

3次元非線形 FEM 解析による RC 部材のひび割れ性状に関する解析的検討

鹿島建設(株) 正会員 ○十川貴行 曾我部直樹 玉野慶吾 平 陽兵

1. はじめに

筆者らは、RC 部材の両引き実験にて、鉄筋の降伏強度を超える引張力を载荷し、除荷した後の残留ひび割れ幅と除荷前の鉄筋ひずみとの間に一定の相関関係があることを確認し、地震後に残留したひび割れ幅から作用した断面力の大きさや、RC 部材の損傷の程度を評価できる可能性を示唆したり。ただし、残留ひび割れ幅と除荷前の鉄筋ひずみとの関係には、鉄筋強度など様々な要因が影響すると考えられ、それらを検討するには、解析による手法が有効であると思われる。本稿では、3次元非線形 FEM 解析によって RC 部材の両引き実験の再現解析モデルを検討した内容について報告する。

2. RC 部材の両引き実験

図-1 に解析対象とした試験体を示す。試験体は、断面 $140 \times 140 \text{mm}$ 、長さ $2,500 \text{mm}$ のコンクリートの中心に、D32 ネジ節鉄筋(SD345)を配置した RC 部材である。試験体の両端から突出している鉄筋に引張力を与えることで、試験体に対して引張力の载荷と除荷を繰り返した。試験体の伸びは、両端を標点として設置した変位計によって計測した。ひび割れ幅は、試験体の全長にわたって連続的に設置したパイ型変位計(標点距離 100mm)によって計測した。鉄筋ひずみは、鉄筋の表面に FBG 方式の光ファイバセンサを設置し、OFDR 法²⁾によって空間分解能 0.6mm 、計測間隔 0.6mm で計測した。

3. 解析概要

解析は、汎用解析プログラム DIANA10.5 を用いて実施した。解析モデルは図-2 に示すように、対称性を考慮して試験体の半断面を対象として、鉄筋、コンクリートともにソリッド要素でモデル化した。鉄筋は、節の高さ程度の要素長で、節の形状を含めてモデル化した。また、コンクリートについては、コンクリート表面における要素長が 10mm となるように分割した。コンクリートには回転ひび割れモデルを適用し、圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係はコンクリート標準示方書³⁾に基づき設定した。鉄筋には Von Mises 塑性モデルを適用し、応力-ひずみ関係はひずみ硬化点を考慮したトリリニアモデルとした。鉄筋とコンクリートの間には、両者の接触を考慮するために界面要素を設けた。鉄筋からコンクリートが離れる方向とずれる方向の変形を拘束しないようにするため、界面要素の引張、せん断方向の剛性を十分小さな値とした。一方、コンクリートが鉄筋に押し付けられる方向となる界面要素の圧縮方向の剛性については、後述するように実験のひび割れ性状を再現できる大きさを水準とし、実験結果と照合した。

4. 解析結果

図-3 に鉄筋の引張応力度が 180N/mm^2 に達した時点における実験と、界面要素の圧

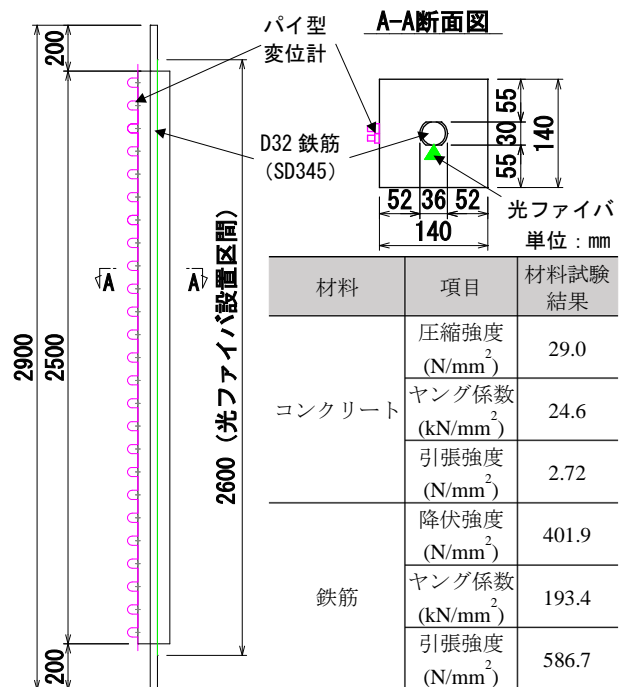


図-1 解析対象とした試験体

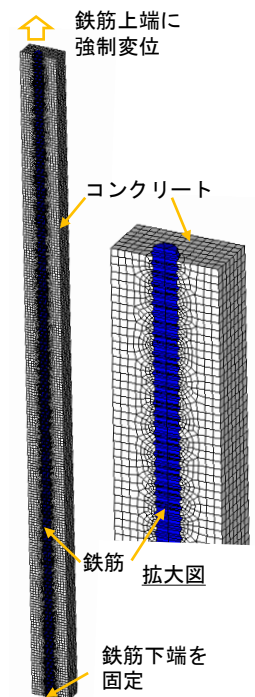


図-2 解析モデル

キーワード 3次元非線形 FEM 解析, RC 部材, 両引き実験, ひび割れ幅

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

縮方向の剛性が異なる2つの解析ケースのひび割れ図を示す。界面要素の圧縮剛性を $100,000\text{N/mm}^3$ としたケースでは、実験に比べひび割れ本数が多くなったのに対し、圧縮剛性を $1,000\text{N/mm}^3$ としたケースでは、実験で観測されたひび割れ性状と概ね一致した。鉄筋とコンクリートの界面付近、特に節と節の間では、粗骨材を含まないモルタル分となっていることや微細な空隙が生じていることなどによって、周囲のコンクリートよりも局所的に弱部となっている可能性がある。そのため、界面要素の圧縮剛性を剛となる大きさよりも小さめに設定することで、同部分における応力の伝達状況が再現され、ひび割れ性状が実験と近似したものとする。以下では、界面要素の圧縮剛性を $1,000\text{N/mm}^3$ とした解析結果について考察する。

図-4に、各ステップにおける鉄筋ひずみとひび割れ幅の分布図を示す。鉄筋が降伏する前の鉄筋応力度 345N/mm^2 時点では、鉄筋ひずみとひび割れ幅ともに実験と解析が精度よく一致した(図-4(a))。鉄筋降伏後の試験体の伸び 8.5mm 、 25.9mm 時点では、実験において、鉄筋ひずみが $15,000\mu$ 程度に達するまで、ひび割れ位置の鉄筋ひずみが局所的に増加しつつ、ひび割れ幅が増加し(図-4(b))、その後は、鉄筋ひずみの最大値の増加が鈍化する一方で、ひび割れ位置を中心として降伏領域が拡大することで、ひび割れ幅が増加する様子(図-4(c))が確認された。これに対して、解析では局所的な鉄筋ひずみの値については、実験との相違がみられるものの、鉄筋ひずみの増加に対してひび割れ付近を中心として降伏領域が拡大する状況や、それに伴ってひび割れ幅が増加する傾向が示されており(図-4(c))、実験結果を概ね再現できていると評価できる。

5. まとめ

RC部材の両引き実験を対象に、3次元非線形FEM解析による再現解析を実施した結果、鉄筋の降伏後を含め、鉄筋ひずみとひび割れ幅の挙動を概ね再現できたことを確認した。今後、同解析モデルを用いて、残留ひび割れ幅と除荷前の鉄筋ひずみとの関係に影響する要因について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 十川貴行ほか：RC部材における残留ひび割れ幅に基づく鉄筋ひずみの推定に関する基礎的検討，土木学会第76回年次学術講演会，V-241，2021。
- 2) 井川寛隆ほか：OFDRを用いた長ゲージFBGによる分布計測の研究，日本機械学会論文集(A編)，72巻724号，2006。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017。

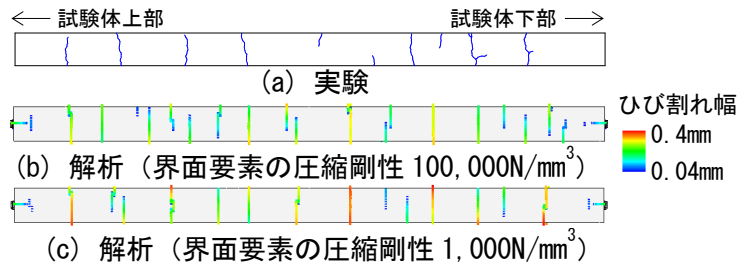


図-3 鉄筋引張応力度 180N/mm^2 時点のひび割れ図

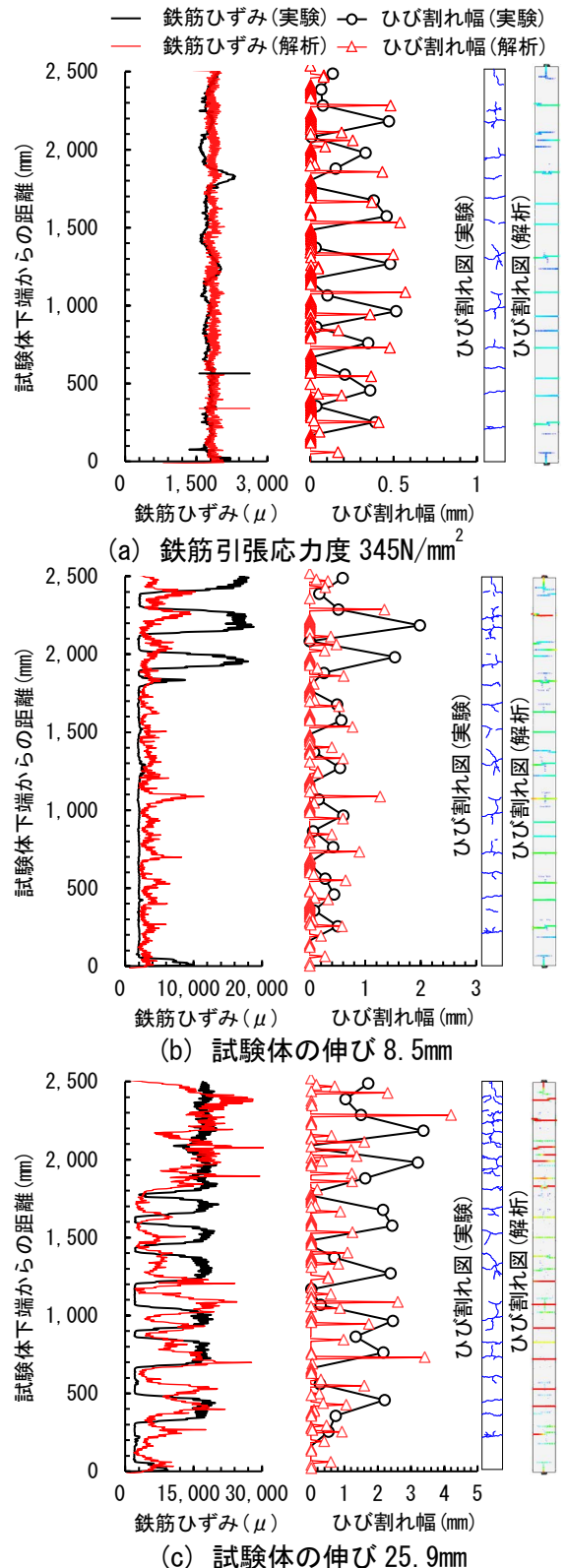


図-4 鉄筋ひずみとひび割れ幅分布