高レベル放射性廃棄物処分場の THM長期挙動評価(その1) ~境界条件の異なる縮尺模型による 遠心載荷時間加速試験~

西本 壮志^{1*}•荒井郁岳²•阿部孝行³

¹ (一財)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)
² (株)ジオデザイン (〒108-0023東京都港区芝浦3丁目20-6)
³ (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター (〒104-0044 東京都中央区明石町6-4)
*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

高レベル放射性廃棄物処分場の再冠水期における熱・水理・力学連成現象を評価するために、相似則に基づいた 遠心載荷時間加速試験を行った.試験は緩衝材に作用する上載圧に着目し、埋戻し材の有無や厚さの違いを模擬し た3つの模型,異なる境界条件を設定し、約100年相当の試験を実施した.その結果、間隙水浸潤初期では境界条件に よらず廃棄体は緩衝材下部の膨潤により浮上する.一方、その後は埋戻し材が無い(緩衝材に地圧を負荷)条件ではほ ぼ収束、埋戻し材が有る条件では沈下傾向を示した.また、埋戻し材の厚さにより沈下量も異なった.加えて、試験後の 緩衝材の密度計測において埋戻し材の有無により、異なる鉛直密度分布を示すことがわかった.

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地層処分において、人工バリア の工学的信頼性向上のため、その品質に係る実験、調査 等が実施されている¹⁾. 実処分環境では人工バリア周辺 (ニアフィールド)の岩盤の変形などの諸挙動も想定さ れるため、人工バリアと周辺岩盤の相互作用も含めて評 価する必要がある. 処分場閉鎖後の再冠水期から飽和に 至る初期の数十年から数百年において、熱・水理・力学

(THM)の相互作用を伴う複雑な現象が発生する.処 分場の長期挙動を評価する手法として,実験による現象 理解,適切なモデル化による数値解析などが挙げられる. 実験的手法は,例えば,JAEA幌延深地層研究センター で実施されている実規模実証試験「人工バリア性能確認 試験」や各種要素試験があり,実物の現象を評価するこ とが可能である².一方,これらの試験は,数百年とい った現象を直接評価することは困難であるため,最終的 には数値解析的検討に委ねられるが,解析による評価の 信頼性向上には,その妥当性確認が必要不可欠である.

電力中央研究所では遠心力場の相似則(時間加速)に 着目し,廃棄体周辺模型を用いた遠心載荷試験の技術開 発を行っている.同試験によりオーバーパックの移動量, 緩衝材の膨潤挙動,岩盤ひずみに関して,閉鎖後~約 200年相当の試験データを取得した結果,周辺岩盤が堆 積岩の場合,岩盤と緩衝材の力学的相互作用により,こ れらの経時変化が処分深度や周辺の剛性に依存すること を実験的に明らかにした³⁾.加えて,同試験模型をモデ ル化し,独自開発のTHM連成コードを用いた数値解析 を実施し,試験と解析結果との比較検討を行い,結果の 相違点についても考察した⁴⁾.

このような背景を受け本研究では、最終的な目標とし て処分システムを構成する人工バリアと周辺岩盤の閉鎖 後の数百年程度のTHM長期挙動評価手法の構築を目指 し、これに資するために、①遠心模型試験、②数値解析 のパラメータ取得のための要素試験、③数値解析、を通 じ、解析手法の妥当性を確認する方法を検討する.

このうち本稿では、数値解析モデルの妥当性確認に資 するために、処分坑道内の埋戻し材の有無および厚さの 違い(緩衝材への上載圧の違い)に着目した処分場の縮 尺模型を作製し、遠心場の相似則に基づく遠心載荷時間 加速試験を実施した結果について報告する.

2. 遠心載荷時間加速試験

(1) 遠心力場での相似則

遠心模型試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・水理・力学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,既報を参照されたい³⁾.従って,実寸法の1/Nの模型を遠心力載荷装置により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とした場合は40日間,N=50とした場合は15日間で約100年相当の挙動の評価が可能となる.

表-1 遠心力場(静的場)の相似則.

物理量	model/prototype	相似率
長さ	1 _m /1	1/ <i>N</i>
面積	A_m/A	1 / N ²
体積	V_m/V	1/N ³
応力	σ_{m}/σ_{m}	1
ヤング率	E_m/E	1
弾性ひずみ	ε _{em} /ε _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

(2) 対象とした施設およびその模型

本試験では、「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次とりまと めー」(以下, HLW第2次取りまとめ)⁵に示されている竪置き ブロック方式の施設を対象とした、異なる3種類の模型を作製 し(HS-01, 03, 05), 試験に用いた. 図-1および表-2に、模 型のイメージおよび境界条件の一覧を示す.

HS-01は、オーバーパック(以下, OP)1体,緩衝材1組を岩 盤内の処分孔1孔に封入した1/30模型である.緩衝材上部、 周圧に地圧相当の全応力を負荷した等方地圧条件であり、 埋戻し材は設置していない(緩衝材上端面は圧力容器蓋).

HS-03は、同様にOP1体、緩衝材1組を処分孔に封入した

1/30模型であるが、緩衝材上部に高さ0.6m相当分の埋戻し 材を設置した. 埋戻し材の模擬が一部であるため、実物で生 じる埋戻し材の自重応力相当分を圧力容器の軸圧で与えた.

HS-05は、OP-緩衝材-処分孔-埋戻し材一対はHS-03 と同様であるが、1/50模型であり、坑道トンネルと緩衝材上部 に設置される埋戻し材の全高さ分、およびその上部の岩盤を 模擬した模型である. HS-03とHS-05では埋戻し材の厚さ、す なわち、埋戻し材の体積弾性率が異なる.

HS-01,03について,鉛直応力(圧力容器で与える軸圧)一 定である「応力一定条件」,HS-05は坑道のトンネル空間が閉 鎖後初期では一定高さであると仮定し,模型の高さ方向の変 位を固定した「変位一定条件」である.周圧は,飽和後の有 効応力が全ての試験で同一条件になる様に設定した.

以下に,その他の共通の条件を記す.

a) 共通の条件(材料)

人工バリアについて、OPの材料はステンレス鋼で、温度調整用のヒーターを封入した. HLW第2次取りまとめに示されているOPの全密度を基準に、試験用OPの比重を6.35とした.

緩衝材は、ベントナイト(クニゲルV1)70wt%+ケイ砂(3号,5 号を50wt%で混合)30wt%とした。初期含水比は約10%、膨 潤後平均乾燥密度は1.60Mg/m³となるよう、所定の治具を用 い円盤状・リング状に締め固めた。





図-1 模型のイメージ.

埋戻し材は、ベントナイト(クニゲルVI)15wt%+ケイ砂 85wt%の割合とした.初期含水比は約8%、初期締固め乾燥 密度は1.81Mg/m³ (湿潤密度:1.91Mg/m³)である.

ケイ砂の粒径について、実物の1/Nの粒径を持つケイ砂を 用意することは困難である。このため本研究では緩衝材・埋 戻し材は弾性材料で破壊しないと仮定し、緩衝材直径に対 し、粒径が2%程度以下となるよう選別した。

周辺岩盤は、軟岩系サイトを対象とし、凝灰岩である三浦 層群初声層(以下、初声凝灰岩)を採取した.これはHLW第 2次取りまとめに示された解析データセットのうち、変形が期 待できる比較的一軸圧縮強さの低いSR-C~E⁵に近い物性 値のためである.初声凝灰岩の乾燥密度は1.68Mg/m³、湿潤 密度は2.07Mg/m³、ヤング率は1.85GPaである.

b) 共通の条件(応力,水質,温度)

応力場は、深度400mを想定した。このため、飽和後の処 分孔上端面の位置の周方向の有効応力が4.0MPa(岩盤密 度2.0 Mg/m³と仮定)となるように、相似則による模型の高さ方 向で生じる自重応力を考慮し、負荷する拘束圧および模型 下端面から注入する間隙水圧を決定した。また試験では、間 隙水については蒸留水を使用した。

OPの温度は、HLW第2次取りまとめで解析により示された 経時変化の結果のうち、処分孔竪置きブロック方式・隙間モ デルのCASE.A(OP-緩衝材間、緩衝材-岩盤間の隙間の 充填物が空気)のCxinの経時変化を採用し発熱させた(図-2, OP表面の最高上昇温度94.5°C).また、模型の境界温度(岩 盤と圧力容器境界)は、実験室の常温(25°C)を地上の平均 気温と仮定し、平均的な地温勾配(2°C/100m)から深度400m に相当する33°C一定に設定した.

(3) 遠心力載荷装置

本研究では、最長6ヶ月連続運転可能な超長期遠心載荷 岩盤実験装置を使用した(図-3).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(167.2pm)である.模型を搭 載するプラットホーム面積は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





図-3 本実験で用いた遠心力載荷装置. 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(送水ポンプ)4台,プラットホームにはOPの温度制御装置を搭載している.増圧機・OP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尺模型を用いるため、模型に深度400m相当の応力を負荷する.このため図-1右に示すような圧力容器を用いた³⁾. 圧力容器は周圧を水圧,軸圧をピストン構造によって負荷する三軸タイプで、周圧,軸圧ともに最大10MPaを負荷できる. 圧力容器の下端・上端にそれぞれ注水・排水ポートが設けられており、模型にゴムスリーブを被覆することで間隙水の注入が可能である. 容器内部下端には、貫通孔式耐圧フィードスルーが設置され、ひずみゲージ、熱電対、土圧計、非接触変位計、オーバーパックのヒーターの電線等を通し、ロガー、温度コントロールユニットに接続する.

(5) 試験手順

具体的な試験手順は以下の通りである.

Stepl:模型を圧力容器に設置後,周圧および軸圧を 0.05MPa/minで所定の圧力まで昇圧する.拘束圧を負荷した 後,ひずみゲージの計測値が安定するまで静置した.

Step2:ひずみゲージの計測値が安定した後,遠心力載荷 装置の運転を開始した.所定の遠心加速度に到達後,各セ ンサーの値が安定するまで,状態を保持した.

Step3:各センサー値の安定を確認後,送水ポンプを用い 模型下端面に0.03MPa/minで所定の間隙水圧まで昇圧,同 時にOPの温度制御を図-2に従い昇温,試験開始とした.

結果および考察

試験で計測した値のうち、本稿では緩衝材の応力(処分孔 上端面部)、オーバーパックの鉛直変位について述べる.ま たHS-05では模型内の水位を計測したため、併せて述べる. 以下に、得られた結果を示す.図において、緩衝材の応 カは計測された土圧から間隙水圧を差し引いた値である.また、オーバーパック変位量のプラスは浮上、マイナスは沈下を示す.図の下横軸は相似則による実物換算時間(対数)、 上横軸は実験経過時間(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物換算値・時間を用いて述べる.

(1) 経時計測の結果

a) 模型内(HS-05)の間隙水の水位

HS-05では模型内の水位を計測するために岩盤内に2ヶ所, 埋戻し材内に2ヶ所,水位センサーを設置した(図-4上).水 位センサーは,縦5mm×横10mm×厚さ0.1mmの2枚のステ ンレス板を電極として使用した簡易なセンサーで,岩盤・埋戻 し材内部の間隙水がセンサー部に到達すると電極間が通電 して電圧(6V)が出力される.

図ー4上に水位センサーで計測した出力電圧の経時変化 を示す.WG01は0.27年相当経過時,WG02が0.63年相当経 過時,WG03が0.88年相当経過時,WG04が1.09年相当経過 時にそれぞれ出力しており,間隙水が模型(岩盤〜埋戻し材) の下方から上方へ順に浸潤していることがわかる.

模型下端面からWG01間の実物換算距離をa, WG01からWG02間をb, WG02からWG03間をc, WG03からWG04間をdとして間隙水の浸潤速度を求めた.ここで浸潤速度とは, a-dの距離を水位センサーの出力時間で除した値である. 図-4下に各間における浸潤速度を示す. 求められた浸潤速度はおよそ3.2~3.7×10⁷m/sであり,本試験では岩盤と埋戻し材の浸潤速度に大きな差は見られなかった.

b) 緩衝材の応力

図-5に、緩衝材の応力の経時変化を示す. 緩衝材の応力は、設置された土圧計の位置(処分孔上端面部)における間隙水圧を深度400m相当の静水圧と仮定し、それを差し引いた値と定義した.



図中の矢印は、HS-05で計測した水位センサーの結果から 求めた浸潤速度がHS-01およびHS-03も同等であると仮定し、 水位が処分孔上端部まで到達した時間を示している. HS-03 とHS-05において、緩衝材の応力に有意な変化が生じる時刻 は処分孔上端部まで間隙水が到達する前である. これは、上 部埋戻し材があることで緩衝材の上方からも間隙水が浸潤 する可能性があり、緩衝材上部が膨潤することで応力の発生 が早くなったものと考えられる. 一方でHS-01では上部埋戻し 材がないため、HS-03、05と異なり、緩衝材上部からの間隙水 の供給はないと考えられ、緩衝材の下部から順に膨潤が発 生する. このため、緩衝材の応力の発生が開始する時刻は 1.8年相当経過時とHS-03、05より遅くなったと考えられる. HS-01、03、05で経時挙動は異なるものの、応力の最大値は 0.6MPa程度とほぼ同等であった.

最大値計測後の挙動は、HS-01では変化が小さいのに対し、HS-03、05では最大値計測後に値の低下が見られた.

c)オーバーパックの鉛直変位

図ー6にオーバーパックの鉛直変位の経時変化を示す. 図中の矢印は,前項(3.1(2))で述べた様に,水位が処分孔上 端部まで到達したと思われる時間を示している.

いずれの試験も、処分孔底部に間隙水が到達し下方の緩 衝材が膨潤を開始するとともに、OPの浮上が開始する.その 後、緩衝材の膨潤により浮上を続け最大値を計測した.最大 変位計測後、緩衝材上部に地圧相当の応力が負荷されて いるHS-01ではOP変位の変化は小さく収束傾向にあるが、緩 衝材上部に埋戻し材があるHS-03、05は沈下する傾向を示し た.また埋戻し材の一部とその自重応力を圧力容器の軸圧と して与えたHS-03に比較して、処分坑道の全高さの埋戻し材 を設置したHS-05では沈下量が小さい結果となった.



(2) 試験後の計測の結果

a) 緩衝材の密度測定

図-7 に試験終了後の緩衝材の膨潤後乾燥密度の深度 分布を示す.緩衝材に金属製のロッドを打ち込み,定体積サ ンプリングを行うことで所定の位置での密度を求めた. HS-01 は下部に比べると上部の密度が高く,対して埋戻し材を設置 した HS-03,05 では上部と下部の密度が低く,中部の密度が 高い凸型の形状を示した. HS-01 は緩衝材上端部に圧力容 器蓋(排水面)があり,緩衝材の膨潤が下部から順に発生す ると考えられる. これにより下部で発生した膨潤圧により上部 の緩衝材が圧縮され密度は大きくなると考えられる.

一方、HS-03、05では緩衝材上部に埋戻し材が設置されて おり、緩衝材より透水係数の高い埋戻し材が存在する.この ため緩衝材の下部の膨潤が始まった後、埋戻し材を通じて 緩衝材の上部に間隙水が浸潤し、緩衝材中部より先に緩衝 材の上部が膨潤したと考えられる.これにより、緩衝材の中部 が上下より圧縮され密度が高くなった可能性がある.また、 HS-03、05では分布形状は類似しているが、密度が大きく異 なる.これはHS-05が1/50模型と小寸法であることから、サンプ リング時にケイ砂が一部欠損した影響も含まれる.しかし約 0.1Mg/m³の密度差(質量0.11g)を生じさせるには、欠損がケイ 砂160粒程度に相当するため、この密度差はその他の影響が 考えられる.これについて、次項で述べる.

b)X線CT撮影

X線CT撮影に用いた装置は、医療用のヘリカルCT (Aquilion64 TSX-10 1A,管電圧135keV,最小分解能0.35mm) であり、試験終了後、圧力容器から模型を取り出し撮影を実施した.このため応力解放後の結果である.

HS-03,05では緩衝材上部に埋戻し材があり、その膨出が 予想された.この膨出を評価するために、ターゲットとして緩 衝材上端部に厚さ0.3mmの長尺のリン青銅板を設置した.

図-8に試験後のHS-03のX線CT撮影の結果(立断面)を 示す.この図は、緩衝材上部〜埋戻し材付近を拡大したもの であり、リン青銅板の形状を検討するために画像の色調を補 正したものである.図-8下の黄線は試験前のリン青銅板の



図-7 試験後の緩衝材の膨潤後平均乾燥密度の分布.

位置であり、赤点線は試験後のリン青銅板の位置である. 画像から、リン青銅板が凸状になっていることが観察された. 画像解析により、換算値で最大11.5mmの変形(膨出)が認められた.

図-9に試験後のHS-05のCT画像を示す.中央に立断面, 上段,右段,下段に中央の立断面の示した箇所の横断面も 合わせて示す.(b)~(d)(埋戻し材と岩盤の境界付近)は,(b) より(c),(d)とそれぞれ0.7mm,1.4mm(実寸法)下方の断面で あり,図-9においても色調補正を行っている.なお立断面の (b~d),岩盤-埋戻し材境界でみれる黒色部は隙間であり, 応力解放後に生じたものである.

HS-05においてもHS-03同様,リン青銅薄板を設置したが, 小寸法のためCTによる膨出の検出は困難であった.一方で, (a)の埋戻し材, (e)の岩盤とは明らかに色調(CT値)が異なる,



図-8 HS-03の試験後の CT 画像.



模型横断面に広がる白色部が(c),(d)の処分孔周辺で認め られた.またこれらの白色部が,埋戻し材の砂粒間に浸入し ているように見える(中央横断面の処分孔・緩衝材上部の自 色部). この白色部について, CT値から見積もられる換算密 度は最大で2.4Mg/m³程度を示した.また,この白色部につい て, CT撮影終了後の模型解体時に,岩盤および埋戻し材に 白い付着物が目視で確認された.詳細は不明だが,緩衝材 上部が大きく膨出し,何らかの理由でベントナイト成分が濃集 した可能性がある.

以上, 試験後の密度計測およびCT撮影結果より, 坑道全 高さを模擬し埋戻し材を設置したHS-05では, 緩衝材が岩盤 ー埋戻し材の間等に大きく膨出することで, 緩衝材の密度が 相対的に低下, このために緩衝材上部のオーバーパックに 対する下方への押しつけ圧が低くなったことから, HS-03と比 較して, オーバーパックの沈下量が小さくなったと推定される.

4. まとめ

本研究では、高レベル放射性廃棄物処分場の再冠水期 における熱・水理・力学連成現象の長期挙動を評価するため に、相似則に基づき緩衝材に作用する上載圧に着目し埋戻 し材の有無や厚さの違いを模擬した3つの模型,異なる境界 条件を設定し、遠心模型試験を実施した.その結果、以下の ことが明らかになった.

- (1) 間隙水浸潤初期では境界条件によらずオーバーパック は緩衝材下部の膨潤により浮上する.一方,その後は埋 戻し材が無い(緩衝材に地圧を負荷)条件ではほぼ収束, 埋戻し材が有る条件では沈下傾向を示した.
- (2) 緩衝材上部に埋戻し材が存在することにより、緩衝材中部より先に上部に間隙水が供給され、結果として緩衝材上部・下部が中部の緩衝材を圧縮することで、中部の密度が相対的に高くなる.

(3) 試験後のCT撮影結果より, 埋戻し材に対し緩衝材が膨 出し, その膨出の程度は緩衝材の厚さ(体積弾性率)に 依存する.

謝辞

本研究は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平 成27-28年度地層処分技術調査等事業(処分システム工 学確証技術開発)」及び「平成29年度高レベル放射性廃 棄物等の地層処分に関する技術開発事業(処分システム 工学確証技術開発)」の成果の一部である.

参考文献

- (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター(2015):平成26 年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術 開発」報告書(第2分冊) -人工バリア品質/健全性評価 手法の構築-緩衝材.
- 中山雅澤田純之,棚井憲治,杉田裕(2013):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A14,529.
- Nishimoto,S., Sawada,M. and Okada,T. (2016): 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, 3323– 3341.
- Sawada, M., Nishimoto, S. and Okada, T. (2017): New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 2: Numerical Simulation of Model Tests in Isothermal Condition. *Rock Mech. Rock Eng.*, **50**, 159–169.
- 5) 核燃料サイクル開発機構(1999): 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-.

EVALUATION OF THM LONG-TERM BEHAVIOR IN HLW DISPOSAL REPOSITORY (PART 1): CENTRIFUGAL TIME-ACCELERATING MODEL TEST UNDER DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS

Soshi NISHIMOTO, Fumitaka ARAI and Takayuki ABE

Our aim is to evaluate the long-term behavior of the coupled THM phenomena in the reflooding of HLW disposal repository by the centrifugal time-accelerating test. Focusing on overburden stress of the buffer, we made the models with/without the backfill material, and then, conducted the test equivalent to 100 years. As a result, the overpack heave due to swelling of the lower buffer in all models in the initial reflooding stage. After that, the displacement of overpack showed the almost convergence under the condition of giving overburden stress equivalent to the ground pressure to the buffer. On the other hand, overpack sank under the condition of existence of backfill material. In addition, the vertical distribution of the density of the buffer after the test varied depending on the presence or absence of the backfill material.