

放射性廃棄物の地下処分における粉末および粒状ベントナイト緩衝材の変形・強度特性

Deformation and strength properties of buffer materials made of powder or granular bentonite for the underground disposal of radioactive waste

高田英典¹, 元山泰久², 小高猛司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 日特建設（元名城大院）

3 名城大学・理工学部建設システム工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp

概 要

本研究では、放射性廃棄物の地下処分で緩衝材として用いられる高密度の粉末および粒状ベントナイト緩衝材の変形・強度特性の検討を目的とし、高圧一面せん断試験を実施した結果を示す。具体的には、粉末および粒状ベントナイトを様々な乾燥密度で圧縮成型した供試体を用いて試験を実施し、変形・強度特性を検討した。また、供試体の含水比を自然含水状態から飽和状態まで変化させ、供試体の飽和化による影響を検討した。さらに試験後の供試体内部を X 線 CT によって観察した。一面せん断試験の結果より、供試体の飽和化に伴いせん断抵抗角が小さくなることが示された。また、不飽和状態の粉末ベントナイト供試体が脆性的な破壊形態を示すのに対し、粒状ベントナイト供試体は延性的な破壊形態を示した。さらに、X 線 CT による観察結果では、不飽和供試体においてせん断に伴う亀裂が供試体内部に進展している様子が観察された。しかし、飽和供試体では、せん断に伴う亀裂は観察されなかった。

キーワード：粉末ベントナイト，粒状ベントナイト，一面せん断試験，飽和度，X 線 CT

1. はじめに

原子力発電に伴い生産される放射性廃棄物の安全な処分は我が国が直面する重要な課題である。放射性廃棄物は、その放射性濃度や性状によって、大きく 2 つに分類される。使用済の燃料および再処理の工程で分離された高い放射能を持った廃液を高レベル放射性廃棄物と呼び、チャンネルボックスや制御棒、作業員が用いた防護服等の消耗品など、高レベル放射性廃棄物と比較して放射濃度の低いものを低レベル放射性廃棄物と呼ぶ。これらの放射性廃棄物は人間の生活空間から隔離する必要があり、自然災害や人間の活動の影響を受けにくくする必要がある。我が国では、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。その中で地下深部の地層ならば地下水の移行が遅いため物質が動きにくく、人間の生活環境から十分な距離を得ることができると考えられ、特定放射性廃棄物の最終方針として、地下 300m 以上の政令で定める深さの地層に必要な措置を講じて安全かつ確実に埋設することを決定している。また、地下処分は、天然の地質環境（天然バリア）と工学的な対策（人工バリア）を組み合わせた多重バリアシステムによって放射能を封じ込めることを基本としている。

放射性廃棄物の地下処分は廃棄物の放射性濃度によって人工バリアの構成ならびに処分サイトの深度等が異なる。高レベル放射性廃棄物はまずガラス原料と高温で融かし合わせ、オーバーパックと呼ばれる金属製の容器の中で固化し、安定したガラス固化体にする。次に、ガラス固化体を金属製の容器に封入した後、その周りを緩衝材で覆って、地下 300m 以深の安定した地層中に埋設する²⁾。一方、低レベル放射性廃棄物の中で放射能濃度が比較的低い廃棄物に関しては浅地中に、それよりも高い廃棄物に関しては地表から 50m～100m 程度（余裕深度）の核種移行防止機能の高い地中にコンクリートピットと同等以上の閉じ込め機能を持った人工バリアを設置するとされている。また人工バリアの構成に関しては、低透水層の内側に核種移行を抑止するための低拡散層を設ける形態となっている³⁾。

人工バリアにおける緩衝材は、放射性廃棄物の地下処分において大きな役割を担っている。その役割としては主に廃棄物と地下水の接触を阻み、放射性核種の移行を遅延させることである。また放射性核種が残存する数百年から千年程度の期間に起こりうる現象に対応可能な材料である必要がある。地下処分においてこれらの必要条件を満たす材料として、高密度のベントナイトが有力視されている。なお、高レベル放射性廃棄物の処分に用いられる緩衝材では経済性や支持力性能、さらに放射性廃棄物の発する熱を

逃がすための熱伝導率や透気性の向上を見込んで、ベントナイトに珪砂混入した珪砂ベントナイト混合体の使用が検討されている。また低レベル放射性廃棄物の処分では、粒状のベントナイトを用いることが検討されている。

処分場で用いられるベントナイト緩衝材は施工時の不飽和状態から地下水の再冠水によって飽和状態へと変化する。また処分場の設計のために、高密度ベントナイト緩衝材の強度・変形特性を把握することは必要不可欠であると言える。

そこで本研究の目的は、放射性廃棄物の地下処分において用いられる粉末および粒状ベントナイト緩衝材の不飽和から飽和状態までの変形・強度特性を把握することである。本論文では粉末および粒状ベントナイトを用いた不飽和および飽和状態の高密度ベントナイト供試体において、各種の供試体条件が変形・強度特性に及ぼす影響について検討した。具体的には、高圧一面せん断試験を実施し、粉末および粒状ベントナイトを用いた圧縮ベントナイト供試体における供試体の乾燥密度が変形・強度特性に及ぼす影響を検討する。また、飽和供試体については飽和化に伴う変形・強度特性の変化に加え、供試体作製方法の違いによる影響も検討する。さらに、試験後の供試体において、X線CTを用いて、表面上では観察できない緩衝材の内部構造の変化について観察する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

写真1に本研究で用いた高圧一面せん断試験装置を示す。地下処分場で用いられるベントナイト系材料は高圧で圧縮成型されかつ硬質であることから、载荷装置にも高圧条件が必要であるため、垂直方向および水平方向の载荷容量の最大を、それぞれ10、および8MPaとした。本試験装置にはメガトルクモータを採用し、パソコンにより高い分解能で制御が可能であり、ひずみ速度は垂直、水平ともに0.001mm/min~1.0mm/minの範囲で可変である。さらに、定体積条件および定圧条件で一面せん断試験を実施可能である。写真2に試験機中心部を示す。せん断は高剛性ボルトで上部せん断箱を固定し、上部と下部のせん断箱の間に隙間を空けて、水平方向のメガトルクモータにより下部せん断箱を水平方向に可動させることによりせん断する。垂直荷重計測用ロードセルは、せん断に伴う供試体の体積膨張により発生するせん断箱内部との摩擦力の影響を避けるために、载荷軸とは反対側のせん断箱の下部に設置している。水平荷重計測用ロードセルは、左方向より水平荷重を作用するため、せん断箱の左側面に設置している。供試体は50mm×50mm角の正方形断面で40mm厚の矩形供試体であり、厚さ10mmのスペーサーを用いることで、厚さ20mmの供試体も試験可能である。加圧板はせん断箱と触れ合うことで摩擦が発生しないように、加圧板の寸法を供試体の寸法より0.2mm程度小さくしている。またせん断箱に硬質アクリルを設置することで、せん断中に生成・

発生するせん断帯を長手方向に定量的かつ容易に観察することができる。

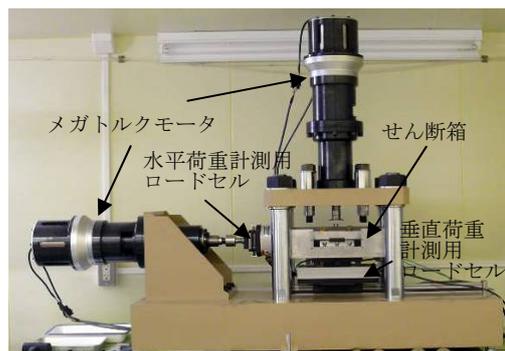


写真1 高拘束圧一面せん断試験機(全様)

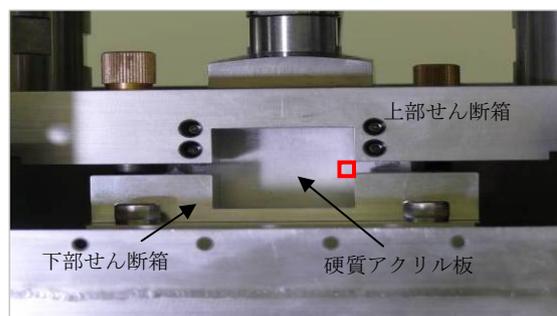


写真2 せん断箱中心部

2.2 試験試料

試験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, 含水比 $w=11.61\%$ ）と粒状ベントナイト（クニゲル GX, 含水比 $w=8.6\%$ ）の2種類のベントナイトを用いた。粉末ベントナイトを用いる試験の場合、三河珪砂6号を乾燥質量比で30%混合する。また余裕深度処分における低透水層の施工には、最大粒径10mm以下のベントナイトが用いられるが、本試験における粒状ベントナイトの最大粒径は2.0mm以下に調整して用いた。しかし、地盤工学会基準における「土の圧密定体積一面せん断試験方法」においては、最大粒径0.85mmを超える土に対しては供試体直径を最大粒径の70倍程度を標準とするとされているが、それに従えば試料の最大粒径は本試験で用いるせん断箱の直径（50mm）を1/70倍した0.71mm以下にする必要がある。今回はそれより大きい、粒状ベントナイトの粒子は非常に簡単に破砕するため、特に関係はないと判断した。図1に粒状ベントナイトの全粒度試料および粒度調整試料の粒度分布を示す。

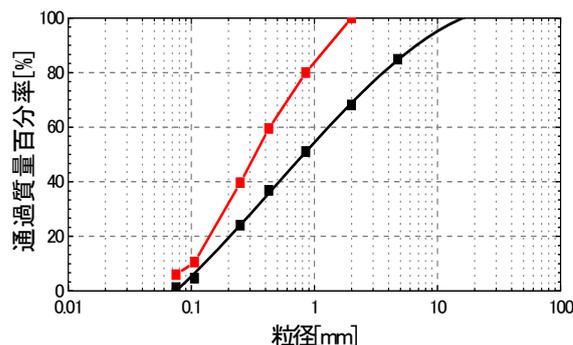


図1 粒状ベントナイトの粒度分布

2.3.1 不飽和供試体の作製方法

不飽和供試体は、写真1に示す高圧一面せん断試験装置で圧縮成型して作製した。なお本研究では、自然含水状態の粉末ベントナイトに珪砂を混合し圧縮成型を行った供試体を珪砂ベントナイト混合体、一方、粒状ベントナイトを圧縮成型した供試体を圧縮粒状ベントナイト供試体と呼ぶ。珪砂ベントナイト混合体では供試体の乾燥密度を1.55, 1.60, 1.65, 1.70, 1.75 Mg/m³とし、供試体は前述のように、50mm×50mmの正方形断面、厚さ40mmの矩形供試体を基本とするが、乾燥密度1.65 Mg/m³については厚さ20mmの供試体も作製し、供試体厚さによる影響を検討した。圧縮粒状ベントナイト供試体では供試体の乾燥密度を1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 Mg/m³とし、供試体寸法は50mm×50mmの正方形断面、厚さ20mmの矩形供試体を基本とするが、乾燥密度1.60 Mg/m³については厚さ40mmの供試体も作製し、供試体厚さによる影響を検討した。せん断はせん断速度0.4mm/minで水平変位6.0mmまで定体積条件で行い、供試体の乾燥密度が圧縮ベントナイト供試体の力学特性に与える影響について検討した。

2.3.2 飽和供試体の作製方法

本研究では、飽和供試体の作製方法は、専用モールドを用いて圧縮成形した不飽和圧縮ベントナイト供試体に蒸留水を浸潤させる方法を基本とするが、比較のため、霧吹きで含水調整したベントナイトを高圧一面せん断試験装置にて圧縮成型する方法も用いた。以下に飽和供試体の作製手順を示す。

(1) 上部分離型モールドを用いた作製方法

自然含水状態の試料を油圧ジャッキで直径80mm、高さ20mmの高剛性リング内に圧縮成型した後、写真3の上部分離型モールドに設置し、上部载荷ピストンを設置した後、写真4に示す剛なフレームによって、軸変位を固定する。図2に飽和モールドの概略図を示す。供試体の上下にはポーラスメタルがあり、吸水が可能となっている。アクリル円筒内に蒸留水を入れ、浸潤飽和させるが、浸潤初期は片面注水で供試体内の空気の逃げ道を確保しながら実施し、その後両面注水させ供試体を飽和させる。その際に飽和モールド上部に設置されたロードセルによって膨潤圧を計測する。膨潤圧が一定になった段階を飽和とみなした。その後、モールドを解体し、高剛性リングを取り出し、50mm×50mm角のガイドカッターによって矩形供試体を成型し試験を実施した。

(2) 完全拘束型モールドを用いた作製方法

上部分離型モールドと同様に、自然含水状態の試験試料を直径80mm、高さ20mmの高剛性リング内に圧縮成型する。次に写真5に示す完全拘束型モールドに設置し、真空圧を作用させ脱気を行う。脱気の完了後、膨潤圧を計測しつつ注水し飽和させた。図3に完全拘束型モールドの概略図を示す。供試体の上下のポーラスメタルから蒸留水を浸



写真3 上部分離型モールド

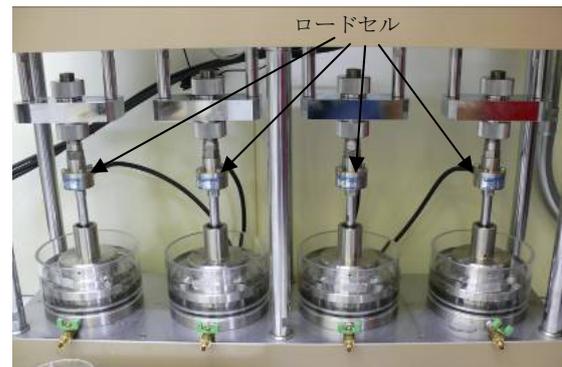


写真4 4連载荷フレーム

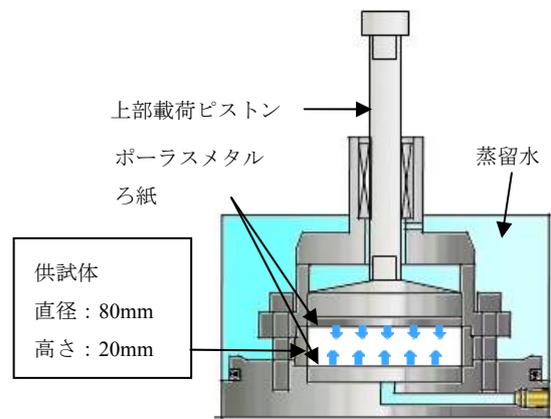


図2 上部分離型モールド（概略図）



写真5 完全拘束型モールド

潤させることが可能となっている。また、モールド下部のロードセルにより、供試体の膨潤圧を計測する。(1)の上下分離型モールドと同様に膨潤圧が一定となった段階で飽和とみなした。その後、上下分離型モールドと同様の供試体成型を行い、試験を実施した。

(3) 霧吹きであらかじめ含水調整する作製方法（加水法）

自然含水状態の試験試料に霧吹きによる加水を行い、試料の含水比を調整した後、一面せん断試験装置にて供試体を圧縮成型する（以下、加水法と呼ぶ）。その際、加水によってベントナイトが団粒化した部分は除去し、出来る限り均質に含水調整ができた試料を用いて供試体作製を行った。ただし、供試体の飽和度を上昇させるために、圧縮成型後に試験装置内で1日水浸させることで飽和度をさらに上昇させた。なお、供試体寸法は50mm×50mmの正方形断面に、厚さ20mmの矩形供試体とした。図4に浸水中の試験装置中心部の概略図を示す。供試体上下にポラスメタルがあり、吸水が可能となっている。浸潤初期は上下せん断箱間まで蒸留水を入れて、空気の逃げ道を確認しながら浸潤し、その後、せん断箱上部まで給水し最終的な飽和化を行う。その際、飽和過程の膨潤圧をせん断箱下部に設置したロードセルにより計測した。飽和後、蒸留水を排水し、一面せん断試験を実施した。

これらの飽和供試体の作製方法を、珪砂ベントナイト混合体および圧縮粒状ベントナイト供試体において実施する。なお、供試体の乾燥密度を完全拘束型では1.60、1.70 Mg/m³とし、上部分離型および加水法では1.60 Mg/m³とした。せん断は不飽和供試体と同様にせん断速度0.4mm/minで水平変位6.0mmまで定体積条件で行い、供試体の飽和化が力学特性に与える影響について検討した。また、供試体の作製方法の違いによる影響についても検討した。

3. 珪砂ベントナイト供試体の試験結果

3.1 不飽和供試体の一面せん断試験結果

図5に珪砂ベントナイト供試体における不飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は各供試体の乾燥密度を示している。

図5(a)のせん断応力～変位関係より、いずれの乾燥密度においてもせん断初期にせん断応力が増加し、水平変位1.5mm程度でピークに到達している。その後、せん断応力は徐々に減少している。乾燥密度が高いほど、最大せん断応力が大きく、その後の減少幅も大きくなっている。乾燥密度1.65 Mg/m³において供試体厚さによる比較を行うと、せん断応力のピーク時の水平変位が、厚さ40mmの供試体では1.5mm程度であったのに対し、厚さ20mmの供試体では2.0mmと供試体が厚い方が、せん断応力が早くピークに到達することがわかる。

図5(b)に示す応力経路を見ると、供試体の乾燥密度が高くなるほど圧縮成型時に高い垂直応力を要するため、初期

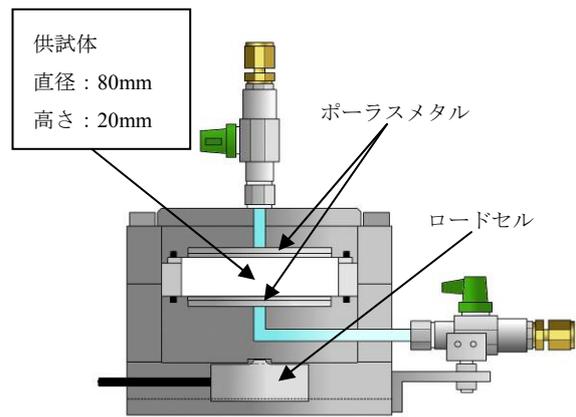


図3 完全拘束型モールド（概略図）

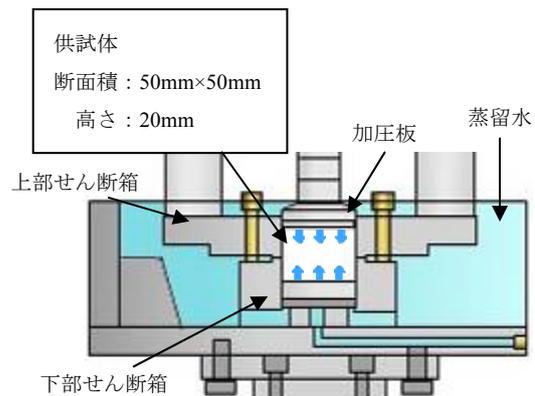


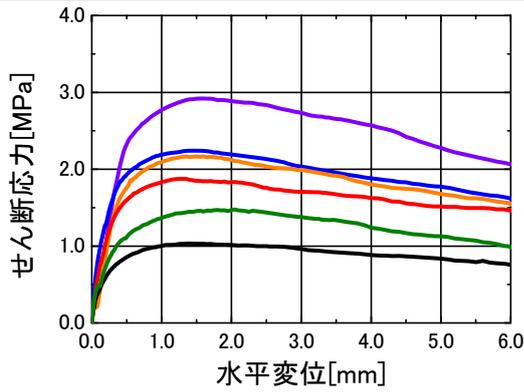
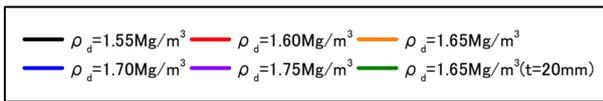
図4 試験機中心部の概略図

垂直応力に違いがある。また、いずれの乾燥密度においても、せん断が進むにつれ、負のダイレタンシーの発現により塑性圧縮を伴うひずみ軟化の挙動を示している。粘性土の一面せん断試験の整理法にならないせん断抵抗角を求めると、いずれの乾燥密度でもせん断抵抗角は $\phi' = 33^\circ$ となった。乾燥密度1.65 Mg/m³において供試体厚さによる比較を行うと、せん断抵抗角 $\phi' = 28^\circ$ となり、供試体厚さ40mmと比べると低い値となり、供試体厚さが厚いほど最大せん断応力が大きくなっている。

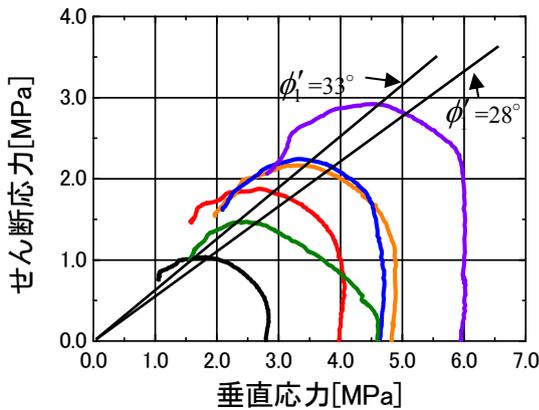
3.2 飽和供試体の一面せん断試験結果

図6に珪砂ベントナイト混合体における飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は各供試体の乾燥密度と飽和方法を示している。なおせん断の際には、各供試体が飽和化の過程で示した膨潤圧を垂直応力として負荷させている。ただし、一面せん断試験装置で作製した供試体では、圧縮成型時の垂直応力を初期垂直応力としている。

図6(a)のせん断応力～変位関係を見ると、いずれの供試体もせん断開始直後に、せん断応力が急激に増加し、ピークに到達した後、緩やかに軟化している。飽和モールドを用いた場合では、せん断応力のピークは水平変位0.6mm程度で到達しており、最大せん断応力は上部分離型モールドより完全拘束型モールドで作製した場合の方が大きい結果となった。図6(b)に示す応力経路を見ると、完全拘束



(a) せん断応力～変位関係



(b) 応力経路

図5 不飽和供試体の一面せん断試験結果

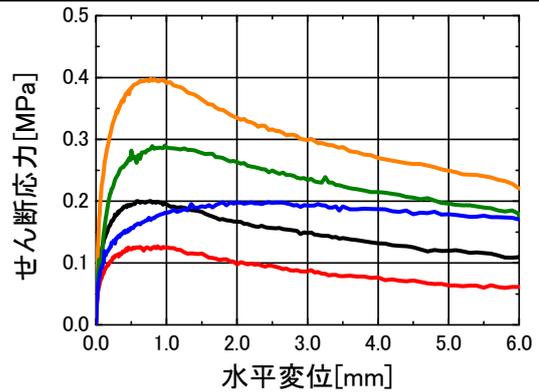
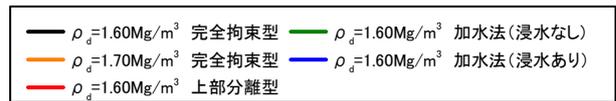
型モールドで作製した供試体の方が大きな膨潤圧を計測し、初期垂直応力も大きくなっている。それに伴い最大せん断応力が大きくなったと考えられる。また加水法を用いた場合には、せん断応力のピークは浸水なしでは 1.0mm、浸水ありでは 1.8mm 程度となった。最大せん断応力は、浸水ありでは飽和モールドで作製した場合と同等の値となったが、浸水なしは大きい値となった。これは、加水のみでは十分な飽和に至っておらず、浸水を行ったことにより供試体の飽和化がより進んだことが考えられる。

図 6(b)に示す応力経路を見ると、不飽和供試と同様に、せん断が進むにつれ、ひずみ軟化の挙動を示している。せん断抵抗角 ϕ'_1 を求めると、飽和モールドで作製した供試体で $\phi'_1=19^\circ$ となり、飽和モールドの違いによるせん断抵抗角への影響は見られなかった。また、加水法の浸水なしで $\phi'_1=23^\circ$ 、浸水ありで $\phi'_1=20^\circ$ となり、浸水ありの方が低い値となった。これは、浸水による供試体の飽和によって、せん断抵抗角が低下したと考えられる。

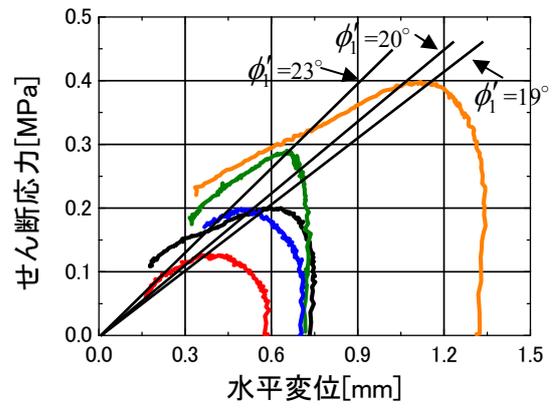
3.3 X線 CT による観察結果

本節では、供試体表面からは観察できない供試体の内部構造の変化について観察を行った。

写真 6 にせん断終了後に供試体を取り出す手順を示す。せん断箱ごと供試体を一面せん断試験機本体より取り出し専



(a) せん断応力～変位関係



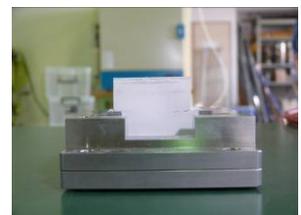
(b) 応力経路

図6 飽和供試体の一面せん断試験結果

用の治具を取り付け、油圧ジャッキを用いて、せん断箱から供試体を取り出す。一面せん断試験によって損傷を受けた供試体は脆性的であるため、すべての工程を慎重に行う。取り出した供試体は含水比が変化しないように、真空パックし、京都大学に搬入し、マイクロフォーカス X 線 CT 装置 (KYOTO-GEOμXCT : 東芝 TOSCANER-32250μHDK) を用いて観察した。



(a) 油圧ジャッキによる上部せん断箱の取り外し



(b) 上部せん断箱を取り外した状態



(c) 油圧ジャッキによる下部せん断箱の取り外し



(d) せん断箱から取り外した試験後の供試体

写真 6 せん断箱から供試体を取り出す過程

図7に不飽和および飽和供試体のX線CTによる内部観察結果を示す。凡例は供試体の乾燥密度を示している。なお、飽和供試体では供試体の作製方法についても示す。X線CT画像は供試体のほぼ中央を撮影しており、X線の透過量が多いほど黒くなり、低密度領域を示している。

図7(a)の不飽和供試体では、いずれの乾燥密度でも供試体端部から供試体内部に向かって、斜めの亀裂が発生していることが確認できるが、供試体の中心部では連続した水平な亀裂は確認できない。しかし、高密度供試体である 1.75 Mg/m^3 については、中心部分にうっすらとした連続する高密度領域が確認できる。

図7(b)の飽和供試体では、全体的に密度のばらつきが見られるが、不飽和供試体で見られるような特殊なせん断帯は見られない。しかし、上下せん断箱境界の両端部から供試体内部に向かう水平な低密度領域が見られ、内部に進行するほど、不明確となっている。また飽和モールドで作製した供試体の濃淡が全体的に均一であるのに対し、加水法によって作製した供試体中には明暗がはっきりとわかる部分が見られる。これは、供試体作製時に一部高密度化した部分が存在していることを示唆している。

4. 粒状ベントナイト供試体の試験結果

4.1 不飽和供試体の一面せん断試験結果

図8に圧縮粒状ベントナイトの不飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は各供試体の乾燥密度を示している。

図8(a)のせん断応力～変位関係より、いずれの乾燥密度においても水平変位 3.0mm 程度まで緩やかにせん断応力が増加していることがわかる。

図8(b)に示す応力経路を見ると、供試体の乾燥密度が高くなるほど圧縮成型時に高い垂直応力を要するため、初期垂直応力に違いがある。また、いずれの乾燥密度においても、せん断が進むにつれ、負のダイレタンシーの発現により塑性圧縮を伴うひずみ軟化の挙動を示している。せん断抵抗角を求めると、乾燥密度 $1.50, 1.55, 1.60, 1.65 \text{ Mg/m}^3$

ではせん断抵抗角 $\phi'_1=38^\circ$ となり、 1.70 Mg/m^3 では $\phi'_1=34^\circ$ となった。また乾燥密度 1.60 Mg/m^3 の試験結果より、供試体厚さによる力学特性への影響は認められない。

4.2 飽和供試体の一面せん断試験結果

図9に圧縮粒状ベントナイトにおける飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は各供試体の乾燥密度と飽和方法を示している。なおせん断の際には、珪砂ベントナイト混合体と同様に、飽和化の過程で計測された膨潤圧を垂直応力を負荷させている。ただし、一面せん断試験装置で作製した供試体に関しては圧縮成型時の垂直応力をせん断開始時の初期垂直応力としている。

図9(a)のせん断応力～変位関係より、いずれの乾燥密度、飽和方法においても水平変位 1.5mm 程度でピークを迎えている。

図9(b)に示す応力経路を見ると、各供試体の膨潤圧から設定した初期垂直応力に応じて、最大せん断応力が異なっている。不飽和供試体と同様にせん断抵抗角を求めると、完全拘束型モールドにおける乾燥密度 1.60 Mg/m^3 で $\phi'_1=29^\circ$ 、 1.70 Mg/m^3 で $\phi'_1=25^\circ$ となり、不飽和供試体のせん断抵抗角よりも小さい値を示した。また、乾燥密度の増加に応じて、せん断抵抗角が小さくなっている。さらに、上部分離型モールドにおける乾燥密度 1.60 Mg/m^3 では $\phi'_1=25^\circ$ となり、飽和供試体の作製方法によって、せん断強度に若干の差が見られた。これは、飽和の際の拘束方法の違いなどにより、計測された膨潤圧が異なるためと考えられる。加水法によって作製した供試体では、浸水無しでは $\phi'_1=29^\circ$ 、浸水ありでは $\phi'_1=25^\circ$ となり、供試体作製後の浸水によってより飽和化が進み、せん断強度が低下したと考えられる。

4.3 X線CTによる観察結果

圧縮粒状ベントナイト供試体において、試験後の供試体を珪砂ベントナイト混合体と同様に試験装置から取り出し、X線CTによる観察を行った。

図10に試験後の不飽和および飽和圧縮粒状ベントナイ

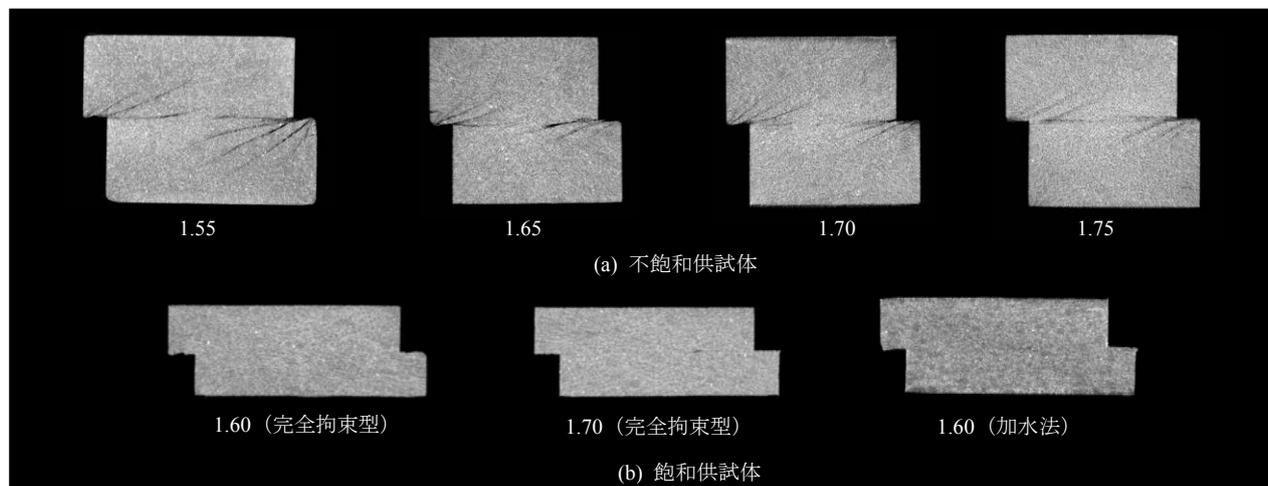


図7 X線CTによる観察結果 (珪砂ベントナイト混合体)

ト供試体の CT 画像を示す。不飽和供試体では、高密度な粒状部分とそれ以外の低密度部分の明暗が明確であり、さらにせん断に伴う亀裂が供試体内部に進展している様子がわかる。一方、飽和供試体では、高密度な粒状部分は依然として存在するが、それ以外の部分では全体的に濃淡が均一化しているように見える。これは、飽和化に伴いベントナイトが膨潤し、間隙を充填したことを示唆している。さらに、せん断に伴う亀裂は、飽和供試体中では観察できなかった。

5. 珪砂ベントナイト混合体と圧縮粒状ベントナイト供試体の変形・強度特性の比較

本章では、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 の珪砂ベントナイト混合体と圧縮粒状ベントナイト供試体の不飽和供試体を用いた一面せん断試験結果の比較を行った。

図 11 に一面せん断試験結果を示す。凡例は供試体の種類を示している。

図 11(a)のせん断応力～変位関係を見てみると、最大せん断応力はほぼ同等の値であるが、その値に達する水平変位は、圧縮粒状ベントナイト供試体では 3.0mm 程度、珪砂ベントナイト混合体では 1.5mm 程度となっており、最大せん断応力に達するのは圧縮粒状ベントナイト供試体の方が遅いことがわかる。また最大せん断応力を迎えた後の減少幅は、珪砂ベントナイト混合体の方が大きくなっている。このことから、珪砂ベントナイト混合体よりも粒状ベントナイト供試体の方が延性的な性質を示していることがわかる。

図 11(b)の応力経路を見ると、いずれにおいても同様の挙動を示している。せん断抵抗角 ϕ'_1 を求めると、粒状ベントナイト供試体では $\phi'_1 = 38^\circ$ 、珪砂ベントナイト混合体では $\phi'_1 = 34^\circ$ を示しており、粒状ベントナイト供試体の方が若干大きい結果となった。

写真 7 に珪砂ベントナイト混合体および圧縮粒状ベントナイト供試体のせん断後の供試体の様子を示す。写真 7(a)の珪砂ベントナイト混合体を見ると、均質な固結材料を強制的にせん断したために、せん断箱端部という特殊な境界条件から数本の亀裂が斜めに生じていることがわかる。そのため、せん断箱から受ける圧力が供試体厚さによって変化し、3.1 節において異なるせん断抵抗角を示したと考えられる。一方、写真 7(b)に示す圧縮粒状ベントナイト供試体を見てみると、珪砂ベントナイト混合体と同様に、特殊な境界条件から亀裂が生じているが、砂の一面せん断試験に近い破壊形態を示している。このため、4.1 節において粒状ベントナイト供試体の試験結果において、供試体厚さによる影響が見られなかったのは、粒状ベントナイト供試体が粒状体としての性質を示したためと考えられる。

これらのことから、珪砂ベントナイト混合体が固結材料としての脆性的な破壊形態を示すのに対し、圧縮粒状ベントナイト供試体の方が粒状体としての性質を表し、比較的延性的な破壊挙動を示すことがわかった。

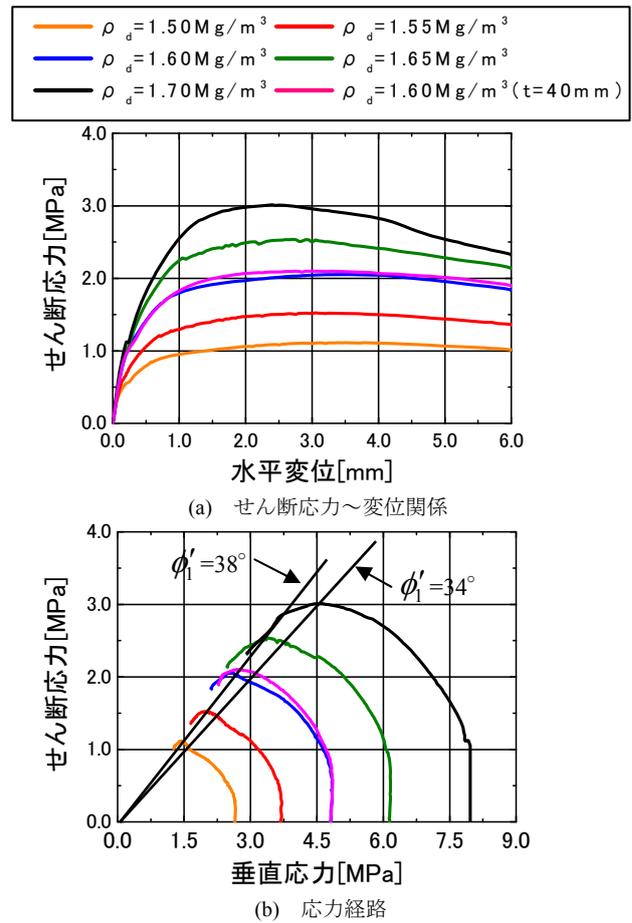


図 8 不飽和供試体の一面せん断試験結果

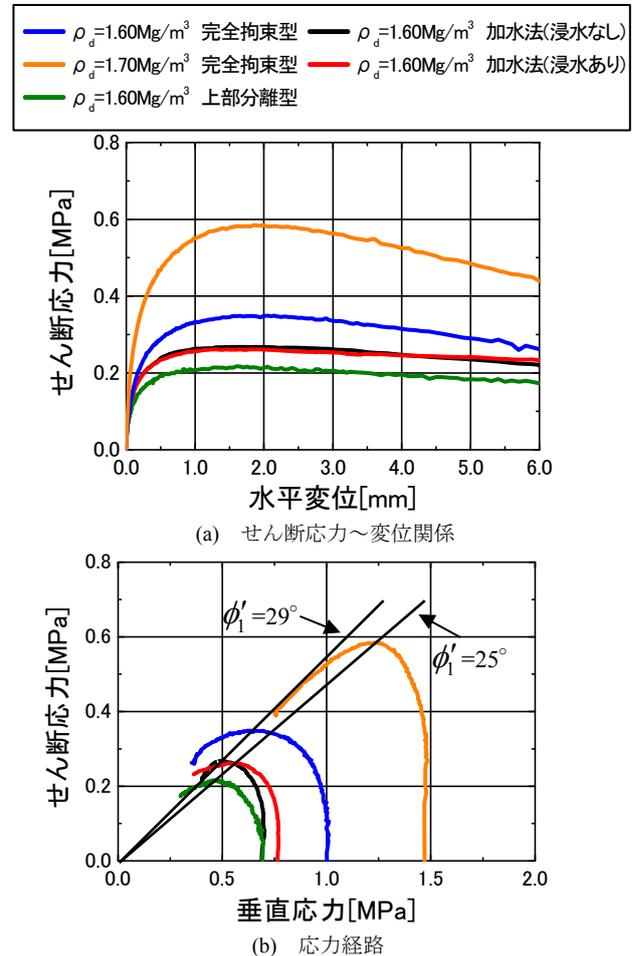


図 9 不飽和供試体の一面せん断試験結果

6. おわりに

珪砂ベントナイト混合体および圧縮粒状ベントナイト供試体を用いて高圧一面せん断試験を実施した。試験結果より、いずれの不飽和供試体においても供試体の乾燥密度が高くなるにつれ、最大せん断応力が大きくなった。しかし、せん断抵抗角はほぼ同等の値を示した。また飽和供試体では、飽和化に伴い不飽和供試体より総じてせん断抵抗角が小さくなることが示された。X線CTによる試験後の供試体内部の構造についての観察結果より、いずれの不飽和供試体では、せん断箱端部という特殊な境界条件から供試体内部に向かう斜めの亀裂が確認されたが、飽和供試体ではこのような亀裂は確認されなかった。また、飽和状態の圧縮粒状ベントナイト供試体では、依然として高密度な粒状部分が見られるが、飽和化に伴いベントナイトが膨潤し、間隙を充填している様子が確認された。珪砂ベントナイト混合体と圧縮粒状ベントナイト供試体についての比較より、せん断応力のピークに到達する水平変位に差異が見られた。また応力経路において、最大せん断応力は同等の値であったが、せん断抵抗角は若干異なった値となった。これらの結果より、珪砂ベントナイト混合体が固結材料としての脆性的な破壊形態を示すのに対し、圧縮粒状ベントナイト供試体の方が粒状体としての性質を表し、比較的延性的な破壊挙動を示すことがわかった。

謝辞

X線CTの観察にあたり、京都大学の岡二三生教授、肥後陽介助教にご協力を賜りました。また、本試験に用いたクニゲルGXはハザマの千々松正和氏にご提供いただきました。記して謝意を表します。

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百十七号、最終改正平成二十三年七月二日法律第八四号）
- 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、pp.IV-1-IV-205、1999。
- 3) 内閣府原子力委員会、現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について、第1章 対象廃棄物処分に関する安全確保の考え方、3.対象廃棄物処分の基本的考え方、pp.4-7、1998。

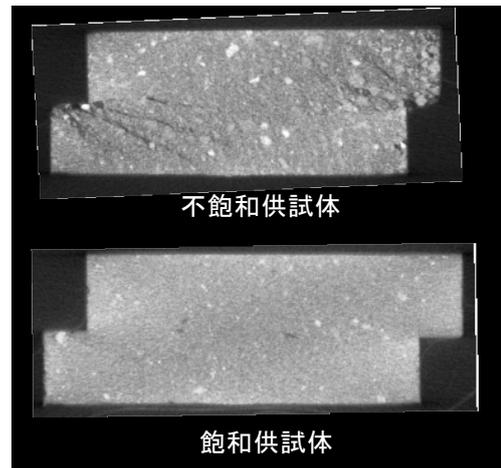
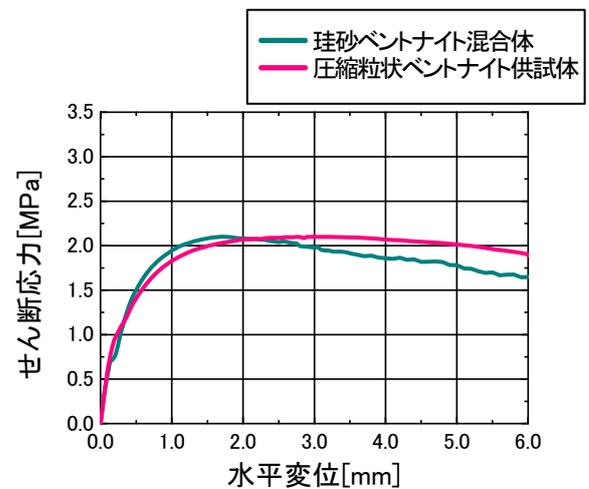
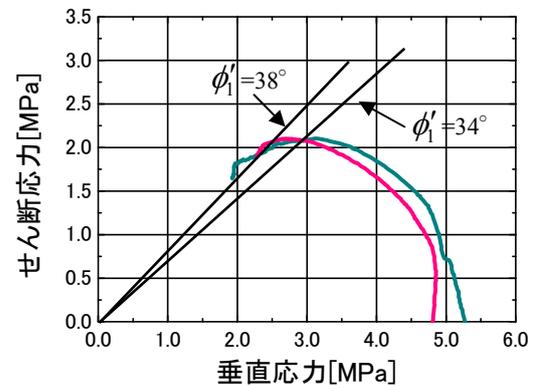


図10 X線CTによる観察結果（粒状ベントナイト）

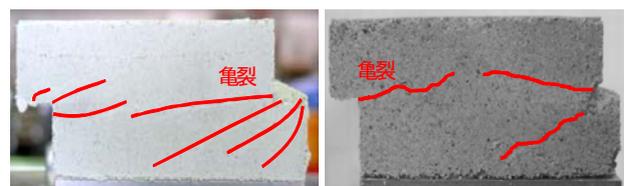


(a) せん断応力～変位関係



(b) 応力経路

図11 珪砂ベントナイト供試体と圧縮粒状ベントナイト供試体の一面せん断試験結果



(a) 珪砂ベントナイト供試体 (b) 圧縮粒状ベントナイト供試体

写真7 珪砂ベントナイト混合体と圧縮粒状ベントナイト供試体の試験後の様子