

論文 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

壹岐直之*1・清宮理*2

要旨： コンクリートの軸方向応力が異形鉄筋の付着強度に及ぼす影響を把握するため、コンクリートの断面積と、コンクリートへの鉄筋軸方向圧縮力を要因とした載荷実験を行った。実験による付着応力-すべり関係から最大付着応力を近似し、その断面でのコンクリート平均応力が及ぼす影響を評価した。その結果、最大付着応力はコンクリート断面内の軸方向の断面平均応力で評価でき、引張応力の減少および圧縮応力の増加に伴って最大付着応力は増加することを確認した。

キーワード： 局所付着特性, 付着応力, すべり, コンクリート応力, 載荷実験

1. まえがき

RC部材の設計において、コンクリートと異形鉄筋の付着特性は重要な因子のひとつであり、ひびわれ幅の予測、終局変形量の予測など使用限界状態から終局限界状態の検討で用いられる。設計での付着応力の予測精度を上げるためには、多様な状況下での付着特性を明らかにし、条件の違いが及ぼす影響を整理する必要がある。

これまでに、森田¹⁾、島ら²⁾は種々の付着実験を行い、付着応力-すべり関係式を提案している。しかしながら、森田の提案式では最大付着応力とその時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よりかなり小さな値を設定している。また、島らの提案式では、柱はり接合部での鉄筋の抜出しを問題としているため、定式化は引抜試験を基にしている。ひびわれ幅の算定に島らの提案式を用いた場合、付着応力を強めに評価し、ひびわれ幅を小さめに予測する可能性がある³⁾。これらの原因は、コンクリートの応力場が両引試験では引張、引抜試験では圧縮となるためであり、コンクリートの応力状態が付着特性に差異を与えると考えられる。

著者らは既に、コンクリートの応力場が付着

特性に強い影響を与え、最大付着応力は引張応力場の場合は圧縮応力場での値の60~80%になることを示した⁴⁾。本研究では、コンクリートの断面積と軸方向圧縮荷重を実験要因とすることで、コンクリートの軸方向応力が異形鉄筋の弾性域での付着特性に及ぼす影響を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験要因の組み合わせ

実験要因の組み合わせを表-1に示す。供試体は11体である。コンクリートの断面は円形とし、直径 D_c は15,30および45[cm]とした。圧縮荷重係数 K_p とは、コンクリート部への鉄筋軸方向圧縮荷重の、鉄筋の引張荷重に対する比率である。

表-1 実験要因

供試体名	直径 D_c [cm]	断面積 A_c [cm ²]	圧縮荷重係数 K_p
D15-0.0	15.0	176	0.0
D15-1.0			1.0
D15-2.0			2.0
D30-0.0	30.0	707	0.0
D30-0.5			0.5
D30-1.0			1.0
D30-1.5			1.5
D30-2.0			2.0
D45-0.0	45.0	1590	0.0
D45-1.0			1.0
D45-2.0			2.0

*1 若築建設(株)土木本部 技術研究所

(正会員)

*2 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授

工博

(フェロー会員)

表-2 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kgf/m ³]				f'_c [N/mm ²]
		W	C	S	G	
51.5	46.8	169	329	829	973	21.91

K_p は0.0, 1.0および2.0とし, さらに $D_c=30$ [cm]の供試体では0.5および1.5を加えた.

2.2 使用材料および形状寸法

使用したコンクリートの配合および圧縮強度 f'_c を表-2に示す. 圧縮強度は載荷実験前後で行った圧縮強度試験結果の平均値である. 打設は鉄筋軸を鉛直にした状態で行い, 打設時の上側を, 本文では供試体の左側として表した.

鉄筋はD16ネジ節鉄筋を用いた. 鉄筋の公称直径は $D=15.9$ [mm]である. 材料試験による弾性係数は $E_s=1.92 \times 10^5$ [N/mm²], 降伏強度は $f_y=390$ [N/mm²]であった.

供試体の形状は円筒形とし, 断面の中央に鉄筋を埋め込んだ. D30シリーズの形状寸法を図-1に示す. 鉄筋とコンクリートの付着長は, すべての供試体において, $40 \cdot D=636$ [mm]とした. 供試体両端への圧縮荷重が一部に集中しないため, また, 圧縮荷重係数 $K_p=0.0$ の場合にもほかの供試体と同じ条件にするため, 長さ $10 \cdot D$ 程度の非付着区間を設けた.

2.3 計測項目および載荷方法

鉄筋のひずみ ϵ_s は, 図-1に示す箇所には貼り付けたひずみゲージで測定した. ひずみゲージの間隔は $5 \cdot D$ とし, 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貼付けた.

載荷方法の概要を図-2に示す. 供試体を載荷治具内に水平に設置し, 引張載荷用ジャッキで鉄筋に引張力を単調載荷した. $K_p > 0.0$ の場合は, 圧縮用ジャッキで設定した K_p を満たすよう, コンクリート圧縮力を制御した. 最大引張荷重は75.0 [kN], 載荷速度は7.5 [kN/min]程度とした. 載荷試験中, 鉄筋は降伏強度に達していない.

3. 実験結果

3.1 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみ分布を図-3に示す. 供試体中央から $20 \cdot D$ の位置での鉄筋ひずみは, 引張荷重と鉄

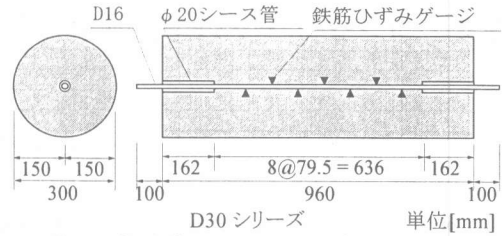


図-1 供試体形状寸法および計測位置

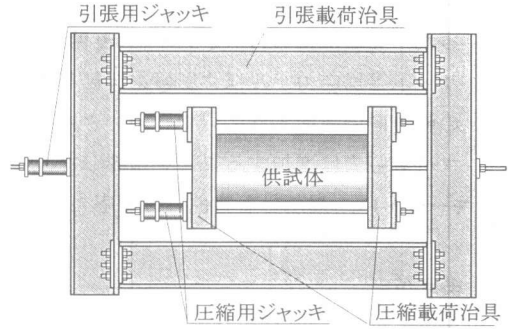


図-2 載荷方法

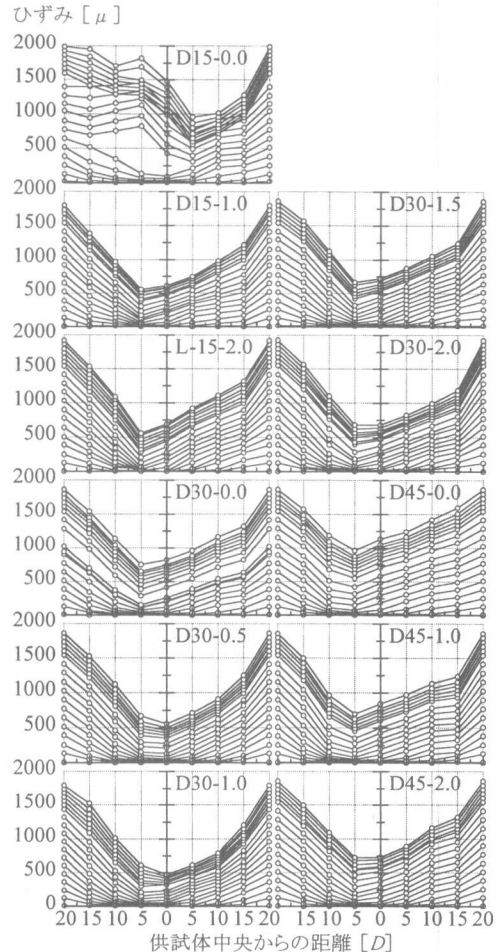


図-3 鉄筋ひずみ分布

筋の弾性係数より算定した。D15-0.0は引張荷重30[kN]で、供試体中央から左側10・Dの位置にひびわれが発生したため、これ以降のひずみ分布は放物線に近い形状を示していない。また、すべての供試体において、鉄筋ひずみが最小となる位置が供試体中央より左に偏っている。これは、供試体の左右で打設の方向と鉄筋引張力の方向が異なることが原因であり、供試体の右側では、鉄筋節の支圧力が作用する側の強度が、ブリージングによって低下するためと考えられる。このような現象は既往の研究等^{4),5)}でも確認されている。

鉄筋ひずみ分布は、圧縮荷重をかけていない $K_p=0.0$ の供試体に比べ、 $K_p>0.0$ の供試体ではひずみ分布の傾きが大きく、中央付近のひずみが抑制される傾向が認められた。また、これらのことは K_p の値が大きいほど強くなる傾向が認められた。

3.2 付着応力-すべり関係

付着応力 τ および、すべり S の決定方法は既往の研究^{2),6),7)}とほぼ同じである。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た。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、 $\tau = D/4 \cdot E_s \cdot d\varepsilon_s/dx$ として算定した。すべりは、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 $S = \int \varepsilon_s \cdot dx$ として算定した。

付着応力-すべり関係を図-4に示す。図-4には供試体中央から左右10・Dと15・Dでの付着応力-すべり関係を示した。また、後述する左側10・Dでの近似曲線も示してある。供試体D15-0.0のグラフには、ひびわれ発生以降はプロットしていない。

供試体左右での付着応力-すべり関係は大きく異なり、右側は左側よりも付着応力が小さく、すべりが大きい傾向が認められた。左側の付着応力-すべり関係を、圧縮荷重係数 K_p で比較すると、 K_p が大きくなるに従い付着応力は増加し、

付着応力; τ/f_c'

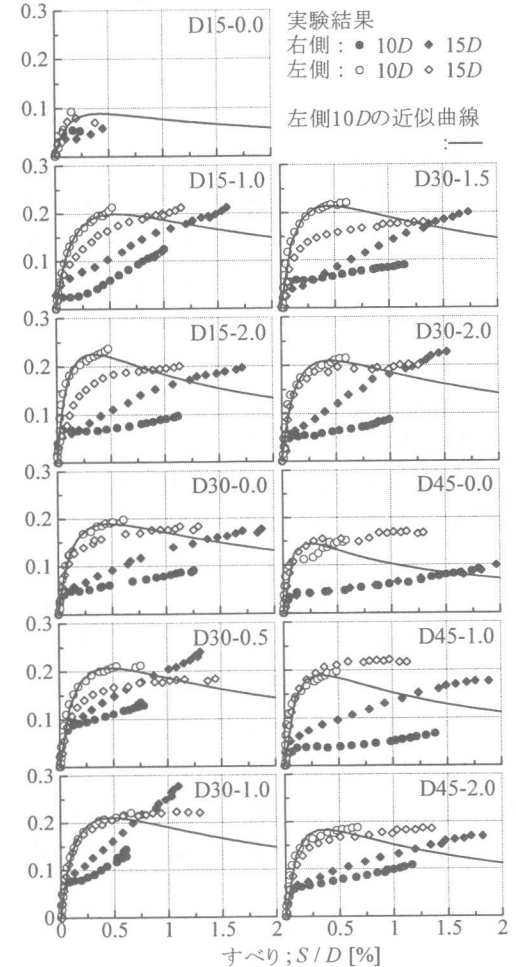


図-4 付着応力-すべり関係

すべりは減少する傾向が認められた。また、コンクリート断面積が小さいと、 K_p の影響は大きい傾向が認められた。

4. 付着特性に応力状態が及ぼす影響と考察

4.1 最大付着応力の近似

コンクリート圧縮荷重および断面積が付着応力-すべり関係に及ぼす影響を定量的に評価するため、左側10・Dの付着応力-すべり関係に着目し、森田¹⁾の付着応力関係式(1)を用いて最大付着応力 τ_{max} と、そのときのすべり S_{max} を近似した。式(1)中の e は自然対数の底である。

$$\tau = \tau_{max} \cdot e^{-\frac{\ln\{(e-1)S/S_{\tau_{max}}+1\}}{(e-1)S/S_{\tau_{max}}+1}} \quad (1)$$

左側10・Dに着目した理由は、左側は打設時の

方向による付着の低下を生じていないこと、 $10 \cdot D$ は供試体左半分の中央にあり、載荷端の影響や、中央付近にみられる値が小さいことによる近似での誤差の影響を、受け難いことである。また、D15-0.0は近似の範囲をひびわれ発生荷重までとした。近似結果を表-3に示し、これらの値を式(1)に代入して算定した結果を図-4に実線で示す。近似曲線と実験値とは一致した。

したがって、近似した最大付着応力と、そのときのすべりは、各供試体での左側 $10 \cdot D$ の位置での局所付着特性を代表する値であると考えられる。

4.2 実験要因が及ぼす影響

コンクリート断面積と圧縮荷重係数 K_p との関係を図-5に示す。コンクリートに圧縮荷重を載荷していない $K_p=0.0$ の場合は、コンクリート断面積 $A_c=176[\text{cm}^2]$ での最大付着応力に対し、 $A_c=707[\text{cm}^2]$ での値は2.13倍、 $A_c=1590[\text{cm}^2]$ での値は1.64倍であった。断面積が大きくなると、最大付着応力が増加する傾向が認められた。

$K_p=1.0$ の場合は、 $A_c=176[\text{cm}^2]$ での値に対し、 $A_c=707[\text{cm}^2]$ での値は1.06倍、 $A_c=1590[\text{cm}^2]$ での値は0.96倍であり、断面積の顕著な影響は認められなかった。

$K_p=2.0$ の場合は、 $A_c=176[\text{cm}^2]$ での値に対し、 $A_c=707[\text{cm}^2]$ での値は0.93倍、 $A_c=1590[\text{cm}^2]$ での値は0.81倍であった。 $K_p=0.0$ の場合とは逆に、断面積が大きくなると、最大付着応力が減少する傾向が認められた。

最大付着応力と圧縮荷重係数 K_p との関係を図-6に示す。コンクリート直径 $D_c=15[\text{cm}]$ の場合は、圧縮荷重係数 $K_p=0.0$ での最大付着応力に対し、 $K_p=1.0$ での値は2.24倍、 $K_p=2.0$ での値は2.55倍であった。圧縮荷重が大きくなると、最大付着応力が大きくなる傾向が認められた。

$D_c=30[\text{cm}]$ の場合は、圧縮荷重係数 $K_p=0.0$ での最大付着応力に対し、 $K_p=0.5$ での値は1.10倍、 $K_p=1.0$ での値は1.12倍、 $K_p=1.5$ での値は1.13倍、 $K_p=2.0$ での値は1.11倍であった。 $D_c=45[\text{cm}]$ の場合は、圧縮荷重係数 $K_p=0.0$ での最大付着応力に対し、 $K_p=1.0$ での値は1.31倍、 $K_p=2.0$ での値は

表-3 最大付着応力の近似結果

供試体名	最大付着応力 τ_{\max}/f'_c	最大付着応力時のすべり $S_{\tau_{\max}}/D$ [%]
D15-0.0	0.089	0.415
D15-1.0	0.200	0.556
D15-2.0	0.227	0.340
D30-0.0	0.190	0.470
D30-0.5	0.209	0.462
D30-1.0	0.212	0.472
D30-1.5	0.215	0.447
D30-2.0	0.211	0.440
D45-0.0	0.146	0.238
D45-1.0	0.191	0.332
D45-2.0	0.184	0.355

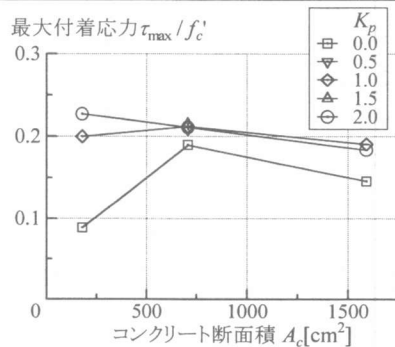


図-5 最大付着応力とコンクリート断面積の関係

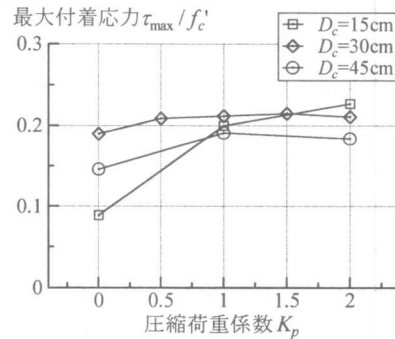


図-6 最大付着応力と圧縮荷重係数の関係

1.26倍であった。これらの場合、圧縮荷重が大きくなると、最大付着応力はわずかに大きくなっているようである。

最大付着応力は圧縮荷重の影響を大きく受け、また、コンクリート断面が小さいほど影響の程度は大きかった。この影響の要因は、コンクリート断面内の平均応力に換言できる。つまり、付着応力-すべり関係の違いは、その断面でのコンクリートの応力状態が影響を及ぼしていることが原因と考える。

別の原因として以下のことが考えられる。

$K_p > 0$ では、コンクリートの圧縮ひずみによって鉄筋とコンクリートとの相対変位が大きくなるため、実際のすべりは鉄筋ひずみ曲線の積分で算定される値よりも大きくなると考えられる。このため、図-4に示した付着応力-すべり関係は、すべりを小さめに見積もっている可能性も有る。しかしながら、本研究では付着応力-すべり関係から最大付着応力を近似し、これを用いて付着特性を評価した。このため、前述のすべりの影響は、最大付着応力時のすべりの近似結果には影響を及ぼすが、最大付着応力の近似結果には影響を及ぼさない。したがって、本研究での最大付着応力の評価においては、コンクリートひずみの影響は無視できると考える。

4.3 コンクリートの断面平均応力の算定

付着特性とコンクリート応力との関係进行评估するため、着目する断面でのコンクリート応力を鉄筋引張荷重の各段階で決定し、各供試体で応力状態を代表する値を決定する。

供試体左側10Dの断面でのコンクリートの平均応力 $\bar{\sigma}_c$ を、コンクリート断面積 A_s 、鉄筋引張荷重 P 、圧縮荷重係数 K_p 、および鉄筋のひずみ ϵ_s 、弾性係数 E_s を用い、式(2)で算定した。

$$\bar{\sigma}_c = \left\{ P \cdot (1 - K_p) - \epsilon_s \cdot E_s \cdot \pi D^2 / 4 \right\} / A_c \quad (2)$$

次に、コンクリート断面力の鉄筋引張荷重に対する比率 $\bar{\sigma}_c \cdot A_c / P$ を算定した。鉄筋引張荷重 P と断面力比 $\bar{\sigma}_c \cdot A_c / P$ の関係を図-7に示す。各供試体において断面力比は、載荷荷重の増加に伴ない減少するが、減少の量および傾向はほぼ同じであった。また、コンクリート直径による差もほとんどない。このため、各供試体でのコンクリートが負担する断面力の代表値として断面力比の平均値を用い、この平均値をコンクリート断面積で除した断面応力係数 $K_c = \bar{\sigma}_c / P$ [cm^2]を導入した。断面応力係数 K_c はコンクリートの軸方向断面平均応力の鉄筋引張荷重に対する比率の、各荷重段階での平均値である。断面力比の最小、最大、平均、 K_c の平均値を表-4に示す。

図-8に K_c の平均値と A_c の積と、 K_p の関係を示す。本実験の範囲内において、断面応力係数 K_c

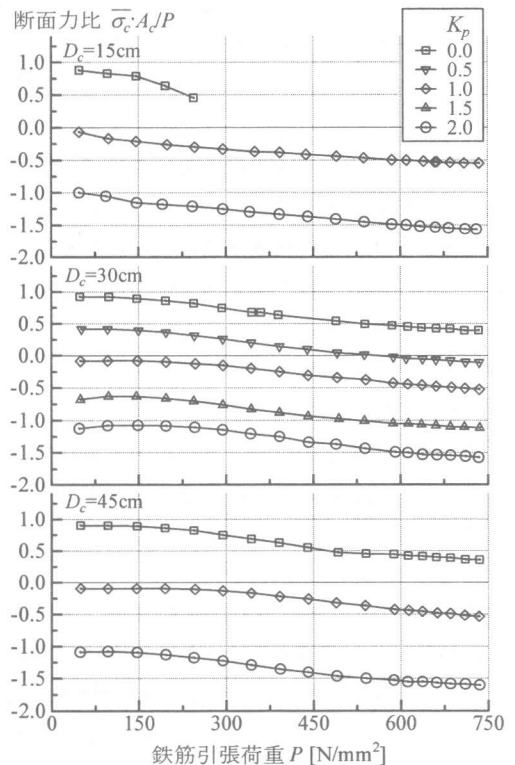


図-7 コンクリートの断面力比

表-4 断面応力係数 $K_c = \bar{\sigma}_c / P$ の算定値

供試体名	断面力比 $\bar{\sigma}_c \cdot A_c / P$ [無次元]			応力比 K_c [$10^{-3}/\text{cm}^2$]
	最小値	最大値	平均値	
D15-0.0	0.46	0.83	0.68	3.84
D15-1.0	-0.55	-0.17	-0.42	-2.37
D15-2.0	-1.57	-1.05	-1.38	-7.80
D30-0.0	0.23	0.66	0.37	0.85
D30-0.5	-0.80	-0.43	-0.70	0.15
D30-1.0	-1.78	-1.25	-1.62	-0.44
D30-1.5	-1.12	-0.63	-0.92	-1.30
D30-2.0	-1.57	-1.07	-1.34	-1.90
D45-0.0	0.36	0.90	0.58	0.36
D45-1.0	-0.54	-0.09	-0.31	-0.19
D45-2.0	-1.60	-1.07	-1.39	-0.88

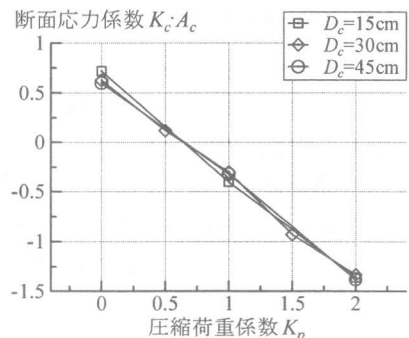


図-8 断面応力係数と圧縮荷重係数の関係

は圧縮荷重係数 K_p と断面積 A_c とで正規化できることが確認された。したがって、各供試体でのコンクリート応力状態を代表する値として、断面応力係数 K_c を用いることは妥当と考えられる。

4.4 コンクリート断面平均応力が及ぼす影響

図-9に最大付着応力 τ_{max} と断面応力係数 K_c との関係を示す。最大付着応力は K_c の影響を強く受け、 K_c が小さいほど最大付着応力は大きくなる傾向を示した。すなわち、コンクリート断面内の引張応力が減少し、圧縮応力が増加するほど、最大付着応力は増加する傾向がある。このため、局所付着応力はコンクリートの断面平均応力と相関関係があり、断面平均応力が圧縮側に増加するに伴ない最大付着応力は増加すると考える。

図-10に最大付着応力時のすべり S_{max} と断面応力係数 K_c との関係を示す。最大付着応力時のすべりと K_c との間には、明白な相関関係が認められなかった。この原因として、前述したとおり、本研究ではすべりを鉄筋ひずみの積分値として算定した。一方、コンクリートに圧縮荷重を載荷したため収縮ひずみが生じ、鉄筋とコンクリートの相対変位は供試体によって異なる。本研究で定義したすべりには、実際の付着挙動との違いを含んでいることが原因と考える。

5. まとめ

コンクリートの応力状態が異形鉄筋の局所付着応力に及ぼす影響を確認するため、コンクリートへの軸方向圧縮荷重とコンクリート断面積を要因とした載荷実験を行い、森田らの付着応力関係式を用いて最大付着応力を近似した。本実験での要因が付着特性に与える影響は、以下のとおりであった。

- ① コンクリートの軸方向圧縮荷重が大きいほど最大付着応力は大きい。
- ② 圧縮荷重が最大付着応力に与える影響はコンクリート断面積が小さいほど強い。

これらのことはコンクリートの応力状態に換言できると考え、各供試体のコンクリート応力状態を鉄筋引張荷重に対する断面平均応力の比

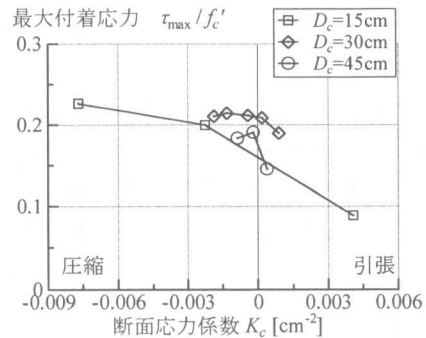


図-9 最大付着応力とコンクリート応力の関係

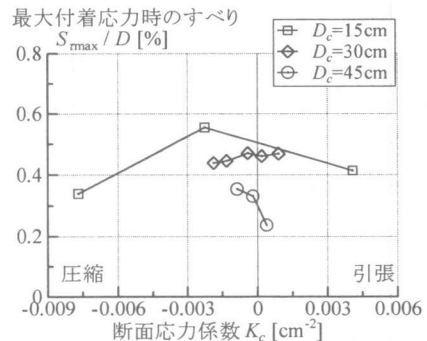


図-10 最大付着応力時すべりとコンクリート応力

率で評価した結果、以下の結論を得た。

- ③ 付着特性はコンクリートの軸方向断面平均応力で評価でき、圧縮応力が大きいほど最大付着応力は大きい。

参考文献

- 1) 森田: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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 壹岐直之, 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
- 5) 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, pp45~51, 1969.5
- 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, 土木学会論文報告集, No.343, pp.219~228, 1984.3
- 7) 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