

論文

[2082] 異形鉄筋の付着特性に及ぼす横方向引張応力の影響

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)

松原 三郎 (高松工業高等専門学校)

1. はじめに

コンクリート中に埋め込まれた異形鉄筋に引張力が加わると、その力は横ふしから周囲のコンクリートへと斜め前方に伝達される。この伝達力により、周囲のコンクリートは様々な形態の損傷を受け、場合によっては部材の破壊へとつながることもある。鉄筋軸に沿う割裂ひびわれは、その代表的なものの一つである<sup>1)</sup>。

このような鉄筋からコンクリートへの力の伝達挙動、いわゆる付着挙動は、通常、引抜試験のような一軸型の付着試験、あるいはカンチレバー型試験体のようなより実部材に近い形の試験体を用いたモデル試験によって実験的に調べられる。しかし、前者は、付着特性を知る上で比較的広い用途をもつ反面、かぶりや横補強筋などの幾何条件および鉄筋軸直交方向の応力条件が考慮に入れにくいという欠点を有している。また、後者は、それらの条件を現実に近いものにできる利点はあるが、種々の影響因子の分離が難しく、逆にその結果の適用範囲が制限される場合がある。

本研究は、これらのことを踏まえ、鉄筋からの斜め方向伝達力によって生じるコンクリートの応力と、それとは別の原因で生じる鉄筋軸直交方向の応力とが分離して取り扱え、しかもかぶりなどの条件が比較的簡単に考慮できるように従来の一軸型試験体に工夫を施し、それを用いた引抜試験を実施したものである。鉄筋軸に直交する横方向からの応力としては、鉄筋周囲のコンクリートに最も不利に作用すると考えられる引張応力を対象とし、その付着特性への影響を数種類のかぶりと対応づけて実験的に検討した。

2. 実験方法

(1) 供試体

図-1に供試体の形状・寸法を示す。供試筋として市販の直角横ふし鉄筋(D22)を使用し、断面400×400mm、高さ155mmのコンクリート中に埋め込んだ。コンクリート側面には、六角ボルト(M6)を深さ41mm、ピッチ30mmで埋め込んだ。

コンクリート断面の左右対称位置には、155mmの直線部をもつ平行な中空部分を設け、その直線部に挟まれた区間を試験区間とした。この中空部分の間隔を変えることにより、かぶりを変化させることができる。中空部分は、さらに、コンクリート表面に作用する供試筋引抜力の反

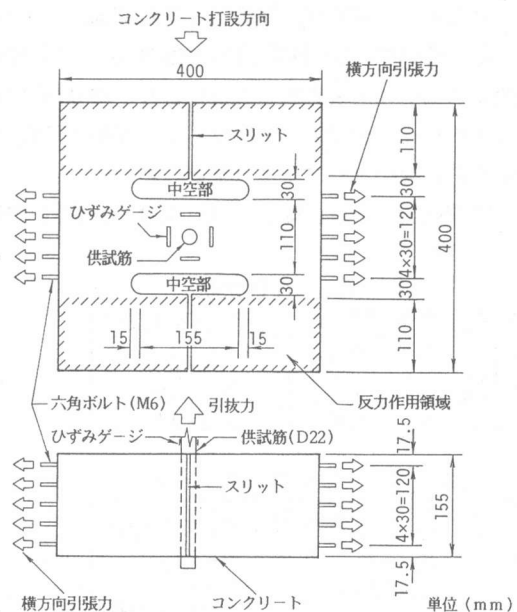


図-1 供試体形状・寸法 (c=2Dの場合)

力の試験区間への影響を遮断する働きももっている。中空部分の両外側にはスリットを設け、横方向引張応力の作用領域を試験区間のみ限定した。

実験変数は、鉄筋のかぶり  $c$  と横方向引張応力  $p_t$  の 2 つである。  $c=1.08D, 1.98D, 3.10D$  ( $D=22.2\text{mm}$ : 供試筋公称径) の 3 種類のかぶりに対して、それぞれ  $p_t=0, 0.49, 0.98, 1.47\text{MPa}$  ( $0, 5, 10, 15\text{Kgf/cm}^2$ ) の 4 種類の横方向引張応力を作用させ、それらの付着特性への影響を調べた。なお、以下では、簡略化してかぶり  $c$  を  $1D, 2D, 3D$  と表記する。

付着試験においては、定着長を実験変数として考慮に入れなければならないが<sup>1)</sup>、今回は、既往の実験結果<sup>2)</sup>に基づき、自由端すべりが生じ易く、しかも載荷端と自由端のすべりの差が比較的小さいと予想される  $155\text{mm}$  ( $7D$ ) という値を採用した。また、断面寸法を  $400\text{mm}$  としたのは、六角ボルト付近の応力の乱れが試験区間中央にまで及ばないように、試験区間の幅が 1 番大きい  $c=3D$  の場合においても、その幅 ( $7D$ ) の 2.5 倍以上の長さになるよう配慮したものである。

実験に使用した鉄筋およびコンクリートの力学的性質等を、それぞれ表-1 と表-2 に示す。コンクリートは、単位水量  $200.5\text{Kg}$ 、水セメント比  $61\%$ 、粗骨材最大寸法  $13\text{mm}$  の A E コンクリートである。供試筋が水平になるよう型枠を設置し、コンクリートを打設した。その後、養生室内で  $21\sim 23$  日間放置し、実験に供した。平均スランプは  $8\text{cm}$  であり、コンクリート圧縮強度  $f'_c$  は目標強度  $23\text{MPa}$  ( $234\text{Kgf/cm}^2$ ) に対して  $\pm 10\%$  の範囲内で変動し、引張強度  $f_t$  は目標強度を  $2.0\text{MPa}$  ( $20\text{Kgf/cm}^2$ ) としたが、実際には平均値で  $2.4\text{MPa}$  と大きく出た。試験体の数は 36 体 (各かぶり  $c$  ごとに 12 体) であり、そのうちの 33 体の結果をデータ整理に使用した。

## (2) 載荷・測定方法

図-2 に載荷・測定状況を示す。所定の横方向引張応力  $p_t$  を加えた後引抜試験を実施した。供試筋引抜力の反力は、鋼製反力板を介し、供試筋表面から  $3.5D$  以上外側の横方向引張応力作用方向と平行なコンクリート部分 (図-1 の斜線部分) に圧縮力として作用させた。

横方向引張応力は、載荷板をコンクリート側面に埋め込んだ六角ボルトとナットで締め付け、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、① 鋼製型枠の使用により供試体側面の平行度を高める、② 載荷板と連結板との間にスペーサーを入れることにより、両者の平行度を高める、③ コンクリート表面に貼付けたひずみゲージの読みをモニターし、連結板部のナットの締め具合を調節する、などにより、極力偏心載荷を小さくするよう配慮した。

載荷端および自由端のすべり量は、変位計 (精度  $0.001\text{mm}$ ) を用いて測定した。載荷端側コン

表-1 使用鉄筋

鉄筋の種類	D22 (直角横ふし)
横ふし高さ hr (mm)	1.4
横ふし間隔 sr (mm)	15.0
降伏応力度 $f_y$ (MPa)	$3.95 \times 10^2$
弾性係数 $E_s$ (MPa)	$1.96 \times 10^5$

表-2 使用コンクリート

圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	20.0~24.9 (22.6)
引張強度 $f_t$ (MPa)	2.2~2.5 (2.4)
$f'_c/3$ 弾性係数 $E_c$ (MPa)	$1.96 \times 10^4 \sim 2.23 \times 10^4$ ( $2.09 \times 10^4$ )

( ) 内は平均値

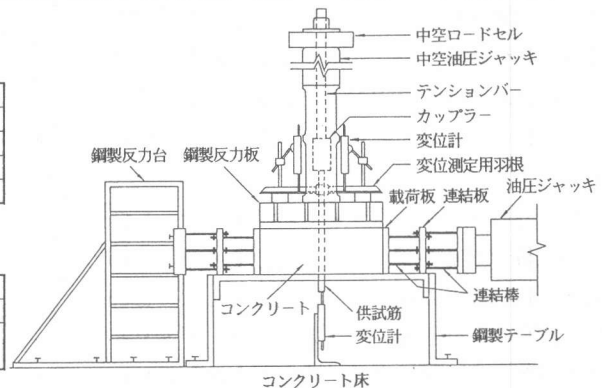


図-2 載荷・測定状況

クリート表面には、供試筋表面から 1D 離れた互いに直交する 4ヶ所にひずみゲージを貼付け、横方向引張応力の載荷状況、鉄筋横ふしのくさび作用によるリングテンションなどを観察した。

### 3. 実験結果およびその考察

#### (1) 破壊形式

本実験で観察された破壊形式は、概ね図-3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割裂破壊であった。横方向引張応力  $p_t=0$  の場合には、載荷端側コンクリート面の供試筋周囲に、わずかながらうと状のひびわれ<sup>2), 3)</sup>が見られる供試体もあった。

#### (2) 各種無次元量の定義

a) 無次元化横方向引張応力 横方向引張応力  $p_t$ (MPa)はコンクリート引張強度  $f_t$ (MPa)以上にはなり得ない。そこで、次の無次元化横方向引張応力  $p_o$  により基準化して取り扱う。

$$p_o = p_t / f_t \quad \text{--- (1)}$$

b) 無次元化付着応力 付着応力には平均付着応力  $\tau_{av}$ (MPa) を用い、最大荷重時の平均付着応力を付着強度として  $\tau_{uav}$ (MPa) で表す。コンクリート強度  $f_c'$ (MPa) の付着強度への影響を除去するため、次式で表される正規化付着応力  $\tau_n$  を導入する<sup>1), 3)</sup>。

$$\tau_n = \tau_{av} / \sqrt{f_c'} \quad \text{--- (2)}$$

さらに、各かぶり  $c$  ごとに、 $p_o=0$  の場合の正規化付着強度の平均値 ( $\tau_{nu}(p_o=0)_{av}$  と表記) が 1 となるよう、次式で定義される無次元化付着応力  $\tau_o$  により基準化する。

$$\tau_o = \tau_n(p_o) / \tau_{nu}(p_o=0)_{av} \quad \text{--- (3)}$$

c) 無次元化すべり 本実験では、鉄筋径  $D$  を実験変数としていない。そこで、すべり  $S$  に一般性をもたせるため、次式で表される無次元化すべり  $S_o$  を利用する<sup>3)</sup>。すべり  $S$  については、測定精度の高い自由端すべり  $S_f$  を用いる。なお、載荷端すべり  $S_l$  を用いた結果は、 $S_f$  を用いた場合の結果と同様の傾向を示した。付着強度時の  $S_o$  は  $S_{ou}$  と表記する。

$$S_o = S_f / D \quad \text{--- (4)}$$

#### (3) 付着応力-すべり関係

図-4は、 $c = 2D$  の場合について、付着応力  $\tau_n$ -すべり  $S_o$  関係に及ぼす横方向引張応力  $p_o$  の影響を示したものである。 $p_o$  の増加とともに、付着挙動は大きくぜい性化の方向に変化しており、モデル化に際して横方向引張応力の作用を考慮に入れる必要があることを顕著に示している。なお、他のかぶり  $c$  に対しても、同様の傾向が得られた。

#### (4) 付着強度

図-5は、本実験における  $p_o=0$  の場合の付着強度  $\tau_{nuexp}$  と、付着割裂強度算定式としてその適合性が高い藤井・森田式<sup>1)</sup>による算定値  $\tau_{nucal}$  との比の値

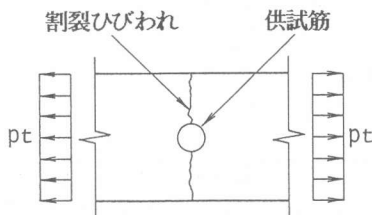


図-3 破壊形式

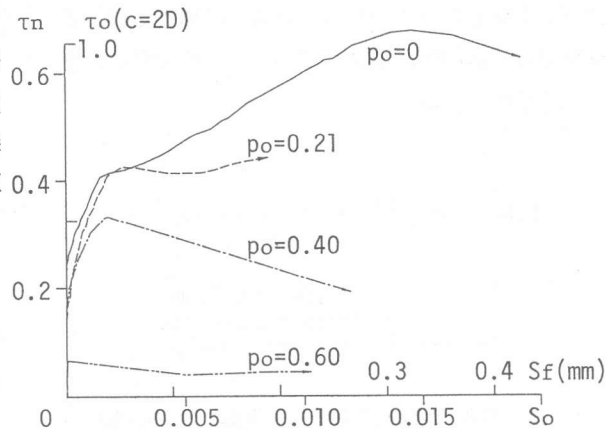


図-4 付着応力-すべり関係 ( $c=2D$  の場合)

を各かぶりに対して示したものである。図中、かぶり  $c$  は鉄筋径  $D$  により無次元化してある。算定値に比べて、実験値の方が  $c=1D$  においてやや高く、 $c=3D$  においてやや低く出ているが、両者の比の全体での平均値は 0.98 とよく一致していた。したがって、これに横方向引張応力  $p_o$  の作用を重ね合わせることができれば、 $p_o$  を考慮に入れた付着強度のモデル化が可能になる。なお、一般に定着長の短い場合には付着強度は高くなるとされているが、本実験では、その傾向は顕著ではなかった。

図-6 は、各かぶり  $c$  に対して、付着強度  $\tau_{ou}$  と横方向引張応力  $p_o$  との関係を示したものである。ここに、 $\tau_{ou}$  は付着強度時の  $\tau_o$  を表している。いずれの  $c$  においても、 $p_o$  の増加に伴い、 $\tau_{ou}$  は急激に低下することがわかる。いま、 $p_o=1$  の時の  $\tau_{ou}$  は 0 になるものとし、両者の関係を次のように 2 次式で近似する。

$$\tau_{ou} = (k_1 \cdot p_o - 1)(p_o - 1) \quad \text{--- (5)}$$

かぶり  $c=1D, 2D, 3D$  の各々について、最小自乗法により係数  $k_1$  を求めた結果は、それぞれ 0.65, 1.21, 0.61 であった。式(5) は  $k_1 \leq 1$  でなければならないため、 $c=2D$  については  $k_1=1.00$  とおき、全体の重み付き平均値を計算すると、 $k_1=0.70$  となった。図-6 中には、式(5) の  $k_1$  にこの平均値を用いた場合の曲線を実線で示してある。

#### (5) 付着強度時のすべり

付着特性のモデル化に際しては、付着強度とともにその時点のすべりを知ることが必要になる。

図-7 は、横方向引張応力  $p_o=0$  の場合について、付着強度時のすべり  $S_{ou}$  と無次元化かぶり  $c/D$  との関係を示したものである。かぶりの増大に伴って、 $S_{ou}$  はほぼ直線的に増大している。これを最小自乗

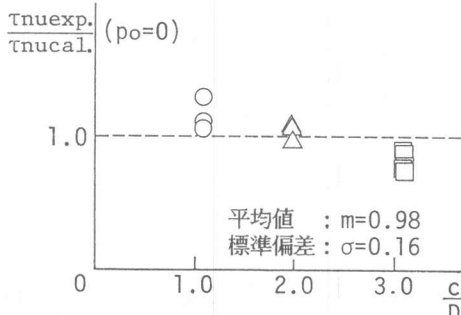


図-5 付着強度の実験値と算定値<sup>1)</sup>との比較 ( $p_o=0$  の場合)

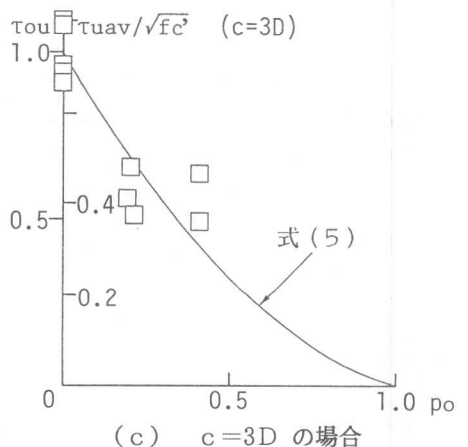
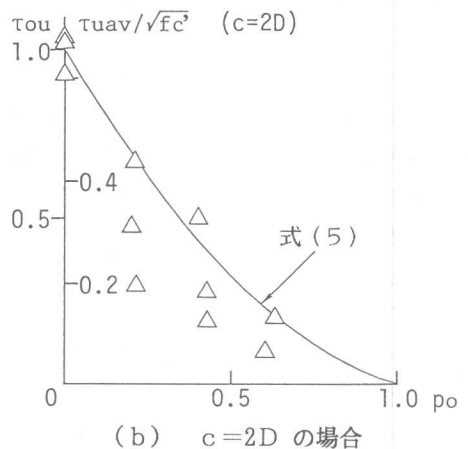
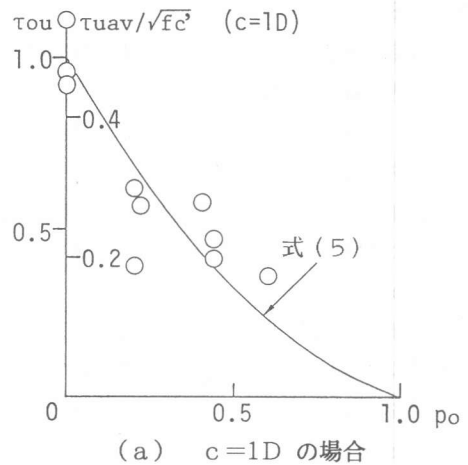


図-6 付着強度への横方向引張応力の影響

法によって直線近似すると次式を得る。図-7中には、この式を実線で示してある。

$$Sou(p_o=0) = (3.31 \cdot c/D + 6.45) \times 10^{-3} \quad (6)$$

図-8は、付着強度時のすべり  $Sou$  と横方向引張応力  $p_o$  との関係を、各かぶり  $c$  に対して示したものである。かぶり  $c$  にかかわらず、 $p_o$  の増加とともに  $Sou$  は急激に減少しており、3. (3) で述べたぜい性傾向を明確に裏付けている。 $p_o=0.5$  を超えた辺りでは、 $Sou$  はほぼ0になってしまう。一方、 $p_o$  が同一であれば、かぶり  $c$  が小さいほど  $Sou$  は小さく、ぜい性的となる傾向にある。次式は、 $Sou$  と  $p_o$  との関係を直線近似し、しかも  $p_o=0$  のときの  $Sou$  が1となるよう基準化した式である。

$$Sou(p_o)/Sou(p_o=0) = k_2 \cdot p_o + 1 \quad (7)$$

かぶり  $c=1D, 2D, 3D$  の各々について、最小自乗法により係数  $k_2$  を求めると、それぞれ-2.30, -2.72, -2.01, 全体の重み付き平均値は-2.28 となり、 $c$  と  $k_2$  との間には明確な傾向は見られなかった。図-8中には、式(7)において、 $k_2$  に平均値、 $Sou(p_o=0)$  に式(6)から計算される値を用いた場合の直線を実線で示してある。

(6) 初期付着すべり剛性

図-9は、横方向引張応力  $p_o=0$  の場合について、すべり  $S_o=0.0005$  ( $S_f=0.011\text{mm}$ ) の時点における付着応力  $\tau_{ni}$  ( $\tau_{ni}$  と表記) と無次元化かぶり  $c/D$  との関係を示したものである。 $\tau_{ni}/S_o$  は付着応力-すべり曲線における割線付着すべり剛性を意味しているが、いま、 $S_o$  は一定でしかも小値であるため、 $\tau_{ni}$  は間接的に初期割線付着すべり剛性を表現することになる。 $\tau_{ni}$  はまた、bi-linear型の付着モデルにおける第一付着すべり剛性とも対応するものである。同図より、初期付着すべり剛性に与えるかぶりの影響はほとんどないことがわかる。 $\tau_{ni}(p_o=0)$  の平均値は0.22であった。

図-10は、各かぶり  $c$  に対して、 $S_o=0.0005$  の時点における付着応力  $\tau_{ni}$  と横方向引張応力  $p_o$  との関係を示したものである。実験結果はかなりばらついてはいるが、かぶり  $c$  にかかわらず、 $p_o$  の増加とともに  $\tau_{oi}$ 、すなわち初期付着すべり剛性は低下する傾向が見られる。いま、 $p_o=0$  における  $\tau_{ni}$  が1となるよう基準化し、次式のように直線近似する。

$$\tau_{ni}(p_o)/\tau_{ni}(p_o=0) = k_3 \cdot p_o + 1 \quad (8)$$

$c=1D, 2D, 3D$  に対して、最小自乗法により係数  $k_3$

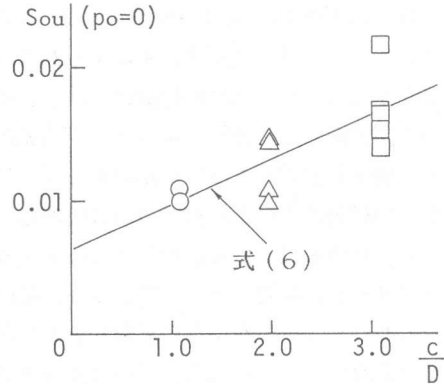


図-7 付着強度時すべりへのかぶりの影響

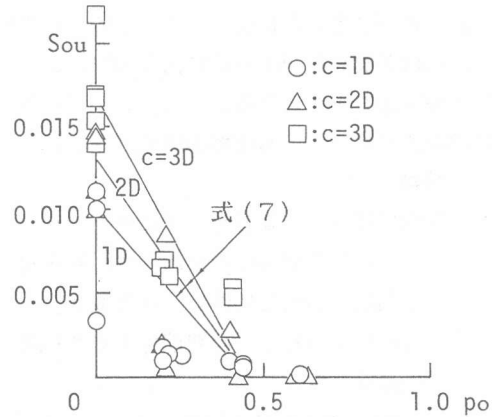


図-8 付着強度時すべりへの横方向引張応力の影響

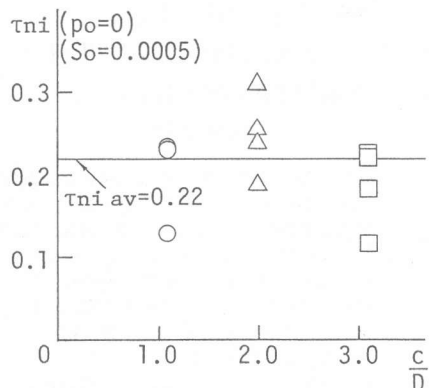


図-9 初期付着すべり剛性へのかぶりの影響

を求めると、それぞれ  $-0.55, -0.78, -0.64$  となり、 $c$  と  $k_3$  との関係は明確ではなかった。 $k_3$  について全体の重み付き平均値を計算すると、 $k_3 = -0.66$  となった。図-10 中には、式(8)の  $\tau_{ni}(p_o=0)$  および  $k_3$  にそれぞれ平均値を用いた場合の直線を実線で示してある。

(7) コンクリート表面ひずみ

図-11は、 $c=2D$ の場合について、付着応力  $\tau_n$  と、載荷端側コンクリートひずみ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  およびその平均  $\varepsilon_{av}$  との関係を示したものである。

ここに  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  は、同図(b)中に示したように、供試筋表面から  $1D$ だけ離れた位置における、横方向引張応力作用方向に貼付けたひずみゲージの読みを表している。横方向引張応力  $p_o$  にかかわらず、付着強度の約  $2/3$  の付着応力付近からひずみは急増し、破壊に至る。 $\varepsilon_1$  の増加傾向が  $\varepsilon_2$  のそれよりも大きいのは、コンクリート打設時に  $\varepsilon_1$  の位置が  $\varepsilon_2$  の位置よりも上方にあり、ブリージングの影響が大きかったことなどが主原因と考えられる。この傾向が大きい場合には、 $\varepsilon_1$  側のひびわれの先行の度合いが大きくなり、強度低下が早まることになる。図-5で、かぶりが大きくなるほど実験値が小さめに出たのは、このことが一因と考えられる。なお、 $c=2D$  以外のかぶりについても同様の結果が得られた。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) かぶりの如何にかかわらず、横方向引張応力の増加に伴い、付着強度、その時のすべりおよび初期付着すべり剛性は低下する
- (2) 横方向引張応力が同一の場合、かぶりの増加に伴い、付着強度およびその時のすべりは増大する。
- (3) 一定横方向引張応力作用下における付着強度算定式を提案した。

参考文献

- 1) 藤井 栄, 森田 司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究(第一報)(第二報), 日本建築学会論文報告集, 第319号, 第324号, 昭和57年9月, 昭和58年2月, pp. 47~54, pp. 45~52
- 2) 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, 1989年, pp. 171~176
- 3) 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, 1986年8月, pp. 177~186

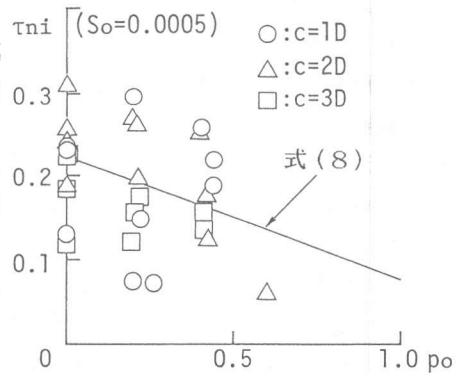
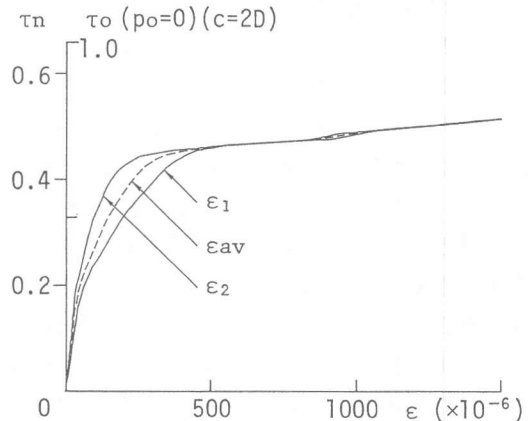
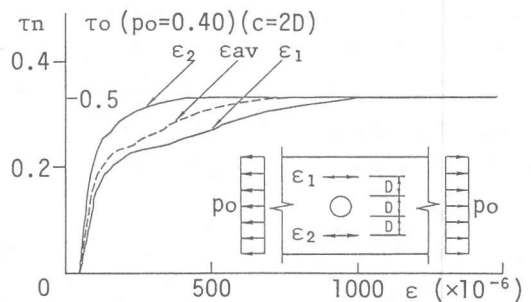


図-10 初期付着すべり剛性への横方向引張応力の影響



(a)  $p_o=0$  の場合



(b)  $p_o=0.40$  ( $p_t=0.98$  MPa) の場合

図-11 付着応力-コンクリート表面ひずみ関係 ( $c=2D$ の場合)