

高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールド模型を用いた遠心力载荷装置による長期挙動評価試験

西本 壮志^{1*}・岡田 哲実¹・澤田 昌孝¹

¹ (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)

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

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の周辺（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。縮小模型供試体は処分孔を空けた岩盤（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（2～10 MPa）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、岩盤のひずみ、ベントナイトの膨潤、オーバーパックの浮上・沈下が観測され、実物換算時間で100年程度経過した時点においてもこれらの値は収束しなかった。また、計測結果には拘束圧依存性が認められ、緩衝材中の廃棄体が安定して定置するまで軟岩サイトでは少なくとも100年以上の年月を要する可能性が示唆された。

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

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分施設周辺(ニアフィールド)では、長期間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、岩盤の変形などが発生し、これらが相互に影響を及ぼし合う関係にある¹⁾。このため、処分施設の安全評価上、例えば1000年後の緩衝材の厚みが安全基準通り担保されているかどうか、クラック等の進展による核種移行経路に対する影響の可能性など、ニアフィールドにおける数十年～数千年にわたる長期の挙動評価が重要になる。より実証的なデータを得るためには、実規模実証試験(プロトタイプテスト)を行い、物理的・力学的・水理的な計測を行うことが有効である。一方で、場所や時間・経済的な制約などから長期間のプロトタイプテストは容易ではなく、これまでの研究例も少なく²⁾、長期の挙動予測は数値解析的による検討が現実的である³⁾。

ニアフィールドは金属製の収納容器(オーバーパック)、粘土である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ため、ここで生じる諸現象は熱・水・応力などの複合連成相互作用を生じる極めて複雑な環境下にある¹⁾。そのため、長期にわたるニアフィールドの挙動評価を行う数値解析モデルは、そのパラメータ取得やモデルの妥当性検証が必要不可欠である。パラメータ取得には、ニアフィールドを構成する様々な材料の力学・透水特性の把握試験、また、解析モデルの検証には主としてプロトタイプテス

トとのヒストリーマッチングが必要である。一方で、プロトタイプテストを実施できる期間は限りがあり、数百年単位の長期挙動モデルの検証は非常に困難である。このため、遠心場の相似則における時間短縮の効果に基づいた、縮尺模型上で長期間の現象を再現する遠心力模型試験による、ニアフィールドの長期挙動評価が可能になれば、数値解析モデルの長期予測の検証等に適用できる可能性がある。

そこで本研究では、ニアフィールドの長期力学挙動の把握・評価を行うことを目的として、遠心力载荷装置を用いた縮小模型実験を行い、岩盤のひずみ、ベントナイトの膨潤圧、模型オーバーパックの沈下量を測定した。本研究により、HLW 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を提供できると考えられる。

2. 遠心力模型試験

(1) 遠心場での相似則

遠心力模型試験における相似則は、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、表-1のようになる。詳細については、既報⁴⁾⁵⁾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 $1/n^2$ に短縮

表-1 本遠心力模型試験における相似則。

物理量		相似則
長さ	L_m/L_p	$1/n$
面積	A_m/A_p	$1/n^2$
体積	V_m/V_p	$1/n^3$
応力	σ_m/σ_p	1
ひずみ	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1
間隙流体の速度	u_m/u_p	n
圧密・膨潤・透水時間	T_m/T_p	$1/n^2$

※添え字の m , p は、それぞれ模型 (model), 実物 (prototype) を表す。

されて再現されることになる。例えば $n = 30$ として1ヶ月間の実験を行なえば約76.5年相当の挙動を評価できることになる。

(2) 想定した施設およびその模型供試体

本研究で用いた模型供試体は、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)。この模型供試体は、電中研・電事連共同研究報告書⁶⁾において提案されている廃棄体(オーバーパック)や処分孔サイズの約1/30の大きさである。すなわち、模擬オーバーパックは直径27.3mm、高さ62mm、処分孔部は直径約56mm(緩衝材部の直径は54mm)、高さ127mmである。岩盤部はφ180mm×高さ180mmの円柱状であり、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整形した。田下凝灰岩は、乾燥密度、湿潤密度はそれぞれ、約1.7g/cm³、2.0g/cm³であり、一軸圧縮強さは15~33MPa(気乾)および8~16MPa(湿潤)である。緩衝材および埋め戻し材には圧縮ベントナイト(クニゲルV1)を用い、膨潤後平均密度を1.55g/cm³(初期乾燥密度は1.74g/cm³)になるように圧縮した。模擬オーバ

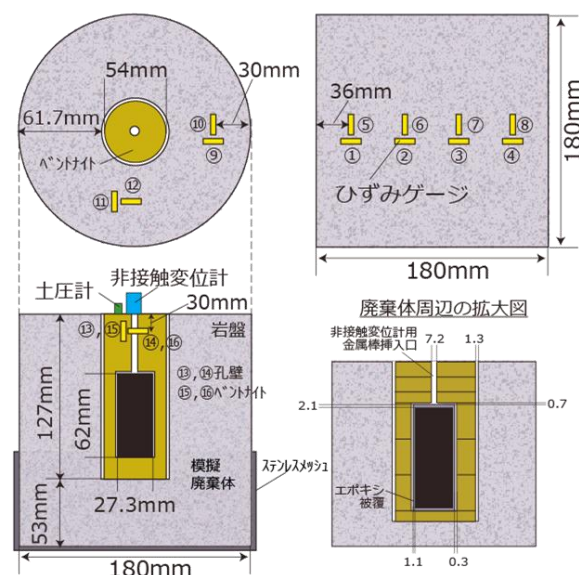


図-1 実験に使用した模型供試体の平面・断面図およびセンサーレイアウト。

ーパックは全密度が6.16g/cm³となるようにステンレス鋼材(SUS430)にエポキシ樹脂を被覆し調整してある。エポキシ樹脂の厚さは2mm程度である。

(3) 遠心载荷岩盤実験装置

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)⁵⁾。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80t、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

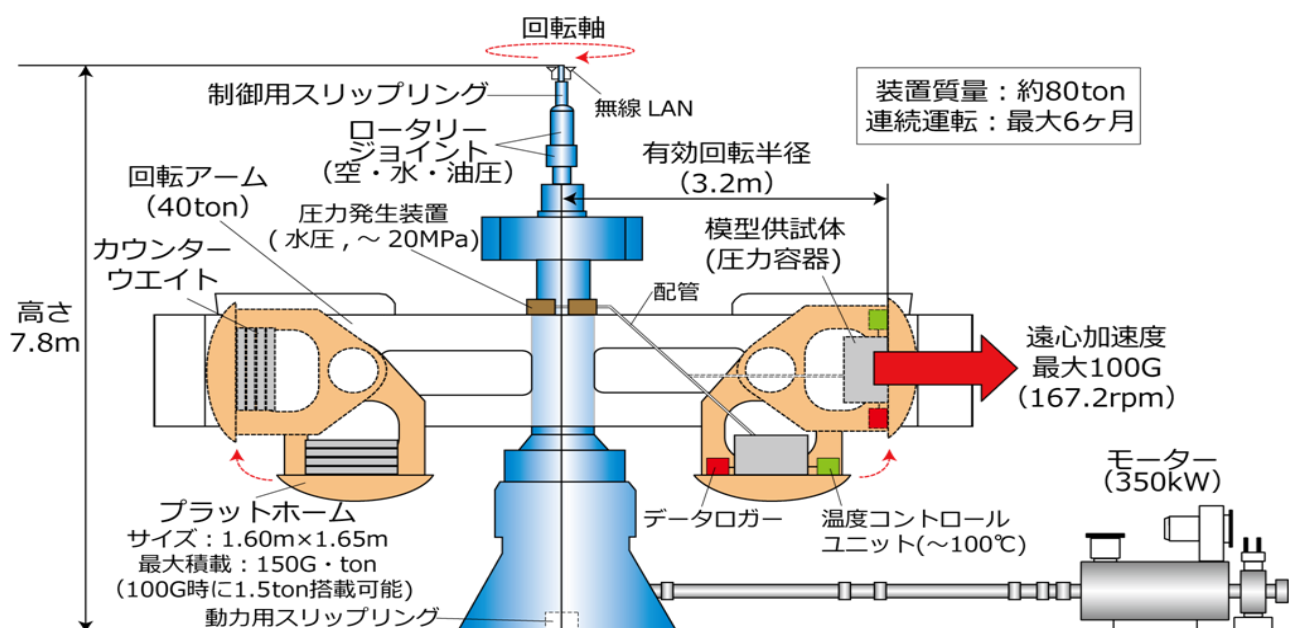


図-2 本実験で用いた遠心载荷装置, CENTURY5000-THM の概略図⁵⁾。

納されている。本装置で付与出来る最大遠心加速度(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 m² (1.60 m×1.65 m), 最大積載可能量は150G・tonである。中心回転軸の上端には動力用スリップリング(4極AC200V/60Aおよび2極AC100V/60A), 制御用スリップリング(17極), 通信用無線LAN機器(2セット), 油圧・水圧・空圧を付与できるロータリージョイント(各2ポート)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台を搭載している。増圧機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

本研究では廃棄体周辺を抽出した縮小模型供試体を用いるため, 供試体に地圧相当の応力を負荷する必要がある。このため図-3に示すような圧力容器を用いた⁹⁾。本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, 最大10 MPaの等方圧を負荷できる。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, 供試体にゴムスリーブを被覆することで透水試験が可能である。容器内部下端には, 耐圧フィードスルー(6極/10個)が設置され, ひずみゲージを接続し, 外部に設置しているロガーに接続できるようになっている。容器上蓋内部には非接触変位計と土圧計が組み込まれており, 同様にロガーに接続する。

(5) 試験条件

試験条件は遠心加速度30G場で等方圧条件とし, それぞれ2~10 MPaの拘束圧を負荷した(表-2)。模型供試体への注水圧は拘束圧の半分, 背圧は0.5 MPaで一定制御し(排水条件), 供試体下面より注水した。供試体下半分にはステンレスメッシュが被覆するため(図-2), 注水された水は供試体下面および下半分の側面より供試体に流入することになる。なお, 本試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。温度は25℃一定で, オーバーパックは加熱していない。また, 岩盤およびベントナイトは乾燥状態で試験を開始した。供試体を圧力容器に設置した後, 所定の拘束圧を負荷, 圧密によるひずみが収束した後に遠心加速度を付与, 所定の遠心加速度に到達した後, 注水を開始した。試験期間は最長で約2カ月である。

3. 結果および考察

(1) ひずみ, ベントナイト膨潤圧, 模擬オーバーパック変位の長期挙動

本試験において得られた結果の内, ここでは典型的な結果が得られたTG-10(拘束圧 σ_{xyz} =6 MPa, 注水圧 U_{kl} =3

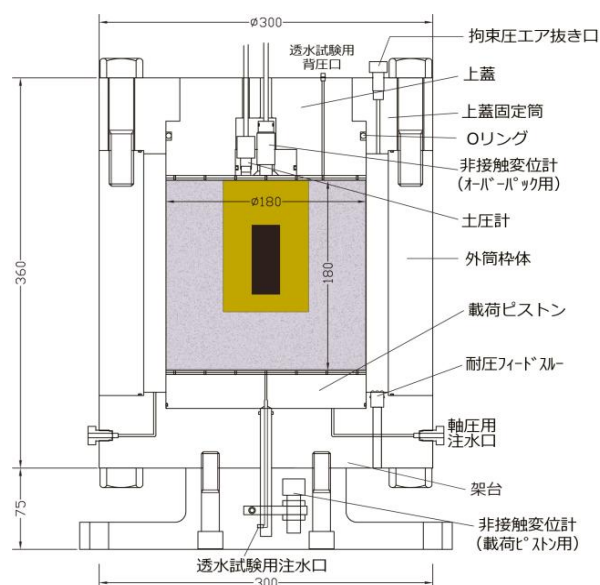


図-3 実験に使用した圧力容器の断面図⁹⁾。

表-2 本試験における試験条件および試験日数。

試料名	TG-01	TG-03	TG-10	TG-11	TG-12	TG-05
拘束圧(MPa)	2.0	5.0	6.0	7.0	9.0	10.0
注水圧(MPa)	1.0	2.5	3.0	3.5	4.5	5.0
背圧(MPa)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
遠心加速度(G)	30	30	30	30	30	30
試験日数(日)	13	34	24	40	67	40
実物換算年(年)	32.1	83.8	59.2	98.6	165.2	98.6

MPa, 背圧 U_2 = 0.5 MPa)のひずみ(図-4~7), ベントナイト膨潤圧(図-8), 模擬オーバーパック変位(図-9)の経時変化について示す。なお図において, ひずみのプラスは膨張, マイナスは圧縮, 模擬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。ベントナイトの有効膨潤圧は土圧計で計測された値から背圧を差し引いたものである。図の上横軸は試験経過時間, 下横軸は相似則による実物換算時間, 図のそれぞれの値は既定の遠心加速度場に到達した時点をも原点(0時間)としてプロットしてある。また, 本節では特に断りのない限り試験経過時間を用いて記述する。

供試体側面の周・軸方向に貼付したひずみゲージ(Gauge 1~4および5~8, 図-1)の計測結果を図-4, 5に示す。注水開始後, 約10時間程度経過した時点でGauge 4およびGauge 8が1000 μ 程度の急激な膨張を示し, その後緩やかな膨張傾向を示した。そのほかのひずみゲージも同様に, 一定時間経過後に急激に膨張, その後緩やかに膨張を続けた。この急激な膨張ひずみは, 注水側(供試体下側)のひずみゲージから排水側のひずみゲージ(上面)に向けて順に発生している。試験は乾燥状態の供試体に水を注入しており, 供試体内部で水が達した場所では見かけの有効応力が低下するため, このような膨張挙動が計測されると考えられる。すなわち, 観測された急激な膨張ひずみは注入した水の移動フロント(水位線の移動)を捕らえていると考えられる。また, 特に

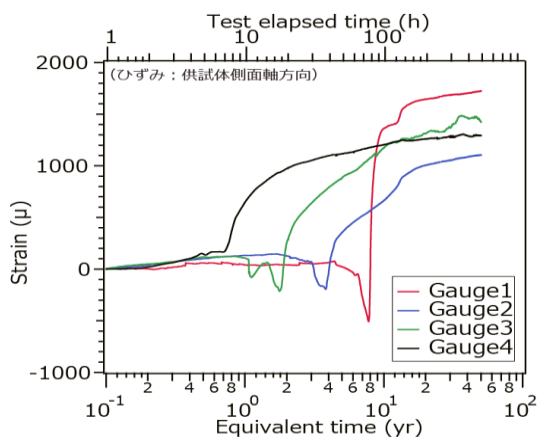


図-4 模型供試体側面の軸方向に貼付したひずみゲージの経時変化。

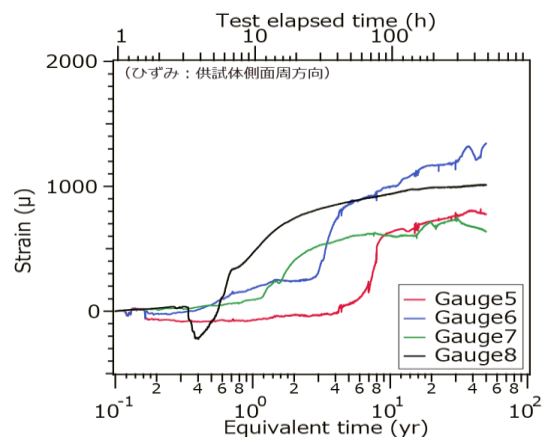


図-5 模型供試体側面の周方向に貼付したひずみゲージの経時変化。

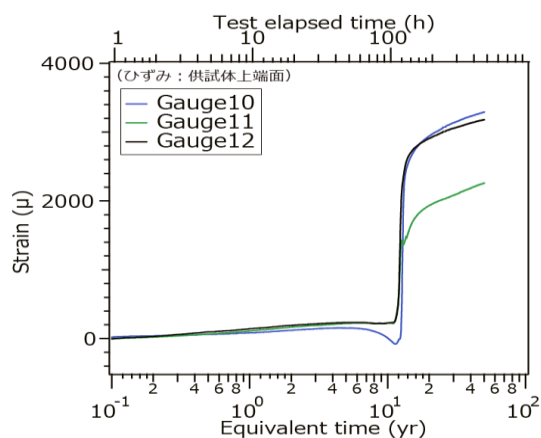


図-6 模型供試体側面上端面に貼付したひずみゲージの経時変化。

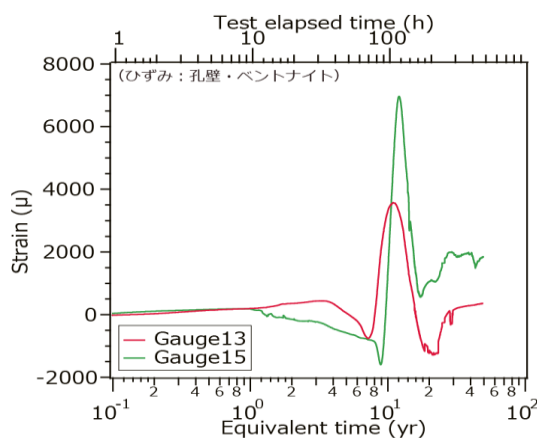


図-7 模型供試体孔内岩盤およびベントナイトに貼付したひずみゲージの経時変化。

顕著にGauge 2～4において膨張が発生する直前に急激な圧縮が計測されている。本模型試験では、下方から地下水位が上昇していく過程を模している。一般に、地下水位より下部に相当する飽和域の直上には毛管帯(capillary fringe)が形成され、この毛管帯の間隙圧はその上部の気相領域の圧力(通常であれば大気圧)より低くなることが知られている⁷⁾。すなわち、模型供試体内においても注入した水の上昇により毛管帯が形成されたとするなら、毛管帯の上部では一時的に間隙圧が低下することになる。これにより、ひずみゲージを貼付した場所の下部付近まで水位が上昇したとき、見かけの有効応力が大きくなる可能性があるため、このような圧縮が生じたものと考えられる。

供試体上端面に貼付したGauge 10～12の結果について図-6に示す。なお、Gauge 9についてはゲージ線の断線によりデータが得られなかった。全てのゲージにおいて約120時間経過時まで、100μ程度の緩やかな膨張傾向を示した後、2000～3000μの急激な膨張を示した。その後、ふたたび緩やかな膨張傾向を示した。これらのひずみゲージは全て供試体上端面に貼付されている(図-1)ことから、上述と同様な現象が起きたと考えられる。

供試体の処分孔内の岩盤およびベントナイトに貼付したGauge 13およびGauge 15(図-1)の結果について図-7に示す。なお、Gauge 14, 16についてはゲージ線の断線によりデータが得られなかった。Gauge 13において、約40時間経過時までには緩やかな膨張傾向を示すが、40～80時間経過時に1000μ程度の圧縮傾向を示した。その後、約100時間経過時から3500μ程度の急激な膨張を示したが、ピーク膨張ひずみを計測した後は急激に圧縮に転じた。さらにピーク圧縮ひずみを計測した後は膨張に転じ、最終的には緩やかな膨張傾向を示した。ベントナイトに貼付したGauge 15についても同様の傾向が見られたが、ピーク膨張ひずみに関しては7000μ程度を計測した。これらの変化について、約80時間経過時までの弱膨張傾向から圧縮に転じるメカニズムは、上述と同様に毛管帯の形成によるものと考えられる。また、その後の急激な膨張は注水による有効応力の変化(Gauge 13)およびベントナイトの膨潤(Gauge 15)によるもの、その後のGauge 13(孔内岩盤)の圧縮はベントナイトの膨潤圧の影響、Gauge 15(ベントナイト)の圧縮はベントナイトの飽和より圧密に転じたことによる影響と考えられる。

ベントナイトの膨潤圧(図-8)は供試体上端部で計測を行

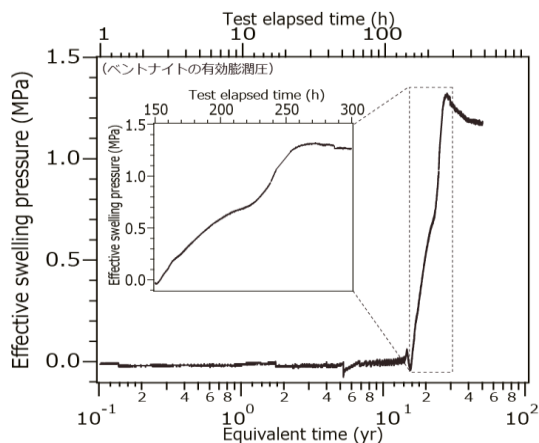


図-8 ベントナイト有効膨潤圧の経時変化.

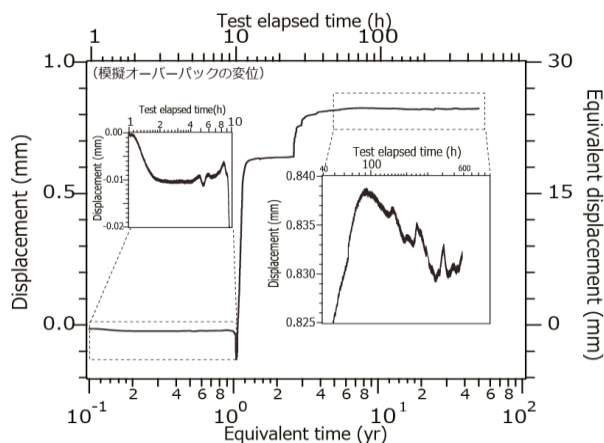


図-9 模擬オーバーパック変位量の経時変化. 左縦軸は計測変位量, 右縦軸は実物換算変位量である.

っているため、試験開始から140時間経過時までほぼ変化が見られなかった一方で、それ以降急激に膨潤圧が増加し、その後緩やかな低下に転じた。また、急激な膨潤圧が計測される過程の内、210～230時間付近において膨潤圧の増加勾配が一時的に緩やかになった。この一時的な“小康状態”は、ベントナイトの吸水による一時的な水の浸透性低下による影響と考えられ中村・田中の結果⁹⁾とも調和的であった。

図-9に模擬オーバーパックの変位量を示す。本図では、左縦軸が計測変位量、右縦軸が相似則による実物換算変位量を示す。ここでは特に断りのない限り変位量は“計測変位量(実物換算変位量)”の形式で記述する。模擬オーバーパックは試験開始直後から0.01 mm (0.3 mm) 程度の沈下が計測された。これは模擬オーバーパックの自重によるベントナイトへの沈みこみによる影響と考えられる。その後、約10時間経過時点から急激な浮上を示し、浮上は二段階で起こっている。これはベントナイトの膨潤による水の浸透率の低下によるものと推察されるが、詳細は不明である。この時の原点からの浮上量は最大で約0.8 mm (24 mm)であった。図-4, 5で示した通り、Gauge 4, 8およびGauge 3, 7は経過時間で10時間前後において膨張挙動を示している。供試体の高さ方向で考えれば、これらのひずみゲージの間に処分孔底部が位

置する(図-1)。このため、水の浸潤により処分孔底部のベントナイトが吸水し、ベントナイトの継ぎ目や処分孔内の隙間を埋めつつ膨潤したことによる浮上と考えられる。また、急激な浮上後の模擬オーバーバックは緩やかな沈下挙動を示した。これはベントナイトが飽和したことによる密度低下と圧密によるものと考えられ、膨潤圧の低下と調和的である。

(2) 長期挙動の拘束圧依存性

図-10には本試験で得られたベントナイト膨潤圧および模擬オーバーバックの変位量の経時変化を、実物換算時間を横軸にとり拘束圧ごとに示した。併せて、中村・田中⁹⁾によるベントナイトと模擬オーバーバックを用いた既往の遠心力模型試験の結果もプロットしている。プロットしたデータは、ベントナイトの種類と膨潤後平均密度は本試験と同じ条件の結果である。中村・田中⁹⁾の試験では鋼製の容器にベントナイトと模擬オーバーバックを封入したひずみ拘束条件、周辺岩盤を含めていないという点が本試験との大きな相違点である。

大局的には、拘束圧ごとのベントナイトの膨潤圧、模擬オーバーバックの変位量ともに経時変化の傾向は類似し、それらの値は拘束圧の依存性が認められる。特にベントナイトのピーク膨潤圧を比較すると、拘束圧が高くなるにつれピーク

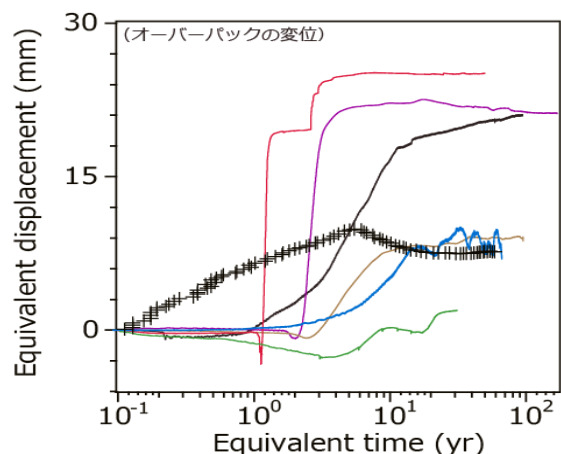
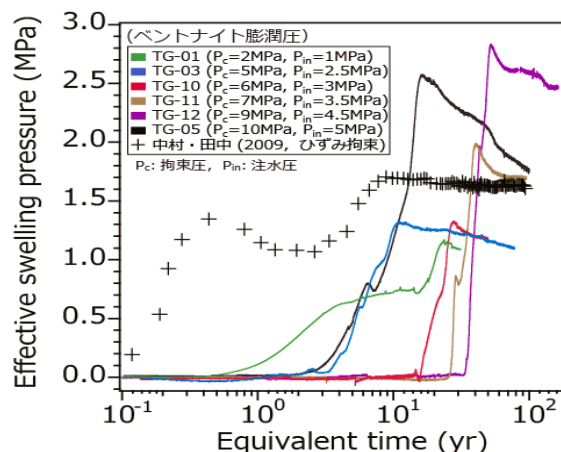


図-10 拘束圧の違いによるベントナイト膨潤圧(上)、模擬オーバーバック変位量(下)の経時変化.

膨潤圧も高くなる傾向が見られる。また、高い拘束圧条件下では中村・田中⁹⁾で報告されたピーク膨潤圧・変位量よりも大きい結果が得られた。田中⁹⁾ではベントナイトの膨潤圧が周囲にある物質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膨潤圧が大きく異なるという結果と調和する。この影響で模擬オーバーパックの変位量も拘束圧によって異なると推測される。加えて中村・田中⁹⁾の試験結果では、ベントナイト膨潤圧、模擬オーバーパックの変位(沈下)量の結果はいずれもピーク膨潤圧・変位量が計測された後、実物換算時間で50～60年程度経過した時点でほぼ収束している。一方で、本試験で得られた結果は全ての拘束圧条件でひずみ(図-4～7)、ベントナイト膨潤圧(図-8, 10)、模擬オーバーパックの変位量(図-9, 10)のいずれも収束していない。最も長い期間試験を行ったTG-12(実物換算時間で約165年)においても収束は認められなかった。

また、本研究の試験条件は周辺岩盤の変形を許す応力拘束条件である。図-4～7で示したとおり、供試体側面に貼付したひずみゲージの値が見かけの有効応力の低下による急激な膨張を示した後、緩やかに膨張を続け収束していない。ベントナイト膨潤圧および模擬オーバーパックの変位量が収束しなかったことと調和的である。すなわち、ベントナイトの膨潤により周辺岩盤が緩やかに変形を続け、その結果としてさらなる膨潤圧の低下、オーバーパックの沈下が起こり続けたと考えられる。

4. 結言

高レベル放射性廃棄物処分ニアフィールドの長期挙動を把握するために、本研究では廃棄体周辺の模型供試体を用い、最長約2ヶ月(実物換算時間で約165年)の遠心力载荷試験を行った。その結果、岩盤のひずみ、ベントナイトの膨潤、オーバーパックの浮上・沈下が観測され、実物換算時間で100年程度経過した時点においてもこれらの値は収束しな

かった。また、ベントナイト膨潤圧、模擬オーバーパックの変位量に拘束圧依存性が認められた。これは廃棄体の安定・定置まで、処分場の深度にも依存するが、少なくとも軟岩サイトでは100年以上の年月を要する可能性を示唆する。

このためさらに長期間の試験、高い遠心加速度を与えて可能な限り長期挙動の評価の必要がある。今後、遠心加速度50 Gを付与しさらに長期挙動が評価可能な試験、加えて異方応力条件における試験を予定している。

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。ここに記して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, 電力中央研究所総合報告, N02, 2006.
- 2) Svensk Kärnbränslehantering, A. B.: Äspö Hard Rock Laboratory - Annual report 2006, TR-07-10, 2007.
- 3) 澤田昌孝, 岡田哲実, 西本壮志: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル放射性廃棄物処分のための国際共同研究(その 10) - ベントナイトの膨潤挙動に伴う密度変化の数値解析による予測 -, 電力中央研究所研究報告書, N09020, 2010.
- 4) 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, 電力中央研究所研究報告, U03074, 2004.
- 5) 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1) - 超長期遠心载荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発 -, 電力中央研究所研究報告, No. N10018, 2011.
- 6) 電力中央研究所, 電気事業連合会: 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術(概要版), 195p., 1999.
- 7) 山本荘毅: 新版 地下水調査法, 490p., 古今書院, 1983.
- 8) 中村邦彦, 田中幸久: ベントナイトの種類と密度がオーバーパックの沈下量に与える影響, 土木学会論文集, C, 65, 1, 85-96, 2009.
- 9) 田中幸久: 締固め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 -, 電力中央研究所研究報告, No. N10015, 2011.

LABORATORY MEASUREMENT OF A LONG TERM BEHAVIOR IN HLW NEAR-FIELD BY CENTRIFUGAL MODEL TEST

Soshi NISHIMOTO, Tetsuji OKADA and Masataka SAWADA

The objective of this paper is to evaluate the long term behavior of HLW near-field by the centrifugal model test. The model specimen consists of rock mass, bentonite buffer and model waste. The specimen was enclosed with the pressure vessel and centrifugal model tests were conducted at 30 G of centrifugal force field with confining pressures of 2 to 10 MPa and injecting water. As a result, we observed the strain of rock mass, swelling of bentonite and displacement of overpack, and these values did not converged more than 100 equivalent years. In addition, the measured values showed the confining pressure dependency. It is suggested that the stability of HLW in the bentonite buffer takes more than 100 years at least..