

AFRP シートせん断補強 RC 梁の耐荷性状に関する実験的パラメータ研究

Experimental parameter study on shear load-carrying capacity of RC beams reinforced with AFRP sheets in shear

張 広鋒*, 岸 徳光**, 三上 浩***, 澤田 純之****

Guangfeng ZHANG, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Sumiyuki SAWADA

*正会員 博(工) 室蘭工業大学助手 工学部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 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)

***フェロー会員 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-132 千葉県流山市駒木 518-1)

****正会員 博(工) 室蘭工業大学 工学部 博士研究員 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

This paper aims to investigate the effects of stirrup and bonding configurations of FRP sheets on shear load-carrying capacity of RC beams reinforced with Aramid FRP (AFRP) sheets in shear. Total ten RC beams designed as three series for studying the effects of stirrup, bonding depth of U-shape sheet and anchorage of sheet bonded on the top of beam were used in this study. All the beams were tested with a three-point loading test method. From this study, following results are obtained: shear strength of the beams bonded with U-shape sheet are dependent upon the bonding depth of sheet; a good anchorage can be provided by bonding the sheet up to the top surface of the beams for restraining the debonding behavior, but it can not prevent the debonding of the sheets from the free edge.

Key Words : RC beam, AFRP sheet, shear reinforcing, shear behavior

キーワード : RC 梁, AFRP シート, せん断補強, せん断耐荷挙動

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐荷・耐震補強法として、軽量で施工性に優れかつ高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRP シート) を構造物の引張側に接着する曲げ補強法や巻き付けるせん断補強法がよく採用されるようになってきた (例えば、1)。その中で、RC 梁部材のせん断補強には、FRP シートの拘束効果を向上するために、FRP シートを部材全周に巻き付ける方法 (閉合補強) が一般的に採用されている。しかしながら、構造物の構造特性 (例えば、梁上面および側面に支承や落橋防止装置等が設置されている場合) や、施工条件 (例えば、横梁部の上部の施工区間が狭い場合) によって、閉合補強を施すことが困難な場合も見受けられる。このような場合には、梁上面に支承や落橋防止装置等が設置される場所を除いた部分に FRP シートを巻き付ける不完全閉合補強や、梁の側面および下面に FRP シートを貼り付ける U 字形補強、あるいはこれらの補強方式を組み合わせる補強する工法を採用するケースもある (2,3)。

また、上述の各せん断補強方法を採用する場合における破壊モードに関しては、図-1 に示すように、閉合補強の場合には、腹部におけるシート破断、不完全

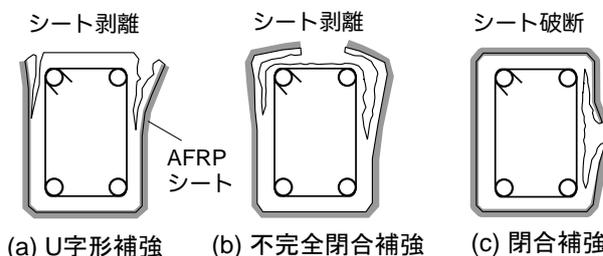


図-1 破壊形式の模型図

閉合補強や U 字形補強の場合には、シート破断の他、シート剥離によって終局に至る場合もある。いずれの破壊モードにおいても、コンクリート表面からのシート剥離によってシートのせん断補強効果が失われ、RC 梁の耐荷性能は急激に低下する。一方、上述の各せん断補強方法の他、せん断補強筋の有無も FRP シートのせん断補強効果に影響を与える。これは、せん断補強筋とせん断補強用 FRP シート間の相互作用が大きく影響し、せん断補強筋の有無によって FRP シートが受け持つせん断耐力分が異なるためと考えられる。

現在のところ、世界中の多くの研究機関では、FRP シートによる梁部材のせん断補強法やせん断補強効果に関する研究が数多く行われ、シートによる RC 梁のせん断耐力への寄与に関する評価法も提案されてい

表-1 試験体の一覧

シリーズ	試験体名	断面寸法 幅 × 高さ (mm)	せん断 スパン比	鉄筋呼び径, 鉄筋比		補強形式	検討項目
				主鉄筋	せん断補強筋		
基準 試験体	N-N	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	-	無補強	
	S-N	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	D6, 0.24%	無補強	
A	N-U2	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	-	U字形, 1/2 d	せん断補強筋の 有無の影響
	S-U2				D6, 0.24%		
	N-U4	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	-	U字形, 1.0 d	
	S-U4				D6, 0.24%		
B	S-U1	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	D6, 0.24%	U字形, 1/3 d	U字形補強高さ の影響
	S-U2					U字形, 1/2 d	
	S-U3					U字形, 2/3 d	
	S-U4					U字形, 1.0 d	
C	S-W1	220 × 300	3.92	D32, 4.25%	D6, 0.24%	不完全閉合補強	上面シートの 定着効果の影響
	S-W2					閉合補強	

A, B 両シリーズにおける S-U2 と S-U4 試験体は同一試験体である

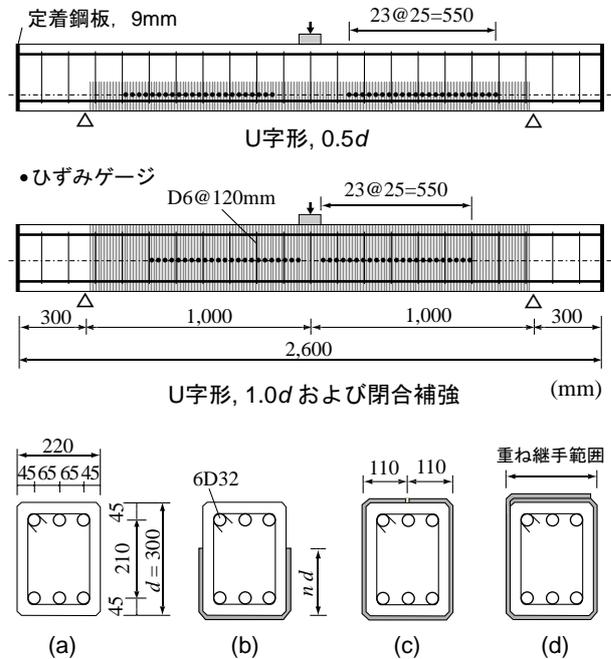
る^{4~9)}。しかしながら、これらの研究は、全て閉合補強や断面の全高さまでの U 字形補強を対象としたものであり、U 字形補強高さを含む補強形式の影響に関する研究は未だ見当たらないのが現状である。一方、実構造物のせん断補強法に関しては、せん断補強筋を有する梁部材が多いことと、前述のように構造特性や施工条件によって閉合補強以外の補強形式を採用するケースもあることより、FRP シートのせん断補強効果に及ぼす U 字形補強高さを含む補強形式の影響やせん断補強筋の有無の影響を検討することは実務の観点からも重要であるものと判断される。また、このような研究を行うことにより、FRP シートによる合理的なせん断補強設計法を確立するための基礎資料を得ることも可能である。

このような背景を踏まえ、本研究では、アラミド製連続繊維シート（以後、AFRP シート）せん断補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすせん断補強筋の有無や補強形式の影響を検討することを目的に、せん断補強筋の有無や補強形式をパラメータとした全 10 体の矩形 RC 梁に対して 3 点曲げ荷重実験を実施し、各試験体間の比較を行うことにより、AFRP シートのせん断補強効果に及ぼすこれらのパラメータの影響を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体名の第 1 項目はせん断補強筋の有無 (N: 無し, S: 有り)、第 2 項目は AFRP シートの補強形式 (N: 無し, U: U 字形補強, W1: 不完全閉合補強, W2: 閉合補強) を示している。なお、英字 U に付随



- (a) 無補強
- (b) U字形, $n = 1/3, 1/2, 2/3, 1.0$
- (c) 不完全閉合補強 (折返し範囲: 左右それぞれ110 mm)
- (d) 閉合補強 (重ね継手範囲: 全断面幅)

図-2 試験体の概要図

する数値は、せん断補強シートの補強高さ (1: $1/3 d = 100$ mm, 2: $1/2 d = 150$ mm, 3: $2/3 d = 200$ mm, 4: $1.0 d = 300$ mm, d : 梁高) を示している。これらの試験体は、せん断補強筋の有無に対して AFRP シートの接着無である基準試験体 (N-N, S-N) の他、以下の 3 つのシリーズに分けられる。

A シリーズ: せん断補強筋の有無の影響を検討するもので、せん断補強筋の有無に対して U 字形補強高さ

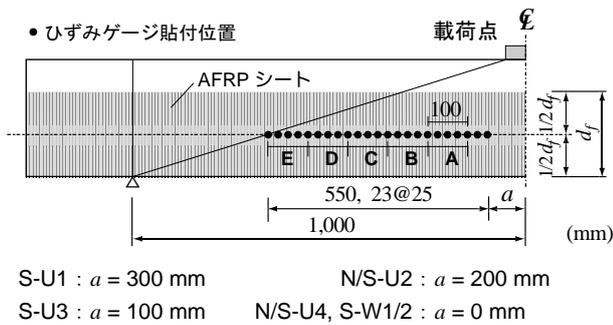


図-3 ひずみゲージの貼付詳細

を2種類に変化させた全4体である。

B シリーズ：U字補強高さの影響を検討するものであり、せん断補強筋を有する場合に対してU字形補強高さを4種類に変化させた全4体である。

C シリーズ：不完全閉合補強における梁上面シートの折返しおよび閉合補強における重ね継手による定着効果を検討するものである。せん断補強筋を有する場合に対して、左右対称で梁幅の中央点まで折返しをつけた試験体と全断面幅に重ね接着した試験体の2体である。

図-2には、試験体寸法、シートの接着状況およびひずみの計測位置を示している。試験体の形状寸法は、幅220 mm、高さ300 mmの矩形断面で、純スパン長2,000 mm、せん断スパン比が3.92である。軸方向鉄筋にはD32 (SD345)を6本配置している。鉄筋の十分な定着を保証するためと定着長を節約するために、両端部に厚さ9 mmの鋼板を設置しそれに鉄筋を溶接している。せん断補強筋は、D6 (SD295)をスパン中央から120 mm間隔で全スパンに渡って配置した。FRPシートによるせん断補強には、繊維目付量が280 g/m²の一方向AFRPシートを、繊維強化方向を梁高さ方向にして接着している。シート接着面には、骨材が見える程度までショットブラスト処理を施し、シートの接着性能の向上を図っている。接着剤には市販のエポキシ系接着樹脂を用いた。また、隅角部の面取り半径は10 mmとした¹⁾。

一方、AFRPシートの耐荷挙動を把握するために、図-2に示すように、シート高さ方向の中央に横一列に25 mmピッチで1軸ひずみゲージを貼り付け、繊維強化方向(梁高さ方向)におけるシートのひずみを計測した。また、ひび割れ発生に関する補強高さの影響を検討するために、補強高さの異なる4種類の試験体には、図-3に示すようにひずみゲージ貼付位置を変化させている。なお、図中のA～E区間に関する説明は第3章に譲ることとする。

実験時のコンクリートは材齢が40日、圧縮強度が $f'_c = 35.1$ MPaである。主鉄筋およびスターアップの降伏強度は、それぞれ335および380 MPaである。繊維目付量が280 g/m²の一方向AFRPシートの材料特

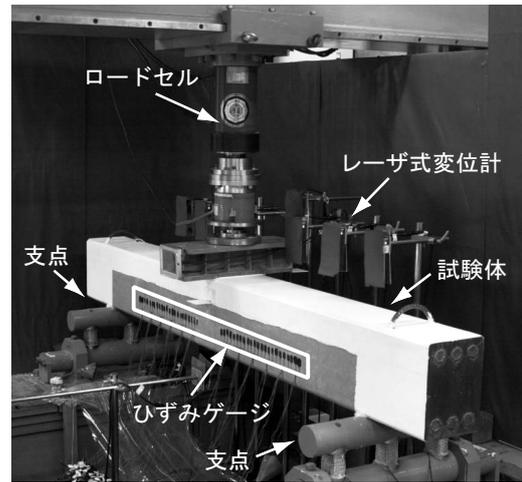


図-4 実験設置状況

性値(公称値)は、厚さが0.193 mmで弾性係数および破断強度が、それぞれ118.0 GPaおよび2.06 GPaである。

2.2 実験方法

図-4には試験体の設置状況の一例を示している。実験は、スパン中央部に幅100 mmの鋼製治具を設置して静的に載荷することにより実施している。実験時における計測項目は、載荷荷重、変位およびAFRPシートのひずみであり、それぞれ静荷重測定用ロードセル、レーザ式変位計およびひずみゲージを用いて測定している。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サンプリング周波数10 Hzにて一括収録している。

3. 実験結果の考察

本章では、1) 実験終了直前あるいは終了後の破壊状況写真(破壊した半スパンのみ)、2) 最大荷重時までの変位-AFRPシートの繊維方向ひずみ(側面シート:梁高さ方向、上面シート:断面幅方向)曲線、3) 荷重-スパン中央点変位(以後、単に変位)曲線、の3項目について実験結果を考察することとする。ここで、変位-AFRPシートのひずみ曲線に着目した考察では、シートの軸方向に関する耐荷性状の把握を容易にするために、図-3に示すように、各計測点のひずみ値ではなく、A～Eの各区間における平均ひずみを用いることとした。なお、いずれの試験体でも、載荷点側の端区間をA区間、支点側の端区間をE区間としている。

図-5には、両基準試験体に関する破壊状況写真を示している。(b)図に示すS-N試験体の場合には、(a)に示す同変位時のN-N試験体のひび割れ状況と比較して、せん断ひび割れの開口幅が小さい。但し、ひび割れの本数は多い。これより、せん断補強筋を配置

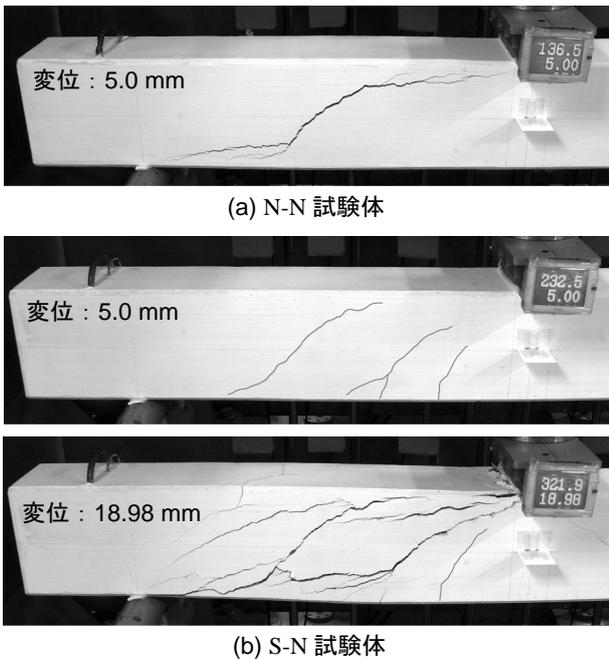


図-5 破壊状況，基準試験体

することによって，せん断ひび割れの開口幅が抑制される一方，ひび割れの発生範囲が分散し，ひび割れの本数も増えることが分かる．変位 18.98 mm 時における S-N 試験体にはひび割れが数多く発生している．

図-6 には荷重-変位関係に関する比較図を示している．図より，S-N 試験体の場合には，N-N 試験体の場合に比較して最大荷重と共に最大荷重時変位も大きくなっていることが分かる．

以下において，これらの基準試験体の破壊状況や荷重-変位関係を基本にして，各補強試験体の破壊挙動や AFRP シートのせん断補強効果を検討することとする．また，図-7 には，破壊メカニズムの検討のために，破壊模式図を示している．図中，(a)の破壊模式図は，U 字形補強時のシートの接着高さが低いことにより，斜めひび割れの発生に伴ってひび割れ近傍のシート上端部が剥離して破壊に至る状況を示している．一方，(b)の場合は，シートの接着高さが高いことにより，斜めひび割れ近傍部のシートが局部的に剥離傾向を示すもののシートが上部で十分に定着されているため，かぶりコンクリートを伴ってシート上端部が剥離して破壊に至る状況を示している．

3.1 せん断補強筋の有無の影響

図-8, 9 には，せん断補強筋の有無の影響を検討する A シリーズに関する実験終了直前あるいは終了後の破壊状況写真，変位- AFRP シートのひずみ曲線および荷重-変位関係の比較図を示している．

(1) 破壊状況および AFRP シートひずみ

図-8(a), (b) には N-U2, S-U2 両試験体の破壊状況写真を示している．写真より，斜めひび割れの発生

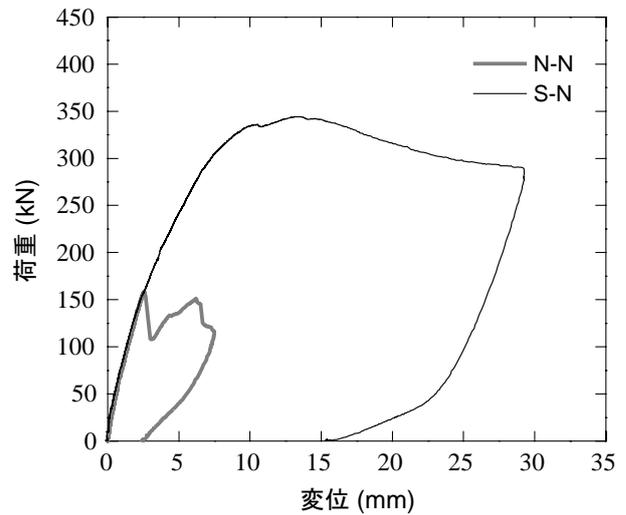


図-6 荷重-変位関係，基準試験体

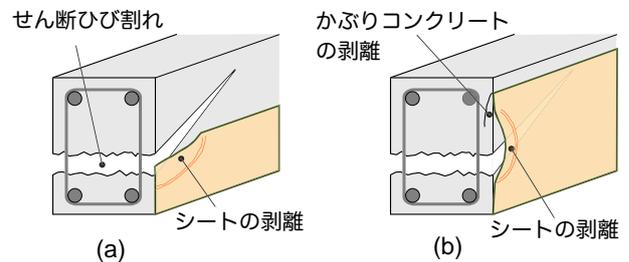


図-7 破壊模式図，U 字形補強

や，かぶりコンクリートを伴ってシート上端部(以後，自由端と呼ぶ)が側面方向に剥離している様子が確認できる．一方，図-8(c), (d)においてもほぼ同様な破壊形式が見受けられる．これより，せん断補強筋の有無に関わらず，U 字補強された試験体はいずれもシートの自由端からの剥離によって終局に至ることが分かる．

図-8 に示す変位- AFRP ひずみ曲線より，N-U2 試験体の場合には，最大荷重時に達した時点においても各区間のひずみレベルは全体的に低く，最大 500μ 程度であることが分かる．せん断補強筋を有する S-U2 試験体の場合には，変位 3mm および 7mm 近傍より，それぞれ D, E 区間および A, B 区間におけるひずみが急激に増大している様子が見られる．最大ひずみレベルは $2,400 \mu$ 程度である．また，N-U4 試験体と S-U4 試験体の比較より，両試験体のひずみ増加開始時変位 (3.5 mm 付近) および最大ひずみレベル ($5,000 \mu$) はほぼ同程度であるが，変位に対するひずみの増加割合(以後，増加率)は異なっている．すなわち，N-U4 試験体の場合は，S-U4 試験体の場合に比較してひずみの増加率が大きい．

これらのひずみ分布より，補強高さが低い場合において，1) せん断補強筋を有しない N-U2 試験体の場合には，せん断ひび割れの発生と同時にシート剥離

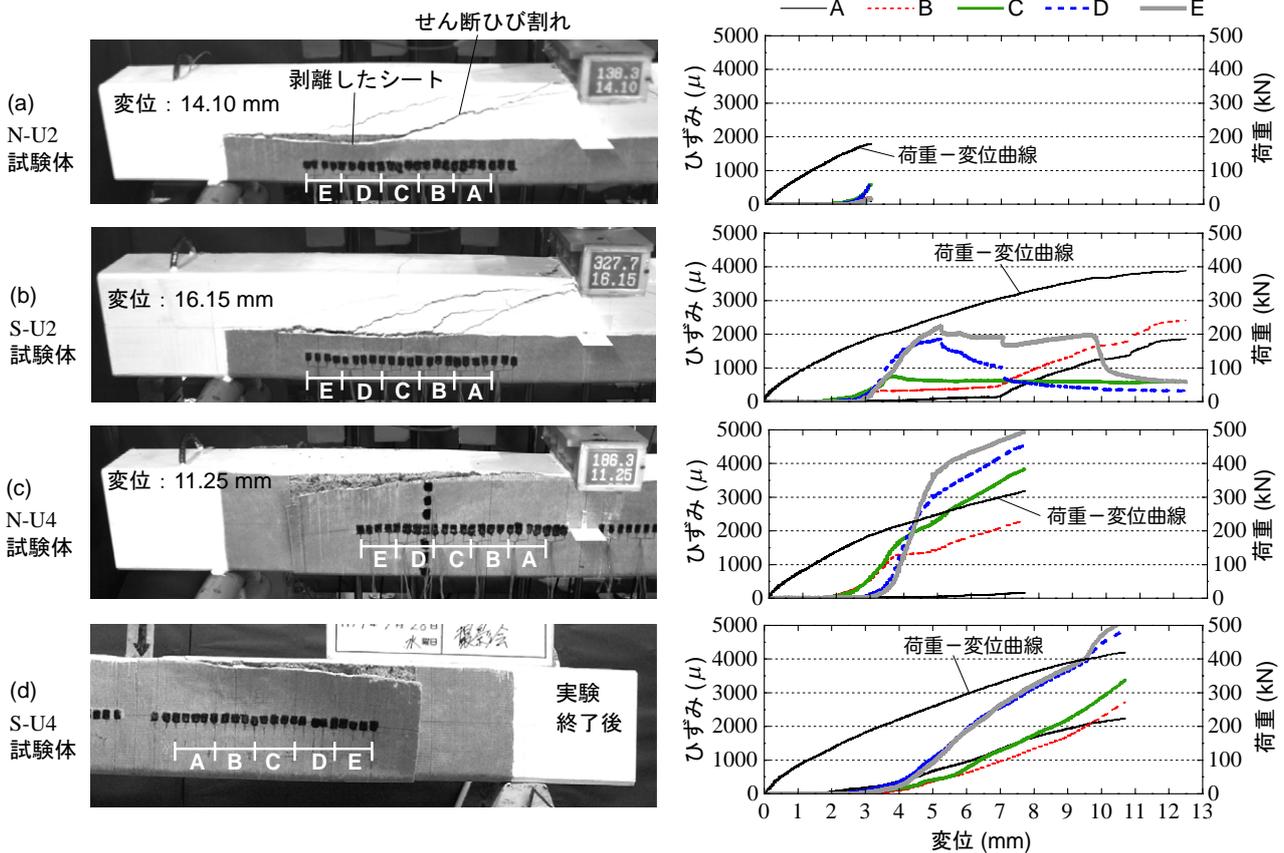


図-8 破壊状況写真, 変位- AFRP シートのひずみ曲線 (A シリーズ)

が発生するため, AFRP シートの補強効果は終局時まで明瞭に発揮されないこと, 2) せん断補強筋を有する S-U2, S-U4 試験体の場合には, 広い範囲にひずみが分散していることより, シートの補強効果が発揮されていることが推察される。また, N-U2, N-U4 試験体の場合には, シート剥離の変位当りの進展割合は, 補強高さに関わらずせん断補強筋を有する場合より大きい。

ここで, 図-7 に示す破壊模式図を用い, 上述の現象に関する詳細な考察を試みる。N-U2 試験体の場合には, ひずみレベルの低い段階でシート剥離が発生している。これは, 図-7(a) に示すように, U 字形補強高さが梁高の半分あるいは半分以下の場合には, 梁高さ中央付近からせん断ひび割れの発生かつ開口幅の増加によって AFRP シートの剥離が自由端から開始することによるものと推察される。但し, せん断補強筋を有する S-U2 試験体の場合には, せん断補強筋の拘束効果によってひび割れの開口が徐々に進展するため, 終局時までの梁の変形やひずみは, せん断補強筋を有しない場合より大きくなる。

一方, 全高さまで補強した N-U4, S-U4 両試験体の場合には, 図-7(b) に示すように, いずれも梁高さ中央付近からシート剥離が発生しているが, ひび割れの上部シートが十分定着されている状態にあるため, 耐力の向上が確認できる。最終的には, N-U4 試験体

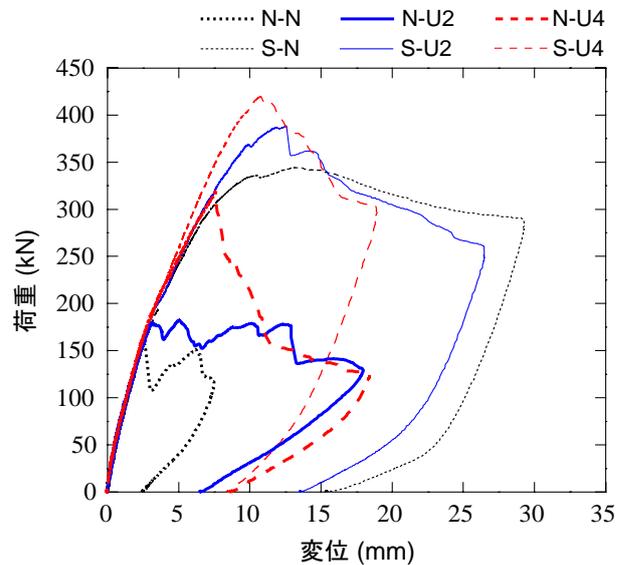
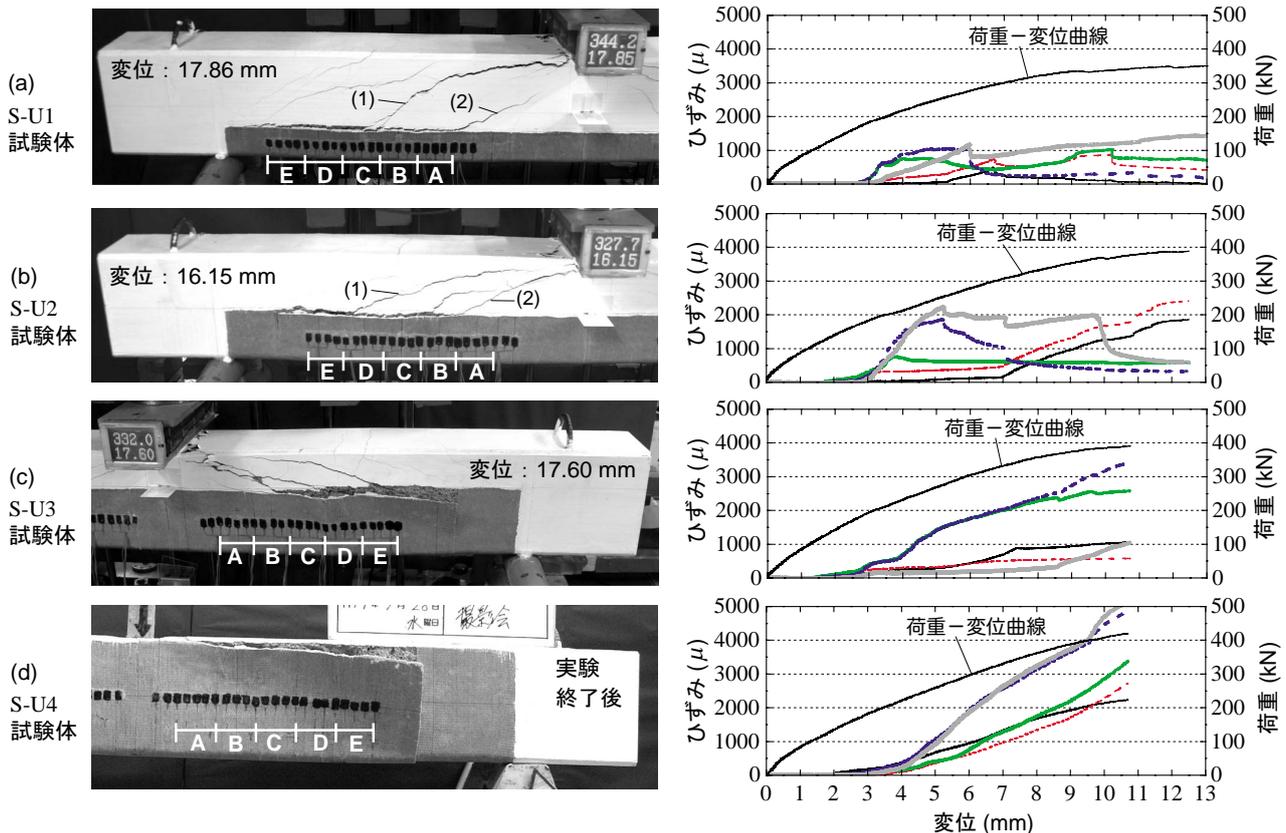


図-9 荷重-変位関係 (A シリーズ)

の場合にはせん断補強筋が配筋されていないことにより, より小さい変位レベルでせん断ひび割れの開口幅が急激に増加し, かぶりコンクリートを伴って全面剥離に至っている。また, S-U4 試験体の場合にはせん断補強筋の拘束効果によって上述のようにひび割れの開口も徐々に進展するものの, 最終的にはせん断補強筋を配筋しない場合と同様にかぶりコンクリートを伴って全面剥離に至っている。



(2) 荷重-変位関係

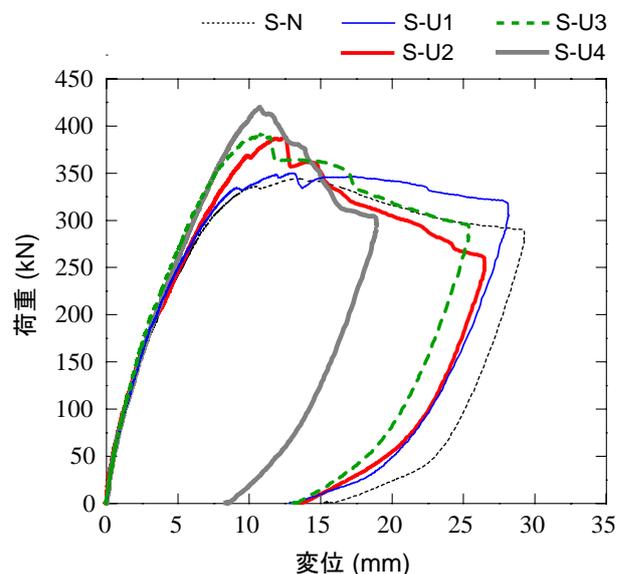
図-9には、Aシリーズの各荷重-変位関係を比較して示している。図より、いずれの補強試験体も、基準試験体より最大荷重が増加していることが確認できる。なお、最大荷重時変位に着目してみると、せん断補強筋を有しない補強試験体の場合には基準試験体より最大荷重時変位は増加している。しかしながら、せん断補強筋を有する補強試験体の場合には基準試験体より最大荷重時変位が低下していることが見受けられる。このような現象に関しては、次節において詳細に検討する。

3.2 U字形補強高さの影響

図-10, 11には、U字形補強高さの影響を検討するためのBシリーズに関する破壊状況写真、変位- AFRPシートのひずみ曲線および荷重-変位関係の比較図を示している。

(1) 破壊状況およびAFRPシートひずみ

図-10に示す各試験体の破壊状況写真より、いずれの試験体も自由端からのシート剥離によって終局に至っていることが分かる。S-U1, S-U2 および S-U3 試験体のシート接着が施されていない部分のコンクリートを観察すると、いずれの試験体も2本のせん断ひび割れが明瞭に発生し、基準試験体と類似する分布状況を示していることが確認できる。



また、図-10に示す変位- AFRPシートのひずみ曲線を見ると、S-U1, S-U2 試験体の場合には、S-U3, S-U4 試験体と異なる分布性状を示していることが見受けられる。すなわち、S-U1, S-U2 両試験体の場合には、荷重と変位の増加に伴いひずみが最大となる区間は変化している。これに対し、S-U3, S-U4 両試験体の場合は、荷重や変位の増加に伴ってひずみが最大となる区間は変動していない。これは、1) 補強高さの低い

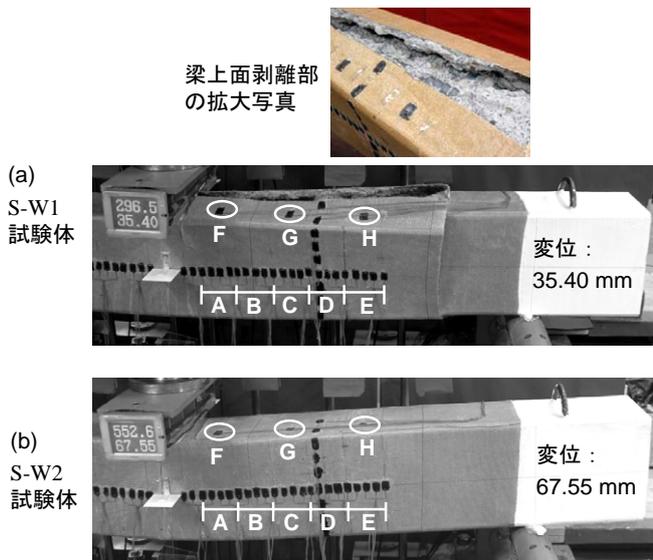
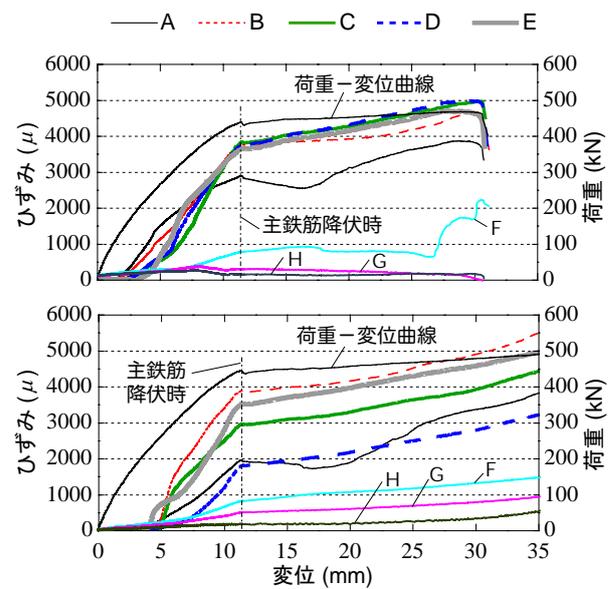


図-12 破壊状況写真，変位- AFRP シートのひずみ曲線 (C シリーズ)



S-U1, S-U2 両試験体の場合には、せん断ひび割れの発生や開口に対する AFRP シートの拘束効果が小さいため、両試験体とも無補強試験体 (図-5) と同様、2本のせん断ひび割れが明瞭に発生する、2) これらの2本のひび割れの発生・開口幅の増加に伴って、対応する区間のひずみが大きくなる。なお、いずれの試験体においても、2本のひび割れは写真に示す順番で発生したことを確認している。一方、3) 補強高さの高い S-U3, S-U4 両試験体の場合には、AFRP シートのせん断拘束効果によってひび割れの分散が抑制され、RC 梁のせん断破壊は载荷初期段階から発生するせん断ひび割れ部から進行するものと推察され、これによって両試験体とも载荷レベルによらずひずみが最大となる区間は変動しないものと推察される。

以上より、S-U1, S-U2 両試験体の場合には、せん断ひび割れの発生や開口に対する AFRP シートの拘束効果は十分でないことが明らかになった。

(2) 荷重-変位関係

図-11 には各試験体の荷重-変位関係に関する比較図を示している。図より、補強高さが高いほど、最大荷重も大きくなる一方、最大荷重時変位は小さくなっていることが分かる。これは、せん断補強された試験体の場合には、無補強試験体の場合と比較して、シートの拘束効果によってひび割れの分散や開口幅の増加が抑制されることにより、梁のせん断剛性が向上しかつ終局近傍までその剛性が保持される傾向を示すため、より小さい変位状態で終局に至るものと推察される。従って、補強高さが高いほど、最大荷重時変位の減少量も大きい。

3.3 上面シートの定着効果の影響

図-12, 13 には、梁上面におけるシートの折返しあ

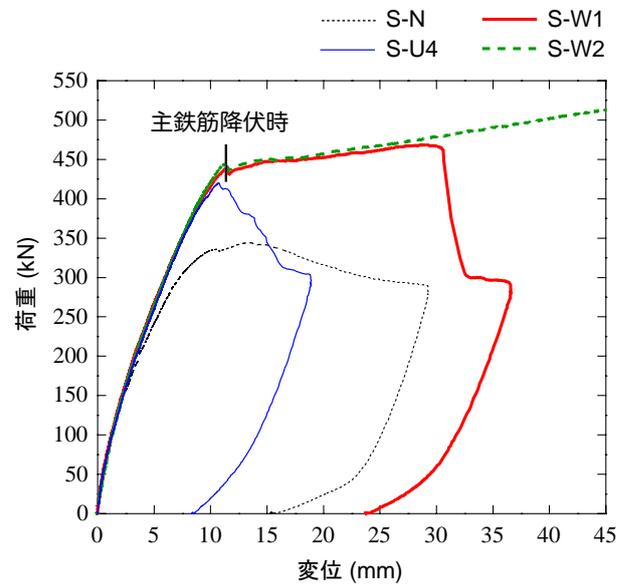


図-13 荷重-変位関係 (C シリーズ)

るいは重ね継手による定着効果の影響を検討するための C シリーズに関する破壊状況、変位- AFRP シートのひずみ曲線および荷重-変位関係の比較を示している。なお、変位-ひずみ曲線の比較図には、梁上面における F, G, H の3カ所におけるひずみ曲線も合わせて示している。ここで、F, G, H の区域におけるゲージの貼付位置は折返し部分の繊維強化方向中央点である。

(1) 破壊状況および AFRP シートひずみ

図-12(a) より、S-W1 試験体は梁上面における折返したシートの自由端からのシート剥離によって終局に至ったことが分かる。また、剥離部の拡大写真より、上縁かぶりが大きく剥離していることも確認できる。一方、S-W2 試験体の場合は、ロードセル容量の

表-2 実験結果の一覧

シリーズ	試験体名	せん断耐力 V_{max} (kN)	最大荷重時変位 δ_{max} (mm)	V_{max} の増分 $V_{f,exp}$ (kN)	δ_{max} の増分 $\delta_{f,exp}$ (mm)	最大ひずみと発生区間 $\epsilon_{f,max}$ (μ)	シートの有効率 r_f	シートのせん断力負担分の計算値 $V_{f,cal}$, ($V_{f,cal}/V_{f,exp}$) (kN)	破壊形式
基準試験体	N-N	159.1	2.6	-	-	-	-	-	梁のせん断破壊
	S-N	344.5	13.5	-	-	-	-	-	
A	N-U2	179.6	3.2	20.5	0.6	2,190, B	0.13	25.4, (123.9%)	シート剥離
	S-U2	388.6	12.5	44.1	-1.0	4,090, E	0.23	47.5, (107.7%)	
	N-U4	318.8	7.6	159.7	5.0	5,710, E	0.33	66.3, (41.5%)	
	S-U4	419.8	10.7	75.3	-2.8	6,030, E	0.34	70.0, (93.0%)	
B	S-U1	350.3	13.1	5.8	-0.4	3,820, E	0.22	44.4, (765.5%)	シート剥離
	S-U2	388.6	12.5	44.1	-1.0	4,090, E	0.23	47.5, (107.7%)	
	S-U3	391.3	11.0	46.8	-2.5	4,920, C	0.28	57.1, (122.0%)	
	S-U4	419.8	10.7	75.3	-2.8	6,030, E	0.34	70.0, (93.0%)	
C	S-W1	439.4	11.5	94.9	-2.0	3,805, B	0.22	44.2, (46.6%)	シート剥離
	S-W2	445.2	11.3	100.7	-2.3	3,892, B	0.22	45.2, (44.9%)	-

S-W1, S-W2 試験体には、主鉄筋降伏時における結果を用いている。

制限により荷重 550 kN 近傍で載荷を終了した。除荷時まではシート破断に至らずシートに明瞭な損傷が未だ発生していない。図-10(d) に示す S-U4 試験体の破壊性状と比較することによって、シート剥離は梁上面に折返しをつけることによって抑制されることが明確に確認できる。しかしながら、シート定着が十分でないこと他、曲げ圧縮によるポアソン効果によって梁上面コンクリートが割裂する傾向を示すことより、シート自由端からのかぶりコンクリートを伴った剥離を防止することができないものと考えられる。

また、変位- AFRP シートのひずみ曲線より、S-W1 試験体の場合には、主鉄筋が降伏する前に側面シートのひずみは大きく増加しており、主鉄筋降伏時には最大 3,800 μ 程度に達している。その後、ひずみの増加率が低下し、終局時における最大ひずみは 5,000 μ 程度となっている。これは、主鉄筋降伏後の RC 梁は曲げ破壊が卓越し、せん断ひび割れの開口幅の増加率が低下したことによるものと考えられる。また、折返し部のシートひずみ値は全体的に小さく、終局時直前では 2,000 μ 程度である。一方、閉合補強の S-W2 試験体の場合には、S-W1 試験体と類似のひずみ分布性状を示し、荷重あるいは変位の増加に対応して増加の傾向を示している。このことは、閉合補強によって梁断面内に効率よくシートの拘束効果が発揮されることを示唆している。

(2) 荷重-変位関係

図-13 には、比較のために、基準試験体および S-U4 試験体の結果も示している。図より、S-W1, S-W2 両試験体の場合は S-U4 試験体に比較して耐荷性状や

変形性能が向上していることが分かる。なお、S-W1, S-W2 両試験体は曲げ破壊によって終局に至ったため、せん断耐力を数値的に評価することが不可能であるが、両試験体とも図-13 や表-2 により確認できる主鉄筋降伏時の曲げ耐力を上回ったせん断耐力を有していることは明白である。

4. AFRP シートの補強効果の検討

表-2 には、せん断破壊によって終局に至った各試験体に関する実験結果のせん断耐力 V_{max} 、最大荷重時変位 δ_{max} 、シート補強によるせん断耐力 V_{max} の増分 $V_{f,exp}$ (シートが受け持つせん断力分)、シート補強による最大荷重時変位 δ_{max} の増分 $\delta_{f,exp}$ 、シートに発生した最大ひずみ $\epsilon_{f,max}$ (以下には有効ひずみと呼ぶ) および発生区間 (図-3 を参考)、公称破断ひずみに対するシートの有効率 r_f (本実験に用いたシートの公称破断ひずみ: 17,500 μ)、シートが受け持つせん断力の計算値 $V_{f,cal}$ および破壊形式を纏めて示している。 $V_{f,exp}$ はせん断耐力 V_{max} から無補強試験体のせん断耐力を差し引いた値である。また、表中に示すシートの最大ひずみ $\epsilon_{f,max}$ は、前章に示す平均値ではなく、各ひずみゲージから得られた値である。なお、S-W1, S-W2 両試験体の場合には、シートが破断する前に曲げ破壊に移行したため、参考として主鉄筋降伏時における各値を示している。

4.1 RC 梁の耐荷性状に関する検討

前章の考察や表-2 の結果より、せん断補強筋の有

無によらず、シートが受け持つせん断力 $V_{f,exp}$ は、U字形補強高さの増加に対応して大きくなっていることが分かる。なお、N-U4 試験体の $V_{f,exp}$ は S-U4 試験体の 2 倍程度であるが、N-U2 試験体の $V_{f,exp}$ は S-U2 試験体のそれより小さい。これは、シートによるせん断補強効果がシートの接着高さによっても変わること示唆している。

せん断補強筋を有しない場合には、U字形補強高さが高いほど最大荷重時変位 δ_{max} は大きい。一方、せん断補強筋を有する場合には、U字形補強高さの増加に伴って最大荷重時変位 δ_{max} が小さくなる傾向にある。これは、3.2 節においても述べているように、U字形補強を施すことによって、ひび割れの分散やひび割れ開口幅の増加が抑制されたことによるものと考えられる。

S-W2 試験体を除き、せん断補強筋の有無によらず、いずれの試験体も AFRP シートの自由端からの剥離によって終局に至っている。S-W1 試験体と S-U4 試験体の比較より、梁上面に折返しをつけることによって AFRP シートのせん断補強効果は向上することが明らかとなった。但し、図-14 に示すように、シートの定着に伴う引張力の作用と共に、曲げ圧縮力の作用によるポアソン効果によってコンクリートが割裂する傾向を示すため、重ね接着をせずに折返しのみをつける場合には、シートの自由端からの剥離を完全に抑制することができないものと考えられる。

4.2 AFRP シートの有効ひずみに関する検討

せん断補強 AFRP シートの有効ひずみに影響する要因を考察すると、1) せん断補強筋の有無、2) シートとコンクリートの付着界面のせん断抵抗、3) シートの材料物性や補強量、および 4) 補強形式等が挙げられる。すなわち、

せん断補強筋の有無：せん断補強筋の有無やせん断補強筋比は、せん断ひび割れの分布形状および開口幅に影響を与える。そのため、シートの有効ひずみもせん断補強筋の有無およびせん断補強筋比に影響されるものと考えられる。

付着界面のせん断抵抗：剥離先端部におけるせん断抵抗は、剥離の進展およびこれによるシートの有効ひずみに影響するものと考えられる。付着界面のせん断抵抗は、コンクリートの引張強度を定めるパラメータである $f_c^{2/3}$ と比例することが報告されている^{4,5)}。

シートの材料物性や補強量：シートの材料物性や補強量を表すパラメータである $E_f \rho_f$ は、シートの有効ひずみに影響を与える。ここで、 E_f は AFRP シートの弾性係数、 ρ_f はシートのコンクリート断面に対する体積割合である。

補強形式：シートの有効ひずみは、U字形補強高さ、不完全閉合補強における梁上面の折返しシートの長さ

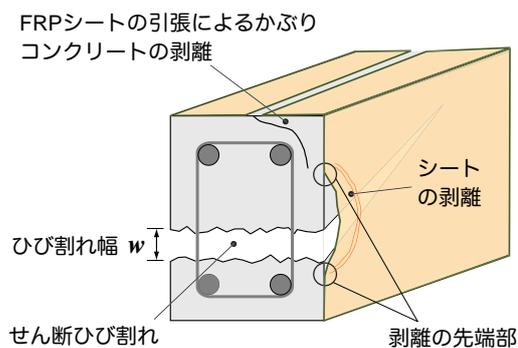


図-14 破壊模式図 (不完全閉合補強)

および閉合補強における重ね継手の範囲等に影響される。

本研究では、上述の各パラメータの中で、せん断補強筋の有無、U字形補強高さおよび折返しの有無による影響のみを検討した。表-2 には、各試験体における AFRP シートの有効ひずみ $\epsilon_{f,max}$ およびシートの有効率 r_f を示している。A シリーズの各結果において、S-U2 試験体の有効ひずみ $\epsilon_{f,max}$ は $4,090 \mu$ であり、N-U2 試験体の $2,190 \mu$ の約 2 倍程度である。N-U4 と S-U4 両試験体の有効ひずみ $\epsilon_{f,max}$ は同程度であり、それぞれ $5,710$ と $6,030 \mu$ である。また、B シリーズの各結果より、U字形補強高さが高いほどシートの有効ひずみ $\epsilon_{f,max}$ も大きい。これらの比較より、本研究の範囲内では、以下のようなことが明らかとなった。1) 全断面高さまで U字形補強する場合には、せん断補強筋の有無にかかわらず、シートの有効ひずみは同程度であるが、梁高の半分程度まで補強する場合には、せん断補強筋の有無によって異なってくる。2) U字形補強高さは高いほど有効ひずみは大きい。

4.3 AFRP シートの受け持つせん断力 V_f の計算

AFRP シートが受け持つせん断力 V_f の評価には、トラス理論が一般的に用いられている。せん断補強筋の評価法と同様、AFRP シートをトラスモデルの部材に近似することによって V_f は評価可能である。全高さまでの U字形補強や閉合補強の場合は、AFRP シートをトラスモデルの斜材や鉛直材に置き換えることができるが、補強高さが梁高以下である場合には、一般的には不可能となっている。ここでは、全高さまで補強した場合に基づいた V_f の評価式を用い、補強高さが梁高以下にある場合の V_f の評価の可能性について検討を行うこととする。すなわち、計測した有効ひずみを用いて V_f を計算し、実験結果の $V_{f,exp}$ と比較することにより、その適用性を検討することとする。

トラス理論に基づいた AFRP シートの受け持つせん断力 $V_{f,cal}$ の計算式は、式 (1) に示すように導かれる^{4,5)}。

$$V_{f,cal} = (\rho_f E_f) \varepsilon_{fe} b_w d_f (\sin \beta + \cos \beta) \quad (1)$$

ここで、 b_w ：梁幅、 E_f ：シートの弾性係数、 A_f ：区間 s_f におけるシートの総断面積、 $\rho_f = A_f / (b_w s_f)$ 、 ε_{fe} ：有効ひずみ、 β ：シートが部材軸となす角度、 d_f ：有効高さ。

表-2より、S-U1とN-U4試験体を除き、計算値 $V_{f,cal}$ は実験値 $V_{f,exp}$ を大略評価していることが分かる。一方、S-U1試験体の場合には、 $V_{f,cal}$ は実験結果に対して過大に評価している。これは、局所的に発生した大きいひずみ値を用いたことによるものと考えられる。一方、N-U4試験体の場合には過小評価の傾向を示している。これは、ひずみ計測点がひび割れ開口部近傍から離れていることにより、ひずみが過小に評価されたことによるものと推察される。

以上のことより、トラス理論に基づいたシートの受け持つせん断力 V_f の評価式は、補強高さが梁高以下にある場合にも適用可能であるものと判断される。今後、数式化に向けて詳しい検討を行いたいと考えている。

5. まとめ

本論文では、AFRPシートによる梁部材の合理的なせん断補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的に、AFRPシートせん断補強RC梁の耐荷性状に及ぼすせん断補強筋の有無の影響およびせん断補強方式の影響について実験的に検討を行った。実験では、せん断補強筋の有無、U字形補強高さおよび梁上面における折返し接着や重ね継手の有無をパラメータとした全10体のRC梁に対して3点静曲げ載荷実験を実施した。検討では、各試験体の破壊状況、変位-AFRPシートのひずみ曲線および荷重-変位関係に関する比較検討を行い、RC梁の耐荷性状に及ぼす各パラメータの影響の検討を試みた。また、補強高さが梁高以下の場合に対するトラス理論の適用性も検討した。本研究に得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

- 1) せん断補強筋の有無によらず、U字形補強や不完全閉合補強の場合はAFRPシートの自由端からの剥離によって終局に至る。また、梁上面に折返しをつけることによってシートの剥離を遅延することができるが、シートの自由端からの剥離を完全に防止することはできない。
- 2) せん断補強筋の有無によらず、シートが受け持つせん断耐力は、U字形補強高さの増加に対応して大きくなる。
- 3) せん断補強筋を有しない場合には、U字形補強高さが高いほど最大荷重時変位は大きい。一方、せ

ん断補強筋を有する場合には、U字形補強高さの増加に伴って最大荷重時変位が小さくなる。

- 4) トラス理論に基づいたシートの受け持つせん断力評価式は、適切な有効ひずみを用いることにより、補強高さが梁高以下にある場合にも大略適用可能である。

参考文献

- 1) 土木学会編：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 101，2000。
- 2) 中島 規道，三上 浩，田村 富雄，平井 正雄：RC梁のせん断耐力に与えるアラミド繊維シートの貼付形状の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1411-1416，2002。
- 3) 篠崎 裕生，三上 浩，中島 規道，田村 富雄：アラミド繊維シートによるU字形補強と部分閉合補強を併用したRC梁のせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1891-1896，2003。
- 4) Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., and Abdel Aziz, M. I., "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.4, pp.195-202, 1998.
- 5) Triantafillou, T. C., and Antonopoulos, C. P., "Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.4, No.4, pp.198-205, 2000.
- 6) Pellegrino, C. and Modena, C., "Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.6, No.2, pp.104-111, 2002.
- 7) Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., and Ashraf, M., "Effective Shear Strengthening of Concrete Beams Using FRP Sheets with Bonded Anchorage." *The Sixth International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Singapore, pp.457-466, July, 2003.
- 8) Adhikary, B.B., and Mutsuyoshi, H., "Behavior of Concrete Beams Strengthened in Shear with Carbon-Fiber Sheets." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.8, No.3, pp.258-264, 2004.
- 9) Carolin, A., and Taijsten, B., "Experimental Study of Strengthening for Increased Shear Bearing Capacity." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.9, No.6, pp.488-496, 2005.

(2006年9月11日受付)