

# プレテンション部材における伝達長の 実験とその考察\*

加賀美一二三, 松井 時治, 長谷川 博

## 緒 言

プレテンション部材のコンクリート中に誘起されるプレストレスは、プレストレス解放後部材端近くのPC鋼線が縮むことによって導入され、所要のプレストレスが得られるためには伝達長が必要である。すなわち部材端ではプレストレスは零で、部材端から計算上のプレストレスが作用する断面までの距離が伝達長である。いまPC鋼線とコンクリートとが完全に近く附着するものと仮定すれば、部材端におけるコンクリート表面のひずみは零にて逐次大となり、計算上のプレストレスの作用する断面にいたりほぼ一定のひずみに落ちつくものと考えられる。著者はこの根拠にもとづき、PC鋼線2.9mmφを用いてかぶり厚さ、PC鋼線数を変えて実験し、PC鋼線とコンクリートの付着力、PC鋼線の収縮並びにコンクリートの圧縮による現象を要素として伝達長の式を誘導し、実験値と照査したところよく一致する結果を得たので、その実験と考察について述べることにする。

### 1. 実験供試体と測定方法

#### (1) 実験材料

PC鋼線は住友伊丹製作所製品の2.9mmφにて、使用前約15日間コンクリート床上にて湿砂をもっておほい、表面を適度に錆びさせたものを使用した。このPC鋼線の応力-ひずみ曲線、破壊強度、降伏点および伸びは図-1のものである。

セメントはU社の早強ポルトランドセメントを用い、コンクリートの設計配合は表-1のものとした。

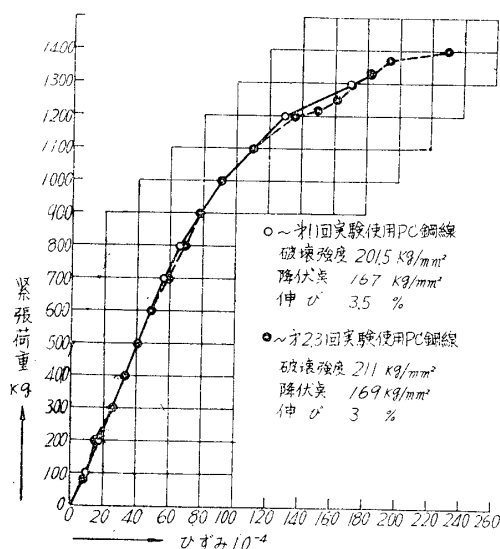


図-1 2.9mmPC鋼線の応力-ひずみ曲線, その他

表 - 1

碎石粗骨 材の 最大寸法 (mm)	スランブ 量 (cm)	単位水量 W (kg)	単位セメント 量 C (kg)	水セメント比 W/C (%)	絶対細骨 材率 s/a (%)	単位細骨 材量 S (kg)	単位粗骨 材量 G (kg)
15	0	162	450	36	34.7	637	1200

※ 昭和35年12月, 土木学会中, 四国支部講演会にて発表のもの

この配合によるコンクリートの応力-ひずみ曲線とその破壊強度は図-2のごとくである。

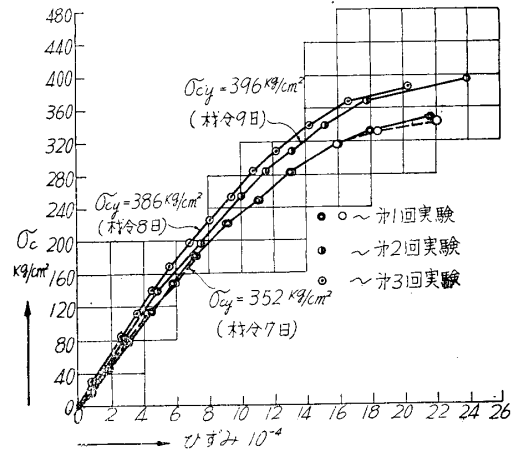


図-2 第1, 2, 3回実験に用いたコンクリートの応力-ひずみ曲線, その他

(2) 供試体

写真-1はPC鋼線引張台上の供試体を示し, 図-3は供試体の中心より左, 右側にひずみ測定用ゲージK-8を貼った側面図であり, 図-4は実験各種供試体の断面図を示している。

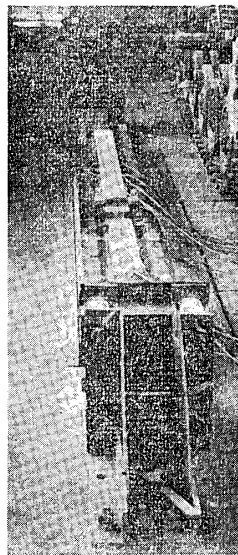


写真-1 PC鋼線引張台上の供試体の状態

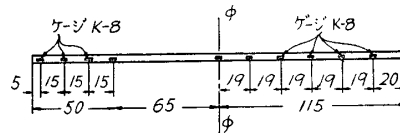


図-3 供試体の側面にゲージを貼った状態

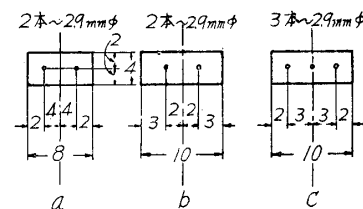


図-4 実験各種供試体の断面図

(3) 実験方法

コンクリート打込後材令1週にて, その破壊強度  $\sigma_{cy}$  がほぼ  $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上となったので実験した。写真-2は片側のベンチを緩め, プレストレスを解放した状態を示すもので, 供試体上面の測定装置はダイヤルゲージによるひずみ測定装置であり, 電気抵抗線ひずみ計と併用して測定値を照査し, プレストレス解放後の時間経過に伴う測定箇所のひずみの変化を測定した。

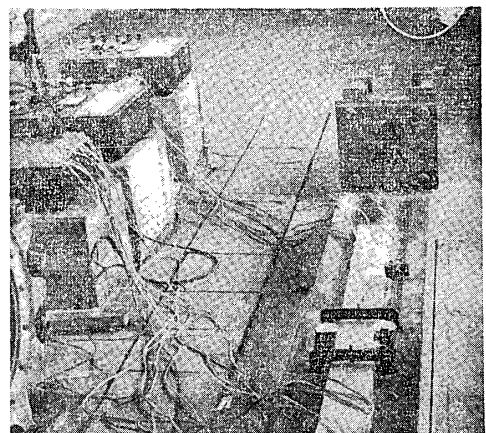


写真-2 プレストレスを解放した状態

## 2. 実験結果

### (1) 第1回実験の結果

図-4, aの断面の供試体にて, 図-3のゲージ位置にてプレストレス解放後のひずみを測定したのであるが, その測定結果は図-5である。

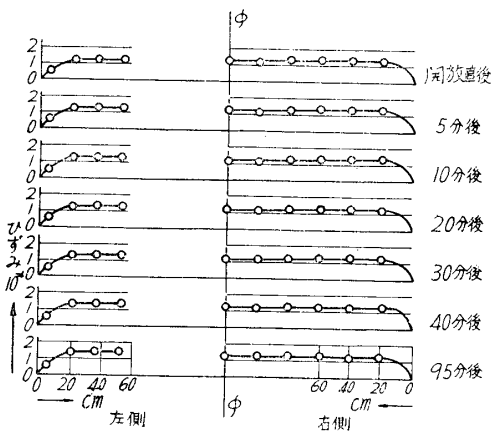


図-5 第1回実験のひずみ様相

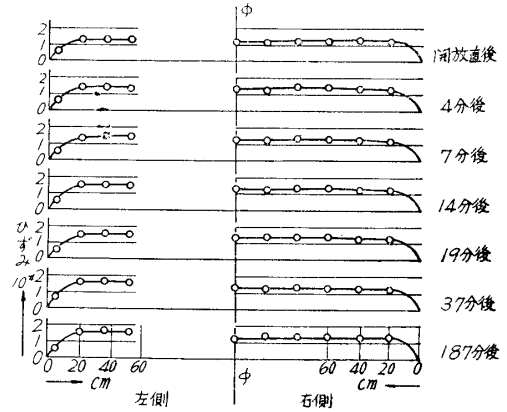


図-6 第2回実験のひずみ様相

### (2) 第2回実験の結果

図-4, bの断面の供試体にて, 図-3のゲージ位置にて前者と同様に測定した結果は図-6である。

### (3) 第3回実験の結果

図-4, cの断面の供試体にて, 第1, 2回実験と同様に測定した結果は図-7である。

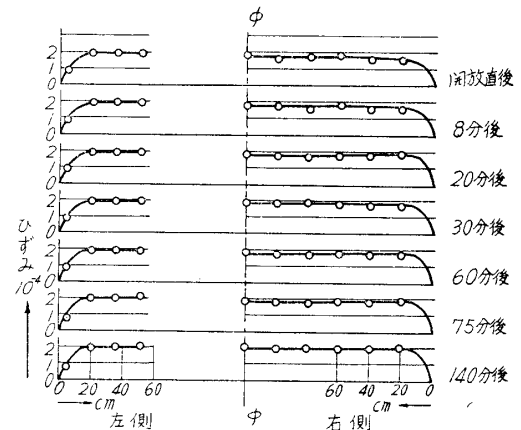


図-7 第3回実験のひずみ様相

第3回実験にて, 図-3の供試体左端より約70cm附近に写真-3のごとく1/100mm読みのダイヤルゲージによるひずみ測定装置を設置して, プレストレス解放準備, 完全解放後の時間一ひ

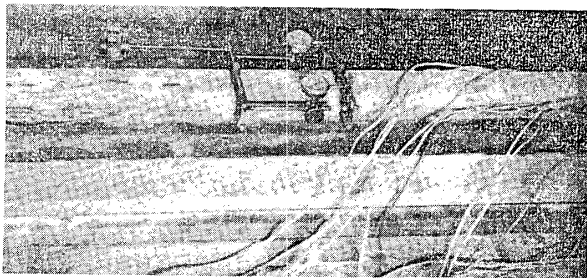


写真-3 ダイヤルゲージによるひずみ測定装置

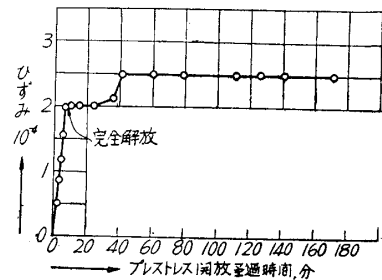


図-8 ダイヤルゲージによるプレストレス解放経過時間とひずみとの関係

ずみ関係を求めた結果は図-8のごとくであり, 完全解放後35分程度にてひずみ値が落つていることがわかる。

### 3. 既往の主な研究と伝達長の式

#### (1) 既往の研究

Hoyer の式～

$$L = \frac{\phi}{2\mu} (1 + m_c) \left( \frac{n}{m_p} - \frac{\sigma_{pi}}{E_c} \right) \frac{\sigma_{pt}}{2\sigma_{pi} - \sigma_{pt}} \quad (1)$$

ここに

$m_c$  = コンクリートのポアソン比

$m_p$  = PC鋼線のポアソン比

$n = E_p/E_c$

$\sigma_{pi}$  = PC鋼線の最初の引張応力度

$\sigma_{pt}$  = プレストレスを与えた直後のPC鋼線引張応力度

$\mu$  = PC鋼線とコンクリートとの間の摩擦係数

いま、第1回の実験の場合を適用してみることにする。

$$\phi = 0.29 \text{ cm}, \quad \mu = 0.30, \quad m_c = 0.15, \quad n = 6, \quad m_p = 0.3$$

$$\sigma_{pi} = 1000 / (\pi\phi^2/4) = 15,200 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{pt} = \{(90 - 1.2)10^{-4} \times 15,200\} / 9010^{-4} = 14,900 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 3.2510^5 \text{ Kg/cm}^2$$

$$L = \frac{0.29}{2 \times 0.3} (1 + 0.15) \left( \frac{6.0}{0.3} - \frac{15,200}{3.2510^5} \right) \frac{14,900}{2 \times 15,200 - 14,900} \doteq 10.8 \text{ cm}$$

Briceの式～

$$L = 3.5\sqrt{\phi + \sigma_{pi}} \frac{\phi}{180} \quad (2)$$

ここに、式中の記号は Hoyer の場合と同じ

いま、第1回実験の場合を適用すると

$$L = 3.5\sqrt{0.29} + 15,200 \frac{0.29}{180} \doteq 26.3 \text{ cm}$$

日本土木学会設計施工指針の式～(新設計施行指針が1961年8月改訂発刊され、公式は除かれた。)

$$L = \frac{\text{PC鋼線の引張力}}{\text{付着応力} \times \text{PC鋼線の周長}} \quad (3)$$

いま、第1回実験の場合を適用するに当り付着応力はPC鋼線の錆を考慮してほぼ  $20 \text{ kg/mm}^2$  とすると

$$L = \frac{1,000}{20 \times 3.14 \times 0.29} = 54.9 \text{ cm}$$

以上既往の代表的と思われる式について計算してみたが、第1回の実験結果は図一5にみるようにほぼ  $18 \text{ cm}$  程度と考えられるので、何れも実験と一致しない。ゆえに次項にて伝達長の式を求めてみることにする。

#### (2) 伝達長の式

プレストレスを解放すると部材のPC鋼線とコンクリートとは、図一9のような状態になり図示のごとき応力関係が働くものと考えられる。

すなわち、PC鋼線の収縮に伴う影響にもとずきプレストレスの解放後PC鋼線が膨脹するとい

うことより、コンクリートは逆に  $n(\sigma_{pim} - \sigma_{ptm})/m_p$  の応力にて PC 鋼線を収縮することになる。また、PC 鋼線の収縮によりコンクリート断面中に誘起された  $\sigma_c$  は、 $\sigma_{cm}/m_c$  となり、コンクリート自由面を張出すように作用すると考えられる。以上の二要素はプレストレスが解放された場合、コンクリートと PC 鋼線との摩擦作用、すなわち引裂抵抗応力として働くことになると考えられる。

いま、 $\sigma_{cm}$ 、 $\sigma_{pim}$ 、 $\sigma_{ptm}$  を考えるために、土木学会の設計施工指針によるプレストレスの分布曲線形を応用して考察することにする。すなわち、図-10の分布曲線は次式にて示す放物線と仮定できるので、

$$\sigma_x^{n'} = \xi x, \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{n'}{\xi} x}, \quad \xi = \text{常数}$$

この放物線図形の面積を F とすると、

$$F = \int_0^x \sigma_x dx = \int_0^x \sqrt{\frac{n'}{\xi} x} dx$$

$$F = \xi \frac{1}{n'} \frac{n'}{n'+1} x \frac{n'+1}{n}$$

(a)

いま、 $\sigma_{xm}$  を x 区間の平均応力とすると

$$\sigma_{xm} = \frac{F}{x} = \frac{n'}{n'+1} \sigma_x$$

ゆえに、L 区間の平均応力は

$$\sigma_m = \frac{n'}{n'+1} \sigma$$

(b)

以上、(b) 式の関係をも  $\sigma_{cm}$ 、 $\sigma_{pim}$ 、 $\sigma_{ptm}$  に適用するには、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_{pi}$ 、 $\sigma_{pt}$  に  $n'/(n'+1)$  の係数を乗ずることにより求められることになる。さて、この  $n'$  の次数を定めるに当り土木学会設計施工指針 p.48 の図-a より、放物線式を最小自乗法により求めると次式となる。

$$\sigma^{1.68} = 24.7L \tag{4}$$

ゆえに、 $n' = 1.68$  となり、 $n'/(n'+1)$  は 0.627 となる。

ここに、プレストレス解放後の図-9 の応力平衡を考えると次式が成立する。

$$P_t = -\mu \frac{\sigma_{cm}}{m_c} UL + \mu n \frac{\sigma_{pim} - \sigma_{ptm}}{m_p} UL \tag{c}$$

$$L = \frac{P_t}{\mu U \left( n - \frac{\sigma_{pim} - \sigma_{ptm}}{m_p} - \frac{\sigma_{cm}}{m_c} \right)} \tag{5}$$

ここに、

$L$  = 伝達長, cm

$P_t$  = 解放後の PC 鋼線 1 本のプレストレス, kg

$U$  = PC 鋼線の周長, cm

$\mu$  = コンクリートと PC 鋼線との摩擦係数, 0.35~0.45

$m_c$  = コンクリートのポアソン数, 4~6 (プレストレス解放時)

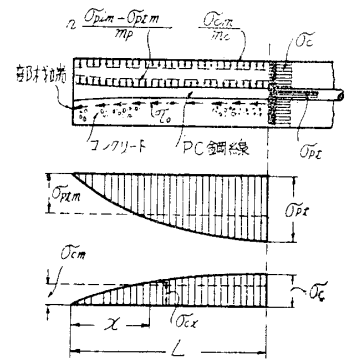


図-9 プレストレス解放後の部材端の応力の作用様相

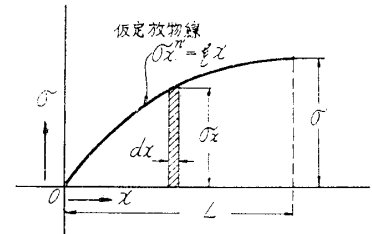


図-10 部材端の応力の仮定放物線形

$$n = 5 \sim 7$$

$m_p = \text{PC鋼線のポアソン数, } 3.5$

$\sigma_{pim} = 1 \text{本のPC鋼線に最初に与えた平均引張力, } kg/cm^2$

$\sigma_{ptm} = \text{プレストレスを解放後における1本のPC鋼線に作用している平均引張力, } kg/cm^2$

$$\sigma_{pim} = \frac{n'}{n'+1} \frac{P_i}{A_p}, \quad \sigma_{ptm} = \frac{n'}{n'+1} \frac{P_t}{A_p}$$

$P_i = A_p \text{に最初に与えた引張力, } kg$

$P_t = \text{プレストレスを与えた後の } A_p \text{に作用している引張力}$

$A_p = 1 \text{本のPC鋼線の断面積, } cm^2$

#### 4. 誘導式による実験値の照査

##### (1) 第1回実験の場合

図一1の第1回の実験の場合、PC鋼線1本につき1tの引張力に対しては $90 \cdot 10^{-4}$ のひずみが生じている。プレストレス解放後の一応落ついたときの収縮ひずみは、図一5のごとく $1.210^{-4}$ である。

ゆえに、

$$P_i = 1,000Kg, \quad P_t = \frac{88.8}{90} \times 1,000 = 986.6Kg$$

$$U = 3.14 \times 0.29 = 0.91cm, \quad \mu = 0.40$$

$$m_c = 4, \quad m_p = 3.5, \quad n = 6$$

図一2、第1回実験のコンクリートの応力-ひずみ曲線より、ひずみ $1.210^{-4}$ に対しては $\sigma_c$ が $30kg/cm^2$ であることがわかる。しかるに、図一4、aより1本のPC鋼線に対するコンクリート断面積は $16cm^2$ であるから

$$\sigma_c = 30 \times 16 = 480Kg/16cm^2$$

$$\sigma_{cm} = \frac{n'}{n'+1} \sigma_c = 0.626 \times 480 = 300Kg/16cm^2$$

$$\sigma_{pim} = \frac{n'}{n'+1} \times \frac{1,000}{0.066} = 9,485Kg/cm^2$$

$$\sigma_{ptm} = \frac{n'}{n'+1} \times \frac{989.6}{0.066} = 9,358Kg/cm^2$$

$$\sigma_{pim} - \sigma_{ptm} = 127Kg/cm^2$$

$$L = \frac{986.6}{0.40 \times 0.91 \left( \frac{300}{5} + 6 \times \frac{127}{3.5} \right)} \doteq 17.2cm$$

##### (2) 第2回実験の場合

第1回実験の場合と同様、図一6の実験結果から一応落ついたひずみは $1.310^{-4}$ とみなされるとき、 $\sigma_c$ は $31kg/cm^2$ となる。しかるに、図一4、bより1本のPC鋼線に対する断面積は $20cm^2$ であるから、次の諸値となり、

$$\sigma_{cm} = 388Kg/20cm^2, \quad P_i = 1000Kg, \quad P_t = 985.5Kg$$

$$\sigma_{pim} = 9,485Kg/cm^2, \quad \sigma_{ptm} = 9,347Kg/cm^2, \quad \sigma_{pim} - \sigma_{ptm} = 138kg/cm^2$$

$$L \doteq 17. / cm$$

(3) 第3回実験の場合

前回と同様、図一7、図一4、cより次の諸値となり、

$$\sigma_{cm} = 525 \text{Kg}/13.3 \text{cm}^2, \quad \sigma_{pim} = 9,485 \text{Kg}/\text{cm}^2, \quad \sigma_{ptm} = 9,294 \text{Kg}/\text{cm}^2, \quad \sigma_{pim} - \sigma_{ptm} \\ = 191 \text{Kg}/\text{cm}^2$$

$$L \doteq 12.1 \text{cm}$$

以上の計算例のごとく誘導式は、実験値とよく一致することがわかる。

## 5. 考 察

径2.9mmのPC鋼線にひずみ測定用ゲージ<sup>(2)</sup>を貼ることは仲々容易でなく、またコンクリートの一部を欠除して、PC鋼線一部を露出<sup>(3)</sup>することは、伝達長実験供試体のごとき断面の場合には妥当ではない。さらに露出部にポンチ打点によるひずみ測定も疑点がある。最近猪股氏は供試体部材端の外側にてPC鋼線とコンクリートの相対的移動量<sup>(1)</sup>を測定しているが、その装置と測定内容に十分とは言い難いものがある。

著者はプレストレス解放後の伝達長を求めるに当り、伝達長に影響する要素中PC鋼線の形状、直径、表面状況、最初に与えたPC鋼線の引張応力度、コンクリートの品質は同一とした。そして、図一4、a、b、cのようにPC鋼線横のかぶり厚さを変化し、またPC鋼線1本の受持コンクリート断面積を異にして実験した結果、コンクリート測表面のひずみは近似的に断面内部のPC鋼線のひずみを表わすものと考えられることが、実験値と伝達長の計算値より立証できたものと考えられる。既往の研究者の式によると伝達長の値はかなりの開きがあるが、一般には径の80~150倍<sup>(4)</sup>といわれている。勿論PC鋼線の錆程度などが大きく影響されることと考えられる。PC鋼線製造後の滑表面に技術常識上の錆を附与する場合は80倍程度以下に納ることが立証できた。図一5、6、7にみるように電気抵抗線ひずみ計による測定値が、プレストレス解放後ある時間で一応安定するが、これをさらに物理的に測定するために写真一3の装置によったが、約40分程度にて一応安定することが図一8により立証できた。

## 結 言

プレストレス解放後のコンクリート側表面のひずみを測定して、供試部材端よりほぼ一定のひずみが得られた位置までを伝達長として実験的に求め、これを誘導式により照査したところよく一致した結果が得られた。得られた要項は

- (1) コンクリート側表面のひずみは、一般のかぶり厚さにおいてはその厚さによる差違はほとんど認められない。
- (2) PC鋼線の形状、直径、表面状況、コンクリートの品質を同一にした場合は、プレストレスの大小は伝達長に影響する。
- (3) 伝達長の誘導式<sup>(5)</sup>は実験と割合によく一致するものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 猪股，加藤，異形PC鋼線のプレストレス導入時における付着効果，p.4，11図，No.11，セメントコンクリート，1959.
- (2) 猪股，プレストレスコンクリートの設計および施工，p.225，図一6，1957.
- (3) 三浦，異形PC鋼線のコンクリートとの付着について，第3回材料試験連合講演会，1959.
- (4) K. Billing, Prestressed Concrete p.211, 1952.
- (5) 神山，プレストレスコンクリート鋼線の定着長させん断応力，セメント技術年報，1955.