

断層系の幾何学的形状の形成と動的破壊過程：断層の自発的屈曲と相互作用を考慮したシミュレーション

Formation of the geometry of fault system and dynamic earthquake rupture process

安藤 亮輔[1], 山下 輝夫[1]

Ryosuke Ando[1], Teruo Yamashita[1]

[1] 東大・地震研

[1] ERI, Univ. of Tokyo

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ando/>

はじめに

一般に自然の断層は屈曲や分岐を伴った非常に複雑な幾何学的形状をしており断層系を構成している。しかし、このような複雑な断層系の形状が、地震時の動的な破壊過程のなかでどのように形成されるかは、基本的な問題ながら解明がすすんでいない。一方、断層の動的な破壊過程は、最近の観測的・理論的研究で、断層の幾何学的形状にも強く依存していると考えられるようになってきている。しかし、動的破壊に伴い形成される断層の屈曲や分岐が動力学的にどのような影響を与えるのかは未だに明らかではない。このように、断層形状の形成過程と動的破壊過程は同時に考察する必要があるが、これまで主に数学的な取り扱いの難しさと計算機性能の制約から、双方の過程を同時に考察するようなシミュレーションは行われてこなかった。そこで本研究では、(1)断層の自発的な屈曲と(2)断層セグメント間の動的相互作用を考慮したシミュレーションを行い、(a)複雑な断層形状の成因と(b)地震時の動的破壊過程(破壊の成長・停止、滑りの時空間分布、放射地震波動)の複雑性の要因へのそれらの効果を調べる。

手法・モデル

本研究では、屈曲や分岐した断層を差分法(FDM)や有限要素法(FEM)などと比較し、より精度良く取り扱うことのできる、境界積分方程式法(BIEM)を数値計算手法として用いる。またこの手法は、断層形状をあらかじめ設定しておく必要がなく、自発的な断層の屈曲を扱うことにも優れている。破壊の進展方向は、断層端での剪断応力が最大値を取る面の方向と仮定する。

結果1．断層形状の形成

ここでは、問題を簡単化するために2つの断層間の相互作用を考え、破壊は2つの断層から同時に開始し両方向へ等速で伝播するものとしている。シミュレーションの結果、断層の屈曲様式はその初期配置に依存し断層どうしが結合する場合と分離する場合があり、さらに4つのタイプに分類できることが分かった。この結果は、図1に示す断層周辺の剪断応力が最大になる面の向きの空間分布と調和的である。また、屈曲の大きさはある速度以上では破壊伝播速度と正の相関をもつことも示されている。

結果2．断層の動的破壊

ここでは、二つの断層間の相互作用を扱うが、上でのモデルとは、破壊は一方の断層(Fault1)から自発的に開始し、他方の断層(Fault2)の破壊はFault1の成長により励起されるとしている点が異なる。Fault1はFault2に比べより以前に破壊し、強度回復が完了し応力蓄積がすすんだ断層をモデル化したものである。

シミュレーションの結果、破壊の進展はFault1の屈曲が大きくなった場合には(a)Fault1の進展途中(Fault2との結合以前)と、(b)Fault1と2の結合点という2つの局面で停止する場合のあることが分かった。また、滑りの空間分布は断層間の相互作用により不均質になることが分かった。滑りは、Fault1の屈曲した部分で減少し(凹み)Fault2では全体的に結合点の方へ偏って分布している。さらに、Fault1から2への破壊の乗り移りに際して、時間遅れの発生する場合があることも分かった。また断層から離れた地点での地震波形を計算し求めたところ、Fault1から放射されたStopping Phaseが明瞭に現れることが分かった。このようなStopping Phaseは、断層の屈曲と人工的なBarrierを仮定しない場合には発生しないことも示された。

これらの結果を1992 Landers 地震と比較したところ、(1)断層形状、(2)滑りの空間分布、(3)結合点での破壊の乗り移りの時間遅れ、の3点において非常に良く現象を再現していることが示された。

結果3．断層破砕帯中

断層破砕帯を動的破壊に先立ち応力降下した多数の既存の弱面の配列としてモデル化し、その破壊過程をシミュレーションした。その結果、破壊の成長は既存の弱面の初期配置に敏感に依存し、弱面間の距離がその延長線方向に近い場合(coplanar interactions が卓越)には破壊は大きく成長するが、遠い場合(non-coplanar interactions が卓越する場合)にはすぐに停止することが分かった。

結論

断層の自発的屈曲・分岐と断層間相互作用を同時に考慮し、断層形状と動的破壊過程の複雑性に与えるそれらの効果を調べた。その結果、断層形状は断層の初期配置に依存し、断層が結合する場合と分離する場合があるこ

とが示された。また、動的破壊過程については、断層が屈曲・結合することで破壊が促進され、また屈曲が大きくなった場合には破壊は停止することが示された。さらに、滑りの時空間分布は断層間相互作用により不均質になることが示された。これらの結果は自然地震の特徴をよく再現し、断層形状と動的破壊過程の複雑性を上記の二つの効果を考慮することで統一的に理解することが可能になった。