

載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート曲げ補強効果に関する実験的研究

Flexural strengthening effects of AFRP sheet on RC beams with loading history

室蘭工業大学
 室蘭工業大学
 三井住友建設（株）
 室蘭工業大学 大学院

○ 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 AbdelAziz Mohamed Ali

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修補強工法として、連続繊維 (FRP) シート接着工法が広く採用されている。しかしながら、既設 RC 構造物は長期供用や近年の過積載車両通行の影響等により、ひび割れや残留変位を生じているものも少なくない。一方、これまで FRP シートによる RC 部材の耐力向上効果に関する研究は、国内外において数多く実施されているものの、著者らの研究も含め、そのほとんどは新設の試験体を対象とした検討に留まっている。FRP シート接着工法による既設 RC 構造物の補強効果を適切に評価するためには、新設のみならずひび割れや残留変位を生じた RC 部材を対象とした検討が重要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、FRP シート接着工法による既設 RC 部材の曲げ補強効果を適切に評価することを目的に、事前載荷によりひび割れおよび残留変位等の損傷を与えた RC 梁を対象として FRP シート接着工法による補強効果を実験的に検討した。

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、無補強試験体の他、シート補強量を2種類、事前載荷レベルを3種類に変化させた全7体である。なお、シートには保証耐力が588 kN/mのアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを1層もしくは2層用いている。

表中、試験体名の第1項目の英文字 S に付随する数値は AFRP シート層数、第2項目の英文字 L に付随する数値は事前載荷レベルを示している。ここで、事前載荷レベルは、無補強試験体の実験結果を参考にして設定しており、表中の事前載荷レベル 1, 2 は、それぞれ主鉄筋が降伏に至る載荷レベル、およびスパン中央部の残留変位が純スパン長の4% (10.4 mm) 程度となる載荷レベルと設定した。

表－1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋	シート層数	事前載荷レベル	予想される破壊形式
N	D16	-	-	曲げ圧壊型
S1-L0		1	無し	
S1-L1			レベル 1	
S1-L2			レベル 2	剥離破壊型
S2-L0		2	無し	
S2-L1			レベル 1	
S2-L2			レベル 2	

図－1 には、本実験に用いた試験体の概要を示している。試験体は、断面寸法 (幅 × 高さ) 15 × 25 cm、純スパン長 2.6 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には SD345 D16 を2本ずつ配置している。曲げ補強シートの幅は、梁幅と同様とし、梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に接着した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、29.5 MPa であった。また、鉄筋の降伏強度は、392 MPa であった。表－2 には、AFRP シートの力学的特性値 (公称値) を示している。

2.2 実験方法

本実験において、事前載荷により RC 梁に損傷を与える場合には、載荷前に RC 梁下面にブラスト処理を施している。事前載荷終了後、試験体を反転させて前述の補強範囲にプライマーを塗布し、含浸接着樹脂を用いて AFRP シートを接着した。また、樹脂硬化後、再度 RC 梁を実験装置に設置し、梁が終局に至るまで載荷を行った。なお、これらの載荷実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて行っている。

本実験の測定項目は、載荷荷重、スパン中央点変位 (以後、変位) および AFRP シートのひずみ分布である。また、実験時には、RC 梁のひび割れ進展状況やシートの剥離・破断状況をデジタルカメラを用いて逐次的に撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 事前載荷時の結果

表－3 には、事前載荷時における各試験体の実験結果を一覧にして示している。表には、最大荷重時および除荷後における荷重、変位、主鉄筋および上縁コンクリートのひずみを示している。表より、事前載荷レベル 1, 2 の場合において、除荷後の残留変位はそれぞれ 1 ～ 2, 10 mm 程度となっており、特に事前載荷レベル 2 の場合には主鉄筋および上縁コンクリートに過大な残留ひずみが生じていることが分かる。

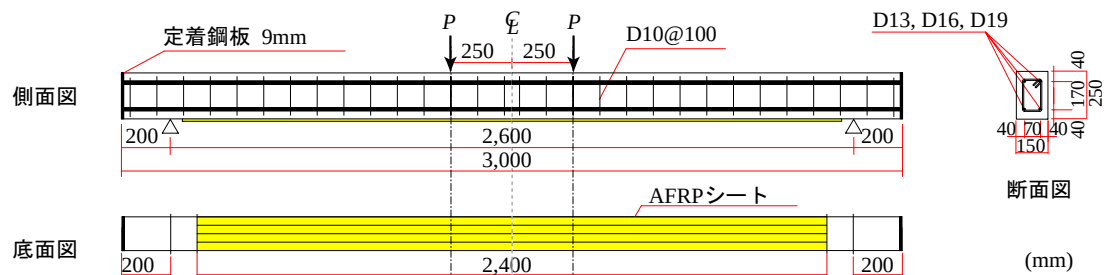
3.2 荷重－変位関係

図－2 には、各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果を事前載荷時の結果および無補強試験体の結果と併せて示している。

図より、いずれの補強試験体も無補強試験体に比較して

表－2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

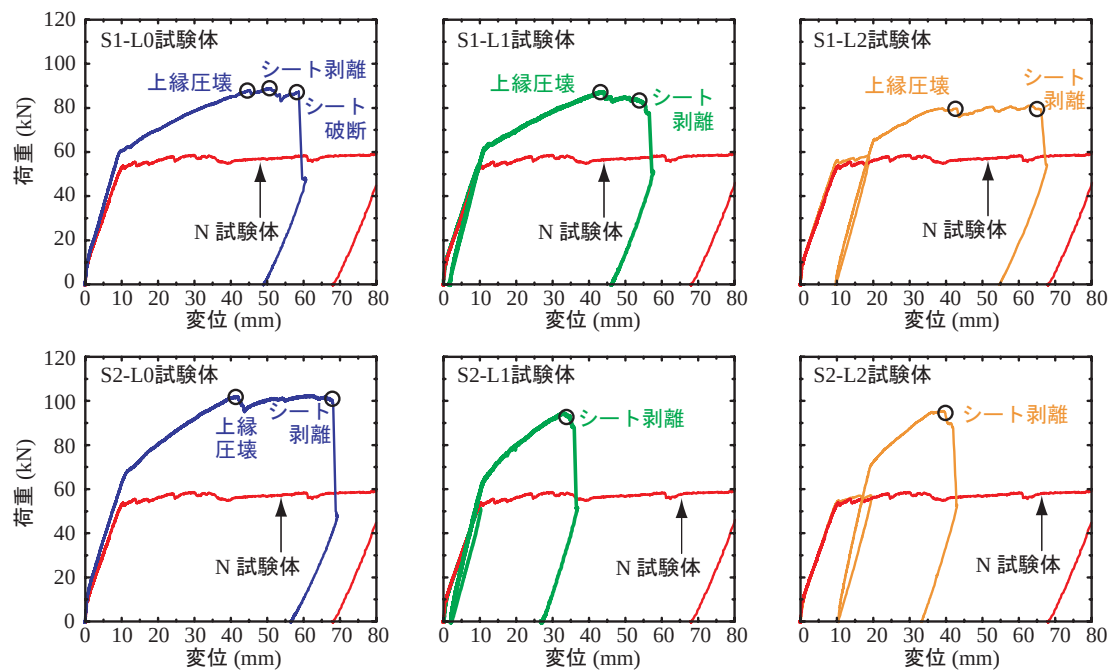
繊維目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75



図－１ 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

表－３ 事前荷重時における実験結果

試験体名	最大荷重時				除荷後		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリート ひずみ (μ)	変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)	上縁コンクリート ひずみ (μ)
S1-L1	53.9	9.5	1,911	-1,092	1.3	270	-100
S2-L1	51.0	10.2	1,873	-1,407	2.1	420	-378
S1-L2	57.5	18.8	16,609	-3,043	9.6	11,510	-1,665
S2-L2	56.8	19.5	16,847	-2,259	10.3	14,560	-1,035



図－２ 各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果

主鉄筋降伏荷重が若干大きく、かつ主鉄筋降伏後においては剛性勾配の低下を伴うものの、変位の増加に伴い荷重が増大していることが分かる。なお、主鉄筋降伏後、主鉄筋降伏後の剛性勾配および最大荷重は、シート補強量の多い S2 梁の場合が S1 梁の場合よりも大きくなる傾向にある。また、S1 梁の場合には、事前荷重レベルによらず、上縁コンクリート圧壊後、シート剥離に至る性状を示している。なお、上縁コンクリートが圧壊に至る変位は、事前荷重レベルによらずほぼ同様 (40 mm 程度) である。

S2 梁の場合において、事前荷重のない S2-L0 試験体の場合には、最大荷重時に上縁コンクリートが圧壊した後、シートの部分剥離が生じ、変位の増大に伴って剥離範囲が増大して完全剥離に至っている。これに対し、事前荷重した

S2-L1/2 試験体の場合には、上縁コンクリートの圧壊前にシートが完全に剥離して荷重が急激に低下している。

以上のことより、AFRPシートの付着性状に及ぼす事前荷重の影響は、S1 梁よりも S2 梁において強く現れることが明らかになった。

図－３には、荷重－変位関係に関する実験および計算結果の比較図を事前荷重による残留変位を考慮せずに、S1 および S2 梁について整理して示している。なお、計算結果は土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に準拠して、断面分割法により算出したものである。

図より、S1/S2 梁ともに、主鉄筋降伏までの剛性勾配 (以後、初期剛性) は事前荷重レベルによらず、ほぼ同程度となっていることが分かる。従って、事前荷重を受ける場合

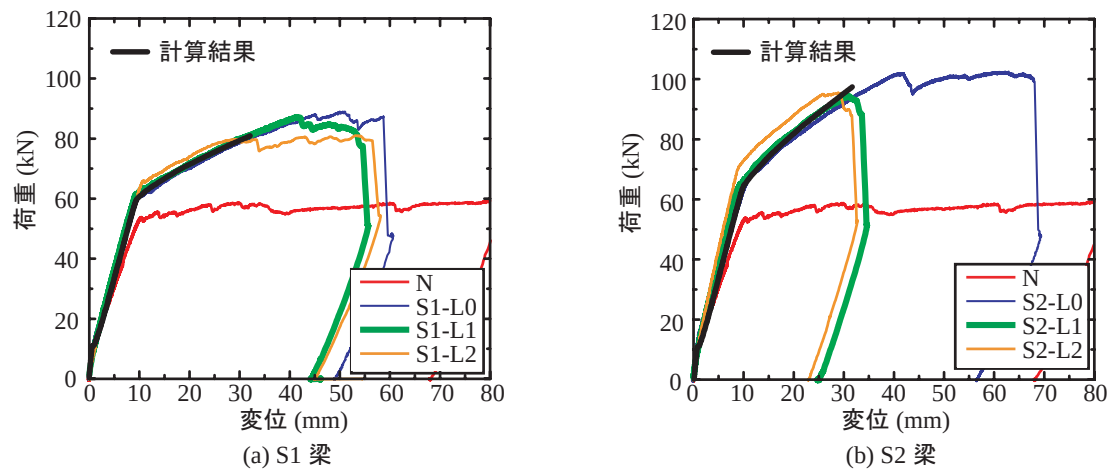


図-3 荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較図

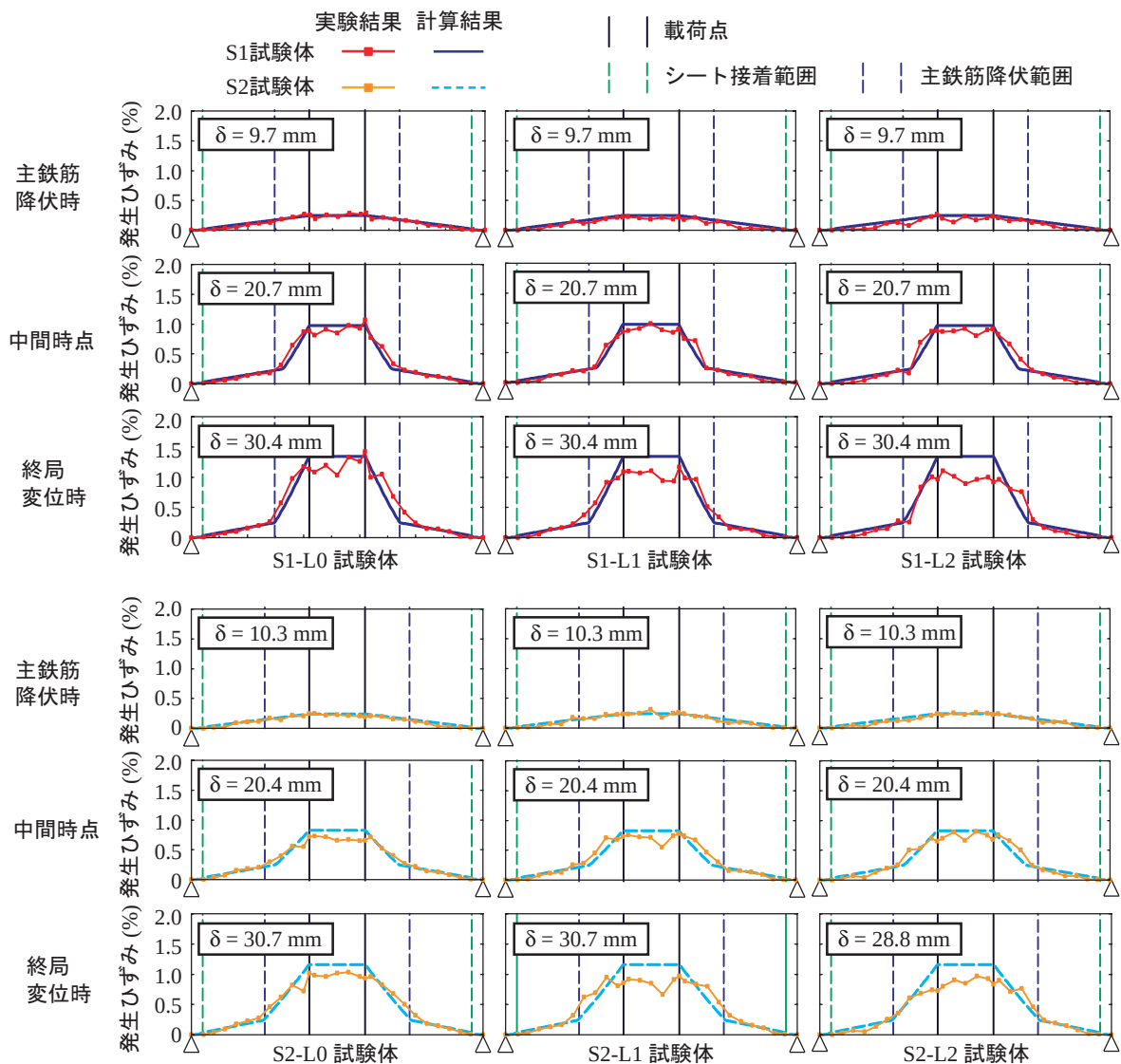


図-4 AFRPシートの軸方向ひずみ分布性状に関する実験および計算結果の比較

においても、RC 梁の初期剛性は、AFRPシート補強により新設RC 梁を補強する場合と同程度まで改善されるものと考えられる。

主鉄筋降伏後の結果を見ると、S1 および S2 梁の場合に

は、それぞれ事前荷重レベルが大きい場合ほど、小さな変位で上縁コンクリートの圧壊およびシート剥離を生じている。これは、S1 梁の場合には事前荷重時に生じた上縁コンクリートの残留ひずみの影響によるものと考えられる。

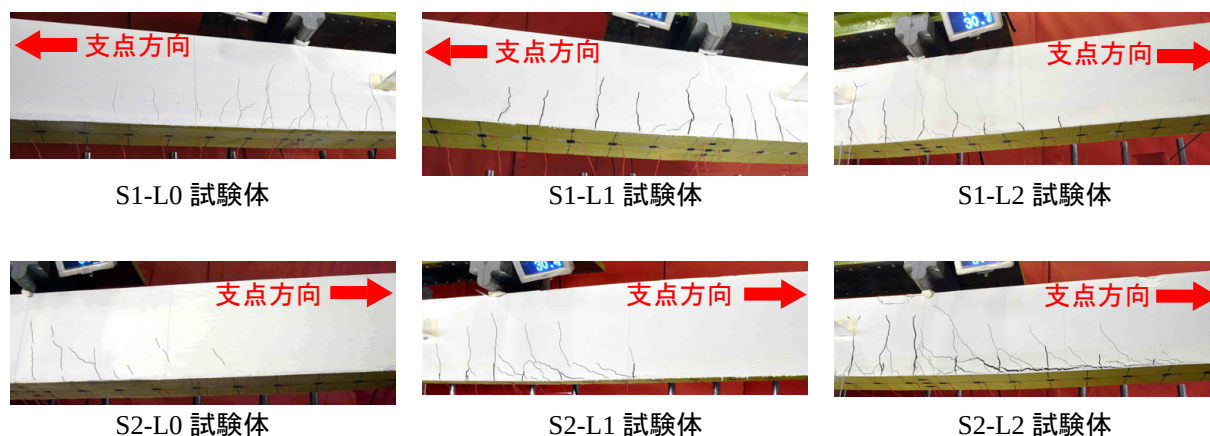


写真-1 各補強試験体におけるAFRPシートの剥離進展状況

一方、S2梁の場合には、後述するように事前载荷により生じた残留変位がピーリング作用によるシート剥離を促進したことによるものと推察される。

3.3 AFRPシートの軸方向ひずみ分布

図-4には、各試験体のAFRPシートの軸方向ひずみ分布に関する実験および計算結果の比較図を図-3を参考に1) 主鉄筋降伏時、2) 計算主鉄筋降伏時および終局時の中間の変位時(以後、中間時点)、3) 終局変位時について示している。なお、終局変位時については、S1-L0/1/2、S2-L0/1試験体場合には計算終局変位時のひずみ分布を示し、S2-L2試験体場合には計算終局時に至る前にシート剥離により終局に至っているため実測終局変位時のひずみ分布を示している。

図より、事前载荷していないS1/2-L0試験体の実験結果は主鉄筋降伏時から終局変位時まで計算結果と良く対応していることが分かる。このことより、シートとコンクリートとの付着は終局変位時まで十分に確保されているものと判断される。

事前载荷を行ったS1/2-L1、S1/2-L2試験体の場合には、中間時点までは実験および計算結果が良く対応している。しかしながら、終局変位時では、S1/2-L1試験体場合には、等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみよりも $2,000\mu$ 程度小さく、主鉄筋降伏領域外においても大きなひずみが発生している。特に、S2-L1試験体場合には、このような傾向が顕著であり、この時点においてシートの部分剥離が進展しているものと考えられる。なお、実験時にはこの直後、シートが全面剥離に至っていることを確認している。また、事前载荷レベルの大きいS1/2-L2試験体場合には、S1/2-L1試験体の場合よりも等曲げ区間の実測ひずみが小さい。これは、後述するように、シートの部分剥離の他、事前载荷時に生じた上縁コンクリートの残留ひずみの影響により圧縮破壊を生じているためである。

以上のことより、AFRPシート曲げ補強RC梁は、事前载荷の影響により、シートの部分剥離や上縁コンクリートの圧縮破壊が早期に発生することが明らかになった。

3.4 破壊性状

写真-1には、図-4に示した各終局時におけるRC梁側面のひび割れ性状を示している。

写真より、S1/2梁ともに事前载荷レベルが大きい場合ほど、ひび割れの発生・開口およびシートの部分剥離が顕在

化していることが分かる。また、事前载荷レベルの大きいS1/2-L2試験体場合には、シートの部分剥離の他、上縁コンクリートの圧縮破壊も見受けられる。

シートの部分剥離は、いずれの試験体においても下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れがシートを下方に押し出して引き剥がずピーリング作用により生じている。また、シートの部分剥離は、シート補強量の多いS2梁の場合においてより顕著に現れている。

なお、著者らの既往の研究においては、ピーリング作用によるシート剥離の起因となる下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れは、主としてRC梁の主鉄筋降伏範囲において、曲率の増大に伴って大きく開口することが明らかになっている。従って、事前载荷により残留変位を生じた状態(曲率を有する状態)でシート補強を行う場合には、ピーリング作用によるシートの部分剥離が早期に生じるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、FRPシート接着工法による既設RC部材の曲げ補強効果を適切に評価するため、事前载荷によりひび割れや残留変位等の損傷を与えたRC梁を対象にFRPシート補強する場合の曲げ耐荷性状を実験的に検討した。本実験により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) AFRPシート補強により、事前载荷によりひび割れや残留変位を生じたRC梁においてもその初期剛性や降伏荷重を改善可能である。ただし、事前载荷により、シートの剥離や上縁コンクリートの圧壊が早期に発生する。
- 2) ピーリング作用によるシート剥離の起因となる下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れは、主としてRC梁の主鉄筋降伏範囲において、曲率の増大に伴って大きく開口する。そのため、事前载荷により残留変位を生じた状態(曲率を有する状態)でシート補強を施した場合には、ピーリング作用によるシートの部分剥離が早期に生じる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、2007