

各種の供試体条件が圧縮ベントナイトのせん断強度特性と破壊挙動に及ぼす影響

Effect of various specimen conditions on shear strength properties and failure behavior of compacted bentonite

元山泰久¹, 平手寿大¹, 小高猛司²

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・理工学部建設システム工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp

概 要

本研究では、高レベル放射性廃棄物を地層処分する際に用いられる緩衝材に地震等の外力によりせん断帯が発生した場合、緩衝材の基本特性の維持について検討を行っている。地下 300m 以深に埋設される際には不飽和状態である緩衝材が、再冠水に伴い、飽和状態になると考えられている。本論文では、不飽和および飽和圧縮ベントナイト供試体に一面せん断試験を実施し、供試体密度と珪砂混合率がせん断特性に及ぼす影響を調べるとともに、X 線 CT によりせん断後の供試体内部の観察を行った。また、飽和供試体においては、供試体作製方法の違いによる影響も検討した。その結果、不飽和供試体では、珪砂混合率が高くなるほどせん断抵抗角が大きくなった。一方、飽和供試体では、乾燥密度が高くなるほどせん断抵抗角が大きくなり、供試体作製方法によるせん断抵抗角に変化は見られなかった。X 線 CT の結果から不飽和・飽和供試体ともに乾燥密度が高くなるほど、亀裂が生じやすいことが分かった。別途、実施した数値シミュレーションは X 線 CT の結果に類するものを示した。

キーワード：圧縮ベントナイト，一面せん断試験，密度，珪砂，X 線 CT

1. はじめに

我が国では、原子力発電で使用済みの燃料を有効利用の観点から再処理し、再利用することを方針としている。しかし、再処理によりウランやプルトニウムを回収した後には高い放射能を持った廃液（以下、高レベル放射性廃棄物と呼ぶ）が発生する。我が国では、高レベル放射性廃棄物を長期間に渡って化学的および物理的に安定した地下深部の地層中に処分することを決めている。地層処分における基本的な考えは、1999 年に、旧核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）が公表した「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—」において、わが国における最終処分場の基本設計の概念を示しており、廃液をガラス固化体にして、金属製のオーバーパックに封入し、その周りを緩衝材で覆い、深層の岩盤中に埋設する人工バリアの設計について詳細に記されている¹⁾。

人工バリアに用いられる緩衝材の力学的役割には、オーバーパックを支持するだけでなく、周辺岩盤のクリープ変形による応力の緩衝性能や核種移行を抑制する機能などが必要であり、その候補材料に高压で圧縮された

ベントナイトが有効視されている。珪砂を混合することにより、熱伝導性や透気性など、性能を向上させるだけでなく、現場における施工性や経済性にも有利な方向になるため、珪砂を混合した材料においても検討されている。現場施工時では不飽和状態であるが、地下深部には地下水が存在し、長い時間が経過するうちに、地下水が高レベル放射性廃棄物最終処分場を覆う状態（以下、再冠水と呼ぶ）になる。再冠水に伴い、ベントナイト自身の膨潤による緩衝材内の圧力の上昇、オーバーパックの腐食膨張など、周囲の環境が変化すると考えられている。

本研究の目的は、急激な地殻変動や周辺岩盤のクリープ破壊により、現場施工後の最終処理場が損壊し、緩衝材も損傷を受けた場合を想定し、緩衝材の基本性能の維持について検討することである²⁾³⁾。本論文では不飽和および飽和圧縮ベントナイト供試体において、各種の供試体条件がせん断特性に及ぼす影響を検討する。具体的には、高拘束圧一面せん断試験を実施し、圧縮ベントナイト混合体における供試体密度と珪砂混合率が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供試体作製方法の違いによる影響も検討する。さらに、一面せん断試験時に CCD マイクロスコープにより、せん断中の破壊挙動を供試体表面から PIV 画像解析によ

って観察し、せん断後の供試体において、マイクロフォーカス X 線 CT を用いて、表面上では観察できない損傷を受けた緩衝材の内部構造変化を詳細に観察する。

2. 不飽和供試体の一面せん断試験

最終処分場で処理した後も緩衝材は数十年から百年の間、不飽和状態であると考えられ、不飽和状態の圧縮ベントナイトにおける強度特性を把握することは重要である。しかし、不飽和三軸試験は難しいとされており、ほとんど実施されておらず、不飽和状態のベントナイトの変形・強度特性はほとんど解明されていないのが実情である。また、先述の地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおいて、緩衝材の設計をする場合に考慮すべき要件が示されている¹⁾。その中において、現場締固め方式や機械成型加工方式の両方に求められる機能を満足する緩衝材仕様（珪砂混合率、乾燥密度）の最適化が図られている。

本章では、珪砂混合率および乾燥密度が不飽和圧縮ベントナイトの力学特性に及ぼす影響について検討するとともに、せん断帯の生成・発達について観察した。

2.1 供試体作製方法および試験方法

供試体試料には、ベントナイト（クニミネ工業(株)製 Na 型ベントナイト・クニゲル V1）に三河珪砂 6 号を乾燥質量比 30% 混合したものを用いる。ベントナイトの含水比は 10% で、珪砂の含水比は 0% である。圧縮成型時の乾燥密度が 1.55, 1.65, 1.70, 1.75 Mg/m^3 になるようにそれぞれの質量を決定し、よく攪拌させ、高拘束圧一面せん断試験機により圧縮成型し、供試体を作製する。また 1.55 Mg/m^3 においては、珪砂混合率を 40%, 50% に変え、実施した。本論文において、緩衝材は高圧で圧縮成型され、かつ硬質であるために、せん断試験機も高圧性能が必要であるため、写真 1 に示す高拘束圧一面せん断試験機を用いた。載荷機構には、メガトルクモータを採用しており、垂直および水平方向の載荷容量はそれぞれ 15 MPa と 12.5 MPa である。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。垂直荷重計測用のロードセルは、加圧盤側に付けると、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を計測できないので、載荷軸とは反対側のせん断箱の下部に設置している。

供試体寸法は、せん断帯を長手方向に観察するために、50mm×50mm の正方形断面、厚さ 40mm の矩形供試体を基準とした。せん断箱前面に硬質のアクリル板を取り付けることで、せん断帯の観察を容易とした。せん断は、上部せん断箱を高剛性ボルトで連結固定させ、下部せん断箱を水平移動させることで実施している。またメガトルクモータを任意の高さで固定することができるため、

定体積条件で一面せん断試験を実施することが可能である。本論文では、圧縮成型時の垂直荷重を加圧したまません断する供試体（以下、正規圧密供試体と呼ぶ）、と圧縮成型時の垂直荷重を 0MPa まで除荷してせん断する供試体（以下、過圧密供試体と呼ぶ）の 2 種類の供試体を用いて、ひずみ速度 0.4mm/min で水平変位 6.0mm まで定体積条件で一面せん断試験を実施した。

せん断帯の発生・発達過程を観察するために、せん断箱前方に CCD マイクロスコープを設置し、デジタル画像を撮影する。せん断箱前面に設置している硬質アクリル板を通して、せん断箱のエッジ部分から伝播してくるせん断帯を観察できるよう、写真 2 に示す枠線で囲った箇所をせん断終了まで撮影する。撮影した画像より PIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）画像解析をすることにより、速度ベクトルを計測する。また、せん断終了後の供試体を専用の器具を用いて、せん断箱より取り出し、真空パックした後、京都大学に搬入し、マイクロフォーカス X 線 CT 装置 KYOTO-GEO μ X CT（東芝製 TOSCANER-32250 μ HDK）を用いて、供試体内部の観察を行った。

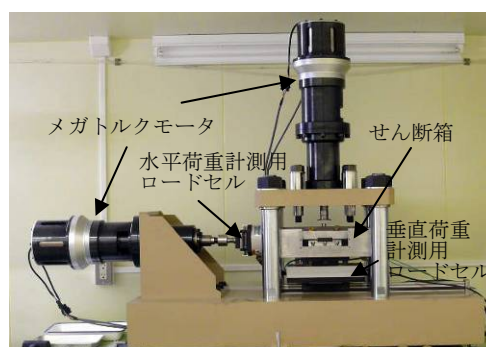


写真 1 高拘束圧一面せん断試験機(全様)

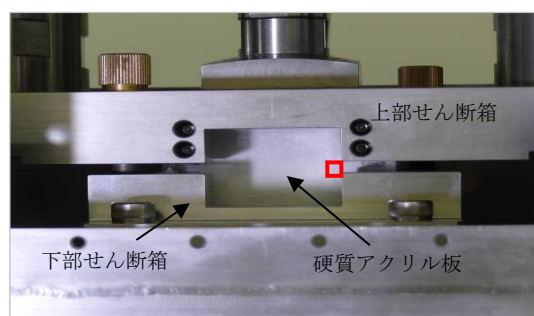


写真 2 せん断箱中心部

2.2 不飽和供試体の一面せん断試験結果

図 1 に珪砂混合率を 30% に限定して、供試体の乾燥密度を 1.55, 1.65, 1.70, 1.75 Mg/m^3 に変えて実施した試験結果を示す。凡例の数字は乾燥密度を示しており、正規圧密供試体には N, 過圧密供試体には O を記す。図 1(a)のせん断応力～変位関係を見ると、正規圧密供試体ではせん断初期に急激にせん断応力が増加し、水平変位 1.5mm 付近で最大せん断応力に達して、その後減少して

いる。乾燥密度が高いほど、最大せん断応力が大きく、その後の減少幅が大きくなっている。一方、過圧密供試体は、せん断初期に緩やかにせん断応力が増加し、水平変位 2.0mm 付近で一定もしくはわずかな減少となり、明確なピークは確認できない。次に図 1(b)の応力経路を見ると、正規圧密供試体では乾燥密度が高くなるほど供試体の圧縮成型時に高い垂直応力を要するため、初期の垂直応力に違いが見られる。しかしながら、各乾燥密度においてせん断が進むにつれて、負のダイレイタンスの発現により、塑性圧縮を伴うひずみ軟化の挙動を示している。原点と各々の乾燥密度の最大せん断応力を直線で結ぶことでせん断抵抗角を求めると、 $\phi' = 33^\circ$ となる。過去に実施されている緩衝材の飽和三軸試験における内部摩擦角 $\phi' = 16.6^\circ$ ⁴⁾ よりも大きい値を示している。一方、過圧密供試体では正のダイレイタンスにより、せん断応力が増加するとともに垂直応力も増加する挙動を示している。

図 2 には供試体の乾燥密度 1.55 Mg/m³ において、珪砂混合率を種々に変えて実施した試験結果を示す。凡例は、正規圧密供試体には N、過圧密供試体には O を記し、数字は珪砂混合率を示している。図 2(a)のせん断応力～変位関係を見ると、正規圧密供試体では珪砂混合率が高くなるほど最大せん断応力が小さくなっている。過圧密供試体の O-40%および O-50%においては、せん断初期に急激に増加したせん断応力がわずかに減少した後、再び増加する挙動を示している。図 2(b)の応力経路を見ると、正規圧密供試体においては、珪砂混合率が高くなるほど、高圧を要する要因となる粉末状のベントナイトの割合が少ないために、初期の垂直応力は小さくなっている。せん断抵抗角を求めると正規圧密供試体 N-40%および N-50%では N-30%よりも大きく $\phi' = 37^\circ$ となり、珪砂混合率が高くなるとせん断抵抗角が大きくなることを示している。

2.3 PIV 画像解析によるせん断帯の観察

一面せん断試験中のせん断帯の生成・発達の観察を行った。2.2 節で示した図 1 の乾燥密度 1.70 Mg/m³ の正規圧密供試体および過圧密供試体の一面せん断試験中に撮影した写真に速度ベクトル分布を重ねて示したものを示す。

デジタル画像の 15 ピクセル四方を 1 要素として、縦 31 要素×横 40 要素の計 1240 要素で写真全領域をカバーしており、1 ピクセルあたりの実際の長さは約 0.01mm となっている。ベクトルの速度の色表示に、最大値 10 μ m/s を赤色、最小値に 0 μ m/s を青色で評価した。

図 3(a)の正規圧密供試体の速度ベクトルを見ると、水平変位 1.5mm で斜めの亀裂が発生し、変位が進むにつれて小さな亀裂を伴い、速度ベクトルの領域を拡大している。せん断初期に斜めに入った亀裂は徐々に水平に近

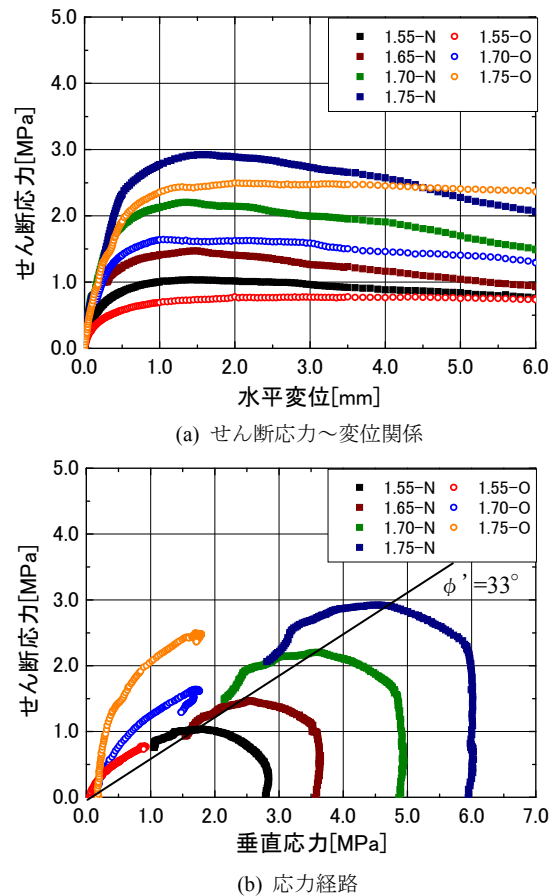


図 1 乾燥密度の異なる供試体の試験結果

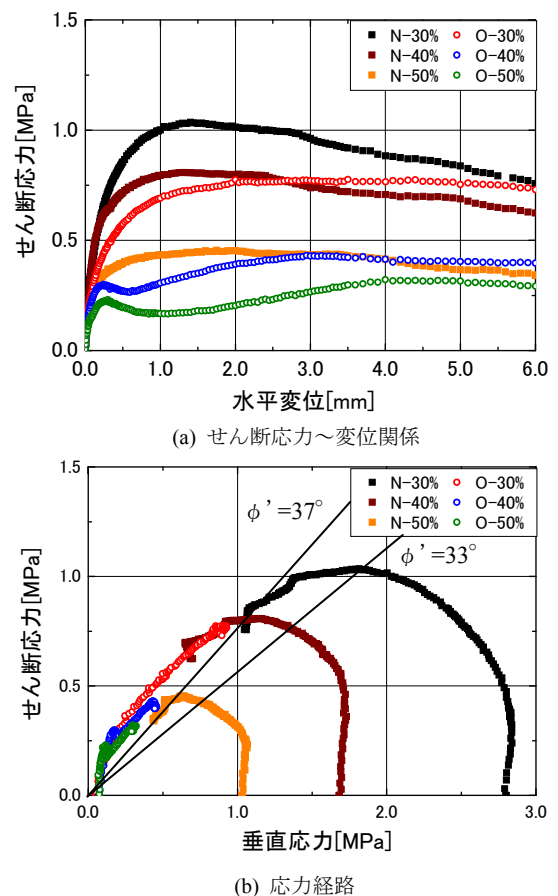


図 2 珪砂混合率の異なる供試体の試験結果

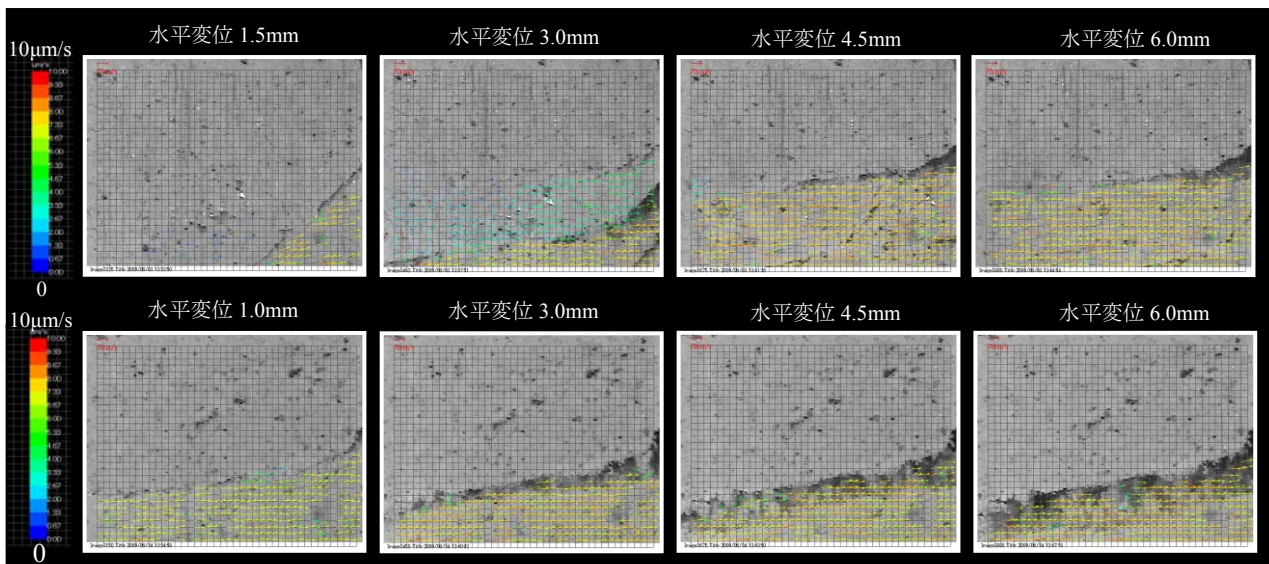


図3 速度ベクトル；(a) 正規圧密供試体（上図），(b) 過圧密供試体（下図）

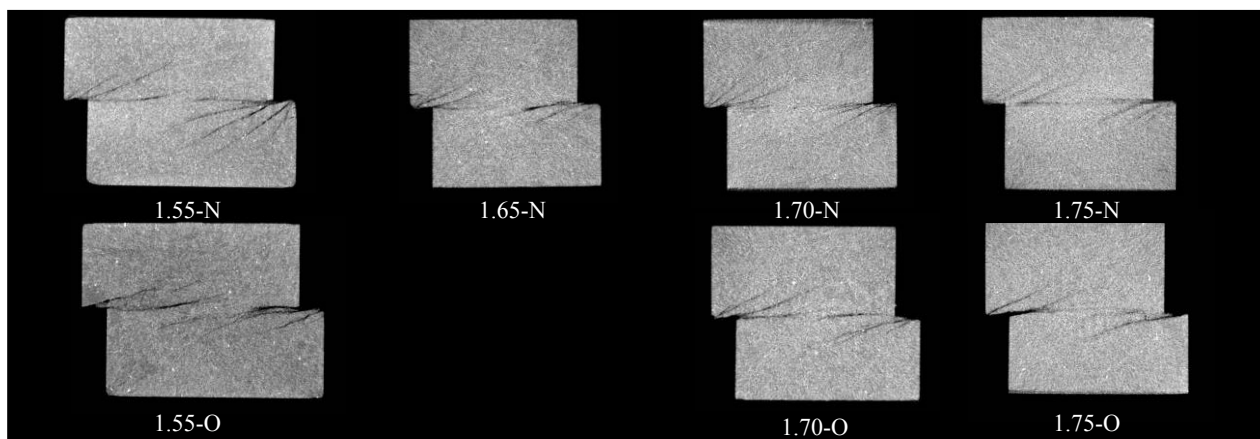


図4 X線CT結果

づく。次に図3(b)の過圧密供試体の速度ベクトルを見ると、早い段階の水平変位 1.0mm で観察領域全体に水平な亀裂が生じ、この亀裂より下側の領域が右方向に移動している。また、正規圧密供試体とは異なり、初期に発生した水平な亀裂はそのまま観察できる。その下側の領域がせん断に伴いゆっくりと移動し続けていることがわかる。また、下側領域の移動に伴い、亀裂の開口部が大きくなっている。

2.4 X線CTによる供試体内部の観察

前節では、PIV画像解析による結果から、供試体表面上におけるせん断帯の生成・発達を観察したが、本節では、供試体の内部構造変化について観察する。

写真3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、X線

CT撮影する。

図4に正規圧密供試体および過圧密供試体のX線CTによる内部観察結果を示す。供試体名は図1で用いたものと同様である。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。正規圧密供試体および過圧密供試体ともにせん断箱

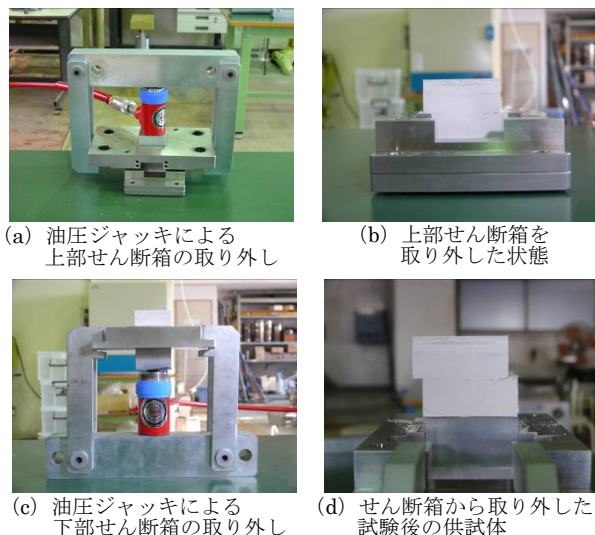


写真3 せん断箱から供試体を取り出す過程

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、供試体中心部では連続した水平な亀裂は確認できない。また、正規圧密供試体と過圧密供試体の X 線 CT 結果が類似しているのは、図 1 で示した結果における残留応力が近い値だからである。しかしながら、高密度供試体である 1.75N および 1.75O については、中心部でうっすらと連続した低密度領域が確認できる。

3. 飽和供試体の一面せん断試験

3.1 飽和供試体作製方法

本試験では飽和供試体作製用モールドを用いて飽和供試体を作製する方法を基本としているが、その作製過程は、最終処分場での緩衝材の状態を模擬していないことが懸念されるため、本論文では一面せん断試験機内で圧縮成型し飽和させ供試体を作製する方法も用いた。

3.1.1 飽和モールドを用いた供試体作製方法

不飽和供試体を作製する際と同様に、ペントナイト供試体の試料を計測し、写真 4 に示す飽和モールドの一部である直径 80mm、高さ 20mm の高剛性圧縮リングに詰め、油圧ジャッキにより、リング高さまで圧縮する。圧縮リングごと供試体を飽和モールドにセットし、上部载荷ピストンを設置した後に、写真 5 に示す剛なフレームによって、軸変位を固定する。図 5 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る。その際に、ロードセルにより膨潤圧を計測して、飽和の目安とする。膨潤圧がある程度一定になった時を飽和とし、飽和モールドを解体し、供試体を取り出す。専用のガイドカッターを用いて、50mm×50mm×20mm 厚の矩形供試体に成型し、飽和時に計測した膨潤圧と同等の垂直荷重を作用させた後、一面せん断試験を実施した。

3.1.2 一面せん断試験を用いた供試体作製方法

不飽和供試体を作製する際と同様に、配合した試料をせん断箱に入れ、高拘束圧一面せん断試験機により圧縮成型し、不飽和供試体を作製する。供試体寸法は飽和モールドと同様の 50mm×50mm×20mm 厚とした。本論文では正規圧密供試体と過圧密供試体の 2 種類の供試体を飽和させた。図 6 に試験機中心部の概略図を示す。供試体上下にポーラスメタルがあり、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、

空気の逃げ道を確保しながら実施し、その後、せん断箱上部まで入れて最終的な飽和化を約 1 ヶ月間行った。その際、飽和過程の膨潤圧をせん断箱下部に設置されたロードセルにより計測した。最終的な膨潤圧は正規圧密供試体、過圧密供試体いずれも同様な値を示した。飽和後、蒸留水を排水し、一面せん断試験を実施した。



写真 4 専用飽和モールド

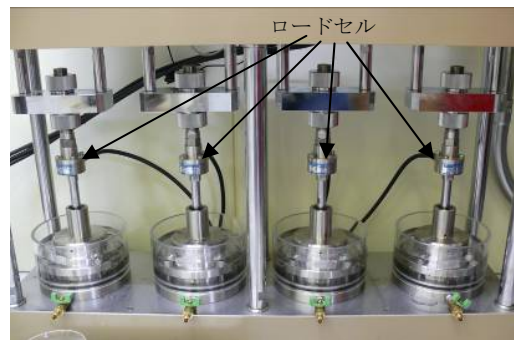


写真 5 4 連载荷フレーム

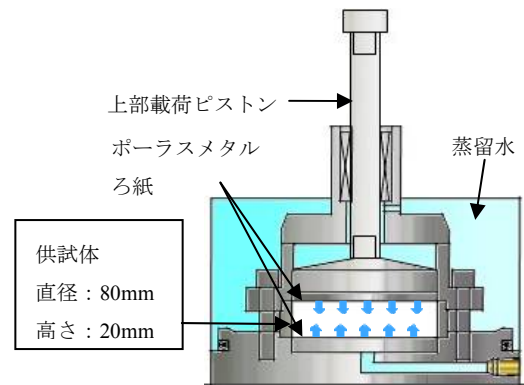


図 5 モールド概略図

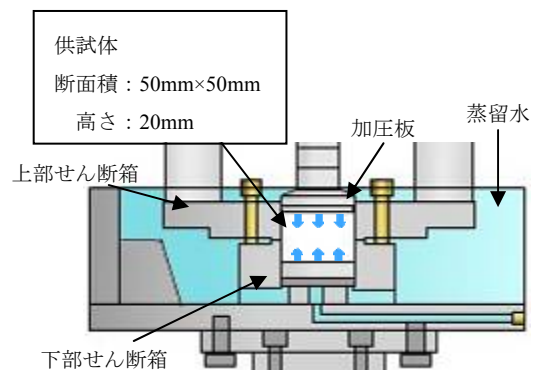


図 6 試験機中心部の概略図

3.2 飽和供試体の一面せん断試験結果

図7に飽和モールドで作製した供試体の乾燥密度1.55, 1.60, 1.70, 1.75, 1.80 Mg/m³の一面せん断試験結果を示す。凡例は乾燥密度を示している。また、各供試体の初期垂直荷重は飽和過程で観測した膨潤圧を使用した。

図7(a)に示すせん断応力～変位関係を見ると、せん断開始時より急激にせん断応力が上昇し、ピークに達すると、緩やかにひずみ軟化する挙動を示している。また、乾燥密度が高くなるほど、最大せん断応力が大きく、ピーク後の減少幅が大きいことがわかる。図7(b)に示す応力経路を見ると、せん断開始時よりせん断応力が上昇し、負のダイレイタンスにより供試体体積を収縮するとともに垂直応力が減少している。各供試体の最大せん断応力を示す応力状態と原点を結んでせん断抵抗角を求めると、乾燥密度が高くなるにつれて、せん断抵抗角が高くなる傾向が見られる。緩衝材の飽和三軸試験⁴⁾から得られた内部摩擦角と比較すると近い値であるが、2.2節に示した不飽和供試体における一面せん断試験の結果と比較すると小さい値である。

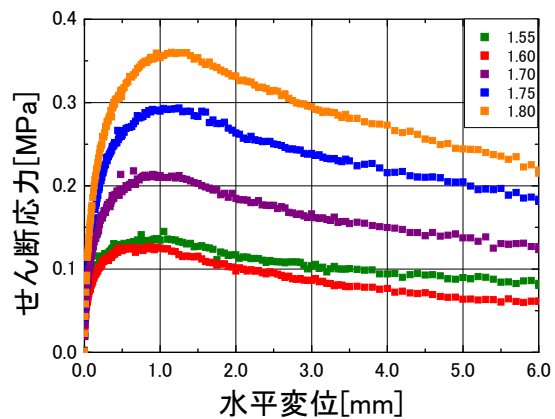
図8に乾燥密度を1.60 Mg/m³に限定し、試験機内で飽和させた供試体の一面せん断試験結果を示す。なお、飽和モールド内で作製した供試体の試験結果も比較のため掲載した。凡例において試験機内で飽和させた供試体の頭にはSをつけ、浸潤させる前の供試体の状態が正規圧密の場合をN、過圧密の場合をOとした。

図8(a)に示すせん断応力～変位関係を見ると、試験機内で飽和させた供試体の方がピークに達する水平変位が若干小さく、最大せん断応力に大きな差が見られ、ピーク後のせん断応力の減少幅が大きいことがわかる。図8(b)に示す応力経路を見ると、膨潤圧の違いのために初期垂直応力に差が見られ、モールド内と試験機内で飽和させた供試体とではせん断開始時の立ち上がりに違いが生じている。これはせん断開始前に、上下せん断箱間隔を空けるために上部せん断箱を引き上げた際に、供試体とせん断箱壁面の間の摩擦力により、供試体に負荷していた垂直応力が減少したために、供試体が過圧密挙動を示したと考えている。ただし、試験機内で作製した供試体のせん断抵抗角は、飽和モールドで作製した供試体のせん断抵抗角と同じ $\phi' = 18^\circ$ となり、作製方法による違いは生じなかった。

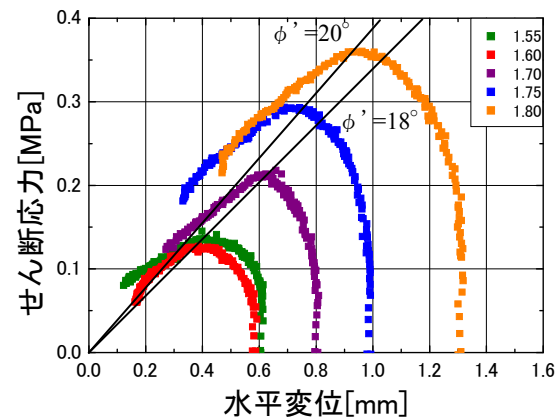
3.3 PIV 画像解析によるせん断帯の観察

不飽和供試体と同様に、飽和供試体でもせん断帯の生成・発達を観察した。図9に3.2節で示した飽和モールドおよび試験機内で作製した供試体における一面せん断試験中に撮影した写真に速度ベクトル分布を重ねて示したものを示す。

図9(a)のモールドを用いて作製した供試体における

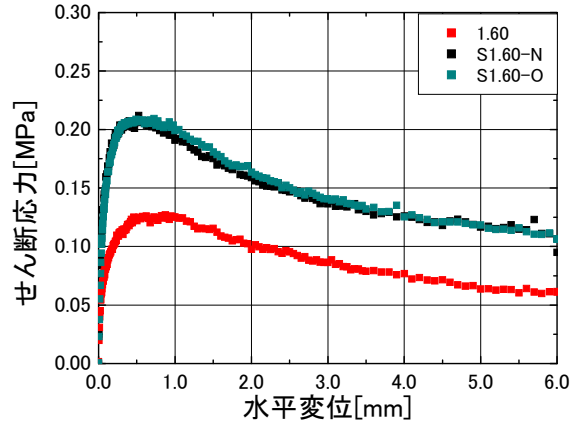


(a) せん断応力～変位関係

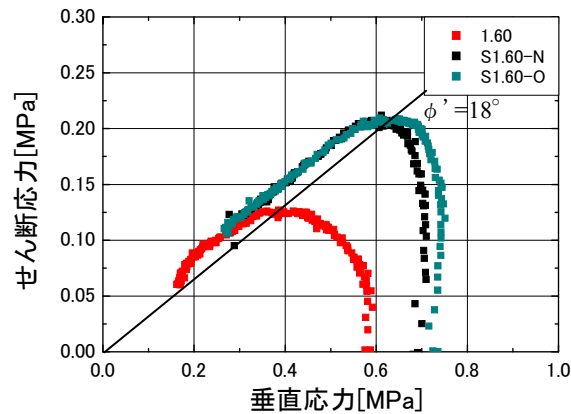


(b) 応力経路

図7 乾燥密度の異なる供試体の試験結果



(a) せん断応力～変位関係



(b) 応力経路

図8 供試体作製方法の異なる供試体の試験結果

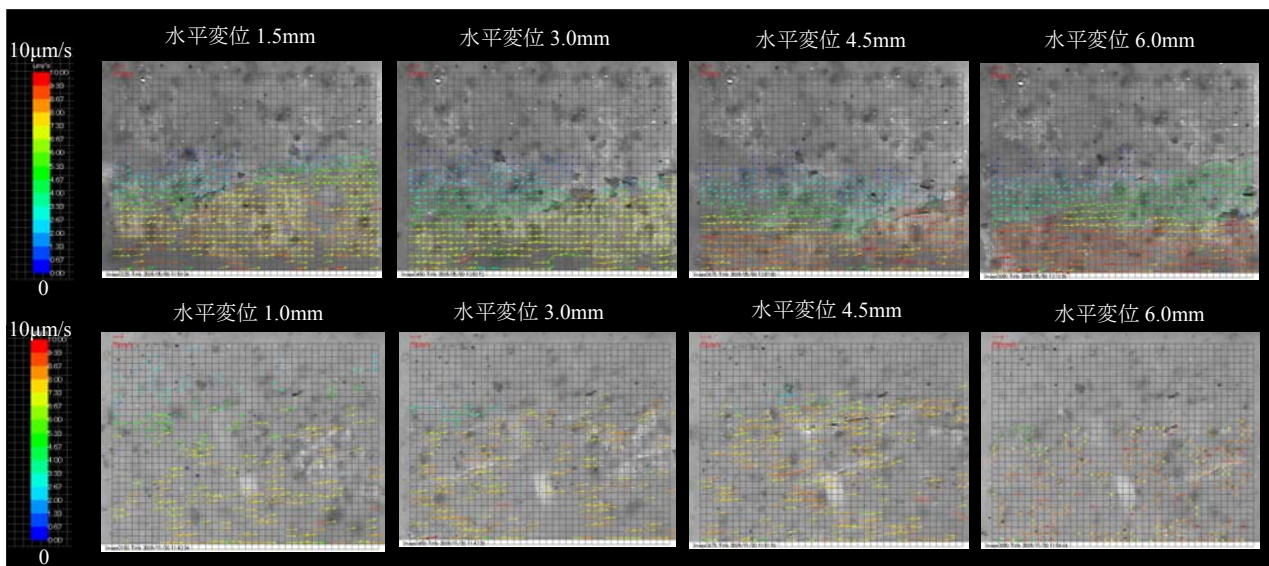


図9 速度ベクトル ; (a) モールドを用いて作製した供試体 (上図), (b) 試験機内で作製した供試体

速度ベクトルを見ると、不飽和供試体と違い、水平変位 1.5mm に達しても、明確な亀裂は生じず、水平変位 3.0mm で空洞が見られる。これは、供試体設置時にアクリル板との間に隙間ができることにより、空洞が見えたり見えなかったりするものと考えられる。変位が進むと、その現象が顕著に見られる。図 9(b)の試験機内で作製した供試体における速度ベクトルを見ると、図 9(a)よりも速度ベクトルが少なくなっている。これは飽和させた際、供試体がアクリル板にくっつき、全体的にぼやけた画像になってしまったためと考えられる。一面せん断試験をしている間、明確な亀裂は生じなかった。

3.5 X線 CT による供試体内部の観察

不飽和供試体と同様に、飽和供試体でも供試体内部の構造変化を観察した結果を図 10 に示す。供試体名は、図 7、図 8 で用いたものと同じである。全体的に密度のばらつきが見られるが、特に 1.75, 1.80 では上下せん断箱間の端部より左斜め下に向かって明確な亀裂が生じているのが確認できる。S1.60-O においては、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、内部に行くほど、不明確になっている。

飽和供試体による一面せん断試験について、2次元平面ひずみ条件下でシミュレーションを実施することで、供試体内に発生するせん断帯近傍の密度構成について調べた⁵⁾。

解析には *GEOASIA* を用い、*SYS* カムクレイモデルの基本的なパラメータは、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の緩衝材の基本特性データベースで一般公開されているベントナイト珪砂混合供試体の一次元圧密試験および非排水三軸試験の結果より設定した⁴⁾。それ以外の弾塑性パラメータは、初期有効拘束圧 0.9 MPa における実験結果を説明するように設定した。シミュレーションにおける供試体寸法は前述の飽和供試体の試験と

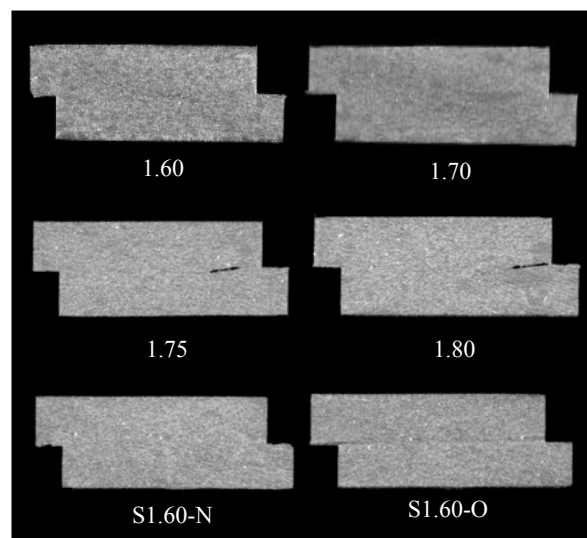


図 10 X線 CT 結果

同様にした。要素数は横 50 要素×縦 40 要素の合計 2000 要素である。境界は、下部せん断箱と接する部分は固定境界とし、上部せん断箱と接する部分は唐変位境界とした。せん断は、上部せん断箱を右方向に強制変位させた。

図 11 に一面せん断試験の数値シミュレーション結果におけるせん断ひずみ分布を示す。水平変位 0.5mm から 3.8mm まで示したものである。上下せん断箱間の両端から発生したせん断ひずみの集中領域が水平変位 1.0mm を超えるあたりで明確に水平につながり、せん断帯を形成している。S1.60-O で生じた低密度領域と類似するものをシミュレーションでも生じている。図 12 は比体積変化の分布であり、圧縮を青、膨張を赤とする。せん断帯の両端には、応力解放ならびに引張ひずみの発生によって膨張する領域が発生しているが、試験時に亀裂が発生する場所と調和している。これは、今回の亀裂がせん断箱の端部という特殊な境界条件下で発生していることを示している。なお、解析でも試験でも供試体の中心部では低密度領域は見られない。

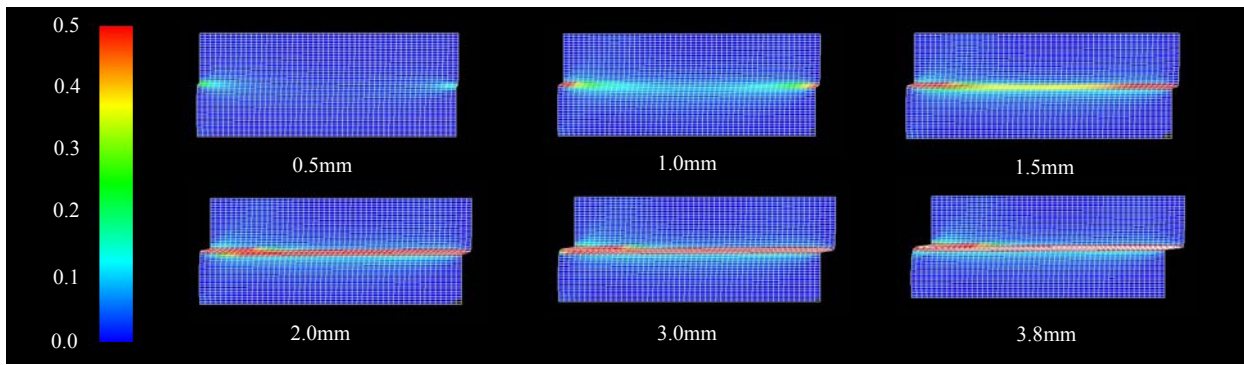


図 11 一面せん断試験の数値シミュレーション（せん断ひずみ分布）

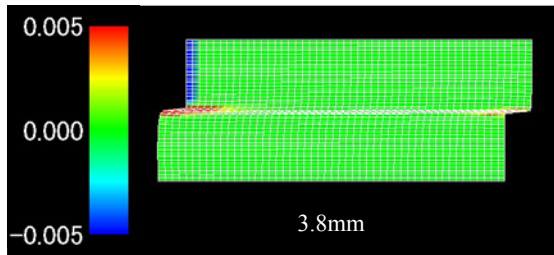


図 12 比体積の分布

4. 結論

本研究を通して、以下の知見を得た。

- (1) 乾燥密度が異なる不飽和圧縮ベントナイトにおいて、正規圧密、過圧密ともに乾燥密度が高くなるほど、最大せん断応力が大きく、また正規圧密ではピーク後に負のダイレイタンスの発現により塑性圧縮を伴うひずみ軟化する挙動を示している。せん断抵抗角は $\phi' = 33^\circ$ と、緩衝材における飽和三軸試験の内部摩擦角の約2倍を示した。
- (2) 珪砂混合率の異なる不飽和圧縮ベントナイトにおいては、正規圧密、過圧密ともに珪砂混合率が高くなるほど、最大せん断応力が小さくなるが、正規圧密において、珪砂混合率が高くなるほど、せん断抵抗角は大きい値を示した。
- (3) 不飽和条件下の正規圧密および過圧密供試体における PIV 解析よりせん断に伴う亀裂を観察することができた。過圧密においては、せん断が進むにつれて、下部領域で亀裂が大きくなることが示された。
- (4) せん断後の不飽和供試体において、X線CTを用いて、供試体内部を観察した結果、供試体内部に向かって、斜めに亀裂が生じていることが確認されたが、供試体中央部では、低密度領域は確認されなかった。
- (5) 乾燥密度の異なる飽和圧縮ベントナイトにおいて、不飽和供試体と同様な挙動を示し、乾燥密度が高くなるほど、せん断抵抗角は大きくなるが、不飽和供試体よりも小さい値を示した。
- (6) 供試体作製方法の異なる飽和圧縮ベントナイトにおいては、挙動に違いが見られたが、せん断抵抗角に有意な差は生じなかった。
- (7) PIV 画像解析により、飽和供試体のせん断帯の観察を行ったが、明瞭な亀裂は観察できなかった。
- (8) せん断後の飽和供試体において、X線CTを用いて、供試体内部を観察した結果、乾燥密度が高くなるほど、亀裂が生じやすいことが示された。
- (9) 飽和供試体の一面せん断シミュレーションでは、X線CTと同様な傾向が得られた。

以上の結果より、不飽和圧縮ベントナイトは乾燥密度および珪砂混合率が高くなることで大きなせん断強度を有するが、大变位による亀裂を生じやすくなることが示唆された。そのため、せん断強度、亀裂の発生を考慮して、その両方を満足する乾燥密度および珪砂混合率を求める必要がある。再冠水後を考慮した飽和圧縮ベントナイトにおいては、供試体作製方法において、せん断強度に有意な差は生じないことが分かり、大きな変位が生じて、低密度領域が発生しないことが示された。

謝 辞

本研究は、中部電力基礎技術研究所の特別研究助成で実施したものである。また 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、数値解析にあたり、浅沼組の高稲敏浩氏にご指導賜りました。記して、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 小高猛司，寺本優子：不飽和および飽和条件下での圧縮ベントナイトのせん断破壊特性，地盤工学ジャーナル，Vol.4, No.1, pp.59-69. 2009。
- 3) 小高猛司，寺本優子，平手寿大，元山泰久：圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.2, pp.207-218, 2010。
- 4) 高治一彦，鈴木英明：緩衝材の静的力学特性，核燃料サイクル開発機構報告書，JNC TN8400 99-041，1999。
- 5) 小高猛司，寺本優子，平手寿大，元山泰久，高稲敏浩：飽和圧縮ベントナイトの一面せん断破壊挙動の数値解析，第 45 回地盤工学研究発表会講演概要集，2010。