

堆積軟岩の原位置加熱実験（フェーズⅡ）

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

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

²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国立大学法人横浜国立大学大学院 工学研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）

*E-mail: ikenoya.takafumi@tokyu-cnst.co.jp

筆者らは、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を目指し、原位置での実験データをもとに熱-水-応力の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50m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処分孔堅置き方式の約1/8モデルの空洞を掘削し、原位置加熱実験を実施している。

実験では、想定されている緩衝材の制限温度を基に90℃を最高温度とし、段階的に温度を上昇・下降させながら約3ヶ月間に亘り、熱源周辺の岩盤の温度とひずみを計測した。本論ではこのときの熱源周辺の温度と岩盤ひずみの影響範囲および経時変化について報告する。

Key Words : radioactive waste disposal, thermal characteristics, creep, in-situ test, rock mass, soft rock

1. はじめに

一般に割れ目の少なく透水性の低い堆積軟岩は、エネルギー貯蔵や廃棄物処分等の地下利用の対象として注目されている。しかし、堆積軟岩は結晶質岩と比較して長期の変形特性が顕著であり、熱や水等の外部環境の変化に影響を受け易い。そこで筆者らは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を目指し、堆積軟岩中に構築した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処分孔堅置き方式の約1/8モデルの空洞を掘削し、原位置加熱実験を実施し¹⁾²⁾、原位置での計測技術の確立および熱-水-応力連成解析コード³⁾の検証を行った。

本稿では、最高90℃まで加熱した時の熱源周辺岩盤の温度と岩盤ひずみの影響範囲および経時変化について考察する。

2. 実験概要

(1) 実験サイトの概要

実験を実施した地下空間実験場は、神奈川県相模原市郊外の田名地区に位置し、相模川から約500m離れた標高約90mの河岸段丘にある。

周辺の地層構造は、G.L.-7mまではローム層であり、

その下の層厚約5mの田名原礫層と層厚約9mの座間丘陵礫層およびそれ以深の上総層群泥岩層（堆積軟岩）で構成されている。泥岩層の物性値は、湿潤単位体積重量が約20.0kN/m³、一軸圧縮強さが約5.6MPa、ヤング率（ E_{50} ）が約300MPa、ひずみレベルが0.001%以下のヤング率（ E_{max} ）で約3,200MPa、変水位透水試験で得られた透水係数が約 1.0×10^{-8} m/s、有効間隙率が約35%等である⁴⁾。また、泥岩層は概ね均質であるが未固結な砂層やスコリ



図-1 地下空間実験場

ア層が水平方向に幾層も介在するなど特異な水みち特性を有している。

原位置加熱実験は、G.L.-50mの横坑内にある幅1.1~2.0m、奥行き3.65m、高さ1.9mの馬蹄形横坑（多目的実験室）において実施した。

(2) 原位置加熱実験の概要

多目的実験室の底盤に直径300mm、深さ600mmのヒーター孔を掘削し、孔内に満たした地下水を投込み式ヒーターによって設定温度まで加熱した。図-2にヒーター孔の構造を示す。ヒーター孔内は温度が均一となるよう、2台の攪拌機を設置した。また、実験室の底盤面は発泡スチロールで覆う事で断熱境界を模擬した。

実験は表-1に示す様に、対象とする現象によって3段階のフェーズに分けて実施した。本稿では、フェーズIIについて述べる。

設定温度および各温度の保持期間を表-2に示す。高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の制限温度を基に、最高温度を90℃とした。

ヒーター孔の周辺には深さ1.0~1.5mの計測孔を配置し、埋設型ひずみセンサ等を用いて、ひずみ、温度、間隙水圧等の計測を行った。また、ヒーター孔壁および多目的実験室底盤にも計測センサを配置した。センサの配置図を図-3に示す。これらのセンサの配置は事前解析⁹⁾により得られた温度分布およびひずみ分布を基に設定した。

(3) ひずみゲージの温度補正

実験中の岩盤内部のひずみを計測するため、計測孔から採取したボーリングコアにひずみゲージを貼付した後、再度計測孔に埋戻す方法⁹⁾を用いている。これによる計測値は、温度変化により影響を受けるため、温度補正を行った⁹⁾。補正項目を下記に示す。なお、埋戻し直後であれば、埋戻し材の硬化に伴う変形等⁹⁾も考慮する必要があるが、埋戻してから数年が経過していることから、これらの影響は収束していると判断し、ここでは考慮しない。

a) データロガーのゲージ率補正

ひずみ計測に使用したデータロガーはゲージ率2.00として初期設定されているため、式(1)でゲージ率の補正を行う。

$$\varepsilon_0 = \varepsilon \times 2.00 / K \quad (1)$$

ここで、 ε_0 ：補正後のひずみ、 ε ：計測したひずみ、 K ：真のゲージ率。

b) リード線の感度補正

ひずみゲージの抵抗値はリード線の抵抗値と長さにより変化し、感度低下が生じるため、式(2)によりリード線の感度補正を行う。

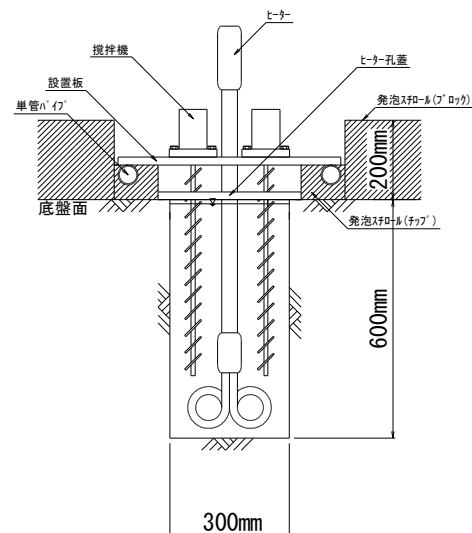


図-2 ヒーター孔の構造

表-1 実験フェーズ

	最高温度	目的
フェーズI	60℃	余裕深度、TRU想定温度域での現象把握
フェーズII	90℃	高レベル放射性廃棄物想定温度域での現象把握
フェーズIII	150℃	想定温度を超えた範囲での現象把握

表-2 設定温度および各温度の保持期間

過程	温度	期間
加熱	40℃	1週間
	60℃	1週間
	70℃	1ヶ月間
	90℃	1ヶ月間
減熱	70℃	1週間
	60℃	1週間
	40℃	1週間

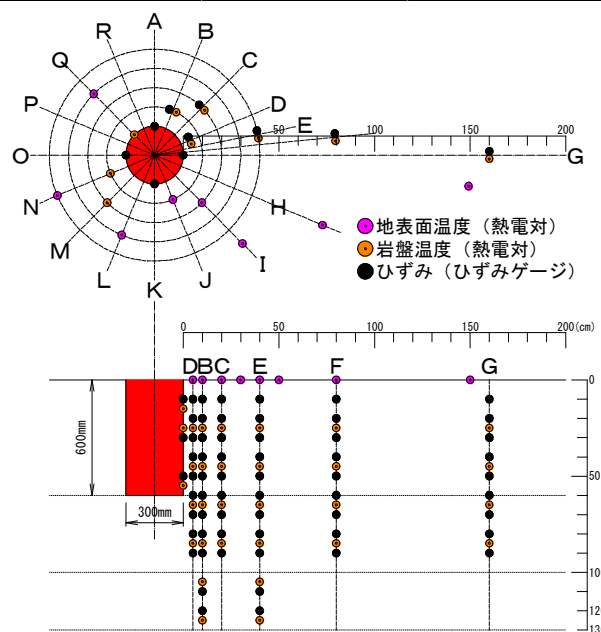


図-3 計測センサの配置図

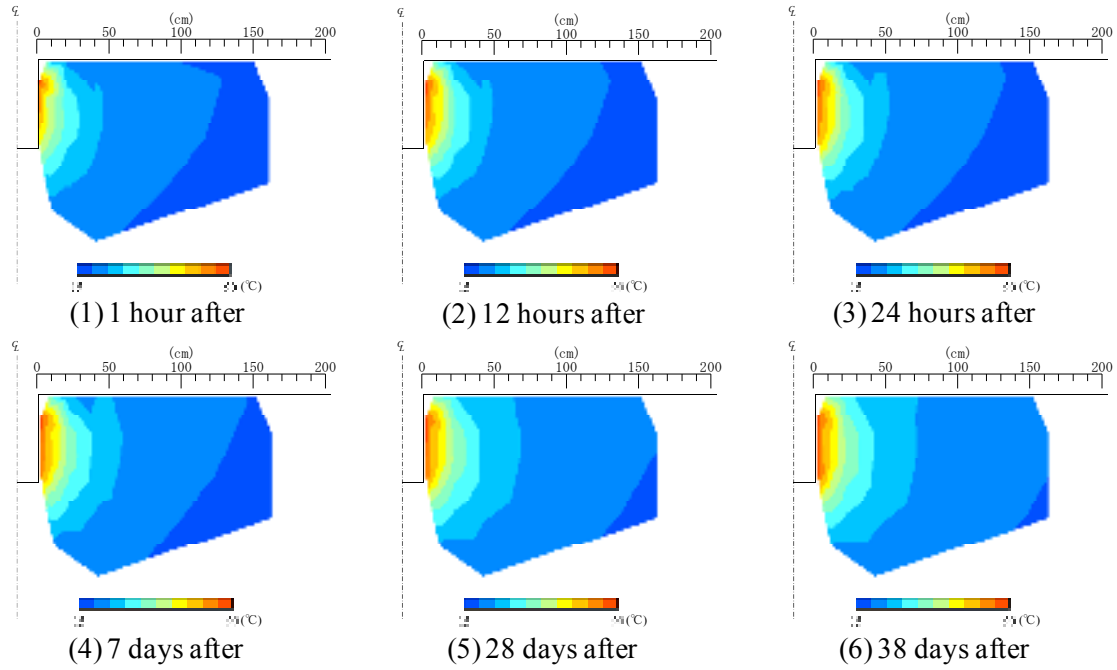


図-4 90℃加熱時の岩盤の温度コンタ図¹⁰⁾

$$K_0 = K \times R / \{R + (r \times L/2)\} \quad (2)$$

ここで、 K_0 ：リード線の感度補正後のゲージ率、 R ：使用したひずみゲージの抵抗値 (Ω)、 r ：リード線1m当りの往復抵抗値 (Ω/m)、 L ：リード線長さ。

c) 温度変化によるゲージ率補正

ひずみゲージは計測中の温度変化に伴い、ゲージ率が変化する。これにより見かけのひずみが発生するので式(3)により温度変化によるゲージ率補正を行う。

$$K_T = K \times (1 + C_k \times \Delta T_{ck} / 1000) \quad (3)$$

ここで、 K_T ：温度変化の補正後のゲージ率、 C_k ：ゲージ率の温度係数 ($\%/10^\circ\text{C}$)、 ΔT_{ck} ：熱出力が0となる20℃からの温度増分 ($^\circ\text{C}$)。

式(2)、式(3)の補正後のゲージ率を用いてひずみ補正を行う。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \times K_0 / K_T \quad (4)$$

d) 熱出力の補正

ひずみゲージを貼付した材料に、外力を加えずに熱のみを加えた時に出力されるひずみを熱出力 ε_{app} と呼ぶ。熱出力は原理的に式(5)で表される。

$$\varepsilon_{app} = \alpha / K \times \Delta T + \beta_s \times \Delta T - \beta_g \times \Delta T \quad (5)$$

ここで、 α ：ゲージ受感部の抵抗温度係数 ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)、 β_s ：ゲージを貼付した材料の線膨張係数 ($\mu^\circ\text{C}$)、 β_g ：ゲージの線膨張係数 ($\mu^\circ\text{C}$)、 ΔT ：温度増分 ($^\circ\text{C}$)。

式(5)の右辺第1項は温度変化によるゲージ受感部の抵抗値変化に伴う見かけのひずみ、第2項はゲージを貼付

した材料の熱膨張ひずみ、第3項はゲージ自体の熱膨張ひずみである。したがって、第2項以外は見かけのひずみであり、これを計測結果から除く必要がある。通常、ひずみゲージには温度補償された線膨張係数に対応する標準試料（例えばSS400）の熱出力のデータシートが付属されており、 ε_{app} は温度の関数として与えられている。また、標準試料の線膨張係数 β_s は既知（例えば $\beta_{s,SS400}=11.8\mu^\circ\text{C}$ ）である。したがって、式(5)で示されるひずみゲージ固有の見かけのひずみ（右辺第1項と第3項）を計測したひずみから差引くことにより、式(6)の通り熱出力の補正ができる。ただし、 ε_{app} についても式(1)～(4)の補正を行う必要がある。

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= \varepsilon_i - (\alpha / K \times \Delta T - \beta_g \times \Delta T) \\ &= \varepsilon_i - (\varepsilon_{app} - \beta_s \times \Delta T) \end{aligned} \quad (6)$$

e) 温度補正まとめ

以上より、式(6)に式(1)～(5)を代入すると、補正ひずみ ε_c は下式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= \varepsilon \times 2.00 \times R \times K^{-1} \times \{R + (R \times l/2)\}^{-1} \\ &\quad \times \{1 + C_k \times \Delta T_{ck} / 1000\}^{-1} - (\varepsilon_{app} - \beta_s \times \Delta T) \end{aligned} \quad (7)$$

3. 実験結果

(1) 温度計測結果

設定温度90℃における岩盤の温度コンタ図を図-4に示

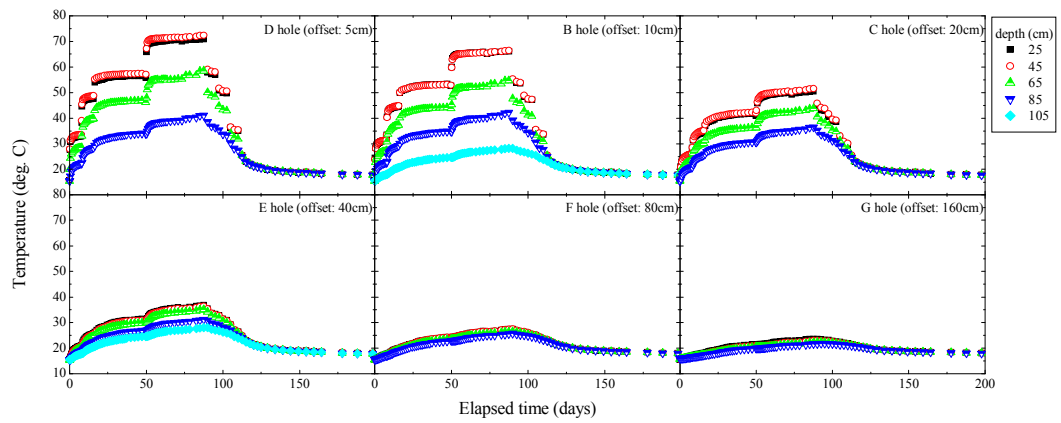


図-5 岩盤内部の温度の経時変化

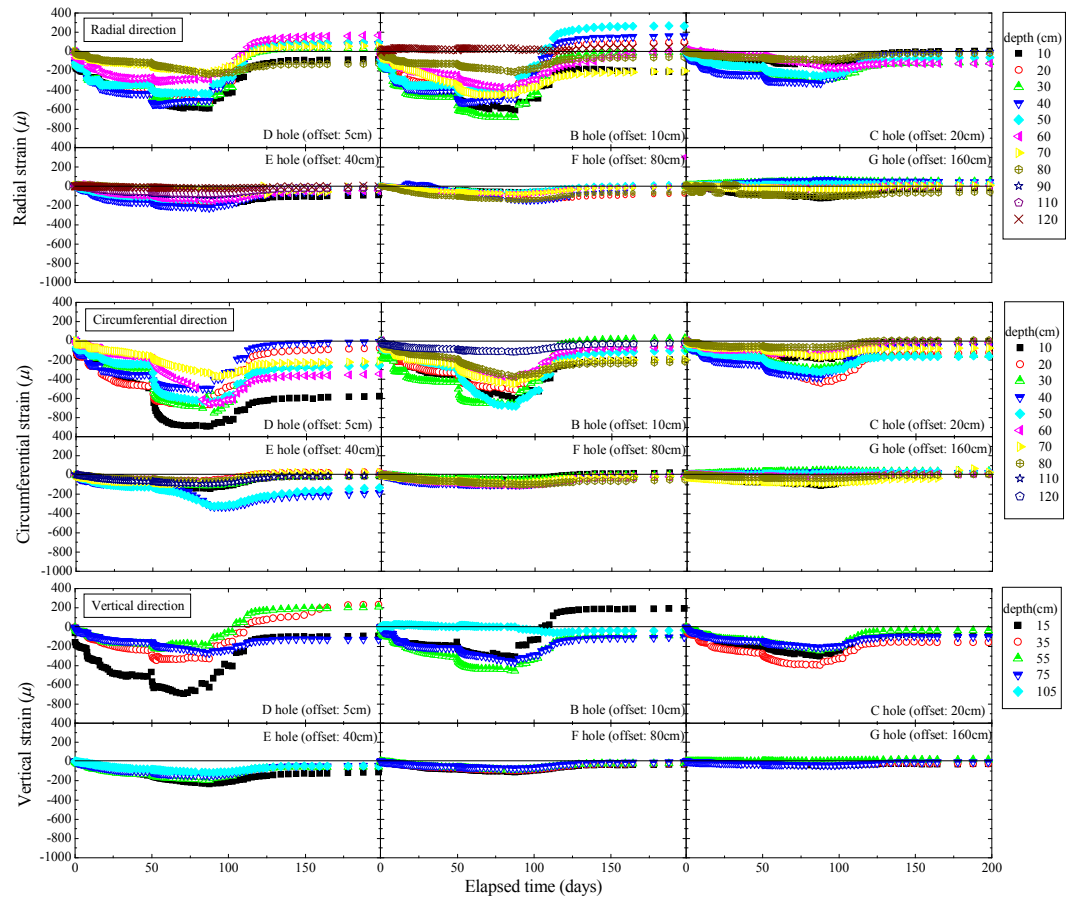


図-6 岩盤ひずみの経時変化（上：半径方向，中：周方向，下：鉛直方向）

す。熱源であるヒーター孔付近が最も高温で、離れるにつれて温度が低くなっていくが、最終的には熱源から160cm離れた位置においても最大で7~8℃の温度上昇を確認した。同位置における事前解析での温度上昇量の予測値は5℃以上⁵⁾であり、同程度の値である。また、温度コンタが地表面に対して直交していないことから、実験室底盤面の断熱条件は完全には保持できておらず、実験室内の気温に影響されていることが推測される。

次に、図-5に示す岩盤内部の温度の経時変化から、熱源の温度変化に伴って周辺岩盤の温度が変化する様子を明確に確認できる。ヒーター孔底より浅い深度-25cmおよび-45cmはほぼ同じ傾向を示し、熱源を40℃加熱した

時の最もヒーター孔に近いD孔（離間距離5cm）では岩盤の温度は5~7日程度で約33℃（温度上昇量は約17℃）に収束し、フェーズIにおいて40℃加熱した結果²⁾と同等である。また、90℃加熱時は4日程度で約72℃（温度上昇量は約54℃）に収束した。一方、ヒーター孔底盤面より深い深度-65cmおよび-85cmでは、90℃加熱時ではヒーター孔底盤深度より浅い箇所と比較して最大温度がそれぞれ59℃、41℃と低く、温度が収束する時間も5~6日間と長い。また、減熱時も加熱時と同様に熱源の温度変化に追従して温度が減少し、各計測点で温度が収束に要する時間は、温度上昇量が大きいほど短い傾向にある。最終的には実験開始時の岩盤温度+2~3℃に収束している

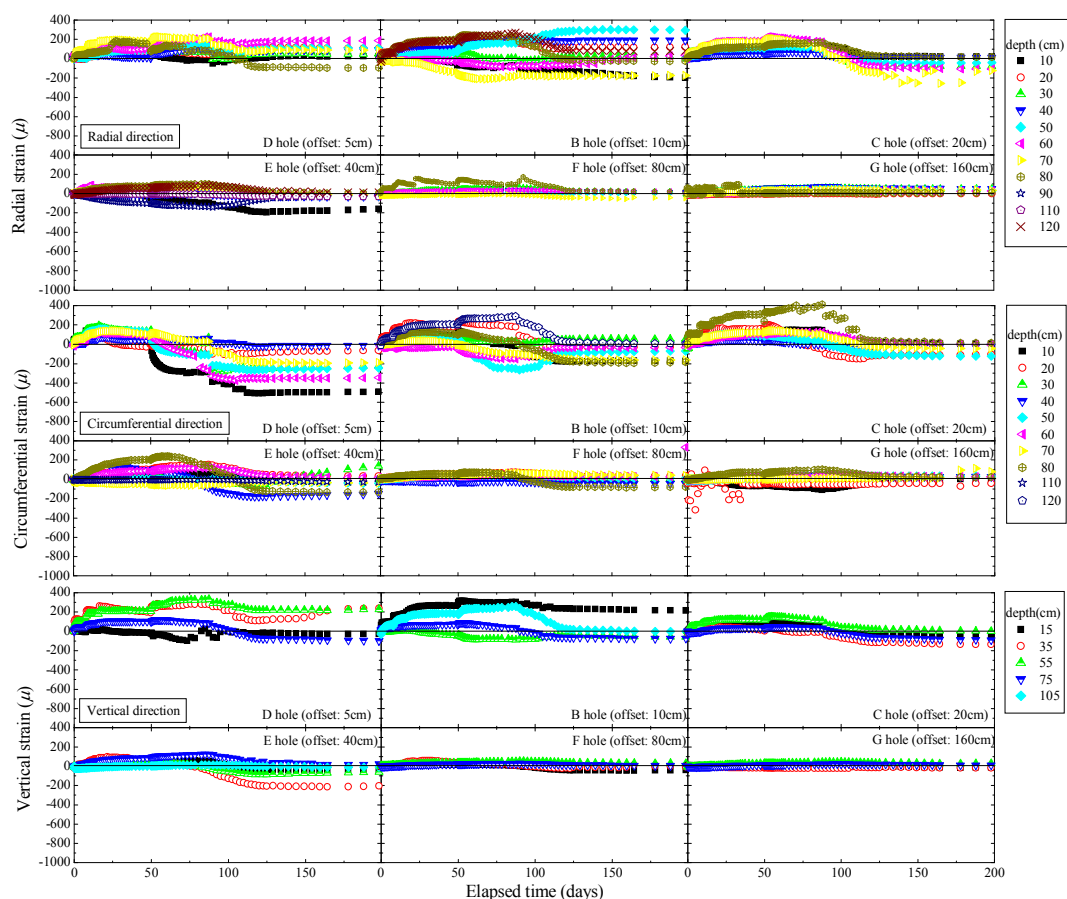


図-7 熱膨張ひずみを除いた岩盤ひずみの経時変化（上：半径方向，中：周方向，下：鉛直方向）

が、この違いは実験を開始したのが冬季であるのに対し、終了したのが夏季であることによると考えられる。

(2) ひずみ計測結果

岩盤ひずみの経時変化を図-6に示す。収縮を正、伸長を負としている。加熱により、全ての方向で伸長ひずみが生じており、ひずみの変化と岩盤温度の変化のタイミングは一致している。最もヒーター孔に近いD孔（離間距離5cm）では最大 600μ 程度のひずみが生じており、泥岩の線膨張係数を $10\mu/\text{C}$ とすると、温度上昇量が約 54C であるから、熱膨張によるひずみは約 540μ と推測される。したがって、発生するひずみの大部分は熱膨張によるものと考えられる。また、ヒーター孔からの離隔が大きくなったり、計測個所が深くなったりして熱源からの距離が遠くなるにしたがって、生じるひずみが小さくなる事も温度変化の傾向と同様である。しかし、実験終了時のひずみは温度とは異なり、実験開始時の値に戻らずにひずみが残留するものが見られる。この残留ひずみは、半径方向および鉛直方向では多少のばらつきは見られるが主として収縮側、周方向では伸長側のみである。また、ヒーター孔からの離隔が小さいほど、残留ひずみは大きくなる傾向にある。熱によって岩盤が膨張することにより周囲の岩盤に生じた応力が長期的に作用した結果、クリープ変形を生じた可能性が考えられる。

次に、図-6に示した岩盤ひずみから、線膨張係数より推定される熱膨張ひずみを除いた岩盤ひずみの経時変化を図-7に示す。熱の影響を差し引いているため、この図から確認されるひずみはその他の作用によるひずみであり、熱源からの距離が近いほどひずみは大きくなる傾向にある。全般的に加熱時には収縮する傾向にあり、加熱によって膨張した周辺の岩盤から圧縮応力を受けるためと推測される。熱源に近いほど岩盤温度は高く、熱による膨張量も大きくなるため、熱源に近いほどひずみが大きくなる事と調和的である。

半径方向については、概ね収縮方向にひずみを生じており、加熱に伴い膨張した周辺岩盤から圧縮応力を受けたことによるとと思われる。最もヒーター孔に近いD孔（離間距離5cm）よりもB孔（離間距離10cm）の方がひずみが大きい傾向にあるが、ヒーター孔壁は拘束されていないことから、孔壁直近では半径方向応力は生じず、やや離れた位置の方が影響を受けるものと推測される。残留ひずみは概ね収縮方向で、圧縮応力の長期作用によるクリープ的挙動を示しているものと思われるが、C孔（離間距離20cm）では伸長方向にひずみが残留しており、単純にクリープだけの影響とは言えない。

周方向については、加熱初期には収縮方向にひずみを生じており、半径方向と同様に周辺岩盤の膨張による圧縮応力の作用と考えられる。また、事前解析⁹等から、

ヒーター孔は中心に向かって押出す方向に変形を生じるため、このことから周方向応力としては圧縮応力と考えられる。しかし、多数の箇所では最高温度に達する前に伸長方向に転じており、ヒーター孔の径が拡大する方向に変形した様子を示している。すなわち、周方向に圧縮応力が作用する範囲は孔壁から厚さ数cm程度のリング状の範囲であり、このリングよりも外側では岩盤の熱膨張により径が拡大する方向に変形していると考えられる。フェーズIにおける実験からも孔壁のみ周方向の圧縮ひずみが観察されており、同様のことが推測される。加熱初期に圧縮ひずみが生じたのは、リングが十分に形成される以前であったためと思われる。

鉛直方向については、実験室底盤面が拘束されていないことから、特に底盤面近くではそれほど大きな圧縮応力は作用せず、深部ではポアソン効果によりある程度の圧縮応力が生じると考えられる。D孔においては、概ねそのような傾向を示しているものの、B孔では底盤面近くにおいて最大の圧縮ひずみを生じている。半径方向と変わらない大きさの残留ひずみが収縮側に生じている。介在している砂層の影響等、他にもひずみを生じる原因があると思われる、今後の詳細な検討が必要である。

4. まとめ

堆積軟岩中に構築した深度50m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処分孔設置方式の約1/8モデルの空洞を掘削し、最高温度90℃の原位置加熱実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 90℃で加熱した場合、熱源から5cmの位置で最大70℃以上、160cm離れた位置でも最大約8℃の温度上昇が確認された。
- ② 加熱により、全域に亘って伸長側のひずみが生じた。
- ③ 加熱停止後もひずみは残留し、クリープ変形を生じ

た可能性がある。

参考文献

- 1) 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, pp.263-266, 2007.
- 2) 池野谷尚史, 岡田哲実, 高倉望, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫: 高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験(フェーズI), 第37回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.289-294, 2008.
- 3) 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨: 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—, 電力中央研究所報告, N05028, 2006.
- 4) 越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫: 立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.143-152, 1993.
- 5) 澤田昌孝, 竹田佳代, 谷和夫, 岡田哲実, 高倉望, 池野谷尚史: 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.
- 6) 岡田哲実, 澤田昌孝, 平賀健史, 平野公平, 谷和夫: 堆積軟岩の埋設型ひずみ計測方法の高度化, 土木学会第62回年次学術講演会, pp.395-396, 2007.
- 7) 高倉望, 池野谷尚史, 岡田哲実, 澤田昌孝, 平賀健史, 平野公平, 谷和夫: ボーリングコアを用いた岩盤中のひずみ計測方法の適用性について, 土木学会第62回年次学術講演会, pp.457-458, 2007.
- 8) 平野公平, 岡田哲実, 澤田昌孝, 高倉望, 池野谷尚史, 谷和夫, 田中悠一: 温度が変化する条件下における岩盤内部のひずみ計測結果の補正, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.
- 9) 池野谷尚史, 高倉望, 岡田哲実, 澤田昌孝, 平野公平, 平賀健史, 谷和夫: 堆積軟岩空洞における処分孔設置方式を模擬した空洞の掘削, 土木学会第62回年次学術講演会, pp.275-276, 2007.
- 10) 池野谷尚史, 高倉望, 岡田哲実, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫: 原位置加熱実験による堆積軟岩の熱特性(フェーズII), 土木学会第64回年次学術講演会, pp.249-250, 2009.

IN-SITU HEATING TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCK (PHASE II)

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

Various researches have been conducted on high level radioactive waste geological disposal in sedimentary soft rocks. It is noted that the long-term mechanical behaviors of sedimentary soft rocks can be affected by various environmental factors such as temperatures or hydraulic conditions.

Therefore, in-situ heater test was conducted in an underground cavern at a depth of 50m for the purpose of improving thermo-hydro-mechanical coupled analysis code.

This report presents the test result demonstrating the changes of temperature and strain distributions with time at the elevated temperature of the heater up to 90℃.