

論文 FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離制御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，FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法として，曲げ補強シートの上にシートを U 字型に巻付ける工法に着目し，効率的な U 字巻付け方法およびその剥離抑制メカニズムに関する検討を行った。実験は，AFRP シート曲げ補強 RC 梁に対して U 字巻付けしない場合を含め，巻付けシート目付量および巻付け高さを変化させた全 7 体により実施した。本実験の範囲内では，効率的な U 字巻付けシート目付量は曲げ補強シートの 15% 程度，巻付け高さは計算終局時の中立軸高さの半分程度であることが明らかとなった。

キーワード：RC 梁，AFRP シート，曲げ補強，U 字巻付け

1. はじめに

近年，道路橋示方書の改訂による耐震設計法および設計活荷重の変更に伴い，既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震・耐荷性能の向上を目的とした補強工事が各地で盛んに行われている。著者らは，これまで既設 RC 構造物の補強工法として連続繊維シート (以後，FRP シート) 接着工法に着目し，特に FRP シートによる RC 梁部材の合理的な曲げ補強設計手法の確立に向けた検討を行ってきた^{1),2)}。その結果，FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は，断面分割法に基づいて算出した計算耐力を下回る状態でシートが剥離し終局に至る場合 (以後，剥離破壊型) と上縁コンクリート圧壊後に計算耐力と同程度の荷重レベルでシートが剥離し終局に至る場合 (以後，曲げ圧壊型) に分類できることを明らかにしている。特に曲げ補強後の RC 梁が剥離破壊型と判定される場合には，計算耐力を下回る荷重で部材が終局に至るため，計算耐力と同程度の曲げ耐力を確保するためには曲げ補強シートの剥離を抑制する必要がある。

このような観点より，本研究では剥離破壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として，曲

げ補強シートの上にシートを U 字型に巻付ける剥離抑制法 (以後，U 字巻付け) に関する検討を行った。なお，検討は U 字巻付けによる曲げ補強シートの剥離抑制メカニズムおよび効率的な U 字巻付けシートの目付量と巻付け高さおよび範囲に着目して行っている。

2. 実験概要

2.1 RC 梁の概要

図 - 1 には，本実験に用いた RC 梁の形状寸法および配筋図を示している。試験体は，断面寸法 (幅×高さ) 15×25 cm，純スパン長 2.6 m，下端鉄筋に D13，上端鉄筋に D19 をそれぞれ 2 本ずつ用いた複鉄筋 RC 梁である。ここで，上端鉄筋に D19 を用いたのは，FRP シート曲げ補強 RC 梁の上縁コンクリートの圧壊がシートの剥離に先行して生じにくいようにするためである。また，せん断補強筋には，RC 梁が曲げ補強後においてもせん断破壊しないように D10 を 10 cm 間隔で配置した。

2.2 補強方法

本実験で使用される曲げ補強シートの目付量や接着範囲および U 字巻付けシートの巻付け範囲，

*1 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井建設(株) 主席研究員 技術研究所 博(工) (正会員)

*4 (独)北海道開発土木研究所 研究員 材料研究室 博(工) (正会員)

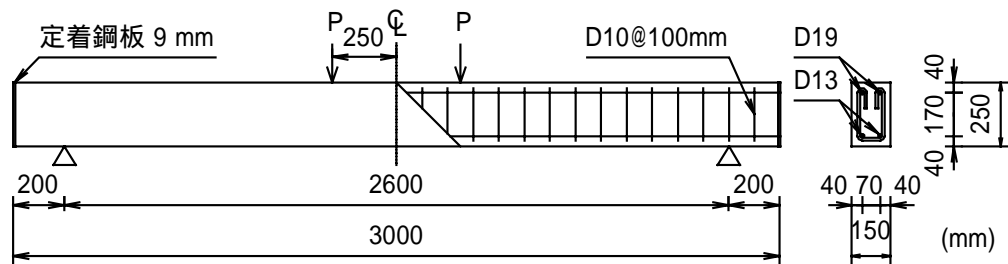


図 - 1 形状寸法および配筋図

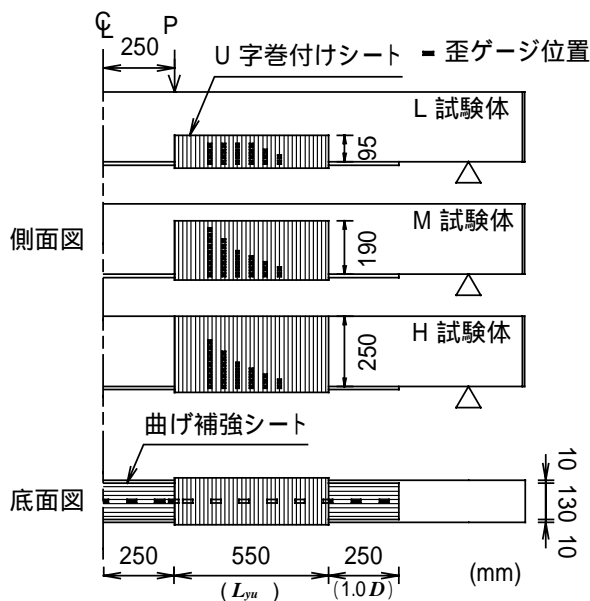


図 - 2 補強概要およびシート歪測定位置

巻付け高さ目付量は以下のように設定した。

(1) 曲げ補強シート

曲げ補強シートには既往の研究¹⁾を参考にして、曲げ補強後の RC 梁の破壊形式が剥離破壊型となるように目付量 415 g/m^2 のアラミド繊維製 FRP (以後、AFRP) シートを 2 層用いることとした。また、曲げ補強シートの接着範囲は、曲げ圧壊時の計算耐力を保証するために必要な補強範囲として設定した。すなわち、既往の研究²⁾を参考にして片側等せん断力区間における接着範囲を $L_{yu} + 1.0D$ (L_{yu} : 計算終局時の主鉄筋降伏領域、 D : 断面高さ) とした。本実験に用いる曲げ補強 RC 梁の L_{yu} は 55 cm であることより、 $L_{yu} + 1.0D = 80 \text{ cm}$ となる。

(2) U 字巻付けシート

曲げ補強シートの剥離は、等せん断力区間における主鉄筋降伏領域内の下縁かぶり部におい

表 - 1 試験体の一覧

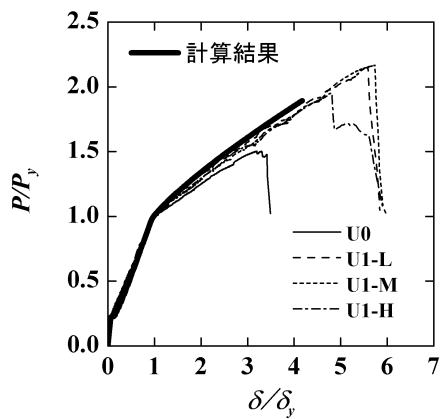
試験体名	曲げ補強シートの目付量 (g/m^2)	U 字巻付けシートの目付量 (g/m^2)	梁下縁からのシート巻付け高さ (cm)
U0		-	-
U1-L	415 × 2	140	9.5
U1-M			19
U1-H			25
U2-L	280	280	9.5
U2-M			19
U2-H			25

表 - 2 AFRP シートの力学的特性

繊維目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断歪 (%)
140	0.0965	2.52	115	2.19
280	0.193			
415	0.286			

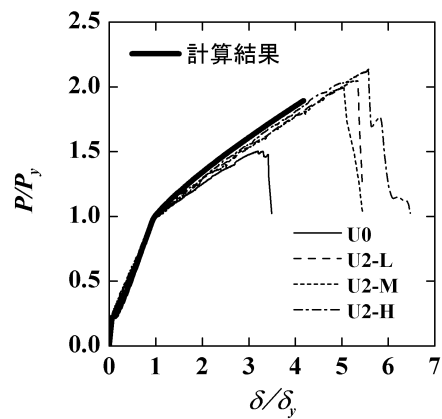
てブロック化したコンクリートがシートを押し下げるピーリング作用によって生じることが明らかとなっている。本研究では、ピーリング作用によるシートの剥離を抑制するために、部材軸方向の U 字巻付け範囲を計算終局時の主鉄筋降伏領域 L_{yu} ($= 55 \text{ cm}$) とした。また、巻付け高さは i) 梁下縁から梁上縁まで、ii) 梁下縁から計算終局時の中立軸高さ ($= 19 \text{ cm}$) まで、iii) 梁下縁から計算終局時の中立軸高さの半分 ($= 9.5 \text{ cm}$) まで、の 3 種類を設定して効率的な巻付け高さを検討することとした。

一方、U 字巻付けシートの目付量は曲げ補強シートの 15 または 30 % 程度とし、140、280 g/m^2 のシートを用いて効率的な目付量を検討



(a) U1- 試験体

(U 字巻付けシート目付量：140 g/m²)



(b) U2- 試験体

(U 字巻付けシート目付量：280 g/m²)

図 - 3 無次元荷重 - 変位曲線に関する実験および計算結果の比較

することとした。図 - 2 には、各試験体の補強概要とシート歪測定位置を示している。

2.3 試験体および材料の力学的特性

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、目付量 415 g/m² の AFRP シートを 2 層用いて曲げ補強した RC 梁に対して、U 字巻付けしない場合を含め、U 字巻付けシートの目付量を 2 種類および巻付け高さを 3 種類に変化させた全 7 体である。第 1 項目の U に付随する数値は U 字巻付けシートの目付量を示しており、U1, U2 でそれぞれシート目付量は 140, 280 g/m² である。また、第 2 項目は U 字巻付けシートの梁下縁からの巻付け高さ (L: 9.5 cm, M: 19 cm, H: 25 cm) を示している。実験時のコンクリートは材齢が 124 日、平均圧縮強度 $f'_c = 29.7$ MPa であった。また、主鉄筋の降伏強度は 412 MPa であった。表 - 2 には AFRP シートの力学的特性を示している。本実験における測定項目は載荷荷重、スパン中央部変位および AFRP シート各点の歪である。

3. 実験結果及び考察

3.1 無次元荷重 - 変位関係

図 - 3 には、各試験体における無次元荷重 - 変位曲線の実験結果を U 字巻付け量ごとに整理して示している。また、図中には、U 字巻付けを施していない U0 試験体の実験および計

算結果も併せて示している。計算は既往の文献¹⁾と同様に曲げ補強シートとコンクリートの完全付着を仮定し、上縁コンクリート歪が終局圧縮歪 3,500 μ に至るまで実施している。図中、実験結果および計算結果は各試験体の主鉄筋降伏後における AFRP シートの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討するため、各々の主鉄筋降伏荷重および降伏変位で無次元化し整理している。

図より、U0 試験体は主鉄筋降伏後に剛性勾配が計算結果よりも低下し、計算耐力よりも小さな荷重レベルでシートが剥離して終局に至る剥離破壊型¹⁾の性状を示していることが分かる。一方、U 字巻付けした U1, U2- 試験体は、主鉄筋降伏後も計算結果と同様の曲線関係を示しており、計算終局耐力および計算終局変位を上回って終局に至っている。従って、本実験の範囲内では、U 字巻付けシートの目付量を 140 g/m²、巻付け高さを梁下縁から 9.5 cm (計算終局時の中立軸高さの半分) 以上とすることで、曲げ補強シートの剥離抑制効果が十分発揮され、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性能を計算値と同等程度以上に向上可能であることが明らかとなった。なお、U1-H 試験体は巻付け高さが最も高いにも拘わらず、最大荷重および最大荷重時変位が他の U1- 試験体よりも小さい。一方、U2-H 試験体ではこの傾向は見られない。

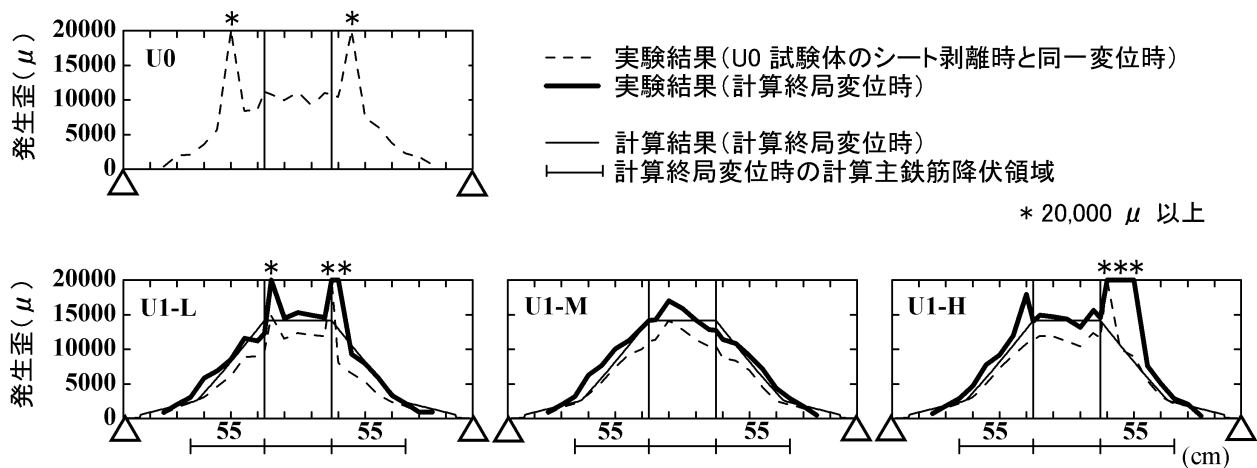


図 - 4 各無次元変位時における曲げ補強シートの軸方向歪分布性状

以上から，U1-H 試験体の早期剥離は，計算終局時を超えてコンクリートの圧縮破壊が進行する状態下での実験誤差によるものと考えられる。

3.2 曲げ補強シートの歪分布性状

図 - 4 には，U0 および U1- 試験体における曲げ補強シートの軸方向歪分布性状を，U0 試験体のシート剥離時と同一の無次元変位時および計算終局変位時について示している。また，図中には計算終局時における軸方向歪分布の計算結果も併せて示している。さらに，U1- 試験体の歪分布図の下部には，計算終局時における等せん断力区間の計算主鉄筋降伏領域 L_{yu} (= 55 cm) を付記している。なお，この領域は U 字巻付け範囲と対応するものである。

図より，U0 試験体のシート剥離時における等曲げ区間の歪分布は，作用曲げモーメント分布と同様にほぼ一定であることが分かる。一方，左右の等せん断力区間では歪分布が大きく乱れ，局所的に 20,000 μ 以上の歪が発生していることが分かる。これは，ブロック化した梁下縁部のかぶりコンクリートがシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用の発生によるものと考えられる。これに対して，U1- 試験体における U0 試験体のシート剥離時と同一の無次元変位時での歪分布（図中，破線）は，載荷点近傍で 20,000 μ 以上の大きな歪が発生しているものの，等せん断力区間の歪分布に大きな乱れは見られない。これより，U 字巻付けを施すことで

ピーリング作用によるシートの引き剥がれが抑制されていることが分かる。

U1- 試験体の計算終局時における等曲げ区間の実測歪分布（図中，太実線）は，計算結果と比較的良好に対応している。また，等せん断力区間の主鉄筋降伏領域内（U 字巻付け範囲内）の実測歪分布は，U1-M 試験体のように計算結果と良好に対応している部分も見られるが，総じて歪分布の乱れは著しく，20,000 μ を越える歪が多数の測点で発生している。これは，主鉄筋降伏領域内には U 字巻付けが施されているにも拘わらず，載荷荷重が大きいため下縁かぶり部においてコンクリートブロックが形成され，シートを押し下げて部分剥離が生じているためと考えられる。しかしながら，この時点においては曲げ補強シートの全面的な剥離には至らず，梁は高い荷重レベルを保持している。なお，このように U 字巻付けを施すことによって曲げ補強シートのピーリング作用による剥離が抑制される性状は U 字巻付けシート目付量の多い U2- 試験体でも同様に見られた。

以上より，U 字巻付けを等せん断力区間の主鉄筋降伏領域に施すことにより，曲げ補強シートの剥離要因となるコンクリートブロックの形成が抑制され，かつ，部分剥離から全面剥離への進展が抑制されることが明らかとなった。また，曲げ補強シートの軸方向歪分布性状に及ぼす U 字巻付けシートの目付量や巻付け高さの

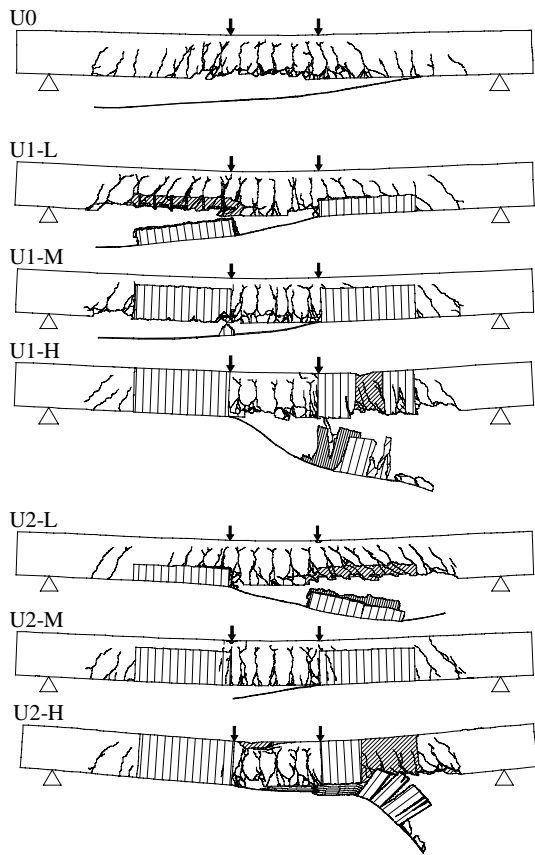


図 - 5 実験終了後における破壊性状

影響は顕著ではないことが明らかとなった。

3.3 破壊性状

図 - 5 には実験終了後における各試験体の破壊性状を示している。図より、U0 試験体は等せん断力区間においてコンクリートブロックが形成されていることが分かる。実験時には、既往の実験結果¹⁾と同様、ピーリング作用によって曲げ補強シートが剥離する挙動を確認している。U 字巻付け高さが最も低い U1-L, U2-L 試験体では、U 字巻付けシートが曲げ補強シートとともに剥離していることが分かる。両シートの剥離は瞬間的に発生し、特に U 字巻付けシートは梁側面のかぶりコンクリートを大量にもなって剥離している。

U 字巻付け高さを中立軸高さまでとした U1-M, U2-M 試験体では、-L 試験体のような U 字巻付けシートの剥離は生じなかった。ただし、U1-M 試験体では計算終局変位到達後に U 字巻付けシートが破断して曲げ補強シートが剥離

し、U2-M 試験体では曲げ補強シートの破断で終局に至っている。一方、梁上縁まで U 字巻付けを施した U1-H, U2-H 試験体では、U 字巻付けシート的一部分と曲げ補強シートがともに剥離している。ただし、U1-L, U2-L 試験体のように梁側面のかぶりコンクリートの剥落・剥離は生じていない。

このように、U 字巻付けシート目付量や巻付け高さは破壊性状に影響を与えていることが分かる。しかし、本実験の範囲内ではすべての U 字巻付け試験体が曲げ圧壊を想定した計算終局耐力および終局変位以上で破壊している。これは、耐力や変形能の向上の観点からは、適切な範囲を U 字巻付けすることが重要であることを示している。すなわち、U 字巻付け範囲を計算主鉄筋降伏領域 L_{yu} と設定することで、巻付けシート目付量や巻付け高さが耐力や変形能(曲げ補強シートの剥離抑制効果)に与える影響を小さくすることができるものと考えられる。

3.4 U 字巻付けシートの歪分布性状

図 - 6 には、U 字巻付けシートの剥離抑制メカニズムを検討するため、巻付け高さの異なる U1-L および U1-M 試験体における巻付けシートの上下方向歪を断面高さごとに示している。なお、ここでは終局時にシート剥離もしくはシート破断が生じた等せん断力区間の結果について示した。図には、1) 主鉄筋降伏時、2) U0 試験体のシート剥離時と同一の無次元変位時、3) 計算終局変位時および 4) 実測最大耐力発生時の結果をまとめている。

図より、両試験体ともに主鉄筋降伏時には顕著な歪の発生は見られないことが分かる。これは、主鉄筋降伏時には曲げ補強シートの剥離要因となる下縁かぶりコンクリート部のブロック化によるピーリング作用が未だ顕在化していないためと考えられる。U0 試験体のシート剥離時と同一の無次元変位時には、両試験体ともに梁下縁から断面高さ方向に 10 cm 以下の範囲で最大 3,000 μ 程度の歪が発生している。従って、この時点では U 字巻付けシートが梁の上

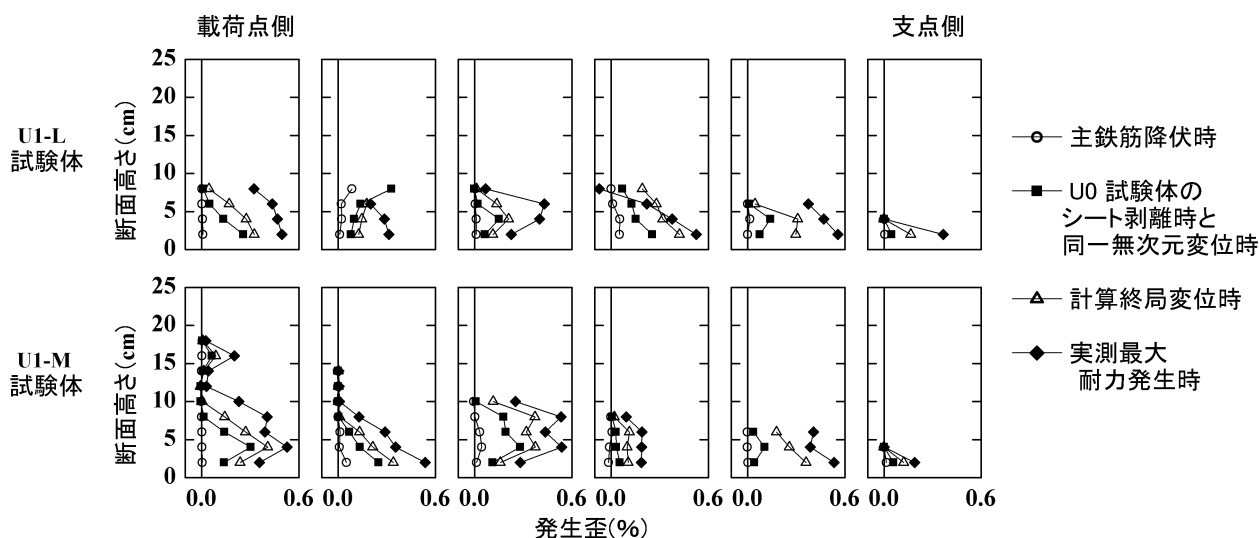


図 - 6 U 字巻付けシートの断面高さ方向の歪分布性状

下方向に生じる引張力を分担していることが分かる。これは、下縁かぶり部に生じたコンクリートブロックが曲げ補強シートを押し下げる力に対して U 字巻付けシートが抵抗していることを示すものと考えられる。その後、実測最大耐力発生時まで U 字巻付けシートの歪は増加し続け、発生歪は最大で $6,000 \mu$ 程度を示している。また、歪の発生領域は断面高さ方向に拡大し、U1-M 試験体の載荷点側では梁下縁から 12 cm 程度の領域に達している。なお、載荷荷重の増加にともない U 字巻付けシート上部の歪が下部のそれよりも大きく示されている測点が見られるが、これは試験体腹部に生じた斜めひび割れの影響によるものと考えられる。

以上より、U 字巻付けシートは梁下縁から断面高さ方向 10 cm 程度までの範囲でコンクリートブロックがシートを押し下げるピーリング作用の発生を抑制していることが分かる。このため、U 字巻付け高さを梁下縁から 9.5 cm とした U1-L、U2-L 試験体が他の U 字巻付け試験体と同様の耐力および変形能を示したものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法として、曲げ補強シートの

上からシートを U 字型に巻付ける方法に着目し、効率的な U 字巻付け方法および剥離抑制メカニズムに関する検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 計算終局時における等せん断力区間の主鉄筋降伏領域に U 字巻付けを施すことにより、剥離破壊型の AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性能を曲げ圧壊型 RC 梁が示す耐荷性能と同等程度以上にまで向上させることが可能である。
- 2) 本実験の範囲内での効率的な U 字巻付けシート目付量は、曲げ補強シートの 15 % 程度、梁下縁からの巻付け高さは計算終局時の中立軸高さの半分程度であった。

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.
- 2) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一: FRP シートの必要接着長に着目した曲げ補強 RC 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 835-840, 2001.