

論文 異形鉄筋の表面形状の改善に関する実験的研究

長友 克寛^{*1}・角 徹三^{*2}・松原 三郎^{*3}

要旨：本研究は、付着割裂破壊が生じにくい異形鉄筋の表面形状を実験的に求めることを目的としている。実験の結果、D22相当の鉄筋では、横ふし前面の角度が90度で、ふしの高さがJIS規定の上限値(0.1D、D：公称径)程度に大きく、ふし純間隔がふし間隔に関するJIS規定の上限値の約50%程度(0.35D)、ふし頂部幅が0.2D程度の表面形状をもつものが付着性能に優れているとの結論を得た。一般に、鉄筋周囲のコンクリートの拘束が比較的大きい場合には横ふし間のコンクリートのせん断破壊が生ずる。本研究においては、この破壊時についても検討を加え、提案した表面形状が有効であることを示した。

キーワード：異形鉄筋、付着割裂破壊、付着せん断破壊、付着強度、初期付着応力すべり剛性

1. はじめに

現行の異形鉄筋の表面形状に関するJIS規定は、横補強筋によって鉄筋周囲のコンクリートを拘束した付着試験の結果に基づいて決定されている。このような環境での付着破壊は、鉄筋横ふし頂面を連ねる面でのせん断ずれに支配される。以下では、これを付着せん断破壊と呼ぶことにする。この破壊は、せん断面積がある程度以上確保されている鉄筋であればほぼ同じせん断応力レベルで生ずるといわれている[1]。従って、付着性能の優劣を判断する目安となるのは主に常時のひび割れ分散性である。そこで、これに関係のある初期付着応力すべり剛性の大小を中心に表面形状の規定が検討され[2]、得られた結果に基づき製造された鉄筋は優れた耐久性や耐疲労性を実現している。

しかし、鉄筋表面形状に関するJIS規定の範囲はかなり広く、規定を満足する鉄筋の間でも付着強度に関してはかなりの相違が予想される。特に、鉄筋コンクリート骨組の柱や梁のようにかぶりが薄い場合の付着特性は、鉄筋軸に沿う縦ひび割れによる破壊、いわゆる付着割裂破壊に支配されることが多い。市販の鉄筋を用いた場合、効果的な横補強がなされていなければ付着割裂破壊の発生は避けられず、建築学会の終局強度型耐震設計指針[3]では、この破壊に対する検討が規定されている。このことは、少なくとも現行の表面形状に関する規定がこの破壊に対して十分配慮されているとは言い難いことを意味している。

もし、付着割裂破壊を生じ難い異形鉄筋の表面形状が見出せれば、部材性能の向上や設計の簡略化につながる。本研究は、既往の研究成果と現行のJIS規定値とを参考にし、付着せん断破壊時の付着特性を損なうことなく、全割裂型の付着割裂破壊が生じ難い異形鉄筋の表面形状を実験的に求めることを目的としている。

2. 実験概要

供試筋として材質S45Cの丸鋼を切削加工し、D22の公称径(D=22.2mm)に等しい7種類の直角横

*1 高松工業高等専門学校助教授 建設環境工学科，博（工学） （正会員）

*2 豊橋技術科学大学教授 建設工学系，工博 （正会員）

*3 高松工業高等専門学校助手 建設環境工学科

ふし鉄筋を試作した。ふしの形状および変数記号を図-1に示す。鉄筋に関する変数は、ふし高さ h 、ふし純間隔 l_n およびふし頂部幅 t である。各供試筋の寸法を一覧を表-1に示す。

既往の研究[4],[5]では、ふし高さ h とふし純間隔 l_n の比 h/l_n を大きくするほど割裂力は小さくなることが報告されている。そこで、ふし純間隔 l_n の基準としてふし間隔 l に関するJIS規定の上限値 15.5mm の約50% (7.5mm) を採用した。ふし高さ h には、JIS規定 1.1~2.2mm のほぼ中央値 (1.6mm) および規定範囲の両外側の値 (0.8, 2.4mm) を採用した。ふし高さ h と純間隔 l_n とを固定して頂部幅 t を3種類に変えることにより、ふし間のコンクリートキーの寸法を一定に保ったまま単位付着長当たりのコンクリートキーの数を変化させた。ふし前面の角度 θ は、くさび作用に伴う放射力によるリングテンションを無くするため90度とした。角度 θ が大きいと、ふし前面においてコンクリートがくさび状に圧壊し、見かけ上角度 θ の緩やかなふし面を形成するとの報告がある。本研究では、基準とするふし純間隔 l_n を上述のように小さく採ることによりそれを生じ難くした。

通常、引抜試験は正方形断面をもつ試験体を用いて行われる[6]。その時の付着割裂強度は、無補強の試験体においても現実の付着割裂強度よりもはるかに大きな値となる。载荷端側に非付着区間を設けることや反力鋼板の孔径を小さく採ることはこれに拍車をかける。従って、このタイプの試験体から得られる付着割裂強度は、理想的な状態での鉄筋による割裂力の相対的な比較にしか意味をもたない。そして、その比較によって最適であると判断された鉄筋のふし形状・寸法が、現実の付着割裂破壊の生じやすい条件下においてもその性能を発揮できるか否かは保証されていない。

著者等は、1方向のかぶりを他方向よりも大きくし、非付着区間は設けず、鉄筋周囲のコンクリートの面外変形をできるだけ拘束しないように反力を作用させる引抜試験体を用いれば、既往の付着強度式[3]による全割裂破壊時の推定値と同じオーダーの付着割裂強度が実験より得られるという結果を得ている。そこで、本研究では図-2に示す形状・寸法の試験体を採用することにした。

実験変数として、供試筋のふし寸法に加えて、側面かぶりおよびスターラップの有無を採用した。実験は、以下に示す4シリーズからなる。

- ① C0シリーズ：側面かぶり $C \cong 1.5D$ ，スターラップ無し
- ② S0シリーズ：側面かぶり $C \cong 4.0D$ ，スターラップ無し
- ③ S2シリーズ：側面かぶり $C \cong 4.0D$ ，スターラップ2本 (径6mm丸鋼，間隔 $S=37.5\text{mm}$)
- ④ S3シリーズ：側面かぶり $C \cong 4.0D$ ，スターラップ3本 (径6mm丸鋼，間隔 $S=25.0\text{mm}$)

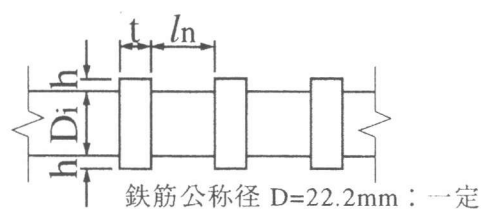
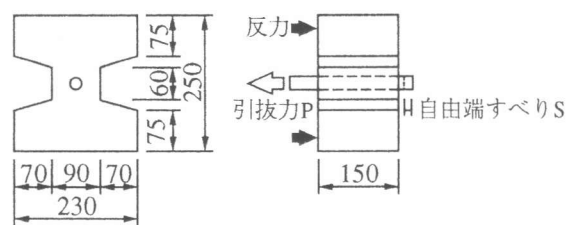


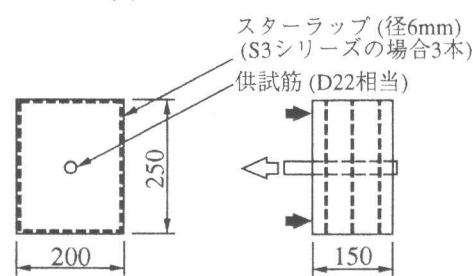
図-1 供試筋表面形状

表-1 供試筋の寸法

鉄筋 NO.	内径 D_i (mm)	ふし高さ h (mm)	ふし純間隔 l_n (mm)	ふし頂部幅 t (mm)
0	市販鉄筋	1.58	12.08	1.60
1	21.76	1.60	10.00	1.50
2	21.93	0.80	7.50	1.50
3	21.64	1.60	7.50	1.50
4	21.33	2.40	7.50	1.50
5	20.95	1.60	7.50	4.50
6	20.54	1.60	7.50	7.50
7	21.42	1.60	5.00	1.50



(a) C0シリーズ



(b) S0, S2, S3シリーズ

図-2 試験体形状・寸法 (単位mm)

図-2(a)は、C0シリーズに用いた試験体であり、全割裂型の付着割裂破壊の生じ易い条件を想定している。同図(b)は、S0、S2およびS3シリーズに用いた試験体である。本研究では、付着割裂破壊から付着せん断破壊への中間的な状態を想定したスターラップ無し(S0)の場合と、付着せん断破壊の生じ易い条件を想定したスターラップ2本(S2)および3本(S3)の場合の3種類を使用した。

引抜試験では、付着割裂破壊を防ぐためにスパイラル筋や鋼管による補強がなされる場合がある。この補強は鉄筋にその半径方向からの圧縮拘束を与え、補強の程度が大きいと、単なるマッシュブなコンクリート中での付着せん断強度よりも高い付着強度を得る。極端な例として、コンクリート強度と同等の付着せん断強度が得られた実験結果もある[4]。逆に、補強の程度が小さいと、割裂ひび割れは容易に開口・進展し易くなり、鉄筋の割裂力の違いにより、付着割裂破壊と付着せん断破壊という異なる破壊形式におけるふし表面形状と付着特性との関係を比較検討するということが起こりうる。また、ひび割れ幅が大きくなるとふしの形状・寸法の効果に影響が現れるという報告もある[5]。本研究でスターラップ量を実験変数に用いたのはこのためである。スターラップには、割裂ひび割れ発生時にひび割れ面をその直交方向のみから拘束するよう□型のものを用いた。付着長は、付着せん断破壊時における載荷端での鉄筋応力が降伏応力程度になるよう150mmとした。

コンクリートには、水セメント比57%，単位水量180kg，粗骨材最大寸法20mmのものを用いた。スランブは8cm，圧縮強度 f_c' は26.7～28.5 MPa，割裂引張強度 f_t は2.3～2.8 MPaであった。供試筋を水平に配置し，上方よりコンクリートを打設した後，養生室通路にて28日間気中養生した。

供試筋の引抜きには中空油圧ジャッキを用い，供試筋端部に施したねじ切りを利用して引抜力Pを加えた。その反力は，径125mmの円孔をもつ鋼板を用い，供試筋表面から2.3D以上外側のコンクリートに圧縮力として作用させた。供試筋自由端の変位を変位計で測定し，すべりSとした。

3. 実験結果

3. 1 破壊形式

スターラップ補強のないC0シリーズおよびS0シリーズでは，鉄筋の種類に関わらず，全て全割裂型のひび割れが生じた。しかし，S0シリーズではC0シリーズに比べて大きなすべりでひび割れが発生し，その進行の緩やかなものが多かった。両シリーズとも，市販鉄筋以外の試作鉄筋ではふし間コンクリートの削り取りが観察された。S0シリーズの破壊形式は，当初の想定通り付着割裂破壊から付着せん断破壊への移行状態にあると考えられるが，以下では付着割裂破壊として整理した。

スターラップ補強のあるS2，S3シリーズでも割裂ひび割れは観察されたが，貫通していない試験体が多く，破壊後の観察ではひび割れ幅はかなり小さかった。ふし間コンクリートは完全に削り取られた状態で引き抜かれており，以下では付着せん断破壊を生じたものとして整理した。

3. 2 付着割裂破壊の発生した試験体

図-3(a)，(b)は，基準化付着割裂強度 $\tau_{ou} = \tau_u / \sqrt{f_c'}$ に与えるふし高さ h およびふし頂部幅 t の影響をそれぞれ示している。縦軸は，既往の付着割裂強度式[3]を参考にし，付着強度 τ_u (MPa)をコンクリート圧縮強度の平方根 $\sqrt{f_c'}$ (MPa)で除すことにより f_c' の影響を小さくしてある。C0シリーズとS0シリーズとは，同一の鉄筋を用いているにも関わらずかなり傾向が違っており，一般に使用されている鉄筋径に比例させた正方形断面もつ引抜試験体のみによって付着割裂強度を議論することには今一度検討が必要である。なお，本項では主にC0シリーズの結果に注目して考察を行った。

図-3より，付着割裂強度はふし高さ h がJIS規定の上限値2.2mm近くまで大きく，ふし頂部幅が $t = 4.5\text{mm}$ (0.2D)程度以下であれば良いことがわかる。ふし純間隔 l_n の影響は小さいため図示してい

ないが、大きい方がわずかながら良いように思われた。

赤司等[5]は、割裂ひび割れを想定したスリットを予め設けた片引試験を行い、同一付着力であればふし高さ・間隔比 h/l が大きいほど割裂力は小さくなることを指摘している。また藤井等[7]は、重ね継手の試験より、 h/l を0.2程度までを上限に大きくすべきであるとの提案をしている。一方後藤等[8]は、両引試験体を用い、ふし高さが高いほど縦ひび割れは発生しやすく、ふし間隔の影響は小さいという逆の結果を報告している。木村等[9]も、スパイラル補強した試験体の片引試験より、0.2程度までの範囲で割裂強度（ここでは、付着応力—すべり曲線において剛性が急に低下し、すべりが急増する付着応力）はふし高さ・純間隔比 h/l_n に反比例することを指摘している。これらの相違の原因は、鉄筋横ふしからの内部ひび割れが十分成長できるか否か、表現を変えれば鉄筋応力を高いレベルまで生じさせ得るか否かという、鉄筋に対する拘束条件の違いによるものであると考えられる。今回のC0シリーズは、かぶりが小さく横補強も無いため拘束は十分ではない。従って、結果は藤井等のものと符合している。

図-4(a), (b)は、初期付着応力すべり剛性 k_1 （以下、初期剛性）に与えるふし純間隔 l_n およびふし頂部幅 t の影響をそれぞれ示している。ここに k_1 は、基準化した1/3付着強度 $\tau_{oi} = \tau_u / 3\sqrt{f_c'}$ を、その時点の無次元化自由端すべり $So_i = S/D$ で除した割線剛性 τ_{oi}/So_i を表している。同図より、初期剛性 k_1 はふし純間隔 l_n が小さく、ふし頂部幅が $t = 4.5\text{mm}$ 程度以上であれば良いことがわかる。ふし高さ h については図示していないが、ある程度大きい方が望ましいと考えられた。

以上の結果より、付着割裂強度と初期剛性とが良好であるふし寸法は、高さ h がJIS規定の上限値(0.1D) 近くまで大きく、純間隔 l_n がJIS規定の上限値の約50%程度(0.35D)で、頂部幅が $t = 4.5\text{mm}$ (0.2D) 程度であれば良いことになる。これをもとにふし高さ・純間隔比を計算すると約0.3となる。

3. 3 付着せん断破壊の発生した試験体

図-5(a), (b), (c)は、基準化付着せん断強度 $\tau_{ou}' = \tau_u / f_c'$ に与えるふし高さ h 、ふし純間隔 l_n およびふし頂部幅 t の影響をそれぞれ示している。縦軸には、著者等の別の実験結果に基づき τ_u を f_c' で除した τ_{ou}' を用いている。同図より、付着強度はふし高さ h がJIS規定の上限値近くまで大きく、ふし純間隔 l_n はJIS規定の上限値の約50%以上あり、ふし頂部幅 t は小さいほど良いことがわかる。なお、付着せん断強度の値自体は $\tau_{ou}' = 0.4 \sim 0.5$ であり、既往の実験結果と一致している。

次に、初期剛性 k_1' に与えるふし形状の影響について検討した。初期剛性 k_1' は、基準化した1/3付着強度 $\tau_{oi}' = \tau_u / 3f_c'$ をその時点の無次元化すべり $So_i = S/D$ で除した割線剛性 τ_{oi}'/So_i で定義した。図示してはいないが、初期剛性 k_1' はふし高さ h がある程度大きく、ふし純間隔 l_n は逆に小さい方が良

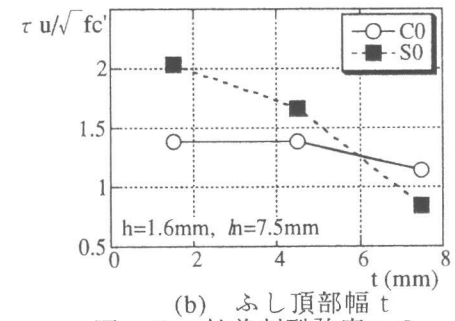
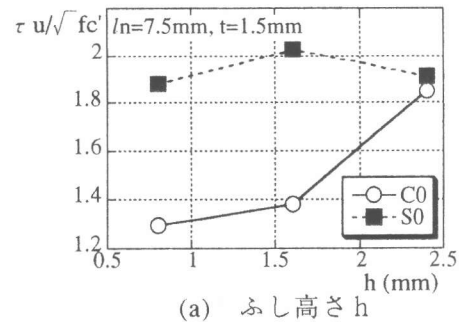


図-3 付着割裂強度への鉄筋表面形状の影響

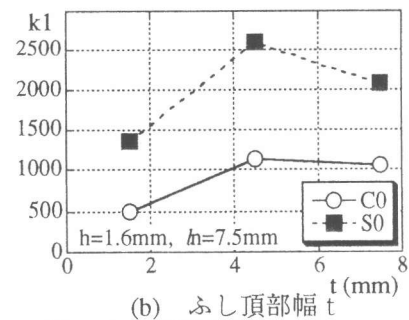
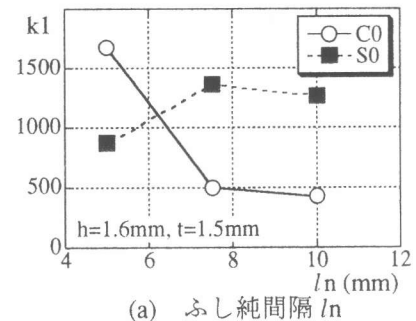


図-4 初期剛性への鉄筋表面形状の影響

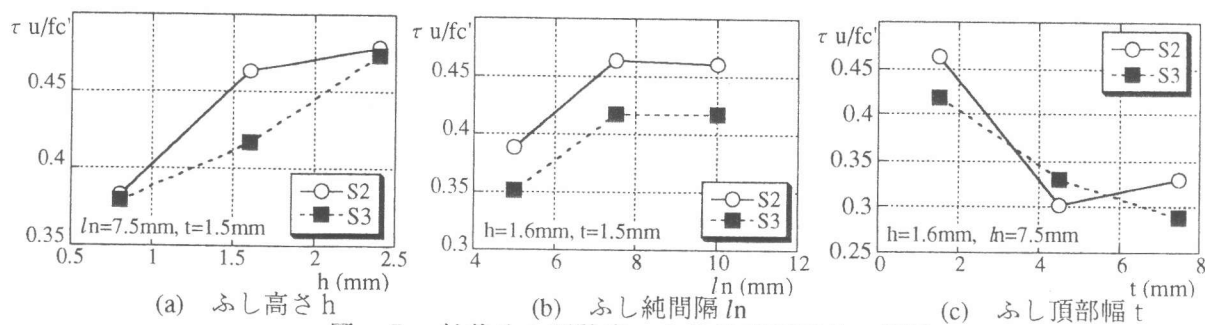


図-5 付着せん断強度への鉄筋表面形状の影響

いことがわかった。ふし頂部幅 t の影響は小さかったが、大きい方が幾分良いようであった。

以上の結果を総合すると、付着せん断破壊時の付着強度と初期剛性とが良好であるふし寸法は、3.2で述べた付着割裂破壊の場合において望ましい寸法と同じであると結論づけられる。

国分等[1]および木村等[9]は、ふし高さ・純間隔比 h/ln は0.2までの範囲で大きいほど付着せん断強度や初期剛性が大きくなることを報告している。今回の結果

は、傾向としてはこれらと一致しているが、付着割裂破壊の防止のことを考慮すれば h/ln の上限値を3.2で述べた0.3程度まで大きくした方が良いと思われる。なお、国分等の提案している支圧面積係数 BA とせん断面積係数 SA とを今回の結果について計算してみると、 $BA=18\%$ 、 $SA=64\%$ となり、 BA についてはかなり大きめ、 SA に関しては推奨されている値の下限値(60%)に近い値となった。

付着せん断破壊時において付着強度到達後の大きなすべりの時点における付着応力が大きいということは、付着靱性が大きいことを意味している。これに関するふし寸法の影響を検討した結果、全体的な傾向は図-5に示した付着せん断強度の場合と一致していた。

図-6は、S2シリーズにおける基準化付着応力 τ/fc' と試験体の付着長中央位置での割裂ひび割れ幅 wav との関係を示している。同図より、市販鉄筋No.0のひび割れ幅 wav は試作鉄筋に比べて際立って大きく、スターラップ補強がなされていなければ付着性能の保持できないことがわかる。

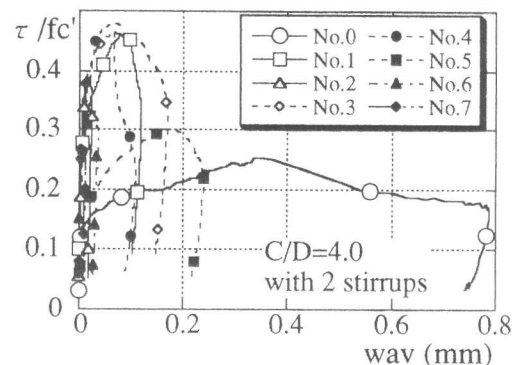


図-6 付着応力-割裂ひび割れ幅関係

3. 4 市販鉄筋と試作鉄筋との付着性能の比較

図-7(a)は、各シリーズ毎の市販鉄筋(No.0)に対する試作鉄筋(No.i)の基準化付着強度 τ_{ou} および τ_{ou}' の比を棒グラフで示したものである。同図(b)は、同様に初期剛性 k_l および k_l' の比を示したものである。両図中の数字は、各鉄筋毎の全4シリーズの比の平均値を表している。全ての試作鉄筋の

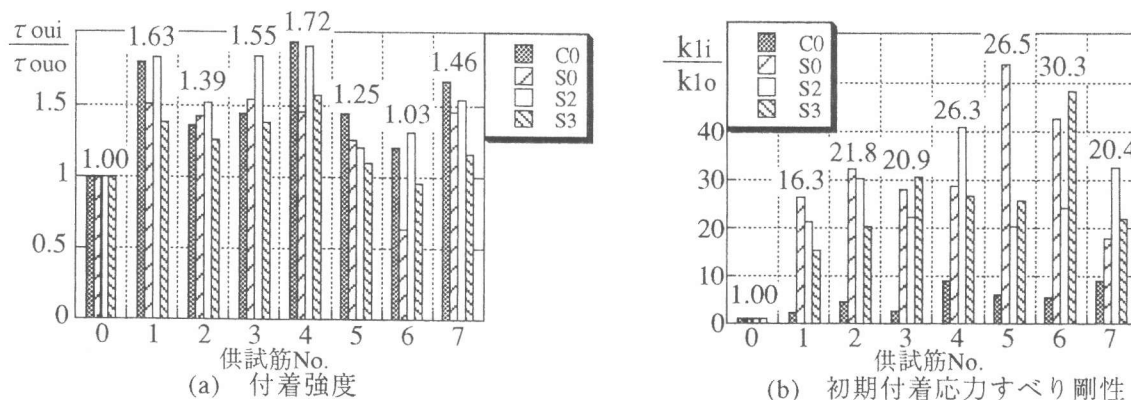


図-7 市販鉄筋に対する試作鉄筋の付着性能の比較

平均値が1.0を超えており、全体的には横ふし前面の角度を90度にするにより市販鉄筋よりもかなり付着性能を改善できることがわかる。また、両図よりNo.4の鉄筋の付着性能が優れていることが読みとれる。この鉄筋は、ふし高さ $h=2.4\text{mm}$ 、ふし純間隔 $l_n=7.5\text{mm}$ 、ふし頂部幅 $t=1.5\text{mm}$ であり、今回試作した鉄筋の中では3.2、3.3節で得られた結果に最も近い表面形状・寸法をもつものであった。このNo.4鉄筋のC0シリーズにおける付着強度は 9.9MPa で、市販鉄筋のS3シリーズにおける付着強度 8.2MPa を上回っており、本研究の目的は一応達成されているものと考えられる。

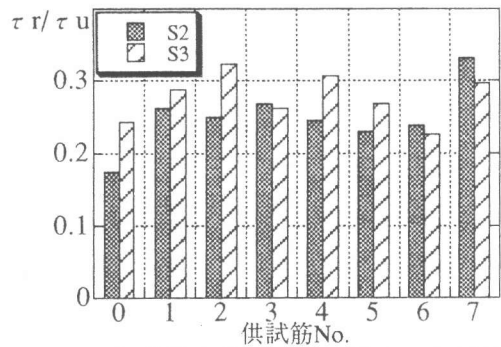


図-8 付着強度後の残存摩擦すべり抵抗

図-8は、付着せん断破壊時における各鉄筋の付着強度 τ_u 後の残存摩擦すべり抵抗 τ_r を示している。何れの試作鉄筋も市販鉄筋(No.0)よりも大きなすべり抵抗 τ_r を保持している。これは、図-6に示したように、市販鉄筋では割裂ひび割れ幅の大きくなるのが1つの原因と考えられる。

4. 結論

本研究は、D22相当の鉄筋を用いた引抜試験を行い、横ふし間コンクリートのせん断破壊時の付着特性を損なうことなく、付着割裂破壊の発生しにくい鉄筋の表面形状・寸法を実験的に調べたものである。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) かぶりが小さかったり横補強筋が効果的に配置されていない環境では、付着割裂破壊が生ずる。この場合の付着強度および初期付着応力すべり剛性を大きくするためには、まず横ふし前面の角度を90度にし、その上で横ふしの高さをJIS規定の上限値($0.1D$)近くまで大きく、横ふし純間隔を横ふし間隔に関するJIS規定の上限値の約50%程度($0.35D$)に、そして横ふし頂部幅を $t=4.5\text{mm}$ ($0.2D$)程度にすれば良い。
- (2) かぶりが大きかったり横補強が効果的に配置されている環境では、横ふしによるふし間コンクリートのせん断破壊が生ずる。この場合にも(1)の表面形状・寸法が有効である。
- (3) 従来、横ふし高さ・純間隔比は0.2程度を上限にすべきであると言われている。今回の実験の結果をもとにその上限を計算してみると、0.3程度の高い値となった。

参考文献

- [1] 国分正胤, 岡村 甫: 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, pp.103-113, 1972.6
- [2] 土木学会: 太径鉄筋D51を用いる鉄筋コンクリート構造物の設計指針(案), 土木学会コンクリートライブラリー, 第40号, 1975.6
- [3] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11
- [4] 赤司二郎, 藤井 栄, 森田司郎: コンクリート強度と鉄筋のふし形状が付着特性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.127-132, 1991
- [5] 赤司二郎, 藤井 栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着力と割裂力の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.69-74, 1992
- [6] 村田二郎, 河合紀茲: 引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究, 土木学会論文集, 第348号/V-1, pp.113-122, 1984.8
- [7] 藤井 栄, 木村秀樹, Jirsa, J. O.: 異形鉄筋の表面形状が付着割裂強度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演概要集C構造Ⅱ, pp.226-228, 1993.9
- [8] 後藤幸正, 大塚浩司: 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, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.85-100, 1980.2
- [9] 木村秀樹, Jirsa, J. O.: 鉄筋の節形状とコンクリート強度が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.117-122, 1993