

上総層群堆積軟岩の熱特性と高温下力学特性

岡田 哲実^{1*}・平賀 健史²・高倉 望³・谷 和夫⁴・澤田 昌孝¹・吉川 和夫³

¹財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²株式会社 セレス 我孫子事業所 (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646電力中央研究所内)

³東急建設 株式会社 技術本部 土木エンジニアリング部 (〒150-8340東京都渋谷区1-16-14)

⁴国立大学法人横浜国立大学 (〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷常盤台79-1)

*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

温度の影響を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法を確立する目的で、現地のヒーター試験を実施する予定である。ヒーター試験に先立ち、現地の上総層群の堆積軟岩である泥岩を用いて、比熱、熱膨張率、高温下の三軸試験、高温下の一軸クリープ試験を実施した。その結果、熱特性、力学特性ともに温度依存性を示すことがわかった。特に力学特性については、三軸試験の結果から温度の負荷により強度が低下し、一軸クリープ試験の結果から温度の負荷により破壊時間が短くなる傾向が示された。

Key Words : high temperature, triaxial compression test, creep test, specific heat, thermal expansion

1. はじめに

地下発電所等に代表される大深度地下利用では、地下の岩盤空洞の長期間の安定性を評価し、設計・施工を行っている。ただし、従来は一般に硬質な岩盤中に空洞が建設されることが多く、長期間の安定性は大きな検討課題にならなかった。しかし今後は、透水性の低い堆積軟岩を対象として、エネルギー貯蔵や廃棄物処分などの新規地下利用が期待されている。堆積軟岩を対象とする場合、長期の変形特性(クリープ特性)が顕著であり、また熱や水などの外部環境の変化に影響を受けやすいことが懸念される。そのため、外部環境の変化を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立が望まれている。

そこで本研究では、現地での計測技術の検討と熱・水・応力の連成解析コード¹⁾の検証を行うため、堆積軟岩中に構築した地下空間実験場において、高温条件(約90°C)を負荷する現地加熱クリープ実験(以降、ヒーター試験と呼ぶ)を実施する予定である²⁾。

ヒーター試験に先立ち、堆積軟岩の高温下の特性を調べるため、現地からサンプリングしたコア試料を用いて軟岩の比熱、熱膨張率、高温下の三軸試験、高温下の一軸クリープ試験を実施し、熱特性および高温下の力学特性に関する情報を取得した。現段階では試験数量は限られており、データのばらつきもあることから、本論文では速報的にその結果を報告するものである。

2. 試料

試料はヒーター試験を実施する神奈川県相模原市郊外のGL-50mの地下実験場²⁾から採取した。なお、地下実験場は掘削から約14年が経過している。同深度は上総層群の泥岩層で構成されている。底盤から長さ約5mのボーリングを計4本実施した(SDB-1~4)。試料は採取後すぐに約10cmに切断し、ラップで包んだ後、真空コアパックに保存した状態で試験室に運搬した。

他の試験に先立ち、ボーリングコア2本分(SDB-1 & 2)の供試体を用いて、密度の測定と超音波速度の計測を行った。試験方法はそれぞれJGS2132-2000、JGS2110-1998に準拠して行った。それらの結果と深度との関係を図-1に示す。SDB-1とSDB-2の結果に明確な差はみられない。超音波速度 V_s と V_p には、若干深度依存性が見られることがわかる。これが掘削に起因するものか、風化に起因するものかは現段階では不明である。

ヒーター試験は地表付近で実施することから、以降の試験では、 V_s と V_p の若干低下が見られる4m以浅の供試体をあえて使用した。

3. 試験の概要

(1) 熱特性測定

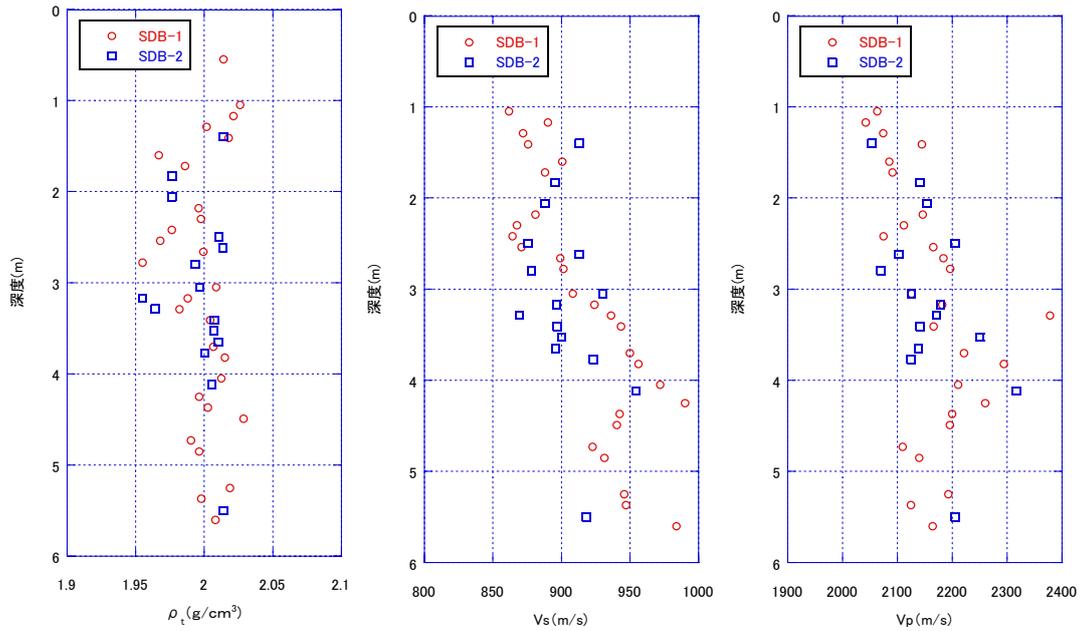


図-1 密度および超音波速度の測定結果

断熱法³⁾による比熱測定装置を用いて比熱の測定を行った。湿潤試料と、110°Cの乾燥炉で1日以上加熱乾燥した試料を用いた。測定温度は常温～200°Cとした。乾燥した試料については、再現性を確認するため、3回計測を行った。なお、試料は蓋付容器に収めて計測を行っているが、完全に密封されているわけではない。

線膨張係数の測定は、次のとおりである。まず、湿潤状態の供試体に軸方向の2枚のひずみゲージを対面位置に貼付け、同じ型番のひずみゲージを石英ガラスにも貼付けた。その両方を同じ水槽に入れ、水槽をヒーターによって加熱した。線膨張係数が既知の石英ガラス (0.5 μ /°C) のひずみ量をキャンセルすることによって温度ドリフト値を求め、その値をキャンセルすることによって岩石供試体の線膨張係数を計算した。

(2) 力学試験

高温下での圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。温度を负荷する三軸セルは既往の方法と同様である⁴⁾。試験方法は、温度を负荷すること以外はJGS2533-2002に準拠して実施した。圧密後に排水条件でセル水を加熱し、供試体の温度が一定になった後、ひずみゲージや内部ロードセルの出力値の安定を待って、非排水条件でせん断した。軸荷重の荷重は主応力差の最大値を確認後、すぐに除荷し、次の拘束圧に上げていく多段階方式で行った⁵⁾。拘束圧は0.4, 0.8, 1.6, 3.2MPa, 温度は常温, 60, 90°Cで実施した。

また高温下で一軸クリープ試験を実施した。試験装置は既往の方法と同様である⁶⁾。供試体はひずみゲージを

張った後、約1日水中で脱気して飽和させた。また、供試体の温度が一定になった後、ひずみゲージの出力値の安定を待って、軸圧縮した。軸ひずみ速度は2.0%/minを目標として手動でハンドルを回すことにより制御した。軸荷重については、一軸圧縮強さ q_u (5.4MPa) に対する荷重 (クリープ) 応力 q_{creep} を応力比 (q_{creep}/q_u) として定義し、荷重条件を決定した。応力比は0.7～0.9, 温度は常温～90°Cで実施した。

4. 試験結果および考察

(1) 熱特性測定

比熱の測定結果を図-2に示す。湿潤試料については、岩石中の水の比熱が大きいので、70°C付近からたいへん大きな値を示している。乾燥試料については、1回目の加熱試料に110°C付近でピーク値 (約2.0J/gK) が見られるが、2回目の試料にはピーク値は見られず、若干の温度依存性を示す。1回目の計測には何らかの問題があったのではないかと当初考えたが、凝灰岩と砂岩を対象に比熱特性を調べた既往の研究において1回目の試験データの130°C付近にピーク値が見られたことが報告されており、この理由として岩石中の吸着水の脱水が原因ではないかと考察されている⁷⁾。この点については今後も検討を継続する予定である。

いずれにしてもヒーター試験で対象としている90°C以下の泥岩の比熱の値は0.8～1.0 J/gK程度である。他の岩種を対象にした既往のデータ⁸⁾と比較しても同等の値で

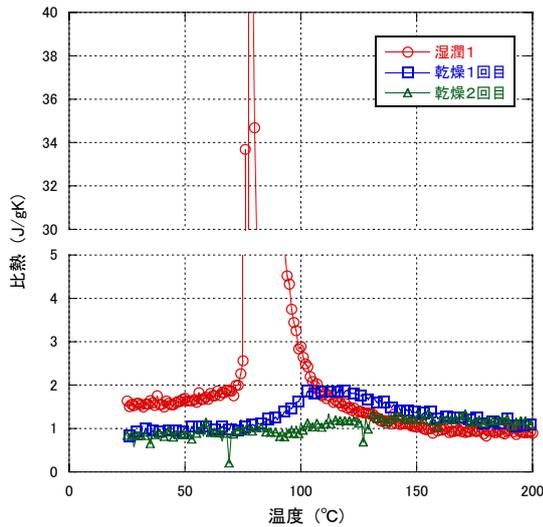


図-2 比熱の測定結果

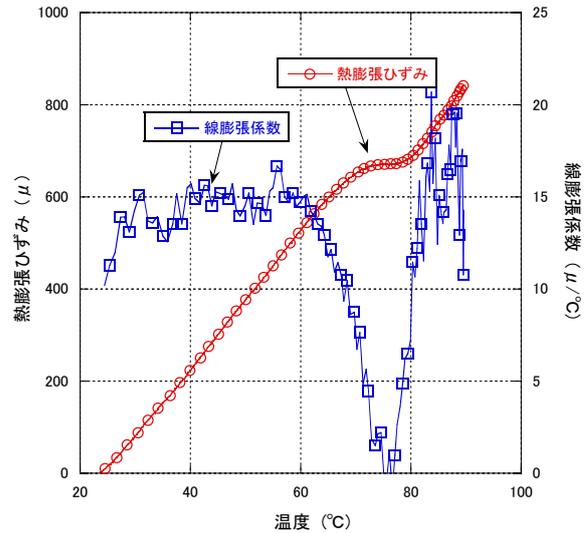


図-3 線膨張係数の測定結果

あり、比熱は岩種にほとんど依存しないことがわかる。

水中で実施した線膨張係数の測定結果を図-3に示す。90°C付近まで加熱することによって、約800 μ 程度の熱膨張ひずみが生じた。ただし、70°C~80°C付近でひずみが増加しない区間があり、このため、線膨張係数がこの区間で大きく低下する結果となった。これが計測方法の問題であるのか、この泥岩の特性であるのかは現時点では不明であるが、今後もデータを追加し、検討を行う予定である。なお、他の岩種を対象にした既往のデータ⁸⁾においても、線膨張係数が温度に対して非線形な特性を示す結果が得られているものも見られる。

(2) 力学試験

三軸圧縮試験の結果から得られた破壊（ピーク）時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ と有効平均応力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ との関係を図-4示す。図より90°Cの強度が60°Cの強度よりも若干低下している。泥岩を対象とした既往の研究では、温度の上昇により c が低下し、 ϕ が上昇する傾向が見られた⁴⁾。試験数量が限られているため、明確ではないが同様の傾向が示された。これが一般的な傾向であるかどうか、実験を追加することにより今後も検討を進める予定である。

一軸クリープ試験の軸荷重載荷からの経過時間 t とひずみゲージで計測された軸ひずみ $\epsilon_{\text{軸ひずみ}}$ の関係を図-5に示す。常温(24°C)の応力比 (q_{creep}/q_u) が0.7のケース以外は全て破壊した。90°Cの実験結果については、クリープ変形中にひずみが減少する傾向が見られるが、これはひずみゲージが剥がれたためと考えられる。高温のケースでは、今後ひずみゲージの貼付け方法を工夫する必要がある。図-6に q_{creep}/q_u と破壊時間 t_{cf} との関係を示す。同じ応力比で比較すると、温度が高いほど破壊時間が短いことがわかる。泥岩を対象とした既往の研究では、ク

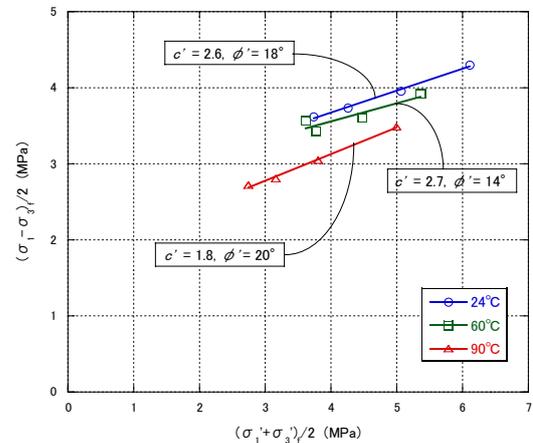


図-4 三軸試験の結果

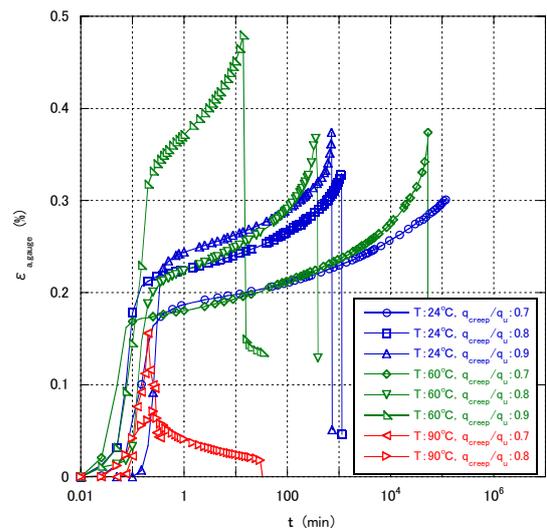


図-5 一軸クリープ試験の結果

リープ特性に温度依存性が見られなかった⁹⁾。一方、凝灰岩を対象とした既往の研究では、クリープ特性に温度依存性が見られ、温度が高いほど早く破壊する結果が得られている^{9,10)}。試験数量は限られているものの強度特性と同様にクリープ特性についても温度依存性を示すことがわかった。今後とも試験を追加してクリープ特性の温度依存性について検討する予定である。

5. おわりに

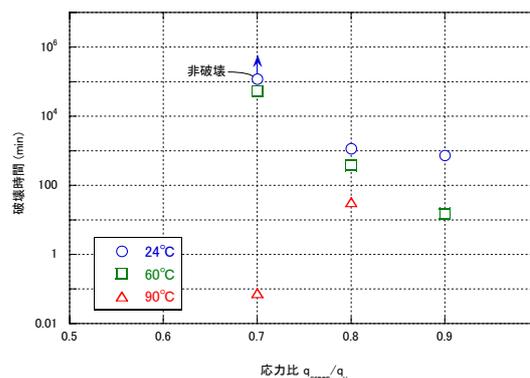
ヒーター試験を計画している上総層群の堆積軟岩である泥岩を用いて、熱特性と高温下の力学特性について検討を行った。特に力学特性については、強度特性、クリープ特性ともに温度依存性を示すことが示唆された。よって、今後とも試験を追加し、温度依存性について明らかにするとともに、それらの結果をモデル化し、ヒーター試験の数値解析を行うことにより、温度の負荷が空洞の力学的安定性にどのような影響を与えるかについて検討を行う予定である。

謝辞：

現地試験の計画やコアサンプリングに際し、東急建設株式会社の菊池智彦氏にご協力いただきました。また、実験を行うにあたり、株式会社セレスの平野公平氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澤田昌孝・岡田哲実：地下施設力学的相互作用解析のための軟岩クリープモデルの開発，電力中央研究所研究報告，N04028，2005。
- 2) 高倉 望，岡田哲実，谷 和夫，吉川和夫，澤田昌孝，竹田佳代：高温下における堆積軟岩の原位置クリープ試験計画，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2007。



図一6 応力比と破壊時間の関係

- 3) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック，p.544，1990。
- 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) 木村 誠，谷 和夫，岡田哲実：他段階荷重の三軸圧縮試験のモデル化とその適用性の検討，土木学会論文集，No.722/III-61，pp.275-287，2002。
- 6) 加藤雄介，谷 和夫，岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の一軸クリープ試験と予測モデルの提案，第33回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.25-32，2004。
- 7) 木下直人，安部 透：高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性，土木学会論文集，No.517/III-31，pp.53-62，1995。
- 8) 土木学会岩盤力学委員会：熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして，pp.27-35，2006。
- 9) 山辺正，宮本綾子，伊藤文雄，谷卓也：温度場を考慮した軟岩のクリープ挙動と数値解析への適用，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.321-235，2002。
- 10) 柴田健弘，谷 和夫，岡田哲実：高温下における大谷石の一軸クリープ試験—最小ひずみ速度とクリープ挙動の関係—，第34回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.1-8，2005。

THERMAL AND MECHANICAL PROPERTY AT HIGH TEMPERATURE OF SEDIMENTARY SOFT ROCK

Tetsuji OKADA, Kenji HIRAGA, Nozomu TAKAKURA,
Kazuo TANI, Masataka SAWADA and Kazuo YOSHIKAWA

In-situ heater test will be conducted to establish a evaluation method for the long-term stability of underground facilities in sedimentary soft rocks. Before the heater test, measurements of the specific heat and the rate of thermal expansion, triaxial compression tests and unconfined creep tests were conducted using the specimens retrieved at the site of the sedimentary soft rock. The results demonstrate that the thermal and the mechanical property are dependent on the temperatures. At the higher temperature, the compressive strengths obtained from the triaxial compression tests and the times to failure in the unconfined creep tests decreased.