# 堆積軟岩における原位置加熱実験の 熱・水・応力連成解析

澤田 昌孝1\*・岡田 哲実1・谷 和夫2・高倉 望3・池野谷 尚史3

#### <sup>1</sup>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) <sup>2</sup>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常盤台79-5) <sup>3</sup>東急建設株式会社 土木総本部土木技術部(〒150-8501 東京都渋谷区1-16-14) \*E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

堆積軟岩地盤は放射性廃棄物処分等の地下構造物のサイトとして期待されているが、時間依存性挙動を 示し、熱・水などの外部環境の影響を受けやすいと考えられる.そこで、深度50mの堆積軟岩坑道におい て原位置加熱実験を実施し、熱の影響を考慮した長期挙動評価手法を検討している.原位置加熱実験は横 坑底盤から縦孔を掘削し、孔内を満たす水をヒーターで加熱して堆積軟岩に熱を与えるものである.ヒー ター孔の温度を15.5℃から段階的に90℃まで上昇させたときの温度、ひずみの計測値と解析結果の比較に ついて報告する.加熱による変形挙動は概ね等方弾性体に熱膨張を考慮することで説明可能であるが、孔 壁の変形モードや鉛直ひずみの大きさなど、このモデルでは説明できない挙動も見られた.

Key Words : soft rock, heat transfer, thermal expansion , numerical analysis, radioactive waste disposal

## 1. はじめに

堆積軟岩は一般に割れ目が少なく,放射性廃棄物地層 処分での候補岩体の一つとして検討されている.この地 層処分では廃棄体の核種崩壊熱により岩盤が通常よりも 高温になると想定される.堆積軟岩はクリープ特性が顕 著であり,熱・間隙水の影響を受けることも懸念される. そのため,熱・水などの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確立が望まれる.

著者らは堆積軟岩中に構築された地下空間実験場にお いて、岩盤を段階的に最高90℃に加熱する原位置加熱実 験<sup>1)</sup>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検証を行うこととした.本報では、 堆積軟岩を加熱した際の温度上昇・変形挙動に対して、 力学モデルを等方線形弾性体とした熱・水・応力連成解 析を適用し、解析結果と計測結果の比較から解析コード の基本的な適用性を確認するとともに、加熱時の堆積軟 岩挙動の特徴について考察する.

# 2. 原位置加熱実験

#### (1) 地下空間実験場周辺の地質特性

地下空間実験場は神奈川県相模原市郊外の田名地区に

位置する.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/m<sup>3</sup>、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 $E_{30}$ は平均で約300MPa、ひ ずみレベルが0.001%以下のヤング率 $E_{max}$ は約3000MPaで ある.変水位透水試験で得られた透水係数は約  $1.0 \times 10^8$ m/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.

#### (2) 原位置加熱実験の概要

原位置加熱実験はGL-50mに位置する最大幅8m,最大 高さ8m,長さ15mのアーチ部を有する空洞から幅1.1~ 2.0m,奥行き3.65m,高さ1.9mで人力掘削された馬蹄形 の横坑(多目的実験室,写真-1)で実施した.

まず,多目的実験室の底盤から直径300mm,深さ600 mmのヒーター孔を削孔し,その後,ヒーター孔に水が 溜まった状態でその水を目標温度まで加熱した.ヒータ ー孔周辺には計測孔を配置し,採取した岩石コアにひず みゲージ,熱電対を貼り付けて戻す埋戻式コアセンサー 等を用いて,ひずみ,温度,間隙水圧の計測を実施した.



写真-1 多目的実験室の様子(加熱実験中)



図-1 計測センサーの配置

また、ヒーター孔壁および実験室底盤には計測センサを 配置した. 図-1に計測センサーの配置を示す. 現象が軸 対称を満たすという仮定の下、計測孔同士がお互いに影 響を与えることがないようにヒーター孔軸を中心に放射 方向をずらして計測孔を配置した.

加熱実験はこれまでに複数回実施しており、フェーズ I (2007年8月7日加熱開始,最高温度60°C)の結果につ いては一部報告している<sup>2)</sup>.ここではフェーズII (2008 年3月19日加熱開始,最高温度90°C)<sup>1)</sup>を対象にした解析 について報告する.

## 3. 熱・水・応力連成解析の概要

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種類の物理現象を、それらの相互作用を 考慮した解析手法のことである.近年、高レベル放射性廃 棄物に係る問題に対して、国際的に開発が進められ、多く の解析事例<sup>例にわ</sup>が報告されている.

著者ら<sup>4</sup>は、熱や水の影響を受ける地下施設の長期的な挙動を予測するための熱・水・応力連成FEM解析コード LOSTUFを開発した.本報ではこのLOSTUFを原位置加熱実験に適用する.LOSTUFでは、地盤を粒子骨格と水・空気で 満たされた空隙で構成される多相システムとして取り扱い、 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く.間隙ガス圧は一定で大 気圧に等しいとし、ガスに関する連続式は考慮しない.以 下にその支配方程式について簡単に記す.

地下水の連続式から以下の式が導かれる.

$$\rho_{l}S_{l}\frac{\partial(\nabla \cdot \boldsymbol{u})}{\partial t} + \rho_{l0}\phi S_{l}\beta_{Pl}(\rho_{l} - \rho_{v})C_{lP}\frac{\partial P}{\partial t}$$
$$-(\rho_{l0}\phi S_{l}\beta_{Tl} - \rho_{l}C_{vT})\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(-\rho_{l}\frac{\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}_{rl}}{\mu_{l}} - \rho_{l}D_{Pv}\boldsymbol{I}\right)\nabla P\right]$$
$$+\nabla \cdot \left((-\rho_{l}D_{Tv}\boldsymbol{I})\nabla T\right) = Q_{B} + \nabla \cdot \left(\rho_{l}\frac{\boldsymbol{k}\boldsymbol{k}_{rl}}{\mu_{l}}\boldsymbol{g}\right)$$

(1)

ここで、 $\rho$ は地下水の密度、 $\rho$ 、は水蒸気の密度、S,は飽和度、  $\rho_0$ は初期条件での地下水の密度、 $\phi$ は間隙率、 $\beta_H$ は水の圧縮 係数、 $\beta_H$ は水の熱膨張係数、kは固有透過度テンソル、 $k_H$ は 相対透水係数、 $\mu$ は水の動粘性係数、Iは単位テンソル、gは重力加速度ベクトル、 $Q_H$ はソース項である。未知量は変 位ベクトル $u(\epsilon=05(\nabla u + (\nabla u)), \epsilon_e = \nabla u)$ 、間隙水圧P、温度T である。 $C_P$ は水の貯留係数であり、水分特性曲線から算出 される。 $C_H$ は本の貯留係数であり、水分特性曲線から算出 される。 $C_H$ は本の貯留係数であり、これらの 水蒸気の貯留係数および拡散係数は温度や飽和度の関数で あり強い非線形性を持つが、ほぼ飽和状態となっている今 回の原位置加熱実験ではこれらを有する項は無視できる。

エネルギー保存則からは次の支配方程式が導かれる.

$$((1-\phi)3K_{D}\beta_{TD}T)\frac{\partial(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{n})}{\partial t} + (\rho c)_{m}\frac{\partial T}{\partial t}$$
$$+\nabla \cdot \left\{\phi S_{I}\left[T\left(\frac{\beta_{TI}}{\beta_{PI}}\right)\frac{\boldsymbol{k}k_{rI}}{\mu_{I}} + \rho_{I}LD_{Pv}\boldsymbol{I}\right]\nabla P\right\}$$
(2)
$$-\nabla \cdot (\lambda_{m}\boldsymbol{I}\nabla T) + (c_{I}q_{I})\cdot\nabla T = Q_{TB}$$

ここで、 $K_D$ は体積弾性係数、 $\beta_D$ は固相の線膨張係数、Lは 単位体積あたりの水蒸気の潜熱、 $Q_B$ はエネルギーのソース 項である、 $\lambda_m$ 、( $\alpha$ )<sub>m</sub>はそれぞれ地盤の熱伝導率、熱容量であ り、次式で求まる.

$$\lambda_m = \phi S_l \lambda_l + (1 - \phi) \lambda_s \tag{3}$$

$$(\rho c)_m = \phi S_l \rho_l c_l + (1 - \phi) \rho_s c_s \tag{4}$$



図-2 有限要素メッシュと境界条件

ここで、 $\lambda$ は水の熱伝導率、 $\lambda$ は固相の熱伝導率、qは水の 比熱、cは固相の比熱、 $\rho_{s}$ は固相の密度である.

また、応力の釣り合い式は次式となる.

$$\nabla \cdot \left( \boldsymbol{D} : \frac{\partial (\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{tr})}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left( -\boldsymbol{I} \boldsymbol{\chi} \frac{\partial P}{\partial t} \right)$$
$$+ \nabla \cdot \left( (-\boldsymbol{D} : \boldsymbol{I} \boldsymbol{\beta}_{TD}) \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$
$$= \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\rho}_{m} \boldsymbol{g}) + F_{B}$$
(5)

ここで、D は剛性テンソルで等方線形弾性体を仮定する場合、ヤング率E とポアソン比v で定義される.また、 $\chi$  は不飽和パラメータ、 $\rho_m$  は地盤の湿潤密度、 $F_B$  は外力項である.

#### 4. 原位置加熱実験の数値解析

#### (1) 解析モデルと解析用物性値

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, 原位置加熱実験のフェ ーズII(ヒーター孔壁を最高90℃まで段階的に加熱し、そ の後段階的に温度を下げてヒーター孔壁が加熱前の温度に 戻るまでの125日間)を対象とする. ヒーター孔掘削時から フェーズ2の加熱開始のひずみの履歴は解析に含めない. 解析領域は、半径5.0m、高さ10.0mとした. 節点数は609、要 素数は560である.解析領域の上面が実験を実施した多目的 実験室の底盤にあたる、実験室底盤を断熱条件に保持する ことを目指して厚さ20cmの発泡スチロールで覆ったが、必 ずしも断熱条件を達成できなかったと考えられる. そこで 解析領域上面に熱伝達境界を与え、甲藤やを参考に熱伝達係 数には静止した空気との境界を想定し、2326 WmKを与え た. 図-3にフェーズⅡにおいて計測されたヒーター孔壁の 温度変化を示す. 孔内の温度を均一にするために攪拌して いたが、ヒーター孔下部は上部と比較して温度が低くなっ ている. 図-2に示したようにこの計測結果に基づき、ヒー ター孔最下部と上部では異なる温度を境界条件として与え

表-1 解析に用いた主な物性値 入力定数 記号 単位 値 g/cm<sup>3</sup> 地盤の湿潤密度 2.0  $\rho_m$ ヤング率 MPa 1400 Ε 0.3 ポアソン比 v -0.6 初期間隙比  $e_0$ \_  $1.0 \times 10^{-15}$  $m^2$ 固有透過度 k 軟岩の比熱 J/kg K 740  $C_{s}$ J/kg K 4200 水の比熱  $C_l$ W/mK 160 軟岩の熱伝導率 λs W/mK 0.58 水の熱伝導率  $\lambda_l$ 1.0×10<sup>-5</sup> 1/K 軟岩の線膨張係数  $\beta_{TD}$ 5.0×10<sup>-4</sup> 1/K 水の熱膨張率  $\beta_{\pi}$ 1/MPa 5.0×10<sup>-4</sup> 水の圧縮係数  $\beta_{Pl}$ 



た. 解析領域上面の熱伝達境界の外側温度についても図-3 の室温の変動(155℃~265℃)に合わせて与えた.また実 験室底盤に水中ポンプを設置し地下水位を底盤付近に保持 したため、初期・境界条件をこれに合わせて設定した.

解析に用いた主な物性値を表-1 にまとめる. これらの値は当該サイトの堆積軟岩で実施された各種室内試験から決定した<sup>6,7)</sup>. 堆積軟岩の線膨張係数は1.0×10<sup>-5</sup>(1/K)である. なお, 図-1 に示したようにヒーター孔および計測孔のボーリングコアにおいて,厚さ10cm,約76°で多目的実験室入口側に傾斜している砂層の存在が確認されている. しかし,加熱実験前に実施したパラメータ解析によりこの砂層の存在が温度・ひずみの解析結果に与える影響はほとんどないことを確認しており,今回の解析では泥岩のみが存在すると仮定している.

#### (2) 解析結果

#### a) 計測孔での温度上昇・ひずみ変化

まず,各計測孔に着目して,解析と計測の比較を行う. 図-4にD孔(ヒーター孔壁から離隔5cm),B孔(離隔 10cm),E孔(離隔40cm)の3本の計測孔における温度の経 時変化を示す.B孔の深度105cmのセンサにおいて10°C近い 差があるが,その他のセンサでは3°C以下の差に収まってお



図-4 計測孔での温度変化(フェーズ2:D, B, E孔)



図-5 計測孔でのひずみの変化(フェーズ2:B, E孔)

り、概ね地中の温度変化を再現できているものと考えられる. コア観察等からはB孔の深度105cmの位置で、特に他の 測定箇所と異なる点は確認できなかった. 温度分布を精度 良く予測できることで、温度に起因する熱膨張等の挙動に ついて、計測と解析を比較することが可能となった.

B孔(離隔10cm)とE孔(離隔40cm)における3方向 (半径方向,周方向,鉛直方向)のひずみの経時変化を 図-5に示す.3方向ともひずみが引張側(+)に伸びる 傾向を示し,解析と計測は一致している.各センサを個 別に見た場合に計測と解析でひずみ変化量の差が大きい ものもあるが,全体としては,ひずみ変化量についても 解析は傾向を捉えていると考えられる.E孔の半径方向 ひずみでは、ヒーター孔温度上昇直後(0~0.5日)にE 孔より内側の熱膨張に起因して一旦圧縮ひずみが発生す る.計測でもそのような挙動が見られるものの、解析ほ ど顕著ではない.これはヒーター孔から5mの位置で変 位固定していることが原因で、より大きく解析領域を設 定する必要があると考えられる.しかし、ひずみ変化が 引張方向に転じてからの変化量は良く捉えられている. 鉛直方向ひずみに関しては、どちらの孔においても解析 結果が計測値よりも大きい傾向がある.

#### b) 変形挙動の分析

ヒーター孔周辺での軟岩の変形挙動についてさらに分 析する.図-6に解析から得られた90℃に昇温して39日後



図-6 変形図(ヒーター孔温度90℃としてから39日後)

の変形図を示す.解析において発生する変形は温度上昇 に伴う熱膨張に起因するものである.底盤とヒーター孔 壁の変位が拘束されておらず,鉛直上向きの変位が最大 0.71mmである.一方,ヒーター孔壁の変形を見ると, 上部においては外側へ最大0.091mmの変位(孔を拡げる 方向の変位),下部においては内側へ最大0.025mmの変 位が見られる.

図-7に解析から得られたB孔(離隔10cm)における温 度上昇とひずみ変化の関係を示す. グラフ中の直線は, 解析で使用した線膨張係数1.0×10<sup>-5</sup> (1/K)の関係を表して いる. この図によると、半径方向ひずみは線膨張係数か ら想定される膨張ひずみに対して70~100%程度異なっ ている.一方,周方向ひずみは上部(深度10cm)と下 部(深度30,50cm)では傾向が異なり,前者が線膨張 係数から想定される膨張ひずみを示すのに対して、後者 は温度が上昇してもひずみが伸びなくなる.また,鉛直 方向ひずみは、線膨張係数から想定されるひずみを上回 るひずみが発生しており、実験室の底盤近くでは特に大 きい. これらの傾向は上面境界において変形が拘束され ていないため、熱膨張に加えて、半径方向、周方向の圧 縮応力によるポアソン効果が含まれていると考えられる. 図-8に計測から得られたB孔(離隔10cm)における温度 上昇とひずみ増加の関係を示す. 孔内におけるひずみゲ ージと熱電対の位置が必ずしも一致していないが、ひず みゲージ位置での温度を精度良く内挿できるものを抽出 した(深度25~45cmに位置するもの). 半径方向, 周 方向のひずみは線膨張係数相当ひずみとなっているのに 対して鉛直方向ひずみは線膨張係数から想定されるひず みに対して50~70%の値となっている. 周方向ひずみと 鉛直方向ひずみは解析と計測で傾向が異なる. 解析と計 測の相違の原因の一つとして、半径5mの解析領域の上



**図-7** 温度上昇とひずみ増加の関係(解析, B孔, 離隔10cm, 引張が正)



図-8 温度上昇とひずみ増加の関係(計測, B孔, 離隔10cm, 引張が正)

面は全く変位拘束していないが、実際の多目的実験室の 空間は1辺2m程度で、支保などの設置物があり、これ らによる拘束の影響の可能性がある.また、当該地点の 堆積軟岩の熱膨張特性に異方性がないか確認する必要が ある.

図-9にヒーター孔壁における周ひずみについて解析と 計測の比較を示す.計測においては、すべて引張方向に



図-9 ヒーター孔壁の周ひずみ

ひずみが発生しており, 孔壁は外側に変位している. 一 方解析では, 図-6からも分かるように上部は引張ひずみ となり,下部は圧縮ひずみとなる.解析領域を半径方向 に5mとしたが,実際にはさらに遠方まで圧縮ひずみが 及んでいる可能性がある.また,計測では60℃に加熱し た段階で,約500~600µのひずみが発生しており深度に よる差は小さいが,解析では深度により大きく値が異な っている.解析では鉛直方向の拘束効果の違いによる影 響が出ていると考えられる.

# 7. まとめ

上総層群の堆積軟岩中で実施された原位置加熱実験を 対象に数値解析を実施し、実験時の温度・ひずみの変化 について分析を実施した.実験室の底盤に施した断熱処 理は必ずしも十分ではなかったが、熱伝達境界を仮定す ることで、実験中の温度変化を解析で再現することがで きた.温度上昇を伴う変形挙動は、軟岩を等方線形弾性 体と仮定し、熱ひずみを与えることで概ね表現すること ができた.しかし,ヒーター孔周辺での鉛直ひずみが大 きいことやヒーター孔壁全体が外側に変位することなど 今回の解析モデルでは表現できない現象も観察された. これらの現象には,初期地圧,実験室の3次元的形状・ 掘削履歴,ヒーター孔遠方での岩盤のひずみ,岩盤の異 方的な力学挙動等が影響している可能性があり,それら を考慮した解析を実施する予定である.

また、フェーズⅢ、Ⅳでは実験室底盤の変位を精密に 取得することを試みており、そのデータと計測孔内のひ ずみ変化を比較しながら変形挙動についてより詳細に検 討したいと考えている.

#### 参考文献

- 池野谷尚史,岡田哲実,高倉望,澤田昌孝,平野公平, 谷和夫:堆積軟岩の原位置加熱実験(フェーズⅡ), 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,CD-ROM, 2011.
- 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 ウム講演集,CD-ROM, 2008.
- 3) 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.
- 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-緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・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.
- 5) 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂版, 1964.
- 6) 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.
- 7) 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.

# THERMO-HYDRO-MECHANICAL COUPLED ANALYSIS FOR AN IN-SITU HEATING TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCK

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

Soft rock is expected to be one of the potential host rocks for the geological disposal of radioactive waste. An in-situ heating test was conducted in order to establish an evaluation method of long-term stability of caverns in soft rocks. Thermo-hydro-mechanical coupled analysis for the heating test was also conducted. The comparison between numerical results and measurement when the temperature of heater was finally set as 90 °C is reported in this paper. Deformation of soft rock during the heating test was able to be broadly reproduced by numerical model considering linear elasticity and thermal expansion with the exception of the displacement pattern of the heater wall and the smaller vertical strains.