

ベントナイト・砂混合土のサクシヨン制御不飽和透水試験の試み
(その2) 気液二相流シミュレーションによる試験の適用性について

(株) 大林組 正会員 ○山本 修一 正会員 森岩 寛稀 正会員 佐藤 伸
足利大学 正会員 西村 友良

1. 目的

本研究では、(その1) 研究¹⁾で行ったサクシヨン制御不飽和透水試験の気液二相流モデルによるシミュレーション解析を行い、提案する不飽和透水試験における供試体内の飽和度分布や流速分布を考察するとともに、試験で評価される透水係数と供試体の真の物性値との相違の程度を調べ、本試験法の相対透水係数評価への適用性を確認した。

2. 解析方法

解析は気液二相流の軸対称モデルにより試験条件を可能な限り忠実にモデル化して行った。解析の初期条件、境界条件、有限要素メッシュを図-1に、用いた物性値を表-1に示す。固有透過係数は本試験で得られた飽和透水係数 (5.62×10^{-12} m/s) に基づいて設定した。また、水相の相対透水係数は本試験結果の近似曲線(後段、図-5の破線)を用いた。水分特性曲線は同じ仕様の供試体に対して行われた保水性試験の結果²⁾を van Genuchten モデル³⁾(以下、vGモデル)により最小二乗近似した曲線(図-3の実線)を用いた。なお、使用した解析コードは熱・水理(気液二相流)・力学連成 FEM 解析コード Code_Bright⁵⁾である。

3. 解析結果

解析においては、所定のサクシヨンを付与して80日経過後には全てのサクシヨン(20, 60, 100, 400 kPa)のケースにおいて定常状態に達した。付与サクシヨン 60 kPa の場合を例として、定常状態における水の流速ベクトルと飽和度分布を図-2に示す。透水(流入側)は仕切り板の近傍において外側に向かう相対的に速い流れが見られるものの、仕切り板より6 mm(3メッシュ分)程度以上内側は鉛直一次元流とみなせる流れであることがわかる。他のサクシヨン(20, 60, 400 kPa)の場合も全く同様であった。飽和度は供試体内部で完全に様な分布にはならないが、73.9~75.7%の範囲(2%程度の幅の中)に分布しており、平均値は74.8%であった。サクシヨン60 kPaに対しては飽和度74.4%で平衡する材料特性が与えられているので、これを考慮すれば、このサクシヨン制御透水試験システム内の供試体は、上下端境界で付与したサクシヨンに対応する様に近い飽和度分布になっていると言える。

図-3に、定常状態における供試体内の平均飽和度と付与サクシヨンの関係(プロット)を、材料特性として与えた水分特性曲線(実線)とともに示す。両者がよく一致していることから、先に述べた通り、供試体内は平均的には上下端境界で付与したサクシヨンに対応する飽和度になっていると理解できる。

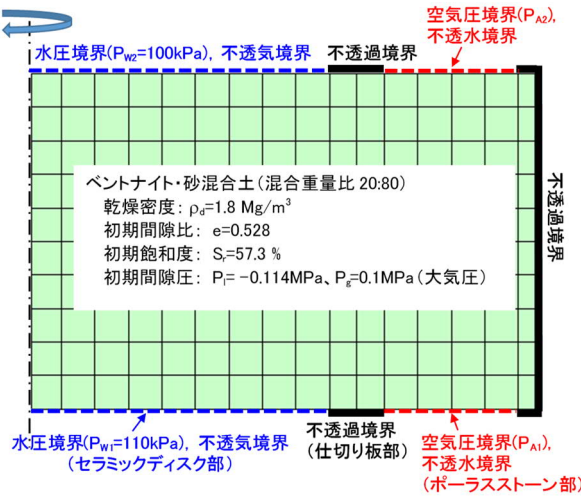


図-1 解析の初期条件、境界条件、FEMメッシュ

表-1 気液二相流解析に用いた物性値

固有透過係数 K (m ³)	5.50×10^{-19}
水の残留飽和度 S_{lr}	0
水の最大飽和度 S_{ls}	1
水分特性 (van Genuchten モデル ³⁾) $s = P_0 \left(S_e^{n/(1-n)} - 1 \right)^{1/n}$, $S_e = (S - S_{lr}) / (S_{ls} - S_{lr})$	$P_0 = 0.0214$ (MPa) $n = 1.24$
水相の相対透過係数 (van Genuchten モデル ³⁾) $k_{rw} = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$	$m = 0.969$
気相の相対透過係数 (Grantモデル ⁴⁾) $k_{ra} = 1 - k_{rw}$	-

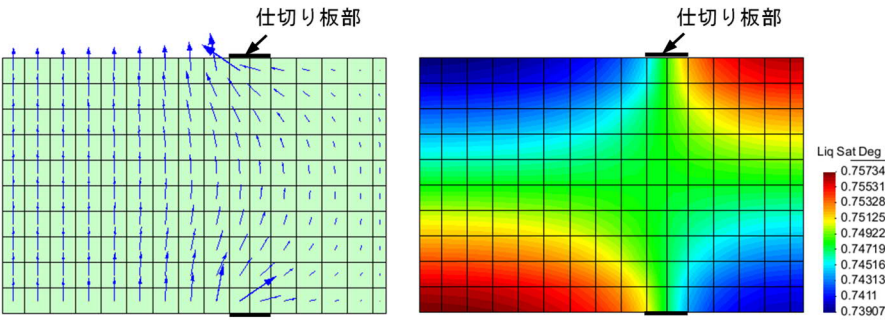


図-2 定常状態における透水流速分布(左)と飽和度分布(右)

キーワード ベントナイト, 不飽和透水試験, サクシヨン制御試験, 相対透水係数, 放射性廃棄物処分, 緩衝材
連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 原子力本部 Tel. 090-3473-7508

図-4は上下端境界で付与したサクションと定常時の透水係数との関係を示している。透水係数は、セラミックディスク部からの透水流量および上下端境界で付与した動水勾配から算定したものである。破線は材料物性値として与えた特性を示しているが、解析結果（青プロット）が与えた物性値と概ね一致することから、このサクション制御透水試験システムにおいて上下端境界の定常透水流量から算定される透水係数は、付与したサクションに対応する材料自身の透水係数を概ね表していると言える。なお、解析結果（青プロット）の透水係数が材料物性値より少し大きめに評価されているのは、図-2の流速ベクトルで見られた仕切り板近傍での透水の乱れに伴う透水量の増大によるものである。

図-5に、相対透水係数に着目して、解析結果ならびに試験結果とそのvGモデルによる最小二乗近似曲線（解析物性値として使用）を示す。試験結果と解析結果の横軸は、定常状態における供試体内の平均的な飽和度で、縦軸は、セラミックディスク部からの透水流量および上下端境界で付与した動水勾配から算定された透水係数である。解析結果（青プロット）が与えた物性値（破線）とほぼ一致していることから、このサクション制御透水試験システムにより、供試体材料の相対透水係数曲線を適切に計測評価できることがわかる。

本サクション制御透水試験システムでは、仕切り板近傍で流れが乱れ、流速が増大して透水係数をやや高めに評価することが明らかになった。この乱れの影響を排除してより正確な透水係数を取得するために、上部（下流側）のセラミックディスク部に内側と外側とで透水量を分けて測れる仕切り板（分割仕切り板）を設け、透水の乱れのない内側部分だけの透水量を計測して評価する方法が考えられる。そのような試験システムを想定した透水試験をシミュレーション解析した結果を図-6、図-4（×プロット）に示す。図-6の流速ベクトル（サクション60 kPaの場合を例示）からは、分割仕切り板より内側は鉛直方向の一次元流が達成されていること、従って、図-4に見られるようにサクションと透水係数の関係は材料特性とよく一致するということがわかる。提案試験システムで分割仕切り板より内側の透水流量を計測することにより、供試体材料の透水係数をより正しく計測評価できると言える。

4. まとめ

提案のサクション制御不飽和透水試験法について、①定常時に供試体内は付与サクションに応じた一様に近い飽和度となる、②仕切り板近傍では透水に多少の乱れはあるもの主要な透水領域は鉛直一次元流とみなせる、などが明らかとなり相対透水係数（不飽和透水係数）評価への適用性・有用性が確認された。

参考文献

- 1) 森岩, 山本, 佐藤, 西村: ベントナイト・砂混合土のサクション制御不飽和透水試験の試み - (その1) 試験概要と試験結果, 土木学会第78回年次学術講演会, 2023.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成13年度地層処分経済性向上調査, 人工バリア・天然バリアのガス移行挙動の評価報告書, 平成14年3月, 2016.
- 3) van Genuchten, M.T.: A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980.
- 4) Grant, M. A.: Geothermal reservoir engineering, Academic Press, New York, 1982.
- 5) Olivella, S. Vaunat, J. and Rodriguez-Dono, A.: Code_Bright 2022 User's Guide, 2022.

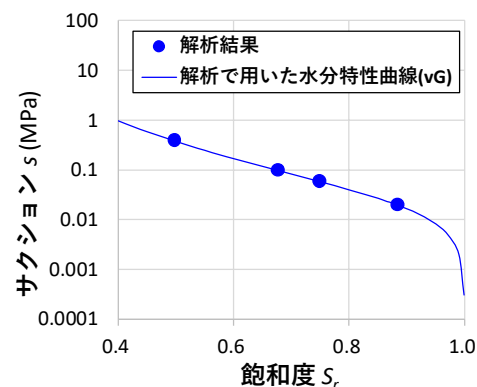


図-3 供試体内の平均飽和度と付与サクションの関係

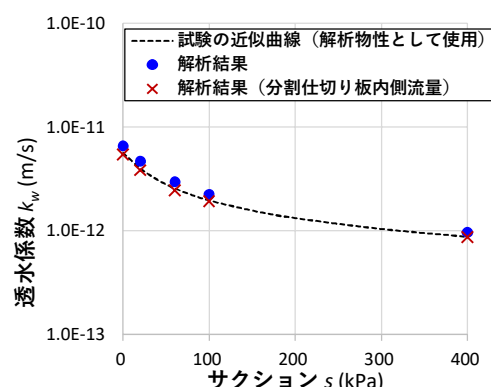


図-4 付与サクションと透水係数の関係

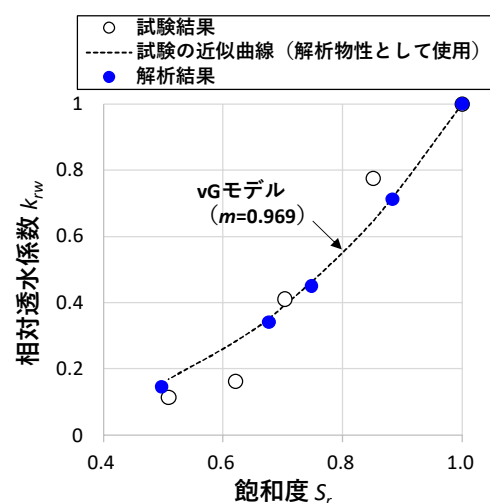


図-5 供試体内の平均飽和度と相対透水係数の関係

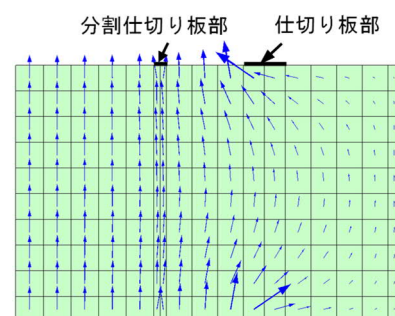


図-6 上部セラミックディスクに分割仕切り板を設けた場合の透水流速分布例