

論文 RBSM による曲げ破壊する RC はりのポストピーク挙動評価

北川 晴之*1・山本 佳士*2・中村 光*3・三浦 泰人*4

要旨 :RC はり部材のポストピーク挙動に対する RBSM の再現性を検証するために、応答値のばらつきの定量的な評価を目的に実施された RC はり曲げ載荷実験を対象に、同手法を用いて解析を行った。対象実験は、同一条件下で 15 体の載荷実験を行っており、ばらつきが評価された実験結果と解析結果の比較を行うことができる。検証の結果、提案する解析手法では、1)最大荷重および最大荷重低下後のある一定の領域までは、微小変形モデルおよび幾何学的非線形モデルの両方で実験結果を再現できること、2)15 体すべての供試体で観察された、2 段階目の荷重低下は、幾何学的非線形性を考慮することで再現できることが分かった。

キーワード : RBSM, 幾何学的非線形性, ポストピーク挙動, 圧縮破壊, 局所化, 鉄筋座屈

1. はじめに

コンクリート構造物を対象とした数値解析手法は、非線形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形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⁾。

また、RC 構造部材のポストピーク挙動を対象とした実験的な研究もこれまでに数多く行われている。なお、ポストピーク挙動は、コンクリート材料のばらつきのみならず、載荷装置の剛性や載荷速度など様々な要因の影響を受けることが知られており、実験から得られる応答値のばらつきは大きくなると考えられる。米国機械学会（以下、ASME）の V&V（Verification & Validation：検証と妥当性確認）のガイドライン²⁾、あるいは日本原子力学会、「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン」³⁾では、計算モデルの Validation（妥当性確認）のためには、検証用に特化した実験を行い、各種の不確かさを定量化したうえで、計算モデルの妥当性を確認することの重要性が述べられている。しかしながら、通常、RC 部材の載荷実験では同一条件に対して 1 回の実験がほとんどであり、RC 部材のポストピーク挙動におけるばらつきは十分に把握されていない。

一方、著者らは、各種応力下におけるコンクリート材料の軟化・局所化挙動および部材レベルのポストピーク挙動、特に現状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^{4),5)}。さらに、部材のポストピーク域における大変位・大回転挙動も再現

可能なように、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^{6),7)}。同手法の、RC 部材のポストピーク挙動シミュレーションの妥当性は、既往の RC 柱の偏心圧縮実験との比較により確認しているものの、対象とした実験は、ばらつきが評価されていないものであり、したがって、提案モデルの妥当性の確認は十分ではなかった。

以上のような背景から、本研究は、同一条件で実施した 15 体の曲げ引張破壊型 RC はりの載荷実験を対象に、上記の提案モデルで解析を行い、特に、荷重-変位応答の定量的な再現性および破壊進展過程の定性的な再現性について妥当性の確認を行ったものである。また、既往の研究において、ポストピーク域の荷重-変位応答には着目されているものの、供試体内部でどのように破壊が進展し、抵抗機構が変化しているかについては十分に理解されていない。本研究ではさらに、実験で観察された、鉄筋降伏後、はり上縁の圧縮破壊により荷重が低下した後につづく、耐荷・破壊進展現象についても、数値解析的に評価を行った。

2. 解析手法

2.1 コンクリートモデル

本研究では、コンクリートを Voronoi 分割によるランダムな形状を有する 3 次元剛体バネモデル(RBSM)によりモデル化した。RBSM は対象を剛体要素と要素間のバネにより離散化する手法である。要素間のバネは図-1 に示す様に、要素境界面の重心と頂点からなる 3 角形の重心に配置される。バネは境界面法線方向の垂直バネが 1 成分と水平方向のせん断バネ 2 成分から構成される。このように複数のバネを配置することで、境界面内の応力の分布を再現でき、回転バネを導入することなく、モ

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 准教授 博士 (工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 博士 (工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助教 博士 (工) (正会員)

ーメントの伝達を簡易に表現できる。

コンクリートの構成モデルには RBSM のバネに、コンクリートのひび割れ、圧縮軟化、拘束圧依存性挙動を再現できる非線形構成モデルを導入した。具体的には垂直バネの圧縮挙動に、図-2 に示す、軟化を仮定しない逆 s 字型の応力ひずみ関係を導入し、引張挙動には図-3 の 1/4 モデルを導入した。また、せん断バネには、図-4 のモール・クーロンの破壊基準に従う軟化挙動を仮定した。この時、図中のパラメータについて、 E はコンクリートのヤング係数、 σ_c は圧縮挙動に関わるパラメータ、 σ_t は引張強度、 ϕ は内部摩擦角、 c は粘着力である。構成モデルに関するパラメータの決定は、既往の研究⁴⁾を参考にした。

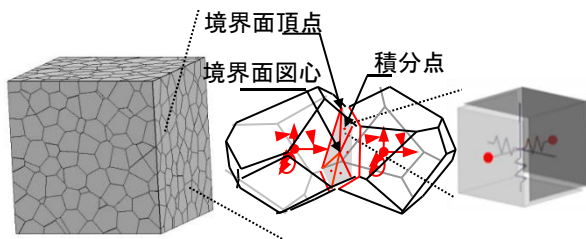


図-1 RBSM の概要

2.2 鉄筋モデル

鉄筋は、Saito⁸⁾らが提案している離散鉄筋要素によりモデル化した。この離散鉄筋要素では、図-5 の様に鉄筋を梁要素によりモデル化する。梁要素節点に配置した、リンク要素と呼ばれる長さ 0 のバネで、RBSM と梁要素を結合している。このリンク要素の構成モデルに非線形性を導入することで、鉄筋-コンクリート間の付着すべり挙動を表現している。鉄筋の構成則にはバイリニア型

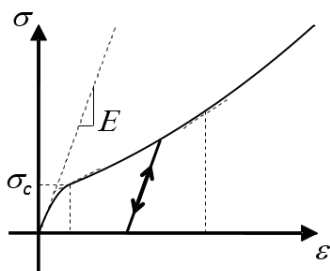


図-2 垂直バネの圧縮挙動

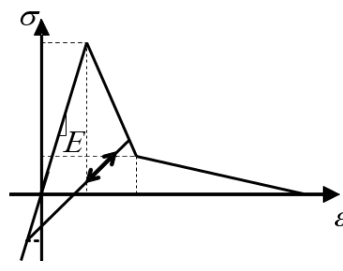


図-3 垂直バネの引張挙動

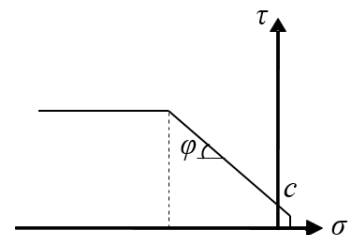


図-4 モール・クーロンの破壊基準

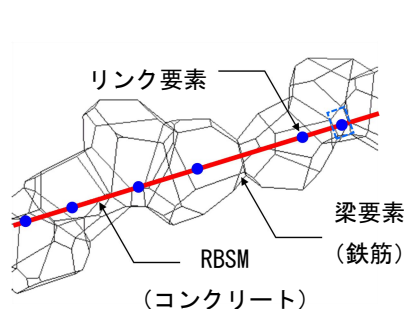


図-5 離散鉄筋要素の概要

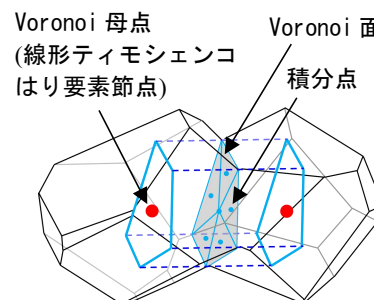


図-6 提案手法の概念

の応力-ひずみ関係を仮定し、鉄筋降伏後の二次勾配を $1/100E_s$ とした。ここで、 E_s は鉄筋のヤング係数である。鉄筋の付着-すべり挙動には、澤部ら⁹⁾の提案しているモデルを適用した。

2.3 幾何学的非線形性の考慮⁶⁾

幾何学的非線形性を考慮には、著者らが提案している、RBSM と線形ティモシェンコはり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⁶⁾。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線形ティモシェンコはり要素⁶⁾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。Toi¹⁰⁾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の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積分点を持つ1点積分線形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、線形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。すなわち、2つの剛体要素間の力学モデルとして線形ティモシェンコ梁を仮定すれば、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、

線形ティモシェンコはり要素の断面内の積分点は、従来の手法と同様に、Voronoi 面の重心と頂点からなる三角形の重心に配置 (図-1) 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を使用した。同一のものを使用しても、前述したコンクリートの各種応力下の圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動は定量的にも妥当な精度で再現できることを確認している。

3. 曲げ破壊する RC はりのポストピーク挙動解析

3.1 実験概要

図-7 に実験供試体の寸法および境界条件を示す。本研究では、全長 1750mm、高さ 200mm、奥行き 150mm のはりを対象として、4 点曲げ載荷試験を行った。供試体には、引張鉄筋として D16 を 2 本、圧縮鉄筋として D10 を 2 本配置し、かぶりを 50mm とした。また、スターラップには D6 を使用し、供試体全体に 75mm 間隔で配置した。境界条件は、支承を左端から 200mm および 1550mm の位置に配置し、載荷板を左端から 650mm および 1100mm の位置に配置した。なお、本対象実験は、コンクリート構造分野のシミュレーションの Verification & Validation, 特に不確かさ評価を含む Validation に向けた基礎的な検討として、RC 部材の載荷実験におけるばらつきなどの定量的な評価のために実施した実験である。同実験は、同一の工場で作成した RC はり供試体を、5 つの研究機関で、詳細は異なるもののほぼ同一の条件下で、それぞれ複数の供試体に対して 4 点曲げ載荷を実施している。したがって、ここでは、材料のばらつきおよび境界条件や載荷装置の詳細の違いに起因するばらつきを含む計 15 体分の実験結果との比較を行う。

コンクリートの材料特性は 5 つの研究機関で、3 体ずつ、計 15 体の円柱供試体を用いて計測された。その結果、圧縮強度は、平均値 45.4N/mm²、標準偏差 2.35N/mm² であり、静弾性係数は、平均値 34.0kN/mm²、標準偏差 2.09kN/mm² であった。鉄筋のヤング係数と降伏強度は、引張試験により求めた。D16 のヤング率は 186kN/mm²、降伏強度は 401N/mm² であり、D10 の降伏強度は 398N/mm² であった。D6 は明確な降伏棚を示すことは無く、破断強度は 632N/mm² であった。

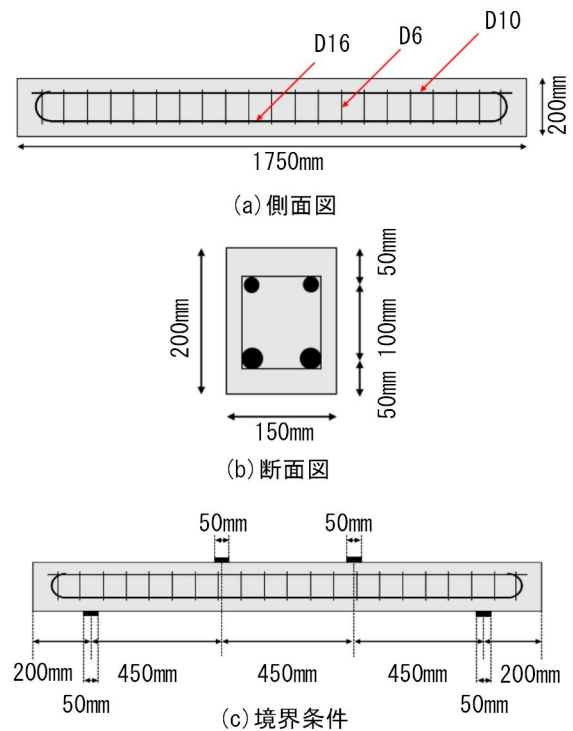


図-7 供試体寸法および境界条件

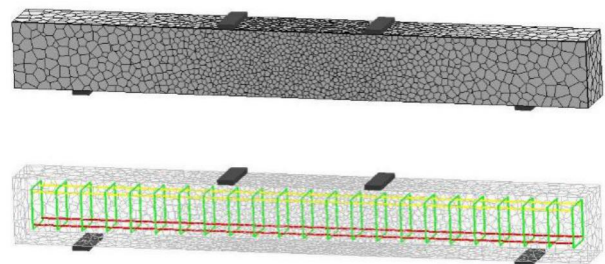


図-8 解析モデル概要

3.2 解析概要

解析モデルを図-8 に示す。RBSM の平均要素寸法は等曲げ区間内において、10mm であり、等曲げ区間外では、長手方向両端部に向かうにつれて 10mm から徐々に要素寸法を大きくし、両端部で 30mm になるようにした。境界条件は、モデル下部の載荷板を単純支持とし、解析モデル上部に設置された、二つの載荷板要素を同時に変位制御することにより載荷した。材料パラメータについては、試験により得られたコンクリートの圧縮強度および、鉄筋のヤング係数、降伏強度を採用した。コンクリートの他の力学特性については、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に示されている設計式を用いて、圧縮強度から算定した。

3.3 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-9 に実験および解析により得られた荷重-変位関係を示す。

まず、実験結果に着目すると、いずれの供試体も中央変位が 15mm 前後で最大荷重に達し、一度目の荷重低下が生じている。その後、荷重はほぼ横ばいの値を示し、中央変位 70~90mm で二度目の荷重低下が生じている。表一、二に全供試体の曲げ降伏時、最大荷重時および 2 段階目の荷重低下時の荷重および変位の平均値、標準偏差および変動係数を示す。最大荷重時以前と同様、ポスピーク時の応答も荷重に対して、変位のばらつきが大きくなっていたが、変動係数がやや大きい傾向にあった。

次に解析結果に着目する。比較のため、解析結果は、微小変形の仮定に基づいた RBSM と、幾何学的非線形性を考慮した RBSM による結果を示す。両者を比較すると、最大荷重に達し、荷重が低下した直後まではほぼ同様な挙動を示している。実験結果と比較すると、荷重が低下した直後までは、両モデルとも、実験値の幅の範囲内にある。しかしながら、微小変形モデルでは最初の荷重低下後、一定の荷重を保ち続けている様子が確認できる。すなわち、微小変形モデルでは、実験において 15 体の供

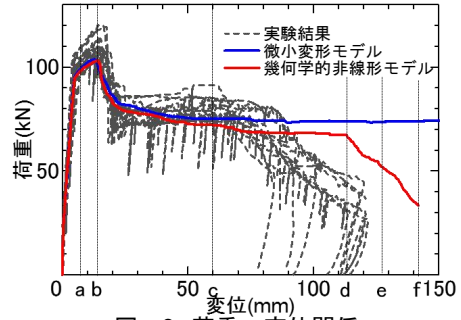


図-9 荷重-変位関係

表一 応答値のばらつきの比較(荷重)

	曲げ降伏時	最大荷重時	二段階目の荷重低下直前
平均値(kN)	99.6	111	80.2
標準偏差(kN)	4.01	4.32	4.54
変動係数(%)	4.03	3.89	5.66

表二 応答値のばらつきの比較(変位)

	曲げ降伏時	最大荷重時	二段階目の荷重低下直前
平均値(mm)	5.14	14.8	69.6
標準偏差(mm)	0.62	1.67	9.89
変動係数(%)	12.1	11.3	14.2

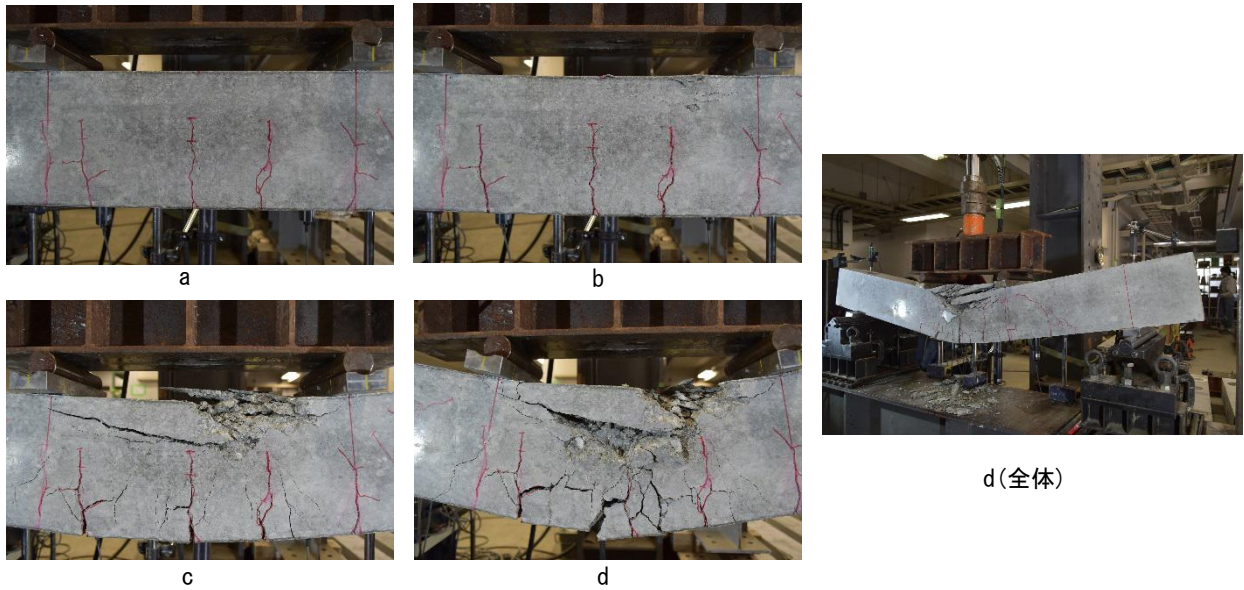


写真-1 実験における局所化挙動の一例

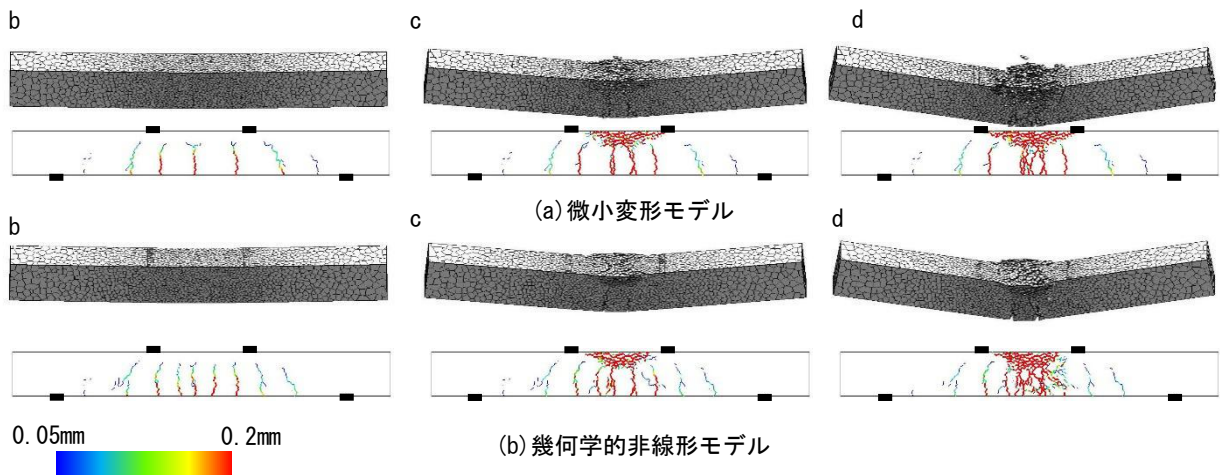


図-10 変形図および表面ひび割れ図

試体のすべてで確認された2回目の荷重低下が再現できなかった。一方、幾何学的非線形性を考慮したケースでは、実験の幅を外れており、定量的には再現できていないが、定性的には2回目の荷重低下を再現できている。

(2) 破壊性状

写真-1に実験におけるRC梁の破壊進展過程および局所化挙動の一例を示す。ここで、図中の記号は図-9中の記号と対応している。実験では、15体全ての梁で共通の破壊進展過程が確認された。具体的には、まず、最大荷重に達したb点で、等曲げ区間内のはり上縁でコンクリートの圧壊が観察された。以降はb点で圧壊が観察された点を中心に破壊が局所化していく。その後、c点で見られるように、等曲げ区間のかぶりコンクリートが面外方向にはらみ出す。さらに変形が進展し、d点で見られるようにコアコンクリートの圧壊が観察された。

図-10に解析により得られた変形図および解析モデル表面におけるひび割れ図を示す。図に添えられた文字は、写真-1と同様、図-9中の文字と対応している。ひび割れ図に着目すると、荷重がピークに到達する前の時点では等曲げ区間の内外を問わずひび割れが広く発生している。しかしながら、ポストピーク域においては、ひび割れ進展は等曲げ区間に集中し、損傷が局所化している。この局所化領域の大きさを、写真-1中の実験供試体の性状と比較すると、微小変形モデルおよび幾何学的非線形性を考慮したモデル、どちらのモデルでも概

ね再現していることが分かる。

(3) ポストピーク域における破壊進展メカニズム

図-9の荷重-変位関係では、幾何学的非線形性を考慮することで、実験で見られたポストピーク域における2回目の荷重低下を定性的ではあるが再現していた。ここでは、この現象のメカニズムについて解析的に評価する。

図-11に等曲げ区間における、軸方向鉄筋近傍の断面におけるはり軸方向の垂直応力分布および、上面から見た鉄筋の変形図を示す。図中の記号は、図-9中の変位点と対応している。なお、図-11のはり軸方向垂直応力分布は以下のように計算している。まず、1つの剛体要素を、要素重心を通り、はり軸方向に垂直な面で切断する。そしてその自由体の力の釣り合いから、切断面に作用する内力を求め、切断面面積で除することで計算している。ここで、本来であれば、幾何学的非線形モデルの場合、応力は、変形後の剛体要素の位置およびパネの方向を用いて、上記の計算をしなければならない。しかしながら、本研究では、可視化プログラムの都合上、要素位置、パネの方向を更新せず、初期の位置、パネの方向を用いて応力を計算している。この仮定が結果に与える影響は十分検証する必要があるがこのことは今後の課題としたい。

はじめに、応力分布に着目すると、プレピーク時からピークにかけて、はり上縁の圧縮応力が増加し、その後、ポストピーク域に入ると、はり上縁の圧縮応力の低下が

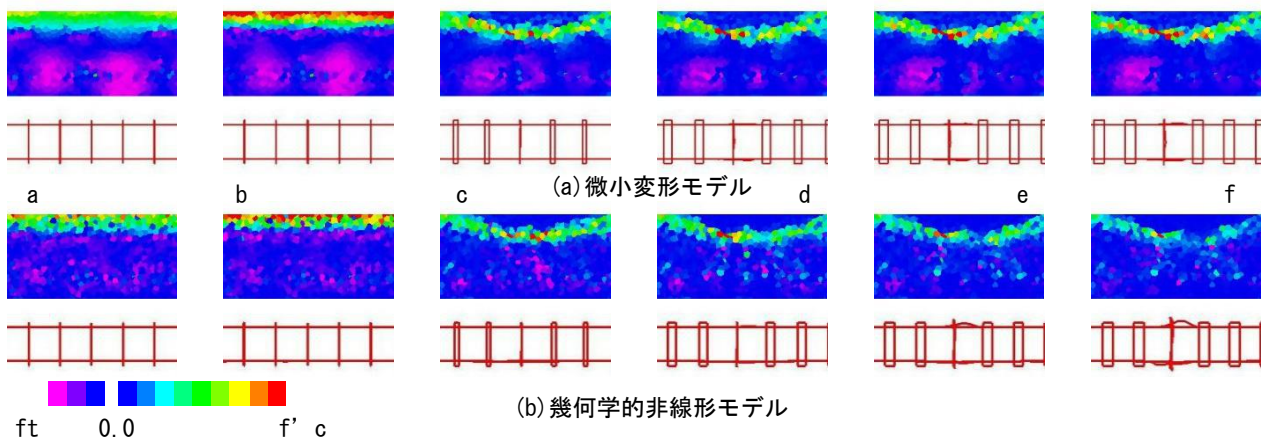


図-11 等曲げ区間内の応力分布/鉄筋変形図（上面）



写真-2 圧縮鉄筋の座屈

確認できる。これは、上縁コンクリートが圧壊したためである。上縁の圧壊後は、圧縮鉄筋とスターラップで囲まれた、まだ抵抗機構を残しているコアコンクリートで圧縮応力が大きくなっている様子が確認できる。この時点まででは幾何学的非線形性の考慮の有無で応答の違いは見られない。しかしながら、さらに変位が増加すると、微小変形モデルでは、上縁応力に変化が見られないのに対して、幾何学的非線形性を考慮したモデルでは、コアコンクリート部で生じていた圧縮応力の低下が確認できる。ポストピーク域における鉄筋の変形挙動を確認すると、微小変形モデルでは、圧縮鉄筋に顕著な変形は見られない。一方、幾何学的非線形性を考慮したモデルでは、部材奥行き方向に鉄筋が座屈していることが分かる。また、実験でも、15体全ての供試体で、写真-2に示す様に、供試体中央部で圧縮鉄筋が座屈していた。供試体ごとに座屈した位置には、ばらつきがあるものの、いずれも、スターラップ1区間分が座屈していた。さらに、鉄筋が座屈した部分で、コアコンクリート圧壊していることが確認された。

これらのことから、解析結果におけるd点以降の荷重の急落は、圧縮鉄筋およびスターラップにより囲まれたコアコンクリートが、鉄筋の座屈により拘束を失い、圧縮破壊したためと考えられる。

4. 結論

本研究は、同一条件で実施した15体の曲げ引張破壊型RCはりの載荷実験を対象に、提案モデルで解析を行い、特に、荷重-変位応答の定量的な再現性および破壊進展過程の定性的な再現性について妥当性の確認を行ったものである。以下に得られた結論を示す。

- 1) 同一の工場で作成した15体のRC梁の曲げ載荷試験が、同一の境界条件の下で行われた。その結果、荷重変位応答、ひび割れ本数および破壊の局所化領域の大きさには供試体ごとのばらつきが確認されたが、破壊モードや、破壊進展過程は一致していた。
- 2) 幾何学的非線形性を考慮したRBSMを用いて、ポストピーク域における鉄筋座屈と、それに起因する圧縮破壊を再現し、破壊進展メカニズムを踏まえて、曲げ破壊するRCはりの損傷箇所予測が可能であることがわかった。
- 3) 15体すべての供試体で観察された、2段階目の荷重低下は、幾何学的非線形性を考慮することで、定性的には再現できる。ただし、2段階目の荷重低下に至る変位は過大評価しており、定量的な評価に関しては、モデルの修正も含めてさらに検討を要する。
- 4) ポストピーク域における2段階目の荷重低下のメカニズムを解析的に検証した。その結果、2段階目の荷重低下は、圧縮鉄筋およびスターラップにより囲まれたコアコンクリートが、鉄筋の座屈に伴い拘束が低下し、圧縮破壊することで生じることが分かった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会, コンクリート建造物のポストピーク挙動解析研究委員会: コンクリート建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) The American Society of Mechanical Engineers: ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME, New York, NY, USA, 2006.
- 3) 日本原子力学会: シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン, 2015.
- 4) 山本佳士ら: 3次元剛体パ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.
- 5) Yamamoto, Y. et al.: 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.
- 6) 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, Vol38, No.2, pp.91-96, 2016
- 7) 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建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
- 8) Saito, S., Hikosaka, H.: Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network, international journal for numerical methods in engineering, Vol.14, pp.916-986
- 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) 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.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 丸善, 2012