

# 論文 AFRP 板水中接着により曲げおよびせん断補強した RC 梁の耐荷性状

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

**要旨:** 本研究では、AFRP 板水中接着工法により RC 梁を曲げおよびせん断補強した場合における補強効果の検討を目的に、AFRP 板水中接着曲げ補強した RC 梁に対し、AFRP 帯を巻付けてせん断補強した場合の静載荷実験を行った。その結果、1) せん断破壊型の RC 梁に対し、水中接着せん断補強を施すことにより、その破壊形式を曲げ破壊型に移行可能であること、2) せん断補強用 AFRP 帯の目付量が大い場合ほど斜めひび割れの開口が抑制され、AFRP 帯の部分剥離も抑制されること、3) 斜めひび割れ角度は AFRP 帯の目付量により変化するため、それに対応してせん断力を分担する AFRP 帯の本数が変化すること、などが明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, AFRP 板, 水中接着工法, 曲げ補強, せん断補強

## 1. はじめに

近年、耐震設計法の改定によって既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚を対象とした補強工事が盛んに行われている。また、地震の巨大化や発生頻度の増加に伴い、耐震補強工事が急速に進められている。最近では、耐震補強工法の 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。ここで、河川橋脚等の水中構造物の場合には、施工部を乾燥状態にするために構造物周辺の仮締切工事を行うことが通例である。このため、この種の構造物の耐震補強工事は陸上での補強工事に比較して膨大なコストを要することより、未だ限定的にしか実施されていないのが現状である。そのため、仮締切工事が不要な安価で効率的な工法の開発が喫緊の課題となっている。

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させ板状に加工した AFRP 板を水中接着樹脂を用いて接着補強する工法を考案し、その補強効果を載荷実験により検討している。

既往の研究では、提案工法を用いて曲げ補強やせん断補強した RC 梁に関する静載荷実験を行い、気中接着と同程度まで耐力を向上可能であること等を明らかにしてい

る<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、本工法を用いて RC 梁に曲げ補強とせん断補強を併用した場合に関する補強効果については未だ検討していないのが現状である。

このような背景より、本研究では水中接着曲げ補強とせん断補強を併用した場合における補強効果の検討を目的に、AFRP 板水中接着曲げ補強した RC 梁に対し、AFRP シートを予め带状に加工した AFRP 帯を巻付けてせん断補強した場合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および各種計算結果を示している。なお、表中の設計曲げ耐力  $P_u$  および設計せん断耐力のコンクリート分担分  $V_c$  は土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準拠し、コンクリート実圧縮強度  $f'_c = 35.7 \text{ MPa}$ 、軸方向鉄筋の実降伏強度  $f_y = 370 \text{ MPa}$  を用いて算出した。また、AFRP 帯の設計せん断耐力分担分  $V_{AF}$  はアラミド補強研究会の「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案)」(以後、補強設計要領<sup>4)</sup>)に準拠し、下式 (1) により算出した。

$$V_{AF} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s \quad (1)$$

表-1 試験体一覧

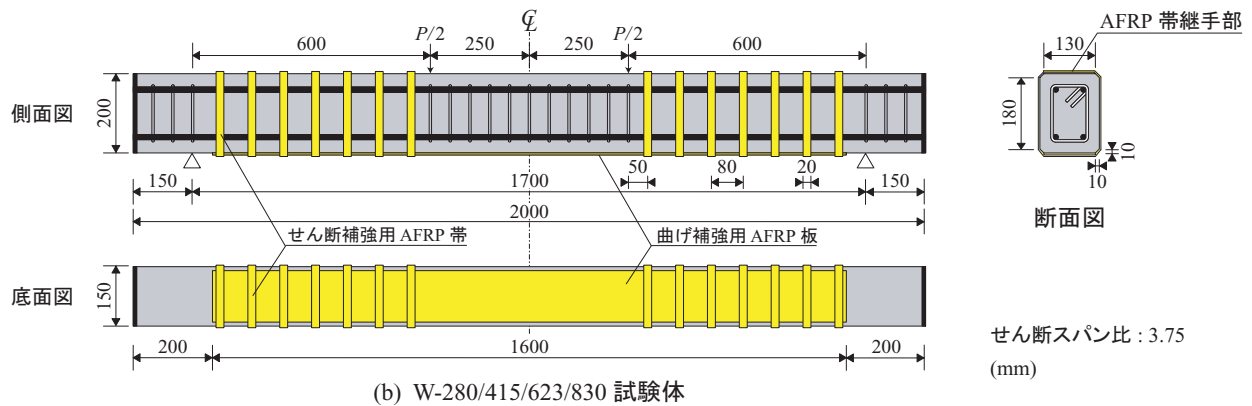
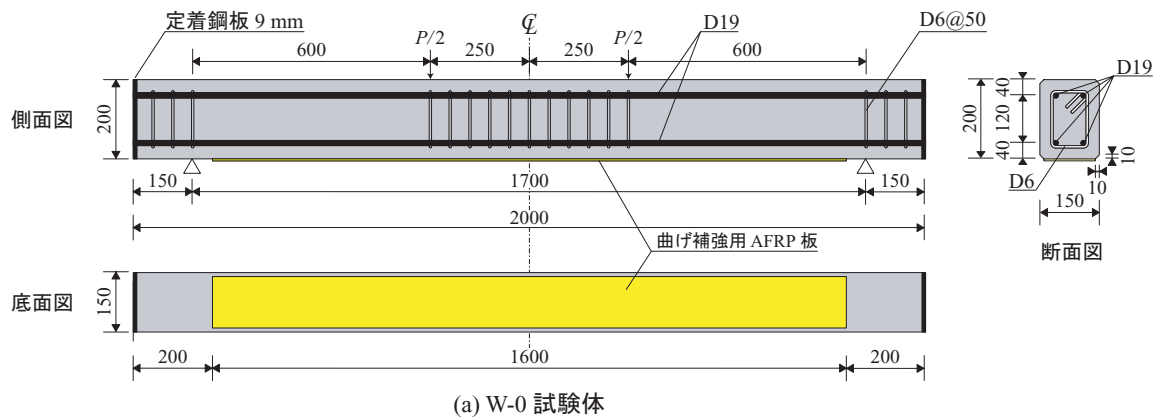
試験体名	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )		設計曲げ耐力 $P_u$ (1) (kN)	設計せん断耐力 $2 \times V_u$ (kN)			せん断余裕度 (2) / (1)
	曲げ補強用 AFRP 板	せん断補強用 AFRP 帯		コンクリート分担分 $2 \times V_c$	AFRP 帯分担分 $2 \times V_{AF}$	合計 (2)	
N	-	-	96.5	63.4	-	63.4	0.66
W-0	830	-	141		-	63.4	0.45
W-280		280			33.2	96.6	0.68
W-415		415			49.2	113	0.80
W-623		623			74.0	137	0.97
W-830		830			98.4	162	1.14

\*1 大成建設 (株) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (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 上席研究員 博 (工) (正会員)

\*4 (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (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 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	400	0.193	2.06	118	1.75
415	600	0.286			
623	900	0.430			
830	1,200	0.572			

表－3 水中硬化型接着樹脂の力学的特性値 (公称値)

接着材種類	材料特性	物性値 (MPa)	測定方法
パテ状 接着樹脂	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
液状 接着樹脂	圧縮強度	35.0	JIS K - 6911
	曲げ強度	40.0	JIS K - 6911

ここに、 $A_w$  : せん断補強面における一組の AFRP 帯の総断面積、 $f_{wyd}$  : AFRP 帯の引張強度、 $\alpha$  : AFRP 帯と部材軸とのなす角度、 $z$  : 圧縮力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離 ( $= d/1.15$ )、 $d$  : 有効高さ、 $s$  : AFRP 帯の配置間隔である。なお、AFRP 帯の引張強度は補強設計要領に準拠し、表－2 に示す引張強度に 0.6 を乗じて評価している。

試験体数は、無補強試験体および AFRP 帯の目付量を変化させた全 6 体である。試験体名の内、第 1 項目は AFRP 板による水中接着曲げ補強の有無 (N : 無補強、W : 曲げ補強有) を示し、第 2 項の数字は AFRP 帯の目付量 (単位 : g/m<sup>2</sup>) 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 × 200 mm、純スパン長 1.7 m の複鉄筋 RC 梁である。なお、実構造物に AFRP 板を巻付けて補強する場合には、隅角部の応力集中を緩和するために、面取りを施す必要がある。従って、本

試験体においても四隅に 10 mm の面取りを施している。上下端鉄筋には D19(SD345) を 2 本ずつ配置している。また、スターラップには D6(SD345) を用い、等せん断力区間を除き 50 mm 間隔で配置している。AFRP 板による曲げ補強には表－2 に示す保証耐力 1,200 kN/m の AFRP 板を接着している。せん断補強に用いた AFRP 帯幅は、施工性を考慮しその最小値として 20 mm とした。また、配置間隔は土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>における最小間隔  $d/2$  ( $d$  : 有効高さ) である 80 mm とし、表－2 に示す各保証耐力の AFRP 帯を接着している。

表－3 には、水中接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。本研究に用いた水中接着樹脂は 2 種類であり、いずれも 2 種混合型のエポキシ系接着樹脂である。AFRP 板とコンクリートの接着には、表－4 に示す材料組成および性状を有するパテ状の接着樹脂を用いた。一方、RC 梁上面における AFRP 帯の継手部および下面における AFRP 帯と板の接着には、表－5 に示す材料組成および性状を有

表-4 パテ状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
外観	白色パテ状	暗灰色パテ状
比重	1.85	1.78
配合比	主剤：硬化剤 = 1：1 (重量比)	
可使用時間	30分 (at. 25℃)	

表-5 液状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
外観	灰色グリース状	淡黄色透明液状
粘度	50,000 以上 (at. 23℃)	
配合比	主剤：硬化剤 = 2：1 (重量比)	
可使用時間	30分以上 (at. 23℃)	

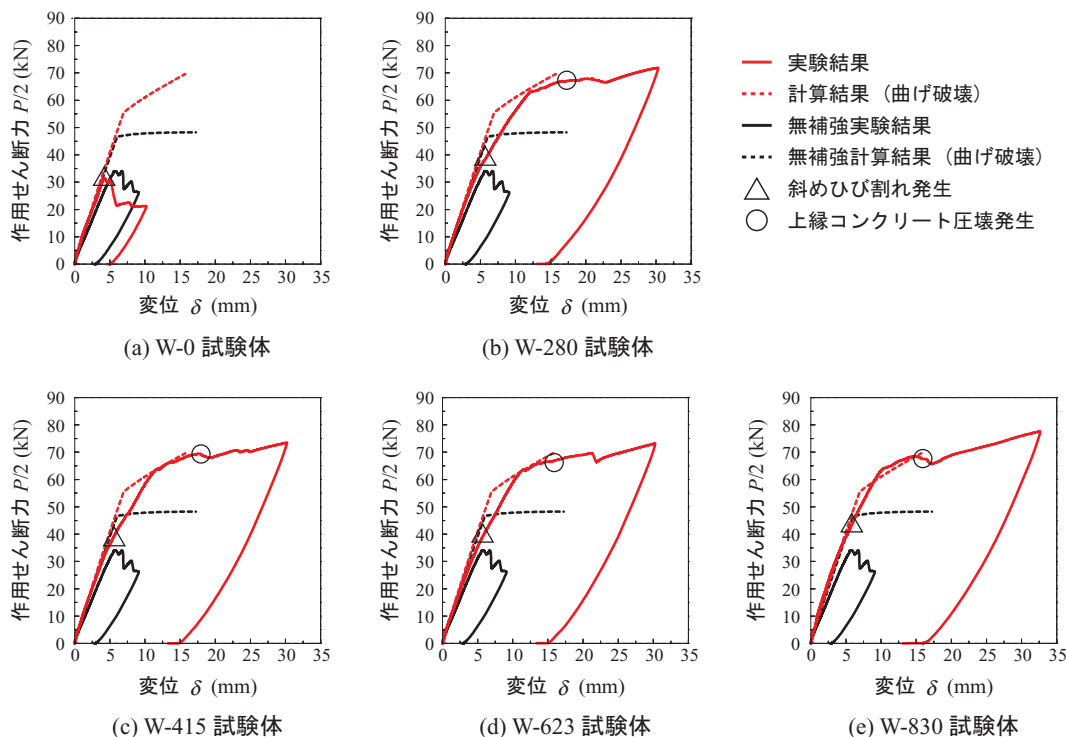


図-2 各試験体の作用せん断力-変位関係に関する実験結果および計算結果の比較

する液状の接着樹脂を用いた。なお、パテ状の水中接着樹脂の面外方向の接着性能は、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」<sup>5)</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、破壊時の強度の平均値は2.6 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、本実験に用いたパテ状の水中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。

液状の水中接着樹脂については、継手長を10 cm程度以上とすることでAFRP板の引張耐力以上の付着力が確保できることを確認している<sup>6)</sup>。従って、AFRP帯の継手長はRC梁上面において13 cmとした。

## 2.2 RC梁の水中接着補強方法および実験方法

水中接着曲げ補強は、1) 気中でAFRP板とパテ状の水中接着樹脂を一体化させた後、2) 大型水槽内に水没させたRC梁の底面に配置し、3) 圧着した状態で5日間程度水中養生する工程で実施した。なお、AFRP板のコンクリー

トとの接着面には5号珪砂による砂付処理を施し、コンクリート表面にはショットブラスト処理(処理深さ1 mm程度)を施している。

水中接着せん断補強は、前述の曲げ補強を行い十分な水中養生を行った後に実施した。AFRP帯とパテ状の水中接着樹脂は曲げ補強と同様に気中で一体化させ、それを水没させたRC梁に一面ずつ専用の装置を用いて圧着し、5日間程度水中養生を行った。なお、液状の水中接着樹脂は圧着直前に接着面に塗布している。また、水中接着曲げおよびせん断補強は、パテ状の水中接着樹脂の可使用時間(30分程度)内に接着作業を完了し、樹脂の厚さは圧着後3 mm程度になるように施工した。

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4点曲げ荷重試験法により行った。なお、水中接着補強したRC梁の荷重実験は、試験体を水槽から引き揚げ、ひずみゲージを貼り付けた後直ちに行うこととしている。

本実験の測定項目は、荷重、スパン中央点変位(以後、変位)、AFRP板各点の軸方向ひずみ、AFRP帯各点の巻付

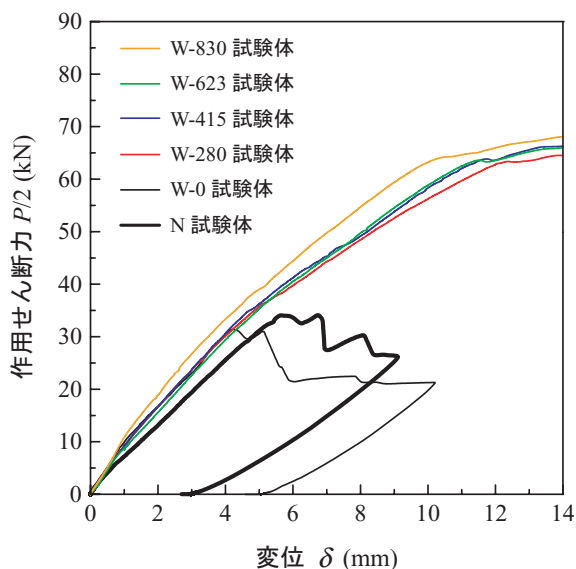


図-3 作用せん断力-変位関係における剛性勾配の比較

け方向ひずみである。また、実験時にはRC梁のひび割れを連続的に撮影し、実験終了時には破壊状況を撮影している。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 作用せん断力-変位関係

図-2には、各補強試験体の作用せん断力-変位関係の実験結果を計算結果と比較して示している。また、無補強のN試験体の実験および計算結果も併せて示している。計算結果は曲げ破壊を想定し、土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準拠して曲げ補強用AFRP板とコンクリートの完全附着を仮定した断面分割法により算出したものである。

図より、曲げ補強のみのW-0試験体の場合には、剛性勾配がN試験体よりも大きいものの、最大荷重はN試験体よりも若干小さい。両試験体の荷重は、曲げ破壊を想定した計算最大荷重よりも小さな荷重レベルで急激に低下している。このことから、せん断破壊によって終局に至っていることが分かる。実験時には、後述するように、片側に斜めひび割れが大きく開口し、せん断破壊により終局に至っていることを確認している。

曲げおよびせん断補強したW-280/415/623/830試験体の実験結果を見ると、斜めひび割れ発生時(図中△印)以後も荷重が増加していることが分かる。また、その後主鉄筋が降伏し、さらに上縁コンクリートが圧壊(図中○印)している。従って、これらの試験体の破壊モードは曲げ破壊型に移行しているものと判断される。なお、斜めひび割れ発生後、実験結果における剛性勾配が計算結果に比較して小さくなっている。これは、斜めひび割れの開口により、変形量が増加したことによるものと推察される。

なお、表-1においてW-280/415/623試験体のせん断余裕度は1.0よりも小さいにもかかわらず、これらの試験体は曲げ破壊により終局に至っている。これは、設計条件と

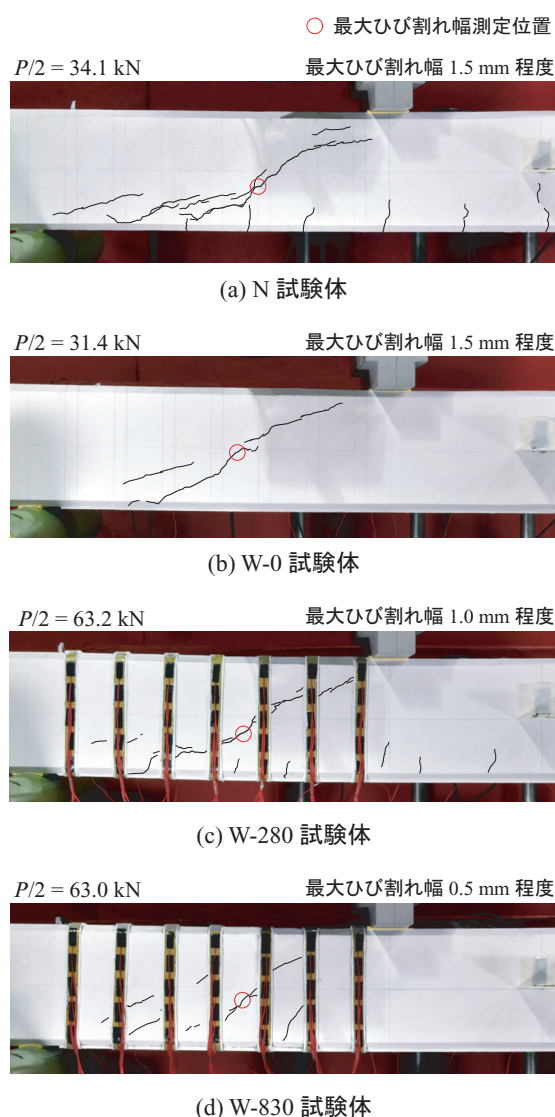


写真-1 ひび割れ性状の一例

実挙動が異なっているためであるものと考えられる。このことについては、3.4節で検討する。

図-3には、各試験体の作用せん断力-変位関係における剛性勾配を比較して示している。図より、曲げ補強したW-0~830試験体はいずれも無補強のN試験体よりも高い剛性勾配を示していることが分かる。また、せん断補強したW-280~830試験体はいずれも斜めひび割れが発生した作用せん断力 $P/2 = 40$  kN、変位 $\delta = 5$  mm程度に到達後、剛性勾配が低下している。ただし、AFRP帯の目付量を大きくすることにより、剛性勾配の低下が抑制される傾向にあることが分かる。また、AFRP帯の目付量を大きくすることにより、作用せん断力 $P/2 = 65$  kN程度の主鉄筋降伏時における変位も小さくなる傾向にあることが分かる。これは、後述するように、AFRP帯の目付量が大きい試験体ほど斜めひび割れの開口が抑制されていることによるものと推察される。

なお、W-830試験体は斜めひび割れ発生前においても他の試験体よりも高い剛性勾配を示している。これは、せん断補強量が多いため、せん断変形に対する抵抗性が高いことによるものと推察される。

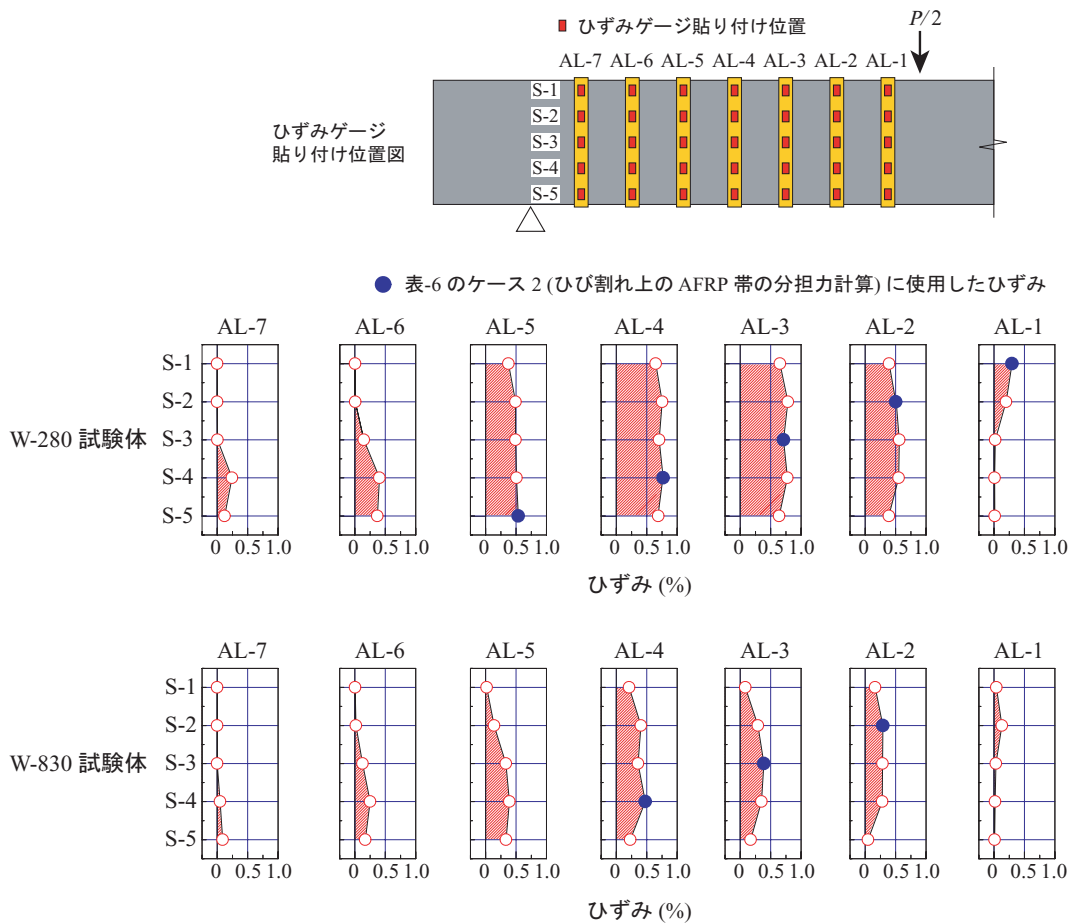


図-4 主鉄筋降伏時における AFRP 帯ひずみ分布の一例

### 3.2 ひび割れ性状

写真-1 には、N および W-0/280/830 試験体のひび割れ性状を示している。なお、N、W-0 試験体および W-280/830 試験体に関しては、それぞれ最大せん断力作用時および主鉄筋降伏時の状況を示している。

写真より、N 試験体の場合にはひび割れが荷重点から下端鉄筋位置近傍までアーチ状に発生し、さらに支点部に向かって直線的に多数のひび割れが進展し、せん断破壊に至っていることが明瞭に示されている。また、W-0 試験体はひび割れが荷重点から斜め下方に直線的に進展し、せん断破壊に至っていることが分かる。

一方、せん断補強した W-280/830 試験体はひび割れが荷重点から斜め下方に直線的に進展しているものの、せん断破壊に至っていない。また、W-280 試験体の場合には斜めひび割れが 5 本の AFRP 帯と交差し、ひび割れが大きく開口している。これに対し、W-830 試験体は斜めひび割れが 3 本の AFRP 帯と交差し、ひび割れの開口は小さい。なお、AFRP 帯で巻付けてせん断補強した試験体では、ひび割れ交差部周辺の AFRP 帯が部分的に剥離していることを確認している。また、この傾向は AFRP 帯の目付量が小さい場合に顕著であった。

各試験体の最大ひび割れ幅は、N および W-0 試験体の場合で 1.5 mm 程度であるのに対し、W-280 および W-830 試験体は各々 1.0 mm、0.5 mm 程度と AFRP 帯の目付量が

大きい場合ほど斜めひび割れの開口が抑制される傾向にあることが分かる。なお、AFRP 帯の目付量が最も大きい W-830 試験体の最大ひび割れ幅は、N 試験体の場合の 1/3 程度である。

### 3.3 AFRP 帯のひずみ分布性状

図-4 には、主鉄筋降伏時における AFRP 帯のひずみ分布を W-280/830 試験体について示している。

図より、W-280 試験体に巻付けた AFRP 帯のひずみは、写真-1 に示すひび割れの位置と同様の位置で大きな値を示していることが分かる。しかしながら、AFRP 帯 AL-2～5 では、斜めひび割れ開口部以外においても大きなひずみが発生し、巻付け方向でほぼ一定の値を示している。これは、斜めひび割れが発生および開口したことにより AFRP 帯が部分剥離したために、AFRP 帯に発生するひずみが平均化されたことによるものと推察される。

W-830 試験体に巻付けた AFRP 帯のひずみは、写真-1 に示すひび割れの位置と同様の位置で大きな値を示しているものの、W-280 試験体よりも小さい。また、AFRP 帯が部分剥離しているような性状は認められない。このことから、AFRP 帯の目付量が大きい場合には、斜めひび割れの開口が抑制されると共に、AFRP 帯の部分剥離が顕在化しないことが明らかになった。

### 3.4 AFRP 帯の分担せん断力

表-6 には、AFRP 帯のせん断力分担性状を検討するた

表-6 主鉄筋降伏時におけるAFRP帯の分担せん断力

試験体名	作用せん断力 (kN)	補強による荷重増分 (kN)	ケース1		ケース2	
			AFRP帯3本の分担力 (kN)		斜めひび割れと交差するAFRP帯の分担力 (kN)	
			左側	右側	左側	右側
N	34.1	-	-	-	-	-
W-0	31.4	-2.7	-	-	-	-
W-280	63.2	29.1	19.2 (0.66)	21.5 (0.74)	25.7 (0.88)	30.3 (1.04)
W-415	63.6	29.5	23.3 (0.79)	23.3 (0.79)	31.9 (1.08)	27.0 (0.92)
W-623	63.6	29.5	23.1 (0.78)	20.4 (0.69)	32.0 (1.08)	30.1 (1.05)
W-830	63.0	28.9	31.1 (1.08)	29.0 (1.00)	31.1 (1.08)	29.0 (1.00)

( )内は荷重増分に対する比

め、せん断補強による荷重増分とAFRP帯の実測ひずみから得られる分担せん断力について整理した。なお、分担せん断力は、i)修正トラス理論に基づき、斜めひび割れ角度を45度と仮定し、せん断力に抵抗するAFRP帯の本数を3本とした場合(ケース1)、ii)実験結果に基づき、斜めひび割れと交差するAFRP帯を考慮した場合(ケース2)、について算定した。なお、ケース1では図-4におけるAL-2~4のAFRP帯の各最大実測ひずみを用い、ケース2では●印で示した実測ひずみを用いて分担せん断力を算定した。

表より、ケース1の場合には、荷重増分に対する分担せん断力の割合が0.66~1.08までばらついていることが分かる。特に、AFRP帯の目付量が小さい場合には上記の割合が小さく示される傾向にある。これは、AFRP帯の目付量が小さい場合には補強効果が過小評価され、設計でせん断破壊が予想された試験体が曲げ破壊したことに関連するものと考えられる。

一方、ケース2の場合には、分担せん断力の割合が0.88~1.08となっており、ケース1の場合よりも両者の対応が良好である。これは、写真-1に示すようにAFRP帯の目付量により斜めひび割れ角度が変化することに対応して、斜めひび割れと交差するAFRP帯の本数を確定し、分担せん断力を算出していることによるものと推察される。このことから、斜めひび割れ角度を適切に評価することにより、本工法によるせん断耐力向上効果を精度良く算定できるものと考えられる。

以上のことから、斜めひび割れ角度はAFRP帯の目付量により変化するため、それに対応してせん断力を分担するAFRP帯の本数が変化することが明らかになった。また、水中接着したAFRP帯は斜めひび割れの開口を抑制することで部材のせん断耐力向上に寄与することが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究では、水中接着曲げ補強とせん断補強を併用した場合の補強効果の検討を目的として、水中接着樹脂とAFRP

板を用いて水中接着曲げ補強したRC梁に対し、AFRP帯を巻付けてせん断補強を行い、静載荷実験を実施した。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) せん断破壊型のRC梁に対し、水中接着せん断補強を施すことにより、その破壊形式を曲げ破壊型に移行可能である。
- 2) せん断補強用AFRP帯の目付量が大きい場合ほど斜めひび割れの開口が抑制され、AFRP帯の部分剥離も抑制される。
- 3) 斜めひび割れ角度はAFRP帯の目付量により変化するため、それに対応してせん断力を分担するAFRP帯の本数が変化する。

#### 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梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.1327-1332, 2010.7
- 2) 杉本成司, 栗橋祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP帯で水中接着せん断補強したRC梁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.1183-1188, 2014.7
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2012.
- 4) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案), 1998.
- 5) 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.
- 6) 河本幸子, 栗橋祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP板水中巻付け補強によるコンクリート円柱の耐荷性能向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1315-1320, 2013.7