

分法による実験試料内の 3 次元波動伝播シミュレーション

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

これまでに、試料の内部構造や亀裂の状態を調べる目的で、岩石試料の圧縮破壊実験に伴う透過波モニタリングなどが行われてきた。しかし、実験室で用いられる試料は有限サイズであるため、観測される透過波の後続相には試料の端面で反射・変換した波が多数含まれている。これまで後続相の成因はほとんど不明であったため、透過波の解析は初動部分を対象としたものが多かった。取得された透過波記録全体をより有効に活用できるようにするためには、まず後続相の成因をはっきりとさせる必要がある。そこで、Yoshimitsu et al. (2013)や Zhang et al. (2014) は、岩石試料の透過波実験を差分法 (Finite-Difference Method: FDM) を用いた 2 次元シミュレーションにより再現し、後続相の起源を調べようと試みた。その結果、閉じられた試料内で何度も波の反射・変換が起こり、時間の経過とともに複雑な波動場が形成される様子が明らかになった。本研究では、2 次元シミュレーションでは考慮しきれなかった 3 次元的な試料形状の影響を調べるため、3 次元 FDM シミュレーションを実施した。

解析手順

円柱形のウェスタリー花崗岩試料に相当する領域を含んだモデル媒質を、水平方向 54 μm 、垂直方向 60 μm の格子間隔で 1024 \times 1024 \times 2048 グリッドに離散化し、食い違い格子を用いた FDM 計算で試料内の波動場を計算した。花崗岩試料をモデル化する際には、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナによる撮影で得た X 線吸収係数と媒質の物性値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密度、P 波速度、S 波速度を設定した。震源には、透過波試験で用いられる圧電素子の動きを模した点震源を与えた。時間刻み幅は 0.0035 ms で 20000 ステップの波動伝播計算を行った。シミュレーションの結果得られた波動場は、発散場 (P 波成分) と回転場 (S 波成分) に分け、画像化して評価した。同時に、図 1 に示した各点における試料表面の振動を速度波形として得た。

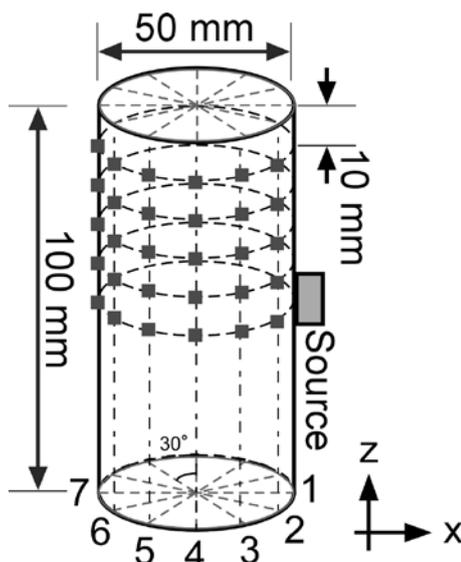


図 1. 波形取得位置の分布. 黒四角の位置で試料表面の振動を記録.

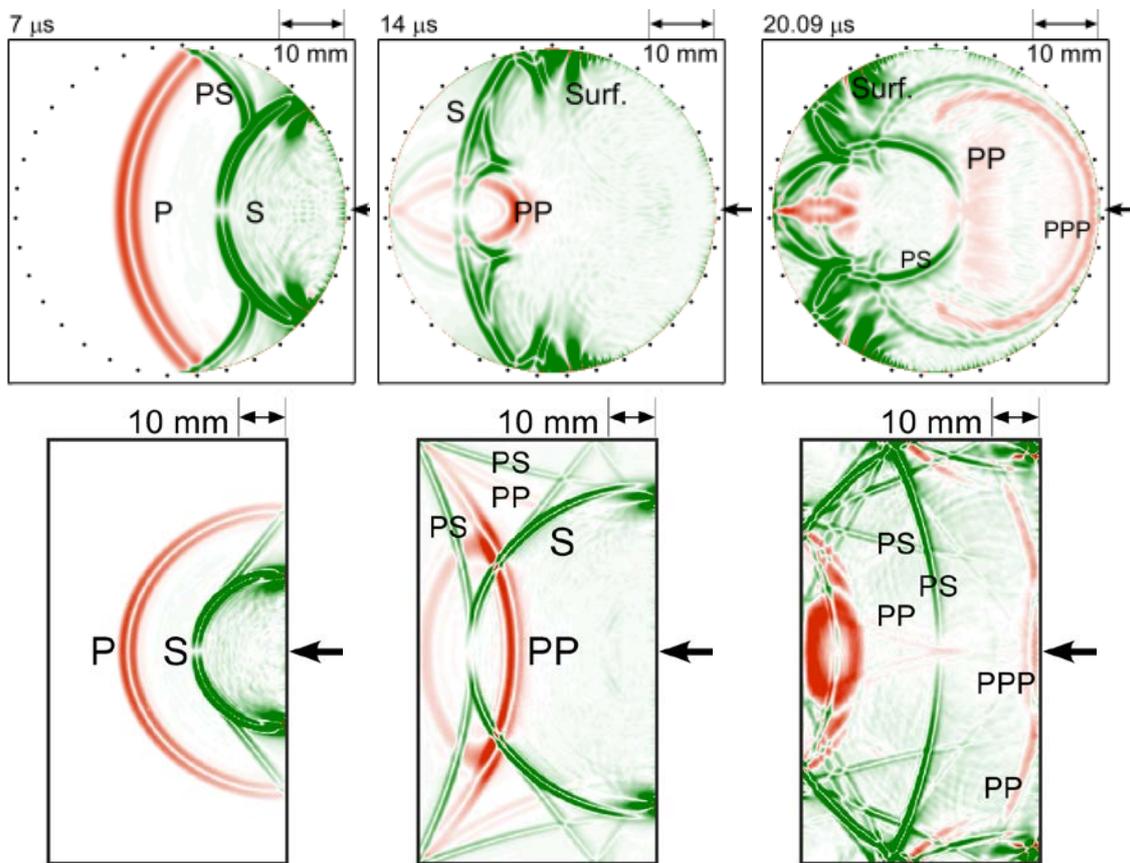


図 2. 円筒軸に対して垂直な断面における試料中央部の空間波動場（上段）と、円筒軸と平行な断面における空間波動場（下段）。振動入力後の経過時間はそれぞれ（左）7 μ s, (中) 14 μ s, (右) 20.09 μ s.

結果・議論

岩石試料のサイズ自体は一辺が数センチメートルと小さいものの、試料内を伝播する波は数十 kHz~数 MHz と高周波になるため格子を細かく切る必要があり、本シミュレーションを実施するためには 1.5 TB 程度のメモリが必要となる。このような規模の計算は従来の計算機では不可能であり、大容量メモリを持った高速計算が可能な計算機の利用によってはじめて実現した。

図 2 に、震源と同一水平面における空間波動場のイメージを示す。赤色が P 波、緑色が S 波を表している。2 次元シミュレーションによって得られていた、直達波の伝播と試料周境界における反射・変換波は、3 次元でのシミュレーションでも同様に観察された。さらに、試料の上下端からの反射波と変換波が試料全体を覆うように伝播して、試料内の波動場形成に大きく寄与していることが新たにわかった。

各観測点における計算波形と波動伝播アニメーションから、最も大きな振幅を持っているのは試料の周境界を伝播している表面波的なふるまいをする波群であることがわかった。

各観測点における粒子軌跡を確認したところ、円状の軌道を描いており、この波群がレイリー波であることが確認された。また、円筒軸方向に平行な断面における波動伝播の様子を観察したところ、円筒軸方向にも試料表面に沿って表面波的に伝播する波群が見られた。さらに、試料の上端や下端における角の部分で、反射と変換が起こっていることが明らかになった。

本シミュレーションにより、境界面を持った有限媒質中を波が伝播していく過程と、後続相の起源を詳細に確認することができた。しかし、実測波形と計算波形を比較した際に、振幅の大小が一致しないなどの相違点も見られているため、さらなる計算条件の改良と検討が必要である。

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。