

摂南大学工学部 正 員 平城 弘一 八幡市役所 正 員 藤田 孝志
 摂南大学工学部 学生員 ○ 矢内 慶祐 大阪大学工学部 正 員 松井 繁之

1. まえがき これまで、コンクリート構造の設計方法が許容応力度設計法に従うものであったため、変形およびひび割れとそれらに関係が深いとされる付着特性とを関係づけて論じることが少なかった。しかしながら、近年のようにコンクリート構造の多様化、あるいは国の内外における設計法の限界状態設計法への移行の流れなどに伴い、変形およびひび割れ挙動の解明に、付着応力―すべり関係が注目されつつある。また、コンピュータを用いた解析法の進歩は、より厳密な解を得るため、鋼とコンクリートとの付着挙動に合理的な定式化の検討を加速しているように思える。

そこで、本研究では、まず異形鉄筋の付着特性に関する既往の研究を収集・整理し、付着強度に及ぼす影響因子を明らかにし、さらに統計解析により、それらの因子分析を行った。次いで、付着理論に関する基礎的考察を加えた。最後に、付着特性に影響する因子を考慮した引抜き試験の結果を考察し、付着応力度と相対すべりの関係について、2種類の経験式でもってあてはめを行った。

2. 既往の研究の整理と統計解析 異形鉄筋の付着特性に関する既往の試験データを国の内外から収集整理した。その結果、付着強度に関しては、多数の試験データが検索できた。しかし、最大すべり量に関するものは皆無のようであった。一例として、図-1に付着強度とコンクリート強度の関係を示す。この図から、コンクリート強度は付着強度に大きく影響していることが分かった。

各因子が付着強度に及ぼす影響度を検討するために、重回帰分析を実施した。ここでは、数値データに置換可能な5個の影響因子を選定した。解析する試験データは、まずコンクリート打設時の鉄筋の方向と位置で分類(3ケース)し、さらにそれらは、鉄筋軸に対するふしの角度(2ケース)で分けられた(6ケース)。解析結果を表-1に示す。まだ、試験データが少ないこともあり、重相関係数は低い値を示すものがあつた。t値から判断すると、「解の有意性」はコンクリートの強度・断面積と付着長さにある。

3. 付着理論の基礎的考察 付着に関する基礎微分方程式は、式(1)のとおりである。

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{1+n\rho}{E_s A_s} \tau_x \phi \quad (1)$$

ここで、 S_x :任意点(x)の相対すべり、 n, ρ :ヤング係数比と鉄筋比、 E_s, A_s :鉄筋のヤング係数と断面積、 τ_x :任意点の付着応力、 ϕ :鉄筋周長。

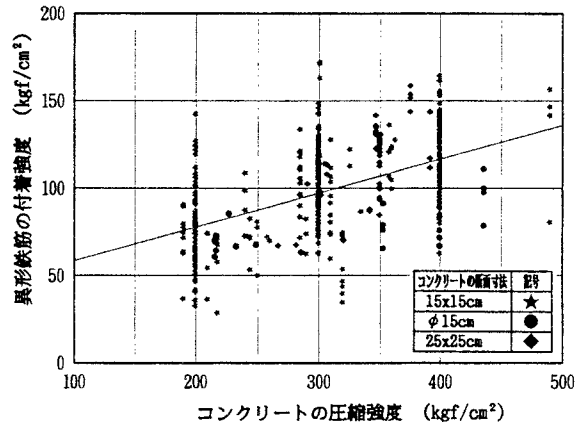


図-1 付着応力度とコンクリート強度の関係

表-1 異形鉄筋の付着強度に関する重回帰分析結果

No.	a (t値)	b (t値)	c (t値)	d (t値)	e (t値)	f (t値)	重相関係数 (r)	備考(ケース数)
1	1134 (2.574)	0.6234 (8.521)	-1.3544 (2.221)	-0.2248 (2.985)	3.3524 (2.750)	-1.6421 (2.736)	0.6387	水平筋〔下筋以外〕 ふし混在 (267)
2	0.0068 (1.956)	0.4730 (7.161)	1.3446 (2.804)	— (—)	-0.6822 (1.965)	0.2228 (1.517)	0.6064	水平筋〔下筋〕 ふし混在 (131)
3	0.0319 (3.012)	0.4721 (7.881)	1.1205 (4.783)	-0.1390 (2.950)	-0.7128 (2.063)	0.0289 (0.184)	0.7088	鉛直筋 ふし混在 (144)
4	1578 (0.894)	0.5005 (3.795)	-1.3683 (0.756)	0.0263 (0.129)	3.1342 (0.858)	-1.5949 (0.894)	0.6280	水平筋〔下筋以外〕 直角ふし (82)
5	230.4 (1.885)	0.6461 (8.650)	-1.0130 (1.569)	-0.2617 (3.143)	2.7467 (2.126)	-1.3714 (2.162)	0.6373	水平筋〔下筋以外〕 斜めふし (185)
6	39.50 (3.300)	0.1032 (1.086)	— (—)	— (—)	1.1278 (0.600)	-0.4010 (0.408)	0.3365	水平筋〔下筋〕 直角ふし (26)
7	0.0080 (1.183)	0.4835 (4.204)	1.3114 (1.882)	— (—)	-0.9675 (1.676)	0.1587 (0.669)	0.4831	水平筋〔下筋〕 斜めふし (105)
8	2.3×10^7 (2.483)	0.1663 (1.072)	-0.4005 (0.346)	-5.1368 (3.570)	5.5631 (2.050)	-2.6765 (2.079)	0.7157	鉛直筋 直角ふし (31)
9	0.0023 (4.085)	0.5016 (7.598)	1.5679 (5.578)	-0.0977 (2.041)	-0.8791 (2.485)	0.0561 (0.366)	0.7498	鉛直筋 斜めふし (113)

$\tau = a \sigma_c A_c L^b D^c p^d$ τ : 鉄筋の付着強度(kgf/cm²), σ_c : コンクリート強度(kgf/cm²), A_c : コンクリートの断面積(cm²), L : 付着長さ(cm), D : 鉄筋の直径(cm), p : 鉄筋比

また、 τ - S 曲線の近似化は、対数形で示される式(2)が採用されている。

$$\tau_1 = e \frac{\log t_1}{t_1} \quad (2)$$

ここで、

$$t_1 = (e-1)S_1 + 1, \\ S_1 = \frac{S}{S_{\tau=\tau_{\max}}}$$

自由端よりある微小長さ ΔL 内側での鉄筋引張力は、近似的に式(3)より与えられる。

$$(P_{sx})_{x=\Delta L} = e(\log t_0/t_0) \tau_{\max} \phi \Delta L \quad (3)$$

4. 引抜き試験 今回実施した引抜き試験体の種類・形状寸法および試験結果を表-2にまとめて示す。試験パラメータは、鋼とコンクリートの付着長さを一定とし、鉄筋直径、補強筋とゲージの有無、コンクリートの形状寸法、そして鉄筋比とコンクリート強度である。

5. 試験結果および考察 表-2より明らかのように、最大付着強度はコンクリート強度に影響していることが分かる。鉄筋径 $\phi 19\text{mm}$ の付着強度が、コンクリート断面の大きさに影響していることも表-2から分かる。

図-2は、試験体名「A-15-15A」の平均付着応力と相対すべりの関係を示したものである。この図中には最小2乗法で求めた対数形の経験式(2)と指数形の経験式(4)の回帰曲線も、実験曲線とのあてはめを確認するために示されている。

$$\tau = \beta f'_c V^\delta \quad (4)$$

ここで、 τ :付着応力度、

f'_c :コンクリートの圧縮強度、

V :相対すべり、

β, δ :実験結果から定まる定数。

この図より、指数形は載荷初期の実験曲線を、

また対数形は最大付着強度を示す近辺の実験曲線

とよく一致していることが分かる。指数形と対数形の経験式の付着-相対すべり関係へのあてはめは、他の試験体に対しても同様ことが言える。これより、経験式のあてはめには適用範囲があることが分かった。

図-3は、試験体名「B-10-15A」の自由端からの距離における鉄筋引張力の変化を示したものである。図中の理論値は、式(3)から求めたものである。この図から明らかのように、相対すべりが小さい($S_0=0.04\text{mm}$)場合には、実験値と理論値がよく一致していることが分かる。しかし、相対すべりが大きくなるに従い、自由端に近いところでは鉄筋引張力の実験値が理論値より大きくなる傾向を示すことが分かった。

表-2 引抜き試験体の種類・形状寸法および試験結果

番号	試験体名	異形鉄筋(mm) 直径 補強筋	ゲージ	コンクリート(cm) 断面寸法 付着長さ	鉄筋比 p(%)	コンクリート (kgf/cm ²)	最大付着強度 $\tau_{\max}$ (kgf/cm ²)
1	A-8-15N	無	無	8x8 15	2.0	361	98.2
2	A-8-15A	有	有	8x8 15	2.0	361	94.8
3	A-15-15N	無	無	15x15 15	0.56	361	105.0
4	A-15-15A	有	有	15x15 15	0.56	361	97.0
5	A-7.5-15N1	無	無	7.5x7.5 15	2.0	270	113.3
6	A-7.5-15N2	無	無	7.5x7.5 15	2.0	270	84.3
7	A-7.5-15N3	無	無	7.5x7.5 15	2.0	270	79.0
8	A-7.5-15N4	無	無	7.5x7.5 15	2.0	270	120.0
9	B-10-15N	無	無	10x10 15	2.0	361	103.6
10	B-10-15A	有	有	10x10 15	2.0	361	104.9
11	B-15-15N	無	無	15x15 15	0.88	361	102.7
12	B-15-15A	有	有	15x15 15	0.88	361	106.3
13	C-12-15N	無	無	12x12 15	2.0	361	103.6
14	C-12-15A	有	有	12x12 15	2.0	361	104.9
15	C-15-15N	無	無	15x15 15	1.27	361	122.2
16	C-15-15A	有	有	15x15 15	1.27	361	127.8

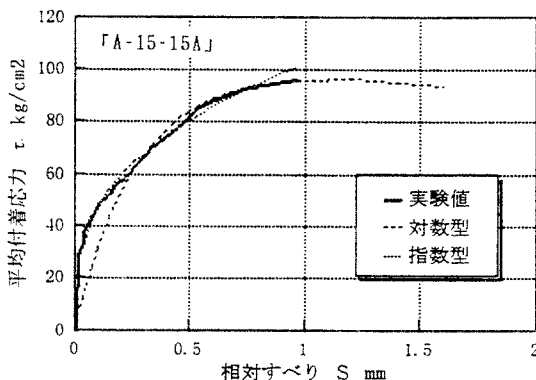


図-2 平均付着応力と相対すべりの関係

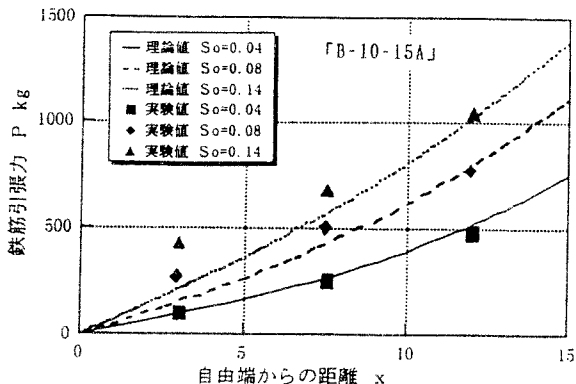


図-3 自由端からの距離における鉄筋引張力の変化