

試験装置の違いがベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響の解釈

(財) 電力中央研究所 フェロー会員 ○田中 幸久

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設の構成要素の一つとして締固めたベントナイト系材料を用いることが検討されている。ベントナイト系材料に求められている特性のうち膨潤性は、ほとんどの場合、室内試験により評価されている。しかし、有効粘土密度などの指標が同一でも、測定された平衡膨潤圧にはばらつきがあるため、そのことが施設の性能評価における不確実性の一因となっている(図1参照)。そのため室内試験結果のばらつきの原因を調べる研究が行われ、いくつかの要因のうち、試験装置の違いが試験結果に特に大きな影響を及ぼすことが既に報告されているが<sup>1)</sup>、そのメカニズムの解明はなされていない。そこで本報告ではベントナイトの吸水膨潤挙動を表わし得る新しい応力ひずみモデルを開発し、そのモデルを用いて、膨潤圧試験の数値シミュレーションを行い、試験結果に影響を及ぼす要因のうちの、試験装置の変形性、供試体高さが平衡膨潤圧に及ぼす影響のメカニズムを解明した。

2. 実験

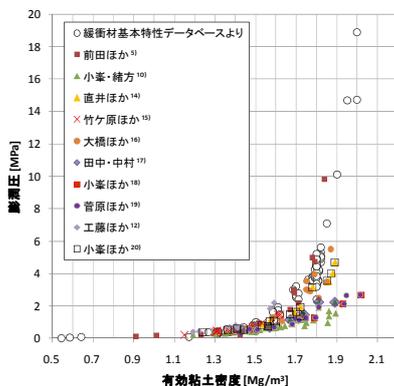
本報告で着目した試験装置を図2、図3に示す。試験に用いたベントナイトはクニゲルV1である。図2、図3の試験装置は文献1)ではそれぞれ拘束型試験装置、圧密類似型試験装置と称されている。本報告では試験装置の特性をよりの確に表現するため、図2の試験装置を供試体リング・上板結合型試験装置(または結合型試験装置と略称)、図3のように結合型試験装置の上板に相当するキャップと供試体リングが分離している試験装置を供試体リング・上板分離型試験装置(または分離型試験装置と略称)と称することとした。特に図3の試験装置は電中研で使用されていたことから供試体リング・上板分離型試験装置(CRIEPI)(または分離型試験装置(CRIEPI)と略称)と称することとする。試験の詳細は文献1)に記載されているので参照されたい。

3. ベントナイトの新しい応力ひずみモデル

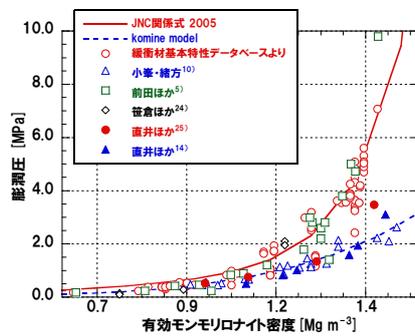
新しい応力ひずみモデルの概要を以下に記す。詳細は文献2)を参照されたい。

$$\sigma'_m = \text{Max}\{\sigma'_{m,i}, \sigma'_{m,ii}\} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma'_m$ : 平均有効応力であり、吸水膨潤後には平衡膨潤圧に等



(a) 有効粘土密度



(b) 有効モンモリロナイト密度

図1 膨潤圧と有効粘土密度ならびに有効モンモリロナイト密度の関係<sup>1)</sup>

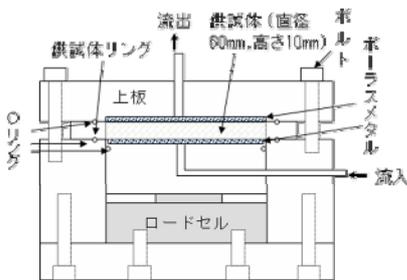


図2 供試体リング・上板結合型試験装置<sup>1)</sup>

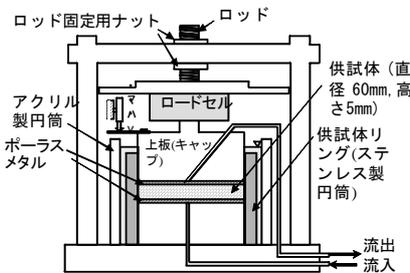


図3 供試体リング・上板分離型試験装置(CRIEPI)<sup>1)</sup>

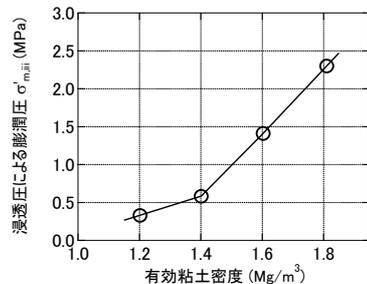


図4 浸透圧による膨潤圧と有効粘土密度の関係<sup>2)</sup>

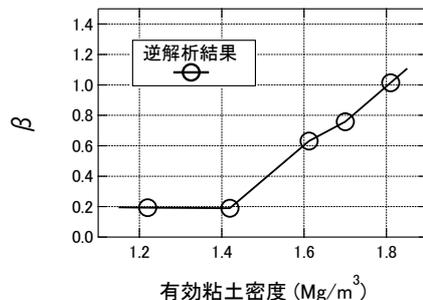


図5 βと有効粘土密度の関係<sup>2)</sup>

キーワード ベントナイト, 膨潤圧, 試験法, 数値シミュレーション

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財)電力中央研究所バックエンド研究センター TEL 0471-82-1181

しい,  $\sigma'_{m,iii}$ : 浸透圧による膨潤圧であり, 有効粘土密度に依存する (図 4 参照),  $\sigma'_{m,ii}$ : サクシオン変化または外力変化による平均有効応力であり, 増分は次式で表わされる.

$$d\sigma'_{m,ii} = \left[ \frac{\sigma'_{m,ii}}{K_d(u_c)} \cdot \frac{\partial K_d(u_c)}{\partial u_c} + \beta \cdot S_{w,e} \right] / \left\{ 1 + \frac{K_d(u_c)}{h/D} \right\} \cdot du_c \quad (2)$$

ここで,  $K_d$ : ベントナイトの体積弾性係数,  $S_{w,e}$ : 有効水飽和度,  $\beta$ : 有効粘土密度に依存する依存パラメータ (図 5 参照),  $u_c$ : サクシオン,  $h$ : 供試体の高さ,  $D$ : 単位膨潤圧による容器の軸方向の変形量であり, 図 2, 図 3 の試験装置でそれぞれ 0 mm/MPa, 0.1051 mm/MPa

#### 4. 数値シミュレーションの結果

##### 4.1 結合型試験装置と分離型試験装置(CRIEPI)による試験結果の差の解釈

図 2 ならびに図 3 の試験装置による試験結果と後者の数値シミュレーション結果を図 6 に示す. 数値シミュレーションでは, 図 3 の試験装置に対する実測値  $D = 0.1051$  mm/MPa を用い, 供試体高さは  $h = 5$  mm とし,  $\beta$  は結合型試験装置の試験結果から  $D = 0$  として逆算したものをを用いた. 計算結果と試験結果との対応はよく, このことから, 図 2 ならびに図 3 の試験装置による平衡膨潤圧の差は試験装置の  $D$  ならびに  $h$  の違いとして解釈できることがわかる.

##### 4.2 供試体高さの影響の解釈

JAEA 所有の分離型試験装置を用いて, 有効粘土密度毎にベントナイトの平衡膨潤圧におよぼす縦横比の影響 (供試体直径が一定であるため, 実質的には供試体高さの影響) を調べた試験結果が, 図 7 中にプロットされている<sup>3)</sup>. 図 7 によると, 有効粘土密度が 1.2 Mg/m<sup>3</sup> ならびに 1.4 Mg/m<sup>3</sup> の供試体には, 寸法効果は認められないが, 1.6 Mg/m<sup>3</sup> ならびに 1.8 Mg/m<sup>3</sup> の供試体では, 縦横比が大きいほど平衡膨潤圧が大きい. 図 7 中に示されている計算結果も試験装置の変形性と供試体高さを考慮することにより, 実測結果の特徴を良く表している.

##### 4.3 平衡膨潤圧と有効粘土密度関係のばらつきの説明

図 1 (a) によれば膨潤圧と有効粘土密度の関係にはバラツキが大きいが, 図 1 (a) をよく調べると有効粘土密度に対する膨潤圧が小さいデータの多くは, 図 3 に示す分離型試験装置(CRIEPI)により得られていることがわかった. このデータをグループ 2 と呼ぶこととする. 一方, その他のデータのうち, 分離型試験装置で供試体高さが 20 mm の場合をグループ 1 と呼ぶことにする.

図 8 中の赤四角は図 3 に示す分離型試験装置(CRIEPI)に対するシミュレーション計算結果であり,  $D = 0.1051$  mm/MPa,  $h = 5$  mm, 初期含水比 10% として計算した. 図 8 中には, 図 1 (a) にプロットされたグループ 2 のデータのうち, 初期含水比が 5~15% のデータをプロットしてある. 計算結果はほぼグループ 2 のデータに対応していると言える.

一方, 図 8 中の赤三角は, 初期含水比 10% とし, 図 7 ならびに図 8 に示すシミュレーション計算と同様に  $D = 0.15$  mm/MPa とした. また, 供試体高さは, 図 8 のシミュレーション計算と同様に  $h = 20$  mm とした. 計算結果はほぼグループ 1 のデータに対応していると言える.

図 8 中には結合型試験装置( $D = 0$ )の初期含水比 10% の場合の計算結果も示されているが, この計算結果はグループ 1 の膨潤圧よりもさらに大きい.

以上のことから平衡膨潤圧のばらつきは, 試験装置の変形性と供試体高さの違いによりほぼ説明できると言える.

参考文献: 1) 共同研究報告 (2010): ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討. 2) 田中幸久 (2011): 締め固めたベントナイトの吸水膨潤過程のモデル化 (その 1), 一膨潤圧に及ぼす実験条件の影響の数値シミュレーション, 電力中央研究所研究報告 N10015. 3) 棚井憲治, 菊池広人 (2008): 緩衝材の膨潤応力測定手法に関する現状と課題, 原子力学会 2008 年秋の大会予稿集, 講演番号 M26, p. 722.

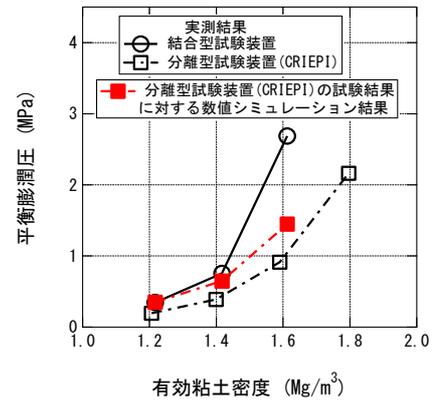


図 6 平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係<sup>2)</sup>

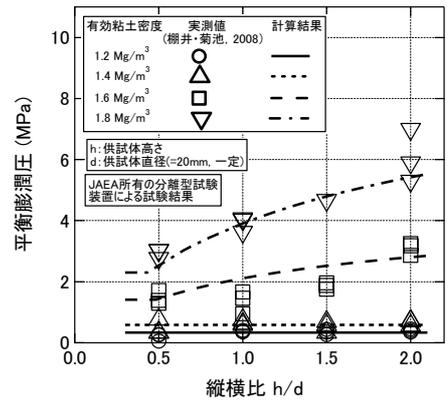


図 7 平衡膨潤圧と供試体高さの関係<sup>2)3)</sup>

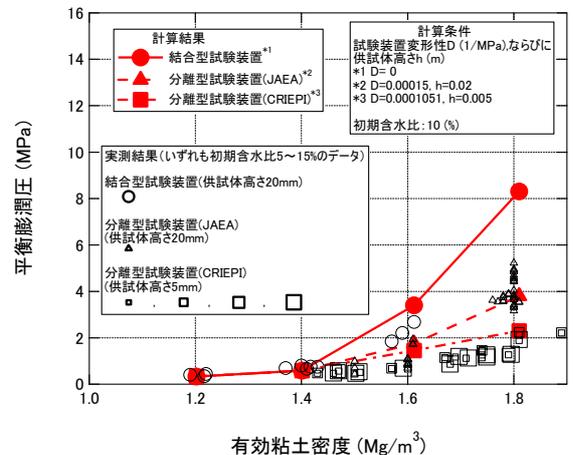


図 8 平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係 (数値計算においては初期含水比 10% を仮定)<sup>2)</sup>