

地層処分の緩衝材として用いるベントナイト・珪砂混合体の不飽和力学特性

Unsaturated mechanical properties of bentonite-silica sand mixture using as a buffer material for geological disposal

古山翔悟¹, 小高猛司², 崔瑛³

- 1 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・cuiying@meijo-u.ac.jp

概 要

本研究では、放射性廃棄物の地層処分において緩衝材として用いられる予定のベントナイト・珪砂混合体を対象として、不飽和から飽和過程までを含む様々な含水条件下での強度・変形特性の把握を試みた。具体的には、試験材料として選択した工業製品である粉末状ベントナイトの自然状態での含水比から、ほぼ飽和に近い疑似飽和状態までの広い領域の含水比をカバーして作製したベントナイト・珪砂混合体の供試体を用いて、それぞれの含水条件下での変形・強度特性を詳細に調べた。特に、供試体の均質性と試験の再現性、ならびにせん断試験中に供試体の含水条件が極力変化させないために、非排気・非排水条件下での三軸試験を行った。ただし、せん断試験中の変形特性を詳細に把握するために、気相を含む不飽和供試体の体積変化を正確に計測できる 2 重セル構造の三軸試験装置を新たに作製して試験に用いた。その結果、供試体の飽和度が上昇するにつれ、せん断強度が低下することが示され、しかも飽和直前でその傾向が顕著になることがわかった。

キーワード：ベントナイト、緩衝材、地層処分、三軸試験、不飽和土

1. はじめに

東日本大震災における福島原発の事故処理をはじめ、脱原発社会を考える日本では、放射性廃棄物が大量かつ早期に発生する問題に直面しており、放射性廃棄物を安全かつ恒久的に処分することが重要な課題である。我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、多重バリアシステムで数万年にわたり超深地層処分に廃棄物を封じ込めておくことを基本方針としており、2000年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」¹⁾(特定放射性廃棄物とは、高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物を指す)が制定されている。具体的には、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物をオーバーパックと呼ばれる金属製容器に封入し、その周りを緩衝材で覆い、地下 300m 以深の岩盤に埋設することを基本としている²⁾。その際の緩衝材の役割は、周辺岩盤から加わる外力によってオーバーパック等の破損を防ぐ緩衝機能や、廃棄物と地下水との接触を阻み、放射性核種の移行を遅延させる遮水機能等が求められる。地層処分におけるこれらの必要条件を持った材料として、緩衝材には高压で圧縮したベントナイトが用いられる。なお、高レベル放射性廃棄物処分に用いられる緩衝材には、支持力性能や放射性廃棄物が発する熱を逃がすための熱伝導率や透気性の向上、また経済的な面からもベントナイ

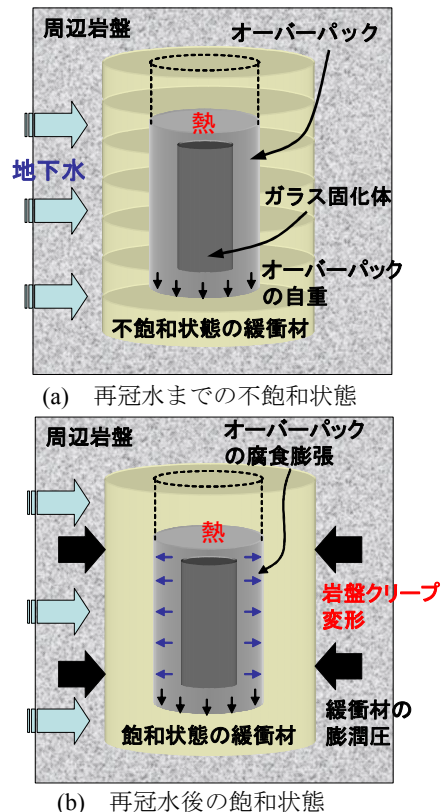


図 1 地層処分における多重バリアシステムの概要

トに珪砂を混入させると考えられている。

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、不飽和状態で締め固められて製造されるため、放射性廃棄物が搬入される処分場の操業時には不飽和状態である。この不飽和状態は、処分場の操業が終わって閉鎖された後に、地下水が処分場を完全に覆う再冠水と呼ばれる状態となるまで続く(図1(a)参照)。その後、緩衝材は地下水の浸潤により飽和するが、ベントナイト自身が持つ膨潤特性により緩衝材内部では膨潤圧が上昇するとともに、周辺岩盤からのクリープ変形やオーバーパックが腐食膨張することなどによって様々な外力が長期的にわたり作用することになり、不飽和状態の時とは環境も大きく変化する(図1(b)参照)。このように、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ことが考えられる。そのため、処分場を合理的に設計するためには、不飽和状態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。

そこで、本研究の目的として、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。また、各飽和度におけるベントナイト・珪砂混合体の力学特性について説明するとともに、サクシオンがこれらの試験結果に及ぼす影響について議論する。

2. 供試体作製方法および試験方法

図2に本研究で用いた2重セル構造の高圧三軸試験装置の概要を示す。載荷機構にはメガトルクモータを使用している。載荷方法には単調載荷および繰り返し載荷が可能となっており、せん断速度はそれぞれ、0.01%~2.0%/min, 0.01%~1.0%/minの範囲で可変となっている。なお、本研究では不飽和から飽和状態へと遷移する過程の高密度ベントナイト緩衝材の力学特性を把握することを目的としている。そのため、各種不飽和状態の珪砂・ベントナイト供試体を用いた非排気非排水条件の三軸試験を実施した。一般的な飽和供試体を用いた三軸試験を行う場合であれば、供試体の吸排水量を計測することによって試験中の供試体の体積変化を計測することが可能である。しかし、不飽和供試体を用いる場合では、供試体には液相も気相も存在するので、供試体に存在する気相の体積変化まで含めて正確に計測することが、供試体の変形特性を把握する上で必要不可欠となる。そこで、本研究では2重セル構造の三軸試験装置を使用した。2重セルは、同じ圧力を作用させられる外セルと内セルの2つを有し、試験中の供試体の体積変化と等しい水が内セルに流出入すると考え、その水の体積を2重管ビュレットと差圧計で計測する。

本研究の試料には、粉末ベントナイト(クニゲル V1, クミネ工業製 Na型ベントナイト, 自然含水比 $w=9.51\%$)に三河珪砂6号を乾燥質量比30%で混合した試料を自然

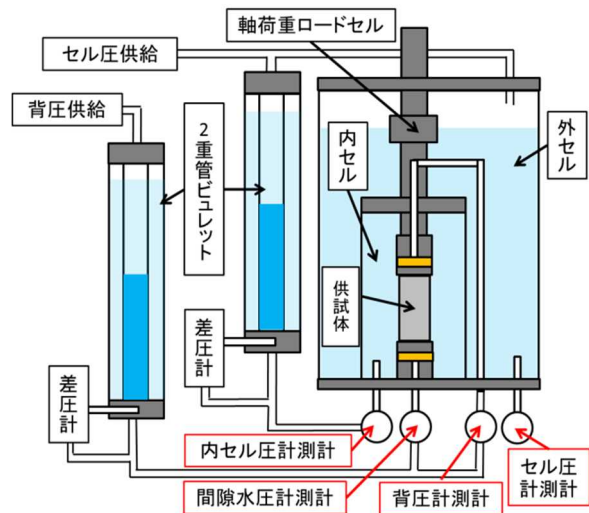


図2 2重セル構造の高圧三軸試験装置

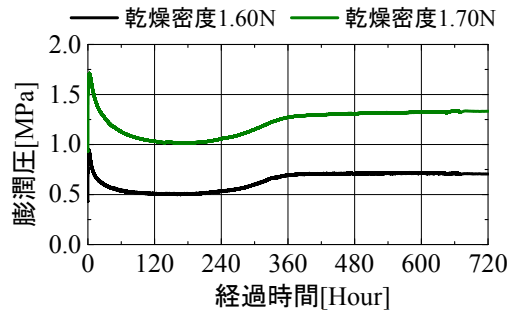


図3 ベントナイト・珪砂混合体の膨潤圧試験

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 $S_r(\%)$	拘束圧 (MPa)
供試体 自然含水	IM1-1	29	0.1
	IM1-2	27	
	IM5-1	29	0.5
	IM5-2	29	
供試体 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
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	
	VM15-1	79	1.5
	VM15-2	86	

含水状態の試料として用いた。作製した供試体は、供試体の飽和度ごとに異なる名称で呼ぶ。自然含水状態の試料で作製した場合は「自然含水供試体」。飽和に近い含水比の試料を用いた場合は「疑似飽和供試体」。そして、それらを補間する様々な飽和度の供試体を「各種不飽和供試体」と呼ぶ。自然含水供試体は、自然含水状態の試験試料を油圧ジャッキにて圧縮成形した後、両端面を成形し作製した。各種不飽和供試体および疑似飽和供試体は、所定の飽和度となるように、霧吹きにて含水比調整を行った試験試料を用いて、自然含水供試体と同様の手順で作製した。供試体の乾燥密度は 1.6Mg/m^3 とし、供試体は直径 35 mm、高さ 70mm の円柱とした。三軸試験の初期拘束圧は 0.1MPa および 0.5MPa の 2 つを基本とした。図 3 は完全拘束条件下でのペントナイト・珪砂混合体の膨潤圧試験の結果である。厚さ 20mm の自然含水供試体に上下端面から脱気水を注水した際の時間～膨潤圧の関係を示している。乾燥密度 1.6Mg/m^3 の供試体において、およそ 1.0MPa の膨潤圧が発生することから、実際の処分場においても、緩衝材の飽和過程において周囲の岩盤からの反力によって 1.0MPa 以上の有効拘束圧が作用する場合も想定される。そのため、本研究では高拘束圧 (1.5MPa) での試験も行った。

なお、いずれの試験においても、載荷速度は 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。表 1 に各試験ケースの詳細情報を示す。

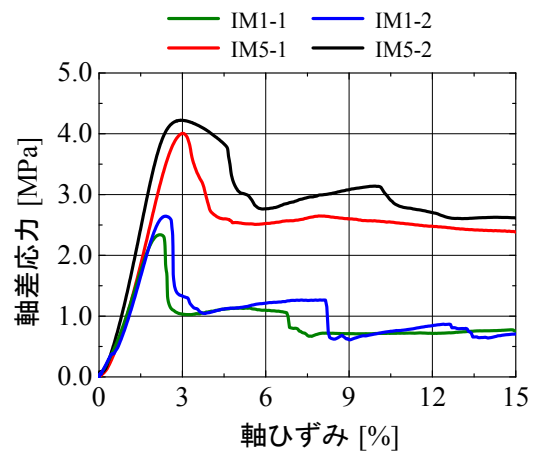
3. 試験結果

3.1 自然含水供試体の試験結果

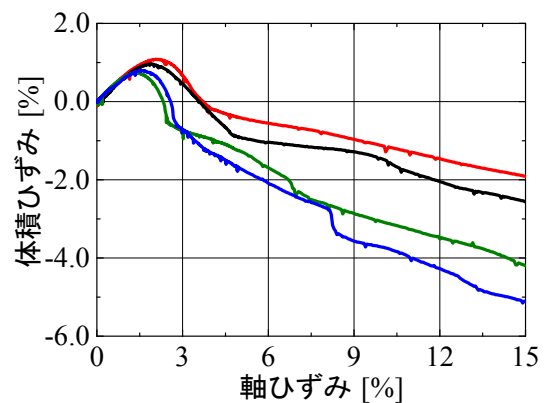
図 4 に自然含水供試体の非排気非排水三軸試験の結果を示す。凡例は表 1 に示した試験ケースである。

図 4 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体においても軸ひずみ 3%程度まで軸差応力が急激に増加し、最大軸差応力に到達している。最大軸差応力に到達した後、供試体はひずみ軟化の挙動を示し、軸ひずみ 6%付近から残留状態となっている。この破壊形態は固結材料に見られる挙動で、試験終了時の供試体には明確なせん断面とひびが見られた。IM1-1, IM1-2 と IM5-1, IM5-2 を比較すると、最大軸差応力の値は拘束圧が高い IM5-1, IM5-2 の方が高い値となっている。また、IM1-1 と IM1-2 を比較すると、供試体の飽和度が低い IM1-2 の方が、若干ながら高い値を示している。

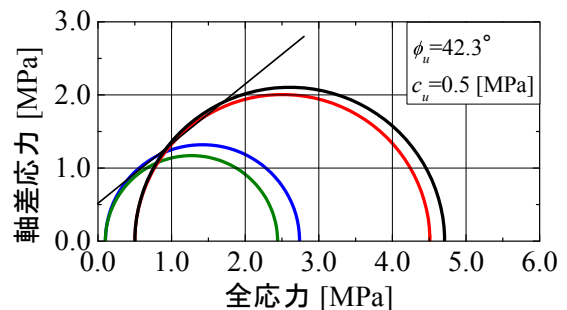
図 4 (b) の体積ひずみ～軸ひずみ関係より、供試体の体積ひずみが正の値では供試体の体積圧縮を示し、負の値では供試体の体積膨張を示している。いずれの供試体においても、軸差応力が最大値を示す手前まで体積圧縮を続けている。最大軸差応力に到達する軸ひずみでは、供試体がすでに体積膨張に転じており、その際の膨張割合は試験中に最大となっている。その後、供試体は緩やかに体積膨張を続け、残留強度を発揮している。各拘束圧を比較すると、拘束圧の低い IM1-1, IM1-2 の方が試験終了後の供試体の体積膨張量が大きくなっている。



(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係



(c) モールの応力円

図 4 自然含水供試体の非排気非排水三軸試験

図 4 (c) のモールの応力円より、粘着力 c は 0.5MPa、内部摩擦角 ϕ_u は 42.3° と、非常に大きい値となった。

3.2 疑似飽和供試体の試験結果

図 5 に疑似飽和供試体の非排気非排水試験の結果を示す。凡例は表 1 に示した試験ケースである。

図 5 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体でも軸ひずみの増加に伴い軸差応力が増加し続け、軸ひずみ 10%程度で最大軸差応力に到達している。しかし、いずれの供試体においても最大軸差応力の値は自然含水供試体に比べると非常に低い値となった。さらに、自然含水供試体で見られた最大せん断応力到達後の大きなひずみ軟化挙動、試験終了後の供試体の明確なせん断面は疑似飽和供試体では見られなかった。

図 5 (b) の体積ひずみ～軸ひずみ関係より、いずれの供試体においても軸差応力の増加に伴い、供試体は体積圧縮している。せん断終了時の体積ひずみは QS1-1, QS1-2 に比べ、QS5-1, QS5-2 の方が小さい値となった。これは、等方圧縮時に拘束圧が高い方が供試体内の気相の体積が減少しており、供試体内の土粒子構造がせん断前から密詰め傾向にあったと考えられる。

図 5 (c) のモールの応力円より、粘着力 c は 0.12MPa、内部摩擦角 ϕ_u は 6.1° となり若干の ϕ_u が見られる結果となった。しかし、本試験で使用した疑似飽和供試体は完全に飽和しておらず、完全飽和状態であれば、内部摩擦角は 0° であったと考えられる。また自然含水供試体と比較すると、粘着力および内部摩擦角とも非常に低い値となった。

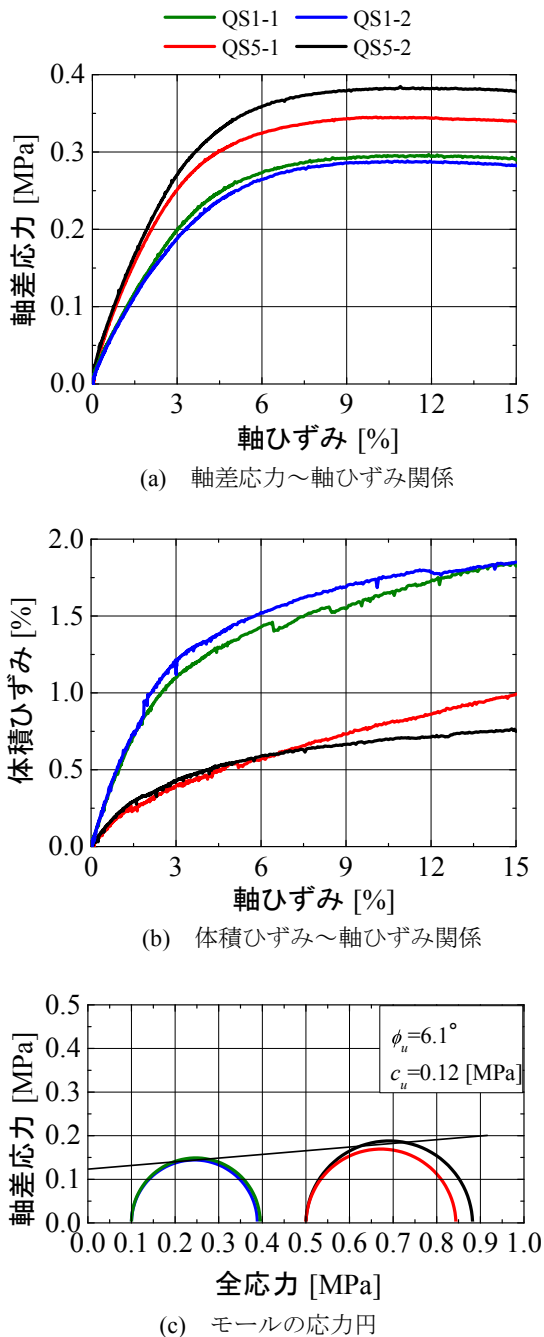


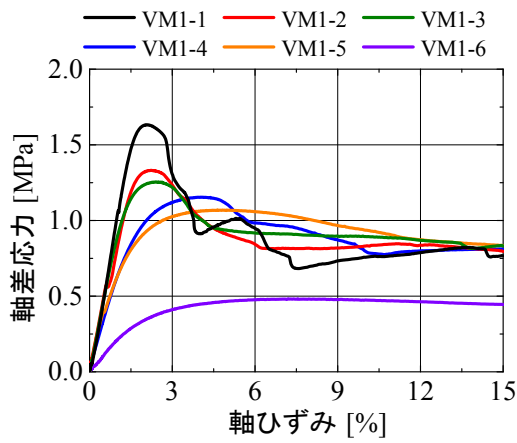
図 5 疑似飽和供試体の非排気非排水三軸試験

3.3 各種不飽和供試体の試験結果

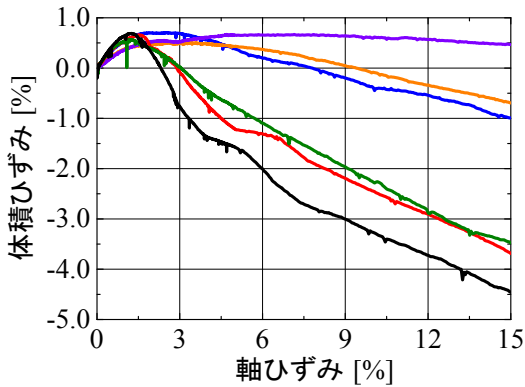
図 6～8 に各種不飽和供試体の非排気非排水三軸試験の結果を示す。なお、図 6 に拘束圧 0.1MPa、図 7 に拘束圧 0.5MPa の試験結果を示す。図 8 は各種不飽和供試体の試験結果から描いたモールの応力円となっている。凡例は表 1 に示した試験ケースである。

図 6 (a) と図 7 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、拘束圧 0.5MPa で試験を実施した 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、拘束圧が高い場合も、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、ベントナイト・珪砂混合体では、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 6 (b) と図 7 (b) に体積ひずみ～軸ひずみ関係より、VM5-2～VM5-6 では疑似飽和供試体と同様に供試体は体積圧縮を続ける結果となった。しかし、VM5-1 は自然含水供試体と同様の挙動を示している。ただし、体積圧縮量は自然含水供試体に比べ小さく、供試体の体積膨張の値も小さい値となっている。VM5-3 については、いずれの供試体より大きく体積圧縮している。これは、VM5-3 の供試体が若干のゆる詰め傾向であり、VM5-3 の最大軸差応力が、飽和度の高い VM5-4 より小さくなったと考えられる。VM1-1～VM1-6 では自然含水供試体と同様の挙動を示しており、せん断開始直後の軸差応力が急激に増加する段階において供試体は体積圧縮を続けている。最大軸差応力に到達する手前で供試体は体積膨張に転じ、その後は軸差応力の急激な低下に伴い、急激に体積膨張している。残留状態となつてからは、供試体は緩やかに体積膨張している。供試体の体積ひずみは飽和度が低いほど変化量が大きく、膨張割合も大きくなっている。しかし、飽和度が高くなるほど、最大せん断応力到達後の供試体体積ひずみの膨張は徐々に見られなくなった。これらの結果から、各種不飽和供試体の飽和度が低い場合では自然含水供試体と同様に、体積圧縮した後、体積膨張に転じる挙動となる。しかし、供試体の体積圧縮量および体積膨張量はいずれも自然含水供試体よりも小さい値となった。また、供試体の飽和度が高くなると、疑似飽和供試体と同様に、せん断中に供試体は体積圧縮を続ける挙動となった。ただし、供試体の拘束圧が高い場合では、全般的に疑似飽和供試体と同様の挙動となった。しかし、供試体の飽和度が低い場合では、自然含水供試体と同様に膨張傾向を示した。これらの試験結果か

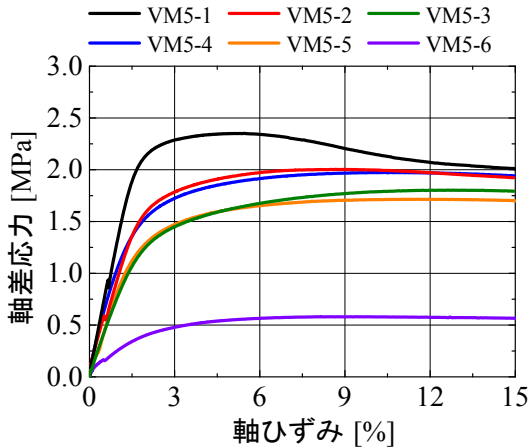


(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

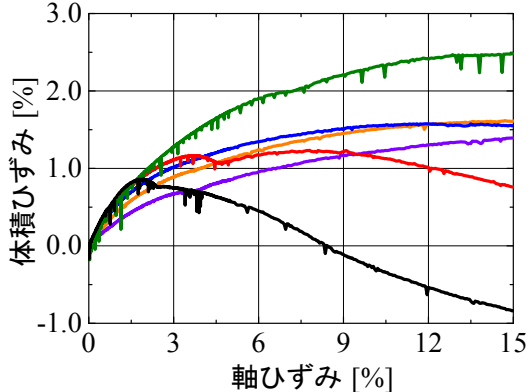


(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図6 各種不飽和供試体の試験結果 (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7 各種不飽和供試体の試験結果 (0.5MPa)

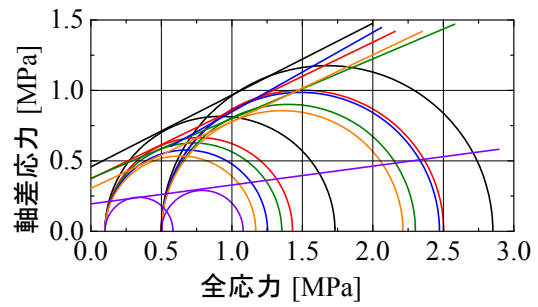


図8 各種不飽和供試体のモールの応力円

表2 各種不飽和供試体粘着力 c と内部摩擦角 ϕ_u

供試体	飽和度 (%)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ_u (°)
各種不飽和 供試体	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

ら、試験中の珪砂・ベントナイト混合体のダイレイタンスー特性は、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。

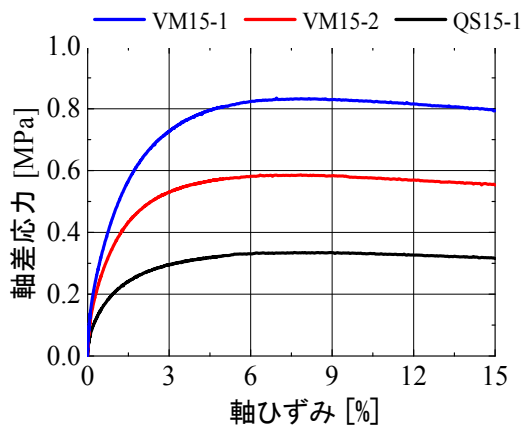
表2に図8の各種不飽和供試体のモールの応力から求めた、粘着力 c と、内部摩擦角 ϕ_u を示す。表より、供試体飽和度が高くなるにつれ、粘着力と内部摩擦角は徐々に低下し、飽和直前で急激に低下していることがわかる。

3.4 高拘束圧条件における試験結果

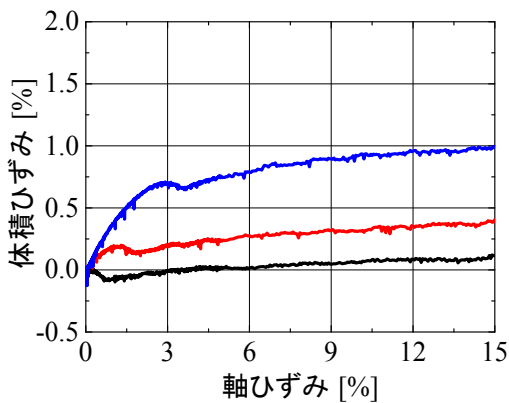
図9に高拘束圧条件による非排気非排水三軸試験の結果を示す。なお、高拘束圧としたのは、2節で述べたように実際の現場では飽和状態の高密度ベントナイト自体の膨潤圧が反力として作用することが想定されるためである。凡例は表1に示した試験ケースである。図9(c)は各飽和度の試験結果から描いたモールの応力円である。ただし、表1に示した飽和度は供試体作製時の値であり、高校側圧を作用させた状態では、気相の圧縮によって、飽和度が相当量上昇している可能性がある。

図9(a)の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体においても軸ひずみの増加に伴い軸差応力が増加し続け、軸ひずみ7%程度で最大軸差応力に到達している。また、最大軸差応力は飽和度が低いものほど、大きい値となり、低拘束圧(拘束圧 0.1MPa, 0.5MPa)の試験結果と同様の傾向を示した。しかし、高拘束圧の飽和度79%と飽和度86%の供試体のせん断挙動は、低拘束圧ほど大きく異なる傾向はみられなかった。これは、先述のように供試体作製時に低飽和度であった供試体でも、高拘束圧条件下では高い飽和度に変化しているためと考えられる。

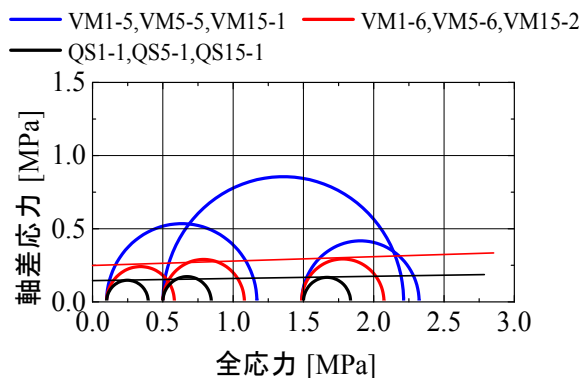
図9(b)の体積ひずみ～軸ひずみ関係から、いずれの供試体においても体積圧縮を続け、供試体の飽和度が高くなるにつれ体積変化の度合いは小さくなる結果となった。このことから、高拘束圧の試験結果は、拘束圧 0.5MPa と



(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係



(c) モールの応力円

図9 高拘束圧の非排気非排水三軸試験結果

ほぼ同様の傾向を示し、試験中のベントナイト・珪砂混合体のダイレタンシー特性は高拘束圧においても、飽和度によって変化することが示された。また、QS15-1は3.2節のQS1-1, QS5-1と同様に試験中は圧縮傾向を示したが、圧縮量は非常に小さい値となっている。これは、高拘束圧の作用によって、供試体内の空気や間隙が充填されたためと考えられる。また、せん断開始直後のわずかな体積膨張については、内セル内に貫入する载荷ロッドの補正による誤差の可能性が考えられる。

図9(c)のモールの応力円より、飽和度が約90%で整理したモール円では、粘着力 $c=0.15\text{MPa}$ 、内部摩擦角 ϕ_i

$=0.8^\circ$ 、飽和度が約80%では、粘着力 $c=0.25\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi_i=0.0^\circ$ となった。なお、飽和度約70%で整理したモール円については内部摩擦角と粘着力を求めることができなかった。これは、高拘束圧の供試体の飽和度が他の拘束圧よりも高くなっているためと考えられる。

Agusら³⁾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。

また、向後・森山⁴⁾は、非塑性シルトの不飽和三軸試験を実施し、不飽和供試体に作用させるサクシオンが、せん断時の最大軸差応力やダイレタンシー特性などの力学特性に大きく影響を及ぼすことを示している。本研究の試験結果は、試験材料は異なるものの、向後・森山の試験結果の傾向ときわめて類似している。

4. おわりに

様々な飽和度を有するベントナイト・珪砂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、せん断強度が低下するが、特に飽和直前で急激に低下することが示された。不飽和の粘性土においては、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^{4),5)}。本研究の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ことは明白であることから、今後はサクシオンをパラメータとして力学特性の統一的な解釈をすすめるとともに、不飽和領域の力学挙動に適用できる数値モデルの構築を検討する。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律 (平成十二年六月七日法律第十七号, 最終改正平成二十三年七月二二日法律第八四号)
- 2) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物, 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—, 分冊2 地層処分の工学技術, 第IV章 処分場の設計に関する検討, 4.1 人工バリアの設計・製作, IV-1-IV-205, 1999.
- 3) S. Agus, T. Schanz and D. Fredlund, Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(5), 583-594, 2010.
- 4) 向後雄二, 森山英樹: 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.
- 5) 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.