

ベントナイト・珪砂混合体の不飽和三軸試験

名城大学大学院
名城大学
(株)不動テトラ（元名城大院）

学生会員　○古山翔悟
正会員　小高猛司・崔　瑛
正会員　高田英典

1. はじめに

放射性廃棄物処分の緩衝材や遮水材として用いるベントナイト・珪砂混合体は、処分場の施工直後の不飽和状態から地下水冠水に伴い徐々に飽和状態へ遷移するため、不飽和状態での力学特性も十分に把握しておく必要がある。本稿では、様々な不飽和状態での強度・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、試料に霧吹きで加水して含水調整を行った後、圧縮成形したものである。供試体の乾燥密度は 1.60 Mg/m³ 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%/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し、図 1，図 2 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。

図 1(a)および図 2(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と挙動に大きな違いが見られた。各種不飽和供試体において、拘束圧が低い場合、単調増加する結果が見られる。一方、拘束圧が高い場合、飽和度が比較的低いケースではひずみ軟化挙動が見られるが、VM1-6 ではひずみ軟化挙動はほとんど見られなかった。また、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た。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、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(b)および図 2(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圧縮の後、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した。一方、拘束圧が高い場合および拘束圧が低い飽和直前の供試体において、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。

表 1 非排気非排水試験における試験

	供試体名	飽和度 Sr (%)	拘束圧 (MPa)
自然含水供試体	IM1-1	29	0.1
	IM1-2	27	
	IM5-1	29	0.5
	IM5-2	29	
疑似飽和供試体	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	

キーワード ベントナイト，三軸試験，不飽和土

名城大学 理工学部 社会基盤デザイン工学科（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel 052-838-2347）

図 3~5 に、上記の試験結果から得られる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 ϕ をまとめて示す。飽和度が高くなるにつれ、 c と ϕ 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、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。

向後ら¹⁾は、DL クレイを用いて作製した供試体に様々なサクシオンを与えた三軸圧縮試験を行い、密詰め供試体の場合サクシオンによりそのせん断挙動が大きく変化することを示している。本研究の各種不飽和供試体の力学挙動は、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しており、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。一方、Agus ら²⁾は、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% 混合供試体においては、含水比が 15% から 25% に上昇するのに対し、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、その理由として飽和度による土粒子間のサクシオンの大きな変化が考えられる。今後は、飽和度が土粒子間のサクシオンに及ぼす影響、サクシオンが珪砂・ベントナイト混合体のせん断挙動に及ぼす影響について更なる検討をすすめるとともに、不飽和領域の力学挙動に適用する数値モデルの構築を検討する。

参考文献 1) 向後ら：不飽和シルトおよび砂・粘土混合土の三軸応力条件下での体積変化およびせん断挙動，農業土木学会論文集 66(1), 35-49, 1998. 2) Agus et al.: Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures, Canadian Geotechnical Journal, 47(5), pp.583-594, 2010.

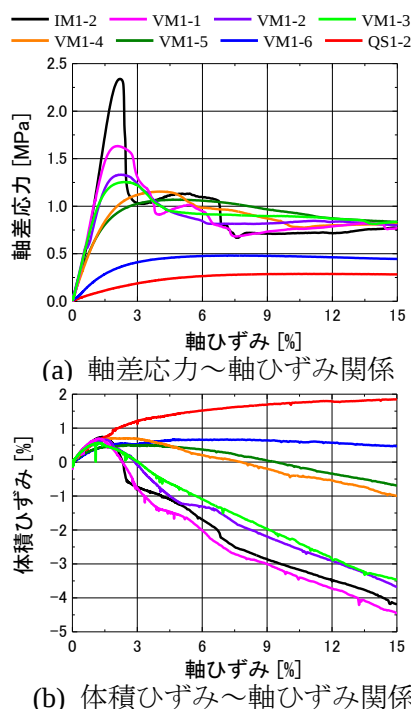


図 1 非排気非排水三軸試験結果
拘束圧 0.1MPa

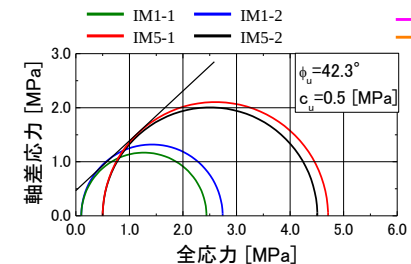


図 3 自然含水供試体の
モールの応力円

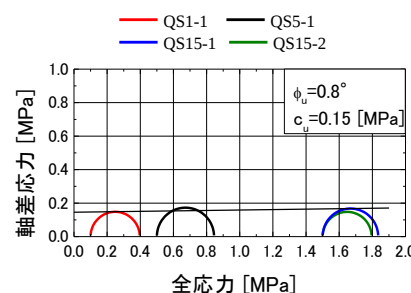


図 5 疑似飽和供試体の
モールの応力円

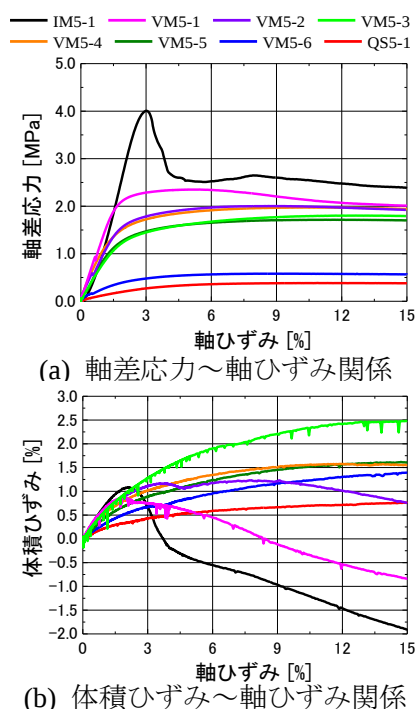


図 2 非排気非排水三軸試験結果
拘束圧 0.5MPa

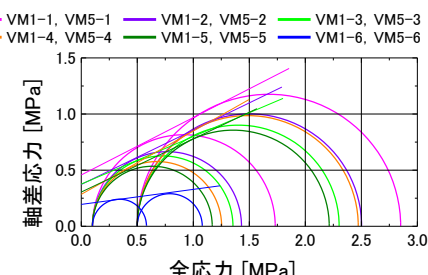


図 4 各種不飽和供試体の
モールの応力円

表 2 各種不飽和供試体の
粘着力 c と内部摩擦角 ϕ_u

供試体	飽和度 (%)	c (MPa)	ϕ_u (°)
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