

圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価

Performance Evaluation of Compacted Bentonite Buffer Material at Shear Failure

寺本優子*, 平手寿大*, 小高猛司**

Yuko TERAMOTO, Toshio HIRATE and Takeshi KODAKA

高レベル放射性廃棄物処分場で緩衝材として使用する圧縮ベントナイトを対象として、不飽和および飽和供試体に定体積条件で高拘束圧一面せん断試験を行い、せん断中に生成・発達するせん断帯を PIV 画像解析および X 線 CT によってそれぞれ観察した。その結果、不飽和供試体では正規圧密状態と過圧密状態でせん断帯の生成過程が異なるものの、垂直応力が十分に作用している状況においては、どちらの状態でも供試体中心部では低密度領域が発達しにくいことがわかった。また、飽和供試体ではせん断帯が確認されなかったため、せん断帯の有無によって透水係数の比較を行った結果、せん断帯の有無によって遮水性能が損なわれることはないことが示された。

キーワード：圧縮ベントナイト，一面せん断試験，せん断帯，X 線 CT，透水試験

Compacted bentonite, direct shear test, shear band, X-ray CT, permeability test

1. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分では、ガラス固化された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 以深の岩盤中に埋設することを基本方針としている。緩衝材には、オーバーパックを恒久的に安全に支持しながら、岩盤のクリープ変形や地震等の外力から守ることに加えて、地下水環境内から隔離することも求められるため、その材質には高圧で圧縮したベントナイトが有力視されている。圧縮ベントナイト緩衝材は、不飽和状態で締固められて製造されるため、処分場の操業時には不飽和であるが、その後、地下水の浸潤により緩衝材は徐々に飽和し、数十年から百年後には地下水が処分場を完全に覆う再冠水と呼ばれる状態になる。再冠水後は、ベントナイト自身が持つ膨潤特性によって緩衝材内部では膨潤圧が上昇するとともに、オーバーパックの腐食膨張や周辺岩盤からのクリープ変形など様々な外力が長期に亘り作用することになり、緩衝材を取り巻く環境は大きく変化する。

本研究の目的は、急激な地殻変動や長期的なクリープ破壊によって高レベル放射性廃棄物最終処分場の周辺岩盤に局所的な変形が発生し、緩衝材にも破壊が伝播してせん断帯が形成されるというシナリオを想定した場合に、緩衝材の有する遮水性などの基本性能が維持できるのかについて検討を行うことである。万が一せん断帯が発生した場合には、遮水性能などを評価するために、そのせん断帯の観察が重要となる。本論文では、不飽和ならびに飽和圧縮ベントナイト供試体の高拘束圧一面せん断試験を行い、その際に生成・発達するせん断帯を PIV 画像解析およびマイクロフォーカス X 線 CT によって観察し

た結果を示す。さらにせん断後の飽和供試体を用いて透水試験を行い、遮水性能の維持について検討した結果を示す。

2. 不飽和供試体による一面せん断

2.1 供試体作製方法および試験方法

粉末状のベントナイト（クニミネ工業㈱製 Na 型ベントナイト・クニゲル V1）に三河珪砂 6 号を質量比 30% で配合したものを、本研究のために開発した高拘束圧一面せん断試験機¹⁾ 本体で圧縮成型することにより供試体を作製した。供試体寸法は 50mm 四方の正方形断面で、40mm 厚を基準とする。垂直荷重を加圧したままの正規圧密供試体と一旦加圧した後に垂直荷重を 0MPa まで除荷した過圧密供試体を水平変位速度 0.4mm/min でせん断した。また最終処分場では岩盤に覆われているため体積は一定であると考え、せん断は定体積条件とした。せん断帯の観察は、写真-1 に示すせん断箱の前面に設置した硬質アクリル板を通して、せん断箱のエッジ部分から伝

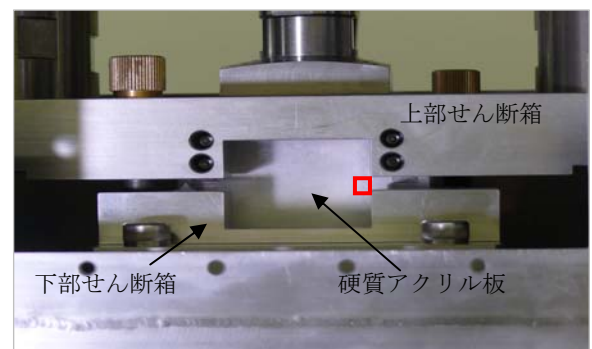


写真-1 せん断箱

* 名城大学大学院 大学院生

** 名城大学理工学部 教授

Graduated Student, Graduate school of Science and Technology, Meijo University

Prof., Faculty of Science and Technology, Meijo University

播してくるせん断帯を撮影できるよう、枠で囲った箇所に CCD マイクロスコップを設置し、水平変位 6.0mm になるまで供試体の表面を撮影した後、PIV 画像解析で撮影領域の各点における速度ベクトルを計測する。また、水平変位 0.25～6.0mm のせん断後の供試体を X 線 CT 装置で可視化するため、専用の治具を用いてせん断箱から外し、真空パックで京都大学工学研究科へ搬入し、KYOTO-GEO μ XCT（東芝製 TOSCANER-32250 μ HDK）を用いてせん断帯生成過程の観察を行った。

2.2 一面せん断試験結果

乾燥密度 1.55Mg/m³ の正規圧密供試体および過圧密供試体の試験結果を図-1 に示す。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開始直後、せん断応力は急激に上昇し、水平変位 1.5mm でピークとなり、その後せん断応力は緩やかに低下しているが、過圧密供試体ではせん断応力が緩やかに上昇し、水平変位 3.0mm 辺りからほぼ一定となり、ピークを示さないまません断を終える。定体積一面せん断試験では、不飽和材料であっても疑似的に有効応力経路に近い応力経路を得ることができ、せん断強度はもちろん、ダイレイタンスー特性も把握することが可能である。図-1(b)の応力経路を見ると、正規圧密供試体はせん断の進行とともに負のダイレイタンスーにより塑性圧縮を伴う顕著なひずみ軟化を示しており、軟化後の最終状態は原点を通る直線となり、ピーク時のせん断強度を求めると $\phi' = 33^\circ$ となった。過去に実施されている三軸試験による内部摩擦角 $\phi' = 16.6^\circ$ ²⁾ と比べると、今回の値は 2 倍程度大きい。

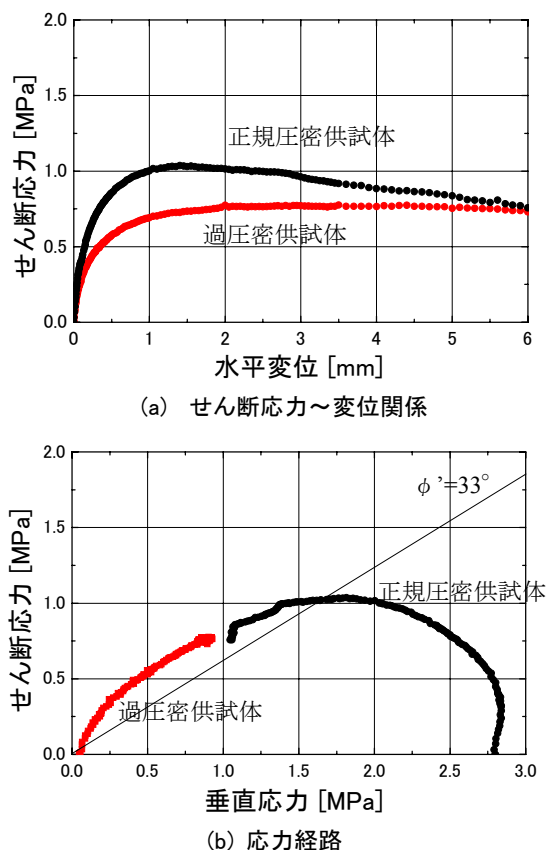


図-1 不飽和供試体の一面せん断試験結果

両者に差が生じた原因は、試験法の違いよりも、不飽和／飽和の状態の違いによってベントナイトの力学特性に表れる大きな差によるものとされる。一方、過圧密供試体は载荷初期から正のダイレイタンスーによる垂直応力の増加に伴ってせん断応力も増加している。このように、同じ乾燥密度の供試体であっても、正規圧密、過圧密といった応力履歴の違いにより、せん断挙動が大きく異なるが、水平変位 6.0mm の試験終了時にはどちらの供試体もほぼ同じ応力状態に到達していることがわかる。

2.3 画像解析によるせん断帯の観察

2.2 節の正規圧密供試体および過圧密供試体について、画像解析によるせん断帯の観察を行った。図-2(a)および図-3(a)に速度ベクトルを示す。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 要素の合計 1240 要素を用いて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 となっており、ベクトルの速度は色表示に最大値 10 μ m/s を赤色、最小値 0 μ m/s を青色として評価した。また、図-2(b)および図-3(b)は対応するせん断ひずみ分布図である。なお、固定した観測窓で変位速度を計測し続ける解析手法であるため、計測されるひずみ量は、実際の固体の変形から得られる本来のひずみ量とは直接対応していない。

図-2(a)の正規圧密供試体の速度ベクトル図より、せん断初期にはほとんど変化は見られないが水平変位 1.5mm になると明確なせん断帯が確認できる。その後、さらに下側の部分にもせん断帯が生じ、それを境にして供試体は右斜め下方向に崩れ、さらにせん断帯の進行につれてせん断帯は水平に近づく。図-2(b)の正規圧密供試体のせん断ひずみ分布図を見ると、水平変位 1.5mm から画面右下部に観察されはじめたせん断ひずみが、せん断の進行につれてその領域を拡大してゆき、最終状態の水平変位 6.0mm の状態では、観察領域全域にわたって大きなせん断ひずみが観察される。図-1(a)のせん断応力～変位関係を見ると、水平変位 1.5mm 付近でせん断応力がピークとなり、その後の変位の増加とともに緩やかにせん断応力が減少してゆく。図-2(a)で見られるせん断帯は、せん断応力のポストピークに発生する現象であり、ピークまでは供試体全域で圧縮して抵抗するものと考えられる。

図-3(a)の過圧密供試体の速度ベクトル図より、正規圧密供試体よりもはるかに早い水平変位 0.5mm の段階において、観察領域の右下部分にすでにせん断帯が認められる。さらに水平変位 1.5mm のときには、観察領域全域に水平な大きなせん断帯があることがわかり、それより下側の領域が図の右方向に移動している。また、図-2 に示した正規圧密供試体とは異なり、水平なせん断帯がそのまま最後まで観察でき、その下側の領域がせん断に伴いゆっくりと移動を続けていることがわかる。また、下側領域の移動に伴い、せん断帯内の亀裂の開口が大きくなっている。図-3(b)のせん断ひずみ分布図においても同様の傾向が見られ、せん断帯上部ではほとんどせん断ひずみが生じていないのに対して、下部の領域でははじめ

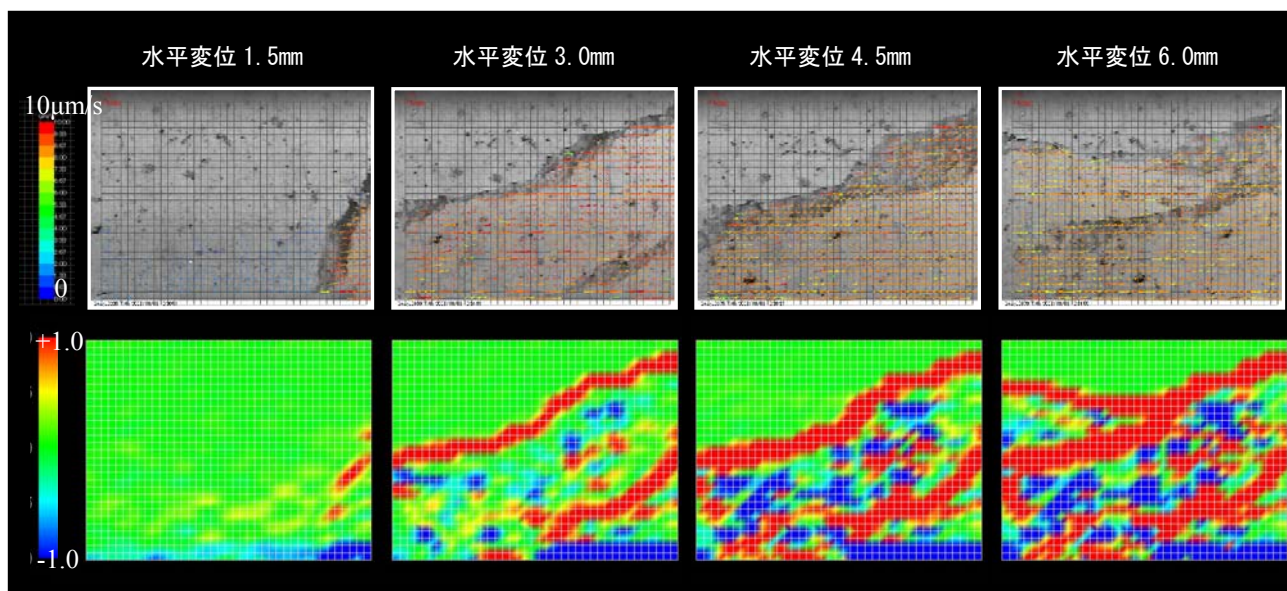


図-2 正規圧密供試体のせん断過程におけるせん断帯の観察；
(a) 速度ベクトル(上図), (b) せん断ひずみ分布図(下図)

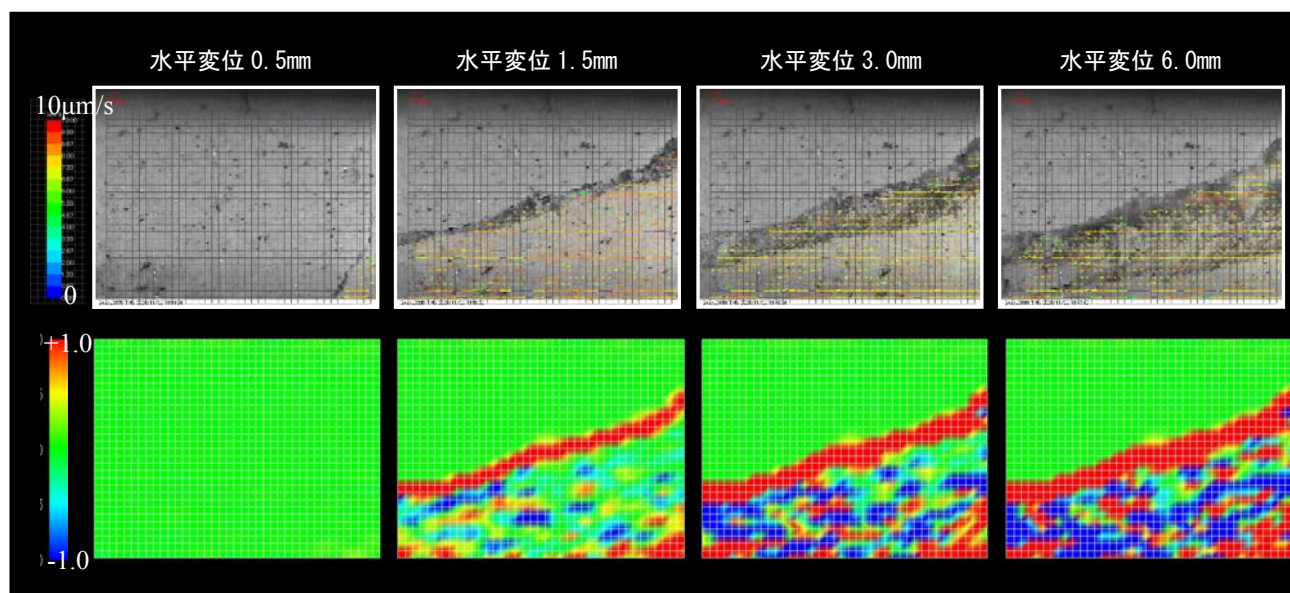


図-3 過圧密供試体のせん断過程におけるせん断帯の観察；
(a) 速度ベクトル(上図), (b) せん断ひずみ分布図(下図)

は水平なせん断帯のみに集中していたせん断ひずみが、水平変位の増大に伴い、下部領域全般にわたり広がってゆくことがわかる。

2.4 X線CTによるせん断帯の観察

2.3節では供試体表面の一部分のみの観察であったが、本節ではせん断に伴う供試体内部のせん断帯の発達状況を確認するため、任意の水平変位までせん断させた供試体をX線CTによって可視化することを試みた。供試体の乾燥密度は 1.55 Mg/m^3 とし、あらかじめ決めた所定の水平変位までせん断した時点で試験を終了し、X線CTで観察した。そのため、複数の供試体での観察結果を用いて、あたかも一連のせん断帯の発達として評価することとしていることに注意されたい。

図-4 は正規圧密供試体および過圧密供試体の一面セ

ん断試験後の供試体内部のX線CT結果である。X線透過量が多いほど黒くなり、低密度領域と判断できる。正規圧密供試体では、せん断箱の端部からの応力解放に伴い、斜めの亀裂が供試体内部に向かって生じており、せん断の進行とともにその数は増える。しかし、最終状態においても供試体の中心部では低密度領域は確認できない。一方、過圧密供試体では、垂直応力が小さいため、せん断のごく初期からせん断箱の端部から中心部に向かって、ほぼ水平な亀裂が生じている。しかし、せん断の進行に伴い正のダイレイタンスによって垂直応力が上昇し、低密度領域は徐々に閉合され、最終状態には正規圧密供試体と同様に供試体の中心部では低密度領域が消失している。図-1(b)の応力経路に示すように、最終状態の応力状態は、正規圧密、過圧密のいずれの供試体にお

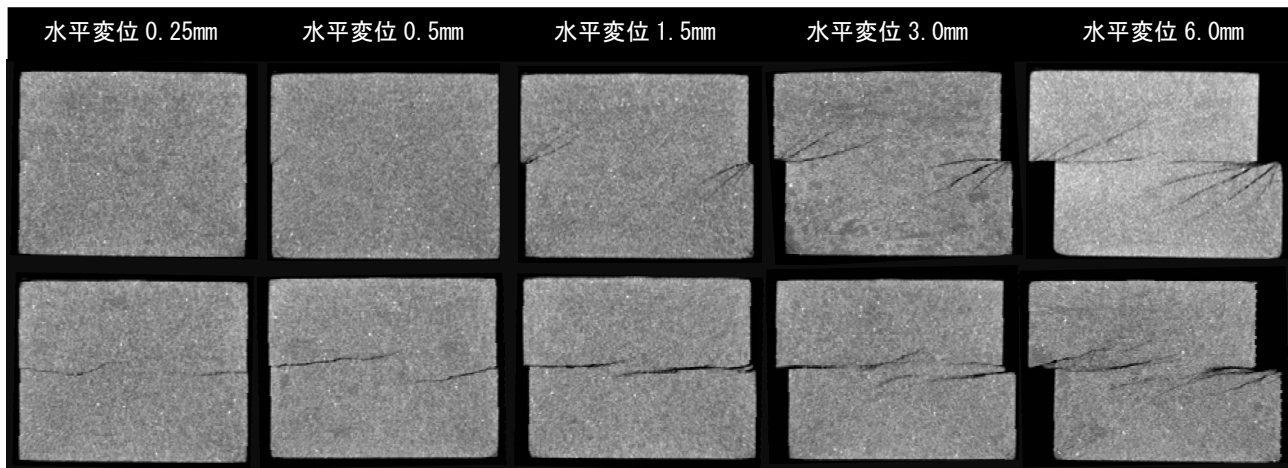


図-4 X線CT結果;正規圧密供試体(上段), 過圧密供試体(下段)

いてもほぼ同じであるため、供試体内の亀裂やそれに伴う低密度領域の分布も類似したものになっていると考えられる。

3. 飽和供試体による一面せん断試験

3.1 供試体作製方法および試験方法

不飽和供試体と同様の配合率のベントナイト・珪砂混合物を、圧縮成型後に所定の乾燥密度になるよう計量し、直径 80mm、高さ 20mm の高剛性圧縮リングに投入し、油圧ジャッキを用いて圧縮成型する。圧縮リングのまま、一次元圧密容器にセットして、上下完全拘束条件で膨潤圧を計測しながら約 3 ヶ月間水浸飽和させる。飽和後、圧密容器から圧縮リングを取り出し、ベントナイト供試体を取り出し、50mm 角のガイドカッターを用いて 20mm 厚の直方体に成形し、高拘束圧一面せん断試験機にセットする。水平変位速度は 0.4mm/min とし、水平変位 6.0mm になるまで定体積条件でせん断した。不飽和供試体と同様に、せん断中の供試体表面を CCD マイクロスコープを用いて撮影し、せん断後は X 線 CT 装置によってせん断帯の観察を行った。なお、飽和供試体の含水比から飽和度を計算したところ、飽和モールド内で完全に体積拘束されていた時点では飽和度は 100%に達していたことが確認できたが、モールドから取り出した直後に 1.9mm 程度膨張していたことにより、一面せん断試験時には飽和度が 91%程度まで低下していると考えられる。

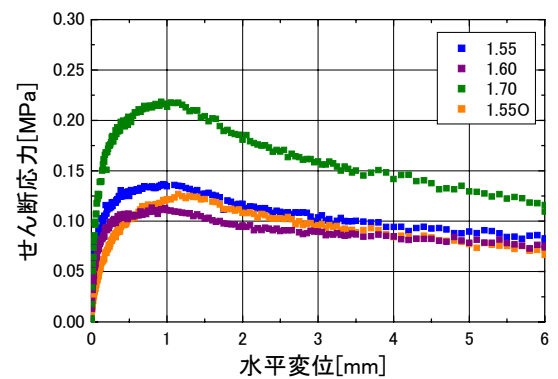
表-1 に一面せん断試験の試験条件を示す。初期の垂直応力は飽和供試体作製時の膨潤時に観察された最終的な膨潤圧とほぼ同様にしており、今回の試験では、乾燥密度 1.55 および 1.6Mg/m³ の供試体には、初期垂直応力を 0.6MPa、乾燥密度 1.7 Mg/m³ の供試体には、初期垂直応力を 1.2MPa 与えて試験を行った。また、乾燥密度 1.55 Mg/m³ の供試体については、過圧密供試体として初期垂直応力を与えずにせん断する試験も実施した。

3.2 正規圧密供試体の試験結果

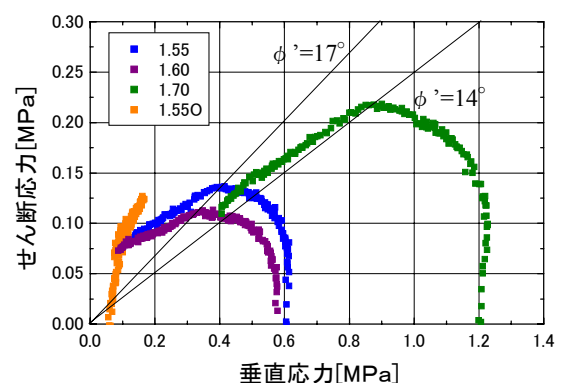
図-5(a)にせん断応力～変位関係、図-5(b)に応力経路を示す。図-5(a)を見ると、どの乾燥密度でも水平変位 1.0mm 前後で最大せん断応力に達し、その後緩やかな軟

表-1 飽和供試体の試験条件

供試体名	正規圧密 ／過圧密	乾燥密度 [Mg/m ³]	初期垂直応力 [MPa]
1.55	正規圧密	1.55	0.6
1.60		1.60	
1.70		1.70	1.2
1.55O	過圧密	1.55	0



(a) せん断応力～変位関係



(b) 応力経路

図-5 飽和供試体の一面せん断試験結果

化をしており、乾燥密度の大きいものほど軟化幅は大きくなっている。また、正規圧密供試体 1.55 と過圧密供試体 1.55O を見ると、最終状態のせん断応力はほぼ同じである。図-5(b)を見ると、正規圧密供試体ではどの乾燥密度でも残留強度の大きさを超えた辺りから垂直応力が減

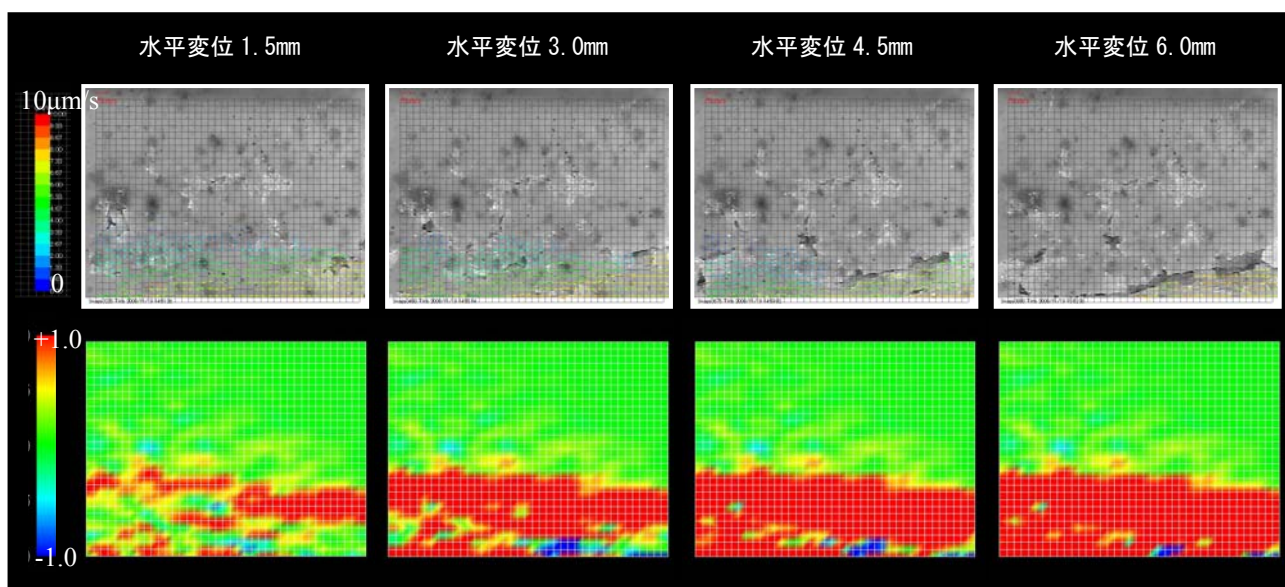


図-6 正規圧密飽和供試体のせん断帯過程におけるせん断帯の観察；
(a) 速度ベクトル(上図), (b) せん断ひずみ分布図(下図)

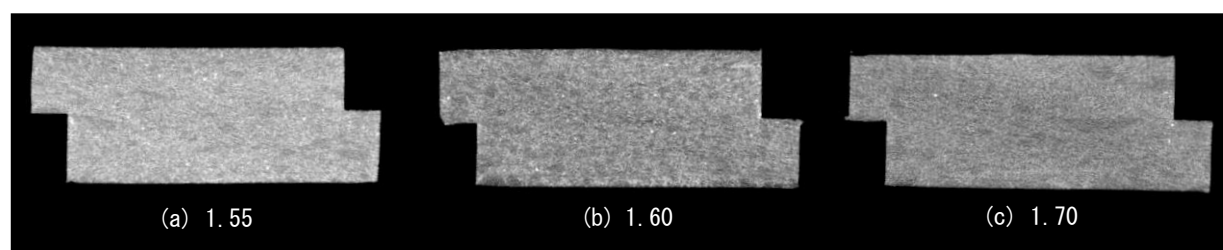


図-7 正規圧密飽和供試体の X 線 CT 結果

少しはじめ、ピーク強度後は急激にひずみ軟化して残留状態に至る。一方、過圧密供試体 1.55O は、せん断応力の増加とともに垂直応力も上昇してゆくが、ピーク後の残留状態は、正規圧密供試体 1.55 とほぼ一致している。このことから、同一の乾燥密度であれば、初期の垂直応力が水浸・膨張時の膨潤圧以下では、発揮する最大せん断応力および最終残留状態は同一となることがわかる。また、正規圧密供試体の最大せん断応力から飽和圧縮ベントナイトのせん断抵抗角を求めると、 $\phi' = 17^\circ$ あるいは 14° となり、飽和圧縮ベントナイト供試体の三軸試験結果 $\phi' = 16.6^\circ$ ²⁾ と比べると、今回のせん断抵抗角は非常に近い値となっている。

3.3 画像解析によるせん断帯の観察結果

不飽和供試体と同様に、飽和供試体での一面せん断試験においても、画像解析によるせん断帯の観察を行った。乾燥密度、正規圧密、過圧密などの供試体の別によっての有意義な差は見られなかったため、ここでは図-6 に正規圧密供試体 1.60 の観察結果を示す。観察箇所は不飽和供試体の場合と同様に、写真-1 に示す枠で囲まれた箇所で行った。

図-6(a)の速度ベクトルを見ると、不飽和供試体と異なり亀裂や崩壊を伴っていないが、観察領域中央で上下 2 つに分断する水平なせん断帯が確認できる。また、図-6(b)のせん断ひずみ分布図を見ると、せん断初期から下部領域のみにせん断ひずみの集中が見られる。飽和供試

体では、不飽和供試体で観察されたように、斜めの亀裂が幾重にも生成しながら局所変形帯が発達してゆくわけではないため、明確な水平なせん断ひずみの集中のみが観察されたと考えられる。

3.4 X 線 CT によるせん断帯の観察

不飽和供試体と同様に、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いてせん断破壊時の供試体内部の状況について観察を行った。図-7 に水平変位 6.0mm までせん断した正規圧密供試体 1.55, 1.60 および 1.70 の X 線 CT 結果をそれぞれ示す。どの供試体も多少密度のばらつきがあるが、せん断帯が存在するはずの部分には密度変化は見られない。よって、大変位のせん断帯が発生しても密度変化は生じないと考えられる。

次に、正規圧密供試体 1.55 について写真-2 のように供試体の中心部から円柱供試体を取り出し、観察領域を小さくすることにより解像度を高くして X 線 CT 撮影を行った。なお、写真-2 の供試体の面は、一面せん断試験装置の観察面の裏側であるため、供試体表面の中央に見える線はせん断帯ではなく、上下せん断箱の隙間の跡である。図-8 に拡大撮影した X 線 CT 結果を示す。上下に入っている黒い 2 本の線は、せん断方向がわかるようにカッターナイフで付けた溝である。また、供試体中の珪砂 6 号の最大粒径が約 0.4mm であり、画像内に分布した白い斑点のものが珪砂にあたる。これだけ解像度を高くしてもせん断変形に伴う密度変化は見られない。したが



写真-2 観察用の円柱供試体

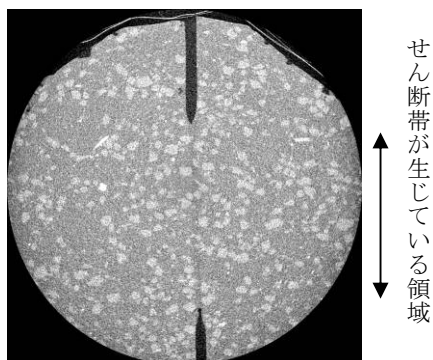


図-8 観察用円柱供試体の X 線 CT 結果

って、処分場が完全に再冠水し、緩衝材の圧縮ベントナイトが飽和した後であれば、周辺的环境変化により緩衝材にせん断帯が発生したとしても、その遮水機能には大きな影響はない可能性が高いことが示唆される。

4. せん断帯を含む飽和供試体の透水性

4.1 超低透水性材料用透水試験装置

X 線 CT による観察では、飽和供試体はせん断変形に伴う密度変化が認められなかったが、実際にせん断帯が発生しても遮水性能は維持されているのか確認するため、直接的に透水試験を行い、遮水性能の検討を行った。

本研究では、極めて透水性の低い圧縮ベントナイトの透水係数を計測するために、超低透水性材料用の透水試験装置を作製した。写真-3 に示す試験装置は、供試体用小型モールドとその中を透過する水量を計測する二重管ビュレットで構成している。二重管ビュレットは、最大 1MPa まで加圧できるアクリル円筒製の圧力室に微量の透水量を計測できる内径約 1.8mm のガラス細管を入れたものである。4 本あるビュレットについてキャリブレーションを行って断面積を計測した。その結果、水面 1cm の変動で 0.00265cm^3 の水量が移動することを確認した。一方、ベントナイト供試体は、写真-4 に示す直径 1.5mm、厚さ 0.3mm の供試体リングに設置する。この直径は一面せん断試験の供試体の大きさから決めており、厚さは現実的に計測可能な時間スケールを勘案して決定した。小型モールドには、供試体の上下にポーラスメタルを設置しており、底盤から入った水が供試体を透過して上盤にある穴から流出するようになっている。



写真-3 超低透水性材料用透水試験装置



写真-4 小型モールドの解体

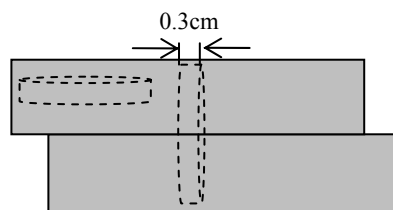


図-9 供試体のくり抜き箇所

4.2 透水試験用供試体の作製方法

試験材料は一面せん断試験後の飽和供試体を使用する。せん断後の供試体から、図-9 に示すように、せん断帯を含む供試体と含まない供試体を取り出す。専用のマイターボックスで供試体を固定し、カッターナイフで縦断面に 3 等分する。マイターボックスから供試体を取り出し、さらに横断面に 2 分割し、写真-4 に示すガイドカッターを押し当ててくり抜くことによってせん断帯を含む円柱供試体を作製する。ガイドカッターに入れた円柱供試体をエポキシ樹脂の止水剤を湿布した供試体リングに挿入し、止水剤が固まるまで 1 日静置させ、その後、供試体の両面を成形する。透水試験装置と小型モールドを連結させ、小型モールドの底盤に供試体リングを設置し、上盤を載せてキャップボルトで固定することによって完全に供試体の変位を拘束した状態で、透水試験を開始する。

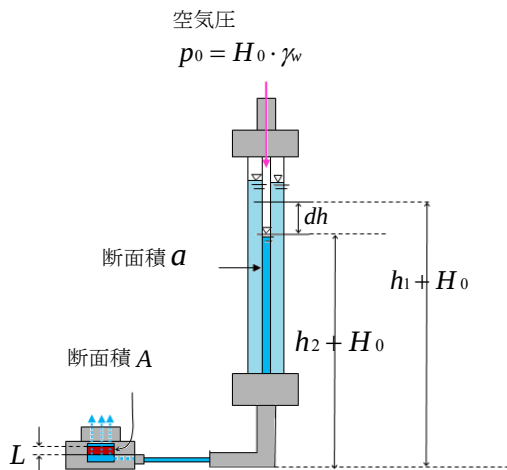


図-10 透水試験機の概要

4.3 透水試験の算出方法

図-10 に今回使用した透水試験装置の概要を示す。ベントナイトのような極端に透水性の低い材料の透水係数を計測するには、大気圧下でのガラス細管内の水の自由落下だけでは透過量に限度がある。そこで、図-10 のように圧力室内に空気圧を作用させて、あらかじめ大きな水頭を加えておく。ここでは、あらかじめ負荷する圧力を p_0 とする。この場合、 $H_0 = p_0 / \gamma_w$ の水頭が負荷されることとなる。

よって透水係数 k は

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1 + H_0}{h_2 + H_0} \quad (1)$$

となる。もちろん $H_0 \rightarrow 0$ の場合には、通常の変水位透水試験の式と同じになる。

4.4 透水試験の結果

乾燥密度 1.70 Mg/m^3 の供試体で実施した透水試験結果を図-11 に示す。図の凡例は、使用した供試体中のせん断帯の有無と、試験時の作用空気圧を示している。実験データは、実験開始時点からそれぞれの計測時間で計測した透水係数であり、計測時間が長くなるほど透水係数も低下し、収束に向かっている。また、図中の各線は、同条件で同時に計測した4つの実験データを計測時間毎に平均して算出した値を結んだものである。

図-11 を見ると、作用空気圧が 100, 200kPa の場合は供試体の断面にせん断帯がある場合の方が低い値の透水係数を示しているが、作用空気圧 300kPa となると、供試体断面にせん断帯がない場合の方が低い透水係数を示している。しかしながら、どの作用空気圧を見ても透水係数は、 $1.4 \sim 2.1 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ となっており、供試体中のせん断帯の有無によって、透水係数の値に有意義な差は見られない。したがって、せん断帯が発生しても遮水機能は維持されと考えられる。

次に、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 の供試体で実施した透水試験の結果を図-12 に示す。図中の凡例は、供試体中のせん断帯の有無とせん断試験後からの経過時間を示している。すなわち、図-11 の結果を得た供試体は、一面せん

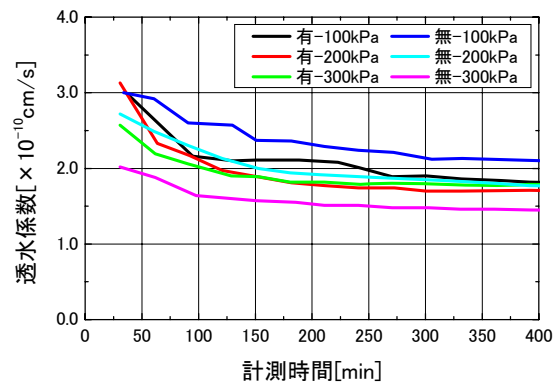
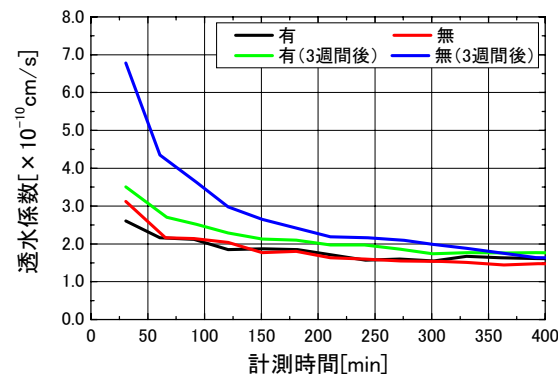
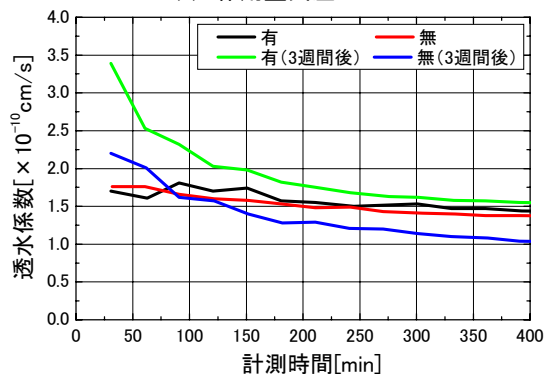


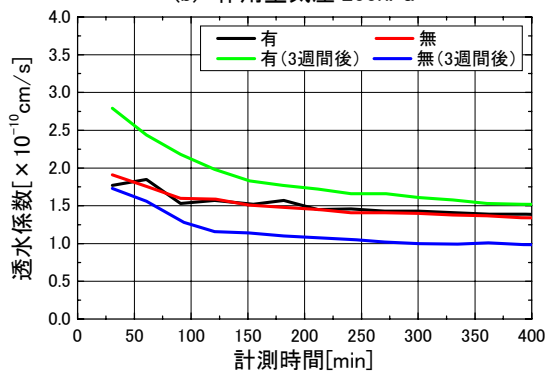
図-11 せん断帯の有無による比較



(a) 作用空気圧 100kPa



(b) 作用空気圧 200kPa



(c) 作用空気圧 300kPa

図-12 せん断後の経過時間による比較

断試験後、京都大学に移送して X 線 CT による観察を行なってから、再び名城大学に持ち帰って透水試験を実施したため、せん断後かなりの時間が経過していた。そのため、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 の供試体においては、せん断後の時間の経過によって、供試体中にせん断面を含む供

試体の遮水性能に違いが生じるのか検討するために、一面せん断試験実施直後に成形した供試体とせん断試験実施後3週間が経過した後に成形した供試体の2種類を用いて比較を行なった。また、グラフの値は、図-11と同様に4本のピュレットの平均値である。

図-12を見ると、どの作用空気圧でも最初の透水係数にばらつきが見られるが、全ての供試体の透水係数は、最終的に $1.0 \sim 1.7 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ となっている。本試験ケースにおいても、せん断後の経過時間によって供試体内のせん断帯の有無によって、透水係数に有意な差が生じないことがわかった。

5. 結論

本研究を通して、以下に示す知見を得た。

- (1) 正規圧密状態の不飽和圧縮ベントナイトにおいては、一面せん断の初期から正規圧密土的な挙動を示し、ピーク強度以降には塑性圧縮を伴いひずみ軟化を示した。ピーク強度から得た不飽和圧縮ベントナイトのせん断抵抗角は $\phi' = 33^\circ$ であり、飽和圧縮ベントナイトのせん断抵抗角より2倍程度大きいことが示された。
- (2) 過圧密状態の不飽和圧縮ベントナイトにおいては、せん断後の早い段階から、定体積せん断に伴う正のダイレイタンスが発揮されることによって、せん断応力が増加することが示された。
- (3) 正規圧密、過圧密のいずれの供試体においても、一面せん断時には、大きな亀裂を伴うせん断帯がPIV画像解析を用いて観察できた。過圧密供試体の方が、せん断初期からせん断帯が大きく発達し、亀裂が伴う崩壊領域も大きいことが示された。
- (4) せん断後の不飽和供試体をマイクロフォーカス X 線 CT 装置で観察した結果、正規圧密と過圧密ではせん断帯の生成過程は異なるものの、どちらの供試体でも垂直応力が十分に作用している状況においては、供試体中心部では低密度領域が発達しにくいことが示された。
- (5) 飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験から得られたせん断抵抗角は、既往の三軸圧縮試験によるせん断抵抗角とほぼ同じであることが示された。
- (6) せん断後の飽和供試体をマイクロフォーカス X 線

CT 装置で観察したところ、大変位を伴うせん断帯の領域であっても低密度領域は発生せず、遮水性能の低下の大きな懸念はないことが示された。

- (7) せん断帯を含む供試体と含まない供試体において透水試験を行い比較した結果、せん断帯の有無によって、遮水性能に有意な差は生じないことが確認された。

以上の結果より、高レベル放射性廃棄物の地層処分に於いて、再冠水の途上にある不飽和圧縮ベントナイトは、飽和供試体に比べて大きなせん断強度を有する反面、大きな亀裂を伴い脆性的な破壊挙動を示すことがわかった。しかし、圧縮ベントナイトは飽和してしまえば、せん断強度は低下するものの、大きな変位を与えても低密度領域などは発生せずに、緩衝材としての大きな性能低下は引き起こさない可能性が高いことも示された。

謝辞: 本研究は（財）原子力環境整備・資金管理センターの地層処分重要基礎技術研究調査として実施したものであり、研究の一部は、中部電力基礎技術研究所の特別研究助成のお世話にもなりました。本研究を始めるにあたり、大西有三京都大学副学長、小峯秀雄茨城大学教授には有益なご助言を賜りました。また、X 線 CT による観察に関し、京都大学の岡二三生教授、肥後陽介助教、元大学院生の佐名川太亮氏にご協力賜りました。最後に、名城大学元学生の今場寿幸氏、松村竜樹氏には卒業研究を通して一面せん断試験を実施していただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 59-69, 2009.
- 2) 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.

Compacted bentonite is planned for use as a buffer material in the geological disposal of the high-level radioactive waste. In this paper, in order to study the failure behavior of the compacted bentonite, a series of constant volume direct shear tests were performed. At the same time, developed shear bands were observed during the direct shearing using the PIV image analysis. Also, inside of the specimens were observed by using a μ -focus X-ray CT scanner. Even though the process of shear bands formation in the unsaturated over-consolidated specimen was different from the process in unsaturated normally consolidated specimen, the low density region due to the shear failure was hardly observed in the center of both specimens under the relative high vertical stress condition. In case of saturated specimens, there was no change of density at the shear band, and also, it has been confirmed that sealing performance does not change after development of shear bands.