

[125] 横ふし1個のみを持つ異形鉄筋の付着特性に関する実験的研究

正会員 ○長友 克寛(高松工業高等専門学校)

正会員 角 徹三(豊橋技術科学大学建設工学系)

1. 研究目的

鉄筋コンクリート構造のひび割れ変形性状、耐力等を解析的に評価する場合、各種の材料特性を如何にモデル化するかが重要となるが、その中で鉄筋とコンクリート間の付着-滑り作用の果たす役割の大きいことが多くの研究者によって指摘されており、具体的にはボンドリンク要素等の形でモデル化されている。^{1),2)} このような付着解析モデルに与えるべき材料特性値は引き抜き試験等の付着試験より定めるのが通例であるが、これには種々の影響因子が複雑に係り合ってくるため、多くの場合経験的に決定されているのが実状である。しかも、通常の付着試験においては載荷端からある距離までの付着を断ち、あるいは無視し、付着の安定した領域での挙動を対象とすることが多いが、例えば鉄筋コンクリート部材のひび割れ開口の進展において、その原因となる鉄筋とコンクリートとの相対変位はひび割れ面近傍に比較的集中し、特に荷重増加に伴うよう状剥離の発生以降においては大半を占めることを考えると、載荷面をひび割れ面に想定し、この近傍域での付着性状を検証する必要性がクローズアップされてくる。^{2),3)}

著者等はこのような問題解明のため、まず横ふし1個のみを持つ異形鉄筋という単一エレメントを対象とし、その基本的な付着機構の実験的な再把握および解析的表現の可能性を見た上で通常の鉄筋の考察へと展開していく、という認識のもとに研究を行ってきた。本論文はその一環としてふし前面でのかみ合いに特に注目し、それに大きく関与すると考えられるふし形状・寸法の影響を再検討すると共に、合せてふしの載荷端からの位置の相異によるこの領域での付着耐力等の変化を観察することを目的としている。

2. 実験方法

供試体の名称・諸元を表-1に、供試体の形状・寸法および載荷方法を図-1に示す。直角横ふし1個のみを持つ鉄筋を作製し、そのふし前面の角度θ、ふし高さh、ふしの載荷端からの埋め込み長さおよびコンクリート圧縮強度f_cの相異による付着性状の変化を観察した。鉄筋には油を塗布し、ふし前面でのかみ合いのみによって付着力を伝達させるものとした。コンクリートの断面としては鉄筋

表-1 供試体および実験結果一覧

ジ ズ ナ ム	供 試 体 名	ふ し 角 度 θ (deg.)	ふ し 高 さ h (mm)	埋 み 長 L (mm)	コンクリート強度 圧縮 f _c (kg f/cm ²)		最大荷重 P _u (tf)	初期剛性 K _I (tf/mm)	破壊形式 *2
					圧縮 f _c	引張 f _t			
A	B A30-1.5-15	30	1.5	15	278	27	0.022	1.41	F
	B A30-1.5-30			30			1.800	1.20	F
	B A30-1.5-45			45			2.967	1.54	F
	B A30-1.5-60			60			3.320	1.58	S
B	B B45-1.5-15	45	1.5	15	305	30	0.683	3.79	F
	B B45-1.5-30			30			1.400	4.54	F
	B B45-1.5-45			45			2.400	1.78	S
	B B45-1.5-60			60			2.917	3.13	S
C	B C45-1.5-15	45	1.5	15	241	23	0.413	3.73	F
	B C45-1.5-30			30			1.119	8.50	F
	B C45-1.5-45			45			1.938	5.61	F
	B C45-1.5-60			60			2.767	2.69	S
D	B D60-1.5-15	60	1.5	15	331	32	0.444	2.38	F
	B D60-1.5-30			30			1.372	2.74	C
	B D60-1.5-45			45			2.300	2.27	C
	B D60-1.5-60			60			2.867	2.38	C
E	B E90-1.5-15	90	1.5	15	293	28	0.641	6.91	F
	B E90-1.5-30			30			1.386	7.09	C
	B E90-1.5-45			45			2.600	3.84	C
	B E90-1.5-60			60			3.360	12.50	C
F	B F45-1.5-15	45	1.5	1.5	318	30	0.625	4.37	F
	B F45-2.0-15			2.0			0.634	8.04	F
	B F45-2.5-15			2.5			0.544	10.84	F
	B F45-3.0-15			3.0			0.659	8.05	F
G	B G45-1.5-30	45	1.5	1.5	399	31	1.511	4.99	F
	B G45-2.0-30			2.0			1.525	8.21	F
	B G45-2.5-30			2.5			1.492	13.55	F
	B G45-3.0-30			3.0			1.950	8.16	F
H	B H45-1.5-45	45	1.5	1.5	313	29	1.800	4.37	S
	B H45-2.0-45			2.0			2.400	8.86	S
	B H45-2.5-45			2.5			2.761	10.35	S
	B H45-3.0-45			3.0			2.550	9.67	S
I	B I45-1.5-60	45	1.5	1.5	317	29	2.961	2.63	S
	B I45-2.0-60			2.0			3.384	13.97	S
	B I45-2.5-60			2.5			3.275	5.45	C
	B I45-3.0-60			3.0			3.686	6.35	C
J	B J45-1.5-75	45	1.5	1.5	339	30	3.923	3.89	S
	B J45-2.0-75			2.0			4.544	6.85	S
	B J45-2.5-75			2.5			4.350	22.24	S
	B J45-3.0-75			3.0			4.791	4.79	S

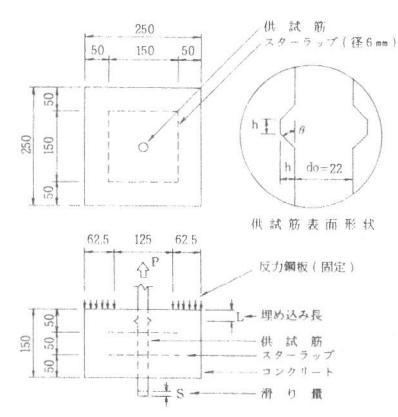


図-1 供試体形状・寸法および載荷方法(単位mm)

*1 BA30-1.5-15

*2 F:うとう状破壊, S:割裂破壊, C:コーナー破壊

まわりの拘束の比較的大きな場合を想定してある。

載荷は荷重制御による単調載荷である。反力は、既往の研究を参考にし、径 12.5 cm の円孔を有する反力鋼板を介することにより鉄筋表面から鉄筋外径の 2 倍よりも外側のコンクリートに作用するよう配慮した。滑りとしては鉄筋周囲のコンクリートの面外変形をも含めたものを対象とし、反力鋼板位置のコンクリート表面と鉄筋自由端との相対変位をダイヤルゲージ（精度 1/1,000 mm）で測定することにより求めた。²⁾

コンクリート配合は W / C = 60%，均質性を高め測定値のばらつきを押えるため骨材最大寸法は 5 mm とし、川砂と碎砂とを容積比 1 : 0.85 の割合で使用した。打設方向は鉄筋軸に直交方向であり、湿布養生 26 日、気中養生 2 日のうち実験に供した。

3. 実験結果および考察

実験結果の概要を表-1 に示す。図-2 は本実験で観察された破壊形式を 3 種類に大別したものである。しが小さい（15～30 mm）場合 θ の如何に係らず図 a のろうと状破壊を示す。しが大きく（45～75 mm）なってくると、 θ が小さい（30～45°）場合には図 b の割裂破壊、 θ が大きい（60～90°）場合には図 c の隅角部のせん断破壊へと移行していく傾向が見られ、後者においてはふし前面でのコンクリートの粉体化も観察された。

図-3 a, b には θ , h = 一定の場合の荷重-滑り関係を示してある。滑り挙動は L に大いに依存しており、材端近傍域における付着耐力低下の考慮の重要性が再認識される。初期滑り剛性 K_1 への L の影響に関しては今回の実験ではあまり明確ではない。 L の増加と共に K_1 も幾分増大するようにも読み取れるが、巨視的に見ればその変化は無視できるものである。 θ の K_1 への影響に関しては θ の増加と共に K_1 も増大する傾向にあるが、 $\theta = 30^\circ$ と 60° との間では有意な差は現れていない。

図-3 c, d には θ , L = 一定の場合の荷重-滑り関係を示す。図中、荷重の一時的な低下が見られるのは縦ひび割れの発生に対応している。

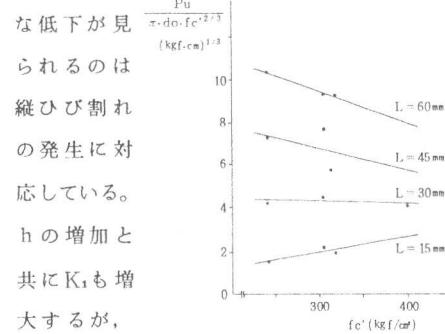


図-4 $P_u/\pi d_0 f_c^{2/3}$ - f_c 関係
($\theta = 45^\circ$, $h = 1.5 \text{ mm}$)

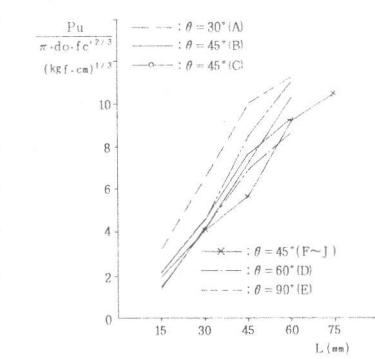


図-5 $P_u/\pi d_0 f_c^{2/3}$ - L 関係 ($h = 1.5 \text{ mm}$)

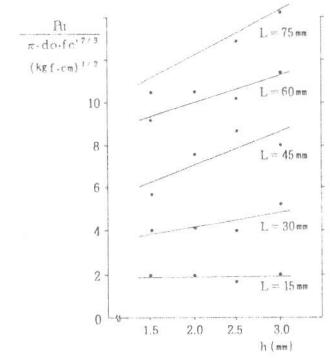


図-6 $P_u/\pi d_0 f_c^{2/3}$ - h 関係 ($\theta = 45^\circ$)

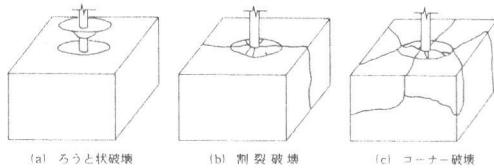


図-2 破壊状況

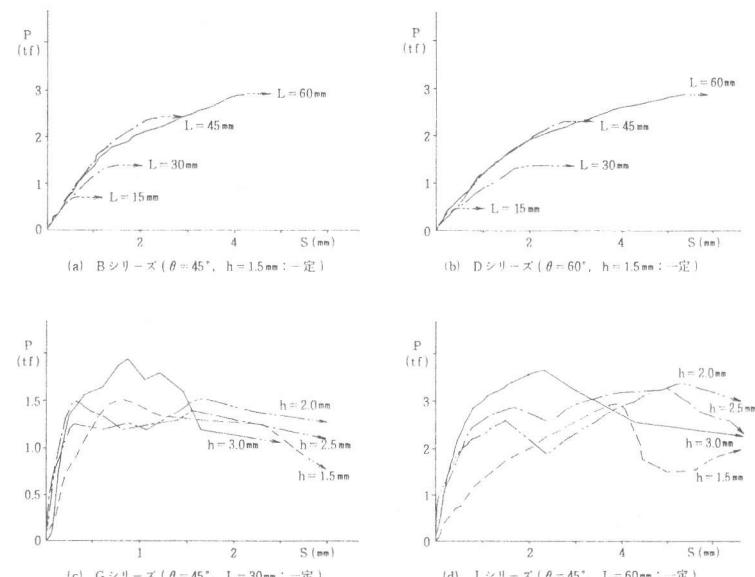


図-3 荷重-滑り曲線（実験結果）

を超えるとその傾向は鈍る。付着性能を抜け出し剛性という面で捉えた場合、このことは h がある限度を超えると付着性能は改善されないという既往の研究結果とも符合するものであり、JIS にある D22 筋のふし高さの上限は 2.2 mm という規定は載荷端近傍においても妥当なものと言える。

コンクリート強度の最大荷重 P_u への影響を調べるために P_u を幾つかの $f_{c'}$ 等の関数によって正規化することを試みた。その中から比較的良好な傾向の得られた $f_{c'}^{1/3}$ を用いた結果を図-4 に示す。 P_u を高めるため $f_{c'}$ を高めることは L が小さい場合には有効であるが、 L が大きくなるに従いその効果は減少していくことがわかる。

図-5 は正規化最大荷重 $P_u/\pi \cdot do \cdot f_{c'}^{1/3}$ (以後、耐力と記す) と L の関係を示している。 L の増加に伴い耐力は線形的に増大し、このことが直接適用できる訳ではないが L の関数として表現し得る可能性を示唆している。 L が 45 mm を超えると増大傾向は鈍り始め、破壊形式の遷移とを考え合せると載荷端から鉄筋径の 2 倍程度の範囲までが付着耐力劣化域と考えられる。 L が同一の場合、 $\theta = 90^\circ$ のものを除き、 θ の大きいものほど耐力は小さく出る。 $\theta = 90^\circ$ については付着機構を区別して捉える必要があろう。

図-6 には耐力と h の関係を示している。 h の増加に伴い耐力も増大し、特にその傾向は L の大きな位置ほど著しくなることがわかる。

4. 有限要素解析

今回得られた実験結果を解析的にどの程度まで表現できるかを検討するため、ろうと状破壊を起した BF45-1.5-15 および BG45-1.5-30 の供試体を対象とした有限要素解析を行った。その概要を表-2 に示す。表中、最大荷重 P_u とは要素破壊が急激に進行し数値計算が不安定になった時点の荷重を意味している。供試体は平面応力問題として図-7 のようにモデル化し、諸材料特性値としては表-3 に記したものを使用した。解析パラメータはふしの埋込み長 L 、ふし前面に沿うコンクリートとの相対滑りの有無、および反力面での摩擦の有無である。

鉄筋およびコンクリート要素には 4 節点アイソパラメトリック要素を用い、応力、ひずみ等の評価はガウス積分点にて行った。コンクリートの構成則には Darwin & Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性理論を用い、ひび割れ発生に際してはひび割れ直交方向の主引張応力を等価節点力として解放させた。

付着力の伝達は実験に合わせてふし前面でのかみ合いのみによってなされるものとし、完全付着はその位置での鉄筋要素の節点とコンクリート要素の節点とを共有させることにより、ふし前面に沿う滑りは両節点間に接合要素を挿入することにより表現した。図-8 は接合要素に持たせた応力-変位関係である。ふし面法線方向の剛性 k_n には十分剛な値を採用し、接線方向の剛性 k_t を弾性および剛塑性とした時の挙動の変化を見た。

図-9 は A ~ C シリーズの荷重-滑り曲線を比較したものである。何れのシリーズにおいても L の増加に伴う付着挙動の変化を定性的には良く表現している。ふし前面に沿う滑りを許容するこ

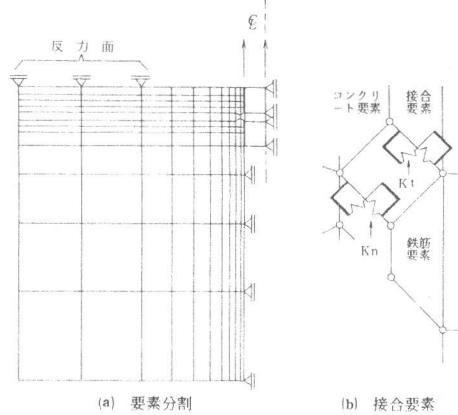


図-7 解析モデル ($\theta = 45^\circ$, $h = 1.5\text{mm}$, $L = 15\text{mm}$)

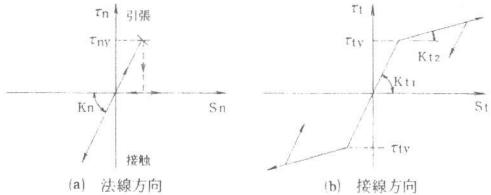


図-8 接合要素の応力-変位関係

表-3 材料特性

表-2 解析結果一覧

シリ ズ	供試体名	埋込み長 L (mm)	ふし前面 での滑り の有無	反力面 での摩擦 の有無	ひび割れ 発生荷重 $P_{cr}(f)$	最大荷重 P_u (tf)	P_u 計算値 $P_{u,exp}$ (tf/mm)	K_1 (tf/mm)	P (tf)
シリ ズ No.	記号 *1								
A	1 CA45-1.5-15	15	完全付着	自由	0.08	0.49	0.78	37.6	0.28
	2 CA45-1.5-30	30			0.07	0.91	0.60	47.0	0.41
B	3 CB45-1.5-15	15	彈性	自由	0.09	0.39	0.62	32.6	0.26
	4 CB45-1.5-30	30			0.11	1.00	0.66	35.4	0.34
C	5 CC45-1.5-15	15	剛塑性	自由	0.09	0.47	0.75	38.6	0.29
	6 CC45-1.5-30	30			0.10	1.00	0.66	36.0	0.34
D	7 CD45-1.5-15	15	剛塑性	完全拘束	0.09	0.43	0.69	40.6	0.32
	8 CD45-1.5-30	30			0.10	0.93	0.62	50.6	0.46

要素	材 料 特 性	() 内は $L = 30\text{mm}$
鉄筋 弾性係数 E_s	2.043×10^6	(kgf/cm ²)
ボアン比 ν_s	0.333	
初期弾性係数 E_{co}	$3.929(2.922) \times 10^8$	(kgf/cm ²)
ゴリ ボアン比 ν_c	0.260(0.200)	
シント 屈筋強度 f_c'	318 (399)	(kgf/cm ²)
クト 引張強度 f_t'	30 (31)	(kgf/cm ²)
法線方向剛性 K_n	1×10^6	(kgf/cm ²)
接合要素 第一剛性 K_{t1}	1×10^4	(kgf/cm ²)
第二剛性 K_{t2}	1×10^3	(kgf/cm ²)
向 降応力 τ_{ty}	5	(kgf/cm ²)

とはある程度全体の抜け出し量の増大につながるものであるが、低荷重域および高荷重域においてはひび割れ進展状況の相異から一概には結論付けられない。Puへの影響も同様であり、ふし前面での滑りの有無によりPuは変化するが特定の傾向は見出せない。反力面の摩擦考慮の影響については図示しなかったが、滑り剛性に関しては若干の増大となって現れ、Puに関しては逆に少し低下した。

図-10の荷重-滑り曲線は剛塑性パネを用いた解析結果と実験結果とを比較したものである。解析結果はかなり付着剛性を剛に評価していることがわかる。この原因としては線形要素の純曲げ変形に対する精度の悪さ、ひび割れの領域的な取り扱い、要素分割の粗さ等が考えられる。高次要素の使用、離散的なひび割れの導入を含めた体系的な検討の必要があろう。Puに関しては解析結果はかなり低めの評価となっている。L=30mmの場合にその傾向が強いことから、上記の原因に加えてスターラップの拘束効果を無視していることも一因と考えられる。

図-11は完全付着および剛塑性パネを設定した解析におけるひび割れ進展状況を比較したものである。完全付着の場合ひび割れは荷重の増加と共に広角度の扇状に、漸進的に進展するのに対して、剛塑性パネの場合狭い角度の領域に比較的集中し、しかもその進展は不連続的である。弾性パネについては剛塑性パネと同様の傾向を示した。別途行った軸対称弾性有限要素解析によるとふし角度θの減少に伴いふし前面領域の主応力方向はある一定方向に近づく傾向が見られた。これらのことと総合すると、ふし前面でのかみ合いが滑らかであるほど主応力方向は揃い、しかもひび割れの進展は不連続的かつ遅れ気味になると見えるよう。図-5に示したθの耐力への影響はこの現れと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) 載荷端からのふし位置の変化に伴い付着挙動は大きく変化し、材端近傍域での付着耐力劣化考慮の必要性を示している。
- (2) ふし埋め込み長Lの増加に伴い耐力は増加するが、L=45mmを超えるとその傾向は鈍る。初期滑り剛性への影響は明確ではない。
- (3) ふし角度θの増加に伴い耐力は減少するが、初期滑り剛性については増大する。ただし、θ=90°の場合の耐力は中間的値を示す。
- (4) ふし高さhの増加に伴い耐力は増大し、その傾向は埋め込み長の大きな位置ほど著しい。初期滑り剛性についても増大するが、h=2.5mmを超えるとその傾向は鈍る。
- (5) 耐力はコンクリート圧縮強度fc'の%乗により正規化可能である。
- (6) 付着耐力劣化域は載荷端から鉄筋径の約2倍程度の範囲と考えられる。
- (7) 線形要素を用い、ひび割れを領域的に取り扱った有限要素解析では耐力、滑り剛性等の定量的な評価は困難である。
- (8) ふし前面での滑りを考慮することは付着挙動についての有限要素解析結果にかなりの影響を与える。

参考文献

- 1) 藤井、森田:RC構造のせん断問題に対するコロキウム論文集、日本コンクリート工学会協会、昭和58年10月、pp.37-44
- 2) 角:同上、pp.53-60
- 3) 角、長友、中村、松永:第4回コンクリート工学年次講演会論文集、1982、pp.269-272
- 4) 国分、岡村:土木学会論文報告集、第202号、1972年6月、pp.103-113

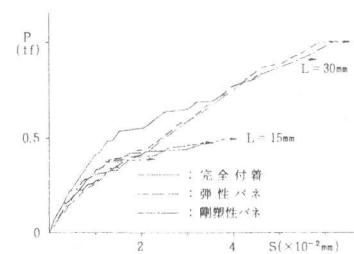


図-9 荷重-滑り曲線
(解析結果、θ=45°、h=1.5mm)

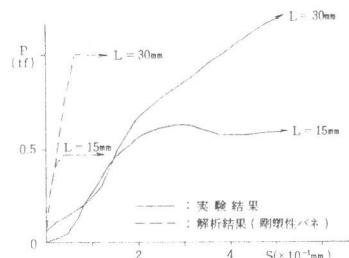
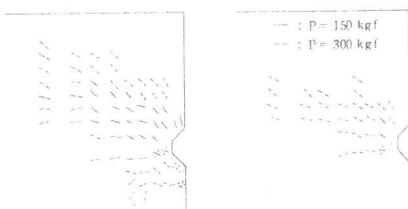


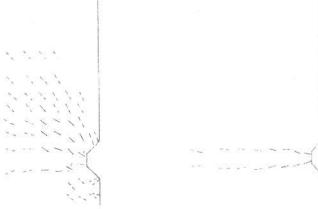
図-10 荷重-滑り曲線
(実験結果との比較、θ=45°、h=1.5mm)



(a) 完全付着 (L=15mm) : P=150 kgf
--- : P=300 kgf



(b) 剛塑性パネ (L=15mm) : P=300 kgf



(c) 完全付着 (L=30mm) : P=300 kgf
--- : P=600 kgf



(d) 剛塑性パネ (L=30mm) : P=600 kgf

図-11 ひび割れ進展状況