

鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モンテカルロ法

茨城大学 学生会員 ○羽生 隼輝

茨城大学 学生会員 芦田 拓海

茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

米国機械学会 (ASME) では, V&V (Verification & Validation) とよばれる数値解析の信頼性を保証するための方法がガイドライン ASME V&V 10 (以下, VV-10) に示されている. とくに Validation では実験と数値解析で生じる不確かさを定量化し, 妥当性確認する方法が示されている. VV-10 では, 材料のばらつきを用いたモンテカルロシミュレーションと複数回の実験により, それぞれの不確かさの定量化を行った実例が紹介されている¹⁾. しかし, 非線形有限要素解析は一般的に計算コストが高いことからモンテカルロシミュレーションを実施することは現実的ではない.

そこで, 本研究では低い計算コストでモンテカルロシミュレーションを代替する方法を提案する. 具体的には, 曲げ破壊型鉄筋コンクリート (RC) はりを対象に, 解析結果を短時間で精度よく出力可能な代替モデルを作成する. 応答曲面法を用いた代替モデルを使用することで, 低コストでモンテカルロシミュレーションを実施できることを示す.

2. 計算モデル

本研究では, 損傷モデルによる非線形有限要素解析²⁾を計算モデルに用いる.

コンクリートの構成モデルには損傷モデルを適用する. 等価ひずみ ε_e は次式で表される.

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

ここで, ν はポアソン比, k は圧縮引張強度比, I_1' は微小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第 2 不変量である. 応力とひずみの関係は, 次のように表される.

$$\sigma = (1 - D(\varepsilon_e)) \mathbf{c} : \varepsilon \quad (2)$$

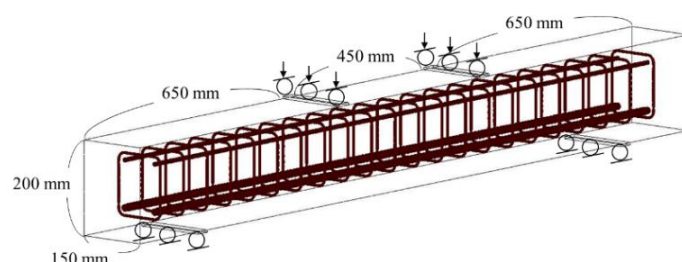


図-1 曲げ破壊型 RC はりの形状, 荷重・境界条件

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

ここで, $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソル, ε はひずみテンソル, 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 は損傷を評価する領域長さである. 鉄筋の構成モデルには von-Mises 塑性モデルを適用する.

3. モンテカルロ法による妥当性確認

VV-10 では, 数値解析の妥当性確認として, 材料のばらつきを用いたモンテカルロシミュレーションと複数回の実験から, 不確かさを定量化する方法が紹介されている. 本研究では文献³⁾の曲げ破壊型 RC はりにおける実験結果を用いる. 対象とする曲げ破壊型 RC はりの形状, 荷重・境界条件を図-1 に示す.

モンテカルロシミュレーションの試行回数を 100 回として, 平均値から $\pm 18\%$ の範囲で材料パラメータに一樣乱数を与えた. $\pm 18\%$ は材料試験結果³⁾をもとにして結果を網羅するように設定した. 一樣乱数を用いた 100 ケースのパラメータセットで, 非線形有限要素解析を実施する. 本研究で用いる材料パラメータはヤング率, 破壊発生ひずみ, 圧縮引張強度比とし, 着目する結果を変位 10 mm のときの荷重値とする. VV-10 の事例²⁾で紹介された評価指標 M^{SRQ} を用いて, 非線形有限要素解析の妥当性を確認する. M^{SRQ} は 1.366%であり, 極めて低い値であることから非線形有限要素解析の妥当性は

キーワード V&V 妥当性確認 応答曲面法 モンテカルロシミュレーション 分散分析

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL : 0294-38-5162 E-mail : 18t50411@vc.ibaraki.ac.jp

確認できた。しかし、この妥当性確認の方法では1回の非線形有限要素解析の計算時間が12時間程度であるため、モンテカルロシミュレーションは現実的ではない。

4. 代替モンテカルロ法による妥当性確認

本研究では、材料パラメータにおける不確かさを考慮する解析結果を短時間で精度よく出力できる代替モデルを作成する。代替モデルでモンテカルロシミュレーションを実施し、低コストで実施できることを示す。

(1) 代替モデルの作成

応答曲面法を用いた重回帰式を導出することで、解析結果が短時間で出力可能な代替モデルを作成する。応答曲面法は、実験計画にしたがってデータを収集し、多項式曲面（重回帰式）を推定する方法である。

本研究では、ヤング率、破壊発生ひずみ、圧縮引張強度比を説明変数とし、変位 10 mm のときの荷重値を目的変数とする重回帰式を作成する。次のような重回帰式を導出し、代替モデルとする。

$$y = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 \varepsilon + \beta_3 k + \beta_{12} E\varepsilon + \beta_{13} Ek + \beta_{23} \varepsilon k + \beta_{11} E^2 + \beta_{22} \varepsilon^2 + \beta_{33} k^2 \quad (3)$$

ここで、 y は変位 10 mm のときの荷重値、 $\beta_0 \sim \beta_{33}$ は回帰係数である。係数算出用の 13 ケースから回帰係数を求めることで重回帰式を作成する。1 回の非線形有限要素解析は、計算時間が 12 時間程度であるのに対して、代替モデルの計算時間は 1 秒未満である。

(2) 代替モデルの精度

代替モデルの精度を示すために、非線形有限要素解析で実施した 100 ケースのパラメータセットに対し、代替モデルで同様のパラメータセットを実施する。100 ケースの非線形有限要素解析の結果と、代替モデルから得られる結果の誤差を図-2 に示す。これを見ると、誤差は、すべて 0.5%以内であることから、代替モデルの結果は、非線形有限要素解析の結果を精度良く再現できていることがわかった。

(3) 代替モンテカルロ法の適用性

評価指標 M^{SRQ} を用いて、代替モデルのモンテカルロシミュレーションに対する適用性を確認する。文献²⁾の実験結果と、代替モデルの結果から M^{SRQ} を求める。 M^{SRQ} は 1.369%であり、非線形有限要素解析の妥当性確認の結果とほぼ一致する。代替モデルは、モンテカルロシミュレーションを短時間で実施できることが確認できた。

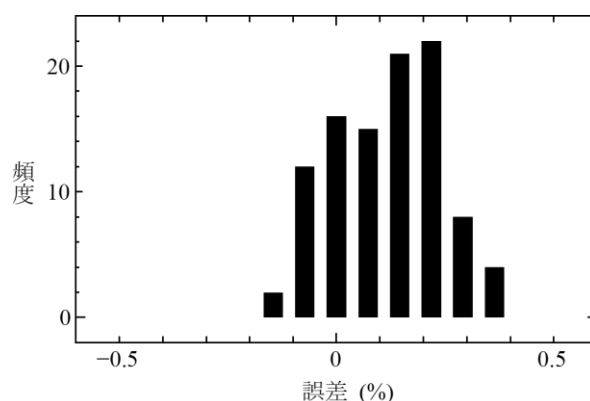


図-2 100 ケースにおける誤差のヒストグラム

5. まとめ

非線形有限要素解析では、不確かさを定量化するためのモンテカルロシミュレーションは現実的ではない。本研究では、応答曲面法を用いることで、モンテカルロシミュレーションを代替する方法を提案した。

4 章から、代替モデルは非線形有限要素解析を再現可能であることが確認できた。また代替モデルは、モンテカルロシミュレーションに使用できることを示した。すなわち、代替モデルを用いることで、モンテカルロシミュレーションを低コストで実施できることがわかった。

本研究での代替モデルは、曲げ破壊型 RC はりを対象としたため、異なる解析対象についての検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics: ASME V&V 10.1-2012, The American Society for Mechanical Engineers, 2012.
- 2) 相馬悠人, 車谷麻緒: 破壊力学に基づく損傷モデルによる RC 部材の大規模破壊シミュレーションに関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, pp.I 263-I 271, 2018.
- 3) 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季: 不確かさの定量化に向けた RC はりの一斉載荷実験, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 75, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 22), I_411-I_420, 2019.