

PC 鋼より線の付着・定着について

松 本 進
(受理 昭和54年5月31日)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DEVELOPMENT BOND AND ANCHORAGE BOND OF PC STRANDS

Susumu MATSUMOTO

This paper described the results of experiments on the development bond and anchorage bond of PC strands, especially in the case that PC strands were embedded into cast-in place concrete and were not prestressed. Based on the test results, the mechanical behaviors of the development bond and anchorage bond of PC strands was clarified to a certain degree.

1. 緒 言

近年、プレキャスト PC 素材を補強材兼型枠材として利用したコンクリート合成構造の基礎的な研究がなされ、それぞれに良好なる成果が収められている。この種の合成構造の特長は施工の急速化、省力化ならびに経済化が図れることである。しかしながら、この種の合成構造の実用化には、設計に取り入れる基礎的な資料—特に構造細目的な事項等が明らかにされてなく、これらの点が障害となっている。

本研究はこの点に鑑みて、特に PC 鋼材を直接場所打コンクリートに無応力で埋込んだ場合に生じる問題の中で、PC 鋼材の付着および定着の問題を取上げたものである。従来の PC 鋼材の付着・定着の問題はプレストレストコンクリート構造物に利用されている関係上、プレストレスの伝達長の問題で数多く研究されていて、それらの成果は土木学会や建築学会の指針等に反映されている。従来の研究では PC 鋼材にはプレストレスが導入されるため、鋼材のポアソン効果が期待でき、また、コンクリート強度も 500kg/cm^2 程度とかなり高いため、これらの点が本研究で行うようなコンクリート合成構造の場合とかなり相異してくることが考えられる。

本研究では、3種類の PC 鋼より線を対象として、ASTM に準じた引抜き試験を行うことにより付着性能の検討を詳細に行い、また、PC 鋼材の定着長を種々に変えた合成ばり供試体を製作し、曲げ試験を行う

ことにより定着性能を検討したものである。これらの実験結果に基づき、PC 鋼材の定着長について合理的な設計方法の一提案を行うものである。

2. 実験供試体ならびに実験方法

図-1 は PC 鋼より線の付着性状を検討した供試体である。断面は $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ の立方コンクリート供試体であって、これの中心に鋼材を埋め込んだものである。なお、供試体の製作に当っては鋼材を水平に設置していわゆる横打ちで製作した。使用した鋼より線は2本より線 $\phi 2.9\text{mm}$ 、7本より線 $\phi 10.8\text{mm}$ および7本より線 $\phi 12.4\text{mm}$ の3種類であり、それぞれの降伏点応力度は $15,000 \sim 17,000\text{kg/cm}^2$ 程度のもので、弾性係数は $2.02 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 程度のものである。(表-

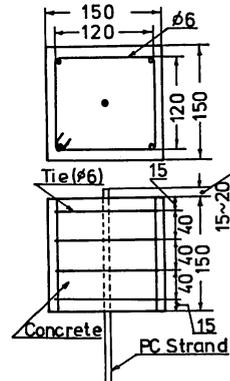


図1 引抜き試験供試体

表 1 使用鋼材の物理的性質

鋼材の種類	呼び径	公称断面積	引張荷重	降伏荷重
SWPR1	2.9mm	13.21mm ²	2,600kg	2,300kg
SWPR7A	10.8	69.68	12,200	10,400
SWPR7A	12.4	92.90	16,300	13,900

1参照) また、使用したコンクリートは圧縮強度が約 300 kg/cm² のものと約 500 kg/cm² の2種類であって、表-2 にこれらのコンクリートの示方配合ならびに力学的性質を示す。付着性状を検討した試験の方法は ASTM に準じた引抜き試験方法であって、鋼材の自由端に1/100のダイヤルゲージを設置して、その滑動量を各荷重毎に計測を行った。

図-2 は PC 鋼より線の定着性能を検討した合成ばりであって、プレキャスト PC 板 (断面 5 × 20 cm, 長さ 130cm, 有効プレストレス 193kg/cm², 使用鋼材 7 本より線 φ10.8mm 2 本) の上に場所打ちコンクリートを打継いで T 形コンクリート合成ばりとしたものである。供試体の種類は場所打ちコンクリートに埋込んだ鋼材の定着長さを 15φ~32.4φ (φ: 鋼より線の平均径) の範囲で 4 種類に変化させたものと、鋼材の

端部を一部分直角に折曲げたものの計 5 種類である。なお、供試体には定着部を一部スターラップで補強したものと補強していないものがある。また、場所打コンクリートとプレキャスト PC 板との打継面がせん断力により破壊しない様に、異形鉄筋 D10(SD35) をスターラップとして 10cm ピッチで場所打コンクリート部分のみに配置した。実験に使用した PC 鋼より線は前記したものと同じであり、またコンクリートについては場所打コンクリートは圧縮強度が 397kg/cm² 程度のものであり、プレキャストコンクリートのそれはほぼ 500kg/cm² 程度のものであった。これらのコンクリートの示方配合ならびに力学的性質を表-2 に併せて示す。試験は 図-3 に示した様にはリスパンが 140 cm で中央集中一点荷重である。荷重の方法は設計荷重 (6 t) までは 0.3t ピッチで 3 回の繰返し荷重を行い、4 回目の荷重時で破壊に至らしめた。測定としては 図-3 にも示したように歪ゲージにより各点の歪を、1/100 mm ダイヤルゲージにて荷重点下のたわみを計測し、供試体端部より約 10mm 程度突出させた鋼より線に 1/100mm ダイヤルゲージを設置して、滑込み量を計測した。なお、コンクリート表面に発生

表 2 使用コンクリートの示方配合等

コンクリートの種類	最大寸法 (mm)	水セメン (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					物理的性質(kg/cm ²)	
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	圧縮強度	弾性係数
場所打	20	33	46	7.5	2	232	422	717	841	-	284	2.11 × 10 ⁵
場所打	20	40	40	4.5	2	227	569	569	853	6.14	472	2.72
プレキャスト	20	36.8	42	7.0	-	167	470	709	1022	5.64	451	2.77

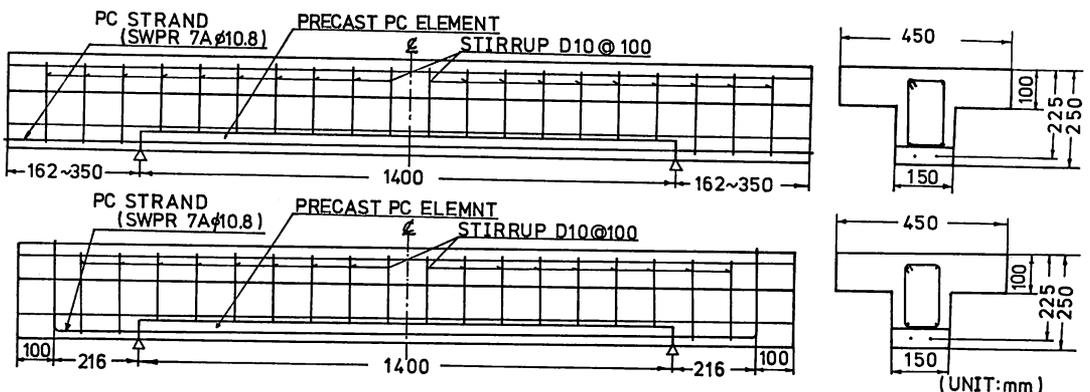


図 2 定着試験用合成ばり供試体

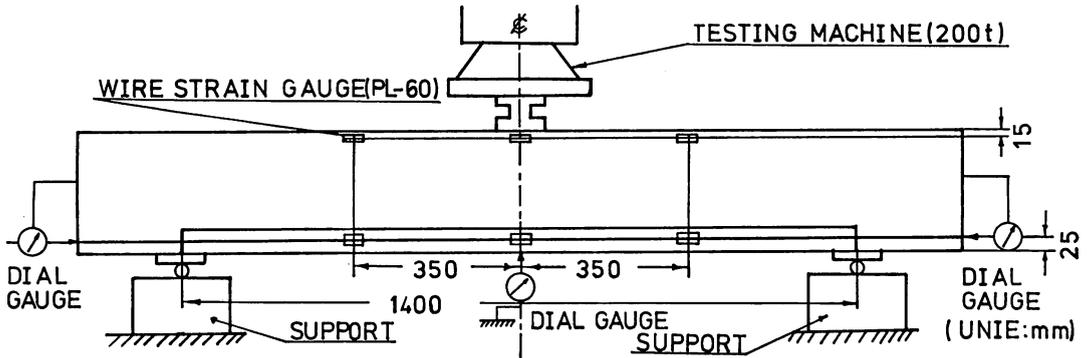


図3 定着試験方法

表3 引抜き試験結果

コンクリートの圧縮強度	滑り量 (mm)	平均付着応力度 (kg/cm ²)		
		SWPD 1φ2.9	SWPR 7A10.8	SWPR 7A12.4
284kg/cm ²	始め	20.	55.4	39.9
	0.1	21.	97.9	62.5
	0.25	19.	104.4	61.1
	最大	25.	115.1	62.8
472kg/cm ²	始め	37.	86.0	61.5
	0.1	41.	99.5	89.6
	0.25	35.	112.9	94.1
	最大	41.	113.4	95.4

※ 表中の値は供試体3個の平均である

するひびわれ等についても肉眼により詳細に観察した。

3. PCより線の付着性状

表-3は引抜き試験より得られた結果を各滑込み量に対する平均付着応力度と最大付着応力度でコンクリートの圧縮強度が2種類の場合について取りまとめた総一覧である。なお、PC鋼より線の場合平均付着応力度を算定するに当って付着面積の取扱いがより合せピッチならびにより合せ本数によって異なると考えられ、この点について検討した結果、より合せピッチおよびより合せ本数を考慮して求めた付着面積と鋼材面積と等価な丸鋼として求めた付着面積とは計算上1%以下の差しか認められなかったため、本実験では便宜的に後者の方法で次式によって全ての結果を整理したものである。

$$\tau = P / \pi \phi l \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 τ ：平均付着応力度 (kg/cm²)

P ：引抜き荷重 (kg)

ϕ ：鋼材断面積と等価な丸鋼とした時の直径 (cm)

l ：付着長さ (cm)

表-3よりコンクリートの圧縮強度が284kg/cm²から472kg/cm²と増加したことによる最大付着応力度の伸びは2本より線では1.66倍、7本より線φ12.4mmでは1.52倍となっており、コンクリート強度が1.67倍と増大したことに伴い、ほぼ同様の付着強度の増大が認められる。一方、7本より線φ10.8mmでは圧縮強度の増加に伴う付着強度の増大は全く認められなかった。

次に、鋼材の滑込み始めたときの平均付着応力度についてみると、コンクリートの圧縮強度が284kg/cm²

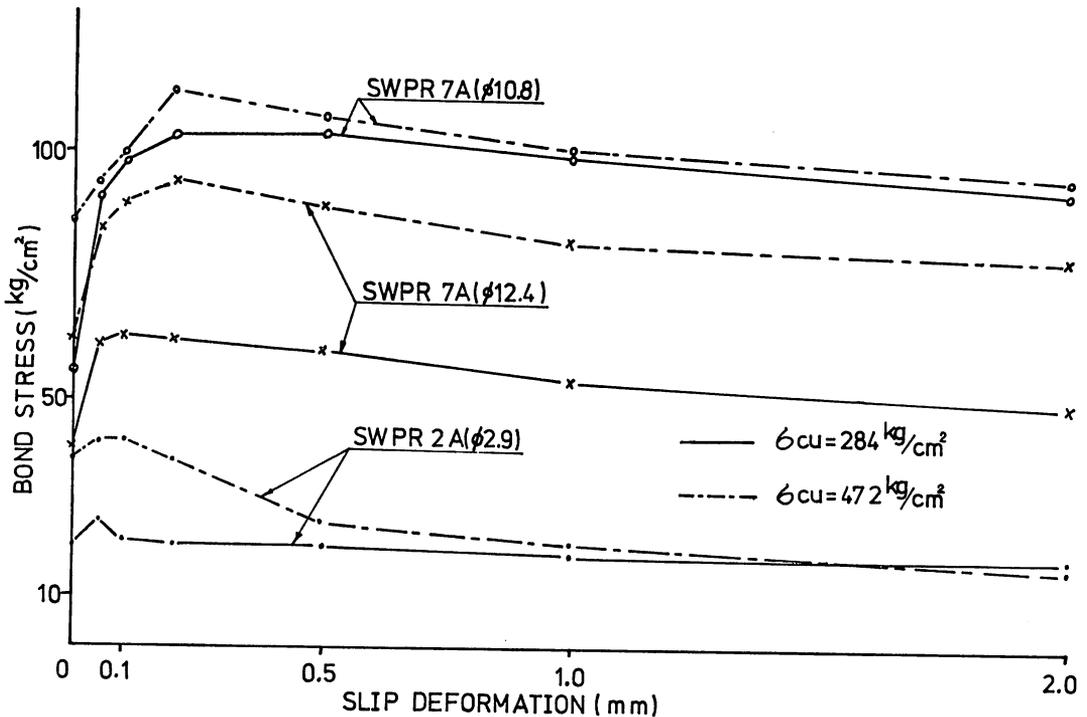


図4 PC 鋼より線の付着性状の一例

および 472kg/cm^2 のいずれの場合も最大付着応力度が大きければ滑り始めの平均付着応力度も大きいことが認められ、その大きさは2本より線 $\phi 2.9\text{mm}$ で $20.0\sim 37.2\text{kg/cm}^2$ 、7本より線 $\phi 12.4\text{mm}$ で $39.9\sim 61.5\text{kg/cm}^2$ および7本より線 $\phi 10.8\text{mm}$ で $55.4\sim 86.0\text{kg/cm}^2$ であった。さらに鋼材の滑込みが進行すると、2本より線 $\phi 2.9\text{mm}$ を除けば大体において滑込み量が $0.1\text{mm}\sim 0.25\text{mm}$ までは平均付着応力度の増大の傾向が認められるが、2本より線 $\phi 2.9\text{mm}$ では滑込み量が 0.1mm を越えると平均付着応力度の減少が顕著に認められる。

図-4 は上記した各滑込み量と平均付着応力度の関係の実測値の一例を示したもので、この点についてさらに詳細に観察してみると、いずれの鋼より線もある平均付着応力度に達するまでは滑込みの現象が認められず、この値を超えると滑込みが徐々に起り滑込み量が $0.1\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$ 程度で最大付着応力度が生じる。さらに、この $0.1\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$ 程度の滑込みを越えると、極めてわづかながら平均付着応力度の低下が生じ始め、その後極めて大きな滑込み変形が生じても極端な平均付着応力度の低下は認められなく、また異形鉄筋等で見受けられるコンクリートの割裂は全ての供試

体に認められなかった。なお、この鋼より線の引抜け時の様子を詳細にみてみると鋼より線がらせん状に回転しながら引抜けてゆくことが特徴的に認められた。

一般に異形鉄筋の場合、表面形状の相違による付着性能の差異についてはふしの間隔および鉄筋の中心軸に対するフシの傾斜角等によってその付着性を評価する研究が数多くなされてきて良好なる成果を収めている。これらの研究成果によればフシの間隔が適当な範囲で短かく、かつ傾斜角が大きいく程、付着性能が優れると報告されている。この様な観点から、鋼より線についても鋼より線のより合せピッチをフシの間隔に、より合せ角度を傾斜角として、各より線の付着性能を詳細に検討してみた。表-4 は各より線のより合せピッチならびにより合せ角度を実測して示したものであって、それぞれの値は2本より線 $\phi 2.9\text{mm}$ では40

表 4 使用鋼より線の表面形状

鋼材の種類	呼び径	より合せピッチ	より合せ角度
SWPR2A	2.9mm	40mm	4.2°
SWPR7A	10.8	20	7.7
SWPR7A	12.4	25	7.0

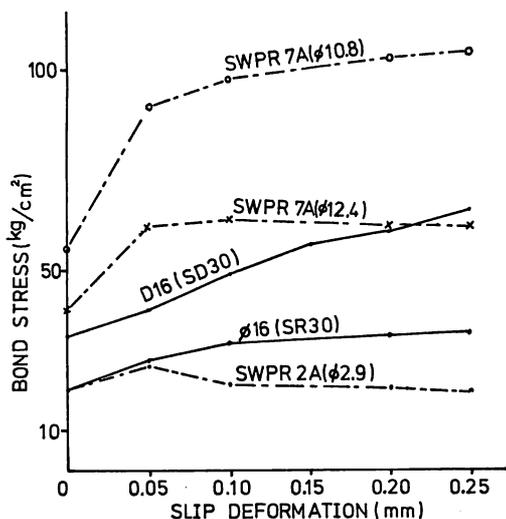


図5 付着性状の比較

mm-4.2°, 7本より線 φ 10.8 mm では 20 mm-7.7°, 7本より線 φ 12.4mm では 25mm-7.0°であった。これより、より合せピッチは7本より線 φ 10.8 mm が一番小さく、より合せ角度は逆に一番大きな値となっており、このことから、7本より線 φ 10.8 mm の付着性能が一番優れていると考えられ、最大付着応力度にしても変形状状にしてもこのことを裏付けているものと考えられる。

図-5 は実験に使用した鋼より線の付着性状を通常の異形鉄筋 (D16) および普通丸鋼 (φ 16) と比較した一例である。これより2本より線 φ 2.9mm については普通丸鋼に比べて付着性能が劣っている様に見受けられる。これは鋼より線の製作上、冷間引抜き加工を行うため、これを本実験の様に無応力の状態で使用する場合には鋼より線のより戻しが生じ、このため付着と性能が劣ったものと考えられる。しかしながら、7

本より線 φ 10.8mm および φ 12.4mm については2本より線の場合の様により戻しの影響も余り受けてないようで、付着性能も異形鉄筋と同程度もしくはそれ以上のものを有していることが認められる。

4. PC 鋼より線の定着性状

表-5 はPC鋼より線の定着長を種々に変えて、曲げ試験を行った結果の一覧を示したものである。この結果から、供試体 No. 4 および供試体 No. 5 には破壊に至るまで鋼より線の滑込みの現象は全く認められず、また実測の破壊モーメントも計算による破壊モーメントに対して102%~109%と耐力的にも十分であることが認められる。また、供試体 No. 2 および No. 3 は耐力的にも計算値の103%~114%と十分ではあるものの、破壊時において鋼より線の滑込みが認められ、特に、供試体 No. 1 にいたっては耐力的にも計算値の79%と不十分であり、鋼より線の滑込みも計算破壊モーメント67%で生じていることが認められる。いづれにしても、供試体 No. 1, No. 2 および No. 3 は鋼より線の定着長のとり方に問題があることが判る。そこでこの様な問題に対して、コンクリート合成ばり表面に生じた曲げひびわれ、およびたわみの観点から詳細に検討を行う。

図-6 はコンクリート合成ばり表面に発生した曲げひびわれを観察した結果を示したものである。同図より、供試体 No. 4 および No. 5 をみると、ひびわれ本数は6~7本程度で、ひびわれの生じ方もかなり均等であって、ひびわれの分布性状はかなり良好であることが認められる。一方、PC鋼よりの定着長に問題が認められた供試体の中で、特に供試体 No. 1 はひびわれの本数も2~3本とかなり少なく、開口したひびわれの幅も極めて大きく、ひびわれ性状の点から余り好

表 5 定 着 試 験 結 果

供 試 体	定 着 長	定着補強	実測破壊モーメント	計算破壊モーメント	実/計	備 考
No. 1	15φ	有	4.97 t·m	6.29 t·m	79%	4.20 t·m (67%) で急激にすべる
No. 2	20φ	無	7.18		114	6.83 t·m (109%) で急激にすべる
No. 3	20φ	有	6.48		103	6.48 t·m (103%) で急激にすべる
No. 4	32.4φ	有	6.83		109	破壊に至るまですべらず
No. 5	20φ + フック	有	6.41		102	破壊に至るまですべらず

※表中φは呼び径10.8mmである。

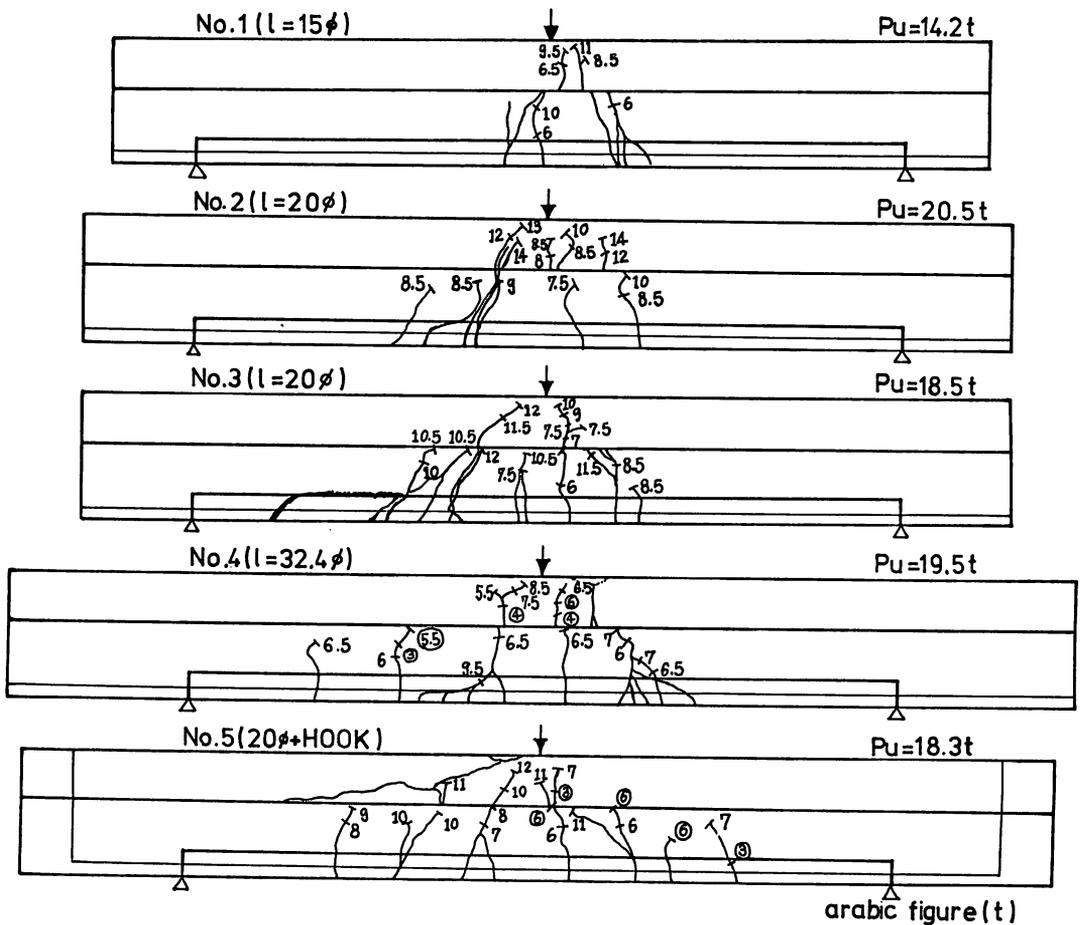


図6 合成ばり表面状発生した曲げひびわれの観測図

しくないことが認められる。また、供試体 No.2 および No.3 について、特に No.3 についてはひびわれ性状に関しては No.4 および No.5 と余り大差がないことが認められるが No.2 についてはひびわれ本数も少なく、ひびわれ性状の点からは若干好ましくないことが認められる。

図-7 は荷重点下におけるたわみの実測値の一例を示したものである。同図より、供試体 No.2, No.3 および No.4 のたわみ性状をみても、プレキャスト PC 素材にひびわれが生じるまでは極めて弾性的な挙動を示し、この間で数回の繰返し荷重を受けずも残留たわみは極めて少なく、復元性に優れていることが認められる。さらにプレキャスト PC 素材にひびわれが生じた後のたわみ性状は剛性の低下が生じるものの破壊に至るまでの変形はかなり弾性的であることが認

められる。このようなたわみ性状は弾性論で求めた計算値 (1) および (2) とほぼ良く合致していることが認められ、これら供試体が力学的には何等问题がないことを示していると考えられる。一方、供試体 No.1 のたわみ性状は供試体 No.2, No.3 および No.4 に比べて明らかに異っている。すなわち、数回の繰返し荷重を受けると残留たわみも極めて大きく、復元性に劣っていることが認められ、さらに、プレキャスト PC 素材にひびわれが生じた後のたわみ性状は計算値 (2) に比べ、たわみ量が大きくなり鋼材の滑込みの影響が見受けられる。

以上の実験結果の考察より、PC 鋼より線の定着長としては (1) 耐力の点、(2) 鋼より線の滑込みの点 (3) 力学性状の点から考えると、20D では (2) の点で若干不十分であるが、32.4φ あれば極めて十分

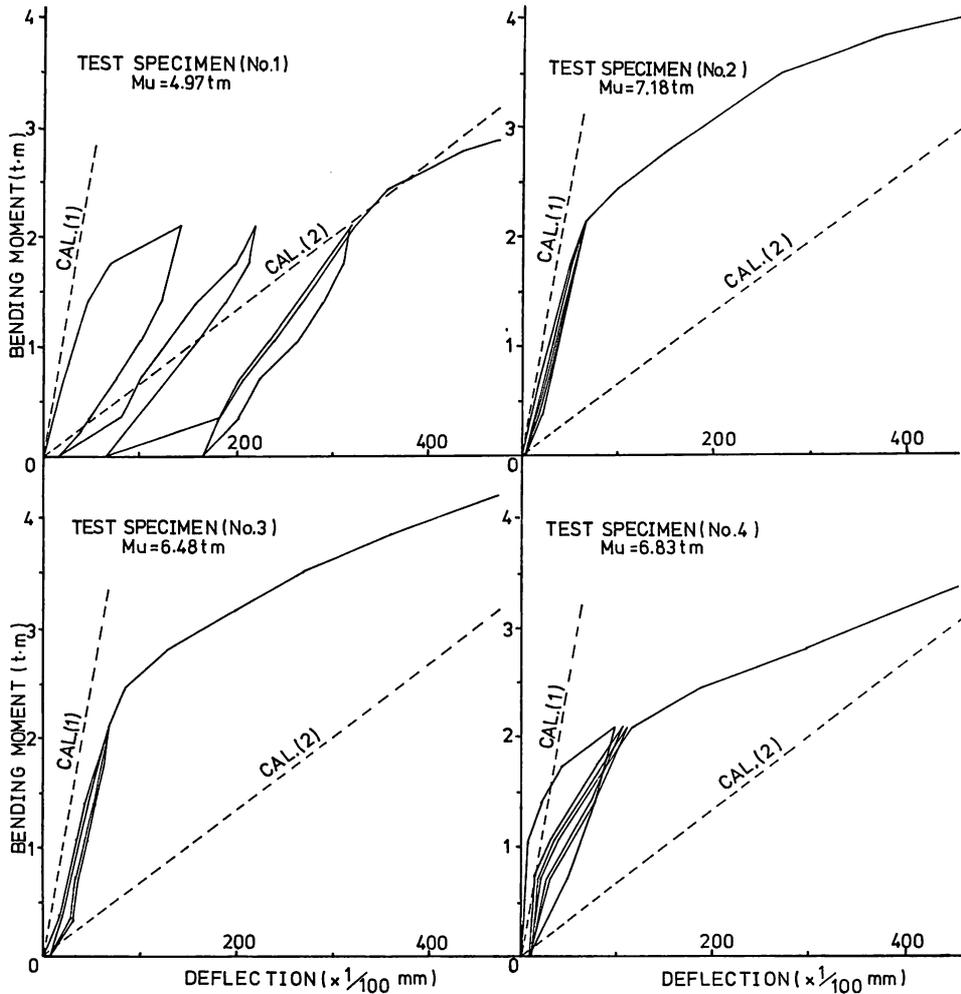


図7 合成ばりのたわみ性状の一例

であると考えられる。既往のPC鋼より線の定着長は25D程度あれば十分であると報告されている事実とも考え合わせると、PC鋼より線7本より線φ10.8mmの定着長としては25φとれば十分であろうと判断される⁶⁾。また、定着部に直角フックを設ければ、上記した(1)、(2)および(3)の点から、十分に直角フックの効果があると認められるわけで、この直角フックの受け持つ割合は異形鉄筋でも言われている程度の効果一すなわち1/4程度あるものと判断される。

5. PC鋼より線の定着に関する一考察

一般に、鋼材をコンクリートとの付着力によって定

着を行う場合には、鉄筋コンクリートの設計ではその定着長(*l*)の算定は次式で求められる¹⁾。

$$l = \frac{\sigma_{pa}}{4\tau_{oa}} \cdot \phi \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 τ_{oa} ：許容付着応力度 (kg/cm²)
 σ_{pa} ：PC鋼材の許容応力度 (kg/cm²)
 ϕ ：PC鋼材の呼び径 (cm)

PC鋼より線の定着長を上記の算定式に求めるに当たっては、 τ_{oa} の値を決定する必要が生じてくる。3章において7本より線φ10.8mmの付着性能は少なくとも異形鉄筋と同程度あることが認められたので、 τ_{oa} に関しては異形鉄筋と同程度の値を有させることは可能である。また、 σ_{pa} について、一般にはPC鋼

より線の引張応力度は鉄筋と比べると4～5倍程度大きい。この様な観点からPC鋼より線の定着長を(2)式を用いて計算すればその定着長は極めて大きくなり、不経済となる恐れが生じる。

そこで、本章ではこの点を解決する一つの方法として、終局強度設計法の観点から検討してみた。まず、4章で7本より線 $\phi 10.8\text{mm}$ の定着長は25 ϕ 程度とすれば良いことが明らかとなったので、これに2倍の安全度を持たせて定着長を50 ϕ (54.0 cm) とし、鋼材の引張強度を17,600kg/cm²として、この場合における付着応力度を求めてみると、87.2kg/cm²となる。この値は3章で示した圧縮強度が284kg/cm²のときの、PC鋼より線 $\phi 10.8\text{mm}$ の自由端滑込み量0.1mmの時の平均付着応力度に相当する。このことから、PC鋼より線の定着長を算定するに当たって、付着試験より得られた0.1mm滑込み量のときの平均付着応力度を用いれば、これによって求められた定着長は終局時に対して2倍程度の安全度を有させうることが考えられる。

一方、許容応力度設計法の観点から、再度PC鋼より線の定着長を考え直してみると、 τ_{oa} については異形鉄筋と同程度の割合で有させるものとすれば、土木学会コンクリート標準示方書ではコンクリートの圧縮強度が300kg/cm²時のそれは、18kg/cm²となっていて、これは付着強度のほぼ1/3程度であるので、PC鋼より線の場合にもこの考えを適用すると、 τ_{oa} は38.4kg/cm²となる。また、 σ_{pa} については土木学会PC設計、施工指針によれば i) $\sigma_{pa} \leq 0.70\sigma_{pu}$, ii) $\sigma_{pc} \leq 0.80\sigma_{py}$ (ここに σ_{pu} : 引張強度, σ_{py} : 降伏点応力度) としてあって、一例として $\sigma_{pa} = 12,000\text{kg/cm}^2$ を採る。これらの値を用いて、(2)式により定着長を求めてみると84cmなる。本方法で考慮したPC鋼より線は無応力で使用しているため、ポアソン効果が期待できないことおよびより戻しがあるため付着性能が劣ることが十分に考えられるのであって、従来のPC鋼より線の伝達長に比べれば、本方法で求めた定着長ははかり大きめの値を与えていることになるものの、かなり妥当性のある値であると考えられる。

6. 結 言

本研究はプレキャストPC素材で補強したコンクリート合成構造の活用を図る際に生じる問題の中で、特

にPC鋼より線は無応力で使用した場合の付着ならびに定着の問題を取上げ、実験的に詳細な検討を行ったものである。実験の数が少なく、確定的なことは言い難いが、実験の範囲から次のことが言えると思われる。

(1) PC鋼より線の付着性能はより合せピッチ、より合せ角度、およびより合せ本数によって影響を受けると考えられる。すなわち、7本より線ではより合せピッチが小さく、より合せ角度の大きい $\phi 10.8\text{mm}$ の方がより合せピッチの大きい、より合せ角度の小さい $\phi 12.4\text{mm}$ より付着性能が優れていることが認められた。また2本より線では上記のより合せ角度、より合せピッチおよびより合せ本数の影響の他により戻しの影響も加わるため、7本より線よりも付着性能が劣ることが認められた。また、7本より線の付着性能は異形鉄筋と同程度もしくはそれ以上の性能を有し、2本より線のそれは普通丸鋼と同程度もしくはそれ以下の性能を有していることが併せて確かめられた。

(2) PC鋼より線 (特に、7本より線 $\phi 10.8\text{mm}$) を場所打コンクリートに付着力で定着する場合にはその長さを25 ϕ 程度とすれば、鋼より線の滑込みも生ぜず、耐力的にも十分なものとすることができ、変形形状も極めて良好であることが認められた。また、鋼より線の一部にフックを設ければ、フックの受け持つ割合は全定着力の1/4程度であって定着長を短くできることも併せて確かめられた。

本研究は昭和52年度および昭和53年度の卒業研究において取り上げたものであって、堀切康二氏 (現大宮建設KK勤務) ならびに久保朝雄氏 (現建設省四国地建勤務) に負う所が多く、また実験の実施に当っては本大学前村政博技官の援助を賜った。ここに感謝の意を表します。また、本研究は昭和52年度および昭和53年度にわたって文部省科学研究費(試験研究1.285103)を受けたもので、ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，昭和49年。
- 2) 土木学会：プレストレストコンクリート設計・施工指針，昭和36年。
- 3) 建築学会：プレストレストコンクリート設計・施工規準・同解説，1961。
- 4) 土木学会：第2回異形鉄筋シンポジウム，コンクリートライブラリー，第14号，1965年12月。

- 5) 松本進：プレキャストP C素材で補強したコンクリート合成構造の力学的特性に関する基礎研究，土木学会論文報告集第246号，1976年2月。
- 6) 松本進：P C鋼より線の定着について，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第5部，昭和53年9月。
- 7) 足立他2名：P C鋼材の付着の影響について，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第5部，昭和53年9月。
-