

論文 アラミド繊維をせん断補強筋に用いた梁のせん断耐力に関する研究

竹之井 勇^{*1}・浅井 洋^{*2}・中島 規道^{*3}・藤田 学^{*4}

要旨：連続繊維は高強度で耐久性に優れており、一般的に FRP ロッドやシート接着として樹脂で固定して用いられる。連続繊維を鉄筋の代替品として使用する試みは以前から行われているが、FRP 補強材では曲げ加工部が弱点となり、また現場での曲げ加工も困難であった。そこで、本研究では、現場の施工性を考慮して、アラミド繊維を帯状織物や組紐状に加工し、樹脂で固着しない状態でコンクリート中に配置した梁のせん断補強効果について検討した。

キーワード：アラミド繊維，せん断補強材，せん断耐力

1. はじめに

海浜地区など環境の厳しい地域では、塩害によるコンクリート構造物の劣化が深刻な問題となっている。新設構造物では、かぶりの十分な確保、エポキシ鉄筋の使用、表面被覆などの対策が行われている。既往の研究では、高強度で耐久性に優れた FRP 補強材を鉄筋代替品として使用する研究が行われ、炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維を用いた FRP ロッドが実用化されてきた。アラミド FRP は、鉄筋よりもヤング係数が小さく、強度は鉄筋と同等以上である。寺田や三上ら他は、アラミドの FRP ロッドをスパイラル状に加工してせん断補強筋として用い、コンクリート梁のせん断性状を把握し、荷重変位やひずみ分布から鉄筋と同程度の補強効果があることなどを報告している¹⁻⁶⁾。連続繊維補強材をせん断補強筋として使用する場合、曲げ加工部で応力集中が生じ、曲げ加工していない連続繊維補強材の耐力よりも大幅に低下することなどが問題であった。また、現場での実用化を考えると連続繊維補強材を各構造に合わせて、あらかじめ所定の寸法に曲げ加工する必要がある、コストアップの一因となっていた。そこで、本研究では、現場の施工性を考慮して、アラミ

ド繊維を樹脂で固着しないで補強材とし、曲げ加工部で生じる応力不均一の問題を帯状や組紐状に編むことで緩和することを目的としたアラミド繊維補強材をせん断補強筋に用いた梁のせん断補強効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 アラミド繊維補強材

本稿では、アラミド連続繊維を帯状または組紐状に編み、樹脂で固着しない補強材をアラミド繊維補強材と称する。使用したアラミド繊維を写真-1に、その性能と補強材の特性を表-1, 2に示す。

表-1 アラミド繊維性能

記号	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸度
A1	3430	7.26E+04	4.6%
A2	2744	1.30E+05	2.4%

表-2 アラミド繊維補強材一覧

記号	名称	寸法	引張耐力 (KN/本)	ヤング係数 (N/mm ²)
BA1	アラミド [®] リボン	B=27mm, t=4mm	156.0	7.26E+04
SA1	アラミド [®] シート1	B=30mm	35.3	
SA2	アラミド [®] シート2	B=30mm	35.3	1.30E+05
R1A2	アラミド [®] 組紐1	断面積45.5mm ²	61.2	
R2A2	アラミド [®] 組紐2	断面積59.5mm ²	81.5	

※記号のつけ方 組み方-繊維性能
組み方：B=帯状、S=シート、R=組紐

*1 三井住友建設株式会社 技術研究所 工修(正会員)
 *2 三井住友建設株式会社 技術研究所 主任研究員(正会員)
 *3 三井住友建設株式会社 技術研究所 主任研究員 工修(正会員)
 *4 三井住友建設株式会社 技術研究所 土木研究開発部長 博(工)(正会員)

アラミド繊維は 2 種類(A1, A2)とし、帯状および組紐状に加工した 5 種類を補強材として用いた。アラミドリボン(BA1)は、アラミド繊維を厚さ 4mm の帯状に編んだものである。アラミドシート(SA1, SA2)は幅 30mm の一方向シートであり、ほぼ引張耐力は等しいが、アラミド繊維の性能が異なる 2 種類を使用した。アラミド組紐(R1A2, R2A2)はアラミド繊維 A2 を用いた 8 本の繊維束を組紐状に編んだものである。

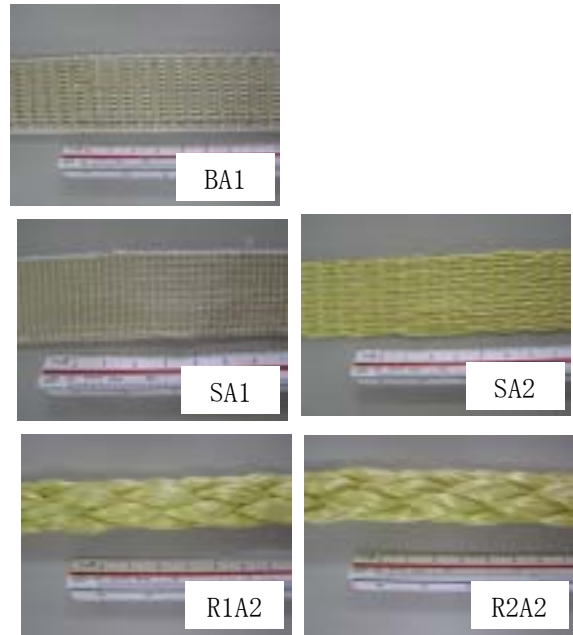


写真-1 アラミド繊維補強材

2.2 せん断試験体

せん断試験体の一覧と使用した鋼材の材料特性を表-3, 4に示す。せん断試験体は、せん断補強筋にアラミド繊維補強材を用いた試験体5体と、補強効果を比較するため、無補強、D10, D13 および D16 の4種類を加えた9体とした。図-1に試験体寸法を示す。試験体は、500mm×200mm×4000mmのRC梁である。全ての試験体において引張鉄筋にφ23の異形PC鋼棒4本、圧縮鉄筋にD13(SD345)2本を配置した。アラミド繊維補強材は、たるみが生じないようにスパイラル状に配置し、端部は樹脂で定着した(写真-2)。設計せん断耐力は、コンクリート負担分と鉄筋負担分をコンクリート標準示方書(構造性能照査編)の式から算出し、アラミド繊維補強材負担分を「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」⁷⁾に基づく式(1)から算出した。アラミド繊維補強材のピッチは、鉄筋の試験体と耐力比較できるようにピッチを定めた。

表-3 せん断試験体一覧

No.	名称	引張耐力* (KN/本)	ピッチ
S0	鉄筋なし		
S1	D10(SD345)	35.0	@150
S2	D13(SD345)	62.1	@150
S3	D16(SD345)	97.3	@200
BA1	アラミドリボン	156.0	@250
SA1	アラミドシート1	35.3	@150
SA2	アラミドシート2	35.3	@150
R1A2	アラミド組紐1	61.2	@200
R2A2	アラミド組紐2	81.5	@150

*) 鉄筋は JIS 規定の引張強度×断面積、アラミド繊維は保証耐力を使用

表-4 鋼材の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D10(SD345)	426	558	1.95E+05
D13(SD345)	384	555	1.84E+05
D16(SD345)	376	561	1.84E+05
異形PC鋼棒 (φ23)	1090	1160	2.03E+05

$$S_{AF} = \frac{A_{AF} \sigma_{AFd} d (\sin \theta_{AF} + \cos \theta_{AF})}{1.15 a_{AF}} \quad (1)$$

S_{AF} : アラミド繊維の負担するせん断耐力

A_{AF} : 単位幅あたりの断面積(mm²)

σ_{AFd} : 引張強度(N/mm²)

(参考文献7では、引張強度に強度低減係数0.6を乗じているが、本稿では強度低減係数を1.0とする。)

θ_{AF} : 部材軸となす角度(90度として計算)

a_{AF} : ピッチ(mm)



写真-2 アラミド繊維組立

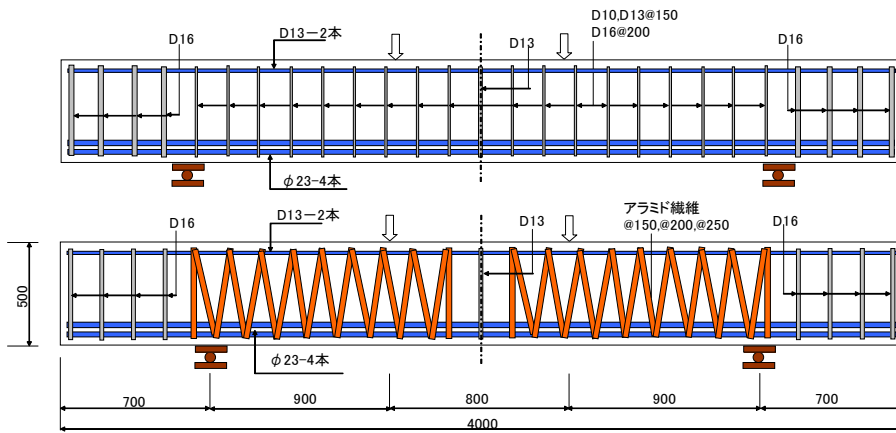


図-1 せん断試験体形状

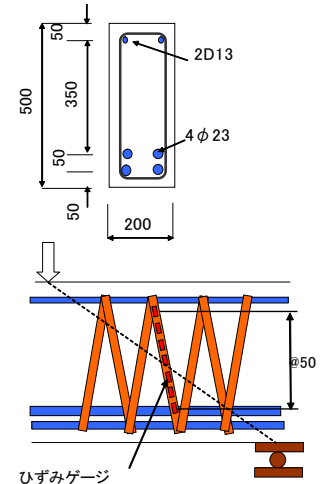


図-2 アラミド繊維ひずみ測定

2.3 せん断載荷試験

載荷方法は、載荷スパン 80cm，せん断スパン 90cm の 2 点曲げ載荷とし，ひび割れの挙動を観察するため、載荷除荷を繰り返しながら荷重を増加していった（写真-3）。測定項目は、載荷荷重，支間中央変位，斜めひび割れ幅などのほか，アラミド繊維のひずみを図-2 に示すように高さ方向 5cm 間隔にゲージを配置して測定した。



写真-3 せん断載荷試験

3 実験結果と考察

3.1 試験体のせん断耐力と破壊状況

表-5 に計算値および実験結果，図-3 に荷重変位関係，図-4 にひび割れ図を示す。実験時のコンクリート強度は 47N/mm^2 であった。約 50kN で曲げひび割れが発生し，約 250 kN で大きなせん断ひび割れが生じた。各試験体でひび割れ発生荷重に大差は認められなかった。破壊形状は，S2，S3，SA2 で曲げ破壊し，その他の試験体では，せん断破壊を示した。BA1 と SA1 は，荷重変位挙動と最大荷重が，無補強試験体 S0 と同程度であり，せん断補強の効果は全く期待できない結果であった。SA2 は計算値以上の耐力が認められ，また荷重変位曲線も S1 に近い挙動を示した。組紐に関しては，計算値に対して R1A2 が 78%，R2A2 が 75% となった。また全てのアラミド繊維補強材は，終局時においても破断はしなかった。

表-5 計算値および実験結果

名称	計算値 (KN)				実験値 (KN)		破壊状況
	曲げ耐力 M	せん断耐力 S	M/S	補強筋負担分	最大荷重	補強筋負担 S_{FE1} (最大荷重-406.0)	
S0	180.0	5.8			406.0		S
S1	479.4	2.2	299.4		754.8	348.8 (116%)	S
S2	659.4	1.6	479.4		952.8	546.8 (114%)	F
S3	732.8	1.4	552.8		941.4	535.4 (97%)	F
BA1	1103.6	0.95	923.6		355.0	-51 (-9%)	S
SA1	528.4	2.0	348.4		406.8	0.8 (0%)	S
SA2	527.8	2.0	347.8		808.0	402.0 (126%)	F
R1A2	632.8	1.7	452.8		494.0	88.0 (19%)	S
R2A2	983.8	1.1	803.8		733.0	327.0 (38%)	S

S:せん断破壊
F:曲げ圧縮破壊

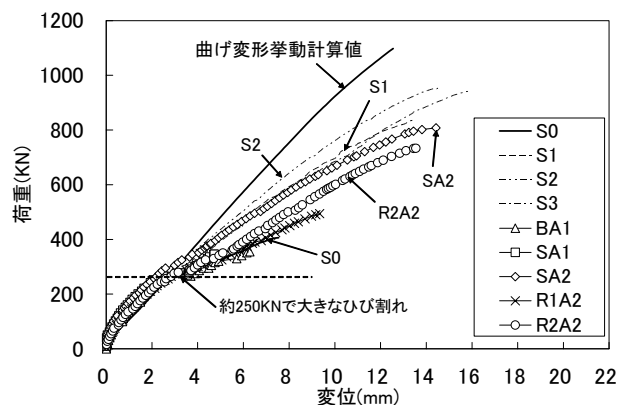


図-3 荷重変位関係

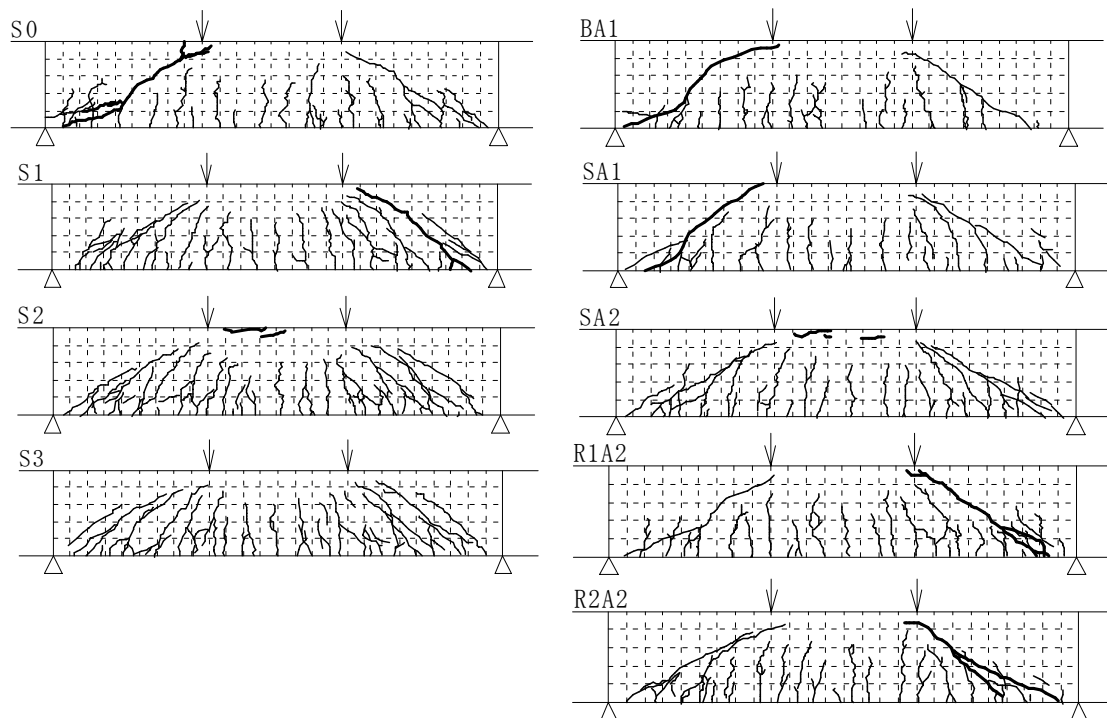


図-4 ひび割れ図（最大荷重時）

3.2 せん断補強負担

表-5の補強筋負担 S_{AF1} は、各試験体の最大荷重から無補強試験体S0の最大荷重を引いて算出した値であり、せん断補強筋が受け持つせん断耐力と考えることができる。またアラミド繊維補強材につけたひずみゲージから得られた最大張力から、式(1)用いてアラミド繊維補強材が負担した耐力 S_{AF2} を算出した。図-5にそれらの計算値に対する割合を合わせて示す。これより、シート形状のSA2で最もせん断補強効果が認められた。 S_{AF1} と S_{AF2} で、SA1, SA2で差はあるものの、おおむね同じ傾向となった。これより、アラミド繊維補強材が荷重を負担することによってせん断耐力が増加していると判断できる。

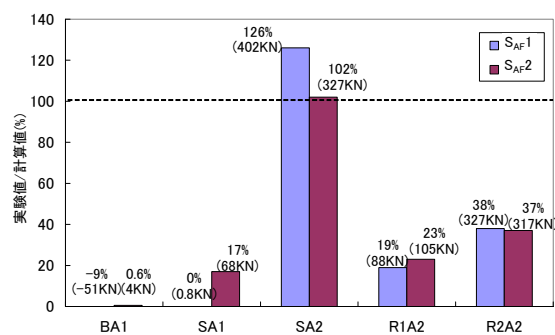


図-5 アラミド繊維負担耐力

3.3 アラミド繊維と編み方の違いについて

アラミド繊維(A1, A2)の違いや編み方(シートと組紐)の違いの検討をSA1, SA2, R2A2で行った。図-6に試験体の下縁から20cmの位置での π 型変位計から得られたひび割れ幅の挙動を示す(写真-4)。SA1は、S0(無筋)と同じようにひび割れが生じたあと、荷重の増加に比べひ

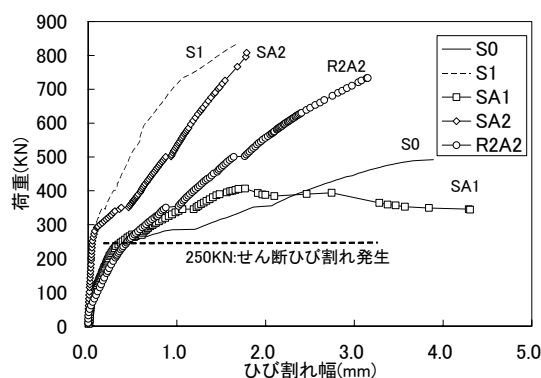


図-6 ひび割れ幅挙動

び割れ幅の増加が著しい傾向を示している。反対にSA2は、鉄筋を用いたS1に比べれば若干ひび割れ幅は大きいですが、近い挙動を示していることがわかる。載荷荷重500KNにおけるS1とSA2のひび割れ幅を比較すると、SA2は1.9倍のひび割れ幅であり、補強材の弾性係数比より若干大

きな値であった。また図-7に SA1, SA2, R2A2 のひび割れ幅とアラミド繊維補強材のひずみ関係を示す。SA2 はひび割れ初期から荷重を負担し、ひび割れ幅に比例して、ひずみが増加しているが、SA1 と R2A2 は、0.5mm 程度までひび割れ幅が広がってから荷重を負担し始めていることがわかる。これは、補強材に荷重が作用する際、初期に生じる繊維のたるみ等の構造的な伸びが原因と考えられる。

次に、図-8にアラミド繊維補強材の SA1, SA2, R2A2 のひずみ分布を示す。ひずみ分布より式(2)、式(3)を用いて SA1, SA2, R2A2 の平均付着応力度を算出した。また表-6に各アラミド繊維補強材の断面積、周長を示す。図-9にアラミド繊維補強材に作用する引張応力度と平均付着応力度の関係を示す。

$$S = \Delta\varepsilon \times A_{AF} \times E / \Delta l \quad (2)$$

$$\tau = S / L_{AF} \quad (3)$$

τ : 平均付着応力度 (N/mm²)

S : 単位長さあたりの付着力 (N/mm)

$\Delta\varepsilon$: アラミド繊維補強材のひずみ

Δl : ひずみゲージ間隔 (mm)

A_{AF} : 断面積 (mm²)

L_{AF} : 周長 (mm)

組紐形状 R2A2 の平均付着応力度は、9N/mm² に至るまで線形的に増加する傾向を示した。これに対して、SA1, SA2 の平均付着応力度は、頭打ちの傾向を示し、単位表面積あたりの付着性状は組紐形状の方が良好であることがわかる。次に、図-10にアラミド繊維に作用する引張応力度と定着長の関係を示す。定着長は、式(4)を用い

表-6 アラミド繊維の材料特性

	SA1	SA2	R2A2
E (N/mm ²)	7.26E+04	1.30E+05	
A _{AF} (mm ²)	14.76	18.41	59.5
L _{AF} (mm)	60	60	27.3
A _{AF} /L _{AF}	0.246	0.307	2.18

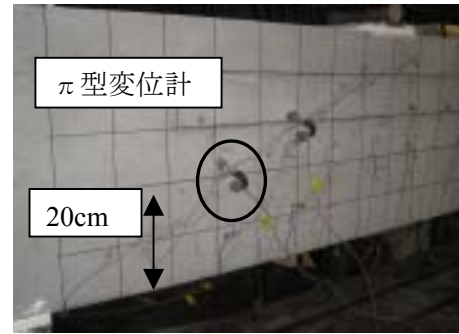


写真-4 ひび割れ幅測定

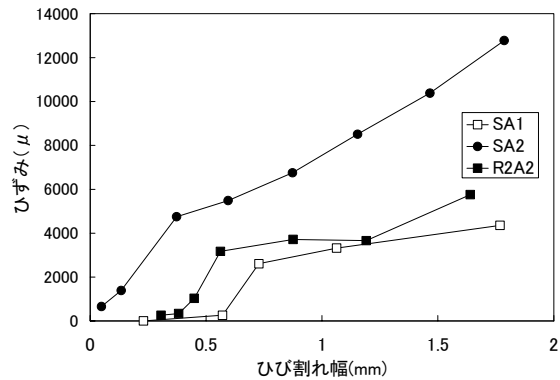


図-7 ひび割れ幅とひずみ

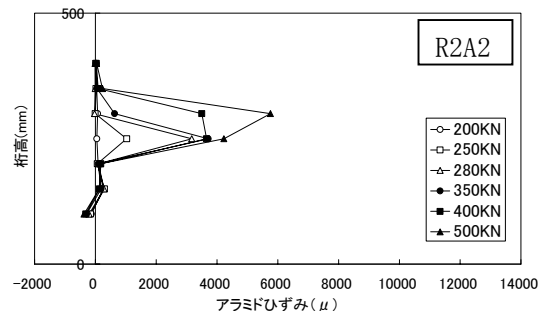
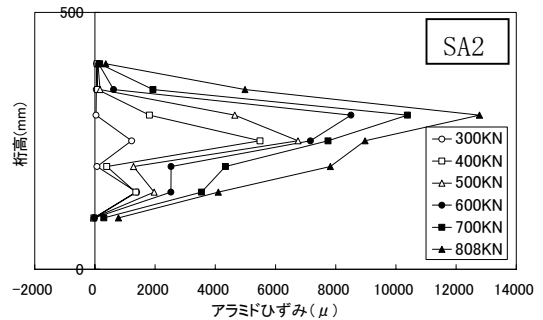
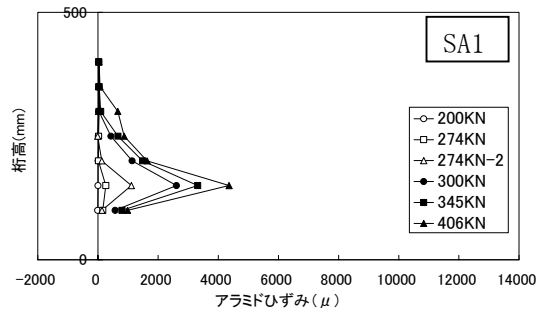


図-8 アラミド繊維ひずみ分布

て算出した。

$$\Delta L = P / S \quad (4)$$

ΔL : 定着長(mm)

P : アラミド繊維に作用する引張力(N)

せん断補強効果が最も大きいと考えられるシート形状の SA2 は、同じシート形状の SA1 に比べ、定着長は小さな値を示した。また組紐形状の R2A2 と比べると、シート形状の平均付着応力度は小さいが、表面積が大きいために、定着長は組紐形状の R2A2 と同程度であった。

これらより、定着長が小さく、荷重を負担する時の構造的な伸びが小さいほど、補強効果が期待できると考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

(1) 樹脂で固着していないアラミド繊維補強材をせん断補強筋に使用した場合、シート状の補強材 SA2 でせん断補強効果が認められた。

(2) ひび割れ発生初期において、補強材の構造的な伸びが生じ、補強効果が得られない場合がある。

(3) 平均付着応力度は、組紐形状が良好な値を示した。

(4) 定着長が小さく、構造的な伸びが小さいアラミド繊維補強材は、せん断補強効果が期待できる。

参考文献

- 1) 寺田ほか：FRP をせん断補強に用いた RC はりの破壊性状について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-3，pp.541-546，1988
- 2) 辻ほか：FRP で補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-3，pp.547-552，1988
- 3) 三上ほか：組紐状 FRP ロッドによるスパイラル筋を用いた RC 梁の曲げ・せん断性状，コン

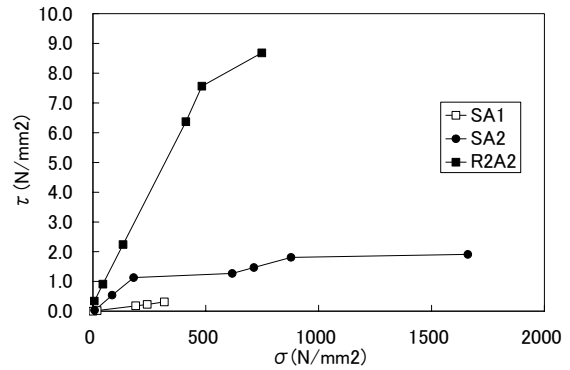


図-9 アラミド繊維の付着応力度

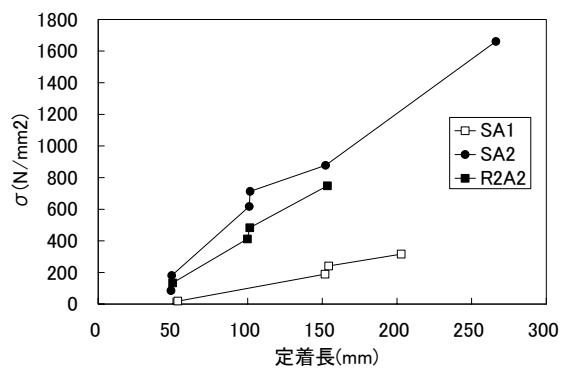


図-10 アラミド繊維の定着長

クリート工学年次論文報告集，Vol.11-1，pp.813-818，1989

4) 平田ほか：組紐状 FRP ロッドをせん断補強に用いたコンクリート梁のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12-1，pp.1129-1134，1990

5) 中田ほか：紐状炭素繊維を用いたせん断補強効果について，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第5巻，pp-81-84，2005

6) Nguyen Hung PHONG : EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH CONTINUOUS FIBER ROPE, コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第5巻，pp-81-84，2005

7) アラミド補強研究会：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)，平成10年1月