

コンクリートの軸方向応力を考慮した異形鉄筋の局所付着特性

壹岐直之¹・清宮理²

¹正会員 若築建設(株) 土木本部技術研究所 (〒153-0064 東京都 目黒区 下目黒二丁目23-18)

²フェロー会員 工博 早稲田大学 土木工学科 教授 (〒169-8555 東京都 新宿区 大久保3-4-1)

コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着特性は、実験条件や鉄筋軸に沿った位置によって異なることが知られ、既往の研究により鉄筋ひずみの影響を考慮した付着応力関係式が提案されている。しかし、載荷方法やコンクリート断面積が異なると、この提案式では付着特性を表現できない場合があることを筆者らはこれまでに確認し、コンクリート応力状態が付着特性に影響を及ぼす可能性があることを示唆した。本論文では、付着実験を基に、コンクリート軸方向応力が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響を評価した。その結果、すべりにコンクリートの変位を考慮し、コンクリート軸方向応力の増加による付着応力の低減を考慮した補正を行うことで、種々の実験条件において、既往の付着応力関係式と実験結果とが一致することを確認した。

Key Words : local bond characteristic, deformed bar, bond stress, slip, steel strain, concrete sectional stress

1. はじめに

コンクリートと異形鉄筋の付着特性は、ひびわれ幅の予測や終局変形量の予測など、構造物の挙動を推定する上で重要な因子の一つである。有限要素解析や数値計算によって構造物の挙動を推定する場合、鉄筋軸に沿った任意の位置での付着応力 τ とすべり S を、 $\tau=f(S)$ として表す局所付着特性を用いるのが一般的である。これまでに、島ら¹⁾は局所付着特性を実験的に調べ、付着応力-すべり関係に鉄筋ひずみの影響を組み込み、 $\tau=f(S, \epsilon_s)$ とすることにより、鉄筋に沿った任意の位置に適用できる局所付着応力関係式（以下、島式と称す）を提案した。

しかしながら、筆者らは、載荷方法とコンクリート断面積により、島式と一致しない場合があることを確認した²⁾。すなわち、コンクリート断面の比較的大きな引抜試験での局所付着特性は島式と一致するが、一軸引張試験での付着応力は島式で算定される値よりも小さくなり、一軸引張試験でのコンクリート断面積が小さくなれば付着応力はさらに小さくなる。また、引抜試験において、コンクリート断面積が小さくなると、付着応力は島式で算定される値より大きくなることを確認した。これらの局所付着特性の差異は、コンクリート軸方向応力の影響によって生じたものであると考えている。

六車ら³⁾は、実験の条件にかかわらず付着応力-すべりの関係が類似の曲線で表されることを確認し、この曲線

を最大付着応力とそれに対応するすべりの関数として表している。しかし、一軸引張試験と引抜試験とで、最大付着応力と、それに対応するすべりの値を変化させ、一軸引張試験での最大付着応力を引抜試験での値よりも小さくすることで、解析結果と実験結果と一致させている。この研究においても、筆者らが報告したことと同様に、載荷方法による局所付着特性の差異が表れていると考える。

島式は、その研究が目的とするところの、マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の引抜量を推定する上では、十分に精度が高いと考えられる。しかし、ひびわれ幅を推定する場合は、ひびわれに挟まれた区間のコンクリートは一軸引張試験と同じ応力状態になるため、島式を解析に直ちに用いることはできない。また、鉄筋が複数配置される部材では、鉄筋1本に着目した場合、コンクリート断面積は比較的小さいため、ここに島式を適用することにも問題があると考えている。

本論文では、前回の報告²⁾から、さらに付着実験^{4), 5)}を追加し、載荷方法およびコンクリート断面積の違いが、局所付着特性およびコンクリート軸方向応力の状態に及ぼす影響を評価した。実構造物において、載荷方法は付着が作用する部材の状況に相当し、コンクリート断面積は鉄筋の間隔やかぶりに相当する。次に、これらの実験条件の違いにより局所付着特性が異なることを、コンクリートの軸方向応力の影響を取り込むことで説明できる

表-1 実験条件 および 材料特性

コンクリート		鉄筋	載荷方法 (付着長 [D])
強度特性 [N/mm ²]	断面形状 [cm]	D [mm] f_y, E_s [N/mm ²]	
$f_c' = 21.9$	$\phi 15$	$D = 15.9$	一軸引張 (20,40)
$f_t = 1.81$	$\phi 30$	$f_y = 390$	両側引抜 (20,40)
$E_c = 21000$	$\phi 45$	$E_s = 192000$	片側引抜 (10,20)
$f_c' = 31.2$	15×15	$D = 19.1$	一軸引張 (40)
$f_t = 2.78$	30×30	$f_y = 358$	両側引抜 (40)
$E_c = 22800$	45×45	$E_s = 181000$	片側引抜 (20)
$f_c' = 44.4$	$\phi 50$		
$f_t = 6.50$	$\phi 15$	$D = 15.9$	一軸引張 (40)
$E_c = 32400$	$\phi 30$	$f_y = 395$	両側引抜 (40)
	$\phi 45$	$E_s = 180000$	片側引抜 (20)

*1:片側引抜試験はコンクリート断面 $\phi 30, \phi 45$ のみ。

表-2 各載荷方法での境界条件

載荷方法	載荷端			中央 もしくは 自由端		
	すべり	鉄筋ひずみ	コンクリート応力	すべり	鉄筋ひずみ	コンクリート応力
一軸引張	$S > 0$	$\varepsilon_s > 0$	$\sigma_c = 0$	$S = 0$	$\varepsilon_s > 0$	$\sigma_c > 0$
両側引抜	$S > 0$	$\varepsilon_s > 0$	$\sigma_c < 0$	$S = 0$	$\varepsilon_s > 0$	$\sigma_c < 0$
片側引抜	$S > 0$	$\varepsilon_s > 0$	$\sigma_c < 0$	$S \geq 0$	$\varepsilon_s = 0$	$\sigma_c = 0$

$\bar{\sigma}_c > 0$: 引張, $\bar{\sigma}_c < 0$: 圧縮

かを検討し、島式の補正を試みた。なお、本論文は鉄筋降伏以前の弾性域を対象としている。

2. 載荷実験の概要

(1) 実験条件 および 供試体

実験条件の組み合わせを表-1に示す。コンクリート圧縮強度は $20, 30, 40\text{N/mm}^2$ 級の3水準である。それぞれの圧縮強度 f_c' 、引張強度 f_t 、弹性係数 E_c を表-1に示す。なお、実験開始時と終了時に強度差があった供試体では、実験結果の評価において強度特性を補間した。表-1はその平均値である。鉄筋は、ネジ節鉄筋を使用した。それぞれの供試体に用いた鉄筋の直径 D 、降伏強度 f_y 、弹性係数 E_s を表-1に示す。

供試体は、表-1に示した断面形状と付着長を持つコンクリートの中心に、鉄筋を埋め込んだものとした。コンクリートの断面は、 $f_c'30\text{N}$ 級では $15, 30, 45\text{cm}$ の正方形、および 50cm の円形、 $f_c'20\text{N}$ 級と $f_c'40\text{N}$ 級では $15, 30, 45\text{cm}$ の円形とした。一軸引張試験と両側引抜試験での鉄筋とコンクリートとの付着長は、比較的短いものとして鉄筋径の20倍、比較的長いものとして鉄筋径の40倍とした。片側引抜試験での付着長はこれらの半分となる。載荷端には、載荷端近傍でのコンクリートの拘束条件の違いによる影響をなくし、かつ引抜試験時にコンクリートに作用する圧縮力を均等にするため、鉄筋をシース管で覆うことにより、長さ $10D$ 程度の非付着領域を設けた。ただし、 $f_c'30\text{N}$

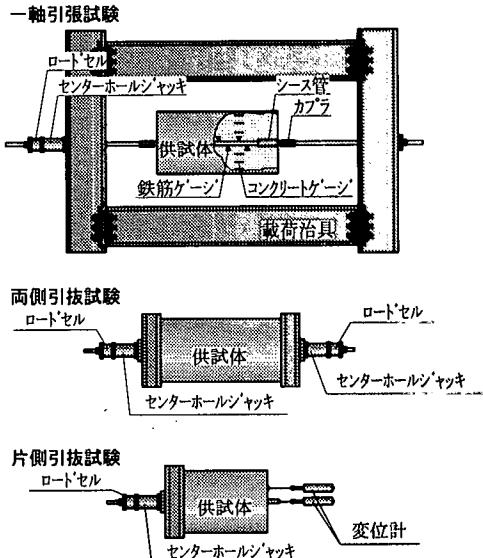


図-1 載荷方法 (平面図)

級で一軸引張試験の供試体には非付着領域を設けていない。打設は、 $f_c'30\text{N}$ 級で正方形断面を有する供試体では鉄筋を水平にした状態で行い、これ以外は鉛直にした状態で行った。

なお、 $\phi 15\text{cm}$ と $15 \times 15\text{cm}$ での一軸引張試験では、鉄筋降伏の $1/3$ 程度の荷重で供試体の中央付近にひび割れが発生し、付着応力とすべりは小さな値しか観測できなかったため、以降で示す実験結果の評価からは除外した。

(2) 載荷方法 および 計測項目

載荷方法は、表-1に示すように、一軸引張試験、両側引抜試験、および片側引抜試験の3通りとした。載荷方法を図-1に示す。それぞれの載荷方法における境界条件を表-2に示す。一軸引張試験での境界条件は、供試体中央ですべり $S=0$ 、鉄筋ひずみ $\varepsilon_s > 0$ 、コンクリート断面平均の軸方向応力 $\bar{\sigma}_c > 0$ であり、載荷端では $\bar{\sigma}_c = 0$ である。両側引抜試験では、供試体中央で $S=0$ 、 $\varepsilon_s > 0$ 、 $\bar{\sigma}_c < 0$ であり、載荷端でも $\bar{\sigma}_c < 0$ である。片側引抜試験では、自由端で $S \geq 0$ 、 $\varepsilon_s = 0$ 、 $\bar{\sigma}_c = 0$ であり、載荷端では $\bar{\sigma}_c < 0$ である。つまり、一軸引張試験と両側引抜試験との境界条件の違いは、供試体中央および載荷端での $\bar{\sigma}_c$ にあり、両側引抜試験と片側引抜試験との違いは、自由端での S と ε_s にある。また、一軸引張試験では供試体全長にわたって $\bar{\sigma}_c$ は引張場にあり、両側引抜試験と片側引抜試験では圧縮場にある。

載荷は、供試体の鉄筋軸を水平にした状態で、センターホールジャッキによって鉄筋に軸引張力を与えた。両

側引抜試験および片側引抜試験では、鉄筋引張の反力をコンクリートに軸圧縮力として載荷した。鉄筋軸を鉛直にして打設した供試体について、片側引抜試験での鉄筋引張力の方向は打設方向の逆、つまり打設時の上側が載荷端とした。また、一軸引張試験および両側引抜試験においても、鉄筋引張力と打設方向との関係が、片側引抜試験と同じになる側を評価の対象とした。

載荷荷重は鉄筋降伏荷重までとし、載荷速度は端部の鉄筋ひずみで100~200μ/minとした。なお、両側引抜試験では、2つのジャッキを操作して載荷することになるが、それぞれの載荷荷重が所定の値となるよう注意して操作を行った。

計測項目は、コンクリートに埋め込まれた部分の鉄筋ひずみ、載荷荷重、および片側引抜試験での自由端のすべりである。鉄筋ひずみは、載荷中の鉄筋に偏心がないことを確認するため表裏交互に、5Dの間隔で貼り付けたひずみゲージにより測定した。ひずみゲージの貼り付けは、付着特性に及ぼす影響が最小限になるように、山尾ら⁹の研究を参考にして行った。載荷荷重はセンターホールロードセルで計測した。片側引抜は、自由端でS≥0となるため、自由端でのコンクリートと鉄筋の相対変位を計測した。さらに、f_{c'}40N級の供試体では載荷端から10Dの断面で、鉄筋軸方向のコンクリートひずみの、半径方向の分布を、コンクリートに埋め込んだ長さ125mmの短軸モールドゲージで計測した。

(3) 付着応力、すべり、およびコンクリート軸方向応力の決定方法

任意の位置の付着応力τと、すべりSの決定方法は既往の研究¹⁰⁾と同じである。鉄筋ひずみ曲線は、着目点と左右に隣接する点の3点を通る放物線で補間し、補間した放物線の範囲は着目点と隣接する点との中間までとした。付着応力は着目点での鉄筋ひずみ曲線の微分値を用い、 $\tau = DE_s / 4 \cdot d\epsilon_s / dx$ として算定した。

すべりは、既往の研究¹⁰⁾と同様に鉄筋の変位とし、コンクリートの変位は無視した。本論文では、すべりにコンクリートの変位を考慮すべきであることを後述し、すべりの定義として2種類取り扱うこととなる。これらを区別するため、すべりを鉄筋の変位のみとした場合はS_s、コンクリートの変位も考慮した場合はS_{sc}と表す。

一軸引張試験および両側引抜試験でのすべりS_sは、鉄筋ひずみ分布曲線の傾きが0となる点から、着目点までの鉄筋ひずみ曲線の積分値 $S_s = \int \epsilon_s dx$ として算定した。片側引抜試験では、自由端から着目点までの鉄筋ひずみ曲線の積分値 $\int \epsilon_s dx$ に、自由端で計測した鉄筋とコンクリートの相対変位を加えた値として算定した。

本研究では、コンクリートの応力状態を量量化するため、鉄筋軸に直交する任意の断面での軸方向のコンクリ

ート平均応力 $\bar{\sigma}_c$ と、コンクリートの変位S_cを算定した。鉄筋弹性範囲内では、 $\bar{\sigma}_c$ は、鉄筋引張力Pと、それに対するコンクリート圧縮力の比K_p、任意の位置の鉄筋ひずみε_sと、コンクリート断面積A_c、および鉄筋の断面積A_sと弾性係数E_sの関数として表され、式(1)となる。ここで、K_pは一軸引張試験では0.0、両側引抜試験および片側引抜試験では1.0となる。

$$\bar{\sigma}_c = \{P(1 - K_p) - \epsilon_s A_s E_s\} / A_c \quad (1)$$

コンクリートの変位S_cは、コンクリートの割線弾性係数E_cを用い、 $S_c = \int \sigma_c / E_c dx$ として算定した。なお、 $\bar{\sigma}_c$ が圧縮側に最大となる引抜試験(f_{c'}20N級、A_c:φ15cm)の供試体の載荷端においても、 $\bar{\sigma}_c$ はf_{c'}の20%となり、コンクリートの応力-ひずみ関係の線形範囲内とみなせるため、割線弾性係数を用いることに問題はないと考える。

3. 載荷方法とコンクリート断面積が付着応力-すべり関係に及ぼす影響

載荷方法およびコンクリート断面積が、付着応力-すべり関係に及ぼす影響を比較するため、f_{c'}30N級の供試体の付着応力-すべり関係（以下、τ-S_s関係と称す）を図-2に示す。図-2には、島ら¹¹の提案式(2)を用いた数値解析によるτ-S_s関係と、後述する補正式を用いた数値解析によるτ-S_s関係も併せて示した。

$$\tau = 0.73 f_{c'} \left\{ \ln(1 + 5000 S_s / D) \right\}^3 \frac{1}{1 + 10^5 \epsilon_s} \quad (2)$$

島式は載荷方法およびコンクリートの断面積を考慮していないため、付着長の長い場合、各グラフのτ-S_s関係はすべて同じ曲線となる。なお、コンクリート断面積が大きい両側引抜試験および片側引抜試験では、島式と補正式は重なっている。

片側引抜試験でのコンクリート断面積A_c:φ50cmのτ-S_s関係は、島らの実験とほぼ同じ条件であるため、島式を用いた解析結果と一致した。また、島式は供試体中央での境界条件の違いを考慮してあるため、両側引抜試験でのA_c:45×45cmのτ-S_s関係も、載荷端は若干異なるが、15Dより内側では島式と一致した。しかし、コンクリート断面積の小さな供試体、片側引抜試験でのA_c:15×15cmのτ-S_s関係は、載荷方法は島らの実験と同じであるにもかかわらず、島式よりも付着応力が増加し、すべりS_sが減少した。本実験範囲内における15Dの位置での最大値について、A_c:φ50cmでの値と比較すると、 $f_{c'}$ が10%程度増加し、S_s/Dは30%程度減少した。

一方、一軸引張試験の状況は引抜試験と異なった。一軸引張試験でのA_c:45×45cmのτ-S_s関係は、島式よりも付着応力が低下し、すべりS_sが増加していることがわかる。

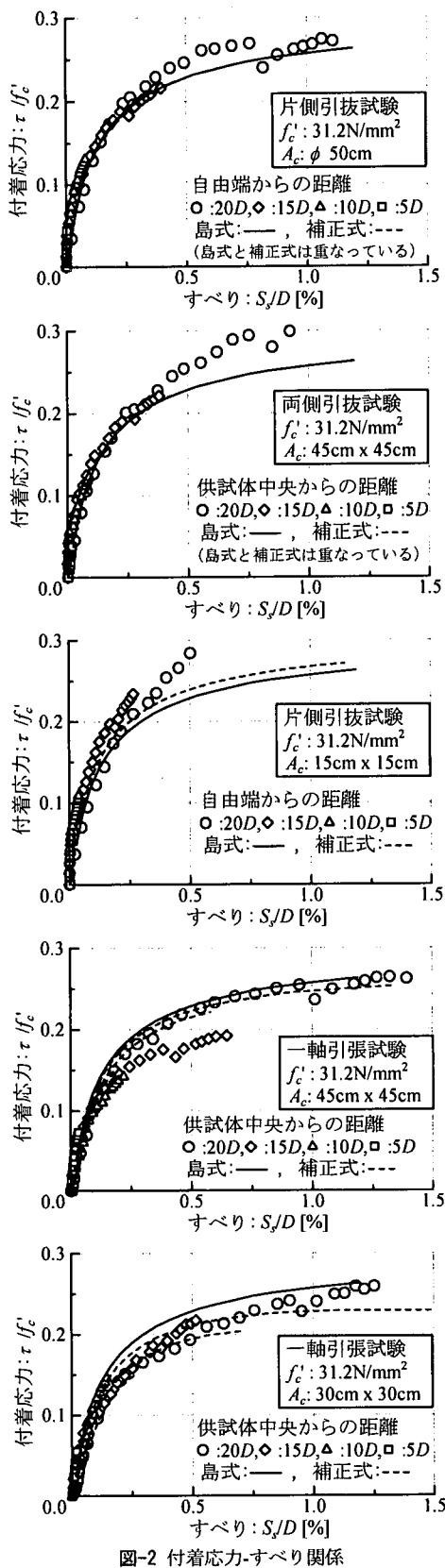


図-2 付着応力-すべり関係

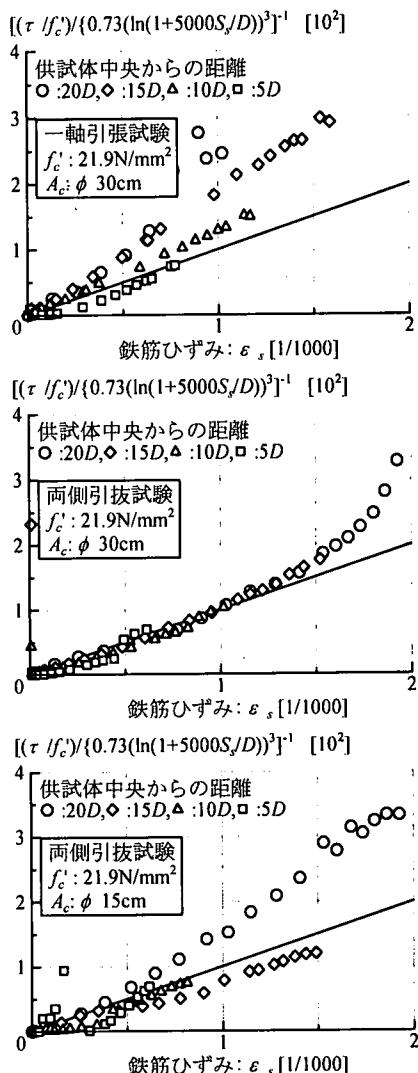


図-3 付着特性に鉄筋ひずみが及ぼす影響

本実験範囲内における15Dの位置での最大値について、 $A_c: \phi 50\text{cm}$ での値と比較すると、 τ/f'_c が10%程度減少し、 S_s/D は60%程度増加した。さらに、コンクリート断面積の小さな一軸引張試験の $A_c: 30 \times 30\text{cm}$ では、付着応力が低下し、すべり S_s が増加する傾向は大きくなつた。

次に、島らの研究と同様に、鉄筋ひずみが局所付着特性に及ぼす影響を評価するため、実験で得たおよび S_s から成る式(3)の逆数と、鉄筋ひずみとの関係の一例を図-3に示す。図中の直線は島式の算定値である。一軸引張試験での関係は、供試体中央付近では島式と同程度であるが、載荷端に近づくほど島式とは異なり、式(3)の逆数は大きくなることがわかる。一方、コンクリート断面積の比較的大きな両側引抜試験($A_c: \phi 30\text{cm}$)では、鉄筋軸に沿った位置にかかわらず同一の直線を示し、島式とほぼ一致した。しかし、コンクリート断面積が小さくなると、

載荷端以外は、式(3)の逆数は島式の関係より小さくなつた。他の供試体もこれらと同じ状況であった。

$$[(\tau/f_c)/\{0.73(\ln(1+5000 S_s/D))^3\}]^{-1} \quad (3)$$

これらの現象は既に報告したことであり、コンクリートの応力状態の影響であると説明した。すなわち、一軸引張試験では載荷端で $\sigma_c = 0$ であり、供試体中央に近づくに伴い、鉄筋から伝達される付着力によって σ_c は増加する。コンクリートは、供試体全長にわたって引張の応力場となり、付着力が同じである場合はコンクリート断面積が小さいほど引張応力が強く働くこととなる。一方、片側引抜試験では、任意の断面で鉄筋とコンクリートの力は釣り合うため、コンクリートは圧縮の応力場となり、付着力が同じである場合は、コンクリート断面積が小さいほど圧縮応力が強く働くこととなる。

$\tau-S_s$ 関係はコンクリートの応力状態の影響を受け、圧縮応力場では付着力が強くなり、引張応力場では付着力が弱くなると仮定すれば、前述の現象は説明できると考えている。また、異形鉄筋とコンクリートの付着作用は、鉄筋の節の噛み合わせによる機械的な拘束作用である。すべりが生じるのは鉄筋周辺のコンクリートが局所的に破壊されているためであり、鉄筋の近傍は、コンクリート軸方向応力が圧縮であっても、引張力が作用していることとなる。しかし、コンクリートの局所的な破壊の範囲は、コンクリート軸方向応力が引張側にあれば圧縮側にある場合より広くなる。この局所的な破壊の広さが、付着特性に影響を及ぼすと考えている。

さらに、コンクリートの断面積が大きな場合は、コンクリートのひずみは鉄筋のひずみと比較して小さいため、コンクリートの変位 S_s は無視できると考えられる。しかし、コンクリート断面積が小さな場合は、コンクリートのひずみが無視できなくなるのではないかと考えている。

4. 載荷方法とコンクリート断面積がコンクリート軸方向応力に及ぼす影響

ここで、載荷方法およびコンクリート断面積の違いが、コンクリート軸方向応力にどの程度影響を及ぼしているかについて述べる。

コンクリート軸方向ひずみの半径方向の分布を図-4に示す。両側引抜試験でのコンクリートひずみは、荷重の増加に伴い鉄筋近傍では引張側に増加するが、鉄筋から離れるに伴うひずみの変化量は大きくなつた。片側引抜試験でのコンクリート軸方向ひずみの分布も、両側引抜試験と同様の結果であった。

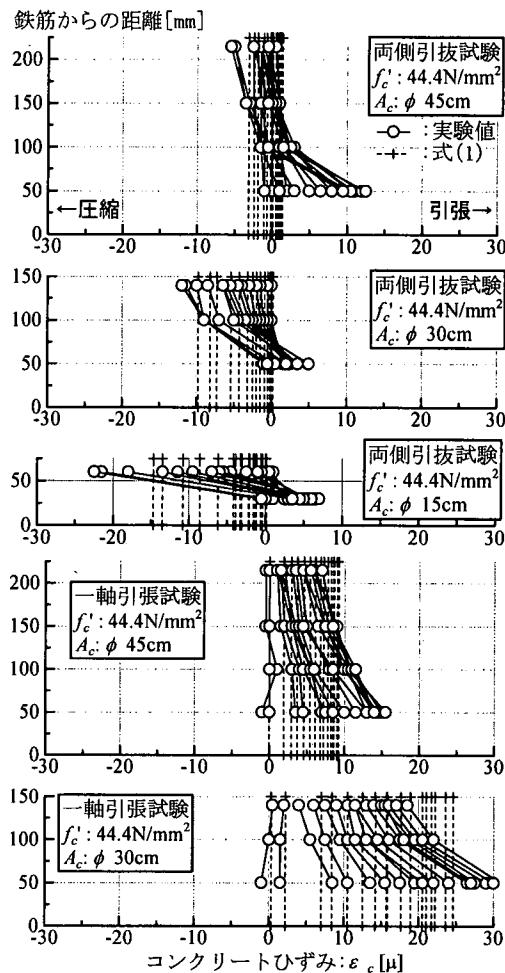


図-4 コンクリートひずみの半径方向の分布
(供試体中央から $10D$ の断面)

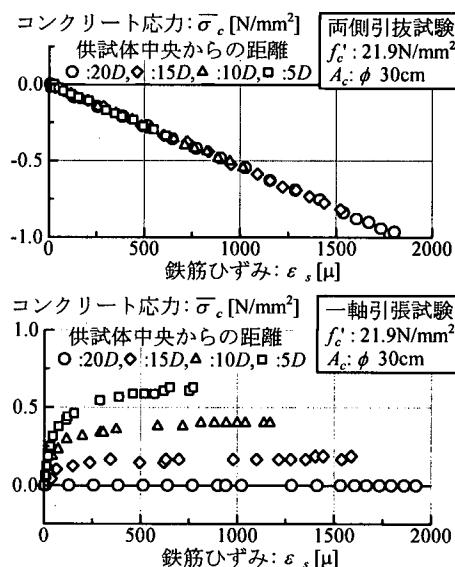


図-5 コンクリート軸方向応力と鉄筋ひずみの関係

一方、一軸引張試験でのコンクリート軸方向ひずみは、荷重の増加に伴い引張側に増加し、鉄筋に近いほどその値が大きいことがわかる。また、コンクリート断面積が小さいほどその傾向が強くなった。図中の破線は、式(1)で算定した $\bar{\sigma}_c$ をコンクリートの弾性係数で除したコンクリートの軸方向ひずみの算定値である。算定値は実験値と概ね一致した。以上、図-4より、両側引抜試験ではコンクリートの軸方向応力は圧縮場にあり、一軸引張試験では引張場にあることがわかる。

式(1)で算定したコンクリート軸方向応力 $\bar{\sigma}_c$ と鉄筋ひずみの関係の一例を図-5に示す。両側引抜試験での $\bar{\sigma}_c$ は、式(1)からして当然であるが、鉄筋ひずみと線形関係にあり、鉄筋軸に沿った位置にかかわらず同一の直線となる。また、コンクリートの断面積が異なればこの直線の傾きは異なることとなる。一方、一軸引張試験での $\bar{\sigma}_c$ は、載荷端では0であるが、載荷端以外では鉄筋ひずみの増加に伴い、鉄筋ひずみ500μ程度までは増加し、供試体中央に近づくほど $\bar{\sigma}_c$ は大きくなつた。

次に、断面内の平均値として算定したコンクリート変位 S_c と鉄筋変位 S_s の関係の一例を図-6に示す。一軸引張試験でのコンクリート変位 S_c は、正の側にあり、コンクリート弹性係数2100N/mm²、 $A_c:\phi 30cm$ の場合、鉄筋変位 S_s の1.5%程度であった。両側引抜試験では、コンクリート変位 S_c は負の側にあり、コンクリート断面積の小さい供試体 $A_c:\phi 15cm$ では、鉄筋変位 S_s の12%程度であった。

以上のことから、載荷方法およびコンクリート断面積によって、コンクリートの軸方向応力の状態が異なることは明らかである。また、コンクリートの断面積が小さな場合は、コンクリート軸方向ひずみの積分値であるコンクリート変位 S_c を無視できない可能性がある。

5. 付着応力-すべり-ひずみ関係の補正

(1) 補正式の提案

島式を基にし、コンクリートの軸方向応力の状態を考慮できるよう、補正式(4)を提案した。

$$\tau = 0.73 f'_c \left\{ \ln \left(1 + 5000 S_{s,c} / D \right) \right\}^3 \frac{1}{1 + 10^5 \varepsilon_s \cdot F(\bar{\sigma}_c)} \quad (4)$$

$$F(\bar{\sigma}_c) = \left\{ f_t / (f_t - \bar{\sigma}_c) \right\}^c \quad (5)$$

ここで、 τ ：付着応力

f'_c ：コンクリートの圧縮強度

$S_{s,c}$ ：すべり ($= S_s - k S_c$)

S_s ：鉄筋の変位

S_c ：コンクリートの変位

D ：鉄筋径

ε_s ：鉄筋ひずみ

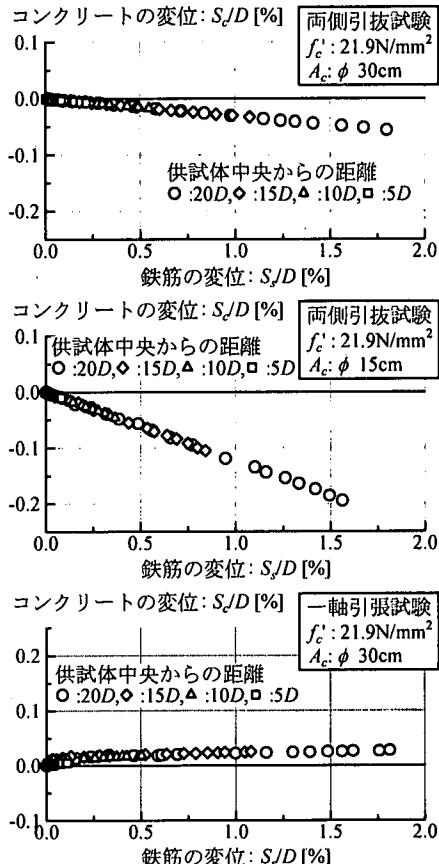


図-6 コンクリート変位と鉄筋変位の関係

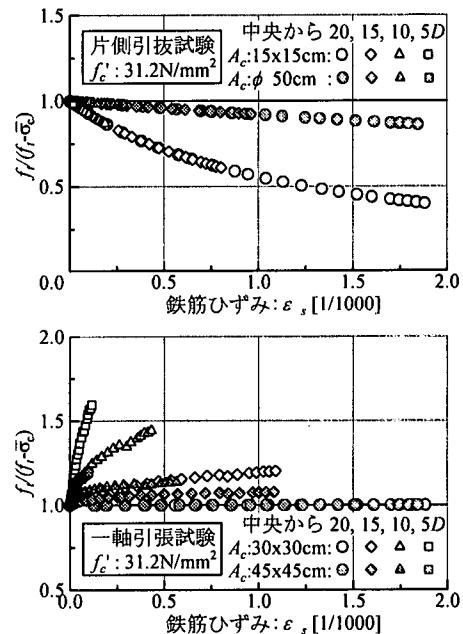
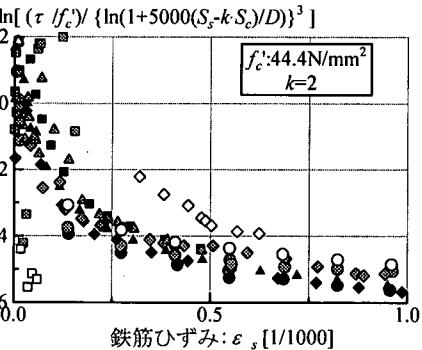
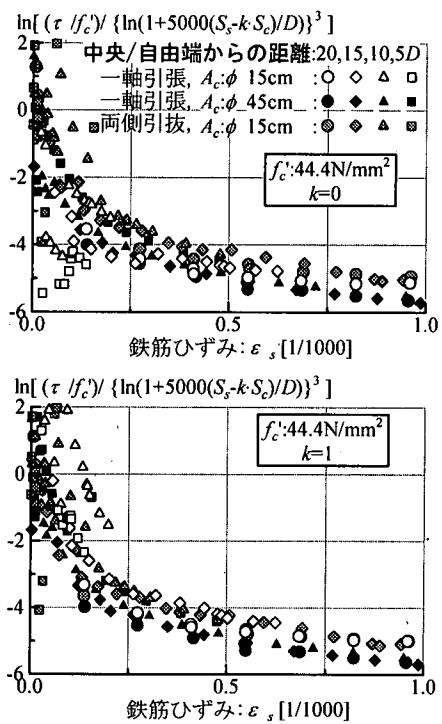
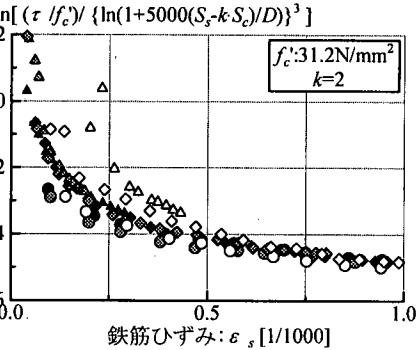
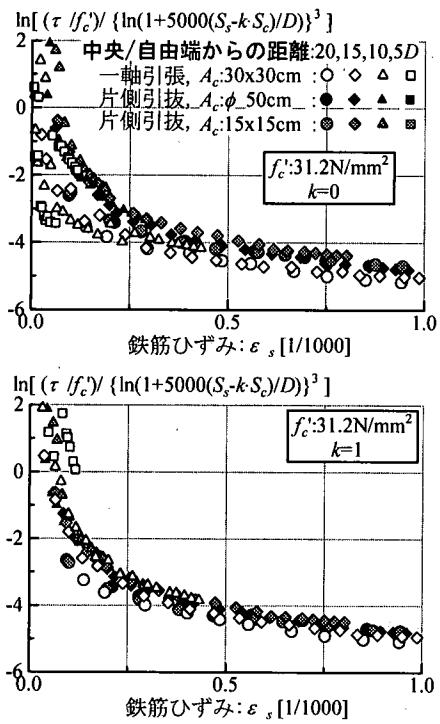


図-7 $F(\bar{\sigma}_c)$ と鉄筋ひずみの関係



$F(\bar{\sigma}_c)$: コンクリート応力を考慮する関数
 f_c : コンクリート引張強度
 $\bar{\sigma}_c$: コンクリートの断面平均応力
 k, c : 定数

この補正式の特徴は以下の2つである。まず、コンクリートの変位 S_c を考慮していることである。すべりを鉄筋とコンクリートとの相対変位と定義した。なお、コンクリートの変位 S_c は、鉄筋からの距離によって異なると考えられるため、断面平均ひずみの積分値を変位 S_c とし、これに定数 k を乗ずる形で表した。

もう一つは、島式での鉄筋ひずみの増加による付着応力の低下に加え、軸方向のコンクリートの引張応力増加に伴う付着応力の低下、および圧縮応力増加に伴う付着応力の増加を新たに考慮していることである。関数

$F(\bar{\sigma}_c)$ は、コンクリート断面積が大きくて平均応力 $\bar{\sigma}_c$ が無視できる程度に小さい場合は1となり、コンクリート断面応力が引張場にあるときは1以上、圧縮場にあるときは0に近づくような関数で表す必要がある。そこで、 $F(\bar{\sigma}_c)$ は式(5)に示すように、引張強度と、その断面でのコンクリート平均応力と引張強度の差との比とし、さらに、その影響の程度を実験結果から定めるため、 c 乗という形を仮定した。なお、一軸引張試験の載荷端では、 $\bar{\sigma}_c$ は常に0であるため $F(\bar{\sigma}_c)$ は常に1となるが、載荷端はすべり S_{sc} が大きいため、コンクリート軸方向応力の影響はコンクリートの変位 S_c を考慮することで充分であるとした。関数 $F(\bar{\sigma}_c)$ と鉄筋ひずみの関係の一例を図-7に示す。このように、関数 $F(\bar{\sigma}_c)$ は前述の条件を満たしている。

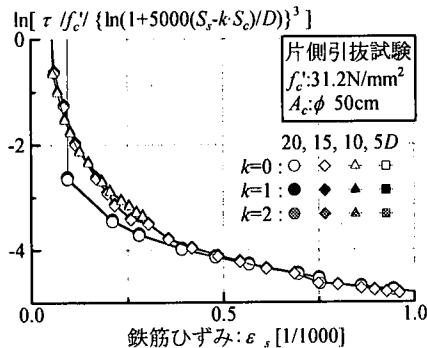


図-10 コンクリート断面積の大きな片側引抜試験に
コンクリート変位が及ぼす影響

(2) コンクリート変位の影響

コンクリート変位 S_c の影響を考慮する定数 k は、鉄筋ひずみの影響が小さい範囲で評価する必要がある。このため、実験による付着応力と、鉄筋変位 S_s 、およびコンクリート変位 S_c から成る対数関数 $G(\tau, S_s, S_c) = [\tau/f_c]/[\ln\{1+5000(S_s-k \cdot S_c)/D\}]^3$ と、実験による鉄筋ひずみとの関係に着目した。鉄筋ひずみの比較的小さい範囲内で、実験条件による関数 $G(\tau, S_s, S_c)$ の値の差異を消去できるよう、定数 k を決定した。決定の一因となった例として、関数 $G(\tau, S_s, S_c)$ と鉄筋ひずみの関係を図-8に示す。

$k=0$ 、すなわち、コンクリートの変位 S_c を考慮しない場合は、載荷方法により関数 $G(\tau, S_s, S_c)$ の値は異なり、一軸引張試験での値は、片側引抜試験での値より小さかった。とくに、鉄筋ひずみの小さい範囲で、載荷方法による差異が大きいことがわかる。片側引抜試験での、コンクリート断面積による差はほとんど認められなかった。次に、 $k=1$ とした場合、載荷方法による関数 $G(\tau, S_s, S_c)$ の差異はほとんどなくなった。さらに、 $k=2$ とした場合は、一軸引張試験での $G(\tau, S_s, S_c)$ の値は、片側引抜試験での値よりも大きくなった。図-9に示すように、コンクリート圧縮強度にかかわらず、 $f_c^{'} 40N$ 級でも同様の傾向となった。

なお、図-10に示すように、コンクリート断面積の大きな片側引抜試験では、 k の値にかかわらず $G(\tau, S_s, S_c)$ は同一の曲線となり、コンクリート変位 S_c の影響はほとんどないことがわかる。

したがって、 $k=1$ が最適値であり、島式でのすべり S_s は、任意の断面での鉄筋とコンクリートの相対変位すべきであると考える。ここで、鉄筋の変位 (=すべり S_s) は島らと同様に、境界条件が $S_{s,c}=0, \varepsilon_s > 0$ となる一軸引張試験および両側引抜試験では、境界からの着目点までの鉄筋ひずみの積分値とすればよく、境界条件が $S_{s,c} > 0, \varepsilon_s = 0$ となる片側引抜試験では、自由端 (=境界) での鉄筋とコンクリートの相対変位に、自由端から着目点までの鉄筋ひずみの積分値を加えた値とすればよい。また、

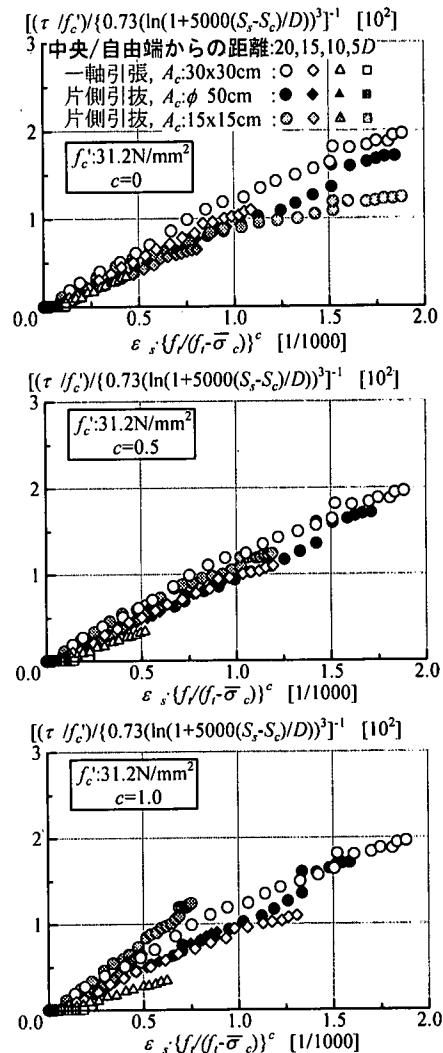


図-11 コンクリート応力の影響 ($f_c^{'} 30N$ 級)

コンクリートの変位 S_c は、式(1)で算定されるコンクリート断面平均の軸方向応力を弾性係数で除した値をコンクリート軸方向ひずみとし、これを境界から着目点まで積分すればよい。そして、鉄筋とコンクリートの相対変位は、それぞれの変位の差、 $S_{s,c} = S_s - S_c$ とすればよい。

(3) コンクリート軸方向応力の影響

コンクリート軸方向応力の影響を考慮する定数 c は、鉄筋ひずみの影響が比較的大きな範囲で評価する必要がある。このため、実験による付着応力、鉄筋変位 S_s 、およびコンクリート変位 S_c から成る関数 $H(\tau, S_s, S_c) = [\tau/f_c]/[\ln\{1+5000(S_s-k \cdot S_c)/D\}]^3 J^1$ と、実験による鉄筋ひずみとの関係に着目し、鉄筋ひずみの比較的大きな範囲で実験条件による関数 $H(\tau, S_s, S_c)$ の値の差異を消去できるよう、定数 c を決定した。関数 $H(\tau, S_s, S_c)$ と鉄筋ひずみの関係の一例を図-11に示す。

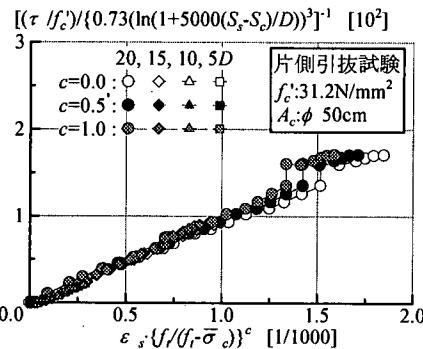


図-12 コンクリート断面積の大きな片側引抜試験にコンクリート応力が及ぼす影響

$c=0$ 、すなわち、コンクリート軸方向応力を考慮しない場合、コンクリート断面の大きな $A_c: \phi 50\text{cm}$ での片側引抜試験では、関数 $H(\tau, S_s, S_c)$ と鉄筋ひずみは1対1の線形関係となった。一軸引張試験での関数 $H(\tau, S_s, S_c)$ の値は、 $A_c: \phi 50\text{cm}$ の片側引抜試験での値より大きく、コンクリート断面積の小さな $A_c: 15 \times 15\text{cm}$ での片側引抜試験での $H(\tau, S_s, S_c)$ の値は、 $A_c: \phi 50\text{cm}$ の片側引抜試験での値より小さかった。また、鉄筋ひずみが増加すると差異が大きくなることがわかる。次に、 $c=0.5$ とした場合、載荷方法およびコンクリート断面積による関数 $H(\tau, S_s, S_c)$ の差異はほとんどなくなった。さらに、 $c=1.0$ とした場合は、 $c=0$ の場合とは逆方向に差異が大きくなつた。

図-12に示すように、コンクリート断面積の大きな片側引抜試験では、 c の値による $H(\tau, S_s, S_c)$ の値の差異はほとんどなく、コンクリート軸方向応力の影響は小さいことがわかる。

これらの結果から、 $c=0.5$ が最適値であると判断した。島式での鉄筋ひずみの影響を考慮した項 $1/(1+10^5 \epsilon_s)$ は、その断面でのコンクリートの軸方向平均応力: $\bar{\sigma}_c$ の引張側への増加もしくは圧縮側への増加に伴う、鉄筋ひずみ: ϵ_s の増幅もしくは低減を考慮すべきであると考える。これは、鉄筋ひずみの増加によって鉄筋近傍のコンクリートに局所破壊が起きると、その断面でのコンクリートの軸方向応力の状態により局所破壊の程度が異なり、軸方向応力が引張場であれば ϵ_s の影響は増幅し、圧縮場であれば低減されるという考えを考慮したものである。ここで、コンクリートの軸方向応力は、着目する断面において、鉄筋ひずみと載荷荷重および載荷方法による係数 K_p の関数である式(1)で、算定される断面平均応力を用いればよい。

(4) 補正式の検証

以上示したとおり、コンクリートの軸方向応力を考慮した島式の補正式は、式(5)のようになる。

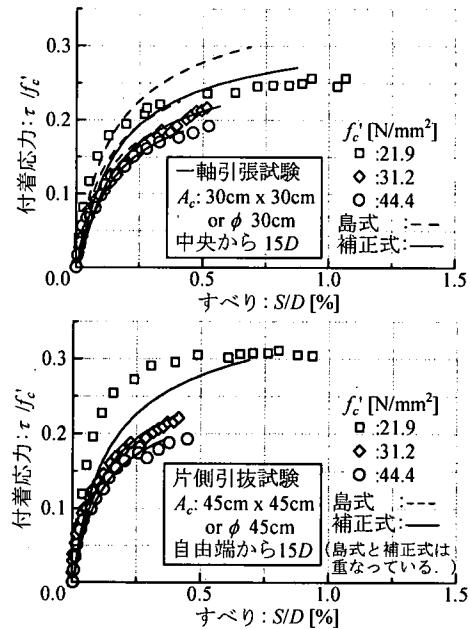


図-13 付着応力-すべり関係(圧縮強度による違い)

$$\tau = \frac{0.73 f'_c \cdot \{\ln(1 + 5000(S_s - S_{s,c})/D)\}^3}{1 + 10^5 \epsilon_s \cdot \sqrt{f'_c / (\bar{\sigma}_c - \bar{\sigma}_e)}} \quad (5)$$

式(5)を用いた数値解析による $\tau-S_s$ 関係を図-2に破線で示した。式(5)を用いることによって、載荷方法とコンクリート断面積にかかわらず、一つの式で $\tau-S_s$ 関係を表せることが確認できる。なお、図-2で、片側引抜試験および両側引抜試験での式(5)を用いた解析による $\tau-S_s$ 関係は、鉄筋軸に沿った位置によらず同一曲線上にあったが、一軸引張試験での $\tau-S_s$ 関係は鉄筋軸に沿った位置によって異なり、複数の $\tau-S_s$ 曲線を持つ解析結果となつた。

また、式(5)はコンクリートの圧縮強度に加えて、引張強度の影響も含んでいる。しかしながら、図-13に示すように、コンクリートの圧縮強度が異なつても、式(5)による $\tau-S_s$ 関係は実験値と概ね一致した。

図-14に、式(5)を用いて数値解析した付着応力: $\tau f'_c$ 、すべり: $S_{s,c} = (S_s - S_c)/D$ 、鉄筋ひずみ: ϵ_s 、およびコンクリート軸方向応力: $\bar{\sigma}_c f'_c$ の、鉄筋軸に沿った分布を示す。式(5)の比較検証のため、載荷方法の異なるもの、圧縮強度の異なるもの、付着長の異なるものを列挙した。なお、付着長の短い一軸引張試験では、供試体左右の鉄筋ひずみ分布に偏りがあり、 $S_{s,c}=0$ となる境界が左にずれていたため、数値解析における付着長は、実験で $S_{s,c}=0$ となる位置から載荷端までとした。このため、図-14での解析値は供試体中央から2D程度までは表示していない。

図-14から、式(5)を用いた数値解析の結果は、実験結果と概ね一致した。とくに、載荷端でのすべり $S_{s,c}$ は実験

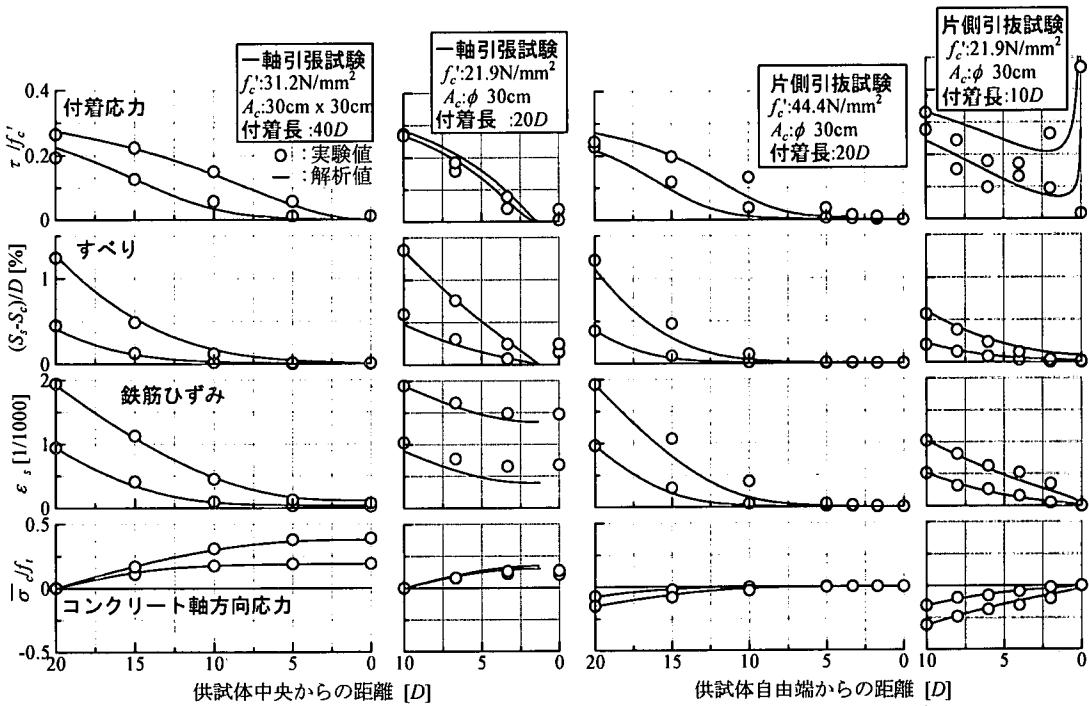


図-14 付着応力、すべり、鉄筋ひずみ、およびコンクリート軸方向応力の鉄筋軸に沿った分布

結果とよく一致し、ひびわれ幅の予測や終局変形量の予測など、構造物の挙動を推定する上で実用上の精度を有していると考える。なお、付着長10Dの片側引抜試験では、自由端近傍で付着応力が急激に増加している。これは、解析上の発散ではない。自由端近傍では、鉄筋ひずみが急激に0に近づくため、鉄筋ひずみの変化量が大きくなることが原因である。また、この供試体では鉄筋降伏荷重の半分程度の荷重で、鉄筋の引き抜けによる破壊が顕著となり実験を中断したため、図-14では鉄筋ひずみで1000 μ 程度までしか示していない。

以上で示したものは、本実験での供試体の一部であるが、他の供試体に対しても以上で示したものと同様の検証を行い、式(5)を用いた数値解析による τ - S 関係は実験結果とほぼ一致することを確認した。

(5) 補正式を用いた数値解析の一例

補正式での定数 k 、および c が、解析上どの程度付着応力-すべり関係に影響を及ぼすかを評価するため、定数 k 、 c をパラメータとした数値解析を行った。解析のモデルは、鉄筋間隔10cmで複数の鉄筋が配置され、40cm間隔で発生したひびわれに挟まれる部位を想定した。解析に用いた諸元を表-3に示す。最大荷重は載荷端の鉄筋ひずみで600 μ とした。これは、表-3の条件での解析において、隣り合うひびわれ間の中央に、新たなひびわれが発生する荷重に相当する。

なお、ひびわれ近傍には割裂ひび割れが発生しやすく、

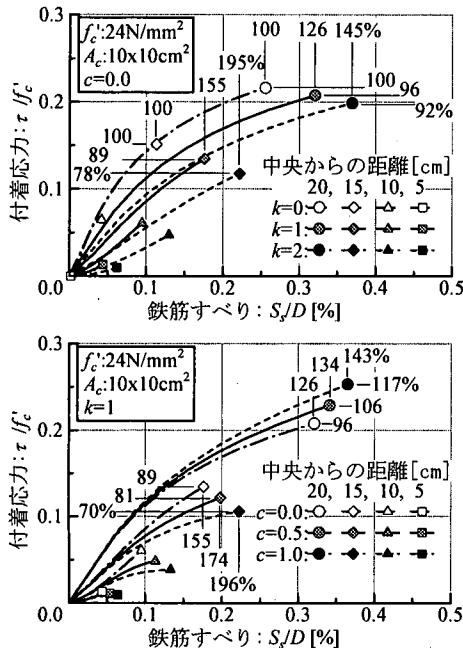
表-3 解析条件

コンクリート		鉄筋	載荷方法 (付着長)
強度特性	断面形状		
$f'_c = 24.0 \text{ N/mm}^2$ $f_t = 1.9 \text{ N/mm}^2$ $E_c = 23 \text{ kN/mm}^2$	$10 \times 10 \text{ cm}$	$D = 15.9 \text{ mm}$ $f_y = 295 \text{ N/mm}^2$ $E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$	一軸引張 (40cm = 25.2D)

割裂ひび割れが発生した場合は付着応力が極度に低下することが知られているが、本解析ではこのことは考慮していない。本解析は、提案した補正が解析結果にどのような影響を及ぼすかを検討したものである。割裂ひび割れの発生限界となる割裂付着強度、および割裂ひび割れの発生による付着応力の低下量については、他の研究成果^{18,19,20}が参考になる。

また、設定した解析条件は、島ら¹⁹の提案式が導かれた実験条件から外れるが、本研究の目的である付着応力関係式の適用範囲の拡大、とくにひび割れの算定に用いる方向への拡大を考え、コンクリート断面積の小さな例をとりあげた。

数値解析は、載荷端でのすべり S_{sc} をパラメータとした収束計算である。まず、鉄筋軸を法線とする面で部材を有限の要素に分割し、載荷端で設定される鉄筋ひずみと、仮定したすべり S_{sc} を式(5)に代入して付着応力を算定する。次に、付着応力を用いて次の要素の鉄筋ひずみとすべり S_{sc} を算定し、それらから次の要素の付着応力を算定する。この作業を境界まで繰り返し、境界条件(表-2参照)を満たせば収束とした。



(図中の数値は $k=0, c=0$ の解析結果に対する百分率)
図-15 付着応力-すべり関係に定数 k, c の及ぼす影響

解析結果を図-15に示す。ここでのすべりは、島式を基とした補正式の比較であるため、島らの研究¹⁾と同様に鉄筋の変位としてすべり S_s で表す。なお、図中の数値は、最大荷重時における部材の中央から15cmおよび20cmの位置についての、定数 $k=0, c=0$ のとき、すなわち島式を用いた解析結果に対する、定数 k, c を変化させたときの付着応力およびすべり S_s の比率である。

定数 k を増加させると、付着応力は減少し、すべり S_s が増加する傾向を示した。 $k=1$ とした場合、中央から20cm(載荷端)での付着応力は島式の96%、すべり S_s は126%となり、中央から15cmの位置での付着応力は89%、すべり S_s は155%となった。付着応力-すべり関係式にコンクリート変位 S_c を考慮することによって、付着応力は低下し、すべり S_s が増加することとなった。また、コンクリート変位 S_c を考慮することによって、鉄筋軸に沿った位置の違いによる τS_s 関係の差異が生じ、図-2で示した一軸引張試験 $A_c:45 \times 45\text{cm}$ の結果と同じ傾向を示した。

定数 c を増加させると、載荷端では付着応力は増加し、すべり S_s が減少する傾向を示したが、コンクリートの内部では逆に、付着応力は減少し、すべり S_s が増加する傾向を示した。載荷端での付着応力の増加は、コンクリート応力を考慮することによる全体的な付着応力の低下によって、付着応力の低下が少ない載荷端付近で、付着力の負担が大きくなつたことが原因と考える。

定数を $k=1, c=0.5$ とした場合、すなわち提案した補正式での解析結果について、中央から20cmでの付着応力は島

式の106%とほぼ同程度であるが、すべり S_s は134%と大きな値となつた。中央から15cmの位置での付着応力は81%、すべり S_s は174%となつた。コンクリートの軸方向応力を考慮することによって、コンクリート内部での付着応力は低下し、すべり S_s は増加することとなつた。

6. 結論

載荷方法およびコンクリート断面積を要因とした載荷実験を行い、これらの要因が、局所付着特性およびコンクリート軸方向応力の状態に及ぼす影響を評価した。さらに、これらの条件の違いにより局所付着特性が異なることを、コンクリートの軸方向応力の影響を取り込むことで説明できるかを検討し、既往の付着応力関係式の適用性を論じて補正式を提案した。結論を以下に示す。

(1) 局所付着特性は載荷方法およびコンクリート断面積の影響を受けることを確認した。載荷方法が引抜試験の場合、コンクリート断面積が大きいときの付着応力-すべり関係は島式と一致するが、コンクリート断面積が小さいと、付着応力は10%程度増加し、すべり S_s は30%程度低下した。片側引抜試験と両側引抜試験とでは境界条件が異なるが、付着応力-すべり関係はほぼ同じであった。載荷方法が一軸引張試験の場合、引抜試験より付着応力は10%程度低下し、すべり S_s は60%程度増加した。また、コンクリート断面積が小さいほどこの傾向は強かった。なお、付着応力およびすべり S_s の増減の比率は、本実験の範囲内での値であり、載荷端から5D内側の位置での値である。

(2) 一軸引張試験でのコンクリートの軸方向ひずみは、断面全体が引張場にあり、鉄筋に近いほどひずみ量が大きくなることを確認した。また、引抜試験での軸方向ひずみは、鉄筋軸近傍は引張場となるが、コンクリート表面付近は圧縮場となった。断面内の平均値として算定したコンクリートの変位 S_c は、コンクリート断面積の小さな供試体では、鉄筋変位 S_s の12%程度となった。

(3) 島式の補正として、すべりの定義を鉄筋とコンクリート変位の差とし、さらに、コンクリートの軸方向応力の増加による付着応力の低減を考慮することを提案した。この補正式を用いた解析により、異なる載荷方法および異なるコンクリート断面積での実験結果を、一つの式で表せることを確認した。

(4) ひびわれた部材を想定し、割裂ひび割れの発生を考慮しないモデルを用いた補正式による解析結果は、島式を用いた場合に比べて載荷端でのすべり S_s が30%程度増加した。また、載荷端での付着応力は島式を用いた解析結果と同程度であったが、コンクリート内部での付着応力は20%程度低下した。

7. あとがき

本論文で、コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の局所付着特性に、コンクリートの軸方向応力状態の与える影響が大きいことを示した。載荷方法やコンクリートの断面積が島らの実験条件と異なる場合は、コンクリート軸方向応力の状態が異なるため、局所付着特性の差が解析結果に影響を及ぼし、設計の目的である付着力や載荷端でのすべりは、島式を用いた解析結果とは異なる。設計の対象とする部材の状況に応じて局所付着特性の取り扱いを考える必要があり、コンクリート軸方向応力の状態を考慮して設計に局所付着応力関係式を用いる必要があると考える。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省港湾技術研究所主任研究官の山田昌郎氏に貴重な御助言を頂き、多大な御協力を賜わった。また、実験の一部は、当時早稲田大学理工学部の学生であった小塙 親君、前川芳紀君、中井章裕君、中嶋龍哉君に御協力頂いた。末筆ながらここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫 : マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165~174, 1987.2.
- 2) 堺直之, 清宮 理, 山田昌郎 : 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.73~83, 1996.11.
- 3) 六車 熙, 森田司郎, 富田幸次郎 : 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, No.131, pp.1~8, 1967.1.
- 4) 堺直之, 清宮 理 : コンクリートの応力状態が異形鉄筋の付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21-No.3, pp.373~378, 1999.
- 5) 堺直之, 清宮 理 : 静的繰り返し載荷が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22-No.3, pp.1195~1200, 2000.
- 6) 山尾芳秀, 周 礼良, 岡村 甫 : 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219~228, 1984.3.
- 7) 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 付着割裂強度算定式の提案—, 日本建築学会論文報告集, pp.45~52, 1983.2.
- 8) 吉川弘道, 田辺忠顯 : 鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 366/V-4, pp.93~102, 1986.2.
- 9) 前田匡樹, 小谷俊介, 青山博之 : 異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着強度式, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.277~284, 1994.3.
- 10) 森田司郎 : 鉄筋コンクリートにおける付着とひび割れに関する研究, 京都大学学位論文, 1968.4.
- 11) 関 博, 赤塚雄三 : コンクリート柱に水平に埋め込んだ異形鉄筋の付着強度, 土木学会論文報告集, No.164, pp.45~51, 1969.5.
- 12) 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の応力伝達に関する研究, 土木学会論文報告集, No.307, pp.85~97, 1981.3.
- 13) 村田二郎, 河合紀茲 : 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, No.348/V-1, pp.113~122, 1984.8.
- 14) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫 : 異形鉄筋の降伏後における付着特性, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.213~220, 1987.2.
- 15) 岡村 甫, 前川宏一 : 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, pp.160~182, 技報堂出版, 1991.5.
- 16) 土木学会編 : コンクリートの力学的特性に関する調査研究報告, コンクリートライブラリ 69, pp.48~60, 1991.3.

(2000.7.6 受付)

LOCAL BOND CHARACTERISTIC OF DEFORMED BAR CONSIDERED CONCRETE AXIAL STRESS

Naoyuki IKKI and Osamu KIYOMIYA

A local bond characteristic of the deformed bar embedded concrete is affected by experimental conditions and its position along the steel bar. In the recent paper published by Shima, the bond-slip function considered steel strain was proposed in 1987. However, there are some exceptions to Shima's function, under different conditions of loading method and concrete sectional area from Shima's experiments. Moreover, we suggested that the bond-slip relationships were affected by the condition of concrete axial stress. In this paper, we performed experimental evaluations of the effect of concrete axial stress on bond-slip relationships. As a result, it was confirmed that the bond-slip function depended on loading method and stress properties around steel bar.