

ベントナイトの水分拡散解析に関する基礎的研究

茨城大学 学生会員 ○渡邊 義仁 正会員 車谷 麻緒
茨城大学 学生会員 小山田 拓郎 正会員 小峯 秀雄

1. はじめに

ベントナイトは、膨潤性粘土鉱物のモンモリロナイトを主成分とする粘性土であり、吸水に伴い膨潤する性能を有し、膨潤後は水みちとなる間隙を充填させる特性がある。この特性から、図-1に示す高レベル放射性廃棄物を対象とした地層処分における多重バリアシステムの緩衝材としての使用が検討されている。処分場の地下施設が再冠水する際、緩衝材は地下水の浸入により不飽和状態から飽和状態へと遷移する。しかし、ベントナイトが有する低透水性により緩衝材は長期間不飽和状態で存在することが考えられるため、不飽和状態における緩衝材内の水分移動を把握することは重要である。ベントナイトの水理特性として、小山田ら¹⁾は、浸潤によるベントナイト中の水分移動を拡散現象とし、ベントナイトの水分拡散特性を評価する研究を行っている。この研究から得られた水分拡散係数は、体積含水率に依存せず一定であると評価されている。また、竹内ら²⁾は、水分拡散係数の体積含水率への依存性を経験式として示し、U字型の関数になることを述べている。このように、水分拡散係数において、両者の見解に相違が生じている。

そこで、本研究では、水分拡散係数を体積含水率に依存せず一定とした場合および体積含水率に依存するとした場合で有限要素法による数値解析を行い、不飽和ベントナイト中の水分移動を評価することを目的とする。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

等温条件下における不飽和ベントナイト中の水分移動を1次元の拡散現象としてみなすこととし、支配方程式として1次元非定常拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 D は水分拡散係数、 θ は体積含水率、 x はベントナイト供試体の高さ方向の位置、 t は時間である。

2.2 有限要素法による空間方向の離散化

式(1)を弱形式化し、有限要素法により離散化すると以下の有限要素方程式が得られる。

$$M\dot{\theta} + K\theta = q \quad (2)$$

ここで、 M は質量行列、 $\dot{\theta}$ は時間微分した体積含水率ベクトル、 K は拡散行列、 θ は体積含水率ベクトル、 q は水分移動のフラックスベクトルである。

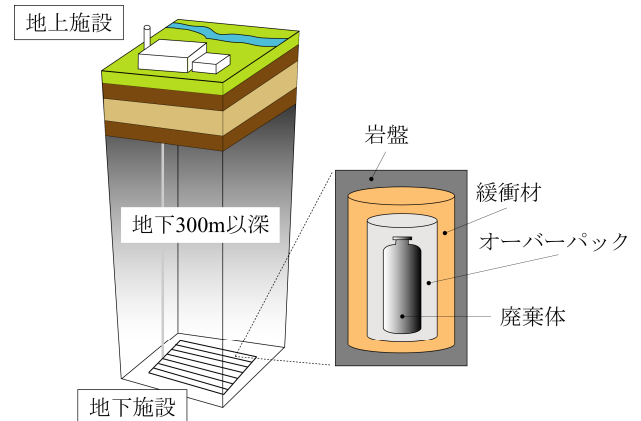


図-1 地層処分における多重バリアシステムの概略図

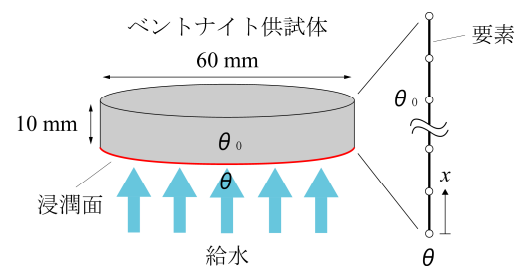


図-2 ベントナイト供試体と解析モデル

2.3 有限要素法による時間方向の離散化

不飽和ベントナイト中の水分移動を評価するため、以下に示す後退差分法を用いる。

$$\left(\frac{1}{\Delta t} M + K \right) \theta^{n+1} = q + \frac{1}{\Delta t} M \theta^n \quad (3)$$

ここで、 n は時間ステップ、 Δt は時間ステップ幅である。

3. 実験結果と解析結果の整合性の確認

水分拡散係数を体積含水率に依存せず一定とした場合で数値解析を行い、既往の研究¹⁾から得られた実験結果と解析結果の比較を行った。

3.1 解析モデルと解析条件

解析対象は、既往の研究¹⁾で用いられたベントナイト供試体であり、そのベントナイト供試体とそれをもとに作成したモデルを図-2に示す。解析条件は、実験で試験終了としている7日間とし、解析ステップは1000、要素数は40とした。用いたパラメータは、既往の研究¹⁾から得られたデータをもとに算出し、表-1に示す。

キーワード 水分拡散係数 体積含水率 ベントナイト

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 茨城大学工学部 TEL 0294-38-5004 FAX 0294-38-5268

3.2 水分分布図からの解析結果の妥当性評価

数値解析により得られた解析結果を用いて作成したベントナイト供試体内の水分分布図を図-3に示す。グラフ横軸は、浸潤面に設定したベントナイト供試体下部からの距離、縦軸は体積含水率である。図-3より、経過時間の増大に伴い、ベントナイト供試体内の水分が増加していく様子を読み取ることができ、約4000分以降ではほぼ飽和に達したとわかる。既往の研究¹⁾では、約4000分以降で飽和に達したと示しており、解析結果は実験結果と同様の結果になったため、数値解析により得られた解析結果は妥当であると考えられる。

3.3 吸水量の算出方法

吸水量の実験結果と比較するため、図-4に示す水分分布図を用いて台形積分を行い、次式から1要素の単位面積あたりの吸水量 ΔV_{wi} を算出する。

$$\Delta V_{wi} = \frac{1}{2}(\Delta\theta_{i-1} + \Delta\theta_i)h_e \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\theta$ は体積含水率の増加分、 h_e は要素長である。よって、吸水量 ΔV_w は次式で算出することができる。

$$\Delta V_w = \sum_{i=1}^n \Delta V_{wi} \times V \quad (5)$$

ここで、 n は要素数、 V はベントナイト供試体の体積である。

3.4 吸水量の実験結果と解析結果の比較

約4000分以降では、吸水量における水分拡散係数の影響は少ないことが考えられるため、経過時間4000分以前の吸水量と経過時間の関係を図-5に示す。図-5より、実験結果と解析結果の吸水量を比較すると、経過時間の増大に伴い、実験結果と解析結果の差が増加していることがわかる。経過時間の増大に伴い、実験結果と解析結果の差が増加している要因のひとつとして、水分拡散係数を一定としたことによる影響が考えられる。

3.5 逆解析による水分拡散係数の比較

実験結果と解析結果に差が生じた要因として、水分拡散係数の影響が考えられることから、水分拡散係数を変化させて数値解析を行い、実験結果を目標値とする逆解析を行った。逆解析を行う前に用いた水分拡散係数は、表-1に示した通りである。逆解析により得られた水分拡散係数は、 $3.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ある。この水分拡散係数を用いて作成した吸水量と経過時間の関係を図-6に示す。逆解析によって得られた水分拡散係数のオーダーは、既往の研究から得られた水分拡散係数のオーダーと一致していることが確認できた。図-6に示すように、実験結果と解析結果に差が生じており、この要因のひとつとして、水分拡散係数を一定としたことによる影響が考えられる。

4. おわりに

本研究では、既往の研究¹⁾から得られた実験結果と水分拡散係数を体積含水率に依存せず一定とした場合における解析結果の比較を行った。経過時間の増大に伴い、吸水量の実験結果と解析結果の差が増加し、この要因の

表-1 数値解析に用いるパラメータ

水分拡散係数 $D (\text{m}^2/\text{s})$	4.60×10^{-10}
初期体積含水率 $\theta_0 (-)$	0.1141
飽和体積含水率 $\theta_s (-)$	0.4953

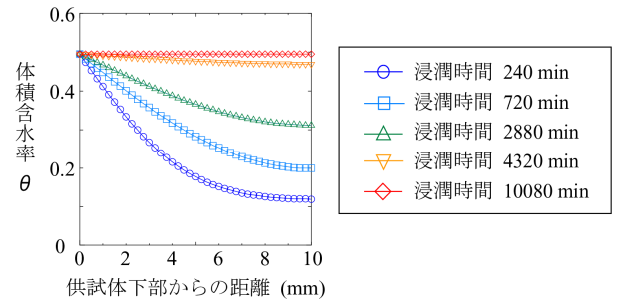


図-3 水分分布図

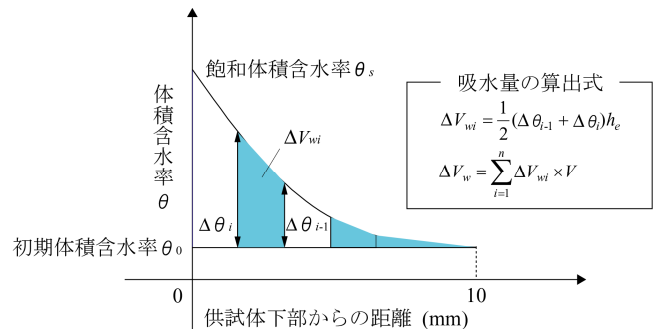


図-4 吸水量の算出方法の概略図

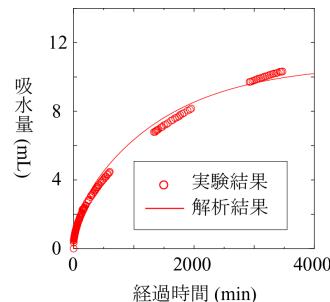


図-5 実験結果と解析結果の吸水量と経過時間の関係

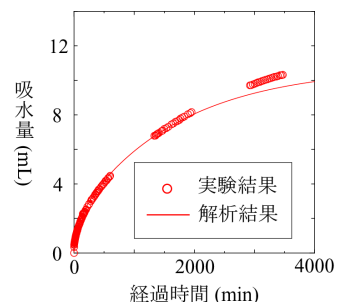


図-6 実験結果と逆解析から算出した解析結果の吸水量と経過時間の関係

ひとつとして、水分拡散係数を一定としたことによる影響が考えられることを示した。今後、水分拡散係数を体積含水率に依存する（非線形）とした場合で有限要素法による数値解析を行い、実験結果と解析結果の整合性を確認し、不飽和ベントナイト中の水分移動の評価を公演時に示す。

参考文献

- 1) 小山田拓郎, 小峯秀雄, 村上哲, 関根一郎, 関口高志, 遠藤さち恵: 不飽和状態における各種ベントナイトの水分拡散特性の評価, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.
- 2) 竹内真司, 原啓二, 中野政詩: 圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学学会論文集, vol.135, No.3, 129-137, 1995.