ベントナイト・砂混合土の水分保持特性に関する Kita-Sako モデルの適用性に関する一考察

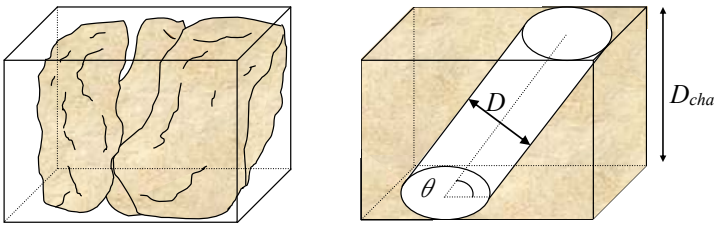
（株）大林組　正会員　○森岩　寛稀，佐藤　伸，深谷　正明，山本　修一
鹿児島大学　正会員　酒匂　一成，北村　良介

１．はじめに

放射性廃棄物施設の安全性評価には，THM 連成解析が用いられることが多い。解析を実施するには施設の人工バリアに使用されるベントナイト系材料(緩衝材)に関する水分特性曲線を把握することが重要であるが，ベントナイトなどの細粒分を含む土の保水性試験は，非常に試験時間が長いなどの課題がある。そこで，本研究では，間隙比および粒径加積曲線の一般的な土質試験結果から水分特性曲線を推定できる Kita-Sako モデル[1)]を用いて，ベントナイト・砂混合土の水分特性曲線に対するモデルの適用性について検証した。

２．Kita-Sako モデルの概要

図-1 に Kita-Sako モデルの考え方を示す。**図-1(a)** は数個の土粒子からなる一要素を示しており，間隙部分を管径 D と傾き θ の円管とし，土粒子部分を円管以外の不透水性の固体とモデル化したものを素体積（**図-1(b)**）と称す。間隙の複雑さを表現するため，管径 D と傾き θ を確率変数とし，確率的考察により次式が得られる。



(a)　数個の土粒子からなる一要素　　(b)　モデル化された一要素（素体積）

図-1　間隙のモデル化

$$W_v=\frac{e(d)}{1+e}=\frac{1}{1+e}\int_0^d\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\frac{V_p}{V\text{-}V_p}P_d(D)P_c(\theta)\,\mathrm{d}\theta\mathrm{d}D \qquad (1)$$

$$s_u=\gamma_w\cdot h_c=\frac{4\cdot T_s\cdot\cos\alpha}{d} \qquad (2)$$

ここに，d：間隙水を保持する円管の最大管径，$P_d(D)$：円管の管径 D の確率密度関数，$P_c(\theta)$：円管の傾き θ の確率密度関数，D_{cha}：素体積高さ（$=D_{10}$，**図-1(b)**）。

本モデルでは，円管の管径 D の確率密度関数，$P_d(D)$（間隙径分布）を粒度分布および間隙比から推定している。粒度分布が対数正規分布で近似でき，間隙径分布も対数正規分布で表され，それらの変動係数が一定（すなわち，粒度分布と間隙径分布の累積分布が平行）と仮定している。

３．ベントナイト・砂混合土の水分特性曲線と Kita-Sako モデルの計算結果

本研究で対象とする試料は，緩衝材の候補材料である Na 型ベントナイト（クニゲル V1）とケイ砂を乾燥重量比で 7:3 の割合で混合し，乾燥密度 ρ_d=1.6Mg/m^3 で締め固めたものである。ケイ砂は 5 号と 7 号を重量比で 1：1 になるように混合している。水分特性曲線は，佐藤ら[2)]により，露点サーモサイクルポテンシャル測定装置（デカゴン社製，WP4-T）を用いて計測されたもので

表-1　Kita-Sako モデルの入力パラメータ

土粒子密度（g/cm^3）	2.76
間隙比	0.725
水の表面張力(N/m)（水温：15℃）	73.48×10^{-3}
水の粘性係数(Pa・s)（水温：15℃）	1.138×10^{-3}
粒径加積曲線データ	
粒径（mm）	通過質量百分率（%）
0.800	100.00
0.425	99.99
0.250	72.91
0.106	71.00
0.075	70.02
0.0457	69.49
0.0205	66.01
0.0119	62.54
0.0084	59.06
0.0012	48.64

あり，図-2 に示す。試験結果は，初期含水比 w_0 から脱水側のポテンシャルを与えた後に WP4-T で計測した結果である。WP4-T からは Total suction が計測されるが，飽和時の供試体のポテンシャルを Osmotic suction として，Matric suction を得ている。これらの結果に対し，Kita-Sako モデルの適用性を検討する。表-1 に Kita-Sako モデルの入力パラメータを示す。今回の計算では，試験試料の粒径加積曲線が得られていなかったため，ベントナイトと豊浦砂で模擬した曲線を用いた。図-2 より，計算結果は，試験結果よりもやや低い保水性を示している。また，試験結果は高飽和度領域で計算結果よりも高い保水性を示しており，この差はベントナイトとケイ砂の 2 種類の粒度分布の傾向を持った混合土の粒径加積曲線を，本モデルでは対数正規分布で近似しているためと思われる。

次に，山本ら[3]による水銀圧入法による細孔分布計測結果（図-3）と Kita-Sako モデルで用いられる間隙径分布（図-4）の比較を行う。図より，細孔径分布の試験結果では，水銀に加えられる圧力に対応した間隙径とそのときの水銀流入量による間隙体積の変化量で表され，10^2～10^3nm の間隙径の際にピークが表れることがわかる。また，3×10^2nm の間隙径にもピークが見られる。一方で，Kita-Sako モデルによる計算結果を図-4 に示す。この結果は，図-1(b)に示す円管の直径とその発生確率を示し，10^{-2}～10^{-3}nm の円管径の発生確率が高いことがわかるが，試験結果よりだいぶ小さい径である。これは，細孔径分布とモデルの間隙径の定義が異なるためと考えられる。また，細孔径分布で見られる 2 つのピークが，モデルの結果で見られないが，これは対数正規分布を用いているためと考えられる。

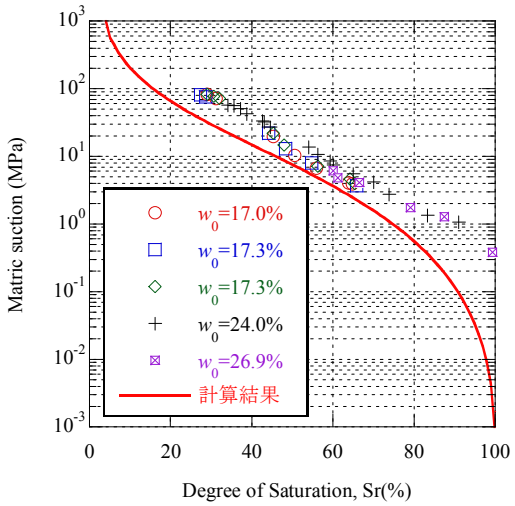


図-2 クニゲル V1 ベントナイトとケイ砂の混合土の水分特性曲線

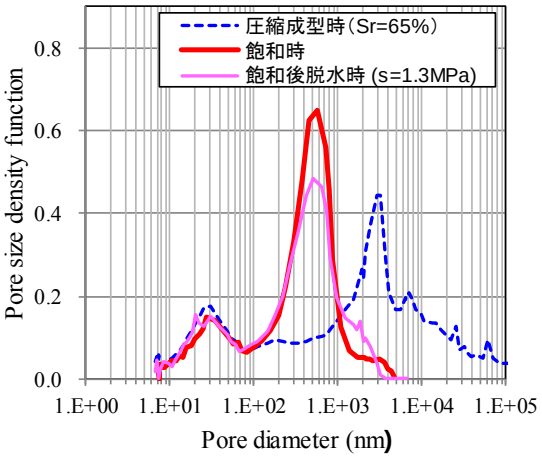


図-3 細孔分布の試験結果[3]

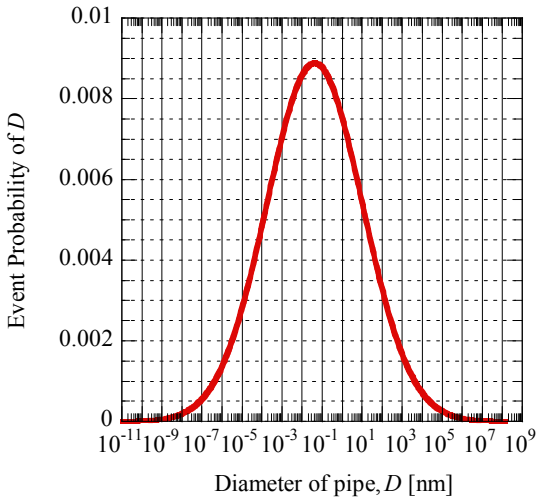


図-4 円管の管径 D の発生確率

4．おわりに

本研究の結果として，Kita-Sako モデルで，間隙比と粒径加積曲線から，緩衝材の候補材料の水分特性曲線を推定できる可能性を示すことができた。今後，さらに推定精度の向上のため，粒径加積曲線の近似方法や細孔径分布の試験結果との比較方法について，さらに検討を行いたい。

参考文献

1) K. Sako and R. Kitamura: A Practical Numerical Model for Seepage Behavior of Unsaturated Soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
2) 佐藤伸，山本修一，西村友良，E. 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講演概要集，pp.2059-2060，2017.
3) 山本修一，佐藤伸，E. Romero：ベントナイト・砂混合土のヒステリシス水分特性と微視的間隙構造変化，第 52 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2061-2062，2017.