

ベントナイト緩衝材の膨潤解析

広島大学	学生会員	○足利大地
広島大学	正会員	岡澤重信
清水建設	正会員	中島均
清水建設	正会員	石井卓
清水建設	正会員	櫻井英行

1. 研究背景・目的

原子力発電施設等から発生する放射性廃棄物はその性質に適合した処理が実施され、安全性を確かめた方法により処分が行われる。そして、いくつかある処分方法の中でも地層処分という方法が重要視されている。これは、Fig.1のように放射性廃棄物をガラスと混ぜ合わせ安定なガラス固化体とし、それをオーバーパックという金属製の容器に入れる。そして、オーバーパックと地盤との間を数種類の緩衝材から構成されるバリアシステムで包囲するものである。

このバリアシステムにおいて、主要な緩衝材として使われるのが本研究の対象であるベントナイトという粘土である。ベントナイトは膨潤性・遮水性・吸着性・熱伝導性・無機物であるなどといった性質を有しており、緩衝材として適している。地層処分ではFig.1のように、時間とともに他の緩衝材の体積減少や亀裂などにより空隙が発生する。こうした空隙があるとそこから放射性廃棄物が漏洩する可能性があり非常に危険であるが、ベントナイトの膨潤によりこのような有害な空隙が修復される。しかし、ベントナイトの膨潤は非常に長い期間を要するため、実験を行うことは困難である。

そこで本研究ではベントナイトの性質の中でも膨潤性に着目し、地層処分におけるベントナイトの膨潤過程をシミュレートすることにより、長期期間後に空隙が隙間なく充填されるかどうかを検討・評価する。

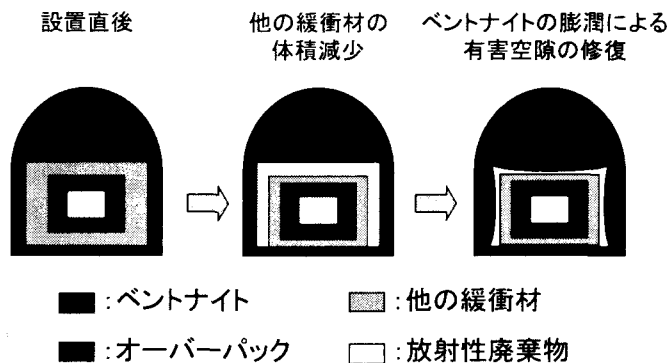


Fig.1 Swelling of bentonite

2. 膨潤性と遮水性

先程述べたように、本研究ではベントナイトの性質の中の膨潤性に着目しているが、解析を行うに当たっては膨潤性とともに遮水性も重要となってくる。膨潤とは、ベントナイトを水に浸すと各ベントナイト粒子の層間に水が入り込み、層間隔を押し広げる。その結果、自分の体積の数倍から十数倍に膨れ上がる現象である。しかし、ベントナイト粒子自体の体積は変化していない。

また、膨潤性と遮水性を評価する値として膨潤圧と透水係数がある。膨潤圧とは、膨潤によるベントナイトの体積増加を抑えるのに必要な抑圧である。透水係数とは地盤中での水の流れやすさであり、ここではベントナイト中での水の流れやすさを示している。

3. 膨潤の支配方程式

本研究では新たにベントナイトの流速の導出に仮定としてDarcy則を用いた。このとき使用した式を以下に示す。まず、ベントナイトの膨潤圧 P_s は次式で表される⁽¹⁾。

$$P_s = 10^{2.145\rho_{Bd}-3.214} \quad (1)$$

次に透水係数 k は次式で表される⁽²⁾。

$$k = 9.769 \times 10^6 \times \exp\{-42.1 + 1.1447\rho_{Bd} - 2.1232\rho_{Bd}^2\} \quad (2)$$

ここで、 ρ_{Bd} はベントナイト乾燥密度である。以上のものは既存の研究の成果であるが、これらをDarcy則に適用することを考える。水頭ポテンシャルを ϕ 、位置を x とすると、流速 v は水頭ポテンシャル ϕ の勾配として表され

$$v = -k \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3)$$

となる。本研究では、流速は遅く水温変化もないものとし、加えて非定常問題として扱っている。また、透水係数 k が時間とともに変化するものと考えている。また、水頭ポテンシャル ϕ は

$$\phi = \frac{P_s}{\rho_w g} \quad (4)$$

で与えられる。

4. 解析手法

本研究ではベントナイトを流体とみなし、有限差分法を用いて解析を行う。

まず、全質量 M 、全体積 V の湿潤状態のベントナイトを考える。全ベントナイト粒子自体の質量を M_b 、体積を V_b とする。また、空隙は全て水で満たされているものとする。このとき、ベントナイト粒子自体の密度 ρ_{mat} は

$$\rho_{mat} = \frac{M_b}{V_b} \quad (5)$$

で表され、ベントナイト乾燥密度 ρ_{Bd} は

$$\rho_{Bd} = \frac{M_b}{V} \quad (6)$$

で表される。ここで、解析を行うに当たり密度関数 f を導入した。密度関数とは、ベントナイト乾燥密度をベントナイト粒子自体の密度で割ったものであり

$$f = \frac{\rho_{Bd}}{\rho_{mat}} \quad (7)$$

で与えられる。密度関数が 0 ならベントナイト粒子が存在せず水のみであることを示し、1 ならベントナイトが全く水を含んでおらずベントナイト粒子のみであることを示している。

次に、ベントナイトに移流方程式を適用することを考える。本研究では任意量を密度関数 f 、外力を 0 としているので、

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

となる。式 (1)～式 (8) より、差分法を用いることによってベントナイトの膨潤過程をシミュレートする。

5. 解析結果

有限差分法を用いて、ベントナイトの膨潤過程の解析を行った。解析条件は、質量保存則を考慮せず、加えて温度や外力などの外的な影響を受けない空間を考え、内部はベントナイトと水のみで構成されているとした。内部においても膨潤圧以外の浸透抵抗や温度の変化などといった要因を無視した。また、内部から外部への流出やその逆もないものとする。解析対象は 1 次元で 2, 5, 10 要素, 2 次元で 25 要素とした。紙面の都合上、Fig.2 に 1 次元 10 要素, Fig.3 に 2 次元 25 要素の結果だけを示す。Fig.2 は両端が、Fig.3 は左下がベントナイトで満たされている。また、数値軸はベントナイト乾燥密度 ρ_{Bd} を示している。

1 次元 10 要素では、時間とともにベントナイトが膨潤し隙間が充填される様子が確認できる。2 次元 25 要

素の場合でも 1 次元のときと同様にベントナイトが膨潤し隙間が充填される様子が確認できる。また、2 次元 25 要素では水平方向と垂直方向の条件を等しくしたが、その条件の通り対称に膨潤していることが分かる。そして、最終的にはどちらの場合も隙間がなくなり、どの要素もベントナイトで満たされることが確認できる。ここで、質量保存則を無視しているため、両結果とも解析の最初と最後でベントナイト乾燥密度の値が異なっている。

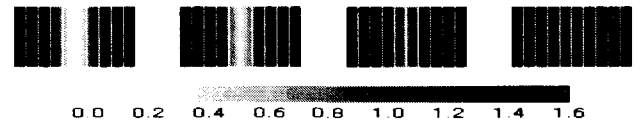


Fig.2 Computational results of 1D (10 elements)

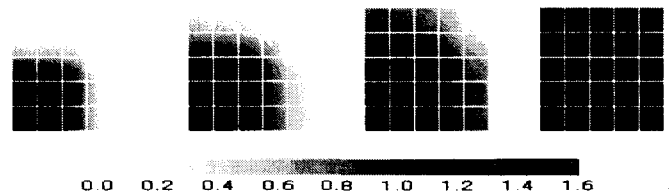


Fig.3 Computational results of 2D (25 elements)

6. 結論

差分法を用いることにより、ベントナイトの膨潤過程をシミュレートすることが可能となった。また、ベントナイトの速度の導出に仮定として Darcy 則を用いたが、その仮定によりベントナイトの膨潤挙動が示されることが分かった。さらに、1 次元の場合と同様に 2 次元の場合でも隙間が充填され正しい結果が得られた。これにより、3 次元解析への発展が期待できる。

7. 課題

本研究では、ベントナイトの膨潤圧のみを考え、それ以外の要因を考慮していない。そのため今後の課題としては、質量保存則の適用、温度や海水等の周辺環境の要因の考慮、他の緩衝材や地盤との接触の問題、膨潤性以外のベントナイトの性質の考慮、2 次元解析から 3 次元解析への発展、要素数を増加させたより大規模な現実的なモデルでの解析といったことが挙げられる。こうした因子を考慮することにより、ベントナイトが実際に利用される場合の現実的なシミュレーションへの発展が期待できる。

参考文献

- 1) 前田宗宏他：カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性，核燃料サイクル開発機構レポート，(1998)
- 2) 松本一浩他：緩衝材の飽和特水特性，核燃料サイクル開発機構レポート，(1997)