拡張有限要素法(X-FEM)を用いた自発的な断層破壊の数値解析手法の開発

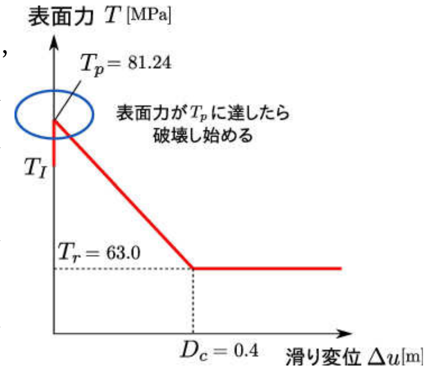
京都大学工学研究科　学生員　○和田　一範
京都大学防災研究所　正会員　後藤　浩之

1．はじめに

断層の自発的な破壊進展問題を数値解析するための方法としては，一般に領域型の解法や境界型の解法が用いられている．差分法(FDM)や有限要素法(FEM)といった領域型の解法は，不均質な媒質や非線形な媒質を容易に設定できる反面，断層のように変位が不連続である境界を考えるためには，境界を要素境界に沿わせて節点の自由度を倍にする(Split Node)など，特別な処理を施す必要がある．それに対して，境界積分方程式法(BIEM)に代表される境界型の解法は，解析解を利用するために断層近傍の応力場を精度良く解析できるが，Green関数の解析解が存在するような場合，すなわち全無限均質媒質といった単純な問題しか扱うことができないため，対象とできる問題が限られる．

一方，近年 Belytschko and Black [1)]や Moës [2)]らによって提案された拡張有限要素法(X-FEM)は要素内に不連続な境界を導入できる手法である．エンリッチノードと呼ばれる新たな自由度を節点に追加し，エンリッチ関数と呼ばれる不連続関数を形状関数に導入することで，要素内の不連続な境界を表現できる．

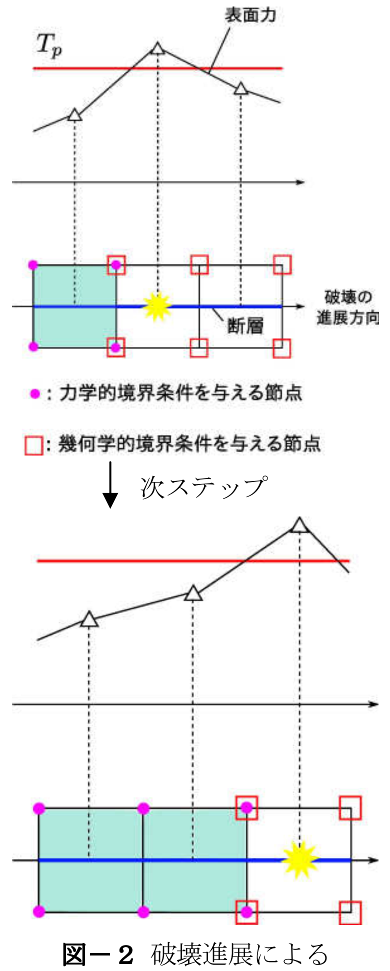
本研究では，自発的破壊進展問題に X-FEM が有用な解析手法に成り得るかを 2 次元 SH 問題について検討する．BIEM で解が得られるような単純な問題に対して，X-FEM で求められる結果と BIEM による結果とを比較して精度を確認する．



図－１ 滑り弱化型摩擦則

2．解析方法

断層の破壊基準は Ida [3)]の滑り弱化型摩擦則を用いる．次節からの解析で用いるパラメータ値を含めて**図－１**にその関数形を示す．断層が破壊している領域は，表面力が規定される力学的境界条件に相当し，まだ破壊していない領域は，滑り変位が０として規定される幾何学的境界条件に相当する．力学的境界条件は外力項として与えることができるので，表面力をエンリッチノードにかかる外力に置き換えることで制御する．幾何学的境界条件は，滑り変位値と表面力の釣り合い式とからエンリッチノード値を求めて，エンリッチノード値を制御する．解析は４節点アイソパラメトリック要素で行い，降伏表面力で規定する破壊の判定は要素を切る断層の領域の表面力で行う．すなわち，**図－２**に示すように，破壊進展時には，いずれの要素も幾何学的境界条件か力学的境界条件かを選択することになり，エンリッチノードで見ると両方の効果の含まれた節点が破壊先端に位置する．



図－２ 破壊進展による境界条件の変遷

3．手法の検証

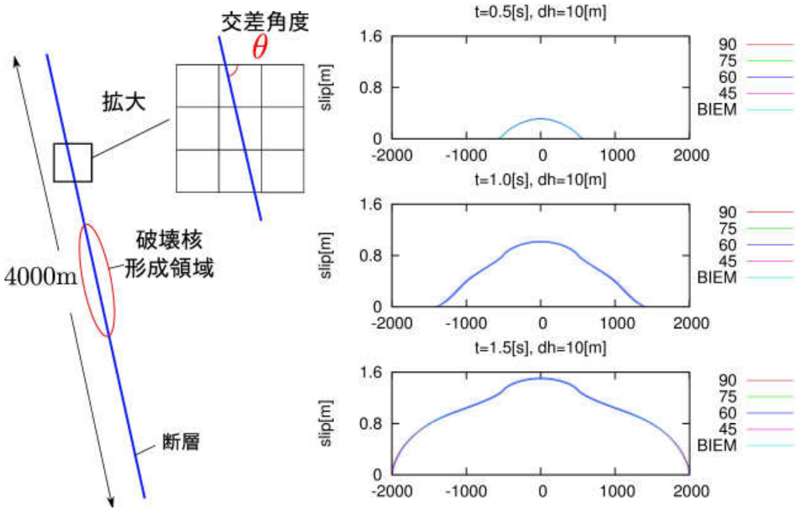
2 次元の全無限均質媒質において，同じ要素配置の下で要素境界を断層が切る角度を変化させて X-FEM により解析した結果と，BIEM による結果と

キーワード　拡張有限要素法，自発的な断層破壊
連絡先　〒611-0011　宇治市五ヶ庄　京都大学防災研究所　TEL　0774-38-4069

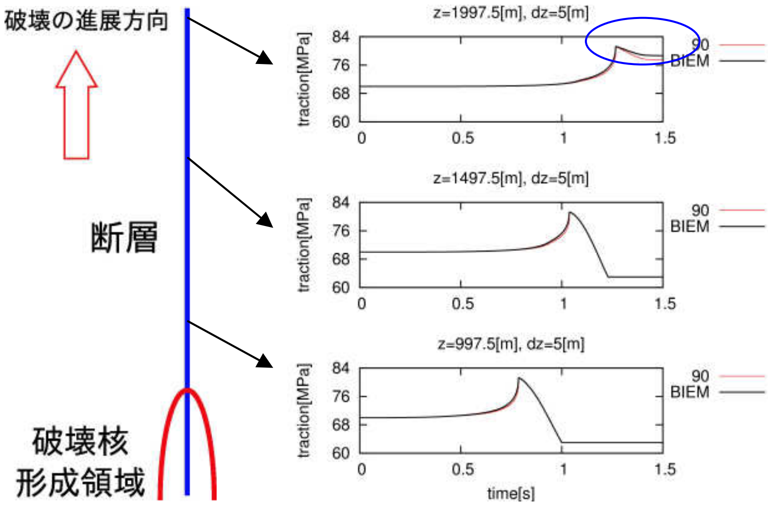
を比較する．媒質と断層の物理定数を**表－１**に示す．

図―３は滑り変位の空間分布を表す．時刻は上から t = 0.5, 1.0, 1.5 秒の時点である．全ての傾斜角の結果が BIEM の結果と良く一致していることがわかる．

図－４は，表面力の時刻歴を表す．おおむね X-FEM と BIEM で一致しているが，断層端で両者の違いが現れている．これは破壊がその先に伝播できないように拘束しているため，断層端の応力値が特異点となるからであると考えられる．



図－３ 滑り変位の空間分布(全無限)

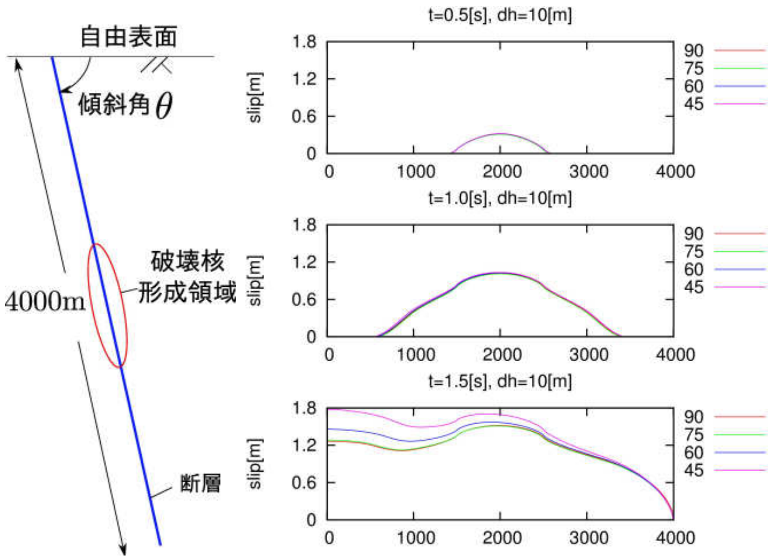


図－４ 表面力の時刻暦(全無限)

４．数値解析例

全無限均質媒質中の解析では，BIEM によって高精度な解を求めることができるが，**図－５**のように断層上端に自由表面があるような場合は，BIEM では計算することができない．X-FEM では自由表面の設定を容易に行えるため，断層上端に自由表面があるような半無限均質媒質中で傾斜角を変えて解析を行う．媒質と断層の物理定数は**表－１**とする．

図－５が滑り変位の空間分布である．破壊が自由表面まで至ると傾斜角の違いが現れるが，逆に断層下端付近では，それぞれの角度で一致する．



図－５ 滑り変位の空間分布(半無限)

表－１ 媒質と断層の物理定数

初期表面力[MPa] (破壊核形成領域内)	81.6
初期表面力[MPa] (破壊核形成領域外)	70.0
S 波速度[m / sec]	3464
密度[kg / m ³]	2670
傾斜角[度]	45, 60, 75, 90

参考文献

1) Belytschko, T. and Black, T., 1999, Elastc crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **45**, 602-620.

2) Moës, N., Dolbow, J., Belytschko, T., 1999. A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **46**, 133-150.

3) Ida, Y., 1972. Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith’s specific surface energy, *J. geophys. Res.*, **77**, 3796-3805.