

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

ON THE BOND STRESS DISTRIBUTION ALONG ROUND BARS, DEFORMED BARS AND TWISTED DEFORMED BARS

水野高明*・渡辺明**
Takaaki Mizuno and Akira Watanabe

1. 緒言

近年，日本においても異形鉄筋に対する関心が急速に高まり，その使用量も年々増加しつつある。他方，異形鉄筋に関する静的，動的，あるいは疲労についての検討なども各方面でなされている。筆者らは各種鉄筋につき引抜き，押抜きおよびはり試験を実施し，その際，特殊な方法を用いて鉄筋内部のひずみを実測し，これから付着応力分布を導いた。なお，はり試験に際しては，顕微鏡によるひびわれ観測も行なった。その代表的結果をここに報告して考察を加える。

2. 鉄筋の付着機構

鉄筋とコンクリートとの付着を構成する要素を，つぎの3つに大別することができる。

- ① 純付着力
- ② 摩擦抵抗力
- ③ 機械的抵抗力

すなわち ① は鉄筋とコンクリートとの間に滑動が生じない前に存在する純粋の付着力または粘着力で，② は鉄筋とコンクリート間の側圧と鉄筋表面の粗さなどにもとづく摩擦 ボンドを意味する。③ は鉄筋表面の凹凸による滑べり抵抗，すなわち異形丸鋼，異形ねじり鉄筋などにみられるボンドであり，上記要素中特に高い比重を占める。

これらの3要素によって鉄筋コンクリートにおける付着作用が営まれるのであるが，付着の様相はさらに断面寸法，コンクリート強度，鉄筋間隔，被覆厚，荷重状態，そして試験法によっても影響されて複雑である。

表一1 は試験法による差異を比較したものであるが，同じ鉄筋とコンクリートで，かつ供試体寸法を同じくす

表一1 試験法による付着作用の差異

試験法の種類	鉄筋または鋼線	コンクリート
引抜き試験	引 張	圧 縮
押抜き試験	圧 縮	引 張
RC はり試験	引 張	引 張
PC はり試験	引 張	圧 縮

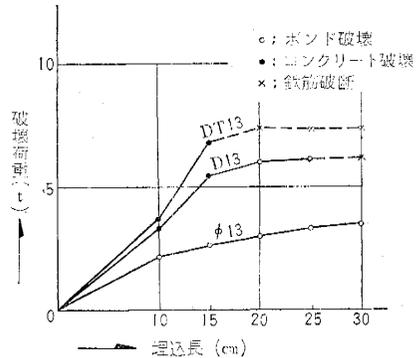
* 正員 工博 九州大学教授 工学部土木工学教室

** 正員 工修 九州大学助手 工学部土木工学教室

る場合でも，引抜き抵抗力，押抜き抵抗力が異なって得られるゆえんを説明している。

また，付着応力度は通常，引抜き力または押抜き力を付着面積で除したいわゆる平均付着応力度で示されている。しかしながら，引抜き力あるいは押抜き力が埋込み長に比例しないことは，図一1 の実験結果にも示されるとおりで，この説明は付着機構の本質，埋込み部における付着応力度の分布状態が不明であるかぎり不可能である。

図一1 鉄筋の引抜き試験結果 (径 13 mm)

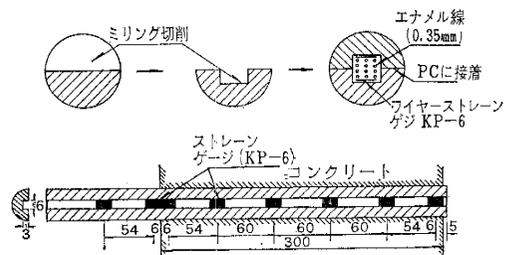


3. 付着応力度測定法

付着応力度は近接する二点間の鉄筋の応力差から導かれる。したがって鉄筋のひずみ分布を知ればよいこととなるが，鉄筋の表面ひずみを実測するには多くの困難がともない，しかも肝腎の付着面を部分的に切損する結果ともなり，接触面の条件を乱して好ましくない。

そこで筆者らは R.M. Mains¹⁾ の考案を改良して，図一2 に示すように鉄筋内部にミリングマシンで溝を

図一2 鉄筋供試体の製作



加工し、その中にストレンゲージ (KP-6, ゲージ長 6 mm, 共和電業KK製) を貼付して (実測値の精度を高めるため、半円凹断面の相対位置に貼付した) 鉄筋内部のひずみを計測した。

引抜き試験, 押抜き試験においてはリード線にレシーバコード (1.4 mm 径) を用いたが, 鉄筋削溝の大きさに拘束されて測点が多くとれないので, はり付着試験においてはリード線の改善に努め, その径が極力小さくて電気抵抗が小さく, しかも絶縁抵抗の十分大きいリード線を各方面に物色し, 結局, 特殊エナメル線を用いて成功した。このリード線は径 0.35 mm できわめて絶縁度高く抵抗値は 100 μΩ 以上もある。ゲージとリード線との接合部分と鉄筋溝壁とがショートしないように初め絶縁ワニスを塗布したが, その絶縁度低く (10 μΩ 以下) で失敗し, 最終的には PC-12 接着剤 (共和電業 KK 製) をもって代用し良好なる結果を得た。また鉄筋供試体の接合に Mains のような溶接を用いず PC-12 による接着を行なったことはゲージの過熱損傷を防ぎ, 鉄筋供試体の防水性を高め得た点で非常に有効であった。

なお, 鉄筋の降伏点以後のひずみを応力度に換算するには, 別に行なった鉄筋引張試験により得られた応力度-ひずみ曲線を直接用いた。

4. 試験の種類

付着試験は引抜き, 押抜き, はりの順序で行ない, 各場合とも鉄筋の種類, 直径などを変えて実施した。表-2 に試験概要を示す。

なお, コンクリートの材令が若いうちに引抜き, 押抜き試験を実施したのは, 鉄筋が破断せずに付着で破壊することを期待したためであり, 逆にはり試験を4週後実施したのはコンクリートの強度を高めて, はりとしての作用を十分ならしめるためであった。

5. 引抜き試験

(1) 供試体製作と試験法

供試体コンクリート型わくには便宜上 φ15×30 または φ20×40 モールドを利用した。表-2 に示したとおり鉄筋内部7測点にゲージを貼付し, オルゼン型試験機 (50 t) にて引張力を与え, 破壊に至る各荷重段階で, 共和電業 KK

表-2 試験概要

	鉄筋の種類	鉄筋径 (mm)	コンクリート配合*	埋込み長 (cm)	材令 (日)	測点数
引抜き試験	丸鋼 異形丸鋼 異形ねじり鉄筋	13, 16, 19 22, 25	φ22, φ25のみⅡ 他はⅠ	φ22, φ25のみ40 他は30	φ22, φ25のみ28 他は5~7	7
押抜き試験	〃	13, 16, 19	Ⅱ	30	5~7	7
はり試験 (ひびわれ測定も併行)	〃	13, 16, 19	Ⅱ	150	28~30	16

* コンクリート配合

配合	セメント (kg)	水 (kg)	w/c (%)	砂 (kg)	砂利 (kg)	粗骨材最大寸法 (mm)	σ ₁ (kg/cm ²)	σ ₂₈ (kg/cm ²)
Ⅰ	400	140	35	664	1 203	20	400	600
Ⅱ	280	163	58	773	1 160	20	100	250

製 SM-4 J 型ストレンゲージによるひずみ計測を行なった。

(2) 測定結果

図-3, 4, 5(a), 5(b), 5(c) は鉄筋径 25, 19, 13 mm の各場合についての鉄筋の引張応力度分布曲線 (以後 σ_s 分布曲線と略称する) と, これより計算した付着応力度分布曲線 (以後 τ₀ 分布曲線と略称する) を示したものである。曲線に付した数字は引張力を表わす。また, φ は丸鋼, D は異形丸鋼 (八幡製鉄 KK 製), DT は D をねじったものである。

丸鋼および異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋に関し, 外力の増加にとまなう最大付着応力度の動向を示したものがそれぞれ, 図-6(a), (b) である。

この結果を要約すればつぎのとおりである。

- ㊸ 引抜き抵抗力は異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋が丸鋼に比し非常に大きい。
- ㊹ 丸鋼は全部鉄筋のすべりにもとづくボンド破壊,

図-3 σ_s, τ₀ 分布曲線 (φ 25, 引抜き試験)

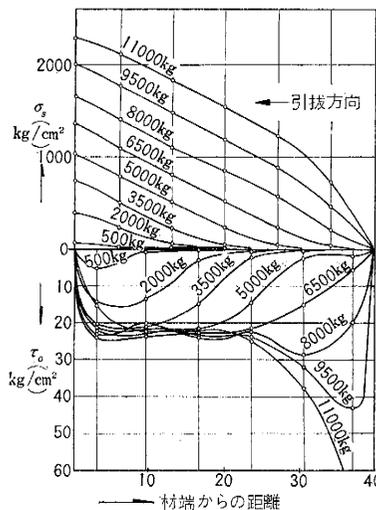


図-4 σ_s, τ₀ 分布曲線 (φ 19, 引抜き試験)

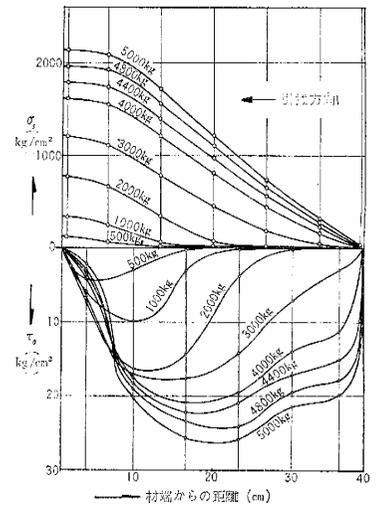


図-5 (a) σ_s, τ_0 分布曲線
($\phi 13$, 引抜き試験)

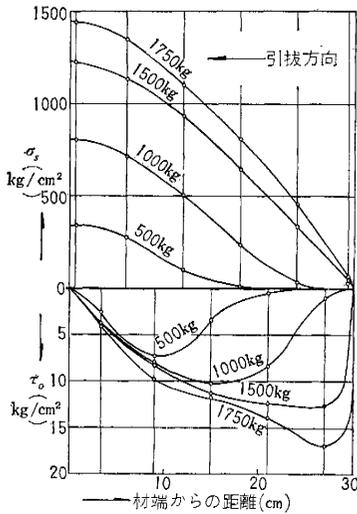


図-5 (b) σ_s, τ_0 分布曲線
(D 13, 引抜き試験)

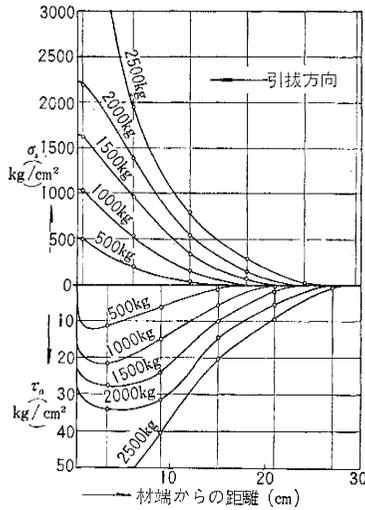
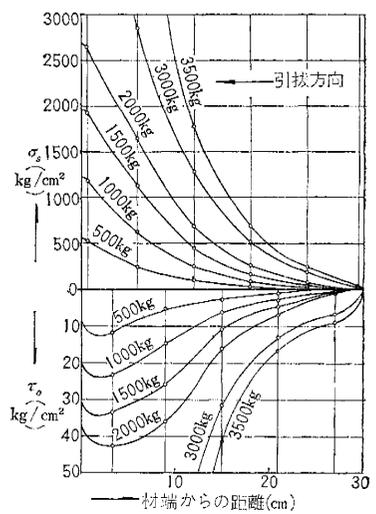


図-5 (c) σ_s, τ_0 分布曲線
(DT 13, 引抜き試験)



異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋では主としてコンクリート破壊または鉄筋破断であった。

◎ 丸鋼における τ_0 分布曲線の動向は大體つぎのようである。

初期：山の高さも有効付着長（実際に付着応力が存在する範囲の長さを有効付着長と仮称する）もともに増大

図-6 (a) 荷重—最大付着応力度曲線
(丸鋼, 引抜き試験)

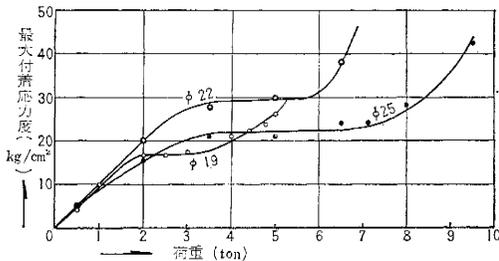
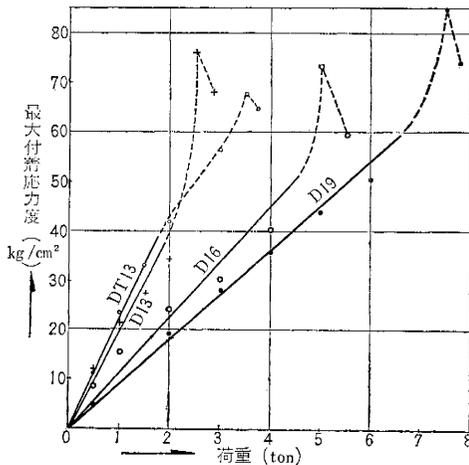


図-6 (b) 荷重—最大付着応力度曲線
(異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋, 引抜き試験)



する。

中期：山の高さの上昇が鈍り, 有効付着長の増加が大きい。

後期：有効付着長が一定となり（埋込み長に達する）山の高さのみ急増する。

① 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の場合には有効付着長はほとんど停滞し, 山の高さのみ上昇する。しかも τ_0 分布曲線のピークは加力端よりほぼ一定の場所にあり移動しない。

◎ 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の σ_s 分布曲線は非加力端に漸近する。丸鋼ではそのようにならない。

④ 同一荷重下においては, 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の有効付着長は丸鋼のそれより短い。

考察

τ_0 分布曲線からわかるように, 荷重が小さい間は埋込み長全体にわたっては付着応力は存在していない。荷重の増加にともない有効付着長は埋込み長に接近するが, その場合でも分布曲線は山形状をなしているから, 一般の平均付着応力度の考え方は適当でない。

異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋では τ_0 曲線のピークが加力端近傍に生じ, 有効付着長は丸鋼にくらべ相当短縮される。ふし, リブが効果的に働いたためスリップが起これずコンクリートへの力の伝達がすみやかに確実に行なわれるためと考えられる。したがって, 有効付着長以上の鉄筋長は付着機構上からは無意味である。丸鋼におけるようなフックの必要性はないと認められる。

6. 押抜き試験

(1) 供試体製作と試験法

供試体コンクリート型わくには $\phi 15 \times 30$ モールドを用いた。引抜き試験と同様の鉄筋供試体に, オルゼン型

図-7 (a) σ_s, τ_o 分布曲線 ($\phi 16$, 押抜き試験)

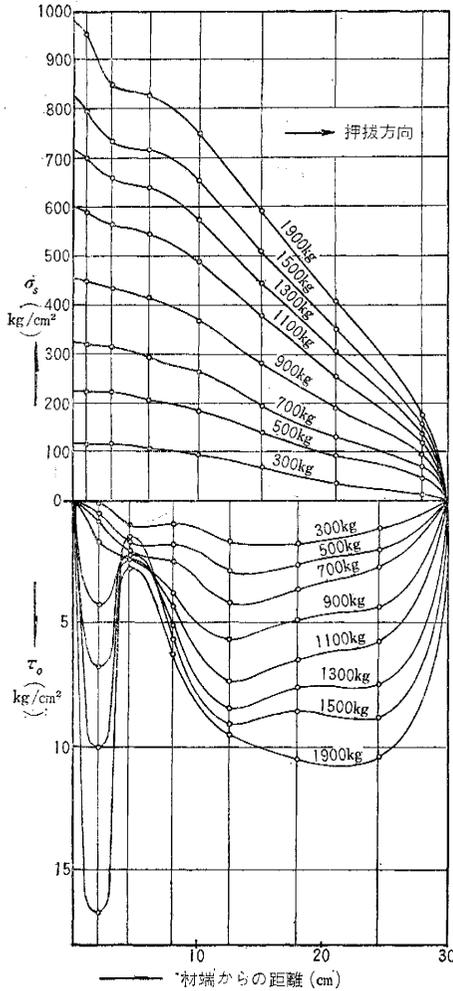
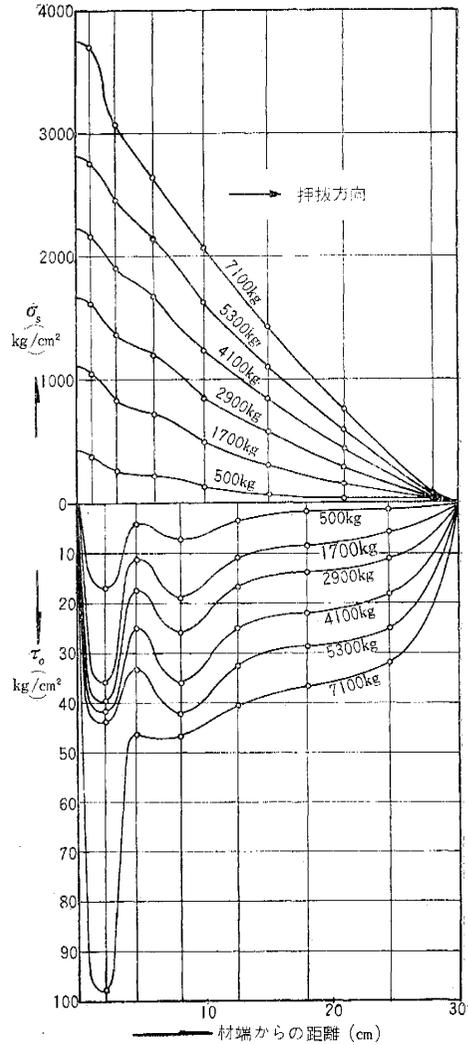


図-7 (b) σ_s, τ_o 分布曲線 (D 16, 押抜き試験)



試験機で押抜き荷重を加え、各荷重段階における鉄筋の圧縮ひずみを計測した。なお、載荷の際に加力側鉄筋が座屈するのを防止するために、その突出長を極力短く 5 mm とし、また鉄筋接着面のはく離を防ぐためメタルキャップを用いた。

(2) 測定結果

径 16 mm の鉄筋についてその種類別比較をするため、図-7 (a), (b), (c) にそれぞれ丸鋼, 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の σ_s, τ_o 分布曲線を示す。

つきにこの結果を要約する。

④ 丸鋼はすべてボンダ破壊であり、異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋はともにコンクリート破壊であった。

⑤ 有効付着長は、丸鋼においては比較的荷重のときから埋込み長全域にわたった。

⑥ τ_o 分布曲線に 2 つの山が存在し、加力端近くにネック部を生じる。

⑦ 荷重の増加につれて τ_o 分布曲線の 2 つの山はほぼ比例的に上昇するが、丸鋼においては、鉄筋がすべり

始めたのちは非加力端の山が上昇して、逆に加力端の山は下降し始める。ただし、山の位置は移動しない。異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の場合にはコンクリートのひびわれが加力端から発生し、その付近のボンダを破壊するため山の位置が一瞬前進の気配をみせて急速に破壊する。

⑧ 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の σ_s 分布曲線は非加力端に漸近するが、丸鋼ではそのようにならない。ただし両者の差異は引抜き試験におけるほどいぢるしくない。

⑨ 異形ねじり鉄筋の σ_s, τ_o 分布曲線は性状的に異形丸鋼のそれらに近似している。

⑩ 実測した付着応力度の最大値は、異形ねじり鉄筋, 異形丸鋼, 丸鋼の順序で低下した。

考 察

τ_o 分布曲線において加力端より数 cm のところにネック部が存在した理由は、鉄筋が圧縮荷重を受けてクサビ

図-7 (c) σ_s, τ_o 分布曲線 (DT 16, 押抜き試験)

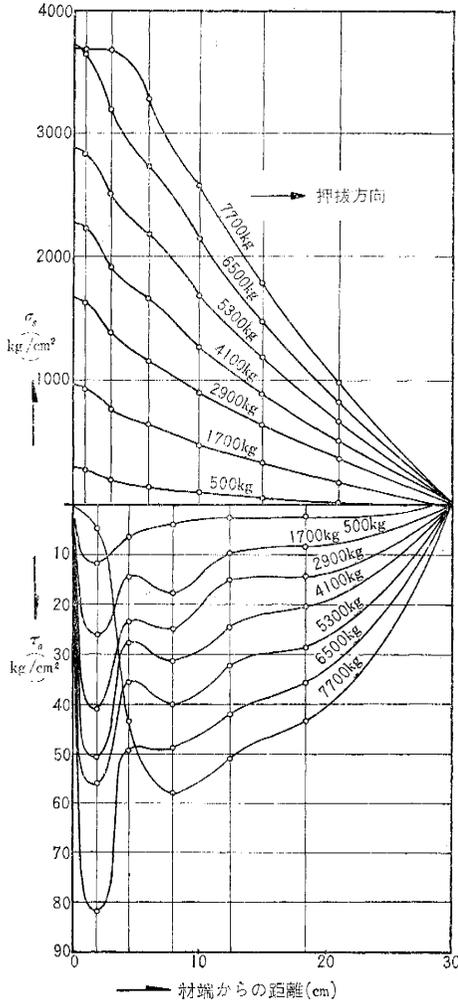


図-8 はり付着試験供試体

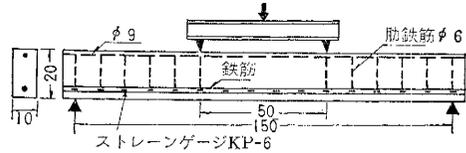
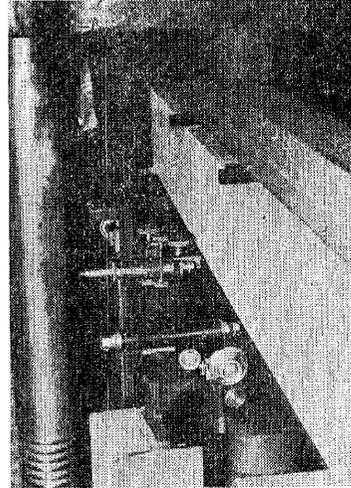


写真-1 はりひびわれ測定装置



し、顕微鏡3台によるひびわれ測定も同時に行なった。

(2) 測定結果

径 16 mm 鉄筋についてその種類別比較をするため、図-9 (a-1), (a-2), (b-1), (b-2) にそれぞれ丸鋼, 異形丸鋼の σ_s, τ_o 分布曲線を示す。ただし各曲線に付した数字は全荷重 $2P$ を表わす。また、同一荷重下で σ_s, τ_o 分布曲線について鉄筋の種類別比較をしたものを図-10-1, 図-10-2 に示す。

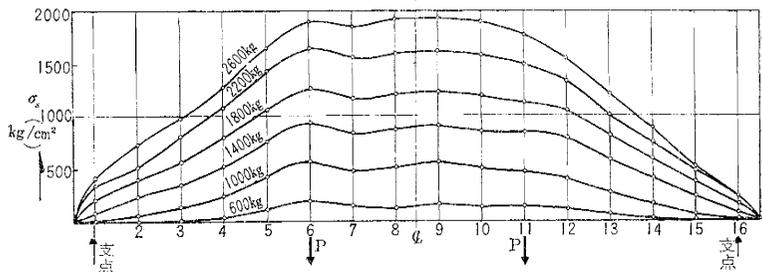
表-3 は実測したはり破壊荷重を鉄筋種類別に示したものである。

以上の結果を要約すると、つぎのとおりである。

表-3 鉄筋種類別, はり破壊荷重 (kg)

助鉄筋	丸 鋼			異形丸鋼			異形ねじり鉄筋		
	$\phi 13$	$\phi 16$	$\phi 19$	D13	D16	D19	DT13	DT16	DT19
不使用	3 200	3 600	3 800	3 100	3 600	4 300	3 000	3 600	4 100
使用	—	2 700	4 200	—	3 800	5 200	—	5 200	7 000

図-9 (a-1) σ_s 分布曲線 ($\phi 16$, はり試験)



形を形成する際、加力端近傍は特に強い圧縮を受けるから、その断面拡大がいちじるしく、したがって、そのやや先方の断面が相対的に小さくなって τ_o が激減し、ここがネック部に相当するのであると解釈されるであろう。

7. はり付着試験

(1) 供試体製作と試験法

図-8 に示したはり付着試験供試体製作には特に設計

した鉄製型わくを用い、せん断補強のため両端部には $\phi 6$ mm 肋鉄筋を配置した。引張鉄筋内部には 10 cm 間隔でストレインゲージを貼布し、リード線には特殊エナメル線を採用した。載荷方法は図-8、写真-1 に示すとおりで、破壊に至る各荷重段階で引張ひずみ、およびたわみを測定した。この際、はり側面には石膏を塗布

④ 鉄筋の引張応力度は支点より
 載荷点に向かい必ずしも直線的に増
 加せず、また、載荷点間の分布状態
 は鉄筋の種類により異なる。

⑤ 異形丸鋼、異形ねじり鉄筋の
 σ_s 分布曲線ははり端に向って漸近す
 る。丸鋼ではこのようにならない。
 引抜き試験の結果に類似している。

⑥ 同一荷重下で σ_s 分布曲線を
 比較すると、丸鋼では載荷点間すな
 わち等モーメント区間ではほぼ直線
 状を呈し、異形丸鋼、異形ねじり鉄
 筋では山形状を呈した。また、 τ_o
 分布曲線を比較すると、丸鋼の場合に
 は等せん断力区間でほぼ矩形状を呈
 するが、異形丸鋼では、三角形分
 布を呈し、そのピークは非常に高く、
 かつ載荷点直下に接近する。異形ね
 じり鉄筋の場合も三角形分布を示
 すが、そのピークの位置は等せん断
 力間のほぼ中間に位する。等モー
 メント区間においては、丸鋼の場合ほ
 ぼ0に近くなるが、異形丸鋼および
 異形ねじり鉄筋の場合には、いず
 れも波状を呈した。

⑦ 等モーメント区間、すなわち
 せん断力0の区間においても局部的
 に付着応力が存在し、異形丸鋼およ
 び異形ねじり鉄筋ではかなり大きい
 値となる。

⑧ 肋鉄筋を使用しないはりでは
 鉄筋の種類別による破壊荷重の差異
 はほとんど認められなかった。しか
 し、肋鉄筋を使用した場合にはその
 差異がいちじるしく、丸鋼、異形丸
 鋼、異形ねじり鉄筋の順序で増大し
 た。

考 察

同一荷重下で鉄筋の種類により引
 張応力度の差異が認められる一因を
 考察するに、一般に鉄筋コンクリ
 ート構造においてはコンクリートの引
 張応力を無視して設計するが、実際
 上はコンクリートは引張強度を有し
 ひびわれ断面以外では外力のモー
 メントに対して鉄筋とコンクリートと
 が共同して抵抗するものである。た
 だ荷重分担の割合が鉄筋の種類によ

図-9 (a-2) τ_o 分布曲線 ($\phi 16$, はり試験)

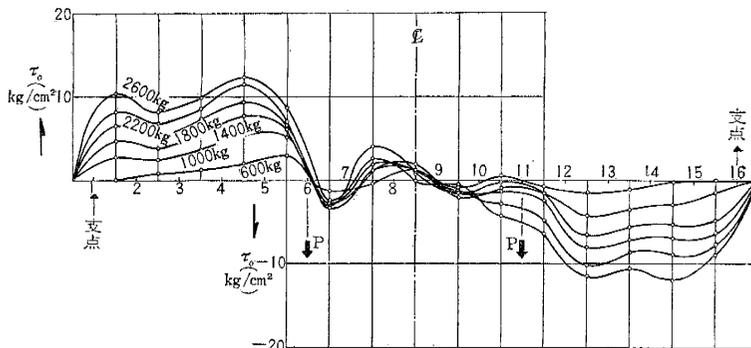


図-9 (b-1) σ_s 分布曲線 (D 16, はり試験)

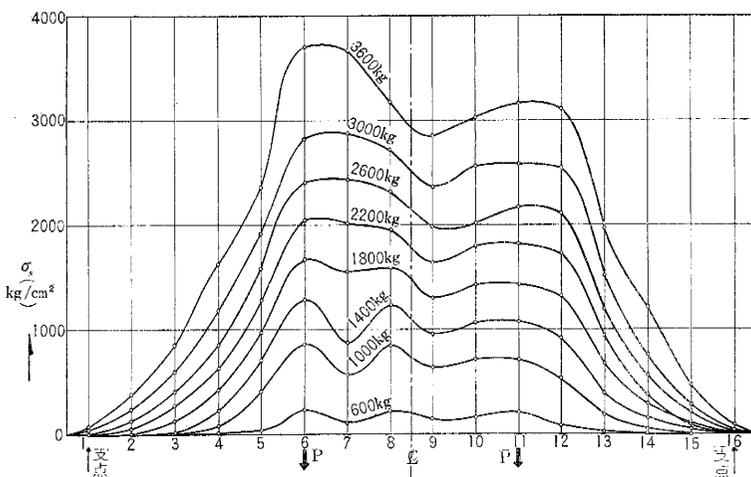
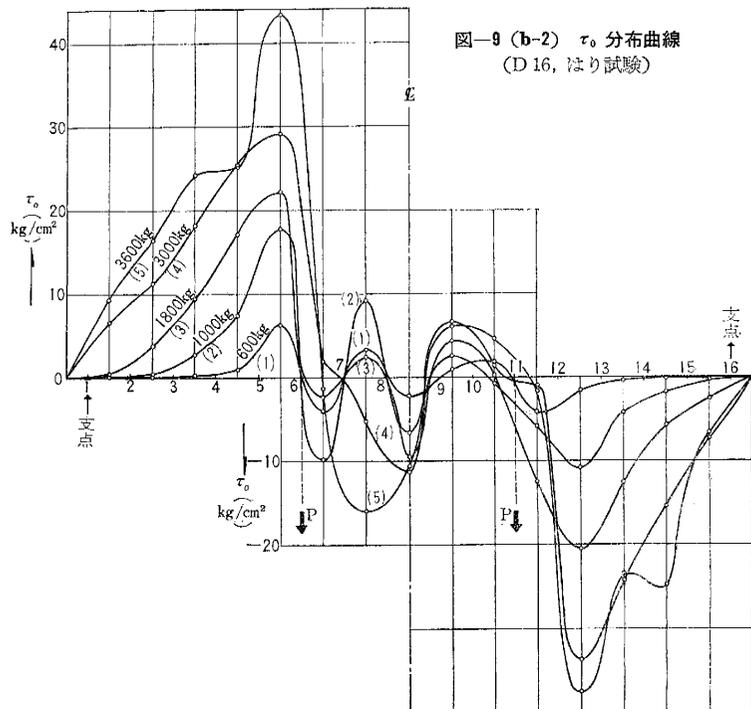


図-9 (b-2) τ_o 分布曲線
 (D 16, はり試験)



り異なるためであると解することができる。

また等モーメント区間に付着応力が存在した理由については、鉄筋コンクリートにおいて筋鉄筋の部分に応力の集中が認められることは周知であるが、異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋のふし部分が、あたかもこの筋鉄筋のような働きを演じて、付着応力の散発的集中がもたらされたと考えることができ、付着応力をせん断力によってのみ規定する一般的な考え方が必ずしも正しくないことを示している。

同一荷重下で σ_0 分布曲線の波数が丸鋼, 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の順序で増加することは、ひびわれ数が丸鋼, 異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋の順序で増加しているという観測結果に一致しており、ひびわれ部分のコンクリートの付着応力は当然0となり、ひびわれを生じていない残余部分に集中する傾向にあることを示している。

同一荷重下, 同一荷重のモーメントは等しいはずであるが、図-10-1の例えば載荷断面で比較すると鉄筋の実測応力度は丸鋼, 異形ねじり鉄筋, 異形丸鋼の順序で大きいのが、支点に向かうや、この順位が逆転しているのは興味ぶかい。すなわち、異形丸鋼, 異形ねじり鉄筋はそのふしの効果によって中央からのモーメントをすみやかにコンクリートに伝達してしまうからである。異形ねじり鉄筋のボンド特性は性状的には異形丸鋼に準じているが量的には丸鋼と異形丸鋼のほぼ中間に位した。異形ねじり鉄筋では異形丸鋼における縦リブがらせん状になっているから、これが鉄筋軸方向の力の伝達に寄与し、結局、異形丸鋼と丸鋼の中間的性状を呈せしめる一因と考えられる。

8. はりひびわれ試験

(1) 試験の目的と方法

荷重の増加ともなうひびわれの発生, 進行状況(ひびわれ数, 幅), さらに鉄筋の種類との関係などについて調べるために、写真-1に示した方法でひびわれ観測を行なった。ひびわれ幅の測定ははり中央および両端部において最初に発見した3個について、はりの破壊に至

図-10-1 同一荷重下, 鉄筋種類別 σ_0 分布曲線 (ビーム試験)

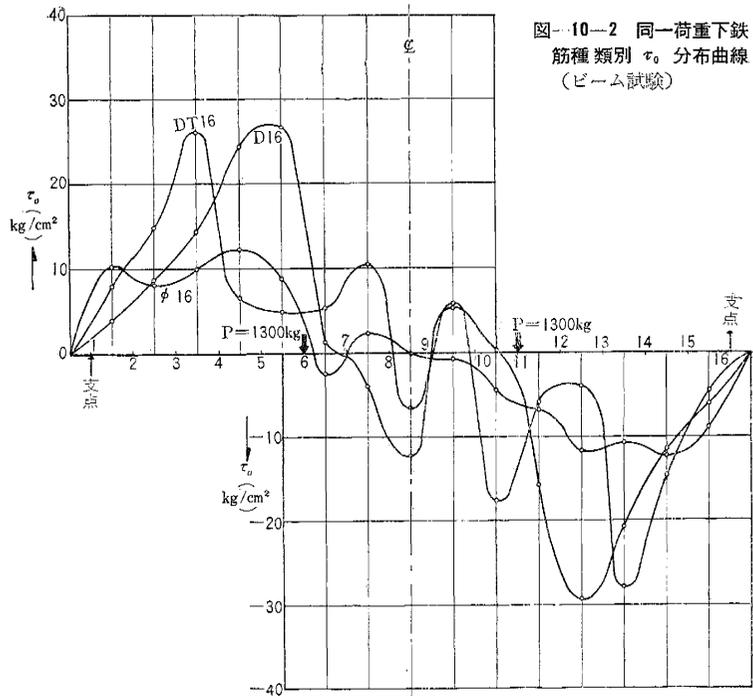
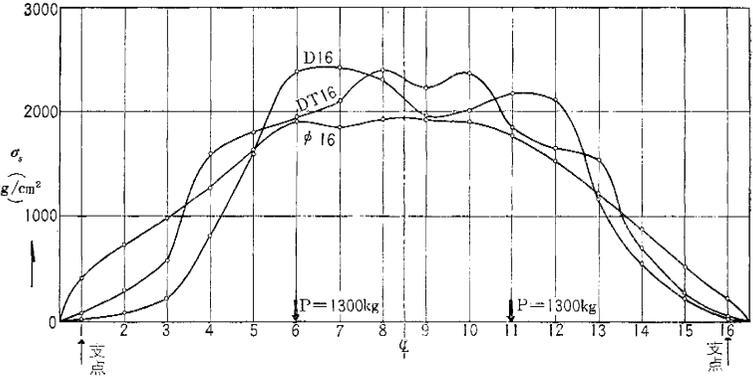


図-10-2 同一荷重下鉄筋種類別 τ_0 分布曲線 (ビーム試験)

るまで実施した。

(2) 測定結果

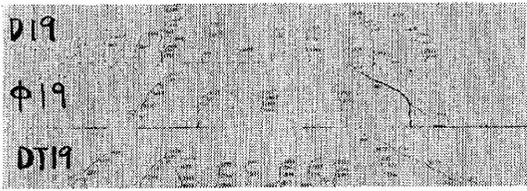
写真-2は荷重の上昇ともなうひびわれ進行状況であり、図-11, 12は径19mm丸鋼および異形丸鋼に関する荷重とひびわれ幅の実測曲線を示す。同図, (b), (a), (c)はそれぞれはり中央, 両端部において追跡観測したひびわれを意味する。

以上の結果を要約すると、

① ひびわれ数: 丸鋼においては発生するひびわれ数が少ない。異形丸鋼では低荷重のときからひびわれが多数発生し、初期より後期に至るまでその数はほとんど変化しない。異形ねじり鉄筋の場合は丸鋼と異形丸鋼の中間的性状を示し、初期にはひびわれ数が少なく、中期以後徐々に増加し、最終的には異形丸鋼のそれとほぼ同数になる。

写真-2 ひびわれ観測結果

(a) 肋鉄筋を使用した場合



(b) 肋鉄筋を使用しない場合

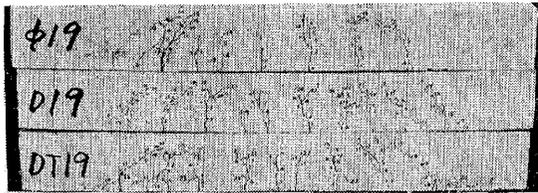


図-11 荷重—ひびわれ幅曲線 (φ19)

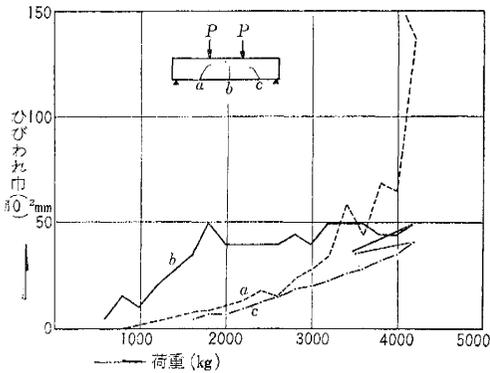
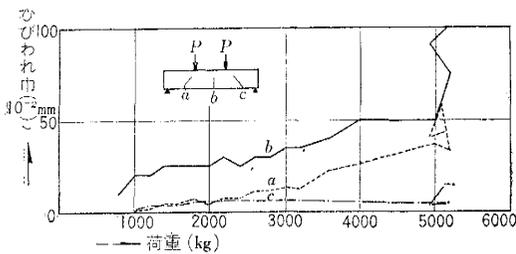


図-12 荷重—ひびわれ幅曲線 (D19)



⑮ ひびわれ幅：丸鋼のひびわれ幅は急速に発達して破壊点近くで斜引張応力による 45° のひびわれが急激に増大した。異形丸鋼，異形ねじり鉄筋では終始徐々に増加するが，丸鋼におけるような大きなひびわれ幅への発達はずっとおくれる。

⑯ ひびわれ長：荷重の増加にともない，丸鋼ではひびわれの長さが漸次伸びて，破壊点近くでははり上面に達する。異形丸鋼，異形ねじり鉄筋ではその伸長速度がおそく，破壊点でも上面まで達しない。

⑰ スパン中央部のたわみ：異形丸鋼，異形ねじり鉄筋の場合にはほぼ等しく，丸鋼の場合に比し小さい。

9. 結 言

以上の実験により引抜き，押抜き試験における平均付着応力度の考え方は正しくないことが示された。異形丸鋼，異形ねじり鉄筋はそのふし，リブの効果により力やモーメントがすみやかに確実にコンクリートへ伝達されたが，有効付着長は相当に短縮されることがわかった。このことは，はり端部におけるフック省略の妥当性を裏付け，定着長短縮への可能性を示唆したものとえよう。また，異形丸鋼，異形ねじり鉄筋の場合においてはひびわれ発生数が多く，したがって，その幅が非常に小さいから，はりの破壊荷重を増大させ，かつ，ひびわれ幅が大きいためひき起こされる諸障害を除き得られる利点は大きい。異形ねじり鉄筋はあたかも丸鋼と異形丸鋼との中間的性状を示し，特に破壊に対し良好なる結果を示した。

あとがき

この実験にあたって八幡製鉄 KK よりご援助を賜った。ここに付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Mains, R.M. : Measurement of the Distribution of Tensile and Bond Stresses Along Reinforcing Bars, Journal of ACI, V. 23, No. 3, Nov. 1951.

(原稿受付：1962.10.22)