

# 論文 AFRP シートの 3 面補強と 4 面補強を併用してせん断補強した RC 梁の正負交番載荷試験

中島 規道<sup>\*1</sup>・三上 浩<sup>\*2</sup>・藤田 学<sup>\*3</sup>・井之上 賢一<sup>\*4</sup>

**要旨**：ラーメン橋脚横梁を模した RC 梁の正負交番載荷試験を実施した。RC 梁は、横梁上面に支承があることを想定し、アラミド繊維シートにより 3 面補強と 4 面補強を併用してせん断補強を行った。本論文では、梁の上下面の補強状態が非対称な場合に正負交番載荷が耐力に与える影響と、併用補強における両者の補強区間の長さの比の影響、および効率的な設計方法について、過去の実験結果も合わせて比較検討した。

**キーワード**：アラミド繊維シート，3 面補強，4 面補強，交番載荷，せん断

## 1. はじめに

早くから整備が進められてきた都市部の主要幹線交通網では、交通量の増大や経年劣化の進展により補修工事の必要性が高まっており、現在急ピッチで補修工事が進められている。この中で、ラーメン橋脚の面内方向は、一般に十分な強度や変形性能を有していると考えられてきたため、面内方向の地震時保有水平耐力の照査は省略され、面外方向力に対する柱部の補強のみ行われてきた。その後、不静定構造物の非線形領域における変形性能の研究が進み、面内方向の地震動に対する横梁補強の必要性が生じてきている。

ラーメン橋脚横梁は、上面および側面に支承や落橋防止装置が設置されているなど、施工条件に制約があるため、連続繊維シート巻付け補強が有効であるが、その場合においても支障物を避けて貼付けを行うため、不完全なものにならないのが現状であった。このような部材全体の補強が困難な構造物を対象として、筆者らは部材の 2 側面および底面への 3 面補強と、部分的に部材全周に巻付ける 4 面補強を併用したアラミド繊維シート(以下,AFRP シート)補強工法の開発を進め<sup>1)~3)</sup>、その設計手法の検

討を進めている。

本試験では、上下非対称となる 3 面と 4 面の併用補強の地震動に対するせん断補強効果の確認、および合理的な設計手法の検討を目的とし、正負交番載荷試験によりせん断補強効果を試験的に検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体

試験体の形状・寸法を図-1 に示す。試験体は、幅 400mm、高さ 400mm の矩形断面とした。

補強材は、引張側と圧縮側に、SD345-D35 をそれぞれ 8 本使用し、梁端部に定着用の鋼板を用いて配置した。載荷方法は、支点間距離 3100mm、載荷点間距離 1300mm の 2 点集中載荷とした。支点および載荷点には幅 100mm の載荷版を使用した。

試験体の形状・寸法および載荷方法は、筆者らがこれまで行ってきたラーメン橋脚横梁のせん断補強を対象とした試験体の緒言を参考に定めた。断面分割法で計算した曲げ耐力は、1146kN、土木学会示方書<sup>6)</sup>で計算したせん断耐力は 328kN で、両者の比となるせん断余裕度は 0.29 である。

\*1 三井住友建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 三井住友建設 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

\*4 ファイベックス(株)

## 2.2 補強方法

試験体の一覧を表-1に、AFRPシートの貼付方法を図-1にそれぞれ示す。

1層目のAFRPシートは、梁のせん断区間1300mmの2側面および底面の3面に隙間なく貼付した。梁の上面は、既往の知見<sup>1)</sup>に基づいて圧縮鉄筋の水平かぶり厚さ以上となる110mmの折返しを行った。

2層目に付加する4面補強は、1層目と同一耐力のAFRPシート3枚を400mm間隔で梁の全周に巻き付け、梁の下面において100mmの重ね継ぎ手により閉合した。この際、3面補強区間の全長に対する4面補強区間のシート幅の合計の比を閉合率 $\beta$ とし、 $\beta$ が15%および30%になるようにシート幅を調整した。

さらに、3面のみを補強した試験体、および全区間を従来の全周補強とした試験体についても試験を行った。基準となる無補強を加えて、全試験体は5体とした。

これらの試験体のせん断補強量、およびせん断補強筋比を表-1に示す。せん断補強筋比は、式(1)の土木学会指針式<sup>5)</sup>により算出した。この際、4面への補強量は式(2)として加算されるが、3面補強のみで評価した補強筋比( $\rho_{af1}$ )、および4面のシートも考慮した平均厚さによる補強筋比( $\rho_{af2}$ )の2種の値を設定し、それぞれせん断耐力の計算結果と試験結果の比較検討に使用した。

$$\rho_{af} = A_{af} / (b_w \cdot s_{af}) = t_{af} / b_w \quad \dots (1)$$

$\rho_{af}$ : せん断補強率、 $b_w$ : 試験体幅、

$A_{af}$ : 区間 $s_{af}$ のシートの断面積

$s_{af}$ : シートの配置間隔、 $t_{af}$ : シートの平均厚さ

$$t_{af} = t_u + \beta \cdot t_h \quad \dots (2)$$

$t_u$ : 3面補強のシート厚さ

$t_h$ : 4面補強のシート厚さ、 $\beta$ : 閉合率

## 2.3 使用材料

AFRPシートの機械的性質を表-2に示す。AFRPシートは、高弾性タイプの一方向シートを使用した。AFRPシートの貼付は、一般的な常温硬化型のエポキシ樹脂を使用して、従来の繊維補強工法と同様の手順で実施した。さらに、試

表-1 試験水準

試験体	閉合率 $\beta$ %	補強量			せん断補強筋比	
		3面 kN/m	4面 kN/m	合計 kN/m	$\rho_{af1}$ %	$\rho_{af2}$ %
N	—	—	—	0	0.0	0.0
U	0	588	—	588	0.143	0.143
UH15	15	588	88	676	0.143	0.164
UH30	30	588	176	764	0.143	0.186
F	100	—	588	588	0.143	0.143

表-2 アラミド繊維シート

耐力 kN/m	目付け g/m <sup>2</sup>	設計厚 mm	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>
588	415	0.286	118	2060

表-3 コンクリートおよび鋼材

	圧縮/降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
コンクリート	25.6~33.3	26.3~28.8
鉄筋	389	198.6

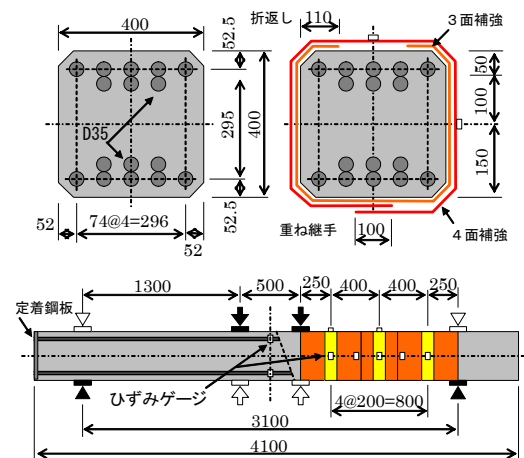


図-1 試験体形状・寸法

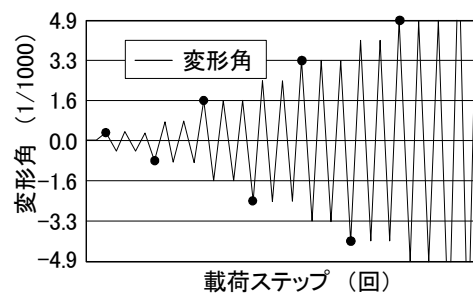


図-2 载荷ルール

試験時のコンクリートおよび鋼材の材料特性値を表-3に示す。

## 2.4 載荷方法

上下非対称補強であることと耐震補強であることを考慮して、図-4に示す正負交番繰返し載荷とした。載荷は変位制御とし、変形角 1/1600 を基準としてその整数倍に変位を増加させて実施した。なお、繰返し回数は 2.5 回とし、各ステージの初回の加力方向を交互に反転させた。

## 2.5 測定項目

AFRP シートのひずみは、補強区間の側面および上面にひずみゲージを貼付し、梁軸直角方向の値を計測した(図-1 参照)。変位の測定は、試験体側面の引張鉄筋位置で行った。さらに、試験体中央の引張鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみについても計測を行った。

## 3. 試験結果

### 3.1 破壊状況

試験結果の一覧を表-4に、破壊時の試験体側面の観察状況を図-3に示す。無補強の N 試験体は、正負の両方向で斜めひびわれが発生し、最大荷重の平均は 277kN であった。

せん断区間全体を全周補強した F 試験体は、斜めひびわれ位置の剥離が順次拡大し、最大荷重時には側面のほぼ全面に達した。この際、シートの破断は認められず、内部のコンクリートの劣化により耐荷力の減少域に移行した。最大荷重は、正負の平均で 837kN であった。

3面補強のみを行った U 試験体、3面と4面の併用補強を行った UH15 および UH30 試験体は、せん断区間上縁に割裂状のひびわれが認められた後に、かぶりコンクリートが AFRP シートと共に剥離する破壊形式を示した(写真-1 参照)。これらの破壊状態は、単調載荷試験<sup>2)3)</sup>における梁の圧縮縁でも発生が認められ、上下非対称補強の特徴的な形式となっている。梁上面の拘束力が他の面に比べて小さいこと、3面補強シートの定着を上面での折返しにより確保していることが主因であると推測される。

正方向と負方向の最大荷重の差は、5%以下の僅かな値であった。最大荷重時の正負の変位差

表-4 試験結果

試験体	f'c N/mm <sup>2</sup>	P <sub>max</sub> (kN)		δ <sub>max</sub> (mm)	
		正側	負側	正側	負側
N	25.6	275	279	2.45	2.76
U	30.7	589	557	9.81	11.31
UH15	30.4	751	717	17.97	18.67
UH30	33.3	836	818	16.08	19.52
F	31.4	843	830	22.86	26.16

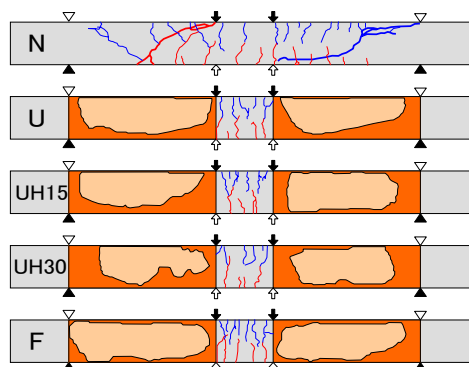


図-3 破壊状況

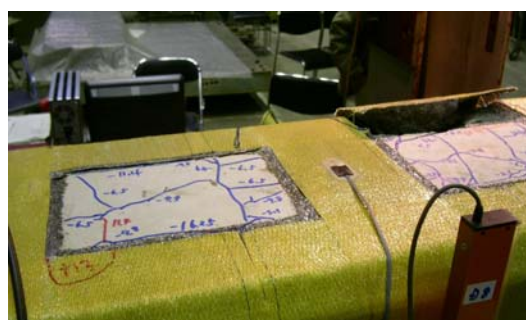


写真-1 破壊状況(UH30)

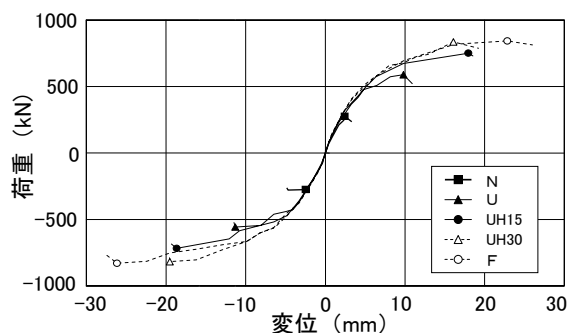


図-4 荷重-変位関係

は、4~21%程度認められるものの、N 試験体と F 試験体の正負の変位差も同程度の値であった。

### 3.2 荷重 - 変位関係

各試験体の荷重-変位関係を骨格曲線として図-4に示す。全周補強の F 試験体は、N 試験

体の最大耐力点以降、徐々に軟化傾向を示しつつ、耐力が増加することが認められる。

3面補強のみのU試験体についても、N試験体に比して最大耐力および最大耐力時の変位が共に増進していることが認められる。4面補強を併用したUH15、UH30試験体は、さらに耐力および変位が増進しており、UH30試験体はF試験体とほぼ同等の最大耐力を示した。

AFRPシートで補強した各試験体の履歴は、概ねF試験体の履歴曲線上に位置しており、3面補強と4面補強の併用は、繰返し载荷による内部コンクリートへの損傷の蓄積およびかぶり部の破壊を抑制し、全周補強の耐荷性状に近づける効果を有していると推測される。

さらに、何れの補強試験体も正負の履歴曲線に顕著な差異が認められないことから、上下面が非対称な併用補強においても、耐震補強としての有効性が期待できるものと判断される。

### 3.3 荷重-AFRPシートひずみ関係

試験体側面および上面で計測されたAFRPシートひずみの最大値を表-5に示す。U試験体の最大ひずみは、 $3000 \times 10^{-6}$ 程度でありAFRPシートの規格破断ひずみの17%程度に留まっている。部分的に4面補強を併用したUH30試験体では、最大ひずみは、 $12,000 \times 10^{-6}$ 程度となり、規格破断ひずみの70%程度に達している。

荷重-AFRPシートひずみ関係の一例をせん断スパン側面の中央点について図-5に、同様に上面の中央点について図-6に示す。AFRPシートのひずみは、剥離の影響などにより値が大きく変動しているが、両図は一時的なひずみの減少を省いた骨格曲線として表示した。

試験体側面中央において、巻付け補強のF試験体は、斜めひびわれの発生の270kN付近から、概ね単調に増加している。一方、上下面が非対称な補強であるUH15およびUH30試験体は、 $2000 \times 10^{-6}$ 程度でひずみの増加が緩和される傾向が認められる。

試験体上面の閉合シートのひずみは、側面と対照的にUH15およびUH30試験体のひずみが

表-5 AFRPシートの最大ひずみ

試験体	AFRPシート最大ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )			
	側面		上面	
	正側	負側	正側	負側
U	2,940	2,550	-	-
UH15	6,080	5,720	7,290	7,550
UH30	4,150	3,820	10,720	12,200
F	9,180	8,910	1,300	1,240

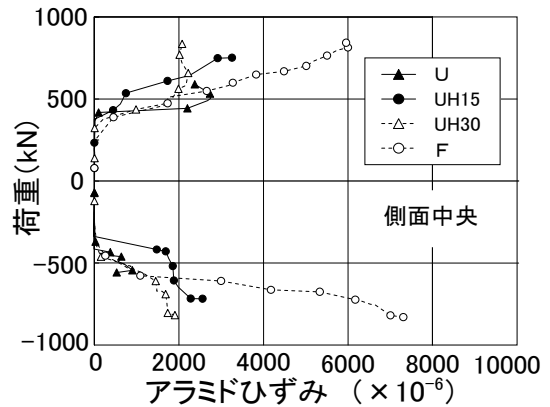


図-5 荷重-AFRPひずみ関係(1)

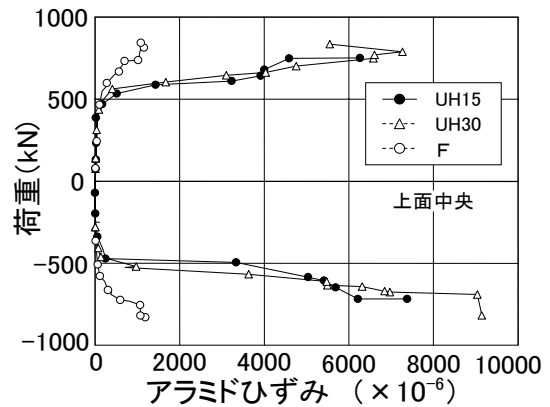


図-6 荷重-AFRPひずみ関係(2)

500kN付近から急増する傾向が認められ、F試験体のひずみは比較的小さな値に留まっている。

UH30試験体とF試験体は、最大耐力および側面の剥離の状態に大きな差異が認められないが、ひずみの増加する面は異なる結果となった。これは、試験体上面において軸方向に割裂ひびわれの発生が認められることに対応し、4面補強を付加する効果は、3面補強の未補強面の軸方向ひびわれを直角方向に拘束することで発揮されることを示していると推測される。

#### 4. 3面と4面併用補強の効果

##### 4.1 せん断力の算定

AFRP シートの分担するせん断力の試験値と計算値の比較を表-6に示す。本試験の結果は、正負の耐力に大きな差がないことから平均を取り表記した。さらに、既往の研究<sup>2)3)4)</sup>から4シリーズ(B~E)の実験データも併せて表記した。

これらの試験体の形状・寸法は、本試験の約3/4であり、せん断余裕度、閉合補強の方法は、本試験とはほぼ同一である。試験体名は新たに簡略化して表記した。なお、B~Eシリーズはすべて単調荷重である。

シートが分担するせん断力の試験値( $V_{af0}$ )は、各補強試験体の最大せん断力( $V_{max}$ )から無補強試験体の最大せん断力( $V_n$ )を一律に減じて算出した。この際、コンクリート強度( $f'_c$ )がせん断力に与える影響は、式(4)を用いて無補強試験体との比を算出して補正した。

シート分担力の計算値は、前述の2種のせん断補強筋比( $\rho_{af}$ )を用いて、3面補強のシートのみを用いたせん断力( $V_{af1}$ )、および4面のシートも考慮したせん断力( $V_{af2}$ )の2種を算出した。

$$V_{af} = V - V_n \quad \dots (3)$$

$V_{max}$ : AFRP補強試験体の最大せん断力

$V_n$ : 無補強試験体の最大せん断力

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad \dots (4)$$

$$\beta_d = (1/d)^{1/4}, \text{ただし}, \beta_d \leq 1.0$$

$$\beta_p = (100 p_w), \text{ただし}, \beta_p \leq 1.5$$

$$f_{vcd} = 0.2 (f'_c)^{1/3}, \text{ただし}, f'_c \leq 75 (\text{N/mm}^2)$$

$b_w$ : 腹部の幅,  $d$ : 有効高さ,  $p_w$ : 引張鉄筋比

$$V_{af2} = K_2 \cdot A_{af} \cdot f_{af} (\sin \theta + \cos \theta) z / \gamma_b \quad \dots (5)$$

$$K_2 = 1.68 - 0.67R \quad \text{ただし}, 0.4 \leq K_2 \leq 0.8$$

$$R = (\rho_{af} \cdot E_{af})^{1/4} \left( \frac{f_{af}}{E_{af}} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{f_{af}} \right)^{1/3} \quad \text{ただし}, 0.4 \leq R \leq 0.8$$

$K_2$ : シートのせん断補強効率,

$A_{af}$ : シートの断面積  $\theta$ : 補強角( $90^\circ$ )

$f_{af}$ : シートの引張強度  $z = d / 1.15$

$E_{af}$ : シートの弾性係数  $\gamma_b$ : 部材係数(1.0)

##### 4.2 併用補強の効果

AFRP シートの閉合率とせん断補強効果の関

表-6 せん断力の比較

	試験体	閉合率 $\beta$ %	補強筋比 $\rho_{af2}$ %	せん断力の増分 kN		
				実験	計算1	計算2
				$V_{af0}$	$V_{af1}$	$V_{af2}$
A	U	0	0.143	139	216	216
	UH15	15	0.164	220	215	237
	UH30	30	0.186	262	223	268
B	A1	0	0.032	57	27	27
	A2	33	0.075	90	27	60
C	B1	0	0.065	65	54	54
	B2	15	0.074	73	54	62
	B3	33	0.108	100	54	80
D	C1	0	0.129	89	90	90
	D1	0	0.191	88	157	158
E	D2	17	0.222	161	160	179
	D3	33	0.254	173	160	196

B,C,D: 文献3), E: 文献2)4)

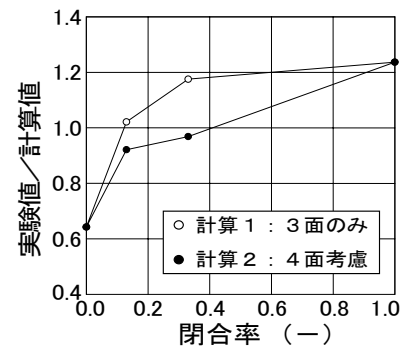


図-7 閉合率とせん断補強効果

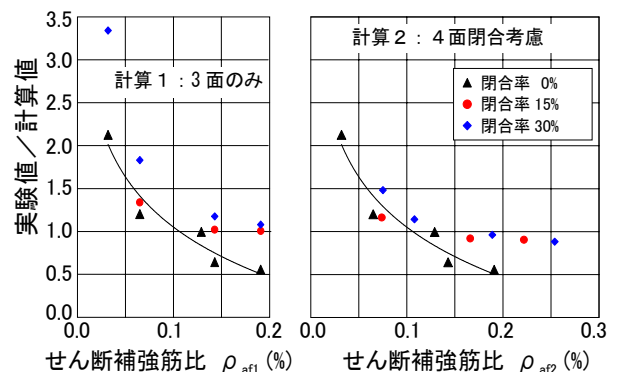


図-8 せん断補強筋比と補強効果

係を図-7に示す。縦軸は、耐力増分の実験値と計算値の比として表示した。3面補強のU試験体は、実験値  $V_{af0}$  と計算値  $V_{af1}$  の比が 0.64 程度の値である。3面のみを評価する計算手法では 15%の閉合により実験値と計算値の比が 1.0 を上回る結果となった。しかしながら、4面補

強も考慮する手法では 30%の閉合においても若干ながら 1.0 を下回る結果となった。

せん断補強筋比と補強効果の関係を既往の試験結果も含め図-8に示す。横軸を 2 種の補強筋比として閉合率ごとの補強効果を比較した。

閉合率 0%の 3 面補強試験体の補強効果は、せん断補強筋比の増加と共に低下する傾向が認められ、補強筋比 0.1%を超えると従来の全周補強の計算耐力以下となっている。これは、補強量の増加によりシート端部の負担が大きくなりかぶり破壊が誘発されたためと推測される。

3 面補強のみを用いた計算手法では、この場合においてもせん断補強筋比 0.2%程度までは、閉合率 15%程度の 4 面補強を付与することにより、全周補強の計算耐力を満足することが可能であることが認められる。反面、補強筋比が小さな領域では AFRP シートのせん断補強効果を大幅に過小評価してしまう傾向も示された。

4 面補強も考慮した計算手法では、補強筋比の小さな領域での実験値との適合性が向上するものの、補強筋比 0.15%以上の領域では閉合率を増加させても補強効果はほぼ横ばいとなり、危険側に留まる傾向となることが示された。

図-9に AFRP シートを用いてせん断補強を実施した実橋脚のせん断補強筋比の分布を示す。縦軸は、梁幅と梁高さの比として表示した。実橋脚の横梁は、扁平な形状が多く、せん断補強筋比 0.15%以下の領域に分布していることが認められる。補強筋比に応じて設計法を選定することで、これらラーメン横梁の合理的な設計が可能となると考える。

## 5. まとめ

アラミド繊維シートにより、部材の 2 側面と底面への 3 面補強、および部分的に 4 面全周補強を併用した RC 梁の正負交番載荷試験を行った。本試験により得られた知見を以下に示す。

(1) 上下面が非対称なアラミド繊維シート 3 面補強は、正負交番載荷重が作用した場合にお

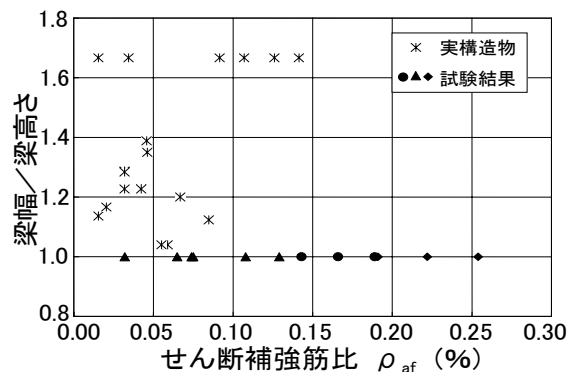


図-9 実橋脚横梁のせん断補強筋比の分布

いてもせん断補強効果を有する。

- (2) アラミド繊維シート 3 面補強に部分的な 4 面全周補強を付加することで、RC 梁の耐荷重性状が改善する。
- (3) 3 面補強のせん断補強効果は、せん断補強筋比の増加と共に低下する傾向を示す。

## 参考文献

- 1) 中島ほか：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報告集，Vol.24，No.2，pp.1411-1417，2002
- 2) 篠崎ほか：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報告集，Vol. 25，No.2，pp.1891-1896，2003
- 3) 中島ほか：AFRP シートを用いた U 字型と部分閉合補強を併用した RC 梁のせん断耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.1519-1524，2003
- 4) ASHRAF ほか：Shear upgrading of reinforced concrete beams with externally bonded composite sheets，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24，No.2，pp.1537-1542，2002
- 5) 土木学会編：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
- 6) 土木学会編：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002