

# 論文 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

中島 規道\*1・三上 浩\*2・田村 富雄\*3・平井 正雄\*4

**要旨**：支障物によりアラミド繊維シートを部材の全周に巻付け補強することができない場合を想定し、アラミド繊維シートの種類および貼付形状を変えたRC梁の荷重試験を行いせん断補強効果を検討した。その結果、全周を閉合した補強には及ばないものの、梁の上下面にシートの折返しを行えば、側面のみ補強によっても一定の補強効果を期待できること、1方向シートに比べて2方向シートの補強効果が大きいことを明らかにした。

**キーワード**：アラミド繊維シート，せん断補強，側面補強，折返し長さ

## 1. はじめに

近年、社会基盤構造物の地震防災の重要性が認識される中で、鉄道、道路橋脚等の既存鉄筋コンクリート(以下、RC)柱を対象にした耐震補強工事が進められている。構造物全体の耐震性向上のためには構成部材をバランス良く補強することが重要である。しかしながら、実際の補強工事において付帯設備や近接構造物の配置により部分的に巻付け補強が困難な部材が存在することが避けられず、効果的な対策が求められている<sup>1)</sup>。

本研究は、支障物近傍の有効な補強方法を明らかにすることを目的とし、アラミド繊維シート(以下、AFRPシート)の種類および貼付形状を変えて補強したRC梁の曲げ荷重試験を実施し、側面のみ補強および側面と引張面の補強を行った場合のせん断補強効果を実験的に検討したものである。

## 2. 試験体

試験体の形状・寸法を図-1に示す。試験体は、幅300mm、高さ175mmの扁平な形状とした。補強鋼材は、圧縮側、引張側共にSD345-D25を3本配置した。これらは、実際のラーメン橋脚横梁を想定し、1/4モデルとして設定したもの

である。荷重方法は、支点間距離を1215mm、荷重点間距離を405mmとした3等分点荷重とし、単調加力により試験を実施した。試験体のコンクリートは、 $G_{max}=20mm$ の早強コンクリートを使用した。試験時のコンクリート強度は、 $37.3N/mm^2$ であった。

AFRPシートの貼付形状を図-2に、試験水準の一覧を表-1に示す。AFRPシートは、繊維を1方向のみに配列したシートを2種

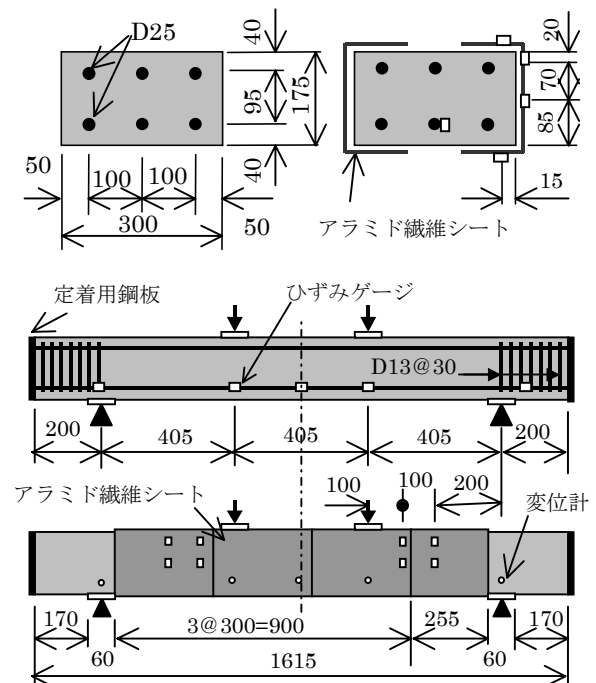


図-1 試験体形状・寸法

\*1 三井建設(株)技術研究所 工修 (正会員)  
 \*2 三井建設(株)技術研究所 工博 (正会員)  
 \*3 ファイベックス(株) (正会員)  
 \*4 ファイベックス(株)

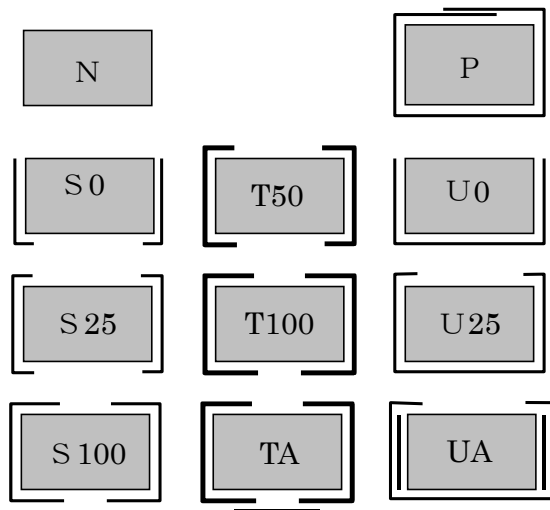


図-2 補強方法

類、および繊維を直交2方向に織り上げたシートを1種類の計3種類を使用した。各シートの単位幅あたり耐力は、1方向シートが196kN/mと98kN/m、2方向シートが各方向に98kN/mである。AFRPシートの力学的性質の規格値を表-2に示す。

シート貼付け形状は、側面補強と側面に加えて引張面を補強したU字型の補強（以下、U字補強）の2種類とした。側面補強は、圧縮面および引張面にシートを折返すものとし、折返し長さを0から100mmの間で変化させた。比較のため側面補強に加えて引張面を1方向シートで接続した試験体、および1方向シートを直交方向に重ねて貼付した試験体も製作した。これらの組合せにより、試験体数は合計11体とした。

補強範囲は、支点間のほぼ全長1155mmの区間とし、幅300mmのシートを並べて貼付した。この際、梁軸方向の重ね合わせは行わず、端部のシートで補強幅を調整した。コンクリートの表面処理は、ディスクサンダーによる清掃のみとし、隅各部の面取りは行わなかった。貼付けに使用するプライマーおよび含浸接着樹脂は、熱硬化型の一般的なエポキシ樹脂を使用した。

図-1に基本的なゲージの貼付パターンを示す。計測は、AFRPシートの梁軸直角方向のひずみを中心とし、梁の変位、引張鉄筋ひずみについてもそれぞれ測定した。

表-1 試験体一覧

試験体	形状	折返し (mm)		シート種類
		上部	下部	
N	無	-	-	
P	閉合	-	-	1方向A
S0	側面	0	25	1方向A
S25	側面	25	25	1方向A
S100	側面	100	100	1方向A
T50	側面	50	50	2方向
T100	側面	100	100	2方向
TA	側面	100	50	2方向
U0	U型	0	-	1方向A
U25	U型	25	-	1方向A
UA	U型	100	-	1方向B

TA：引張面を1方向シートで接続

UA：側面を1方向シートで直交2層。

表-2 AFRPシートの力学的特性

シート種類	耐力 kN/m	目付け g/m <sup>2</sup>	設計厚 10 <sup>-3</sup> mm	弾性係数 GPa	引張強度 GPa
1方向A	196	140	97	1.18	2.06
1方向B	98	70	48		
2方向	98/98	90/90	48/48		

### 3. 試験結果

#### 3.1 破壊状況

試験結果の一覧を表-3に示す。無補強のN試験体は、荷重220kNで斜めひびわれが発生した。計算上の斜めひびわれ発生荷重は、122kNであり2倍程度の差異が生じている。これは試験体の断面が扁平であるためタイドアーチ的な耐荷機構が卓越し、斜めひびわれが発生が抑制されたためと判断される(写真-1参照)。さらに、斜めひびわれ発生後も大幅な荷重の増進が認められ、最大荷重は、338kNとなった。

完全閉合したP試験体は、斜めひびわれが260kNで発生した。そして、荷重390kNで主鉄筋が降伏した後、コンクリート圧縮縁が破壊ひずみに達して破壊に至った。

側面補強やU字補強を行った試験体は、何れも斜めひびわれ発生後にAFRPシートが剥離して耐力を喪失した。剥離時の耐力は全て完全閉合のP試験体以下となった。完全併合試験体

表-3 試験結果一覧

試験体	斜めひびわれ発生 (kN)	最大荷重 (kN)	主鉄筋降伏 (-)	シートの剥離位置	シートの最大ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	コンクリートの割裂	破壊形式
N	220	338	無	---	---	無	せん断破壊
P	260	390	降伏	無	7300	無	曲げ圧縮破壊
S0	230	360	無	上/下部	5300	無	せん断破壊
S25	230	329	無	下部	17000	無	せん断破壊
S100	220	349	無	下部	8200	無	せん断破壊
T50	225	349	無	上部	18500	無	せん断破壊
T100	230	368	降伏	下部	16500	有	曲げ/せん断破壊
TA	220	356	無	上部	18000	有	せん断破壊
U0	220	350	無	上部	8300	無	せん断破壊
U25	240	373	降伏	上部	7300	無	曲げ/せん断破壊
UA	240	330	無	上部	13600	有	せん断破壊

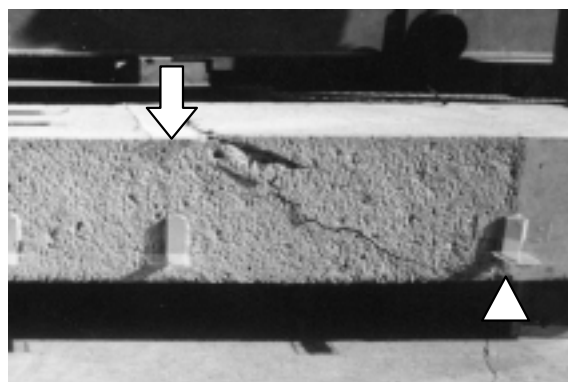


写真-1 N試験体破壊状況

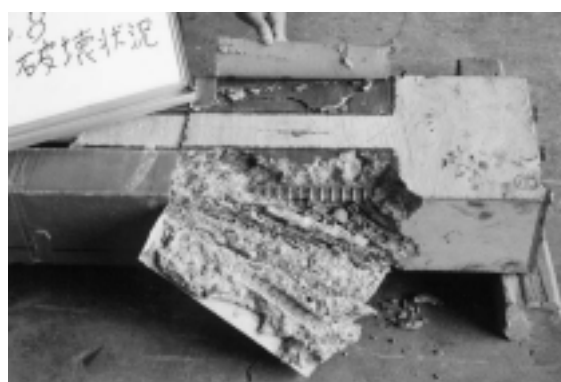


写真-2 TA試験体破壊状況

の挙動から、何れの試験体に関してもタイドアーチ的な耐荷機構の影響を含むと推測されるが、以降、シートの剥離をせん断破壊として取り扱い、剥離の状態、および剥離時の耐力に着目して補強効果を検討するものとする。

シートの剥離位置は、側面補強が引張面中心、U字補強は全て圧縮面となった。折返しのないS0試験体やU0試験体の剥離面は、コンクリートの付着量が少ない界面での単純な剥離であった。折返しを有する試験体は、繊維シートのみならずかぶりコンクリートが躯体から剥離する破壊形式を示した。なお、S25試験体はシート端部に軸方向のひびわれが発生して比較的低荷重で耐力を喪失した。これは折返し長が主鉄筋の水平方向かぶりと同値であり、鉛直方向のひびわれを誘発し構造的な弱点となったためと推測される。折返しは、鉄筋の水平かぶりを超えて行うことが有効であると思われる。

かぶりコンクリートの剥離は、補強形式やシートの折返し長さの違いによらず発生していること、コンクリートが塊状に付着していることから、完全に閉合しないせん断補強においては繊維シートの接着強度よりも、コンクリートの母材強度やかぶり部の応力状態の影響が大きいことが示唆されている。

2方向AFRPシートで折返し長の大きいT100試験体、TA試験体および1方向AFRPシートで直交2層の補強を行ったUA試験体は、圧縮面中央部に割裂ひびわれの発生が認められ、剥離は鉄筋の露出が認められる程の状態であった(写真-2参照)。割裂ひびわれの発生は、アーチ的な耐荷機構により圧縮部の負担が大きくなっていること、断面が扁平であり水平方向の体積膨張が大きく現れることから、シートによる拘束を行っていない圧縮面が構造的な弱点になっていることを示していると推測される。

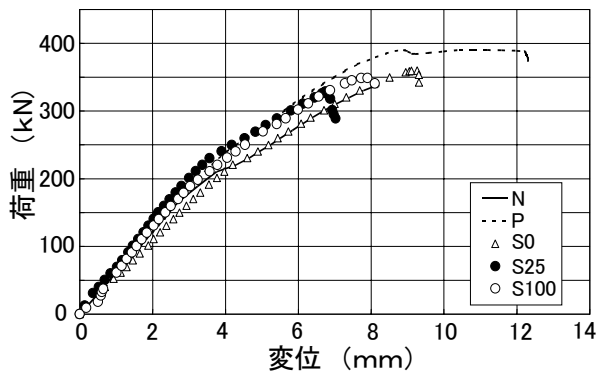


図-3 荷重-変位関係

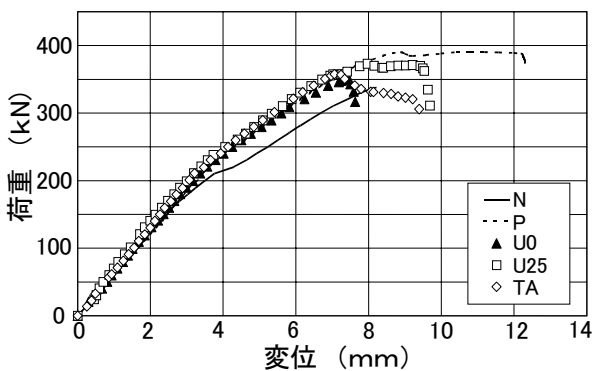


図-4 荷重-変位関係

U25 試験体と T100 試験体は、主鉄筋降伏後に剥離が発生し、最大耐力も比較的大きな値を示した。試験時のコンクリート強度が計画値よりも大きくなったこと、タイドアーチ的な挙動を示したことにより、曲げ破壊に移行してしまったものの、断面全周を閉合しない補強によっても効果的なせん断耐力の増加を期待できる可能性が示唆されている。

### 3.2 荷重-変位関係

1方向のAFRPシートにより側面補強を行った試験体の荷重-変位関係を図-3に示す。図中には、無補強のN試験体と完全閉合のP試験体の値も併記した。

N試験体は、斜めひびわれ発生時に変位の増加が認められるが、AFRPシートで補強を行った各試験体においては剛性が比較的緩やかに低下し斜めひびわれ発生の影響が顕著に現れていない。折返しの無いS0試験体は、無補強の試験体とほぼ同一の曲線を示したが、折返しのある試験体に関しては側面補強のみによっても

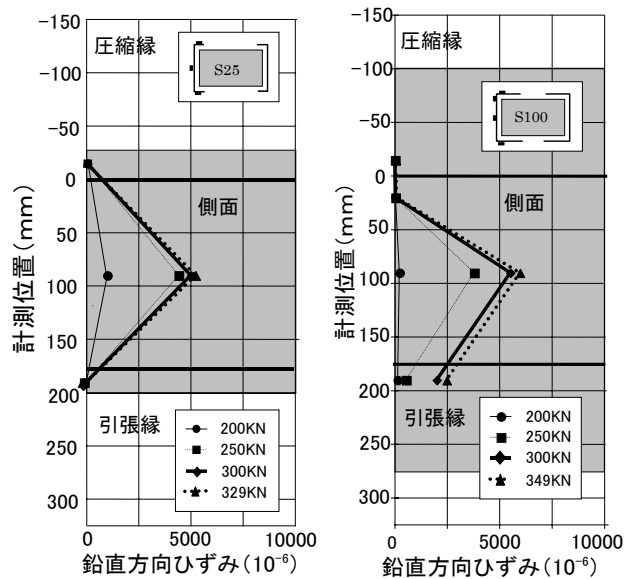


図-5 AFRPシートのひずみ分布

変形の減少効果が認められる。

同様にU字補強を行った試験体について図-4に示す。U字補強では、完全閉合のP試験体にほぼ等しい荷重変位関係を示し比較的良好な補強効果が認められる。

荷重-変位関係における2方向シートと1方向シートの違い、および変位の減少量と耐力の間には明確な関係が認められなかった。

### 3.3 AFRPシートのひずみ

AFRPシートのひずみ分布の一例を図-5に示す。図中、縦軸は側面と圧縮縁の境界を基準とした計測位置を、横軸は梁軸直角方向のひずみを示している。さらに、網掛けの領域でAFRPシートの貼付範囲を示した。

側面中央部のひずみは、斜めひびわれ発生後に急増し、せん断力に抵抗していることが認められた。側面と圧縮縁の境界部は、折返し長やシート種類によらず、斜めひびわれの発生以後もひずみの増加は認められない。一方、側面と引張縁の境界部のひずみは、S100試験体で大きくなっている。試験体により計測ひずみは大きく変動するものの、側面補強の剥離部が引張縁中心であることも踏まえると、圧縮側の隅角部よりも引張側隅角部の応力負担が大きく重点的な補強を行う必要があると判断される。

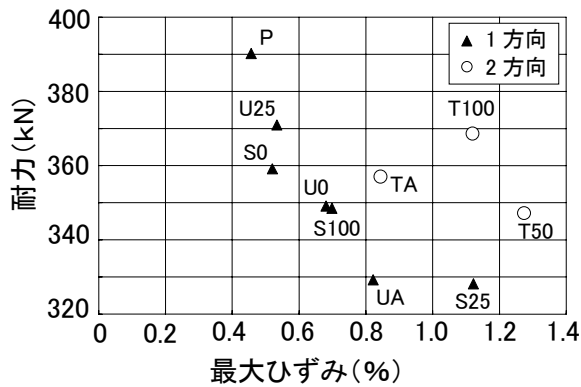


図-6 アラミドひずみと耐力の関係

AFRPシートの最大ひずみと破壊耐力の関係を図-6に示す。繊維シートのひずみは、荷重300kNにおける載荷点から100mmの計測位置の値を表示した。1方向シートを使用した試験体において、最大ひずみが大きくなると、破壊耐力が低くなる傾向が認められる。これは、斜めひびわれ部での損傷集中度と関連していると推測される。2方向シートを使用した試験体は、大きな最大ひずみを示しつつも比較的良好な耐力を示しており、損傷の集中による耐力低下を生じにくいと考えられる。

#### 4. 補強効果の比較

側面補強およびU字補強によるせん断補強効果を表-4に示す。有効率は、シートが分担するせん断力の実験値と計算値の比として算定した。実験値は、アーチ的な耐荷機構が卓越していることから斜め引張破壊を前提とした計算値と直接的な比較が難しいが、無補強試験体の最大せん断力を基準とし各試験体の最大せん断力との差分をAFRPシートによる補強効果として比較検討を行うものとした。

計算値は、式(1)に示される一般的なトラス理論にAFRPシートの特性を考慮した計算式により求めた。ここで、式(1)中の補正係数Kは、終局時におけるAFRPシートの平均応力から、繊維シートの分担するせん断力を評価するための補強効率として定められている。筆者らの検討では、斜めひびわれ発生後にシートが破断する破壊形式では0.7程度、斜めひびわれの発生

表-4 有効率

試験体	実験値		設計値	有効率 ①/②
	最大荷重 (kN)	増分① (kN)	Vaf② (kN)	
N	169.0	0.0	0.0	
P	195.0	26.1	28.0	0.932
S0	179.8	10.9		0.389
S25	164.3	-4.6		-0.164
S100	174.5	5.6		0.200
T50	173.9	5.0		0.179
T100	184.1	15.1		0.539
TA	178.0	9.0		0.321
U0	174.8	5.9		0.211
U25	186.6	17.7		0.632
UA	164.9	-4.1		-0.146

\*コンクリートの分担量<sup>3)</sup>:  $V_c = 60.9$  (kN)

後に、曲げ破壊もしくは圧縮弦材が破壊される形式の破壊形式では0.4程度となっている<sup>2)</sup>。本研究においては、既往の設計手法<sup>3)</sup>に従いAFRPシートの補強効率を0.6として計算を行った。なお、設計値との比較を行うためAFRPシートの破断強度は規格値を使用している。

$$V_{af} = K \cdot A_{af} \cdot f_{afu} (\sin \theta + \cos \theta) z / \gamma_b \quad (1)$$

$V_{af}$ : シートの負担するせん断力,

$K$ : 補正係数 ( $K = 0.6$ )

$A_{af}$ : アラミド繊維シートの断面積,

$f_{afu}$ : アラミド繊維シートの破断強度

$z$ : 応力中心間距離,  $\gamma_b = 1.0$

$\theta$ : シートの補強角 ( $\theta = 0, 90^\circ$ )

基準となる全周補強のP試験体の有効率は、0.93であり、斜めひびわれ発生後の曲げ破壊であるものの、AFRPシートの母材強度が比較的効率的に利用されていることが認められる。

1方向のAFRPシートにより補強した試験体の有効率を図-7に示す。側面補強のS25試験体は、有効率が負の値となっている。これは前述の通り上下の折返し長が25mmで鉄筋かぶりと同値であることが構造的な弱点となったためと推測される。さらに、S100試験体の有効率も、S0試験体の有効率よりも小さく、1方向シートを使用して側面補強を行った場合には、局所的な応力の影響が大きく現れて、耐力が変

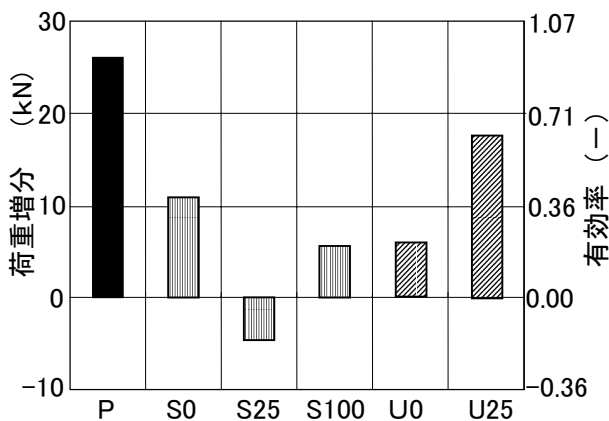


図-7 1方向AFRPシートの有効率

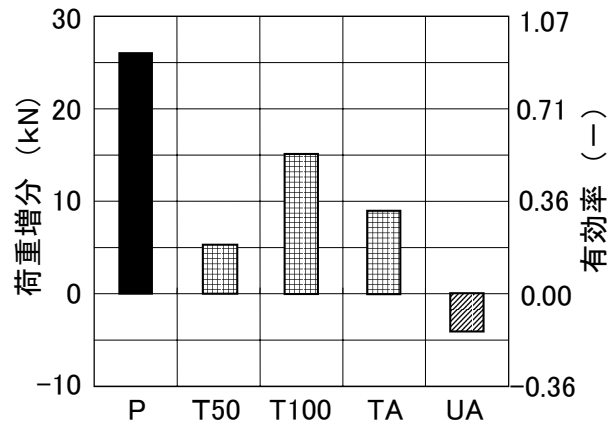


図-8 2方向AFRPシートの有効率

動する可能性が示唆されている。

U字補強のU0試験体とU25試験体の比較においては、僅かな折返しによって最大荷重が大きく増加することが示されている。さらにU25試験体は主鉄筋の降伏も認められており、全周を閉合したP試験体に近い良好な補強性状が示されている。一方、側面で1方向シートを直交させたUA試験体は、U0試験体よりも小さな有効率となっている。これは、扁平な断面形状により圧縮部が構造な弱点となっており割裂ひびわれの発生によって耐力低下が誘発されたこと、および積層化により2層目のせん断補強効果が低下していることによると推測される。

2方向のAFRPシートにより補強した試験体の有効率を図-8に示す。T50試験体は、1方向シートのS100試験体と同程度の補強性状を示している。さらに、折返しの長いT100試験体は、有効率0.54と側面補強のみでも良好な補強性状を示し、2方向AFRPシートの有効性が示唆されている。2方向シートの下部を接続したTA試験体は、全体としてU字補強の形式となっているが、側面補強のみのT100試験体よりも小さな有効率となっている。これは、同様に圧縮面の割裂ひびわれによる強度低下が現れたためと推測される。

総じて補強範囲が閉合型に近くなるにつれて補強効果が増加する傾向が認められる。さらに、折返し長さは、鉄筋かぶりを超えて行うことが有効であると判断される。

## 5. まとめ

AFRPシートで側面補強、および側面と引張面を補強した鉄筋コンクリート梁のせん断試験の結果、以下の点が明らかになった。

- ・ 側面のみの補強によって、最大値で設計値の54%程度のせん断補強効果が認められる。
- ・ 側面と引張面の補強では、最大値で設計値の63%程度のせん断補強効果が認められる。
- ・ 隅角部の折返しは、鉄筋かぶりを超えて定着することが有効である。
- ・ 2方向AFRPシートは、1方向AFRPシートに比して良好な補強性状を示した。
- ・ 側面補強および側面と引張面の補強効果は、梁の断面形状や鉄筋かぶりの影響を受ける。

## 参考文献

- 1) 小泉ほか：RC1層ラーメン橋脚梁部の耐震補強に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.895-900，2001
- 2) 中島ほか：アラミド繊維シートにより補強した鉄道高架橋柱のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.255-260，1997
- 3) アラミド補強研究会編：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