

## 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

京都大学防災研究所 正会員 ○後藤 浩之  
Carnegie Mellon University 非会員 Jacobo Bielak

### 1. はじめに

地震時に断層で生じる破壊過程を動力学に基づいてモデル化する動力学震源モデルは、過去の実地震における破壊現象に物理的な背景を持たせて説明してきた。また同時に、動力学震源モデル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数値解析手法として提案されているが、破壊過程の数値解析の特徴である、1) 断層極近傍の応力場を高精度に求めること、2) 不均質な地盤の解析が可能であること、の両者を十分に満足させる手法は以上に挙げた解析手法単一では難しい。そこで本研究では、有限要素法と境界積分方程式法とを組み合わせた解析手法を採用して、2次元 P-SV 波動場を対象とした面内クラックの断層モデルに対する断層破壊の数値解析を実施する。

### 2. 解析手法

動力学に基づいた断層の破壊現象を解析する上で2つの関係式が必要である。1つは断層間に働く摩擦力の発生を滑り変位、滑り速度と表面力との関係として記述した断層の摩擦則であり、もう1つは断層を取り巻く地盤を弾性体としてモデル化することにより得られる滑り - 表面力関係式である。

後者の滑り - 表面力関係式は断層を取り巻く地盤の物性や地盤構造などを反映して構成される。全無限均質媒質として地盤をモデル化した場合には Green 関数が解析的に与えられるため、断層をその媒質の表面とすることで滑り - 表面力関係が境界積分方程式として表現される。境界積分方程式を離散化した境界積分方程式法 (BIEM) は精度が高く、従来より断層破壊の数値解析に利用されてきたが、解析解が必要であるために単純な地盤には利用されている<sup>1)</sup>ものの複雑な地盤を対象とした問題に対して利用されることはなかった。一方、有限要素法 (FEM) などの領域型の数値解析手法では不均質な地盤構造や自由表面の取り扱いが可能である。しかし、断層面の表現において精度を欠くため、断層の破壊過程を解析する際に与えられた滑り変位に対応する隣接した断層面上の表面力を計算する必要からこの精度の問題が重要となる。

そこで本研究では、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とを組み合わせ、次式のような滑り - 表面力関係式を用いる。

$$\Delta T(x, t) = \Delta T^H(x, t) + \Delta \bar{T}^{hete}(x, t) - \Delta \bar{T}^{homo}(x, t). \dots\dots\dots (1)$$

不均質な地盤に対する表面力変化を表す左辺に対して、右辺が3つの項で構成されている。第一項目は全無限均質媒質に対する境界積分方程式により計算される項であり、解析的な積分方程式表現が可能である。第二項目は不均質な地盤を対象として有限要素法により計算される表面力を、第三項目は全無限均質媒質を対象として有限要素法により計算される表面力を表す。Fig. 1 に式 (1) に対応した表面力変化  $\Delta T$  の計算手順を示す。

### 3. 断層破壊の数値解析

半無限地盤における断層破壊を対象に数値解析を実施する。地盤モデルと断層、及び地表面に設定する観測点の配置を Fig. 2 に示す。地盤モデルは P 波速度 6000 m/s, S 波速度 3464 m/s, 密度 2670 kg/m<sup>3</sup> の均質地盤とし、幅 10 km の断層を深さ 1000 m に配置して4通りの傾斜角 (0°, 30°, 60°, 90°) について考察する。

半無限地盤に対して計算された自由表面上の速度波形と、全無限媒質に対する破壊過程を半無限地盤内に設定した断層に導入して計算された速度波形 (H を付記して表す) とを、Fig. 3 に示す。全無限媒質を仮定して生成させた破壊過程による波形との違いが明瞭に確認できる。傾斜角が 30°, 60°, 90° の場合における速度

キーワード: 断層破壊, 境界積分方程式法, 有限要素法

連絡先: 〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 Tel 0774-38-4067/ Fax 0774-38-4070

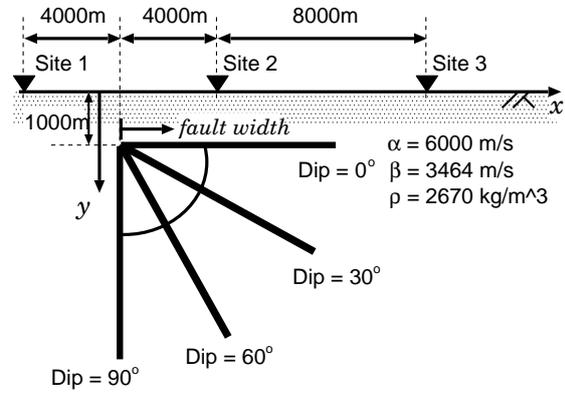
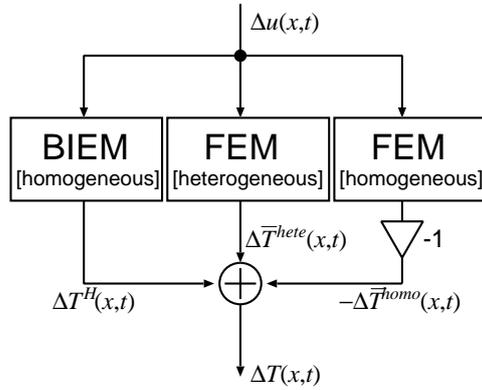


Fig. 1: 有限要素法を組み込んだ境界積分方程式法の計算手順 Fig. 2: 断層と観測点の配置

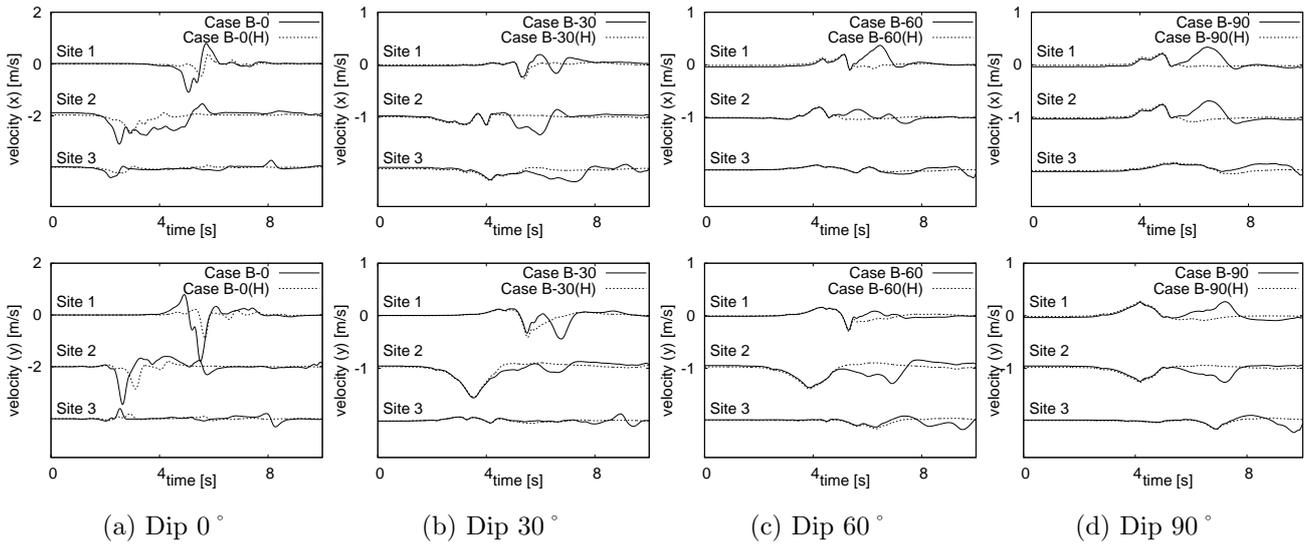


Fig. 3: 地表面で観測される速度波形の比較 .

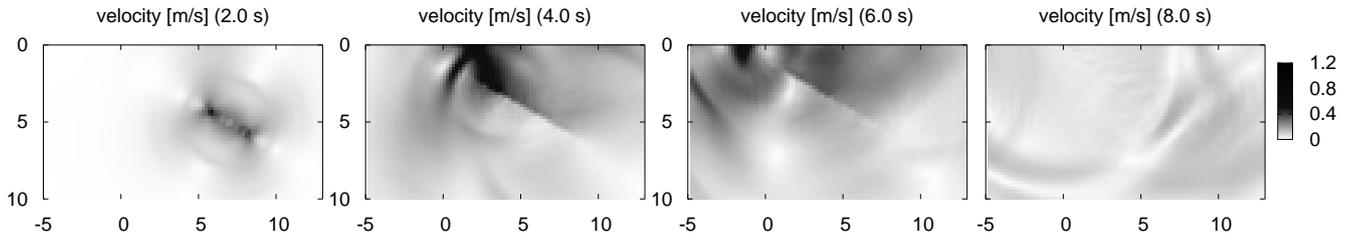


Fig. 4: 傾斜角 30° の場合に対する波動場 . 速度の 2 成分合成値を示す . 縦軸, 横軸の単位は km

波形の大きな違いは、波形に第 2 のフェーズが表れる点であり、導入する断層の破壊過程の違いにより生成されるフェーズであることから、このフェーズは半無限地盤を反映した震源過程によるものと考えられる。ただし、第 1 のフェーズに差が認められない傾向が確認される。

傾斜角 30° の場合を対象にして対象領域で計算された各地点における速度の 2 成分合成値を時刻毎に Fig. 4 に示す。時刻 2 秒までは、生成された波動場の空間分布に半無限地盤の影響が明瞭に確認できないが、時刻 4 秒から 6 秒まで地表面と断層との間に速度の大きな領域が形成され、その後左右に伝播する様子が見られる。速度波形に見られる第 2 のフェーズの到達時刻と比較すると、この速度の大きな領域が第 2 のフェーズに対応する。また、断層を挟んで上側の領域の方が速度の値が大きく、断層の下側の領域へと波動が多く透過しない様子も確認される。

参考文献

1) Zhang, H. and Chen, X.: Dynamic rupture on a planar fault in three-dimensional half space - I. Theory, *Geophys. J. Int.*, Vol.164, pp.633-652, 2006.