

4. スタークラックの動的破壊に関する数値シミュレーション

(1) はじめに

効率的でかつ周辺環境への影響を考慮した発破工法を確立するには理論的に裏付けされた発破制御を行う必要がある。発破による岩盤掘削は衝撃応力波を伴う動的破壊であるから、制御発破工法の理論的裏付けを行うにはき裂の動的破壊解析を行う必要がある。このような背景をもとに、本章では、図 4.1 に示すような円孔から放射状に出た複数のき裂、いわゆる、スタークラックの動的挙動を数値的に明らかにする。スタークラックモデルはかなり単純なものであるが、き裂の数や長さを変化させることにより、発破によるき裂進展に関する基礎的情報が得られる。

さまざまなスタークラックに関する静的解析は Ouchterlony[1] によって行われている。彼はクラックの長さや数、また、荷重条件を変化させることにより、き裂進展の不均一性や発破にともなうガス圧の影響などを検討している。ここでは、動的解析を通して静的解析結果の妥当性を検証するとともに、動的効果の影響を検討する。

(2) 解析モデルと解析法

図 4.1 に示すように 2 次元無限弾性体での平面ひずみ状態におけるスタークラックを考える。円孔の直径は $2a$ で時刻 $t=0$ に p なる圧力が内壁に作用し、そのまま一定値を保つものとする。発破による圧力は時間的に変動すると考えられるが、ここでは、線形問題を考えているので、一定圧力の解を適当に重ね合わせることでより変動圧力の解を得ることができる。円孔から放射状に延びるクラックの総数は n とし (図 4.1 は $n=8$ の場合を示している)、クラックの先端の位置は円孔中心からの距離 R により与えられる。以下の例では、図 4.1 に示すように 2 種類のクラックの内、一方のクラック先端を $R=2a$ に固定し、他方のクラック先端を $R=\lambda a$ として変化させる。なお、放射状に延びるクラックの面上には常に応力は作用しないものと仮定する。

解析は時間域境界要素法を用いて行った。境界要素法は境界だけを要素分割すれば良くスタークラックのような複雑な形状における問題も容易に解析を行うことができる。解析法の詳細は文献 [2] を参照されたい。境界要素解析に用いたパラメータは次の通りである。要素分割は要素長さが $a/10$ 以下になるように行った。時間刻み幅は $c_T t/a = 0.15$ (c_T : S 波速度、 t : 時間、 a : 円孔半径) とし、周辺弾性体のポアソン比は 0.25 とした。

(3) 結果と考察

a) $n=2$ の場合

図 4.2 は、 $n=2$ の場合、すなわち、円孔から左右に出たき裂の先端における応力拡大係数 K_I の経時変化を示したものである。き裂先端位置が $R=1.5a$ と $2a$ の 2 通りについて計算を行っている。いずれも、クラック先端に縦波が到達した直後は K_I が負の値を示し、その後、急激に増加して最大値を示し、しだいに静的解 ($K_I \sqrt{\pi R/2pa} = 0.7971 (R=1.5a), 0.8957 (R=2a)$) に漸近していく。き裂長さが長いと K_I の最大値は大きい、円孔からき裂先端までの距離が長いと波の到達が遅れ、最大値の出現時刻は遅れる。

b) $n=4$ の場合

図 4.3 は $n=4$ の場合で、向かい合う一組のき裂先端 A を $R=2a$ とし、他方の B を $R=1.5a$ としたときの応力拡大係数の経時変化を示したものである。図 4.2 と図 4.3 を比較すると、 $n=2$ の場合に比べて、 $n=4$ の場合は複数のクラックの干渉により、複雑な経時変化を示している。特に、 $n=4$ の場合、き裂先端 A での K_I がかなり大きいピーク値を示している点特徴的である。

図 4.4、4.5 は、き裂先端 A を固定して、B 点のき裂先端位置を $R=2a, 2.5a$ と変化させたときの動的応力拡大係数を示したものである。図 4.3~4.5 より、長いき裂の先端において K_I の最大値が発生し、また、き裂が長ければ長いほど最大値の発生時刻は遅れることがわかる。一方、初動部分に着目すると、衝撃応力波が最初に到達する短いき裂の先端での K_I が大きい値を示すことがわかる。このことは、 K_I の最大値が長いき裂側で発生するからといって、必ずしも常に長いき裂が進展するとは限らないことを示唆している。

b) $n=6$ の場合

図 4.6 は $n=6$ の場合で、向かい合う一組のき裂先端 A を $R=2a$ とし、他方の B を $R=1.5a$ としたときの応力拡大係数の経時変化を示したものである。 $n=4$ の図 4.3 と比較すると、き裂先端 B での K_I がかなり減少していることがわかる。このことから、き裂の本数が増えると長いき裂がより進展しやすくなると考えられる。このことは静的解析における傾向 [1] と一致している。

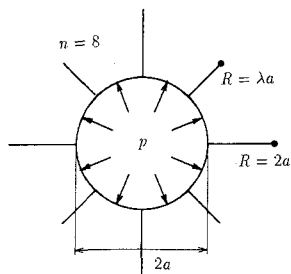
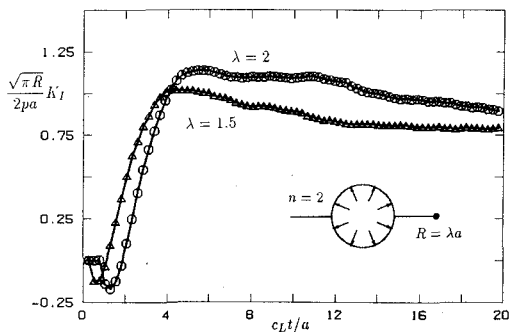
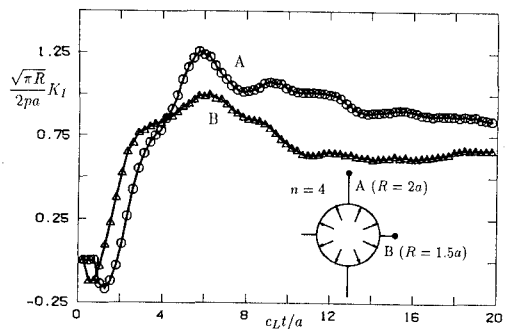
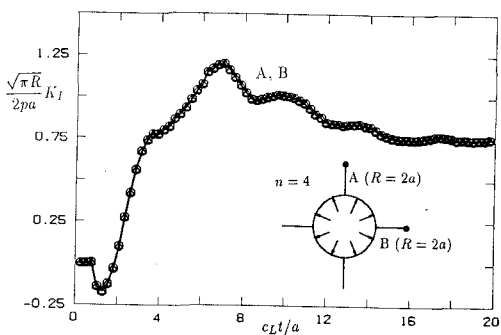
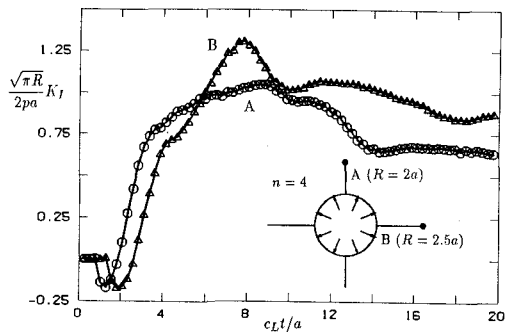
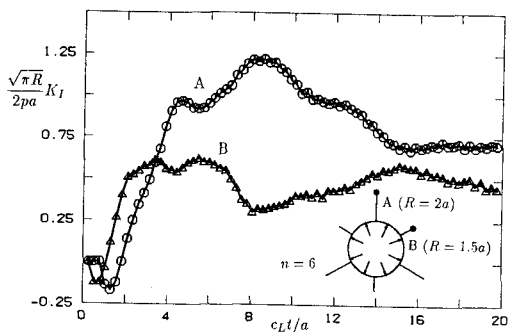


図 4.1 スタークラックの形状.

図 4.2 K_I の経時変化 ($n=2$).図 4.3 K_I の経時変化 ($n=4$).図 4.4 K_I の経時変化 ($n=4$).図 4.5 K_I の経時変化 ($n=4$).図 4.6 K_I の経時変化 ($n=6$).

- 参考文献 [1] Finn Ouchterlony, Analysis of cracks related to rock fragmentation, In: Rock Fracture Mechanics (H. P. Rossmanith ed.), Springer, Wien, pp.31-67, 1983.
- [2] S. Hirose, Scattering problems by an inplane crack with contact boundary conditions (accepted for publication in Wave Motion).

(岡山大学工学部 廣瀬社一、 スウェーデン爆破研究所 Finn Ouchterlony)