

論文 鉄筋降伏後の局所付着応力-すべり量関係の検討

栗原 朋久*1・三谷 龍世*1・西澤 和輝*2・金久保 利之*3

要旨：鉄筋コンクリート部材における鉄筋降伏前後の局所付着性状の変化に着目し、付着長が長く鉄筋が降伏する試験体の鉄筋の単調片引き試験を実施した。実験因子は付着長とした。鉄筋にひずみゲージを鉄筋径の2倍の間隔で貼付し、計測した鉄筋のひずみからすべり量、鉄筋引張応力、付着応力を算出した。得られた局所付着応力-すべり量関係から鉄筋が降伏する場合の付着応力-すべり量関係のモデルを提案した。提案したモデルを用いて付着解析を行った結果、実験で得たひずみ分布は付着解析の計算結果とよい適合性が見られた。

キーワード：鉄筋降伏, 局所付着, 付着応力-すべり量関係, 付着長, 付着解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物が大きな外力を受けるとき、鉄筋を降伏させ、大きな塑性変形を生じさせることで、エネルギーを吸収させる設計を行う。鉄筋降伏後においてもRC部材の靱性能を確保するためには、鉄筋とコンクリートの付着性能が重要である。したがって、鉄筋降伏後のRC部材の付着性状を把握することは、大きな外力に対するRC構造物の挙動を精確に評価するために必要となる。

RC部材の付着性状に関して数多くの研究がなされているが、鉄筋降伏後の付着性状に着目した研究は少ない。島ら²⁾は、すべり量および鉄筋ひずみの2変数を用い、鉄筋降伏後の付着応力を定式化しているが、鉄筋降伏後の付着応力-すべり量関係に着目した研究はほとんど見られない。

本研究では、RC部材において鉄筋降伏後の局所付着応力-すべり量関係を検討することを目的として、鉄筋が降伏するRC試験体の単調片引き試験を行う。計測された鉄筋ひずみから局所付着応力-すべり量関係を算出し、それをモデル化、付着解析を行って実験結果と比較する。

なお、試験体の実験因子は付着長であるが、局所付着性状が軸方向に変化する場合（例えば、鉄筋腐食によって付着性能が軸方向位置によって異なる場合）の検討も目論み、軸方向にスリットを有する試験体が存在する。実験の結果、すべての試験体において付着割裂破壊せず鉄筋が降伏して加力を終了した。そのため、スリットの影響は考慮せず、鉄筋降伏後の付着性状のみに焦点を当てて検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

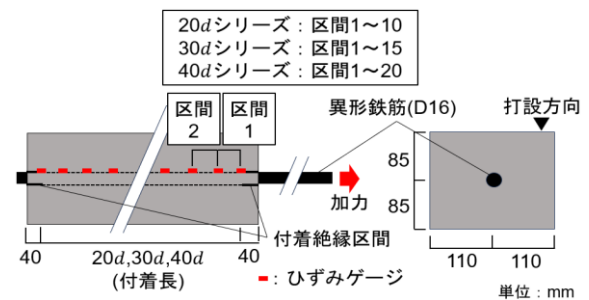


図-1 試験体概要



図-2 ひずみゲージ貼付状況（20dシリーズ試験体）

試験体の概要を図-1に示す。断面形状は170mm×220mmの長方形で、断面中央に異形鉄筋D16（SD345）を1本配した。実験因子は試験体付着長であり、鉄筋径の20倍の320mm、30倍の480mm、40倍の640mmとし、それぞれ20dシリーズ、30dシリーズ、40dシリーズとした。ここで、 d は鉄筋径である。各付着長試験体について3体ずつ、計9体作製した。鉄筋のひずみを測定するために、ゲージ長2mmのひずみゲージを2d間隔で貼付した。ひずみゲージの貼付状況を図-2に示す。付着性状に与える影響が小さくなるように、鉄筋の縦リブ上にひずみゲージを接着後、横筋部分に極力被らないように養生用テープを貼付した。リード線は鉄筋に沿わずに、貼付位置に近い箇所から試験体打設上面に出した。ひずみゲージ間を荷重端側から順に「区間1」、「区間2」とし、自由端側のひずみゲージ区間は20dシリーズでは

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究群（学生会員）

*2 筑波大学 理工学群 工学システム学類

*3 筑波大学 システム情報系教授 博士(工学)（正会員）

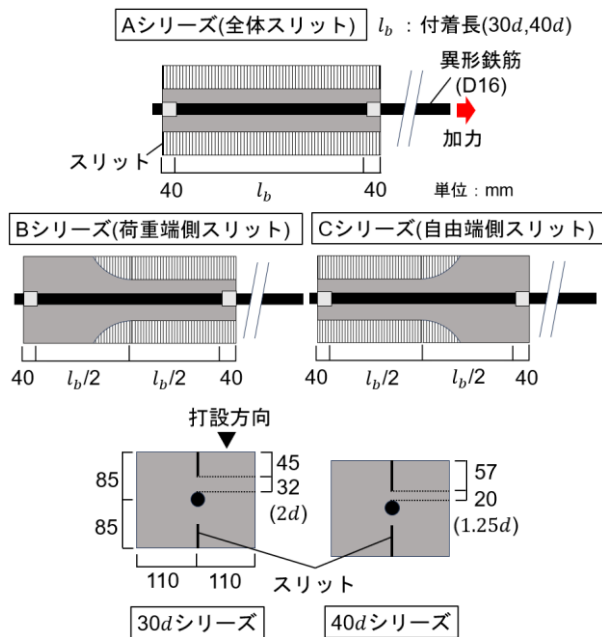


図-3 スリット概要

表-1 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	割線弾性係数 (kN/mm ²)
18.1	1.95	16.6

表-2 鉄筋の材料特性

降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
378	553	186

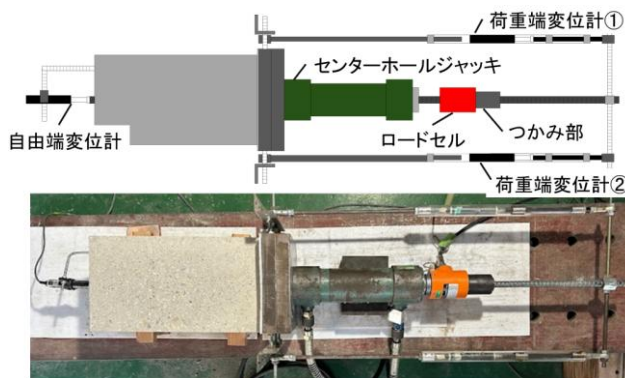


図-4 加力装置

「区間 10」、30dシリーズでは「区間 15」、40dシリーズでは「区間 20」となる。コンクリートのコーン破壊を防ぐために、付着区間両端部に付着絶縁区間を 40mm ずつ設けた。

また、30dシリーズおよび40dシリーズ試験体には、局所付着性状を軸方向に変化させることを意図して、コンクリートカッターにより打設上面および下面に軸方向のスリットをいれた。スリットの概要を図-3に示す。30dシリーズ、40dシリーズにおいて、それぞれかぶり厚さが 2d, 1.25d となるようにスリットをいれた。試験体全長に

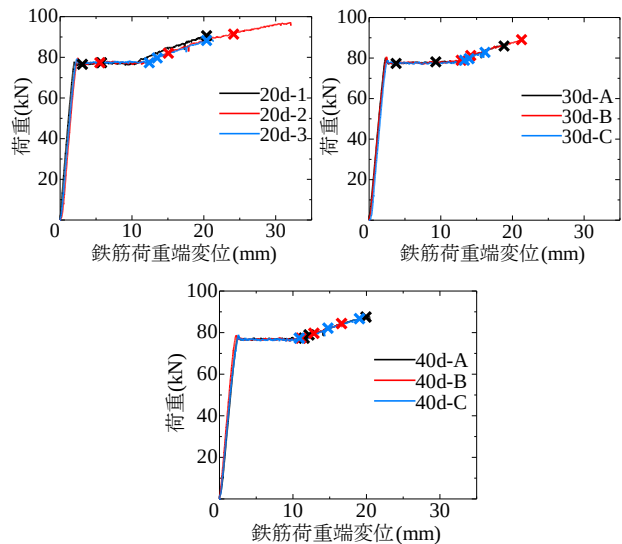


図-5 荷重－鉄筋荷重端変位関係

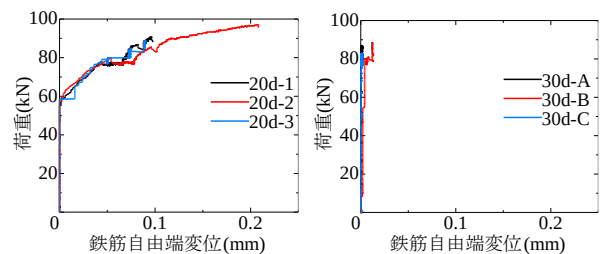


図-6 荷重－鉄筋自由端変位関係

わたってスリットをいれた試験体を A シリーズ、荷重端側半分のスリットをいれた試験体を B シリーズ、自由端側半分のスリットをいれた試験体を C シリーズとし、30dシリーズと 40dシリーズについて各 1 体ずつ作製した。しかし、前述したようにすべての試験体において割裂破壊せず鉄筋が降伏したため、スリットによる影響を考慮せず 20dシリーズ試験体と同様に鉄筋降伏後の付着性状の検討を行う。

試験体に用いたコンクリートの材料特性を表-1に、鉄筋の材料特性を表-2に示す。

2.2 加力・計測方法

加力装置を図-4に示す。試験体荷重端側にテフロンシートを介して反力板を設置し、センターホールジャッキにより単調引抜き加力を行った。計測項目はロードセルによる引抜き荷重、ひずみゲージによる鉄筋のひずみ、変位計による鉄筋荷重端変位および鉄筋自由端変位である。鉄筋荷重端変位は、鉄筋荷重端すべりと付着区間外の鉄筋の伸びを含んでいる。

3 実験結果

3.1 引抜き荷重－鉄筋変位関係

20dシリーズ、30dシリーズ、40dシリーズ試験体の引抜き荷重－荷重端変位関係を図-5に、20dシリーズおよび30dシリーズ試験体の引抜き荷重－自由端変位関係を

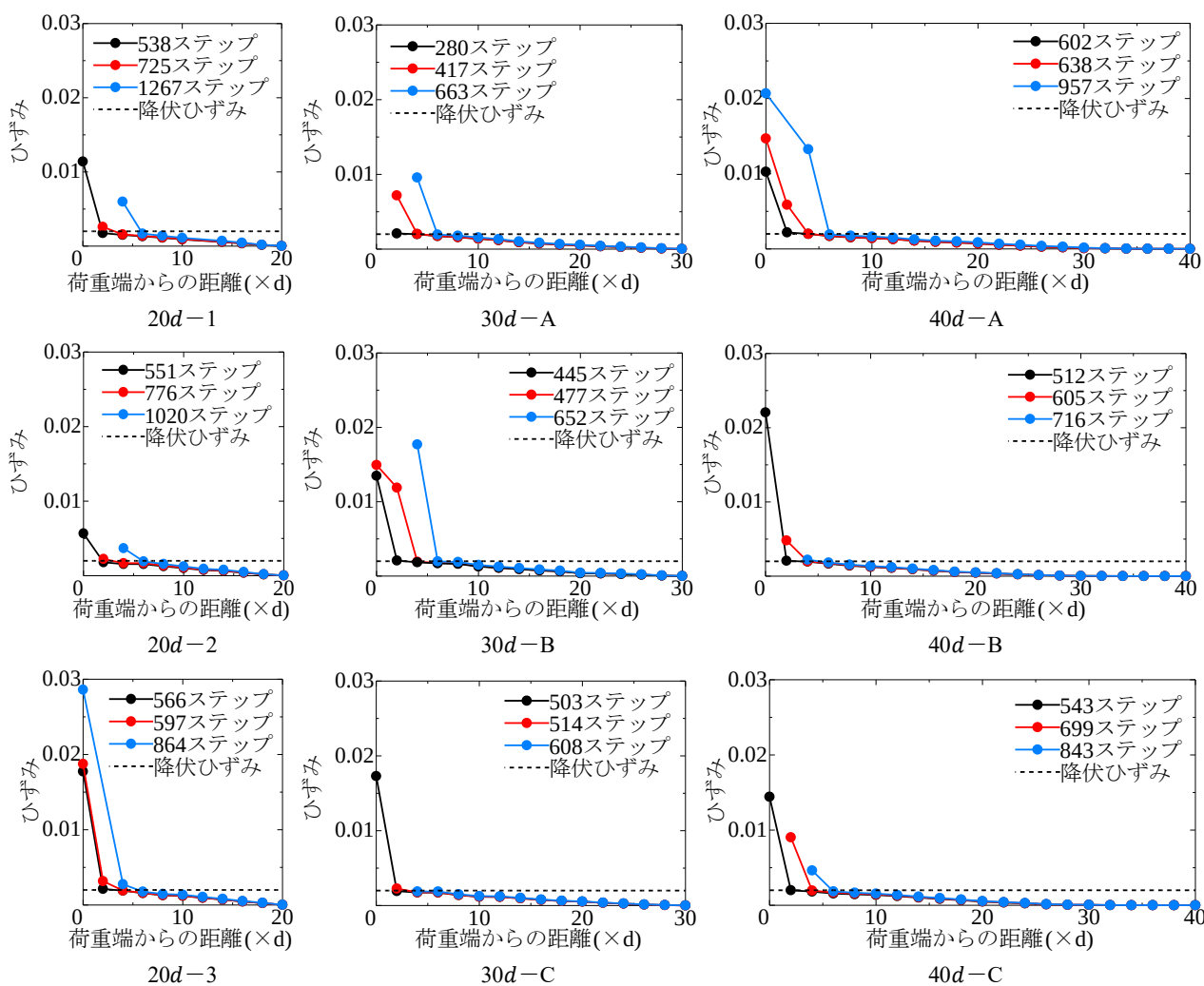


図-7 ひずみ分布

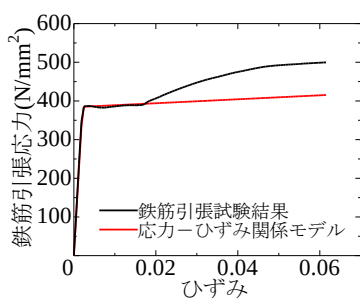


図-8 鉄筋応力-ひずみ関係およびそのモデル

図-6 に示す。なお図中の×印は、次節の鉄筋ひずみ、鉄筋応力分布プロット時の測定点である。付着長が長くなると鉄筋自由端変位は小さくなり、40dシリーズ試験体ではほぼ見られなかった。すべての試験体において、鉄筋が降伏し、鉄筋のひずみ硬化開始後、加力装置の鉄筋つかみ部がずれ、加力を終了した。

3.2 鉄筋ひずみ、鉄筋応力分布

各試験体において、荷重端側3ヶ所のひずみゲージ測定点において、それぞれ鉄筋が降伏し、ひずみが0.02程度になった時点の鉄筋ひずみ分布を図-7に示し、その時点を図-5に×でプロットした。なお、ゲージが剥離

または断線したと考えられ、特異な値を計測した点のプロットは除外している。また、20d-1試験体の荷重端から12dの位置、および30d-A試験体の荷重端のひずみゲージではゲージ不具合のためデータが計測できなかった。加力終了までに、おおむね4d~6dの範囲でひずみゲージの計測値が降伏ひずみを上回り、鉄筋が降伏したと考えられる。40dシリーズ試験体では荷重端から30d以降の区間では、ひずみはほぼ生じなかった。

ひずみゲージにより計測した鉄筋ひずみおよび鉄筋の応力-ひずみ関係から鉄筋引張応力を算出する。鉄筋の応力-ひずみ関係には、式(1)に示すバイリニアモデルを用いた。鉄筋の引張試験から得られた応力-ひずみ関係および式(1)に示すバイリニアモデルを図-8に示す。引張試験結果に合致するように、降伏後の第2直線の勾配を弾性係数の3/1000とした。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon_s & (0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \\ \frac{3E_s}{1000} \cdot \left(\varepsilon_s - \frac{\sigma_y}{E_s} \right) + \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon_s) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 σ_s :鉄筋応力 (N/mm²)、 E_s :鉄筋弾性係数 (N/mm²)、 ε_s :鉄筋ひずみ、 σ_y :鉄筋降伏強度 (N/mm²) である。

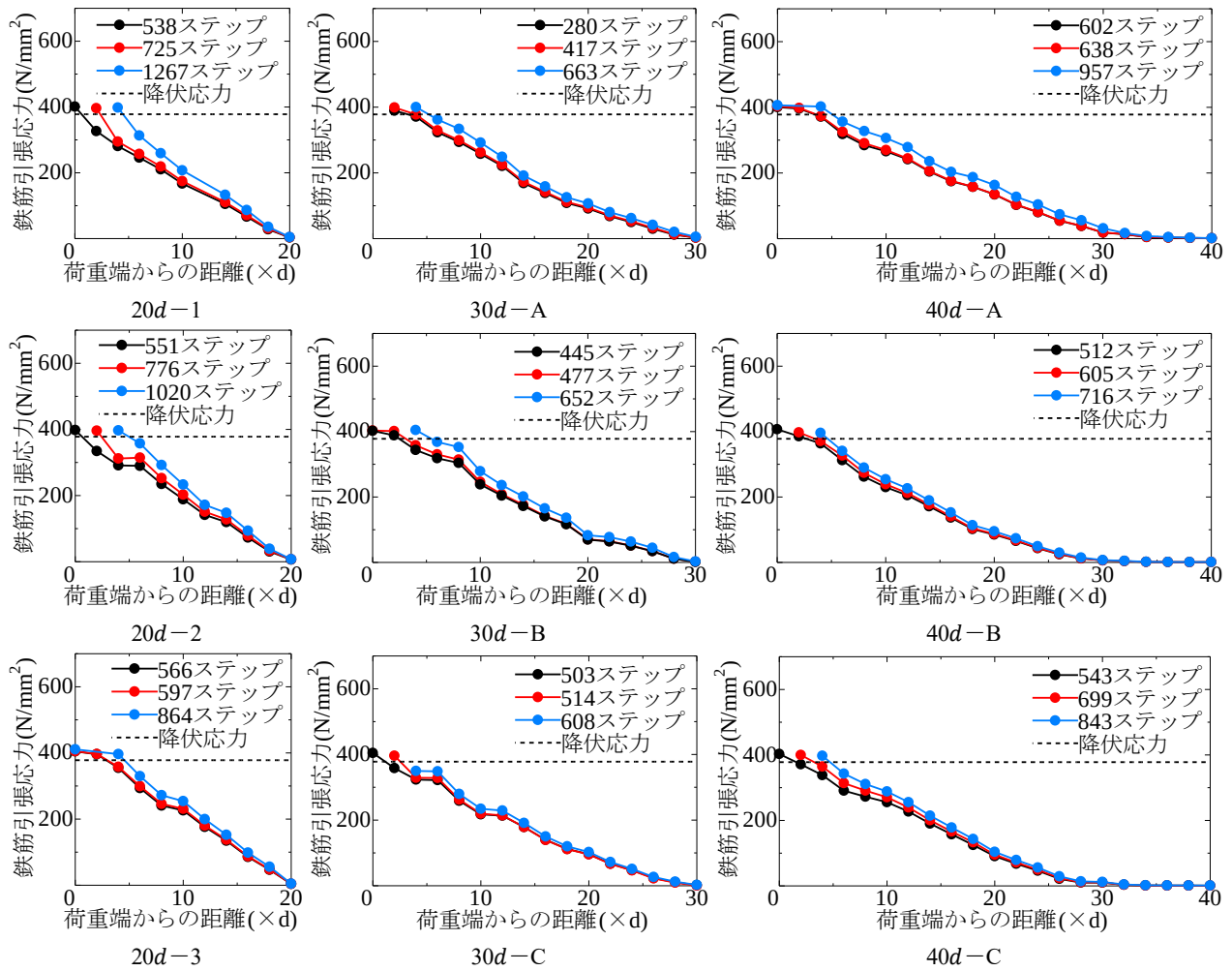


図-9 鉄筋引張応力分布

鉄筋ひずみ分布と同一計測ステップ時の鉄筋応力分布を図-9 に示す。なお、ひずみ分布と同様に、特異な値を計測した箇所はプロットしていない。20dシリーズ試験体では多くのひずみゲージ区間で同様な割合で応力が増加している一方、40dシリーズ試験体では荷重端から30d以降の区間では鉄筋応力があまり生じていない様子が見て取れる。当然ながら、降伏した区間における鉄筋応力の差異は小さい。なお、いくつかの試験体で荷重端から5d前後の位置および10d前後の位置で応力勾配が逆、もしくは小さくなる区間が見られるが、原因は不明である。

4 局所付着性状の検討

4.1 局所付着応力-すべり量関係

各ひずみゲージ間の付着応力、鉄筋のすべり量をそれぞれ式(2)、式(3)により算出する。

$$\tau_i = \frac{A_s}{\varphi_s} \cdot \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta x} \quad (2)$$

$$S_i = S_{i-1} + \frac{(\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1})\Delta x}{2} \quad (3)$$

ここで、 S_i ：自由端から*i*番目の区間におけるすべり量 (S_0 ：自由端変位) (mm)、 ε_i ：自由端から*i*番目のひずみゲージの計測値、 Δx ：ひずみゲージ間隔 (mm)、 τ_i ：自由端から*i*番目の区間における付着応力 (N/mm²)、 A_s ：鉄筋の公称断面積 (mm²)、 φ_s ：鉄筋の公称周長 (mm)、 $\Delta\sigma_s$ ：鉄筋引張応力増分 (N/mm²) である。20d-1 試験体の荷重端から12dの位置のひずみゲージではデータが計測できなかったため、区間6および区間7を同一の区間6.5とし、ひずみゲージ間隔を4dとした。

各試験体においてすべり量が0.1mmを上回った区間の付着応力-すべり量関係を図-10に示す。鉄筋が降伏した区間を実線で、降伏しなかった区間を点線で示し、降伏ひずみを超えた時点を▲でプロットした。30d-A試験体において、荷重端のひずみゲージのゲージ不具合によりデータが計測できなかったため、区間1は検討から除外した。図-9において述べたように、応力勾配が逆になると付着応力が負になる区間があり、原因は不明である。ばらつきが大きく、付着応力-すべり量関係の形状において付着長の違いによる一定の傾向は見られなかった。また、鉄筋が降伏した区間において、付着応力が

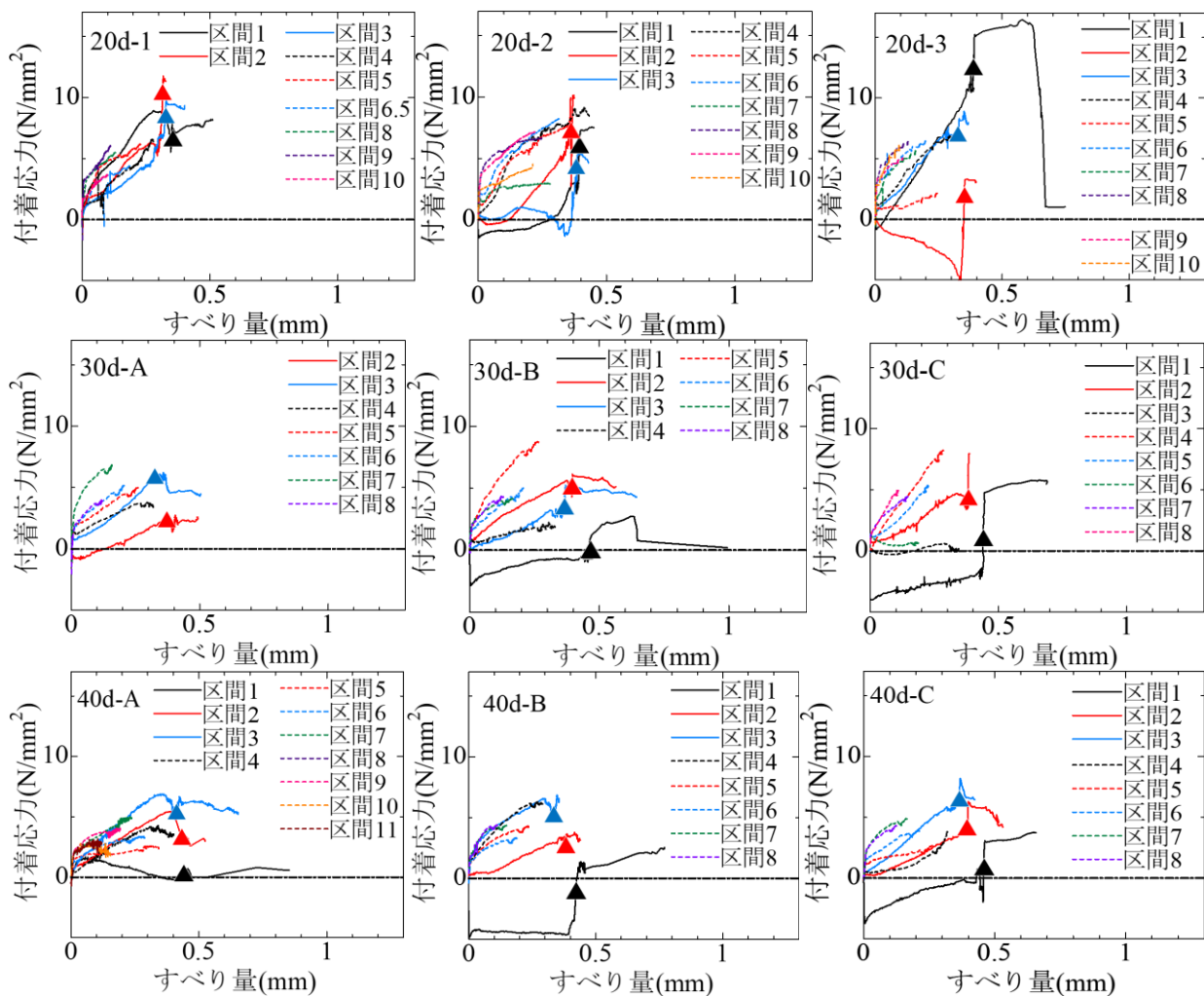


図-10 局所付着応力-すべり量関係

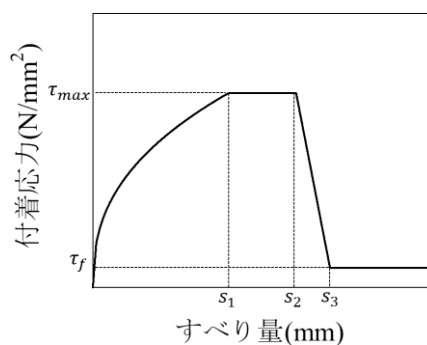


図-11 fib モデル概形

表-3 fib モデルおよび本モデルのパラメータ

パラメータ	本モデル	fib モデル
τ_{max}	$2.5\sqrt{f_c^*} = 10.6$	
s_1	0.4mm	1.0mm
s_2	0.6mm	2.0mm
s_3	0.7mm	鉄筋節間距離(10mm)
τ_f	$0.1\tau_{max}$	$0.4\tau_{max}$

* : f_c はコンクリート円柱供試体の圧縮強度 (N/mm²)

一定ですべり量のみが増加する範囲がある傾向が見られた。

4.2 局所付着応力-すべり量関係のモデル化

鉄筋降伏後も含めた局所付着応力-すべり量関係を、図-11 および式(4)に示す fib モデル³⁾を参照し、本実験の結果と適合するようにパラメータを変更し、モデル化することとした。なお、参照した fib モデルは「Good bond」の片引き試験を対象としたもので、その他の場合における適合性の検証にはさらなる検討が必要である。

$$\tau = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^{0.4} & (0 \leq s \leq s_1) \\ \tau_{max} & (s_1 \leq s \leq s_2) \\ \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_f)(s - s_2)}{s_3 - s_2} & (s_2 \leq s \leq s_3) \\ \tau_f & (s_3 \leq s) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 τ : 付着応力 (N/mm²)、 τ_{max} : 最大付着応力 (N/mm²)、 s : すべり量 (mm)、 s_1 、 s_2 、 s_3 : すべり量に関するパラメータ (mm)、 τ_f : 付着応力に関するパラメータ (N/mm²) である。fib モデルおよび本モデルのパラメータを表-3 に示す。また、本実験から得た各付着長シリーズ試験体の鉄筋降伏位置において、付着応力が負

の値とならず、大きいすべり量まで計測できた2つの区間の局所付着応力-すべり量関係と本モデルとの比較を図-12に示す。各パラメータに関して、 τ_{max} はfibモデルと本モデルで同一とした。 s_1 , s_2 , s_3 はfibモデルでは定数となっており、本実験においては鉄筋降伏後に取得できたデータが少なくばらつきが大きいものの、図-12に示すようにそれぞれ概略0.4mm, 0.6mm, 0.7mm程度であった。 τ_f も同様に得られたデータが少ないが、およそ $0.1\tau_{max}$ 程度であった。

付着応力-すべり量関係にfibモデルおよび本モデルを用い、文献4)に示される、自由端側から逐次積分を行う解析方法を用いて付着解析を行い、解析結果のひずみ分布と本実験のひずみ分布との適合性を検討した。なお、鉄筋の応力-ひずみ関係には式(1)に示すバイリニアモデルを用いた。解析結果のひずみ分布と、図-7に示したひずみ分布の一例を比較して図-13に示す。鉄筋降伏区間の代表として、荷重端から2d位置のひずみが等しくなる際の解析結果と比較した。同図上段は、下段のグラフの縦軸を拡大した図である。鉄筋弾性範囲ではfibモデルと本モデルの解析結果にあまり差が見られなかった。

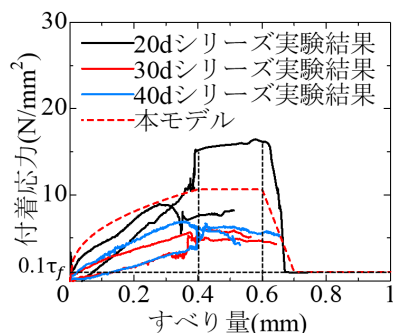


図-12 本モデルと実験結果との比較

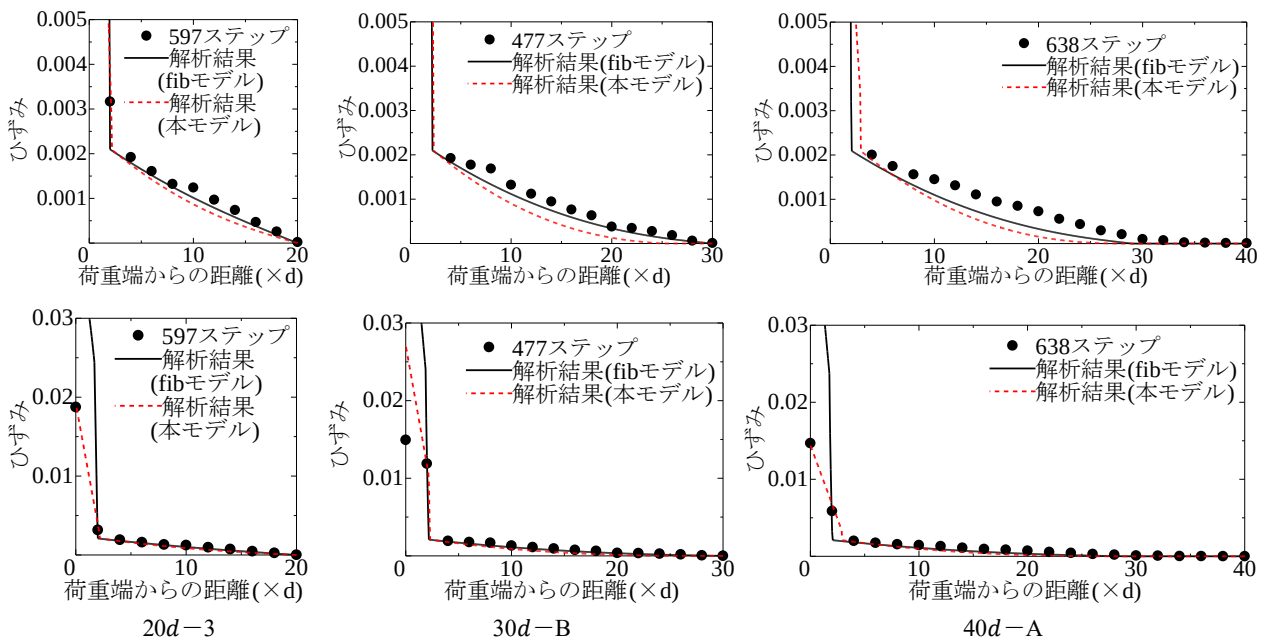


図-13 ひずみ分布の解析結果と実験結果との比較

一方、鉄筋降伏区間では、fibモデルを用いた解析結果よりも、本モデルを用いた解析結果の方が鉄筋降伏後のひずみ分布と良い適合性が見られた。

5 まとめ

本研究では、鉄筋降伏後の付着性状を検討することを目的として、RC試験体の単調引き試験を行った。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) おおむね荷重端から4d～6dの範囲で鉄筋が降伏し、40dシリーズ試験体では荷重端から30d以降の区間では、鉄筋応力はほぼ生じなかった。
- (2) 試験体付着長の違いによる局所付着応力-すべり量関係の差異は明瞭に見られなかった。
- (3) 本実験から得た局所付着応力-すべり量関係をモデル化し付着解析を行った結果、解析結果は鉄筋降伏後のひずみ分布と良い適合性が見られた。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：「コンクリートと補強材の付着定着挙動と構成則の利用研究委員会」報告書，2011
- 2) 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，第378号，V-6，pp.213-220，1987
- 3) fib Model Code for Concrete Structures 2020 (MC2020)，International Federation for Structural Concrete
- 4) 金久保利之，小島浩一，米丸啓介，福山洋：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第506号，pp.163-169，1998