

[1118] アラミド繊維による組紐状棒材を用いた PC はりの静的耐荷挙動

正会員 ○三上 浩（三井建設 土木技術部）

林 寿夫（三井建設 技術研究所）

正会員 加藤 正利（三井建設 土木技術部）

正会員 田村 富雄（三井建設 技術研究所）

1. はじめに

本文は、アラミド繊維を組紐状に成形した棒材をプレテンショニング用PC緊張材に使用した場合の、コンクリートはりの耐荷特性に関する実験的研究結果を報告するものである。同時に、PC鋼棒を使用したプレテンショニングはりの実験を行い両者を比較検討した。本実験では、緊張材に与える初期緊張力を変えることにより、PCはりの下縁応力度を3段階に変化させ、初期緊張力の大きさが、はりの耐力、破壊形態等の耐荷特性に与える影響について調べた。

2. 使用した緊張材とコンクリートの力学的諸特性

2.1 組紐状棒材

使用したアラミド繊維製棒材には2種類あり、一方は棒材の表面に砂を接着させたもので、他方は未処理のものである。棒材の直径は8mm、断面積は0.5cm²、基準引張強度は6.4ton、弾性係数は 0.66×10^6 (kgf/cm²)で破断時の歪みは 2.2×10^{-2} 程度である。ここで、基準引張強度とは、棒材118本の引張試験における平均引張強度7.15tonに対して、約 3σ (σ :標準偏差)の安全性を考慮した強度である。また、見掛けのボアソン比(異方性体のため見掛けのボアソン比と仮称する)は0.6程度で、純リラクセーション率は10%程度である。前述した弾性係数および見掛けのボアソン比は、118本の供試体の引張試験における平均値である。なお、引張試験時の棒材の定着には、樹脂に砂を混ぜた樹脂定着具を用い、歪みの測定は棒材の表面に張り付けた歪みゲージで行った。

一方、本実験に先立ち、プレテンショニング用緊張材として極めて重要な定着特性を把握するための実験を行った。この実験に用いたコンクリート供試体の形状は、円柱状で直径φが各々50, 75, 100mm、長さL=1000mmで断面図心位置に組紐状棒材を緊張材として一本配置したものと、はり状ではり高さが15cm、はり幅10cm、はり長さL=1200mmで断面核点位置に棒材を一本配置したものである。緊張力を徐々に解放した時のコンクリート表面の歪みから、何れの供試体においても、組紐状棒材の付着長(材端から有効プレストレスの95%が導入される点までの距離)は砂付き棒材で約20D(Dは棒材直径)、砂無し棒材では30~35D程度と、PC鋼線と同程度もしくは、それよりも短い結果を示しており、プレテンショニング用緊張材として十分使用できるものである。

2.2 PC鋼棒

使用したPC鋼棒はJIS G 3109 D種1号(ウルボン)で、直径は9.2mm、断面積は0.66cm²、引張荷重が9.7ton、弾性係数は 2.05×10^6 (kgf/cm²)、リラクセーション率は0.6%である。

2.3 コンクリート

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。粗骨材の最大寸法は10mmで、いわゆるマイクロコンクリートである。上記配合におけるコンクリートの材令1~2週における圧縮強度は400

(kgf/cm²) , 弹性係数は 2.7×10^5 (kgf/cm²) 程度である。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの 範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨 材 s	粗骨材 G	流動化 剤	AE減水 剤
10	10±2	4±1	33.5	37.0	156	466	627	1076	4.66	4.66

3. 実験概要

3.1 供試体の種類

供試体の種類は、表-2に示す 9種類であり、緊張材の種類（3種類）と初期緊張力の大きさ（3段階）をバラメータとした。ここで Pu は、組紐状棒材の基準引張強度を示し、初期緊張力が 0.2Pu における、はり下縁の初期プレストレスは $17.1(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、0.4Pu 時は $34.1(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、0.6Pu 時は $51.2(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ である。

3.2 供試体形状寸法および載荷方法

供試体形状寸法および載荷方法を図-1 に示す。供試体は、はり高さ 20cm, はり幅 15cm で、はりの純スパンは 200cm である。緊張材は断面の核半径位置に 2本配置し、初期緊張力を与えることによるはり上縁のコンクリート歪みは、ほとんど 0 である。

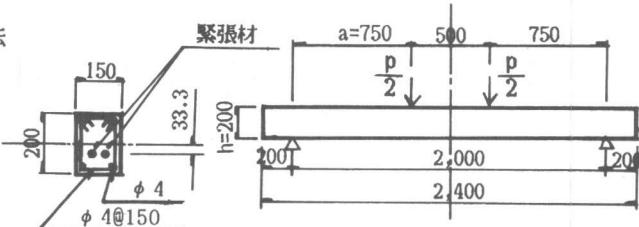
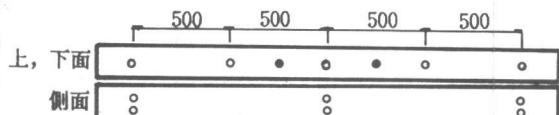


図-1 供試体形状寸法および載荷方法

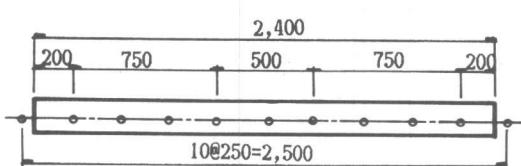
載荷は 2点載荷とし、せん断スパンはり高比 (a/h) は 3.75 とした。なお、緊張力の導入にはセンターホールジャッキとキリンジャッキを用い、緊張力の管理はロードセルによって行った。

3.3 歪みゲージおよび変位計取り付け位置

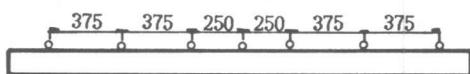
はりの上、下面及び側面と組紐状棒材表面の歪みゲージ取り付け位置および変位計の取り付け位置を図-2 に示す。



歪みゲージ（はりの上下面、側面）



歪みゲージ（組紐状棒材）



変位計

図-2 歪みゲージおよび変位計取り付け位置

4. 実験結果および考察

4.1 ひび割れ図

図-3 に、初期緊張力が 0.4Pu における供試体のひび割れ図を示す。砂付き棒材を使用したはりの方がひび割れの分散性が高く、付着性能が良好であることがわかる。緊張材位置に発生した

水平方向のひび割れの大部分は、部材が破壊した時に発生したもので、棒材とコンクリートとの付着が大変形により切れたためと考えられる。

4.2 荷重-変形曲線

図-4に、はり中央での荷重-変形曲線を示す。組紐状棒材を用いた供試体の変形は、ひび割れ前の弾性領域と遷移領域、および棒材の示す弾性領域から成立している。初期緊張力が大きなはりほど破壊時の変形量が小さく、破壊荷重は大きい。

PC鋼棒を用いたはりでは、荷重が3tonを超えたあたりから変形量が大幅に増加し始めたが、これは付着が良好でなかつたためと考えられる。

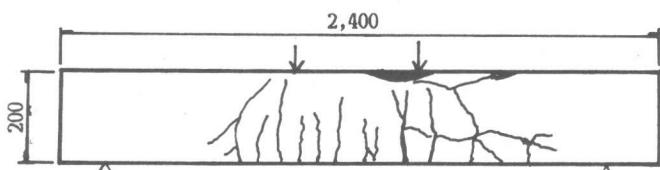
4.3 組紐状棒材の歪み分布

棒材に張り付けた歪みゲージの読みから、各荷重段階ごとの各測点における棒材の歪みを図-5に示す。砂付き棒材の場合、測点Bより支点側には、載荷重による歪みは、ほとんど発生していない。砂無し棒材では、載荷重が大きくなるにしたがって測点C, B, Aに歪みが生じてくる。ただし、測点Aすなわち支点位置における歪みは僅かである。

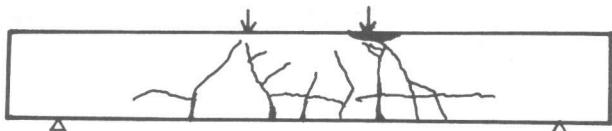
これは、棒材に砂を接着させると付着性能が良好になることを示している。しかし、はり中央における棒材の歪みは、砂付き、砂無しどちらの場合でも大差無く、このため破壊荷重に大きな差異が生じなかつたと推定される。

4.4 初期緊張力と部材破壊時の各種実験量の関係

はり破壊時における載荷重によるモーメントは既知であり、これと内力のなすモーメントは釣合っていると考える。この時、コンクリートの圧縮強度をもとにして、全圧縮力を中立軸からはり上縁までの距離 x に関する1次式で表し、これをモーメントの釣合い式に代入する。こうして得られた x に関する2次方程式を解くことにより、中立軸の位置 x が求まる。この x とコンクリート上縁の圧縮歪みより、組紐状棒材位置でのコンクリートの歪みを平面保持の仮定をもとに推定することができ、この歪みの推定値と実測された棒材の歪みの割合を付着係数と仮称する。



組紐状棒材（砂付き）



組紐状棒材（砂無し）

図-3 ひび割れ図（0.4 Pu時）

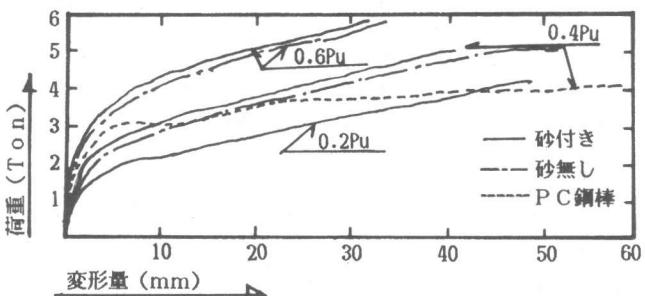


図-4 荷重-変形曲線（はり中央）

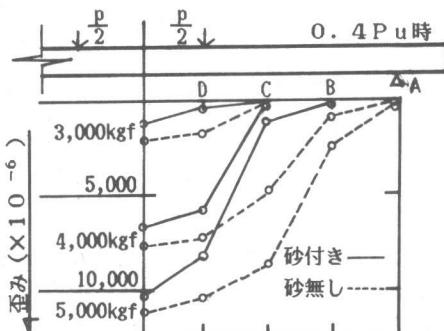


図-5 棒材の歪み分布

図-6 a に、付着係数を示す。これによると、付着係数は初期緊張力と棒材の表面粗度に影響されると考えられる。ただし、初期緊張力が大きくなると、表面粗度の影響度は低下する。

これは、組紐状棒材は見掛けのボアソン比が大きいため、接触圧力（緊張解放後、棒材とコンクリート間に発生する棒材径の増加に基づく圧力を仮称したもの）の低下が起こり、また、低初期緊張力の場合は、接触圧力よりも表面粗度のほうが付着に対して影響度が大きいためと推察される。

図-6 b に示すように、初期緊張力が大きいほど、破壊荷重は大きくなっている。これは、今回のはり断面、緊張材の位置および初期緊張力の大きさでは、緊張材の破断によるはりの破壊は生じにくいためと予想される。

図-6 c より、部材破壊時の変形量は、初期緊張力の大きさと、使用した棒材の表面粗度（付着係数）に依存することがわかる。

図-6 d に示すように、コンクリートの圧縮歪みは付着係数の低い0.2 Pu時の砂無し棒材を用いた場合を除き、ほぼ同程度である。

図-6 e に、組紐状棒材の、はり破壊時における歪みを示す。この歪みは、初期緊張力に対応する初期歪みと、部材に載荷することによって棒材に生じた歪みを加算したものである。初期緊張力が大きいほど、部材破壊時の棒材の歪みは大きくなっている。部材の破壊が棒材の破断によって生じたものではないことを示すものと考えられる。

5. 部材の破壊荷重の計算

5.1 計算に用いた組紐状棒材の応力-歪み関係

プレテンショニングはりの製作時から載荷試験終了までに組紐状の棒材には、図-7 a に示す荷重-時間関係と図-7 b に示す応力-歪み関係が成立していたものと推定される。ここでは、実験結果より荷重の中間放置以後の棒材の応力-歪み関係を図-7 b のようにモデル化して部材の破壊荷重の計算を行う。

このような応力-歪み関係が生じる一つの要因としては、組紐状の棒材を高荷重下で変形を一定にし、長期間にわたり保持することにより、組紐が締まり荷重保持以前の見掛けのボアソン比よりも、荷重保持以後の見掛けのボアソン比が小さくなることが予想される。この時、荷重保持以後の弾性係数は、荷重保持時の荷重強度と、荷重保持時間等に依存するようであるが、ここでは、実験結果をもとに図-8 のように仮定して考える。

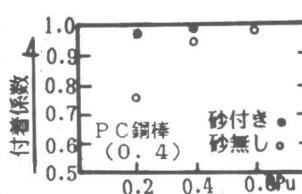


図-6 a 付着係数

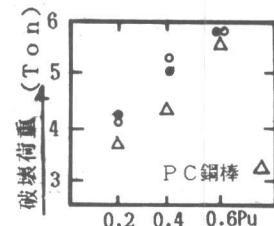


図-6 b 破壊荷重

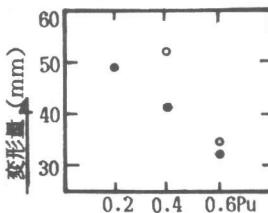


図-6 c 変形量

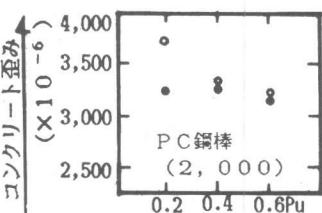


図-6 d コンクリート歪み

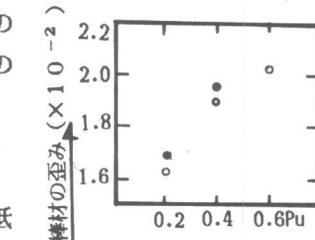


図-6 e 棒材の歪み

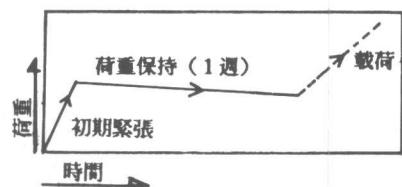


図-7 a 荷重-時間関係

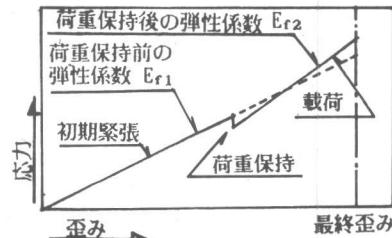


図-7 b 応力-歪み関係

5.2 部材破壊時における棒材の歪みの推定式

(a) 平面保持の仮定より

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pe} + f \frac{d - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (a)$$

(b) 組紐状棒材の応力-歪み関係より

$$\sigma_p = \beta \cdot E_{f1} \cdot \varepsilon_{pe} + E_{f2} \cdot f \frac{d - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (b)$$

(c) 断面力の釣合いより

$$\alpha b x \sigma_{cu} = A_f \cdot \sigma_p \quad (c)$$

(a),(b),(c) 式を基に ε_p についての 2次方程式を解くと(d) 式が得られる。

$$\varepsilon_p = -\frac{1}{2} \left[\varepsilon_{pe} \left(2 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \varepsilon_{cu} \right] + \frac{1}{2} \sqrt{\left[\varepsilon_{pe} \left(2 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \varepsilon_{cu} \right]^2 + \frac{4 f \alpha b d \sigma_{cu} \varepsilon_{cu}}{A_f \cdot E_{f2}} - 4 \left(1 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) (\varepsilon_{pe}^2 - \varepsilon_{pe} f \varepsilon_{cu})} \quad (d)$$

ここで

ε_p : 部材破壊時の組紐状棒材の歪み ($\times 10^{-6}$)

f : 付着係数 (前述)

ε_{pe} : 初期緊張力に対応する棒材の歪み (〃)

d : はりの有効高さ (cm)

ε_{cu} : 上縁コンクリートの圧縮破壊歪み ($\times 10^{-6}$)

x : 中立軸から上縁までの距離(cm)

σ_p : ε_p に対応する応力 (kgf/cm^2)

β : $1 - r$

σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (〃)

b : はりの幅 (cm)

E_{f1} : 棒材の荷重保持前弾性係数 (kgf/cm^2)

r : 棒材の純リラクセーション率

E_{f2} : 棒材の荷重保持後弾性係数 (〃)

α : コンクリートに関する係数 (0.85)

A_f : 棒材の断面積 (cm^2)

ε_{pe} : 初期緊張力 ($\times 10^{-6}$)

5.3 ε_p と ε_{pe} の相関関係および部材の破壊形態について

(d) 式を用いて、各初期緊張力に対応する部材破壊時の棒材の歪みを推定した。結果を図-9 に示す。ここで、 E_{f1} は $0.66 \times 10^6 (\text{kgf/cm}^2)$ 、純リラクセーション率は 10%とした。この図より、初期緊張力を 0.7Pu 程度以上とすると、部材の破壊形態はコンクリートの圧縮破壊から、棒材の破断による破壊へと移行するであろうことが予想される。今回の実験でも初期緊張力を大きくしていくと、曲げモーメント一定区間のひび割れ幅が大きくなる傾向を示しており、上記予想の妥当性を表すものと考えられる。

以上から、この種の棒材を緊張材として用いた部材の破壊形態は、部材断面寸法と緊張材の本数、配置および初期緊張力に大きく影響されると考えられる。

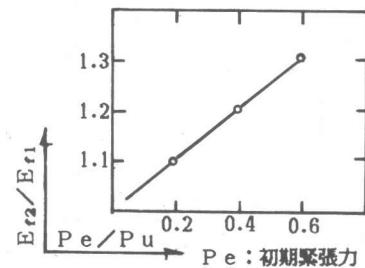


図-8 保持荷重と弾性係数の増加割合の関係

(c)

(d)

(d)

ε_p : 部材破壊時の組紐状棒材の歪み ($\times 10^{-6}$)
 ε_{pe} : 初期緊張力に対応する棒材の歪み (〃)
 ε_{cu} : 上縁コンクリートの圧縮破壊歪み ($\times 10^{-6}$)
 σ_p : ε_p に対応する応力 (kgf/cm^2)
 σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (〃)
 E_{f1} : 棒材の荷重保持前弾性係数 (kgf/cm^2)
 E_{f2} : 棒材の荷重保持後弾性係数 (〃)
 A_f : 棒材の断面積 (cm^2)

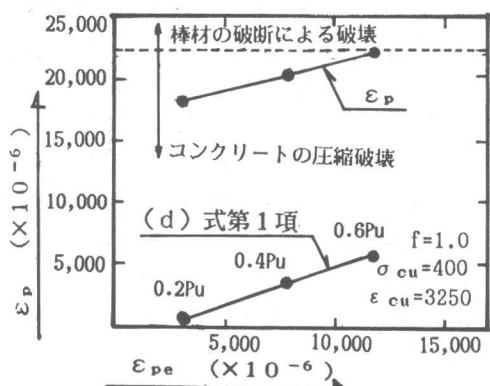


図-9 ε_p と ε_{pe} の相関関係および部材の破壊形態

5.4 計算値と実験値の比較

表-3に、部材破壊時の棒材の歪みおよび破壊荷重の計算値と実験値との比較を示す。なお、荷重保持前の棒材の弾性係数および純リラクセーション率は5.3の記述と同様とした。

表-3

初期緊張力の大きさ	表面処理	付着係数の推定値	弾性係数の増加割合の仮定値	棒材の実測歪み ①	棒材の計算歪み ②
0.2Pu	砂付き	0.97	10%	16, 927×10 ⁻⁶	17, 600×10 ⁻⁶
	砂無し	0.76		16, 085 //	16, 961 //
0.4Pu	砂付き	1.00	20%	19, 427 //	20, 324 //
	砂無し	0.95		18, 909 //	20, 016 //
0.6Pu	砂無し	0.98	30%	20, 185×10 ⁻⁶	21, 998×10 ⁻⁶

初期緊張力の大きさ	表面処理	① / ②	実測破壊荷重 ③	計算破壊荷重 ④	③ / ④
0.2Pu	砂付き	0.96	4.3 Ton	4.53 Ton	0.95
	砂無し	0.95	4.2 //	4.40 //	0.95
0.4Pu	砂付き	0.96	5.1 //	5.25 //	0.97
	砂無し	0.94	5.4 //	5.17 //	1.04
0.6Pu	砂無し	0.92	5.9 Ton	5.60 Ton	1.05

6. 結論

アラミド繊維製の組紐状棒材を緊張材とした、プレテンショニングはりの一連の静的耐荷実験から、この棒材をプレストレストコンクリートの緊張材として使用することが可能であることが判明した。今回の実験結果および考察を以下に取りまとめる。

- (1) 組紐状棒材を用いたPCはりの荷重-変形量の関係は、ひび割れ発生前のコンクリートの弹性領域と遷移領域、および棒材の示す弹性領域から成り立つ。
- (2) 組紐状棒材のコンクリートとの付着は良好であり、特に初期緊張力が大きい場合は、0.9以上の付着係数が期待できそうである。また、初期緊張力が小さい場合は、棒材の表面に砂を接着させることにより、付着性能を向上させることができる。
- (3) 棒材に与える初期緊張力の大きさが、棒材の付着係数、はりの耐力、破壊形態等に大きく影響を与えることが予想される。
- (4) 新示方書に基づいて、アラミド繊維製の組紐状棒材を用いたプレストレストコンクリートはりの破壊荷重を、ある程度の精度で推定できるものと考えられる。

最後に、今後は図-7b、図-8に示す荷重の中間放置に対応する棒材の応力-歪み関係について、その原因や弹性係数の増加割合等について詳細な研究が必要と考えられる。

末筆ながら、本研究を進めるに当たり大変貴重な御意見を賜った、東京大学 生産技術研究所 小林一輔教授並びに宇都宮大学工学部 佐藤良一助教授に感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1)長滝重義、佐藤良一：GFRP-BARで緊張したPC部材の力学的特性、東工大 土木工学研究報告、N0.17, 12月, 1974, PP 33~46
- 2)石田、小林、趙、則武：FRPロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究 第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986, PP 657~660
- 3)福沢、沼尾、吉本、野崎：FRPロッドを緊張材としたレジンコンクリートはりの曲げ性状、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、V-75, 1987, PP 188~189