

AFRP 板水中接着により曲げおよびせん断補強した RC 梁の静載荷実験

Static loading tests on flexural and shear strengthened RC beams with submerged AFRP plate bonding method

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 杉本 成司 (Joji Sugimoto)
室蘭工業大学 正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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、検討を行ってきた。既往の研究では、提案の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、水中接着と同程度まで耐力を向上可能であることを明らかにしている^{1), 2)}。しかしながら、提案の工法を用いて 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の研究は未だ行われ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の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 帯を用いてせん断補強した 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³⁾に準拠し、コンクリート実圧縮強度 $f'_c =$

35.7 MPa、軸方向鉄筋の実降伏強度 $f_y = 370$ 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⁴⁾)に準拠し、下式 (1) により算出した。

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

ここに、 A_w : せん断補強面における AFRP 帯の総断面積、 f_{wyd} : AFRP 帯の引張強度、 α : 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に示す値に 0.6 を乗じて評価している。

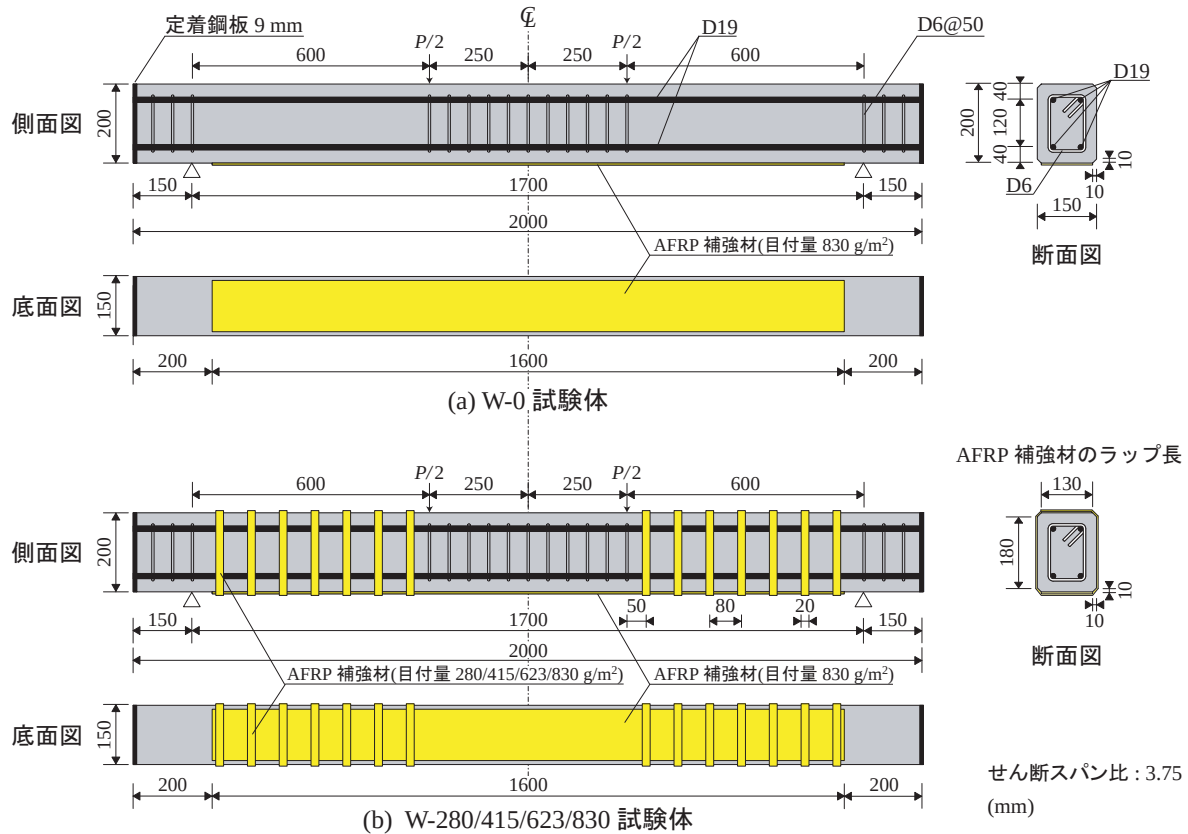
試験体数は、無補強試験体および AFRP 帯の繊維目付量を変化させた全 6 体である。試験体名の内、第 1 項目は AFRP 板による曲げ補強の有無 (N: 無補強, W: 曲げ補強有) を示し、第 2 項の数字は AFRP 帯の繊維目付量 (単位: g/m^2) を示している。

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、断面の四隅には 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 1176 kN/m の AFRP 板を接着している。また、AFRP 帯幅および巻付け補強間隔 s は各々 20 mm、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主剤、硬化剤ともにパテ状の接着樹脂を用い、RC 梁上面における AFRP 帯のラップ部分および下面における AFRP 帯と板の接着には、液状の接着樹脂

表-1 試験体一覧

試験 体名	施工・ 養生環境	AFRP 帯幅 (mm)	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)
				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	気中	-	96.5	63.4	-	63.4	0.66
W-0	水中	20	141		-	63.4	0.45
W-280					33.2	96.6	0.68
W-415					49.2	113	0.80
W-623					74.0	137	0.97
W-830					98.4	162	1.14



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 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
415	588	0.286			
623	882	0.430			
830	1176	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

を用いた。なお、パテ状の水中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」⁵⁾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を確保できることを確認している。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

水中接着補強は、気中で AFRP 板と水中接着樹脂を一体化させ、大型水槽内に設置した RC 梁の所定の位置に配置し、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。また、AFRP 板による曲げ補強を行い十分な養生をした後、AFRP 帯による巻付けせん断補強を行っている。なお、接着樹脂の可使時間 (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。

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。水中接着補強した RC 梁の載荷実験は、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 荷重－変位関係

図－２には、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³⁾に準拠して断面分割法により算出したものである。

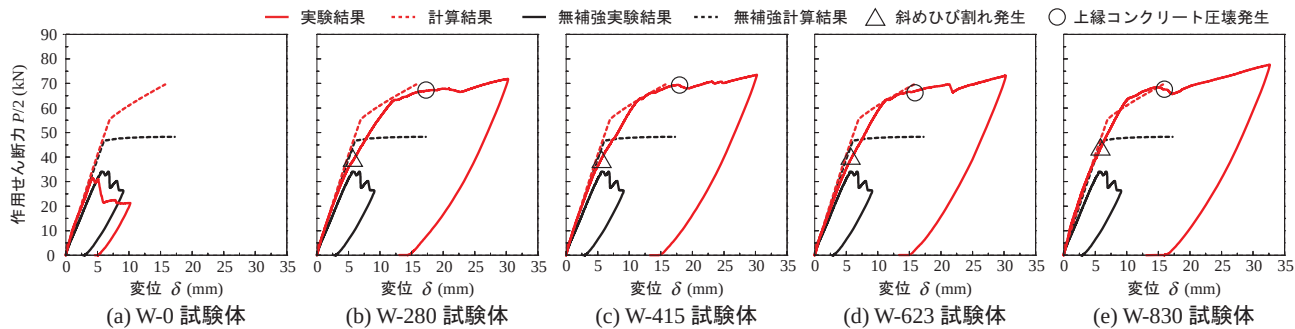


図-2 各試験体における作用せん断力-変位関係の実験結果および計算結果の比較

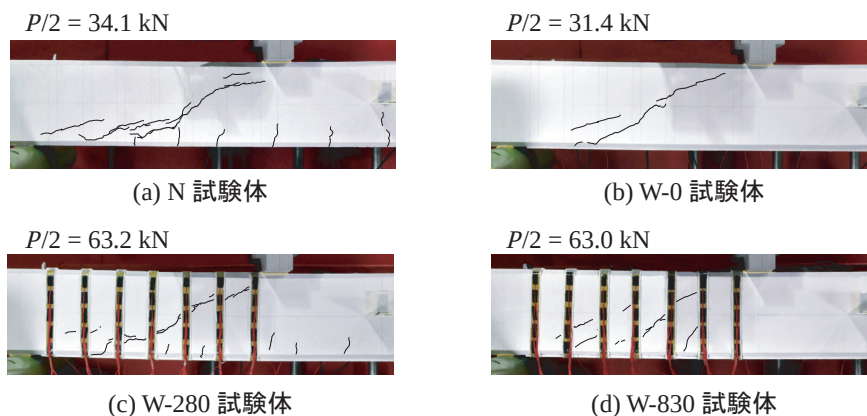


写真-1 ひび割れ性状の一例

図より、無補強試験体および W-0 試験体は W-0 試験体の方が若干小さいものの、作用せん断力が 35 kN 程度まで線形に増加した後、急激に低下し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。

一方、せん断補強試験体の場合には、いずれも作用せん断力が 35 kN に到達した後も増加し、斜めひび割れが発生するとともに計算結果よりも小さな剛性勾配を示していることが分かる。しかしながら、W-830 試験体は他の試験体に比べ、剛性勾配の低下が小さいことが分かる。また、いずれの試験体も作用せん断力が $P/2 = 65$ kN 程度では剛性勾配が急激に低下し、計算結果と同程度の変位にて上縁コンクリートが圧壊している。なお、上縁コンクリート圧壊後も作用せん断力は増加し、変位 $\delta = 30$ mm を超えた後、载荷実験を終了している。これより、AFRP 板で曲げ補強した RC 梁に対して、せん断補強することにより RC 梁の破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行したことが分かる。

3.2 ひび割れ性状

写真-1 には、無補強および W-0 試験体は最大作用せん断力時の、W-280 および W-830 試験体は主鉄筋降伏時のひび割れ性状を示している。

写真より、無補強試験体はひび割れが、载荷点から下端鉄筋配置位置近傍までアーチ状に発生し、さらに支点部に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载荷点から斜め下方に直線的に開口し、せん断破壊に至っていることが分かる。

一方、AFRP 帯で補強した試験体はひび割れが载荷点から斜め下方に直線的に開口しているものの、せん断破壊に

至っていない。また、W-280 試験体は 5 本の AFRP 帯にひび割れが交差し、ひび割れが大きく開口しているのに対し、W-830 試験体は 3 本の AFRP 帯にひび割れが交差し、ひび割れは大きく開口していない。なお、AFRP 帯で巻付けてせん断補強した試験体は実験時に AFRP 帯が部分的に剥離していることを確認している。

3.3 ひずみ分布性状

図-3 には、主鉄筋降伏時における AFRP 帯のひずみ分布を W-280 および W-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 帯のひずみ出力値は写真-1 に示すひび割れの位置と同様の場所で高い値を示していることが分かる。しかしながら、ひび割れの大きさによらず AFRP 帯 AL-2～5 に貼付したひずみゲージは各 AFRP 帯の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 帯が剥離したために、AFRP 帯に発生するひずみが平均化されたためと推察される。

W-830 試験体に巻き付けた AFRP 帯のひずみ出力値は写真-1 に示すひび割れの位置と同様の場所で高い値を示しており、AFRP 帯が剥離しているようなひずみ性状は示していない。

3.4 AFRP 帯の分担せん断力

表-4 には、AFRP 帯のせん断力分担性状を検討するため、せん断補強による耐力増分と 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-3 における AL-2～4

表-4 主鉄筋降伏時における AFRP 帯の分担力

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) 左側	AFRP 帯 3 本の分担力 (kN) 右側	ひび割れ上の AFRP 帯の分担力 (kN) 左側	ひび割れ上の AFRP 帯の分担力 (kN) 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)

() 内は補強による荷重増分に対する比

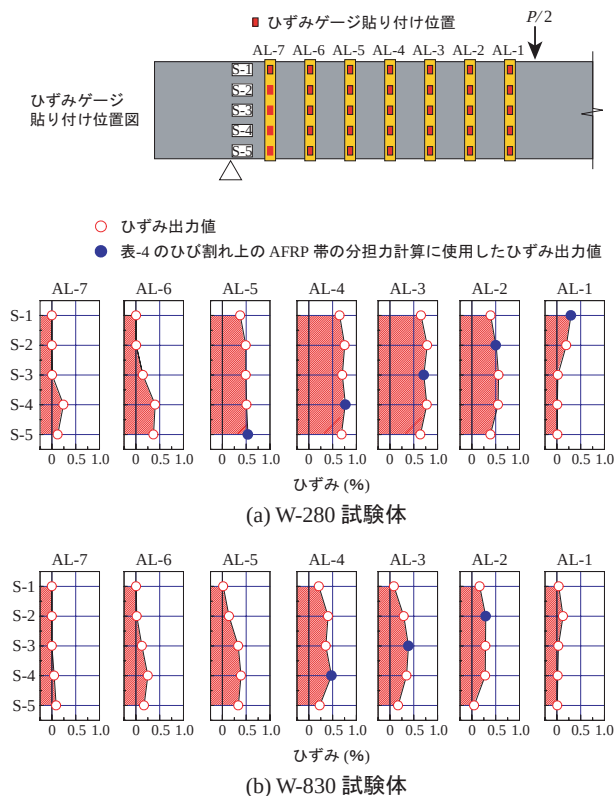


図-3 主鉄筋降伏時における AFRP 帯ひずみ分布の一例

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、補強による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、目付量が小さい場合には AFRP 帯の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、せん断力を分担する 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。

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しており、気中接着の場合と同様の補強効果を発揮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 帯を巻付けせん断補強を施し、静載荷実験を行った。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) 水中接着曲げ補強した RC 梁に対し、水中接着せん断補強を施すことにより、せん断破壊型 RC 梁の破壊形式を曲げ破壊型に移行可能である。
- 2) 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。
- 3) 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。

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.
- 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.
- 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.