

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

埼玉大学大学院 正会員 山辺 正
 埼玉大学大学院 学生員 ○金子 泰彦
 須田 悠尽

1. まえがき

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、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 (ALC) を用いた同一条件の試験により、三者を比較検討した。

2. 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 °C 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の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が、これらも常に一定の方位で設置した。

3. 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。圧縮試験は変位速度 0.1mm/min. の変位制御である。今回の岩石

表-1 常温時の基本的な物性値 (σ_t 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

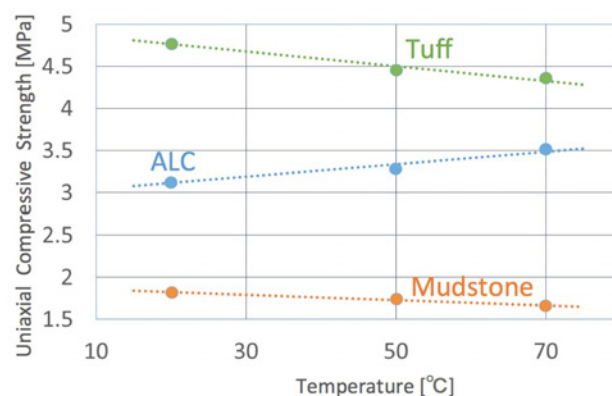


図-1 一軸圧縮強さの温度依存性

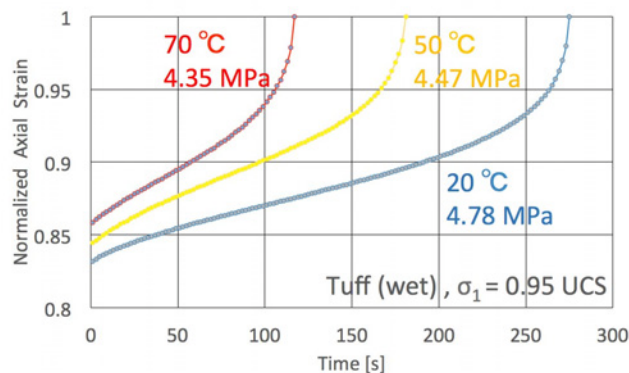


図-2 凝灰岩のクリープ曲線 (応力レベル 95%)

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。

Key Words: soft rock, ALC, high temperature, time dependency

〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院理工学研究科 yamabe@mail.saitama-u.ac.jp

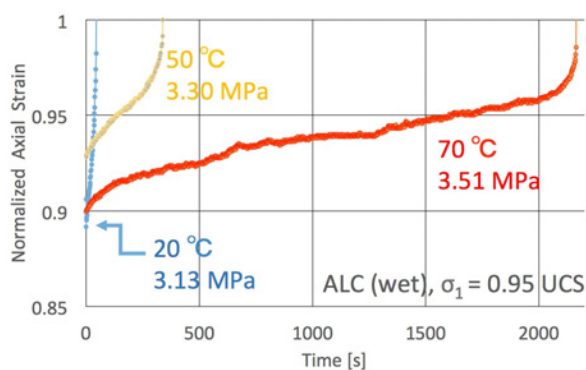


図-3 ALC のクリープ曲線（応力レベル 95%）

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。

4. 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。

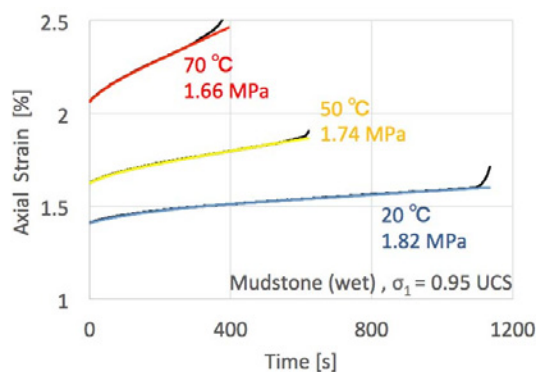


図-4 泥岩における Burgers 近似と実験結果

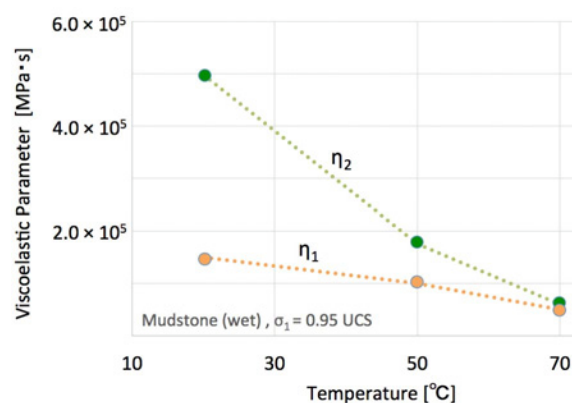


図-5 泥岩における粘弾性定数の温度依存性

5. 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予定である。

謝辞: ALC のブロックサンプルを旭化成ホームズ（株）住宅総合技術研究所の松井久仁雄氏から提供して頂きました事を記して感謝いたします。また本研究は JSPS 科学研究費補助金 (JP2663028) の助成を受けました。

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。