

地震破壊による周辺媒質の異方的破碎とその破壊成長への力学的影響と放射される弾性波動

東大地震研究所 山下輝夫

1. はじめに

通常、地震破壊をモデル化する際には、均質等方な弾性体の中に平面形状の特異面に沿う変位の食い違いを仮定する。このようなモデル化は、比較的長周期の地震波の発生機構の解明には適当であろうが、断層の広がりよりもかなり短い波長を持つ地震波の発生機構の解明には問題がある。なぜならば、断層周辺（特に断層先端近傍）には、破碎や二次的破壊が生じると考えられるからである。このように生じた破碎帯は、非等方、非一様な力学状態となり、断層近傍の地震波動に大きな影響を及ぼすと考えられるからである。

また、このような破碎帯は、余震の発生源となり、本震-余震という地震の全過程の理解にとっても意義が深いものである。さらに、断層先端の process zone をも統一的に扱えるという利点がある。

2. モデルと計算

本研究では、

(1) 断層周辺の破碎化と主断層の成長の間の力学的相互作用、および

(2) 破碎帯の生成が断層近傍の地震波動へ与える影響

を数値計算により考察する。変形は2次元 plane strain を仮定し、計算は差分法による。なお、非等方、非一様な弾性体を仮定するので、広く用いられている staggered grid 法の適用は困難であり、Kelly et al. による方法に基づいて計算を実行する。また、主断層面上では応力境界条件（剪断応力の解放）を与えるが、これは仮想面を導入することにより考慮する。室内実験や野外観察の結果に基づき、破碎は、mode I 型の微小亀裂群の生成により生ずるものとし、微小亀裂群の力学効果を弾性定数の異方性により表現する。この微小亀裂の向きは局所的な応力状態によるので、非一様な異方性を考慮する必要がある。

各空間点で最大伸び応力の方向とその値を計算し、応力値がある基準値 c を超えるとそこで微小亀裂群が生成し始めるものとする。従って、微小亀裂は最大圧縮応力軸の方向を向く。亀裂密度 ε は、最大伸び応力の値に比例するものとする。具体的には、

$$\varepsilon = \beta [1 - \exp(-(P_{33}^{\max} - c) / a)]$$

のような関数型を仮定する。ここで β は、亀裂密度の上限、 c は亀裂生成が開始する最大伸び応力の敷居値、 a は、亀裂密度の増え方を表す量である。また、 P_{33}^{\max} は、最大伸び応力の値である。このようにして各点の異方性が求まり（弾性定数テンソルは亀裂密度と亀裂の向きに関係している）、弾性定数テンソルを変換することにより元の XY 座標系（図1）での変位場や応力場が求まる。なお、ここで注意すべきは、Hudson の結果は1次散乱の仮定に基づくものであり、亀裂密度の上限値 β は、あまり大きな値を取れないということである。例えば、平行亀裂の入った1次元的な棒の伸長を考えると $0 < \beta < 1/3$ という制限が加わることがわかる。

本研究では、簡単のために主断層は一定速度で両側に X 軸に沿って動的に広がっていくと仮定する。

3. 断層近傍の破碎帯の形成

断層先端近傍では、伸び応力がきわめて大きくなり破碎が生成される。ある瞬間での破碎帯と微小亀裂の亀裂面の向きの分布を図1に示す。なお、主断層は、X軸に沿って成長しており、図では断層の右半分だけを示している。亀裂の向きは、野外調査の結果と調和的である。このような破碎帯の存在のため主断層先端の応力は低下し、process zone の役割を果たす。

4. 主断層近傍の地震波

主断層近傍の地震波は、破碎の影響を何らかの形で受けているはずである。特に、破壊先端の通過後も破碎はしばらく続くため、破碎は、主断層近傍での地震波の振動継続時間を長くする役割を果たすだろう。図2に、主断層近傍の点での、変位速度のY方向成分を示すが、実際、破碎が生じると、パルス状の短周期成分にはほとんど影響はないものの、長周期成分は長く運動が継続することがわかる。すなわち、破碎の生成は、断層近傍の比較的長周期の成分に影響を及ぼすということがわかる。

図1 時刻 $T/dT=1000$ における破碎帯。

$c=2.0$, $\beta=0.2$, $a=0.7$ を仮定した。主断層の伝播速度はP波の1/2である。濃い色ほど亀裂のX軸から計った傾き θ が大きい。なお、傾き θ は、100度から130度の範囲にある。また、この瞬間には、主断層の先端は $X/dX=200$ にある。

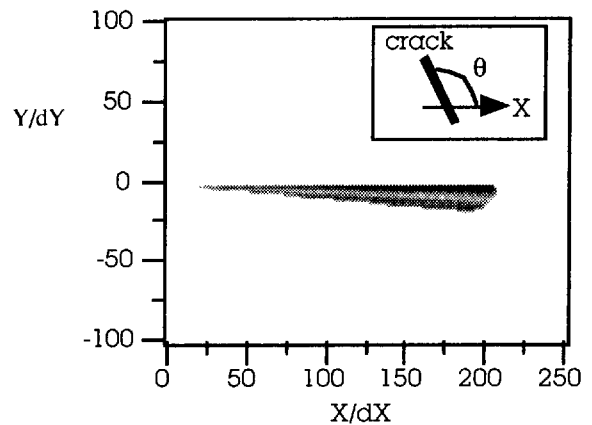


図2 $X/dX=100$, $Y/dY=10$ における変位速度のY方向成分。移動平均をとり変化をなめらかにしてある。 $\beta=0.2$, $a=0.7$ を仮定した。主断層の伝播速度はP波の1/2である。なお、三つの曲線は、 $T/dT=600$ 以降、振幅の大きい順に、 $c=2.0, 3.0, \infty$ の場合を表す

($c=\infty$ は破碎が生じないことを意味する)。従って、破碎が起きやすいほど長周期変動がより継続することがわかる。

