高レベル放射性廃棄物処分施設の縦置き孔模型 実験における緩衝材発生圧力の予測・評価

小峯 秀雄¹・長田 徹²・高尾 肇²・植田 浩義³

¹正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: hkomine@mx.ibaraki.ac.jp

²正会員 日揮(株) (〒220-6001 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-1)

³東京電力(株) (〒100-0011 東京都千代田区幸町1-1-3)

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設におけるベントナイト系緩衝材の自己シール性を定量的に評価するため、第一著者は「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」を提案している。本研究では、上記の評価式の適用性・有効性を確認することを目的に、高レベル放射性廃棄物処分施設の縦置き孔における隙間部分と緩衝材の関係を、軸対称に縮尺・模擬した模型実験を行い、ベントナイト系緩衝材の隙間充填過程の発生圧力を経時的に測定した。その結果、ベントナイト系緩衝材の膨潤変形により隙間部分が充填されることを確認した。また、隙間充填後の最大発生圧力は、先の理論評価式により比較的良好な精度で予測できることを明らかにした。

Key Words : high-level radioactive waste, bentonite, swelling, model test

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の有力な処分方法として、廃棄物を収納容器に収め、地下数百 m より深い岩盤中に設けた処分孔ピットに埋設し、廃棄物収納容器と周辺岩盤との間を緩衝材と呼ばれる土質材料で埋め戻す方法が考えられている^{1)~4)}。この緩衝材にはベントナイトを主体とする土質材料を高圧で締め固めて利用することが検討されており、長期間にわたって廃棄物を人間の生活圏から隔離することはもちろん、処分施設の建設に伴い生じる廃棄物収納容器や周辺岩盤と緩衝材との間の隙間部分を膨潤変形により充填する役割、すなわち図-1 に概念を示す自己シール性が期待されている。

このような背景から参考文献 5), 6)では、緩衝材の自己シール性を定量的に評価するため、粘土鉱物結晶間の反発力や引力の理論評価式に、独自の膨潤挙動を評価するためのパラメータの算出式を組み合わせ、「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」を提案した。本評価式の適用性については、膨潤圧や膨潤変形に関する室内要素実験の結果と比較され確認されている。また、著者らは、図-1 の右下図に示す隙間部分と緩衝材の関係を一次的に縮尺・模擬した模型実験を行い、緩衝材の隙

間部分への充填挙動について調査し、先の膨潤特性理論評価式の適用性について検討した⁷⁾。その結果、膨潤変形により隙間部分がほぼ充填されることを確認するとともに、膨潤特性理論評価式が隙間充填後の最大発生圧力の予測に適用できることを明らかにした。

図-1 高レベル放射性廃棄物処分場と緩衝材の自己シール性

図-2 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性評価式の概念図

本研究では、図-1の右下図に示す隙間部分と緩衝材の関係を、軸対称に縮尺・模擬した模型実験を行う。なお、詳細な縮尺・模擬については後述を参照されたい。そして、緩衝材の膨潤変形による隙間部分への充填挙動について観察するとともに、先の膨潤特性理論評価式のさらなる適用性・有効性について詳細に調査する。

2. ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式の概要

本章では、参考文献 5), 6)において提案した「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」の概要について述べる。

図-2は、「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」の概念図である^{5), 6)}。参考文献 5), 6)では、化学的な環境条件に大きく影響を受ける膨潤特性の評価を可能とするため、Gouy-Chapman theory と呼ばれる粘土鉱物結晶レベルの膨潤現象を評価できる拡散二重層理論^{8)~12)}と結晶レベルの引力を規定する van der Waals 力に関する理論式^{13), 14)}を組み合わせる基本式とした。

これに独自に提案している結晶レベルおよび緩衝材・埋戻し材中のモンモリロナイトの膨潤挙動を評価できる提案式¹⁵⁾を組み合わせることにより、砂とベントナイトの配合割合および含有される交換性陽イオンの種類や組成を考慮できる膨潤特性理論評価式を提案した。なお、モンモリロナイトとは、ベントナイト中に含まれる膨潤性粘土鉱物である。

「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」では、ベントナイトの主要な交換性陽イオンである Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} の 4 種類に対して、それぞれの交換性陽イオンに起因する粘土結晶層間

に作用する反発力と引力を算出し、各イオンの交換容量を用いて加重平均し評価する方法としている（図-2 および式(1)参照）。「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」は、下記の式(1)および式(1-a)~(1-k)で表されるとおりである。式(1-a)~(1-d)は、拡散二重層理論に基づく粘土鉱物結晶層間の反発力を評価するものである。式(1-e)は、結晶層間の引力を評価する van der Waals 力に関する理論式である。これに加え、砂とベントナイトの質量比率に関するパラメータであるベントナイト配合率を導入した「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の算出式^{5), 6)}（下記の式(1-f)~(1-h)）を用いることにより、砂とベントナイトの配合割合を考慮できるようにしている。なお、ベントナイト配合率は全試料の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率である。ここで乾燥質量とは 110℃の乾燥炉内に 24 時間投入した後の質量を言う。式(1-i)は、粘土鉱物結晶層間の距離と上記の「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の関係式であり、式(1-j)および式(1-k)はそれぞれ、粘土鉱物周辺の間隙水の水質変化および粘土鉱物結晶の比表面積を評価する式である。

$$p = \frac{1}{CEC} \sum_{i=\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}} [\text{EXC}_i \{ (f_r)_i - (f_a)_i \}] \quad (1)$$

$$(f_r)_i = 2nkT(\cosh u_i - 1) \times 10^{-3} \quad (1-a)$$

$$u_i = 8 \tanh^{-1} \left[\exp(-\kappa_i d_i) \tanh \left(\frac{z_i}{4} \right) \right] \quad (1-b)$$

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{2n\nu_i^2 e'^2}{\varepsilon kT}} \quad (1-c)$$

表-1 使用したベントナイトの基本的性質¹⁶⁾

タイプ	Na 型
土粒子の密度	2.79 Mg/m ³
液性限界	473.9 %
塑性限界	26.61 %
塑性指数	447.3
活性度	6.93
塑性比	16.81
粘土分(< 2 μm)含有率	64.5 %
モンモリロナイト含有率	48 %
陽イオン交換容量	0.732 meq/g
交換性 Na イオンの交換容量	0.405 meq/g
交換性 Ca イオンの交換容量	0.287 meq/g
交換性 K イオンの交換容量	0.009 meq/g
交換性 Mg イオンの交換容量	0.030 meq/g

n_0 : 緩衝材・埋戻し材中の間隙水のイオン濃度 (mol/m³)

ε : 間隙水の誘電率(C²J⁻¹m⁻¹)

A_h : Hamaker 定数(モンモリロナイトの場合, $=2.2 \times 10^{-20}$ J)

t : モンモリロナイトの結晶層厚($=9.60 \times 10^{-10}$ m)

ε_{smax} : 緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率(%)

e_0 : 緩衝材・埋戻し材の初期間隙比

C_m : ベントナイトのモンモリロナイト含有率(%)

ρ_{d0} : 緩衝材・埋戻し材の初期乾燥密度(Mg/m³)

α : 緩衝材・埋戻し材のベントナイト配合率(%)

ρ_m : モンモリロナイトの土粒子密度(Mg/m³)

ρ_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)

ρ_{sand} : 砂の土粒子密度(Mg/m³)

$(R_{ion})_i$: モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン i の非水半径(m)

N_A : アボガドロ数($=6.023 \times 10^{23}$)

S : ベントナイトの比表面積(m²/g)

S_m : モンモリロナイトの比表面積(m²/g)

S_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積(m²/g)

図-3 には, 膨潤特性理論評価式による緩衝材・埋戻し材の膨潤挙動の評価手順の一例を示している。

3. 隙間部分と緩衝材の関係を軸対称に縮尺・模擬した処分孔モデル実験

前章で述べた「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」のさらなる適用性・有効性を確認することを目的に, 図-1の右下図に示す処分孔内の隙間部分と緩衝材の関係を軸対称に縮尺・模擬した処分孔モデル実験を行った。本章では処分孔モデル実験の概要と得られた結果を述べる。

図-4 (財)電力中央研究所・電気事業連合会が提示した処分孔の外形・寸法¹⁷⁾

図-5 緩衝材供試体の寸法と外観

(1) 使用した試料

試料は, 著者らが1987年~2000年の期間に入手した山形県月布産のNa型ベントナイト(クニミネ工業製のクニゲルV1)である。表-1は, 当該試料の基本的性質を示す¹⁶⁾。本ベントナイトは交換性陽イオンが主にNa⁺イオンのベントナイト, すなわちNa型ベントナイトであり, 低透水性, 膨潤性に富むベントナイトである。日本の高レベル放射性廃棄物処分技術に関する研究・開発において, 頻繁に実験等に使用されている材料である。本試料は温度が22±1℃, 相対湿度が70~80%となる室内で保存しており, このときの含水比は7.16~13.99%の範囲にあった。本試料のモンモリロナイト含有率は, そのメチレンブルー吸着量の67 meq/100gと純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量である140 meq/100gの比率から算出し, その値は48%であった^{5), 6)}。混合する砂には, 三河珪砂6号(粒径: 0.053~0.590 mm, 土粒子の密度: 2.66 Mg/m³)を使用した。

(2) 緩衝材供試体の設定仕様

(1)で述べたベントナイトもしくは, これに三河珪砂6

表-2 緩衝材供試体の仕様

ベントナイト配合率	初期乾燥密度
80%	1.62 Mg/m ³ , 1.77 Mg/m ³
100%	1.61 Mg/m ³ , 1.84 Mg/m ³
70%	1.81 Mg/m ³

図-6 緩衝材供試体の製作用治具

号を混合した材料を締め固め、後述のような5種類のベントナイト配合率、乾燥密度の緩衝材供試体を作製した。処分孔の外形・寸法については、核燃料サイクル開発機構や(財)電力中央研究所・電気事業連合会による設計例がある。本研究では、図-4に示す(財)電力中央研究所・電気事業連合会が提示した処分孔の外形・寸法^{4), 17)}を参考に、緩衝材供試体の仕様を設定した。本案では、緩衝材の外径は1620 mm、内径はオーバーパックの直径に応じて820 mm、緩衝材の水平方向厚さが400 mmとされている。本実験では、この緩衝材の約1/5縮尺の供試体を用いて実施することとした。すなわち、図-5に示すように、外径が332 mm、内径が172 mm、緩衝材の水平方向の厚さが80 mmのドーナツ型緩衝材供試体とした。ドーナツ型供試体とした理由は、図-5に示すようなブロックを数個積み上げて処分孔を製作・施工することは、施工性の面から有利と考えられているためである。ドーナツ型緩衝材は、参考文献4), 17)においても提案されているタイプの一つである。また、緩衝材供試体の高さは50 mmとした。

今回製作したドーナツ型緩衝材供試体は、ベントナイト配合率80%で初期乾燥密度が1.62 Mg/m³および1.77 Mg/m³、ベントナイト配合率100%で初期乾燥密度が1.61 Mg/m³および1.84 Mg/m³の4個の供試体、これに加えて1.81 Mg/m³を初期乾燥密度としたベントナイト配合率70%の供試体の全5供試体である。後者は、核燃料サイクル開発機構で提案されている緩衝材の仕様を想定したものである³⁾。表-2に上記の緩衝材供試体の仕様を表示した。

(3) 緩衝材供試体の作製方法

緩衝材供試体の製作治具は、図-6に示す金型モー

図-7 緩衝材供試体の作製手順の概念図

ルド、ピストンおよび抜き出し用ジャッキで構成される。緩衝材供試体の締め固めは、最大荷重5000 kNのプレス機を用いて行った。供試体の作製手順は、参考文献18)に詳述しているので参照されたい。そのおおよその手順は、次の通りである。すなわちプレス機により圧縮成形した後、緩衝材供試体を損傷することなく取り出すために、クレーンを用いて金型モールドを上下反転させ、ジャッキを用いて緩衝材模型を下から上に押し出すという方法を採用した。図-7に、上記の緩衝材供試体の作製手順の概念図を示す¹⁸⁾。締め固め圧力は、緩衝材供試体の初期乾燥密度が高く、ベントナイト配合率が高いものほど高く設定し、1.09~31.59 MPaの範囲で変化させた。所定の締め固め圧に達するのに必要な時間は、7分35秒から23分25秒の範囲にあった。所定の締め固め圧力を継続的に作用させる時間は、すべてのケースで15分に設定した。この時間は、参考文献19)で実施されたベントナイトの締め固め実験における締め固め圧力の継続時間と同じである。

(4) 処分孔モデル実験の方法

図-8は、本研究で実施した処分孔モデル実験の概要を示すとともに、緩衝材の自己シール性の模擬を示した。図-8に示すように、図-4に示した処分孔の鉛直方向の一部(図-8上の四角で囲った部分)を切

図-8 緩衝材の自己シール性と処分孔モデル実験装置の概要

り出し、水平方向の寸法を 1/5 に縮尺したモデルを想定した。処分孔モデル実験では、ベントナイト系緩衝材と廃棄物収納容器の間および緩衝材と周辺岩盤との間に生じる隙間に対するベントナイト系緩衝材の膨潤挙動を測定・評価する。本モデルでは、周辺岩盤および廃棄物収納容器をアクリル製円筒セルで模擬し、周辺岩盤を模擬したアクリル製円筒セルの孔壁に土圧計を設置し、隙間充填後のベントナイ

(a) ベントナイト配合率 80 %, 初期乾燥密度 1.62 Mg/m³ の場合

(b) ベントナイト配合率 100 %, 初期乾燥密度 1.84 Mg/m³ の場合

図-9 3 個の土圧計により測定された隙間充填過程における緩衝材の発生圧力の経時変化の例

ト系緩衝材の膨潤により孔壁に作用する圧力を経時的に測定した。なお、使用した土圧計の最大容量は 2000 kPa, 最小目盛は 0.5 kPa の土圧計である。また、土圧計の受圧面の形状は直径 5 mm の円形であり、内径 332 mm のアクリル製円筒セルの内壁に設置しても、特に隙間に突出することのない状態であった。

図-8 中央の実験装置の概念図に示すように、ドーナツ型のベントナイト系緩衝材供試体を設置した。その後、隙間部および供試体の下端から、室温状態の脱気した蒸留水を給水した。給水開始直前よりアクリル製円筒セル内壁部に設置した土圧計の出力を経時的に計測した。実験期間は約 2 ヶ月とした。

(5) 処分孔モデル実験の孔壁におけるベントナイト系緩衝材の発生応力の経時変化

図-9は、表-2に示すベントナイト配合率80 %, 初期乾燥密度1.62 Mg/m³およびベントナイト配合率100 %, 初期乾燥密度1.84 Mg/m³の2ケースにおいて、アクリル製円筒セルの内壁部に設置された3個の土

図-10 隙間充填過程における緩衝材の発生圧力の経時変化

図-11 実験終了後の隙間の充填状況

圧計により測定された隙間充填過程における緩衝材の発生圧力の経時変化を示す。これらの図から分かるように、3個の土圧計により測定される値は、測定期間中、それらの平均の20%程度の範囲内の値を示していた。その他の供試体条件のケースでも、同様の傾向を示した。なお、今回測定された隙間充填過程の緩衝材の発生圧力の経時変化のうち、図-9(a)

に示す土圧計2のみ、ピークに到達した後、やや低下する傾向が認められた。これは、本実験ケースの土圧計2付近の緩衝材が、他の部位よりも早く膨潤変形し、土圧計2に早く接触したことによるものと推察される。その後、他の部位の緩衝材が随時、隙間部分を充填し均一になることにより、緩衝材の発生圧力は、他の土圧計1および3が示す圧力値に収束する傾向を示している。また、図-9(a)および(b)の比較から、緩衝材の発生圧力がほぼ一定値に収束するまでの経過時間に差異が認められる。これは、緩衝材供試体の透水係数に起因していると考えられる。ベントナイト配合率が高く、初期乾燥密度の大きい図-9(b)の供試体の方が透水係数が低いため、緩衝材に浸潤する水の速度が小さく、膨潤変形による隙間の充填に時間を要するため、図-9(a)および(b)のような経時変化の差異が生じたと推察される。

図-10は、表-2に示す全供試体条件において、アクリル製円筒セルの内壁部に設置された3個の土圧計により測定された隙間充填過程における緩衝材の平均発生圧力の経時変化を示す。この平均発生圧力は、3個の土圧計による測定値の測定時間ごとの平均である。前述のように、3個の土圧計により実測されたそれぞれの発生圧力は、図-10に示した平均圧力の20%程度の範囲に分布した。図-10から分かるように、ベントナイト配合率が高く、初期乾燥密度の大きいものほど、隙間充填後の緩衝材の平均発生圧力は大きくなる。

また、図-11には、緩衝材の膨潤変形による隙間部分の充填状況の観察結果を示す。これらの図から分かるように、緩衝材は、その膨潤変形により、隙間部分をほぼ完全に充填できることを確認した。50mmの深度方向の隙間全体においても、ほぼ完全に充填されていたことを確認している。

4. 処分孔モデル実験の結果に対する「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」の適用性

図-10に示す実験結果に対して、「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」が隙間充填後の緩衝材の発生圧力の評価に適用できるか否かを検討した。膨潤特性理論評価式による計算で用いた各パラメータの設定値は、表-3に示す通りである。これらの値は、表-1に示したように、実験に用いたベントナイト（クニミネ工業製・クニゲルV1）の測定値に基づき設定しており、その詳細について

表-3 膨潤特性評価式による計算で用いた各パラメータの値

モンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m (Mg/m ³)	2.77
モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 ρ_{nm} (Mg/m ³)	2.81
モンモリロナイトの比表面積 S_m (m ² /g)	810
モンモリロナイト以外の鉱物の比表面積 S_{nm} (m ² /g)	0
モンモリロナイト含有率 C_m (%)	48
陽イオン交換容量 CEC (meq/g)	0.732
交換性 Na イオンの交換容量 EXC_{Na^+} (meq./g)	0.405
交換性 Ca イオンの交換容量 $EXC_{Ca^{2+}}$ (meq./g)	0.287
交換性 K イオンの交換容量 EXC_{K^+} (meq./g)	0.009
交換性 Mg イオンの交換容量 $EXC_{Mg^{2+}}$ (meq./g)	0.030
交換性 Na イオンの非水半径 (R_{ion}) _{Na} (nm)	0.098
交換性 Ca イオンの非水半径 (R_{ion}) _{Ca} (nm)	0.1115
交換性 K イオンの非水半径 (R_{ion}) _K (nm)	0.133
交換性 Mg イオンの非水半径 (R_{ion}) _{Mg} (nm)	0.0835
交換性 Na イオンの価数 v_{Na}	1
交換性 Ca イオンの価数 v_{Ca}	2
交換性 K イオンの価数 v_K	1
交換性 Mg イオンの価数 v_{Mg}	2
モンモリロナイトの結晶層厚 l (m)	9.60×10^{-10}
砂の土粒子密度 ρ_m (Mg/m ³)	2.66

各パラメータの設定の詳細は、参考文献 5), 6) を参照のこと。

は、参考文献 5), 6) を参照されたい。なお、モンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m は、Lambe and Whitman (1969)²⁰⁾ において $2.75 \sim 2.78 \text{ Mg/m}^3$ と報告されることから、これを参考に $\rho_m = 2.77 \text{ Mg/m}^3$ とした^{5), 6)}。モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 ρ_{nm} は、式(1-h)を用いて、上記の $\rho_m = 2.77 \text{ Mg/m}^3$ に加え、表-3 に示したモンモリロナイト含有率 $C_m = 48 \%$ とベントナイト配合率 $\alpha = 100 \%$ として計算される ρ_{solid} の値が、表-1 に示す使用したベントナイトの土粒子密度 2.79 Mg/m^3 になるときの ρ_{nm} の値を算出すると、表-3 に示す値となる^{5), 6)}。また、ここで注意する点として、ベントナイトは産出年度によって性質が変化する点である²¹⁾。本研究で使用したベントナイトは、2000 年以前に産出された上記名称のベントナイトである。横山らの粘土鉱物学的研究²²⁾ によれば、同一名称のベントナイトであっても、産出年度によって採掘時期や採掘箇所が異なり、その性質が変化することが指摘されている。2000 年以降に産出された上記名称

図-12 隙間充填後の緩衝材の最大発生圧力に関する実測値と膨潤特性理論評価式による予測値の比較

のベントナイトを用いた研究、例えば、参考文献 23) で報告されている測定値とは異なることに注意が必要である。

図-12 は、隙間充填後に緩衝材が発生する圧力の最大値、すなわち図-10 の平均発生圧力の最大値と膨潤特性理論評価式により予測した最大発生圧力との関係を示す。先にも述べたように、3 個の土圧計による各測定値は、図-12 の縦軸に示す隙間充填後の緩衝材の最大発生圧力の実測値の 20% 程度の範囲に分布していた。このことを加味して考えると、図-12 に示す結果から、両者は、良く対応していると考えられる。すなわち、先に提案された膨潤特性理論評価式は、隙間充填後の緩衝材の最大発生圧力の予測に利用できるものと考えられる。高レベル放射性廃棄物地層処分において利用が検討されているベントナイト系緩衝材は、ベントナイト配合率が 70 ~ 100 % の範囲で、乾燥密度が $1.6 \sim 2.0 \text{ Mg/m}^3$ の範囲で設計される可能性が高い^{3), 4)}。したがって、本研究の成果から、先に提案された膨潤特性理論評価式は、緩衝材の自己シール性の観点から、適切なベントナイト配合率や乾燥密度を設計することに利用できる。

5. 結論

本研究で実施した処分孔モデル実験の結果から、ベントナイト系緩衝材の膨潤変形により廃棄物収容容器や周辺岩盤と緩衝材との間の隙間部分がほぼ完全に充填されることを実験的に確認し、ベントナイトが自己シール性と呼ばれる機能を保有することを確かめた。また、「ベントナイト系緩衝材・埋戻し

材の膨潤特性理論評価式」が、このような隙間充填後の緩衝材の最大発生圧力の予測に適用できることを明らかにし、自己シール性の観点からの緩衝材仕様の設計に利用できることを示した。

謝辞：本研究で述べた処分孔モデル実験は、電力10社による電力共通研究「高レベル廃棄物処分における人工バリア物性評価に関する研究」において実施した成果であり、第一著者が電力中央研究所に在職中に実施したものである。その際、元電力中央研究所の緒方信英氏には、多大な技術的助言をいただいた。また、本研究における「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤特性理論評価式」の適用性に関する成果は、文部科学省科学研究費基盤(B)の援助の下、実施した。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. : SKB91 Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety, SKB Technical Report 92-20, 1992.
- 2) Atomic Energy of Canada Limited : Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-10711, COG-93-1, 1994.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：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次取りまとめ—総論レポート, JNC TN 1410 99-020, pp. IV-41, 1999.
- 4) (財)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, 1999.
- 5) Komine, H. and Ogata, N. : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 460-475, 2003.
- 6) Komine, H. and Ogata, N. : Predicting swelling characteristics of bentonites, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 130, No. 8, pp. 818-829, 2004.
- 7) 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏：一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.101-112, 2004.
- 8) Chapman, D. L. : A contribution to the theory of electrocapillarity, *Philosophical Magazine*, Vol. 25, No. 6, pp. 475-481, 1913.
- 9) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B. P. : *Soil - Water Interactions*, Marcel Dekker, Inc., pp. 131-166, 1988.
- 10) Van Olphen, H. : Dispersion and flocculation, Chapter 3 in *Chemistry of Clays and Clay Minerals* (Edited by Newman, A. C. D.), pp. 203-224, 1987.
- 11) Van Olphen, H. : *An Introduction to Clay Colloid Chemistry* (Second Edition), Krieger Publishing Company Malabar, pp. 92-110, 1991.
- 12) Mitchell, J. K. and Soga, K. : *Fundamentals of Soil Behavior* (Third Edition), John Wiley & Sons, pp. 143-171, 2005.
- 13) London, F. : The general theory of molecular forces, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 33, No.8, 1937.
- 14) Casimir, H. B. C. and Polder, D. : The influence of retardation on the London-van der Waals forces, *Physical Review*, Vol. 73, p. 360, 1948.
- 15) Komine, H., and Ogata, N. : Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 2, pp. 83-97, 1999.
- 16) 小峯秀雄, 緒方信英：砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.373-385, 2002.
- 17) 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, Vol. 5, No. 2, pp.103-121, 1999.
- 18) 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏：高レベル放射性廃棄物処分のためのブロック型緩衝材の製作方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.203-208, 2003.
- 19) 小峯秀雄, 緒方信英：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集, No.436, pp.103-110, 1991.
- 20) Lambe, T. W. and Whitman, R. V. : *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., pp. 29-31, 1969.
- 21) 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回年次学術講演会講演概要集, pp. 251-252, 2005.
- 22) 横山信吾, 黒田真人, 筒井政則, 佐藤努, 鈴木啓三, 榎戸洋之：月布ベントナイト鉱床における川向坑産ベントナイトと梅ノ木田坑産ベントナイトの鉱物学的比較, 粘土科学, 第44巻, 第2号, 2004.
- 23) Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S. : Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46(2), pp. 177-189, doi: 10.1139/T08-120, 2009.

(2012. 5. 7 受付)

PREDICTION OF PRESSURE OF BENTONITE BUFFER IN MODEL TEST OF DISPOSAL PIT FOR HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE

Hideo KOMINE, Toru OSADA, Hajime TAKAO and Hiroyoshi UEDA

Bentonite-based buffer materials for high-level radioactive waste (HLW) disposal are expected to fill up the space between buffer and a wall of the disposal pit, and/or between buffer and an waste-container called as overpack by its swelling deformation. That is called as self-sealing ability. This study performs the model tests simulated the relationship between buffer and space mentioned above. It also investigates the validity of the theoretical equations for evaluating the swelling characteristics of bentonite-based buffer and backfill material, which were proposed in Komine and Ogata (2003, 2004), by comparing the calculations and the experimental results.