

## コード間対照による鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析のコード検証

茨城大学大学院 学生会員 ○渡邊 英吾 茨城大学 飯島 昂也  
茨城大学 山川 綾之 茨城大学大学院 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、コード検証と解析検証で構成される。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。解析検証は、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。原子力分野を含む他分野の Verification の研究では、他の解析プログラムと比較することでコード検証を実施した例がある。しかし、コンクリート工学分野では、他のコードと比較することによってコード検証を実施した例は見当たらない。

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を実施することである。本研究では、文献<sup>2)</sup>の曲げ破壊型 RC はりの非線形計算手法 (参照解) および汎用 FEM コードである ISCEF と比較することで、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。

## 2. 損傷モデルによる非線形有限要素解析

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<sup>3)</sup>。

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

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

車谷らは、損傷モデルで多次元のひずみテンソルお

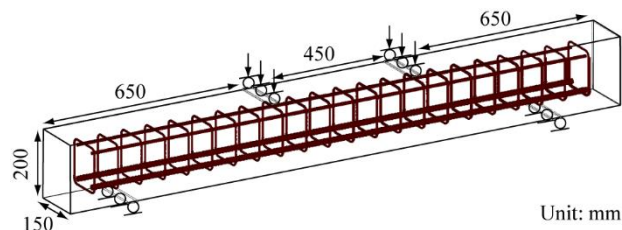


図-1 解析対象とする RC はりの形状

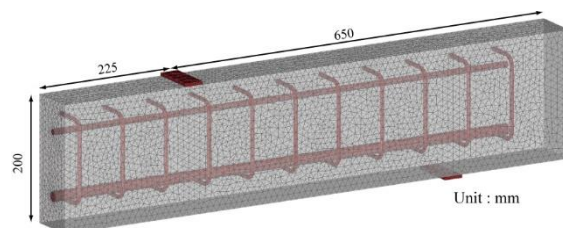


図-2 損傷モデルにおける有限要素モデル

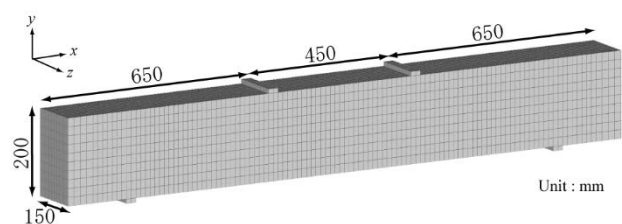


図-3 ISCEF における有限要素モデル

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<sup>4)</sup>。式 (2) の修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ  $\varepsilon_e$  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、 $\nu$  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  $\varepsilon_e$  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<sup>4)</sup>。

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

キーワード V&V, Verification, コード検証, 損傷モデル, ISCEF

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 : 22nm843t@vc.ibaraki.ac.jp

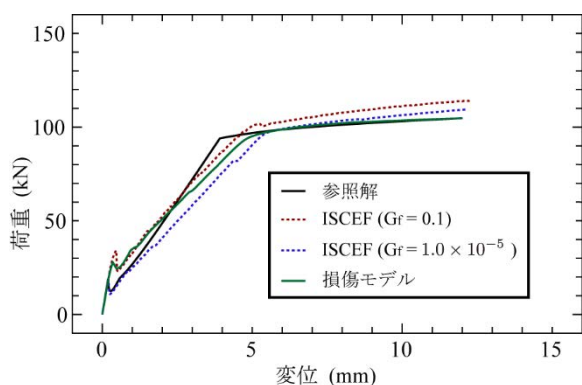


図-4 参照解と解析結果の荷重－変位曲線

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

ここで、 $E$  はヤング率、 $\varepsilon_0$  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. ISCEF における非線形有限要素解析

ISCEF では、Smeared Crack (分散ひび割れモデル) を用いた RC 要素を採用し、非線形有限要素解析を実施する。コンクリートの材料モデリングは 2 直線軟化モデルである。また、圧縮側における材料モデルは圧縮線形である。鉄筋の材料モデルはバイリニアモデルを採用する。ISCEF では鉄筋が導入されていることを再現するために、鉄筋比を RC 要素に設定する必要がある。鉄筋比は要素の各断面積に対する鉄筋の断面積を除いた面積率で求める。

### 4. 曲げ破壊型 RC はりのコード検証

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。

損傷モデルにおけ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 0.05 N/mm とする。破壊エネルギーをゼロにできないため、小さい値に設定する。損傷モデルの解析に用いる要素の種類は、図-2 のように四面体一次要素とする。

ISCEF におけ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、引張強度を 4 MPa、破壊エネルギーを 0.05 N/mm および  $1.0 \times 10^{-5}$  N/mm、せん断剛性低下率を  $1.0 \times 10^{-3}$  とする。ISCEF に用いる要素の種類は、図-3 のように六面体一次要素である破壊

エネルギーは損傷モデルと同じ 0.05 N/mm のケースだけでなく、参照解と同条件にするため  $1.0 \times 10^{-5}$  N/mm ケースについても解析する。

コード検証の判定基準としては、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、変位 10 mm における荷重値の 2 点において、損傷モデルと参照解の差異が小さいことである。

参照解と ISCEF、損傷モデルの荷重－変位曲線を図-4 に示す。参照解は 1 次元の解法であり、損傷モデル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荷重－変位曲線の全体的な形状では、損傷モデルと参照解に大きな差異はない。また、ISCEF と損傷モデルを比較すると、二次剛性および最大荷重は損傷モデルの方が低くなっている。しかし、荷重－変位曲線の全体的な形状において、両者に両者に大きな差異はない。各変位 10 mm での荷重値における損傷モデルと参照解および ISCEF との差異を比較する。参照解との差異は 0.37%、ISCEF との差異は破壊エネルギーが 0.05 N/mm のとき 6.86%、破壊エネルギーが  $1.0 \times 10^{-5}$  N/mm のとき 2.68% であり、参照解および ISCEF との差異は小さいと判断できる。

### 4. おわりに

文献<sup>2)</sup>の参照解および ISCEF を参照解とし、本研究で設定した検討項目について、損傷モデルと比較することでコード検証が行えることを示した。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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