

# 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

## STUDY ON BOND CHARACTERISTICS OF DEFORMED BARS WITH ONLY A SINGLE TRANSVERSE RIB

長友克寛\*・角 徹三\*\*

By Katsuhiko NAGATOMO and Tetsuzo KAKU

Bond behavior in the neighborhood of a primary transverse crack was investigated using deformed bars with only a single transverse rib. Test results showed that the deterioration of bond strength in this region was remarkable, and that it was necessary to take account of the bond strength and slip stiffness defined by the function of the distance from crack in the numerical analysis of RC members.

Furthermore, the nonlinear analyses of shear spring systems modeling the past authors' pull-out tests were carried out, in which the above mentioned test results were used to estimate the strength and stiffness of the shear springs. The comparison of the bond behavior between in analyses and in tests exhibited good agreement, provided that the confinement around the reinforcing bar was strong enough to prevent the splitting failure.

### 1. 序 論

鉄筋コンクリート構造物は鉄筋とコンクリートとの複合耐力機構をその成立原理としており、両者間の応力伝達機構、いわゆる付着作用が構造全体の挙動に重要な役割を果たすことは衆知のところである。

異形鉄筋を対象とした付着性状については、1961年のRehm<sup>1)</sup>による基礎的な研究を契機として、森田<sup>2)</sup>、後藤<sup>3)</sup>あるいはLutz & Gergely<sup>4)</sup>らの実証的な研究によってその解明が大いに進み、定着・継手等の付着強度の問題にとどまらず、付着応力に付随する鉄筋とコンクリート間のすべりの重要性がクローズアップされてきた。この相対すべりに着目した場合、それは、ひびわれ幅の定量化という長期荷重下での変形予測と、鉄筋コンクリート骨組のクリティカル断面での鉄筋の抜け出しによる付加回転の定量化という短期荷重下での変形予測の2つの点で重要な意味をもつといえる。特に後者については、土木分野では橋脚フーチング、建築分野ではラーメン柱-はり接合部等を対象にしたいくつかの解析<sup>5)-7)</sup>も試み

られている。このような研究では鉄筋軸上の任意点での局部付着応力-すべり関係をあらかじめ設定する必要があるが、対象としている鉄筋周囲の拘束条件、具体的にはコンクリートかぶりの厚さ、横補強筋量、考えている点の横断ひびわれ位置からの距離、さらには付着力の方向等によって付着耐力・すべり剛性は大いに異なる。解析対象構造物のレベルに応じた合理的な耐力・剛性評価法はいまだ確立されておらず、解析手法の発達に比べて現象解明および解析への橋渡しのところでの研究の遅れが否めない。

異形鉄筋では、横ふしのくさび作用によって力が伝達されるため鉄筋近傍のコンクリートには漏斗状の内部ひびわれが発生し、これに伴い面外変形が生じるのが大きな特徴である。このことを考慮に入れた引き抜き試験体の解析例としては、黒正<sup>8)</sup>、池田<sup>9)</sup>および野口<sup>10)</sup>らの研究があり、面外変形ゾーンをモデル化するときの物理定数の設定の仕方にそれぞれ工夫が凝らされているが、それらが合理的かどうかの検証法がないのも事実である。

著者らは、これらの物理定数を直接実験から求められないか、さらに、付着強度が横断ひびわれ位置からの距離に大きく依存するという従来からの指摘<sup>11)</sup>を実験的に明白にしたいとの見地から、異形鉄筋の付着の原点に立ち戻って横ふし1個のみの付着挙動を明らかにすること

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

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

を思い立ち、以下の実験を実施した。すなわち、実験パラメーターとして横ふし前面の角度、ふし高さ、コンクリート強度および載荷端からふし位置までの距離を選んだ横ふし1個のみをもつ鉄筋の引き抜き試験を行い、これらの付着挙動への影響を明らかにした。さらに、著者らの既往の引き抜き試験体<sup>12)</sup>について、面外変形ゾーンを弾塑性せん断ばねに置き換えた単純なモデル化を行った。このばねの特性値は、上述の実験結果を用いて決定しているところに特徴がある。

以上のように、異形鉄筋の付着挙動を最も単純な横ふし1個のみのくさび作用として実験的に明確にし、この結果をもとに、通常の引き抜き試験体に対する比較的単純なマクロモデルを提案することが本研究の目的である。

## 2. 直角横ふし1個のみをもつ鉄筋の引き抜き試験

### (1) 実験目的

異形鉄筋の付着応力-すべり挙動を把握するというこは、ある与えられた鉄筋かぶり、鉄筋間隔等の幾何学的条件のもとで、鉄筋から伝達される付着力をも含めてコンクリートがどのような応力状態にあり、どのように

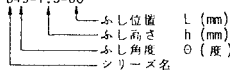
損傷していくかを知ることである、ということが出来る。付着特性を解明するためこれまでに数多くの付着試験がなされてきているにもかかわらずまだ普遍的な定量化に至っていないという事実は、結局は鉄筋周囲のコンクリートの応力状態が実験ごとに相違しているという点に大きな原因があると考えられる。たとえば、通常、実験的に付着応力-すべり関係を導く場合、試験体のいかんを問わず鉄筋周囲のコンクリートは弾性であり鉄筋軸方向には一様引張応力が作用する、あるいはコンクリートの変形は無視できるという前提が用いられ、すべりはあたかも鉄筋表面での純すべりのごとく評価される。しかし、現実のコンクリートの応力状態は複雑であり、当然その損傷状態も試験体ごとに異なるため、結果として現われる付着応力-すべり関係はばらつくのである。

解析に導入される付着特性は、しばしば局部付着応力-すべり関係という形で取り扱われる。これは、引き抜き試験においてその付着長を極限まで短くしていった場合に得られる荷重-すべり曲線であり、それはふし1個のみをもつ異形鉄筋の荷重-すべり曲線に等しいと考えることができる。このような単一エレメントを対象とするとき、あるコンクリートの応力状態に対するその変形状態は、鉄筋のふし形状およびコンクリートの特性に応

表-1 実験計画および実験結果

| シリーズ<br>No. | 供試体名<br>記号*1  | かし角度<br>θ (度) | ふし高さ<br>h (mm) | ふし位置<br>L (mm) | モルタル強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                     | 最大荷重<br>Pu (tf) | 初期剛性<br>K <sub>i</sub> (tf/mm) | 破壊形式*3 |
|-------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
|             |               |               |                |                | 圧縮 f <sub>c</sub> '              | 引張 f <sub>t</sub> ' |                 |                                |        |
| A           | 1 A30-1.5-15  | 30            | 1.5            | 15             | 278                              | 27                  | 0.922           | 1.41                           | F      |
|             | 2 A30-1.5-30  |               |                | 30             |                                  |                     | 1.900           | 1.20                           | F      |
|             | 3 A30-1.5-45  |               |                | 45             |                                  |                     | 2.967           | 1.54                           | F      |
|             | 4 A30-1.5-60  |               |                | 60             |                                  |                     | 3.320           | 1.58                           | S      |
| B           | 5 B45-1.5-15  | 45            | 1.5            | 15             | 305                              | 30                  | 0.683           | 3.79                           | F      |
|             | 6 B45-1.5-30  |               |                | 30             |                                  |                     | 1.400           | 4.54                           | F      |
|             | 7 B45-1.5-45  |               |                | 45             |                                  |                     | 2.400           | 1.78                           | S      |
|             | 8 B45-1.5-60  |               |                | 60             |                                  |                     | 2.917           | 3.13                           | S      |
| C           | 9 C45-1.5-15  | 45            | 1.5            | 15             | 241                              | 23                  | 0.413           | 3.73                           | F      |
|             | 10 C45-1.5-30 |               |                | 30             |                                  |                     | 1.119           | 8.50                           | F      |
|             | 11 C45-1.5-45 |               |                | 45             |                                  |                     | 1.933           | 5.61                           | F      |
|             | 12 C45-1.5-60 |               |                | 60             |                                  |                     | 2.767           | 2.69                           | S      |
| D           | 13 D60-1.5-15 | 60            | 1.5            | 15             | 331                              | 32                  | 0.444           | 2.38                           | F      |
|             | 14 D60-1.5-30 |               |                | 30             |                                  |                     | 1.372           | 2.74                           | C      |
|             | 15 D60-1.5-45 |               |                | 45             |                                  |                     | 2.300           | 2.27                           | C      |
|             | 16 D60-1.5-60 |               |                | 60             |                                  |                     | 2.867           | 2.38                           | C      |
| E           | 17 E90-1.5-15 | 90            | 1.5            | 15             | 293                              | 28                  | 0.641           | 6.91                           | F      |
|             | 18 E90-1.5-30 |               |                | 30             |                                  |                     | 1.386           | 7.09                           | C      |
|             | 19 E90-1.5-45 |               |                | 45             |                                  |                     | 2.600           | 3.84                           | C      |
|             | 20 E90-1.5-60 |               |                | 60             |                                  |                     | 3.360           | 12.50                          | C      |
| F           | 21 F45-1.5-15 | 45            | 1.5            | 15             | 318                              | 30                  | 0.625           | 4.37                           | F      |
|             | 22 F45-2.0-15 |               | 2.0            |                |                                  |                     | 0.634           | 8.04                           | F      |
|             | 23 F45-2.5-15 |               | 2.5            |                |                                  |                     | 0.544           | 10.84                          | F      |
|             | 24 F45-3.0-15 |               | 3.0            |                |                                  |                     | 0.659           | 8.05                           | F      |
| G           | 25 G45-1.5-30 | 45            | 1.5            | 30             | 399                              | 31                  | 1.511           | 4.99                           | F      |
|             | 26 G45-2.0-30 |               | 2.0            |                |                                  |                     | 1.525           | 8.21                           | F      |
|             | 27 G45-2.5-30 |               | 2.5            |                |                                  |                     | 1.492           | 13.55                          | F      |
|             | 28 G45-3.0-30 |               | 3.0            |                |                                  |                     | 1.950           | 8.16                           | F      |
| H           | 29 H45-1.5-45 | 45            | 1.5            | 45             | 313                              | 29                  | 1.800           | 4.37                           | S      |
|             | 30 H45-2.0-45 |               | 2.0            |                |                                  |                     | 2.400           | 8.86                           | S      |
|             | 31 H45-2.5-45 |               | 2.5            |                |                                  |                     | 2.761           | 10.35                          | S      |
|             | 32 H45-3.0-45 |               | 3.0            |                |                                  |                     | 2.550           | 9.67                           | S      |
| I           | 33 I45-1.5-60 | 45            | 1.5            | 60             | 317                              | 29                  | 2.961           | 2.63                           | S      |
|             | 34 I45-2.0-60 |               | 2.0            |                |                                  |                     | 3.384           | 13.97                          | S      |
|             | 35 I45-2.5-60 |               | 2.5            |                |                                  |                     | 3.275           | 5.45                           | C      |
|             | 36 I45-3.0-60 |               | 3.0            |                |                                  |                     | 3.686           | 6.35                           | C      |
| J           | 37 J45-1.5-75 | 45            | 1.5            | 75             | 339                              | 30                  | 3.523           | 3.89                           | S      |
|             | 38 J45-2.0-75 |               | 2.0            |                |                                  |                     | 4.544           | 6.85                           | S      |
|             | 39 J45-2.5-75 |               | 2.5            |                |                                  |                     | 4.350           | 22.24                          | S      |
|             | 40 J45-3.0-75 |               | 3.0            |                |                                  |                     | 4.791           | 4.79                           | S      |

\*1 (例) B45-1.5-60



(1kgf/cm<sup>2</sup>=0.098MPa, 1tf=9.8kN, 1tf/mm=9.8MN/m)

\*2 1/3最大荷重点以下の荷重-すべり曲線を最小二乗法を用いて直線近似することにより計算。

\*3 F: ろうと状破壊, S: 割裂破壊, C: コーナー破壊

じて唯一的に決定されるはずである。この基本的な挙動から出発して、より一般的な応用へと拡張していくことはできないだろうか。これが、付着特性解明のために著者らがとろうとしている立場である。本章で述べる実験の目的は、それらを実験的に把握することにある。

従来、付着応力-すべり関係は鉄筋軸上の座標位置には無関係であるという扱いがなされてきたが<sup>2),11)</sup>、近年、横断ひびわれ近傍域での付着耐力劣化考慮の必要性がクローズアップされつつある<sup>12),13)</sup>。今回の実験では、このような横ふしの位置というものにも特に注意を払った。

(2) 実験方法

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  $d_0=22\text{ mm}$ 、以後これを直径とみなす)を試作し、そのふし前面の角度  $\theta$  を  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  に、ふし高さ  $h$  を  $1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{ mm}$  に、載荷端からふしまでの距離  $L$  を  $15, 30, 45, 60, 75\text{ mm}$  に、さらにはモルタル強度  $f'_c$  を2種類に変化させ、それらの付着特性への影響を調べた。供試体の名称・諸元は表-1に示すとおりである。AからJまでの10シリーズについて、各シリーズ4体、合計40体を実験に供した。

付着力伝達機構をふし前面での機械的かみ合いのみに限定するため、供試筋表面に油を塗布し、摩擦の影響を除去した。供試体モルタル部分の寸法については、鉄筋周囲の拘束が比較的大きい場合を想定し、かつ全体の曲げせん断変形の影響をできる限り小さくするという配慮のもとに、その断面および長さを図-1のように決定した。モルタル中には、径  $6\text{ mm}$  普通丸鋼を用いた横補強筋を  $5\text{ cm}$  間隔で2本配置し、割裂ひびわれ等によるぜい性的な破壊に伴い測定器が破損することを防止した。

b) 使用モルタルの配合

供試筋の横ふしが1個のみであることから、ふしと骨材との寸法比によっては測定値にかなりの変動が予想さ

れる。そこで、骨材最大寸法は  $5\text{ mm}$  とし、供試体の均質性を高めた。使用したモルタルは、水セメント比  $50\%$ 、単位水量  $194\text{ kg}$  の AE モルタルである。骨材には砕砂(径  $2.5\sim 5\text{ mm}$ )を海砂に対して容積比  $1:0.85$  の割合で混合したものをを使用した。

目標圧縮強度は  $300\text{ kgf/cm}^2$  ( $29.4\text{ MPa}$ ) と設定したが、実際の圧縮強度は G シリーズを除けばその  $\pm 13\%$  の範囲内であった。C シリーズは強度の影響をみるため目標強度を意図的に低く設定したものである。

供試筋は水平に配置し、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。載荷は手動中空油圧ジャッキによる単調載荷であり、供試筋端部にねじを切り、カップラーを介してテンションバーと連結することにより引き抜き力を与えた。最大荷重までを荷重制御とし、それ以降は適宜ピーク荷重にて測定を行った。油圧ジャッキと供試体との間には径  $12.5\text{ cm}$  の円孔を有する鋼板を介し、反力は供試筋表面からその直径の約2倍よりも外側のモルタル部分に圧縮力として作用させた。これは、既往の研究<sup>9),14)</sup>を参考に、鉄筋周囲のモルタルの面外変形を拘束しないように配慮したものである。変位計(精度  $1/1000\text{ mm}$ )で供試筋自由端の絶対変位量を測定し、この値を鉄筋周囲のモルタルの面外変形も含んだすべり量とみなした。

3. 実験結果およびその考察

実験結果の概要を表-1に示す。

(1) 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に示す。 $L$  が小さい場合 ( $15\sim 30\text{ mm}$ )、 $\theta$  のいかんにかかわらず同図 (a) の漏斗状破壊を示した。 $L$  が大きく ( $45\sim 75\text{ mm}$ ) なってくると、 $\theta$  が小さい場合 ( $30\sim 45^\circ$ ) には同図 (b) の割裂破壊、 $\theta$  が大きい場合 ( $60\sim$

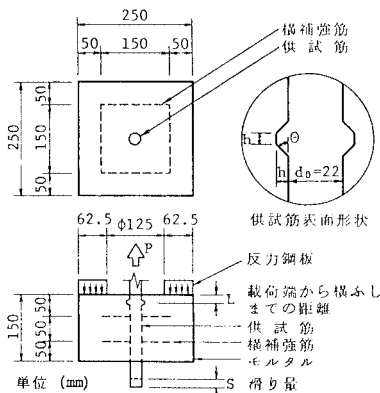


図-1 供試体の形状・寸法

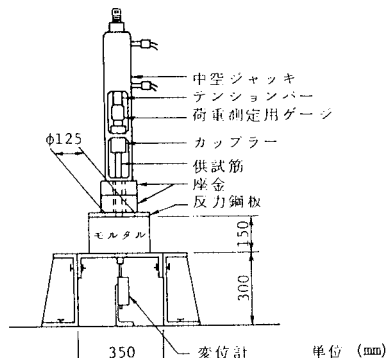


図-2 載荷装置

90°)には反力の影響を受け同図(c)の隅角部のせん断破壊へと移行する傾向がみられた。 $L$ 、 $\theta$ ともに大きい場合においては、ふし前面のモルタルがくさび状に粉体化することによる新しいすべり面の形成も観察された。

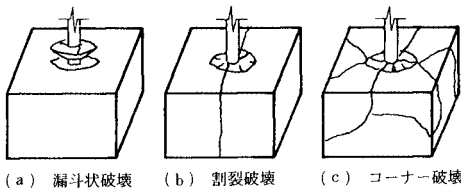
(2) 荷重-すべり関係

図一4(a)に $\theta=60^\circ$ 、 $h=1.5\text{ mm}$ の場合(Dシリーズ)の荷重(付着力)-すべり曲線を示す。付着すべり挙動は $L$ に大きく依存しており、載荷端近傍域での付着耐力劣化を考慮することの重要性が認識される。このことは、他の $\theta$ および $h$ の場合においても同様であった。

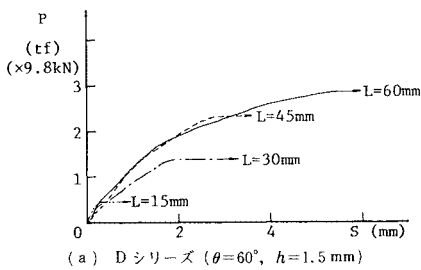
図一4(b)には $\theta=45^\circ$ 、 $L=60\text{ mm}$ の場合(Iシリーズ)の荷重-すべり曲線を示す。 $h$ の増加に伴い、最大荷重、すべり剛性ともに増大する傾向がみられる。図中、荷重が一時的な低下を示すのは、割裂ひびわれの発生に対応しているものと考えられる。そして、これと同時にあるいはわずかな荷重増加の後最大荷重に到達し、それ以後、かなりのすべり量までその50%以上の荷重を保持した。

(3) 付着耐力

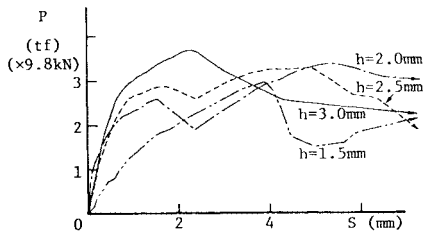
図一5は、本実験結果においてモルタル強度 $f_c'$ の供試体最大荷重 $P_u$ への影響を取り除くため、 $P_u$ を $\pi \cdot d_o \cdot f_c'^{1/2}$  ( $\pi$ :円周率)で除して正規化することを試



図一3 破壊形式



(a) Dシリーズ ( $\theta=60^\circ$ ,  $h=1.5\text{ mm}$ )



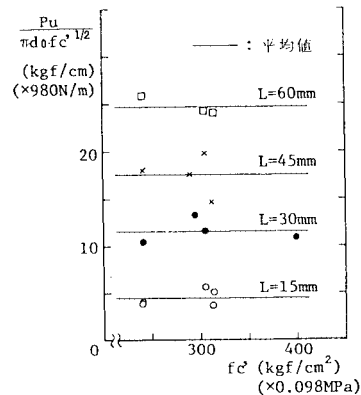
(b) Iシリーズ ( $\theta=45^\circ$ ,  $L=60\text{ mm}$ )

図一4 荷重-すべり曲線 (実験結果)

みたものである。これは、供試体の破壊は横ふしからの内部ひびわれに支配され、そのひびわれはモルタル引張強度に大きく依存し、さらにそれは $f_c'^{1/2}$  (単位は応力のまま)と比例関係にある、という考えに基づいている。 $P_u/\pi \cdot d_o$ は横ふし間隔を単位長(1 cm)と考えれば付着強度に対応しており、正規化最大荷重 $P_u/\pi \cdot d_o \cdot f_c'^{1/2}$  (以後、耐力と記す)はそのような付着強度をモルタル引張強度で無次元化したものとも考えることもできる。同図より、 $L$ が同一であれば、多少平均値からのばらつきはあるものの、本方法により $f_c'$ の影響を除去できることがわかる。以下では、このように定義された付着耐力と個々の実験パラメーターとの関係について議論を進めていくことにする。

図一6は、 $L$ の耐力への影響を示している。 $\theta$ が同一の場合、 $L$ の増加に伴い耐力は直線的に増大し、このことは耐力を $L$ の関数として表現し得ることを示唆している。 $L$ が45 mmを超えるとこの傾向は幾分鈍り始め、これは図一3に示した破壊形式の遷移との対応をなすものである。

図一7は、 $\theta$ の耐力への影響を示している。 $L$ が同一の場合、 $\theta=60^\circ$ までは $\theta$ の小さいもの、すなわち付着の滑らかなものほど耐力は大きく出ている。後藤・大塚<sup>15)</sup>は、種々の横ふし角度をもつD32鉄筋について両引き試験を実施し、ふし角度が小さくなるにつれ内部ひびわれの発生数は少なく、しかもその進展長は短くなることを指摘しており、上述の $\theta$ の耐力への影響はこのような内部ひびわれ進展傾向の鈍化によるものと考えられる。しかし、一方で付着割裂破壊という面から考察した場合、 $\theta$ の減少は付着力の鉄筋表面に垂直な放射方向成分の増加をもたらし、それはひいてはリングテンションの増大に伴う割裂強度の低下を招くという逆の結果が予想される。実際、村田・河合<sup>16)</sup>は割裂引き抜き試験においてそのような結論を得ている。この相違の原因の



図一5 付着耐力とモルタル強度との関係 ( $\theta=45^\circ$ ,  $h=1.5\text{ mm}$ )

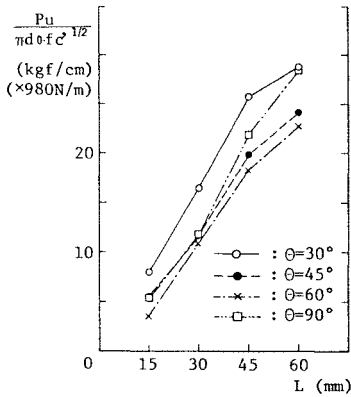


図-6 付着耐力とふし位置との関係 (h=1.5mm)

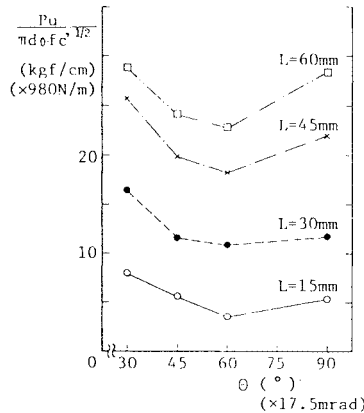


図-7 付着耐力とふし角度との関係 (h=1.5mm)

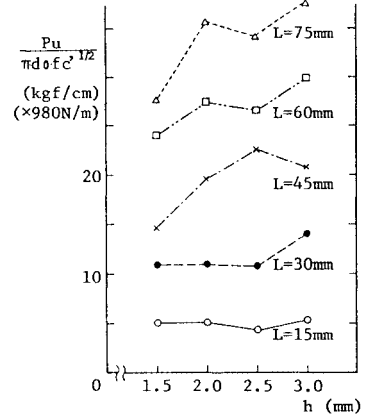


図-8 付着耐力とふし高さとの関係 (theta=45度)

1つとしては、著者らの実験では横補強筋が2本配置されているのに対して、村田らの実験ではコンクリートが無補強であることが挙げられる。theta=90度の場合の耐力は、それ以前の傾向とは逆に増大に転じている。

図-8は、hの耐力への影響を示している。hの増加に伴い耐力は増大し、その傾向はLが大きな位置ほど顕著となる。しかし、h=2.0~2.5mmあたりよりこの増加傾向は鈍り始め、付着強度向上という点からみてhをむやみに大きくすることは得策でないことがわかる。

(4) 付着すべり剛性

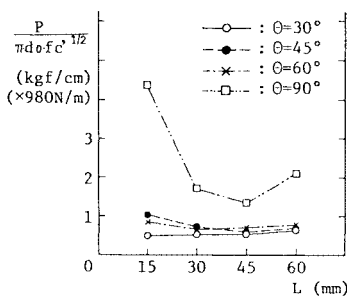
図-9, 10, 11は、すべり量 S=0.05mm時および S=1.0mm時における正規化荷重 P / (pi \* d\_o \* f\_c'^(1/2)) と L, theta, hとの関係をそれぞれ示したものである。したがって、P / (pi \* d\_o \* f\_c'^(1/2)) はその Sでの割線付着すべり剛性を表すことになる。以下では、これをすべり剛性と記す。

図-9(a), (b)は、hが一定 (=1.5mm)の場合のすべり剛性とLとの関係を示している。S=0.05mm時には、Lの影響は明確ではない。S=1.0mm時になると、Lの増加に伴いすべり剛性も増大傾向を示すが、

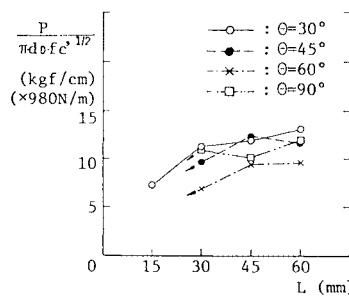
L=45mmを超えるとその傾向は鈍る。同図(c)は、thetaが一定 (=45度)の場合のすべり剛性とLとの関係を示している。ここで、L=15および30mmに対する荷重は最大荷重到達以後のものである。この図でも同様にLの増加に伴うすべり剛性の増大傾向が現われているが、同図(b)と比較すると、thetaよりもhの方がすべり剛性増大傾向に与える影響の大きいことがわかる。

図-10は、S=0.05mm時のすべり剛性とthetaとの関係を示している。ここに、hは一定 (=1.5mm)である。すべり剛性はthetaの増加とともに増大するが、その傾向はtheta=30~60度まではわずかであり、theta=60~90度で大きくなる。S=1.0mm時には、内部ひびわれ進展状況の相違の影響が現われ、図-7と同様の傾向を示すようになる。

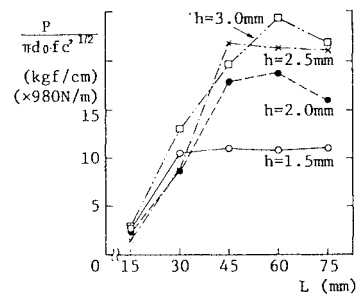
図-11は、thetaが一定 (=45度)の場合のすべり剛性とhとの関係を示している。ここで、同図(b)のL=15および30mmの曲線は最大荷重到達以後におけるものである。S=0.05mm時には、hの増加に伴いすべり剛性はほぼ直線的に増大し、その傾向はLの大きいものほど顕著となる。しかし、h=2.0~2.5mmを超えると、



(a) S=0.05mm, h=1.5mm

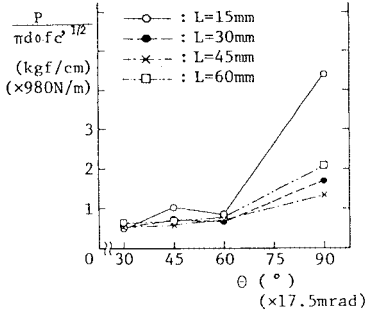


(b) S=1.0mm, h=1.5mm

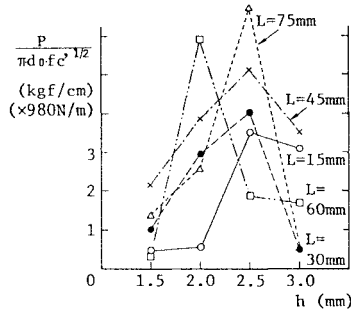


(c) S=1.0mm, theta=45度

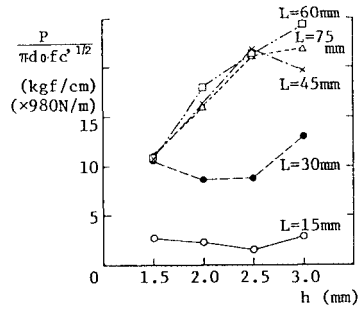
図-9 すべり剛性とふし位置との関係



図一10 すべり剛性とふし角度との関係  
(S=0.05 mm, h=1.5 mm)



(a) S=0.05 mm, θ=45°



(b) S=1.0 mm, θ=45°

図一11 すべり剛性とふし高さとの関係

Lにかかわらずすべり剛性は逆に低下を始める。S=1.0 mm 時においても、L=45~75 mm の場合に対して同様の傾向がみられるが、Lのすべり剛性増大傾向への影響は同図 (a) ほど明確ではなくなっている。(3)では、付着耐力の面から有効ふし高さの上限は2.5 mm 程度であることを述べたが、このことは付着すべり剛性の面からも成り立つことになる。同様の指摘は、国分・岡村<sup>17)</sup>の太径異形鉄筋の引き抜き試験においてもなされている。なお、JISではD22鉄筋のふし高さの最大値は2.2 mmと規定されており、本実験の結果と符合する。通常の異形鉄筋は鉄筋径の増加とともにふし高さ(およびふし間隔)も直線的に増加する場合が多く、この前提に立てば、以上のことはすべり量を鉄筋径(あるいはその関数)で除して無次元化すること<sup>16), 18)</sup>により、その径の付着すべりへの影響を除去できる可能性を示唆している。

(5) 付着応力-すべり関係の無次元化

(3), (4)では、付着応力τをコンクリート圧縮強度の平方根f<sub>c</sub><sup>1/2</sup>で、すべり量Sを鉄筋径Dでそれぞれ除して無次元化することにより、それらのτ-S挙動への影響を除去できる可能性のあることを示した。本節では、このことを供試体H45-1.5-45(横ふし間隔1.5 cmと仮定)、および後述する図一13の引き抜き試験体16-1(付着長16 cm)と40-2(同40 cm)の各実験結果<sup>12)</sup>に対して適用し、その有効性について考察する。なお、試験体16-1と40-2は正負繰返し载荷を受けており、τ-S曲線としてはその包絡線を用いた。対象となる各供試筋の諸元は表一2に示すようにはほぼ幾何学的に相似な表面形状を有しており、(4)で述べた条件を満足している。注目する鉄筋上の点までの载荷端からの距離、鉄筋周囲の拘束についてもほぼ同等と考えられる。

各供試体のτ/f<sub>c</sub><sup>1/2}-S/D関係は、図一12に示すようになりに接近しており、本方法がτ-S関係に与えるf<sub>c</sub>およびDの影響除去にある程度有効であることを示している。ただし、これらはすべりの比較的小さい領域に</sup>

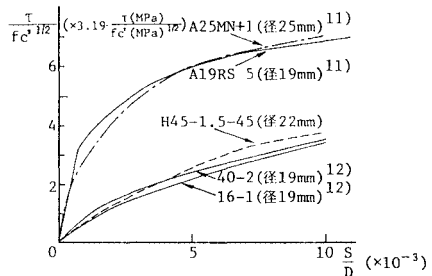
おけるものであり、試験体16-1と40-2がこのあとτ/f<sub>c</sub><sup>1/2}≒4で最大付着応力に到達したのに対して、供試体H45-1.5-45ではさらにその約2倍程度の付着強度を示した。これは、前者では载荷端より内部へと将棋倒し式に付着破壊が進行し、τ-S関係はそれに支配されることが一因と考えられ、このことは横ふし1個のみをもつ鉄筋を用いた付着試験の適用限界を示唆している。</sup>

図一12には、波ふし鉄筋(D19およびD25)を载荷端よりその付着長中央までの距離が10 cmの位置に、ふし間隔の2ピッチ長(ふし4個分)だけ付着させた場合の引き抜き試験結果<sup>11)</sup>についても合わせて無次元化表示してある。f<sub>c</sub>とDの影響に関してはここでもある程度除去されているが、その曲線形状は上述の結果と比較して初期すべり剛性の高いかなり異なったものとなっている。この原因としては、ふし形状、τ-S関係を算出する際の付着長(ふし個数)の相違等が挙げられるが、特に文献11)の実験では供試体の破壊がふし頂を連ねる円筒面での直接せん断破壊であったことを考慮すると、破壊パターンの違いが最大の原因であると推察され

表一2 無次元化の検討に用いた供試筋の形状<sup>12)</sup>

| 供試体名                | 鉄筋径 D (mm) | ふし形状  | ふし高さ h (h/D) (mm) | ふし間隔 λ (λ/D) (mm) | ふし角度 θ (度) | 载荷端からの距離 L (mm) | 付着長さ   |
|---------------------|------------|-------|-------------------|-------------------|------------|-----------------|--------|
| H45-1.5-45          | 22         | 面角様ふし | 1.5 (0.068)       | 15 (0.68)         | 45         | 45              | ふし4個分  |
| 16-1 <sup>12)</sup> | 19         | 面角様ふし | 1.3 (0.068)       | 13.3 (0.70)       | 45         | 50              | ふし15個分 |

\*1) (オシム) プラチン線径2cm



図一12 付着応力-すべり関係の無次元化<sup>11), 12)</sup>

る。

結局、 $\tau$ - $S$  関係の無次元化に関して次のように結論づけられよう。ある表面形状をもつ異形鉄筋の付着特性が  $\tau/f_c^{1/2}-S/D$  の形で得られているならば、これを用いてそれと相似な表面形状をもつ別の鉄筋の  $\tau$ - $S$  関係を推定することが可能である。逆に、表面形状以外の実験条件をそろえておけば  $\tau/f_c^{1/2}-S/D$  関係を比較することにより種々のふし形状の鉄筋に対する付着性能の優劣を評価することもできる。ただし、表面形状の相似な鉄筋であっても、破壊形式の異なる付着試験結果の比較は意味がない。

(6) 付着耐力劣化域

本実験で観察された  $L$  の変化に伴う破壊形式、付着耐力、そして付着すべり剛性等の変化から判断した場合、付着耐力劣化域として供試体のさらに内部の付着域とは区別した取り扱いをすべき領域は載荷端より約 4.5 cm までの範囲と考えられる。これは、著者ら<sup>12)</sup>が図-13に示す試験体を用いて実施した引き抜き試験の結果ともほぼ一致する。ただし、これらは約 4.5 cm という絶対量で扱うよりも鉄筋径の倍数で表現する方がより実用的であろう。いずれにしても、各ふし位置のずれにより劣化域長はふし間隔1個分程度はばらつくものであり、これに割裂ひびわれの進展、繰り返し載荷等の影響が加わることを考え合わせれば、あまり詳細な定量化は不可能かつ無意味とも思われる。

4. せん断ばね系モデルによる RC プリズムの解析

(1) 解析目的

部材レベルでの異形鉄筋の付着特性を準マクロモデル化する場合、それは本来領域的な扱いをすべきであると考える。実際、このような領域型モデルはすでにいくつか提案されており、それらは大きく2つのタイプに分類できる。その1つは二次要素型モデルであり、内部ひびわれの進展をコンクリートの材料特性の変化で間接的に表現しようとするものである。黒正ら<sup>9)</sup>は鉄筋周囲にボンドゾーンを設定し、解析結果が実験結果に一致するようそのゾーンの幅およびせん断剛性を変化させ、ゾーンの幅が鉄筋径の約2倍であることを示した。野口<sup>10)</sup>はボンドゾーン内のコンクリートの鉄筋軸方向弾性係数分布をあらかじめいくつか設定し、その弾性係数の低減とそれに伴うせん断剛性およびポアソン比の変化とによって内部ひびわれの進展を表現した。これらは、材料特性の決定に試行的作業を要するもの連続体としての取り扱いが可能であるところに大きな特徴を有している。

もう1つのタイプは、内部ひびわれにより形成されたコンクリートくし歯を直接的に片持ちばりあるいは中空

円盤等に置換し、それらの曲げ・せん断剛性をもたせた一次元ばね系にモデル化するものである。池田<sup>9)</sup>はくし歯を片持ちばりとみなし、実験的に求めた鉄筋応力と内部ひびわれ進展長との関係を用いてその片持ちばりのスパンを決定するばね系モデルを提案している。著者ら<sup>11)</sup>は野口、池田のモデルを参考に、内部ひびわれパターンとそれに対応する一軸ばねの組合せをあらかじめいくつか設定しておき、応力・変形状態に応じてそのパターンのいずれかを解析的に選択するモデルを提案した。このタイプのモデルは、より現実に近い付着力伝達機構の考察に基づくものではあるが、内部ひびわれ進展の判定が難しく、しかも片持ちばり等の変形だけでは付着すべり剛性が過大に評価される等の問題点を残している。

以上のことを踏まえ、著者らはボンドゾーンを単純にせん断ばねのみの集合で表現し、そのばね剛性にはふし1個のみをもつ鉄筋の付着特性を利用するという手法を採用することにした。本章では、このモデル化手法を用いた引き抜き試験体の弾塑性解析を行いその適用性を検討するとともに、その際特に載荷端近傍域での付着耐力劣化挙動のモデルへの組み込みに注意を払い、その必要性について吟味する。横ふし1個のみをもつ鉄筋の付着特性の決定方法には、実験結果を利用する方法と有限要素法等の数値解析に基づくもの<sup>11)</sup>の2つが考えられるが、ここでは前者を採用した。これは、3.で述べた実験結果がどの程度の有用性をもって一般の問題に拡張できるかを検討するためである。

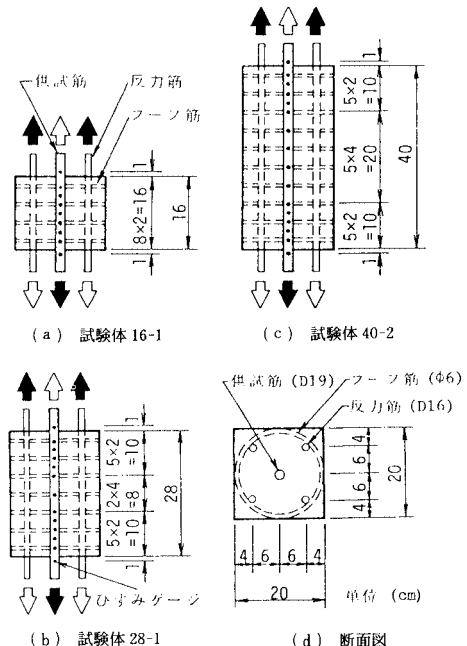


図-13 引き抜き試験体の詳細<sup>12)</sup>

(2) 解析対象

解析の対象として取り上げた引き抜き試験体を図-13に示す。これは、著者ら<sup>12)</sup>が鉄筋降伏以後をも含めた正負繰返し荷重下での付着劣化性状をその付着長をパラメーターとして調べるための実験に使用したものである。

D19 供試筋を 20×20 cm のコンクリート断面の中心に埋め込み、それに負荷する引き抜き力は 4 隅に配置された D16 反力筋により受け持たれる。反力筋の周囲は φ6 フープ筋により取り囲まれており、鉄筋回りの拘束は比較的大きいものとなっている。

各試験体の破壊は、16-1 および 28-1 ではそれぞれ供試筋の降伏前および降伏後における割裂ひびわれの貫通に、そして 40-2 では供試筋の破断によるものであった。

(3) 解析モデル

図-13 に示した引き抜き試験体を図-14 (b) のような一軸ばね系にモデル化した。試験体は供試筋、付着ゾーンおよび外部コンクリートの剛性を加え合わせた反力筋の 3 部分から構成されると考えた。供試筋と反力筋とをそれぞれ軸剛性  $k_1$ 、 $k_2$  をもつ直列ばねに置換し、両者の節点間に付着力伝達機構を表現するせん断ばねを挿入した。軸剛性の算出に際しては、供試筋にはバイリニア

型(降伏後の弾性係数低下率  $\alpha_{sv}=0.5\%$ )の、反力筋には完全弾性の引張応力-ひずみ関係を設定した。使用した材料特性値を表-3 に示す。

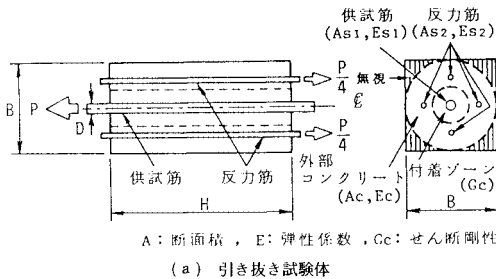
付着ゾーンは最終的に内部ひびわれの進展可能なコンクリート領域を想定したものであり、本解析ではその幅を鉄筋径の 2 倍とした。ゾーンのせん断変形特性としては、付着長を付着耐力劣化域内外の 2 領域に区分し、それぞれ図-15 (a) に実線および破線で示したような付着力(荷重)-すべり(相対変位)関係を設定した。これは、図-4 に示した荷重-すべり曲線等を参考にモデル化したものである。初期せん断ばね剛性  $G_{c1}$  は、3. (5) で述べた無次元化  $\tau$ - $S$  関係の性質を利用して、表-1 に示した B シリーズの初期すべり剛性の平均値  ${}_B K_{1av}$ 、モルタル圧縮強度  ${}_B f'_c$  および鉄筋径  ${}_B D$  を用いて次式から算出した。

$$G_{c1} = {}_B K_{1av} \frac{D \cdot f_c'^{1/2}}{{}_B D \cdot {}_B f_c'^{1/2}} = 8.62 \times 10^2 \cdot D \cdot f_c'^{1/2} \quad (\text{kgf/cm})$$

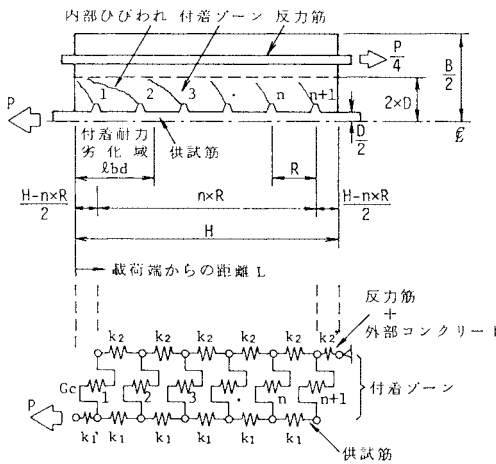
$$= 2.70 \times 10^8 \cdot D(m) f_c'(\text{MPa})^{1/2} \quad (\text{N/m})$$

ここに、 $D$ 、 $f_c'$  は解析対象の鉄筋径およびコンクリート圧縮強度である。最大荷重  $P_u$  到達後のせん断剛性低下率  $\beta$  および  $\beta'$  には適当な小値(=0.001)を、そして付着耐力劣化域での荷重低下率  $\alpha$  には 0.75 を採用した。

最大荷重  $P_u$  に関しては、付着耐力劣化域の長さ  $l_{bd}$  を 3. (6) で述べた 4.5 cm とし、B シリーズの実験で得られた  $P_u/{}_B f_c'^{1/2}$ - $L$  関係を図-15 (b) のように線形化して用いた。林ら<sup>13)</sup>は、引き抜き試験および曲げせん断試験の結果をコンクリート強度の影響を無視して整理し、最大付着応力の低下率  $\gamma$  とひびわれ面からの距離  $L'$  との間に  $\gamma=0.29 L'$  という近似を行い解析に利用した。



(a) 引き抜き試験体



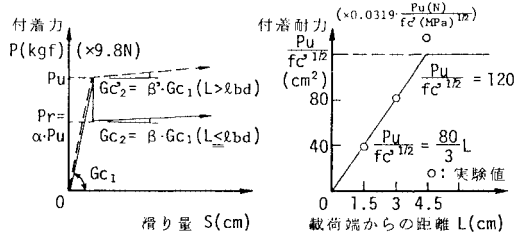
(b) せん断ばねモデル

図-14 引き抜き試験体のせん断ばね系へのモデル化

表-3 引き抜き試験体の材料特性<sup>12)</sup>

| 供試体名 | 供試筋                |                    | コンクリート      |                    | 反力筋                |
|------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|
|      | 降伏応力 $\sigma_{sv}$ | 弾性係数 $E_{s1}$      | 圧縮強度 $f'_c$ | 弾性係数 $E_c$         | 弾性係数 $E_{s2}$      |
| 16-1 | 3660               |                    | 420         | $2.34 \times 10^5$ |                    |
| 28-1 | 3597               | $2.44 \times 10^6$ | 403         | $2.58 \times 10^5$ | $2.06 \times 10^6$ |
| 40-2 | 3683               |                    | 382         | $2.70 \times 10^5$ |                    |

(kgf/cm<sup>2</sup>) (×0.098MPa)

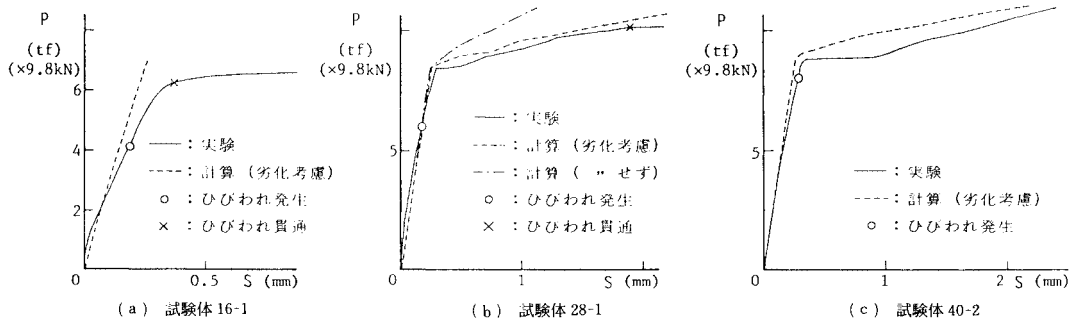


(a) 付着力-すべり関係のモデル化

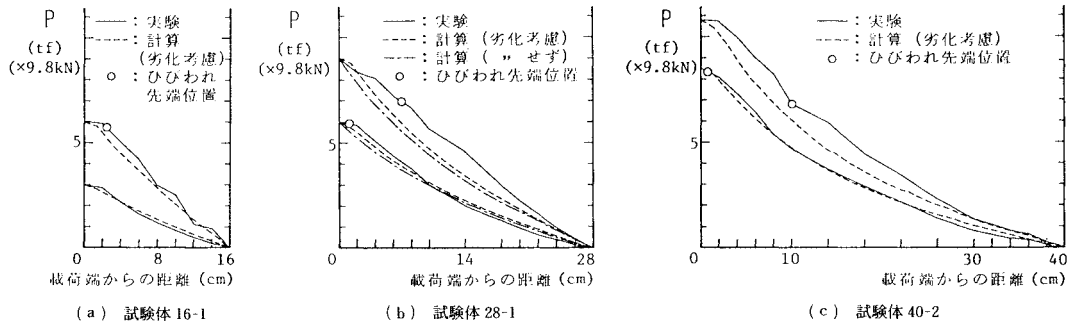
(b) 付着耐力-ふし位置関係のモデル化

図-15 せん断ばねの特性





図一16 引き抜き試験体の荷重-材端すべり関係 (実験と解析との比較)<sup>12)</sup>



図一17 引き抜き試験体の供試筋軸力分布 (実験と解析との比較)<sup>12)</sup>

ている。これを今回の実験結果で検討すると  $\gamma = P_u/P_u$  ( $L \geq 4.5 \text{ cm}$ ) = 0.22  $L$  となる。両者はオーダー的にはば一致しており、1つの目安として注目すべきである。

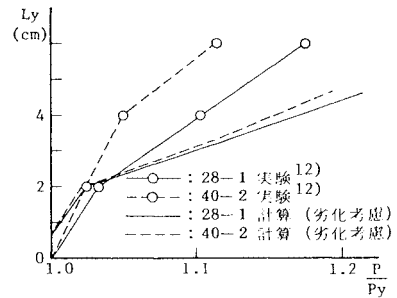
(4) 解析結果

a) 荷重-材端すべり関係

図一16に各試験体の荷重-材端すべり関係についての実験と解析との比較を示す。試験体 28-1 および 40-2 においては実験結果と解析結果とはかなり一致している。しかし、試験体 16-1 においては、低荷重域では両者はある程度一致しているものの、荷重の増加につれて実験結果は解析結果よりも顕著な剛性低下を示し始める。これは、実験では割裂ひびわれの発生・進展に伴って供試筋周囲の拘束がだいに弱まっていくのに対して、解析ではそれを考慮に入れていないことが主原因と考えられる。割裂ひびわれ発生後の剛性低下の合理的な評価については、今後の課題として残される。

b) 供試筋の軸力分布

図一17に各試験体の供試筋軸力分布についての実験と解析との比較を示す。解析結果は、低荷重時には実験結果とのよい一致をみているが、高荷重時には幾分低めに評価されるようになる。これは、実験では荷重増加に伴う割裂ひびわれの進展により付着応力の再分配が生じ、それが上に凸の軸力分布となって現われるのに対し、解析ではその割裂ひびわれを考慮していないため



図一18 降伏進展長さ $L_y$ と荷重増大率との関係<sup>12)</sup>

である。

c) 荷重端近傍域における付着耐力劣化の影響

図一16 (b) および図一17 (b) には、荷重端近傍域での付着耐力劣化を考慮しない場合の解析結果を一点鎖線で示してある。これらより、付着耐力劣化を考慮することの効果は、供試筋降伏以前よりもむしろそれ以後において明確であり、それは供試筋の塑性伸びによる材端すべりの増大および荷重端近傍域での軸力分布の平坦化という現象のより正確な評価となって現われることがわかる。

d) 降伏進展長さ

著者ら<sup>12)</sup>は、既往の実験において供試筋の荷重端からの降伏進展長さ  $L_y$  は供試筋の引き抜き荷重  $P$  をその

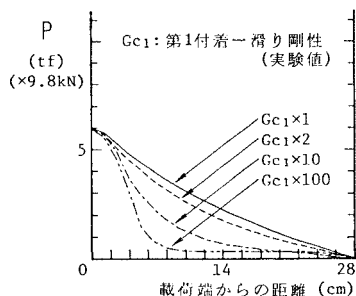


図-19 供試筋軸力分布に与えるせん断ばね剛性の影響

降伏荷重  $P_y$  で除した荷重増大率  $P/P_y$  の関数で表現できると報告している。図-18は、今回の実験および解析についてこの関係を示したものである。解析結果は28-1および40-2のいずれの試験体においても実験結果よりも  $L_v$  を小さめに評価している。しかし、定性的には降伏域の進展挙動をよく再現しており、割裂ひびわれ考慮の有無および実験結果のばらつき等を考え合わせると本モデルの有効性がある程度みることができると考えられる。

#### e) 初期付着すべり剛性の影響

図-19に図-17(b)の解析において使用した初期せん断ばね剛性  $G_{c1}$  を2, 10, 100倍に変化させた場合の供試筋軸力分布の変化を示す。せん断剛性が増加すると、鉄筋引き抜き力のコンクリートへの伝達は載荷端近傍の短い領域でほぼ完了してしまい、軸力分布はこの領域で極端な上に凸の分布をなす。せん断剛性を正確に評価することの必要性が再認識されるところである。荷重-材端すべり関係へのせん断剛性増加の影響については、当然すべり剛性の増大となって現われる。

## 5. 結 論

本研究では、まず、異形鉄筋の付着の原点に立ち戻り、横ふし1個のみをもつ鉄筋を対象とし、その基本的な付着特性を明らかにするための引き抜き試験を実施した。その結果、コンクリート強度  $f'_c$  と鉄筋径  $D$  の付着応力  $\tau$ -すべり  $S$  関係への影響はそれを  $\tau/f'_c{}^{1/2}-S/D$  関係として扱うことによりある程度除去可能であること、および載荷端より鉄筋径の約2倍までの範囲は付着耐力劣化域として区別して考慮すべきであること等の結論を得た。全体的な結果はふし1個のみでない場合とはほぼ同様の結果を示し、本実験の有効性を裏付けるものであった。

次に、これら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、既往の引き抜き試験体への適用を試みた。解析結果は、割裂ひびわれの拘束された状態においては実験結果とのよい一致を示し、このことは横ふし1個のみの実験結果がより一般的な問題に拡張可能であることを示唆するものであった。

## 参 考 文 献

- 1) Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton, Deutscher Ausschuss für Stahl-Beton, Heft 138, 1961.
- 2) 六車 熙・森田司郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (I~III), 日本建築学会論文報告集, 第131, 132, 134, 139号, pp. 1~8, 1~6, 1~8, 1~10, 昭和42年1, 2, 4, 9月.
- 3) Goto, Y.: Cracks formed in concrete around deformed tension bars, ACI Journal, Vol. 68, No. 4, pp. 244~251, April 1971.
- 4) Lutz, L. A. and Gergely, P.: Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete, ACI Journal, Vol. 64, No. 11, pp. 711~721, November 1967.
- 5) Niwa, J., et al.: Nonlinear spring element for strain-slip relationship of a deformed bar, JCI-C 9 C, Vol. 2, pp. 227~235, May 1985.
- 6) 角 徹三ほか: 接合部からの鉄筋の抜け出しを考慮した鉄筋コンクリート骨組の変形解析, 第5回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 301~304, 1983.
- 7) 多田利正・武田寿一: 鉄筋コンクリート部材における付着劣化過程の解析的研究 (その1), 日本建築学会論文報告集, 第351号, pp. 22~30, 昭和60年5月.
- 8) 黒正清治ほか: 異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1155~1156, 昭和49年10月.
- 9) 池田尚治: 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究, 土木学会論文報告集, 第307号, pp. 85~97, 1981年3月.
- 10) 野口 博: 有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析 (第2報-その1), 日本建築学会論文報告集, 第258号, pp. 27~37, 昭和52年8月.
- 11) 森田司郎・角 徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp. 15~24, 昭和50年3月.
- 12) 角 徹三ほか: 鉄筋の降伏以後を含む異形鉄筋とコンクリート間の付着劣化に関する実験的研究, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 269~272, 1982.
- 13) 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, 日本建築学会論文報告集, 第348号, pp. 86~96, 昭和60年2月.
- 14) 角 徹三: 鉄筋近傍のコンクリートの面外変形を考慮した付着-滑り特性に関する研究, JCI-C 5, pp. 53~60, 1983年10月.
- 15) 後藤幸正・大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第294号, pp. 85~100, 1980年2月.
- 16) 村田二郎・河合弘茲: 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.
- 17) 国分正胤・岡村 甫: 太径鉄筋の使用に関する研究, 土木学会論文報告集, 第202号, pp. 103~113, 1972年6月.
- 18) 山尾芳秀ほか: 付着応力-滑り関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第343号, pp. 219~228, 1984年3月.