

RC 梁に接着した AFRP シートの剥離制御に関する実験的研究

Experimental Study on debonding control of AFRP sheet bonded to RC beam

室蘭工業大学 正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 学生員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)
室蘭工業大学 ○学生員 鈴木 健太郎 (Kentaro Suzuki)

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用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 AFRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として曲げ補強用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) に着目し、U 字巻付けによる曲げ補強用シートの剥離抑制メカニズムおよび適切な U 字巻付け量と巻付け高さおよび範囲に関する検討を行っている。

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、下側鉄筋に D13、上側鉄筋に D19 をそれぞれ 2 本ずつ用いた複鉄筋 RC 梁である。ここで、上側鉄筋に 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な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

本実験で使用する曲げ補強用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、巻付け高さ目付量は以下のように決定した。

(1) 曲げ補強用シート

曲げ補強用シートには既往の研究¹⁾を参考にして、曲

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	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			

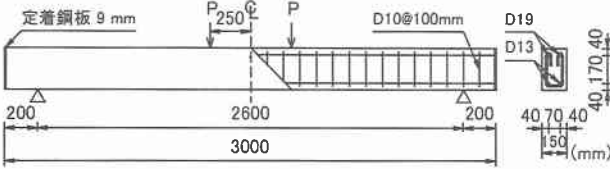


図-1 形状寸法および配筋図

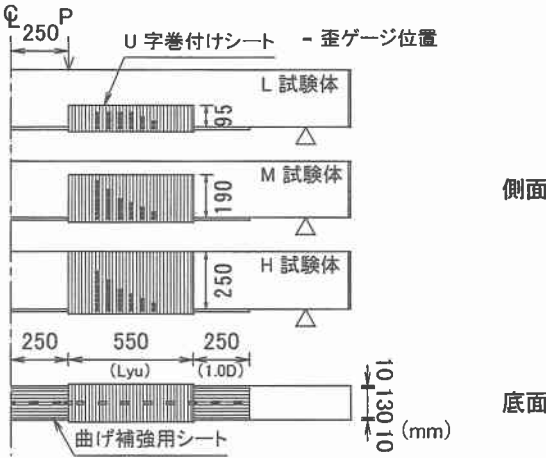
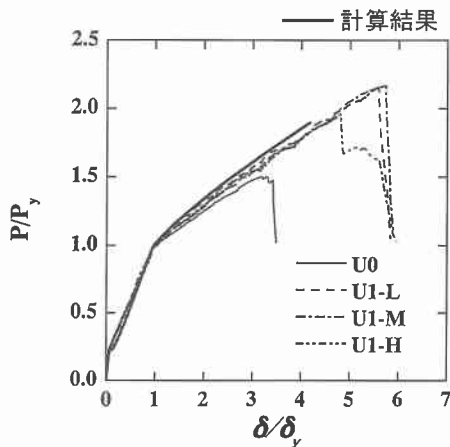
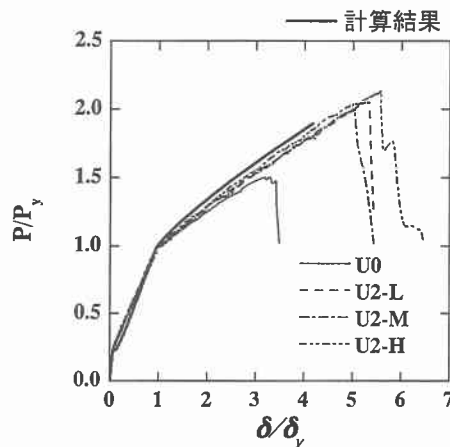


図-2 補強概要図



(a) U1-試験体



(a) U2-試験体

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

げ補強後の RC 梁の破壊形式が剝離破壊型となるように目付量 415 g/m^2 のシートを 2 層用いることとした。また、曲げ補強用シートの接着範囲は、曲げ圧壊時の計算耐力を保证するために必要な補強範囲を確保することとして設定した。すなわち、既往の研究²⁾を参考にして等せん断力区間に対する補強範囲を $L_{yu} + 1.0D$ (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

曲げ補強用シートの剝離は、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剝離を抑制するために、部材軸方向の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 h まで, iii) 梁下縁から $h/2$ まで, と 3 種類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用シートの $15 \sim 30 \%$ 程度とし, $140, 280 \text{ g/m}^2$ のシートを用いて効率的な目付量を検討することとした。図-2 には, 各試験体の補強概要図を示している。

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/m^2 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 字巻付けシート目付量を 2 種類およびその高さを 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が $140, 280 \text{ g/m}^2$ であることを意味している。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 $f'_c = 29.7 \text{ MPa}$ であった。また, 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. 実験結果および考察

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-変位曲線の実験および計算結果を 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。計算結果は曲げ補強用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 $3,500 \mu$ に至るまで計算し算出している。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 P_{ye}, P_{yc} および降伏変位 δ_{ye}, δ_{yc} で無次元化し整理することとしている。

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剝離して終局に至っていることが分かる。一方, U 字巻付けした U1, U2- 試験体はともに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, 計算終局変位および計算耐力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/m^2 , 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, 曲げ補強用シートの剝離抑制効果が十分発揮され, FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐力を計算耐力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かかわらず, 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が, U2- 試験体ではこの傾向はみられないことから実験誤差であると考えられる。

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用シートの軸方向歪分布性状を, U 字巻付けを施していない U0 試験体のシート剝離時と同一の無次元変位時

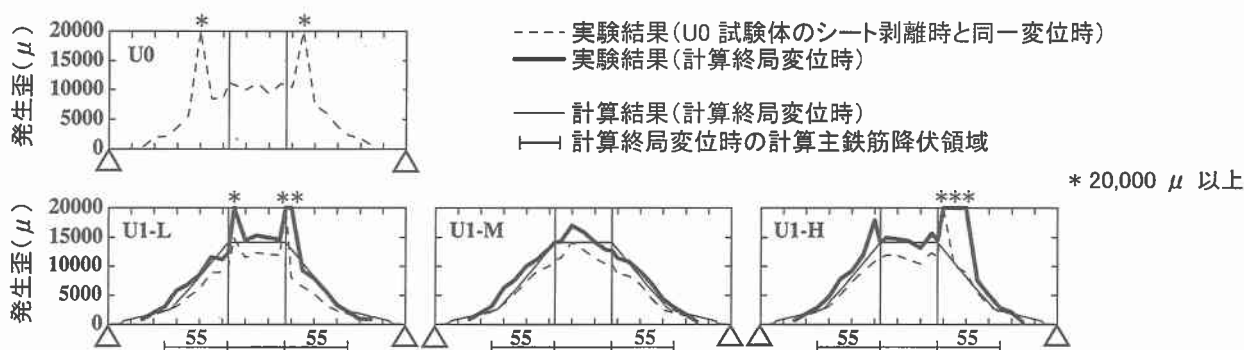


図-4 各無次元変位時における曲げ補強用シートの軸方向歪分布性状

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あわせて示している。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} を示している。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の等曲げ区間における歪分布は、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わかる。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 $20,000 \mu$ 以上の歪が発生していることがわかる。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 $20,000 \mu$ 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。このように、U 字巻付けを施すことによりピーリングの発生（シートの引き剥がれ）が抑制されていることがわかる。

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 字巻付け領域内）の実験結果は 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、 $20,000 \mu$ 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かかわらず、載荷荷重が大きいために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用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、このような性状は U 字巻付け量の多い U2-試験体でも同様にみられた。

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、曲げ補強用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、部分剥離の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に及ぼ

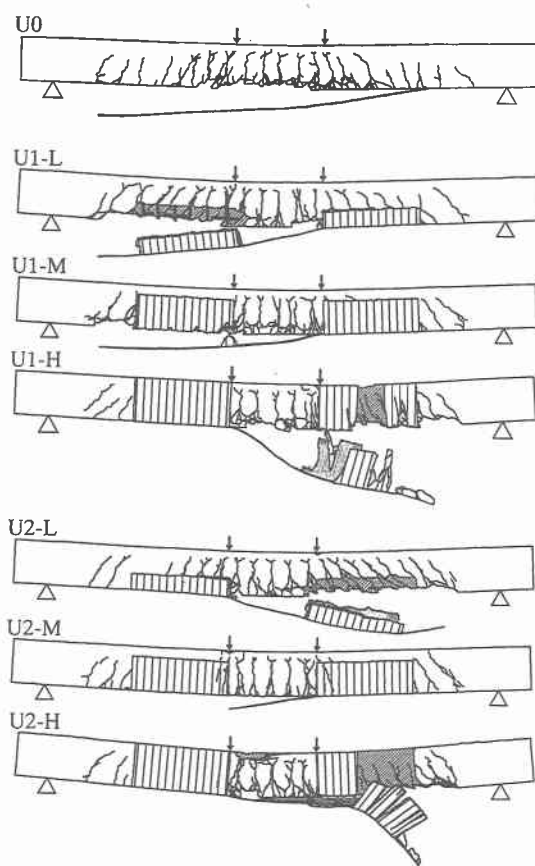


図-5 実験終了後における破壊性状

す U 字巻付けシートの目付量や巻付け高さの影響は小さ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、既往の実験結果¹⁾と同様にピーリング作用によって曲げ補強用シートが剥離していることがわかる。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用シートとともに剥離していることがわかる。実験時には両シートの剥離が瞬間的に発生し、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ともなって剥離していることを確認している。

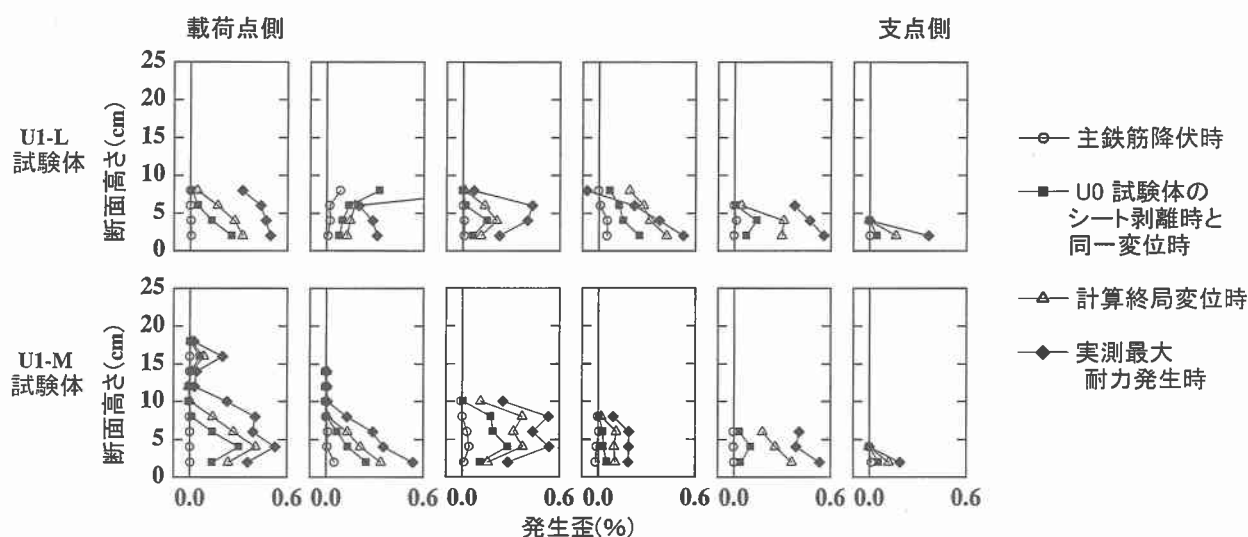


図-6 U 字巻付けシートの断面高さ方向の歪分布性状

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、側面の U 字巻付けシートには損傷が見られなかった。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剝離し、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剝離している。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剝落・剝離は生じていない。

このように、各試験体によって破壊性状が異なるものの、いずれの試験体も圧壊を想定した計算終局耐力および変位を上回って破壊していることより、本実験の範囲内では U1-L 試験体が最も効率の良い補強方法と云える。

3. 4 U 字巻付けシートの歪分布性状

図-6 には、U 字巻付けシートの剝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、ここでは紙面の都合上、終局時にシート剝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限定して示した。図には、1) 主鉄筋降伏時、2) U0 試験体のシート剝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わかる。これは、主鉄筋降伏時には曲げ補強用シートの剝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顕在化していないためと考えられる。

U0 試験体のシート剝離時と同一の無次元変位時には、梁下縁から断面高さ方向に 10 cm 程度の範囲において最大 3,000 μ 程度の歪が発生している。従って、この時点では両試験体ともに U 字巻付けシートが梁の上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 μ 程度を示している。

以上より、U 字巻付けシートは主として梁下縁から断面高さ方向 10 cm 程度でコンクリートブロックがシートを押し下げてピーリングが生じるのを抑制していることが明らかとなった。また、これは U 字巻付け高さを梁下縁部から 10 cm 程度とした U1-L, U2-L 試験体が他の U 字巻付け試験体と同様の曲げ耐荷性状を示すことに対応している。

4. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の曲げ補強用シートの剝離抑制法として、曲げ補強用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、U 字巻付けによる曲げ補強用シートの剝離抑制メカニズムおよび効率的な U 字巻付け方法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、剝離破壊型の AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐力を曲げ圧縮破壊時の耐力以上に向上させることが可能である。
- 2) 効率的な U 字巻付けシート量は曲げ補強用シート目付量の 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 梁の静荷重実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 835-840, 2001.