

## 接合要素を用いた異形鉄筋とコンクリート間の付着特性再現性の検討

法政大学大学院 ○学生会員 南波 謙太 正会員 藤山 知加子  
阪神高速道路株式会社 正会員 新名 勉

### 1. 研究目的

鉄筋コンクリート構造を対象とした FEM における異形鉄筋のモデル化は、線要素や分散鉄筋モデルが用いられる場合が多く<sup>1)2)</sup>、また異形鉄筋の幾何形状を直接モデル化する場合<sup>3)</sup>がある。線要素や分散鉄筋モデルは、鉄筋とコンクリートは完全付着と仮定することが多い。一方、形状を直接モデル化する場合は、付着性状を精度よく評価することが可能だが<sup>3)</sup>、メソスケール解析であるため、RC 床版等を対象としたマクロスケール解析に用いることは困難である。そこで本研究では、異形鉄筋の付着特性をマクロスケール解析に適用させることを目標とし、機械的な付着-すべり性状を接合要素によってモデル化することを試みた。具体的には、異形鉄筋の引抜き試験<sup>4)</sup>や両引き試験<sup>5)</sup>を対象にした再現解析を行い、接合要素特性値を検討した。

### 2. 異形鉄筋モデル化の概要

本研究は解析コード COM3D を用いた。異形鉄筋のモデルは節やリブを簡略化し、円形断面ではなく正方形断面とした細長い長方形とした(図1)。鉄筋要素とコンクリート要素の境界面に設ける接合要素のモデル<sup>2)</sup>を図2に示す。作用力が初期付着強度を超えた場合、接合要素は close mode から open mode に移行し、open mode ではモールクーロンの摩擦則に基づく。本研究における接合要素の特性値を表1に示す。摩擦係数は 0.6 と 1.0 で検討した。初期付着強度はコンクリート標準示方書(5.2.2)に示されるコンクリートの付着強度式(1)<sup>6)</sup>より算出した。

$$f_{bok} = 0.28f'_{ck}{}^{2/3} \cdots \text{式(1)}$$

ここに、 $f_{bok}$ : 付着強度、 $f'_{ck}$ : コンクリート圧縮強度である。上式の算出値と、6, 10, 20 倍にした値を用いて初期付着強度を検討した。

### 3. 引抜き試験の再現解析

玉井らによる実験<sup>4)</sup>を対象に異形鉄筋引抜き試験の再現解析を行った。供試体1を対象とし再現モデルを図3に示す。実験ではコンクリートにひび割れが多く発生するように供試体は長いもの(2700mm)としている。コンクリートの圧縮強度は  $45\text{N/mm}^2$ 、鉄筋は SD490、径が 19.5mm である。初めに初期付着強度を比較について荷重-平均ひずみ関係を図4に示す。平均ひずみは両端部における鉄筋の相対変位より算出した。Free bar(鉄筋単体)を除き、いずれも荷重の増加につれて初期剛性から傾きが変化した。これは鉄筋とコンクリートの付着切れによると考えられる。式(1)算出値を用いた F6-B1 は比較的早期に付着切れが発生したため、接合要素の初期付着強度には、式(1)算出値は小さい値であると考えられる。F6-B10 と F6-B20 はほぼ同じ挙動を示し、初期剛性からの傾きの変化は緩やかであった。これは鉄筋とコンクリート間を剛結状態としたケースと同様の挙動を示したため、傾きの変化の原因は付着切れではなく、コンクリートのひび割れ発生であると考えられる。次に摩擦係数

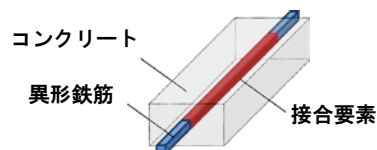


図1 本解析における異形鉄筋と接合要素

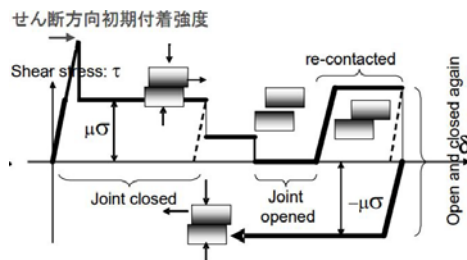


図2 鉄筋・コンクリート間の接合要素モデル<sup>2)</sup>

表1 接合要素 特性値

| case   | Friction | Initial Bond        |
|--------|----------|---------------------|
| F6-B1  | 0.6      | $f_{bok}$           |
| F6-B6  | 0.6      | $f_{bok} \times 6$  |
| F6-B10 | 0.6      | $f_{bok} \times 10$ |
| F6-B20 | 0.6      | $f_{bok} \times 20$ |
| F10-B6 | 1.0      | $f_{bok} \times 6$  |

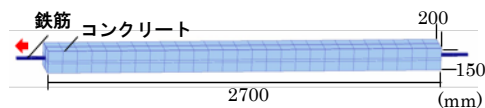


図3 引抜き試験再現解析モデル

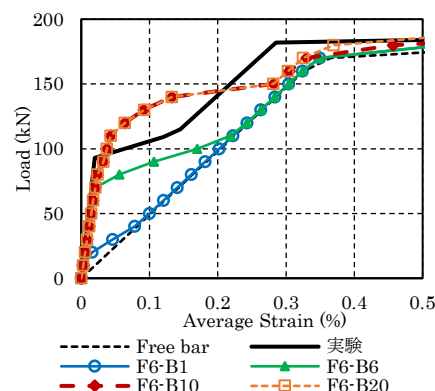


図4 荷重-平均ひずみ関係 (初期付着強度の比較)

とひずみ算出方法の比較結果を図5に示す。初期付着強度は式(1)算出値の6倍とした。F6-B6とF10-B6の比較により、ほぼ同じ挙動を示したことから、本解析では摩擦係数の影響は小さいと考えられる。F6-B6Cはひずみを解析モデル中央に位置する一つの鉄筋要素から算出した。F6-B6Cは実験の付着切れ荷重を精度よく再現したと言える。以上より接合要素による付着特性値について、摩擦係数は0.6、初期付着強度は式(1)算出値の6倍程度の値を用いることが妥当であると考えられた。

#### 4. 両引き試験の再現解析

飯塚らによる実験<sup>5)</sup>を対象に異形鉄筋両引き試験の再現解析を行った。シリーズIにおけるコンクリート圧縮強度 $f'_c=32.7, 55.8\text{N/mm}^2$ の供試体<sup>5)</sup>を対象とし再現解析モデルを図6に示す。供試体は中間に横ひび割れが発生しない長さ(150mm)としている。鉄筋は高降伏強度の異形PC鋼棒(D25, 降伏強度 $1013\text{N/mm}^2$ )を用いた。解析モデルの付着特性について、摩擦係数は0.6、初期付着強度は式(1)算出値の6, 10倍とした。付着応力-すべり関係を図7に示す。付着応力は式(2)<sup>5)</sup>より算出した。

$$\tau = As(\sigma_{s1} - \sigma_{s0})/ul \cdots \text{式(2)}$$

ここに、 $As$ ,  $u$ は鉄筋の公称断面積と公称周長、 $\sigma_{s0}$ ,  $\sigma_{s1}$ は供試体中央および載荷端での鉄筋応力、 $l$ は片側付着長(75mm)である。図7より実験は初期剛性から緩やかに最大付着応力達しているが、解析はいずれも初期剛性のまま最大付着応力に達した。これは付着切れが徐々に起きる現象を再現できていないと考えられる。また圧縮強度 $f'_c=55.8\text{N/mm}^2$ について比較すると $f'_c=55.8\text{-B6-F6}$ と $f'_c=55.8\text{-B10-F6}$ は実験より少ないすべり量で最大付着応力に達したが、その最大値は概ね一致した。しかし、圧縮強度 $f'_c=32.7\text{N/mm}^2$ では最大付着応力は実験と解析で $1\text{N/mm}^2$ 以上差があった。これは、実験ではコンクリートのひび割れ発生は抑制されているのに対して、解析では図8に示すように鉄筋周りのコンクリートにひび割れ発生に相当する $200\mu$ 以上のひずみが分布したため、接合要素による付着力が最大に達する前に鉄筋がすべったと考えられる。また、どの解析ケースも最大付着応力時のすべり量が実験より小さいため、ポストピークにおいてすべり量に対する付着応力が実験より小さく、 $f'_c=55.8\text{-B6-F6}$ では急激な付着応力の減少がみられた。以上より接合要素において、最大付着応力までの剛性の変化やポストピークの挙動について更なる検討が必要であると考えられる。

#### 5. 結論

本研究ではCOM3Dにおける接合要素を用いて異形鉄筋の付着特性の再現を検討した。結果、摩擦係数は0.6、初期付着強度は式(1)算出値の6倍程度とすることにより、実験<sup>45)</sup>における付着切れ発生荷重や最大付着強度を再現することができた。しかし、最大付着応力までの剛性やポストピークの挙動について更なる検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 堀田久人, 冨昌根: コンクリートの三軸応力-ひずみ特性を考慮した鉄筋コンクリート部材の三次元有限要素曲げ強度解析, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp115-121, 2000, 4
- 2) 松村寿男, 上村明弘, 藤山知加子, 前川宏一: COM3Dを用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労損傷解析, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度)
- 3) 武藤信太郎, 中村光, 田辺忠顕, スリソロ ワラポン, 李 相勲: メソスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着解析, 応用力学論文集, Vol7, pp767-774, 2004, 8
- 4) 玉井真一, 島 弘, 出雲淳一, 岡村 甫: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係: 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp239-247, 1987.2
- 5) 飯塚敬一, 檜貝 勇, 斉藤成彦, 高橋良輔: かぶり厚の影響を考慮し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 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp280-296, 2011
- 6) 公益社団法人 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2007

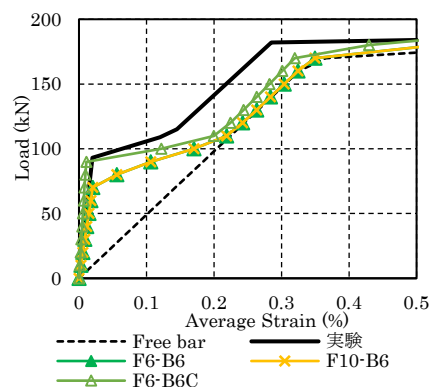


図5 荷重-平均ひずみ関係  
(摩擦係数, 算出位置の比較)

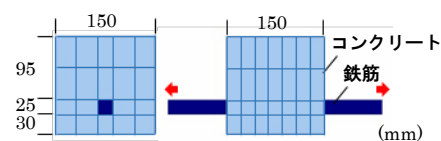


図6 両引き試験再現解析モデル

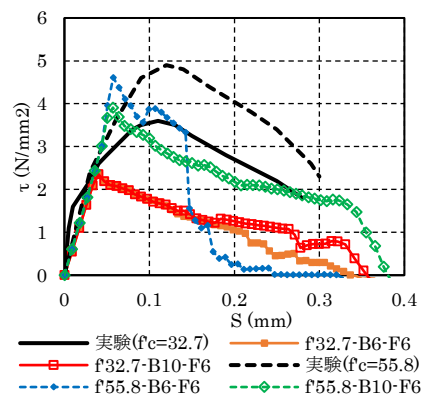


図7 付着応力-すべり関係

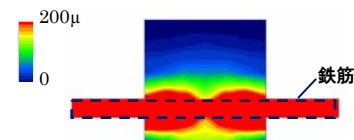


図8 鉄筋方向断面ひずみコンター