

コンクリートの表面近傍にアラミド緊張材を用いた梁の 曲げひび割れ性状

Flexural Cracking Behavior of Concrete Beam Reinforced with Aramid Fiber Strings Placed in the Cover Concrete

竹山 忠臣 TADAOMI TAKEAYAMA
有川 直貴 NAOKI ARIKAWA
三加 崇 TAKASHI SANGA
浅井 洋 HIROSHI ASAI

RC はりの表面近傍に、細径のアラミド連続繊維を複数本配置した場合の曲げひび割れ幅制御に関する検討を行った。はりの曲げ試験の結果、本実験の範囲では、ひび割れ本数に変化はみられなかったが、ひび割れ幅が局所化し、拡大することを抑制できた。アラミド連続繊維にあらかじめ張力を与えた実験では、曲げひび割れ発生直後におけるひび割れ幅を抑制することが可能であった。

キーワード：アラミド連続繊維，緊張材，かぶり，ひび割れ幅

This paper describes flexural crack widths of RC beams which are reinforced with small diamental strings of aramid fiber. The strings are placed in the cover concrete. Result of the bending test on RC beams, the number of cracks of the RC beams did not depend on the amount of placing strings of the aramid fiber. Localize the crack width of RC beams was controlled by placing strings. 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る。例えば、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¹⁾、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²⁾などがある。この中で、有機繊維であるアラミド3軸メッシュシート³⁾は、あらかじめ型枠に設置して剥落防止に用いられている。このような用途では、例えば、細径のアラミド繊維をコンクリート表面近傍に複数配置し緊張力を与えることで、コンクリートの剥落防止に加えて、ひび割れ幅を抑制できると考えられる。

筆者らは、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⁴⁾。本研究においては、一般的なRCはりのかぶり部分に、緊張したアラミド繊維を配置した供試体の曲げ試

験により、そのひび割れ特性の改善効果について検討した。

2. 実験概要

(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、長さ3600mmのはりとした。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(以下、アラミド緊張材)を配置した。

(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本当たりの断面積1.201mm²、引張耐力2248N/mm²(メーカー提示の引張耐力)のアラミド緊張材⁴⁾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。

アラミド緊張材の引張試験結果を図-3、表-1に示す。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(図-3中①)。試験は、JIS A 1192 に準じて行った。アラミド生材の両端を樹脂加工し、つかみ部としたものを供試体として用いた。本実験で用いたアラミド緊張材の応力-ひずみ関係は図-3に示すように、ひずみが大きくなるほど応力の増加が大きくなる傾向を示す。表-1の中のヤング係数 E_{fp} は JIS にしたがって計算したもので、引張荷重の20~60%間の勾配である。ヤング係数 E は図-3中②~ T_{fpu} の勾配である。

供試体は、母材とつかみ部の境界で破断するため引張強度はメーカー提示の引張強度 (f_{tu}) よりも小さくなっている。

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 はアラミド緊張材を配置した時にたるみが生じない程度の張力を与えたもので絞りによる変形が除去できていない試験体である。S9 は図-3中①までの初期の絞りがなくなる程度の張力を与えた。なお、S9 は緊張装置の関係でアラミド緊張材の配置本数は35本とした。S57 は絞り変形の除去とプレストレスによる効果を期待した。図-3には、各試験体のアラミド緊張材張力レベルを併記した。

(3) 使用繊維および試験体一覧

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

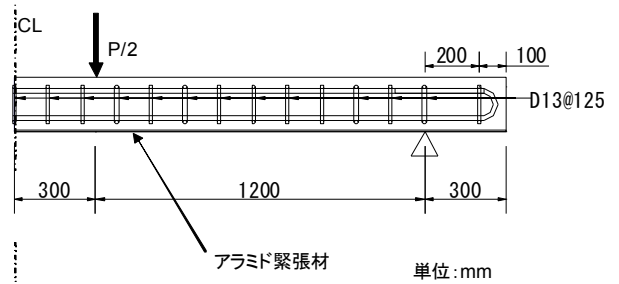


図-1 試験体(側面図)

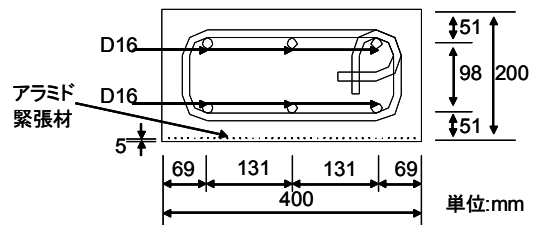


図-2 試験体(断面図)



写真-1 アラミド緊張材

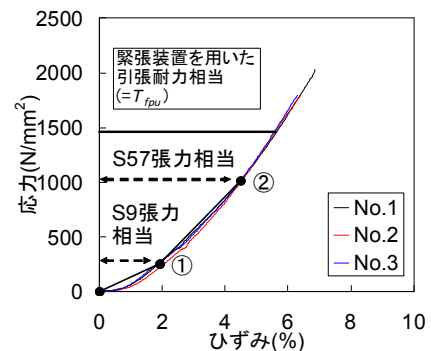


図-3 引張試験結果

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_{tu})
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

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 ⁴⁾ に対する割合(%)	ヤング係数(kN/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	ひび割れ発生強度(N/mm ²)	
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

値が所定荷重になるまで緊張した。

(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 のレディーミックス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

(1) アラミド緊張材によるプレストレス導入試験

コンクリートを打設し、1 週間養生した後、型枠を脱枠し、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。ただし、下縁のコンクリートひずみは、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。

(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。

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、パイ型変位計を用い、曲げによる曲率の影響を考慮するため試験体側面の下縁から 7.5mm の位置(取付コマ寸法 15×15mm)に標点距離が 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。

4. 実験結果

(1) アラミド緊張材によるプレストレス導入

S57 のプレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度

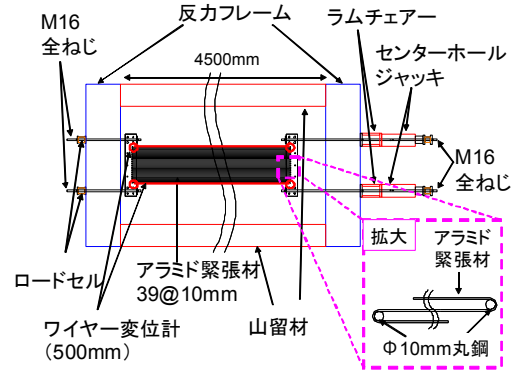
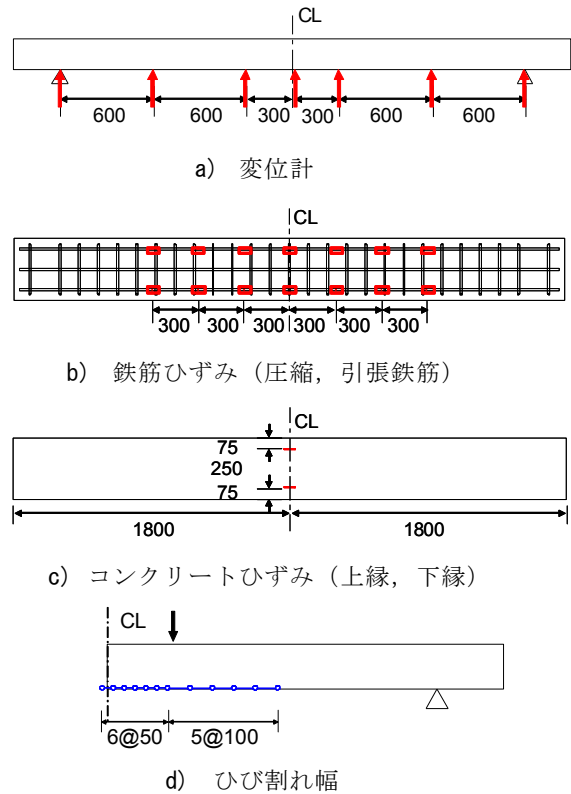


図-4 緊張装置 (S57)



単位 :mm

図-5 計測位置図

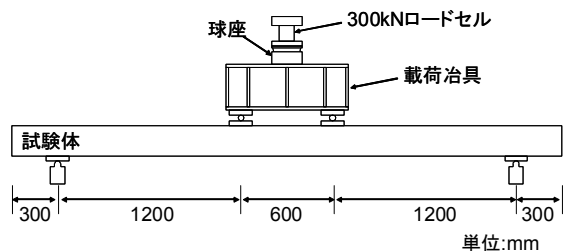


図-6 荷重装置

を表-2に示した。図-7に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 の範囲において均等にプレストレスが導入されているのが分かる。図-8に中央断面にお

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。

(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。

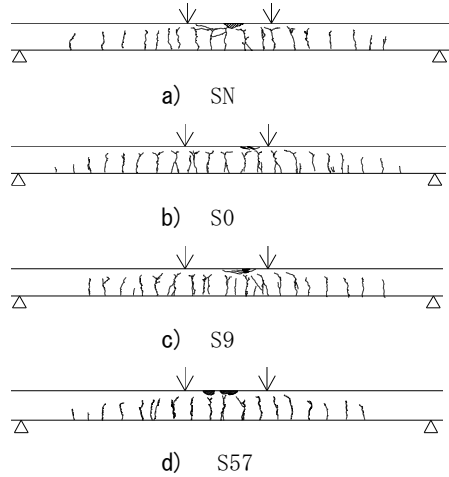


図-9 ひび割れ図

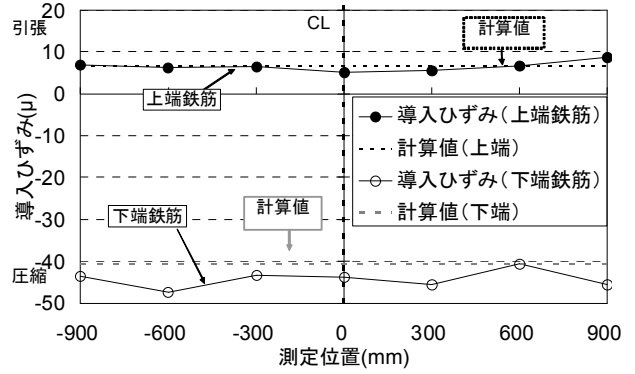


図-7 導入ひずみ分布 (鉄筋ひずみ)

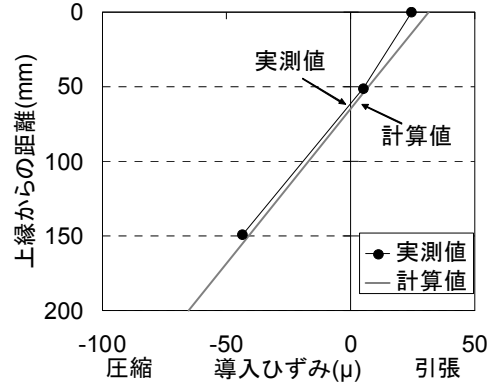
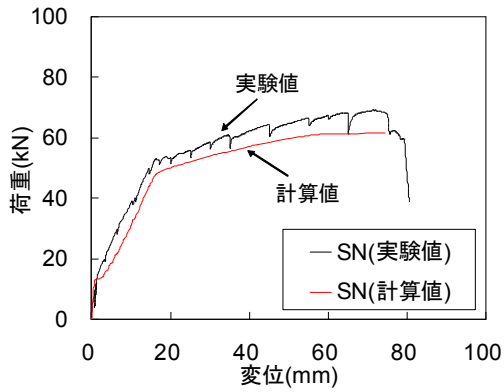
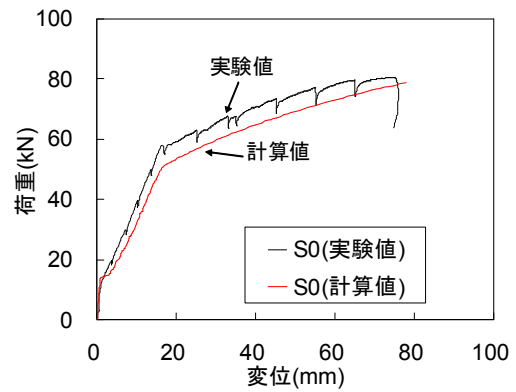


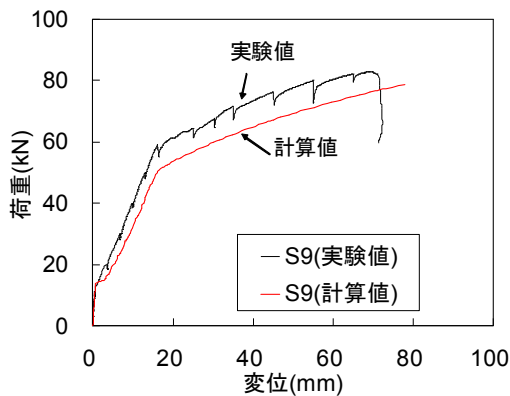
図-8 導入ひずみ (中央断面)



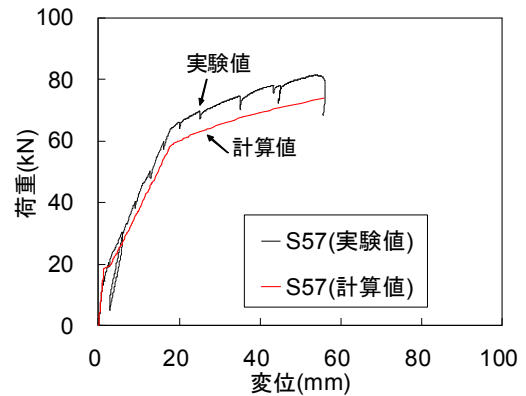
a) SN



b) S0



c) S9



d) S57

図-10 荷重-変位関係

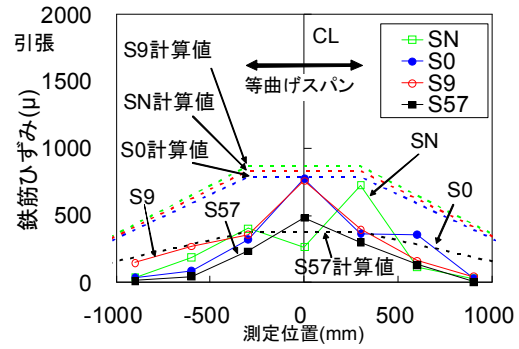
いずれの試験体も材齢2～3週間の間に荷重を行った。S57の圧縮強度が他の試験体の65%程度となっているが、これは試験体製作時期がS57のみ異なるためである(表-2)。

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⁵⁾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⁶⁾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。

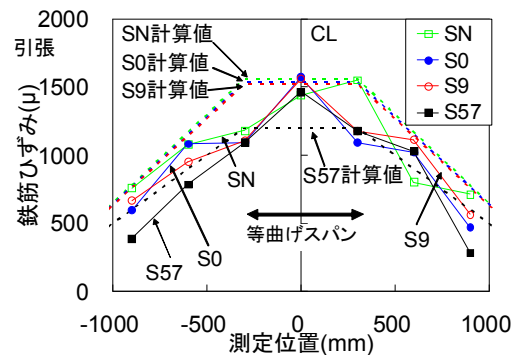
(3) 荷重-鉄筋ひずみ

かぶり部分をアラミド緊張材で補強すれば、同一荷重を載荷した際、試験体下面に発生するひび割れは分散もしくはひび割れ幅が小さくなることが期待された。すなわち、同一荷重の時、鉄筋に発生するひずみが小さければ、表面のひび割れ幅は小さくなると言える。図-11に荷重20kN(最大曲げひび割れ幅で0.05～0.15mm程度)、40kN(最大曲げひび割れ幅0.3mm程度)の時の引張鉄筋のひずみ分布を示す。なお、図に示している鉄筋ひずみはひずみゲージを取り付けた2本の下縁の鉄筋で、同程度のひずみを示したため、2つの平均値としている。荷重20kNの時、全ての試験体の鉄筋ひずみの最大値は計算値とほぼ同程度である。S57の鉄筋ひずみは

SN, S0, S9の鉄筋ひずみよりも約300μ小さい値に収まっている。荷重40kNの時、SN, S0, S9の鉄筋ひずみは計算値と同程度であるのに対して、S57は計



a) 荷重20kN



b) 荷重40kN

図-11 鉄筋ひずみ分布

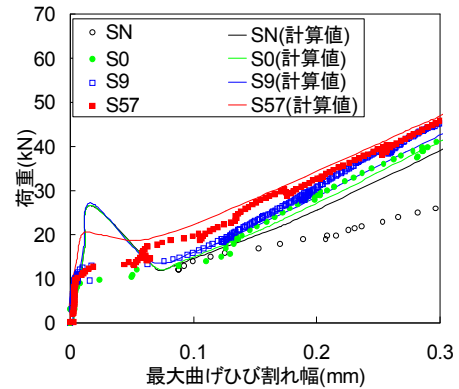


図-12 ひび割れ幅

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

算値よりも約300μ大きく、他の試験体と大差ない値となった。

(4) 曲げひび割れ幅

図-12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幅の算定式⁵⁾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。

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

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), ϕ : 鋼材径 (mm), σ_{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), ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等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、打設から載荷までの期間が短いことから、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等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直後においては他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-13に荷重 20kN, 30kN, 40kN の時のひび割れ幅の分布を示す。ここでの計算値は式 (1) から得られた結果を示している。SN のひび割れ幅は、計算値を大きく越えるものが数カ所見られ、ばらつきが大きい。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いてバラつきが少ない。取り付けたパイ型変位計は、2本以上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、ひび割れ幅が局所的に大きくなることを抑制することは可能であった。

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。

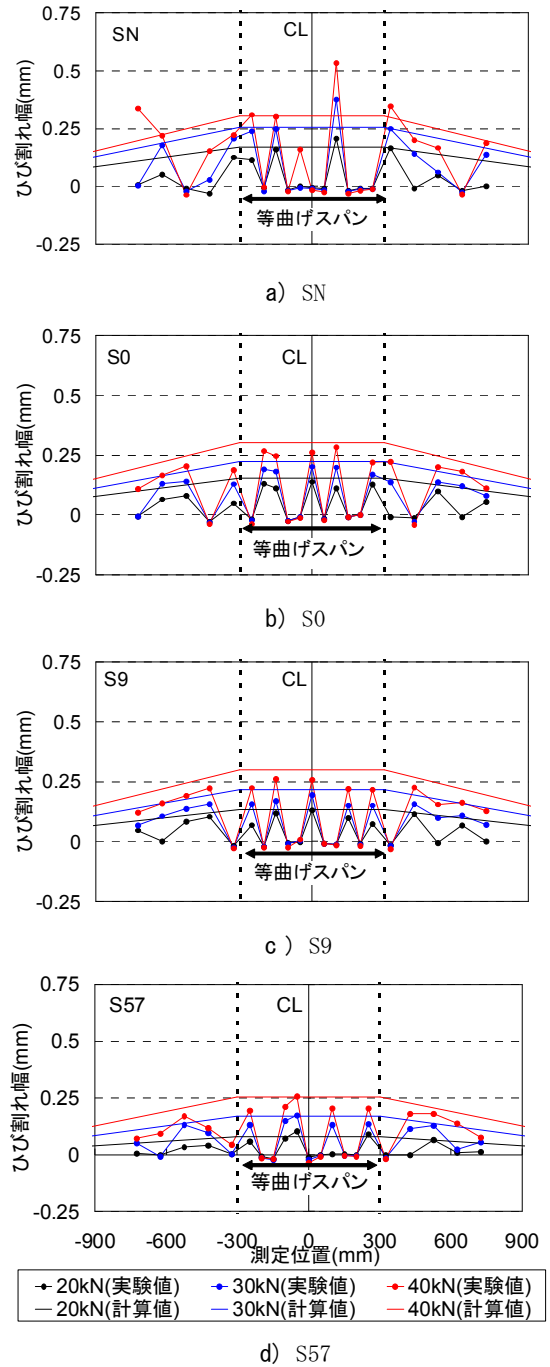


図-13 ひび割れ幅分布

- 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、計算通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本試験体では、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が局所化し、拡大することを防止できる。

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