

修士論文

個別要素法を用いた開口型亀裂分岐過程の研究

東北大学大学院理学研究科

地球物理学専攻

玉手 弘一郎

(指導教官 佐藤 春夫 教授)

平成 15 年

要旨

実際の地震破壊は、既存弱面がすべるタイプの破壊だけではなく、同時に亀裂が成長して新たな破壊面を形成するタイプの破壊をも含んでいると考えられる。従来行われてきた研究では破壊が直線的に進むものと暗に仮定している場合が多かったが、破壊の伝播方向に全く拘束を与えていないいくつかの研究では、均質媒質であっても破壊が高速化するにつれて亀裂の分岐や屈曲が生じることを指摘している。そこで本研究では、破壊現象と弾性波動伝播を同時に扱うことができる個別要素法を用いて、均質媒質における開口型亀裂の動的成長過程と、それにもなって励起される弾性波の特徴、特に、亀裂の分岐や屈曲が波動場に与える影響を調べた。

本研究で用いた 2 次元個別要素モデルでは、媒質を互いに線形バネ（ボンド）で正三角格子状につながれた質点の集合と考え、個々の質点について運動方程式を解くことによってポアソン比 0.25 の等方線形弾性体を模擬する。また、質点間をつなぐボンドに対して、隣接する質点間の距離があるしきい値を超えると破断するという破壊基準を設定することで、破壊現象を表現する。

同モデルを用いて、開口型亀裂の動的伝播のシミュレーションを行った。破壊の伝播方向に拘束を与えない場合、亀裂は初期の段階では直線的に成長し、破壊の進展が徐々に高速化した。そして破壊伝播速度が Rayleigh 波速度のおよそ 0.73 倍に達したところで分岐が生じた。亀裂の先端近傍における Hoop Stress $\sigma_{\theta\theta}$ を求めたところ、その分布は理論値が示す方位依存性

の特徴を比較的よく再現した。これらの結果は、個別要素法を用いて同様のシミュレーションを行った過去の研究結果とも良く一致する。また、分岐が生じたときの破壊伝播速度は、過去の研究で応力分布の方位依存性から亀裂の分岐が予測されている理論値とも概ね一致しており、本研究の結果はこの理論予測が正しいことを裏付けるものである。

シミュレーションによって得られた亀裂形状に対し、フラクタル解析に用いられるデバイダ法を適用して分岐の伝播方向の統計的特徴を調べた。格子間隔の 10 ~ 40 倍のスケールで見ただけの場合には、分岐が初期亀裂の延長方向に対して $10^\circ \sim 20^\circ$ の方向に伝播していた。これは、分岐の伝播方向が大局的には広域の応力場に支配されていることを示している。一方、格子間隔の 5 倍のスケールで見ただけの場合には、分岐が $0^\circ \sim 30^\circ$ と比較的広い角度にわたって伝播していた。

亀裂の分岐や屈曲が波動場に与える影響を明らかにするため、破壊の伝播方向をあらかじめ直線状に拘束した場合についてもシミュレーションを行い、比較を行った。亀裂近傍で得られた速度波形記録を調べたところ、破壊の伝播方向に拘束を与えなかった場合には、直線状に拘束した場合に比べてより高周波数の成分を含んだ波群が観測され、高周波側でのスペクトル振幅の減少の仕方も緩やかであることがわかった。また、破壊の伝播方向に拘束を与えなかった場合について、得られた速度波形記録の顕著なフェーズの発現時を詳細に解析した結果、亀裂の分岐点から輻射されたと思われる明瞭なフェーズが存在することがわかった。このことから、観測された高周波数の波動は、亀裂の分岐や屈曲にともなって励起されたものであると考えられる。さらに、破壊にともなって励起される弾性波の輻射分布を調べたところ、破壊の伝播方向を直線状に拘束した場合には速度の振幅や極性の輻射特性が明瞭な規則性を示すのに対し、破壊の伝播方向に拘束を与えない場合にはこのような輻射特性の方位依存性が見られなかった。実際に観測される地震波の高周波数領域のスペクトル形状や輻射特性を説明するために、従来は媒質の不均質性に起因する複雑な震源過程や地震波の散乱が考えられてきた。これに対して本研究の結果は、そもそも均質な媒質であっても、亀裂の自発的な分岐や屈曲によって高周波数の波動が励起され、その輻射特性が単純な震源モデルから予測されるものとは大きく異なってくる可能性を示唆している。

本研究は、個別要素法では独立に扱われていることが多かった破壊現象と波動現象の双方を 1 つのモデルで同時にシミュレートし、定量的に評価した数少ない研究である。以上の結果は、本手法が将来、地震断層の動的破壊、およびそれにもともなって励起される弾性波の双方を扱う有力な手段となりうることを示している。