

ボンダ定着プレテンション工法における鋼線の の摩擦係数およびその測定法に関する研究*

STUDIES ON THE FRICTION COEFFICIENT OF PRESTRESSING
WIRE OF PRETENSIONED PRESTRESSED CONCRETE AND ITS
MEASURING METHOD

渡 辺 明**

By Akira Watanabe

1. 緒 言

プレストレスト コンクリート (PC) は良質、高強度の鋼線およびコンクリートの開発の結果、初めて実用化されたものであるが、プレストレスが確保されるための肝心の条件、すなわち、ポストテンション工法における鋼線端部定着問題、あるいはプレテンション工法におけるボンダ定着問題が重要であることは論をまたない。筆者が本論で取り上げたテーマは後者に属する。

筆者は、さきに、プレテンション部材の鋼線定着に関して、研究の結果を報告したが、その中で、ボンダ定着の主役は鋼線の緊張解放時の断面膨張に基づくフリクション ボンドであること、したがって鋼線表面のさび状態、換言すれば摩擦係数の程度が大きく関係し、付着長 (プレテンション部材に所要のプレストレスを導入するために必要な部材端からの長さ) を支配すること、すなわち摩擦係数が多いほど、ボンダ定着は強化され、付着長が短縮されることなどを述べた。

さて、メーカーより購入した直後の PC 鋼線の表面は光沢状態を呈しているから、そのままではフリクションによる定着効果は期待できない。そこで PC 施工業者は、屋外放置散水式、あるいは化学的電気的さび生成促進策などを講じているわけであるが、現状では、さびの程度を表わす基準が確立されておらず、納品後 1 週半光沢状態とか、表面浮さび状態とか、あるいは不完全さび、完全さびなどときわめて抽象的であいまいな表現法をとらざるを得ない。プレテンション部材においては鋼線さびを摩擦係数という見地から把握すべきであり、しかも、その値は特に重要な意義をもつから、さびの程度を適確に表わす必要が痛感される。

これまでにも、PC 鋼線の摩擦係数値を知るための努力がなされなかったわけではない。この値を示した報告が、若干、内外の文献に散見されるからである。しかしながら、これらはいずれも、平板鋼材を用いるなどして、間接的に測っており、PC 鋼線そのものについて直

接測定したものではない。

筆者が実測した方法の原理は土のせん断試験にヒントを得ており、これまで種々の方法を試みたが、それぞれに難点があり、そのつど改良を加えてきた。

まず、1. では筆者が本研究を始めるに至った動機を述べた。2. では PC 鋼線の摩擦係数および純付着力などが付着長におよぼす影響について、筆者が導いた理論式により吟味し、3. には、それら摩擦係数、純付着力の新測定法を、今日に至るまでの曲折をも交えて示す。そして 4. にはその方法による実測結果ならびに考察を述べる。

2. PC 鋼線の摩擦係数および純付着力などが 付着長におよぼす影響

(1) 付着長理論式と計算条件

コンクリートの硬化収縮、クリープなどの影響を無視する場合の付着長は、筆者の理論によれば式 (1) のようになる^{1),2)}。

$$\lambda_0 = \frac{r_1}{2\mu\psi} \ln \frac{1}{1 - 0.95\mu\psi\sigma_{se}/(\tau_{0.345} + \mu\phi)} \dots (1)$$

ここに、

λ_0 : 付着長

r_1 : PC 鋼線の半径

μ : PC 鋼線とコンクリート間の摩擦係数

$\tau_{0.345} : \tau_{0.3} + \tau_{0.4} + \tau_{0.5}$: PC 鋼線とコンクリート間の純付着力 + くさび形によるすべり抵抗力 + 機械的抵抗力 (プレテンション工法における $\tau_{0.3}$ はきわめて小さく、平滑鋼線の場合には $\tau_{0.5}$ は 0 である)

σ_{se} : PC 鋼線の初期緊張応力度

ϕ, ψ : PC 鋼線およびコンクリートの径, ポアソン比, 弾性係数および鋼線比などで決まる定数

さて、筆者が実験した (3) の条件下で λ_0 値を計算してみよう。ただし、式 (1) において $\mu=0$ を代入すると、 $\lambda_0 = \infty$ となって計算不能となるから、この場合には式 (2) で計算するものとする。

$$\lambda_0 = 0.95 \sigma_{se} r_1 / 2 \tau_{0.345} \dots (2)$$

* 九州大学工学部紀要 第 24 巻 第 3 号に一部発表

** 正会員 工博 九州工業大学助教授 開発土木工学科

条件 $r_1 = 2.5 \text{ mm}$
 $\sigma_{se} = 100 \text{ kg/mm}^2$
 $\phi = 3.268 \text{ kg/mm}^2$
 $\psi = 0.03390$
 $\mu = 0 \sim 1.0$
 $\tau_{0.345} = 0 \sim 0.5 \text{ kg/mm}^2$ } (3)

(2) 計算結果

計算結果を示せば 図-1, 図-2, 図-3, 図-4 のごとくなる。

図-1

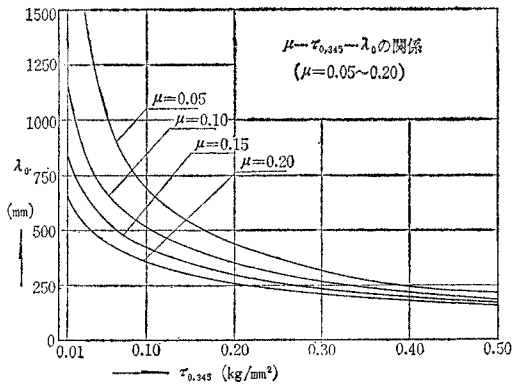


図-2

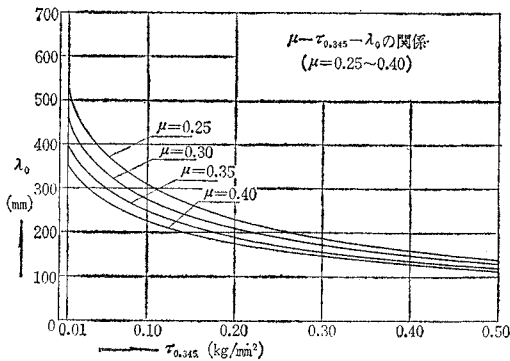


図-3

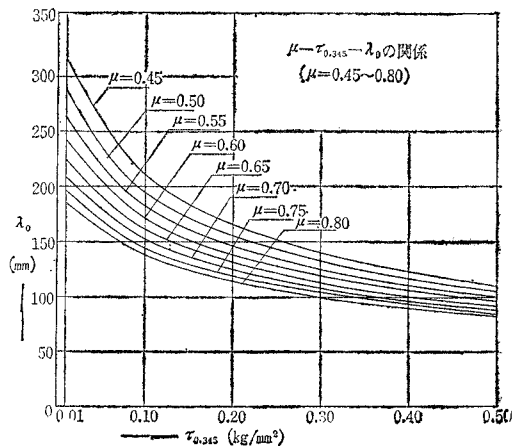
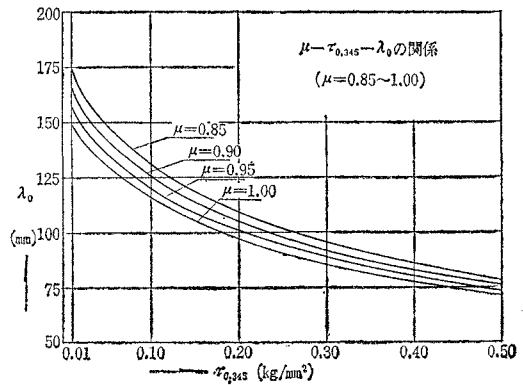


図-4



(3) 結果考察

一般にプレテンション工法では、鋼線がコンクリート中にすべり込むため、純付着力が失われ、したがって $\tau_{0.345}$ は小さいものと考えられる。図-3 によれば、たとえば $\mu = 0.5$ の場合、 $\tau_{0.345} = 0 \text{ kg/mm}^2$ では $\lambda_0 = 31 \text{ cm}$ であるのに対し、 $\tau_{0.345} = 0.1 \text{ kg/mm}^2$ では $\lambda_0 = 19 \text{ cm}$ に短縮されることになる。いま、 $\tau_{0.345}$ の増分に対する λ_0 の減分の比をとってみると $\Delta\lambda_0/\Delta\tau_{0.345} = 12/0.1 = 120$ となる。

つぎに、 $\tau_{0.345}$ を固定した場合を検討する。

いま、たとえば $\tau_{0.345} = 0.01 \text{ kg/mm}^2$ の場合、 $\mu = 0.2$ では (図-1) $\lambda_0 = 65 \text{ cm}$ であるのに対し、 $\mu = 0.4$ では (図-2) $\lambda_0 = 35 \text{ cm}$ に短縮される。この場合、 μ の増分に対する λ_0 の減分の比を計算すると $\Delta\lambda_0/\Delta\mu = 30/0.2 = 150$ となって、 μ 値の影響が著しく大きいことがわかる。

さて、異形鋼線などを使用する場合には、機械的すべり抵抗 $\tau_{0.5}$ が著しく大きいため $\tau_{0.345}$ はさらに増大する。そこで、いま、仮りに $\tau_{0.345} = 0.5 \text{ kg/mm}^2$ として調べてみると、摩擦係数が非常に小さく $\mu = 0.2$ の場合でも λ_0 はわずか 15 cm にすぎず、 $\mu = 0.5$ ともなれば $\lambda_0 = 10 \text{ cm}$ ときわめて短縮される理屈となる。

3. PC 鋼線の摩擦係数および純付着力を測定する方法

(1) まえがき

本測定法の原理は、土のせん断試験にヒントを得たことは前述したとおりである。しかしながら、今日、筆者が行っている方法に至るまでにはかなりの曲折があった。本法を測定法として確立するためには高精度、かつ、容易であることが肝要であり、加圧装置、引張装置そして引抜荷重測定装置などに関する種々の難点を解決しなければならなかったからである。それらの難点を具体的に示すために、また、今後、本法をさらにより良くするために加えられるべき問題点をも明らかにする意味に

図-5

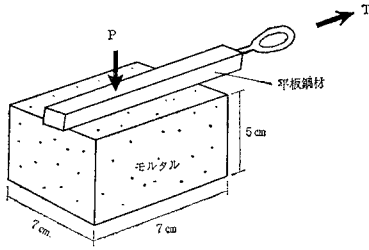
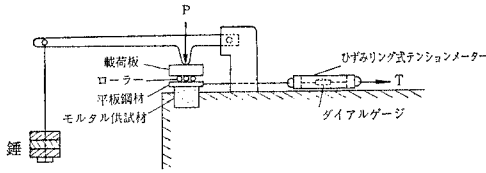


図-6



において、今日の方法に至るまでに試みた若干の方法なども掲げることとする。

(2) 平板鋼材による方法

a) 供試体製作と測定原理 なるべくPC鋼線に近い材質の鋼線から切削した平板鋼材を図-5に示すごとく、まだ固まらないモルタルの上面に置き、モルタル硬化後、適当な材令で図-6のような装置で引き抜く。いま、平板鋼材に加える鉛直荷重が P_I, P_{II} の時、引抜荷重がそれぞれ T_I, T_{II} とする。平板鋼材の厚さを十分にとれば、鉛直荷重はモルタルとの付着面に一様に分布されると考えることができるから、つぎのつりあい式が成立する。ただし、平板鋼材とモルタルの摩擦係数を μ 、純付着力を τ_0 、かつ、付着面積を A とする。

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 A + \mu P_I &= T_I \\ \tau_0 A + \mu P_{II} &= T_{II} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を解けば

$$\mu = \frac{T_{II} - T_I}{P_{II} - P_I} \dots\dots\dots (5)$$

図-7は、縦軸に T 、横軸に P をとって測点を示したものであるが、両測点を結ぶ直線の勾配すなわち $\tan \theta$ は式(5)に相当し、 μ 値を与えることになる。また、

図-7

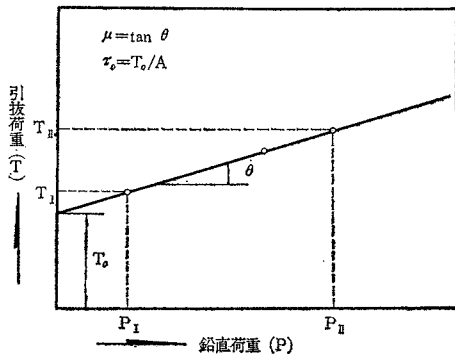
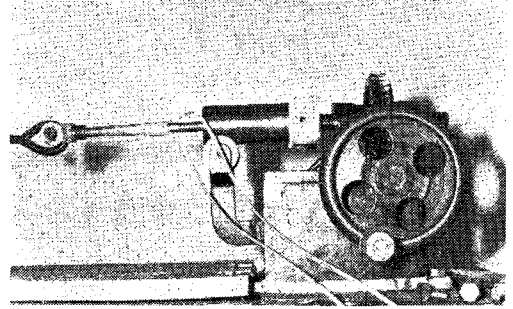


写真-1 引張装置



$P=0$ における T (図-7 における T_0) を A で除すれば、ただちに τ_0 が得られる。

なお、引張荷重 T は写真-1に示すような手動のオームギヤ装置により加え、引抜荷重の測定は、図-6に示したごときひずみリング式テンションメーターによった。

b) この方法の欠点

- ① 鋼材の表面状態をPC鋼線のそれに近似させてはいるが、PC鋼線そのものではない。
- ② モルタルのブリージングのため、鋼材とモルタルの間に浮水が生じ、付着面のボンドを弱める。
- ③ 供試体を試験台に設置する際、わずかの力で、鋼材がモルタル面よりはずれる。
- ④ 引抜方向のわずかの狂いが敏感に影響する。すなわち、上下に狂った時にははく離現象を促し、左右に狂った場合は、鋼材をモルタル面上で回転させる結果となり、いずれの場合にも精度を期しがたい。
- ⑤ 引抜荷重の測定を目で行なうため、精度が悪く、かつ、引抜直後のショックでテンションメーターのダイヤルゲージがしばしば破損する。
- ⑥ 鉛直荷重がモルタル面に一様分布されない。

(3) 半割鉄筋を用いる方法

a) 供試体製作と測定原理 (2)における欠点を改めるため、供試体製法、鉛直加圧装置、そして引抜荷重測定装置などに若干の工夫を加える。すなわち、③と④の一部を改めるため、図-8に示すごとき半割鉄筋供試体を用いる。また、②を改めるために、半割鉄筋は下側に伏せた状態でモルタル打設を行なう。つぎに⑤の欠

図-8

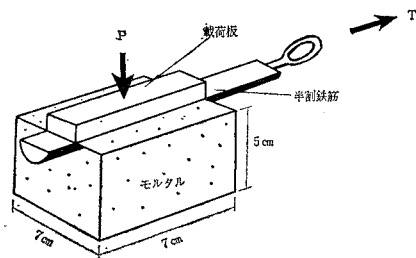
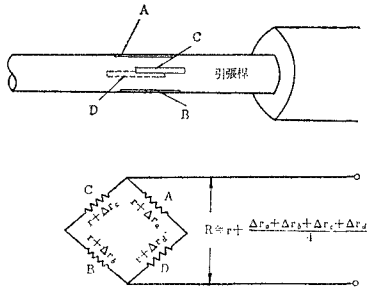


図-9 ゲージ貼付ならびに結線法



点を除くため、ひずみリング方式をワイヤー ストレインゲージ方式に変更する。すなわち、写真-1 に示した引張棒の表面にワイヤー ストレインゲージを貼布し、新興通信工業KK製 AS3/A 型自記記録計で引抜荷重を正確にとらえる。その際、ワイヤー ストレインゲージの結線法は、筆者がコンクリート円柱供試体の弾性係数測定のために工夫した方法³⁾を転用する。すなわち 図-9 において、引張棒に貼布された 4 枚のストレインゲージ中、相対するゲージを直列に接続し、それら 2 組を並列接続する方法である。いま、ゲージ抵抗値 r を有するストレインゲージ A, B, C, D が荷重を受けてそれぞれ $\Delta ra, \Delta rb, \Delta rc, \Delta rd$ なる抵抗変化を生じたとするときの全抵抗値 R は

$$R \div r \left[1 + \frac{\Delta ra/r + \Delta rb/r + \Delta rc/r + \Delta rd/r}{4} \right]$$

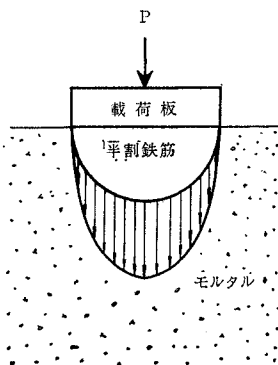
$$\div r \left[1 + \frac{(\epsilon a + \epsilon b + \epsilon c + \epsilon d)G.F.}{4} \right]$$

$\epsilon a, \epsilon b, \epsilon c, \epsilon d$: ゲージ A, B, C, D のひずみ
ここに

G.F. : Gauge Factor

となる。したがってこの結線法を用いればスイッチボックスのターミナルを 4 分の 1 に節約できてわずか 2 個で済み、ひずみの平均値が自動的に得られる利点がある。もう一つの改良点は、図-8 に示したとおり、半割鉄筋上に載荷板を置き、鉛直集中荷重がモルタル面へ一様に分布するように図ったことにある。

図-10 付着面応力分布



b) この方法の欠点

①' 鉄筋の表面をサンドペーパーで仕上げて PC 鋼線の表面状態に似せたが、PC 鋼線のものではない。

④' 引抜方向が上下に狂った場合には、半割鉄筋がモルタル面からはく離しようとする。

⑦ 半割鉄筋供試体

図-11

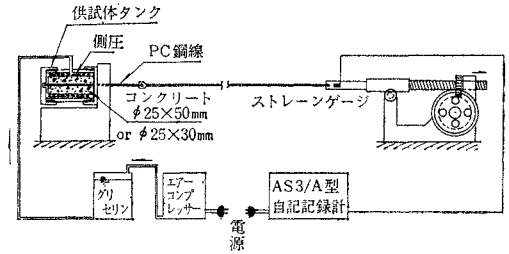
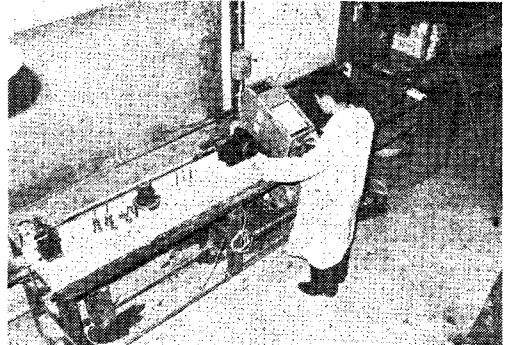


写真-2 測定全景



が、載荷板を介して、鉛直荷重 P を受ける場合に、鉄筋とモルタルの付着面における応力分布は複雑であり、厳密には知りたい(図-10)。

(4) PC 鋼線そのものを用いる方法

a) 供試体製作と測定原理 (2)の方法は(1)の場合にくらべ相当に改善はされたが、PC 鋼線について直接測定する方法ではない。そこで、筆者は(2)をさらに改良して、図-11、写真-2 に示すような方法を見出したり。すなわち、PC 鋼線を中央に通した $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ のコンクリート供試体の円周方向からエアーコンプレッサーによる油圧を加えておき、PC 鋼線に引張荷重を加えて引抜く方法である。この方法によれば、(2)の欠点①', ④'そして⑦などは一きよに除かれたことになる。

図-12 供試体用型わく

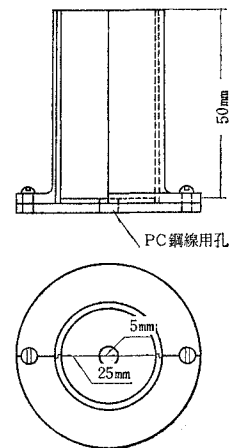
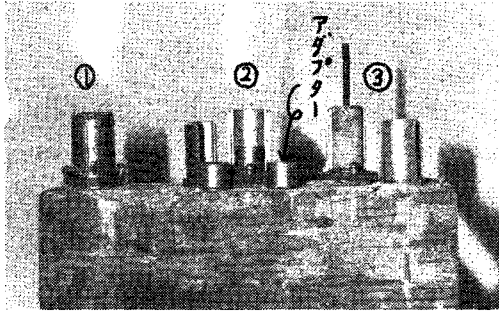


図-12、写真-3 は供試体製作用の型わくである。式(4)からわかるように、加圧は、理論的には 2 段階でよいわけであるが、精度を高める意味から数段階実施するものとする。本実験において筆者は PC 鋼線、コンクリートを同じくする供試体を大体 6 個ずつ製作した。

本法の、前二者と異なる特徴の一つは、加圧装置に液圧を採用したことである。液圧にすればコンクリート円筒の

写真-3 型わく組立, 脱型



周囲に等布外圧として作用することになるから、解析が容易であり、また、液体として粘性の高いグリセリンを用いたのは、コンクリート内面への浸透を極力、防止することを意図したためである。比較的高圧下で使用することから、粘性の低い液体では、コンクリートの内部に深く浸透し、肝心のPC鋼線との付着面のボンドを低下させる懸念もなしとしない。

この方法では、一般の引抜試験と同様に加力側から軸圧も生じ、その影響を免がれ得ないが、側圧を大ならしめることにより、その影響を抑えることができる。

なお、本法の原理は、本質的には(1),(2)の場合と同じであるが、PC鋼線とコンクリートの付着面の圧力を理論的に求めておかねばならない。

いま、図-13に示すごとく、コンクリート供試体の外側に等布側圧 p が加えられた場合、PC鋼

線とコンクリートとの付着面の圧力 \bar{p} は、厚肉円筒理論によって、つぎのごとく求められる。解析に先立ち、まず、記号を定める。

- E_c, E_s : コンクリートおよびPC鋼線の弾性係数
- ν_c, ν_s : コンクリートおよびPC鋼線のポアソン比
- r_1, r_2 : PC鋼線の半径、コンクリート供試体の外径

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_c}{1-\nu_c} \left[C(1+\nu_c) - \frac{D}{r_1^2} (1-\nu_c) \right] &= -\bar{p} \\ \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \left[C(1+\nu_c) - \frac{D}{r_2^2} (1-\nu_c) \right] &= -p \end{aligned} \right\} (6)$$

式(6)を解いて

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{(1-\nu_c)(\bar{p}r_1^2 - pr_2^2)}{E_c(r_2^2 - r_1^2)} \\ D &= \frac{(1+\nu_c)r_1^2r_2^2(\bar{p}-p)}{E_c(r_2^2 - r_1^2)} \end{aligned} \right\} (7)$$

コンクリートの内壁 \bar{r} 点の変位は式(8)で与えられ

るから

$$U_b = Cr_1 + \frac{D}{r_1} \dots\dots\dots(8)$$

式(7)を式(8)に代入し、整理すると

$$U_b = \frac{r_1}{E_c(r_2^2 - r_1^2)} [(1-\nu_c)(r_1^2\bar{p} - r_2^2p) + r_2^2(1+\nu_c)(\bar{p}-p)] \dots\dots\dots(9)$$

つぎに、PC鋼線の外壁 \bar{a} 点の変位を計算する。中実円筒の場合には内径、内圧を0とおけばよいから式(7)より

$$\left. \begin{aligned} C &= -\frac{(1-\nu_s)\bar{p}}{E_s} \\ D &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

したがって、 \bar{a} 点の変位 U_a は式(11)で与えられる。

$$U_a = -\frac{(1-\nu_s)\bar{p}r_1}{E_s} \dots\dots\dots(11)$$

適合の条件、 $U_a = U_b$ が満足されねばならぬから

$$\begin{aligned} -\frac{r_1(1-\nu_s)\bar{p}}{E_s} &= \frac{r_1}{E_s(r_2^2 - r_1^2)} \\ &\cdot [(1-\nu_c)(r_1^2\bar{p} - r_2^2p) + r_2^2(1+\nu_c)(\bar{p}-p)] \end{aligned} \dots\dots\dots(12)$$

式(12)を解けば

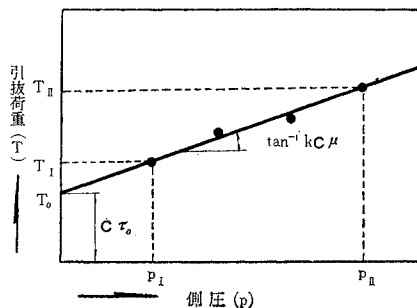
$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{2nr_2^2p}{(1-\nu_s)(r_2^2 - r_1^2) + n\{(1-\nu_c)r_1^2 + (1+\nu_c)r_2^2\}} \\ &= k \cdot p \\ \text{ここに} \\ k &= \frac{2nr_2^2}{(1-\nu_s)(r_2^2 - r_1^2) + n\{(1-\nu_c)r_1^2 + (1+\nu_c)r_2^2\}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

以上で \bar{p} と p の関係式が得られたから、つぎに、側圧ならびに引抜荷重から摩擦係数、純付着力を求める式を導く。

図-14に示すように、縦軸に引抜荷重 T 、横軸に側圧 p をとる。いま、側圧 p_1 の時の引抜荷重を T_1 、側圧 p_2 の時の引抜荷重を T_2 として、それら2測点を結ぶ直線を引く。供試体の長さを l 、摩擦係数を μ 、そして純付着力を τ_0 とすれば式(4)と同様に

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi r_1 l (\tau_0 + \mu \bar{p}_1) \\ T_2 &= 2\pi r_1 l (\tau_0 + \mu \bar{p}_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

図-14



とおける。ただし、 l は短かく、ボンド応力は等分布するものとしている。

式(14)を解いて

$$\mu = \frac{T_{II} - T_I}{2\pi r_1 l (\bar{p}_{II} - \bar{p}_I)} \dots\dots\dots(15)$$

さて、式(15)に式(13)を代入すれば

$$\mu = \frac{1}{2\pi r_1 l k} \cdot \frac{T_{II} - T_I}{(p_{II} - p_I)} = \frac{1}{Ck} \tan \theta \dots\dots\dots(16)$$

が得られる。

また、 $p=0$ の場合、 $T=T_0$ とすれば

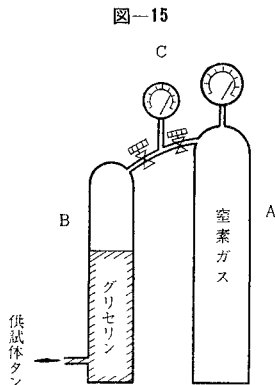
$$\tau_0 = \frac{T_0}{2\pi r_1 l} = \frac{T_0}{C} \dots\dots\dots(17)$$

も得られる。

結局、図-14の $T-p$ 曲線の勾配、ならびに T 軸の切片から容易に μ 、 τ_0 値などが求まることがわかった。

b) 本法のその後の改良点 引抜荷重は摩擦抵抗力と純付着力の和で示される。側圧が小さいと摩擦抵抗力も小さく、したがって、引抜荷重の中で純付着力の占める割合が大きくなる。しかも、この純付着力はセメントミルクの粘着力、コンクリートの硬化収縮に基づく把握力などで構成されるものと考えられ、一般に、比較的ばらつきが大きい。そこで、 μ 値測定の精度を高めるためには、できるだけ高い側圧を加えて引抜くことが望ましい。この見地から、最大圧 10 kg/cm^2 のエアークンプレッサーを使用していた本法の加圧装置部を、最大圧 150 kg/cm^2 の窒素ボンベ方式に変更した。

図-15において、ボンベAには窒素ガス、ボンベBにはグリセリンが入っている。窒素ガスの圧力はコックにより自由に調節でき、圧力計Cによって読み取られる。また、ボンベA、Bには高圧による危険防止のため、 50 kg/cm^2 の圧力を越えないように、それぞれ安全弁を取りつけた。かくして、グリセリンボンベの油圧はパイプを通して安全に供試体タンクに伝えられる。供試体タンクとその取付状況を写真-4に示す。同タンク上部の安全弁は空気抜きも兼ねている。



4. 本法によるPC鋼線の摩擦係数および純付着力の実測

(1) 供試体の種類

摩擦係数や純付着力に影響が大きいと思われる4項目、すなわち、①：コンクリートの配合（特に粗骨材の

写真-4 供試体タンク

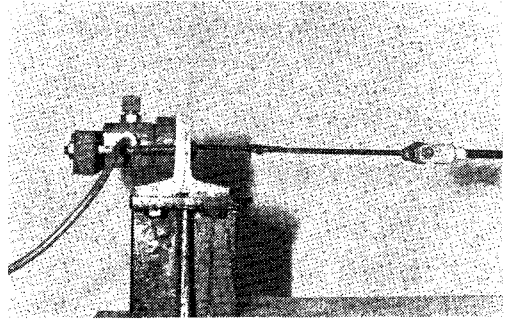


表-1 供試体の種類

比較項目 分類	配合			骨材		鋼線		表面			モルタル	
	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	D ₃		E
配合	30%											
	40%	○		○	○	○	○	○	○	○		
	50%		○									
骨材	砕石	○	○	○		○	○	○	○	○		
	玉石				○							
	軽骨					○						
鋼線	平滑 5mm	○	○	○	○			○	○	○	○	○
	平滑 2.9mm						○					
	異形 5mm						○					
表面	さび付	○	○	○	○	○	○				○	○
	半さび							○				
	さび無し								○			

表-2 供試体用コンクリート示方配合

分類	単水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	水セメント比 (%)	絶対細骨材率 (%)	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量 (kg)
A ₁	220	490	45	40	655	980
A ₂	200	440	45	50	880	880
A ₃	185	410	45	30	550	1230
B ₁	220	490	45	40	655	915
B ₂	220	490	45	40	655	525
C ₁ , C ₂ , D ₁ , D ₂ , D ₃	220	490	45	40	655	980
E	351	779	45		1046	

(注) 本実験に用いた粗骨材は、供試体の大きさが非常に小さいことに制約されたので、特に JIS 7.93 mm ふるいを通過し、5 mm ふるいにとどまるものとした。

量、絶対細骨材率)、②：骨材の種類、③：PC鋼線の種類、④：PC鋼線の表面状態などについて検討するため、供試体の種類は表-1のごとく計画した。

表-1の分類欄の A₁, A₂, A₃, B₁, …… などについて、コンクリート示方配合を示せば表-2となる。

(2) 供試体用コンクリートの材料、圧縮強度、弾性係数

セメントは、普通ポルトランドセメント、早強セメントの2種類を使用した。それぞれの比重は3.16, 3.13であった。細骨材は福岡市海の中道産の砂(比重2.56)を用いた。粗骨材には、砕石(花崗岩系, 比重2.66, 吸水率1.6%), 玉砂利(川砂利, 比重2.58, 吸水率1.5

表-3 供試体用コンクリートの圧縮強度、弾性係数

比較項目		4週 圧縮強度平均 (kg/cm ²)	4週 弾性係数平均 (kg/cm ²)
s/a を変えたもの	s/a=30%	407	3.10×10 ⁵
	s/a=40%	485	
	s/a=50%	407	
骨材を変えたもの	砕石	485	3.10×10 ⁵
	玉砂利	405	3.00×10 ⁵
	軽骨	355	2.34×10 ⁵
	モルタル	454	2.90×10 ⁵

%)、人工軽量骨材(膨張頁岩系、比重1.40、吸水率6.5%)の3種類を使用した。図-11に示したごとく、本測定に用いるコンクリート供試体はその外径わずか25mmであり、その中央に5mm鋼線を通すものとすれば空きは10mmにすぎない。したがって粗骨材の最大径には、特別に低い制限を加えなければならなかった。筆者は、やむを得ず JIS 7.93mm ふるいを用いてふるい、かつ、5mm ふるいとどまるもの(一般の場合とはかけ離れるが)を粗骨材として使用することにした。

つぎに、供試体用コンクリートの圧縮強度、弾性係数を示せば、表-3のとおりである。

(3) 実測結果ならびに結果考察

測定は、(1)に掲げたごとき種類について行なったが、その中から代表的数例を示そう。まず、モルタル供試体を用い、径5mmさび付平滑鋼線で実施した測定データを表-4に示し、また、それを図化して図-16に示す。データの中の○印は、たとえば表-4で説明すると、供試体が普通ポルトランドセメントを用いたモルタルより成り、その中にさび付平滑5mm鋼線を5cm埋込んだものであることを意味する。この場合、精度を期すため、特に9個の供試体について、引抜荷重(T)と側圧(p)の関係を実測したが、図-16からわかるように、測点はかなりばらついている。

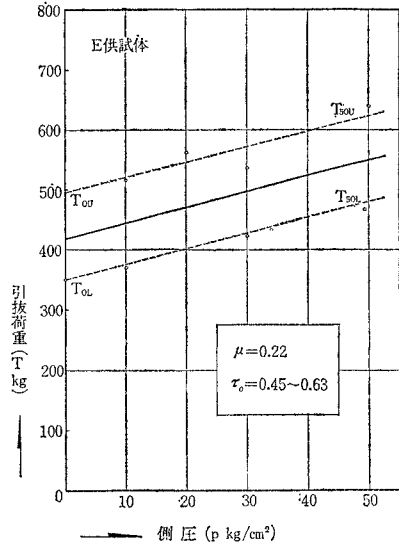
いま、それらの測点から適当な方法、たとえば最小自乗法などによって平均的T-p曲線を求め、それに平行な、下限および上限曲線を引くと、p=0の時のT値、

表-4

PC鋼線のμ, τ ₀ 測定データ						
試料	絶対細骨材率 (s/a)	30%	40%	50%		
		砕石	玉砂利	軽骨	○モルタル	
PC鋼線		○平滑5mm	平滑2.9mm	異形5mm		
分類	表面状態	○さび付	半さび	さび無し	ショーボンド	
E	使用セメント	○普通ポルト	早強			
	供試体の長さ	○5cm	3cm			

側圧 (kg/cm ²)	0	20	30	10	30	49	10	34	50
記録計の読み	40.2	64.5	61.5	19.6	22.2	23.6	25.0	20.5	31.5
引抜荷重 (kg)	350	560	535	370	420	457	520	430	635

図-16



すなわち、T軸の切片は、下限でT_{0L}=350kg、上限でT_{0U}=495kgであり、また、p=50kg/cm²の時のT値は、下限T_{50L}=480kg、上限T_{50U}=625kgである。

摩擦係数は式(16)で示したごとく、T-p曲線の勾配から決定されるから、値は1個定まるが、純付着力は式(17)からわかるように、T_{0L}、T_{0U}それぞれについて定まることになる。筆者は、さきに、3.(4)において、純付着力は比較的ばらつきが大きいから、μ値測定の精度を高めるためには、できるだけ高い側圧を加えることが望ましいことを指摘し、実際に、エアークンプレッサーによる加圧方式をポンベ方式に改良したのであるが、それでも、十分な解決には至っていなかったことがわかる。

さて、別に実測した、E、ν、rなどの値を式(13)に代入して、kを計算し、さらに式(16)によって摩擦係数を求めるとμ=0.22が得られる。また、純付着力は式(17)より、下限値τ_{0L}=0.45kg/mm²、上限値τ_{0U}=0.63kg/mm²となる。

つぎに、完全な本さび状態に入った、径2.9mm平滑鋼線を、砕石使用のコンクリート供試体から引抜いた実験の結果を、図-17に示す。図-17右上の文字は、C₁供試体がs/a=40%で、砕石を用い、鋼線には平滑2.9mmをさび付きで使用し、セメントは普通ポルトランドセメントを使い、そして埋込長が5cmであったことを意味する。図-16の場合と同様に、下限曲線と上限曲線の間隔は、依然として離れており、純付着力の下限値τ_{0L}=0.59kg/mm²、上限値τ_{0U}=0.80kg/mm²と、比較的過大な値が得られた。本鋼線はコイル状に巻いたまま10年余、倉庫に放置されていたものであるから、多少の屈曲が残っていて、そのため引抜抵抗力を増大させた

ものと解される。摩擦係数も、予想外に大きく $\mu=0.66$ が得られた。

図-18 および 図-19 などは、それぞれ、 s/a 、骨材、鋼線、セメント、そして供試体の長さを同じくし、鋼線の表面状態のみ変えた場合の実測結果を示したもので、前者はさび付、後者はさびなしの場合である。これら 図

図-17

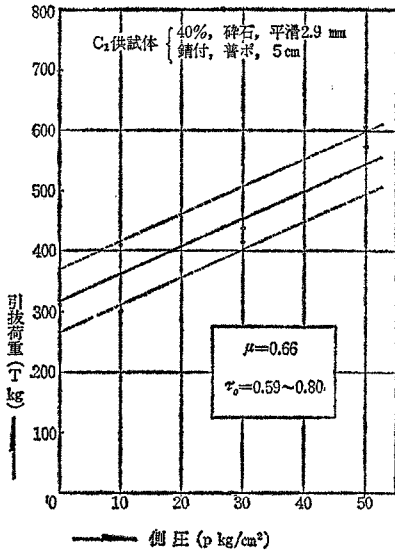


図-18

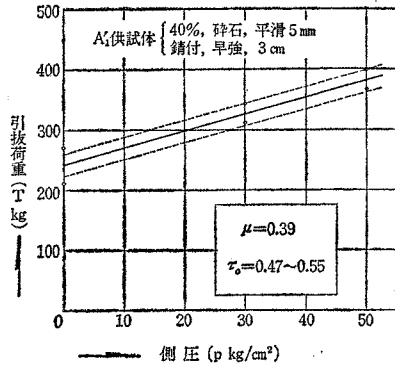


図-19

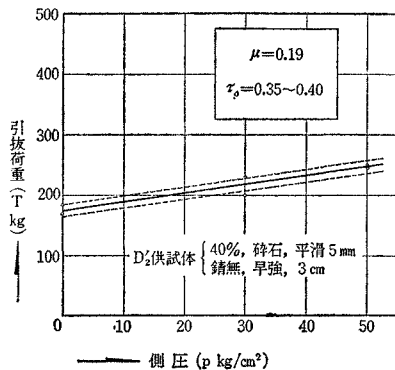
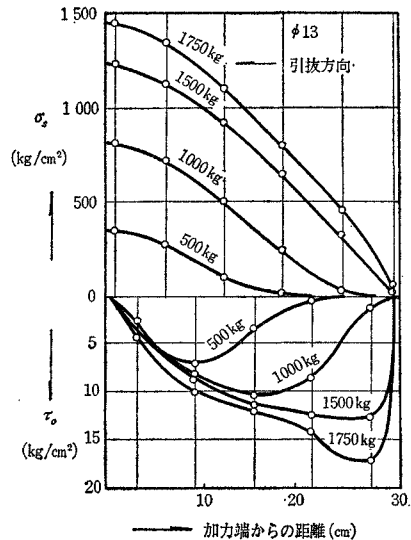


図-18、図-19 を前掲の図-16、図-17 と比較して、ただちに気付く点は、下限曲線と上限曲線の幅が著しくせばまってきたことである。筆者は、この幅を小さくするための方法として、さきに、側圧の増大策を採り、改善を進めたが、今回は方向を転じて、供試体の長さを短縮し、 $l=3\text{cm}$ で実施したことが、好結果を生むに至った原因と考えている。その理由を、つぎに述べる。

一般に、鉄筋の引抜試験においては、引抜荷重を付着面積で除した、いわゆる、平均付着応力度の考え方が許容されているが、それは厳密には成立せず、ボンド応力は、埋込長や荷重、そして鉄筋の種類などによって、複雑な分布をすることは、今日、異論のないところである。径 13 mm の普通丸鋼について行なった筆者らの実験^{5),6)}から、一例を掲げれば、図-20 のごとくなり、そのことを明白に物語っている。しかしながら、埋込長が非常に短い場合には、等分布の仮定が近似的に成立するわけで、本測定の場合、当初 7 cm であった供試体長さをやがて、5 cm に短縮し、さらに今回のごとく 3 cm にしたのは、このような考慮に基づいていた。しかも、側圧を増大し、かつ、供試体長さ、すなわち埋込長を短縮すれば、引抜抵抗力の中に占める、純付着力による抵抗力の比重が小さくなり、したがって、図-16、図-17 に見られたごとき純付着力のばらつきも小さくなる理屈である。さらにまた、供試体の長さを短くすればするほど、PC鋼線の屈曲に基づく引抜抵抗力も軽減され、これが、見掛上、純付着力に加重されるへい害をも少なくすることができることになる。よって今後は供試体の長さは 3 cm にすることが望ましい。

写真-3 に示したごとき 3 cm 供試体を作る時には 5 cm 供試体用型わくの中に長さ 2 cm の充填物を入れて併用する。

図-20 普通丸鋼の引抜き試験結果



さて、図-18よりさび付の場合の摩擦係数を求めると、 $\mu=0.39$ が得られ、また、 $T_{oL}=362\text{ kg}$ 、 $T_{oU}=400\text{ kg}$ であるから、純付着力は $\tau_0=0.47\sim 0.55\text{ kg/mm}^2$ となる。同様にさび無しの場合には、図-19より、 $\mu=0.19$ 、 $\tau_0=0.35\sim 0.40\text{ kg/mm}^2$ が得られる。 μ 値を比較してみると、さび付鋼線はさび無しの場合の2倍にも達しており、さびの効果が著しいことを示している。そして、2.でも述べたとおり、プレテンション部材の付着長は、 μ 値を増加させることによって非常に短縮され得るから、平滑鋼線は完全さびの状態で使用することが望ましい。

ここで、さびの特性を眺めてみよう。図-21、図-22、図-23、図-24などはそれぞれさび無しならびにさび付平滑鋼線を引抜く場合の引張荷重の時間的推移をみる

図-21

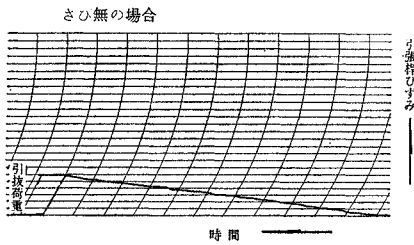


図-22

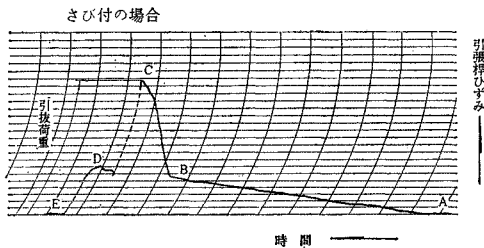


図-23

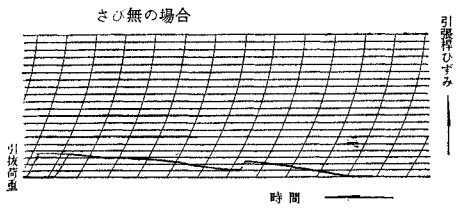
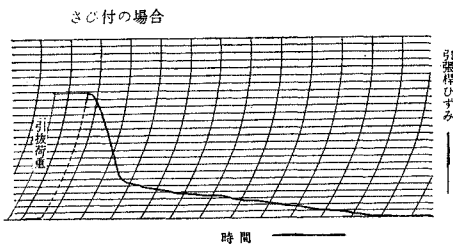


図-24



ため、オッシログラフ上の実測結果をぬき出して示したものである。これらのうち、前二者は一瞬にして抜け出したものであり、後二者は抜け出しの途中で、抵抗を示した例である。これらによると、さび無し鋼線の場合には、終始一様な上昇を示すに対し、さび付の場合には、終局近くで急上昇がみられ、前者より相当に高い引抜抵抗を示している。筆者は、前掲、図-20に13mm普通丸鋼の引抜試験の際の鉄筋応力度およびボンド応力度分布曲線を示したが、さらに、図-25に同径異形丸鋼に関して示す。普通丸鋼(図-20)にさび無し鋼線(図-21)を、異形丸鋼(図-25)にはさび付鋼線(図-22)を対比させて考えると、さびの特性がうかがえて興味深い。

図-26は、さび付鋼線の付着面を微視的に仮想したものである。さび付鋼線の場合の終局近傍、すなわち、ある程度相対的ずれが生じた後で、強い引抜抵抗が見られるのは、同図において鋼線の山とコンクリートの谷が接触していたものが、次第にずれて、山と山が接触するに至るためであろう。

つぎに、図-23、図-24などにみられるごとき、第2次の山が存在した理由は、鋼線が滑動し始めた後でも、付着面の roughness に基づくボンドが働らいたためと解される。また、さび付の鋼線で、ほとんどの場合たとえば、図-24のごとく、2次山の高さ(D)が、1次山の急上昇点(B)の高さに、ほぼ一致していることは注目に値する。図-26における鋼線の山とコンクリー

図-25 異形丸鋼の引抜き試験結果

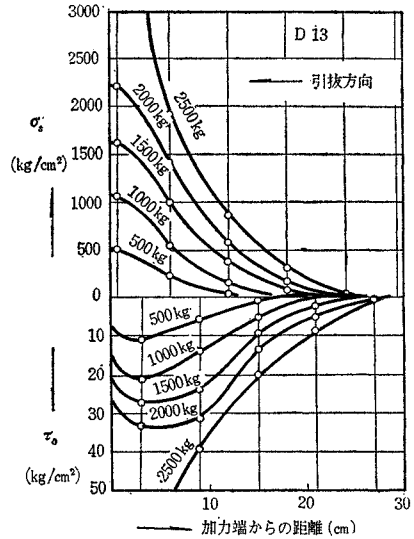
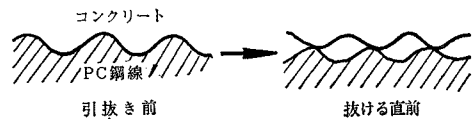


図-26



トの山が接触する時が図-23の(C)に相当し、同図の(B),(D)点は、すべり出しの前後に当り、いずれの場合も、鋼線の山とコンクリートの谷が接触している状態にあるため、ほぼ、同じような高さを示すのではあるまいか。なお、B-C-Dなる山区間は、さび付鋼線に特有のものであることから、フリクションボンドに関係する区間と考えられ、また、滑動前のA-B区間は粘着力、滑動後のD-E区間はスリップ後の付着面のroughnessに基づくボンドが関係しているものと解される。

表-1のA₁, A₂, A₃供試体などは、コンクリートの絶対細骨材率の変化が摩擦係数にどのように影響するかを調べるために計画されたが、それらの実測結果を表-5にまとめる。

表-5

s/a	摩擦係数	純付着力 (kg/mm ²)
30%	0.40	0.55~0.80
40%	0.34	0.62~0.78
50%	0.31	0.65~0.83

(注) l=5cm の供試体で測定した値

一般に、粗骨材が多くなれば(もちろん限度はあるが)、鋼線とコンクリート間の摩擦は強化されそうに思われるが、表-5の実測結果はそれを裏付けている。すなわち、s/aが30%, 40%, 50%と増大するにしたがいμ値は0.40, 0.34, 0.31と減少している。また、同表によれば、s/aの変化にともなってτ_c値に著変は認められないが、平均値と比較すれば、μ値の場合とは逆に増大している。s/aが大きくなると、モルタルの量が多くなり、結果的に純付着力を増大させるためと考えられる。

つぎに、コンクリートに用いる骨材の種類は、摩擦係数や純付着力にどのように影響するかについて調べた結果を表-6に示そう。

表-6

骨材の種類	摩擦係数	純付着力 (kg/mm ²)	σ ₂₈ (kg/cm ²)
砕石	0.34	0.62~0.78	485
玉砂利	0.46	0.52~0.74	405
軽骨	0.51	0.38~0.66	355

(注) l=5cm の供試体で測定した値

表-6によれば、摩擦係数は砕石、玉砂利、軽量骨材の順に増加しており、純付着力は、逆に減少している。一般に、純付着力と圧縮強度は比例関係にあるといわれているが、表-6右端に付加した4週強度表と対比すれば、その傾向が認められる。なお、表-5、表-6などは供試体長さ5cmで実施した測定結果であるから純付着力値の上下限の差異は比較的大きい。表-4、図-16に示した、モルタル供試体に関するμの実測値が0.22と小さいのは、粗骨材を含んでいないためと考えられる。

なお、本実験の結果から総合的に平滑鋼線の摩擦係数値をながめてみると大体つぎようになる。

さび付	0.35~0.50
半さび	0.3程度
さび無し	0.15~0.20

鋼線径の大小による影響については、表-1にも示したごとく、本測定が主としてφ5mm鋼線について行なったもの多く、φ2.9mmに関するものは少ないため、十分な比較とはならないが、両者の間に目立った差異は認められなかった。理論的には小径鋼線ほどボンド性がよいことになるが、その場合にはむしろコンクリートの品質の影響の方が大きいように思われる。

セメントの種類による差異は、本測定の結果では認められなかった。

異形鋼線およびショーボンド塗布鋼線などはすべて、引抜けず、これらを用いれば鋼線の定着が確実に行なわれることがわかった。しかしながら、このような定着がくり返し荷重に対しても十分耐えるためには今後それらの荷重に対する摩擦係数や純付着力の動向、すなわちボンド疲労の問題もあわせて究明すべきであろう。

5. 結 言

プレテンション部材において、鋼線定着の主役はフリクションボンドであり、鋼線の摩擦係数を高めることが付着長短縮への捷路であろうことは、一般に推測されているところである。そこで筆者は、摩擦係数、純付着力などと付着長との関係を理論的に計算して、グラフに表わし、上記の推測を確かめた。

つぎに、鋼線のさび状態を表わす定義、換言すれば摩擦係数に対する基準が確立されていない現状にかんがみ、しかも、その理由は、簡便有用なる測定法が見出されていないことにあると考え、それを測定する一方法を考案した。

筆者は、この方法によって種々の場合について摩擦係数、純付着力を測定し、また、コンクリート中の骨材の量・種類、PC鋼線の種類・径・表面などは、それらにどのような影響を与えるかを調べ、興味ある結果を得た。

本法は、最初の試作から、つぎつぎと改良を加え、実験も重ねてようやく有用の域に達したと信じているが、何分にも「測定法」なるものには、特別に高い精度が要求されるからその意味において、これで十分に完成したと満足しているわけではない。ことに、本法では費用その他の事情から、小型の供試体を用いたため、粗骨材の最大径に低い制限を加えなければならなかったが、実際のコンクリートそのもので実測するためには、さらに大型化する必要もあろうかと考えている。広く各位のご批判を仰ぐ次第である。

終りに、本研究が昭和39年度文部省科学各個研究費によるものであることを付誌する。また、本文は参考文献1)とともに筆者の九州大学審査学位論文の一部である。

謝 辞

本研究に当って、九州大学 水野高明教授、徳光善治助教授より種々ご助言を賜りました。また、卒論として取り上げて下さった出光 隆(九大)、内藤公紀(若松築港KK)、松尾隆彦(九大)、そして星野親房(九工大)の諸君の他多くの方々のご協力を頂きました。付記して深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 渡辺 明：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，昭和41年
- 2) Akira Watanabe：Studies on the Transmission Length of Pretensioned Prestressed Concrete, The Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. XXIV, No. 3, 1965
- 3) 水野高明・渡辺 明：コンクリートの弾性係数測定の方法と考察，セメント技術年報，昭和40年
- 4) 渡辺 明・出光 隆：PC鋼線のフリクションボンドについて，土木学会西部支部研究発表会，昭和39年
- 5) 水野高明・渡辺 明：丸鋼，異形丸鋼および異形ねじり鉄筋の付着に関する研究，土木学会論文集第93号，昭和38年
- 6) Takaaki Mizuno, Akira Watanabe：Studies on the Distribution of Bond Stresses along Various Reinforcing Bars, The Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. XXV, No. 3, 1966

(1966.4.11・受付)