

論文 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

工藤礼央*1・大下英吉*2

要旨: 一般に実構造物において、鉄筋周辺は鉄筋軸垂直方向や軸方向に各種レベルの応力が組み合わされた多軸応力状態にあり、鉄筋とコンクリートとの付着性状の詳細な解析のためにはそのような要因を考慮した研究を行なう必要がある。本研究では角柱形試験体を使用した小径な異形鉄筋の引抜き試験を実施し、側圧を載荷して鉄筋周辺の拘束力を増やし鉄筋軸垂直方向の応力の違いが付着特性に及ぼす影響を評価した。

キーワード: 拘束効果, 小径な鉄筋, 付着応力, すべり

1. はじめに

近年、さまざまな用途の RC 構造物が作られており、基礎構造物、水中構造物、地下構造物などの拘束効果を有する土木構造物が多く存在する。実構造物において、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、拘束効果を有するコンクリートについての研究は少ない。周¹⁾、島²⁾らは側圧のない十分な定着長をもって埋め込まれた鉄筋において荷重端近傍を除いた位置での無拘束時における、付着応力-すべり関係を提案している。さらに、荷重端近傍では付着の劣化などの要因により、荷重端から離れた位置での付着応力-すべり関係とは異なるということを指摘している。しかし、荷重端近傍の付着性状は詳細な研究が行われておらず、荷重端近傍の付着性状を知ることが重要である。一方、付着性状に及ぼす拘束効果の影響を評価した研究として白井³⁾らの研究が挙げられる。白井³⁾らは鉄筋軸に垂直な一方の側圧を載荷した状態で鉄筋の両引き試験を行い、側圧が最大付着応力により基準化された付着応力-すべり関係に及ぼす影響は少ないとしている。これは、任意の側圧時の丸鋼と異形鉄

筋の付着応力-すべり関係の比較であり、側圧の違いによる影響は最大付着応力のみによって評価されている。しかしながら、側圧の違いによる付着性状を詳細に把握するには、最大付着応力に至るまでの付着応力-すべり関係について評価する必要がある。白井³⁾らの研究はこの点に触れていない。

本研究においては、マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋に垂直な二方向の側圧を載荷して引抜き試験を実施し、鉄筋軸垂直方向からの拘束を行なった状態で、側圧の違いによる鉄筋ひずみ、鉄筋応力、すべり、付着応力分布および荷重端近傍と離れた位置の付着応力-すべり関係についての評価を行なった。

2. 実験の概要

付着性状を表す付着応力-すべり関係を求めるために、本研究においては、鉄筋の引抜き試験、さらに試験体の圧縮強度の 15、および 30% の側圧を加えた引抜き試験を行った。

2. 1 試験体

試験体は断面 25×25 cm、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。コンクリートの配合は表-1 に示す通りであり、使用したセメントは、普通セメントを用いた。設計基準強度は 20MPa とし、すべて

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	10	5	55	42.5	174	318	748	1032	0.343

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
D10-15	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 (GPa)	降伏強度 f _y (MPa)	引張強度 f _u (MPa)
SD295-D10	9.53	180	406	547

の試験体について同配合とした。コンクリートの打設は、鉄筋のふしの下面でのコンクリートの沈降による空隙が生じないように、図-1に示すように鉄筋の引抜き方向と反対とした。コンクリートの力学的特性を表-2に示す。なお、養生は試験体の乾燥収縮による表面のひび割れの影響を少なくするために、水中養生とした。埋込んだ鉄筋の引抜きによる縦ひび割れの発生は、異形鉄筋の付着性状を急激に変化させる。そこで、本実験では、縦ひび割れを防ぐために、コンクリートの断面積を鉄筋に対して極力大きく、すなわち、鉄筋比を小さくした。また、鉄筋引抜き端近傍での、コーン状抜け出しを防止するため10Dの非付着域を設けた。

本研究では、実験装置の関係から表-3に示すようなSD295-D10という小径な異形鉄筋を使用した。引抜きによる鉄筋のひずみを測定するために図-2に示すような鉄筋径Dの5倍の間隔で、鉄筋の表裏にひずみゲージを貼付した。ひずみゲージの貼り方は、鉄筋の縦リブ部分の表面を薄く削り、表面の研磨・清浄を行いひずみゲージを接着した。その上からW-1、V Mテープ(共に防湿・防水コーティング剤)、P 2(接着剤)の順にコーティングした。

2.2 荷重試験装置

側圧荷重試験装置は、図-3に示すように、鉛直方向には1000KNの万能試験機、水平方向にはH形鋼を反力盤としたセンターホールジャッキであり、両装置とも所定の応力レベルに達するまで、同一速度で側圧を荷重した。そして、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

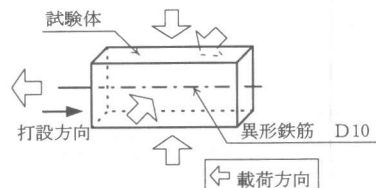


図-1 荷重方向と打設方向

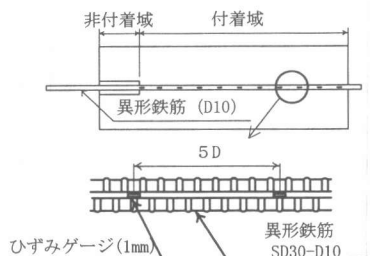
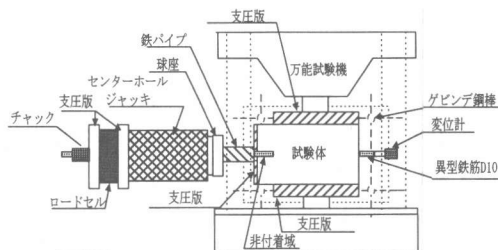
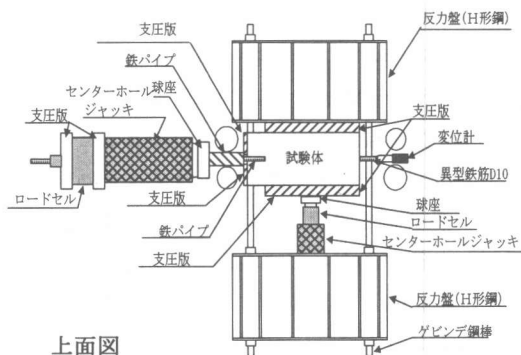


図-2 ひずみゲージ配置図



正面図



上面図

図-3 荷重試験装置

は、鉄筋が降伏するまでは変位速度約 200 μ/minとした。さらに、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。

2.3 実験パラメータ

付着性状を調べるため設定した実験パラメータは、表-4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, 15および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。

試験体名	側圧レベル (%)	側圧 (MPa)
D10-0	0	0.00
D10-15	15	3.35
D10-30	30	6.60

3. 実験結果

3.1 付着性状の算出

実験において計測される項目は、鉄筋ひずみ ε_s 、鉄筋の拔出し量であり、鉄筋とコンクリートとの付着性状を評価するために、それらの計測項目から鉄筋応力 σ_s 、すべり s および付着応力 τ を算出した。また、本研究において鉄筋はひずみが約 2500 μ 前後で降伏する個所がみられたため、鉄筋降伏後の値はデータの整理及び考察が困難である。そこで、約 2000 μ 前後までの値に関して評価を行なった。

(1) 鉄筋応力

鉄筋の応力 σ_s は鉄筋降伏前の値を使用したため計測された鉄筋ひずみにヤング係数を乗じることにより次式で表した。

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_x \quad (1)$$

(2) すべり

すべり s は既往の研究¹⁾²⁾と同様にコンクリート中の不動点を基準とし、そこから任意の鉄筋位置までのひずみを積分することにより算出した。本研究においては、鉄筋終端部の抜け出し量が0であったため次式のように求めることができる。

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

(3) 付着応力

付着応力 τ も既往の研究¹⁾²⁾と同様のものを

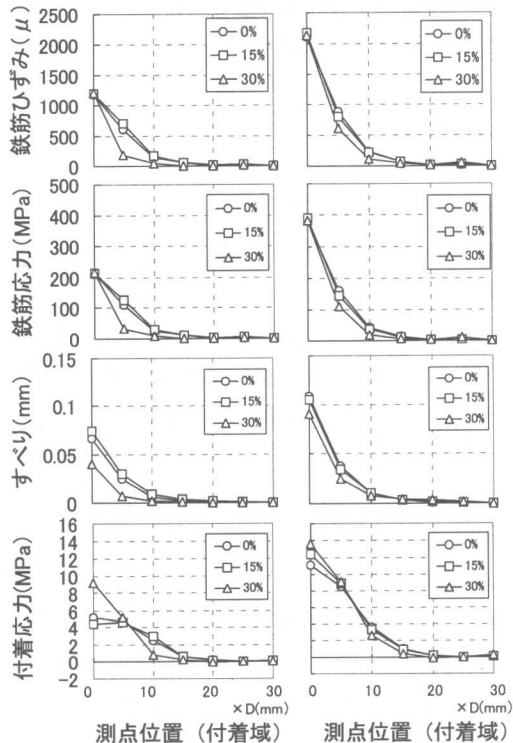
使用した。鉄筋の任意点における付着応力は、ひずみ分布曲線の傾き $d\varepsilon_s/dx$ を用いることにより求められ以下のように示される。

$$\tau = \frac{E_s \cdot D}{4} \cdot \frac{d\varepsilon_s}{dx} \quad (3)$$

本研究においては鉄筋の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勾配を算出した。なお、付着域の始端部と末端部の勾配は、始端部から見て始端部と次の測点、終端部と一つ前の測点をそれぞれ結んだ勾配とした。

3.2 側圧を受けるコンクリートと鉄筋の付着性状

側圧の変化による ε_s , s , σ_s , τ の分布性状を比較するために図-4に各値の分布性状を示す。



(a) 鉄筋ひずみ 1191 μ (0D) (b) 鉄筋ひずみ 2138 μ (0D)

図-4 各値の分布図

図-4において縦軸は ε_s , s , σ_s , τ 、横軸は付着域における鉄筋軸に沿った測点の距離であり、それぞれの図は付着域における各値の分布性状を示している。同図において○, □, △ はそれぞれ側圧 0%, 15, 30%の各分布を示し

ている。鉄筋ひずみ分布は、既往の研究と同様にすべての側圧で各荷重ステップ毎に増加する傾向にあった。本来は各荷重ステップ毎のすべてについて考察すべきであるが、本研究では2つの一般的な分布のみを記す。なお、30D以降の位置においては鉄筋ひずみが $\pm 0 \sim 50 \mu$ という非常に小さな値であったため30D以降を省略した。しかしながら、鉄筋応力 σ_s 、すべり S および付着応力 τ の算出においては勿論使用している。なお、側圧0%時においては30D以降の鉄筋ひずみはほぼゼロであった。

(1) 鉄筋ひずみ分布

鉄筋ひずみ分布の一般的傾向は、既往の研究と同様に引抜き荷重の増加に伴いひずみ分布の増加を示した。付着域0D~20Dの区間において鉄筋ひずみは最も顕著な変化を示しており、その区間では下に凸の分布形状になっている。すなわち、始端部から離れるにしたがって鉄筋ひずみが急激な低下を生じている。そして、20D以降の区間では図-4(a)のひずみ分布および図-4(b)のひずみ分布の差は微少である。つまり鉄筋の引抜力が増加しても20D以降の領域にはほとんど影響を及ぼしていないことが伺えた。次に側圧の違いによる傾向を示す。図-4の(a)(b)両図において側圧30%時の分布が5D以降において最も小さな値を示しているが、0%、15%の分布にはほとんど影響がない。図には表していないが、他の荷重ステップにおいても同様の傾向を示した。

(2) 鉄筋応力分布

鉄筋応力分布は本研究では鉄筋ひずみにヤング係数を乗じたものであるため鉄筋ひずみ分布と同様の傾向を示していることが分かる。

(3) すべり分布

すべり分布は既往の研究と同様に鉄筋の引抜き荷重の増加に伴い分布も増加する傾向にあった。値の変動は0~20Dの区間において顕著にみられ下に凸の分布形状を示していることが分かる。側圧の違いによる傾向を示す。すべり分布は鉄筋ひずみ分布、すべり分布と同様に側圧

30%時のすべりが最も小さく、0%、15%の分布は図-4(a)では0%、15%の順に大きな値になるが、図-4(b)では15%、0%順に変化している。

(4) 付着応力分布

付着応力分布は既往の研究と同様に鉄筋の引抜き荷重の増加に伴い分布も増加した。しかしながら、分布の増加する過程において鉄筋ひずみ、鉄筋応力、すべりとはまた異なった傾向を示している。図-4(a),(b)で10D以降では下に凸のグラフになっているが、(a)の0Dから10Dの範囲では上に凸の分布形状を示している。また、0D~5Dの位置において側圧0%と15%の時、コンクリートが鉄筋を拘束する力が弱いため付着が弱く付着応力が小さいものと考えられる。それに対し、側圧30%時においては拘束力が強いいため0Dの付着応力が側圧0%、15%の分布図より大きな値を示していると思われる。

次に、0%、15%、30%各側圧を比較すると、0D~5Dと5D以降では異なった傾向を示している。0~5Dにおいては側圧30%が付着応力値も大きいことに対し5D以降においては最も小さな値を示している。

(5) 側圧が付着性状に及ぼす影響

各分布性状を全体的に捉えると5D以降すべての分布性状に関して側圧30%の分布が最も小さい値を示しており、0%、15%についてはほとんど差異がない。すなわち、ある一定の側圧を超えた場合において拘束効果の影響が大きくなることが予測され、また、付着域始端部近傍では側圧の増大により付着応力が大きくなるが、始端部から離れるにしたがって、鉄筋とコンクリートの一体性により側圧の影響はほとんどないものとなっている。

3.3 付着応力-すべり関係

拘束効果が付着応力-すべり関係(以下 $\tau-s$ 関係)に及ぼす影響を評価する。本研究では荷重端付近と荷重端から離れた領域に分けて検討を行なう。

(1) 荷重端から離れた位置の $\tau - s$ 関係

図-5, 図-6, 図-7 に側圧 0%, 15%, 30%時の鉄筋のひずみが約 2000 μ までの $\tau - s$ 関係を示す。各図中に示す記号は○は 10D, Δ は 15D, □は 20D, ×は 25Dのそれぞれの位置における値である。図-5, 図-6, 図-7 に示されるように側圧が载荷された状態であっても 10D 以降の荷重端から離れた領域で側圧 0%及び 15%に関してはほぼ一義的に表されることが確認できる。島²⁾らは定着長が長く自由端のひずみとすべりが0である時, 荷重端付近を除いて一義的に表せることを指摘した次式を提案している。

$$\tau = 0.9(f_c')^2 [1 - \exp\{-40(S/D)^{0.6}\}] \quad (4)$$

$$\tau = 0.73f_c' \{ \ln(1 + 5000S/D) \}^3 / (1 + \epsilon \times 10^5) \quad (5)$$

ここで, (5) 式は定着長の短い試験体についても適用できるものであり (5) 式で評価できることが望ましいが側圧の载荷によるひずみの影響が大きくなり, すべり 0.2%付近まで非常に大きくなれば生じたためここでは(4)式のみを示す。(4)式は側圧 0, 15%においてもこれらの式で精度良く表すことが確認できた。しかしながら, 側圧 30%の場合には, (4)式の適用性はとめられず, 急激な付着応力の増加を生じている。すなわち, 側圧 30%においては拘束効果が $\tau - s$ 関係に強く影響を及ぼしていることが伺える。

図-5, 図-6, 図-7 から 10D以降の領域では, 側圧が大きくなるほどすべりの最大値が小さくなっていくことが分かる。これは, 側圧が大きくなるほど鉄筋を拘束する力が強くなり, すべりが小さくなることによるものである。一方, 同じすべりに対する付着応力は, 側圧 0%および 15%ではほぼ同じ程度の大きさであるが, 側圧 30%の場合にはすべりが 0.05%付近から勾配が急になり, 同じすべりに対する付着応力は 0%, 15%よりも大きくなっている。すなわち, ある側圧レベル以降では側圧の影響が非常に大きくなり付着応力も増大することが予測

される。

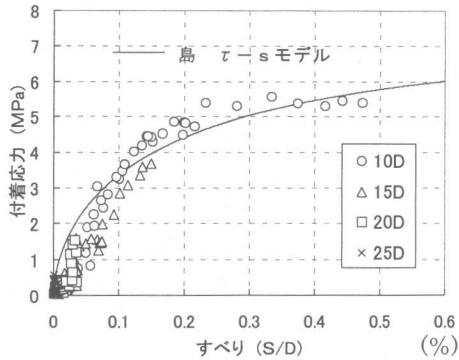


図-5 側圧 0%時の $\tau - s$ 関係

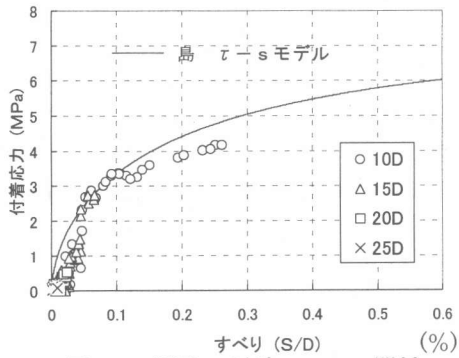


図-6 側圧 15%時の $\tau - s$ 関係

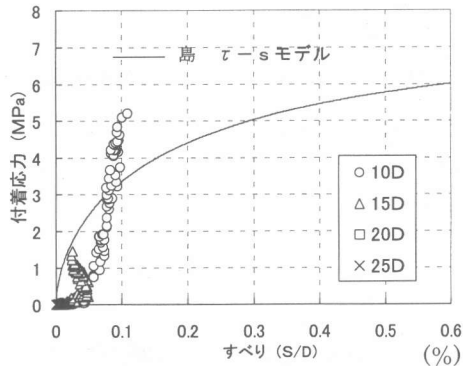


図-7 側圧 30%時の $\tau - s$ 関係

(2) 荷重端近傍の $\tau - s$ 関係

図-8, 図-9, 図-10 に側圧 0%, 15%, 30%時の鉄筋のひずみが約 2000 μ までの 5Dの位置における $\tau - s$ 関係を示す。まず, 側圧 0%時の $\tau - s$ 関係ほぼ線形的傾向を示しているとみなして, 側圧 15%, 30%の場合にはすべりが 0.1%付近以降ですべりの急激な増加が生じた後, 線形的になっている。次に, 側圧の

違いによる $\tau-s$ 関係の比較を行なうために、ほぼ同じ傾向であるすべりが 0.1% までの値を用いて線形近似を行なったものを同図中に実線で示す。すなわち、この実線の勾配を比較することにより側圧の影響評価が可能となるわけであり、側圧の増大に伴い $\tau-s$ 関係の勾配が大きくなっていることが分かる。このことから判断すると、側圧の影響は荷重端近傍において非常に大きく、荷重端から離れるに従って小さくなるものである。

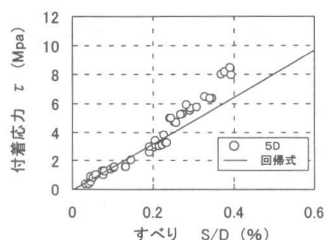


図-8 荷重端近傍の $\tau-s$ 関係(側圧 0%)

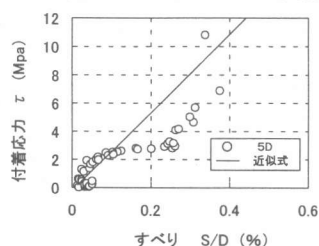


図-9 荷重端近傍の $\tau-s$ 関係(側圧 15%)

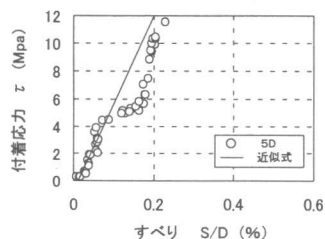


図-10 荷重端近傍の $\tau-s$ 関係(側圧 30%)

(3) $\tau-s$ 関係に及ぼす側圧の影響

図-5~図-10の結果から、側圧つまり鉄筋軸に垂直方向の内部応力が低レベル時には、既往の $\tau-s$ モデル²⁾の適用性が評価できた。しかしながら、側圧が増大すると既往のモデルには一致せず、一般的な $\tau-s$ 関係とは異なる傾向を示している。このことから、ある応力レベルより $\tau-s$ 関係に及ぼす影響が大きくなるように思われる。さらに図-5~図-8

より、荷重端近傍の $\tau-s$ 関係のほうが、荷重端始端部から離れた位置のそれより、側圧の影響が大きいに思われる。

なお、本研究においては側圧 30% 時までの実験しか行なえなかった。側圧の違いによる $\tau-s$ 関係のモデルを構築するためには今後より大きな側圧をかけた実験を行い、鉄筋径および強度の違いなどの要因を考慮した更なる研究が必要である。

4. 結論

本研究では、側圧を载荷した状態で小径な異形鉄筋の引抜き試験を実施し、鉄筋とコンクリートとの付着性状に及ぼす影響について研究を行った。本研究内では以下のような結論を得た。

- (1) 小径な鉄筋における鉄筋ひずみ、応力、すべり、付着応力分布は荷重端付近では側圧が増大するとある側圧レベルから勾配が大きくなり付着応力も増大する。
- (2) 小径な鉄筋の $\tau-s$ 関係は側圧 0%, 15% までは荷重端近傍を除いて一つの式で表せたが、側圧レベル 30% においては表せなかった。
- (3) 小径な鉄筋の荷重端近傍の $\tau-s$ 関係はすべりの小さな範囲で側圧の増大に伴い同じすべりに対する付着応力が大きくなる。
- (4) 小径な鉄筋の $\tau-s$ 関係は荷重端近傍の方が離れた位置よりも側圧の及ぼす影響が顕著に見られる。

【参考文献】

- 1) 周 礼良, 二羽 淳一郎, 岡村 甫: マッシブなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル, 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, pp. 45-52, 1983. 10
- 2) 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, pp. 165-174, 1987. 2
- 3) 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, pp. 9-16, 1983. 10