

動力学的破壊シミュレーションの結果を用いた領域削減法の検証解析

構造計画研究所 正会員 三橋 祐太 非会員 Szucio Barbara
正会員 ○渡辺 高志

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。一方で動力学的破壊シミュレーションでは広域の断層全体をモデル化する必要があるため、地表面付近の構造物等への影響をある程度細かいメッシュで同時に評価することを考えると解析モデル規模が大きく実務で用いるのは現実的ではない。そこで、広域モデルと地表面付近のモデルを分離して2段階の検討が可能な領域削減法 (Domain Reduction Method ; DRM) ¹⁾の適用性を検討する。

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 FrontISTR²⁾をカスタマイズしたものをを用いた。領域削減法においては、図1に示すように検討対象とするモデル (全体モデル) を STEP1 (広域モデル) と STEP2 (部分領域モデル) に分離する。STEP1 は比較的荒いメッシュで広い範囲の検討を行ったうえで、STEP1 の結果から算出する等価地震力 (節点荷重) を STEP2 に付与する。STEP2 は粘性境界等の半無限性を模擬した要素を設定することで、全体モデルに対してごく一部の範囲のみをモデル化するだけで等価な検討が可能であり、全体モデルに対して部分領域モデルをより詳細にモデル化することも可能である。本研究では、全体モデルとして三橋³⁾で作成したモデル (図2) を用い、STEP1 の広域モデルで同じモデルを用いたうえでその一部を切り出したモデルを部分領域モデルとして検証解析を実施する。各モデルは、地盤をソリッド要素、断層をジョイント要素、モデル底面及び側面には地震動の逸散を表現する粘性境界を設定する。本検討では断層の自発的破壊を模擬した動力学的破壊シミュレーションを採用し、断層には図3に示すすべり弱化モデルに従う非線形構成則を設定する。

3. 領域削減法の結果評価

検証解析として、領域削減法による解析の妥当性を検討するために、全体モデルから断層を含まない部分領域モデルを取り出し、全体モデルの応答から等価地震力を算出し部分領域モデルに入力した結果を、全体モデルの解析結果と比較する。比較は相対変位に対して行う。

まず等価加振力の計算の検証として、断層の自発的破壊を考慮せず、図2の破壊開始点のみを破壊させた際の緑丸に対して赤丸で示した位置の相対変位時刻歴を、①全体モデル、②全体モデルに等価加振力を与えたモデル、③部分領域モデルに等価加振力を与えたモデルの3つのモデルで比較したものを図4に示す。なお、②は粘性境界のモデル化精度を検討することを目的として、全体モデルに対して DRM の等価地震力を入力したものである。①と②の応答変位時刻歴はおおむね一致しており、等価加振力の計算が想定通り実施できていることが確認できる。両者の若干の差異は DRM 境界の精度に起因するものと考えられる。②と③にも若干の差異が生じており、両者の差異は境界のモデル化のみであることから、粘性境界の精度の影響であると考えられる。

次に、動力学的破壊シミュレーションを実施し、同じ位置の相対変位時刻歴を全体モデルと部分領域モデルで比較したものを図5に示す。両者は比較的一致しているが、時刻4~7秒付近の応答に乖離が見られる。時刻4秒の全体モデルと部分領域モデルのせん断応力コンター図を比較したものを図5に示す。応力レベルにお

キーワード 動力学的破壊シミュレーション, 断層変位, 領域削減法, 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

いても両者はよく一致していることが確認できる。

動学的破壊シミュレーションにおいて差異が生じる要因としては、先に指摘した DRM 境界および粘性境界の精度の影響に加えて、主断層が破壊することで地盤の均質性が担保されなくなるためであると考えられる。特に、図3に示したすべり弱化モデルにおいては、断層が破壊し限界ずれ量を超えた領域では、ジョイント要素せん断方向の接線剛性がゼロとなるため（ただし鉛直剛性は線形）、影響が大きいものと推測できる。

4. まとめ

本研究では、動学的破壊シミュレーションを用いた副断層の活動性評価に向けた領域削減法の適用性を検討し、一定程度の誤差はあるものの領域削減法で計算コストを低減したうえで概ね同等な答えが得られることを確認した。今後は誤差の削減方法の検討と並行して、より複雑なモデルによる検討を進めていきたい。

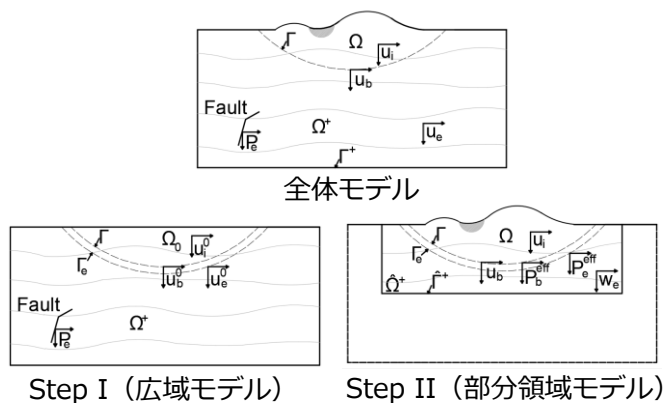


図1 領域削減法のイメージ

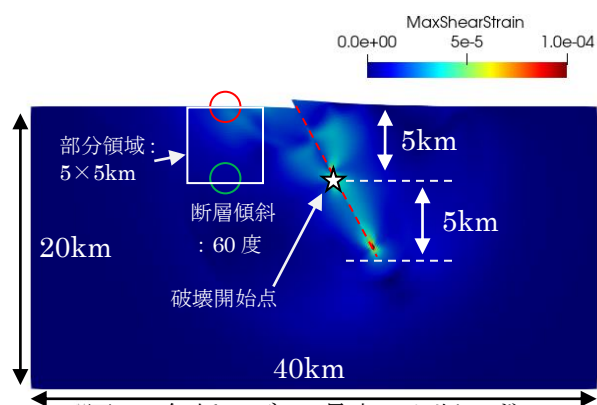


図2 解析モデル+最大せん断ひずみ
コンター図 (時刻 3.0 秒)

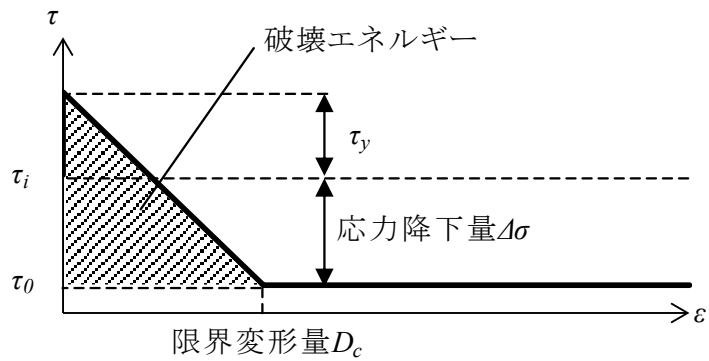


図3 主断層の変位応力関係

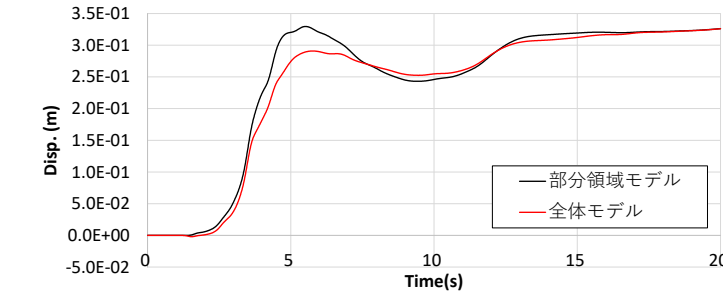


図5 水平応答変位時刻歴
(動学的破壊シミュレーション)

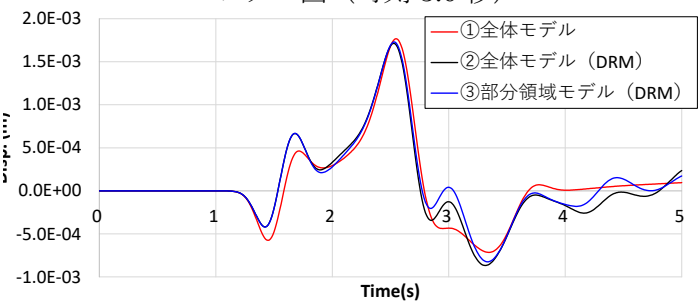


図4 水平応答変位時刻歴 (検証解析)

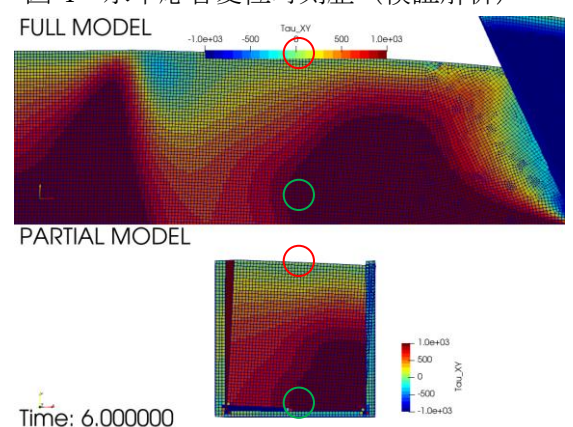


図6 応力の比較

参考文献

- 1) Bielak et. al., Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 2, 817-824.
- 2) FrontISTR 研究会 HP: <https://www.frontistr.com/>
- 3) 三橋, 断層変位評価のための動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, 土木学会令和2年度全国大会, 2020.9.