

論文 高強度材料を用いた RC 部材の鉄筋付着特性に関する研究

山本 晴人^{*1}・伊藤 始^{*1}・三島 徹也^{*2}・島 弘^{*3}

要旨：高性能コンクリート構造物の設計に必要な基礎データを得ることを目的に高強度鉄筋 (USD685) および高強度・高流動コンクリート ($f'_c=80\sim90\text{N/mm}^2$) の組み合わせにおける鉄筋の引抜き実験を行った。その結果、高強度・高流動コンクリートを用いた場合の付着応力は普通コンクリートよりも高いことが分かった。また、鉄筋径、鉄筋節形状、鉄筋強度、定着長の違いによる付着応力の影響を検討し、最後に付着応力-すべり関係の定量化を行った。

キーワード：高強度・高流動コンクリート、高強度鉄筋、付着強度、すべり

1. はじめに

近年、構造物の高性能化の要求が高まっている中で、高強度材料の利用は有効な一つ的手段であり、橋梁部材としても利用されつつある。高強度材料を構造部材として橋脚に用いた場合には、耐力、じん性の向上などによって、よりスレンダーな橋脚となることが期待でき、その開発のために多くの研究が注がれている^{1), 2)}。また高強度材料の利用は近年、盛んに研究が行われている性能照査型設計の一役を担うものであると期待されている。しかし、高強度材料を構造部材として用いるためには幾つかの課題が残されており、例えば高強度鉄筋と高強度コンクリートの付着性能の把握もその一つといえる。

本研究は、高強度材料を用いた引抜き実験により、高性能コンクリート構造物の設計に必要な高強度鉄筋 (USD685) および高強度・高流動コ

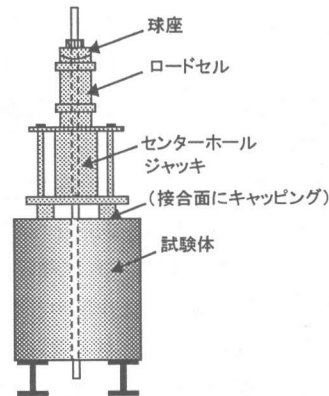


図-1 実験方法の概略図

ンクリート ($f'_c=80\sim90\text{N/mm}^2$) の組み合わせにおける鉄筋の定着に関する基礎データを得ることを目的とするものである。なお、本研究では、定着長が十分長い鉄筋の降伏までの弾性時における付着特性を検討の対象としている。

表-1 材料強度、仕様の一覧

試験体	鉄筋種類	鉄筋径* D(mm)	定着長 (×D)	鉄筋規格	コンクリート 強度 (N/mm ²)	節形状	降伏強度 fy(N/mm ²)	引張強度 fu(N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)	
T1	D29	28.6	20	USD685	79	ネジ節	708	872	1.961	
T2			30							
T3			40							86
T4										33
T5			SD345	86	382		551	1.856		
T6	D19	19.1	20	USD685	89	波節	708	872	1.961	
T7			40		86	ネジ節	714	904	1.983	

*ただし、本検討では小数点以下を四捨五入した鉄筋径を用いた。

*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 工博 (正会員)

*3 高知工科大学教授 工学部社会システム工学科 工博 (正会員)

2. 試験体及び実験方法

本研究では、島らの研究³⁾を参考にして、マッシーなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着特性に着目した。実験は、図-1に示すように、試験体上部にセンターホールジャッキを設置し、鉄筋を一方方向に引き抜くことで行った。

試験体の材料強度、仕様の一覧を表-1に示す。今回使用した高強度・高流動コンクリートは自己充填性を有しており、試験体の打設においても、特に、バイブレーターなどによる締め固めは行っていない。事前に試験練りを行い、自己充填コンクリートとしてのフレッシュ性状ならびに強度特性を確認し、配合を選定した。その配合を表-2に示す。なお、骨材はコンクリートプラントにて通常用いられている普通強度のものを使用した。

試験体は、図-2に示すように、直径600mmのコンクリート円筒の中心に、鉄筋を埋め込んだものである。試験体寸法は、縦ひび割れが発生しないこと、コンクリートに作用する応力が小さくかつ均等になることなどを考慮して十分に大きくした。実験因子は(1)定着長、(2)コンクリート強度、(3)鉄筋強度、(4)鉄筋節形状、(5)鉄筋径である。

埋め込まれた鉄筋のひずみ分布を測定するため、ひずみゲージを定着区間下端部より5D(Dは鉄筋径)間隔に貼付した。定着区間上端部及び定着区間下端部には変位計を取り付け、抜け出し量を測定した。なお、荷重端から鉄筋直径の10倍(10D)の範囲に、荷重端近傍での付着劣化の影響を避けるため、非定着区間を設けた。

3. 実験結果

3.1 引抜き特性の検討

各試験体の付着特性を代表する性状として、図-2に示すA点での鉄筋応力-抜け出し変位関係を図-3に示す。

高強度・高流動コンクリートを使用したT1, 2, 3, 7試験体はほぼ同様な引抜き特性を示しており、降伏時の抜け出し変位 δ_y は0.3~0.4mm程度である。これらの試験体は普通コン

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スラブ フロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	SP
60	60±5	5.5±0.5	33	51.4	165	500	846	801	1.6
24	12±2.5	4.5±1.5	57.5	47.1	166	289	862	982	-

*1 セメント:低熱ポルトランドセメント(比重:3.21)
 *2 細骨材:大里郡大里村産陸砂、秩父郡皆野町産砕砂
 *3 粗骨材:秩父郡皆野町産砕石
 *4 高性能AE減水剤:SP-8S(B)

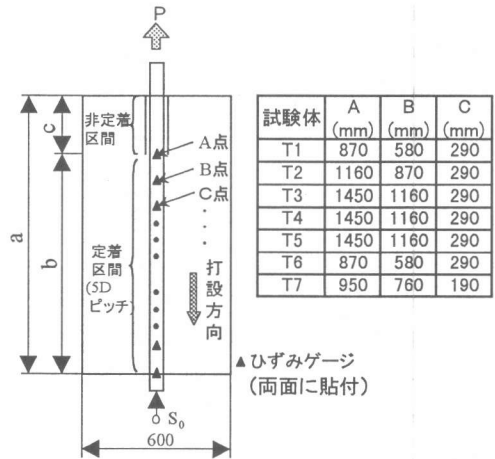


図-2 試験体図

クリートを使用したT4試験体($\delta_y=1.2\text{mm}$ 程度)と比べて剛性が高く、優れた付着特性を示すことが認められる。T5試験体に関しては、SD345の鉄筋を使用しているため降伏応力は他の試験体と比べて低くなっているが、降伏までの剛性はT1, 2, 3, 7とほぼ同様な特性を示している。また、T6試験体(波節)は節の形状が異なるT1, 2, 3, 7試験体(ネジ節)に比べてやや剛性が低めであり、今回の試験範囲では鉄筋の節形状が付着性

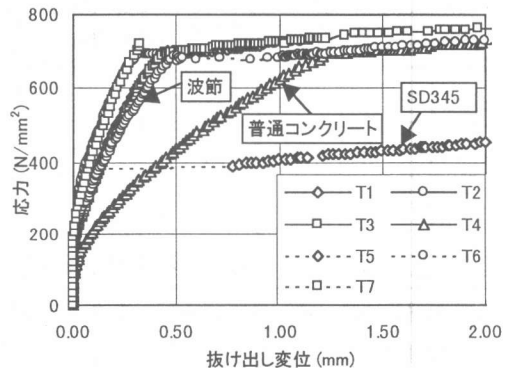


図-3 鉄筋応力-抜け出し変位関係

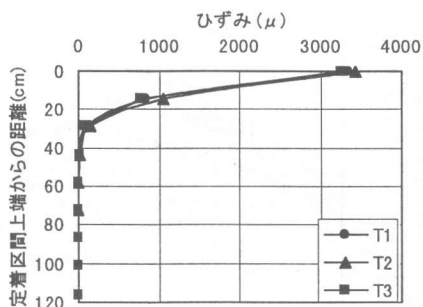


図-4 定着長の違いによるひずみ分布への影響

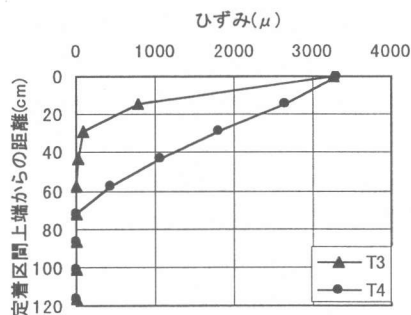


図-5 コンクリート強度の違いによるひずみ分布への影響

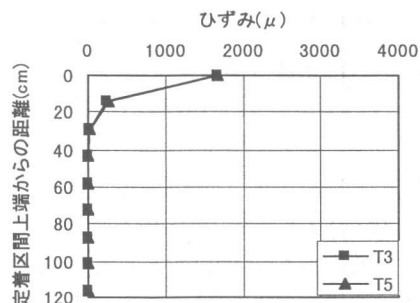


図-6 鉄筋強度の違いによるひずみ分布への影響

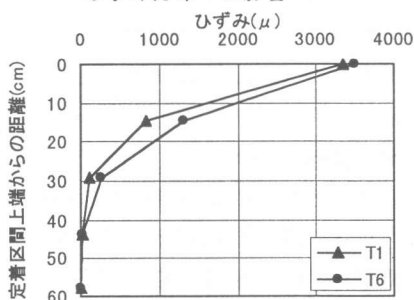


図-7 筋形状の違いによるひずみ分布への影響

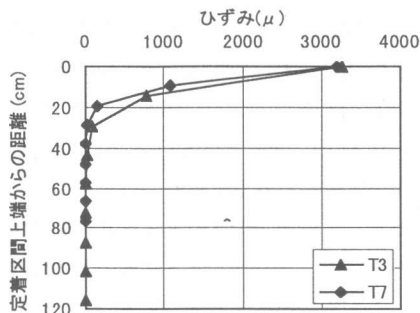


図-8 鉄筋径の違いによるひずみ分布への影響(L)

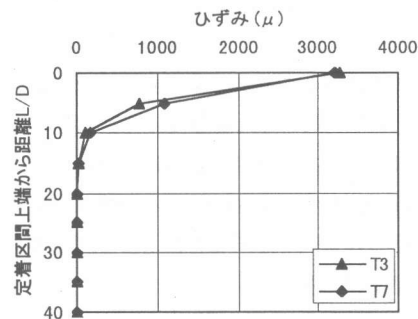


図-9 径の違いによるひずみ分布への影響(L/D)

状に若干の影響を与える結果となっている。

3.2 ひずみ分布の検討

(1) 定着長の違いによる影響

図-4 に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約 3300μ 時 (降伏直前) の T1, 2, 3 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。T1, 2, 3 試験体の定着長はそれぞれ 20D, 30D, 40D であるが、各試験体のひずみ分布はほぼ同様の傾向を示している。これは、本実験が十分長い定着長の引抜き実験であったためと思われる。

(2) コンクリート強度の違いによる影響

図-5 に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約

3300μ 時 (降伏直前) の T3, 4 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。ここに、T3, T4 試験体のコンクリート強度は、それぞれ $86, 32\text{N}/\text{mm}^2$ である。これより、高強度・高流動コンクリートを使用した T3 試験体の方が普通コンクリートを使用した T4 試験体に比べてひずみ分布の勾配が大きいことが認められる。

(3) 鉄筋強度の違いによる影響

図-6 に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約 1700μ 時 (T5 試験体の降伏直前) の T3, 5 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。なお、T3, 4 試験体の使用鉄筋はそれぞれ、USD685, SD345 である。

鉄筋強度の異なる両試験体のひずみ分布はほぼ一致しており、当然の結果ではあるが、鉄筋弾性時の付着特性は鉄筋強度によらないことが確認できる。

(4) 鉄筋節形状の違いによる影響

図-7 に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約 3300μ 時の T1, T6 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。T1 試験体の鉄筋節形状はネジ節であり、T6 試験体の節形状は波節である。T1 試験体の方が T6 試験体と比べてひずみ分布の勾配が若干大きいことが認められ、先に示した引抜き特性と同様に、節形状がひずみ分布に影響を与えることが分かる。

(5) 鉄筋径の違いによる影響

図-8 に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約 3200μ 時の T3, 7 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。T3, 7 試験体の鉄筋径はそれぞれ 29, 19 であるが、T7 試験体の方が T3 試験体と比べてひずみ分布の勾配が若干大きくなっている。

これに対して、図-9 に、定着区間上端部からの距離 L を鉄筋径 D で除して無次元化した値を縦軸で表した場合のひずみ分布を示す。鉄筋径の異なる両試験体のひずみ分布はほぼ一致しており、鉄筋径がひずみ分布に与える影響は、距離 L を径 D で無次元化することによって考慮できることが確認できる。

4. 付着応力の検討

4.1 実験結果の整理方法

鉄筋ひずみ計測点における付着応力は、各点での鉄筋の応力分布を、近傍の 3 点を結ぶ 2 次放物線に仮定して、以下の式を用いて算出した。

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

すべり量は、次式に示すように、定着区間下端部でのすべり量 S_0 に、各測定点における鉄筋ひずみを積分した値を加えることによって求めた。なお、本実験の全試験体について、定着長が十分長い場合、定着区間下端部でのすべり S_0 は、ほとんどゼロであった。

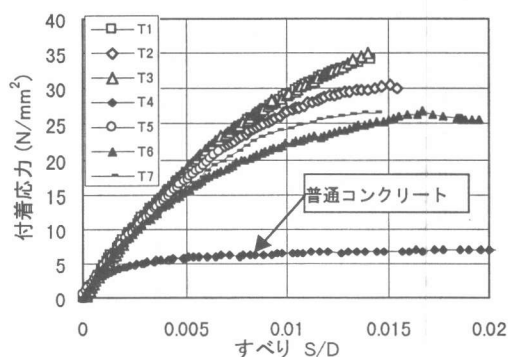


図-10 付着応力—すべり関係

$$S = \int_0^L \varepsilon dx + S_0 \quad (2)$$

S_0 : 定着区間下端部でのすべり

付着応力は、ひずみ計測点の各々で求められるが、測定点 A 以外のひずみの計測値は小さく、得られる付着応力も小さいレベルにとどまっている。そこで、以下の検討では基本的に A 点での付着特性に着目することとする。

4.2 付着応力—すべり関係

マッシブな普通コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着—すべり関係のモデルに島ら³⁾の式がある。島らは、式(3)に示すように、普通コンクリート ($f'_c = 20 \sim 50 \text{ N/mm}^2$) に埋め込まれた十分長い定着長を有する鉄筋の付着応力 τ は、鉄筋径で除して無次元化されたすべりの関数で表すことができ、コンクリート強度の影響は圧縮強度の $2/3$ 乗に比例する形で考慮できるとしている。

$$\tau = 0.9 f'_c \cdot s^{2/3} (1 - \exp(-40s^{0.6})) \quad (3)$$

ここで、 $s = S/D$ 、 S はすべり量、 D は鉄筋径、 f'_c はコンクリートの圧縮強度である。

島らにならって鉄筋径で無次元化したすべりと付着応力の関係を図-10 に示す。鉄筋径の異なる T3 ($D=29$)、T7 ($D=19$) 試験体はほぼ同様の付着性状を示しており、ここでも、無次元化すべり (以下、すべりという) を用いることによって鉄筋径の影響をおおむね考慮できることが分かる。

同図に示すように、高強度・高流動コンクリート試験体の付着強度は普通コンクリートの強

度の数倍に達しており、極めて優れた付着性状を示すことが確認できる。これは、本研究で用いた高強度・高流動コンクリートが自己充填性を有し、ブリージングもほとんど無いため、鉄筋とコンクリート界面の接触状態が非常に堅固であることが主要因と考えられるが、詳細については不明な点も多く、さらなる検討が必要と思われる。

4.3 付着特性の比較

(1) 普通コンクリートの場合

図-11 に、T4 試験体（普通コンクリート、ネジ節）の付着応力—すべり関係を示す。これよ

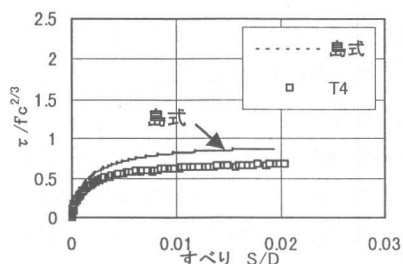


図-11 付着応力とすべり関係
(普通コンクリート、ネジ節)

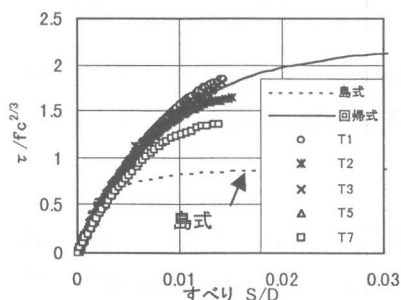


図-12 付着応力とすべり関係
(高強度コンクリート、ネジ節)

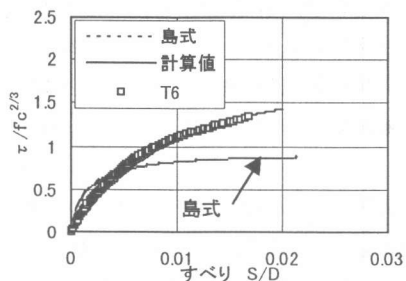


図-13 付着応力とすべり関係
(高強度コンクリート、波節)

り、T4 試験体の付着性状は、島らの式より若干としては、以下の要因が考えられる。すなわち、本試験体では、他の試験体に比べて鉄筋の表裏に貼付したひずみゲージの測定値に大きな差が生じていることが認められており、載荷時に鉄筋に作用した曲げの影響によって付着応力が低下したものと推定される。理想的な載荷条件下では、島式に近い結果が得られたものと考えられる。

(2) 高強度・高流動コンクリートの場合

本実験より得られた高強度・高流動コンクリートの付着応力—すべり関係を図-12(ネジ節)、図-13(波節)に示す。両図に示すように、高強度・高流動コンクリートの付着応力—すべり関係は島式と大きく異なっている。新たな評価式が必要と思われるが、本実験の試験体数は限られており、コンクリート強度や鉄筋径の影響に対する詳細な定量化は困難である。そこで高強度・高流動コンクリートにおいても、前例に従って、すべりは鉄筋径 D で無次元化し、コンクリート強度の影響は強度の $2/3$ 乗で評価できると考えた。

これらの付着応力—すべり関係の実験値から、最小自乗法を用いて島らと同様の関数形で回帰させた結果、次式を得た。

ネジ節の場合：

$$\tau = 2.2f_c^{2/3}(1 - \exp(-113s)) \quad (4)$$

波節の場合：

$$\tau = 1.6f_c^{2/3}(1 - \exp(-113s)) \quad (5)$$

なお、本実験におけるコンクリート強度は、T4, 6 試験体を除いて $79 \sim 86 \text{ N/mm}^2$ に限られていることから、式(4)、(5)の適用範囲は、圧縮強度 80 N/mm^2 程度の高強度・高流動コンクリートに限定すべきと思われる。

4.4 すべり—ひずみ関係の検討

(1) すべり—ひずみ関係の算出

ここでは、付着応力が式(3)のように、コンクリート強度の $2/3$ 乗に比例し、すべり s の関数で与えられる場合、すべりとひずみの間にも一義的な関係が得られることを示す。

一般に、付着の基礎方程式は次式で与えられる。

$$E_s A_s \frac{d\varepsilon}{dx} = \phi \tau \quad (6)$$

さらに、

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{d\varepsilon}{ds} \frac{ds}{dx} = \frac{d\varepsilon}{ds} \frac{\varepsilon}{D} \quad (7)$$

となることを考慮し、付着応力 τ は、 $\tau = f'_c{}^{2/3} h(s)$ の形で表現できるとすると、式(6)は次式となる。

$$E_s \frac{\pi D^2}{4} \frac{d\varepsilon}{ds} \frac{\varepsilon}{D} = \pi D f'_c{}^{2/3} h(s) \quad (8)$$

したがって、次式を得る。

$$\varepsilon = f'_c{}^{1/3} \sqrt{\frac{8}{E_s} \int h(s) ds} \quad (9)$$

すなわち、すべりとひずみは一義的な関係として与えられ、ひずみはコンクリート強度の $1/3$ 乗に比例することとなる。

(2) すべり—ひずみ関係の比較

式(4)、(9)用いて、高強度・高流動コンクリート (T1 試験体) のすべり—ひずみ関係式を、実際に計算すると式(10)となる。なお、普通強度のコンクリートに対して、島らは、式(9)と同等な実験式として、式(11)を与えている。

$$\varepsilon = \left\{ \frac{17.6}{E_s} \left(s + \frac{1}{113} e^{-113s} - \frac{1}{113} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \times f'_c{}^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$s(f'_c/20)^{2/3} = \varepsilon(2+3500\varepsilon) \quad (11)$$

式(10)と実験結果を比較したものが図-14 である。計算値と実験値はよく一致しており、式(9)の妥当性が確認できる。

さらに、鉄筋の応力—ひずみ関係 ($\sigma = E_s \varepsilon$) を考慮すると、式(10)は鉄筋応力と抜け出し量の関係を簡便に与える式と見ることができ、同式は実用上、有用と考えられる。

5. まとめ

高強度材料を用いた引抜き実験を実施し、定着長が長い場合の鉄筋弾性時における付着特性について検討を行った。その結果をまとめると、

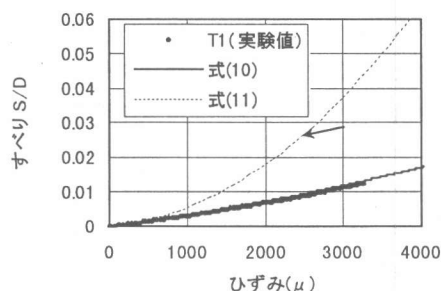


図-14 T1 試験体のすべりとひずみの関係

以下のとおりである。

- (1) 本実験で用いた自己充填性を有する高強度・高流動コンクリートの付着特性は普通コンクリートと比べて極めて優れている。
- (2) 高強度・高流動コンクリートにおいても、付着応力は、径で無次元化されたすべりの関数として与えられる。
- (3) 圧縮強度 80N/mm^2 程度の高強度・高流動コンクリートの付着応力は、 $20 \sim 50\text{N/mm}^2$ を対象とした島らの式の適用範囲外であり、新たに付着応力—すべり関係の定量化を行った。
- (4) 今回の実験範囲においては、波節鉄筋よりネジ節鉄筋の方が、付着特性に優れる傾向が示された。
- (5) 鉄筋の定着長が十分長い場合、すべり—ひずみ関係もまた一義的な関係を有する事を示した。

参考文献

- 1) 近藤眞生, 三島徹也, 下野一行, 佐藤勉: 高強度材料を用いた RC 部材の変形性能評価方法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 217~222, 1999. 6
- 2) 佐藤文則, 城国省二, 佐々木満, 中島良光: 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度・高流動コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 475~480, 1998. 6
- 3) 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, 第 378 号/V-6, pp. 165~174, 1987. 2