

審査の結果の要旨

氏名 澤田 昌孝

本論文の題目は「断層変位ハザード評価のための高性能計算を利用した数値解析手法の開発」である。大規模な内陸地震が発生すると地表に断層が出現し、地震動だけでなく、その断層変位によっても土木構造物が被害を受ける場合がある。2011年の東日本大震災後に施行された原子力発電所の新規制基準では、重要施設の基礎地盤について、震源として考慮する断層（主断層）に加えて、敷地に分布する小規模な断層（副断層）や地すべり面についても、将来、変位が生じるおそれがないかを検討することが求められている。

断層変位に対する構造物の設計・安全評価を行う場合、構造物近傍の断層変位を定量的に評価する必要がある。この予測・評価手法として数値解析が考えられる。ただし、断層のずれの進展を解析する場合、一般的には三次元解析が必要であり、必要となる計算資源は非常に大きい。本論文では、信頼性のある断層変位予測のために高性能計算を用いた数値解析手法の開発に関する研究を行った。

断層を含む地盤の解析モデルを構築するために断層のずれ表現するための三次元ジョイント要素を断層面のラグランジアンから厳密に導出した。断層の破壊という不安定な問題を正しく計算するため、エネルギー保存を満たすシンプレクティック積分を適用した。シンプレクティック積分では解析モデル全領域だけでなく、小領域においてもエネルギーが保存される。この2つの機能をオープンソースの並列有限要素法プログラムに実装した。一次元的な断層の問題や比較的単純な断層を含む地盤の三次元モデルに開発したプログラムを適用し、その検証を行った。また、解の不安定を伴う断層問題では、不確実性の評価のために条件の異なる多ケースの解析が必須であることを指摘した。入力ずれ変位と地表ずれ変位の関係を一度の解析で評価できる準静的解析の優位性に触れ、動的解析と準静的解析の解の整合性の確認により準静的解析を用いることを提案した。

解析モデルの妥当性を確認するため、2014年長野県北部地震で発生した地表地震断層を対象としたシミュレーションを実施した。この地震では、主断層だけでなく副断層も生じており、それを含む $5\text{km} \times 5\text{km} \times 1\text{km}$ の領域を対象に解析モデルを作成した。解析モデルの底面に地殻変動の逆解析に基づく強制変位を与えた。入力ずれ変位の増加とともに主断層及び副断層の地表部で急激なずれ変位の発生が見られ、その変位量ノルムは観測結果と概ね整合した。これにより本解析手法を用いることで、主断層・副断層の変位の発生を評価可能であることを示した。また、副断層での地表ずれ変位の発生は、近

傍の主断層でのずれ変位分布の影響を受けることが分かり、予測解析に適用するには主断層のずれ変位の分布の与え方を検討する必要があることが分かった。

不確実性の評価のための多ケース解析の例として、岩盤及び断層の物性値を例にとり、高性能計算をサンプリング法による確率論的断層変位評価に適用した。物性値の不確実性が断層変位に与える影響を整理するとともに、応答値の確率分布を評価した。その結果、高性能計算を用いることで実務でも対応可能な計算時間で断層変位評価における応答値のばらつきを評価可能であることを示した。

審査での主な質疑応答は以下の通りである。まず、岩盤と断層の連続体モデルを用いた提案手法は岩盤崩落にも適用できると考えられることが指摘された。これに対し、岩盤崩壊も健岩部と不連続面を考慮した解析モデルとなり、同様の解析検討が可能であることが回答された。また、経年劣化など不連続面の構成式で工夫が必要となることが説明された。

ついで、シンプレクティック時間積分での減衰の取り扱いが質問された。シンプレクティック時間積分では、エネルギーが保存されるので、減衰効果は全くないこと、簡易なモデルを使って、クーラン条件満たす範囲でエネルギーが保存されることを数値解析で確認したことが回答された。

論文の主眼である、解の不安定性の喪失の後に安定性が回復することを示す必要性に関して質問があった。これに対し、断層変位の量は必ずしも安定解で決まっているわけではないこと、周辺岩盤の拘束の影響で変位量が決まること、また、解が安定性を喪失しても、唯一であり、解そのものは存在することが回答された。

準静的解析と動的解析の位置づけに関しても質疑があり、動的解析が基本であること、不確実性の評価のための条件の異なる多ケース解析では準静的解析を使うこと、動的解析と準静的解析の結果の整合を確認した上で、準静的解析を実施することを提案していることが回答された。

最後に、副断層の変位の観測値は不確実性を考慮した場合の結果のばらつきの範囲内に入るか否かが質問された。これに対して、実地震の解析では、ばらつきの評価は実施していないことが説明された。しかし、簡略化したモデルでは物性値の不確実性による結果のばらつきは評価しており、このばらつきを使えば、観測値がばらつきの範囲内に入るか否かは判定できることが回答された。なお、副断層の変位については、ばらつきが小さく、副断層の長さなどのモデルの影響が支配的であると考えていることも説明された。

本論文は、地表地震断層の評価に対し、特に主断層と連成して挙動する副断層に焦点を当てて、解の安定性喪失とエネルギー保存を満たす数値解析手法を考案し、それを並列有限要素法に実装した点、さらに、開発された数値解析手法を使って実地表地震断層の再現に一定の成功をみた点は十分高く評価できる。従来の断層変位ハザード評価とは一線を画する数値解析手法となる可能性も評価された。以上の理由をもって、本論文を

合格と判定した。また、学位申請者が学位に値する専門的な学識を有していることも了解された。この結果、学位にふさわしい論文であると判断された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。