

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420474

研究課題名(和文) 冗長性を含む耐震性能評価のためのRC構造物の崩壊シミュレーション手法の高度化

研究課題名(英文) Development of Collapse Simulation Method of Reinforced Concrete Structures For Seismic Performance Evaluation Including Ductility and Structural Redundancy

研究代表者

山本 佳士 (Yamamoto, Yoshihito)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70532802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物の倒壊挙動を精度良く再現可能な解析技術の確立は、重要な土木・建築構造物の高度な安全性の評価において非常に重要である。本研究では、大地震動を受けるコンクリート構造物の局所的な損傷進展過程、損傷領域ならびにシステム全体の倒壊挙動までを再現可能な手法を開発した。具体的には、コンクリートの破壊の局所化現象を定量的に再現可能な、構成モデルを適用した剛体バネモデルを、大変位・大回転挙動を再現可能になるよう拡張した。既往の実験との比較により、提案手法は、これまでに再現が困難であった、破壊の局所化挙動ならびに大変位・大回転を伴う倒壊挙動を良好に再現可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：A new formulation considering a finite rotational displacement is developed in the ordinary Rigid-Body-Spring Model (RBSM) in order to simulate large displacement and rotation collapse behavior of RC structure. In the proposed formulation, a finite rotation matrix by using axial vector is applied. The model is found effective, however, showed unnatural deformation behavior in a range of large rotation. Therefore, a new discrete analysis model is further developed based on the equivalence between RBSM and linear Timoshenko beam with applied reduced integration scheme. It is confirmed that this proposed model can simulate the large rotation behavior of concrete and RC structure including the localized failure behaviors.

研究分野：コンクリート工学、構造工学

キーワード：剛体バネモデル 幾何学的非線形 有限回転 局所化 冗長性

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物のポストピーク挙動までを精度よく再現する数値解析技術の確立は、大地震に対する重要構造物の高度な安全性の評価のために重要な役割を果たすものと考えられる。すなわち、この数値解析技術を実構造物に適用することによって、想定外作用を受けた場合の、複雑・高度化する土木・建築構造物のシステム全体の安全性の余裕度、リダンダンシーの評価が可能になり、また、既存構造システムにおける未知の脆弱性の発見、未知の現象メカニズムの解明にも大きく貢献するものと考えられる。

コンクリート構造物を対象とした数値解析手法としては、非線形 FEM が最も多く研究が行われてきており、静的荷重下および地震作用下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。このような背景のもと、現在、非線形 FEM は実務においても性能照査法として利用される段階にきている。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、その中でも重大なもの一つにコンクリートの圧縮軟化・局所化挙動の再現が挙げられる。

圧縮応力下のコンクリートは巨視的に見てひずみ軟化挙動を示し、低拘束圧状態においては破壊が 3 次元的な拡がりを持つ領域に集中し、その他の領域で除荷挙動が生じる、いわゆる破壊局所化挙動を示す。さらに、拘束圧が増大するにしたがい、強度が増大するだけでなく、脆性的な軟化挙動から延性的な塑性挙動へと遷移していく。コンクリート構造を対象とした非線形 FEM 解析技術の現状として、この圧縮応力下における拘束圧依存性を含む破壊局所化現象の再現は難しく、例えば圧縮軟化型の構成モデルを適用した場合、要素寸法に依存した、実験とは異なる領域に破壊が局所化してしまうなどの問題が知られている。

コンクリート構造物は、引張応力が卓越する領域には鉄筋等による適切な補強が施されるため、部材レベルの終局時にはコンクリートの圧壊が卓越するケースが多い。したがって、コンクリート構造物のポストピーク挙動の再現には、圧縮軟化・局所化挙動と拘束圧依存性挙動の適切な評価が必須となる。特に近年、耐震性能は、損傷を受けた構造物を含むシステム全体の機能回復までを考慮した復旧性と結びつけられて定義されており、その照査のためにも、上記の破壊局所化現象を定量的に精度良く再現し、局所化した損傷領域ならびにその程度、進展過程までの情報を提供する数値解析手法へのニーズは一層高まっていくと考えられる。しかしながら、手法を非線形 FEM に限定すれば、拘束圧依存を含む圧縮軟化・局所化挙動を定量的に再

現できるモデルは、例えば非局所理論あるいは Cosserat 理論等、従来の連続体理論を修正する方法が研究されているものの、その適用は未だ検討段階であり、現在のところ存在しないといっても過言ではない。さらに、各コンクリート部材が破壊の局所化を経て、システム全体が崩壊する挙動までを再現するためには、大変位・大回転挙動を再現可能な手法が必要となる。

2. 研究の目的

研究代表者は、メソスケール（粗骨材寸法程度）の力学挙動を想定した構成モデルを適用した 3 次元剛体バネモデル（以下、RBSM）を用いることで、コンクリートの圧縮軟化挙動、破壊局所化領域および拘束圧依存性挙動を定量的にも再現できることを明らかにしている。また、同手法に鉄筋を表現する梁要素と鉄筋とコンクリートの相互作用を表現するリンク要素を結合した解析手法により、1 軸圧縮を受ける横拘束コンクリートの破壊挙動評価を行っている。その結果、横拘束コンクリートの受動的な拘束効果による強度増加、軟化性状の変化および破壊局所化領域までを定量的に再現できることを明らかにしている。さらに、同手法を用いて鉄筋コンクリート部材の曲げ、せん断破壊解析も行っており、荷重-変位応答、実験で観察されるひび割れ進展挙動、破壊モードおよび破壊局所化領域までを良好に再現可能であることを確認している。本研究では、上述の提案手法を、構造システム全体の倒壊挙動までを再現できるように、現状では、微小変形の仮定で定式化している同手法を大変位・有限回転を考慮した手法へと拡張することを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、まず、大変位・大回転領域の挙動を再現可能にするために、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した 3 次元 RBSM を拡張する。さらに、鉄筋モデルに対しては、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した線形ティモシェンコ梁要素を適用する。最終的に既往の実験結果との比較により同手法の妥当性および有用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 解析手法の概要

RBSM は Kawai 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。

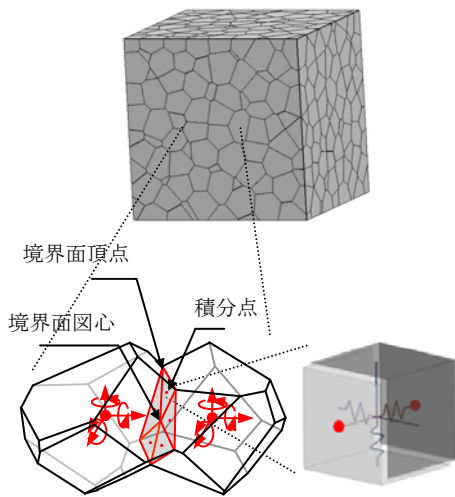


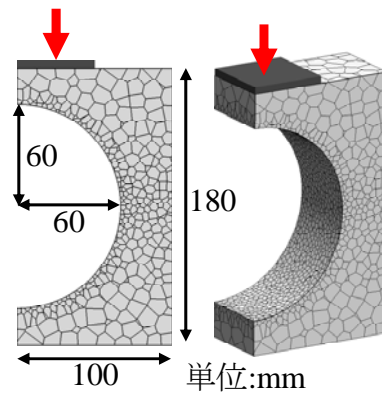
図-1 RBSM の概要

図-1 に示すように、3次元 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、提案した手法では、軸性ベクトルを用いた有限回転マトリクスを適用し、厳密な回転変位の算出を行っている。有限回転を考慮した RBSM の定式化は 5. 雑誌論文 3),5) および学会発表 2) を参照されたい。2 要素間の境界面上には、表面力の評価点として積分点を設定する。提案手法では、Voronoi 分割を用いたランダム多面体要素の適用を前提としており(図-1)、要素内の自由度設定点には Voronoi 母点を選択している。また、要素間の相対回転変位に対するモーメントの伝達を表現できるように、Voronoi 面を、Voronoi 面重心と Voronoi 面頂点からなる複数の三角形に分割し、その三角形の重心を積分点としている。積分点には垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系(垂直バネ 1 個、せん断バネ 2 個)を配置する。垂直バネおよびせん断バネに適用する構成モデルは、コンクリートの引張、圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動、ひび割れ面のせん断伝達挙動等、コンクリートの複雑な力学挙動を再現可能な構成モデルを適用する。

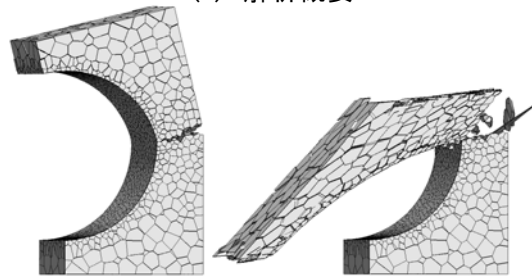
(2) 解析手法の妥当性および有用性

図-2 に、従来モデルおよび提案モデルにより得られた半円状の欠陥を有するコンクリート供試体の倒壊解析結果を示す。図より、従来モデルでは、ひび割れ貫通後の剛体回転変位を伴う倒壊挙動を再現できていないことが分かる。一方、提案モデルでは、ひび割れ貫通後の剛体回転挙動を再現していることが確認できる。

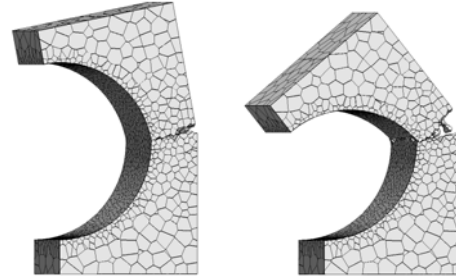
図-3 に、J.Nemecek et al.によって行われた、圧縮鉄筋の座屈を伴う RC 柱の偏心圧縮実験を対象として行った解析結果を示す。解析条件等の詳細は、5. 雑誌論文 5) を参照されたい。図より、従来モデルでは、鉄筋の座屈



(a) 解析概要



(b) 従来モデル

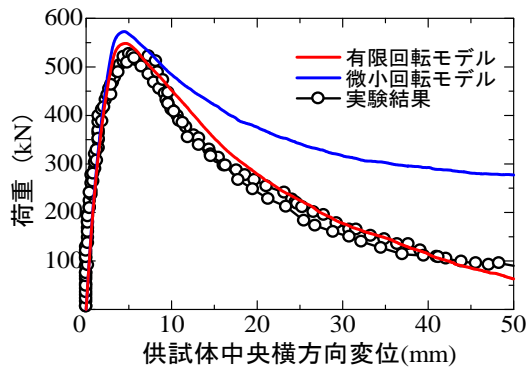


(c) 提案モデル

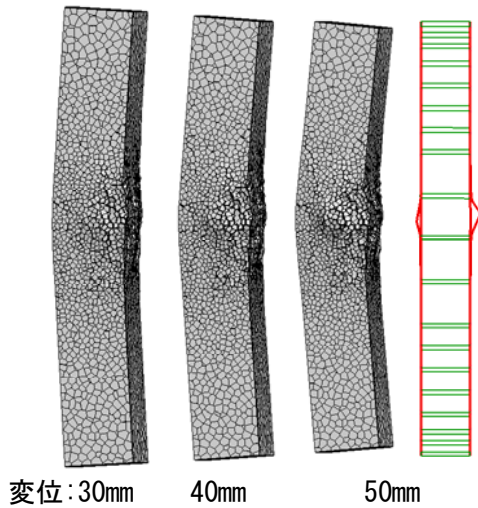
図-2 コンクリートの倒壊挙動

を再現できず、荷重-変位応答および破壊局所化領域を再現できていないことが分かる。一方、提案モデルでは、荷重-変位応答、鉄筋の座屈、破壊局所化領域を妥当に再現していることが分かる。

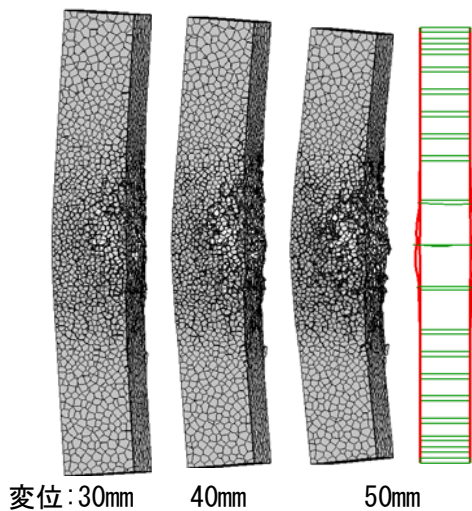
上述のように、提案モデルは従来モデルでは再現できない、鉄筋の座屈を含む破壊局所化挙動および倒壊挙動を再現できる一方で、要素間の相対回転変位がある一定値を超えると、要素同士が重なる挙動を示すこと、あるいは高拘束圧下で脆性的な挙動を示すなど、問題があることが分かった。本研究ではこの問題を解決する新たな手法の提案も行った。上述の問題点および新たな解析手法の詳細は、5. 学会発表 4) に譲るが、新たな提案手法は、RBSM と線形ティモシェンコ梁要素との等価性に着目し、剛体要素とバネからなる提案モデルを、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した線形ティモシェンコ梁のネットワークとして置き換えるというものである。同手法は、微小変形領域においては、従来の RBSM と完全に一致する挙動を示



(a) 荷重－変位関係



(b) 提案モデル

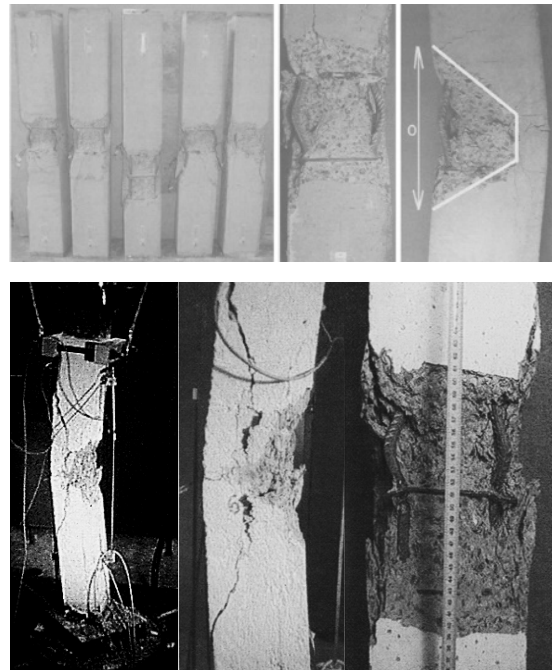


(c) 従来モデル

図－3 偏心圧縮解析

し、大回転領域においては、コンクリートの破壊の局所化、鉄筋の座屈、崩壊時の剛体回転挙動を再現でき、かつ前述の問題点を回避することができる。

なお同手法は既に動的解析手法へと拡張している。今後の課題として、部材同士が崩壊する過程で再接触する挙動のモデル化が



図－4 実験における試験後の破壊性状¹⁾

挙げられる。新たなモデルの追加により、さらに詳細な崩壊シミュレーションが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) J.Nemecek and Z.Bittnar : Experimental investigation and numerical simulation of post-peak behavior and size effect of reinforced concrete columns, *Materials and Structures*, Vol.37, pp.161-169, 2004

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- 1) 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, 2017.(掲載決定)
- 2) 山本佳士, 岡崎宗一郎, 別府万寿博, 中村光, 三浦泰人: 高速衝突を受ける鉄筋モルタルはり部材の裏面剥離発生メカニズムに関する解析的研究, *構造工学論文集* Vol.63A, 2017.
- 3) 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号 pp.91-96, 2016.
- 4) 岡崎宗一郎, 山本佳士, 別府万寿博, 中村光: RBSM解析による高速衝突を受ける鋼板補強モルタル梁の局部破壊機構評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 38, No. 2号, pp.745-750, 2016.

- 5) 山本佳士, 岡崎宗一郎, 別府万寿博, 中村光, 三浦泰人: RBSM による高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊挙動評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.61A, pp.945-957, 2015.

[学会発表] (計 4 件)

- 1) 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 構造物の倒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.
- 2) Yoshihito Yamamoto, Soichiro Okazaki, Hikaru Nakamura, Masuhiro Beppu and Taiki Shibata: Crack Propagation and Local Failure Simulation of Reinforced Concrete Subjected to Projectile Impact Using RBSM, Proceedings of ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2016.
- 3) 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

よるコンクリート構造物の倒壊シミュレーション, 計算工学講演会論文集, Vol. 21, 2016.

- 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 3 次元 RBSM によるコンクリートのせん断軟化・膨張挙動の評価, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 佳士 (YAMAMOTO YOSHIHITO)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70532802

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし