

## 不飽和-飽和領域でのベントナイト・珪砂混合体の強度・変形特性

ベントナイト 三軸試験 不飽和土

名城大学  
名城大学大学院  
(株) 不動テトラ (元名城大院)国際会員 小高猛司・崔 瑛  
学生会員 ○古山翔梧  
正会員 高田英典

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分の地層処分において、緩衝材および遮水材として用いられるベントナイト・珪砂混合体は、処分場建設時の不飽和状態から、地下水環境下にて数十年を経て飽和状態に遷移する。そのため、処分場を合理的に設計するためには、不飽和から飽和過程までを含むベントナイト・珪砂混合体の力学特性を把握する必要がある。本稿では、様々な飽和状態での強度・変形特性を求めるために、各種の含水条件で作製したベントナイト・珪砂混合体の供試体を用いて、非排気・非排水条件下での三軸試験を行った。

## 2. 試験方法

試験試料は、粉末ベントナイト（クニゲル V1、初期含水比 11.6%）に三河珪砂 6 号を乾燥質量比 30%で混合したものとした。自然含水供試体は、初期含水比のままのベントナイトに乾燥珪砂を混合し圧縮成型したものである。疑似飽和供試体および各種不飽和供試体は、表 1 に示す所定の飽和度となるように、ベントナイト・珪砂混合試料に霧吹きで加水して含水調整を行った後、圧縮成型したものである。供試体の乾燥密度は  $1.60 \text{ Mg/m}^3$  とし、供試体寸法は直径 35mm、高さ 70mm とした。作製した供試体は、2 重セル構造の三軸試験装置を用いて、拘束圧 0.1 および 0.5MPa（1 ケースのみ 1.5MPa）を載荷した上で、載荷速度  $0.5\%/\text{min}$  で軸ひずみ 15%まで非排気非排水条件のせん断を行った。

## 3. 試験結果

表 1 に各試験ケースの詳細情報を示す。表に示す供試体の飽和度は、供試体圧縮成型時の値であり、拘束圧を載荷した後の等方圧縮時の供試体圧縮量については考慮していない。

図 2、図 3 に非排気非排水三軸試験の試験結果を拘束圧ごとに示す。凡例は表 1 に示した試験ケースである。

図 2(a)および図 3(a)に示す軸差応力～軸ひずみ関係より、自然含水供試体と疑似飽和供試体の強度に大きな違いが見られ、供試体の飽和度が高くなるにつれて最大軸差応力が小さい値となった。また、自然含水供試体ではせん断中に大きなひずみ軟化挙動が見られたのに対し、疑似飽和供試体ではひずみ軟化挙動は見られず、試験中の軸差応力は単調に増加する結果となった。各種不飽和供試体において、拘束圧が高いケース VM5-2～VM5-6 では、疑似飽和供試体と同様にせん断中にひずみ軟化が見られず単調に増加する結果が見られた。また、飽和度 73%である VM5-5 と飽和度 87%である VM5-6 のせん断挙動に大きな差が見られた。一方、拘束圧が低い場合、飽和度が比較的低いケースではせん断中にひずみ軟化挙動が見られるが、飽和度の増加とともにその度合いが緩やかになり、VM1-6 ではひずみ軟化挙動はほとんど見られなかった。さらに、拘束圧が低い場合も、飽和度 77%と飽和度 88%のケースのせん断挙動が大きく異なる傾向が見られた。すなわち、いずれの拘束圧においても飽和度が 70 %を超えるとせん断強度が急激に減少する傾向が見られ、これは飽和度が 70%以上になるとサクションが急激に低下するためであると考えられる。これらの試験結果から、珪砂・ベントナイト混合体では、供試体飽和度が高くなるにつれ強度が徐々に低下し、特に飽和直前で急激に低下することが示された。

図 2(b)および図 3(b)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係より、いずれの拘束圧においても自然含水供試体は最大軸差応力の到達前まで圧縮を続け、その後膨張に転じるのに対し、疑似飽和供試体は圧縮し続ける結果となった。各種不飽和供試体は、拘束圧が高い場合には疑似飽和供試体と同様に圧縮を続ける結果となった。拘束圧が低い場合には全般的に自然含水供試体と同様の挙動を示すが、供試体の飽和度が高くなるにつれ体積変化の度合いは小さくなり、飽和直前には疑似飽和供試体とほぼ同様の挙動となった。これらの試験結果から、試験中の

表 1 非排気非排水試験における試験ケース

|             | 供試体名   | 飽和度 $S_r$<br>(%) | 拘束圧<br>(MPa) |
|-------------|--------|------------------|--------------|
| 供試体<br>自然含水 | IM1-1  | 29               | 0.1          |
|             | IM1-2  | 27               |              |
|             | IM5-1  | 29               | 0.5          |
|             | IM5-2  | 29               |              |
| 供試体<br>疑似飽和 | QS1-1  | 92               | 0.1          |
|             | QS1-2  | 90               |              |
|             | QS5-1  | 91               | 0.5          |
|             | QS5-2  | 91               |              |
|             | QS15-1 | 92               | 1.5          |
|             | QS15-1 | 91               |              |
| 各種不飽和供試体    | VM1-1  | 32               | 0.1          |
|             | VM1-2  | 42               |              |
|             | VM1-3  | 50               |              |
|             | VM1-4  | 63               |              |
|             | VM1-5  | 77               |              |
|             | VM1-6  | 88               |              |
|             | VM5-1  | 34               | 0.5          |
|             | VM5-2  | 44               |              |
|             | VM5-3  | 48               |              |
|             | VM5-4  | 63               |              |
|             | VM5-5  | 73               |              |
|             | VM5-6  | 87               |              |

Strength and deformation characteristics of bentonite-silica sand mixture in unsaturated and saturated region

Takeshi Kodaka, Cui Ying, Shogo Furuyama, Hidenori Takada (Meijo University)

珪砂・ベントナイト混合体のダイレタンシー特性は、せん断特性と同様に供試体の飽和度と拘束圧によって変化することが示された。

図4～6に、上記の三軸圧縮試験結果から得られる自然含水供試体、各種含水比供試体および疑似飽和供試体のモールの応力円を示す。なお、実現場では飽和状態のベントナイト自身の膨潤圧が拘束圧として作用すると考えられるため、疑似飽和供試体のみ高拘束圧（1.5MPa）での試験も別途行った。表2に、各種不飽和供試体の粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  をまとめて示す。供試体飽和度が高くなるにつれ、粘着力と内部摩擦角は徐々に低下し、飽和直前で急激に低下する傾向が見られる。なお、疑似飽和供試体のモールの応力円より、粘着力  $c$  は 0.15MPa、内部摩擦角  $\phi$  は  $0.8^\circ$  となり、疑似飽和供試体は  $\phi_u=0$  仮定が成り立つ飽和粘土とほぼ同じ挙動になっている。

Agus ら<sup>1)</sup>は、様々な混合率のベントナイト・珪砂混合体の含水比とサクシオンとの関係を調べており、珪砂 30%混合の供試体においては、含水比が 15 から 25%に上昇するのにに対して、サクシオンは約 10MPa から 1MPa 程度まで低下することを示している。本研究における飽和度によるせん断挙動の違いは、このようなサクシオンの変動に大きく影響を受けていると考えられる。

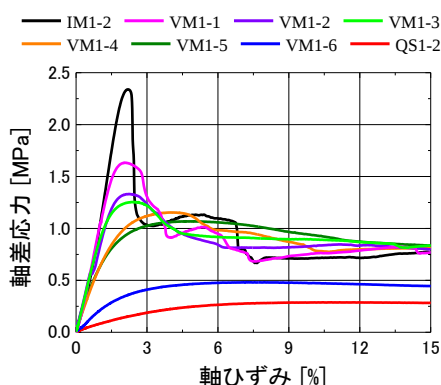
#### 4. まとめ

本報では、様々な飽和度を有する珪砂・ベントナイト供試体の非排気非排水三軸試験を実施した。試験結果から、供試体の飽和度が上昇するにつれ、強度が低下し、飽和直前で急激に減少することが示された。

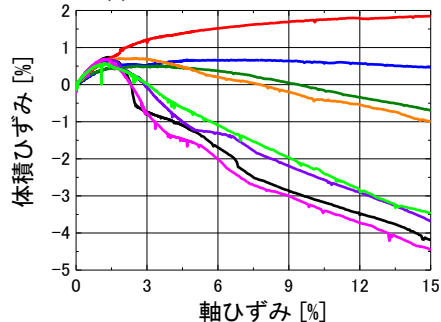
不飽和粘性土は飽和度により土

粒子間のサクシオンが大きく変化し、結果として粘性土の力学挙動に大きな影響を及ぼすことが既往の研究により示されている<sup>2)</sup>。本研究の各種不飽和供試体の力学挙動が、一般的なサクシオンを与えた密詰め構造の粘性土の力学挙動と同様の傾向を示すことから、不飽和ベントナイトの力学特性もサクシオンの影響を受けていると考えられる。本研究で用いたベントナイト・珪砂混合体の飽和度とサクシオンとの関係、ならびにサクシオンがベントナイトの力学挙動に及ぼす影響については更なる検討が必要である。さらに、本研究では離散的に飽和度と強度・変形特性との関係を検討したが、今後は連続的に飽和度が推移してゆく場合の検討も実施する予定である。

参考文献：1) Setianto Samingam Agus, Tom Schanz and Delwyn G. Fredlund, Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol47, NO.5, pp.583-594, 2010. 2) 地盤工学会編, 不飽和地盤の挙動と評価, 第4章 不飽和地盤の評価法, pp.115-138, 2004.

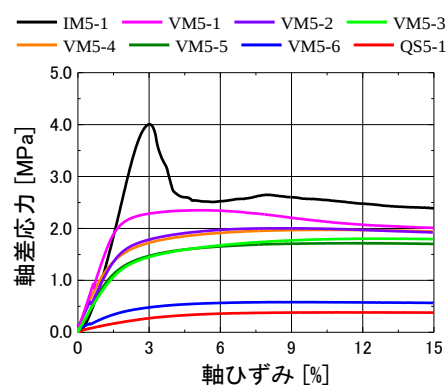


(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

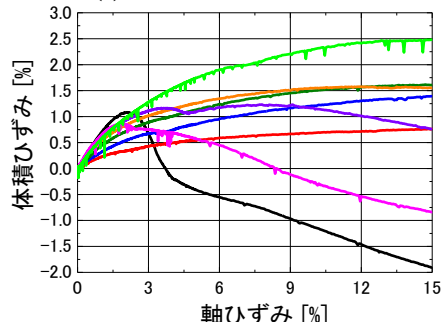


(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図2 非排気非排水三軸試験結果  
拘束圧 0.1MPa



(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図3 非排気非排水三軸試験結果  
拘束圧 0.5MPa

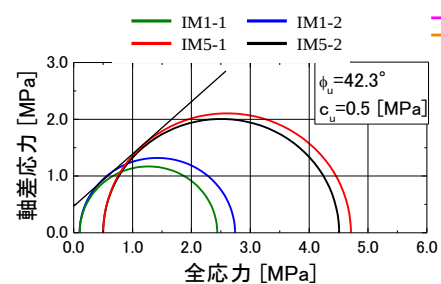


図4 自然含水供試体のモールの応力円

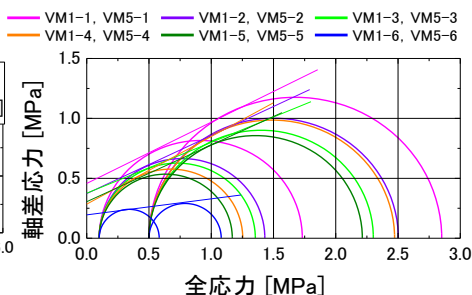


図5 各種不飽和供試体のモールの応力円

表2 各種不飽和供試体の

粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi_u$

| 供試体   | 飽和度 (%) | $c$ (MPa) | $\phi_u$ ( $^\circ$ ) |
|-------|---------|-----------|-----------------------|
| 各種不飽和 | 32, 34  | 0.46      | 27.1                  |
|       | 42, 44  | 0.37      | 25.8                  |
|       | 50, 48  | 0.38      | 23.2                  |
|       | 63, 63  | 0.28      | 29.4                  |
|       | 77, 73  | 0.30      | 25.3                  |
|       | 88, 87  | 0.19      | 7.6                   |

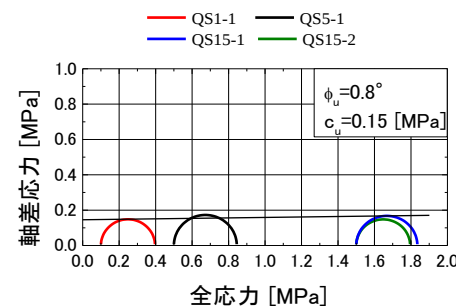


図6 疑似飽和供試体のモールの応力円