

論文 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

伊佐治 優^{*1}・山本 佳士^{*2}・中村 光^{*3}・三浦 泰人^{*4}

要旨：大変位・大回転を伴うコンクリート構造物の倒壊挙動を再現可能な数値解析手法の確立を目的とし、RBSM および離散鉄筋要素ともに有限回転を考慮した手法の開発を行った。同手法を用いて行った、RC 柱の偏心圧縮解析では、従来の手法では再現が困難な対象実験のポストピーク領域における荷重低下の様子および局所化領域・鉄筋座屈等の破壊性状を良好に再現した。また、配筋の異なる RC 柱を用いた両手法の比較解析より、鉄筋の座屈を伴わない範囲の問題であれば、従来の手法においてもポストピークまでの挙動を再現可能であり、座屈を伴うケースに対しては、有限回転の考慮が必要であることを確認した。

キーワード：RBSM, 離散鉄筋要素, 有限回転, ポストピーク挙動, 圧縮破壊, 局所化, 鉄筋座屈

1. はじめに

東日本大震災以降、土木・建築構造物の設計においては、設計地震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重要な課題となってきた。コンクリート構造部材レベルの軟化・局所化を含むポストピーク挙動、ならびに構造システム全体の倒壊挙動までを精度よく再現可能な数値解析技術の確立は、上記のような作用を受ける構造物の安全余裕度の評価および被害範囲の評価等を可能にし、より高度な設計のための有用なツールになるものと考えられる。

このような背景から、著者らは、位置、幅、角度等のひび割れの詳細情報から、各種応力下におけるコンクリート材料および部材レベルのポストピーク挙動、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¹⁾²⁾。さらに、著者らは上記手法を大変位・大回転挙動を伴う倒壊問題へ適用するために、既に有限回転を考慮した 3 次元 RBSM の開発を行っており、同手法のコンクリート材料レベルの応答に対する妥当性および有用性を確認している³⁾。一方、コンクリート構造レベルの応答を再現するためには、鉄筋のモデル化が必要となる。鉄筋のモデル化には、鉄筋の節等の幾何形状から 3 次元メッシュでモデル化する方法と、剛体要素内に離散的に配置したトラス要素あるいははり要素を用いた方法がある。著者らは、計算効率を考慮して、Saito⁴⁾らが提案している、はり要素およびリンク要素を用いた離散鉄筋要素を導入しているが、RC 部材レベルの倒壊挙動をシミュレートするには、RBSM 要素に加え、離散鉄筋要素も、大変位・大回転の挙動を

再現できるよう拡張する必要がある。

本研究では、有限回転を考慮した 2 節点線形ティモシェンコはり要素を離散鉄筋要素に適用し、コンクリートおよび鉄筋の挙動とともに、大変形・大回転に対応した手法の開発を行った。その後、同手法を用いて、偏心圧縮を受ける RC 柱のポストピーク挙動解析を行い、実験結果との比較により提案手法の妥当性の検証を行なうとともに、RBSM および鉄筋モデルへの幾何学的非線形性の考慮が力学応答および破壊性状へ与える影響の検証を行なった。さらに、従来の RBSM と本研究での提案手法それぞれの適応可能な解析対象の範囲の検証を行なった。

なお、本論文では有限回転を考慮したモデルを有限回転モデル、微小回転の仮定に基づいた従来のモデルを微小回転モデルとする。

2. 解析手法の概要

2.1 有限回転を考慮した RBSM

RBSM は Kawai により提案された不連続体解析手法の一つであり⁵⁾、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。

3 次元 RBSM では、剛体要素内の代表点に並進 3 自由度、回転 3 自由度の 3 次元剛体変位を設定し、隣り合う要素境界面上には、表面力の評価点として積分点を設定する。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。要素内には剛体変位場を仮定しており、一般的な RBSM では、要素の回転変位を、微小回転の仮定に基づく回転マトリクスを用いて算出しているが、有限回転を考慮した

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

RBSM では、軸性ベクトルを用いた有限回転マトリクス^{9,7)}を適用し、厳密な回転変位の算出を行っている。なお、著者らは既に、上記手法により弾性片持ち梁の大変位挙動解析およびコンクリート材料のポストピーク挙動解析を行っており、その妥当性および有用性を確認している³⁾。また、具体的な有限回転マトリクスの導出方法および定式化の過程は文献^{3),8)}を参照されたい。

2.2 有限回転を考慮した離散鉄筋要素

鉄筋のモデル化に Saito⁴⁾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、有限回転を考慮した 2 節点線形ディモシエンコはり要素⁷⁾を導入した。なお、有限回転の考慮の方法は、有限回転を考慮した RBSM と同様に、軸性ベクトルを用いた有限回転マトリクスを適用することで行っている。また、上記はり要素では、せん断ロッキング回避のため、はり軸方向に次数低減積分を適用しており、さらには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、澤部⁹⁾が提案しているモデルを用いた。

ここで、開発したはり要素の妥当性を確認するための解析の一例として、鉄筋の座屈解析結果を示す。ここでは田上¹⁰⁾によって行われた 1 軸圧縮を受ける鉄筋の座屈実験のうち、D19 鉄筋に対し細長比が 48 となるケースを対象とした。また、材料特性値として、降伏応力 341MPa、ヤング係数 $1.79 \times 10^5 \text{MPa}$ を与えた。解析では、座屈を生じさせるために、鉄筋軸方向中央部において、微小な水平応力($=0.4\text{N}$)を作用させることで、初期不正を与えた。図-1 に解析より得られた、圧縮応力-ひずみ関係を示す。図中には対象実験における実験結果および微小回転モデルによる解析結果を併せて示す。結果より、微小回転モデルでは、圧縮応力が降伏応力に達し、その後はひずみ硬化によって応力が上昇しており、実験の応答を再現できていないことが分かる。一方、有限回転モデルでは、実験で計測された、降伏応力に達すると同時に座屈が生じる挙動および座屈後の応力低下の挙動を良好に再現できていることが分かる。以上のことより、

開発したはり要素は、微小回転の仮定に基づくはり要素では再現が難しい、鉄筋の座屈挙動を再現可能なモデルであることが分かった。

3. 偏心圧縮を受ける RC 柱のポストピーク挙動解析

3.1 解析概要

J.Nemecsek et al.^{11),12)} 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解析対象に用いた。対象とした供試体は、高さが 1150mm、断面が 1 辺 150mm の正形状である。鉄筋は、 $\phi 12$ の主鉄筋を軸方向に 4 本、 $\phi 6$ の帯鉄筋を高さ中央部において 100mm 間隔で配置している。コンクリートの圧縮強度は 30.0 MPa、主鉄筋および帯鉄筋の降伏強度はそれぞれ 561 MPa, 314 MPa である。実験では、断面図心から 15mm 偏心して 1 軸圧縮を与えており、計測項目は鉛直方向の荷重および供試体中央部における横方向変位である。図-2 に解析モデルおよび鉄筋の断面分割を示す。解析モデルでは、計算負荷軽減のため、実験において破壊の集中した供試体中央部の要素寸法を 10mm と設定し、端部に向かうにつれて徐々に要素寸法を大きくしており最大で 20mm とした。解析における載荷方法は、供試体上下端の全面に厚さ 20mm の載荷板要素をピン支持として配置する。その後、上部の載荷板を 15mm 偏心した位置で鉛直下方向に変位制御することにより偏心圧縮載荷を行った。

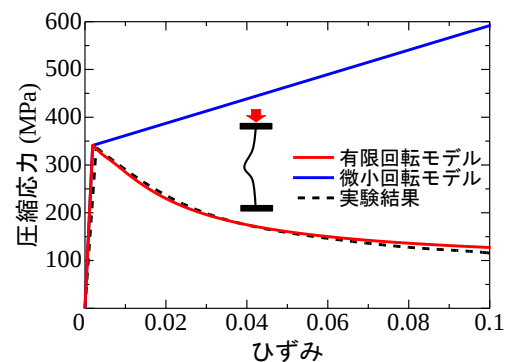
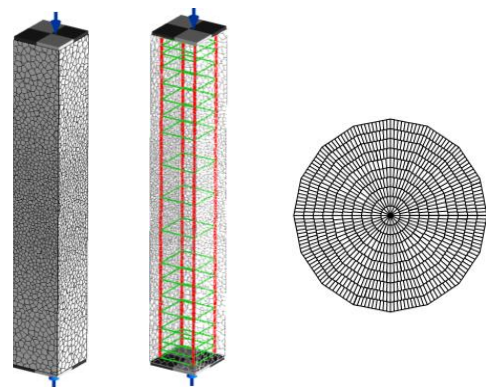


図-1 1 軸圧縮を受ける鉄筋の座屈挙動解析



(a) 要素分割と配筋状況 (b) 鉄筋の断面分割

図-2 解析モデル

3.2 構成モデルおよび材料パラメータの再同定

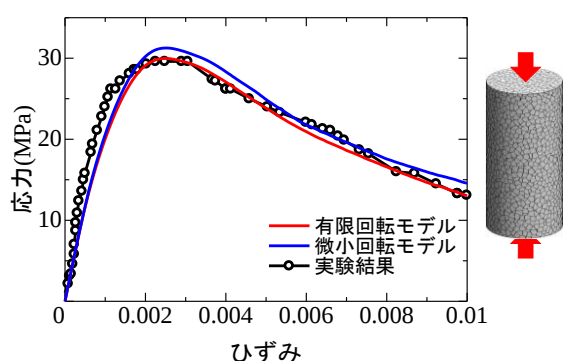
コンクリートの材料特性を表現する垂直バネおよびせん断バネの構成モデルには、著者らが提案している微小回転を前提とした従来の RBSM 用に構築した各種応力下のコンクリートの軟化・局所化挙動を再現できる構成モデル¹⁾を適用している。詳細は文献¹⁾に譲るが、提案している構成モデルの特徴は、垂直バネの圧縮応答に軟化を導入せず、垂直バネの引張軟化およびせん断バネの軟化の組み合わせで、コンクリートの標準供試体寸法程度の巨視的・平均的な引張・圧縮軟化、局所化挙動を再現しているところにある。また、提案モデルをはじめとする剛体バネ系の不連続解析手法ではメッシュの解像度が解析結果に影響する。提案モデルでは、圧縮破壊の局所化領域の大きさを定量的に再現可能な、最大骨材寸法程度のスケールの約 10mm 程度の要素寸法の使用を前提としてモデルの構築および材料パラメータのキャリブレーションを行っている。

なお、本研究で対象とした実験はポストピーク挙動に焦点があてられたものであり^{11),12)}、材料データとして、強度だけではなく、1 軸圧縮応力下におけるひずみ軟化域を含む応力-ひずみ関係の情報まで示されていた。ただし、そこで示されたデータは、著者らが文献¹⁾において、キャリブレーションの対象とした圧縮試験の応力-ひずみ関係における軟化特性よりもやや緩やかなものであった。そこで本研究では、文献¹⁾に示した構成モデルの材料パラメータを基準として、対象実験で提示されている 1 軸圧縮試験の特に軟化特性を対象に再度キャリブレーションした材料パラメータを用いた。なお、実験によって得られるひずみ軟化域の情報については、材料強度、骨材寸法、ひずみの計測方法や、試験装置の剛性、境界条件により大きく影響するため本来であればより詳細な検討が必要であるが、それは今後の課題としたい。

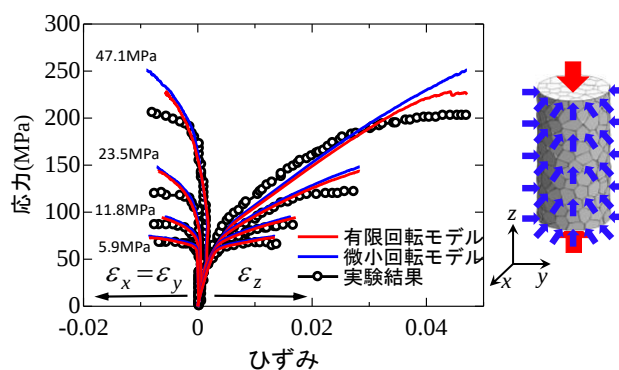
ここで、再同定した材料パラメータを用いた解析結果を示す。本解析では、平均要素寸法を、文献¹⁾で示した解析および図-2 で示したものと同様に約 10mm としている。また、構成モデルの変更は行わず、せん断バネの

破壊基準および軟化特性に関する材料パラメータのみを変化させた。具体的に変化させた材料パラメータは、文献¹⁾で示すせん断バネの破壊基準および軟化特性に関する材料パラメータ σ_b および β_0 , $\beta_{\max}$, χ であり、微小回転モデルでは、 σ_b および β_0 , $\beta_{\max}$, χ を $0.65 f_c'$ および -0.05 , -0.05 , -0.005 とし、有限回転モデルでは、 $0.60 f_c'$ および -0.01 , -0.01 , -0.003 とし、両モデルともにせん断バネの軟化特性がより緩やかな挙動を示すように値を修正した。 f_c' は材料試験より得られる圧縮強度の材料特性値である。なお、既往の研究における感度解析の結果より¹⁾、 σ_b および β_0 , $\beta_{\max}$, χ は、巨視的・平均的な圧縮応力下のひずみ軟化特性に対する感度が大きく、そのほかの 1 軸引張等の応答に対する感度は見られないパラメータである。ここで、両モデルで材料パラメータが異なる理由として、詳細は紙面の都合上省略するが、有限回転モデルでは、有限回転の考慮により、ポストピーク領域での抵抗機構において、微小回転モデルに対して若干変化し、差が生じるためである³⁾。

図-3(a)に、再同定したパラメータを用いて行った 1 軸圧縮解析の結果を示す。図より、微小回転モデルおよび有限回転モデルともに、実験における圧縮強度およびポストピークにおける軟化挙動を妥当に再現できていることが分かる。図-3(b)に同様の解析モデルに対して 3 軸圧縮解析を実施し、既往の実験結果¹³⁾との比較を示す。図より、両モデルともに、側圧の増加による強度増加や体積膨張の様子をよく捉えていることが分かる。再同定したパラメータを用いることにより、1 軸圧縮下のひずみ軟化特性が修正されたとしても、その他の材料試験の応答が再現できなくなればキャリブレーションとして適切ではない。本研究で再同定したパラメータでは、まず巨視的・平均的な 1 軸圧縮下のひずみ軟化特性が適切に修正されていることが分かる。次に 3 軸圧縮応答では、対象実験の材料データは示されていないので既往の他の実験結果¹³⁾との比較にはなるが、概ね再現できている。また、結果は省略するが、ここで変更したパラメータは前述のように巨視的・平均的な 1 軸引張特性に影響を与



(a) 対象実験における 1 軸圧縮試験との比較



(b) 藤掛らの 3 軸圧縮試験との比較

図-3 材料パラメータ再同定後の 1 軸圧縮解析および 3 軸圧縮解析結果

えない。すなわち、1 軸引張強度、およびその軟化特性も再同定したパラメータで良好に再現できる。これらのことから本研究における材料パラメータの再同定は適切に行われたと言える。

本研究におけるこれ以降の解析では、本節で示した再同定後のパラメータを用いて解析を行った。なお、本研究で適用した構成モデルにおいて必要となる材料特性値は、コンクリートの標準供試体試験により得られるコン

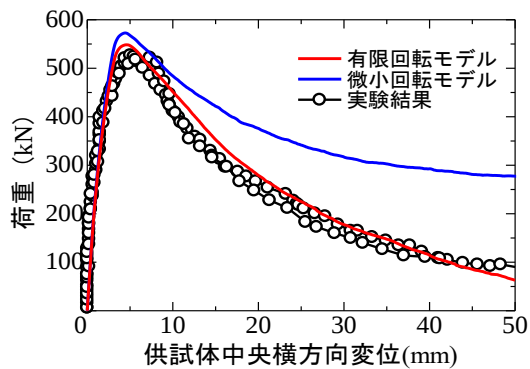


図-4 両モデルの解析結果および実験結果との比較

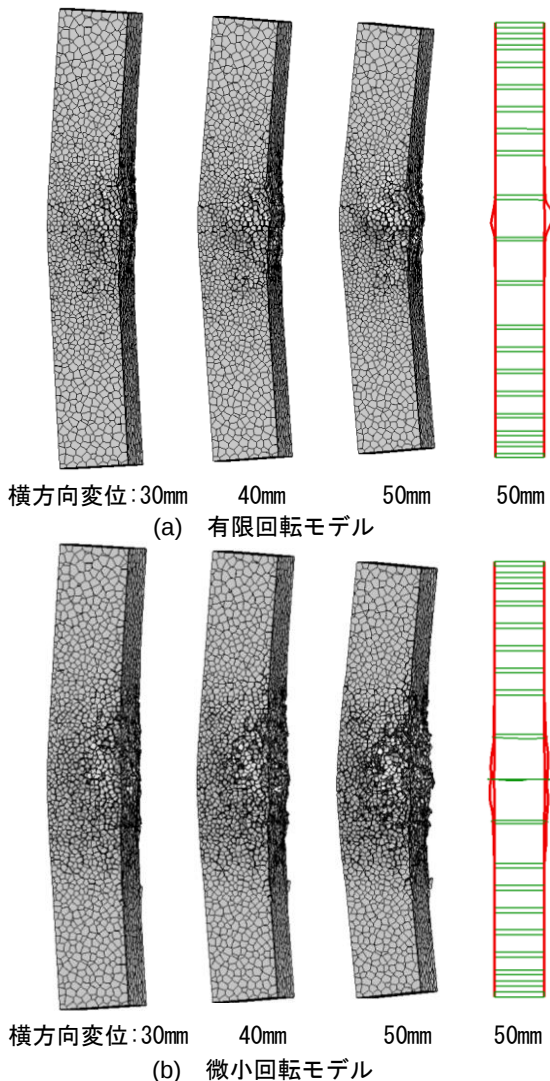


図-5 両モデルでの破壊性状および鉄筋の変形性状

クリートの圧縮強度、ヤング係数、引張強度および破壊エネルギーである。本研究では、対象実験における圧縮強度をもとに、コンクリートのヤング係数、引張強度および破壊エネルギーを、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]の提案式を用いて推定した。

3.3 解析結果

図-4 に両モデルによって得られた供試体中央部における横方向変位に対する鉛直方向荷重との関係を示す。図中には対象実験の結果を併せて示している。解析結果と実験結果を比較すると、微小回転モデルでは若干最大荷重を大きく評価しているが、両モデルとも、実験における最大荷重までの挙動を概ね再現できている。一方、ポストピーク領域においては、微小回転モデルでは、最大荷重以降、緩やかに荷重が低下し、最終的に一定の抵抗力を保持し続けているのに対し、有限回転モデルでは、急激に荷重が低下する挙動を示しており、対象実験で計測された力学応答を良好に再現できていることが分かる。

次に、両モデルにおける破壊性状および横方向変位 50mm 時点での鉄筋の変形性状を図-5 に示す。両図より、横方向変位が 30mm の時点では、両モデルにおいて変形・破壊性状に大きな違いは見られない。しかしながら、横方向変位が増大するにつれ、微小回転モデルでは、破壊が卓越する領域が柱高さ方向および断面方向に広がっているのに対し、有限回転モデルでは、横方向変位が大きな領域においても、供試体中央部の比較的狭い領域で破壊が局所化していることが分かる。次に鉄筋の変形性状を見ると、微小回転モデルでは、帯鉄筋の 2 区間で主鉄筋の横方向変形が顕著になっているのに対し、有限回転モデルでは、主鉄筋が帯鉄筋の 1 区間で座屈挙動のように横方向変形が卓越している様子が確認できる。

図-6 に解析対象とした供試体の試験終了後の写真を示す。図より、対象実験における供試体の破壊性状を見ると、供試体中央部に破壊が集中し、端部領域では破壊が起きていないことから、破壊が局所化している様子が確認できる。さらに、内部の鉄筋の変形性状を見ると、主鉄筋が帯鉄筋の 1 区間で座屈している様子も確認でき

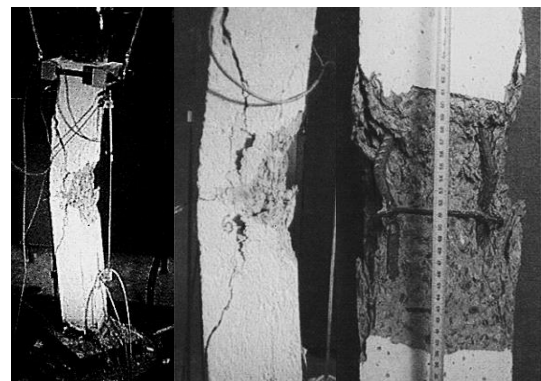


図-6 実験における試験後の破壊性状¹¹⁾

る。実験における破壊性状と、両モデルでの解析結果を比較すると、有限回転モデルでは、実験で見られた局所化領域や主鉄筋の座屈といった特徴的な破壊挙動をよく再現できていることが分かる。

3.4 配筋の異なる RC 柱を用いた両モデルの比較解析

3.3 で示した解析結果より、本研究で行った解析では、両モデルでポストピーク領域において、力学応答および破壊挙動に顕著な違いが確認された。そこで、本節では従来の解析手法である微小回転モデルが再現可能な問題の範囲および本研究の提案手法である有限回転モデルがどのような問題に対して必要となるのかの検証を行った。

ここでは、本研究で解析対象とした RC 柱に対して、配筋を変更した供試体モデルを作成し、両モデルを用いて解析を行った。図-7 に解析モデルを示す。供試体寸法は 3.3 の供試体と同様のものであるが、偏心圧縮荷重を行った際の、引張側のみに主鉄筋を配置し、供試体中央部には帯鉄筋を設けないモデルとした。解析モデルにおける要素寸法は 3.3 のモデルと同様であり、コンクリート・鉄筋の材料特性値、材料パラメータおよび載荷方法も同様としている。

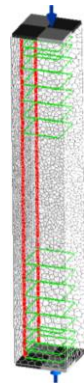


図-7 解析モデル

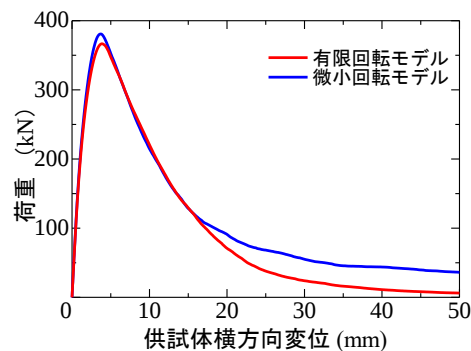


図-8 配筋の異なるケースに対する両モデルの解析結果

図-8 に両モデルによって得られた供試体中央部における横方向変位に対する鉛直方向荷重との関係を示す。解析結果より、両モデルともほぼ同様の荷重-変位関係を示しており、ポストピーク領域での荷重低下の様子においても大きな差は見られない。図-9 に両モデルにおける破壊性状および横方向変位 50mm 時点における鉄筋の変形状を示す。両モデルでの破壊性状を比較すると、横方向変位が大きな段階において、微小回転モデルでの破壊領域が若干大きくなっているものの、両モデルで概ね同様の破壊性状を示していることが分かる。なお、破壊性状に若干の差が表れた要因としては、RBSM 要素への有限回転の考慮によるものであると考えられる。一方、内部の鉄筋の破壊性状を見ると、両モデルでその挙動に全く差は見られなかった。

これら上記の解析結果および 3.3 の結果より、微小回転モデルの適用可能な問題範囲および有限回転モデルが必要と考えられるケースについて以下のようなことが言える。微小回転モデルでは、本節で示した解析結果および本研究室で行われた既往の研究結果¹⁴⁾より、圧縮鉄筋の座屈を伴わない問題であれば、曲げ破壊やせん断破壊

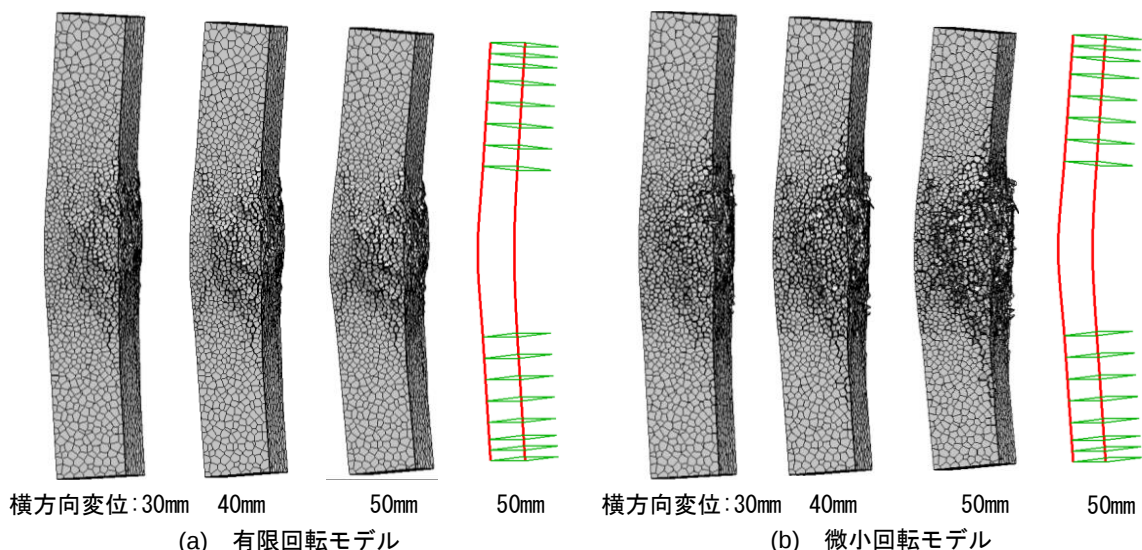


図-9 両モデルにおける破壊性状および鉄筋の変形状

といった各種モードの破壊現象をポストピーク領域まで再現可能である。一方、有限回転モデルでは、座屈を伴うような問題における破壊局所化現象等の再現が可能であり、そのような問題に対しては有限回転モデルが必要であると言える。

4. 結論

本研究では、有限回転を考慮した2節点線形ティモシェンコはり要素を用いることで、RBSM、および離散鉄筋要素ともに有限回転を考慮した解析手法を開発した。提案手法を用いて、偏心圧縮を受けるRC柱のポストピーク挙動解析を行い、既往の実験との比較により、提案手法の妥当性の検証を行った。さらに配筋の異なるRC柱を用いた両モデルの比較解析を行い、両モデルの適用範囲の検証を行った。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) RC柱の偏心圧縮解析では、有限回転モデルより得られた力学応答は、実験における最大荷重およびポストピーク領域での荷重低下の様子を良好に再現できた。
- 2) 両モデルより得られた破壊性状から、破壊の局所化領域および鉄筋の座屈挙動に顕著な違いが表れることが確認された。さらに、実験における破壊性状と比較すると、有限回転モデルは、その破壊性状をよく再現できていることが分かった。
- 3) 配筋の異なるRC柱を用いた両モデルの比較解析より、鉄筋の座屈を伴わない範囲の問題であれば、微小回転モデルでもポストピークまでの挙動を再現可能であり、座屈を伴うケースに対しては、有限回転の考慮が必要であることが分かった。

本研究の結果より、提案手法の有限回転モデルは、ポストピークから終局時にいたるまでのRC部材の力学性能やRC構造物の倒壊挙動等の評価に対して有用であると考えられる。そのため、今後はより大変位領域の破壊現象をターゲットとした、実験および解析の両側面から検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費26420474の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 山本佳士，中村光，黒田一郎，古屋信明：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
- 2) Yoshihito Yamamoto，Hikaru NAKAMURA，Ichiro

KURODA，Nobuaki FURUYA：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

- 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，pp.91-96，2016
- 4) 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
- 5) Kawai，T.：New discrete models and their application to seismic response analysis of structures．Nuclear Engineering and Design. 48，pp.207-229，1978
- 6) Argyris.J：An excursion into large rotations，Computer methods in applied mechanics and engineering，Vol.32，pp.85-155，1982
- 7) 野口裕久，久田俊明：非線形有限要素法の基礎と応用，pp.223-225，丸善株式会社，1995
- 8) 川井忠彦：不連続体力学のすすめ(その4) - “剛体バネ”モデルによる有限回転変位問題の解析 - ，生産研究，35巻，5号，pp.1-5，1983
- 9) 澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じたRCはりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集，Vol.62，No.2，pp.444-461，2006
- 10) 田上和也，中村光，斉藤成彦，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
- 11) 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
- 12) J.Nemecek，P.Padevet，B.Patzak and Z.Bittnar：Effect of transversal reinforcement in normal and high strength concrete columns，Materials and Structures，Vol.38，pp.665-671，2005
- 13) 藤掛一典，上林勝敏，大野友則，水野淳，鈴木篤：ひずみ速度効果を考慮した三軸圧縮応力下におけるコンクリートの直行異方性構成モデルの定式化，土木学会論文集，No.669，V-50，pp.109-123，2001
- 14) Y.H. Gedik，H.Nkamura，Y.Yamamoto，N.Ueda and M.Kunieda：Effect of Stirrups on the Shear Failure Mechanism of Deep Beams，Journal of Advanced concrete technology，JCI，Vol.10，pp.14-30，2012