

鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対するコード検証および解検証

茨城大学 学生会員 ○渡邊 英吾 茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

シミュレーションの品質を保証する方法として、V&V (Verification & Validation) がある。Verification とは、正確に解析が行われているかを検証するプロセスであり、コード検証と解検証で構成される。コード検証とは、解析結果と理論解を比較し、プログラマーがないことを確認するプロセスである。解検証は、数値誤差を定量化するプロセスである。

コンクリート工学分野における Verification の研究には、線形問題において行われた研究がある²⁾。しかし、コンクリートと鉄筋の複合構造である鉄筋コンクリート (RC) のような非線形問題では、理論解が得られない。そのため、理論解と比較して行うコード検証を実施することができない。そこで、車谷らは曲げ破壊型鉄筋コンクリートはりの理論解に近い結果が得られる非線形計算手法を提案した³⁾。土木分野や原子力分野を含む他分野の Verification の研究では、解検証において格子収束指数 (Grid Convergence Index, 以下 GCI) を用いた研究が多くみられる。GCI が適用できるのは、線形問題で要素寸法の細分化に伴って解析結果が収束する問題に限られる。しかし、非線形問題では解析結果が収束するとは限らないため、異なる手法を用いる必要がある。

本研究の目的は、損傷モデルを用いた非線形有限要素解析のコード検証および解検証を実施することである。本研究では、文献³⁾の曲げ破壊型 RC はりの非線形計算手法を参照解とし、損傷モデルを用いた非線形有限要素解析のコード検証を実施する。また、解検証に分散分析を採用することで離散化誤差の定量化を行う。

2. 鉄筋とコンクリートの材料モデリング

コンクリートのモデル化には損傷モデルを用いる。損傷モデルの構成則は、フックの法則にスカラー変数 D を用いた式 (1) である⁴⁾。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (1)$$

ここで、 σ はコーシーの応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソル、 D は損傷変数である。

キーワード V&V, Verification, コード検証, 解検証, 分散分析

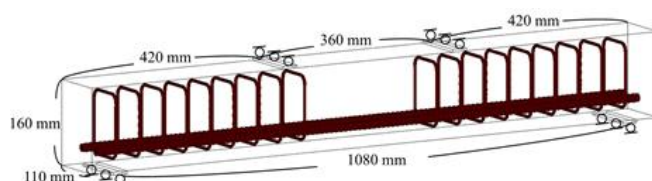


図-1 解析対象とする RC はりの形状

車谷らは、損傷モデルで多次元のひずみテンソルおよび応力テンソルを 1 次元に相当する等価ひずみと等価応力に置き換え、両者の関係から損傷変数を求めている⁴⁾。式 (2) の修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ε_e により、ひずみテンソルをスカラー値に転換する。

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

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。ここで、等価ひずみ ε_e に圧縮強度比 k を用いることで、コンクリートの圧縮に強く引張に弱い力学特性の表現が可能になる⁴⁾。

変形履歴の等価ひずみ ε_e を用いた損傷変数 $D(\varepsilon_e)$ は、式 (3) で表される⁴⁾。

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

ここで、 E はヤング率、 ε_0 は破壊発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギー、 h_e は要素寸法である。また、鉄筋には線形硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを適用する。

3. 曲げ破壊型 RC はりの Verification

解析対象は、図-1 のようなスターラップを十分に配筋した 3 等分点載荷の RC はりである。

コンクリートのパラメータは、ヤング率を 40 GPa、ポアソン比を 0.2、圧縮引張強度比を 12、破壊発生ひずみを 0.0001、破壊エネルギーを 0.1 N/mm とする。解析に用いる要素の種類は、四面体一次要素とする。

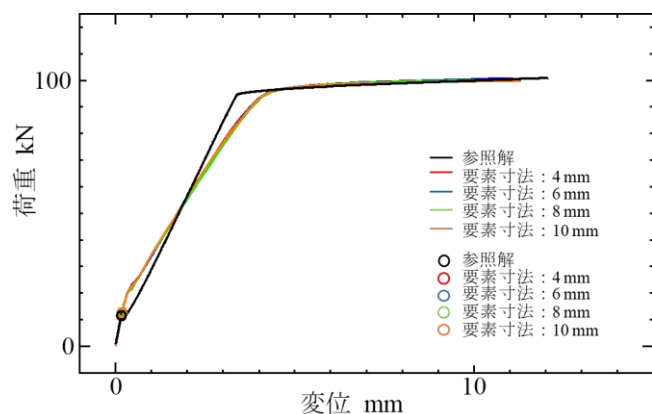


図-2 参照解と解析結果の荷重－変位曲線

3.1 コード検証

コード検証では、文献³⁾の4点曲げ問題における曲げ破壊型RCはりの非線形計算手法を参照解とする。解析に用いる要素寸法は4, 6, 8, 10 mmとする。判定基準としては、参照解と解析結果の荷重－変位曲線における全体的な挙動、初期ひび割れ発生の時点、変位10 mmでの荷重の3点において、参照解との差異が小さいことである。

参照解と解析結果の荷重－変位曲線を図-2に示す。参照解は1次元の解法であり、3次元非線形有限要素解析とは異なる次元の解法であるため、ひび割れの進展に違いが生じる。その違いにより、二次剛性において参照解との差が生じたと考えられる。荷重－変位曲線における二次剛性を除いた挙動では、参照解と解析結果に大きな差異はみられない。ひび割れ発生の時点における参照解と解析結果の差異は限りなく小さい。各変位10 mmでの荷重値における参照解との差異は最大でも0.509%であり、差異は小さい。3つの評価基準において、参照解との差異が小さいため、プログラムにエラーがないと判断できる。

3.2 解検証

非線形問題の解検証では、離散化誤差を定量化する手法が確立されていない。そこで、本研究では分散分析による離散化誤差の定量化を行う。分散分析とは、解析結果に影響を及ぼす因子を選択し、複数回解析を実施することで、各因子の影響度を分散成分として求められる分析方法である。採用した因子は、ヤング率、圧縮引張強度比、破壊発生ひずみ、要素寸法とする。材料パラメータの水準は、±10%増減させたものとする。要素寸法は高水準を8 mm、低水準を4 mmとする。変位10 mmまでの荷重－変位曲線下の面積を解析結果として

表-1 曲線下の面積における変動および影響度

パラメータ	影響度 ($\times 10^9$)	正規化した影響度 (%)
ヤング率	5.16	100
破壊発生ひずみ	2.28	44.18
強度比	1.67	32.39
要素寸法	0.002	0.046

分散分析を行い、要素寸法の影響度を定量化する。荷重－変位曲線の全体的な形状に対する要素寸法の影響度を定量化するために、荷重－変位曲線下の面積を解析結果とする。

各因子の影響度を表-1に示す。本研究では、各因子の影響度を最大値で除して正規化する。影響度を正規化した結果、要素寸法の影響度は、最も影響度の大きいヤング率の0.046%である。したがって、パラメータが変化することによる影響度に対して、要素寸法の影響度が十分に小さいことが分かる。

4. おわりに

文献³⁾の非線形計算手法を参照解とすることで、3次元非線形有限要素解析のコード検証が行えることを示した。解検証に分散分析を採用することで、物理的な影響度に対する要素寸法の影響度を定量化することが可能であり、非線形問題における離散化誤差の定量化に分散分析が有効であることを示した。

参考文献

- 1) 上田 尚史, 岡崎 慎一郎, 車谷 麻緒: シミュレーションの検証と妥当性確認 (V&V) に関する研究事例, Vol. 58, No. 11, 2020
- 2) 和田 健介, 櫻井 英行, 滝本 和志, 山本 真哉: 構造革新に向けた V&V とトポロジー最適化の試行, Vol. 56, No. 9, 2018
- 3) 車谷 麻緒, 坂 敏秀, 山本 佳士, 上田 尚史, 岡崎 慎一郎, 小倉 大季: 理論式に基づく鉄筋コンクリートはりの非線形計算モデルの開発とその検証および妥当性確認, Transactions of JSCES, Paper No.20210020
- 4) 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挙動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, Transactions of JSCES, Paper No.20160004