

鉄筋の幾何形状を考慮した RC はりの 3 次元破壊シミュレーションに関する研究

茨城大学 学生会員 ○星 裕斗
茨城大学 学生会員 相馬 悠人
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

土木構造物の破壊を精度よく予測することが求められている。土木構造物の安全性において RC の破壊挙動が重要であることから、RC の破壊を定量的に評価することを目的とした数値解析の研究が行われている。RC の破壊挙動にはコンクリートと鉄筋の付着挙動が大きく影響を及ぼすため、玉野ら¹⁾は付着をモデル化した RC はりの数値解析を行っている。しかし、実際のコンクリートと鉄筋の付着挙動は鉄筋径やかぶり厚等によって異なることから、あらゆる条件に対応した付着のモデル化は困難である。

そこで本研究では、付着のモデル化をせず、コンクリートの材料モデルに破壊力学に基づく等方性損傷モデル²⁾を、鉄筋の材料モデルに von-Mises 弾塑性モデルを採用し、鉄筋の表面形状を考慮した数値解析を行って RC はりの破壊挙動を再現することを目的とする。また、異形鉄筋と付着挙動が異なる丸鋼を用いた RC はりの実験を行い、本解析手法における丸鋼を用いた場合の破壊進展の再現性を検討する。

2. 数値解析手法

2. 1. 鉄筋の材料モデル

鉄筋のひずみは弾性ひずみと塑性ひずみに加算分解され、応力-ひずみ関係は次式で表される。

$$\sigma = c : \varepsilon = c : (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (1)$$

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は全ひずみテンソル、 ε^e は弾性ひずみテンソル、 ε^p は塑性ひずみテンソルである。

鉄筋の材料モデルには、von-Mises 弾塑性モデルを用いる。降伏条件には非線形等方硬化則を採用し、降伏関数 f は次式で表される。

$$f = \sigma_v - \sigma_{y0} - Q (1 - e^{-bp}) \quad (2)$$

ここで、 σ_v は von-Mises 応力、 σ_{y0} は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみ、 Q と b は非線形硬化のパラメータ

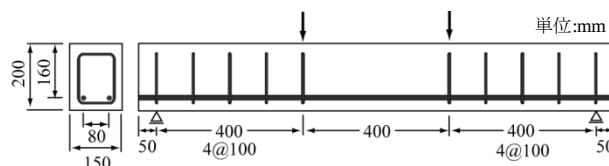


図-1 試験概要

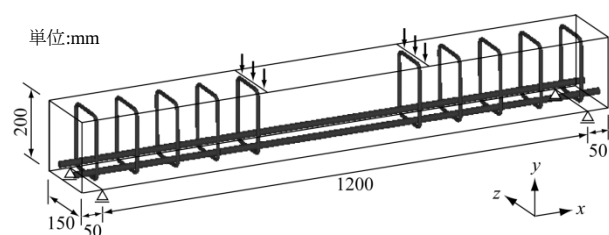


図-2 解析モデル

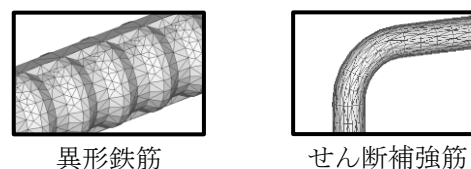


図-3 主筋とせん断補強筋のメッシュ分割

表-1 材料パラメータ

鉄筋					コンクリート				
E	ν	σ_{y0}	Q	b	E	ν	κ_0	G_f	k
200 GPa	0.3	360 MPa	250 MPa	20	29 GPa	0.2	0.0001	0.1 N/mm	20

である。

2. 2. コンクリートの材料モデル

コンクリートの材料モデルに、等方性損傷モデルを適用する。フックの法則にスカラー変数 D を用いて次式で表される。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷の度合いを $0 \leq D \leq 1$ の値で表す損傷変数である。

コンクリートの損傷判定には、修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ε_{eq} を用いる。等価ひずみは次式で表される。

キーワード 鉄筋コンクリート, 異形鉄筋, 丸鋼, 損傷モデル, 3次元破壊シミュレーション

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL. 0294-38-5004 FAX. 0294-38-5280

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1 \right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (4)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第1不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。

変形履歴の最大等価ひずみ κ の値が破壊発生ひずみ κ_0 の値以上のとき、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表される。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (5)$$

ここで、 h_e は要素長さ、 E はヤング率、 G_f は破壊エネルギーである。

3. 実験結果と解析結果の比較と考察

3. 1. 4点曲げ試験の概要

試験体を図-1に示す RC はりとした。せん断補強筋には $\phi 9$ の丸鋼を用い、主筋に異形鉄筋 D16 を用いた試験体と $\phi 16$ 程度の丸鋼を用いた試験体の4点曲げ試験を行った。曲げ試験は荷重制御で2 kN/minで载荷した。

3. 2. 解析モデル

数値解析に用いる解析モデルを図-2に示す。試験体は図中の x 方向と z 方向に対称であるため、試験体を4分割した領域を数値解析の対象領域とし、図中の矢印の向きに強制変位12 mmを480ステップで与えた。解析モデルは、10万節点、70万要素程度とし、モデルのメッシュは図-3のように異形鉄筋のリブと節、せん断補強筋の曲面が表現されるよう分割した。材料パラメータは表-1に示す。

3. 3. 実験結果と数値解析結果の比較と考察

表面ひび割れの実験結果と解析結果を図-4に、荷重－変位関係を図-5に示す。異形鉄筋においては表面ひび割れ、荷重－変位関係ともに実験結果を概ね再現できた。丸鋼の実験結果については、異形鉄筋の結果と大きく異なるものとなった。これは、丸鋼の RC はりの試験では主筋が滑って塑性化せずに破壊に至ったことが原因である。本解析はコンクリートと鉄筋が節点を共有し、鉄筋周辺のコンクリート要素が損傷することで、徐々に付着力を失う様子を表現している。そのため、異形鉄筋のように節があることで滑りが抑制される場合は精度よく再現できるが、丸鋼のように付着力が弱く主筋が滑る場合の再現には対策を講じる必要があると思われる。

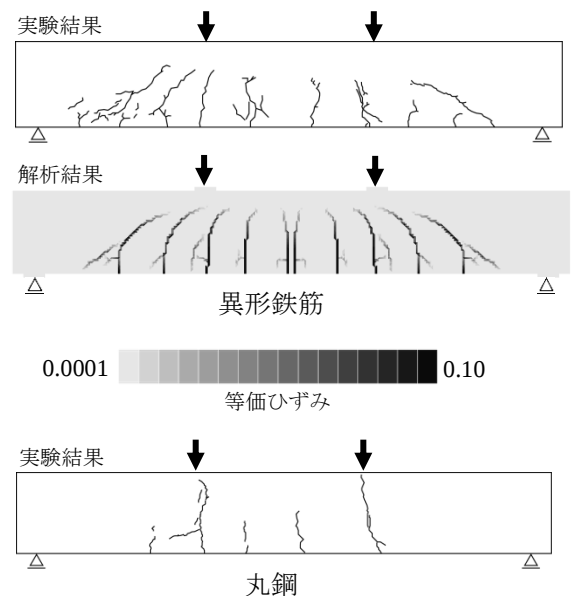


図-4 RC はりの実験結果と解析結果

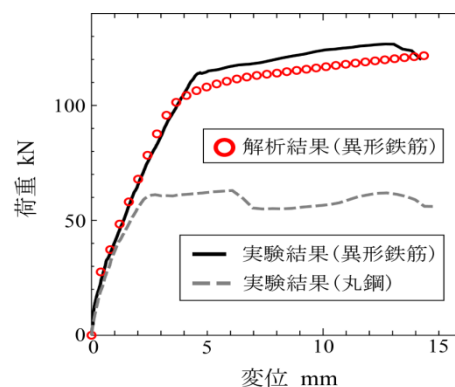


図-5 荷重－変位関係

4. おわりに

コンクリートに破壊力学に基づく等方性損傷モデル、鉄筋に von-Mises 弾塑性モデルを用いた数値解析により、異形鉄筋においては RC はりの破壊挙動を精度よく再現できた。丸鋼の RC はりのように主筋が滑る場合の再現については今後の課題とする。

参考文献

- 1) 玉野慶吾, 中村光, 上田尚史, 国枝稔: RCはり部材に対する曲げひび割れ進展挙動の解析的評価, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.1, 76-91, 2014.
- 2) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 樫山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2013.