

# 中空PC鋼棒を用いたプレテンション方式の 定着に関する研究

今井昌文<sup>1</sup>・出光 隆<sup>2</sup>・横田 勉<sup>3</sup>・溝口 茂<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 オリエンタル建設株式会社 技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5)

<sup>2</sup>正会員 工博 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>オリエンタル建設株式会社 技術部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1)

<sup>4</sup>高周波熱錬株式会社 製品事業部開発営業課 (〒254-0013 神奈川県平塚市田村5893)

パイプ状に加工されたPC鋼棒を用いることにより、PC鋼棒を緊張および固定するための、固定装置を必要としないプレテンション方式プレストレス導入方式が可能となった。この方式を以下、HPCシステムと呼ぶ。HPCシステムのコンクリート部材への定着は、PC鋼棒ねじ部の付着と定着用ナットの支圧とによる複合定着である。本研究では、PC鋼棒ねじの付着特性と定着用ナットの定着特性をそれぞれ個別に把握することにより、この複合定着状態を定量的に表せると仮定して実験的に検証を行った。その結果、複合定着状態をねじの付着特性と定着用ナットの定着特性を用いて定量的に表せることを確認した。さらに、HPCシステムを用いた実大構造物実験により、HPCシステムPC鋼棒の経時定着性能および定着耐力について所要の定着性能を有していることを確認した。

**Key Words** : prestressed concrete, pretensioning system, transfer bond, bond stress, slip

## 1. まえがき

通常、プレテンション方式のプレストレス導入方式では、緊張されたPC鋼材を固定するための強固な固定装置(以下、アバット装置)を必要とする。本研究は、パイプ状に加工されたPC鋼棒を用いることにより可能となった、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導入方式の実用化を目的としたものである。以下、この鋼棒を中空PC鋼棒と呼び、それを用いるプレストレス導入システムをHPCシステムと呼ぶ。HPCシステムによるプレストレスコンクリート(以下、PC)部材の製作工程は以下の通りであり、その概要を図-1に示す。

**STEP1** : 専用の袋ナットで片端を閉じた中空PC鋼棒の中空部に反力PC鋼棒を配置し、この反力PC鋼棒に反力(圧縮力)を取ってジャッキを用いて中空PC鋼棒を緊張する。ジャッキの緊張力は定着用ナットを介して、中空PC鋼棒に伝達される。

**STEP2** : 中空PC鋼棒に所定の緊張力(引張力)を

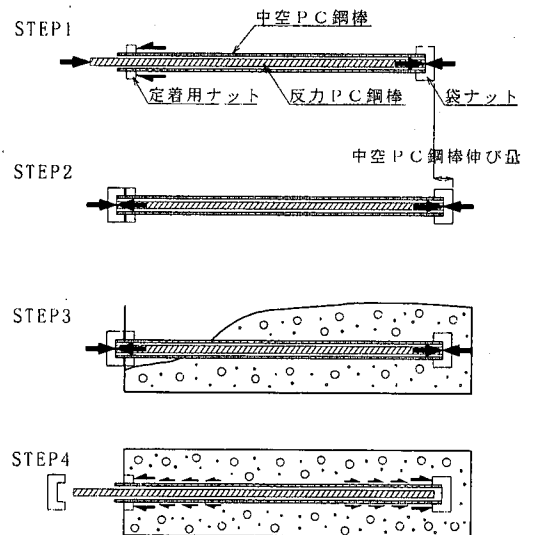


図-1 HPCシステムによるPC部材の製作工程

導入した後、専用の治具を用いて緊張力を保持する。この時、中空PC鋼棒に付与された引張力と、反力PC鋼棒に作用している圧縮力は作用反作用の関係にあり、他より独立した「プレストレス入りのPC鋼棒」を形成する。

STEP3: 「プレストレス入りのPC鋼棒」を型枠内の所定の位置に配置してコンクリートを打設する。

STEP4: コンクリートの圧縮強度が所定の値に達した後、専用の治具を緩めて上述の力の釣り合いを解放する。その際、中空PC鋼棒は、端部のねじとコンクリートとの付着や定着用ナット背面の支圧力でコンクリートに定着されることから、コンクリートに圧縮応力すなわちプレストレスが導入される。

HPCシステムは、以上に示した工程により現場などにおいても、簡便にプレテンション方式のPC部材の製造を行うことができる。

HPCシステムの特徴としては、まず、プレテンション方式であることから、①堅固で高価な定着具を必要としない、②グラウト工を必要としない。また、PC鋼材の緊張を現場以外の場所で行うことができることから、③例えば、管理された工場などで、集中してPC鋼材の緊張および緊張管理を行うことができる、④現場では緊張力の解放作業を行うのみであり、大型のジャッキなどの緊張装置を必用としない、などが挙げられる。HPCシステムを実用化することは、現場作業の省力化に加えて、これまでPCが用いられなかった構造物や補修・補強への利用など、PCの適用分野の拡大を図れるものと考えられる。

HPCシステムの実用化に際しては、PC鋼材のコンクリートへの定着方法の確立が大きな課題のひとつであった。従来のPC鋼より線を用いたプレテンション方式における定着は、PC鋼より線とコンクリートとの付着に加えて、PC鋼より線のポアソン効果に起因するPC鋼より線とコンクリート間の接触圧によって行われ、その伝達長は鋼材径の65倍程度である<sup>2),3)</sup>。しかしながら、中空PC鋼棒とコンクリートとの付着強度は、通常のPC鋼より線の半分程度であることから<sup>4),5)</sup>、そのままでは非常に長い伝達長を必要とする。また、ポストテンション方式と同じ様に鋼材端部に支圧版を設ける方式では、定着端部が大きくなり、定着具を必要としないというプレテンション方式の大きな特徴を損なうことになる。そこで筆者らは、表面が平滑な中空PC鋼棒の付着特性を向上させるために、例えば異形鉄筋のふしの代わりとしてねじを用いることにした。しかしながら、PC鋼棒に設けるねじ部はできるだけ短いことが望ましいことから、ねじ部の付着に加えて、終局荷重時や衝撃などによりねじ部の付着が破壊した場合においても、鋼材耐力を満足できる定着耐力を確保できる、径が最小の専用治具(以

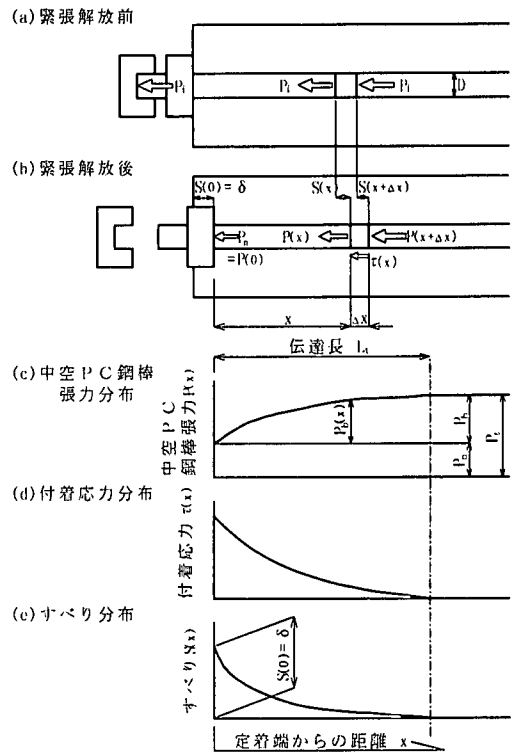


図-2 複合定着状態概念図

下、定着用ナット)を鋼材端部に配置した。その結果、HPCシステムの定着は、ねじ部の付着定着と定着用ナットの支圧定着との複合定着となった。

本論では、上述した複合定着について、2章でその定着機構の考え方を示すとともに、3章以下で複合定着性状を定量的に表すことを目的に行った、基礎実験および実大構造物による定着性能確認実験について報告する。

## 2. 複合定着機構の考え方

### (1) 複合定着機構の概要

HPCシステムを用いたプレテンション部材の、中空PC鋼棒の定着機構を、緊張解放前と比較して図-2(a)および(b)に示す。同図の(c)~(e)には、定着用ナット支圧面からの距離  $x$  によって緊張解放時における中空PC鋼棒張力  $P(x)$ 、付着応力  $\tau(x)$  およびすべり  $S(x)$  がどのように変化するかも併記した。以下、本論では、部材の両端部を部材端、定着用ナット支圧面の位置を定着端と呼ぶ。この定着機構の中で、境界条件として明らかな事項は次の2つである。

①導入緊張力を  $(P_1)$ 、定着用ナットが分担する支圧分担力を  $(P_n)$ 、中空PC鋼棒ねじ部の分担する付着分担力を  $(P_e)$  とすると、

$$P_i = P_n + P_b \quad (1)$$

$$P_n = f_2(\delta) \quad (7)$$

が成り立つ。

②定着用ナットは、部材端で中空PC鋼棒にねじ固定されていることから、プレストレスの導入によって生じる定着端の鋼材とコンクリートとのすべり  $S(0)$  と、定着用ナットの変位  $\delta$  は同じであり、

$$\delta = S(0) \quad (2)$$

が成立する。

よって、中空PC鋼棒ねじ部の付着特性に依存する  $P_b(x)$  と  $S(x)$  の関係と定着用ナットに作用する  $P_n$  と  $\delta$  の関係を個別に把握することにより、上記の2つの境界条件を用いて複合定着時の  $P_n$ 、 $P_b$  および  $P_b(x)$  を求めることができる。

## (2) 定着部の応力解析概要

いま、定着端から  $x$  の位置の中空PC鋼棒張力  $P(x)$  が分かっているとすれば、 $x$  の位置より  $\Delta x$  だけ離れた位置の中空PC鋼棒張力  $P(x+\Delta x)$  は式(3)で与えられる。

$$P(x + \Delta x) = P(x) + \tau(x) \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x \quad (3)$$

ここに、

D: 中空PC鋼棒径

また、すべりを中空PC鋼棒とコンクリートとの相対すべりではなく、すべりが生じていない伝達長位置を基準とした、中空PC鋼棒各位置の変位量としたとき、定着端から  $x$  の位置のすべり  $S(x)$  は、伝達長位置を基準とした中空PC鋼棒の長さ短縮量として下式で表すことができる。

$$S(x) = \sum_{n=1}^{(L_1-x)/\Delta x} \frac{P_i - P(x+n \cdot \Delta x)}{A_p \cdot E_p} \cdot \Delta x \quad (4)$$

ここに、

$L_1$ : 伝達長

$A_p$ : 中空PC鋼棒断面積

$E_p$ : 中空PC鋼棒ヤング係数

したがって、定着端から  $x$  の位置のすべり  $S(x)$  が分かっているとすれば、 $x$  の位置から  $\Delta x$  だけ離れた位置のすべり  $S(x+\Delta x)$  は式(5)で与えられる。

$$S(x + \Delta x) = S(x) - \frac{P_i - P(x + \Delta x)}{A_p \cdot E_p} \cdot \Delta x \quad (5)$$

ここで、付着応力  $\tau(x)$  とすべり  $S(x)$  の関係は、実験などにより式(6)のように表すことができる<sup>6)</sup>。

$$\tau(x) = f_1(S(x)) \quad (6)$$

いま、定着用ナットが分担する支圧分担力( $P_n$ )と定着用ナットの変位( $\delta$ )の関係を式(7)のように与えられると仮定した時、図-2(c)、(d)および(e)に示した  $P(x)$ 、 $\tau(x)$  および  $S(x)$  と  $x$  の関係は、以下に述べる差分法の計算によって求めることができる。

①  $\Delta x$  の値を定める。

②  $S(0) = \delta$  として適当な値を仮定する。

③ 式(7)から  $P_n$  の値を求める。 $P_n = P(0)$  である。

④  $S(0)$  の値を式(6)に代入して  $\tau(0)$  を求める。

⑤  $x=0$  として

⑥ 式(3)から  $P(x+\Delta x)$  を求める。

⑦ 式(5)から  $S(x+\Delta x)$  を求める。

⑧ 式(6)から  $\tau(x+\Delta x)$  を求める。

⑨  $x = \Delta x$ ,  $x = 2\Delta x$ ,  $x = 3\Delta x \dots$  として順次⑤~⑧の計算を繰り返す。

⑩  $S(x+\Delta x) = 0$  となった時、 $P(x+\Delta x) \neq P_i$  であれば、 $S(0)$  の値が適当でなかったことになる。 $P(x+\Delta x) = P_i$  となるまで②へ戻り、 $S(0) = \delta$  の値を変えて繰り返し計算を行う。

⑪  $S(x+\Delta x) = 0$  で  $P(x+\Delta x) = P_i$  となった時の  $x+\Delta x$  が伝達長であり、 $P(x)$ 、 $\tau(x)$ 、 $S(x)$  の分布が、それぞれ中空PC鋼棒張力、付着応力およびすべりの性状を表すこととなる。

## 3. 基礎実験の概要

2章で述べた複合定着機構において、プレストレス導入時の導入緊張力( $P_i$ )に対するねじ部付着分担力( $P_b$ )および定着用ナット支圧分担力( $P_n$ )の分担割合は、ねじ部の付着特性(式(6)に示す付着応力-すべり関係)で以下、 $\tau$ - $S$ 関係)と定着用ナットの定着特性(式(7)に示す支圧分担力-定着用ナット変位関係)で以下、 $P_n$ - $\delta$ 関係)に依存している。本実験では、定着用ナット支圧面積と定着コンクリート面積をパラメータとしたプレテンション試験体を製作し、①実験要因と各定着分担力の割合および定着用ナットの定着特性( $P_n$ - $\delta$ 関係)、②ねじ部の付着特性( $\tau$ - $S$ 関係)について検討を行い、2章で述べた複合定着機構の考え方についての検証を行った。

### (1) 中空PC鋼棒の仕様

表-1 に実験に用いた中空PC鋼棒の機械的性質を示す。中空PC鋼棒は、通常用いられているPC鋼棒と同等の機械的性質を有している。図-3 にねじ部の形状を示す。中空PC鋼棒に設けられているねじは、同外径の通常のPC鋼棒と同じ形状である。

表-1 中空PC鋼棒の機械的性質

外径 (mm)	内径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
32	22	424.1	930	1080	196

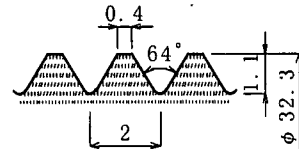


図-3 中空PC鋼棒ねじの仕様(寸法単位: mm)

表-2 試験体寸法および実験要因一覧

試験体 名称	コンクリートの品質		定着コンクリート			定着用ナット		支圧 面積比 An/Ac (%)
	圧縮強度 f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	断面幅 a (mm)	断面幅 b (mm)	面積*1 A <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	径 D <sub>n</sub> (mm)	面積*1 A <sub>n</sub> (mm <sup>2</sup> )	
M0	30.4	26.5	175	190	32395	0	0	0.00
Ms						50	1108	3.42
Mm						60	1972	6.09
Mb						70	2993	9.24
B0			205	220	44245	0	0	0.00
Bs						50	1108	2.50
Bm	60	1972				4.46		
Bb	70	2993				6.76		

\*1: 鋼棒面積分を、ねじ部φ33mmとして除いた値

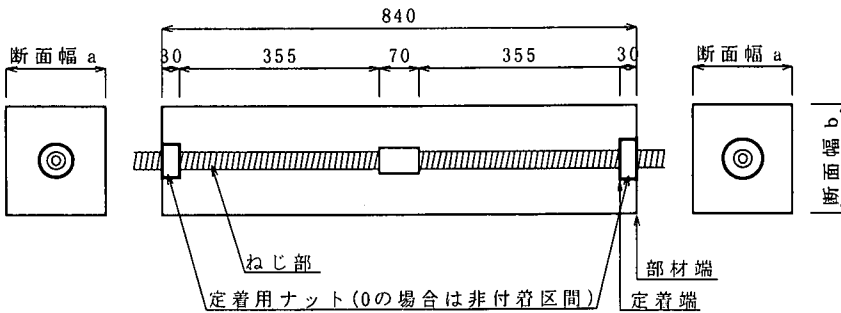


図-4 試験体形状図(寸法単位: mm)

(2) 試験体形状寸法および実験要因

プレテンション試験体の製作はアバット装置を用いて行った。中空PC鋼棒の初期緊張力は  $P_i = 294\text{kN}$  ( $\sigma_{pi} = 693\text{N/mm}^2$ ) である。試験体の製作にHPCシステムを用いなかった理由は、中空PC鋼棒の中空部にひずみゲージを貼付していることから、反力PC鋼棒を配置できないためである。HPCシステムと通常のアバット装置を用いるプレテンション方式は、PC鋼材の緊張反力を取らせる方法が異なるだけであり、PC鋼材の緊張状態に差異は無い。したがって、両プレテンション方式において、プレストレス導入時の定着性状には違いは無いものと判断した。図-4に試験体形状を示す。表-2に試験体寸法および実験要因の一覧を示す。試験体名称のMおよびBは、試験体の定着断面の実験要因を表している(以下、

定着コンクリート面積)。Mは断面幅aが175mmの場合を表している。この値は、使用した中空PC鋼棒が、19本より19.3mmのPC鋼より線(SWPR19-19.3mm)とほぼ同等の機械的性質を有していることから、SWPR19-19.3mmを用いた定着システム(1S19.3)の定着部最小厚を参考に決定した<sup>7)</sup>。Bは、Mより断面幅aを30mm大きくした場合である。断面幅bは断面幅aより15mm大きくし、プレストレス導入時にひび割れが発生したときの、ひび割れ観察面を1方向に限定した。試験体名称の0, s, mおよびbは、定着用ナットの支圧面積を表しており、0は定着用ナット無し、mはφ32mm PC鋼棒の標準ナット支圧面積、sはmの半分の支圧面積およびbはmの1.5倍の支圧面積の場合である。なお、定着コンクリート面積および定着用ナット面積は、中空PC鋼棒ね

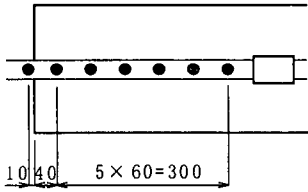


図-5 中空PC鋼棒ひずみゲージ貼付位置 (寸法単位: mm)

じ部をφ33mmとして、その面積を除いた値である。図-4に示すように、中空PC鋼棒には、全長に渡ってねじが施されており、定着用ナットは部材端で中空PC鋼棒にねじ固定されている。定着用ナットを装着しない試験体の場合には、定着用ナットの配置位置に当たる箇所を非附着区間とし、全ての試験体の附着長さを同じにした。試験体は、両端で定着条件を変え、ひとつの試験体で2要因の実験を行っている。なお、中空PC鋼棒は試験体中央部で接合しているが、これは中空部にひずみゲージを貼付できる中空PC鋼棒の長さに限度があったことによる。

### (3) ひずみゲージ貼付位置

中空PC鋼棒へのひずみゲージ貼付位置を図-5に示す。ひずみゲージは中空PC鋼棒ねじ部の附着を損なわないように、中空PC鋼棒の中空部に貼付した。ひずみゲージは同図に示した1点あたり対角に2枚貼付した。

### (4) 中空PC鋼棒張力、附着応力およびすべりの求め方

#### a) 鋼材に沿ったひずみ分布

ひずみ分布曲線は2次放物線で近似できると仮定して、鋼材に貼付した隣りあう3測点を、2次放物線で回帰したものをつなげることにより定めた<sup>7)</sup>。

#### b) 中空PC鋼棒張力

中空PC鋼棒張力は、鋼材ひずみより求めた。中空PC鋼棒張力と鋼材ひずみとの関係は、予めキャリブレーションを実施した。

#### c) 附着応力の求め方

鋼材に沿った任意の位置の附着応力は、鋼材のひずみ分布から求めた。鋼材に沿った任意の位置の附着応力は、ひずみ分布曲線の傾きを用いて式(8)で求められる。

$$\tau = \frac{A_p \cdot E_p}{\pi \cdot D} \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{k}{\pi \cdot D} \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (8)$$

ここに、

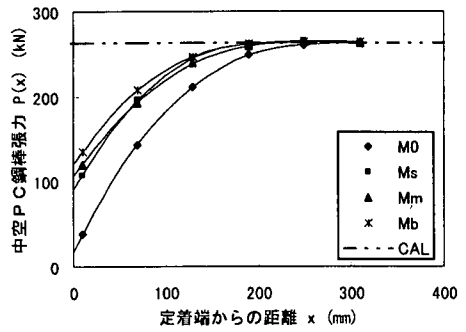
$\tau$ : 附着応力

$A_p$ : 鋼材の断面積

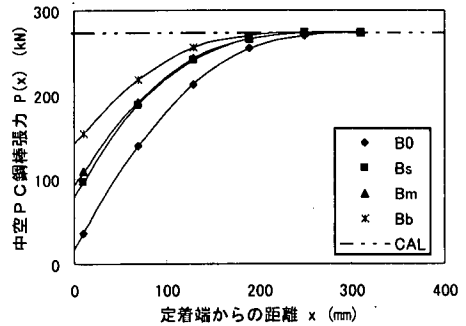
$E_p$ : 鋼材のヤング係数

$D$ : 鋼材の径

$d\varepsilon/dx$ : 任意の位置のひずみ分布曲線の傾き



(a) 定着コンクリートM試験体



(b) 定着コンクリートB試験体

図-6 中空PC鋼棒張力分布

$k$ : 予め求めた鋼材張力と鋼材ひずみの関係

$P=k \times \varepsilon$  となる校正係数

$P$ : 鋼材張力

#### d) すべりの求め方

本研究では、すべりを鋼材とコンクリートとの相対すべりではなく、導入緊張力を保持している位置を基準とした、鋼材各位置の変位量としている<sup>7)</sup>。任意の位置のすべりは、基準となる位置から定着端へ向かって、基準となる位置の鋼材ひずみとのひずみの差(以下、ひずみ差)を、任意の位置まで積分したものとした。

## 4. 基礎実験結果および考察

プレストレス導入直後における中空PC鋼棒張力分布について、定着コンクリート面積M(以下、M試験体)の場合を図-6(a)に、定着コンクリート面積B(以下、B試験体)の場合を図-6(b)に示す。同図のプロットは鋼材ひずみから求めた中空PC鋼棒張力を、曲線は、3章の(4)で述べた方法により求めた鋼材ひずみ分布曲線を張力に換算したものである。なお、同図に示す“CAL”は、

表-3 支圧分担力および付着分担力一覧表

	支圧面積比 An/Ac	導入緊張力 Pt (kN)	支圧分担力 Pn (kN)	付着分担力 Pb (kN)	支圧分担率 Pn/Pt	0.95Pt 伝達長 Lt (mm)
M0	0.0000	263.3	0.0	263.3	0.000	194
Ms	0.0342	264.4	90.2	174.2	0.341	140
Mm	0.0608	262.8	106.0	156.8	0.403	155
Mb	0.0922	264.1	120.2	143.9	0.455	138
B0	0.0000	273.3	0.0	273.3	0.000	204
Bs	0.0250	273.5	78.5	195.0	0.287	169
Bm	0.0445	273.6	92.0	181.6	0.336	166
Bb	0.0676	273.5	142.2	131.3	0.520	141

中空PC鋼棒の初期緊張力から求めた、プレストレス導入直後における導入緊張力の計算値を示す。

同図より、何れの試験体においても、定着端から試験体中央に向かってある距離を経た位置で、中空PC鋼棒張力は導入緊張力となっていることが分かる。このことより、定着コンクリート面積と定着用ナット支圧面積をパラメータとした本試験体は、全て良好に定着されていることが分かる。ここで、定着域（定着端から計算導入力保持されている位置までの区間）における中空PC鋼棒張力分布の形状を見ると、実験要因によって大きく異なっている。各試験体について、定着コンクリート面積（ $A_c$ ）と定着用ナット支圧面積（ $A_n$ ）の比（ $A_n/A_c$ ：以下、支圧面積比）、導入緊張力（ $P_t$ ）、導入緊張力に対する定着用ナットの支圧が負担する力＝支圧分担力（ $P_n$ ）、導入緊張力に対するねじ部の付着が負担する力＝付着分担力（ $P_b$ ）、導入緊張力に対する支圧分担力の比（ $P_n/P_t$ ：以下、支圧分担率）および定着端から導入緊張力の95%を保持している位置までの長さを伝達長（ $L_t$ ）として表-3に示す。なお、支圧分担力は定着端の中空PC鋼棒張力とし、付着分担力は導入緊張力と支圧分担力との差としている。以下、本実験結果より、ねじ部の付着特性および定着用ナットの定着特性について検討を行い、2章で述べた複合定着の考え方についての検証を行う。

(1) 定着用ナットの支圧定着特性

2章で述べたように、定着用ナットの定着特性を、支圧分担力と定着用ナット変位の関係（ $P_n$ - $\delta$ 関係）で表すことを試みた。定着用ナットは中空PC鋼棒にねじ固定されていることから、定着用ナットの変位（ $\delta$ ）は、プレストレス導入直後の、中空PC鋼棒の定着端すべりとしている。図-7に、定着用ナット変位と、支圧分担力を定着用ナット支圧面積で除した支圧応力との関係を示す。同図に示すように、バラツキは有るものの、支圧応力と定着用ナット変位の関係は、概ね式(9)で回帰できる。回帰式のバラツキを表す相関係数  $r$  の2乗は  $r^2=0.746$  である。

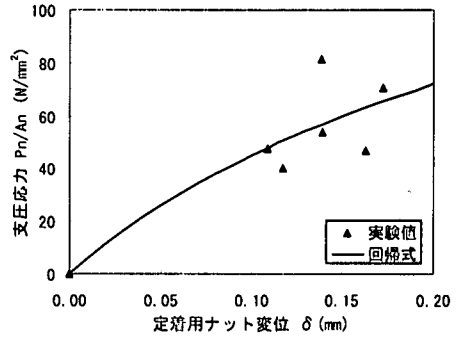


図-7 定着用ナット変位と支圧分担力の関係

$$\frac{P_n}{A_n} = 70.2 \cdot \ln(1 + 8.94 \cdot \delta) \quad (9)$$

2章において式(7)で仮定した、支圧分担力（ $P_n$ ）と定着用ナットの変位（ $\delta$ ）の関係を、式(9)で表した。しかしながら式(9)は、少ない試験体を基に求めた実験式であることからバラツキが大きい。加えて、試験体は同一のコンクリートを用いていることから、コンクリートの弾性変形量など、 $\delta$ に及ぼすコンクリート品質の影響は検討できていない。今後、 $\delta$ に及ぼすコンクリート品質の影響などについて検討を行い、汎用性のある  $P_n$ - $\delta$  関係を求める必要がある。また、図-7から、プレストレス導入時に生じる支圧応力は、 $40\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$  であり、圧縮強度の約1.3~2.6倍と大きい値になることが分かる。支圧応力は、支圧強度に対して安全率が3以上でなければならない<sup>9)</sup>。したがって、HPCシステム定着部では、プレストレス導入時に生じる支圧応力とともに、支圧強度についても検討する必要がある<sup>10)</sup>。

(2) ねじ部の付着特性

3章の(4)で述べた方法により求めた付着応力およびすべりの関係を図-8に示す。図に示すプロットは、定着端から310mm位置を始点として、定着端へ向かって30mmピッチの位置および定着端の位置について計算した付着応力とその位置のすべりである。なお、同図には、式(10)に示す実験結果の回帰式を併記した。回帰式のバラツキを表す相関係数  $r$  の2乗は  $r^2=0.975$  である。

$$\tau = 7.55 \cdot \ln\left(1 + 2000 \cdot \frac{S}{D}\right) \quad (10)$$

$$\tau = 1.6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \ln\left(1 + 2000 \cdot \frac{S}{D}\right) \quad (11)$$

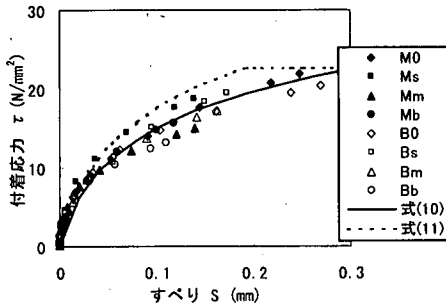


図-8 付着応力とすべりの関係

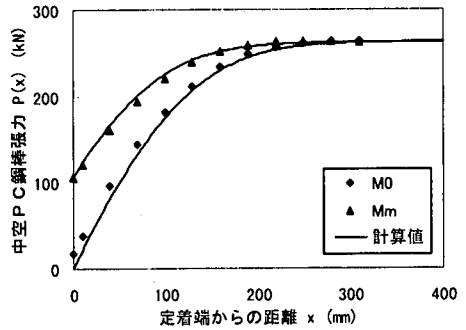


図-9 中空PC鋼棒張力分布図

ここに、

S : すべり (mm)

D : 鋼材径 (mm)

$f_c$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

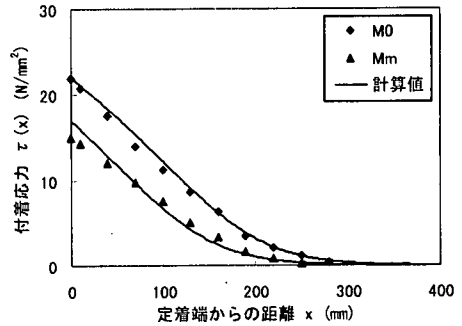


図-10 付着応力分布図

同図に示すように、本実験における試験体ねじ部の  $\tau$ -S 関係は、定着コンクリート面積および定着用ナット支圧面積の実験要因に関わらずほぼひとつの式で表すことができる。このことから、ねじ部の付着特性は定着コンクリート面積の大きさ、定着用ナットの有無および定着用ナット支圧面積の大きさに影響を受けないことが分かる。なお、図-8には引抜き試験から求めた  $\tau$ -S 関係<sup>9)</sup>、式(11)を併記した。同一すべりに対して生じる付着応力は、本実験結果の方が僅かに小さい傾向にある。その差は実験誤差および回帰範囲誤差の範疇とも考えられるが、今後の検討課題とする。

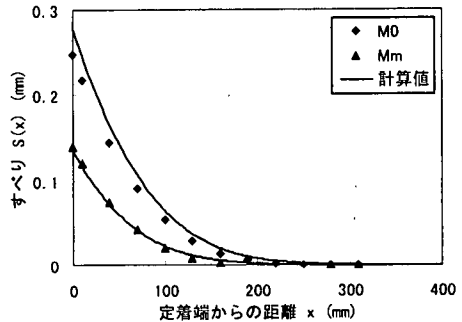


図-11 すべり分布図

ここで、導入緊張力  $P_1$  に対して支圧分担力  $P_0$  が分かっているならば、2章で述べた式(6)に式(10)に示す  $\tau$ -S 関係を代入して、繰返し計算により中空PC鋼棒張力分布、付着応力分布およびすべり分布を求めることができる。計算に際して  $\Delta x$  は 2mm とし、 $P_1$  および  $P_0$  には実験値を用いた。計算値と実験値の、中空PC鋼棒張力分布の一例を図-9に、付着応力分布の一例を図-10に、すべり分布の一例を図-11にそれぞれ示す。図-9、図-10および図-11に示すように、式(10)に示した  $\tau$ -S 関係を用いて2章で述べた手法により求めた中空PC鋼棒張力分布、付着応力分布およびすべり分布の計算値は、いずれも実験値と良く一致した。このことから、導入緊張力  $P_1$  に対して支圧分担力  $P_0$  が求まっていれば、式(10)に示す  $\tau$ -S 関係を用いて、中空PC鋼棒張力分布、付着応力分布およびすべり分布を求められることを確認した。また、中空PC鋼棒張力分布、付着応力分布形状およびすべり分布形状は、図-2(c)、(d)および(e)で仮定した分布形状と概ね同じであることが確認された。

### (3) 複合定着の応力解析方法についての検証

2章では、付着応力とすべりの関係で表すねじの付着特性(式(6))と、定着用ナットへの作用力と定着用ナット変位の関係で表す定着用ナットの定着特性(式(7))を用いて、複合定着の中空PC鋼棒張力分布や伝達長などを定量的に把握する方法を述べた。ここで、ねじの付着特性を表す式(6)に式(10)を、定着用ナットの定着特性を表す式(7)に式(9)を代入して、2章で述べた方法により複合定着状態について計算を行った。表-4に、計算結果を実験結果と比較して示す。図-12には、伝達長の計算値と実験値と比較して示す。同図には、実験値と計算値と

表-4 複合定着状態の実験値と計算値の比較

	支圧分担力 $P_n$ (kN)			付着分担力 $P_b$ (kN)			伝達長 $L_t$ (mm)		
	実験	計算	計/実	実験	計算	計/実	実験	計算	計/実
M0	0.0	0.0	1.00	263.3	263.3	1.00	194	208	1.07
M <sub>s</sub>	90.2	73.6	0.82	174.2	190.8	1.10	140	172	1.23
M <sub>m</sub>	106.0	108.1	1.02	156.8	154.7	0.99	155	152	0.98
M <sub>b</sub>	120.2	136.6	1.14	143.9	127.5	0.89	138	134	0.97
B0	0.0	0.0	1.00	273.3	273.3	1.00	204	210	1.03
B <sub>s</sub>	78.5	75.9	0.97	195.0	197.6	1.01	169	174	1.03
B <sub>m</sub>	92.0	112.3	1.22	181.6	161.3	0.89	166	154	0.93
B <sub>b</sub>	142.2	141.3	0.99	131.3	132.2	1.01	141	136	0.96

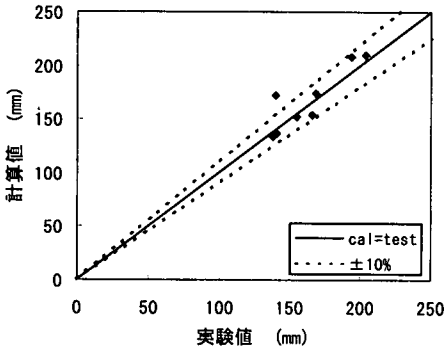


図-12 伝達長の実験値と計算値の比較

の比が1.0となる場合を実線で、0.9および1.1となる場合を破線で示した。なお、伝達長は、定着端から鋼材緊張力が導入緊張力を保持している位置までの長さであるが、図-9に示すように、中空PC鋼棒張力分布は伝達長位置付近で導入緊張力に漸近することから、伝達長位置の特定には誤差を含みやすい。よって本実験での伝達長は、定着端から導入緊張力 ( $P_i$ ) の95%を保持している位置までの距離とした<sup>9)</sup>。図-12に示すように、実験式(9)および(10)を用いた、2章で述べた方法による計算値は、伝達長を概ね±10%程度の誤差範囲で推定できている。また、表-4に示すように、支圧分担力を±20%程度の誤差範囲で、付着分担力を±10%程度の誤差範囲で推定できることを確認した。

以上のように、2章で述べた応力解析概要の考え方により、HPCシステムの複合定着状態を概ね定量的に表せることを確認した。しかしながら、計算に用いたねじの付着特性(式(10))や定着用ナットの定着特性(式(9))は、限られた試験体を用いた実験から導いた実験式であることから、今後、特にコンクリートの品質が及ぼす影響を考慮した上記の関係式を確立することが必要である。

## 5. 実大構造物による定着性能確認実験

コンクリート桁を外ケーブル補強する場合、外ケーブルを定着するための定着体をコンクリート桁に設ける必

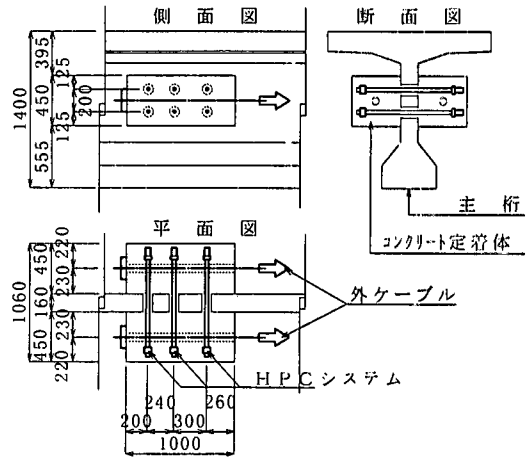


図-13 試験体形状寸法 (寸法単位: mm)

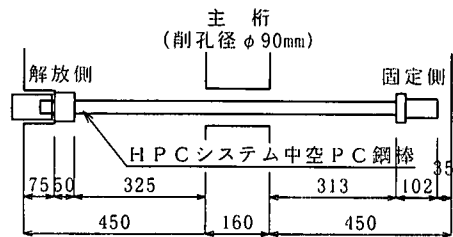


図-14 HPCシステム中空PC鋼棒配置図 (寸法単位: mm)

要がある。本実験は、HPCシステムにより、コンクリート定着体をコンクリート桁に緊結した構造である。適用方法を図-13に示す。通常、コンクリート桁へのコンクリート定着体の緊結には、ポストテンション方式が用いられるが、用いるPC鋼材長が短いことから、緊張によるPC鋼材伸び量が小さく、緊張管理が非常に難しい。また、緊張作業や油圧ジャッキの移動などは主桁間で行われることから、作業空間も非常に狭いものとなる。このコンクリート定着体のコンクリート桁への緊結にHPCシステムを用いることにより、①現場で緊張管理することなく正確なプレストレスを導入できる、②グラウト工を必要としない、③プレストレス導入(緊張力の解放)は電動レンチで行えることから、重い油圧ジャッキを必要としない、など現場作業の省力化を図ることができる。実験は、HPCシステムを用いたコンクリート定着体について、実大試験体により定着耐力確認実験を行なうとともに<sup>8)</sup>、実構造において、HPCシステム中空PC鋼棒の張力状態について約半年の経時計測を行った。HPCシステムの中空PC鋼棒配置詳細を図-14に示す。

ここで、HPCシステムの伝達長について検証する。検証条件は以下の通りである。



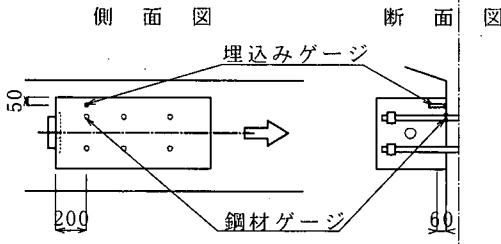


図-15 ひずみ測定位置図 (寸法単位: mm)

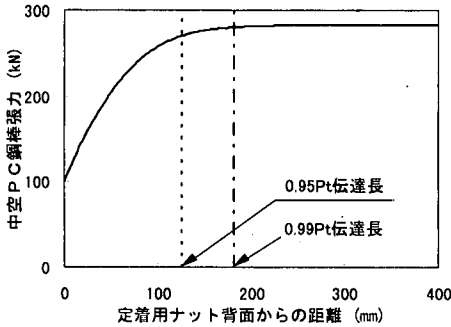


図-16 中空PC鋼棒張力状態試算結果

- ・ HPCシステム初期緊張力:  $P_1 = 294 \text{ kN}$
- ・ 定着用ナット支圧面積:  $A_n = 1972 \text{ mm}^2$
- ・ 定着コンクリート面積:  $A_c = 49770 \text{ mm}^2$   
( $225\text{mm} \times 225\text{mm}$  と仮定。鋼材面積を除く)
- ・ 中空PC鋼棒断面積:  $A_p = 424.1 \text{ mm}^2$
- ・ コンクリート圧縮強度:  $f'_c = 55.3 \text{ N/mm}^2$
- ・ コンクリートヤング係数:  $E_c = 31300 \text{ N/mm}^2$
- ・ 中空PC鋼棒ヤング係数:  $E_p = 196000 \text{ N/mm}^2$

プレストレス導入直後の中空PC鋼棒緊張力は、コンクリートの弾性変形により初期緊張力  $P_1$  から  $P_2$  に減少する。図-15 に示す鋼材ゲージを貼付した中空PC鋼棒のプレストレス導入直後の緊張力の計算値は、 $P_2 = 283 \text{ kN}$  となる。

ねじの付着特性を、コンクリート強度を考慮した式(11)、定着用ナットの定着特性を式(9)として、2章で述べた方法により複合定着状態を求めた。その結果、導入緊張力  $P = 283 \text{ kN}$  に対して、定着用ナットの支圧分担力は  $P_n = 99 \text{ kN}$ 、ねじの付着分担力は  $P_b = 184 \text{ kN}$  となり、中空PC鋼棒張力分布は図-16 に示すようになった。同図に示すように、導入緊張力  $P_1$  の95%を保持している位置までの長さは  $L_{0.95P} = 122 \text{ mm}$  (図中、0.95 $P_t$ 伝達長)、導入緊張力  $P_1$  の99%を保持している位置までの長さは  $L_{0.99P} = 178 \text{ mm}$  (図中、0.99 $P_t$ 伝達長)であった。コンクリート定着体における、HPCシステム中空PC鋼棒の

表-5 プレストレス導入時ひずみ変化 ( $\times 10^{-6}$ )

	コンクリート	中空PC鋼棒	計算
No.1	-151	-188	-135
No.2	-166	-203	
No.3	-189	-206	
No.4	-172	-176	

ひずみの“-”は短縮を示す

定着用ナット背面から主桁とコンクリート定着体の接合面までの長さは、図-14 に示すように 313mm および 325mm であり、伝達長を十分満足している。

この時、定着用ナットの支圧分担力によって生じる支圧応力は  $50.2 \text{ N/mm}^2$  である。ここで、定着用ナットを用いた支圧実験より導いた、支圧強度式を式(12)に示す<sup>10)</sup>。

$$f'_{ak} = 5.18 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot K \cdot \sqrt{\frac{A_c}{A_n}} \quad (12)$$

ここに、

$f'_{ak}$ : 支圧強度 ( $\text{N/mm}^2$ )

$f'_c$ : コンクリート強度 ( $\text{N/mm}^2$ )

$A_n$ : 定着用ナット支圧面積 ( $\text{N/mm}^2$ )

$A_c$ : 定着コンクリート面積 ( $\text{N/mm}^2$ )

$K$ : 補強筋の量によって決まる常数

$$K = 0.531 \cdot t + 0.897$$

$t$ : 補強筋を円筒と仮定した時の換算厚さ(mm)

補強筋量を0と仮定して、式(12)から求めた支圧強度は、 $f'_{ak} = 173.6 \text{ N/mm}^2$ と、コンクリート強度の概ね3.1倍であった。また、この支圧強度は、支圧分担力によって生じる支圧応力  $50.2 \text{ N/mm}^2$  に対して3倍以上の安全率を有している。

図-15 に示す位置で測定した、プレストレス導入時の中空PC鋼棒ひずみとコンクリートひずみの変化を表-5 に示す。測定は4箇所のコンクリート定着体で行った。同表には、それぞれのコンクリート定着体の測定結果を、No.1~No.4として示す。表に示す計算値は、プレストレス導入によるコンクリートの弾性変形に伴う、中空PC鋼棒緊張力の減少量(初期緊張力から導入緊張力に)の計算値をひずみに換算したものである。表-5に示すように、プレストレス導入時におけるコンクリートのひずみ変化は、計算値より1.3倍程度大きくなっている。すなわち、ゲージ位置では計算より大きなプレストレスが導入されていることを示している。これは、ゲージ位置が中空PC鋼棒定着位置に近いことによるプレストレス分布の不均一に起因するものと考えられる。図-17に、位置No.2のコンクリートひずみの経時変化を示す。図に併記したコンクリートひずみ変化の計算値は、以下に示す方法で求めた。また、位置No.2の中空PC鋼棒緊張力の

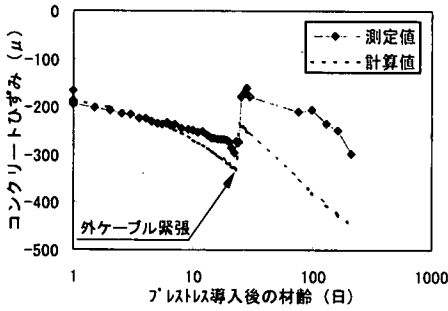


図-17 定着体コンクリートひずみ経時変化

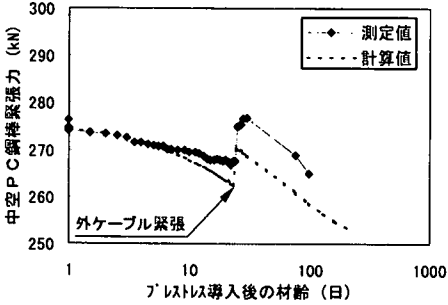


図-18 HPCシステム中空PC鋼棒緊張力経時変化

経時変化を図-18に示す。中空PC鋼棒緊張力は中空PC鋼棒ひずみを換算して求めた値である。図に併記した計算値は、コンクリートひずみ変化の計算値を中空PC鋼棒緊張力に換算したものである。

外ケーブル緊張まで

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{cp} \cdot (1 + \phi_{pt}) + \epsilon_{sh} \quad (13)$$

外ケーブル緊張後

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{cp} \cdot (1 + \phi_{pt}) + \epsilon_{cl} \cdot (1 + \phi_{lt}) + \epsilon_{sh} \quad (14)$$

ここに、

- $\epsilon_{cl}$ : 材齢  $t$  のコンクリートひずみ
- $\epsilon_{cp}$ : プレストレス導入時のコンクリート弾性ひずみ (実測値)
- $\epsilon_{cl}$ : 外ケーブル緊張時のコンクリート弾性ひずみ (実測値)
- $\phi_{pt}$ : プレストレス導入時を荷重開始時とした材齢  $t$  時のクリープ係数<sup>9)</sup>
- $\phi_{lt}$ : 外ケーブル緊張時を荷重開始時とした材齢  $t$  時のクリープ係数<sup>9)</sup>
- $\epsilon_{sh}$ : プレストレス導入時からの材齢  $t$  時の収縮ひずみ<sup>9)</sup>

図-17および図-18に示す、コンクリートひずみおよび中空PC鋼棒緊張力の経時変化では、プレストレス導入

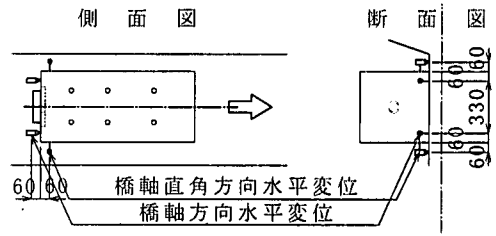


図-19 コンクリート定着体変位測定位置 (寸法単位: mm)

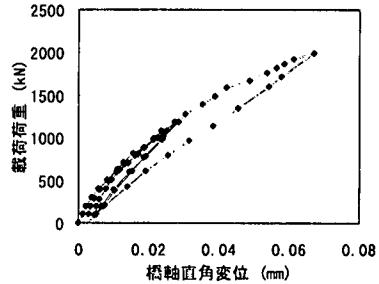


図-20 載荷荷重と橋軸直角変位の関係

後の材齢1日未満の結果は、材齢1日上にプロットしている。プレストレス導入直後のコンクリートひずみは、表-5に示すように $-166\mu$ 、中空PC鋼棒緊張力は、初期緊張力の $294\text{kN}$ から、ひずみで $203\mu$ 減少した $277\text{kN}$ である。図-17および図-18に示すように、コンクリートひずみ、中空PC鋼棒緊張力ともに、その経時変化の挙動は、概ね計算値と同じ傾向を示している。また、図-18に示すように、中空PC鋼棒緊張力は計算値を上回る緊張力を保持していることから、HPCシステムの中空PC鋼棒はコンクリート定着体に良好に定着されていると判断できる。

外ケーブル緊張時における、HPCシステムを用いたコンクリート定着体の定着状態の挙動確認として、定着体の橋軸直角方向水平変位 (以下、橋軸直角変位) および橋軸方向水平変位 (以下、橋軸変位) を測定した。それぞれの変位は、主桁を挟む両定着体について、図-19に示す位置で測定した。図-20に載荷荷重 (外ケーブル緊張力) と橋軸直角変位の関係 (以下、 $P-\delta w$  関係) を示す。変位は両側定着体の4測点の平均である。ここで示す橋軸直角変位とは、荷重開始時を0とした変位である。すなわち、主桁と定着体の接合面にはプレストレスが導入されていることから、橋軸直角変位がそのまま主桁と定着体との接合部の開口を表すものではない。荷重は、外ケーブルの使用時許容緊張力 ( $1176\text{kN}$ ) を3回繰り返した後、外ケーブルの規格引張強度 ( $1960\text{kN}$ ) まで行った。

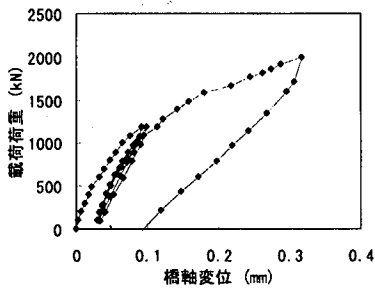


図-21 載荷荷重と橋軸変位の関係

図-20 に示すように、使用時許容緊張力までの  $P-\delta w$  関係は概ね弾性的な挙動を示しており、3回の繰り返し載荷においても良好な復元性が観察される。載荷荷重 1568kN 付近において  $P-\delta w$  関係に変曲点が観察される。これは、図-19 の側面図に示す、定着体左縁の接合部が開口したことによる断面剛性の低下と考えられる。定着体左縁のプレストレスが 0 となる載荷荷重の計算値は 1440kN であり、目視においても 1470kN 付近で主桁と定着体左縁との縁切れが観察されたことから、接合部には設計プレストレスが導入されていることが確認された。その後、外ケーブルの規格引張強度 1960kN まで載荷を行ったが、定着耐力の低下は観察されなかった。また、同図に見られるように、外ケーブルの規格引張強度 1960kN 載荷後の除荷時における橋軸直角変位の復元性も良好であった。

図-21 に載荷荷重と橋軸変位の関係 (以下、 $P-\delta d$ ) を示す。同図に示すように、使用時許容緊張力までの  $P-\delta d$  関係は、1回目載荷時と2回目載荷時に僅かに差は見られるものの、概ね弾性的な挙動を示しており、2回目以降の繰り返し載荷においても良好な復元性が観察される。その後、外ケーブルの規格引張強度 1960kN までの載荷において  $P-\delta d$  関係の勾配は低下するものの、定着耐力の低下は観察されなかった。なお、本試験体の設計せん断伝達耐力は 2100kN である<sup>10)</sup>。

以上のように、HPCシステムを用いて主桁に緊結された外ケーブル定着用コンクリート定着体は、良好な定着性能を有することが確認された。

## 6. まとめ

中空PC鋼棒を用いることにより可能となった、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導入システム“HPCシステム”について行った本実験より得られた知見を以下にまとめる。

(1) 中空PC鋼棒ねじ付着と定着用ナット支圧とによる

- 複合定着の定着状態を、ねじの付着特性および定着用ナットの定着特性とにより定量的に表せることを示した。
- (2) 定着用ナットの定着特性を、定着用ナット背面のコンクリート支圧応力と変位の関係として実験的に求めた。
- (3) プレテンション部材定着部のねじの付着特性を、付着応力とすべりの関係で表した。また、この関係は、引抜き試験から求めた関係と概ね等しいことを確認した。
- (4) ねじの付着特性を用いて、プレテンション定着部の中空PC鋼棒張力分布状態を定量的に表した。
- (5) 桁の外ケーブル補強において、HPCシステムにより主桁に緊結された外ケーブル定着用コンクリート定着体は、所要の定着耐力を有することを確認した。

本研究は、外径 32mm (断面積 = 424.1mm<sup>2</sup>) の中空PC鋼棒を用いたHPCシステムについて行ったが、新たに外径 40mm (断面積 = 549.8mm<sup>2</sup>) および外径 43mm (断面積 = 809.8mm<sup>2</sup>) が開発された。今後、これらの新しい中空PC鋼棒を用いたHPCシステムの実験を行い、本報告で示した考え方の妥当性および適用範囲について検討を行う。

## 参考文献

- 1) Yokota, T., Tezuka, M. and Suzuki, M.: New Prestressing System Using Hollow Prestressing Bars, FIP Symposium '93 Kyoto, Japan, Proceedings, Vol.2, pp.1087-1094, 1993.
- 2) 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25号, pp.21-35, 1966.
- 3) 渡辺 明, 藤井 学, 小林和夫: 新体系土工学, プレストレストコンクリートの力学, 技報堂出版, pp.83-92, 1981.
- 4) 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集, Vol.18, No.2, pp.521-526, 1996.
- 5) 出光 隆: 鉄筋を緊張材として用いたプレキャストPC部材に関する研究, 九州工業大学学位論文, 1992.
- 6) 今井昌文, 出光 隆: 中空PC鋼棒ねじ部の付着性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.361-366, 1999.
- 7) 土木学会: FKK フレシネー工法設計施工指針.
- 8) 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-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書 [平成8年度制定] 設計編, pp.19-21, pp.215, 1996.
- 10) 今井昌文, 出光 隆: コンクリート部材への鋼材定着用として用いたナットの定着性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol.22, No.3, pp.1273-1277, 2000.6.
- 11) 永井淳一, 山口慶三, 北川琢也, 中井裕司: 曽根高架橋ほ

か2橋の橋梁補強工事, プレストレストコンクリート,  
Vol.37, No.6, pp.42-51, 1995.

- 12) 土木学会:コンクリート標準示方書 [平成8年度制定]設計  
編, pp.26-32, 1996.
- 13) 土木学会:コンクリート標準示方書 [平成3年度制定]設計  
編, pp.67-68, 1991.

(2000. 9. 29 受付)

## STUDY ON TRANSFER OF HOLLOW PRESTRESSING BAR USED FOR PRETENSIONED MEMBER

Masafumi IMAI, Takashi IDEMITSU, Tsutomu YOKOTA and Shigeru MIZOGUCHI

A pretensioning system without abutment becomes possible by use of hollow prestressing bar (HPC system). The anchorage of the HPC system is contributed by bearing of nuts and bond between screws and concrete, which nuts and screws are at two ends of the bar. It is supposed that the anchorage of the HPC system can be calculated if the characteristics of the bond and bearing action are known respectively. In this study, some experiments were carried out to evidence the assumption and the results of the experiments show that the assumption is true. The time-depending characteristics and strength of anchorage which are needed in the HPC system were evidenced further in the experiment with a real scale specimen.