2つの膨潤メカニズムを有するモデルによる 締固めたベントナイトの吸水膨潤挙動のシミュレーション

電力中央研究所 フェロー会員 〇田中 幸久

1. はじめに

放射性廃棄物処分においては、放射性核種の移 行を抑止するためなどの理由により締固められた ベントナイトが用いられる. 性能評価上ベントナ イトに求められる性質は主に低透水性であるが, 低透水性を確実にする性質として膨潤性は重要な 特性である.従って,設計上,透水係数ならびに 膨潤圧が必要とされる.最も必要とされるのは飽 和後の透水係数と膨潤圧であるが、飽和化の過程 における非一様な地下水の浸入に伴う非一様な不 飽和膨潤圧が周辺施設へ及ぼす力学的な影響や初 期に密度不均一なベントナイト層の飽和化に伴う 密度分布変化を評価することは、工学的に重要で あり、そのためには飽和化の過程におけるベント ナイト挙動のモデル化が必要である.

そこで本報告においては,吸水飽和化過程にお ける施設の状態の変化の予測精度を向上させるこ とを目的にベントナイトの不飽和膨潤挙動のモデ ル化を行い、各種試験結果のシミュレーションを行った.

2.2つの膨潤メカニズムを有する膨潤モデルの提案

締固めたベントナイトは、吸水すると大きな膨潤ひずみが発 生することが知られている.これは主として、ベントナイトの 主成分であるモンモリロナイトの表面電荷によってモンモリロ ナイト結晶の表面近傍に形成された拡散 2 重層内の間隙水のイ オン濃度と表面電荷の影響の及ばない場所の間隙水のイオン濃 度との差による浸透圧によるものである。そこで、このメカニ ズムによる膨潤を「浸透圧による膨潤」と呼ぶこととする(図 1(b)参照).

一方、締固めた通常の粘土は、飽和過程におけるサクション の減少により、上載圧の大きさにより膨潤または収縮(いわゆ るコラプス現象)が生じることが知られており、締固めたベン トナイトも通常の粘土と同様の現象が生じると考えられる. そ こで、このメカニズムによる膨潤または収縮をまとめて「サク ション減少による膨潤」と呼ぶことにする(図1(a)参照).円柱 状の供試体において、半径方向変位を拘束した場合の「サクシ ョン減少による膨潤」に対応した軸方向ひずみ増分 d & a は次式 で表わされるとした 1).

 $\mathrm{d}\varepsilon_a = \mathrm{d}\sigma_a'/K_{d1} + \left(-\mathrm{d}K_{d1}/K_{d1}\cdot\sigma_m' + \beta\cdot S_{w,e}\cdot\mathrm{d}u_c\right)/K_{d1}$ (1)ここで、 K_{d1} : 一次元体積弾性係数、 S_{we} : 有効水飽和度、 β : 有 効粘土密度 ρ_{de} に依存するパラメータ、 u_c : サクション、 σ'_m : 平 均有効応力

軸方向変位を拘束した場合の「サクション減少による膨潤圧」



図1 飽和過程(不飽和), 飽和後(飽和)における膨潤のメカニズム





(b) 例えば、 $P_{s,suc} > P_v$ かつ $P_{s,osm} > P_v$ (図 2(a) で領域 I-3 または領域 II-3) の場合の膨潤変形 図2 サクション減少による膨潤圧,浸透圧による 膨潤圧 Ps,osm と上載圧の関係

の増分 dσ'aは,式(1)において dεa=0 とすることにより得られ, dσ'aを積分することによりサクション減少による膨 キーワード ベントナイト,膨潤,不飽和,モデル化,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 電力中央研究所 TEL 0471-82-1181

-11-

潤圧 P_{s,suc}が得られる. P_{s,suc}と有効粘土密度の 関係は実験結果に基づき,図2(a)中の赤実線 で表わされる.

一方,「浸透圧による膨潤」は,飽和直後 に発生する浸透圧による膨潤圧 $P_{s,osm}$ による 負の間隙水圧が消散することにより生じる と考えた. $P_{s,osm}$ と有効粘土密度の関係は実験 結果に基づき,図2(a)中の青実線で表わされ る.膨潤圧試験により実測される膨潤圧 P_s は, $P_{s,suc}$, $P_{s,osm}$ のうち,大きい方であると考 えた¹⁾.

$$P_s = \operatorname{Max}(P_{s,suc}, P_{s,osm})$$
(2)

さらに、膨潤変形試験の場合には、上載圧 P_v が「サクション減少による膨潤」「浸透圧 による膨潤」によるひずみにも影響を及ぼす と考え、 P_v と $P_{s,suc}$ 、 $P_{s,osm}$ の関係を考慮した(図 2(a)、図 2(b)参照).詳細は文献 1)を参照さ れたい.

各種実験結果の数値シミュレーション 1 一定上載圧条件下の膨潤変形試験

図 3(a) に示す装置により,上載圧一定条件 で膨潤変形試験が行われた²⁾.図 3(b) 中の凡 例で示す初期有効粘土密度の範囲では,浸透 圧による膨潤圧 $P_{s,suc}$ は,サクション減少に よる膨潤圧 $P_{s,suc}$ よりも大きい.また,上載圧 P_v は $P_{s,suc}$ よりもさらに小さい.従って,飽和 過程ならびに飽和後の膨潤ひずみの発生の 仕方は,図 2(b) に示すとおりである.

数値シミュレーションは,簡単のために以 下に記す手順で行った.まず,飽和過程の解 析を行い,サクション減少による膨潤ひずみ





1.6

1.8

1.4

(b) 試験ケース No.1



0

1.2



を求め、その値を飽和直後の膨潤ひずみとする.次に P_v - $P_{s,osm}$ をもって飽和直後の残留間隙水圧とし、その値を初期値として残留間隙水圧の消散解析を行い、浸透圧による膨潤ひずみを求め、両方の膨潤ひずみを合計する事により供試体のひずみの計算値とした.計算結果を実測結果と比較すると両者の対応は良い(図3(b)参照).

ロードセル

(a) 試験装置

3.2 初期密度が不均一な供試体の膨潤圧試験

図 4(a)に示す装置により,初期密度が不均一な供試体の膨潤圧試験が行われた³⁾.実験の結果得られた供試体の試験前ならびに試験後の乾燥密度の軸方向分布を図 4(b),(c),(d)に示す.飽和の影響により,試験後の乾燥密度分布は試験前の乾燥密度分布より一様に近くなっている.次に,図 4(b),(c),(d)に示される試験結果の数値シミュレーションを行った.この計算では,簡単のために,まず,飽和過程の解析を行い,サクション減少による飽和直後の供試体内の膨潤ひずみ分布と供試体全体の軸方向応力 σ'a を求める.次に σ'a-P_{s.osm} をもって飽和 直後の残留間隙水圧とし,その値を初期値として残留間隙水圧の消散解析を行い,飽和後の膨潤ひずみを求め,両方の膨潤ひずみを合計する事により供試体内のひずみ分布の計算値とした.計算結果を実測結果と比較すると 両者の対応は良い(図 4(b),(c),(d)参照).

参考文献:1)田中(2012):締固めたベントナイトの吸水膨潤過程のモデル化(その2),飽和・不飽和ベントナイトの膨潤モデルの提案とその検証,電中研研究報告N11035.2)小峯ほか(1992):高レベル放射性廃棄物地層処分のための緩衝材の力学特性(その1),締固めたベントナイトの吸水膨潤メカニズムの実験的検討,電力中央研究所報告,研究報告U92039.3)中村,田中,廣永(2011):ベントナイト系材料に対する透水試験と膨潤圧試験の現状調査と試験による検討,電力中央研究所調査報告N10026,2011.