

不均質な岩石試料内の弾性波伝播

—岩石実験から数値シミュレーションへ—

吉光奈奈^{1,2}, 古村孝志^{1,2}, 前田拓人²

1. 東大院情報学環, 2. 東大地震研

はじめに

岩石破壊試験は、制御した条件下で破壊を起こし、震源断層に近い位置で波形の集録を行うことができるため、断層の詳細な成長過程を調べるのに適している。例えば、Yoshimitsu et al. (2009)では、岩石の三軸圧縮破壊に伴う広帯域センサを使った透過波集録を行い、初動の立ち上がりや走時の時間変化を用いて試料内部の構造変化や亀裂成長の様子をモニターした。しかし、圧縮試験に用いられる岩石試料のサイズは通常直径数十ミリ程度と小さく、得られる透過波には直達波のみならず、試料の端面で何度も反射したと考えられる後続相が多数記録される。この中には初動より振幅が大きな位相も含まれ、その成因が不明であるため、試料を透過した波の後続相を積極的に利用した解析はほとんど行われてこなかった。後続相を積極的に利用することが可能になれば、各位相の伝播経路の違いを活用して、媒質の特性を表すパラメータと実際の不均質構造の関係について、地震学で一般的に用いられる解析手法を使って評価することが可能になる。その第一歩として、本研究では差分法（Finite-Difference Method: FDM）を用いたシミュレーションにより岩石試料の透過波実験を再現し、計算波形を用いて初動および後続相の生成・伝播過程を確認するとともに、実測された透過波形と比較することによって、観測波形が持つ特徴的位相の起源の同定を試みた。

解析手順

一般的に岩石破壊試験では直径 50 mm、高さ 100 mmの円柱形試料が使用される。試料の断面に相当する直径 50 mmの円状領域を含む解析領域を、56 μm の格子間隔で 1024 \times 1024 グリッドに離散化し、二次元弾性体のP-SV問題に対する空間4次・時間2次精度の食い違い格子（スタガード格子）を用いたFDM計算により試料内の波動場を計算した。試料として用いたWesterly花崗岩の平均密度は既知であるが、より現実に近いモデル媒質を使って計算を行うために、マイクロフォーカスX線CTスキャナを用いて試料断面を撮影し、X線吸収係数と密度や弾性波速度が比例関係にあると仮定して、計算モデルの各グリッドにおける密度（2.6 - 3.1 kg/m^3 ）、P波速度（5.0 - 6.0 km/s ）、S波速度（2.8 - 3.5 km/s ）を定めた。得られた計算波形は、実験で扱う周波数帯と等しい 50 kHz - 2 MHzのバンドパスフィルタをかけて評価した。

結果・議論

計算結果から、図1のように発散場（P波）と回転場（S波）を求めた。その結果、曲率を持つ試料表面においては、直達波のみならず、P波とS波の多重反射（PP, SS, PPP, SSS波等に相当）やその変換波（PS, SP, PPS波等に相当）が多数発生している様子が確認された。また、媒質の不均質性によって後続相が乱されている様子や、境界面を伝わる波の伝播も確認された。

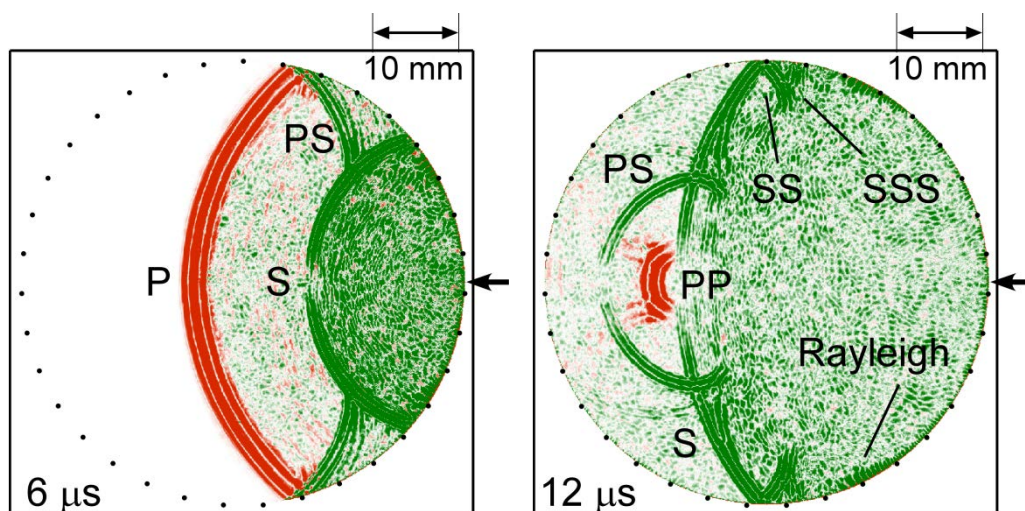


図1: (左) 発振後 6 μs 後の波動場. 矢印と黒点はそれぞれ震源位置と仮想観測点. (右) 発振後 12 μs 後の波動場.

得られた速度波形は、動径方向とその直交方向に回転して評価した（図2）. 動径方向の波形のうち、震源から最も遠い観測点では、初動（9.0 μs ）は直達P波、第2波（19 μs ）はSS波、第3波（23 μs ）はSSS波が到達しており、後続相においてS波が卓越している様子が明らかになった。

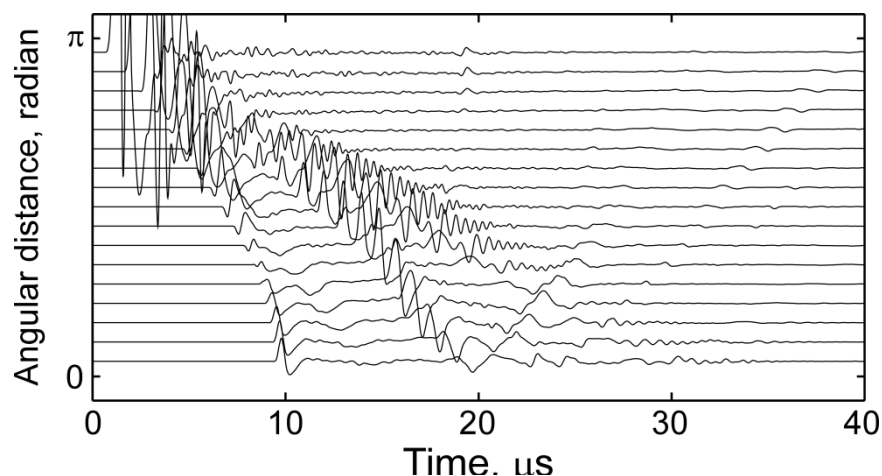


図2: 動径方向外向きを正にとって回転させた速度波形.

本シミュレーションにより、鉱物の作り出す複雑な不均質状態を反映したモデル媒質中を波が伝播していく過程と、後続相の特性が確認できた。今後は、より多くの実測波形を使って多点での観測波形と計算波形の比較を実施するとともに、Green 関数形状や幾何減衰、円柱形試料の上下端などからの反射も考慮するために三次元 FDM への拡張を行い、振幅値も含めてより正しく実測波形と計算波形の位相を比較することを目指す。

謝辞: マイクロフォーカス X 線 CT スキャン画像の撮影に際しては、立命館大学の川方裕則氏、テスコ株式会社の平井秀和氏にお世話になりました。記して感謝いたします。