

# 横方向応力作用下における異形鉄筋の 付着強度に関する研究

長友克寛\*・角 徹三\*\*・松原三郎\*\*\*

本研究は、部材軸に直交する横方向からの圧縮または引張応力、およびかぶりを主実験変数とした異形鉄筋の引抜試験を行い、その付着強度への影響を調べたものである。実験の結果、横方向圧縮応力により付着強度は増加するがその効果には上限があること、および横方向引張応力により付着強度は急激に低下することなどを明らかにした。最後に、それらを考慮に入れた付着強度算定式の提案を試み、その適用性について検証した。

**Keywords** : bond strength, bond failure, lateral stress, concrete cover, deformed bar

## 1. 序 論

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造の終局強度型設計法への移行の動きとあいまって、ぜい性破壊の防止およびじん性確保の必要性が大きく再認識されてきている。RC構造において問題となる代表的なぜい性破壊は、いうまでもなくせん断破壊であり、その破壊機構の解明と防止対策に関して、実験と解析の両面から盛んにアプローチが行われている<sup>1)</sup>。

一方、RC構造のせん断問題における異形鉄筋の付着作用の重要性についても、従来より多くの研究者<sup>2),3)</sup>の指摘するところであり、ある条件のもとでは、せん断耐力以下の荷重でかぶりコンクリートが割れ裂ける、いわゆる付着割裂破壊への移行も問題となっている<sup>4)</sup>。

一例として、RC単純ばりのせん断問題を考えてみる。荷重の増加に伴う斜めひびわれの発生を契機として、はりにはトラス作用とアーチ作用とをもつ複合耐荷機構へと移行する。横補強筋の配置が不適切な場合には、主鉄筋に沿う付着割裂ひびわれにより破壊に至ることもある。ひびわれ面でのだば力の作用は、これを助長する。トラス作用の成立に際しては、下弦材として機能できるだけ主鉄筋の付着強度の確保が問題となる。アーチ作用の実現のためには、支点部での主鉄筋の十分な定着が暗黙の前提となっている。この定着は、付着割裂破壊防止の面からも重要な意味をもつ。

このように、付着作用はRC構造の挙動と密接にかかわっているのであるが、その定量化という点からは未だ十分とはいえない。特に、いまのRCはりの例においても、支点上定着部に作用する大きな圧縮応力や、だ

ば力により主ひびわれ面近傍に発生する引張応力など、主鉄筋周囲のコンクリートに生ずる鉄筋軸直交方向応力（以下、横方向応力）の付着特性に及ぼす影響には無視できないものがあると考えられるが、これまでに直接これらを議論した研究は非常に少なく、定量的にはほとんどわかっていないのが現状である。

著者らは、以上のことを踏まえ、圧縮および引張の両横方向応力を主要実験変数として取り上げ、その付着特性に与える影響について、コンクリートかぶりの変化と絡めて実験的に検討を加えた。本論文は、その実験結果のうち、特に付着強度について論じたものである。

まず2章では、圧縮応力作用下における付着強度について、今回の実験結果と既往の研究結果<sup>4)~6)</sup>の再評価とを利用することにより定量化した。そして、その結果を付着強度式として表現し、既往の実験結果との比較を通してその有用性を確認した。さらに3章では、引張応力作用下における付着強度について、今回の実験結果をもとに、同じく付着強度式の提案とその適用性の検証とを行った。

## 2. 横方向圧縮応力作用下における付着強度

### (1) 既往の研究および実験目的

横方向圧縮応力作用下における付着特性に関する研究は、前述したような主鉄筋定着部における拘束圧の影響を調べることがその契機となっているが、他の目的のものを含めても、これまでに報告されている研究は数少ない。特に、今回着目しようとしている付着強度を取り扱った研究としては、次に述べる4つがその代表的なものとして挙げられる。

Robinsら<sup>5)</sup>は、立方体およびカンティレバー型の軽量コンクリート試験体の引き抜き試験を行い、横方向圧縮応力の増加と共に付着強度はほぼ直線的に増加すること、この傾向は圧縮応力が $0.3 f_{cu}$  ( $f_{cu}$ :立方体コンクリー

\* 正会員 工修 高松工業高等専門学校助教 土木工学科  
(〒761 高松市勅使町 355 番地)

\*\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 建築工学科

\*\*\* 高松工業高等専門学校助手 土木工学科

ト圧縮強度)を越えると頭打ちになり,そのときの付着強度は $1.8\sqrt{f_{cu}}$ であること,そして,これは破壊モードが付着割裂破壊から鉄筋横ふし頂面でのコンクリートのせん断破壊へと移行するためであることなどを示している。

Navaratnarajah ら<sup>6)</sup>は,横方向圧縮応力作用方向に直交する方向のかぶり(側面かぶり)を変化させた引き抜き試験を行い,付着強度をかぶりと圧縮応力の平方根との直線式として表している。

Untrauer ら<sup>7)</sup>は,立方体試験体を用いた引き抜き試験により,付着強度が横方向圧縮応力の平方根の増加とほぼ直線関係にあることなどを報告している。しかし,供試体と載荷板との摩擦を考慮していないためか,付着強度は他の実験結果よりもかなり大きめにでている。

著者ら<sup>8)</sup>は,横ふし1個のみをもつ鉄筋を用い,載荷端とその横ふしとの距離を種々に変化させた引き抜き試験を行い,横ふし位置にかかわらず,横方向圧縮応力の増加に伴い付着強度はほぼ直線的に増大するがその割合はあまり大きくないことを示している。

一般に試験体の破壊は,横方向圧縮応力の作用により従来の付着割裂破壊から横ふし前面のコンクリートのせん断破壊への移行という破壊形態をとることが予想される。しかし,上述の研究においては,付着強度を議論する上で最も大切なひびわれパターン,すなわち破壊形式を予め明確に想定した実験とはなっていない。このことは,実験結果の大ききなばらつきとなって現れ,定量化の妨げとなっている。

本章では,圧縮応力作用方向のかぶり(底面かぶり)の変化に伴うこのような破壊形式の変化を念頭に置き,それに与える圧縮応力の影響を実験的に明らかにするとともに,上述の実験結果<sup>5),6)</sup>の再評価も合わせて行い,両者を統合することにより付着強度式の提案を試みる。

## (2) 各種無次元量の定義

本論文では,以下の議論における一般性を高めるため,次に定義する無次元量を使用した。

- $D$ : 供試筋公称径 (mm)
- $c$ : 底面かぶり(最小かぶり) (mm)
- $c_s$ : 側面かぶり (mm)
- $c_0 = c/D$ : 無次元化かぶり
- $c_{s0} = c_s/D$ : 無次元化側面かぶり
- $f'_c$ : コンクリート圧縮強度 (MPa)
- $p'_c$ : 横方向圧縮応力 (MPa)
- $p'_0 = p'_c/f'_c$ : 無次元化横方向圧縮応力
- $P_u$ : 最大鉄筋力変化量(供試筋引き抜き耐力)
- $l$ : 付着長(定着長)
- $\tau_u = P_u/(\pi D l)$ : (平均)付着強度 (MPa)
- $\tau_{nu} = \tau_u/\sqrt{f'_c}$ : 正規化付着強度
- $\tau_{ou} = \tau_{nu}(p'_0)/\tau_{nu}(p'_0=0)$ : 無次元化付着強度

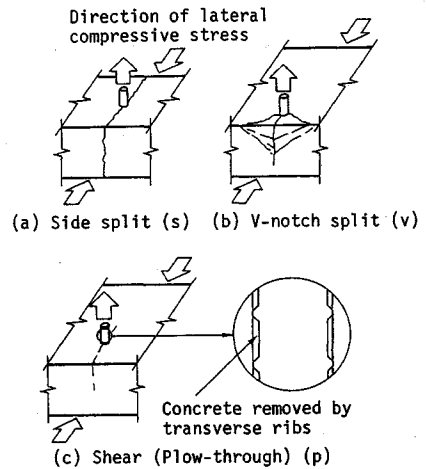


図-1 想定破壊形式

ここで,  $\tau_{nu}$  はコンクリート強度の違いの影響を低減するために用いたものである。また,  $\tau_{ou}$  は横方向圧縮応力  $p'_0=0$  の場合の正規化付着強度  $\tau_{nu}(p'_0=0)$  がそれぞれ基準値(=1)になるように各  $\tau_{nu}(p'_0)$  を無次元化したものである。

## (3) 実験方法

### a) 想定破壊形式

図-1は,今回の実験で想定した3種類の破壊形式を示している。図(a)は横方向圧縮応力作用方向へのサイドスプリット型の破壊,図(b)はVノッチ型の破壊<sup>9)</sup>,そして図(c)は鉄筋横ふし前面コンクリートのせん断破壊を表している。図(c)のタイプには,割裂ひびわれは発生するが部材の貫通には至らずに引き抜けるものも含める。実際の破壊は,各形式の複合したものであることが多い。本論文では,図(a),(b)の破壊が付着割裂破壊と呼ばれるのに対応して,図(c)の破壊のことを付着せん断破壊と呼ぶことにする。なお,今回は,載荷端に現れるろうと状ひびわれや隅角部に鉄筋1本が配置された場合に見られる斜め割裂ひびわれ(図-11(d)参照)によって引き起こされる破壊については実験対象としていない。

### b) 供試体

図-2は,供試体の形状・寸法を示している。データ整理に使用した供試体数は,全部で46体である。図(a)のタイプA供試体は,Vノッチ型の破壊からせん断型の破壊への移行を,図(b)のタイプB供試体は,サイドスプリット型の破壊をそれぞれ想定したものである。

なお,予備実験の結果,タイプA供試体の破壊はかぶりの小さい側から大きい側へのサイドスプリット型ひびわれの進展・貫通に支配されるものであった。そこで,このひびわれ貫通を防ぐために,かぶりの大きい側のコ

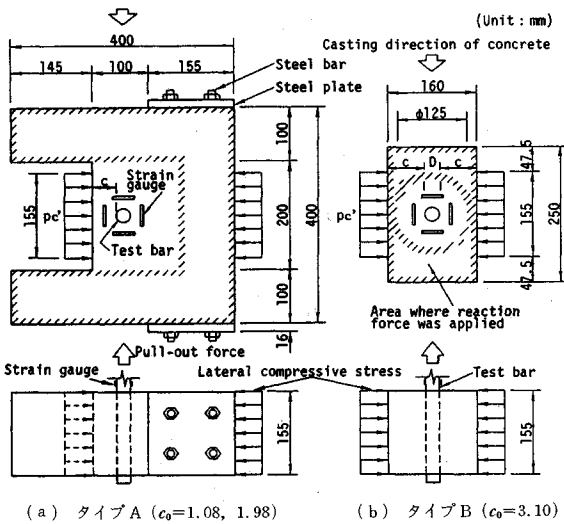


図-2 供試体・形状寸法

ンクリートを 155×155×20 mm の鋼板を介して鋼棒で締め付けることにより圧縮拘束した。締め付けにはトルクレンチを用い、鋼棒 1 本当たり作用する引張力を 5.9 kN (600 kgf) に統一した。これは、かぶりの小さい側のコンクリート縁において、横方向圧縮応力と直交方向に生ずる引張応力が約 0.1 MPa 程度以内におさまる力に相当している。

実験変数は、横方向圧縮応力  $p'_c$  と無次元化かぶり  $c_0$  の 2 つである。 $p'_c$  の大きさは、0, 3.92, 7.85, 9.81, 11.77 MPa (0, 40, 80, 100, 120 kgf/cm<sup>2</sup>) の 5 種類とした。これは、後述するコンクリートの目標圧縮強度のそれぞれ 0, 25, 50, 62.5, 75 % に対応している。

かぶり  $c_0$  は、1.08, 1.98, 3.10 の 3 種類を用いた。タイプ A 供試体では、全体の寸法は同一のまま鉄筋の位置を変えることにより、 $c_0$  を 1.08 と 1.98 とに変化させた。タイプ B 供試体では、 $c_0$  を 3.10 に固定した。

供試筋には、直角横ふしをもつ市販の鉄筋 D 22  $D = 22.2$  mm : 供試筋公称径)を用いた。弾性係数は  $E_s = 1.96 \times 10^5$  MPa, 降伏強度は  $f_y = 3.95 \times 10^2$  MPa であった。なお、今回の実験では横補強筋は使用していない。

通常、付着試験においては定着長を実験変数として考慮しなければならない。しかし、今回は既往の実験結果を参考にし、自由端すべりが生じ、しかも載荷端すべりととの差が比較的小さい  $l = 155$  mm (=7D) という値に固定した。

実験に使用したコンクリートは、単位水量 217 kg, 水セメント比 65 %, 粗骨材最大寸法 13 mm の AE コンクリートである。目標圧縮強度は、 $f'_c = 15.7$  MPa (160 kgf/cm<sup>2</sup>) に設定したが、実際の強度は、 $f'_c = 15.5 \sim 18.8$  MPa (159~191 kgf/cm<sup>2</sup>) の間で変動した。供試体は、供試筋が水平になるよう型枠を設置した状態でコ

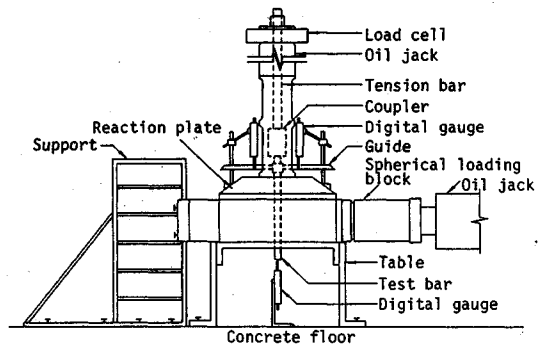


図-3 載荷・測定方法

ンクリートを打設し、養生室内にて気中養生した。

c) 載荷・測定方法

図-3 は、載荷・測定方法を示している。供試体側面に 155 (=7D)×155×20 mm の鋼板をあて、油圧ジャッキにて横方向圧縮応力を作用させた。供試体との間には、機械油をはさんだ 2 枚のビニールシートを挿入し、摩擦による拘束の影響を減じた。

所定の圧縮応力を載荷後、手動中空油圧ジャッキにて供試筋に引き抜き力を加え、その反力は、図-2 中の斜線領域内のコンクリートに圧縮力として作用させた。この反力作用部分は、できる限り鉄筋周辺のコンクリートを拘束しないよう配慮して決定したものである。引き抜き力は、中空ロードセルにてモニターした。

載荷端側コンクリート面の、供試筋表面から 1D 離れた互いに直交する 4 箇所にはひずみゲージを貼付し、圧縮応力の載荷状況や、鉄筋横ふしのくさび作用によるリングテンションを観察した。

(4) 実験結果およびその考察

a) 破壊形式

今回の実験で観察された破壊形式を図-1 を用いて説明する。まずタイプ A 供試体のかぶり  $c_0 = 1.08$  の場合、図-1 (b) の V ノッチ型破壊が大半であり、 $p'_c$  が大きくなると同図 (c) のせん断を伴うものもみられた。同じく  $c_0 = 1.98$  の場合は、 $p'_c = 0$  の 1 体を除いて全て同図 (c) の付着せん断破壊であったが、かぶりの小さい側にサイドスプリット型ひびわれが生じ、それを押し広げながら抜け出したものもあった。

既往の研究成果<sup>5),6)</sup>も考え合わせると、付着割裂破壊から付着せん断破壊への移行は、かぶり  $c_0 = 2 \sim 3$  の範囲で生ずると思われる。強度式の提案に際しては、この値を境界として 2 つの領域に分けて捉える必要がある。

次にタイプ B 供試体 ( $c_0 = 3.10$ ) の場合、大半のものは予想通り同図 (a) のサイドスプリット型ひびわれの貫通によって破壊した。ひびわれの発生方向は  $p'_c$  の作用方向と同じである。

b) 付着強度

図-4は、各かぶり  $c_0$  に対する付着強度  $\tau_{ou}$  と横方向圧縮応力  $p'_c$  との関係を示している。Vノッチ型破壊が支配的であった同図 (a) の  $c_0=1.08$  の場合、 $p'_c$  の増加に伴い  $\tau_{ou}$  は急激に増大しており、 $p'_c$  の効果を考慮することの必要性が明確に読み取れる。

付着せん断破壊への移行が見られた同図 (b) の  $c_0=1.98$  の場合、 $p'_c$  の増加に伴い  $\tau_{ou}$  は  $c_0=1.08$  の場合と同様に増大するが、その増大傾向は小さくなっている。

サイドスプリット型破壊を起こした同図 (c) の  $c_0=3.10$  の場合、 $p'_c$  による  $\tau_{ou}$  の増大効果はほとんど期待できない結果となっている。ただし、横方向圧縮応力載荷面および引き抜き力の反力面の摩擦拘束が大きい場合は、それによりひびわれの進展が拘束されるため、ある程度の付着強度増加が期待できると考えられる。しかし、それを考慮に入れるためにはこの摩擦の定量化が必要条件となってくる。参考までに、鋼板と供試体との間にビニールシートを挟まなかった場合の実験を行ってみた結果、付着強度はかなり大きなものとなり、このことが裏付けられた。

なお、データがばらついていて読み取りにくいのが、各図において同一の  $p'_c$  ごとに  $f'_c$  の違いを無視して  $\tau_{ou}$  の平均値を取ってみると、何れにおいても  $p'_c \approx 0.3 \sim 0.4$  を超えると  $\tau_{ou}$  の増大傾向は頭打ちになっており、付着強度式構築の際注目すべき結果である。

いま、付着強度が増加していると思われるこの  $p'_c$  の範囲を適宜設定し、そのデータを次の式 (1) で直線近似する。

$$\tau_{ou} = a_1 \cdot p'_c + 1 \dots \dots \dots (1)$$

図-4中の実線は、上式による最小自乗近似の結果である。同図中には、 $\tau_{ou}$  を求める際に基準となる、 $p'_c=0$  時の正規化付着強度  $\tau_{nu}(p'_c=0)$  についても示してある。

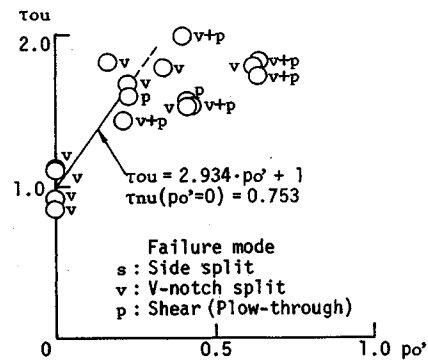
図-5は、サイドスプリット型および完全な(割裂ひびわれを伴わない)付着せん断型以外の破壊を示したと考えられる既往の実験結果について、適宜  $p'_c \leq 0.2 \sim 0.4$  のデータを式 (1) の形で直線近似し、その係数  $a_1$  と  $c_0$  との関係を示したものである。使用したデータは、本実験、Robinsら<sup>\*1</sup>およびNavaratnarajahら<sup>\*2</sup>の実験結果の3つである。

同図より、かぶり  $c_0$  の増加に伴い係数  $a_1$  はほぼ直線的に減少することがわかる。この関係を次式で直線近似してみる。

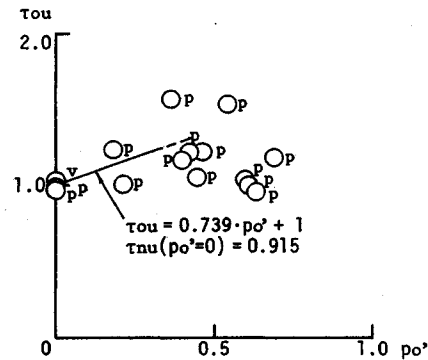
$$a_1 = b_1 \cdot c_0 + b_2 \dots \dots \dots (2)$$

\*1 ここでは、はり型供試体に関するデータを論文中のグラフから読み取った。その際、コンクリート圧縮強度としては、平均立方体強度を0.85倍することにより円柱供試体強度に変換して用いた<sup>5)</sup>。

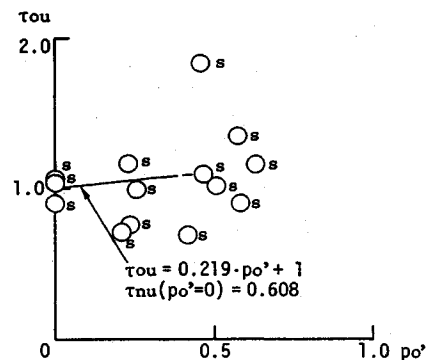
\*2 ここでは、TorbarとHybarの2種類のふし有り鉄筋(径25mm)に関するデータを使用した。コンクリート圧縮強度については、平均圧縮強度を用いた。なお、底面かぶりは、 $c_0=1.5$ で一定である<sup>6)</sup>。



(a)  $c_0=1.08$  の場合



(b)  $c_0=1.98$  の場合



(c)  $c_0=3.10$  の場合

図-4 横方向圧縮応力の付着強度への影響

係数  $b_1$ ,  $b_2$  は、それぞれ  $-1.75$ ,  $4.55$  となった。上述のように、 $c_0=2 \sim 3$  付近において破壊形式はせん断破壊に完全に移行すると考えられる。上式は、 $c_0=2.6$  において  $a_1=0$  となり、このことと対応している。なお、 $a_1$  は  $c_0$  が同一でもかなり変動しており、より正確に定量化するためには鉄筋横ふしの形状・寸法、鉄筋径  $D$ 、実かぶり  $c$  などの影響を考慮する必要がある。

図-6は、Navaratnarajahら<sup>6)</sup>の実験における、係数  $a_1$  と側面かぶり  $c_{s0}$  との関係を示している。同実験における供試体の破壊形式の大半は、後述する藤井ら<sup>4)</sup>の提案した付着割裂強度式においてコーナースプリット型破

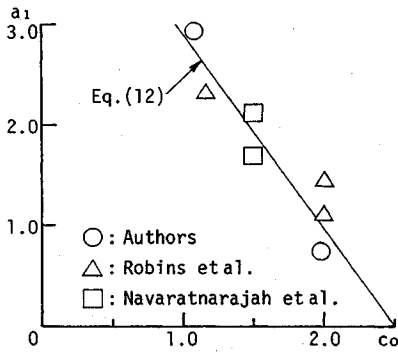


図-5 底面かぶりの係数  $a_1$  への影響

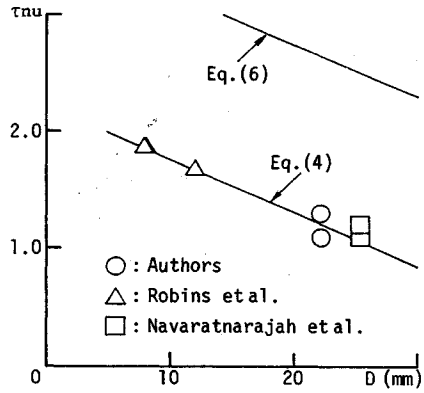


図-7 鉄筋径の付着せん断強度への影響

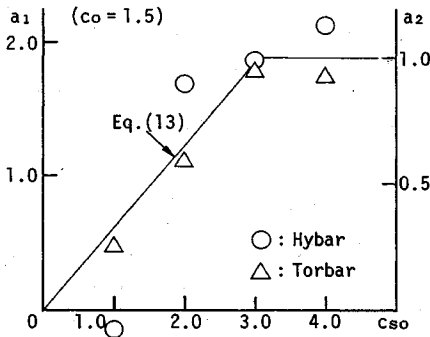


図-6 側面かぶりの係数  $a_1$  への影響

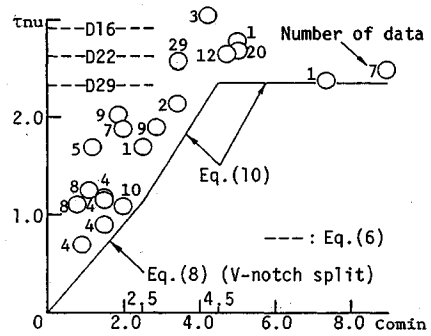


図-8 最小かぶりの付着せん断強度への影響

壊 (図-11 (d) 参照) に分類され、 $p'_0$  の  $\tau_{nu}$  への効果に及ぼす  $c_{s0}$  の影響をみる上で有効なものである。図-6より、 $c_{s0}$  が大きくなるにつれて  $a_1$  は大きくなるが、その傾向は  $c_{s0}=3\sim 4$  で頭打ちになることがわかる。これは、 $c_{s0}$  が小さい場合、鉄筋が割裂ひびわれを押し広げながら抜け出す際の側面かぶりコンクリートの変形剛性、ひいては抜け出しに対する拘束が小さいことが一因であると考えられる。図-6の右縦軸の値  $a_2$  は、 $c_{s0}=3$  と4の場合の  $a_1$  の平均値が1となるよう変換したものである。 $c_{s0} \leq 3$  について  $a_2$  と  $c_{s0}$  との関係を表す式を次式で直線近似する。

$$a_2 = b_3 \cdot c_{s0} \dots \dots \dots (3)$$

係数  $b_3$  は、0.327 となり、ほぼ  $c_{s0}=3$  で  $a_2=1$  となる点と原点とを通る直線となった。

Navaratnarajah ら<sup>6)</sup> は、上端筋と下端筋との付着強度の違いについても検討を加えている。それによれば、下端筋と上端筋との付着強度の比は、横方向圧縮応力の増加と共にわずかず増加する傾向にはあるが、平均をとると1.24となっている。これは、藤井ら<sup>4)</sup>の実験値1.22とほぼ一致しており注目される。

c) 付着せん断破壊

鉄筋横ふし前面コンクリートのせん断による破壊は、付着性能がフルに発揮されるものであり、通常は横ふし前面コンクリートの局所的な圧壊に引き続いて発生する

ものと考えられる。この破壊形式は、鉄筋周囲のコンクリートの拘束が大きな場合、極端に定着長の短い場合、軽量コンクリートの場合などの引き抜きにみられるが、この破壊が先行して部材全体の破壊に至ることはほとんどないため、これまで詳細に議論されているとはいえない。以下では、簡単にこの破壊強度について検討を加えてみる。

上述のように、横方向圧縮応力  $p'_0$  が大きくなり付着せん断破壊を起こすと、付着強度  $\tau_{nu}$  は頭打ちとなる。図-7は、かぶりが  $c_0 \leq 2$  の小さい場合について、この頭打ち領域における  $\tau_{nu}$  の平均値と鉄筋径  $D$  との関係を示している<sup>5), 6)</sup>。同図より、鉄筋径  $D$  の増加に伴い  $\tau_{nu}$  はほぼ直線的に減少することがわかり、これを直線近似すると次式となる。

$$\tau_{nu} = -0.045 \cdot D + 2.21 \dots \dots \dots (4)$$

Soroushian ら<sup>9)</sup> は、柱・はり接合部を想定した、鉄筋周囲の拘束の大きい状態での局部付着強度  $\tau_u$  への鉄筋径  $D$  の影響を調べ、次式を提案している。

$$\tau_u = (20 - D/4) \cdot \sqrt{f'_c/30} \dots \dots \dots (5)$$

この式を変形し、正規化付着強度  $\tau_{nu}$  で表現すると、

$$\tau_{nu} = -0.046 \cdot D + 3.65 \dots \dots \dots (6)$$

となる。式(4)と式(6)とは、かぶりなどの拘束条

件の違いにより、得られる  $\tau_{nu}$  の値そのものは違うけれども、 $D$  の増加に伴う減少率はほぼ一致しており注目される。

図-8 は、付着せん断破壊を起こしたと思われるデータ 148 個<sup>(5), (6), (10)~(15)</sup> を各実験ごとに平均し、その付着強度  $\tau_{nu}$  と最小かぶり  $c_{0min}$  との関係を示したものである。実験結果は、定着長  $l < 10D$  に対するものであり、鉄筋の種類、横方向圧縮応力、繰返し載荷等の違いについては無視している。横補強筋の拘束が大きいと考えられるものは割裂ひびわれの発生の有無にかかわらず使用している。同図より、 $c_{0min}$  の増加に伴い  $\tau_{nu}$  はほぼ直線的に増加し、その傾向は  $c_{0min} \div 4 \sim 5$  で頭打ちになることがわかる。ただし、このときの  $\tau_{nu}$  は式 (6) で示したように鉄筋径  $D$  により変化するはずである。同図中には、幾つかの  $D$  について、式 (6) より得られる  $\tau_{nu}$  の値を示しているが、ある程度実験結果を表現できていると考えられる。

一般に、引き抜き試験体の載荷端近傍では、鉄筋横ふしからのろうと状内部ひびわれの載荷端への到達により早い荷重段階から付着強度劣化が生じ、繰返し載荷はこれに拍車をかける。そのため、試験体破壊時に実際に抵抗している付着長は短くなっている。しかも、たとえ短い定着長であっても付着応力分布は一樣ではなく、応力の再分配が生ずるため局所的な付着強度は平均付着強度よりも実際には大きい。したがって、この図に示した  $\tau_{nu} = 2 \sim 3$  という付着強度の上限値は通常安全側にあると考えられる。実際、条件によっては  $\tau_{nu} = 5 \sim 6$  という高い強度を示している場合もある。

付着せん断強度への鉄筋横ふし間隔  $s_r$  および横ふし高さ  $h_r$  の影響についてはデータが少ないが、鉄筋径  $D$  が同じ場合、 $s_r$  および  $h_r$  の増加に伴い強度はそれぞれ増大するようである<sup>(10), (16), (17)</sup>。

なお、本論文では、付着強度の表示方法として  $\tau_{nu} = \tau_u / \sqrt{f_c}$  を用いている。これは、付着破壊はコンクリートの割裂引張によって引き起こされ、その引張強度は  $\sqrt{f_c}$  に比例するという考えに基づいている。しかし、この考えが付着せん断破壊にも適用できるのかどうかについては、強度への影響因子の定量化と合わせて今後さらに検討すべき課題である。

(5) 付着強度式の提案

a) 横方向圧縮応力  $p'_0 = 0$  時の付着割裂強度式

本論文では、横方向圧縮応力  $p'_0$  の付着強度への効果を一貫して式 (1) をもとに検討してきた。この式は、 $p'_0 = 0$  時の付着強度  $\tau_{nu}(p'_0 = 0)$  を基準にとるものであり、変形すると次式となる。

$$\tau_{nu}(p'_0) = \tau_{nu}(p'_0 = 0) \cdot (a_1 \cdot p'_0 + 1) \dots \dots \dots (7)$$

ここまでのデータ整理では、この  $\tau_{nu}(p'_0 = 0)$  として実験結果の平均値を用いてきたが、付着強度式を構築する

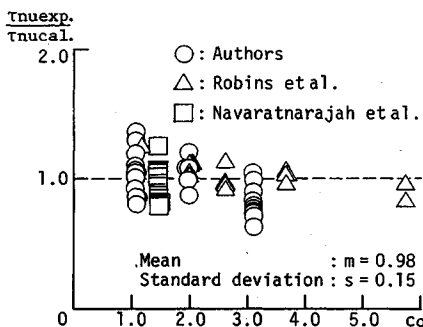


図-9 付着割裂強度の実験値と計算値<sup>4)</sup>との比較 ( $p'_0 = p_0 = 0$  の場合)

ためにはこれをいかに精度良く推定できるかが問題となる。次式は、藤井ら<sup>4)</sup>の提案した付着割裂強度式を MPa 表示に換算したものである。

$$\tau_{nu}(p'_0 = p_0 = 0) = 0.0962 \cdot b_i + 0.134 \dots \dots \dots (8)$$

$b_i$  は割裂破壊形式を判定する尺度であり、以下の  $b_{vi}$ ,  $b_{ci}$ ,  $b_{si}$  の最小値を用いる。

$$\left. \begin{aligned} b_{vi} &= \sqrt{3} \cdot (2 \cdot c_0 + 1) \\ b_{ci} &= \sqrt{2} \cdot (c_0 + c_{s0} + 1) - 1 \\ b_{si} &= b / (N \cdot D) - 1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $b$  : 部材幅、 $N$  : 鉄筋本数である。V ノッチ型破壊の場合  $b_{vi}$ 、コーナースプリット型破壊の場合  $b_{ci}$ 、サイドスプリット型破壊の場合  $b_{si}$  が最小値をとる。

図-9 は、本論文で使用した実験結果のうち付着割裂破壊を起こした 61 体の供試体について、その実験値と式 (8) による計算値との比を示している。かぶり  $c_0$  が大きくなるにつれて計算値は安全側から危険側へと移行する傾向にはあるが、両者の比の平均値は  $m = 0.98$  であり、全体としてみれば有効な強度式であると考えられる。以下では、付着割裂破壊時の  $\tau_{nu}(p'_0 = 0)$  の評価にはこの式を使用するものとして議論を進めていく。

なお、式 (8) は水平上端筋に対するものであり、これ以外の鉄筋については 1.22 倍するものとして提案されている。しかし、以下では安全をみて、式 (8) の値が水平上端筋以外の鉄筋に対するもの、それを 1.22 で除した値が水平上端筋に対するものというように安全側に修正を加えて用いる。

b) 横方向圧縮応力  $p'_0 = 0$  時の付着せん断強度式

前節 b), c) の議論をもとに、V ノッチ型の付着割裂破壊から付着せん断破壊への移行点のかぶりを  $c_0 = 2.5$  とすると、このときの正規化付着強度は式 (8) より  $\tau_{nu} = 1.13$  となる。これに対応して、コーナースプリット型破壊においても  $c_0 > 2.5$  か  $c_{s0} > 4.5$  の領域では付着せん断破壊に移行するものと仮定する。Orangun ら<sup>18)</sup> は、付着割裂強度に関する提案式の中でその適用範囲を  $c_0 \leq 2.5$  としている。定着長を  $l = 10D$  とすると、この

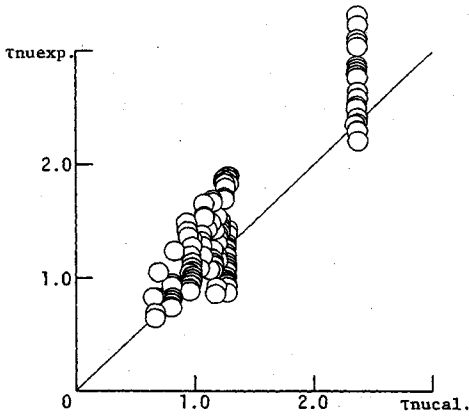


図-10 付着強度式の適用性の検証 ( $p'_0 \geq 0$  の場合)

ときの付着強度は  $\tau_{nu} = 1.14$  となり、上述の値とほぼ一致する。

一方、図-8において付着せん断強度が頭打ちになる点のかぶりを  $c_0 = 4.5$  とし、このときのせん断付着強度を  $\tau_{nu} = 2.35$  とする。これは、式(6)において  $D29$  鉄筋を使用したときの値に相当している。

これら2つの点を点線で結んだものを横方向圧縮応力  $p'_0 = 0$  における付着せん断強度式と仮定すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{nu} &= 0.609 \cdot c_0 - 0.390 \quad (2.5 < c_0 \leq 4.5) \\ &= 2.35 \quad (c_0 > 4.5) \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

既に述べたように、 $p'_0$  による付着せん断強度の増大効果はほとんどないとみなせるため、上式は全ての  $p'_0$  に対して成立するものとする(図-11(e)参照)。なお、 $p'_0 = 0$  の場合、サイドスプリット型破壊においては  $c_0$  の増加に伴う付着せん断破壊への移行は起こらないものとする。

図-8には、式(8)(Vノッチ型破壊  $b_i = b_{vi}$  の場合)と式(10)とを実線で示してある。

c) 横方向圧縮応力  $p'_0$  の効果

横方向圧縮応力  $p'_0$  の付着強度への効果は、式(2)の係数  $a_1$  および式(3)の係数  $a_2$  で表現される。いま、 $a_1$  に  $a_2$  の効果を含めた新しい係数  $k_1$  を次式で定義する。

$$k_1 = a_1 \cdot a_2 \dots\dots(11)$$

ただし、図-11(a)のサイドスプリット型破壊および同図(e)の付着せん断破壊の場合に対しては  $k_1 = 0$  とする。同図(b)に対してはVノッチ型破壊に準ずるものとするが、これについては今後の検討課題である。

式(11)中の係数  $a_1$  については、図-5において付着せん断破壊への移行に伴い  $p'_0$  の効果の無くなる点を  $c_0 = 2.5$  に丸めて直線近似し直すことにより、次式で与えられる。

$$a_1 = 1.93 \cdot (2.5 - c_0) \quad (c_0 \leq 2.5) \dots\dots(12)$$

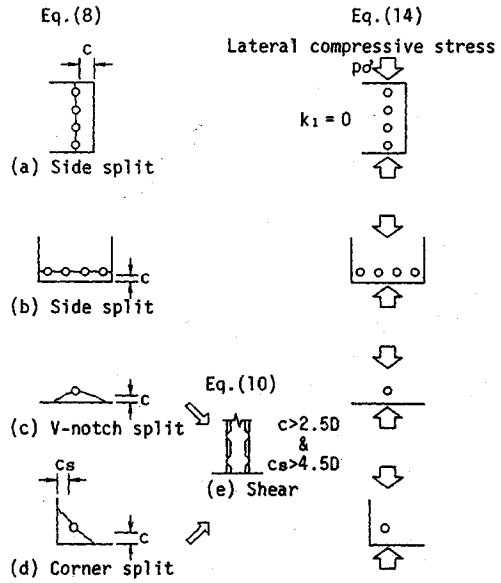


図-11 付着強度計算の流れ図

係数  $a_2$  については、式(3)中の係数  $b_3$  に対する結果を丸めて次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= c_{s0}/3 \quad (c_{s0} < 3.0) \\ &= 1 \quad (c_{s0} \geq 3.0) \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

最終的に、式(7)中の係数  $a_1$  を  $k_1$  で置き換えることにより次式が得られる。

$$\tau_{nu}(p'_0) = \tau_{nu}(p'_0 = 0) \cdot (k_1 \cdot p'_0 + 1) \quad (p'_0 \leq 0.3) \dots\dots(14)$$

図-4の結果を参考にし、横方向圧縮応力による付着強度増大の効果は  $p'_0 = 0.3$  で頭打ちとする。

d) 提案式の実験値との適合性

図-10は、実験値と今回の提案式による計算値とを比較したものである。図-11には、今回提案した付着強度式の計算の流れを示す。使用した実験値は、図-11(a)以外の破壊における、単調荷重を受け、横補強筋をもたない163体の供試体に関するものである。付着強度  $\tau_{nu}$  の実験値と計算値との比は、平均値  $m = 1.19$ 、標準偏差  $s = 0.22$  となった。全体としては安全側の評価となっており、今回の提案式の有効性が確認された。

3. 横方向引張応力作用下における付着強度

(1) 既往の研究および実験目的

異形鉄筋の付着割裂破壊は鉄筋横ふしのくさび作用に伴って生ずるリングテンションによるものであるから、横方向引張応力の作用がこの破壊を助長するものであることは容易に予想される。しかし、それが実際にどの程度のものであるかについては、未だ明らかにはされていない。

著者ら<sup>8)</sup>は、横ふし1個のみをもつ異形鉄筋という基

本エレメントを用いた供試体の引き抜き試験を実施し、横方向引張応力の作用に伴い付着強度は急激に低下するという先の予想を裏付ける結果を得ている。しかし、これ以外には横方向引張応力作用下における付着特性を直接取り扱った研究は見当たらず、わずかにだぼ力と付着力との相互作用に関する研究の中でだぼ力を間接的に鉄筋まわりのコンクリートの引張応力に置換した研究<sup>19)</sup>がみられるだけである。

本章では、まず、著者らの既往の結果<sup>9)</sup>に一般性をもたせるため、かぶりを変数とし、市販の鉄筋を使用して実施した引き抜き試験の結果について述べる。それをもとに横方向引張応力の付着強度への影響を定量化し、強度式の構築を試みる。

(2) 無次元量の定義

本章では、2章における無次元化横方向引張応力  $p_0$  に代わって、次に定義する無次元化横方向引張応力  $p_0$  を用いて議論を進めていく。

$f_t$ : コンクリート引張強度 (MPa)

$p_t$ : 横方向引張応力 (MPa)

$p_0 = p_t / f_t$ : 無次元化横方向引張応力

(3) 実験方法

a) 想定破壊形式

今回の実験で想定した破壊形式は、図-12に示すような横方向引張応力作用方向に直交する面でのサイドスプリット型破壊である。

b) 供試体

図-13は、供試体の形状・寸法を示している。データ整理に使用した供試体数は、全部で55体である。実験変数は、横方向引張応力  $p_t$  とかぶり  $c_0$  の2つである。 $c_0 = 1.08, 1.98, 3.10$  の3種類のかぶりに対して、それぞれ  $p_t = 0, 0.49, 0.98, 1.47$  MPa (0, 5, 10, 15 kgf/cm<sup>2</sup>) の4種類の引張応力を作用させ、それらの付着強度への影響を調べた。

供試筋には、圧縮応力載荷時と同じ市販の直角横ふし鉄筋  $D22$  を使用した。横補強筋については、ここでも使用していない。

供試体中央に埋め込んだ供試筋の左右対称位置に155 mmの直線部をもつ平行な中空部分を設け、これに挟まれた区間を試験区間とした。この中空部分は、その間隔を変えることによりかぶり  $c_0$  を変化させられるだけでなく、コンクリート表面に作用する供試筋引き抜き反力の試験区間への影響を遮断する役割も持っている。中空部分の両外側にはスリットを設け、引張応力の作用領域を試験区間のみに限定した。

引張応力の載荷には、供試体側面のコンクリートに深さ41 mm、ピッチ30 mmで埋め込んだ六角ボルト (M6) を用いた。供試体の横寸法を400 mmとしたのは、この六角ボルト付近の応力の乱れが試験区間中央にまで

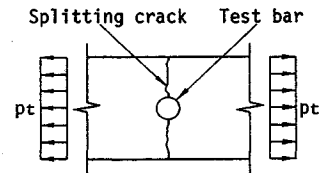


図-12 想定破壊形式

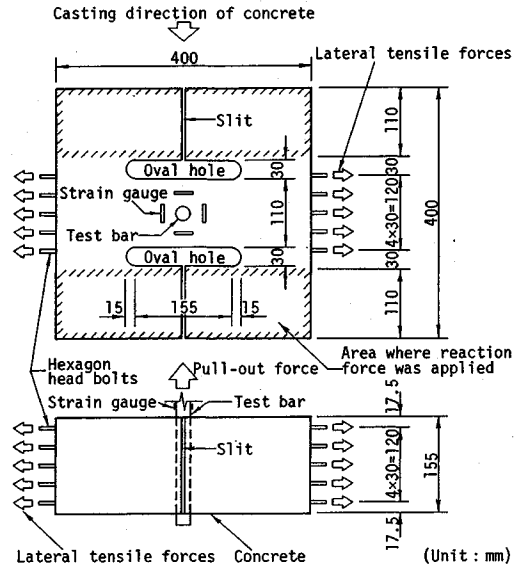


図-13 供試体形状・寸法 ( $c_0 = 1.98$  の場合)

及ばないように、試験区間の幅が1番大きい  $c_0 = 3.10$  の場合においても、その幅の2.5倍以上の長さになるよう配慮したものである。

実験に使用したコンクリートは、単位水量200.5 kg、水セメント比61%、粗骨材最大寸法13 mmのAEコンクリートである。目標圧縮強度は  $f'_c = 23$  MPa (234 kgf/cm<sup>2</sup>)、同引張強度は  $f_t = 2.0$  MPa (20 kgf/cm<sup>2</sup>) に設定したが、実際の強度はそれぞれ  $f'_c = 20 \sim 25$  MPa (202 ~ 254 kgf/cm<sup>2</sup>)、 $f_t = 2.1 \sim 2.5$  MPa (21 ~ 26 kgf/cm<sup>2</sup>) の間で変動した。供試体の打設・養生方法については2章と同じである。

c) 載荷・測定方法

図-14は、載荷・測定方法を示している。所定の横方向引張応力を加えた後、手動中空油圧ジャッキにより供試筋に引き抜き力を加えた。その反力は、図-13中の斜線領域内のコンクリートに圧縮力として作用させた。

引張応力は、載荷板を供試体側面に埋め込んだ六角ボルトとナットとで締め付け、それをさらに連結棒、連結板を介して油圧ジャッキおよび鋼製反力台と接続することにより載荷した。その際、偏心載荷は極力小さくなるよう配慮した。



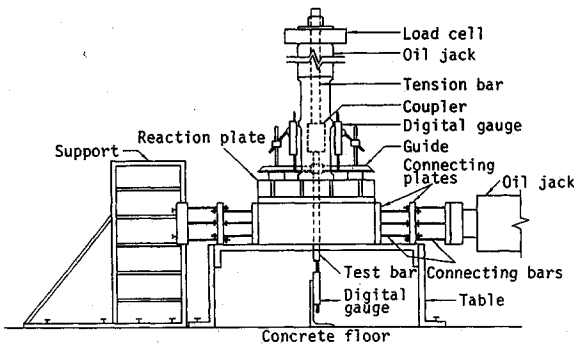


図-14 荷重・測定方法

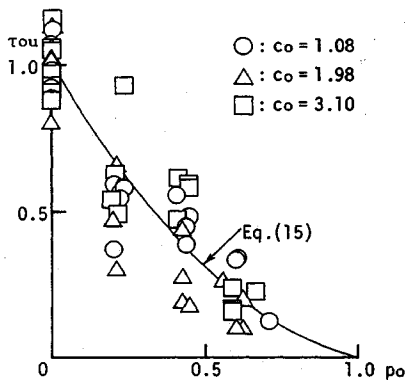


図-15 横方向引張応力の付着強度への影響

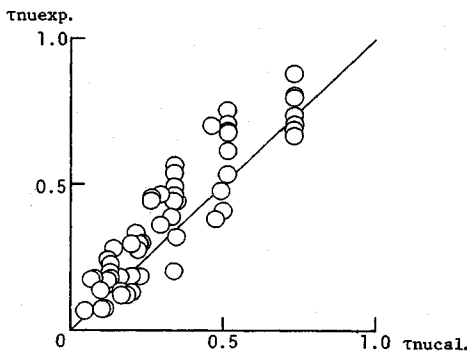


図-16 付着強度式の適用性の検証 ( $p_0 \geq 0$  の場合)

測定事項・方法についても、全て2章と同じである。

(4) 実験結果およびその考察

a) 破壊形式

今回の実験で観察された破壊形式は、概ね図-12に示したようなサイドスプリット型の付着割裂破壊であった。

b) 付着強度

図-15は、付着強度  $\tau_{ou}$  と横方向引張応力  $p_0$  との関係を示したものである。  $c_0$  の如何にかかわらず、  $p_0$  の増加に伴い  $\tau_{ou}$  は急激に低下し、  $p_0=1$ 、すなわち  $p_t$  が  $f_t$  に近づくにつれて  $\tau_{ou}$  もゼロに近づく。横方向引張応

力の作用を考慮することの必要性が再認識される。

鈴木ら<sup>20)</sup>は、鉄筋に所定の引張力を加えた後にだぼ力を作用させた実験を行い、わずかな引張力が作用しただけでだぼ耐力は大きく低下することを明らかにしている。実験条件は全く違うけれども、今回の結果と傾向が似ており興味深い。

(5) 付着強度式の提案

図-15に示した  $\tau_{ou}$  と  $p_0$  との関係を示したような2次式で近似する。

$$\tau_{ou} = (k_2 \cdot p_0 - 1) \cdot (p_0 - 1) \dots \dots \dots (15)$$

全てのかぶりに対する係数の平均値は  $k_2=0.755$  となった。図-15中には、式(15)の  $k_2$  にこの値を用いた場合の曲線を実線で示してある。

式(14)と同様に式(15)を変形すると次式となる。

$$\tau_{nu}(p_0) = \tau_{nu}(p_0=0) \cdot (k_2 \cdot p_0 - 1) \cdot (p_0 - 1) \dots \dots \dots (16)$$

ここでも、  $\tau_{nu}(p_0=0)$  の評価には式(8)を使用する。

図-16は、実験値と今回の提案式による計算値とを比較したものであり、実験値と計算値との比の平均値は  $m=1.26$ 、標準偏差は  $s=0.40$  となった。コンクリート引張強度のばらつきを反映してか両者の比にもかなりのばらつきが見られるが、全体としては安全側の評価であり、今回の提案式はある程度の有効性をもつと考えられる。

4. 結 論

本研究は、異形鉄筋の付着強度に与える鉄筋軸に直交する横方向からの圧縮応力および引張応力の影響について実験的に検討を加えたものである。得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

(1) 横方向圧縮応力の増加とともに付着強度は増大するが、圧縮応力がコンクリート圧縮強度の約30%を越えたとこの傾向は頭打ちとなる、という既往の研究結果を確認した。

(2) 横方向圧縮応力によるこの付着強度増大効果は、最小かぶりが大きくなるにつれて減少し、最小かぶりが鉄筋径の約2.5倍をこえるとほとんど見られなくなる。

(3) これらは、破壊形式が付着割裂破壊から鉄筋横ふし前面コンクリートのせん断破壊へと移行することに対応している。すなわち、後者の破壊形式を起こす場合における圧縮応力の付着強度増大効果は小さい。

(4) 横方向圧縮応力作用方向に平行な面でのサイドスプリット型付着割裂破壊を起こす場合、引張応力による付着強度増大効果は期待できない。

(5) 横方向引張応力の増加とともに付着強度は急激に低下し、引張応力がコンクリート引張強度に等しいときに付着強度がゼロとなる点に向かう。

(6) 横方向圧縮応力および横方向引張応力作用下に

おける付着強度式を提案し、その有効性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 日本コンクリート工学協会：RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，JCI-C1，JCI-C5，1982年6月，1983年10月。
- 2) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第293号，pp.101~109，1980年1月。
- 3) 渡辺史夫：鉄筋コンクリートのせん断性状と付着，RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C1，pp.123~134，1982年6月。
- 4) 藤井 栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究（第2報），日本建築学会論文報告集，第324号，pp.45~53，1983年2月。
- 5) Robins, P.J. and Standish, I.G. : The influence of lateral pressure upon anchorage bond, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.129, pp.195~202, December 1984.
- 6) Navaratnarajah, V. and Speare, P.R.S. : An experimental study of the effects of lateral pressure on the transfer bond of reinforcing bars with variable cover, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol.81, Part 2, pp.697~715, December 1986.
- 7) Untrauer, R.E. and Henry, R.L. : Influence of normal pressure on bond strength, ACI Journal, Vol.62, pp.577~585, May 1965.
- 8) 長友克寛・角 徹三：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，土木学会論文集，第402号／V-10，pp.97~104，1989年2月。
- 9) Soroushian, P. et al. : Bond of deformed bars to concrete, ACI Materials Journal, Vol.88, No.3, pp.227~232, May-June 1991.
- 10) 長友克寛・角 徹三：異形鉄筋の横ふし間隔および個数が付着特性に与える影響について，コンクリート工学年次論文報告集，第11巻，第2号，pp.171~176，1989年。
- 11) 角 徹三：異形鉄筋の付着特性とその鉄筋コンクリート部材の変形状に及ぼす影響に関する研究，京都大学学位論文，1978年8月。
- 12) 六車 照ほか：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 I，日本建築学会論文報告集，第131号，pp.1~8，1967年1月。
- 13) 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.52~63，1982年12月。
- 14) 林 静雄ほか：引き抜き力を受ける異形鉄筋の引き抜き端近傍における付着性状，RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C8，pp.43~48，1984年12月。
- 15) 国分正胤・岡村 甫：コンクリートに対する異形鉄筋の付着性状に関する研究，コンクリートライブラリー第14号，pp.1~19，1965年12月。
- 16) 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。
- 17) 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，第13巻，第2号，pp.127~132，1991年。
- 18) Orangun, C.O. et al. : A reevaluation of test data on development length and splices, ACI Journal, Vol.74, pp.114~122, March 1977.
- 19) Vintzêleou, E.N. and Tassios, T.P. : Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions, Magazine of Concrete Research, Vol.38, No.134, pp.13~22, March 1986.
- 20) 鈴木基行ほか：軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響に関する実験的研究，土木学会論文集，第426号／V-14，pp.159~166，1991年2月。

(1991.12.6受付)

BOND STRENGTH OF DEFORMED BARS UNDER LATERAL STRESS

Katsuhiko NAGATOMO, Tetsuzo KAKU and Saburo MATSUBARA

The influence of both compressive and tensile lateral stresses on the bond strength of deformed bars were studied. The test specimens were devised so that the frictional restraint induced by loading plates for pull-out load and lateral stress were reduced. The major variables used were the lateral stress and concrete cover. The bond strength increases with increasing compressive lateral stress up to about 30% of concrete compressive strength. However, beyond a concrete cover of 2.5 times of test bar diameter this trend disappears. On the other hand, the bond strength rapidly decreases with increasing tensile lateral stress. Taking account of these results, the empirical equations for bond strength under lateral stress were derived.