

高レベル放射性廃棄物処分場の THM長期挙動評価(その2) ～遠心載荷時間加速試験を対象とした数値解析～

渡辺 高志^{1*}・内山 不二男¹・澤田 昌孝²・西本 壮志²・石井 智子³

¹株式会社構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

²一般財団法人電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³公益財団法人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 12F)

*E-mail: takashi-watanabe@kke.co.jp

高レベル放射性廃棄物の処分システムの評価において、ニアフィールドで起こる現象は長期に渡るため、現実的には数値解析による検討が必要となる。また、熱-水-力学 (THM) の複雑な連成作用が生じるため、これらを考慮した解析を行う必要があり、物性など諸条件の不確かさも合わせて、モデル化や解析条件の妥当性確認には多くの課題がある。このような背景から、本研究では処分システムの長期挙動評価において、数値解析モデルの妥当性を確認する手法について検討した。具体的に、比較対象としての遠心載荷時間加速試験と、パラメータ取得のため要素試験を実施し、遠心載荷時間加速試験を模擬した数値解析と結果を比較し、オーバーパック移動量などの力学挙動の再現に重要な解析条件について整理した。

Key Words : *high-level radioactive waste disposal, near field, centrifugal model test, long-term behavior, coupled analysis*

1. はじめに

処分システムの将来にわたる安全性について、実時間で実証することはできないため、遠心載荷時間加速試験や数値解析に代表される長期評価技術による検討を行う必要がある。処分場のプロセスにおいては、その初期に発熱と冠水、それに伴う顕著な力学挙動が過渡的に発生するため、熱-水-力学 (THM) の連成現象を適切に評価することが必要である。そのためには、実施した実験と数値解析を相互に比較し評価することにより信頼性を高め、妥当性を確認するプロセスが重要である。

このような背景から、澤田ら¹⁾は「放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム (LOSTUF)」を開発している。この解析コードは有限要素法による熱-水-力学 (THM) の連成解析を行うものであり、ベントナイトの膨潤や岩盤のクリープなどの挙動も取り扱うことができる。なお、解析手法の詳細については本論文では対象にしないことから文献²⁾を参照されたい。本研究では、解析コードとしてLOSTUFを使用し、遠心載荷時間加速試験の再現解析を行い、試験結果と比較することでモデル化方法や設定パラメータについて考察を行い、ニアフィールドを対象と

する長期挙動評価に数値解析を適用する上で重要となる事項の確認を行った。

2. 実施した数値解析の概要

本研究では、オーバーパック (以降、OP)、緩衝材、埋戻し材、岩盤から成るニアフィールドを対象とし、主として境界条件の違いによるOP変位などの力学挙動に着目し、H27～H29年度にかけて段階的に実施された遠心載荷時間加速試験を対象とし、これらの試験の再現解析を行った。また、これらの再現解析に先立ち、THM連成挙動を考慮した数値解析を実施する上で重要となる、解析結果に感度の高い設定条件を確認するため、OP-緩衝材-処分孔(岩盤)一孔から成るモデルを対象とした感度解析を実施している。この感度解析においては、軸対称モデルを用い、加熱の有無を考慮して多くの解析ケースを設定し、以下のような知見を得た。

- (a) 加熱の考慮により、高温のOP付近で浸潤が遅れる傾向がある。しかし、間隙水の粘度の低下から全体の冠水は速くなる。

- (b) 透水性等の違いによって冠水時期が変動しても最終的なO/P変位量や最大変位には大きな影響はない。
- (c) 力学特性や膨潤挙動、隙間のモデル化などは直接変位量に関係するため条件設定上の優先度は高く、検討する必要がある。

この論文では、これらの成果を踏まえて、H27年度に実施した試験の再現解析から得られた成果について述べる。対象の試験は図-1に示す試験模型を使用しており、試験の詳細は処分システム工学確証技術開発の報告書²⁾を参照されたい。

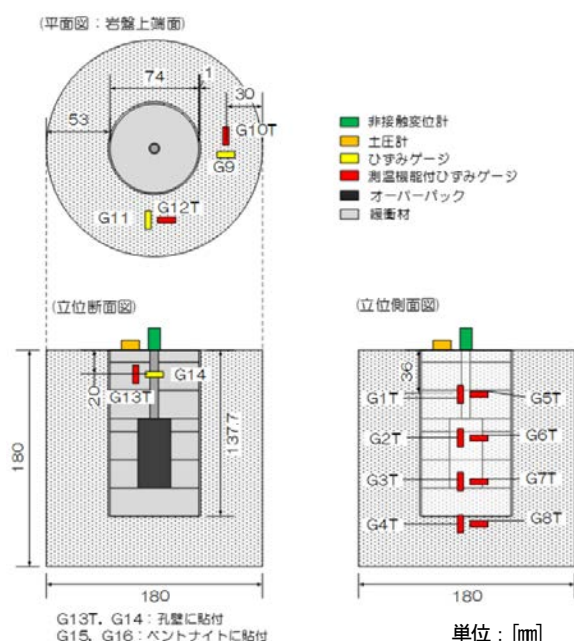


図-1 対象とした遠心载荷時間加速試験の模型レイアウト

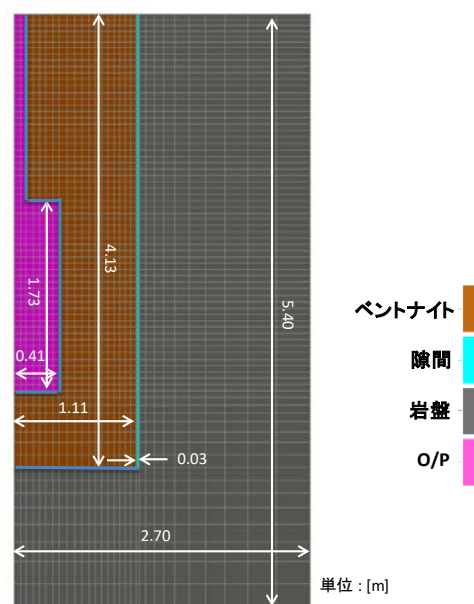


図-2 模型試験を対象とした解析モデル

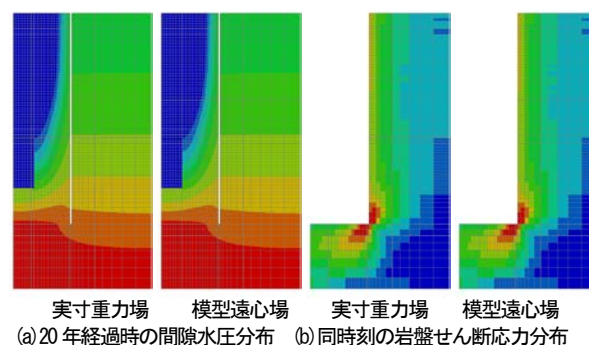


図-3 重力場ケースと遠心場ケースの解析結果の比較

3. 数値解析モデルについて

(1) 解析モデル

解析対象とした試験模型は直径と高さが180mmの円筒型であり、解析では図-2に示されるFEMメッシュを作成し、軸対称条件の解析を実施した。モデル図の左端が中心軸であり、モデル寸法は実寸換算した値で示しているが、解析は1/30模型の寸法で重力加速度を30Gとして行っている。なお、再現解析では基本的な事前検討とし、実寸換算の重力場ケースと模型寸法の遠心場ケースの非定常解析結果を比較し、図-3に示されるように換算時間が等しいステップにおける物理量の空間分布が同じであり、相似則が成立することを確認した。

(2) 境界条件・初期条件

実験では岩盤表面に等方的な周圧を8MPa载荷し、緩

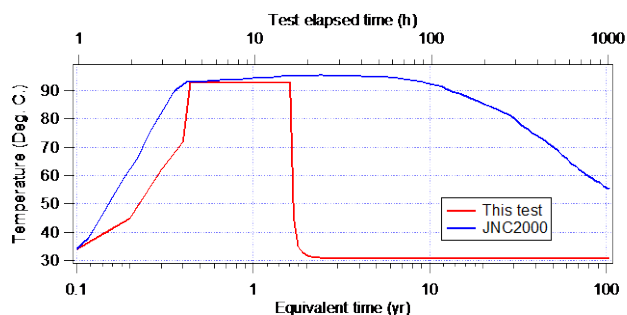


図-4 対象の実験においてO/Pに設定した温度履歴

衝材とO/P模型を設置した後に遠心载荷を開始している。試験模型の底面からは4.1MPaの水圧で注水し、冠水後は上面から4.0MPaの背圧で排水を行っている。また、O/P模型内部のヒーターを温度制御し、試験模型の中央部から加熱を行っている。なお、実験でヒーターに設定された温度履歴は図-4の赤線で示されるものであり、換算時

間で2年経過時より前に急激な温度低下を生じる条件となっている。

解析では、中心軸と上面をローラー条件、水理境界は底面を圧力一定、上面を大気圧を4.0MPaとする浸出面境界、中心軸と外周は非排水条件とした。熱境界は中心軸を断熱、上面と底面および外周を試験装置の雰囲気温度33℃で一定とした。ただし、O/Pの上部に突き出ている芯棒部分は、境界の影響を考慮して伝熱特性を緩衝材相当として設定した。解析モデル全体の初期サクシオンは要素試験時に得られた結果を参照して55MPaとし、岩盤外側からの拘束圧と緩衝材初期応力は別途初期応力解析により計算して外部から設定した。

(3) 隙間のモデル化

隙間をどのように取り扱うかは難しい問題である。緩衝材の膨潤挙動を拘束しない観点からはジョイント要素によるモデル化が好ましい。本研究では、Zienkiewiczによるジョイント要素³⁾をTHM連成作用が考慮できるように改良した要素モデルを用い、隙間や接触面をモデル化している。隙間には厚みがあるため、初期剛性は極めて小さく設定し、隙間の閉塞に伴い垂直剛性が高剛性となる非線形特性を与えた。なお、隙間に設定する透水性は、閉塞するまでは空洞であることから、極めて大きな透水性を与えるか、または節点を共有する緩衝材や岩盤の物性を使用するべきであろう。実際の隙間は多孔質体ではないため、不飽和特性の設定などに難があるが、本研究では基本として節点を共有する多孔質体の物性で代替した。また、隙間を高透水帯として考慮する検討も行い、その場合については透水性のみ非常に大きく設定して評価した。伝熱物性についても基本的に同じ方針で解析モデルを作成している。

なお、図-2に青い線で示される、O/P周りと緩衝材底面には厚さを考慮しないTHM連成のジョイント要素を挿入している。また、接触面の剛性は接触要素間でそれぞれ固い方の物性から決定している。

(4) 緩衝材の膨潤モデル

緩衝材の膨潤圧は有効粘土密度の関数として表せ、与えられた平均応力 σ_m における最大膨潤ひずみ ε_{smax} が得られる。

$$\sigma_m = f(\varepsilon_{smax}) \quad (1)$$

膨潤圧は膨潤を考慮する要素に作用する外力として評価し、個々の要素の応力状態から、式(1)より飽和時の最大膨潤ひずみ ε_{smax} を算出する。不飽和時はサクシオンの低下に伴って膨潤が進行すると考え、基準となる間隙

表-1 基本ケースの解析パラメータ

条件・パラメータ	ベントナイト	模擬廃棄体	岩盤
初期条件			
間隙率	0.414	0.001	0.392
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.585	6.35	1.678
飽和度 (%)	25.6	0	20.5
透水関係のパラメータ			
水分特性曲線 a (MPa ⁻¹)	0.244	0.001	13.6
水分特性曲線 n	1.53	1.43	1.24
固有透過度 (m ²)	式	1.0 x 10 ⁻³⁰	3.58 x 10 ⁻¹⁸
力学関係のパラメータ			
ヤング率 (GPa)	0.01	193	2.7
ポアソン比	0.3	0.3	0.21
膨潤圧 (等体積、飽和時) (MPa)	0.67	—	—
熱関係のパラメータ			
乾燥時の熱伝導率 (W/mK)	0.465	16.7	0.45
飽和時の熱伝導率 (W/mK)	2.188	16.7	1.311
比熱 (J/kg/K)	323.0	590.0	887.0
熱膨張率 (K ⁻¹)	1.0 x 10 ⁻⁵	1.73 x 10 ⁻⁵	2.9 x 10 ⁻⁶

表-2 膨潤の計算に使用したパラメータ (膨潤評価式)

基本的な物理定数	電子素量	1.62 x 10 ⁻¹⁹ C
	Boltzman定数	1.38 x 10 ⁻²³ J/K
	Hamaker定数	2.2 x 10 ⁻²² J
	Avogadro's数	6.023 x 10 ⁻²³
ベントナイトの組成	陽イオン交換容量	1.118 mequiv/g
クニゲルVI相当	交換性Naイオン量	0.673 mequiv/g
	交換性Caイオン量	0.478 mequiv/g
下線は要素試験結果	交換性Kイオン量	0.015 mequiv/g
または配合条件に基づく	交換性Mgイオン量	0.022 mequiv/g
	NaイオンおよびKイオンのイオン価	1
	CaイオンおよびMgイオンのイオン価	2
	Naイオンの非水和イオン半径	0.0980 nm
	Caイオンの非水和イオン半径	0.1115 nm
	Kイオンの非水和イオン半径	0.1330 nm
	Mgイオンの非水和イオン半径	0.0835 nm
	モンモリロナイト粒子の厚さ	9.60 x 10 ⁻¹⁰ m
	モンモリロナイト粒子の密度	2.77 Mg/m ³
	モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度	2.81 Mg/m ³
	砂の土粒子密度	2.64 Mg/m ³
	モンモリロナイトの比表面積	810 m ² /g
	モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積	0 m ² /g
	ベントナイトのモンモリロナイト含有率	54.9%
	ベントナイトの乾燥密度	1.585 Mg/m ³
	ベントナイトの配合率	72.1%
その他	間隙水の誘電率	80 x 8.8542 x 10 ⁻¹² C ² /
	間隙水のイオン濃度	35.2 mol/m ³
	絶対温度 (基準温度)	298.15 K

水圧 P_{i0} と現在の間隙水圧 P_i から不飽和時における最大膨潤ひずみ ω_{smax} を式(2)より計算した。

$$\omega_{smax} = \varepsilon_{smax} \left(\frac{|P_i - P_{i0}|}{|P_{i0}|} \right)^l \quad (2)$$

ここで、 l は膨潤の進行速度に関するパラメータであり、サクシオン変化に線形として1.0を設定した。

膨潤作用を考慮する各要素に、要素剛性から計算した等価節点力を漸増載荷し、生じた体積ひずみから累積膨潤ひずみ ε_{aw} を計算する。計算ステップ毎に各要素の ω_{smax} と ε_{aw} の差分が許容値以下となるまで反復計算を行っている。なお、実験に使用したベントナイトはクニゲルV1であり、式(1)については実験データから設定可能であるが、本研究では拡散二重層理論に基づく膨潤評価式⁴⁾から設定した。

4. 解析パラメータと検討ケース

(1) 基本的な解析パラメータ

数値解析に使用するパラメータは要素試験による取得を基本とし、ばらつきを評価できるように試験項目毎に多数の試験を実施した。しかし、取得が難しいものや標本数が少ないものなどもあり、そのような項目は文献値⁴⁵⁾から補足した。解析パラメータは要素試験結果の平均値からの設定を基本とし、前述の感度解析から力学特性が特に重要であることが分かっており、緩衝材や岩盤の剛性についてはばらつきの影響を検討した。基本的なケースの解析パラメータを表-1に、緩衝材の膨潤モデルの計算に用いた膨潤評価式のパラメータ⁴⁶⁾を表-2に示す。表中の式とパラメータについては以下に補足する。

緩衝材の固有透過度は、HLW第2次取りまとめ⁴⁷⁾に示された固有透過度と有効粘土密度の関係を参考に、間隙率が $0.3 < \phi < 0.6$ の範囲でフィットするように固有透過度 κ (m²)を次式から設定した。

$$\kappa = 10^{6.67\phi - 22.8} \quad (3)$$

なお、岩盤については要素試験結果のばらつきも小さく、一定値を設定した。また、水分特性曲線は保水試験結果に基づき、緩衝材と岩盤でそれぞれ表中のパラメータを決定して、次式に示されるvan Genuchtenモデルから不飽和特性を設定している。

$$S_l = \left\{ 1 + (\alpha P_l)^n \right\}^{\frac{1}{n}-1} \quad (4a)$$

$$k_r = S_l^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - S_l^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (4b)$$

ここで、 S_l は相対飽和度、 k_r は相対透水係数、 P_l は間隙水圧（サクション）であり、 α と n はvan Genuchtenモデルの設定パラメータである。

(2) 緩衝材や岩盤の剛性変化

数値解析には線形の等方弾性体を使用した。しかしながら、緩衝材や岩盤の剛性は浸潤の過程で大きく変化すると考えられる。そこで、想定する飽和度における剛性一定での検討の他、飽和度依存で弾性係数やポアソン比を変化させ、弾性的に不釣り合い力の再配分を行うケースの検討も行った。弾性係数は含水比区分毎に実施された E_{50} に関する要素試験結果を参照し、 $\pm 1\sigma$ のばらつきを評価することで図-5に示されるような3ケースの飽和度依存性を与えている。

なお、緩衝材のポアソン比を浸潤の進行に伴って

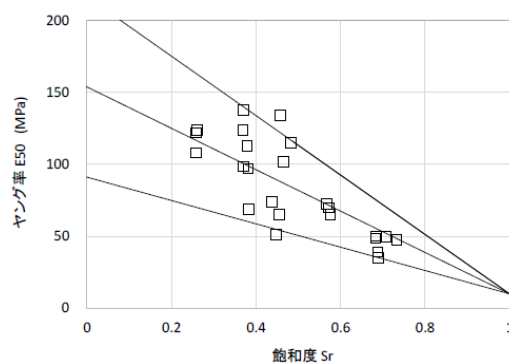


図-5 緩衝材に設定した飽和度依存の弾性係数の例

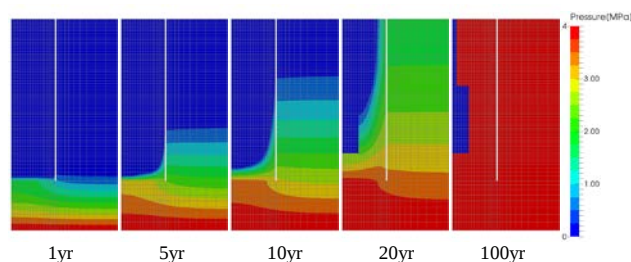


図-6 基本ケースの間隙水圧分布の経時変化

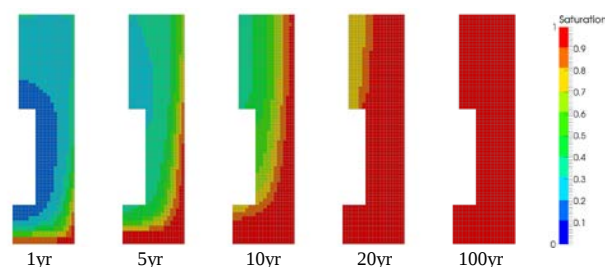


図-7 基本ケースの緩衝材飽和度分布の経時変化

0.49に近づけるように、飽和度に対して線形に計算を行っている。これは不飽和時に生じる膨潤相当荷重を要素剛性から計算しているため、最終的に膨潤圧が等方に作用するように意図して設定した。

5. 解析結果と実験結果の比較と考察

(1) 基本的なケースに見られる傾向について

要素試験に基づく平均値パラメータを用いて解析を行った基本ケースについて、解析結果を確認することで大まかな現象を確認した。解析から得られる結果は処分場の構成する材料の物理特性、熱特性、水理特性、力学特性等、多岐にわたるが、実験と比較し易く、人工バリアの機能上重要なOPの移動量に着目して現象を比較する。OPの移動に強く関係する緩衝材への浸潤過程を確認するため、図-6に模型岩盤を含むモデル全体の間隙水圧分布の経時変化をコンター図で示す。模型底部から間隙水

圧が上昇し、換算時間で1年経過時には緩衝材底部が飽和していることが確認できる。図-7に緩衝材の飽和度分布の経時変化を示す。下部から徐々に浸潤が進行し、20年経過時に降に飽和していることが確認できる。これに対応してO/Pの動きに着目した、換算鉛直変位の経時変化を図-8に示す。実験結果と比較して基本ケースの鉛直変位は非常に大きく、緩衝材が飽和する過程の膨潤作用によりO/Pが下から押し上げられ浮上したことが分かる。その後の20年経過時以後では、上部の緩衝材に生じた膨潤作用や間隙水圧の作用によりO/Pは沈下したと考えられる。実験結果では初期に浮き上がりが認められるが、変位量は小さく、その後は殆ど動きが生じない結果が得られている。

解析結果から、O/Pを押し上げる下部の緩衝材膨潤と、O/Pを沈下させる上部の緩衝材膨潤が同時刻に発生すればO/Pの移動は抑制されると考えられる。そこで、隙間の透水性を岩盤の1000倍とし、水みちとしての働きを設定した解析ケースを設定し、その結果を確認した。図-8に青い点線で解析結果を示しており、基本ケースと比較してO/Pの浮上と沈下がある程度抑制されていることが確認できる。この高透水帯を考慮したケースの間隙水圧分布の経時変化を図-9に示す。隙間の下端に間隙水が到達して以降、隙間が水みちとしての働きをし、上部と下部の緩衝材が同時に膨潤して行く過程が確認できる。

(2) 剛性の変化とばらつきについて

基本ケースでは緩衝材の剛性は飽和する直前の弾性係数を想定していた。実際には浸潤過程で剛性が下がって行くと考えられる。そのため、浸潤が開始して初期の段階ではあまり大きな変形は生じず、剛性低下に伴って緩やかにO/Pが沈下するような現象が生じると考えられる。そこで、要素試験結果より図-5に示されるような飽和度依存性を与え、剛性低下による効果や弾性係数のばらつきの影響を確認した。図-5のグラフは飽和時の剛性に収束するように弾性係数が低下し、それぞれ測定された弾性係数の全サンプルの平均値、+1 σ 、-1 σ の値が飽和度の平均値で交わるように勾配を設定している。これらのケースをMean、+1 σ 、-1 σ とし、O/Pの換算鉛直変位の経時変化を実験結果と比較して図-10に示す。

何れのケースも浸潤初期段階のO/Pの浮上が抑制されており、また飽和度の上昇と剛性低下に伴ない下部の緩衝材が収縮してO/Pが緩やかに沈下する傾向が確認された。この影響で、O/Pが大きく浮上する現象は抑えられているが、緩衝材が飽和する頃には膨潤作用によってO/Pの鉛直変位が大きくなっている。これらのケースの最大変位のオーダーは実験結果と同程度であるが、O/Pの浮上が遅いのは緩衝材の飽和時刻に差が生じているためと考えられる。緩衝材の飽和時刻の違いは大きい

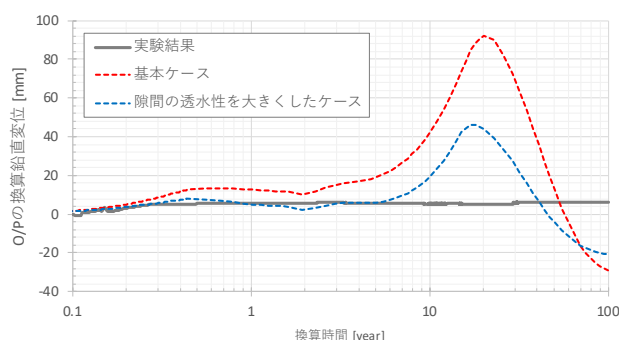


図-8 O/Pの換算鉛直変位の経時変化

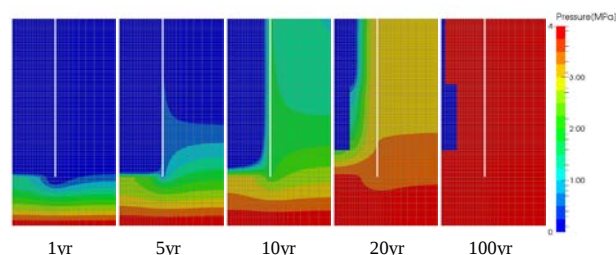


図-9 高透水帯を考慮した際の間隙水圧分布の経時変化

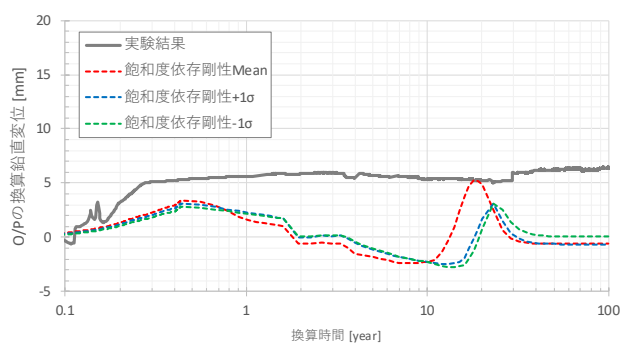


図-10 O/Pの換算鉛直変位の経時変化

緩衝材の剛性を飽和時の剛性で一定とした基本ケースと比べ、O/Pの最大変位や最終変位については実験結果により近い結果が得られており、緩衝材の剛性が現象の再現に重要であることが確認できる。なお、O/P変位に最も大きな影響を与えられとされる緩衝材の飽和度依存剛性を大小振った2ケースについて、平均値ケースは少し異なるがほぼ同等の鉛直変位履歴が得られており、緩衝材の膨潤作用による変形や剛性低下による影響が複雑に絡んでいると考えられる。また、最終的な変位について大きな差異はなく、要素試験から得られる剛性のばらつきの範囲においては、解析結果に大きなばらつきは生じないことが確認された。なお、換算時間で2年経過時付近において、鉛直変位の急激な変化が見られるが、これはO/Pのヒーター出力が無くなったことに対応して生じている。

6. まとめ

ニアフィールドの長期にわたるTHM連成挙動を評価し、その妥当性確認を行うため、数値解析を実施する上での重要点を把握し、また数値解析の信頼性確保を目的とし、遠心载荷時間加速試験の再現解析を行った。実施した解析と試験結果の比較から以下の知見が得られた。

- (a) 数値解析による再現を行うにあたり、最初に実寸重力場モデルと模型遠心場モデルの解析結果を比較し、解析上の相似則の成立を確認した。
- (b) 対象とした試験模型の境界条件においては、下部の緩衝材の膨潤によりO/Pが押し上げられた後に、浸潤が進行して上部の緩衝材の膨潤作用で押し返されてO/Pが沈下する。
- (c) 試験で測定されたO/P変位は小さく、下部と上部の緩衝材の膨潤がほぼ同時に進行し、O/Pの上下で膨潤作用が拮抗していたと考えられる。この現象は隙間を高透水帯として評価することなど、解析条件の検討によってある程度は再現される。
- (d) O/Pの変位に着目すると、飽和時の緩衝材を想定して小さな一定の剛性で計算を行うと、極端に大きな変位や小さな変位となる可能性がある。そのため、緩衝材の剛性は特に重要である。また、剛性の飽和度依存性などもO/Pの変位に与える影響が大きい。
- (e) 特にO/Pの変位に与える影響が大きい緩衝材の剛性について、要素試験結果のばらつきを反映した検討を行った。その結果、実施した検討ケース間では最終変位に大きな差は生じないことが確認された。

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

- 1) 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨：高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—, 電力中央研究所 研究報告, N05028, 2006.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成27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3分冊）人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築, 2016.
- 3) Zienkiewicz O. C., and Best B.: Some non-linear problems in soil and rock mechanics – finite element solution, Conf. on Rock Mechanics, University of Queensland, Townsville, June, 1969.
- 4) Borgeon L., Chijimatsu M., Fujita T. et. al.: Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.38, pp.95-104, 2001.
- 5) 核燃料サイクル機構：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 一分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1440 99-024, 1999.
- 6) 小峯秀雄, 緒方信英：高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案—砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響—, 電力中央研究所 研究報告, U99013, 1999.
- 7) 小峯秀雄：同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.251-252, 2005.

EVALUATION OF THM LONG-TERM BEHAVIOR IN HLW DISPOSAL REPOSITORY (PART 2): NUMERICAL ANALYSIS FOR CENTRIFUGAL TIME-ACCELERATING MODEL TEST

Takashi WATANABE, Fujio UCHIYAMA, Masataka SAWADA, Soshi NISHIMOTO and Tomoko ISHII

Evaluating high-level radioactive waste (HLW) disposal systems requires the understanding of phenomena in the near-field over a long period of time, which can be realized through coupled thermo-hydro-mechanical (THM) numerical simulations. Due to usage of complex numerical techniques and the uncertainty in material properties, validation of the numerical method is important.

In this study, we validate a numerical model used to evaluate the long-term behavior of a HLW disposal system. The parameters used in the model are obtained from material testing data. The findings from the comparison of numerical results with experimental data obtained from centrifugal model tests are discussed.