

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

澤田 昌孝^{1*}・竹田 佳代²・谷 和夫²・岡田 哲実¹・高倉 望³・池野谷 尚史³

¹財団法人電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子1646）

²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）

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 東京都渋谷区渋谷1-16-14）

*E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

堆積軟岩を対象とした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。しかしながら、堆積軟岩は、硬岩に比べ長期の変形特性（クリープ特性）が顕著であり、熱や水などの外部環境の変化に影響を受けやすい。そこで、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、原位置でのヒーター試験を計画した。本報では、ヒーター試験で生じる堆積軟岩内の温度、ひずみ、水圧などの変動を熱-水-応力連成解析およびクリープ解析から予測した。90℃で加熱した場合、5℃以上の温度上昇が発生する領域はヒーター孔から1.5m以上の範囲に及び、加熱による熱膨張あるいはクリープにより100μオーダーのひずみの変動が予想される。

Key Words : *sedimentary soft rock, coupled analysis, in-situ heater test, thermal expansion, creep*

1. はじめに

堆積軟岩は一般に割れ目が少なく、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。しかしながら、堆積軟岩は長期の変形特性（クリープ特性）が顕著であり、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、著者らは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（最高で約90℃）を負荷する原位置加熱実験¹⁾を実施し、原位置での計測技術の検討と熱-水-応力連成解析コードの高度化を行うこととした。

原位置加熱実験を計画するにあたり、熱-水-応力連成解析により、温度、ひずみ、間隙水圧などの変化を予測するとともに、その予測結果に基づき、計測の項目・配置を決定した。本報は、その解析による加熱実験時の挙動予測について報告するものである。

2. 地下空間実験場周辺の地質特性

解析の対象となる地下空間実験場は、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はなれ

た標高約90mの河岸段丘地帯にある。

地下空間実験場周辺の地層構造は、GL-7mまではローム層であり、その下の層厚5mの田名原礫層と層厚9mの座間丘陵礫層、およびそれ以深の上総層群の泥岩層（堆積軟岩）で構成されている。泥岩層の基本物性は、湿潤単位体積重量が約20.0kN/m³、一軸圧縮強さは約5.6MPa、一軸圧縮試験で得られたヤング率は300～3500MPa、変水位透水試験で得られた透水係数は約1.0×10⁻⁸m/s、有効間隙率は約35%である。また、泥岩層は、未固結な砂層やスコリ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GL-50mに位置する地下実験室で実施することとした。

3. 原位置加熱実験の挙動予測解析

(1) 原位置加熱実験の概要

まず、地下実験室の底盤から直径300mm、深さ600mmのヒーター孔を掘削する。その後、ヒーター孔に水が溜まった状態でその水を最高90℃まで加熱する。ヒーター孔の周辺には計測孔を配置し、コアを利用した埋設型ひずみセンサ¹⁾等を用いて、ひずみ、温度、間隙水圧等の計測を実施する。図-1に計測用センサの配置図を示す。

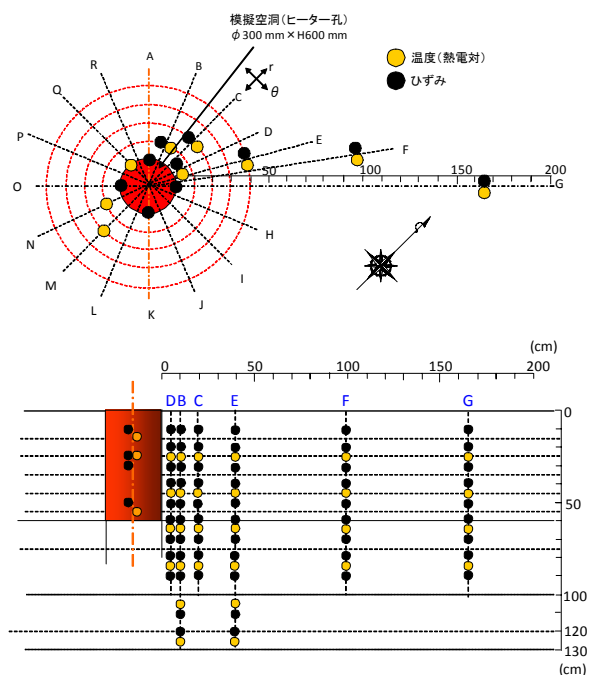


図-1 ヒーター孔および各種計測センサの配置

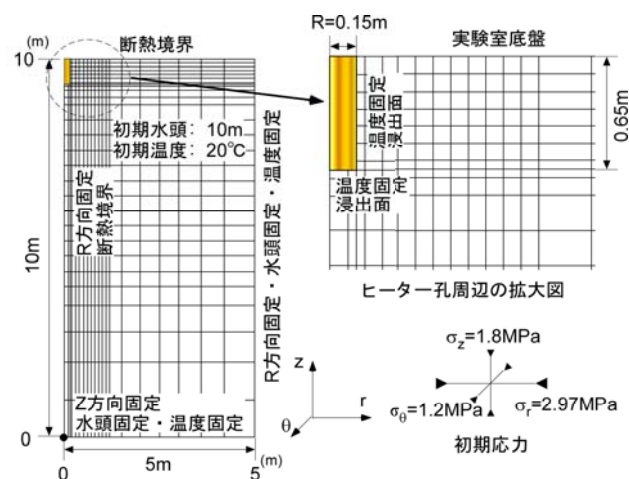


図-2 有限要素メッシュと境界条件

これらのセンサの配置は後述する熱-水-応力連成解析により得られた温度分布およびひずみ分布を基に決定した。

(2) 熱-水-応力連成解析

ここで熱-水-応力連成解析とは、熱の移動、地下水の移動、地盤の力学挙動の3種類の物理現象に対して、それらの相互作用を考慮して解く手法のことである。通常、地下水の連続式、エネルギーの保存則、力の釣り合い式と各種構成則から支配方程式を導き、温度、間隙水圧、変位を未知数として解くものである。土木分野では、水-応力連成による地盤の圧密解析が古くから行われている。最近では、高レベル放射性廃棄物に係わる問題に対して、廃棄体を定置し、処分孔を埋め戻したあとの長期にわたる現象を予測した解析例が報告されている²⁾。

著者らは、熱や水の影響を受ける地下施設の長期的な

表-1 入力定数一覧 (熱-水-応力連成解析)

入力定数	単位	値
単位体積重量	kN/m ³	20
ヤング率	MPa	1400
ポアソン比	-	0.3
初期間隙比	-	0.6
固有透過度	m ²	1.0 x 10 ⁻¹⁵
軟岩の比熱	J/kg K	740
水の比熱	J/kg K	4200
軟岩の熱伝導率	W/m K	3.10
水の熱伝導率	W/m K	0.70
軟岩の線膨張係数	1/K	1.0 x 10 ⁻⁵
水の熱膨張率	1/K	5.0 x 10 ⁻⁴
水の圧縮係数	1/MPa	5.0 x 10 ⁻⁴

挙動予測を実施するための熱-水-応力連成解析コード LOSTUFを開発した^{3), 4)}。この解析コードは以下の特徴を有する。

- 解析手法はFEMである。
- 線形弾性、非線形弾性、軟岩のクリープモデル³⁾、粘土の粘弾塑性 (関口-太田モデル)、カムクレイモデル、緩衝材の膨潤モデル⁴⁾など多くの構成モデルが適用できる。
- 掘削/盛土を模擬できる。

(3) 解析モデル

解析では、直径30cm、深さ65cmのヒーター孔の掘削とヒーター孔に水が溜まった状態で90℃まで加熱した場合を想定した。解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を図-2に示す。解析は軸対称モデルで行い、解析領域は半径方向 (r方向) に5m、深度方向 (z方向) に10mとした。ヒーター孔掘削前の地下水位は、地下実験室の底盤に設置している水中ポンプの影響でほぼ底盤付近 (GL-50m) で一定している。地下実験室内は温度18℃、湿度90%でほぼ一定している。ただし、加熱試験中は断熱のためヒーター孔周辺の底盤を厚さ20cmの発泡スチロールで覆う予定である。

以上から、軸対称線はr方向の変位固定と断熱境界、側面はr方向の変位、水頭、温度を固定、上面は断熱境界、下面はz方向の変位、水頭、温度を固定とした。初期水頭は、実験室底盤を地下水面とする静水圧状態、岩盤の初期温度は20℃、岩盤の初期応力は同GLでの地圧測定に基づき、 $\sigma_r = 2.97 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_\theta = 1.2 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_z = 1.8 \text{ MPa}$ とした。地下実験室底盤付近では、掘削開放や運用期間中のストレスリラクゼーションにより応力状態が変化していると考えられるが、ここでは、全解析領域に同じ初期応力を与えた。解析においては、まずヒーター孔の掘削を行い、その後にヒーター孔壁の境界条件を、温度90℃、変位フリー、浸出面に変更する。

(4) 入力定数

表-1に解析に用いた入力定数を示す。ここで応力と浸透に関する入力定数および線膨張係数は、当該サイトで得られた物性^{5,6)}を用いた。熱伝導に関する入力定数は、文献⁷⁾に記載されている軟岩の値を参考にした。

(5) 熱-水-応力連成解析の結果

図-3に加熱開始から1週間後および4週間後の温度コンター図を示す。温度コンターはヒーター孔から同心円状に形成され、初期温度から5℃以上上昇する領域は、ヒーター壁面から1週間後で1.2m、4週間後で1.8mに広がる。

掘削直後、加熱してから1週間後の変形の様子を図-4、図-5にそれぞれ示す。変位は微小であるため、100倍に拡大して表示した。掘削時のヒーター孔壁の変位はr方向への膨らみ出しが主で、最も変位の大きいヒーター孔最上部で0.4mmである。一方、加熱後は、鉛直上向き

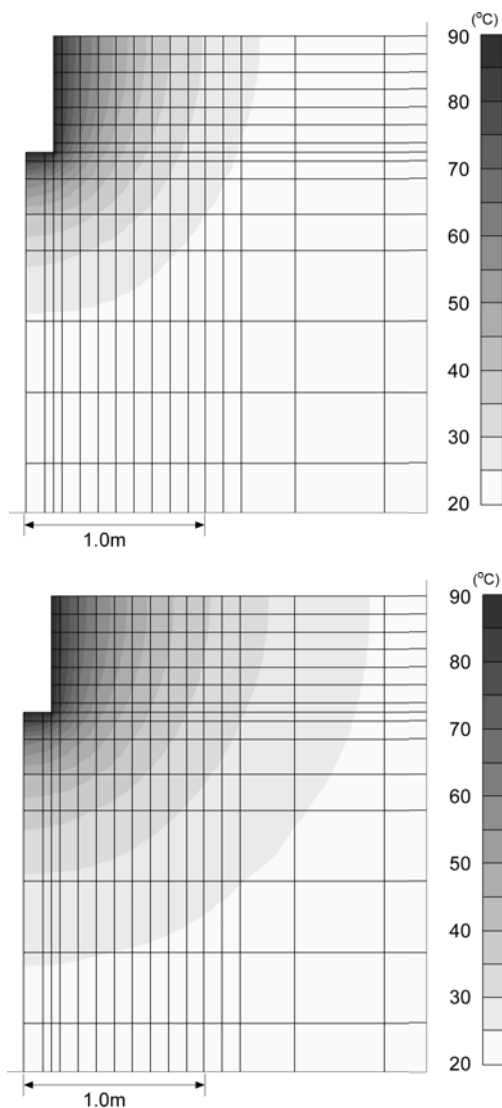


図-3 温度分布コンター図（上：加熱開始から1週間、下：加熱開始から4週間）

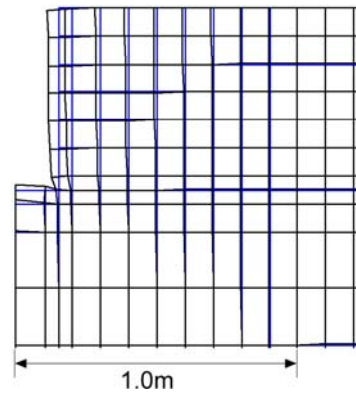


図-4 掘削直後の変形（変位を100倍に拡大）

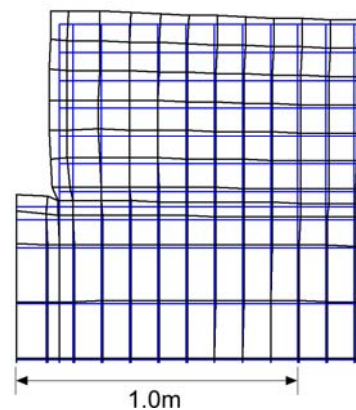


図-5 加熱開始から1週間後の変形（変位を100倍に拡大）

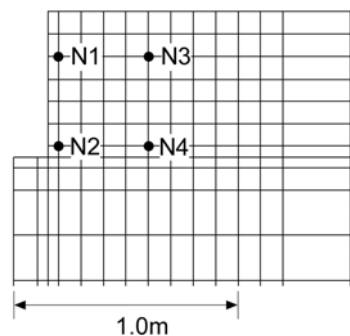


図-6 結果出力に用いた節点

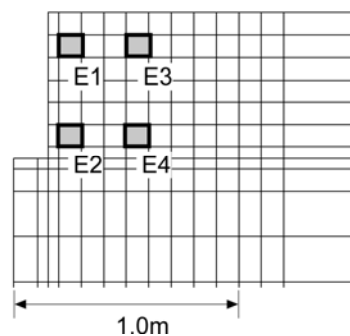


図-7 結果出力に用いた要素

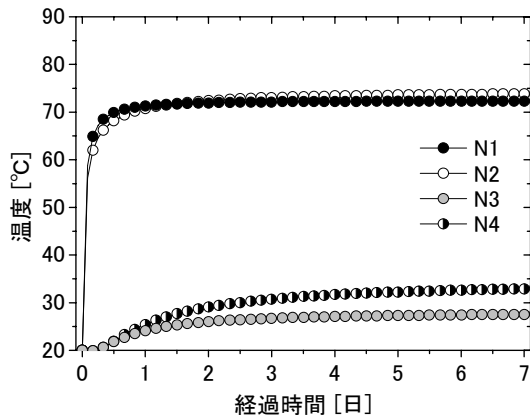


図-8 温度の経時変化

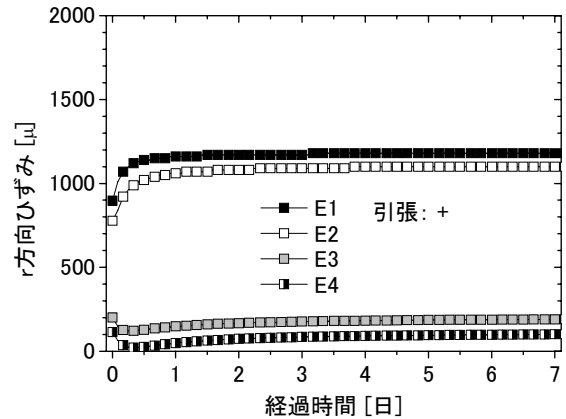


図-10 r方向ひずみの経時変化

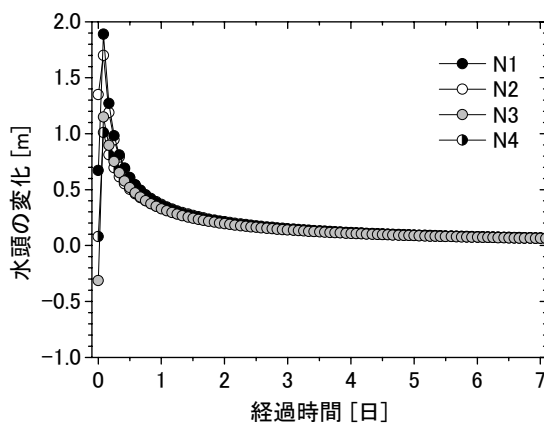


図-9 水頭の経時変化

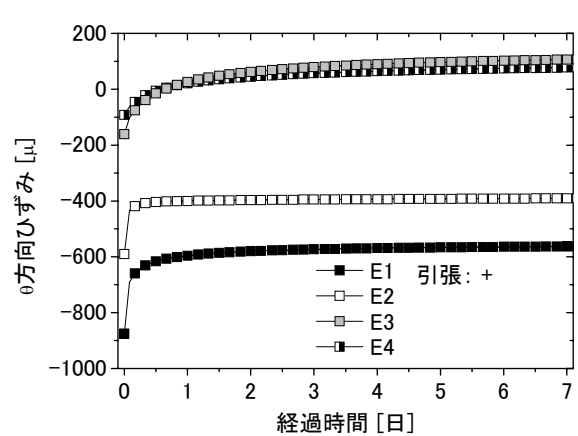


図-11 θ方向ひずみの経時変化

の変位が卓越し、ヒーター孔最上部で0.5mmの鉛直変位が発生する。一方、加熱時にはr方向の変位は極めて微小であり、わずかにヒーター孔が広がる方向に変位が生じる。

次に温度、水頭、ひずみ（引張を正）の経時変化を示す。節点値（温度、間隙水圧）の出力位置、要素値（ひずみ）の出力位置をそれぞれ図-6、図-7に示す。

温度の経時変化を図-8に示す。最初のプロットが掘削直後の状態である（以下、全ての経時変化グラフに適用）。ヒーター孔に近いN1、N2（離隔5cm）では、温度は急激に上昇し収束も早い。一方、離れた位置にあるN3、N4（離隔45cm）では、温度は緩やかに上昇する。水頭の経時変化を図-9に示す。掘削により、-0.5m～1.5mの変動が見られ、加熱直後には一様に上昇する。その後、この上昇分は消散し、初期水頭に収束する。

図-10～図-12にヒーター孔近傍のr方向、θ方向、z方向のひずみの経時変化をそれぞれ示す。掘削により、r方向には伸び、θ方向には縮むようにひずみが発生する。z方向にもわずかに縮む方向のひずみが発生する。一方、加熱後は、熱膨張により全方向に伸びるようにひずみが発生する。加熱後に発生するひずみ量は、z方向で最も

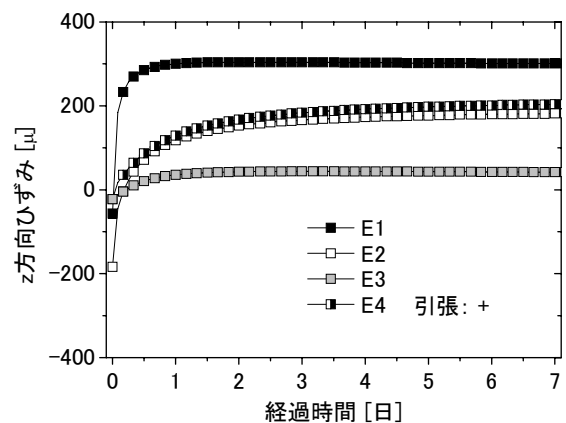


図-12 z方向ひずみの経時変化

大きく、E1、E2では、約350μ伸びている。これは対応する温度上昇（50℃）で無拘束のときに発生する熱膨張ひずみの約70%に相当する。これは鉛直変位が上面で拘束されていないからと考えられる。また、加熱時には孔壁近傍でのr方向の伸びひずみが、θ方向の伸びひずみの発生に伴う遠方でのr方向の圧縮ひずみと相殺されて、孔壁が移動しないという解析結果（図-4、図-5）が得ら

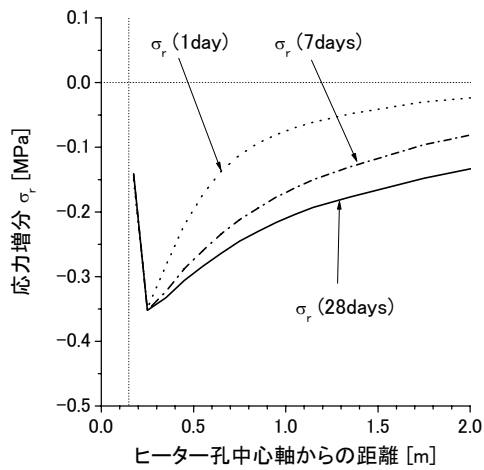


図-13 r軸応力の変化

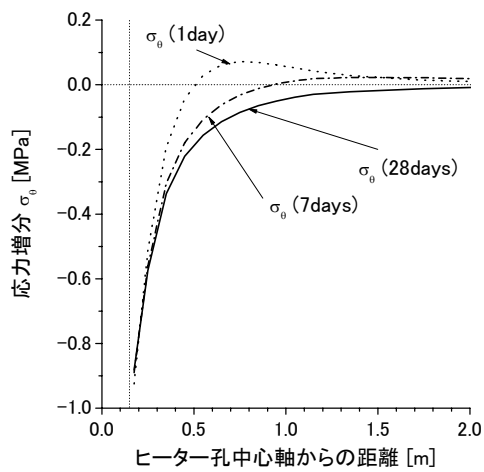


図-14 θ軸応力の変化

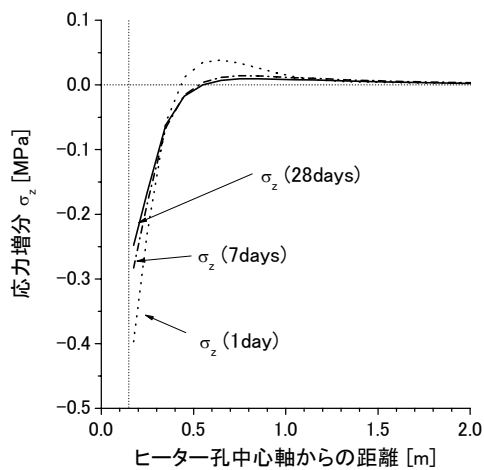


図-15 z軸応力の変化

れたと考えられる。100 μ オーダーのひずみの変動があるので、ひずみゲージを用いた計測システムにより変形挙動を測定することは十分可能と考えられる。

図-13～図-15に加熱後の応力増分（引張を正）の分布を示す。加熱によりヒーター近傍では、r軸、 θ 軸、z軸とも加熱により圧縮側に応力が増加する傾向にある。そ

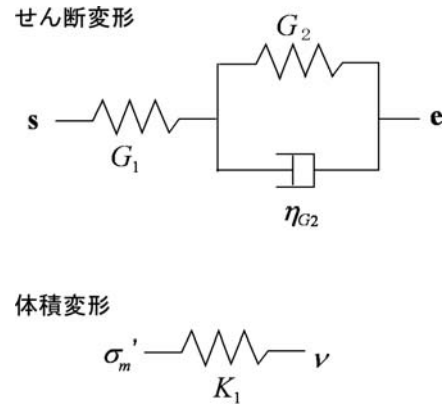


図-16 採用したクリープモデルの力学模型

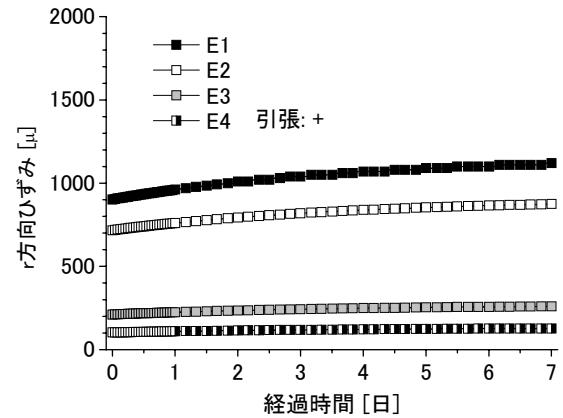


図-17 r方向ひずみの経時変化（クリープ解析）

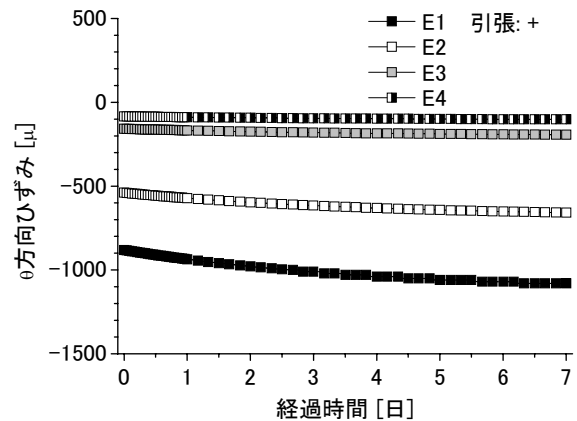


図-18 θ方向ひずみの経時変化（クリープ解析）

の外側では、 σ_θ と σ_z は一部圧縮応力が減少する領域も存在する。これらの応力変化により、孔壁での軸差応力が増加するものの、平均応力も増加する。

(6) クリープ解析

軟岩のクリープ挙動による変形を見積もるため、クリープ解析を実施した。クリープ解析は熱による変形と分離するため、水-応力連成解析で実施した。用いたクリープモデルを図-16に示す。せん断変形に対してはFogtモデルを適用し、体積変形には粘性はないと仮定してい

る。クリープ定数は当該サイトの軟岩で実施されたクリープ試験⁸⁾に基づき、 $G_1=540\text{ MPa}$, $K_1=1170\text{ MPa}$, $G_2=1850\text{ MPa}$, $\eta_{G2}=6.23\times 10^8\text{ MPa}\cdot\text{s}$ とした。

図-17, 図-18にr方向, θ 方向のひずみの経時変化をそれぞれ示す。掘削によりr方向には引張ひずみ, θ 方向には圧縮ひずみが発生する。その後のクリープ挙動においても、この傾向は継続する。クリープによる1週間のひずみの変化は掘削時の変化の10~20% (最大約200 μ) である。なお、z方向のひずみの変動は、1オーダー小さく微小である。 θ 方向のひずみの変動傾向は、加熱による熱膨張とクリープでは正反対である。これは変位にも影響を与え、ヒーター孔最上部において掘削時に内側向きに0.4mmの変位が発生するが、さらに1週間で0.1mm孔壁が内部に変位する結果となった(熱膨張では、孔壁の水平変位は更に微小であり、外向きである)。

4. まとめ

上総層群の堆積軟岩中に地下実験場にて実施される原位加熱実験を対象に数値解析を実施し、温度、間隙水圧、ひずみの各センサの配置を決定するとともに、計測される値を予測した。

ヒーター孔の温度を90℃とした場合、温度が上昇する範囲はヒーター孔から1.5m以上に及ぶ。加熱による熱膨張では、r方向, θ 方向, z方向とも伸びる傾向にある。一方、クリープでは θ 方向のひずみが縮む傾向にあり、z方向のひずみはほとんど変動しない。実際にはこれらが重なった挙動となることが予想される。変位は1mmを下回る微小なものであるが、ひずみは100 μ オーダーで変

動すると予想され、ひずみゲージにより十分計測が可能である。

加熱によるクリープの加速などの相乗効果も考えられるが、別途実施中の熱クリープ試験の結果あるいは原位加熱試験で実際に計測された結果から考察し、モデルに取り入れる予定である。

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講演論文集, pp.263-266, 2007.
- 2) 例えば, 操上広志, 千々松正和, 小林晃, 杉田裕, 大西有三: グリムゼル試験場における熱-水-応力連成原位置試験の解析, 土木学会論文集, No.757/Ⅲ-66, pp.127-137, 2004.
- 3) 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.
- 4) 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, 電力中央研究所 研究報告 N05028, 2006.
- 5) 越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫: 空洞掘削と実験調査および線形逆解析による堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集 No.487/Ⅲ-26, pp.177-186, 1994.
- 6) 岡田哲実, 平賀健史, 高倉望, 谷和夫, 澤田昌孝, 吉川和夫: 上総層群堆積軟岩の熱特性と高温下力学特性, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.349-352, 2007.
- 7) 土木学会: 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして-熱物性と解析-, 丸善, 2006.
- 8) 松本正士, 龍岡文夫: 堆積軟岩のクリープ挙動における粘性モデルの適用, 第31回地盤工学研究発表会予稿集, pp.1385-1386, 1996.

THERMO-HYDRO-MECHANICAL COUPLED ANALYSIS FOR PRELIMINARY INVESTIGATION OF IN-SITU HEATER TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCK

Masataka SAWADA, Kayo TAKEDA, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA,
Nozomu TAKAKURA and Takafumi IKENOYA

We planned the in-situ heater test in order to establish the evaluation method of long term stability of caverns in soft rocks. In this paper, preliminary investigation for the planned heater test is conducted using thermo-hydro-mechanical and creep analyses. When the temperature of the heater is set as 90 °C, increments of temperature greater than 5 °C are found to extend as far as 1.5 meters from the heater. Strains over 100 μ are predicted to be measured. They are caused by thermal expansion or creep of soft rock.