

横方向応力を受ける異形鉄筋の付着特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BOND CHARACTERISTICS OF DEFORMED BARS UNDER LATERAL STRESS

長友克寛*・角徹三**

By Katsuhiko NAGATOMO and Tetsuzo KAKU

Influences of lateral stress on bond characteristics were investigated by means of pull-out tests using deformed bars with only a single transverse rib. The test parameter used were : both compressive and tensile lateral stress level; distance from the loaded end to the rib; and rib height.

Test results showed that the relationships between the bond strength and the lateral stress were nearly linear, and that the bond strength increased with compressive lateral stress and remarkably decreased with tensile lateral stress. These trend appeared prominent with increasing distance from the loaded end to the rib. On the basis of the test results, the bond strength criterion under lateral stress was proposed.

Keywords : bond stress, slip, lateral pressure, pull-out test

1. 序論

鉄筋コンクリート中の異形鉄筋より付着力が伝達されると、周囲のコンクリートには、種々の条件によって横ふしからのろうと状ひびわれ、放射方向への割裂ひびわれ、横ふし前面のコンクリートの圧潰、横ふし頂面を連ねる面でのせん断ひびわれ等が発生する。これにより、周囲のコンクリートによる鉄筋の拘束は緩和され、両者間には相対ずれが生じる。このような作用は、常時荷重時のひびわれ分散性から終局荷重時の大変形性状まで、鉄筋コンクリート挙動のさまざまな領域での解析的評価において重要な意味をもつ。そこで、これを合理的な形で数値計算上考慮に入る目的で導入されたのが局部付着応力-すべり関係という概念である¹⁾。

局部付着応力-すべり関係に関しては、すでにさまざまな観点から数多くの研究²⁾がなされ、現在では基本的な付着機構への理解はかなり固まっている。しかし、定量化という面からは、そのモデル化を含めて未だ限定された条件下での評価にとどまっており、しかも、それ

らの評価誤差が解析挙動に及ぼす影響についても十分議論されているとはいがたい。定量化を困難にしている主原因がその影響因子の多さにあることは共通の認識であるが、それらの因子を実験的に調査・整理していく際の手法に検討の余地はないかという点についても意外と見過ごされている。

従来一般的に用いられてきた実験手法は、コンクリートは剛であると仮定し、鉄筋に貼付したひずみゲージより付着応力およびすべりを求めるというものであった。しかし、付着機構の原点に立ち戻った場合、局部付着応力-すべり関係というのは、鉄筋の材質・形状・寸法、鉄筋軸上の位置、鉄筋端の境界条件等のいかんにかかわらず、本質的には1つ1つの横ふしから周囲のコンクリートへの付着力の伝達と、それに伴って進行するコンクリートの損傷が1つの形として現われたものと考えることができる。すなわち、より一般性の高い定量化を試みるために、鉄筋に注目するよりは、むしろこれまで無視されてきたコンクリートに注目する方が得策ではないか、これが著者らの着眼点である。著者ら³⁾はすでにこのような考えに基づき、横ふし1個のみをもつ異形鉄筋を試作し、その横ふしの形状・寸法、すなわちコンクリートの付着力伝達面の形状・寸法の相違による付着特性の変化について検討を加えている。

* 正会員 工修 高松工業高等専門学校講師 土木工学科
(〒761 高松市勤使町355番地)

** 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
(〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

一方、コンクリートの損傷に着目した場合、横方向から応力が作用することにより、当然その進行には何らかの影響が現われるはずである。ところが、そのような横方向からの応力の影響について調べた研究は少なく、しかもその対象は圧縮応力作用下に限定されている。

Untrauer ら⁴⁾および Robins ら⁵⁾は、引き抜き試験体等を用いて圧縮横方向応力の付着耐力、破壊形式等への影響を調べている。Shirai ら⁶⁾は、両引き試験体を用い、それらに加えてひびわれ分散性や弾性論的な考察も行っている。しかし、いずれも部材全体での平均的な議論が主体であり、局部付着応力-すべりレベルでの検討は不十分である。Gambarova ら⁷⁾は、割裂ひびわれをあらかじめ入れ、そのひびわれ幅一定条件のもとでの引き抜き試験を実施しているが、横ふしのくさび作用により鉄筋軸直交方向に発生する支圧力の変化を調べたものであり、本研究とは対象とする横方向応力の意味が異なる。

局部付着応力-すべり関係への圧縮横方向応力の影響を調べたものとしては、林・森本ら^{8),9)}の柱・はり接合部

を対象とした研究が注目されるが、定性的な議論にとどまっている。その他、はり型試験体等のように間接的・部分的に横方向応力の加わる条件での実験研究は数多くなされているが、横方向応力に特別の注意は払われていない。

本研究は、以上のことと踏まえ、コンクリートへの付着力伝達とそれに伴う損傷の進行に着目した研究の一環として、引張・圧縮両横方向応力の影響を引き抜き試験体を用いて実験的に明らかにすることを目的とするものである。なお、実験では、基本的要素として横ふし1個のみをもつ異形鉄筋を使用し、主ひびわれ面を想定した載荷面からその横ふしまでの距離の相違による横方向応力の影響の変化についても合わせて検討を加えた。

2. 横方向応力を受ける異形鉄筋の引き抜き試験

(1) 実験方法

実験計画および実験結果の概要を表-1に示す。

表-1 実験計画および実験結果

シリーズ名 No.	供試体名 記号 *1		ふし位置 L (mm)	横方向応力 P (MPa)	モルタル強度 圧縮 fc 引張 ft	*3 最大荷重 Pu (kN)	*4 無次元化 付着強度 τ_{nu}	*5 規格化 付着強度 α	*6 破壊形式 C SC S CS
	No.	記号 *1							
A	1	C15-0	15	0 -4.9 -9.8	23.7	2.5	4.4 7.8	0.87 1.55	0.14 0.16 0.25
	2	C15-1							C
	3	C15-2							C
B	4	C30-0	30	0 -4.9 -9.8	28.9	2.6	15.8 16.1 17.1	2.83 2.88 3.06	0.45 0.46 0.49
	5	C30-1							C
	6	C30-2							C
C	7	C30-0'	30	0 -4.9 -9.8	27.0	2.8	13.0 14.0 14.3	2.42 2.60 2.65	0.38 0.41 0.42
	8	C30-1'							C
	9	C30-2'							C
D	10	C45-0	45	0 -4.9 -9.8	28.4	2.7	26.7 29.0	4.83 5.14 5.37	0.77 0.82 0.85
	11	C45-1							SC
	12	C45-2							SC
E	13	C60-0	60	0 -4.9 -9.8	28.4	2.7	33.7 36.1 38.2	6.10 6.53 6.92	0.97 1.04 1.10
	14	C60-1							SC
	15	C60-2							SC
F	16	C75-0	75	0 -4.9 -9.8	36.5	2.6	56.7 67.0 74.0	9.05 10.69 11.81	1.44 1.69 1.87
	17	C75-1							SC
	18	C75-2							SC
G	19	T15-0	15	0 -0.7 -1.5	29.3	2.6	4.8 4.1 3.4	0.86 0.73 0.60	0.14 0.12 0.10
	20	T15-1							C
	21	T15-2							C
H	22	T30-0	30	0 -0.7 -1.5	28.9	2.4	15.8 14.4 11.5	2.83 2.59 2.06	0.45 0.41 0.33
	23	T30-1							S
	24	T30-2							S
I	25	T45-0	45	0 -0.7 -1.5	29.3	2.8	29.3 27.7 17.5	5.21 4.93 3.11	0.83 0.78 0.49
	26	T45-1							SC
	27	T45-2							SC
J	28	T60-0	60	0 -0.7 -1.5	28.9	3.0	47.8 36.9 22.1	8.58 6.62 3.97	1.36 1.05 0.63
	29	T60-1							SC
	30	T60-2							SC
K	31	T75-0	75	0 -0.7 -1.5	29.4	2.6	47.9 28.5	8.54 10.16 5.08	1.35 1.61 0.81
	32	T75-1							SC
	33	T75-2							SC

*1 (一例) T45-1
 |
 | --- 横方向応力のレベル
 | --- 圧縮時 1 : -4.9 MPa , 2 : -9.8 MPa
 | --- 引張時 1 : 0.735 MPa , 2 : 1.47 MPa
 | --- 無載荷時 0

*2 Cシリーズのみふし高さ h = 2.5 mm, 他のシリーズは全て h = 1.5 mm

*3 φ10×20mm 標準円柱供試体による圧縮および割裂引張強度

*4 $\tau_{nu} = P_u / (\pi D l r / f_c)$

*5 $\alpha = \tau_{nu} / \tau_{nu}(p=0, L=60\text{mm})_{av.} = \tau_{nu} / b \tau_{nu}$

*6 C : ろうと状破壊 , S : 割裂破壊 , SC : SとCの複合破壊 (図-3 参照)

a) 供試体 供試体の形状・寸法を図-1に示す。供試筋として直角横ふし1個のみをもつ鉄筋（内直径=22 mm, 以後これを鉄筋径 D とみなす。ふし高さ h =1.5 mm）を試作し、載荷端から横ふしまでの距離 L を15, 30, 45, 60, 75 mm の5種類に変化させ、各 L における圧縮・引張両方向応力（以後単に圧縮・引張応力と記す）の付着特性に与える影響を調べた。ここに、 L はD22 鉄筋の標準的な横ふし間隔（約15 mm）の整数倍を想定している。付着力伝達機構を横ふし前面での機械的かみ合いのみに限定するため、供試筋表面には油を塗布し、摩擦の影響を極力除去した。引張応力の影響を調べる実験では、図-1に示すように供試体側面に六角ボルト（M6）を片面につき24本、計48本埋め込み、これをナットで載荷板と連結し、図-2(b)に示すような方法で応力を与えた。圧縮応力載荷時の供試体では、図-2(a)のように直接応力を加えた。

供試体の名称・諸元は表-1に示すとおりである。AからKまでの11シリーズについて、各シリーズ3体、合計33体を実験に供した。なお、Cシリーズのみ $h=2.5$ mmとし、ふし高さの影響を調べた。

b) 使用モルタルの配合 供試体には、均質性を高めるため AE モルタルを使用した。水セメント比は 50 %, 単位水量は 194 kg である。骨材の最大寸法は 5 mm とし、碎砂を海砂に対して容積比 1 : 0.85 の割合で混合したもの用いた。圧縮強度およびスランプの平均値はそれぞれ 29.0 MPa および 7 cm であった。供試筋は鋼製型枠中に水平に配置し、それに対して鉛直上方向より一体打ちにてモルタルを打設した。実験は湿布養生 26 日、気中放置 2 日の材令 28 日にて実施した。

c) 載荷・測定方法 載荷・測定方法を図-2に示す。油圧ジャッキにより載荷板等を介して所定の横方向応力を作用させたのち、中空手動油圧ジャッキを用いて

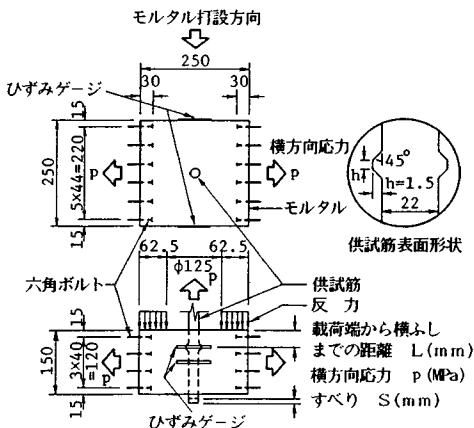


図-1 供試体の形状・寸法（単位：mm）

引き抜き試験を行った。引き抜き荷重 P は、供試筋端部に施したねじ切り部とテンションバーとをカップラーで連結することにより与えた。その反力は、径 12.5 cm の円孔を有する鋼板を用い、供試筋表面から約 $2D$ よりも外側のモルタル部分に圧縮力として作用させた。この円孔径は、著者ら³⁾の既往の研究結果を参考に、鉄筋周囲のモルタルの面外変形ができる限り拘束しないよう配慮して決定したものである。

荷重 P を中空ロードセルにより、供試筋自由端変位 S を変位計によりそれぞれ測定し、付着力-すべり関係とした。すべりは鉄筋周囲のモルタルの面外変形をも含んだものを対象としている。横方向応力作用面に直交する2面の横ふし位置および高さ中央位置にはひずみゲージを貼付し、横ふしのくさび作用によるリングテンションの変化を調べた。

横方向応力の大きさ p は、圧縮時 4.9 MPa (50 kgf/cm²), 9.8 MPa (100 kgf/cm²), 引張時 0.7 MPa (7.5 kgf/cm²), 1.5 MPa (15 kgf/cm²), および応力ゼロの 5 種類を設定した。ここに、圧縮応力はモルタル全断面積に対するもの、引張応力はそれから鉄筋の断面欠損を引いた純断面積に対するものであり、圧縮応力の大きさはモルタル圧縮強度の約 1/6 および 1/3、引張応力の大きさはモルタル引張強度の約 1/4 および 1/2 にそれぞれ対応させている。

横方向応力の載荷に際しては、その等分布性とか、圧縮時の載荷板と供試体との端面摩擦の影響等の問題が出てくる。本実験では、①横方向応力載荷面に鋼製型枠側面の平坦な面を利用する、②平滑な載荷板を使用する、

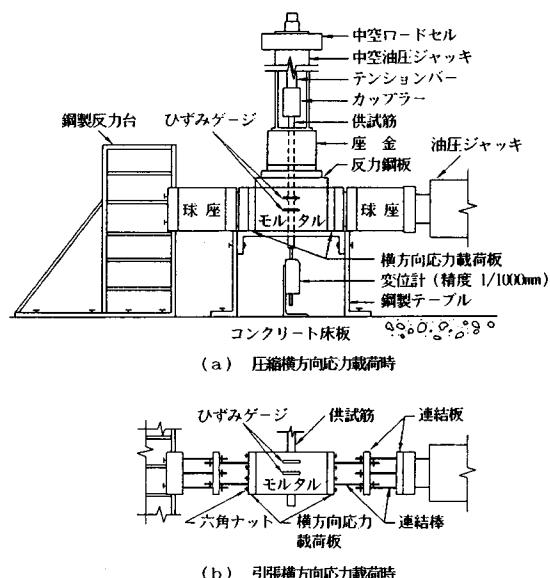


図-2 戴荷・測定状況

③リングテンション測定用の4枚のひずみゲージの読みをモニターして偏心載荷を防ぐ、といった配慮を行った。当然これだけでは不十分であり、本実験で設定した横向応力は厳密には断面での平均値としての意味をもつに過ぎない。

(2) 実験結果およびその考察

a) 破壊形式 本実験で観察された破壊形式を3種類に大別し図-3に、各供試体の破壊形式を表-1の最右欄に示す。横方向応力 $p=0$ の場合、載荷端から横ふし位置までの距離 L が小さい ($L \leq 30 \text{ mm}$) 範囲では、横ふしよりろうと状の内部ひびわれが発生しそれが載荷面に至る図(a)のろうと状破壊を示した。 L が大きくなると、割裂ひびわれを伴いながら横ふし前面のモルタルキーの圧潰およびせん断ずれにより大きなすべりを示したのち、最終的にろうと状ひびわれにより破壊する図(b)の複合破壊へと移行した。割裂ひびわれは、ブリージングの影響を受けモルタル打設方向に発生することが多く、本数は2~3本で、供試体を貫通する場合としない場合とがあった。圧縮応力を載荷した場合、その拘束効果は L が大きくなるほど明確になり、 $L=45\sim60 \text{ mm}$ において図(b)の複合破壊から図(a)のろうと状破壊への移行がみられた。複合破壊における割裂ひびわれは、既往の研究^{4),5)}と同様圧縮応力載荷方向に発生した。これは、圧縮応力によりそれと直交する面におけるリングテンションが打ち消されるためである。

引張応力を載荷した場合、 $L \geq 30\text{ mm}$ において図(c)の割裂破壊を示した。割裂ひびわれは1本であり、当然ながら引張応力に直交する面方向に発生した。

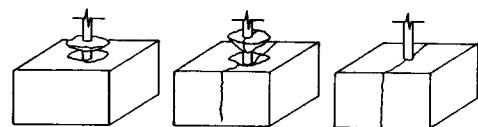
b) 付着力（荷重）-すべり関係 図-4(a)に、横方向応力 $p=0$, $h=1.5\text{ mm}$ の場合の付着力-すべり関係を示す。ここに各曲線は、できる限りモルタル強度の等しいものを選んである。ふし位置 L の増加に伴って付着挙動は大きく変化し、 $L \geq 60\text{ mm}$ では $S=10\text{ mm}$ 前後の大すべりに至るまで付着力が増加している。載荷端ひいては主ひびわれ近傍域とそれより内部の領域とは、付着特性を区別して取り扱う必要性があろう。図中の細線は、 $L=75\text{ mm}$ の場合の実験曲線の最大荷重点と原点とを結んだものである。各曲線の最大荷重点はほぼこの細線上にあり、これは L と付着強度およびそのときのすべりとがほぼ直線関係にあることを意味しており注目される。

図-4(b)には、 $L=30\text{ mm}$, $h=1.5\text{ mm}$ の場合の付着力-すべり関係を示す。付着力の増加とともにすべりもしだいに増加し、ある付着力（ここでは $P=11\sim16\text{ kN}$ ）を過ぎるとその増加傾向は一層顕著となる。この付着力は、割裂ひびわれ、ろうと状内部ひびわれ、横ふし前面のモルタルの圧潰・せん断などの発生と対応して

いるものと考えられる。引張応力時には、この後急激に破壊に至るが、横方向応力 $p=0$ および圧縮応力時には、さらに付着力増加を示したのち大すべりを経験して破壊に至ることが多かった。なお、Untrauer ら⁴⁾は、圧縮横方向応力の増加とともに付着強度時のすべりも増加することを報告しているが、本実験でもそのような傾向がみられた。

c) 付着強度の定義 付着応力 τ (MPa) をモルタル圧縮強度の平方根 $\sqrt{f'_c}$ (MPa) で除したものを無次元化付着応力 τ_n として、

で定義する。この際、最大荷重 $P = P_u$ 時の τ_n を無次元化付着強度として τ_{nu} で表示する。これは、モルタル引張強度 f_t がモルタル圧縮強度 f_c' の平方根 $\sqrt{f_c'}$ （単位は応力 MPa とする）に比例するという考えに基づき、モルタル強度の違いによる付着強度の変化の影響をできる限り小さくして議論しようという狙いによるものである³⁾。なお、本実験では横ふし 1 個のみの鉄筋を使用し



(a) ろうと状破壊:C (b) 複合破壊:SC (c) 割裂破壊:S

图—3 破坏形式

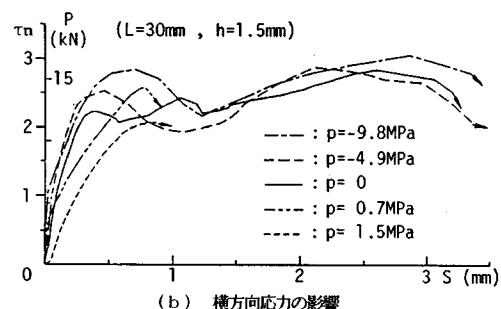
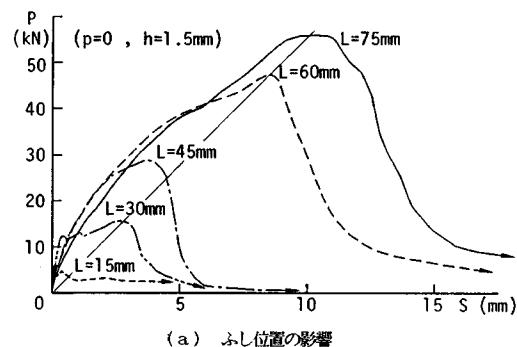


図-4 付着力-すべり関係

ているため、便宜的にD22鉄筋の標準的な横ふし間隔 $l_t=15\text{ mm}$ を用いて付着応力の計算を行った。

図-5は、今回の実験と同一の供試体 ($p=0$, $h=1.5 \text{ mm}$) を用いて、今回のものも含めて著者らがこれまでに実施した合計 33 体の実験について、無次元化付着強度 τ_{nu} とふし位置 L との関係を示したものである。なお、これ以後、最大荷重到達以前に横ふし純間隔 (10.5 mm と仮定) に等しいすべりを生じた場合には、 τ_{nu} の代わりにその時点での無次元化付着応力 τ_n を用いることにする。これは、図-4(a) に示したように L の大きい位置では最大荷重時にかなり大きなすべりを伴うが、今回の供試体では横ふし前面のモルタルキーの長さ ($\approx L$) が実際よりも大きいこと等を考慮に入れると、付着強度を議論するとき、鉄筋横ふし純間隔 (今回の場合 10.5 mm) 程度の大きいすべりが生じたときには付着破壊とみなしても十分であろう、という考えに基づくものである。今回の場合には、 $L=75 \text{ mm}$ の供試体で最大荷重以前に $S=10.5 \text{ mm}$ に到達した。図-5よりわかるることは、 L の増加とともに τ_{nu} もほぼ直線的に増加するが、 $L=60 \sim 75 \text{ mm}$ よりも部材内部においては、 τ_{nu} はすべりにより規定されて頭打ちになってしまうということである。そこで、 $L=60 \text{ mm}$ における τ_{nu} の平均値 ($\bar{\tau}_{nu}=6.31$) を 1 とした正規化付着強度 α を新たに次式で定義し、以下の議論を進める。

なお、この 60 mm (約 3D) という値は、主ひびわれ面近傍での付着強度劣化域長に対応しており、林ら¹⁰⁾の実験結果ともほぼ一致する。また、基準とした τ_{nu} についても、モルタル圧縮強度を $f'_c = 29.4 \text{ MPa}$ とし、横ふし前面のモルタルキーへの支圧応力 f_r およびせん断応力 f_s の f'_c に対する比を計算すると、それぞれ $f_r/f'_c = 11$ 、 $f_s/f'_c = 1$ となり、Rhem¹¹⁾の実験結果と符合する。

d) 付着強度へのふし位置の影響 図-6に、正規化付着強度とふし位置との関係を示す。横方向応力が同

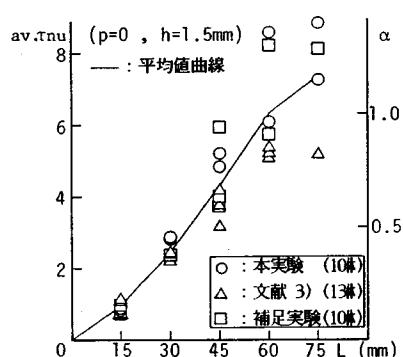


図-5 無次元化付着強度-ふし位置関係（過去の実験結果）

一であれば、付着強度は L の増加とともにほぼ直線的に増加する。

図-7には、 $L \leq 60\text{ mm}$ のデータについて、各ふし位置ごとに正規化付着強度を横方向応力の関数として $\alpha = \beta_p \cdot p + \gamma_p$ の形に直線近似した場合の勾配 β_p を示している。横方向応力の効果は、 L が大きくなるほど、そして圧縮よりも引張の方が大きくなることがわかる。

e) 付着強度への横方向応力の影響 図-8に、正規化付着強度と横方向応力との関係を示す。なお、以後横軸に横方向応力をとる場合には、圧縮応力側と引張応力側とで縮尺を変えて表示する。 L が同一であれば、圧縮応力および引張応力の増加とともに付着強度はそれぞれほぼ直線的に増加および減少する。特に、引張応力

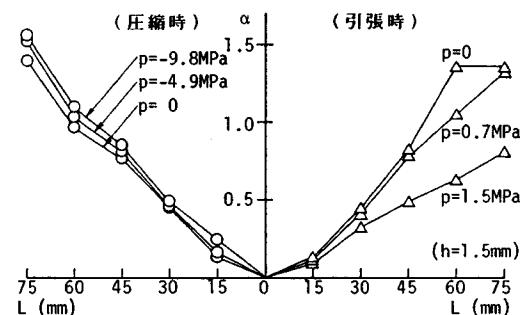


図-6 正規化付着強度-心上位置関係

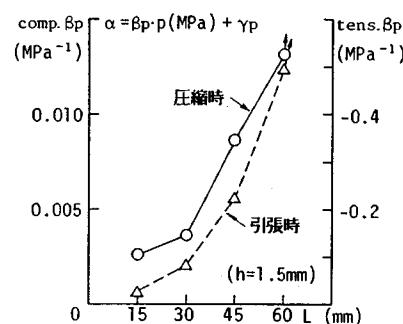


図-7 ふし位置の正規化付着強度への影響

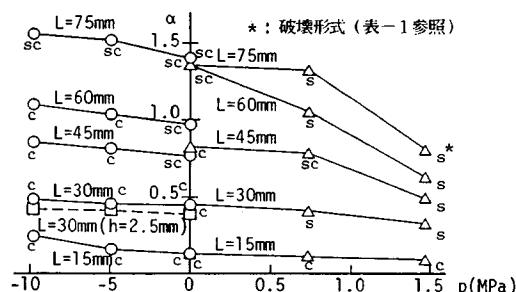


図-8 正規化付着強度-横方向応力関係

時の場合その傾向が顕著である。

図-9には、各横方向応力ごとに正規化付着強度をふし位置の関数として $\alpha = \beta_L \cdot L$ の形に直線近似した場合の勾配 β_L を示している。圧縮および引張応力の増加とともに、 β_L はほぼ直線的にそれぞれ増加および減少し、その傾向は引張応力の方が顕著である。引張応力時の曲線を延長したものと横軸との交点がモルタル引張強度にほぼ等しいことは注目される。

Untrauer ら⁴⁾および Robins ら⁵⁾の実験より、横方向応力 $p=0$ の場合の最大荷重に対するコンクリート圧縮強度の約 1/3 の圧縮横方向応力 (9.8 MPa) 載荷時の大荷重の比を求めるとき、それぞれ 1.94 および約 2.0 であった。両者がかなり大きな耐力増加を示しているのに対して、本実験では、 $L=75$ mm においても、1.30 であった。この相違の最大の原因としては、前二者がそれぞれ 15 cm や 10 cm の定着長をもつ鉄筋の引き抜き試験であり、付着応力の再分配が可能であるのに対して、本実験は横ふし 1 個のみの鉄筋に対する実験であることが挙げられるが、それだけでこれだけの差が出るかどうかについては、さらに詳細な検討が必要である。

Robins ら⁵⁾は、圧縮強度 f'_c の約 1/3 以上の圧縮横方向応力になると横ふし頂面を連ねる面でのせん断破壊が生じ付着強度は頭打ちになるという興味深い結果も報告している。本実験の付着力とすべりの関係からみても十分考えられ得る傾向であり、これについても、多数ふし鉄筋を用いた実験により検証を行う必要があろう。

なお、Untrauer ら⁴⁾は、付着強度は圧縮横方向応力の平方根と直線関係にあるという指摘を行っているが、Robins らおよび著者らの実験結果では、付着強度は圧縮横方向応力そのものとほぼ直線関係にあり、積極的に圧縮横方向応力の平方根を用いなければならない理由は見当たらなかった。

f) 付着応力-すべり剛性 図-10 に、各ふし位置におけるすべり $S=0.2$ mm 時の無次元化付着応力 τ_n と横方向応力との関係を示す。 τ_n は $S=0.2$ mm における割線付着応力-すべり剛性に対応することになる。同図より、圧縮応力時には、 L のいかんにかかわらず、応

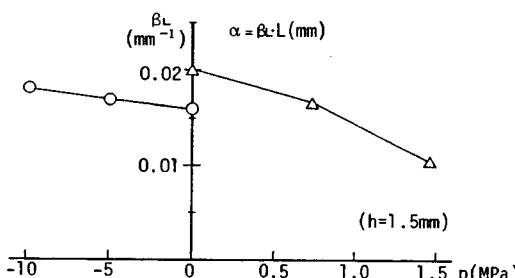


図-9 横方向応力の正規化付着強度への影響

力の増加とともにすべり剛性もほぼ直線的に増加することがわかる。引張応力時には、一見しただけでは応力の影響は明確ではないが、最小二乗法による直線近似によれば、応力の増加とともにすべり剛性は低下傾向にあった。横方向応力 $p=0$ の場合の τ_n を 1 とし、

$$\frac{\tau_n(S=0.2\text{mm})}{\tau_n(S=0.2\text{mm}, p=0)} = k \cdot p + 1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

と置いた場合の係数 k の平均値を計算すると、圧縮応力時 $k=-0.0876$ 、引張応力時 $k=-0.729$ であった。

g) モルタル表面ひずみ 図-11 に、ふし位置 $L=30$ mm (B, H シリーズ) の場合の無次元化付着応力と供試体側面のふし位置におけるモルタルひずみ ϵ_c との関係を示す。 ϵ_c は、横ふしのくさび作用によって鉄筋周囲のモルタルに発生するリングテンションに対応している。図-4(b) の付着力-すべり曲線の折れ曲がり点に対応する付着応力より ϵ_c は急増し引張応力時にはそのまま破壊に至るが、圧縮応力時および横方向応力 $p=0$ の場合には付着応力の低下とともに再び減少する。付着応力がゼロになども、内部ひびわれ面での骨材のかみ合いにより ϵ_c は完全にゼロには戻らず、その傾向は圧縮応力時よりも横方向応力 $p=0$ の場合に顕著である。図-3 に示した破壊形式の変化は、こうと状ひびわれの載荷端への到達とこのリングテンションの引張限界値への到達のどちらが先行するかによるものである。

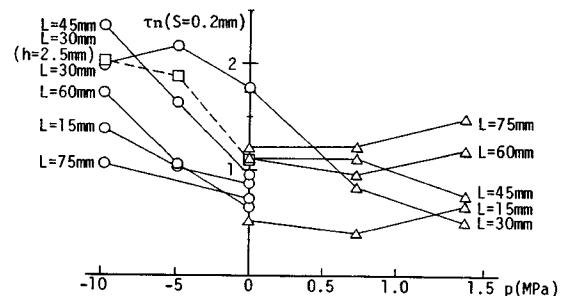


図-10 横方向応力の付着応力-すべり剛性への影響
($S=0.2$ mm 時)

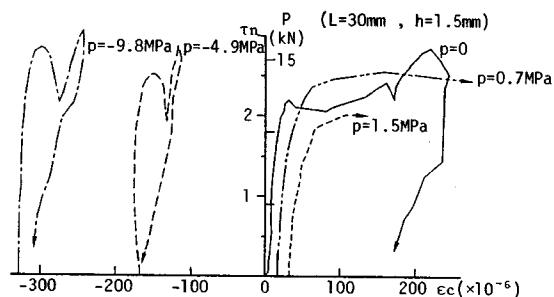


図-11 横方向応力のモルタル表面ひずみへの影響
($L=30$ mm 時)

図-12には、G～Kシリーズの横方向応力 $p=0$ の供試体における無次元化付着応力とふし位置のモルタルひずみとの関係を示してある。ふし位置が小さいほどモルタルひずみは増加しやすく、一般的には、割裂ひびわれは載荷端より発生しやすいことを示唆している。ふし位置が 60 mm を越えると、曲線はほぼ一致してくる。リングテンションはすべりの増大に伴って増大するものと考えられるから、この図はふし位置が大きいほどすべりにくくなることを示すものともいえるが、このことは付着力-すべり曲線にはそれほど明確には現われなかった。

h) ふし高さの影響 図-8 および図-10 には、C シリーズ ($L=30$ mm, ふし高さ $h=2.5$ mm, 圧縮横方向応力載荷時) の実験結果も合わせて表示してある。これによれば、 h の増加は付着強度、付着応力-すべり剛性いずれの増加にもつながっていない。既往の研究³⁾によれば、D22 鉄筋の有効ふし高さは最大 2.2 mm 程度であることが報告されており、このことは横方向応力載荷時にもあてはまることがある。

3. 付着強度算定式の提案

本章では、2. で述べた実験結果をもとに、一定横方向応力載荷下における付着強度算定式の誘導を行う。

図-5 および図-6 より、横方向応力が同一であれば、正規化付着強度とふし位置との関係はほぼ原点を通る直線とみなすことができる。そこで、まず横方向応力 $p=0$ の場合について、これを図-13(a) のようにモデル化する。載荷端からある距離以上部材内部に入ると無次元化付着強度は一定値 k_1 になるものとみなし、その境界までの距離を付着強度劣化域長 l_{bd} とよぶことにする。一般に、鉄筋径とともにその横ふし高さおよび横ふし間隔は直線的に大きくなるため、鉄筋径と l_{bd} との間には何らかの関係があるはずである。ここでは、林ら¹⁰⁾の研究を参考に、 l_{bd} を鉄筋径の倍数、すなわち $l_{bd}=D/k_2$ で表わすことにする。正規化付着強度 α は、 $\alpha=\tau_{nu}/k_1$ で表わされるから、これらより、横方向応力無載荷時の付着強度劣化域における無次元化付着強度 τ_{nu} の算定式

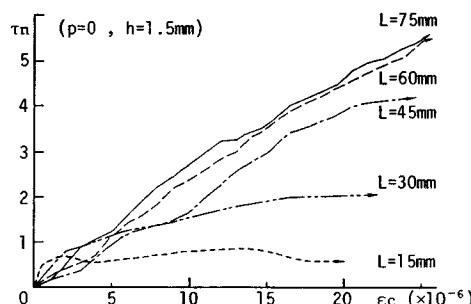


図-12 ふし位置のモルタル表面ひずみへの影響 ($p=0$ 時)

は次式となる.

ただし、 $L > D/k_2$ ならば $L = D/k_2$

本実験では、 l_{bd} は60~75 mmの間にあると考えられ、簡単のため3Dを採用する。図-5の曲線を直線近似し、 $L=3D$ における τ_{nu} を外挿することにより、 k_1 、 k_2 が次のように得られる。

次に、図-9に示した $\alpha = \beta_L \cdot L$ と置いたときの勾配 β_L と p との関係を、図-13(b) のように直線でモデル化する。ここに、縦軸 k_3 は $p=0$ のときの値が 1 となるよう基準化したものである。圧縮応力載荷時の線の勾配を k_4 で表わし、その拘束効果の上限を Robins ら⁵⁾の研究に基づきコンクリート圧縮強度 f'_c の $1/3$ と仮定する。引張応力載荷時の線と横軸との交点を、近似的にコンクリート引張強度 f_t に等しいと置くと、線の勾配 k_5 は自動的に $k_5 = -1/f_t$ となる。求める横方向応力載荷時の無次元化付着強度算定式は、式(4)にこの図(b)で与えられる係数 k_3 を掛け合わせることにより、次式で表わされる。

ここに、圧縮時： $k_3 = k_4 \cdot p +$

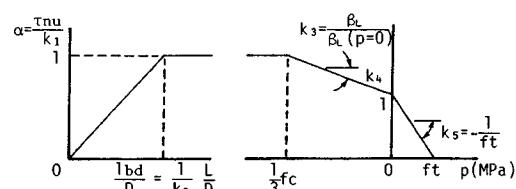
引張時： $k_3 = k_5 \cdot p +$

ただし、 $p < f_c/3$ のとき、 $p = f_c/3$

本実験において、 k_4 については図-9に示した結果を直線近似することにより、 k_5 については f_t としてA-Kシリーズの平均値 2.7 MPa を用いることによりそれぞれ計算すると、次のようになる。

本算定式は、部材内部の安定領域における付着強度、付着強度劣化域長、横方向応力の影響の3つを、係数 $k_1 \sim k_3$ を通してそれぞれ独立に考慮することができる点に大きな特徴がある。

図-14は、 τ_{nu} の実験値と式(6)を用いた計算値との比較を行ったものである。実験値と計算値との比の平均値は1.00と良好であり、特に圧縮応力時には、両者は非常によく一致している。引張応力時において実験値が大きく出ているのは、今回得られた付着強度の実験値



(b) 横方向応力の付着強度への影響

図-13 付着強度モデル

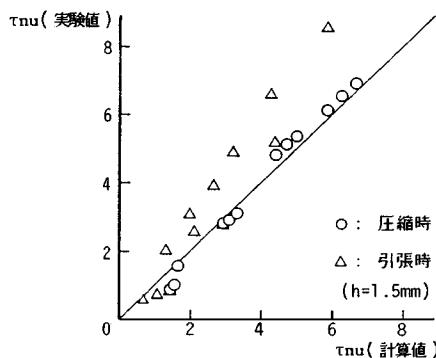


図-14 無次元化付着強度の実験値と計算値との比較

が、図-5に示した過去の実験結果の平均値から大きい方にかなりはずれているためである。

著者³⁾らは、すでに横方向応力のない場合について、横ふし1個のみの鉄筋の実験結果をその変形特性に利用したせん断ばね系付着モデルを提案し、多数ふし鉄筋を用いた引き抜き試験体への適用を試み、良好な結果を得ている。その際、付着応力-すべり関係として $\tau_n \cdot S/D$ の形の表現を採用することにより、同一横ふし形状の鉄筋に対しては、鉄筋径およびコンクリート強度の影響を組み込めることも併せて示している。これらのこととは、ある横ふし形状の鉄筋に対して、部材内部の安定領域における無次元化付着強度 k_1 が与えられさえすれば、このようなばね系のモデルに今回の式(6)を導入することにより、さらに鉄筋周囲のコンクリートの応力状態をも考慮できる、より一般性の高い付着モデルの構築が可能であることを意味している。このことについては、引き続き実験・解析の両面から検証していく予定である。

4. 結 論

横ふし1個のみをもつ異形鉄筋を用い、圧縮・引張両横方向応力下での引き抜き試験を実施し、横方向応力の付着特性への影響について調べた。得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

(1) 付着強度は、載荷端から横ふしまでの距離が大きくなるにつれほぼ直線的に増加する。その増加傾向は、圧縮横方向応力の増加および引張横方向応力の減少とともに直線関係にある。

(2) 初期付着応力-すべり剛性は、圧縮横方向応力の増加および引張横方向応力の減少とともに増加する

が、引張横方向応力の影響はそれほど明確ではない。

(3) 付着力-すべり曲線のすべり急増に対応して、横ふしのくさび作用に伴うリングテンションも急増する。

(4) 横方向応力が作用する場合をも含めた鉄筋の抜け出し解析に資するため、本実験結果をもとに、一定横方向応力載荷下における付着強度算定式を提案した。

本研究の一部は昭和62年度文部省科学研究費補助金によるものである。ここに関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 森田司郎ほか：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、第131、132号、pp.1~8、1~6、昭和42年1、2月。
- 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着応力-すべり関係に関する考察、JCI-C 5、pp.37~44、1983年10月。
- 長友克寛・角徹三：横ふし1個のみをもつ異形鉄筋の付着特性に関する研究、土木学会論文集、第372号/V-5、pp.177~186、1986年8月。
- Untrauer, R. E. and Henry, R. L. : Influence of normal pressure on bond strength, Journal of ACI, Vol. 62, pp.577~585, May 1965.
- Robins, P. J. and Standish, I. G. : Effect of lateral pressure on bond of reinforcing bars in concrete, Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, pp.262~271, June 1982.
- Shirai, N., et al. : Cracking and bond behaviors of reinforced concrete tensile members under lateral pressure, Transactions of JCI, Vol. 4, pp.341~348, 1982.
- Gambarova, P. G. and Karakoc, C. : Shear-confinement interaction at the bar-to-concrete interface, Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, pp.82~96, June 1982.
- 森本敏幸ほか：押込み力と引抜き力を同時に受けるはり主筋の付着性状に関する実験研究、日本建築学会論文報告集、第322号、pp.52~63、昭和57年12月。
- 林静雄ほか：柱はり接合部内に通し配筋されたはり主筋の付着性状に関する実験と解析、日本建築学会構造系論文報告集、第357号、pp.101~111、昭和60年11月。
- 林静雄ほか：ひびわれ近傍における異形鉄筋とコンクリートの付着性状に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集、第348号、pp.86~97、昭和60年2月。
- Rehm, G. : Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton, Deutscher Ausschuß für Stahl-Beton, Heft 138, 1961.

(1988.4.22・受付)