

論文 鉄筋のふし形状が付着割裂特性に与える影響

近藤 吾郎^{*1}

要旨：異形鉄筋のふし形状が付着割裂特性に与える影響を明らかにすることを目的として，異形鉄筋の表面形状を種々に変化させた鉄筋を用いたカンチレバー型の引抜き試験を行った。試験体は，底面かぶりコンクリートが全幅にわたり割裂かれて付着抵抗を失うサイドスプリット型の破壊モードであり，このような部材内における付着特性に及ぼすふし形状の影響について検討を加えたものである。

キーワード：異形鉄筋，ふし形状，支圧面積係数，せん断面積係数

1. はじめに

異形鉄筋の付着は，鉄筋表面に設けられているふし部における機械的な噛み合い作用が支配的であるので，ふし形状が付着特性に影響を及ぼす。そのため，わが国では，表面の異形形状が JIS(G3112)の規定を満たす異形鉄筋が使用されている。また，海外においても，同様の規定が設けられている。

しかしながら，これらの規定が定められてからコンクリートや鉄筋の高性能化は著しく，このような材料特性に対する検討は十分になされていない。また実部材では鉄筋周辺のコンクリートが割裂かれて付着抵抗を失う破壊モードが支配的であるがこのような部材中における付着特性に及ぼすふし形状の影響については，最近の研究¹⁾があるものの未解明な点も多く残されている。そこで，本研究では，付着割裂特性に及ぼすふし形状の影響を明らかにすることを目

的として，ふし形状の異なる鉄筋を用いてカンチレバー型の付着試験を行って得られた結果について，報告するものである。

2 実験の概要

2.1 試験鉄筋

試験鉄筋は，3種類のふし形状をもつ D19 の市販異形鉄筋(竹ふし,波ふし,ねじふし)に，丸棒から切削加工して作成した4種の D19 相当の竹ふし鉄筋および M22 全ねじ鋼棒を加えた8種類とした。なお，切削鉄筋のふし間隔は，公称径の 0.4 および 1.0 倍，ふし高さは公称径の 0.05 および 0.10 倍であり，いずれも縦リブは設けていない。表 - 1 に，試験鉄筋の詳細を示す。これらの試験鉄筋は文献²⁾に用いられているものを再使用したものである。なお，いずれの試験鉄筋も熱処理を行い，強度が高められているものである。

表 - 1 試験鉄筋の詳細

鉄筋名称	弾性係数 (10 ⁵ N/mm ²)	最大径 D(mm)	最小径 d(mm)	ふし間隔 l(mm)	ふし高さ h(mm)	ふし角 度θ(deg)	ふし形状				
							ふし		リブ		
							w(mm)	α(deg)	a(mm)	b(mm)	γ(deg)
0.4-0.05	1.92	20.3	18.3	7.6	1.0	90	2.0	0.783	-	-	-
0.4-0.10	1.69	20.9	16.9	7.6	2.0		2.0	0.807	-	-	-
1.0-0.05	1.90	20.8	18.8	19.1	1.0		2.0	0.974	-	-	-
1.0-0.10	1.74	22.2	18.2	19.1	2.0		2.0	1.041	-	-	-
ねじふし	1.83	21.4	18.3	10.5	1.6	81	2.4	0.782	3.6	3.6	-
波ふし	1.95	21.4	18.9	12.5	1.3	60	2.0	0.813	2.8	4.1	63
竹ふし	1.78	20.8	18.2	12.5	1.3	90	2.0	0.821	4.2	5.2	69
全ねじ	2.08	22.0	19.3	2.5	1.4	90	0	0.977	-	-	-

w: ふし頂部の幅, α: ふし傾斜角, a: リブ頂部の幅, b: リブ底部の幅, γ: リブの傾斜角



*1 千葉大学助教授 工学部都市環境システム学科 工博 (正会員)

2.2 試験体

試験体として、8種類の試験鉄筋について、それぞれ横補強筋のない場合とある場合の計16体を用意した。それぞれの試験体の詳細は、図-1に示すように、幅が160mm、全せいが330mmの断面をもつカンチレバー型の引き抜き試験体であり、試験鉄筋をそれぞれ2本下端筋として配してある。試験鉄筋の付着長さは300mmであり、自由端側100mmには塩ビパイプによって付着を絶ってある。試験鉄筋の側面および底面かぶりりは、サイドスプリット型の破壊が先行するように設定した。また、D19の圧縮主筋に加えて、試験体のせん断破壊を防止するため、D19の付加鉄筋およびD10@75のせん断補強筋を共通に配してある。試験鉄筋の横補強筋として、4組のスターラップ(D10@75)を配してある。なお、縦リブを持つ場合ふしの方向により付着特性が影響されるという報告³⁾があるが、ここでは市販鉄筋を用いる場合には縦リブが上下になる向きに配置した。実験時には、各試験鉄筋の荷端引張力、試験体背面のコンクリート(試験鉄筋高さ)に対する試験鉄筋の荷端および自由端における相対移動量をすべりとして計測した。さらに、図-1中に示す位置でWSGにより、試験鉄筋ひずみおよび横補強筋ひずみを計測した。また、パイゲージにより試験鉄筋付近のコンクリートの変形を計測した。

2.3 荷重方法

加力は、図-2に示すように、試験体に鉄骨ばりを取り付け、全体を3点荷重して行った。試験体のせん断スパンは400mmであり、曲げ圧縮力はピンを介して圧縮主筋位置に作用させた。なお、圧縮鉄筋と試験鉄筋との間の中心距離は240mmである。

2.4 使用材料

コンクリートは、調合強度を 30N/mm^2 として、 $\text{W/C}=60\%$ 、単位水量 174kg/m^3 の調合とした。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大寸法は20mmである。試験時

のコンクリートの力学的特性を表-2にまとめて示す。

横補強筋に使用したD10鉄筋は、降伏強度 344N/mm^2 、ヤング係数 $1.62 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。

3 実験結果とその検討

3.1 結果の概要

実験結果の一覧を表-3に示す。なお、横補強を行っていないねじふし鉄筋の試験体は、測定システムのトラブルにより計測データの記録が行えなかった。ひび割れパターンから判断す

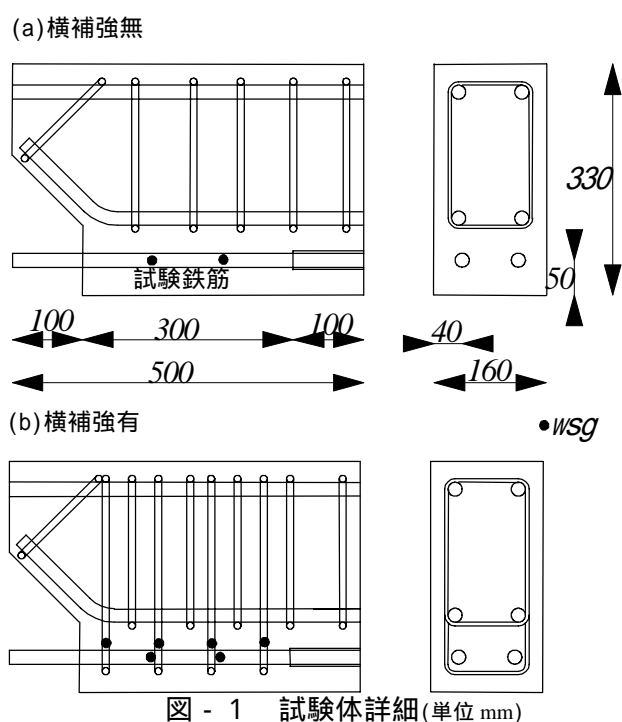


図-1 試験体詳細(単位 mm)

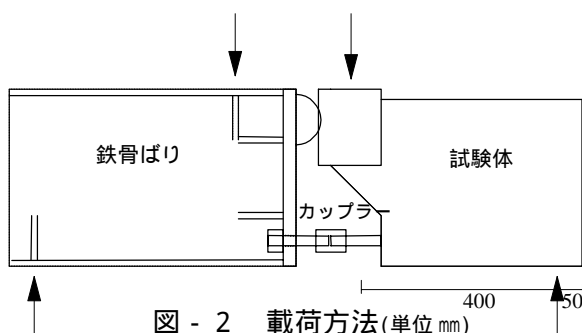


図-2 荷重方法(単位 mm)

表-2 コンクリートの力学的特性

試験鉄筋	波ねじ	竹全ねじ	1.0-0.05	0.4-0.05
			1.0-0.10	0.4-0.10
圧縮強度 (N/mm^2)	34.3	30.9	26.0	26.8
割裂強度 (N/mm^2)	2.83	2.66	2.66	2.84
ヤング係数 (10^4N/mm^2)	2.3	2.3	2.5	2.5

るとすべての試験体において、試験鉄筋が降伏することなくサイドスプリット型の付着割裂破壊となった。試験鉄筋のふし形状の特性を表す指標として、せん断面積係数および支圧面積係数が提案されている⁴⁾。これらの係数は、それぞれ、ふし頂部を結ぶコンクリートのせん断面積およびふし前面の支圧面積をそれぞれ公称付着面積で除した値を表すものであり、支圧面積係数はおおよそふし高さのふし間隔に対する比と等価な係数となる。表中に、試験鉄筋の実測値に基づいて評価したこれらの係数を示してある。同バッチのコンクリートを用いている試験体を比較すると、ふし間隔の狭い切削鉄筋の横補強筋の無い場合を除いて支圧面積係数の大きい鉄筋ほど最大付着応力が大きくなるのが特徴である。また、横補強のない場合は絶対量が小さく判断が困難であるが、横補強筋を配した場合はふし間隔の小さいほど、最大耐力時のすべりが小さい傾向が認められる。

3.2 破壊モード

実験終了時の典型的なひび割れパターンとして竹ふし鉄筋の実験結果を図-3に示す。横補強を行っていない試験体では、ほとんどの場合、載荷端から100mmの位置で試験鉄筋を横切る曲げせん断ひび割れが生じ、その後この位置から試験鉄筋自由端方向に沿った付着割裂ひび割れが生じて、脆性的な破壊を示した。一方、横

拘束を行った試験体では、荷重増加に伴い多数のせん断ひび割れが生じるとともに、付着割裂ひび割れも進展し最大荷重となるが、急激な荷重低下は見られなかった。このような破壊状況は、すべての試験鉄筋で共通であった。

3.3 平均付着応力とすべりの関係

図-4に竹ふし鉄筋の平均付着応力とすべりの関係を示す。この図から横補強を行っていない曲線は、最大耐力に至るまでは横補強を行っている場合とほぼ同じであり、これはほかの試験鉄筋でも同様であった。

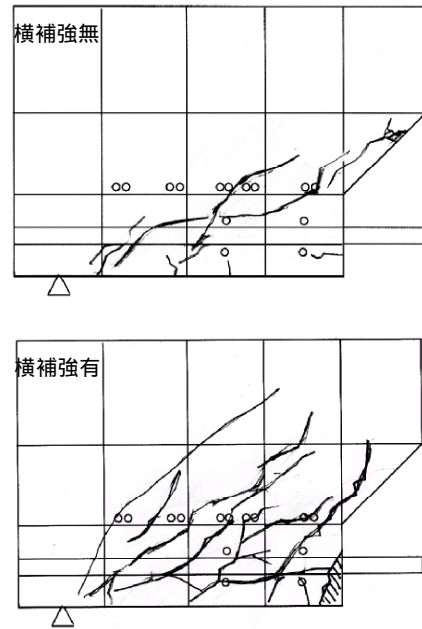


図-3 破壊状況(竹ふし鉄筋)

表-3 実験結果一覧表

試験鉄筋	横補強筋	せん断面積係数	支圧面積係数	最大耐力時								
				載荷端引張力		すべり(mm)				付着応力(N/mm ²)		
				右(kN)	左(kN)	載荷端		自由端		右	左	平均
						右	左	右	左			
波	無	0.800	0.114	53.6	57.2	0.33	0.43	0.03	0.01	2.97	3.18	3.10
				80.2	107.6	1.93	1.69	1.71	1.22	4.46	5.97	5.22
ねじ	無	0.739	0.159	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				109.0	126.1	1.33	1.31	1.10	1.05	6.06	7.01	6.54
竹	無	0.800	0.110	47.3	54.1	0.20	0.21	0.00	0.00	2.63	3.01	2.82
				75.0	110.7	2.06	1.87	1.76	1.37	4.17	6.15	5.14
全ねじ	無	1.010	0.645	51.6	52.3	0.25	0.22	0.05	0.03	2.87	2.91	2.90
				102.8	99.6	1.32	1.22	0.96	0.84	5.71	5.53	5.62
1.0-0.10	無	1.041	0.111	45.9	46.1	0.25	0.32	0.03	0.08	2.55	2.56	2.56
				85.6	84.0	1.78	1.98	1.48	1.61	4.75	4.66	4.70
1.0-0.05	無	0.974	0.054	43.7	44.7	0.18	0.22	0.01	0.03	2.43	2.48	2.46
				77.6	91.0	2.24	2.14	1.83	1.72	4.31	5.06	4.68
0.4-0.10	無	0.807	0.261	48.9	46.4	0.31	0.32	0.05	0.05	2.72	2.58	2.65
				102.4	106.1	1.40	1.50	0.79	0.98	5.69	5.89	5.79
0.4-0.05	無	0.783	0.133	50.2	51.1	0.24	0.29	0.03	0.05	2.79	2.84	2.81
				95.0	104.8	1.43	1.66	0.95	1.00	5.28	5.82	5.55

図 - 5 , 6 に、それぞれ市販鉄筋、切削鉄筋の横補強を行った場合の平均付着応力と載荷端すべりの関係を比較して示す。市販鉄筋を比較すると、ふし間隔、ふし高さの等しい波ふし鉄筋と竹ふし鉄筋は全体的に類似した曲線となっている。ふし間隔の小さく支圧面積係数の大きいねじふし鉄筋は最大耐力は大きいものの軟化勾配が大きい。極端なふし形状の全ねじ棒の場合は JIS(G3112)の規格を満足する鉄筋に匹敵する最大耐力となっているが、軟化域では最も急勾配となっている。

切削鉄筋を比較した図 - 6 では、ふし高さの大きい 1.0-0.10 と 0.4-0.10 が初期剛性も大きいことがわかる。荷重が増すとふし間隔の小さい 0.4-0.10 と 0.4-0.05 の曲線はほとんど相違がなくなっている。実験終了後これらの試験鉄筋を観察したところ、試験鉄筋上面のふし間に形成されたコンクリートウェッジの先端は隣接するふしに達していることが確認された。国分らは有効なふし高さをふし間隔の 1/5 であるとしている⁴⁾が、この実験結果もほぼこれと対応するものとなっている。一方ふし間隔の大きい 1.0-0.10 と 1.0-0.05 ではふし高さの小さい 1.0-0.05 のほうがすべりは大きく、軟化勾配は緩やかになっており、ふし高さとうし間隔に関する既往の実験における傾向と符合している。

3.4 試験鉄筋応力分布

試験鉄筋付着区間 300mm 内で 100mm 間隔に貼付した WSG から求めた鉄筋引張力分布の推移を、例として横補強筋のある竹ふしおよびねじふし鉄筋の場合について図 - 7 に示す。ここで横軸の載荷荷重は、左右 2 本の試験鉄筋の載荷端引張力の合計（試験体の曲げ引張力）を表すものである。横補強の有無によらず早期に載荷端より 100mm 付近に曲げせん断ひび割れが生じるため、このひび割れより載荷端側の範囲における付着力は制限されることになり、最大荷重時には、すべての試験体について載荷端引張力の 0~25%の範囲にある。一方、自由端から 100mm の範囲における付着力は載荷端引張

力の 50~80%の範囲にある。引張力分布に関しては表面形状の相違による影響は明確でなかった。

3.5 横補強筋ひずみ

図 - 8 に載荷端引張力の合計に対する 4 組の横補強筋ひずみの推移を竹ふしおよびねじふし鉄筋を例として示す。それぞれの補強筋は載荷端側からの番号で表している。横補強筋のひずみは載荷端からのひび割れ発生により番号順に

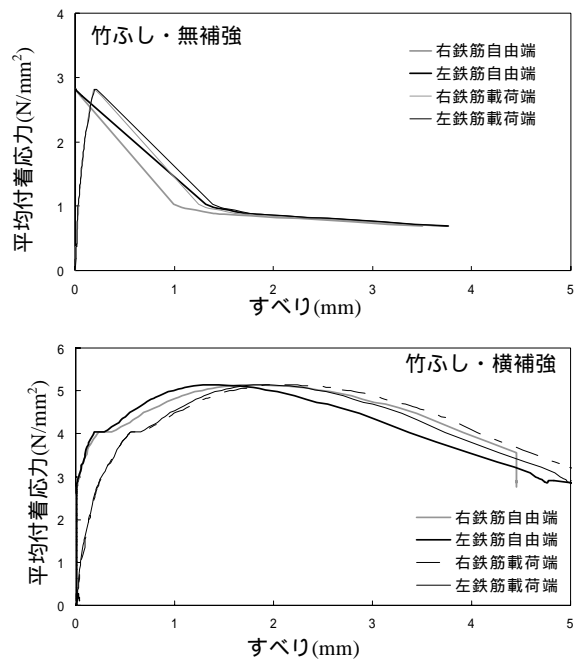


図 - 4 平均付着応力 - すべり曲線

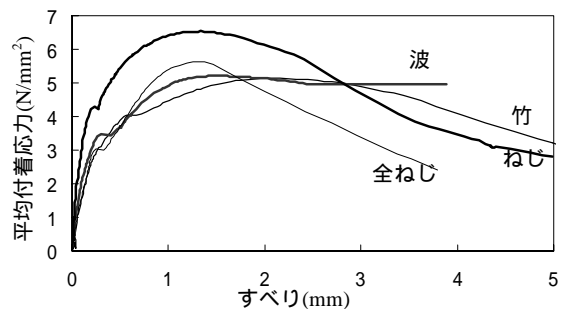


図 - 5 平均付着応力 - すべり曲線の比較

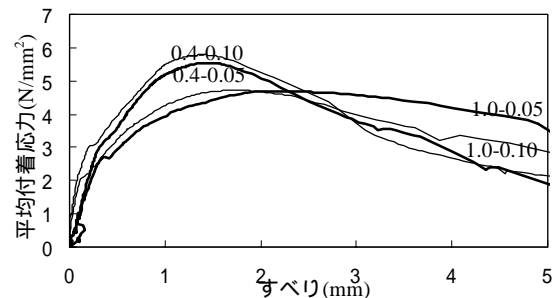


図 - 6 平均付着応力 - すべり曲線の比較

生じるが、最大耐力時には竹ふしの場合いずれも 1500~2000 μ の範囲にあるのに対し、ねじふしの場合荷端より 2 番目の横補強筋が降伏しているが、4 組の横補強筋による拘束力の合計は若干であるが竹ふしの場合のほうが大きい。

図 - 9 に、切削鉄筋試験体の最大荷重時の横補強筋ひずみの分布を示す。ねじふし鉄筋の場合と同じく 4 組の横補強筋のうち荷端より 2 番目のひずみが大きい傾向が見られるが、表面形状の相違による明確な傾向は見られず、横補強筋による拘束力の合計も顕著な違いは見られなかった。

3.6 コンクリートの変形

試験体側面にパイゲージを配置して、コンクリートの相対変位を計測した。図 - 10 にパイゲージの配置を示す。図 - 11 に各計測位置におけるコンクリートの試験体背面に対する水平変位と平均付着応力の関係を横補強を行った竹ふし鉄筋の試験体を例として示す。試験体コア側の計測点(a1~a3)は付加鉄筋上部にあるが、水平方向にはほとんど変位していない。一方、底面かぶり部の計測点(b1,b2,b3)の変位は大きく、特に b1(荷端から 50mm の位置)は最大荷重時に 2mm を超えており、図 - 4 の鉄筋のす

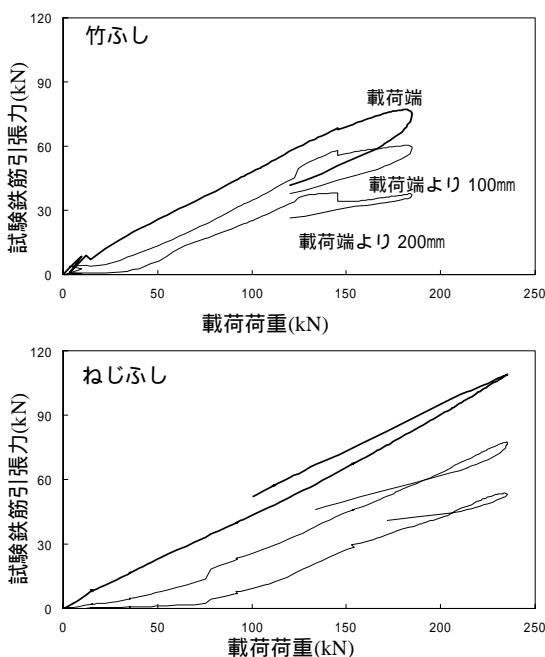


図 - 7 引張力分布の推移

べり量と比較すると荷端近傍ではかぶり部の相対すべりが生じていないことになる。

また、同じ試験体の a1-a2-b2-b2 および a2-a3-b3-b2 のそれぞれ 4 点に囲まれたコンクリートの平均ひずみの推移をそれぞれ x を材軸、 y を鉛直方向として図 - 12 に示す。いずれの図でも ϵ_y と γ_{xy} はおおよそ等しく推移し、 ϵ_x と比

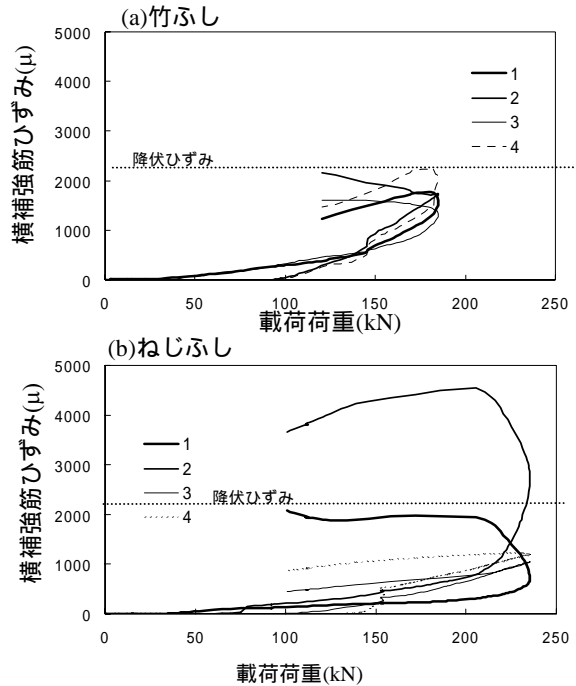


図 - 8 横補強筋のひずみ履歴

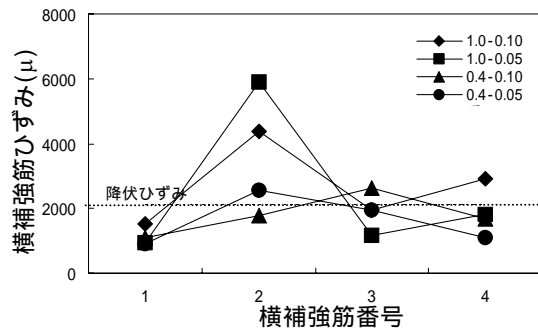


図 - 9 横補強筋ひずみ分布

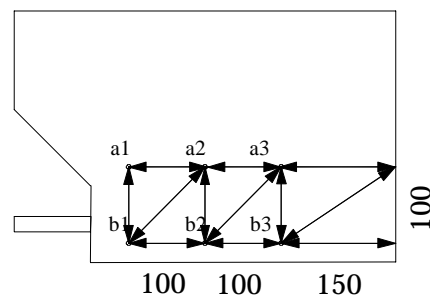


図 - 10 パイゲージの配置 (単位 mm)

較して大きいという傾向は、すべての試験体について共通である。

3.7 付着割裂強度

図-13に、コンクリート強度の平方根で整理した最大平均付着応力と支圧面積係数の関係を示す。なお、同じ試験鉄筋を用いた藤井らの実験結果²⁾を併せて示している。無補強の場合には支圧面積係数の付着強度に対する影響がそれほど明確ではないのに対し、横補強程度を増すほど、支圧面積係数が付着割裂強度に及ぼす影響が強くなっていく。また、支圧面積係数が0.2を越えると支圧面積係数の影響は明確でなくなっており、ふし高さをふし間隔の1/5以上としても付着性能に寄与しないといえる。

4 結論

付着割裂特性に及ぼす異形鉄筋の表面形状の影響を実験的に調査した。本実験で得られた主な知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 支圧面積係数が0.2以下の範囲ではこれが大きいほど付着割裂強度は大きくなる。この影響は、横補強程度の高いほど顕著になる。
- 2) 支圧面積係数が0.2を超える範囲では、付着割裂強度に及ぼす支圧面積係数の影響は明確でない。
- 3) 本実験の範囲では、一部の横補強筋の応力は降伏により制限されたが、横補強筋による拘束力は、ふし形状に関わらず、おおよそ一定であった。

[謝辞] 試験鉄筋は故藤井栄先生に提供いただいた。藤井先生のご冥福をお祈りいたします。また、本研究の一部は、科研費補助金の助成を受けたことを付記する。

[参考文献] 1) 藤井栄ほか：異形鉄筋の表面形状が付着割裂強度に及ぼす影響，日本建築学会大会梗概集 C-2，1993年9月，pp227-228。2) 前田剛ほか：鉄筋表面形状をパラメーターとしたカンチレバー型付着試験，日本建築学会大会梗概集 C-2，1997年9月，pp349-350。3) 市之瀬敏勝ほか：高強度コンクリートを用いたRC部材の付着割裂実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，

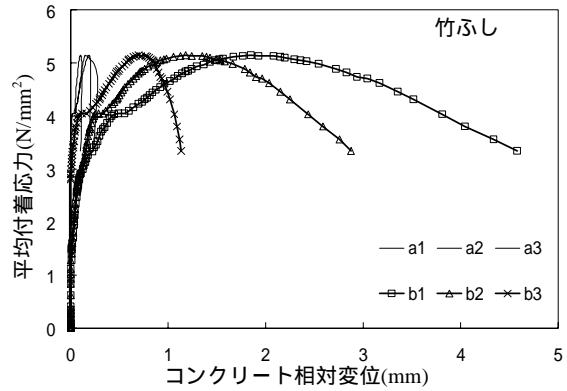


図-11 コンクリートの水平方向相対変位

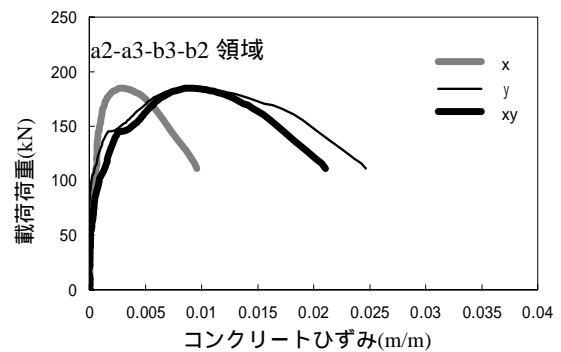
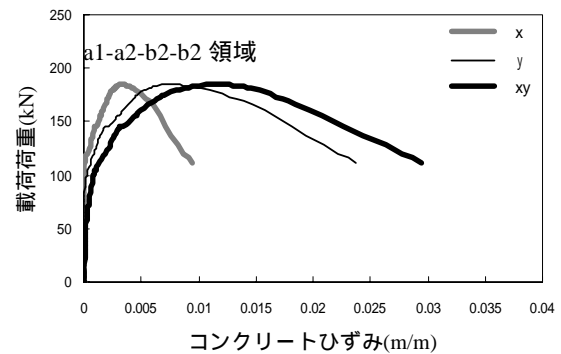


図-12 コンクリートひずみの推移

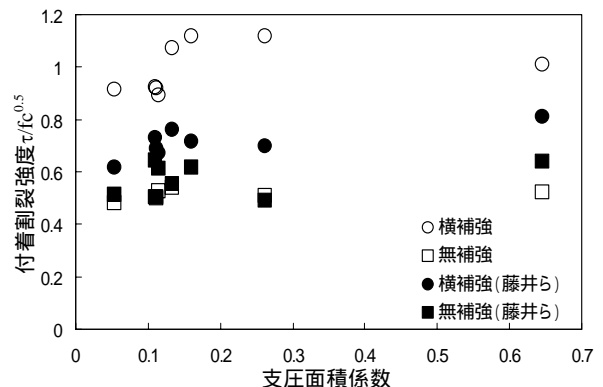


図-13 支圧面積係数と付着割裂強度の関係

No.2, pp.75-80, 1992年6月。4) 国分 正胤ほか：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文集，第202号，pp103-113，1972年