

ひび割れの再接触を考慮した損傷モデルによる 鉄筋コンクリートはりのポストピーク挙動の再現

茨城大学 学生会員 ○河地 陽太 茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリート構造物のポストピーク挙動の検討は、東日本大震災のような大規模災害時における構造物の安全性を考えるうえで非常に重要である。RC はりの破壊力学挙動を包括的に把握するため、現在までに多くの研究が行われてきた。例として、剛体ばねモデルを用いた数値解析により、ポストピーク挙動を含む曲げ破壊型 RC はりの破壊力学挙動を再現した研究が報告されている¹⁾。一方で、非線形有限要素解析により、ポストピーク挙動を精度よく再現した研究は見当たらない。

そこで、本研究では車谷らが提案した損傷モデルを用いた非線形有限要素解析に新たなモデル化を加えることで、曲げ破壊型 RC はりのポストピーク挙動を再現することを試みた。具体的には、界面の摩擦接触を考慮した損傷モデルに、コンクリート要素の引張・圧縮判定を導入した。引張と圧縮のそれぞれに対して損傷変数を定義することで、引張から圧縮に転じた際に生じるひび割れの再接触を考慮した解析を行った。

2. コンクリートと鉄筋の材料モデル

鉄筋コンクリートの破壊力学挙動を 3 次元で詳細に再現するには、コンクリートと鉄筋それぞれに合った材料モデルを与える必要がある。

コンクリートの材料モデルの構成則はフックの法則にスカラー変数 D を用いた次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ はコーシーの応力テンソル、 \mathbf{c} は弾性係数テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、 D は損傷変数である。

損傷モデルでは、ひずみテンソルをスカラー値に変換した等価ひずみを用いる。本研究では、修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ε_e を用いる。

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

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひ

キーワード 曲げ破壊, 鉄筋コンクリートはり, ひび割れの再接触, ポストピーク挙動, 界面

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 : 0294-38-5162 E-mail : 18t5016f@vc.ibaraki.ac.jp

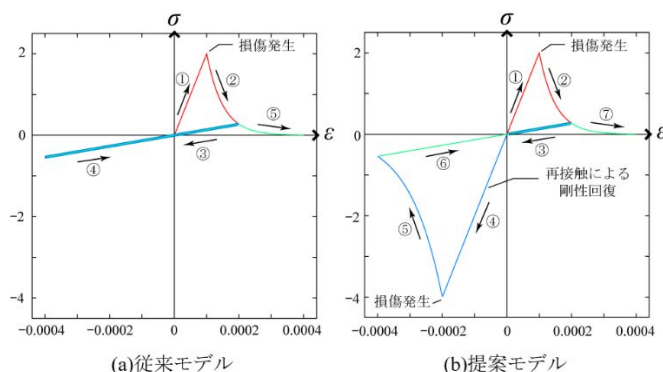


図-1 応力-ひずみ関係

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。等価ひずみ ε_e が破壊発生ひずみ ε_0 以上のとき、損傷変数 D は次式で表される。

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} \exp\left\{-\frac{E\varepsilon_0}{G_f} (\varepsilon_e - \varepsilon_0) h_c\right\} \quad (3)$$

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

本研究では、体積ひずみ ε_v の正負によって、現在のコンクリート要素の状態が引張または圧縮であるかを簡易的に判定する。体積ひずみ ε_v による引張・圧縮判定を導入し、引張時と圧縮時の損傷変数をそれぞれ計算することで、引張から圧縮に転じた際のひび割れの再接触を考慮する。界面については、紙面の都合上省略するが、詳細は文献²⁾を参考されたい。

鉄筋の構成モデルには、非線形等方硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを適用する。

3. 提案モデルの検証例題

本節では、はじめに簡単な検証例題を設定して、従来の損傷モデルと提案モデルの応力-ひずみ関係の違いを示す。解析対象は、1 辺 1000 mm の立方体要素である。この有限要素モデルに対して、1 軸引張解析、1 軸圧縮解析、1 軸引張解析を連続して行い、応力-ひずみ関係の軌跡を確認する。

コンクリートの材料パラメータについて、検証用の

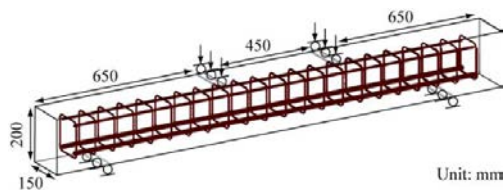


図-2 曲げ破壊型 RC はりの寸法と荷重・境界条件

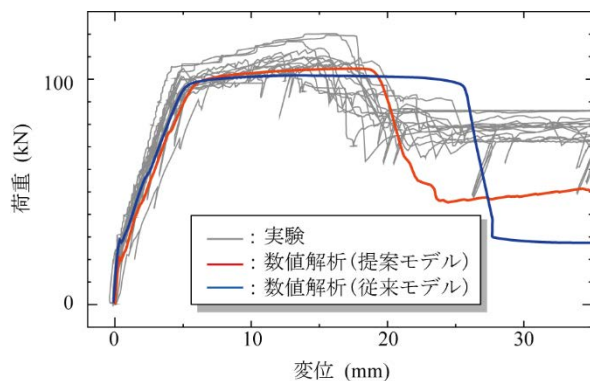


図-3 荷重-変位曲線

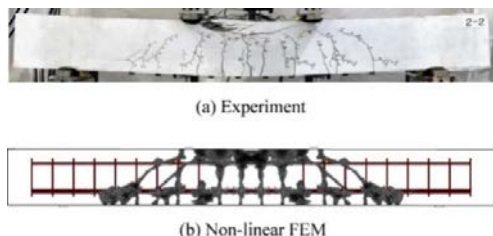


図-4 ひび割れ分布図

ため、ポアソン比 ν は 0.2, ヤング率 E は 20 GPa, 圧縮引張強度比 k は 2, 破壊発生ひずみ ε は 0.0001, 破壊エネルギー G_f は 0.1 N/mm とした。

解析結果として、応力-ひずみ関係を図-1 に示す。従来モデルでは、引張から圧縮に転じた際に、剛性は回復しない。一方で、ひび割れの再接触を考慮した提案モデルでは、引張から圧縮に転じた際に、剛性が回復していることがわかる。

3. 実験結果と解析結果の比較

本研究では、文献³⁾の曲げ破壊型 RC はりの実験結果を数値シミュレーションによる再現対象とする。試験体の寸法および荷重・支持条件を図-2 に示す。4点曲げ試験の対称性を考慮し、1/4 モデルを解析対象とする。

鉄筋の材料パラメータは、引張解析を行い、引張試験とのキャリブレーションにより、材料パラメータを同定した。コンクリートの材料パラメータについて、まずポアソン比は一般的に用いられる 0.2 とした。その他のパラメータは、文献²⁾の材料試験結果とコンクリート

のとり得る値の範囲からヤング率 E は 20 GPa, 圧縮引張強度比 k は 10, 破壊発生ひずみ ε は 0.0001, 破壊エネルギー G_f は 0.1 N/mm とした。界面の材料パラメータに関しては、既往の研究を参考に設定した。

従来モデルと提案モデルの 2 つを用いて曲げ破壊型 RC はりを対象に非線形有限要素解析を実施した。荷重-変位関係を比較した結果を図-3 に示す。従来のモデルでは、10 mm 程度までしか荷重-変位曲線を再現できていないのに対して、界面と再接触を考慮した提案モデルでは、最大荷重を過ぎた 20 mm 程度まで荷重-変位曲線を精度よく再現できていることがわかる。さらに、実験と数値解析において、ポストピークにおけるひび割れ分布を比較した結果を図-4 に示す。数値解析から得られるひび割れ分布を見ると、上縁で生じる圧縮破壊を含めて、実験結果と同様のひび割れ分布が再現されている。

4. おわりに

本研究では、界面とひび割れの再接触を考慮した非線形有限要素解析を行った。ひび割れ分布の比較を行った結果、ポストピーク後に上縁で生じる圧縮破壊を含めたひび割れ分布を再現できることを示した。荷重-変位曲線の比較を行った結果、従来モデルよりもポストピーク挙動の再現性が高いことを示した。

今回は、ポストピーク挙動を含めた曲げ破壊型 RC はりの破壊力学挙動の再現を試みたが、圧縮破壊後の挙動に差異あるため、再現性を向上させることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 山本佳士, 坂敏秀, 車谷麻緒: RBSM を用いた鉄筋コンクリート部材の破壊シミュレーションにおける不確かさ評価と妥当性確認, 計算工学講演会論文集, Vol.26, 2021
- 2) 相馬悠人, 車谷麻緒: 界面の摩擦接触を考慮した損傷モデルによる鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション, 土木学会論文集 A2, Vol.75, No.2, I_165-I_173, 2019.
- 3) 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季: 不確かさの定量化に向けた RC はりの一斉荷重実験, 土木学会論文集 A2, Vol.75, No.2, I_411-I_420, 2019.