

引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに 発生するひびわれに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON CRACKS FORMED IN CONCRETE
AROUND DEFORMED TENSION BARS

後藤 幸正*・大塚 浩司**

By Yukimasa GOTO and Koji OTSUKA

1. 緒 言

引張を受ける異形鉄筋の周辺のコンクリートには種々のひびわれが発生するが、それらは、鉄筋軸と直角方向に発生する“横ひびわれ”，部材表面には現われないが、鉄筋表面近くに発生する“内部ひびわれ”，および鉄筋軸方向に割裂して生ずる“縦ひびわれ”，に大別される。

横ひびわれは、鉄筋の引張応力度が、許容応力度に比べてかなり小さいうちから発生するもので、一般に、その発生を避けることは難しい。横ひびわれ幅が大きくなると鉄筋腐食のおそれが生ずるので、鉄筋コンクリート構造物の設計施工においては、耐久性の面から横ひびわれの幅を制御することが大切な事項とされている。

内部ひびわれは、横ひびわれの発生後まもなくその横ひびわれに近い異形鉄筋のふしから発生し始め、鉄筋応力度の増加あるいは載荷の繰返しとともに、遠いふしからも発生するようになり、順次、その数を増していくが、部材表面には現われないひびわれであって、異形鉄筋とコンクリートとの付着機構に重要な役割をなしている¹⁾。なお、内部ひびわれのうちのあるものは鉄筋応力度がかなり高くなつてから特に成長してコンクリート部材表面に達して横ひびわれとなることがあるが、これは“二次横ひびわれ”とよび、既存の横ひびわれ（“一次横ひびわれ”とよぶ）と種々の点でまったく異なる横ひびわれである¹⁾。

また、縦ひびわれの発生は、一般に、その部分での付着がほぼ破壊されたことを意味するもので、特に、鉄筋の定着部や重ね縫手部などに縦ひびわれが発生すると、部材や構造物の破壊に直接つながることが多く、危険である。縦ひびわれの発生成長は好ましくなく、これを防止することはきわめて大切である。

上記のように、引張異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれは、構造物の耐久性、鉄筋とコンクリートとの付着性、構造物の破壊に対する安全性などに重大な影響を及ぼすもので、これらの性状を明らかにすることは、鉄筋コンクリート工学上重要である。

一方、これらのひびわれの性状は、鉄筋の引張応力の大きさや繰返し回数、鉄筋の表面形状や直径、鉄筋の間隔やかぶり、横方向鉄筋の配置状況、コンクリートの性質、乾燥状態、などによって異なると考えられるが、これら各種の因子の影響については、まだ十分明らかでないことが多い。細径鉄筋は従来からきわめて広く使用されているため、鉄筋周辺のひびわれの実際上の影響についてはある程度わかっているが、近年構造物の大型化に伴い実用されるようになってきた太径鉄筋はまだ使用実績も少なく、ひびわれ性状についての研究もほとんどなされていない。したがって、それらを用いた構造物の耐久性や安全性などについては不安が多い。

筆者らは、以上のこと考慮して、市販および試作の表面形状の異なる、主として比較的太径の異形鉄筋を用いて、引張鉄筋周辺の各種のひびわれの性状、発生機構などを明らかにするための実験的研究を行った。

2. 実験材料

実験に用いた鉄筋は、主として、市販（SD 35）および試作（SD 35 相当）の D 32, D 41 および D 51 の合計 32 種類である。試作材は、ふし高さ、ふし間隔などを種々に変えた直角横ふし異形鉄筋で、熱間圧延したもの（縦リブあり）および旋盤で切削したもの（縦リブなし）である。Table 1 は使用鉄筋の詳細を示したものである。

使用粗骨材（河川砂利）の最大寸法は 25 mm とし、水セメント比は 50% とした。スランプは約 8 cm であり、載荷時のコンクリートの圧縮強度および引張強度は

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東北学院大学助教授 工学部土木工学科

Table 1 Details of bars as used for tests.

Nominal diameter ϕ (mm)	Type of bar	Dimensions of lug				Cross-sectional area A_s (cm ²)	
		Spacing l (mm)	Height h (mm)	Width at top (mm)	Face angle d (deg.)		
16	Rolled bar	$F_{10-1.2}$	10.5	1.2	2.0	1.98	
22	Rolled bar	$H_{14-2.0}$	14.1	2.0	2.0	3.87	
32	Machined bar (Lateral lug)	$S'_{5-1.6}$	5.5	1.6	1.2	7.71	
		$S'_{7-1.6}$	7	1.6	1.2	7.68	
		$S'_{7-2.2}$	7	2.2	1.0	8.02	
		$S'_{10-2.2}$	10	2.2	3.0	8.09	
		$S'_{16-2.2}$	16	2.2	3.0	7.80	
		$S'_{21-1.6}$	21	1.6	3.0	7.48	
		$S'_{21-2.2}$	21	2.2	3.0	7.66	
		$S'_{21-3.2}$	21	3.2	3.0	7.67	
		$S'_{21-2.2-15}$	21	2.2	3.0	15	8.11
		$S'_{21-2.2-30}$	21	2.2	3.0	30	7.76
		$S'_{21-2.2-45}$	21	2.2	3.0	45	7.60
		$S'_{21-2.2-60}$	21	2.2	3.0	60	7.60
		$S'_{21-2.2-90}$	21	2.2	3.0	90	7.58
41	Rolled bar (Lateral lug)	$S_{15-2.2}$	15	2.2	3.0	7.73	
		$S_{21-2.2}$	21	2.2	3.0	7.94	
51	Machined bar (Lateral lug)	$M_{12-3.0}$	12	3.0	3.2	12.84	
		$M_{16-3.4}$	16	3.4	2.8	12.94	
		$M_{27-3.2}$	27	3.2	5.2	13.36	
		$L'_{8-2.0}$	8	2.0	1.0	20.58	
		$L'_{12-3.5}$	12	3.5	2.5	19.22	
		$L'_{15-2.5}$	15	2.5	2.5	20.66	
		$L'_{15-3.5}$	15	3.5	2.5	20.10	
	Rolled bar (Lateral lug)	$L'_{15-4.5}$	15	4.5	2.5	18.80	
		$L'_{20-3.5}$	20	3.5	3.0	20.26	
		$L'_{20-4.5}$	20	4.5	3.0	20.03	
		$L_{12-3.4}$	12	3.4	3.0	19.83	
		$L_{15-3.5}$	15	3.5	3.5	20.27	
	Rolled bar (Diagonal lug)	$L_{20-3.5}$	30	3.5	3.5	20.27	
		$L_{30-5.1}$	30	5.1	5.0	20.64	
		$L_{30-5.5}$	30	5.5	6.2	20.27	

それぞれ大略 300 kg/cm² および 28 kg/cm² であった。なお、コンクリートの含水状態は、ひびわれ性状に大きい影響をもっているが、この研究では、湿潤状態のコンクリートについて実験を行った。

3. 一次横ひびわれ

(1) 概 説

鉄筋コンクリート部材引張部において、横ひびわれが数多く分散して発生すれば、個々のひびわれの幅は小さくなる。したがって、鉄筋腐食の点からみて、まず横ひびわれの分散性が問題である。

ふし部で集中的に力の伝達が行われる異形鉄筋ではなく、鉄筋軸方向に力の伝達が滑らかに行われる鉄筋、たとえば、表面組織が粗な普通丸鋼のような鉄筋を引張鉄筋として用いた場合、横ひびわれの定常状態（鉄筋応力度が増加しても新たな横ひびわれが発生しなくなった

状態）においては、横ひびわれの幅は、そのひびわれをはさむ両隣りのひびわれ間隔の和にほぼ比例する²⁾。また、横ひびわれ間隔（ L ）の限界値として、最大ひびわれ間隔（ L_{\max} ）と、最小ひびわれ間隔（ L_{\min} ）があり、これらの間には、 $L_{\max} \geq L \geq L_{\min}$, $L_{\max} = 2L_{\min}$ の一般法則がほぼ認められる¹⁾。

L_{\max} の値は、鉄筋直径、かぶり、鉄筋間隔あるいは鉄筋比、コンクリートの性質などの因子によって異なるものである。異形鉄筋を使用した場合にも、上述の一般法則に大略従って一次横ひびわれが発生し、定常状態に一応達するが、この場合には上記の因子のほかに鉄筋の表面形状が L_{\max} の値に大きい影響を及ぼす。一般に、 L_{\max} の値の大小によって一次横ひびわれの分散性を比較検討することができる。

なお、異形鉄筋の場合に発生する二次横ひびわれは、ある程度一次横ひびわれの幅に影響を及ぼすが、発生状況や発生原因、発生時の鉄筋応力度などが異なるので区別して取扱う。

一方、一次横ひびわれ内部におけるひびわれ幅は、部材表面から鉄筋表面まで一様ではなく変化するもので、一般に、鉄筋表面で最も小さく、特に、異形鉄筋の場合には著しく小さい。このような横

ひびわれ内部の深さ方向の幅の変化すなわち、“横ひびわれの内側面形状”は分散性とともに鉄筋腐食に密接に関係することは明らかである。この横ひびわれの内側面形状には異形鉄筋の表面形状の影響がきわめて大きいものと考えられる。

この研究では、横ひびわれ分散性については、主として、鉄筋の表面形状および直径の影響を、また、横ひびわれの内側面形状については、主として、鉄筋の表面形状およびかぶりの影響を調べる実験を行った。

(2) 一次横ひびわれの分散性

最大ひびわれ間隔すなわち、 L_{\max} を測定するには Fig. 1 に示したような鉄筋を中心に埋め込んだ正方形断面柱状の両引供試体を用い、側面に浅い切れ目（ノッチ）を入れて横ひびわれの発生位置を制御する方法^{2), 3)}を用いた。この方法によれば、 L_{\max} の値を比較的精度よく容易に求めることができる。両引供試体のコンクリート部分の長さは 2~3 m とし、その断面は、鉄筋比が

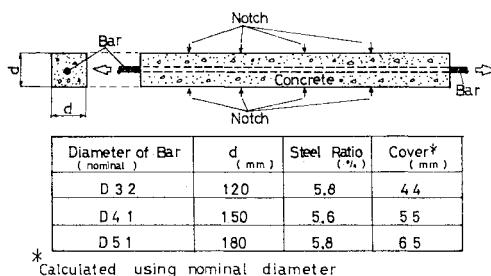


Fig. 1 Axially loaded specimens.



Photo. 1 Equipment for test of axially loaded tensile specimen.

それぞれほぼ一定値(6%弱)となるように、D 32 については 12×12 cm, D 41 については 15×15 cm, D 51 については 18×18 cmとした。

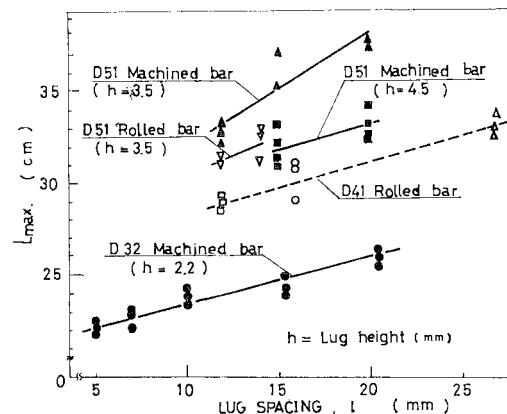
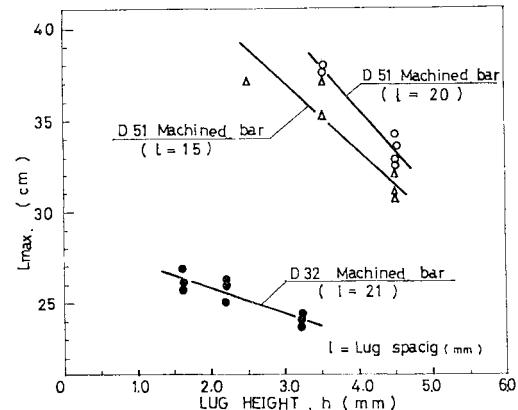
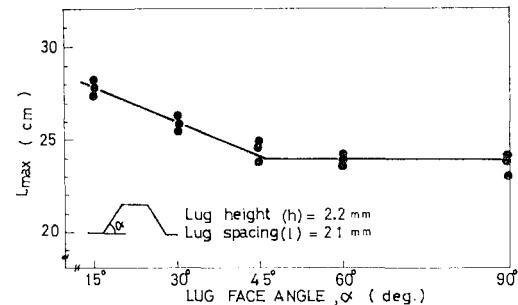
Photo. 1 は実験に用いた両引供試体の載荷装置を示したものである。供試体は自重の影響が大きくならないようにローラーの上に置き鉄筋応力度 3000 kg/cm^2 まで両引載荷した。

Fig. 2 は、横ふし間隔(l)と L_{\max} との関係を示したものである。図をみると、D 32 および D 51 の切削材を用いた場合、横ふし高さ(h)が同じであれば、 l が小さいほど、 L_{\max} が小さくなる、すなわち、横ひびわれ分散性がよくなる傾向が明瞭にみられる。D 41 ロール材の場合も、 h に多少の差があるが、同様の傾向がみられる。D 51 ロール材の場合は、 l が 12 mm と 15 mm とではあまり差がみられないが 12 mm の方がいくぶん分散性がよく、 l が 30 mm のものは h が他のものよりも高いにもかかわらず、かなり分散性が悪いという傾向がみられる。

Fig. 3 は D 32 および D 51 切削材を用いた場合の h と L_{\max} との関係を示したものである。この場合 l が同じであれば、 h が高いほど分散性がよくなる傾向がみられる。

以上のことから、この実験に用いたふし高さとふし間隔との範囲内では、ふし間隔を狭くするほど、また、ふし高さを高くするほど横ひびわれ分散性はよくなることがわかる。また、鉄筋直径は 3 種類について実験を行ったが、分散性に及ぼす直径の影響はあまり明瞭でなく、かぶりの影響が大きく現われている。

Fig. 4 は D 32 切削材を用いて異形鉄筋のふし前面

Fig. 2 Influence of lug spacing on L_{\max} .Fig. 3 Influence of lug height on L_{\max} .Fig. 4 Influence of lug face angle on L_{\max} .

の鉄筋軸に対する角度 α (以下、ふし面角度とよぶ)が横ひびわれ分散性に及ぼす影響を調べる実験を行った結果を示したものである。この場合、 l (21 mm)および h (2.2 mm)は一定である。この図から、横ひびわれ分散性は、 α が 45° 以上であれば α の影響はほとんどないが、 45° 以下のときは α が小さくなるにつれて次第に悪くなる傾向があることがわかる。

(3) 一次横ひびわれの内側面形状

内側面形状は、次の二方法によって求めた。

第一の方法は、**Fig. 5(a)** および **Photo. 2** のよう

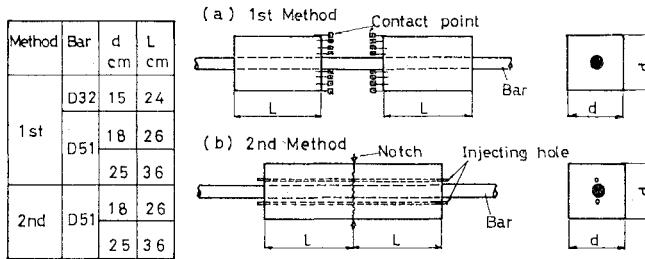


Fig. 5 Details of specimens for crack shape test.

に、両引供試体の内側の向かい合った二つの端面間の、鉄筋軸方向の距離の変化および鉄筋の伸びをコンタクトタイプひずみ計によって実測して、それらの結果から一次横ひびわれの内側面形状を推定する方法である。

第二の方法は、Fig. 5(b)のように、ノッチによって発生させた一次横ひびわれ内に浸透性の高いエポキシ樹脂系の注入剤を圧入し、硬化するまで両引載荷を持続させ、硬化後除荷し、一次横ひびわれ付近のコンクリートを薄片に切断してその横ひびわれ幅を顕微鏡を用いて実測する方法である。

Fig. 6(a), (b) はそれぞれ横ふし間隔の異なる 4 種の D 32 ロール材を用い、かぶり 6.5 cm と 10 cm の場合について、鉄筋応力度 $\sigma_s = 2000 \text{ kg/cm}^2$ の場合の横ひびわれの内側面形状を求めた結果を示したものである。

Fig. 6(a) をみると、横ひびわれの幅はふし間隔が大きくなると部材表面でも鉄筋表面でも大きくなる傾向がみられる。Fig. 6(b) は、ふし高さは低いがふし間隔の小さい鉄筋と、ふし高さは高いがふし間隔の大きい鉄筋とを用い、かぶりの影響を調べた結果を示したものである。この図をみると、かぶりが大きくなると、ひびわれ幅は部材表面では大きくなるが鉄筋表面ではあまり変わらないことがわかる。なお、鉄筋表面でのひびわれ幅すなわち鉄筋の露出幅がふし間隔によって相違するのは鉄筋ふし部から内部ひびわれが生じ、横ひびわれ面近くのコンクリートは鉄筋に対していくぶんすべるがほぼふしとともに移動するため、露出幅はこのすべり量と横ひびわれ面をはさむ最寄りのふしとふしとの間の鉄筋の弾性伸びとの和であるからふし間隔が小さければ露出幅も小さくなるのは当然と考えられる。

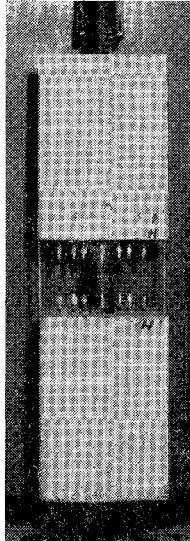


Photo. 2

Photograph of specimen for crack shape test (1st method).

また、Fig. 6 の左方の図は除荷後の両引供試体端面の形状を示したものであるが、この図をみると、除荷後も端面コンクリートのふくらみはある程度残留しており、鉄筋は、逆に、元端面の外にあった部分がコンクリートの中にめり込んだ状態にあることがわかる。これは、ふし付近のコンクリートに生じた内部ひびわれ面でのインターロッキングなどによって除荷後、元の状態に戻れないためであるが、このことから考えると、一次横ひびわれは、除荷後、鉄筋表面付近で完全に口を開いていても、部材表面では口を開いており、鉄筋には引張力が残留し、鉄筋付近のコンクリートには、逆に鉄筋軸方向の圧縮応力が生じることがわかる。この現象は鉄筋応力度の軸方向変化を測定³⁾してもわかる。したがって、一般に、横ひびわれ部における鉄筋腐食の問題を実験的に検討するには、除荷後の残留横ひびわれ幅の状態だけを対象とするのは不適当と考えられる。

Fig. 7 は、3 種の D 51 ロール材を用い、かぶり 6.5 cm と 10 cm の場合について、鉄筋応力度 2000 kg/cm^2 のときの横ひびわれの内側面形状を前述の第二

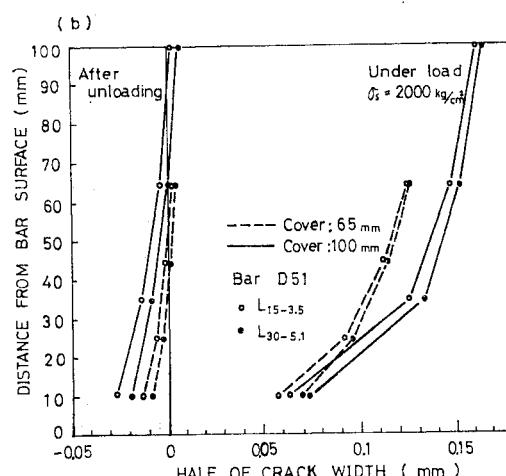
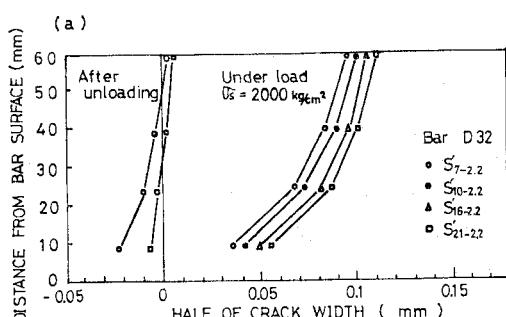


Fig. 6 Lateral crack widths at various levels in the crack (1st method).

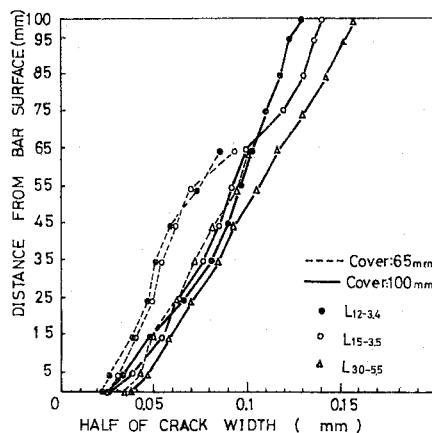


Fig. 7 Lateral crack widths at various levels in the crack (2nd. method).

の方法で測定した結果の一例を示したものである。この方法では、実際の横ひびわれが骨材の存在によって蛇行しているため、鉄筋軸と平行方向に横ひびわれ幅を精度よく測定することはかなり困難であり、また、注入剤が硬化の際、いくぶん収縮するため測定値が小さめに現われるが、図からわかるように、第一の方法によって求めた結果と傾向はよく一致している。

また、横ひびわれと鉄筋との接点付近の鉄筋表面には鉄筋とコンクリートとのはく離^⑨によって生じたすき間に圧入された注入剤の硬化層状物がみられた。その厚さは 0.05~0.1 mm のもののが多かった。この値は、鉄筋表面での横ひびわれ幅の値と同等かそれ以上であり、かなりの大きさといえる。このすき間の大きさも当然、鉄筋の腐食に関係していると考えられる。

4. 内部ひびわれ

(1) 概 説

横ひびわれの内側面形状からみると、引張異形鉄筋周辺のコンクリートは、鉄筋軸方向にみかけ上伸び能力をはるかに超えた大きい伸び変形をしていることがわかるが、これは引張異形鉄筋のふし部から、内部ひびわれが発生していることに起因することが明らかにされている¹⁰。

内部ひびわれは、異形鉄筋とコンクリートとの相互の応力伝達の機構、すなわち、付着機構にきわめて重要な役割をなしており、付着破壊のおもな原因の一つである縦ひびわれの発生や横ひびわれの内側面形状にも密接に関係していると考えられる。

内部ひびわれの性状に影響を及ぼす因子は種々あるがここでは主として異形鉄筋の、表面形状、かぶり、間

隔、直徑、引張応力度などの影響を両引供試体を用いて実験的に検討した。さらに単鉄筋はり供試体における引張主鉄筋周辺の内部ひびわれの性状を調べた。また、引張鉄筋の定着部の例として、重ね継手の部分や大きいブロックに埋込んで定着した部分における内部ひびわれの性状についても調べた。

内部ひびわれの発生状況の観察や実測は次の方法によった。すなわち、供試体のコンクリート中に鉄筋からわずか(3~5 mm)離して鉄筋と平行に細い孔を設け、その孔の中に載荷前に赤インクを注入し、注入圧を保ちながら載荷し、ひびわれ発生による負圧を利用して赤インクをひびわれ内に浸透させ、除荷後、鉄筋軸を含む面で縦割りにして内部ひびわれを調べた。なお、供試体を縦割りにする方法としては、両引供試体の場合は供試体を圧縮試験機により圧裂し、はり供試体の場合には鉄筋の表面まで外側よりコンクリートをはつり、圧裂面またははつり面を観察する方法を主として用いた。特に、内部ひびわれの方向、長さ、本数などをさらに精度よく実測するにはダイヤモンドソーにより切断する方法を用いた。

(2) 単独あるいは広い間隔に並んで配置された引張鉄筋周辺の内部ひびわれ

Photo. 3(a) はふし間隔の異なる 3 種類の D 51 ロール材を用い、正方形断面の中心に 1 本の鉄筋を埋め込んだ両引供試体における内部ひびわれを示したものである。供試体側面にはあらかじめ L_{max} よりいくぶん小さい間隔に一次横ひびわれがまず発生するようにノッチ

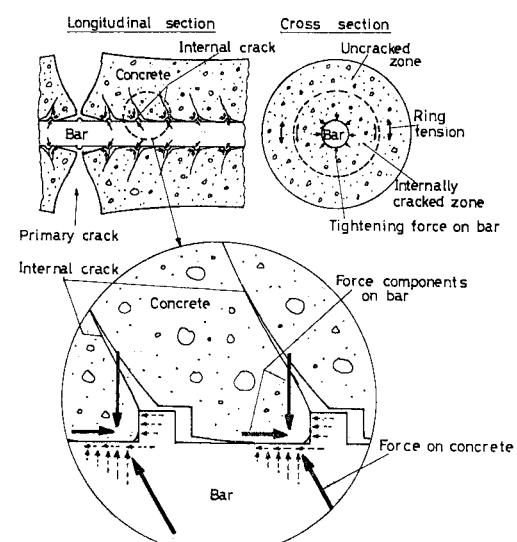


Fig. 8 Deformation of concrete around deformed bar after formation of internal cracks (Schematic diagram).

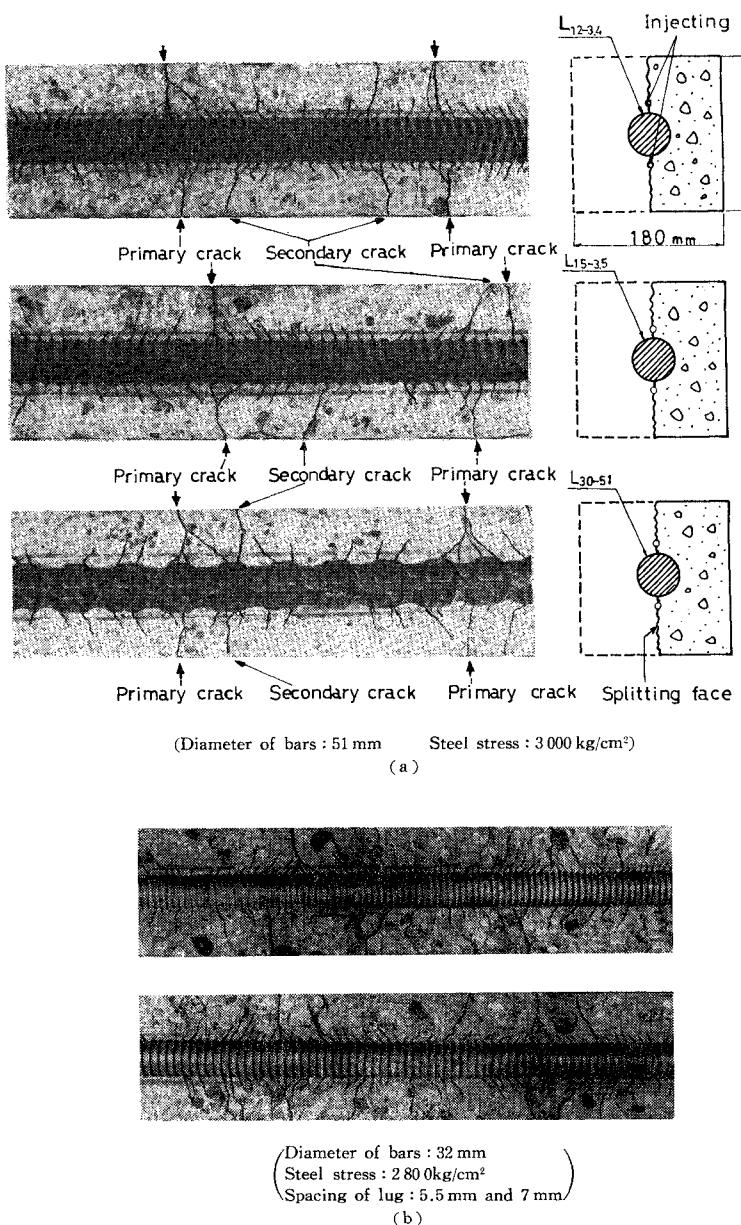


Photo. 3 Influence of lug spacing on the pattern of internal cracks.

を入れておいてから、鉄筋応力度 3 000 kg/cm² まで両引載荷を行った。

Fig. 8 は断面中心に 1 本の鉄筋を配置した両引供試体の内部ひびわれの形状を模式的に示したものである。このように引張鉄筋が単独にまたは広い間隔に並んで配置されている場合の内部ひびわれは、ふし付近を頂部とするほぼ円錐状をなし (Fig. 9(a) 参照)、その底部を最寄りの一次横ひびわれ面 (あるいは両引供試体端面) の方に向けていている¹²。

内部ひびわれ発生時の鉄筋応力度は、異形鉄筋の表面形状によつてかなり異なるものであるが、一般に、それが 1 000 kg/cm² に到達する以前にすでに内部ひびわれの発生がみられることが多い。

Table 2 は、Fig. 5(b) と同様の正方形断面で、長さが L_{\max} の 2 倍弱で、中央にノッチを設けた両引供試体を用い、鉄筋応力度 2 000 kg/cm² まで載荷し、発生した内部ひびわれについて、その先端から鉄筋表面までの最短距離 (内部ひびわれ到達距離) r_c 、鉄筋表面付近で鉄筋軸となす角度 θ 、発生本数 N を詳細に調べた結果を示したものである。

供試体端面と供試体中央に発生させた一次横ひびわれとの間を 3 等分して内部ひびわれの角度について中央 1/3 部と両端 1/3 部とを比較してみると、前者の方が後者よりも平均で 5~14° 大きくなつ

Table 2 Details of internal crack patterns.

Type of Bar	Dimensions of specimen			Internal crack patterns (mean value)			
	Cross section (cm × cm)	Cover (cm)	Total length (cm)	N	r_c (mm)	θ (deg.)	
						Out side of middle third	Middle third
$L_{12-3.4}$	18×18	6.5	$26 \times 2 = 52$	32	17	62	69
	25×25	10	$36 \times 2 = 72$	32	21	62	67
$L_{15-3.5}$	18×18	6.5	$26 \times 2 = 52$	30	18	61	71
	25×25	10	$36 \times 2 = 72$	28	19	60	65
$L_{30-5.1}$	18×18	6.5	$26 \times 2 = 52$	20	23	62	68
	25×25	10	$36 \times 2 = 72$	18	25	59	64

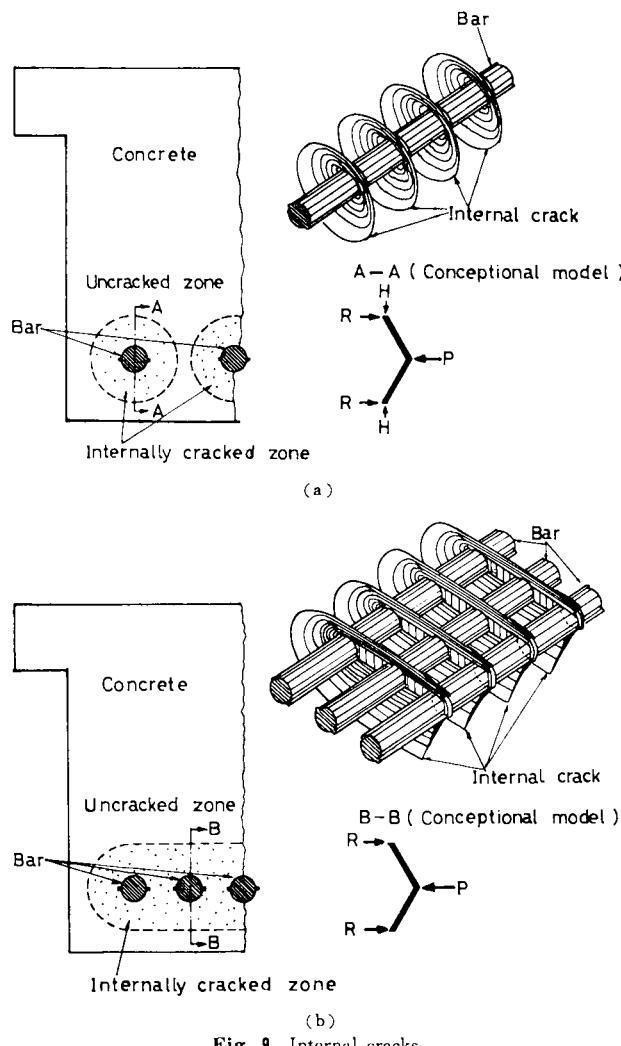


Fig. 9 Internal cracks.



Diameter of bars : 32 mm
 Steel stress : 3000 kg/cm²
 Clear spacing between two bars : 4 cm

Photo. 4 Pattern of internal cracks between two bars placed at close spacing.

ている。

内部ひびわれの r_c と N に及ぼすふし間隔の影響について、ふし間隔 15 mm と 30 mm とを比較すると、前者の方が後者よりも N で約 40~50% 多く、平均の r_c で約 20~30% 短い。一般的にいって、ふし間隔が大きければ、内部ひびわれの数は少なく長さが長い、逆に、ふし間隔が小さければ、長さの短かい内部ひびわれ

が数多く発生する。なお内部ひびわれの鉄筋軸とのなす角度に及ぼすふし間隔の影響はあまり明瞭ではない。

Photo. 3(b) は、ふし間隔を極端に小さくした異形鉄筋の場合の例として、直径 32 mm で横ふし間隔 5.5 mm および 7 mm の切削材を使用した両引供試体における内部ひびわれの発生状況を調べた結果を示したものである。従来、付着性状を改善するために、ふしの高さ、ふしの間隔などをどのように定めるかを検討する際、ふしとふしとの頂部を連ねた面でコンクリートがせん断されないようにすることが大切な事項として考えられているが、これらの写真をみて明らかなように、横ふし間隔をかなり小さくしてもふしの頂部を連ねる面でのせん断はみられず、ふしを起点とする内部ひびわれが数多く発生し、鉄筋からコンクリートへの力の伝達がほとんどのふしから確実になされていることがわかる。

しかしながら、特に、ふし間隔が小さい (5.5 mm) 場合にはコンクリート打込みの際、鉄筋の上側となった面ではほとんどの各ふしから内部ひびわれが発生しているのに、鉄筋の下側の内部ひびわれは各ふしから発生せず間隔がとんでいる。これはふし間隔を特に小さくするために実際上の考慮からふし高さも小さくしたこと、ブリーディングの影響があったことなどが原因と考えられる。以上のことから、内部ひびわれがほとんどの各ふしから発生する限度内でふし間隔を小さくすれば、鉄筋からコンクリートへの力の伝達は、鉄筋軸方向により滑らかになる。すなわち付着性が一様になると考えられる。繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート部材においては異形鉄筋のふし部にコンクリートから集中的に力が加えられることが原因でふし部に応力集中がおき鉄筋が疲労するおそれがある。このような疲労は“付着による鉄筋疲労”として、異形鉄筋を単独に繰返し引張載荷したときのふしの存在が原因でふし部に応力集中がおきて疲労するのと区別する必要がある。ふし間隔の広い太径異形鉄筋を使用したはりの疲労強度がふし間隔の狭い場合に比べて小さくなるという実験結果が報告されている¹⁾が、これは付着による鉄筋疲労の影響もあると考えられ、ふしの付け根の曲率を大きくするばかりでなく、ふし間隔の小さい鉄筋を使用することによってかなり改善できるものと考えられる。

ふしの高さは、内部ひびわれの発生にかなりの影響を

もち、実験の範囲内（鉄筋直径の5~10%）ではふしが高いほど、内部ひびわれは発生しやすいという傾向がみられた。

ふし前面の角度も内部ひびわれの発生に大きい影響をもっており、ふし前面の角度が小さくなると、内部ひびわれの発生数が少くなり、長さも短くなり、鉄筋軸とのなす角度が大きくなる傾向がみられた。特に、ふし前面の角度が45°より小さくなると、それらの傾向が著しくなるようである。

かぶりが内部ひびわれに及ぼす影響を調べるため、かぶり6.5cmと10cmとを比較した結果、あまり大きい差はないが、かぶりの大きい方が内部ひびわれの到達距離がやや大きくなり、角度はやや小さくなる傾向がみられた。

ふしの間隔、高さなどが同じ場合、鉄筋直径が内部ひびわれの到達距離や角度などに及ぼす影響はあまり大きくなかった。このことから、引張鉄筋からコンクリートへ力を伝達する場合のいわゆる影響半径は鉄筋の直径に比例して大きくなるとはいえないのではないかと考えられる。

(3) 狹い間に並んだ引張鉄筋周辺の内部ひびわれ

Photo. 4 は、2本の鉄筋を比較的狭い間に並べて配置した両引供試体を、いずれの鉄筋にも同じ引張力が働くように両引載荷し、鉄筋応力度3000kg/cm²とした場合の2本の鉄筋軸を含む面に現われた内部ひびわれの例を示したものである。この場合、鉄筋はD32横ふしのロール材、供試体断面は12×19.2cm、鉄筋のかぶりおよび純間隔はそれぞれ4.4cmおよび4cm（鉄筋の直径を32mmとして計算した値）である。写真からわかるように2本の鉄筋の間にはさまれた部分では内部ひびわれは鉄筋軸とほぼ90°をなし、両側の鉄筋のふしとふしとを連結するように梯子段状に発生している。これは鉄筋の間隔が狭いために両方の鉄筋からコンクリートへ伝えられた力が重なり合成された結果と考えられる。そして、鉄筋軸を連ねた面に直角で鉄筋軸に平行な面に現われた内部ひびわれの形状は単独または広い間隔の鉄筋の場合とほぼ同様にくし歯状であり、それが鉄筋軸となす角度もあまり相違しない。

このように、狭い間に並んで引張鉄筋が配置されている場合の内部ひびわれの発生状況は、単独にまたは広い間隔に配置されている場合と異なっているもので、この形状を模式的に表わすと **Fig. 9(b)** のようになるとを考えられる。

2本の鉄筋の純間隔を **Photo. 4** の場合よりも広くすると前述の梯子段状の内部ひびわれの段が次第に弓状となり約8cm程度以上離した場合には、2本の鉄筋の

間に発生した内部ひびわれが連結することなく、独立して発生し、その形状も単独の鉄筋の場合とほぼ等しくなった。

このように並んで配置された引張鉄筋周辺の内部ひびわれは、鉄筋とコンクリートとの間のせん断応力、すなわち鉄筋からコンクリートに伝達される力の大きさによって異なるが、鉄筋間隔のある限界を境にして連結したり独立したりするが、このことは縦ひびわれ特性にきわめて大きい影響をもっているものと考えられる。

(4) 重ね継手部の内部ひびわれ

Photo. 5 は2本の鉄筋をわずか離して重ね合わせた重ね継手を設けた両引供試体を鉄筋応力度2500kg/cm²まで引張載荷した結果、両方の鉄筋の軸を含む面に現われた内部ひびわれの発生状況の例^[10]を示したものである。この例では鉄筋はD16横ふしのロール材、重ね合わせ長さは25cm、供試体断面は10×26cm、かぶりは4.2cm、2本の鉄筋の純間隔は0.8cmである。供試体中には2組の重ね継手を設け、2組の重ね継手に同じ応力が働くように載荷した。この写真からわかるように、重ね継手部では継手の両端に一般に比較的大きい一次横ひびわれが発生する。この例では継手部内には一次横ひびわれはみられないが、重ね合わせ長さが長いと継手部内にはさらに一次横ひびわれが発生する。この例のように重ね合わせ長さがあまり長くない場合には、両方の鉄筋にはさまれた部分には継手の全長にわたって、両方の鉄筋のふしとふしとを斜めに連結する内部ひびわれがほぼ平行に数多く発生している。これらの内部ひびわれの鉄筋軸とのなす角度は、両方の鉄筋の間隔や重ね合わせ長さによって異なるが、一般に、狭い間隔に重ね合わせた場合には30~45°程度のものが多く、継手中央部では端部付近に比較して角度が大きい傾向があり、特に、重ね合わせ長さが長い場合にはこの傾向が大きく90°に近いもののがみられることがある。これらの2本の鉄筋にはさまれた部分の内部ひびわれの傾きは、一方の鉄筋から他方の鉄筋に力がコンクリートを通して伝達される方向を示しており、これによって、異形鉄筋の重ね継手の力



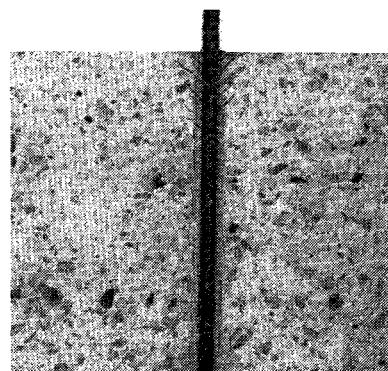
Diameter of bar : 16 mm
Steel stress : 2500 kg/cm²
Clear spacing between two bars : 8 mm

Photo. 5 Pattern of internal cracks around lapped splice.

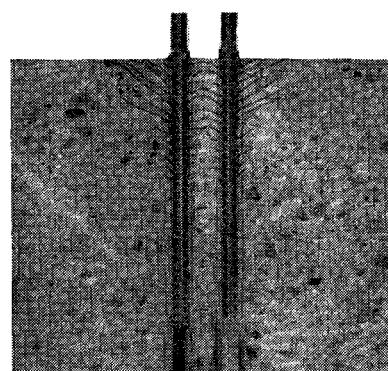
のおもな伝達機構が明確にわかる。なお、両方の鉄筋の外側における内部ひびわれは緑手端部付近で連続している鉄筋のまわりにのみ発生している。

(5) 大きいコンクリートブロックに埋め込んだ引張鉄筋定着部の内部ひびわれ

Photo. 6 は大きいブロックに埋め込まれた 1 本または 2 本の鉄筋を鉄筋から離れた位置に反力をとって引き抜くように、鉄筋応力度 2500 kg/cm^2 まで載荷した結果観察された内部ひびわれの発生状況の例を示したものである。鉄筋は D 22 横ふしのロール材、かぶりは 29 cm (鉄筋 1 本の場合) および 25 cm (鉄筋 2 本の場合)、鉄筋埋込長さは 40 cm である。鉄筋 2 本の場合の鉄筋純間隔は 5 cm である。これらの写真からわかるように、内部ひびわれは、鉄筋の荷重端付近のコンクリートに多く発生しており、自由端付近には発生しておらず、その長さも荷重端に近づくほど長くなっている。内部ひびわれの鉄筋軸とのなす角度は、一般に、鉄筋表面に近い部分では 1 本の鉄筋をもつ両引供試体の場合に比べてやや小さい。荷重端付近に発生した内部ひびわれの場合には鉄筋表面から離れるにつれて次第に鉄筋軸とのなす角度



(a) One bar

(b) Two bars
(Diameter of bar : 22 mm)
(Steel stress : 2500 kg/cm²)**Photo. 6** Pattern of internal cracks at anchorage zone of tension bar.

が大きくなり、コンクリート端面近くで 90° に近い角度となり、いわゆる朝顔状となりやがて端面に達するものがある。また、平行に並んで配置された 2 本の鉄筋の間にはさまれた部分での内部ひびわれは両引の場合と同様、両側の鉄筋のふしとふしを連結するように梯子段状に発生している。しかし、この場合は両引の場合と異なって鉄筋間隔をかなり大きくしても内部ひびわれが連結しやすい。このことは異形鉄筋の定着性にきわめて大きい影響をもっていると考えられる。

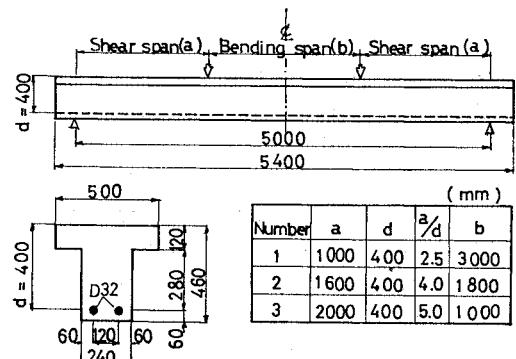
(6) 単鉄筋はり⁹⁾の内部ひびわれ

Fig. 10 のような 3 種の単鉄筋 T 型のはり供試体をそれぞれ鉄筋応力度が計算値 2500 kg/cm^2 になるまで二点載荷し、引張主鉄筋周辺の内部ひびわれを調べた。

Photo. 7(a) は、曲げスパン部におけるひびわれ発生状況の一例として、 $a/d=4.0$ のはりの場合を示したものでコンクリートをはつり、鉄筋軸を含む面を露出させたものである。この写真からわかるように、曲げスパン部においては、1 本の鉄筋を埋め込んだ両引供試体の場合とはほぼ同様に、内部ひびわれは異形鉄筋のふしを頂部とするほぼ円錐をなし、その底部を最寄りの一次横ひびわれ面の方に向いている。

Photo. 7(b) は、せん断スパン部におけるひびわれの発生状況の一例として同じ $a/d=4.0$ のはりの場合を示したものである。なお、写真で、はりの圧縮フランジにみえるひびわれは、除荷後の取扱中に供試体を誤って落下させたときに大きくなったものである。この写真からわかるように、せん断スパン部、特に斜め引張ひびわれ発生位置から支点までの間ににおいては、内部ひびわれの発生状況が曲げスパン部におけるものと著しく異なる。

Fig. 11 は上述の $a/d=4.0$ のはりに発生した内部ひびわれの鉄筋軸とのなす角度の分布を鉄筋の上側に発生したもの (a) および下側に発生したもの (b) に分けて、それぞれ斜めひびわれと支点との間に発生したものと、

**Fig. 10** Details of test beams.

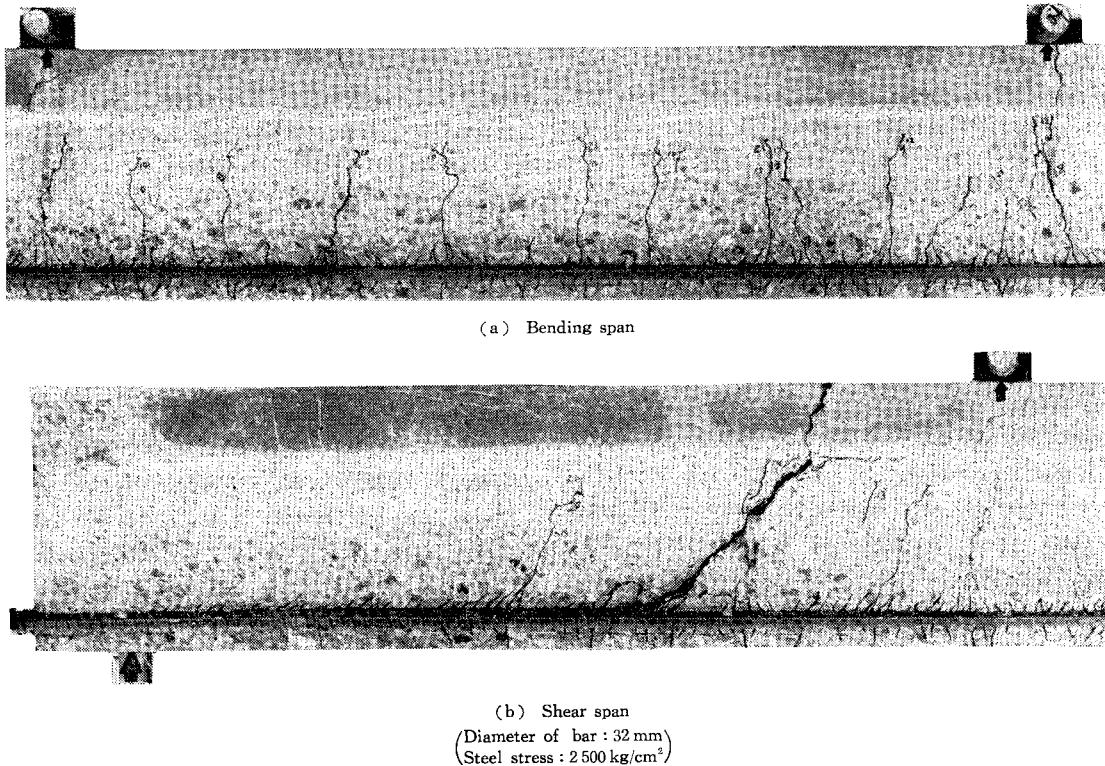


Photo. 7 Pattern of internal cracks around main tension bar in beam.

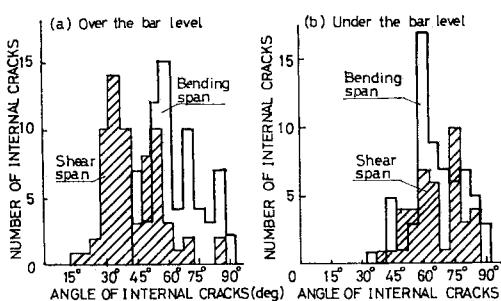


Fig. 11 Distributions of angles of internal cracks.

曲げスパン部に発生したものとを比較した図である。この図をみると、曲げスパン部では鉄筋の上側・下側とも、内部ひびわれの角度は $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ のものが多く、両引供試体において観察された性状とよく似ている。ところが斜めひびわれと支点との間では、鉄筋の上側と下側とでは著しく異なっており、上側ではその角度が小さく $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ のものが多いが下側では比較的大きく $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ のものが多くなっている。また、鉄筋の上側に発生した内部ひびわれのうち斜めひびわれ面に近いいくつかの内部ひびわれは、特に成長し腹部側面に現われたり、斜めひびわれに合流したりする。

$a/d = 2.5, 4.0$ および 5.0 のそれぞれのはりにおける内部ひびわれの性状を比較すると、この実験の範囲内で

は、曲げスパン部ではあまり差はみられなかったが、せん断スパン部の鉄筋の上側では、 a/d が小さくなるほど、内部ひびわれの鉄筋軸とのなす角度は一般に小さくなるようである。

以上述べたように内部ひびわれは、曲げスパン部とせん断スパン部、引張主鉄筋の上側と下側などで、それぞれ特有の性状を示しており、これらの内部ひびわれを観察することによって、各部における鉄筋からコンクリートへの力の伝達状況の特徴を知ることができる。

5. 二次横ひびわれ

(1) 概 説

引張異形鉄筋周辺のコンクリートには前に述べた一般法則に大略従って一次横ひびわれが発生し、定常状態に一応達するが、その後、鉄筋応力度がかなり高くなった場合、既存の一次横ひびわれの比較的近くに新たな横ひびわれ（二次横ひびわれとよぶ）が発生することがある。

二次横ひびわれが発生するとみかけの横ひびわれ間隔は L_{min} より小さくなる。二次横ひびわれは部材表面に現われるものではあるが、発生状況や発生原因、発生時の鉄筋応力度などからみると、一次横ひびわれとまったく

く異なったものである。

(2) 二次横ひびわれの発生機構

二次横ひびわれの発生した後の内部ひびわれの状況を観察すると (Photo. 3 参照), 二次横ひびわれは異形鉄筋のふし部から発生した内部ひびわれと連結しており, このことから, 二次横ひびわれは内部ひびわれのうちのあるものが鉄筋応力度がかなり高くなってから特に成長してコンクリート部材表面まで達したものであることがわかる。

隣接する二つの一次横ひびわれの間においては, 鉄筋ばかりでなくコンクリートも鉄筋軸方向の引張力を分担しているが, 内部ひびわれの発生した後は, 内部ひびわれの到達していない外側の部分 (uncracked zone) のコンクリートでこの引張力を受けなければならない。コンクリートの分担する引張力は, 一次横ひびわれ面から離れるに従って次第に大きくなるが, 一方それを受けるコンクリート断面積は, 一次横ひびわれ面から離れるに従って内部ひびわれ到達距離が短くなるために大きくなる。それでコンクリートの引張応力が最も大きくなる付近にある内部ひびわれから二次横ひびわれが発生しやすいと考えられる。一般に二次横ひびわれは常に特定の位置に発生するとは限らないが, 隣接する二つの一次横ひびわれの間の中央 1/3 内には発生しないもので, 多くは一次横ひびわれに比較的近い位置に発生する。

(3) 二次横ひびわれの発生状況および各種要因の影響

一次横ひびわれは鉄筋表面から部材表面までの間マクロ的にいえば, 鉄筋軸にほぼ直角な平面であるのに対して, 二次横ひびわれは, 鉄筋軸とのなす角度が鉄筋表面付近でほぼ 60° 前後 (内部ひびわれ自身の角度), 部材表面付近でほぼ直角となるような曲面である。

横ひびわれをはさんだ左右両側の内部ひびわれの傾きを比較してみると, 一次横ひびわれの場合には左右対称であるのに反して, 二次横ひびわれの場合には左右同じ方向である。

鉄筋コンクリートはりの引張部に発生した二次横ひびわれをはりの側表面から観察すると, 一般に, 一次横ひびわれのようにはりの中立軸の方へ向かって大きく成長することではなく, 中途で成長が止まるか, または最寄りの一次横ひびわれと合流する (Photo. 7)。

二次横ひびわれが発生すると, 隣接する一次横ひびわれの幅はその瞬間減少し, その後, 鉄筋応力度が増加してもそのひびわれ幅の増加割合はきわめて小さい。また, 後述する縦ひびわれの発生成長も二次横ひびわれの発生によって遅れる傾向がある。

二次横ひびわれは, 一般に, 鉄筋応力度がかなり高くなつてから発生するものであるが, その発生状況は, 一次横ひびわれの間隔, 鉄筋の表面形状や直径, かぶり, 鉄筋間隔, コンクリートの乾燥状態や強度などの状況によって異なるものである。

二次横ひびわれは, 長い一次横ひびわれ間隔の部分によくみられ, 短い一次横ひびわれ間隔の部分にはあまりみられないものである。写真 (Photo. 3) の例では, あらかじめノッチを入れることにより L_{max} に比較的近い間隔に一次横ひびわれを発生させてあるために, 二次横ひびわれがきわめて顕著に現われているが, 自由に一次横ひびわれを発生させた場合には, それらの間隔が L_{max} に近い間隔になることは比較的少なく, したがって, 一般に, 数多くの二次横ひびわれの発生はみられない。

二次横ひびわれは, 異形鉄筋の表面形状によってかなり影響を受けるもので, 一般に, 横ふしの鉄筋の方が斜ふしのものよりも, またふし高さが高い鉄筋の方が低いものより発生しやすい。

6. 縦ひびわれ

(1) 概 説

異形鉄筋のまわりのコンクリートは, 鉄筋軸を含む面に大きい引張応力が働き鉄筋軸方向に割裂していく縦ひびわれを発生しやすいものである¹⁰⁾。縦ひびわれは, 一般に, 普通丸鋼を用いた場合にはほとんどみられないもので, 異形鉄筋を使用した場合に特有のものである。

縦ひびわれの発生は, 一般に, その部分での付着がほぼ破壊したことを意味するもので, 特に, 縦ひびわれが鉄筋の定着部や重ね継手部などに発生すると, その部材や構造物の破壊に直接つながることが多く¹¹⁾, きわめて危険である。また, 縦ひびわれは鉄筋の腐食やかぶりコンクリートのはく落などを招き構造物の耐久性を損う原因ともなる。このように縦ひびわれは発生そのものが本質的に好ましくないものである。

縦ひびわれの発生を防止するためにはまずその発生状況, 発生機構, 各種発生要因の影響など¹²⁾を明らかにすることが必要で, この研究では主として両引供試体を用いてこれらの実験を行った。特に, 定着部における傾向を調べるために引張引抜供試体¹³⁾を用いた。鉄筋周辺のコンクリートにおける鉄筋を中心とした円周方向のひずみを測定するために, 円断面両引供試体の場合には供試体外周にストレンジージをまく方法, 正方形断面の供試体の場合にはリングゲージを埋設する方法¹⁴⁾を用い

た。

(2) 縦ひびわれの発生機構

引張異形鉄筋のまわりのコンクリートに縦ひびわれが生ずるおもな原因は、従来、異形鉄筋のふし前面のくさび作用であって、ふし前面と鉄筋軸とのなす角度が直角に近く、くさび作用がほとんどないと考えられる場合でも、ふし前面のコンクリートが圧壊し、くさび面を形成することによってくさび作用が発生するとされていた¹³⁾。

しかしながら、筆者らの観察によると、一般に、引張を受ける異形鉄筋のふし前面のコンクリートには上記のような圧壊はみられず、前に述べたように、ふしの頂部より内部ひびわれが発生し、Fig. 8 および Fig. 9 に示したように、鉄筋間隔が広い場合には鉄筋軸を含むいづれの断面でもくし歯状となり、また、鉄筋間隔が狭い場合にも鉄筋軸を連ねる面に直角で鉄筋軸に平行な断面ではくし歯状となる。そして、このくし歯状コンクリートが形成された後は、その変形は次に述べるように縦ひびわれ発生の一原因となると考えられる。

すなわち、単独の場合または隣の鉄筋との間隔が十分広い場合には、Fig. 9(a) に示したように鉄筋のふしから伝えられる力によって、くし歯状コンクリートの歯が最寄りの一次横ひびわれの方に向かって曲げられるよう変形するが、内部ひびわれが鉄筋のまわりに円錐形をなすため、その変形は鉄筋を周囲から締めつけることになり、その反作用として鉄筋のまわりのコンクリートにリングテンションが生じる。したがって、Fig. 9(a) の A-A 断面概念図のように、鉄筋のふしから円錐状コンクリートの頂部に働く力 P は、反力 H (鉄筋周囲のリング状のコンクリートによって受けもたれる) と反力 R (鉄筋のまわりの内部ひびわれの到達していない部分、すなわち図中の“uncracked zone”的鉄筋軸方向のコンクリートによって受けもたれる) とでつり合っている。

また、隣りの鉄筋との間隔が狭く、複数の鉄筋が並んで配置されている場合には、内部ひびわれは円錐状とならず、Fig. 9(b) のように鉄筋を連ねた面の両側にほぼ対称にその面とある角度をなした平面に近い形状のひびわれとなる。したがって、この場合は、Fig. 9(b) の B-B 断面概念図のように、鉄筋のふしからコンクリートに伝えられる力 P は反力 R (uncracked zone 的鉄筋軸方向のコンクリートによって受けもたれる) だけとつり合っていて、鉄筋周囲のリング状のコンクリートが存在せず、反力 H はほとんど生じないと考えられる。したがって、 P の作用断面における曲げに抵抗する力が小さいので鉄筋間隔が広い場合に比べて縦ひびわれが発生しやすいことは明らかで、そのひびわれ面は鉄筋軸を連ねた面である。

以上述べたように、鉄筋間隔が広い場合と狭い場合とでは内部ひびわれの発生状況がかなり相違するが、いずれの場合にも内部ひびわれによってくし歯状コンクリートが形成されることから考えると、引張異形鉄筋のまわりのコンクリートに縦ひびわれを生じさせる原因としては、ふし前面のくさび作用と、くし歯状コンクリートの変形作用との両者があることが明らかである。初期(鉄筋応力度の低い)の段階では前者がおもなものであるが、内部ひびわれが発生すると後者が加わり、内部ひびわれの増加成長とともに後者が急激に大きくなり、縦ひびわれの発生に至るものと考えられる。

(3) 縦ひびわれの発生状況および各種要因の影響

両引供試体における縦ひびわれの発生状況を調べるために、端面から距離を変えて、リングゲージを埋設して、両引載荷中にひずみを測定した結果、リングテンションは端面に近づくほど大きく、端面から遠くなるほど小さくなつた。このことから端面から縦ひびわれが発生しやすいことがわかる。一般に、引張異形鉄筋周囲のコンクリートにおける縦ひびわれは、一次横ひびわれが発生した後、鉄筋応力度がかなり高くなつてから、まず最初に一次横ひびわれ面の鉄筋表面付近から発生し、やがてコンクリート部材表面に達し、鉄筋軸方向に伸びていくものである。

Fig. 12 は D 32 ロール材を用いた円断面両引供試体の側面における縦ひびわれの状態の一例と一次横ひびわれ近くのコンクリート表面の円周方向平均ひずみを測定した結果とを示したものである。図中の二重丸印は縦ひびわれの発生点を示している。この図をみると、縦ひびわれ発生時の円周方向平均ひずみは 200×10^{-6} 前後の値

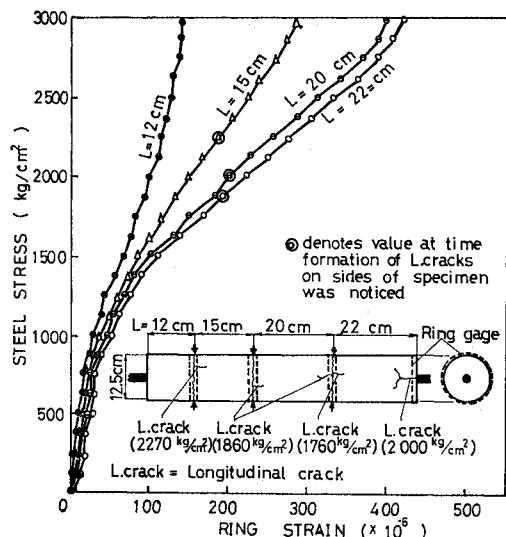


Fig. 12 Influence of lateral crack spacing on ring strain of concrete around deformed tension bar.

にはほぼ集中していることがわかる。この傾向は、供試体断面および鉄筋直径を同一とし、横ひびわれ間隔および鉄筋表面形状を種々に変えた供試体においてもほぼ同様であった。この値はコンクリートの伸び能力の値とあまり相違していない。すなわち、鉄筋のまわりのコンクリートが円周方向に引張られ（リングテンション）、そのひずみがコンクリートの伸び能力の限界を超えると縦ひびわれが発生することを示していると考えられる。

円周方向平均ひずみは、ひずみを測定している横ひびわれ間隔の間に新たな一次または二次横ひびわれが発生すると、増加が止まるかまたは逆にいくぶん減少することが観察された。

なお、Fig. 12 にみられるように、縦ひびわれの先端からひびわれが横方向に枝分かれすることがあるが、これは前に述べた内部ひびわれの成長による二次横ひびわれと縦ひびわれとがコンクリート内部で合流した結果生じるもののように見える。

縦ひびわれの発生に対しては、鉄筋応力度ばかりではなく、一般に、一次横ひびわれの間隔、かぶり、鉄筋間隔、横方向鉄筋、鉄筋の表面形状や直径、コンクリートの乾燥状態や強度などが影響をもっている。

Fig. 12 から明らかなように、一次横ひびわれ間隔が大きいものほど縦ひびわれ発生時の鉄筋応力度は低くなっている。横ひびわれ間隔が L_{min} に近い 12 cm の場合には、鉄筋応力度 3000 kg/cm² まで縦ひびわれの発生はみられない。すなわち、一般に、縦ひびわれは長い一次横ひびわれ間隔の部分に発生しやすい。

縦ひびわれの発生に対して、かぶりや横方向鉄筋が大きい影響をもっていることは明らかであるが、鉄筋間隔も（2）で述べたようにきわめて大きい影響をもっており、鉄筋間隔がある程度狭い場合には隣接する鉄筋の内部ひびわれが連結し、縦ひびわれが特に発生しやすい。

Fig. 13 は両引供試体により、D 32 横ふし異形鉄筋のふし面角度が円周方向平均ひずみに及ぼす影響を調べた結果を示したものである。この図からわかるように、ふし面角度が大きい鉄筋は、鉄筋応力度が小さいうちは円周方向平均ひずみの増加割合はふし面角度が小さいものよりも大きいが、鉄筋応力度が約 1000 kg/cm² 近くなると急激にその増加割合が大きくなり、鉄筋応力度があまり大きくならないうちに縦ひびわれが発生する。それに反して、ふし面角度の小さい鉄筋は、鉄筋応力度が小さいうちは円周方向平均ひずみの増加割合は比較的ふし面角度の大きいものよりも大きいが、鉄筋応力度が約 1000 kg/cm² を超えると、その増加割合は逆に小さくなり、縦ひびわれ発生時の鉄筋応力度も高くなる。

このように、ふし面角度によってリングテンションの増加傾向に差が生じるのは、前述のふし前面のくさび作

用によるリングテンションと内部ひびわれによってできたくし歯状コンクリートの変形作用によるリングテンションとの合成割合がふし面角度によって相違するためと考えられる。すなわち、ふし面角度が小さい場合には、内部ひびわれが発生しにくいので、くし歯状コンクリートの変形作用は小さい。また、ふし面角度が 90° に近い場合は、ふし前面のくさび作用は小さいが、内部ひびわれが発生しやすいので、くし歯状コンクリートの変形作用は大きくなると考えられる。

Fig. 14 はふし間隔が一定で、ふし高さの異なる横ふし異形鉄筋（D 32 切削材および D 51 ロール材）を用いた両引供試体により、鉄筋のふし高さと円周方向平均ひずみとの関係を調べた結果を示したものである。この図からわかるように、ふし高さが高くなるほど、円周方向平均ひずみの増加割合は大きくなる傾向がある。またリングゲージの値が 200×10^{-6} になったときの鉄筋応

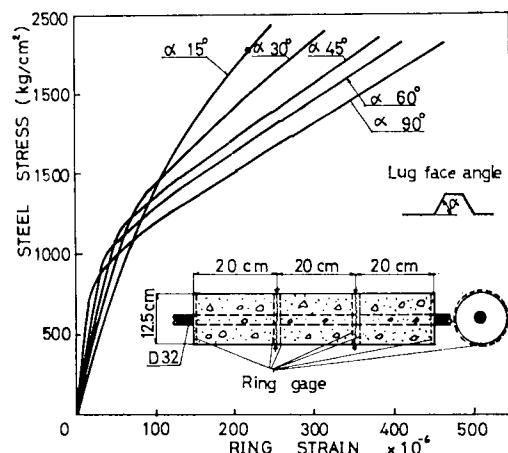


Fig. 13 Influence of lug face angle on ring strain of concrete around deformed tension bar.

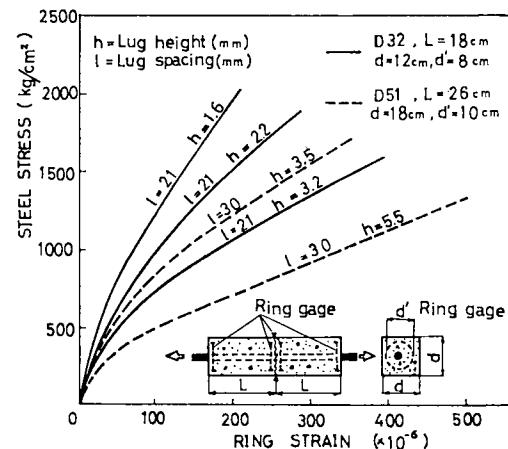


Fig. 14 Influence of lug height on ring strain of concrete around deformed tension bar.

力度をみると、D 32 鉄筋でふし高さ 3.2 mm の場合はふし高さ 1.6 mm の場合の約 50%，D 51 鉄筋でふし高さ 5.5 mm の場合はふし高さ 3.5 mm の場合の約 60% であり、ふしの高い鉄筋は低い鉄筋に比べて縦ひびわれがきわめて発生しやすいといえる。

Fig. 15 は、ふし間隔の異なる横ふし異形鉄筋 (D 32 切削材および D 51 ロール材) を用い、**Fig. 14** と同じ形状寸法の両引供試体により、ふし間隔と円周方向平均ひずみとの関係を調べた結果を示したものである。この図からわかるように、ふし高さが一定であれば、ふし間隔が小さくなるほど円周方向平均ひずみの増加割合はいくぶん大きく、縦ひびわれがある程度発生しやすくなる傾向がある。しかしながら、ふし間隔の影響はふし高さの影響に比べればかなり小さいといえる。

以上、縦ひびわれに及ぼすふしの形状寸法の影響についてみると、付着性を害しないで縦ひびわれの発生をできるだけ抑えるには、ある程度ふし高さを低くし、その代りにふし間隔を狭くし、また、ふし面角度が 50° 前後であまり大きくないうな表面形状の鉄筋がよいと考えられる。このような表面形状とすれば、付着による鉄筋

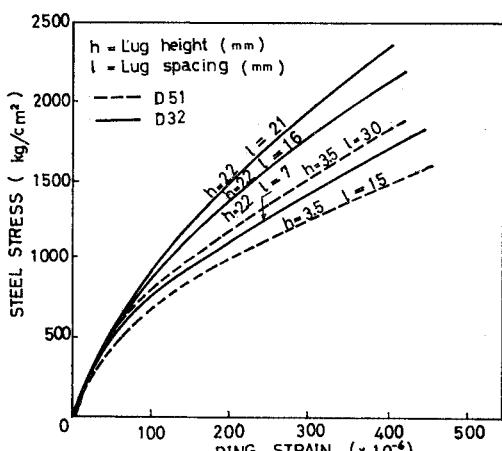


Fig. 15 Influence of lug spacing on ring strain of concrete around deformed tension bar

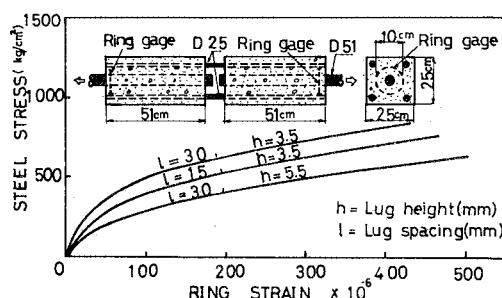


Fig. 16 Influence of lug height and spacing on ring strain of deformed tension bar (pullout test)

疲労に対しても有利となる。また、内部ひびわれ到達距離 (cracked zone の大きさ) が小さくなるので、場合によっては、それが有利となることも考えられる。

鉄筋直径の影響については、実験数が少なく、十分明らかではないが、直径の大きい鉄筋の方が縦ひびわれが発生しやすい傾向がみられた。

なお、**Fig. 16** は引張引抜供試体を用いてふし高さとふし間隔の影響を調べた結果を示したものであるが、両引供試体の場合と比較するとその傾向においてよく似ている。しかしながら、円周方向平均ひずみが 200×10^{-6} になったときの鉄筋応力度を比較すると、前者の方がどの鉄筋の場合も約 50% も低く、引張鉄筋定着部におけるような応力状態ではきわめて縦ひびわれが発生しやすいことがわかる。

7. 結 言

引張異形鉄筋周辺のコンクリートに発生する各種のひびわれ、すなわち、鉄筋軸と直角の一次横ひびわれ、鉄筋のふし付近に発生する内部ひびわれ、内部ひびわれから成長する二次横ひびわれおよび鉄筋軸に平行な縦ひびわれの性状、発生機構などについて、主として市販および試作の表面形状の異なった比較的太径 (D 32～D 51) の異形鉄筋を用いて実験的研究を行った結果、実験の範囲内で主として次のことがいえる。

(1) 正方形断面の中心に 1 本の鉄筋を埋め込んだ両引供試体を用いて最大ひびわれ間隔 (L_{max}) を測定した結果、実験に用いたふし高さとふし間隔との範囲内では、鉄筋直径にかかわらずふし間隔を狭くするほど、また、ふし高さを高くするほど L_{max} が小さくなる、すなわち、横ひびわれ分散性はよくなる。

また、横ひびわれ分散性は、一般に、ふし面角度 (横ふし前面と鉄筋軸とのなす角度) が大略 45° より小さいうちにはふし面角度が大きくなるほどよくなるが、大略 45° 以上の場合にはその影響は小さい。

(2) 一次横ひびわれの内側面形状 (ひびわれの深さ方向の幅の変化) を(1)と同様の両引供試体を用いて、端面で鉄筋とコンクリートとの鉄筋軸方向の相対変化を調べる方法と横ひびわれ内にエポキシ樹脂を圧入硬化させる方法とによって検討した結果、後者の測定値が樹脂の乾燥でいくぶん小さめとなるが、両者の傾向はほぼ一致している。

かぶりが大きくなると部材表面での横ひびわれ幅は大きくなるが、鉄筋表面での幅はほとんど変わらない。しかし、鉄筋応力度やふし間隔が大きくなると部材表面での横ひびわれ幅ばかりでなく鉄筋表面での幅も大きくなる。太径鉄筋の場合には、細径と比べて、一般に、ふし

間隔が大きくかぶりも大きいので、横ひびわれの幅も大きくなることが多い。

横ひびわれ発生後除荷すれば、一般に、横ひびわれ幅は、鉄筋表面では堅く閉じるが、部材表面では残留する。

また、エポキシ樹脂の注入実験によれば、一次横ひびわれの近くでは鉄筋とコンクリートの間にはだ離れが生じており、そのすき間（横ひびわれの近くで鉄筋表面から直角に測った値）は、鉄筋応力度 2000 kg/cm^2 の場合、 $0.05\sim0.1 \text{ mm}$ のものが多く、鉄筋表面近くの横ひびわれ幅と同等かそれ以上であった。

(3) 引張鉄筋が単独にまたは広い間隔に並んで配置されている場合の内部ひびわれは、両引供試体を用いて調べた結果、ふし付近を頂部とする円錐状をなしており、その発生は鉄筋応力度 1000 kg/cm^2 以下でもみられる。内部ひびわれ面と鉄筋軸とのなす角度は、鉄筋表面付近で大略 60° 前後のものが多く鉄筋から離れるといふん大きくなる傾向があり、かぶりが大きいとやや小さい。

内部ひびわれは、直角横ふしの場合には斜めふしの場合に比べて発生しやすい¹⁾。ふし高さが高ければ内部ひびわれが発生しやすく、また長さも長くなる。ふし間隔が小さければ、内部ひびわれ発生数が多く長さが短くなるが、あまりふし間隔を小さくすると、实际上ふし高さも小さくしなければならなくなり、ブリーディングその他の影響もあって、各ふしから内部ひびわれが発生せず、逆に発生数が少なくなる傾向がある。太径鉄筋の場合には、一般に、ふし高さが高く、ふし間隔が大きいため、内部ひびわれの到達距離は長くなる。

(4) 比較的狭い間隔に並んで複数の引張鉄筋が配置されている場合の内部ひびわれについて両引供試体を用いて調べた結果、内部ひびわれの形状は単独にまたは広い間隔に配置されている場合と比べてかなり相違する。鉄筋と鉄筋との間に挟まれた部分で、これらの鉄筋軸を連ねる面に現われた内部ひびわれは、鉄筋軸とほぼ 90° をなし、梯子段状に両側の鉄筋の最も近いふしとふしとを連結している。そして鉄筋軸を連ねる面に直角で鉄筋軸に平行な断面に現われる内部ひびわれは、単独の鉄筋の場合と同様にくし歯状となっている。すなわち、鉄筋軸を連ねる面の両側ではその面とある角度をなして対称に内部ひびわれ面が形成されている。このような内部ひびわれが形成されると、鉄筋軸を連ねる面が割裂面となるような縦ひびわれがきわめて発生しやすくなる。

なお、D 32 および D 41 の場合について鉄筋と鉄筋との純間隔を 8 cm 程度以上とした場合には、2 本の鉄筋の間の内部ひびわれは連結することなく、独立して発生した。

(5) 重ね継手部について両引供試体を用いて重ね合わせ長さがあまり長くない場合の内部ひびわれを調べた結果、両方の鉄筋にはさまれた部分には、ほぼ継手の全長にわたって、両方の鉄筋のふしとふしとを斜めに連結する内部ひびわれがほぼ平行に数多く発生している。内部ひびわれと鉄筋軸とのなす角度は、普通、 $30^\circ\sim45^\circ$ 程度であるが、両方の鉄筋の間隔が、狭いと小さく、広いとさらに大きくなる。継手中央部では端部付近に比較して角度が大きい傾向があり、特に、重ね合わせ長さが長い場合にはこの傾向は顕著である。このような内部ひびわれの発生状況は、異形鉄筋の重ね継手の一方の鉄筋から他方の鉄筋に引張力を伝達する機構をよく表わしている。

(6) 大きいコンクリートブロックに埋め込まれた 1 本の鉄筋を鉄筋から離れた位置に反力をとつて引き抜いた場合鉄筋のふし部を頂部とするほぼ円錐状の内部ひびわれが発生するが、内部ひびわれと鉄筋軸とのなす角度は、一般に、鉄筋表面近くで(3)の場合よりもいくぶん小さいが、鉄筋表面から離れるに従って大きくなる。特に、荷重端面付近に発生した内部ひびわれの場合は、端面に近づくにつれてその角度が大きくなり、ほぼ 90° に近い角度で端面に達し、その形状がいわゆる朝顔状となる。また、2 本の鉄筋を平行に埋め込んだ供試体の場合には、両引の場合と異なって、鉄筋間隔をかなり大きくしても内部ひびわれが連結しやすい。このことは鉄筋の定着性にきわめて大きい影響をもっていると考えられる。

(7) 単鉄筋単純ばりの曲げスパンにおける引張主鉄筋周辺の内部ひびわれ発生状況は、両引供試体において観察された状況にきわめてよく似ている。

せん断スパンの斜めひびわれと支点との間における引張主鉄筋周辺の内部ひびわれの鉄筋軸となす角度は、鉄筋の上側では小さく $25^\circ\sim40^\circ$ のものが多く、鉄筋の下側では大きく大略 $60^\circ\sim90^\circ$ である。

(8) 内部ひびわれが成長してできる二次横ひびわれは、一次横ひびわれ間隔が長く L_{\max} に近い場合、斜めふしより直角横ふしとした場合、ふし高さが高い場合などに発生しやすい。また、二次横ひびわれが発生すると隣接する一次横ひびわれの幅が小さくなり、縦ひびわれの発生や成長も遅れる傾向がある。

(9) 縦ひびわれについて、主として両引供試体を用いて調べた結果、引張異形鉄筋のまわりのコンクリートに縦ひびわれを生じさせる原因としては、ふし前面のくさび作用によるものと、内部ひびわれの発生によってできたくし歯状コンクリートの変形作用によるものとの両者があり、初期（鉄筋応力度の低い）の段階では前者がおもなものであるが、内部ひびわれが発生すると後者が

加わり、内部ひびわれの増加成長とともに後者が急激に大きくなる。また、これらの作用はふし面角度によって相違し、ふし面角度が大きいほど、くさび作用は小さくなるが、内部ひびわれが発生しやすく、くし歯状コンクリートの変形作用が大きくなり、比較的低い鉄筋応力度で縦ひびわれが発生する。

また、ふし高さは高いほど縦ひびわれが発生しやすいが、ふし間隔はふし高さほど大きい影響はない。したがって、太径異形鉄筋の場合には、一般に、細径に比べて縦ひびわれが発生しやすい傾向がある。

これらのことを考えると、付着性を害さずに縦ひびわれ発生をできるだけ抑えるには、ふし高さをある程度低くし、その代りにふし間隔を狭くし、ふし面角度も 50° 前後とあまり大きくしない表面形状の鉄筋を用いるのがよいと考えられる。このようにすれば、ふし部における、付着による応力集中や鉄筋断面変化による応力集中に対する鉄筋の疲労性の点でも有利である。

なお、縦ひびわれは、一般に、 L_{\max} に近い横ひびわれ間隔の部分に発生しやすく、 L_{\min} に近い間隔の部分には発生がみられない。

(10) 鉄筋間隔がある程度狭く、隣接する鉄筋の内部ひびわれが連結すると、(4)で述べたように、鉄筋軸を連ねた面で縦ひびわれがきわめて発生しやすくなる。したがって、適当な表面形状の鉄筋を用い鉄筋間隔をある程度大きくして、隣接する鉄筋の内部ひびわれが連結しないで、それぞれ独立して発生するようにすることは、縦ひびわれの発生を抑えかつ付着強度を十分発揮させうえで望ましく、特に、引張異形鉄筋の定着部などでは大切なことと考えられる。

謝 辞：本論文をまとめることができたのは、研究の実施にあたって、東北大学ならびに東北学院大学のコンクリート研究室の方々の長年月にわたる熱心なご協力をいただいた賜物でここに心から深く感謝申し上げる。また、内部ひびわれの立体的な図化にあたって、東北大学教授 工学博士 志賀敏男先生のご懇切なご援助を賜つ

たことに対して心から厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Goto, Y. : Cracks formed in concrete around deformed tension bars, Jour. of ACI, Vol. 68, pp. 244~251, April 1971.
- 2) 後藤幸正・植田紳治・満木泰郎：鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究、土木学会コンクリートライブラリー第14号、1965。
- 3) 後藤幸正・嶋 文雄・大塚浩司：太径異形鉄筋の付着性についての研究、土木学会第28回年次学術講演会概要集、第5部、1973。
- 4) 後藤幸正・嶋 文雄・大塚浩司：太径異形鉄筋のひびわれ特性について、土木学会第29回年次学術講演会概要集、第5部、1974。
- 5) Bresler, B. and V. Bertero : Reinforced Concrete Prism Under Repeated Loads, Proceedings, International Symposium on the Effects of Repeated Loading on Materials and Structures (Mexico City, 1966), RILEM, Paris (published by Institute de Ingenieria, Mexico, 1966), V. 3.
- 6) 神山 一・久松光世・小沢俊司：直接引張鉄筋コンクリート供試体による付着破壊長さの測定、セメント技術年報、XVIII、1964。
- 7) 佐藤政勝・石渡正夫・高塚 賢：太径鉄筋（横ふしD51）を用いた大型RCばかりの疲労試験、土木学会コンクリートライブラリー第43号、1977。
- 8) 後藤幸正・大塚浩司：異形鉄筋の重ね継手部におけるひびわれについて、土木学会第26回年次学術講演会概要集、第5部、1971。
- 9) 後藤幸正・大塚浩司・沼上孝幸：はりにおける異形鉄筋周辺の内部ひびわれ、土木学会第30回年次学術講演会概要集、第5部、1975。
- 10) 後藤幸正・大塚浩司・村山哲夫：引張異形鉄筋周辺のコンクリートに発する縦ひびわれについて、土木学会第23回年次学術講演会概要集、第5部、1968。
- 11) 後藤幸正・大塚浩司：太径異形鉄筋の重ね継手に関する研究、日本コンクリート工学協会、鉄筋の継手および定着の設計施工に関するシンポジウム発表報文集、1976。
- 12) 後藤幸正・大塚浩司・佐藤英俊：引張異形鉄筋周辺のコンクリートに発する縦ひびわれに関する研究、日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム発表報文集、1977。
- 13) Lutz, L.A. and P. Gengely : Mechanics of bond and Slip of deformed bars in concrete, Jour. of ACI, Vol. 64, No. 11, pp. 711~721, November 1967.

(1978.11.20・受付)