

(92) 中空PC鋼棒を使用したプレテンション部材の伝達長に関する研究

オリエンタル建設(株) 技術研究所 正会員 ○今井 昌文  
九州工業大学 工学部 正会員 出光 隆

1. はじめに

「プレストレス力入りのPC鋼棒」であるNAPPユニットを用いるNAPP工法は、プレテンション方式によるコンクリート部材へのプレストレス導入システムであり、コンクリート部材への定着は、図-1に示すように、アンカーナットの定着と中空PC鋼棒ねじ部の付着とによる複合定着である。NAPP工法の伝達長は、基礎実験<sup>1)</sup>や数例の計測により、中空PC鋼棒径の8倍程度であることが確認されているが、これは限られた条件の基での値であることから、コンクリート強度や鋼材の仕様(径、ねじ形状)、アンカーナット支圧面積などの要因を考慮した伝達長の定量化が求められた。

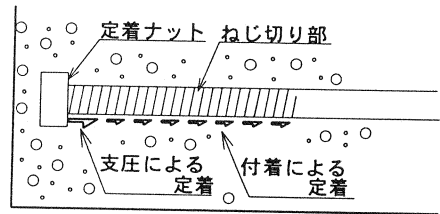


図-1 NAPP工法の定着部

上述のようにNAPP工法の定着は、アンカーナットと中空PC鋼棒ねじ部の複合定着であるが、本研究では、複合定着における伝達長定量化の一環として、中空PC鋼棒ねじ部の付着定着について、引抜き試験から求まる付着性状を用いたプレテンション部材伝達長の定量化について検討を行った。

2. 実験概要

(1) プレテンション部材定着部の定着機構

プレテンション部材の定着機構の概念を図-2に示す。図に示すように、定着部には鋼材とコンクリートとのすべりによる付着応力に加えて、鋼材のポアソン効果に起因する接触圧による摩擦が生じている<sup>2)3)</sup>。この定着機構がNAPP工法の付着定着部においても成立するとすれば、中空PC鋼棒ねじ部の付着応力-すべり関係(以下、 $\tau$ - $S$ 関係と呼ぶ)と中空PC鋼棒のポアソン効果に起因する接触圧の影響を把握することにより、以下の方法で伝達長を求めることができる<sup>2)</sup>。ここで、接触圧の影響を考慮した付着応力を、 $\tau$ - $S$ 関係と接触圧の関数の積として式(1)で表すことができると仮定した時、定着端部から部材中心へ向かっての距離を  $x$  とした時、付着応力分布、鋼材張力分布、鋼材ひずみ変化分布およびすべり分布はそれぞれ下式で表すことができる。

$$\tau_p = f(S) \cdot f_p(\epsilon) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\tau_p$  : 接触圧の影響を考慮した付着応力  
 $f(S)$  : 接触圧を考慮しない  $\tau$ - $S$  関係  
 $f_p(\epsilon)$  : ポアソン効果に起因する接触圧が  $\tau$ - $S$  関係に及ぼす影響

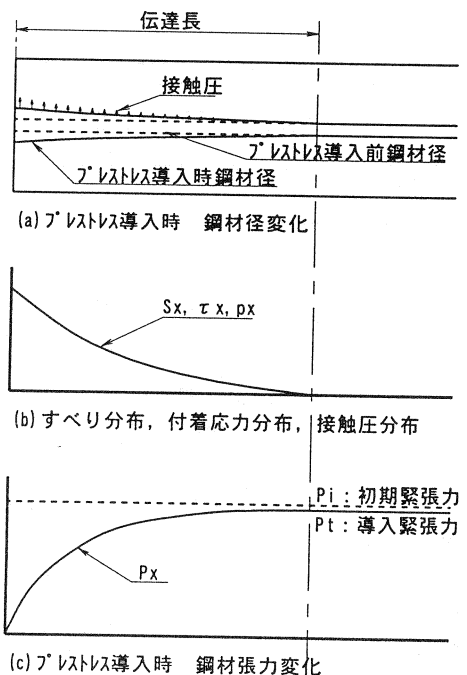


図-2 プレテンション部材の定着機構の概念

$$\tau_{px} = f(S_{x-dx}) \cdot f_p(\epsilon_{x-dx}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$P_x = P_{x-dx} + \tau_{px} \cdot \pi \cdot D \cdot dx \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\epsilon_x = (P_t - P_x) / (A_p \cdot E_p) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$S_x = S_{x-dx} - \epsilon_x \cdot dx \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $P_0 = 0$ ,  $\epsilon_0 = P_t / (A_p \cdot E_p)$

$P_t$ : 導入張力

$\tau_{px}$ : プレストレス導入時における、定着端から  $x$  位置の接触圧を考慮した付着応力

$P_x$ : " , 定着端から  $x$  位置の鋼材張力

$\epsilon_x$ : " , 定着端から  $x$  位置の導入張力時のひずみとのひずみ差

$S_x$ : " , 定着端から  $x$  位置のすべり

ここで、定着端のすべり  $S_0$  を変数として上記の繰り返し計算を行い、 $S_x = 0$  の時に  $P_x = P_t$  となる  $S_0$  を求める。この時の  $\tau_{px}$ ,  $P_x$ ,  $S_x$  がそれぞれ付着応力分布、鋼材張力分布、すべり分布となる。

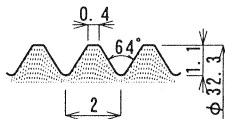
以上のことから、プレテンション部材の定着状態を定量化するためには、 $\tau_p$ - $S$  関係を求めれば良いことがわかる。本研究では、この  $\tau_p$ - $S$  関係を式(1)に示すような、簡便に行うことができる引抜き時化から求める  $\tau$ - $S$  関係と接触圧の関数との積として表すことを目的とした。

(2) 引抜き試験による中空PC鋼棒ねじ部の付着-すべり関係の把握

通常の片側引抜き試験における局所的な  $\tau$ - $S$  関係は、鋼材ひずみの影響により、鉄筋に沿った位置によって異なることが周・島らによって指摘されている<sup>4)</sup>。本研究では、鋼材ひずみの影響の無い  $\tau$ - $S$  関係として、鋼材ひずみが0である自由端部の局所的な  $\tau$ - $S$  関係を鋼材ひずみ分布から求めた。表-1に試験体の仕様を、図-3に中空PC鋼棒ねじ部の形状を、また、図-4試験体形状寸法および測定項目をそれぞれ示す。荷重は、荷重端の変位速度を  $0.5 \mu\text{m}/\text{sec}$  で制御して行った。この時の荷重端鋼材応力速度は、 $10 \sim 30\text{MPa}/\text{min}$  程度であり、JSCEの規定値である  $50\text{MPa}/\text{min}$  以下である。

表-1 引抜き試験体の材料仕様一覧

試験体名称	中空PC鋼棒			コンクリート	
	径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
30T-25	32	424.1	196	24.4	23.9
30T-35	"	"	"	37.8	27.6



φ32中空PC鋼棒ねじ

図-3 中空PC鋼棒ねじ詳細 (mm)

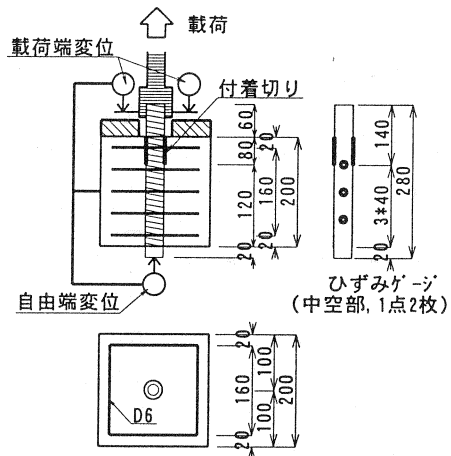


図-4 引抜き試験体寸法および測定項目、位置 (mm)

(3) プレテンション部材定着部の付着性状の把握

表-2にコンクリートおよび中空PC鋼棒の仕様を示す。また、図-5にプレテンション試験体の形状寸法および測定項目を示す。プレテンション試験体の初期緊張力は  $P_t = 294\text{kN}$  で、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張力は  $P_t = 265\text{kN}$  である。なお、試験数は6体である。

表-2 プレテンション試験体の材料仕様

径 (mm)	中空PC鋼棒			コンクリート		
	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	規格引張耐力 (MPa)	規格引張強さ (MPa)	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
32	424.1	930	1080	196	26.6	26.9

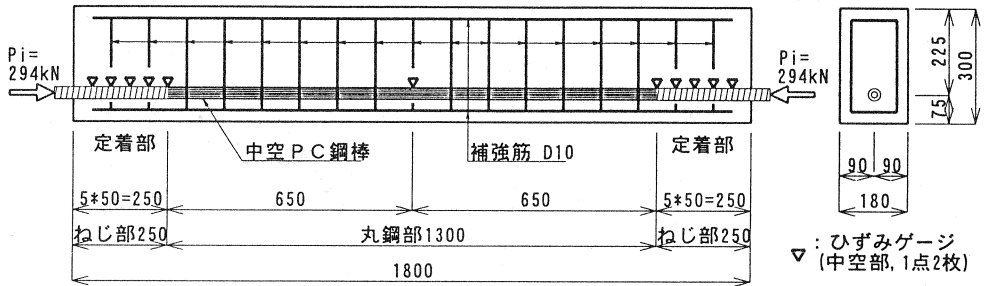


図-5 プレテンション試験体寸法および測定項目, 位置 (mm)

(4) ポアソン効果に起因する接触圧

プレストレス導入時におけるPC鋼材のポアソン効果に起因する接触圧は, 厚肉円筒式を用いて求めた。定着部をPC鋼材を中心とした厚肉円筒と仮定した時, 図-6に示すように, ポアソン効果により自由膨張するPC鋼材半径を( $r_p$ )だけ縮める圧力( $p_o$ )と, コンクリート円筒内半径を( $r_c$ )だけ広げる圧力( $p_i$ )の大きさは等しく,  $r_p$ と $r_c$ の和はPC鋼材のポアソン効果による自由膨張量と等しい。これより, 鋼材張力が $P_i$ から $P_x$ に減少する定着端部から $x$ 位置の中空PC鋼棒とコンクリートとの接触圧は下式となる。

$$p = \frac{\nu_p \cdot (P_i - P_x) / A_p - \nu_c \cdot P_x \cdot n_p / A_c}{(R_p - \nu_p) + (R_c + \nu_c) \cdot n_p} \dots \dots \dots (6)$$

- ここに,  $R_p = (r_{p0}^2 + r_{pi}^2) / (r_{p0}^2 - r_{pi}^2)$
- $R_c = (r_{c0}^2 + r_{ci}^2) / (r_{c0}^2 - r_{ci}^2)$
- $r_{p0}, r_{pi}$ : 中空PC鋼棒の外半径, 内半径
- $r_{c0}, r_{ci}$ : コンクリート円筒の外半径, 内半径
- $\nu_p$ : 鋼材のポアソン比
- $\nu_c$ : コンクリートのポアソン比
- $n_p$ : ヤング係数比  $E_p/E_c$
- $P_i$ : 鋼材の導入張力
- $P_x$ : 定着端部から $x$ 位置の鋼材張力

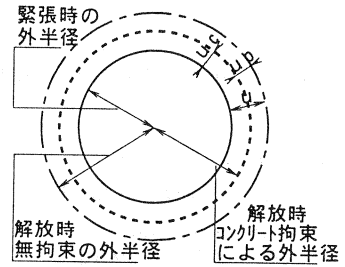


図-6 プレストレス導入時における伝達長内の鋼材外径変化

3. 試験結果および考察

(1) 引き抜き試験による付着-すべり関係

図-7に, 自由端すべりをステップとした鋼材ひずみ分布を示す。測定値間のひずみ分布は, 最寄りの3測点を結ぶ2次放物線をつなげた。このひずみ分布を用いて, 自由端すべり各々についてすべり分布および付着応力分布を求めた。鋼材に沿った任意の位置におけるすべりは, 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すべりを加えたものであり, 付着応力はひずみ分布曲線の傾きから求めたものである。このすべり分布と付着応力分布から求めた, 自由端から各位置の付着-すべり関係を図-8に示す(凡例 $x$ : 自由端からの距離)。すべりは, 鋼材径で除して無次元化している。図中の実線は, 平均付着応力度と自由端すべりの関係を示す。図に示すように, 自由端からの位

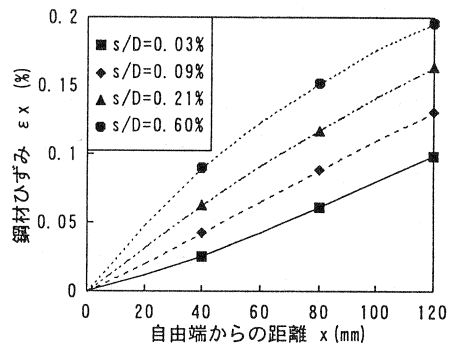


図-7 鋼材ひずみ分布

置によって $\tau$ - $S$  関係は異なっている。最大の平均付着応力は、すべりが約0.7%の時に12.7MPa程度であるが、自由端に近い位置ほど最大付着応力およびその時のすべりは大きく、自由端部では最大付着応力が約20.8MPa、その時のすべりは0.76%であり、荷重端位置では最大付着応力が約10.5MPa、その時のすべりは0.36%であった。これは前述のように、鋼材各位置の鋼材ひずみの影響であることから、鋼材ひずみの影響の無い自由端位置の $\tau$ - $S$  関係について検討を行った。

図-9にコンクリート圧縮強度の異なる試験体の、自由端位置の $\tau$ - $S$  関係を示す。付着応力はコンクリート圧縮強度の平方根で除し、すべりは鋼材径で除してそれぞれ無次元化している。図に示すように、付着応力をコンクリート圧縮強度で除したものと、すべりを鋼材径で除したものの間には高い相関関係が確認された。この関係はコンクリート圧縮強度を考慮した下式により表すことができた。

$$\frac{\tau}{\sqrt{f_c}} = 1.6 \cdot \ln(1+2000 \cdot s/D) \cdot [1-(ss/D-0.01) \cdot 20] \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$\tau = 1.6 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \ln(1+2000 \cdot s/D) \cdot [1-(ss/D-0.01) \cdot 20] \quad \dots \dots \dots (8)$$

- ここに、 $0.006 > s/D$  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、  $s/D=0.006$
- $\tau$  : 付着応力 (MPa)
- $f_c$  : コンクリート圧縮強度 (MPa)
- $s$  : すべり (mm)
- $ss$  : すべり (mm)
- $D$  : 鋼材径 (mm)

(2) プレテンション定着部の付着状態

図-10にプレストレス導入時の中空PC鋼棒各位置における、導入張力を鋼材断面積およびヤング係数で除した導入ひずみとのひずみ差の分布の一例を示す。ひずみ差の分布は、最寄りの3測点を結ぶ2次放物線をつなげたものである。凡例のSTEPは、緊張力の解放時における途中段階を示しており、ひずみ差はそれぞれの解放段階における導入ひずみとの差を示している。図に示すように、定着端部から200~250mmの位置では導入ひずみとのひずみ差はほとんど無く、導入張力を保持していることがわかる。よって、任意の位置のすべりは、定着端から250mmの位置をすべり0の基準として、定着端へ

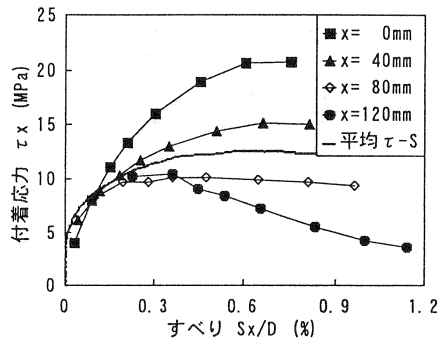


図-8 自由端からの各位置の $\tau$ - $S$  関係

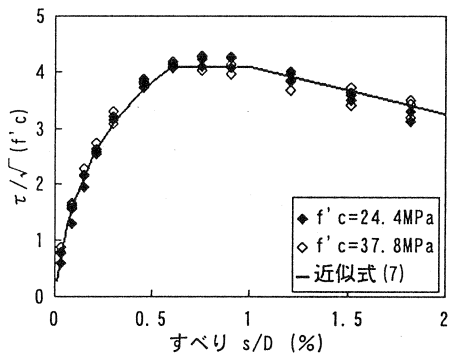


図-9 自由端部の $\tau$ - $S$  関係

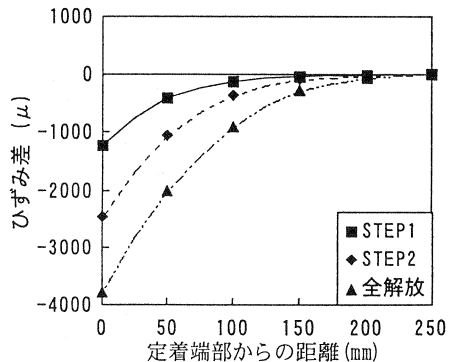


図-10 プレストレス導入時の鋼材ひずみ差

向かってひずみ差を積分したものとした。任意の位置の付着応力は、ひずみ差の分布曲線の傾きから求めた。この付着応力は、鋼材のポアソン効果に起因する接触圧の影響を含むものである。図-11 に、プレテンション試験体の各位置の  $\tau_p$ - $S$  関係と式 (8) との比較を示す。図に示すように、定着端部を除いて、プレテンション試験体定着部の  $\tau_p$ - $S$  関係と引抜き試験から求めた式 (8) は非常に良く一致している。

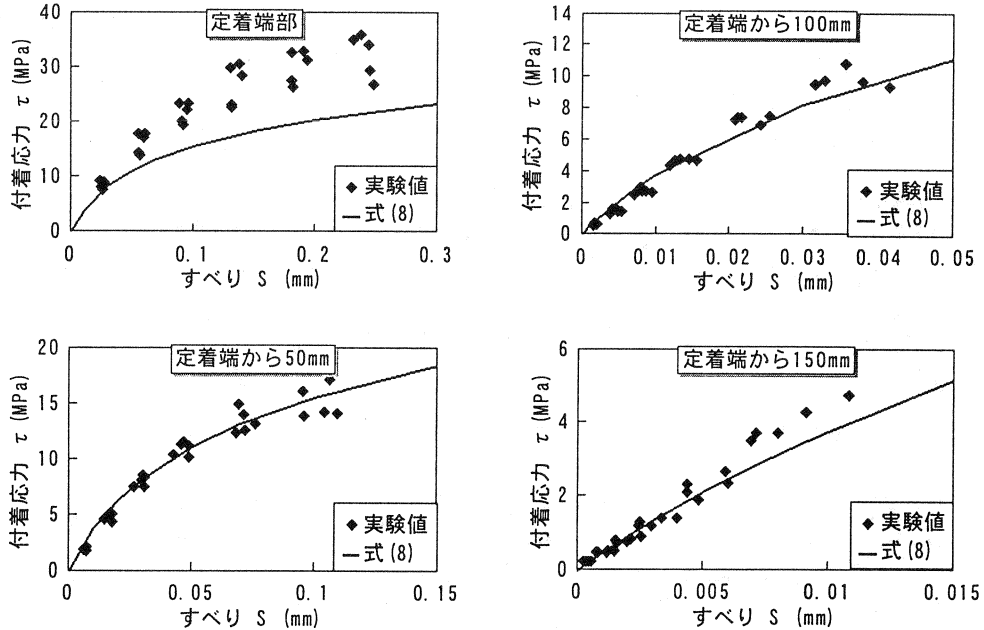


図-11 プレテンション試験体定着部の各位置における  $\tau_p$ - $S$  関係

定着端部では、実験値は式 (8) を大きく上回ったことから、鋼材のポアソン効果に起因する接触圧の影響について検討を行った。前述した、ポアソン効果に起因する接触圧を求める式 (6) から、コンクリート円筒半径を 90mm として接触圧分布を計算した結果を図-12 に示す。図に示すように、定着端部から 150mm の範囲で正の接触圧が、またそれより部材中心方向では若干の負の接触圧が生じる結果となった。この負の接触圧は、コンクリート円筒に導入されたプレストレスの影響である。ここで、大きい正の接触圧が生じる結果となった定着端部について、実験値と式 (8) との比 (以下  $\tau_p/\tau$ 、 $\tau_p$ : 実験値、 $\tau$ : 実験値と同一すべりにおける式 (8) から求めた付着応力) に及ぼす接触圧の影響を図-13 に示す。結果にバラツキは見られるが、 $\tau_p/\tau$  と接触圧の間には、ほぼ式 (9) に示す関係が存在したことから、 $\tau_p$  は式 (10) のように表すことができる。

$$\frac{\tau_p}{\tau} = 1 + 0.26 \cdot \ln(1+p) \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\tau_p = \tau \cdot [1 + 0.26 \cdot \ln(1+p)] \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $\tau_p$ : 接触圧を考慮した付着応力

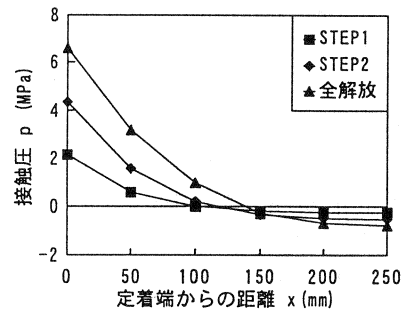


図-12 接触圧分布計算値

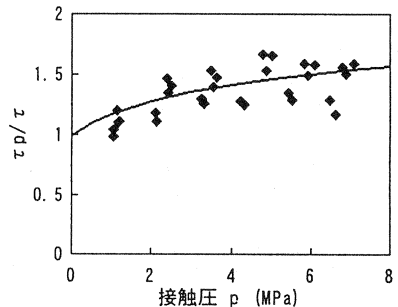


図-13  $\tau_p/\tau$  に及ぼす接触圧の影響

$\tau$  : 式(8)から求めた付着応力  
 $p$  : ポアソン効果に起因する接触圧

以上のように、接触圧を考慮した $\tau$ - $p$ - $S$ 関係を、引抜き試験から求めた $\tau$ - $S$ 関係と接触圧の関数との積として表すことができた。ここで、式(8)(10)を用いて実験概要で述べた方法により $S_0$ を求め、付着応力分布、張力分布、すべり分布を算出した。プレストレス導入時における、各解放段階における鋼材張力分布について、計算値と全実験結果を比較したものを図-14に示す。図に示すように、計算値は実験値を精度良く表している。また伝達長を、定着端から導入張力の95%を保持している位置までの長さとした時<sup>3)</sup>、計算値から求めた伝達長は概ね160mmであり、鋼材径の約5倍の値であった。

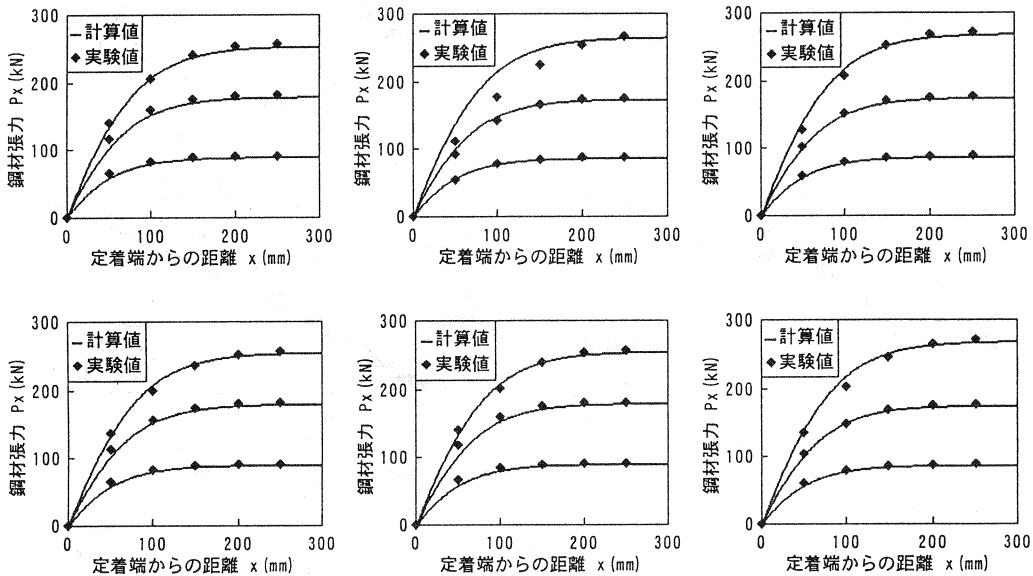


図-14 プレストレス導入時における定着部の鋼材張力分布

#### 4. まとめ

本実験結果を以下にまとめる。

- (1)  $\phi$  32mm 中空P C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式で表すことができた。
- (2) 鋼材のポアソン効果に起因する接触圧作用下の $\tau$ - $p$ - $S$ 関係を、引抜き試験による $\tau$ - $S$ 関係と接触圧の関数との積として表すことができた。
- (3) 鉄筋を用いた既往の研究と同様に、中空P C鋼棒を用いたプレテンション部材の定着状態を、付着特性と接触圧を考慮した式により定量化でき、伝達長を求められることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 今井 昌文ほか：プレテンション用緊張材として用いた中空P C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.521～526，1996.6
- 2) 出光 隆ほか：鉄筋のP C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
- 3) 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，第125号，pp.21～35，1966.1
- 4) 周 礼良ほか：マッシュピなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル，第2回R C構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.45～52，1983
- 5) 島 弘ほか：マッシュピなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着—すべり—ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165～174，1987.2