

PC ストランドの付着強度について

岡 田 清*
 藤 井 学**
 小 沢 恒 雄***

1. まえがき

プレストレスト コンクリート部材の緊張材としてのストランドはその表面形状からコンクリートとの付着性に富んでいるため、従来主としてプレテンション工法によるプレキャスト部材に用いられてきたが、最近ストランドのプレストレスト コンクリート（以下 PC と略記）部材への適用範囲はかなり広汎となり、ポストテンション方式によるいくつかの PC 工法にも盛んに使用されるようになった。

プレテンション工法にストランドが用いられた場合、プレストレス導入時の定着域における付着 (Transfer Bond) 強度ないしは定着長が問題になり、これらに関する研究はかなりなされているが^{1)~4)}、これら PC 部材が曲げを受けた場合に生ずる付着 (Flexural Bond) 応力に関しては、ほとんど研究されていない。

ストランドは曲上げが簡単にできるのでこれを用いてシンプル ビームはもちろんのこと連続ビームあるいはラーメン構造のごとき不静定構造物も種々のポストテンション工法によって造られている。とくにラーメン構造ではその隅角部にくり返し荷重によって生ずる正負の交番応力によるボンド破壊は、交番応力の生じない他構造物における Flexural Bond 破壊よりも急速に進むのではないかと考えられる。

本文は Flexural Bond に関する研究中、その基礎的研究として行なわれた静的載荷によるコンクリートとストランド間の付着強度、主としてストランド埋込み位置、ストランドの表面状態、コンクリート強度等の要因を考慮した場合の付着強度について引抜きおよび引張試

験法によって求められた実験結果を比較検討したものである。

2. 引抜法による付着試験

一般に鋼材とコンクリート間の付着強度は鋼材径、表面状態、埋込み長、埋込み位置、コンクリート強度、試験方法等、多数の要因の影響をうけるが、本実験ではストランド径、ストランドのさびの程度および埋込み位置の三要因をとりあげ、これらの要因の付着強度におよぼす影響を引抜試験法によって比較検討した。

(1) 使用材料

ストランドは $\phi 9.3$ 、 $\phi 10.8$ および $\phi 12.4$ mm の 3 種で、表面状態は全然さびていないもの（以下 $R=0$ と略記）と 5% 食塩水に約 2 週間浸して全面がさびておわれたもの（以下 $R=1$ と略記）の 2 種である。

ストランドの機械的性質（神鋼鋼線鋼索 KK 提供）を表-1 に示す。表-1 からわかるようにストランドの弾性係数は、一般の PC 鋼線のそれよりも若干小さくっており、これはストランドの単位長に比し側線が長く、しかも側線は軸方向引張応力だけでなく、ねじり応力が付加されるためであろう⁵⁾。

使用コンクリートは最大骨材寸法 25 mm、 w/c は 38 %、重量配合比 1 : 1.36 : 2.64 で試験時（2 週）圧縮強度は平均 264 kg/cm^2 である。

(2) 供試体および試験方法

供試体の形状寸法は断面 $15 \times 15 \text{ cm}$ 、高さ 30 cm で供試体下面から 7.5 cm および 22.5 cm の位置に 1 本ずつストランドを水平に埋込み（埋込み長 15 cm）、材令 1 週で 2 つに分割し、 $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ の立方体供試体に

表-1 ストランドの機械的性質

寸 法			降 伏		破 断		弾性係数	伸 び
公称径 $D(\text{mm})$	断面積 $A_s(\text{mm}^2)$	周 長 $\frac{4}{3} \pi D(\text{mm})$	荷 重 (kg)	応 力 (kg/mm^2)	荷 重 (kg)	応 力 (kg/mm^2)	$E_s(\text{kg/mm}^2)$	(%)
9.3	51.7	389	7 750	150	9 100	176	19 800	6.07
10.8	70.5	453	10 600	150	12 400	176	19 700	6.20
12.4	93.0	519	14 000	150	16 400	176	19 200	6.20

* 工博 京都大学教授，工学部土木工学科 ** 工修 東京大学助手，工学部土木工学科 *** 東京大学大学院，工学部土木工学科

図-1 すべり-付着応力曲線 (自由端, $R=0$)

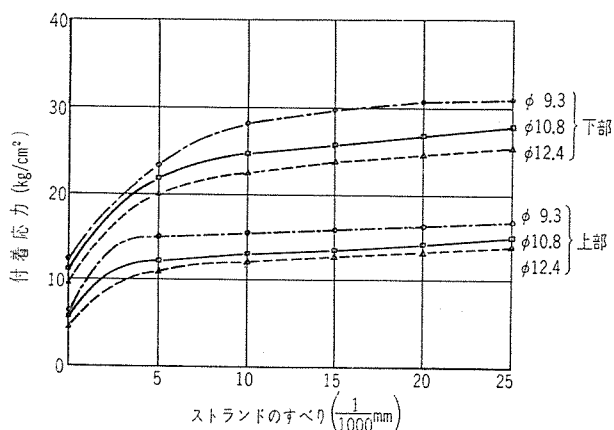


図-2 すべり-付着応力曲線 (自由端 $R=1$)

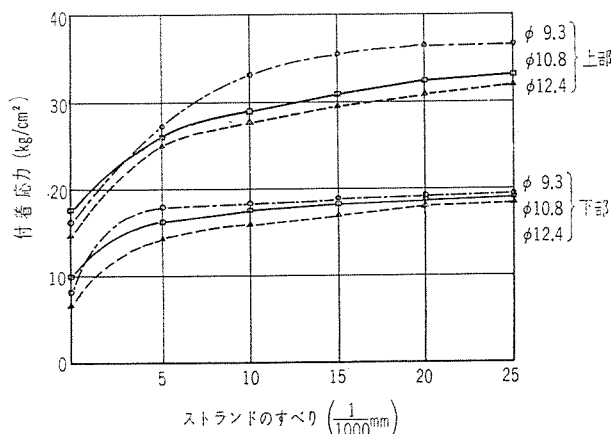


表-2 スtrandのすべりと付着応力との関係 (自由端)

公称径 (mm)	さびの程度	実 測 値		付着応力 τ (kg/cm ²)					平均付着応力 $\tau_{0.025}$ (kg/cm ²)	最大付着応力 τ_{ul} (kg/cm ²)
		ストランドのすべり (1/1000 mm)		5	10	15	20	25		
		埋込み位置								
9.3 10.8 12.4	$R=0$	上 部	0.005	15.0	15.5	16.1	16.5	16.5	15.9	29.3
			0.010	12.5	13.2	14.0	14.4	15.1		
			0.025	11.6	12.5	13.4	13.6	14.0		
		下 部	0.005	23.5	28.5	30.1	30.9	31.0	28.6	73.8
			0.010	21.8	24.8	26.0	27.2	28.1		
			0.025	20.5	22.5	24.2	24.9	25.5		
9.3 10.8 12.4	$R=1$	上 部	0.005	18.1	18.5	19.2	19.5	19.7	19.0	37.8
			0.010	16.5	17.7	18.6	18.9	19.5		
			0.025	14.6	16.4	17.4	18.5	18.8		
		下 部	0.005	27.7	33.5	35.6	36.6	36.6	34.0	76.0
			0.010	27.2	29.2	35.0	32.7	33.3		
			0.025	25.7	28.2	30.3	31.8	32.3		

表-3 埋込み位置上下部の付着応力比

ストランド径 (mm)	さびの程度	$(\tau_{0.025}^u + \tau_{0.025}^l)/2$	$\tau_{0.025}^u / \tau_{0.025}^l$	$(\tau_{ul}^u + \tau_{ul}^l)/2$	$\tau_{ul}^u / \tau_{ul}^l$
9.3 10.8 12.4	$R=0$	22.3 kg/cm ²	0.566	51.6 kg/cm ²	0.397
		19.8	0.554	46.7	0.648
		18.3	0.554	44.0	0.567
9.3 10.8 12.4	$R=1$	26.5	0.560	56.9	0.497
		24.7	0.585	53.6	0.887
		23.4	0.576	52.8	0.648

仕上げて材令2週で引抜試験を行なった。

引抜試験は ASTM C 234-57 T に準じて行なわれた。載荷装置としてリレー式万能試験機が用いられ約 0.200 t の荷重段階で載荷された。供試体の載荷端に2個のダイヤルゲージ (1/100 mm)、非載荷端 (以下自由端と記す) に1個のダイヤルゲージ (1/1000 mm) を取りつけ各荷重段階でストランドのすべりを測定した。

(3) 試験結果および考察

試験結果の若干例を図-1,2 および表-2 に示す。図

1 および図-2 にはストランドのさびの程度がそれぞれ $R=0$ および $R=1$ の場合のストランドのすべりと付着応力との関係が示されている。表-2 には自由端のすべりが、0.005, 0.010, 0.015, 0.020 および 0.025 mm のときの付着応力 τ 、これら付着応力の平均値である平均付着応力 $\tau_{0.025}$ および最大付着応力 τ_{ul} が示されている。

付着応力 τ は各段階の荷重 P をストランドの埋込み部表面積 (LU) で除したもので、 L は埋込み長、 U はス

トランドの周長でストランド公称径 D の $4/3\pi$ 倍(表一1)である。すなわち $\tau=3P/4\pi DL$ より算出されており、各値はすべて3供試体の平均値で表わされている。

つぎにこれら試験結果につき若干の考察を加える。

1) ストランドの埋込み位置の差による付着応力の比較 ストランドの埋込み位置上部一下部の付着応力比を表一3に示す。自由端のすべりが 0.025 mm までの平均付着応力比 ($\tau_{0.025}^u / \tau_{0.025}^l$) についてみると上部は下部に比し $55\sim 60\%$ 、最大付着応力比 ($\tau_{ul}^u / \tau_{ul}^l$) では、ばらつきが大きく $40\sim 90\%$ 程度に減少している。上部が下部にくらべて減少する原因はストランドの下側にコンクリートの沈下による空げきやブリージングによって上昇した水の膜ができ、上面に近い位置ほど沈下量が大きいためであると考えられるが、この傾向は通常の鉄筋においても同様で、上部のものは下部のものより低下するわけで、異形鉄筋に対する影響は丸鋼よりも小さい⁹⁾。

つぎに上下部の付着応力比をストランド表面のさびの程度についてみると、 $R=0$ の場合よりも $R=1$ の場合の方が ($\tau_{0.025}^u / \tau_{0.025}^l$) および ($\tau_{ul}^u / \tau_{ul}^l$) はともに大きくなっており(表一2)、ストランド表面がさびでおおわれている方が埋込み位置による付着強度差が小さい。以上から鋼材の表面形状(鉄筋では異形のリブの形状、間隔等、ストランドでは側線寸法、ピッチの大小等)あるいは表面状態(とくにさび)等による表面粗度が大なるほど埋込み位置による付着強度差が少なくなるのではないかと考えられる。

2) ストランドの表面状態および径の種類による付着応力の比較 表一4から自由端のすべりが 0.025 mm までの平均付着応力では $20\sim 30\%$ 、最大付着応力では $10\sim 20\%$ だけ $R=1$ のものは $R=0$ のものより付着強度が増大している。すなわち、すべりが小さい段階では、さびの付着強度におよぼす影響が大きく、すべりの増加とともに影響が小さくなる傾向を示す。筆者等の行った定着長に関する実験結果⁴⁾によると、 $\phi 12.4\text{ mm}$ ストランドの降伏荷重の約 80% 導入した場合、平均付着応力は $R=0$ および $R=1$ でそれぞれ $38\sim 48\text{ kg/cm}^2$ および $73\sim 92\text{ kg/cm}^2$ となっており、それらの比は 1.92

表一4 ストランドの表面状態および径の種類による付着応力比

ストランド径(mm)	$\tau_{0.025}^{R=1} / \tau_{0.025}^{R=0}$	$\tau_{ul}^{R=1} / \tau_{ul}^{R=0}$	$\tau_{0.025}^{99.3}$ に対する比	$\tau_{ul}^{99.3}$ に対する比
9.3	1.19	1.10	1.00	1.00
10.8	1.25	1.15	0.91	0.95
12.4	1.28	1.20	0.86	0.89

である。

これらを引抜法による場合と比較してみると、プレストレス導入時の平均付着応力は引抜法による最大付着応力(表一2)よりもさらに大きくなっており、これは両者の付着機構が異なるためである。すなわち、前者のプレストレスを導入する場合は、緊張力の解放によりストランドはいくぶん収縮するため、ポアソン効果によって断面が膨脹してコンクリートを押し、またコンクリートは縦方向プレストレスにとまなう横方向ひずみを生ずる傾向があるので側圧、したがって摩擦抵抗を増大するが、後者引抜法による場合は、ちょうど前者の状態と逆になっている。

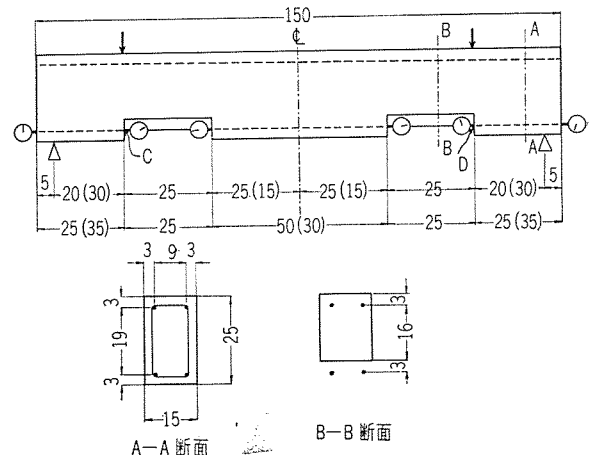
両者の場合のさびつけの効果についてみると、プレストレス導入時の平均付着応力比はさびていないものに対して全面がさびているものは前述のごとく 1.92 で約 90% の増加を示し、プレテンション部材の定着長を減らすためにストランド表面へのさびつけの効果は非常に大であるのに比し、引抜法における場合は $20\sim 30\%$ 程度の増加で前者よりかなり小さい。すなわち、ストランド表面へのさびつけは 'Prestress Transfer Bond' の増強に非常な効果を発揮するが、いわゆる 'Flexural Bond' の増強には、さほどの効果はないのではないと思われる。

表一4の右欄には $\phi 9.3\text{ mm}$ ストランドに対する $\phi 10.8\text{ mm}$ および $\phi 12.4\text{ mm}$ ストランドの平均および最大付着応力比が示されており、ストランド径が大きくなるほど付着強度が減少する傾向がある。

3) 埋込み長と付着強度との関係 本引張試験ではストランドの埋込み長と付着強度との関係については行なわなかったが、非常に興味深い問題であるので、当該関係論文に登載されている鉄筋、PC鋼線、ストランド等の埋込み長と付着強度との関係について考察してみよう。

図一3は各種鉄筋の付着強度を求めるために当研究室

図一3 曲げ試験法用供試体寸法



で ACI Committee 208 に準じて行なわれた曲げ試験供試体の形状寸法を示す⁷⁾。すなわち断面 15×25 cm, 長さ 150 cm で両端の埋込み長を 25 cm と 35 cm (カッコ内の数字) の 2 種とした。

本実験結果によると, 埋込み長 25 cm に対する埋込み長 35 cm の C, D 点 (図-3) の鉄筋のすべりが 0.05 mm 時における付着応力の比は $\phi 13$ mm 丸鋼の場合 0.77, $\phi 16$ mm 丸鋼の場合 0.56 となっており, 埋込み長が 25 cm から 35 cm と長くなれば付着強度は 60~80 % 減少している。

神山氏の著書⁹⁾によると, 引抜試験法によって行なわれた実験では, 鉄筋がすべり出すときの平均付着強度 τ_0 と埋込み長 l との関係は図-4 に示すごとくで, 埋込み長が大きくなるほど付着強度は小さくなるが, 埋込み長が 30 cm 以上では平均付着強度はほぼ一定となる傾向を示している。

Norman W. Hanson, Paul H. Kaar 氏等は各種径ストランドを用いたプレテンション部材のせん断スパンを種々変化させて曲げ試験を行ない, 各荷重段階で材軸方向に沿う数カ所の点でストランドのひずみを SR-4 ゲージで, また部材の両端でストランドのすべりをダイヤルゲージで測定し, ストランドがすべり出し始めたときの平均付着応力 (u_a) と埋込み長 (l_u) との関係 ($u_a = f_{sb} A_s / l_u \Sigma O$, ここに f_{sb} , A_s および ΣO はそれぞれ

図-4 埋込み長さ と 付着強度 (引張強度)

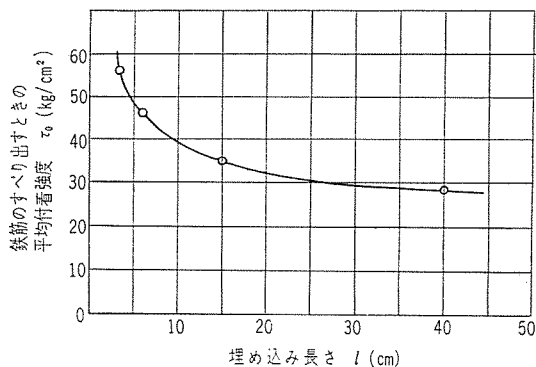


図-5 ストランド埋込み長さ l_u と平均付着応力 u_0 との関係

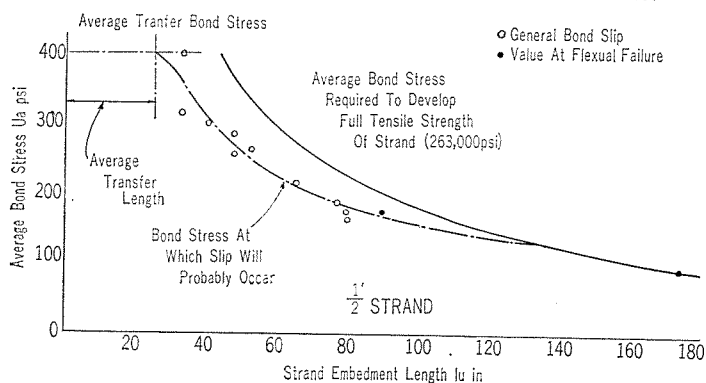
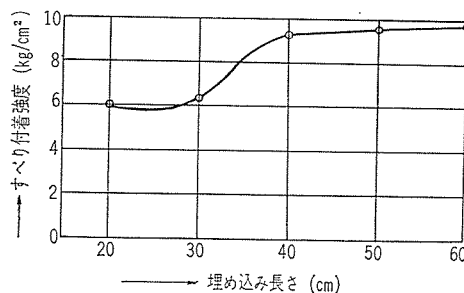


図-6 埋込み長さ一すべり付着強度曲線 (径 5 mm)



ストランドがすべり出したときの最大引張応力, 断面積および周長) を求めた。その実験結果の一例を示すと 図-5 のごとくで, プレストレスされたはり試験と引抜試験とでは応力状態はかなり異なるが, 図-4 の関係と同様な傾向を示している。

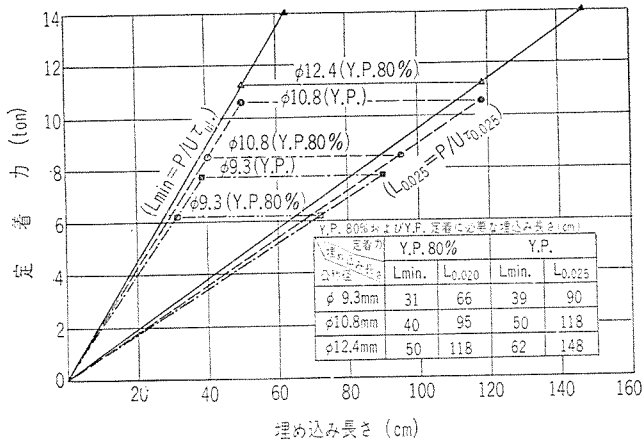
以上二, 三の実験結果ではすべて埋込み長が大きくなるほど平均付着応力度は減少しているが, 水野, 渡辺氏等による $\phi 5$ mm の PC 鋼線を用いた 図-3 型の曲げ試験結果では 図-6 に示すように埋込み長が長くなれば, 最大平均付着強度は逆に増大している。すなわち埋込み長が大きくなれば, 「自由端ですべり出すときの平均付着強度」は減少するのに反し「最大平均付着強度」は増大することになるが, この点についてはさらに研究する必要があるのではないかとと思われる。

引張試験法および, ばりの曲げ試験法による付着強度について述べたが, 一般に前者による付着強度は後者による付着強度よりも大きい, l/ϕ (l : 埋込み長, ϕ : 鋼材径) が同じであれば両者の間には比例関係が成立するという⁹⁾。

4) 埋込み長と可能定着力との関係 当引張試験では埋込み長をすべて 15 cm としているため, 埋込み長と定着力の関係を求めることはできなかったが, 各種ストランドの降伏荷重あるいは許容引張力をすべり付着抵抗により定着しようとする場合, どれほどの埋込み長があればよいかの大体の目安をうるため, 上記 3) で述べたように, 埋込み長が変れば平均付着応力も変化する

ものであるが, 一応変らないものとして求めてみると 図-7 のようになる。図-7 には自由端におけるストランドのすべりが微小な場合, すなわち 0.025 mm すべりまでの平均付着応力 $\tau_{0.025}$ ($R=0$) を用いたときの引張力 P を定着するように必要な埋込み長 L との関係 ($L_{0.025} = P/U\tau_{0.025}$) および最大付着応力 τ_{ul} ($R=0$) を用いた場合の P と L との関係 ($L_{min} = P/U\tau_{ul}$) が示されている。同図中表に上記仮定より求めた各径ストランドの降伏荷重 ($Y.P$) および $Y.P$ の 80% の力を定着するに必要な最小埋込み長 (L_{min}) および自由端

図-7 埋込み長さと可能定着力 $\phi 12.4(Y.P.)$



でのすべりを 0.025 mm 程度におさえた場合の埋込み長さ ($L_{0.025}$) を示す。例えば $\phi 9.3$ mm ストランドの Y.P. の 80% の引張力を定着するのに必要な最小埋込み長は 31 cm, 自由端でのすべりを微小におさえる場合は 66 cm と推測される。

すなわち, $\phi 9.3$ mm ストランドの場合, 埋込み長が 30 cm 程度あれば, 静的荷重 6.20 t (=0.8 Y.P.) を定着することはできるが, 同荷重が静的にも持続した場合, ストランドはコンクリート中を徐々に滑動し付着面積の減少により定着の機能が失われるので, 安全な定着のためには 66 cm 以上埋込み長をとる必要がある。この場合, 載荷端から 30 cm の部分で引張荷重の大半を負担し, 30 cm 以上の部分では 30 cm の部分で定着された残余の力を定着するとともにストランドの過剰な滑動を防ぐ安全性を高めることになる。

しかし実際の場合には動的くり返し荷重が加わるので, ストランドがくり返し荷重によって滑動が進まないように, さらに埋込み長を長くする必要があるであろう。

札幌九条橋に用いられた扇状定着法によるアンカーブロックでは $\phi 3/8$ " (9.3 mm) ストランドが 120 cm 埋込まれており¹¹⁾, この場合 1 本の設計緊張力を降伏荷重の 80% とすれば, 静的荷重に対して最小埋込み長は 31 cm であるので約 4 倍の安全率が見込まれていることになるが, しかしこの場合, 非常に多くのストランド (440 本) が埋込まれており, ストランド群としての定着性が問題であり, 1 本だけのストランドの場合と若干異なるであろう。

3. 引張法による付着試験

引張試験法ははり型試験法より簡単でしかも引抜きあるいは押抜き試験法よりも, はりが曲げを受けた場合に生ずる鋼材とコンクリート間の付着機構に近い状態をよりよく再現できるようによく用いられる方法であり, 本実験は当引張試験法により, ストランド径, ストランドとコンクリートとの断面積比 (以下鋼材比 ρ と記す) コンクリート強度等の諸要因の主としてひびわれ発生後の付着性状, とくに最大付着強度におよぼす影響を調べる目的で行なわれた。以下実験方法, 実験結果につき簡単に述べる。

(1) 使用材料

ストランドは $\phi 12.4$ mm および $\phi 10.8$ mm の 2 種で表面状態は全然さびていないものが用いられた。使用セメントは早強ポルトランドセメントで, コンクリートは $w/c=35\%$ 重量配合比 1 : 1.33 : 2.18 で材令 4 日予定圧縮強度は 300 kg/cm^2 である。試験時材令を変化させて圧縮強度の影響を調べた。

(2) 供試体および実験方法

供試体は RC および PC 供試体の 2 種で, RC 供試体はコンクリート断面の中央にストランドを無応力のまま

表-5 実験結果

供試体番号					試験時のコンクリートの性質			$P_{cti} (t)$	$\sigma_{cti} (\text{kg/cm}^2)$	$\tau_{mul} (\text{kg/cm}^2)$	ひびわれ数 r (個)
ϕ (mm)	No.	$A_c (\text{cm}^2)$	$\rho (\%)$	$\sigma_c (\text{kg/cm}^2)$	$E_c (\text{kg/cm}^2)$	$K_{ct} (\text{kg/cm}^2)$					
RC	12.4	I	10×10	0.93	293	×10 ⁵ 3.42	26.4	2.210	21.0	19.3	1
		II	7.5×7.5	1.65				1.500	24.0	19.0	1
		III	10×10	0.93	357	3.66	28.1	2.500	23.9	19.5	1
		IV	7.5×7.5	1.65				1.530	24.8	18.7	1
	10.8	V	10×10	0.71	397	3.73	32.5	1.830	17.6	19.8	1
		VI	7.5×7.5	1.25				0.830	13.8	21.6	2
		VII	5×5	2.83				0.400	13.9	23.8	4
PC	12.4	VIII	10×10	0.93	350	3.08	28.5	3.000	28.6	13.9	3
		IX	7.5×7.5	1.65				1.560	25.6	15.7	4
	10.8	X	10×10	0.71	285	2.72	25.9	2.200	20.6	10.4	3
		XI	7.5×7.5	1.25				1.480	22.1	14.8	4

配置したもので、PC供試体はストランドを緊張した状態でコンクリートを打設したものである。供試体の形状寸法はRCの場合 $5 \times 5 \times 50$ cm, $7.5 \times 7.5 \times 50$ cm および $10 \times 10 \times 50$ cm の3種で、PCの場合 $7.5 \times 7.5 \times 150$ cm および $10 \times 10 \times 150$ cm とした(表-5)。

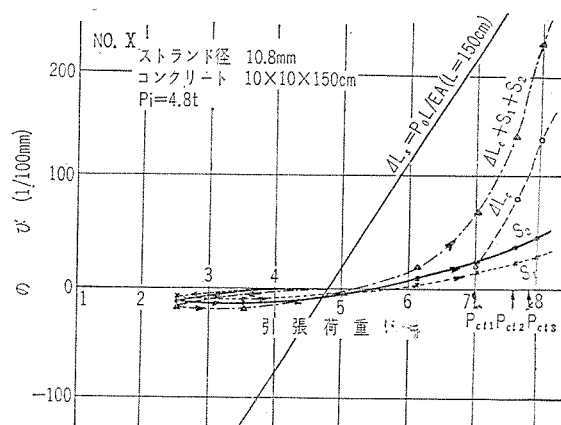
実験方法は、まずRC供試体の場合、リレー式万能試験機で供試体コンクリートの両端に露出したストランドを両端から引張った。0.2 t の荷重段階で引張ったが、各荷重段階ごとにコンクリート供試体両側面および上下面に材端から 5 cm 間隔で貼付された電気抵抗線ひずみ計で軸方向ひずみを、また Huggenberger 型ひずみ計でひびわれ巾を測定した。また両材端においてストランドとコンクリートとの相対変位および、ひびわれ巾をもふくめた供試体コンクリートの全変形量をダイヤルゲージ (1/100 mm) で測定した。

PC供試体は緊張台にストランドを所定の引張力で緊張しておき、コンクリート打設後所定の強度に達したとき、ストランドの片端から緊張をゆるめてコンクリート断面にいったんプレストレスを導入したのち、再びストランドを緊張してコンクリートに引張応力を生ぜしめた。この場合もRC供試体と同様コンクリートとストランドとの相対変位、ひびわれ巾、供試体コンクリートの全変形量を各荷重段階で測定した。

(3) 実験結果および考察

実験結果を表-5 に示す。図-8 および 図-10 にそれぞれRC供試体 No. I およびPC供試体 No. X の両材端におけるコンクリートとストランドとの相対変位

図-10 荷重-のび曲線



S_1 および S_2 , また供試体コンクリートののび (ひびわれ発生後はひびわれ巾をもふくむ) の測定結果を示す。また同図中にはコンクリートで被覆されていない裸のストランドの荷重-のび曲線 ($P_0 \sim \Delta L_s$) をも合わせ示されている。図-9 に供試体 No. I の荷重と平均付着応力 τ_m , コンクリート断面に生ずる平均引張応力 σ_{ctm} との関係を示す。これら τ_m および σ_{ctm} は次のようにして求められたものである。

いまコンクリートを巻いたストランドと巻かないストランドの全体ののび (もとの長さともに L) を等しくした場合 ($\Delta L_c + S_1 + S_2 = \Delta L_s$) の両者の引張力をそれぞれ P_c および P_s とすると、図-8 から明らかなように $P_c > P_s$ で、両者の差 $\Delta P_c = P_c - P_s$ はコンクリートとストランド間の付着力によって生じたものであり、平均付着応力 τ_m と付着力 ΔP_c との関係は次式で表わされる。

$$\Delta P_c = U \int_0^z \tau(x) dx = \tau_m \cdot Uz \dots\dots\dots (1)$$

ここに U はストランド周長、 $\tau(x)$ は材端から距離 x 点における付着応力、 z は材端から $\tau(x) = 0$ なる点までの距離である (ひびわれ発生後はひびわれによって分割された部分について同様に考えればよい)。

したがって平均付着応力 τ_m は上式より

$$\tau_m = \Delta P_c / Uz \dots\dots\dots (2)$$

となり、 ΔP_c は $P_0 \sim \Delta L_s$ 曲線と $P_0 \sim (\Delta L_c + S_1 + S_2)$ 曲線の測定結果より簡単に求めることができるが、 z は $\tau(x)$ 分布を知らなければ求めることはできない。しかし本実験で用いられたRC供試体のように材長が小さい場合 ($L = 50$ cm), z の値が問題になるのは引張荷重 P_0 が非常に小さい場合であり、ある程度 P_0 が大きくなれば $\tau(x) = 0$ となる位置は供試体の中央部に達している (これは電気抵抗線ひずみ計で測定された軸方向ひずみ分布が中央部で最大値を有していたことから明らかである)。したがって本実験のように主としてひびわれ発生

図-8 荷重-のび曲線

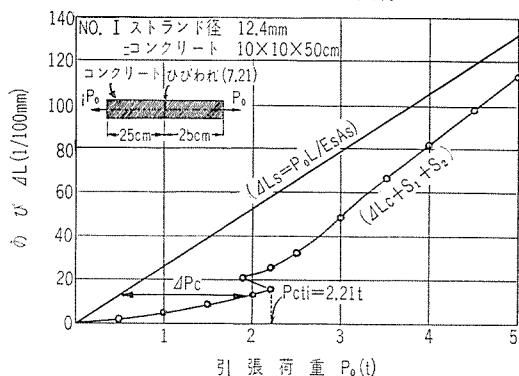
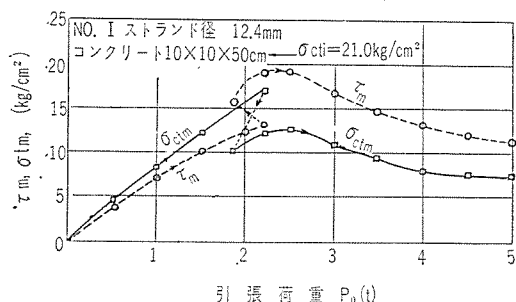


図-9 P0 ~ τm, σctm 曲線



時あるいは発生後の付着応力を問題とする場合は、ひびわれ発生前は供試体長さの $1/2(z=L/2)$ 、ひびわれ発生後は平均ひびわれ間隔の $1/2(z=L/2(r+1))$ 、(r : ひびわれ発生数) として十分の精度を有するものと考えられる。

図-9 にコンクリートの平均引張強度 $\sigma_{ctm} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \sigma_{ct} dA_c$ (σ_{ct} : 考えている断面の任意位置における引張応力) は次の関係から求めた。すなわち、材端から z なる位置のコンクリート断面に生じた引張力 ($\sigma_{ctm} \cdot A_c$) は材端から z なる点に生じた付着力 $U \int_0^z \tau(x) dx$ に等しくなければならない。したがって σ_{ctm} は

$$\sigma_{ctm} = U \cdot Z \cdot \tau_m / A_c \dots \dots \dots (3)$$

より求めることができる。

ひびわれ発生前の供試体の中央断面に生ずる引張応力 σ_{ct}' は、中央断面でコンクリートとストランド間に相対変位がないことに注目して、また平面保持の仮定より σ_{ct}' は

$$\sigma_{ct}' = \frac{P_0}{A_c(1+np)} \dots \dots \dots (4)$$

(ここに $n = E_s/E_c$, $p = A_s/A_c$)

となり、材端における引張力 P_0 より簡単に求められる。

表-5 に初ひびわれ荷重 P_{cti} を換算断面積 $A_c(1+np)$ で除した引張応力 σ_{cti} を示している。また $P_0 \sim \tau_m$ 曲線から求めた最大平均付着応力 τ_{mul} も表-5 の右端に示す。

以上のようにして求めた諸値の相互関係についてつぎに若干の考察を行なう。

1) 荷重～のび曲線

PC 供試体 No. I では両端での引張荷重 $P_0 = 2.210$ t で供試体の中央にひびわれが生じ、その後の荷重増加に対してひびわれは発生しなかった。荷重～のび曲線 $P_0 \sim (4L_c + S_1 + S_2)$ はすでに図-8 に示したように、ひびわれ発生までは $P_c - P_s = \Delta P_c$ は P_0 の増加とともにほぼ直線的に増大し、ひびわれの発生と同時にひびわれ付近のコンクリートとストランドとの相対変位が生ずるため、コンクリートの全のび ΔL_c (主としてひびわれ巾) が増大するので逆に ΔP_c は減少している。しかし平均付着応力 τ_m はひびわれが発生しても必ずしも小さくなるのではなく、No. I 供試体ではむしろ増大している(図-9)。これはひびわれが生ずることにより、付着応力分布 $\tau(x)$ が新たに再編成され、また分布形 $\tau'(x)$ がもとの分布形 $\tau(x)$ と異なり、 $2/L \int_0^{L/2} \tau(x) dx < 4/L \int_0^{L/4} \tau'(x) dx$ になったためと考えられる。ひびわれ発生後の P_0 の増加に対し、再び ΔP_c は増大しその後は徐々に減少し $P_0 \sim \Delta L_s$ 曲線に漸近し

てゆく傾向を示す。すなわち、コンクリートとストランドとの相対変位がある程度増大したときに付着抵抗が最大になり、その後の相対変位の増加に対してはストランド表面のコンクリートのせん断破壊が生じ、付着強度が減少してゆく。

つぎに PC 供試体の例をみると、No. X 供試体はあらかじめストランドを 4.8 t の力で緊張しておきコンクリートを打設し、コンクリートが所定強度に達したとき、ストランドの片端からオイル ジャッキで 2.5 t まで緊張力をゆるめて、いったんコンクリート断面にプレストレスを導入したのち再び緊張したもので、 $P_0 = 7.0$ t のとき初ひびわれがほぼ中央断面に生じ、7.6 t および 7.9 t で中央断面をはきんで両側にひびわれを発生した。このときの $P_0 \sim (4L_c + S_1 + S_2)$ 曲線の状況はすでに図-10 に示したごとくである。図-10 から明らかのように引張力 P_0 を増大する場合は、RC 供試体の場合と同様な傾向を示し、 ΔP_c はいったん大きくなって再び減少してゆくのに反し、プレストレス導入の場合には付着力 ΔP_c は急激に増大している。これは 2. ですでに述べたように両者の定着機構の相違から生ずるものである。

2) 平均引張強度、最大平均付着強度

初ひびわれ発生時コンクリート断面に生じた引張応力 σ_{cti} (表-5) についてみると、一般に鋼材比 p が大なるほど σ_{cti} は大きくなっている。供試体 No. V~VII では σ_{cti} はひびわれ係数 K_{ct} よりかなり小さくなっているが、これはストランドがコンクリート断面の中央に正確に配置されていなかったために曲げが生じたのではないかと思われる。

ひびわれ発生後の平均引張応力 σ_{ctm} は、供試体 No. I の場合(図-9)、その最大値が 12.5 kg/cm^2 で、 $P_0 = 5$ t ではわずか 7 kg/cm^2 程度に減少しており、また、ひびわれ数の多い(4個) No. VII 供試体ではひびわれ間のコンクリートの平均引張応力は非常に小さく、割裂係数 K_{ct} の約 $1/4$ 程度である。これはひびわれが十分入ったあとでは、ひびわれ間のコンクリートの引張りに対するストランドの協力の度合いが非常に低下することを意味しているものと思われる。

$P_0 \sim \tau_m$ 曲線から求めた最大平均付着応力 τ_{mul} は表-5 に示したが、本実験の範囲内では、コンクリート強度、鋼材比 p の大なるほど τ_{mul} は大きくなる傾向を示しているようであるが、顕著な差はなく、大体 20 kg/cm^2 前後の値となっており、引抜試験法より得られた最大平均付着応力(表-2 $R=0$) よりかなり小さく約半分程度である。すなわち、引張試験においてはストランドとコンクリート間の相対変位の増大に対し、ほとんど τ_m の増

加がないのに対し、引抜試験ではストランドのすべりがかなり大きくなるまで付着応力は増大しており、両試験法におけるコンクリートの応力状態はちょうど逆で前者が引張り、後者が圧縮、またストランドの変形状態もいくぶん異なるためであろう。

RCおよびPC供試体についてみると、PC供試体の τ_{mul} はかなり小さくなっており(表-5)、これはセメントの種類、養生方法、実験装置の精度等もその原因とも考えられるが、PC供試体ではプレストレス導入後再び緊張したため、すなわち正負の力を加えたためのボンド破壊がより大きく影響しているのではないかと思われる。

4. む す び

以上 $\phi 9.3$, $\phi 10.8$ および $\phi 12.4$ mm 7本よりストランドの付着強度を引抜試験法および引張試験法により検討した。

得られた結果を要約すると、

1) 引抜法におけるストランドのすべり付着強度曲線はPC鋼線あるいは普通丸鋼と異なり、相当大きなすべりまで付着強度は増大し、最大付着強度は丸鋼と異形鋼棒(SSD 49)の中間にあり、さびがない場合29.3~73.8 kg/cm²、全面さびの場合37.8~76.0 kg/cm²で平均値はそれぞれ47.2 kg/cm² および54.4 kg/cm² である。

2) 付着強度へのさびつけの効果はTransfer Bondにおける場合ほどの効果はなく、約20%増し程度である。

3) ストランドの埋込み位置上下の付着強度の差は、普通丸鋼の場合よりも緩和され、さびつけを行なうとその差はさらに小さくなる。

4) 両試験法による最大平均付着強度の差は非常に大きく、引張試験の方が約50%小さく、また正負の力を加えると付着破壊は急速におこる。

以上のような、実験装置の精度、養生方法の均一性、供試体寸法の選び方にも問題があり、必ずしも正確な比較が行ない得たとはいえない。

ストランドはプレストレスコンクリート部材の緊張材として非常に多くの利点をもっており、今後ますます利用されるであろうが、またその使用上難解な問題も起こってくるであろう。とくにコンクリートとストランド間の相対変位が大きい場合とか、正負の交番応力が生ずる箇所にストランドが用いられた場合、付着抵抗は急激に低下してゆくのではないかと予想されるが、本実験がこれら研究の基礎資料ともなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) E.H. Ratz, M.M. Holmjansky, V.M. Kolner: "The Transmission of Prestress to Concrete by Bond", Report of 3rd Congress of FIP 1958.
- 2) G.D. Bose: "An investigation of transmission length in pre-tensioned concrete", Research Report, No. 5; August, 1958.
- 3) 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研究, 材料試験, 第8巻, 第69号, 昭34.
- 4) 岡田 清, 藤井 学, 小沢恒雄: 「PCストランドの定着長に関する研究」セメント技術年報 XVII, 昭38
- 5) J.L. Bannister, M. Sc., A.M.I. Struct. E.: "Characteristics of Strand prestressing Tendons" Structural Engineer, March. 1959.
- 6) 神山 一: 「鉄筋コンクリート」コロナ社, 昭36.
- 7) 岡田 清・富沢年道・前田依彦: 「異形鋼棒鉄筋コンクリートに関する2,3の実験」土木学会第17回年次学術講演会講演概要IV, 昭37.
- 8) Norman W. Hanson and Paul H. Kaar: "Flexural bond tests of pretensioned prestressed beams", J. of ACI, January, 1959.
- 9) H.J. Gilkey: "The Bond between Concrete and Steel", J. of ACI, Vol. 35 Sept. 1938.
- 10) 水野高明・渡辺 明: 「PC鋼線および鉄筋の付着について」プレストレスコンクリート, Vol.4, No. 4, 1962.
- 11) 湯田坂益利: 「札幌南九条橋(仮称)の設計施工について」プレストレスコンクリート, Vol. 5, No. 2, 1963.

1963.10.25・受付

第4回年次学術講演会講演概要の領布について

2月10日、生命保険協会構堂で行なわれた第4回年次学術講演会は非常に盛況で、会員各位の御協力を深く感謝いたします。

当日講演された19編の講演要旨を収録した「講演概要集」を残部の許すかぎり次の要領で領布いたします。きわめて残部が少ないため、希望者は至急お申込み下さい。先着順に締切ります。

記

体 裁: B5判 42ページ オフセット印刷

頒 価: 250円(送料とも)

申込要領: 前金で御注文下さい(振替口座 東京 62774番)