

幾何学的非線形性を考慮したRBSMを用いたRCはりの 破壊シミュレーションにおける妥当性確認

Validation in Failure Simulation of Reinforced Concrete Members
Using RBSM with geometric nonlinearity

山本佳士¹⁾

Yoshihito Yamamoto

1) 博(工) 法政大学 デザイン工学部 教授 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp)

In recent years, simulation has been increasingly used as a tool for design verification and decision-making in the engineering field. In response to this trend, V&V (Verification and Validation) concepts and specific methods have been developed to assure the reliability of simulation and to clarify the process. The V&V standard of the American Society of Mechanical Engineers requires the evaluation of various uncertainties in numerical simulations and the evaluation of the mean and variation of the response values of the analysis results. This method provides a quantitative and unambiguous assessment of accuracy. In this study, the validation of the numerical simulation method proposed by the authors for reinforced concrete (RC) beams that are subject to flexural failure, especially for post-peak behavior including localized compressive failure and buckling behavior, which cannot be reproduced by existing techniques and have not been validated, is carried out in accordance with the ASME V&V standard, including quantification of uncertainties.

Key Words : RBSM, Collapse simulation, Geometric nonlinearity, V&V, UQ

1. はじめに

近年、原子力発電施設等の重要な土木・建築構造物の設計においては、設計作用を超えるようなケースに対しても安全性の検討を行うことが求められている。ひび割れ、圧縮破壊の局所化、鉄筋の付着すべり、座屈等、RC部材内の要素レベルの破壊挙動から部材全体の倒壊挙動までを精度良く再現可能な数値解析技術の確立は、上記のような安全性の検討のための有用なツールになるものと考えられる。

RC構造物を対象とした数値解析手法は、有限要素法を中心に数多くの研究が行われてきており、静的荷重下、地震作用下等における複雑な非線形域の応答を再現できるようになってきている。しかしながらポストピーク挙動の再現となると未だいくつかの課題が残されており、特に、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、およびその拘束圧依存性挙動の再現は現状においても難しい課題として残されている[1]。さらに、過大な作用を受けて、構造部材中で圧縮破壊の局所化が起きた後、鉄筋の座屈等を経て部材が倒壊していくような、大変位・大回転を伴う挙動までとなると、その再現は一層難しく、国内外でこれを再現できた例はない。

一方、著者らは、RC部材レベルの破壊挙動、特に現状のコンクリートの数値解析技術では再現が困難な圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動までを再現可能な、剛体バネモデル(RBSM)を開発している[2,3]。また、一般的にRBSMは、微小回転の仮定に基づいているため、材料レベルで破壊が局所化した後、鉄筋の座屈等を経て大変位・

大回転を伴って部材あるいは構造システム全体で倒壊していく挙動までは再現が困難であった。そこで著者らは、RBSMを大変位・大回転挙動を伴う倒壊問題へ適用するために、幾何学的非線形性を考慮可能な3次元RBSMの開発を行っている[4-7]。ただし、提案モデルの妥当性確認は十分できていない。

本研究では、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、鉄筋の座屈挙動を経て、RC部材が倒壊するまでの挙動の再現を目的として、著者が提案している、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮した3次元RBSMの妥当性確認の過程を示す。具体的には、同一条件で15体の試験を行った、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により荷重低下が生じ、さらに、鉄筋の座屈に終局に至ったRCはりの曲げ載荷実験を対象として、提案手法を用いて解析を行い、ASME V&V標準に沿った不確かさの定量化を含む妥当性確認を試みる。

2. 提案手法の概要

(1) 幾何学的非線形性を考慮したRBSM[5-7]

本研究では、Voronoi分割によるランダム多面体要素を用い、さらに大変位・大回転挙動を再現できるよう拡張した3次元RBSMによりコンクリートをモデル化した。RBSMはKawai[8]により提案された離散体解析手法の一つであり、対象を剛体要素とバネの集合体としてモデル化し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することにより、対象の力学的挙動を追求する手法である。バネに非線形構成モデルを導入することで、ひび割れ、すべり

等の不連続挙動を簡便に表現することができる。図-1に示すように、RBSMでは、剛体要素内の代表点に並進3, 回転3の計6自由度を設定し、要素内に剛体変位関数を仮定する。一般的なRBSMでは、要素の剛体変位関数に、微小回転の仮定に基づく回転マトリクスを用いているが、本研究では、RBSMと低減積分ティモシェンコはり要素の等価性に着目して新たに開発した、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮した手法を用いた[5-7]。

図-2に提案手法の概要を示す。提案手法では、2つの剛体要素間の力学モデルとして、図中の青線で示すように、Voronoi面を断面に持つ、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を仮定する。ここで、Voronoi分割の性質上、Voronoi面は2つの母点を結ぶ線分の垂直二等分面になる。Toi[9]は、RBSMの積分点位置が2つの剛体要素の自由度設定点のちょうど中間に断面に位置している場合、その要素剛性マトリクスは、同様にはり軸方向中央断面に1点の積分点を持つ低減積分ティモシェンコはり要素の要素剛性マトリクスと、完全に一致することを明らかにしている。すなわち、断面をVoronoi面とし、Voronoi母点を節点とする、低減積分ティモシェンコはり要素のネットワークからなる構造は、要素配列にVoronoi分割を適用し、Voronoi母点を自由度設定点としたRBSMと、微小変形の仮定のもとでは完全に一致する。紙面の都合上、結果は省略するが、検証解析によりこれらは実際に一致することを確認している。すなわち、2つの剛体要素間の力学モデルとして低減積分ティモ

シェンコはりを仮定すれば、微小変形領域においては、従来の微小回転の仮定に基づくRBSMと等価になり、さらに、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮することで、大変位・大回転挙動の再現が可能になる。

また、提案手法では、ティモシェンコはり要素の断面内の積分点は、従来の著者らが提案している手法と同様に[2]、Voronoi面の重心と頂点からなる三角形の重心に配置（図-2）する。さらに、提案手法では、積分点で得られるGreen-Lagrangeひずみの、はり軸方向の垂直ひずみ成分および軸方向を含むせん断ひずみ成分（2成分）を、従来のRBSMにおける垂直バネおよびせん断バネのひずみと仮定し、著者らが提案している従来の構成モデルを適用して応力を算定し、これを第2 Piola-Kirchhoff応力として評価して内力計算を行った。また、コンクリートを表現する各バネの構成モデルは、微小変形を仮定したRBSMで妥当性、有用性を確認しているモデルと同一のもの[2,3]を使用した。

（2）鉄筋モデル[4]

鉄筋のモデル化にSaito[10]らによって提案された、離散鉄筋要素を用いる。離散鉄筋要素では、鉄筋は一連のはり要素としてモデル化され、要素節点において長さゼロのリンク要素によりコンクリート剛体要素に結合される。リンク要素は、鉄筋軸方向（1成分）、鉄筋直交方向（2成分）に配置されたバネおよび各軸回りの回転バネからなり、鉄筋軸方向のバネに非線形構成モデルを導入することで、鉄筋-コンクリート間の付着すべり特性を表現する。ここで本研究では、離散鉄筋要素に、前述の幾何学的非線形性を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を用いた。はり要素断面を微小セル区間に細かく分割し、各セル区間の部材軸方向の垂直応力-垂直ひずみ関係に対して1軸の非線形構成モデルを与えることにより、鉄筋の軸方向および曲げに対する材料非線形性を考慮している。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、鉄筋-コンクリート間の付着応力-すべり関係には、従来手法と同様のモデルを用いた[13]。

3. RCはりの破壊実験を対象とした妥当性確認

（1）妥当性確認の概要

本研究では、RC部材の圧縮破壊および鉄筋の座屈を含むポストピーク挙動を再現することを所期の利用目的とし、着目する現象をRCはり部材における曲げ載荷試験、着目する応答指標を、はり上縁コンクリートの圧縮破壊後の残存耐力および鉄筋座屈時のたわみとした。なお、著者らは既往研究において、最大荷重および最大荷重時たわみを応答指標として妥当性確認を行っているが[14]、本研究は、さらにその後の破壊過程における挙動に着目している。

解析の正確度は、ASME V&V10で推奨されている、以下の式で算定される指標 M^{SRO} を用いて評価した[15]。

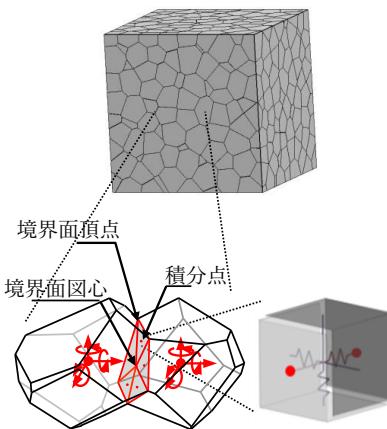


図-1 RBSM の概要

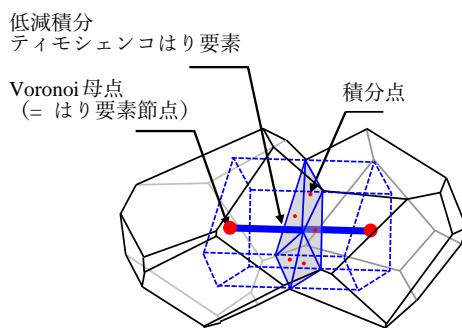


図-2 RBSM と等価な低減積分ティモシェンコはり要素

$$M^{SRQ} = \frac{1}{|\overline{SRQ}^{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ^{mod}}(y) - F_{SRQ^{exp}}(y)| dy \quad (1)$$

ここで、 $F_{SRQ^{mod}}(y)$ および $F_{SRQ^{exp}}(y)$ は応答量 SRQ に関する解析結果および実験結果の累積分布関数、 \overline{SRQ}^{exp} は実験で得られた応答量 SRQ の平均値である。

実験により得られた応答値の累積分布は、詳細は以降に示すが、同一条件で複数回実施した実験の応答値より算定される。解析の応答値の不確かさの定量化は以下のように実施した。まず、解析の入力条件のうち、着目する応答指標の不確かさに与える影響が大きい因子を抽出する。本研究では、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度を不確かさ因子として抽出した。つづいて、例えばモンテカルロ法などにより不確かさを評価するが、本研究例のように計算負荷が大きい場合にはこの方法は実用的ではない。その他の方法としては、応答曲面法など、比較的少数のパラメータセットを用いて応答値を算定し、その結果から代替モデルを作成し、代替モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行う方法などが適用されている。本研究では、後者の方法を適用した。具体的には、後で示す、少数のパラメータのセットで解析を実施して応答値を算定する。その結果から応答値の線形重回帰式を導き、これを代替モデルとして解析の応答値の不確かさを定量評価する。

(2) 実験概要

妥当性確認の対象とする実験は、RCはり部材の曲げ載荷実験である。この実験の特徴は、同一条件で15体の供試体の載荷を行っているところにあり[7,16]、全ての供試体で、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により荷重低下が生じ、その後、一定の荷重値を保ってたわみ変形が進展した後、鉄筋の座屈により2段階目の荷重低下が見られている[7,16]。図-3に試験体の概要を示す。コンクリート

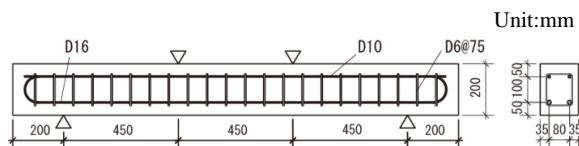


図-3 RCはり供試体の概要

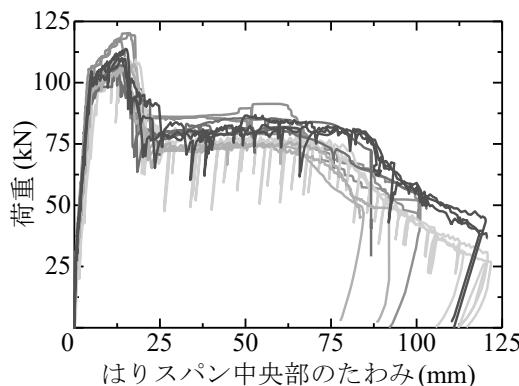


図-4 荷重ーたわみ関係



写真-1 RCはりの破壊性状

の圧縮強度は45.4N/mm²、引張側主鉄筋、圧縮側主鉄筋、スターラップの降伏強度はそれぞれ401N/mm²、398N/mm²、632N/mm²である。

図-4および写真-1に実験により得られた荷重とはりスパン中央のたわみ量の関係および試験終了後の破壊性状を示す。前述のように、全ての供試体で、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮破壊により最初の荷重低下が生じ、その後、一定の荷重値を保ってたわみ変形が進展した後、鉄筋の座屈により2段階目の荷重低下が確認された。ここで、本妥当性確認において設定した着目する応答指標である、はり上縁コンクリートの圧縮破壊後の残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみとは、それぞれ、荷重ーたわみ量関係における、鉄筋座屈時に生じた2段階目の荷重低下時の荷重値およびたわみ量である。

(3) 解析概要

図-5に要素分割図を示す。終局時において破壊が局所化する等曲げ区間においては、平均的要素寸法は20mmとした。計算負荷を低減させるためにせん断スパンでは、要素寸法が、はりの端部に向かって徐々に大きくなるように設定した。なお、2.(1)でも述べたように、使用した構成モデルおよび材料パラメータのセットは、最大粗骨材寸法程度の要素寸法（10~30mm）を用いることで軟化、破壊局所化領域などを含むコンクリートの各種応答力下の応力ーひずみ応答を再現できることが確認されているものである[2]。図-5に中の梁上部に配置した2つの載荷板要素を変位制御することで静的載荷を実施した。

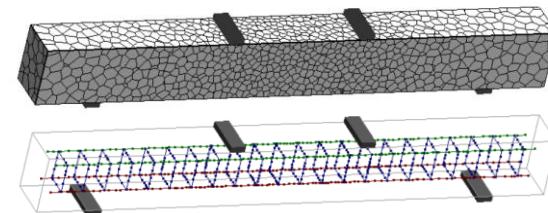


図-5 要素分割図

(4) 代替モデルの作成および不確かさ定量化

代替モデル（本研究では、線形重回帰式）の作成のために、前述の2つの因子（①コンクリートの圧縮強度、および②鉄筋の降伏強度）を3水準で変化させ、それぞれの値のすべての組み合わせを考慮した、計9ケースの解析を実施した。なお、それぞれの因子の3つの水準は、平均値、および平均値から、コンクリートの圧縮強度および主鉄筋の降伏強度は $\pm 2\sigma$ だけ振って値を設定した。ここで、 σ は標準偏差であり、コンクリートの圧縮強度は材料試験結果に基づいた値である[16]。鉄筋降伏強度の標準偏差は試験値が得られておらず仮に設定した値である。

図-6に、計9ケースの、RBSMモデルにより得られた残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみの値と、同じパラメータセットを線形重回帰式回帰式に代入して求めた残存耐力および座屈時たわみの値の対応関係を示す。図より座屈時たわみの線形回帰式の推定精度がやや低いことが分かる。

つづいて、得られた線形回帰式を用いて、解析により得られた残存耐力、および鉄筋座屈時のたわみの不確かさを定量評価する。図-7に解析および実験により得られた累積分布を示す。 M^{SRQ} を評価した結果、残存耐力では11.6%，座屈時たわみでは33.1%となった。

4. 結論

本研究は、RC部材の圧縮破壊および鉄筋の座屈を含むポストピーク挙動を再現することを所期の利用目的とし、着目する応答指標を1) 残存耐力および2) 座屈時たわみ

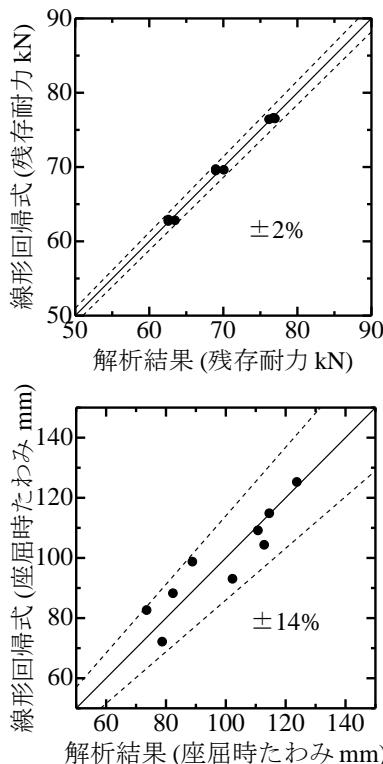


図-6 解析結果と線形回帰式との比較

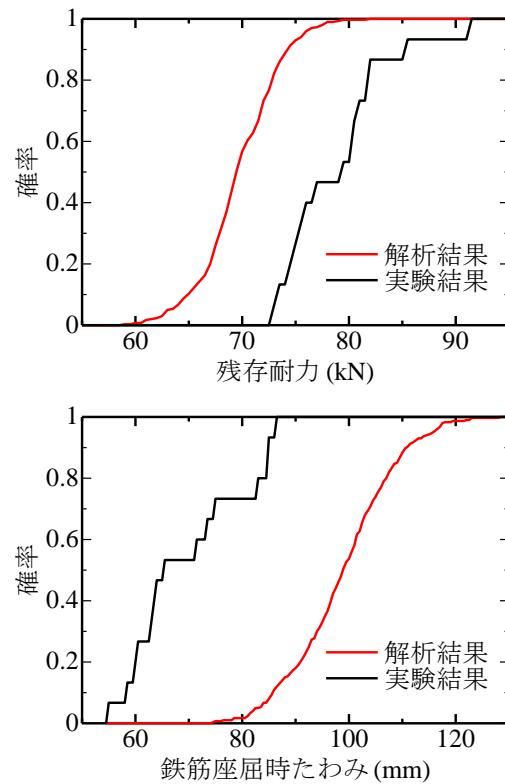


図-7 実験および解析の応答値の累積分布の比較

として検討を行ったものである。

同一条件で15体実施した実験結果、および不確かさを定量化して得られた解析結果の累積分布同士を比較して正確度 M^{SRQ} を評価した結果、残存耐力では11.6%，座屈時たわみでは33.1%となった。特に座屈時たわみの正確度は低いと考えられ、モデルの見直しをする必要がある。また、本研究では、不確かさ量化の際に、線形回帰式を代替モデルとして用いたが、特に座屈時たわみの場合には精度が低く、不確かさ因子の再検討、合理的な代替モデルの作成方法等も併せて検討する必要がある。

参考文献

- [1] 日本国際工学協会、コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用、日本コンクリート工学協会、2003.
- [2] 山本佳士、中村光、黒田一郎、吉屋信明：3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析、土木学会論文集E, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008.
- [3] Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I. and Furuya, N.: Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.8, Issue7, pp.780-792, 2014.
- [4] 伊佐治優、山本佳士、中村光、三浦泰人：幾何学的非線形性を考慮した離散鉄筋要素を導入した3次元RBSMによるRC部材のポストピーク挙動解析、コン

- クリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2号, pp.67-72, 2017.
- [5] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人 : 破壊の局所化および大回転変位を伴うRC構造物の破壊シミュレーションのための新しい離散体解析手法の開発, 計算工学講演会論文集, Vol.22, 2017.
- [6] 北川晴之, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人 : RBSMによる曲げ破壊するRCはりのポストピーク挙動評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2号, pp.73-78, 2019.
- [7] Yamamoto, Y., Isaji, Y., Nakamura, H. and Miura, T.: Collapse Simulation of Reinforced Concrete Including Localized Failure and Large Rotation Using Extended RBSM, Proceedings of 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-10), 2019.
- [8] Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structures, Nuclear Engineering and Design, V1.48, pp.207-229, 1978.
- [9] Toi, Y.: Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.31, pp.1537-1552, 1991.
- [10] Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Japan Society of Civil Engineers, No.627, V-44, pp.289-303, 1999.
- [11] Timoshenko, S. and Gere, J.: Theory of elastic stability, McGraw-Hill Inc., 1961.
- [12] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人 : 有限回転を考慮した3次元RBSMによるコンクリート材料のポストピーク挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.91-96, 2016.
- [13] 田上和也, 中村光, 斎藤成彦, 檜貝勇 : 繰り返し荷重を受ける鉄筋の座屈モデルに関する研究 : 構造工学論文集, Vol.47A, pp.725-734, 2001.
- [14] 山本佳士, 坂敏秀, 車谷麻緒 : RBSMを用いた鉄筋コンクリート部材の破壊シミュレーションにおける不確かさ評価と妥当性確認, 計算工学講演会論文集, Vol.26, 2021.
- [15] ASME:Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME Standard V&V 10-2006, 2006.
- [16] 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季, 車谷麻緒 : RCはりの耐荷・変形性状の再現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2号, pp.229-234, 2019.