

# 論文 連続繊維緊張材使用 PC ロッド埋設によるはりのせん断補強

近藤順\*1・出光隆\*2・山崎竹博\*3・久松光世\*4

要旨：連続繊維緊張材でコンクリートはりのせん断補強をするには、繊維のせん断耐力よりも引張耐力を有効に利用して補強する方法を考えなくてはならない。本研究では、連続繊維緊張材を用いてプレキャストPCロッドを製作し、鉄筋組立時にせん断区間に設置してコンクリートを打込みせん断補強を行った。その結果、PCロッドによるせん断補強効果は、PCロッド自身がせん断補強材として働き、せん断耐力の向上、せん断ひびわれの抑制に対し、ポストテンション方式のプレストレスによる補強効果と同程度以上の優れた特性を示した。

キーワード：連続繊維，せん断，プレストレス，PCロッド，載荷試験

## 1. まえがき

一般に、連続繊維緊張材は延性に乏しく、それ自体の剛性も小さい。そのためせん断補強鉄筋の代替として用いる場合、せん断ひびわれ面など、ずれ変形を受ける場合では十分な補強効果を発揮できないことがある。筆者らは数年来、連続繊維緊張材でプレストレスを導入するせん断補強方法について検討してきたが、安全、省力、迅速化の観点から、あらかじめ連続繊維緊張材でプレキャストPCロッドを作り、それを鉄筋組立時に配置してせん断補強する方法を考え、実際にはり供試体を製作し、その力学特性およびせん断補強効果などを調べた。この方法のメリットは、ロッドをプレキャスト部材とすることにより、現場での緊張作業がなくなり、その結果コンクリート構造物のせん断補強材としての応用範囲が広がることなどが考えられる。また、連続繊維緊張材の配置角度でせん断補強効果が異なると考えられるので、配置角度を変えた場合のせん断補強効果についても基礎的な試験を行った。この試験はプレキャストPCロッドを用いず、直接はりにプレストレスを導入する方法で実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験で使用したせん断補強筋は、 $\phi 10.4\text{mm}$ および $\phi 9.0\text{mm}$ の組紐状アラミド繊維緊張材で、これらの材料特性値を表-1に示す。なお、はりのせん断補強効果を明らかにするため主鉄筋には、連続繊維緊張材を用いず、異形

表-1 緊張材の特性値

緊張材 繊維の 種類	公称直径 (mm)	緊張材 断面積 ( $\text{mm}^2$ )	保証破断荷重 (tf)	破断荷重 (tf)	弾性係数 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	伸び率 (%)
アラミド	10.4	85.0	12.8	17.0	8140	2.39
	9.0	63.0	9.6	11.0	7150	2.45

\*1：オリエンタル建設（株）技術研究所 主任研究員、（正会員）

\*2：九州工業大学教授 設計生産工学科 建設工学教室、工博（正会員）

\*3：九州工業大学助教授 設計生産工学科 建設工学教室、工博（正会員）

\*4：オリエンタル建設（株）技術研究所 副所長、（正会員）

P C鋼棒φ32を緊張しないで用いた。コンクリートの設計基準強度は、500kgf/cm<sup>2</sup>とした。

## 2.2 供試体

供試体は、表-2に示すように、連続繊維緊張材の種類、プレストレスの有無、せん断補強の配置角度、補強方法を実験要因とした6種類各2体計12体とした。なお、緊張力は各緊張材の保証破断荷重の60%とした。ここで、せん断補強材に角度を設けて配置したA6-60、A6-45供試体についてはせん断破壊時の荷重が、試験装置の能力を超える可能性があるため、鉛直(90°)配置した供試体に用いた

表-2 供試体の種類

供試体名	せん断補強筋	緊張力(tf)	補強材角度(度)
N	なし	0	なし
R-A6-90	アラミドφ10.4	12.8×0.6	90(ロッド)
A0-90	アラミドφ10.4	0	90
A6-90	アラミドφ10.4	12.8×0.6	90
A6-60	アラミドφ9.0	9.6×0.6	60
A6-45	アラミドφ9.0	9.6×0.6	45

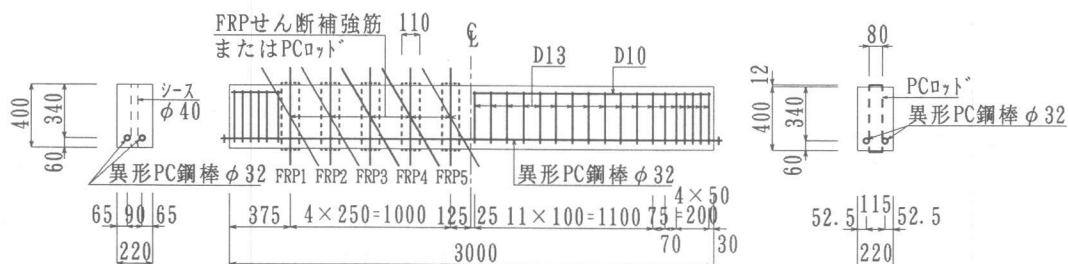


図-1 供試体の形状寸法および配筋図

φ10.4mmより一回り小さいφ9.0mmを用いた。図-1に供試体の形状寸法を示す。供試体はすべて200×400×3000mmの矩形断面はりとし、有効高を340mmとした。せん断補強筋は、供試体の片側半分に配置し、他方は鉄筋で十分せん断補強をおこなった。図-1中の破線はP Cロッドを示し、斜線は角度を設けて配置したせん断補強材を示す。P Cロッド供試体の製作はプレキャストP Cロッドを鉄筋組立時にせん断区間に配置し、型枠を組んで後打ちコンクリートを打込んだ。P Cロッドは110×80×424mmの矩形断面で、中央にアラミド繊維緊張材φ10.4mmを配置して緊張した。P Cロッドの表面は、後打ちコンクリートとの付着を良くするため、型枠表面とコンクリート打込み直後の仕上げ面にリターダーを噴霧し、脱枠後高圧水を噴射し、表面を粗化した。P Cロッドのプレストレス導入はポストテンション方式とした。これは、ロッドが短いためプレテンション方式では十分な定着長さが得られないためである。

## 2.3 実験方法

荷重方法は単純ローラー支持の対称二点荷重とし、はりのせん断スパン比が  $a/d=3.0$  となるように、スパンを2540mm,せん断スパン  $a$  を1020mmとした。加圧は単調漸増静荷重とし、荷重の管理にはロードセルを用いた。なお、支点および加圧点には、はりのスパン方向に5cm,幅方向に22cm厚さ1cmの鋼板を用いた。5tf毎に緊張材のひずみ,供試体のたわみを計測するとともにクラックスケールを用いてひびわれ幅を測定した。せん断スパン比を  $a/d=3.0$  のみについて行ったのは、通常行われている  $a/d=2.5$  で行くと、支承反力の影響を受け  $a/d=3.0$  よりもせん断耐力が若干上回ることがわかっているためである[1]。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 せん断耐力

##### (1) せん断耐力の算定

せん断耐力等の実験結果をまとめたものを表-3に示す。せん断耐力Pcalの計算に当たっては次式を用いた。

$$V_c = 0.94 (f_c \cdot p)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot \{0.75 + \frac{1.4}{(a/d)}\} b \cdot d \quad (1)$$

$$V_s = \frac{A_{sf} \cdot E_{sf} \cdot \epsilon_{sf}}{s} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot \frac{d}{1.15} \quad (2)$$

ここに  $V_c$ :コンクリートの受持つせん断力  $V_s$ :せん断補強筋の受け持つせん断力  
 $f_c$ :コンクリートの試験圧縮強度,  $a$ :せん断斜角,  $b, d$ :はりの幅,有効高さ,  $p$ :引張鉄筋比  
 $A_{sf}, E_{sf}, \epsilon_{sf}$ :せん断補強筋の断面積,弾性係数,0から引張破断までのひずみ  
 $s, \alpha$ :せん断補強材の間隔,配置角度

式(1)はせん断補強筋のない部材のせん断耐方式[2]で、式(2)は、鳥取らの式[3]である。鳥取らの報告によるとせん断補強筋を緊張しなくて用いた場合ひずみ $\epsilon_{sf}$ が10000 $\mu$ を超えるとせん断耐力値は増加しないとあるので、ノンプレストレスのA0-90供試体の計算はそれに従った。プレストレスを導入した供試体についてはプレストレスによるひずみに10000 $\mu$ を加えると式(2)の $A_{sf} \cdot E_{sf} \cdot \epsilon_{sf}$ の値が緊張材の保証破断荷重を超えるのでこの値を保証破断荷重とした。

表-3に示す $V_s$ の等価耐力比は以下の理由により算出を行った。各供試体に用いたせん断補強筋の保証破断強度が異なるため、供試体のせん断耐力値を直接比較することができない。また、試験結果のせん断耐力が、 $V_c$ と $V_s$ の和であるため、せん断補強材のせん断耐力におよぼす効果が明確にわからない。そこで、これらのことを考慮して、通常せん断補強材として用いられているノンプレストレス供試体A0-90を基準値1.0とし、次式により各供試体の $V_s$ の等価耐力比を求め、各供試体のせん断補強材のせん断耐力におよぼす影響の比較が容易にわかるようにした。

$$V_s \text{の等価耐力比} = (P_{test} - 2 \times V_c) \cdot (f_{uA0} / f_u) / (P_{A0} - 2 \times V_c) \quad (3)$$

ここに  $P_{test}, P_{A0}$ :各供試体,A0-90供試体の最大せん断耐力値  
 $f_u, f_{uA0}$ :各供試体,A0-90の緊張材の保証破断荷重  $V_c$ :圧縮強度結果を用いて式(1)で計算

表-3 試験結果一覧

供試体名	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断 ひびわれ 発生荷重 (tf)	P = 2 × (V <sub>c</sub> + V <sub>s</sub> ) (tf)			V <sub>s</sub> の等価 耐力比 試験値	破壊形式
			P <sub>test</sub> 試験値	P <sub>cal</sub> 計算値	P <sub>test</sub> P <sub>cal</sub>		
N	599	26.4	26.4	24.3	1.09	(0.07)	せん断圧縮
R-A6-90	489	40.0	72.8	53.0	1.37	1.82	せん断圧縮
A0-90	599	28.6	51.8	40.6	1.28	1.00	せん断圧縮
A6-90	599	34.1	71.7	54.6	1.31	1.72	せん断圧縮
A6-60	428	37.5	65.1	52.7	1.24	2.14	せん断圧縮
A6-45	370	37.5	67.4	57.8	1.28	2.29	曲げ圧縮

※破壊はすべてコンクリートで破壊し、せん断補強筋の破断によるものはなかった。

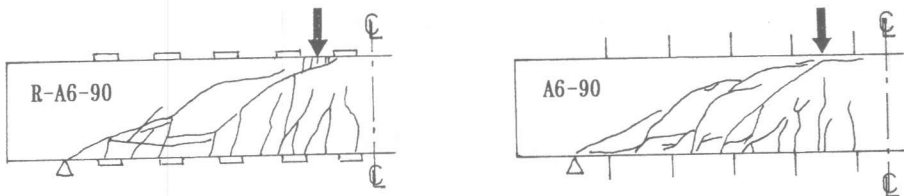
## (2) PCロッド供試体のせん断耐力およびせん断ひびわれ発生荷重

表一3に示すように、PCロッドを用いたR-A6-90 供試体のせん断耐力試験値は計算値の1.37倍あり、PCロッドを用いない同条件のA6-90 供試体と同程度以上の耐力がありPCロッドがせん断補強材として十分抵抗していることがわかる。また、せん断ひびわれ発生荷重もA6-90 供試体を若干上回り優れた特性を示した。PCロッド供試体を含め試験値が計算値を大きく上回ったのは、計算値 $P_{cal}$  に使用した緊張材の強度を設計計算値と試験値の比較をするため、実破断荷重でなく保証破断荷重を用いたこともあるが、それを考慮し、実破断荷重を用いて各供試体の試験値に対する計算値の耐力比を計算すると 1.1~1.16となりそれでも試験値は計算値を上回った。このことから、PCロッドをせん断補強材として用いる場合も、保証破断荷重を用いてせん断耐力の計算を行えば十分安全といえる。

表一3に示すようにPCロッド供試体R-A6-90 のせん断ひびわれ発生荷重は40tfで、せん断補強筋のないN供試体の値26.4tfとの差は13.6tf ある。せん断力に対する使用限界状態に対する検討を行う場合土木学会制定「コンクリート標準示方書」では、せん断力を受ける部材で、設計せん断力 $V$ が式(1)より求められるコンクリートのせん断力 $V_c$  より小さい場合、せん断ひびわれの検討を行わなくてもよいとある。PCロッド供試体のひびわれ発生荷重が高いことから使用限界状態に対する検討の計算に今後反映できるものと考えられる。

### 3.2 破壊およびひびわれ状況

PCロッド供試体R-A6-90とPCロッドを用いない同条件のA6-90供試体の最終ひびわれ状況を図一2に示す。PCロッド供試体R-A6-90 のひびわれ発生状況は、まず純曲げスパン内に曲げひ



図一2 最終ひびわれ状況

びわれが生じ、次にせん断スパン内のはり下側の曲げひびわれが生じた。その後荷重を加えるとせん断スパン内のひびわれは、斜めひびわれに変わり、3本程度のせん断ひびわれが支配的になりそのひびわれは載荷点方向と支点方向の両側に伸び、最終的には、上縁のせん断圧縮破壊に至り、PCロッドを用いない同条件のA6-90 供試体と同じひびわれ状況と破壊形態を示した。PCロッドの影響による異常なひびわれは、認められなかった。

### 3.3 せん断ひびわれ幅

図一3にPCロッド供試体R-A6-90 とその比較供試体の荷重とひびわれ幅の関係を示す。PCロッド供試体は、PCロッドを用いない同条件のA6-90 供試体と同様ノンプレストレス供試体A0-90より高い荷重においても、ひびわれ幅が小さくなっている。せん断補強筋のないN供試体は破壊荷重直前で急激にひびわれ幅が進行するのに対しノンプレストレス供試体A0-90 は荷重に対しひびわれ幅の増加は緩やかであるが、同じ荷重で比較するとPCロッド供試体よりかなり大きなひびわれ幅が測定されている。このことから、PCロッドをせん断補強材として用いると、高荷重においてもひびわれ幅が小さく、せん断力に対してひびわれ発生後、ひびわれ抑制の効果が

きいことがわかった。

### 3. 4 荷重とせん断補強筋のひずみ

荷重とせん断補強材のひずみの関係をPCロッドについては図-4(a)に、A6-90については図-4(b)にそれぞれ示す。この二つの供試体を比較するとほぼ同じ傾向を示しているが、異なった点はPCロッド供試体は40tf付近まで、5本の緊張材すべてひずみがほとんど発生していないのに対しA6-90供試体は35tf付近まで発生していない。このことは、せん断ひびわれがその荷重まで供試体に発生していないことを示す。また、▲印の3本目の緊張材に注目するとPCロッドの場合最大ひずみが4000 $\mu$ であるのに対しA6-90供試体は7200 $\mu$ で大きな差が生じている。この原因はPCロッドに導入したプレストレスが多少目標値よりも大きかったことによるものと思われる。また、

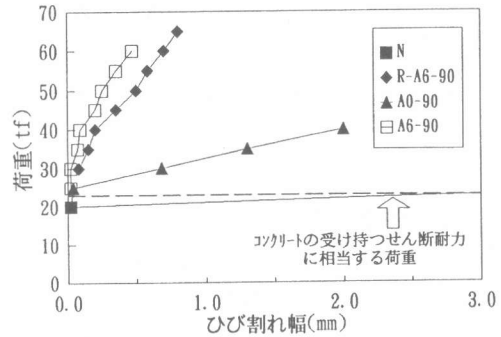
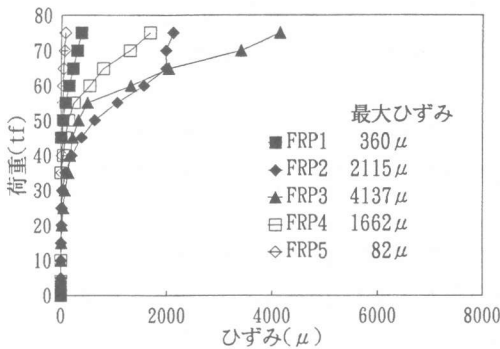
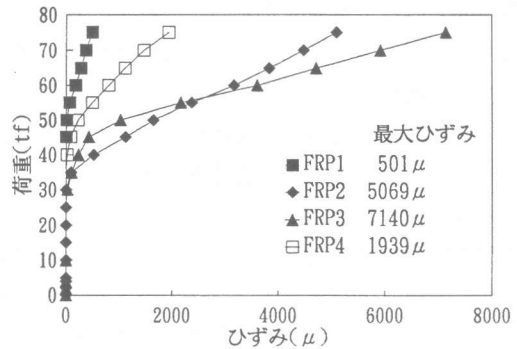


図-3 荷重とせん断ひびわれの関係

図-3 荷重とせん断ひびわれの関係



(a) R-A6-90供試体



(b) A6-90供試体

図-4 荷重とひずみの関係

それにより、荷重-ひずみ曲線の変曲点が3本目の緊張材ではA6-90供試体が45tf付近であるのに対し、PCロッド供試体は55tf付近と大きくなっている。せん断補強筋のひずみはせん断耐力算定をする時の式(2)に用いられているが、供試体の有効高に対しせん断補強筋間隔が大きいことや、ひずみ測定ゲージの位置等により実際の最大ひずみを捕らえていない可能性がある。したがって、本研究では耐力計算の際この試験で得られた緊張材のひずみを直接用いることは行わなかった。

### 3. 5 荷重とたわみの関係

図-5にPCロッド供試体R-A6-60とその比較供試体の荷重とせん断スパン中央たわみの関係の実験結果を示す。同図から明らかなように、せん断補強をしていないN供試体が破壊した25tf付近まで、どの供試体も荷重とたわみの関係は直線的で弾性挙動を示しているが、それ以降ノンプレストレスの供試体A0-90は急にたわみが増加している。これに対しプレストレスを導入した供試体A6-90、PCロッド供試体は、緩いカーブで増加しており変曲点がない。たわみ量は、せん

断ひびわれ幅と深く関係しており、せん断ひびわれ幅が大きい供試体ほどたわみが大きいと言える。図-5の荷重とたわみの関係からPCロッド供試体のたわみは、ノンプレストレス緊張材のものに比べ、ひびわれ後の荷重では明らかに小さい。

#### 4. 配置角度の効果

表-3に示す $V_s$ の等価耐力比の値は、せん断補強筋の受け持つせん断耐力の試験値の比であるが、式(2)を用いて $V_s$ の計算等価耐力比を求めると、緊張材のないものは0、鉛直プレストレスを導入したもの1.85、プレストレスを $60^\circ$ の角度で導入したもの2.53、 $45^\circ$ で導入したもの2.62と各々算出される。表-3の結果をみると試験値はこの計算上の値より小さ目ではあるが、ほぼ同程度の値を示している。したがってせん断補強材は緊張しないで用いるより緊張した方が、鉛直よりも $60^\circ$ さらに $45^\circ$ の角度で配置した方が、高いせん断補強効果を示すことがわかった。また、表-3に示すようにせん断補強筋に角度を設けて配置した場合、試験値と計算値の比が他の供試体とほぼ同じであることから、 $V_s$ の算定に当たっては式(2)の角度の項( $\sin\alpha + \cos\alpha$ )で計算評価できるものと考えられる。

#### 4. まとめ

(1)連続繊維緊張材をせん断補強材として用いた場合、従来の鉄筋代替として用いるよりも緊張を行って用いた方が材料強度を極限まで生かすことができ、せん断耐力、せん断ひびわれの抑制に大きな効果がある。

(2)連続繊維緊張材使用プレキャストPCロッドをせん断補強材として用いた場合のはり供試体のせん断耐力は緊張材のプレストレスを考慮した計算値を上回った。このことからPCロッドと後打ちコンクリートとは一体として挙動していることがわかる。

(3)PCロッドをせん断補強筋として用いるとせん断ひびわれの発生を遅らすことができる。

(4)PCロッドをせん断補強筋として用いるとひびわれ発生後のひびわれ幅の成長を抑制することができる。また、PCロッドの影響による異常なひびわれは生じていない。

(5)せん断補強材の配置角度を $60^\circ$ 、 $45^\circ$ とした場合、鉛直配置したものよりもせん断耐力は大きくなりひびわれ幅の抑制効果が大きい。

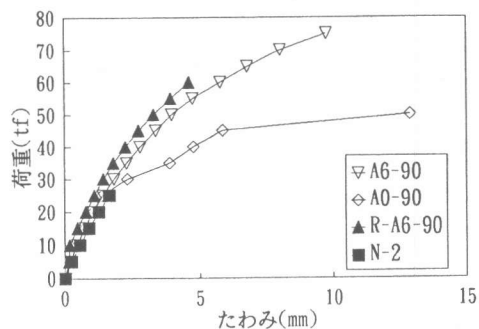


図-5 荷重とたわみの関係

<謝意>本実験の実施及び本論文の作成にあたって多大な協力をいただいた当時九州工科大学院生岳尾 浩一氏(現大成建設)、学部生西川佳彦氏(現前田建設工業)に敬意を表します。

<参考文献>

- 1)近藤順・出光隆・原田哲夫・吉岡民夫：連続繊維緊張材を用いて鉛直プレストレスを導入したはりのせん断試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.6, No.1 pp.1221-1225、1994.6
- 2)石橋忠良・斉藤啓一・寺田年夫：RCはりの腹部に配置された軸方向鉄筋のせん断破壊性状に及ぼす影響について、セメント技術年報40、pp.495-497、1986
- 3)鳥取誠一・佐藤勉：連続繊維補強材を用いた側壁梁方式ガイドウェイの設計法に関する研究、プレストレスコンクリート Vol.35 No.1 pp.59-67、1993.2