

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26630218

研究課題名(和文)熱加速クリープによる軟岩の時間依存性挙動の効率的な予測に関する研究

研究課題名(英文)Heat accelerated creep phenomena of soft rocks

研究代表者

山辺 正 (YAMABE, Tadashi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40125894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高レベル放射性廃棄体からの放熱やエネルギー資源の地下開発に伴う高温環境の出現などにより、高温温度環境における変形挙動を把握する事は重要な課題となっている。本報告では、軟岩相当の凝灰岩と泥岩を用いて高温環境下の一軸クリープ試験を実施し、その時間依存性の変形挙動を検討すると共に軽量気泡コンクリートを用いた同一条件の試験により、三者を比較検討した。その結果、本報告に用いた岩石試料では、加熱により加速するクリープ現象が観察された。一方、脆性材料でもALCは加熱により減速するクリープ現象を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to consider the heat radiation from high-level radioactive waste or underground development of energy resources under high temperature environment, it is an important issue to evaluate the effects of temperature on time-dependent behavior of surrounding rocks. In this research, uniaxial compressive creep tests are conducted under high temperature and high stress level compared with the uniaxial compressive strength conditions. By using tuffaceous rock and mudstone, heat accelerated creep phenomena are observed in each specimens. And the equivalent time related to temperature phenomena are also emerged in the experiments.

研究分野：熱加速クリープ

キーワード：高温環境 クリープ現象

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物を適切に地層処分するための研究開発の全体マップは、資源エネルギー庁における基盤研究開発の一環として地層処分基盤研究開発調整会議を中心に、原子力研究開発機構や環境整備促進資金管理センター、電力中央研究所などで検討されてきた。また、瑞浪や幌延における深地層研究所の着工を踏まえて、現地からの基盤研究も進行する環境が整いつつある。さらに、上記の膨大な研究開発マップの中には長期にわたって処分坑道や岩盤の健全性を確保するため、熱-水-応力-化学変化を連成問題として取り扱う研究も進められ多くの成果が国際学術誌に公表されている。

2. 研究の目的

上述の背景から本研究においては環境温度によって加速された時間依存性現象を、それと等価な時間に置き換えられる事を実験的に明らかにすることが第1の目的である。長期にわたる時間依存性挙動を表現するためには、熱環境下で変形が加速する効果を利用して短時間の実験期間で長期間の挙動を予測する事が必要である。熱加速されたクリープ試験方法は、本研究で目指している「時間と温度の等価性」という新たな観点から、軟岩のみならず他の岩石やコンクリートなどの広範な材料にも適用可能な手法と考えられ、その革新性・独創性から挑戦的萌芽研究としてふさわしいと考えられる。

3. 研究の方法

高レベル放射性廃棄体からの放熱やエネルギー資源の地下開発に伴う高温環境の出現などにより、岩盤を対象とした温度環境において変形挙動を把握する事は重要な課題である。本報告では、今回の研究費と基盤研究(A)の合算によって作成した高温環境下岩石物性測定用三軸圧縮試験装置を用いて、軟岩相当の凝灰岩と泥岩を用いて高温環境下の一軸クリープ試験を実施した。その時間依存性の変形挙動を検討すると共に軽量気泡コンクリート(ALC)を用いた同一条件の試験により、三者を比較検討した。

(1) 供試体の物理特性と実験の概要

実験に用いた試料は、宇都宮市大谷産の凝灰岩、能登半島産の珪藻泥岩、多孔質な脆性材料である軽量気泡コンクリート(ALC)の三種類であり、表-1に基本的な物性値を示す。これらの試料を直径50mm高さ100mmに成形し、2日間真空脱気して飽和させた。この飽和供試体を環境温度制御型の三軸試験装置内に設置し、一軸圧縮試験と一軸クリープ試験を実施した。

本報告では環境温度を20, 50, 70℃の3条件とし、各温度条件下で得られた一軸圧縮強さの95%を圧縮応力とし

てクリープ試験を実施した。試験では所定の温度まで一定速度で昇温させた後に、実験を開始するまで2時間待機した。供試体中心部分が設定した温度に等しくなるまでの待機時間の見積りには、別途実施した熱伝導試験と数値解析結果を参考にした。

凝灰岩では層理面が確認され水平面から約7°傾斜していた。供試体の構造異方性が変形に与える影響を一定とするため、三軸セルの内部に設置したギャップセンサーの位置が、層理面の走向と一致¹⁾するように供試体をセットした。泥岩とALCの場合は等方的であると考えたが、これらも常に一定の方角でセルの内部に設置した。

表-1 常温時の基本的な物性値 (圧裂強度は飽和供試体)

物性値	凝灰岩	珪藻泥岩	ALC
乾燥密度 ρ_d , g/cm ³	1.728	0.729	0.509
間隙率 n , %	31.1	43.8	71.0
圧裂強度 σ_t , MPa	0.489	0.181	0.471

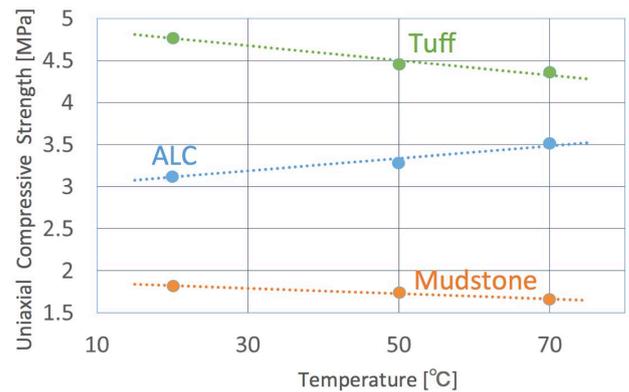


図-1 一軸圧縮強さの温度依存性

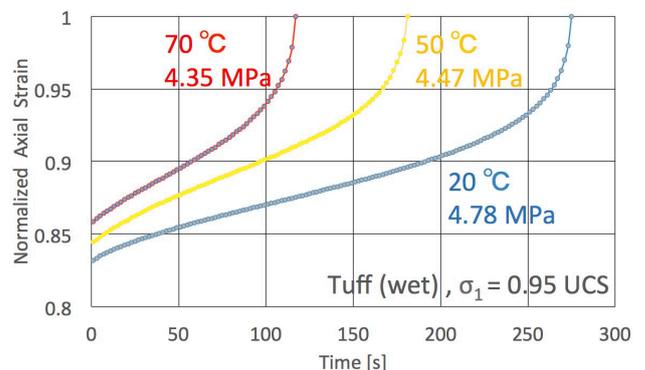


図-2 凝灰岩のクリープ曲線 (応力レベル 95%)

4. 研究成果

(1) 一軸圧縮試験と一軸クリープ試験の結果

表-1に示した3種類の試料を異なる温度環境の下で一軸圧縮強さを求めた結果を図-1に示す。圧縮試験は変位

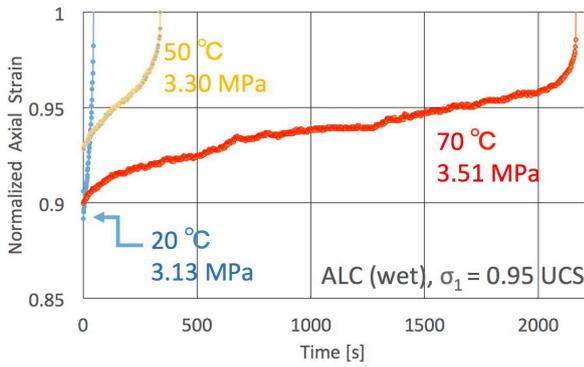


図-3 ALC のクリープ曲線（応力レベル 95%）

速度 0.1mm/min. の変位制御である。今回の岩石試料では温度上昇に伴い強度は低下するが、ALC では逆に強度が上昇する。対象とした温度範囲内で強度の低下(岩石)と上昇(ALC)の程度は同様である。ALC においては数時間の温度環境においても何らかの化学反応が内部で進行している可能性もあり、今後の分析を待ちたい。圧縮試験中の軸荷重は三軸セルの内部に設置したロードセルで計測しており、試験中はセル内の温度分布を一定に保つために攪拌装置を用いて拘束圧力流体を循環させた。図-1 の強度を有する試料に対し一軸クリープ試験を実施した結果を、図-2 (凝灰岩)、図-3(ALC) に示す。両図に示す応力の値は図-1 の強度を表しており凝灰岩では実際に作用しているクリープ応力は高温時の方が低温時より低いにも関わらず、破壊に至る時間は短い事が判る。一方、ALC の場合は逆の傾向を示しており、温度環境が強度に与える影響とも整合的である。また、ALC のクリープ曲線においては特に高温下で揺らぎが観察され、内部で stick slip 的な進行性破壊が発生している可能性を示唆している。

(2) 粘弾性体としての評価

クリープ現象を破壊時まで捉えようとする構成則の試み²⁾は多数あり、時間とひずみ速度の関係において変曲点に着目する事も多い。本報告では2次クリープまでの変形を粘弾性体として評価し、各パラメータの温度依存性について検討した。一定応力 σ_1 に対する軸ひずみの時間応答 $\varepsilon_1(t)$ は、粘弾性体として Burgers モデル³⁾を採用すると次式で表される。

$$\varepsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} \left[1 - e^{-(G_1 t / \eta_1)} \right] + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t \quad (1)$$

ここで、 K 体積弾性係数、 G_1 遅延弾性係数、 G_2 セン断弾性定数、 η_1 遅延弾性速度、 η_2 粘性流体速度である。上式において体積弾性係数を仮定すれば $t = 0$ に対し瞬時挙動から G_2 を得る。続いて2次クリープ部分を直線で近似し、その切片と傾きから G_1 と η_2 を求める事ができる。さらに実験から得られたクリープ曲線と上記の直線との距離から η_1

を決定すれば、粘弾性体に関する全てのパラメータが求められる。泥岩の実験値（黒線）と近似曲線を図-4 に示す。上記パラメータのうち、 η_1, η_2 について温度依存性を図-5 にまとめた。

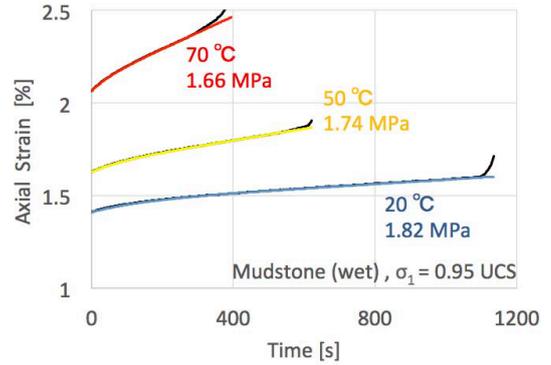


図-4 泥岩における Burgers 近似と実験結果

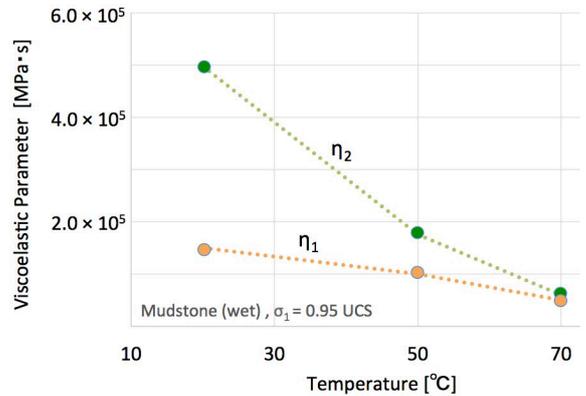


図-5 泥岩における粘弾性定数の温度依存性

(3) 一般化 Voigt モデルによる予測手法

前節の手法をさらに一般化し、クリープ応力を σ_0 とした時の一般化 Voigt モデルにおけるコンプライアンス $J(t)$ に含まれる次式の遅延時間 T_i を決定した。

$$\varepsilon(t) = J_0 + \sum_{i=1}^n J_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \right) \quad (2)$$

ここで、 J_i は各遅延時間に対応する各コンプライアンス、 t はクリープ開始からの継続時間で、コンプライアンスの時間微分から、次式のクリープスペクトル $\Phi_k(t)$ を求める事が可能である。

$$\Phi_k(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k-1)!} (kt)^k \frac{d^k J(kt)}{dt^k} \quad (3)$$

特に $k = 1$ で $\Phi_1(t) = -t \frac{dJ(t)}{dt}$ となり、これをクリープ時間に対してプロットすれば、そのピークを遅延時間として良いので、図-6 から遅延時間を求めた。この遅延時間を用い式 (2) のコンプライアンスを求め、遅延時間までの観測

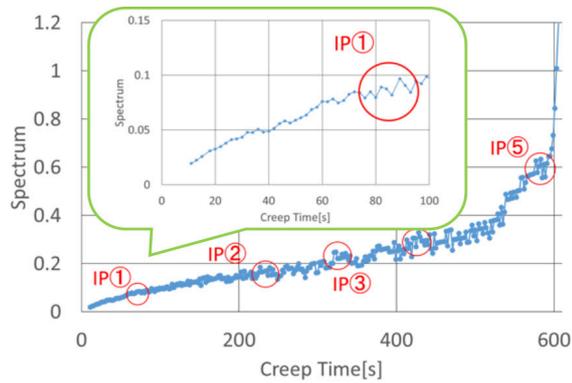


図-6 泥岩における遅延時間の決定

データを延長する手順を繰返し、図-7 を得る。この手順から、一般化 Voigt モデルを用いた観測的方法を提案する事ができた。図-7 からは、 T_4 時間には変形に関する「注意報」が必要となり、 T_5 時間には「警報」が必須となる。さらに、各環境温度において得られた遅延時間をプロット

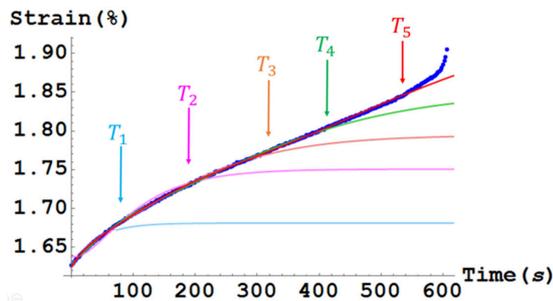


図-7 泥岩のクリープスペクトルを用いた挙動予測

すると図-8 を得る。この例は、凝灰岩の 20℃における遅延時間を横軸に 50℃における遅延時間を縦軸に描いたものである。ピーク時間が岩石内部の遅延機構を表すと考えると、高温環境での遅延時間から低温環境での遅延時間を推定可能となり、温度と時間の等価性を根拠にできる可能性を示す事ができた。

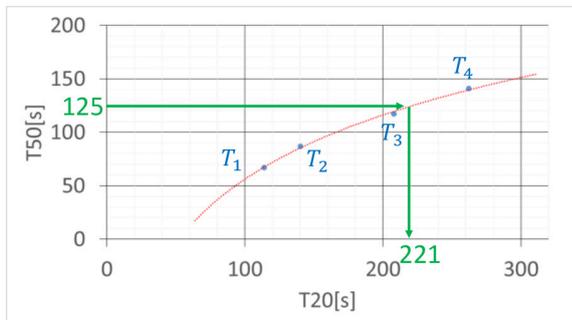


図-8 凝灰岩の遅延時間と環境温度の等価性

(4) 研究成果のまとめ

本報告に用いた岩石試料では、加熱により加速するクリープ現象が観察された。一方、脆性材料でも ALC は加

熱により減速するクリープ現象を示した。また、時間依存性を粘弾性体で近似する手法を適用し、そのパラメータを決定した。今回は一軸圧縮状態を対象としたが、今後は拘束圧力を付加すると同時にクリープ試験の応力レベルも変化させ、環境温度に対する変形挙動の応答について検討する必要がある。上記の構成関係を用いた数値解析によって高レベル放射性廃棄物処分場の立地可能性を検討するための資料を得ることが第2の目的であったが、具体的な成果発表までには至らなかったため、予備的な検討結果の一例を参考文献⁴⁾に示しておく。

参考文献

- 1) 杉浦 岳暁：高温環境における田下凝灰岩の時間依存性挙動に関する実験的研究，埼玉大学卒業論文，2016。
- 2) 及川 寧己，他：CO₂を圧入した泥岩の三軸クリープ試験，第14回岩の力学国内シンポジウム，No.027，2017。
- 3) Cristescu, N.D. and Hunsche, U.: *Time Effects in Rock Mechanics*, Wiley, 1998.
- 4) 大山卓也：熱応力弾塑性解析による地層処分坑道周辺の安定性に関する研究，埼玉大学修士論文，2003。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 山辺正，金子泰彦，須田悠尽；高温環境下にある軟岩とALCの時間依存性に関する実験的研究，土木学会第72回年次学術講演会，III - 402，平成29(2017)年9月
- ② Nabin Kumar IJAM, Tadashi YAMABE & Ranga SUDISMAN；Heat transfer characteristics of Tase Tuff under Freeze-thaw Environment, Proceedings of the 14th Japan Symposium on Rock Mechanics Japan Society for Rock Mechanics, Jan. 2017, Paper 085.
- ③ Ranga SUDISMAN, Tadashi YAMABE & Masahiko OSADA；Strain and Strength of Saturated and Dried Rock Samples Under a Freeze-Thaw Cycle, 9th Asian Rock Mechanics Symposium, 18-20 October 2016, Bali, Indonesia.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山辺 正 (YAMABE, Tadashi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40125894

(2) 研究分担者

長田 昌彦 (OSADA, Masahiko)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00214114