

曲げ内半径の異なるフックの付着・定着挙動および応力伝達メカニズムの明確化

大成建設(株)(元・名古屋大学) 正会員 ○中島 達也
名古屋大学 正会員 中村 光

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、耐震設計の進歩とともに高密度配筋となる事例が増えている。鉄筋の加工・組立の効率化は、生産性向上の鍵であり、鉄筋定着部の曲げ形状は、配筋の作業効率を大きく左右する。しかし、鉄筋定着に最も関係する標準フックの規定は、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾(以下、示方書)では、50年以上前から現在まで変更されていない。そこで本研究では、上記の規定が成された当時には検討されていなかったフック部のひずみや応力分布を、数値解析により明らかにし、フックの挙動や応力伝達メカニズムを検討する。

2. 解析手法

数値解析は、3次元剛体バネモデルを用いて行った。3次元剛体バネモデルは、剛体要素間に配置したバネで対象の力学挙動を再現する数値解析手法である。コンクリートは、Voronoi分割でランダム形状を有する剛体要素の各境界面にバネを配置することでモデル化した。鉄筋は、梁要素の断面を分割したファイバー要素でモデル化し、コンクリート要素と梁要素は図2.1に示すリンク要素を介して応力を伝達する。Farooq²⁾は、リンク要素に図2.2に示す付着応力-すべり関係を導入することで、異形鉄筋を節までモデル化したメゾスケール解析と同様の鉄筋直線部における付着挙動ならびに付着ひび割れ進展挙動を再現可能であることを示している。また、森、中島³⁾は、同解析手法で半円形フックの引抜試験の再現解析を行い、フック部のひずみ進展挙動を再現可能であることを示している。その他の構成モデルの概要は、参考文献^{2,3)}を参照して頂きたい。

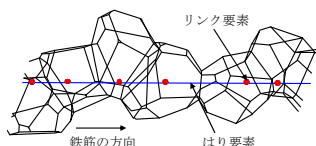


図 2.1 コンクリートと鉄筋の応力伝達モデル

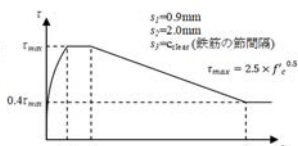


図 2.2 付着応力-すべり関係

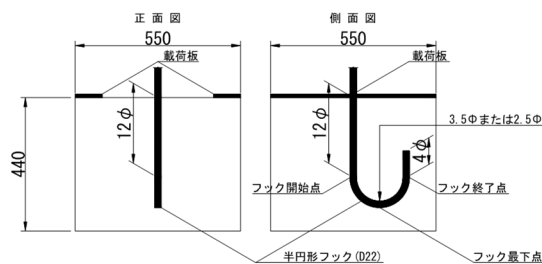


図 3.1 供試体諸元

3. 解析概要

本解析の供試体諸元を図3.1に示す。供試体サイズは、550×550×440mmとし、鉄筋(D22)の埋め込み深さは12φとした。フックの曲げ内半径は、示方書によると、異形棒鋼を用いた軸方向鉄筋のフックではSD395で3.5φ以上であるが、施工性の観点でフックの曲げ内半径の縮小化が求められていることから、3.5φ、2.5φの2ケースで解析を実施した。折り曲げた後の長さは4φとした。コンクリートの圧縮強度は31.2N/mm²、鉄筋の降伏応力は1,031N/mm²、ヤング係数は2.01×10⁵ N/mm²とした。フック部の局所的な付着強度は、異形鉄筋を想定し14.0 N/mm²とした。フック部に十分な応力を伝達するため、フック部以前の直線部(12φ)は、丸鋼程度の付着強度とした。鉄筋の引抜きは、供試体上端部のリンク要素(以下、載荷点)に強制変位を与え、供試体上面に固定した載荷板要素で支持することで再現した。

4. 解析結果

応力-すべり関係を図4.1に示す。縦軸は、鉄筋の引張応力を示し、横軸は、フック開始点(図3.1)のすべり量を示す。引張応力が300N/mm²(ひずみ1,500μ)程度までは、両ケースで違いは確認できないが、それ以降

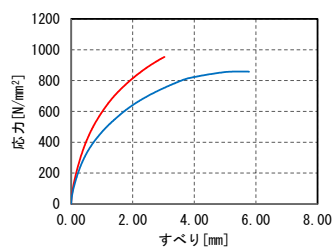


図 4.1 応力-すべり関係

キーワード 付着, 定着, フック, 3次元剛体バネモデル, 引抜解析, 曲げ内半径

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 土木設計部橋梁設計室 TEL:03-5381-5297

は、引張応力が大きくなるほどすべり差が大きくなり、引張応力が 800N/mm^2 (ひずみ $4,000\mu$) に達すると、すべり差は 2mm 程度となり、曲げ内半径 3.5ϕ の方がすべり量が小さく、定着性能が高いことが分かる。

鉄筋の軸ひずみ分布および曲率分布を図 4.2 および図 4.3 に示す。x 軸は、荷重点から鉄筋軸に沿った距離を示し、y 軸は、鉄筋の軸ひずみ、および曲率を示す。それぞれ、荷重点ひずみが $1,000\mu$, $2,000\mu$, $3,000\mu$, および $4,000\mu$ での分布を示す。軸ひずみは、正の値が引張、負の値が圧縮を示し、曲率は、正の値がフック外縁側に凸となる変形、負の値がフック内縁側に凸となる変形を示す。3本の縦線は、左からフック開始点、最下点、および終了点 (図 3.1) の位置を示している。

軸ひずみは、荷重点ひずみ $3,000\mu$ では、両ケースでフック開始点から鉄筋端部にかけて徐々に減少していき、大きな違いは確認できない。しかし、荷重点ひずみ $4,000\mu$ では、曲げ内半径 2.5ϕ のケースでフック開始点の軸ひずみが局所的な降伏の影響で増加し、荷重点ひずみの2倍以上となる。この結果は、曲げ内半径が小さい場合、降伏応力の半分程度の鉄筋応力でもフック部には早期に局所的な降伏が発生する可能性があることを意味する。また実際にはフック部は塑性加工されているため、より早期に降伏の影響を受ける可能性もあると考えられる。

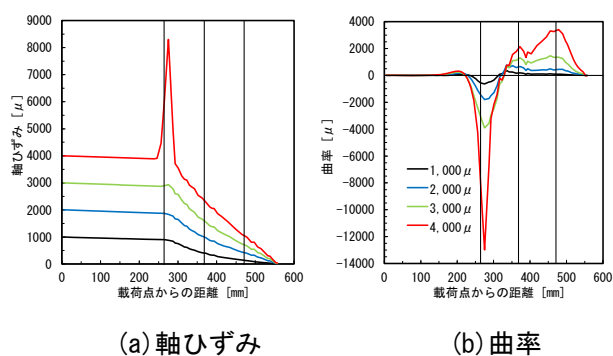


図 4.2 曲げ内半径 2.5ϕ

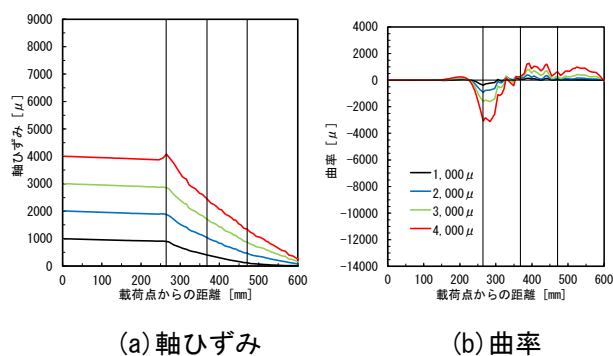
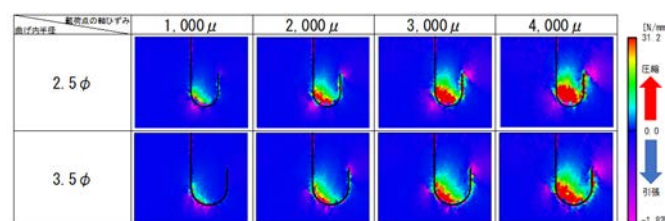


図 4.3 曲げ内半径 3.5ϕ

表 4.1 鉛直応力分布



3.5ϕ のケースでも局所的な増加は確認できるが、荷重点ひずみから 100μ 程度の増加に留まる。

曲率は、両ケースでフック開始点近傍からフック最下点近傍まではフック内縁側が凸となる変形を生じ、フック最下点近傍から鉄筋端部まではフック外縁側が凸となる複雑な変形を生じることが分かる。曲げ内半径 2.5ϕ のケースの曲率は、 3.5ϕ のケースと比べて明らかに大きく、局所的な変形がより顕著になることが分かる。

コンクリート内部の鉛直方向応力分布を表 4.1 に示す。応力は、 1.82N/mm^2 (引張) $\sim 31.2\text{N/mm}^2$ (圧縮) の範囲で示している。上から、曲げ内半径 2.5ϕ と 3.5ϕ のケース、左から、荷重点ひずみが $1,000\mu$, $2,000\mu$, $3,000\mu$, および $4,000\mu$ での応力分布を示す。荷重点の軸ひずみが $2,000\mu$ を超えると、曲げ内半径 2.5ϕ のケースでは、 3.5ϕ のケースに比べて、フック内縁側の領域全体で大きな応力を負担し、圧縮強度 (31.2N/mm^2) に達する部分が多くなることも分かる。

5. 結論

本研究では、曲げ内半径の異なるフックの引抜解析を行い、その違いがフック部のひずみ進展挙動や応力伝達挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、曲げ内半径が小さいと、フック部のひずみが早く進展するとともに局所的な曲げ変形挙動が大きくなること、フック内縁側のコンクリートに応力が集中し、コンクリート強度によっては、圧縮強度に達する部分が多くなることが分かった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2017
- 2) Farooq, U., Nakamura, H., Yamamoto, Y., Miura, T.: Proposal of bond behavior simulation model by using discretized Voronoi mesh for concrete and beam element for reinforcement, Cement and Concrete Composites 110, 2020
- 3) 森 大輔, 中島 達也, 中村 光, 三浦 泰人：端部にフックを有する重ね継手部の数値解析的評価, 日本コンクリート学会年次論文集, 2022