

引張異形鉄筋周辺のコンクリートにおける内部ひびわれ

正会員 後藤幸正(東北大学)

正会員 大塚浩司(東北学院大学)

1. まえがき

内部ひびわれは、コンクリート部材表面には、一般に、現われないが、異形鉄筋の表面近くに発生するもので、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、付着破壊の主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、直径、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。

2. 実験材料および実験方法

実験に用いた鉄筋は、市販および試作のD16、D32およびD51である。試作材は、フシ高さ、フシ間隔などを種々に変えた直角横フシ異形鉄筋である。コンクリートの圧縮強度および引張強度はそれぞれ大略300 kg/cm²および28 kg/cm²であった。

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 mm~5 mm)離して鉄筋と平行に細い孔をもうけ、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。

3. 実験結果および考察

(1) 単独に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. 1は、フシ間隔の異なる2種類のD51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。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、フシ付近を頂部とするぼぼ円錐状をなし(Fig. 1(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)の方に向けている。

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ってかなり異なるものであるが、一般に、それが1,000 kg/cm²に到達する以前に既に内部ひびわれの発生がみられることが多い。一般にいて、フシ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、フシ間隔が小さければ長さの短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

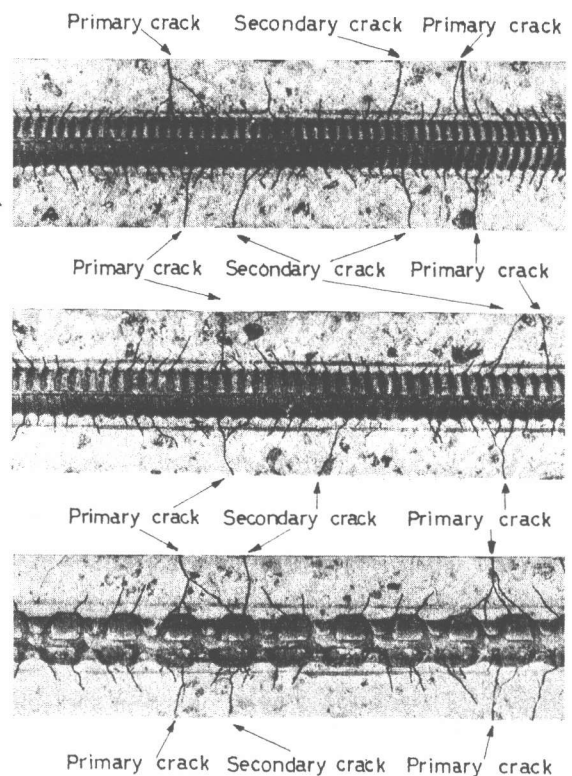


Photo. 1 Influence of lug spacing on the pattern of internal cracks(D51).

なす角度に及ぼすフシ間隔の影響はあまり明瞭ではない。

Photo. 2 は、フシ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 32mm で横フシ間隔 5.5mm および 7mm 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、フシの高さ、フシの間隔などをどのように定めるかを検討する際、フシとフシ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、横フシ間隔をかなり小さくしても、フシの頂部を連ねる面でのせん断はみられず、フシ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フシ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、フシ間隔が小さい (5.5mm) 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 (写真の上側) ではほとんどの各フシ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フシから発生せず、間隔がとんでいる。これはフシ間隔を特に小さくするために実際上の考慮からフシ高さも小さくしたこと、ブリーチ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フシから発生する限度内でフシ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なめらかになる、すなわち付着性が一樣になると考えられる。太径異形鉄筋を使用したはりの疲労強度が、細径の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が、これは異形鉄筋のフシ部にコンクリートから集中的に力を加えられることが原因で、フシ部に応力集中がおきて疲労する、いわゆる "付着による鉄筋疲労" の場合も多く、フシの付け根の曲率を大きくするばかりでなく、フシ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。

フシ高さは、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%) ではフシが高い程、内部ひびわれは発生しやすいという傾向がみられた。

フシ前面の角度も内部ひびわれの発生に大きい影響をもち、フシ前面の角度が小さくなると、内部ひびわれの発生数が少なくなり、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、フシ前面の角度が 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。

かぶり高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、鉄筋表面近くでの角度はやや小さくなる傾向がみられた。

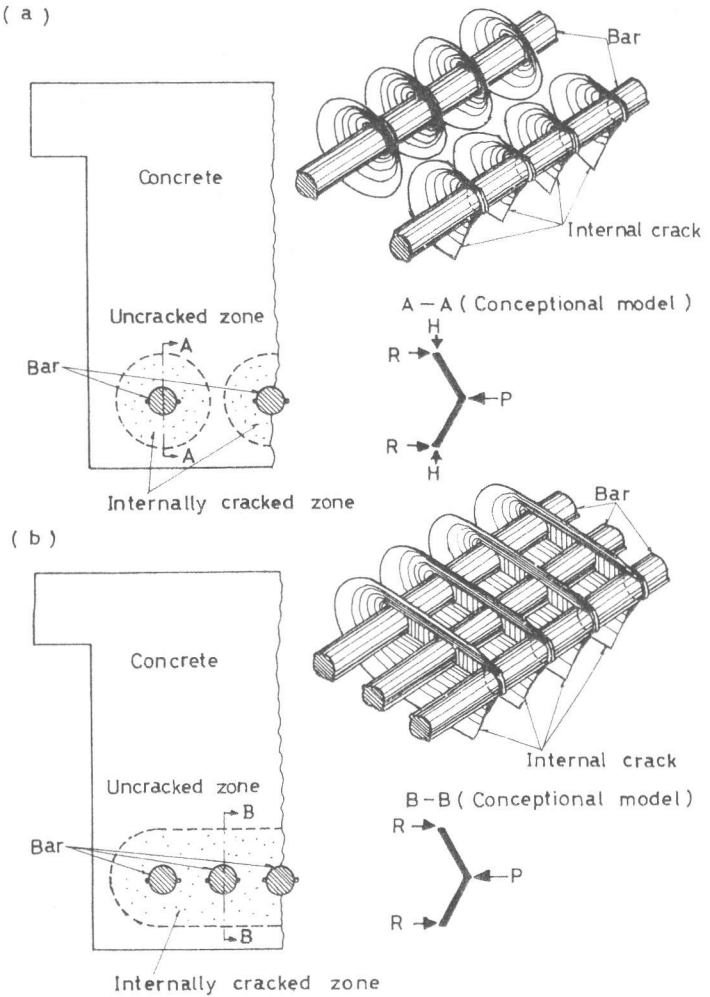


Fig. 1 Internal cracks.

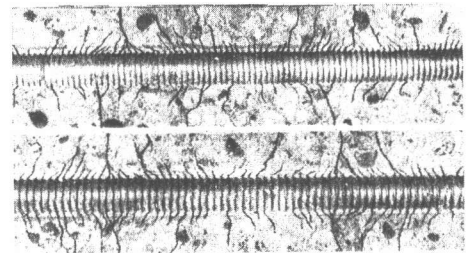


Photo. 2 Influence of lug spacing on the pattern of internal cracks (D32).

(2) 狭い間隔に並んだ引張鉄筋周辺の内部ひびわれ

Photo. 3は、2本の鉄筋を比較的狭い間隔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 $3,000\text{kg/cm}^2$ 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横フシのロール材、供試体断面は $12\text{cm} \times 19.2\text{cm}$ 、鉄筋のかぶりおよび純間隔はそれぞれ 4.4cm および 4cm

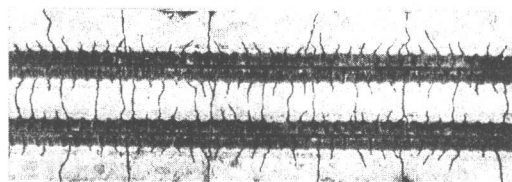


Photo.3 Pattern of internal cracks between two bars placed at close spacing

(鉄筋の直径を 32mm として計算した値)。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、両側の鉄筋のフシとフシ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、狭い間隔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.1 (b) のようになると考えられる。この場合は、Fig.1 (b) のB-B断面概念図のように、鉄筋のフシからコンクリートへ伝えられる力 P は反力 R (Uncracked zoneのコンクリートの鉄筋軸方向の引張力によって受けもたれる) だけと釣合っていて、Fig.1 (a) のようなリングテンションによる反力 H はほとんど生じないと考えられるので、鉄筋間隔が広い場合と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。

2本の鉄筋の純間隔を Photo. 3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 程度以上離れた場合には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。

このように内部ひびわれがある限度を境として連結したり独立したりするもので、このことは縦ひびわれの特性や定着性にきわめて大きい影響を持っていると考えられる。

(3) 重ね継手部の内部ひびわれ

Photo. 4は、2本の鉄筋をわずか離して重ね合わせた重ね継手をもうけた両引供試体を鉄筋応力度 $2,500\text{kg/cm}^2$ 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を示したものである。この例では鉄筋はD16横フシのロール材、重ね合わせ長さは

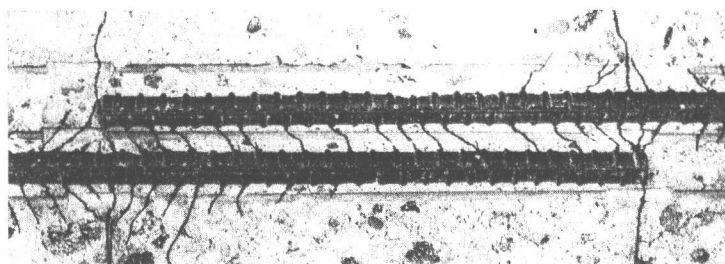


Photo. 4 Pattern of internal cracks around lapped splice.

25cm 、供試体断面は $10\text{cm} \times 26\text{cm}$ 、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組の重ね継手をもうけ、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、両方の鉄筋のフシとフシ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 $30^\circ \sim 40^\circ$ 程度のもが多く、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° に近いものがみられることもある。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の主な伝達機構が明確にわかる。

(4) 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. 5は大きい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って引き抜くように、

鉄筋応力度 $2500\text{kg}/\text{cm}^2$ 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 D32 切削材（フシ間隔 21mm 、フシ高さ 2.2mm ）、かぶりは 26cm 、鉄筋埋込長さ 35cm とした。こ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、やがて端面に達している。このように大きいブロックから異形鉄筋を引き抜くような場合に、一般に、みられる朝顔状のコンクリートの抜出しは、上記のことから内部ひびわれの成長によるものである。

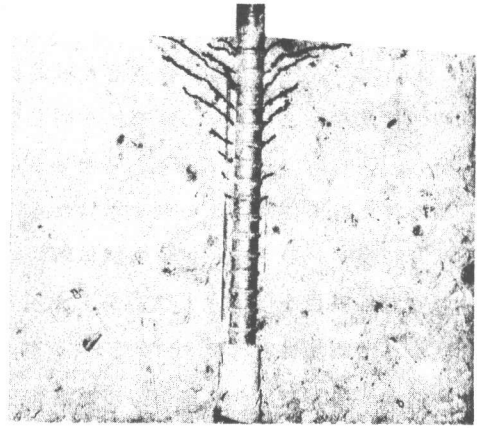
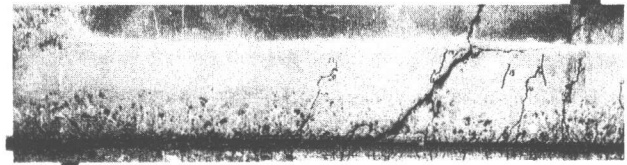


Photo. 5 Pattern of internal cracks at anchorage zone of tension bar.

(5) 単鉄筋はりの内部ひびわれ

スパン 5m 、有効高さ 0.4m 、主鉄筋として D32 を 2 本配した単鉄筋 T 型のはり供試体を鉄筋応力度が計算値 $2500\text{kg}/\text{cm}^2$ になるまで 2 点載荷し引張主鉄筋周辺の内部ひびわれを調べた。

(a)



(b)

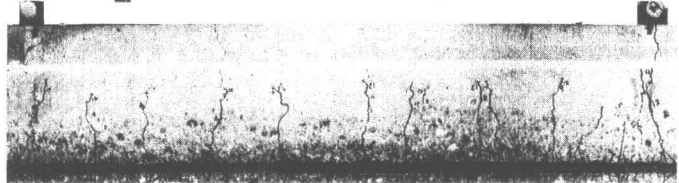


Photo. 6 Pattern of internal cracks around main tension bar in beam.

Photo. 6 (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、せん断スパン長/有効高さの比が 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ほぼ同様に、内部ひびわれは異形鉄筋のフシを頂部とするほぼ円錐状をなし、その底部を最寄りの一次横ひびわれ面の方に向けている。

Photo. 6 (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 Photo. 6 (a) と同じはりの場合を示したものである。この写真からわかるように、せん断スパン部、特に、斜引張ひびわれ発生位置から支点までの間においては、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っている。また、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。

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とで、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。

4. あとがき

引張異形鉄筋周辺のコンクリートに発生する内部ひびわれの性状に及ぼす種々の要因について実験的に調べた結果を述べ、内部ひびわれの性状を調べることによって、その付近の応力状態をある程度知ることができることから、異形鉄筋とコンクリートとの付着機構を内部ひびわれの面から検討した。なお、せん断力を強く受ける領域の内部ひびわれの性状については、さらに研究する必要があると考えられる。