なお、本実験においては、せん断キーの配置間隔を 60 mm とする場合には耐荷性能が改善されるが、せん断キーの配置間隔を 30 mm とする場合にはその改善効果は見られなかった。これは、実験ではせん断キーの配置位置に曲げひび割れが発生する傾向にあることを確認している。これより、せん断キーの配置間隔が小さい場合には、RC 梁下縁かぶりコンクリート、水中硬化型接着樹脂および AFRP 板の界面に多数のひび割れが発生し、このひび割れが AFRP 板の剥離を助長したものと推察される。

4. まとめ

本研究では、著者らが提案した AFRP 板水中接着補強工法における付着性能改善策の提案を目的として、コンクリート表面に等間隔でせん断キーを配置し、AFRP 板を水中接着曲げ補強した RC 梁の静載荷実験を行った。本実験で得られた知見を整理すると以下の通りである。

- 1) コンクリート表面にせん断キーを配置することにより、コンクリートと水中硬化型接着樹脂の付着性能は改善される。
- 2) せん断キーの配置間隔が小さい場合には、水中硬化型接着樹脂と AFRP 板の界面における剥離を助長する可能性がある。
- 3) 本実験の範囲内では、せん断キーの間隔を 60 mm とすることで曲げ耐力が大幅に増大することが明らかとなった。

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 補強材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.
- 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.