

(35) プレテンション部材における付着改良型樹脂防錆PCストランドの定着長及び付着応力に関する解析的研究

京都大学名誉教授

正会員 六車 照

フドウ建研(株)技術本部

正会員 ○ 竹田 清二

フドウ建研(株)技術本部

正会員 南 伊三男

1. はじめに

樹脂防錆PCストランドの問題点の一つは、裸ストランドと比較してコンクリートとの付着強度が著しく小さいことである。筆者らは、溝付表面防錆膜をもつ付着改良型内外完全防錆PCストランドを開発し、φ15.2mm ストランドを用いたプレテンション梁のプレストレス導入実験を行って、付着によるプレストレス導入が可能であることを確認した¹⁾。本研究は、PC鋼材とコンクリートとの付着応力が両者の相対すべりの関数で与えられることに基づいて六車らが導いたプレテンション部材両端のPC鋼材定着部におけるPC鋼材応力分布、付着応力分布、定着長さなどの解析式²⁾を実験結果に適用して、付着改良型内外完全防錆PCストランドの付着応力-相対すべり関数を推定する方法を示し、併せて定着部のPCストランド引張応力分布、付着応力分布、定着長さなどについて実測値と計算値の比較を行ったものである。

2. プレストレス導入端付着応力解析式

図-1はPC鋼材1本を偏心距離eの直線配置としたプレテンション部材のプレストレス導入端を図示したものである。本項では、図-1に基づきプレストレス導入端付着応力解析式¹⁾を導く。

[1] 解放プレストレス力と導入プレストレス力の関係

導入直前のPC鋼材引張力を P_i 、これを解放したときの定着端を除く定常状態部分の導入プレストレス力(=PC鋼材残存引張力)を P とするとき

$$P = P_i / \beta \quad (1) \quad \beta = 1 + np \left(1 + \frac{e^2}{I_c / A_c} \right) \quad (2)$$

ここに、 $n = E_{sp} / E_c$: ヤング係数比、 E_{sp} : PC鋼材の弾性係数、 E_c : コンクリートの弾性係数、 $p = A_{sp} / A_c$: PC鋼材比、 A_{sp} : PC鋼材断面積、 A_c : コンクリート全断面積、 I_c : 重心軸に関するコンクリート断面2次モーメントである。

[2] コンクリートとPC鋼材との相対すべり量と残存プレストレス力

一方、定着部におけるPC鋼材残存引張力は図-1上に示すように材端部 $x = 0$ では $P(x) = 0$ であり、材端から離れるにつれて漸増して定着長の位置 $x = L_a$ では $P(x) = P$ となる。材端から任意の位置 x でのPC鋼材残存引張力を $P(x)$ 、PC鋼材すべりによる消失プレストレス力を $\Delta P(x)$ とするとき、

$$\Delta P(x) = P - P(x) = \frac{P_i}{\beta} - P(x) = \frac{P_i - \beta P(x)}{\beta} \quad (3)$$

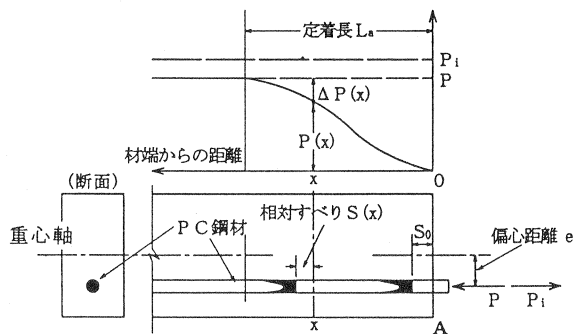


図-1 定着長内でのPC鋼材残存プレストレス力 $P(x)$ 分布と相対すべり $S(x)$

定着部の任意の位置におけるPC鋼材とコンクリートの相対すべりを $S(x)$ とすると、消失プレストレス力は導入時のコンクリートの弾性変形によるプレストレス力の損失を考慮して、

$$\beta \Delta P(x) = - E_{sp} A_{sp} \frac{dS(x)}{dx} \quad (4)$$

したがって、材端から任意位置 $x (\leq L_a)$ における残存プレストレス力(PC鋼材引張力)は次式となる。

$$P(x) = \frac{1}{\beta} [P_i + E_{sp} A_{sp} \frac{dS(x)}{dx}] \quad (5)$$

[3] 定着部におけるPC鋼材引張力分布解析式

(4)または(5)式において、消失プレストレス力 $\Delta P(x)$ または残存プレストレス力 $P(x)$ とすべり $S(x)$ との関係がわかれば、 $\Delta P(x)$ または $P(x)$ を解析することができる。六車らは実験結果からこれを、

$$S(x) = A (e^{B \Delta P(x)} - 1) \quad (6)$$

で表した。ここに、 A および B は実験定数である。(6)式を(3)式に代入して整理すると相対すべり $S(x)$ に関する次の微分方程式が得られる(記号 \log は e を底とする自然対数)。

$$-dt / \log t = \alpha \cdot dx \quad (7)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{\beta}{A \cdot B \cdot E_{sp} \cdot A_{sp}} \quad (8) \quad t = \frac{S(x)+A}{A} = e^{B \Delta P(x)} \quad (9)$$

(7)式の両辺を $x=0 \sim x$ の範囲で積分すると、

$$-\int_{t_0}^{t_x} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt = \int_{t_0}^{t_x} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt = \alpha \cdot x \quad (10)$$

ここに、 t_0 および t_x はそれぞれ $x=0$ および $x=x$ に対する t の値であって、(9)式から次のようになる。

$$t_0 = \frac{S_0+A}{A} = e^{B P} \quad t_x = \frac{S(x)+A}{A} = e^{B \Delta P(x)} \quad (11)$$

ただし、 S_0 は $x=0$ における相対すべり量である。(10)式の積分は解を記述することができないが、(10)式からわかるように、 t は $\Delta P(x)$ の関数であることから、 $0 \leq \Delta P(x) \leq P$ の範囲の適当な $\Delta P(x)$ を選べば、(9)式から選んだ $\Delta P(x)$ に対する t の値、すなわち、 t_x が求められ、(10)式を数値積分することにより、PC鋼材の引張力が $\Delta P(x)$ となる導入端からの距離 x が(10)式から得られる。このようにして定着長さ部分のPC鋼材引張力分布が計算される。なお、(10)式左辺の数値計算方法については紙数の関係で割愛する。

[4] 定着長さの計算式

(10)式において、相対すべり量 $S(x)=0$ となる t の値を t_x として x を求めれば、その値が定着長さ L_x となる。ところが、本理論式では $S(x)=0$ に対して $t_x=1$ 、すなわち、 $1/\log t_x = \infty$ となって、定着長さは理論上 $L_x = \infty$ となる。したがって、ここで消失プレストレス力 $\Delta P(x)$ の大きさが導入プレストレス力 P と比較して十分小さい値、すなわち、本研究では

$$t_x = e^{B \Delta P(x)} = 1.05 \quad \therefore \Delta P(x) = \log(1.05)/B \quad (12)$$

となるときに距離 x の値を定着長さ L_x と定義した。計算式は次式となる。

$$L_x = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{1.05}^{t_0} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt \quad (13)$$

[5] 任意断面における付着応力 $\tau(x)$ の計算

定着長内の任意の位置における付着応力 $\tau(x)$ は、(4)式の $\Delta P(x)$ 、または、(5)式の $P(x)$ から(6)式を考慮して次のように表される。ただし、 ϕ は周長である。

$$\tau(x) = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{dP(x)}{dx} = -\frac{1}{\phi} \cdot \frac{d\Delta P(x)}{dx} \quad (14)$$

また、最大付着応力 $\tau(x)_{\max}$ および その位置 $x_{\tau \max}$ での消失プレストレス $\Delta P(x)$ は、(14)式から

$$\tau(x)_{\max} = \frac{\alpha}{\phi \cdot B \cdot e} = \frac{\alpha}{\phi \cdot B \cdot 2.7183} \quad (15) \quad \Delta P(x) = 1/B \quad (16)$$

その位置 $x_{\tau \max}$ は、(15)式を考慮して(10)式の積分の下限値が $t_x = e = 2.7183$ となることから、

$$x_{\tau \max} = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_e^{t_0} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{2.7183}^{t_0} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt \quad (17)$$

となる。

3. 実験結果に対する理論式の適用

[1] 係数A、Bの定め方

以上に述べた付着応力解析式を筆者らの行った $\phi 15.2\text{mm}$ 付着改良型完全防錆PCストランドのプレストレス導入実験結果¹⁾に適用して、導入端部の残存プレストレス力分布および付着応力分布を解析した。解析にあたっては、(6)式のPC鋼材とコンクリートとの相対すべり曲線の実験定数A、Bを求める必要がある。本研究では、導入実験から得られた定着長さ L_a および最大付着応力度の位置 $x_{\tau \max}$ に基づいてこれを求める方法を開発した。すなわち、 $x_{\tau \max}$ における消失プレストレス力を

$$\Delta P(x) = P/k = 1/B \quad (18)$$

とすると、(17)式の積分の範囲の上限値は

$$t_0 = e^k \quad (19)$$

さらに、

$$x_{\tau \max} = \mu \cdot L_a \quad (\text{ただし、} \mu < 1) \quad (20)$$

とすると、(17)式および(13)式から

$$\begin{aligned} x_{\tau \max} &= \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{2.7183}^{e^k} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt = \mu \cdot L_a = \frac{\mu}{\alpha} \cdot \int_{1.05}^{e^k} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt \\ \therefore \int_{2.7183}^{e^k} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt &= \mu \cdot \int_{1.05}^{e^k} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt \quad (21) \end{aligned}$$

すなわち、 $\mu = x_{\tau \max}/L_a$ の値がわかれば(21)式が成立する係数 k を数値計算により求めることができ、これを(18)式に代入することによって係数Bが決定できる。さらに、係数Aについては、定着長さ L_a がわかれば(13)式から α が求められ、係数Bおよび α の値を(8)式に代入して係数Aが求められる。すなわち、

$$\alpha = \frac{1}{L_a} \cdot \int_{1.05}^{e^k} \left(\frac{1}{\log t} \right) dt \quad (22) \quad A = \frac{\beta}{\alpha \cdot B \cdot E_{sp} \cdot A_{sp}} \quad (23)$$

導入時の定着長内における付着応力度は、定着長さ L_a の $1/2$ 付近で最大になることが経験的に知られている。ここでは、 $\mu = 0.5$ として実験結果から係数Aおよび係数Bを求める。すなわち、(21)式から係数 k を求め、これを(18)式に代入すれば係数Bが、また(22)式から α を求めれば、(23)式から係数Aが求められる。計算結果は以下の通りである。

$$k = 2.30826 \quad (24) \quad \therefore B = 2.30826/P \quad (25)$$

$$\alpha = 8.59034/L_a \quad (26) \quad \therefore A = \beta L_a P / (19.82874 E_{sp} A_{sp}) \quad (27)$$

[2] 付着改良型防錆ストランドプレストレス力導入実験結果からの係数A、Bの推定

先に筆者らの行ったφ15.2mm付着改良型内外防錆7本よりPCストランド(SWPR7BL)1本を幅b=125mm、全高さ240mm、全長4000mmの長方形断面コンクリート梁に偏心距離40mmで直線配置したプレテンション梁のプレストレス導入実験結果¹⁾に対して、2項で述べた理論式を適用して定着端におけるストランド残存引張力P(x)、付着応力τ(x)分布の解析を行った。ここでは、解析に必要なPC鋼材とコンクリートとの相対すべり量(6)式の係数AおよびBを実験結果に基づき推定する。

表-1に解析を行った供試体に対するPCストランドおよびコンクリートの材料定数を示した。供試体TE-1は裸ストランドを使用したプレテンション梁、TE-2~4は付着改良型内外防錆ストランドを使用したプレテンション梁である。

表-1 解析に使用したプレテンション梁の材料諸定数(解析に必要な数値のみ記載)

供試体 記号	φ15.2mmストランド			コンクリート		ヤング 係数比 n=Esp/Ec	PC鋼材比 p=Asp/Ac	
	種類	断面積 Asp(mm ²)	周長 φ(mm)	弾性係数 Esp(GPa)	断面積 Ac(mm ²)			弾性係数 Ec(GPa)
TE-1	裸	138.7	63.67	191.00	30,000	35.77	5.3397	0.4623
TE-2 TE-3 TE-4	完全防錆							

相対すべり量(6)式の係数A、Bの推定には、定着部内付着応力分布の最大値がおこる位置をLa/2、すなわち、μ=1/2と仮定し、(25)式および(27)式を適用した。定着長さLaは、実測から得られた値を使用した。ただし、各供試体について左右両端で定着長さが実測されているが、裸ストランド使用標準梁TE-1については左右両端の定着長さ実測値の平均値を、完全防錆ストランド使用梁TE-2~4についてはその全ての実測定着長さの平均値を用いた。また、供試体TE-2~4については、導入プレストレス力Pについても平均値を用いた。係数AおよびBの計算結果を計算の基本となる数値とともに表-2に示す。なお、参考までに完全防錆ストランドを使用した供試体TE-2~4の各梁ごとに求めた係数AおよびBも表-2に示した。

表-2 係数AおよびBの導入プレストレス力および定着長実験値からの推定結果

供試体	使用 ストランド	導入プレ ストレス力 P(kN)	定着長 実験値 La(mm)	定着完了時消失 プレストレス力 ΔP(x=La)(kN)	係数A	係数B
TE-1	裸	170.41	600	3.602	0.184296	0.013545
TE-2~4*	完全防錆	162.69	917	3.439	0.293353	0.014188
TE-2	完全防錆	167.07	950	3.531	0.312092	0.013816
TE-3		163.13	900	3.448	0.288693	0.014150
TE-4		157.88	900	3.337	0.279402	0.014620

*供試体TE-2~4 3本の導入プレストレス力平均値および定着長平均値を使用して係数A、Bを算定

[3] 導入時定着長内の付着改良型防錆ストランドの残存プレストレス力計算結果と実測結果の比較

表-2に示した定着端におけるストランドとコンクリートの相対すべり量(6)式の係数AおよびBの推定値を用い、各供試体の定着端における導入時残存プレストレス力P(x)分布を計算した結果を、実測値と比較したものが図-2である。ただし、完全防錆ストランドを使用した供試体TE-2~4については、3本の平均導入プレストレス力および平均定着長を用いて計算したA=0.293353 およびB=0.014188を用いた。同図には、供試体TE-1~4の各々について、全プレストレス力を導入するまでの各導入プレストレス力レベルに対する計算結果も実測値と比較している。なお、裸ストランドを使用した供試体TE-1については、実験

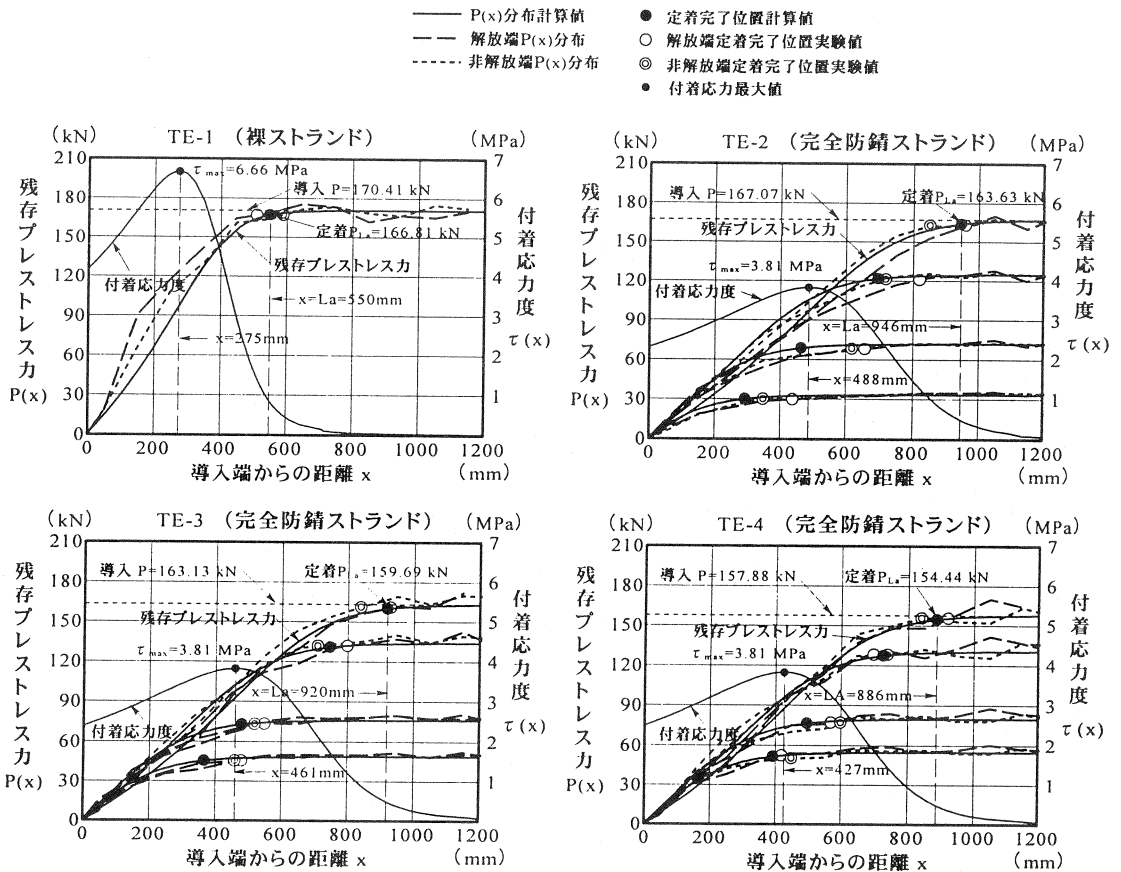


図-2 導入時定着端の残存プレストレス力P(x)分布実測値と計算値の比較

の手違いで全プレストレス導入時までの段階的の実測ができなかったために、全プレストレス導入時の実測値と計算値の比較だけを示した。

図-2から明らかなように、裸ストランド使用供試体 TE-1 については残存プレストレス力分布の実測値と計算値がややずれているが、完全防錆ストランド使用供試体 TE-2~4 については、全プレストレス導入時のみならず、途中の段階の導入プレストレスの場合についても、計算値と実測値が極めて良い一致を示している。

なお、図-2には、参考までに、各供試体について全プレストレス導入時に対する導入端付着応力 $\tau(x)$ 分布計算結果を示してある。計算式は(14)式を考慮して変形した

$$\tau(x) = \frac{\alpha}{\phi} \cdot \frac{\Delta P(x)}{e^{B \Delta P(x)}} = \frac{\alpha}{\phi} \cdot \frac{\Delta P(x)}{t} \quad (28)$$

である。また、(15)式から計算した最大付着応力度は、図中に記したように裸ストランドでは $\tau_{max}=6.66\text{MPa}$ 、完全防錆ストランドでは裸ストランドの57.2%の $\tau_{max}=3.81\text{MPa}$ であった。

表-3は、表-2の係数AおよびB(ただし、完全防錆ストランド供試体についてはTE-2~4に対する値)を用い、(13)式の消失プレストレス力となる位置までを定着長としている。すなわち、

$$P(x) = P - \Delta P(x) = P - \log(1.05)/B \quad (29)$$

となる位置の材端からの距離を定着長実験値とした。なお、消失プレストレス力 $\Delta P(x) = \log(1.05)/B$ の

値は表-2に示したように、供試体 TE-1(裸ストランド)では3.602kN、供試体 TE-2~4(完全防錆ストランド)では3.439kNで図-2にはこれらの定着長実験値および計算値がプロットしてある。表-3または図-2から明らかなように、定着長実験値と計算値はよく一致している。ただし、供試体 TE-2~4の全プレストレスが導入以前の段階的導入プレストレス力に対しては、小さいプレストレス力の場合ほど両者の相違が大きくなる傾向がみられるが、実際にはほとんどあり得ないプレストレス力レベルであるので、実用上は問題とならない。

表-3 定着長 L_a の実測値と計算値の比較

供試体	荷重・定着長	実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計
TE-1 (裸)	導入プレストレス	P=170.41kN											
	定着長 解放端	510	550	0.93									
	(mm) 非解放端	590		1.07									
TE-2 (防錆)	導入プレストレス	P=167.07kN			P=124.82kN			P=71.96kN			P=33.26kN		
	定着長 解放端	960	946	1.01	820	699	1.17	660	464	1.42	440	295	1.49
	(mm) 非解放端	850		0.90	720		1.03	620		1.34	350		1.19
TE-3 (防錆)	導入プレストレス	P=163.13kN			P=133.99kN			P=75.97kN			P=48.65kN		
	定着長 解放端	930	920	1.01	800	747	1.07	550	481	1.14	480	367	1.31
	(mm) 非解放端	840		0.91	710		0.95	520		1.08	460		1.25
TE-4 (防錆)	導入プレストレス	P=157.88kN			P=130.51kN			P=79.76kN			P=54.76kN		
	定着長 解放端	920	886	1.04	700	728	0.96	570	497	1.15	420	393	1.07
	(mm) 非解放端	840		0.95	740		1.02	600		1.21	450		1.15

(注) TE-1の定着長の計算値は消失プレストレス力 $\Delta P(x) = \log(1.05)/B$ を考慮している。

4. まとめ

本研究は、 $\phi 15.2\text{mm}$ 付着改良型防錆PCストランドを用いたプレテンション梁のプレストレス導入実験から得られた定着端における残存プレストレス力分布および定着長と、定着端におけるコンクリートとPC鋼材との相対すべりに基づく付着応力 $\tau(x)$ 分布解析式によるこれらの計算結果との比較検討を行ったもので、得られた主要な成果は下記の通りである。

- ① 解析式をプレストレス導入試験結果に適用して、定着端における残存プレストレス力 $P(x)$ 分布、付着応力 $\tau(x)$ 分布および定着長 L_a の解析に必要な相対すべり曲線(6)式の係数AおよびBの求め方を提案した。
- ② $\phi 15.2\text{mm}$ 裸および付着改良型防錆ストランド使用プレテンション梁のプレストレス導入実験結果に本研究で提案した方法を適用して求めた相対すべり曲線(6)式の係数AおよびBは、下記の通りである。
 裸ストランド: $A=0.184296$ 、 $B=0.013545$
 付着改良型完全防錆ストランド: $A=0.293353$ 、 $B=0.014188$
- ③ 上記の値を適用した定着端残存プレストレス力分布および定着長計算値は実験値とよく一致した。

謝辞: 本研究は、高耐久構造研究会(住建コンクリート工業、神鋼鋼線工業、東京製綱、VSLジャパン、ヒエン電工およびフドウ建研)で実施した研究の一部である。関係各位のご協力に深謝する。

参考文献

- 1) 近藤二郎、南 伊三男、千桐一芳、白濱昭二: 付着改良型樹脂防錆PCストランドのプレテンション部材への適用性研究、第8回PCの発展に関するシンポジウム論文集, pp.505-510、1998年10月
- 2) 坂 静雄、六車 照、森田司郎: ストランドの定着時の付着効果に関する実験的研究、材料試験、第8巻第69号、pp.455-464、1959年6月