

付着応力-すべり関係に影響を及ぼす 要因の実験的研究

壹岐直之¹・清宮理²・山田昌郎³

¹正会員 若築建設(株) 土木本部 設計部 設計4課, [元港湾技研研修生](〒153 東京都目黒区下目黒2-23-18)

²正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因と、その影響の程度を確認するため載荷試験を行った。実験要因は、コンクリートの応力場、コンクリート打設時の鉄筋の向き、割裂防止筋の有無、およびコンクリート断面積である。実験結果の定量的な評価を行ったところ、付着応力-すべり関係にコンクリートの応力状態が強く影響することが判明し、同一のすべりに対する付着応力はコンクリートが引張応力場では圧縮応力場の59~80%となった。さらに、各種の要因が付着応力-すべり関係に及ぼす影響の程度を、既往の付着応力-すべり関係式での影響係数として提案した。

Key Words : bond stress, slip, loading test, stress condition

1. まえがき

コンクリート構造物に発生したひびわれの幅は、耐久性や機能性の観点から重要な因子であり、設計において精度の良いひびわれ幅の予測方法が必要である。各種基準¹⁾でのひびわれ幅算定式は、ひびわれ間隔と鉄筋の平均ひずみの積で表され、ひびわれの定常状態を対象としている。さらに精度の良いひびわれ幅、および定常状態に達するまでのひびわれ幅の予測を行うためには、鉄筋ひずみの分布を把握しなければならない。

鉄筋ひずみの分布を把握するには、付着応力の分布を推定する必要がある。一般に、付着応力 τ はすべり S の関数として表され、これまでに多くの付着応力とすべりとの関係(以下、 τ - S 関係と称する)が提案されている。とくに、六車・森田らの提案式²⁾および島・周らの提案式³⁾は、種々の実験条件における τ - S 関係を精度よく表している。しかし、六車・森田らの提案式では、最大付着応力とそのときのすべりを仮定する必要がある、両引試験での最大付着応力は引抜試験での値よりかなり小さい値を設定している。また、島・周らの τ - S 関係式は柱はり接合部の曲げ荷重による鉄筋の抜け出しを問題としている。このため、定式化には引抜試験を

基にしており、コンクリートは圧縮応力場である。この場合、鉄筋近傍の内部ひびわれの発生は抑えられる。一方、コンクリートが引張応力場では内部ひびわれは発生しやすい状況下にある。ひびわれの発生した部材では、コンクリートは引張応力場にあり、ひびわれ幅の算定に用いる τ - S 関係は、コンクリートが引張応力場にある実験結果を基とすべきである。このためには、コンクリートの応力場が τ - S 関係に及ぼす影響を確認する必要がある。

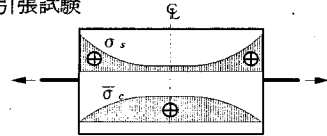
ところで、一般に鉄筋を水平にしてコンクリートを打設するとコンクリート硬化時の沈降やブリージング等によって付着性能の低下が考えられる。コンクリート打設時の鉄筋の向きの違いが、 τ - S 関係に及ぼす影響を確認する必要がある。

本研究では、以下に示す①~④の要因が τ - S 関係に及ぼす影響を調べるため載荷実験を行い、その結果の定量的な評価を行った。①コンクリート応力場および境界条件。②コンクリートの打設時の鉄筋の向き(水平もしくは鉛直)。③拘束筋(割裂防止筋)の有無。④コンクリートの断面積。なお、本研究における τ - S 関係式は、島・周らの提案式を基にした。この式は圧縮応力場における解析では精度がよく、最大付着応力等の定量化が難しい定数を設定する必要がないからである。

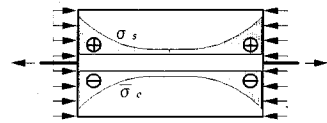
表-1 実験要因の組み合わせと試験体記号

記号	荷重方法	コンクリート打設時の鉄筋の向き	拘束筋	断面形状		
TH1-15	両側引張	水平	有り	15×15cm		
TH1-30				30×30cm		
TH1-45				45×45cm		
TH0-15			鉛直	無し	無し	15×15cm
TH0-30						30×30cm
TH0-45						45×45cm
TV0-45						45×45cm
TV0-50	φ 50cm					
BH0-15	両側引抜	水平	無し	15×15cm		
BH0-30				30×30cm		
BH0-45				45×45cm		
BV0-45				鉛直	45×45cm	
BV0-50					φ 50cm	
PH0-15	片側引抜	水平	無し	15×15cm		
PH0-30				30×30cm		
PH0-45				45×45cm		
PV0-45				鉛直	45×45cm	
PV0-50					φ 50cm	

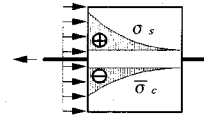
両側引張試験



両側引抜試験



片側引抜試験



σ_s:鉄筋の応力(引張が⊕)
σ_c:コンクリートの断面平均応力(引張が⊕)

図-1 各荷重方法での荷重と応力分布

表-2 鉄筋の性質

D [mm]	E _s [GPa]	f _y [MPa]	f _u [MPa]	ε _{sh} [μ]
19.1	181.3	357.8	558.8	8500

2. 実験概要

(1) 実験要因の組み合わせ

試験体の総数は18体で、各々の試験体の実験要因を表-1に示す。図-1に示すように、荷重方法はコンクリートの応力状態および境界条件の違いによって3種類ある。

両側引張試験は鉄筋に一軸引張力を荷重し、その反力は外部にとった。このため、コンクリートは鉄筋から伝達される引張力によって引張の応力場である。境界条件は、荷重端で $\overline{\sigma}_c = 0$ 、 $\sigma_s = P / A_s$ であり、試験体中央で $S = 0$ である。任意の断面でのコンクリートと鉄筋の応力の関係は $\overline{\sigma}_c = (P - \sigma_s \cdot A_s) / A_c$ である。ここで、 $\overline{\sigma}_c$ はコンクリートの断面平均応力、 σ_s は鉄筋応力であり、引張応力度を正数とした。また、 P は荷重荷重、 A_s および A_c は鉄筋およびコンクリートの断面積である。

一方、両側引抜試験および片側引抜試験は、鉄筋に一軸引張力を荷重し、その反力はコンクリートに圧縮力として荷重した。このため、コンクリートは荷重軸方向に拘束力を受け、コンクリートの応力場は圧縮である。境界条件は、荷重端で $\overline{\sigma}_c = -P / A_c$ 、 $\sigma_s = P / A_s$ であり、試験体中央で $S = 0$ である。片側引抜試験の境界条件は、荷重端で $\overline{\sigma}_c = -P / A_c$ 、 $\sigma_s = P / A_s$ であり、自由端で $\overline{\sigma}_c = \sigma_s = 0$ である。任意の断面でのコンクリートと鉄筋の応力の関係は、

両側引抜試験および片側引抜試験ともに $\overline{\sigma}_c = \sigma_s \cdot A_s / A_c$ である。

(2) 試験体形状寸法および材料

試験体のコンクリートの断面は15×15cm、30×30cm、45×45cmの正方形および直径50cmの円形の4種類であり、断面の中央に引張鉄筋を埋め込んだ。図-2に45×45cmの試験体の形状寸法を示す。引張鉄筋は、ネジ節鉄筋D19SD295Aを使用した。引張鉄筋の寸法および力学的性質を表-2に示す。ここで、 D は鉄筋径、 E_s は鉄筋の弾性係数、 f_y は鉄筋の降伏強度、 f_u は鉄筋の引強強度、 ϵ_{sh} は鉄筋のひずみ硬化の初期ひずみである。引張鉄筋とコンクリートの定着長は76.4cm (=40・ D)とした。これは、島・周らの提案する $\tau - s$ 関係式³⁾を用いた事前解析により、本研究の実験条件下では試験体中央での境界条件として $s = 0$ かつ鉄筋ひずみ $\epsilon = 0$ を満たす長さとした。両側引抜試験および片側引抜試験では、 $\tau - s$ 関係に及ぼす荷重端の影響を取り除くために、φ23cmのシース管を用いて19.1cm (=10・ D)の非付着区間を設けた。また、両側引張試験でコンクリート断面が15×15cmの試験体は、荷重中にひびわれが各所に発生すると予測された。このときの初期ひびわれを、試験体の中央に発生させるため、試験体中央に切欠きを設けた。切欠き位置でのコンクリート

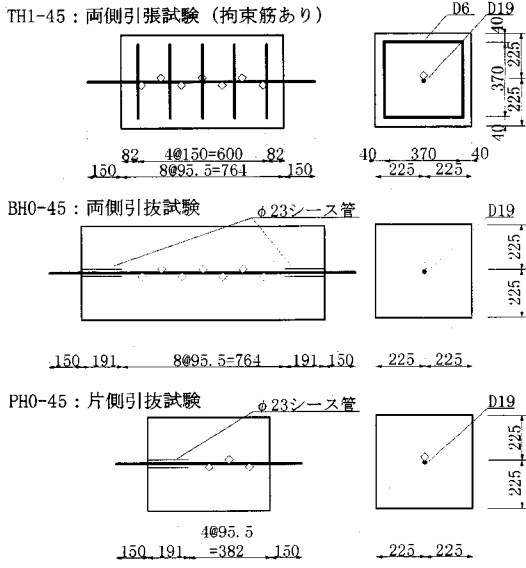


図-2 試験体および鉄筋ひずみ計測位置

表-3 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kgf/m ³]				f_c' [MPa] 開始時～終了時
		W	C	S	G	
60.0	47.0	165	275	871	993	29.41 ~ 33.04

の断面は、13×13cmの正方形とした。
 拘束筋はD6SD295Aを用いた。力学的性質は引張鉄筋と同じである。拘束筋のかぶりはコンクリート断面積にかかわらず一定にし、3.7cmとした。前田らの提案式⁴⁾で割裂付着強度 τ_{bu} を求めると、TH1-15では $\tau_{bu}=18.3\text{MPa}$ であり、TH0-15では $\tau_{bu}=5.7\text{MPa}$ である。島・周らの $\tau-S$ 関係式³⁾を用いた解析によると、載荷荷重12tfまででの最大付着応力は8.1MPaである。TH0-15では割裂ひびわれが発生し、TH1-15では割裂ひびわれは発生しないと予測された。TH0-30では $\tau_{bu}=10.1\text{MPa}$ であり、これ以上の断面積を持つ試験体は割裂ひびわれは発生しないと予測された。

コンクリートの配合および強度を表-3に示す。ここで、 f_c' はコンクリート圧縮強度である。コンクリートの配合は試験体すべて同一のものであるが、試験体数が多く実験が材令25日から55日と長期にわたったため、時間の経過に伴い試験時の圧縮強度が増加した。各試験体のコンクリート圧縮強度は、実験開始時と実験終了時に行った強度試験の結果と時間の関係を直線で補間した。

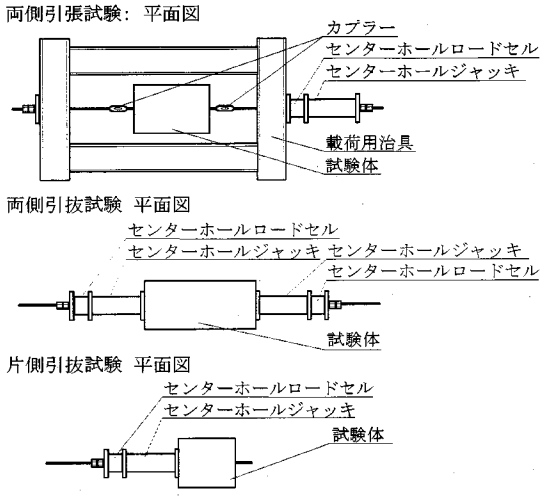


図-3 載荷方法

(3) 鉄筋ひずみ計測方法

引張鉄筋のひずみは、図-2に示す箇所に貼り付けたひずみゲージで計測した。ひずみゲージの間隔は9.55cm (=5・D) とし、載荷中に鉄筋の偏心が無いことを確認するために千鳥状に貼り付けた。ひずみゲージの数は、鉄筋の付着特性に影響を及ぼす可能性があるため最小限にとどめ、両側引張試験と両側引抜試験では7枚、片側引抜試験では3枚とした。ひずみゲージの貼り付けには、山尾・周らの方法⁵⁾を参考にした。

(4) 載荷方法

載荷方法を図-3に示す。両側引張試験は、試験体を載荷用治具内に水平に配置し、センターホールジャッキで鉄筋に軸引張力を載荷した。両側引抜試験は、水平に置いた試験体の左右にセンターホールジャッキを配置し、鉄筋に軸引張力を載荷した。鉄筋軸引張力の反力はコンクリートに圧縮力として載荷した。鉄筋を鉛直にして打設した試験体では、左側が打設時の上面である。片側引抜試験は、水平に置いた試験体の左側にセンターホールジャッキを配置し、鉄筋に軸引張力を載荷した。鉄筋軸引張力の反力はコンクリートに圧縮力として載荷した。鉄筋を鉛直にして打設した試験体では、左側が打設時の上面であり、鉄筋の引抜方向はコンクリート打設方向の逆である。

載荷荷重はセンターホールロードセルで計測した。各試験体ともに、最大荷重は117.6kN (12tf) とし、載荷荷重88.2kNまでは4.9kNごとに、88.2kN以降は

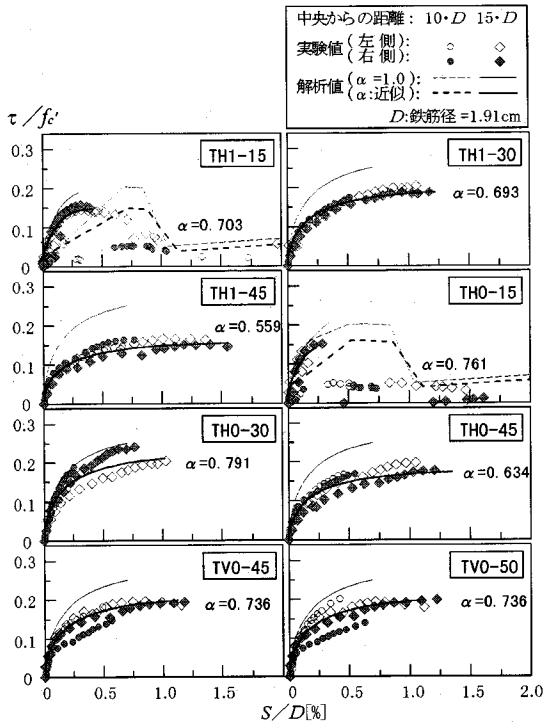


図-8 両側引張試験での付着応力-すべり関係

5, 6, 7に示す。図-5, 6, 7はそれぞれ両側引張試験, 両側引抜試験, 片側引抜試験である。BV0-50は、試験体の右側載荷端付近でジャンカ等の打設不良の箇所が多くあった。このため、ほぼ同一の実験条件であるBV0-45と比較して、同一の載荷荷重における鉄筋ひずみは大きな値となった。両側引張試験のひびわれの発生しなかった試験体について、載荷荷重117.6kNで試験体中央から $15 \cdot D$ の位置での鉄筋ひずみは $1400 \sim 1800 \mu$ であった。これに対し、両側引抜試験および片側引抜試験での鉄筋ひずみは、BV0-50を除くと $1200 \sim 1500 \mu$ であり、両側引張試験よりも小さい値であった。また、試験体中央から $10 \cdot D$ の位置での鉄筋ひずみについても、両側引抜試験および片側引抜試験での鉄筋ひずみは両側引張試験での値よりも小さい値であった。

(2) τ - S 関係の決定方法

鉄筋ひずみ分布の決定方法は、既往の研究^{3),5),6)}とほぼ同じである。鉄筋ひずみ分布は、着目する計測点を含む近傍の3点を通る放物線で補間した。載荷端での鉄筋ひずみは、載荷荷重と鉄筋の性質から算定した値を用いた。降伏していない区間での鉄筋のひずみ曲線が、鉄筋の降伏ひずみに達した場合は、達した位置で鉄筋ひずみ分布は不連続とした。この

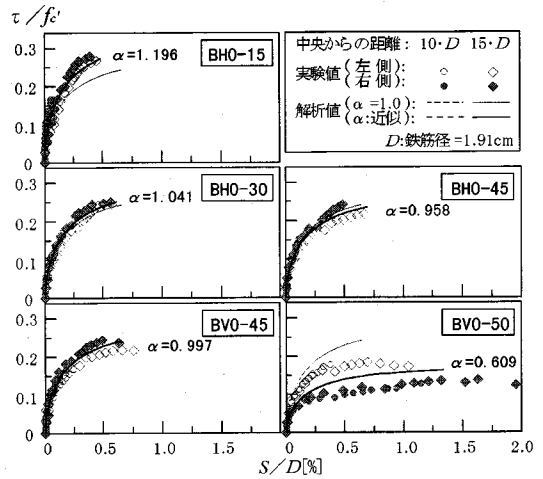


図-9 両側引抜試験での付着応力-すべり関係

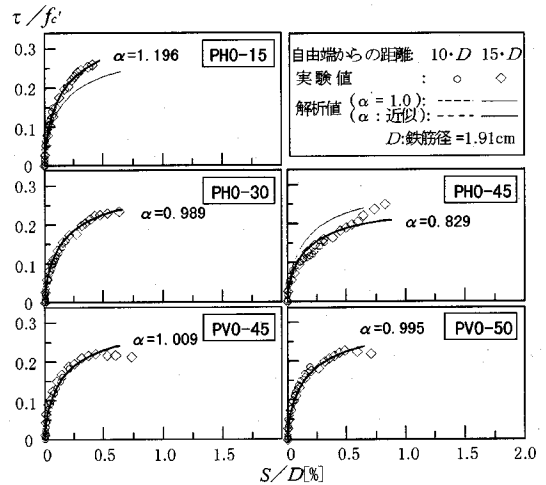


図-10 片側引抜試験での付着応力-すべり関係

位置での鉄筋ひずみは、非降伏側では鉄筋の降伏ひずみ、降伏側ではひずみ硬化の初期ひずみとした。さらに、鉄筋が降伏した区間での鉄筋ひずみの分布は、前述のひずみ硬化の初期ひずみとその位置を用いて、直線もしくは放物線で補間した。付着応力 τ は、以上の方法により決定した鉄筋ひずみを鉄筋応力 σ_s に換算し、鉄筋応力分布を式(1)により微分して求めた。すべり S は、鉄筋ひずみ ϵ を式(2)により積分して求めた。ここで、 $S=0$ となる位置は鉄筋ひずみが最小となる位置とし、 x は $S=0$ の位置からの距離である。

$$\tau = \frac{D}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (1)$$

$$S = \int \epsilon \cdot dx \quad (2)$$

(3) τ - S 関係の実験結果

τ - S 関係の実験結果を図-8, 9, 10に示す. 図-8, 9, 10はそれぞれ両側引張試験, 両側引抜試験, 片側引抜試験である. これらの図には後述する解析による τ - S 関係も示してある. TH1-15とTH0-15にはひびわれが発生し, 他の試験体にはひびわれは発生しなかった.

一般的に, 鉄筋とコンクリートの付着長が短い場合では, 鉄筋に沿った位置の違いにより τ - S 関係に違いが生じる. 一方, 付着長が十分に長い場合では鉄筋に沿った位置にかかわらず τ - S 関係は同一であり, この場合の付着長は $25 \cdot D$ 以上とされている⁹⁾. 本実験での付着長は $20 \cdot D$ であるが, ひびわれの発生しなかった試験体について, 鉄筋に沿った位置の違いによる τ - S 関係の違いはほとんど認められなかった.

また, 一般的に, 引張応力場の試験体では, 荷重端近傍ではコンクリートのポップアウトによって付着応力の低下が考えられる. 本研究での割裂ひびわれの生じなかった試験体では, τ - S 関係は鉄筋に沿った位置によらずほぼ同じであった. したがって, 本試験体の範囲内ではコンクリートのポップアウトによる付着応力の影響はなかったと考える.

TH1-15およびTH0-15で, 試験体中央から $15 \cdot D$ の位置での τ/f_c' はそれぞれ, $S/D=0.4\%$ および $S/D=0.3\%$ 程度で減少し, とくに拘束筋の無いTH0-15の減少は急激であった. この $15 \cdot D$ の位置での τ/f_c' の減少は二次ひびわれの発生とほぼ同時に生じ, TH1-15の左側で二次ひびわれが発生したときは $S/D=0.76\%$, 右側で発生したときは $S/D=0.35\%$ であった. また, TH0-15の左側で二次ひびわれが発生したときは $S/D=0.22\%$, 右側で発生したときは $S/D=0.28\%$ であった. 前述の τ/f_c' の減少は, 二次ひびわれの発生荷重が初期ひびわれよりも大きいので, ひびわれ発生時の付着長の減少による鉄筋ひずみの増加が急激であり, ひびわれ面での割裂ひびわれ等の部分的な付着破壊が発生したことが原因であると考えられる. とくに, 拘束筋の無いTH0-15ではこの現象が顕著であった.

BV0-50は試験体右半分が打設不良のため, 図-9において, 試験体右側での τ/f_c' が同一の S/D に対して左側での τ/f_c' より小さく, 右側での S/D の最大値は左側より大きい値となった.

(4) 既往の τ - S 関係式を用いた解析結果

解析による τ - S 関係を図-8, 9, 10(図中では, 解析 $\alpha=1.0$)に示す. τ - S 関係の解析には島・周らの提案する式(3)³⁾を用いた. この τ - S 関係

式は境界条件の違いによって, 付着長が十分に長い場合での式(3)と, 付着長が短い場合で鉄筋ひずみの影響を考慮した式(4)の2種類がある³⁾. 式(3)の境界条件は, $S=0$ かつ $\epsilon=0$ であり, これを満足する付着長は, 前述のとおり $25 \cdot D$ 以上とされている. 本実験での付着長は $20 \cdot D$ であるが, 両側引抜試験においては, $S=0$ の位置の鉄筋ひずみは最大 20μ 程度であり, 境界条件をほぼ満足している. また, 片側引抜試験でも自由端付近の鉄筋ひずみ分布の傾きはほぼ0であり, 境界条件を満足している. 一方, 両側引張試験の実験結果では, $S=0$ の位置での鉄筋ひずみは最大 300μ 程度であり, 前述の境界条件を満足していない. しかし, 本実験での鉄筋に沿った位置の違いによる τ - S 関係には違いがほとんど認められなかった. したがって, 本実験での付着長は十分に長く, τ - S 関係に及ぼす鉄筋ひずみの影響は小さいため, 式(3)を用いることに問題はないと考える.

$$\tau = 0.9 \cdot f_c'^{2/3} \left[1 - \exp \left\{ -40 \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{0.6} \right\} \right] \quad (3)$$

$$\tau = 0.73 \cdot f_c' \cdot \left\{ \ln \left(1 + 5000 \cdot \frac{S}{D} \right) \right\}^3 \cdot \frac{1}{1 + 10^5 \cdot \epsilon} \quad (4)$$

ひびわれの発生したTH1-15およびTH0-15の解析では, ひびわれの発生までは式(3)を用い, ひびわれの発生以降は式(4)を用いた. また, ひびわれの発生荷重と境界条件は実験結果から決定した. すなわち, TH1-15およびTH0-15についてそれぞれ, 初期ひびわれの発生荷重 31.4 kN および 40.2 kN 以降は解析の対象とする長さはひびわれ発生前の $1/2$ とし, 二次ひびわれの発生荷重 83.3 kN および 66.6 kN 以降はひびわれ発生前の $1/4$ とした. 図-8のTH1-15およびTH0-15では, 解析による $10 \cdot D$ での S/D が $0.5 \sim 0.7\%$ 程度に急激に増加したのは, 二次ひびわれの発生によるものである. また, 同試験体では $S/D=0.8 \sim 1.0$ 程度で解析による τ/f_c' が急激に減少した. これは, 荷重端付近で鉄筋が降伏したためである.

PV0-50は, 島・周らの実験条件とほぼ同じである. PV0-50の τ - S 関係は, 島・周らの提案式を用いた解析結果と一致し, さらに, 荷重 117.6 kN での τ/f_c' および S/D も一致した. 両側引抜試験および片側引抜試験での τ/f_c' は, 打設不良のBV0-50を除いて, 解析での τ/f_c' と同程度, もしくは大きな値となった. 同断面, 同打設方向の試験体と比較すると, 両側引抜試験と片側引抜試験での τ - S 関係はほぼ同じであり, 境界条件の違いが τ - S 関係に及ぼす影響は認められなかった. しかし, 両

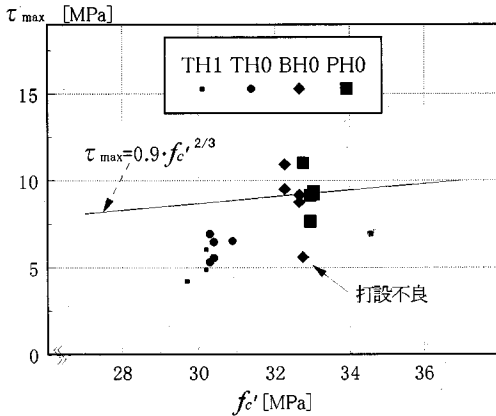


図-11 最大付着応力とコンクリート強度の関係

側引張試験での τ - S 関係は、解析結果と異なり、同一の S/D における τ/f'_c はかなり小さい値であった。また、荷重 117.6kN における実験での τ/f'_c は解析での値より小さく、 S/D は大きい値となった。したがって、コンクリートの応力場が引張であれば、圧縮の場合に比べ同一のすべりに対する付着応力は小さいと考える。

(5) 実験での最大付着応力

実験での τ - S 関係を定量的に評価するため、最小自乗法により各試験体の最大付着応力 τ_{max} を近似した。ここで、実験での τ - S 関係は式(3)の右辺に係数 α を乗じた式(5)に従うとした。すなわち、実験条件にかかわらず、最大付着応力でのすべりは一定であり、実験での付着応力 τ は式(3)を用いてすべり S から算定される値を定数倍 (α 倍) した値であると仮定して τ_{max} を近似した。近似には、試験体中央もしくは自由端から $10 \cdot D$ と $15 \cdot D$ の位置の τ および S を用いた。ひびわれの発生した試験体 TH1-15 および TH0-15 での近似には、二次ひびわれの発生までの τ - S 関係は鉄筋に沿った位置にかかわらずほぼ同一の曲線上にあったため、二次ひびわれの発生までの τ と S を用いた。

$$\tau = \tau_{max} \cdot \left[1 - \exp \left\{ -40 \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{0.6} \right\} \right] \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\tau_{max}}{\tau_0} \quad (\text{島・周らの式では } \alpha = 1)$$

$$\tau_0 = 0.9 \cdot f'_c{}^{2/3}$$

近似により決定した τ_{max} と式(3)における最大付着応力 τ_0 の比である α と、 τ_{max} を式(5)に代

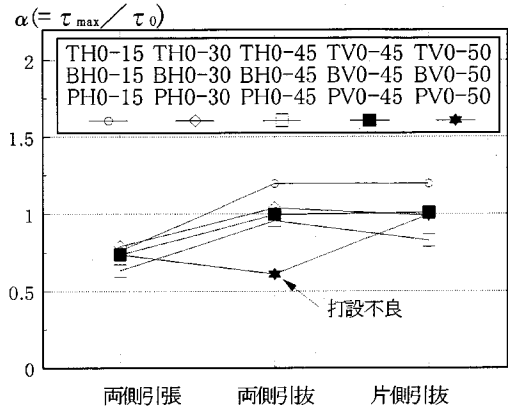


図-12 α と荷重方法の関係

入して τ - S 関係を解析した結果とを 図-8, 9, 10 (図中では、解析 α : 近似) に示す。なお、TH1-15 および TH0-15 でのひびわれ発生以降の τ - S 関係の解析には、式(4)の右辺に α を乗じた式を用いた。近似による τ_{max} を用いた解析結果は、実験による τ - S 関係とほぼ一致した。さらに、最大荷重時の解析による τ/f'_c および S/D の値も実験結果とほぼ一致した。また、ひびわれの発生した試験体で、拘束筋のある TH1-15 の τ - S 関係についても、 α を式(2)の右辺に乗じて解析した結果は実験結果とほぼ一致した。拘束筋のない TH0-15 での τ - S 関係は S/D が 0.3 以上では、近似による α を代入した結果は実験結果と一致しなかった。これは、本実験において TH0-15 は、TH1-15 よりも二次ひびわれの発生に伴う局所的な破壊が顕著であったためと考える。したがって、本研究での実験要因については実験要因によらず、それぞれの τ - S 関係は島・周らの提案する τ - S 関係を τ について定数倍することによって表されると考える。また、この定数は実験要因による影響係数 α として表示する。

最大付着応力 τ_{max} とコンクリート圧縮強度 f'_c との関係を図-11に示す。両側引抜試験および片側引抜試験での τ_{max} は、打設不良の BV0-50 を除くと、およそ 8~12MPa であった。これは、式(1)での最大付着応力に相当する $0.9 \cdot f'_c{}^{2/3}$ とほぼ一致した。しかし、両側引張試験での τ_{max} はおよそ 4~7MPa であり、 $\tau_{max} = 0.9 \cdot f'_c{}^{2/3}$ の算定値よりもかなり小さい値であった。

4. 実験要因が τ - S 関係に及ぼす影響

本章では、本実験での実験要因が、3章において

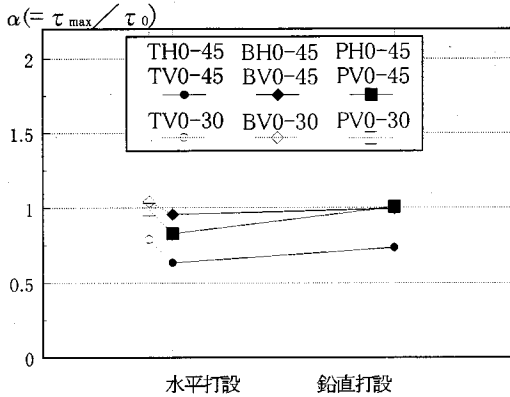


図-13 αとコンクリート打設時の鉄筋の向き関係

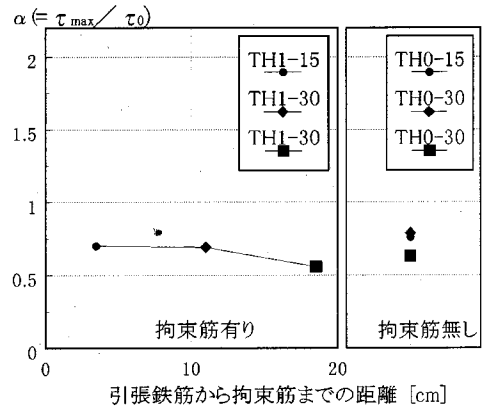


図-14 αと拘束筋の関係

各試験体について推定した τ_{max} に及ぼす影響の程度を評価し、考察を加える。山尾・周ら⁹⁾は、 f_c' の変化が $\tau-S$ 関係に及ぼす影響は、 τ を f_c' の2/3 乗で除することにより評価できるとしている。ここでは、コンクリート強度が最大付着応力に及ぼす影響を除くために、 τ_{max} を式(3)における最大付着応力 τ_0 で除した値 α を用いて評価する。

(1) 載荷方法の影響

α と載荷方法の関係を図-12に示す。両側引張試験での α は0.6~0.8である。両側引抜試験での α は、打設不良の試験体BV0-50では0.6であり、これ以外の試験体では1.0~1.2である。また、片側引抜試験での α は0.8~1.2である。 α について、両側引張試験と両側引抜試験とは異なり、両側引張試験と片側引抜試験とはほぼ同じであった。

両側引張試験と両側引抜試験の違いは、コンクリートの応力場の違いである。コンクリートが圧縮応力場の場合では、鉄筋軸に直角方向の内部ひびわれの発生が抑制され、内部ひびわれの発生しやすい引張応力場の場合に比べて、付着特性が良くなる。本実験で、引張応力場での α は圧縮応力場での α の59~80%であった。引張応力場でのひびわれ幅を算定する上で、引抜試験を基にした既往の $\tau-S$ 関係式を用いる場合には、すべりから算定される付着応力を低減する必要がある。

両側引抜試験と片側引抜試験の違い、すなわち境界条件の違いは $\tau-S$ 関係に影響を及ぼさなかった。これは、本実験の範囲内では、付着長 ($=20 \cdot D$) は境界条件 $S=0$ かつ $\varepsilon=0$ を満足し、 $\tau-S$ 関係に鉄筋ひずみ影響しなかったためであると考えられる。

(2) コンクリート打設方向の影響

α とコンクリート打設時の鉄筋の向きの関係を図-13に示す。鉄筋を水平にして打設した（以下で水平打設と称す）試験体での α の、鉄筋を鉛直にして打設した（以下で鉛直打設と称す）試験体での α に対する比率は、両側引張試験では86%、両側引抜試験では96%、片側引抜試験では84%であった。水平打設の場合では、鉛直打設の場合と比較して α は低下した。

しかし、45×45cmの断面で鉛直打設の試験体と30×30cmで水平打設の試験体とを比較すると、比率は98~107%であり、ほとんど差はない。一般的に打設高さが高いほどブリージングやコンクリートの硬化にともなう沈降によって、付着性能が低下する。関・赤塚の研究⁷⁾では、鉄筋より下側のコンクリートの厚さを7.5cmから22.5cmにすることで、付着強度は70%程度になるとしている。本実験で水平打設の試験体においても、載荷方法や拘束筋の有無にかかわらず45×45cmの断面を持つ試験体の影響係数 α が、これより小さい断面積での α より小さい値であった。本実験で45×45cmの試験体の α は15×15および30×30cmの試験体の80~92%であり、前述の打設高さが影響を及ぼしたと考える。

したがって、45×45cmの断面の試験体では、鉄筋を水平にして打設した試験体では前述の打設高さの影響が大きいため、打設方向が $\tau-S$ 関係に影響を及ぼすと考える。また、比較的打設高さの低い試験体（本実験では30×30cm以下の断面）では、水平打設での打設高さの影響が小さいため、打設方向は $\tau-S$ 関係に影響を及ぼさないと考える。

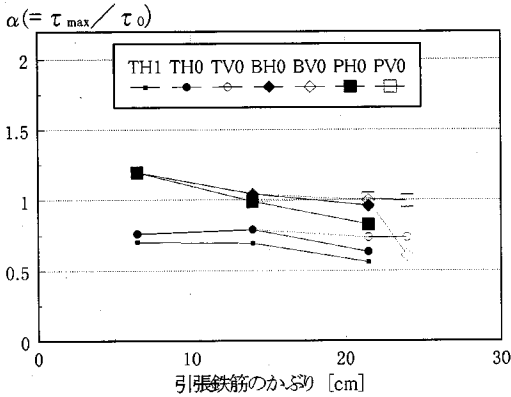


図-15 α とかぶりの関係

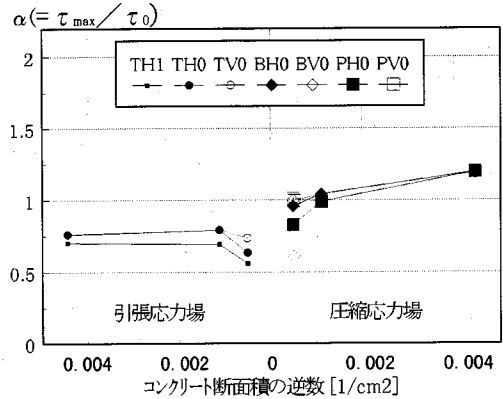


図-16 α とコンクリート断面積の関係

(3) 拘束筋の影響

α と拘束筋の有無の関係を図-14に示す。拘束筋が無い試験体の α の、拘束筋が有る試験体の α に対する比率は、108~114%である。拘束筋の無い試験体では拘束筋の有る試験体よりも、予想と反して、 α がわずかに大きいという結果となった。本研究において、この原因は不明である。しかしながら、 τ_{max} を推定した範囲は割裂ひびわれが発生していない状態であり、割裂ひびわれ発生までの τ - S 関係は鉄筋軸を法線とする面内の拘束には依存しないと推測する。

引張鉄筋から拘束筋までの距離について、TH1-15とTH1-30での α の値は同じであるが、TH1-45の α は前者の80%程度である。しかし、4. (2) で述べたように、TH1-45の α が他の試験体と比較して小さいのは打設時の鉄筋の向きと打設高さの影響であり、引張鉄筋から拘束筋までの距離の影響ではない。

したがって、鉄筋軸を法線とする面内での拘束の強さは、 τ が割裂付着強度に達するまでの τ - S 関係には影響を与えないと考える。

(4) コンクリート断面積の影響

α と引張鉄筋のかぶりとの関係を図-15に示す。両側引張試験TH1およびTH0について、引張鉄筋のかぶりが6.5cmと14.0cmの試験体では、 α はかぶりの大きにかかわらずほぼ同じ値であった。一方、両側引抜試験BH0および片側引抜試験PH0ではかぶりが小さいほど、 α は大きい値となった。BH0およびPH0でのコンクリートの応力場は圧縮である。同一の載荷荷重の下では、コンクリートの断面積が小さいほどコンクリートの断面平均での圧縮応力は大き

くなる。

次に、 α とコンクリート断面積の逆数との関係を図-16に示す。ここで、引張応力場では断面積の逆数を負の値とした。図-16のX軸、コンクリート断面積の逆数は、単位荷重当たりのコンクリートの断面平均の応力と同じ意味を持つ。

両側引張試験では、前述の打設高さの影響を考慮すると、コンクリート断面積の大きさにかかわらず α はほぼ一定となった。コンクリートが引張応力場にある場合、コンクリートの断面積が小さいほど、同一荷重での引張応力は大きく、内部ひびわれが発生しやすくなり、付着性能は低下すると考えられる。しかし、コンクリート断面平均での引張応力が最大となるのは、隣接するひびわれ間の中央である。理論上この位置では、 $S=0$ 、 $\tau=0$ であり、中央付近でのすべりおよび付着応力はひびわれ位置付近と比較してかなり小さな値である。また、ひびわれ位置付近ではひびわれ間の中央と比較して、コンクリートが負担する引張力は小さい。コンクリート断面積の違いがコンクリート断面平均での引張応力に影響を及ぼす程度はわずかである。さらに、ひびわれ位置付近では、コンクリートが引張応力を持つ範囲は鉄筋近傍に限られ、コンクリート断面全体に応力は生じず、コンクリートの断面積が τ - S 関係に影響を及ぼさない。したがって、コンクリートが引張応力場にある場合、コンクリート断面積の大きさが τ - S 関係に及ぼす影響は、ほとんどないと考える。

一方、コンクリートが圧縮応力場にある場合、コンクリート断面積が小さいほど、同一の圧縮荷重におけるコンクリート圧縮応力は大きく、内部ひびわれの発生は抑制されると考えられる。本実験の両側引抜試験および片側引抜試験では、鉄筋引張力の反

力をコンクリートに圧縮荷重として載荷した。このため、同一荷重下における載荷端でのコンクリートの断面平均の圧縮応力は、コンクリートの断面積に反比例し、コンクリートの断面積が小さいほど大きくなる。この圧縮応力は載荷端で最大であり、試験体中央（もしくは自由端）に向かうにしたがって鉄筋から伝達される引張力により圧縮応力は減少する。また、載荷端付近での付着応力およびすべりは部材中で最大の値を持つ。このため、引張応力場と比較して τ - S 関係はコンクリートの載荷軸方向の応力に対して鋭敏になる。すなわち、コンクリートが圧縮応力場にある場合では、コンクリートの圧縮応力が τ - S 関係に及ぼす影響は大きく、コンクリートの載荷軸方向の圧縮応力が大きいほど α は大きいと考える。本実験において、 $15 \times 15 \text{cm}$ の断面を持つ試験体での α の $30 \times 30 \text{cm}$ の断面を持つ試験体での α に対する比率は、両側引抜試験では115%であり、片側引抜試験では121%であった。

(5) 実験要因が τ - S 関係に及ぼす影響

以上のことを総合すると、コンクリートが載荷軸方向に拘束されていない場合の付着応力は同一のすべりにおいて、拘束されている場合での付着応力の59~80%に減少する。コンクリートが載荷軸方向に拘束されている場合では、 τ - S 関係は拘束力の影響を受け、拘束によるコンクリートの圧縮応力が大きいほど付着応力は同一のすべりにおいて大きくなる。しかし、コンクリートの断面積が大きくなるとこの影響は小さくなる。本実験では、 $15 \times 15 \text{cm}$ の断面を持つ試験体の付着応力は、 $30 \times 30 \text{cm}$ の試験体での付着応力の115~121%であった。鉄筋を水平にして打設した場合、打設高さが高いとブリージング等により同一のすべりにおける付着応力は減少し、鉛直にして打設した場合の85~96%であった。打設高さが低い場合には、打設方向の影響はほとんどない。また、載荷軸を法線とする面内の拘束は、付着応力が割裂付着強度に達するまででは τ - S 関係に影響を及ぼさない。

本研究での実験についてそれぞれの要因における τ - S 関係は、島・周らの提案する τ - S 関係式での τ を、実験要因の影響係数 α で乗じた式(5)で表した。本研究で検討した実験要因について、 τ - S 関係は島・周らの提案する式(3)を修正した式(6)で表す。この式の適用範囲は、式(3)の適用範囲と同様に境界条件 $S=0$ かつ $\varepsilon=0$ を満たす場合であり、付着応力が割裂付着強度以下の場合である。ここで、本研究の範囲内において、コンクリート応力状態の影響係数は、圧縮応力場では $\alpha_f=1.0$ 、引張応力場

では $\alpha_f=0.7$ 程度であった。また、打設時の鉄筋の向きの影響係数は、鉄筋を鉛直にして打設した場合には $\alpha_d=1.0$ 、水平にして打設した場合には $\alpha_d=0.9$ 程度であった。ただし、打設時の鉄筋の向きの影響係数は、鉄筋を水平にして打設したときの打設高さが比較的高い場合に有効である。本実験では $45 \times 45 \text{cm}$ のコンクリート断面を持つ試験体に、打設時の鉄筋の向きの影響が認められた。

$$\tau = \alpha_f \cdot \alpha_d \cdot \tau_0 \left[1 - \exp \left\{ -40 \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{0.6} \right\} \right] \quad (6)$$

ここで、 $\tau_0 = 0.9 \cdot f_c^{1/3}$

α_f : コンクリート応力状態の影響係数

α_d : 打設時の鉄筋の向きの影響係数

5. 結論

τ - S 関係に影響を及ぼす要因とその影響の程度を確認するため、コンクリートの応力場、コンクリート断面積、コンクリート打設時の鉄筋の軸方向、および拘束筋の有無を要因とした載荷実験を行った。実験結果の定量的な評価を行ったところ、本実験の範囲内において以下に示す結論を得た。

①コンクリートの応力場は τ - S 関係に大きな影響を及ぼす。コンクリートが圧縮応力場での τ - S 関係は島・周らの提案式とほぼ一致するが、引張応力場での付着応力は同一のすべりにおいて圧縮応力場での付着応力よりかなり小さい。本実験では、引張応力場での付着応力は圧縮応力場での値の59~80%であった。

②鉄筋の向きは、引張鉄筋を水平にして打設したときに打設高さが高い場合には、 τ - S 関係に影響を及ぼす。打設高さが高い場合、鉄筋を水平にした場合では、鉄筋を鉛直にして場合と比較して、同一のすべりに対する付着応力は85~95%であった。一方、打設高さが低い場合には、コンクリートの打設方向は τ - S 関係に影響を及ぼさない。

③拘束筋の有無は、割裂ひびわれの発生まで、すなわち τ が割裂付着強度に達するまででの τ - S 関係には影響を及ぼさない。

④コンクリートの断面積が τ - S 関係に及ぼす影響は、コンクリートの応力場によって違う。同一のすべりに対する付着応力は、引張応力場ではコンクリートの断面積にかかわらずほぼ一定であるが、圧縮応力場では断面積が小さいほどコンクリートの載荷軸方向の拘束による圧縮応力が大きいので τ は増加する。本実験の引抜試験において、 $15 \times 15 \text{cm}$ の

断面を持つ試験体での τ は、 30×30 cmの断面を持つ試験体の τ の115~120%であった。

⑤島・周らの提案式を基に、実験要因が $\tau - S$ 関係に及ぼす影響を考慮した修正式を提案した。

6. あとがき

本研究では、種々の要因が $\tau - S$ 関係に及ぼす影響を、既往の $\tau - S$ 関係式での τ の影響係数として表した。しかし、本実験では各要因に対する試験体数が少ないため、影響係数を正規化もしくは定式化するには至らなかった。今後、一般化され精度の良い $\tau - S$ 関係式の確立には、多くの要因を取り入れたデータの蓄積が不可欠である。本研究で得られたデータは、実構造物でのひびわれ幅の予測に $\tau - S$ 関係式を用いる上で、有用であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、コンクリート標準示方書、平成3年版、設計編、pp. 85~88, 土木学会。
- 2) 六車 照, 森田司朗, 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.
- 3) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュ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.
- 4) 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算定式, 構造工学論文集, Vol. 40B, pp. 277~284, 1994. 3.
- 5) 山尾芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 343, pp. 219~228, 1984. 3.
- 6) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: 異形鉄筋の鉄筋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.
- 7) 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.
- 8) 森田司朗: 鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究, 京都大学学位論文, 1968. 4.
- 9) 山本康弘, 中島 亨: 鉄筋コンクリートの減力時における付着応力と復元特性に関する研究, コンクリート・ジャーナル, Vol. 12, No. 11, pp. 89~99, 1974. 11.
- 10) 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, No. 294, pp. 85~100, 1980. 2.
- 11) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: 異形鉄筋の鉄筋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.
- 12) 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, 第1版, 技報堂出版株式会社, pp. 159~182, 1991. 5.
- 13) 壹岐直之, 清宮 理, 山田昌郎: ポストテンション導入による初期ひびわれの低減に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, 第16巻1号, pp. 1043~1048, 1994. 6.
- 14) 清宮 理, 山田昌郎, 壹岐直之: コンクリート部材のひびわれ幅算定方法とひびわれ対策の効果, 港湾技術研究所報告, Vol. 33, No. 4, 1994. 12.

(1995.11.10 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF NUMEROUS FACTORS ON BOND-SLIP RELATIONSHIP

Naoyuki IKKI, Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA

In order to verify the effects of numerous factors and the extent of their influence on the bond-slip relationship, several pull-out tests of deformed bar embedded in concrete specimen were carried out. The experimental factors were the concrete stress condition, the direction of bar on casting, the existence or not of stirrup and the concrete cross-sectional area. A quantitative estimation of the experimental bond-slip relationship was also performed. It is concluded that the concrete stress condition clearly affects the bond-slip relationship. At same slip, the bond stress on the tensile stress condition was 59 to 80% of that on the compressive one. Furthermore, a modified formula including the effects of some factors concerning bond-slip relationship was proposed.