

人工軟岩におけるクリープ実験と3次クリープを考慮したモデル化

東京大学 学生会員 浅羽 俊之
 東京大学 正会員 井上 純哉

1. はじめに

核廃棄物の地層処分など大深度地下の利用を考えると、大深度地下構造物においては数百年単位の超長期間の利用に耐えること、常に限界荷重の60%もの圧力に耐えることなどが求められ、その安全性を確保する上で問題となる。特にこのような特殊な状況においては、これまでクリープは収束するものとして、考慮されてこなかったクリープ破壊について考慮する必要性が生じてくる。そこで本研究では、構造物の安全性を評価するために、3次クリープを考慮したモデル化を目的とした。本研究では特に日本に広く分布する軟岩を対象として研究を行った。ただし実験には再現性を持たせるために天然の軟岩ではなく、石膏と砂と水を用いて作成した人工の軟岩を使用することにした。

2. 反応速度論を用いたモデル化

本研究では、軟岩の内部において粒子間をつなぐ固結状の物質に亀裂または転位などの破壊が生じることが軟岩の破壊を支配していると仮定した。単一亀裂の進展に関しては、すでに反応速度論を用いた説明がなされている²⁾。本研究ではその理論を拡張し軟岩全体に関して応用する。

反応速度論を用いてモデル化を行うために、まず粒子間の固結状物質が破壊するために必要なエネルギー障壁 $f(\varepsilon_p)$ が存在すると仮定し、軟岩を図-1のようにエネルギー障壁に従う要素 EB と弾性部分を表すバネを直列でつないだモデルで考える。反応速度論から塑性ひずみ速度 $v_p(\varepsilon_p)$ とエネルギー障壁関数 $f(\varepsilon_p)$ の関係は以下の式で表される。

$$v_p(\varepsilon_p) = v_0 [\exp A \{ \sigma^2 - f(\varepsilon_p) \}^2]$$

上式は、速度に関する係数 v_0, A とエネルギー障壁を表す関数 $f(\varepsilon_p)$ を求めることで軟岩の挙動を予測することが可能となることを示している。そこで、まず速度に関する係数 v_0, A を求め、ひずみ速度の関数からエネルギー障壁 $f(\varepsilon_p)$ を同定する。

3. 平面ひずみ実験

各種のパラメータを求めるため、平面ひずみ試験で人工軟岩に関して単調載荷試験とクリープ試験を行った。平面ひずみ試験では面外方向の変位を固定し、側面に一定応力の拘束圧をかける。さらに単調載荷試験・クリープ実験を行いながら面外方向から写真画像をとり、変形の過程を観測する。計測した供試体表面の変形からマッチング法により、変位場、ひずみ場を求めずべり面の進展を捉える。

図-1のモデルにおいて端をひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ で引っ張る場合、ピーク強度付近では弾性ひずみ速度はほぼ0になっている。よって全体のひずみ速度は塑性ひずみ速度と等しいと考えられ、以下の式が成り立つ。

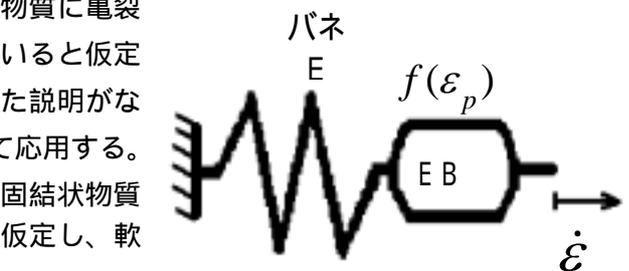


図-1

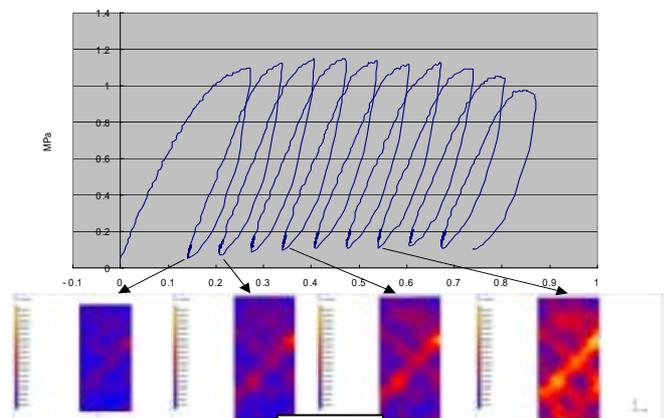


図-2

キーワード 3次クリープ, 反応速度論, 局所化, エネルギー障壁

連絡先 〒113-0004 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 TEL 03-5841-7455

$$\dot{\epsilon} = v_p(\epsilon) = v_0[\exp A\{\sigma^2 - f(\epsilon_p)^2\}]$$

この式を σ について解くと

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{A} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{v_0}\right) - f(\epsilon_p)^2}$$

となる。上式の関係と単調荷重実験によるひずみ速度とピーク荷重の関係から速度に関する係数 v_0, A が求まる。

次に塑性ひずみ速度の関数 $v_p(\epsilon_p)$ を用いてエネルギー障壁 $f(\epsilon_p)$ を同定する。このとき必要とされるのは実際に破壊が進行している部分の速度 $v_p(\epsilon_p)$ である。しかし、単調荷重試験では図-2の変位場の画像解析を見てもわかるように、せん断帯が入り、その部分で破壊が進行している。全体のひずみを計測することはできても局所化が起きている微小部分のひずみを計測することは難しい。そのため単調荷重試験からでは $f(\epsilon_p)$ を同定することが難しいと考えられる。一方、クリープ実験では図-3のように、破壊が全体的に進行している。このことからクリープ試験においては計測している供試体全体のひずみ速度と破壊が進行している部分のひずみ速度は、ほぼ等しいといえる。

均一に破壊が進行したと考えられるクリープ実験のひずみ速度を用いて $f(\epsilon_p)$ を同定した。その結果、エネルギー障壁の関数は図-4のように定まった。

このモデルを用いて、クリープ応力比（限界荷重とクリープ応力との比）とクリープ開始からクリープ破壊までの時間 t との関係を表した。クリープ応力比とクリープ破壊までの時間の対数をとったものに線形関係が見られることが既に知られている¹⁾。クリープ応力比が最も低い実験結果から同定を行った $f(\epsilon_p)$ を用いて、図-5のように実験結果と比較してみると応力比が高いものに関して傾向としてはよく適合していることがわかった。

4. まとめ

エネルギー障壁 $f(\epsilon_p)$ の存在を仮定し、反応速度論を用いることでモデルを構築した。このモデルにより軟岩におけるクリープ応力比とクリープ破壊までの時間との関係を確認した。

今後の課題としては、局所化した部分のひずみ速度を直接計測しモデルに適用することで、局所化以降の挙動を表現できるようにすることなどが考えられる。

参考文献

1) 山内優, 山崎貴博, 山下秀, 杉本文男(1998): 軟岩の圧縮クリープ過程と一軸圧縮破壊過程の関連性, 資源と素材 Vol.114 p163-168 1998
 2) S.M.Wiederhorn, E.R.Fuller Jr, R.Thomson (1980): Micromechanisms of crack growth in ceramics and glasses in corrosive environments, Metal Science August-September p450-458, 1980

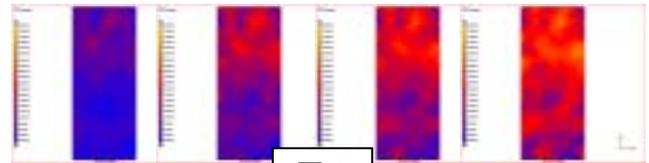
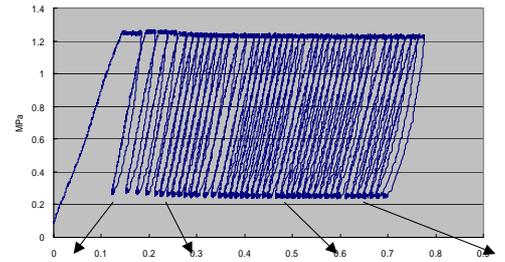


図-3

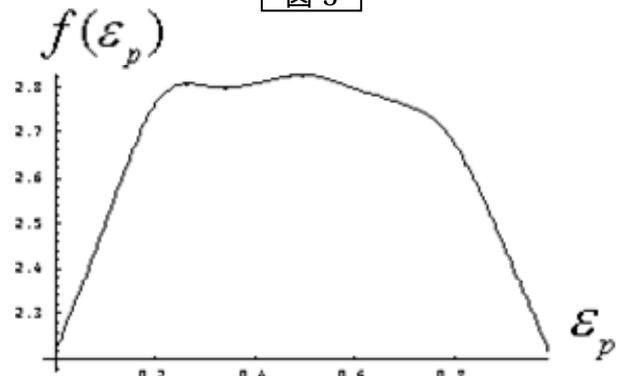


図-4

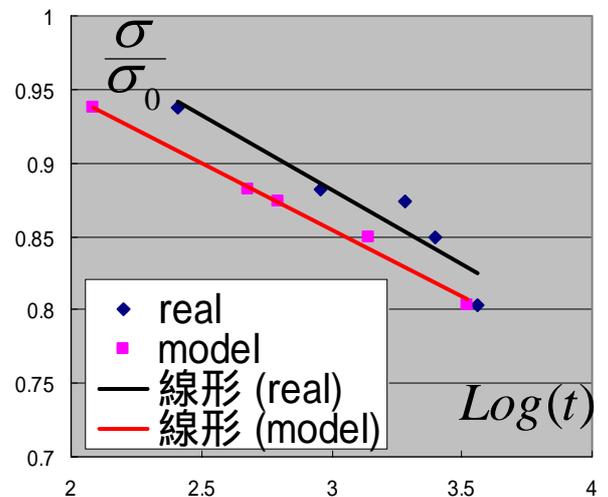


図-5