

# 論文 アラミド繊維をせん断補強筋に用いた PC はりのせん断耐力に関する研究

浅井 洋\*1・中島 規道\*2・三加 崇\*3・三上 浩\*4

**要旨:** アラミド繊維は耐久性に優れ、腐食しない材料として塩害が問題となる構造物への利用が有効である。アラミド繊維を帯状に加工し、柔軟性に優れた補強材をせん断補強筋に用いた実大断面の PC はりのせん断耐力について検討を行った。この補強材は、繊維を樹脂で固着していないため、あらかじめ成形加工を行う必要がない。また、PC はりの緊張材には、アラミドを用いた連続繊維補強材（以下、FRP）と PC 鋼より線を併用している。この結果、樹脂で固着しないアラミド繊維帯材が受け持つせん断耐力は、FRP 補強筋と同じ計算手法を用いて評価できることを明らかにした。

**キーワード:** アラミド繊維, せん断補強筋, せん断破壊耐力, PC はり

## 1. はじめに

飛来塩分による塩害が問題となる地域に架橋する場合、供用年数に応じた塩害対策が要求される。コンクリート表面からの塩分浸透に対して、一般にかぶりを大きくして対応し、特に厳しい地域では、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用している。従来、このような厳しい条件下で、補強筋や緊張材に FRP を適用することが検討されてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、経済性や施工性の面からその適用は限られた範囲にとどまっている。そこで、全ての補強筋に FRP を適用するのではなく、供用期間中に塩分の浸透が予測される範囲に限定して補強筋および緊張材を適用することが考えられる。せん断補強筋は主筋を取り囲むように最外縁に配置されるため、最初に塩害の影響を受けやすい。FRP をせん断補強筋に使用するには、工場で所定の形状に曲げ成形を行う必要がある。これは、FRP の曲げ加工部は直線部に比べて耐力が低下するため、現場加工では品質を確保することが困難であるためである。このような背景から、樹脂を含浸しないアラミド繊維を帯状あるいは組紐状に加工し、これをせん断補強筋に適用した RC はりのせん断耐力について検討を行った<sup>2)3)</sup>。この結果、帯状に加工したアラミド繊維は、良好なせん断補強効果が得られることを明らかにした。

本研究では、せん断補強筋に写真-1 に示す帯状に加工したアラミド繊維（以下、アラミド繊維帯材）を使用し、PC 鋼より線とアラミド FRP（以下、AFRP）を緊張材に使用したホローげたのせん断耐力について検討した。ホローげたは、T 桁や I 桁に比べて飛来塩分の影響を受ける表面積が小さく、塩害対策に有利であるため本形状を用いた。

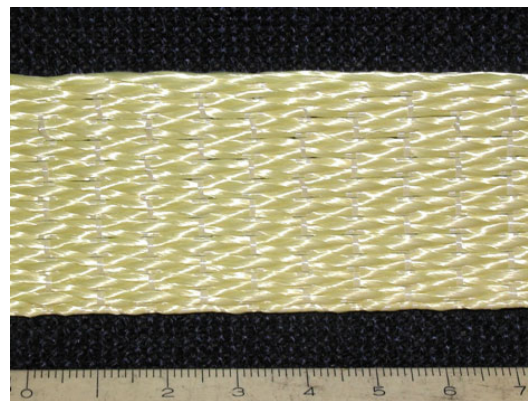


写真-1 アラミド繊維帯材

## 2. 実験概要

試験体は、実大断面（はり高 0.6m, はり長 6.2m）のプレテンション方式によるホローげたである。PC はりの形状を図-1 に示す。緊張材は下縁に 2 段、上縁に 1 段配置している。最下段は AFRP（ $3\phi 7.4$ ）を 8 本配置しており、2 段目は PC 鋼より線（ $\phi 15.2$ ）を 6 本、上縁に PC 鋼より線 3 本を配置している。緊張材の張力は、試験時に引張強度の 60% になるように計画した。せん断スパン内のせん断補強筋はアラミド繊維帯材を螺旋状に巻き付けて配置した。はり端部より 1.2m の断面を充実断面とし、はり中央 3.2m は、発泡スチロール型枠を使用した中空断面である。補強筋および緊張材の材料特性を表-1 に示す。アラミド繊維帯材は、幅 30mm でアラミド繊維を一方方向に織った構造である。樹脂を含浸して一体化していないため、変形性能に優れている。棒部材に比べて薄く、コンクリートとの付着面積が確保でき、織

\*1 三井住友建設（株） 技術研究所主任研究員（正会員）  
 \*2 三井住友建設（株） 技術研究所主任研究員 工修（正会員）  
 \*3 三井住友建設（株） 技術研究所 工修（正会員）  
 \*4 三井住友建設（株） 技術研究所主席研究員 工博（正会員）

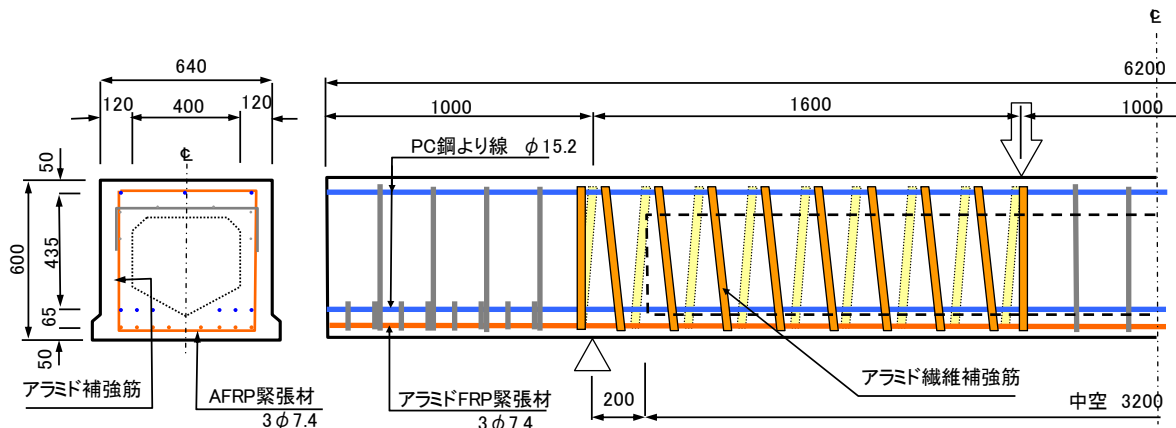


図-1 PC試験はり形状

表-1 材料特性

補強筋・緊張材	材質	形状 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (kN)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
せん断補強筋	アラミド	帯形状幅30mm	19.50	28.0	96.3
PC緊張材	アラミド	異形ロッド 3φ7.4	146.4	244.2	46
PC緊張材	鋼	より線 φ15.2	138.7	261.0	200

表-2 試験体

試験体 No.	せん断補強筋	含浸樹脂	補強筋間隔 (mm)
1	アラミド繊維帯材	アクリル系樹脂	200
2	アラミド繊維帯材	無	200
3	アラミド繊維帯材	無	100

維は帯の表裏を交互に配置しているため、曲げ配置部に生じる繊維配列の乱れを最小限に抑えることができる。ここで、樹脂を含まないせん断補強筋を付着型の定着具で引張試験を行ったときの引張荷重は、平均28.0kN（試験体数3）であった。その破断形状は、定着具近傍で破断している素線もあり、定着具の影響を大きく受けていると推察された。PCはり試験体を表-2に示す。試験体はせん断補強筋の種類と配置を変えた3体である。No.1に用いたアクリル系樹脂を含まない補強筋は、帯材の繊維間のたるみや配置の際に帯材がたるむのを防止する程度に簡易的に固着したものである。樹脂によって繊維を堅固に固着していないため、容易に曲げることができる。No.3は、補強筋の間隔をNo.2の半分にしてせん断補強筋比を2倍に大きくした試験体である。

支間3.6m、載荷スパンを1mとした2点載荷であり、せん断スパン比(a/d)は3.2である。載荷は左右のせん断スパンに斜めひび割れが発生したとき載荷と除荷を2回繰り返し、その後、はりが破壊するまで載荷した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 せん断破壊耐力

載荷にともない、最初に曲げひび割れが載荷スパン内に生じ、載荷荷重の増加にともない進展した。せん断スパン内の曲げひび割れは、載荷点に向かって進展した。各試験体は、載荷荷重1000kN前後で、せん断スパン内のウェブに載荷点と支点とを結ぶ方向の斜めひび割れが生じた。斜めひび割れは、載荷荷重の増加にともなつて、徐々に載荷点および支点側に進展した。最後に、斜

表-3 載荷試験結果および計算値

項目	単位	No.1	No.2	No.3	
実験値	載荷試験時の圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	51.9	48.7	54.0
	せん断耐力	kN	1403	1490	1435
	斜めひび割れ発生荷重	kN	950	990	1180
	せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力 <sup>※1</sup>	kN	185	219	427
	せん断補強筋の平均ひずみ <sup>※2</sup>	×10 <sup>-6</sup>	6424	5691	4911
	(平均ひずみ測定時載荷荷重)	(kN)	(1290)	(1430)	(1430)
計算値	せん断耐力	kN	477	476	510
	コンクリートにより受け持たれるせん断耐力	kN	400	400	400
	せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力	kN	77	76	110
	終局限界状態におけるせん断補強筋のひずみ	×10 <sup>-6</sup>	4714	4652	3362
推定値	せん断耐力	kN	1330	1267	1366
	コンクリートにより受け持たれるせん断耐力	kN	1132	1070	1001
	せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力	kN	198	197	365
	終局限界状態におけるせん断補強筋のひずみ	×10 <sup>-6</sup>	8746	8517	7403

※1 式(5)により算出した値

※2 せん断破壊した側のせん断補強筋で測定が可能であった補強筋の平均ひずみ

めひび割れに沿って載荷点付近のコンクリートが急激に破壊し、はりの耐力が失われた。破壊直前までせん断補強筋の破断音は観察されなかったが、破壊後には斜めひび割れに沿って破断が観察された。載荷点近傍（せん断スパン側）のコンクリートの損傷が著しく、上段のPC鋼より線の座屈が認められた。引張側PC鋼より線およびAFRP緊張材の破断は認められなかった。また、スパン中央およびせん断スパン中央で緊張材ひずみを測定したが、PCはりが破壊するまで降伏ひずみおよび破断ひ

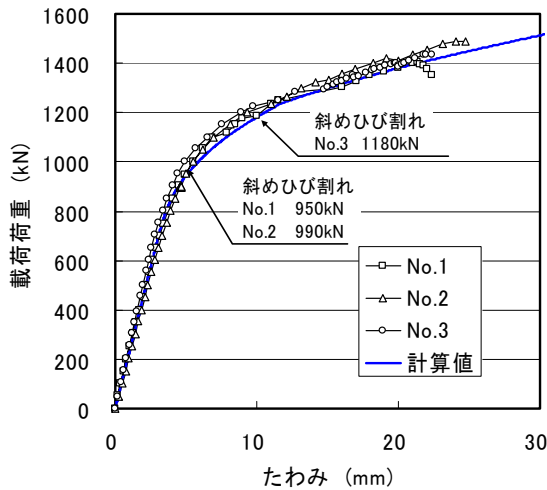


図-2 荷重とたわみの関係

ずみには達していない。はり端部において、引張側 PC 鋼より線および AFRP のすべり量を測定したが、破壊に到るまで移動は認められず、引張弦材が破壊時まで機能していたことを確認した。

載荷試験結果を表-3 に示す。3 試験体の斜めひび割れ荷重、および破壊荷重に明確な差は認められない。図-2 に荷重とスパン中央たわみとの関係を示す。荷重たわみ曲線も明確な差は認められない。図中に各試験体の斜めひび割れ発生荷重を示した。斜めひび割れが生じた後、はりが破壊するまで 200~310kN の耐力増加が認められた。荷重とたわみの関係は、曲げによる計算値と一致しており、著しいせん断変形は認められない。

### 3.2 せん断補強筋ひずみ

せん断破壊が生じた側のひび割れ図とせん断補強筋のひずみ測定位置を図-3 に示す。せん断補強筋ひずみ測定方法は、アラミド繊維帯材の軸方向 30mm×全幅の範囲をエポキシ樹脂で固着し、その表面にひずみゲージを取り付けて測定した。はりが破壊する直前におけるせん断スパン中央付近のせん断補強筋のひずみ分布を図-4 に示す。なお、No.1 は補強筋ひずみを載荷途中までしか測定できなかったため、載荷荷重 1290kN (破壊荷重の 92%) のときの値を示した。このとき、高さ 350mm 位置の測定値が得られなかったため、繰り返し載荷の中で得られた 1200kN 時のひずみを履歴内の値として点線で結んで示した。せん断補強筋には、はり高の中央付近で最大ひずみが生じており、斜めひび割れと交差する点に位置している。3 試験体ともひび割れ近傍で 7100~7600 $\mu$  のひずみが生じ、ひび割れから離れるに従ってひずみは小さくなっており、局部的に大きなひずみを生じることが確認できる。このことより、コンクリートとの付着があり、ひび割れ部に生じた引張ひずみは直ちにせん断補強筋の曲げ配置部に過大な応力は作用しないと

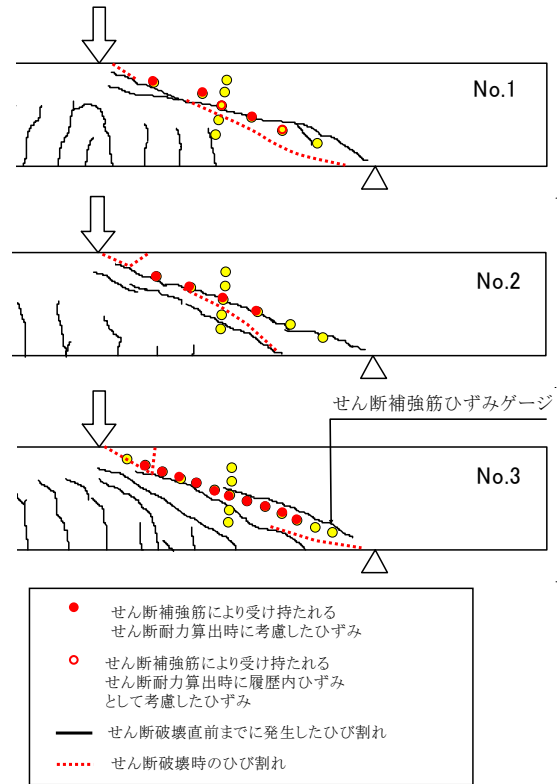


図-3 ひび割れとひずみ測定位置

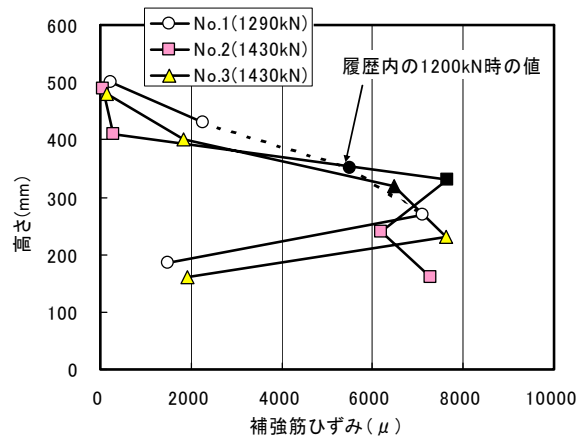


図-4 せん断スパン中央補強筋ひずみ分布

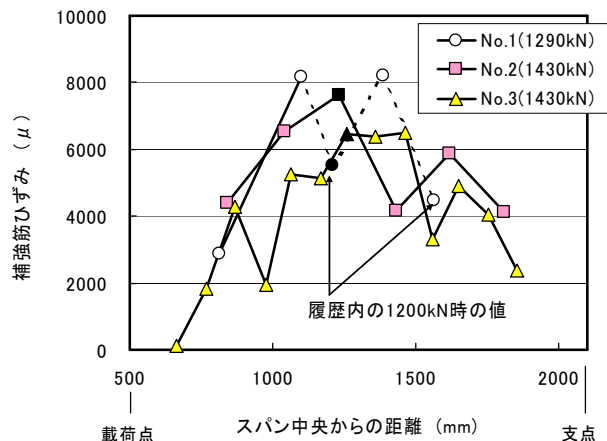


図-5 はり軸方向補強筋ひずみ分布

考えられる。

はり軸方向分布を図-5に示す。測定位置は斜めひび割れが生じた近傍に位置しており、せん断補強筋軸方向分布の中でも、概ね最大ひずみが測定できているものと考えられる。図中の黒抜き測定値は、図-4の黒印測定値に対応している。No.1の黒印測定値は、履歴内の1200kN時の値である。補強筋のひずみはせん断スパン中央付近で大きく、荷重点および支点近傍では小さい傾向を示している。これは、斜めひび割れ幅がせん断スパン中央で大きく、荷重点や支点に近づくとき小さいことが影響していると考えられる。No.2とNo.3とを比較すると、補強筋量を増加したNo.3のひずみは小さい傾向を示している。平均ひずみを表-3に示したが、この値もNo.3が小さい。しかしながら、図-4に示したように、最大ひずみで比較するとNo.2とNo.3に差がないことがわかる。すなわち、このような部位でせん断補強筋の破断が先行すれば補強筋を増加した効果が十分得られない場合があることを示唆している。

3 試験体で測定した補強筋ひずみのうち、1.0%を超えるひずみを示した補強筋は8箇所であった。このうち、7箇所については試験終了まで破断していない。1箇所は、No.1の圧縮縁に近い部分であり、はりの破壊とともに補強筋は破断した。このときのひずみは1.1%である。これより、図-4および図-5に示された補強筋ひずみは、1.1%に対して約70%程度のひずみであり、補強筋の破断には余裕があったと判断でき、補強筋の破断を起因とするはりの破壊ではないと考えられる。

### 3.3 ひび割れ幅と補強筋ひずみ

せん断スパン中央における斜めひび割れ幅とせん断補強筋ひずみの関係を図-6に示す。ひび割れ幅は試験開始前から取り付けられたπ型変位計によって測定した結果であり、ひび割れ幅の他に変位計が跨ぐ範囲のコンクリートひずみやひび割れ面に沿ったずれ変形量が含まれる。No.1の補強筋ひずみは、ひび割れが発生して初期の段階で補強筋ひずみが小さく、荷重と除荷を繰り返すと他の試験体の履歴と同じ傾向を示した。No.3のひび割れ発生直後は、0.3mmのひび割れ幅が生じ、補強筋ひずみは4600μを示した。No.3においても一度除荷するとNo.2と同じ履歴を描くことがわかる。8000μを越えるとひずみの増加は緩やかになる。せん断補強筋は、8000μ程度からコンクリートとの付着が悪くなり、定着長が長くなったため、ひび割れ幅に対してひずみが増加しなくなったと考えられる。すなわち、アラミド繊維からなる補強筋は降伏点を持たないが、荷重の増加にともない、ひび割れ幅を許すことで他の補強材に荷重を分配している可能性が考えられる。

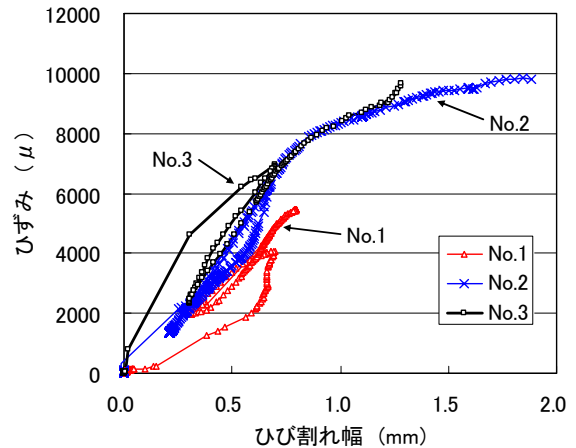


図-6 ひび割れ幅と補強筋ひずみの関係

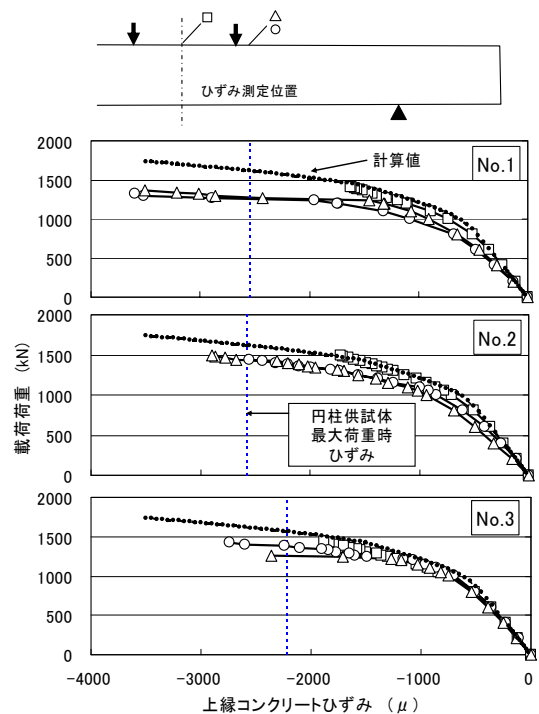


図-7 上縁コンクリートひずみ

### 3.4 圧縮縁コンクリートひずみ

圧縮縁コンクリートひずみを図-7に示す。曲げによる圧縮縁コンクリートひずみの計算値を示した。また、円柱供試体(φ100×200mm)圧縮試験より得られた最大荷重時のひずみを図中に示した。荷重スパン内のひずみは、破壊に至るまで曲げによる計算通りの挙動を示しており、最大荷重時ひずみに達していない。荷重点のせん断スパン側のひずみは、斜めひび割れが生じたあたりからスパン中央のひずみに比べて増加し始め、終局時には圧縮強度試験で得られた最大荷重時のひずみに達している。この結果から、はりの破壊は、せん断圧縮破壊であると判断できる。

### 3.5 セン断耐力算定値との比較

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>4)</sup>(以下、指針(案))では、連続繊維補強材のヤング係数が鉄筋に比べて小さいことや降伏しないことを考慮したせん断耐力算定式が示されている。せん断補強筋が破断しない場合には、せん断破壊するときのせん断補強筋のひずみを求め、せん断補強筋が受け持つせん断耐力を算出している。終局状態におけるせん断補強筋ひずみ算定式を式(1)に示す。

$$\varepsilon_{fwd} = 0.0001 \sqrt{f'_{mcd} \frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\sigma'_N}{f'_{mcd}} \right) \right]} \quad (1)$$

ここに、 $p_w$ ：引張補強筋比、 $E_w$ ：引張補強筋のヤング係数、 $p_{web}$ ：せん断補強筋比、 $E_{web}$ ：せん断補強筋のヤング係数、 $\sigma'_N$ ：プレストレス力を部材断面積で除した値、 $f'_{mcd}$ ：寸法効果を考慮したコンクリートの圧縮強度で式(2)による、 $h$ ：梁の高さ(m)

$$f'_{mcd} = \left( \frac{h}{0.3} \right)^{-1/10} \quad (2)$$

ここに示された算定式は、非線形有限要素解析による数値解析により得られた予測式<sup>5),6)</sup>を基本とし、安全側に簡略化されたものである。この研究成果には、実際のせん断耐荷機構を考慮したせん断耐力推定法<sup>7)</sup>(以下、推定法)が示されている。推定法によるせん断耐力は、曲げ圧縮域で受け持つせん断力、斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力、斜めひび割れ域でのせん断補強筋が受け持つせん断力、および曲げ圧縮域と斜めひび割れ域を結ぶ水平領域でのコンクリートによるせん断力から算出される。このうち、せん断補強筋が受け持つせん断力は、式(3)で示されるせん断補強筋の平均引張ひずみから算出される。ただし、ここに示された算出式は、せん断圧縮破壊を想定して求められた予測式である。

$$\varepsilon_{web} = 0.0053 \frac{\sqrt{f'_c}}{\sqrt{a/d+1}} \exp \left( - \frac{1000}{p_w E_w} - 0.05 \sqrt{p_{web} E_{web}} \right) \times \left[ 1 + \left( \frac{\sigma'_N}{f'_c} \right)^{0.2} \right] \quad (3)$$

ここに、 $f'_c$ ：コンクリート圧縮強度、 $a$ ：せん断スパン、 $d$ ：有効高さ

はりの破壊形式は、主筋およびせん断補強筋の剛性によって異なる。すなわち、主筋およびせん断補強筋の剛性が小さい場合には、斜め引張破壊が生じやすく、剛性が大きくなるにつれてせん断圧縮破壊へと変化する。また、プレストレス力などによる軸圧縮力が作用する場合、せん断圧縮破壊を起こしやすくなる。指針(案)では、

破壊形式を式(4)のように解説している。

$$p_w E_s + 10 p_w E_w \begin{cases} < 5000k & \text{斜めせん断破壊} \\ \geq 5000k & \text{せん断圧縮破壊} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{ここに、 } k = \left( \frac{\sigma'_N}{f'_{mcd}} \right)$$

本実験における PC はりを式(4)で判定すると左辺(2791)が左辺(744)より大きく、せん断圧縮破壊を示す結果となり、本試験結果と同じ結果が得られた。ちなみに、緊張材にプレストレス力を与えない場合は斜めせん断破壊と判定される。

表-3 に指針(案)および推定法に基づいて算出したせん断補強筋のひずみと図-5 で示したせん断補強筋の平均ひずみを示す。なお、No.1 は載荷荷重 1290kN (破壊荷重の 92%) のときの値を示した。各式で用いたせん断補強筋断面積およびせん断補強筋のヤング係数は、表-1 の値を用いた。このときの値は、補強筋 6 本のうち測定できた 3 本の値を用いた。指針(案)によるせん断補強筋ひずみは、推定法による値の約半分であり、約 2 倍の安全率を見込んでいると考えられる。図-4 および図-5 に示した実測ひずみの最大値は、推定法による値の 90~103%であったが、平均ひずみに対しては 66~74% の低い値を示している。指針(案)による値に対しては、122~146%であり、安全側の値であった。

せん断補強筋が受け持つ耐力は、終局限界状態におけるせん断補強筋ひずみより補強筋に作用する荷重を算出し、想定される斜めひび割れを跨ぐ補強筋本数とその角度を考慮して求められる。実験値は、式(5)で算出した。4 面あるウェブのうち、図-3 に示したせん断破壊面を跨ぐせん断補強筋の断面積と平均ひずみを用いて、各面のせん断補強筋の配置角度を考慮した。

$$V_s = 4 A_w \cdot E_w \cdot \varepsilon_w \cdot n (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_w$ ：せん断補強筋の平均ひずみ、 $n$ ：せん断破壊面を跨ぐせん断補強筋の本数、 $\alpha$ ：部材軸とせん断補強筋のなす角度

指針(案)、推定法、および実測値のせん断補強筋により受け持たれるせん断耐力の比較を表-3 および図-8 に示す。指針(案)の計算値と実験値とを比較すると、全ての試験体で計算値以上の耐力を示すことは明らかである。推定法の計算値と比較すると、No.2 および No.3 は計算値に対してそれぞれ 86% および 91% であり、FRP せん断補強筋と同程度の性能を有していると考えられる。アクリル系樹脂を含浸した No.1 は、計算値の 73% であるが、ひずみが測定できなかった補強筋のひずみを履歴内(1200kN)の値相当が作用していたとして算出した場合には、計算値とほぼ同程度の耐力を受け持っていたと推察される。せん断補強筋の平均ひずみは、推定法による計算値に比べて小さいが、せん断補強筋によって受

け持たれるせん断耐力は大きい。これは、ひび割れ角度の推定値に対して実験で生じたひび割れ角度が小さく、ひび割れを跨ぐせん断補強筋の数が多いためである。

指針（案）および推定法によるせん断耐力と実験値を表一3に示す。実験結果は計算値より大きいことが明らかである。しかしながら、せん断補強筋間隔を2倍にしたNo.3の実験値は、No.2より若干小さい。せん断補強筋間隔を変えた場合の推定法によるせん断耐力を図一9に示す。このときのコンクリート強度は50N/mm<sup>2</sup>とした。この結果によれば、補強筋間隔100mmと200mmではせん断耐力にほとんど差が出ないことがわかる。補強筋間隔が大きくなれば、せん断補強筋が受け持つ耐力が減少し、中立軸深さが大きくなり、圧縮域のコンクリート断面積が増加するため、コンクリートが受け持つ荷重は増加する傾向を示している。このようなことから、実験では圧縮強度の影響が顕著に表れなかったことが考えられる。

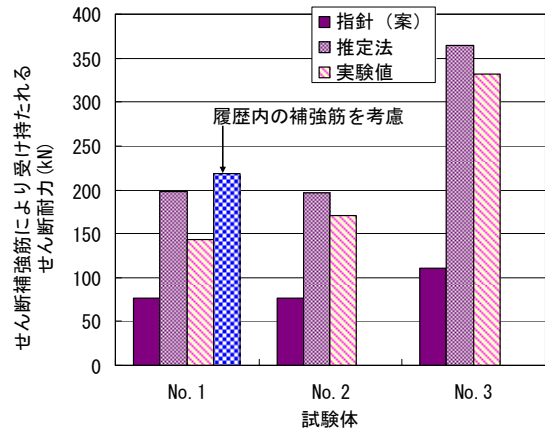
#### 4. まとめ

アラミド繊維帯材をせん断補強筋に使用したPC梁の載荷実験を行い、梁のせん断耐力について検討した結果、以下の結果が得られた。

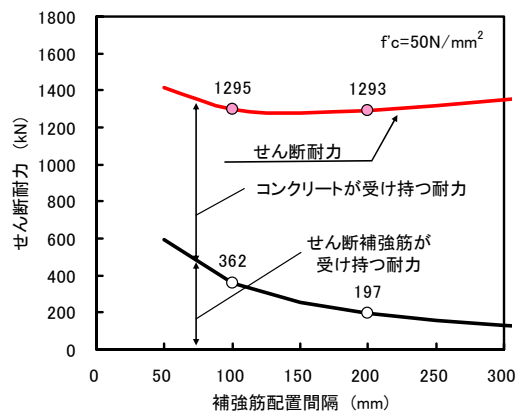
- (1) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）に基づいて算出したせん断耐力に対して、アラミド繊維帯材をせん断補強筋として用いたPC梁のせん断耐力は大きく、連続繊維補強材と同程度安全側に評価され、同様の設計法を適用できる。
- (2) せん断ひび割れ位置に生じたアラミド繊維帯材の引張応力は、コンクリートとの付着によりひび割れ面から離れるに従って低下する。曲げ配置部近傍にひび割れが生じることを除けば、直線部の耐力が期待できる。
- (3) ひび割れ幅とアラミド繊維帯材のひずみとの間には、8000 $\mu$ 程度まで線形関係が得られるが、それ以降は、ひび割れ幅に対してひずみの増加は小さくなり、1本のせん断補強筋に荷重が集中するのを抑制する。

#### 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, pp33-38, 1992
- 2) 竹之井勇, 浅井洋, 中島規道, 藤田学: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1483-1488, 2006



図一8 せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力の比較



図一9 せん断補強筋間隔とせん断耐力の関係

- 3) 浅井洋, 竹之井勇, 中島規道, 藤田学: アラミド繊維をせん断補強材に用いた梁のせん断耐力, 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6巻, pp.313-318, 2006.10
- 4) 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, 1996
- 5) 佐藤靖彦, 上田多門, 角田與史雄: せん断補強筋を有する連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力の定量的評価, 土木学会論文集, No.520, V-28, PP.157-169, 1995.8
- 6) 佐藤靖彦, 上田多門, 角田與史雄: せん断補強筋を有する連続繊維補強プレレストコンクリートはりのせん断耐力, 土木学会論文集, No.520, V-28, PP.213-224, 1995.8
- 7) 佐藤靖彦, 上田多門, 角田與史雄: せん断補強筋を有する鉄筋コンクリート及びプレレストコンクリートはりのせん断耐力, 土木学会論文集, No.544, V-32, PP.43-52, 1996.