

φ9.3mm 7本撚りストランドの定着長さに関する研究

京 都 大 学 坂 静 雄
同 六 車 熙
東畑建築設計事務所 森 田 司 郎

まえがき

本研究はφ9.3mm 7本撚りストランドを用いたプレテンション材の、プレストレス導入時におけるストランド定着長さにつき、実験的研究を行うと共に理論的にも検討し、定着部付近におけるストランドの引張力分布、付着応力分布を求めたものである。一般にP C鋼材の付着効果に影響をあたえる因子として、鋼材表面の状態、コンクリート強度、コンクリートに導入されるプレストレスの大きさなどがあげられるが、これらの因子によるストランド定着長さの変化についても研究を行つた。なお、本研究はプレストレス導入直後におけるストランドの付着性質だけにつきのべたもので、コンクリートのクリープおよび硬化収縮などによつておこるその後の付着性質変化については後日にゆずる。

1. 供 試 体

付着効果に影響する因子として、φ9.3mmストランド(以下単に「ストランド」と略記)の表面の状態(さびの程度をいう)、コンクリート強度、コンクリート断面に導入されるプレストレスの大きさがあげられる。本実験ではこれらの影響を調べるために、表1表のような7つのグループに分けて実験を行つた。

表1 実験計画

グループ	コンクリート5日 予定圧縮強度 (Kg/cm^2)	コンクリート 重量配合比	水セメント比 (%)	供 試 体 断面寸法 ($\text{cm} \times \text{cm}$)	導入予定* プレストレス (Kg/cm^2)	ストランドの さびの程度**	供試体数 (個)
I	300	1:2.29:2.52	50	10×10	60	0	29
II	300	1:2.29:2.52	50	10×10	60	0.5	24
II'	300	1:2.29:2.52	50	10×10	60	0.7	12
III	300	1:2.29:2.55	50	10×10	60	1.0	12
IV	450	1:1.00:0.59	35	10×10	60	0	15
V	300	1:1.88:2.05	45	8×8	94	0	18
VI	300	1:1.88:2.05	45	6×6	167	0	12

*導入プレストレス力計画値は60 tonである。 ** さびの程度を表わす指標として、表面に全然さびのないものを0、表面全体にうすいさびがおおいうものを1.0として、その中間はさびた部分のストランド全表面積に対する面積比で表わした。

コンクリート供試体はすべて正方形断面で、その図心位置に1本の $\phi 9.3\text{mm}$ ストランドを配置したものを用いた。各グループの供試体断面寸法は表1表に示してある。供試体全長は各グループ毎に長さ50cmから150cmの範囲内で、ストランドの定着長さ予定値前後の6種類の長さを5cm~25cmの増分でそれぞれ適宜選定した。これらについては表4表を参照されたい。

表1表でグループⅠ~Ⅲは断面寸法10×10cmの一定とし、ストランド表面のさびの程度をかえて、これの付着効果におよぼす影響を調べた。グループⅠはさびの程度0であり(さびのない場合)、これは、実験全体を通じての標準グループと考えた。グループⅣは断面寸法、さびの程度はグループⅠと全く同じで、コンクリート強度を変化させてこれの影響を調べるためのものである。グループⅤおよびⅥはコンクリート断面を小さくしてコンクリート断面に導入されるプレストレスを大きくしたもので、プレストレスの大きさの変化による影響を調べたものである。

供試体製作に用いた材料は以下の通りである。

(1) セメント —— オノダ早強セメント、圧縮強度は3日、7日および28日でそれぞれ261, 354および461 kg/cm^2 、曲げ強度はそれぞれ49.4, 64.2および83.0 kg/cm^2 であつた。

(2) 骨材 —— 砂は木津川産、最大粒径5mm、砂利は桂川産、最大粒径15mm、粗粒率はそれぞれ29.0および66.5であつた。

(3) $\phi 9.3\text{mm}$ 7本撚りストランド —— 神鋼鋼線鋼索株式会社製のものを用いた。機械的性質はつぎの通りである。

公称径 $D = 9.3\text{mm}$ 、断面積 $A_s = 0.517\text{cm}^2$

抗張力(1本あたり) $P_u = 9.65\text{ton}$

降伏点強度(1本あたり) $P_y = 8.50\text{ton}$

弾性係数 $E_s = 2.010,000\text{kg/cm}^2$

伸び率(G.L. = 60cm) $\delta_u = 2.2\%$

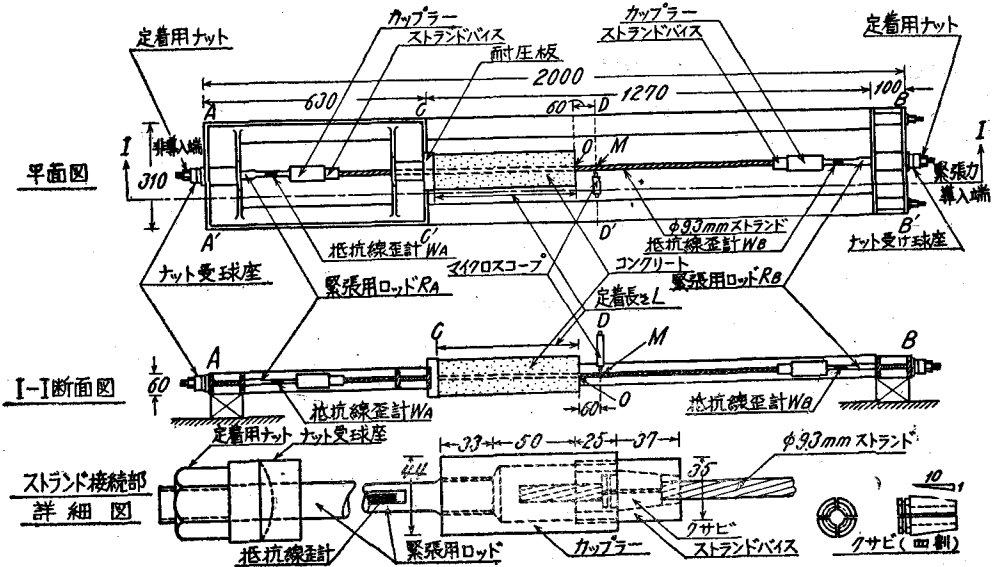
実周長¹⁾ $U = 4\pi D/3 = 38.9\text{mm}$

なお、各グループのコンクリートの配合、水比は表1表に示してある。

2. 供試体の製作、養生

供試体製作にあたって、まず、表1図に示す鉄筋と鋼管からなる緊張棒に1本のストランドを引張力6.7tonで緊張定着する。緊張後2日でストランドのレラクセーション、定着用ストラ

ストランドのしまりなどで、ストランドの引張力は約6.35tonに減少した。それ以後は殆んど減少が認められなかったため、各供試体はストランド緊張後2日でコンクリートを打ち込んだ。緊張おくでの供試体製作位置はオ1図に示す通りである。



オ1図 実験装置(書き込み寸法の単位はmm)

コンクリート打ち込み後は材令5日でストランド引張力を開放してプレストレスを導入するまで湿布養生とした。

3 実験時コンクリートの品質

実験時(材令5日)のコンクリートの品質をオ2表に示す。オ2表の各測定値は各グループにおけるコンクリート試験成績平均値を示してある。

オ2表 実験時のコンクリート品質

グループ	材令 (日)	重量配合比	水比 %	圧縮強度 (kg/cm^2)		弾性係数 (kg/cm^2)
				予定値	実験値	
I	5	1:2.29:2.52	50	300	288	272000
II, II'	5	1:2.29:2.52	50	300	302	265000
III	5	1:2.29:2.52	50	300	258	239500

N	5	1:1.00:0.59	35	450	435	302000
V	5	1:1.88:2.05	45	300	286	250000
VI	5	1:1.88:2.05	45	300	287	223000

4. 実験方法

実験はオ1図におけるストランド緊張端B側の緊張用鋼棒 R_B の引張力を除々に開放しておこなわれた。このときの緊張端B側にあるストランド引張力の開放量 ΔP_B は、あらかじめキャリブレーションしてある鋼棒 R_B 上に貼布した抵抗線歪計 W_B （ベークライトゲージ使用）で読みとつた。同時に非緊張端A側の定着用鋼棒 R_A 上に貼布した抵抗線歪計 W_A でA側におけるストランドの引張力減少量 ΔP_A を求めた。この場合、ストランド引張力はB側だけから開放されるので、ストランドとコンクリートとの付着が完全であれば、コンクリートに導入されたプレストレス力 ΔP_0 は、緊張わくの中段のフレームCC'で負担されることになる。この場合、 ΔP_0 はコンクリートの導入時弾性変形を考慮してつぎの式により計算できる。

$$\Delta P_0 = \frac{\Delta P_B}{1 + np} \quad (1)$$

ここに、 n = ストランドとコンクリートの弾性係数比 ($= E_s / E_c$)、 p = ストランドの鉄筋比 ($= A_s / A_c$) である。したがって、ストランド引張力開放量 ΔP_B のコンクリート弾性変形による損失量 ΔP_e は

$$\Delta P_e = \Delta P_B - \Delta P_0 = \frac{np \Delta P_B}{1 + np} \quad (2)$$

となる。一方、非緊張端A側のゲージ W_A から求められたストランド引張力減少量 ΔP_A は、理論上(2)式の ΔP_e とほぼ一致するはずである。このことは後述の実験結果からも明らかである。

付着が破壊されると ΔP_A は(2)式の ΔP_e 計算値よりも急激に大となり、コンクリートにはそれ以上のプレストレス導入は望めない。この限界における両端鋼棒の引張力減少量 $(\Delta P_A)_{cr}$ 、 $(\Delta P_B)_{cr}$ の差

$$(\Delta P_0)_{cr} = (\Delta P_B)_{cr} - (\Delta P_A)_{cr} \quad (3)$$

をそのときのコンクリート供試体の材長 L に対する導入可能（または定着可能）プレストレス力とした。この場合、材長 L のことを $(\Delta P_0)_{cr}$ のプレストレス導入に必要な定着長さともよぶ。本研究では材長 L を種々にかえて、それぞれの材長に対する導入可能プレストレス力 $(\Delta P_0)_{cr}$ を求めた。

ΔP_A および ΔP_B の測定と同時にオ 1 図に示す B 側のストランド露出部内の 1 点 M に測定標点を設け、ストランド引張力開放時の M 点移動 S_M を 1 マイクロミリまで測定可能なマイクロスコープで測定した。M 点移動量測定値からコンクリート供試体の B 側端 O におけるコンクリートとストランドとの相対変位 S_0 を求めた。 S_0 を求めるにあたって、M 点はコンクリート材端 O 点から B 側え 6cm の位置に設けてあるので、引張力開放量 ΔP_B に対する O M 間のストランドの弾性変形 ΔS_I は

$$\Delta S_I = \frac{\Delta P_A \times 60}{E_S A_S} \quad (\text{単位, ton, mm})$$

一方、コンクリート供試体の材長 L の変化 ΔS_C は、コンクリートに導入されているプレストレス力の分布が材端 O で 0、他端 C で (1) 式の ΔP_O となるような三角形分布であると仮定して

$$\Delta S_C = \frac{\Delta P_O L}{2 E_C A_C} \quad (\text{単位 ton, mm})$$

とした。したがって、コンクリート材端 O におけるコンクリートとストランドの相対変位 S_0 は

$$S_0 = S_M - \Delta S_I - \Delta S_C = S_M - \frac{\Delta P_B \times 60}{E_S A_S} - \frac{\Delta P_O L}{2 E_C A_C} \quad (4)$$

である。しかしながらオ 1 図に示す装置の CC', DD' 間の緊張わく支柱(鋼管)の弾性変形 ΔS_2 、および、コンクリートに導入されたプレストレス力の反力受けフレーム CC' (鋳鉄) のたわみ変形 ΔS_3 も考慮して、(4) 式の S_0 をさらに補正する必要がある。本実験における ΔS_2 値は

$$\Delta S_2 = \frac{\Delta P_B (L + 60)}{E_S' A_S'} \quad (\text{単位 ton, mm})$$

ここに、 $E_S' = CC', DD'$ 間の緊張わく支柱の弾性係数 ($= 21.0 \text{ ton/cm}^2$)、 $A_S' =$ 支柱断面積 ($= 1.400 \text{ cm}^2$) である。また、 ΔS_3 は実測の結果 $\Delta P_B = 1 \text{ ton}$ に対し $\Delta S_3 = 0.0139 \text{ mm}$ であつた。したがって、

$$\Delta S_3 = 0.0139 \Delta P_B \quad (\text{単位 ton, mm})$$

故に S_0 は次式から計算される。

$$\begin{aligned} S_0 &= S_M - \Delta S_I - \Delta S_C - \Delta S_2 - \Delta S_3 \\ &= S_M - \frac{60 \Delta P_B}{E_S A_S} - \frac{\Delta P_O L}{2 E_C A_C} - \frac{\Delta P_B (L + 60)}{E_S' A_S'} - 0.0139 \Delta P_B \quad (5) \end{aligned}$$

測定値 S_M の ΔP_B 増加による変化量は、コンクリート供試体中のストランドの定着が破壊さ

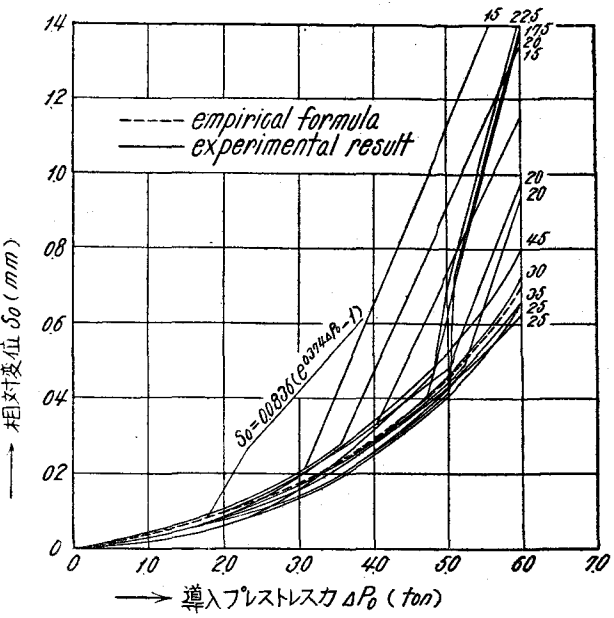
れると急激に大きくなる。前述のように ΔP_A の増加量も同様に急激となるので、この両者からコンクリート材長 L に対する定着可能プレストレス力 $(\Delta P_0)_{cr}$ を確実に知ることができる。なお、 S_M から(5)式によつて計算した S_0 の値は、後述のストランドの付着応力分布、ストランド引張応力分布などの理論計算に用いられる。

5. 実験結果

5.1 導入プレストレス力 ΔP_0 とコンクリート材端0における相対変位 S_0 の関係

オ2図はグループⅡにおける(1)式から計算した導入プレストレス力 ΔP_0 と、これに対する(5)式から求めたコンクリート材端0における相対変位 S_0 との実験結果を例としてあげたものである。図中の曲線群の終端の数値はコンクリート供試体の材長 L をcm単位で表わしたものである。 ΔP_0 が小さい間は付着が破壊されないから ΔP_e と S_0 との関係はなめらかな曲線となるが、付着が破壊された後は S_0 の増加量が ΔP_0 増加量に対して急激に大となり、図のような折線となる。これらの曲線部分と折

線部分との交点に対する ΔP_0 値が、それぞれのコンクリート供試体材長 L に対する定着可能プレストレス力 $(\Delta P_0)_{cr}$ となる。 $(\Delta P_0)_{cr}$ の値はオ4図の ΔP_0 と $\Delta P_A - \Delta P_e$ との関係曲線の折点からも同様にして求められ、この両者は全く一致することは勿論である。オ3表の $(\Delta P_0)_{cr}$ 実験値はこのようにして得た値である。



オ2図 ΔP_0 と S_0 との関係
(グループⅡの実験結果)

さて、オ2図において、ストランドとコンクリートの間の付着が破壊されない範囲では、コンクリート供試体材長 L には無関係に、 ΔP_0 と S_0 との関係はほぼ一定の曲線関係にあると考えられる。実験式は

$$S_0 = A (e^{B \Delta P_0} - 1) \quad (6)$$

の形に書くことができる。^{2), 3)}ここに, A, Bは実験結果から決まる定数であつて, 本研究における各グループの実験結果から各グループに対するA, Bの値を求めた結果を示すと表3のようになった。

表3 (6)式のA, Bの値^{*}(実験結果より計算)

グループ	I	IIおよびII'	III	IV	V	VI
A	0.1495	0.0836	0.0755	0.153	0.217	0.219
B	0.346	0.374	0.374	0.376	0.296	0.306

^{*}(6)式の ΔP_0 の単位はton, S_0 の単位はmmとしたときのA, B値を求めたもの。

表3図は表3のA, B値を(6)式に代入して求めた ΔP_0 と S_0 との関係曲線をまとめて示したもので, 各グループにおける ΔP_0 と S_0 との実験結果の平均曲線を示すものである。ただし, グループIIとII'とは実験結果が殆んど一致するので, 以後はグループIIの中にグループII'を含めて考えることにする。

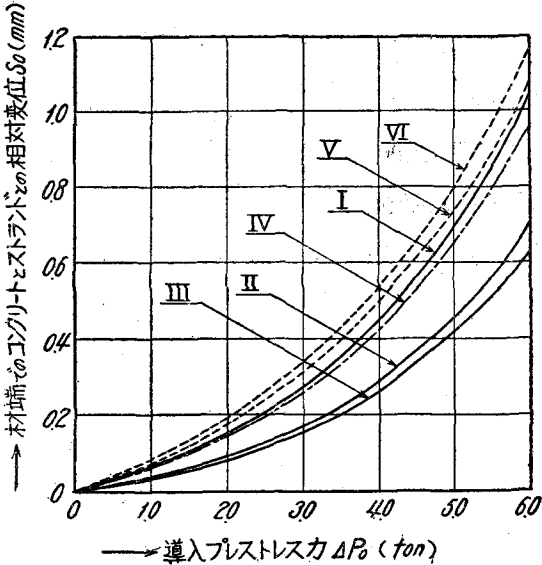


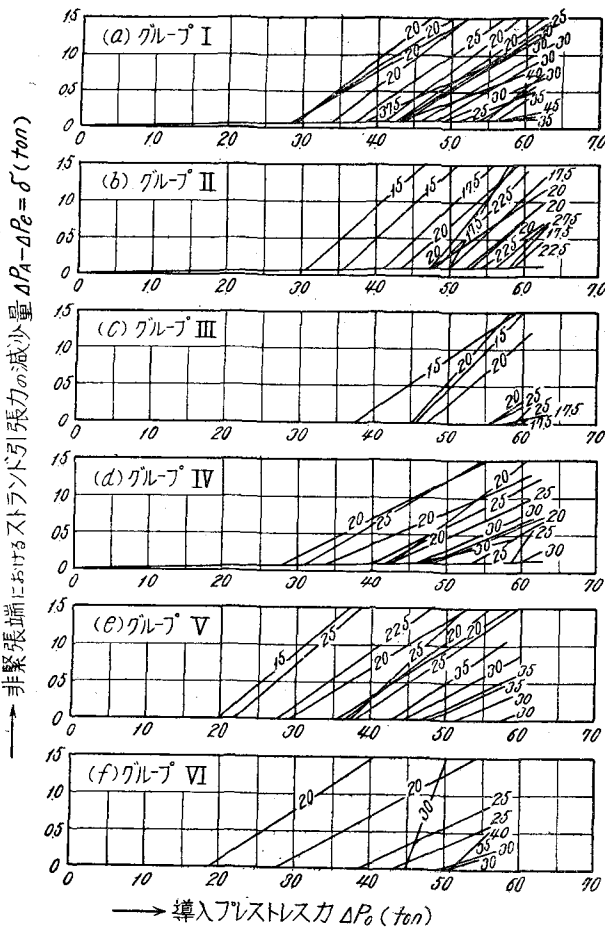
表3図 $\Delta P_0 - S_0$ 平均曲線

5.2 導入プレストレス ΔP_0 と非緊張端Aでのストランド引張力減少量 ΔP_A との関係
表4図は ΔP_0 と次式で定義される δ との実験関係曲線を示したものである。

$$\delta = \Delta P_A - \Delta P_e = \Delta P_A - \frac{np\Delta P_B}{1+np} \tag{7}$$

δ はすでにのべたように理論的には付着が破壊されていない間は0であるが, 付着が破壊されるとストランドのコンクリート供試体全長に亘つてのすべりがおこるので ΔP_B が増大すると共に急激に増大する。すなわち, δ は非緊張端A側でのストランドの真の引張力減少量を表わすもの

で、これに対して ΔP_a 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量であるから、ストランドの滑動によつておこるストランド引張力減少量ではない。したがつて、オ4図で δ が急激に増大し始める位置に対する ΔP_0 値が、そのときのコンクリート供試体全長に対する定着可能プレストレス力(ΔP_0)crとなる。なお、オ4図で付着の破壊されていない範囲でも δ が多少あるが、これは実験装置の弾性変形の影響であつて、実験誤差の範囲に入れられるべきものである。実質的には $\delta=0$ とみなしてもよい。



オ4図 ΔP_0 と δ の関係実験結果

5.3 コンクリート供試体材長 L と定着可能プレストレス力(ΔP_0)crとの関係

前項にのべた $\Delta P_0 \leftrightarrow S_0$ または $\Delta P_0 \leftrightarrow \delta$ 関係実験結果から求めたコンクリート材長 L とそれに対する導入可能プレストレス力(ΔP_0)crとの実験結果をオ4表に示す。表中で不等号の付いている(ΔP_0)crの値はそのときの材長 L に対して定着が破壊されなかつたことを示し、したがつて、それ以上のプレストレス力導入が可能であることを示す。

表4 実験結果一覧表

グループ	コンクリート断面 (cm×cm)	コンクリート圧縮強度 (kg/cm ²)	さびの程度	番号	(1) 実験値										
					定着可能有効プレストレス力：(ΔP ₀) _{cr} (ton)										
					コンクリート材長：l (cm)										
15	175	20	225	25	30	35	37.5	40	45	50					
I	10×10	300	0	1	—	3.42	—	—	—	4.84	>6.17	—	>6.21	5.68	>6.07
				2	—	2.94	—	—	4.50	5.59	3.85	4.48	>6.04	—	
				3	—	4.43	—	—	4.74	5.55	>6.10	>6.00	>6.17	—	
				4	—	—	—	4.24	4.53	—	—	—	—	—	
II	10×10	300	0.5	12	—	4.24	—	5.36	5.44	—	—	—	—	—	
				13	—	2.94	—	3.70	4.57	—	—	—	—	—	
				14	—	2.89	—	5.11	>6.17	—	—	—	—	—	
				5	—	5.18	—	—	>6.14	—	—	>6.15	—	>6.50	
II'	10×10	300	0.7	6	—	5.24	—	>6.07	>6.35	>5.90	—	>6.12	>6.10	—	
				7	3.01	4.96	4.72	4.81	>6.10	>6.12	—	—	—	—	
				4	3.52	4.05	4.70	5.82	—	—	—	—	—	—	
				8	—	4.99	>6.28	5.57	>6.23	>6.17	>6.26	—	—	—	
III	10×10	300	1.0	9	—	5.66	4.52	5.40	>6.17	>6.17	>6.28	—	—	—	
				10	3.74	5.66	5.55	>6.97	5.55	—	—	—	—	—	
				11	4.55	5.95	{ 4.70 4.50	>5.97	5.90	—	—	—	—	—	
				12	—	—	4.74	—	5.86	>6.18	—	—	—	—	
IV	10×10	450	0	13	—	—	3.38	—	5.32	6.00	—	—	—	—	
				14	—	—	2.71	—	4.20	4.54	—	—	—	—	
				15	—	—	4.16	—	3.97	4.70	—	—	—	—	
				16	—	—	4.20	—	3.05	4.55	—	—	—	—	
V	8×8	300	0	16	—	—	3.57	—	3.80	4.45	4.72	—	>5.99	>5.83	
				17	—	—	3.66	—	2.16	5.77	4.30	—	>6.00	>5.89	
				18	1.97	—	2.90	2.75	3.72	5.16	4.80	—	—	—	
				19	—	—	2.76	—	4.37	4.50	5.10	5.19	—	>5.60	
VI	6×6	300	0	20	—	—	1.85	—	3.88	5.06	4.93	>5.50	>5.58		

φ 9.3mm ストランドの破断荷重規格値は 9.1 ton, 定着完了後の許容引張力はこれの 65%, すなわち, 5.9 ton と規定されている。^{4), 5), 6), 7)}したがって, 実際使用に際して $(\Delta P_0)_{cr} \approx 5.9 \text{ ton}$ に対する定着長さ L が問題となる。本研究において得た実験結果より各グループに対する $(\Delta P_0)_{cr} = 5.9 \text{ ton}$ に対する定着長さ L を推定すると表 5 のようになる。 L の値に範囲のあるのは実験値のちらばりによるもので, 実用上の定着長さとしては上限値をとるのが安全である。

表 5 表 $(\Delta P_0)_{cr} = 5.9 \text{ ton}$ に対する定着長さ L

グループ	実 験 値 (cm)		理 論 値 * (cm)
	範 囲	平 均 *	
I	35 ~ 45	40 (43D)	38 (41D)
II, II'	22.5 ~ 27.5	25 (27D)	25 (27D)
III	17.5 ~ 25	21 (23D)	22 (24D)
IV	25 ~ 45	35 (38D)	35 (38D)
V	35 ~ 45	40 (43D)	38 (41D)
VI	35 ~ 45	40 (43D)	40 (43D)

* () 内の値は公称直径 $D = 9.3 \text{ mm}$ に対する定着長の比率

表 5 から明らかなように, ストランド表面のさびの程度が最も定着長さに大きい影響をあたえる。本実験ではストランド表面がさびていないとき (グループ I) に対して, 全面がさびておわれているとき (グループ III) の定着長さは前者の約 $\frac{1}{2}$ となつた。さびの程度が 0.5 ~ 0.7 のとき (グループ II および II') には約 $\frac{2}{3}$ 弱であつた。このことから, 表面に多少のうすさびが出る程度のストランドを使用するのが得策であると結論できる。赤さびの出たストランドではストランド表面の凹部がさびてうまるので, かえって定着長さが長くなり, 赤さびは禁物であるといわれている。コンクリート強度が大きいとき (グループ IV) には多少定着長さが短くなるが, その程度は極めて微少である。また, コンクリートに導入されるプレストレスが大きくなつても (グループ V および VI) 定着長さは変らない。これらは従来のプレテンション用単一鋼線または 2 本撚り線の場合と同じ性質である。

6 定着部のストランド引張力の理論計算式

従来の付着応力に関する理論解は, 付着がつぎの 2 つの何れかによるものと解釈して求めている。

(1) プレストレス導入時のP C鋼材の断面拡大に伴つておこるコンクリートとP C鋼材間の肌
 圧応力に摩擦係数をかけたものを付着応力とする。^{8), 9), 10)}

(2) 付着応力はその点におけるコンクリートとP C鋼材との相対変位に正比例する。^{11), 12), 13)}

これらの仮定は実際の場合と全く合致しない。とくに、導入端近傍でのP C鋼材の周囲のコン
 クリートが圧潰して、機械的付着だけとなつている部分ではこれらの仮定は適用できない。

本実験では材端におけるコンクリートとストランドの相対変位 S_0 と、導入されたプレストレ
 ス力 ΔP_0 との関係が、(6)式の形に表わされることが明らかであるから、(6)式の関係が満足され
 るようなストランドの引張力分布を表わす理論式を導くことによつて、付着応力の正確な分布を
 得ることができる。^{2), 3)}

いま、コンクリート供試体のプレストレス導入側材端から x の距離にあるストランドのプレ
 ストレス導入直後の残存引張力 $P(x)$ を、この位置でのストランドとコンクリートとの相対変位 $S(x)$
 を用いて表わすつぎのようになる。

$$P(x) = \frac{1}{1 + n p} \left(\Delta P_B + E_s A_s \frac{dS(x)}{dx} \right) \quad (8)$$

(8)式をとくためには $P(x)$ と $S(x)$ との間の函数関係がわからなければならない。ここでは $S(x)$ が(6)
 式の S_0 と ΔP_0 の実験式と全く同じ関係で表わされるものと仮定する。すなわち、(6)式の S_0 の
 かわりに $S(x)$ を、 ΔP_0 のかわりに x の位置における付着の不足による導入プレストレス力損失
 量 $\Delta P(x)$ を代入する。

$$S(x) = A (e^{B \Delta P(x)} - 1) \quad (9)$$

ただし、

$$\Delta P(x) = \frac{\Delta P_B}{1 + n p} - p(x) = \Delta P_0 - P(x) \quad (10)$$

であり、かつ、(9)式の常数 A 、 B は各グループに対し表4の値をとることに注意しなければな
 らない。

(9)、(10)式を(8)式に代入整理すると

$$-\frac{1}{B} \log \frac{S(x) + A}{A} = \frac{E_s A_s}{1 + n p} \cdot \frac{dS(x)}{dx} \quad (11)$$

$x = 0$ (プレストレス導入側材端)において $S(x) = S_0$ なる境界条件で(11)式を積分すれば、

$$\text{Li}\left\{\frac{S(x)+A}{A}\right\} = \text{Li}\left\{\frac{S_0+A}{A}\right\} - \alpha x \quad (12)$$

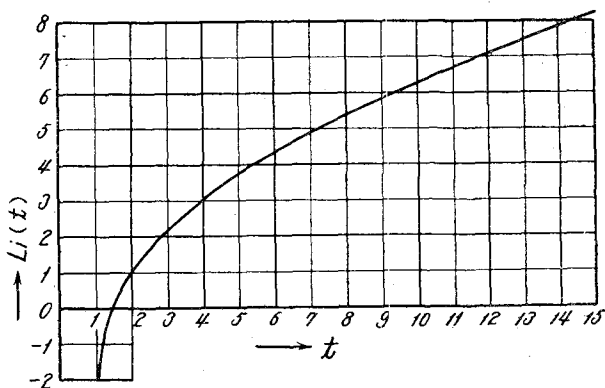
ここに,

$$\alpha = \frac{1 + np}{A \cdot B \cdot E_S \cdot A_S} \quad (13)$$

また, 記号LiはIntegral Logarithm

$$\text{Li}(t) = \int_0^t \frac{dt}{\log t} \quad (14)$$

を表わす。オ5図は t の値に対して(14)式を数値計算した結果を示したものである。



オ5図 Integral logarithmの値

(12)式を $\Delta P(x)$ と x との関係に書き改めると

$$\text{Li}\left\{e^{B\Delta P(x)}\right\} = \text{Li}\left\{e^{B\Delta P_0}\right\} - \alpha x \quad (15)$$

(15)式によつて任意の ΔP_0 に対する任意位置 x における導入プレストレス力損失量 $\Delta P(x)$ が計算できる。定着の完了するのは理論的には $\Delta P(x)=0$ となる位置である。しかるに(15)式で $\Delta P(x)=0$ となる位置は $x \rightarrow \infty$ であり、 x の有限値に対しては $\Delta P(x)=0$ とはならない。そこで、ここでは $\Delta P(x)$ が或程度まで小さくなれば定着完了とみなす或限界を設けることにする。その限界値を

$$\Delta P(x) = \Delta P_1 \quad (16)$$

とすれば、 $\Delta P_0 = (\Delta P_0)_{cr}$ のプレストレス力を導入するのに必要な定着長さ L は(15)式より

$$L = \frac{1}{\alpha} \left\{ \text{Li}\left\{e^{B(\Delta P_0)_{cr}}\right\} - \text{Li}\left\{e^{B\Delta P_1}\right\} \right\} \quad (17)$$

となる。

つぎに、ストランド表面の付着応力分布 $\tau_{(x)}$ ¹⁾は、ストランドの実周長が $4\pi D/3$ (D はストランド公称径)で表わすことになっているので、つぎのようになる。

$$\tau_{(x)} = \frac{3}{4\pi D} \cdot \frac{dP_{(x)}}{dx} \quad (18)$$

(18)および(15)式を用いてこれを書き改めると

$$\tau_{(x)} = \beta \cdot \frac{\Delta P_{(x)}}{e B \Delta P_B} \quad (19)$$

ここに、

$$\beta = \frac{3\alpha}{4\pi \cdot D} \quad (20)$$

である。

なお、(19)式は $\Delta P_{(x)} = 1/B$ で最大値をとり、その値はつぎのようになる。

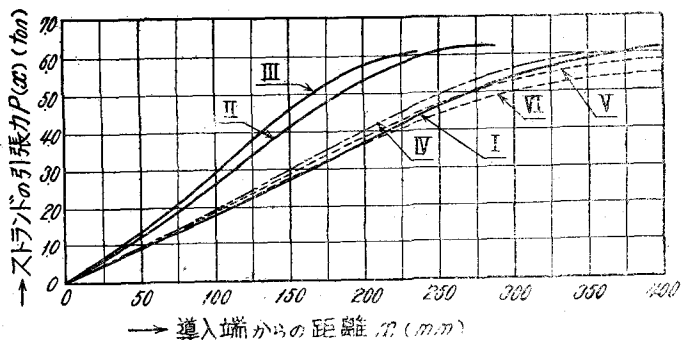
$$\{\tau_{(x)}\}_{max} = \frac{\beta}{B \cdot e} \quad (21)$$

同様に $\Delta P_{(x)} = 1/B$ の位置で(19)式で表わされる $\Delta P_{(x)}$ と x との関係を示すグラフは変曲点を持つ。これらについては次項にのべる $\Delta P_{(x)}$ および $\tau_{(x)}$ 分布曲線から明らかである。

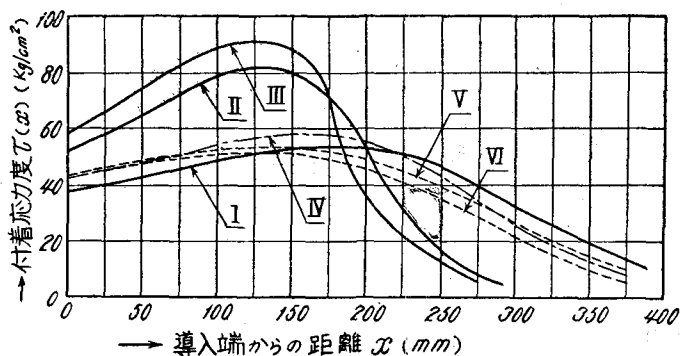
7 理論式の応用

以上に求めた理論式に本実験より得た常数 A 、 B を(15)式および(19)式に代入してストランドの定着部における引張力分布 $P_{(x)}$ および付着応力分布 $\tau_{(x)}$ を求めるとオ6図およびオ7図のようになる。これらは $\Delta P_B =$

6.35tonに対して計算したもので、コンクリートに導入されたプレストレス力に換算すると各グループに対し $\Delta P_0 \div 6.1\text{ton}$ である。



オ6図 定着部におけるストランド引張力分布
($\Delta P_B = 6.35\text{ton}$ の場合)

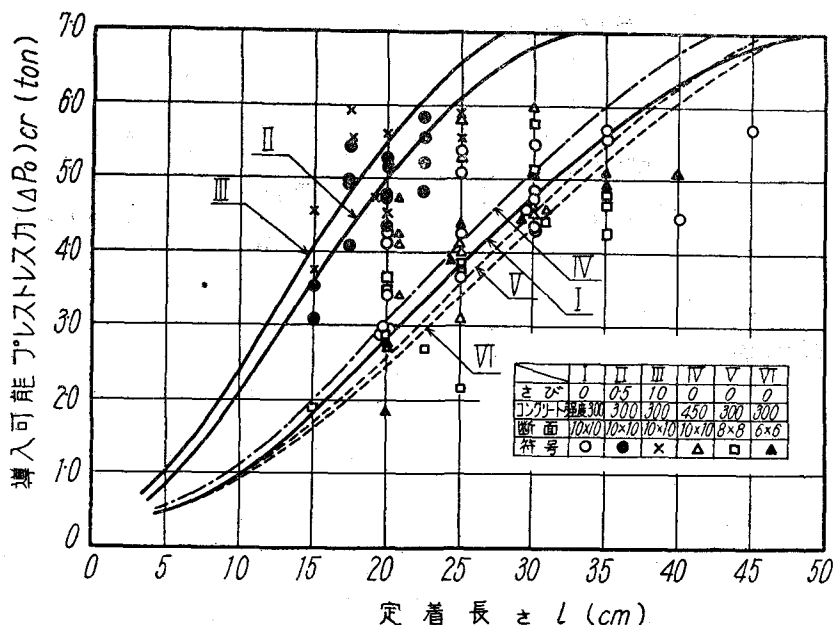


オ 7 図 定着部におけるストランド付着応力分布
($\Delta P_B = 6.35 \text{ ton}$ の場合)

同様にして任意の (ΔP_0) cr 値に対する定着長さ l を仰式から求めた結果をオ 8 図に示す。ただし、定着完了の条件(10式)

$$\Delta P_0 = 0.2 \text{ ton} \quad (22)$$

と仮定した。なお、オ 8 図には本実験で得た実験結果もプロットしてある。



オ 8 図 定着長さと定着可能プレストレス力
との関係理論曲線

オ 8 図で明らかなように実験結果は理論曲線を中心にばらつきがある。これは本研究において求めた $\Delta P_0 - S_0$ 関係(6)式は、各グループにおける個々の供試体での $\Delta P_0 - S_0$ 測定結果の平均曲線を表わすように常数 A, B を決めたからであるから当然である。

オ 5 表には実験値との比較のためオ 8 図の $(\Delta P_0)_{cr} - L$ 理論曲線から $(\Delta P_0)_{cr} = 5.9 \text{ ton}$ に対する定着長さ L の概略値を併記した。これらは平均定着長さ実験値と極めて良く一致している。このことから、6 でのべた理論解は極めて正確なものであることがわかる。

オ 6 表は(2)式から計算した最大付着応力度 $[\tau_{(x)}]_{\max}$ を示したものである。ストランドの表面にさびがないものでは、コンクリートの強度および断面に導入されるプレストレスの大きさには無関係に $[\tau_{(x)}]_{\max} \div 60 \text{ Kg/cm}^2$ であるのに対し、さびの程度 0.5 以上のものでは $[\tau_{(x)}]_{\max} \geq 90 \text{ Kg/cm}^2$ であり、前者の 1.5 倍以上となっている。なお、 $[\tau_{(x)}]_{\max}$ の値は導入されるプレストレス力 $(\Delta P_0)_{cr}$ の大きさには関係なく、一律にオ 6 表の値となることは(2)式から明らかである。また、 $[\tau_{(x)}]_{\max}$ のおこる位置は $(\Delta P_0)_{cr}$ の大きくなるにつれて材端からはなれていく。オ 6 表には各グループに対する $(\Delta P_0)_{cr} = 5.9 \text{ ton}$ に対する $[\tau_{(x)}]_{\max}$ のおこる位置を参考を示してある。

オ 6 表 $[\tau_{(x)}]_{\max}$ の値と $(\Delta P_0)_{cr} = 5.9 \text{ ton}$ のときの
 $[\tau_{(x)}]_{\max}$ のおこる位置 x

グ ル ー プ	I	II および II'	III	IV	V	VI
$[\tau_{(x)}]_{\max} (\text{Kg/cm}^2)$	60.2	91.8	102.0	64.9	59.4	57.8
$x \quad (\text{cm})$	17.9	13.1	11.7	15.9	13.9	12.7

オ 7 表は(17)式から計算した $(\Delta P_0)_{cr} = 1, 2, 3, 4, 5$ および 6 ton に対する各グループの定着長さ L を示したものである。cm 未満は四捨五入してある。また同表には $(\Delta P_0)_{cr}$ の各値に対する平均付着応力度 $[\tau_{(x)}]_{av}$ も同時に示してある。計算式はつぎの通りである。

$$[\tau_{(x)}]_{av} = \frac{3(\Delta P_0)_{cr}}{4\pi DL} = \frac{3\alpha(\Delta P_0)_{cr}}{4\pi D\{Li[eB(\Delta P_0)_{cr}] - Li[eB\Delta P_1]\}} \quad (23)$$

オ 7 表によると、平均付着応力度は導入されたプレストレス力が 4 ton 以上ではほぼ一定値となっていることがわかる。これらは従来の単一または 2 本撚り鋼線の場合と比較してはるかに大きい値となっている様であり、このことからストランドの付着性能が優れていることがわかる。

表7 種々な $(\Delta P_0)_{cr}$ 値に対する定着長さおよび平均付着応力度

グループ	定 着 長 さ (cm)						平均 付 着 応 力 度 (kg/cm^2)					
	導入プレストレス力 (ton)						導入プレストレス力 (ton)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
I	10	16	21	26	31	38	26	32	37	40	42	41
II*	6	10	13	16	20	25	43	51	59	64	64	62
III	5	9	12	15	18	22	52	57	64	71	71	70
IV	10	15	20	25	30	35	26	34	39	41	43	44
V	11	17	22	27	33	38	23	31	35	38	39	41
VI	11	18	23	28	34	41	23	29	34	37	38	38

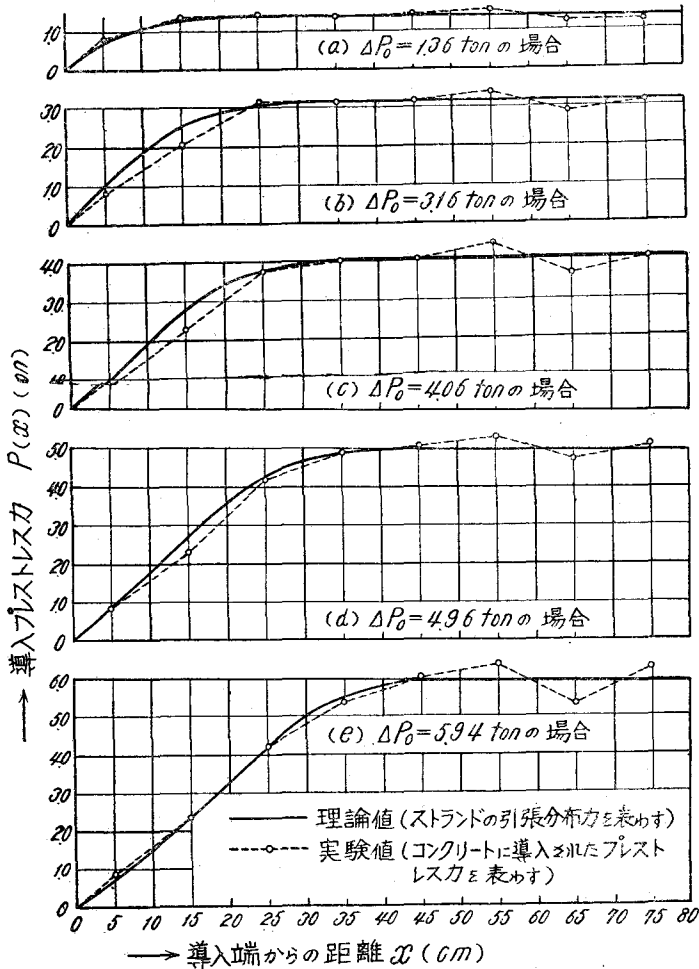
* II' も含む。

8. 理論式の再検討

6でのべた付着応力に関する理論式は、上述の実験結果から得た定着長さ実験値と理論値との比較によつて、理論式が極めて正しいことを検討した。しかし、付着応力（またはストランド引張力）の定着部における理論分布については、実際の場合と比較検討しなければ、理論式の妥当性を検討したことはならない。この検討には定着部ストランドのプレストレス導入時における歪変化を直接測定し、理論値と比較検討するのが理想的であるが、ストランドの歪変化の直接測定は付着効果を阻害することなく行うことが不可能である。そこで、本実験ではコンクリート供試体の表面におけるプレストレス導入時の圧縮歪を検長20mmの抵抗線歪計により測定し、これによりコンクリート断面に導入されたプレストレス力を求め、これとストランド引張力理論値との比較を行った。

供試体は断面10×10cm、全長80cmおよび60cmの2本とし、表1図の実験装置を用いて4でのべた方法で付着応力実験を行うとともに、供試体全表面の中心線上および両縁近傍の長手方向に、プレストレス導入端からそれぞれ5cm、15cm、25cmのように10cm間隔で貼布した抵抗線歪計で、定着部におけるコンクリート圧縮歪分布を求め、これより各歪計貼布位置断面のコンクリート圧縮歪平均値に弾性係数および断面積を乗じてコンクリート各断面に導入されたプレストレス力とを求めた。ストランドは表面にさびのないものとしコンクリートは配合（重量比）1：1.88：2.05、水比45%，材令9日で試験を行った。このときの圧縮強度平均 425 kg/cm^2 、弾性係数300,000 kg/cm^2 であった。

実験結果を図示するとオ9図のようになる。図は全長80cmの場合であり、60cmのものは殆んど同じであるので省略した。図中の点線はコンクリート表面に貼布した抵抗線歪計測定結果より求めた各コンクリート断面に導入されたプレストレス力分布を示し、実線はプレストレス導入端のコンクリートとストランドとの相対変位測定結果を用いて6でのべた理論式から計算したストランド引張力分布を示す。両者は極めてよく一致しており、理論式が極めて正しいことが結論できる。



オ9図 各コンクリート断面に導入されたプレストレス力分布とストランド引張力分布の比較

9. 結 論

本研究はφ9.3mm 7本撚りストランドのプレストレス導入時における付着性能につき、定性的および定量的に明らかにしたものである。研究結果より得た結論を要約するとつぎのようになる。

(1) 定着効果に影響する諸要因のうち、ストランド表面のさびの影響は最も著しい。さびていないものに対するさびの程度0.5以上のものの定着長さは $\frac{2}{3}$ ～ $\frac{1}{2}$ 近くに減少する。したがって、表面に多少のうすさびが出る程度のストランドを使用するのが得策である。

(2) PC用として一般に用いられる程度の強度のコンクリートでは、付着効果はコンクリート強度には無関係にはば一定である。また、コンクリートに導入されたプレストレスの大きさにも関係しない。

(3) 本研究における理論式は定着部付着応力(またはストランド引張力)分布を極めて正確に表わす。

(4) $\phi 9.3$ mm 7本撚りストランドの定着長さ平均値は、導入プレストレス力(ΔP_0)cr = 5.9 tonに対して、表面がさびていないときには40 cm, さびているときには25 cmと考えてよい。ただし、実験結果から明らかなように実験値のちらばりがあるから、これに対する安全率を見込んで定着長さを長く考えるのが安全である。ここでは実験結果からみて安全率1.5を提唱する。

(5) $\phi 9.3$ mm 7本撚りストランドの最大付着応力度($\tau_{(x)}$)max は導入プレストレスの大きさに関係なく、表面がさびていないときは60 kg/cm², さびているときは90 kg/cm²である。これらは従来の単1または2本撚り鋼線とくらべてかなり大きい。

(6) 平均付着応力度($\tau_{(x)}$)avは導入プレストレス力が4 ton以上であれば殆ど変りなく、表面にさびのない場合には40 kg/cm², さびのあるときには60～70 kg/cm²と考えてよい。ただし、実験結果のちらばりを考慮して安全率として1.6をとるのがよい。すなわち、さびのない場合には27 kg/cm², ある場合には40 kg/cm²と考えるのが安全である。これらはコンクリート強度および断面に導入されるプレストレスの大きさには無関係である。

〔参考文献〕

- 1) N.W.Hanson and P.H.Kaar, Flexural Bond Tests of Pretensioned Prestressed Beams, J. of ACI, Vol. 30, No. 7 (Jan. 1939)
- 2) 坂, 六車, 森田, 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 Vol. 8 No. 69, 昭和34年6月
- 3) E.H.Ratz, M.M.Holmjanski and V.M.Kolner, The Transmission of Prestress to Concrete by Bond, Proc. of 3rd Congress of FIP. (1958)

- 4) ストランド使用PC設計施工暫定指針(案), 材料試験, Vol.8 №69, 昭和34年6月
- 5) Tentative Recommendations for Prestressed Concrete, Report of the Joint ASCE-ACI Committee on Prestressed Concrete, Proc. ASCE., J. of Structural Division, Vol.84 № ST1, Jan. 1958.
- 6) PCI Specifications for Pre-Tensioned Prestressed Concrete(Tentative), 1957.
- 7) 坂, 六車, 米国におけるPC用ストランド, 材料試験, Vol.7, №52, 昭和33年1月.
- 8) W. Swida, Über die innere Anpressung der Vorspannung mit Verbund und bei Stahlsaitenbeton, Bauing. 31Jg. H. 2, Feb. 1956.
- 9) 奥島正一, コンクリートと鋼線の付着に関する研究, 建築学会論文集 №60, 昭和33年10月
- 10) J. R. Janney, Nature of bond in pre-tensioned prestressed concrete, Vol.25 №9, May 1954.
- 11) 大島久治, 軽量コンクリートの付着力に関する研究, セメント技術年報X, 昭和31年10月
- 12) Y. Guyon, Prestressed Concrete (1953)
- 13) H. Bufler, Ein neuer Ansatz zur Berechnung der Draht und Haftspannungen in stahlbeton, Bauing. 33Jg. H. 10 Okt. 1958.