

自己充填型高強度・高耐久コンクリートの 鉄筋付着特性に関する研究

山 本 晴 人^{*1} 小 原 孝 之
三 島 徹 也 原 夏 生

要 旨

高性能コンクリート（自己充填型高強度・高耐久）構造物の設計に必要な基礎データを得ることを目的に自己充填型コンクリート（ $f'_c=32.8 \sim 89.5\text{N/mm}^2$ ）を用いた鉄筋の引抜き実験を行った。その結果、自己充填型コンクリートを用いた場合の付着性状は普通コンクリートよりも極めて優れていることが分かった。また、ひずみ分布の比較から鉄筋径、鉄筋節形状、鉄筋強度、定着長及び充填性の違いによる付着性状への影響を検討し、自己充填型高強度・高耐久コンクリートの付着応力 - すべり関係の定量化を行った。

キーワード 自己充填型高強度・高耐久コンクリート / 高強度鉄筋 / 付着強度 / すべり

目 次

- | | |
|--------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 付着応力の検討 |
| 2. 試験体及び実験方法 | 5. まとめ |
| 3. 実験結果 | |

A STUDY ON BOND CHARACTERISTICS OF STEEL BAR EMBEDDED IN SUPER QUALITY CONCRETE

Haruhito YAMAMOTO Takayuki OBARA
Tetsuya MISHIMA Natsuo HARA

Synopsis:

Recently, reinforced concrete structures have been expected to have higher quality, and one of the effective means to achieve this is adopting high strength materials, and they have been to be used in bridges. However, in order to use them rationally, there are some unknown characteristics. One of them is a bond characteristic of high strength steel bar embedded in super quality concrete (SQC), which has high-strength and self-compacting properties.

As a basic study on bond characteristics of high quality reinforced concrete structure, we carried out pull-out experiments with high strength steel bar embedded in SQC.

From these tests, the bond stress of high strength steel bar embedded in SQC is found to be much higher than that of ordinal strength steel bar embedded in ordinal strength concrete. Furthermore we showed that bond characteristics relates to the diameter of bar, the shape of rib, the strength of concrete, and the embedded length of bar. Finally we formulated the relation between bond stress and slippage of them.

* 1 関西支店 大洲長谷作業所

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、曲げ耐力、じん性能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実施されている^{1), 2)}。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)および自己充填型高強度・高耐久コンクリート($f'_c=30\sim 80\text{N/mm}^2$ 程度)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している。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範囲内における付着特性を検討の対象としている。

2. 試験体及び実験方法

島らの研究³⁾を参考にして、マッシブ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。

試験体の材料強度、仕様の一覧を表-1に示す。自己充填型高強度・高耐久コンクリートは高い流動性を有しているため、試験体の打設においてもパイプレーターなどによる締め固めは行っていない。配合は、事前に試験練りを行って、自己充填型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て決定した。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-1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を考慮して十分に大きくした³⁾。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、(6)充填性である。

加力は、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、鉄筋を一方に引き抜くことで行った。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)または2.5D間隔に貼付した。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、天端から鉄筋直径の10倍(10D)の範囲には、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。

鉄筋ひずみ計測位置における付着応力は各点での鉄筋の応力分布に近傍の3点を結ぶ2次放物線を仮定して、その点における応力の傾きを求めることによって得た。すべり量は、自由端から考えている点までひずみを積分したものに自由端すべりを加えて求めた。ここで、定着始点のA点のすべり量を抜け出し変位と定義する。

3. 実験結果

3.1 引抜き特性の検討

各試験体の鉄筋応力—抜け出し変位関係を図-3に示す。80N/mm²級の高強度・高耐久コンクリートを使用したT1, 2, 3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クリートを使用したT4試験体($\delta_y=1.2\text{mm}$)と比べて剛性が高いことが認められる。50N/mm²の高強度・高耐久コンクリートを使用したT10試験体もまた、50N/mm²級の普通コンクリートを使用したT9試験体よりも優れた付着特性を示すことが認められる。しかし、30N/mm²級の高強度・高耐久コンクリートを使用

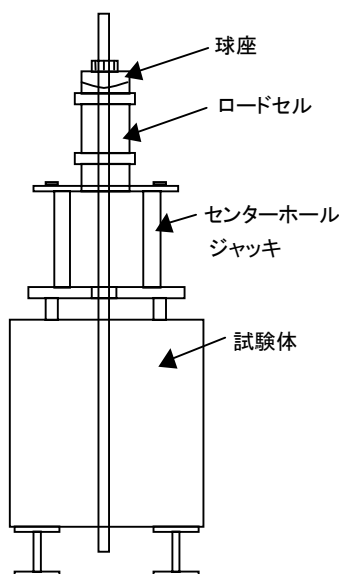


図-1 実験方法の概略図

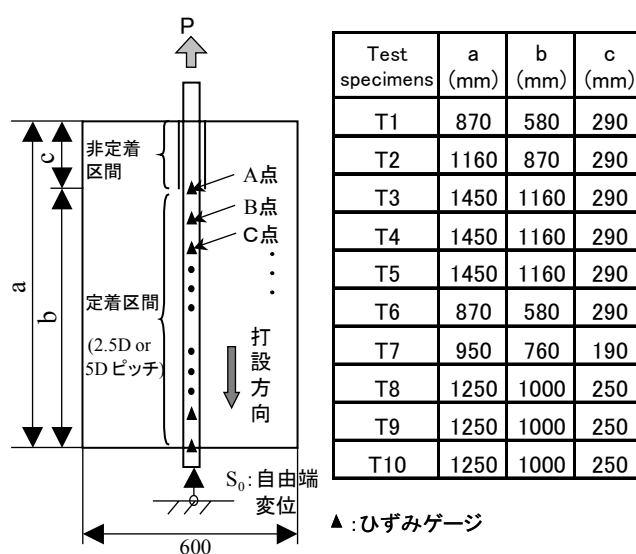


図-2 試験体図

した T8 試験体 ($f_c'=33\text{N/mm}^2$) は T9 試験体 ($f_c'=48\text{N/mm}^2$) よりも剛性が低かった。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状に若干の影響を与える結果となっている。

表 - 1 材料強度及び試験体の仕様

試験体	鉄 筋				定着長 ($\times D$)	コンクリート	
	鉄筋種類	鉄筋径 D(mm)	鉄筋材質	降伏強度 (N/mm^2)		圧縮強度 (N/mm^2)	充填性能
T1	D29	28.6	USD685	693.4	20	79.4	自己充填
T2							
T3							
T4							
T5							
T6	D19	19.1	SD345	394.8	40	85.8	普通
T7							
T8	D25	25.4	USD685	688.3	20	89.5	自己充填
T9							
T10							
T1	D25	25.4	USD685	723.6	40	85.8	自己充填
T2							
T3							
T4							
T5	D19	19.1	SD345	394.8	40	85.8	普通
T6							
T7	D25	25.4	USD685	688.3	20	89.5	自己充填
T8							
T9							
T10	D25	25.4	USD685	723.6	40	85.8	自己充填
T1							
T2							
T3							

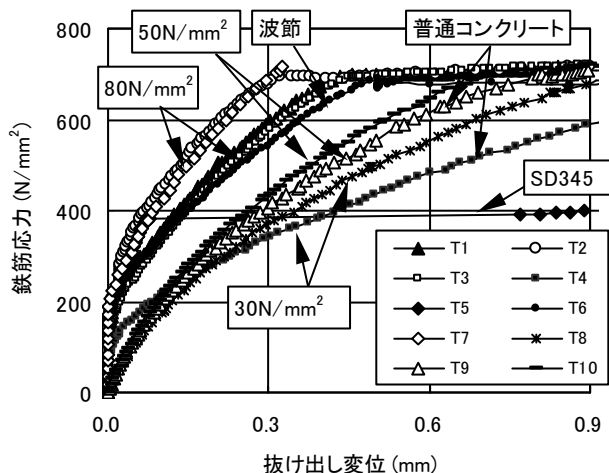


図 - 3 鉄筋応力 - 抜け出し変位関係

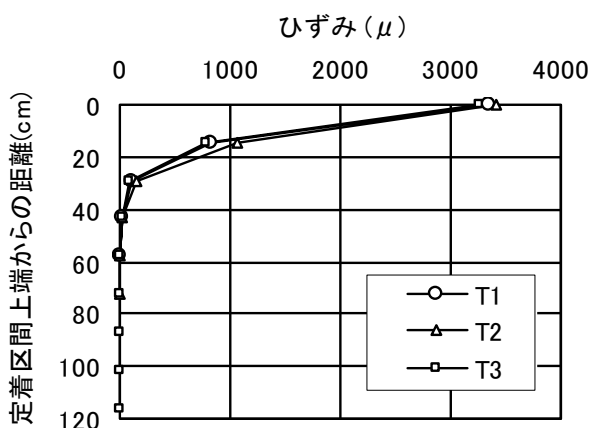


図 - 4 鉄筋応力 - 抜け出し変位関係

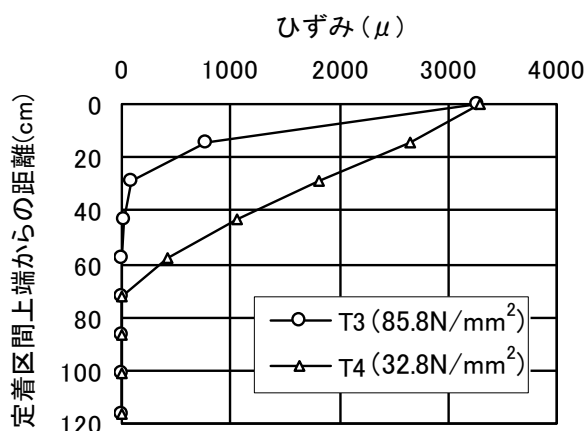


図 - 5 コンクリート強度の違いによるひずみ分布への影響

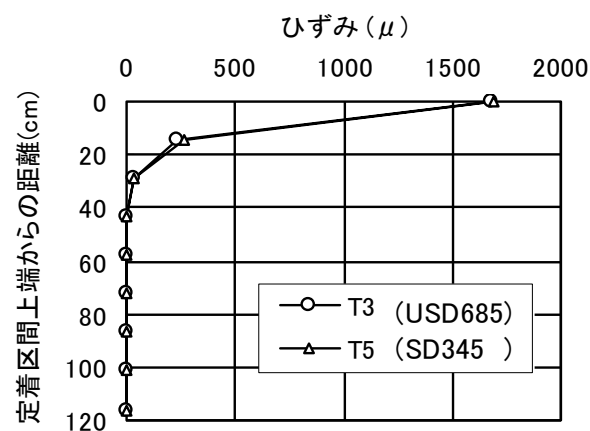


図 - 6 鉄筋強度の違いによるひずみ分布への影響

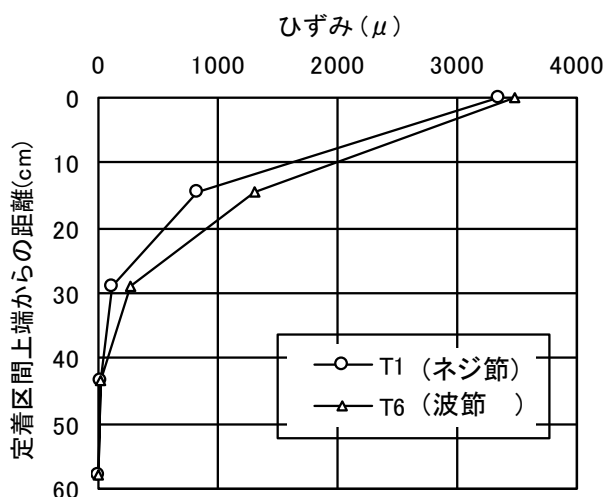


図 - 7 節形状の違いによるひずみ分布への影響

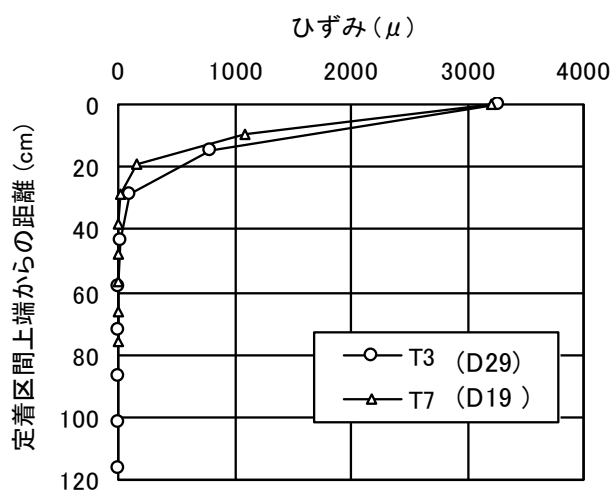


図 - 8 鉄筋径の違いによるひずみ分布の影響

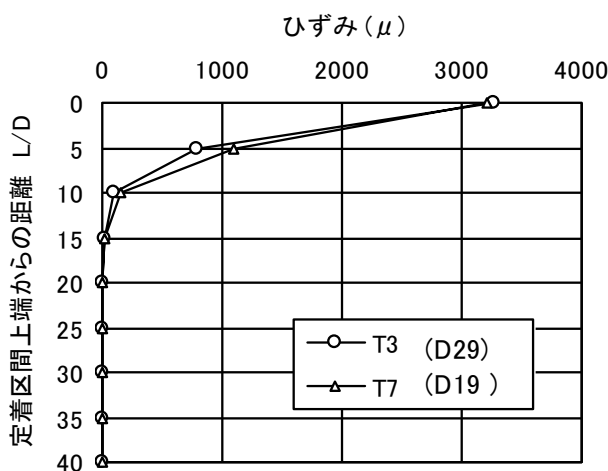


図 - 9 鉄筋径の違いによるひずみ分布の影響

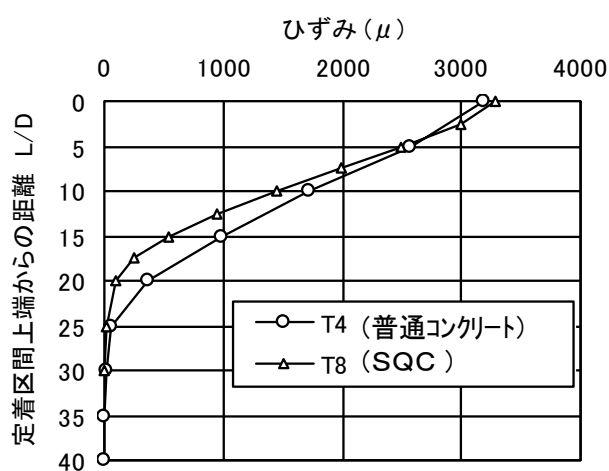


図 - 10 充填性能の違いによるひずみ分布への影響

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 3300 μ 時の 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 3300 μ 時の T3, 4 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。ここに、T3, T5 試験体のコンクリート強度は、それぞれ 86, 32N/mm² である。これより、高強度・高耐久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 1700 μ 時の T3, 5 試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。なお、T3, 5 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、鉄筋弾性時の付着特性は鉄筋強度によらないことがわかる。

(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 3300 μ 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3200 μ 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D29,D19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取り除くことができることがわかる。

(6)自己充填の影響

図-10に、定着区間上端部の鉄筋ひずみが約3200 μ 時のT4,8試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。両試験体は鉄筋径が異なるため、同図では鉄筋径で無次元化した距離を縦軸にとって比較する。T4,8試験体のコンクリート強度は33N/mm²である。これより、自己充填型コンクリートを使用したT8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。

4. 付着応力の検討

4.1 実験結果の整理方法

鉄筋ひずみ計測位置における付着応力は各点での鉄筋の応力分布に近傍の3点を結び2次放物線を仮定して、その点における応力の傾きを求めることによって得た。

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

ここに、

τ : 付着応力

E_s : 鉄筋のヤング係数

D : 鉄筋径

ε : 鉄筋のひずみ

x : 鉄筋に沿った座標軸上の位置

すべり量は、自由端から考えている点までひずみを積分したものに自由端すべり量を加えて求めた。なお、本実験の全試験体については、定着長が十分長いいため、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。

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

ここに、

S : すべり量

S_0 : 自由端すべり量

L : 自由端から考えている位置までの距離

付着応力は、ひずみ計測点の各々で求められるが、A

点近傍の付着応力は定着始点の付着の乱れの影響を受ける。そこで、以下の検討ではA点から5~7.5D離れた位置の付着特性に着目することとする。

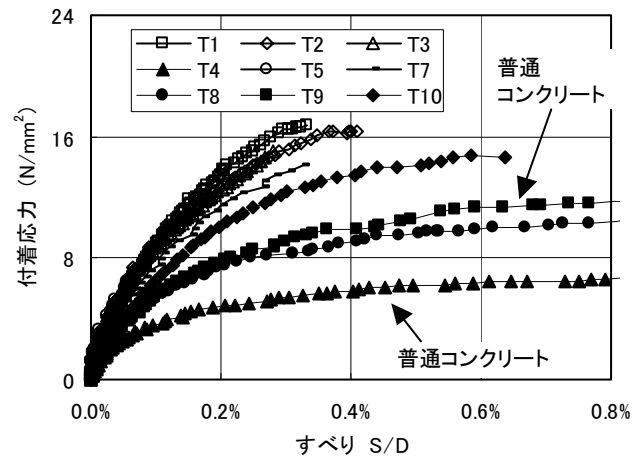


図-11 付着応力 - すべり関係

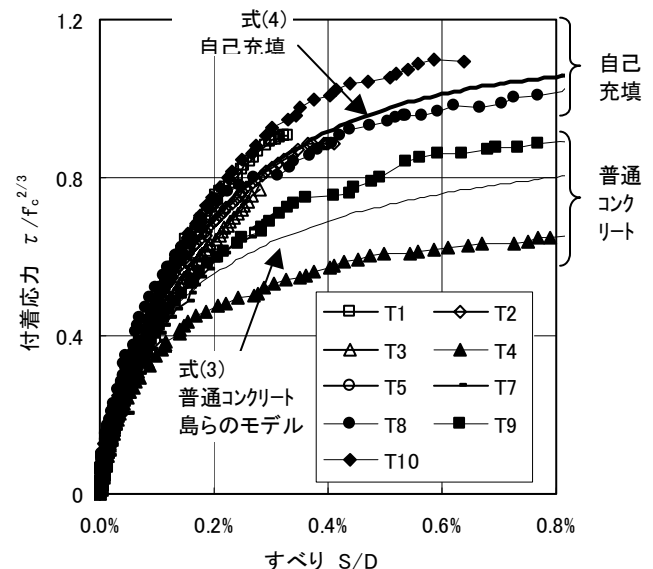


図-12 付着応力 - すべり関係 (無次元)

4.2 付着応力—すべり関係

マッシュ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の式³⁾がある。島らは、式(3)に示すように、普通コンクリート($f'_c=20\sim50\text{N/mm}^2$)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。

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

ここに、

τ : 付着応力(N/mm²)

s : $s=S/D$
S : すべり量
 f'_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)

得られた τ と $s(=S/D)$ の関係を図-12に示す。また、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($\tau/f'_c{}^{2/3}$)の関係を図-12に示す。同図に示すように、高強度・高耐久コンクリート試験体の付着強度は、普通コンクリートに比較して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・高耐久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 付着特性評価式の検討

(1) 付着特性の比較

島らにならってコンクリート強度で無次元化した付着応力とすべりの関係を図-12に示す。同図には式(3)の計算結果も示している。これより普通コンクリートの付着応力とすべりの関係は式(3)の計算結果に概ね対応しているが、自己充填型コンクリートの場合は式(3)よりも高い付着応力を示している。コンクリート強度の影響を考慮しているにも関わらず自己充填コンクリートの付着強度が高いことがここでも確認された。

自己充填型コンクリートを用いた T3,8,10 試験体の付着応力とすべりの関係を最小二乗法を用いて回帰して得たのが式(4)である。

$$\tau = 1.1 f'_c{}^{1/3} \left(1 - \exp(-185 \cdot s^{0.84}) \right) \quad (4)$$

ここに、

τ : 付着応力(N/mm²)
s : $s=S/D$
S : すべり量
 f'_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)

式(4)による計算結果を図-12に示す。同図から、自己充填型コンクリートは普通コンクリートと比較して2~3割程度付着応力が高いことがわかる。

5. まとめ

高強度鉄筋(USD685)および高強度・高耐久コンクリート($f'_c=30 \sim 80\text{N/mm}^2$ 程度)の組み合わせにおける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、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・高耐久コンクリートの付着応力は普通コンクリートと比べて2~3割程度高い。
- (2) 自己充填型高強度・高耐久コンクリートにおいても、

付着応力は鉄筋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 $30 \sim 80\text{N/mm}^2$ 程度の自己充填型高強度・高耐久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。

6. おわりに

本研究はマッシブなコンクリートに十分な長さで定着された鉄筋弾性時の付着特性について検討したものである。しかし、構造物の多様化や性能照査型設計への適用を考えると、鉄筋下端部にすべりを生じるような短い定着長での引抜き実験や鉄筋降伏後の付着特性についてのさらなる検討が必要であると考えられる。

謝辞：

本研究の取りまとめに当たり、高知工科大学島弘教授のご指導を承りました。ここに感謝の意を表します。

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・高耐久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
- 4) 山本晴人，伊藤始，三島徹也，島弘：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，2000