論文 除荷時における異形鉄筋の局所付着特性に関する一考察

壹岐 直之*1 · 清宮 理*2

要旨:除荷経路における異型鉄筋とコンクリート間の局所付着特性を明らかにするため 載荷実験を行った.実験結果から,除荷経路においては鉄筋に引張ひずみが残留し,コ ンクリートに圧縮ひずみが生じることを確認した.この現象は,載荷時において塑性変 形した鉄筋近傍のコンクリートが,除荷に伴なう鉄筋の収縮を拘束することが原因であ ると考察し,除荷経路におけるコンクリート拘束効果をモデル化した.このモデルを用 いた数値解析の結果は,実験による鉄筋ひずみ分布を定性的に表現することができた. +-ワード:局所付着特性,除荷経路,残留ひずみ,付着応力,すべり

1. まえがき

コンクリートと異形鉄筋の局所付着特性は, ひび割れ幅の予測や終局変形量の予測など構造 物の挙動を推定する上で重要な因子のひとつで あるが、除荷経路における局所付着特性につい て言及した論文は少ない.後藤ら¹⁾によって、 除荷後の荷重端(ひび割れ面)の鉄筋には引張 ひずみが残留し、鉄筋近傍のコンクリートには 圧縮ひずみが生じていることが報告された. 一 般的には、除荷経路での付着応力(r)-すべり(S) 関係は加力時とは異なり,非弾性的な挙動を示 すことが知られている.これまでの除荷経路で の付着特性に関する研究は、中島ら2)に代表さ れるように, *τ-S*関係の曲線形状について定性的 に評価し、載荷時とは異なった曲線形状を定式 化したものがほとんどである. 今後, 除荷経路 での付着挙動を予測するためには,鉄筋とコン クリート間の応力伝達機構を把握し、その機構 に立脚した理論を構築する必要があると考える.

本論文では、除荷経路における付着挙動を解 明するために行った付着載荷実験の結果につい て述べ、応力伝達機構について考察する.また、 この考察に妥当性について、除荷経路での付着 構成則が加力時と同じと仮定した付着モデルを 構築し、数値解析による検討を加える.

2. 載荷実験

2.1 実験方法

実験要因の組み合せを表-1に,供試体の一例 としてT-30の形状寸法を図-1に示す. コンクリ ートの形状は円筒形とし,断面の中央にD16ネ ジ節鉄筋(公称断面積A_s=1.986 cm²)を埋め込 んだ.供試体の両端には,引抜試験の載荷端で コンクリート圧縮荷重を均等にし,また,実験 条件を同一にするため,すべての供試体の両端 に長さ10D程度の非付着区間を設けた. コンク リートは鉄筋軸を鉛直にして打設した.本報で は,打設時の上側を供試体の左側として表す.

鉄筋の材質はSD295Aであり、試験の結果、降 伏応力: f_y = 395 N/mm²、弾性係数: E_s =180kN/mm² であった. コンクリートは、供試体と同じ条件 で養生した ϕ 10×20cm試験体による強度試験の 結果、圧縮強度: f_c '=44.4N/mm²、割線弾性係 数: E_c =32.4kN/mm²、割裂引張試験による引張強 度: f_r =6.5N/mm²であった.

表-1 実験要因の組み合せ

供試体の 名称	コンクリートの 直径[cm]	載荷方法	付着長[cm] (鉄筋径:D)
T-30	30	一軸引張	63.6 (40 <i>D</i>)
P-30		引抜	31.8 (20D)
T-45	45	一軸引張	63.6 (40 <i>D</i>)
P-45		引抜	31.8 (20 <i>D</i>)

*1 若築建設(株) 技術本部 技術研究所 博(工) (正会員)*2 早稲田大学 教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)



ひずみゲージの配置は図-1に示した.鉄筋の ひずみは、付着特性に及ぼす影響が最小限にな るように山尾ら³⁾の研究を参考にし、5Dの間隔 で鉄筋の表裏交互に貼り付けた.片側引抜の自 由端から5Dの区間では、鉄筋ひずみの変化が大 きいため、間隔を5/3・Dとした.コンクリートの 鉄筋軸方向のひずみは、荷重端から5Dおよび 10Dの断面において、供試体に埋め込んだモー ルドゲージ(東京測器PMS-60-2L)で計測した.

載荷方法を図-2に示す.荷重は20kN/min程度 の速度で載荷し,途中20,40,60kNで一旦除荷し, 鉄筋降伏荷重78kNまで再載荷した後,除荷した. 荷重はセンターホールロードセルで計測した. 片側引抜試験では,自由端においてコンクリー トと鉄筋の相対変位を変位計で計測した.

なお,実験方法と供試体は既報⁴⁾と同じだが, 本報はその結果の一部を再評価したものである.



2.2 鉄筋ひずみ分布

除荷経路における鉄筋ひずみの分布の一例を 図-3に示す.同図は40kNからと78kNから除荷し たときのものである.一軸引張試験(T-30,T-45) では,最大荷重時に鉄筋ひずみの最小となる位 置が供試体中央より左側にずれた.これは,鉄 筋の引抜方向とコンクリートの打設方向との関 係によるものであり,鉄筋引抜の方向が打設時 の上方向にある場合に付着が強くなるためであ る⁵⁾.本報では,供試体の左側,すなわち付着 の強い側を評価の対象とする.

図-3に示したように、除荷に伴なう鉄筋ひず みの減少について、載荷端から離れるほど減少 量が小さく、除荷後の鉄筋の残留ひずみはT-30 では供試体中央から10Dの位置、P-30では自由 端から10Dの位置で最大となり、その値は400µ 程度であった.

最大荷重時(除荷開始直前)のひずみと,除 荷後の残留ひずみの最大荷重時のひずみに対す る百分率(残留率)との関係を図-4に示す.実 験要因によって値は若干異なるが,定性的には 実験要因に関わらず同様であり,最大荷重時の ひずみ:*cp*=200~300µ程度までは*cp*の増加に伴な



って鉄筋ひずみの残留率は増加し,40~70%程度 に達した.また, ϵ_p =500~700程度以上になると 逆に鉄筋ひずみの残留率が減少し,本実験の範 囲内では,25%程度になることが判った.

2.3 コンクリート断面内の軸方向ひずみ分布 載荷荷重78 k Nからの除荷経路におけるコン クリート断面内の軸方向ひずみの分布を図-5に 示す. 同図は鉄筋の左右(もしくは上下)で計 測した値を平均したものである.



ー軸引張試験(T-30,T-45)でのコンクリート軸 方向ひずみについて,載荷時に生じていた引張 側ひずみは除荷に伴なって減少したが,鉄筋中 心から5~10cm程度までの範囲では,引張ひずみ の減少だけでなく,除荷に伴なって圧縮ひずみ が生じることを確認した.一方,引抜試験 (P-30,P-45)でのコンクリート軸方向ひずみは, 載荷時には,鉄筋中心から5cm程度より内側で は引張ひずみ(P-30の15D以外),外側では圧縮ひ ずみが生じた.除荷に伴なって,引張および圧 縮ひずみは減少したが,P-30の10D以外は,一 軸引張試験と同様に,鉄筋から5~10cm程度まで の範囲では圧縮ひずみが生じることを確認した.

コンクリート内部においても、後藤ら¹⁾が明ら かにした載荷端での状況と同様に、除荷後、鉄 筋近傍(5~10cm程度)のコンクリートに載荷軸方 向の圧縮ひずみが残留することが判った.

2.4 付着応力-すべり関係

付着応力-すべり関係の一例を図-6に示す.付 着応力とすべりの決定方法は既往の研究²⁾と同 じである.すなわち,鉄筋ひずみ ω 分布を隣接 する3点を通る放物線として補間し,鉄筋ひずみ 分布の傾きから付着応力 τ = $D/4 \cdot E_s \cdot d_{E_s}/dx$ を算 定した. すべりは, 一軸引張試験では鉄筋ひず み分布の傾きが0となる点からの鉄筋ひずみの 積分値 $S = \int \varepsilon_s dx$ とし, 引抜試験では自由端から の鉄筋ひずみ積分値に自由端のすべり(鉄筋と コンクリートの相対変位)を加えたものとした.

図-6に示したように,除荷後には付着応力が 負となり,残留すべりが生じることを確認した. 付着応力が負となるのは,載荷端側の残留ひず みが供試体中央もしくは自由端側の残留ひずみ よりも小さくなり,鉄筋ひずみの勾配が載荷時 とは逆になるためである.残留すべりが生じる のは,除荷後のコンクリート内の鉄筋に残留ひ ずみが生じるためである.

2.5 考察

異形鉄筋とコンクリートの付着機構について 考察する.載荷時については,鉄筋の抜け出し に対するコンクリートの拘束作用の結果として 付着作用が存在し,拘束作用の強さ(付着強さ) は鉄筋近傍のコンクリートの局所破壊の程度に よって決定されると考えてよいであろう⁵⁾.

筆者らは、除荷経路における付着機構も載荷 時と基本的には同じと考えている.載荷時の鉄 筋近傍のコンクリートには、鉄筋の大きなひず みに追随できないため、内部ひび割れが発生す



る.除荷経路では,鉄筋の収縮に伴なって内部 ひび割れは閉じることとなるが,コンクリート は塑性変形を生じているため,除荷に伴なう鉄 筋の収縮を,鉄筋近傍のコンクリートが拘束す ることとなる.図-7に概念を示すように,除荷 経路での鉄筋の弾性変形的な復元力と,塑性変 形後のコンクリートによる鉄筋への拘束力との, 鉄筋軸方向の釣り合いによって,局所的な付着 機構は説明できると考える.

また,鉄筋近傍のコンクリートには内部ひび 割れが生じているため,鉄筋との力の釣り合い を考える際の見掛け上のコンクリートの剛性は, ひび割れていないコンクリートの剛性よりも弱 い.除荷経路でのコンクリート拘束効果の剛性 は,内部ひび割れによって形成されるくし歯上 の片持ち梁の曲げ剛性に支配される.加力時の 鉄筋ひずみが大きくなれば,内部ひび割れの発 生範囲が広がり,片持ち梁としての曲げ剛性が 低下することとなる.このため,最大荷重時の 鉄筋ひずみがある程度以上大きくなると,コン クリートの拘束力が低下し,鉄筋の残留ひずみ が小さくなると考える.

3. コンクリート拘束効果を考慮した数値解析 3.1 除荷経路での付着モデル

除荷経路における付着モデルとして、コンク リートの拘束効果を考慮した数値解析モデルを 考案した.この付着モデルの概念を図-8に示す.

鉄筋軸に直交する面でスライスした微小な要素の変形について,任意の位置 *i* での鉄筋の弾性変形量*εs.elas*は,除荷過程前の経験最大荷重時



図-8 除荷経路での付着機構の数値解析モデルの概念

の鉄筋応力と、除荷時のコンクリートの拘束が ないとしたときの鉄筋応力の差に対応するもの とした.鉄筋は、コンクリートの除荷に伴なう 弾性変形分は自由に変形し、それ以上に変形す る場合は、除荷時のコンクリートによる拘束作 用を受け、鉄筋復元力 $E_sA_s(\epsilon_{s,elas}-\epsilon_{c,elas})$ とコンク リート拘束力 $E_cA_c\epsilon_{c,resi}$ との釣り合いによって 変形量が決定されるものとした.

ここで,先に述べたように,載荷時の鉄筋近 傍のコンクリートは損傷を受けているため、除 荷時における拘束の剛性は低下していると考え られる.また,鉄筋を拘束するコンクリートの 範囲は鉄筋近傍の限られた部分であろう. そこ で、コンクリートの拘束作用に関する弾性係数 および断面積をEc', Ac'とおいた. しかし, それ ぞれの値を単独に設定することは、鉄筋ごく近 傍でのコンクリートの挙動を実験的に確かめる 必要があり,計測機器等が付着特性に影響を及 ぼす可能性があるため、困難である、本研究で は、コンクリート 圧縮ひずみの残留する範囲が 5~10cm程度であったことから,半径10cmの円錐 形で変形すると仮定し、図-9に示す斜線部の体 積が等価となる円柱形に変換し、 A_c '=116cm²と した. また, E_c 'は, 値を変化させた数値解析と 実験結果との比較によって設定することとした.

以上のモデルを一般的な付着解析の手法⁶に 組み込み,島ら⁷⁾の付着応力-すべり-ひずみ関係 の補正式⁵⁾を使って数値解析を行った.

3.2 コンクリート拘束効果の設定および考察 除荷経路におけるコンクリートの拘束作用に 関する弾性係数*E*_c'を変化させた数値解析の結 果を,図-10に示す.同図は,鉄筋ひずみについ て実験結果と比較したものである.なお,除荷 終了時(載荷端の鉄筋ひずみ=0)は,数値解析 では収束しないため,図-10には表示していない.

E_c'をコンクリート本来の弾性係数*E_c*の1/1000 とした場合,鉄筋ひずみ分布の解析値は,除荷 経路における鉄筋ひずみ分布特有の上に凸の分 布は現れず,載荷経路における分布と同様に下 に凸となる放物線形状を示した.これは,除荷



図-9 拘束作用の影響範囲の概念



時におけるコンクリート拘束作用の剛性が小さ すぎ,拘束効果を考慮せずに付着解析を行った こととほぼ同じ結果になったのであろう.

 $E_c'=E_c/500$ の場合は、15Dおよび10D付近で上 に凸の分布が現れた.しかし、実験結果よりも 残留ひずみが全体的に小さく、載荷端のひずみ が400 μ のときの15Dの位置のひずみは444 μ であ り、実験結果の732 μ よりも小さい値であった.

 $E_c'=E_c/400$ の場合は、上に凸の分布形状を示し、 実験によるひずみ分布を比較的よく表現した. 供試体中央から15Dの位置について、除荷終了 直前のひずみは実験結果より小さな値であった が、載荷端のひずみが400 μ のときの解析値は 576 μ であり、実験値のとの差が小さくなった. $E_c'=E_c/300$ の場合は、残留ひずみが大きく、実



験結果とは異なった傾向を示した.載荷端のひ ずみが400µのとき、15Dの位置での解析による ひずみは808µとなった.

以上より,除荷時におけるコンクリートの拘 束作用に関する弾性係数は,本来のコンクリー トの弾性係数の数百分の一程度であり,本解析 モデルでは1/300~400程度が妥当と考える.

3.3 数値解析と実験結果との比較検討

解析結果の一例を、P-45について*A_c*'=116cm², *E_c*'=*E_c*/400として解析した鉄筋ひずみ分布を図 -11に、付着応力-すべり関係を図-12に示す.

コンクリート拘束効果を考慮した解析結果は, 以下の定性的な点では,除荷経路における鉄筋 ひずみ分布の実験結果の傾向と一致した.すな わち,除荷経路において鉄筋ひずみの減少量は, 載荷端に近いほど大きく,供試体中央もしくは 自由端近傍での減少量はわずかであること.除 荷終了直前において,引張ひずみが残留し,そ の値は供試体中央もしくは自由端から10~15D 付近で最大となること.載荷端側では,鉄筋ひ ずみ分布の傾きが載荷時とは逆になり,見かけ の局所付着応力が負になること、などである.

しかしながら,鉄筋ひずみの値自体や,除荷 経路における付着応力-すべり関係については, 実験結果を再現することはできなかった.実験 結果からは,載荷時の鉄筋ひずみが大きくなる と,ひずみが残留する割合は減少し,鉄筋の見 かけの復元力が大きくなることが判った.しか し,解析では,載荷時の鉄筋ひずみの大きさに かかわらず剛性の低下は一定として解析を行っ た.このことが,解析結果と実験結果が定量的 に一致しなかった原因のひとつと考える.

4. まとめ

- 除荷後の鉄筋には残留ひずみが生じ、その比率は、最大荷重時の鉄筋ひずみが200~300µ 程度までは増加し、500~700µ程度以上になる と逆に減少することが判った.
- 2) 除荷後, コンクリートには圧縮ひずみが生じ, その範囲は鉄筋より5~10cm程度であった.
- 3) 除荷経路における付着機構は,鉄筋の復元力 と塑性変形したコンクリートの拘束力との 釣り合いによって説明できると考察した.
- 上述の拘束作用を考慮した解析は、実験での 鉄筋ひずみ分布を定性的に表現することが できた。

参考文献

- 後藤幸正,大塚浩司:引張を受ける異形鉄筋周辺の コンクリートに発生するひび割れに関する実験的研 究,土木学会論文報告集,No.294, pp.85~100,1980.2
- 2) 中島 享,山本康弘:鉄筋コンクリートの付着応力度の履歴とひび割れの復元性に関する研究,土木学会論文集,No.219, pp.95~105, 1973.11
- 3) 山尾芳秀,周 礼良,岡村 甫:付着応力-すべり関係 に関する実験的研究,土木学会論文, No.343, pp.219~228, 1984.3
- 4) 壹岐直之, 清宮 理:静的繰り返し載荷が異型鉄筋の 付着特性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文 報告集, Vol.22-No.3, pp.1195~1200, 2000.7
- 5) 壹岐直之, 清宮 理: コンクリートの軸方向応力を考 慮した異形鉄筋の局所付着特性, 土木学会論文集, No.676/V-51, pp.65~76, 2001.5
- 6) 岡村 甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析 と構成則,技報堂出版, pp.160~182, 1991.5
- 7) 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, No.378/V-6, pp.165~174, 1987.2