

## 樹脂を含浸しない帯状アラミド繊維補強材の曲げ部材への適用に関する一考察

三井住友建設(株) 正会員 ○浅井 洋  
 三井住友建設(株) 正会員 工修 中島 規道  
 三井住友建設(株) 正会員 工修 三加 崇  
 三井住友建設(株) 正会員 博士(工学) 三上 浩

### 1. はじめに

飛来塩分による塩害が懸念される橋梁では、コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透により、供用期間中に鋼材が腐食しないかぶりを設定している。かぶりを確保するだけでは鋼材位置の塩化物イオン濃度を腐食発生限界濃度に抑えることができない場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用やコンクリート表面塗装が行われている。著者らは、このような厳しい環境における橋梁の長寿命化を図るため、PC鋼材や鉄筋の代替としてアラミド繊維を用いた緊張材および連続繊維補強材の開発を行ってきた<sup>1),2)</sup>。連続繊維補強材をせん断補強筋などに使用する場合には、あらかじめ所定の形状に成型しなければならない。そこで、現場で容易に曲げ加工や配置が行える補強材として、樹脂を含浸しない帯状アラミド繊維補強材（以下、補強材）の適用について検討を行っている。本稿では、曲げ加工を要するせん断補強筋への適用に先立ち、曲げ部材に用いてひび割れが生じた場合の補強効果について検討を行った。

### 2. アラミド繊維補強材

#### 2.1 形状

本試験で使用したアラミド繊維補強材は、補強材の軸方向をアラミド繊維、軸直角方向をナイロン繊維またはポリエステル繊維を使用して帯状に織った補強材である。従来の連続繊維補強材のように樹脂を含浸して固着しないため、曲げ配置などに対して繊維間が柔軟にずれて変形に追従することができる。補強材を構成するアラミド繊維は、表-1に示す2種類である。補強材は、写真-1および表-2に示す4種類であり、それぞれの幅および厚さが異なる織り方である。また、アラミド連続繊維補強材(TA-ARφ7.4)を比較として用いた。記号の頭文字は繊維の種類を示している。補強材は、繊維束を織ることにより表面に凹凸が形成されている。各補強材の凹凸寸法を表-2に示した。TA-S70およびKA-S20は、繊維の凹凸も小さく、繊維束が直線に近い状態で織られている。TA-S27およびTA-S20は、直線に近い繊維束と凹凸を形成するための繊維束で構成されている。TA-ARφ7.4は、母材繊維は直線に配置されビニルエステル樹脂で成型されたもので、周囲に繊維束を巻き付けて凹凸を形成している<sup>3)</sup>。

表-1 アラミド繊維

記号	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	破断伸度 (%)
TA	3,430	72.6	4.6
KA	2,740	130.0	2.4

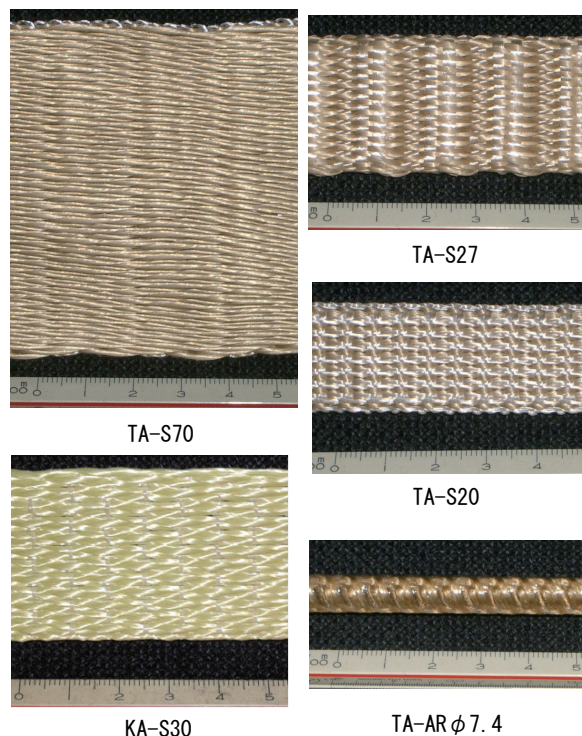


写真-1 アラミド繊維補強材

#### 2.2 引張強度および見かけのヤング係数

樹脂を含浸しないアラミド繊維補強材には、保証

耐力が設定されていないため、繊維の引張強度と補強材の断面積との積を引張荷重として表-2 に示した。また、補強材に張力が作用すると、繊維の弾性変形による伸びと織られた繊維が直線に変形しようとする伸びが生じる。このため、同じ繊維を用いても、繊維の織り方によって変形量が異なることが考えられるため引張試験をおこなった。引張試験体は、全長700mmとし、試験体の両端100mmをエポキシ樹脂で板状に固め、その表面を鋼製のくさびで定着した。ヤング係数は、400mmの間隔に設けた標点間の変形量を変位計で測定して算出した。この結果を見かけのヤング係数として表-2 に示した。試験体の破壊は、定着くさび近傍で生じており、厚い補強材は定着部から繊維束がすべり抜ける現象も認められた。破壊荷重を表中に引張荷重実驗値として示す。

3. RC梁の荷重試験

3.1 試験体

試験体形状を図-1 に示す。試験体断面は、高さ300mm、幅150mmである。圧縮側の主鉄筋にはD16を2本、引張側は、鉄筋またはアラミド繊維補強材を配置した。アラミド繊維補強材は、端部で折り曲げて梁上縁まで延ばして定着した。試験体の一覧および荷重試験時のコンクリート強度を表-3 に示す。

3.2 荷重および測定方法

試験方法は、図-1 に示すように支間2300mm、荷重スパン600mmの2点荷重とした。アラミド繊維補強材のひずみ測定は、樹脂で固着しなければ表面にひずみゲージを取り付けることが困難である。補強材を樹脂で固着すると本来の性能と異なることが懸念されたため、本実験ではひずみゲージを取り付けていない。補強材の変形は、引張補強材が配置された梁鉛直方向の高さに合わせて変位計を配置し、荷重スパン間の補強材の変形量を間接的に測定した。また、パイ型変位計を載

表-2 補強材の形状および引張試験結果

記号	幅 (mm)	厚さ <sup>※1</sup> (mm)	凸部の間隔 <sup>※2</sup> (mm)	凸部の高さ <sup>※2</sup> (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (kN)	見かけのヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張荷重実驗値(kN)
TA-S70	70	1.8	8	0.6	53.9	184.8	52.2	108.0
TA-S27	27	3.2	14	0.9	45.5	156.0	60.2	49.1
TA-S20	20	5.5	5	1.3	49.0	168.0	55.4	81.1
TA-AR φ7.4	φ7.4	—	5	0.5	48.8 <sup>※3</sup>	108.8	46.0 <sup>※3</sup>	81.4 <sup>※4</sup>
KA-S30	30	1.4	8	0.3	12.9	36.8	128.8	34.7

※1 厚さ:繊維加工による凹凸を含む試験体の全厚さ

※2 凸部の間隔, 凸部の高さ:右図参照

※3 繊維および樹脂の断面を考慮した値<sup>3)</sup>

※4 保証強度<sup>3)</sup>

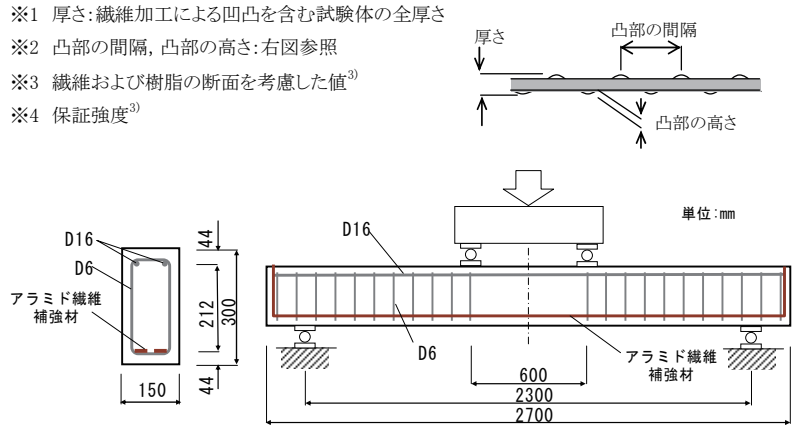


図-1 梁試験体および荷重方法

表-3 引張補強材に使用した梁試験体一覧

記号	補強材	配置本数	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ耐力(kN)	
				計算値	実測値
B-D10	D10	2	45.8	41.3	46.6
B-S70	TA-S70	1	46.7	59.2	56.3
B-S27	TA-S27	2	46.7	84.4	60.6
B-S20	TA-S20	2	46.3	95.4	57.9
B-AR7	TA-AR φ7.4	2	46.7	69.4	90.5
B-KS30	KA-S30	2	53.4	50.5	43.8

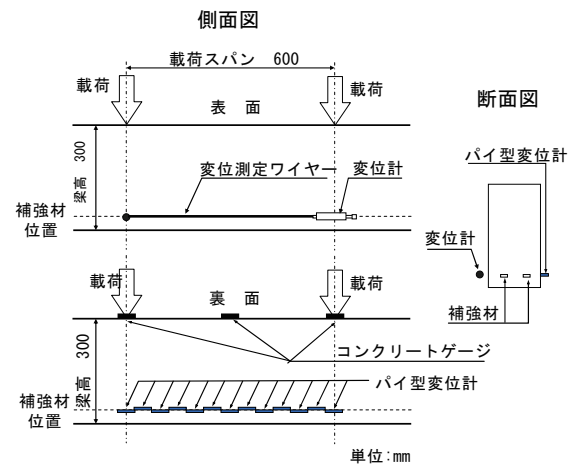


図-2 変位計配置図

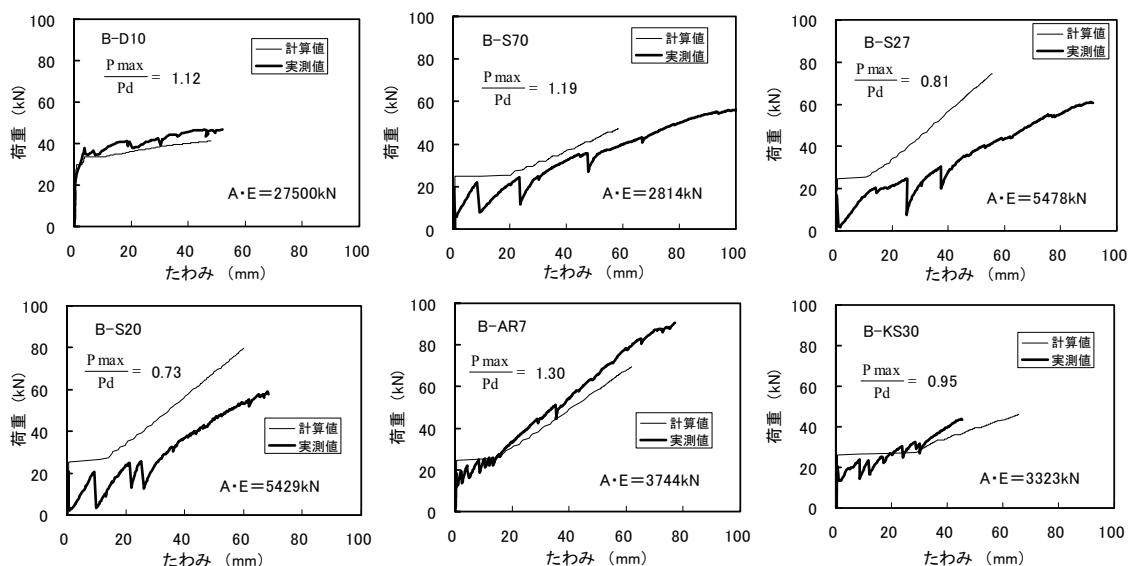


図-3 荷重とたわみの関係

荷スパン全域に設置し、曲げひび割れ幅を測定した。変位計の配置を図-2に示す。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 荷重-たわみ曲線

計算値は、断面分割法によって求めた結果である。試験体断面を高さ方向に均等に60分割(1層5mm)し、補強筋重心位置に補強筋要素を設けた。梁長さ方向の要素は、梁の長さを均等に54分割(1要素50mm)したものである。コンクリートの応力とひずみの関係は、 $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体の圧縮試験より得られた応力とひずみの関係をトリリニアモデルでモデル化した。鉄筋の降伏点およびヤング係数は実測値を用い、アラミド繊維補強材は、引張試験で得られた見かけのヤング係数を用いた弾性体とした。

載荷荷重と支間中央のたわみとの関係を図-3に示す。荷重が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 程度で曲げひび割れが生じ、荷重が上下を繰り返しながらたわみが増加する領域と、荷重とたわみが線形的に増加する領域とが存在する。前者は、曲げひび割れが順次生じ、本数が増加している領域である。荷重が小刻みに上下している試験体は、ひび割れの発生が多く、載荷スパンを中心に分散している。この領域では、コンクリートが受け持っていた引張力を補強材が負担することになるため、伸び剛性(補強材の断面積Aとヤング係数Eの積、図-3)が大きいほどひび割れ発生時のたわみの増加は小さくなる。しかしながら、B-S27およびB-S20は、B-KS30より伸び剛性が大きいにもかかわらず、たわみが約30mmを超えなければ荷重の増加が認められない。これは、補強材とコンクリートとの付着力がB-KS30より小さいことが要因の一つと考えられる。後者の領域では、ひび割れの発生が落ち着き、ひび割れ幅の拡大とたわみの増加が進行する。降伏点のないアラミド繊維補強材は、鉄筋と異なり直線的に増加する。実測値と計算値とを比較すると、B-D10およびB-AR7は計算値とおおむね一致している。アラミド繊維補強材を用いたB-S70およびB-KS30は計算値に近い値を示しているが、B-S27およびB-S20は、初期に生じたたわみの増加に加え、荷重増加に対して若干たわみが増加する曲線を描き計算値よりたわみが大きい結果となっている。これは、次節で述べるコンクリートとの付着による応力伝達長が長くなっていることが原因と考えられる。曲げ耐力の実測値と計算値を表-3に示す。また、実測値と計算値の比( $P_{max}/P_d$ )を図-3に示す。計算に用いた補強材耐力は、繊維強度から算出した理想的な引張強度を用い、圧縮縁コンクリートのひずみが0.0035に達したときとしている。全ての試験体は圧縮縁コンクリートの破壊であるが、B-S70およびB-AR7では、補強材の破断も認められた。

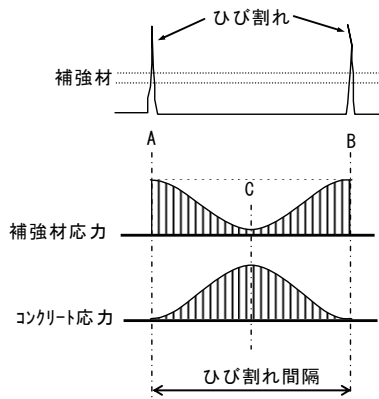


図-4 ひび割れ位置の応力概念図

#### 4.4 ひび割れ

アラミド繊維補強材を用いた梁のひび割れ間隔およびひび割れ幅は、鉄筋を用いた場合と同様と考えられ、図-4に示すように補強材の付着が影響する。すなわち、補強材の応力度はひび割れが生じた断面Aおよび断面Bで最大を示し、付着によって引張力がコンクリートに伝達される。これにともないコンクリートの引張応力度は増加し、ひび割れ間の中央で最大を示す。外力が増加してコンクリートの引張応力度が引張強度を超えると断面Cにひび割れが発生する。付着が良い場合には、断面Aおよび断面Bから離れるにしたがい補強材応力度がコンクリートに伝達され、ひび割れ間隔は狭くなる。反対に、付着が悪い場合には、ひび割れ間隔は広くなる。また、ひび割れ幅は、ひび割れ発生によるコンクリート引張応力度の減少によるひずみを見無視すると、ひび割れ間の平均補強材ひずみにひび割れの間隔を乗じて求めることができる(断面A~Cの補強筋ひずみの面積の2倍)。

ひび割れ図を図-5に示す。補強材の種類によって曲げひび割れの間隔が異なっており、付着性能に違いがあることが明らかである。B-D10のひび割れ間隔と比較して、B-AR7の間隔は平均120mmでありほぼ同程度である。B-S70, B-S27およびB-S20の間隔は、上述の試験体に比べて明らかに広く、荷重位置および支間中央付近に合わせて3~4本のひび割れが生じている。荷重の増加にともなってひび割れ幅が増加して圧縮

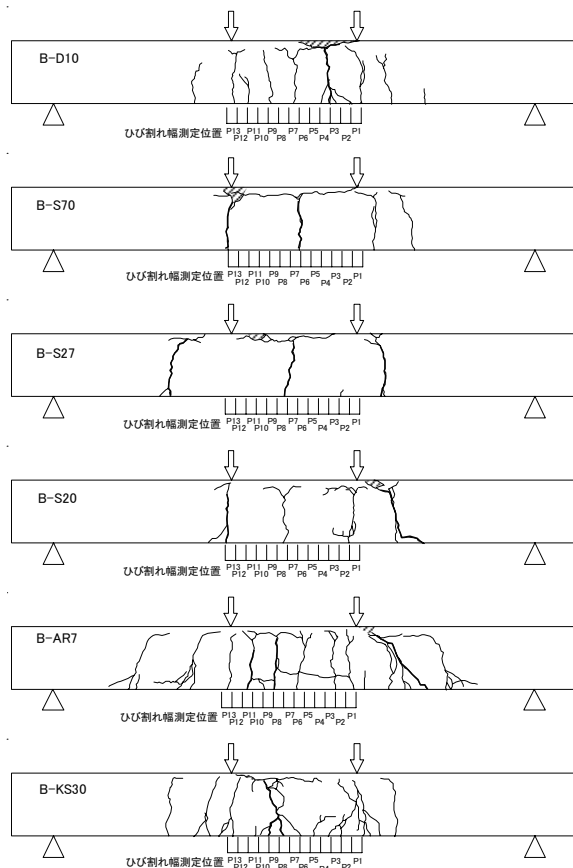


図-5 ひび割れ図

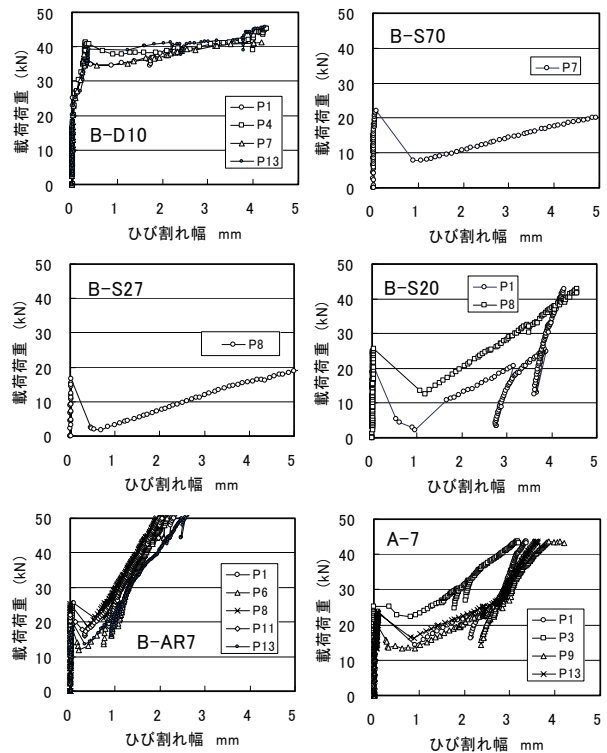


図-6 荷重とひび割れ幅の関係

縁コンクリートの破壊に至った。載荷荷重とパイ型変位計で測定したひび割れ幅の関係を図-6に示す。B-S70およびB-S27は、曲げひび割れが生じた後、荷重の増加に対するひび割れ幅の増加が大きい。これに対して、B-D10およびB-AR7は、ひび割れ幅の増加が小さく、それぞれのひび割れ幅の傾向がほぼ同じであることから、一方所に集中していないことが示されている。ひび割れの間隔およびひび割れ幅から判断すれば、本実験で用いたアラミド繊維補強材のうちKA-S30は、他の補強材に比べてひび割れ幅が小さいときから外力に対して抵抗し、ひび割れの分散も良いと考えられる。なお、本実験のB-S20およびB-KS30のひび割れのうち、グラフ下側のひび割れ(B-S20ではP1, B-K30ではP1, P9, P13)が、3mm程度で傾きを変えている。これは、他のひび割れの発生によって分散されたことが原因と考えられる。

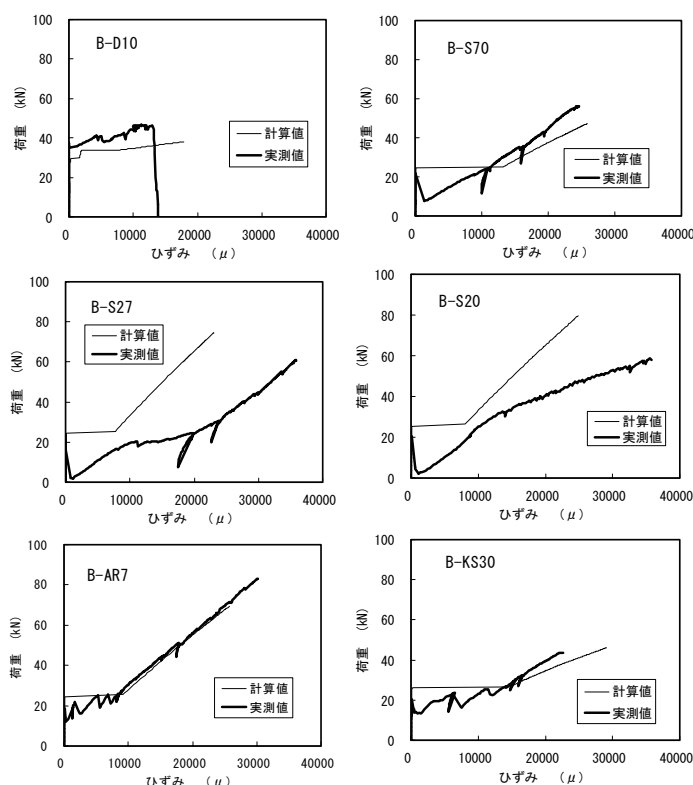


図-7 載荷荷重と補強材位置ひずみの関係

### 4.3 引張補強材位置のひずみ

載荷荷重と引張補強材位置ひずみの関係を図-7に示す。樹脂を含浸しないアラミド繊維補強材のひずみ測定では、補強材表面にひずみゲージを取り付けて測定することが困難であるため、試験体の載荷スパン間の長さ変化から補強材位置のひずみを式(1)により算出した。長さ変化を測定した標点は、コンクリート表面に設けたため、補強材とコンクリートとが一体として挙動した場合には補強材のひずみを示す。また、載荷途中で測定が困難になったものについては、測定できた範囲を示した。

$$\epsilon_c = \frac{\Delta L_{cs}}{L_{cs}} \tag{1}$$

ここに、 $\epsilon_c$  : 載荷スパンの平均ひずみ、 $\Delta L_{cs}$  : 載荷スパンの長さ変化、 $L_{cs}$  : 載荷スパン (=600mm)

実測値と計算値がおおむね一致している B-S70, B-AR7, および B-KS30 は、コンクリートと補強材とが一体として挙動していると言える。一方、計算値に比べて同一荷重でひずみが大きい B-S27 および B-S20 では、コンクリートとの付着が良好でないと推測される。すなわち、載荷スパン付近に生じたひび割れ断面では、外力による曲げモーメントに対して補強材の引張力と圧縮縁コンクリートの圧縮力で抵抗する。補強材の付着が全く期待できない場合には、ひび割れ断面に生じる補強材のひずみは、梁端部の定着位置まで一定となる。この結果、ひび割れ幅は付着がある場合に比べて大きくなり、載荷スパン間の長さ変化も大きくなる。アラミド繊維補強材の場合は、付着がある場合と全くない場合の間の挙動を示し、補強材からコンクリートへ引張力が伝達される距離が長くなり、補強材のひずみの増加が載荷スパンの長さ変化、さらにはたわみの増加につながったと考えられる。

### 4.4 補強材の表面形状

鉄筋およびPC鋼材を用いた部材の曲げひび割れ幅は、式(2)で算出される<sup>4)</sup>。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (2)$$

ここに、 $w$  : 曲げひび割れ幅(mm),  $k_1$  : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数,  
 $k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = \frac{15}{f'c + 20} + 0.7, \quad k_3 : \text{引張鋼材の段数の影響を表す係数 (=1.0), } c : \text{かぶり (mm), } c_s : \text{鋼材の中心間隔 (mm), } \phi : \text{鋼材径 (mm), } \sigma_{se} : \text{鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm}^2\text{), } E_s : \text{鉄筋のヤング係数, } \varepsilon'_{csd} : \text{コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 (本実験では, 0 とした), } f'c : \text{コンクリートの圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}$$

測定したひび割れ幅と式(2)の右辺のうち  $1.1k_2 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} (\sigma_{se}/E_s)$  の算出結果との関係を図-8 に示す。右辺の算出では、実測圧縮強度を用いて  $k_2$  を算出した。ひび割れが生じると載荷荷重に対して断面内で抵抗するのは補強材だけであることが明らかであるため、応力度の増加量  $\sigma_{se}$  には、載荷荷重に対応する補強材応力度の計算値を用いた。ヤング係数は、見かけのヤング係数を用いた。また、B-D10 試験体については、鉄筋の降伏応力度以下の範囲を示した。鉄筋の結果はわずかな範囲であるが、 $k_1=1.0$  と同程度以下であり妥当な結果が得られていると判断できる。B-AR7 は、鉄筋と同等の結果が得られており、ひび割れ幅を小さく抑える表面形状を有していると判断できる。反対に B-S27 は、 $K_1 > 1.3$  であり、ひび割れ幅が大きくなる断面形状を有していると判断できる。また、表-2 に示した表面の凹凸の高さが高いほど付着に寄与すると考えられたが、その傾向は認められなかった。

### 5. まとめ

本実験で使用したアラミド繊維補強材を RC 梁の引張補強材に使用した範囲で、次のことが明らかになった。

アラミド繊維補強材に樹脂を含浸しない場合でも、その形状や繊維の種類によって、曲げ補強およびひび割れの分散性が期待できることが明らかになった。本実験で用いたアラミド繊維補強材の中では、KA-S30 がひび割れ分散性や計算値との整合性がよい結果であった。

### 参考文献

- 1) 子守安博, 篠塚章, 水谷淳, 浅井洋 : アラミド FRP を緊張材に用いた PC 栈橋の建設, 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, JSCE, pp. 33-38, 1992
- 2) 三上浩, 加藤正利, 竹内光, 田村富雄 : 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11-1, pp. 813-818, 1989
- 3) 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), 1996
- 4) 土木学会 : 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2008

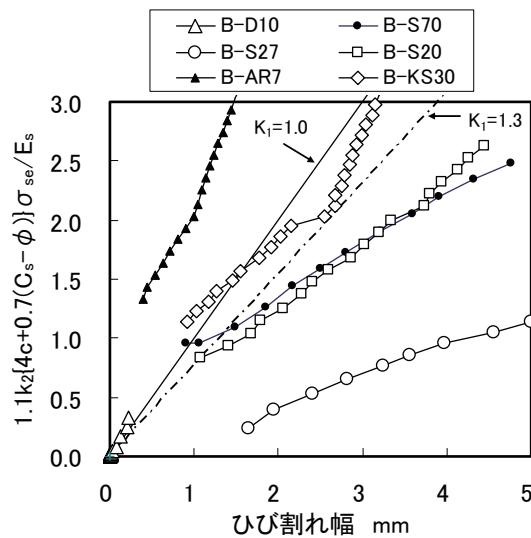


図-8 曲げひび割れ幅算定式とひび割れ幅の関係