

# TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その1) -緩衝材 (ベントナイト・砂混合材料) の不飽和せん断強度特性-

(株)大林組 正会員 ○山本修一, 正会員 志村友行  
 (公財) 原環センター 正会員 古賀和正, 大和田 仁  
 カタルニア工科大学 Enrique Romero

## 1. はじめに

放射性廃棄物のうち, TRU 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あるいはベントナイト・砂混合土の膨潤特性, 圧密特性, せん断強度特性, 水分特性とそれらのモデル化に関する研究<sup>1)~5)</sup>を行ってきたが, 不飽和せん断強度特性に関する実験データは少なく, 特に, ベントナイト・砂混合土の粘着力や内部摩擦角のサクシオン依存性については明らかにされていない.

本報告では, 載荷応力とサクシオ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 (ベントナイト・ケイ砂混合材料) のせん断試験を行い, せん断強度のサクシオン依存特性について検討した.

## 2. 試験方法

サクシオンを独立に制御できる三軸試験装置 (図-1) 6),7)を用いてベントナイト・砂混合材料のサクシオン一定三軸圧縮試験 (排水排気条件) を行った. 供試体は, Na 型ベントナイト (クニゲル V1) とケイ砂 (3号, 5号, 乾燥重量比 1:1 混合) を乾燥重量比で 7:3, 含水比 17.0%で混合したものを乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  に圧縮成型したもの (直径 38mm, 高さ 40mm) を用いた.

試験は, 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オンを所定の値まで低下させ, 力学的, 水理的に釣り合い状態を確認後, サクシオンおよび側圧一定条件下で軸応力制御 (軸応力速度:  $0.05\text{kPa/min}$ ) によりせん断した. 試験ケースを表-1 に示す.

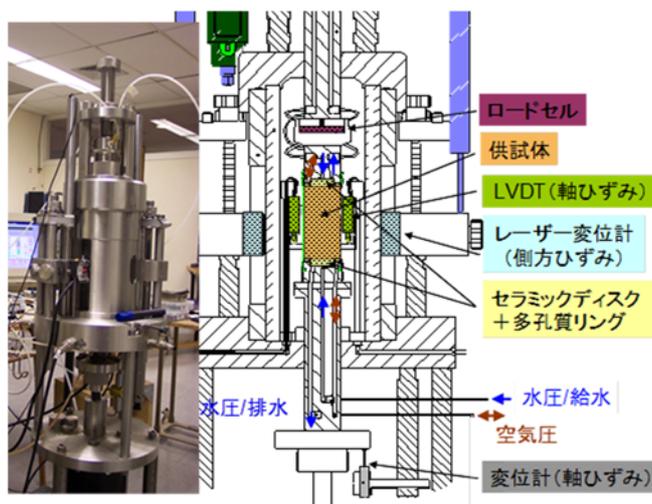


図-1 サクシオン制御三軸試験装置

## 3. 試験結果と考察

図-2 にサクシオン 400kPa の場合の軸ひずみ $\epsilon_1$ ~軸差応力  $q$  の関係を示す. 応力制御試験のため試験終了時点 (軸ひずみ 15~20%) が軸差応力の最大となるが, 軸ひずみ 7%程度まではひずみ硬化挙動を示し, その後ほぼ一定の軸差応力となるのが見られる.

試験終了時点 (軸ひずみ 15~20%) における最大軸差応力 ( $q_{ls}$ ) と平均ネット応力 ( $p''$ ) の関係を図-3 に示す.

図の破線は最小二乗近似直線であり, その傾き  $M$  はサクシオン  $s=400\text{kPa}$ ,  $s=800\text{kPa}$  のそれぞれで,  $M=0.415$  ( $\phi=11.2^\circ$ ),  $M=0.414$  ( $\phi=11.2^\circ$ ) である. 図より, 最大軸差応力 ( $q_{ls}$ ) と平均ネット応力 ( $p''$ ) は線形関係にあること, また, その傾き ( $M$ ) はほぼ等しく有効内部摩擦角 $\phi$ はサクシオン  $s$  に依存しないことがわかる. ここに,  $M$  と  $\phi$  の関係は下記で表される.

表-1 三軸試験ケース

サクシオン (kPa)	初期の平均ネット応力 (側圧) (kPa)
400	600
	900
	1200
800	600
	900
	1200

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (1)$$

一方で、高治ら<sup>8)</sup>が行った同仕様のベントナイト・ケイ砂混合材料に対する飽和非排水三軸圧縮試験によると、軸差応力ピーク値から算定された有効内部摩擦角は  $16.6^\circ$  ( $M=0.63$ ) と報告されている。本試験と同程度の軸ひずみ (15%) における応力から有効内部摩擦角を算定し直しても  $15.9^\circ$  であり、今回のサクシオン制御三軸試験結果の  $\phi'=11.2^\circ$  (サクシオンに依らず一定) と整合しない。原因として、サクシオン制御の有無の他に、排水条件、ひずみ速度、供試体寸法などの違いが考えられるが明らかではない。

次に、試験結果に基づいて粘着力  $c'$  のサクシオン依存性を定量化する。Mohr-Coulomb の破壊基準に基づけば、最大軸差応力 ( $q_{ls}$ ) と平均ネット応力 ( $p''$ )、有効内部摩擦角  $\phi'$ 、粘着力  $c'$  の関係は以下の通りである。

$$q_{ls} = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} p'' + \frac{6 \cdot c'}{3 - \sin \phi'} \quad (2)$$

式(1)を考慮すれば、

$$q_{ls} = Mp'' + Mc' \cdot \cot \phi' \quad (3)$$

そこで、 $M=0.415$  ( $\phi'=11.2^\circ$ ) 一定として、図-3 の切片値から式(3)に基づいて  $c'$  を求めた結果を図-4 に示す。図中の直線は、飽和の場合 ( $s=0$ )、 $c'=0$  と仮定して求めた最小二乗近似線を示している。図より粘着力はサクシオンに比例して増大し、 $c'=0.20s$  で近似できるのがわかる。

### 3. まとめ

緩衝材の候補材料の1つであるベントナイト・砂混合材料 (混合重量比 7:3, 乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ ) を対象にサクシオン一定の三軸圧縮試験を実施し、せん断強度のサクシオン依存性について検討した結果、本試験条件の範囲 (サクシオン  $800\text{kPa}$  以下, 平均ネット応力  $600\sim 1200\text{kPa}$ ) において以下が明らかになった。

- ・ 内部摩擦角  $\phi'$  はサクシオンの影響を受けない
- ・ 粘着力  $c'$  はサクシオンに比例する ( $c'=0.20s$ )

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である平成 28 年度地層処分技術調査等事業 (TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発) の成果の一部である。

### 参考文献

- 1) 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) 山本ほか：不飽和ベントナイトのせん断強度特性と水分特性, 第 67 回土木学会年次学術講演会, CS13-007, 2012
- 4) 山本ほか：TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発 (その 4) ベントナイト・砂混合材料のヒステリシス水分特性とサクシオン変化に伴う膨潤・収縮変形特性, 第 70 回土木学会年次学術講演会, CS12-029, 2015
- 5) 山本ほか：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, 2017.
- 6) Romero, E.: Controlled-suction triaxial and oedometer tests on PRACLAY mixture, UPC report, Ref 010904, 2004.
- 7) 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.
- 8) 高治ほか：緩衝材の静的力学特性 (研究報告), 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 99-041, 1991

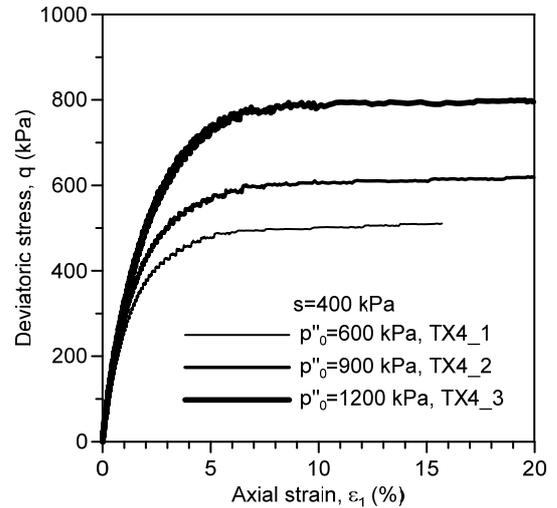


図-2 軸ひずみと軸差応力の関係 (サクシオン 400kPa のケース)

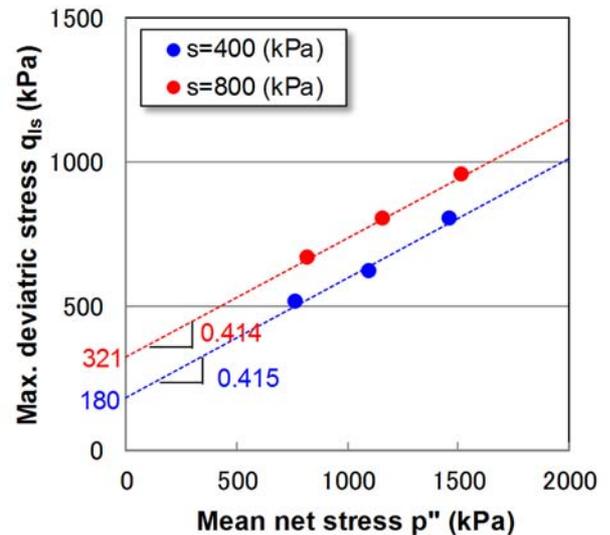


図-3 最大軸差応力 ( $q_{ls}$ ) と平均ネット応力 ( $p''$ ) の関係

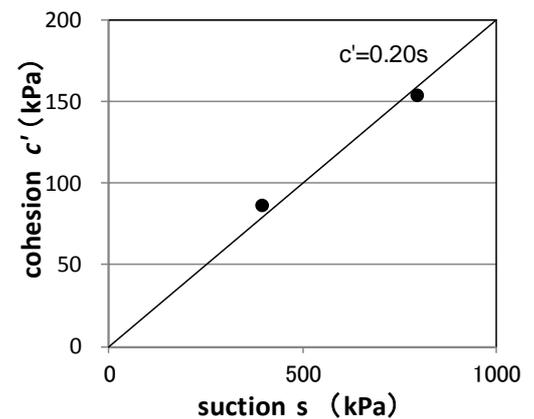


図-4 粘着力とサクシオンの関係