

U.D.C 624.121

熱・水・応力連成解析による堆積軟岩の 長期安定性評価手法の高度化(フェーズⅠ)

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層は、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しい地下利用領域として期待されている。その堆積軟岩層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。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に、当社の地下空間実験場で熱源の温度を最大 150℃程度まで上昇させるヒーター試験を実施している。本論では岩盤中の熱源を 40℃まで上昇したときに得られた堆積軟岩のひずみ、温度の影響範囲および経時変化を示し、得られたデータを基に実験前に実施した熱・水・応力連成解析の予測精度の評価および評価手法の課題を抽出する。

キーワード： 熱・水・応力連成解析, 堆積岩, 軟岩, 原位置試験, ヒーター試験, 地下空間利用

目次：	1. はじめに	5. 解析の概要
	2. 原位置加熱実験の概要	6. 解析結果
	3. 実験結果	7. まとめ
	4. 熱・水・応力連成解析	8. 残された課題

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¹⁾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。

本研究では、堆積軟岩に構築したGL-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竖置き方式²⁾の約1/8サイズの円筒空洞を掘削し、原位置加熱実験を実施する。さらに、得られた実験データを基に熱・水・応力連成解析コード³⁾を検証する。

平成18年度では、原位置加熱実験の試験計画および熱源90℃を模擬した事前解析結果について報告した⁴⁾。本年度は、常時で18℃程度の堆積軟岩層を40℃まで加熱した段階での熱源周辺岩盤の温度とひずみの影響範囲および経時変化、およびその結果を熱源40℃で模擬した解析結果と比較する。

2. 原位置加熱実験の概要

2.1 実験サイトの概要

地下空間実験場は、図1に示すように矩形断面の立坑(掘削長 50m)および横坑(掘削長 35m)からなる。

原位置加熱実験はGL-50mの横坑にある幅1.1m×2.0m、奥行き3.65m、高さ1.9mの馬蹄形横坑内(図1中、丸で

示した箇所：以下、試験横坑と略す)で実施した。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泥岩層(堆積軟岩)で構成されている。概ね当該地区の泥岩は均質であるが、層中の水平方向に未固結な砂層やスコリア層が幾層も介在している。また、縦方向(N79W/81SE)に破砕帯が確認されている。



図1 地下空間実験場全景

既に得られている堆積軟岩の力学特性としては湿潤単位体積重量で約20kN/m³、一軸圧縮強さで約5.6MPa、ヤング率 (E_{50}) は約300MPa、ひずみレベルが0.001%以下のヤング率 (E_{max}) で約3,200MPaである⁵⁾。

2.2 実験方法

試験横坑の底盤（以下、底盤と略す）に円筒空洞（ヒーター孔：φ300mm×H600mm）を掘削した。これは高レベル放射性廃棄物処分で想定されている竖置き方式の約1/8サイズである。ヒーター孔内（以下、孔内と略す）は湧水を満たした状態で、ヒーターによって加熱することで周辺岩盤に熱を負荷する。また、孔内の水温が均一となるように攪拌機を設置した。図2にヒーター孔の構造を示す。

底盤は、境界条件を断熱境界とするため、厚さ20cmの発泡スチロールで覆った。加熱段階は表1に示すように3つのフェーズに分けて段階的に行う。本論では、フェーズIの40℃の結果について述べる。

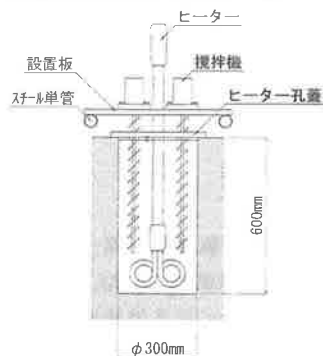


図2 ヒーター孔の構造

表1 加熱フェーズ

	加熱温度	目的
フェーズI	40℃	余裕深度、TRU想定温度域での現象把握
	60℃	
フェーズII	80℃	高レベル放射性廃棄物想定温度域での現象把握
	90℃	
フェーズIII	120℃	想定域外での現象把握
	150℃	

※余裕深度：地層処分において一般的であると考えられる地下利用に十分余裕をもちた深度（GL-50～100m程度）

※※TRU：超ウラン元素、すなわちウランより重い元素で、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウム、キュリウムなどを言う

2.3 計測方法

岩盤中のひずみ（以下、岩盤ひずみと略す）と温度は、サンプリングしたコアにひずみゲージおよび熱電対を貼付し、当該岩盤と同程度のヤング率を有する材料によって一体化したものをサンプリングした同じ場所に埋設して計測した^{6), 7)}。

計測位置は、事前解析から得られた熱の影響範囲を基に定めた⁸⁾。計測位置を図3に示す。岩盤ひずみはヒーター孔を中心に、半径方向、周方向、鉛直方向を計測した。温度は岩盤ひずみと同じ箇所で計測した。ヒーター

孔壁のひずみは、ひずみゲージを孔壁に貼付し周方向および鉛直方向を計測した。

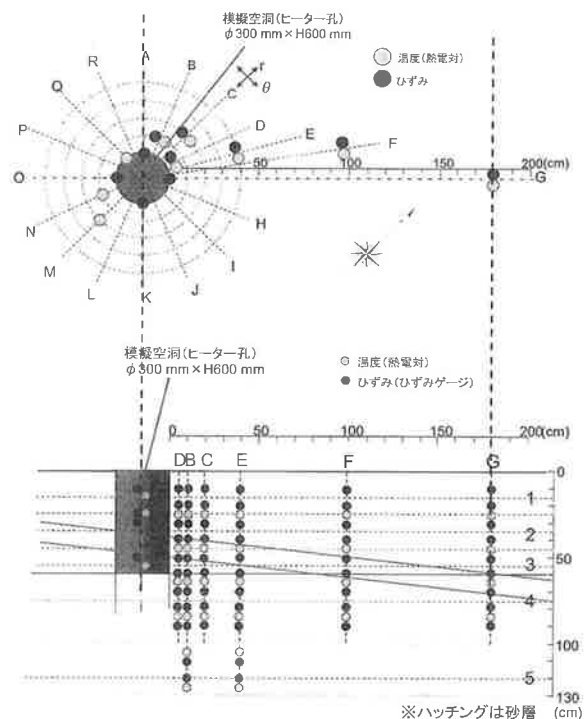


図3 計測位置（上：平面図，下：断面図）

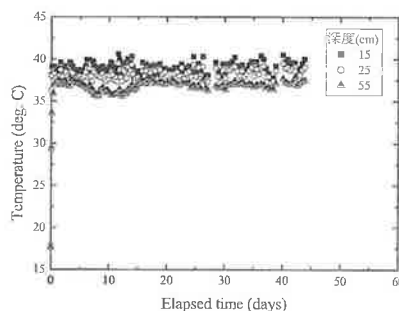


図4 ヒーター孔内温度の経時変化

3. 実験結果

3.1 温度

湧水で満たされた孔内の水温の経時変化を図4に示す。水温は、加熱開始後数時間でほぼ定常となった。孔内での水温分布は37～40℃で概ね安定しており、ヒーターの温度調整および湧水の攪拌が問題なく行われていることを示している。結果の一例としてD孔、E孔、G孔の温度経時変化を図5に示す。孔の位置は図3を参照されたい。D孔の底盤下25cmと底盤下45cmの温度は、他の計測孔に比べて33℃程度と高く、定常に達する時間は加熱して5日間程度と短い。ヒーター孔底以深の底盤下65cm、底盤下85cmでは温度はやや低くなり定常に至るまでに6～7日間程度を要している。伝熱傾向は、ヒーター孔から離れるにつれ温度は低くなり、定常状態へ移行する時間も長くなる。ヒーター孔壁からの離隔180cm離れたG孔におい

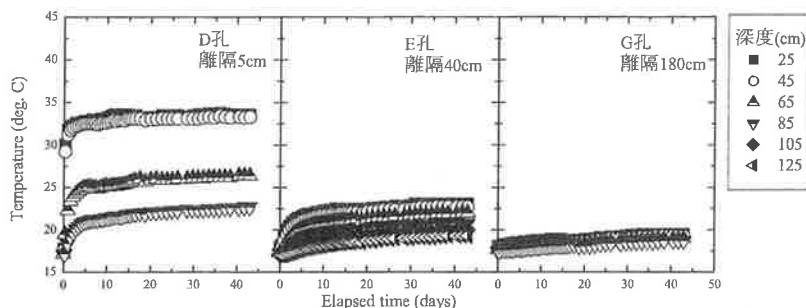


図5 ヒーター孔周辺の温度経時変化

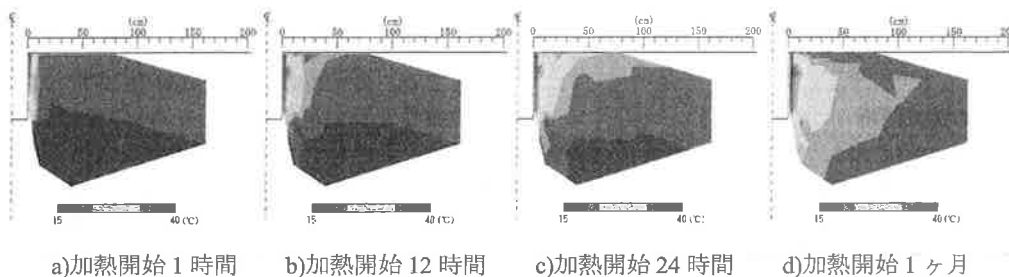


図6 温度コンタ図

ては40日程度で定常に達し、温度上昇量は1℃程度である。

図6に断面の温度コンタ図を時系列に示す。ヒーター孔を中心とした高温の領域が時間の経過に伴って拡大していく様子が分かる。また、底盤付近の温度分布を見ると境界条件は、断熱境界に近いと考えられる。

3.2 岩盤ひずみ

岩盤ひずみの一例として、図7に孔壁から5cm離れのD孔の経時変化を示す。図は、圧縮側が正、引張側が負である。

D孔では加熱直後に全ての方向で引張側の岩盤ひずみ

が発生した。その後、半径方向と鉛直方向は継続して引張側に移行しているものの周方向は5日目まで引張側を示し、その後地盤下40cm以外で圧縮側に移行している。ここで、地盤下40cmは、砂層に位置することから岩種の違いにより周方向の岩盤ひずみの挙動が違うものと判断した。これらの現象は、加熱直後の岩盤温度上昇に伴い周方向の砂層以外で岩盤は膨張し、最大の岩盤ひずみで周方向の底盤下35cmで180μ程度である。室内試験から得られている当該サイトの泥岩の線膨張係数は10μ/℃程度であり、底盤下35cm地点の温度上昇量(18℃)に対して予測される岩盤ひずみは180μ程度である。予測値

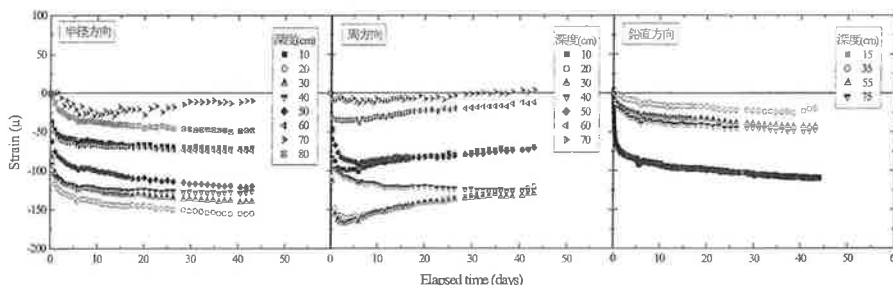


図7 D孔の半径方向、周方向、鉛直方向の岩盤ひずみの経時変化図

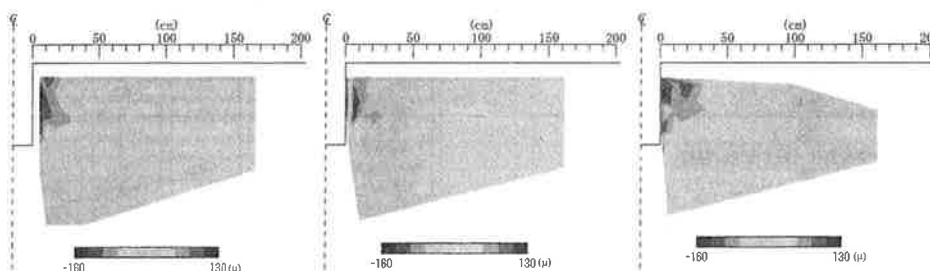


図8 計測終了時の岩盤ひずみコンタ図 (左:半径方向, 中:周方向, 右:鉛直方向)

と計測結果が同等であることから、実験値は妥当であると判断した。図8に計測終了時(加熱開始から43日後)における半径方向、周方向、鉛直方向のひずみコンタ図を示す。データ間は線形補間した。全ての方向でヒーター孔近傍において最も大きな引張ひずみが発生し、ヒーター孔から離れるにつれ、岩盤ひずみが小さくなる傾向が分かる。

周方向については、ヒーター孔壁で圧縮ひずみが発生しているものの岩盤内部に入ると引張ひずみへと変化している。図8から厚さ数cm程度のリング状の部分が、熱膨張による孔壁の押し出しに対して抵抗しているものと考えられる。

4. 熱・水・応力連成解析

熱・水・応力連成解析とは、熱、水理、力の3つの物理現象の相互作用を考慮して解く解析手法である。

過去の解析例として、高温域は熱水の地下貯蔵施設や圧縮空気貯蔵施設、低温域は液化天然ガスの貯蔵施設などの設計に用いられている。最近では、高レベル放射性廃棄物処分において廃棄体を埋め戻した後の長期にわたる現象を予測する解析に用いられている⁹⁾。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高熱の廃棄体を、30~50年間かけて約400℃から100℃以下まで下げ、GL-300m以深に埋め戻すことである。しかし、熱・水・応力連成解析結果を原位置試験データと比較した例は少ない。そこで、著者らは当社が開発に関わった熱・水・応力の連成解析コードConheatを用いて、実験データと比較した。

5. 解析の概要

5.1 解析の目的

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シミュレートすることである。解析では、直径30cm、深さ60cmの孔内に地下水が溜まった状態で40℃まで加熱した場合を模擬した。解析手順を図9に示す。

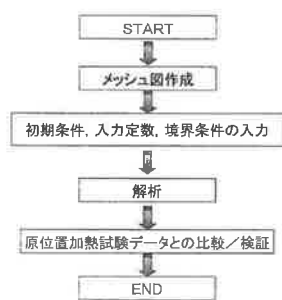


図9 事前解析の流れ

まず、ヒーター孔をモデル化した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ステップで初期応力状態を作成し、2ステップで40℃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。

5.2 解析モデル

解析に用いたメッシュ図と境界条件を図10に示す。解析モデルは軸対称モデルとし、その寸法は、半径方向2m(ヒーター孔の直径の5倍以上)、鉛直方向は7mとした。

境界条件は、軸対称線の半径方向の変位を固定、温度を断熱境界とする。側面は半径方向の変位を固定、水位を水頭固定、温度を固定とする。底盤面は温度を断熱境界とする。モデルの下面は温度を20℃で定温、鉛直方向の変位を固定とする。ヒーター孔壁面は温度を40℃で固定、変位をフリー、水理境界として浸出面とする。初期水位は底盤面に設定し、岩盤の初期温度は20℃で一定と仮定する。初期応力状態は、初期地圧測定から得られた鉛直方向の初期地圧を底盤面に载荷して模擬した。また地盤下30cm~40cmに幅10cm程度の砂層を模擬した。

5.3 入力定数

表2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、過去に当社の地下空間実験場で得られた物性⁵⁾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²⁾に記載されている軟岩の値を参考にした。

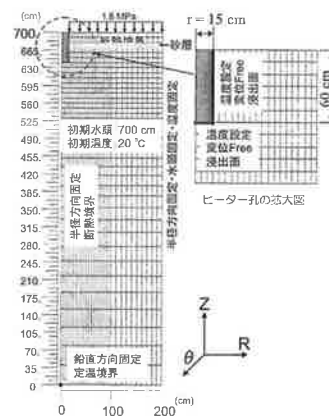


図10 メッシュ図と境界条件

表2 入力定数一覧

	単位	水	泥岩	砂	備考
弾性係数	MPa	-	1,400	700	
ポアソン比	-	-	0.3	0.3	
一軸圧縮強さ	MPa	-	6	3	泥岩「立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の形状特性」を参照
粘着力	MPa	-	3	0	砂岩「一般的な値を使用」
内部摩擦角	°	-	0	35	
単位体積重量	KN/m ³	10.0	20.0	18.0	
透水係数	m/s	-	1.00E-08	1.00E-05	
熱膨張係数	1/°C	0	1.00E-05	1.00E-05	
比熱	kJ/(kg·°C)	4.2	0.74	8.37E-01	泥岩「地層処分研究開発第2次取りまとめ」を参照
比熱容量	kJ/(kg·°C)	-	-	-	砂岩「一般的な値を使用」
熱伝導率	W/(m·°C)	0.7	3.1	0.9	
体積膨張係数	1/°C	0.0021	-	-	

6. 解析結果

6.1 温度

図11に底盤下25cmラインの解析値と実験値の温度変化を比較して示す。図から解析で時間の経過とともに岩盤中を温度が上昇する現象を模擬することができ、定量的には、解析値の温度上昇速度が実験値と比べて速い。この要因として、解析で入力した熱伝導率の値が実際よりも大きかったことが推察できる。3章の図5に示すようにヒーター孔壁から180cm離れた地点の温度上昇が1℃であったことから、側面の温度の境界条件は妥当であると判断した。

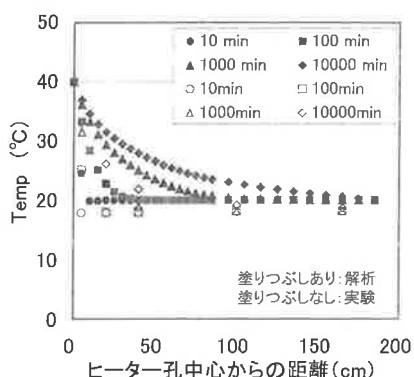


図11 底盤下30cmラインの温度変化

図12に加熱開始から24時間経過した時点の温度コンタ図を解析結果と実験結果とを比較して示す。同図から実験で得られているヒーター孔から離れ15cm~20cmの高温域を解析で模擬することができた。砂層については、解析結果から温度変化帯を模擬できたものの、実験では顕著な変化を確認することができなかった。

6.2 岩盤ひずみ

解析と実験との結果を比較例としてD孔、底盤下30cmにおける半径(R)、周(θ)、鉛直(Z)方向の岩盤ひずみの経時変化を図13に示す。図は、圧縮側が正、引張側が負である。

D孔の岩盤ひずみ計測の結果、加熱直後は全てのひずみが引張側となることが確認されている。この現象は、

岩盤内の温度上昇に伴う膨張と考えられ、ヒーター孔底と底盤は隆起し、ヒーター孔の内空は堆積軟岩の膨張圧(P_{hex})が原因で減少したと考える。その大きさは、周(θ)方向で最大180μ程度である。

一方、解析では、半径(R)方向と鉛直(Z)方向は引張側を示すものの、周(θ)方向は圧縮側を示した。この現象はヒーター孔底と底盤が隆起し、周(θ)方向は拘束圧(P_c)によってヒーター孔の内空が減少したことを意味する。ここで、実験と解析との周(θ)方向のメカニズムを式で表すと以下の通りである。

$$\text{原位置加熱実験： } P_{hex} > P_c$$

$$\text{解析： } P_{hex} < P_c$$

解析で得られた岩盤ひずみは半径(R)方向と鉛直(Z)方向で60μ~75μ程度であり実験値より小さい。この要因として、解析に用いたパラメータ、ヒーター孔の掘削を考慮していないことや境界条件、解析メカニズム、解析手法、要素分割方法など解析に寄因するもの、実験値に含まれるひずみゲージの接着に用いた接着剤や接着方法、ひずみゲージの種類等の影響など原位置試験方法に寄因するものが考えられる。なお、原位置試験方法で考えられる要因については室内試験で検証中である⁹⁾。

7. まとめ

堆積軟岩中に構築したGL-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縦置き方式の約1/8サイズの空洞を掘削し、原位置加熱実験した結果と熱・水・応力連成解析結果とを比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・原位置加熱実験の結果、加熱したことで岩盤全域にわたり膨張ひずみが発生した。
- ・40℃まで加熱した時の膨張量は最大で180μと予測値とほぼ同等であった。
- ・実験で確認されたヒーター孔からの離れ15cm~20cmの高温域を熱・水・応力連成析で模擬することができた。

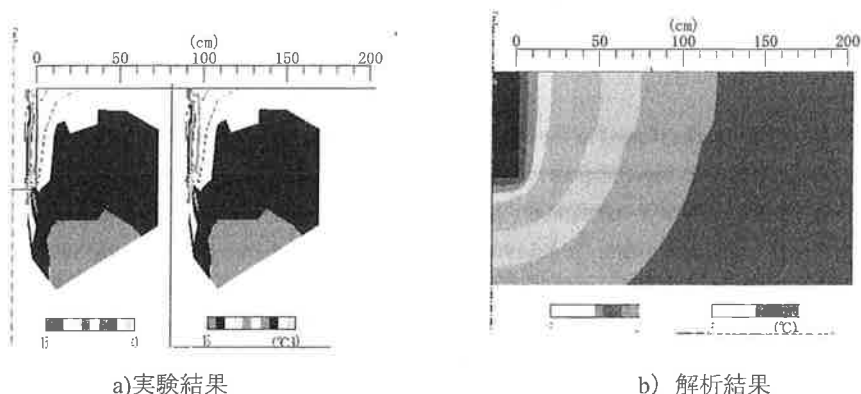


図12 実験結果と計測結果の温度コンタ図(加熱開始から24時間経過後)

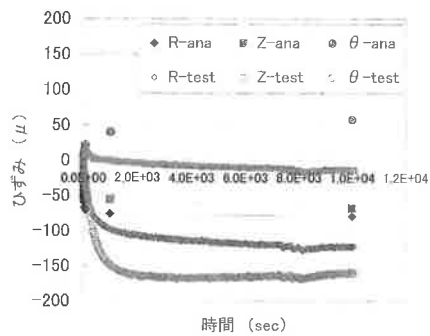


図 13 D 孔の底盤下 30 cm 測点のひずみ変化

- ・実験の結果から今回の解析の底盤面の境界条件は、ほぼ断熱境界としてモデル化できると判断した。

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環として実施したものである。関係各位には、ここに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) 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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート，JNC-TN1400-99-020，ppIV-72，1999.
- 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，電力中央研究所報告，N04028，2005.
- 4) 高倉望・池野谷尚史・他1名：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，技術研究所報 No. 32，pp.59-69，2007，2.
- 5) 例えば，越智健三・龍岡文夫・他1名：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，p.143-152，1993.
- 6) 岡田哲実・谷和夫・他3名：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・岡田哲実・他5名：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) 澤田昌孝・高倉望・他4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，2008，投稿中.
- 9) 田中悠一・高倉望・他3名：地盤埋設型センサーの計測手法に関する検討，第37回岩盤力学に関するシンポジウム，2008，投稿中.

ADVANCED OF AN ANALYSIS USING COUPLING ANALYSIS OF THERMO-HYDROLOGIC-STRESS IN SEDIMENTARY SOFT ROCKS (Phase I)

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 sedimentary soft 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 40°C 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 thermo-hydrologic-stress, the effects of the temperature and stress, generated in the sedimentary soft rock, due to the heater test.

- ・実験では全方向の岩盤ひずみが引張側を示した。一方、解析では半径と鉛直方向が引張側を示すものの周方向の岩盤ひずみは圧縮側を示した。
- ・解析で得られた岩盤ひずみは半径方向と鉛直方向で 60 μ ~ 80 μ 程度と実験値 (180 μ 程度) より小さい。

8. 残された課題

原位置加熱実験で計測されている岩盤ひずみに不確定な影響が伺える。従って、その影響は評価しなければならない。また、実験結果と解析結果とを比較した結果から、想定されたヒーター孔周辺の周方向の岩盤ひずみ発生要因の検証が挙げられる。今後、フェーズII、フェーズIIIで得られる実験値と解析値との比較検証をもとに熱・水・応力連成解析の精度を向上させる。