

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

Experimental study on debond control of FRPs for flexural strengthened RC beams with FRPs

岸 徳光*, 三上 浩**, 栗橋 祐介***, 澤田 純之****

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Yusuke Kurihashi and Sumiyuki Sawada

*工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

***博(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

****修(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this paper, to establish a rational sheet debond control method for flexural reinforced RC beams with FRP sheet (FRPs), an applicability of a proposed side-surface reinforcing method with FRPs was investigated based on the experimental results for Fourteen RC beams. These were conducted taking reinforcement volume ratio of FRPs and reinforcing height of FRPs as variables under using cross-directional FRPs for reinforcing side-surface of RC beam. Results obtained from this study are as follows: 1) debonding of flexural reinforcing FRPs can be effectively controlled by bonding FRPs on the side-surface in the region of equi-bending span and rebar yield region; 2) applying the proposed method, failure mode of debonding failure type RC beams can be shifted to the flexural failure type.

Key Words : RC beam, AFRP sheet, peeling action, debond control method

キーワード : RC 梁, AFRP シート, ピーリング作用, 剥離制御

1. はじめに

平成 7 年に発生した阪神淡路大震災や車両総重量の規制緩和等により、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の各種設計要領が改訂され (例えば 1), それに伴い 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 2),3)。著者らは、これまで RC 構造物の曲げ補強方法の一つとして連続繊維シート (以後、FRP シートあるいは単にシート) 接着工法に着目し、その補強効果を実験的・数値解析的に検討してきた 4)~8)。

その結果、シートの剥離を伴う FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、i) 主鉄筋降伏後においても断面分割法に基づく計算曲げ耐力 (以後、単に計算曲げ耐力) と同程度の耐荷性状を示し、上縁コンクリートの圧壊後にシートが剥離して終局に至る曲げ圧壊型と、ii) 主鉄筋降伏後、剛性勾配が計算結果のそれを下回り、計算曲げ耐力に到達する前にシートが剥離して終局に至る剥離破壊型に分類できること 4), が明らかになっている。また、シートの剥離挙動に着目した検討結果より、シートの剥離は等せん断力区間の計算終局時主鉄筋降伏領域 L_{yu} (以後、主鉄筋降伏領域 L_{yu}) の下縁かぶりコンクリートに形成される斜めひび割れ先端部が

せん断ずれに伴いシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用によって発生すること 4) を明らかにしている。さらに、このようなシートの剥離メカニズムを考慮して、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法も提案 5) している。

曲げ補強後の RC 梁の破壊形式が曲げ圧壊型と判定される場合には、計算曲げ耐力を用いることにより安全側で設計可能である。これに対して、剥離破壊型と判定される場合には、計算曲げ耐力を保証するために曲げ補強シートの剥離を抑制する必要がある。このような曲げ補強シートの剥離抑制法に着目した研究は、これまで種々の研究機関で実施されている 9)~11)。その方法の一つとして、曲げ補強シート接着後に同種のシートを曲げ補強シートの接着端部に U 字型に巻付ける方法 (以後、U 字巻付け工法) が提案されている。著者らも同様の実験を実施し、等せん断力区間の主鉄筋降伏領域 L_{yu} のみにシートの U 字巻付けを施すことにより、FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性能を計算曲げ耐力と同程度以上に向上させることが可能であること等を明らかにしている。

また、前述のように曲げ補強シートの剥離が載荷点近傍下縁かぶりコンクリートに発生する斜めひび割れ先端部のせん断ずれに伴って発生することが明らかに

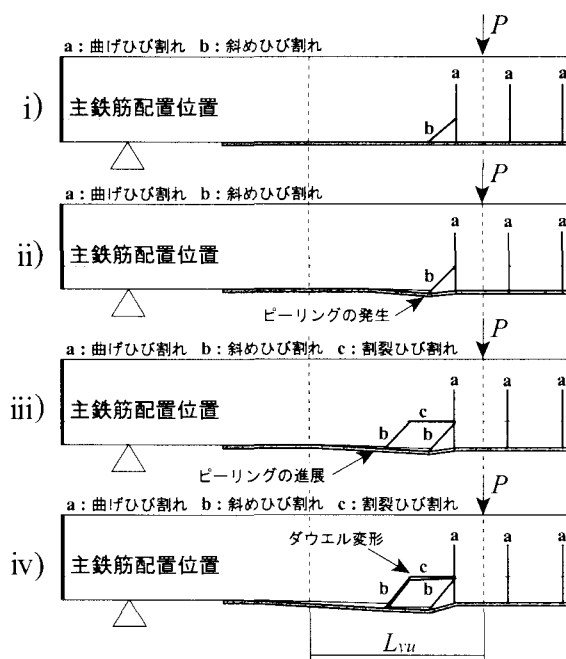


図-1 曲げ補強 RC 梁のひび割れ進展過程

なっている。このことより、このせん断ずれを抑制することでシートの剥離を制御可能であるとの考え方にに基づき、FRP シートを等せん断力区間内の主鉄筋降伏領域 L_{yu} の側面部のみに限定して接着する工法 (以後、側面接着法) を提案し、その妥当性に関する実験的検討も行っている。この実験では、FRP シートによる梁側面の補強方向を梁高方向のみとしていたため、1) 剥離要因となる斜めひび割れが側面接着を施していない等曲げ区間に発生し、そのひび割れのピーリング作用によってシート剥離が生じる場合や、2) 側面接着部に梁高さ方向に進展する曲げひび割れが発生し、その曲げひび割れによって非繊維強化方向にシートが破断してせん断ずれを生じ、そのピーリング作用によってシート剥離が生じる場合、があるものの、本工法を適用することによって曲げ補強 FRP シートの剥離抑制効果を期待できることが明らかになっている。本工法の場合には、U 字巻付け工法に比較して補強材料の節約が可能であり、また施工が簡便であることから、上記 1), 2) の問題点を解決し、剥離抑制のための設計法を確立することが、合理的な曲げ補強を行う上で極めて重要であるものと考えられる。

このような観点から、本研究では剥離破壊型で終局に至る FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象に、シート剥離を抑制して計算終局耐力を確保するための FRP シート側面接着工法の確立に向けた 4 点載荷法による静載荷実験を実施した。本研究では、上述のようなシート剥離現象も抑制するために、1) 側面接着領域を計算終局時における主鉄筋降伏領域 L_{yu} のみならず等曲げ区間に拡張すること、2) 側面接着シートの繊維強化方向

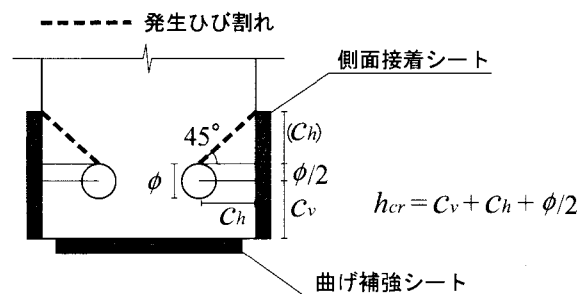


図-2 シートの必要接着高さ h_{cr} に関する模式図

を梁高方向と梁軸方向の 2 方向とすること、とした。なお、側面シートの剥離抑制効果を検討するための変数として、側面接着シートの梁下縁からの高さ (以後、単に接着高さ) と補強量に対応するシートの目付量を設定している。

2. 曲げ補強シートの剥離抑制法の概要

過去の実験結果に基づく、FRP シート曲げ補強 RC 梁のピーリング作用に起因するシート剥離現象は、以下のような過程で発生・進展することが明らかになっている。すなわち、図-1 に示す 4 点曲げ載荷における模式図を用いて説明すると、1) 鉛直荷重載荷によって、曲げと共にせん断力が作用することにより、等曲げ区間には曲げひび割れが、また載荷点近傍の等せん断力区間には曲げひび割れと共に斜めひび割れが発生する、2) 荷重の増加に伴い、載荷点近傍下縁かぶりコンクリートの斜めひび割れ先端部がせん断ずれによって下方に押し出されるピーリング作用によりシートの部分剥離が開始する、3) シートの部分剥離は、シート接着界面のコンクリートを付着した状態でシート端部方向に進展する。また、4) シート剥離の進展に伴って、主鉄筋の降伏に伴うダウエル変形も増加することとなり、主鉄筋に沿う割裂ひび割れが発生して、シートは全面剥離して終局に至る。

これより、曲げ補強シートの剥離を抑制するためには、1) ピーリング作用の原因となる下縁かぶりコンクリートに発生する斜めひび割れおよびそのひび割れのせん断ずれの抑制と、2) シート剥離進行時に発生する主鉄筋に沿う割裂ひび割れの抑制がきわめて重要であることが分かる。

本研究では、これら 2 つの現象を梁側面に FRP シートを接着することによって抑制させることとした。なお、着目するひび割れの方法は、斜め方向および水平方向であるが、梁高さ方向に曲げひび割れが発生してシートの非繊維強化方向が破断してせん断ずれが生じることを防止するため、側面接着シートの繊維強化方向は梁高方向および梁軸方向の 2 方向とした。また、このような現象が下縁かぶり部と主鉄筋周りにのみ発生

表－１ 試験体一覧

試験体名	梁タイプ (梁幅 × 梁高)	曲げ補強シート 目付量 (g/m ²)	側面接着シート			
			シート種類	目付量 (g/m ²)	高さ方向 接着範囲 (mm)	軸方向 接着範囲
A0	A (15 × 25 cm)	830 (415 × 2)	-	-	-	-
A90-cr			2 方向メッシュ	90	87	等曲げ区間 + L_{yu}
A140-cr			1 方向シート	140		
A280-cr			2 層 (縦 + 横)	280		
A90-h			2 方向メッシュ	90	125	
A140-h			1 方向シート	140		
A280-h			2 層 (縦 + 横)	280		
B0	B (15 × 30 cm)	830 (415 × 2)	-	-	-	-
B90-cr			2 方向メッシュ	90	87	等曲げ区間 + L_{yu}
B140-cr			1 方向シート	140		
B280-cr			2 層 (縦 + 横)	280		
B90-h			2 方向メッシュ	90	150	
B140-h			1 方向シート	140		
B280-h			2 層 (縦 + 横)	280		

していることより、シートによる補強範囲もその領域に限定することが可能である。本研究では、これら 2 つのひび割れ発生を抑制するためのシートの必要接着高さ h_{cr} を、以下のような考えの下に設定することとした。

図－2 には、シートの必要接着高さ h_{cr} を決定するための模式図を示している。本研究では、主鉄筋に沿う割裂ひび割れが主鉄筋の中心軸上に発生するものと仮定し、それに対するシートの定着長を梁の側面側に配筋された主鉄筋の上縁から 45° の方向線と梁側面の交点までと設定した。すなわち、

$$h_{cr} = c_v + c_h + \phi/2 \quad (1)$$

ここで、 c_v および c_h は、それぞれ側面側に配置されている主鉄筋中心位置から梁下縁までの距離と主鉄筋中心位置から側面までの距離(以後、芯かぶり)であり、 ϕ は主鉄筋径である。

なお、側面接着シートの梁軸方向接着範囲は、前述のように著者らの既往の研究¹¹⁾を参考にして、等曲げ区間および等せん断力区間の計算終局時主鉄筋降伏領域 L_{yu} とした。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

本実験に用いた試験体は、破壊形式が剥離破壊型と予測される 2 種類の FRP シート曲げ補強 RC 梁である。試験体数は、断面高さ、側面接着シートの目付量および高さ方向の接着範囲を変数とした全 14 体であ

る。表－1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。表中、試験体名の第 1 項目の英文字は試験体の梁高 (A: 25 cm, B: 30 cm) を示しており、それに付随する数値は側面接着シートの目付量 (g/m²) を示している。なお、数値が 0 の試験体は曲げ補強のみを施した試験体である。また、第 2 項目の英文字は側面接着シートの接着高さを示しており、-h は梁高の 1/2 まで、-cr は前章で設定した必要接着高さ h_{cr} まで接着した場合を示している。

図－3 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。試験体の断面寸法(梁幅 × 梁高)は、A および B 試験体でそれぞれ 15 × 25 cm, 15 × 30 cm であり、いずれの試験体も下端および上端鉄筋にそれぞれ D13, D19 を 2 本ずつ配筋した複鉄筋矩形 RC 梁である。なお、上端鉄筋に D19 を用いたのは、上縁コンクリートの圧壊がシート剥離に先行して生じ、梁が曲げ圧壊型で終局に至るのを避けるためである。純スパン長は、 $a/d = 5.0$ となるように A, B 試験体でそれぞれ 2.6, 3.1 m とした。せん断補強筋量は、曲げ補強後においてもせん断余裕度(計算せん断耐力 / 計算曲げ耐力)が 1.0 よりも十分大きく、曲げ破壊先行型となるように決定している。ここで、計算せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書¹²⁾(以下、示方書)に準拠して算定している。また、計算曲げ耐力は、シートとコンクリートとの完全付着を仮定し断面分割法によって算出した。断面分割法における各種材料の応力－ひずみ関係は、コンクリートおよび鉄筋に対しては示方書に準拠し、FRP シートはアラミド補強研究会の補強要領書¹³⁾(以下、補強要領)に準拠して

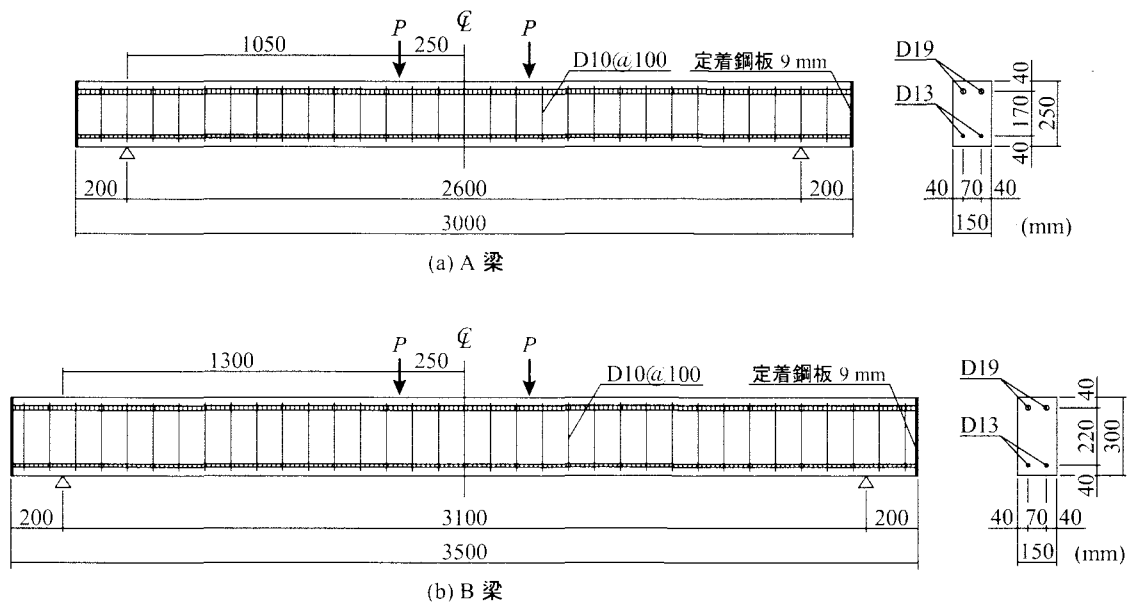


図-3 試験体の形状寸法および配筋状況 (側面図および断面図)

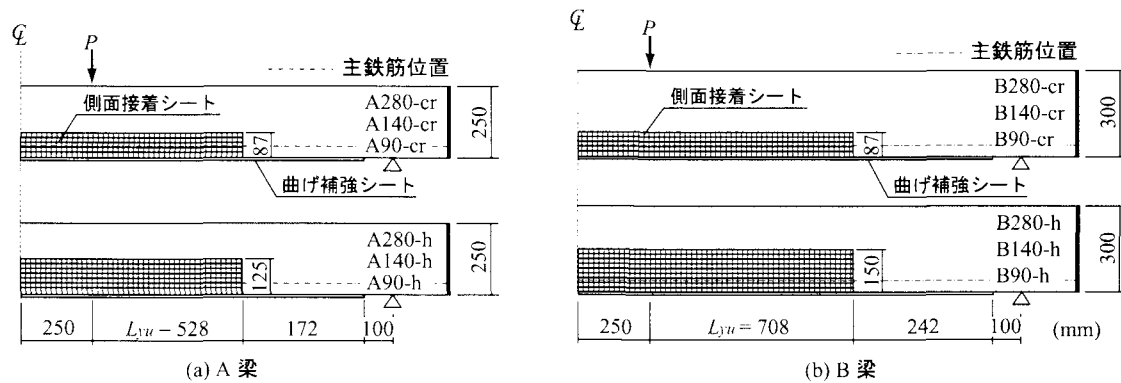


図-4 FRP シートの補強概要 (側面図)

表-2 AFRP 補強材の力学的特性値

目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
140	0.0965	118	2.06	1.75
280	0.193			
415	0.286			
90 / 90°	0.048			

* : 2 方向メッシュ

破断ひずみに至るまで応力が線形に増加するものと仮定している。

図-4 には、FRP シートの補強概要を示している。曲げ補強シートには A, B 試験体ともに幅 13 cm, 目付量 415 g/m² の AFRP シートを 2 層用いている。また、曲げ補強シートの補強範囲は梁中央部から両支点の 10 cm 手前までとした。

側面接着シートは、前述のとおり梁中央より等曲げ区間および主鉄筋降伏領域 L_{yu} の範囲に接着している。

また、断面高さ方向の接着範囲は、前述の必要接着高さである h_{cr} あるいは梁高の 1/2 までとした。側面接着シートの繊維強化方向を梁軸方向および梁高方向の 2 方向にするため、2 方向メッシュを 1 層もしくは 1 方向シートを 2 層直交して接着している。なお、両シートの接着面にはシートの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 mm 程度) を施している。本実験に用いたコンクリートの圧縮強度は $f'_c = 27.4$ MPa, 軸方向鉄筋 D13, D19 の降伏強度はそれぞれ $f_y = 432, 383$ MPa であった。表-2 には、AFRP シートおよび 2 方向メッシュの力学的特性値 (公称値) を示している。

3.2 実験概要および測定項目

写真-1 には、本実験の実験状況写真を示している。本実験における測定項目は、載荷荷重、スパン中央変位 (以後、単に変位) および FRP シート各点のひずみであり、それぞれ静荷重測定用ロードセル、非接触型レーザ式変位計および箔ひずみゲージを用いて測

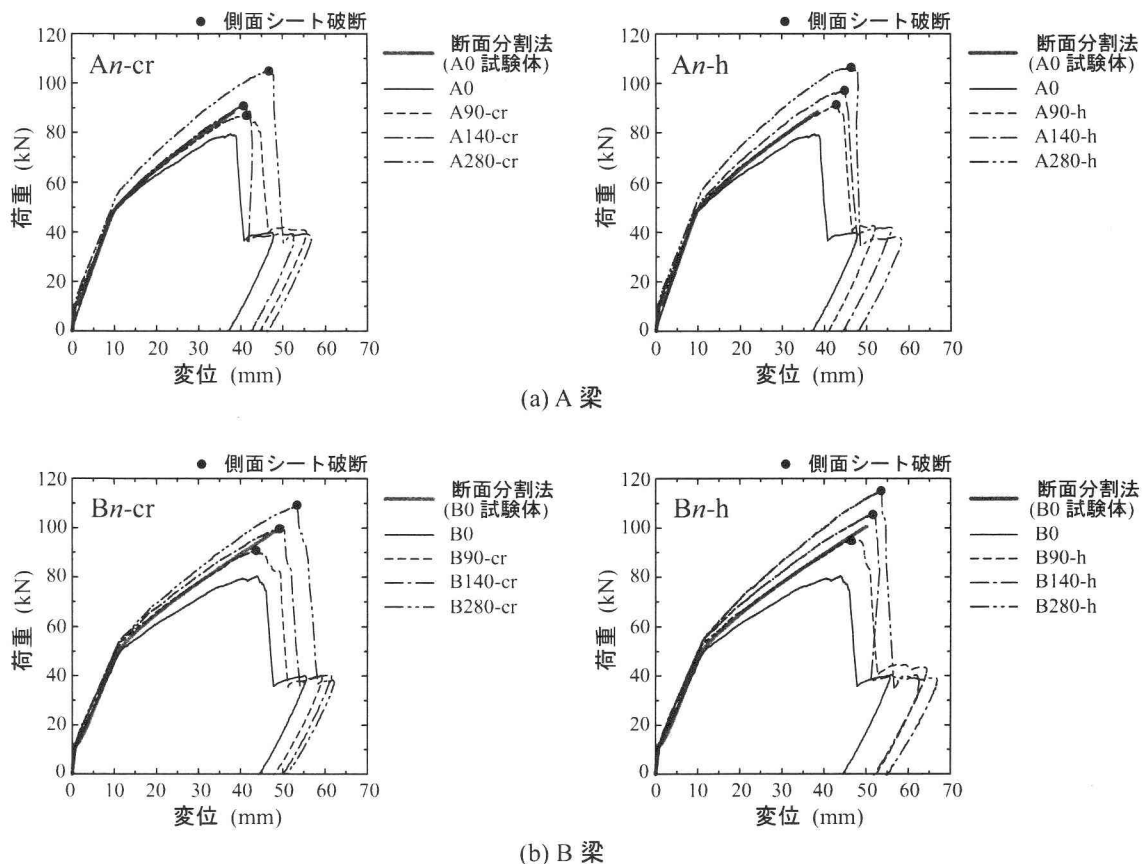


図-5 荷重-変位曲線(側面接着シートの目付量の比較)

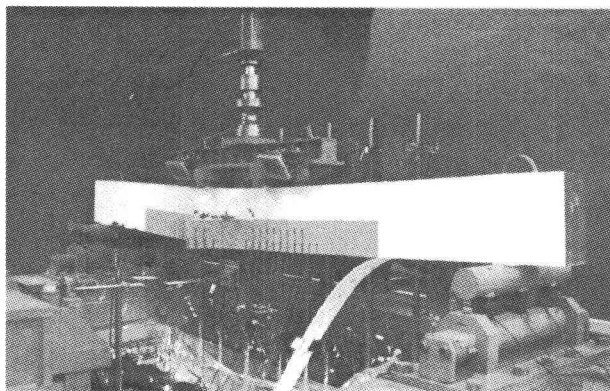


写真-1 試験体の設置状況

定している。各センサーからの出力データは、アンプ内蔵のデジタルメモリレコーダを用いて10 Hzのサンプリングによって一括収録している。なお、実験時には、デジタルカメラを用いてひび割れの発生状況およびシートの剥離進展状況を連続的に撮影している。

4. 実験結果

4.1 荷重-変位関係

ここでは、側面接着を施した試験体に関する荷重-変位関係の実験結果を、曲げ補強のみのA0/B0試験体の実験結果や計算結果と比較することによって、側面

接着法による曲げ補強シートの剥離抑制効果を検討するとともに、側面接着シートの合理的な補強範囲およびシート目付量に関する検討を行うこととする。

図-5には、側面接着シートの目付量が曲げ補強シートの剥離抑制効果におよぼす影響を検討するため、側面接着高さが同等である試験体の結果をAおよびB梁毎に比較して示している。図-5(a)より、曲げ補強のみを施したA0試験体を見ると、主鉄筋降伏後の剛性勾配が低下し計算結果のそれを下回り、計算終局耐力に到達する前に曲げ補強シートの剥離によって終局に至っていることより、剥離破壊型の性状を示していることが分かる。側面接着を施した試験体は、いずれも計算結果と同程度かそれ以上の荷重レベルで終局に至っていることより、側面接着シートが十分な剥離抑制効果を発揮していることが分かる。

図-5(b)より、B0試験体を見ると、A0試験体と同様に主鉄筋降伏後に剛性勾配が低下し、計算終局耐力到達前に終局に至っている。また、B梁の場合は側面接着シートの目付量により若干異なった性状を示している。すなわち、目付量が 140 g/m^2 以上であるB140-cr/h、B280-cr/h試験体は、計算結果を越えた後に終局に至っているのに対し、目付量が 90 g/m^2 であるB90-cr/h試験体は計算耐力および変位に到達する前に剛性勾配が低下し終局に至っている。この剛性勾配の

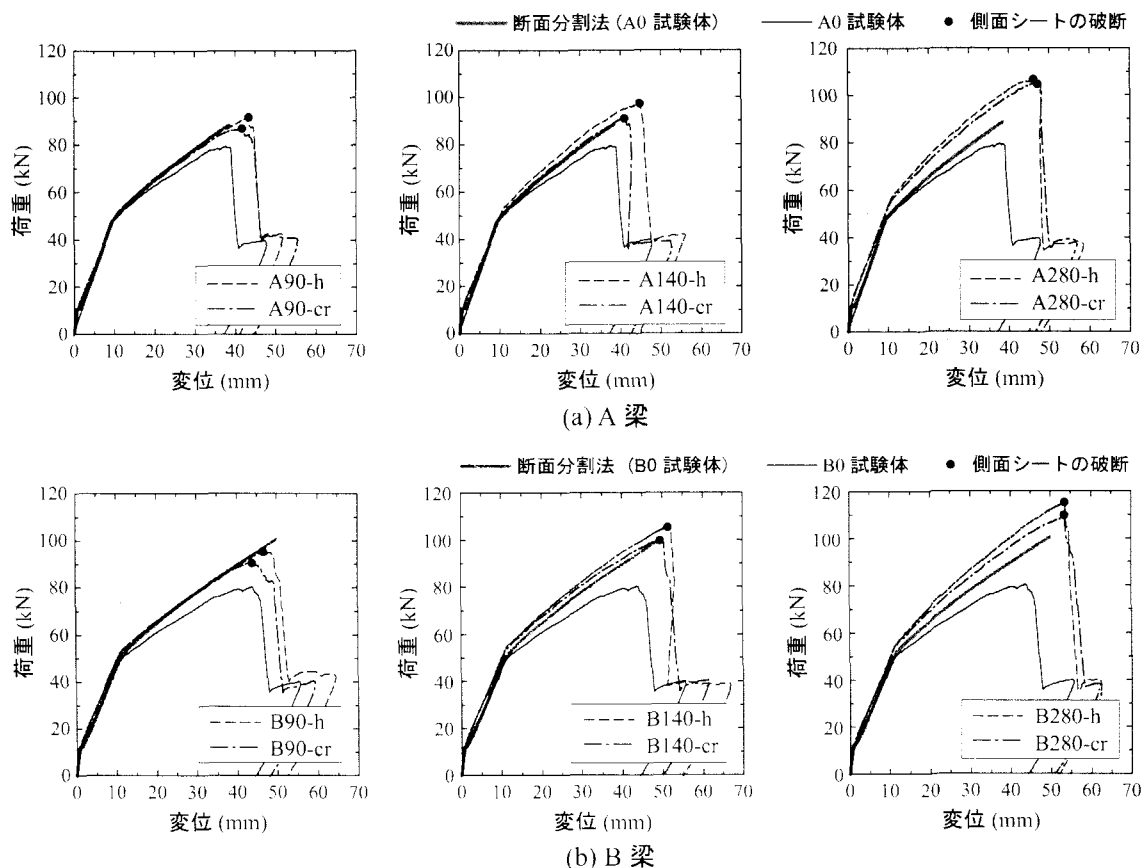


図-6 荷重-変位曲線(側面接着シートの接着高さの比較)

低下は、後述のように側面接着シートの破断によって生じている。したがって、本研究に用いた剥離破壊型のFRPシート曲げ補強RC梁のシートの剥離を計算終局時まで抑制するためには、A、B梁の場合で側面接着シートの目付量をそれぞれ90、140 g/m²以上とする必要があることが明らかになった。なお、曲げ補強シートの効果は、梁の種類や側面接着シートの接着高さにかかわらず、側面接着シートの目付量が多いほど高い。これは、いずれの梁も側面接着シートの破断に伴う曲げ補強シートの全面剥離によって終局に至っているためである。

図-6には、側面接着シートの接着高さが曲げ補強シートの剥離抑制効果に及ぼす影響を検討するため、側面接着シートの目付量が同等である試験体の結果をA梁およびB梁毎に比較して示している。図-6(a)より、主鉄筋降伏後の勾配は目付量の違いにかかわらず、接着高さの大きい-h試験体で若干大きくなる傾向にあることが分かる。これは、-cr試験体に比較して接着高さが大きい場合、曲げ補強効果も多少大きく出現するためと考えられる。また、終局時の荷重と変位に着目すると、A90、A280試験体では、接着高さにかかわらずほぼ同程度であるものの、A140試験体では、接着高さの高い-h試験体の荷重および変位が-cr試験体よりも大きいことが分かる。このことより、接着高さが低

いA140-cr試験体の場合にはシート長さがA140-h試験体よりも短く、シート破断しやすい傾向にあることが分かる。また、A140-cr試験体では側面接着シートの破断に伴って曲げ補強シートがより小さな変位で全面剥離し、終局に至ったものと考えられる。ただし、両者共に計算耐力を超えた時点で終局に至っており、補強設計上の耐力は満足している。

図-6(b)より、B梁の場合もA梁と大略同様の性状が見受けられる。すなわち、-h試験体の場合には-cr試験体よりも剛性勾配が多少大きく、最大荷重時変位も同等程度であることから、その最大荷重は-cr試験体よりも多少大きい。なお、目付量の少ないB90試験体では、接着高さにかかわらず、計算耐力以前に終局に至っていることが分かる。

以上のことより、側面接着シートの接着高さが剥離抑制効果に与える影響は顕著でないことが分かる。このように、A、B梁の-cr試験体の接着高さが-h試験体のそれぞれ7、6割程度であるにもかかわらず、ほぼ同様の剥離抑制効果を発揮していることより、必要接着高さ h_{cr} を適用することで効果的に曲げ補強シートの剥離を抑制可能であるものと判断される。

表-3には、最大荷重時における実験結果、計算結果およびその比を一覧にして示している。なお、表には実験終了時における破壊状況もあわせて示している。

表-3 実験結果の一覧

試験体名	最大荷重時						実験終了時における破壊状況
	実験結果		計算結果		最大荷重比	最大変位比	
	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)			
A0	79.5	37.6	88.6	38.4	0.90	0.98	曲げ補強シートの剥離
A90-cr	87.2	41.7			0.98	1.09	側面シートが梁軸方向に破断した後、曲げ補強シートが剥離
A140-cr	91.1	40.8			1.03	1.06	
A280-cr	105.0	46.5			1.19	1.21	側面シートの破断と曲げ補強シートの剥離が同時に発生
A90-h	91.6	43.0			1.03	1.12	側面シートが梁軸方向に破断した後、曲げ補強シートが剥離
A140-h	97.2	45.0			1.10	1.17	
A280-h	106.7	46.2			1.20	1.20	側面シートの破断と曲げ補強シートの剥離が同時に発生
B0	80.4	42.8	100.6	50.0	0.80	0.86	曲げ補強シートの剥離
B90-cr	90.9	43.6			0.90	0.87	側面シートが梁軸方向に破断した後、曲げ補強シートが剥離
B140-cr	99.9	49.0			0.99	0.98	
B280-cr	109.5	53.5			1.09	1.07	側面シートの破断と曲げ補強シートの剥離が同時に発生
B90-h	95.1	46.7			0.95	0.93	側面シートが梁軸方向に破断した後、曲げ補強シートが剥離
B140-h	105.5	51.4			1.05	1.03	
B280-h	115.3	53.7			1.15	1.07	側面シートの破断と曲げ補強シートの剥離が同時に発生

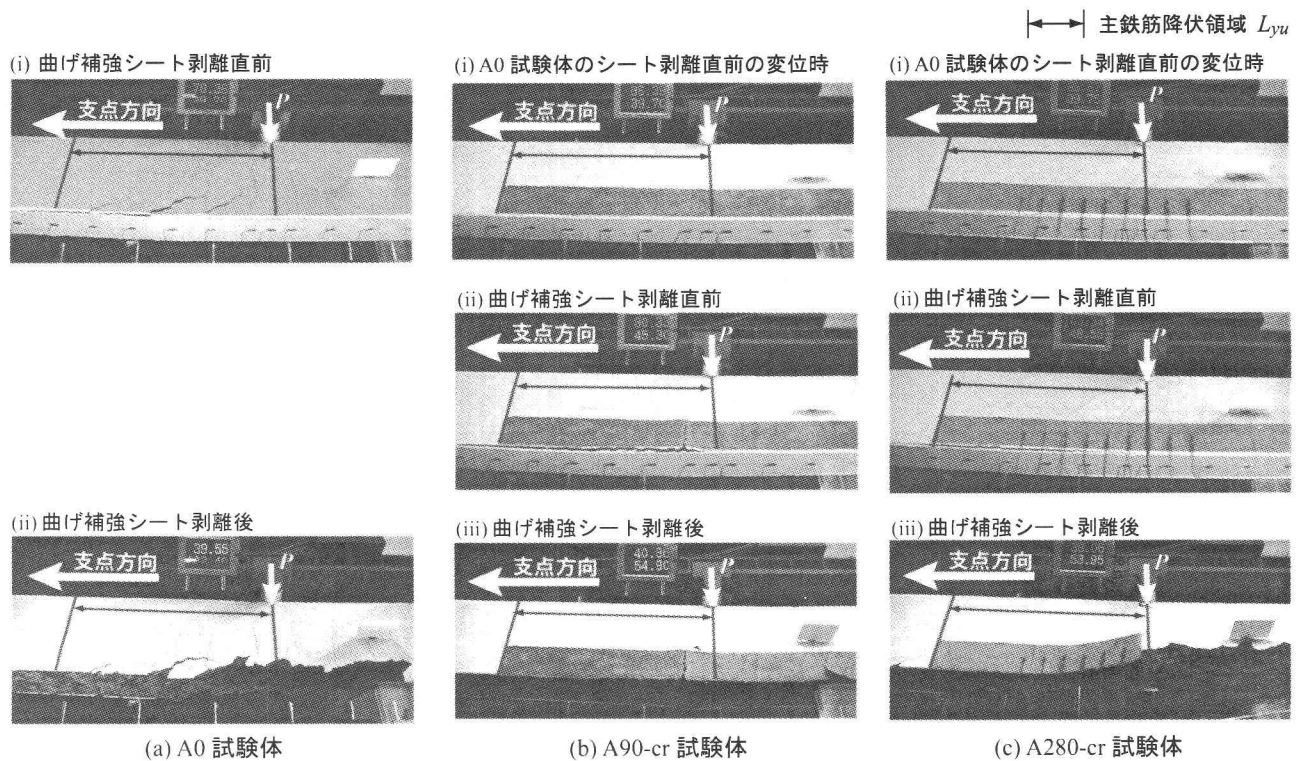


写真-2 各変位時における下縁かぶり部のひび割れ進展状況 (A0, A90/A280-cr 試験体)

表より、A, B 梁ともに目付量が大きい場合ほど最大荷重比、最大変位比が大きく示され剥離抑制効果が大きいことが分かる。破壊状況に着目すると、A0, B0 試験体はともにピーリング作用によるシート剥離によって終局に至っている。一方、側面接着試験体のうち目付量の小さい場合には側面シートの破断後に曲げ補強シートが剥離する状況が見られた。また、目付量が大きい場合には側面接着シートの破断と曲げ補強シートの剥離がほぼ同時に発生することが明らかになった。このことより、側面接着シートの剥離抑制効果は、その

シートの破断に大きく影響されるものと考えられる。したがって、側面接着シートの補強量を多くし、側面接着シートの破断を遅らせることで剥離抑制効果をさらに向上させることができるものと考えられる。

4.2 曲げ補強シートの剥離進展状況

写真-2 には、曲げ補強シートの剥離進展状況の一例として、A0, A90/A280-cr 試験体に関する載荷点近傍下縁かぶり部の状況を各変位時について示している。ここで、A0 試験体に関しては、(i) 曲げ補強シート剥離

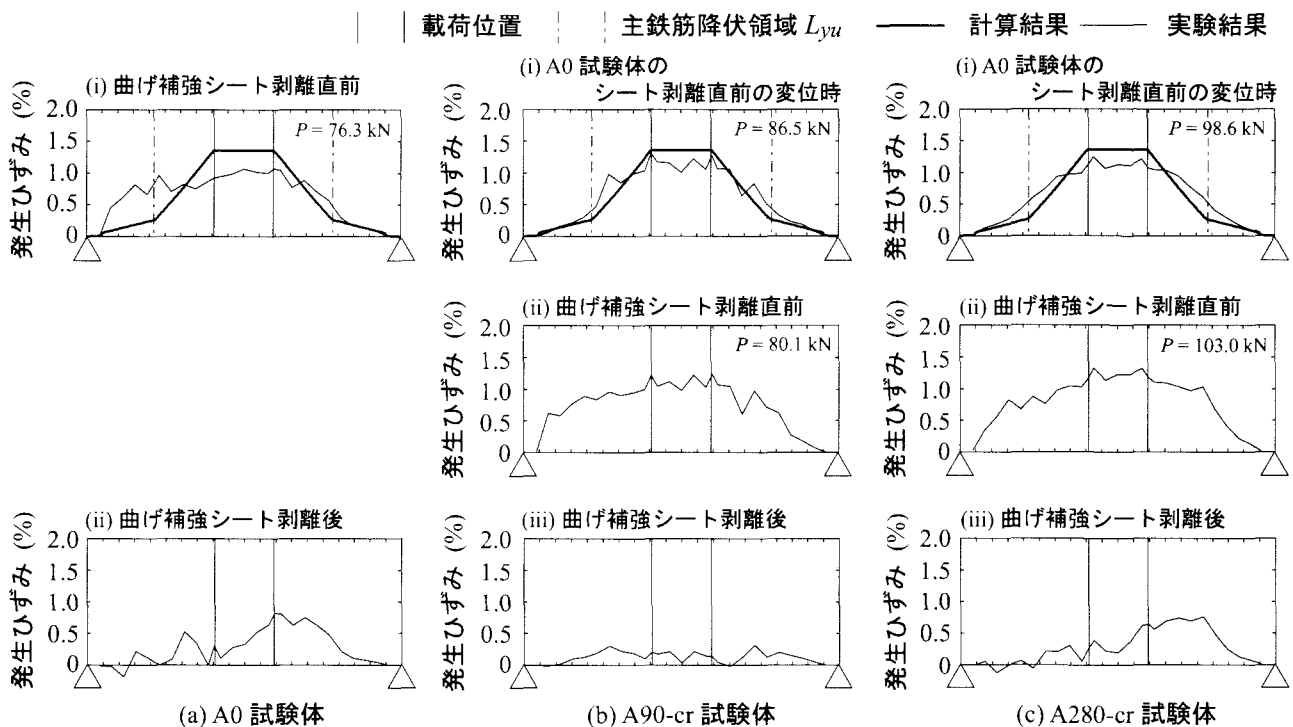


図-7 曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状 (A0, A90/A280-cr 試験体)

直前、および (ii) 曲げ補強シート剥離後について示し、A90/A280-cr 試験体に関しては、(i) A0 試験体のシート剥離直前の変位時 ($\delta = 39.7$ mm)、(ii) 当該試験体の曲げ補強シート剥離直前、(iii) 曲げ補強シート剥離後、の各状況について示している。

写真より、A0 試験体のシート剥離直前 (i) では、主鉄筋降伏領域 L_{yu} 内の下縁かぶりコンクリート部に斜めひび割れが数本発生し、主鉄筋降伏領域 L_{yu} 内の中央部の斜めひび割れ先端部においてせん断ずれが生じていることが分かる。また、このせん断ずれの位置よりピーリング作用によって発生したシートの部分剥離が支点方向に向かって進展していることが分かる。このような状況は、前述の 図-1 に示したモデル図とほぼ同様である。また、シート剥離後 (ii) には、等曲げ区間および等せん断力区間の荷重点近傍部における下縁かぶりコンクリートが完全に剥落していることが分かる。なお、この剥落範囲は主鉄筋降伏領域 L_{yu} 内であることが確認できる。

A90-cr 試験体の場合には、A0 試験体のシート剥離直前の変位時 (i) において、側面接着シート上部に曲げおよび斜めひび割れの発生が確認できるものの、側面接着シートの損傷や曲げ補強シートの部分剥離は見られない。しかしながら、曲げ補強シートの剥離直前時 (ii) には、側面接着シートが既に破断していることが分かる。また、曲げ補強シートの部分剥離は、側面接着シート破断部近傍から支点側に向かって進展している。実験時には、側面接着シートの破断に伴い曲げ補強シートの部分剥離が急激に進展したことを確認して

いる。このことより、側面接着シートに目付量の小さい 2 方向シートを用いる場合には、曲げ補強シートよりも早期に側面接着シートが梁高方向に破断して、この部分を介して梁下縁にせん断ずれが生じ、曲げ補強シートが剥離する場合のあることが明らかになった。

一方、A280-cr 試験体の場合には、A90-cr 試験体と同様、A0 試験体のシート剥離直前の変位時 (i) には、側面接着シートの損傷や曲げ補強シートの部分剥離は見られない。また、曲げ補強シートの剥離直前時 (ii) には、A90-cr 試験体の場合と異なり、側面接着シートの破断は見られない。また、この時点における A280-cr 試験体の荷重レベルは、A90-cr 試験体のそれよりも 20 kN 程度大きい。このことより、側面接着シートの破断が、曲げ補強シートの剥離に大きな影響をおよぼしていることが分かる。すなわち、側面接着シートの目付量が大きい場合ほど、高い荷重レベルまで破断が生じずにピーリング作用が抑制されるものと考えられる。曲げ補強シート剥離後の状況 (iii) を見ると、側面接着シートが破断していることが分かる。また、表-3 にも示しているように、実験時には、曲げ補強シートの剥離と側面接着シートの破断がほぼ同時に発生していることを確認している。

4.3 曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

図-7 には、写真-2 と同様、A0, A90/A280-cr 試験体に関する各変位時のひずみ分布性状を示している。なお、ひずみ分布の計算結果は、前述の断面分割法により算出したものである。図より、A0 試験体の場合に

は、シート剥離直前 (i) において等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみよりも小さく示されていることが分かる。また、左側等せん断力区間においても等曲げ区間と同程度の実測ひずみが発生していることから、シートの部分剥離によりひずみが均等化されていることが分かる。一方、A90/A280-cr 試験体の場合には、A0 試験体のシート剥離時と同一変位時 (i) において等曲げ区間の実測ひずみが計算ひずみに比較して多少小さいものの、ほぼ対応している。また、等せん断力区間においては、実測ひずみが計算ひずみよりも多少大きく示されていることから、ピーリング作用による部分剥離が発生し始めているものと考えられる。

A90/A280-cr 試験体の曲げ補強シート剥離直前時点 (ii) では、1.0 % 程度の大きなひずみが広範囲にわたって発生しており、曲げ補強シートの部分剥離が進展していることが分かる。しかしながら、実測ひずみの大きさや大きなひずみの発生領域は A0 試験体の場合よりも大きい。これは、側面接着を施すことにより、曲げ補強シートの部分剥離発生後も側面接着シートがその全面剥離に抵抗していることを示しているものと考えられる。特に、A280-cr 試験体の場合には、この時点では側面接着シートは未だ破断していないことより、A90-cr 試験体の場合よりも、発生ひずみレベルが大きく、大ひずみの発生範囲も広い。

以上のことより、側面接着シートの目付量を大きくすることで曲げ補強シートの全面剥離が抑制され、かつシートの曲げ補強効果も大きく出現することが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の合理的なシート剥離抑制法の確立を目的に、RC 梁の側面に FRP シートを接着する工法を提案し、実験的にその妥当性に関する検討を行った。検討は剥離破壊型を示す 2 種類の FRP シート曲げ補強 RC 梁に対し、側面接着シートの目付量 3 種類、接着高さ 2 種類とした全 14 体の試験体を用いて行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 主鉄筋降伏領域の梁側面に提案の必要接着高さ h_{cr} を確保してシートを 2 方向に貼り付けることで、完全付着を想定した計算曲げ耐力まで曲げ補強シートの剥離を抑制することが可能である。
- 2) 側面接着シートの剥離抑制効果は、側面接着シートの目付量を大きくすることにより、側面シートの破断が遅延するため、効果的に発揮されること

が明らかになった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 (V 耐震設計編) 同解説, 1996.7
- 2) 理工図書：連続繊維による耐震補強, 2000.4
- 3) 土木学会：性能照査システムにおけるコンクリート構造物の補強, コンクリート技術シリーズ 42, 2001.6
- 4) 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
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介：FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.91-109, 2002.8
- 6) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒：FRP シート曲げ補強 RC 梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.255-272, 2003.2
- 7) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介, 澤田 純之：AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離制御法に関する実験的研究, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.5, pp.899-909, 2002.8
- 8) 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, pp.1771-1776, No.2, 2003.6
- 9) 高橋 博威, 睦好 宏史, 近藤 悦郎：各種補強工法を用いた鉄筋コンクリートはりの力学的性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No2, pp.1493-1498, 1996.7
- 10) Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R. : Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets, Journal of Structural Engineering, pp.903-911, July, 1997.5
- 11) 原田 哲夫, 永藤 政敏, 久保田 慶太, 岳尾 弘洋：端部増貼り補強による炭素繊維シートの定着耐力向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No1, pp.469-474, 2000.7
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 設計編, 2002.5
- 13) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領 (案), 1998.1

(2004 年 9 月 17 日受付)