

高温環境における 大谷石の圧密非排水三軸圧縮試験

岡田 哲実¹・平賀 健史²・納谷 朋広³

¹ 正会員 電力中央研究所 地球工学研究所 パッケージ研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:t-okada@criepi.denken.or.jp

² (株) セレス 我孫子事業所 地質・耐震構造部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³ (株) ダイヤコンサルタント ジェンジー・エンジニアリング 事業部 (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

高レベル放射性廃棄物処分施設の設計では、岩盤の熱に対する影響を考慮して、処分施設の力学的安定性を検討する必要がある。そこで本研究では、高温高压環境下で三軸試験が可能な装置を開発し、堆積軟岩である大谷石を対象に常温、60℃、120℃の条件で圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。その結果、120℃の条件ではせん断強度が低下する傾向が見られた。しかしながら、変形特性と残留強度については温度に依存する傾向はあまり見られなかった。

Key Words : high temperature, soft rock, triaxial compression test, high-level radioactive waste disposal

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、廃棄物に含まれる核種の崩壊に伴い熱を発生する。この発熱によって、緩衝材や周辺岩盤は熱の影響を受けることになる。よって、その温度影響を考慮した処分施設の設計が必要となる¹⁾。

一方、地盤材料の力学特性の温度依存性については、過去に数多くの研究が見られるものの、硬岩や粘土を対象としたものが多い。処分施設の候補岩体としては、一般に透水性が不連続面に依存しない軟岩も有力な候補の1つと考えられる。軟岩は硬岩と異なり、力学特性は排水条件に強く依存するため、圧密条件やせん断時の排水条件に注意を払った実験を行う必要がある。また、軟岩の室内要素試験はベディングエラーの影響を受けやすいため²⁾、粘土の場合と異なり、ひずみの計測は供試体の側面で正確に行う必要がある。これらの点に注意を払った軟岩の温度影響を検討した事例は極めて少なく、一般的な結論を得るに至っていない。

そこで本研究では、堆積軟岩の力学特性の温度依存性を把握し、その結果を処分施設の設計に反映させることを目的として、高温高压条件で試験が可能な三軸試験装置を開発し、常温、60℃、120℃の条件で堆積軟岩である大谷石の圧密非排水三軸圧縮試験を行った。

2. 試験装置

装置の主な仕様を表-1に示す。供試体の温度は、セル圧流体(シリコンオイル)を加熱することにより上昇させる。セル圧流体の加熱については、セル外部に設置した加熱チャンバー(ヒーターを保有した压力容器)で行い、加熱しながらポンプで三軸セルへセル圧流体を循環させる³⁾。著者らはこれまで三軸セル内部に設置したヒーターで加熱し、セル内部のプロペラでセル圧流体を攪拌していたが⁴⁾、この方法では温度が高くなると十分に攪拌されず、セル内に温度むらが生じるという問題があった。また攪拌プロペラ部のシールの耐久性に難があり、セル圧流体の漏れもしばしば起こっていた。これらの問題を解決するためにセル圧流体循環方式を採用し

表-1 試験装置の仕様

軸荷重	Max	200kN
セル圧	Max	20MPa
背圧	Max	20MPa
温度	常温	~200℃
供試体	Max	φ 50mm

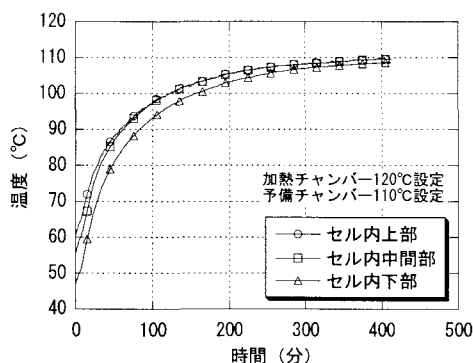


図-1 セル内部の温度変化

た。図-1に今回の方法で計測したセル内の温度の計測結果を示す。温度が高くなるにしたがって、セル内の温度が均一になることがわかる。

なお、荷重はセル内部に設置したロードセルにより計測した。変位（ひずみ）は供試体の側面に設置した非接触型変位計により計測した。また、ひずみの計測結果の信頼性を検討するため、供試体側面の対角位置にひずみゲージを2枚貼付した。

3. 試験方法

用いた試料は新第三紀中新世の溶結凝灰岩（通称、大谷石）である。ブロックサンプリングした試料をコア抜き機、カッター、端面整形機を使用し、直径50mm、高さ100mmの円柱形の供試体に成形した。メンブレンには耐熱性のフッ素系ゴム（厚さ2mm）を使用した。供試体側面にゲージを貼付した後、水中で約1日脱気して飽和させた後、三軸セルにセットして試験を行った。

試験方法については、原則として岩石の圧密非排水三軸試験（JGS 2532-2002）に準拠して行った。ただし、加熱については、圧密終了後、排水条件で加熱し、目標温度に達した後、30分～2時間程度温度を保持し、その後非排水条件でせん断した。

有効拘束圧は0.4～6.4MPaの4種類で、温度は常温（約24℃）、60℃、120℃の条件で試験を行った。載荷速度はひずみ速度制御で0.1%/minとした。

4. 試験結果

図-2に、3種類の方法で計測した主応力差 q と軸ひずみ ϵ の関係の一例を示す。既往の研究³⁾と同様に外部変位計の計測結果はベディングエラーにより大きなひずみを示している。非接触型変位計とひずみゲージの計測結果は整合しており、高温中においても非接触型変位計に

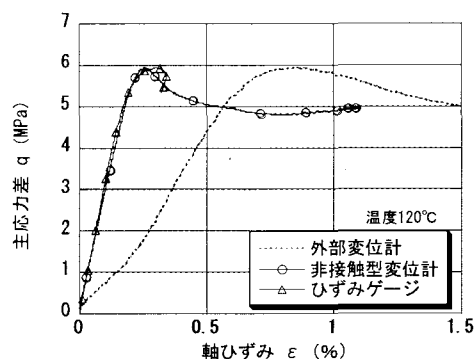


図-2 応力とひずみの関係

よりひずみを正確に計測することができた。ひずみゲージでは大きなひずみを計測できないため、以降のひずみの計測結果は原則として非接触型変位計の結果を用いることとする。

(1) 応力ひずみ関係、間隙水圧ひずみ関係

温度別の主応力差 q 、過剰間隙水圧 Δu と軸ひずみ ϵ の関係を図-3に示す。温度の違いによる目立った変化は見られないが、温度が120℃の場合は、応力ひずみ関係が拘束圧に依存する傾向が見られる。

Δu は q に比べるとかなり小さいため、本試料では間隙水圧の影響はかなり小さいものと考えられる。ただし、間隙水圧の挙動は従来の大谷石を対象とした三軸試験結果³⁾と比較すると、かなり異なるため計測結果の信頼性を再検討する必要があると思われる。よって、以降では全応力で試験結果を整理した。

(2) 変形特性

弾性係数 E_{30} と初期の有効拘束圧 σ'_c の関係を図-4に示す。図中の直線は温度別に最小二乗法により線形近似した結果である。温度によらず拘束圧の増加にともない、 E_{30} が増加する傾向が見られる。常温の場合に E_{30} が小さい傾向が見られるが、60℃と120℃の差は小さく、温度の影響はあまり見られない。

破壊ひずみ ϵ_f と有効拘束圧 σ'_c の関係を図-5に示す。図中の曲線は温度別に最小二乗法により指数関数で近似した結果である。温度によらず拘束圧の増加にともない ϵ_f が増加する傾向が見られる。120℃の場合に ϵ_f が小さい傾向がみられるが、常温と60℃の差は小さく、温度の影響はあまり見られない。

(3) 強度特性

破壊（ピーク）時の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ と $(\sigma_1 + \sigma_3)_f/2$ の関係を図-6に示す。ある程度ばらつきが大きいものの、120℃

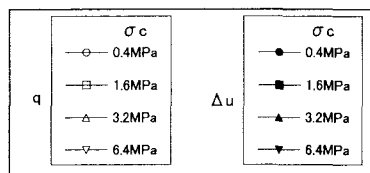
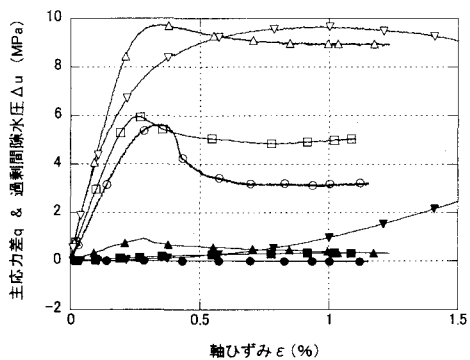
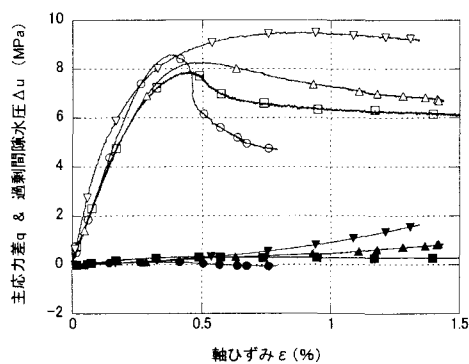
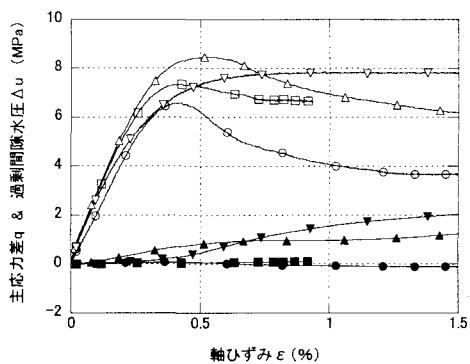


図-3 応力とひずみの関係 (温度別)
(左上: 常温, 右上: 60°C, 左下: 120°C)

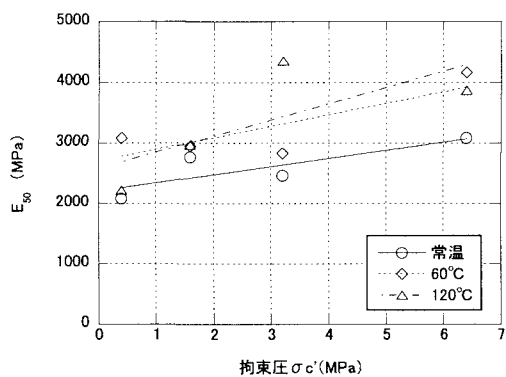


図-4 E_{50} と拘束圧の関係

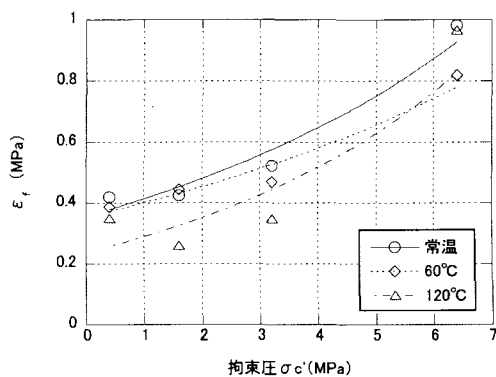


図-5 破壊ひずみと拘束圧の関係

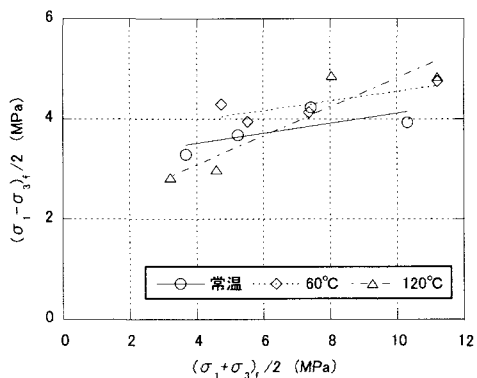


図-6 せん断強度の比較

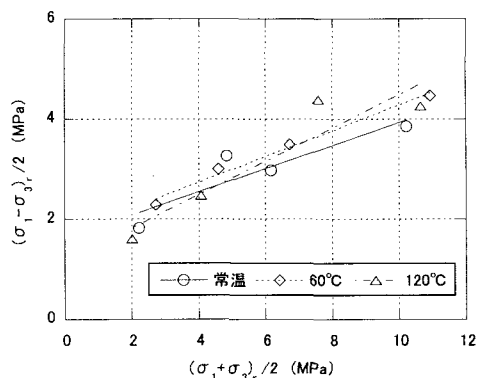


図-7 残留強度の比較

の場合には低拘束圧でせん断強度が低下する傾向が見られる。同一地点から採取した大谷石の一軸圧縮試験の結果でも高温時（約100℃）で強度が低下する傾向が見られた⁶⁾。

残留時の $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ と $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ の関係を図-7に示す。ある程度ばらつきが大きいものの、ピーク強度と比較すると残留強度には、温度依存性はあまり見られない。同様の傾向は泥岩や砂岩でも確認されており²⁾、一般的な傾向である可能性が高い。

5. まとめ

開発した試験装置により高温高压条件で高精度の三軸試験が可能となった。この試験装置を用いて大谷石の圧密非排水三軸試験を行った。その結果、120℃の低拘束圧の条件ではせん断強度が低下する傾向が見られた。残留強度や変形特性については温度に依存する傾向は顕著ではなかった。

6. 今後の課題

間隙水圧の計測結果について再検討を行う。また、試験を追加するとともに三軸クリープ試験の結果とあわせて、高温高压下における堆積軟岩の力学特性評価手法および解析手法の確立を目指す。

参考文献

- 1) 高橋美昭, 出口朗, 樋田吉造: 高レベル放射性廃棄物処分場の概念設計, 土と基礎, Vol.46, No.10, pp.7-9, 1998.
- 2) 龍岡文夫, 小高猛司, 王 林, 早野公敏, 古関潤一: 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集, No.561, pp.1-17, 1997.
- 3) 岡田哲実, 納谷朋広: セル圧流体循環型の高温高压三軸試験装置の開発と大谷石の三軸圧縮試験, 第 59 回土木学会年次学術講演会, III-435, pp.21-30, 2004.
- 4) 岡田哲実: 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その 1), 電力中央研究所研究報告, N04026, 2005.
- 5) 地盤工学会編: 堆積軟岩の工学的性質とその応用, pp.84-87, 1987.
- 6) 三保雄司: 堆積軟岩の高温三軸クリープ特性に関する実験的検討, 横浜国立大学卒業論文, 2005.

CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TEST OF OHYA STONE UNDER HIGH TEMPERATURE

Tetsuji OKADA, Kenji HIRAGA and Tomohiro NAYA

Heat is generated due to the collapse of nuclide in high-level radioactive waste (HLW), the rock mass around the geological disposal facility will experience high temperatures. Therefore, it is important to understand the effect of high temperature on the rock masses. In this study, a series of triaxial compression tests of sedimentary soft rock of OHYA stone was conducted under the temperature of 24℃, 60℃, 120℃. Triaxial compression tests were carried out under consolidated-undrained (CU) condition. The results reveal that the compressive strengths of all specimens decrease at 120℃, but the stiffness and the residual strength is not dependent on the temperature level.