

CS - 33 圧縮荷重下における硬岩のクリープ解析

埼玉大学 正員 奥井 義昭
 東京大学 正員 堀井 秀之
 日本大学 正員 秋山 成興

1. はじめに

岩石、岩盤のクリープ変形・破壊過程を予測することは、岩盤内の地下構造物の長期の安定性を確保する上で工学的に重要な課題といえる。走査型電子顕微鏡を用いた観察より、岩石のクリープ変形はミクロなクラックの発生、進展に起因することが確かめられている。このような一定応力下でのクラック進展は時間依存型クラック進展(subcritical crack growth)と呼ばれ、クラック先端での応力拡大係数がその限界値である破壊靱性値以下でも非常にゆっくりとした速度で進展することが知られている。また、クラックの進展速度は温度や間隙水の有無、pHなどに依存することから、そのメカニズムは応力腐食割れが有力視されている。

クリープ変形の最終段階で生じるクリープ破壊は、このようなメカニズムによって進展したクラックが局所化し、巨視的な破面が形成する事により生じる。したがって、最終的なクリープ破壊を予測するためには、クラックの発生・進展挙動を表現出来るだけではなく、クラックの局所化の過程をも再現できねばならない。しかも、岩石内部の無数のクラックを個々に取り扱うことは不可能であり、連続体理論による取り扱いが必要になる。本論文は著者らが提案している微視構造を持つ材料の連続体理論(相互干渉場理論^[1])を圧縮荷重下の岩石のクリープ変形に適用したもので、以下では定式化の概要と計算例を示す。

2. 基礎理論

クラックを多数含む弾性体を考え、これを均一化する事により応力-ひずみ関係を導いた。具体的にはクラックを含む弾性体上で平均応力と平均ひずみの関係を求めると、次式となり、

$$\hat{\sigma} = D^e (\hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}^*), \quad \hat{\epsilon}^* = \frac{1}{2V_c} \int_{V_c} ([u] \otimes n + n \otimes [u]) ds \quad (1)$$

これを応力-ひずみ関係とした。上式において D^e は基質部分の弾性テンソル、 $\hat{\epsilon}^*$ はクラックによって生じるひずみ、 $[u]$ はクラックの開口変位、 n はクラック表面での法線ベクトルを表す。上式の開口変位はクラック間の相互干渉を無視すれば、クラック密度とクラック長の関数として求められる。

次にクラックの進展則は、載荷直後の短期の挙動についてはグリフィスの基準を用い、クリープ変形時にはクラック進展速度 dl/dt と応力拡大係数 K_I 間にべき乗則が成立することがクラック速度試験から確かめられているため、これを用いた。すなわち、

$$f = K_I - K_c = 0 : \text{for short-term crack growth}$$

$$\frac{dl}{dt} = A(K_I)^n : \text{for creep} \quad (2)$$

ここで、 K_c は破壊靱性値、 A, n は岩種や温度などに依存する定数を表す。

本理論の特徴は上記の進展則においてクラック間の相互干渉を考慮した点で、本来離散的に存在するクラック間の相互干渉効果を考慮するためのpseudo-traction法をクラックが連続的に分布する場合に拡張した。これより、(2)式の応力拡大係数は次の形 $K_I = K_I(l, \hat{\sigma}, \sigma^P)$ として求められ

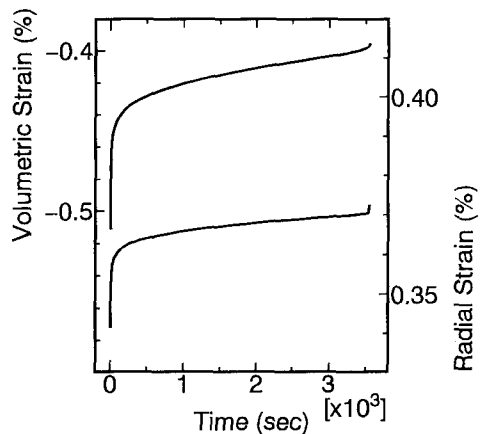


図1 クリープ曲線

る。ここで σ^p は相互干渉効果を表す場の変数として新たに導入された変数であり、インターラクシオンテンソルと呼ぶ。また、インターラクシオンテンソルは次の積分方程式を満足しなければならない。

$$\sigma^p(x) = \int_V \rho \gamma(x|\xi) \{ \hat{\sigma}(\xi) + \sigma^p(\xi) \} d\xi \quad (3)$$

ここで、 ρ クラックの密度、 $\gamma(x|\xi)$ はクラック間の相互干渉を表す影響係数である。

結局、問題は以上の方程式と釣り合い式、ひずみ-変位関係式を連立して解く初期値境界値問題となる。

3. 花崗岩のクリープ試験のシミュレーション

上記の基礎方程式を有限要素法で離散化し、オイラー法を用いて各時間ステップの解を求めた。理論を検証する目的で Kranz [2] の行った Barre granite のクリープ試験の再現を試みた。解析結果の一例として、図1に拘束圧100MPa、軸差応力比0.91の場合のクリープ曲線を示す。ここで、軸差応力比とはクリープ試験で載荷した軸差応力を短期の破壊試験で得られた最大の軸差応力で無次元化したものである。同図より実際の岩石のクリープ試験でも現れるクリープ曲線の特徴が再現されていることが分かる。計算においては3次クリープ以後に生じる巨視的な破壊は、ひずみ（クラック長）の急激な増加として表される。

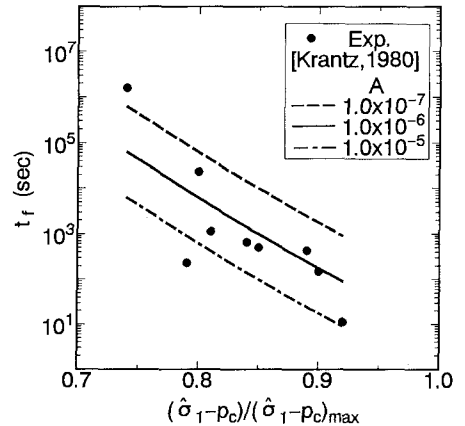
次に拘束圧が0, 53, 100 MPaの3ケースについて軸差応力比と破壊時間の関係を図2に示す。図中、・が実験値、曲線が理論値を表し、理論値はクラックの進展則において係数Aを変化させた複数の計算ケースを示してある。拘束圧が0の一軸圧縮試験では実験値のバラツキが大きい、拘束圧を作用させたケースにおいては、バラツキが小さくなり曲線の勾配は提案する理論によってよく再現されている。

4. まとめ

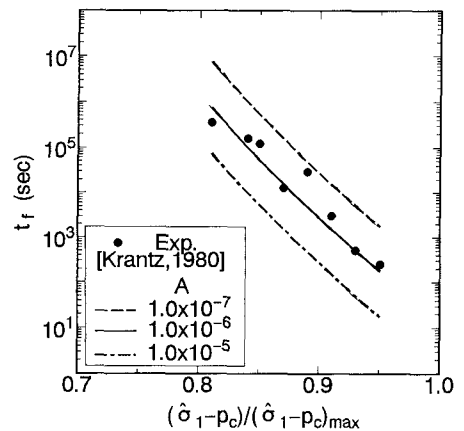
提案する理論により岩石の供試体レベルのクリープ変形・破壊が再現可能であることを示した。しかし、岩盤のクリープ変形を解析するためには、岩盤内に含まれるジョイントのクリープ特性を考慮に入れる必要があり、これは今後の課題としたい。

参考文献

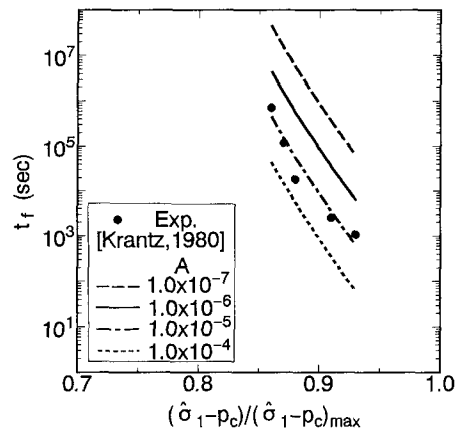
- [1] Okui, Horii, Akiyama: A Continuum Theory for Solids Containing Microdefects, Int. J. Engng. Sci., Vol.31, No.5, pp.735--749, 1993
- [2] Kranz: The Effect of Confining Pressure and Stress Difference on Static Fatigue of Granite, J. Geophys. Res., Vol.89, No.B6, pp.4137--4152, 1980



(a) $p_c=0$



(b) $p_c=53$ MPa



(c) $p_c=100$ MPa

図2 破壊時間と軸差応力比の関係