

温度環境下の軟岩の時間依存性とその変形予測に関する実験的研究

大成建設技術研究所 正会員 伊藤文雄
大成建設技術研究所○正会員 小川豊和
埼玉大学工学部 正会員 山辺 正
東京電力(株) 正会員 出口 朗
東京電力(株) 正会員 小野文彦

1. はじめに

構造物基礎や放射性廃棄物処分場として岩盤を利用する場合には、長期安定性や時間依存性を十分把握しておく事が重要である。特に軟岩のように、岩盤の力学挙動が岩石自身の物性に影響される場合には、供試体レベルでの力学特性を把握する必要性が高い。軟岩のクリープ現象を研究した例は多く、応力レベル、温度、時間効果、および水の存在に大きく依存することが知られている^{1)~3)}。軟岩がクリープ荷重下で破壊する時、その変形過程においては急激にひずみの進行する点があり、この点はクリープスペクトルのピークとして表わされる。ここではピーク時間に対応する離散化モデルにより実験値を評価し、クリープ挙動を予測することを目標とした。軟岩である田下凝灰岩を用いた一軸クリープ試験を実施し、時間依存挙動を観察することで粘弾性体としての特性を決定した。また、観測的手法を導入すれば変形予測が可能になることを明らかにした。さらに、その変形が高温温度環境においては加速され、低温温度環境では遅延する性質を示した。

2. クリープ実験とクリープスペクトル

乾燥・湿潤状態の田下凝灰岩を用いて、応力レベル75~95%の一軸圧縮クリープ試験を行った。実験時の軸方向および横方向ひずみから得たクリープひずみを移動平均し、クリープスペクトルを計算した。ひずみの計算には、赤木の方法⁴⁾に従い一定応力 s_0 のもとでのひずみの時間変化をクリープコンプライアンス $J(t)$ を用いて $\epsilon(t) = J(t)s_0$ としこの $J(t)$ を

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^{n-1} J_i(1 - e^{-t/T_i}) + h_n \cdots \cdots (1)$$

で表した。ここで J_i は各要素のコンプライアンス、 T_i は遅延時間、 h_n は粘塑性コンプライアンスであり、本研究では粘塑性コンプライアンスを0として2次クリープまでの挙動をモデル化した。遅延スペクトル $F(t)$ はその第一近似⁵⁾として $F(t) = t \frac{dJ(t)}{dt}$ を用い、平滑化した時間~クリープひずみ曲線の傾きにクリープ開始からの経過時間をかけて求めた。スペクトルに現れるピークを遅延時間と見なすことにより構成則を決定できる。このようなひずみの時間変化を問題にする時には、実験条件としての一定応力 s_0 を安定に制御することが重要である。実験では、空気圧を油圧に変換し加圧したため、実験中の応力の変動はほとんどのケースでクリープ応力の $\pm 0.2\%$ 以内であった。図1にはクリープ時の軸ひずみの時間変化と上述の方法により決定したスペクトルの一例を示した。同図には軸方向ひずみのみを示したが、スペクトルのピークを決定する際には軸方向のみならず横方向ひずみからもスペクトルを求め、両方向にピークの現れる時を真のピーク時間とした。

3. 観測的方法

スペクトルのピーク時間を遅延時間とするフォークト要素の和として2次クリープまでの挙動をモデル化した。ピークが現れる度に粘弾性定数を更新することにより、順次、変形予測を試みた。応力レベル

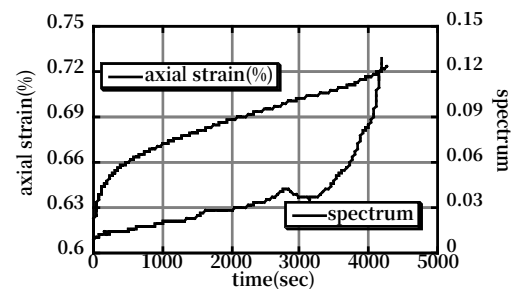


図1 一軸圧縮状態における軸ひずみの時間変化とクリープスペクトル (応力レベル85%)

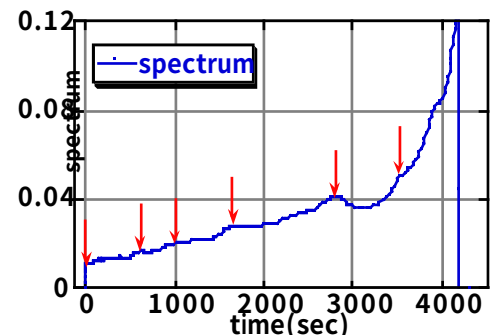


図2 観測的方法に用いたスペクトルのピーク位置 (応力レベル85%)

85%で行った実験を例にして検討した方法では、時間の経過とともに、現れたピークを追加しながらその時間までのひずみの値から、 $J(t)$ の値を順次更新した(図3)。ピークの決定方法は前述の通りであり、この供試体においては図2の↓で示した6点のピークを用いた。破壊にもっとも近い第6番目のピーク時間は3675秒であったが、その時間までのデータに基づいて $J(t)$ を計算した結果、実験値と4080秒付近までほぼ一致することが判った。3次クリープの開始点を決定するためにクリープひずみ速度が最小となる点を求める方法や、破壊までの変形挙動を含めたクリープ挙動全体を表現するための構成則を決定する方法などもあり一概に優劣を付けがたい。現位置岩盤への適用を念頭に、この観測的手法について今後とも検討を続ける予定である。

4. 温度を変化させたクリープ実験

想定した環境温度下-10℃, 20℃, 55℃で、一軸圧縮強度との相対的な応力レベルを等しくしクリープ試験を実施した。高温になるほど、ひずみ速度が速くなり破壊時間が短くなった(図4)。高温のクリープ実験ではスペクトルのピークが早く現れることも判り、この傾向は既報⁶⁾とも整合的である。また、20℃, 60℃, 90℃で実施した乾燥・湿潤状態でのクリープ試験について、クリープ時間とクリープ破壊が生じた応力レベルの関係から、温度の上昇やクリープ応力レベルの低下とともに破壊までの時間は長くなることがわかる(図5)。さらに、湿潤状態での試料は、乾燥状態の試料と比較して見かけの靱性を増していることもうかがえる。このように、温度条件下でのクリープ破壊は応力レベルで異なることが明らかになった。

5. まとめと今後の展望

クリープ実験からクリープスペクトルを計算しピークの存在を確認するとともに、粘弾性定数を随時更新していくことによって、計算に用いた遅延時間よりも先のひずみを予測する手法について検討した。また、環境条件を変化させることでクリープ破壊までの時間が変化することを観測した。本研究では、粘弾性の範囲である2次クリープまでについてモデル化を行ったが、観測的方法により決定した3次クリープの開始点以降の変形挙動を表現するためには、複数の3軸圧縮クリープ試験を異なる拘束応力下で実施し、式(1)の一般応力下の粘塑性ポテンシャル η_n についても別途考慮する必要がある。

参考文献

- 1) N.D.Cristescu & U.Hunsche: Time Effects in Rock Mechanics, WILEY, 1998.
- 2) 吉中龍之進: 岩石・岩盤の長期変形および長期強度の評価について, システム総研, pp.89-115, 1999.
- 3) 大久保誠介 他: 気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ, 材料, Vol.43, #490, pp.819-825, 1994.
- 4) 赤木知之: レオロジーモデル定数の一決定法, 土と基礎, Vol.25, #3, pp.47-52, 1977.
- 5) 山本三三三: 物体の変形学, 誠文堂新光社, 1970.
- 6) 山辺正他: 軟岩の時間依存性挙動に関する実験的研究, 地盤工学会第35回学術講演会(投稿中)。

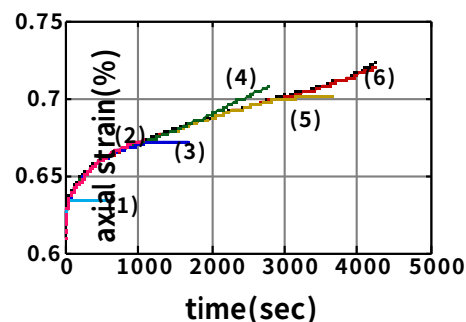


図3 観測的方法による変形予測の更新状況 (1) (6)

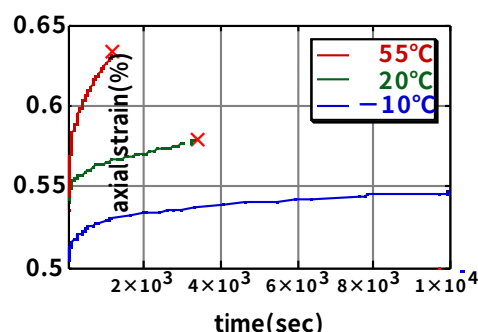


図4 環境温度の違いによるひずみ～時間関係の変化 (応力レベル79%) ×は破壊点を示す

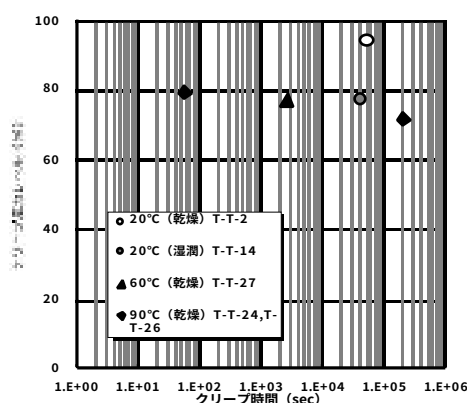


図5 各温度におけるクリープ破壊時間と応力レベルの関係