

## 論文の内容の要旨

論文題目     不確実性パラメータを考慮した断層をまたがる  
                 構造物の大規模並列解析手法に関する研究

氏     名     三橋   祐太

### 第1章 序論

地震という現象は人類を長く苦しめてきたが、そのメカニズムが判明したのは20世紀に入ってからのことである。地震は震源断層の破壊により引き起こされ、地震発生に関するシミュレーションとしては、数キロ～数十キロにわたる断層全体をモデル化することで動力的破壊シミュレーション解析による検討などが行われてきた。

有限要素法は微分方程式の数値解析手法の一種であり、方程式の定義域を小領域（要素）に離散化し、要素内を比較的簡単な形状関数で近似することで微分方程式の近似解を得る手法である。

### 第2章 地盤解析技術と有限要素法

有限要素法は地震時の構造物や地盤の解析にも幅広く応用されており、例えば原子力発電所等における重要土木構造物の耐震安全性評価においては、有限要素法などの数値解析手法を用いた地震に対する検討が主に行われてきた。有限要素により地盤をモデル化する際には、地盤の半無限性や不連続面、不確実性の評価などが重要な問題となる。半無限性の表現としては減衰要素を用いた粘性境界の手法などが挙げられる。不連続面の表現は接触解析による手法、スメヤードモデルやジョイント要素によるモデル化などが提案され実際に用いられている。また地盤は材料物性値などに不確実性が大きいことが知られており、それらを考慮した解析手法として物性値等の不確実性から応答の不確実性を導く検討や、応答から物性値を予測する逆問題の手法など様々な検討が実施されている。

### 第3章 不連続面を考慮した地盤のモデル化に係る要素定式化の提案とその性能評価

断層のモデル化などに用いられるジョイント要素は2面が張り合わさった3角柱(6節

点) ないしは 4 角柱(8 節点) の形状を持つ. 2 面間の厚さは 0 であり, 要素形状は 3 角形ないしは 4 角形となる. Goodman らは要素形状を長方形と仮定した定式化を行っているが, 本研究では任意の 3 角形および 4 角形に拡張した定式化を行った.

さらに改良した Goodman ジョイント要素とオリジナルのジョイント要素の性能比較を実施し, 改良した Goodman ジョイント要素の方が歪んだメッシュ形状の場合に理論解に近い結果が得られることを示した.

#### 第 4 章 地盤モデルのメッシュ生成技術の提案とその性能評価

ジョイント要素を含む有限要素メッシュは作成が煩雑であることから, 新たなメッシュ生成手法を提案し性能評価を行った. 本研究では, 4 面体ソリッド要素のみからなる解析メッシュとジョイント要素を挿入する面 (ジョイント面) の情報 (方向数) を入力して, 4 面体ソリッド要素と 3 角形ジョイント要素からなる解析メッシュを生成するアルゴリズムを提案した. このアルゴリズムを複数のジョイント面に対して再帰的に適用することにより, 複数のジョイント面を含む有限要素メッシュを生成する. さらに提案するアルゴリズムによりジョイント要素を有する有限要素モデルを作成し手法の妥当性を検証した.

#### 第 5 章 不確実性パラメータの同定手法とその性能評価

提案したジョイント要素を断層のモデル化に用いて, 神城断層地震のシミュレーション解析を実施することで, 実際の地震を有限要素解析で模擬できることを示した. 断層は活動による静摩擦から動摩擦への移行を模擬した非線形構成則を用いた. 初期応力を与える方向をパラメータとした検討を実施し, 得られた解析結果を観測記録の変位時刻歴と比較することで, 最も観測記録と整合的となる初期応力の方向をレイク角  $\lambda = 60$  度と求めた.

断層全体で一様な断層モデルを仮定した解析で, 変位の大まかな時刻歴は模擬することができたが, より精度の高い解析を行うためには断層の不均質性をモデルに反映することが必要であると考えた. そこで, ベイズ最適化を用いて不均質性を考慮した断層モデルを構築し, 断層の不確実な物性値を解析モデルに反映する手法を開発した. 周辺より大きな地震動を発生する領域 (SMGA) を周囲より応力降下量の大きい領域と考え, SMGA を円形と仮定した上で位置と半径をパラメータとして, 観測記録をより説明できる SMGA の分布を同定した. 経験的グリーン関数法により得られた震源モデルは探索により得られた SMGA を包絡するようなモデルとなっており, まったく別の解析手法により得られた断層モデルとしては, 定性的に一致する結果が得られた.

#### 第 6 章 大規模モデルによる断層をまたがる構造物のモデル化とその評価

有限要素法を用いた地震時の構造物の挙動に関する検討はこれまでにも多く実施されてきているが, 断層変位を受ける構造物の健全性評価は事例が少ないこと等から検討手法が確立されているとは言い難く, 喫緊の課題となっている. しかしながら, 食い違い断層変位

を受ける構造物の健全性評価においては、構造物を詳細に考慮する必要があることから構造物の極近傍のみをモデル化した実施例が多く、その場合は動的な問題が考慮できないなどの問題点がある。

以上を背景として、本研究ではトンネル構造物を詳細にモデル化した上で断層の動力学的破壊シミュレーション解析を実施し、食い違い断層変位を受けるトンネルの損傷メカニズムを動的解析により検討した。トンネル構造物の周辺地盤等の条件を変えたパラメータスタディにより、食い違い断層変位を受けるトンネルの力学的な挙動を解析的に求める。

現実をある程度模擬できている解析条件として、神城断層地震のシミュレーションに用いた断層パラメータを用い、地表面部分に新たに岩盤中のトンネルを模擬した地中構造物をモデル化することで解析モデルを作成した。モデル化領域等は 5 章で設定したものと同様である。トンネルの周辺地盤の剛性の設定や周辺地盤中の断層パラメータの設定、SMGA の考慮の有無を合わせて複数の解析ケースを設定した。

周辺地盤の剛性を変更した各解析ケースにおいて、岩盤の初期剛性の高い Case01 では、断層位置に変形が集中している。一方地盤の剛性を下げた Case02 および Case03 では、断層から離れた位置にも広く変形が生じていることが確認できる。一方 Case01 では断層交差部に大きなひずみが生じているのに対して、地盤が柔らかいケースではトンネル構造物全体にひずみが生じることにより、トンネル全体の変位が大きくなっているにもかかわらず最大値が小さくなっている。これらの結果からこのような食い違い断層変位を受ける構造物の検討においては、地盤との相互作用を評価することが重要であるといえる。本研究によって、食い違い断層変位を受けるトンネル構造物に関して、断層と構造物を同時にモデル化した精緻な解析が可能になった。

## 第7章 結論

本論文の成果を以下にまとめる。

1. Goodman らの提案したジョイント要素は形状を長方形としたものであったが、これを任意形状の三角形ないしは四角形に適用できるような定式化を提案した。提案手法を FrontISTR をカスタマイズすることで実装し、その有効性を示した。またジョイント要素が並列計算に対して適用可能であることを、実際にジョイント要素を含む大規模な解析モデルを計算することで示した。
2. ジョイント要素を含む有限要素メッシュ作成手法を提案し、提案手法を用いたメッシュャーを実際に作成することでその有効性を示した。この手法によって、複数枚の不連続面を含む解析モデルが容易に作成可能となった。作成したメッシュャーを不連続面を含む岩盤の剛性評価の問題に適用することで、実問題への適用性も合わせて示した。
3. 断層をジョイント要素によりモデル化した動力学的破壊シミュレーションにより、

2014 年神城断層地震のシミュレーション解析を実施した。観測記録の変位時刻歴とシミュレーション解析を比較することで、ある程度断層変位をシミュレーション可能であることを示した。また、断層の不均質性のモデル化技術としてベイズ最適化の手法を用いたパラメータの同定を実施し、経験的グリーン関数法による不均質性の推定結果と比較することでその妥当性を確認した。

4. 食い違い断層変位を受けるトンネル構造物の問題に着目し、断層全体とトンネル構造物を同時にモデル化して断層の動力的破壊シミュレーションを実施することで、トンネルに対する被害が検討可能であることを示した。またトンネル構造物近傍の地盤物性値等をパラメータとして複数のケースを検討することで、パラメータがトンネルの応答に与える影響を評価可能であることを示した。節理性岩盤の剛性を別途 2 の方法により評価することにより、マルチスケールの問題にも適用可能である。

5. 食い違い断層変位を受けるトンネル構造物に関して、これまではトンネルと近傍の地盤のみをモデル化した静的な検討が行われてきたが、動的な応力評価ができないという課題があった。本検討は動力的な断層の破壊とトンネル構造物の応力評価を実施することで、動的な影響評価が実施可能となった。