

WP4C を用いたベントナイト珪砂混合土の水分特性曲線パラメータの推定方法の検討

鹿児島大学工学部 学生会員 ○高橋かなた
 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 伊藤真一, 酒匂一成
 鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 森田司, 高田雄大

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分を行う際、放射性廃棄物は緩衝材で覆われるが、その緩衝材には高い遮水機能が求められ、ベントナイトと珪砂を混ぜ合わせたベントナイト珪砂混合土が使用されることが多い。ベントナイト珪砂混合土が緩衝材として長期的に機能するかを評価するために、THM 連成解析による安全性評価¹⁾が行われている。その際、ベントナイト珪砂混合土の水の流動特性を把握することは重要であり、そのためには水分特性曲線の推定が必要となる。ここで、ベントナイト珪砂混合土は保水性が高いため、水分特性曲線を得るためには高サクシオン域の測定が可能な保水性試験を行う必要があり、また、THM 連成解析を行うためには、水分特性曲線を関数として求める必要がある。本研究では、WP4C を用いて保水性試験を行い、得られた試験結果から水分特性曲線モデルにおけるパラメータを推定する方法について検討する。

2. WP4C による保水性試験

WP4C(decagon 社製)は、チルドミラー露点法を採用しており、供試体の水ポテンシャルを測定する。WP4C はマトリックサクシオンとオスモティックサクシオンの和であるトータルサクシオンを測定する。水分特性曲線を得るためには、計測されたトータルサクシオンからオスモティックサクシオンを差し引いたマトリックサクシオンを得る必要があり、オスモティックサクシオンは、式(1)のように表される。

$$\varphi_o = \varphi_{os} \frac{\theta_s}{\theta} \quad (1)$$

ここで、 φ_o はオスモティックサクシオン、 φ_{os} は飽和時の水ポテンシャル、 θ_s は飽和時の体積含水率、 θ は測定時の体積含水率である。本研究では、飽和度 100%の供試体を複数個作製して WP4C によって水ポ

テンシャルを測定し、その水ポテンシャルの平均値を φ_{os} とした。表-1 は本研究における試験試料の物理的特性を示している。表-1 に示す混合比で間隙比が $e=1.0$ となるように供試体を作製した。供試体の作製方法に関しては、2 種類の方法を検討した。1 つ目は、飽和度毎に供試体を作製してサクシオンを測定する方法(以下、Case1)であり、2 つ目は、高飽和度の供試体を作製し時間をおくことで供試体を乾燥させ含水比ごとのサクシオンを測定する方法(以下、Case2)である。図-1 は WP4C による保水性試験の結果を示している。Case1 の条件で実験を行った場合は広範囲の飽和度のプロットを得ることができたのに対して、Case2 では供試体を乾燥させる過程でひび割れが生じて、含水比の小さいプロットを得られないという結果になった。以上のことから、WP4C を用いたベントナイト珪砂混合土の水分特性曲線の推定には、Case1 の方が適していると考えられる。

表-1 試料試験の物理的特性

	ベントナイト	珪砂3号	珪砂5号
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.60	2.63	2.61
混合比 (%)	70	15	15
ベントナイト珪砂混合土			
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.61		
間隙比 e	1.0		

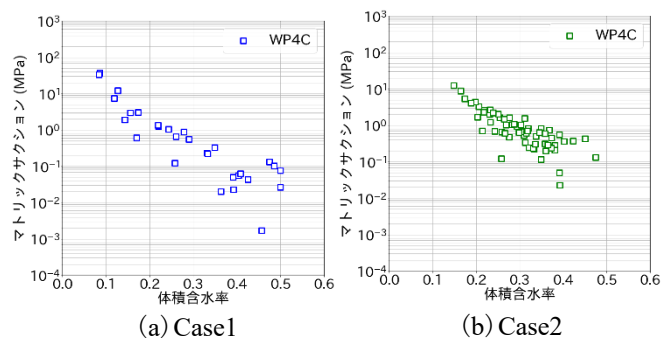


図-1 WP4C による計測データ

3. 非線形局所最適化法による水分特性曲線の推定

数値解析シミュレーションを行うためには、水分特性曲線のプロットを関数として表す必要がある。本研究では、式(2)に示す van Genuchten モデルに対する試験結果のフィッティングを試みた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (2)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 α 、 n はモデルの形状を決定するパラメータ、 ψ は圧力水頭である。この中で θ_r 、 θ_s 、 α 、 n の4つが未知パラメータであり、まずは、非線形局所最適化法の一つである Levenberg-Marquardt 法 (以下、L-M 法) を用いてモデルパラメータの推定を試みた。図-2 は L-M 法を用いてパラメータを推定して得られた水分特性曲線を示している。なお、供試体作製時の間隙比 $e=1.0$ から飽和体積含水率は $\theta_s=0.5$ としている。図-2 の結果から、どちらの Case においても、推定された水分特性曲線は高サクション域で体積含水率がマイナスの値になっており物理的にあり得ないパラメータ ($\theta_r < 0$) が推定されている。以上の結果より、局所最適化法を用いると、局所解に収束してしまい水分特性曲線のモデルパラメータを適切に推定できない場合があることがわかった。

4. MCMC 法による水分特性曲線の事後分布推定

次に、土の不均質性も考慮してパラメータを確率的に推定する手法として、Markov Chain Monte Carlo 法 (以下、MCMC 法) の適用を試みた。MCMC 法は、マルコフ連鎖とモンテカルロ法を組み合わせた手法であり、パラメータを大域的に探索しデータに基づいて事後分布を推定することができるベイズ推定の手法の一つである。本研究では MCMC 法の計算の繰り返し回数は 100,000 回とした。図-3 は MCMC 法によって推定された水分特性曲線の事後分布を示している。図中の実線が水分特性曲線の平均 μ を表しており、破線は $\mu \pm \sigma$ の範囲を表している。図-3 の結果より、どちらの Case においても保水性試験の結果を概ね再現できる水分特性曲線を確率分布として推

定できていることがわかる。WP4C による保水性試験では、試験中の供試体作製時などに誤差が生じ、試験結果がばらつくことがあるため、水分特性曲線モデルのパラメータを推定するための方法として、MCMC 法のような確率的な幅を考慮できる方法の適用が有効であると考えられる。

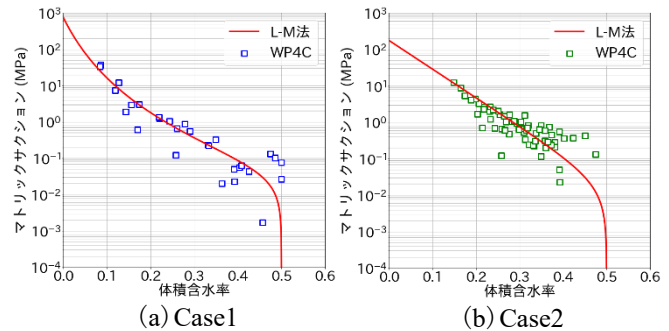


図-2 L-M 法による水分特性曲線

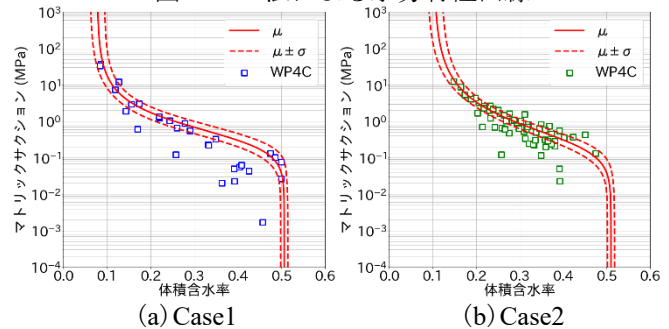


図-3 MCMC 法による水分特性曲線

5. おわりに

本研究では、ベントナイト珪砂混合土の水分特性曲線の推定を目的とし、WP4C 試験で得られた結果に基づいて水分特性曲線のモデルパラメータを推定する方法について検討した。まず、局所最適化法による水分特性曲線モデルのパラメータを推定したが、局所解に収束してしまい、物理的にあり得ないパラメータを推定してしまう場合があることが分かった。そこで、パラメータを確率分布として推定するベイズ推定に着目し、MCMC 法を用いた水分特性曲線の推定を試みた。その結果、Case1 と Case2 のどちらに対しても、試験結果を概ね再現した水分特性曲線の事後分布を推定できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 操上広志ほか：高レベル放射性廃棄物の地層処分における連成現象の地下水流れ，土木学会論文集，No.736，3-63，261-271，2003.