

原位置試験における加熱過程での 堆積軟岩の変形特性

高倉 望^{1*}・岡田 哲実²・澤田 昌孝²・池野谷 尚史¹・平野 公平³・谷 和夫⁴

¹東急建設株式会社 土木本部 土木技術部（〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14）

²一般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）

³株式会社セレス（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 （財）電力中央研究所内）

⁴（独）防災科学技術研究所（〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21）

*E-mail:takakura.nozomu@tokyu-cnst.co.jp

高レベル放射性廃棄物処分は、結晶質岩と堆積軟岩の2種類のサイトを候補地として計画が進められている。筆者らは、2種類のサイトのうち長期の変形特性が顕著で、かつ熱や水などの外部環境の変化の影響を受け易い堆積軟岩サイトを対象に原位置加熱実験を実施した。実験は、最大90℃の熱を段階的に岩盤へ負荷し、それぞれの段階での温度域で加熱加圧試験を実施した。実験の結果、定性的には载荷に伴い载荷範囲に近い測点のひずみが周方向で引張、半径方向で圧縮と妥当な傾向を示した。定量的には計測データと理論解とを比較した結果、周方向及び半径方向のひずみが理論解よりもやや小さめに得られた。なお、今回の実験では堆積軟岩の変形特性における明確な温度依存性は確認されなかった。

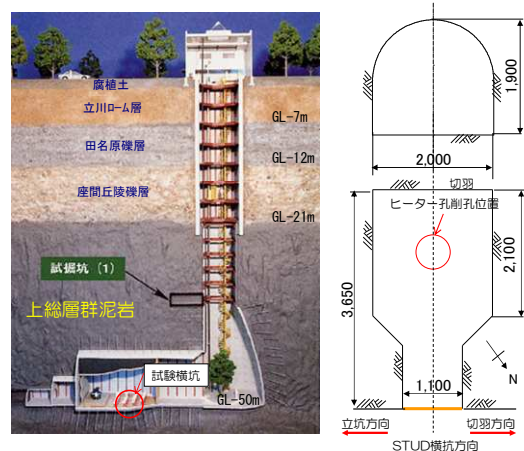
Key Words : radwaste disposal, thermal deformation characteristics, filed test, sedimentary soft rock

1. はじめに

透水性の低い堆積軟岩を対象とした放射性廃棄物の地層処分の研究が進められている。堆積軟岩は、結晶質岩に比べて長期の変形特性（クリープ特性）が顕著であり、また、熱や水など外部環境の変化に影響を受け易いことから、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、筆者らは、原位置での実験データを基に熱-水-応力連成解析コードの検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度50 mの地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分想定されている縦置き方式の約1/8サイズの空洞（以下、ヒーター孔と呼ぶ）を掘削し、最大加熱温度150℃までの原位置加熱実験を実施した¹⁾。

本論では、本研究で新たに開発した緩衝材の膨潤を模擬できる加圧機能を備えたヒーター（以下、PM-heaterと呼ぶ）を用いて加熱加圧試験を実施し、原位置で高温下での堆積軟岩の変形特性を評価したのでここに報告する。

実験場所は、深さ50 mの立坑および延長35 mの横坑からなる地下空間実験場である。実験場の概要を図-1に示す。原位置加熱実験場所は、GL-50 mの位置（図-1 a）に丸で示す）にある試験横坑（幅1.1~2.0 m、奥行き3.65 m、高さ1.9 mの馬蹄形横坑内（図-1 b）参照）である。対象とした地盤は、新第三紀鮮新世後期から更新世前期の上総層群の泥岩である。概ね均質な泥岩を主体としているが、未固結な砂層やスコリア層が幾層も介在している。また、破碎帯がN79W/81SE方向に確認されている。



a) 地下空間実験場全景

b) 試験横坑の構造

図-1 地下空間実験場の構造

2. 研究概要

(1) 実験サイト

既に得られている泥岩の力学特性は、湿潤単位体積重量で約20.0 kN/m³，一軸圧縮強さで約5.6 MPa，ヤング率（E₅₀）は平均で約0.3GPa，ひずみレベルが0.001 %以下の微小ひずみにおけるヤング率（E_{max}）で約3.2 GPaである。

(2) 全体研究の流れ

本研究の全体の流れを図-2に示す。まず、ボーリング調査を実施して、ヒーター孔削孔位置の周辺で調査から得られた試験範囲の地層構造やサンプリングしたコアの物理特性と力学特性の結果を基に事前に熱-水-応力連成解析によるFEM解析を実施し、埋設型のひずみセンサーの配置位置を決定した（図-3参照）。ここで、図-3 b)に示すように、ボーリング調査の結果から、ヒーター孔を斜めに輪切りにするように厚さ10～15 cm程度の砂層が介在していることが確認されている。

地盤中に埋設型のひずみセンサーを設置後、ヒーター孔（φ30×D60 cmの円筒空洞）を掘削し、常温状態で、6ヵ月間ヒーター孔内およびその周辺岩盤の挙動を計測した。その後、原位置加熱実験を開始した。

筆者らは、フェーズⅠとフェーズⅡで埋設したひずみセンサーのキャリブレーションを目的とし、加熱加圧試験を実施し、実験から得られるひずみデータの妥当性を示した²⁾。

本報では加熱過程で加圧試験が可能なフェーズⅢとフェーズⅣのなかから、早期に実施したフェーズⅢ（図-2の太文字で示す）の結果について述べる。

3. 加熱過程の加熱加圧試験方法

(1) 加熱装置

フェーズⅢのヒーターは、表-1に示すPM-heaterを用いた。図-4にPM-heaterのシステム図を、写真-1にPM-heaterの構成部品を示す。PM-heaterは、高さ64 cm，外径29.5

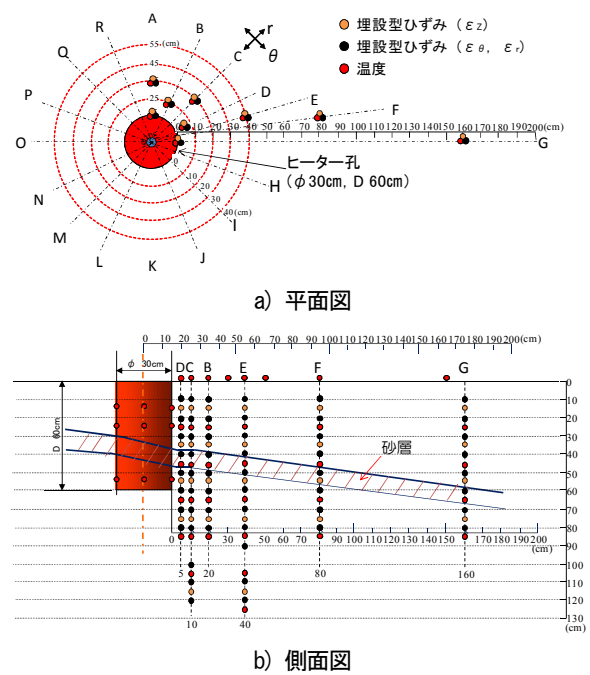
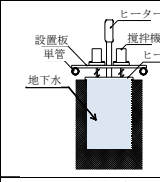
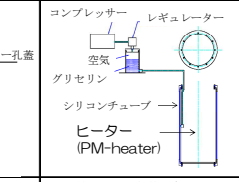


図-3 加熱加圧試験に関する計測項目と計測位置

表-1 研究フェーズの概要

	フェーズⅠ	フェーズⅡ	フェーズⅢ	フェーズⅣ
最大加熱温度	60℃	90℃	90℃	150℃
ヒーター構造				
孔壁周辺の水理特性	飽和状態	飽和状態	飽和状態	不飽和状態
孔壁周辺に作用する圧力	静水圧	静水圧	膨張圧(0.05MPa)	膨張圧(0.05MPa)
目標	余剰深度・TRU想定温度域の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定内での温度域の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定内での温度域の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定外での温度域の現象把握

cm，厚さ9 mmの鋼管の側面と底面の外側にラバーヒーターを貼り付け，側面のラバーヒーターの外側にシリコンチューブで覆い，ラバーヒーターとシリコンチューブの間にグリセリン（引火点：177℃）を注入して加圧することができる。鋼管の側面と底盤の内側には，熱効率を上げるために断熱材を貼り付けた。

(2) 加熱サイクル

フェーズⅢの加熱サイクルタイムを図-5に示す。加熱サイクルは，2日間かけて次の段階の温度帯に上昇させ，それらの温度帯で2日間維持し，熱源90℃のケースを実施した後に減熱した。加熱加圧試験を実施した温度帯は加熱前16℃，熱源60℃，そして熱源90℃の3回である。

(3) 測定システム

加熱加圧試験から得られるひずみと温度のデータは，スイッチボックス（東京測器製：SWC-50）で集積し，データロガー（東京測器製：TDS-601）で測定した。

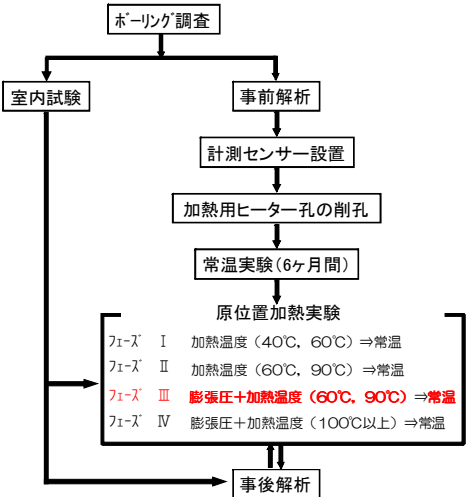


図-2 研究の流れ

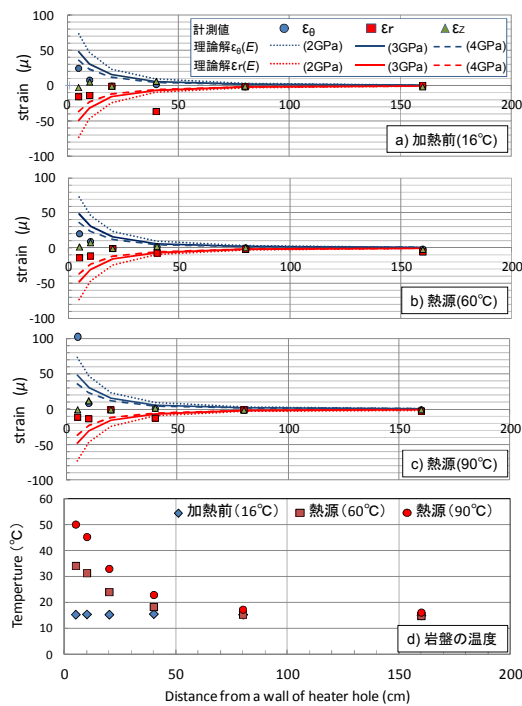


図-7 深度 30 cm での半径方向の分布図（フェーズⅢ）

測点で反応し、水平载荷に伴い ε_{θ} が引張、 ε_r が圧縮、鉛直方向がほぼ 0μ と妥当な傾向を示している。定量的には、前項で記載したとおり、熱源 90°C における深さ 30 cm の ε_{θ} が極端に大きなデータを示している以外は、 ε_r で -20μ 、 ε_{θ} で 30μ と理論解と比べて小さい。温度依存性については、 ε_r が熱源の温度上昇に伴い小さくなる傾向が視てとれるものの差として極めて小さく明確な違いは確認されなかった。

4. おわりに

高温下における計測技術の確立および原位置加熱実験で得られたデータを基に熱-水-応力連成解析コードの検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度 50 m の地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている縦置き方式の約 1/8 サイズの空洞を掘削し、

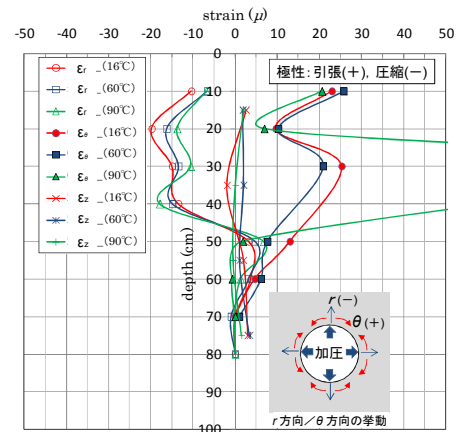


図-8 加圧 0.2 MPa における深度方向のひずみ分布

実験した。本論は、その研究の一環として加圧機能を備えたヒーターを用いて、加熱過程における堆積軟岩の変形特性を評価した。その結果、定性的には载荷範囲に近い測点が反応し、水平载荷に伴い ε_{θ} が引張、 ε_r が圧縮、鉛直方向がほぼ 0μ と妥当な傾向を示した。定量的には、計測データと理論解とを比較した結果、 ε_{θ} 、 ε_r はヤング率を大き目 ($E = 4 \text{ GPa}$) に想定して求めた理論解よりもやや小さめに得られた。要因として、ヒーター孔周辺の排水条件の影響や埋設型のひずみセンサーと岩盤との密着性の影響などが示唆される。また、今回実施した温度域では、堆積軟岩の変形特性に対する明確な温度依存性は確認されなかった。

今後も、原位置加熱実験で得られたデータを基に熱-水-応力連成解析コードの精度向上を目指していく。

参考文献

- 1) 池野谷尚史, ほか 5 名: 高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験 (フェーズⅢ), 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.197-201, 2012.
- 2) 高倉望, ほか 5 名: 原位置試験による高温の温度履歴を受けた堆積軟岩の変形特性, 第 12 回岩の国内力学シンポジウム, pp.555-558, 2008.
- 3) 澤田昌孝, ほか 5 名: 堆積軟岩を対象とした原位置加熱実験の熱-水-応力連成解析による事前検討, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.283-288, 2008.

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF THE SEDIMENTARY SOFT ROCK UNDER A HEATING PROCESS IN THE FIELD TEST

Nozomu TAKAKURA, Tetsuji OKADA, Masataka SAWADA,
Takafumi IKENOYA, Kouhei HIRANO and Kazuo TANI

The purpose of this experiment is to examine the deformation characteristics of the sedimentary soft rocks under a heating process in a field test. Therefore, the pressuremeter test was carried out at different temperatures. The result did not check the clear temperature dependency over the deformation characteristic of sedimentary soft rocks in the range of $16 \sim 90^{\circ}\text{C}$. As a result of heating pressurization examination, I was able to judge it to read a valid tendency qualitatively, but was provided almost in comparison with a theory solution into small value quantitatively.