

堆積軟岩を対象としたヒーター試験の 熱・水・応力連成解析による事前解析と計画

— 堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の高度化 —

高倉 望* 池野谷尚史** 吉川 和夫***

要約： 都市部や沿岸部などの地下に広範囲に分布する堆積軟岩は、道路トンネル、エネルギー貯蔵施設、廃棄物処分場などの新規地下利用領域として期待されている。その堆積軟岩の特徴のひとつに、硬岩に比べてクリープ変形などの長期の変形特性が顕著であり、さらに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挙げられる。

そこで、本研究で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高度化を目的として、当社の地下空間実験場でヒーター試験を実施する予定である。本報では事前解析として、そのヒーター試験で生じる堆積軟岩内の温度、ひずみ、水圧などの影響を熱・水・応力連成解析から予測すると共に、その結果を基に策定した試験計画について報告する。

事前解析の結果からヒーター試験の発熱温度を 90℃と仮定した場合、加熱から 7 日間経過した時点で熱源から半径/鉛直の方向とも約 1.5 m まで伝熱すること、半径方向のひずみと水頭はそれぞれ孔壁周辺岩盤で約 300 μ および約 3 cm 増加することが予測された。

キーワード： 熱・水・応力連成解析、堆積岩、軟岩、ヒーター試験、地下利用

<p>目次：</p> <p>1. はじめに</p> <p>2. 地下空間実験場周辺の地質特性</p> <p>3. 事前解析</p> <p>4. ヒーター試験計画</p>	<p>5. まとめ</p> <p>6. おわりに</p>
---	------------------------------

1. はじめに

地下発電所や石油備蓄基地などに代表される大深度地下施設では、岩盤空洞の長期安定性を評価して、設計・施工・維持管理を行っている。

従来、そのような地下空洞は、硬質な岩盤に建設されることが多く、長期安定性は、大きな検討課題にならなかった。しかし、今後、図 1 に示すように温度では常温から 200℃以下、深度では地表面から GL-500 m 範囲で、透水性の低い軟岩を対象としたエネルギー貯蔵、廃棄物処分などの新規地下利用が計画されている。

その軟岩の変形特性は、硬岩に比べてクリープ変形が顕著であり、さらに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挙げられる。

そこで、本研究で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高度化を目的として、当社の地下空間実験場でヒーター試験を実施する予定である。本報は、そのヒーター試験で生じる堆積軟岩内の温度、ひずみ、水圧などの影響を熱・水・応力連成解析から予測すると共に、解析結果を基に策定した試験計画について報告する。

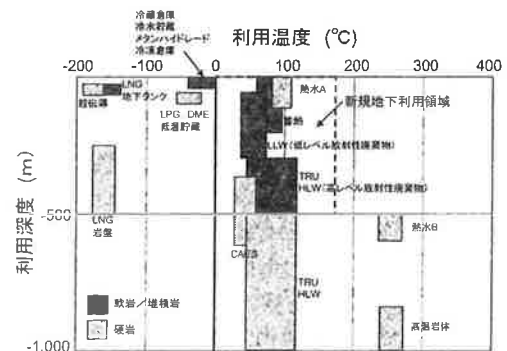


図 1 エネルギー地下利用施設と深度との関係¹⁾

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 500 m 離れた標高約 90 m の河岸段丘地帯である。

図 2 に地下空間実験場周辺の地層構造を示す。

GL-7 m までのローム層、その下、層厚 5 m の田名原礫層と層厚 9 m の座間丘陵礫層、およびそれ以上の

*土木エンジニアリング部 土木施工グループ **同トンネルグループ ***同土木設計第一グループ

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、湿潤単位体積重量は約 20.0 kN/m³、一軸圧縮強さは約 5.6 MPa、一軸圧縮試験で得られたヤング率は、300～3500 MPa、変水位透水試験で得られた透水係数は、約 1.0×10^{-8} m/sec、有効空隙率は約 35 %である。

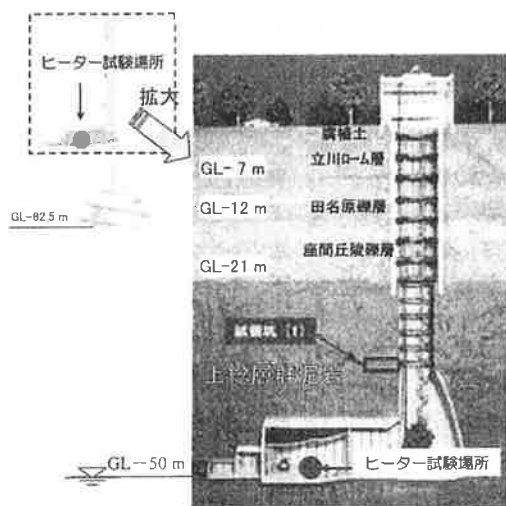


図 2 地下空間実験場の全景

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し、破砕帯が N79W/81SE 方向に存在するなど特異な水みち特性を有している。

3. 事前解析

3.1 熱・水・応力連成解析

熱・水・応力連成解析とは、熱、水理、力の3つの物理現象に対して、それらの相互作用を考慮して解く解析手法のことである。

適用される構造物として、高温側は熱水の地下貯蔵施設や圧縮空気貯蔵施設、低温側は液化天然ガスの貯蔵施設などがある。土木分野の中で身近なものに水・応力連成解析による地盤の圧密解析が古くから用いられている。

最近では、高レベル放射性廃棄物処分に関わる問題に対して、100℃前後の廃棄体を埋め戻した後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⁾。ここで、高レベル放射性廃棄物処分とは、原子力発電所から発生する使用済燃料を再処理する過程で分離される廃棄体を、30～50年間かけて約 400℃から 100℃以下まで下げ、GL-300 m 以深に埋め戻すことである。

現在使用されている熱・水・応力連成解析のコードには、TEAM6 ((独)日本原子力研究開発機構)²⁾、GEOH3D ((財)電力中央研究所)³⁾などがあるが、両者とも原位試験の結果と比較/検証した例は少なく、その中でも堆積軟岩を対象とした報告例はない。

3.2 今回用いた解析コードの特徴

今回用いた熱・水・応力連成解析ソフトは CONHEAT (Ver1.0.1) である。このコードは以下の特徴がある。

- ① 解析手法は FEM である。
- ② 線形弾性解析、非線形解析、弾塑性解析（関口・太田モデル）、粘弾塑性解析、電中研モデル、ダンカン・チャンモデル、ドラッカー・ブラッカーモデル、モール・クーロンモデルなど、多くの構成則モデルに適用できる。
- ③ 浸透流解析は、飽和・不飽和領域が模擬できる。
- ④ 掘削/盛土を STEP 解析で模擬できる。
- ⑤ 市販のプリ・ポストを使用することで入力データの作成や出力結果の整理が容易である。

3.3 事前解析の流れ

事前解析の目的は、地下空間実験場周辺に分布する堆積軟岩の熱の影響ををシミュレートすることである。解析は、直径 30 cm、深さ 60 cm のヒーター孔に地下水が溜まった状態で 90℃まで加熱した場合を想定した。解析手順を図 3 に示す。

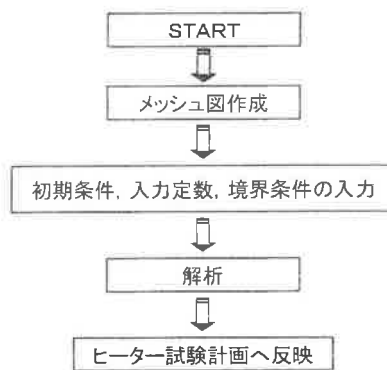


図 3 事前解析の流れ

まず、ヒーター孔の周辺岩盤（以下、孔壁周辺岩盤と呼ぶ）を解析モデルとしてメッシュ図を作成し、次に、初期条件、入力定数、境界条件を入力する。

解析は、1 Step 目で初期応力状態を作成し、2Step 目で 90℃まで加熱するステップ解析とした。解析時間は、 6.0×10^5 秒（約 7 日間）である。

最後に、孔壁周辺岩盤の温度、応力、ひずみ、水頭の数値からヒーター試験に用いるセンサーの仕様と配置を決定する。

3.4 解析モデル

解析に用いたメッシュ図と境界条件を図 4 に示す。解析モデルは軸対称モデルとし、半径方向 (R 方向) は 2 m（ヒーター孔の直径の 5 倍以上）、深度方向 (Z 方向) は 7 m とした。

ヒーター孔削孔前の地下水位は、地下空間実験場の底

盤に設置している水中ポンプの影響でほぼ底盤付近 (GL-50 m) で一定している。地下空洞内の温湿度は、温度で 18 度、湿度で 90 % と一定している。但し、試験中はヒーター孔周辺の底盤面を、厚み 20 cm 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 (底盤面) は断熱境界、下面是断熱境界と Z 方向の変位を固定、ヒーター孔壁は、温度を 90°C で固定、変位フリー、水理境界は浸出面とする。初期水頭は、底盤面を地下水面とする静水圧状態、岩盤の初期温度は、20 °C で一定と仮定する。

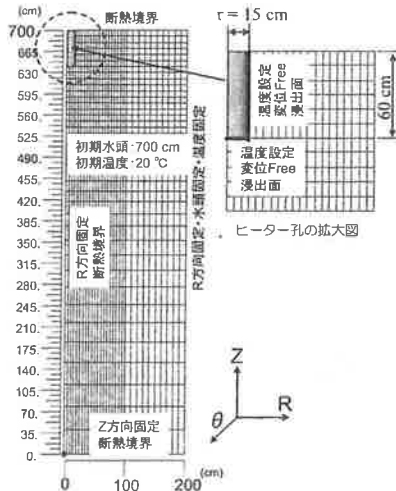


図 4 メッシュ図と境界条件

3.5 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わる入力定数は、過去に当該サイトで得られた物性⁴⁾を用いた。熱特性に関わる入力定数は、地層処分研究開発第 2 次取りまとめ⁵⁾に記載されている軟岩の値を参考にした。

表 1 入力定数一覧

	単位	水	泥岩
弾性係数	MPa		1.400
ポアソン比	-		0.3
一軸圧縮強さ	MPa		6
単位体積重量	KN/m ³	10.0	20.0
透水係数	m/s		1.00E-08
熱膨張係数	1/°C		1.00E-05
比熱	kJ/(kg·°C)	4.2	1.4
熱伝導率	W/(m·°C)	0.7	2.2
潜熱		80	
体積膨張係数	1/°C	0.0021	

3.6 解析結果

図 5 に孔壁周辺岩盤の時間経過に伴う温度変化を示す。図 6 に 6.0×10^5 秒 (約 7 日間) 経過後の温度コンター図を示す。

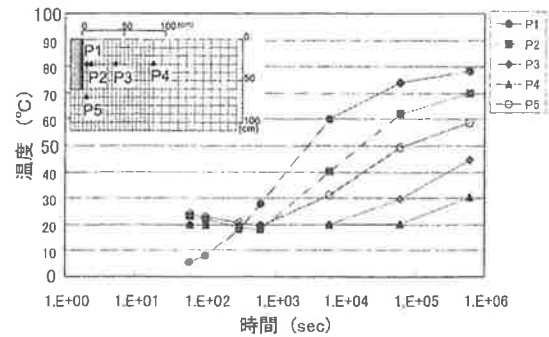


図 5 孔壁周辺岩盤の伝熱特性

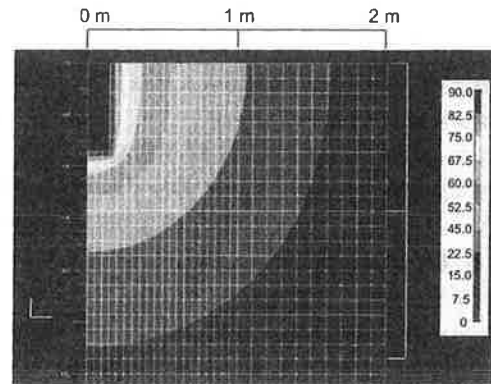


図 6 温度コンター図 ($t = 6.0 \times 10^5$ 秒)

図 5 から 6.0×10^5 秒以降の P1 の温度が 80°C まで達することが想定できる。なお、加熱直後に P1 が 20°C 以下になる原因については検討中である。

P2, P5 は加熱して $1.0 \times 10^3 \sim 4$ 秒後に伝熱している。また、P4 (ヒーター孔壁から半径方向に 85 cm 離れ) で $1.0 \times 10^6 \sim 6$ 秒後に伝熱している。

図 6 から 6.0×10^5 秒経過後の伝熱範囲は、孔壁から半径方向/鉛直方向とも約 1.5 m と予測される。

図 7, 8 に孔壁周辺岩盤の水頭と半径方向のひずみの経時変化を示す。

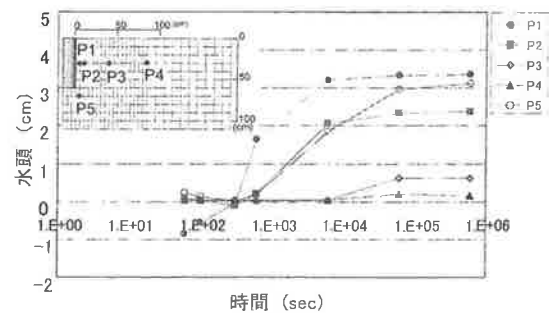


図 7 孔壁周辺岩盤の水頭変化

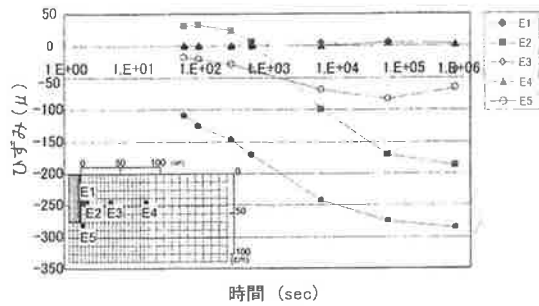


図 8 孔壁周辺岩盤の半径方向のひずみ変化

図 7 から P1 で 1.0×10^4 秒以降に 3 cm の水頭変化が予測される。また、温度に伴う水頭変化は収束していくことが予測される。ここで、P1 において約 1.0×10^3 秒以前に負圧が生じている理由としては、ヒーター試験の結果と比較して評価する。

図 8 から半径方向のひずみは E1 で約 300 μ 発生することが予測される。一方、E3, E4 のひずみは微小であることが予測される。ここで、E2 で約 1.0×10^3 秒以前に 40 μ 程度の引張が生じている原因についてもヒーター試験の結果と比較して評価する。

センサーは、解析結果から得られたヒーター孔周辺の温度、ひずみ、水頭の変化量から市販の熱電対やひずみゲージおよび間隙水圧計で十分計測できる範囲であると判断し、既製品を用いる。

4. ヒーター試験計画

4.1 試験サイトの概要

試験場所は、図 2 の赤丸で示す GL-50 m の横坑側壁である。試験空洞の形状は、幅 1.1~2.0 m、奥行き 3.65 m、高さ 1.9 m で人力掘削した馬蹄形である(図 9 参照)。

空洞内の目視観察の結果、壁面には北東方向に $8^\circ \sim 10^\circ$ 下がりで幅約 5 cm のスコリア層が連続して介在し、壁面や底盤面から浸み出る程度の湧水が観察されている。また壁面の風化状況は現時点で少ないと判断している。

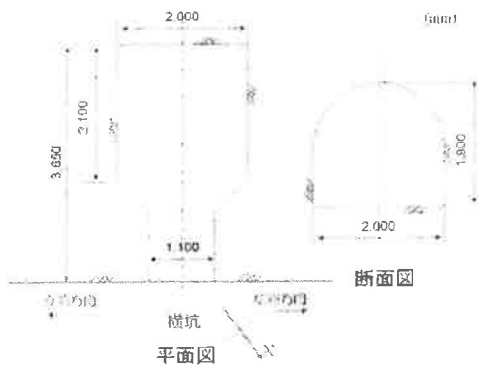


図 9 ヒーター試験を実施する空洞の形状

4.2 試験の流れ

図 10 に試験の流れを示す。

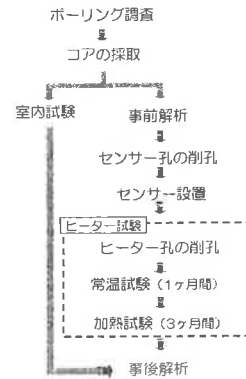


図 10 試験の流れ

図中のボーリング調査は、試験サイト周辺の詳細な地質構造の把握と室内試験のためのコア採取を目的とする。室内試験は、採取した泥岩の力学特性、熱力学特性を調べるために実施する⁶⁾。

次に、計測センサーの仕様と配置は、3章で報告した事前解析の結果を基に決定する。

ヒーター試験は、ヒーター孔を削孔した後、空洞内を地下水(水温 18 $^\circ\text{C}$)で満たした状態で 1 ヶ月間ほど保持(常温試験)し、その後 60 $^\circ\text{C}$ 、80 $^\circ\text{C}$ 、90 $^\circ\text{C}$ と 3 段階で加熱する(加熱試験)。

最後に、室内試験で得られた熱力学特性(熱物性値)を用いて試験結果を事前解析と同じ手法で事後解析する。

4.3 計測項目と計測位置

計測項目は、過去に硬岩で実施されている原位置ヒーター試験^{2),7)}を参考にして、温度、岩盤ひずみ(半径方向、周方向、鉛直方向)、間隙水圧、土圧(半径方向)、底盤の変位とした。また、孔壁周辺岩盤をヒーター試験前後に目視観察と弾性波探査で確認し、岩盤の損傷度を評価する。図 11 に事前解析から得られた温度のコンター図(図 6)に計測位置を重ねて示す。

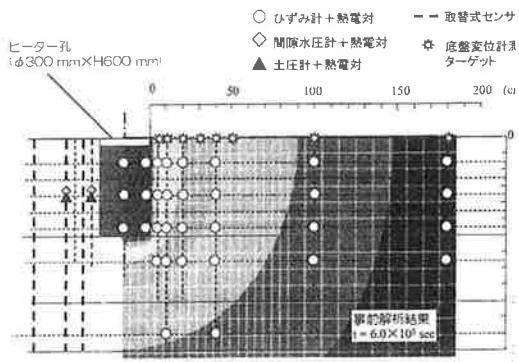


図 11 計測項目と計測位置(断面図)

深度方向の計測位置は、試験空洞の形状や温度コンター図を基にして底盤面から 15 cm, 35 cm, 55 cm, 75 cm, 120 cm とする。半径方向の計測位置は、試験空洞の形状や温度コンター図に加え、ヒーター孔周辺を密に配置することで、孔壁から 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 100 cm, 180 cm に配置する(図 12, 写真 1 参照)。また、センサー孔同士が計測値に対して干渉しないようにセンサー孔は、同一放射線状に配置せず千鳥状に配置する。

4.4 計測方法

今回の計測センサーは、従来、岩盤計測で用いられている埋込式のセンサー(以下、埋込式センサーと呼ぶ)と現在開発中の取替式センサーの 2 種類を使用する。

以下にそれぞれのセンサーについて説明する。

4.5 計測センサーの概要

a) 埋込式センサー

埋込式センサーとして用いるひずみ計と土圧計は、計測値に対して埋戻し材の影響を最小限に抑えるため、サンプリングした泥岩のコアにセンサーを貼り付け、再びそのコアをセンサー孔に埋め戻す。その際に生じるセンサー孔壁とコアとの隙間は、当該地盤のヤング率と同等のセメント系材料で埋め戻す。

間隙水圧計は、センサー部分を砂で覆い、その上を当該地盤のヤング率と同等の材料で埋め戻す。

熱電対は、センサーの温度補正データを兼ねるため各種センサーの近傍に取り付ける。

b) 取替式センサー

取替式センサーは、今回の研究の一環として開発しているセンサーである。

センサーの構造は、試験孔内の止水などに用いられるパッカー外側に温度計、水圧計、電極などのセンサーを貼り付け、試験孔内でそのパッカーを膨らませることで各センサーを孔壁に密着させる。

取替式センサーを用いることで、ボーリング孔内の場を乱すことなく、温度、水圧、比抵抗などを同時に計測できる。また、パッカーを収縮させてセンサーユニットを回収することにより、破損ないし性能が低下したセンサーを取り替えることが可能となる。

4.6 計測データの収集

各種センサーから得られるデータは、データログに取り込む。計測間隔は、ヒーター孔削孔中、削孔後、および各加熱段階に達する前後を密にして、それ以外は 4 から 6 時間とする。

4.7 ヒーター試験方法

ヒーター孔を 1 ヶ月間ほど水温 18℃の地下水に満たした状態で保持した後、投込み式ヒーター(容量 5 kw, 坂口電熱株式会社製)を投入し、温度調節器を用いて ±2℃の範囲で制御しながら、60℃, 80℃, 90℃と多段階に加熱する。計測期間は、加熱する 3 段階の合計で

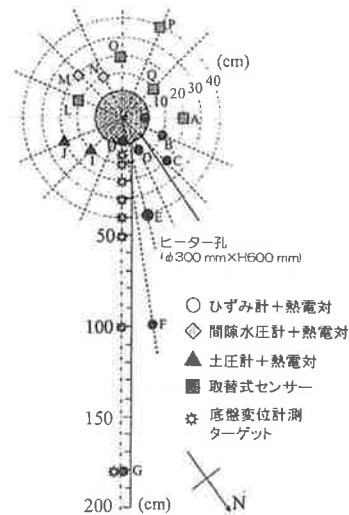


図 12 計測項目と計測位置(平面図)



写真 1 センサー孔とヒーター孔の削孔位置

3 ヶ月間程度とする。その際、ヒーター孔内の水温を一樣にするために 2 台の攪拌機を用いる(図 13 参照)。

さらにヒーター孔内の熱効率を高めるために蓋をする。ヒーターと攪拌機の荷重は、それらを単管で固定することで地盤に負荷させない。

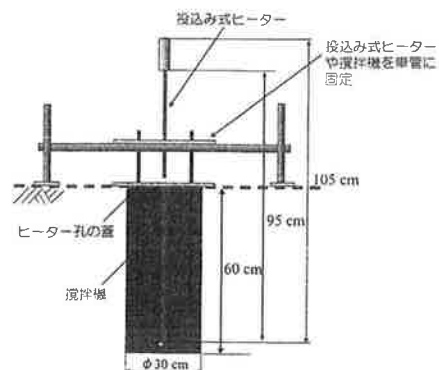


図 13 ヒーター孔の構造

5. まとめ

事前解析の結果からヒーター試験の発熱温度を 90℃ と仮定した場合、加熱から 7 日間経過した時点で熱源から半径方向／鉛直方向とも約 1.5 m まで伝熱すること、半径方向のひずみと水頭はそれぞれ孔壁周辺岩盤で約 300 μ および約 3 cm 増加することが予測された。センサーについては、解析で得られた温度、ひずみ、水頭の変化量から市販の熱電対、ひずみゲージおよび間隙水圧計で十分計測できる範囲であることが判断された。

今後は、ヒーター試験を実施した後に、事前解析と同じ熱・水・応力連成解析で事後解析を行い、事前解析の精度を検証し、解析結果の信頼性を向上する。

6. おわりに

堆積軟岩にエネルギー貯蔵施設や廃棄物処分場などを建設する際、熱や水などの外部環境の不確実性に対して網羅的な検討が重要となる。

そこで、本研究では、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高度化を目的として、当社の地下空間実験場でヒーター試験を実施する。本報は、そのヒーター試験で生じる岩盤内の温度、ひずみ、水圧などの影響を熱・水・応力連成解析を用いて予測するとともに試験計画の参考資料とする。

今回の一連の研究で得られる知見は、エネルギー貯蔵や廃棄物処分などの坑道の設計や安全評価の規準・規制に反映する。

謝 辞

本研究は、横浜国立大学、(財)電力中央研究所、東急建設(株)の三者による共同研究の一部として実施しました。関係各位には記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.16-35, 丸善, 2006.
- 2) 例えば、線上広志, 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, 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 研究報告: N05028, 2006.
- 4) 高倉望, 大深度地下実験施設で実施してきた実験/観測の成果のまとめ, 東急建設技術発表会論文集, 27C-09, 2001.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ -, JNC TN1400, 99-022, 1999.
- 6) 岡田哲実, 平賀健史, 澤田昌孝, 高倉望, 吉川和夫, 谷和夫：上総層群堆積軟岩の熱特性と高温下力学特性, 第36回岩盤力学シンポジウム, 2007.
- 7) FOWG・ANDRA・BGR et al : *Mont Terri Project Programme Overview and Work Programme of Phase 9*, p43, 2003.

AN ADVANCED ANALYSIS USING COUPLING ANALYSIS OF HEAT-HYDROLOGIC-STRESS AND PLANING OF THE HEATER TEST IN SOFT SEDIMENTARY ROCKS

N.Takakura, T.Ikenoya and K.Yoshikawa

In the future, Soft sedimentary rocks, found in the city and the costal areas, are expected to be utilized, as new utilization of underground space, for tunnel, energy storage, disposal of radioactive wastes, etc... One of the characteristics of soft sedimentary rocks is that their long term behavior property is markedly higher than that of hard rocks, and that they are sensitive to changes in the external environment, such as heat and water.

In this study, we will conduct the heater test in the underground laboratory of our company, assuming that a heat of about 90℃ is applied underground, for the purpose of upgrading the method for evaluating the long-term stability of sedimentary soft rock caves, with due consideration of the changes in external environments. This report estimates, using coupling analysis of heat-hydrologic-stress, the effects of the temperature, stress, and water pressure, generated in the rock, due to the heater test. Also, this report explains the heater test plan.