

水分拡散係数に着目したベントナイトの水分拡散解析に関する研究

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、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とする粘性土であり、吸水に伴い膨潤し、膨潤後は水みちとなる間隙を充填させる特性を有している。このことから、水分の通りやすさを表す水分拡散係数は、水分量に依存することが考えられる。ベントナイトの水理特性として、鈴木ら¹⁾は、水分拡散係数が体積含水率に依存し、U字型の分布を示すと報告している。一方で、長谷川²⁾は、水分拡散係数を一定値と仮定した場合においても水分拡散係数の体積含水率への依存性は無視できると報告している。以上のように、水分拡散係数は2通りの見方がされており、両者の見解に相違が生じている。

そこで、本研究では、水分拡散係数を一定およびU字型の関数とした場合で有限要素法による数値解析を行い、実験結果との比較および各解析結果の比較により、解析結果にどの程度の差が生じ、整合性が見て取れるのかを確認、考察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、支配方程式である1次元非定常拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (1)$$

ここで、 $D(\theta)$ 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中の位置、 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。

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

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

2.3 差分法による時間方向の離散化

本研究では、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。

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

ここで、 n は時間ステップ、 Δt は微小時間の増分である。

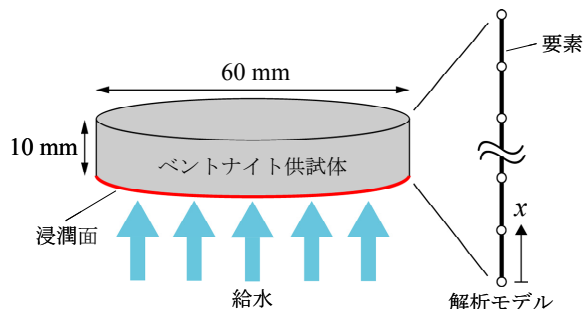


図-1 ベントナイト供試体と解析モデル

表-1 数値解析に用いるパラメータ³⁾

水分拡散係数 $D(\text{m}^2/\text{s})$	3.88×10^{-10}
初期体積含水率 θ_0	0.1502
飽和体積含水率 θ_{sat}	0.4135

2.4 非線形解析手法：ニュートン・ラプソン法

非線形方程式を行列表示で次式のように表す。

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} \boldsymbol{\theta} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\theta} - \mathbf{b} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$ は残差ベクトル、 $\mathbf{N}(\boldsymbol{\theta})$ は非線形拡散行列、 $\mathbf{b}$ は定数ベクトルである。収束限界に対する初期値依存性の影響を避けるため、初期値はゼロ値分布で統一する。また、残差ベクトル $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$ の最大値が 10^{-8} 以下になった時点で収束と判定した。

3. 水分拡散係数を一定とした場合における解析結果と実験結果との比較

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水分拡散解析を行い、小山田ら³⁾の研究から得られた実験結果と解析結果との比較を行い、整合性の確認、考察を行う。

3.1 解析モデルと解析条件

解析対象は、小山田ら³⁾の研究で用いられているベントナイト供試体であり、その供試体と水分拡散解析に用いるモデルを図-1に示す。また、解析条件として、解析時間は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。また、水分拡散解析に用いるパラメータを表-1³⁾に示す。

3.2 吸水量の実験結果と解析結果との比較

小山田ら³⁾の実験結果と解析結果をもとに作成した吸水量と経過時間の関係を図-2に示す。一般に、不飽和状態における土中では、水分拡散係数が体積含水率に依存するといわれているが、図-2に示すように、経過時間8000分以降に差が生じているものの、吸水量の

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

実験結果と解析結果に良い整合性が見て取ることができる。したがって、水分拡散係数を一定と仮定した場合においてもベントナイト供試体中の水分移動を評価できると考えられる。

4. 水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における各解析結果の比較

水分拡散係数を U 字型の関数とした場合で非線形水分拡散解析を行い、小山田ら³⁾の実験結果と解析結果との比較を行いたい。しかし、非線形水分拡散解析に用いる近似関数は、鈴木ら¹⁾が実験式として算出しているモデルを参考にしており、小山田ら³⁾と鈴木ら¹⁾は実験条件や整理方法が異なるため、前者の実験結果と解析結果との比較を行うことができない。したがって、本節では、水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における各解析結果の比較を行い、どの程度の差が生じ、整合性が取れるのかを確認、考察を行う。

4.1 近似関数の算出方法²⁾

本研究で用いる近似関数を次式に示す。

$$D(\theta) = \frac{a_1(\theta - \theta_{sat})}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_{sat})} + \frac{a_2\theta}{b_2(\theta - b_2)} \quad (5)$$

ここで、 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 は実測値によるフィッティングから得られた係数、 θ は体積含水率、 θ_{sat} は飽和体積含水率である。

4.2 水分分布の各解析結果の比較

水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における各解析結果をもとに作成した吸水量と経過時間の関係を図-3、水分分布を図-4 に示す。図-3 に示すように、吸水量に関して、経過時間初期において有意な差は見られなかったものの、経過時間の増大に伴い差が生じていることが読み取れる。図-4 に示すように、水分分布に関して、経過時間初期において差が生じているものの、経過時間の増大に伴い差が減少していることが読み取れる。吸水量に差が生じなかった要因として、水分分布の経過時間初期の部分で体積含水率の多い部分と少ない部分が打ち消し合っていることが考えられる。また、経過時間後半において水分分布の差が減少しているため、ほぼ飽和に達する時間は同程度であることが確認できる。

5. おわりに

本研究では、まず水分拡散係数を一定とした場合で水分拡散解析を行った。実験結果と解析結果に良い整合性が見て取れたため、水分拡散係数を一定と仮定した場合においてもベントナイト供試体中の水分移動を評価できることを示唆した。次に、水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における各解析結果の比較を行った。吸水量に関しては、経過時間後半に差が生じているものの、有意な差は見られなかった。水分分布に関しては、経過時間後半において差が減少しているため、ほぼ飽和に達する時間は同程度であることが確認できた。

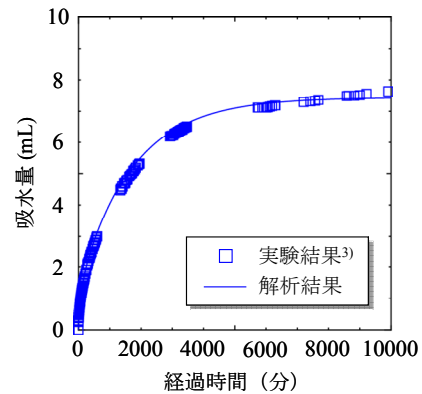


図-2 吸水量と経過時間の関係

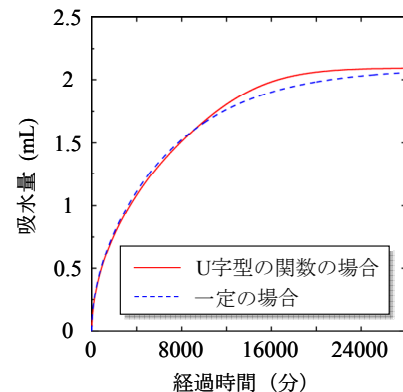


図-3 水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における吸水量と経過時間の関係

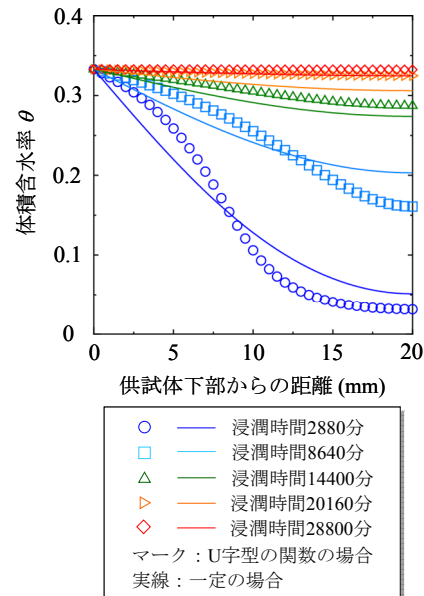


図-4 水分拡散係数を一定および U 字型の関数とした場合における水分分布図

参考文献

- 1) 鈴木英明, 藤田朝雄, 菅野毅: 緩衝材中の水分ポテンシャルと水分拡散係数, 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所公開資料, PNC TN8410 96-117, 1986.
- 2) 長谷川琢磨: ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.
- 3) 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, D-04, pp.2093-2094, 2011.