

ベントナイトの吸水試験・浸潤試験の再現解析による妥当性検証

大林組 正会員 ○白河部 匠

正会員 佐藤 伸

正会員 山本 修一

早稲田大学 正会員 小峯 秀雄

1. はじめに

地層処分におけるベントナイト系緩衝材の水分移行特性を室内試験から明らかにする方法として、吸水試験による供試体への吸水量変化と浸潤試験による供試体内部の水分分布から水分拡散係数を理論的に算出する方法が提案されている¹⁾。一方、ベントナイトの水分移行予測においては、熱・水・応力連成解析等が用いられる²⁾。本研究では、2つの室内試験を対象に熱・水・応力連成解析コードを用いて力学連成二層流解析を実施し、2つの室内試験に対する水分移行特性の理論的解釈の妥当性を検証した。

2. 吸水試験・浸潤試験の方法および試験結果の理論的解釈方法

本研究で対象とした材料は、クミネ工業製のNa型ベントナイト(クニゲルV1)に対して、供試体高さ20mm、直径28mm、乾燥密度を 1.5 Mg/m^3 に締め固めたものである。吸水試験は、図1のように、これらの供試体の体積一定のもと、供試体下部に接続した二重管ビュレットから蒸留水を給水して、ビュレットの水位差から吸水量 Q を測定した。また、浸潤試験は供試体の水分分布を求めるため、所定の時間が経過した後、供試体を10等分にして供試体の飽和度分布を求めた。得られた吸水量の経時変化から一定飽和度の範囲内における水分拡散係数を算出する方法として式(1)、水分分布から水分拡散係数を算出する式として式(2)が提案されている。式(1)、式(2)の導出に関する詳細は、筆者らによる文献¹⁾を参照していただきたい。

$$D = \pi \left(\frac{a}{2An'_e} \right)^2 \quad \text{式(1)}$$

$$D(\theta_x) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\chi}{d\theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_0}^{\theta_x} \chi d\theta \quad \text{式(2)}$$

D , $D(\theta_x)$: 水分拡散係数, A : 供試体の面積, n'_e : 供試体の吸水に対する有効間隙体積率, χ : ボルツマン変換に用いる定数, θ_x : x における体積含水率, a , θ_0 : 試験結果から得られる定数とする。

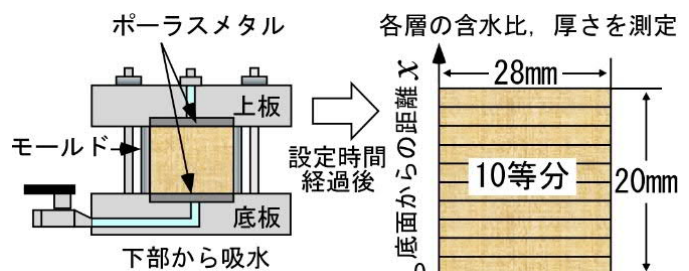


図1 吸水試験・浸潤試験の概略図

3. 再現解析のモデル化概要

本試験の再現解析には、熱・水・応力連成解析コードCODE_BRIGHT²⁾を用いた。解析モデルは、図2のように供試体の半断面を軸対象モデルでモデル化し、要素分割を $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ とした。本研究の水分移行のモデルパラメータである2相流曲線を、図3に示す。本試験の供試体は乾燥密度 1.5 Mg/m^3 であるが、解析におけるVan Genuchtenの式のパラメータは、佐藤ら³⁾が取得した7:3のベントナイト・砂混合土の乾燥密度 1.6 Mg/m^3 の水分特性曲線を援用した。また、相対浸透率は林ら⁴⁾が取得した乾燥密度 1.6 Mg/m^3 のクニゲルGXに対するパラメータを用いた。力学パラメータは、山本ら⁵⁾の文献をもとに小峯の膨潤評価式から不飽和パラメータを設定した。

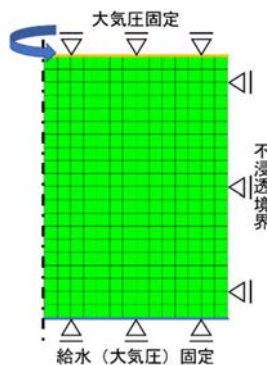


図2 解析モデル

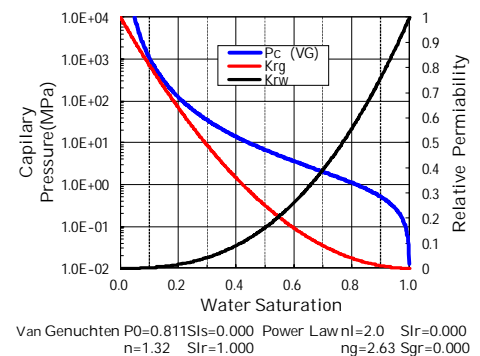


図3 二層流パラメータ

キーワード ベントナイト, 水分移行特性, 熱・水・応力連成解析

連絡先 〒108-8502 東京都港区2-15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組 TEL070-1003-4043

4. 吸水試験・浸潤試験の結果および再現解析による妥当性検証

吸水試験において測定した吸水量の経時変化と浸潤試験において測定した層ごとの含水比の経時変化を図4に示す。吸水試験の結果として、給水後、時間が経過するにつれて、吸水量 Q の変化は徐々に小さくなることが分かった。浸潤試験の結果として層ごとの含水比分布は、供試体下部の方が早く浸潤して、給水につれて供試体上部の含水比が徐々に高くなることが確認された。

図5は、浸潤試験によって得られた層ごとの飽和度分布と再現解析の比較である。本試験では、供試体の端部の層を切り分ける際、ろ紙に吸着する試料があり十分な精度で体積を測定できなかったため、供試体端部を除いた8層分を用いて比較した。吸水初期の飽和度は、解析結果よりも実測値の方が小さいが、解析結果が実測値に対して、おおむね良好な再現性を示していることが分かった。

図6は、吸水試験・浸潤試験の結果を用いて、式(1)および式(2)より求めた水分拡散係数から算出した吸水量と飽和度の経時変化と解析結果の比較である。図6の飽和度はすべて供試体全体の値を示しており、解析結果は解析モデル全体の平均値を示している。また、図中の赤い点線は式(2)において、 χ と θ_x の関係を求める際に、試験値のばらつきを考慮したうえでフィッティングして求めた水分拡散係数から求めた飽和度である。式(1)から求めた吸水量の理論値(吸水試験_理論値)は、実測値(吸水試験_実測値)を良好に再現していることが確認された。上記について解析結果と比較すると、試験開始から4日程度まで解析結果の方が、吸水量の実測値より大きく、その後は解析結果の方が小さくなった。一方、浸潤試験の結果を用いて、式(2)から求めた飽和度の理論値(浸潤試験_理論値)は、実測値(浸潤試験_実測値)とおおむね整合した。また、解析結果も実測値を良好に再現しており、解析結果がばらつきを考慮した理論値の間に含まれることが確認された。

5. まとめ

本研究におけるベントナイトの水分移行の再現解析によって、解析結果と浸潤試験による水分分布の結果、全体の飽和度の変化および浸潤試験による理論値とおおむね整合することが分かった。また、吸水試験の理論値も、実測値を再現していることが確認しており、再現解析の結果ともおおむね整合したことが分かった。これより、吸水試験、浸潤試験から得られた水分拡散係数による水分移行特性の評価に対する有用性を示した。

参考文献 1) 白河部匠, 王海龍, 後藤茂, 山本修一, 小峯秀雄: 不飽和ベントナイトの水分移動特性に及ぼす温度履歴の影響評価, 土木学会論文集(投稿中), 2) UPC: CODE_BRIGHT User's Guide 2020., 3) 佐藤伸, 山本修一, 西村友良, Enrique Romero: ベントナイト・砂混合土のヒステリシス水分特性の取得と適用性検証, 第52回地盤工学研究発表会論文集, 2017, 4) 林秀郎, 竹内邦文, 山本修一, 伊藤裕紀, 谷智之: 余裕深度処分施設におけるベントナイト層の飽和期間に関する検討, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007, 5) 山本修一, 佐藤伸, 志村友行, Romero, E., 西村友良, 大和田仁: サクション制御試験に基づくベントナイト系人工バリア材の不飽和力学特性と保水性, 土木学会論文集C(地圏工学), 75巻3号, pp. 257-272, 2019.

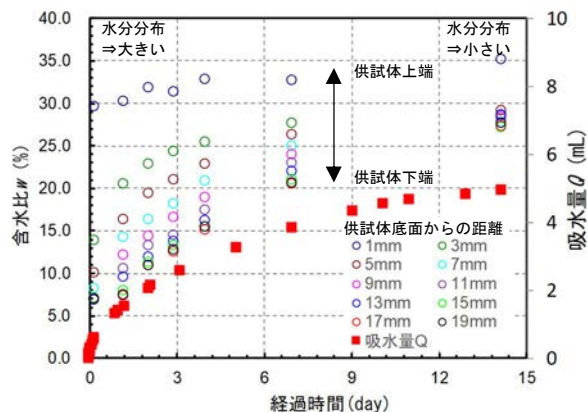


図4 吸水試験および浸潤試験の結果

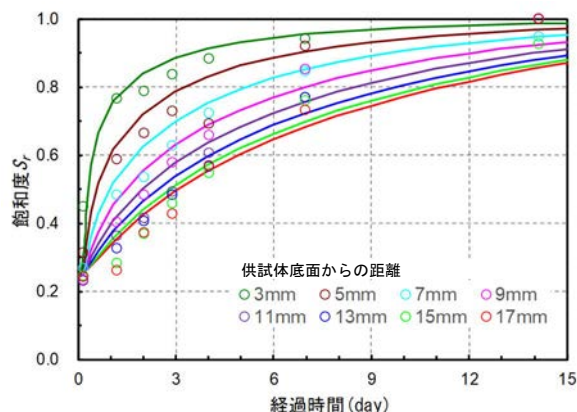


図5 飽和度の経時変化における再現解析

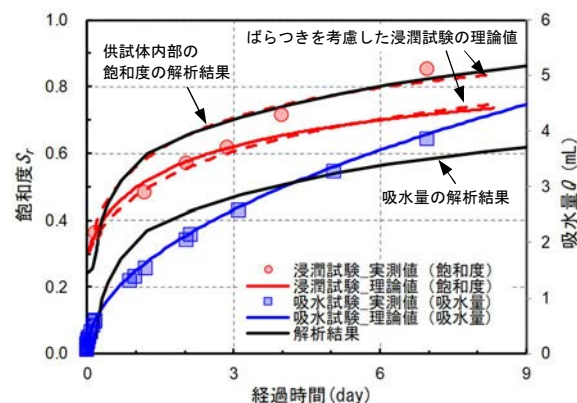


図6 各試験の理論的解釈と再現解析の比較