

# 論文 CFRP ロッドの引張特性と PC はりへの適用性に関する実験的研究

山口 浩平<sup>\*1</sup>・日野 伸一<sup>\*2</sup>・太田 俊昭<sup>\*3</sup>

要旨：九州大学で独自に開発した CFRP 製作ロボットを用いて製作された CFRP ロッドは，両端部に U 型アンカーを有し，同アンカーに鋼製ピンを通すことで容易に緊張用治具に固定でき，即座に緊張が可能となる。そこで本研究では，U 型アンカーのこの利点に着目し，CFRP ロッドの PC 部材としての適用性を検討するために，ロッドの引張試験および付着試験，U 型アンカーの引張試験，同ロッドを用いた PC はりの性能試験を行った。その結果，現行の PC 鋼材を用いた PC はりの設計と同様に，本ロッドを緊張用ロッドとして活用できる可能性があることを示した。

キーワード：CFRP ロッド，引張特性，PC はり，緊張

## 1. はじめに

新素材として注目されている CFRP(炭素繊維補強プラスチック)は，高強度・軽量・高耐食性などの特徴を有しており，鉄筋や PC 鋼材の代替としてコンクリート構造物への適用に関する研究が進められている<sup>1)</sup>。本研究で対象とする CFRP ロッド(以下，ロッドと略称する。)は，九州大学で開発した CFRP 製作ロボットを用いて製作されるロッドの両端部に U 型アンカー(以下，アンカーと略称する。)を有する特徴がある(図 - 1(a))。そのアンカーに鋼製ピンを通すことで容易に緊張用治具に固定でき，即座に緊張が可能となる(図 - 1(b))。

そこで本研究では，アンカーのこれらの利点に着目し，ロッドの PC 部材としての適用性を検討するために，ロッドの引張試験および付着試験，アンカーの引張試験，ロッドを緊張材に用いた PC はりの性能試験を行い，ロッドの緊張材としての性能，PC はりの曲げ挙動を明らかにすることを目的としている。

## 2. CFRP ロッドの製作方法

図 - 2 に，ロッドの製作方法の概略を示す。

炭素繊維供給部でエポキシ樹脂を含浸させながら，供給部を軸方向に平行移動させ，両端アンカーに軸方向繊維となる CF(引張強度 4,900N/mm<sup>2</sup>，V<sub>f</sub>=60%程度)を所定の巻数を巻



(a) U 型アンカー (b) 緊張用治具

図 - 1 U 型アンカー

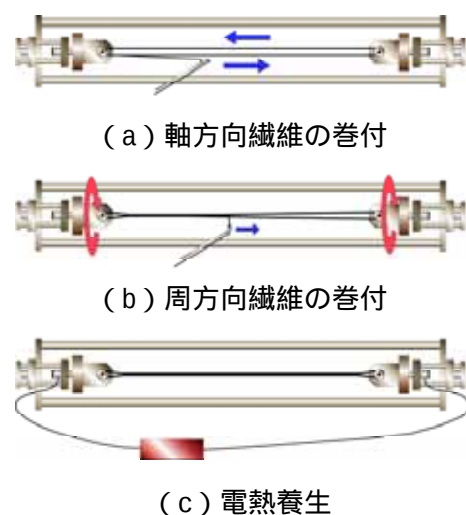


図 - 2 CFRP ロッドの製作方法

\*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博(工) (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

\*3 九州大学名誉教授 工博

く。このとき、張力制御装置により、一定の張力を与えながら CF を供給部へと送り出す。

両端アンカーに接続されているモーターで、両端で回転速度が一致するように制御しながら回転させる。このとき、供給部は速度を緩め、片側のアンカー付近からもう片側のアンカーに向けて平行移動することで、軸方向繊維の外周にコンクリートとの付着性状を向上させるための周方向繊維を巻きつける。これによって軸方向の繊維束は 1 つの繊維束としてまとめられる。

電熱養生装置により、繊維束に電流を流し約 70℃ に発熱させ、エポキシ樹脂を硬化させる。

### 3. CFRP ロッドの引張特性

#### 3.1 ロッド母材の引張特性

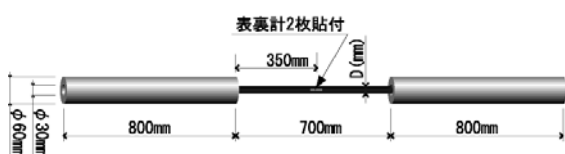
「連続繊維補強材の引張試験方法（案）（JSCE-E531-1995）」<sup>2)</sup> に準じて、引張試験を行った。試験体は 6 体で、アンカーを切断したロッド両端を鋼管スリーブにより膨張材で定着<sup>3)</sup>させた。試験体および試験装置を図 - 3 に示す。試験部の長さは 700mm、両端部の鋼管スリーブの長さは 800mm、全長は 2300mm である。定着

用膨張材の目標膨張圧は  $70 \text{ N/mm}^2$  とし、鋼管スリーブの軸方向および円周方向に貼付したひずみゲージにより測定管理した。その際、ロッドと膨張材間の摩擦係数を 0.23、付着強度を  $3.9 \text{ N/mm}^2$  とした。載荷はオルセン万能試験機を使用し、載荷速度は毎分 30kN とした。

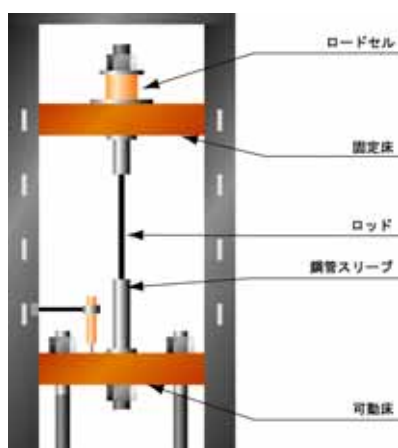
結果は、試験体 6 体のうち 3 体は鋼管スリーブ付近のロッドが破断して、残り 3 体は試験体中央部で破断した（写真 - 1）。結果を表 - 1 に示す。引張強度の平均値は  $2167 \text{ N/mm}^2$ 、平均値から標準偏差の 3 倍を引いた保証引張強度は  $1398 \text{ N/mm}^2$ 、ヤング率は  $119 \text{ kN/mm}^2$  であった。なお、ヤング率は最大引張荷重の 20% と 60% の傾きとして算出した。

#### 3.2 U 型アンカーの引張特性

緊張用治具から直接荷重を受ける部位であるアンカーの引張特性を検討するために、同部に着目した引張試験を行った。試験体は 4 章に述べる PC はりに用いた緊張材と同一形状（図 - 4）であり、全長は 3600mm で両端のアンカーに鋼製ピンを通して、そのピンを試験機に固定して、3.1 節と同様に引張試験を実施した。なお、試験体数は 6 体である。



(a) 試験体



(b) 試験装置

図 - 3 ロッド母材の引張試験



写真 - 1 破断状況（ロッド母材の引張試験）

上から順に No.1 - No.6

表 - 1 ロッド母材の引張試験結果

| No  | 直径 (mm) | 最大荷重 (kN) | 引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ ) | ヤング率 ( $\text{kN/mm}^2$ ) |
|-----|---------|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 1   | 15.9    | 474       | 2376                     | 128                       |
| 2   | 16.0    | 470       | 2347                     | 121                       |
| 3   | 15.7    | 476       | 2449                     | 129                       |
| 4   | 17.2    | 425       | 1835                     | 105                       |
| 5   | 16.3    | 400       | 1939                     | 113                       |
| 6   | 16.5    | 438       | 2058                     | 116                       |
| 平均値 | 16.3    | 447       | 2167                     | 119                       |
| 保証値 | -       | 354       | 1398                     | -                         |

表 - 2 に結果を示す。アンカー耐力は、母材耐力 (447kN) の 55.4% であった。これは、ロッドは繊維の集合体であるため、アンカーは引張力を受けるとアンカー外縁の引張応力が内縁より

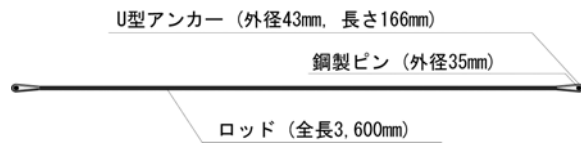


図 - 4 U型アンカーの引張試験試験体

表 - 2 U型アンカーの引張試験結果

| No  | U型アンカー耐力 (kN) | 母材耐力比 (%) |
|-----|---------------|-----------|
| 1   | 260           | 58.2      |
| 2   | 230           | 51.5      |
| 3   | 240           | 53.7      |
| 4   | 230           | 51.5      |
| 5   | 256           | 57.3      |
| 6   | 270           | 60.4      |
| 平均値 | 248           | 55.4      |
| 保証値 | 202           | 45.2      |



図 - 5 ロッド母材の付着試験試験体

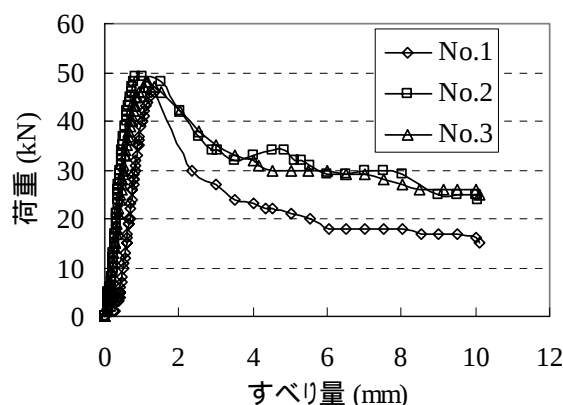


図 - 6 荷重 - すべり量関係

表 - 3 ロッド母材の付着試験結果

| No  | 最大荷重 (kN) | 付着強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | すべり開始変位 (mm) |
|-----|-----------|---------------------------|--------------|
| 1   | 46.0      | 13.0                      | 1.25         |
| 2   | 49.0      | 13.8                      | 1.00         |
| 3   | 48.0      | 13.5                      | 1.16         |
| 平均値 | 47.7      | 13.4                      | 1.14         |
| 保証値 | 43.1      | 12.2                      | -            |

も増加し、外縁から繊維が破断し始め、アンカー全体の破壊へと至るためである。したがって、本ロッドのアンカーの付加価値を活かすためには、アンカー部の耐力向上を図ることが必要である。

### 3.3 ロッド母材の付着特性

「引抜試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法（案）（JSCE-E539-1995）」<sup>2)</sup> に準じて、付着強度試験を行った。試験体は3体で、概略図を図 - 5 に示す。コンクリートブロックのコンクリート強度は JSCE-E539-1995 では  $30 \pm 3 \text{ N/mm}^2$  と規定されているが、本ロッドの高い引張力を有効に活かすためにも、コンクリート強度も高いほうが望ましい。よって、本試験では圧縮強度  $54 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度  $3.6 \text{ N/mm}^2$ 、ヤング率  $30.4 \text{ kN/mm}^2$  のコンクリートを用いた。載荷は、図 - 3 に示す試験機を用いて、固定床上面に置かれたロードセル上にコンクリートブロックを配置することで固定し、アンカー側は治具を用いて可動床側に固定した。載荷速度は、3.1 節と同様である。

図 - 6 に荷重 - すべり量関係を示す。同図より、いずれの試験体も最大荷重到達後は、徐々に付着切れが発生し荷重が低下する挙動であることがわかる。表 - 3 に結果を示す。同表より、付着強度は  $13.4 \text{ N/mm}^2$  であり、先に実施した異形鉄筋を用いた付着強度試験から得られた異形鉄筋の付着強度と同程度であることがわかった。

## 4. ロッドを緊張材に用いた PC はりの性能試験

### 4.1 供試体および試験方法

本ロッドを緊張材としてコンクリート部材に適用し、PC はりを2体製作した。供試体概略図を図 - 7 に示す。PC1 は断面内 (250mm × 400mm) にロッドを2本、PC2 は3本配置し、スパンは3000mmとした。供試体は図 - 8 に示す PC 緊張装置を用いて製作した。同装置の長手方向にロッドを所定の本数設置して、両端の2基のジャッキでロッドを緊張後、コンクリートを打設した。使用材料諸元を表 - 4 に示す。引張筋は緊張

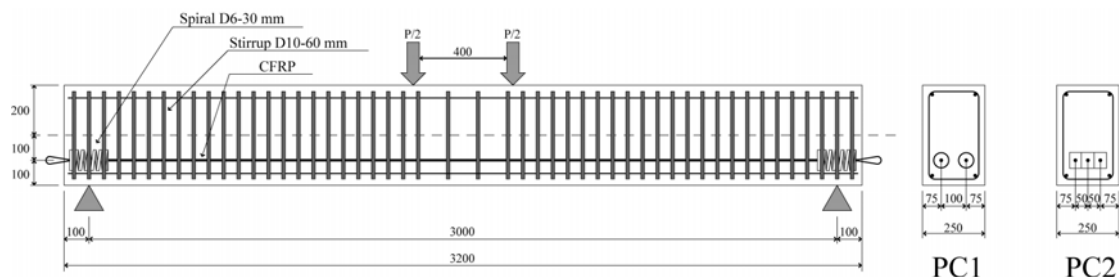


図 - 7 PC はり供試体

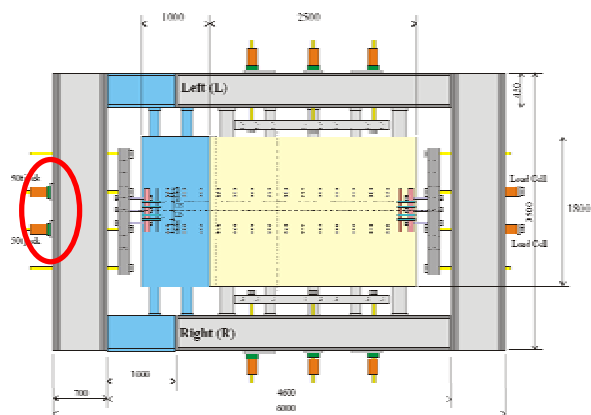


図 - 8 PC 緊張装置

表 - 4 使用材料諸元

(a) ロッド

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 直径 (mm)                     | 16.3 |
| 保証引張耐力 (kN)                 | 354  |
| 保証引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 1398 |
| 保証U型アンカー耐力 (kN)             | 202  |
| 保証付着強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 12.2 |
| ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )  | 119  |

(b) コンクリート

|                            | PC1  | PC2  |
|----------------------------|------|------|
| 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )  | 43.7 | 46.1 |
| 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )  | 3.03 | 3.48 |
| 曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )  | 7.40 | 7.90 |
| ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 28.4 | 30.5 |

材のロッドのみ，せん断補強筋は異形鉄筋（SD295）を 60mm 間隔で配筋して，上縁コンクリート圧壊の曲げ破壊先行型になるように設計した。

緊張力は，コンクリート打設後 5 日目に，アンカー保証耐力 202kN の 75% の 150kN/ロッドをプレテンション方式で導入した。緊張力による

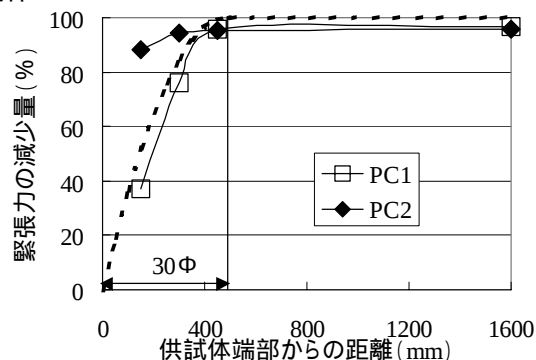
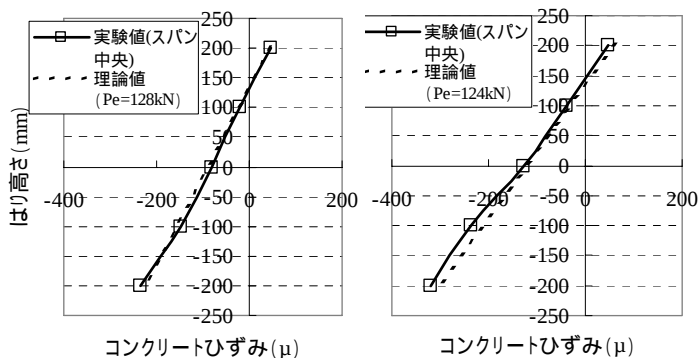


図 - 9 緊張力の伝達長さ



(a) PC1

(b) PC2

図 - 10 コンクリート断面のひずみ分布

定着部コンクリートの付着割裂破壊を防止するために，ロッド周囲に補強筋を配置した。

載荷は 2 点線載荷として，破壊に至るまで 10kN 毎に漸増載荷した。

#### 4.2 緊張力導入

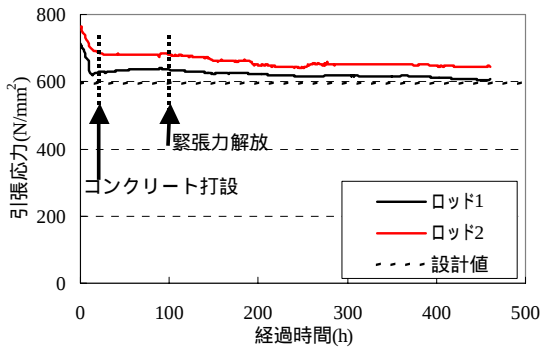
本ロッドの緊張材としての適用性を検討するために，プレストレス導入（緊張力解放）直後から破壊試験までの PC1 は 14 日間，PC2 は 11 日間，緊張力を経時的に計測した。設計上の有効緊張力は，PC1 は 128kN/ロッド（618N/mm<sup>2</sup>），PC2 は 124kN/ロッド（599N/mm<sup>2</sup>）であり，それによるプレストレス導入直後のコンクリート上縁および下縁の応力度は，それぞれ PC1 は -1.28N/mm<sup>2</sup>，6.40N/mm<sup>2</sup>，PC2 では -1.86N/mm<sup>2</sup>，

9.30N/mm<sup>2</sup>となる。ここに、コンクリートのクリープ係数は 1.7、コンクリートの収縮ひずみは 620 μ、ロッドの見かけのリラクセーション率は 3%とした<sup>4), 5)</sup>。

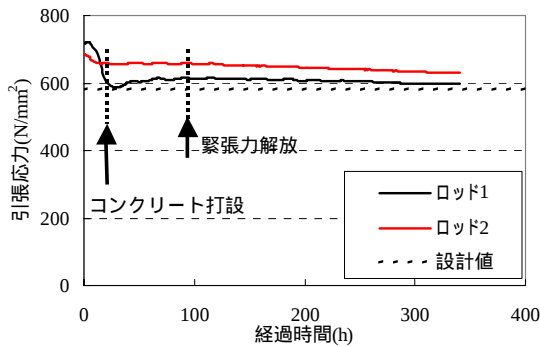
図 - 9 に、破壊試験直前のロッド貼付のひずみゲージから算出した、ロッドの緊張力の伝達長さを示す。緊張力の大きいPC2 はPC1 に比べて、端部近傍での損失が小さいことがわかる。また同図中の点線は、PC より線を用いた場合の付着力分布であるが、本ロッドも PC 鋼材と同様に端部より 30 φ（φ：ロッド直径）の位置での緊張力の損失はほぼ 0 であることがわかる。

図 - 10 に、破壊試験直前のスパン中央コンクリート断面のひずみ分布を示す。同図より、実験値と設計上の有効緊張力によるひずみ分布はほぼ一致していることがわかる。

図 - 11 に、プレストレス導入直後から破壊試験直前までのロッドの緊張力の経時変化を示す。ロッド 1、2 は断面内の両外側のロッドである。PC1 ではロッドの初期緊張応力度 700N/mm<sup>2</sup> に対して、破壊試験直前は 613N/mm<sup>2</sup> であり、減少



( a ) PC1



( b ) PC2

図 - 11 緊張力の経時変化

量は 12.4%である。これは、設計上の最終有効緊張力減少量 17.1%よりも小さく、本ロッドは緊張力を有効に導入できていることがわかる。PC2 においても、ロッドへの初期緊張応力度 699N/mm<sup>2</sup> に対して、破壊試験直前では 626N/mm<sup>2</sup> であり、減少量は 10.4%と、設計上の最終有効緊張力減少量 15.2%よりも小さいことがわかった。

### 4.3 結果および考察

図 - 12 に荷重 - 変位（スパン中央）曲線を示す。表 - 5 にひび割れおよび最大荷重を示す。両供試体ともに破壊形式は曲げ圧縮破壊であり、上縁コンクリートが圧壊した後、CFRP ロッドひずみが 10000 μを超えた時点で載荷を終了し、その荷重を最大荷重とした。

PC1 のひび割れ荷重は 118kN であり、荷重が 342kN に達したときコンクリート上縁が圧壊を起こし、荷重が一旦減少した。さらに変位を増加させていくと、変位が 28mm に達したところでロッドひずみが限界ひずみ 10000 μになった。PC2 のひび割れ荷重は 147kN であり、荷重を増加させると PC1 と同様の挙動となり、最大荷重は 429kN であった。

最大荷重の実験値と理論値の比は、PC1 は 1.22、

表 - 5 ひび割れおよび最大荷重

| 荷重    |         | PC1  | PC2  |
|-------|---------|------|------|
| ひび割れ  | 実験 (kN) | 118  | 147  |
|       | 理論 (kN) | 98   | 133  |
| 最大    | 実験 (kN) | 342  | 429  |
|       | 理論 (kN) | 280  | 339  |
| 実験/理論 |         | 1.22 | 1.27 |

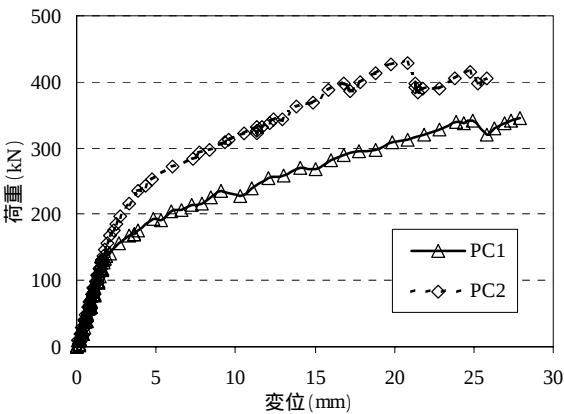


図 - 12 荷重 - 変位（スパン中央）曲線

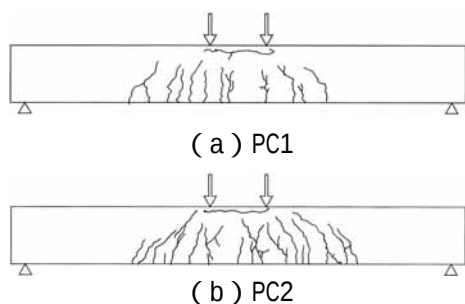


図 - 13 ひび割れ状況

PC2 は 1.27 といずれも 2 割程度安全側の結果となった。また両供試体とも、破壊までロッドのコンクリートとの付着切れによるすべり込みは見られなかったため、ロッドとコンクリートの付着性状は良好であったと考えられる。

図 - 13 にひび割れ図を示すが、両供試体ともひび割れ分散性は良好で、設計上想定したスパン中央上縁コンクリートの圧壊が見られる。

図 - 14 に荷重 - スパン中央のロッドのひずみ曲線を示す。同図は、破壊載荷直前の有効緊張力によるロッドに生じているひずみを考慮しているため、荷重 0kN 時にひずみが 5000  $\mu$  程度生じている。ひび割れ発生荷重までのロッドひずみの増分はほとんどない。しかしひび割れ発生後は、ロッドが引張筋として機能するため、引張筋量の違いにより PC1 の方が PC2 に比べて荷重に対するひずみの増分が大きいことがわかる。

## 5. まとめ

- (1) ロッドの引張特性としては、引張強度は  $2167\text{N/mm}^2$  (保証値は  $1398\text{N/mm}^2$ ) であり、PC 鋼材と同等、コンクリートとの付着強度は、コンクリートの圧縮強度  $54\text{N/mm}^2$  に対して  $13.4\text{N/mm}^2$  (保証値は  $12.2\text{N/mm}^2$ ) であり異形鉄筋と同等である。
- (2) U 型アンカー耐力は、母材耐力の 55.4% であり、本ロッドを緊張材に場合、U 型アンカー耐力により緊張力を設計することになる。
- (3) 本ロッドを緊張材として PC はりに適用した結果、緊張力導入直後から載荷試験直前までの緊張力減少量は 15% 程度と、PC 鋼材を用いた場合の減少量と同程度である。また、

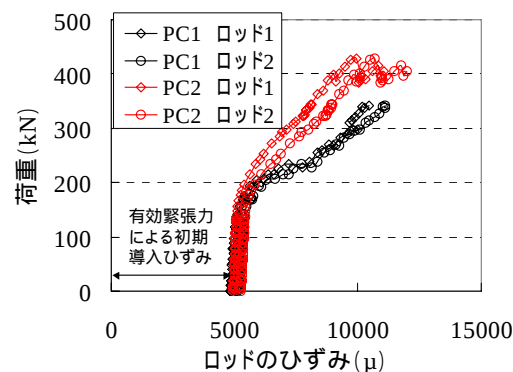


図 - 14 荷重 - ロッドのひずみ曲線

はりの曲げ挙動に関しては、現行の PC 鋼材を用いた PC はりと同様の設計ができる。

本ロッドでは、端部の U 型アンカーを用いることで容易に緊張力を導入することが可能であり、CFRP を PC 部材に適用する際の定着方法などの問題を解決することができると考える。

## 謝辞

本研究の一部は、平成 17～18 年度科研費若手研究 B (代表：山口浩平) の補助を受けています。また、九州大学大学院工学研究院知能機械システム部門鬼鞍宏猷教授、佐島隆生助教にはロッド製作に関して協力を頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72，1992
- 2) 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
- 3) 原田哲夫：連続繊維緊張材のノンメタリック定着法に関する研究，平成 6 年度科学研究費補助金（一般研究（C））研究成果報告書，1995
- 4) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用橋げた 設計・製造便覧「JIS A 5373-2004」，2004
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），2002