

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760373

研究課題名(和文)メゾ-マクロスケール連結解析手法によるコンクリート構造物の崩壊過程の高解像度評価

研究課題名(英文)Evaluation of collapse process of concrete structures using coupled meso-macro mechanical modeling

研究代表者

山本 佳士 (Yamamoto, Yoshihito)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・助教)

研究者番号：70532802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大地震動を受けるコンクリート構造物の、崩壊に至るまでのひび割れ、損傷進展過程を高精度・高解像度で評価できる解析手法の確立を目的としている。具体的には、まず、著者が提案している、ひび割れの発生、進展から破壊の局所化までを再現可能な、コンクリートのメゾスケール力学挙動に基づいた剛体バネモデルを、地震応答が再現できるよう拡張した。さらに、鉄筋コンクリート要素としての巨視的・平均的な力学応答を再現できるFEMを結合した解析手法を開発した。同手法により、想定される損傷の大小に応じて解析解像度を変化させることにより、計算負荷を低減させながら、高精度・高解像度の数値解析が可能になった。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation method of the failure behaviors of concrete structures subjected to seismic loading with high-resolution has been developed in order to estimate the safety of important structures. First, Rigid-Body-Spring Model (RBSM) applied the proposed meso-scale constitutive models, which can quantitatively estimate the fracture localization behavior of concrete, has been enhanced to deal with cyclic loadings and dynamic problems. In addition, a coupled RBSM - FEM has been developed. FEM represents the steel reinforcing material and the macro-scopic mechanical behaviors of reinforced concrete element. The proposed method can reasonably simulate the detailed cracking information and the post-peak behaviors such as crack width, crack angle, crack spacing and the volume of the fracture localization, while it can reduce the computational cost by using the different scale models at the each region in the whole region of analytical object in accordance with the required resolution.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：剛体バネモデル 繰返し応力 地震応答解析 ひび割れ進展 圧縮軟化・局所化 ポストピーク

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物が崩壊に至るまでのひび割れ・損傷進展過程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。

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次元的な拮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み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。

また、近年、耐震性能は、崩壊あるい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いる。その照査のためにも、ひび割れや、上記の圧縮軟化・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くると考えられる。

## 2. 研究の目的

このような背景を踏まえ、本研究では、大地震動を受けるコンクリート構造物のポストピーク域までの、ひび割れ、損傷進展過程および損傷領域を高精度・高解像度で評価できる解析手法の確立を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究の方法は、大きく以下の2つに分類される。

(1) 研究代表者が既に提案している、ひび割れの進展および前述の圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動を定量的に再現可能な、コンクリートのメゾスケール力学挙動に基づく構成モデルを適用した剛体バネモデル(以下、RBSM)を、繰返し応力下の力学応答に対応できるように拡張する。さらに、上記の手法を動的解析手法へと拡張し、地震応答解析を可能にする。なお、前述のように、ポストピーク域で生じる圧縮軟化・局所化挙動に対する提案モデルの再現性は、既に実証済みである。本研究では、特に、地震応答を精度よく再現するために、繰返し応力下の力学応答およびひび割れの発生・進展性状の再現性に焦点を当てた。

(2) 上記のモデルは、コンクリート材料・構造の応答を高解像度で再現できるものの、メゾレベルからモデル化しているため、実大規模のコンクリート構造物の応答の評価のためには、計算負荷が非常に大きくなる。そこで、本研究では、上記のモデルに、鉄筋コンクリート(以下、RC)要素としての巨視的・平均的な力学応答を再現できる、FEMを結合した解析手法を開発する。同手法により想定される損傷の大小に応じて解析解像度を変化させ、計算負荷を低減させながら、高精度ならびに高解像度の性能を併せ持つ数値解析手法を構築する。

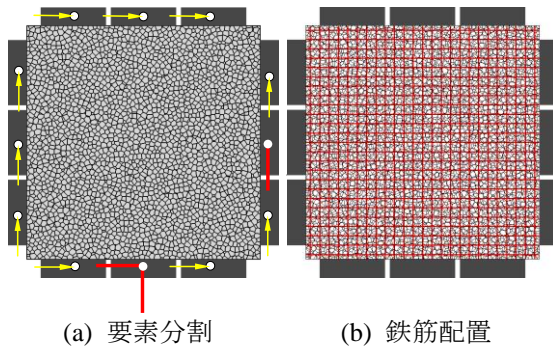
## 4. 研究成果

(1) 本研究で開発した、繰返し応力下の応答を再現できる数値解析モデルは、既往の、各種条件下における RC 部材の正負交番繰返し載荷実験を対象に解析を行い、実験結果との比較により妥当性を検証した。提案モデルの詳細と、妥当性評価のため解析の詳細は、5.雑誌論文(1)を参照されたい。ここでは、解析結果の例を簡単に示す。まず、RC パネルの正負交番繰返し載荷実験<sup>1)</sup>を対象とした解析結果を示す。図1は解析モデルであり、図2,3は、解析により得られた、荷重-変位関係および終局時のひび割れ性状図である。解析により得られた荷重-変位関係の履歴特性および鉄筋比に応じて、ひび割れ間隔が変化する性状も良好に再現していた。

さらに、準実物大スケールの RC 耐震壁の繰返し載荷実験を対象に解析を行った。図4は解析モデルを、図5,6は、繰返し荷重を受ける耐震壁の荷重-変位関係およびひび割れ性状図である。このケースでも、解析は実験の荷重履歴特性およびひび割れ性状を良好に再現していた。特に、各種荷重段階におけるひび割れ間隔、角度および幅を妥当に再現し

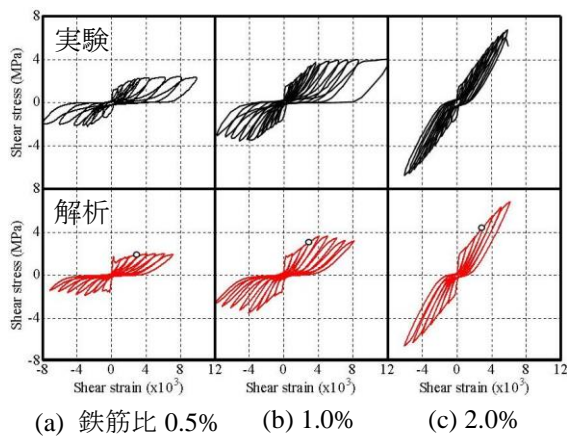
ていた。さらに、同手法を動的解析手法へと拡張した。ここでは、数値積分法として、Newmark  $\beta$ 法を用いた。

(2) 開発したRBSMとFEMの結合方法の概要を以下に示す。RBSMとFEMの境界において、まず、FEMの各要素節点に、長さ0のリンク要素を設置する。このリンク要素を介してコンクリートを表現するRBSM要素に結合する。リンク要素は、直交する3方向の相対変位に対して抵抗するバネからなる。FEMの要素タイプとして、梁要素、シェル要素およびソリッド要素を用意した。鉄筋をモデル化する梁要素とRBSM要素間のリンク要素に関しては、



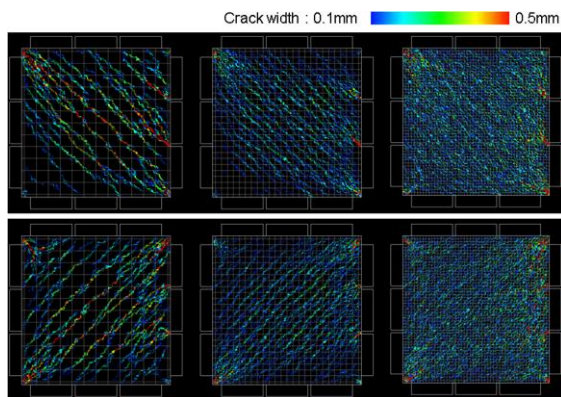
(a) 要素分割 (b) 鉄筋配置

図1 RCパネルの繰返し载荷解析



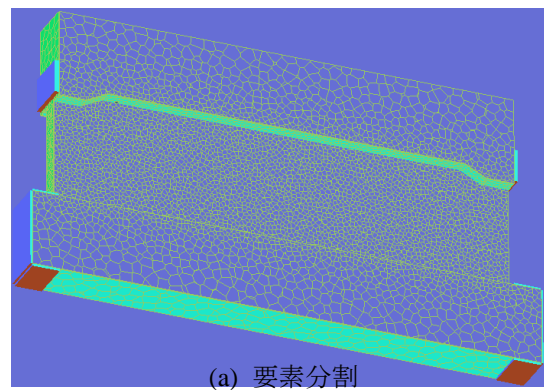
(a) 鉄筋比 0.5% (b) 1.0% (c) 2.0%

図-2 荷重-変位関係

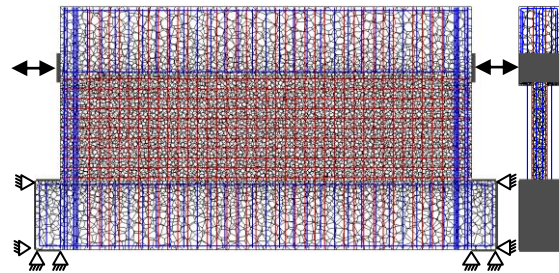


(a) 鉄筋比 0.5% (b) 1.0% (c) 2.0%

図-3 ひび割れ性状



(a) 要素分割



(b) 鉄筋配置

図-4 RC耐震壁の繰返し载荷解析

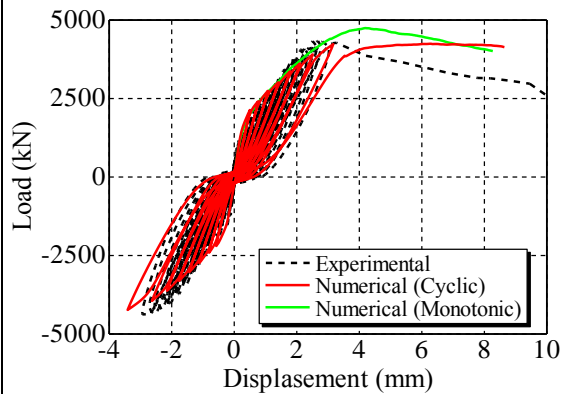


図-5 荷重-変位関係

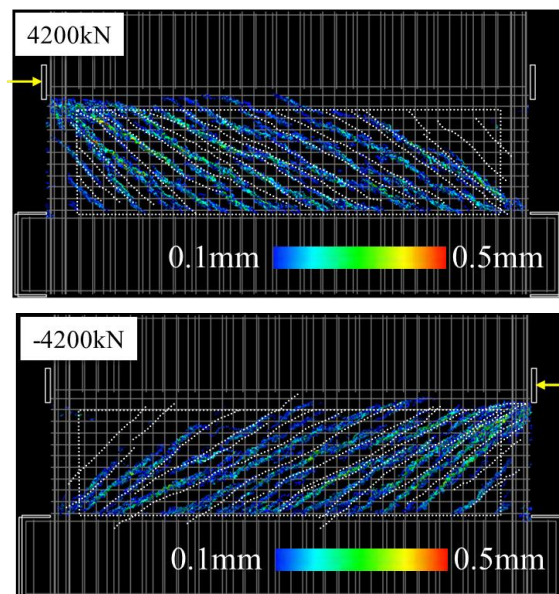


図-6 ひび割れ性状



梁軸方向の相対変位に対して抵抗するバネに非線形性を導入し、鉄筋-コンクリート間の付着すべり特性をモデル化している。シェル要素およびソリッド要素に関しては、簡単のため、リンク要素の各バネは線形弾性と仮定した。FEMに適用する構成則は、鋼材に対して von Mises の降伏条件を用いた弾塑性型モデルを、RC 要素としての巨視的・平均的な力学応答は、名古屋大学で開発された格子等価連続体モデル<sup>2)</sup>を用いた。なお、メソスケール力学挙動に基づいた RBSM とマクロスケール力学挙動に基づいた FEM とを連結する際には、当然その境界に、解析解像度すなわち要素寸法のギャップを伴う。このギャップを克服するために、本手法では、境界付近で、要素寸法を徐々に変化させ、寸法レベルを同一オーダーにした上で、両者を結合する方法を取った。開発した手法により、想定される損傷の大小、あるいは解析者が詳細に評価したい箇所等に応じて、解析対象の領域ごとに解析解像度を変化させることにより計算負荷を低減させながら、高精度ならびに高解像度の性能を併せ持つ数値解析が可能になった。

なお、本研究で開発した手法を用いて、現在実施されている国際ベンチマーク解析、SMART2013 (Seismic design and best-estimate Methods Assessment for Reinforced concrete buildings subjected to Torsion and non-linear effects, <http://smart2013.eu/>, 準実物大スケールの鉄筋コンクリート建屋の振動台実験を対象としたベンチマーク解析) に参加している。開発した手法の適用例は、今後も発表していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 大森信次, 高橋敏夫, 坪田張二, 井上範夫, 栗原和夫, 渡辺茂雄: 繰返し面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 403 号, pp. 105-118, 1989.
- 2) 伊藤睦, Kongkeo P., 中村光, 田辺忠顕: 格子等価連続体化法による鉄筋コンクリート部材の有限要素解析, 土木学会論文集, No.767/V64, pp.115-129, 2004.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) 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*, pp.1-13, 2014.  
DOI : 10.1080/19648189.2014.881755

- (2) 古橋 宏紀, 中村 光, 山本 佳士, 国枝稔: 曲げ降伏後に繰返し荷重を受ける RC 部材におけるせん断耐力低下挙動の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, Vol.2, pp.67-72, 2013.

[学会発表] (計 3 件)

- (1) Yoshihito YAMAMOTO, Hikaru NAKAMURA, Ichiro KURODA, Nobuaki FURUYA : Simulation of Crack Propagation in RC Shear Wall Using a 3D Rigid-Body-Spring Model with Random Geometry, *Proceeding of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8)*, (CD-ROM), 2013.
- (2) 古橋 宏紀, 中村 光, 山本 佳士, 国枝稔: 曲げ降伏後に繰返し荷重を受ける RC 部材におけるせん断耐力低下 挙動の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, Vol.2, pp.67-72, 2013.
- (3) 山本佳士, 黒田一郎, 古屋信明, 中村光 : RBSMによる繰返しせん断力を受ける RC パネルのひび割れ進展解析, 第 62 回理論応用力学講演会(NCTAM2013) (CD-ROM), 2013.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山本 佳士 (YAMAMOTO YOSHIHITO)  
防衛大学校・システム工学群・助教  
研究者番号 : 70532802

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし