

論文 AFRP シートせん断補強 RC 梁の耐荷性状に関する実験的検討

張 広鋒^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨: 本論文では, 連続繊維シート (FRP シート) による梁部材の合理的なせん断補強設計法確立のための基礎資料を収集するため, シートのせん断補強効果に及ぼすせん断補強筋や補強形式の影響を実験的に検討した。補強形式は, 補強高さを2種類に変化させたU字形補強および閉合補強の全3種類とした。検討の結果, 1) U字形補強の場合は閉合補強よりも補強効果が小さいこと, 2) 既往のU字形シートが負担するせん断力の計算式は, せん断補強筋の有無によって実験結果を過小あるいは過大に評価すること, 等が明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP シート, せん断補強, 補強形式, せん断耐力

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) が, 補強効果は高く, 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橋防止装置等が設置されている場合があり, 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得ることを目的に, せん断補強筋の有無や補強形式の異なる 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, FRP シートのせん断補強効果に及ぼすせん断補強筋や補強形式の影響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体の矩形 RC 梁を使用した。

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	鉄筋径, 鉄筋比 (%)		補強形式
		主鉄筋	せん断補強筋	
N	N-N	D32, 4.25	-	無補強
	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	D32, 4.25	D6, 0.24	無補強
	S-U1			U字形, 0.5 d
	S-U2			U字形, 1.0 d
	S-W			閉合補強

2. 実験概要

表-1には, 本実験に用いた試験体の一覧を示している。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, 補強高さが異なる2種類のU字形補強および閉合補強の全4体の試験体を用いている。

図-1には, 試験体寸法, シートの貼付状況およびび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。主

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 助手 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 研究員 博(工) (正会員)

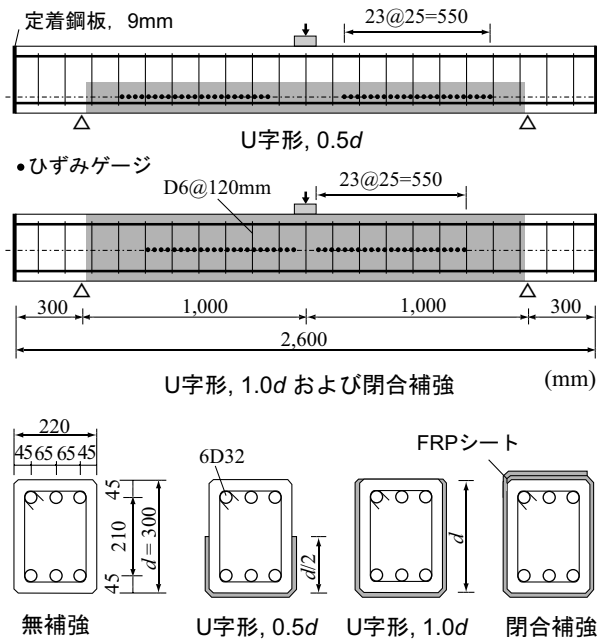


図-1 試験体の概要図

鉄筋には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120mm間隔で配置した。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25mmピッチでひずみゲージを貼り付けている。なお、ひずみゲージは、-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150mmの位置から貼り付けている。

実験時のコンクリートは材齢が40日、圧縮強度が $f'_c = 35.1\text{ MPa}$ である。主鉄筋およびスタラップの降伏強度は、それぞれ335および380MPa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0.193mmで弾性係数および破断強度が、それぞれ118.0GPaおよび2.06GPaである。

図-2には試験体の設置状況の一例を示す。本研究では3点曲げ載荷により実験を実施した。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

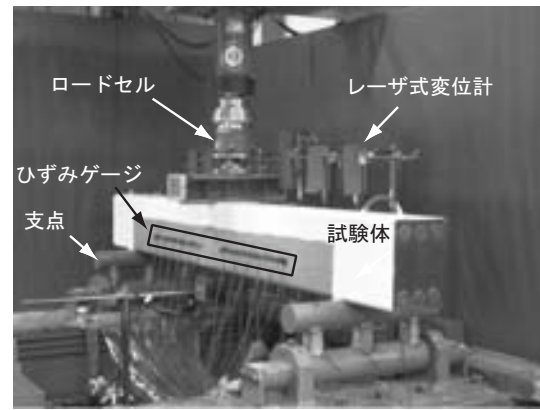


図-2 試験体設置状況

ひずみゲージを用いて測定している。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

図-3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), (e)図に示す無補強試験体の結果より、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)図に示すN/S-U1両試験体の破壊状況より、斜めひび割れの発生や、コンクリートを併ってシート上端部が側面方向に剥離する状況が確認できる。(c), (g)図に示すN/S-U2両試験体の破壊状況より、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)図に示す閉合補強の両試験体に関しては、N-W試験体では、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終局に至り、側面のシートが大きく剥がれていることが分かる。S-W試験体では、シート破断に至らずロードセル容量の制限により荷重550kN近傍で載荷を終了した。終局時には、両試験体とも主鉄筋が降伏し、曲げひび割れも数多く発生していることを確認している。

なお、剥離したシートを観察すると、いずれの試験体にも、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、シート剥離は接着界面からではなく、かぶりコンクリートから発生しているものと推察される。

3.2 シートのひずみ分布

図-4には、繊維方向(梁高さ方向)における

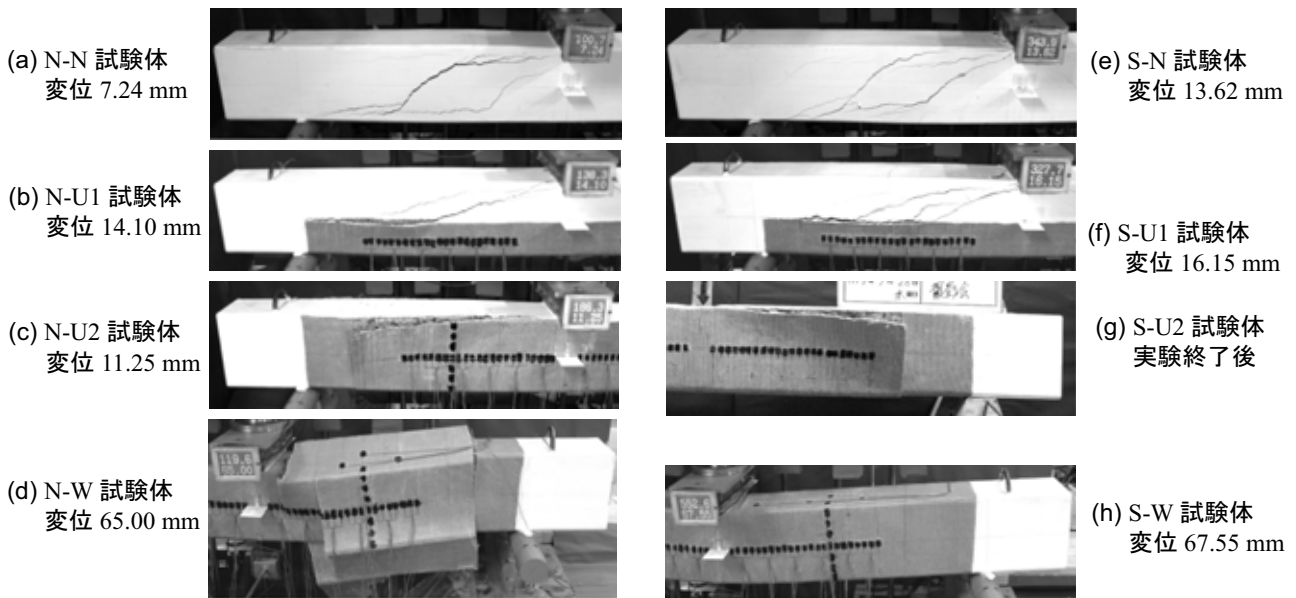


図-3 試験体の破壊状況

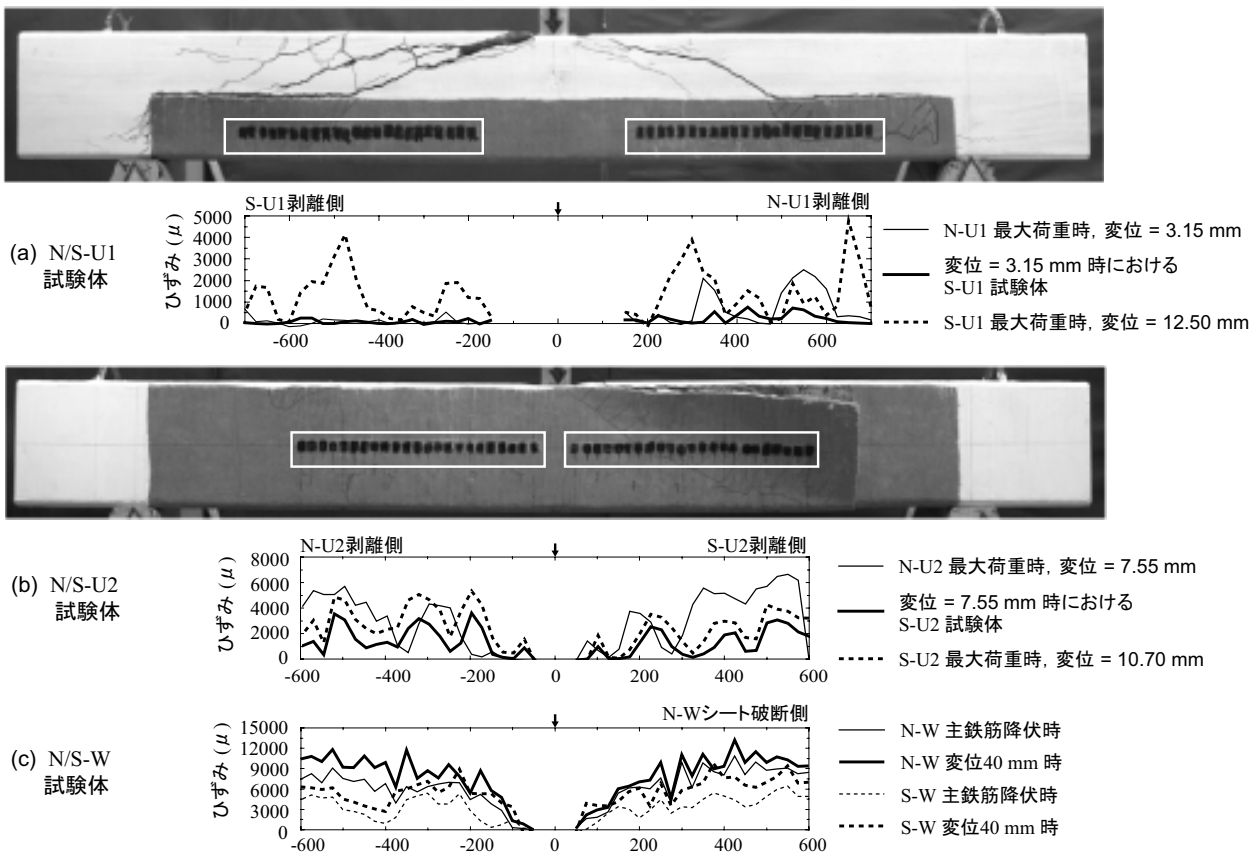


図-4 FRP シート繊維方向 (梁高さ方向) ひずみの梁軸方向分布

FRP シートの梁軸方向ひずみ分布を示している。

(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 試験体の結果より、梁右側に最大 $2,500 \mu$ 程度のひずみが 2箇所発生していることが分かる。また、同一荷重時の S-U1 試験体では最大で 750μ 程度であり、N-U1 試験体を大きく下回っている。S-U1

試験体の最大荷重時には、最大で $5,000 \mu$ 程度のひずみが発生していることが分かる。

(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のひずみは、同一荷重時における S-U2 試験体よりも大きく、最大で $7,000 \mu$ 程度のひずみが発生している。一方、S-U2 試験体の最大荷重時における

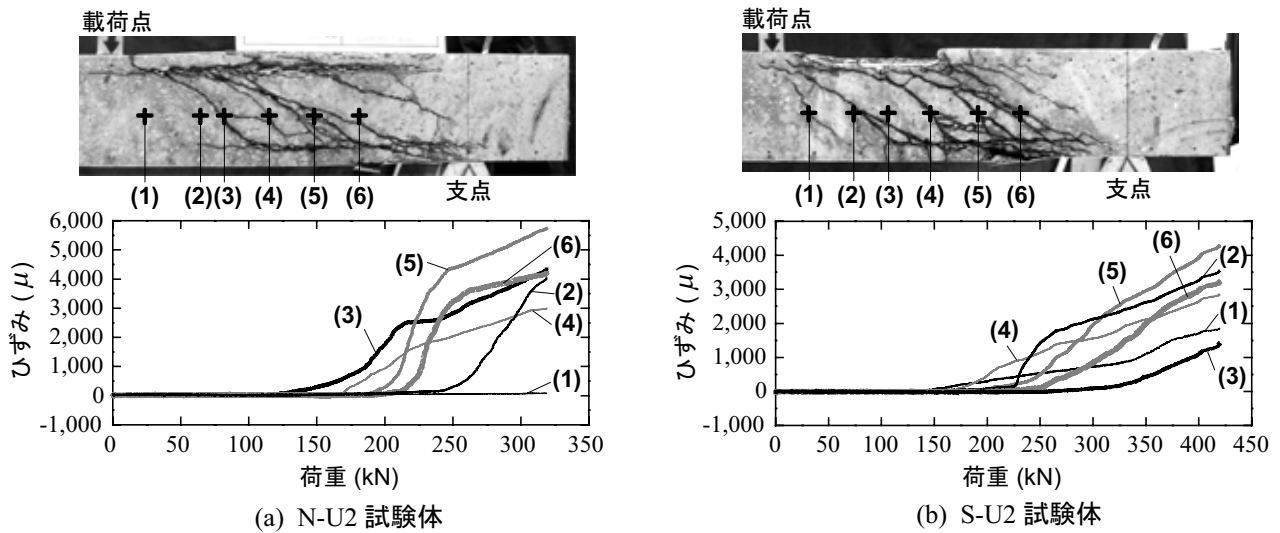


図-5 切断面のひび割れ分布および各計測点における荷重-シートひずみ関係

最大ひずみは $5,000 \mu$ 程度であることが分かる。

(c) 図には、主鉄筋降伏時および変位 40 mm 時 (純スパン長の 2%) 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、S-W 試験体より N-W 試験体のひずみレベルが大きい。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 $6,570 \mu$ である。

図-5には、一例として N/S-U2 試験体に関する各ひずみ計測点における荷重-シートひずみ関係を示している。ここで、計測点 (1)~(6) は概ねひび割れの発生位置と対応している。(a) 図に示す N-U2 試験体の各曲線を見ると、いずれも一定の荷重レベルに達した後ひずみ値が急激に増加する傾向を示している。これは、その計測点においてひび割れが発生し、かつ開口幅が増加し続けることによるものと考えられる。ひずみの増加開始荷重は、計測点番号 (3), (4), (5), (6), (2) の順番で増加していることが分かる。これより、各ひび割れもこのような順番で発生したことが推察される。また、計測点 (5) では、ひび割れの開口が大きく、最大 $5,800 \mu$ 程度のひずみが発生している。一方、(b) 図より、S-U2 試験体における各計測点のひずみの増加開始荷重レベルは、計測点番号 (1), (4), (2), (5), (6), (3) の順番となっていることが分かる。これは、せん断補強筋を有しない N-U2 試験体と異なっ

ている。なお、最大荷重時近傍では、計測点 (6) のひずみが大きくなり、最大 $4,200 \mu$ 程度となっている。

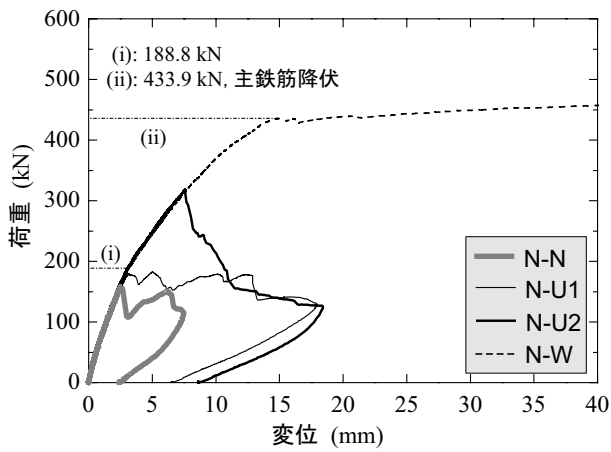
以上の考察より、1) U字形補強の場合のシートに生じる最大ひずみは $5,000 \sim 7,000 \mu$ 程度であること、また、2) せん断補強筋の有無によってせん断ひび割れの発生挙動が異なること、等が明らかになった。

3.3 荷重-変位関係

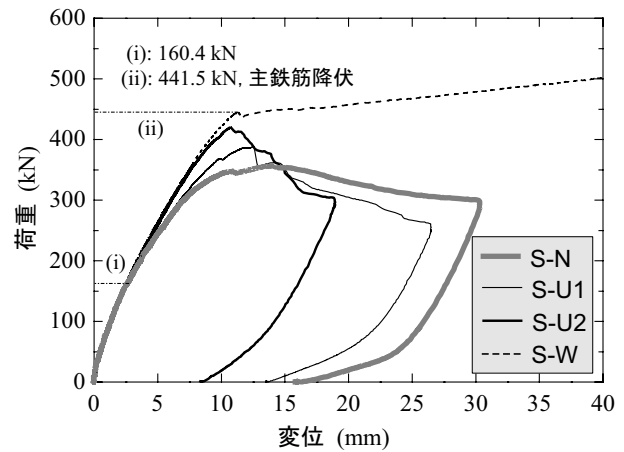
図-6には、荷重-スパン中央点変位 (以後、単に変位) 関係に関する比較図を示している。

図-6(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到達した後、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) 時点で荷重-変位関係の剛性勾配 (以後、単に剛性勾配) 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はさらに向上し、N-U2 試験体では荷重 320 kN 程度で荷重が急激に低下しせん断破壊に至った。N-W 試験体は、荷重 (ii) 時点で主鉄筋の降伏によって剛性勾配がほぼゼロまで低下している。

図-6(b)には、せん断補強筋を有する試験体



(a) N シリーズ



(b) S シリーズ

図-6 荷重-変位関係

表-2 設計値および実験結果の一覧

試験体名	実験結果		計算値				
	せん断耐力 V_{exp} (kN)	シートによる増分 $V_{f,exp}$ (kN)	せん断耐力				
			曲げ耐力 P_u (kN)	V_c (kN)	V_s (kN)	$V_{f,T}$ ($V_{f,T}/V_{f,exp}$) (kN)	$V_{f,K}$ ($V_{f,T}/V_{f,exp}$) (kN)
N-N	159.2	-	417.4	155.0	-	-	-
N-U1	179.6	20.4	417.4	155.0	-	-	-
N-U2	318.8	159.6	417.4	155.0	-	99.2 (62.2%)	108.2 (67.8%)
S-N	344.6	-	417.4	155.0	89.3	-	-
S-U1	388.6	44.0	417.4	155.0	89.3	-	-
S-U2	419.8	75.2	417.4	155.0	89.3	99.2 (131.9%)	108.2 (143.9%)

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 近傍で剛性勾配の低下傾向が見受けられる。これは、(a) 図に示す 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、変位が 30 mm 程度まで進行した後せん断破壊に至っている。S-U1 試験体も、S-N 試験体と同様、荷重 (i) 時点で剛性勾配が明瞭に低下している。その後、荷重および変位は増加し、変位 13 mm 程度で最大荷重を示した後、荷重が低下しつつ変位は増大し、25 mm 程度でせん断破壊に至っている。S-U2 試験体は変位 10 mm 程度で最大荷重を示した後、荷重の低下とともに変位が増大し、変位が 20 mm 弱でせん断破壊に至っている。S-W 試験体は、荷重 (ii) 時点より主鉄筋が降伏し、剛性勾配が明瞭に低下している。

3.4 シートのせん断補強効果

表-2 には、せん断破壊により終局に至った

各試験体に関する実験結果のせん断耐力 V_{exp} 、FRPシートによる耐力増分 $V_{f,exp}$ 、曲げおよびせん断耐力の計算値を一覧にして示している。表中、 V_{exp} は実験結果の最大荷重、 $V_{f,exp}$ は最大荷重から無補強試験体の V_{exp} を差し引いた値である。 V_c 、 V_s は、コンクリートおよびせん断補強筋が受け持つせん断力の計算値²⁾である。

一方、シートが受け持つせん断耐力の計算では、比較のために、U字形補強に適用可能である Triantafillou らの式³⁾ および Khalifa らの式⁴⁾ を用いた。表中の $V_{f,T}$ 、 $V_{f,K}$ は、それぞれ Triantafillou らの式および Khalifa らの式による計算値である。各式における共通のパラメータは以下の通りである。 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、 $\rho_f = A_f / (b_w s_f)$ 、 β ：シートが部材軸となす角度、 d_f ：有効高さ。

Triantafillou らの式

$$V_f = 0.9(\rho_f E_f) \epsilon_{fk,e} b_w d (\sin \beta + \cos \beta) \quad (1,a)$$

$$\epsilon_{fk,e} = \alpha \epsilon_{f,e} \leq \epsilon_{max} = 0.005, \quad \alpha = 0.8 \quad (1,b)$$

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0.65 \left(f_c'^{2/3} / E_f \rho_f \right)^{0.56} \times 10^{-3}, \right. \\ \left. 0.17 \left(f_c'^{2/3} / E_f \rho_f \right)^{0.30} \varepsilon_{f,u} \right] \quad (1,c)$$

ここに、 $\varepsilon_{fk,e}$ 、 $\varepsilon_{f,e}$ はシートの有効ひずみ率およびシートのひずみ率である。

Khalifa らの式

$$V_f = A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f / s_f \quad (2,a)$$

$$R = \varepsilon_{f,e} / \varepsilon_{f,u}, \quad \rho_f E_f < 1.1 \text{ GPa} \quad (2,b)$$

ここに、 f_{fe} 、 R は、シートの有効強度および有効ひずみ率である。 R は式 (2,c)、(2,d) により評価され、両者の小さい方を用いて V_f を計算する。

- シート破断が発生する場合：

$$R = 0.5622 (\rho_f E_f)^2 - 1.2188 (\rho_f E_f) + \\ 0.778 \leq 0.50 \quad (2,c)$$

- シート剥離が発生する場合：

$$R = \frac{0.0042 (f_c')^{2/3} W_{fe}}{(E_f t_f)^{0.58} \varepsilon_{f,u} d_f} \quad (2,d)$$

$$W_{fe} = d_f - L_f \quad (2,e)$$

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E_f)} \quad (2,f)$$

上述の両計算式は、いずれも梁断面の全高さまで補強を行った場合を対象としていることより、S/N-U1 試験体に適用できない。

表-2 に示されているように、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。また、せん断補強筋を有しない N-U2 試験体の $V_{f,exp}$ は、せん断補強筋を有する S-U2 試験体の 2 倍程度大きい。一方、補強高さが $d/2$ の場合におけるシートのせん断力負担は、せん断補強筋のある S-U1 試験体がせん断補強筋のない N-U1 試験体より大きい。このことより、せん断補強筋の影響は補強高さによっても変わることが考えられる。

また、シートが受け持つせん断力の計算値を見ると、N シリーズの場合には、 $V_{f,T}$ と $V_{f,K}$ の両結果とも実験結果を過小に評価し、それぞれ実験結果の 62.2 % および 67.8 % となっている。

一方、S シリーズの場合には、両結果とも実験結果を過大に評価し、それぞれ実験結果の 131.9 % および 143.9 % となっている。

4. まとめ

本研究では、AFRP 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を目的に、AFRP シートのせん断補強効果に及ぼすせん断補強筋や補強形式の影響を実験的に検討した。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) 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。
- 2) U字形シートの補強効果は閉合補強に比べて小さい。その補強効果は補強高さが高い方が大きい。
- 3) Triantafillou らや Khalifa らの式によって評価される U字形シートのせん断力負担は、せん断補強筋のない場合には実験値より小さく、せん断補強筋のある場合には実験値より大きくなる傾向にある。

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.
- 3) 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.
- 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.