

# ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と 簡易評価法の提案

小峯秀雄<sup>1</sup>・緒方信英<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 茨城大学助教授 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)

<sup>2</sup>正会員 工修 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 地盤耐震部 首席研究員(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646番地)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分孔や坑道を充填する緩衝材や埋戻し材には低透水性や膨潤性が要求されており、ベントナイトを用いた材料が有望である。産業廃棄物処分場における遮水材としてもベントナイトを用いた材料が利用され始めている。本研究では、砂とベントナイトの配合割合が5～100%と広範囲に亘るベントナイト系緩衝材・埋戻し材の基本的な透水特性を調べるとともに、乾燥密度の影響や最長120日間における透水係数の長期変化および膨潤変形前後での透水性の変化について実験的に調査した。また、著者らが提案するパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」を用いて、緩衝材・埋戻し材の透水特性を簡易に評価する方法を提案した。

*Key Words : bentonite, hydraulic conductivity, montmorillonite, swelling, nuclear waste disposal*

## 1. はじめに

ベントナイトは他の土質材料と比べ低透水性や膨潤性を有することが知られており、高レベル放射性廃棄物の地下処分施設における緩衝材・埋戻し材としての利用が有望視されている。我が国ならびに欧米各国で考えられている高レベル放射性廃棄物の有力な処分方法は、地下数百mより深い地盤中に、収納容器に封入した廃棄物を埋設する方法である<sup>1)~3)</sup>。図-1は、スウェーデンで検討されている高レベル放射性廃棄物の処分施設の概要の一例を示している<sup>4)</sup>。このような処分施設の建設に際し、廃棄物収納容器と周辺地盤との間を充填する材料が必要とされている。この材料は「緩衝材」と呼ばれている。この材料に要求されている性質は、長期間にわたり廃棄物を人間の生活圏から隔離する必要性や廃棄物から発生する熱の対策等から、低透水性や膨潤性、熱伝導性等である。特に、緩衝材の最も重要な役割はバリアとしての機能であることから、非常に低い透水性が必要とされている。核燃料サイクル開発機構では、緩衝材の透水係数として $4.5 \times 10^{-13}$  m/sec程度を想定した検討を行っている<sup>1), 2)</sup>。緒方らも、緩衝材の設計透水係数として $1 \times 10^{-12}$  m/secを提示している<sup>3)</sup>。

一方、図-1に示す処分孔ピット間を連結する処分坑道部においても、砂・ベントナイト混合材料の利用が有望視されている。この部分に用いられる材料は、「埋戻し材」と呼ばれ、先の緩衝材と比べてベントナイトの配合割合が低い混合材料の利用が検討されている。埋戻し材には、処分坑道部を充填しトンネル周辺岩盤の緩み域の拡大や過度の変形を可能な限り防ぎ、かつ埋戻し部が水みちなどの水理的な弱点にならないようにする役割が期待されている。このような観点から、埋戻し材にも低透水性が要求されている。核燃料サイクル開発機構では、埋戻し材の透水係数として $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-12}$  m/sec程度を想定した検討を行っている<sup>1), 2)</sup>。塩崎らも、埋戻し材の透水係数として $1 \times 10^{-11}$  m/sec程度としている<sup>6)</sup>。

以上のように、ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の透水特性の把握は、高レベル放射性廃棄物の処分技術の構築において重要である。特に、緩衝材・埋戻し材の仕様を設計する上で、砂とベントナイトの配合割合や締固め密度等のパラメータが透水特性に及ぼす影響を詳細に把握することは肝要である。そこで本研究では、ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の透水係数に関して、砂とベントナイトの配合割合や乾燥密度の影響について実験的

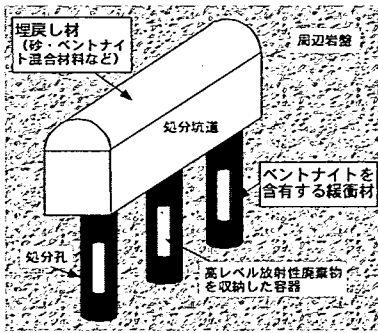


図-1 高レベル放射性廃棄物処分施設の概念

に調査を行う。また、透水係数の経時変化や膨潤変形前後での透水特性の変化を実験により調べ、材料内部における膨潤挙動の観点から考察する。さらに材料内部におけるベントナイトの膨潤挙動観察結果に基づき著者が提案している「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」<sup>7)</sup>を用いて、緩衝材・埋戻し材の透水特性を評価する方法を提案する。

## 2. 緩衝材・埋戻し材の透水係数と乾燥密度・ベントナイトの配合割合との関係および透水係数の経時変化

本章では、緩衝材・埋戻し材の透水係数に及ぼす乾燥密度および砂とベントナイトの配合割合の影響や透水係数の経時変化に関する実験の結果について述べる。

### (1) 実験概要

#### a) 試料

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）である。このベントナイトは交換性陽イオンが主にNa<sup>+</sup>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、止水性、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。図-2にX線回折法により得られたX線パターンを示す。使用したベントナイトには膨潤性を有するモンモリロナイトが含有されており、それ以外に非膨潤性の鉱物である石英や長石等も含有している。表-1には、使用したベントナイトの基本的な性質を示す。モンモリロナイト含有率は、純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量（140 meq./100g）を基準に、使用したベントナイトのメチレンブルー吸着量（67 meq./100g）から算出

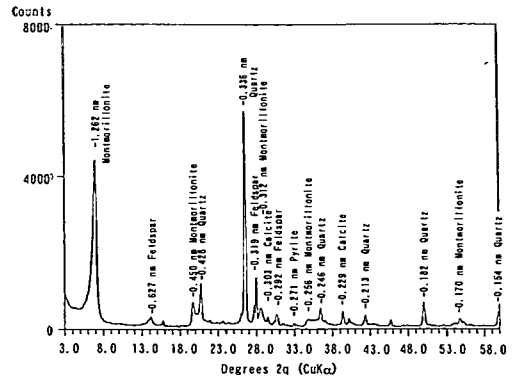


図-2 使用したベントナイトのX線パターン

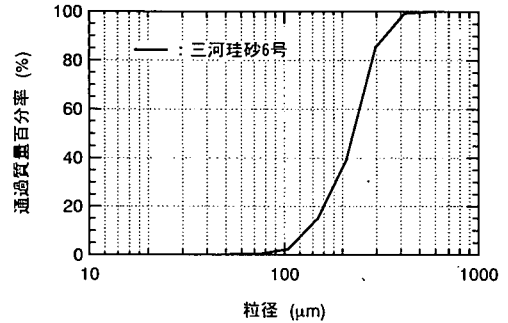
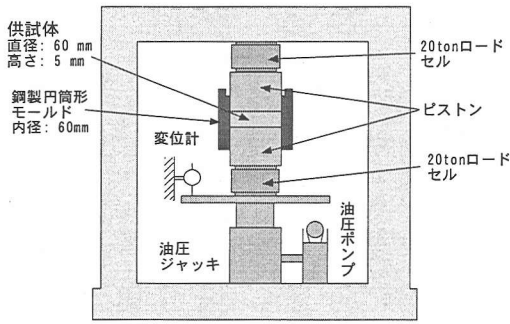


図-3 使用した砂の粒径積加曲線

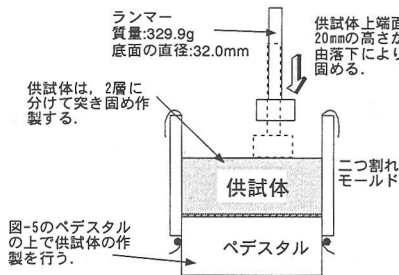
表-1 使用したベントナイトの基本的性質

タイプ	Na型
土粒子の密度	2.79 Mg/m <sup>3</sup>
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 イオン量	0.405 meq./g
交換性 Ca イオン量	0.287 meq./g
交換性 K イオン量	0.009 meq./g
交換性 Mg イオン量	0.030 meq./g

48%とした。なおメチレンブルー吸着量の測定は日本ベントナイト工業会標準試験方法により行った<sup>8)</sup>。各交換性陽イオン量は、1N酢酸アンモニウム（CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>）溶液を用いて抽出操作をし、プラズマ（ICP）発光分析装置により測定した<sup>9)</sup>。陽イオン交換容量は、Na, Ca, K, Mgの各交換性陽イオン量の総和とした。また、使用したベントナイトは温



(1) 緩衝材を模擬した供試体の場合



(2) 埋戻し材を模擬した供試体の場合

図-4 供試体作製状況の概要

度が $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、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6.5~10.0%の範囲にあった。混合する砂には、図-3に粒径加積曲線を示す三河珪砂6号(粒径:0.053~0.590mm, 土粒子の密度:2.66  $\text{Mg/m}^3$ )を使用した。

本実験では、上述のベントナイトと砂を用いて、緩衝材を模擬した供試体(以下、緩衝材供試体と記述する)と埋戻し材を模擬した供試体(以下、埋戻し材供試体と記述する)の2種類を作製した。スウェーデンではベントナイトのみを締固めたものを緩衝材として利用することを考えている。日本においては、80%や70%のベントナイト配合率でブロック状に締固めたものを緩衝材に利用することを考えている<sup>1)~3)</sup>。また、原位置において締固めて製作する緩衝材の場合には、ベントナイト配合率50%の試料も検討対象となっている<sup>10), 11)</sup>。そこで緩衝材供試体においては、ベントナイト配合率、すなわち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が100%, 80%, 70%, 50%の4種類の試料を用いた。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。埋戻し材供試体には、ベントナイト配合率が5%, 10%, 20%, 30%, 50%の5種類の試料を用いた。これらの配合率も、埋戻し材として実際に採用されるであろう範囲を含むよ

表-2 埋戻し材供試体の最大乾燥密度と最適含水比

ベントナイト配合率(%)	5	10	20	30	50
平均土粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )	2.67	2.68	2.69	2.70	2.73
最大乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )	1.61	1.64	1.68	1.72	1.66
最適含水比(%)	19.4	17.6	17.0	14.6	17.5

うに設定した<sup>1)~4)</sup>。

#### b) 供試体作製方法

緩衝材の製作方法として、工場においてブロック状に製作したものを処分孔ピットに搬入し設置する方法が有力と考えられている<sup>5)</sup>。そこで、緩衝材供試体の作製には、図-4(1)に示す装置を使用し静的荷重による締固め方法を採用した。図-4(1)の装置は、締固め圧力载荷用のフレーム、試料を投入する内径60 mm、高さ100 mmの円筒形モールドおよびピストンから構成されている。ピストンの外径は、円筒形モールドの内径より0.05 mm小さくしており、ピストンとモールドの間の摩擦は生じない。締固めた後に供試体高さが10 mmになるように所定質量の試料を、円筒形モールドに投入する。なお、ベントナイトは、温度が $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度が70~80%となる室内で保存したときの含水比状態(6.5~10.0%)で供試体作製に用いた。次に、2つのピストンロッドにより試料の上下端から3.1~50.8 MPaの範囲の締固め圧力を作用させ15分間放置する。締固め圧力は、ピストン部に設置された2個のロードセルにより計測する。15分経過後、円筒形モールドから、後述の高圧圧密実験装置付属のステンレスリング(図-5を参照)に供試体を移動して緩衝材供試体の作製を完了する。供試体の乾燥密度は1.47~2.07  $\text{Mg/m}^3$ の範囲にあった。各供試体とも直径60mm、高さ10mmを目標に作製した。

一方、埋戻し材は、処分坑道内において現地締固め転圧や吹き付け工法等により施工するものと考えられている<sup>3), 6)</sup>。本実験では、現地での締固めによる埋戻し材の施工を想定して、使用した試料を最適含水比状態に調整したものを締固めて、埋戻し材供試体を作製した。表-2に、日本工業規格「突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210:1999)」<sup>12)</sup>に準拠し求めた最適含水比、最大乾燥密度を示す。表-2には砂とベントナイトの配合割合に対する平均土粒子密度を併記した。これらの値は、ベントナイトと三河珪砂6号の土粒子密度と配合割合から計算して求めた。

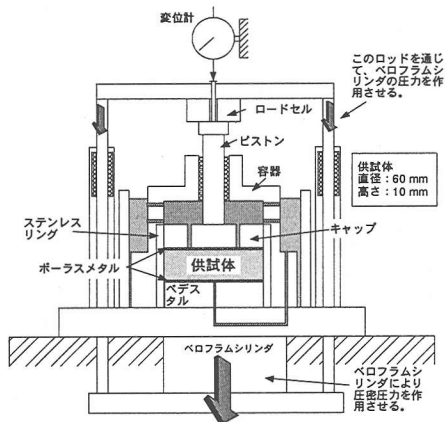


図-5 高圧圧密実験装置

埋戻し材供試体の作製手順は次の通りである。後述の透水実験装置のペDESTAL (図-6参照) の側面にゴムメンブレンを装着し、その外側に二つ割りモールドを設置した後、ゴムメンブレン内に最適含水比の試料を投入した。なお、ペDESTALの上面ならびにキャップの下面には、フィルター材として直径60mm、厚さ0.1mmの生テフロンシートと直径60mm、厚さ5mmのポーラスメタルが設置してある。生テフロンシートは1 $\mu$ m以下の孔を多数有しており、水を通すと共にベントナイトの流出を軽減するために用いた。このポーラスメタルとテフロンシートを併用したフィルター材の透水係数を測定したところ、10<sup>-8</sup>m/secオーダーであった。

次に、目標とする所定の乾燥密度になるようランマーで突き固めた。ランマーの突固め部の直径は32.0mm、質量は0.3299kgである。ランマーの落下高さは20mmとした。突固めは、1層を5mmとし2層に分けて実施した。突固め後、直径60mm、厚さ5mmの円盤を供試体上面部に押し当て平坦にした。図-4(2)に、突き固め状況を模式的に示す。本実験で用いた埋戻し材供試体の乾燥密度は、1.43~1.79 Mg/m<sup>3</sup>の範囲で変化させた。

### c) 緩衝材供試体の透水係数測定方法

緩衝材供試体は乾燥密度およびベントナイト配合率が高いため、供試体に動水勾配を作用させて透水係数を求める方法では、非常に高い動水勾配を作用させなければならず、また非常に長い実験期間も要する。日本工業規格「土の透水試験方法 (JIS A 1218 : 1998)」では、圧密試験結果から間接的に透水係数を計算で求める方法を提示している<sup>12)</sup>。そこで、緩衝材供試体の透水係数の測定は高圧圧密実験により行った。本研究で用いた高圧圧密実験装置を図-5に示す。

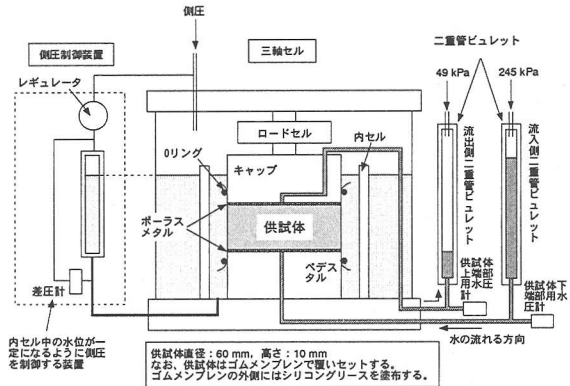


図-6 透水実験装置

今回実施した高圧圧密実験では、緩衝材供試体を図-5のように実験装置に設置し、圧密圧力を段階的に一定期間作用させることにより、その圧密・透水特性を求めた。圧密圧力は、1.96, 3.92, 5.88, 7.84, 9.81 MPaと段階的に作用させた。各圧密圧力を作用させてから0~10分までを15秒間隔、10~120分までを10分間隔、120~720分までを60分間隔、720~1440分までを180分間隔で圧密量を経時的に測定した。各圧密圧力の荷荷時間は24時間である。また、実験室内の温度は22 $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cであった。これらの実験データに対して、日本工業規格「土の段階荷荷による圧密試験方法 (案) (JIS A 1217 : 2000)」に準拠し結果の整理を行った<sup>12)</sup>。各荷荷段階の圧密量と時間の関係に対して $\sqrt{t}$ 法により整理し体積圧縮係数 $m_v$  (m<sup>2</sup>/kN)と圧密係数 $c_v$  (m<sup>2</sup>/sec)を求め、次式により透水係数 $k$  (m/sec)を算出した。なお、透水係数の算出は圧密圧力が5.88 MPa以上の段階において実施した。したがって、圧密実験開始から2日間を飽和期間としており、透水係数の算出段階においては供試体はほぼ飽和しているものと思われる<sup>13)</sup>。また、5.88 MPa以上の圧密圧力は緩衝材供試体の最大膨潤圧よりも大きいため、これらの段階において、供試体の膨潤変形は生じていない。

$$k = c_v m_v \rho_w g \quad (\text{m/sec}) \quad (1)$$

ここに、 $\rho_w$  : 水の密度 (kN $\cdot$ sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)、 $g$  : 重力加速度 (=9.80665 m/sec<sup>2</sup>)

### d) 埋戻し材供試体の透水係数測定方法

埋戻し材供試体の透水係数の測定には図-6に示す透水実験装置を使用した。実験室内の温度は22 $\pm$

1℃である。埋戻し材供試体を実験装置のベDESTAL部に締固め、ゴムメンブレンで覆って設置する。その後、内セルおよび三軸セルを組み立て脱気水を注水し、供試体のセットを完了する。なお、内セル中の水および二重管ピュレット中の水の蒸発を防止するため、各部位の水面にケロシンを薄く張った。ゴムメンブレンの外側にはシリコングリスを塗布し、ゴムメンブレンの劣化およびセル水の供試体への浸水を防止することに努めた。なお、実験データの再現性を確認するため、ベントナイト配合率と乾燥密度がほぼ同じ供試体を2~3個作製し実験に用いた。埋戻し材供試体をベDESTAL部に設置した後、キャップを載せ固定する。その際に発生する鉛直圧は1.47~2.26kPaの範囲にあった。

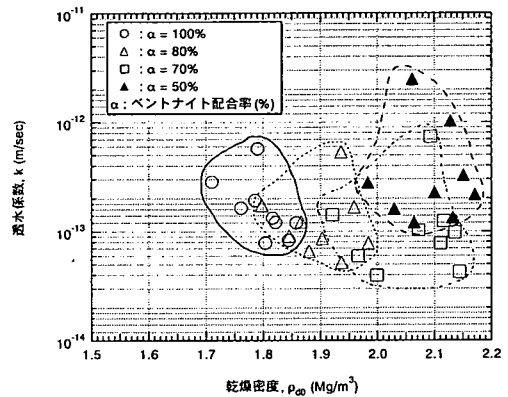
供試体のセットが完了した後、ベDESTALを通じて供試体下端から室温状態(22±1℃)の脱気した蒸留水を約9.8kPaの水頭で給水した。その際、供試体の体積変化が生じないようにした状態で発生する鉛直方向の膨潤圧を図-6に示すロードセルにより経時的に測定した。鉛直方向の変位を拘束した状態で、試料下端から蒸留水を通水し、その際に供試体の体積変化が生じないように三軸セル内の圧力を制御し、膨潤圧の時間変化を測定する。膨潤圧がほぼ一定になった後に透水実験を実施する。

透水実験では、図-6に示すように流入側二重管ピュレットに245kPaの圧力を、流出側二重管ピュレットに49kPaの圧力を作用させ、各ピュレットにより単位時間当たりの流入量および流出量を測定した。両者の測定値がほぼ等しくなった後、単位時間当たりの流出量を3回計測し、その平均値と供試体上下端部の水圧測定値から、Darcyの法則に基づき次式により透水係数を算出した。

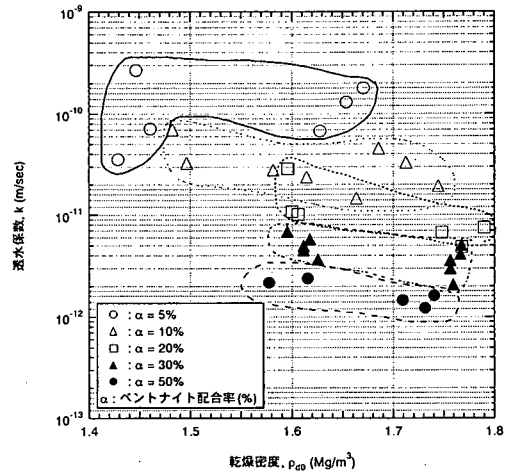
$$k = \frac{q}{A} \rho_w g \frac{H_0}{P_{in} - P_{out}} \quad (\text{m/sec}) \quad (2)$$

ここに、 $q$ ：単位時間当たりの平均流出量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )、 $A$ ：供試体の断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $P_{in}$ ：供試体下端部における水圧 ( $\text{kN/m}^2$ )、 $P_{out}$ ：供試体上端部における水圧 ( $\text{kN/m}^2$ )、供試体高さ  $H_0$  (m)、 $\rho_w$ ：水の密度 ( $\text{kN} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ )、 $g$ ：重力加速度 ( $=9.80665 \text{ m/sec}^2$ )

また、透水係数の経時変化を調べるため、ベントナイト配合率が10~50%の埋戻し材供試体については、上記の条件で一定期間、繰り返し流出量を測定し透水係数と経過時間の関係を求めた。実験終了後には、供試体の含水比測定を行い、その値と土粒子



(a) 緩衝材供試体



(b) 埋戻し材供試体

図-7 透水係数と乾燥密度の関係

の密度、水の密度、実験後の供試体の間隙比から飽和度を算出したところ、いずれの供試体も100~119%の値を示した。これは、含水比測定の際、供試体表面に表面張力等により薄い水膜が付着していたためと考えられる。

## (2) 透水係数と乾燥密度・ベントナイトの配合割合との関係

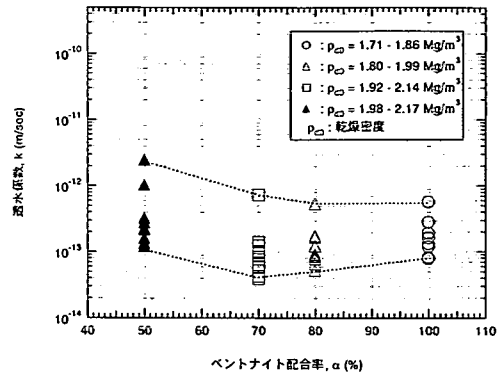
本節では、前述の各実験により測定した緩衝材・埋戻し材供試体の透水係数について述べ、供試体の乾燥密度およびベントナイトの配合割合の影響について論じる。また、電子顕微鏡観察によるベントナイトの膨潤挙動観察結果から、緩衝材・埋戻し材の透水特性について考察する。

図-7は、緩衝材・埋戻し材供試体の透水係数と乾燥密度との関係を、図-8には透水係数とベントナイト配合率との関係を図示した。ベントナイト配合率と乾燥密度がほぼ同じ埋戻し材供試体においては、

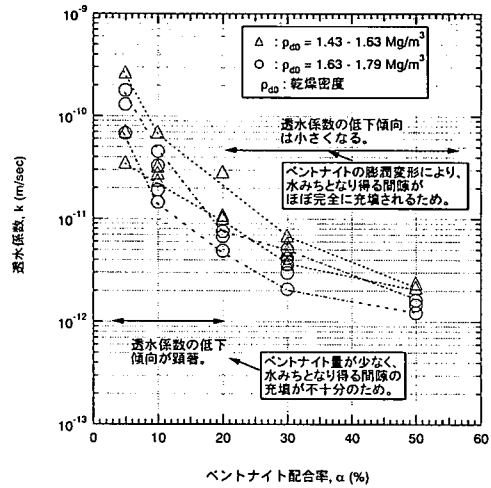
測定される透水係数には大きな差異はなく、図-6の実験装置により再現性のあるデータが取得されているものと判断された。これらの図から、50~100%のベントナイト配合率の範囲において、緩衝材供試体の透水係数は $2.47 \times 10^{-12} \sim 3.94 \times 10^{-14}$  (m/sec)にあることが分かる。一方、埋戻し材供試体においては、5~20%のベントナイト配合率では透水係数は $2.66 \times 10^{-10} \sim 4.85 \times 10^{-12}$  (m/sec)の範囲で変化し、30~50%では $6.87 \times 10^{-12} \sim 1.21 \times 10^{-12}$  (m/sec)の範囲にあることが分かる。乾燥密度の増加に伴い透水係数は低下する傾向にある。しかし、ベントナイト配合率の増加に伴う透水係数の低下割合の方が顕著である。特にベントナイト配合率が5~20%の範囲では、ベントナイト配合率の増加に伴う透水係数の低下は顕著であるが、20%以上の配合率では透水係数の低下の割合が小さくなること分かる。

著者は、試料周辺の温度と水蒸気圧が制御できる走査型電子顕微鏡により、砂・ベントナイト混合材料中のベントナイトの膨潤挙動を観察した<sup>7)</sup>。写真-1は、ベントナイト配合率100%の緩衝材供試体中のベントナイトの膨潤挙動を観察した結果の一例である。写真-2は、ベントナイト配合率が10%および50%の埋戻し材供試体内部におけるベントナイトの膨潤挙動の観察結果を例示したものである。いずれの写真も、加水前には水みちになると考えられる間隙が観察されていると共に、ベントナイトが吸水により体積膨張している状況が認められる。写真-2に示すベントナイト配合率10%の埋戻し材供試体では、吸水によるベントナイトの体積膨張は水みちとなり得る間隙を十分に充填するまでに至ってなく、加水後も間隙が存在していることが分かる。一方、緩衝材供試体やベントナイト配合率50%の埋戻し材供試体の観察結果では、吸水に伴うベントナイトの体積膨張により水みちとなり得る間隙がほぼ完全に充填されていることが分かる。同様の観察をベントナイト配合率5%、20%、30%の埋戻し材供試体に対し行ったところ、ベントナイト配合率が20%以上では、間隙がベントナイトの体積膨張により徐々に充填され、最終的にはほぼ完全に間隙が充填されている状況が認められた<sup>7)</sup>。以上のように、緩衝材・埋戻し材の低透水性には、ベントナイトの膨潤により材料中の間隙部分を充填し、水みちを閉塞することも影響しているものと考えられる。

図-8(b)に示すように、ベントナイト配合率が5~20%の埋戻し材供試体では、ベントナイト配合率の増加に伴い透水係数は大きく低下している。一方、20%以上の埋戻し材供試体や緩衝材供試体では、ベ



(a) 緩衝材供試体



(b) 埋戻し材供試体

図-8 透水係数とベントナイト配合率

ントナイト配合率の増加に伴う透水係数の低下割合は小さくなる。先述のように、配合率5%、10%では水みちとなる間隙が完全には充填されず、ベントナイト配合率の増加により間隙の充填程度は大きく変化するため、透水係数の変化は大きくなるものと考えられる。一方、ベントナイト配合率が20%以上の場合、ベントナイトの膨潤変形により供試体中の間隙がほぼ完全に充填されるので、透水係数は $10^{-11}$  m/sec以下と非常に小さく、ベントナイト配合率の増加に伴う透水係数の低下傾向も小さくなるものと考えられる。

Filippo他や緒方他は、混合する砂の粒度分布を変化させたベントナイト系材料の透水試験を実施しており、ベントナイト配合率が0~15%程度の混合材料では、砂の粒度特性が透水係数に与える影響が大きく、ベントナイト配合率が20%以上になると、その影響は小さくなるという結果を得ている<sup>14), 15)</sup>。

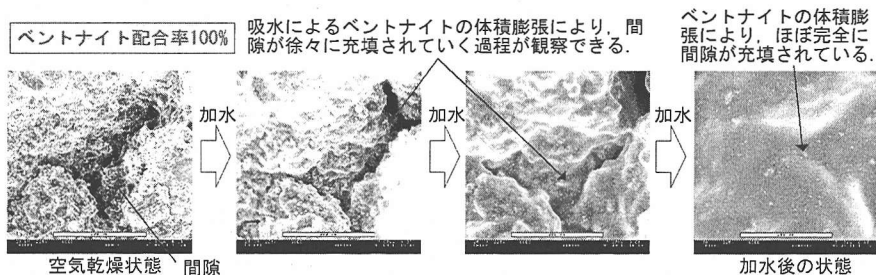


写真-1 緩衝材供試体中のベントナイトの膨潤挙動

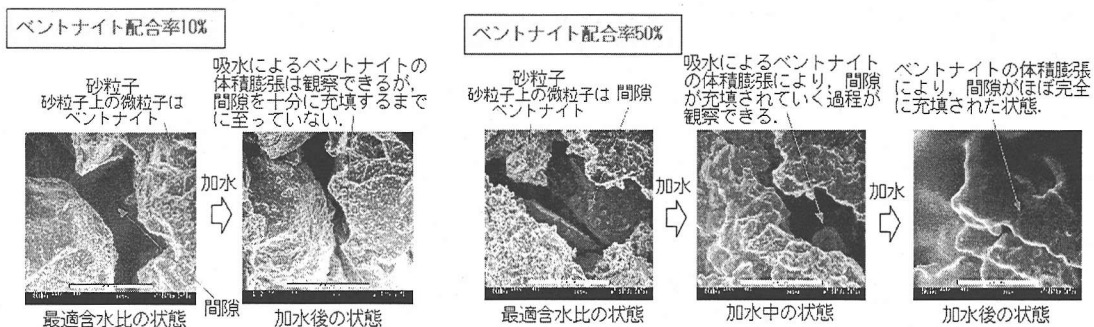


写真-2 埋戻し材供試体中のベントナイトの膨潤挙動

20%以下のベントナイト配合率では飽和後も水みちとなる間隙が残存するため、その透水係数は混合する砂の粒度特性に依存するものと考えられる。一方、ベントナイト配合率が20%以上の場合は、ベントナイトの膨潤変形により混合材料中の間隙がほぼ完全に充填されるので、透水係数は砂の粒度特性に影響を受けないと考えられる。Sivapullaiah他も、ベントナイト配合率10%程度以下では砂の種類により透水係数は変化するが、ベントナイト配合率が大きくなるに伴い透水係数のバラツキは小さくなると述べており<sup>10)</sup>、上記の考察と整合するものと言える。

### (3) 透水係数の経時変化

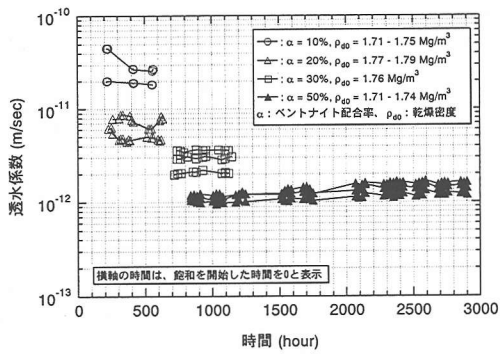
本節では、ベントナイト配合率が10～50%の埋戻し材供試体の透水係数の経時変化について述べ、前節で述べたベントナイトの膨潤挙動観察結果の観点から考察する。

図-9に、ベントナイト配合率が10～50%の埋戻し材供試体の透水係数と経過時間の関係を示す。この図より、ベントナイト配合率が10、20%の場合、透水係数は $7 \times 10^{-11} \sim 4 \times 10^{-12}$  m/secの範囲に、30%と50%では $6 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-12}$  m/secの範囲にあることが分かる。また、同じベントナイト配合率であれば、乾燥密度の大きい供試体の方が、その透水係数はやや低い値になっている。

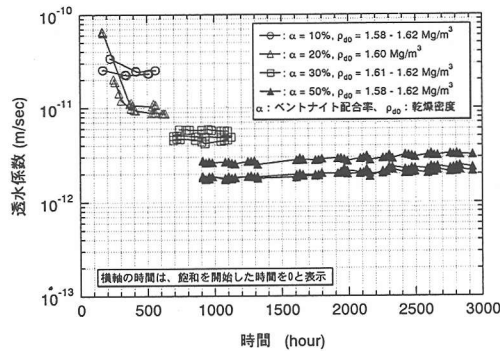
各供試体の透水係数の経時変化については、ベントナイト配合率が50%の場合は約3000時間経過まで、

30%の場合は約1200時間経過までの範囲で、その透水係数の変化はほとんどないことが分かる。一方、ベントナイト配合率が10%と20%の場合は、先の30%や50%の配合率の場合と比較して、やや透水係数に変化が認められる。

写真-2の結果と考察の観点から、上記の結果は次のように考えられる。すなわち、ベントナイト配合率が50%の場合、砂粒子間の間隙部分を、膨潤したベントナイトがほぼ完全に充填していたのに対し、配合率が10%の場合には、ベントナイトの膨潤は生じているものの、完全には間隙は充填されていなかった。このことから、ベントナイト配合率が比較的低い10%や20%の場合は、間隙の充填程度が不十分であり、時間の経過に伴いベントナイト粒子が砂粒子間を移動することが考えられる。これにより、時間経過に伴う透水係数の変化が生じたものと思われる。50%等のベントナイト配合率が比較的高い場合には、砂粒子間の間隙はベントナイトの膨潤によりほぼ完全に充填された状態であるため、透水係数は低く、時間が経過してもその変化は小さいと考えられる。



(a) 乾燥密度が比較的大きい場合の実験結果



(b) 乾燥密度が比較的小さい場合の実験結果

図-9 埋戻し材供試体の透水係数の経時変化

### 3. 膨潤変形前後における透水特性

緩衝材や埋戻し材が膨潤変形を生じた場合に、その透水係数が増加し止水性能の低下が懸念される。そこで、本章では、ベントナイト配合率20~50%の埋戻し材供試体に対し一定の鉛直圧の下で膨潤変形を発生させ、膨潤変形後における透水係数について調べた実験の結果について述べる。

#### (1) 実験概要

##### a) 試料

使用したベントナイトおよび砂は、2章で用いた試料と同じである。5%、10%のベントナイト配合率の埋戻し材供試体では膨潤変形がほとんど生じないため、本実験では、20%、30%、50%の埋戻し材供試体を用いた。緩衝材供試体の透水係数は非常に低く、後述の図-10に示す実験装置では透水係数の測定が困難であったため実施しなかった。

##### b) 供試体作製方法

供試体の作製方法も2章の埋戻し材供試体の作製

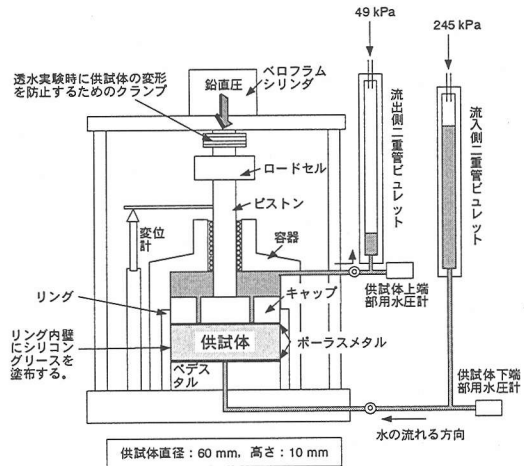


図-10 膨潤変形前後の透水実験装置

方法とほぼ同様である。後述の図-10に示す実験装置のペDESTALとリングを組み立て、リング内に最適含水比の試料を投入した。ペDESTALの上面ならびにキャップの下面には、フィルター材として直径60mm、厚さ0.1mmの生テフロンシートと直径60mm、厚さ5mmのポーラスメタルを設置した。生テフロンシートは1 $\mu$ m以下の孔を多数有しており、水を通すと共にベントナイトの流出を軽減するために用いた。次に、目標とする所定の乾燥密度になるようランマーで突き固めた。突き固めの条件と状況は2章の埋戻し材供試体と同様である。本実験で用いた埋戻し材供試体の乾燥密度は1.60~1.77 Mg/m<sup>3</sup>の範囲にあった。各供試体とも直径60mm、高さ10mmを目標に作製した。

##### c) 実験方法

使用した実験装置は図-10に示す通りである。実験室内の温度は22 $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cである。供試体を作製した後、ベントナイト配合率20%の場合には、14.7kPaと40kPaの鉛直圧を作用させた。ベントナイト配合率が30%と50%の供試体の場合には、40kPaと100kPaの鉛直圧を作用させた。上記の鉛直圧を作用させた状態でペDESTALを通じて供試体下端から室温状態(22 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C)の脱気した蒸留水を約9.8kPaの水頭で給水を開始し膨潤変形を発生させ、その一次元変形量を経時的に測定した。供試体の一次元膨潤変形量を供試体の初期高さで除し100倍した値を膨潤率 $\epsilon_s$ (%)とした<sup>7)</sup>。この膨潤率の経時変化曲線に対し双曲線近似を行い、その漸近線の値を最大膨潤率 $\epsilon_{smax}$ (%)と定義し、その値の95%以上の膨潤率を発生した場合、膨潤変形はほぼ終了したと判定し、供試体の変形が生じないようにクランプを締めピストンを固定して透水実験を実施した。



透水実験では、図-10に示すように流入側二重管ピュレットに245kPaの圧力を、流出側二重管ピュレットに49kPaの圧力を作用させ、各ピュレットにより単位時間当たりの流入量および流出量を測定した。両者の測定値がほぼ等しくなった後、単位時間当たりの流出量を3回計測し、その平均値と供試体上下端部の水圧測定値から、Darcyの法則に基づき式(2)により透水係数を算出した。この場合、式(2)中の供試体高さ $H_0$  (m)は、膨潤変形後の供試体高さである。

## (2) 膨潤変形に伴う透水特性の変化

図-11に、ベントナイト配合率20%、30%、50%の各埋戻し材供試体の膨潤変形後の透水係数と膨潤率との関係を示す。この図では、膨潤率=0%のデータとして、2章で述べたベントナイト配合率、乾燥密度がほぼ同じ埋戻し材供試体の透水実験結果を併記した。この図から、ベントナイト配合率20~50%の範囲の埋戻し材供試体では、膨潤変形が発生しても透水係数はやや増加する傾向にあるが、大きく変化はしなかった。図-11(a)に示すベントナイト配合率20%の場合では、5~20%程度の膨潤率が発生しているものの、乾燥密度が高い場合にはほとんど透水係数に差異はない。また、図-11(b), (c)に示すように、ベントナイト配合率が30%以上の場合において、30~80%程度の膨潤率が発生しても、透水係数は $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-12}$  m/secの範囲にあった。以上より、5~80%程度の膨潤率で体積膨張が発生しても、第1章で述べた埋戻し材に要求される透水係数の $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-12}$  m/secの範囲にあり、その止水性能は大きく低下することは無いものと考えられる。一般の砂質土等では、体積膨張などにより間隙比が増加すると透水係数も大きくなる。しかし、写真-1, 2において考察したように、ベントナイト配合率が20%以上の埋戻し材供試体の場合、供試体中の間隙はベントナイト自身の吸水膨張によりほぼ完全に充填されていると考えられる。すなわち、供試体の膨潤変形の有無にかかわらず、供試体内部においてはベントナイトの膨潤変形が生じており、水みちとなり得る間隙の体積は同程度であるため、図-11に示されるような実験結果が得られたものと考えられる。

## 4. 緩衝材・埋戻し材の透水特性簡易評価法

本章では、前章まで述べた緩衝材・埋戻し材の透水特性に関する室内実験の結果および考察を踏まえ、

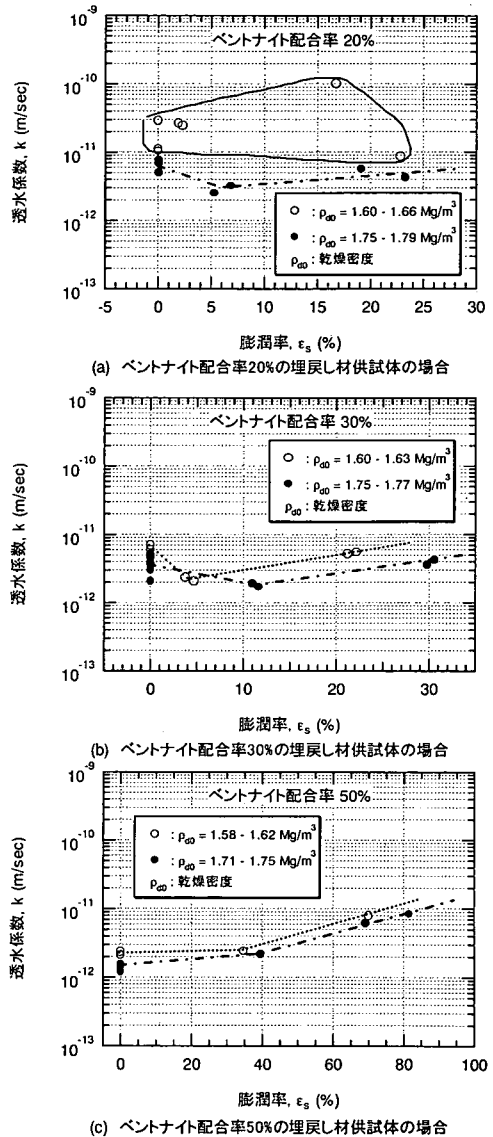


図-11 膨潤変形前後の透水係数の変化

著者が提案している新しいパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ 」を用いて、緩衝材・埋戻し材の透水特性の評価法を提案する。

### (1) 「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の概要

本節では、著者が提案した「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ 」<sup>7)</sup>について概説する。ベントナイトの膨潤挙動は、モンモリロナイト結晶層間の吸水挙動に起因する膨潤が支配的であると考えられている。著者が提案した $\varepsilon_{sv}^*$ とは、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの膨潤変形前後の体積比率を意味するものであり、モンモリロナイトの結晶レ

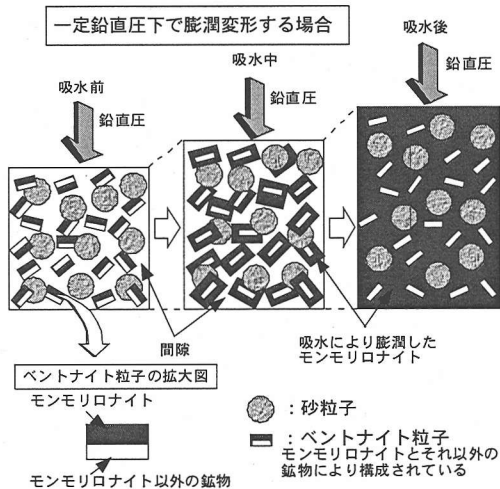


図-12 緩衝材・埋戻し材中のベントナイトの膨潤挙動イメージ

バルでの膨潤挙動とベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤挙動を結ぶパラメータである。著者は緩衝材や埋戻し材中のモンモリロナイトの膨潤挙動に着目し、写真-1, 2の電子顕微鏡観察の結果や膨潤圧・膨潤変形実験の結果を参考に、ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の膨潤圧および膨潤変形の発生プロセスを図-12のようにモデル化した。このモデルに基づき、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パラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ 」を式(3)~(5)のように定義した。この式によれば、膨潤率の最大値、すなわち最大膨潤率 $\varepsilon_{smax}$ とモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ が関係づけられる。式(3)~(5)の誘導は、参考文献7)に詳述されているので参照されたい。

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_0 + 1) \right\} \times \left[ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right] \times 100 \quad (3)$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (4)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_{sv}^*$ ：モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ(%)、 $\varepsilon_{smax}$ ：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(%)、 $\rho_{d0}$ ：緩衝材・埋戻し材の乾燥密度( $Mg/m^3$ )、 $\alpha$ ：ベントナイト配合率(%) (全土質材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)、 $\rho_m$ ：モンモリロナイトの土粒子密度( $Mg/m^3$ )、 $\rho_{nm}$ ：モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度( $Mg/m^3$ )、 $\rho_{sand}$ ：砂粒子密度( $Mg/m^3$ )

## (2) 「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」を用いた透水特性評価法

図-13は、全実験データに対しパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ 」を計算し、測定された透水係数との関係を示したものである。計算にあたり必要となる入力データは次の通りである。一般に、モンモリロナイトの土粒子密度は2.75~2.78 $Mg/m^3$ 程度と言われており<sup>17)</sup>、この値を参考にモンモリロナイトの土粒子密度 $\rho_m = 2.77 Mg/m^3$ と設定した。モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度は、式(5)においてベントナイト配合率 $\alpha$ を100%としたときの $\rho_{solid}$ が<sup>8)</sup>、ベントナイトの土粒子密度の測定値(2.79  $Mg/m^3$ )になるように計算で求めたところ、 $\rho_{nm} = 2.81 Mg/m^3$ となった。砂の土粒子密度 $\rho_{sand}$ は、三河珪砂6号の土粒子密度である2.66 $Mg/m^3$ を用いた。モンモリロナイト含有率 $C_m$ は、純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量(140meq/100g)を基準に、使用したベントナイトのメチレンブルー吸着量(67meq/100g)から算出し48%とした<sup>8)</sup>。図-13から、緩衝材・埋戻し材の透水係数と著者の提案するパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\varepsilon_{sv}^*$ 」には相関関係が認められ、今回整理した実験結果では透水係数 $k$  (m/sec)と $\varepsilon_{sv}^*$  (%)との間には式(6)の関係があった。

$$k = 1.18 \times 10^{-17} (\varepsilon_{sv}^*)^{2.02} \quad (6)$$

以上に述べた式(3)~(6)を組合せることにより、ベントナイトの配合割合、乾燥密度等の材料仕様を種々変化させた場合の緩衝材・埋戻し材の透水係数を簡易に予測できる。また、緩衝材・埋戻し材として要求される透水係数を設定すれば、適切なベントナイトの配合割合や乾燥密度を設計することも可能と考えられる。図-14は、式(3)~(6)を利用した透水係数の評価フローを示す。なお、図-13に示す関係

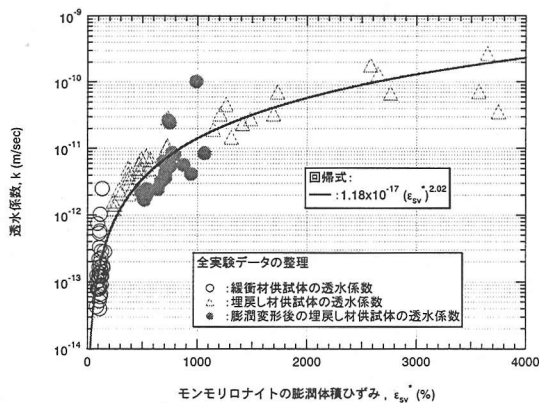


図-13 緩衝材・埋戻し材の透水係数と $\epsilon_{sv}^*$ の関係

および式(6)は、 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ の温度環境の下で、ナトリウムを主な交換性陽イオンとするNa型ベントナイトを用いた供試体に、蒸留水を通した透水実験結果に基づき得られた実験式である。したがって、緩衝材・埋戻し材にNa型ベントナイトを利用した場合や地下水が陽イオンを多く含まない場合にのみ適用できるものと考えられる。また、高温環境下では適用は難しくなるものと考えられる。これらの点については、今後、ベントナイトの種類や水質、温度を変化させた透水実験を行いデータを蓄積すると共に、理論的な検討を行う必要がある。

## 5. 結論

- (1) 緩衝材・埋戻し材の透水係数と乾燥密度 ( $1.43 \sim 2.07 \text{ Mg/m}^3$ ) およびベントナイト配合率 (5~100%) との関係を実験的に調査した。その結果、①乾燥密度およびベントナイト配合率の増加に伴い透水係数は低下する傾向にあること、②特に、ベントナイト配合率が 5~20%の範囲において透水係数の低下割合が顕著であること、③20%以上のベントナイト配合率では透水係数の低下の割合が 5~20%の場合と比べて小さくなるのが分かった。また電子顕微鏡によるベントナイトの膨潤挙動観察の結果から、緩衝材・埋戻し材の低透水性には、ベントナイトが膨潤により材料中の間隙部分を充填し水みちを閉塞することも影響しているものと考えられる。
- (2) ベントナイト配合率が 10~50%の埋戻し材に対して透水係数の経時的な変化を実験的に調査した。測定期間は実験可能な期間とし 50~120 日としたその結果、ベントナイト配合率が 30%と 50%の場合、測定期間中において透水係数にほとんど変化は

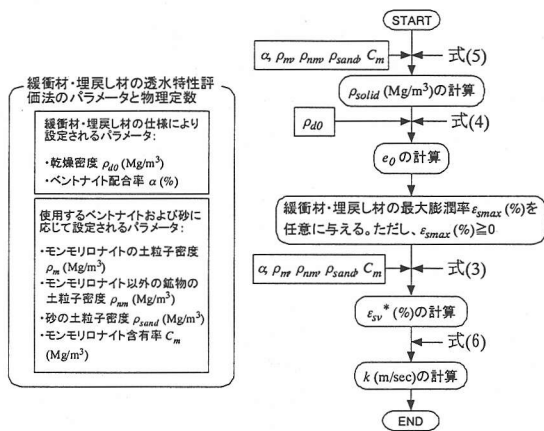


図-14 緩衝材・埋戻し材の透水係数の簡易評価法

認められなかった。ベントナイト配合率が 10%と 20%の場合にはやや透水係数に変化が認められた。これはベントナイトの膨潤による砂粒子間の間隙の充填程度がやや不十分で、時間の経過に伴いベントナイト粒子が砂粒子間を移動することが原因と思われる。

- (3) ベントナイト配合率 20~50%の埋戻し材に対し膨潤変形後の透水係数について実験的に調査したところ、5~80%程度の膨潤率で体積膨張が発生しても、その透水係数はやや増加する傾向にあるものの、大きく変化するものではなかった。
- (4) 著者が提案するパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ $\epsilon_{sv}^*$ 」を用いて、緩衝材・埋戻し材の透水特性の評価法を提案した。この透水特性評価法によれば、ベントナイトの配合割合、乾燥密度等の材料仕様を種々変化させた場合の緩衝材・埋戻し材の透水係数を簡易に予測できる。

謝辞：本論文で報告した実験データは、第一著者が電力中央研究所職中に取得したものである。電力中央研究所副所長・西好一博士をはじめとする関係各位にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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 TN1400 99-020, 1999.
- 2) 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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.

- 3) (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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 塩崎功, 緒方信英, 金川忠, 出口朗, 高橋美昭, 高尾肇, 阿波野俊彦, 河村秀紀: 高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術—その7廃棄体の埋設と処分施設の埋戻し—, 原子力バックエンド研究, Vol. 5, No. 2, pp.153-168, 1999.
- 7) 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.
- 8) 日本ベントナイト工業会標準試験法: ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法, JBAS-107-91, 1991.
- 9) 五十嵐敏文, 馬原保典: 自然環境中の安定同位元素を用いた放射性核種分配係数測定方法の提案, 電力中央研究所報告U95025, 1996.
- 10) 杉田裕, 千々松正和, 藤田朝雄: 粘土充填・熱負荷試験における緩衝材充填技術の検証, サイクル機構技術資料, TN8430 98-003, 1998.
- 11) 出口朗, 増田良一, トラン デュク フィ オアン: 緩衝材原位置締固め工法に関する検討(その1), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第7部, pp.460-461, 1999.
- 12) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, 2000.
- 13) 小峯秀雄, 緒方信英: ベントナイトを含有する緩衝材の膨潤評価式と自己シール性評価, 土と基礎, Vol. 46, No. 10, pp.23-26, 1998.
- 14) Filippo Santucci de Magistris, Francesco Silvestri and Filippo Vinale : Physical and mechanical properties of compacted silty sand with low bentonite fraction. Canadian Geotechnical Journal, Vol.35, pp.909-925, 1998.
- 15) 緒方信英, 小峯秀雄, 堀江芳博, 石井卓, 三谷泰浩: ベントナイト混合土の透水性と骨材との関係について, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集(第3部門), pp.1080-1081, 1993.
- 16) Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A. and Stalin, V.K. : Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.406-413, 2000.
- 17) Lambe, T.W. and Whitman, R.V. : Soil Mechanics, John Wiley & Sons Inc., pp.29-31, 1969.

(2001. 7. 2 受付)

## HYDRAULIC PROPERTIES OF BENTONITE BUFFER AND BACKFILL MATERIALS AND SIMPLIFIED EVALUATION

Hideo KOMINE and Nobuhide OGATA

The compacted bentonite and sand-bentonite mixture are attracting greater attention as buffer and backfill materials for high-level nuclear wastes disposal because they have impermeable and swelling properties. This study investigated the hydraulic-conductivities at the different sand-bentonite mass ratio and dry density, which are the specifications of material, by the experimental works. This study also obtained the experimental data of hydraulic conductivities of the materials for 120 days at the farthest, and the permeability changes before and after swelling. Furthermore, this study proposed the evaluation method for hydraulic conductivity using the parameter "Swelling volumetric strain of montmorillonite", which was proposed by the authors.