

I-15

岩石のクリープ変形・破壊のモデル化

東京大学 学生員 吉田 秀典
東京大学 正員 堀井 秀之

1. はじめに

岩石等の脆性材料の挙動は極めて複雑であり、温度、拘束圧、間隙水圧等の様々な要因に強く依存することが知られている。例えば Fig.1 が示すように、一定応力を受ける花崗岩の歪は時間と共に増加し、やがて破壊に至る。破壊に至る時間は、加える応力が小さい程長い。これはクリープ変形・破壊として知られているが、近年の電子顕微鏡を用いた観察により硬岩のクリープ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・成長であることが明らかにされている。クラックの進展のメカニズムは化学反応に起因するクラック先端における応力腐食割れであり、クラックの進展速度と応力拡大係数には Fig.2 に示すような関係があることが実験的に明らかにされている。[1] 岩盤や大深度地下の構造物の長期的な経年変化を予測するためには、このような岩石のクリープ挙動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に基づいたモデル化を行う。

2. 現象のモデル化

圧縮下において初期欠陥より発生・成長するクラックの進展は Fig.3 に示すモデルで表される。[2] 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。

$$K_I = \frac{\sqrt{2c\tau^*}}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} + \frac{\sqrt{\pi l}}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

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

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。またクラック進展の条件としては、応力拡大係数が材料の破壊靱性 K_{Ic} に達したときクラックは脆性的に進展し、それ以下の値では Fig.2 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。これらの式を用いれば、与えられた応力に対して、クラック長と時間の関係が得られる。さらに、クラックの進展による非弾性歪 ε_{ij} は次式より求まる。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{V} \int_S ([u_i]n_j + [u_j]n_i) ds \quad (4)$$

ここで、 S はクラック表面、 V は材料の体積である。

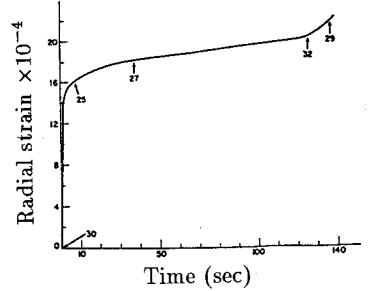


Fig.1 Radial strain in a creep

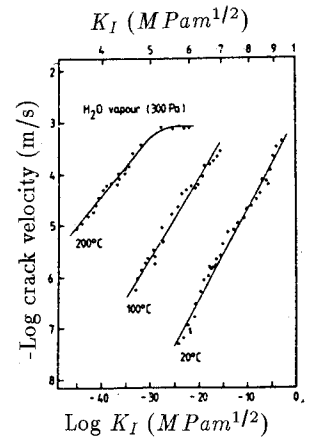


Fig.2 Crack velocity as a function of K_I

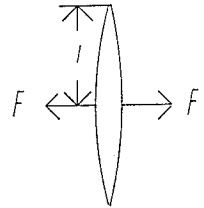


Fig.3 Model of crack growth under compression

3. クラックの進展

本研究では Kranz による実験結果 [3] をもとに、数値解析を行った。Kranz の実験では花崗岩の三軸圧縮試験を行い、種々の拘束圧に対する供試体の破壊時間、破壊直前のクラック長、非弾性体積歪を計測している。ここでは、これらの実験を前述のクラック進展モデルを用いて再現することを試みた。まず、与えられた応力に対して、式 (1)、(2) を用いて K_I を求め、クラック進展の条件である $K_I = K_c$ を用いて載下開始時のクラック長を求める。次に式 (3) を用いて、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。Kranz の実験によれば拘束圧が一定の場合、軸圧縮応力の値にかかわらずクリープ破壊直前の非弾性体積歪は一定となる。この非弾性体積歪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。ここ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。この条件より求まる破壊時間を軸圧縮応力の関数として Fig.4、5、6 に示し、Kranz の実験結果と比較した。ここでは参考文献 [1] に基づき、 $K_c = 1 \text{ MPa m}^{1/2}$ 、 $R = 0.0001$ 、 $n = 30$ としている。さらに Kranz 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、材料の弾性定数を $E = 12000 \text{ MPa}$ として各拘束圧に対して計算した非弾性歪の値を Fig.7 に示し実験値と比較した。

4. 結語

以上のように、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微視クラックの発生と応力腐食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。温度を変化させれば、Fig.2 に示したようにクラック進展速度と K_I の関係が変化し、式 (3) の R と n がそれに従い変化する。そこで本モデルにより、温度を変化させたときのクリープ挙動を正確に予測できるかを調べることは今後の課題である。さらに本モデルに基づいてクリープの構成方程式を導くことによって、例えば大深度地下の構造物などの長期的経年変化の予測が可能になるものと考えられる。

参考文献

- [1]Bairry Kean Atkinson, Subcritical growth in geological materials, J.Geophys.res., 89, 4077-4114, 1984.
- [2]H.Horii and S.Nemat-Nasser, Brittle failure in compression:splitting,faulting and brittle-ductile transition, Phil.trans.Roy.Soc.London, 319(1549), 337-374, 1986.
- [3]Robert L.Kranz, The effects of confining pressure and difference on static fatigue of granite, J.Geophys.res., 85, 1854-1866, 1980.

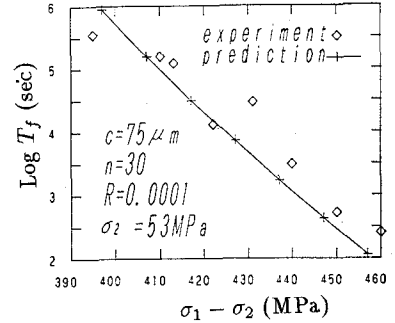


Fig.4 Logarithm of failure time

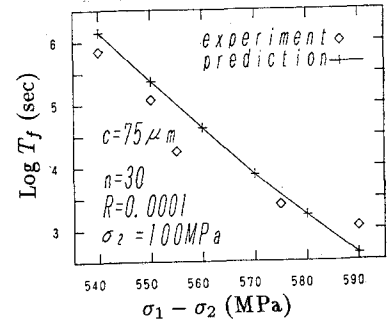


Fig.5 Logarithm of failure time

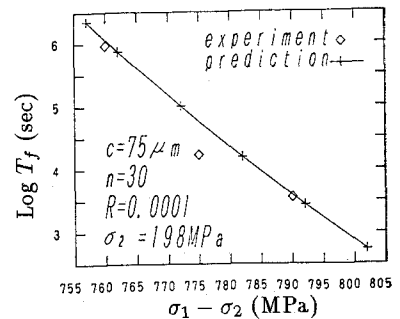


Fig.6 Logarithm of failure time

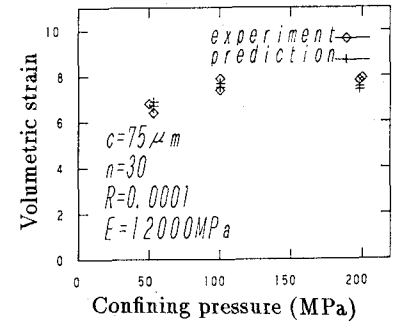


Fig.7 Volumetric strain as a function of confining pressure