

## 遠心力模型実験による高レベル放射性廃棄物処分場 ニアフィールドにおける長期力学的挙動計測

西本壮志\*1 岡田哲実\*1 澤田昌孝\*1

高レベル放射性廃棄物地層処分場周辺（ニアフィールド）の長期挙動評価のために、遠心力载荷装置を用いたニアフィールド模型試験を行った。縮小模型は処分孔を開けた岩盤（凝灰岩）、ベントナイト、模擬オーバーパッカー対から成り、圧力容器に封入された後、地圧相当の応力を負荷し、30 Gの遠心場において最長約2ヶ月の試験を行った。その結果、オーバーパッカーの変位量、ベントナイト緩衝材の土圧が負荷した拘束圧により変化し、かつ本実験の期間内において収束しなかった。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、ニアフィールドの挙動が地圧依存性・時間依存性を生じることを実験的に初めて明らかにした。

**Keywords:** 高レベル放射性廃棄物処分、遠心力模型実験、ニアフィールド、長期挙動評価、力学的相互作用

We carried out the centrifugal model test focusing on the stiffness of the bedrock and hydraulic-mechanical processes in the near-field of the HLW disposal repository. The model consisted of a rock mass, bentonite buffer, and model overpack. The centrifugal model tests were conducted at 30 G of centrifugal force field with confining pressures and injecting pore water. The measured local maximum values and the temporal changes in the displacement of the overpack, the soil pressure of the bentonite, and the strain of the rock mass were clearly dependent on the confining pressure. Our data revealed experimentally that the long-term behavior in the near-field was changed by the geomechanical interaction between the deformation stress of the bedrock and the swelling behavior of the buffer corresponding to the depth of the disposal repository and the stiffness of the bedrock.

**Keywords:** HLW disposal, centrifugal model test, near-field, long-term behavior, geomechanical interaction

### 1 緒言

高レベル放射性廃棄物（HLW）の地層処分場周辺（ニアフィールド）は、金属製の廃棄体収納容器（オーバーパック）、粘土である緩衝材、それらを封入する岩盤という異種複合材料で構成され、かつ、長期にわたり熱・水・応力などの複合連成相互作用を生じるきわめて複雑な環境下にある[1]。このため、例えば1000年後の緩衝材の厚みが安全基準通り担保しているかなど、処分場の信頼性向上のためには、数百年単位の長期挙動評価が重要になる。一方、長期挙動評価のための数値解析結果の妥当性検証に、実規模実証試験を数百年単位で実施することは現実的に困難である。

遠心力場では模型上において相似則に基づく自重応力の再現や時間短縮の効果が期待でき、縮尺模型による遠心力载荷実験を行えば、ニアフィールドの長期挙動（オーバーパッカーの変位量や緩衝材の膨潤挙動、周辺岩盤のひずみ等）を再現・評価できる可能性がある。そこで本研究では遠心力载荷模型実験により、周辺岩盤と緩衝材の力学的相互作用に着目したオーバーパッカーの変位量、緩衝材の土圧、周辺岩盤のひずみに関するニアフィールド長期挙動データの取得を行った。これにより、ニアフィールド場で生じる連成現象を実規模実証試験、数値解析シミュレーション以外の方法、すなわち、遠心力载荷模型実験により評価する新しいニアフィールド長期挙動評価手法の骨格を提示する。

### 2 遠心力模型実験

#### 2.1 遠心力場の相似則

Laboratory measurements of long-term geomechanical behavior in the near-field of HLW disposal repository by centrifugal model test by Soshi NISHIMOTO (soshi-n@criepi.denken.or.jp), Tetsuji OKADA, Masataka SAWADA

\*1 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所  
Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry,  
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

実物と模型が同じ材料であると仮定した場合、静的条件においてニアフィールドで起こりうる力学的・水理的現象は、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。したがって、遠心力模型実験における相似則は、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と模型の相似な位置において同じになり、かつ、実物換算時間の $1/n^2$ に短縮されて再現されることになる。例えば $n=30$ として1ヶ月間の実験を行えば約76.5年相当の挙動を評価できることになる。詳細については、既報[2,3]を参照されたい。

#### 2.2 実験装置およびニアフィールド縮小模型

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。本装置は、回転アームが4柱ビーム式（試料搭載側、カウンターウエイト側固定）、総質量約80 t、最大有効回転半径3.2 mの装置であり、直径約10 mのコンクリートピット内に格納されている。本装置で付与できる最大遠心加速度（G）は静的条件で100 G（167.2 rpm）である。試料を搭載するプラットフォーム面積は2.64 m<sup>2</sup>（1.60 m×1.65 m）、最大積載可能量は150G・tonである。

本研究で用いた模型は、廃棄体周辺を抽出したものである。すなわち、廃棄体周辺の岩盤部（田下凝灰岩）および処分孔内の緩衝材部（クニゲルV1、膨潤後平均乾燥密度：1.55 g/cm<sup>3</sup>）、廃棄体部（全密度が6.16 g/cm<sup>3</sup>）から成る縮小模型である（Fig. 1）。この模型模型は、電中研・電事連共同研究報告書[4]において提案されている廃棄体（オーバーパッカー）や処分孔サイズの約1/30の大きさである。

#### 2.3 実験条件

本研究で用いる模型は廃棄体周辺領域のみを抽出していることから、地圧相当の応力を負荷するために三軸タイプ

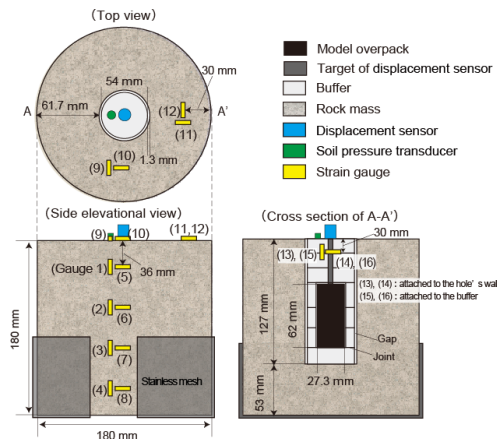


Fig. 1 Near-field model of the centrifugal model test

の压力容器を用いた。計測は、模型のひずみ、緩衝材の土圧、オーバーパックの変位である。実験条件は、遠心加速度 30G 場で等方圧条件とし、それぞれ 5~10MPa の拘束圧を負荷した (応力拘束条件)。間隙水の注入圧は拘束圧の半分、背圧は 0.5MPa で一定制御し (排水条件)、乾燥状態の模型の下面より注水した。温度は 25°C 一定である。実験は、所定の拘束圧を負荷し計測値が収束した後、遠心加速度を付与、所定の遠心加速度に到達した後、注水を開始した。試験期間は 2~6 週間である。

### 3 結果および考察

Fig. 2 に本実験で得られたオーバーパックの変位量 (a) およびベントナイト土圧 (b) の経時変化を拘束圧ごとに示した。あわせて、中村・田中[2]によるベントナイトとオーバーパックのみを用いた遠心実験の結果もプロットしている。彼らの実験では鋼製の容器にベントナイトとオーバーパックを封入したひずみ拘束条件であり、周辺岩盤を含めていないという点が本実験との大きな相違点である。

オーバーパックの変位量について、ベントナイトの膨潤による影響で急激な浮上傾向を示した後に緩やかに沈下に転じている。また、いずれの結果においても沈下量より浮上量の方が明らかに大きく、中村・田中[2]の結果に比べても変化の幅が大きいといった特徴を持つ。ベントナイト土圧は、吸水膨潤にともない急激に土圧が上昇し、極大値を計測した後は低下に転じている。

大局的な挙動は中村・田中[2]の結果と類似しているが、計測値の極大値に着目すると本実験では明らかに拘束圧依存性を持つ。田中[5]では、ベントナイトの膨潤圧が周囲の剛性に依存することを指摘している。本研究における拘束圧の違いによってピーク値が大きく異なるという結果と調和する。加えて、中村・田中[2]のデータは収束傾向を示すが本実験では収束していない (時間依存性)。すなわちベントナイトに周辺岩盤の変形 (処分孔の収縮) により生じる応力を付与する一方、ベントナイトの膨潤圧が周辺岩盤に応力を付与し処分孔の拡大を引き起こす。このため、これらの応力が平衡に達するまで収束しないと考えられ、地圧や岩盤の変形性によってオーバーパックの変位量やベントナイト土圧の収束値、収束時間が異なる可能性がある。

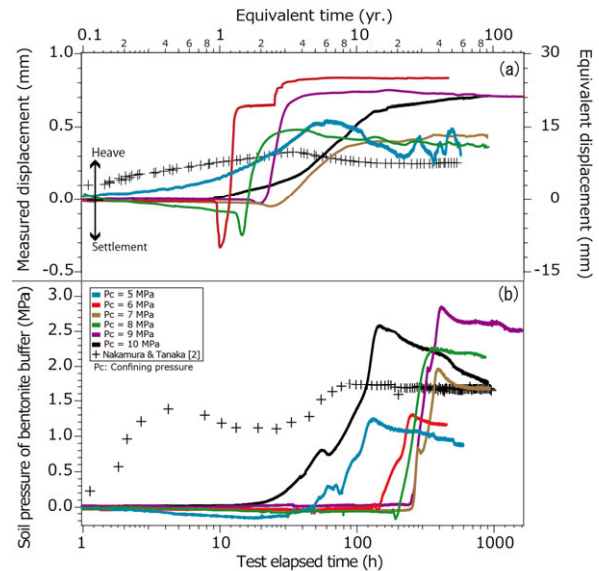


Fig. 2 Temporal change of (a) the displacement of the overpack under and (b) the soil pressure of the bentonite under the confining pressures

### 4 結言

高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールドの長期挙動評価のために、本研究では遠心力模型実験を行った。その結果、地圧と時間経過に応じた岩盤の変形と緩衝材の膨潤変形の力学的相互作用によって、ニアフィールドの長期挙動が地圧依存性・時間依存性を生じることを実験的に初めて明らかにした。以上から、ニアフィールドの長期挙動評価では、処分場の深度に応じて作用する周辺岩盤と緩衝材の力学的相互作用の影響を考慮する必要があると考える。

### 謝辞

本研究を行うに当たり、(株) ジオデザインの荒井郁岳氏には実験業務に協力して頂いた。感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] 新孝一, 岡田哲実, 中村邦彦, 澤田昌孝, 田中幸久: 高レベル放射性廃棄物処分施設のニアフィールドの力学的な長期挙動評価技術. 電中研総合報告 N02 (2006).
- [2] 中村邦彦, 田中幸久: 高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動-遠心模型実験と簡易沈下予測法の提案-. 電中研研究報告 U03074 (2004).
- [3] 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力載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1). 電中研研究報告 N10018 (2011).
- [4] 緒方信英, 小崎明郎, 植田浩義, 朝野英一, 高尾肇: 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, 2, p.103-121, (1999).
- [5] 田中幸久: 締め付けたベントナイトの吸水膨潤過程のモデル化 (その1) —膨潤圧に及ぼす試験条件の影響の数値シミュレーション—. 電中研研究報告 N10015 (2011).