

幾何学的非線形性を考慮した損傷モデルと塑性モデルによる 鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション

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

鉄筋コンクリート構造物が破壊すると甚大な被害が生じる危険性がある。そのため、鉄筋コンクリートの破壊性状を精度よく予測する必要がある。コンクリートの破壊を簡易的に表現できる方法として、離散型の解析手法を用いたものがある¹⁾。鉄筋コンクリートに生じるひび割れや力学性能を詳細に再現しているが、RC柱などの軸方向鉄筋の座屈を伴う破壊は、有限変形を考慮した数値解析が必要なため、予測することは難しい。そこで、本研究では超弾性モデルに適用させた損傷モデルと塑性モデルを組み合わせることで、有限変形を考慮した鉄筋コンクリートの破壊を詳細に再現できる手法を提案する。加えて、RCはりの実験と解析を比較することで、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非線形等方硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを用いる²⁾。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、 τ_{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、車谷ら³⁾が提案した等方性損傷モデルを Hencky 超弾性モデルに適用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。

キーワード 鉄筋コンクリート、等方性損傷モデル、von-Mises 塑性モデル、Hencky 超弾性モデル、RC はり

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

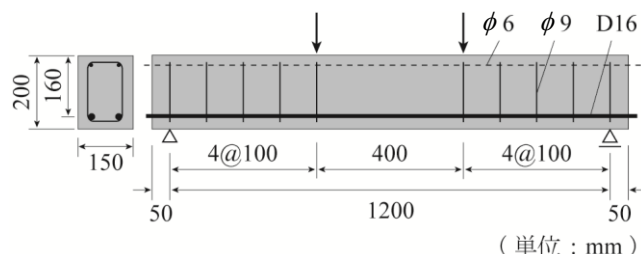


図-1 実験概要

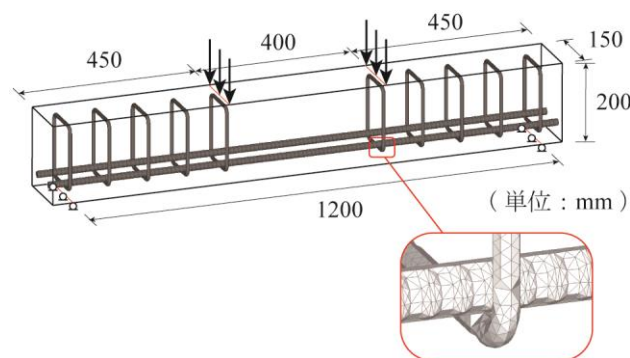


図-2 解析モデル

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 ν	0.3	ポアソン比 ν	0.2
初期降伏応力 σ_{y0}	400 MPa	圧縮引張強度比 k	20
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 κ_0	0.0001

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。

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

ここで、 ν 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, λ 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. 実験概要を図-1 に示す.

図-2 に解析モデルを示す. 解析モデルは, RC はりの対称性を考慮して解析範囲を 1/4 とした. 要素には四面体一次要素を用いた. 解析モデルの節点数と要素数は, 100355 節点と 553583 要素である. 図-2 の矢印方向に強制変位 12 mm を 400 step で与えて解析を行った.

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ひび割れを示す. 解析結果は実験結果のひび割れの本数や角度を精度よく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, 外部からだけでなく, 内部から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, 超弾性モデルに適用した等方性損傷モデルと von-Mises 塑性モデルを組み合わせた解析手法を提案し, 妥当性の検証を行った. 結果として, RC はりのひび割れおよび荷重変位関係を精度よく再現できた. 今後は, RC 柱の解析を行うために, RC 柱に一定の軸力を与えて解析を行うプログラムへと発展させ, RC 柱の曲げ挙動の再現を行う予定である.

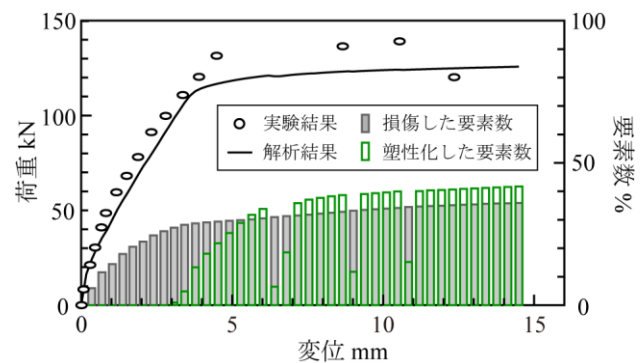


図-3 実験結果と解析結果の荷重変位関係

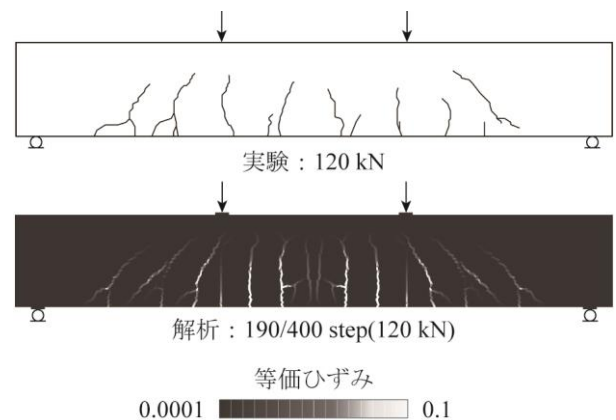


図-4 実験結果と解析結果の表面のひび割れ

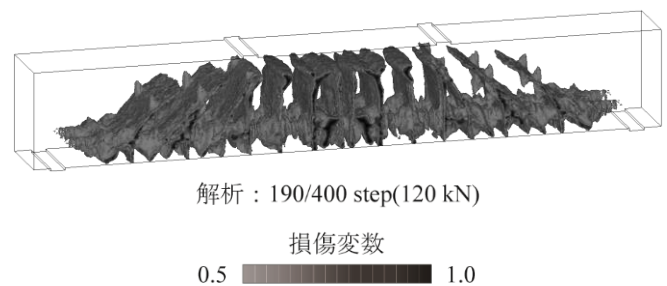


図-5 解析結果の内部のひび割れ

参考文献

- 1) 林大輔, 長井宏平: 三次元離散解析手法による多方向配筋時の RC 定着性能の微細構造解析, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.241-257, 2013.
- 2) Javier Bonet and Richard D. Wood: Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis, New York: Cambridge University Press, 2008.
- 3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷考史, 檜山和男: 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.