AFRP シートによりせん断補強された RC 梁の耐荷性状に関する実験的研究

Experimental study on load-carrying behavior of RC beams reinforced in shear with AFRP sheet

室蘭工業大学　○正　員　張　広鋒 (Guangfeng Zhang)
室蘭工業大学　フェロー　岸　徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設（株）　フェロー　三上　浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学　正　員　澤田　純之 (Sumiyuki Sawada)

1. はじめに

連続繊維シート（FRP シート）を用いたラーメン橋脚のせん断補強には，FRP シートを部材全周に巻き付ける方法（閉合補強）は補強効果が高く一般的に採用されている．しかしながら，横梁部は上部の施工区間が狭く，上面および側面に支承や落下防止装置等が設置されていることがあり，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，梁の側面および下面にシートをはり付ける U 字形補強や，U 字形と部分的に閉合補強を組み合わせて補強する工法が採用されている [1)]．

本研究では，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収集するために，U 字形補強や閉合補強を施した RC 梁に関する 3 点曲げ載荷実験を実施し，各試験体間の比較を行うことによりその補強効果を検討することとした．実験には，せん断補強筋の有無や補強形式を変化させた全 8 体の RC 梁を使用した．

2. 実験概要

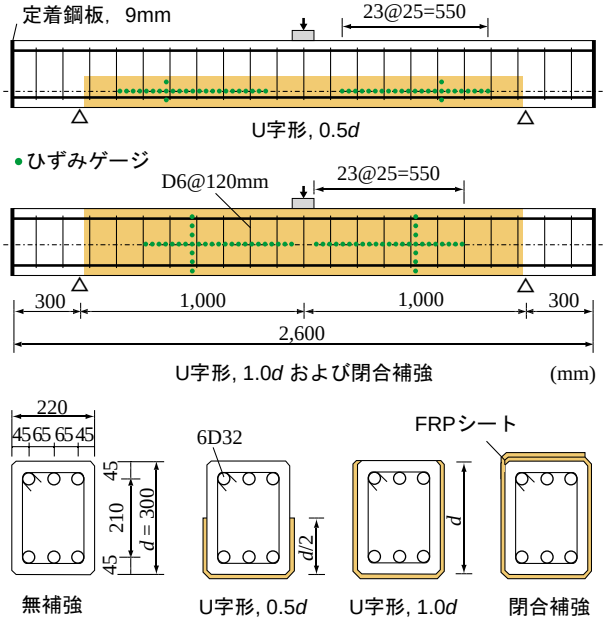
2.1 試験体

表－1 には，本実験に用いた試験体の一覧を示している．N シリーズはせん断補強筋を有しない試験体，S シリーズは D6 のせん断補強筋を有する試験体である．両シリーズのいずれにも，無補強の基準試験体を含め，補強高さの異なる 2 種類および閉合補強の全 4 体の試験体を用いている．試験体名に関しては，第一項目はシリーズ名，第二項目は補強シートの有無や補強形式を表している．ここで，-N は無補強，-U1 は梁高 d の半分までの U 字形補強，-U2 は梁高 d の全高さに U 字形補強，-W は閉合補強を示している．また，表には，コンクリート標準示方書 [2)] に基づいた計算曲げ耐力も示している．

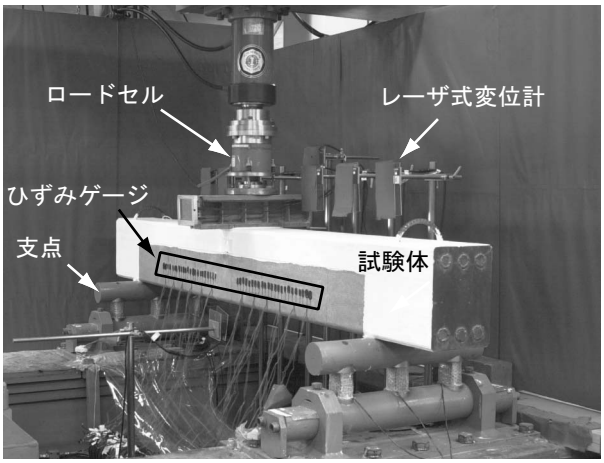
表－１　試験体一覧

シリーズ	試験体名	せん断補強筋の呼び径	補強形式	設計曲げ耐力 (kN)
N	N-N	-	無補強	417.3
	N-U1		U 字形，0.5 d	
	N-U2		U 字形，1.0 d	
	N-W		閉合補強	
S	S-N	D6	無補強	417.3
	S-U1		U 字形，0.5 d	
	S-U2		U 字形，1.0 d	
	S-W		閉合補強	

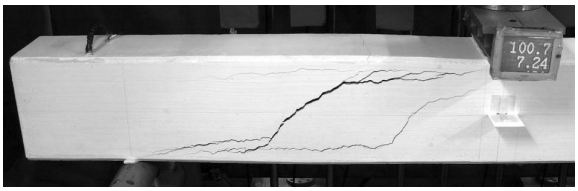
図－1 には，試験体寸法，シートの貼付状況およびひずみの計測位置を示している．試験体は，幅 220 mm，高さ 300 mm の矩形断面である．軸補強筋には SD345-D32 を 6 本配置している．せん断補強筋を有する S シリーズの 4 試験体には，SD295-D6 をスパン中央から 120 mm 間隔で配置した．試験体端部では，厚さ 9 mm の定着鋼板を設置している．FRP シートには，繊維目付量が 280 g/m^2 の一方向アラミド繊維シート（AFRP シート）を用いている．シート接



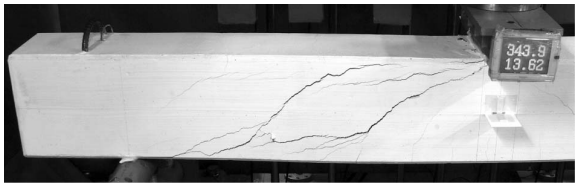
図－１　試験体の概要図



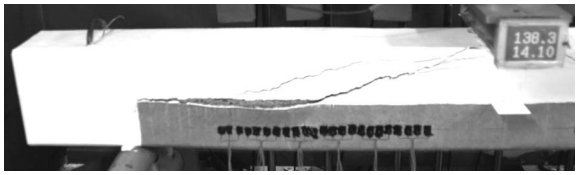
写真－１　試験体設置状況写真



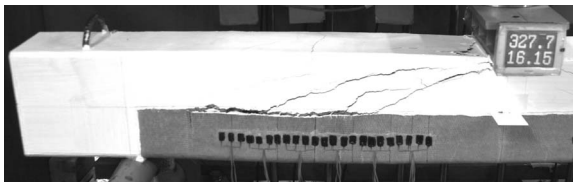
(a) N-N 試験体，変位 7.24 mm



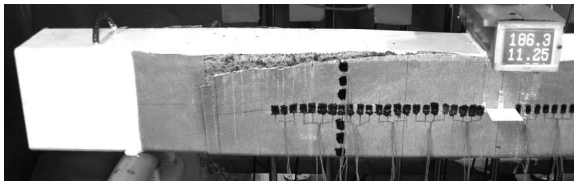
(e) S-N 試験体，変位 13.62 mm



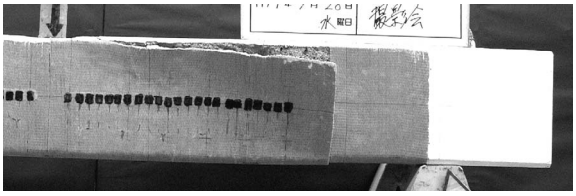
(b) N-U1 試験体，変位 14.10 mm



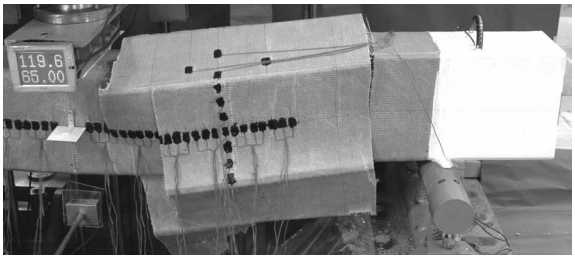
(f) S-U1 試験体，変位 16.15 mm



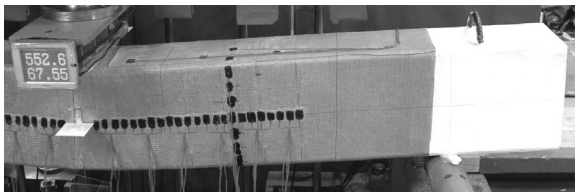
(c) N-U2 試験体，変位 11.25 mm



(g) S-U2 試験体，実験終了後



(d) N-W 試験体，変位 65.00 mm



(h) S-W 試験体，変位 67.55 mm

写真－2　試験体の破壊状況

着領域には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．また，**図－1** に示すように，シートの高さ方向の中央において横一列に 25 mm ピッチでひずみゲージを貼り付けている．-U2 試験体や -W 試験体の場合には載荷点直下，-U1 試験体の場合には載荷点直下から 150 mm の位置から貼り付けている．これは，シート部に発生するせん断ひび割れの位置が異なるためである．なお，シートの高さ方向にもひずみゲージを貼り付けている．

実験時のコンクリートは材齢が 40 日で平均圧縮強度が f'_c =35.1 MPa である．繊維目付量が 280 g/m^2 の一方向 AFRP シートの材料特性値（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 実験方法および計測項目

写真－1 は，実験時における試験体設置状況写真の一例である．本研究では，3 点曲げ載荷により実験を実施した．載荷点には幅 100 mm の載荷板を使用した．本実験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．

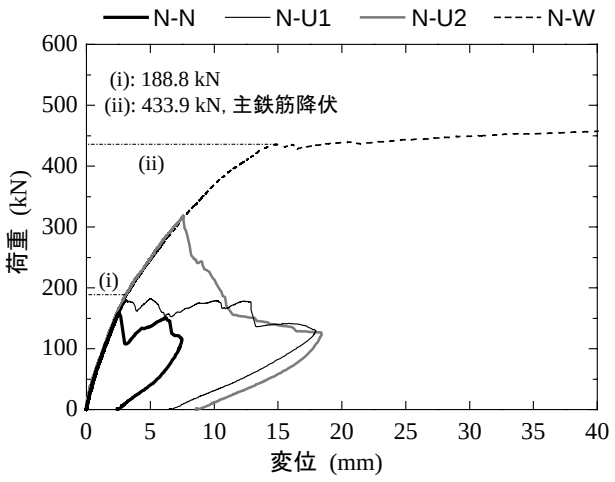
3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

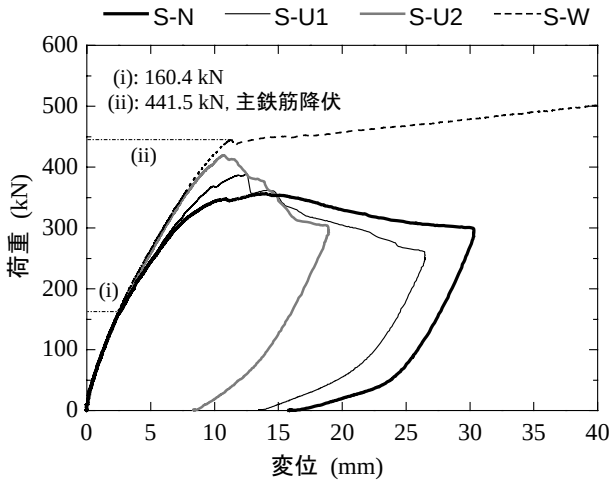
写真－2 には，各試験体における実験終了直前あるいは終了後の破壊状況を示している．(a)〜 (d) は N シリーズ，(e)〜 (h) は S シリーズのものである．

(a), (e) に示す無補強試験体の写真より，両試験体ともに斜めひび割れが大きく開口し，せん断破壊によって終局に至ったことが分かる．(b), (f) に示す N/S-U1 両試験体の破壊状況より，斜めひび割れの発生や，シートの剥離が確認できる．(c), (g) に示す N/S-U2 両試験体の破壊状況より，斜めひび割れの発生状況は確認できないものの，シートは上端面から大きく剥離していることが分かる．一方，(d), (h) には閉合補強の両試験体の破壊状況を示している．N-W 試験体は，裏側面における梁高さ中央付近のシートの破断によってシートの剥離が大きく発生し終局に至った．なお，S-W 試験体に関しては，ロードセル容量の制限によって荷重 550 kN 近傍で載荷を終了したため，シート破断には至っていない．しかしながら，両試験体のいずれも，終局時には主鉄筋が降伏し，斜めひび割れのみならず曲げひび割れも数多く発生していることが確認できる．

なお，剥離したシートを観察すると，いずれの場合にもシート表面にはコンクリート塊が多く付着していることより，シート剥離は接着剤の破壊ではなく，かぶりコンク



(a) N シリーズ



(b) S シリーズ

図－2　荷重－変位関係

リートの剥離によるものと推察される．

以上より，せん断補強筋の有無にかかわらず，U 字形補強する場合には，シート上端部におけるかぶりコンクリートの引張破壊によってシートが剥離し，RC 梁は終局に至る．これに対して，閉合補強の場合には，梁上面におけるシートの定着が十分にあるため，シートが破断する前に主鉄筋が降伏し，RC 梁はせん断破壊型から曲げ破壊型に移行することが考えられる．

3.2 荷重－変位関係

図－2 には，荷重－スパン中央点変位（以後，単に変位）関係に関する比較図を示している．また，**表－2** には，各試験体の最大荷重 P_{max}，最大荷重時変位 δ_{max}，およびこれらの無補強試験体に対する増分を一覧にして示している．ここで，N/S-W 両試験体は曲げ破壊によって終局に至ったため，便宜的に変形量が純スパンの 2% である 40 mm に達した時点の荷重や変位を P_{max} および δ_{max} としている．

図－2(a) より，無補強の N-N 試験体は，荷重 159 kN 近傍で斜めひび割れの発生によって荷重が急激に低下し終局に至った．N-U1 試験体は最大荷重に達した後，シートの部分剥離によって荷重が増加せずに変位のみが増加していることが分かる．また，N-U2/W 両試験体の結果を見ると，荷重 (i) 時点で剛性が低下していることが分かる．これは，斜めひび割れの発生によるものと推察される．しかしながら，シートのせん断補強効果によって荷重がさらに向上している．N-W 試験体は，荷重 (ii) 時点で主鉄筋の降伏によって剛性がほぼゼロまで低下している．

表－2　試験結果の一覧

試験体名	最大荷重 P_{max} (kN) (N/S-N に対する増分)	最大荷重時変位 δ_{max} (mm) (N/S-N に対する増分)
N-N	159.1	2.56
N-U1	179.6 (20.5)	3.15 (0.59)
N-U2	318.8 (159.7)	7.55 (4.99)
N-W[1)]	456.2 (297.1)	40.00 (37.44)
S-N	344.5	13.20
S-U1	388.6 (44.1)	12.50 (-0.70)
S-U2	419.8 (75.3)	10.70 (-2.50)
S-W[1)]	503.0 (158.5)	40.00 (26.20)

1)：N-W および S-W 試験体は変位 40mm 時の荷重である．

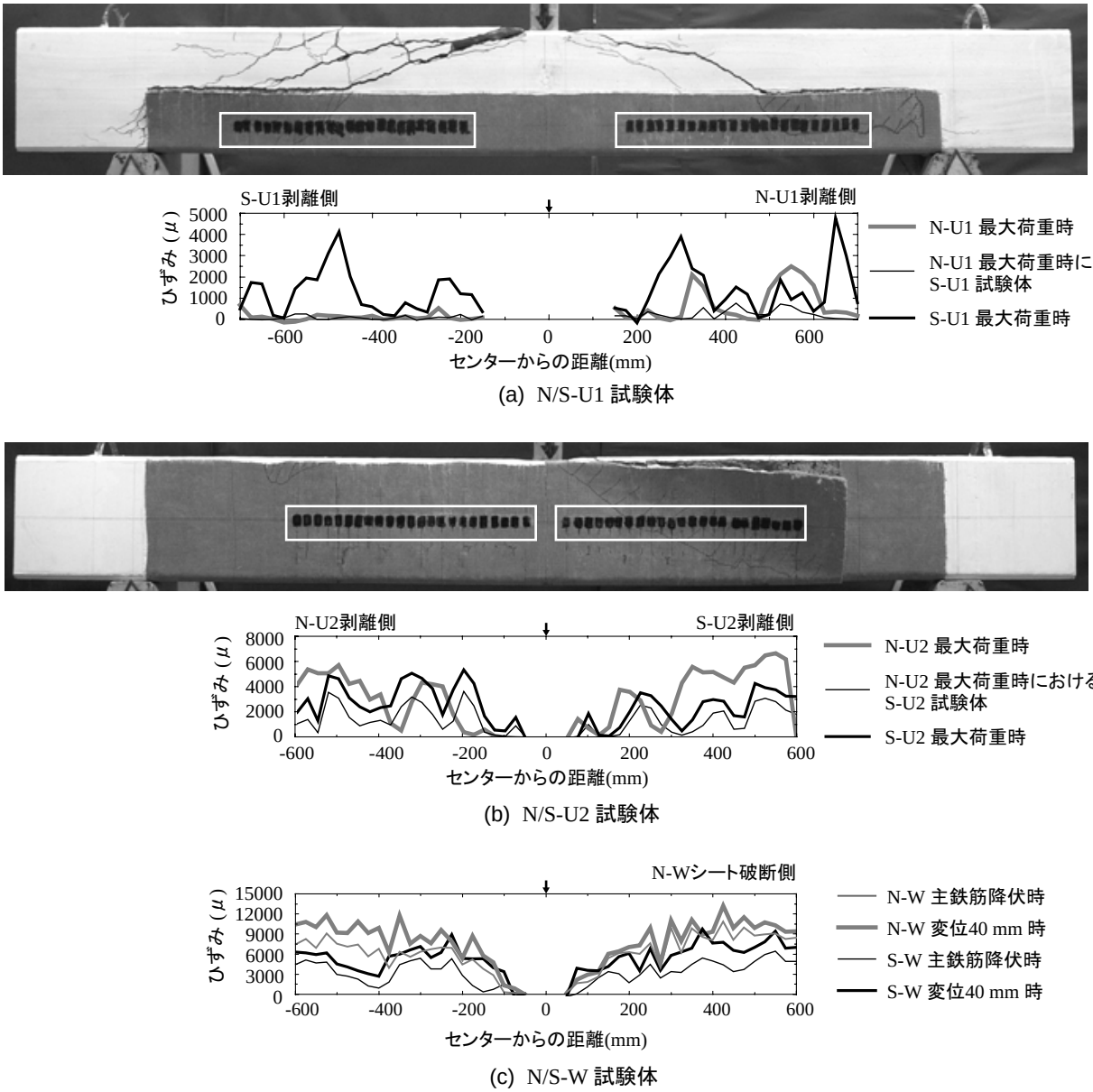
図－2(b) にはせん断補強筋を有する試験体に関する比較図を示している．無補強の S-N 試験体の結果より，荷重 (i) の 160 kN 近傍で剛性の低下傾向が見受けられる．これは，(a) に示す N-N 試験体の最大荷重と対応しており，斜めひび割れの発生によるものと推察される．その後，せん断補強筋の補強効果によって荷重がさらに増加している．S-U1 試験体も，S-N 試験体と同様，荷重 (i) 時点で剛性が明瞭に低下している．一方，S-U2/W 両試験体は，S-N/U1 両試験体に比べ，荷重 (i) 時点における剛性の低下が少ない．

表－2 に示す最大荷重 P_{max}，最大荷重時変位 δ_{max} を見ると，N シリーズの場合には，U 字形補強高さの増加に伴って P_{max} および δ_{max} の両方が増加していることが分かる．一方，S シリーズの場合には，U 字形補強高さの増加によって P_{max} は増加するものの，δ_{max} は低下していることが分かる．これは，せん断補強筋があることにより，S-N 試験体の終局時変位が大きくなり，補強試験体ではシートによる斜めひび割れの発生・開口を抑制する効果が加わることで，より小さい変形でシート剥離によって終局に至ったためと考えられる．また，閉合補強の両試験体の場合には，いずれもせん断破壊する前に主鉄筋が降伏し曲げ破壊型となり，十分なせん断耐力を保有していることが分かる．

3.3 シートのひずみ分布

図－3 には，各試験体における FRP シートの繊維方向（梁高さ方向）ひずみの軸方向分布を示している．ここで，せん断補強筋の有無の影響を検討するために，N, S 両シリーズにおいて，補強形式の同様の 2 試験体の結果をまとめて比較している．

(a) 図には N/S-U1 試験体に関する比較図を示している．最大荷重時における N-U1 試験体の結果を見ると，梁右側に最大 2,500 μ 程度をピークとするひずみの集中が 2 箇所で生じていることが分かる．また，同一荷重時の S-U1 試験体のひずみは最大で 750 μ 程度であり，N-U1 試験体を大きく下回っている．これは，S-U1 試験体の場合には，AFRP シートのみならずせん断補強筋もせん断力を負担しているためである．S-U1 試験体の最大荷重時には，最大で 5,000 μ 程度のひずみが発生していることが分かる．このため，S-U1 試験体の方が N-U1 試験体よりも耐力増分が大きくなったものと考えられる．



図－3　FRP シート繊維方向（高さ方向）ひずみの梁軸方向分布

(b) 図には N/S-U2 試験体に関する比較図を示している．N-U2 試験体の最大荷重時におけるひずみは，同一荷重時における S-U2 試験体のひずみよりも大きく，最大 7,000 μ 程度である．一方，S-U2 試験体の最大荷重時には，最大で 5,000 μ 程度のひずみが発生していることが確認できる．以上，最大発生ひずみは N-U2 試験体の方が S-U2 試験体よりも大きく，このため耐力増分は N-U2 試験体の方が大きくなったものと考えられる．

(c) 図には，主鉄筋降伏時および変位 40 mm 時における N/S-W 両試験体の比較図を示している．両時点のいずれにおいても，N-W 試験体のひずみレベルは S-W 試験体よりも大きくなっていることが分かる．なお，主鉄筋降伏時における N-W および S-W 試験体の最大ひずみは，それぞれ 10,630 および 6,570 μ である．

4. まとめ

1）U 字形補強は閉合補強に比べてせん断耐力増分が小さい．また，U 字形補強の耐力増分は補強高さに影響される．

2）せん断補強筋の有無にかかわらず，U 字形補強された RC 梁は，AFRP シートの上端面からの剥離によって終局に至る傾向がある．

3）U 字シートに生じる最大ひずみは 5,000 ～ 7,000 μ 程度であり，同一荷重レベルではせん断補強筋を有する方がシートの発生ひずみは小さい．

参考文献

1) 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.

2) 土木学会：コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編，2002.