

令和元年6月24日現在

機関番号：33919

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14307

研究課題名(和文) 膨潤性鉱物を主体とした地盤材料を記述するための土質力学の再構築

研究課題名(英文) Reconstruction of soil mechanics to describe the geomaterials mainly containing expansive minerals

研究代表者

小高 猛司 (Kodaka, Takeshi)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：00252271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、放射性廃棄物処分に使用するベントナイト緩衝材に代表される膨潤性鉱物を多く含有する地盤材料の力学特性を記述するために、各種含水条件でのベントナイト供試体を用いた三軸試験を実施して、従来の土質力学で用いられる有効応力の適用性について検討を行った。その結果ベントナイト緩衝材の変形・強度特性にはサクションの影響が大きく、通常の有効応力の概念は成り立たないことが示された。また、再冠水して飽和している状態でのベントナイト緩衝材については、三軸試験や一面せん断試験のような大きな変形を伴う問題であっても、数値シミュレーションを通じて、通常の有効応力の概念が適用できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

種々の飽和度ならびに応力条件下におけるベントナイト緩衝材の系統的な三軸試験を実施し、そのダイレイタンスー特性を含む変形・強度特性を明らかにし、さらに、飽和度に応じた変形・強度特性の変化は、膨潤性鉱物特有の高いサクションの影響であることを示したことの学術的意義は大きい。また、不飽和条件下での従来の有効応力の適用限界を示しつつ、その一方で飽和条件のベントナイトであれば、有効応力をベースとした数値シミュレーションによって緩衝材の大変形時の挙動予測までできることを示したことの社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, a series of triaxial tests using bentonite specimens was performed under various moisture conditions to study the mechanical properties of geomaterials containing a large amount of expansive minerals such as bentonite buffer materials used for radioactive waste disposal. It was also conducted to study the applicability of effective stress used in conventional soil mechanics. As a result, it was shown that the influence of suction is large on the deformation and strength properties of bentonite buffer material, and the concept of effective stress does not hold. In addition, for bentonite buffer materials in saturated condition, the applicability of concept of effective stress was shown through numerical simulation, even for problems with large deformation such as triaxial test and direct shear test.

研究分野：地盤工学

キーワード：ベントナイト 三軸試験 膨潤性鉱物 モンモリロナイト

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の廃炉処理をはじめ、我が国では放射性廃棄物処分の問題に直面している。比較的線量が高い低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分においても、高レベル放射性廃棄物の地層処分においても、緩衝材として高密度のベントナイトを用いることが確実視されている。膨張性粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とするベントナイトは、吸水に伴って粘土粒子内に水分子を取り込み、土粒子の大きさが変わる。また、その吸水の割合は、ベントナイトが Na 型であるのか、Ca 型であるのかという化学的な性質ばかりではなく、圧力や拘束条件によっても変わる。つまり、土粒子の間隙が完全に水で飽和した状態であっても、吸水時に境界が拘束されていると膨張が制限され、その代わり極めて大きな膨潤圧が発生するが、その膨潤圧を拘束している圧力が緩和すると、土粒子への吸水が進み膨張する。そのため、「土粒子と間隙水は非圧縮」という前提で成り立つ有効応力の原理とはそもそも相容れない。土粒子の剛性が無限大とする仮定も成り立たないことも考えなければならない。また、土粒子に取り込まれた間隙水の体積分だけ土粒子が膨張するという単純なものでもない。したがって、不飽和条件まで考慮する場合には、従来の有効応力の原理が適用できる保証はない。しかしながら、現状では従来型の土質力学をベースとした手法でしか性能評価の術はなく、通常は緩衝材を弾性体と扱う解析コードが多い。このような従来の土質力学をベースとして緩衝材の性能評価を行う場合については、その適用限界を明確にすることが必須であり、そのためには不飽和領域を含めたベントナイト緩衝材の力学特性の把握が重要となる。

### 2. 研究の目的

膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを主材とするベントナイトは、放射性廃棄物処分において緩衝材として使用されることが確実視されており、その力学特性の把握が急務である。しかし、土粒子非圧縮を前提として構築されている従来の土質力学の枠組みでは、不飽和から飽和状態に推移する条件下において土粒子が体積変化するベントナイトのような地盤材料に対しては、その力学挙動を記述することは困難と考えられる。

本研究の目的は、膨潤性粘土を含む地盤材料の性能評価を適正に行うために、様々な含水状態と応力条件下において土粒子の体積が変化する特殊な地盤材料の力学特性を把握し、そのような地盤材料に適した土質力学の再構築を検討することである。特に、緩衝材の力学特性を合理的に説明するため、種々の含水率と圧力条件でのベントナイトの力学挙動を把握することを主目的とした。さらに、膨潤性粘土を多く含有する地盤材料の力学特性を適正に記述するために、従来の土質力学で用いられている「有効応力」の適用性についての検討も行った。

### 3. 研究の方法

放射性廃棄物処分において緩衝材として使用される予定のベントナイトは、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを主材している。しかし、従来の土質力学は、土粒子が非圧縮であり、かつ、間隙水も非圧縮であること前提として、土粒子の配列構造が変化することによってのみ体積が変化することができるために、ベントナイトの力学挙動を適正に記述することは難しいと考えられる。本研究では、Na 型ベントナイトに三河珪砂を混合した上で、高密度に圧縮成型した高密度ベントナイト供試体を作製し、それを高レベル放射性廃棄物処分の緩衝材に見立てて検討を行った。具体的には、自然含水状態のベントナイトに乾燥砂を混合した最も飽和度の低い実験試料から、間隙がほぼ水で満たされている疑似飽和状態の供試体までの様々な飽和度の供試体を用いて、不飽和三軸圧縮試験を実施することにより、膨潤性粘土を含む圧縮ベントナイトの飽和状態と応力状態に応じた、変形・強度特性の把握を行った。さらに、疑似飽和供試体に対して、従来の土質力学をベースとした弾塑性モデルを用いて、三軸試験と一面せん断試験のシミュレーションを実施し、その適用限界についての検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 不飽和三軸試験

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、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、圧縮成形したものである。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、0.5 および 1.5 MPa 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。

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オ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。

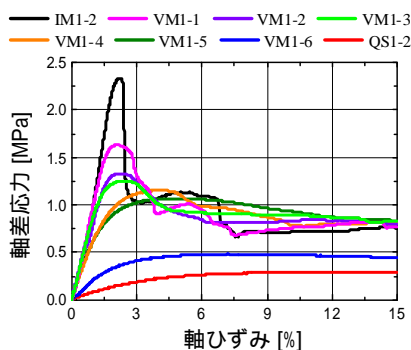
図 1(b)および図 2(b)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係より、いずれの拘束圧においても自然含水供試体は圧縮の後、膨張に転じるのに対し、疑似飽和供試体は圧縮し続ける結果となった。各種不飽和供試体は、拘束圧が低い場合には全般的に自然含水供試体と同様の挙動を示した。一方、拘束圧が高い場合および拘束圧が低い飽和直前の供試体において、疑似飽和供試体とほぼ同様の挙動となった。これらの試験結果から、試験中のダイレタンスー特性は、せん断特性と同様に供試体の飽和度と拘束圧によって変化することが示された。

以上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はサクシオンの影響を受けていると考えられる。珪砂を 30%混合したベントナイト供試体の含水比とサクシオンとの関係については、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が指摘されている。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。

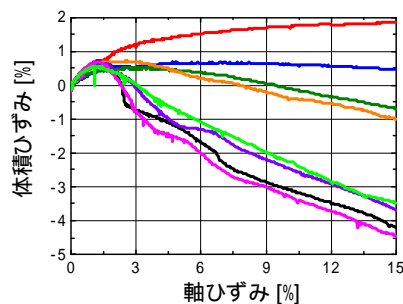
本研究では、様々な飽和度を有する珪砂・ベントナイト供試体の非排気非排水三軸試験を実施した。試験結果から、供試体の飽和度が上昇するにつれて強度が低下し、特に飽和直前で急激に減少することが示された。その現象はベントナイト特有のサクシオンの大きな変化と考えられるため、不飽和領域でのベントナイト緩衝材の力学挙動はサクシオンの効果を適正に記述する必要がある。

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 (%)	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
	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	

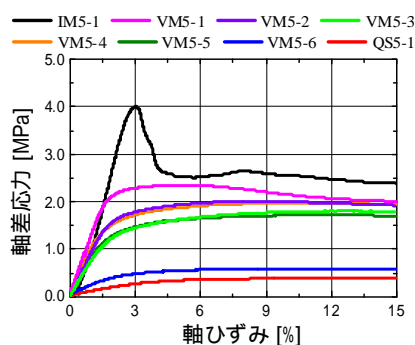


(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

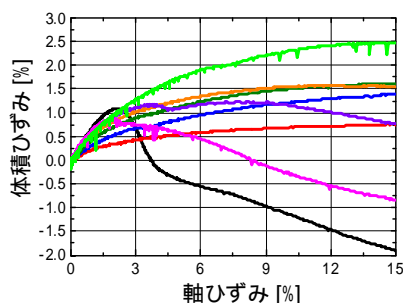


(b) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図 1 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 2 非排気非排水三軸試験結果  
(拘束圧 0.5MPa)

## (2)飽和ベントナイト緩衝材のシミュレーション

図3に、飽和ベントナイト緩衝材の圧密非排水条件の三軸試験の数値解析によるシミュレーション結果を試験結果とともに示す。なお、この三軸試験結果は、緩衝材データベースにて公開されている結果を用いており、数値解析には弾塑性モデルであるカムクレイモデルを用いている。図3(a)および(b)に、応力～ひずみ曲線および有効応力経路をそれぞれ示す。カムクレイモデルの各弾塑性パラメータは、拘束圧1.5 MPaの試験結果を基準として、その試験結果を記述するように設定し、拘束圧0.9 MPa, 1.9 MPa, 2.9 MPaの各試験結果は同じパラメータを用いて解析している。すなわち、先行圧密応力が1.5 MPaであると仮定し、拘束圧0.9 MPaの供試体については、1.5 MPaから0.9 MPaまで等方除荷を行い、初期拘束圧1.9 MPa, 2.9 MPaの供試体については、1.9 MPaから2.9 MPaまで等方圧縮を行い、その後非排水せん断を実施した。ただし、あくまで試験を模擬した数値計算上の話である。

図3に示すように、応力～ひずみ曲線、有効応力経路ともに、解析結果は試験結果を非常によく説明していることがわかる。特に、初期有効拘束圧が大きい供試体においては、等方圧密による等方硬化の効果により、ひずみ軟化の程度が拘束圧に応じて大きくなることなどの一致度も高く、カムクレイモデルが飽和条件下での緩衝材の力学挙動であれば、非常によく説明できることが示された。

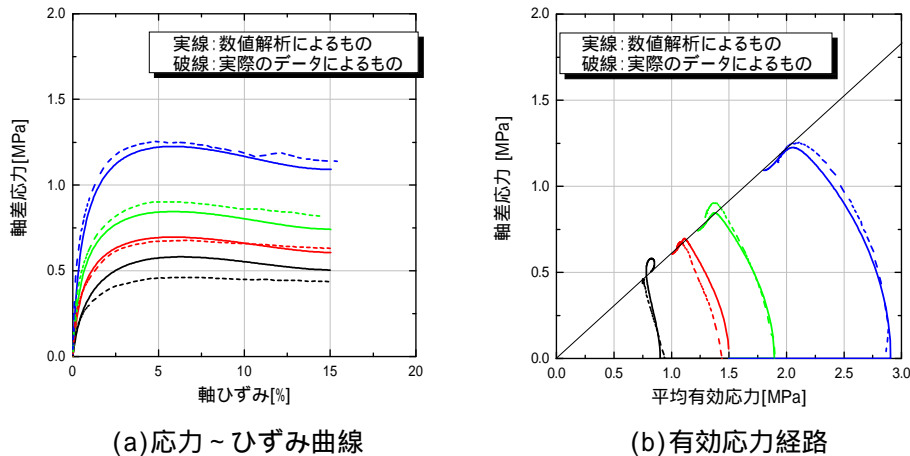


図3 カムクレイモデルによる緩衝材の三軸試験結果のシミュレーション結果

次に、飽和ベントナイト緩衝材の一面せん断試験のシミュレーション結果を示す。矩形供試体と同様の寸法（5cm角×2cm厚）とし、2次元平面ひずみ条件で解析を実施した。要素数は横50要素×縦40要素の合計2000要素であり、1要素4節点のアイソパラメトリック要素を用いて、節点総数は2091節点である。上下せん断箱は上下には動かず、さらに境界からの水の出入りはないと仮定し、定体積条件を満足するものとした。また、有限要素解析を実施するのにあたり、図3と同様の弾塑性パラメータを使用した。緩衝材の透水係数については、ベントナイトとしての標準的な値である  $1.0 \times 10^{-11}$  m/s を用いた。なお、数値解析は、カムクレイモデルによる有限変形水 - 土骨格連成弾塑性有限要素解析を実施した。

図4および図5はそれぞれ解析によって得られたせん断ひずみおよび比体積の分布であり、初期状態から水平変位5mmまで1mmごとに示したものである。比体積とは空隙比に1を加えた量であり、土粒子実質部分に対する土全体の体積の比率を表す。したがって、空隙比と同様に比体積が小さくなるほど空隙の割合が少なくなることを意味する。図4からわかるように、上下せん断箱間にせん断帯が発生している。緩衝材の遮水性能の維持としての観点では、せん断帯が発生することによって緩衝材のマクロな透水性がどのように変化するのが重要であるが、その判断材料となるのが図5の比体積分布である。図からわかるように、図4にてせん断帯の発生に伴い引張応力が作用する供試体端部においては、比体積が増加しているが、供試体の内部においては、せん断ひずみが大きく発生しているにも拘わらず、比体積の変化は全く現れてきていない。これは、透水係数が非常に小さいために、せん断ひずみが大きく発生し、それに伴い過剰間隙水圧が発生したとしても、せん断中には間隙水のマイグレーションが発生しないために比体積の変動はないものと考えられる。

緩衝材の三軸試験結果から予測した弾塑性パラメータを用いて一面せん断試験の有限要素解析を実施し、緩衝材に強制的にせん断帯が生成する問題を検討した。最大せん断応力を発揮する程度の水平変位までしか数値解析を実施していないが、供試体内部の状態をある程度予測することができている。今回の数値解析においては、飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験結果と調和的なシミュレーション結果が得られた。この有限要素解析は平面ひずみ状態を仮定できる一面せん断試験であるが、極めて限定された領域に発生するせん断帯であることや引張応力の発生に伴う複雑な境界条件の設定など、今後、最終処分場を想定した実規模での本格的なシミュレーションを実施してゆく上で貴重な基礎資料となった。

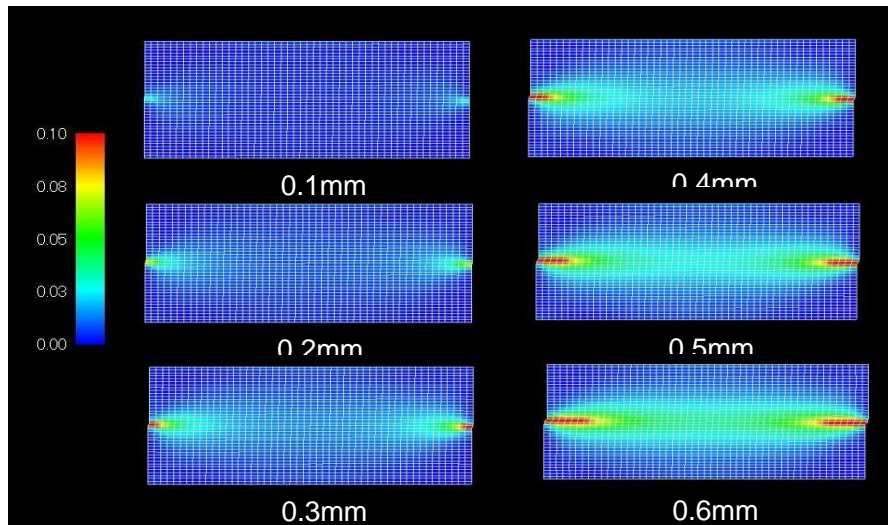


図4 一面せん断試験の数値シミュレーション（せん断ひずみ分布）

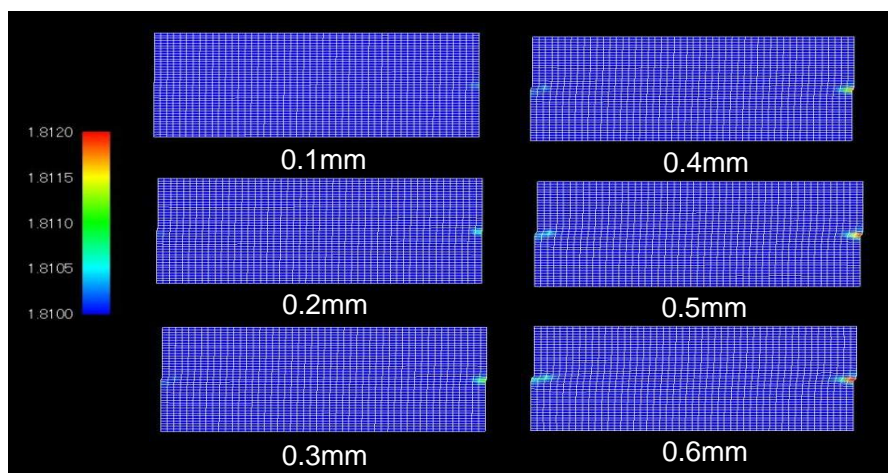


図5 一面せん断試験の数値シミュレーション（比体積分布）

本研究の結果，飽和条件下に限定すれば，膨潤性鉱物のベントナイト緩衝材であっても，従来の土質力学の枠内の有効応力の原理に基づく弾塑性モデルによって，三軸試験の力学挙動や一面せん断試験の変形特性を説明できることが示された。不飽和条件下のベントナイト緩衝材については，極めて大きなサクシヨンの影響を受けることが示されているため，不飽和時から再冠水後の飽和状態までを含めて緩衝材の力学性能を評価するためには，抜本的に数値解析手法の再構築をすすめる必要があるが，飽和後の力学挙動の予測については，有効応力の原理の適用も可能であることが示された。