

## 付着応力-すべり関係に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL BOND-SLIP RELATIONSHIP

山尾 芳 秀\*・周 礼 良\*\*・二羽 淳 一 郎\*\*\*  
By Yoshihide YAMAO, Lie-liung CHOU and Junichiro NIWA

## 1. はじめに

昭和 53 年の宮城県沖地震において、コンクリートの圧壊や主鉄筋の座屈により、橋脚が脆性的に破壊した例が報告されており、コンクリート構造物の設計に対する改善の余地を示している。すなわち、コンクリート構造物に対して、許容応力度による安全性の照査と合わせて、鉄筋降伏以後も一定の範囲内において脆性的な破壊を生じることなく変形できるような、変形性能を与えることが必要となってきているのである。

コンクリート構造物に対する変形性能の評価に関しては、現在までに広範な実験的研究が行われているが、この中で特に地震による大きな水平力を受ける場合には、主鉄筋のフーチングからの拔出しが、橋脚天端の水平変位に対して大きな影響を与えることが明らかにされており<sup>2)</sup>、この方面での研究が必要となっている。この鉄筋の引抜けは、非常に重要な課題であるにもかかわらず、鉄筋とコンクリートとの付着性状に関することであるがゆえに、十分に解明されているとはいえない点が多くあると考えられ、その解析の困難さとも組み合わせると従来ほとんど手が付けられていないのが現状である。

本研究は、これらの現状を踏まえて、従来あまり行われていなかった埋込み長さの長い実際の構造物に類似した供試体により、鉄筋とコンクリートとの付着応力-すべり関係を実験的に明らかにしようとするものである。今回の実験で選択した、付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因としては、鉄筋の定着長のほかにコンクリート強度、鉄筋径、鉄筋の付着特性、鉄筋自由端におけるすべりの有無、および荷重端からの距離などである。

従来の研究では、森田、角<sup>3)</sup>に代表されるようにふしが

2 個程度（定着長=3D（D は呼び名で表わした鉄筋直径）の定着長が短い場合の実験を行い、その自由端すべりを測定し付着応力-すべり関係を求めることが多かった。しかし、実際のコンクリート橋脚をみると、主鉄筋は非常にマッシュなフーチング中に十分に長く定着されており、付着応力-すべりのメカニズムは、定着長の短い場合から得られた実験結果とは異なっていると予測される。

鉄筋とコンクリートとの付着強度としては、引抜き試験、押抜き試験、両引き試験、はり試験<sup>4)</sup>および偏心引抜き試験<sup>5)</sup>などがあり、それぞれの特徴を持ち合わせているが、今回の研究では、実際の構造物の挙動をできる限り、実際に近い状態で予測する目的で、マッシュなコンクリートの中心に鉄筋を埋め込み、この鉄筋を引き抜く方法を採用することとした。

つまり、本研究で用いた実験方法によれば、自由端ですべりを生じない実際の橋脚の主鉄筋の付着応力-すべり関係を実験的に求めることが可能となる。なお、従来の実験データと比較すること、および定着長の変化が付着応力-すべり関係にどのような影響を及ぼすかを検討する目的で、定着長の短い実験も若干加えてある。

実験技術上、引抜き試験を行う場合には、さまざまな問題点が存在する。たとえば、鉄筋に貼付したひずみゲージによるひずみの測定精度、供試体からの鉄筋の拔出し量の測定精度、および試験装置の精度などが挙げられるが、これらの改善を行うことは必要不可欠であり、今回の実験では後述するように、特にこれらの諸点について留意して実験を行った。

## 2. 実験の概要

## (1) 供試体

## a) 供試体の形状

供試体は、図-1 に示すように、直径 50 cm の円筒

\* 学生会員 工修 日本大学大学院

\*\* 工修 東京大学大学院

\*\*\* 正会員 工博 東京大学工学部

表-1 実験の要因の組合せ

供試体	鉄筋径 D (mm)	コンクリート強度 $f_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	鉄筋の種類**	定着長 (L)	コンクリートの配合の種類**
A 5	25	180	A-2	24D	A
AU10	25	188	A-2	25D*	C
AU 9	25	303	A-2	25D*	D
A 6	25	425	A-2	25D	B
A 16	19	220	A-3	50D	F
A 7	25	160	A-2	50D	A
A 17	32	220	A-1	50D	F
AU11	25	190	A-2	10D*	C
A 5	25	180	A-2	24D	A
AU 8	25	188	A-2	40D*	C
A 7	25	160	A-2	50D	A
AU12	25	303	A-2	10D*	D
AU 9	25	303	A-2	25D*	D
A 18	25	339	B-1	50D	E
A 20	25	339	B-2	50D	E
A 22	25	339	B-3	50D	E
A 19	25	220	B-1	50D	F
A 21	25	220	B-2	50D	F
A 23	25	220	B-3	50D	F

\* 荷重端から 10D の非付着区間をもち、さらにこの内側に上記の定着長を有する。

\*\* コンクリートの配合の種類は表-2 に示す。また、鉄筋の種類は表-3 および表-4 に示す。

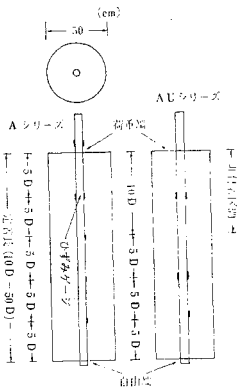


図-1 供試体の形状

形コンクリートの中心に、鉄筋を断面に垂直に埋め込んだものである。これらの供試体の高さは 50 cm から 160 cm の範囲であり、定着長は表-1 に示すとおり 10D から 50D までと十分に大きくしてある。供試体の型枠としては直径 50 cm の紙型枠を用いており、それを切断することにより供試体の高さを自由に変化させた。

b) コンクリート強度

コンクリート強度の変化が 付着応力-すべり関係に及ぼす影響を検討するために、試験時におけるコンクリート強度を 160~425 kgf/cm<sup>2</sup> まで変化させた。これらの

表-2 コンクリートの配合

種類	最大骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スラブ (cm)	コンクリート強度 $f_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
				W	C	S	G	Ad*		
A	25	80	53	170	213	938	920	0.532	14.0	180
B	25	38	43	184	494	669	941	1.235	6.5	425
C	25	80	50	172	215	950	954	0.537	16.5	188
D	25	51	43	168	330	780	1037	0.825	7.8	303
E	25	50	43	163	330	787	1047	0.825	8.5	339
F	20	65	65	174	268	810	1039	0.670	12.0	220

\* AE 減水剤標準形ポゾリス No. 70

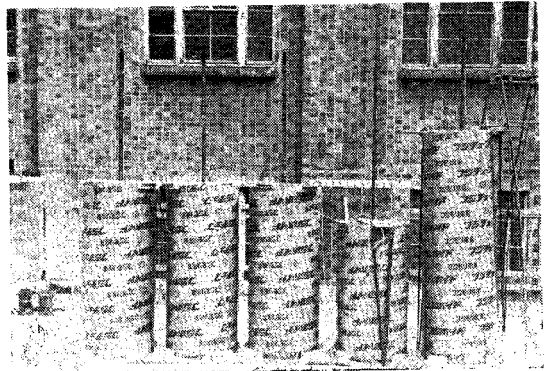


写真-1 コンクリートの打込み状況

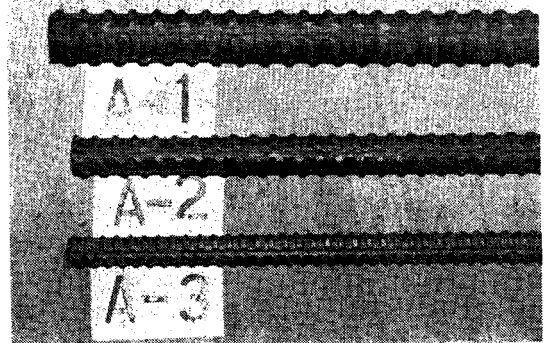


写真-2 使用したねじふし鉄筋

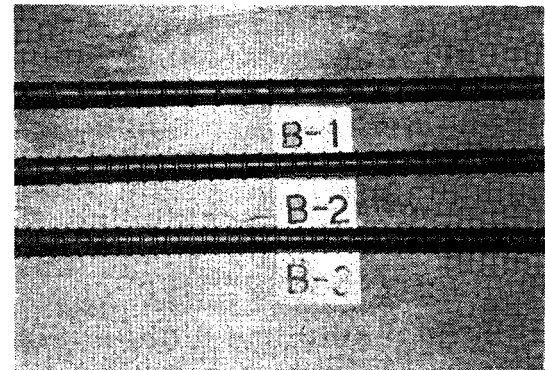


写真-3 使用した切削鉄筋

コンクリートの配合、スラブおよび強度は、表-2 に示すとおりである。コンクリートの打込みは、実際の構造物の打込みと類似させるために、供試体に応じて 5~10 層に分割して、写真-1 に示すように鉄筋の軸線方向に鉛直に打ち込んだ。その際、鉄筋周辺のコンクリートが均一に行き渡るように注意した。コンクリート打込み後、材令 7 日まで湿潤養生を行い、その後実験室において実験開始まで 2~8 日間放置した。

c) 使用鉄筋

表-3 ねじふし鉄筋の形状寸法

記号		A-1	A-2	A-3	
1	鉄筋径	D (mm)	32	25	19
2	鉄筋の外径	$\phi_o$ (mm)	35.8	28.2	21.5
3	鉄筋の内径	$\phi_i$ (mm)	31.0	24.8	18.6
4	鉄筋の断面積	U (cm <sup>2</sup> )	7.94	5.07	2.87
5	ふしの間隔	$l_n$ (mm)	16.6	13.9	9.5
6	ふしの純間隔	$l_o$ (mm)	9.5	7.5	5.8
7	ふしの高さ	h (mm)	2.4	1.7	1.45
8	ふしの有効高さ	$h_e$ (mm)	2.4	1.7	1.45
9	ふし数/100 cm	n	28	36	47
10	支圧面積係数	BA (%)	8.8	8.8	9.1
11	せん断面積係数	SA (%)	41	39	44
12	鉄筋の降伏点*	$f_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	37.8	37.7	36.6

\* 焼入れ前の降伏点

表-4 切削鉄筋\*の形状寸法

記号		B-1	B-2	B-3	
1	丸鋼の外径	$\phi_o$ (mm)	29.9	29.9	29.9
2	丸鋼の内径	$\phi_i$ (mm)	26.1	26.1	26.1
3	ふしの間隔	$l_n$ (mm)	29.9	18.0	13.5
4	ふしの純間隔	$l_o$ (mm)	27.4	15.2	11.0
5	ふしの高さ	h (mm)	1.9	1.9	1.9
6	ふしの有効高さ	$h_e$ (mm)	1.9	1.9	1.9
7	ふし数/100 cm	n	33	55	74
8	支圧面積係数	BA (%)	5.3	8.8	11.7
9	せん断面積係数	SA (%)	56	52	50

\* D=25 mm の異形鉄筋相当  
 断面積 (U) : 5.07 cm<sup>2</sup>  
 周長 (U<sub>o</sub>) : 8.17 cm  
 鉄筋の降伏点 : 31.0 kgf/mm<sup>2</sup> (焼入れ前の降伏点)

鉄筋は、D19、D25 および D32 のねじふし鉄筋と  $\phi 30$  の丸鋼を切削加工して製作した切削鉄筋を使用した。ねじふし鉄筋の形状および寸法は、写真-2 および表-3 に、切削鉄筋の形状および寸法は、写真-3 および表-4 に示した。この切削鉄筋の断面積は、ほぼ異形鉄筋の D25 に相当するものである。

異形鉄筋の付着性状にとって重要なパラメーターは、一般に、ふしの間隔、ふしの高さおよびふし側面の傾斜角などである。今回使用したねじふし鉄筋は、このうちふし側面の傾斜角は同一でふしの間隔およびふしの高さが鉄筋径に比例している。また切削鉄筋は、ふしの高さおよびふし側面の傾斜角を等しいものとし、ふしの間隔のみを変化させたもので、今回の実験のために製作したものである。

これらのねじふし鉄筋および切削鉄筋は、ふしの形状寸法がよく管理されており、さらに両鉄筋とも、ふしを研磨することなくひずみゲージを貼付することができるので付着特性に変化を与えない状態でひずみの測定が可能となるという利点を有する。なお、今回用いたねじふし鉄筋の支圧面積係数<sup>6)</sup>は、8.8~9.1% である。また、切削鉄筋の支圧面積係数は、5.3%、8.8% および 11.7% である。

ねじふし鉄筋および切削鉄筋には、高周波焼入れを施

し、降伏点を 80 kgf/mm<sup>2</sup> 以上としてある。これは鉄筋の降伏点を高めることにより、荷重端側の鉄筋の降伏による局所的な伸びを防止し、付着応力-すべり関係をコンクリート内部の深い位置まで求めることが可能となるように配慮したためである。

降伏点が 30~50 kgf/mm<sup>2</sup> 程度の通常の鉄筋を用いた場合は、荷重の増加に伴い荷重端面から鉄筋が降伏し、降伏域がしだいに自由端側へと進んでいくと考えられる。しかし、この降伏域に達しない部分の  $\tau$ -S 関係は、降伏しない場合の  $\tau$ -S 関係と同様であると考えられる。そこで、本研究では、基礎的な  $\tau$ -S 関係を自由端深くまで明確にするということの主たる目的として、意図的に、荷重端側を降伏させない条件で実験を行うこととした。

d) 定着長

定着長の変化が付着応力-すべり関係に及ぼす影響を検討するために、定着長を 10D~50D (D は呼び名で表わした鉄筋直径) と変化させて実験を行った。また、これらの供試体には、2 種類のシリーズがある。このうちの 1 つは、A シリーズであり、これはコンクリート中の鉄筋全体がコンクリートと付着しているものである。もう一方の AU シリーズは荷重端面から 10D の区間に限り、鉄筋とコンクリートとの付着を除去したものであり、付着応力-すべり関係に荷重端の影響を及ぼさない目的で行ったものである。

これらの実験の要因の組合せは、表-1 に示すとおりである。

(2) 載荷装置および方法

今回の実験では、供試体が非常に大きいために、従来の引抜き試験方法では実験することが不可能である。したがって、写真-4 に示すような載荷プレートおよび載荷リングを製作して引抜き試験を行った。図-2 に示すように、載荷プレートの上に球座を配置し、載荷時における鉄筋の偏心引張りを防止した。この球座の上にセ

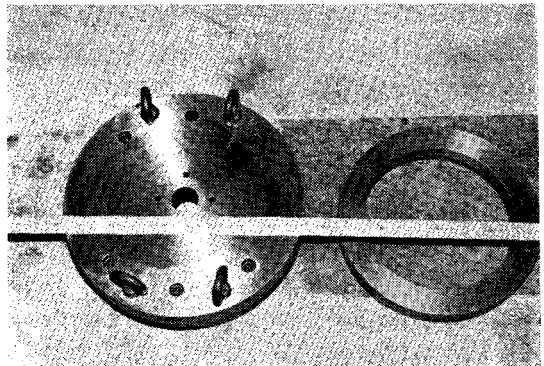


写真-4 載荷プレートおよび載荷リング

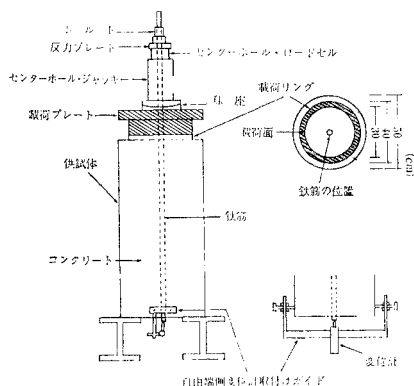


図-2 荷重装置

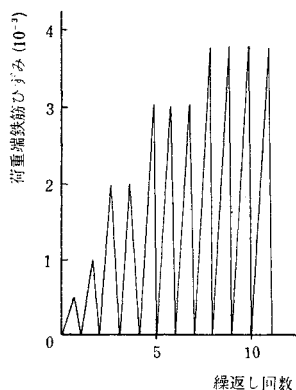


図-3 片側繰返し荷重方法

荷重方法は、図-3に示すような片側繰返し荷重であり、Aシリーズでは荷重端側の鉄筋に貼付したひずみゲージの値によって、また、AUシリーズでは、鉄筋とコンクリートとの付着を除去した非付着区間の鉄筋に貼付したひずみゲージの値によって荷重を制御し、荷重および除荷時に0、500、1000、2000、3000および3750  $\mu$  を目標にして、250  $\mu$  ごとに測定を行うものとした。ただし、今回の実験では、油圧ポンプを用いて加力を行ったために、荷重時および再荷重時における制御は、容易に目標のひずみの値を維持することが可能であったが、除荷時における制御は、急激な油の拔出しによって、目標のひずみの値を目指すのが困難な場合があったので、場合により小刻みに除荷を行い測定を行った。

### (3) 鉄筋ひずみの測定方法

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋のひずみは、図-1に示すように鉄筋に5Dの間隔で貼付したひずみゲージによって測定した。さらに、偏心引張りを監視する目的で、荷重端側に1か所、荷重端面から5Dのコンクリート中に埋め込まれた位置に1か所おのおの2枚ずつ計4枚貼付した。

ひずみゲージを鉄筋に貼付する場合には、一般に、研

磨のために鉄筋のふしや断面を損傷することが避けられないが、このことは、鉄筋本来の付着特性の点から考えれば最小限にしなければならないものである。つまり、ふしの損傷により鉄筋とコンクリートとのかみ合わせが損なわれて付着特性が低下し、さらに、断面の減少により応力集中が起こりやすくなるからである。

ひずみゲージの貼付に関して、特別の注意を払わない予備実験を行い、実験終了後供試体を割裂してひずみゲージの貼付状態を観察した。その結果、高荷重下における繰返しの影響を受けて、ひずみゲージが鉄筋表面から剥離したり、あるいはひずみゲージのリード線と接続コード間が切断したりしている状態が認められた。

そこで、本実験では、ひずみゲージによる測定の精度を向上させるために、以下に述べる方法を用いてひずみゲージを貼付した。

- ① 鉄筋断面にリブのないねじふし鉄筋および切削鉄筋のようにほとんど研磨の必要のない鉄筋を用いる。
- ② ひずみゲージの貼付には、24時間の養生を要する遅延型の接着剤を用いる。
- ③ ひずみゲージのリード線を自由端側に向けて貼付し絶縁のためにリード線の下側およびひずみゲージ防水のためにひずみゲージの上側にブチルゴム系コーティングテープ (VMテープ) を貼り付ける。
- ④ コードの接続に際し、ひずみゲージのリード線に余裕をもたせ、コーティングワックスを薄く塗る。
- ⑤ コードの上から包むように、さらにVMテープを貼付し、これらの周囲にコーティングワックスを塗ることによって防水性を確実にする。

以上の方法を用いてひずみゲージを貼付することにより、信頼性の高いデータを得ることが可能となったのである。

### (4) 鉄筋とコンクリートとの相対変位の測定方法

鉄筋のコンクリートからの拔出しは、以下のように測定した。鉄筋の変位は、荷重端側のコンクリート表面か

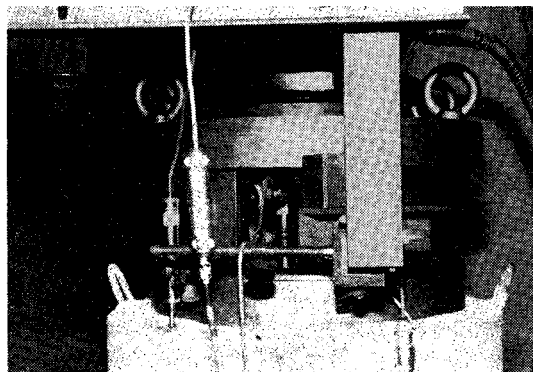


写真-5 荷重端側の変位測定方法

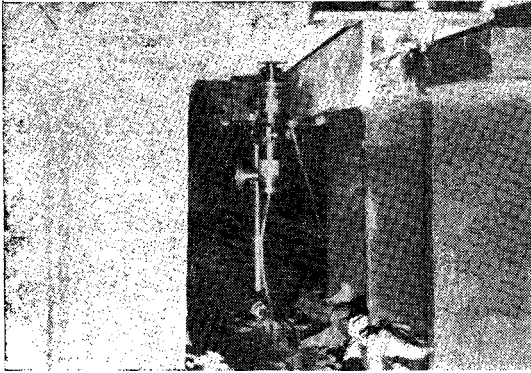


写真-6 自由端側の変位測定方法

ら約 1 cm 離れた位置の鉄筋に取り付けたプレートに、水平変位計をセットして測定を行った。また、コンクリートの変位は、写真-5 に示すように、载荷プレートの外側のコンクリート面にセットした水平変位計によって測定して、鉄筋とコンクリートとの相対変位を求めた。また、自由端側は、写真-6 に示すように供試体の下側にガイドを取り付けて、このガイドにセットした水平変位計によって自由端変位の測定を行った。

鉄筋とコンクリートの相対変位の測定は、付着応力-すべり関係 ( $\tau$ - $S$  関係) の妥当性を検討するための重要な尺度である。したがって、使用する変位計の精度が重要である。このため、今回の実験では、精度が 1/1 000 mm の変位計を使用した。

### 3. 付着応力-すべり関係の解析手法

本研究では、測定された鉄筋のひずみより、付着応力とすべり量を計算するために、以下に示す解析手法を用いた。

ひずみゲージより得られたコンクリート内部での鉄筋ひずみのデータより、ひずみ分布曲線  $\epsilon = \epsilon(x)$  を仮定する。 $\epsilon = \epsilon(x)$  は、隣接した 3 点を通る二次曲線とする。この  $\epsilon = \epsilon(x)$  を順次組み合わせることにより、全体のひずみ分布曲線が得られる。すなわち、ある隣接した 3 点の測定値を、 $(x_{i-1}, \epsilon_{i-1})$ 、 $(x_i, \epsilon_i)$ 、 $(x_{i+1}, \epsilon_{i+1})$  として、

$$\epsilon = \epsilon(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 \dots\dots\dots(1)$$

に代入して、係数  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  を決定する。このとき式 (1) から求められる曲線は、 $(i-1)$  点から  $(i)$  点までを表すものとし、自由端  $x=l$  から荷重端  $x=0$  に向かって次々と曲線を求め、組み合わせることとした。

式 (1) を用いると  $\tau_i(x)$  および  $S_i(x)$  は次式で計算される。

$$\tau_i(x) = -E_s D / [4(b_i + 2c_i x)] \dots\dots\dots(2)$$

$$S_i(x) = S_{i-1}(x) + \int_{x_{i-1}}^{x_i} (a_i + b_i x + c_i x^2) dx \dots\dots\dots(3)$$

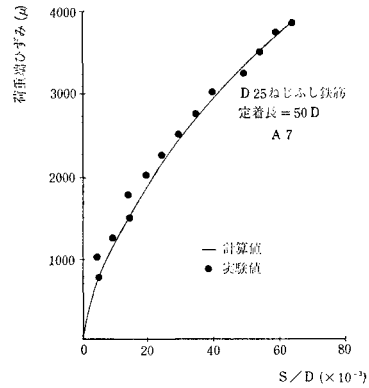


図-4 荷重端におけるすべり量の計算値と実験値の比較

ただし、 $\tau$ : 付着応力、 $S$ : すべり量、 $D$ : 鉄筋径  
 $E_s$ : 鉄筋のヤング係数、 $\epsilon$ : 鉄筋のひずみ  
 ただし、境界条件としては、自由端 ( $x=l$ ) において  $\epsilon(l)=0$  とし、荷重端 ( $x=0$ ) においては荷重端面のコンクリートより外側の鉄筋のひずみを  $\epsilon(0)$  として用いることとした。

上記の方法により、計算されるすべり量と実測されるすべり量を比較して図-4 に示す。これは、自由端すべり量が 0 のときの荷重端における鉄筋のひずみに対して、荷重端でのすべり量の計算値と実験値を示したものである。図より、この計算方法を用いることにより、測定されたひずみ分布から、すべり量が精度よく算定されることが認められる。

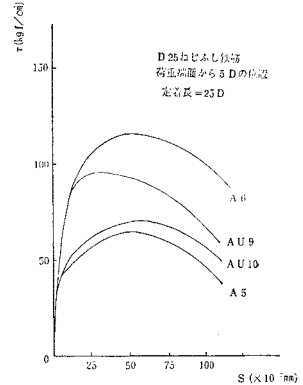


図-5 実測したひずみより計算される付着応力-すべり関係の例

上記の方法により求められる  $\tau$ - $S$  関係を概略的に示すと図-5 のようになる。

### 4. コンクリート強度が $\tau$ - $S$ 関係に及ぼす影響

コンクリート強度の変化による  $\tau$ - $S$  関係を検討するために、定着長を 25D と同一として、コンクリート強度 ( $f_c'$ ) を 180~425 kgf/cm<sup>2</sup> と変化させて実験を行った。

図-6 は、このようにして得られる最大付着応力 ( $\tau_{max}$ ) と  $f_c'$  の関係を示したものである。ここで  $\tau_{max}$  は、5D 間隔でひずみの測定を行った各点でそれぞれ  $\tau$ - $S$  関係を求め、それらの  $\tau$ - $S$  関係のうちの  $\tau$  の最大

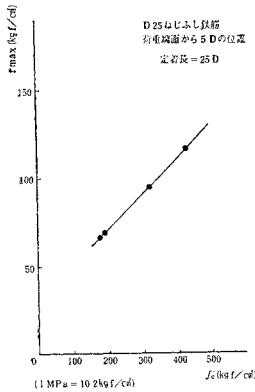


図-6  $\tau_{\max}$ - $f_c'$  関係

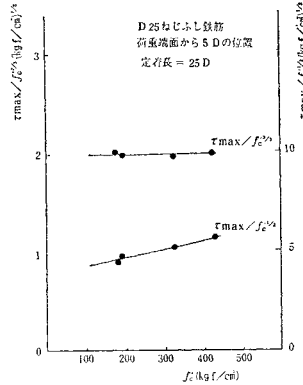


図-7  $\tau_{\max}/f_c'^{1/2}$  および  $\tau_{\max}/f_c'^{2/3}$  とコンクリート強度の関係

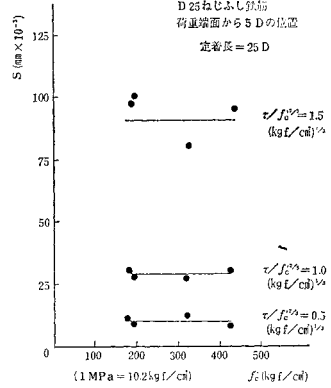


図-8 任意の  $\tau/f_c'^{2/3}$  に対するすべり量とコンクリート強度の関係(荷重端面から 5D の位置)

値とした。

荷重端から 10D の非付着区間を設けた AU シリーズでは、非付着区間から 5D (荷重端からは 15D) の位置の  $\tau$ - $S$  関係から、すべての供試体で  $\tau_{\max}$  が得られた。一方、非付着区間を設けなかった A シリーズでは、荷重端からの圧縮応力等により、荷重端に近い 5D 位置では  $\tau$ - $S$  関係に影響を受けることが予測されたが、今回行った  $f_c'$  が 180~425 kgf/cm<sup>2</sup> 程度での実験データをみる限りその影響はほとんどなく、この場合も荷重端から 5D の位置での  $\tau$ - $S$  関係から  $\tau_{\max}$  が得られた。各供試体はいずれも、D25 のねじふし鉄筋をコンクリート中に埋め込んだものであり、25D の定着長(定着長:  $L$ )を有している。図-6 によれば  $\tau_{\max}$  は、 $f_c'$  が高くなるに伴い、ほぼ直線的に増加している。したがって、 $\tau_{\max}$  に対して、 $f_c'$  が大きく影響を及ぼすことが予測される。そこで、この影響度を定量的に評価することを試みた。

ACI<sup>7)</sup> では、 $\tau_{\max}$  が  $f_c'$  の 1/2 乗に比例している。そこで、 $\tau_{\max}$  を  $f_c'$  の 1/2 乗で正規化すると図-7 に示すように、 $f_c'$  の増加に伴い  $\tau_{\max}/f_c'^{1/2}$  が若干増加していく傾向が認められ、 $f_c'$  の 1/2 乗で正規化したのでは、完全には、 $f_c'$  の影響を表現できないことがわかる。そこで、各種の関数形を用いて整理してみたが、最終的に、 $\tau_{\max}$  を  $f_c'$  の 2/3 乗で正規化すると、図-7 に示すように  $f_c'$  にかかわらず  $\tau_{\max}/f_c'^{2/3}$  の値が一定となることが認められた。したがって、 $\tau_{\max}$  は  $f_c'$  の 2/3 乗に比例すると考えることにより、 $f_c'$  が  $\tau_{\max}$  に及ぼす影響を表わすことが可能となる。

$\tau_{\max}$  に関しては、以上のように、 $f_c'$  の 2/3 乗に比例するとして、整理することが可能であった。そこで次に、求められた  $\tau$ - $S$  関係自体が  $f_c'$  の 2/3 乗により正規化できるかどうかを検討することとした。このため、 $\tau$  を  $f_c'^{2/3}$  で除して、 $\tau/f_c'^{2/3}$ - $S$  関係を求め、 $\tau/f_c'^{2/3}$  が一定の値、すなわち 0.5, 1.0, 1.5 のときの、すべり量

とコンクリート強度との関係を図-8 に示した。これは荷重端から 5D の位置におけるすべり量と  $f_c'$  の関係を示したものである。 $\tau/f_c'^{2/3}$  が 0.5 および 1.0 の場合は、すべり量がいずれの  $f_c'$  においてもほぼ同様な値を示している。また、 $\tau/f_c'^{2/3}$  が 1.5 の場合は、すべり量に若干の差が生じているがおおむね同様の値を示している。

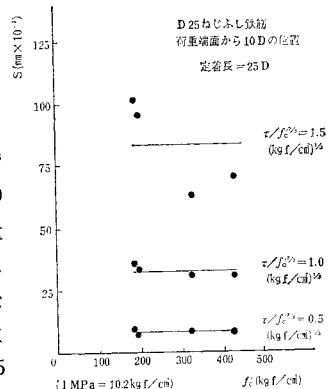


図-9 任意の  $\tau/f_c'^{2/3}$  に対するすべり量とコンクリート強度の関係(荷重端面から 10D の位置)

付着応力度は、鉄筋に沿ったひずみ分布曲線の勾配を意味することから考えても、ひずみ分布の微小な変化に対して、その性質上鋭敏に変化するものである。したがって、付着応力度の実験データのばらつきは、本質的なものであると思われる。さらに、図-9 は荷重端から 10D の位置におけるすべり量と  $f_c'$  を示したものであるが、5D の位置と同じく、この位置においても  $\tau/f_c'^{2/3}$  が一定の値に対しては、ほぼ同様なすべり量を示していることがわかる。

以上のことから、 $f_c'$  の変化が  $\tau$ - $S$  関係に及ぼす影響は、 $\tau$  を  $f_c'$  の 2/3 乗で除することにより、評価することが可能であると考えられる。

### 5. 鉄筋径が $\tau$ - $S$ 関係に及ぼす影響

鉄筋径が  $\tau$ - $S$  関係に及ぼす影響を検討するために、D19, D25 および D32 のねじふし鉄筋を用いて実験

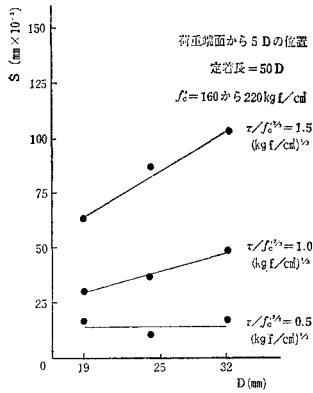


図-10 任意の  $\tau/f_c'^{2/3}$  に対するすべり量と鉄筋径の関係 (荷重端面から 5D の位置)

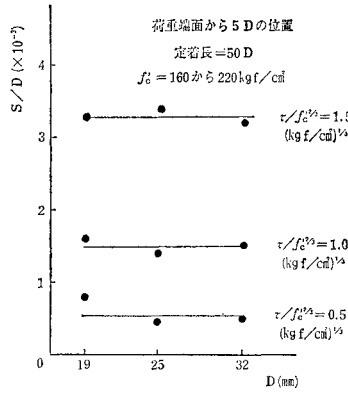


図-11 任意の  $\tau/f_c'^{2/3}$  に対するすべり量/鉄筋径と鉄筋径の関係 (荷重端面から 5D の位置)

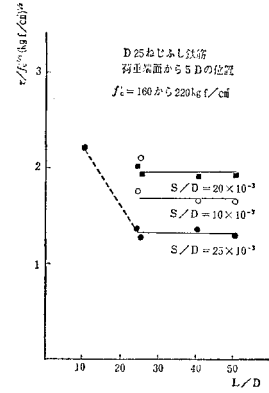


図-12 任意の  $S/D$  に対する  $\tau/f_c'^{2/3}$  と  $L/D$  の関係 ( $f_c' = 160 \sim 220 \text{ kgf/cm}^2$ )

を行った。この実験に用いた供試体の定着長は 50D である。 $f_c'$  は 160~220 kgf/cm<sup>2</sup> まで変化している。 $f_c'$  が  $\tau$  に及ぼす影響を取り除くために、4. に従って  $\tau$  を  $f_c'$  の 2/3 乗で除した。

$\tau/f_c'^{2/3}$  の値をパラメーターとした場合の、すべり量と鉄筋径との関係を図-10 に示す。図中のすべり量は、荷重端から 5D の位置における値を表わしたものである。図-10 によれば、鉄筋径の増加に伴ってすべり量が増加していく傾向を示している。この傾向は、 $\tau/f_c'^{2/3}$  の値が大きいほど顕著となっている。つまり、鉄筋径はすべり量に対して大きな影響を及ぼすものであり、鉄筋径の増加とともに同一の  $\tau/f_c'^{2/3}$  に対してすべり量が增大していくのである。

そこで、鉄筋径がすべり量に及ぼす影響を定量的に評価するために、すべり量を鉄筋径で無次元化して示したのが図-11 である。図によれば、いずれの  $\tau/f_c'^{2/3}$  の値に対しても、鉄筋径にかかわらず  $S/D$  は同様な値を示しており、明らかに、鉄筋径の影響が除去されている。

なお、池田の研究<sup>8)</sup>においても、すべり量の取扱いに関しては、引抜き試験により得られた自由端の相対すべり ( $S_0$ ) を鉄筋直径 ( $D$ ) で除して無次元化した相対すべり指数 ( $S_0/D$ ) を用いており、これと平均付着応力との関係を示している。本実験の場合もすべり量を鉄筋径で無次元化することによって、鉄筋径の変化がすべり量に及ぼす影響を評価することが可能となった。

### 6. 定着長が $\tau$ - $S$ 関係に及ぼす影響

定着長が  $\tau$ - $S$  関係に及ぼす影響を検討するために、定着長 ( $L$ ) を 10D, 24D, 25D, 40D および 50D と変化させて実験を行った。これらの供試体の  $f_c'$  は 160~300 kgf/cm<sup>2</sup> であり、使用した鉄筋は D25 のねじふし

鉄筋である。図-12 は  $f_c'$  が 160~200 kgf/cm<sup>2</sup> の場合であり、荷重端から 5D の位置での  $S/D$  をパラメーターとして、その値が  $2.5 \times 10^{-3}$ ,  $10.0 \times 10^{-3}$ ,  $20.0 \times 10^{-3}$  における  $\tau/f_c'^{2/3}$  と定着長との関係を示したものである。実験により得られた  $\tau$ - $S$  関係によれば、 $\tau/f_c'^{2/3}$  が 1.5 を越える程度となると急速にすべり量  $S$  が増加していくことが認められた。このためパラメーター  $S/D$  は  $2.5 \times 10^{-3}$  程度から、 $\tau = \tau_{\max}$  を与えるすべり量に近い、 $20 \times 10^{-3}$  程度まで大きく変化させて、定着長の及ぼす影響を調べることにした。 $S/D$  が  $2.5 \times 10^{-3}$  の場合は、定着長が 10D のときの  $\tau/f_c'^{2/3}$  を 1 とすると、定着長が 24D のとき 0.49、定着長が 40D のとき 0.52、および定着長が 50D のとき 0.50 となる。つまり、定着長が 24D 以上の場合の付着応力は、定着長によらずほぼ一定であり、かつ定着長 10D 程度の場合の付着応力の 50% 程度となっているのである。

図-13 は  $f_c'$  が約 300 kgf/cm<sup>2</sup> の場合における  $\tau/f_c'^{2/3}$  と定着長との関係を示したものである。さらに図中には、森田、角の研究<sup>9)</sup>により得られた定着長が 3D のときの  $\tau_{\max}$ 、および今回実験を行った定着長が 25D の場合の  $\tau_{\max}$  も合わせて示してある。図-13 より、定着長が 10D の場合の  $\tau/f_c'^{2/3}$  を 1 とすると、定着長が 25D の場合、 $S/D$  が  $0.4 \times 10^{-3}$  のときは 0.39 に、 $S/D$  が  $1.0 \times 10^{-3}$  のときは 0.35 にそれぞれ低下している状態が認められる。つまり、定着長が短い場合には、定着長が

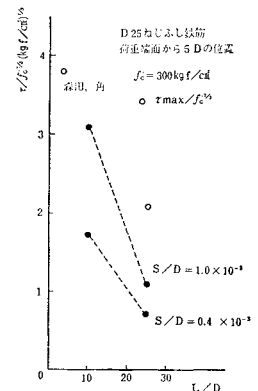
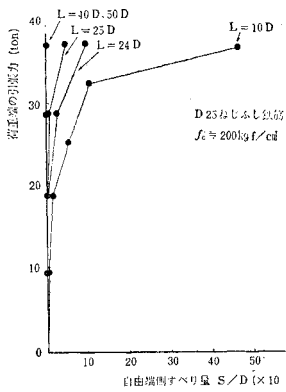


図-13 任意の  $S/D$  に対する  $\tau/f_c'^{2/3}$  と  $L/D$  の関係 ( $f_c' = 300 \text{ kgf/cm}^2$ )



図一四 荷重端の引張力と自由端すべり量との関係

十分に長い場合と比較して同一のすべり量に対する  $\tau$  がかなり増加しているのである。このことは、実験的には、定着長が 10D の場合は自由端においてすべりが生じているのに対し、定着長が 25D の場合は自由端においてすべりがほとんど生じることなく、さらに定着長が 40D 以上の場合は自由端においてすべりは完全に生じていなかったことから裏付けられる。この例として 図一四に、コンクリート強度が約 200 kgf/cm<sup>2</sup> で、D25 ねじふし鉄筋を使用し、定着長を 10D~50D と変化させた場合の荷重端側の引張力と自由端すべり量との関係を示す。なお、定着長が 40D 以上の場合でも、さらに荷重が上昇するならば自由端すべりは当然発生するものと思われる。しかし、荷重の上限は、鉄筋の降伏強度により支配されるものである。本実験のように、降伏強度を 80 kgf/mm<sup>2</sup> 程度と通常の降伏強度の 2 倍程度にしても、定着長が 40D 以上あれば、自由端すべりは認められなかった。したがって、通常の鉄筋を用いれば、定着長が 40D 以上もあれば、自由端すべりはまったく発生しないことが予測される。以上まとめると、任意のすべり量に対して、定着長が短い場合の  $\tau/f_c^{2/3}$  は、定着長が長い場合に比較して、かなり大きいものであることが認められた。また、最大付着応力に関しても、定着長が 3D のときの  $\tau_{max}/f_c^{2/3}$  を 1 とすると、定着長が 25D のとき 0.55 であり、定着長が短くなるに伴い、最大付着応力は増加している。しかし、定着長が 25D 程度以上になると、同一すべり量に対する  $\tau/f_c^{2/3}$  の値は一定に近づき、その変化はほとんどみられなかったのである。

以上、実験データについては、以下のように説明することが可能であると思われる。すなわち、定着長の短い場合と長い場合には、それぞれ、付着抵抗機構が異なるのであって、定着長が短い場合には、荷重端で大きな引張力を作用させることができないため、埋め込まれた鉄筋の周囲に内部ひびわれが発生せず、付着抵抗機構は鉄筋のふし前面のふし間コンクリートの圧縮力により形成されると考えられる。この場合は、付着応力-すべり関係においても、剛性が高くなり、また、最大付着応力も上昇していく。そして、最終的に鉄筋のふし頂部を連ねたすべり線に沿って鉄筋が引き抜けて破壊に至る。

一方、定着長が長い場合には、自由端すべりが生じないため、荷重端で大きな引張力を作用させることが可能となる。この場合は、荷重端近くでは、鉄筋の周囲に円錐状の内部ひびわれが発生し、付着抵抗機構もふし前面でのふし間コンクリート圧縮力に加えて、この内部ひびわれ間のコンクリートの曲げによって形成されるものと考えられる。この場合は、曲げを受けるコンクリートの変形のため、付着応力-すべり関係の剛性も低く、また、この部分が破壊することにより最大付着応力も低下していくものと考えられる。

したがって、定着長が短い供試体を用いて行った実験に基づいて実際の構造物の付着挙動を推定することには限界があると思われる。実際の構造物の付着挙動を推定するための鉄筋の定着長としては、本実験の範囲からみて自由端がすべらない程度の埋込み（少なくとも 25D 程度）が必要であると考えられる。

### 7. 自由端にすべりを生じない場合の $\tau$ -S 関係

定着長が 24D, 25D, 40D および 50D で、自由端にほとんどすべりを生じない場合に対して、荷重端面から 5D, 10D, 15D および 20D の各位置における  $\tau$ -S 関係を求め、その  $\tau$ -S 関係に基づいて、任意のすべり量に対する  $\tau$  を求めた。これを 表一五 に示す。表一五

表一五 各深さにおける任意のすべり量に対する付着応力

S/D ( $\times 10^{-3}$ )	0.5	2.5	5.0	10	20	30	40	
A5	5D	0.80	1.35	1.50	1.80	2.05	2.20	2.30
	10D	0.80	1.18	1.60	1.85	2.10	2.30	—
	15D	0.90	1.30	1.70	1.80	—	—	—
	20D	0.90	1.30	1.70	—	—	—	—
A6	5D	0.85	1.30	1.60	2.00	—	—	—
	10D	0.85	1.40	1.75	—	—	—	—
	15D	0.90	—	—	—	—	—	—
	20D	—	—	—	—	—	—	—
A7	5D	0.90	1.42	1.58	1.82	2.05	2.20	2.15
	10D	0.90	1.20	1.60	1.82	2.05	2.10	—
	15D	0.90	1.45	1.60	1.82	—	—	—
	20D	0.85	1.40	1.48	1.80	—	—	—
AU8	5D	0.90	1.35	1.45	1.62	1.88	2.06	2.10
	10D	0.70	1.20	1.40	1.50	—	—	—
	15D	0.80	1.10	1.20	1.30	—	—	—
	20D	0.80	1.00	1.30	—	—	—	—
AU9	5D	0.84	1.30	1.80	2.00	1.85	—	—
	10D	0.90	1.40	1.75	2.05	—	—	—
	15D	1.00	1.40	—	—	—	—	—
	20D	—	—	—	—	—	—	—
平均	0.86	1.30	1.54	1.78	2.00	2.17	2.18	
変動係数(%)	7.5	9.3	11.0	11.2	4.8	3.9	3.9	

これらの値は付着応力を  $f_c'$  の 2/3 乗で除したものである。  
荷重端面からの位置 5D, 10D, 15D, 20D (D: 鉄筋径)



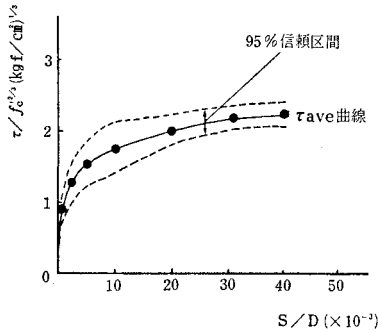


図-15 実験より得られる  $\tau$ - $S$  関係の分布

中には、さらに、各すべり量ごとの  $\tau$  の平均とその変動係数も示してある。これらのデータは、 $f_c'$  が 180~425 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲にあり、D25 のねじふし鉄筋を用いたものである。表-5 に示すようにすべり量 ( $S/D$ ) が  $0.5 \times 10^{-3} \sim 40 \times 10^{-3}$  と変化した場合でも、変動係数は 4% から 11% の範囲にあり、そのばらつきは小さいといえる。表-5 に示される  $\tau$  の平均値および変動係数を用いて、図-15 に  $\tau$  の平均値曲線と 95% 信頼区間を示す。

表-5 および 図-15 より判断して、定着長が長く自由端にすべりを生じない場合で、かつ荷重端面から一定の深さ(今回の実験によれば 5D)以上の範囲においては、 $\tau$ - $S$  関係は、一定の狭い領域内に集中しており、したがって同一の表示式で表現することが可能であると予測される。

### 8. 鉄筋の付着特性が $\tau$ - $S$ 関係に及ぼす影響

鉄筋の付着特性は、岡村、国分<sup>9)</sup>により提案されている支圧面積係数を用いて評価することにした。今回の実験において使用した鉄筋はねじふし鉄筋であるが、このねじふし鉄筋の支圧面積係数は、8.8% から 9.1% の範囲にある。本実験では支圧面積係数の変化による付着特性の変化を明らかにするために、 $\phi 30$  の丸鋼を切削加工して、支圧面積係数を 5.3%、8.8% および 11.7% と 3 種類に変化させた切削鉄筋を製作した。この切削鉄筋の断面積はほぼ D25 に相当する。この切削鉄筋を用いた実験では、いずれの供試体においても定着長を 50 D ( $D=25$  mm) とし、コンクリート強度は 220 kgf/cm<sup>2</sup> および 340 kgf/cm<sup>2</sup> の 2 種類とした。

今回の実験より得られた荷重端から 5D の位置における支圧面積係数(図中において BA とする)と  $\tau_{max}$  の関係を示すと 図-16 のようになる。すなわち、支圧面積係数が 8.8% のときの  $\tau_{max}$  を 1 とすると、支圧面積係数が 5.3% の場合は、 $f_c'$  が 220 kgf/cm<sup>2</sup> のとき 0.90、 $f_c'$  が 340 kgf/cm<sup>2</sup> のとき 0.95 となる。ま

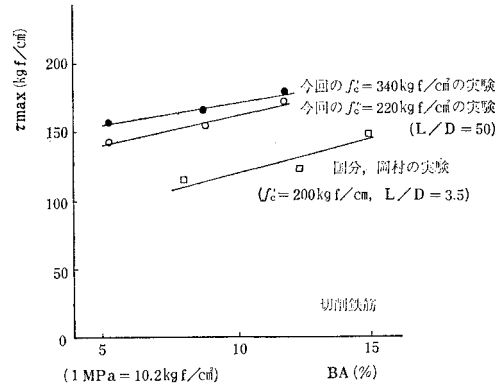


図-16  $\tau_{max}$ -支圧面積係数 (BA) の関係

た、支圧面積係数が 11.7% の場合は、 $f_c'$  が 220 kgf/cm<sup>2</sup> のとき 1.08、 $f_c'$  が 340 kgf/cm<sup>2</sup> のとき 1.06 となる。このように、支圧面積係数の増加に伴い  $\tau_{max}$  が若干ではあるが増加している傾向が認められる。

また、図-16 には、岡村、国分の実験結果も合わせて示してある。岡村、国分の研究は、定着長を 3.5D、 $f_c'$  を 200 kgf/cm<sup>2</sup> とした供試体を用いており、支圧面積係数を 8%、12.3% および 15% と変化させた場合の、平均最大付着応力 ( $\tau_{ave,max}$ ) の変化を検討したものである。図-16 に示されるように、定着長の短い供試体より得られた  $\tau_{ave,max}$  は支圧面積係数の増加に伴い、着実に増加していることが報告されている。 $\tau_{ave,max}$  は、鉄筋の定着長に沿う平均的な最大付着応力であるので、局所的な最大付着応力は、図中の  $\tau_{ave,max}$  よりも、さらに増加していると思われる。

つまり、定着長の短い供試体の場合、支圧面積係数の増加とともに、 $\tau_{max}$  は着実に増加する。一方、今回の実験のような定着長の長い場合でも、短い場合に比べて、その程度は小さいながら、やはり支圧面積係数の増加とともに  $\tau_{max}$  は増加しているのである。

したがって、付着特性に及ぼす支圧面積係数の影響は、定着長の長い場合も、やはり考慮しておくことが必要である。

### 9. 結 論

コンクリート強度、鉄筋径、定着長および鉄筋の付着特性が付着応力-すべり関係に及ぼす影響を検討した結果、本実験の範囲内において以下のような結論が得られた。

- (1) コンクリート強度が付着応力-すべり関係に及ぼす影響は、付着応力をコンクリート強度の 2/3 乗で正規化することにより、評価することができる。
- (2) 鉄筋径が付着応力-すべり関係に及ぼす影響は、

すべり量を鉄筋径で無次元化することによって評価することができる。

(3) 定着長の変化は、付着応力-すべり関係に大きな影響を及ぼす。すなわち、同一のすべり量に対しても、定着長の増加に伴い付着応力が低下すること、および一定の定着長以上では同一のすべり量に対する付着応力が一定となることが認められる。また、定着長が短く付着応力が増加する場合には、定着長の長い場合とは、付着抵抗機構が異なり、自由端においてすべりが生じている。したがって、実際の構造物の付着挙動を実験的に推定するためには、鉄筋の定着長として自由端がすべらない程度の埋込みが必要である。

(4) すべりを生じない場合で、かつ荷重端面から一定(5D)以上の範囲における付着応力-すべり関係は、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の荷重端からの位置にかかわらず同一の式で表現できると予測される。

(5) 鉄筋の付着特性は付着応力-すべり関係に影響を及ぼす。すなわち、今回の実験のように定着長が長い場合でも、支圧面積係数の増加に伴い、付着応力は増加する。

謝 辞：本研究を進めるにあたり終始ご指導，ご教

示いただいた東京大学工学部 岡村 甫教授に深く感謝いたします。また、実験器具の製作および実験の実施等にご協力いただいた同 榎本松司技官、鈴木正治助手ならびに土木工学科コンクリート研究室の皆様にも、感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 既存コンクリート構造物の耐震補強 一実施および研究の現状と問題点一，日本コンクリート工学協会，1983-1.
- 2) 周・山尾・岡村：フーチング中に埋込まれた鉄筋のひずみ分布，第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集，1982.6.
- 3) 森田・角：繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，第229号，1975-3.
- 4) 国分ほか：土木材料実験，技報堂，1978.10.
- 5) 村田・堺・河合：付着疲労に関する2,3の実験，土木学会第37回年次学術講演会概要集，第5部，1982-10.
- 6) 国分・岡村：コンクリートと補強材との結合機構に及ぼす補強材の表面形状の影響，日科技連第6回複合材料シンポジウム，1973.10.
- 7) ACI：Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI(318-77).
- 8) 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，土木学会論文報告集，No.307，1981.3.

(1983.6.13・受付)