# 断層変位評価のための動力学的破壊シミュレーションにおける非線形構成則の影響検討

構造計画研究所 正会員 〇三橋 祐太

## 1. 目的

近年地震動のみならず,地震の際の断層変位が構造物に与える影響が問題になっており,特に原子力発電所 近傍で破砕帯などの弱層に変位が励起された際の影響評価が,裕度評価や確率論的リスク評価の観点から求め られている.主断層の活動に伴う破砕帯や弱層の挙動のシミュレーションは様々な方法が提案・実施されてき ているが,有限差分法や有限要素法による動力学的破壊シミュレーションは、断層の自発的破壊を考慮して動 的な検討が可能であるという点に優位性がある.一方で解析を行う際には,断層に非線形構成則を与える必要 があるが,実施者により様々な手法が行われているのが現状である.本検討では,非線形構成則が解析結果に 与える影響に着目し,等価な解析結果を与える条件や差異に関して検討を行った.

#### 2. 解析モデル

検討は 2 次元の有限要素法により実施した. 解析コードは,大規模並列解析可能な有限要素解析コード FrontISTR<sup>1)</sup>をカスタマイズしたものを用いた. 筆者ら<sup>2)</sup>は過去に神城断層地震の動力学的破壊シミュレーショ ンを 3 次元解析により実施しており,その際に観測記録に解析結果を合わせこむために逆算した条件を基に 2 次元解析モデルのパラメータを決定した.表1に設定したパラメータを示す. 地盤はソリッド要素,断層をジ ョイント要素,地盤の周囲に逸散減衰をモデル化した粘性境界を付与する. 神城断層地震は横ずれを伴う逆断 層と報告されており,筆者らの既往の 3 次元 FEM による検討もその報告に則っているが,本検討では 2 次元で モデル化する都合上純粋な逆断層としてモデル化を行った.

### 2. すべり弱化モデルと弾塑性モデルの比較

断層に与える非線形構成則として,静止摩擦から動摩擦への移行を表現した図1左に示すようなすべり弱化 モデルが多く用いられている.一方で,図1左のような非線形特性は一般的な汎用 FEM プログラムに実装され ている例はあまり多くなく,図1右に示すような初期剛性と破壊強度を有する非線形特性が一般的である(以 後,弾塑性モデルと呼称する).そこで両者の差異が解析結果に与える影響を分析する.

図1左のすべり弱化モデルで与えるパラメータは、応力降下量  $\Delta \sigma$ ,強度超過(SE)、臨界変位量 Dc の 3 つで あり、Andrews に従い SE=1.6 $\Delta \sigma$  とすると、パラメータは 2 つとなる.図1右の弾塑性モデルにおいては与え るパラメータは、応力降下量  $\Delta \sigma$ 、破壊強度 ry、初期剛性 ks の 3 つであり、同様に SE=ry- $\Delta \sigma$ =1.6 $\Delta \sigma$  とすると、 パラメータは 2 つとなる。両者で応力降下量は共通しており、初期に非線形を設定した断層がすべて破壊し力 を解放すると仮定した際、解析の最終状態における変形は応力降下量のみから決定されるため、応力降下量が 断層変位量を決定することは容易に推測できる。そこで、すべり弱化則を設定した際の臨界すべり変位量 Dc と、弾塑性モデルを設定した場合の初期剛性 ks の関係を検討する。

地震時に断層面に生じる変位は、破壊力学におけるモード II、III のせん断モードであり、その際の単位面 積当たりの破壊エネルギーGc は図 1 のそれぞれ斜線で示す部分の面積に相当する. 破壊エネルギーと破壊伝 播速度の関係性に関する菊池ら<sup>3)</sup>の研究を参考として、横軸に破壊エネルギー、縦軸に動的な破壊挙動を示す 値として破壊伝播速度 Vr を地盤の S 波速度 β で除した値(Vr/β)を取って、0.05≦Gc≦0.3(MPa·m)の範囲です べり弱化モデル、弾塑性モデルともに複数の破壊エネルギーに対してプロットしたものを図 2 に示す.ここで、 破壊伝播速度は図 3 に示すように、横軸に時刻、縦軸に破壊開始点から図 1 の赤点で示す位置までの距離を取 ったうえで、最小二乗法により傾きを求めることで算出した. 地表面に近づくほど速度は上がるが、破壊エネ ルギーと Vr/β の関係は、モデルの違いで若干の差異は見られるものの概ね一致していることが確認できる.

キーワード 動力学的破壊シミュレーション,断層変位,非線形構成則,並列有限要素解析,FrontISTR 連絡先 〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号 構造計画研究所 防災・環境部 TEL 03-5342-1137 次に破壊エネルギーGc ≒ 0.1(MPa·m)のケースで,時刻3秒の変形図および最大せん断ひずみを図4に示す. コンター図は弾塑性モデルのもののみを示すが,すべり弱化モデルとの差異はほぼ見られなかった.図5に時 刻1.0,2.0,3.0秒における断層面の変位分布を2つのモデルで比較したものを示す.赤丸で囲った破壊フロ ント部分で差異が見られ,すべり弱化モデルは変位ゼロの領域と変位が発生する領域がより明瞭にみられる結 果となっている.これは図1の非線形構成則において,弾塑性モデルは初期の剛性がすべり弱化モデルより小 さく,破壊フロントにおいては食い違い変位が進展しやすい為である.一方で変位が Dc を超えた領域では, 両者の差異は小さい.

### 4. まとめ

動力学的破壊シミュレーションの非線形構成則として、すべり弱化と弾塑性モデルの違いが結果に与える影響を比較した.破壊エネルギーが同じ場合に両者は概ね同等の結果を与えるが、特に破壊フロント部分の応答に差異が生じることを確認した.より複雑な形状、分岐などを持つ断層に対して検討していきたい.



### 参考文献

1) FrontISTR 研究会 HP: https://www.frontistr.com/

2) Yuta Mitsuhashi, Gaku Hashimoto, Hiroshi Okuda and Fujio Uchiyama, Study on estimation of the fault model of Kamishiro Earthquake using dynamic fault rupture simulation, SMiRT-24, 2017.8.

3) 菊池ら, SH 型割れ目の伝播について, 地震第2輯, 23 巻, 4 号, 1970.