

論文の内容の要旨

論文題目 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
Development of Numerical Analysis Method Using High Performance
Computing for Estimation of Surface Earthquake Fault Hazard

氏 名 澤 田 昌 孝

大規模な内陸地震が発生すると地表に断層が出現し（地表地震断層）、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。1999年に相次いで発生したトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震においては、地表に生じた断層変位により多くのインフラが被害を受けた。日本においても、近年、2011年東北地方太平洋沖地震の1ヶ月後に発生した福島県浜通りの地震、2014年長野県北部地震、2016年熊本地震のように、地表地震断層を伴う地震が発生している。

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に加えて、敷地に分布する小規模な断層や地すべり面についても将来の変位の有無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、構造物近傍の断層の変位を定量的に評価する必要がある（ハザード評価）。

断層変位ハザード評価手法として数値解析が考えられる。本論文では、大規模な内陸地震において発生する地表地震断層の断層変位ハザード評価のための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。

まず、断層変位に関する物理現象を分析し、数理問題の設定を行った。断層変位発生のメカニズムは、断層面でのずれの伝播である。したがって、断層変位は断層面の破壊を伴う、摩擦の問題である。数理問題の設定にあたっては、解の有無、唯一性、安定・不安定の観点から考察を行う必要がある。摩擦問題の解の安定性の考察から、断層のせん断剛性がずれ変位の増加とともに低減し、限界値を超えると一定値となる構成式を用いることとした。この構成式を用いるとき、ずれ変位-力関係において、力が若干増えたときにずれ変位が大きく増加する「飛び移り」が発生する。一方、飛び移りを含む解の安定・不安定に関わらず成立する保存則がある。断層挙動の場合は、地下でのずれのエネルギーが断層面の摩擦の仕事と周辺地盤のひずみに変換されるというエネルギー保存が成立する。

数値解析による断層変位ハザード評価を行うにあたり、その数値解析の品質保証が重要課題である。地表での断層変位を評価するために三次元、かつ適切な解像度の解析モデルを構築し、数値解析を実施する必要がある。断層を含む地盤の解析モデルを構築するにあたり、断層に対して三次元ジョイント要素を適用する。ずれ変位-力関係を正しく計算するために上記のエネルギー保存を数値解析の全過程で満たすことが必要である。

そのため、三次元ジョイント要素を厳密に導出し、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。断層面のラグランジアンから三次元ジョイント要素を定式化し、従来のジョ

イント要素と数値実験による比較を行うことでその有効性を示した。また、数値積分として一般的に用いられるオイラー法およびニューマークベータ法と、シンプレクティック積分を数値実験により比較して、シンプレクティック積分の優位性を示した。さらに、一次元断層問題の動的解析にシンプレクティック積分を適用し、ハミルトニアンが保存されること（解析モデル全領域だけでなく、小領域においても保存される）、ハミルトニアンを計算を合せて実施することで数値解析の検証が出来ることを示した。

次に、厳密に導出した三次元高次ジョイント要素とエネルギー保存に優れた陽的シンプレクティック時間積分という 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。本有限要素法プログラムにより並列計算による大規模解析が可能となった。

一次元的な断層の問題を設定して、解析プログラムの基本的な検証を行った。また、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。開発した解析手法は 100 万自由度程度の解析モデルに適用可能で、並列計算を利用することで 1 時間以内で計算を終えることが可能であることを示した。

解の不安定を伴う断層変位問題では、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多ケース解析に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。この地震においては地表地震断層の北端部に副断層とされる断層変位も生じており、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。主断層のジオメトリや地層構造およびその物性値の決定に当たっては、日本全国を網羅する形で整備されている J-SHIS のデータベースを基に設定した。副断層については観測結果に基づいて配置した。主断層・副断層ともに、ジョイント要素により陽にモデル化し、周辺地盤は線形弾性体とした。これは、重要施設基礎岩盤において綿密な地質調査がなされ、断層をはじめとした不連続面の分布状況が把握されている原子力発電所の状況を考慮している。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、主断層および副断層の地表部での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、副断層での地表のずれ変位の発生は、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分布の与え方を検討する必要がある。

不確実性の評価のための多ケース解析の例として、岩盤および断層の物性値を例にとり、高性能計算を直交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。

断層の配置や地下での入力ずれ変位は認識論的不確実性とも関連しており、専門家のコンセンサスを得ながら複数のシナリオを設定した評価が求められる。また、断層変位が生じる地点では、同時に強い地震動にさらされることが確実であり、断層変位による施設のフラジリティ評価では、断層変位と地震動の重畳の効果を評価することが課題である。