

CS1-5〔I〕 マイクロメカニクスに基づく岩盤のクリープ挙動の一モデル

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

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・高温岩体発電等、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。核廃棄物格納といったような岩盤構造物に対して長期的安定性が要求されるような場合、クリープ・疲労というような時間依存的挙動特性の検討が重要である。特に温度に影響されるクリープ挙動に対しては注意が必要である。こうした現象を予測するためには、現象を支配しているメカニズムを把握し、モデル化を行うことが必要である。本研究の目的は、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である。そこで、硬岩におけるクリープ変形・破壊の予測モデル^[1]に基づいてクリープの構成式を導き、それを有限要素法の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. 岩盤のクリープ挙動の有限要素解析

2.1 構成式

クラックを含む体積 V の弾性体を考える。この場合、平均応力、及び平均ひずみは次式のように与えられる。

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

ひずみ-変位関係、 $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ 、と発散定理を用いることにより、平均ひずみは

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

と求められる。ここで D_{ijkl} は弾性体のコンプライアンス、 S^C はクラック面、 $[u]$ 、 n はそれぞれクラック面における変位のギャップ、法線ベクトルを表す。式(2)を変形することにより次式が得られる。

$$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \{ \bar{\varepsilon}_{kl} - \frac{1}{2V} \int_{S^C} ([u_k]n_l + [u_l]n_k) dS \} \quad (3)$$

ここで、 C_{ijkl} は弾性定数である^[2]。

圧縮下のクラック進展モデル^[1]を用いればクラック面の変位のギャップ $[u]$ とクラック先端の応力拡大係数は

$$[u] = f(\bar{\sigma}_{ij}, l) \quad (4)$$

$$K_I = g(\bar{\sigma}_{ij}, l) \quad (5)$$

の形で与えられる。また、クラックの進展は応力腐食割れによるクラックの進展則に従うものとする。すなわち、

$$dl/dt = A(K_I)^n \quad (6)$$

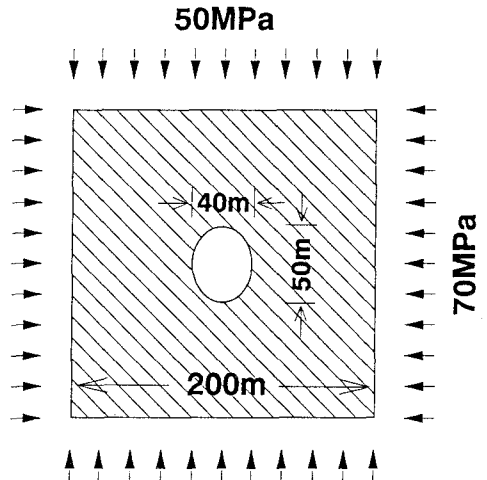


図1 地下2000mにおける楕円形の地下空洞

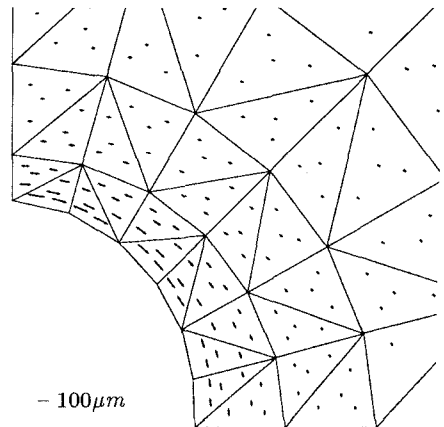


図2 空洞周辺部におけるクラックの分布と長さ

ここで dl/dt はクラック進展速度であり、 $A \cdot n$ は温度・水分といった環境条件に依存する材料パラメーターである^[3]。

例えば、 $\bar{\sigma}_{ij}$ が一定の場合、式(5)(6)よりクラック長 l が時間の関数として求められ、次に式(3)(4)より平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ が計算される。一般的には $\bar{\sigma}_{ij}$ は時間とともに変化し、応力とひずみの関係は式(3)(4)(5)(6)を連成することにより求められる。

2.2 有限要素解析

前節のクリープ構成式を組み込むことにより、クリープ挙動の有限要素解析が可能となる。ここで採用するアルゴリズムでは、まず、与えられた荷重(境界条件)に対して有限要素法による弾性解析を行い、各点における応力状態を求める。次に、クラック進展モデルを用いて応力拡大係数・初期クラック長・クラックひずみ等を計算する。そして式(6)を用いて与えられた時間増分に対し、Euler法を用いてクラック進展量を算出する。それらを式(3)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。こうして、任意の問題における応力・ひずみ・クラック長等の分布を時間の関数として求めることができる。

解析例として図1に示すような、地下2000mの花崗岩内における楕円形の地下空洞を考えた。計算に用いるパラメーターは文献[1]と同様に、Atkinson^[3]、及びKrantz^[4]の実験結果に基づき決定した。図2は温度400°C、3000年後における地下空洞周辺部におけるクラックの分布と長さを示している。この図より、軸差応力が大きい空洞近傍において、クラックの進展量が大きいことが分かる。また、表1はクラックの進展量の大きい空洞天端部において、種々の温度に対するクラック長の経年変化を表したものである。表より、岩体内の温度が高いほどクラックの進展量は大きいことがわかる。また、いずれの温度の場合もクラックは時間と共に進展するが、仮にクラック長が100 μm に達したとき破壊が起こるものとする、岩盤構造物は温度20°Cの場合3000年後も安全であるが、100°Cでは100日後から30年後の間に壊れ、400°Cでは一瞬にして破壊に至ることになる。クラック長の増加は初期の段階で大きい、表は20°Cでは3000年かかる現象が400°Cでは一瞬にして起こることを示している。

表1 種々の温度に対するクラック長の経年変化量

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

3. 結語

文献[1]ではマイクロメカニクスに基づいた硬岩のクリープ変形・破壊のクラック進展モデルを提案し、Krantz^[4]の実験結果の再現を試み、モデルの妥当性を示した。本研究はそのモデルを用いてクリープの構成式を導き、それを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した。本研究で開発した、比較的パラメーターの少ない有限要素解析モデルを用いることによって、クリープが問題となる岩盤構造物の長期的安定性を検討できるものと思われる。

<参考文献>

- [1] 吉田、堀井：岩石のクリープ変形・破壊のモデル化、土木学会年次学術講演会、I-15、平成3年9月
- [2] 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).
- [3] Bairy Kean Atkinson, Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. Vol.89, No.B6, pp.4077-4114 (1984).
- [4] 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).