

## 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

## An Experimental Study on Debonding Control of Flexural Strengthened RC Beams with AFRP Sheet

岸 徳光\*, 三上 浩\*\*, 栗橋祐介\*\*\*, 澤田純之\*\*\*\*, 田口史雄\*\*\*\*\*

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Yusuke KURIHASHI, Sumiyuki SAWADA and Fumio TAGUCHI

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

\*\*フェロー会員 博(工) 三井建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*正会員 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)

\*\*\*\*学生会員 修(工) 室蘭工業大学博士後期課程 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*\*正会員 北海道開発土木研究所室長 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

In this paper, in order to keep a flexural strengthening FRP sheet for RC beam from debonding by ultimate state, an applicability of U-shaped jacketing method was experimentally discussed. Here, static loading tests for flexural strengthened RC beams with AFRP sheet were conducted taking jacketing area (height  $\times$  width) and jacketing volume of AFRP sheet as variables. From this study, it was seen that jacketing the RC beams from the lower edge to half height of the neutral axis of rebar yield area in the equi-shear span using AFRP sheet with 15 % volume of flexural strengthening one, the RC beams can be upgraded upto the calculated ultimate state.

**Key Words :** RC beam, flexural strengthening, AFRP sheet, debonding control, U-shaped jacketing

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート (RC) 構造物の劣化対策や各種設計要領の改訂に伴う RC 構造物の耐震耐荷性能の向上が急務となっており、効率的な補修・補強法の確立が強く求められている<sup>1),2)</sup>。著者らは、補強方法の一つとして軽量で高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRP シートもしくはシート) を用いた接着工法を取り上げ、種々の実験研究を実施してきた。FRP シート接着工法のうち、RC 梁の引張側底面に FRP シートを接着して曲げ補強する場合を想定すると、補強後の RC 梁の破壊形式には、上縁コンクリートの圧壊、シート破断の他、シートの剥離が考えられる。特にシート剥離の場合には断面分割法 (後述) による計算値を下回る荷重で終局に至ることも想定されるため、著者らはこれまで FRP シート曲げ補強 RC 梁の静荷重実験を数多く実施し、その耐荷性状およびシートの剥離性状に関する検討を行ってきた<sup>3)~5)</sup>。

その結果、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、i) 主鉄筋降伏後、剛性勾配が計算結果のそれを下回り、計算耐力および計算終局変位を下回る状態でシートが剥離して終局に至る剥離破壊型と、ii) 主鉄筋降伏後においても計算結果と同様の耐荷性状を示し、計算結果の終局変位を上回った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曲げ圧壊型に、分類できることを明らかにしている (図-1 参照)。また、

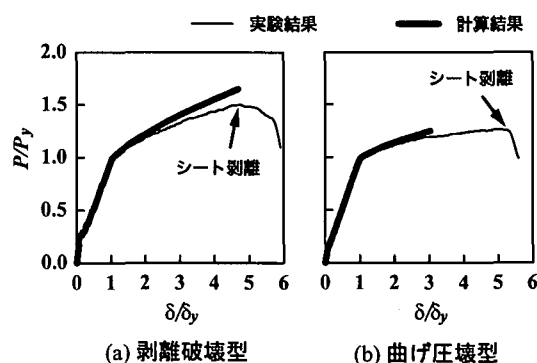
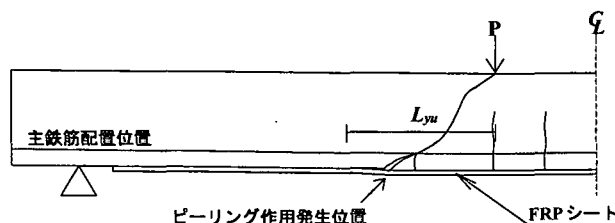
図-1 荷重-変位関係の一例<sup>5)</sup>

図-2 ピーリング作用発生の模式図

シートの剥離メカニズムに着目した検討により、シートの剥離は等せん断力区間における計算終局時の主鉄筋降伏領域  $L_{yu}$  内の下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックがシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によって生じることも明らかにしている (図-2 参照)。さらに、シートの剥離性状が  $L_{yu}$

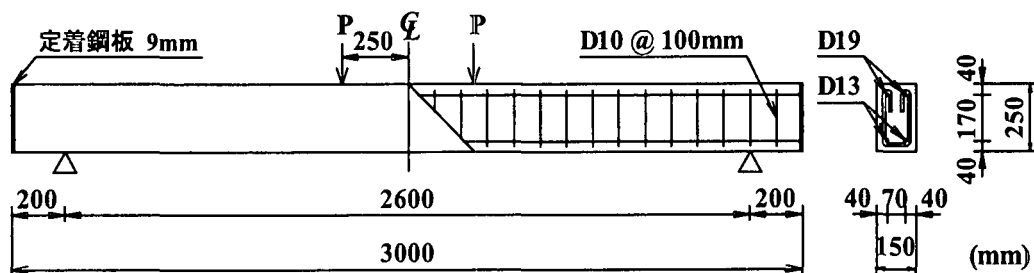


図-3 RC 梁の形状寸法および配筋図

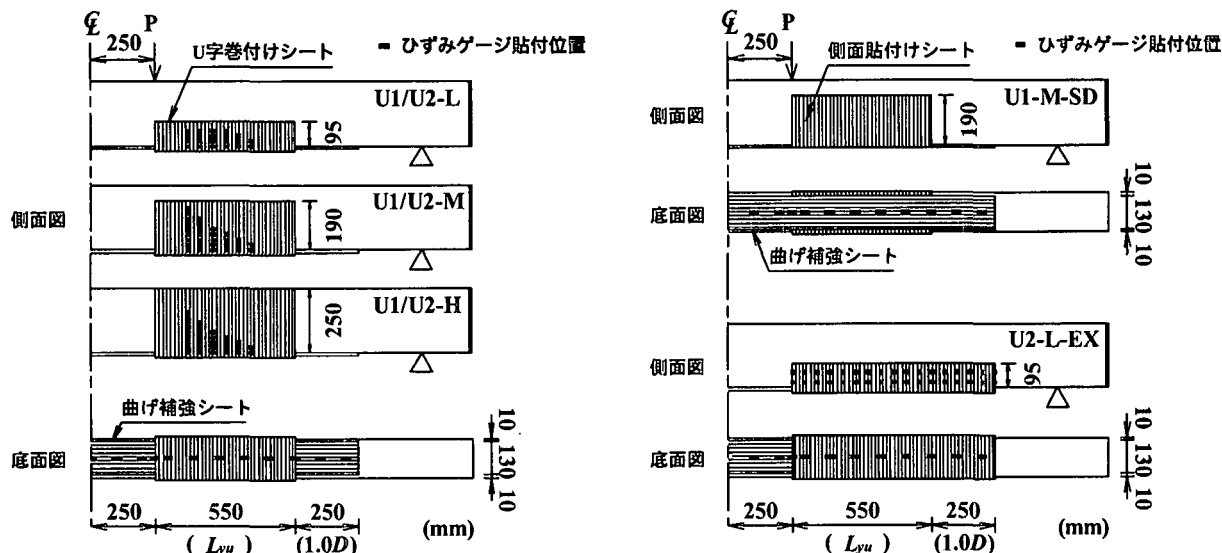


図-4 補強概要およびシートひずみ測定位置

に対するせん断スパン長  $a$  の比に関連することに着目して、FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測法を提案している<sup>5)</sup>。

ここで、上記予測法により FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式が曲げ圧壊型と予測される場合には、計算値と同程度の耐荷性能が保証される。一方、剥離破壊型と予測される場合には、計算耐力よりも小さな荷重段階でシートが剥離して終局に至る可能性があることより、計算耐力と同程度の耐力を発揮させ設計耐力を確保するためにはシートの剥離を抑制することが必要となる。RC 梁の引張側底面に接着した曲げ補強シートの剥離抑制法に関しては、これまで種々の方法が提案され実験的に検討されている<sup>6)~9)</sup>。その結果、曲げ補強シート接着後、同種のシートを U 字型に巻付ける (以下、U 字巻付け) ことにより、アンカーボルト等を用いずに効率的に曲げ補強シートの剥離を抑制可能であることが明らかになっている。しかしながら、未だ巻付け範囲やそのシート厚さを決定するための手法が提示されるには至っていない。

このような観点より、本研究では剥離破壊型となる FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象に、効率的なシート剥離抑制法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、U 字巻付けによる剥離抑制法を取り上げ、1) 剥離抑制効果、2) U 字巻付け後のシート剥離メカニ

ム、3) 効率的な U 字巻付けシートの目付量 (単位面積当たりの質量)、巻付け高さおよびその範囲、に関する検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 RC 梁の概要

図-3 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 RC 梁である。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ことを避けるためである。また、せん断補強筋量は、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た。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<sup>10)</sup> (以下、示方書) に準拠して算出している。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。なお、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は示方書に準拠して設定している。また、AFRP シートの応力-ひずみ関係は、アラミド補強研究会の補強要領<sup>11)</sup> (以下、補強要領) に準拠して破断ひずみに

表-1 試験体の一覧

| 試験体名      | 曲げ補強<br>シートの<br>目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | U字巻付け<br>シートの<br>目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 梁下縁から<br>のシート<br>巻付け高さ<br>(cm) |
|-----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| U0        | 415 × 2                                    | -                                           | -                              |
| U1-L      |                                            | 140                                         | 9.5                            |
| U1-M      |                                            |                                             | 19                             |
| U1-M-SD*  |                                            |                                             | 25                             |
| U1-H      |                                            |                                             | 25                             |
| U2-L      |                                            | 280                                         | 9.5                            |
| U2-L-EX** |                                            |                                             | 19                             |
| U2-M      |                                            |                                             | 25                             |
| U2-H      |                                            |                                             | 25                             |

\*：側面貼付け

\*\*：U字巻付け範囲を曲げ補強シート端部まで拡張

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

| 繊維<br>目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 厚さ<br>(mm) | 引張<br>強度<br>(GPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 破断<br>ひずみ<br>(%) |
|----------------------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 140                              | 0.0965     | 2.52              | 115               | 2.19             |
| 280                              | 0.193      |                   |                   |                  |
| 415                              | 0.286      |                   |                   |                  |

至るまで応力が線形に増加するものと仮定している。

## 2.2 補強方法

本実験で使用する曲げ補強シートの目付量や接着範囲、およびU字巻付けシートの目付量や巻付け範囲並びに巻付け高さは、それぞれ下記のように設定している。なお、図-4には、各試験体の補強概要とシートひずみ測定位置を示している。

### (1) 曲げ補強シート

曲げ補強シートは、既往の研究<sup>5)</sup>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<sup>2</sup>、幅 13 cm 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、その接着範囲は、十分な接着長さを確保することとし上縁コンクリート圧壊時の計算耐力を保証できる長さとして設定した。すなわち、既往の研究<sup>12)</sup>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。本実験の場合には、曲げ補強 RC 梁の  $L_{yu}$  が 55 cm、 $D$  が 25 cm であることより、 $L_{yu} + 1.0D = 80$  cm となる。なお、曲げ補強シート上には、図-4 に示されているように、ひずみゲージをスパン中央部から両支点側に 10 cm 間隔および載荷点直下に貼付けている。

なお、シート接着部のコンクリート表面には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) を施している。

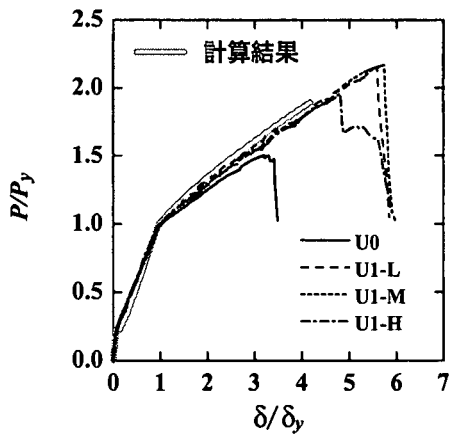
### (2) U字巻付けシート

前述のとおり、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て、曲げおよび斜めひび割れの発生により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、このピーリング作用によるシートの剥離を抑制することにより、梁の破壊形式を剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行可能であるとの考え方にに基づき、部材軸方向のU字巻付け範囲 (以後、単にU字巻付け範囲と呼ぶ) を計算終局時の主鉄筋降伏領域  $L_{yu}$  (= 55 cm) とした。なお、比較のためにU字巻付け範囲を載荷点位置から曲げ補強シート接着端部までの領域 ( $L_{yu} + 1.0D$ ) とする場合についても実験を行っている。また、効率的な巻付け高さを検討するために、本研究では、i) 梁下縁から梁上縁まで、ii) 梁下縁から計算終局時における中立軸高さ (= 19 cm) まで、iii) 梁下縁から計算終局時における中立軸高さの 1/2 (= 9.5 cm) まで、の3種類の巻付け高さを設定した。さらに、側面貼りのみによるシートのピーリング作用抑制効果を確認するために、シートをU字型に巻付けずに梁側面および下縁面取り部のみに接着する場合 (以後、側面貼付け) についても併せて検討を行っている。なお、U字巻付けにおける隅角部は、シートの応力集中を避けるため半径  $r = 10$  mm の面取りを施している。また、梁側面のシート接着部にはダイヤモンドディスクサンダーによる表面処理を施している。

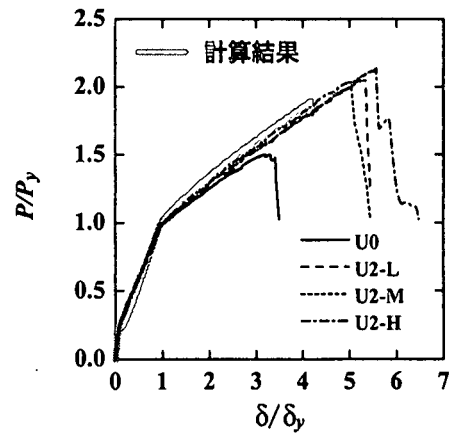
U字巻付けシートの目付量は、曲げ補強シートの 15 または 30 % 程度とし、それぞれ 140, 280 g/m<sup>2</sup> のシートを用いることとした。なお、梁側面部のU字巻付けシートには繊維方向に図-4 に示されているようにひずみゲージを貼付している。すなわち、U1/U2-L/M/H 試験体 (後述) には、左右のせん断スパンに対して斜めひび割れおよびピーリング作用の発生が予想される位置に 42 ~ 60 点のひずみゲージを貼付している。一方、U2-L-EX 試験体には、左右のせん断スパン全体に対してひずみの軸方向分布性状を検討するために全 68 点のひずみゲージを貼付している。

## 2.3 試験体名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。表中、試験体名のうち第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、U0はU字巻付けを施していない場合を、U1, U2はそれぞれシート目付量が 140, 280 g/m<sup>2</sup> の場合を意味している。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



(a) U1- 試験体



(b) U2- 試験体

図-5 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  
(U字巻付けシートの目付量および巻付け高さの影響)

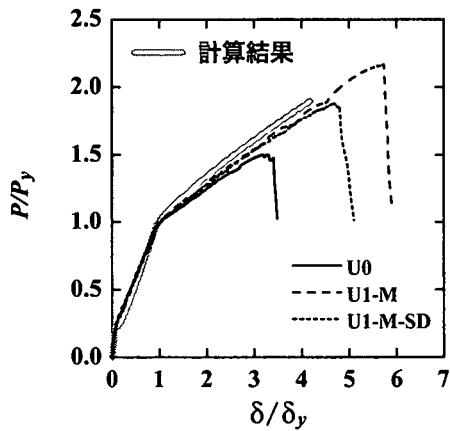


図-6 無次元荷重－変位曲線に関する実験および  
計算結果の比較 (側面貼付けの影響)

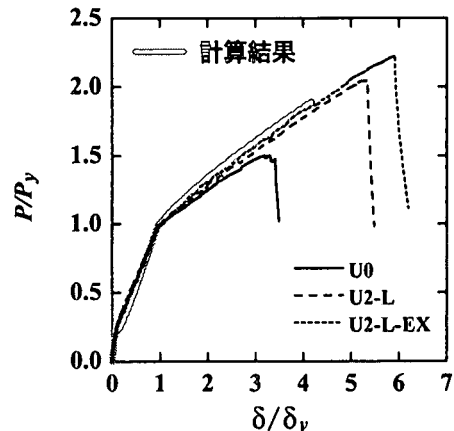


図-7 無次元荷重－変位曲線に関する実験および  
計算結果の比較 (U字巻付け範囲の影響)

る。第3項目に付した -SD は側面貼付けであることを意味し、-EX は U 字巻付け範囲を他の場合よりも拡張し  $L_{yu} + 1.0D$  とする場合を意味している。

実験時のコンクリートは材齢が 124 日、平均圧縮強度が  $f'_c = 29.7 \text{ MPa}$  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、各 AFRP シートに関する公称の力学的特性値の一覧を示している。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 シート各点のひずみであり、実験時にはアンブ内蔵のデジタルメモリレコーダを用いて 10Hz のサンプリングによって各出力データを一括収録している。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 無次元荷重－変位関係

図-5 には、U1-L/M/H および U2-L/M/H 試験体に関する無次元荷重－変位曲線の実験結果を U 字巻付けシート目付量毎に整理して示している。図中には、比

較のために U 字巻付けを施していない U0 試験体の実験結果および計算結果も併せて示している。計算結果は、前述の断面分割法により、シートが計算終局時までコンクリートと完全付着状態にあるものと仮定し、梁上縁コンクリートのひずみが  $3,500 \mu$  に至った時点を終局として算出している。図中、実験結果および計算結果は、主鉄筋降伏後における各試験体の 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て整理している。

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の性状を示していることが分かる。一方、U 字巻付けした試験体は、U 字巻付けシートの目付量や巻付け高さにかかわらず、主鉄筋降伏後も計算結果と同様の荷重－変位関係を示し、計算耐力を上回った後終局に至っている。このことは、U 字巻付け補強を行うことでシートの付着が計算終局時まで十分に確保され、実験結果は示方

表-3 各試験体の実験および計算結果と実験終了時における破壊状況

| 試験体名    | 降伏荷重<br>$P_y$<br>(kN) |          | 降伏変位<br>$\delta_y$<br>(mm) |          | 無次元<br>終局荷重<br>$P_u / P_y$ |          | 無次元<br>終局変位<br>$\delta_u / \delta_y$ |          | 実験終了時における破壊状況                   |
|---------|-----------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|--------------------------------------|----------|---------------------------------|
|         | 実験<br>結果              | 計算<br>結果 | 実験<br>結果                   | 計算<br>結果 | 実験<br>結果                   | 計算<br>結果 | 実験<br>結果                             | 計算<br>結果 |                                 |
| U0      | 50.5                  | 46.5     | 10.1                       | 9.5      | 1.50                       | 1.89     | 3.19                                 | 4.17     | 曲げ補強シートの剥離                      |
| U1-L    | 48.6                  |          | 9.9                        |          | 2.15                       |          | 5.56                                 |          | 曲げ補強およびU字巻付けシートの剥離              |
| U1-M    | 48.9                  |          | 9.6                        |          | 2.17                       |          | 5.73                                 |          | U字巻付けシートの破断を伴う<br>曲げ補強シートの剥離    |
| U1-M-SD | 50.7                  |          | 10.3                       |          | 1.88                       |          | 4.69                                 |          | 曲げ補強シートの剥離,<br>側面貼付けシート損傷無し     |
| U1-H    | 49.1                  |          | 9.9                        |          | 1.95                       |          | 4.81                                 |          | U字巻付けシートの割裂・剥離を伴う<br>曲げ補強シートの剥離 |
| U2-L    | 51.3                  |          | 10.2                       |          | 2.05                       |          | 5.31                                 |          | 曲げ補強およびU字巻付けシートの剥離              |
| U2-L-EX | 49.8                  |          | 9.8                        |          | 2.22                       |          | 5.91                                 |          | 曲げ補強シートの破断,<br>U字巻付けシート一部割裂     |
| U2-M    | 49.9                  |          | 9.7                        |          | 1.99                       |          | 5.03                                 |          | 曲げ補強シートの破断,<br>U字巻付けシート損傷無し     |
| U2-H    | 49.7                  |          | 10.2                       |          | 2.13                       |          | 5.57                                 |          | U字巻付けシートの割裂・剥離を伴う<br>曲げ補強シートの剥離 |

書に準拠して算出された計算耐力を十分確保していることを意味している。従って、本実験の範囲内では、U1-L試験体のようにU字巻付けシートの目付量を  $140 \text{ g/m}^2$ 、巻付け高さを梁下縁から  $9.5 \text{ cm}$  (計算終局時の中立軸高さの  $1/2$ ) 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。しかしながら、U2-H試験体ではこのような傾向は見られない。これより、U1-H試験体の早期の破壊は、計算終局点を越えた時点における上縁コンクリートの圧縮破壊が進行する状態下の実験誤差によるものと推察される。

図-6には、シートをU字型に巻付けずに側面貼付けとした場合の耐荷性状を検討するために、U1-M-SD試験体の実験結果をU0、U1-M試験体の実験結果および計算結果と比較して示している。図より、3試験体の実験結果を比較すると、終局耐力および終局変位はU0、U1-M-SD、U1-M試験体の順に大きいことが分かる。ただし、U1-M-SD試験体の終局耐力および終局変位はU1-M試験体の結果より小さいものの、その耐荷性状は主鉄筋降伏後も計算結果とほぼ同様の傾向を示し、計算終局変位を上回った後、計算耐力と同程度の荷重レベルで終局に至る曲げ圧壊型に近い性状を示している。このことより、シートを梁の側面に貼付けることによって、下縁かぶり部におけるコンクリートブ

ロックの形成やこのブロックによるピーリング作用が計算終局時まで抑制され、耐力を計算終局耐力程度まで向上させることが可能であることが分かる。なお、U1-M-SD試験体の終局耐力や終局変位はU1-M試験体の結果に比較して小さい。これは、計算終局点到達以降において、U字巻付けの場合に比較して早期にコンクリートブロックが形成され、対応してピーリング作用によるシート剥離も早期に開始したことを意味している。

図-7には、U字巻付け範囲を曲げ補強シートの端部まで拡張したU2-L-EX試験体の実験結果をU0、U2-L試験体の実験結果および計算結果と比較して示している。図より、U2-L試験体は計算終局点 ( $\delta/\delta_y \approx 4$ ) に到達後、無次元変位が  $\delta/\delta_y \approx 5$  前後で終局に至っているものの、U2-L-EX試験体の場合はU2-L試験体の場合よりも大きな終局耐力を保持し終局に至っていることが分かる。これは、i) U2-L試験体の場合には、後述のように計算終局点に到達した後、曲げ補強シート接着端部近傍のかぶりコンクリートに発生した斜めひび割れがシートに作用する引張力に伴うピーリング作用によって助長され、主鉄筋に沿う割裂ひび割れと連結した後に、曲げ補強シートおよびU字巻付けシートがかぶりコンクリートとともに剥離しているのに対し、ii) U2-L-EX試験体の場合には、U字巻付け領域が拡張されたことにより、上述のかぶり部斜めひび割れの進展が抑制されて曲げ補強シートの定着性能が向上し、最終的に曲げ補強シートの破断によって終局に至った

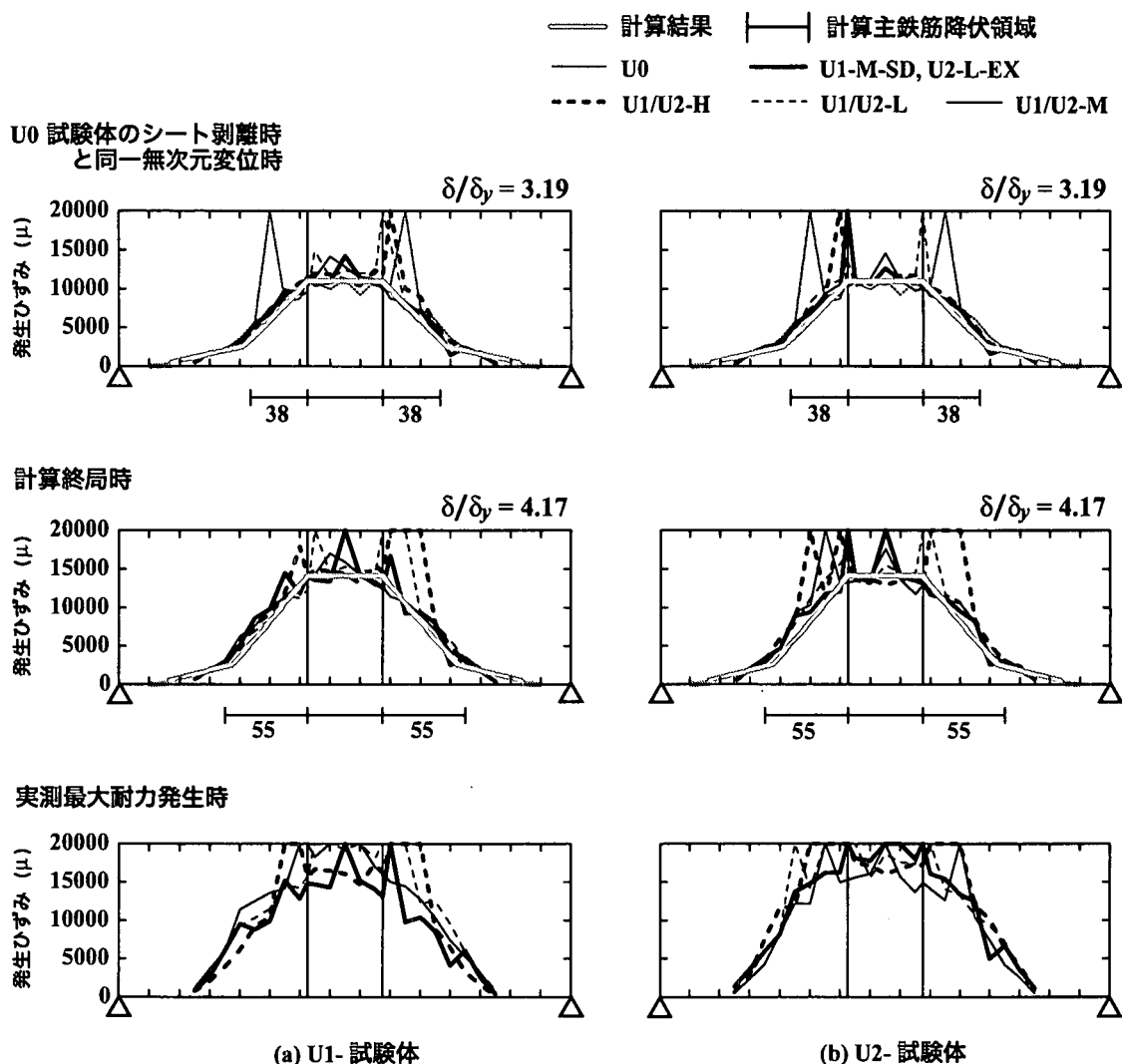


図-8 各試験体の曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状に関する実験および計算結果の比較図

めと推察される。

表-3 には、各試験体の実験結果および計算結果に関する主鉄筋降伏荷重  $P_{ye}$ ,  $P_{yc}$ , 主鉄筋降伏変位  $\delta_{ye}$ ,  $\delta_{yc}$ , 無次元終局荷重  $P_{ue}/P_{ye}$ ,  $P_{uc}/P_{yc}$ , 無次元終局変位  $\delta_{ue}/\delta_{ye}$ ,  $\delta_{uc}/\delta_{yc}$  および実験終了時における破壊状況の一覧を示している。表より、実験結果に関する主鉄筋降伏時の荷重および変位  $P_{ye}$ ,  $\delta_{ye}$  は、各試験体でそれぞれ 50 kN, 10 mm 程度となっており、ともに計算結果  $P_{yc}$ ,  $\delta_{yc}$  を上回っていることが分かる。また、U 字巻付けした試験体の実験時の無次元終局荷重  $P_{ue}/P_{ye}$  および無次元終局変位  $\delta_{ue}/\delta_{ye}$  は、いずれの場合も計算結果  $P_{uc}/P_{yc}$ ,  $\delta_{uc}/\delta_{yc}$  を上回っていることが分かる。これより、U0 試験体に U 字巻付けを施すことにより破壊形式が剥離破壊型から曲げ圧壊型に移行していることが分かる。なお、側面貼付けした U1-M-SD 試験体の場合には、 $P_{ue}/P_{ye}$  は  $P_{uc}/P_{yc}$  とほぼ同程度、 $\delta_{ue}/\delta_{ye}$  は  $\delta_{uc}/\delta_{yc}$  を上回っており、曲げ圧壊型に近い性状となっている。

一方、U 字巻付けした試験体において、破壊性状が類似であるにもかかわらず、各試験体間で  $P_{ue}/P_{ye}$

や  $\delta_{ue}/\delta_{ye}$  が対応しない場合が見受けられる。例えば、U1/U2-H 試験体はともに U 字巻付けシートの割裂・剥離に伴って曲げ補強シートが剥離する性状を示しているにもかかわらず、U1-H 試験体の  $P_{ue}/P_{ye}$ ,  $\delta_{ue}/\delta_{ye}$  は U2-H 試験体の結果に比較して 1 割程度小さい。また、U2-M および U2-L-EX 試験体はともに曲げ補強シートの破断により終局に至っているにもかかわらず、U2-M 試験体の  $P_{ue}/P_{ye}$ ,  $\delta_{ue}/\delta_{ye}$  はともに U2-L-EX 試験体の結果に比して 1 割以上小さい。これらは、U 字巻付けすることにより曲げ補強シートの剥離が抑制可能であるものの、計算終局点以降では上縁コンクリートの圧壊を伴うため、実験誤差の影響が大きいことを意味している。

### 3.2 曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

図-8 には、各試験体に関する曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布の実験および計算結果の比較図を U 字巻付けシートの目付量毎に整理して示している。ここで、計算結果はシートとコンクリートの完全付着を仮定した前述の断面分割法により算出している。図に

は、i) U0 試験体のシート剥離時と同一無次元変位時、ii) 計算終局時、iii) 実測最大耐力発生時、について示している。また、ひずみ分布図の下部には、各時点における計算主鉄筋降伏領域を示している。なお、計算終局時の等せん断力区間における主鉄筋降伏領域は、U2-L-EX を除く試験体の 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と同一無次元変位時における各試験体のひずみ分布を見ると、いずれの試験体も等曲げ区間において  $10,000 \mu$  程度のひずみが発生し、かつ計算結果と良好に対応していることが分かる。一方、等せん断力区間では、U0 試験体の場合において、局所的に  $20,000 \mu$  以上の大きなひずみの発生が見られる。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、U 字巻付けもしくは側面貼付けを施した試験体の場合には、載荷点近傍において曲げひび割れに起因する大きなひずみの発生が見られるものの等せん断力区間のひずみ分布に大きな乱れは見られず、計算結果と良く対応していることが分かる。これより、U 字巻付けを施すことによりコンクリートブロックのピーリング作用によるシートの引き剥がれが十分抑制されていることが分かる。

これらの試験体の計算終局変位時における実験結果を計算結果と比較すると、等曲げ区間では曲げひび割れ発生に伴って大きなひずみが発生しているものの、いずれの試験体においても両結果がほぼ対応していることが分かる。一方、等せん断力区間では、特に主鉄筋降伏領域内 (U 字巻付け範囲内) においてひずみ分布の乱れが著しく、一部の測定点では  $20,000 \mu$  を越えるひずみが発生している。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コンクリートブロックが形成され、この部分が曲げ補強シートを押し下げピーリング作用による部分剥離を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は未だ全面的な剥離に至らず、計算耐力と同程度の荷重レベルを保持している。さらに、実測最大耐力発生時の結果を見ると、計算終局時よりもひずみが増大しており、ピーリング作用がより顕在化していることが分かる。ただし、U1-M-SD 試験体は、他の U 字巻付けした試験体よりも小さな荷重および変位段階で終局に至っているため、この時点での発生ひずみは小さく示されている。一方、U 字巻付け範囲を拡張した U2-L-EX 試験体では、他と比べて大きな荷重および変位で終局に至っているため、等曲げ区間の発生ひずみは大きく示されている。

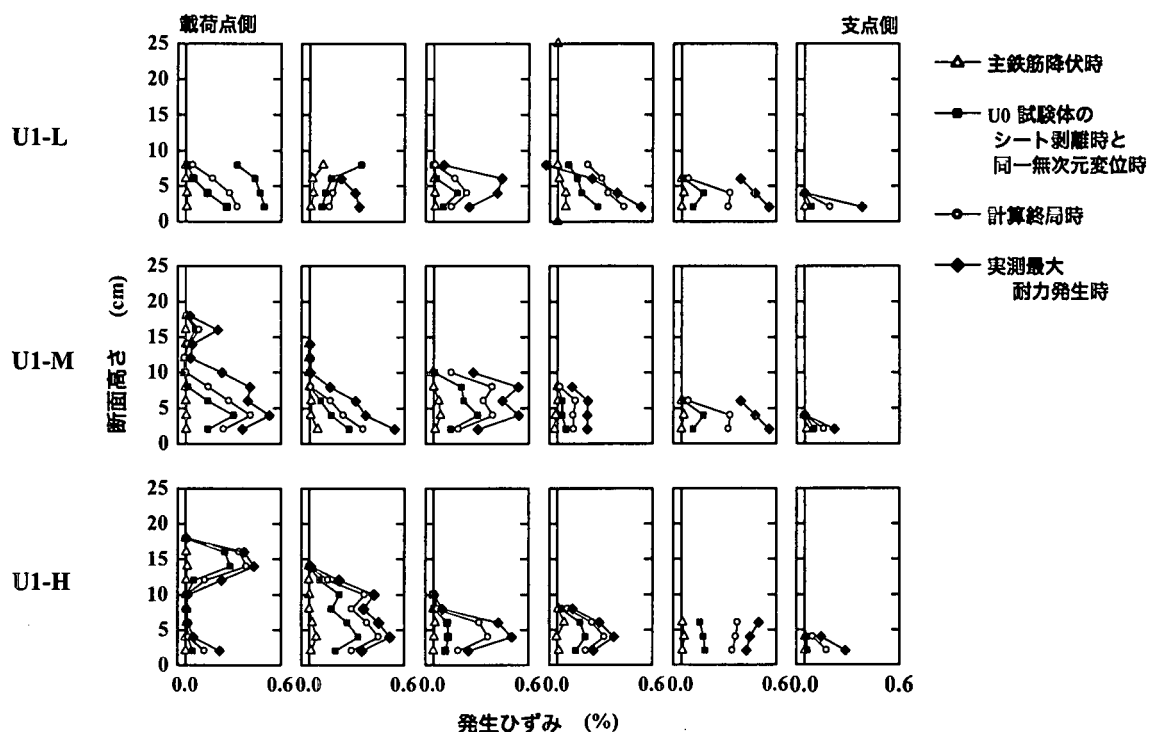
以上より、U 字巻付けを等せん断力区間の主鉄筋降伏領域に施すことにより、曲げ補強シートの剥離要因

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ひずみ分布性状に及ぼす U 字巻付けシートの目付量や巻付け高さの影響は顕著ではないことが明らかになった。一方、側面貼付けの場合には、U 字巻付けする場合よりも小さな荷重および変位レベルで曲げ補強シートが剥離するものの、計算終局時までは他の試験体と同様のひずみ分布性状を示すことや、巻付け範囲を拡張した U2-L-EX 試験体は、他試験体と比べて大きな荷重および変位で終局に至ったため、実測最大耐力発生時の発生ひずみは他に比べて大きいことが明らかとなった。

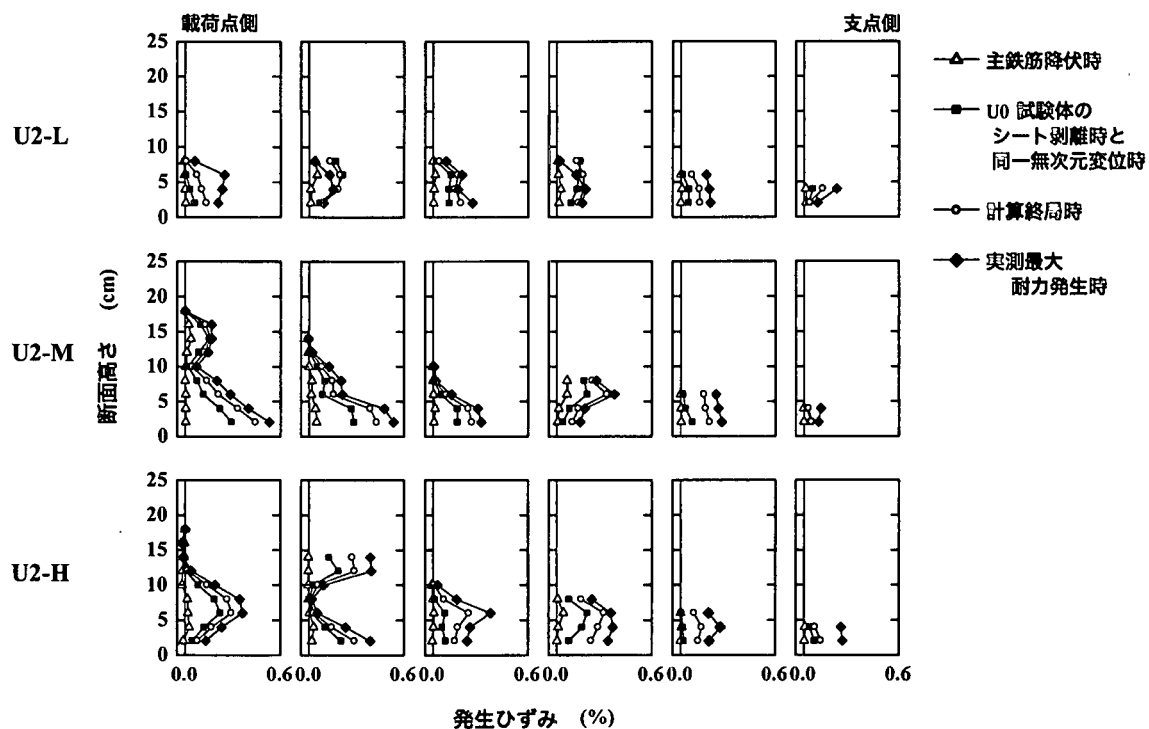
### 3.3 U 字巻付けシートのひずみ分布性状

図-9 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、U1-L/M/H および U2-L/M/H 試験体に関する巻付けシートの繊維方向 (断面高さ方向) のひずみ分布を示している。なお、これらの試験体は図-4 のひずみゲージ貼付位置図に示されているように、斜めひび割れやピーリング作用の発生が予想される位置に着目して、U 字巻付けシートのひずみを断面高さ方向に  $2 \text{ cm}$  間隔で測定している。また、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検討することとしている。ただし、曲げ補強シートが破断した U2-M 試験体に関しては、ひずみが比較的大きく示されている右側等せん断力区間の結果について示すこととした。図には、i) 主鉄筋降伏時、ii) U0 試験体のシート剥離時と同一無次元変位時、iii) 計算終局変位時、iv) 実測最大耐力発生時の結果をまとめている。

図より、いずれの試験体も主鉄筋降伏時には顕著なひずみ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無次元変位時には、U2-L/H 試験体を除き、いずれの場合においても梁下縁から断面高さ方向に  $10 \text{ cm}$  以下の範囲で最大  $3,000 \mu$  程度のひずみが発生している。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ピーリング作用力に対して 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 字巻付けシートのひずみは増加し続け、発生ひずみは最大で  $6,000 \mu$  程度を示している。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ひずみ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



(a) U1- 試験体



(b) U2- 試験体

図-9 U字巻付けシートの断面図高さ方向のひずみ分布性状

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/U2-L 試験体は他の 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。

次に、U1-L/M/H および U2-L/M/H 試験体の結果よ

り、U 字巻付けシート目付量の違いによる影響を検討する。図より、目付量の小さい U1- 試験体において各測定点のひずみ値が大きく示される傾向にあることが分かる。特に支点側下部ではその傾向が顕著である。しかしながら、U1- 試験体の場合においても、U 字巻付けシートに発生するひずみは最大で 6,000  $\mu$  程度であることより、曲げ補強シートが鉛直方向へ押し



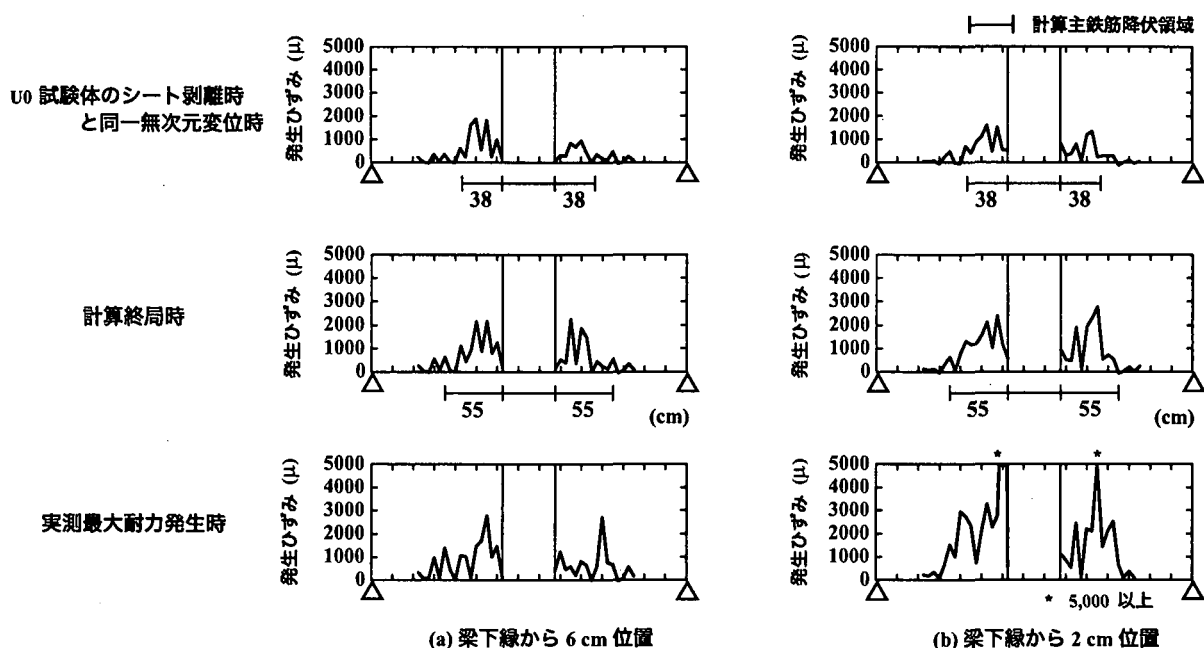


図-10 U字巻付けシートの繊維方向ひずみに関する部材軸方向の分布 (U2-L-EX 試験体)

下げられるピーリング作用力に対しては U1- 試験体に用いた U 字巻付けシート (目付量  $140 \text{ g/m}^2$ ) で十分耐え得ることが分かる。

図-10 には、U2-L-EX 試験体の U 字巻付けシートの繊維方向ひずみに関する部材軸方向の分布を示している。ここでは、梁下縁かぶり部近傍における U 字巻付けシートのひずみ分布性状を検討するために、図-4 に示しているように梁下縁から 2 cm および 6 cm (主鉄筋配置位置の上・下方 2 cm) の位置で部材軸方向に 5 cm 間隔でシートひずみを測定している。図には、i) U0 試験体のシート剥離時と同一無次元変位時、ii) 計算終局時、iii) 実測最大耐力発生時の結果について整理している。また、図の下部には各時点における計算主鉄筋降伏領域を付記している。

図より、発生ひずみは梁下縁から 6 cm 位置よりも 2 cm 位置において大きく示される傾向にあることが分かる。これは、ピーリング作用が主鉄筋配置位置よりも下方のかぶり部で顕在化するためと考えられる。また、梁下縁から 2 cm の位置におけるひずみ分布より、各時点での大ひずみ発生領域は計算主鉄筋降伏領域とほぼ対応していることが分かる。これは、この領域においてコンクリートブロックのピーリング作用による曲げ補強シートの剥離進展を、U 字巻付けシートが抑制していることを示すものと考えられる。

なお、前述の図-5 から分かるように、他の U 字巻付け試験体の耐荷性状は、計算終局時までは U2-L-EX 試験体のそれとほぼ同様であることから、主鉄筋降伏領域内において U 字巻付けシートが曲げ補強シートの剥離抑制効果を発揮する性状は、U2-L-EX 試験体以外の場合においても同様であるものと推察される。これより、剥離破壊型となる FRP シート曲げ補強 RC 梁の

耐力を計算耐力程度まで向上させるためには、U 字巻付け範囲を計算終局時の主鉄筋降伏領域  $L_{yu}$  程度に設定する必要があることが明らかとなった。なお、実測最大耐力発生時には、大ひずみの発生領域が拡大するとともに載荷点近傍では  $5,000 \mu$  以上のひずみが発生し、U 字巻付けシートがより大きなピーリング作用力に抵抗していることが分かる。

### 3.4 破壊性状

図-11 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 試験体の場合には、等せん断力区間においてピーリング作用の起因となるコンクリートブロックが形成されていることが分かる。U 字巻付けを施した試験体の場合には、いずれも計算終局点到達後、曲げ補強シート接着端部領域のかぶりコンクリートに発生した斜めひび割れがシートに作用する引張力に伴うピーリング作用によって顕在化し、主鉄筋に沿う割裂ひび割れと連結した後、曲げ補強シートが U 字巻付けシートの剥離もしくは破断を伴って剥離しているため、曲げ補強シート端部近傍のかぶりコンクリートが剥落している。ただし、U2-M および U2-L-EX 試験体は曲げ補強シートの破断により終局に至っているため、曲げ補強シート端部近傍に著しい損傷は見られない。また、U1-M-SD 試験体は、シートが U 字型に巻き付けられていないためピーリング作用による曲げ補強シートの部分剥離発生後、剥離領域が急激に支点側に進展して全面的な剥離に至っていることより、曲げ補強シート端部のコンクリートには著しい損傷は見られない。

各試験体の破壊性状を U 字巻付け高さごとに検討すると、U 字巻付け高さが最も低い U1/U2-L 試験体の場

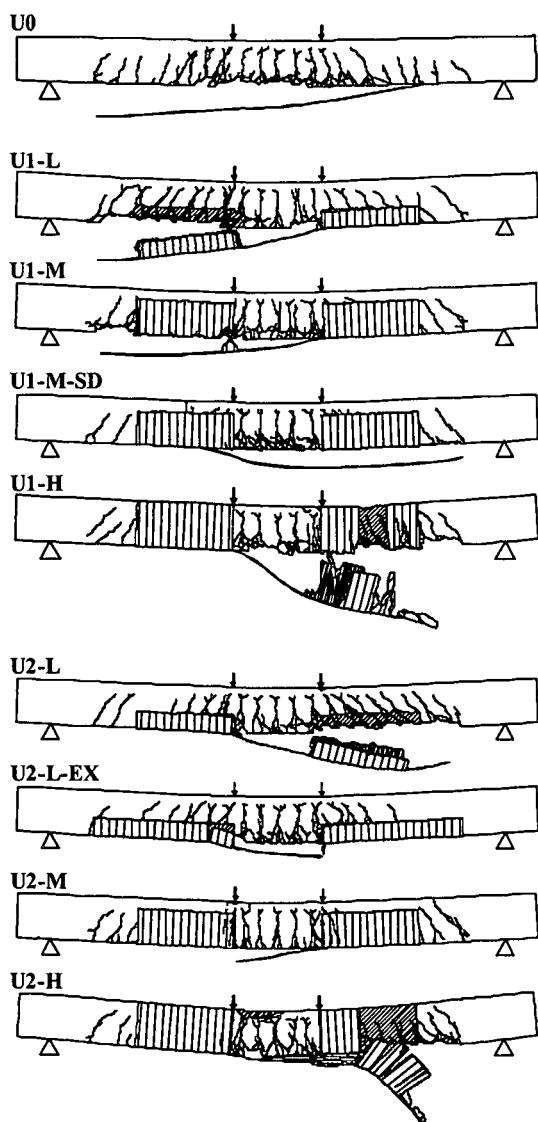


図-11 破壊性状

合には、U字巻付けシートが曲げ補強シートとともにかぶりコンクリートを伴って剥離していることが分かる。これは、両試験体のU字巻付け高さが低いため曲げ補強シート端部近傍に生じた割裂ひび割れが、U字巻付けシート接着端部まで進展した後、この部分のかぶりコンクリートの引き剥がれをU字巻付けシートが抑制できなかったためと考えられる。一方、U2-L-EX試験体の場合には、曲げ補強シート端部までU字巻付けされているため、この部分に生じる斜めおよび割裂ひび割れの発生が抑制され、U字巻付けシートは剥離せずに曲げ補強シートの破断により終局に至っている。

U字巻付け高さを中立軸高さとしたU1/U2-M試験体では、U1/U2-L試験体のようなU字巻付けシートの剥離を生じていない。U1-M試験体は計算終局変位到達後、U字巻付けシートが隅角部で破断したことによって曲げ補強シートが全面的に剥離して終局に至っており、U2-M試験体は曲げ補強シートの破断により終局に至っている。一方、梁上縁までU字巻付けを施したU1/U2-H試験体では、U字巻付けシートの一部

分と曲げ補強シートがともに剥離している。ただし、U1/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字巻付け試験体では、U字巻付けシート目付量や巻付け高さが破壊性状に影響を与えていることが分かる。しかしながら、本実験の範囲内ではU字巻付けシートの目付量や巻付け高さにかかわらず、全てのU字巻付け試験体が梁上縁コンクリートの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。このことは、適切な範囲をU字巻付けすることにより、効率的に耐力および変形性能を向上可能であることを示唆している。これより、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、計算終局時の耐力、変形性能を保持するための最適なU字巻付けシートの目付量、巻付け高さの決定が容易になるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、剥離破壊型となるFRPシート曲げ補強RC梁を対象に、効率的なシート剥離抑制法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、曲げ補強シート接着後その上にFRPシートをU字型に巻付ける剥離抑制法を取り上げ、効率的なU字巻付けシートの目付量、巻付け高さおよびその範囲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 $L_{yu}$ 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を想定した計算結果と同等程度以上にまで向上させることが可能である。
- 2) 計算終局時において、 $L_{yu}$ 内のU字巻付けシートがピーリング作用による曲げ補強シートの剥離を抑制していることが実験的に確認された。
- 3) 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1/2程度であった。
- 4) シートをU字型に巻付けずに側面貼付けとした場合においても、下縁かぶり部におけるコンクリートブロックの形成やこのブロックによるピーリング作用が抑制されるため、曲げ補強シートの剥離を計算終局点程度まで抑制可能である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針(案)，コンクリートライブラリー 95，1999。
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー

- リー 101, 2000.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1399-1410, 1999.
  - 4) 岸 徳光, 三上 浩, 池田憲二, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁のスパン方向偏心載荷時における耐荷性状, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1175-1182, 2000.
  - 5) 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.
  - 6) 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, No.2, pp.1493-1498, 1996.
  - 7) Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R. : Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets, Journal of Stractural Engineering, pp.903-911, July, 1997.
  - 8) 三上 浩, 岸 徳光, 佐藤昌志, 松岡健一: FRP シートの曲げ付着性状に与える U 字型付着補強の影響, 連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.55-60, 1998.
  - 9) 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, Vol22, No.1, pp.469-474, 2000
  - 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 設計編, 2002.
  - 11) 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.
  - 12) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, 澤田純之: AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの必要接着長評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 987-997, 2000.

(2002 年 4 月 19 日受付)