

AFRP シートを下面接着したせん断破壊型 RC 梁の耐荷性状に関する実験的研究

Experimental study on load carrying capacity for shear failure type RC beam bonded with AFRP sheet

室蘭工業大学
三井住友建設 (株)
室蘭工業大学
室蘭工業大学
(株) ケイジーエンジニアリング

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正会員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)
○ 学生員 近藤 雅俊 (Masatoshi Kondo)
正会員 巽 治 (Osamu Tatsumi)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象にした補修・補強工事に連続繊維シート (以後、FRP シート) を用いた接着工法が多く採用されている。これまで FRP シートを用いて RC 部材を補強する際の合理的な補強設計手法の確立を目的に、諸研究機関において FRP シートで補強した RC 部材を用いた数多くの実験的検討が行われてきた。その中で、押し抜きせん断破壊で終局に至る RC 版を対象として FRP シートを下面接着する場合には、三次元的な挙動を示すため、シート接着が耐荷性状に与える影響は十分には把握されていないのが現状である。著者らは、既往の研究で RC 版の押し抜きせん断耐荷性状に与えるシート補強の影響をより詳細に検討するため、せん断破壊で終局に至る FRP シート下面接着 RC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を実施した¹⁾。その結果、シートの補強効果に主鉄筋降伏の有無が大きく影響し、主鉄筋が降伏する場合には補強効

果が大きく発揮され、降伏しない場合にはほとんど出現しないことを明らかにしている。しかしながら、主鉄筋が降伏しない場合にはせん断ひび割れが支点近傍のシート無接着部にまで進展し、シート定着長が不足したため補強効果が出現しなかったものと考えられた。

そこで本研究では、シートの定着長を十分に長くしたせん断破壊型の FRP シート下面接着 RC 梁を用いた 3 点曲げ載荷実験を行い、その耐荷性状に関する検討を行った。

2. 試験体の概要

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法、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 (梁幅 × 梁高) 15 × 25 cm、純スパン長 2.4 m、軸方向鉄筋に D13 または D22 を上・下端に 2 本ずつ配置した複鉄筋矩形 RC 梁である。なお、試験体にはせん断破壊先行とするため、せん断補強筋を配置していない。

曲げ補強シートの補強範囲は、梁幅方向に 13 cm、梁軸方向には梁中央部から両支点の 3 cm 手前までとしている。なお、シート接着部のコンクリート表面には付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理 (処理深さ 1 ~ 2

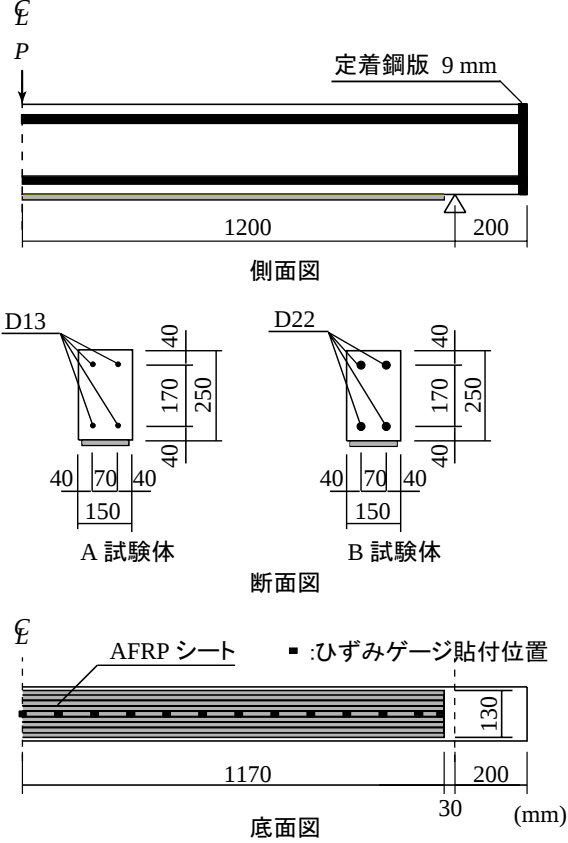


図-1 RC 梁の形状寸法、配筋状況および補強概要

表-1 試験体一覧

試験体名	軸方向鉄筋	補強層数	体積補強割合 (%)	曲げ耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)	せん断余裕度
A-N	D13	無補強	0	32.7	59.5	1.82
A-S1		1層	0.99	60.1		0.99
A-S2		2層	1.98	79.2		0.75
A-S3		3層	2.97	92.9		0.64
A-S4		4層	3.97	103.9		0.57
B-N	D22	無補強	0	90.7	86.3	0.97
B-S1		1層	0.99	110.2		0.79
B-S2		2層	1.98	126.0		0.69
B-S3		3層	2.97	139.2		0.63
B-S4		4層	3.97	150.3		0.58

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	0.286	2.06	118	1.75

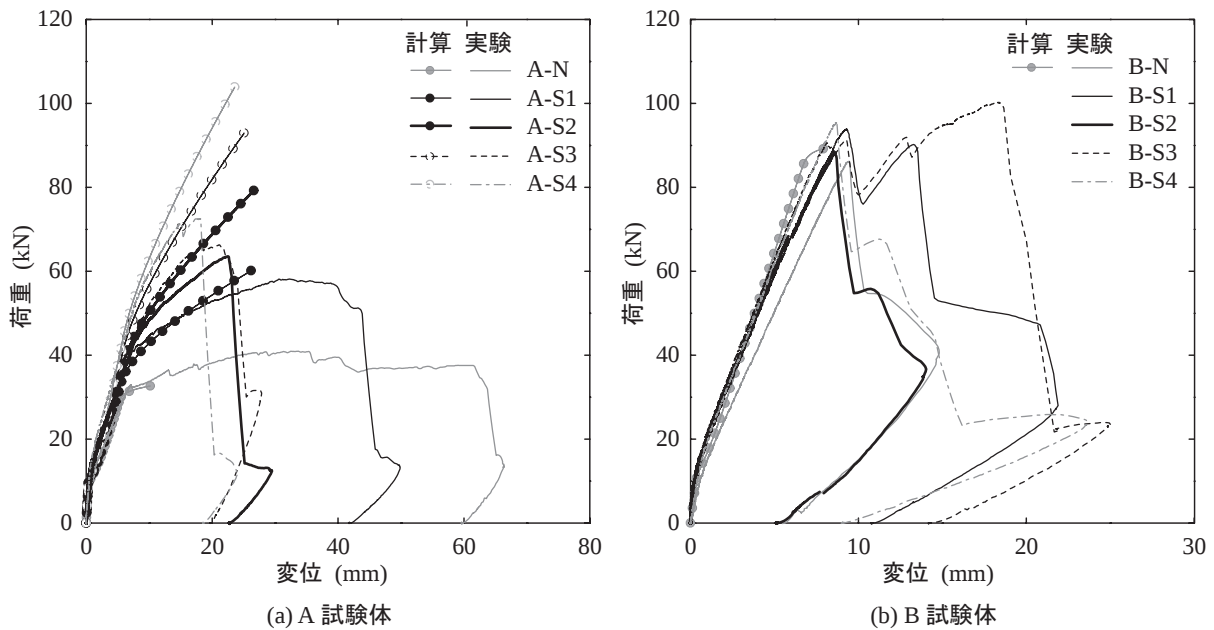


図-2 荷重-変位関係

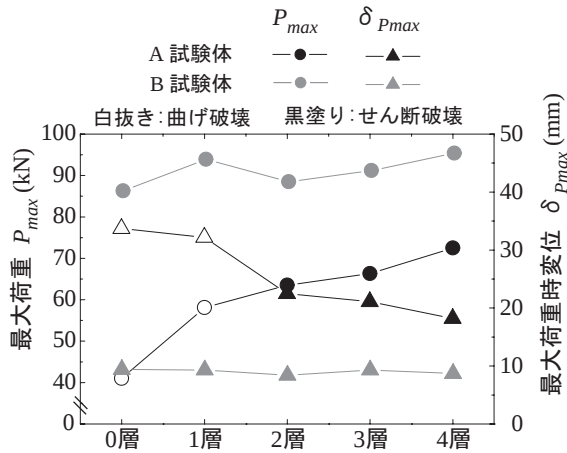


図-3 シート層数と最大荷重および最大荷重時変位の関係

mm)を施している。また、シート上には、検長10mmのひずみゲージをスパン中央部から両支点側に10cm間隔およびシート端部に貼り付けている。

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、軸方向鉄筋を2種類、シート層数を無補強を含む5種類に変化させた全10体のRC梁である。表中、試験体名の第一項目は軸方向鉄筋の種類(A:D13, B:D22)、第二項目のNは無補強, Sは補強試験体を示しており、それに付随する数字は補強層数を示している。また、表には体積補強割合、計算曲げ耐力、せん断耐力およびせん断余裕度を併せて示している。曲げ耐力は平面保持を仮定した断面分割法を用いて、上縁コンクリートの圧壊ひずみを $3,500\mu$ として算出した。また、せん断耐力はコンクリート標準示方書²⁾に準拠し、シート補強を無視して算出している。また、せん断余裕度は、せん断耐力を曲げ耐力で除した値であり、1.0を下回る場合には計算上せん断破壊するものと判断される。本実験に用いた試験体は、無補強時に曲げ破壊し、FRPシートで下面接着を行うことによりせん断破壊型に移行することが予想されるA試験体と、無補強時および補強後もせん断破壊が予想されるB試験体の2種類である。

実験時のコンクリートの材齢は66日、平均圧縮強度は $f'_c = 40.6 \text{ MPa}$ であった。また、軸方向鉄筋D13, D22の降伏強度はそれぞれ $f_y = 373, 380 \text{ MPa}$ 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。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重とスパン中央変位(以後、単に変位)の関係を断面分割法による計算結果と比較して示している。図中の計算結果はA試験体では全試験体について示しているが、B試験体では、いずれも主鉄筋降伏の前にせん断破壊していることより、B-N試験体の結果のみを示している。図-3には図-2より得られる最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{Pmax} と補強層数の関係を示している。図中、A試験体の白抜きは曲げ破壊を、黒塗りはせん断破壊をしたことを示す。

図-2(a)より、無補強のA-N試験体は計算結果とほぼ対応し、計算終局荷重および変位を大きく上回った後に、上縁コンクリートの圧壊を伴って終局に至ったことがわかる。シート補強したA-S1試験体は、主鉄筋降伏後の第2勾配が計算結果よりも若干小さいもののほぼ対応し、上縁コンクリートの圧壊後に終局に至っている。

一方、A-S2/S3/S4試験体は主鉄筋降伏時まではほぼ計算結果と対応しているものの、その後、剛性勾配が低下し、計算終局点到達前の60~70kN程度で急激に荷重が低下している。これより、上記試験体はせん断破壊により終局に至っていることがわかる。ここで、図-3より、A試験体ではシートの補強層数の増加に伴い最大荷重が増加し、最大荷重時変位が減少する傾向にあることがわかる。特に、シート下面接着後においても曲げ破壊したA-S1試験体では耐力の増大が顕著である。一方、主鉄筋降伏後にせん断破壊に至った試験体では、シート補強層数の変化による最大荷重および変位の変動が少ないことがわかる。

図-2(b)より、無補強のB-N試験体は、計算結果と比較して荷重の増加とともに剛性勾配が小さくなる傾向にある

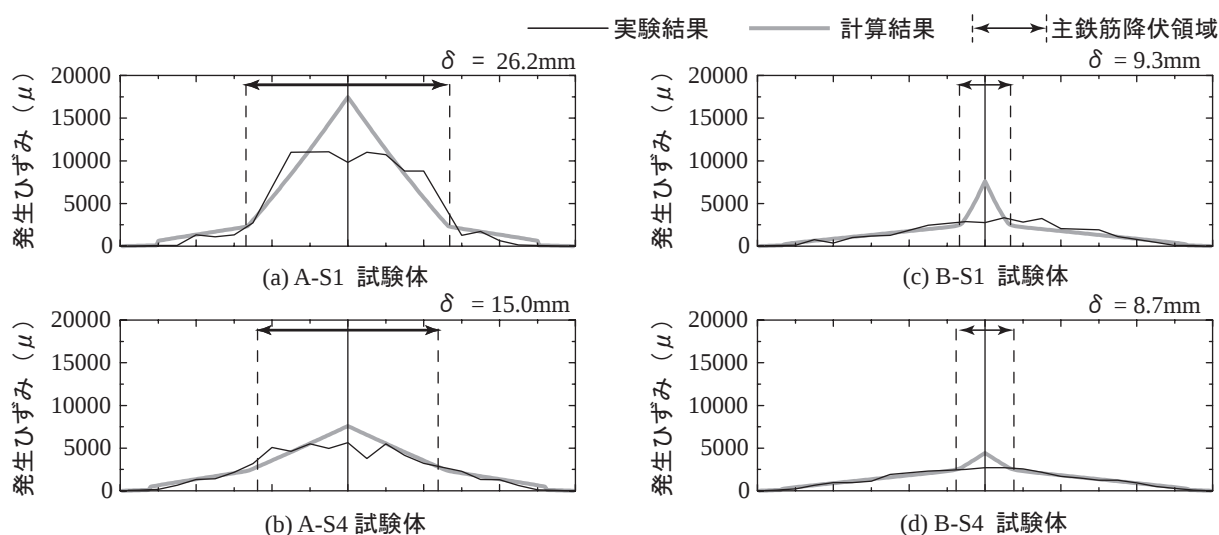


図-4 実測最大荷重時におけるシートのひずみ分布性状

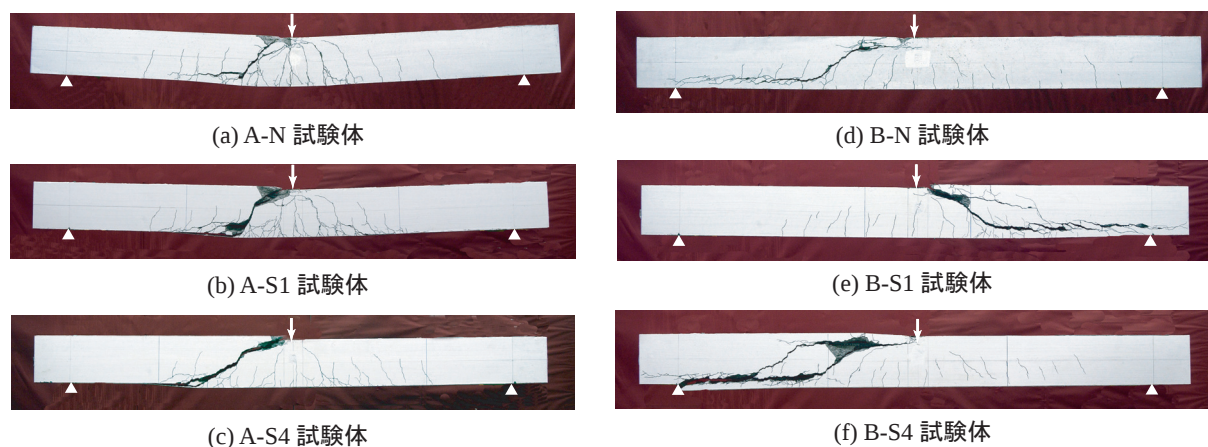


写真-1 ひび割れ分布性状

ことがわかる。その後、86 kN 程度で急激な荷重低下を伴うせん断破壊により終局に至っている。

シート補強した B-S 試験体は、シート補強層数が多いほど初期勾配が大きくなる傾向にあるものの、ほぼ同程度の荷重および変位で斜めひび割れの開口に伴う荷重低下により終局に至っている。なお、B-S1/S3 試験体では荷重低下の後、荷重が再度増加する傾向にある。これは、載荷点近傍に斜めひび割れが発生するものの、梁中央部から支点近傍までシートの定着長が確保されたことにより、載荷点と支点を結ぶアーチ作用が働いたことによるものと推察される。また、図-3 より、B 試験体の最大荷重および最大荷重時変位は補強層数にかかわらずほぼ同様の値を示していることがわかる。これらのことより、既往の研究結果¹⁾と同様に主鉄筋が降伏する前にせん断破壊で終局に至る RC 梁の場合には、シートの補強効果はほとんど発揮されないことが明らかになった。

3.2 シートのひずみ分布性状

図-4 には、実測最大荷重時におけるシートのひずみ分布を同一変位時の計算結果と比較して示している。図には、A-S1/S4、B-S1/S4 試験体の結果を示しており、A-S1 試験体は計算終局変位時、A-S4、B-S1/S4 試験体は実測最大荷重時の結果を示している。図より、A-S1 試験体の計算結果は、載荷点を頂点とする二等辺三角形形状の分布を示し

ているのに対し、実験結果は主鉄筋降伏領域を底辺とする台形状の分布を示している。これは主鉄筋降伏領域においてピーリング作用が顕在化し、シートひずみが均等化したためと考えられる。しかしながら、シートの発生ひずみは約 10,000 μ であり、接着端部ではほぼ計算結果と対応していることから、シートの補強効果が大きく出現していることがわかる。一方、主鉄筋降伏後にせん断破壊により終局に至った A-S4 試験体では、実測最大荷重時において 5,000 μ 程度のひずみが発生し、左側スパンの主鉄筋降伏領域ではピーリングの発生に伴うひずみの均等化が見られる。このことから、シートのせん断破壊直前までは既往の研究結果と同様、ピーリング作用によるシート剥離が進展するものの、せん断耐力を超えた後にせん断破壊に至ったことがわかる。

B 試験体の実測最大荷重時の計算結果では、主鉄筋が降伏しているものの、降伏範囲は小さく実験結果は計算結果とほぼ対応した分布を示している。また、シートに発生したひずみは 3,000 μ 程度である。このことから、主鉄筋が降伏しない場合には、シートの補強効果がほとんど発揮されないことが明らかになった。

3.3 ひび割れ分布性状

写真-1 には、A/B-N/S1/S4 試験体の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。写真より、A-N 試験体

表-3 実験結果一覧

試験体名	降伏荷重 P_y (kN)	降伏変位 δ_y (mm)	最大荷重 P_{max} (kN)	最大荷重時変位 $\delta_{P_{max}}$ (mm)	耐力 増加割合	破壊形式
A-N	31.9	6.7	41.0	33.7	-	曲げ破壊
A-S1	40.4	7.0	58.1	32.2	1.42	
A-S2	44.1	8.0	63.5	22.5	1.55	せん断破壊
A-S3	47.1	8.3	66.3	21.1	1.62	
A-S4	53.2	8.0	72.5	18.2	1.77	
B-N	-	-	86.3	9.4	-	せん断破壊
B-S1	-	-	93.9	9.3	1.09	
B-S2	-	-	88.5	8.4	1.03	
B-S3	-	-	91.2	9.3	1.06	
B-S4	-	-	95.4	8.7	1.11	

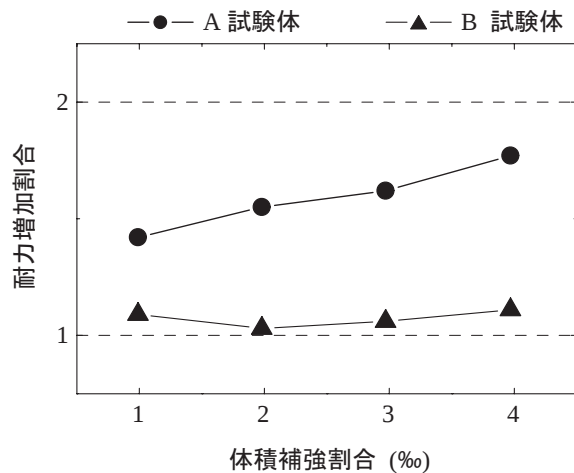


図-5 体積補強割合と耐力増加割合の関係

は、梁下縁より曲げひび割れが梁全体に発生し、荷点近傍には斜めひび割れの開口が見られる。また、A-S1/S4試験体においても、A-N試験体と同様に梁下縁から曲げひび割れが発生し、荷点近傍の下縁かぶり部ではピーリング作用の起因となる斜めひび割れが発生していることがわかる。また、終局時には、荷点より斜め下方に向かってひび割れが大きく開口している。なお、開口した斜めひび割れの角度は、A-S4試験体の方が、A-N/S1試験体よりもゆるやかである。

一方、B試験体では、無補強のB-N試験体で荷点近傍の上端鉄筋に沿う割裂ひび割れから斜めひび割れに進展し、下端鉄筋に沿う割裂ひび割れが支点まで達していることがわかる。またB-S1/S4試験体では斜めひび割れが発生し、下端鉄筋に沿う割裂ひび割れが進展し、支点の外側まで連続している。また、斜めひび割れの外側にアーチ状のひび割れも発生している。これは、前述したようにシート定着長が十分であることより荷点と支点を結ぶアーチ作用が発揮されたことを示すものと考えられる。

3.4 シート下面接着による補強効果の検討

表-3には、本実験結果より得られた降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y 、最大荷重 P_{max} 、最大荷重時変位 $\delta_{P_{max}}$ 、無補強試験体に対する耐力増加割合および終局時の破壊性状を一覧にして示している。なお、耐力増加割合はA/B-S補強試験体の最大荷重をA/B-N試験体の最大荷重で除した値である。また、図-5には、体積補強割合と耐力増加割合との

関係を示している。図より、無補強時に曲げ破壊するA試験体では、体積補強割合の増加とともに耐力増加割合がほぼ線形に増大していることがわかる。これは、シートの補強効果が主として主鉄筋降伏後に発揮されることより、耐力の増加割合が大きく示されたものと考えられる。一方、無補強時にせん断破壊するB試験体では、シートの補強割合にかかわらず、シートの耐力増加割合は最大でも1.1倍程度である。このように、主鉄筋の降伏を伴ってせん断破壊する場合にはシートの補強効果が出現するものの、主鉄筋が降伏しない場合はシートの補強効果はほとんど出現していない。これは、シートを下面接着したRC版の押し抜きせん断耐力が、主鉄筋が降伏する場合に大きく、降伏しない場合は小さいこと³⁾と対応している。

4. まとめ

本研究では、せん断破壊によって終局に至るFRPシート下面接着RC梁の耐荷性状に関する検討を目的に無補強時に曲げ破壊するRC梁とせん断破壊するRC梁を対象にシート補強を行い、3点曲げ荷重実験を行った。本研究の範囲内で得られた結論は以下の通りである。

- 1) シート下面接着後、RC梁のせん断耐力が降伏耐力よりも大きく主鉄筋が降伏する場合には、補強量の増加とともに耐力は増加する傾向にある。また、せん断破壊が発生するまでは既往の研究と同様にピーリング作用が顕在化する。
- 2) シート下面接着後、RC梁のせん断耐力が降伏耐力よりも小さい場合には、シートの補強効果は小さい。

参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田学, 澤田純之: FRPシート下面接着RC梁のせん断耐力に及ぼす主鉄筋降伏の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1429-1434, 2005
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 2002
- 3) 三上 浩, 岸 徳光, 藤田学, 澤田純之: AFRPシート下面接着RC版の押し抜きせん断性状に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1299-1307, 2005