# 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

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 朝野 英一大林組 正会員 山本 修一, 正会員 林 秀郎

## 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,不飽和状態での特性を把握 し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<sup>1),2),3)</sup>.本報告では,拘束応力とサクショ ンを独立に制御できる三軸試験装置を用いて飽和・不飽和ベントナイトのせん断試験を行い,ベントナイトの せん断強度特性とそのモデル化について検討した.

#### 2. 不飽和土のせん断強度に関する既往の知見

不飽和土のせん断強度式として Bishop ら(1963)<sup>4)</sup>は 式(1)を Fredlund ら (1978) <sup>5)</sup>は式(2)を提案している.

$$\tau_f = c' + \{ (\sigma - u_a)_f + \chi (u_a - u_w)_f \} \tan \phi'$$
 (1)

 $\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b$  (2) ここに,  $\tau_f$ :破壊面上のせん断応力, c':飽和状態の有効粘着力,  $(\sigma - u_a)_f$ :破壊面上の基底垂直応力( $\sigma$ :垂直応力,  $u_a$ :間隙空気圧),  $\chi$ :飽和度 $S_r$ に関連するパラ メータ,  $(u_a - u_w)_f$ :破壊面上のサクション( $u_w$ :間隙水圧), $\phi'$ :基底垂直応力( $\sigma - u_a$ )に関する内部摩擦角,  $\phi^b$ :サクションによるせん断強度増加の割合を示すパラメータ(図-1参照).

Fredlund らは不飽和状態では飽和せん断強度 にサクション $(u_a - u_w)$ に起因する粘着成分(式 (2)右辺第3項)が付加されるとしている(図-1). 両式を等価と考えれば,  $\tan \phi^b = \chi \tan \phi'$ という 関係があり,第一次近似として $\chi = S_r$ とすれば,

$ \tan \phi^b = S_r \tan \phi' $	(3)
$\tau_f = c' + \sigma_f' \tan \phi'$	(4)
$\exists \exists \exists v_r \in \mathcal{S}_r = \sigma_f - \{S_r u_w + (1 - S_r)u_a\}_f$	(5)

という関係が得られる (S<sub>r</sub>: 飽和度, σ<sub>f</sub>: 破壊面

図-1 不飽和土に拡張された破壊基準 6)



図-2 サクションの異なるカオリン粘土の限界状態線 7)

上の垂直全応力,  $\sigma'_{f}$ :破壊面上の有効垂直応力).式(4)は飽和度のせん断強度式と同じ形であり,有効応力として式(5)を採用すれば,破壊時の有効垂直応力 $\sigma'_{f}$ とせん断応力 $\tau_{f}$ の関係はサクションに関係なく一本の直線で表されることを意味する.この考えを支持する実験データとして図-2 にSivakumar(1993)<sup>7)</sup>によるカオリン粘土の限界状態線を示した. $p_{net}$ (平均基底応力)~q(主応力差)平面で見ればサクションの増加に伴いせん断強度は増加するが(左図),p'(平均有効応力)~q平面でみれば限界状態線(CSL)はサクションに関係なく一本の直線で近似される.なお,前者の場合,サクションの増加に伴うせん断強度の増加割合は式(2)および図-1 に示されるようにtan $\phi^{b}$ で表される.tan $\phi^{b}$ は式(3)より飽和度  $S_{r}$ に比例するのでサクションとtan $\phi^{b}$ の関係は水分特性曲線(飽和度~サクション関係)に対応するものとなる.Öberg 6<sup>8)</sup>は既往のせん断試験データと水分特性曲線を使って式(2),(3)の妥当性を説明している.

以上の議論では,内部摩擦角ф'はサクションに依存しないものとしている.軽部ら<sup>9)</sup>はサクション一定下で

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, 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

粘土の三軸試験を行い,サクションの増加に伴い内部摩擦角がわずかに増加したと報告しているが,式(1),(2) 同様,実用上サクションに依存しないとしているモデルが多い<sup>10,11)</sup>.

## 3.ペントナイトのサクション制御三軸圧縮試験

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, tan  $\phi^b$ で代表されるサクションによ る粘着力増加特性および内部摩擦角 $\phi'$ 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(図・3) 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.

供試体の上下部には 1.5MPa の空気侵入圧を有するセラミ ックスディスクと多孔リングがセットされており,吸排水とサ クション制御が可能となっている.直径 38mm,高さ 40mm, 初期乾燥密度 1.36Mg/m<sup>3</sup>,初期含水比 35%の供試体(初期サ クション 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応力制 御(軸応力速度:0.02~0.05kPa/min)によりせん断した.実験ケ ースを表-1 に示す.なお,サクション 700kPa のケースは初期含 水比 35%での試験である.

### 4.試験結果と考察

図-4 に,全ての試験の破壊までの応力経路と各サクション(s) の限界状態線(CSL)を示す.ここに,飽和(s=0)の場合は粘着 力c'=0と仮定し,s=700(kPa)の場合の内部摩擦角は飽和のそ れに等しいとして限界状態線を描いている.s=500,700(kPa) の結果から,サクションの増加に伴いせん断強度(粘着力)が増大 する傾向が,また,s=500kPa の結果から,その内部摩擦角は飽 和試料の内部摩擦角とほぼ同等であることがわかる.

ベントナイトのサクションによる粘着力の増加特性や内部摩擦 角のサクション依存性を定量的に議論するためには,サクション制 御三軸試験などによるせん断試験データの拡充が必要である.

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「TRU廃棄物処分技術:人工バリア長 期性能評価技術開発」の成果の一部である.

#### 参考文献

- 1) 山本ほか: THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関 する一考察,第63回土木学会年次学術講演会, CS5-19-, pp.205~206, 2008.
- 2) 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.



- 4) Bishop, A.W. et al. : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Geotechnique 13(3), 1963.
- 5) Fledlund, D.G. et al. : The shear strength of unsaturated soils, Can. Geotech. J., Vol.15, no.3, 1978.
- 6) Fledlund, D.G. et al. : Soil mechanics for unsaturated soils., John Wiley & sons, 1993
- 7) Sivakumar, V. : A critical state framework for unsaturated soils, PhD thesis, Univ. Sheffield, 1993.
- 8) Öberg et al. : Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sand based on water retention curve, Geotech. Testing Journal, Vol.20, No.1,1997.
- 9) 軽部ほか:不飽和カオリンの有効応力と力学定数,土木学会論文集, No.370/III-5, 1986.
- 10) Alonso, E. et al. : A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40, No.3., 1990.
- 11) 飯塚ほか:間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土 / 水連成解析, 土木学会論文集, No.659/III-52, 2000.



図-3 サクション制御三軸試験装置

表-1 実験ケース

サクション(kPa)	平均ネット応力*(kPa)
0(飽和)	700
500	300
500	400
500	500
700(含水比 35%)	600

\*飽和試験では有効応力を示す



応力経路と限界状態線