

不飽和圧縮ベントナイトの力学特性とサクシジョンの関係

ベントナイト 三軸圧縮試験 地層処分

名城大学 国際会員 小高 猛司・崔 瑛
名城大学大学院 学生会員 ○竹内 啓介

1. はじめに

地層処分の緩衝材として用いる圧縮ベントナイトは、処分時の不飽和状態から地下水の再冠水に伴って数十年から百年程度をかけて不飽和状態から徐々に飽和状態へと遷移していくことが想定されている。そのため、処分場のオーバーパック周りの長期安定性を検討するためには、圧縮ベントナイト緩衝材が長い期間をかけて飽和するまでの不飽和遷移領域の力学特性を把握しておくことが必要である。本研究では、各種の飽和度の不飽和状態の圧縮ベントナイト供試体を用いて非排気非排水試験を実施し、それぞれの含水状態に応じた力学特性を得るとともに、それらの含水状態におけるベントナイト供試体のサクシジョンを計測することにより、力学特性とサクシジョンの関係について検討を行った。

2. 試験試料と試験装置

試験試料は、粉末ベントナイト（クニゲル V1）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、油圧ジャッキを用いて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 Mg/m^3 とし、供試体寸法は直径 35mm、高さ 70mm とした。ただし、油圧ジャッキの圧縮成形時に両端の含水比が高くなる傾向が認められたため、長さ 80mm に圧縮成型した後、両端を切り落として長さ 70mm の供試体を作製している。作製した供試体は、図 1 に示す 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）を载荷した上で、载荷速度 $0.5\%/\text{min}$ で軸ひずみ 15%まで非排気非排水条件のせん断を行った。

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、拘束圧を载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。

3. 試験結果

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)及び図 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ジ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。

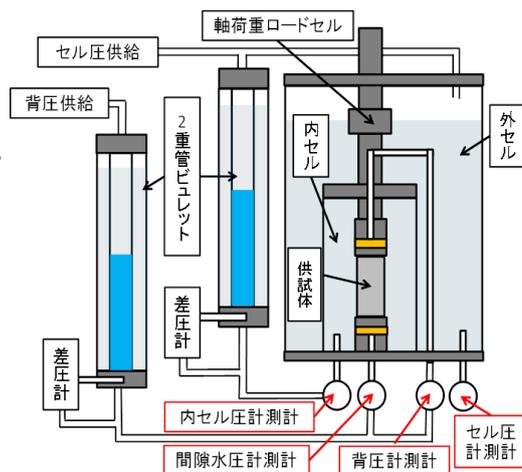


図 1 二重セル構造三軸試験機

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 Sr (%)	拘束圧 (MPa)
試体 自然含水	IM1-1	29	0.1
	IM1-2	27	
	IM5-1	29	0.5
	IM5-2	29	
試体 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	

A relation between the mechanical properties and suction of an unsaturated compacted bentonite:

T. Kodaka, Y. Cui, K. Takeuchi (Meijo University)

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。一般の不飽和粘性土においても、飽和度によって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（例えば文献 1), 2)）。本試験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。

4. サクシオンの計測

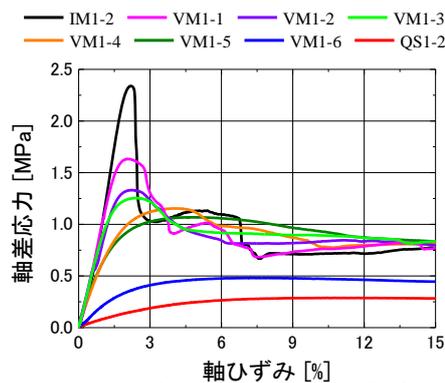
ベントナイト・珪砂混合体においても、サクシオンの計測が試みられている。本研究では Schanz らを参考にサイクロメータを用いて圧縮ベントナイト供試体のサクシオンを計測した。写真 1 に計測に用いたサイクロメータ (Decagon Devices 社製 WP4C) を示す。チルドミラー露点測定法と呼ばれる原理で水ポテンシャル (サクシオン) を測定する精密機械であり、水蒸気圧に平衡状態にある供試体をミラーとともにチャンバー内に格納し、チルド (冷却) しながらミラーが結露した時点の水蒸気圧を計測することによって供試体のサクシオンを求めるものである。測定範囲は 0~300MPa であり、0~5MPa までは±0.05MPa、-5~300MPa の間では±1%の精度で測定することが可能とされている (本報では便宜上サクシオンを負圧として表示する)。測定原理からも計測は温度に非常に敏感であり、内部には温度コントロールシステムが内蔵されている。

サクシオンの計測には、三軸試験の供試体と全く同様の方法で作製したものをを用いた。円柱供試体を上部、中部、下部の 3 つに均等に切り分け、それぞれの中心部を専用のカップに入るサイズに削った。

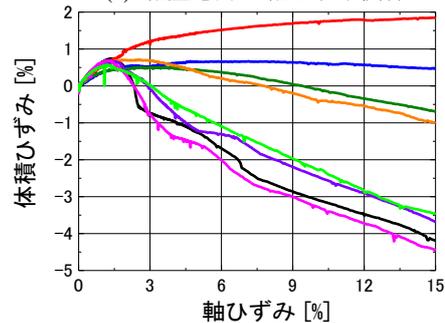
図 4 にサクシオンの計測結果を示す。自然含水状態に近い供試体では、サクシオンとして 100MPa 以上の負圧となり、飽和度の上昇に伴い急激に低下することがわかる。ただし、急激な低下と雖も、飽和度 50%付近でも 10MPa 程度のサクシオンとなっており、非常に大きな値であり、圧縮ベントナイトのせん断強度の高さを裏付けている。

5. まとめ

本報の三軸試験ならびにサクシオンの計測結果より、圧縮ベントナイトのせん断強度とサクシオンとは密接な関係があることが示された。今後、温度環境やベントナイトの吸水状態も含めた精度の高い計測を実施していく予定である。参考文献: 1) T. Schanz ら: Time effects on total suction of bentonites, S&F, 50(2), 2010. 2) S. Agus ら: Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, 47(5), 2010.

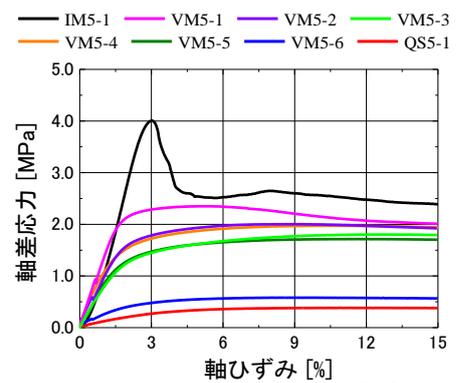


(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

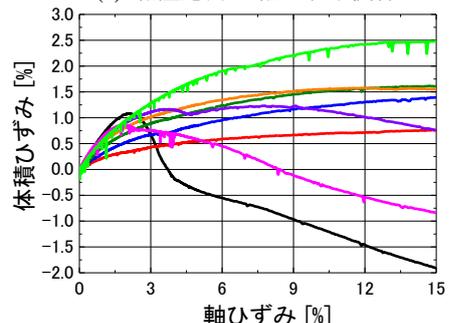


(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

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 サイクロメータ (WP4C)

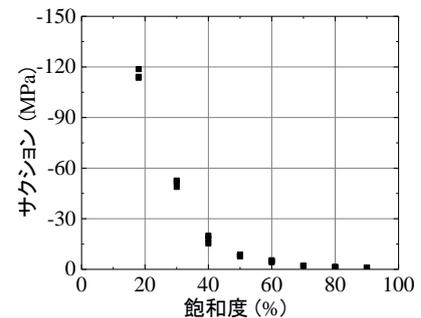


図 5 サクシオン計測結果