

## 引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究

## STUDYS ON BOND STRENGTH OF DEFORMED BARS BY PULL-OUT TESTS

村田二郎\*・河合紘茲\*\*

By Jiro MURATA and Tadashi KAWAI

The properties of bond between reinforcing steel and concrete in a reinforced concrete structure are extremely complex, and an effective method of accurately testing bond strength has not yet been found. In this study are proposed a splitting and an eccentric pull-out test methods with a the principal aim to simulate the properties of bond failures of deformed bars. The former expresses the bond failure from splitting of concrete due to wedge actions of lugs of deformed bar, while the latter expresses the bond failure due to shear of concrete between lugs of tension bars reinforced by lateral bars with short space, and detailed studies were made regarding shape and size of specimens, and procedures of testing in order that bonding performances can be satisfactorily tested.

## 1. 緒 言

異形鉄筋の付着破壊は、ふしのくさび作用による鉄筋周囲のコンクリートの割裂き起因し、丸鋼のように鉄筋とコンクリートとの界面の付着が切れ、滑動により抜け出す現象とは全く相違する。しかし、異形鉄筋の付着強度試験については、丸鋼常用時の試験方法がそのまま適用されていたり、わずかな改良を加えた程度のもも多く、根本的な検討が迫られている。

本来、材料の力学特性の試験方法は、試験値がそのまま構造計算の資料として役立つことが望ましい。しかし、構造物内の鉄筋とコンクリートとの付着性状は、鉄筋の連続部や種々の端定着部によって応力状態が異なるばかりでなく、鉄筋の表面形状やコンクリート強度はもちろん、鉄筋の間隔、かぶり厚さ、横方向鉄筋の配置状態等によっても影響されきわめて複雑であるから、理想的な試験方法の確立は難しい。

最近、内外で異形鉄筋の付着破壊機構に注目した試験方法の研究<sup>1),2)</sup>が試みられている。これらの研究や諸外

国の規格等を参考にし、異形鉄筋の付着性状の特徴を表現でき、少なくとも破壊のメカニズムは類似する簡易な方法として、割裂き引抜き試験方法および偏心引抜き試験方法を提案した。これらの方法は異形鉄筋およびコンクリートの付着に対する材料としての相対評価は可能と思われる。

次に、丸鋼および市販の異形鉄筋を切削して、幾何学的に規則性をもつふし形状および間隔を有する供試材を作製し、上記の試験方法によって鉄筋の表面形状が付着性状に及ぼす影響を確かめ、ふし形状や間隔の適正化について論じた。さらに、D 16~D 57の表面形状の異なる5種の市販の異形鉄筋について、これらの両試験を適用し、国産異形鉄筋の付着特性を明らかにした。

## 2. 使用材料

## (1) 鉄 筋

実験に用いた鉄筋は、切削試験片と市販の異形鉄筋5種(高炉鉄筋)であって、材質はすべてSD 35である。

切削試験片は、丸鋼および市販の横ふし筋の加工品であって、直径はD 32に相当する。丸鋼から切削した試験片はふし間隔を直径の0.5~3倍、ふし高さを2.2mmとしたものおよびふし側面の傾斜角を15~90度としたもので、幾何学的規則性をもっている。市販品を加

\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

\*\* 正会員 日本大学講師 生産工学部土木工学科  
(〒275 習志野市泉町 1-2-1)

表一 試料鉄筋の機械的性質および表面形状

鉄筋 銘柄 呼び名	機械的性質			表面形状					
	引張強 σ <sub>b</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強 σ <sub>s</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び ε (%)	ふし間 隔 f (mm)	ふし高 さ h (mm)	ふしの 間隔 t (mm)	ふしと軸 とのなす角 α (°)	ふし側面 の傾斜角 θ (°)	
A	D16	38.2	57.2	26.8	9.6 (0.69)	1.2 (0.08)	2.7 (0.18)	90.0	59.1
	D25	39.8	57.9	32.8	13.9 (0.85)	1.9 (0.12)	4.6 (0.29)	90.0	57.0
	D32	40.6	57.2	31.8	14.6 (0.94)	2.2 (0.14)	4.9 (0.31)	90.0	54.0
	D35	40.4	57.3	29.3	15.2 (0.98)	2.5 (0.16)	4.8 (0.30)	90.0	58.2
	D38	38.3	61.5	28.4	15.9 (1.02)	2.4 (0.15)	5.7 (0.35)	90.0	57.4
	D41	41.6	62.6	24.3	14.6 (0.94)	2.7 (0.17)	6.1 (0.39)	90.0	58.4
	D51	41.8	59.7	21.4	14.5 (0.93)	2.8 (0.18)	5.5 (0.34)	90.0	57.2
	D57	42.9	66.8	23.2	16.0 (1.04)	3.0 (0.19)	5.0 (0.31)	90.0	44.3
	D32	39.6	57.1	29.6	15.8 (1.02)	2.4 (0.15)	5.6 (0.35)	90.0	53.6
B	D35	38.2	57.8	28.3	22.4 (1.46)	2.2 (0.14)	7.5 (0.47)	90.0	57.2
	D38	36.8	59.6	28.4	23.6 (1.51)	2.5 (0.16)	7.2 (0.45)	90.0	56.5
	D41	36.7	57.8	25.2	25.6 (1.64)	2.7 (0.17)	7.5 (0.47)	90.0	58.3
	D51	38.4	58.1	24.4	24.5 (1.56)	2.8 (0.18)	7.3 (0.46)	90.0	56.4
	D32	38.3	56.2	27.9	17.0 (1.07)	2.2 (0.14)	8.1 (0.50)	90.0	58.2
C	D35	39.7	59.8	23.4	17.7 (1.13)	2.5 (0.16)	7.2 (0.45)	90.0	54.2
	D38	37.3	55.4	22.2	17.0 (1.07)	3.2 (0.20)	10.0 (0.62)	90.0	54.3
	D51	39.2	57.2	25.1	19.4 (1.23)	4.2 (0.26)	13.8 (0.84)	90.0	49.5
D	D16	38.6	58.6	26.3	10.4 (0.69)	1.5 (0.09)	4.3 (0.27)	52.6	46.1
	D25	39.1	60.7	27.5	15.7 (1.01)	2.3 (0.14)	5.1 (0.31)	52.7	48.4
	D32	39.4	61.1	28.0	21.5 (1.37)	2.6 (0.16)	5.8 (0.36)	53.8	44.0
	D35	38.3	57.2	29.1	23.5 (1.47)	2.5 (0.16)	6.8 (0.42)	53.6	49.7
	D38	38.2	57.6	28.4	25.8 (1.64)	2.7 (0.17)	7.0 (0.43)	53.5	50.3
	D41	36.4	58.0	22.3	28.3 (1.78)	4.2 (0.26)	7.4 (0.45)	71.1	52.3
	D51	38.3	56.4	26.6	30.5 (1.94)	3.6 (0.22)	7.8 (0.48)	72.5	53.6
	D32	38.7	57.8	28.1	18.7 (1.18)	2.7 (0.17)	4.8 (0.29)	52.8	48.3
	D35	39.6	58.9	27.4	20.0 (1.26)	2.2 (0.14)	6.2 (0.38)	53.1	48.9
E	D38	38.2	56.2	24.3	23.4 (1.46)	2.4 (0.15)	7.7 (0.47)	52.8	49.7
	D41	37.4	57.8	25.2	25.7 (1.64)	3.0 (0.19)	7.8 (0.48)	52.5	51.1
	D51	38.3	59.6	23.3	32.1 (2.01)	4.5 (0.28)	8.5 (0.51)	75.1	53.2

表中の( )内の値は鉄筋直径に対する比  
ふし側面の傾斜角はカーパー反方向の角度。

工したものは横ふし筋のふしを1個おきおよび3個中2個を切除したもので、ふし高さを1/3~2/3に切削したものである。市販の異形鉄筋は、横ふし筋3種と斜めふし筋2種であって、寸法はD16~D57である。これらの機械的性質および表面形状を表一に示す。表一において、大部分の鉄筋のふし間隔および高さは直径にほぼ比例しているが、鉄筋BおよびEのD51、鉄筋DのD41以上は、ふし間隔を特に短縮しており、鉄筋AのD16およびD57以外は、ふし間隔を15mmの定値としている。なお、表一に示すふし側面の傾斜角は鉄筋の軸を含む面で切断し、断面を撮影し拡大した印画上で測定したものである。

(2) コンクリート

コンクリートは、粗骨材の最大寸法を20mmおよび25mm、スランブ約8cm、材令28日の圧縮強度約300kgf/cm<sup>2</sup>のものとした。ただし、コンクリート強度の影響を試験するために、圧縮強度約200、250、350および400kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートも用いた。これらの配合を表二に示す。使用したセメントは、日本製薬普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメント、細粗骨材は富士川産の川砂および川砂利である。

表二 コンクリートの配合

コンクリート強度 σ <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材最大寸法 G <sub>max</sub> (mm)	スランブの概理 S (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					セメント C	水 W	砂 S	砂利 g
200	25	8±2	63	42	284	179	774	1068
250	25	8±2	63	41	292	175	738	1078
300	20	8±2	55	40	300	170	738	1140
300	25	8±2	58	41	297	172	758	1091
350	25	8±2	55	41	300	169	770	1130
400	25	8±2	53	40	315	167	759	1108
450	25	8±2	50	39	330	165	700	1112

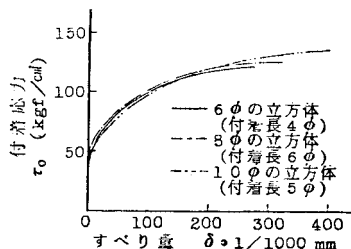
3. 割裂き引抜き試験

(1) 試験方法

通常のかぶり有する鉄筋コンクリート部材における異形鉄筋の付着破壊は、ふしのくさび作用に起因するコンクリートの割裂きによるから、鉄筋に沿う縦ひびわれ発生時の付着強度は付着性能評価の重要な尺度となる。ひびわれ発生時の付着強度を容易に求めるために、無補強コンクリート供試体からの鉄筋の引抜き試験を採用し、割裂き引抜き試験と名付けた。無補強コンクリート供試体による引抜き試験として、従来 ASTM C 234<sup>3)</sup>、RILEM 暫定規準<sup>4)</sup>等の方法があるが、前者は丸鋼に対して考案されたものをそのまま異形鉄筋にも適用しているのであり、後者はコンクリートの割裂きが生じないよう供試体の一边を鉄筋直径の10倍としたものであって、いずれも本試験方法とは基本的に相違する。

a) 供試体の形状および寸法

割裂き引抜き試験における最大引抜き力は、コンクリート供試体の割裂荷重にほかならないから、鉄筋直径の影響を消去するために供試体各部の寸法を鉄筋直径に正しく比例させる必要がある。そこで、一边を鉄筋直径の6倍(以下6φと記す)、8φおよび10φとした立方体供試体による引抜き試験を行い、供試体の形状および寸法について検討した。この場合、どの供試体も加圧板からの応力の均等化を図るために荷重端側に長さ2φの非付着区間を設けた。試験の結果を図一に示す。図一において、一边を10φとした場合は、コンクリートの破壊前に鉄筋が破断することが多いが、6φまたは8φとした場合は、付着応力すべり関係、割裂き付着強度等に本質的な差異は認められないので、太径鉄筋への適用も考慮して一边を6φと定めた。



図一 供試体寸法が付着強度に及ぼす影響

表—3 非付着区間の有無による付着強度試験値のばらつき

セメントの種類	試験材令 (日)	非付着区間の有無	供試体数 (体)	試験値の範囲 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準偏差 (kgf/cm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
普通	14	有	10	120~134	124	3.97	3.2
		無	10	117~147	133	9.26	7.0
		※	10	120~131	126	3.21	2.5
普通	28	有	10	125~155	139	10.30	7.4
		無	10	98~123	109	10.50	9.6
		※	10	121~133	125	3.50	2.8
早強	14	無	10	127~158	137	10.00	7.3

注) ※印はテフロンシートを挿入したものである。  
付着長は、非付着区間のあるものは4φ、非付着区間のないものは6φである。  
使用鉄筋は、鉄筋AのD 32である。

表—3は、一辺6φの立方体供試体において、荷重端側に非付着区間を設けた場合と設けない場合の付着強度試験値のばらつきを比較したものである。表—3において、非付着区間のない場合の試験値の変動係数は約10%となり、供試体と加圧板との間にテフロンシートを挿入した場合でも、変動係数は7.0~7.4%となっている。これに対し、非付着区間のある場合は、変動係数は2.5~3.2%であって、非付着区間の設定は試験誤差の低減に有効であるとともに、供試体の補強部として作用し、割裂き付着強度を高め、比較的広い範囲の付着応力すべり関係を与えることができる。このように、非付着区間は補強部として働くから、鉄筋が通る孔径も鉄筋直径に比例させる必要がある。このため、JIS K 6771「軟質ビニール管」に規定する塩化ビニール管から、その内径が鉄筋外径にほぼ等しいものを選んで鉄筋を被覆すれば、孔径と鉄筋直径との比を1.2~1.5とすることができる。なお、自由端側のコンクリートに引張応力が生じることから、自由端にも非付着区間を設けるのがよいとの研究<sup>5)</sup>もあるが、供試体の製作が繁雑となるため、荷重端側だけに設けることとした。

次に、一辺4φ、6φ、8φおよび10φの正方形断面、高さを4φとした供試体（非付着区間なし）について、かぶり厚さが付着強度に及ぼす影響を試験した。試験の結果は表—4のようであって、かぶりが鉄筋直径の4.5倍程度までは、破壊時においてコンクリートに働くフープテンションのかぶり方向における平均的な値はほぼ一定と考えられる。

b) 供試体の製造および養生

側板に鉄筋を通す開口部を設けた型枠に鉄筋を水平に

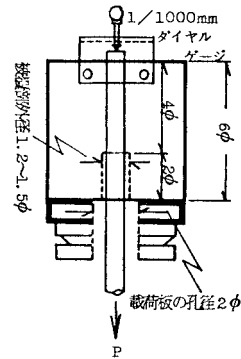
表—4 かぶり厚さが割裂き付着強度に及ぼす影響

供試体断面の一辺の長さ $l$ (φ)	かぶり厚さ $t$ (cm)	割裂き付着強度 $\tau_{0s}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{0s} / t$ (kgf/cm <sup>2</sup> /cm)
4	4.8 (1.5φ)	70	46.7
6	8.0 (2.5φ)	124	49.6
8	11.1 (3.5φ)	170	48.6
10	14.3 (4.5φ)	208	46.3

注) 鉄筋 A D 32 使用。

設置する。この場合、付着区間となる部分は、文字などの圧延マークのない部分とし、あらかじめ十分に清掃した。コンクリートは、厚さ10cm以下のほぼ相等しい層に分けて打ち込み、各層を小型内部振動機を用いて締め固め、上面を平滑に仕上げた。同時にJIS A 1132に従い、φ10×20cm圧縮強度試験供試体を作製した。供試体の養生は、材令2日で脱型し、20±2°Cの水中で養生し、材令28日において試験を行った。

c) 載荷方法および試験結果の表わし方



図—2 割裂き引抜き試験供試体および載荷状況

載荷方法は図—2に示すように、鉄筋直径の約2倍の孔径を有する加圧板上に湿潤状態の供試体を正しく据え、球座を介して鉄筋に引張力を与えた。鉄筋のすべり量は、自由端に設置した1/1000mmダイヤルゲージによって測定した。荷重速度は、鉄筋の引張応力の増加が毎分500kgf/cm<sup>2</sup>以下とし、自由端すべり量0.01~0.1mmの範囲で適当な間隔で荷重を読み取り、式(1)を用い、各すべり量における付着応力を計算した。

$$\tau_0 = \frac{P}{4\pi\phi^2} \cdot \alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\tau_0$ : 付着応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $P$ : 引張力 (kgf)、 $\phi$ : 鉄筋の公称直径 (cm)、 $\alpha$ : 補正係数  $\{\alpha = 300/\sigma_c, \sigma_c$  は同時に造った円柱供試体の圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)}

$\alpha$  は、目標強度からの若干の差異に対する補正係数であって、圧縮強度300kgf/cm<sup>2</sup>の場合を基準としている。この値は後述するように、圧縮強度約200~400kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で割裂き付着強度は圧縮強度にほぼ一次比例することから定めたのであって、RILEMの暫定規準<sup>6)</sup>においても同様な補正係数を用いている。

式(1)から求めた付着応力を用い、付着応力すべり曲線を描くとともに、割裂き付着強度 $\tau_{0s}$ および鉄筋直径の0.2%に相当するすべり量における付着応力を計算し、初期付着強度 $\tau_{0i}$ とした。

(2) 異形鉄筋の表面形状が割裂き付着強度に及ぼす影響

a) ふし側面の傾斜角の影響

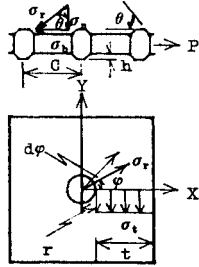


図-3 異形鉄筋のくさび作用

かぶりコンクリートの割裂きは図-3に示すように、ふしに働く支圧応力の水平分力に等しい半径方向応力に起因するフープテンションによる。フープテンションがふし間隔およびかぶりの方向に一樣に分布すると仮定すれば、その大きさは式(2)で与えられる。

$$\sigma_t = \frac{1}{c \cdot t} \int_0^{\pi/2} h \cdot \sigma_b \cdot \cot \theta \cdot \sin \phi \cdot r d\phi$$

$$= \frac{h \cdot r}{c \cdot t} \cdot \sigma_b \cdot \cot \theta \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\sigma_t$ ：フープテンション (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_b$ ：支圧応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $c$ ：ふしの間隔 (cm)、 $h$ ：ふしの高さ (cm)、 $\theta$ ：ふし側面の傾斜角 (度)、 $r$ ：鉄筋の半径 (cm)、 $t$ ：かぶり (cm)。

異形鉄筋の付着応力は、ふしの支圧応力、鉄筋とコンクリートとの接着力および摩擦力からなっているが、後二者は前者に比べて小さいのでこれを無視し、かつ付着応力は鉄筋の長さに沿って一樣に分布すると仮定すれば、

$$\tau_0 = \frac{h}{c} \cdot \sigma_b = \frac{2t}{\phi} \cdot \sigma_t \cdot \tan \theta \dots \dots \dots (3)$$

$t/\phi = \gamma$  とおけば、割裂き付着強度は、

$$\tau_{0s} = \gamma \cdot \sigma_{tu} \tan \theta = \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\tau_{0s}$ ：割裂き付着強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{tu}$ ：コンクリートの引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)。

したがって、フープテンションがふしの間隔およびかぶり方向に一樣に分布すると仮定できる場合には、割裂き付着強度は式(4)で与えられ、かぶり厚さと鉄筋直径とが定比の場合には、コンクリートの引張強度とふし側面の傾斜角だけに関係する。本研究で選定した供試体では  $\gamma = 2.5$  である。

ふし側面の傾斜角と割裂き付着強度  $\tau_{0s}$  の関係を実験によって確かめるために丸鋼を切削し、ふし間隔 22 mm、ふし高さ 2.2 mm、ふし側面の傾斜角を 15~90 度

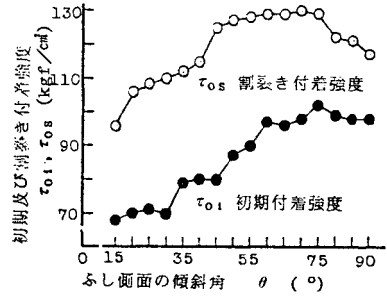


図-4 ふし側面の傾斜角が初期および割裂き付着強度に及ぼす影響

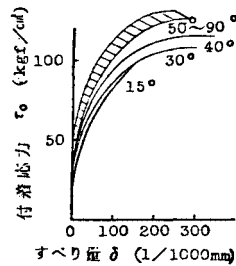
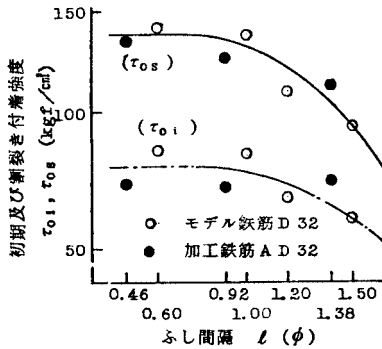


図-5 ふし側面の傾斜角差異が付着応力すべり曲線に及ぼす影響

まで 5 度おきに变化させた D 32 の横ふし形モデル鉄筋を製作した。このモデル鉄筋を用いた割裂き引抜き試験結果を図-4に示す。図-4において、ふし側面の傾斜角が 45 度程度以下の場合には、傾斜角が増すほど割裂き付着強度は増大する。その増大する程度は 92 から 125 kgf/cm<sup>2</sup> であって、必ずしも  $\tan \theta$  に一次比例しないが、これは、非付着区間による補強の影響と思われる。傾斜角が 45 度を超えると割裂き付着強度はあまり変化せず、130 kgf/cm<sup>2</sup> 前後となっている。これは、傾斜角が小さい場合は、ふしの斜面に沿って鉄筋が滑り、コンクリートを押し広げるように働くが、傾斜角が 45 度以上になると、ふし前面のモルタルが局部支圧によって粉状化し、鉄筋がわずかに移動し、さらに、押し固められた粉状のモルタルは 30~40 度の傾斜をもつふしと同様に作用して割裂き作用が進行するといわれている<sup>6),7)</sup>。図-5は、ふし側面の傾斜角が 45 度より小さい場合と大きい場合の典型的な付着応力すべり曲線であって、上記の考察を裏付けている。なお、初期付着強度に及ぼすふし側面の傾斜角の影響はより顕著であって、図-5に示すように 60~70 度程度まで傾斜角の増加に伴って初期付着強度は増大する。したがって、異形鉄筋のふし側面の傾斜角は少なくとも 45 度以上とするのが適当と思われる。

b) ふし間隔の影響

丸鋼を切削し、ふし間隔を変化させた D 32 の横ふし



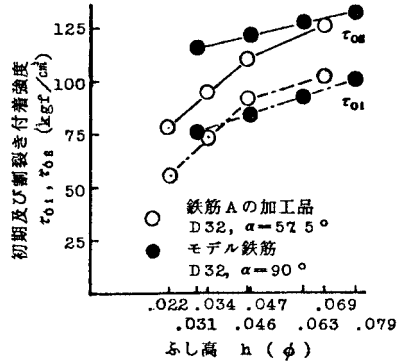
図—6 割裂き引抜き試験によるふし間隔が初期および割裂き付着強度に及ぼす影響

形モデル鉄筋と D 32 の鉄筋 A のふしを適宜切除したものについて割裂き引抜き試験を行った。モデル鉄筋のふし間隔は、19.0 mm (0.6 φ), 31.8 mm (1 φ), 38.2 mm (1.2 φ) および 47.9 mm (1.5 φ), ふし高さ 2.2 mm, ふし側面の傾斜角 90 度である。鉄筋 A の加工品は、ふしを 1 個おきおよび 3 個中 2 個を切除したもので、ふし間隔 14.6 mm (0.46 φ), 29.3 mm (0.92 φ) および 43.9 mm (1.38 φ), ふし高さ 2.2 mm, ふし側面の傾斜角約 57 度である。

試験の結果を図—6 に示す。図—6 において、モデル鉄筋と鉄筋 A の加工品とで実験結果に大差なく、割裂き付着強度は、ふし間隔が鉄筋直径以下の場合同等であるが、鉄筋直径を超えるとしだいに減少し、鉄筋直径の 1.5 倍の場合約 12% 減少した。これは、ふし間隔が増大するとふしの支圧応力によるフープテンションがふし近傍に集中するためであって、フープテンションがふし間隔に一樣に分布するとみなし得るのは、ふし間隔がおよそ鉄筋直径以下の場合であることを示唆している。なお、ふし間隔が初期付着強度に及ぼす影響は、ふし間コンクリートが弾性状態に近い場合、割裂き付着強度の場合より緩和されると考えられる。したがって、異形鉄筋のふし間隔は、割裂き破壊の観点からは、その直径以下とするのが適当である。

c) ふし高さの影響

丸鋼を切削して D 32 の横ふし形モデル鉄筋を製作し、ふし高さ 1 mm, 1.5 mm, 2 mm および 2.5 mm (0.03 ~ 0.08 φ), ふし間隔 22 mm, ふし側面の傾斜角を 90 度としたものおよび D 32 の鉄筋 A のふし高さを 1/3, 1/2 および 2/3 (0.73 ~ 1.47 mm) に切削したものについて割裂き引抜き試験を行った。試験結果を図—7 に示す。式 (4) において、ふし高さは割裂き付着強度に影響しないことになる。しかし、図—7 においては、ふし高さが鉄筋直径の約 8% 程度以下の範囲では、モデル鉄筋の場合、ふし高さに比例して 17 kgf/cm<sup>2</sup> 程度ではあ

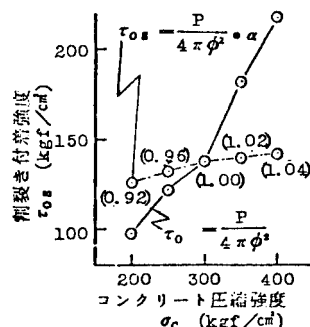


図—7 ふし高が初期および割裂き付着強度に及ぼす影響

るが割裂き付着強度は増大している。鉄筋 A の加工品の場合、モデル鉄筋と同様な傾向を示さなかったのは、ふしの頂部を切削して所定の高さとしたので、ふし高さが低いものほどふし側面の平均的な勾配が緩やかとなったためと思われる。ふし高さは初期付着強度の増加に有効であり、ある範囲内であるべく高くするのが有利である。通常の引抜き試験の結果において、ふし高さが直径の 7% 程度までは付着強度は、ふし高さに伴って増大するが 7% を超えると減少する傾向を示した研究<sup>8)</sup>もある。

(3) コンクリート強度が割裂き付着強度に及ぼす影響

図—8 は、圧縮強度約 200, 250, 300, 350 および 400 kgf/cm<sup>2</sup> のコンクリートを用い、コンクリート強度と割裂き付着強度との関係を試験した結果である。なお、使用鉄筋は D 32 の鉄筋 A である。図—8 において、割裂き付着強度は、圧縮強度の増加に伴いほぼ直線的に増大することが認められる。したがって、コンクリートの圧縮強度が 200 ~ 400 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲では、割裂き付着強度は圧縮強度に一次比例するとみなしてよい。式 (1) 中の補正係数 α は、この実験結果に基づいて定めたのである。



図—8 補正係数 α に関する実験結果

#### 4. 偏心引抜き試験

##### (1) 試験方法

異形鉄筋の付着破壊は、一般にかぶりコンクリートの割裂き起因するが、部材内の軸方向鉄筋は通常横方向鉄筋で十分に取り囲まれているので、鉄筋に沿う縦ひびわれの発生によってただちに付着耐力を失うことはない。かぶりが特に大きい場合は別として、荷重の増加によって縦ひびわれがしだいに開口するとともに鉄筋が移動し、ついに、ふし間コンクリートのせん断破壊によって鉄筋が引き抜け、付着の終局状態となる。このような終局付着強度を試験するための方法として、RILEMの暫定規準<sup>9)</sup>を参考にし、はりのせん断スパン部をモデル化した偏心引抜き試験方法を提案した。

##### a) 供試体の形状および寸法

供試体の形状および寸法を図-9に示す。供試体は、はりの下縁に引張鉄筋を配置し、スターラップで十分補強したものであって、図中に示す荷重、反力の作用点および作用方向によって、供試体は、はりのせん断スパン部を表現している。供試体各部の寸法は、鉄筋直径に比例しており、幅  $6\phi$ 、高さ  $8\phi$  の長方形断面で、全長は  $16\phi$  となっている。

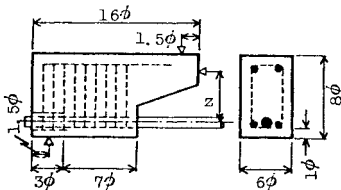


図-9 偏心引抜き供試体

軸方向鉄筋のかぶりは  $1\phi$  とした。これは、早期に鉄筋に沿う縦ひびわれが発生し、しだいに付着破壊が進行する状態を再現するためであって、D 32の鉄筋 A および D を使い、かぶりを  $1\phi$ 、 $1.5\phi$  および  $2\phi$  として偏心引抜き試験を行った結果、縦ひびわれ発生荷重はかぶりが  $1\phi$  の場合、終局荷重の 15~20% であるのに対し、 $1.5\sim 2\phi$  の場合は 85~95% となったからである。ただし、スターラップで十分補強してあるため、かぶりによって終局付着強度に差異は少なく、たとえば、鉄筋 A を用いた場合かぶりが  $1\phi$ 、 $1.5\phi$  および  $2\phi$  に対し、終局付着強度は、それぞれ約  $71\text{ kgf/cm}^2$ 、 $77\text{ kgf/cm}^2$  および  $77\text{ kgf/cm}^2$  であった。

次に、軸方向鉄筋の付着強度に及ぼす支点反力の影響を消去するために、支点付近の付着を断ち、付着長は  $7\phi$  とした。このため、供試体は支点付近で無筋コンクリートとなり、早期にひびわれが発生し、斜めひびわれに発展しやすい。斜めひびわれが軸方向鉄筋の付着性状に及

ぼす影響を極力低減するために、せん断応力が比較的小さいはり形状とするとともに、スターラップを密に配置し、さらに、はり下側のスターラップの隅角部に比較的に太い組立て鉄筋を配置し、これを支点付近における引張鉄筋として作用させた。

鉄筋の引張応力に対するコンクリートのせん断応力の割合は、 $Sa = Tz$  より、

$$\xi = \frac{\tau}{\sigma_s} = \frac{S}{bd} \cdot \frac{A_s \cdot z}{M} = \frac{A_s}{bd} \cdot \frac{z}{a} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $S$ ：はりのせん断力 (kgf)、 $T$ ：鉄筋の引張力 (kgf)、 $\tau$ ：平均せん断応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_s$ ：鉄筋の引張応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $b$ ：供試体幅 (cm)、 $d$ ：有効高さ (cm)、 $A_s$ ：鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>)、 $z$ ：アーム長 (cm)、 $M$ ：曲げモーメント (kg・cm)、 $a$ ：せん断スパン (cm)。ここで、 $b = 6\phi$ 、 $d = 6.5\phi$ 、 $a = 13\phi$ 、ヤング係数比  $n = 7$  として、 $\xi \approx 0.01$  である。

スターラップは、D 10~D 25 を 3~5 cm 間隔に配置した。スターラップ量を  $a_s/A_s \cdot s$  で表わせば 0.012~0.014 cm<sup>-1</sup> となっている。ただし、 $a_s$ ：スターラップ本の断面積 (cm<sup>2</sup>)、 $s$ ：スターラップの間隔 (cm)、スターラップ比で表わせば特例を除き、0.94~1.24% であって、前記の理由により通常の鉄筋コンクリートは、はりの場合より著しく大となっている。

次に組立て鉄筋として軸方向鉄筋の直径の約 1/3 および約 1/2 のものを用い、斜めひびわれ発生状況を検討した結果、軸方向鉄筋が D 32 の場合も D 51 の場合も組立て鉄筋の直径を軸方向鉄筋の約 1/3 および約 1/2 とした場合、斜めひびわれはそれぞれ終局荷重の約 80% および 90% 付近で発生した。この実験結果に基づいて、軸方向鉄筋の約 1/2 の直径を有する組立て鉄筋を用いることとした。

##### b) 供試体の製造および養生方法

引張鉄筋をスターラップと組立て鉄筋を用いて型枠内の所定位置に正しく配置し、支点上の引張鉄筋の非付着区間を塩化ビニール管で被覆した。引張鉄筋を下側にしてコンクリートを 2 層に打ち込み、各層を小型内部振動機を用いて締め固めた。同時に、 $\phi 10 \times 20\text{ cm}$  圧縮強度試験供試体を作製した。これらの供試体は材令 2 日で脱型し、温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $90 \pm 5\%$  の霧室内で養生し、材令 28 日において試験を行った。

##### c) 載荷方法

載荷は、図-10 および図-11 に示す載荷装置を用いて行った。図-10 は万能試験機に載荷枠を取り付けたもので、試料鉄筋が D 32 以下の場合に適用し、D 32 を超える場合は、図-11 の特殊載荷装置を用いた。

載荷は、試料鉄筋に引張力を与え、その反力を支点 A、B および C で受ける。なお、この場合供試体の底面を

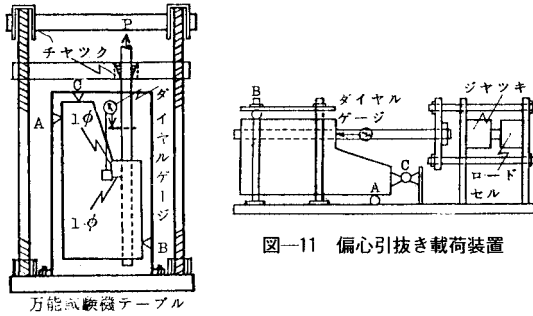


図-10 偏心引抜き载荷装置

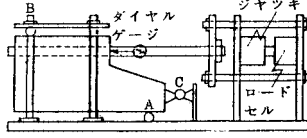


図-11 偏心引抜き载荷装置

上側にして設置し、ひびわれが容易に観察できるようにした。荷重速度は、鉄筋の引張応力の増加が毎分 500 kgf/cm<sup>2</sup> 以下となるようにした。鉄筋の荷重端に装着した 1/1 000 mm ダイヤルゲージにより、0.05~0.25 mm の範囲で適当な間隔で荷重を読み取り、式 (6) を用いて各段階の付着応力を算定し、付着応力すべり曲線を描くとともに終局付着強度を求めた。

$$\tau_0 = \frac{P}{7\pi\phi^2} \dots \dots \dots (6)$$

なお、鉄筋のすべりを荷重端で測定した理由は、自由端すべり量はせん断ひびわれの発生によって乱されるからである。

(2) 異形鉄筋の表面形状が終局付着強度に及ぼす影響

a) ふし間隔の影響

丸鋼を切削した横ふし形のモデル鉄筋と鉄筋 A のふしを適宜切除したのものについて、偏心引抜き試験を行った。鉄筋試料はいずれも D 32 であって、モデル鉄筋はふし間隔 15.9 mm (0.5 φ), 31.8 mm (1 φ), 47.7 mm (1.5 φ), 63.6 mm (2 φ), 79.5 mm (2.5 φ) および 95.4 mm (3 φ)、ふし高さ 2.2 mm、ふし側面の傾斜角 90 度である。鉄筋 A の加工品はふし間隔 12.7 mm (0.4 φ), 28.6 mm (0.9 φ) および 41.3 mm (1.3 φ)、ふし高さ 2.2 mm、ふし側面の傾斜角約 54 度である。試験の結果を図-12 に示す。図-12 において、ふし間隔が 2.5 φ 程度まではふし間隔が大となるほど終局付着強度はほぼ直線的に増加している。この関係は、モデル鉄筋の場合と鉄筋 A の加工品の場合とで差異はなく、

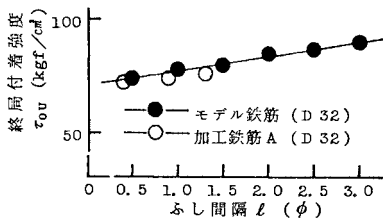


図-12 ふし間隔が終局付着強度に及ぼす影響

ふし間隔 0.5 φ および 2.5 φ の場合の終局付着強度は約 73 kgf/cm<sup>2</sup> および 88 kgf/cm<sup>2</sup> であって、ふし間隔 0.1 φ の増加により、終局付着強度は約 0.8 kgf/cm<sup>2</sup> 増大した。

b) ふし高さの影響

割裂き引抜き試験 (3. (2)c) で用いたものと同じ鉄筋 A の加工品を用い、ふし高さが終局付着強度に及ぼす影響を検討した。試料鉄筋のふし高さは、0.73 mm, 1.1 mm, 1.47 mm および 2.2 mm (0.02~0.08 φ) である。試験の結果を図-13 に示す。図-13 において、ふし高さが鉄筋直径の 8 % 程度以下の範囲ではふし高さが高いほど終局付着強度はほぼ直線的に増大した。

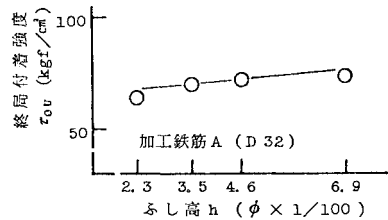


図-13 ふし高が終局付着強度に及ぼす影響

(3) コンクリート強度が終局付着強度に及ぼす影響

D 32 の鉄筋 A および D を用い、コンクリートの圧縮強度を約 200, 250, 300, 350 および 400 kgf/cm<sup>2</sup> とした場合の終局付着強度を比較した。試験の結果を図-14 に示す。図-14 において、いずれの鉄筋を用いた場合もコンクリート強度が終局付着強度に及ぼす影響は僅少であって、たとえば、鉄筋 A を用いた場合、圧縮強度約 200 kgf/cm<sup>2</sup>, 300 kgf/cm<sup>2</sup> および 400 kgf/cm<sup>2</sup> に対し、終局付着強度はそれぞれ 69 kgf/cm<sup>2</sup>, 72 kgf/cm<sup>2</sup> および 75 kgf/cm<sup>2</sup> となっている。したがって、式 (6) には圧縮強度に対する補正係数を考慮しないこととした。なお、(2) および (3) の実験において、終局付着強度の変動係数は、4.3~8.1% であった。

(4) 通常の引抜き試験方法との比較

英国規格<sup>10)</sup>や日本コンクリート工学協会案<sup>11)</sup> (以下 JCI 案と略記) に示されているらせん筋補強コンクリート供試体からの引抜き試験は、それぞれの補強状態に対応する終局付着強度を試験できる方法として広く利用されている。図-15 は、D 32 の鉄筋 A, C および D を用い、

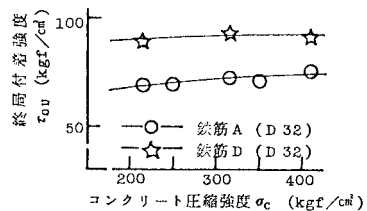
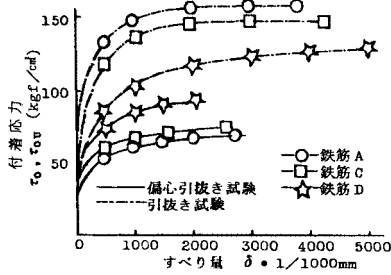


図-14 コンクリート強度と終局付着強度との関係



図一15 偏心引抜き試験と引抜き試験の付着応力すべり曲線

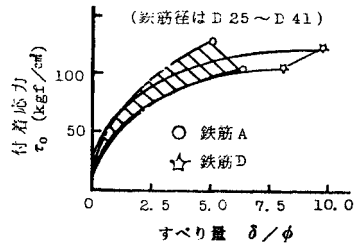
偏心引抜き試験と JCI 案の引抜き試験を行った結果である。JCI 案の供試体は一辺 20 cm の立方形で、線径 9 mm、らせん直径 16 cm、ピッチ 4 cm のらせん鉄筋で補強してある。図一15において、偏心引抜き試験における終局付着強度は鉄筋 A、C および D に対して 71 から 94 kgf/cm<sup>2</sup> であって、ふし間隔にはほぼ一次比例している。これらに対応する JCI 案の終局付着強度は 158 から 127 kgf/cm<sup>2</sup> であり、ふし間隔が増すほど小となる傾向を示している。両者が相反する結果となったのは、主として横方向鉄筋による補強程度の差によるのであって、JCI 案では鉄筋の移動量が大きいものほどコンクリートが押し広げられ、付着の終局状態に達する以前にコンクリートの割裂によって破壊したものと考えられる。このように、試験方法の相違によって付着強度試験値はもちろん鉄筋の表面形状に対する付着性能の傾向等も相違する場合があるから、材料の相対評価としての付着強度を試験する場合でも試験方法の選定を慎重に行い、誤った判断とならないよう注意しなければならない。

5. 市販異形鉄筋の付着性状

従来、ふし形状や間隔を種々に変化させた異形鉄筋の付着強度を試験し、表面形状の適正化について論じた貴重な研究がある<sup>12),13)</sup>。しかし、前記のように、付着強度はその試験方法によって著しく相違する場合が多い。3. および 4. に述べたように、割裂き引抜き試験は鉄筋とコンクリートの一体性を示す初期付着強度、異形強度の通常の付着破壊を示す割裂き付着強度、ならびに付着応力すべり関係に関する情報を与え、偏心引抜き試験は横方向鉄筋で十分に補強された引張鉄筋の終局付着強度に関する情報を提供する。そこで、これら 2 つの試験方法によって、表一1 に示した横ふし筋 3 種、斜めふし筋 2 種の市販鉄筋の付着性状を検討した。使用したコンクリートは圧縮強度約 300 kgf/cm<sup>2</sup> のものであり、付着強度試験値は供試体 5 個の平均値とした。試験結果を表一5 に示す。表一5 には、初期付着強度、割裂き付着強度および割裂時の自由端すべり量、終局付着強度および終局時の荷重端すべり量等が示されている。

表一5 割裂き引抜き試験および偏心引抜き試験結果

鉄筋 銘柄	呼び名	割裂き引抜き試験			偏心引抜き試験		
		初期付着強度 $\tau_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂き付着強度 $\tau_{ov}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大すべり量 $\delta$ (mm)	初期付着強度 $\tau_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	終局付着強度 $\tau_{ov}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大すべり量 $\delta$ (mm)
A	D16	66.2	128	125	15.5	84.8	2100
	D25	74.6	126	175	13.8	84.2	2500
	D32	72.3	121	300	13.6	71.4	2600
	D35	89.6	126	300	15.0	73.8	1800
	D38	87.4	120	400	14.1	76.5	1800
	D41	89.7	129	400	16.8	77.6	1900
	D51	98.8	123	225	18.0	75.4	1700
	D57	83.3	103	200	16.6	69.1	1300
B	D32	53.2	124	300	12.7	80.8	4000
	D35	60.9	129	400	5.8	82.6	3500
	D38	69.6	126	350	7.1	88.5	3100
	D41	62.3	135	450	6.6	84.2	2900
	D51	97.6	125	200	19.7	82.4	2600
C	D32	83.5	129	300	10.8	76.3	2000
	D35	87.7	113	325	14.3	73.1	2700
	D38	88.2	118	330	15.7	75.9	2800
	D51	91.8	114	255	17.9	80.8	2600
	D57	50.2	104	400	13.3	88.6	1800
D	D25	64.8	120	350	12.6	91.7	1700
	D32	53.0	123	475	10.3	94.1	1900
	D35	54.1	124	500	9.3	89.4	2150
	D38	58.7	128	400	9.2	87.3	2500
	D41	57.2	121	375	13.2	92.6	2150
E	D51	66.1	119	300	13.8	93.1	1500
	D32	61.6	125	350	11.5	72.4	3200
	D35	57.2	134	400	9.8	71.1	3400
	D38	57.4	129	550	8.9	73.4	3500
	D41	57.9	120	500	8.6	73.9	2700
D51	72.6	121	400	12.5	72.3	2200	



図一16 付着応力すべり曲線

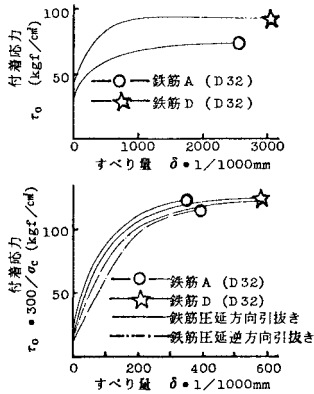
a) 付着応力すべり関係

図一16 は鉄筋 A および D の割裂き引抜き試験結果について、鉄筋直径で除して無次元化したすべり量 ( $\delta/\phi$ ) と付着応力との関係を示したものである。ふし間隔を直径にかかわらず一定とした鉄筋 A の付着応力すべり曲線は、直径によって分散するが、ふし間隔が直径に比例する鉄筋 D の場合はほぼ一曲線に収斂している。これは、引抜きによって鉄筋周囲に内部ひびわれが発生し、剛性の低下した層が形成され、鉄筋の表面形状が幾何学的に相似の場合、その厚さが鉄筋直径に比例するからであろう。したがって、このように相似の表面形状を有する異形鉄筋の場合には、代表的な直径の鉄筋について割裂き引抜き試験を行えば、他の直径の鉄筋の付着性状を類推することができる。

b) 付着性状の一般的傾向

図一17 は、横ふし筋と斜めふし筋の割裂き引抜き試験および偏心引抜き試験における典型的な付着応力すべり関係であって、D 32 の鉄筋 A および D の場合である。





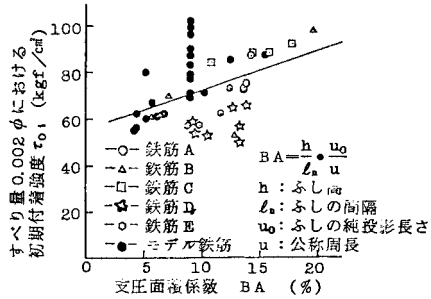
図一七 割裂き引抜き試験および偏心引抜き試験における典型的な付着応力すべり曲線

ふしの間隔、高さおよび側面の傾斜角の相違により、割裂き引抜き試験における付着応力すべり曲線の勾配は著しく相違し、鉄筋 A の初期付着強度は鉄筋 D の約 1.4 倍となり、一体性に優れていることを示している。しかし、いずれの鉄筋もふし間隔が直径の 70% 以下、ふし側面の傾斜角は 45 度以上であるため、割裂き付着強度に差異はない。また、鉄筋 D の割裂き時の自由端すべり量は鉄筋 A の約 1.6 倍であって、割裂き破壊に対して粘りのある性状を示し、さらに鉄筋 D の終局付着強度（上図）は、鉄筋 A より約 30% 大きい。ふし側面の傾斜角は圧延方向と反対方向とで相違する。すなわち、鉄筋 A の圧延方向の傾斜角 54.3 度、反対方向 56.7 度、鉄筋 D の場合、圧延方向 43.8 度、反対方向 49.9 度である。下図中の一点鎖線は、引抜き試験における荷重方向と圧延方向を一致させた場合、実線は、相反させた場合であって、両者の割裂き付着強度に差異はないが、付着応力すべり曲線の勾配は相違し、圧延方向に引いた場合の初期付着強度は、反対方向の約 0.6~0.8 倍となっている。したがって、本実験においては、すべて荷重方向と圧延方向を一致させ、引抜き試験を行ったのである。

c) 初期付着強度および割裂き付着強度

初期付着強度は、表一五に示すように、鉄筋の表面形状によって相当に相違し約 50~90 kgf/cm<sup>2</sup> となった。鉄筋の付着性を表わす形状係数として、従来支圧面積係数が提案<sup>8)</sup>されている。図一八は支圧面積係数と初期付着強度との関係を示したもので、表一五の試験結果だけでなく、3. (2) に示したモデル鉄筋の試験結果のうち、ふし側面の傾斜角 45 度以上のものも打点してある。図中の回帰直線の相関係数は 0.24 であって、付着性をふし間隔と高さだけの関数で表わすことは困難のようであり、現状では適当な試験によって評価するのが望ましい。

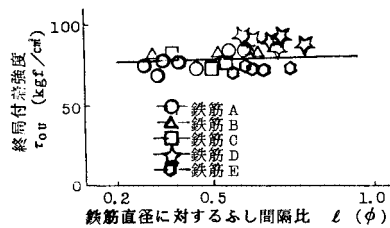
次に表一五において、割裂き付着強度は、一部の太径



図一八 支圧面積係数と初期付着強度との関係

鉄筋を除いて 120~130 kgf/cm<sup>2</sup> とほぼ同様な値を示している。これは、試料とした市販鉄筋がすべて JIS G 3112 に適合し、ふし間隔が 0.7 φ 以下であることによる。鉄筋 A の D 57 の割裂き付着強度は、他に比して 20 kgf/cm<sup>2</sup> 程度小さい。これは、同種の鉄筋の D 51 以下に比べ、ふし側面の傾斜角が著しく小さいこと等によると思われる。

d) 終局付着強度



図一九 ふし間隔と終局付着強度との関係

図一十九は、表一五に示すすべての試験値について、終局付着強度を鉄筋直径に対する比で表わしたふし間隔について整理したもので、図一十二に示した D 32 のモデル鉄筋の試験結果を実線で記入してある。図一十九において、圧縮強度約 300 kgf/cm<sup>2</sup> のコンクリートを用いた場合の終局付着強度は約 69~94 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲であり、ふし間隔比が大きいほど終局付着強度が大となる一般の傾向が示され、大部分の試験値は、モデル鉄筋の結果と近似している。

6. 結 語

異形鉄筋の付着破壊の性状に類似させることを主眼とした割裂き引抜き試験方法および偏心引抜き試験方法を提案し、異形鉄筋の表面形状およびコンクリート強度が付着強度に及ぼす影響を確かめ、さらに、市販の異形鉄筋の付着特性を明らかにしたこの実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 割裂き引抜き試験は、異形鉄筋のふしのくさび

作用によるかぶりコンクリートの割裂き破壊を表現するため、無筋コンクリート供試体からの引抜き試験としており、割裂き付着強度のほか、一体性を表わす初期付着強度ならびに付着応力すべり関係に関する情報を与える。また、偏心引抜き試験は、はりのせん断スパン部をモデル化した供試体において、横方向鉄筋で十分補強された引張鉄筋の引抜きによるふし間コンクリートのせん断破壊を表現し、終局付着強度に関する情報を提供する。これらの方法における試験誤差は小さく、割裂き付着強度の変動係数で約7%、終局付着強度の場合、約6%であった。

(2) かぶりと鉄筋直径との比が一定である場合、割裂き付着強度は理論上ふし側面の傾斜角の正切とコンクリートの引張強度に正比例するが、実験結果は、ふし側面の傾斜角が大になると支圧によって押し固められたふし前面のモルタルがゆるい斜面をもつ仮想のふしを形成するため、傾斜角が45度程度以上では割裂き付着強度はほぼ一定値を示す。したがって、異形鉄筋の軸線を含む面におけるふし側面の傾斜角は45度以上とするのがよい。

(3) 割裂き付着強度はふし間隔が鉄筋直径以下の範囲ではふし間隔にかかわらずほぼ一定値を示すが、これを超えるとしだいに低下した。また、ふし高さが鉄筋直径の7~8%以下の範囲では、割裂き付着強度はふし高さに比例して増加する傾向を示した。

(4) 終局付着強度は、ふし間隔が鉄筋直径の約2.5倍まではふし間隔が増すほどほぼ直線的に増大し、その増大する程度は、ふし間隔が鉄筋直径の0.5~2.5倍までに約20%であった。また、終局付着強度はふし高さに伴って比例的に増加し、ふし高さが鉄筋直径の2~8%の範囲で終局付着強度の増加は約14%であった。

(3) および(4)の結果から、異形鉄筋のふしの間隔は鉄筋直径以下とし、ふしの高さは鉄筋直径の約7~8%程度とするのがよい。

(5) 割裂き付着強度はコンクリート強度の影響を顕著に受けるが、終局付着強度の場合その影響は少ない。すなわち、圧縮強度200~400 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で割裂き付着強度は98~218 kgf/cm<sup>2</sup>と圧縮強度にほぼ一次比例するが、終局付着強度の差異はごく少なく5 kgf/cm<sup>2</sup>程度であった。

(6) 市販の異形鉄筋はふしの間隔および高さが鉄筋直径に比例するものが多い。このような場合、割裂き引抜き試験で得られる付着応力すべり曲線において、すべり量を鉄筋直径で除して無次元化した場合、鉄筋直径にかかわらずほぼ一曲线に収斂する。したがって、代表的な直径の鉄筋について割裂き試験を行えば、他の直径の付着性状を類推することができる。ただし、ふし側面の

傾斜角が製造時の圧延方向と反対方向とで相違し、これが付着応力すべり曲線の初期の勾配に相当に影響するので注意しなければならない。

(7) 市販の異形鉄筋は横ふし型と斜めふし型に大別され、これらの付着性状は(2)、(3)および(4)で述べた法則によって説明されるが、およそ次の一般的傾向が認められた。横ふし筋はふし側面の傾斜角が大きいため初期付着強度が大で一体性に優れているが、割裂き破壊時のすべり量は小さい。いずれの鉄筋のふし間隔も直径の70%以下となっているので、割裂き付着強度に差異はないが、終局付着強度はふし間隔および高さが大きいものほど大となった。

(8) コンクリートの圧縮強度約300 kgf/cm<sup>2</sup>の場合、市販の異形鉄筋の初期付着強度は鉄筋の表面形状により50~92 kgf/cm<sup>2</sup>と大幅に変化した。割裂き付着強度は一部の太径鉄筋を除いてほぼ一定値を示し、120~130 kgf/cm<sup>2</sup>であった。また、終局付着強度はふし間隔および高さにより63~90 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

#### 参考文献

- 1) Anders Losberg and Per-Åke Olsson : Bond Failure of Deformed Reinforcing Bars Based on the Longitudinal Splitting Effect of the Bars, ACI Journal, January 1979.
- 2) 森田・角 : 太径鉄筋“D 51”の割裂き強度, コンクリート工学, Vol. 16, No. 10, Oct. 1978.
- 3) ASTM Designation C 234 : Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis the Bond Developed with Reinforcing Steel.
- 4) RILEM Recommendation 7-11-28 “Bond Test for Reinforcing Steel” 2, Pull-Out Test.
- 5) 大塚・佐藤・加藤 : 引張異形鉄筋周辺のコンクリートの縦ひび割れについて, 土木学会東北支部大会, 昭和51年.
- 6) Leroy A. Lutz and Peter Gergely : Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete ACI Journal, Nov. 1967.
- 7) Rehm, G. : The Fundamental Law of Bond Proceeding Symposium on Bond Crack Formation in Reinforced Concrete, Stockholm 1957.
- 8) 国分・岡村 : 太径鉄筋の使用に関する研究, 土木学会論文報告集, 第202号, 1972年6月.
- 9) RILEM Recommendation 7-11-28 Bond Test for Reinforcing Steel I. Beam Test.
- 10) B. S. Code of Practice for Reinforced Concrete CP 114, 1972.
- 11) 日本コンクリート工学協会, 鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法案, 土木材料実験, 技報堂, 1982.
- 12) 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, 第6回複合材料シンポジウム, 日本科学技術連盟, 昭和48年10月.
- 13) George Robert Wernish : Bond Studies of Different Types of Reinforcing Bars, Journal of ACI, Vol. 34, 1937.

(1984.12.13・受付)