

# 論文 **せん断キーを設けた場合の AFRP 板水中接着曲げ補強 RC 梁の静的耐荷性状**

池下 雄哉<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・栗橋 祐介<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、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に、コンクリート表面に等間隔にせん断キーを設ける方法に着目し、その効果について静載荷実験を行った。その結果、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こと、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 板の接着界面における剥離を助長する可能性があること、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向上すること、などが明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, AFRP シート, AFRP 板, 水中接着曲げ補強, せん断キー

## 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。この種の補強法を、海洋構造物や河川橋脚など水中に供用される構造物に適用する場合、通常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して実施しなければならない。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。このような課題を解決するため、近年、仮締切工事を必要としない水中補強工法に関する研究が諸研究機関で実施されている。これまでの研究では、芦野ら<sup>1)~3)</sup>や根元ら<sup>4),5)</sup>が水中適用型エポキシ樹脂を用いて格子状に成形した炭素繊維 (以後、CFRP グリッド) を接着する補強工法を提案している。しかしながら、この提案工法の場合には CFRP グリッドが格子状であるため、耐震補強のように大きな補強量に対応することは容易ではない。

一方、著者らはアラミド繊維シート (以後、AFRP 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を提案している。著者らの提案工法の場合には、補強材が面状であるため、積層化等により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。

著者らの既往の研究では、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<sup>6)</sup>。その結果、RC 梁の曲げ耐力を向上可能であるものの、鉄筋降伏後の比較的荷重の大きい領域における付着性能は、気中接着補強の場合よりも劣ることが明らかになっている。これは、気中接着の場合にはプライマー処理を施すことによって、コンクリートの接着界面を強化することが可能であるの

に対して、水中接着の場合にはこの種の処理が不可能であることによるものと推察される。水中接着補強法におけるコンクリート界面の付着性能向上法としては、樹脂を塗布する等の化学的手法とせん断キーを設ける等の力学的手法が考えられる。化学的手法は水の対策が難しいことにより妥当ではない。本研究では、突起を設ける等により比較的妥当にせん断キーを設けることができるものと判断した。

このような観点より、本研究では、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、その付着性能向上効果を静載荷実験により検討した。本研究ではせん断キーの間隔を 2 種類設定し、気中接着補強、およびせん断キーを配置していない水中接着補強の場合と比較検討を行うこととした。

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 <sup>2</sup> )	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

\*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)

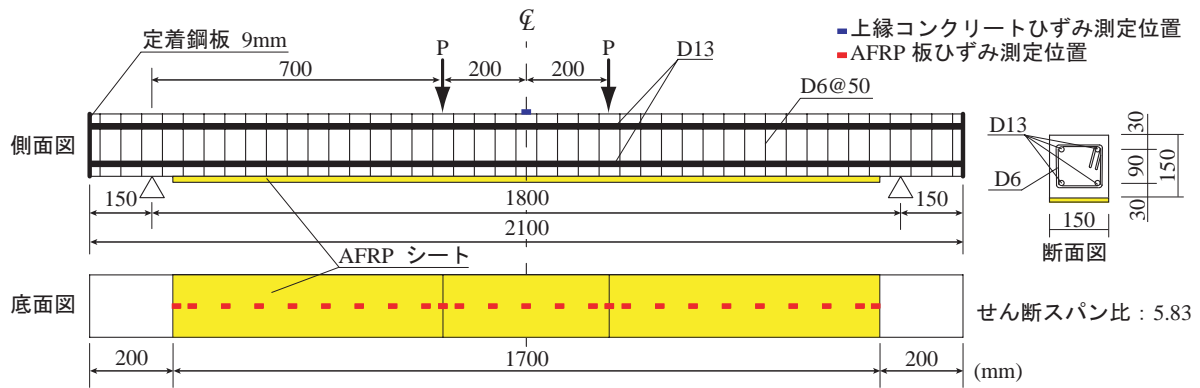


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

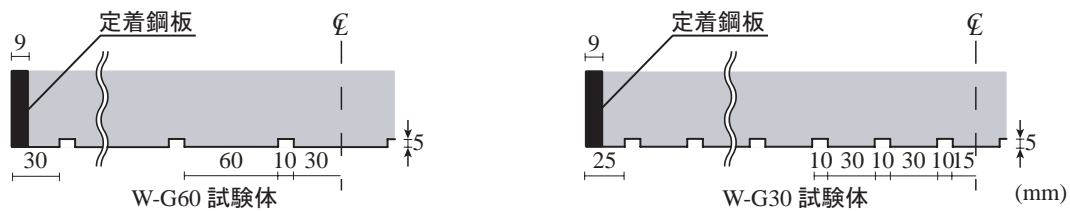


図-2 せん断キー配置状況

## 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)を示し、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。また、表-2には、AFRPシートの力学的特性値の一覧を示している。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間隔で配置した。梁の下面には、保証耐力392kN/mのAFRP板を接着している。AFRP板の幅は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。

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、せん断キーの配置間隔によらずそれぞれ10, 5mmと設定した。また、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は38.3MPaであり、軸方向鉄筋の降伏強度は378MPaであった。

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

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

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」<sup>7)</sup>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、接着強度の平均値は2.0MPa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(1.5MPa)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判断される。

### 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てRC梁を水没させた状態で行った。なお、付着性能を改善するためにAFRP板の接着界面およびコンクリート表面には以下の処理を行っている。AFRP板の場合には予め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260g/m<sup>2</sup>程度振り掛けて粗面化処理を施している。また、コンクリート表面の場合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。なお、水中接着補強における施工手順は以下の通りである。

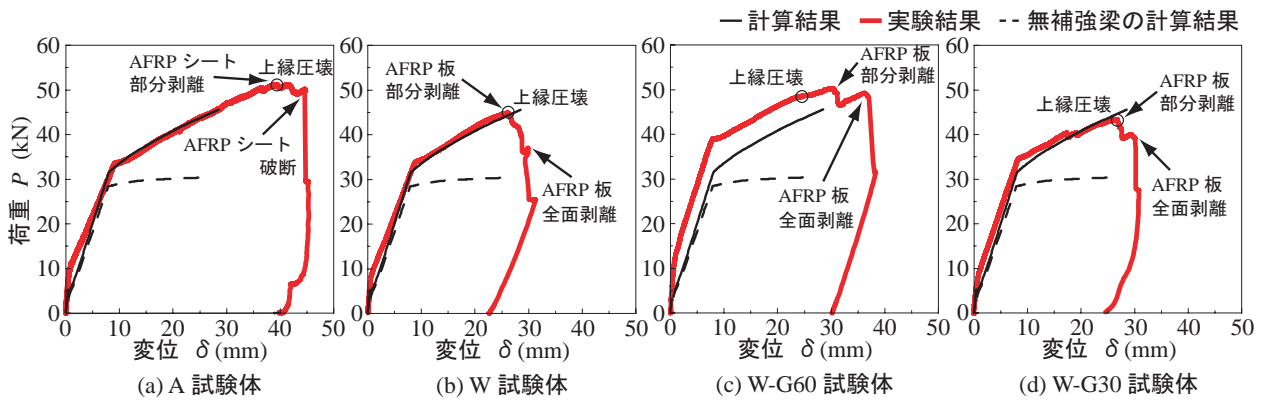


図-3 各試験体における荷重-変位関係の実験結果と計算結果の比較

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			上縁コンクリート圧壊後における 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	31.5	33.6	1.07	45.6	51.3	1.13	AFRP シート破断
W		34.0	1.08		44.9	0.98	AFRP 板全面剥離
W-G60		39.0	1.24		50.3	1.10	
W-G30		34.9	1.11		43.4	0.95	

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、その上に成形した水中硬化型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) を配置して圧着する、
- 4) 圧着した状態で 5 日間程度水中にて養生する、

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。なお、本論文では AFRP シートと AFRP 板を総称して AFRP 補強材と呼ぶこととする。

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連続的に撮影し、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、土木学会コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>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 補強材とコンクリートの完全付着を仮定している。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一覧にして示している。

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耐荷性状を示しており、計算終局変位以降においても  $\delta = 40$  mm における最大荷重近傍までほぼ一定の剛性勾配を保持していることが分かる。また、最大荷重近傍において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 1 kN 程度低い荷重レベルで 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、 $\delta = 24$  mm において上縁コンクリートが圧壊し、 $\delta = 30$  mm で最大荷重に達し、AFRP 板の部分剥離を生じた。その後、荷重は一旦低下するものの再度増大し、最終的には計算耐力よりも 5 kN 程度高い

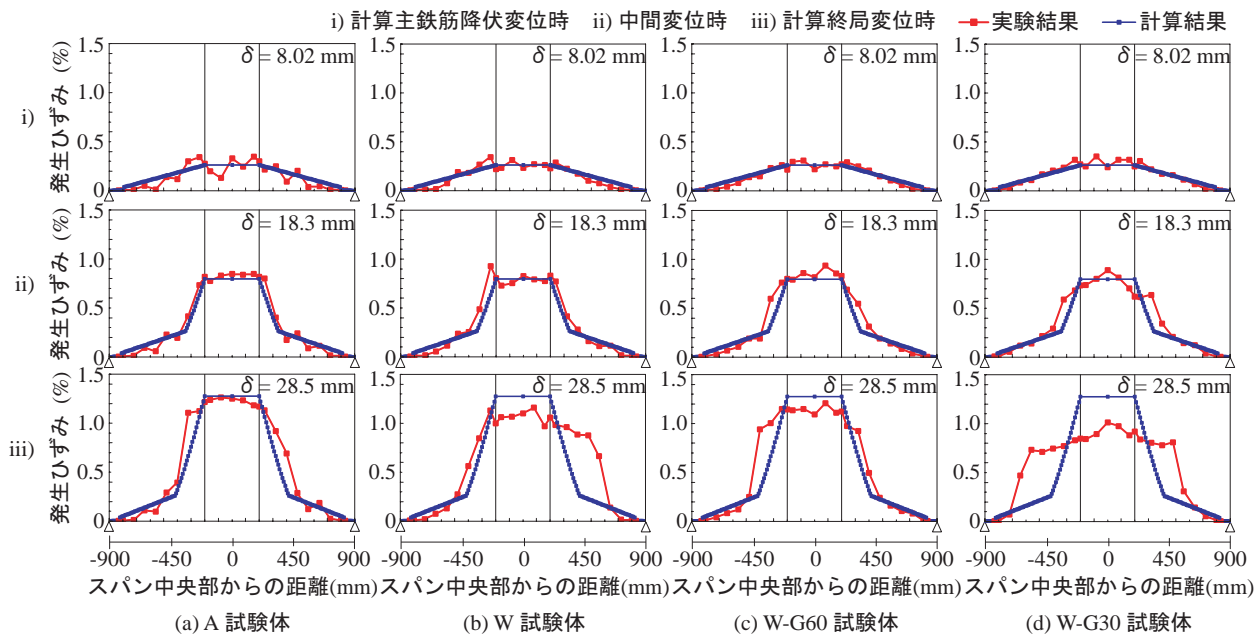


図-4 AFRP 補強材の軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果および計算結果の比較

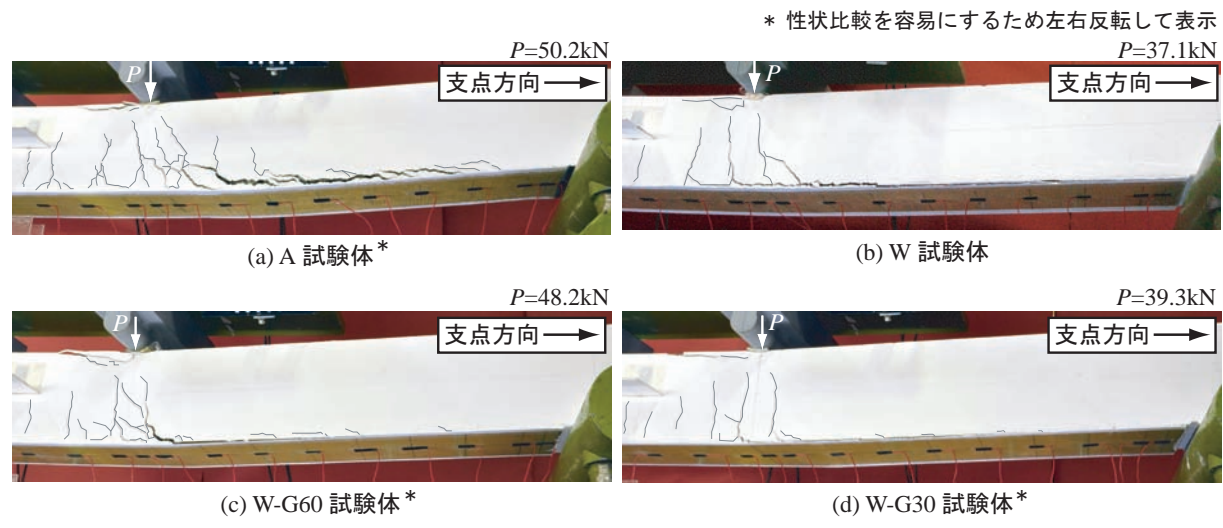


写真-1 各試験体の終局直前における梁側面のひび割れおよび AFRP 補強材の剥離性状

荷重レベルに達し、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 2 kN 程度低い荷重レベルで AFRP 板の部分剥離が発生した。その後、W 梁と同様に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し、気中接着補強の場合と同程度の補強効果となるが、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現しないことが明らかになった。

3.2 AFRP 補強材の軸方向ひずみ分布性状

図-4 には、計算主鉄筋降伏変位時、中間変位時および

計算終局変位時における AFRP 補強材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 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、いずれの試験体も中間変位時までは、実験結果と計算結果は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、計算終局変位時においても 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



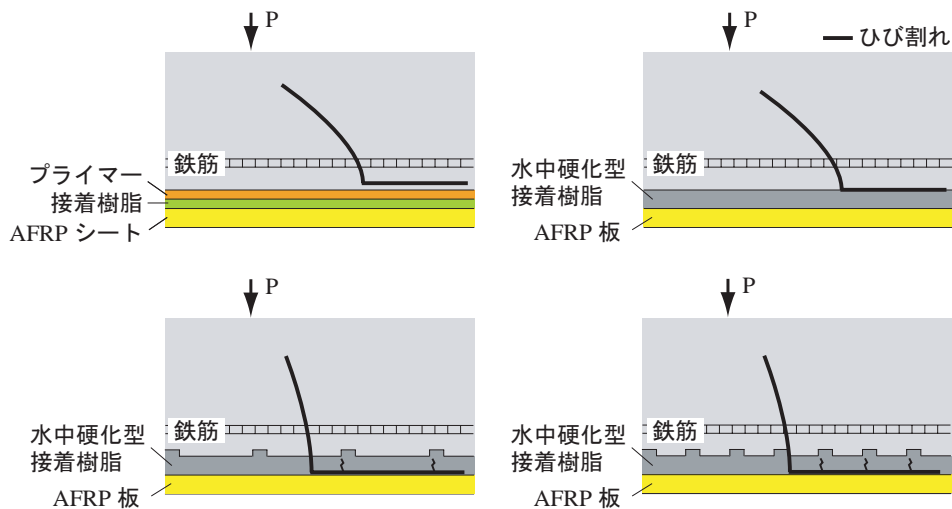


図-5 各試験体の等せん断力区間における AFRP 補強材の剥離挙動

において実験結果が計算結果をそれぞれ  $2000 \mu$  および  $4000 \mu$  程度下回っている。また、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。このことより、この均等化領域において AFRP 板が部分剥離していることが推察される。

### 3.3 破壊性状

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 補強材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 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、AFRP 補強材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はコンクリートの引張強度を上回っていることが推察される。

W 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、気中接着補強と異なり、コンクリート表層部において剥離破壊したものと考えられる。

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とが分かる。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。なお、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直ぐには全面剥離しない粘り強い性状を示した。それ

に対して、W-G30 試験体の場合には、部分剥離後早期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、等せん断力区間において、水中硬化型接着樹脂と 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。

### 3.4 AFRP 補強材の剥離性状の概要

図-5 には、各試験体の等せん断力区間における AFRP 補強材の剥離挙動の概要図を示している。

3.3 節で示したように、A 試験体ではかぶりコンクリートが付着した状態で AFRP シートの剥離が生じ、W 試験体ではコンクリート表層部で AFRP 板の剥離が生じている。

これに対し、W-G60/30 試験体はせん断キーの配置位置に曲げおよびせん断ひび割れが発生する傾向があることが確認されており、ひび割れが発生することにより水中硬化型接着樹脂が割れ、AFRP 板と水中硬化型接着樹脂の剥離を助長しているものと考えられる。このことより、せん断キーの配置間隔が小さい W-G30 試験体においては、W-G60 試験体と比較してより多くのひび割れが発生するため、AFRP 板の剥離をより助長しているものと考えられる。本実験においては、せん断キーの配置間隔を  $60 \text{ mm}$  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  $30 \text{ mm}$  とする場合には、せん断キーを配置していない場合と同程度の耐荷性能を示す結果となった。

## 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いて、AFRP 板の付着性能を向上させることを目的に、コンクリート接着面にせん断キーを配置する方法を提案し、その妥当性を検討するために RC 梁を用いた静載荷実験を実施した。本研究ではせん断キーの間隔を

2種類(30 mm, 60 mm)に変化させて検討を行った。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) 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, No1, pp.1123-1128, 2001.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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, pp.1327-1332, 2010.6
- 7) 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.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007.