

## PCストランド鋼材の応力伝達長に関する研究

(株)安部工業所 技術開発部 正会員 ○國富 康志  
 正会員 泉 満明  
 (株)安部工業所 技術開発部 正会員 横山 博司

### 1. まえがき

近年、経済性、施工性などの観点から、コンクリート構造物のプレキャスト化が進められている。また、それに伴いプレキャスト部材の大量製作および大型化が進んでいる。プレキャスト部材は、プレテンション方式が主流である。したがって、プレキャスト部材の大型化に伴い、導入プレストレスも増大してきている。したがって、今後は太径のPCストランド鋼材の使用が予想される。

ここで、現在のプレテンション部材に用いられているPCストランド鋼材はφ15.2mmが最大であり、φ15.2mm以下のPCストランド鋼材の応力伝達長(プレストレス定着長)の研究は行われてきている。しかし、太径のPCストランド鋼材の長期の応力伝達長に関する研究は少ない。

本研究は、現在使用されているφ9.3mm、15.2mmに加えて21.8mm、21.8mm(インデント)28.6mmの5種類のPCストランド鋼材を使用した供試体を作成して、PCストランド鋼材のひずみ計測、およびコンクリート表面ひずみの長期(1年間)計測を行うことにより、PC鋼材の径および定着後の時間経過等がプレストレス定着長に及ぼす影響を確認した。また、応力伝達長に関する、国内・国外基準に基づく比較検討を実施した。ここに、本研究結果について報告するものである。

### 2. 実験概要

#### (1) 実験供試体

本研究で使用した供試体の形状と概要を、図-1および表-1に示す。供試体はPC鋼材の種類により5種類とし、各供試体にPCストランド鋼材を2本配置し、鉄筋で補強した。形状は長方形断面の部材であり、供試体の断面は使用PCストランド鋼材種ごとに導入プレストレス応力度を7.0 N/mm<sup>2</sup>として、縦横比を1:2として決定した。さらに、供試体の長さは予想される導入長に約1mの余裕をみため、すなわち(2×100φ+1000(mm))とした。

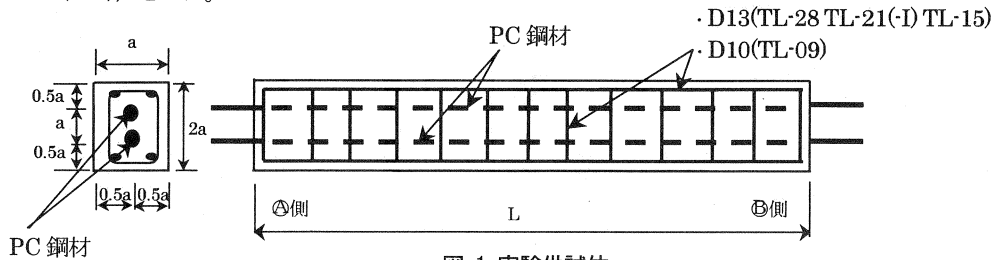


図-1 実験供試体

表-1 実験供試体概要

供試体	鋼材径 (mm)	供試体数 (本)	部材長 L (mm)	a (mm)	A <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	PC鋼材2本の緊張力 (kN)	PC鋼材応力度 σ <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	導入プレストレス応力 σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
TL-28	28.6	2	7000	290	168200	1103.8	1036.6	6.56
TL-21	21.8	2	5000	240	115200	811.0	1295.9	7.04
TL-21-I	21.8	2	5000	240	115200	808.0	1291.1	7.01
TL-15	15.2	2	4000	160	51200	372.1	1341.4	7.27
TL-09	9.3	2	3000	95	18050	135.8	1315.4	7.52

注) I : インデント鋼材

(2) 使用コンクリートの示方配合および強度

使用コンクリートは $\sigma_{ck}=50 \text{ N/mm}^2$ とし、表-2に示方配合を、表-3にコンクリート強度試験結果を示す。

表-2 使用コンクリートの示方配合

最粗大骨寸材法の (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水・ セトセ 比メ (%)	粗骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					セ メ ト ン		細 骨 材	粗 骨 材	混 和 材
					C	W			
20	10±2.5	4.5±1.5	35	41.1	406	142	739	1056	2.44

表-3 コンクリート強度

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	導入時	6ヶ月後
TL-28	38.75	----
TL-21	42.36	----
TL-21-I	36.88	----
TL-15	38.58	62.69
TL-09	42.06	----

(3) 計測方法

PC 鋼材の応力伝達率は、以下の方法により計測した。

- ① プレスト導入 1 週間後までの計測：PC 鋼材の素線に貼付けたワイヤーストレインゲージ (WSG) による PC 鋼材のひずみ計測 (図-1(A)側のみ) と、コンタクトゲージによるコンクリートひずみ計測を行った。
- ② 1 年間の長期計測：コンタクトゲージによる供試体側面のコンクリートひずみ計測を行った。

3. 実験結果

(1) コンクリート表面ひずみ計測結果

TL-28 のコンタクトゲージによる計測結果を図-2 に示す。図の中の鉛直方向の点線は 65 φ の位置を示しており、鉛直方向の実線は計測結果による推定伝達長 1 年後の結果を示す。また、表-4 に各供試体の計測時ごとの推定導入長を示す。これらの結果より、A 側の測定値は、B 側に比較して全体に大きくなる傾向を示している。これは、A 側の PC 鋼材に WSG を貼付けたことにより、PC 鋼材の付着が減少した為と考えられる。そこで、これらの影響を考慮するための式を式(3-1)の様を考え、これを用いて修正を行う。

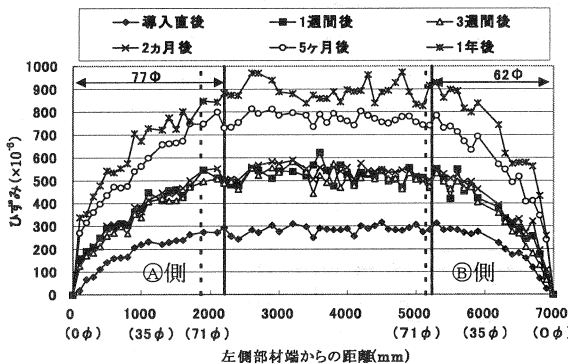


図-2 コンクリートひずみの測定結果

$$G = \frac{T - W}{T} \times 100 \quad (3-1)$$

- G : 導入長の中で付着のある部分の割合 (%)
- T : 実測より求めた推定導入長 (mm)
- W : 推定導入長の付着の無い部分の長さ (mm)

式 (3-1) を使用した計算例を以下に示す。

<計算例> TL-28 (φ28.6), 1 年後の実測値, 推定導入長=77 φ, 導入長区間のワイヤーストレインゲージ貼付け枚数=6 枚の場合。

$$T = 77 (\phi) \times 28.6 (\text{mm}) = 2202.2 (\text{mm})$$

$$W = 6 (\text{枚}) \times 40 (\text{mm}) = 240 (\text{mm})$$

$$G = \frac{2202.2 - 240}{2202.2} \times 100 = 89.1 (\%)$$

表-4 計測結果の応力伝達率

供試体		導入直後	1週間後	3週間後	2ヵ月後	5ヵ月後	1年後
TL-09	A側	55 φ	70 φ	84 φ	86 φ	86 φ	88 φ
	B側	44 φ	53 φ	59 φ	60 φ	62 φ	66 φ
TL-15	A側	46 φ	46 φ	68 φ	74 φ	74 φ	74 φ
	B側	46 φ	46 φ	46 φ	46 φ	46 φ	46 φ
TL-21	A側	37 φ	55 φ	60 φ	60 φ	62 φ	64 φ
	B側	37 φ	37 φ	50 φ	50 φ	50 φ	50 φ
TL-21-I	A側	36 φ	40 φ	42 φ	47 φ	47 φ	41 φ
	B側	37 φ	37 φ	37 φ	37 φ	37 φ	40 φ
TL-28	A側	37 φ	51 φ	55 φ	66 φ	76 φ	77 φ
	B側	37 φ	51 φ	51 φ	51 φ	60 φ	62 φ

注) A 側, B 側は、図-1 参照

表-5 A 側付着部分の割合 (G の値)

供試体	TL-09	TL-15	TL-21	TL-21-I	TL-28
導入直後	75.4%	83.0%	89.4%	88.0%	83.9%
1週間後	75.4%	83.0%	89.4%	88.0%	86.6%
3週間後	75.0%	83.0%	89.4%	88.0%	87.1%
2ヵ月後	76.6%	83.0%	89.4%	87.2%	87.8%
5ヵ月後	78.6%	83.0%	89.4%	88.7%	87.1%
1年後	78.6%	83.0%	90.8%	88.7%	89.1%

式 (3-1) を用いて算出した、各供試体の測定日毎の導入長の中で付着のある部分の割合を表-5 に示す。ここで、供試体の A 側の WSG が張り付けてある測定点の部材端からの距離は、 $L'$  (補正值) $=G \times L$  (実測値) となる。

上記の様に導いた補正值、および補正区間以外の計測値に対して 2 次の回帰式を用いて、応力伝達長を推定した。その時の TL-28 におけるコンクリートひずみを図-3 に、各供試体の計測時ごとの修正した推定導入長を表-6 に示す。図中の鉛直方向の点線および実線は図-2 と同様である。

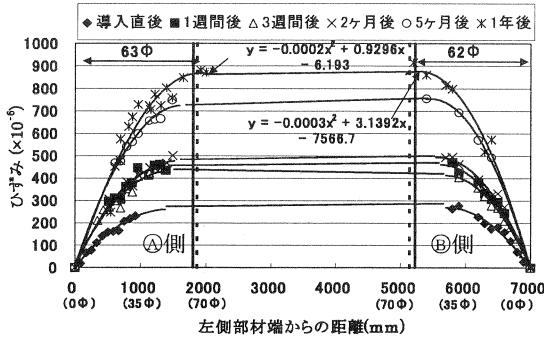


図-3 付着を考慮して回帰式で推定した導入長

表-6 修正後の応力伝達長

供試体	導入直後	1週間後	3週間後	2ヵ月後	5ヵ月後	1年後	
TL-09	A側	46φ	62φ	70φ	65φ	71φ	75φ
	B側	44φ	53φ	59φ	60φ	65φ	66φ
TL-15	A側	47φ	47φ	47φ	47φ	46φ	46φ
	B側	46φ	46φ	46φ	46φ	46φ	46φ
TL-21	A側	38φ	38φ	36φ	42φ	42φ	48φ
	B側	51φ	45φ	55φ	55φ	55φ	55φ
TL-21-I	A側	36φ	37φ	38φ	40φ	40φ	43φ
	B側	37φ	37φ	38φ	37φ	41φ	42φ
TL-28	A側	47φ	49φ	49φ	53φ	52φ	63φ
	B側	48φ	48φ	48φ	51φ	52φ	62φ

補正值の結果では、計測結果に比べて左右の応力伝達長の値が同等となった。これにより、WSG貼付けの影響により伝達長が伸びていた事が確認できる。道路橋示方書では、「定着長は、φ15.2 までの PC 鋼より線の場合その直径の 65 倍としてよい。」と規定されている<sup>1)</sup>。今回の太径 PC 鋼材の応力伝達長の試験結果においても、本規定を満足する結果が得られた。

また、表-6 の結果からインデント鋼材に関して、応力伝達長に対して効果がある事が確認できた。

(2) PC 鋼材ひずみ計測結果

応力伝達長区間での PC 鋼材の応力変化の理論式は (3-2) 式となる<sup>2) 3)</sup>。本理論式は、以下の仮定により求めたものである。

- ① PC 鋼材とコンクリートのポアソン効果により、コンクリートと PC 鋼材との間に圧力が生じる。
- ② 上記圧力により、PC 鋼材とコンクリートの摩擦抵抗が生じる。
- ③ コンクリートと PC 鋼材の接触面では、PC 鋼材とコンクリートのひずみが等しい。

$$\sigma_{sx} = \sigma_{s0} \left[ 1 - \frac{\sinh \alpha(l-x)}{\sinh \alpha l} \right] \quad (3-2)$$

$$\alpha = \frac{Uf}{A_s} \cdot \frac{\mu_s}{1 + \frac{E_s}{E_c}(1 + \mu_c)}$$

U: PC 鋼材の周長,  $A_s$ : PC 鋼材公称断面積

f: PC 鋼材とコンクリートの間の摩擦係数

$\sigma_{sx}$ : PC 鋼材の応力分布

$\mu_s, \mu_c$ : 鋼材, コンクリートのポアソン比

l: プレストレス定着長

$E_s, E_c$ : 鋼材, コンクリートのヤング係数

コンクリートのポアソン比は  $\mu_c = 0.08 \sim 0.16$  である。鋼材のポアソン比  $\mu_s$  は 0.33 であるが、実際には PC 鋼材の構成状態を考慮する必要がある。また、応力伝達長を評価する場合のコンクリートと PC 鋼材間の摩擦係数を定める事は今後の課題である。(3-2) 式を用いるには、今後それらを適切に定める必要がある。

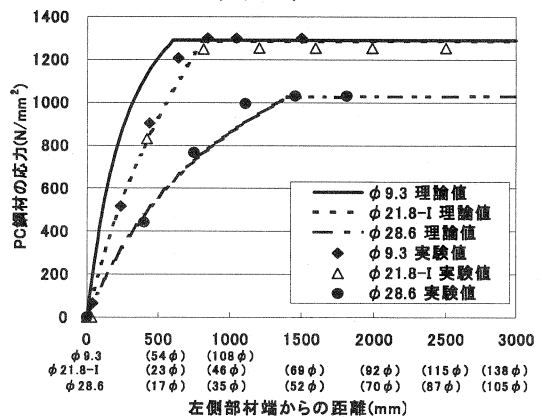


図-4 理論値と補正した実測値の鋼材応力度

図-4 に、TL-09, TL-21-I, TL-28 について  $\mu_c=0.16$  で  $\mu_s=0.33$ ,  $f=0.25$  として、実験結果から  $l$  を求めて求めた場合の理論値と、実験値との比較を示す。TL-09 以外では、応力伝達区間の応力変化は、理論値と実験値がほぼ一致する事が分かる。TL-09 の理論値と実験値の結果に差があるのは、コンクリートのひずみ結果でも示した様に、WSGの貼付け間隔による影響によって、コンクリートと鋼材間の滑りが大きくなったものと考えられる。

4. 国外の導入長算定式との比較

ACI 規定等、各種導入長算定式を表-7 に示す。

表-7 国外規準の導入長算定式

名称	導入長算定式
Current ACI AASHTO	$Lt = \frac{1}{3} f_{se} d_b$
Zia and Moatafa	$Lt = 1.3 \left( \frac{f_{si}}{f'_{ci}} \right) d_b - 2.3$
Shahawy, Issa and Batchelor	$Lt = \frac{f_{si} d_b}{3}$
Russell and Burns	$Lt = \frac{f_{se} d_b}{2}$
Mitchell, Cook, Khan and Tham	$Lt = \frac{f_{si} d_b}{3} \sqrt{\frac{3}{f'}}$

$Lt$  : 応力導入長 (inch)  
 $f_{se}$  : PC 鋼材の有効プレストレス (ksi)  
 $d_b$  : 鋼材の公称径 (inch)  
 $f_{si}$  : プレストレス導入時の応力 (ksi)  
 $f'$  : コンクリート圧縮強度 (ksi)  
 $f'_{ci}$  : プレストレスを与えた時のコンクリート圧縮強度 (ksi)

表-7 で示した各導入長算定式に材料特性を代入した結果に対して、表-6 の1年後との比率を表-8 に示す。

表-8 各導入長算定式と測定値との比率 (算定式/測定値)

供試体	TL-28	TL-21	TL-21-I	TL-15	TL-09	平均
Current ACI AASHTO	0.89	1.12	1.20	1.40	0.72	1.07
Zia and Moatafa	0.83	0.96	0.97	1.13	0.48	0.87
Shahawy, Issa and Batchelor	1.10	1.40	1.50	1.74	0.90	1.33
Russell and Burns	1.33	1.68	1.80	2.09	1.08	1.60
Mitchell, Cook, Khan and Tham	0.80	1.04	1.05	1.27	0.63	0.96

上表からも分かるように、算定式の種類によって理論値がばらつく結果となった。TL-09 を除けば、「Zia and Moatafa」の式が修正値に最も近い値となる。

5. 結論

- (1) 道路橋示方書に記述されているプレストレス導入長  $Lt=65\phi$  は、太径 PC 鋼材の TL-21, TL-28 においても妥当と推定できる。
- (2) インデント鋼材に関して、応力伝達長に対して効果がある事が確認できた。
- (3) 応力伝達長区間での PC 鋼材の応力変化の理論値は、各種係数の値を適切に選択できれば、信頼性の高いものと推定できる。

以上の結論は限られた数の供試体で行われたものである。しかし、太径 PC 鋼材とコンクリートの付着に関する、PC 鋼材の応力伝達長の基礎資料が得られたものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (I 共通編・III コンクリート橋編) 平成 8 年 P.183~185
- 2) 泉 満明：名城大学理工学部研究報告書 第 43 号 「PC 鋼材の定着長」 平成 15 年
- 3) 猪俣 俊司：プレストレストコンクリートの設計・施工 1982 年 P.9~11, 221~223, 229~230  
 : プレストレストコンクリートの設計および施工 1957 年 P.252~P.255