

論文 側面接着を施した FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に関する実験的研究

澤田 純之^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 本研究では, シートの剥離破壊が予想される FRP シート曲げ補強 RC 梁の効率的なシート剥離抑制法の確立を目的に, 梁側面に FRP シートを接着した FRP シート曲げ補強 RC 梁の静的 4 点曲げ載荷実験を実施した。検討の結果, 計算終局耐力程度まで曲げ補強シートの剥離を抑制するためには, 側面接着シートの繊維強化方向を 2 方向または梁軸方向とし, 補強範囲を梁軸方向に計算終局時の主鉄筋降伏領域, 梁高さ方向に梁高の 1/2 程度の範囲に接着する必要があること, 側面接着シートの目付量が多い場合には小さい変位レベルで剥離する傾向にあること, 等が明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP シート, ピーリング作用, 側面接着法

1. はじめに

近年, 連続繊維シート (以後, FRP シート) を用いた補修・補強工法が採用されるようになり, 諸研究機関で様々な検討が行われている。著者らも, FRP シートを梁部材の引張側底面に接着した FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する実験¹⁾を実施してきた。その結果, 1) 曲げ補強シートの剥離は載荷点近傍下縁かぶり部に発生する斜めひび割れの開口に伴うピーリング作用によって発生すること, 2) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は, 平面保持を仮定し, コンクリート標準示方書²⁾に準拠した断面分割法による計算結果 (以後, 単に計算結果) の終局耐力および終局変位到達前にシート剥離を生じ破壊に至る剥離破壊型と, 計算終局変位を上回り, 上縁コンクリートが圧壊した後に計算終局耐力と同程度のレベルで終局に至る曲げ圧縮破壊型に分類されること¹⁾, を明らかにしている。

破壊形式のうち, 剥離破壊型と判定される場合には, 計算終局時まで曲げ補強シートの剥離を抑制する必要がある。著者等は, 簡便な剥離抑制法として, ピーリング作用の要因となる下

縁かぶり部に発生する斜めひび割れの発生を抑制することを目的として, 梁側面にシートを接着する側面接着法を提案し, その効果を種々検討してきた^{3),4)}。その結果, 1) 側面接着シートの目付量が少なく, 繊維強化方向が梁高さ方向の場合には側面接着シートの横糸が破断し, その部分でせん断ずれが発生するために剥離抑制効果が低いこと, 2) 斜めひび割れが発生する等せん断力区間の主鉄筋降伏領域のみに側面接着する場合には等曲げ区間が弱点となり, その領域の載荷点近傍部でピーリングに伴うシート剥

表-1 試験体一覧

試験体名	側面接着シート			
	目付量 (g/m ²)	繊維 強化方向	接着高さ (cm)	接着 範囲
S0	-	-	-	-
S1-cr1,2,3	415	2 方向	-cr1, -h1, -v1 : 8.7 cm	S0 試験体 主鉄筋 降伏 領域
S1-h1,2,3		梁軸方向		
S1-v1,2,3		梁高さ方向		
S2-cr1,2,3	830	2 方向	: 12.5 cm	
S2-h1,2,3		梁軸方向		
S2-v1,2,3		梁高さ方向	: 19.8 cm	

*1 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科 研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所 構造部 材料研究室 研究員 博(工) (正会員)

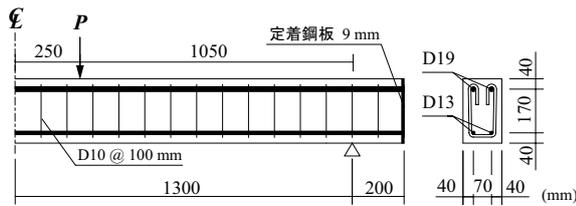


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

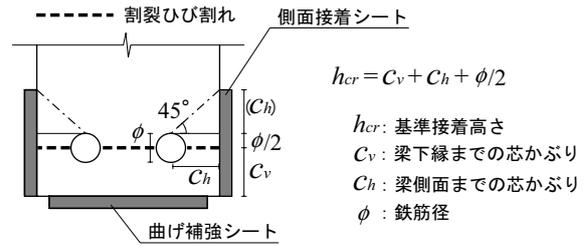


図-3 シートの基準接着高さに関する模式図

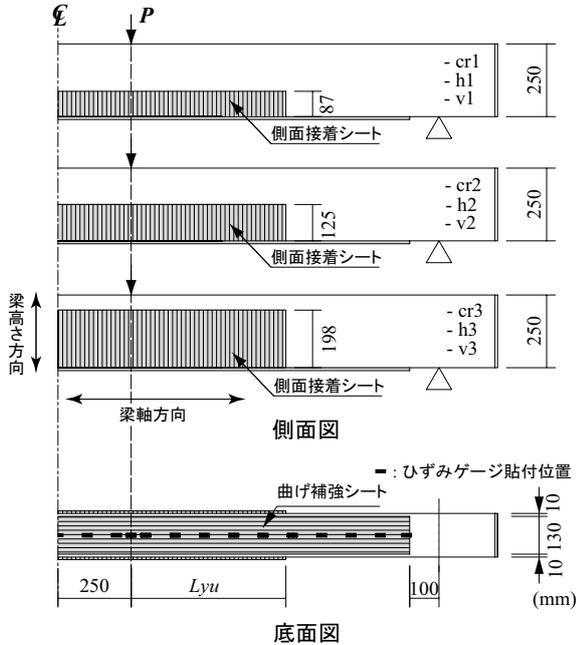


図-2 AFRPシートの補強概要

離が生じること、3) 側面接着シートとして、曲げ補強用シートよりも目付量の小さい2方向繊維強化シートを用いる場合には、梁軸方向の繊維が破断しやすく剥離抑制効果が向上しないこと、一方で4) 側面接着法を適用して計算終局耐力を保証するための側面接着シートの必要接着高さは、梁高さの半分以下で十分であること、等が明らかとなっている。そこで、本研究では、効率的な側面接着法を確立することを目的に、側面接着シートを等曲げ区間および主鉄筋降伏領域に貼り付けることを条件にして、さらに繊維の強化方向、シート接着高さおよび目付量を変化させたFRPシート曲げ補強RC梁を作製して静的4点曲げ載荷実験を実施した。

2. 試験体の概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。本実験に用いた試験体は、いずれ

表-2 AFRPシートの力学的特性値(規格値)

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
830	0.572			

もFRPシートを下面接着して曲げ補強を施しており、側面接着シートの目付量を2種類、繊維強化方向を3種類、接着高さを3種類とし、側面接着シートの無い試験体も含めた全19体のRC梁である。表中、試験体名の第1項目は、側面接着シートの目付量 (S0: 側面接着シート無し, S1: 415 g/m², S2: 830 g/m²) を示し、第2項目は側面接着シートの繊維強化方向 (-cr: 2方向, -h: 梁軸方向, -v: 梁高さ方向) と接着高さ (1: 8.7 cm, 2: 12.5 cm, 3: 19.8 cm) の組み合わせを示している。なお、繊維強化方向が2方向の場合には、1方向シートを梁軸方向と梁高さ方向にそれぞれ1層ずつ計2層接着している。

図-1には、本実験に用いたRC梁の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、断面寸法(梁幅×梁高)15×25 cm、上端・下端鉄筋にそれぞれD19, D13を2本ずつ配筋した複鉄筋矩形RC梁である。上端鉄筋にD19を用いたのはシート剥離に先行して上縁コンクリートの圧縮破壊が生じ、梁が曲げ圧縮破壊型で終局に至るのを避けるためである。支点間距離は2.6 mとし、せん断スパン比を5.0としている。

図-2には、本実験に用いた試験体の補強概要を示している。曲げ補強シートには、目付量830 g/m²、幅130 mmのアラミド繊維製FRP(以後、AFRP)シートを1層用いることとした。また、その接着範囲は梁中央から両支点の100 mm

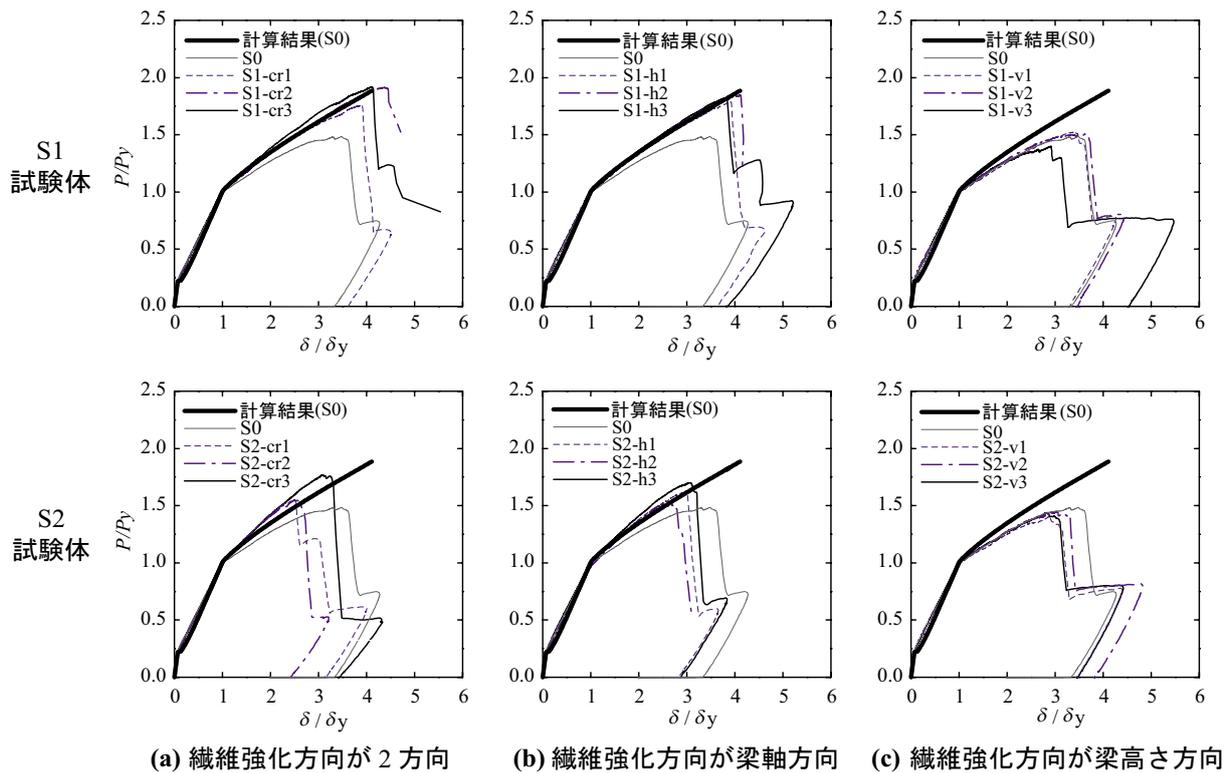


図-4 無次元荷重-無次元変位関係

手前までとしている。なお、曲げ補強シート上には、ひずみゲージを 100 mm 間隔および荷重点直下に貼付けている。

側面接着シートの梁軸方向接着範囲は参考文献 1) を参考にして、S0 試験体の計算終局時における主鉄筋降伏領域と設定している。また、梁高さ方向の接着高さに関しては、図-3 に示すように主鉄筋に沿って割裂ひび割れが発生するものと仮定し、主鉄筋の上縁から 45° 上方までの領域を定着長とする場合の接着高さを基準接着高さとして 1) 基準接着高さとする場合 (8.7 cm)、2) 梁高の 1/2 とする場合 (12.5 cm)、3) S0 試験体の計算終局時における中立軸の高さまでとする場合 (19.8 cm) を設定した。

実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度は 26.1 MPa、主鉄筋の降伏強度は D13、D19 でそれぞれ 394、386 MPa であった。また、表-2 には、本実験に用いた AFRP シートの材料特性値 (規格値) を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重-無次元変位関係

図-4 には、側面接着シートの繊維強化方向毎に主鉄筋降伏時の荷重、スパン中央点変位 (以後、単に変位) で無次元化した荷重-変位関係を計算結果と比較して示している。

図より、S0 試験体は主鉄筋降伏後に剛性勾配が低下して、計算終局荷重および変位に到達する前に急激な荷重低下を示して終局に至っていることから、剥離破壊型の性状を示していることが分かる。これに対して、S1 試験体に関する実験結果から、-cr 試験体および -h 試験体の場合には、いずれの場合も S0 試験体の荷重および変位を上回った後に終局に至っていることから、剥離抑制効果が発揮されていることが分かる。一方、-v 試験体の場合には S0 試験体と同程度もしくはそれを下回る状態で曲げ補強シートが剥離し終局に至っている。これは、既往の研究成果と同様²⁾、写真-1 に示すように側面接着シートの横糸が曲げひび割れに沿って破断し、その裂け目部分で躯体がせん断方向にずれ、

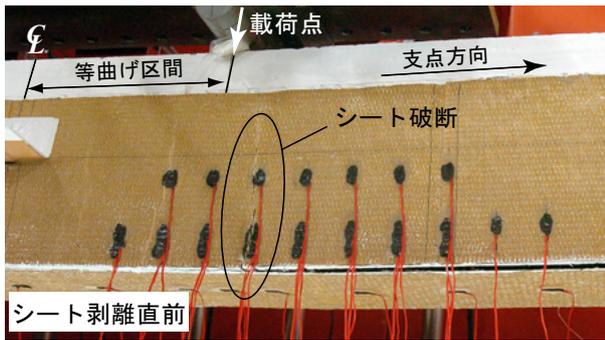


写真-1 S1-v3 試験体の载荷点近傍における側面接着シートの破壊状況

曲げ補強シートを押し下げるピーリング作用が励起されシートが剥離したためと考えられる。

側面接着シートの目付量が多い S2 試験体では、S2-cr 試験体および S2-h 試験体で S0 試験体よりも耐力は大きいものの、小さい変位レベルでシート剥離に至っている。一方、S2-v 試験体に関する終局荷重および変位は S0 試験体に比較して小さい。このことより、側面接着シートの目付量が多い場合には、曲げ補強のみの試験体よりも小さな変位レベルで曲げ補強シートが剥離する傾向にあることが明らかになった。これは、側面にシートを接着することによって、ピーリング作用の原因となる斜めひび割れの発生を抑制することが可能であるものの、繊維強化方向が梁軸方向となる場合には曲げ補強効果も発揮されることから、断面曲げ耐力と主鉄筋降伏時曲げ耐力の関係¹⁾から、依然として剥離破壊型になっているためと推察される。

-cr 試験体および -h 試験体を対象に、シートの接着高さの影響に着目して検討すると、S1 試験体では、接着高さを梁高さの 1/2 とした試験体でほぼ計算結果に対応する補強効果が出現していることから、接着高さは梁高さの 1/2 程度以上は必要であるものと推察される。一方、シート目付量が多い S2 試験体では、接着高さの高い試験体で補強効果がより大きく出現しているものの、曲げ補強シート剥離時の荷重および変位を計算終局時の値まで改善させることが出来ないため、計算終局時までを保証するほどの剥離抑制効果は得られていないことが分かる。

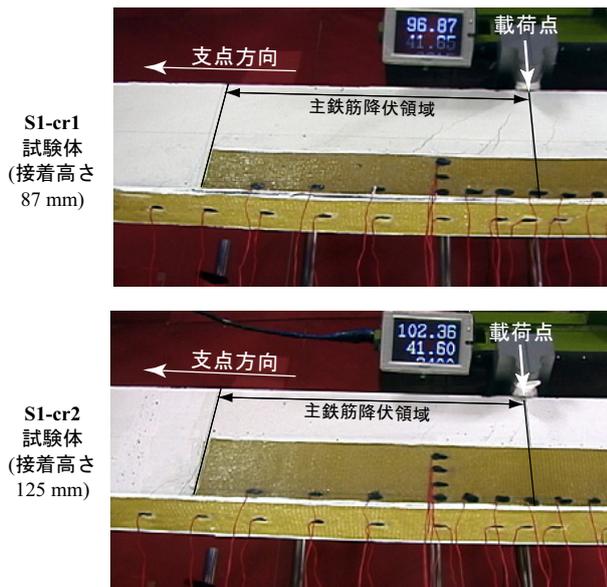
以上のことより、側面接着により S0 試験体の計算終局耐力および変位を保証できる効率的な接着高さは、本研究の範囲内では梁高さの 1/2 程度であり、シートの繊維強化方向は 2 方向あるいは梁軸方向である。なお、側面接着シートの目付量が多い場合には曲げ補強シートのみの試験体よりも小さい変位レベルでシート剥離する傾向にある。これは、前述のように側面接着シートの繊維強化方向が梁軸方向の場合には、ピーリング作用の原因となる斜めひび割れの発生を抑制すると共に、曲げ補強効果も発揮されることに起因しているものと推察される。

3.2 接着高さが破壊性状に与える影響

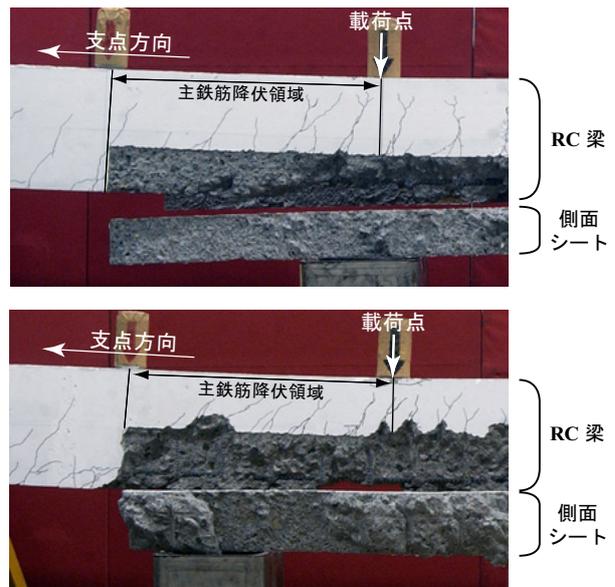
写真-2 には、S1-cr1/cr2 試験体の破壊性状を示している。写真-2(a) は S1-cr1 試験体の曲げ補強シートが剥離直前となる変位時点における S1-cr1/cr2 試験体の状況を比較して示したものである。また、写真-2(b) は両試験体の実験終了後のシート剥離の状況を示している。

写真-2(a) より、S1-cr1 試験体では载荷点近傍の側面接着シートの上方に曲げひび割れが数本発生しており、そのひび割れ発生部の下縁ではピーリング作用による曲げ補強シートの部分剥離が見られる。一方、同一変位時の S1-cr2 試験体にはひび割れはほとんど見られず、シートの部分剥離も認められない。

写真-2(b) の側面接着シート剥離後の状況を見ると、S1-cr1 試験体では载荷点近傍の下縁かぶり部でコンクリートが剥落しており、曲げ補強シートの剥離がピーリング作用の顕在化によって発生したことがうかがえる。しかしながら、側面接着シートに対するかぶりコンクリートの付着も少なく、また試験体の表面も健全であることから、RC 梁はピーリング作用の原因となるせん断ずれを抑制するためのシート定着長が不足したことにより、シート剥離が早期に生じたものと推察される。一方、S1-cr2 試験体の場合には側面接着シートの全面に梁側面のかぶりコンクリート片が付着している。これは、側面接着シートの定着が十分確保され、ピーリング



(a) シート剥離直前の状況



(b) 実験終了後の側面シート接着部の状況

写真-2 S1-cr1/cr2 試験体に関する曲げ補強シートの剥離直前および実験終了後の載荷点近傍における破壊状況

作用の原因となるせん断ずれを十分に抑制したことによるものと考えられる。以上より、S1 試験体の場合には、側面接着シートの接着高さを基準接着高さ以上とし、梁高さの 1/2 程度とすることが必要であるものと考えられる。

3.3 繊維強化方向が破壊性状に与える影響

写真-3 には、S0, S1-cr3/h3 各試験体に関する実験終了後の破壊状況を示している。

写真より、S0 試験体では載荷点近傍および等曲げ区間内において、ピーリング作用に伴う下縁かぶりの剥落が認められる。側面接着シートを用いた試験体を見ると、S1-cr3 試験体では側面接着シートが左側スパンで全体的に剥離しているのに対し、S1-h3 試験体では下縁より 10 cm 程度の高さで繊維方向に沿って横糸が切れシートが 2 分している。最終的には、下方のシートが部分的に側面のかぶりコンクリートと共に引き剥がされ、上方のシートは未だ十分な接着状態にあった。このことより、シートの繊維強化方向が梁軸方向の場合には、梁高さ方向の場合に比べてピーリング作用の抑制効果が高いものの、繊維強化方向が 2 方向の場合ほどは効果的でないことが明らかになった。



(a) S0 試験体 (側面接着シート無し)



(b) S1-cr3 試験体 (繊維強化方向 : 2 方向)



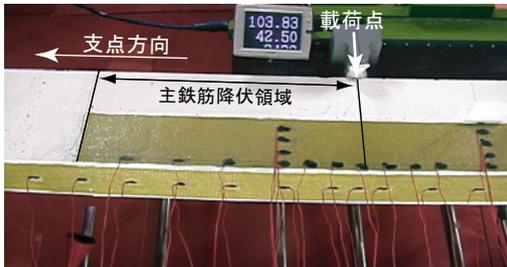
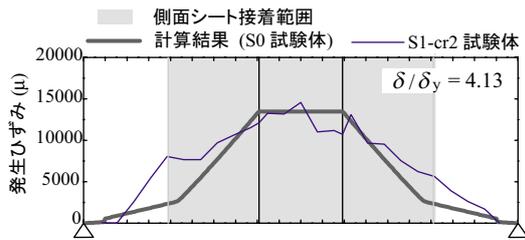
(c) S1-h3 試験体 (繊維強化方向 : 梁軸方向)

写真-3 実験終了後の破壊状況

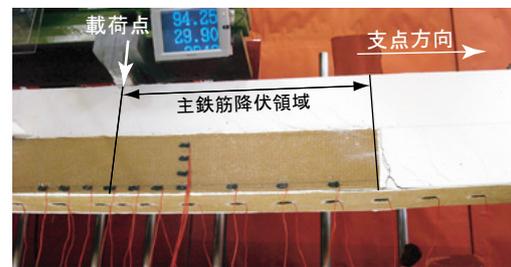
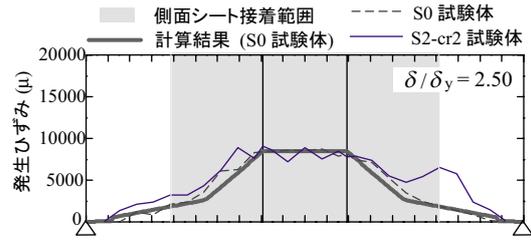
3.4 目付量が破壊性状に与える影響

図-5 には、S1/S2-cr2 試験体の曲げ補強シートのひずみ分布および剥離進展状況を示している。なお、計算終局耐力を確保した S1-cr2 試験体の場合には S0 試験体の計算終局変位時の状況を、計算終局点到達前にシート剥離した S2-cr2 試験体の場合には実測最大荷重時の状況を示している。また、S1-cr2 試験体のひずみ分布図には同一変位時の S0 試験体の実験結果もあわせて示している。

図-5(a) の S1-cr2 試験体に関するひずみ分布



(a) S1-cr2 試験体 (S0 試験体の計算終局変位時)



(b) S2-cr2 試験体 (実測最大荷重時)

図-5 曲げ補強シートのひずみ分布性状およびひび割れ性状

から、側面接着シートの補強範囲における等せん断力区間で計算値を上回るひずみが発生し、ピーリング作用による部分剥離が顕在化していることが分かる。しかしながら、曲げ補強シート接着端部での発生ひずみは計算値と同程度であり、曲げ補強シートの定着は確保されているものと推察される。また、載荷点近傍の曲げ補強シートに若干の部分剥離が見られるものの、未だ全面剥離には至る傾向にないことが分かる。

一方、S2-cr2 試験体の実測最大荷重時におけるひずみは、等曲げ区間では計算結果とほぼ同等であるものの、等せん断力区間では計算結果および S0 試験体の発生ひずみよりも大きいひずみが発生している。また、側面接着シートの接着端部では計算値を上回るひずみが発生している。写真からは、側面接着シート端部近傍に斜めひび割れの発生が認められる。このことより、側面接着シートの目付量が多い場合には、前述のように載荷点近傍に発生する斜めひび割れの抑制のみならず、曲げ補強効果も期待できるため、断面曲げ耐力の関係から、未だ剥離破壊型のモードを示したものと考えられる。

4. まとめ

本研究より、側面接着法によって効率的に FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離を抑制す

るためには、繊維強化方向を 2 方向または梁軸方向とし、補強範囲を梁軸方向に計算終局時の主鉄筋降伏領域とし、梁高さ方向には本研究の範囲内では梁高の 1/2 程度とするべきであることが明らかになった。ただし、側面接着シートの目付量が多い場合には曲げ補強のみの試験体よりも小さい変位レベルで剥離する傾向にあることから、最適な目付量の選定が重要であるものと判断される。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.8
- 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) 栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田純之: FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1771-1776, 2003
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介, 澤田純之: 側面接着法による剥離破壊型 FRP シート曲げ補強 RC 梁の剥離制御に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1049-1057, 2005.3