

圧縮ベントナイトのせん断破壊時の強度特性と遮水性能

名城大学大学院 学生会員 平手寿大
学生会員 寺本優子
名城大学 国際会員 小高猛司

1. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、ガラス固化し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 以深の岩盤に埋設することを基本方針としている。その際に使用される緩衝材に必要な条件として、オーバーパックを恒久的に安全に支持するとともに、地盤からの長期的クリープ変形や地震などの外力から守ることに加えて、地下水環境下から隔離することが重要である。これらの条件を満たす材料として高圧で圧縮したベントナイトが有力とされている。圧縮ベントナイトは、不飽和状態で締め固められて製造された後、埋設されるため、地層処分場の閉鎖後、地下水の浸潤により緩衝材は飽和状態になるが、ベントナイト自身による膨潤圧の増加、オーバーパックの腐食膨張、周辺岩盤からのクリープ変形の長期的な作用などと不飽和状態の時と比べると環境が変化する。

本研究では、急激な地殻変動や長期的なクリープ破壊によって周辺岩盤にせん断帯が発生し、緩衝材にも破壊が伝播してせん断帯が形成された場合、緩衝材の基本性能は維持されるのかを検討している。特に本論文では、飽和圧縮ベントナイト供試体を用いて一面せん断試験を実施し、破壊時の力学特性を調べるとともに、せん断中に発生したせん断帯について PIV 画像解析やマイクロフォーカス X 線 CT を用いて観察した結果を示す。さらに、せん断帯を含む供試体を用いて、透水試験を行うことにより、遮水性能の維持について検討した結果を示す。

2. 飽和供試体作製方法及び試験方法

粉末状のベントナイト（クニミネ工業（株）製 Na 型ベントナイト・クニゲル V1）を 70%、三河珪砂 6 号を 30%の質量比で配合した試料を、圧縮成型後に所定の乾燥密度になるように計量し、写真-1 に示す直径 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。写真-2 に示すように圧縮リングを飽和供試体作製用モールドにセットした後、写真-3 に示す 4 連載荷フレームに設置し、鉛直軸を固定して両面注水させることによって飽和させる。この際、ロードセルによって膨潤圧を計測することにより飽和化の目安とする。今回の試験では圧縮ベントナイトを約 3 ヶ月飽和させた。飽和後、モールドを解体し供試体を取り出し、50mm 角のガイドカッターを用いて 50×50mm の正方形断面で、厚さ 20mm の直方体に成形する。高拘束圧一面せん断試験機に供試体をセットし、水平変位速度 0.4mm/min、上下せん断箱間隔 1mm とし、水平変位 6mm になるまで定体積条件で一面せん断試験を行った。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が 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。

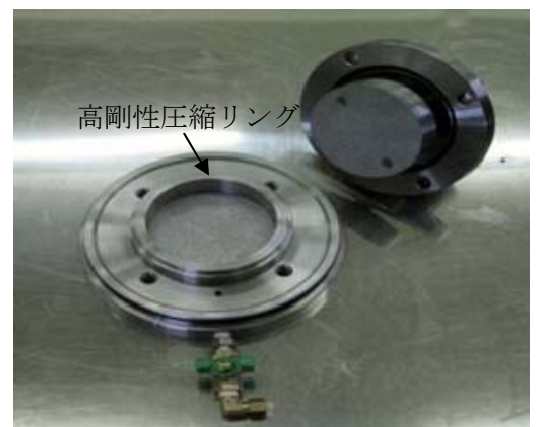


写真-1 飽和供試体作製用モールド組み立て前



写真-2 飽和供試体作製用モールド組み立て



写真-3 4連載荷フレーム

3. 飽和供試体による一面せん断試験

(1) 試験条件

表-1 に一面せん断試験の試験条件を示す。今回の試験では、乾燥密度 1.55 および 1.6Mg/m^3 の供試体には、初期垂直応力を 0.6MPa 、乾燥密度 1.7Mg/m^3 の供試体には、初期垂直応力を 1.2MPa を与えて試験を行った。これらの垂直応力は、飽和膨潤過程で観察された最終的な膨潤圧と同じ値とした。また、乾燥密度 1.55Mg/m^3 の供試体については、初期垂直応力 1.3MPa まで負荷させた試験も行った。これは、供試体内に強制的に発生させた間隙水圧がベントナイトの強度特性に影響を及ぼすか検討するためである。以上の一連の試験ケースを正規圧密供試体とした。表-1 の供試体名には乾燥密度を表す数字の後に N と示している。一方、乾燥密度 1.55Mg/m^3 の供試体については、初期垂直応力を与えずにせん断する試験も実施した。これを過圧密供試体として、乾燥密度を表す数字の後に O と示している。

表-1 一面せん断試験の条件

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)
1.55N-1	正規圧密	1.55	0.6
1.55N-2			1.3
1.6N		1.6	0.6
1.7N		1.7	1.2
1.55O	過圧密	1.55	0

(2) 正規圧密供試体の試験結果

図-1 (a) にせん断応力～変位関係、図-1 (b) に応力経路を示す。図-1 (a) を見ると、どの乾燥密度でも水平変位 1mm 前後で最大せん断応力に達して、その後緩やかな軟化をしている。また、乾燥密度が大きいほど軟化幅が大きくなっている。図-1 (b) を見ると、どの乾燥密度でも同じ様な形状の挙動を呈しており、せん断直後から垂直応力が減少していき、ピーク強度に達してからひずみ軟化をして最終状態になっている。 $1.55-1$ 、 1.6 および 1.7 の最大せん断応力からせん断抵抗角を求めるとそれぞれ $\phi' = 17^\circ$ 及び 14° である。これは過去に行った不飽和状態の圧縮ベントナイトを用いて一面せん断試験を行って求めたせん断抵抗角 $\phi' = 33^\circ$ ¹⁾ と比べると小さい値を示しているが、JAEA が公開している三軸試験による内部摩擦角 $\phi' = 16.6^\circ$ ²⁾ と比べると非常に近い値となっている。膨潤圧以上の初期垂直荷重を与えてから試験した $1.55-2$ を見ると最大せん断応力とピーク強度は $1.55-1$ と同じ値になっているが、せん断応力が 0MPa まで減少した。これは供試体内に膨潤圧以上の間隙水圧が発生してせん断応力が低下したと考えられる。

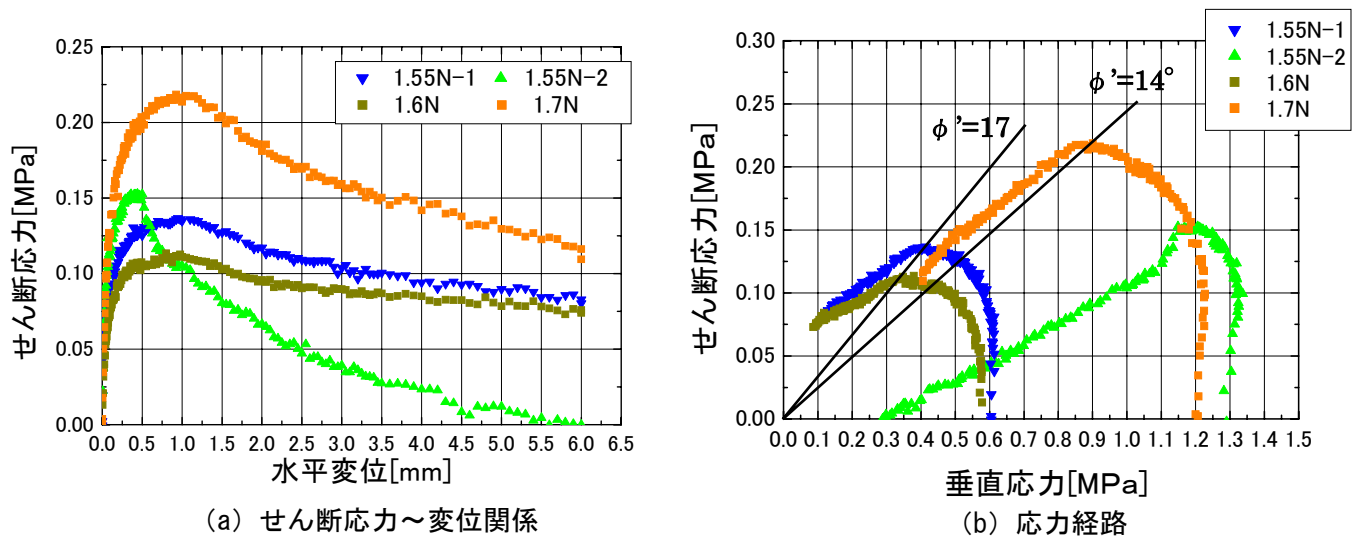


図-1 正規圧密供試体の試験結果

(3) 過圧密供試体の試験結果

図-2(a)にせん断応力～変位関係、図-2(b)に応力経路を示す。比較のために正規圧密供試体の試験結果も示している。過圧密供試体は、初期垂直応力 0MPa としてせん断する予定であったが、せん断準備中に供試体が膨張したことによって垂直応力も若干増加し、最終的に初期垂直応力 0.05MPa で試験を開始した。

図-2(a)を見ると、正規圧密供試体、過圧密供試体両方とも水平変位 1mm 辺りで最大せん断応力に達し、その後ひずみ軟化している。最終状態は同じせん断応力となっている。図-2(b)を見ると、過圧密供試体は正のダイレイタンスの発現により、せん断応力の増加とともに垂直応力も増加している。また、最終状態は正規圧密供試体と過圧密供試体では非常に近い値を示している。このことから、乾燥密度が同じであれば、初期の垂直応力が水浸・膨張時の膨潤圧以下であれば、発揮する最大せん断応力及び最終残留状態は同一であるとわかる。

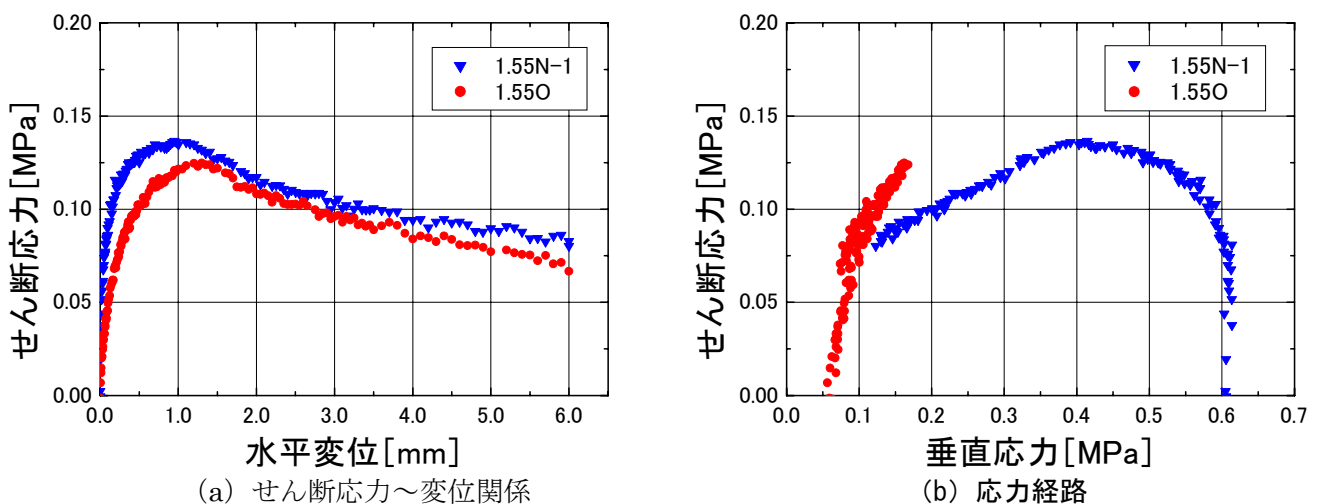


図-2 正規圧密供試体と過圧密供試体の試験結果

4. 画像解析結果

画像解析によるせん断帯の観察を、3(2)で示した正規圧密供試体 1.55-1 について実施した。観察箇所は写真-4 に示すせん断箱右側の赤い枠で囲った部分である。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するのは、この近辺が最適だと過去の試験から判断した。

図-3(a)に速度ベクトルを示す。ベクトルの速度は色表示に最大 $12\mu\text{m/s}$ を赤色、最小 $0\mu\text{m/s}$ を青色で評価した。また、図-3(b)にせん断ひずみ分布図を示す。なお、固定した観測窓から変位速度を計測し続ける解析手法であるために、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には対応していない。

図-3(a)を見ると、水平変位 1mm 辺りでは、下部領域の移動速度はあまり大きくないが、水平変位 2mm を過ぎてからほぼ同一で下部領域が移動しているのがわかる。また、水平変位 1mm でせん断帯が見られるが、せん断終了の水平変位 6mm を見ても大きな崩壊の確認はできなかった。図-3(b)を見ると、せん断初期から観察領域全体にせん断ひずみの分布が見られる。これは、飽和供試体では、顕微鏡で観察するためのアクリルガラス面が湿るために、デジタル画像が不明瞭になるのが一因となっている。しかしながら、せん断が進行するにつれて供試体の中央部には明瞭にせん断ひずみが集中しているのがわかる。

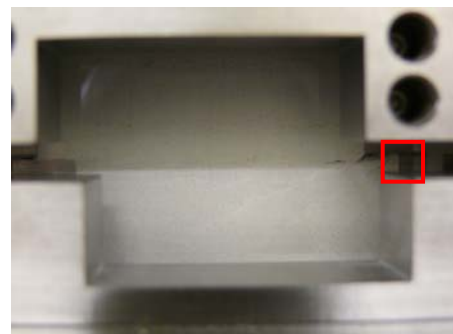
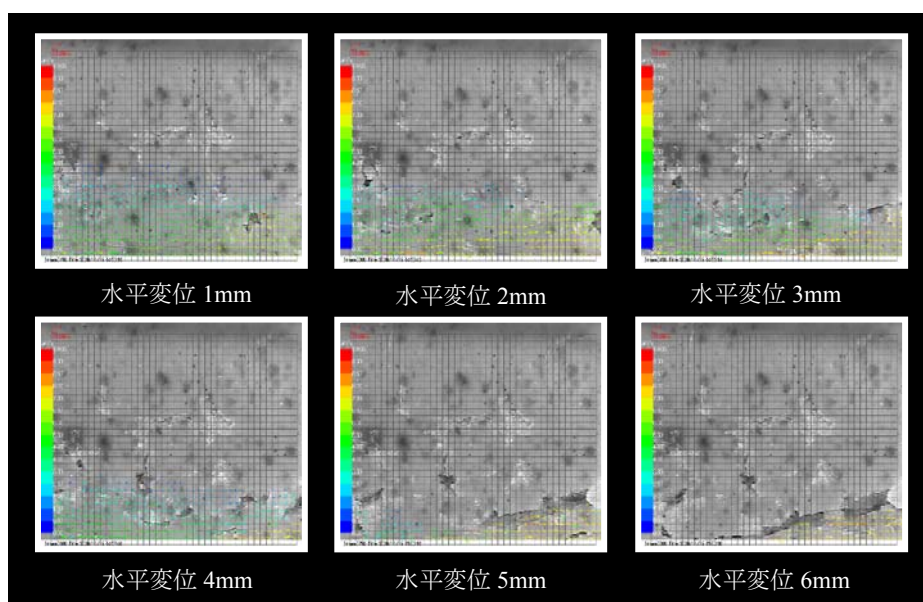
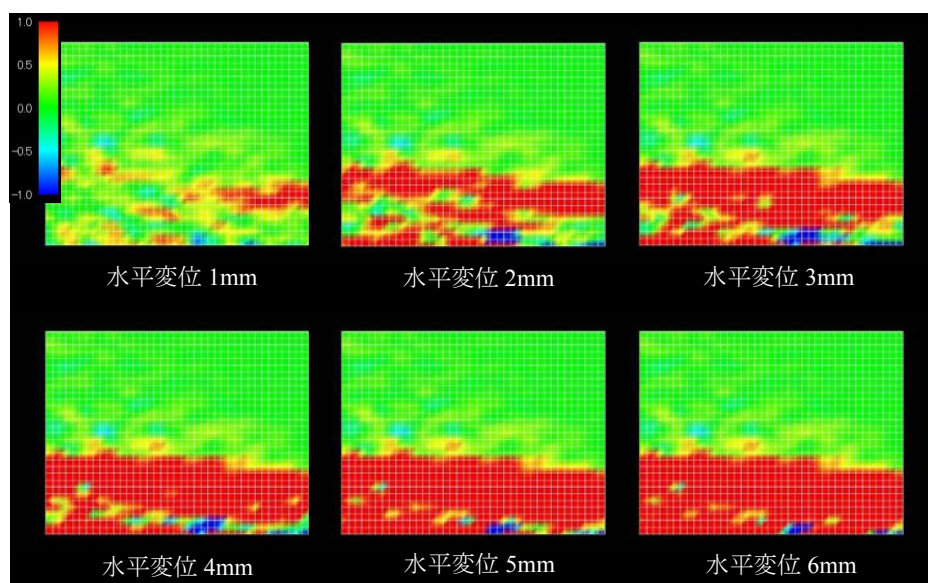


写真-4 観察位置



(a) 速度ベクトル



(b) せん断ひずみ分布図

図-3 画像解析結果

5. X線CTによる観察

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。装置は、京都大学工学研究科が所蔵する KYOTO-GEO μ XCT（東芝製 TOSCANER-32250 μ HDK）を用いた。一面せん断試験を行った後、供試体をせん断後の状態を保つように専用の治具を用いてせん断箱から慎重に取り出し、供試体を真空パックして京都大学に搬入した。

図-4 に X 線 CT 画像を示す。図中の数字は 3 (1) で示した正規圧密供試体を示している。どの供試体も多少の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 1.55-1 について写真-5 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。結果を図-5 に示す。上下に入っている黒い 2 本線は、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、供試体に混合している珪砂 6 号の最大粒径は約 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。よって、処分場が再冠水した後、緩衝材が飽和状態であれば、環境の変化によってせん断帯が発生しても遮水機能は維持されると推察される。

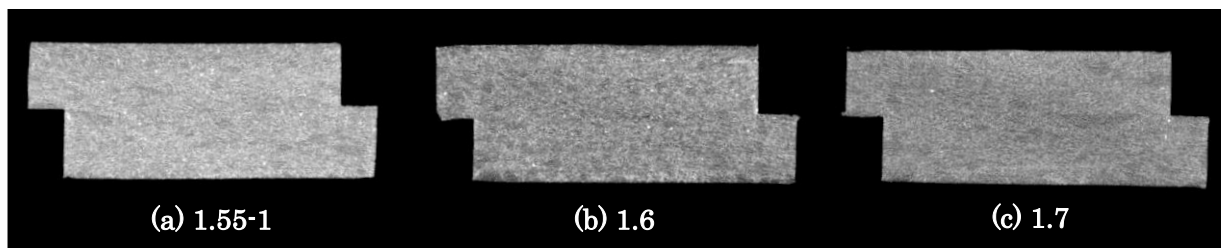


図-4 X 線 CT の結果

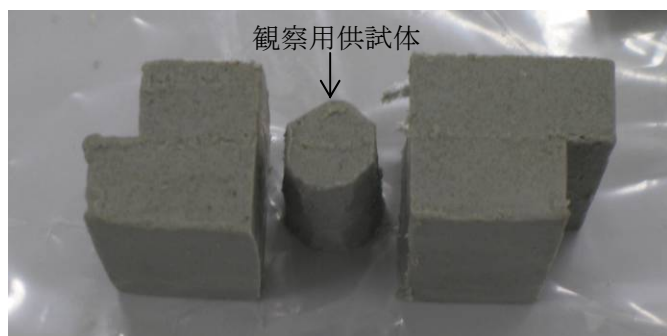


写真-5 観察用供試体

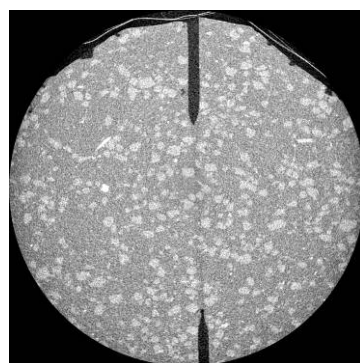


図-5 観察用供試体の X 線 CT の結果

6. 超低透水性材料用透水試験

(1) 透水試験器

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が維持されているか確認するための直接的な透水試験を行い遮水性能の検討をした。

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器を作製した。写真-6 に透水試験器の全景を示す。試験器は、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。



写真-6 透水試験器

その結果、水面 1cm の変動で 0.00265m^3 の水量が移動すると確認した。ベントナイト供試体は、写真-7 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。

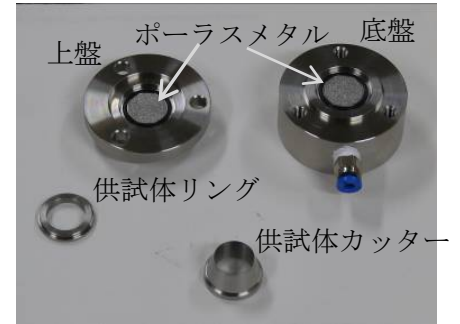


写真-7 小型モールドの解体

(2) 透水試験用供試体の作製方法

供試体は、一面せん断試験を行った後の飽和供試体を使用する。せん断後の供試体から図-6 に示すようにせん断面を含んだ供試体と含まない供試体を取り出す。写真-8 に示すようにマイターボックスと固定器具を取り付けてカッターナイフで縦断面に 3 分割にする。マイターボックスから取り出した供試体を写真-9 に示す円形にガイドカッターを押し当て、くり抜くことによってせん断面を含んだ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て、止水剤が固まるまで 1 日静置する。その後、供試体の両面を形成する。成形後の供試体を写真-10 に示す。供試体とリングをモールドの底盤に設置し、上盤を載せてキャップボルトで固定することによって変位を固定する。組み立てたモールドを透水試験機に繋ぎ、試験を開始する。

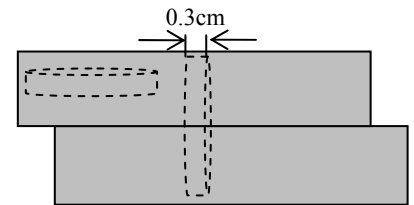


図-6 供試体のくり抜き箇所



写真-8 専用器具による
供試体の切断

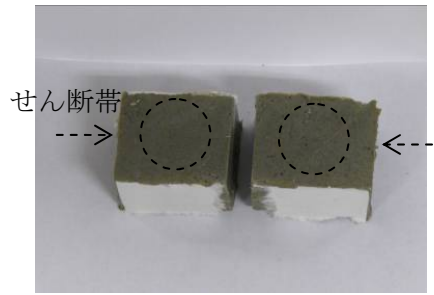


写真-9 せん断帯を含む
供試体

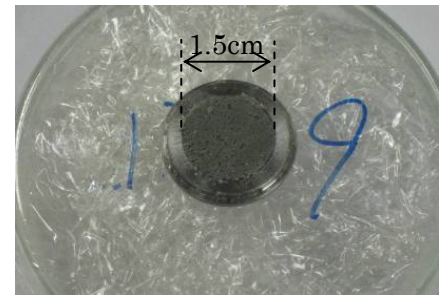


写真-10 供試体リングに
形成した供試体

(3) 透水係数の算出方法

図-7 に今回使用した透水試験機の概要を示す。ベントナイトの様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-7 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になる。

よって、透水係数 k は

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

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。

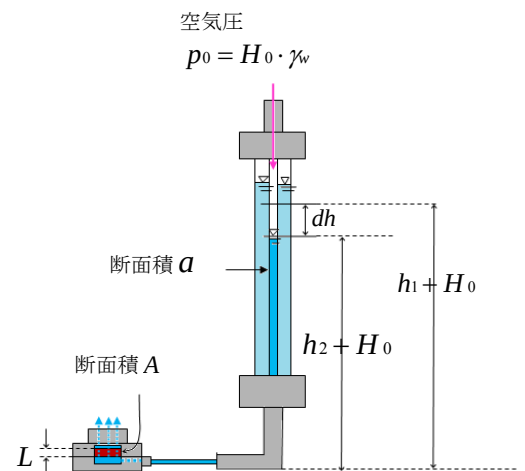


図-7 透水試験機の概要

(4) 再構成粘土による透水試験器の検証

飽和供試体による透水試験に先立ち、あらかじめ透水係数が判明している再構成粘土を用いて透水試験を行い、透水試験機の検証を行った。作用空気圧は 0, 10, 30, 50, 100, 200, 300kPa とした。表-2 に結果を示す。別途、同じ再構成粘土で CRS 圧密試験を行い、その圧密試験から計測した透水係数も記載している。どの作用空気圧においても同じような値となっている。また、圧密試験の結果と比較しても大きな違いはないので、本試験機は、低透水性の材料においても透水係数が計測するのに有効であると確認できた。

表-2 再構成粘土の透水係数

作用空気圧 (kPa)	透水係数 (cm/s)
0	5.08×10^{-8}
10	5.34×10^{-8}
30	5.20×10^{-8}
50	5.00×10^{-8}
100	4.49×10^{-8}
200	4.95×10^{-8}
300	5.66×10^{-8}
圧密試験	5.24×10^{-8}

(5) 透水試験の結果

乾燥密度 1.7Mg/m^3 の供試体で実施した透水試験結果を図-8 に示す。図の凡例は、使用した供試体中のせん断面の有無と、計測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全水頭から計算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、収束に向かっていくことがわかる。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-8 を見ると、作用空気圧が 100, 200kPa の場合はせん断面ありのほうが低い値の透水係数を示しているが、作用空気圧が 300kPa となると、せん断面なしのほう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

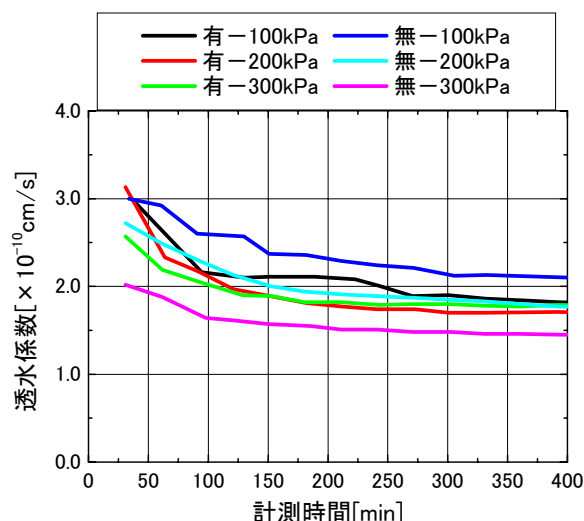


図-8 せん断面有無による結果

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、供試体中のせん断面の有無によって、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则认为される。

次に、乾燥密度 1.6Mg/m^3 の供試体で実施した透水試験の結果を図-9 に示す。図中の凡例は、供試体中のせん断面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-8 の結果を得た供試体は、一面せん断試験後、京都大学に移送して X 線 CT による観察を行ってから、再び名城大学に持ち帰って透水試験を実施したので、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 1.6Mg/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った。また、グラフの値は、図-8 と同様に 4 本のビュレットの平均値である。

図-9 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面の有無によって、透水係数に有意義な差が生じないことがわかった。

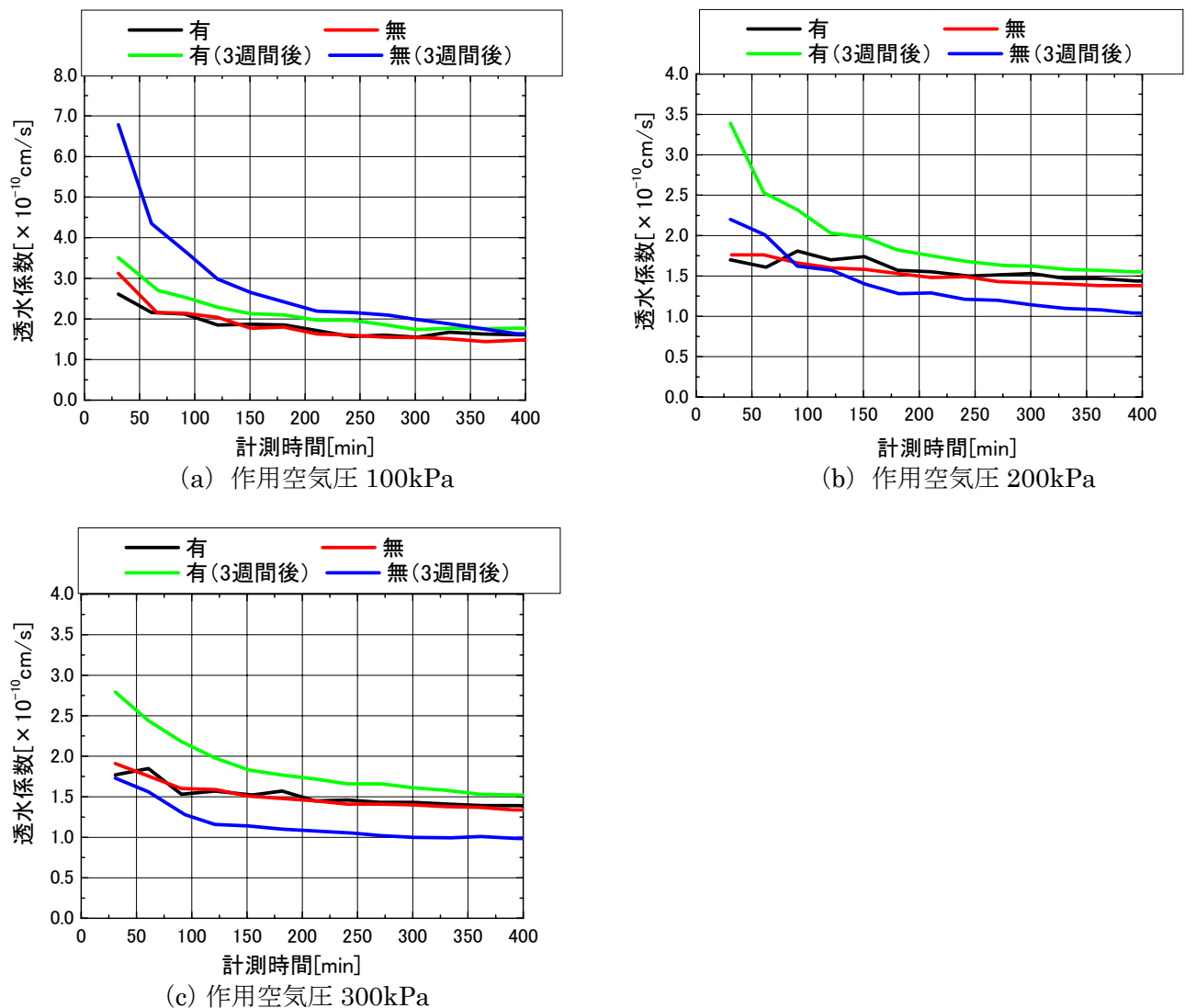


図-9 せん断後の経過時間による比較

7. まとめ

最終処分場の再冠水に伴って圧縮ベントナイト緩衝材が飽和状態になれば、不飽和時より緩衝材のせん断強度は大きく低下することがわかった。また、同じ乾燥密度であれば、初期垂直応力に依存せずに、ほぼ同一の最大せん断応力を保つこともわかり、長期にわたり使用する飽和圧縮ベントナイトの特長も示された。X線CTによる観察では、一面せん断試験後の飽和供試体内部のせん断帯の部分においても、密度変化は確認できなかった。さらに透水試験によって、遮水性能を直接確認した結果、やはり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かめられた。今後の課題としては、より高密度の供試体について一面せん断試験を行っていくとともに、透水試験の精度向上と間隙流体の塩分濃度による透水係数の差異についても検討を行っていく必要がある。なお、本研究は、(財)原子力環境整備・資金管理センターによる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る。また、本研究の一部は、中部電力基礎技術研究所の研究助成の補助も受けて実施したものである。関係各位に記して謝意を示します。

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，pp.59-69，2009.
- 2) 核燃料サイクル開発機構，緩衝材の静的力学特性，JNC TN8400 99-041，1999.