粘性流体を含む亀裂による SH 波散乱の
2 次元差分法シミュレーション

椎名 高裕[1]・河原 純[2]・岡元太郎[3]

[1]東北大学大学院理学研究科、[2]茨城大学理学部、[3]東京工業大学大学院理工学研究科

はじめに

亀裂群による地震波の散乱波動場を数値的に扱う際には、計算精度や散乱体形状の自由度などの理由から境界積分方程式法(BIEM)が好んで用いられている(e.g. Murai et al., 1995: Yomogida and Benites, 2002)。これに対して Suzuki et al. (2006)は 2 次元亀裂群による散乱を差分法(FDM)で扱う単純な方法を開発し、実用上十分な計算精度が得られることを示した。彼らは、亀裂面上に応力解放条件を課すことで中空亀裂を表現したが、実際の地下亀裂への適用を考える上では、亀裂内部の流体の効果を考慮することが望ましい。そこで本研究では、SH 波散乱に関する Suzuki らの計算方法を、粘性流体を含む亀裂の場合に拡張し、その計算精度と安定性を検証した。

シミュレーションの概要

本研究では Suzuki et al. (2006)に準じて、背景媒質には標準的な空間 2 次精度・速度-応力型 FDM(Virieux, 1984)を用いる。一方、亀裂については、すべての亀裂は平行で、同じ長さ($2a$)と一様な厚さ(ε)を持つとし、かつ ε はグリッド間隔 Δh に等しいとした。また、亀裂内部は粘性率 η の流体で満たされているとし、亀裂の相対剪断変位に伴って流体内部には振動的な 2 次元クエット流が発生すると仮定した。それに伴って亀裂面に働く粘性抵抗は、亀裂面の変位速度に比例するが、本研究では速度-応力型 FDM を採用しているため、粘性抵抗の計算を直接的に行うことができる。以上により、SH 波に対する亀裂内部の流体の応答を取り組むことができる。以下では、粘性流体による影響を無次元パラメータ $\sigma = \eta\beta/\mu\varepsilon$ (βとμはそれぞれ媒質の S 波速度と剛性率)を用いて記述する(Kawahara and Yamashita, 1992)。なお、$\sigma = 0$ の場合は、Suzuki et al. (2006)が扱った中空亀裂の場合に相当する。

計算精度の検証

今回の方法の計算精度を検証のため、Suzuki et al. (2006)に準じて、以下の 2 種類の実験を行った。まず、単一亀裂に正弦波を入射した場合に生じる相対変位を、今回の方法を用いて$0 \le \sigma \le 5,\ 1 \le ka \le 6$の範囲($k$は波数)で計算し、精度が保障されている BIEM(Murai et al., 1995)による計算結果と比較した。結果として、グリッド間隔が十分に小さければ(例えば $\Delta h = a/80$)、σ や ka に依らず、両者はよい一致を示し、今回の

計算方法が十分な計算精度を持つことが示された(図 1)。次に、多数の平行亀裂(数密度n)がランダムに分布する媒質中の波動場を今回の方法で計算し、その平均的な観測波形の、主に直達波部分の減衰と位相速度の分散を求めた。その結果は、Foldy 近似理論(Kawahara and Yamashita, 1992)の予測値と概ねよく一致した(図 2)。同理論の有効性については、すでに十分な数値的検証がなされており(Murai et al., 1995; Suzuki et al., 2006)、それと調和的であることは、今回の計算法の妥当性を改めて支持する。また、今回の方法で数値計算を安定的に行うための条件を実験的に推定したところ、ka に依らず$\beta\Delta t/\Delta h < 1/\sqrt{2+\sigma^2}$ (Δtは時間ステップ)という不等式が得られた。なお、同式は$\sigma \to 0$ で、弾性媒質に対する既知の安定条件(Moczo, 1998)と一致する。

謝辞

村井芳夫氏(北大)による BIEM 計算プログラムを使用させていただきました。

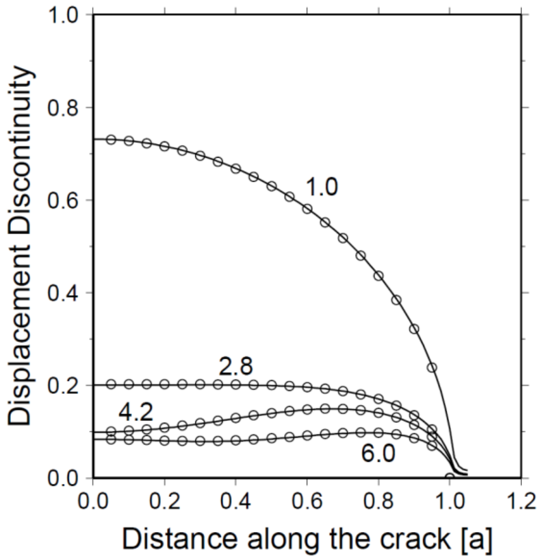

図 1. 亀裂の相対剪断変位($\sigma = 0.5$, $\Delta h = a/80$, $\Delta t = 0.003a/\beta$)。実線が FDM、○が BIEM の計算値をそれぞれ示し、図中の数値はkaの値である。横軸は亀裂中心からの距離。縦軸は$ka = 0$で亀裂中心での変位が 1 となるように規格化している。

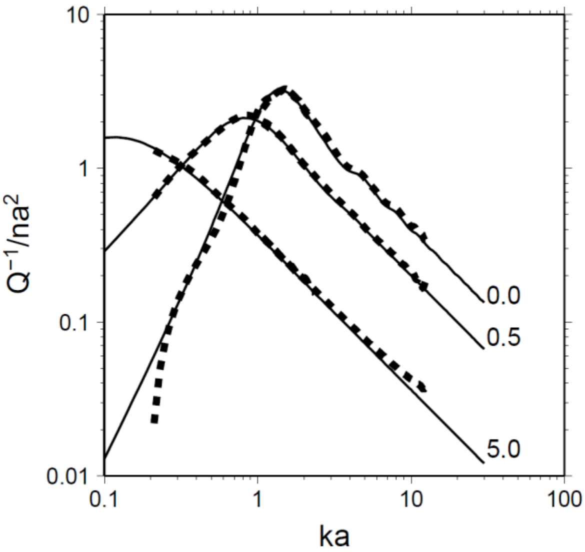

図 2. 散乱減衰 Q^{-1} の波数依存性。太い点線が FDM による数値実験の結果($na^2 = 0.013$)、細い実線が Foldy 近似理論による予測値をそれぞれ示す。図中の数値はσ 値である。