不飽和ベントナイトのせん断強度特性と水分特性

大林組 正会員 山本修一 , 正会員 志村友行

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 朝野英一,正会員 並木和人

カタルニア工科大学 Enrique Romero

1.はじめに

放射性廃棄物処分における人工バリアの再冠水時やガス発生時の熱・水・応力・ガス(THMG)連成挙動を数値 解析により予測評価するためには,人工バリア材料の飽和状態のみならず,不飽和状態から飽和状態への,あるい は,その逆の過渡的なプロセスにおける特性を把握しそれを適切に数値解析モデルに組み入れることが必要となる. 筆者らはこれまで飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性および膨潤特性とそれらのモデル化に関する研究を行って きた^{1),2)}.本報告では,応力とサクションを独立に制御できる三軸試験装置を用いて不飽和ベントナイト緩衝材の

せん断試験を行い, せん断強度のサクション依存特性について検討した.また,サクションを制御できる圧密試験装置を用いてベントナイト緩衝材の水分特性を取得し,湿潤過程と乾燥過程における水分特性の違いなどを検討した.

2.ペントナイトのサクション制御三軸圧縮試験

(1)試験方法 人工バリア材料であるベントナイトのせん断強度特性に関する実験データは少なく,サクションによる粘着力増加特性および内部摩擦角のサクション依存性については明らかにされていない. そこで,これらの特性を調べるために,サクションを独立に制御できる三軸試験装置^{3),4)}を用いて飽和・不飽和ベントナイト(クニゲルV1)のせん断試験を行った.

直径 38mm,高さ 40mm,初期乾燥密度 1.36Mg/m³,初期含水比 35%の供試体(初期サクション約 700kPa)に所定の等方拘束応力を 載荷した後,拘束応力一定でサクションを所定の値まで低下させ,力 学的,水理学的に釣り合い状態を確認後,サクション一定条件下で側 圧一定の軸応力制御(軸応力速度:0.02~0.05kPa/min)によりせん 断した.試験ケースを表-1に示す.なお,サクション 700kPaのケー スは含水比 35%一定での試験である.

<u>(2)試験結果と考察</u> 図-1 に実験結果のピーク軸差応力に基づく内部摩擦角 ϕ とサクション*s*との関係を示す.ここに、 ϕ は不飽和ではネット応力に関する内部摩擦角を、飽和では有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' を示している.図より内部摩擦角はサクションにほとんど依存しないことがわかる.これは、Bishop et al.⁵⁾や Fredlund et al.⁶⁾の不飽和土に対するせん断強度論と一致する.そこで、内部摩擦角はサクションに関係なく一定($\phi=\phi'=13^\circ$)として、 $p_{net} \sim q$ 面上(p_{net} :平均ネット応力,q:軸差応力)にプロットされるピーク応力点に対して限界状態線(CSL: Critical State Line)を最小二乗近似したのが図-2である.切片から見かけの粘着力 *c*を求めサクション *s*との関係を図-3に示しているが、両者はほぼ比例関係(*c*=0.069*s*)にあることがわかる.以上より今回の試験条件の範囲(*s*<700kPa,300< p_{net} <700kPa)では、乾燥密度 1.36Mg/m³のクニゲルV1ベントナイトの内部摩擦角は

表-1 三軸試験ケース

サクション(kPa)	初期の平均ネット応力 (側圧) ^{注)} (kPa)
0(飽和)	700
300	300
	500
500	300
	400
	500
700(含水比35%)	600

注) 飽和試験では有効応力を示す



図-1内部摩擦角とサクションの関係



キーワード ベントナイト,不飽和土, せん断強度, サクション, 水分特性, 放射性廃棄物処分, 人工バリア 連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 低レベル放射性廃棄物処分プロジェクト TEL 03-5769-1141 とがわかる.なお,内部摩擦角はサクションに依存せず一定で見かけの粘 着力はサクションに比例するという実験結果は Alonso et al.⁷⁾の提案する 不飽和粘土のモデル(Barcelona Basic Model)とも一致する.

3.ペントナイトの水分特性試験

(1)試験方法 用いたサクション制御可能な圧密試験装置の模式図を図 -4 に示す.上部および下部のペデスタルにはポーラスメタルがセットされ ており上部から空気圧(u_a)を,下部から水圧(u_w)を独立に作用させる ことができる構造となっている.また,上部からの空気圧が供試体内に保 持されるよう,下部のポーラスメタル上には空気侵入圧の高いアセチルセ ルロース膜(Spectra/Pro membrane MWCO:6-8000)が敷いてある.こ れにより供試体のサクション($u_a - u_w$)を制御することができる.なお,上 載圧 σ_v も同時に載荷できる機構となっている.

試料は,クニゲルV1を含水比35%で乾燥密度1.36Mg/m³に静的に締固 めたものを用いた.供試体寸法は直径50mm,高さ10mmである.試験 中のサクション変化による供試体の変形をなるべく小さく抑えるために, 供試体の平衡膨潤圧に相当する鉛直応力(0.4MPa)を作用させ,一定鉛 直応力条件下でサクション(s)を載荷,除荷する方法で試験を行った.

未飽和湿潤過程として *s* =0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.01 MPa, 未飽和乾燥過程 として *s* =0.8, 1.3 MPa, 飽和後乾燥過程として一旦飽和させた後に *s* =0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.3 MPa をそれぞれ別の供試体(計12体)に作用させ,定常 状態となった時点で試料を取り出し含水比を測定して飽和度を求めた.

(2)試験結果と考察 飽和度 S_r とサクション(毛細管圧力 P_c)の関係を図-5 に示す.図中の実線は van Genuchten モデル $^{\circ}$ で実験値をフィッティングしたものである.飽和経験のない試料の湿潤過程と飽和後の乾燥過程の水分特性は明らかに異なっており,飽和後の乾燥過程のサクションの方が大きいことがわかる.これは既往の研究 $^{\circ}$ でも示されているが,一旦飽和するとベントナイトの水和膨潤によって大きい間隙は減少してより小さい細孔径の間隙が多くなるが,その後乾燥しても間隙構造は元に戻らないために,同じ乾燥密度,飽和度であっても一旦飽和したものの方が高い保水性を有すると理解できるなお,今回の試験の範囲では,乾燥密度 1.36Mg/m³のクニゲルV1ベントナイトの水分特性曲線は湿潤過程も乾燥過程も van Genuchten モデルで近似可能であり,モデルパラメータは表-2 に示すとおりである.

本報告は経済産業省から公益財団法人原子力環境整備促進・資 金管理センターが受託した「平成23年度TRU廃棄物処分技術: 人工バリア長期性能評価技術開発-ガス移行挙動の評価-」の成果 の一部である.

参考文献

- 山本ほか: 飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化,第64回土 木学会年次学術講演会,CS5-40,2009.
- 2) 山本ほか: 力学連成二相流解析におけるクニゲル GX ベントナイトの力学特性の検討, 第65回土木学会年次学術講演会, CS7-029, 2010.
- 3) Romero, E. : Controlled-suction triaxial and oedometer tests on PRACLAY mixture, UPC report, Ref 010904, 2004.
- 4) 朝野ほか: 飽和・不飽和ベントナイトのせん断強度特性に関する研究, 第66回土木学会年次学術講演会, CS3-015, 2011.
- 5) Bishop, A.W. et al. : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Geotechnique 13(3), 1963.
- 6) Fledlund, D.G. et al. : The shear strength of unsaturated soils, Can. Geotech. J., Vol.15, no.3, 1978.
- 7) Alonso, E. et al. : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3., 1990.
- 8) van Genuchten, M.Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成14年度地層処分技術調査等TRU 廃棄物関連処分技術調査人工バリア・天然バリアのガス 移行挙動評価報告書,2003.





図-4 サクション制御圧密試験装置



図-5 水分特性曲線 表-2 van Genuchten モデルパラメータ

		パラメータ値		
近似モデル	パラメータ	未飽和湿潤・	飽和後乾燥	
		乾燥過程	過程	
	適用範囲	Sr>0.83	Sr>0.93	
van Genuchten	Po (MPa)	0.35	0.55	
$P_c = P_0 \left(S_e^{-1/\lambda} - 1 \right)^{1-\lambda}$	λ	1.6	2.7	
$S_{e} = (S_{l} - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr})$	Sir	0.7	0.90	
	Sls	1.0	1.0	