

# 鉄筋コンクリートの付着応力の分布について

伝田 正直\*・長 尚\*\*

(昭和48年3月26日受理)

## 1. ま え が き

鉄筋コンクリートの付着応力の分布は、平均的な一様分布でなく、幾つかの山を持った波状分布であることを渡辺<sup>1),2)</sup>らは実験により指摘している。

筆者も、コンクリートの引張破壊を防止するために周囲をスパイラル鉄筋もしくは鋼管で補強した、改良された押抜き試験により、波状の付着応力度分布を実測した。本文はその分布性状を報告すると共に、実験モデルを有限要素法を用いた非線形計算により解析し、実験結果と比較検討することにより付着応力度の分布について考察しようとするものである。

なお、最近鉄筋コンクリート構造物の大型化と、高強度コンクリートの使用により、鉄筋数本を一つに束ねた、いわゆる束ね鉄筋<sup>3),4)</sup>が使用されるようになってきた。この場合の付着強度の低下の問題についても若干の実験結果により考察を加える。

## 2. 実 験 方 法

付着強度試験方法には、引抜き、押抜き、両引き、はり試験などがあるが、本実験では押抜き試験を採用した。ただし、押抜き試験の欠点といわれている、コンクリートの引張破壊および加力端の突出鉄筋の座屈などの防止には特別な対策を講じた。

一般に、押抜き試験の場合コンクリート内部に発生する主応力は図-1のようになる。そこで鉄筋とコンクリートの付着が切れて滑り出す前に、鉄筋とコンクリートの境界の部分で加力端からひび割れが進行して破壊が起り完全な付着強度を測定できないことがある。本実験ではこれを防ぐために、ラセン鉄筋もしくは鋼製パイプで側方への変位を拘束した。ただしラセン鉄筋の場合はその効果が鋼製パイプの場合ほどではなかった。

鋼製パイプで補強した実験では、鉄筋がすべり抜けるまでに鉄筋の座屈、接着面の剝離などが起こることを防ぐために配合強度を下げた。

付着応力は近接する2点間の鉄筋の応力差から導かれる。したがって鉄筋のヒズミの分

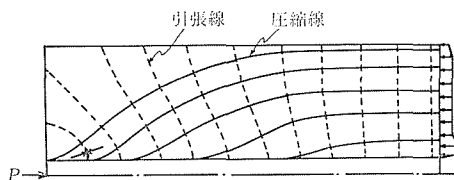
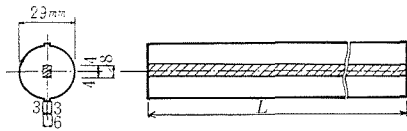


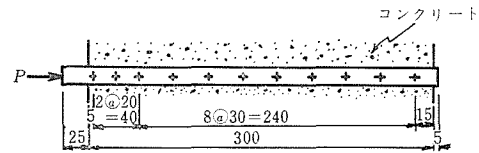
図-1 押抜き試験の場合コンクリート内部に発生する主応力

\* 土木工学教室 助手

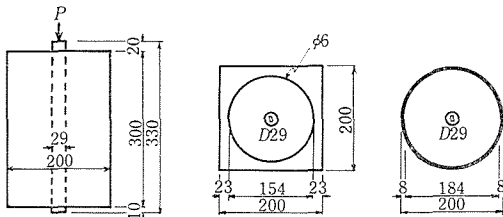
\*\* 土木工学教室 教授



図一 2 鉄筋加工図



図一 3 ゲージ間隔



- (a) 側面図
- (b) ラセン鉄筋で補強した場合の断面図
- (c) 鋼製パイプで補強した場合の断面図

図一 4 供試体諸元

表一 1 骨材, セメントの諸元

	比重	吸水率 (%)	粗粒率	備 考
細骨材	2.57	1.07	2.4	
粗骨材	2.58	1.28	—	粒度調整
セメント	3.15	—	—	

表一 2 コンクリートの配合

配合番号 設計基準強度	最大粗骨材 寸法 (mm)	スランプ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	単位骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
配合 1 $\sigma_{25} = 250 \text{ kg/cm}^2$	20	10 ± 1	50	42.35	170	340	775	1057
配合 2 $\sigma_{25} = 150 \text{ kg/cm}^2$	20	10 ± 1	60	40.35	185	308	722	1076

布を知れば付着応力は求まることとなるが、鉄筋表面にゲージを貼ってヒズミを実測することはコンクリートとの接触面を乱し、又測定にも困難がともなう。そこで、本実験では渡辺の提案した方法によった。すなわち鉄筋をミリングマシンで凹型に溝切加工し、その中にストレインゲージを貼付し、これを二つ重ねて接着した鉄筋を用いて鉄筋内部のヒズミを測定した(加工図は図一 2 参照)。ゲージ間隔は図一 3 に示す。

供試体、使用鉄筋、ラセン鉄筋、鋼製パイプの諸元は図一 4 に示す。骨材およびセメントの諸元は表一 1 に、コンクリートの配合は表一 2 に示す。

実施した試験種別を表一 3 に示す。

### 3. 有限要素法による解析<sup>5)~10)</sup>

鉄筋は供試体断面の中心に配置したので、これは軸対称問題と考えられる。座標軸は鉄筋軸方向を z 軸、これと直角方向を r 軸とする。z 方向は鉄筋の軸に直角な面でいくつか

表-3 実施した試験種別

		補強形式	使用 ゲージ	コンクリート 配合及強度 ( $\sigma_{28}$ )	実験数	養生方法	材令	結果 グラフ 図番号	備 考				
異 形 鉄 筋  (D29)	一 本	ラセン 鉄筋 $\phi 6\text{mm}$ ピッチ 3cm	PL-5-11	配合 1 250(kg/cm <sup>2</sup> )	3本	水中養生	7日	I	実際の強度  水中養成 $\sigma_7 = 144\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{27} = 242\text{kg/cm}^2$  空中養成 $\sigma_7 = 145\text{kg/cm}^2$				
	3				"	28							
	2				空中養生	7							
	一 本	鋼パイプ	YL-5	配合 1 配合 2 (150kg/cm <sup>2</sup> )	6本 9	恒温恒湿 室	7日	IV, V	配合 1 $\sigma_7 = 210\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{28} = 240\text{kg/cm}^2$  配合 2 $\sigma_7 = 135\text{kg/cm}^2$				
丸 ( $\phi 28$ )	鋼 パイプ	YL-5	配合 2 (150kg/cm <sup>2</sup> )	8本	恒温恒湿 室	7日							

に等分割し、 $r$ 方向は応力の変化を考慮して鉄筋とコンクリートが接する付近で分割要素が小さくなるように分割した。計算に用いる分割例を図-5に示す。供試体と底板の接する部分は $z$ 方向の変位が0であるから図-5中の○印の節点を変位指定して解析する。異形鉄筋の突起の扱い方は図-6の斜線を付した部分のごとく実際の突起間隔とほとんど等しくなるように鉄筋の隣接部分の要素を鉄筋の延長と考へた。 $r = 0$ 付近に分割要素がないのはストレージゲージ貼付用の溝があり空洞のためである。ただしこの空洞は長方形であるが等断面の円形に換算した。有限要素法を用いる場合の基本式は次のとおりである。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} = [B]\{\delta\},$$

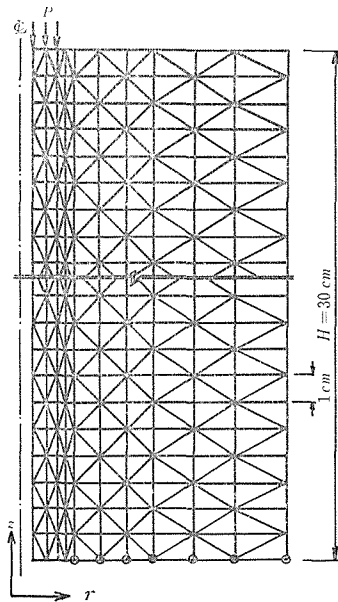


図-5 計算に用いる分割例



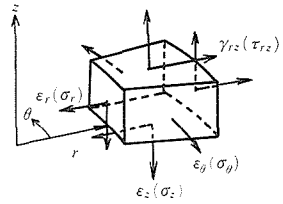
図-6 異形鉄筋の突起の扱い方

$$[B_i] = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} 0 & c_i \\ b_i & 0 \\ \frac{a_i}{r} + b_i + \frac{c_i}{r}z & 0 \\ c_i & b_i \end{pmatrix}$$

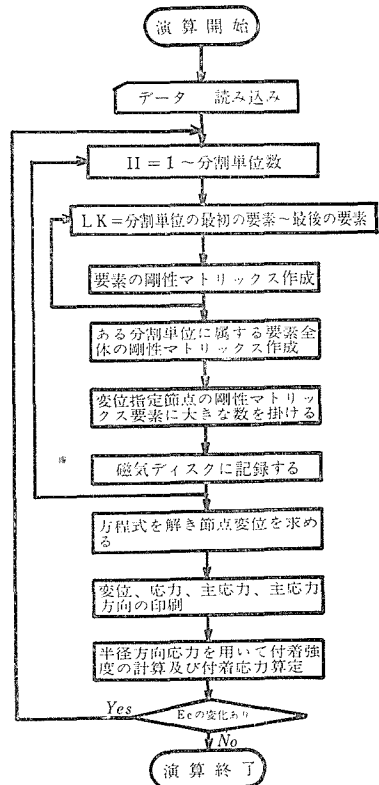
$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{pmatrix}$$

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{pmatrix} = [D]\{\varepsilon\}$$

$$[k] = 2\pi \int \int [B]^T [D] [B] r dr dz.$$



図一七 軸対称物体の応力、ヒズミ成分



図一八 FACOM-230-60 用プログラムフローチャート

ここに $\Delta$ ：要素三角形の断面積， $\varepsilon$ ：ヒズミ， $\delta$ ：節点変位， $k$ ：剛性マトリックス等である．図一七に軸対称物体の応力，ヒズミ成分を示す．節点外力は円周方向に積分した値を用いる．解析に用いた FACOM-230-60用プログラムの概略をフローチャートで示す(図一八)が，実際の状態をできるだけ忠実に計算に取り入れるために付着のすべりとコンクリートの弾性係数の変化を考慮した非線形計算(繰り返し演算)を行なった．

まず，付着のすべりは次のように扱う．ある要素において純付着力( $\tau_{op}$ )，摩擦力( $\mu\sigma_r$  = 摩擦係数 $\times$ 半径方向応力)，機械的抵抗力( $\tau_{oq}$ )の3種類を考えた付着強度( $\tau_{om}$ )，すなわち  $\tau_{om} = \tau_{op} + \mu\sigma_r + \tau_{oq}$  と2点間の応力差から求まる付着応力( $\tau_o$ )の関係が， $\tau_o > \tau_{om}$  となった場合，この要素付近のコンクリートの弾性係数  $E_c$  を  $E'_c (= E_c \times (\tau_{om}/\tau_o)^\alpha)$  に減少させる．次にどのコンクリート要素もヒズミによって弾性係数を変化させる(図一九の応力-ヒズミ曲線\*を仮定)．鉄筋に接するコンクリートの要素では以上二つのうちで小

\* Nilson, A. H. (1967) の35ページ Table 3・2 を参考にして最大応力( $f_o$ )に対する破壊応力( $f_f$ )，ヒズミ( $e_f$ )を求め，最大応力に対するヒズミ( $e_o$ )は同ページの式によって求めた．

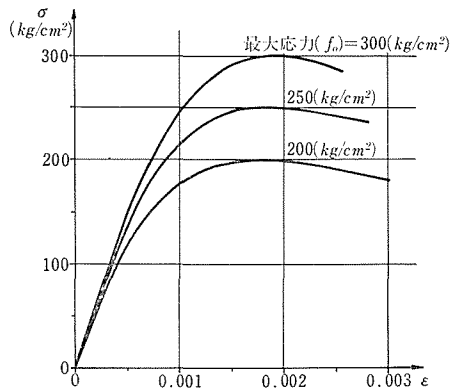


図-9 ヒズミによって弾性係数を変化させるために仮定した応力-ヒズミ曲線

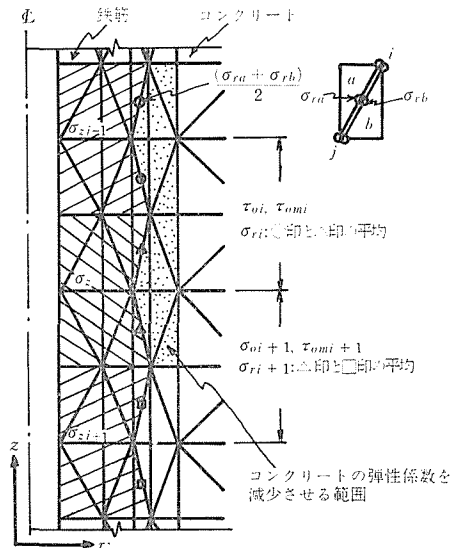


図-10 付着強度 ( $\tau_{om}$ ) を求める式中の半径方向応力 ( $\sigma_r$ ) の求め方

さいほうの弾性係数を次回の計算に用いる。これによって弾性係数の変化がなくなる ( $\tau_o \leq \tau_{om}$ ) まで繰り返し計算を行なう。付着応力と付着強度との関係からコンクリートの弾性係数を減少させる場合の  $\alpha$  の値は小さいほうが精度が良いが収斂が遅いし、2 にすると弾性係数の変化が大きくなりすぎるので 1.3 と定めた。

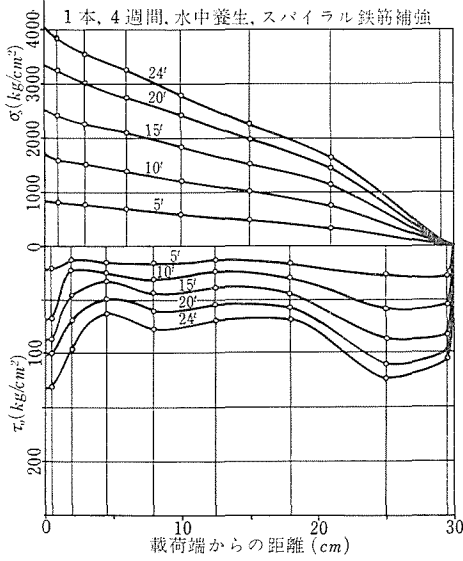
付着強度 ( $\tau_{om}$ ) を求める式中の摩擦力の項の半径方向応力 ( $\sigma_r$ ) は鉄筋の要素から求めたものとコンクリートの要素から求めたものとは違うので図-10の方法によった。すなわち鉄筋の突起部分の要素  $a$  から鉄筋とコンクリートが接する節点  $i, j$  の応力を求め、辺  $ij$  の中点の応力 ( $\sigma_{ra}$ ) を節点  $i, j$  の応力の平均として求める。同様に突起に接するコンクリート要素  $b$  から辺  $ij$  の中点の応力 ( $\sigma_{rb}$ ) を求める。そして  $\sigma_{ra}$  と  $\sigma_{rb}$  の平均を接触面  $ij$  での  $\sigma_r$  とする。このようにして求めた  $\sigma_r$  を  $\tau_o, \tau_{om}$  を考える範囲について図-10のように平均し、これを用いて摩擦力を決定する。

次にある点での鉄筋の  $z$  方向応力は  $z$  軸に沿って 2cm, 10要素の平均 ( $\sigma_{zi-1}, \sigma_{zi}, \sigma_{zi+1}$  等) とし、 $\tau_o, \tau_{om}$  の考える範囲およびコンクリートの弾性係数を減少させる範囲は 4cm, 鉄筋の弾性係数  $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ , ポアソン比 0.30, コンクリートの弾性係数 (初期値)  $2.1 \times 10^8 \text{kg/cm}^2$ , ポアソン比 0.154, 荷重  $20t$  とする。

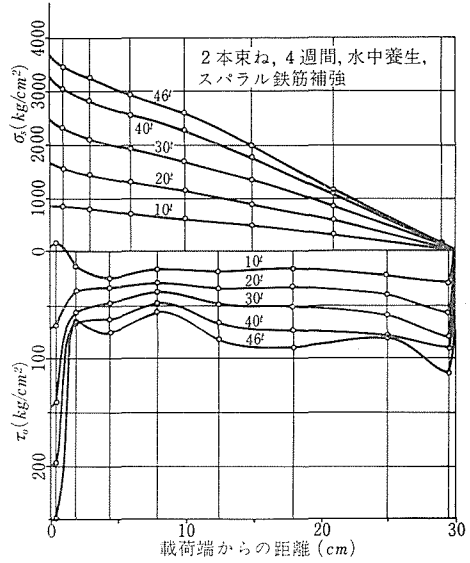
#### 4. 実験結果および解析結果とその考察<sup>11)</sup>

表-3 に示した実験の中から若干の結果を図-11~17および表-4 に示す。

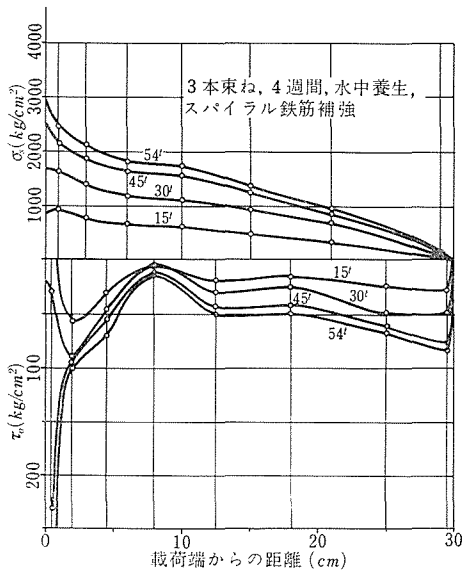
図-11~16は各載荷時における鉄筋の応力と付着応力を左端を、加力端として描いたものである。この場合鉄筋の応力を求めるに当っては、鉄筋の引張試験により得られた  $\sigma - \epsilon$



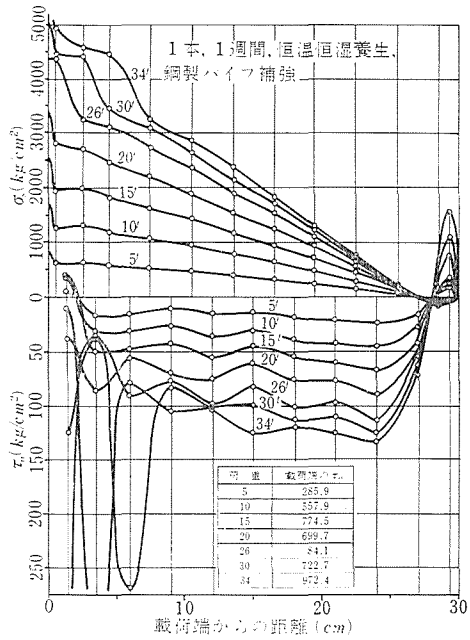
図—11 実験結果 I



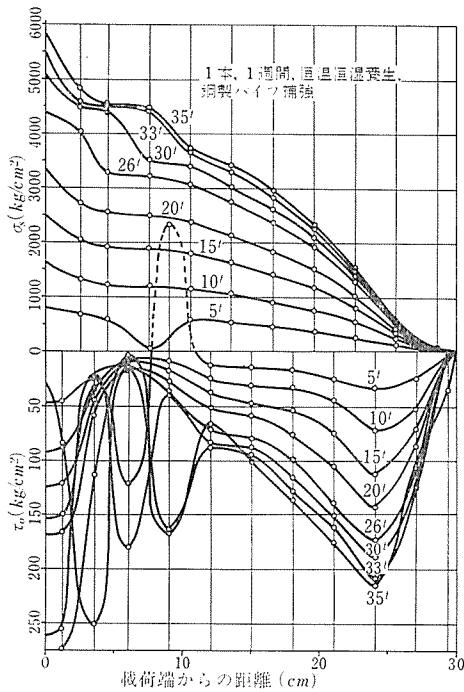
図—12 実験結果 II



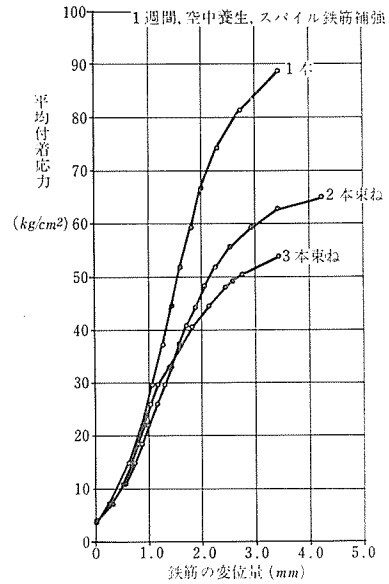
図—13 実験結果 III



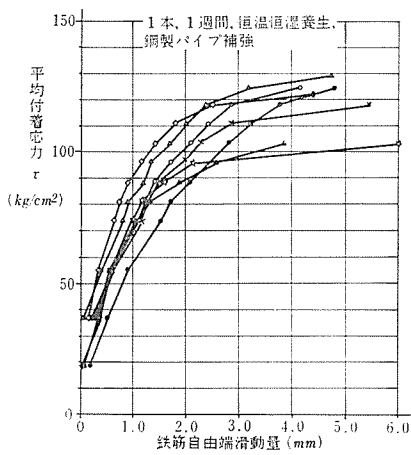
図—14 実験結果 IV



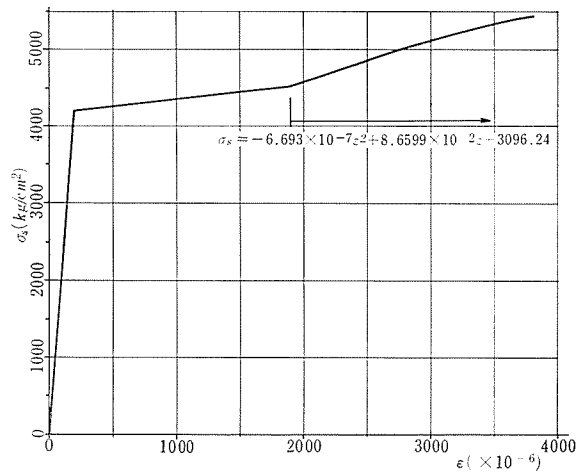
図一15 実験結果 V



図一16 平均付着応力—鉄筋の変位量



図一17 平均付着応力—鉄筋自由端滑動量



図一18 鉄筋の引張試験により得られた  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線

表—4

すべり始めの荷重 (t)	$P'(l)^*$	荷重 $P'$ における最大 $\tau_o$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	平均付着応力 $\tau$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	$\tau_o/\tau$	最大の $\tau_o$ が生ずる位置 (加力端からの距離) (cm)
32	15	90.1	55.6	1.62	27
32	15	67.0	55.6	1.21	24
32	15	113.2	55.6	2.04	24
22	10	66.5	37.0	1.84	27
26	10	67.9	37.0	1.84	3.5
30	15	101.2	55.6	1.82	27

\* すべり始めの荷重の 1/2 以下で一番近い実験時の荷重。

(注) 荷重  $P'$  における最大  $\tau_o$  は加力端の  $\tau_o$  を除外して考えている。

曲線 (図—18) を用いた。また付着応力  $\tau_o$  は次式によって求めた。

$$\tau_o = \frac{A\Delta\sigma_s}{\pi D\Delta l}$$

ここに  $A$  : 鉄筋の断面積,  $D$  : 鉄筋の直径,  $\Delta l$  : 2点間の距離,  $\Delta\sigma_s$  : 2点間の鉄筋の応力差を示す。

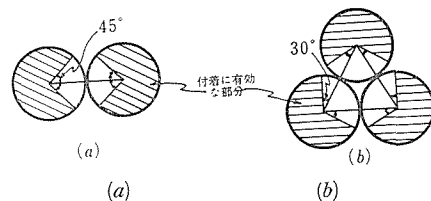
図—16, 17は鉄筋の変位量と平均付着応力度の関係を示す。

表—4は滑り始める荷重の $\frac{1}{2}$ 付近の荷重時の平均付着応力に対する実測された最大付着応力の比を示す。

以上の図表から次のことが言える。

- 1) 付着応力度の分布は波状で、一般に加力端と、非加力端の直前に大きな山が発生する。(図—11~15)
- 2) 加力端から $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{4}$ 入った所に谷が発生する。(図—11~15)
- 3) 鋼製パイプで周囲を補強した場合滑り始めてから載荷端から付着が切れて加力端の付着応力の山が非加力端に移動する。スパイラル鉄筋で周囲を補強した場合はそのような現象はないが、これは側方変位拘束が弱いためと考えられる。(図—11~17)
- 4) 付着応力度の最大値は平均付着応力度の約2倍近くにも達する。(表—4)。
- 5) 付着応力の分布形状およびその値にはかなりばらつきがある。
- 6) 図—16から東ね鉄筋の付着強度の減少を有効付着周長比もしくは図—19に示す付着減少角度で表わすと表—5のようになる。

次に鋼製パイプで補強した実験モデルの

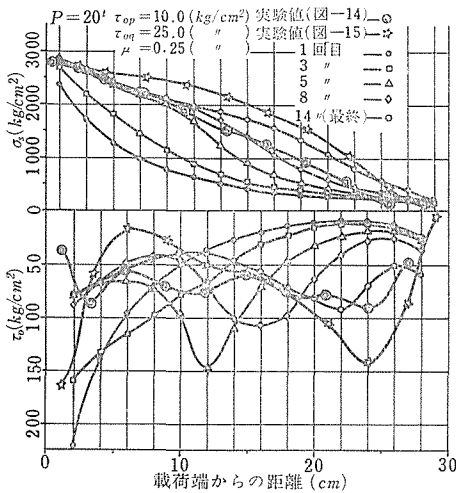


図—19 東ね鉄筋の有効付着周長の減少

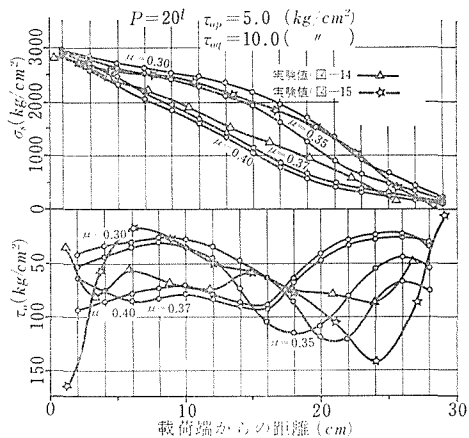


表一五 束ね鉄筋の付着強度の減少

	鉄筋のすべり始めの荷重 (t)	有効付着長比	束ね形状	減少角度(度)	備考
1 本	18	1	—	—	
2 本束ね	28	1.5	図一19 (a)	45	鉄筋中心をむすんだ直線から付着が切れる部分までの角度
3 本束ね	36	2.0	図一19 (b)	30	〃



図一20 計算結果と実験値の比較



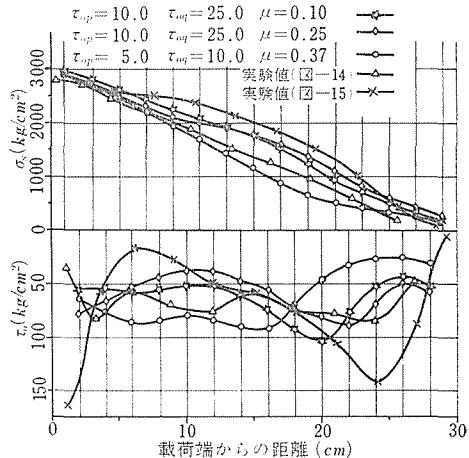
図一21 計算結果と実験値の比較

$P = 20t$  の場合についての有限要素法を用いた非線形計算の結果を図一20~22に示す。

図一20は  $\tau_{op} = 10.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\tau_{oq} = 25.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\mu = 0.25$  とした場合の繰り返し計算の経過の一部を示したもので、1回目は弾性計算に相当する。図一21は  $\tau_{op} = 5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\tau_{oq} = 10.0 \text{ kg/cm}^2$  とし、摩擦係数  $\mu$  を 0.3, 0.35, 0.37, 0.40 と変化させた場合の最終結果である。図一22は  $\tau_{op}$ ,  $\tau_{oq}$ ,  $\mu$  の異った組み合わせの場合の最終結果である。

これらの図から次のことが言える。

- 1) 弾性計算の結果と実験結果とは全く一致しない。



図一22 計算値と実験値の比較

2) 純付着力  $\tau_{op}$  機械的抵抗  $\tau_{oq}$  および摩擦係数  $\mu$  が適当に推定できれば、有限要素法による非線形計算の結果と実験値はかなり一致する。

3)  $\tau_{op}$ ,  $\tau_{oq}$ ,  $\mu$  の僅かの変化に対し結果が非常に変動する。

## 5. む す び

以上の実験結果および解析結果より次のことが結論される。

1) 付着応力度の分布は加力端と非加力端の直前に山があり、加力端から少し入った所に谷がある波状分布で、その最大値はいわゆる平均付着応力度の2倍に達する。

2) 付着の挙動は弾性的でなく塑性的である。

3) 実験値がかなりばらつくのは、一つには測定誤差が付着応力度に敏感に響く（鉄筋応力の差から求めるので）こともあるが、有限要素法の解析結果から判るように、付着性状のばらつきが結果に大きく響くからである。

4) 束ね鉄筋の付着強度の低下は2本束ねの場合  $\frac{1}{1.5}$ 、3本束ねの場合  $\frac{1}{2}$  程度である。

最後に本研究を進めるに当り御協力を頂いた昭和46年度卒研生磯貝滋、西沢博、昭和47年度卒研生倉谷勝敏、高橋秀樹の諸君に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 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，1963.
- 2) 渡辺明：鉄筋の付着ならびにプレストレストコンクリートの付着長に関する研究，1964.
- 3) 斉藤辰彦・土屋秀雄：束ね鉄筋を用いたコンクリート部材，日本建築学会論文報告集，第171号，1970.
- 4) 矢代秀雄：たばね配筋，建築技報，No. 223，1970.
- 5) O. C. シェンキーヴィッツ，Y.K. チェーン著（吉識雅夫）監訳：マトリックス有限要素法，培風館，1970.
- 6) Nilson, A. H: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, University of California, Berkeley, 1967.
- 7) Lutz, L. A. and P. Gergely: Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete, ACI Journal, Vol. 64, No. 11, 1967.
- 8) Perry, E. S. and N. Jundi: Pullout Bond stress Distribution Under Static and Dynamic Repeated Loadings, ACI Journal, Vol. 66, No. 5, 1969.
- 9) Brown, C. B. and Z. S. Szabo: A study of bond between steel and restrained expanding concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 20, No. 62, 1968.
- 10) Nilson, A. H: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by Finite Element Method, ACI Journal, Vol. 65, No. 9, 1968.
- 11) 伝田正直・長 尚・倉谷勝敏・高橋秀樹：コンクリートの付着応力の分布の計算と実験，昭和47年土木学会中部支部講演概要集，II—27，1973.

### Summary

#### On the Bond Stress Distribution of Reinforced Concrete

Masanao DENDA and Takashi CHOU

(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

The bond stress distribution of reinforced concrete was investigated by making a comparison between observed bond stresses for the push on tests and non-linearly analyzed ones using the finite element method.

A typical distribution of the bond stress was observed as a wave-like form having the peaks at a force offering end and a point closed to the free end, and the maximum value was about twice as large as the so-called average bond stress.

In consequence of the appropriate assumptions of the quantitative constants depending on the bond characteristics, the distribution forms obtained from the non-linear analyses were qualitatively in agreement with those obtained from the observations, but the linear analyses, by which the distribution forms were not wave-like, could not make clear the actual observations at all. It was found that the distribution is greatly affected by the slight changes of the bond constants. Then the conclusion may be drawn that the bond behavior in reinforced concrete is not elastic but plastic.

The bond strength of the group bars was also observed, and the coefficients of the effective bond area were nearly 0.67 for 2 bars and 0.5 for 3 bars respectively.