

論文の内容の要旨

論文題目 Application of Stochastic Finite Element Method to Non-Linear
 Elasto-Plastic Problems
 確率有限要素法の非線形弾塑性問題への適用

氏名 アンデルス マチエイ シモン

巨大地震によって地表地震断層が形成された場合、ずれ変位によって、付近の構造物に相当の被害を与えることが報告されている。地震を引き起こす地殻内の震源断層に関しては、ずれ変位の大きさを推定できるものの、地表地震断層のずれ変位を推定することは難しい。これは、必ずしも地表地震断層が形成されるとは限らない上に、ずれの大きさが震源断層のずれとは一致しないためである。地表地震断層の形成は、震源断層からのずれが基盤をずらし、そのずれが不均一な地表層を進展する破壊過程の結果とみなすことができる。この過程は地表層の構造や材料特性等に大きく依存するが、地下構造を正確に同定することは難しい。

不確かな地表層を決定論的ではなく確率的にモデル化すると、応答として現れる地表地震断層も確率論的に取り扱わざるをえない。本論文は、断層のずれを塑性ひずみが集中したせん断としてモデル化した上で、この確率モデルに対する非線形問題を解く新しい解析手法を提案する。そして、この解析手法を有限要素法に組み込み、新しい確率有限要素法を開発する。この確率有限要素法の基となる解析理論は一般的なものであり、非線形弾塑性体の材料等のばらつきが大きい場合でも、変位やひずみ・応力等の応答に対する平均・分散・確率密度関数等の確率特性を評価することができるものである。

提案された確率有限要素法の特徴は、応答の確率特性の変化を解析する理論である。非線形弾塑性体では、応答の変化が非線形方程式によって記述されているため、各応答の確率特性の変化は極めて複雑である。特に、軟化型弾塑性構成則に代表されるように変形局

所化現象が引き起こされる場合には、非線形方程式が分岐解を持ち、解析自体も容易ではない。提案された確率有限要素法は、1)カルーネンルーベ(Karhunen-Loeve)展開と多項式カオス(polynomial chaos)展開を確率的に変化する挙動に施し、2)平均挙動の上下限を与えるバウンディングメディアを用いて応答の摂動をとる、という二つの理論を用いている。この結果、応答の非線形方程式の平均挙動の摂動が計算されるため、分岐解の中から平均挙動に最も近いと思われるものが自動的に選ばれる。なお、非線形方程式に確率的関数展開を施すこと、分岐解の平均から摂動を計算することは近似計算であり、その妥当性・有効性を厳密に証明することはできない。しかし、この手法は分散が0となる極限において正解を与えることは保証されている。

一方、地表地震断層の解析は3次元であり、確率特性を考慮すると極めて大きい自由度の問題を数値計算しなければならない。より効率的な並列化処理も確率有限要素法に施し、計算量は通常の有限要素法よりも多いものの、十分実用に耐えるものとした。

提案された確率有限要素法の妥当性はモンテカルロシミュレーションとの比較により検討した。完全弾塑性、軟化型弾塑性の材料に対し、2次元・3次元のさまざまな例題をとりあげ、確率特性の比較を行い、確率有限要素法の精度を検証している。

確率有限要素法の有効性を示すために、理想化されてはいるが、地表層の確率モデルを作り、基盤に横ずれ断層が達した場合の地表地震断層の形成過程をシミュレーションした。基盤に純粹の横ずれ変位を与えると、地表には、一様にずれる面上の断層が形成される代わりに、横ずれを示す小さい断層がほぼ周期的に並ぶ雁行状亀裂が形成される。これは変形局所化に伴う分岐現象の典型である。提案された確率有限要素法のシミュレーションでは、この雁行状亀裂の形成を再現することに成功した。モンテカルロシミュレーションとの比較により、さまざまな分岐解があるものの、基盤のずれ変位が増大にするにつれて、分岐解は一つに集まっていくことが示された。平均挙動のみを計算するにも関わらず、少なくとも断層変位による被害を検討する際には、提案された確率有限要素法が有効であることを示唆するものである。数値シミュレーションの結果を用いて、地表層の不確かさが地表地震断層形成に与える影響、基盤のずれ変位と地表のずれ変位との関係、その関係に与える地表層の厚さの影響等を検討した。