

遠心力载荷装置を用いた異方応力条件下における 高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動 に関する実験的研究

西本 壮志^{1*}・澤田 昌孝¹・岡田 哲実¹

¹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)
*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

高レベル放射性廃棄物処分施設周辺（ニアフィールド）では熱-水-応力連成現象の長期挙動を評価するために、岩盤、緩衝材、模擬廃棄体からなる廃棄体周辺モデルを用い、遠心力場の相似則を利用した等方応力条件下で遠心力载荷模型実験（時間加速実験）を行ってきた。今回新たに三主応力を独立に制御できる圧力容器を開発し、異方応力条件下での模型実験を行うことを可能にした。 $\sigma_x = \sigma_z = 6\text{MPa}$ 、 $\sigma_y = 12\text{MPa}$ 条件下で実験した結果、廃棄体の浮上量は等方応力条件下の実験と同程度であったが、廃棄体の沈下量および緩衝材の土圧の経時変化は異なり、計測されたひずみから異方応力場で生じた岩盤（処分孔）の変形による透水経路の不均質性が影響したことが示唆された。

Key Words : centrifugal model test, high-level radioactive waste, long-term behavior, THM coupling

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設周辺（ニアフィールド）では、長期にわたり廃棄体の発熱、地下水の再冠水、ベントナイト緩衝材・埋戻し材の膨潤・変形、岩盤の変形といった挙動が複合連成作用を生じる極めて複雑な環境下にある。かつ金属製の収納容器（オーバーパック）、粘土のベントナイト緩衝材、それらを封入する岩盤という異種複合材料で構成される。このため、オーバーパックの支持性や核種移行経路に影響を及ぼしうる緩衝材や周辺岩盤の長期挙動を評価し、施設の安全評価の信頼性向上を図る必要がある。

この信頼性向上のために、実規模実証試験や予測数値解析シミュレーションが実施されている^{1,2)}。数値解析結果の妥当性検証のために実規模試験結果との比較・検討を行うことは数値解析モデルの高精度化のために有効な手段の一つである。しかし実規模試験の期間は現実的には十数年程度であるため、数値解析による百年単位の長期挙動を検証するには限りがあった。

遠心力場の相似則を利用した遠心力模型実験は、力学・水理・熱や時間加速の効果により、ニアフィールドの長期力学的挙動をある程度推定できる可能性があることから、数値解析結果の妥当性確認に有効であると考えられている。

この点に着目し、電中研では長期運転が可能な遠心力載

荷装置と同装置を用いたニアフィールドの長期力学的挙動評価実験を開発してきた³⁾。これまで等方応力、常温(25°C)及び廃棄体の発熱(95°C)を考慮した条件で、遠心力30G場、模擬廃棄体・緩衝材・周辺岩盤から成るモデルを用い、最大約200年相当(実験時間約85日)の遠心力模型実験を実施した。その結果、オーバーパックの変位量、緩衝材の土圧が拘束圧に応じて変化し、かつ同実験の期間内において収束しないことが分かった。すなわち地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動と緩衝材の膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、緩衝材の土圧が地圧依存性・時間依存性を生じることを実験的に明らかにした。また、高温状態が緩衝材の密度分布に影響を及ぼすことが明らかになった^{3,4)}。

一方で、実サイトを考慮した場合、地下深部の岩盤に対して処分坑道の掘削によって生じる鉛直・水平方向の応力異方性、あるいは、ある特定のテクニクな場においては水平方向の地圧異方性が発生することも考えられる。異方応力条件下では、条件によっては岩盤の変形が緩衝材の膨潤挙動やオーバーパックの変位挙動に影響を及ぼす可能性がある。このため本研究では、新たに遠心力場で三主応力が载荷可能な圧力容器を開発し、同様の遠心力模型実験を実施した結果を報告する。

2. 遠心力模型実験

(1) 遠心力場での相似則

遠心力模型実験において実物と模型が同じ材料であるとした場合、ニアフィールドは岩盤・土と間隙流体からなる二相混合体と考えることができる。このため熱・水・応力に関連するパラメータの相似率は表-1のようになる。詳細については、既報³⁾を参照されたい。従って、実寸法の1/Nの模型を遠心力载荷装置によりN倍の重力加速度場に置けば、実際の応力やひずみの分布が実物換算時間の1/N²に短縮されて再現されることになる。例えばN=30とした場合、約100年相当の挙動の評価は40日の実験時間で可能となる。

(2) 想定した施設およびその模型

本研究で用いたニアフィールド模型は、オーバーパック周辺を抽出したものである。すなわち、オーバーパック周辺の岩盤部および処分孔内の緩衝材部・廃棄体部から成る縮小模型である(図-1)。この模型は、電中研・電事連共同研究報告書⁹⁾において提案されているオーバーパックや処分孔サイズの1/30の大きさである。加熱型模擬オーバーパックは全密度が6.16Mg/m³となるようにステンレス鋼材(SUS430)に小型ヒーター(200V-1.2A)を封入した。緩衝材は圧縮ベントナイト(クニゲルV1)を用い、初期乾燥密度は1.74Mg/m³(膨潤後平均密度を1.55Mg/m³)になるように圧縮した。周辺岩盤は一辺180mmの立方体で、軟岩サイトを想定し、均質・安価で容易に入手可能な田下凝灰岩を使用した。田下凝灰岩の乾燥密度、湿潤密度はそれぞれ、約1.7Mg/m³、2.0Mg/m³であり、一軸圧縮強さは20MPa(気乾)および12MPa(湿潤)程度である⁹⁾。

(3) 遠心力载荷装置

本研究では、最長6ヶ月連続運転可能な超長期遠心载荷岩盤実験装置("CENTURY5000-THM": Centrifugal Test equipment for Ultra-long time Range of 5000 Years: simulating coupled Thermo- Hydro-Mechanical processes)を使用した(図-2)。本装置は、回転アームが4柱ビーム式、最大有効回転半径3.2mの装置であり、直径約10mのコンクリートピット内に格納されている。付与できる最大遠心加速度は静的条件で100G(167.2rpm)である。模型を搭載するプラットフォーム面積は2.64m²(1.60m×1.65m)、最大積載可能量は150G・tonである。回転軸には動力・制御用スリップリング、通信用無線LAN、油圧・水圧・空圧用ロータリージョイントが設置されており、機外から回転体内部へ電力や油圧等が供給される。また、圧力容器の応力制御のために、回転軸付近のアーム上面に増圧機4台、プラットフォームには加熱型オーバーパックの温度制御装

表-1 遠心力場の相似則。

物理量	model/prototype	相似率
長さ	l_m/l	$1/N$
面積	A_m/A	$1/N^2$
体積	V_m/V	$1/N^3$
応力	σ_m/σ	1
ヤング率	E_m/E	1
弾性ひずみ	$\varepsilon_{em}/\varepsilon_e$	1
温度	T_m/T	1
間隙流体の粘性	η_{wm}/η_w	1
間隙流体の速度	u_m/u	N
時間	t_m/t	$1/N^2$

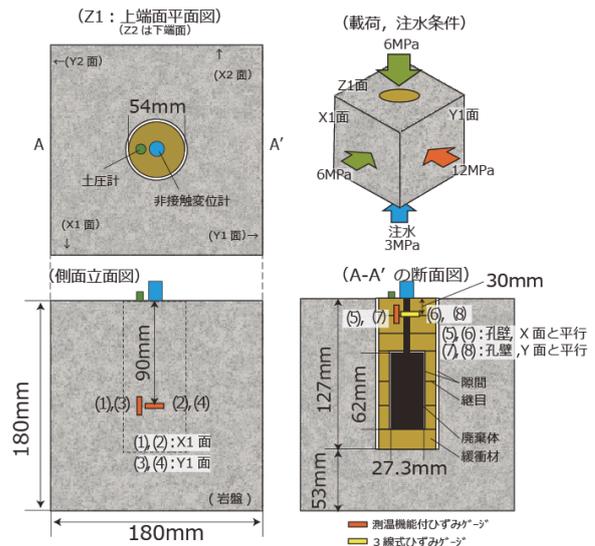


図-1 模型およびセンサーレイアウト。



図-2 本実験で用いた遠心力载荷装置。

置を搭載している。増圧機・加熱型オーバーパックの制御および実験データは無線LANを通じて計測室内のPCで随時制御・保存する。

(4) 圧力容器

本研究ではオーバーパック周辺を抽出した縮小模型を用い、かつ模型に地圧相当の異方応力を負荷する。このため図-3に示すような圧力容器を用いた³⁾。圧力容器は、5面剛板载荷方式(水圧により作動、上蓋面は反力のみ)の真三軸タイプで、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z の独立した応力を立方体模型に負荷でき、最大12MPa、最大主応力と最小主応力の差が最大6MPaの異方応力の負荷が可能である。

模型にはゴムスリーブが被覆され、間隙水の注入が可能

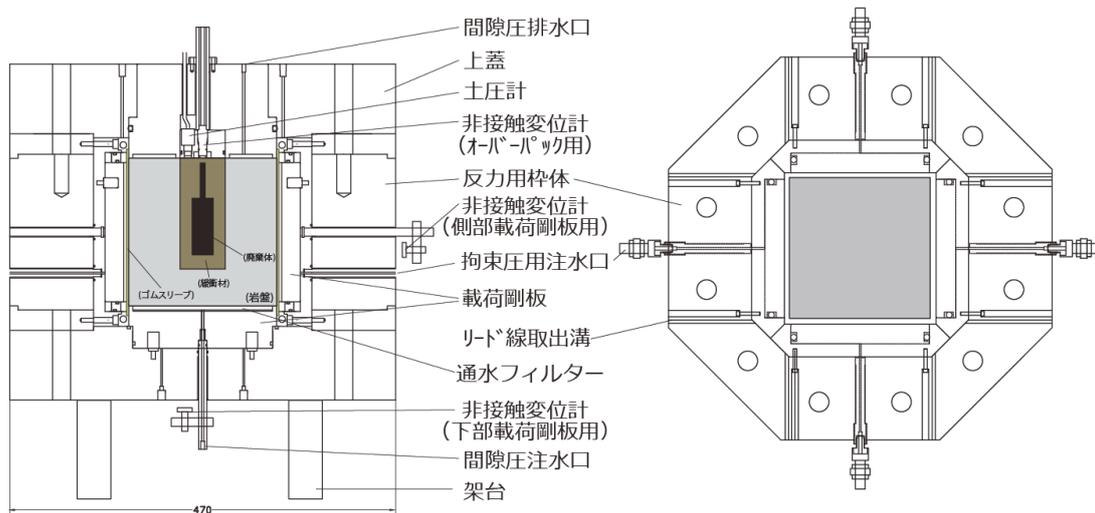


図-3 圧力容器の概略.

能である。模型への間隙水圧は、下部載荷板に設けられた注水口を通じ負荷され、間隙水は上蓋面の排水口から排出される。

(5) 実験条件

実験条件は、遠心加速度30G、深度300mでの水平異方応力場を想定し、拘束圧 $\sigma_x = \sigma_z = 6\text{MPa}$ 、 $\sigma_y = 12\text{MPa}$ とした。温度条件は、25°C（常温実験，TG-22）と廃棄体の温度95°C一定（加熱実験，TG-20）とした。模型への注水圧は3MPa（蒸留水），排水圧（背圧）は0.5MPaで一定圧制御し、模型下面より注水した。なお、本実験は静的試験であるため、相似則上、実物と模型の流入流体の粘性が同一である必要があることから、蒸留水を注入した。

実験手順は、乾燥状態の模型を圧力容器に設置した後、遠心ピット内を所定の温度に設定、拘束圧を付与した。拘束圧による岩盤のひずみがほぼ収束した後に遠心力を付与、所定の遠心加速度に到達した後、注水を開始した（加熱実験では廃棄体の加熱も同時に実施）。実験期間は最長60日（実物換算時間約150年相当）で、オーバーパックの鉛直変位量、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみを計測した（加熱実験では廃棄体及び所定の箇所でも計測）（図-1）。

3. 結果および考察

以下に、本実験で得られた結果を示す。なお図において、オーバーパック変位量のプラスは浮上、マイナスは沈下、ひずみのプラスは引張、マイナスは圧縮を示す。ベントナイトの土圧は計測された土圧から背圧を差し引いたものである。図の下横軸は実験経過時間（対数）、上横軸は相似則による実物換算時間（対数）、図の値はオーバーパックの加熱と注水開始点を原点（0時間）と

してプロットしてある。特に断りのない限り実験値・実験経過時間を用いて記述する。また、オーバーパックの変位とベントナイトの土圧については、比較として既往の等方応力条件での結果もあわせて示している（常温実験TG-10⁶、加熱実験TG-17⁴、いずれも拘束圧6MPa）。

(1) オーバーパック変位

図-4にオーバーパックの鉛直変位量を示す。加熱実験（TG-20，図-4上）で得られたオーバーパックの変位は、初期において既往の等方応力実験と同様に、実験開始後20時間経過後からベントナイトの膨潤に伴い急激に浮上を示した一方、極大値に到達するまで300時間程度要し、等方応力実験に比べ時間を要している。最大値を計測した後は等方応力実験と同様に沈下傾向にあるが、沈下量は大きく、局所的には浮上沈下を繰り返す、実験終了時には初期位置より沈下している（計測値-0.2mm）。常温実験（TG-22，図-4下）で得られたオーバーパックの変位は、ベントナイトの膨潤に伴う浮上、最大値を計測するまでは、加熱実験、等方応力実験と類似の傾向を示す。また、最大値は緩やかに低下する傾向は等方応力実験と同様である。なお、約700時間時に計測されている0.1mm程度の急激な低下は、排水ポンプのトラブルにより一時的に背圧が上昇した影響によるものである。

(2) ベントナイトの土圧

図-5にベントナイトの土圧の経時変化を示す。初期においては本実験の加熱実験（図-5上）、常温実験（図-5下）ともに等方応力条件の実験の経時変化と同様の傾向を示した。すなわち、処分孔内に設置されたベントナイトが模型に注入された間隙水によって下部から吸水膨潤しながら処分孔内の隙間や継目を下から順に埋める。実験においてベントナイトの土圧は模型上端面において計測していることから（図-1，3），土圧計の値

が数十時間程度変化せず、その後ベントナイトの膨潤による土圧の急激な上昇が計測される。

異方応力実験では急激な土圧の上昇以降、加熱実験では一旦は低下するが再度上昇し、実験終了時には2.2MPaを計測した。常温実験においても土圧は一旦低下し再び上昇、その後は実験終了時まで低下傾向を示し、実験終了時は0.8MPaを計測した。

(3) 岩盤のひずみ

計測のうち、孔壁に貼付したGauge5～8に着目する(図-6)。孔壁のひずみは、常温・加熱実験、X・Y面、軸・横方向いずれも複雑な挙動を示している。概略的には、100時間経過付近で、側面のひずみ同様、急激な引張が現れる。その後、急激な引張と圧縮が繰り返される中でひずみが大きくなり(引張)、最大値は加熱実験(TG-20)の方が大きい(TG-20のGauge8)。加えて、TG-20ではY面と平行な面横方向に貼付したGauge8の方がX面と平行な面の横方向に貼付したGauge6より最大値

が大きい。なお、TG-20のGauge8の約700時間以降、TG-22のGauge6の約400時間以降はひずみゲージを貼付する際に岩盤に塗布した下地剤が剥離したと考えられる影響で、計測値が大きくばらついている。

(4) 考察

オーバーパックの変位の最大値について、常温実験に比べ加熱実験の方がやや小さく、等方・異方応力条件での差は明瞭ではない(等方・異方応力条件ともに常温実験で約1mm、加熱実験で約0.5～0.8mm程度の浮上)。本研究では異方応力条件が常温・加熱実験各1ケースずつの実施のみであるため今後データ数を増やす必要があるが、少なくとも本実験で実施した水平応力差が2倍程度の異方応力条件では、応力差に比べ温度条件による違いの方がオーバーパックの浮上量に対して与える影響が大きい可能性がある。

オーバーパックが浮上し変位が最大値を示した後は、沈下傾向に転じる。同様にベントナイトの土圧も最大値

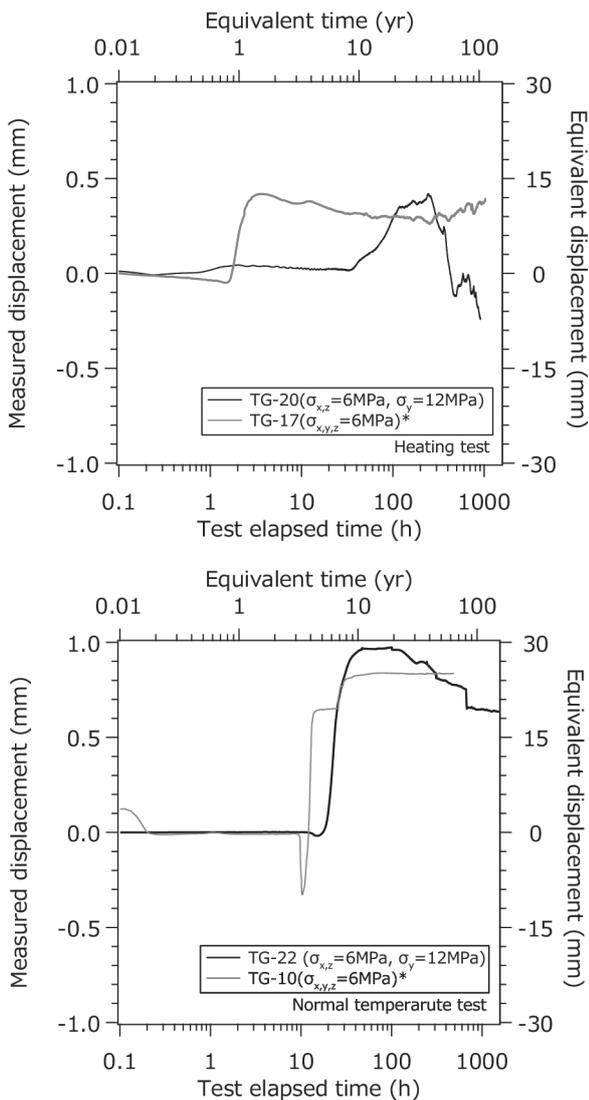


図-4 オーバーパックの鉛直変位の経時変化。

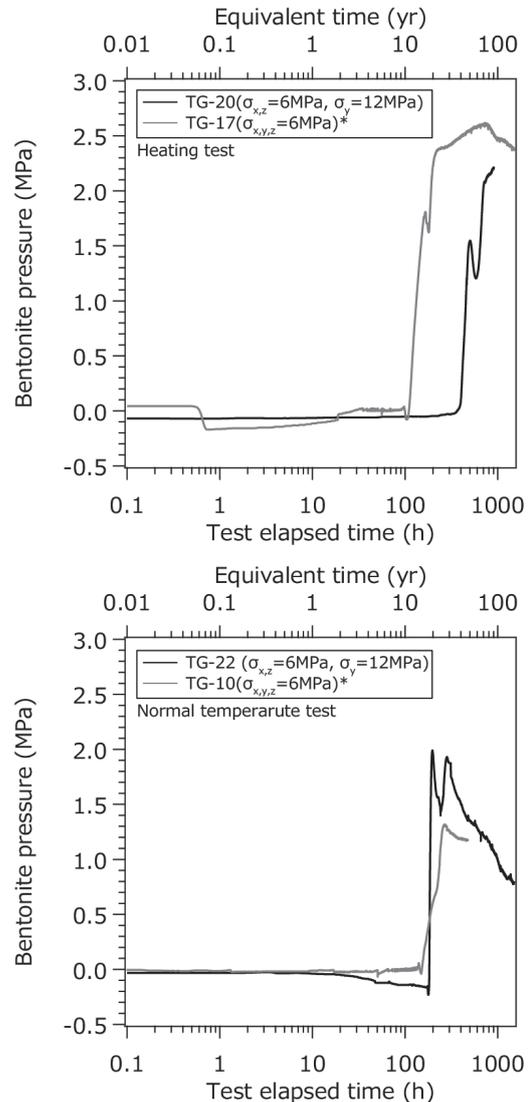


図-5 ベントナイトの土圧の経時変化。

を計測した後、低下に転じる（TG-20を除く）。低下に転じる傾向は等方応力実験と同様である。一方で、異方応力条件の本実験では、等方応力実験よりもオーバーパックの沈下量とベントナイトの土圧の低下量が明らかに大きい。また、ベントナイトの土圧の最大値について、本実験のTG-22と等方応力実験のTG-10を比較すると、TG-22の方が高い（加熱実験は、TG-20が実験途中で終了したため比較の対象外とした）。定性的には、高いベントナイトの土圧が発生すれば、オーバーパック上方からの押しつける力が高くなるので沈下量も大きくなることから、オーバーパックの沈下量がTG-10よりTG-22のほうが大きいことと調和的である。また、異方応力実験のTG-22と等方応力実験のTG-10のベントナイトの土圧の最大値について、異方応力条件の方が高い値を示している。ベントナイトは岩盤処分孔内に埋設され拘束圧（地圧）の影響を受ける。計測されるベントナイトの土圧は岩盤の変形によって生じる応力に近づく可能性がある。このため、 σ_v に高い拘束圧を与えている本実験の方が高くなったと考えられる。

次に、ベントナイトの土圧の経時変化について、等方応力実験に比べ異方応力実験では増減を繰り返している。ベントナイトが膨潤する過程においてベントナイトの吸水による一時的な透水係数低下によって、土圧（膨潤圧）の上昇の経時変化の傾きが一時的に緩やかになることが既往の遠心力模型実験^{3,4,6}で計測されているが、本研究では大きく低下した後、再び増加するという異なる傾向を示している。この要因を検討するため、孔壁の岩盤のひずみに着目した。

孔壁のひずみ（図-6）は、複雑に引張・圧縮を繰り返している。ここで、処分孔をある外圧の作用する無限遠（二次元平面）において円孔が存在する場と考える。円孔の中心を原点とする極座標に置き換え、この時の応力・円孔の変位について、Kirschの式^{7,8}より、結論だけ述べると、異方応力場においては孔壁の接線方向では外圧の最大3倍の応力集中が生じ、また本実験における応力条件では処分孔がX軸方向に1%程度歪むことになる。異方応力場においては、等方応力場に比べ透水係数が変化することが知られている⁹。これは、異方応力によっ

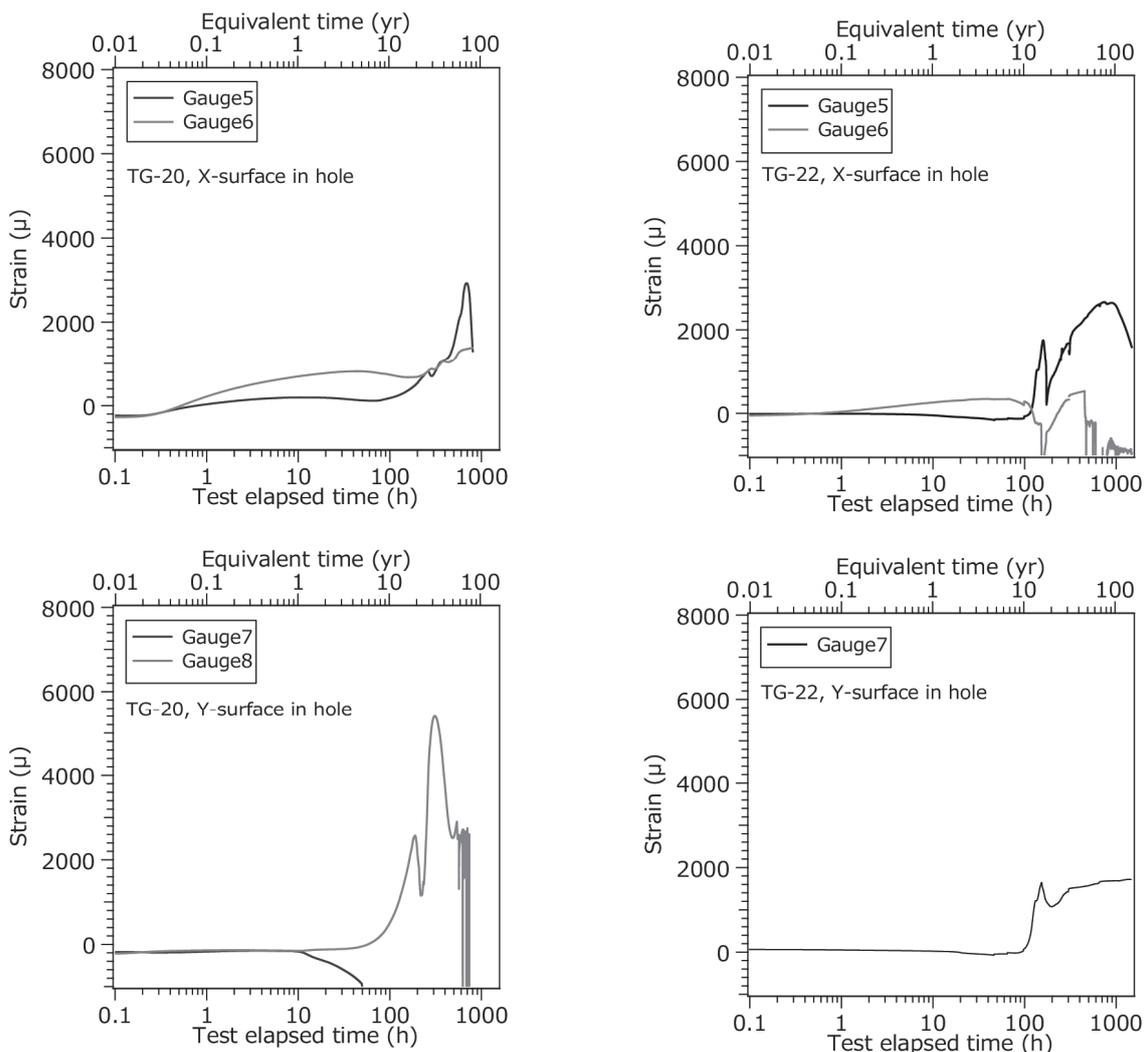


図-6 処分孔壁のひずみの経時変化.

て岩盤内の間隙形状の変化やマイクロクラックが生じることなどによって、透水経路（間隙の連結性）などが変化することに起因する。用いた田下凝灰岩の三軸圧縮強さ⁹⁾を考えると、本実験の異方応力条件では岩盤や処分孔が破壊し亀裂を生じることはないと考えられる。一方で、異方拘束圧の载荷によって処分孔周辺における応力集中による岩盤内間隙の形状変化、それに伴い透水経路の連結性の不均質性が生じやすい場であると考えられる。また、実験経過とともに間隙水が浸潤し岩盤の有効応力と剛性低下が生じる。これらと処分孔内で発生するベントナイトの膨潤圧によって処分孔内のひずみが等方応力実験と異なり引張・圧縮を繰り返した可能性がある。逆に、岩盤内で生じた透水経路の不均質性などによって、既往の要素試験や等方応力実験に比べ、ベントナイトが均質に膨潤しなかったことも考えられる。すなわち、孔壁のひずみの引張・圧縮と同じ様にベントナイトの土圧が増減を繰り返していることから、異方応力場では等方応力場に比べ、岩盤の変形およびそれによって生じる透水経路の不均質性などとベントナイトの膨潤変形による力学的相互作用がより強く生じる可能性がある。

4. まとめ

高レベル放射性廃棄物処分ニアフィールドの長期力学的挙動を把握するために、本研究では、異方応力条件下におけるの遠心力模型実験を行った。本報では以下のような結果を得た。

(1) 異方応力条件で計測された模擬オーバーパックの最大浮上量は、等方応力条件の結果と類似していた。

(2) 一方で、オーバーパックの沈下量およびベントナイトの土圧の経時変化は異なり、計測された孔壁のひずみから異方応力場で生じた岩盤（処分孔）の変形による透水経路の不均質性が影響したことが示唆された。

現在、異方応力場の遠心力模型実験は本報で報告した

常温・加熱実験の各1ケース、水平応力の異方応力場の実験のみである。このため今後は応力条件を変え、さらなる実験データの蓄積を行う予定である。これにより、より異方応力場におけるニアフィールドの長期力学的挙動を把握し、高レベル放射性廃棄物処分場の長期安全評価の信頼性向上のための基礎的なデータの提供を目指す。

参考文献

- 1) 中山雅, 澤田純之, 棚井憲治, 杉田裕: 幌延URLにおける人工バリアの性能確認試験(1)試験計画の全体概要, *日本原子力学会2013年春の大会予稿集*, A14, pp. 529, 2013.
- 2) 日本原子力研究開発機構: 平成27年度地層処分技術調査等事業「処分システム評価検証技術開発」報告書, 2016.
- 3) 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その2), *電力中央研究所報告*, N11040, 2012.
- 4) 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その4), *電力中央研究所報告*, N14003, 2014.
- 5) 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義: 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術—その4人工バリアの設計と製作—, *原子力バックエンド研究*, 5, pp. 103–121, 1999.
- 6) Nishimoto, S., Sawada, M. and Okada, T.: New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, *Rock Mech. Rock Eng.*, 49, pp. 3323–3341, 2016.
- 7) Kirsch, G., *Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*, *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 42, pp. 797–807, 1898.
- 8) 福島啓一: わかりやすいトンネルの力学, 土木工学社, 1994.
- 9) Holt, R. M.: Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field, *SPE Form. Eval.*, 5, 4, pp. 44–448, 1990.

LABORATORY MEASUREMENT OF LONG-TERM BEHAVIOR IN HLW NEAR-FIELD UNDER ANISOTROPIC STRESS CONDITION BY CENTRIFUGE MODEL TEST

Soshi NISHIMOTO, Masataka SAWADA and Tetsuji OKADA

To evaluate the THM long-term behavior in HLW near-field, we conducted the centrifuge model test under the isotropic stress conditions on the basis of a centrifuge scaling law. Now, we have developed the new pressure vessel which can independently control three principal stresses, and can conduct model tests under the anisotropic stress conditions. As the result under $\sigma_x = \sigma_z = 6\text{MPa}$, $\sigma_y = 12\text{MPa}$, the maximum heave value of overpack was similar to the test under the isotropic stress condition. However, the settlement value of overpack and the temporal change of soil pressure of buffer were different. It was suggested that the inhomogeneity of the permeation path caused by the deformation of the rock under the anisotropic stress was influenced.