

## 論文の内容の要旨

論文題目 Numerical analysis of failure pattern variability estimation by means of PDS-FEM  
(PDS-FEMによる破壊パターンのばらつき評価の数値解析)  
氏名 チェン ハオ

本論文は、破壊過程のばらつき評価に利用できる数値解析手法の開発を目的としている。論文は8章から構成され、第1章から第3章は背景・文献調査等の準備、第4章は数値解析手法の定式化、第5章と第6章はばらつきの原因である材料不均一性と境界条件の乱れが破壊過程に及ぼす影響の検討、第7章はばらつき評価のシミュレーションの例である。第8章において結論と将来の課題が整理されている。以下、各章の具体的な内容を説明する。

第1章は序論である。観測固体地球科学と計算科学の進歩により、数値シミュレーションに基づく地震予知の可能性が検討されている。数値シミュレーションの地震予知を実現するためには、計算力学の観点からは2つの問題点が考えられる。第一の課題は、変形・破壊過程を高精度・高効率で計算する数値解析手法の開発である。開発される手法を使って、亀裂進展の結果である破壊パターンのばらつきが評価できることが望まれる。第二の課題は、解析モデルの材料特性や境界条件の不確定性である。上記を背景に、本論文は、破壊パターンのばらつきを評価しうる数値解析手法を開発することを目的とする。第2章は文献調査である。既存の数値解析手法に関する文献調査を踏まえ、粒子離散化手法に基づく有限要素法、PDS-FEM (Particle-Discretization-Scheme Finite Element Method) を、数値シミュレーションの地震予知に用いることとした。第3章は、開発する数値解析手法の利用方法である。地震予知は、観測とシミュレーションを融合させるデータ同化に基づく。地殻変動や地震発生の時間スケールが長いことから、材料特性の分布や境界条件の乱れが異なる解析モデルを多数発生させ、シミュレーションを行い、観測結果に近い結果をもたらすモデルを抽出する、という方法が合理的である。多数の解析モデルのシミュレーションが必要となるため、開発される数値解析手法は高い計算効率を持つことが重要である。

第4章は、動的な破壊過程のシミュレーションが可能となるよう、PDS-FEM を拡張するための定式化を整理している。計算量子力学の分野で開発されている、高性能の非線形時間積分手法を組み込むため、ラグランジュアン、その離散化、ハミルトニアンへの変換という手順を踏む定式化を行っている。反復回数を固定しながらも、所定の精度を確保できるパイラテラル時間積分手法を PDS-FEM に組み込むことに成功した。

第5章と第6章は、それぞれ、亀裂進展のばらつきの原因である、材料不均一性と境界条件の乱れが亀裂進展経路に及ぼす影響を調べている。第5章では反対称平行亀裂、第6章ではせん断亀裂を対象としている。準静的状態では、理想的材料均一性を仮定すると、平行亀裂は反対称性を保ちながら進展する。荷重速度が低い場合、材料不均一性が加わっても、亀裂進展経路はこの解の経路に近く、さほどのばらつきはない。しかし、荷重速度が高くなると、亀裂進展経路はこの解の経路とは大きく異なってしまう。実際、亀裂進展経路の確率密度関数を計算すると、定量的にばらつきを評価することができる。この結果は、理想的材料均一性の亀裂進展経路は、荷重速度が低い場合は安定であり、高い場合は不安定であることを示している。さらに、荷重速度が高い場合、進展経路は完全にランダムになるのではなく、幾つかの特定のパターンに近づくことも示された。せん断亀裂のシミュレーションでは、境界と亀裂の距離が遠い場合、亀裂進展に与える境界条件の乱れの影響は小さく、進展経路の乱れは無視できることが示された。しかし、場合によっては、局所的な変位場に相対的に数パーセントの違いをもたらすことも示された。変位の観測を使ったデータ同化には、境界条件の乱れの影響を考慮することが示唆される。

第7章では、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの簡単なモデルを使った地震活動のシミュレーションを試行した。これは、抽出を使うデータ同化を念頭においた数値実験であり、プレート境界付近の材料特性の分布を種々変えたモデルを複数生成し、参照解となるモデルの破壊過程と近い破壊過程となるモデルを選択することを試みた。選択の基準に局所的破壊の位置のずれを用いたところ、600の局所的破壊に対し、参照解の破壊過程を再現するようなモデルを一つ選択することは難しいが、三つ程度のモデルであれば抽出可能であることが示された。参照解の破壊過程の予測には、この三つのモデルを使うことになり、ばらつきを含め、将来の破壊過程の予測が原理的には可能となることが示唆された。

第8章は本論文の結論と将来の課題を整理している。結論の主眼は、研究の目的であった破壊過程のばらつきの評価に利用できる数値解析手法が開発されたことである。開発された手法を使って、破壊過程のばらつきの原因である材料不均一性や境界条件の乱れの影響を調べ、ばらつき評価の具体的な例として、データ同化の簡単なシミュレーションを行った。将来の課題として、計算力学の観点からは計算効率の向上性、地球物理学の観点からはより現実的な問題設定を行った上でのデータ同化のシミュレーションを挙げている。また、4つの補を設け、PDS-FEMの基本的な定式化、亀裂進展の安定性の考察、時間積分手法、PDS-FEMの並立化性能をまとめている。