

## ポストテンション PC 部材定着部の機能低下に関する研究

### Experimental Study on Malfunction of Anchorage Zone in Post-tensioned Prestressed Concrete Members

伊藤 忠彦\*  
Tadahiko Itō

熊谷 健洋\*\*  
Takehiro Kumagae

和田 高清\*\*\*  
Takakiyo Wada

磯 陽夫\*  
Akio Iso

土橋 吉輝\*\*\*\*  
Yoshiteru Dobashi

西山 直洋\*\*\*\*\*  
Naohiro Nishiyama

西 保\*\*\*\*\*  
Tamotsu Nishi

#### 要 約

本研究は、ポストテンションプレストレストコンクリートの耐久性について、従来あまり研究されていない定着部の機能低下に着目し、実験的研究を行ったものである。実験対象としたのは、グラウトを行うボンド方式のポストテンション部材である。

実験は、PC 鋼材の付着強度試験、伝達長試験、曲げ載荷試験の3種類を行い、定着機能低下後の部材端部のプレストレス減少区間（伝達長）を求め、既往のプレテンション部材の研究と比較した。

実験の結果、ノンブリージングのグラウト材を使用することで、従来のプレテンション部材より、伝達長はかなり短縮されることが判明した。特に丸鋼でその効果が高くなった。解放直後の伝達長は、丸鋼で23φ～26φ、異形鋼棒で19φ～22φ、より線で26φ～31φであった。

#### 目 次

- §1. まえがき
- §2. 実験方法
- §3. 実験結果と考察
- §4. まとめ

#### §1. まえがき

プレストレストコンクリート構造物（以下 PC 構造物

と称す）が日本で施工されて三十数年になる。近年、大深度地下開発・海洋開発・宇宙開発等の大規模プロジェクトが提案されている中で PC 構造物は、より過酷な自然条件下での使用と耐久性の向上が求められている。また、使用期間が数百年にもおよぶような構造物が計画され、今までにない長期的なオーダーでの耐久性が問題になってきている。たとえば、我が国の低レベル放射性廃棄物処分用ピットは耐用年数300年が予定されている。また、オランダの防潮堤（サージバリア）は PC 構造物として異例の耐用年数200年<sup>1)</sup>で建設されている。

PC 構造物が本来の機能を十分に発揮するためには、PC 鋼材がコンクリート中に確実に緊結定着されていなければならない。この定着作用はプレテンション部材ではコンクリートと PC 鋼材の付着力で、ポストテンション部材では定着装置によって行われている。したがって

\*技術研究所土木技術課

\*\*技術研究所先端技術研究課

\*\*\*技術研究所建築技術課

\*\*\*\*技術研究所土木技術課係長

\*\*\*\*\*技術研究所建築技術課係長

\*\*\*\*\*技術研究所土木技術課副課長

PC構造物の耐久性を考える場合、コンクリート自身の劣化やPC鋼材の腐食等とともに、PC鋼材定着部の耐久性は重要な問題である。

定着部の研究はプレテンション部材について古くから行われ<sup>2)3)4)</sup>、特にPC鋼材の定着長は規準化もされている<sup>5)</sup>。しかしポストテンション部材に関しては、定着装置の開発<sup>6)</sup>や部材端局部応力の研究<sup>7)</sup>が多く、定着機能そのものが低下した場合を問題とした研究は少ない。本研究は、定着装置や定着部のPC鋼材が腐食損傷した後、定着機能が低下することに着目し、これによるプレストレス減少区間を実験的に検討したものである。ただし、ポストテンション部材にはグラウトを行うボンド方式と行わないアンボンド方式があるが、本実験はボンド方式を対象とした。

## § 2. 実験方法

### 2-1 実験の概要

実験は以下の3種類について行なった。

- ① 引抜きによるPC鋼材の付着強度試験
- ② はり部材による伝達長試験
- ③ はり部材による曲げ載荷試験

実験①は、シース内のグラウト材とPC鋼材の付着性状を引抜き試験により求めるものである。定着機能低下後は、PC鋼材とグラウト材の付着作用で緊張力を保つことになるため、グラウト材は設計規準強度300~700 kgf/cm<sup>2</sup>の高強度セメントペーストの使用を基本とする。ただし比較のため、500kgf/cm<sup>2</sup>のモルタルとエポキシ樹脂についても実験した。

実験②は、ポストテンションPCはり供試体を作製し、片方の定着部を解放した時の伝達長及びその経時変化を求めるものである。定着部を解放すると部材端でPC鋼材がスリップするため、ある区間で導入プレストレスが

得られなくなる。この部材端から導入プレストレスが残留している点までの距離が伝達長である。

実験③は、定着部を解放した状態のPCはり供試体を単調曲げ載荷と繰返し曲げ載荷を行い、その時の部材の挙動および伝達長の変化を求めるものである。

### 2-2 付着強度試験

#### (1) 実験ケース

引抜きによる付着強度試験方法には、標準試験法としてASTM法・JCI法・JIS(案)法があるが、いずれも

Table 1 付着強度試験ケース一覧

ケース	P C 鋼 材						グラウト材*				
	φ32	D32	φ23	D23	1T19.3	1T12.7	A	B	C	D	樹脂
1	○							○			
2		○						○			
3			○				○				
4			○					○			
5			○						○		
6				○			○				
7				○				○			
8				○					○		
9					○			○			
10						○	○				
11						○		○			
12						○			○		
13			○							○	
14				○						○	
15				○							○

\* ) グラウト材A, B, C, DはTable 3参照

Table 2 PC鋼材の機械的性質

PC鋼材	記 号	PC鋼材の機械的性質			
		基本径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 Pu (kgf)	降伏強度 Py (kgf)
φ32	S B P R 95/110	32.0	804.2	88,460	76,400
D32	S B P D 95/110				
φ23	S B P R 95/110	23.0	415.5	45,710	39,470
D23	S B P D 95/110				
1T12.7	S W P R 7B	12.7	98.7	18,700	15,900
1T19.3	S W P R 19	19.3	243.7	46,000	39,500

コンクリートと鉄筋の付着強度を求めるもので、シー  
ス内のグラウト材とPC鋼材の付着強度を求めるもの  
ではない。そこで、供試体寸法はJCI法を、その他はJIS  
(案)法を参考にして実験を行った。

本実験に使用するPC鋼材は丸鋼( $\phi 32$ ,  $\phi 23$ ), 太径  
ネジふし異形鋼棒(D32, D23), より線(1T12.7=7本  
より, 1T19.3=19本より)とし、実験ケース一覧を  
Table 1 に示す。

(2) 使用材料の特性値と配合

PC鋼材の機械的性質をTable 2に、異形鋼棒形状を  
Fig. 1 に示す。

グラウト材のセメントペーストおよびモルタルは試験  
練りを行い、コンシステンシー等がグラウト材として適  
当となるように各種混和材料を添加し、ノンブリージン  
グとしたものである。グラウト材の配合をTable 3に、

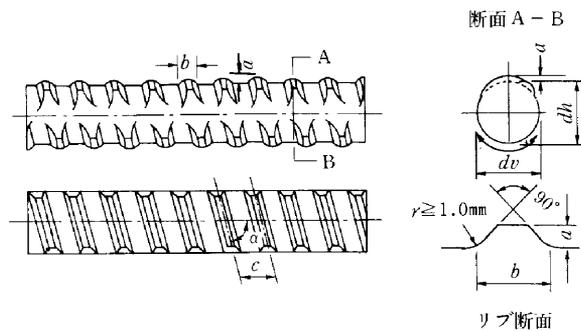
コンクリートの配合をTable 4に示す。なおグラウト材  
として使用する樹脂は、エポキシ樹脂系コンクリート用  
接着剤のコニシボンドE206を用いた。

(3) 供試体作製方法

供試体はPhoto 1に示す型枠で、鋼製スパイラルシ  
ースを埋込んだコンクリートブロックをあらかじめ作製  
し、PC鋼材を挿入後、Fig. 2に示すグラウト注入治具  
をセットしグラウト材を注入した。グラウト排出口から  
のグラウト濃度が所定の濃さになったら、グラウトが硬  
化するまで(約24時間)排出口の高さを約1mに保持し  
た。

コンクリートブロックの大きさは、PC鋼材別に  
Table 5に示す立方体である。供試体は試験時(グラウ  
ト注入から28日後)まで水中養生(20±3℃)を行った。

(4) 試験方法



公称径	単位重量 G (kg/m)	母材径		母材 断面積 (mm <sup>2</sup> )	リブ寸法			
		dh (mm)	dv (mm)		高さ a (mm)	幅 b (mm)	ピッチ c (mm)	リード角 α (度)
23mm	3.42	23.0	23.0	415.5	1.4	5.5	12	81
32mm	6.63	32.0	32.0	804.2	2.0	7.0	17	81

Fig.1 異形鋼棒形状

Table 3 グラウト材配合

配 合		σ <sub>rk</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/C (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )									
					混 和 材 料									
					W	C	S	GF-630	GF-700	CSA#20	タスコ	Σ5000	NP-20	UWB
セメント ペースト	A	300	48	—	604	1251	—	12.6	—	—	—	—	—	—
	B	500	38	—	542	1198	—	—	—	71.3	157	—	20.0	—
	C	700	33	—	508	1468	—	—	23.2	77.2	—	—	15.4	—
モルタル	D	500	44	1.0	385	766	872*	—	—	20.1	—	87.5	18.0	0.10

\*) 珪砂5・6号をそれぞれ436kg/m<sup>3</sup>ずつ使用

Table 4 コンクリート配合(付着強度試験)

$\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				A E減水剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
400	40.0	38.9	183	458	638	1021	1832	12.0	4.0

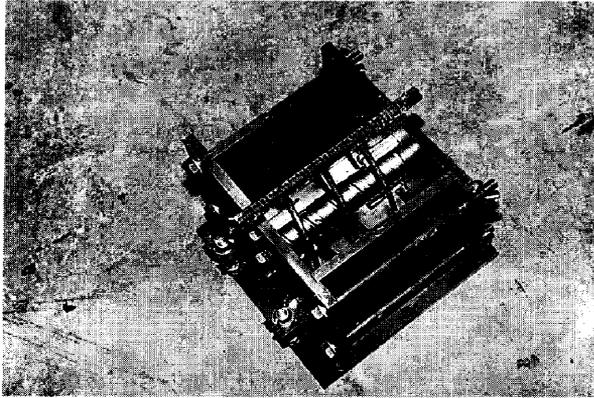


Photo 1 型枠セット状況(引抜き試験)

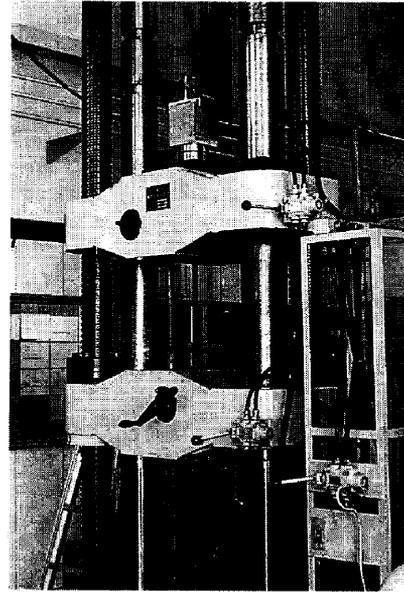


Photo 2 供試体セット状況(引抜き試験)

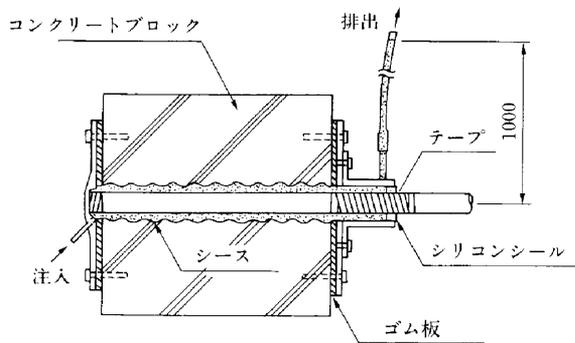
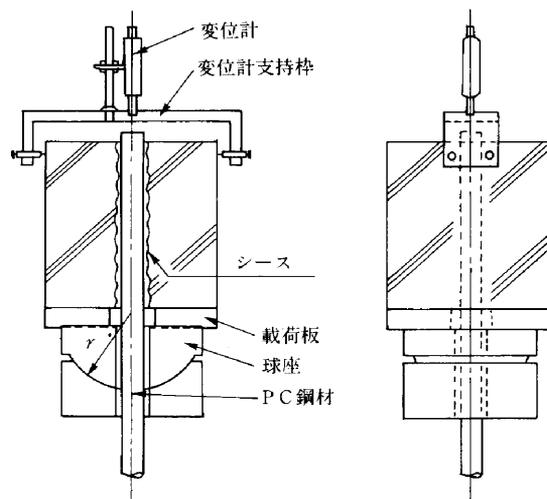


Fig.2 グラウト注入治具

Table 5 供試体寸法

PC鋼材	一辺の長さ L (cm)	L/φ	シース径 (mm)
φ32, D32	20.0	6.25	40
φ23, D23	15.0	6.52	30
1T19.3	15.0	7.77	28
1T12.7	10.0	7.87	26

φ: PC鋼材公称直径(cm)



PC鋼材	載荷板(mm)			球座(mm)	
	幅	厚さ	孔径	球r	孔径
1T12.7	100	25	25	75	50
φ23, D23 1T19.3	150	25	46		
φ32, D32	200	25	64		

Fig.3 球座および載荷板寸法

供試体は試験機のカrossヘッド上面に球座および載荷板をセットし、偏心荷重が加わらないように設置した。供試体セット状況を Photo 2 に、球座・載荷板寸法を Fig. 3 に示す。載荷方法は PC 鋼材の引張応力度が<sup>3</sup>500

kgf/cm<sup>2</sup>/min となる速度で行った。ただし、丸鋼は付着強度が低いことが予想されるため1/3の速度とした。計測値は引抜き荷重と鋼材自由端すべり量である。

2-3 伝達長試験

(1) 実験ケース

実験ケースおよび供試体寸法の一覧を Table 6 に示す。PC はりは正方形断面とし、部材の中心に緊張力を与える構造とした。なお、コンクリートの乾燥収縮によるひずみ測定用に無筋コンクリートはりを供試体寸法ごとに作製した。

(2) 使用材料

PC 鋼材は Table 2 のものを、グラウト材は Table 3 配合 B のものを使用した。コンクリートは Table 7 に示す設計規準強度400kgf/cm<sup>2</sup>の早強コンクリートを使用した。

より線の定着装置は Fig. 4 に示すように、緊張後の解放を考慮して、シングルストランド用スリーブの外側をネジ切加工しナット定着する構造とした。なお支圧板は PC 鋼材の緊張力が集中荷重とならないように、板厚・寸法等を決定した。

(3) 実験方法

PC 鋼材の緊張はすべて片引きで行い、コンクリートの圧縮強度が300kgf/cm<sup>2</sup>を越えた時点で行った。緊張定着状況を Fig. 5 に示す。緊張力の管理はロードセルで行い、緊張側には解放時の影響を梁端部に与えないように、

ラムチェアーを定着具と支圧板の間に設置した。定着方法は、鋼棒の場合はナットを締めつけ、より線の場合はシングルストランド用ジャッキ内のピストンでウェッジを圧入することにより行った。定着完了後、ただちにグラウトポンプでグラウト材の注入を行った。

定着部の解放はグラウト注入から4週間経過した時点で行った。定着解放状況を Fig. 6 に示す。解放方法は、いずれの場合も油圧ジャッキで鋼材応力に変化を与えない範囲で再緊張し、ナットを緩めることで行った。より線1T19.3の定着および解放状況を Photo 3,4 に示す。

計測値は解放側の部材端近傍のコンクリートひずみ変化量とその経時変化であり、測定は定着部解放後90日間行った。

2-4 曲げ載荷試験

(1) 実験ケースおよび載荷方法

本実験の PC はりは T 形断面であり、Fig. 7 に示す片持ち構造で曲げ載荷するものである。載荷方法の違いにより、本実験は以下の2ケースを行った。

①単調載荷

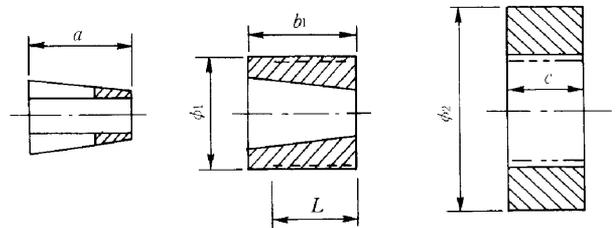
単調に変位を増加させて破壊に至らす。

②繰返し載荷

①で得られた結果をもとに、最大弾性変位の1/2・最大弾性変位・一本目のひびわれ発生変位・鋼材の降伏点変位・最大耐力時の変位・最大耐力時変位の2倍・最大

Table 6 実験ケースおよび試験体寸法

ケース	PC 鋼材	断面寸法 (cm)	はり長 (cm)	緊張力 0.8Py (tf)
1	φ32	25×25	600	61.1
2	D32	25×25	600	61.1
3	φ23	18×18	500	31.6
4	D23	18×18	500	31.6
5	1T12.7	14×14	300	12.7
6	1T19.3	18×18	300	31.6



種別	ウェッジ	スリーブ			ナット	
	a	φ <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	L	φ <sub>2</sub>	c
1T12.7	37	35	37	30	54	25
1T19.3	65	55	65	54	76	40

Fig.4 より線の定着装置

Table 7 コンクリート配合(伝達長試験)

σ <sub>ck</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スラフ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	A E 減水剤		
400	37.5	39.1	157	419	682	1082	1.048	8.0	4.0

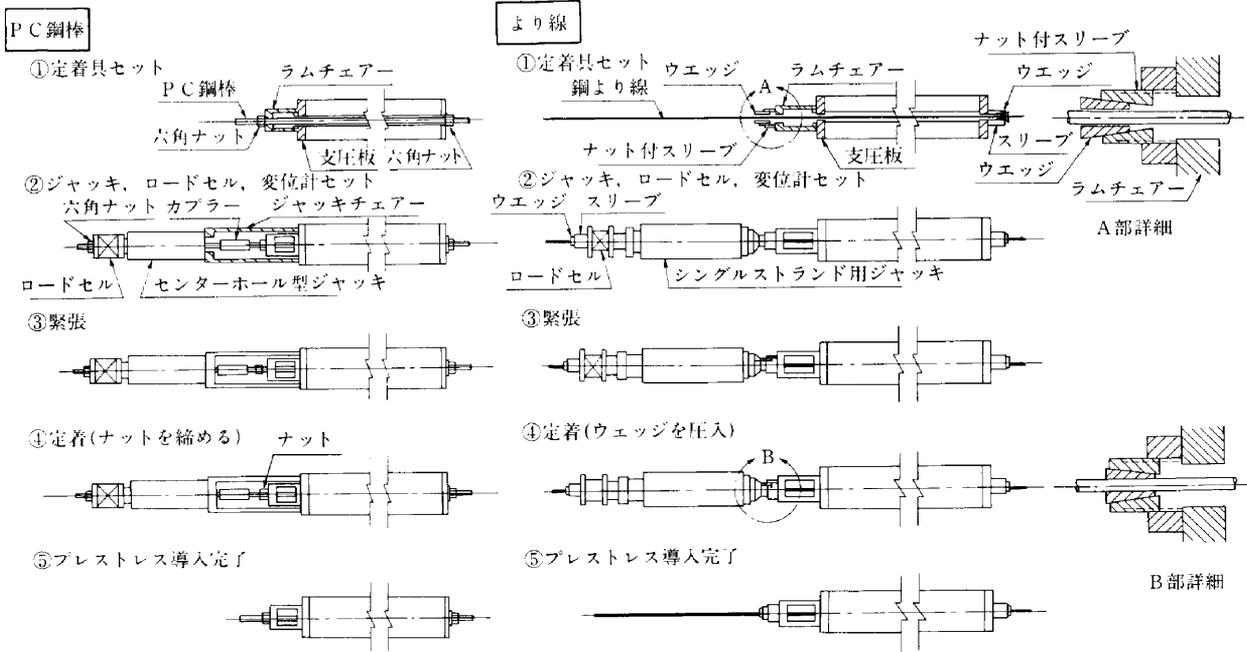


Fig.5 緊張定着状況

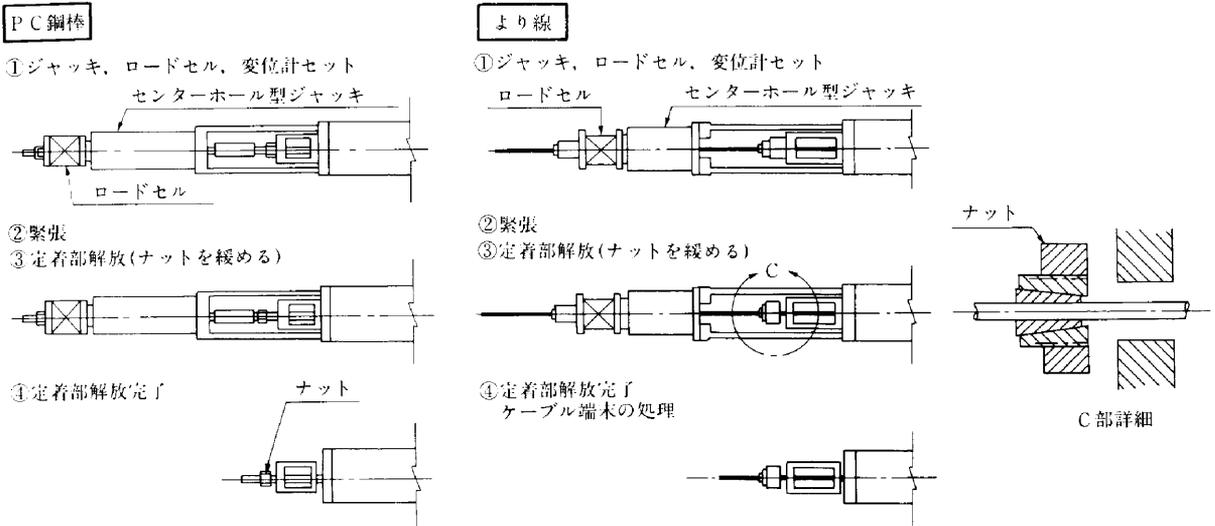


Fig.6 定着解放状況

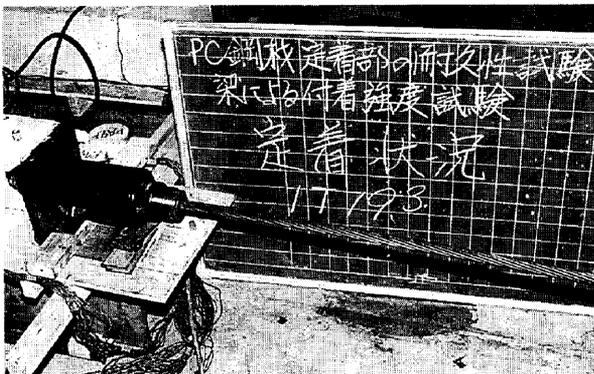


Photo 3 1T19.3定着状況

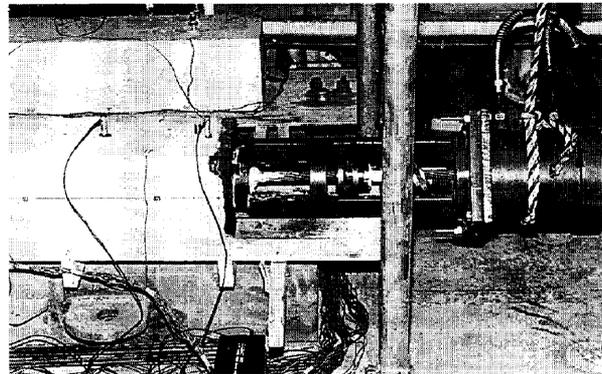


Photo 4 1T19.3解放状況

Table 8 コンクリート配合(曲げ載荷試験)

$\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					ス ラ ブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	A E 減水剤		
450	34.5	36.4	161	467	617	1098	1.168	8.0	4.0

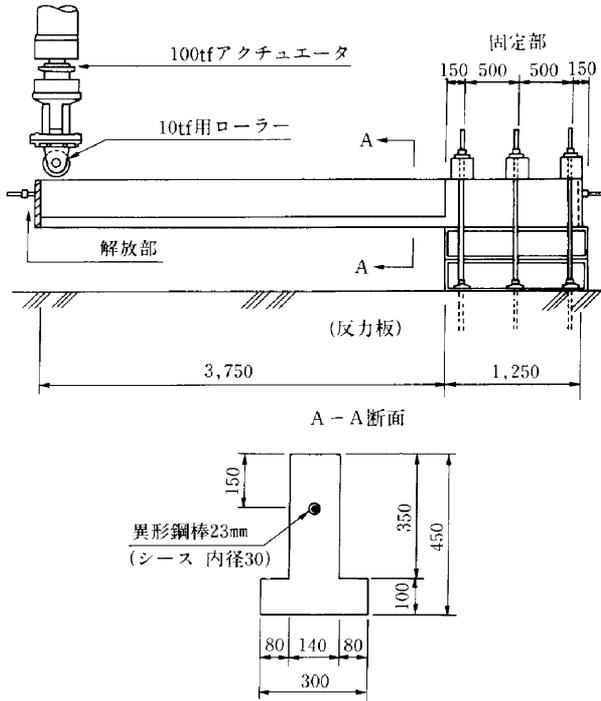


Fig.7 曲げ載荷試験方法

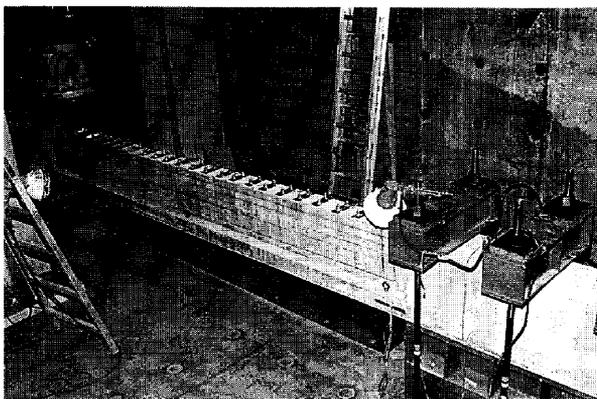


Photo 5 曲げ載荷試験状況

耐力時変位の3倍の各点で、それぞれ10回の繰返し載荷を行い破壊に至らす。

(2) 使用材料および実験方法

本実験に使用したPC鋼材はTable 2の異形鋼棒D23であり、緊張力は伝達長試験と同様  $P=31.6\text{tf}$  であ

る。グラウト材も伝達長試験と同様 Table 3 配合 B のものを使用した。コンクリートは Table 8 に示す設計規準強度  $450\text{kgf/cm}^2$  の早強コンクリートを使用した。

曲げ載荷はグラウト注入4週間後に行った。曲げ載荷状況を Photo 5 に示す。

§ 3. 実験結果と考察

3-1 グラウト強度と付着強度の関係

(1) 終局付着強度

引抜き試験による付着強度試験結果(3供試体の平均)を Fig. 8 に示す。図中の『シース無』というのは、グラウトを行わずにPC鋼材をコンクリート中に直接埋込んで試験したものである(以下、直埋め供試体という)。終局付着強度は、最大引抜き力を鋼材の埋込み長で除した平均付着強度で、以下の式で計算した。

$$f_{bou} = P_u / \pi \phi \ell$$

ここに、 $f_{bou}$  : 終局付着強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_u$  : 最大引抜き力 (kgf)

$\phi$  : PC鋼材の公称直径 (cm)

$\ell$  : PC鋼材の埋込み長 (cm)

丸鋼はグラウト強度による終局付着強度の差は無いので、今回実験したケースの範囲では、グラウト材に高強度のセメントペーストを使用しても効果は少ない。また、丸鋼の直埋めの供試体の終局付着強度は、グラウトしたもの(以下、グラウト供試体という)に比べ、約65%低い結果を得た。これは供試体を作製する時に鋼棒を水平にセットしてコンクリートを打設したため、かなりブリージングの影響を受けて付着強度が低下したものと考えられる。

異形鋼棒は丸鋼と異なり、グラウト強度が高いほど終局付着強度も高くなった。また、直埋め供試体の終局付着強度は、グラウト供試体に比べ約40%高くなり、丸鋼とは逆の結果になった。一般に、直埋め供試体の引抜き試験における異形鉄筋の付着強度は、コンクリートの割裂強度に起因する<sup>9)</sup>。本実験のグラウト供試体も、最終的には周囲のコンクリートブロックが割裂破壊を起こし付

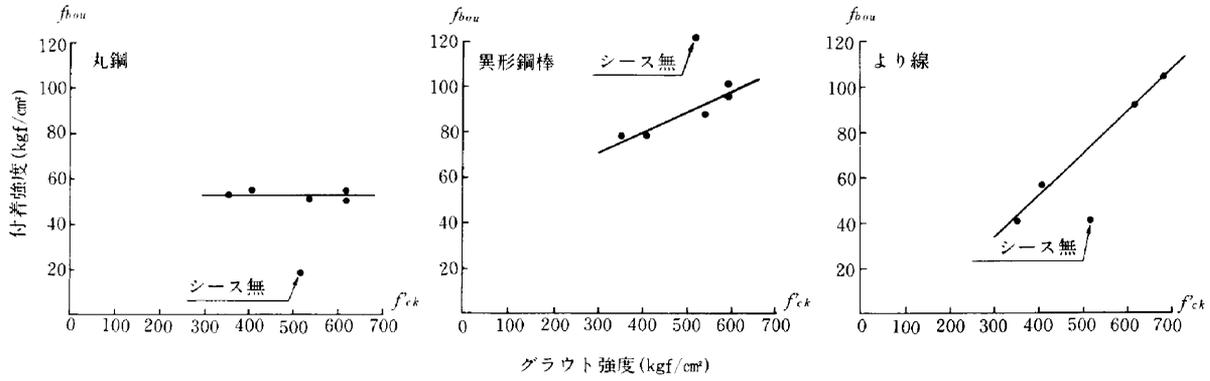


Fig.8 付着強度試験結果

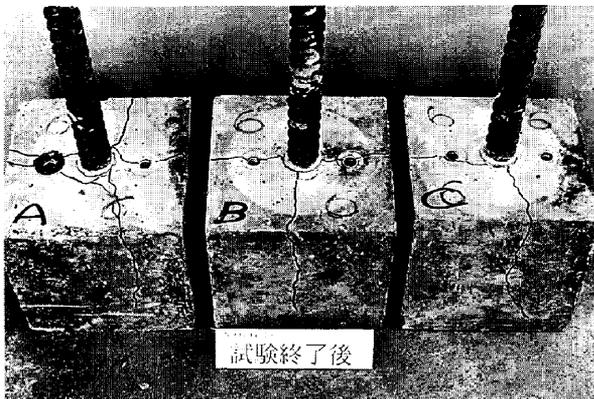


Photo 6 異形鋼棒の破壊状況

着が消失した(Photo 6)。異形鋼棒は丸鋼のような摩擦  
 付着よりも、鋼材のリップによる機械的付着が主であるため、  
 ブリージングの影響は少ないと考えられる。したがって、  
 グラウト供試体の終局付着強度が直埋め供試体より低くなっ  
 たのは、別の要因が考えられる。

そこで、D23グラウト供試体のシース径を30mmから35  
 mmと40mmに変えた実験を追加した。実験結果を Fig. 9  
 に示す。シース径35mmでは終局付着強度にあまり変化は無  
 いが、40mmでは直埋め供試体と同程度の強度を得た。こ  
 の結果から、異形鋼棒の付着強度はグラウト強度と共に、  
 シース径にも影響されることが判明したが、詳細に関しては  
 別途研究課題としたい。

より線の終局付着強度は異形鋼棒と同様に、グラウト  
 強度に比例して高くなった。しかし直埋め供試体の終局  
 付着強度はグラウト供試体に比べ、約45%低い結果とな  
 った。これは丸鋼と同様にブリージングの影響と考えら  
 れる。このことは、より線の付着強度は機械的付着とと  
 もに、摩擦付着の影響が大きいことを示すものである。  
 より線供試体の内部ひびわれ状況を Photo 7 に示す。  
 グラウト内には、引抜き方向に対してほぼ直角方向にひ

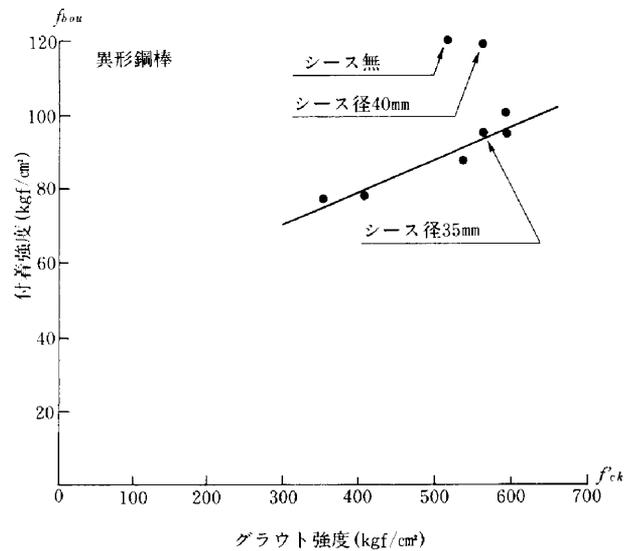


Fig.9 シース径の差による付着強度

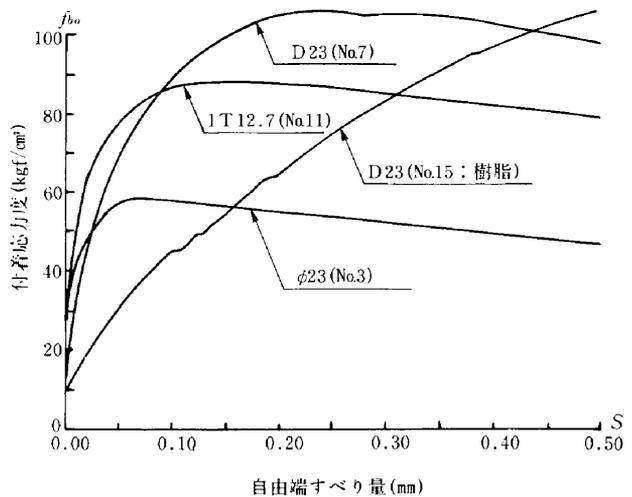


Fig.10 付着応力度とすべり量

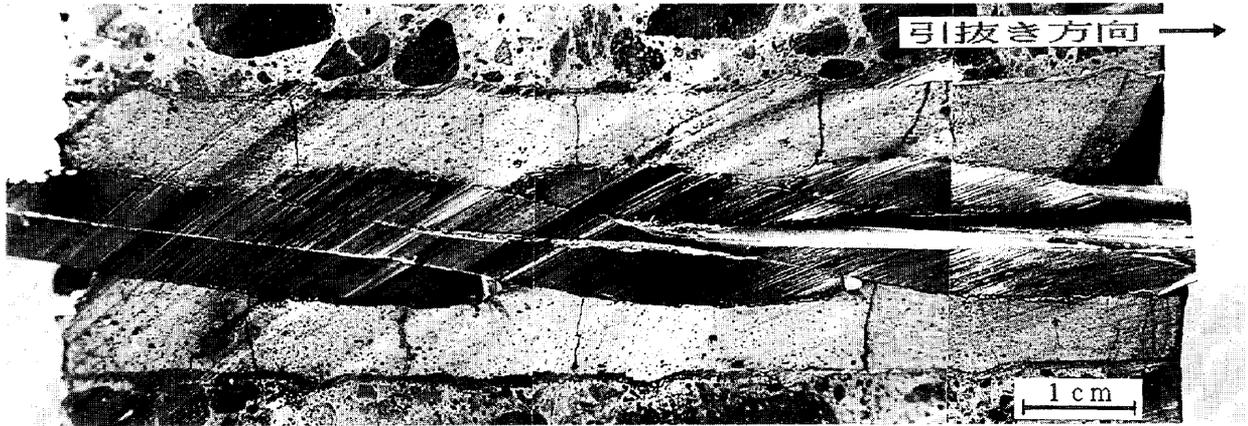


Photo 7 グラウトの内部ひびわれ(1T12.7)

びわれが発生していることが分かる。後藤の研究<sup>9)</sup>によれば、グラウト内のひびわれは異形鋼棒では斜め状に、丸鋼では直角状に形成されることが報告されている。

グラウト材にモルタルを使用した場合、終局付着強度はセメントペーストと差は無かった。しかしモルタルは、注入時に閉塞を起こしやすい欠点が見られた。樹脂を使用した場合、終局付着強度はグラウト供試体に比べ約30%高くなった。しかしこの場合、鋼材すべり量も大きく、後述する初期付着強度は逆にグラウト供試体より約65%低くなった。これらのことから、今回使用したモルタルおよび樹脂は、ポストテンション部材のグラウト材には向かないと考えられる。

Fig. 10 に付着応力度と自由端すべり量の一例を示す。

(2) 初期付着強度

引抜き試験による付着強度試験結果を一般的に表現する方法として、自由端における鉄筋のすべり量  $S$  を鉄筋径  $\phi$  で除した無欠元量  $S/\phi$  で表す方法が提案されている<sup>8)10)</sup>。村田らの研究<sup>8)</sup>は  $S/\phi = 2 \times 10^{-3}$  のすべり量

における付着応力度を、異形鉄筋の初期付着強度と定義し、コンクリートと鉄筋の一体性を表す指標としている。

ここでは上記の報告を参考に、 $S/\phi = 2 \times 10^{-3}$  における付着応力度を異形鋼棒の初期付着強度とした。ただし丸鋼のすべてと、より線の一部が  $S/\phi = 2 \times 10^{-3}$  以前のすべり量で終局付着強度を記録しているため、丸鋼とより線は  $S/\phi = 1 \times 10^{-3}$  における付着応力度を初期付着強度とした。

若干の追加実験を含めた実験結果を Fig. 11, Table 9 に示す。図中に示した土木学会規準値は、コンクリート標準示方書による設計付着強度で、以下の式により計算した。

Table 9 付着強度の実験式

P C 鋼材	終局付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	初期付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
丸 鋼	$f_{\text{boa}} = 53.1$	$f_{\text{bo}} = 2.79 \times 10^{-3} f_{\text{ck}} + 37.3$
異形鋼棒	$f_{\text{boa}} = 8.64 \times 10^{-2} f_{\text{ck}} + 44.8$	$f_{\text{bo}} = 4.53 \times 10^{-2} f_{\text{ck}} + 34.1$
より線	$f_{\text{boa}} = 1.85 \times 10^{-1} f_{\text{ck}} - 22.8$	$f_{\text{bo}} = 1.02 \times 10^{-1} f_{\text{ck}} - 2.65$

$300 \leq f_{\text{ck}} \leq 700$

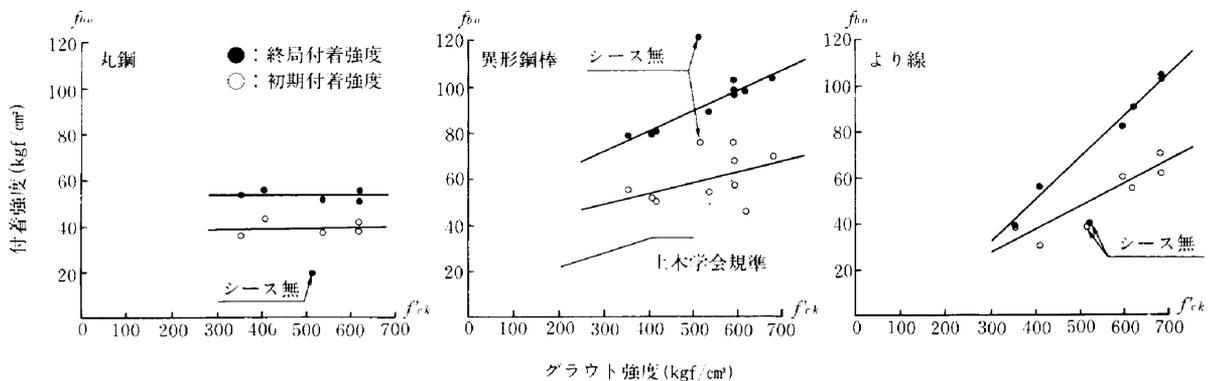


Fig.11 初期および終局付着強度

$$f_{bod} = 0.6 f_{ck}^{2/3} / r_c$$

ここに、 $f_{bod}$ ：設計付着強度 ( $\leq 33 \text{kgf/cm}^2$ )

$f_{ck}$ ：コンクリートの設計規準強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )  
 ( $200 \text{kgf/cm}^2 \leq f_{ck} \leq 500 \text{kgf/cm}^2$ )

$r_c$ ：材料係数 (=1.0で計算)

### 3-2 伝達長と経時変化

#### (1) 解放時の伝達長

緊張力解放直後のコンクリートひずみ変化量を Fig. 12 に示す。この変化量は、実験開始までの乾燥収縮やクリープの影響を除くため、解放直前のコンクリートひずみをゼロとした変化量である。一般に、伝達長は部材端から導入プレストレスが100%残留する点までの距離であるので、本実験の伝達長は、部材端から解放によるひずみ変化の無い位置までの距離ということになる。

ひずみ変化量から求まる伝達長の実測値および、付着強度試験結果から求めた伝達長の計算値を Table 10 に示す。伝達長の計算は、初期付着強度と終局付着強度の実験式 (Table 9) を用いて以下の式で行った。

$$L = P / f_{b0} \pi \phi$$

ここに、 $L$ ：伝達長 (cm)

$P$ ：PC鋼材緊張力 (kgf)

$f_{b0}$ ：初期または終局付着強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\phi$ ：PC鋼材公称径 (cm)

実験の結果得られた伝達長の公称径に対する倍率は、丸鋼で23~26倍、異形鋼棒で19~22倍、より線で26~31倍であり、丸鋼の伝達長が予想以上に短い結果となった。奥島らの研究<sup>11)</sup>によれば、丸鋼は緊張力のために生ずるわずかな横方向収縮ひずみ(細まり)によって、付着強度が1/3程度に低下することが報告されている。緊張力を解放すると、丸鋼は逆に横方向膨張ひずみが生じるため、付着強度が増大し伝達長が短くなったと考えられる。

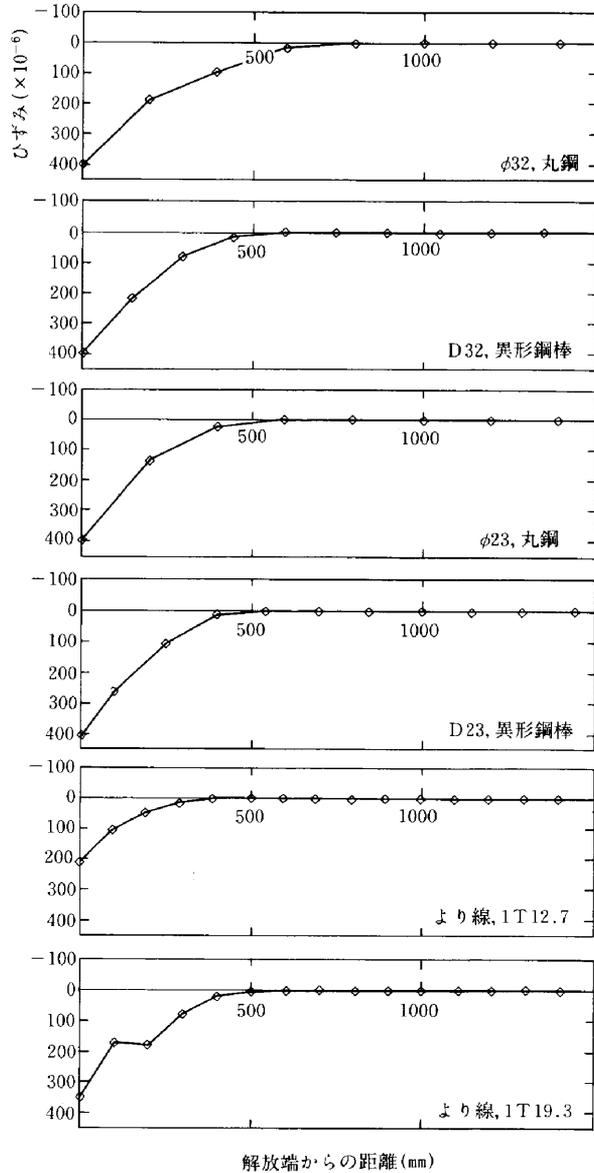


Fig.12 解放直後のひずみ変化

Table 10 伝達長の実験値と計算値

ケース	P C 鋼材	緊張力 P (tf)	伝達長 (cm)			$L_1/L_0$	$L_2/L_0$	グラウト強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
			$L_0$	$L_1$	$L_2$			
1	φ32	61.1	75(23φ)	156	115	2.1	1.5	588
2	D32	61.1	60(19φ)	100	64	1.7	1.1	
3	φ23	31.6	60(26φ)	113	82	1.9	1.4	563
4	D23	31.6	50(22φ)	73	47	1.5	0.9	
5	1T12.7	12.7	40(31φ)	52	34	1.3	0.9	630
6	1T19.3	31.6	50(26φ)	85	56	1.7	1.1	

$L_0$ ：実験値、( )内は公称径に対する倍率

$L_1$ ：初期付着強度からの計算値

$L_2$ ：終局付着強度からの計算値

異形鋼棒およびより線は、引抜き試験で得られた終局付着強度から計算した伝達長と実験値がほぼ一致した。ただし、引抜き試験による付着強度は、供試体寸法や横補強鉄筋の違いで差が有るため、さらに検討が必要と思われる。

(2) 伝達長の経時変化

緊張力解放から90日経過時までのコンクリートひずみ変化量を Fig. 13 に示す。ただし、この変化量は無筋コンクリート供試体で計測された乾燥収縮ひずみで補正したものである。伝達長の公称径に対する倍率は、丸鋼で31~35倍、異形鋼棒で25~28倍、より線で36~39倍であり、解放時の倍率に比べ、それぞれ約1.4倍、約1.3倍、約1.3倍となった。

時間経過に伴いコンクリート内部で圧縮ひずみが増加しているが、これはコンクリートのクリープによるものと考えられる。

解放直後とそれ以降の伝達長の経時変化を比較すると、解放後1日以内が大きく、その後の変化量は少ない。

(3) プレテンション PC 部材との比較

一般に伝達長は、プレテンション部材特有の概念であり、古くから多くの実験値が報告されている。これらの一部をまとめて Table 11 に示す。ただし、ここに示した値は、本実験と比較するため鋼材表面にさびが無く、緊張力を徐々に解放したものを選んでいる。

本実験で測定された伝達長は、これら従来の実験値と比べ短い結果となり、特に丸鋼でその差が大きい。しかし、丸鋼の付着強度に直埋め供試体で得られた値を用いて、伝達長の計算をすると  $L_2 \approx 100\phi$  となり、従来の研究結果とほぼ等しくなる。同時に、より線の場合を計算すると  $L_2 \approx 63\phi$  となり、これも同程度の結果が得られる。すなわち、摩擦付着の影響が大きな丸鋼やより線は、ブリージングの影響を受けずに付着強度が高くなった分、そのまま伝達長が短くなったと考えられる。

以上のことから、ポストテンション PC 部材で丸鋼やより線を使用する場合は、ノンブリージングのグラウト材を使用することで、定着機能低下後の伝達長を短縮することができると考えられる。特に丸鋼でその効果が高いようである。異形鋼棒は主にリブの形状等が伝達長に影響を及ぼすため、このような効果は少ないと考えられるが、伝達長そのものは一番短くなる。

伝達長への影響要因としては、鋼材の径、鋼材の表面状態、鋼材の緊張応力、コンクリート強度、コンクリート種類(普通、軽量など)、緊張力解放の方法などが考えられるが、従来の研究(プレテンション部材)では以下のように言われている。

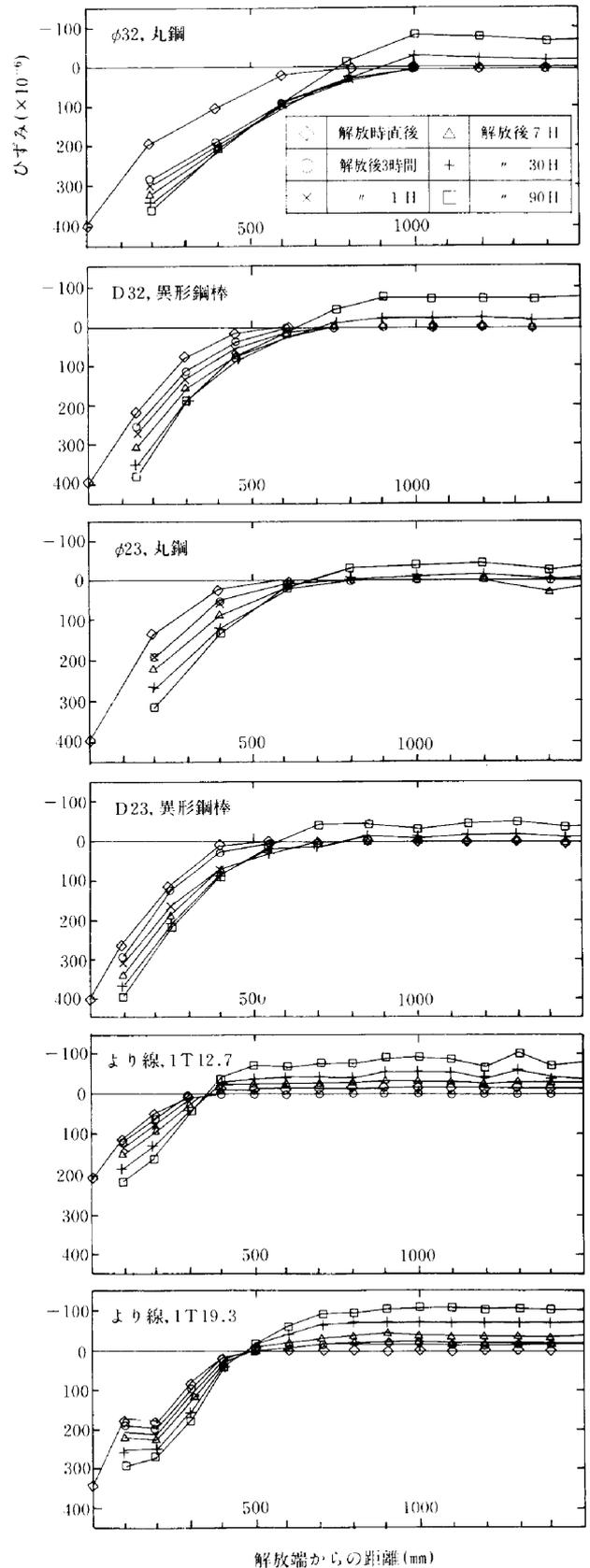


Fig.13 伝達長の経時変化

Table 11 プレストレス導入直後の伝達長実測例

鋼材の種類	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伝達長 (cm)	公称径倍率	測定者
平滑鋼線 2.54mm 3.11mm 4.00mm 7.01mm	320	35~50 40~53 43~55 46~55	138φ~197φ 129φ~170φ 108φ~138φ 66φ~78φ	Janney <sup>5)</sup> (1954)
平滑鋼線 3.5mm	568	40	114φ	渡辺 <sup>3)</sup> (1966)
7本より線 9.3mm	300 300 450	37.5~40 39~41 35~40	40φ~43φ 42φ~44φ 38φ~43φ	坂 <sup>5)</sup> (1959)
7本より線 6.35mm 9.54mm 12.7mm 15.2mm	120~350	23~28 51~66 81~94 71~107	36φ~44φ 53φ~69φ 64φ~74φ 47φ~70φ	P.H.Kaar <sup>12)</sup> (1963)
7本より線 10.8mm 12.4mm	589 608	40~55 60~75	37φ~51φ 48φ~60φ	八巻 <sup>15)</sup> (1979)
異形鋼棒 10.0mm	356 370	33~34 29~30	33φ~34φ 29φ~30φ	P.S.Rao <sup>13)</sup> (1977)

Table 12 プレテンションPC部材定着長の規準値

	平滑鋼線	表面凹状の異形鋼線	7本より線	表面凸状の異形鋼線
日本土木学会	100φ	100φ	65φ	65φ
日本建築学会	180φ	—	45φ	—
B S I (C P 110)	100φ	65φ	22φ~28φ	—
A C I (318-83)	—	—	$(f_{se}/3)\phi - (f_{su} - f_{se})\phi$	—

$f_{se}$  : 損失後の鋼材有効応力

$f_{su}$  : 鋼材引張強度

- ① PC鋼材の表面は適当にさびている方が伝達長は短くなる<sup>2)3)5)</sup>.
- ② PC鋼材の緊張応力が大きいほど伝達長は長くなる<sup>3)12)</sup>.
- ③ 伝達長はコンクリート強度に関係しない<sup>2)5)12)</sup>.
- ④ 普通コンクリートと軽量コンクリートでは伝達長に差がない<sup>5)</sup>.
- ⑤ 緊張力の解放を急激に行うと、徐々に行うものより伝達長は長くなる<sup>12)13)</sup>が、異形鋼棒はほとんど差がない<sup>13)</sup>.

これらのうち、丸鋼およびより線の伝達長に最も影響を与える要因は①であり、ついで②、⑤であるが、異形

鋼棒はこれらの影響は少ないようである。

本実験からは上記のような特徴を明らかにすることはできないが、異形鋼棒に関してはグラウト強度の違いや、シース径の違いで伝達長に変化がないとはいきれないので、今後の研究課題としたい。

また、各国でプレテンションPC部材定着長の設計用規準値が制定されている<sup>14)</sup>が、いずれの規準も太径の異形鋼棒に対する規定は無い (Table 12)。

本実験から、定着機能低下後のポストテンション部材の伝達長は、ノンブリージングの高強度グラウト材の使用を条件に、丸鋼・より線で40φ、異形鋼棒で30φ程度でよいと考えられる。

### 3-3 加力による伝達長への影響

#### (1) はりとしての力学的特性

実験結果（荷重～自由端たわみ曲線）を Fig. 14 に示す。二つの供試体は載荷までに10日の差があり、個体差

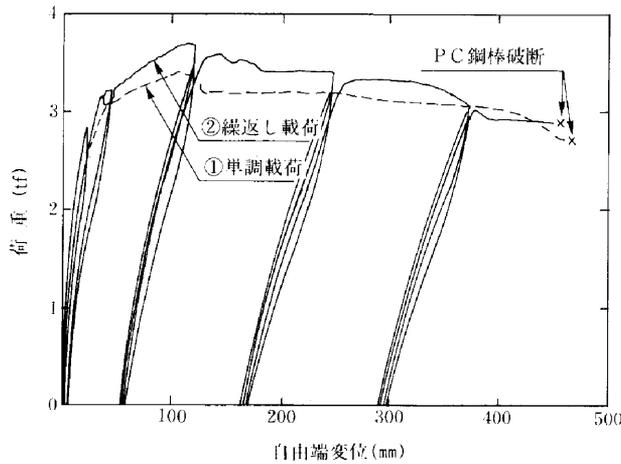


Fig.14 曲げ載荷試験結果

もある程度存在するため、コンクリートのひびわれに影響される挙動には幾分の差が見られるが、はりとしての力学的特性は同一と見て差し支えないものと判断される。

また供試体の破壊は、どちらも固定部の PC 鋼棒破断によるもので、定着部解放の影響がないことを示している。

#### (2) 載荷による伝達部への影響

伝達部近傍（自由端から25cm）のコンクリートひずみと PC 鋼棒の引込まれ量から、伝達部への影響について検討する。繰返し載荷時の実験結果を Fig. 15 に示す。

自由端近傍のコンクリートひずみは、1～2ステップで急速に引張側に変化し、その後は一定の割合で変化する。PC 鋼棒の引込まれ量も1ステップ目で急速に増加し、その後の変化量は一定である。これらは実験の初期段階で、鋼材のすべりが大きいことを示すものである。しかし、PC 鋼棒降伏（4ステップ開始）までは、自由端

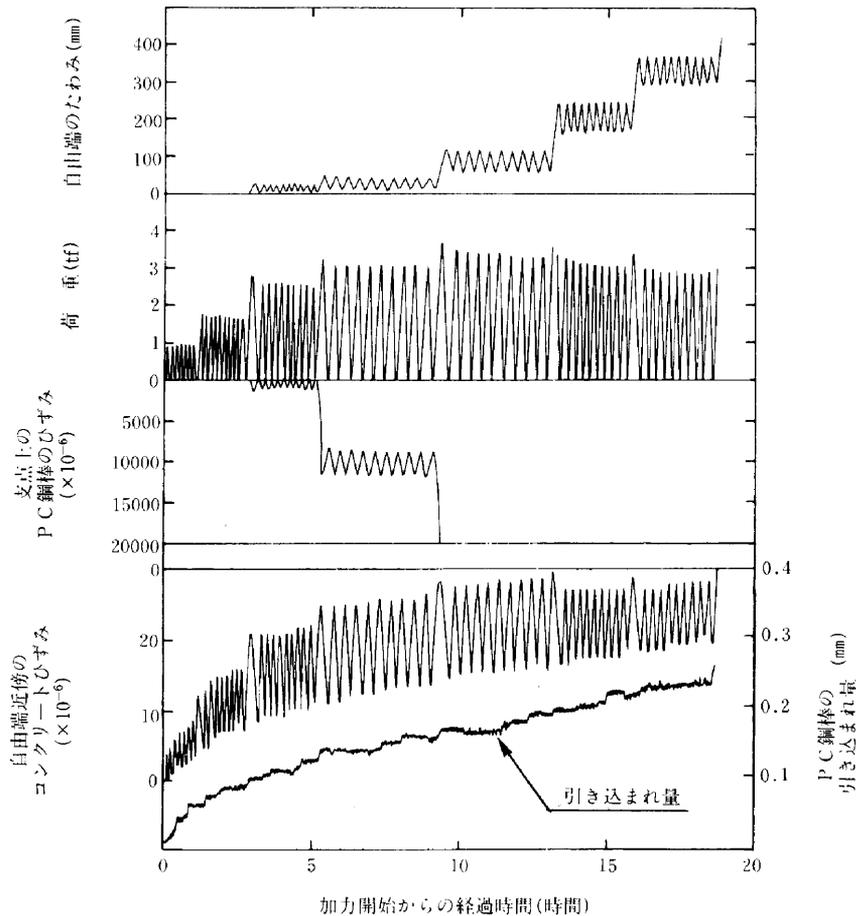


Fig.15 繰返し載荷時の実験結果

に残留変位が生じず復元力もあることから、部材全体は健全であると考えられ、伝達部の挙動と一致しない。

このことは、1～2ステップでの自由端近傍のコンクリートひずみの急速な変化は、緊張力解放による静的な変化が主原因であり、载荷の影響はほとんど受けないことを示していると考えられる。伝達長試験 (Fig. 13 参照) によると、異形鋼棒 (D23) 供試体の解放直後からのコンクリートひずみ変化量は、解放後3時間で約  $15 \times 10^{-6}$  (解放端から25cmの位置) であり、Fig. 15の結果とほぼ一致していることが判る。

### (3) 伝達長の変化

载荷中の伝達部コンクリートのひずみ変化量は、PC鋼棒降伏時で、わずか  $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$  程度であるため、伝達長の変化も少ないと考えられる。

藤井らの研究<sup>16)</sup>によると、伝達長の変化量は以下の式で表すことができる。

$$\Delta L = E_s A_s S / \alpha P$$

ここに、 $\Delta L$ : 伝達長 (cm)

$E_s$ : PC鋼材の弾性係数  
( $= 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ )

$A_s$ : PC鋼材の断面積 ( $= 4.16 \text{ cm}^2$ )

$S$ : 引込まれ量 (cm)

$\alpha$ : 補正係数

$P$ : 初期緊張力 ( $= 31600 \text{ kgf}$ )

この式より、 $\alpha = 1$  とし PC鋼材降伏時の引込まれ量  $S = 0.014 \text{ cm}$  を代入し、伝達長を計算すると  $\Delta L = 3.8 \text{ cm}$  が得られる。これは解放時の伝達長の約8%である。

## § 4. まとめ

ポストテンションPC部材定着部の機能低下に伴うプレストレス減少を、伝達長に着目して実験的検討を行ってきた。以下に、本実験の範囲で得られた主な結果をまとめる。

- (1) 丸鋼の付着強度はグラウト強度による差はほとんど無いが、異形鋼棒・より線はグラウト強度が高い程、付着強度も大きくなる。
- (2) グラウト材と丸鋼・より線の付着強度は、コンクリートとの付着強度よりも高くなる。コンクリート中では摩擦付着がブリージングの影響を受けて低下するためと考えられる。
- (3) 緊張力解放直後の伝達長は、丸鋼で  $23\phi \sim 26\phi$ 、異形鋼棒で  $19\phi \sim 22\phi$ 、より線で  $26\phi \sim 31\phi$  である。
- (4) 異形鋼棒・より線の伝達長の実測値は、引抜き試験で求めた終局付着強度からの計算値と一致する。

- (5) 丸鋼の伝達長の実測値は、引抜き試験で求めた終局付着強度からの計算値の約65%である。これは解放による横方向膨張ひずみの影響で短縮されたものと考えられる。
- (6) 伝達長の経時変化は、解放後1日で大きくその後の変化は少ない。90日経過後の伝達長は、丸鋼で  $31\phi \sim 35\phi$  (解放直後の約1.4倍)、異形鋼棒で  $25\phi \sim 28\phi$  (同約1.3倍)、より線で  $36\phi \sim 39\phi$  (同約1.3倍) である。
- (7) 定着機能低下後の丸鋼・より線の伝達長は、ノンブリージングのグラウト材を使用することで、従来のプレテンション部材より短くなる。
- (8) 载荷による伝達長の変化はほとんど無く、むしろ解放による静的な変化の方が大きい。

以上の結果から、ポストテンション部材の定着部が何らかの影響で機能低下を起こしても、高品質のグラウトがしっかりと施工され、ある程度の伝達長 (丸鋼・より線で  $40\phi$  程度、異形鋼棒で  $30\phi$  程度) を確保しておけば、部材耐力に悪影響を与えることは無いと考えられる。ただし、伝達部に曲げひびわれが発生すると、ひびわれ両端で付着応力が増大し、伝達部が付着破壊する危険がある。この場合、部材耐力は大幅に減少するため、ひびわれ発生を許容するような部材では、本実験結果を単純に適用することはできない。

なお本実験の一部は、科学技術庁「放射性廃棄物処理処分技術開発促進費補助金」の交付を受けて行ったものである。

**謝辞** 最後に本実験を行うに際し、(株)阿部工業所の横山博司氏をはじめ、多くの方々の御協力をいただいた。ここに感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 第14回フレシネー技士海外研修団：プレストレスコンクリートにおける補修・補強例と損傷対策，プレストレスコンクリート，vol. 25, No. 5, 1983
- 2) 岡田・藤井・小沢：PCストランドの定着長に関する研究，セメント技術年報，No. 17, 1963
- 3) 渡辺：ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究，土木学会論文集，第125号，1966
- 4) A.S.G.Bruggeling：The transmission length of pretensioned prestressing steel，BETONWERK+FERTIGTEIL-TECHNIK，HEFT 5，1988
- 5) 例えば，プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説，日本建築学会，1987

- 6) PC 定着工法, プレストレストコンクリート, vol. 30, 特別号, 1988
- 7) 例えば, 藤井: コンクリート構造物における局部応力とその設計について, コンクリート工学, vol.14, No. 10, 1976
- 8) 村田・河合: 引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究, 土木学会論文集, 第348号, 1984
- 9) F.レオンハルト: レオンハルトのコンクリート講座⑤プレストレストコンクリート, 鹿島出版会, pp. 38~39
- 10) 池田: 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究, 土木学会論文集, 第307号, 1981
- 11) 奥島・鈴木・藤岡: PC 鋼棒とグラウトとの付着に関する研究, プレストレストコンクリート, vol.17, No. 3, 1975
- 12) P.H.Kaar, R.W.LaFraugh, M.A.Maas : Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length, Journal of the PCI, vol. 8, No.5, 1963
- 13) P.S.Rao, P.Kalyanasundaram, M.F.Sharief : Transmission length of ribbed bars in pre-tensioned concrete, Indian concrete Journal, vol.51, No.5, 1977
- 14) 藤井: 部材の設計 (その5) -付着・定着-, コンクリート・ライブラリー, 第41号, 1976
- 15) 八巻・小林・曾根: プレテン PC 桁の試験, 東工, vol. 30, No. 3, 1979
- 16) 藤井・荒木: プレテンション用 PC 鋼材の付着性能の評価法について, セメント技術年報, No.26, 1972
- 17) 伊藤・熊谷・土橋・西: ポストテンション PC 部材の付着強度と定着部の伝達長について, 土木学会第45回年次学術講演会, 第 V 部, 1990, 投稿中