

成長速度の応力拡大係数依存性を考慮した岩盤中の亀裂成長に関する解析

Analyses on Crack Propagation in Rock Mass Considering Stress Intensity Factor-Dependency of Crack Velocity

北海道大学工学研究科 ○正 員
北海道大学工学研究科藤井義明 (Yoshiaki Fujii)
石島洋二 (Yoji Ishijima)

1. はじめに

岩盤中の亀裂についてその先端の応力拡大係数が破壊靱性値に達すると成長するという仮定が多くの研究でなされている。しかしながら、亀裂は、その先端の応力拡大係数が破壊靱性値未満でも、応力腐食等の原因によりゆっくりと成長することが知られている¹⁾(Subcritical Crack Growth、以下 SCG と呼ぶ)。本研究では SCG を考慮した亀裂成長の解析方法を2つの岩盤破壊現象に対して応用した。

2. Subcritical Crack Growth について

図-1 はアルミナに関してダブルトーション法で得られた応力拡大係数と亀裂速度の関係²⁾を示している。亀裂速度は応力拡大係数とともに大きくなっている。もう少し詳しく見るとトルエン中の試験の場合に、一旦データの傾きが小さくなっている。この部分を第2領域と呼ぶ。それ以前を第1領域、第2領域以降を第3領域と呼ぶ。第1領域では、亀裂先端の化学反応速度が亀裂成長を律速し、応力拡大係数の増加に伴い亀裂速度も増加する。第2領域では、侵食種(腐食物質)の亀裂先端への拡散が亀裂成長を支配し、クラック速度は頭打ちになる。第3領域では主に熱力学的な活性化作用(すなわち、応力拡大係数が破壊靱性値に近づくので原子間隔が限界以上に引き伸ばされることによって原子の分離が生じる)が亀裂成長を支配する。水中で行われた試験では第1領域のみが認められている。これは、クラック先端における応力腐食物質の供給が十分なためと考えられる。第1領域における応力腐食指数(線図の傾き)に対する水の影響は大きくない。

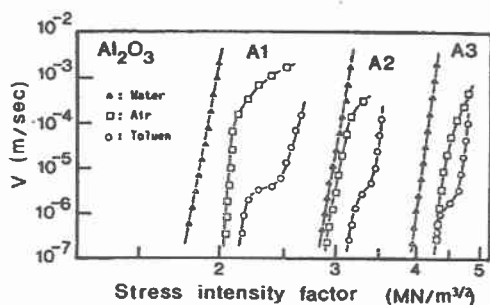


図-1 Al_2O_3 のダブルトーション試験で得られた亀裂成長速度 V の対数と応力拡大係数 K_I との関係²⁾

3. 岩石の亀裂速度と応力拡大係数の関係

一般に原位置の岩盤はある程度含水している、そこで、アルミナの水中における亀裂速度と応力拡大係数の関係が岩盤でも成立すると仮定し、以下の式を用いることにする。

$$V = V_0 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 V は亀裂速度、 V_0 は $K_I = K_{IC}$ のときの亀裂速度、 K_I はモードIの応力拡大係数、 K_{IC} は破壊靱性値、 n は応力腐食指数である。亀裂速度の上限はP波速度 V_p の0.38倍³⁾なので $V_0 = 0.38 V_p$ と仮定する。ただし、亀裂速度がある程度以上大きい場合の解析結果の信頼性は、(1)式の妥当性が不明、応力拡大係数に関する静的解析解の適用限界、等の理由により低くなる。応力腐食指数 n は、本来ならダブルトーション試験を行い図1のように整理した応力拡大係数と亀裂速度の関係における第1領域の傾きとすべきであるが、ここではシェブロンノッチを有する円柱形供試体の3点曲げ試験をいくつかの載荷速度の下で行い評価することを試みる。なぜならば、ダブルトーション試験で必要とされる薄板供試体の作製が困難な岩種が多いからである。

図-2 に水中にて試験した支笏溶結凝灰岩の載荷速度と最大荷重点における応力拡大係数との関係を示す。

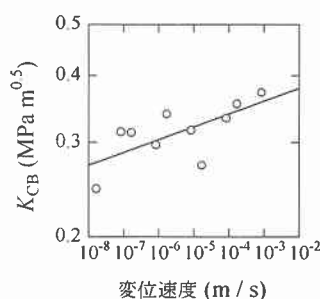


図-2 最大荷重点における応力拡大係数と変位速度との関係(支笏溶結凝灰岩)

図1で示したアルミナの場合と同様に、岩石においても応力拡大係数は載荷速度とともに増加することがわかる。Davidge et al.によれば載荷速度と各種強度との関係を示す回帰直線の傾きは $(n+1)^{-1}$ に等しい⁴⁾。これを利用すると図-2における応力腐食指数 n の値は40.7となる。P波速度は2.15 km/sなので、 V_0 は817 m/sとなる。破壊靱性値の正確な値は不明であるが安全側の値として三点曲げ試験における最大値 $0.372 \text{ MPa m}^{0.5}$ を用いることにする(真の破壊靱性値はもっと大きいと予想される)。

4. 水圧を受ける亀裂

表面が凍結した崖の岩盤中に初期長さ $2a_0$ の亀裂があり、亀裂に水圧 p が作用する場合を考える(図-3)。簡単のために

無限媒質中にある内圧を受ける亀裂としてモデル化すれば亀裂先端の応力拡大係数は

$$K_I = p\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

で与えられる。ここで a は亀裂の半長である。亀裂が成長しても水みちから十分な量の地下水が供給され内圧が保たれると仮定していくつかの水圧について計算した亀裂長さの経時変化を図-4 に示す。亀裂は当初ゆっくりと成長した後、急激な成長に移行している。水圧が大きいほど破断に至るまでの経過時間は短い。このモデルを用いると、明らかなトリガーや前兆現象なしに突然急崖が崩壊する現象のメカニズムが定性的に説明できる。

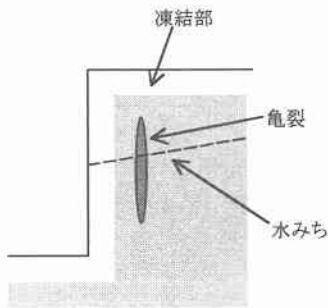


図-3 表面が凍結した崖のモデル(断面図)

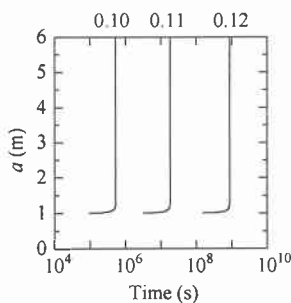


図-4 亀裂に水圧が作用する場合の亀裂半長の経時変化(初期亀裂半長 1 m、水圧 0.10、0.11、0.12 MPa の場合)

5. 圧縮応力を受ける傾斜亀裂

岩盤中に傾斜亀裂があり圧縮応力を受ける場合を考える(図-5)。応力がある程度以上大きいとき傾斜亀裂の先端から二次亀裂が成長するが、二次亀裂がある程度以上長ければ、初期亀裂と二次亀裂は中央に集中力 P が作用する一つの亀裂で近似される⁹⁾。この場合の応力拡大係数は

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi a}} \quad (3)$$

で与えられる。いくつかの集中力の値について亀裂長さの経時変化を計算したところ、集中力が大きいほど亀裂成長速度は速いこと、ならびに、亀裂は数 10 年以上経ってもゆっくり成長を続けることがわかった(図-6)。このモデルにより圧縮応力下の岩盤中の亀裂が地質的長期間にわたって成長を続けるメカニズムが定性的に説明できる。また、自由面近傍で二次亀裂が十分長く成長すると座屈条件を満たす可能性がある。

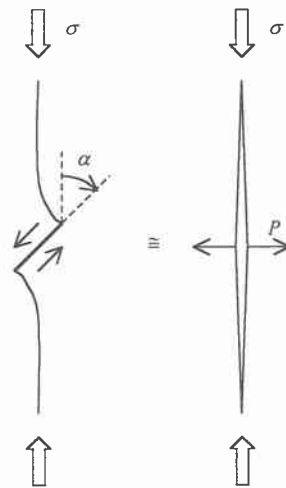


図-5 集中力が作用する 1 つの亀裂(右)による初期亀裂と二次亀裂(左)の近似

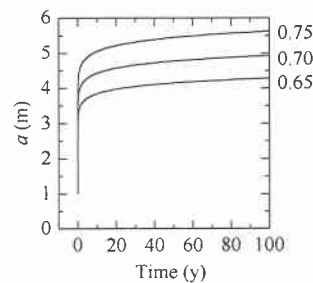


図-6 亀裂中央に集中力が作用する場合の亀裂半長の経時変化(初期亀裂半長 1 m、集中力 0.65、0.70、0.75 MN/m の場合)

6. まとめ

2 つの問題に対して成長速度の応力拡大係数依存性を考慮した解析を試みた。亀裂速度を評価する式に現れるパラメータの求め方に仮定が多い等の問題もあるが、本方法を岩盤崩壊やトンネル壁面近傍岩盤における時間依存性の破壊現象などの解析に応用することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) Atkinson, B. K.: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, J. Geophys. Res., Vol. 89, No. B6, pp. 4077-4114, 1984.
- 2) 若井史博・桜本久・阪口修司・松野外男: DT 法によるセラミックスのき裂進展特性評価、材料、Vol. 35, No. 395, pp. 50-55, 1986.
- 3) 岡村弘之: 線形破壊力学入門、培風館、1976.
- 4) Davidge, R. W., McLaren, J. R. and Tappin, G.: Strength-Probability-Time (SPT) Relationships in Ceramics, J. Materials Science, Vol. 8, pp. 1699-1705, 1973.
- 5) Germanovich, L. N. and Roegiers, J.-C.: A Model for Borehole Breakouts in Brittle Rocks, Rock Mechanics in Petroleum Engineering (Proc. Eurock '94), p. 361-370, Balkema, Rotterdam, 1994.