

# 可撓性に優れたアラミド繊維せん断補強材の研究

## Study of the Flexible Aramid Rope for Shear Reinforcements

浅井 洋 HIROSHI ASAI

中島 規道 NORIMICHI NAKAJIMA

川上 健太郎 KENTAROU KAWAKAMI

東北支店 竹之井 勇 ISAMU TAKENOI

帯鉄筋など曲げ加工が必要な部位に FRP 材を用いるためには、工場であらかじめ曲げ成型を行う必要があった。本研究では、連続繊維に樹脂を含浸しないことで、現場において容易に曲げ加工を可能にした可撓性に優れたせん断補強材に着目した。連続繊維の加工形状を変えた補強材をせん断補強材に用いた梁の載荷実験を実施し、せん断補強効率のよい補強材について検討した。この結果、帯状のアラミド繊維補強材は、優れたせん断補強効果を有することが示された。

**キーワード**：連続繊維補強材，アラミド繊維，せん断試験，せん断補強材

In order to use the bended FRP reinforcements, it needed to be processed in advance at the factory. The aramid fiber ropes, which have not impregnated with resin, were developed in this study. As a result, they keep flexibility and can be bent easily on site. The shear experiments of the beam, which was reinforced with the aramid fiber ropes weaved in various shape, were carried out. As a result of these experiments, it proved that the belt-shaped aramid fiber is effective for shear reinforcements.

**Key Words**: Fiber Reinforced Plastics, Aramid Fiber, Shear Test, Shear Reinforcements

### 1. 目的

海浜地区などの飛来塩分の多い地域のコンクリート構造物は、塩害による劣化が問題となっている。プレストレストコンクリートなどに使用される富配合コンクリートは、中性化による劣化よりも塩害による腐食が深刻な問題である。コンクリート表面に付着した飛来塩分は、内部との濃度差によって浸透するため、コンクリート表面付近の塩化物イオン濃度は高く、内部に至るにつれて低くなる。したがって、かぶり厚が小さい構造物では、早期に鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなり、鉄筋表面の不動態皮膜の損傷が生じる。また、外部からの水分や酸素の供給も容易であり、鋼材の腐食が進展しやすい。梁部材では一般に帯鉄筋が最外部に位置するため、帯鉄筋から腐食が生じる場合が多い。鉄筋防錆対策として、かぶり厚の確保が重要であるが、供用年数と環境条件から、現実的なかぶり厚にならない場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用やコンクリート表面被覆が行われている。また、電気防食の採用、ステンレス鉄筋やステンレスクラッド鉄筋の使用などが検討されている。しかし、これらの対策では、鋼材を補強材として使用している以

上、根本的な問題解決はなされていない。すなわち、かぶり厚確保の限界、鉄筋表面の樹脂被覆の不完全性<sup>1)</sup>、コンクリート表面被覆による内部水分の逸散不完全性など鉄筋腐食に対する懸念事項が完全に解消されるわけではない。

そこで、耐久性に優れたアラミド繊維を用い、樹脂を含浸して成型したFRP補強材（以下、AFRP補強材）を開発し、実構造物にも使用してきた<sup>2,3)</sup>。AFRP補強材はあらかじめ製造工場で行い、樹脂を熱硬化させて製造する必要があり、現場で曲げ加工することは困難であった。

本研究では、樹脂を含浸していないアラミド繊維を組紐状あるいは帯状に加工したせん断補強材をコンクリート部材中に配置し、その補強効果を把握することを目的に梁の載荷実験を行った。

### 2. 実験方法

#### (1) アラミド繊維補強材

補強材に使用したアラミド繊維の性能を表-1に示す。アラミド繊維は、ヤング係数および破断伸度の異なる2

表-1 アラミド繊維の性能

記号	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸度 (%)
A1	3,430	72,600	4.6
A2	2,744	130,000	2.4

種類の繊維を使用した。アラミド繊維を、帯状あるいは組紐状に加工したものを本稿ではアラミド繊維補強材と称す。アラミド繊維補強材は、樹脂によって固着していないため、容易に形状を変えることができる。アラミド繊維補強材の保証耐力および形状寸法を表-2に示す。

写真-1に示すように、帯状の補強材は、厚さを薄く織り上げている。このため、軸方向に繊維を直線に引き揃えた棒状補強材に比べて、曲げ加工部に生じる内外差が小さく、繊維のたるみが生じにくい。また、帯状の加工は、断面積に対してコンクリートとの接触面積が大きくなることから、コンクリートとの付着が期待できる。

B1-A1とB1-A2は、繊維の種類が異なる補強材である。形状はほぼ同じであるが、繊維の織加工方法が異なっており、B1-A1のほうが比較的細かい目で織られている。B2-A1は厚い帯材であり、耐力は大きいですが、単位断面積当たりのコンクリートとの付着面積は減少する。B2-A2は、B1-A2を幅60mmに加工し、二つ折りにして幅30mmにしたものである。

組紐状に加工した補強材は、繊維束が補強材の表裏に織り込まれており、曲げ加工部に生じる内外差を繊維の織り加工と繊維束の微少なずれによって吸収できる。曲げ加工部では、補強材断面は扁平に変形して追従する。また、繊維を編み込むことで補強材の表面に凹凸が生じ、付着力の向上が期待できる。R1-A2、R2-A2およびR3-A2は組紐径を変えたものである。

(2) 梁試験体

梁試験体の一覧を表-3に示す。試験は2シリーズ行った。各シリーズでは、コンクリートが分担するせん断耐力を把握するため、せん断補強材を用いない梁試験を実施した。また、アラミド繊維と比較するため、D10、D13、およびD16の3種類の帯鉄筋(SD345)を使用した。表中の帯鉄筋の保証荷重は、実測した降伏荷重である。シリーズ1では、2種類のアラミド繊維と組紐について検討を行った。S1B1A1とS1B1A2はアラミド繊維の種類と帯状の加工方法が異なる試験体である。S1B2A1はS1B1A1より帯の厚さが厚い補強材である。S1R2A2およびS1R3A2は組紐の径が異なる補強材である。シリーズ2は、シリーズ1の結果を踏まえた試験体である。S2R1A2-3およびS2R1A2-5は、補強材の付着

表-2 アラミド繊維補強材

記号	繊維の種類	保証耐力 (kN)	補強材形状	
			形状	寸法
B1-A1	A1	36.8	帯状	幅30mm, 厚さ0.57mm
B2-A1	A1	156.0	帯状	幅30mm, 厚さ4mm
B1-A2	A2	36.8	帯状	幅30mm, 厚さ0.57mm
B2-A2	A2	73.6	帯状	幅30mm, 厚さ1.14mm
R1-A2	A2	20.1	組紐状	断面積17.5mm <sup>2</sup>
R2-A2	A2	61.2	組紐状	断面積45.5mm <sup>2</sup>
R3-A2	A2	81.5	組紐状	断面積59.5mm <sup>2</sup>

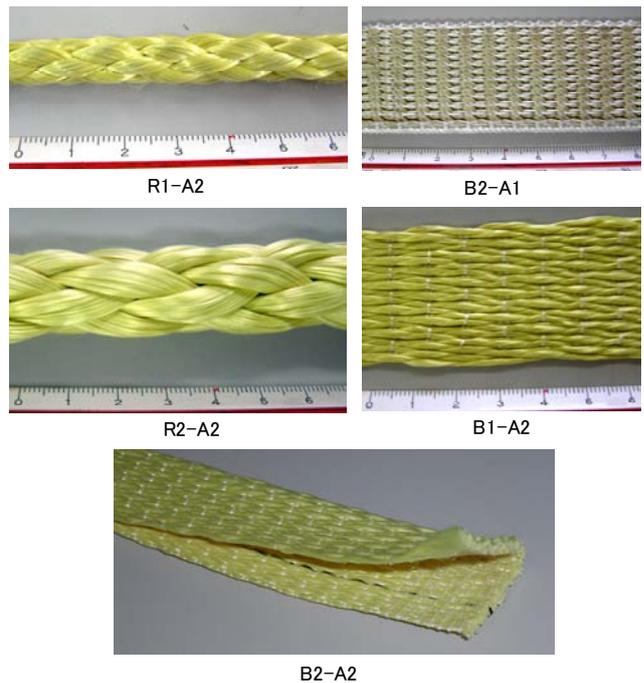


写真-1 アラミド繊維補強材の形状

表-3 せん断試験体一覧

シリーズ	No.	記号	補強材の種類	補強材量 <sup>※1</sup>	補強材の保証荷重 <sup>※2</sup> (kN)	補強材の間隔 (mm)
1	1	S1N	無	—	—	—
	2	S1D10	D10	1	30.4	150
	3	S1D13	D13	1	48.6	150
	4	S1D16	D16	1	74.7	200
	5	S1B1A1	B1-A1	1	36.8	150
	6	S1B2A1	B2-A1	1	156.0	250
	7	S1B1A2	B1-A2	1	36.8	150
	8	S1R2A2	R2-A2	1	61.2	200
	9	S1R3A2	R3-A2	1	81.5	150
2	10	S2N	無	—	—	—
	11	S2D13	D13	1	50.6	150
	12	S2D16	D16	1	76.3	200
	13	S2R1A2-3	R1-A2	3	60.3	150
	14	S2R1A2-5	R1-A2	5	100.5	200
	15	S2B1A2	B1-A2	1	36.8	100
	16	S2B2A2	B2-A2	1	73.6	200

※1 補強筋量：一組のせん断補強材の構成本数

※2 補強材の保証荷重：一組のせん断補強材の保証荷重であり、鉄筋の場合は実降伏強度、アラミド繊維の場合は保証強度に断面積を乗じて算出した値

を高めるため、細径の組紐を使用して単位断面積当たりの表面積の割合を大きくした。さらに、補強材の引張荷

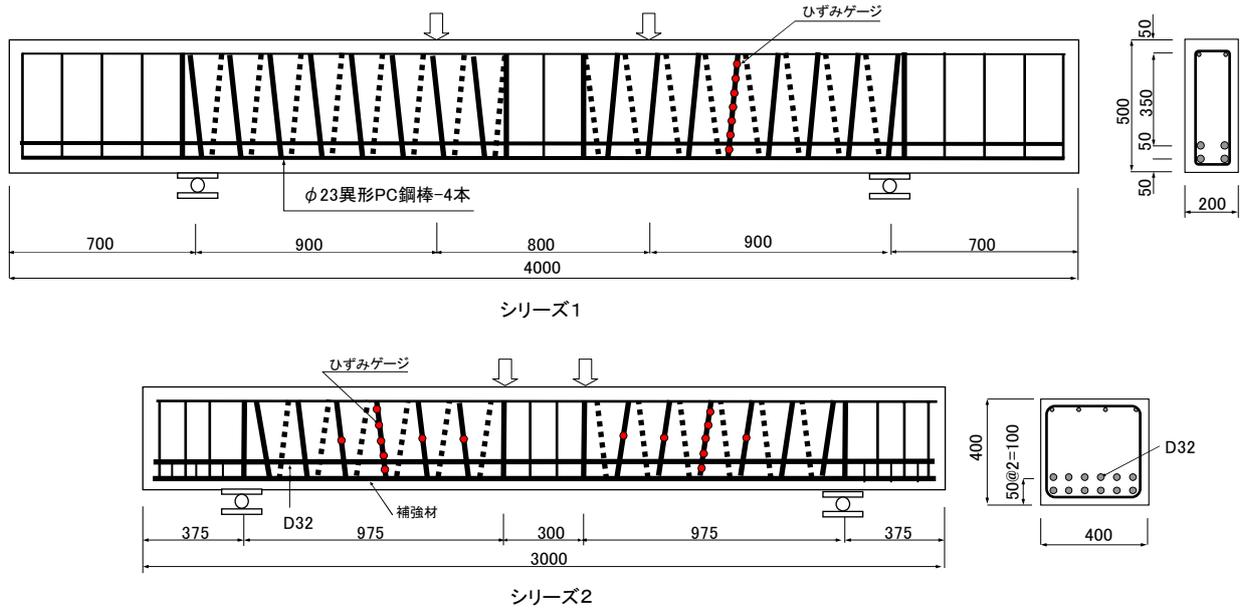


図-1 梁試験体形状

重増加を目的として並列に複数本配置した。S2B2A2は二つ折りにすることで補強材の引張荷重を大きくすることを狙ったものである。

梁試験体形状を図-1に示す。シリーズ1は、梁高500mm、幅200mmの矩形断面で、主圧縮鉄筋はD13を2本、主引張鉄筋はφ23mm異形PC鋼棒4本とした。帯鉄筋が部材軸となす角度は90度である。アラミド繊維補強材は、せん断スパン区間を螺旋状に巻き付け、端部をエポキシ樹脂で固定した。補強材は、コンクリート打込み時に位置がずれないように合成樹脂製結束帯で主鉄筋に固定した。目標コンクリート強度は40N/mm<sup>2</sup>である。

(3) 載荷試験

載荷方法は、図-1に示すように、2点載荷とした。シリーズ1のせん断スパンと有効高さの比(a/d)は2.1であり、シリーズ2はa/d=3.0とした。せん断補強材の情報を得るため、せん断補強材にひずみゲージを取り付けた。アラミド繊維補強材は、繊維束間が固着されていないため、直接ひずみゲージを取り付けることが困難であった。そのため、取付位置を幅20mm程度樹脂で固着して、その表面に測長5mmの箔ゲージを取り付けた。また、せん断スパンに生じるひび割れ幅をπ型変位計で測定した。

3. 実験結果と考察

(1) せん断耐力と破壊状況

実験結果を表-4に示す。せん断耐力計算値1は、コン

表-4 実験結果

シリーズ	記号	せん断耐力計算値1 (1) (kN)	せん断耐力計算値2 (2) (kN)	実測最大荷重 (3) (kN)	(3)/(1) (%)	(3)/(2) (%)	破壊形状	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	S1N	185	185	406	220	220	せん断	43.0
	S1D10	483	—	755	156	—	せん断	42.5
	S1D13	664	—	953	144	—	せん断	43.0
	S1D16	739	—	941	127	—	曲げ	44.7
	S1B1A1	548	264	407	74	154	せん断	47.1
	S1B2A1	1,085	302	355	33	118	せん断	47.1
	S1B1A2	548	264	808	147	306	曲げ	47.1
	S1R2A2	633	294	494	78	168	せん断	47.0
	S1R3A2	984	329	733	74	223	せん断	47.4
	S2N	352	352	462	131	131	せん断	39.4
2	S2D13	733	—	1,151	157	—	せん断	39.4
	S2D16	783	—	1,220	156	—	せん断	39.4
	S2R1A2-3	796	593	700	88	118	せん断	37.4
	S2R1A2-5	918	648	740	81	114	せん断	41.7
	S2B1A2	786	568	1,030	131	181	せん断	47.8
	S2B2A2	782	567	794	102	140	せん断	48.2

クリート標準示方書<sup>4)</sup>(以下、標準示方書)に基づいて算出した値である。アラミド繊維補強材によって受け持たれるせん断耐力を式(1)で算出した。

$$V_{AF1} = \frac{A_{AF} f_{AFd} d (\sin \alpha_{AF} + \cos \alpha_{AF})}{1.15 s_{AF}} \quad (1)$$

ここに、

- V<sub>AF1</sub> : アラミド繊維補強材が負担するせん断耐力
- A<sub>AF</sub> : 単位幅当たりの断面積 (mm<sup>2</sup>)
- f<sub>AFd</sub> : 保証引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- d : 有効高 (mm)
- α<sub>AF</sub> : 部材軸となす角度
- s<sub>AF</sub> : ピッチ (mm)

せん断耐力計算値2は、連続繊維補強材を用いたコン

クリート構造物の設計・施工指針(案)<sup>5)</sup>(以下、指針(案))に基づいて算出した値である。アラミド繊維補強材によって受け持たれるせん断耐力を式(2)で算出した。

$$V_{AF2} = \frac{A_{AF} E_{AFd} \epsilon_{AF} d (\sin \alpha_{AF} + \cos \alpha_{AF})}{1.15 s_{AF}} \quad (2)$$

ここに、

$V_{AF2}$ : アラミド繊維補強材が負担するせん断耐力

$E_{AFd}$ : せん断補強材のヤング係数

$\epsilon_{AF}$ : 終局限界状態におけるせん断補強材ひずみ

$$\epsilon_{AF} = \sqrt{f'_{mc} \frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w}} \times 10^{-4}$$

$f'_{mc}$ : 寸法効果を考慮したコンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

$$f'_{mc} = \left( \frac{h}{0.3} \right)^{-1/10} \cdot f'_c$$

$p_w$ : 引張補強材比

$E_{fu}$ : 引張補強材のヤング係数

$p_{web}$ : せん断補強材比

$E_w$ : せん断補強材のヤング係数

$h$ : 部材の高さ (m)

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

載荷試験で得られた最大荷重と両計算値との比を表中に示した。実験時のコンクリート圧縮強度は、37.4～48.2  $N/mm^2$ であった。

帯鉄筋を用いた梁は、計算値1を満足している。アラミド繊維補強材を用いた梁では、B1-A2およびB2-A2の帯状補強材が、両計算値を満足し、他のアラミド繊維補強材は、計算値2を満足している。

シリーズ1の荷重たわみ曲線を図-2に示す。各試験体は35～55kNで曲げひびわれが発生し、264～285kNで載荷点と支点とを結ぶ位置に斜めひび割れが生じた。S1D13、S1D16およびS1B1A2は、載荷スパン内の上縁コンクリートが圧縮破壊し、曲げ破壊を示した。残りの試験体はすべて斜めひびわれ延長線上のコンクリートが破壊した。アラミド繊維A1の帯状補強材を使用したS1B1A1とS1B2A1は、無補強試験体S1Nと同程度の破壊耐力であり、せん断補強材としての効果が認められなかった。

シリーズ2の荷重たわみ曲線を図-3に示す。各試験体は40～100kNで曲げひび割れが発生し、480～524kNで斜めひびわれが支点と載荷点を結ぶ位置に生じた。斜め

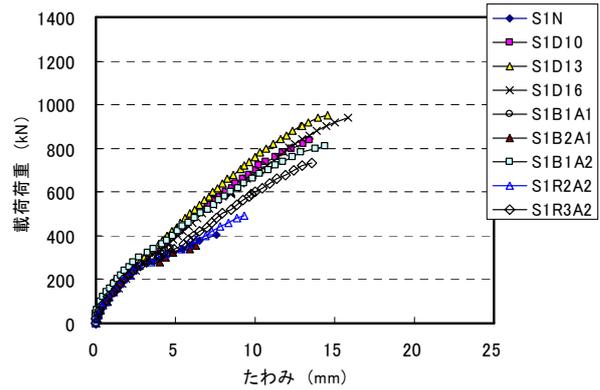


図-2 荷重たわみ曲線(シリーズ1)

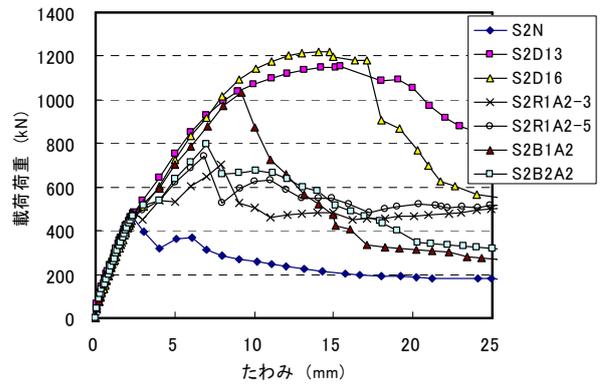


図-3 荷重たわみ曲線(シリーズ2)

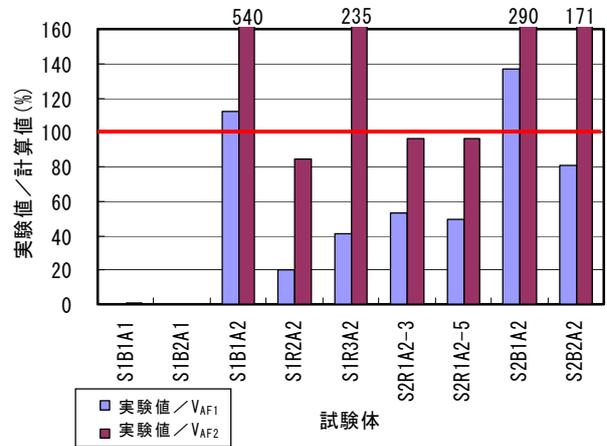


図-4 補強材が負担した耐力の割合

ひび割れが生じると、S2Nの耐力は低下する。補強材を配置した試験体は、ひび割れ後も荷重の増加が認められ、斜めひび割れが進展してせん断破壊に至った。

斜めひび割れが生じるまでは、帯鉄筋とアラミド繊維補強材とで、たわみに差は認められない。S1B1A2およびS2B1A2のひび割れ発生後のたわみは、帯鉄筋に近い傾向を示しているが、他のアラミド繊維補強材は、帯鉄筋に比べて大きい傾向が認められる。

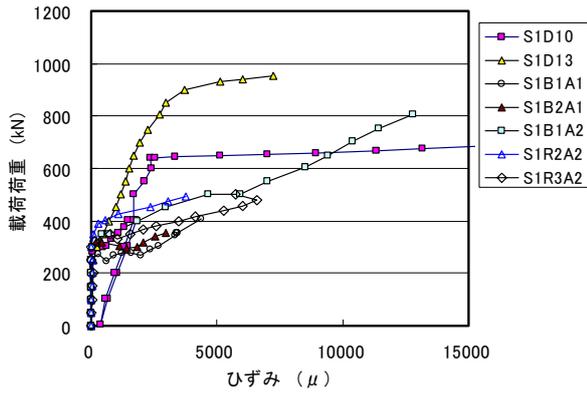


図-5 補強材ひずみ (シリーズ 1)

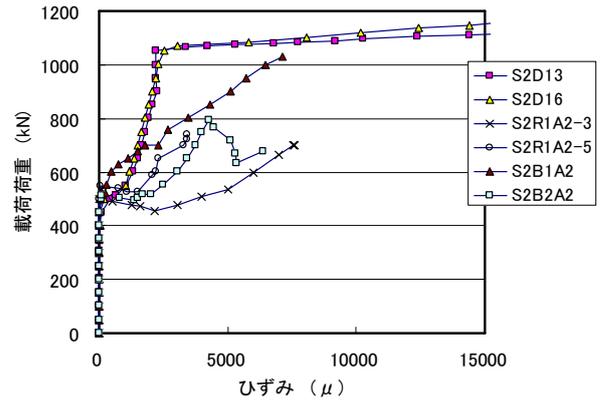


図-6 補強材ひずみ (シリーズ 2)

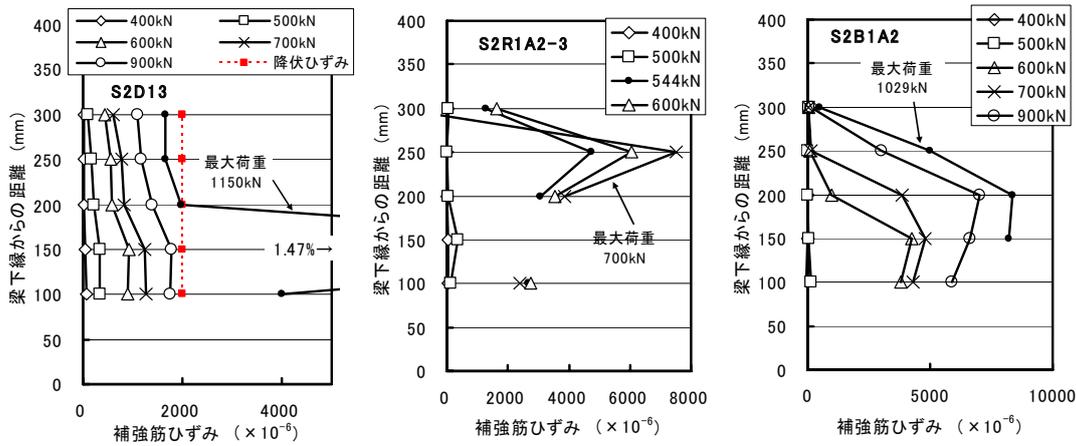


図-7 補強材ひずみ分布

(2) せん断補強材の負担耐力

図-4に計算値に対するアラミド繊維補強材が負担するせん断耐力の割合を示す。アラミド繊維補強材が負担するせん断耐力は、各試験体の最大荷重から無補強試験体の最大荷重を差し引いて求めた値である。計算値 $V_{AF1}$ および $V_{AF2}$ は、それぞれ式(1)および式(2)で算出した値である。

S1B1A1 および S1B2A1 の最大荷重は、無補強試験体の最大荷重と同程度のため、補強材はせん断耐力を負担しない結果となっている。B1-A2を用いた S1B1A2 および S2B1A2 は、 $V_{AF1}$ に対する割合が 100%を超えており、標準示方書による算出方法と同等以上の良好な補強効果が得られている。一方、 $V_{AF2}$ に対しては、十分大きな割合となっており、B1-A2を用いた補強材が負担するせん断補強耐力は、指針(案)による算定式では過少評価される結果となっている。S2B2A2 は、S2B1A2 よりも補強効果が小さく、二つ折りにした内面がコンクリートと付着していないことが原因の一つと考えられる。

組紐形状では、 $V_{AF1}$ に対する割合が 50%程度であるが、 $V_{AF2}$ に対してはおおむね計算値に近い値が得られて

いる。この結果より、せん断補強材の負担耐力を比較すれば、組紐状補強材に比べ、薄型の带状補強材によるせん断補強が効果的であると考えられる。

(3) 補強材ひずみ

補強材ひずみと荷重の関係を図-5および図-6に示す。図には、斜めひび割れ発生位置に近く、測定ひずみの大きい位置を示した。斜めひび割れが生じる前は、鉄筋や補強材のひずみはほとんど増加していないのに対して、斜めひび割れが生じるとひずみは増加する。帯鉄筋は降伏点に達すると、ひずみの増加が著しい。アラミド補強材のひずみは、ひび割れ後の載荷荷重に対して、おおむね線形的に増加していることから、ひび割れ後の載荷荷重の増加は補強材が負担していると考えられる。

図-7にシリーズ2のせん断補強材のひずみ分布を示す。S2D13は、破壊近くになると斜めひび割れ近傍で鉄筋が降伏し、局部的に大きなひずみが生じる。アラミド繊維補強材を用いた S2R1A2-3 および S2B1A2 も同様に斜めひび割れ近傍で大きなひずみが生じるが、降伏点がないため帯鉄筋のような著しいひずみ増加は示さない。

また、S2B1A2の比較的損傷の少ない圧縮縁隅角部付近（梁下縁からの距離300mm）では、せん断補強材のひずみは小さく、200mm付近のひび割れ位置に生じた補強材張力は約100mmの区間で定着されている。

(4) ひび割れ幅

載荷荷重とひび割れ幅の関係を図-8および図-9に示す。シリーズ1は、せん断ひびわれが生じた後、除荷してπ型変位計を取り付け、再度載荷したときのひび割れ幅の増加を示している。したがって、載荷開始とともにひび割れ幅が増加する結果となっている。一方、シリーズ2では、試験前よりπ型変位計をあらかじめ設置したため、斜めひび割れ発生とともにひび割れ幅が増加している。このように、測定方法の違いによって初期の傾向は異なるが、アラミド繊維補強材を用いた梁のひび割れ幅の増加は、帯鉄筋を用いたものに比べて大きい傾向にある。なかでも、組紐状の補強材は、ひび割れ幅の開口が大きい。ひび割れ幅がおおむね3mm程度に達すると試験体はせん断破壊を生じている。一方、B1-A2補強材を用いたS1B1A2は、S1D10と同程度のひび割れ幅であり、S2B1A2はS2D13と同程度にひび割れ幅の開口を小さく制御している。この結果、コンクリートが負担するせん断耐力の低下が小さく抑えられ、高いせん断耐力が得られたと考えられる。

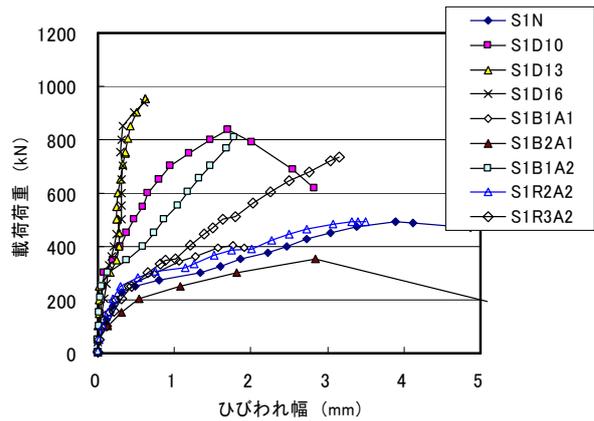


図-8 ひび割れ幅（シリーズ1）

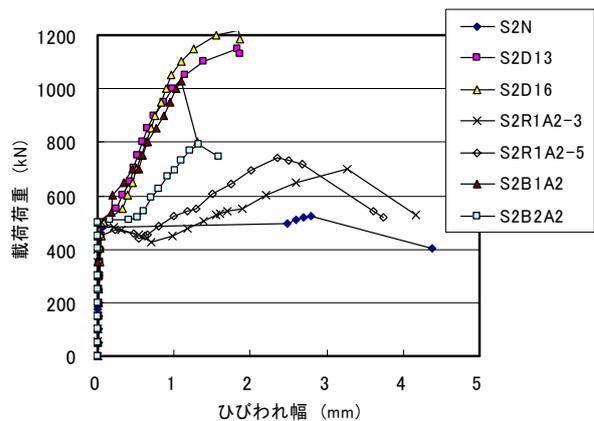


図-9 ひび割れ幅（シリーズ2）

4. 結論

- ①ヤング係数の低いアラミド繊維 A1 を带状に加工した補強材は、せん断補強効果が得られなかった。
- ②アラミド繊維 A2 を带状に加工した B1-A2 補強材は、良好なせん断補強効果があり、コンクリート標準示方書に基づいて算出した計算値と同程度のせん断補強効果が得られた。
- ③組紐状に加工した補強材は、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）に基づいた計算値と同程度のせん断補強効果が得られた。
- ④B1-A2補強材を用いた梁のたわみは、帯鉄筋と同様の挙動を示し、組紐状に加工した補強材を用いた梁のたわみは、帯鉄筋の値に比べて大きい。
- ⑤アラミド繊維補強材のひずみは、斜めひび割れが生じた後、載荷荷重に対しておおむね線形的に増加し、せん断耐力に寄与する。
- ⑥アラミド繊維補強材を用いた梁のひび割れ幅は、帯鉄筋を用いた場合に比べて大きくなるが、B1-A2補強材を用いた場合は、ひび割れ幅を小さく制御でき

る。

参考文献

- 1) 浅井洋, 石井浩司, 守屋進, 大澤隆英: 海上飛沫部に20年暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋の引張性能, プレストレストコンクリート技術協会第15回シンポジウム論文集, 2006.10
- 2) 三上浩, 加藤正利, 田村富雄: 組紐状FRPロッドによるスパイラル筋のせん断補強効果について, 土木学会年次学術講演会, Vol.44, V-130, pp.314-315, 1989.10
- 3) 岡野素之, 木村耕三, 熊谷紳一郎, 中井祐司: 連続繊維補強材のせん断補強筋への適用性に関する実験, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム, 土木学会, pp.205-210, 1992
- 4) 土木学会: 2002制定コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編], 2002
- 5) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）, コンクリートライブラリー88, 1995