

論文

[2019] 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

木村秀樹*1・James O. JIRSA*2

1. はじめに

異形鉄筋の節形状に関する JIS (Japanese Industrial Standard) あるいは ASTM (American Society for Testing and Materials) の規定は 30 年以上も前の研究に基づいており、今日使用されているコンクリート強度は、鉄筋節形状が規定された当時の 2~3 倍以上にもなっている。高強度材料を有効に利用しようという意図から、構造部材の断面は小さくなり配筋は混みあうようになってきた。このような部材では鉄筋の周囲のコンクリートの割裂が大きな問題となってくる。本研究は定着長さの低減を可能とするような異形鉄筋の最適な節形状を開発すること、そして高強度コンクリートと鉄筋の付着に関する基礎データを得ることを目的として行なった鉄筋の引き抜き試験について述べるものである。

2. 実験計画

試験体は図-1 に示すような一辺 200mm の立方体で、その中心に試験鉄筋を水平に配し、この外側に $\phi 6\text{mm}$ の鉄筋をピッチ 40mm、直径 160mm のスパイラル状に配置してある。コンクリートは試験鉄筋が水平の状態で作設した。試験体の加力端には加圧板からの応力の均等化を図るために 50mm の非付着区間を設けた。

試験鉄筋は $\phi 44.45\text{mm}$ の丸鋼 (降伏点 $\approx 6300\text{ kg/cm}^2$) から切削加工し、節形状は竹節を模擬した。但し、縦節は設けていない。表-1 に試験鉄筋の形状一覧と鉄筋表面形状の模式図を合わせて示す。試験鉄筋は ASTM 規格による #11 鉄筋の公称断面積と等しくなるように加工寸法を定めた。すなわち、単位長さ当たりの重量が等しくなるようにし、節の高さ及び間隔は、公称直径 $D=35.8\text{mm}$ (1.41 in.) を基準に定めている。節の支圧面が鉄筋軸となす角度は 60 度とし、節頂部の幅は $0.05D$ (D : 公称直径) とした。節の高さと間隔の組み合わせを図-2 に示す。節高さは $0.05D \sim 0.11D$ 、節間隔は $0.2D \sim 0.8D$ の範囲にあり、これらの組み合わせによって計 14 種類の節形状を設定した。同図には ASTM 及び JIS の最大、最小値規定も合わせて示している。また、比較のために市販の #11 の竹節鉄筋も用意した。

コンクリートは圧縮強度 40、80、120 MPa の 3 レベルを用いた。80 と 120 MPa のコンクリートではフライア

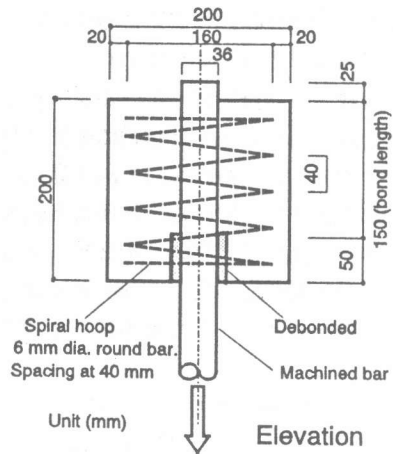


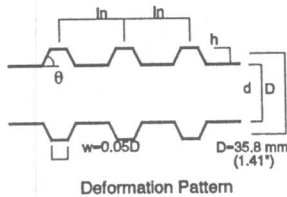
図-1 試験体詳細

* 1 (株) 竹中工務店技術研究所 研究員、工修 (正会員)

* 2 Janet S. Cockrell Centennial Chair in Engineering, Ferguson Structural Engineering Laboratory, University of Texas at Austin, Ph.D.

表-1 試験鉄筋の形状寸法一覧

Bar Number	ln (mm)	h (mm)	d (mm)	ln/D	h/D	h/ln	θ (degree)	Bearing Area (mm ²)	Shear Area (mm ²)
# 1	7.1	1.8	34.3	.2	.05	.25	60	4231	13318
# 2	10.7	1.8	34.8	.3	.05	.17	60	2860	14997
# 3	14.2	1.8	35.1	.4	.05	.13	60	2057	15096
# 4	10.7	2.8	34.0	.3	.08	.27	60	4526	15493
# 5	14.2	2.8	34.3	.4	.08	.20	60	3255	15394
# 6	18.0	2.8	34.8	.5	.08	.16	60	2640	16500
# 7	21.6	2.8	34.8	.6	.08	.13	60	1980	15082
# 8	25.1	2.8	35.1	.7	.08	.11	60	1661	14917
# 9	10.7	4.1	32.8	.3	.11	.37	60	6583	15990
# 10	14.2	4.1	33.5	.4	.11	.28	60	4800	16288
# 11	18.0	4.1	34.0	.5	.11	.22	60	3892	17226
# 12	21.6	4.1	34.3	.6	.11	.18	60	2938	15841
# 13	25.1	4.1	34.5	.7	.11	.16	60	2465	15663
# 14	28.7	4.1	34.8	.8	.11	.14	60	2481	18154
Com.Bar	24.0	1.8	34.3	.7	.052	.08	30	1209	14134



Specimen Notation

3 - U H

Concrete Strength
Nothing : 40 MPa
H : 80 MPa
U H : 120 MPa

Bar Number
1 - 14 & Com.Bar

ッシュを用い、120 MPa のコンクリートではさらにシリカヒュームを加えた。粗骨材の大きさが附着性状に及ぼす影響は大きいと考えられるため、最大粒径は120 MPa のコンクリートの骨材の大きさに合わせ、すべてについて 10 mmを用いた。

载荷にはセンターホールジャッキを用い、ジャッキと試験体の間に厚さ 25mm の 210 × 210 mmの鉄板を加圧板として用いた。加圧板と試験体との間にはテフロン板2枚、そしてゴム板を1枚配して摩擦による拘束力を除去している。加圧板中央の穴の径は 65mm とした。自由端のすべり量は、試験体に埋め込んだインサートに測定治具を固定し、それを不動点として計測した。

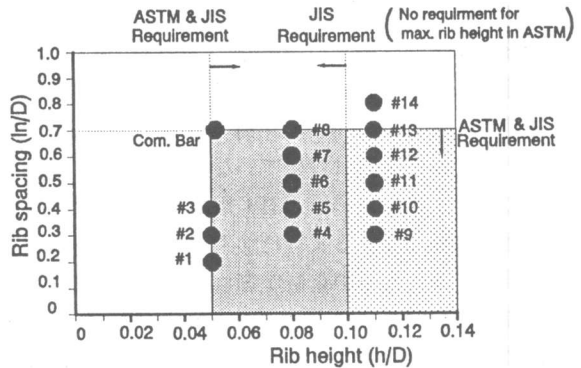


図-2 鉄筋の節高さと節間隔の組み合わせ

3. 試験結果

3.1 試験経過及び破壊性状

いずれの試験体も载荷初期段階は荷重の増加に伴い自由端すべり量は比例的に増大した。コンクリート強度が 40 MPa で鉄筋節間隔が小さい試験体を除いて、荷重が一定ですべり量が急増する点が存在した。このときの荷重段階で試験体の側面にひび割れが観察されるものもあったが、目視ではひび割れを確認できない場合が多かった。その後顕著なひび割れが観察できるようになり、急激なひび割れの進展と共にすべり量が増大し荷重が低下した。コンクリート強度が 40、80 MPaの試験体はこの時点で試験を終了したが、120MPa の試験体では更に大きな変位まで载荷した。この場合、荷重は再び上昇し、最終的には節と節との間のコンクリートキーがせん断破壊

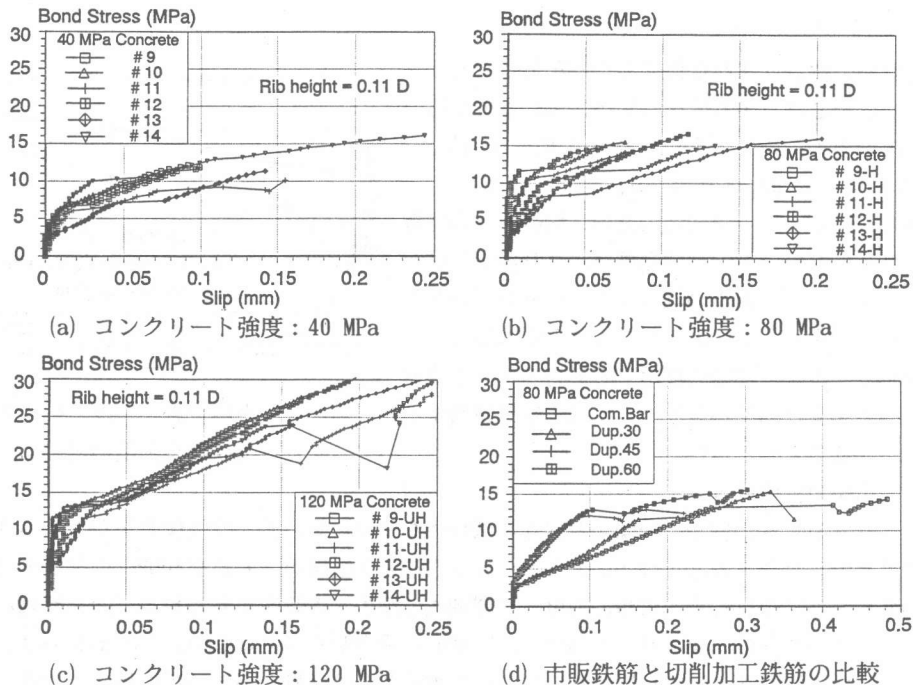


図-3 付着応力～自由端すべり曲線

して最大耐力に至った。試験終了後、試験体をコンクリートカッターで切って内部のひびわれの状況を観察したところ、鉄筋の節頂部から45～60度の角度で伸びるひびわれが、ほとんどの試験体で観察された。このひびわれは、スパイラル筋で囲まれる面に達するとスパイラル筋の頂部をつなぐ破壊面を形成していた。

3.2 付着応力～すべり曲線

付着応力～自由端すべり曲線の一例をコンクリート強度別に図-3 (a)、(b)、(c) に示す。

図-3 (d) は市販鉄筋(Com. Bar)と、切削加工鉄筋で市販鉄筋と同一節高さ、同一節間隔を有するものを比較したものである。ここで付着応力を求めるときの付着面積の算定には公称直径($D=35.8$ mm)を用いた。切削加工鉄筋支圧面が鉄筋軸となす角度は30、45 および60度である。コンクリート強度は80 MPaである。市販鉄筋の支圧面が鉄筋軸となす角度は約30度であった。切削加工鉄筋で支圧面が鉄筋軸となす角度が45度と60度のもの(Dup. 45、60)の付着応力～すべり曲線はほとんど同一であるが、30度のもの(Dup. 30)の剛性は45度と60度のものに比べ小さい。このことは支圧面が鉄筋軸となす角度が45度以上では付着性状に及ぼす影響は小さいとする既往の研究結果[1、2]と一致する。市販鉄筋と同一の節高さ、節間隔及び支圧面が鉄筋軸となす角度を有する切削加工鉄筋は、市販鉄筋とほぼ同一の付着性状を示した。

4. 結果の検討

良好な付着性状を示す鉄筋節形状とは、応力～すべり曲線において高い剛性、高い付着強度を示し、かつ、付着割裂が生じにくいものと考えられる。実験結果を評価するために、平均付着応力度、初期剛性、割裂強度を図-4のように定義して用いた。すなわち、本試験では120 MPaの試験体についてのみ鉄筋が抜け出すまで载荷したが、実際の構造物ではそのような大きな鉄筋の滑りを考えてもあまり意味がないと考えられ、むしろ割裂が生じた後のひび割れたコンクリート

中の鉄筋の付着性状を把握することが重要であると
考えた。そこで、あるすべり領域における付着応力
度を評価するために、すべり量が 0.025、0.051、
0.076 及び 0.102 mm (0.001、0.002、0.003、
0.004 in.) における付着応力度の平均値を平均付着
応力度として用いた。初期剛性はすべり量が0.0127
mm (0.0005 in.) あるいはコンクリートの割裂が生
じた点のいずれか小さいほうにおける応力度として
定義した。また、割裂強度は付着応力～すべり曲線
において急激に剛性が低下し、すべり量が急増する
点における応力度とした。

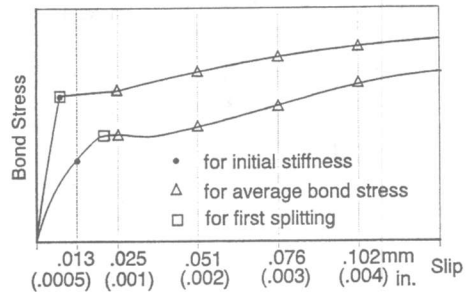


図-4 平均付着応力度、初期剛性
及び割裂強度の定義

4.1 節間隔の影響

図-5は節高さが同じで節間隔が異なる試験体を比較している。試験体番号が大きいほど節間隔が大きい。データのばらつきはあるが、コンクリート強度が 40 及び80MPa の試験体では節間隔が増加するにつれて平均付着応力度と初期剛性は減少する傾向が見られる(図-5(a)、(b))。しかし、この傾向はコンクリート強度が120 MPa の場合明らかではない。JIS あるいは ASTM で規定する最小節高さ、最大節間隔を有する市販鉄筋(C.B.)は最も小さい平均付着応力度と初期剛性を示した。割裂強度はかなり大きなばらつきを示し、割裂強度に対する節間隔の影響は明らかではない。

4.2 節高さの影響

図-6には同一節間隔で節高さの異なる試験体を比較したものを示す。同一節間隔のグループの中では右側に位置するものほど節高さが高い。いくつかの例外はあるが平均付着応力度と初期剛性は節高さが増加するにつれて大きくなっている(図-6(a)、(b))。この傾向はコンクリート強度が大きくなるにつれて強くなる。割裂強度は節高さに依存していない(図-9(c))。

4.3 節高さ/節間隔 (h/1n) の影響

図-7に平均付着応力度、初期剛性及び割裂強度と、(節高さ/節間隔 : h/1n) との関係を示す。ここで (h/1n) を取り上げた理由は、鉄筋の節の支圧面積の大きが付着性状に及ぼす影響が大きいと考えたためである。すなわち、鉄筋の単位長さ当たりの支圧面積は、節高さ (h) に比例し、節間隔 (1n) に反比例する。従って (h/1n) の値が大きい鉄筋は節の支圧面積が大きいことを意味する。

データにばらつきはあるが(特にコンクリート強度120 MPa の場合)、平均付着応力度と初期剛性は、コンクリート強度に関係なく (h/1n) の値が大きくなるほど、すなわち支圧面積が大きくなるほど増大する傾向がある。しかし、この傾向は (h/1n) が 0.2程度までであって、この値を超えた場合、付着応力度は頭打ちになる。一方、割裂強度は (h/1n) が 0.2程度までの範囲で (h/1n) に反比例する傾向が認められる(図-10(c))。

岡村らは、圧縮強度が約 34 MPa のコンクリートと、太径鉄筋D51 (直径51mm) を用いた引き抜き試験を行い、(h/1₀; 1₀は節の純間隔)が0.23以上の鉄筋はかえて初期付着応力度は低下するとしている [3]。今回の試験結果はこの結果とほぼ一致している。

4.4 コンクリート強度の影響

図-5、6、7では同一節形状でコンクリート強度が異なる試験体の比較も行なっている。

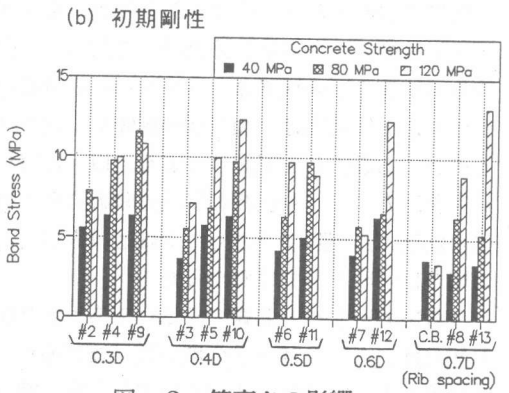
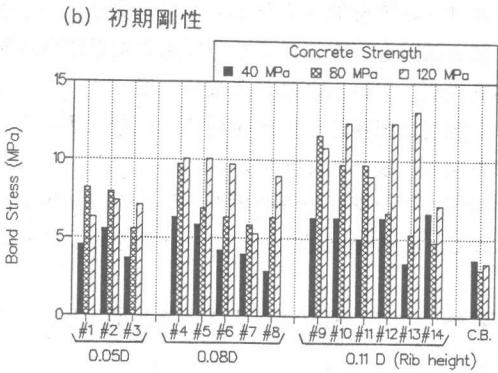
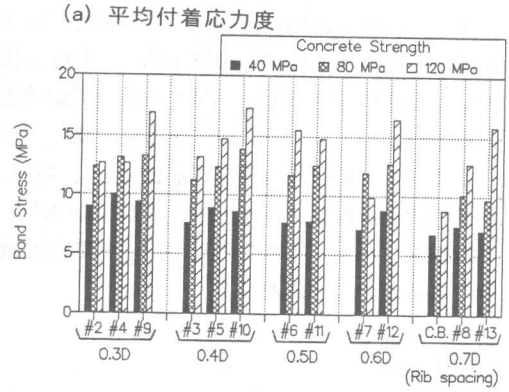
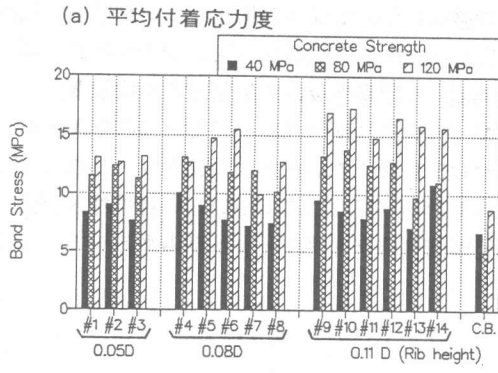


図-5 節間隔の影響

図-6 節高さの影響

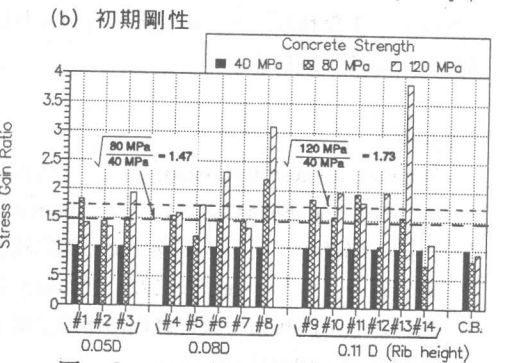
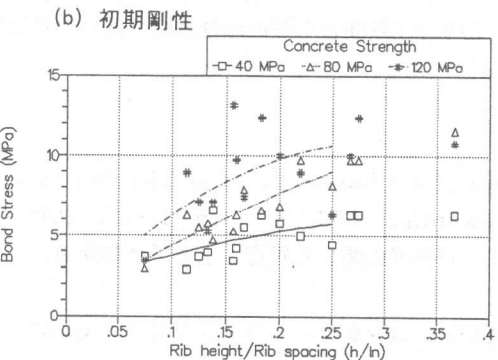
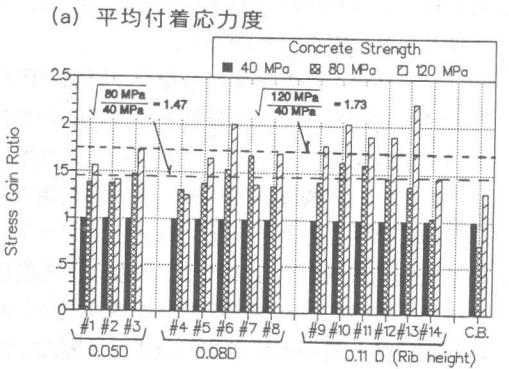
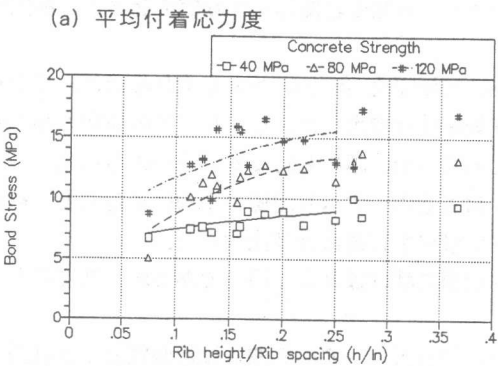


図-7 (h/l_n)の影響

図-8 コンクリート強度の影響

図-8には平均付着応力度、初期剛性、及び割裂強度について同一節形状でコンクリート強度が40MPaに対する80 MPaの試験体の強度比と120 MPaの試験体の強度比（80/40 MPaと120/40 MPa）を比較して示す。80/40 MPaの平均付着応力度、初期剛性及び割裂強度の平均強度比は、それぞれ1.38、1.47、1.48であった。また、120/40 MPaのそれは1.68、1.87、1.66であった。コンクリートの圧縮強度実測値は38.3、82.9及び115.1 MPaであった。コンクリート強度の実測値の比は80/40 MPaで1.47、120/40 MPaで1.73であった。ここで用いた付着性状を評価する指標すなわち、平均付着応力度、初期剛性及び割裂強度はコンクリート強度の平方根でほぼ評価できるものと思われる。

5. まとめ

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を調べるために、コンクリート強度と異形鉄筋の節高さ及び節間隔を変数とした引き抜き試験を実施した。ここで用いた試験体は実際の梁や柱の中の鉄筋とコンクリートの付着状態を模擬しているとは言えない。従って、ここで得られた試験結果は、節形状の影響やコンクリート強度の影響について相対的な比較に用いられるべきであることを明記しておく。以下に得られた結果をまとめて示す。

- 1) 付着応力～すべり曲線の平均付着応力度と初期剛性はコンクリート強度が40及び80 MPaの場合鉄筋の節間隔が小さくなるほど増大した。しかし、この傾向はコンクリート強度が120 MPaの場合には明らかではなかった。
- 2) 付着応力～すべり曲線の平均付着応力度と初期剛性は鉄筋の節高さが大きいほど増大した。この傾向は、コンクリート強度が高いほど強かった。
- 3) 付着応力～すべり曲線において試験体に割裂が生じたときと推定される点、すなわち急激に剛性が低下し、すべり量が急増する点の応力度は、コンクリート強度に関わらず鉄筋の節高さ、節間隔にほとんど影響されなかった。
- 4) コンクリート強度に関わりなく、鉄筋の節高さ／節間隔比 (h/l_n) が大きくなるほど、すなわち支圧面積が大きくなるほど平均付着応力度と初期剛性は増大した。しかし、この傾向は (h/l_n) が0.2程度までであって、この値を超えた場合これらの値は頭打ちになる傾向がみられた。
- 5) コンクリート強度が120 MPaまでの範囲では、付着応力～すべり曲線の平均付着応力度、初期剛性割裂が生じるときの応力などはコンクリート強度の平方根にほぼ比例した。
- 6) 支圧面が鉄筋軸となす角度が45度以上の鉄筋の付着性状はほとんど同一であるが、30度になると付着応力～すべり曲線の初期剛性は減少した。
- 7) 市販鉄筋と同一の節形状を有する切削加工鉄筋の付着応力～すべり曲線は市販鉄筋とほぼ同一であった。すなわち、同一の節形状を有すれば、切削加工鉄筋と市販の圧延鉄筋は同一の付着性状を示すと考えられる。

参考文献

- 1) Soretz, S. and Holzenbein, H. : Influence of Rib Dimensions of Reinforcing Bars on Bond and Bendability, ACI Journal, Proceedings V.76, No.1, pp.111-125, 1979
- 2) 村田二郎ほか：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年8月
- 3) 国分正胤・岡村甫：太径鉄筋の使用に関する研究、コンクリートライブラリー、第43号 pp.19-29、1977年8月