

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19860040
 研究課題名（和文） FEM 解-BIEM 解融合法による不均質地盤内の断層破壊解析手法の開発
 研究課題名（英文） Spontaneous rupture simulation based on combined boundary integral equation method (BIEM) and finite element method (FEM) approach
 研究代表者
 後藤 浩之 (GOTO HIROYUKI)
 京都大学・防災研究所・助教
 研究者番号：70452323

研究成果の概要：地震は断層の破壊が面的に広がることで地震波を放射する現象である。断層の破壊現象を応力場などに基づいて物理的に取り扱うために、従来さまざまな手法が提案されてきた。本研究では、境界積分方程式法（BIEM）と有限要素法（FEM）の欠点を補い合う新しい手法を提案して、断層破壊を精度良く、かつ自由な媒質に対して適用可能な手法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：土木工学・地震工学

キーワード：断層、破壊過程、不均質地盤、有限要素法、境界積分方程式法

1. 研究開始当初の背景

地震時に震源断層では破壊が面的に進展している。この破壊現象を場の応力状態や断層形状などに基づいて物理的に取り扱うモデルを動力学震源モデルという。過去の実地震に対しても、動力学震源モデルは発生した断層の破壊現象に物理的な背景を持たせることに利用されている。

動力学震源モデルの発展と同時に、その破壊の数値解析手法も発展を続けている。有限要素法や差分法、境界積分方程式法などがその手法として利用されているが、破壊過程の数値解析では次の2点に注意する必要がある。

- ・断層近傍の応力場を高精度に求められること

- ・不均質な地盤の解析が可能であること

この両者を十分に満足させる手法は従来の解析手法単一では難しい。例えば、領域型の解法である有限要素法では、不均質な地盤の解析が可能であるものの、断層近傍の応力場を高精度に求めるためには設定する断層の位置に Sprit node などの特別な処理を行う必要がある。また、境界型の解法である境界積分方程式法は高精度に応力場を表現できるものの、解析可能な地盤が単純なものに限られてしまう。

このため、断層の破壊を高精度に、かつ自由な地盤に対して計算できるようにするための数値解析手法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、境界積分方程式法の利点である断層近傍の応力場が高精度に表現されることと、有限要素法の利点である複雑な地盤に対する応力場が計算可能であることをお互いに利用するため、両手法を組み合わせた新しい破壊過程の数値解析手法を開発する。

境界積分方程式法と領域型的手法とを組み合わせる手法としては、断層を取り囲むように境界積分方程式法で解く領域を設定し、外側を領域型の解法で行うソースボックスの概念が一般的であった。ソースボックスは予め設定しておく必要があるため、本研究ではソースボックスを用いない方法を提案する。

3. 研究の方法

手法の開発には、京都大学大型計算機センターの並列計算機や、デスクトップマシンを利用して、大規模計算が可能な環境を利用した。また、有限要素法や境界積分方程式法の基本的な概念に詳しいアメリカ・カーネギーメロン大学の Jacobo Bielak 教授との議論を経て、本研究のアイデアを構築した。

4. 研究成果

(1) 手法の概要

対象とする地盤に不均質または地表面などの境界面がある場合、断層で発生したある時刻の滑りに対する断層面上の表面力の増分は、不均質の影響を受けない直接的な項と不均質の影響を含む項との和で表現することができる。不均質の影響を含まない項は全無限均質媒質における応答と等しいので、境界積分方程式法を用いて精度良く計算することができる。一方、不均質の影響を含む項は、一般に境界積分方程式法で求めることができない。

そこで、2つの有限要素法の解を合成して不均質の影響を含む項のみを抽出する方法を考える。1つは、対象とする不均質な地盤をモデル化した場合の有限要素法の解、もう1つは全無限均質媒質を仮定した場合の有限要素法の解である。要素配置を両有限要素法で一致させた場合、その解の差は不均質の影響を含まない項がキャンセルされるために不均質の影響を含む項のみを取り出すことができる。

有限要素法は断層の近傍で応力を精度良く表現することが難しいものの、その影響が危惧される直接的な項がキャンセルされるため、ある程度の距離離れた精度の保証された不均質の影響が担保される。

具体的な式は以下の通りである。

$$\Delta T_i(\mathbf{x}, t) \square \Delta T_i^H(\mathbf{x}, t) + \Delta \bar{T}_i^{\text{hetero}}(\mathbf{x}, t) - \Delta \bar{T}_i^{\text{homo}}(\mathbf{x}, t)$$

ここに、左辺は滑りによって生じた断層面の表面力変化を表す。右辺第一項は境界積分方程式法で求める直接的な影響による表面力変化を表す項、第二項は対象の地盤モデルに対して有限要素法で得られた表面力変化、第三項は地盤モデルが全無限均質媒質であるとした場合の有限要素法による表面力変化である。図1は上式を表現するための概念図である。

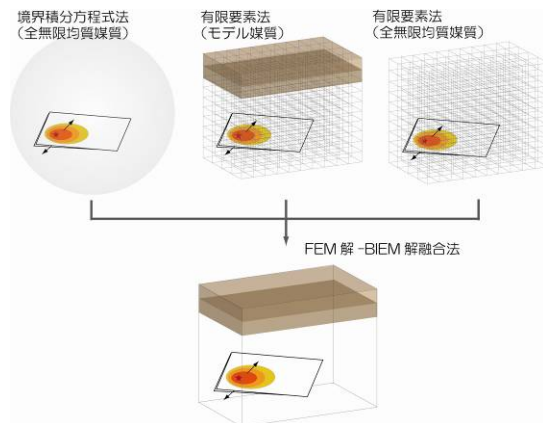


図1 FEM解-BIEM解融合法の概念

これを時間ステップ毎に適用させることで、不均質な地盤に対しても断層の破壊を精度よく計算できることが期待できる。ただし、2つの有限要素法の差として表現される不均質の影響を含む項が精度良く計算できると仮定できる場合に、手法が成立する。言い換えると、不均質が断層の極近傍にある場合、断層が層境界などに接する、跨ぐ場合には近似が成立しない。

(2) 手法の検証

提案する FEM 解-BIEM 解融合法の妥当性を確認するため、単純な問題に対して検証を行った。自由表面を有する二層地盤内に震源を配置し、震源で食い違い滑りを発生させた場合の応力場を計算する。震源の極近傍の点から離れた点までの3点について、提案手法によるクーロン応力変化と密な要素配置による有限要素法のクーロン応力変化とを比較する。提案手法の有限要素法は粗い要素配置とし、震源と震源極近傍の観測点までの距離は要素サイズと等しくしている。

図2に検証結果を示す。震源極近傍の観測点に見られるクーロン応力変化は、震源で発生する滑りの直接的な影響が支配的である。この影響の精度を境界積分方程式解が保証するため、要素サイズが粗い提案手法でも精度よく計算できている。一方、離れた観測点では後続波に複雑なフェーズが見られるように不均質の影響が見られる。これは全無限の境界積分方程式解では表現できないもの

の、有限要素法解により組み込まれるため表現することができている。中間の観測点についても密な要素配置による解析結果と一致しており、シームレスに震源極近傍から離れた観測点までの精度を保証していることがわかる。

従来のソースボックスを用いる手法などでは震源極近傍の影響を受ける領域と不均質の影響を受ける領域とを分離して設定する必要があった。本提案手法は領域を分離せずとも自動的にその影響の強弱を反映することができることが大きな特徴である。

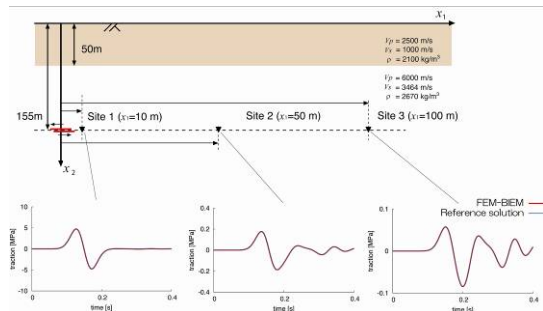


図2 手法の検証

(3) 数値解析例

FEM 解-BIEM 解融合法を用いて震源断層が動的に破壊する現象の解析を試みた。断層の破壊現象を解析するためには、提案手法のような解析ツールと、断層間の摩擦則を規定する必要がある。本研究では、強震動を生成するような高速破壊時に有用とされる滑り弱体化型モデルを用いている。

図3に示す結果は、断層が地表の近傍に位置する場合に、発生した地震動が地表で反射して断層に戻る事で、再び破壊エネルギーとなり断層を破壊させるプロセスを示したものである。全無限媒質において同条件で計算した場合は、破壊開始から4.0秒までに破壊が停止して地震動の発生が収まるが、地表が存在する場合は破壊が停止しない。4.0秒前後のクーロン応力の分布を調べると、断層を破壊させる傾向の成分が地表から反射して断層に向かう様子が見られる。この成分により断層が破壊すると、生成された地震動と反射した地震動との作用により断層と地表の間に速度値の大きな領域が形成されることが示された。

このような地表による効果は、断層と地表との距離、また断層の角度に依存する。例えば、横ずれ断層のように90度の傾斜角の断層の場合は地表の影響は比較的少ないが、傾斜角が低角である場合ほど影響が顕著となる。また、様々なケースについて地表の影響を整理すると、最終的な滑り量が大きくなること、破壊伝播速度が速くなること、

が共通して見られた。

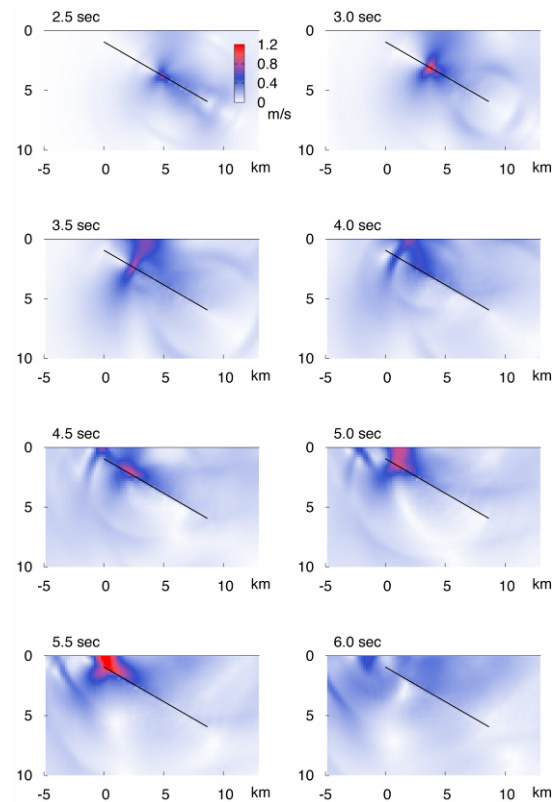


図3 破壊現象に及ぼす地表面の効果

(4) その他

① ガラーキン境界積分方程式法

境界積分方程式法の精度を向上させるために、ガラーキン境界積分方程式法の開発を試みた。ガラーキン境界積分方程式法とは、境界積分方程式に対してさらに変分原理を適用し、試験関数と滑り関数の両者に同じ形状関数を適用する方法である。境界積分方程式に比べて特異性が下がるため、数値積分が利用できることから自由な形状関数を導入することができ、精度を向上させることができる。

ガラーキン積分方程式法を断層の破壊解析に適用して精度を検証したところ、通常の境界積分方程式よりも収束が早いことが認められた。

② 3次元効果による摩擦力の変化

断層の破壊解析には断層面間に働く摩擦力をモデル化した摩擦則を適用するが、一般に摩擦則は1次元の摩擦試験に基づいたスカラー量による摩擦モデルである。ところが、実際の断層は3次元媒質中に置かれた2次元面であるので、少なくとも2次元、断層ガウジの幅方向を含めれば3次元のせん断現象によるものと捉える必要がある。このため、摩擦現象の3次元的な影響を調べるために、

粒子群からなる供試体を作成して個別要素法による数値実験を実施した。

通常のせん断を行うと摩擦力はピークを示した後になだらかな弱化挙動を示す。ところが、せん断変位に空間勾配を与えながら変形させると、発現する摩擦力は必ず減少することが示された。摩擦力の減少量は空間勾配の程度と正の相関が見られることから、3次元的な変形が影響している可能性が考えられるため、供試体内部のミクロな応力鎖構造(図4)を調べると、応力鎖が外力の方向と直交しない方向に成長していることが認められた。

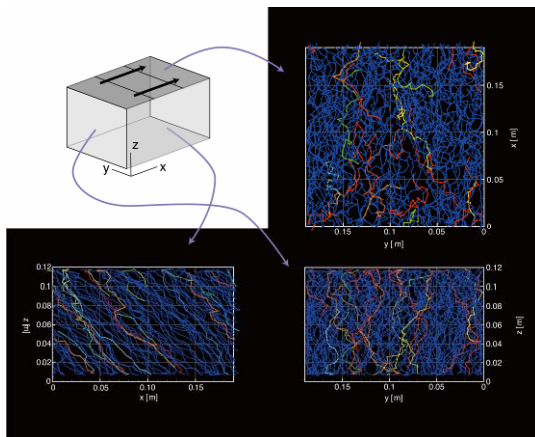


図4 数値実験により観察された粒子群が構成する応力鎖構造

③ 動力学震源モデルのパラメタ

断層の破壊現象を支配するパラメタは、断層の摩擦則を規定するといくつか絞ることができる。ところが従来の研究では、観測波形に含まれるノイズのために、全てのモデルパラメタが観測可能なわけではなく、トレードオフ関係であることが知られていた。このトレードオフ関係は順解析で仮定の基に実施されていたことから、逆解析手法を利用して網羅的にこの関係を取りまとめることを試みた。

モデルを設定して計算した地表波形を観測波形とみなし、その観測波形から推定されるパラメタを様々な解析条件の基で取りまとめた。ここで利用する逆解析手法は強い非線形性を有するため、大局的最適解に達することが必ずしもできないこと、複数の局所的最適解が存在してその値の違いが顕著でないことなどの特徴がある。

集めた結果を調べると、断層各点ごとの破壊時刻-滑り速度がピークとなる時刻の間の時間が、滑り弱化的勾配と強い相関があることが明らかとなった(図5)。数学的にはこの2つのパラメタは独立であるものの、滑り速度がピークとなるまでの破壊の情報が観測波形には乏しいことから、この2つのパ

ラメタを分離することが難しいことが明らかとなった。

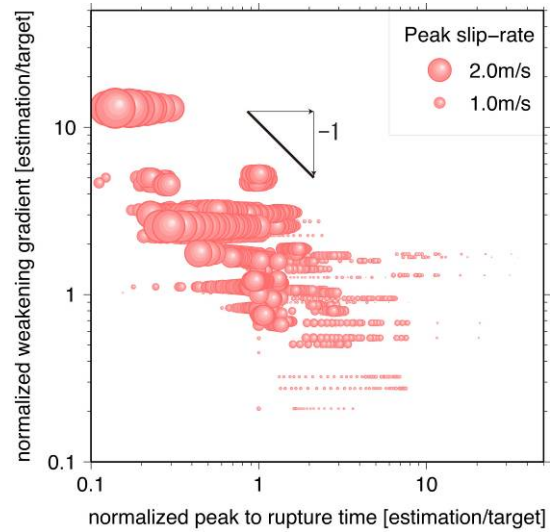


図5 動力学震源モデルパラメタのトレードオフ関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Hiroyuki Goto, Jacobo Bielak, Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems: SH-case, Geophysical Journal International, 172, 1083-1103, 2008、査読有
- ② Hiroyuki Goto, Leonardo Ramirez-Guzman, Jacobo Bielak, Numerical simulation of dynamic fault rupture propagation based on a combination of BIEM and FEM solutions, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008、査読無
- ③ Hiroyuki Goto, Jacobo Bielak, Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems, Proceedings of the 21st KKCNN Symposium on Civil Engineering, 226-229, 2008、査読無
- ④ 後藤浩之, Jacobo Bielak, 有限要素法と境界積分方程式法を組み合わせ手法による断層破壊の数値解析、応用力学論文集、10、613-622、2007、査読有
- ⑤ 石井やよい, 後藤浩之, 澤田純男, 新潟県中越地震の震源インバージョンによる川口町の地震動特性の考察、土木学会地震工学論文集、29、153-160、2007、査読無

有

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① 後藤浩之、阪口秀、澤田純男、変動成分を許容した滑りに対して発現するせん断摩擦の数値解析的検討、平成 20 年度京都大学防災研究所研究発表講演会、2009 年 2 月 25 日、京都市
- ② Hiroyuki Goto、Sumio Sawada、Trade-offs of dynamic parameters inferred from 2D dynamic source inversion results、2008 AGU Fall Meeting、2008 年 12 月 19 日、アメリカ・サンフランシスコ
- ③ Hiroyuki Goto、Hide Sakaguchi、Sumio Sawada、Can 1D scalar variables in friction law really describe 3D fault system?、7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan、2008 Fall meeting、2008 年 11 月 26 日、茨城県つくば市
- ④ Hiroyuki Goto、Jacobó Bielak、Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems、The 21st KKCNN Symposium on Civil Engineering、2008 年 10 月 27 日、シンガポール
- ⑤ Hiroyuki Goto、Leonardo Ramirez-Guzman、Jacobó Bielak、Numerical simulation of dynamic fault rupture propagation based on a combination of BIEM and FEM solutions、14th World Conference on Earthquake Engineering、2008 年 10 月 13 日、中国・北京
- ⑥ 後藤浩之、阪口秀、澤田純男、せん断摩擦力に対する滑り変位の空間勾配依存性、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 30 日、千葉市
- ⑦ 後藤浩之、Jacobó Bielak、ガラキン境界積分方程式法を用いた自発的な断層破壊解析手法の開発、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 29 日、千葉市
- ⑧ Hiroyuki Goto、Jacobó Bielak、Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems、2007 AGU Fall Meeting、2007 年 12 月 11 日、アメリカ・サンフランシスコ
- ⑨ 後藤浩之、Jacobó Bielak、有限要素法と境界積分方程式法を組み合わせた断層破壊の数値解析手法の開発、日本地震学会 2007 年秋季大会、2007 年 10 月 25 日、仙台市
- ⑩ 後藤浩之、宮腰研、凌甦群、澤田純男、石井やよい、高島大輔、佐藤芳樹、新垣芳一、微動アレーを用いた新潟県柏崎市の S 波速度構造調査、日本地震学会 2007 年秋季大会、2007 年 10 月 24 日、仙台市
- ⑪ 後藤浩之、Jacobó Bielak、有限要素法と境

界積分方程式法を組み合わせた手法による断層破壊の数値解析、第 62 回土木学会年次学術講演会、2007 年 9 月 12 日、東広島市

- ⑫ 後藤浩之、澤田純男、動力学震源インバージョンに対する推定変数の感度分析、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007 年 5 月 21 日、千葉市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 浩之 (GOTO HIROYUKI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：70452323