

## コンクリート表面近傍にアラミド繊維を配置した梁の曲げ挙動とひび割れ性状

三井住友建設(株)	工修	○竹山 忠臣
三井住友建設(株)	正会員	有川 直貴
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(工) 浅井 洋

Abstract : This paper describes flexural crack widths of RC beams which are reinforced by the strings of aramid fiber. The strings are placed in the cover concrete. The crack width of the RC beams cannot be controlled only by placing strings of the aramid fiber in this paper. But localize crack width of RC beams can be controlled by placing string. The strings to which the tensile stress are given can expect the reduction of crack width after flexural crack happened.

Key words : Aramid fiber , PC tendon , Cover concrete , crack width

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物に要求される性能は多様化しており、繊維補強コンクリートがその一つとして挙げられ、コンクリートのひび割れ制御を目的とした短繊維補強コンクリート<sup>1)</sup>、FRPを緊張材や補強材として用いる連続繊維補強コンクリート<sup>2)</sup>などがある。有機繊維であるアラミド3軸メッシュシート<sup>3)</sup>は腐食しないので、剥落防止、ひび割れ幅の低減効果を期待し、躯体表面近くに配置することができる。しかし、アラミド繊維の特長は、鋼繊維と比較して高い引張耐力を有するが、ヤング係数が小さいため張力を与えずに使用すると、引張耐力を有効に発揮しているとはいいがたい。そこで、コンクリートの表面近傍に配置したアラミド繊維に張力を与えることでコンクリートの曲げ特性が向上すると考えられる。

筆者ら<sup>4)</sup>は、アラミド繊維に張力を与え、超薄型PC板のプレストレス導入および曲げ耐力についての検討を行い、薄肉部材にプレストレスを導入できることを報告した。そこで、本研究においては、工場プレキャスト製品を対象とし、コンクリート部材のかぶり部分の補強を目的に、コンクリート表面付近にアラミド繊維を配置し、その効果について検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

図-1、図-2に本研究で用いた試験体を示す。幅400mm、高さ200mm、全長3600mmの梁とした。断面上・下縁にD16軸方向鉄筋 (SD345) を3本ずつ配置し、下縁から5mmの位置に10mm間隔でアラミド繊維

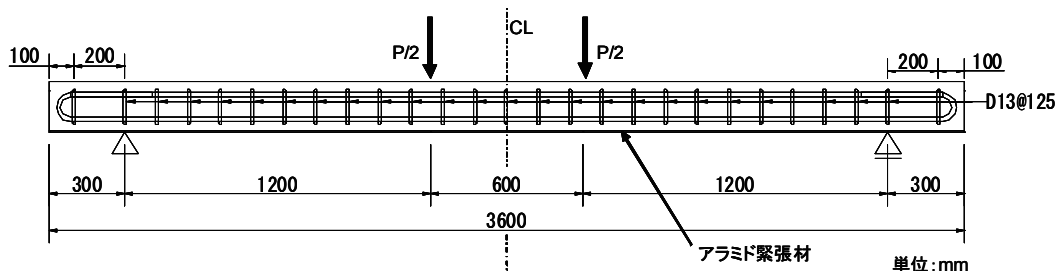


図-1 試験体 (側面図)

維 (以下, アラミド緊張材) を配置した。

### 2.2 使用繊維および試験体一覧

本研究では, アラミド繊維に撚りを与えて糸径1.7mmに収束し, 1本あたりの断面積1.201mm<sup>2</sup>, 引張耐力2248N/mm<sup>2</sup> (メーカー提示の引張耐力) のアラミド緊張材<sup>4)</sup>を用いた (写真-1)。なお, アラミド緊張材は樹脂を含浸していない。

本研究で使用したアラミド緊張材は, 撚りを与えて糸状にしているため張力を与えた直後, アラミド緊張材の伸びが大きく生じる。これを本稿では絞りと称する。筆者ら<sup>4)</sup>は, アラミド緊張材の緊張装置を用いた引張試験結果を報告したが, アラミド緊張材の固定部分の絞りを含んだ結果としていたため, 再度アラミド緊張材の引張特性を検討した (図-3, 表-1)。試験は, JIS A 1192に準じて行い, 試験区間は樹脂を含浸せずアラミドの生材としての引張試験を行った。緊張後, アラミド緊張材に絞りが発生した後, 応力が大きくなり破断に至った。

表-2に試験体一覧を示す。SNは, アラミド緊張材を配置していない試験体である。S0は, アラミド緊張材に張力を与えずに絞りによる変形が除去できていない試験体である。S9は, 張力をわずかに与え初期の絞りの変形を除去した試験体であり, 緊張装置の関係でアラミド緊張材の配置本数は35本となっている。S57は絞りの除去とプレストレスによる効果を期待した。

### 2.3 アラミド緊張材の張力導入方法

図-4にS57のアラミド緊張材の緊張装置を示す。フレームの間に山留材を挟み込んで反力フレームとし, 片端にはM16全ねじ緊張ボルトを介して鋼製緊張プレートを固定した。他端には鋼製緊張プレートを設置した全ねじボルトに緊張用センターホールジャッキ (容量400kN) とロードセル (200kN) を設置してナット定着した。アラミド緊張材は, φ10mm丸鋼に1本のアラミド緊張材を互い違いに掛けて固定した。緊張の際には, 全ねじボルトナットを締め込み, アラミド緊張材のたるみ

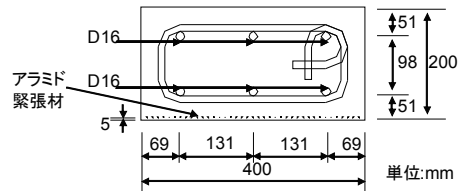


図-2 試験体 (断面図)



写真-1 アラミド緊張材

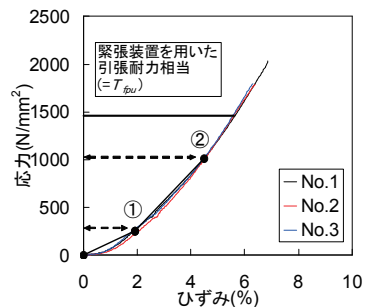


図-3 引張試験結果

$T_{fpu}$ : 緊張装置を用いたアラミド緊張材の引張耐力

表-1 引張試験結果

試験体	ヤング係数 $E_{fp}$ (GPa)	ヤング係数 $E^*$ (GPa)	引張強度 $f_{fpu}$ (MPa)	備考 ( $f_{fpu}/f_{fu}$ )
No.1	32.8	39.3	2031.2	0.90
No.2	32.5	42.0	1785.4	0.79
No.3	30.8	41.4	1797.7	0.80
平均	32.1	40.9	1871.4	0.83

$f_{fu}$ : メーカー提示の引張強度

$E_{fp}$ : 最大引張荷重の20~60%間の勾配

$E^*$ : 図-3中①~②間の勾配

表-2 試験体一覧

試験体名称	アラミド緊張材の有無	アラミド緊張材の本数 (本)	導入時		載荷時				
			アラミド緊張材		コンクリート		コンクリート		
			導入張力 (kN)	引張耐力 <sup>4)</sup> に対する割合 (%)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ発生強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SN	無	-	-	-	-	-	-	-	-
S0	有	39	0	0	33.1	53.1	32.4	58.7	3.3
S9		35	5.2	9					
S57		39	38.8	57	28.7	33.3	28.6	38.5	3.0

をとって両端のアラミド緊張材位置で測定している2箇所の変位が均等になるように緊張し、2台のロードセルの合計値が所定荷重になるまで緊張した。

2.4 試験体製作

アラミド緊張材を緊張後、型枠を設置し、鉄筋を所定位置に配置して、最大骨材寸法20mmのレディミクストコンクリートを試験体の上面から打設した。打設後、湿布養生を行い、1週間実験室内に静置した。

3. 実験方法

3.1 アラミド緊張材によるプレストレス導入試験

試験体を打設し、1週間養生した後、側枠を脱枠し、アラミド緊張材の張力を導入した。計測位置図を図-5に示す。導入時の計測項目は、鉄筋ひずみとコンクリートひずみとした。鉄筋のひずみは、鉄筋のリブの内側にゲージ長さ2mmのひずみゲージを貼付けて測定した。コンクリートのひずみは、単軸のゲージ長さ60mmのひずみゲージを貼付けて計測した。下縁のコンクリートひずみは、導入前に下面の型枠を脱枠していないため、計測していない。なお、S9は導入するアラミド緊張材の張力が小さく導入による影響が小さいと思われたため、導入時のひずみの計測は行っていない。

3.2 曲げ試験

荷重は、荷重スパン600mm、せん断スパン1200mmの2点荷重とし、試験機には、容量2000kNの万能試験機を用いた(図-6)。試験体に均等に荷重をかけるため、荷重治具とロードセルの間に球座を設置して荷重した。

図-5に計測位置図を示した。荷重の検出には、容量300kNのロードセルを用い、たわみの計測には、高感度変位計(容量25mm)を用い、等曲げスパンの箇所には容量50mmのものを用いた。鉄筋およびコンクリートのひずみゲージの配置はプレストレス導入時と同じである。ひび割れ幅の検出には、試験体側面の下縁から7.5mmの位置(取付コマ寸法15×15mm)にパイ型変位計を標点距離が50mm(容量5mm)を試験体中央から6箇所(中央も含む)、標点距離が100mm(容量5mm)を5箇所設置し、計21箇所にパイ型変位計を取り付けた。本研究では試験体の下縁から7.5mmの位置のパイ型変位計で測定した開口幅をひび割れ幅とした。

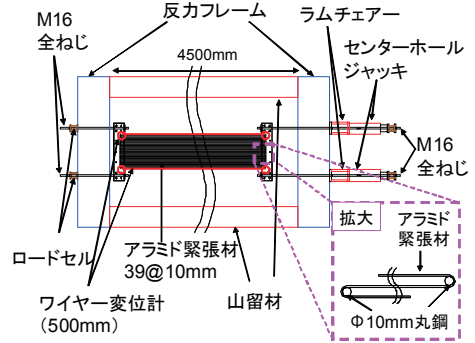
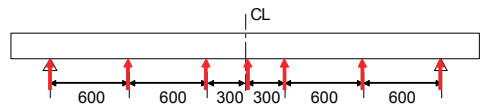
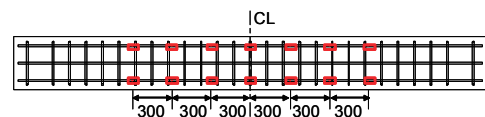


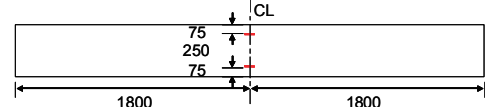
図-4 緊張装置 (S57)



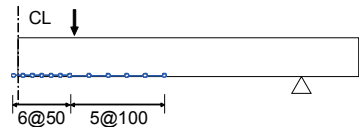
a) 変位計



b) 鉄筋ひずみ (圧縮, 引張鉄筋)



c) コンクリートひずみ (上縁, 下縁)



d) ひび割れ幅

単位:mm

図-5 計測位置図

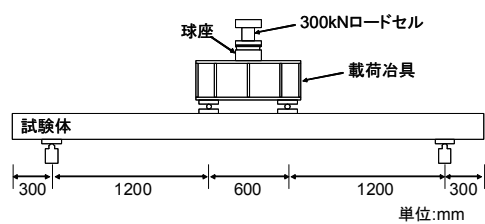


図-6 荷重装置

#### 4. 実験結果

##### 4.1 アラミド緊張材によるプレストレス導入

プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度を表-2に示した。図-7にS57のプレストレス導入時のひずみ分布を示す。導入ひずみは計算値とほぼ一致しており、試験体中央区間1800mmでの範囲が均等にプレストレスが導入されているのが分かる。図-8にS57の中央断面における導入ひずみを示す。導入ひずみは計算値とほぼ一致しており、かぶりの小さいところにプレストレスを導入しても平面保持の仮定が成立することが分かる。また、プレストレス導入後、部材端部および下面に付着ひび割れは発生していない。このことから、試験体のかぶり部分にプレストレスを導入することが可能であることが分かる。

##### 4.2 曲げ試験結果

プレストレス導入後、試験体は実験室内に静置した。いずれの試験体も材齢2~3週間の間に荷重を行った。S57の圧縮強度がほかの試験体の65%程度となっているが、これは試験体製作時期がS57のみ異なるためである(表-1)。

図-9に破壊時のひび割れ図、図-10に試験体中央の荷重-変位関係、表-3に試験結果を示す。計算値はファイバーモデルを用いて算出した値である。材料モデルはコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に準じた。コンクリートの圧縮強度は荷重試験時の実強度を用い、鉄筋降伏応力度は引張試験による結果を用いた。アラミド緊張材のヤング係数は繊維規格値<sup>6)</sup>を用い、絞りの影響を考慮していない。曲げひび割れ発生荷重は、試験体下縁に貼りつけていたコンクリートゲージの測定値が急変した荷重である。なお、SNは試験体に荷重治具をセットした後、急激に荷重を行い、ひび割れが発生して

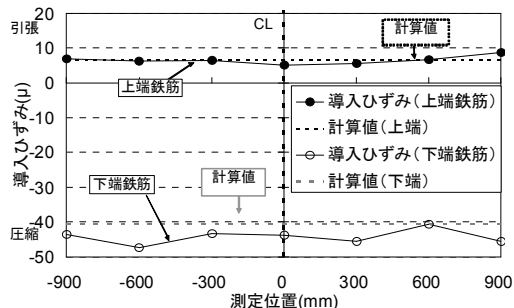


図-7 導入ひずみ分布 (鉄筋ひずみ)

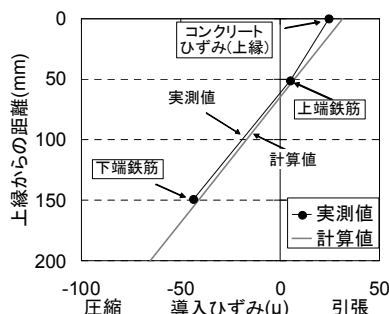


図-8 導入ひずみ (中央断面)

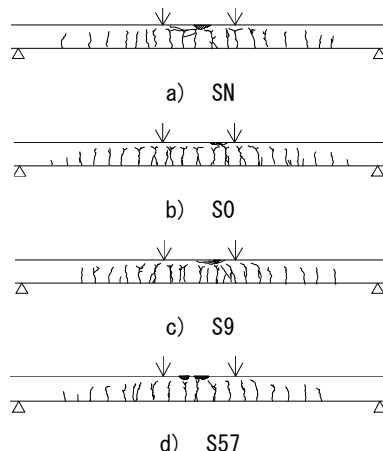


図-9 ひび割れ図

表-3 実験結果

試験体名	曲げひび割れ発生荷重 $P_{ck}$ (kN)		引張鉄筋降伏荷重 $P_{sy}$ (kN)		最大荷重 $P_{max}$ (kN)		備考
	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	
SN	11.9	-	48.4	54.4	61.7	69.0	上縁の圧壊
S0	11.9	10.6	50.9	58.0	78.7	80.5	上縁の圧壊
S9	12.5	11.2	52.3	59.1	78.7	82.8	上縁の圧壊
S57	10.0	15.3	59.0	59.8	73.9	81.3	上縁の圧壊※

※S57のみ上縁の圧壊時にアラミド緊張材が破断

しまったため、曲げひび割れ発生荷重を記載していない。いずれの試験体も曲げひび割れが発生し、引張鉄筋が降伏した後、上縁が圧壊する曲げ圧縮破壊に至った。曲げひび割れ発生荷重はS57の実験値が計算値よりも若干高いことが分かる。引張鉄筋降伏荷重、最大荷重は計算値よりも実験値が若干大きい、いずれも概ね一致していることが分かる。また、破壊時の変形もよく一致している。

4.3 ひび割れ性状

図-11に本試験において得られた荷重-ひび割れ幅の関係と土木学会

コンクリート標準示方書の曲げひび割れの算定式<sup>5)</sup>を用い、計算値から得られた荷重-引張鉄筋応力の関係から算出した結果を比較した。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left( \frac{\sigma_{se} + \epsilon'_{csd}}{E_s} \right) \quad (1)$$

ここに、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ : 鉄筋の表面形状やコンクリートの品質、鉄筋の段数を考慮する係数 ( $k_1=1.0$ ,  $k_2=0.89$ ,  $k_3=1.0$ ) ※S57のみ $k_2=0.96$ ,  $c$ : かぶり (mm),  $c_s$ : 鋼材の中心間隔 (mm),  $\phi$ : 鋼材径 (mm),  $\sigma_{se}$ : 鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量 ( $N/mm^2$ ),  $E_s$ : 鉄筋の弾性係数

( $N/mm^2$ ),  $\epsilon'_{csd}$ : コンクリートの収縮およびクリープなどを考慮するための数値。

なお、本研究においては、アラミド緊張材の弾性係数が鋼材に比べて小さいこと、載荷材齢が打設から経過していないことから、収縮やクリープ、アラミド緊張材の張力低下が小さいことが考えられたため、アラミド緊張材の張力低下および収縮などは無視することとした。

SNは、計算値よりひび割れ幅は大きい傾向を示した。最大曲げひび割れ幅はS0, S9, S57のいずれも実験値と計算値は概ね一致していることが分かる。S57は曲げひび割れ発生後の初期においては、ほかの試験体よりもひび割れは抑制されているが、荷重が大きくなると差が認められなくなった。

図-12は荷重20kN, 30kN, 40kN時のひび割れ幅分布の実験値と計算値を比較したものである。計算値は式(1)で鉄筋ひずみの分布を仮定して算出したものである。SNのひび割れ幅は、ばらつきが大きく、計算値を越えるものが数カ所見られる。一方、S0, S9, S57のひび割れ幅の分布は計算値と同程度かそれ以下に制御されており、ひび割れ幅のばらつきが小さい。取り付けたパイ型変位計は、2本以上

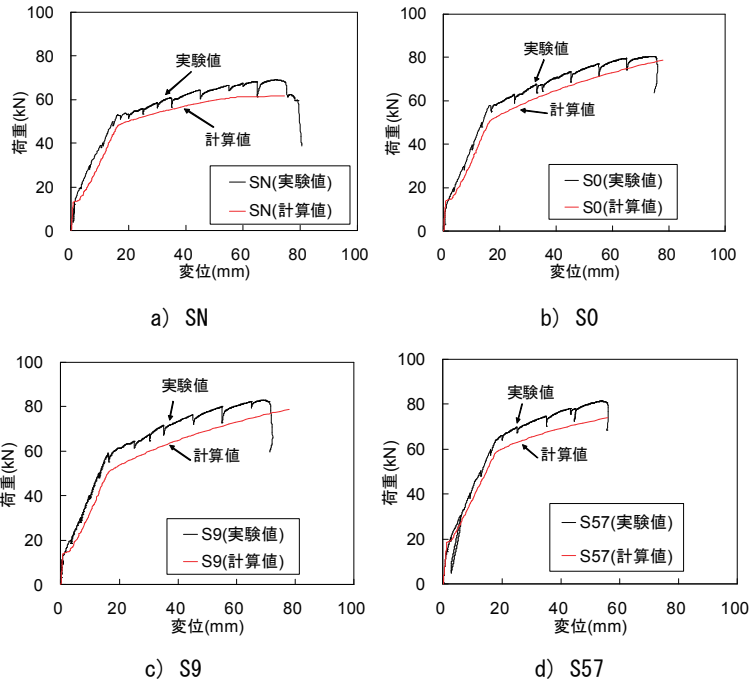


図-10 荷重-変位関係

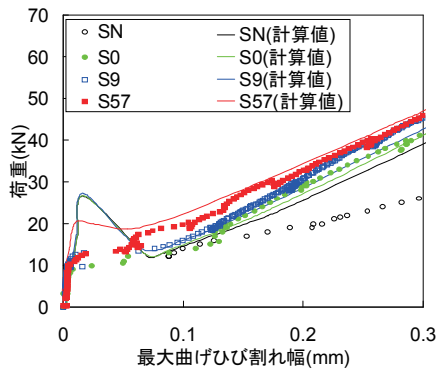


図-11 ひび割れ幅

のひび割れをまたいでいないことを確認していることから、アラミド緊張材を配置することで、ひび割れ幅の局所的な増大を抑制することが可能である。

### 5. まとめ

本研究では、コンクリートのかぶり部分の補強を目的に、下縁から5mmの位置にアラミド緊張材を配置し、そのアラミド緊張材に与える張力の影響を検討し、以下の結論が得られた。

- 1) アラミド緊張材をコンクリートの下縁から5mmの位置に配置し、アラミド緊張材に張力を導入することで、ひび割れ発生荷重は計算値とほぼ一致し、計算どおりの曲げ耐力が得られる。
- 2) アラミド緊張材に張力を与えることで、曲げひび割れ発生直後のひび割れ幅を抑制することができる。
- 3) アラミド緊張材を配置することでひび割れ幅のばらつきを抑制することができる。

### 参考文献

- 1) 柳博文, 松岡茂, 武田康司, 松尾庄二: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No. 3, pp. 1225-1230, 1998
- 2) 中井裕司, 浅井洋, 岡野素之, 小田切隆幸: 連続繊維緊張材を用いたPC梁のせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 15, No. 2, pp. 865-870, 1993
- 3) 青木圭一, 中井裕司, 多田育修: テクニカルレポート 予防保全としての剥落防止工法の開発 砂付アラミド3軸メッシュ工法, コンクリート工学, Vol. 42, No. 11, pp. 29-34, 2004. 11
- 4) 竹山忠臣, 有川直貴, 三加崇, 浅井洋: アラミド繊維を緊張材に用いた薄型PC板の基礎的研究, プレストレストコンクリート工学会 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 593-598, 2014, 10
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 6) 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

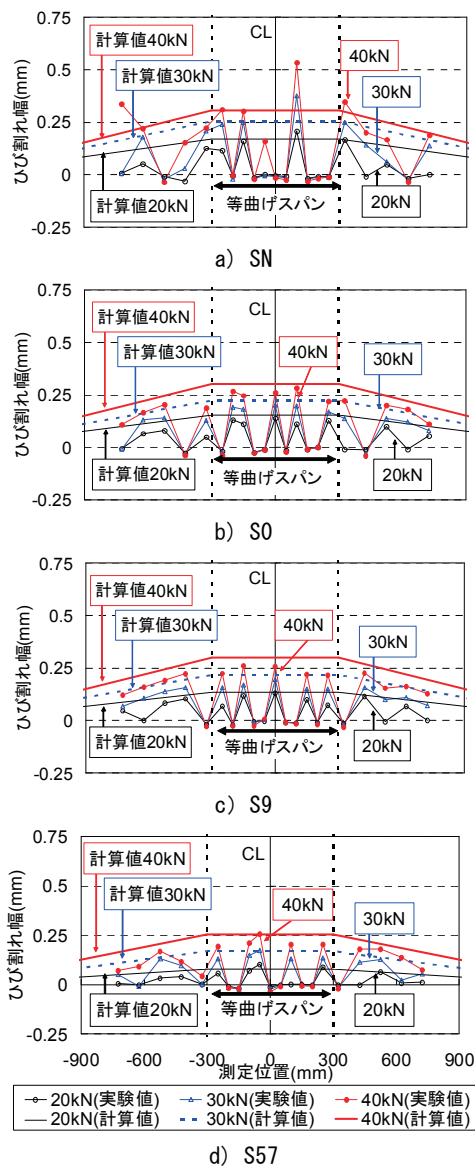


図-12 ひび割れ幅分布