

# ベントナイト・珪砂混合試料の 高温環境下での膨潤特性

児玉潤<sup>1</sup>・足立格一郎<sup>2</sup>・田邊亮<sup>3</sup>・鈴木絵理子<sup>4</sup>・山元茂弘<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 芝浦工業大学大学院博士課程 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D. 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)  
E-mail: adachi@sic.shibaura-it.ac.jp

<sup>3</sup>工修 西松建設㈱ (〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

<sup>4</sup>工修 千葉県庁 (〒260-8667 千葉県千葉市中央区市場町 1-1)

<sup>5</sup>学生会員 学士 芝浦工業大学大学院修士課程 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

ベントナイト・珪砂混合試料の高温環境下での膨潤特性を把握するために、温度が膨潤性に与える影響を実験により調査した結果、温度の上昇に伴い膨潤性は向上することが示された。実験結果をもとに膨潤評価式についても検討したところ、全体的には実験結果の傾向を良好に表現していた。しかし、高温になる程設定した間隙水イオン濃度が実体と異なってくるため、理論曲線と実測結果との乖離が大きくなる。そこで、乖離のない一本の曲線で実験結果を表す方法を検討し、各膨潤率での間隙水イオン濃度を温度別に推定する式を求めた。この推定式から算出した各膨潤率での間隙水イオン濃度に対応する膨潤圧と膨潤率の関係を膨潤評価式に取り入れることにより、高温環境下での膨潤特性を推定できる可能性を示した。

**Key Words :** *high-level radioactive waste, high temperature, bentonite, swelling evaluation formula, swelling characteristics*

## 1. はじめに

現在、原子力発電は日本の総発電電力量の約3分の1をまかなっている。原子力発電に関係する事故などによって市民の原子力発電に対する不安感がいつそう高まってきているのを背景に、太陽・風力・地熱発電などがクリーンエネルギーとして注目されているが、现阶段では、技術面、経済面、発電量において原子力発電にとってかわる代替エネルギーとして位置付けることはまだ難しいといえる。したがって、エネルギーの安定確保や発電コスト、環境問題の全ての観点から見て引き続き原子力発電を継続していく可能性が高い。そうした際に市民の理解と支持を得るためにも、原子力発電の安全性の確保はもちろんのこと、原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物に対しても的確な対策をとる必要がある。

放射性廃棄物も産業廃棄物と同様、発生量を少なく抑える努力が行われている。また、発生した廃棄物を除染、減容処理したり、再利用や再使用技術の開発も進んでいる。放射性廃棄物には、極々低い放射能レベルの廃棄物から高いレベルのものまで様々な放射能レベルの廃棄物があり、それぞれのレベルに応じた処分あるいは再利用の技術開発が国際的に行われている。その中で、高レベル放射性廃棄物の処分法として重点を置かれているのが

「地層処分」と呼ばれる処分法であり、“安定な形態にガラス固化し、30～50年間崩壊熱の冷却のために貯蔵した後、多重バリアシステムによって地下数百mより深い安定な地層中に処分する”という手法である。多重バリアシステムとは、人工の構造物(人工バリア)と天然の地層からなる多重の障壁によって廃棄物を人間環境から隔離するシステムで、人工バリアにはガラス固化体、オーバーパック、緩衝材が含まれる。緩衝材は、オーバーパックと岩盤の間に設置されるものである。この緩衝材には、放射性核種の長期間隔離や崩壊熱への対応、周辺地盤や廃棄物容器と緩衝材との間に生じる隙間部分を充填する自己シール性が要求され、非常に高い止水性・膨潤性を持つベントナイトの利用が有効であると考えられている。さらに、具体的な計画として、経済性と要求性能を考慮してベントナイトに砂や現地発生土を混合したものを緩衝材とすることが有望視されている。

実際の処分場での緩衝材は、放射性廃棄物の崩壊熱や地熱により高温環境に曝されるため、高温環境での緩衝材の特性を調べる必要がある。そこで、本研究ではベントナイトに珪砂を混合した試料を用いて80℃、50℃、20℃での緩衝材の膨潤特性を実験により把握し、温度の違いによる膨潤性を比較・検討することを目的とする。また、今回行った実験より得られたデータをもとに、小

峯・緒方<sup>1)</sup>によって提案されている緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式についても検討する。なお、高温状態での膨潤特性の研究には、東畑ら<sup>2)</sup>、鈴木・藤田<sup>3)</sup>の研究がある。東畑ら<sup>2)</sup>の研究では、室温と90℃で体積一定の状態にてベントナイトの膨潤応力を測定したところ、90℃の最終膨潤圧は室温より低くなった。ベントナイトを加熱すると体積収縮する傾向が強まるため、膨潤圧が低くなったとしている。また、一定圧の過圧密状態で1年以上自由に体積膨張させたところ、1か月目以降に高温試料だけ膨潤をやめて収縮し始めた。これは、長期的には粘土はクリープ収縮するものではあるが、高温の下ではこれが早まるらしいとしている。鈴木・藤田<sup>3)</sup>の研究では、温度の上昇に伴う膨潤応力の低下は、ベントナイトの変形係数の低下が膨潤応力を低下させる大きな要因であるとしている。ベントナイトに温度履歴を与えた研究には、小峯ら<sup>4)</sup>、山元ら<sup>5)</sup>の研究がある。

## 2. 膨潤評価式<sup>1)</sup>

ベントナイトはモンモリロナイト、石英、沸石、方解石、斜長石などから構成されており、これらの鉱物の中で、ベントナイトの膨潤に寄与するものは主成分となっているモンモリロナイトである。モンモリロナイトの結晶粒子層間に水が入り込み、さらにその水が電気的に結ばれた水分子となり層間隔を押し広げることによってベントナイトの体積が増大し、膨潤する。

小峯らによって提案されている膨潤評価式<sup>1)</sup>は、モンモリロナイト粒子表面付近に分布している何種類かの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の理論をもとに、モンモリロナイトの膨潤体積ひずみと平行2粒子間距離の1/2に相当するパラメータを介して、ベントナイト配合率や乾燥密度に応じて締固めたベントナイトの発生する圧力と膨潤率の関係を求めるもので、式は以下ようになる。

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

$p$ : 緩衝材の発生する圧力(kPa)

$(f_r)_i$ : 交換性陽イオン*i*に起因する反発力(kPa)

$(f_a)_i$ : 交換性陽イオン*i*に起因する引力(kPa)

$EXC_i$ : 交換性陽イオン*i*の交換容量(mequiv/g)

$CEC$ : 陽イオン交換容量(mequiv/g)

膨潤評価式による理論曲線の算出に必要なパラメータは、参考文献1)から引用して設定した。この文献によると、緩衝材・埋戻し材中の間隙水のイオン濃度  $n_0$

は、膨潤圧試験では  $40\text{mol/m}^3 \sim 50\text{mol/m}^3$ 、膨潤変形試験では  $10\text{mol/m}^3 \sim 30\text{mol/m}^3$  と推定されている。膨潤変形試験は膨潤圧試験より大きく変形するため吸水量が大きく、間隙水のイオン濃度が低くなるため、イオン濃度の推定値は低くなる。本研究でもこの推定値を参考に実験結果を評価した。

## 3. 試料および各試験方法

### (1) 試料

#### a) ベントナイト

本研究で使用したベントナイトは、山形県月布産のベントナイト(クニミネ工業製、クニゲルV1・N a型)である。

#### b) 珪砂

本研究では、愛知県産三河珪砂6号( $\rho_s=2.66\text{g/cm}^3$ )を使用した。

#### c) 供試体作製方法

ベントナイトと珪砂の乾燥質量比が7:3(ベントナイト含有率70%)となるように混合した試料に、蒸留水を加えて含水比 $w=15\%$ となるよう水分調整したものを内径10cmの円筒形モールドに投入し、初期乾燥密度が $1.78\text{Mg/m}^3$ となるように4.5kgランマーを高さ45cmから自由落下させて均等に突き固める(この条件は、緩衝材の施工方法として現地締め固め方式とブロック方式の両方が可能な緩衝材の仕様として研究者間で一般的に用いられている)。このように締固めた試料に供試体と同サイズの Cutter-Ring を押し込み、両端面をナイフで平面に仕上げた後リングから供試体を押し出して、供試体作製完了とした。使用した供試体の初期状態を表-1に示す。ベントナイトは一般の粘性土に比べ透水性が低いため、吸水膨潤に長時間を要するものと考え、高さを低く設定して実験を行った。

### (2) 試験装置較正試験

試験装置は金属製であり、供試体の高さが5mmであるのに対して試験装置(図-1、図-2)の高さは10cm～数

表-1 各温度での供試体初期状態

温度(℃)	初期乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	含水比(%)	試験名	サイズ
20	1.68~1.82	14.1~15.6	膨潤圧試験	直径:35mm 高さ:5mm, 10mm
			膨潤変形試験	直径:60mm 高さ:5mm
50	1.79~1.83	13.8~15.1	膨潤圧試験	直径:35mm 高さ:5mm
			膨潤変形試験	
80	1.76~1.81	14.2~15.7	膨潤圧試験	直径:35mm 高さ:5mm
			膨潤変形試験	

10cm であるため、試験装置を所定の温度にすることにより発生する膨張量や供試体の膨潤圧による試験装置の収縮量が膨潤率の算出に大きな影響を及ぼす。そのため、実測データを補正する必要がある。本研究では、まず、試験装置の較正試験を行ってから各試験を行った。

#### a) 熱膨張較正試験

熱膨張較正試験は、熱による試験装置の膨張量を測定する試験である。供試体を入れずに本試験と同じ状態に設置し、ヒーターの電源を入れる。三軸セル内の水が設定の温度になり、変位量が一定になったところで試験を終了する。なお、20℃膨潤圧試験では三軸セル内に水は入れずに室温下(20℃)で行ったため、当試験は80℃、50℃の温度に対して行った。

#### b) システム較正試験

システム較正試験は、供試体であるベントナイトの膨潤圧を受けて収縮すると考えられるステンレス製シャフト、キャップ、ポーラスストーン、ろ紙やペダスタルのひずみ量を測定する試験である。供試体を入れずに本試験と同じ状態に設置し、圧縮装置を自動で上昇させることにより圧力をかけ、試験装置のひずみ量を測定した。なお、当試験は、80℃、50℃、20℃の温度で行った。

#### c) 20℃膨潤変形試験用較正試験

20℃膨潤変形試験のみ標準圧密試験装置(図-2)を使用した。載荷荷重による試験装置の収縮量を補正するために、供試体を設置しない状態で各荷重における試験装置の収縮量を測定した。

### (3) 膨潤圧試験

膨潤圧試験は、比較的膨潤率の低い状態での膨潤圧を測定する試験で、温度コントロール型三軸圧縮試験装置に改良を加えたもの(図-1)を試験装置として使用した。温度調整は、試験装置内のヒーターと温度コントローラーによって温度を制御することができる。当試験は、80℃、50℃、20℃の3つの温度で行った。特に、50℃は20℃から80℃になる過程を調査する目的も含め実施した。

ペダスタル部に設置した供試体の外側に、ペダスタル、キャップとの擦りあわせや剛性を十分に考慮したステンレス製リング(内径35.05mm、厚さ4.5mm、高さ40mm)をかぶせることで供試体の膨潤による側方への変形を拘束する。このステンレス製リングに1MPaの膨潤圧が働いたときの側方への変形量を計算した結果、変形量は内径で $4.2 \times 10^{-4}$ mmだけであり、側方への変形は無視できるものである。リングの温度が20℃から80℃に上昇したときの膨張量を計算した結果、リングの面積は1.0021倍に膨張するだけであり、温度の影響も無視してよいと判断できる。供試体を設置する際には、供試体とリング間の摩擦を低減するためにグリースをリング内壁

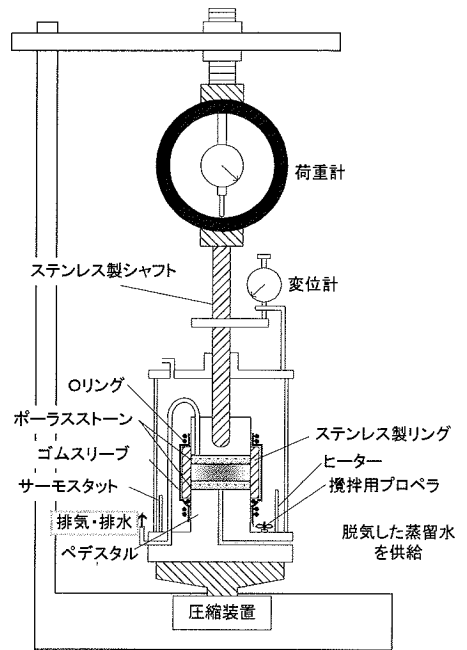


図-1 温度コントロール型三軸圧縮試験装置

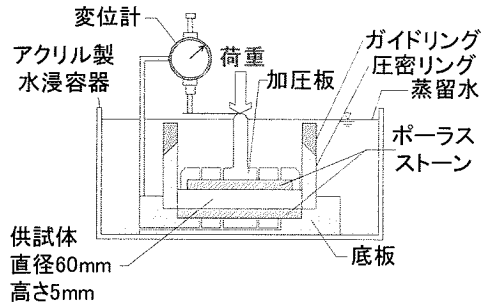


図-2 圧密試験装置概略図

に塗布する。また、供試体とキャップ、ペダスタルとの間には、フィルター材としてポーラスストーンとろ紙を挿入した。そして、ステンレス製リングの外側にはゴムスリーブを被せ0リングで密封し、ステンレス製リングの位置を固定する。なお、このゴムスリーブには漏水防止といった機能も果たしている。

供試体の設置が完了したら、三軸セルの中に水を供給する。この時、ヒーターの電源はOFFである。満水になったら、電源をONと同時に試験開始である。20℃のテストは三軸セル内に水を入れないため、供試体設置完了後、試料への給水と同時に試験開始である。

供試体の膨潤による側方への変形をステンレス製リングで拘束し、鉛直方向には荷重計の上部と三軸セルの下部を固定した状態で、供試体の膨潤変形を制御してい

る。三軸セル内の水が設定した温度になり、さらに試験装置や供試体に十分温度が伝わるのに要する時間の経過後、供試体の下部から常温状態の脱気した蒸留水を供給する。なお、この供給水は透水速度が小さいため、試料に達するまでに設定温度になる。供試体の吸水を促進するため、蒸留水には約9.81kPaの背圧をかけた。蒸留水を吸水した供試体が膨潤過程で発生する圧力を上部の荷重計で測定し、変位計によって供試体の鉛直方向の変位量を測定する。その圧力と変位量が一定となったところで試験を終了する。膨潤圧試験では、試験装置の都合上膨潤量を0にした試験はできないため、圧縮装置で三軸セルを手動で上昇させ膨潤量を調節した3種類の試験を行った。膨潤量を調節しない標準試験、膨潤量を抑えた変位抑制試験1、さらに変位抑制試験1の結果を踏まえ、膨潤量を極力0に抑制した変位抑制試験2の3種類の試験を行った。

#### (4) 膨潤変形試験

膨潤変形試験は膨潤率が高い時の膨潤圧を測定する試験である。以下に説明するように、低拘束応力下での膨潤量を測定するための試験であり、装置と実験時間の制約により、高温と常温では異なる装置を用いたが、結果に大きな差異は無いと判断できる。

##### a) 50℃、80℃での膨潤変形試験

当試験は膨潤圧試験と同じ手順で準備するが、供試体を初期段階で大幅に膨潤させるため、荷重計とステンレス製シャフトとの間に隙間を空け、拘束しない状態で供試体に脱気した蒸留水を加える。供試体が膨潤し、シャフトを持ち上げ設定された膨潤量付近で拘束されたときに発生する圧力と膨潤量を測定する。試験は設定膨潤率50%、90%、130%の3種類を行った。

##### b) 20℃での膨潤変形試験<sup>6)</sup>

20℃膨潤変形試験は、図-2に示す標準圧密試験装置を使用した。圧密試験装置は、圧密容器、水浸容器、載荷装置、変位計からなっている。圧密容器を構成している圧密リング、ガイドリングはともにステンレス製で、供試体の膨潤による側方変形を拘束しており、鉛直方向のみの膨潤を許した状態で鉛直方向に荷重をかけ、鉛直方向の変形量を変位計によって測定する。

供試体は、ポーラスストーン、加圧板との間にろ紙を挿入した状態で試験装置に設置する。試験開始とともに水浸容器に常温の蒸留水を注入し膨潤を開始させ、衝撃を与えないように短時間で載荷して、設定された鉛直応力下での鉛直方向の膨潤量を測定する。

載荷荷重は、第1段階:353.2kPa、第2段階:176.6kPa、第3段階:9.81kPaの3段階とし、それぞれの段階ごとに3t法で膨潤の終了を確認した後、次の段階へ除荷を行った。

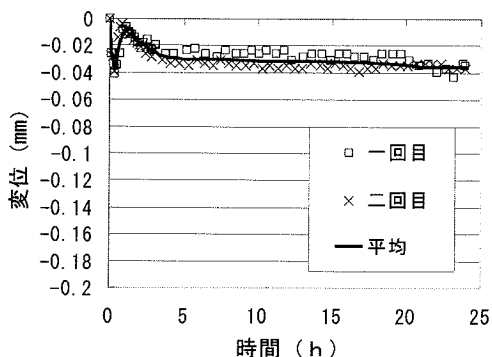


図-3 試験装置熱膨張量の経時変化 (80℃)

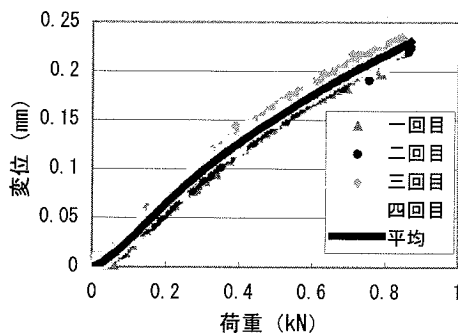


図-4 試験装置収縮量と荷重の関係 (80℃)

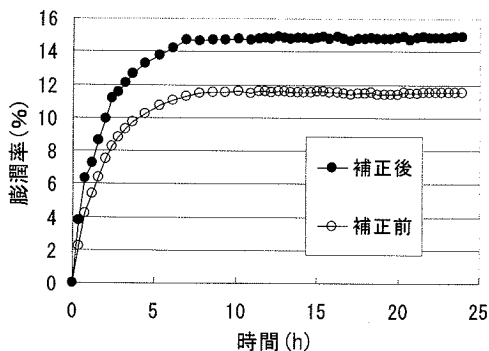


図-5 試験装置補正前後の膨潤率の差

## 4. 結果および考察

膨潤率の計算は、リングは十分な剛性があるので側方への変形はないと考え、以下の式を用いて算出した。

$$\text{膨潤率 (\%)} = \frac{a-b}{b} \times 100$$

a ; 実験終了時の供試体高さ (試験装置の補正後の値)

b ; 供試体初期高さ

(1) 試験装置校正試験結果・考察

80°C膨潤圧試験用熱膨張校正試験結果を図-3に示す。試験は何度か行い、その結果を平均して校正曲線とした。試験開始後数時間は、試験装置を構成する材料の種類により膨張性が異なるため値が大きく変化しているが、5時間を越えるとほぼ一定となっている。

80°C膨潤圧試験用システム校正試験結果を図-4に示す。熱膨張校正試験と同様に試験は何度か行い、その結果を平均して使用した。

80°C標準試験の試験装置の変形補正の前後の膨潤率と時間の関係を図-5に示す。図より、補正の前後では値が大きく異なるため、試験結果を補正することは重要であるといえる。なお、次節以降で示す実験結果は、全て補正後のデータである。

(2) 20°C試験結果・考察<sup>6)</sup>

20°C膨潤圧試験結果を図-6、図-7に示す。図-7より、変位抑制試験2では、供試体の変形を約2%しか許さずに膨潤圧を測定できていることがわかる。このことから、この試験方法を用いることによって供試体変形量が0に近い状態で供試体の膨潤圧を測定することが可能

であることが明らかになった。また、どの試料も膨潤率の低い試料ほど膨潤圧は高くなっている。これは、膨潤性の高いベントナイト試料を拘束し、膨潤の余地を制約すると極めて高い膨潤圧力を周辺に与えるということである。また、厚さ10mmの試料は、吸水に時間を要するため膨潤圧が一定値になるのに時間を要することがわかる。

図-8に20°C膨潤変形試験結果を示す(2つの試料に対して実施：試料Aおよび試料B)。実験終了時の膨潤率は、試料Aが試料Bに比べ約10%程度多くなっているが、これは供試体の初期条件の差が影響したものと考えられる。供試体作製には、水分調整した珪砂とベントナイトを混合し、供試体サイズよりやや大きめに締固めた試料を供試体サイズのリングで押し抜く方法を用いているため、供試体サイズにした際にベントナイト・珪砂の混合比が正確に7：3となっていない可能性がある。したがって、2つの試料の結果にもそのような混合比の相異による差が表れているとも考えられる(BはAに比べ珪砂の含有率が高かったために低い膨潤率となった)。

試験開始時に膨潤率がマイナスになっているが、これは給水と同時に荷重を載荷したため、供試体が吸水し十分な膨潤が発生する前に供試体が圧縮されたものである。

図-9は20°C全実験データを実験終了時の膨潤圧と

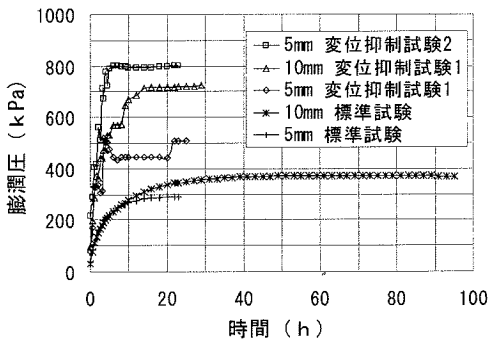


図-6 20°C膨潤圧試験の膨潤圧の経時変化

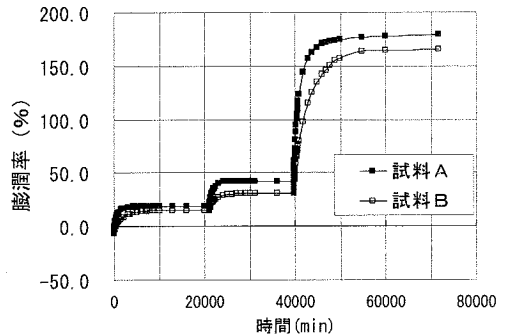


図-8 20°C膨潤変形試験結果

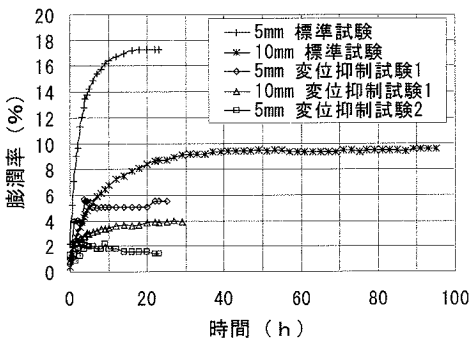


図-7 20°C膨潤圧試験の膨潤率の経時変化

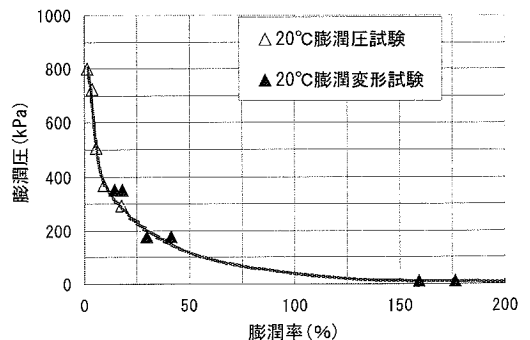


図-9 20°Cの膨潤圧と膨潤率の関係

膨潤率の関係に整理したグラフである。膨潤率が低くなるほど膨潤圧が高くなる傾向にあることがわかる。

### (3) 50°C試験結果・考察

50°C全実験結果を図-10、図-11に示す。20°Cでの結果と同様に、膨潤を抑えた試験ほど膨潤圧は高くなっている。また、膨潤変形試験では、シャフトと荷重計の間の隙間を膨潤により埋めるのに時間がかかるため、膨潤圧の発生に時間を要している。

図-12は50°C全実験データを実験終了時の膨潤圧と膨潤率の関係に整理したグラフである。膨潤率が低くなるほど膨潤圧が高くなる傾向にあることがわかる。

### (4) 80°C試験結果・考察

図-13は80°C全実験データを実験終了時の膨潤圧と膨潤率の関係に整理したグラフである。膨潤率が低くなるほど膨潤圧が高くなる傾向にあることがわかる。

### (5) 20°C, 50°C, 80°Cの比較

図-14は、全ての温度における全実験データを実験終了時の膨潤圧と膨潤率の関係に整理したグラフである。20°C, 50°C, 80°Cの順番で膨潤性は向上したが、50°Cと80°Cの差はほとんどない結果となった。よって、20°Cと

50°Cの間で膨潤性が大きく変化するものと思われる。

膨潤評価式は材料パラメータの1つである乾燥密度の違いが計算結果に大きく影響する。本研究で用いたすべてのタイプの供試体は同じ初期状態を目標に作製されてはいるが、実際、作製後に乾燥密度を測定したところ多少のばらつきが見られた。これが原因となり一部で80°Cより50°Cの膨潤性が上回ったと考えられる。

膨潤圧試験（膨潤率が低い領域）では、膨潤圧が高く

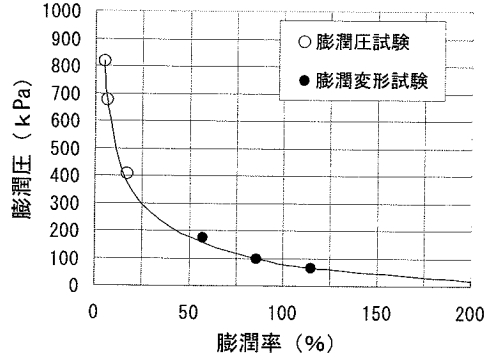


図-12 50°Cの膨潤圧と膨潤率の関係

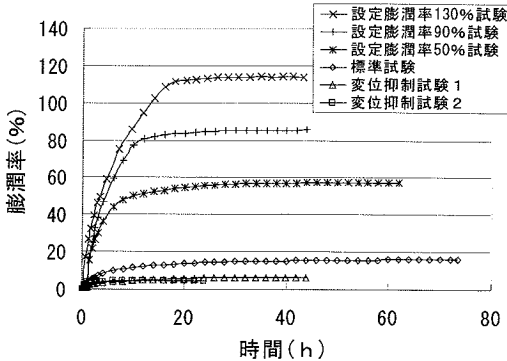


図-10 50°C膨潤圧の経時変化

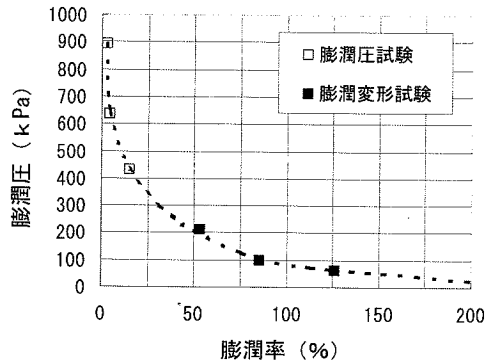


図-13 80°Cの膨潤圧と膨潤率の関係

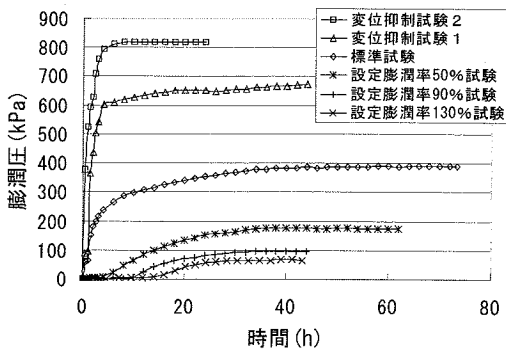


図-11 50°C膨潤率の経時変化

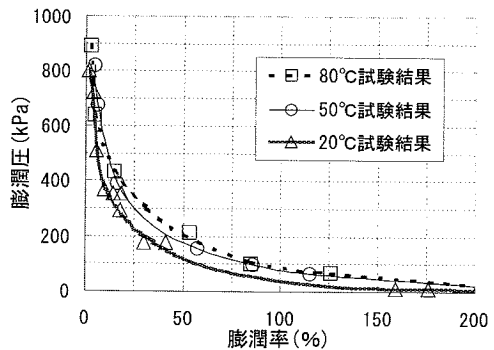


図-14 全温度の膨潤圧と膨潤率の関係

表-2 膨潤評価式設定値の一部

温度 (°C)	間隙水のイオン濃度 (mol/m <sup>3</sup> )	初期乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	試験方法
20	40	1.76	膨潤圧試験
	24	1.73	膨潤変形試験
50	40	1.82	膨潤圧試験
	13	1.80	膨潤変形試験
80	45	1.78	膨潤圧試験
	15	1.80	膨潤変形試験

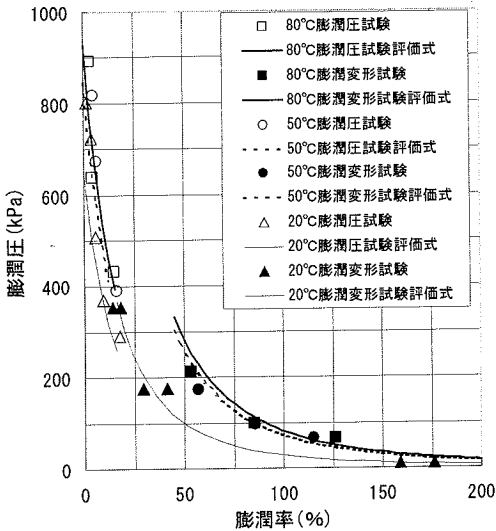


図-15 理論曲線を挿入した全ての温度での膨潤圧と膨潤率の関係

なるほど 20°C と 50°C・80°C の温度差による、同一膨潤率での膨潤圧の差が大きくなる。また、膨潤変形試験（膨潤率の高い領域）では、膨潤圧が低くなるほど 20°C と 50°C・80°C の温度差による、同一膨潤率での膨潤率の差が大きくなる。

膨潤率数%付近では、温度の違いによる膨潤性への影響はほとんどなくなる。

図-15 は全実験データを膨潤圧と膨潤率の関係に整理したものに、表-2 の設定値をもとに求めた膨潤評価式による理論曲線を重ねたものである。間隙水イオン濃度の設定値は、参考文献1) で推定された値の範囲内で実験結果を最も良好に表現する値を設定値として使用した。膨潤圧試験と膨潤変形試験を比較すると、膨潤変形試験は、粘土結晶層間水と間隙水のイオン濃度の差が膨潤圧試験より大きくなるため膨潤圧・膨潤量が高くなる。

実際の間隙水のイオン濃度は、膨潤率に応じて変化していると考えられるが、現在提案されている膨潤評価式では、試験方法ごとに間隙水のイオン濃度を設定しなければならない。そのため、高温になる程設定した間隙水のイオン濃度の違いによる膨潤圧試験と膨潤変形試験の理論曲線の乖離が大きくなる。そこで、この乖離をなく

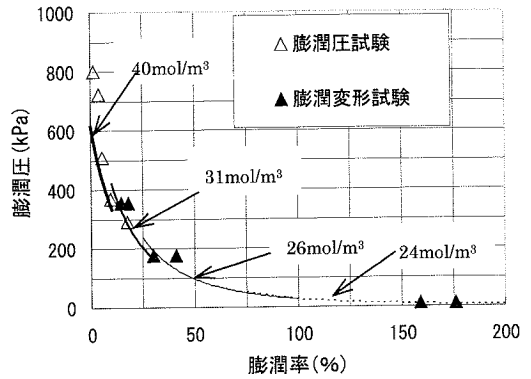


図-16 20°C 実験結果と  $n_0$  を変化させた理論曲線の関係

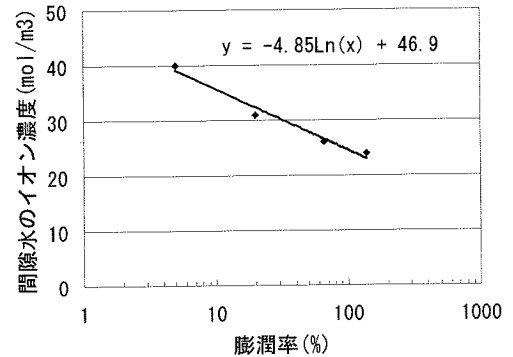


図-17 20°C における間隙水のイオン濃度と膨潤率の関係とその推定式

して一本の曲線で実験結果を表す方法を検討した結果を以下に述べる。

### (6) 膨潤特性の新しい評価方法の試み

#### a) 20°C での検討結果

まず、間隙水のイオン濃度を变化させた数種類の理論曲線を組合せて図-9 に示したような 1 本の理論曲線で実験結果を表せないかを検討した。その結果、間隙水のイオン濃度 ( $n_0$ ) の変化を膨潤率の関数としてある割合で変化させるようにすれば 1 本の線に近づくことがわかった (図-16)。次に、各イオン濃度理論曲線の中央点の膨潤率と間隙水イオン濃度の関係をグラフ化してみた (図-17)。その結果、間隙水のイオン濃度と対数で表した膨潤率の関係は直線になり、以下に示す関係式が得られた。

$$y = -4.85 \ln(x) + 46.9$$

y: 間隙水のイオン濃度 (mol/m<sup>3</sup>)

x: 膨潤率 (%)

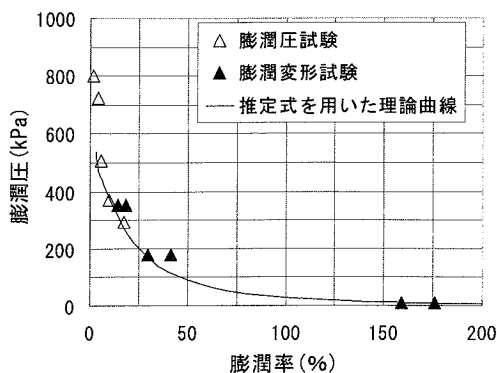


図-18 20°C推定式を用いた理論曲線

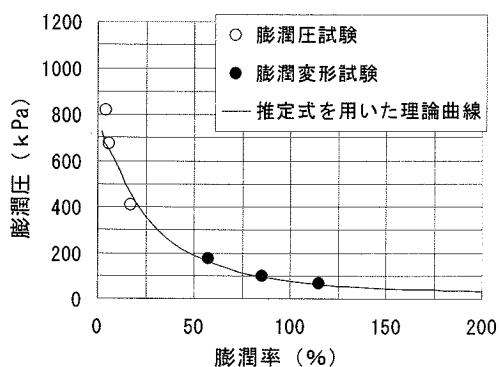


図-20 50°C推定式を用いた理論曲線

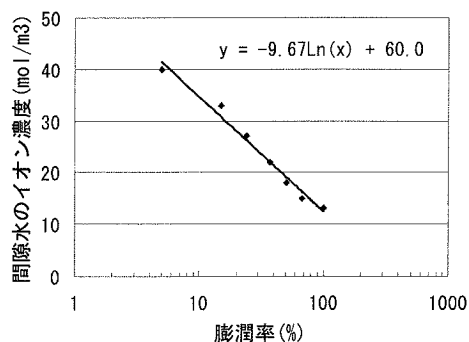


図-19 50°Cにおける間隙水のイオン濃度と膨潤率の関係とその推定式

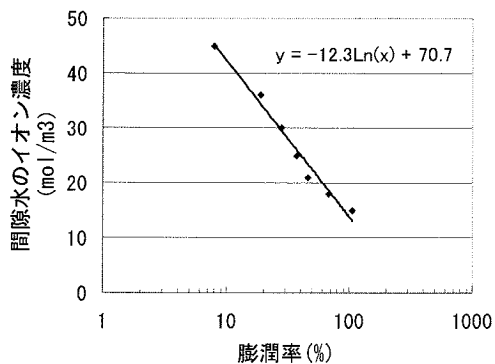


図-21 80°Cにおける間隙水のイオン濃度と膨潤率の関係とその推定式

この間隙水のイオン濃度と膨潤率の関係式から、各膨潤率に対応した間隙水のイオン濃度を算出し、各膨潤率と間隙水のイオン濃度に対応する膨潤圧を膨潤評価式により求めた結果、図-18 に示した1本の曲線で実験結果を表すことができた。

#### b) 50°Cでの検討結果

50°Cも20°Cと同様に検討した結果、図-19 に示す関係式が得られ、この式をもとに膨潤圧と膨潤率の関係を求めた結果、図-20 に示した曲線が得られた。

#### c) 80°Cでの検討結果

80°Cも20°C・50°Cと同様に検討した結果、図-21 に示す関係式が得られ、この式をもとに膨潤圧と膨潤率の関係を求めた結果、図-22 に示した曲線が得られた。

高温環境がベントナイト・珪砂混合試料の膨潤特性に与える影響として、以上に示した実験結果およびそれから得られた推定式に示されるように、同一条件の試料が異なった温度環境に置かれると、間隙水のイオン濃度に

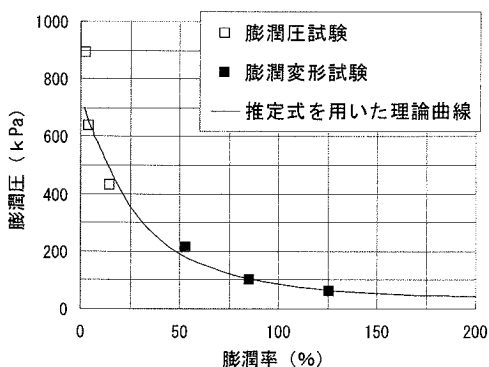


図-22 80°C推定式を用いた理論曲線

変化の生じることが大きな要素であるといえる。すなわち、同一の膨潤率(=間隙比=含水比)においても、間隙水のイオン濃度は温度の上昇とともに低下する傾向を示し、それが膨潤性を増大させているといえる。

ただし、この傾向は、膨潤率が小さくなると縮小し、温度変化の影響がほとんど見られなくなる。すなわち、間隙水のイオン濃度が高い状態では、高温環境はベント



ナイトの膨潤特性に大きな影響は与えないということになる。

以上の結果は、自由間隙水と吸着水層のイオン濃度の経時変化を直接測定することができれば最も良く説明できると考えられる。しかし、イオン濃度を詳細に測定することは現時点では難しい。したがって、定性的傾向をもとに高温環境がベントナイトの膨潤性に与える影響に関する解釈を以下に示す。

#### 1. 短期間の影響（数日間程度：当研究の結果に対応）

①イオン析出速度が上がる、②自由間隙水の浸透速度が上がる（粘性が下がることにより）、③吸着水層のイオン濃度が上がり吸着水層の厚さが大きくなる、等の理由により短期間では、高温環境はベントナイトの膨潤性を増大させるものと推測される。

#### 2. 長期間の影響（数ヶ月程度以上）

①自由間隙水のイオン濃度が上がる（吸着水層からの移動）、②吸着水層と自由間隙水間のイオン濃度差の減少、③吸着水層の拡大傾向が抑制される（膨潤性の低下）、等の理由により長期間では、高温環境はベントナイトの膨潤性を常温より低下させる可能性がある【参考文献2）の結果など】。

以上の考察を基に、今回の自由間隙水イオン濃度推定式の意味を考えると、短期間では高温環境が自由間隙水のイオン濃度を下げ吸着水層のイオン濃度との差を大きくする効果を持つため、高温での膨潤性を高く評価する式が得られたものと考えられる。ただし、今回提示した推定式は、試験結果からの逆算と上記考察を基に求めたものであり、今後より詳細な検討の余地が残されている。また、何千年という長期間の高温環境がベントナイトに与える影響については、別の視点からの検討・検証が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、温度の違いによるベントナイト・珪砂混合試料（乾燥質量比7：3）の緩衝材の膨潤特性を把握することを目的に、膨潤圧試験・膨潤変形試験を実施した。本研究で得られた主要な知見をまとめると以下のようになる。

- ・ 高温環境下でのベントナイトの膨潤性能は、短期間（今回の研究では1～3日間）では高くなるのがわかった。今後は長期間での膨潤特性を調べる必要がある。
- ・ 50℃の試験結果は20℃と80℃の試験結果の中間に来ると思われたが、80℃とほとんど変わらない結果

となった。よって、Na型ベントナイト・クニゲルV1では、20℃から50℃の間で膨潤性能が大きく変わると思われる。ただし、他のベントナイトについては試験による検証が必要である。

- ・ 80℃・50℃の実験結果と理論曲線は良好に一致しているが、20℃は膨潤率0%～5%付近で実験結果より理論曲線が下回っている。このことについては原因を究明する必要があるが、全体的に見ると理論曲線は実験結果を良好に表現しているといえる。
- ・ 膨潤率から間隙水のイオン濃度を推定する式を求め、この式を膨潤評価式に取り入れることにより、実験結果を1本の曲線で表すことができた。ただし、この推定式は実験結果から膨潤率と間隙水のイオン濃度を推定した式であるため、様々な材料・環境条件に対応できるように改良する必要がある。
- ・ 推定式を用いた膨潤評価を行うには、正確な間隙水イオン濃度の測定方法の開発が必要である。

## 参考文献

- 1) 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—, 電力中央研究所報告U99013, 1999.
- 2) 東畑郁夫, ビシット クンティワタナクン, 大石幹太, 竹内直樹: 粘土の工学的性質に及ぼされる高温環境の影響, 土と基礎, Vol. 46, No. 10, pp. 27-30, 1998.
- 3) 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の膨潤特性, 核燃料サイクル開発機構研究報告 TN8400 99-038, 1999.
- 4) 社団法人 地盤工学会: 高温環境と土—粘土の微視構造から廃棄物の地中処分問題まで—シンポジウム, pp. 141-146, 1997.
- 5) 山元茂弘, 足立格一郎, 田邊亮, 大澤真理子, 保田崇: 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるベントナイト系バリアへの高温の影響の実験的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS10-049, 2002.
- 6) 足立格一郎, 鈴木絵理子, 田邊亮, 黄西朱: 高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト緩衝材の膨潤特性に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 CS1-003, 2001.

(2003.4.24 受付)

# SWELLING CHARACTERISTICS OF BENTONITE-SILICA MIXTURE UNDER HIGH TEMPERATURE

Jun KODAMA, Kakuichiro ADACHI, Ryo TANABE,  
Eriko SUZUKI and Shigehiro YAMAMOTO

Swelling characteristics of Bentonite-Silica Mixture under high temperature are studied experimentally and theoretically. The test results indicate that the swelling characteristics of the Mixture increase with the increase of temperature. The formula proposed by H.Komine estimates overall tendency of the test results. However, "a modified swelling evaluation formula " presented in this paper well estimates the swelling behavior of the Bentonite-Silica Mixture.