砂層をベントナイト層で挟み込む三層構造試料における水分拡散係数を用いた不飽和時の吸水量評価に関する試案

早稲田大学 学生会員 ○尾崎 匠
早稲田大学 正会員 小峯 秀雄
(株)大林組 正会員 山本 修一
早稲田大学 学生会員 浦田 智仁

１．はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し，それに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故を原因とする放射性物質による環境汚染が発生した．現在設置が決定している中間貯蔵施設には [1]，仮置きされている除染廃棄物を，最終処分場での廃棄が可能になるまでの最大 30 年間保管できる性能が必要とされている．中でも重要となるのが，外部から水が浸入し事故由来放射性廃棄物に接触することを軽減するための遮水性である．当施設では，低透水性に優れるベントナイトを用いて，覆土および遮水工を設けることとなっている．ここで使用されるベントナイトと現地発生土とを組み合わせて多層構造とすると，保水特性の異なる材料を挟み込むことにより吸水特性を変化させることができ，浸透抑制効果が向上することが考えられる．このような構造として，現在砂層をベントナイト層で挟み込む構造が有効であると考えられるため，この構造の吸水特性を定式化し算出することを目指す．本論ではその試案として砂層をベントナイト層で挟み込む三層構造供試体の吸水量を定式化し算出した上で，既存の筆者の研究 [2]で得られた実験値との比較検討を行った．

２．既往の研究における実験 [2]にて使用した粗粒土および粘性土の基本的性質

著者らのグループで進めているベントナイトに関する研究においては，モンモリロナイト含有率と交換性陽イオン組成の異なる A～E のベントナイトを選定している [3]．本研究では，その中のベントナイト B（クニミネ工業製，クニボンド）および三河珪砂 V7 号を使用した．表 1 はベントナイト B の基本的性質を示した表である．三河珪砂 V7 号の基本的性質については土粒子密度 2.65 (Mg/m^3)，自然含水比 0.0 (%)である．また，平均粒径は 0.177 (mm)，均等係数は 1.62 である．

表 1　ベントナイト B の基本的性質

タイプ	Ca 型
土粒子密度(Mg/m^3)	2.65
液性限界(%)	124.88
塑性限界(%)	52.92
塑性指数	71.96
モンモリロナイト含有率(%)	74
自然含水比(%)	12.23

３．既往の研究 [2]にて実施された吸水量測定試験の試験概要

図 1 に吸水量測定試験装置の概略図を示す．本試験では，供試体に一定鉛直圧 19.6 (kPa)を作用させた状態で二重管ビュレット(最大容量：25mL，最小目盛り 0.1mL)から供試体に給水を行った．所定の経過時間における供試体の吸水量を二重管ビュレットの目盛りを用いて目視で計測すると同時に，膨潤変形量を変位計(最大容量 25mm，最小目盛り 0.002mm)にて測定した [4]．膨潤変形がほぼ認められなくなった後に，吸水量の変化量が経過時間の水位に対してほぼ線形になった時点で，供試体内の水分分布の変化がなくなったと考え試験を終了した．今回の試験ではおよそ経過時間 4320 分まで試験を行い，経過時間に対する吸水量変化が線形になったことを確認した．使用した三層構造供試体は各層厚 10 (mm)かつベントナイト層の乾燥密度は 0.96 (Mg/m^3)，砂層の乾燥密度は 1.70 (Mg/m^3)となるように自然含水比状態で突き固めて作製したものを使用した．

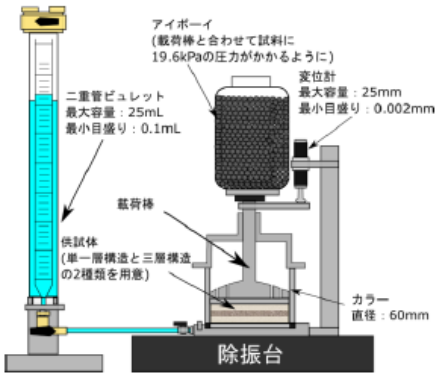

図 1　吸水量測定試験装置概略図

キーワード　ベントナイト，不飽和土，吸水膨張
連絡先　〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58-203 早稲田大学理工学術院 TEL 03-5286-2940

4．三層構造供試体における水分拡散を考慮した吸水量評価法の導入

まず既往の遠藤ら[4]および渡邊ら[5]の研究で共通する算出法に則り，既往の研究で得られたデータ[6]を用いて三層構造供試体が有する，ベントナイト層部分の水分拡散係数を算出する．この算出法[4) 5)]によれば，この試験による不飽和ベントナイト中の水の移動は式(1)の一次元拡散方程式に従うとしている．そして，ラプラス変換を用いてこの式を解くとS_e'は余誤差関数を用いて式(2)の様に表すことが出来る[7]．ここで，D：水分拡散係数，θ：体積含水率，x：供試体内における高さ，n_e'：供試体の吸水に対する有効間隙体積率（初期含水率と飽和状態の体積含水率の差），S_e'：供試体の吸水に対する有効飽和度，である．

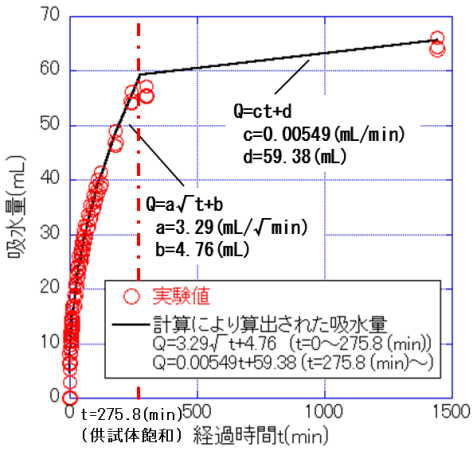

図 2　定数 a，b の算出および整合性

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=D\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\Leftrightarrow n_e'\frac{\partial S_e'}{\partial t}-n_e'D\frac{\partial^2 S_e'}{\partial x^2}=0 \quad \cdots \quad (1) \qquad S_e'(x,t)=erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \cdots \quad (2)$$

これにより供試体に流入する水のフラックス F は式(3)の様に表せるので，当試験で得られる吸水量 Q は式(4)で表せる．今回は拡散係数でなく定数 a，b を求め利用する．ここで，A：供試体底面積，である．

$$\mathrm{F}=\mathrm{D}\frac{\partial\theta}{\partial x}=n_e'\mathrm{D}\frac{\partial S_e'}{\partial x}\bigg|_{x=0}=n_e'\sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad \cdots \quad (3) \qquad \mathrm{Q}=2\mathrm{A}n_e'\sqrt{\frac{D}{\pi}}\sqrt{t}=\mathrm{a}\sqrt{t}+b \quad \cdots \quad (4)$$

ベントナイト単体に関しては既往のデータ[2)]を用いて計算比較すると図 2 に示す結果となり，a=3.29，b=4.76 が得られる．図 2 において勾配が変化した点は供試体が飽和した点であり，これは膨潤を考慮した供試体の空隙体積から求めた．図 2 から，既往のデータ[2)]と式(1)～(4)による計算結果が比較的良好に整合していると分かる．

ここで求めた a および b を利用して三層構造での吸水量を推定する．水分移動の挙動に関しては既往の筆者の研究[6)]における考察を参考に，下部ベントナイト層が飽和するまでは水が拡散的に供試体内に広がり，それ以降は砂層の低サクションにより下部ベントナイト層の低い透水係数に吸水量は支配される移動になると仮定し，計算を行った．このようにして計算された理論値と既往の筆者の研究[2)]で得た実験値の比較を図 3 に示す．図 3 より計算結果は概ね良好な結果が得られていると考えられる．この図 3 で実験値の勾配が変化したのは t=1440 (min)の地点であったが，供試体全体が飽和するまでの時間がやや短く見積もられているとわかるため，勾配の変化点に関しては検討の余地があると考えられる．

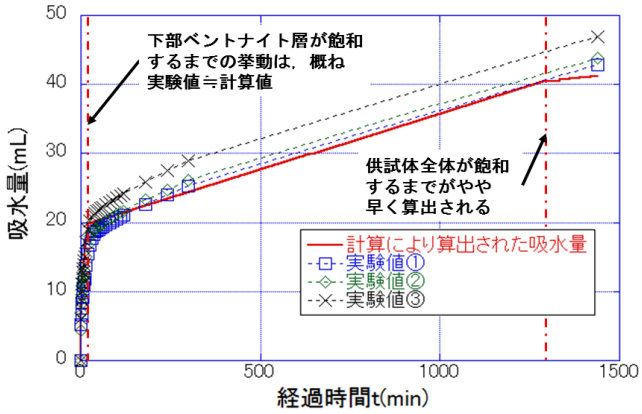

図 3　吸水量の理論値と実験値の比較(三層構造)

5．結論および今後の展望

今回の試験より，三層構造供試体による吸水量測定試験の結果は，単一層の試験結果をもとに今回の条件下では良好な精度で再現が可能であることがわかった．さらに，供試体全体が飽和する経過時間に関して検討を行うことで精度が向上する可能性も示唆された．下部ベントナイト層飽和後の吸水挙動に関しては中間砂層および上部ベントナイト層の条件によって変化する可能性があるため，今後検討の余地があると考えられる．

参考文献　1) 環境省：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について，2011, 10, 29　2) 尾崎匠，小峯秀雄，山本修一，浦田智仁：砂層をベントナイト層で挟み込む三層遮水構造における砂層の粒径が吸水・膨潤特性に及ぼす影響の考察，第 52 回地盤工学研究発表会（投稿中）3) 直井優，小峯秀雄，安原一哉，村上哲，百瀬和夫，坂上武晴：各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響，土木学会論文集 No. 785/III-70, 39-49, 2005.03. 4) 遠藤さち恵，小峯秀雄，安原一哉，村上哲，関口高志，関根一郎：不飽和ベントナイトの吸水量と膨潤圧の同時測定可能な新しい実験手法の提案と水分拡散係数の評価，土木学会第 65 回年次学術講演会，CS7-021，2010. 5) 渡邊義仁，車谷麻緒，小山田拓郎，小峯秀雄：ベントナイトの水分拡散解析に関する基礎的研究，第 39 回土木学会関東支部関東技術研究発表会 6) 尾崎匠，小峯秀雄，山本修一，浦田智仁：粗粒材と粘性土で構成される覆土式遮水構造の設計に向けた砂層をベントナイト層で挟み込む三層構造の吸水・膨潤特性評価，第 51 回地盤工学研究発表会 7) 齋藤大作，星清：移流拡散方程式の解析解(1)，開発土木研究所月報 pp13-19，No.533，1997，10