

論文 鉄筋とコンクリートの付着性状に関する直応力依存型挙動のモデル化と適用性評価

工藤 礼央^{*1}・染谷 弘法^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：実構造物において、鉄筋周辺は各種レベルの応力が生じた多軸応力状況下におかれており、そのような応力の違いは付着性状に影響をあたえる重要な因子である。本研究では、鉄筋垂直軸方向の応力の違いが付着性状に与える影響を実験的に解明しモデルの構築および適用性の評価を行う。

キーワード：鉄筋垂直軸方向応力, 付着応力, すべり, joint 要素

1. はじめに

近年、さまざまな用途の RC 構造物が存在し、実構造物中の鉄筋周辺は複雑な応力状況下におかれている。従って、鉄筋周辺の応力の違いは付着性状に及ぼす重要な因子の一つであり、より詳細な研究が必要とされている。これまで、付着性状に及ぼす種々の要因を考慮した鉄筋の実験的、解析的研究が数多く行われているが、鉄筋垂直軸方向の応力の違いをパラメータとした研究は非常に少ない。このような応力性状の違い(側圧)の影響を評価した研究として著者¹⁾ら及び白井²⁾らの研究が挙げられる。いずれの研究においても鉄筋垂直軸方向の応力の違い(側圧)は、付着性状に十分に影響を与えるパラメータであることを指摘しており、更なる研究が強く望まれる。本研究では鉄筋垂直軸方向の応力、すなわち直応力依存型の付着モデルの構築及び、解析への導入による適用性評価を行った。

2. 実験の概要

付着モデル構築のために、本研究においては、著者¹⁾らによって行われた側圧を載荷した状態での鉄筋の引抜き試験のデータを用いた。

2.1 実験パラメータ

付着性状を調べるために設定したパラメータは、表-1 に示す通りである。実験パラメータは圧縮強度 f'_c に対し 0, 30%の側圧レベルとした。側圧の定義は、一方向の圧縮力を付着域の表面積で除したものである。

表-1 実験パラメータ

試験体名	側圧レベル (%)	側圧 (MPa)
D10-0	0	0.00
D10-30	30	6.60

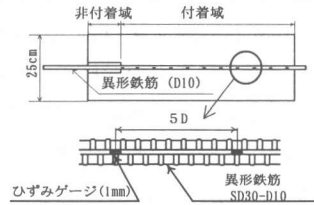


図-1 試験体及びゲージ配置図

2.2 試験体

試験体は断面 25×25cm、長さ 60D (D: 鉄筋径)のコンクリート角柱に異形鉄筋を埋め込んだものである。異形鉄筋には、図-1 に示すように 5D 間隔で、鉄筋の表と裏にひずみゲージを貼り付け、コーティングを施した。更に、鉄筋引き抜き端近傍でのコーン状抜け出しを防ぐため 10D の区間の付着を切った。試験体を使用したコンクリート、鉄筋の力学性状を表-2、表-3 に示す。鉄筋の応力～ひずみ関係は図-2 に示すとおりであり、鉄筋のひずみを

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

応力に変換する際に使用する。

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	f'_{ck} (MPa)	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (Pa)
D10-0	19.6	22.3	1.9	26.8
D10-30	19.6	22.0	2.4	27.3

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋の種類	鉄筋径 (mm)	ヤング係数 E_s (Pa)	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)
SD295-D10	9.53	180	383	457

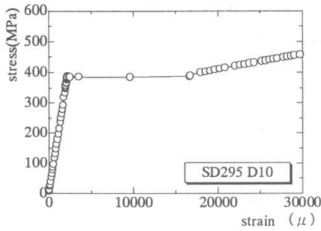


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

2.3 試験方法

本研究で使用した荷重試験装置を図-3に示す。所定の応力レベルに達するまで同一速度で側圧を荷重後、センターホールジャッキにより側圧を保持した状態で鉄筋を引抜いた。鉄筋の引抜き速度は、鉄筋が降伏するまでは変位速度約 200 μ /min とし、降伏後は約 1000 μ /min である。また、引き抜き方向と反対の鉄筋端部に電気式変位計を設置して鉄筋端部のずれ量を測定した。なお、本研究に関しては、測定したずれ量は全く生じなかった。

3. 実験結果

3.1 付着性状の算出

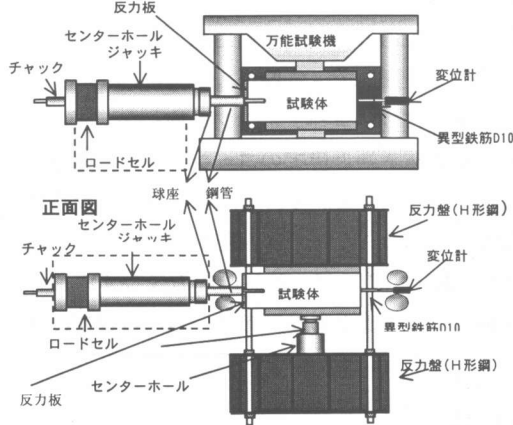


図-3 荷重試験装置

付着応力、すべりの算定方法は既往の研究同様次式を用いて表す。

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

$$s = \int \epsilon_s dx \quad (2)$$

ここで、鉄筋の応力勾配は任意の測点とその両隣の鉄筋応力値を 2 次式で近似し微分することにより算出した。なお、付着域の荷重端部と自由端部の勾配は、荷重端部から見て荷重端部と次の測点、自由端部と一つ前の測点をそれぞれ結んだ勾配である。本研究においては、荷重端付近で鉄筋の降伏が見られたため、降伏後の応力は図-2 に示される鉄筋の応力-ひずみ関係を使用した。

3.2 付着応力-すべり関係

算出された $\tau-s$ 関係は、荷重端近傍と離れた位置では異なる傾向を示した。図-4、図-5 に側圧 0%、30%の荷重端近傍の 5D と離れた位置の 10D 以降の $\tau-s$ 関係を示す。

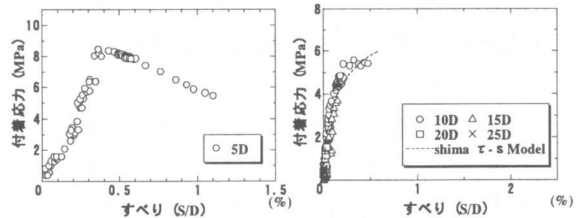


図-4 側圧 0% 各位置における $\tau-s$ 関係

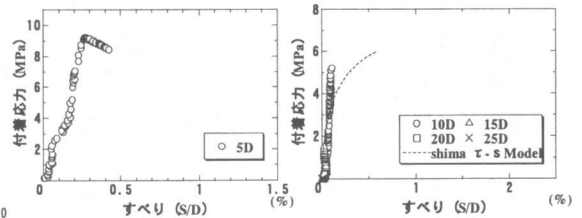


図-5 側圧 30% 各位置における $\tau-s$ 関係

図-4、図-5 の 10D 以降の図に示される破線は、次式に示される島³⁾らによる定着長の長い場合の $\tau-s$ モデルである。

$$\tau = 0.9(f'_c)^{\frac{2}{3}} \left[1 - \exp\{-40(S/D)^{0.6}\} \right] \quad (3)$$

側圧が荷重されていない状態の 10D 以降では、島らのモデルを良く追従していることが確

認できる。しかしながら、側圧载荷状態の 10D 以降では、同じすべりに対する付着応力の勾配が急になっており、側圧の影響が十分に評価できていないことが伺える。

荷重端近傍の 5D の位置において、鉄筋が降伏し、 $\tau-s$ 関係は、ピークまではほぼ線形的な挙動を示し、その後軟化するという 10D 以降とは全く異なる傾向を示している。これは、荷重端近傍では、载荷による鉄筋のひずみ速度が早いために、脆性的に付着破壊が生じていることによるものである。付着領域の急激な剥離破壊又は節間のせん断破壊の卓越により、付着部分のコンクリートが粉体に近い状態になり線形的な挙動を示すと考えられる。

一方、荷重端から離れた領域では鉄筋の応力の伝達が徐々に進行するために、 $\tau-s$ 関係は非線形的な挙動を示す。しかし、側圧の増加に伴って徐々に線形的な挙動に変化する。これは、側圧があるレベルに達したときに、鉄筋周辺のコンクリートの破壊が進展し粉体に近い状態になり、線形的な挙動を示すことによるものと考えられる。

25D 以降の位置においては、鉄筋のひずみの変化がほとんど見られず、付着応力およびすべりはほぼ 0 である。これらを踏まえると本実験における付着性状は、図-6 に示すような 3 つの領域に分かれる。

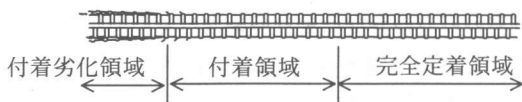


図-6 本実験の付着性状

図-6 に示される付着劣化領域は、本実験の 5D の位置に相当し、付着領域、完全付着領域が 10D 以降の位置を表している。側圧の無い既往の研究において島³⁾等は、10D 以降の離れた領域では、同じ $\tau-s$ 関係で表現できるということを証明しているが、図-5 で示されるように本実験のような側圧がある場合の荷重端から離れた位置においても、同じ $\tau-s$ 関係で表せることが確認できた。また、実験結果を踏ま

えると、荷重端近傍と離れた位置の $\tau-s$ 関係は全く異なる性質の付着性状であり、モデル化を行う際には、荷重端近傍と離れた位置を分けて考える必要があると思われる。

4. 付着モデルの構築

4.1 鉄筋垂直軸方向応力の影響

本研究では、鉄筋を垂直軸方向の応力の違いが付着性状に及ぼす影響を考慮するために、図-7 に示すような修正した Mohr-Coulomb の破壊基準を提案する。

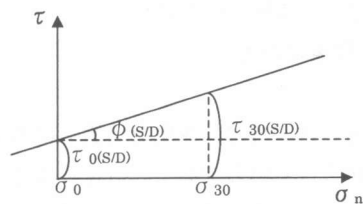


図-7 Mohr-Coulomb の破壊基準

Mohr-Coulomb における強度パラメータ、内部摩擦角及び粘着力は一定では無くすべりを無次元化した値 (S/D) に依存する。直応力を考慮するために粘着力は側圧が载荷されていない状態の付着応力-すべり関係と仮定した。つまり、無载荷状態の付着性状を基準とすれば、鉄筋垂直軸方向の応力が異なる場合の付着応力は次式で表すことができる。

$$\tau_n = \tau_0(S/D) + \sigma_n \tan\{\phi(S/D)\} \quad (4)$$

ここで、

τ_n ; 応力の違いを考慮した付着応力

τ_0 ; 側圧 0% 時の付着応力 (粘着力)

σ_n ; 側圧応力

式(4)に示される内部摩擦角及び粘着力は鉄筋垂直方向の応力依存型の付着性状に関わる重要な要素である。また、鉄筋とコンクリート間に生じる付着応力は鉄筋の応力分布に勾配が生じるために発生し、勾配の発生はすべりの存在によるところが大きい。特に、すべりは異型鉄筋の場合、節間のせん断破壊、又は 2 次ひび割れの発生による影響が大きく、徐々に進展する

コンクリートの破壊が密接に関係しているものと考えられている。ここでは示さないが、本研究のデータから、内部摩擦角はすべりの変化に伴い変化することが確認されたから、粘着力(0%時の付着応力)及び内部摩擦角をすべりに依存する関数と捉え、(4)式を利用することにより詳細なモデルの構築が可能となるものとした。

4.2 粘着力と内部摩擦角

荷重端近傍と離れた位置での付着性状は全く異なる傾向を示すため、それぞれの場合で粘着力、内部摩擦角の関係を定式化する。

4.2.1 荷重端近傍

(1) 粘着力

荷重端近傍の粘着力は、無載荷状態時における荷重端近傍の付着応力である。荷重端近傍では線形的な挙動を示す。実験では近傍付近で鉄筋が降伏したために最大付着応力以降で軟化傾向を示すが、実験結果をもとにして本モデルでも軟化傾向を考慮した。図-8に近傍の付着応力とS/Dの関係を示す。

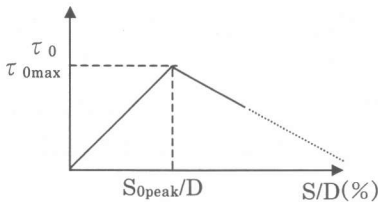


図-8 荷重端近傍の付着応力とS/Dの関係

ここで、付着応力とすべりは次式で表される。

$$S/D \leq S_{0peak}/D$$

$$\tau_0 = \frac{\tau_{0max}(S/D)}{S_{0peak}/D} \quad (5)$$

$$S/D > S_{0peak}/D$$

$$\tau_0 = \frac{\tau_{s0max} - \tau_{0max}}{S_{0max}/D - S_{0peak}/D} (S/D - S_{0peak}/D) + \tau_{0max} \quad (6)$$

実験結果より、最大付着応力、最大付着応力時のすべり $\tau_{0max} = 9(MPa)$ 、 $S_{0max}/D = 1\%$ 、パラメータ $\tau_{s0max} = 5.44(MPa)$ 、 $S_{0peak}/D = 0.43\%$ と本研究では設定したが、これらは、材料及び境界条件によりことなるパラメータであり、近

傍の $\tau - s$ 関係については、今後更に研究を行う必要がある。なお、post peak の付着応力が0に至った場合は以降0とする。

(2) 内部摩擦角

荷重端近傍の内部摩擦角は、鉄筋垂直軸方向の応力の増加に伴い線形的に増加していくものであり、最大付着応力時のすべりに至った後、徐々に減少し S_0/D 以降 $\tan \phi = 0$ となるものと仮定した。近傍の内部摩擦角とすべりの関係を図-9に示す。

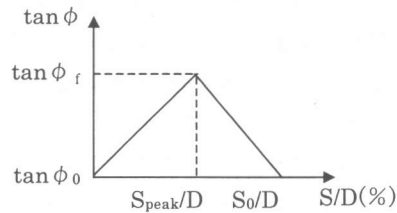


図-9 荷重端近傍の内部摩擦角とS/Dの関係

ここで、内部摩擦角とすべりは次式で表される。

$$S/D \leq S_{peak}/D$$

$$\tan \phi = 200(S/D) \quad (8)$$

$$S_{peak}/D < S/D \leq S_0/D$$

$$\tan \phi = \frac{-200S_{peak}/D}{\{S_0/D - (S_{peak}/D)\}} \{(S/D) - (S_0/D)\} \quad (9)$$

$$S/D > S_0/D$$

$$\tan \phi = 0 \quad (10)$$

S_0/D は無載荷状態の最大付着応力時のすべりを表し0.43%である。 S_{peak}/D は鉄筋垂直軸方向の応力の異なる場合の最大付着応力時のすべりである。図-4、5に示す最大付着応力を(4)式に代入することにより、次式で表すことができる。

$$S_{peak}/D = \frac{\tau_{nmax}}{20 + 2.19\sigma_n} (\%) \quad (11)$$

4.2.2 荷重端から離れた位置

(1) 粘着力

荷重端から離れた位置の粘着力は、無載荷状態の荷重端から離れた位置の $\tau - s$ 関係である。荷重端から離れた位置においては、本研究においても良好な結果を示した島等³⁾の $\tau - s$ モデ

ルを使用する。(12)式

$$\tau = 0.9(f'_c)^{\frac{2}{3}} \left[1 - \exp\left\{-40(S/D)^{0.6}\right\} \right] \quad (12)$$

(2) 内部摩擦角

荷重端から離れた位置の内部摩擦角は、鉄筋垂直軸方向の応力の増加に伴い徐々に増加していく。離れた位置の $\tau-s$ 関係は非線形な曲線を描くことから、内部摩擦角の変化も曲線を描くものとなり、すべりの最大値になると一定になるものとした。離れた位置の内部摩擦角の関係を図-10に示す。

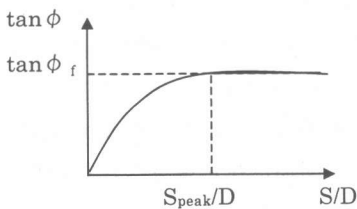


図-10 離れた位置の内部摩擦角とS/Dの関係

ここで、内部摩擦角とすべりは次式で表される。

$$S/D \leq S_{peak}/D$$

$$\tan \phi = 3 \tan \phi_f \sqrt{2 \left\{ (100S/D) - 4(100S/D)^2 \right\}} \quad (13)$$

$$S/D > S_{peak}/D$$

$$\tan \phi = 3 \tan \phi_f \sqrt{2 \left\{ (100S_{peak}/D) - 4(100S_{peak}/D)^2 \right\}} \quad (14)$$

ここで、 $S_{peak}/D = 0.1\%$ $\tan_f \phi = 0.34$ で表される。

5. 直応力依存型 $\tau-s$ モデルの適用性評価

本研究で構築したモデルを有限要素解析に導入し適用性の評価を行う。

5.1 ジョイント要素

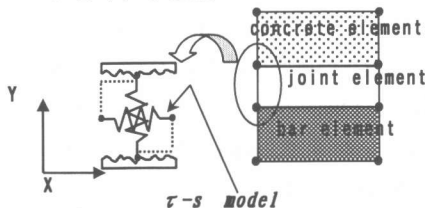


図-11

鉄筋とコンクリート界面の付着性状を表現するために、図-11に示されるような、ジョイ

ント要素を使用した。ジョイント要素は大きさをもたない要素であり、鉄筋とコンクリートの相対変位であるすべりを詳細に評価することが可能となる。従来、不連続面における付着挙動のモデル化の際、鉄筋軸鉛直軸方向の影響は開きに対しては考慮し、圧縮の方向に対しては、考慮しない場合や、考慮する場合がある。考慮する場合には、例えば、直応力から求まるせん断応力

に対応する摩擦角 μ をせん断剛性を非常に小さいものとした状態で、すべり方向と反対方向に等価な節点力として与える場合がある。しかしながら、これらの剛性、パラメータは研究者が任意に定めることが現状であり、実現象を詳細に捉えているとはいえない。特に、鉄筋垂直軸方向の影響をこのような任意の値を用いて表現する方法は、実際には不可能なのである。そこで、実験から求まる直応力依存型の $\tau-s$ 関係を与えることにより、通常有限要素解析に用いることができるものと仮定した。

5.2 解析モデル

解析モデルは図-12に示すように、本研究で行った側圧荷状態の片引き試験である。鉄筋は弾完全塑性、コンクリート要素は弾性体と見なし、2次元平面応力状態で解析を行った。鉄筋とコンクリートの境界には、joint要素を組み込み、鉄筋端部の節点に適切な強制変位を与えて繰り返し計算を行うことにより解析を行った。なお、各ステップで生じる不平衡力に対する収束計算には、Newton-Raphson法を用いた。

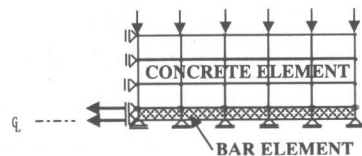


図-12 解析モデル

6. 解析結果と検討

本研究で構築したモデルの導入による解析結果を図-14、図-15に示す。図-14、図-15は側

圧0%，30%時の荷重と抜け出し量の関係を示している。

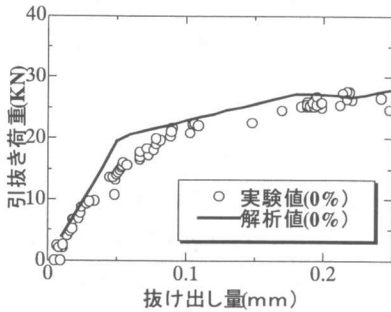


図-1 3 引抜き荷重-抜け出し量関係(無載荷時)

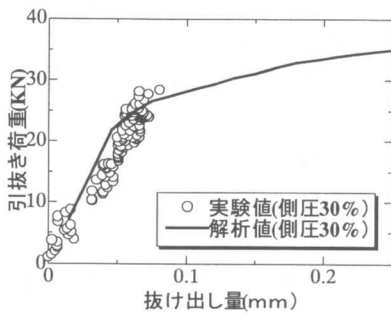


図-1 5 側圧 30%時の荷重抜け出し量関係

図-14における側圧が0%時の荷重と抜けだし量の関係は実験結果を精度良く評価しており、構築モデルの適用性が確認できる。0.5mm付近での勾配の変化は荷重端近傍でのモデルの軟化挙動が卓越するために生じるものでその後荷重端近傍での付着応力が0になる部分で荷重端から離れた領域のモデルで受け持たれるためにほぼ一定値を示す。なお、本解析モデルの荷重端近傍まで、島等³⁾の定着長の長い場合の $\tau-s$ モデルを導入した場合、抜け出し量の小さな範囲で付着応力の急激な増加が見られ本実験結果には当てはまらないことが確認できた。

側圧30%の鉄筋垂直軸応力を考慮した図-15においては、無載荷状態の引き抜き荷重-抜け出し量の関係とは異なった傾向を示している。実験値の傾向として、抜け出し量の小さな値で最大付着応力に至っており、線形的な挙動を示している。初期勾配はほぼ実験値を精度良く捉えており、本研究の範囲内では構築したモデル

の適用性が確認できる。

本研究では、付着応力すべり関係を付着要素に導入したが、この要素は鉄筋とコンクリートの応力伝達機構を正確に捉えているわけではない。特に荷重端近傍の付着性状においてはコンクリートのひび割れの影響が大きいと思われるため、破壊力学やその他のアプローチで研究を行う必要がとられる。

7. まとめ

本研究では、付着性状の鉄筋垂直方向依存型挙動の詳細な評価を目的とし、付着モデルの構築及びその評価を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のように示される。

- (1) 本研究の範囲内で、定着長の長い供試体での $\tau-s$ 関係は荷重端近傍と離れた位置では異なる傾向を示した。
- (2) 修正した Mohr-Coulomb の破壊基準の手法を利用することによって、付着応力に影響を及ぼす鉄筋垂直軸方向応力の違いを、すべりと関連付けて考慮する式を提案した。
- (3) 本研究の範囲内で、鉄筋垂直軸方向応力依存型付着モデルを解析に導入し、適用性が確認できた。

参考文献

- 1) 工藤礼央, 大下英吉: 拘束効果を有する鉄筋とコンクリートの付着性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第22巻, 第3号, pp. 1267-1272, 2000
- 2) 白井信明, 佐藤稔雄: 鉄筋コンクリートの付着～ひび割れモデル, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp9-16, 1983. 10
- 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～すべり関係, 土木学会論文集, 第378号, V-6, pp165-174, 1987. 2