

## 論文 中空 PC 鋼棒ねじ部の付着性状に関する基礎的研究

今井 昌文\*<sup>1</sup>・出光 隆\*<sup>2</sup>

**要旨:** パイプ状の中空 PC 鋼棒を用いた, プレテンション方式によるプレストレストコンクリート部材の製造を目的に, 中空 PC 鋼棒ねじ部の付着性状について研究を行った。その結果, 引抜き試験により, 中空 PC 鋼棒ねじ部とコンクリートとの付着特性を, コンクリート圧縮強度の影響を考慮した付着応力-すべり-ひずみ関係で表せることを確認した。また, 引抜き試験と異なり, 鋼材が縮む状態となるプレテンション部材定着部の付着状態も上記の付着応力-すべり関係で概ね評価できることを確認した。

**キーワード:** 中空 PC 鋼棒, プレテンション方式, 付着応力-すべり-ひずみ関係

## 1. はじめに

通常のプレテンション方式のプレストレストコンクリート部材は, PC 鋼より線をアバット装置に緊張固定して製作されるが, 筆者らはパイプ状に加工された中空 PC 鋼棒を用いることにより, アバット装置を必要としないプレテンション方式によるプレストレストコンクリート部材の製造方法を考案した。本方法では, 緊張材の緊張力は主に中空 PC 鋼棒ねじ部とコンクリートとの付着によりコンクリート部材に定着され, その伝達長は概ね鋼棒径の 8 倍程度であることが確認されている<sup>1)</sup>。しかしながら, 上記の伝達長は実験値であることより, 低強度コンクリートへの対応やねじ形状の要因などの定着条件が異なる場合には, その都度プレテンション方式による試験体を製作して伝達長を確認する必要がある, 非常に煩雑となる。よって本研究は, 中空 PC 鋼棒を用いたプレテンション方式の伝達長の定量化を目的に, 中空 PC 鋼棒ねじ部の基本的な付着特性を把握するとともに, この付着特性とプレテンション部材の付着定着部における中空 PC 鋼棒ねじ部の付着状態との関係について検討を行ったものである。

## 2. 実験概要

鉄筋とコンクリートとの付着特性は, 島・周らによる, 鋼材ひずみとすべりの境界条件を考慮した提案式<sup>2)</sup> や沓岐・清宮・山田らによる, コンクリート応力状態や鉄筋の向きを考慮した提案式<sup>3)</sup> などにより, 付着応力-すべり関係 (以下,  $\tau$ - $S$ 関係と呼ぶ) や付着応力-すべり-ひずみ関係 (以下,  $\tau$ - $S$ - $\epsilon$ 関係と呼ぶ) で表わせることが報告されており, この関係を用いることにより, 鉄筋の使用状態に則った付着状態を把握することができる。このように, 鉄筋の付着については多くの研究が行われ報告されているが, 鋼材が引っ張られることによって生じる鉄筋の付着とは異なり, プレテンション部材定着部のように, 鋼材が縮むことによって生じる付着についての研究は少ない<sup>4)</sup>。プレテンション部材定着部の伝達長は, 鉄筋の付着特性を表す  $\tau$ - $S$ 関係や  $\tau$ - $S$ - $\epsilon$ 関係の把握試験と同様に, その使用状態を想定した付着試験により求めるのが望ましいが, プレテンション部材の試験では, 予め鋼材を緊張しておく必要がある, 試験要因が多い場合などには非常に煩雑となる。よって本研究では, 従来の付着試験により得られ

\* 1 オリエンタル建設(株) 技術研究所 (正会員)

\* 2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科, 工博 (正会員)

る付着特性により、プレテンション部材の伝達長を定量化することを目的に、「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)(JSCE-G503-1988)」(以下、引抜き試験と呼ぶ)に準じた試験により、中空P C鋼棒ねじ部の基本付着特性としての $\tau$ -S- $\epsilon$ 関係を把握するとともに、この $\tau$ -S- $\epsilon$ 関係とプレテンション試験体定着部の付着性状との関係についての検討を行った。

## 2.1 試験体形状寸法および試験仕様

### (1) 中空P C鋼棒の仕様

表-1 中空P C鋼棒仕様一覧

公称 外径 (mm)	公称 内径 (mm)	公称 断面積 (mm <sup>2</sup> )	規格 引張耐力 (MPa)	規格 引張強さ (MPa)
32	22	424.1	930	1080

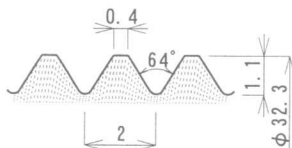


図-1 中空P C鋼棒ねじ部詳細図 (mm)

### (2) 引抜き試験用試験体

表-2に引抜き試験体のコンクリート品質を、図-2に試験体形状寸法、荷重位置および測定項目、位置をそれぞれ示す。ひずみゲージは、鋼棒ねじ部の付着を損なわないように、中空部に貼付した。荷重速度は、荷重端変位速度0.5  $\mu$ m/secで行った。この時の鋼材応力速度は10~30MPa/min程度であり、JSCE規定の50MPa/min

以下を満足している。試験は、各強度についてそれぞれ3体行った。

表-2 引抜き試験体コンクリート品質

	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
TYPE25	24.4	23.9
TYPE35	37.8	27.6

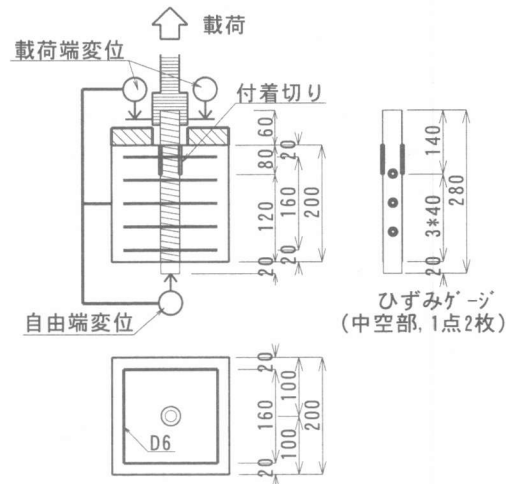


図-2 引抜き試験体形状寸法および測定項目、位置図 (mm)

### (3) プレテンション試験体

表-3 プレテンション試験体コンクリート品質

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
26.6	26.9

表-3にプレテンション試験体のコンクリート品質を、図-3に試験体形状寸法、測定項目および位置をそれぞれ示す。ひずみゲージは、中空P C鋼棒を半割にして中空部に貼付した。

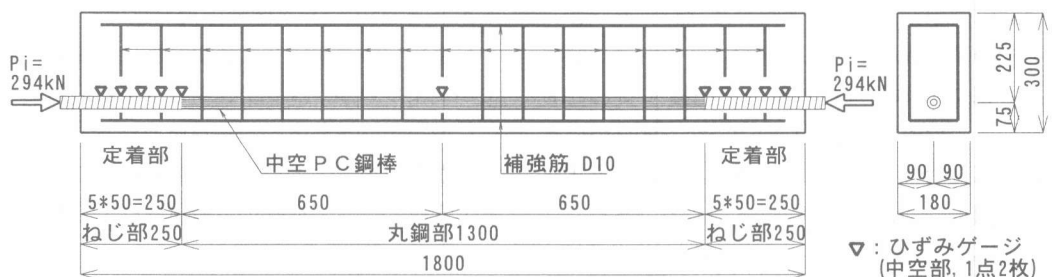


図-3 プレテンション試験体形状寸法および測定項目、位置図 (mm)

P C鋼材の初期緊張力は  $P_i=294\text{kN}$  であり、コンクリートの弾性変形を考慮したプレストレス導入直後の P C 鋼材張力は  $P_t=265\text{kN}$  である。P C 鋼材張力および鋼材ひずみの測定は、試験体 3 体の両端、計 6 箇所について行った。

### 3. 試験結果および考察

#### (1) 引抜き試験体

中空 P C 鋼棒ねじ部に沿った各位置のひずみは、鋼棒中空部に各点 2 枚貼付したひずみゲージの値を平均して求めた。もよりの 3 点を結ぶ 2 次放物線をつなげることにより求めたひずみ分布 ( $\varepsilon_{sx}$ ) の一例を図-4 に示す。また、このひずみ分布を用いて算出したすべり分布図 ( $S_{sx}$ ) を図-5 に、付着分布図 ( $\tau_{sx}$ ) を図-6 にそれぞれ示す。鋼棒ねじ部に沿った任意の位置のすべりは、自由端から任意の位置までのひずみを積分したものに、自由端のすべり量を加えたものとした (式 2)。また、鋼棒ねじ部に沿った任意の位置の付着応力は、その点におけるひずみ分布曲線の傾きを用いて求めている (式 3)。

$$\varepsilon_{sx} = F_s(x) \quad x=0 \text{ の時 } \varepsilon_{sx}=0 \quad (1)$$

$$S_{sx} = \int F_s(x) dx + s \quad x=0 \text{ の時 } S_{sx}=s \quad (2)$$

$$\tau_{sx} = k F_s'(x) / (\pi D) \quad (3)$$

- $x$  : 自由端からの距離 (mm)
- $s$  : 自由端すべり (mm)
- $F_s(x)$  : 自由端すべりが  $s$  の時の補間 2 次曲線
- $\varepsilon_{sx}$  : " " 自由端から  $x$  位置の鋼材ひずみ
- $S_{sx}$  : " " 自由端から  $x$  位置のすべり (mm)
- $\tau_{sx}$  : " " 自由端から  $x$  位置の付着応力 (MPa)
- $k = 80 \text{ (N}/\mu)$  : ゲージのキャリブレーション値
- $D$  : 中空 P C 鋼棒径 (mm)

図-7 にひずみ分布を用いて算出した付着応力 ( $\tau_{s,x}$ ) とすべり量 ( $S_{s,x}$ ) との関係を示す。図より、自由端からの位置によって  $\tau$ - $S$  関係が異なっていることが分かる。島らにより「境界条件が  $\varepsilon = 0$  かつ  $S \neq 0$  の場合は  $\tau$ - $S$  関係は、鉄筋

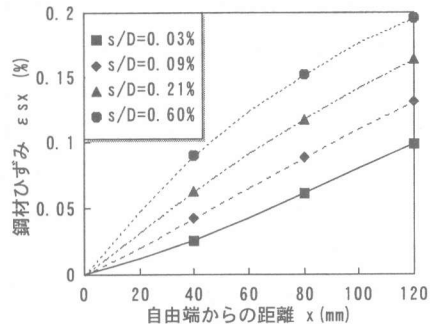


図-4 ひずみ分布図

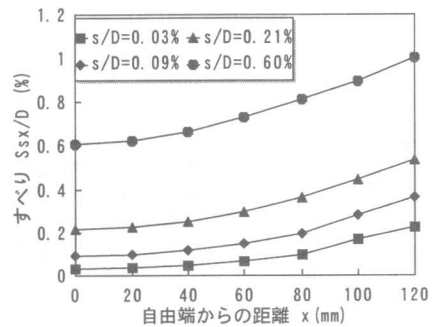


図-5 すべり分布図

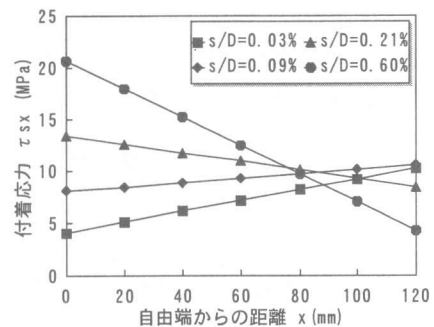


図-6 付着応力分布図

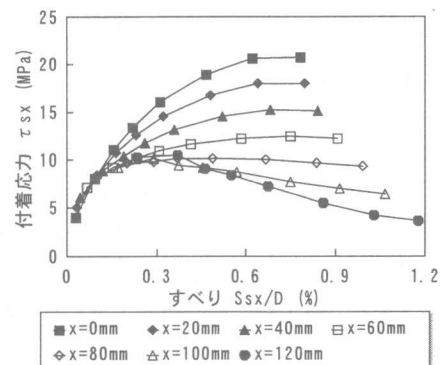


図-7 鋼材に沿った各位置の  $\tau$ - $S$  関係

に沿った位置により異なり、鉄筋のひずみを考慮したひとつの $\tau$ - $S$ - $\varepsilon$ 関係で表すことができる」と報告されている。よって以下に、中空PC鋼棒ねじ部の付着に及ぼす鋼材ひずみの影響について検討を行った。まず、鋼材ひずみの影響の無い $\tau$ - $S$ 関係として、鋼材ひずみが常に0である自由端部の $\tau$ - $S$ 関係を、コンクリート圧縮強度の異なる2つの試験について図-8に示す。

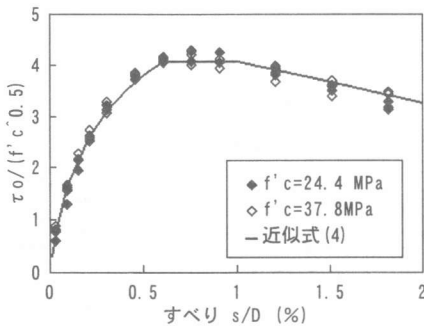


図-8 自由端部の $\tau$ - $S$ 関係

図に示すように、鋼材ひずみの影響が無い場合には、 $\tau$ - $S$ 関係はコンクリート圧縮強度を考慮した下式(4)で表わすことができる。

$$\tau_0 = 1.6 \cdot \sqrt{f'c} \cdot (\ln(1 + 2000 \cdot s/D)) \cdot (1 - (ss/D - 0.01) \cdot 20) \quad (4)$$

0.006 > s/D の時, ss/D = 0.01  
 0.01 > s/D > 0.006 の時, s/D = 0.006 and ss/D = 0.01  
 s/D > 0.01 の時, s/D = 0.006

$\tau_0$  : 鋼材ひずみ0の時の付着応力 (MPa)  
 $f'c$  : コンクリート圧縮強度 (MPa)  
 $s, ss$  : すべり (mm)  
 $D$  : 鋼材径 (mm)

図-9に $\tau$ - $S$ 関係に及ぼすひずみの影響を示す。縦軸の $\tau/\tau_0$ は、式(3)から求めたひずみの影響を含む $\tau$ と、式(4)から算出したひずみの影響を除いた $\tau_0$ との比を表し、横軸はひずみ $\varepsilon$ である。図より、ひずみが大きくなるほど $\tau_0$ に対して $\tau$ が小さくなるのが分かる。この $\tau/\tau_0$ に及ぼすひずみの影響は、圧縮強度の

違いにより若干異なるが、圧縮強度毎にそれぞれ式(5)、(7)に近似することができた。これより、中空PC鋼棒ねじ部とコンクリートとの付着特性は、式(6)、(8)に示す $\tau$ - $S$ - $\varepsilon$ 関係で表すことができる。

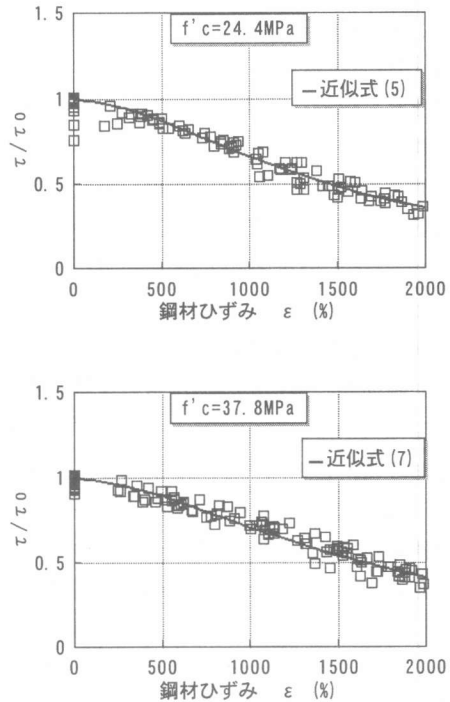


図-9  $\tau$ - $S$ 関係に及ぼすひずみの影響

$f'c = 24.4$  MPaの時

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{1}{1 + 0.5 \cdot (1000 \cdot \varepsilon)^{1.8}} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + 0.5 \cdot (1000 \cdot \varepsilon)^{1.8}} \quad (6)$$

$f'c = 37.8$  MPaの時

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{1}{1 + 0.4 \cdot (1000 \cdot \varepsilon)^{1.8}} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + 0.4 \cdot (1000 \cdot \varepsilon)^{1.8}} \quad (8)$$

$\tau$  : 付着応力 (MPa)  
 $f'c$  : コンクリート圧縮強度 (MPa)  
 $\tau_0$  : 式(4)に示す、ひずみの影響を除いた $\tau$ - $S$ 関係に基づく付着応力 (MPa)  
 $\varepsilon$  : 鋼材ひずみ

自由端のすべりを入力値として、圧縮強度の異なる試験毎にそれぞれ、式(6)、(8)を用いて算出した付着応力分布から求めたP(載荷荷重)と $\delta$ (自由端すべり)の関係を図-10に示す。図に示すように、計算値と実験値は良く一致していることより、式(6)、(8)は中空PC鋼棒ねじ部の付着特性を良く表していると考えられる。

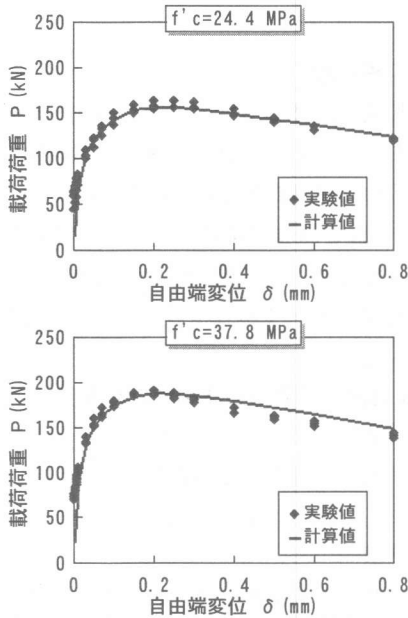


図-10 載荷荷重-自由端変位の関係

(2) プレテンション試験体

伝達長は、PC鋼材緊張力をコンクリート部材に定着するために必要な付着長さであり、所要の緊張力を導入した時に、付着応力(鋼材ひ

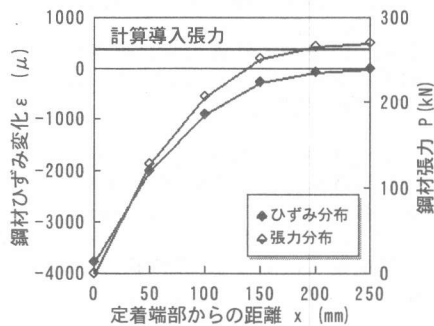


図-11 プレストレス導入時の鋼棒ひずみ分布および鋼棒張力分布

ずみ変化)が生じている区間の長さである。所要の張力が定着端部で確実に定着されれば、伝達部以外の位置では、付着応力やすべりは生じない。図-11にプレストレス導入時の中空PC鋼棒ねじ部のひずみ分布と張力分布実験結果の一例を示す。定着端部のひずみは中空PC鋼棒作用荷重(荷重計示度)から、各測定点の張力はひずみから、それぞれ求めた荷重-ひずみ関係を用いて算出した。図に示すように、定着端部から200mm~250mmの位置ではひずみ変化がほとんど無いこと、また、この位置において鋼材張力は設計値を満足していることより、本試

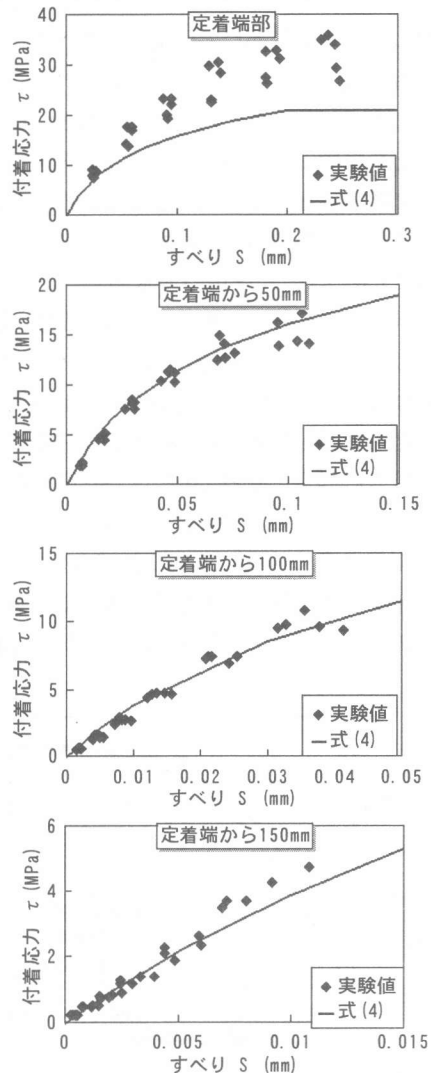


図-12 各測定点における $\tau$ -S関係

験体の伝達長は250mm程度であると判断できる。これより、定着端部から250mmの位置のひずみ変化 ( $\varepsilon$ ) およびすべり ( $S$ ) を0と仮定して、このひずみ変化分布を用いて式(2)、(3)より求めた定着端部からの各位置における $\tau$ - $S$ 関係を図-12に示し、引抜き試験より求めた $\tau$ - $S$ 関係(式(4))と比較した。検討は、試験体3体の両定着部6ヶ所のうち、計測不良の1ヶ所を除く5ヶ所で行った。図に示すように定着端部の実験値は、式(4)の $\tau$ - $S$ 関係に比べ同一すべりに対して生じる付着応力は大きく、またその値もばらついている。しかしながら、定着端から50mm、100mm、150mmの位置の $\tau$ - $S$ 関係は式(4)と良く一致した。定着端部において同一すべりに対する付着応力が式(4)より大きくなっているのは、鋼材のポアソン効果に起因する鋼材とコンクリートとの接触圧の増加が、すべりの大きい定着端部で顕著となったことが想定されるが詳細については今後の課題である<sup>4)</sup>。

図-13に、式(4)を用いて求めたプレストレス導入時の中空PC鋼棒張力分布を示す。図-12に示したように、定着端での $\tau$ - $S$ 関係は式(4)と異なったことより、定着端から50mm位置の張力変化を基点として計算したものを計算値1とし、付着区間全てを式(4)として計算したものを計算値2とした。図に示すように、計算値1は実測値と良く一致しており、式(4)は定着端から50mm以降の付着特性を良く表していることが分かる。ここで伝達長を、定着端から変動張

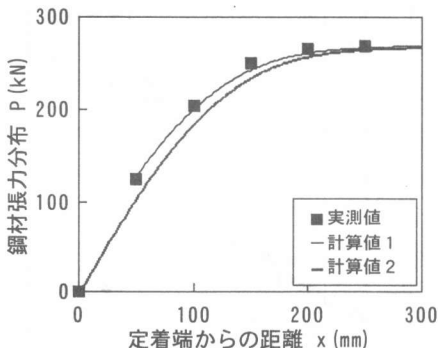


図-13 プレストレス導入時鋼材張力分布図

力が導入張力の1%以下になる位置までの長さとした時、計算値1の伝達長は246mm、計算値2では258mmであり、いずれの計算値も概ね鋼材径の8倍程度であった。以上より、定着端部の付着特性をより正確に評価すれば、プレテンション部材定着部の伝達長は、引抜き試験から求めた $\tau$ - $S$ 関係を用いて求められることが確認された。

#### 4. まとめ

引抜き試験体およびプレテンション試験体を用いた、 $\phi 32$ mm中空PC鋼棒ねじ部の付着について行った試験結果を以下にまとめる。

(1) 引抜き試験により、中空PC鋼棒ねじ部の付着特性を、コンクリート圧縮強度を考慮した、付着応力-すべり-ひずみ ( $\tau$ - $S$ - $\varepsilon$ ) 関係で表した。

(2) 引抜き試験から求めた、付着応力-すべり ( $\tau$ - $S$ ) 関係により、プレテンション部材の伝達長を概ね定量化できることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 今井昌文・出光 隆・橋本順平：プレテンション用緊張材として用いた中空PC鋼棒の定着に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 2, pp. 521-526, 1996. 7
- 2) 島 弘・周 礼良・岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着-応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No. 378/V-6, pp. 165-174, 1987. 2
- 3) 壺岐直之・清宮 理・山田昌郎：付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究，土木学会論文集，No. 550/V-33, pp. 73-83, 1996. 11
- 4) 出光 隆ほか：鉄筋のPC緊張材としての利用に関する研究，第1回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp. 1-6, 1990. 10
- 5) 村田二郎ほか：引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究，土木学会論文集，No. 348/V-1, pp. 113-122, 1984. 8
- 6) 渡辺 明：ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 125, pp. 21-35, 1966. 1