

(54) マイクロメカニクスに基づく硬岩 のクリープ挙動の一予測手法

東京大学大学院 学生員 ○ 吉田 秀典

東京大学工学部 正会員 堀井 秀之

A Prediction Method for Creep Behaviors of Hard Rock Based on Micromechanics

University of Tokyo, Hidenori YOSHIDA

University of Tokyo, Hideyuki HORII

Abstract

Recently, various ideas on the underground development are proposed and associated technical problems are studied. One of the fundamental issue is long-term mechanical behavior of underground structures. It is necessary to establish a prediction method for creep deformation and creep failure of rock in order to ensure the long-term safety of underground structures. Studies with scanning Electron Microscopy (SEM) revealed that the mechanism of creep deformation and creep failure is the microcracking nucleated at the pre-existing defects. Under compressive stress, the crack gradually grows and the rock specimen finally fails. The mechanism of the time-dependent crack growth is understood as the stress corrosion at the crack tips. In this study, we propose a model for creep behaviors of hard rock based on micromechanics. The model is implemented into a finite element program to analyse creep behaviors of underground structures. As an example, a problem of a elliptical excavation is analysed and crack length is predicted as a function of time.

1. はじめに

近年、大深度地下の開発について様々な構想やプロジェクトが、多くの分野で検討・研究されている。例えば地下の持つ特性を積極的に利用した、低温ガスの貯蔵・原子力施設の設置・超伝導マグネットによる電力の保存・高温岩体発電など、種々の地下空間の利用が考えられるようになってきており、大深度地下の開発・利用における技術的課題に関する研究もなされている。例えばカナダのホワイトシエル原子力研究所では、核廃棄物の地下格納に関する研究が行われている¹⁾。地下1000m以深の岩盤内に高レベル放射性核廃棄物を封じ込めた場合、岩盤が化学的、物理的にどのような挙動を示すかを様々な側面から研究している。岩盤などの脆性材料の力学的挙動は一般に複雑であり、応力・温度・間隙水圧・含水率・pHなどの様々な要因に強く依存することが知られている。岩盤構造物の長期的安定性評価のためには、クリープ・疲労などの挙動特性の検討が重要である。様々な要因に依存するこれらの現象の予測手法を確立するためには、現象を支配しているメカニズムを把握し、そのモデル化を行うことが必要である。本研究は、硬岩におけるクリープ変形・破壊の微視的メカニズムに着目し、クリープ挙動の予測手法を確立することを目的とする。

岩盤の複雑な挙動を微視的な観点から解明しようという試みがなされているが、近年の電子顕微鏡を用いた研究により硬岩のクリープ挙動を支配しているメカニズムは、静的挙動同様、微視的クラックの発生・成長であり、クラック進展のメカニズムは化学反応に起因するクラック先端の応力腐食割れであることが明らかにされている。クラック進展速度は荷重・温度・含水率・pHなどに依存するが、その進展法則を実験的に求める研究がなされている²⁾。一方、圧縮下における岩石中のクラック進展をモデル化し、割裂破壊・せん断破壊・脆性-延性遷移などの複雑な岩石の破壊挙動を説明する試みもなされている³⁾。

岩盤や大深度地下の構造物の長期的経年変化を予測するためには、岩石のクリープ変形・破壊を予測し得る力学モデルを構築することが不可欠である。本研究では圧縮下の微視クラック進展のモデル化を行い、そのモデルを用いてクリープの構成式を導き、そして有限要素プログラムに組み込むことによりクリープ挙動の解析手法を提案する。

2. クリープ挙動のメカニズム

2.1 クラック進展

硬岩は一定荷重を継続して受けると、時間とともに変形が僅かずつではあるが進行し、やがて圧縮破壊する事が知られている。図1は Krantz による一軸圧縮強度の87%の一定応力を载荷した、花崗岩のクリープ試験の実験結果であるが、図からわかるように一定応力を受ける硬岩のひずみは時間と共に増加し、やがて破壊に至る⁴⁾。破壊に至る時間は加える応力が小さい程長い。さらにこの実験では、異なる時間载荷した後(点A~点E)に供試体を切り出し、電子顕微鏡を用いてクラックの数・長さ・方向などを観察している。図2はクラックの方向の分布を表したもので、この図より、荷重载荷前はランダムに分布していたクラックが、载荷後には最大圧縮方向に卓越していることが分かる。これは载荷によりクラックが最大圧縮方向に平行で、それが引張クラックであることを意味している。

2.2 応力腐食割れ

一定荷重を受ける硬岩中の準静的なクラック進展のメカニズムは、クラック先端における化学的な腐食と応力作用による応力腐食割れであることが実験的に明らかにされている。図3は応力拡大係数とクラック進展速度の関係をグラフにプロットしたもので、両対数グラフの場合、両者の関係は図のようにほぼ直線になる⁵⁾。

3. クリープメカニズムのモデル化

3.1 クラック進展の微視的モデル

岩石中には、その脆性挙動にとって重要と考えられる多くの微細な構造的特徴が初めから存在している。例えば、鉱物粒子の境界・結晶粒子の種類や方向・微細空隙・初期クラックなどが挙げられる。圧縮下においてそれらが摩擦すべりや塑性変形を起こすことにより、局所的に引張応力が生じ、クラックが発生・進展する。図4は大理石において観察されたクラックの発生・進展メカニズムを表している。メカニズムを単純化することにより、圧縮下において初期欠陥より発生するクラックの進展は図5に示すモデルで表される。このときクラック先端の応力拡大係数 K_I は次式で与えられる。

$$K_I = \frac{F}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} + \sigma_2 \sqrt{\pi l} \quad (1)$$

$$F = \sqrt{2c} \{ -(\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{\mu}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \}, \quad \frac{l^*}{c} = 0.27 \quad (2)$$

ここで $2c$ は初期欠陥の寸法、 μ は初期欠陥における摩擦係数である。⁴⁾

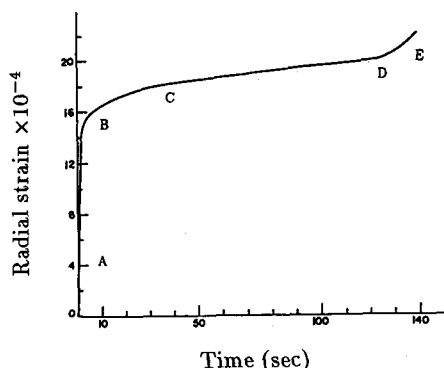


Figure 1 Radial strain as a function of time in creep test ⁴⁾

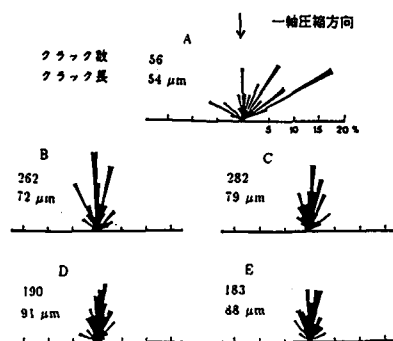


Figure 2 Relative distribution of Crack orientation

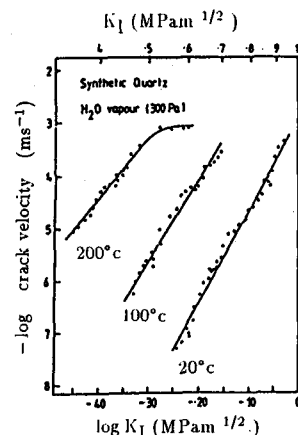


Figure 3 Crack velocity as a function of K_I

3.2 応力腐食割れによるクラックの進展

クラックの進展条件としては応力拡大係数が材料の物性値である破壊靱性 K_{Ic} に達したときにクラックは脆性的に進展し、それ以下の値では図3に示されるような関係を満足するものと仮定する。すなわち、クラックの進展速度 dl/dt は応力拡大係数の関数として、

$$\frac{dl}{dt} = R(K_I)^n \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 R 、 n は材料定数である。実験より、クラック進展速度は温度・含水率・pH といった環境条件によって変化することが知られており、材料定数の R 、 n はこうした環境条件の関数と考えられる。与えられた応力に対して式(1)、(2)を用いて応力拡大係数を求め、クラック進展条件である $K_I = K_{Ic}$ を用いて载荷開始直後のクラック長を計算する。次に式(3)を積分することにより、時間とクラック長の関係が求められる。クラック進展によるクラックひずみは次式で与えられる。

$$\bar{\epsilon}_{ij}^c = \frac{1}{2V} \int_S ([u_i]n_j + [u_j]n_i) dS \quad (4)$$

ここで、 S はクラックの表面積、 V は材料の体積、 $[u]$ は変位のギャップである。図5のモデルにおける変位のギャップは陽な形で与えられ、それを式(4)に代入し積分することにより、各状態におけるクラックひずみが求められる。

3.3 破壊基準

以上に述べたモデルにより、クラック長と時間の関係、及びクラック進展によるクラックひずみを計算することができる。しかしながら破壊を予測するには破壊基準が必要である。Krantz の報告によれば一定拘束圧のもとでは、軸圧縮応力と破壊時間によらず、クリープ破壊直前のクラック進展による体積ひずみはほぼ一定である。したがって、クラック体積ひずみがある限界値に達した時に破壊が起こるという破壊基準が考えられる。このクラック体積ひずみはクラックの進展に起因するものであり、一定の拘束圧におけるクリープ破壊時のクラック長、クラック密度が一定であることを示唆している。本研究では各拘束圧に対して破壊クラック長を選び、クラック長がその値に達した時、破壊するものと仮定する。

4. クリープ試験の解析

4.1 実験結果⁶⁾

Krantz は花崗岩を用いて三軸圧縮試験を行い、種々の拘束圧に対して供試体が破壊に至るまでの時間・クラックひずみを計測し、さらに破壊直前に供試体を取り出し走査電子顕微鏡を用いてクラックの数・方向・長さ等を観察し、以下の報告をしている。クラックの進展方向は軸圧縮応力に平行である。加える軸圧縮応力が大きいほど破壊時間は短い。加える拘束圧が大きいほど破壊直前のクラック体積ひずみは大きい。同じ軸圧縮応力のもとでは拘束圧が大きいほど破壊へ至るまでの時間は長い。

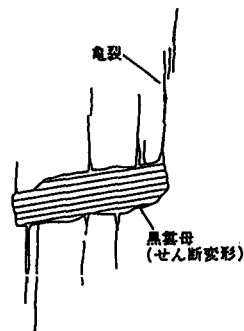


Figure 4 Stress-induced microcrack at a biotite grain boundary

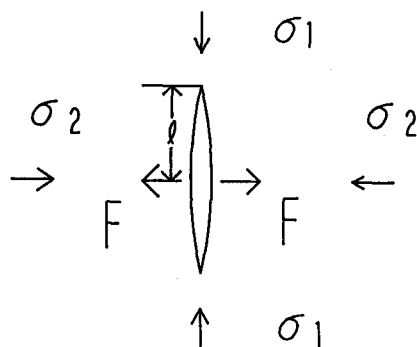


Figure 5 Crack growth model under compression

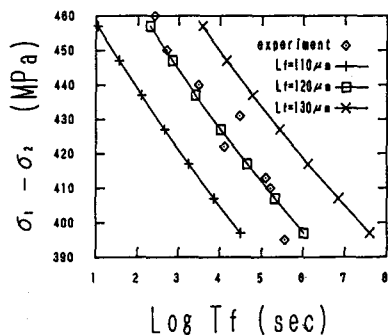


Figure 6 Stress difference vs. failure time

4.2 解析結果及び考察

本研究では、前述のクラック進展のモデルを用いて Krantz の実験の再現を試みた。まず、与えられた応力に対して前章で示したアルゴリズムに従い計算を行い、その荷重条件における時間とクラック長の関係を求める。そして破壊基準である破壊クラック長を各拘束圧に対して選び、この条件から求められる破壊時間を軸圧縮応力の関数として計算した。本研究では初期欠陥長を $2c = 150\mu\text{m}$ 、さらに参考文献 (5) に基づき、 $K_c = 1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、 $R = 0.0001$ 、 $n = 30$ とし、拘束圧が 53MPa の場合の軸圧縮応力と破壊時間の関係を図 6 に示した。ここでは種々の破壊クラック長について計算した結果と Krantz の実験結果を併せてプロットしたが、破壊クラック長を $120\mu\text{m}$ とした場合に実験結果とよく一致することがわかる。また拘束圧を変えた場合でも、適当な破壊クラック長を選ぶことにより Krantz の実験が再現可能である。さらに Krantz の電子顕微鏡による観察結果に基づいてクラック密度を決定し、弾性定数を $E = 10000\text{MPa}$ 、各拘束圧において計算したクラック体積ひずみの値を図 7 に示し、実験値と比較した。

5. 岩盤構造物におけるクリープ挙動の有限要素解析

提案したクラック進展モデルを用いることによって、岩石のクリープ挙動が再現できた。そこで、このモデルに基づいて、クリープの構成式を導き、有限要素プログラムに組み込んだ。解析例として、岩体内の地下空洞におけるクリープ変形の予測を試みた。

5.1 構成式

平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ 、及び平均ひずみ $\bar{\varepsilon}_{ij}$ は次式のように与えられる。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV, \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV \quad (5)$$

クラックを含む弾性体の場合、平均応力と平均ひずみの関係は上式を用いると、

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl} \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \int_S ([u_i] n_j + [u_j] n_i) dS \quad (6)$$

となり、これを変形すると、

$$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \left\{ \bar{\varepsilon}_{kl} - \frac{1}{2V} \int_S ([u_k] n_l + [u_l] n_k) dS \right\} \quad (7)$$

となる。ここで D_{ijkl} はコンプライアンス、 C_{ijkl} は弾性定数である⁷⁾。

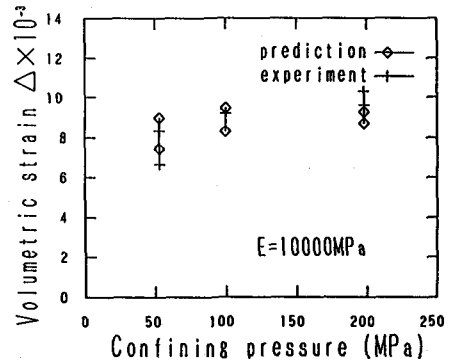


Figure 7 Crack volumetric strain as a function of confining pressure

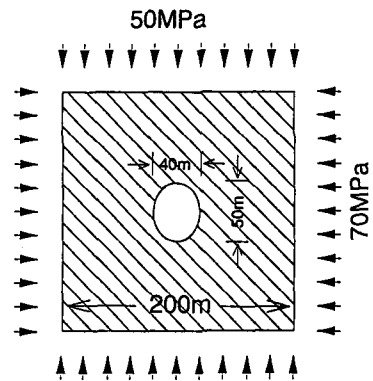


Figure 8 Elliptical excavation at 2000m depth

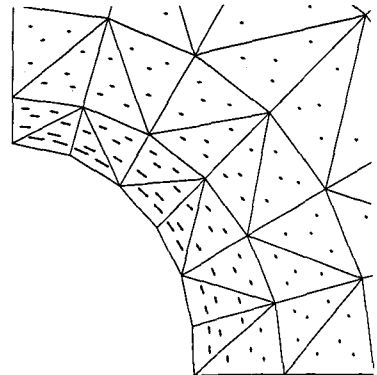


Figure 9 Length and orientation of cracks

5.2 有限要素解析

本研究で提案したモデルと式(7)を用いることにより、クリープ挙動の有限要素解析が可能となる。時間に関しては Euler 法を用い、与えた時間増分に対するクラックの進展量を以下のように繰り返し計算する。与えられた荷重に対して有限要素法による弾性解析を行い、各要素における応力状態を求める。それらより最大主応力と最小主応力を計算し、式(1)に代入して応力拡大係数を求める。3.2と同様に $K_I = K_c$ より、初期クラック長を計算する。次に式(3)を用いて、与えられた時間増分に対するクラック進展量を算出し、式(4)を用いてクラックひずみを計算する。それらを式(7)に代入して有限要素解析を行い、新しい応力状態を求め、計算を繰り返していく。計算例として地下2000mにおける地下空洞(図8)を考え、岩体の温度を変化させて解析を行った。図9はそのときの地下空洞周辺部におけるクラック長の分布を示している。この図より、より大きな応力集中が起こる天端部において、クラックの進展量が大きいことが分かる。また、表1は異なる温度における天端部でのクラック長の経年変化を表したもので、温度が高いほどクラックの進展量は大きい。

Time Temperature	1 second	1 day	100 days	30 years	3000 years
t=20°C	25.62 μm	56.44 μm	68.80 μm	81.36 μm	93.72 μm
t=100°C	50.60 μm	81.36 μm	93.72 μm	105.58 μm	116.82 μm
t=400°C	99.72 μm	127.34 μm	137.04 μm	145.96 μm	154.08 μm

Table 1 Crack length at the top of excavation

6. 結語

本研究ではマイクロメカニクスに基づき硬岩のクリープ変形・破壊の再現を試みた。提案した応力腐食割れに基づくクラック進展モデルを用いることによって、岩石のクリープ挙動の再現が可能であることが示された。このことは硬岩のクリープ挙動がマイクロクラックの発生と応力腐食割れによる進展に支配されているという考えを支持している。高温下の硬岩においてはクラックの進展速度は大きく、地下構造物に対しては影響を及ぼすものと思われる。特に核廃棄物格納といった長期的な安定を必要とする構造物建設にあたっては注意が必要であろう。本研究で開発したクリープ挙動の有限要素法プログラムにより任意の地下構造物に対する解析が可能であり、例えば核廃棄物が発生する熱が影響を考慮して、地下構造物の長期的経年変化を検討することができる。破壊基準を明らかにすること、地下構造物のクリープ挙動に対する温度・水分の影響を明らかにすることが今後の課題である。

<参考文献>

- 1) The Geoscience Program Proceedings of The Twelfth Information Meeting of The Nuclear Fuel Waste Management Program, Atomic Energy of Canada Limited Technical Record, TR-200 (1982).
- 2) B.J.S.Wolkins & A.R.Reich & W.R.Wallace, Slow Microcracking in Plutonic Rocks, Atomic Energy of Canada Limited Technical Record, TR-264 (1984).
- 3) H.Horii and S.Nemat-Nasser, Brittle Failure in Compression: Splitting, Faulting and Brittle-ductile Transition, Phil.trans.Roy.Soc.London. vol.319, pp.337-374 (1986).
- 4) Robert L.Krantz, Crack Growth and Development During Creep of Barre Granite, J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr. Vol.16, pp.23-35 (1979).
- 5) Bairy Kean Atkinson, Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. Vol.89, No.B6, pp.4077-4114 (1984).
- 6) Robert L.Krantz, The Effects of Confining Pressure and Stress Difference on Static Fatigue of Granite, Journal of Geophysical Research. Vol.85, No.B4, pp.1854-1866 (1980).
- 7) H.Horii and S.Nemat-Nasser, Overall Moduli of Solids with Microcracks: Load-Induced Anisotropy, J.Mech.Phys.Solids. Vol.31, pp.155-171 (1983).