

ベントナイト・砂混合土のサクシオ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

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

1. 目的

放射性廃棄物の地層処分においては、処分場閉鎖後に起こる再冠水時の人工バリアの熱・水理・力学 (THM: Thermo-Hydro-Mechanical) 連成挙動の適切な評価が、処分システムの安全評価の初期条件を決定するという意味で大変重要な課題である。既往の研究成果から再冠水におけるベントナイト系人工バリアの THM 連成挙動には間隙空気 (空気圧) が大きな影響を及ぼすことが明らかになってきており、THM の H (水理) 挙動の理解には水蒸気や空気の溶存・拡散を含む気液二相流モデル適用の必要性が指摘されている¹⁾²⁾。気液二相流解析においては、媒体の固有透過度や水分特性と同様に相対透過係数 (気相、液相) の設定が解析結果に大きな影響を及ぼすが、特に液相の相対透過係数は試験の困難さから一般的には媒体の飽和過程 (非定常状態) の試験結果をフィッティングして同定するなど間接的な手法による評価が行われているのが現状である³⁾⁴⁾。

本研究 (その1) では、ベントナイト系人工バリアを想定したベントナイト・砂混合土に対して、加圧板法によるサクシオンを制御した定常状態での不飽和透水試験を試み、既往の研究 (非定常間接法) の結果⁵⁾と比較した。また、(その2) では、不飽和透水試験の気液二相流シミュレーションを行い本試験法の相対透水係数評価への適用性を検討した。

2. 実験方法

サクシオンを制御した不飽和透水試験 (提案する試験法) の概念を図-1 に示す。供試体に一定のサクシオンを作用させた状態でセラミックディスクを介して上下面に水圧差 ($P_{W1} > P_{W2}$) を与えることで不飽和状態での透水を行うという基本概念である。実際には、下記のように、①試料の上下面を同じ空気圧で制御する方法と、②上下面を同じサクシオンで制御する方法が考えられる。

$$\textcircled{1} \quad P_{A1} = P_{A2} > P_{W1} > P_{W2}$$

(下面サクシオン $P_{A1} - P_{W1} <$ 上面サクシオン $P_{A2} - P_{W2}$)

$$\textcircled{2} \quad P_{A1} > P_{A2} > P_{W1} > P_{W2}, P_{A1} - P_{A2} = P_{W1} - P_{W2}$$

(下面サクシオン $P_{A1} - P_{W1} =$ 上面サクシオン $P_{A2} - P_{W2}$)

①の場合は試料上下間で空気圧勾配は発生しないが、供試体内にサクシオン勾配が発生し、供試体内が一様のサクシオンとは言えないという問題がある。一方、②では供試体内に見かけ上のサクシオン勾配は発生しないが空気圧勾配が発生するため、透水のみならず透気も発生するという問題がある。本研究では見かけ上のサクシオンを一様にするを優先し、②の方法を採った。なお、上下の多孔盤はセラミックディスク (中央部) とポーラスストーン (外周部) のハイブリッド構造になっており、両者の間には仕切り板が設けられセラミックディスク側の水圧とポーラスストーン側の空気圧を分離して加圧制御できる構造である (図-2 参照)。試料にはクニゲル V1 ベントナイトと珪砂を混合重量比 1:4

(乾燥重量比) で混合したものを使用した。混合土を 11% の含水比に調整した後、乾燥密度 1.80 Mg/m^3 に静的締

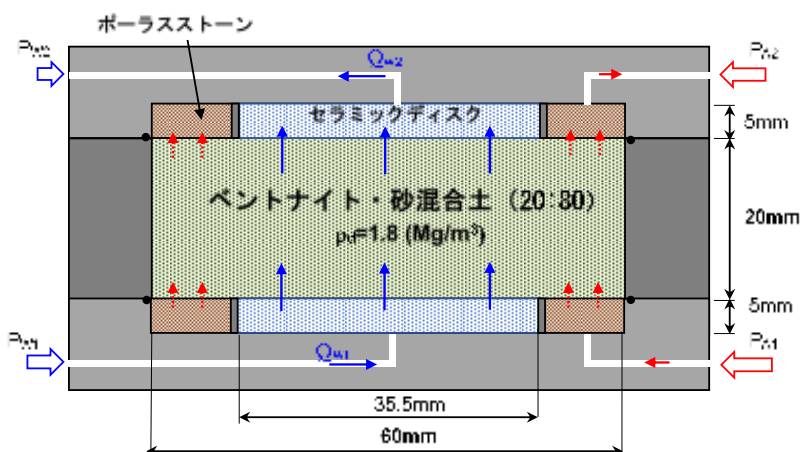


図-1 サクシオン制御不飽和透水試験の概念図



図-2 サクシオン制御不飽和透水試験装置

キーワード ベントナイト, 不飽和透水試験, サクシオン制御試験, 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

固めを行い直径 60 mm、高さ 20 mm の供試体を作製した。締固めは外径 100 mm、内径 60 mm、高さ 20 mm の透水試験リング（ステンレス製）内で直接行った。セラミックディスクの仕様として、空気侵入値（AEV 値）は 1000 kPa、飽和透水係数値は 2.65×10^{-11} m/s とした。

セラミックディスク、ポーラスストーンの間には仕切り板を設置し、樹脂で強固に固定し、ポーラスストーンの外側の溝には O-リングを設置し、供試体を納めたリングと上下盤の密閉度を高め間隙圧の漏れを防ぐ構造とした。

試験準備として、上下盤を 24 時間脱気槽内で飽和させた。次に供試体を納めない状態でセラミックディスク内に水圧を加圧し通水させることで、空気が供給される部分を除き、試験システム全体を飽和させ、気泡を排除した。一方、ポーラスストーンは空気圧をかけて乾燥させ、水分を排除した。

供試体の透水量を測定するために 2 体の二重管ビュレット（容量 5.0 ml）に差圧計を装着している。同二重管ビュレットに背圧作用を制御することで上下盤のセラミックディスクを介して供試体に間隙水圧を与えることが可能となっている。

試験は 20℃恒温室において行った。表-1 に示すように、供試体上下端の間隙空気圧、間隙水圧を制御することで所定のサクシオン载荷を行い、二重管ビュレットの水位の変化から供試体の不飽和透水係数を算定した。なお、サクシオン変化後に透水流量の変化が十分に小さくなる 60 日間経過後をもって定常（一定流量）と判断した。また、セラミックディスク部分の面積を透水断面と仮定し、且つ、上下のセラミックディスクの透水係数を考慮して供試体の透水係数を算定した。透水試験終了後、各供試体を軸方向に 4 等分に分割採取し、取り出した部分の含水比を測定した。また、脱気水槽内で飽和させた供試体を用いて同じ装置により飽和透水係数測定を行った。

3. 試験結果

図-3 は、試験結果を载荷サクシオンと透水係数の関係で整理したものである。サクシオンが高く飽和度が低いほど透水係数が小さいことがわかる。図-4 に、相対透水係数と飽和度の関係を示す。ここに、供試体の飽和度は、試験後に測定した 4 分割スライス片の含水比の平均値から求めた。図-4 には、同じ材料仕様（ベントナイトのモンモリロナイト含有率は異なる）に対して実施された非定常注水試験の結果に基づいて Kunze & Kirkham（1962）の式⁵⁾を用いた逆解析により同定された相対透水係数³⁾を比較して示している。また、それぞれの試験値に対する van Genuchten モデル⁶⁾での近似曲線も示した。定常状態の透水量から直接取得した本研究結果の方が非定常・間接法よりやや大きい相対透水係数となったが、両者はともに vG モデルで近似できるという点では調和的である。

参考文献

1)Garitte, B., Shao, H., Wang, X. R., Nguyen, T. S., Li, Z., Rutqvist, J., Birkholzer, J., Wang, W. Q., Kolditz, O., Pan, P. Z., Feng, X. T., Lee, C., Graupner, B. J., Maekawa, K., Manepally, C., Dasgupta, B., Stothoff, S., Ofoegbu, G., Fedors, R., and Barnichon, J. D.: Evaluation of the predictive capability of coupled thermo-hydro-mechanical models for a heated bentonite/clay system (HE-E) in the Mont Terri Rock Laboratory, Environmental Earth Sciences volume 76, Article number: 64, 2017. 2)Alcolea, A., Madaschi, A., Bosch, J. A., Ferrari, A., Laloui, L., Damians, I. P., Olivella, S., Gens, A., Marschall, P., Garitte, B. and Firat-Luthi, B.:The Full-scale Emplacement (FE) Experiment Modelling Task Force, DECOVALEX Coupled Processes Symposium 2019, Brugg, Switzerland, The DECOVALEX 2019 Project, 18, 2019. 3)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. 4)田中ほか：放射性廃棄物処分施設へのガス移行解析コードの適用に関する研究-気液二相流解析コードの選定と適用-電力中央研究所，研究報告 N09003, 2009.6)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. 5) Kunze, Raymond J., and Don Kirkham. "Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations." Soil Science Society of America Journal 26.5 (1962): 421-426. 6)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.

表-1 サクシオン制御条件

サクシオン	空気圧		水圧	
	$S=P_A-P_W$	P_{A1}	P_{A2}	P_{W1} P_{W2}
400		510	500	110 100
100		210	200	
60		170	160	
20		130	120	

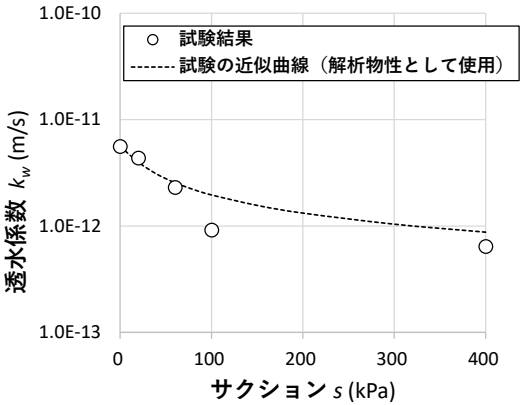


図-3 試験結果：サクシオンと透水係数の関係

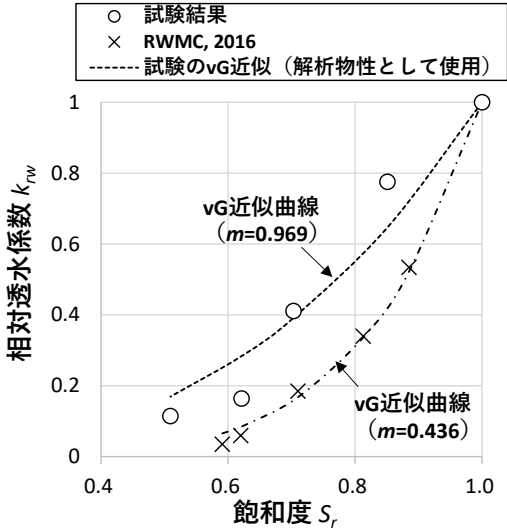


図-4 試験結果：相対透水係数