

論文

[2011] 異形鉄筋の付着力と割裂力の関係

正会員○赤司二郎（京都大学大学院）
 正会員 藤井 栄（京都大学建築学科）
 正会員 森田司郎（京都大学建築学科）

1. 序

コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋を引き抜いた場合、鉄筋の突起（ふし）によって周囲のコンクリートを割裂こうとする力が働き、鉄筋軸と直交方向の拘束が不十分な場合、コンクリートが割裂かれて破壊してしまう。

異形鉄筋の割裂力を直

接測定した研究としてはGAMBAROVAによる研究[1]があるが、割裂力はふしの形状とも関係があると思われ、彼らの研究によって十分に解明されているとは言えない。本研究では、表面ふし形状と異形鉄筋の界面での付着力と割裂力との関係を把握することを目的とし、割裂ひびわれ幅・表面ふし形状を実験変数として、異形鉄筋の割裂力を直接計測する実験を行った。

2. 実験計画

図-1 に供試体形状及び加力条件を示す。供試体は200mm角の立方体コンクリートで、その中央位置に2本の試験鉄筋を配すること

によって供試体の回転を防止した。供試体には、鉄筋軸を通る断面に厚さ1mmの鉄板の両側に厚さ2mmの発泡スチロールの板を貼付けたスリットを用いて、予め割裂ひびわれを作成してある。試験鉄筋の付着領域は供試体中央部にあり、その両側での付着は絶縁されている。付着長さ L は、公称径 25.4mmの3倍以上でふし間隔 ϕ の整数倍となる長さとした。

試験鉄筋は $\phi 30$ の丸鋼棒を切削加工し、熱処理をしてSD100クラスまで強度を高めたものである。表-1 に表面ふし形状の一覧を示す。試験鉄筋は D25 異形鉄筋と公称断面積が等しくなるように加工寸法を定めた。ふし高さ h は2.5、1.3mm（約0.1、0.05 db）の2種類、ふし間隔 ϕ は25.4、

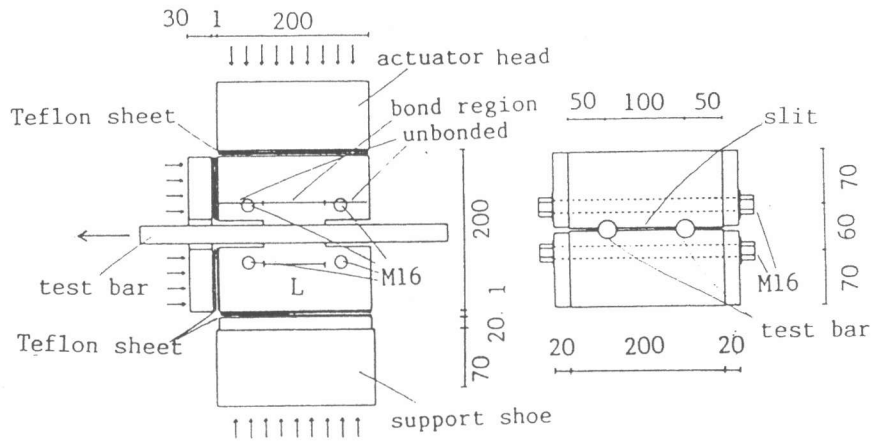


図-1 供試体及び加力条件

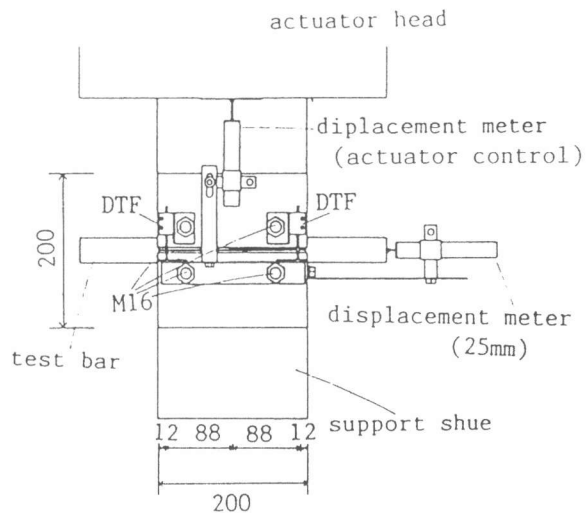


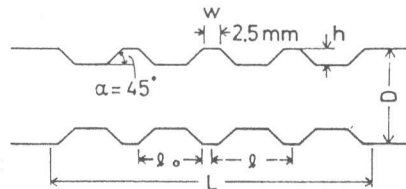
図-2 ひびわれ幅計測位置

17.8、10.2mm (約1、0.7、0.4db) の3種類で、それらの組合せで計6種類の表面ふし形状を設定した。各々の鉄筋に対して、3種類 ($w_n=0、0.15、0.3mm$) のひびわれ幅を設定し、計18体の試験体を用いて実験を行った。供試体の名称は、表-1 脚注に示す。

表-1 表面ふし形状及び供試体名称

供試体名称	ふし個数	L (mm)	g (mm)	h (mm)	h/g	D (mm)
1-0.1	3	76.2	25.4	2.5	0.10	29.4
1-0.05	3	76.2	25.4	1.3	0.05	27.5
0.7-0.1	5	89.0	17.8	2.5	0.14	28.9
0.7-0.05	5	89.0	17.8	1.3	0.07	27.3
0.4-0.1	8	81.6	10.2	2.5	0.25	27.8
0.4-0.05	8	81.6	10.2	1.3	0.13	26.9

NOTE: ふし傾斜角 $\alpha=45^\circ$ 、ふし頂部の幅 $w=2.5mm$ は共通



供試体の名称

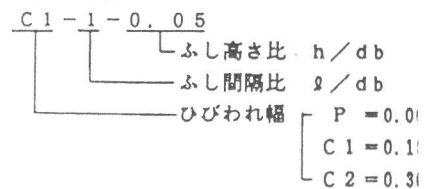


表-2 実験結果一覧

供試体名称	コンクリート強度 (kgf/cm ²)		最大耐力時の値					割裂応力*1	
	f _c	f _t	荷重 (tonf)	付着応力 τ_{max} (kgf/cm ²)	拘束力 (tonf)	割裂応力 σ_n (kgf/cm ²)	すべり量 S _{max} (mm)	最大値 σ_{nmax} (kgf/cm ²)	
P-1-0.1	297	31.3	上端	14.05	263.4	12.62	652.0	1.489	601.9
			下端	14.49	271.7	10.03	518.2	0.676	
P-1-0.05	297	31.3	上端	9.81	183.9	9.85	508.9	-----*2	746.6
			下端	11.15	209.0	6.86	354.4	1.897	
P-0.7-0.1	297	31.3	上端	12.85	206.3	11.30	499.9	1.888	807.8
			下端	16.67	267.6	17.21	761.3	1.862	
P-0.7-0.05	297	31.3	上端	13.67	219.4	12.99	574.6	2.369	686.5
			下端	16.92	271.6	17.68	782.1	2.232	
P-0.4-0.1	297	31.3	上端	13.02	227.9	11.05	533.1	1.623	870.4
			下端	15.20	266.1	15.68	756.5	1.866	
P-0.4-0.05	297	31.3	上端	14.20	248.6	13.22	637.8	1.903	971.7
			下端	14.82	259.5	8.96	432.3	1.020	
C1-1-0.1	178	20.7	上端	9.38	175.9	5.56	287.3	3.946	297.6
			下端	11.23	210.5	5.22	269.7	2.686	
C1-1-0.05	178	20.7	上端	8.93	167.4	5.74	296.6	5.870	302.3
			下端	9.11	170.8	5.74	296.6	5.702	
C1-0.7-0.1	193	22.7	上端	13.77	221.0	7.11	314.5	1.676	351.2
			下端	14.31	229.7	7.34	324.7	2.034	
C1-0.7-0.05	193	22.7	上端	8.94	143.5	4.19	185.3	2.772	242.9
			下端	10.64	170.8	4.84	214.1	3.302	
C1-0.4-0.1	193	22.7	上端	9.03	158.1	3.79	182.9	0.944	246.1
			下端	11.01	192.8	3.79	182.9	0.806	
C1-0.4-0.05	193	22.7	上端	7.52	131.7	3.21	154.9	1.274	189.6
			下端	9.66	169.1	3.54	170.8	1.216	
C2-1-0.1	199	22.3	上端	10.57	198.2	5.73	296.1	3.940	307.4
			下端	10.36	194.2	5.91	305.4	4.554	
C2-1-0.05	199	22.3	上端	8.74	163.9	4.82	249.0	6.608	271.3
			下端	8.59	161.0	4.82	249.0	6.490	
C2-0.7-0.1	199	22.3	上端	8.68	139.3	3.87	171.2	2.186	213.2
			下端	11.57	185.7	4.37	193.3	2.222	
C2-0.7-0.05	199	22.3	上端	7.32	117.5	3.96	175.2	4.008	185.8
			下端	9.63	154.6	3.96	175.2	3.548	
C2-0.4-0.1	211	25.8	上端	5.42	94.9	2.31	111.5	1.504	130.3
			下端	7.07	123.8	2.53	122.1	1.486	
C2-0.4-0.05	211	25.8	上端	5.68	99.4	2.57	124.0	1.468	157.3
			下端	8.65	151.4	2.81	135.6	1.224	

NOTE: *1 P ($w_n=0.00mm$) シリーズはすべて割裂によって最大耐力が定まったため、供試体割裂直前の拘束応力を示した。

*2 変位計故障のため、計測できず

* C2-0.4-0.1 供試体は、載荷開始直後に大きな拘束力が加わり供試体に損傷を与えた。

引抜力は2本の鉄筋に同時に与え、載荷初期に両鉄筋に等しい引抜力が与えられるように調節した。垂直方向の拘束にはサーボアクチュエーターを用いた。図-2に示す4点に取り付けた高周波差動トランス(DTF)によって計測したひび割れ幅の平均値を所定の値とするように制御した。載荷に際しては、供試体と加圧面の間にテフロンシートを2枚配して、摩擦による拘束を除去した。また、想定したひびわれ以外の割裂ひびわれを防ぐため、供試体両側面に厚20mmの鉄板を当て供試体に埋め込んだφ16mmのネジ棒で締め付けて、水平方向の供試体の変形を拘束した。載荷は初め一定の拘束力(約0.5tonf)のもとで試験鉄筋を引張り、所定の割裂ひびわれ幅に到達した後はそのひびわれ幅を保持しながら載荷した。

コンクリートは、鉄筋が水平になるよう打設した。試験時材令でのコンクリート強度は、表-2中に記す。計測事項は自由端すべりである。

3. 実験結果

3.1 概要

表-2に各供試体の鉄筋ごとの最大耐力時の付着応力 τ_{max} 、割裂応力 σ_n 、自由端すべり量 S_{max} 、及び割裂応力の最大値 σ_{nmax} の一覧を示す。付着応力 τ は、引抜力をスリットによる減少分を考慮した付着面積で除して求めた。割裂応力 σ_n は、垂直方向の拘束力を2本の鉄筋に均等に配分し、図-3に示すように割裂応力の垂直方向成分の合力が拘束力と釣り合うものとして、次式に従って算出した。

$$\sigma = \frac{N}{db \cdot L} \quad (N : 1 \text{本あたりの拘束力})$$

ひびわれ幅 $w_n=0\text{mm}$ の供試体は、当初厚板(20mm)を側面に設置しなかったため、水平方向の変形の拘束が十分でなく、全て鉄筋軸に沿った新たな割裂ひびわれが発生して、ひびわれ幅の制御が不能になり実験を終了した。これは意図した破壊モードとは全く異なるものであり、適切な実験データが得られたとは考えられない。表-3に、昨年筆者らが提案した完全に横方向の拘束がなされた場合の付着応力-自由端すべり関係式[2]に従って計算した最大付着強度、最大耐力時のすべり量を示す。これは割裂ひびわれが発生しないよう拘束した状態での実験結果から得られたものであり、本実験の $w_n=0\text{mm}$ の場合に相当する。よって、以下の考察において、最大付着応力を評価するときには実験データの代わりにこの計算値を用いることとする。ひびわれ幅 $w_n=0.15, 0.3\text{mm}$ の供試体は、全て、ふし間コンクリートが、図-4に示すふ

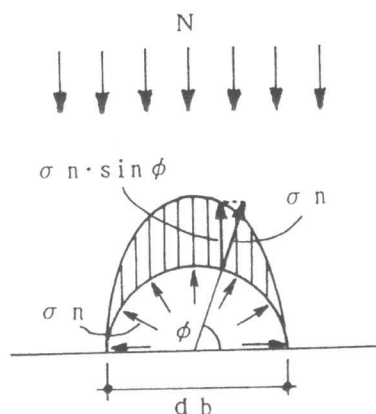


図-3 割裂応力 σ_n の算出

表-3 筆者らの提案式による計算値

供試体名称	計算値	
	τ_{max} (kgf/cm ²)	S_{max} (mm)
P-1-0.1	299.0	2.988
P-1-0.05	287.1	5.746
P-0.7-0.1	285.5	1.692
P-0.7-0.05	273.9	3.253
P-0.4-0.1	251.7	0.694
P-0.4-0.05	240.7	1.335

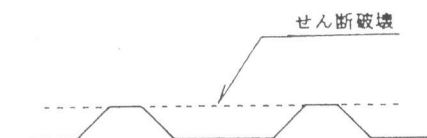


図-4 破壊状況

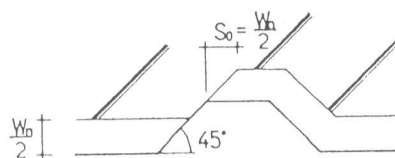


図-5 すべり量の修正

し頂部を結ぶラインで削り取られ、鉄筋が抜け出して破壊した。载荷終了後の供試体を2つに割って鉄筋近傍の状態を観察した結果、削り取られたコンクリートは圧壊し粉体化しており、粉体化したコンクリートの一部は開いたひびわれの隙間へ入り込んでいることが認められた。

$w_n=0.15, 0.3\text{mm}$ のC1、C2供試体では、図-5に示すように、载荷初期に所定のひびわれ幅に達するまで、ふし間コンクリートがふし前面をすべり上がってS₀だけすべっていると考えられる。以下の考察では、ふしとふし間コンクリートとのすべりが無い状態で双方が完全に噛み合っからの付着性状を評価するため、自由端すべり量の実測値からS₀を引いた修正値を新たなすべりS_bとして定義し、その値を用いる。

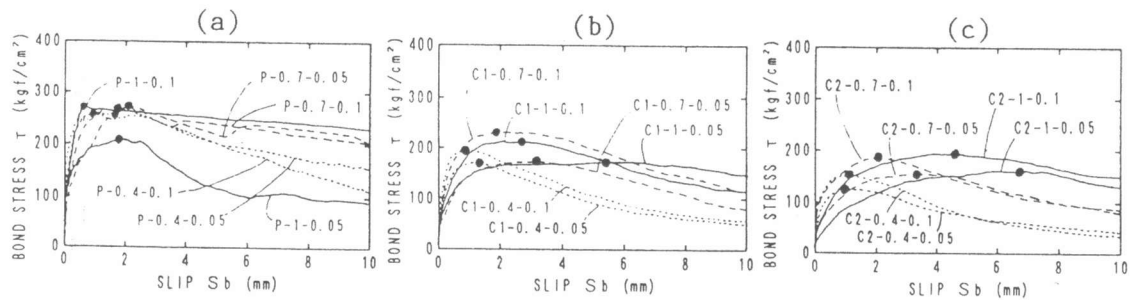


図-6 付着応力-自由端すべり曲線

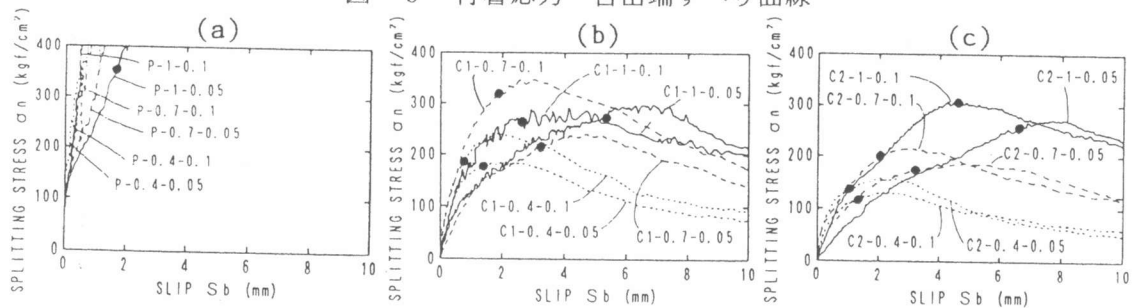


図-7 割裂応力-自由端すべり曲線

3. 2 実験結果の検討

(1) 付着すべり特性

図-6、図-7に各供試体の下端側の鉄筋についての付着応力-自由端すべり曲線 ($\tau-S_b$ 曲線) 及び割裂応力-自由端すべり曲線 (σ_n-S_b 曲線) を示す。双方の曲線とも、ひびわれ幅の増大にしたがって、最大強度が低下し最大強度時のすべり量が増大して同様の性状を示している。同一ひびわれ幅では、ふし高さ間隔比 h/d が大なるほど付着すべり剛性が增大しており、これらの傾向は昨年得られた結果[2]と一致する。両図を比較すると、すべり量の小さい間は割裂応力は付着応力に対して小さいが、最大付着強度時(図中●印)には割裂応力は付着応力の1.1~1.5倍になっている。その後割裂応力はしばらく上昇を続け、付着応力よりも大きなすべり量で最大耐力点に至り、付着強度の1.3~1.7倍の値となる。

(2) 付着応力-割裂応力関係

図-8は、表面ふし形状が同じでひびわれ幅 w_n が異なる供試体についての付着応力と割裂応力との関係($\tau-\sigma_n$ 関係)を示している。これらの曲線の形状は、図-9に示す模式図のように、所定のひびわれ幅に達し割裂応力が上昇していく部分、その後付着応力が最大値に達して曲線の傾きが水平になる部分、そして最大耐力以後の下降部分の3つで特徴付けられる。荷重上昇過程

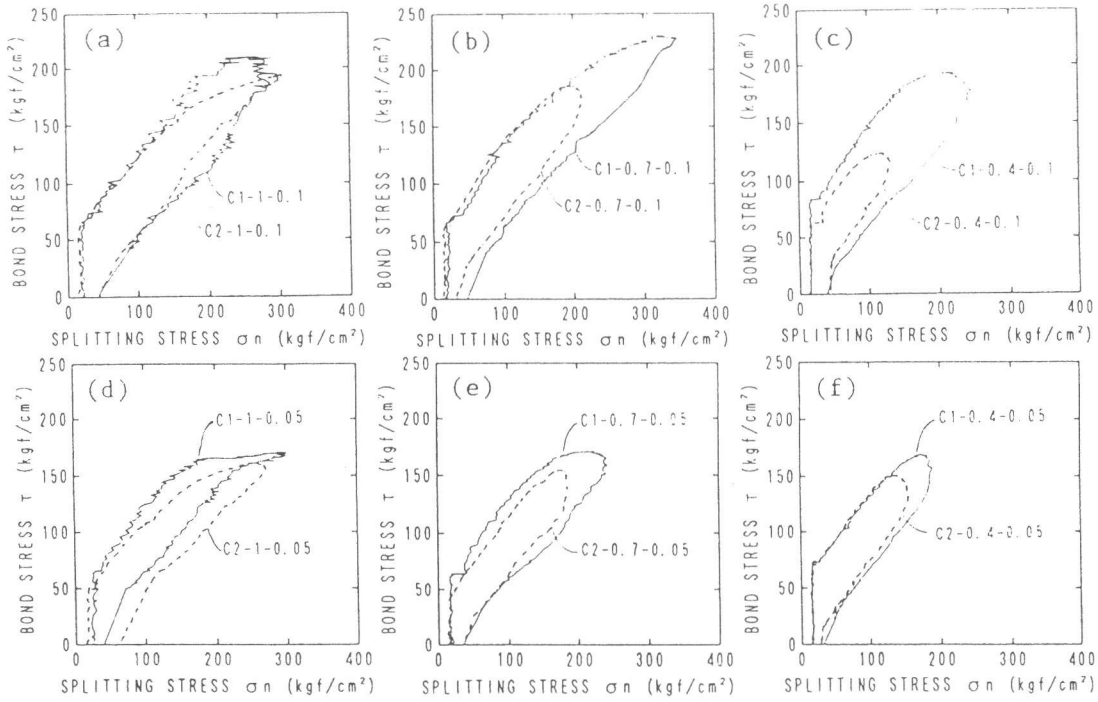


図-8 付着応力-割裂応力関係

ではひびわれ幅の大きい方が同一付着力に対する割裂力が大きいことがわかる。上昇部分と下降部分の傾きはほぼ等しく付着応力の増大と減退に伴って同じ割合で割裂応力が変化している。

図-10は、各供試体の下端側の鉄筋についてのふし前面支圧応力と、付着応力と割裂応力との合力が向かう角度 θ との関係($\sigma_r-\theta$ 関係)を示す。支圧応力は引抜力をふしの全投影面積で除して求めた。各曲線とも、最大耐力前は緩やかに上昇し、最大耐力以後 $60^\circ \sim 65^\circ$ のほぼ一定の角度を保って減少する同様の性状を示している。最大支圧応力度はふし高さ・間隔比 h/λ が小さなものほど大きく、最大支圧応力時の θ はふし高さ h に関わらずふし間隔 λ ごとにほぼ等しい値となっており、表面ふし形状の影響をより明確に表している。

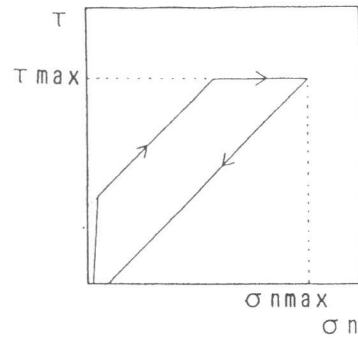


図-9

付着応力-割裂応力関係の
模式図

(3) 最大付着強度

図-11に最大付着強度 τ_{max} とひびわれ幅 w_n との関係を示す。なお τ_{max} はコンクリート強度(f_c)の違いによる影響を除去するため f_c で除してある。 $w_n=0.15$, $0.3mm$ の値は、上端側

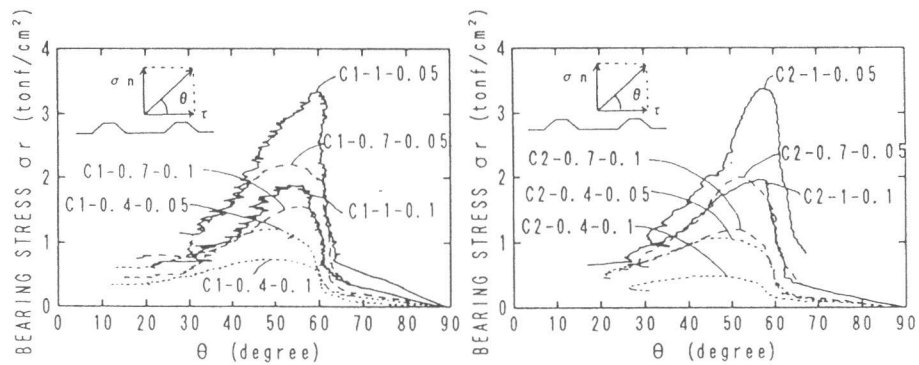


図-10 $\sigma_r-\theta$ 関係

・下端側両鉄筋の平均値を用いた。また、 $w_n=0\text{mm}$ の時の値は前述の計算値を用いた。 $w_n=0.15\text{mm}$ までは τ_{\max} は $w_n=0\text{mm}$ の時の値とほぼ等しい値となっているが、 $w_n=0.3\text{mm}$ になると τ_{\max} は大きく減少している。また、その減少の割合はふし間隔 ℓ の狭いものほど大きくなる傾向にある。

(4) 最大割裂応力度

図-12は最大割裂応力度 $\sigma_{n\max}$ とひびわれ幅 w_n の関係である。この図から、 w_n の増大にしたがって $\sigma_{n\max}$ が大きく減少していることがわかる。また、同一ひびわれ幅では、ふし間隔 ℓ の大きいものの方が $\sigma_{n\max}$ の値が大きくなっている。ふし高さ h の影響は明確でない。

(5) 表面ふし形状と割裂力の関係

図-13は、表面ふし形状が割裂力に与える影響を明確にするため、 $w_n=0.15\text{mm}$ の供試体について付着応力がそれぞれ60、80、100、120、140 kgf/cm^2 の時の割裂応力の値をプロットしたものである。この図より、同一付着応力時の割裂応力はふし高さ間隔比 h/ℓ が小さなものほど大きくなっていることがわかる。これは、ふし前面のコンクリートが圧密されて同一付着応力時のすべり量が h/ℓ の小さなものほど大きくなるため、更にふし傾斜角を緩やかにし、押し開き力を大きくしているものと考えられる。

4. 結論

- (1) 割裂ひびわれ幅 w_n が増加すると、 $\tau-S$ 曲線、 $\sigma-S$ 曲線ともにすべり剛性が低下する。
- (2) ふし高さ・間隔比(h/ℓ)が小さいほど同一付着力に対する割裂力が大きくなる。
- (3) 割裂ひびわれ幅が大きいほど付着強度・最大割裂応力が低下し、同一付着応力に対する割裂応力も大きい。
- (4) 割裂力のピークは付着強度以降に生じ、最大付着強度の1.3~1.7倍となる。

参考文献

- 1) P.G.Gambarova, et al: Steel-to concrete bond after concrete splitting: test results, および constitutive laws and interface deterioration, Materials and Structures, 22, pp.35-47, pp.347-356, 1989
- 2) 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、13-2、pp.127-132、1991

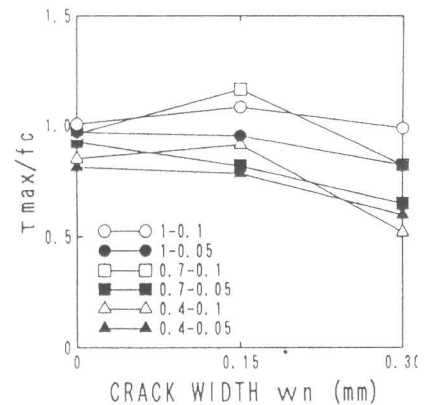


図-11 τ_{\max} と w_n との関係

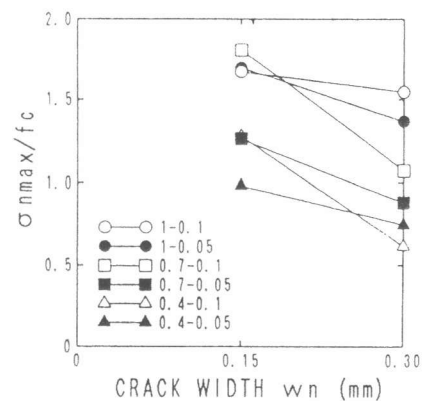


図-12 $\sigma_{n\max}$ と w_n との関係

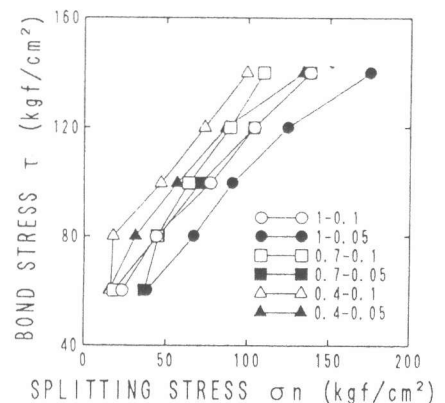


図-13 表面ふし形状の割裂力に対する影響