

# 花崗岩を対象とした深部地下空洞の長期安定性評価に関する基礎的研究

## Fundamental study on long - term stability analyses of underground openings excavated in deep granitic rock

小田 匡寛 (理工学研究科・教授)

Masanobu Oda (Graduate School of Science and Engineering, Professor)

### 1. はじめに

高い拘束圧縮応力下にある脆性材料の破壊現象は、地震予知、地熱エネルギー開発、高レベル原子力廃棄物の地層処分場立地のように、深い岩盤への関心とともに、急速に高まっている。地下深部での空洞開削を可能にする技術の確立は喫緊の課題であるが、特に、空洞周辺のクリープ破壊の危険性予知は、安全性確保の観点からも極めて重要である。最近の岩石の高圧三軸試験を分析した結果によれば、クリープ変形の結果として、マイクロクラックの成長がある閾値 (threshold) に達すると、進展したクラックによって岩石はブロック状に細分化され、最終破断に至ることが示されている。この事実は、クラックの進展状況を適切に把握することによって、脆性材料のクリープ破壊の危険性が予知できることを示唆している。本研究は、この可能性を実際の花崗岩の脆性破壊試験と数値実験の両面から検証するものである。本文では数値解析の結果に焦点を絞って取り纏めることとする。

### 2. 解析方法

圧縮荷重下での岩石の挙動をモデル化するために、マイクロメカニクスに基づく等価連続体理論を採用した (Okui et al., 1993)。すなわち、硬岩内部には多くの微視的な潜在欠陥が存在し、荷重荷重によって、それらの欠陥 (マイクロクラックと呼ぶ) は、ほぼ最大圧縮主応力方向に平行に進展する。マイクロクラックの進展を解析していくと、多数のマイクロクラック間の連結が生じ、最終的には、クリープ破壊が生じる。

短期荷重おけるクラックの進展条件は線形破壊力学に従うものとする。すなわち、クラック先端での応力拡大係数  $K_I$  が破壊靱性値  $K_{IC}$  に達した時に、初期欠陥からマイクロクラックが発生するものとした。花崗岩等の結晶質の岩石では、応力拡大係数がたとえ破壊靱性値以下であっても、非常にゆっくりした速度でクラックは進展し、静的疲労現象が生じる。このメカニズムによるクラックの進展を応力腐食割れと考え、クラックの進展速度と応力拡大係数の関係として、Atkinson (1984) の提案式を採用した。

弾性体内部には、マイクロクラックが離散的に存在しているため、応力、ひずみ等の力学量は不均一に分布しているが、これらの量について局所的な平均操作を行い、等価連続体モデルを構築した。また、マイクロクラック間の弾性相互干渉の効果を、pseudo-traction 法 (Horii and Nemat-Nasser, 1985) を用いて考慮している。

### 3. 解析結果の一例

花崗岩の岩盤の地下約 200m に建設された地下空洞を想定して解析を行った。解析に必要な入力パラメータの値は、破壊靱性値を除いて、埼玉大学の試験装置を使ったクリープ実験から決定した。(詳細は Golshani et al. (2007) を参照のこと。)

初期欠陥長を  $2c_0=2.0\text{cm}$  に設定して解析を行った。図 1 は、一例として、マイクロクラックの進展を時間の関数として示したものである。非弾性ひずみは累積していき、約 30 万年後に三クリープへ移行後、最終的にはクリ

ープ破壊が生じている。数値解析の結果は、実験でみられる一次から三次クリープへの移行をよく捉えている。

図2は、荷重直後(a)と約30万年経過後 (b) を例として、マイクロクラックの進展長さを空洞周辺の分布図として示している。時間の経過でマイクロクラックは進展し、側壁には三次クリープへの移行が認められる。この結果は、クリープ挙動が地下空洞の安定に重要な影響を及ぼす可能性を示唆するものである。この解析プログラムを実務に適用するには、今後更に、数値解析の信頼性の向上に努めなければならない。

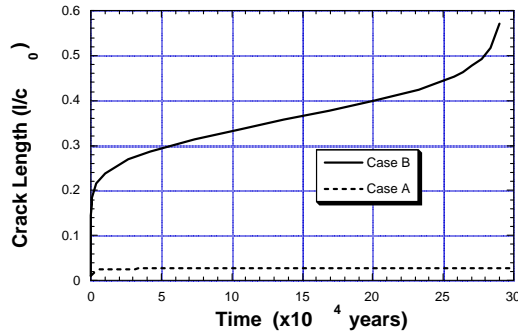


図1 無次元化したクラック長  $c/c_0$  のクリープ曲線： $2c_0=2.0\text{cm}$

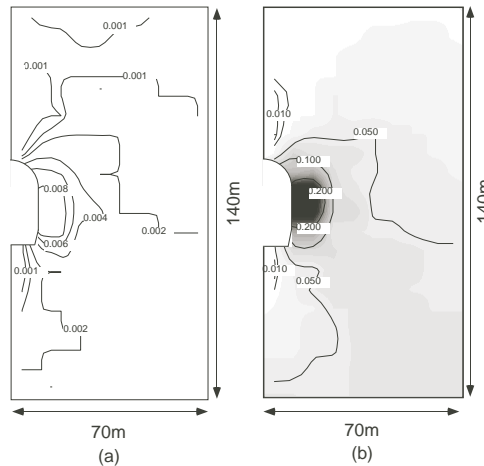


図2 クラック長  $c/c_0$  の分布図 ( $2c_0=2.0\text{cm}$ , ケース B) ; (a)時間0 と(b)約30万年後

4. 謝辞 本研究は、埼玉大学の奥井義昭, Golshani, A., また産総研の竹村貴人らとの共同研究である。記して、感謝の意を表したい。

#### 5. 参考文献

- 1) Atkinson, B.K., 1984, Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophys. Res.*, 89, 4077-4114.
- 2) Golshani, A., Oda, M., Okui, Y., Takemura, T. & Munkhtogoo, E., 2007, Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock, *Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences*, 44, 835-845.
- 3) Horii, H. and Nemat-Nasser, S., 1985, Compression-induced microcrack growth in brittle solid: Axial splitting and shear failure, *J. Geophys. Res.*, 90, 3105-3125.
- 4) Okui, Y., Horii, H. & Akiyama, N., 1993, A continuum theory for solids containing microdefects, *J. Eng. Science*, 31(5), 735-749.