

メッシュサイズに依存しない 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 ○相馬 悠人

茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

鉄筋コンクリートは、力学挙動の異なる鉄筋とコンクリートを組み合わせた材料であるため、複雑な破壊挙動を示す。その破壊挙動は、鉄筋の配筋や構造形態によって異なり、大きく曲げ破壊とせん断破壊に分類される。曲げ破壊は延性的な挙動を示すのに対し、せん断破壊は脆性的な挙動を示すため、構造物の破壊挙動を予測し、せん断破壊を防ぐことが重要である。構造物の破壊挙動を予測・把握するため、数値解析により鉄筋コンクリートの破壊挙動を詳細に精度よく再現するための研究が盛んに行われている。

既往の研究では、鉄筋コンクリートの破壊挙動を再現した例¹⁾はあるが、鉄筋を簡易的にモデル化しているため、鉄筋周りのひび割れが詳細でないことや、メッシュサイズに結果が依存する問題がある。そこで、車谷らは破壊力学に基づく損傷モデルを開発し、メッシュサイズに依存することなくコンクリートのひび割れ進展挙動を再現した。著者らは、車谷らの損傷モデルと鉄筋の塑性モデルを組み合わせ、鉄筋の幾何形状まで詳細に反映させた有限要素モデルに適用することにより、RC はりにおける曲げ破壊とせん断破壊の異なる破壊モードを詳細に精度よく再現した²⁾。力学挙動の異なる鉄筋が加わることで、複雑となった RC はりの数値解析においても、ひび割れ進展挙動がメッシュサイズに依存することなく再現できれば、より有用な数値解析手法となる。

そこで、本研究では大規模な有限要素解析を行うため、RC はりの数値解析手法に並列化を適用し、メッシュサイズの異なる RC はりの数値解析結果と実験結果を比較することにより、異なる破壊モードに対するメッシュサイズ依存性の検証を行う。

2. RC はりの数値解析手法

2-1 鉄筋の材料モデル

鉄筋には、非線形等方硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを用いる。降伏関数 f は次式で表される。

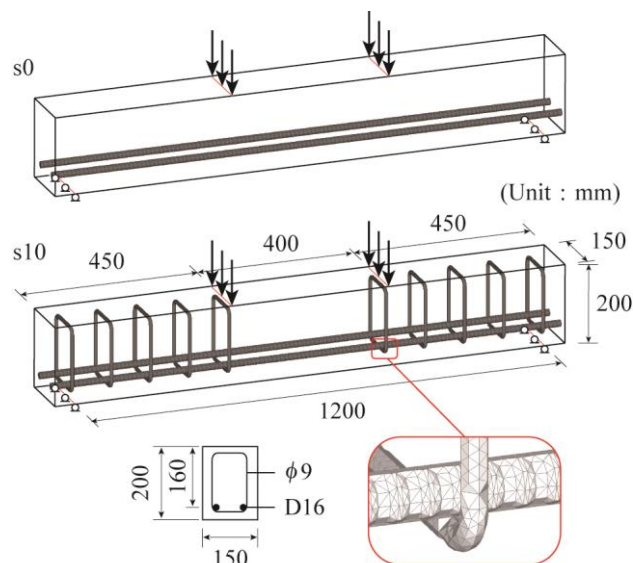


図-1 供試体寸法を基に作製した数値解析モデル

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

ここで、 σ_v は von-Mises 相当応力、 σ_{y0} は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみ、 Q と b は硬化パラメータである。

2-2 コンクリートの材料モデル

コンクリートには、等方性損傷モデルを用いる。構成則は次式で表される。

$$\sigma = (1 - D) c : \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は接線係数テンソル、 ε はひずみテンソル、 D は損傷変数である。

損傷の発展は、ひずみテンソルをスカラー値に変換した等価ひずみにより評価する。圧縮に強く、引張に弱い材料特性を付加した等価ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

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。

変形履歴における等価ひずみの最大値 κ により、損傷変数 D は次式で表される。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e (\kappa - \kappa_0)}{G_f}\right) \quad (4)$$

キーワード RC はり、破壊モード、損傷モデル、von-Mises 塑性モデル、メッシュサイズ

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. 0294-38-5151 FAX. 0294-38-5268

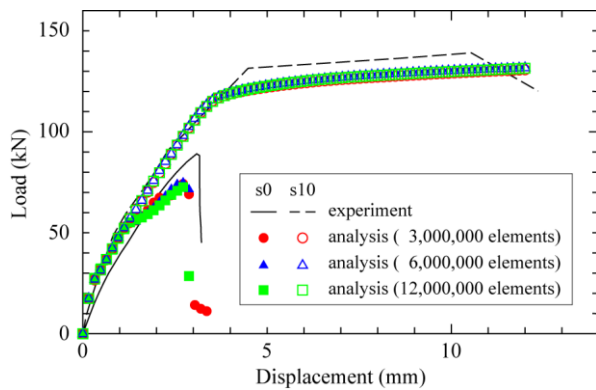


図-2 実験と解析の荷重変位関係

ここで、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 E はヤング率、 h_e は要素長さ、 G_f は破壊エネルギーである。

2-3 並列化

本研究では、領域分割法に基づくプロセス並列化をRCはりの数値解析手法に適用する。解析領域を複数の領域に分割し、それぞれの領域を各コアで計算させることにより、大規模な有限要素解析を可能にする。

3. 実験結果と解析結果の比較および考察

3-1 実験概要と解析条件

破壊モードが異なるRCはりを作製した。供試体寸法を基に作製した有限要素モデルを図-1に示す。メッシュサイズ依存性について検証するため、有限要素モデルの要素数を、約300, 600, 1200万に設定し、数値解析を行った。鉄筋の材料パラメータは、 $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_{y0} = 400 \text{ MPa}$, $Q = 180 \text{ MPa}$, $b = 15$ である。コンクリートの材料パラメータは、 $E = 29 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$, $k = 20$, $G_f = 0.1 \text{ N/mm}$, $\kappa_0 = 0.0001$ である。

3-2 実験結果と解析結果の比較考察

実験と解析の荷重変位関係とひび割れ分布を図-2, 図-3, 図-4に示す。結果を比較すると、メッシュサイズにほとんど依存することなく、実験結果を詳細に再現できていることが分かる。

4. おわりに

本研究では、著者らが開発したRCはりの数値解析手法に並列化を適用し、大規模な有限要素解析を可能にした。メッシュサイズの異なるRCはりの数値解析結果と実験結果を比較した結果、メッシュサイズにほとんど依存することなく、実験結果を詳細に再現でき、RCはりに対して有用な数値解析手法であることを示した。

参考文献

1) 山本佳士, 岩田道春, 黒田一郎, 古屋信明: RBSM

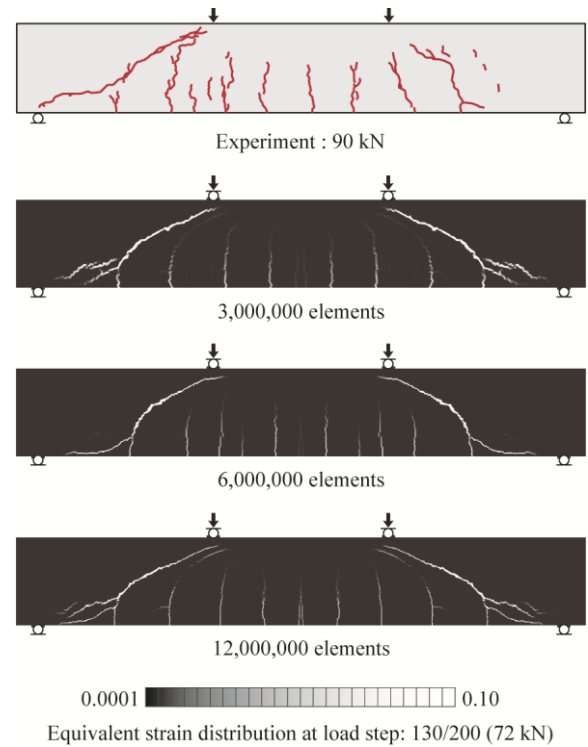


図-3 実験と解析のひび割れ分布(s0)

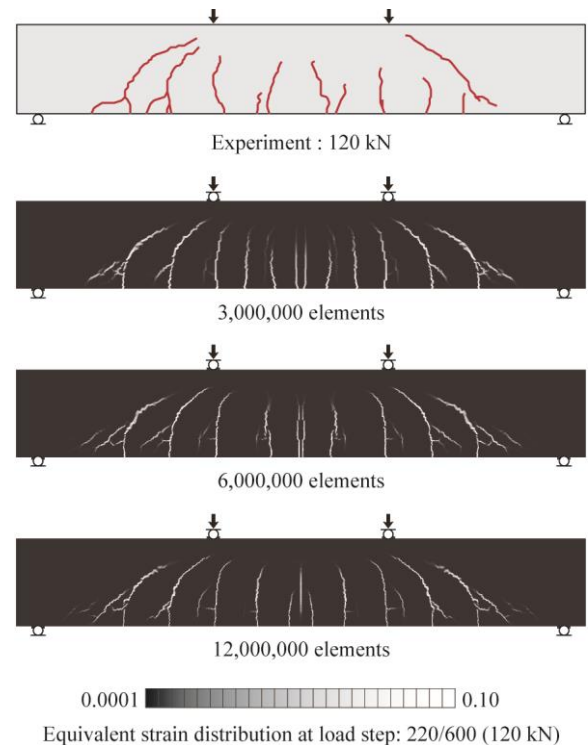


図-4 実験と解析のひび割れ分布(s10)

解析によるRCループ継手の破壊機構の評価, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.915-927, 2010.

2) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの3次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2016, pp.20160004, 2016.