

強度にばらつきを持つ分岐断層の破壊方向に関する XFEM シミュレーション

京都大学工学部 学生員 ○山下 大輝
 京都大学防災研究所 正会員 後藤 浩之
 京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男

1. はじめに

入力地震動は構造物の動的応答解析を行う上で必要であり、近年は耐震設計においても導入が進められている。入力地震動の設定にあたっては想定する地震の断層破壊プロセスを何らかの方法で仮定する必要があるが、断層の破壊方向については中田他¹⁾により提案された方法が参照されてきた。例えば、断層トレースが Fig.1 のように分岐を持つ場合、破壊は分岐に向かって進展すると仮定される。これは地震本部における強震動評価を行う場合にも現在採用されている考え方である。一方、2016 年熊本地震本震は、布田川断層と日奈久断層が接続する分岐部から破壊が始まり、阿蘇方面に向かって進展したことが知られている。これは上の仮定と異なる事実である。

Fig.1 分岐を持つ断層の破壊方向の考え方¹⁾

そこで本研究は、分岐断層の破壊方向がどのような条件の下で決定されるか明らかにすることを目的とし、断層強度や応力条件のばらつきに着目して拡張有限要素法 (XFEM) による数値解析を実施した。また、分岐断層を解析上取り扱いはやすくするため、新しいエンリッチ関数による断層変位の表現を試みた。

2. XFEM における分岐断層の表現

拡張有限要素法 (XFEM) は、変位の近似式に不連続性を与える関数 (エンリッチ関数) を導入することで、クラックや断層といった不連続な変位場を要素分割とは独立に与えることができる手法である。一般的な XFEM では、節点に自由度 (エンリッチノード) を追加して変位場を表現するが、隣接する要素間でエンリッチノードを共有する必要があるため、アルゴリズムが煩雑でかつ計算コストの大きいものとなる。

そこで、本研究では要素毎に独立な自由度を与える方法で不連続な変位場を表現する。

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{u}_{node} + g(\mathbf{x})\mathbf{R}\Delta u \quad (1)$$

ここで Δu は要素毎に与えられる自由度である。またエンリッチ関数 g は、次のように形状関数 N_j を用いて定義する。

$$g(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{j \in J^-} N_j(\mathbf{x}) & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega^+ \\ -\sum_{j \in J^+} N_j(\mathbf{x}) & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega^- \end{cases} \quad (2)$$

形状関数の一般的な性質から $\sum_{j \in J^- + J^+} N_j = 1$ であるため、変位が不連続となる断層上では g による不連続量が常に 1 となるため、自由度にすべり量 (食い違い量) といった物理的意味を持たせることができる。

断層が分岐を持つ場合、2つの断層が交わるような特別な要素を用意する必要がある。既往の研究では Junction Element²⁾ という特別な表現がなされてきたが、より複雑で一般的な状況を表現しようとするのが扱いが容易でなくなる。本研究では要素に自由度を付加するような表現を用いているため、より一般的で簡便な方法を提案してこれを用いることとした (Fig.2)。まず、断層の分岐や屈曲といった状況を、断層先端を 1つのみ含む要素 (tip 要素) の重ね合わせで表現する。このように考えることで、要素内に 3枚以上の断層が集まる場合や、より複雑な状況も表現することができる。tip 要素は、エンリッチ関数に不連続面からの角度 ϕ で定義される関数 $h(\phi)$ を乗じて表す。これにより、断層の延長上で不連続が解消される。また、同じ位置に先端を有し、2つの不連続面のなす角が π であるような 2つの tip 要素の重ね合わせは、平面断層と同じエンリッチ関数とならなければならないため、 $h(\phi)$ の関数形状は次のように与えられなければならない。

$$h(\phi) = 1 - \frac{|\phi|}{\pi} \quad \text{for } -\pi < \phi \leq \pi \quad (3)$$

キーワード 分岐断層, 破壊方向, XFEM, 重ね合わせ

連絡先 〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 TEL 0774-38-4069

この表現の妥当性を数値実験により確認した結果，問題ないと判断されたため，以降の数値解析に用いることとした．

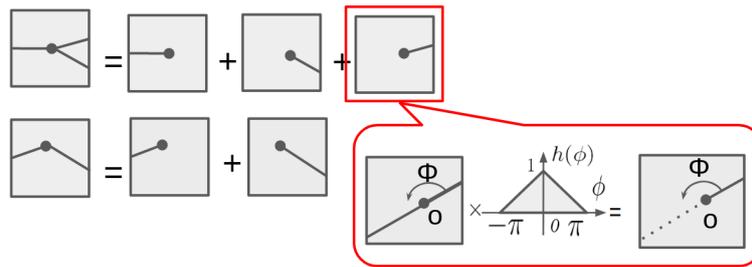


Fig.2 tip 要素の重ね合わせによる分岐の表現方法

3. 分岐断層の破壊方向に関する数値解析

様々な条件下で分岐断層の破壊方向がどのように変化するかを確認するため，分岐断層の応力条件および強度にばらつきを与えて，得られる破壊パターンについて取りまとめた．対象とする断層モデルは，2016年熊本地震の本震に関与したと考えられている布田川断層と日奈久断層の形状を模したものである（Fig.3）．ただし，本研究での検討は2次元の数値解析であるため，地表の断層トレスのみを参照した．また，計算コストの大きな問題であるため，断層サイズは実際の1/2とした．

初期応力場は，熊本地震を対象に検討された実際の応力場³⁾を参考にした．具体的には，主応力方向を53°から83°の間で一様分布を持つように，ケース毎に主応力軸の方向にばらつきを与えて設定した．また各セグメントの強度は，von Karman型の空間ランダム性（相関距離1km）を持つものとし，様々に乱数を変えて生成した．これらの応力場，強度分布を与えることで，ランダムに選ばれた強度の低い箇所から動的に破壊が進行する．

解析結果のうち，セグメント1を全て破壊した93ケースのみを抽出した．93ケースのうち72%はセグメント1で破壊が始まり，セグメント3に破壊が乗り移った．また，93ケースのうち8.6%はセグメント3からセグメント1に破壊が伝播した．その他のケースでは解析開始時点で両セグメントで破壊が生じた．熊本地震で見られた分岐断層を起点とするような破壊もいくつか表れたが，その割合は多いとは言えない．

2016年熊本地震で見られた断層破壊の様子はこのような稀な現象として表れたものなのか，あるいは別の力学的メカニズムを背景に持つのか，今後より詳細な力学的検討を進めて，分岐断層における破壊現象を明らかにしたい．

参考文献

- 1) 中田高，島崎邦彦，鈴木康弘，佃栄吉：活断層はどこから割れ始めるのか，地学雑誌，Vol.107，pp.512-528，1998．
- 2) Daux, C., N. Moës, J. Dolbow, N. Sukumar, and T. Belytschko: Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method, *Num. Meth. Engng.*, Vol.49, pp.1741-1760, 2000.
- 3) Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Saito, Y. Asano, S. Tanaka, K. Sawazaki, Y. Urata and E. Fukuyama: Stress rotations due to the M6.5 foreshock and M7.3 main shock in the 2016 Kumamoto, SW Japan, earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.43, pp.10097-10104, 2016.

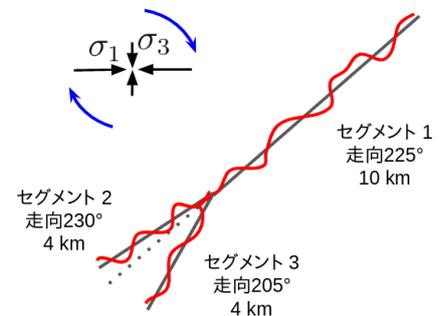


Fig.3 対象とする分岐断層モデル

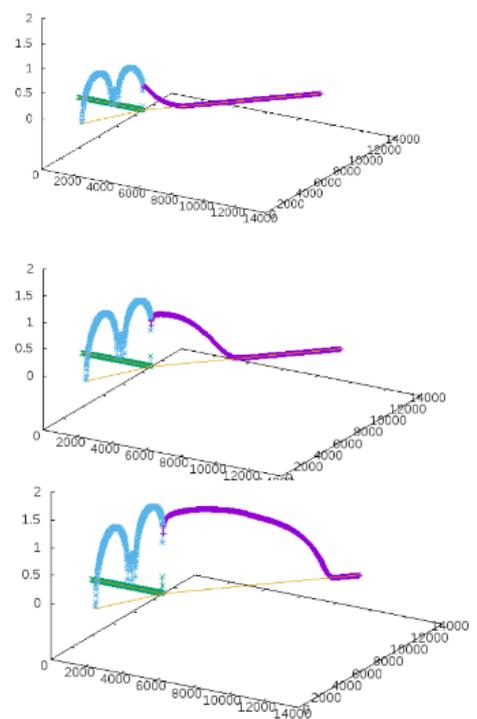


Fig.4 解析結果の例