

## ベントナイト原鉱石の固結が高圧圧密実験による透水係数測定に及ぼす影響

早稲田大学 学生会員 ○伊藤大知, 正会員 小峯秀雄  
クニミネ工業 諸留章二  
戸田建設 正会員 関口高志, 三浦玄太

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の仕様設計にあたっては、ベントナイトの透水特性を正確に把握することが重要である。これまでに、様々な研究機関にてベントナイト系材料の透水係数測定に関する研究が行われ、データベースが構築されてきたり。また、緒方ら<sup>2)</sup>は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。しかし、高レベル放射性廃棄物の放射能レベルの十分な低下には数千年から数万年を要するため、緩衝材の設計に際してはベントナイトの長期的変質とその工学的評価を反映する必要がある。具体的には、緩衝材がそのような長期間地盤深部に置かれた場合、膠結作用に伴う固結が生じ、膨潤性や低透水性など緩衝材の要求性能に関連する物理特性が変化する可能性が考えられる。著者らは固結した緩衝材の物理特性は現存するベントナイト原鉱石に類似すると考え、原鉱石における測定結果から緩衝材の長期的物理特性変化を間接的に評価することを考えた。そこで本論文では、原鉱石の不攪乱供試体と、固結を除去した再構成供試体を用いて高圧圧密実験により透水係数を測定し、固結の有無による透水係数の差異を評価した。



図1 原鉱石サンプル(29-1)

### 2. 使用した試料および供試体作製方法

本研究では、山形県月布鉱山 29 番層産の Na 型ベントナイトで、緩衝材の候補材料であるベントナイト A (クニゲル V1, クニミネ工業株式会社製) の原鉱石を用いた。図 1 に原鉱石サンプルを示す。また、表 1 に使用した原鉱石の基本的性質を示す。今回、原鉱石の固結の有無による透水係数の差異の傾向を実験的に調査するため、3 種類のサンプル (29-1, 29-2, 29-3) を用いた。なお、表 1 中のモンモリロナイト含有率はメチレンブルー (MB) 吸着量試験<sup>3)</sup>により得られた MB 滴定量から純モンモリロナイト含有率を 140 mmol/100 g とし算出した。

また、固結の有無による透水係数の差異を評価するため、次に述べる方法により原鉱石の固結を保持した不攪乱供試体と、固結を除去した再構成供試体を用意し、実験に用いた。不攪乱供試体はカッターリング等のトリミング器具を用いて、直径 60 mm、高さ 10 mm の円柱形となるように切り出し、作製した。再構成供試体は 0.425 mm ふるいを通過した粉末状試料に荷重を静的に加えることにより締め、作製した。なお、不攪乱供試体の初期乾燥密度は  $1.6 \sim 1.8$  Mg/m<sup>3</sup> の範囲にあり、再構成供試体も同様になるよう荷重を調整した。

表 1 ベントナイト A 原鉱石の基本的性質

	29-1	29-2	29-3
土粒子の密度(Mg/m <sup>3</sup> )	2.77	2.77	2.80
液性限界(%)	419.1	438.5	431.6
塑性限界(%)	29.2	28.0	26.8
塑性指数	389.9	410.5	404.8
モンモリロナイト含有率(%)	44.7	38.6	51.4

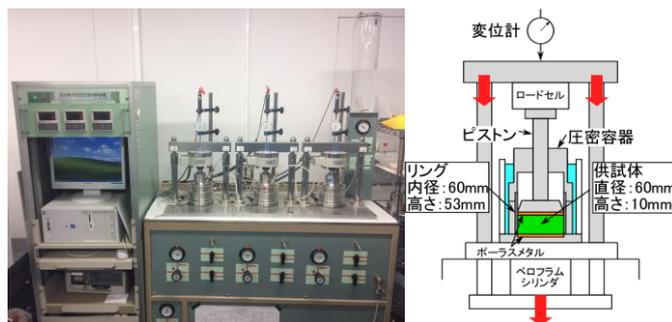


図2 高圧圧密実験装置

### 3. 高圧圧密実験の概要および結果の整理方法

ベントナイト等の低透水性材料の透水係数測定方法として、日本工業規格「土の透水試験方法 (JIS A 1218: 2009)」では圧密試験が示されている<sup>4)</sup>。しかし、一般的に用いられる標準圧密試験装置では最大圧密圧力が 1.6 MPa であ

キーワード 地層処分, ベントナイト原鉱石, 高圧圧密実験, 透水係数, 有効モンモリロナイト密度

連絡先

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-5286-2940

り<sup>5)</sup>, ベントナイトは乾燥密度によっては吸水に伴い 1.6 MPa 以上の膨潤圧を発生させるため<sup>6)</sup>, 正確な試験を実施することは困難である. そこで本研究では, 1.6 MPa よりも大きい圧密圧力を作用できる高圧圧密実験装置を用いた. 図 2 に本研究で用いた高圧圧密実験装置を示す. 高圧圧密実験によるベントナイトの透水係数測定方法は佛田らの研究<sup>7)</sup>によって提案されており, 本研究はこれに基づいて実験を行った. また, 結果の整理は日本工業規格「土の段階載荷による圧密試験方法 (JIS A 1217: 2009)」に基づき行った<sup>5)</sup>.

透水係数  $k$  (m/sec) の算出式を式 (1) に示す.

$$k = C_v \cdot m_v \cdot \rho_w \cdot g \quad (1)$$

ここに,  $C_v$ : 圧密係数(m<sup>2</sup>/sec),  $m_v$ : 体積圧縮係数(m<sup>2</sup>/kN),  $\rho_w$ : 水の密度(kN・sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>),  $g$ : 重力加速度(=9.80665 m/sec<sup>2</sup>)である.

#### 4. 不攪乱供試体および再構成供試体における透水係数の比較

不攪乱供試体および再構成供試体において得られた透水係数と有効モンモリロナイト密度との関係を図 3 に示す. これより, 両者の透水係数はいずれも 10<sup>-12</sup> ~ 10<sup>-14</sup> m/sec オーダーであった. これは先述した緩衝材の設計透水係数よりも低く, 透水性に関する緩衝材の要求性能を満たしている. また, 両供試体において有効モンモリロナイト密度の増加に伴い透水係数が低下する傾向がみられた.

故に, 固結の有無に因らずモンモリロナイト含有量が大きくなるにつれて透水係数が低下すると言える. 加えて, 有効モンモリロナイト密度が 1.3~1.4 Mg/m<sup>3</sup> の範囲では不攪乱供試体の透水係数は再構成供試体より 1 オーダー程度低いことが読み取れる. 以上から, 緩衝材において膠結作用により固結が発生した場合, 低透水性は維持される, もしくは向上する可能性が示唆された.

#### 5. 不攪乱供試体および再構成供試体における透水係数差異の原因に関する考察

著者らが実施した原鉱石の不攪乱供試体および再構成供試体の膨潤圧測定実験より, 不攪乱供試体の膨潤圧は再構成供試体の 10 分の 1 程度に留まる結果が得られた<sup>8)</sup>. これを踏まえると, 不攪乱供試体の透水係数が再構成供試体に比べて低い原因として, モンモリロナイトの膨潤ではなく, 供試体内の細孔形状の差異および不攪乱供試体の変形性の低さが考えられる. 以上の 2 点はいずれも不攪乱供試体中の固結の影響に因るものである. すなわち, 前者に関しては固結により土粒子骨格が緻密になり, 供試体内の細孔への水分子の浸入が制限され, 透水性が低くなると考えられる. また, 後者に関しては固結により土粒子骨格が強化され, 変形性が低下することにより, 圧密理論における前提, すなわち飽和土における圧密に伴う体積減少量を水分放出量と等価と見なす<sup>9)</sup>際に, 透水係数の値が実際よりも過小評価されている可能性が考えられる. 故に, 加圧型変水位透水試験装置<sup>10)</sup>を用いて不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数を測定し, 比較する必要がある.

#### 6. まとめ

高圧圧密実験装置を用いたベントナイト原鉱石の透水係数の測定により, 以下の結論を得た.

- 1) ベントナイト原鉱石の不攪乱供試体と再構成供試体の透水係数は 10<sup>-12</sup>~10<sup>-14</sup> m/sec オーダーであり, 有効モンモリロナイト密度が 1.3~1.4 Mg/m<sup>3</sup> の範囲では, 不攪乱供試体の方が 1 オーダー程低い値であった.
- 2) 緩衝材が固結した場合, 低透水性は維持される, もしくは向上する可能性が示唆された.
- 3) 不攪乱供試体の透水係数が再構成供試体より低い理由として, 細孔形状の差異や変形性の低さが考えられる.

**参考文献**: 1) 例えば, 小峯秀雄, 緒方信英: 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, 土木学会論文集 No.708/III-59, pp.133-144, 2002. 2) 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, 一その 4 人工バリアの設計と製作一, 原子力バックエンド研究, Vol.5, No.2, pp.103-121, 1999. 3) (旧)日本ベントナイト工業会: ベントナイトのメチレンブルー吸着量測定方法 (JBAS-107-77), 日本ベントナイト工業会標準試験方法 (JBAS, 1977), 1997. 4) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 1-, pp.524-525, 2009. 5) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 1-, pp.462-499, 2009. 6) 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所: 緩衝材の特性試験 (I), pp.31-43, 1992. 7) 佛田理恵・小峯秀雄・安原一哉・村上哲: 高圧圧密試験装置を用いたベントナイトの透水係数算出における試験方法の高度化, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 3, pp. 573~578, 2006. 8) 伊藤大知, 小峯秀雄, 諸留章二, 関口高志, 三浦玄太: ベントナイト原鉱石の膨潤圧特性から観た緩衝材における膠結作用の定量評価の試み, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017. (投稿中) 9) 足立格一郎: 土質力学, 共立出版株式会社, pp.92-100, 2002. 10) 倉持隼斗, 小峯秀雄, 伊藤大知, 関口高志, 三浦玄太: 変水位透水試験による砂・ベントナイト混合土の材料条件に応じた適切な試験装置・試験方法の検討, 第 60 回地盤工学シンポジウム, pp.37-42, 2016.

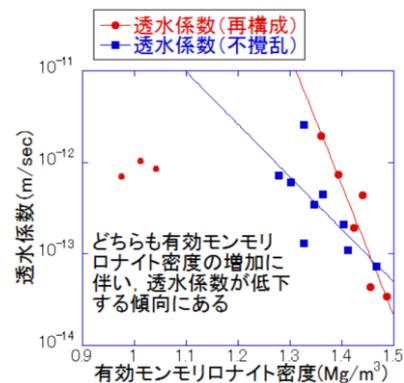


図 3 有効モンモリロナイト密度-透水係数関係