

論文 異形鉄筋のフック定着部における鉄筋軸方向に沿った付着特性

福重 悟^{*1}・島 弘^{*2}

要旨：鉄筋のコンクリートへの定着は、鉄筋コンクリートが成立するために重要な事柄である。近年の耐震規準による鉄筋量の増大や使用する鉄筋の太径化によって、定着が十分に出来ないという問題が起こっている。定着には鉄筋端部をフックとすることが有効であるが、太径鉄筋や高強度鉄筋におけるフックの定着性能は明らかにされていない。そこで、本研究では、フック定着部における鉄筋軸方向に沿った付着応力分布を測定した。実験結果から、フックの形状に関わらず付着応力が大きくなるのは曲げ開始点から45度程度の範囲であり、フックの大きさを現行の規定よりも小さくできる可能性があることが分かった。

キーワード：付着、フック、定着、異形鉄筋、付着応力、標準フック

1. はじめに

鉄筋コンクリートにおいては、外力に対して鉄筋とコンクリートとが一体となって働く必要がある。そのため、外力が作用したときの鉄筋端部の定着はきわめて重要である。たとえば、片持ばりの固定端にははりの最大曲げモーメントが作用しているので、一般に主引張鉄筋には、大きな引張応力が作用している。この鉄筋は壁や柱のコンクリート中に十分延長されていない場合には抜け出してしまい、部材の破壊につながる。

一方、近年、構造物の大型化や阪神大震災をきっかけとした耐震規準の強化によって鉄筋量が増え、鉄筋の端部処理である定着が十分にできないという問題が起こっている。

そこで、本研究は、定着長を短くできるフック定着に関して、フック定着における規定の緩和をすることの基礎的な資料を得ることを目的としたものである。標準フックである直角フックと半円形フックに引張力が作用した時の鉄筋軸に沿ったひずみを測定し、フックにおける付着応力の分布等から規定緩和の可能性を考察した。

2. 現状と問題点

鉄筋端部は、コンクリート中に十分埋め込んで、鉄筋とコンクリートとの付着力によって定着するか、フックを付けて定着するか、または機械的に定着しなければならないとされている¹⁾。

引張鉄筋の定着端にフックを設けた場合には、フックの部分の鉄筋が定着長として加わったり、フックの内側のコンクリートの支圧による力の伝達を期待できるので、その分、定着長を小さくすることができる。土木学会コンクリート標準示方書では、簡単にするため、各国の基準等を参考にし、標準フックを規定して、標準フックを設けた場合には定着長を一律に鉄筋直径の10倍(10

φ)だけ減じてもよいとされている¹⁾。引張鉄筋におけるフックによる定着長の低減量は、本来は鉄筋の種類、コンクリートの強度、曲げ内半径、定着余長等によって異なる。しかし、丸鋼と異形鉄筋に対する半円形フックの規定が同じであることや、近年の鉄筋の高強度化や太径化にもかかわらず、フックによる定着の合理的な設計法が考察されていないのが現状である。

3. 実験

3.1 実験条件

試験体の実験条件を表-1に示す。実験の要因は、フックの形状である。フックの形状としては、標準フックとされる「直角フック」および「半円形フック」とそれらと比較するための折り曲げずに真っ直ぐ伸ばした「直筋」とした。

なお、付着割裂ひび割れや局所的な破壊を防ぐために、コンクリートブロック断面を十分に大きくし、載荷端には非定着部を設けた。

表-1 実験条件

試験体番号	フック形状	試験時コンクリート圧縮強度 (MPa)
1	直筋	28.4
2	直角フック	29.3
3	半円形フック	31.3

3.2 材料

(1) 鉄筋

ひずみ分布を詳細に測るためには、ひずみゲージを密に貼る必要がある。しかし、細い鉄筋にひずみゲージを密に貼ると、コーティングやリード線などが付着を妨げる可能性がある。そこで、実験が実施できる範囲で最も

*1 高知工科大学 工学部社会システム工学科 (正会員)

*2 高知工科大学 工学部社会システム工学科教授 工博 (正会員)

太いD38（公称直径 $\phi=38.1\text{mm}$ ）を用いた。

また、ひずみゲージを貼附するに当たって、断面を削らなくて良いものとするために、JIS G 3112に適合する側面にふしのないネジふし鉄筋を用いた。使用した鉄筋にひずみゲージを貼附した後の様子を図-1に示す。鉄筋の材質はSD345であり、鉄筋の特性を表-2に示す。試験に用いた鉄筋のロットは同じであるが、鉄筋の応力とひずみは各試験体の引張荷重と非定着部のひずみから算出しているので、特性値は試験体ごとに異なったものとなる。



図-1 使用した鉄筋とひずみゲージ

表-2 鉄筋の特性

試験体	ヤング係数 (GPa)	降伏点 (MPa)
直筋	200	417
直角フック	205	424
半円形フック	210	424

(2) コンクリート

鉄筋とコンクリートとの付着にはコンクリートのブリージングが影響することが知られている。そこで、出来るだけブリージングを少なくするために固練りのコンクリートとした。コンクリートの示方配合、スランプ値およびブリージング試験の結果を表-3に示す。なお、ブリージング試験は、JIS A 1123に準じて行った。

3.3 試験体

(1) フックの形状

フックの形状と寸法は、図-2に示すように、標準フックとして土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に規定される最小限のものと同一のものとした。すなわち、直角フックは、鉄筋の端部を90°折り曲げ、折り曲げてから鉄筋直径の12倍をまっすぐ延ばした。半円形フックは、鉄筋の端部を半円形に180°折り曲げ、半円形の端から鉄筋直径の4倍をまっすぐ延ばしたのものとした。フック

の曲げ内半径 r も規定の最小限である 2.5ϕ に最も近いものとした。

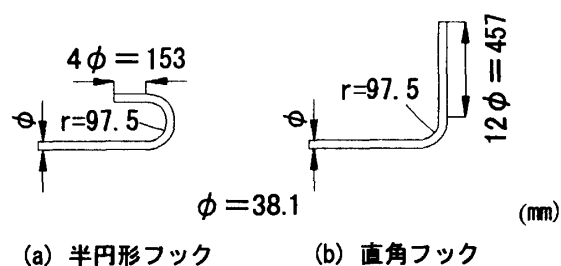


図-2 フックの形状と寸法

(2) 試験体の形状寸法

試験体は、角形のコンクリートブロックに鉄筋を埋め込むものとした。試験体の概略を図-3に示す。割裂ひび割れの発生や割裂破壊をさせないようにするために、コンクリートブロックの断面は十分に大きいものとした。ブロックの寸法は、高さが900mmおよび奥行きが500mmであり、幅はフックの寸法に応じて変化させた。また、コンクリートブロック端部で付着応力が小さくなる影響を無くすために、載荷端には非定着部を設けた。

フックを有する試験体では、載荷端からの非定着長は約 10ϕ とし、折り曲げ開始点まで 4ϕ の定着部を取った。直筋の試験体については、標準フックを設けると定着長を 10ϕ 減じてよいとされているために、今回はフック試験体における折り曲げ開始点以降に 11ϕ の直筋部を有するように全体の定着長を 15ϕ とした。土木学会コンクリート標準示方書¹⁾による定着長の設計値は式(1)のように 23ϕ であり、実験は設計値に較べて厳しいものである。直筋試験体の非定着部は約 9ϕ である。

$$l = \alpha \frac{f_y}{4f_{bo}} \phi = 0.6 \frac{424}{4 \times 0.28 \times 30^{2/3}} \phi = 23\phi \quad (1)$$

鉄筋定着端（自由端）のすべりを測定するために、必要定着部以降を非定着として鉄筋をコンクリートブロック表面に露出させた。

(3) ひずみゲージの貼附

鉄筋軸に沿ったひずみ分布を測るために、鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージの貼附位置を図-3に示す。鉄筋はふしのない面を内外側にして折り曲げたため、ひずみゲージの貼附は曲げ部の内外面である。ひずみゲージの間隔は、60mmから95mmの範囲である。

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

設計強度 (MPa)	スランプ (cm)	ブリージ ング率 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
30	4.5	1.8	51.0	44.2	156	306	820	1062	3.06

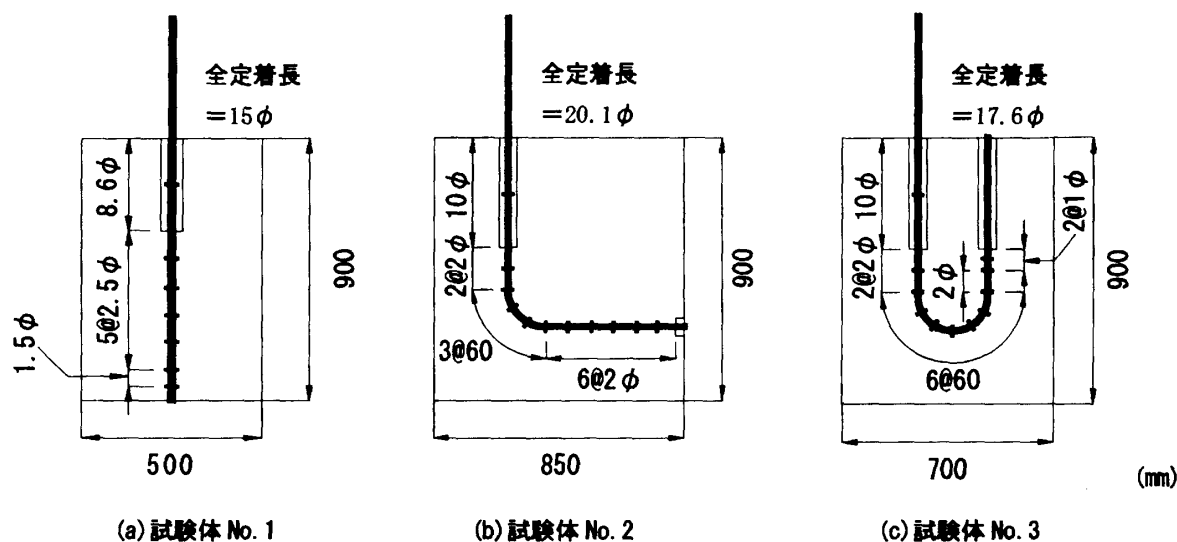


図-3 試験体およびひずみゲージ貼附位置

が、試験体 No. 1 と No. 3 の自由端においては、それぞれ 1.5ϕ および 1.0ϕ とした。非定着部においてもその中央部にゲージを貼附した。

ひずみゲージを貼り付ける際、ふしのない部分を紙やすりを用いて研磨し、ゲージを瞬間接着剤で貼り付けた。ゲージを貼り付けた後、リード線を細い針で鉄筋に固定し、上からブチルゴム系テープでコーティングした。

3.4 載荷

試験体から出しておいた鉄筋に中空型ジャッキを通して、ロードセルを設置し、鉄板とロックナットを使って固定した。コンクリートブロックに反力による曲げ応力が発生するのを防ぐために、載荷板や載荷梁は用いずに、図-4に示すように、中空型ジャッキを直接ブロックに設置した。ジャッキの外径は150mmである。

一方向（引張のみ）の載荷とし、載荷荷重、ひずみおよび自由端すべりを測定した。

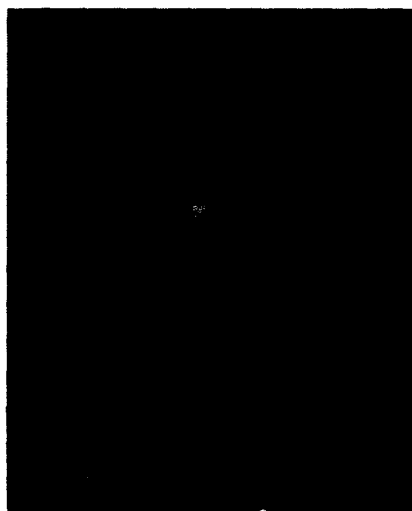


図-4 載荷方法

4. 結果および考察

4.1 ひずみ分布

直筋試験体のいくつかの荷重下におけるひずみ分布を図-5に示す。このひずみは、鉄筋の裏表に貼ったひずみゲージによる測定値の平均である。荷重の増加とともにひずみが内部に伸展していることが分かる。

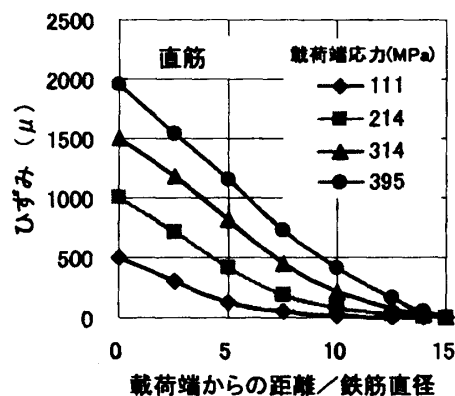


図-5 直筋試験体のひずみ分布

直角フック試験体および半円形フック試験体においては、ひずみゲージを曲げ部の内側と外側に貼ったために、鉄筋に引張力が作用すると鉄筋が曲がることによって、裏表のひずみゲージの値に差が出る。一例として、直角フック試験体における載荷端応力が403MPaのときの鉄筋の内側と外側のひずみ分布を図-6に示す。横軸は、鉄筋を真っ直ぐに伸ばした時の荷重端からの距離である。折り曲げ開始点 ($x=4\phi$) 近傍では、内側のひずみが外側よりも大きく、折り曲げ終了点 ($x=8.72\phi$) 近傍では、外側のひずみが内側よりも大きくなっている。すなわち、引張力によって、曲げ加工部

が内側に変形している結果である。

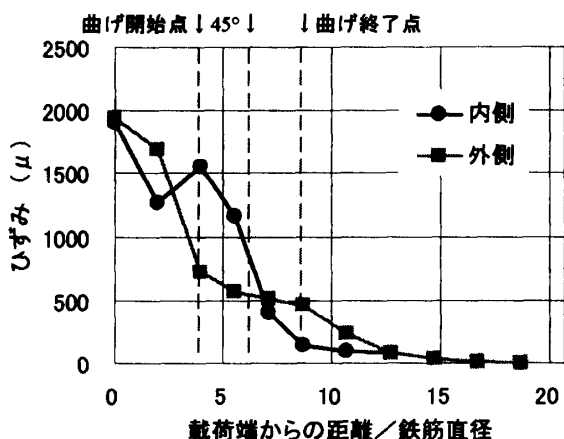


図-6 直角フック試験体における内外のひずみ分布

直角フックおよび半円形フック試験体におけるひずみ分布を図-7および図-8に示す。これらのひずみは、鉄筋の内側と外側のひずみの平均であり、鉄筋の軸ひずみを表している。直角フックおよび半円形フックでは、曲げ部においてひずみ分布の傾きが大きくなっている。

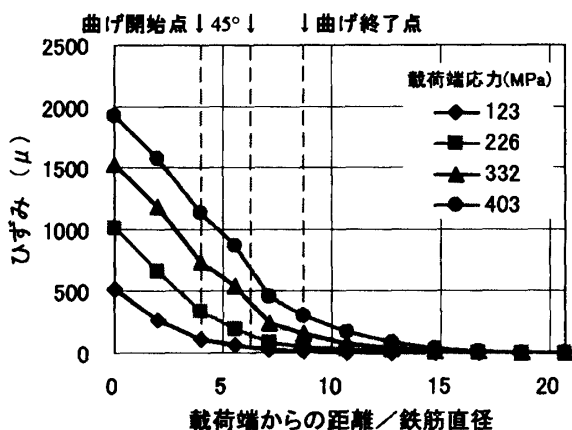


図-7 直角フック試験体の軸ひずみ分布

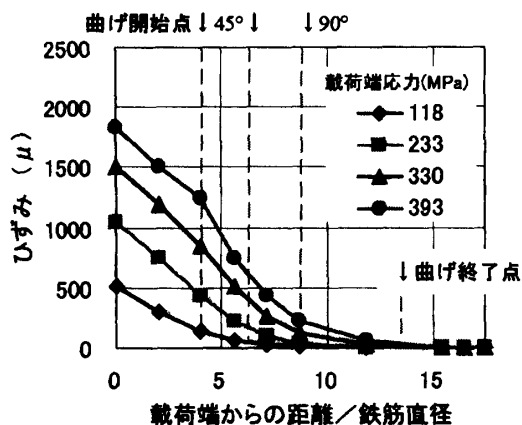


図-8 半円形フック試験体の軸ひずみ分布

4.2 自由端すべり

各試験体において、いずれの大きさの荷重でも自由端でのすべりは無かった。

4.3 鉄筋応力分布

荷重端の鉄筋が降伏する直前における各試験体内の鉄筋応力の分布を図-9に示す。この図は、鉄筋軸に沿った各位置までにおける定着力の負担量を示すものである。載荷端から5φの範囲で定着力の約半分が負担され、10φでは直筋で約80%、直角フックおよび半円形フックでは約90%が負担されることを示している。さらに、直筋、直角フックおよび半円形フックにかかわらず、載荷端から15φの位置で鉄筋にはほとんど引張力が作用しなくなっている。

現在のフック定着の規定としては、例えば土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、標準フックは直筋の10φに相当し、SD390に対して、直角フックで折り曲げ開始点から17.5φ以上、半円形フックで折り曲げ開始点から15φ以上長くするとされているが、この実験結果から、標準フックを直筋10φ分とする場合には、折り曲げ終了点以降の長さを短くすることができる可能性を示唆している。

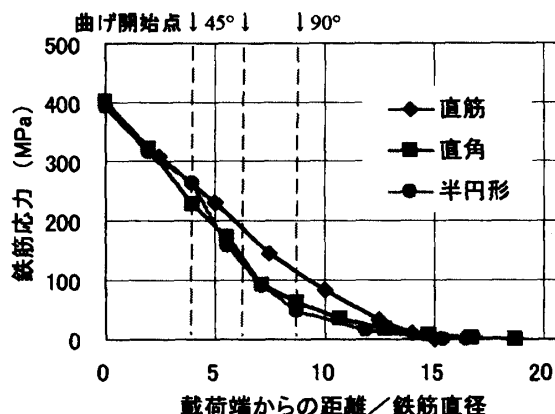


図-9 各試験体における鉄筋応力の分布

4.4 付着応力分布

(1) 各試験体の付着応力分布

各試験体の付着応力分布を図-10から図-12に示す。付着応力は、ひずみの測定位置において、近接3点のひずみを通る2次放物線を求め、その傾きから式(2)を用いて計算した²⁾。

$$\tau = \frac{ED}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (2)$$

ここで、 τ ：付着応力 (N/mm²)

E ：鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

D ：鉄筋の直径 (mm)

$d\varepsilon/dx$ ：ひずみ分布の傾き (1/mm)

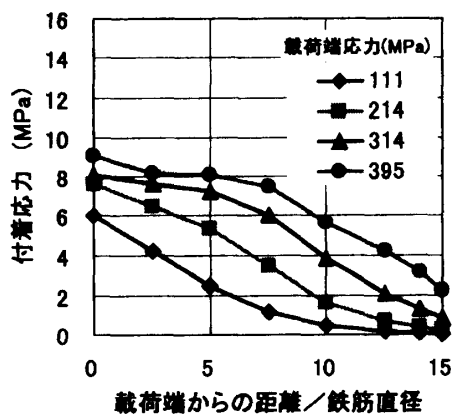


図-10 直筋試験体の付着応力分布

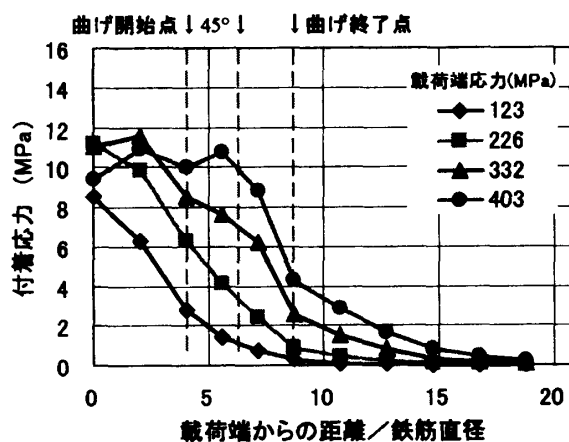


図-11 直角フック試験体の付着応力分布

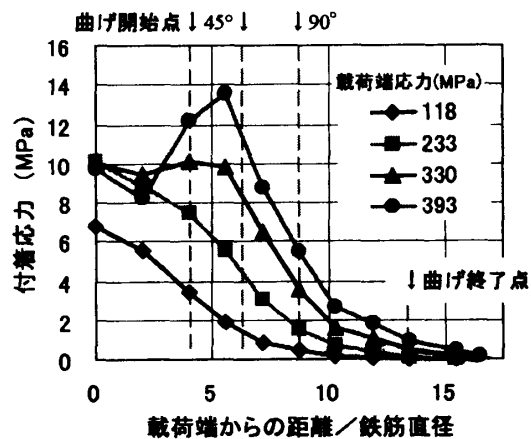


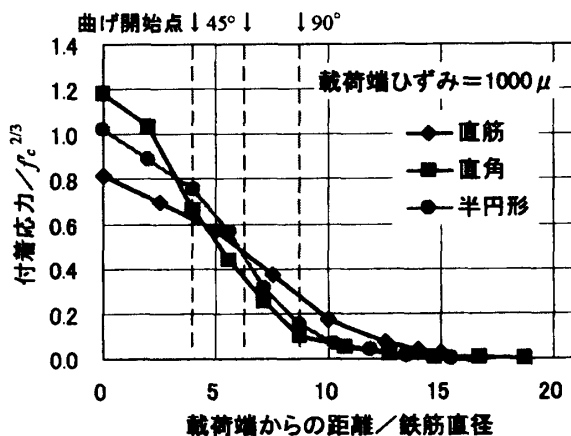
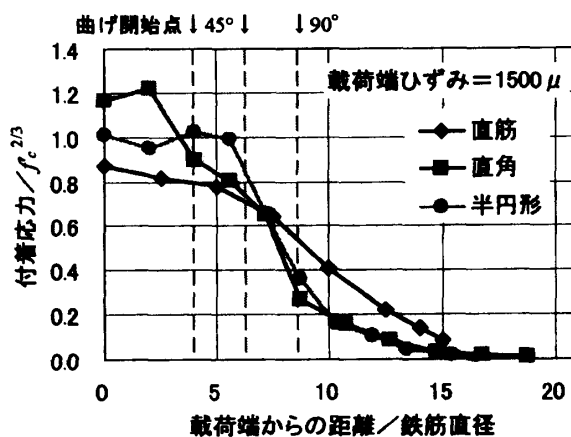
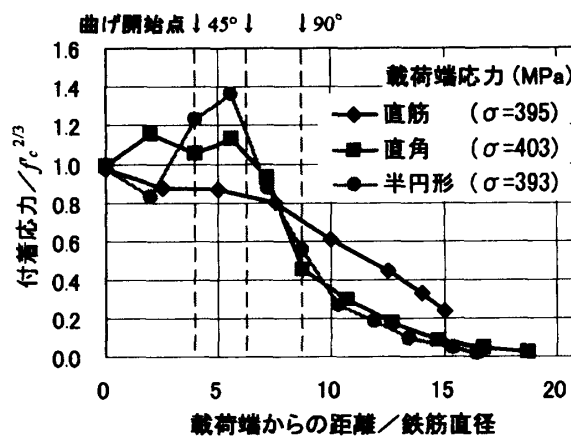
図-12 半円形フック試験体の付着応力分布

直筋試験体においては、荷重の増加とともに試験体内部における付着応力が大きくなり、最終的には自由端においても付着応力が生じる結果となっている。直角フックおよび半円形フック試験体においても直筋試験体と同様に、荷重の増加とともに試験体内部の付着応力が大きくなっている。しかし、フックを有する試験体では、付着応力が曲げ部において特に大きい。半円形フックで

は、折り曲げ開始点から 45 度の範囲の付着応力が最終的には荷重端部よりも大きくなっている。

(2) フック形状の影響

載荷端における鉄筋ひずみが 1000μ 、 1500μ および鉄筋応力が約 400MPa のときの付着応力分布をそれぞれ図-13 から図-15 に示す。なお、試験時材齢によってコンクリート強度が異なるために、付着応力をコンクリート圧縮強度の $2/3$ 乗で除したものを縦軸としている³⁾。

図-13 載荷端ひずみが 1000μ の時の付着応力分布図-14 載荷端ひずみが 1500μ の時の付着応力分布図-15 載荷端応力が約 400MPa の時の付着応力分布

載荷端ひずみが 1000μ と降伏強度の半分程度のときには、直筋に比べて直角フックおよび半円形フックでは折り曲げ開始点から 45° の範囲よりも自由端側で付着応力が小さくなっており、逆に荷重端近傍の直線部分での付着応力が大きくなる結果となっている。

載荷端ひずみが 1500μ のときには、両フックの付着応力は、フックの折り曲げ開始点から約 60° の位置で直筋の付着応力と逆転している。また、その位置よりも自由端側では、直角フックと半円形フックの付着応力は同じ分布形となっている。

載荷端応力が約 400MPa という降伏直前の荷重においては、フックの折り曲げ開始点から約 45° の範囲で付着応力が特に大きくなっている。両フックと直筋の付着応力が逆転する位置も載荷端ひずみが 1500μ のときよりもやや奥に入っている。また、その位置よりも自由端側では、この荷重においても直角フックと半円形フックの付着応力は同じ分布形となっている。

以上のことより、フックの形状にかかわらず、フックの付着応力が大きくなるのは曲げ開始点から 45° 程度の範囲であり、それよりも自由端側では付着応力分布に差はないと言える。

また、直角フックおよび半円形フック試験体では自由端に近づくにつれて、付着応力が小さくなっていることから、折り曲げ終了点以降の必要長さについて検討する。設計においてフックを直筋のどれだけに相当させるかによって、フックに対する要件は異なってくる。ここでの前提条件は、土木学会コンクリート標準示方書で示されている標準フックを直筋 10ϕ に相当させるときの条件とする。今回の実験では直筋試験体は折り曲げ開始位置から 11ϕ の定着長を有しているため、その直筋と比較することはフックにとって少し厳しい条件である。荷重端における引張力が大きくなると、直筋の自由端においても付着応力が発生するようになる。そこで、フックにおいても直筋の自由端における付着応力と同じ付着応力発生を許すとする、図-13 から図-15 を見て分かるように、フックにおける付着応力は載荷端から約 $12\sim 13\phi$ において直筋と同じであり、この位置までが必要長さとなる。直角フックにおいて、この位置を 12.5ϕ と

すると、この位置は折り曲げ終了点から自由端方向に 3ϕ の距離であり、現行の規定の 12ϕ よりも 9ϕ だけ短くできる結果となる。半円形フックにおいて、この位置を 12ϕ とすると、この位置は折り曲げ終了点から手前に 3ϕ の距離である。ただし、これらの位置で鉄筋を打ち切ってしまうと、鉄筋端部での回転拘束が無くなるなどの影響によって定着力が低下する可能性も考えられるので、必要鉄筋長についてはさらなる検討が必要である。

5. 結論

本研究の実験結果から以下の結論を得た。

- (1) 直角フックならびに半円形フックという形状にかかわらず、フックによる付着応力が大きくなるのは曲げ開始点から 45° 程度の範囲であった。
- (2) フックの曲げ開始点から 45° 程度の点から自由端側ではフックの形状にかかわらず付着応力分布に差はない。
- (3) 自由端における付着応力の大きさの程度等を指標とした場合、直角フックおよび半円形フックにおいて、フックの折り曲げ終了点以降の長さを現行の規定よりも短くできる可能性がある。

謝辞

供試体の作製や実験の実施にあたっては、高知工科大学COE職員の宮地日出夫氏をはじめコンクリート研究室の皆さんに協力して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002.3
- 2) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.2
- 3) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.343, pp.219-228, 1984.3