

論文の内容の要旨

論文題目 粒子離散化手法を用いた数値解析手法の開発と
固体の破壊現象の数値シミュレーション

(Development of Numerical Analysis Method Based on Particle Discretization
Scheme for Simulation of Fracture Phenomena of Solid)

氏 名 若 井 淳

固体の破壊現象では、亀裂進展等の破壊過程の際に、さまざまなばらつきが発生することが知られている。現在、社会基盤施設や大型構造物の耐震性を分析するため、実大実験が実施されるが、巨大な構造物では実験そのものができず、また、実験ができる場合でも実験供試体の数が限定されてしまい、破壊過程のばらつきに起因する耐震性を正確に評価することは難しい。このため、破壊過程のばらつきを評価する数値解析手法が必要とされている。亀裂進展が引き起こす脆性破壊現象では、破壊過程のばらつきは材料の局所的不均一性に起因する。したがって、ばらつきの評価には、不均一性の分布が異なる多数のモデルを解析するモンテカルロシミュレーションが必要となる。本論文で開発する数値解析手法は、特異性を持つ亀裂先端の応力を高精度に計算するとともに、モンテカルロシミュレーションが実施できる計算コストの安さを兼ね備えている。計算精度の高さと計算コストの安さという背反する課題は、進展する亀裂や材料不均一性の表現を工夫することで解決されているのである。

本論文ではまず、粒子離散化手法(PDS)を使い、数値解析の観点から亀裂や材料不均一性を簡易に表現する方法を工夫した。具体的には、対象とする固体をボロノイ分割し、その境界を進展する亀裂面の候補と限定することである。さらに、亀裂面の境界条件を満たすため、例えば、トラクションフリーの亀裂に対しては、亀裂を厚さ0の空隙として扱うことを試みている。この工夫により、2次元の線状に進展する亀裂は勿論、3次元の平面・曲面を作りながら進展する亀裂を簡単に計算することが可能となる。また、計算負荷をさほどかけずに、モンテカルロシミュレーションを使った破壊現象の数値シミュレーションが実行可能となる。

PDSを組み込んだ有限要素法(PDS-FEM)を開発し、破壊現象の数値シミュレーションを行った。この数値シミュレーションによって、亀裂進展経路のばらつきが評価できるか否かを検討することを目的とする。なお、進展経路がばらつく原因は局所的な材料不均一性であるが、数理的には、進展経路が不安定であることとして理解できる。進展経路の不安定性とは、不均一性を無視した理想的な均一体で計算される進展経路が、若干の乱れがあった時に、大きく変わる場合を意味する。数値シミュレーションにより、単一

亀裂の場合、亀裂進展経路は安定であるが、平行亀裂の場合は不安定であることが示された。平行亀裂は相互作用が働くため、進展経路が不安定となることは十分理解できるが、数値シミュレーションの結果、不安定性は単純ではないことが示された。実際、不均一体モデルの亀裂進展経路には3つのパターンがあり、複雑な解の分岐が起こる結果、このパターンが形成されているのである。数値シミュレーションで計算された亀裂進展経路に対して、確率密度関数を求め、経路のばらつきを定量的に評価した。確率密度関数はモンテカルロシミュレーションの結果を集約するものである。この確率密度関数を使って、上述の3つのパターンが発生する確率を評価した。さらに、確率密度関数から経路の分散を計算することで、進展経路の幅としてばらつきの度合いが評価できることも示した。

さらに、脆性破壊の高速実験の光弾性データを対象に、PDS-FEMを使った数値シミュレーションによって得られた亀裂の進展経路の正しさを検証した。開発された数値解析手法は、準静的過程と強度の破壊基準を仮定しているため、実験結果を正確に再現することはできない。しかし、光弾性のフリッジパターンから推定される応力分布の再現には成功している。また、限定付きではあるが、実験で得られた亀裂進展経路のばらつきを再現することにも成功した。完全に実験結果が再現されてはいないが、工学的に十分と思われる精度で、応力分布を計算し、亀裂進展経路のばらつきを評価できることは示された。これは、PDS-FEMを使った破壊現象の数値シミュレーションに対し、有用性を示唆する結果である。