

## 幾何学的非線形性を考慮した 鉄筋コンクリートはりの3次元破壊シミュレーション

茨城大学 学生会員 ○相馬 悠人  
茨城大学 学生会員 阿部 俊逸  
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

### 1. はじめに

1995年に生じた兵庫県南部地震のように、鉄筋コンクリート構造物が破壊すると甚大な被害をもたらす。そのため、鉄筋コンクリートの破壊挙動を精度よく予測することは非常に重要である。

著者ら<sup>1)</sup>は、鉄筋コンクリートの破壊挙動を3次元で詳細に再現できる手法を提案した。しかし、提案手法は微小変形理論に基づくものであり、変形が微小なRC部材を対象にしたものである。RC柱など座屈を伴い破壊する部材の場合、形状が大きく変化するため、鉄筋とコンクリートの材料非線形性に加え、幾何学的非線形性を考慮した解析手法を構築する必要がある。

そこで本研究では、著者らの提案手法を超弾性モデルに拡張させ、座屈を伴うRC部材の破壊挙動を、詳細に再現できる解析手法を構築する。そして、RCはりの数値実験を行い、解析手法の妥当性を検証する。

### 2. 鉄筋コンクリートの数値解析手法

#### 2-1. 鉄筋の材料モデル

鉄筋の材料モデルは、Hencky超弾性モデルに適用したvon-Mises塑性モデルを用いる<sup>2)</sup>。非線形等方硬化則に基づく降伏関数 $f$ は次式で表される。

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{\tau}' : \boldsymbol{\tau}') - \tau_{y0} - Q(1 - e^{-bp})} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\tau}$ は偏差キルヒホッフ応力テンソル、 $\tau_{y0}$ 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

コンクリートの材料モデルは、著者らが提案した等方性損傷モデルをHencky超弾性モデルに拡張させたものを用いる。構成則は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha\alpha} \boldsymbol{T}_{\alpha} \otimes \boldsymbol{T}_{\alpha} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{\alpha\alpha}$ は主方向コーシー応力テンソル、 $\boldsymbol{T}_{\alpha}$ は座標

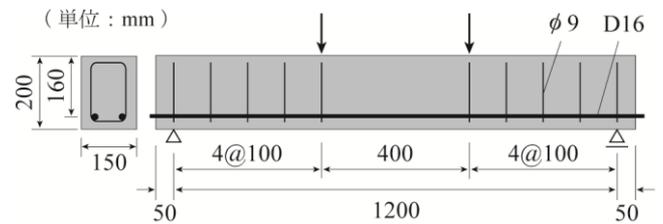


図-1 実験概要

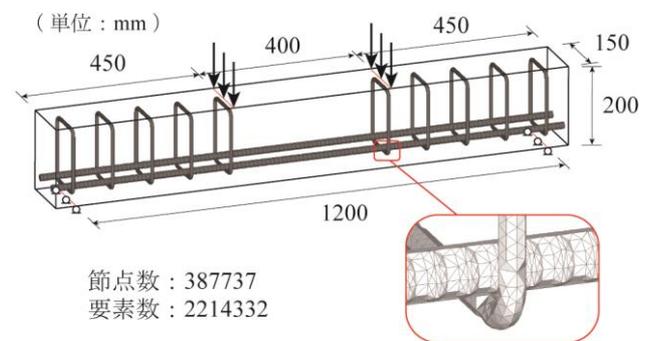


図-2 解析モデル

表-1 材料パラメータ

鉄筋		コンクリート	
ヤング率 $E$	210 GPa	ヤング率 $E$	29 GPa
ポアソン比 $\nu$	0.3	ポアソン比 $\nu$	0.2
初期降伏応力 $\sigma_{y0}$	400 MPa	圧縮引張強度比 $k$	15
硬化パラメータ $Q$	180 MPa	破壊エネルギー $G_f$	0.1 N/mm
硬化パラメータ $b$	15	破壊発生ひずみ $\kappa_0$	0.0001

変換行列、 $D$ は損傷の度合いを表す損傷変数であり、損傷がなければ0、完全に破壊すれば1となる。

損傷の進展を評価するために、Henckyひずみテンソルをスカラー値に変換した等価Henckyひずみを使用する。コンクリートの圧縮に強く、引張に弱い材料特性を付加した等価Henckyひずみ $\ln\lambda_{eq}$ は次式で表される。

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

キーワード 鉄筋コンクリート、幾何学的非線形性、損傷モデル、von-Mises塑性モデル、Hencky超弾性モデル  
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

ここで、 $\nu$ はポアソン比、 $k$ は圧縮引張強度比、 $I_1$ はHencky ひずみテンソルの第1不変量、 $J_2$ は偏差Hencky 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Hencky ひずみの最大値を $\ln\lambda_k$ で表すことにより、損傷変数 $D$ は次式で表される。

$$D = 1 - \frac{\lambda_k^{(1-2\nu)} \ln\lambda_0}{\lambda_0^{(1-2\nu)} \ln\lambda_k} \exp\left(-\frac{E \ln\lambda_0}{\lambda_0^{(1-2\nu)} G_f} h_e (\lambda_k - \lambda_0)\right) \quad (4)$$

ここで、 $\lambda$ はストレッチ、 $\ln\lambda_0$ は破壊発生ひずみ、 $E$ はヤング率、 $G_f$ は破壊エネルギー、 $h_e$ は変形前の要素長さである。

### 3. 実験結果と解析結果の比較および考察

#### 3-1. 実験概要および解析条件

せん断補強筋10本のRCはりを作製し、荷重制御で4点曲げ試験を行った。図-1に実験概要を示す。

図-2に解析モデルを示す。要素には四面体一次要素を用い、鉄筋の幾何形状まで詳細に再現されるように要素分割を行った。図-2の矢印方向に強制変位12mmを400stepで与えて数値解析を行った。

表-1に材料パラメータを示す。鉄筋はD10の3点曲げ試験を行い、同条件の数値解析と比較することで、パラメータを求めた。また、コンクリートは円柱供試体の圧縮強度からヤング率を求め、他のパラメータは一般的に得られる平均値に設定した。

#### 3-2. 解析結果

図-3に実験結果と解析結果の荷重変位関係を示す。解析結果は実験結果の荷重変位関係を概ね再現しており、典型的な曲げ破壊を再現できていることが分かる。

図-4に実験結果と解析結果の表面のひび割れを示す。また、図-5に解析結果の内部の損傷分布と鉄筋の相当塑性ひずみを示す。解析結果は実験結果のひび割れを詳細に再現できていることが分かる。さらに、異形鉄筋の幾何形状を再現しているため、鉄筋の塑性状態や、外部からだけでなく内部で進行するひび割れも再現できていることが分かる。

### 4. おわりに

本研究では、著者らの提案手法を超弾性モデルに拡張し、座屈を伴うRC部材の破壊挙動を、詳細に再現できる解析手法を構築した。そして、RCはりの数値実験を行い、ひび割れおよび荷重変位関係を精度よく再現できることを示した。今後は、座屈を伴うRC部材を対象にし、提案手法の有効性を検証する予定である。

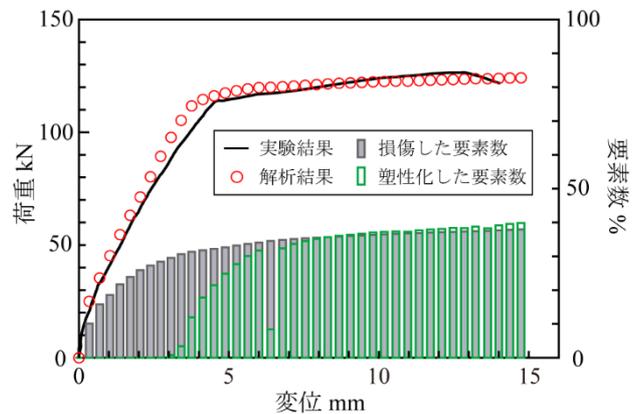


図-3 実験結果と解析結果の荷重変位関係

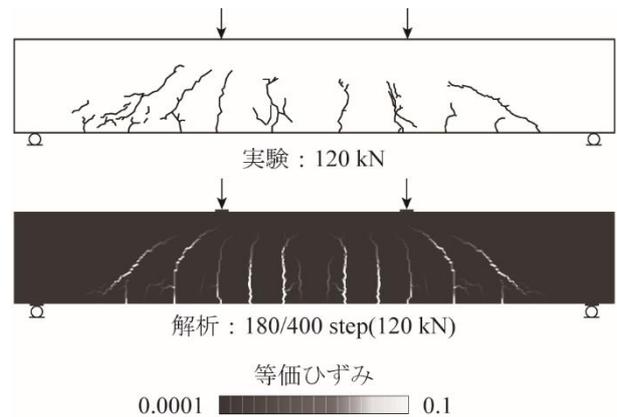


図-4 実験結果と解析結果の表面のひび割れ

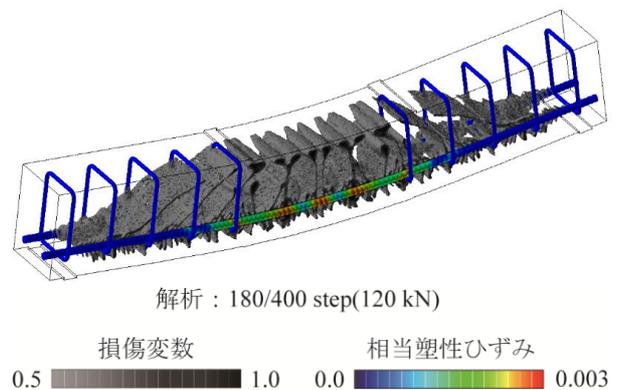


図-5 内部の損傷分布と鉄筋の相当塑性ひずみ

### 参考文献

- 1) 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, 日本計算工学論文集, Vol. 2016, pp.20160004, 2016.
- 2) Javier Bonet and Richard D. Wood: Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis, New York: Cambridge University Press, 2008.