

○東京大学 学生員 竹内 渉
東京大学 正 員 堀井秀之

1 まえがき

高レベル放射性廃棄物の処分は重要な問題であるが、現在のところ地層処分が国際的に一般的な方式となっている。1,000～10,000 年にわたる安全性を確保するためには、岩盤処分空洞の超長期的安定性を保証することが不可欠である。本研究においては、圧縮下におけるマイクロクラックの進展を岩石のクリープ変形・破壊のメカニズムとして捉え、その局所化がクリープ破壊を引き起こすものとして、理論・解析手法を構築した。また、提案するクリープ理論を有限要素解析と組み合わせることにより、岩盤のクリープ挙動に対する不連続面の影響を評価した。

2 硬岩のクリープ理論

2つのクラックの時間依存の進展問題を考えることにより、岩石のクリープ破壊のメカニズムを考える。

圧縮応力下にある硬岩内部の微視的な欠陥の観察から、荷重的作用により初期欠陥から引っ張りクラックが発生し、最大圧縮主応力方向にはほぼ平行に進展することが明らかになっている。この硬岩内部のマイクロクラックの進展モデルとして、図 1(a)の Wring crack model や、それをさらに単純化した図 1(b)の簡略化モデルが知られている。本研究では後者を用いる。

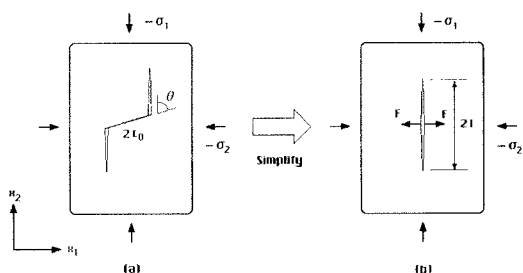


図 1：圧縮荷重下での岩石内部のモデル：(a) Wring crack model、(b)簡略化モデル

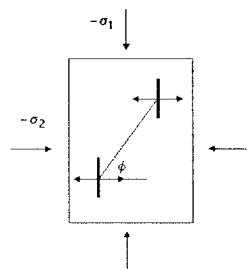


図 2：2つのクラックの進展問題

クラック先端での応力拡大係数が破壊靱性値以下であってもクラックは進展していく。これは静的疲労として知られているが、クラック進展速度試験からクラックの進展速度と応力拡大係数とのあいだには、次のべき乗則が成立することが示されている。

$$\frac{dl}{dt} = A(K_I)^n \quad (1)$$

以下では、式(1)を発展方程式として計算を行う。

複数のマイクロクラックは相互に干渉しあい、その相互干渉効果によりマイクロクラックの進展が促進されクリープ破壊に至る。本研究では図 2 のような 2つの平行クラック問題を解くことによりクリープ破壊の解析を行う。

3 硬岩のクリープ解析

解析結果の一つとして、クラックの進展の様子を示す (図 3)。これは 2つのクラックが水平($\phi=0^\circ$)と、斜め 45° ($\phi=45^\circ$)に配置されたときの結果である。両方とも $t=0$ において急激にクラック進展が起こる。 $\phi=0^\circ$ のケースではクラックの進展は見られないが、 $\phi=45^\circ$ では、クラック長がある程度大きくなるとクラック間の相互干渉効果から再び応力拡大係数が増加し、最終的にはクラックが不安定進展をはじめクリープ破壊に至る。

次にクラック間の距離を観察されたクラック密度から計算される値に固定し、配置を変化させて何通りか計算させることにより、不安定進展を始める時間がクラックの配置によってどのように変化するかを調べた (図 4)。同図より、 $\phi=58^\circ$ のクラック配置の場合がもっとも早く不安定進展をはじめることがわかる。最大圧縮方向から計ると 32° であるが、これは Kranz が行ったクリープ試験の破壊面の角度とはほぼ一致する。

高レベル廃棄物、マイクロメカニクス、クリープ理論、不連続面

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部土木工学科 Tel.03-3812-2111 Fax.03-3812-4977

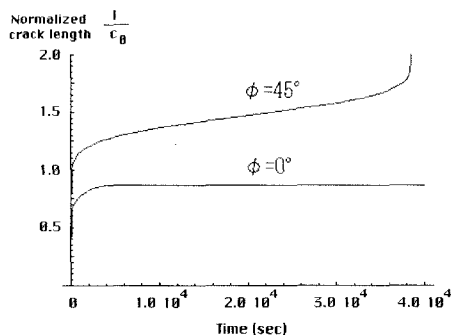


図 3：時間とともに変化するクラック長

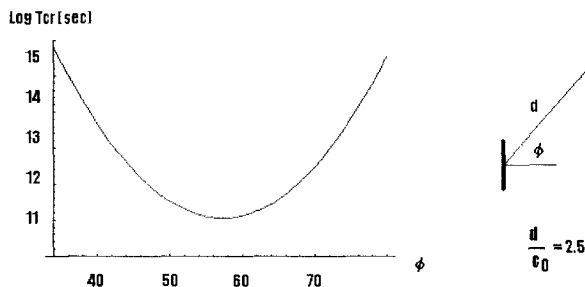


図 4：クラックの配置と破壊時間

さらに、クラック間の距離を適当な値に、配置を $\phi=58^\circ$ に固定し、いくつかの応力状態について不安定進展までの時間を計算することにより、任意の応力状態での破壊時間を求めた (図 5)。同図から、偏差応力が大きいほど破壊時間は短くなり、側圧比が 1 に近づくにつれて破壊時間が大きくなることがわかる。

4 不連続面の影響

岩盤中にランダムに不連続面を発生させ、有限要素解析により応力分布を計算し、先のクリープモデルを用いて破壊時間を算出する (図 6)。直行する 2 セットの不連続面を考え、不連続面のせん断抵抗はないものとする。不連続面に対して主応力軸が 0° および 45° のケース、最大主応力が 25MPa、最小主応力が 17.5MPa および最大主応力が 35MPa、最小主応力が 25MPa となる計算ケースを考えた。得られる最小の破壊時間を不連続面の計 4 ケースの関数として図 7 に示した。

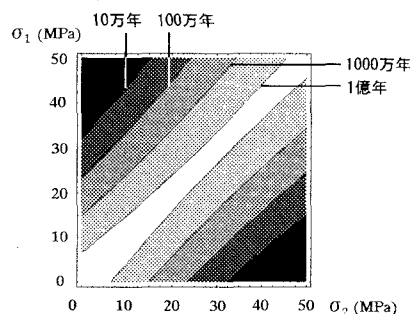


図 5：任意の応力下での岩盤の破壊時間

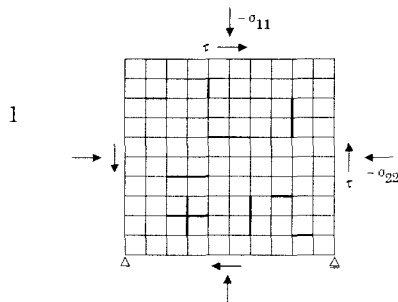


図 6：不連続性岩盤のメッシュ図

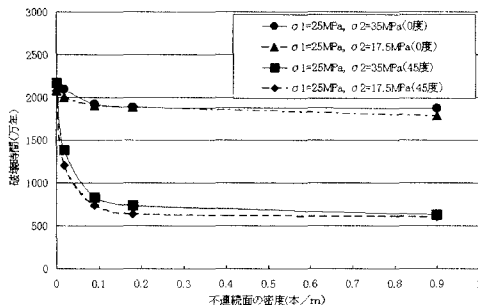


図 7：不連続性岩盤のクリープ破壊時間

主応力軸が不連続面と直行するときは、不連続面は滑らないため不連続面の影響はほとんど見られない。不連続面が主応力軸に対して 45° のときは、不連続面が滑って応力集中が起こり破壊時間の低下が見られる。しかし、この解析例では依然として破壊時間は長く 500 万年を超えている。

5 おわりに

本研究ではマイクロクラックの相互干渉に基づくクリープモデルにより、破壊時間に対する応力状態や不連続面の影響を予測しうることを示した。クリープ破壊においては、温度・水分量・Ph 等の環境条件が大きく影響することが知られているので、今後はとくに温度の影響についてさらに詳しい解析を進めていく。

参考文献

奥井・堀井、硬岩のクリープ破壊時の変形の局所化メカニズムの考察

Y.Okui and H.Horii, Stress and time dependent failure, J.Geo.Res., Vol.102, B7, 14,869-14,881, 1997