

地層処分地における圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊挙動の解明

名城大学大学院 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、多重バリアシステムで数万年に亘り超深地層中で廃棄物を封じ込めることを基本としている。すなわち、図-1 に示すように、ガラス固化された高レベル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。その際の緩衝材の役割は、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に、その材質は高圧で圧縮したベントナイトが有力となっている。圧縮ベントナイトは不飽和状態で締固められて製造されるため、放射性廃棄物が搬入される処分場の作業時には不飽和状態であるが、この不飽和状態は、処分場の作業が終わって閉鎖された後に、

地下水が処分場を完全に覆う再冠水と呼ばれる状態となるまで続く（図-1(a)参照）。その後、緩衝材は地下水の浸潤により飽和するが、ベントナイト自身を持つ膨潤特性により緩衝材内部では膨潤圧が上昇するとともに、周辺岩盤からのクリープ変形やオーバーパックが腐食膨張することなどによって様々な外力が長期に亘り作用することになり、不飽和状態の時とは環境も大きく変化する（図-1(b)参照）。

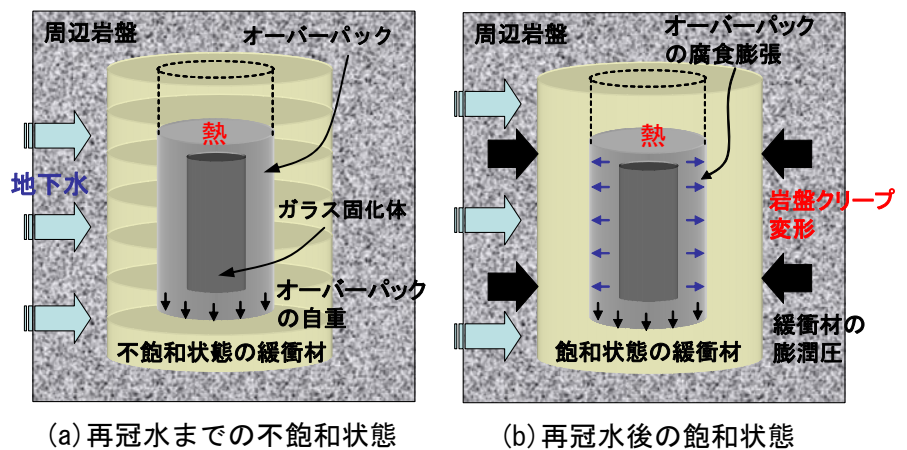


図-1 地層処分における多重バリアシステムの概要

再冠水後の飽和ベントナイトについては多くの三軸圧縮試験が実施されており¹⁾、その変形・強度特性が比較的明らかにされているのに加えて、既往の粘土の構成モデルを援用してのシミュレーションも実施されてきている^{2),3),4)}。一方、不飽和状態の圧縮ベントナイトについては、不飽和三軸試験が難しいこともあってほとんど実施されておらず、不飽和ベントナイトの変形・強度特性は解明されていないのが実情である。しかし、処分場操業から、やがて閉鎖して緩衝材が再冠水するまでには、数十年から百年程度はかかると考えられており、処分場設計の点からも、不飽和ベントナイトの力学特性を明確にすることは非常に重要である。

本論文は、一面せん断試験を実施し、不飽和ならびに飽和状態の圧縮ベントナイトのせん断破壊挙動を解明することを目的としている。一面せん断試験は、破壊形態が不均一であり要素試験には成り得ないが、等体積条件で実施することにより不飽和材料であっても擬似的に有効応力経路を類推することが可能である特長がある。また、強制的にせん断帯を生じさせる一面せん断試験の特性から、本論文では圧縮ベントナイトのせん断帯の詳細な観察も実施している。これは、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最悪の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の確認を目的としている。

2. 高拘束圧一面せん断試験の概要

(1) 高拘束圧一面せん断試験装置

写真-1 に実験に使用した一面せん断試験装置を示す。地層処分は地下 300m 以深の超深層を対象としている上に、ベントナイト自身の膨潤圧も大きいことから、緩衝材の力学特性を正確に評価するためには高拘束圧で実験を行う必要がある。そのため、試験機の載荷機構にはメガトルクモータを使用しており、垂直応力ならびにせん断応力の載荷容量はそれぞれ 10MPa および 8MPa 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。写真-2 に試験装置中心部を示す。上部から垂直荷重を作用させるため、垂直荷重計測用のロードセルはせん断箱の下部に設置している。なお、あらかじめ不連続面を有していない硬質地盤材料の一面せん断試験は、軟岩の一面せん断試験に成功している澁谷らの研究グループの業績⁵⁾の他にはなく、本試験機も澁谷らの試験装置を参考にして製作している。

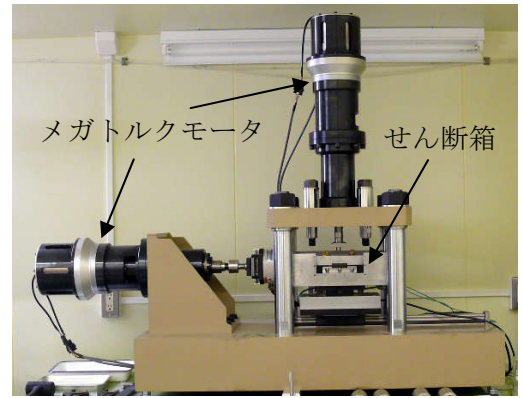


写真-1 高拘束圧一面せん断試験装置

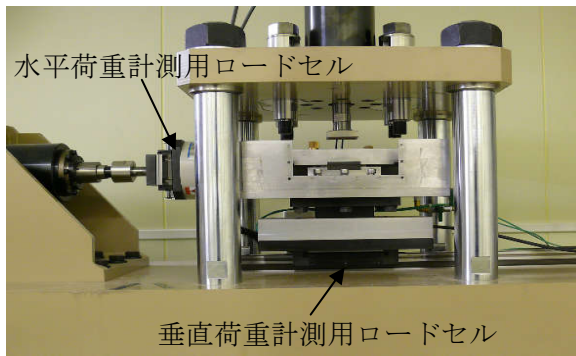


写真-2 高拘束圧一面せん断試験装置 (拡大)

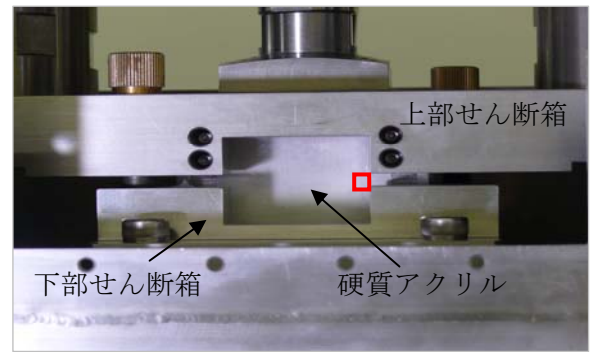


写真-3 矩形供試体用せん断箱

(2) 局所変形帯観察用画像解析の方法

一面せん断試験の特長は、強制的にせん断帯を発生させることにより、局所的な破壊挙動の観察が詳細に行えることでもある。本研究では、せん断中に供試体に生成・発達するせん断帯を長手方向に観察するためには、円柱供試体よりも矩形供試体の方が有利であると判断し、50mm×50mm の正方形断面、厚さ 40mm を供試体の基準とした。写真-3 に示すように、せん断箱前面には硬質アクリルを設置してせん断帯の観察を容易にしている。せん断中は上部せん断箱を高剛性ボルトで連結固定しておき、下部せん断箱を水平移動することによりせん断を実施している。

せん断中には、写真-4 に示すようにせん断箱前面に設置した CCD マイクロスコープ (株式会社朝日光学機製作所製「ハンディスコープ MS-100」) により実験中のデジタル画像を撮影する。写真-3 に示すせん断箱右側の枠で囲った部分を撮影するように設置することで、せん断箱のエッジの部分から伝播してくるせん断帯が観察できる。撮影したデジタル画像を PIV(Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法)で画像解析することにより、せん断帯内部のせん断ひずみや体積ひずみ等の諸量を計測する。写



写真-4 マイクロスコープを用いたせん断帯観察システム

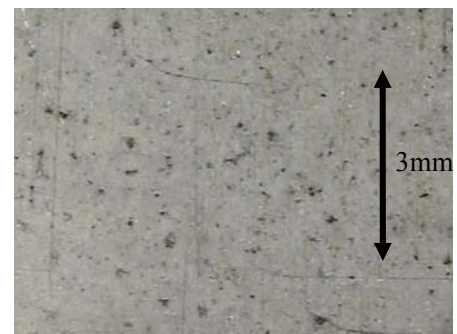


写真-5 供試体のデジタル画像

真-5 はせん断時の供試体のデジタル画像である。圧縮ベントナイト供試体には珪砂の砂粒子が供試体表面に程よいパターンを形成しており、画像相関法を用いる PIV 画像解析の適用性が高いと判断した。PIV 画像解析においては、デジタル写真の 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、写真-5 に示すほぼ全領域をカバーすることとした。それにより、1 ピクセルあたりの実際の長さは約 0.01mm となっている。本 PIV 画像解析はサブピクセル解析をしており、さらに 1 ピクセルの 1/10 の移動量の判別が可能であるため、実質 1 μ m の解像度の画像解析である。

3. 不飽和ベントナイト供試体の作製方法

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）と三河珪砂 6 号を質量比 30%で配合したものを、一面せん断試験機本体で圧縮成型することにより供試体を作製し、そのまません断した。供試体の乾燥密度は 1.4, 1.5, 1.55 および 1.6Mg/m³ の 4 種類を設定し、50mm 四方の正方形断面で 40mm 厚の供試体寸法となる時に所定の乾燥密度となるように、それぞれ投入するベントナイト・珪砂混合物の質量を決定する。

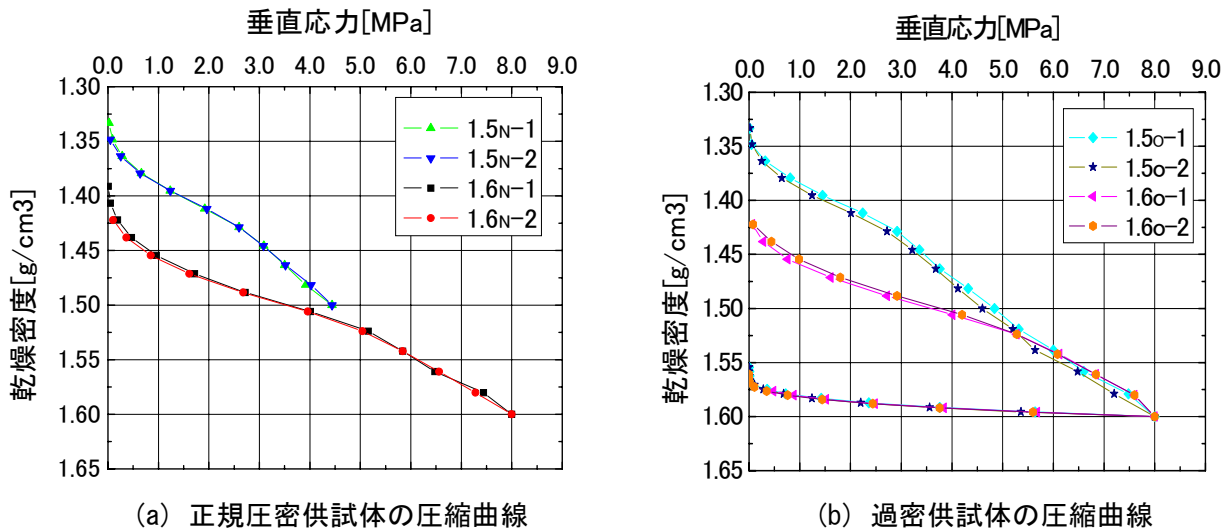


図-2 供試体作製時の軸圧縮過程における垂直応力と乾燥密度の関係

図-2 は供試体作製過程での不飽和圧縮ベントナイト供試体の圧縮曲線を示したものである。図-2 (a)は乾燥密度 1.5 および 1.6Mg/m³の正規圧密供試体の圧縮曲線であり、図-2 (b)は最終乾燥密度 1.55Mg/m³の過圧密供試体の圧縮曲線である。図-2 (a)においては、供試体完成時の目標乾燥密度（供試体厚が 40mm になった時点での乾燥密度）1.5, 1.6 Mg/m³それぞれの場合における、供試体厚さ 40mm になるまでに 0.5mm ずつ段階的に圧縮させた時の圧縮完了直後の垂直応力をプロットしている。圧縮に伴い乾燥密度が大きくなるにつれて垂直応力も大きくなり、1.6N-1, 1.6N-2 では載荷許容量の限界値に近い 8MPa まで到達している。2 種類の目標乾燥密度の供試体について各 2 回ずつ試験を実施したが、図-2 (a)に示すようにいずれも同じ曲線となり再現性が高いことが確認された。また、同図において目標乾燥密度 1.5Mg/m³と 1.6Mg/m³の場合を比べてみると、目標乾燥密度 1.5Mg/m³の場合には垂直応力 4.5MPa 付近で供試体厚さ 40mm に到達して圧縮を終了しているが、もしそれ以上に軸圧縮を継続した場合には目標乾燥密度 1.6Mg/m³の曲線と重なることが予想できる。実際にその様子が図-2 (b)の 1.5 σ -1 および 1.5 σ -2 の曲線からわかる。それらは供試体厚さ 40mm となってからも軸圧縮を継続したところ、垂直応力 5.0MPa 付近で目標乾燥密度 1.6 Mg/m³の曲線と重なり、その後は垂直応力 8.0MPa になるまで同じ曲線となった。8.0MPa に到達した時点においては、目標乾燥密度 1.6 Mg/m³の供試体では厚さ 40mm であるのに対して、目標乾燥密度 1.5Mg/m³として圧縮を開始した供試体では、厚さ 37.5mm であった。いずれの目標乾燥密度の供試体においても、0.1mm ずつ加圧板を供試体から離し、垂直応力が 0MPa になるまで除荷を行った。加圧板を上方向に戻すたびに計測された垂直応力とその

時点での乾燥密度との関係も図-2(b)に示している。垂直応力 0MPa における乾燥密度はいずれの条件でも 1.55Mg/m^3 となり、目標乾燥密度 1.6Mg/m^3 および 1.5Mg/m^3 の供試体における最終供試体厚さは、それぞれ 41mm および 38.6mm であった。図では便宜上、当初の目標乾燥密度を用いて、それぞれの供試体を区別しているが、いずれも最終乾燥密度は 1.55Mg/m^3 であり、供試体厚さが異なるのみの違いである。

4. 不飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験結果

(1) 正規圧密供試体における乾燥密度の比較

乾燥密度 1.4, 1.5, 1.6Mg/m^3 において上下せん断箱の隙間間隔を 1.0mm, 水平変位速度を 0.4 mm/min の条件で、等体積条件を保ったままで、水平変位 6mm になるまでせん断した。

図-3 に (a) せん断応力～変位関係, (b) 応力経路を示す。なお、供試体名は乾燥密度と試験回数を指している。図-3(a)をみると、いずれの乾燥密度においても、水平変位とせん断応力の関係は非線形になっており、せん断開始後せん断応力は急激に上昇し、乾燥密度 1.4Mg/m^3 では水平変位 1.2mm, 1.5Mg/m^3 では水平変位 1.5mm, 1.6Mg/m^3 では水平変位 1.8mm 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。乾燥密度の大きいものほどせん断応力の値は大きく、ピークが現れるのもゆっくりである。またピーク後のせん断応力も乾燥密度が大きいものほど減少量は大きい。等体積一面せん断試験では、不飽和材料であっても擬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、ダイレイタンス特性も把握することが可能である。図-3(b)の応力経路を見ると、乾燥密度によって初期の垂直応力が異なるものの、形状は相似形を呈しており、どの乾燥密度においてもせん断初期から垂直応力が減少する正規圧密土的な挙動を示す。また、せん断が進行すると塑性圧縮を伴う顕著なひずみ軟化を示し、比較的高位な構造を有することを示唆している。全試験のピーク強度も軟化後の残留状態も原点を通る直線で表すことができる。ピーク強度からこの不飽和圧縮ベントナイトのせん断抵抗角を求めると $\phi'=33^\circ$ であり、既往の飽和ベントナイトの三軸試験結果 $\phi'=16.5^\circ$ と比べると、今回の値は 2 倍程度大きい。両者に差が生じた原因は、試験法の違いよりも、飽和か不飽和による違いの方が大きいと考えられる。

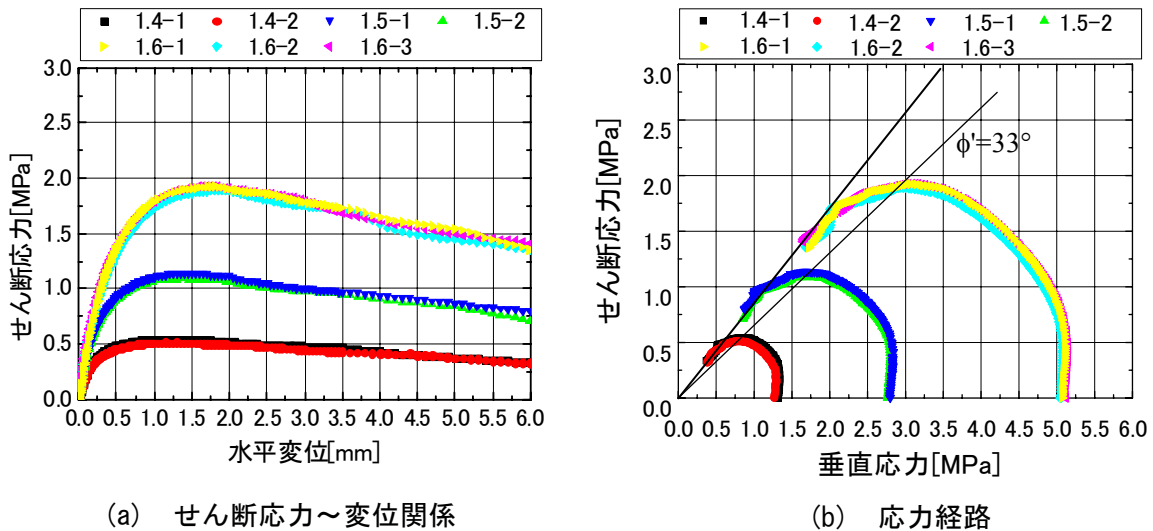


図-3 正規圧密供試体における乾燥密度の比較

(2) 過圧密供試体と正規圧密供試体の比較

3章で述べたように目標乾燥密度 1.5Mg/m^3 の試料で作製された乾燥密度 1.55Mg/m^3 の過圧密状態の供試体と、乾燥密度 1.5, 1.55 および 1.6Mg/m^3 の正規圧密状態の供試体で比較を行った。せん断条件は上下せん断箱の隙間間隔は 1.0mm, 水平変位速度 0.4mm/min とし、水平変位 6mm になるまでせん断を行った。図-4 に (a) せん断応力～変位関係, (b) 応力経路を示す。なお、正規圧密供試体は前節で得られた 1.5-1 および 1.6-1

の結果を用い、過圧密供試体の供試体名には O、正規圧密供試体には N を付けている。

図-4 より、過圧密供試体はせん断応力が緩やかに上昇し、水平変位 3.0mm 辺りからはわずかに上昇するか、あるいは一定となり、ピークを示さないまません断を終える。せん断終了時点で、せん断応力は 0.6～0.75MPa と小さな値となるが、これは初期垂直応力がゼロであることに起因している。この垂直応力は、せん断につれて供試体が正のダイレイタンスを發揮することにより上昇し、それに応じてせん断応力も増加してくるが、いずれにしてもその値は小さい。

実際の地層処分地において緩衝材として圧縮ベントナイトをどのような形態でどのような方法で用いるかにもよるが、高レベル放射性廃棄物の埋設中や閉鎖後の再冠水時には、圧縮ベントナイトは不飽和状態であつ拘束圧もそれほど大きくない場合には、せん断強度も大きくはなく力学的な安定性はそれほど期待できないことがわかる。

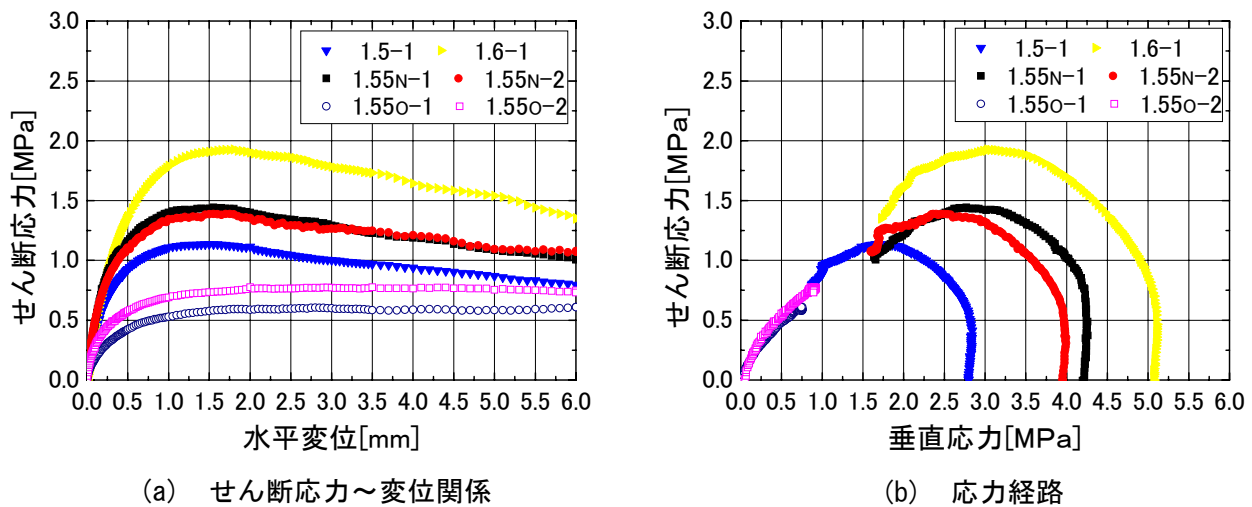


図-4 過圧密と正規圧密による比較

5. 画像解析によるせん断帯の観察

画像解析によるせん断帯の観察は、4章(2)節で示した正規圧密供試体 1.55N-2 および過圧密供試体について実施している。図-5(a)および図-6(a)に速度ベクトルを示し、ベクトルの速度は色表示に最大値 12 $\mu\text{m/s}$ を赤色、最小値 0 $\mu\text{m/s}$ を青色として評価した。なお、本章で示す図面については、ダウンロード版のカラー原稿をご参照いただきたい。また、図-5(b)および図-6(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。

どちらの供試体においても水平変位 1mm 前後には右下に斜めのせん断面が現れ、せん断が進むにつれてせん断面より下側に速度ベクトルは集中する。その後、正規圧密供試体ではせん断が進行するにつれて、小さな亀裂を伴いながら、少しずつ上側の不動領域を下側の移動領域が巻き込む形となり、斜めに生じたせん断帯は徐々に水平となる。図-5(b)からもせん断帯が領域中央に水平方向に生じている様子が分かり、その下側にはひずみが集中するが、上側にはあまりひずみは見られない。一方、過圧密供試体は正規圧密供試体と異なりせん断開始直後からせん断帯が発生し、しばらくはせん断帯の下側のみが移動するために、水平変位 3mm を過ぎるまでせん断帯を境界にして徐々に大きな空洞が生じる。水平変位 4mm を超えると上部の領域にも大きな亀裂が入り、一気に次々と塊状の崩壊が始まる。塊状の崩落によって速度ベクトルは大きな値をとり、破壊が伝播する領域は正規圧密供試体に比べて格段に大きい。図-6(b)を見ても領域全体にひずみが生じており、細かい亀裂が集合してできた大きな破壊領域が構成されていることが分かる。

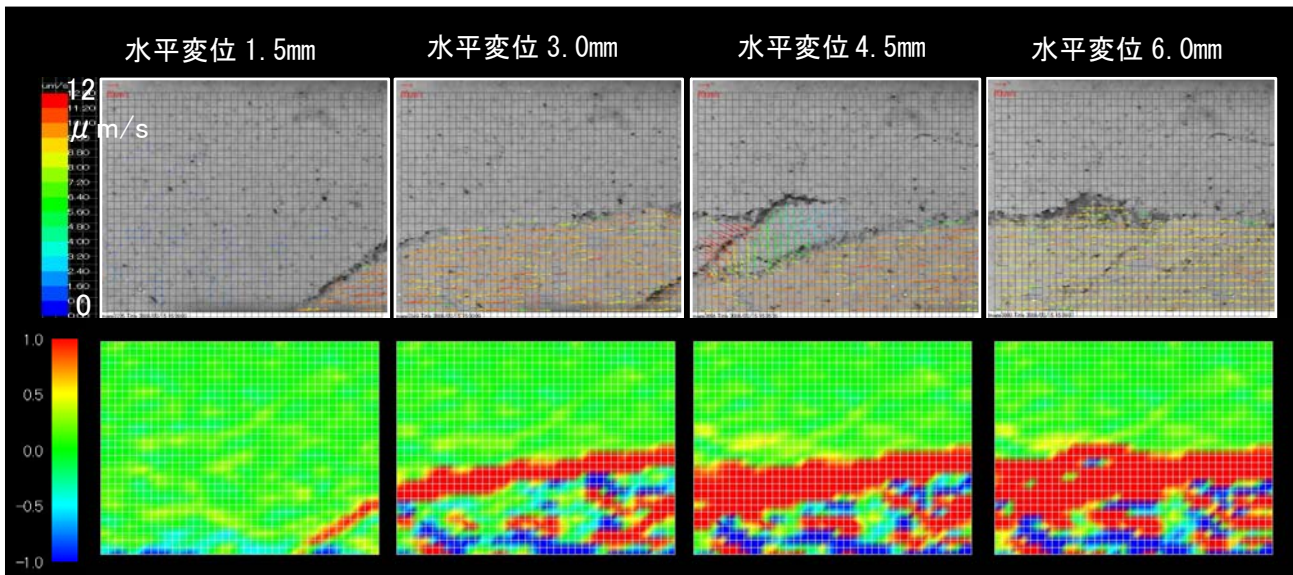


図-5 正規圧密供試体のせん断過程におけるせん断帯の観察；
 (a)速度ベクトル（上図），(b)せん断ひずみ（下図）

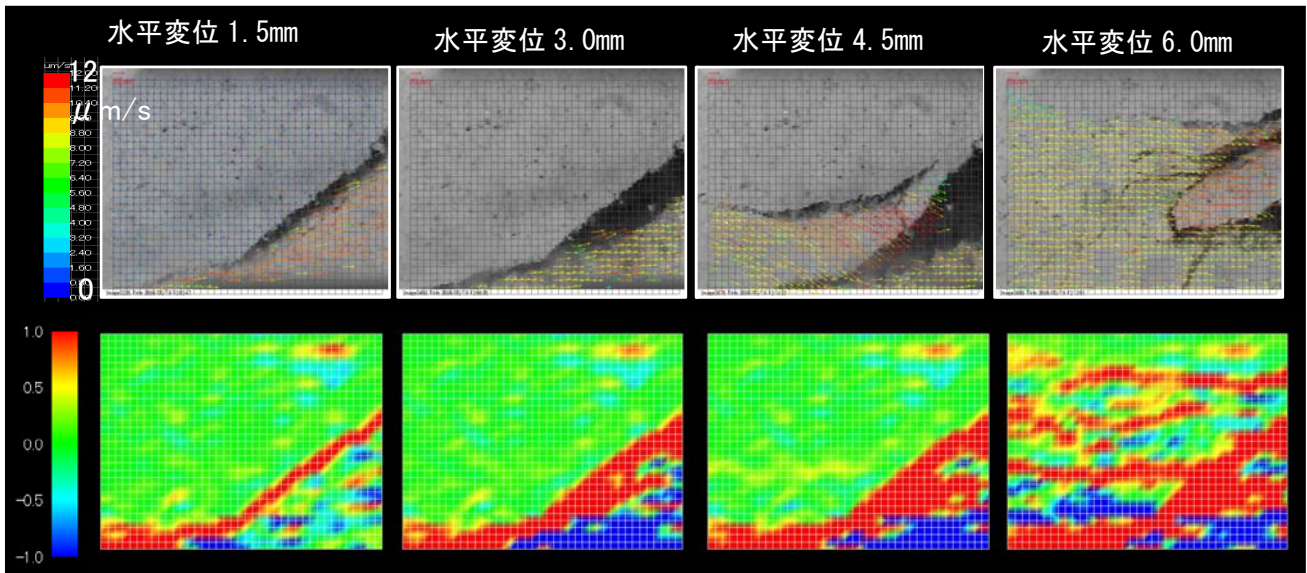


図-6 過圧密供試体のせん断過程におけるせん断帯の観察；
 (a)速度ベクトル（上図），(b)せん断ひずみ（下図）

6. X線CTによる不飽和圧縮ベントナイトのせん断帯の観察

第4章の一面せん断試験結果より、正規圧密の圧縮ベントナイトは塑性圧縮を伴いながら残留状態に至ることがわかった。したがって、最もせん断変形が大きいせん断帯内部では、ベントナイトは高密度化すると考えるのが自然であるが、第5章の画像解析の結果からは、正規圧密供試体のせん断帯でも亀裂が発生しており、せん断帯付近では体積膨張していることが示唆された。遮水性が最も重要な性能と位置付けられている緩衝材にとって、体積膨張や亀裂が生じることは致命的な損傷である。本章では、マイクロフォーカスX線CT装置で可視化した実験後の供試体の内部の状態を示す。装置は、京都大学工学研究科が所蔵するKYOTO-GEOmXCT(東芝製TOSCANER-32250mHDK)

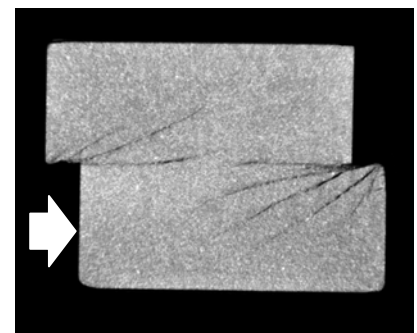


図-7 正規圧密供試体内部のX線CT画像

を用いている。名城大学において一面せん断試験を実施した後に、専用の治具によりせん断箱から慎重に外した供試体を真空パックにして保存し、京都大学に輸送してX線撮影を行った。

図-7は正規圧密供試体のせん断試験後の様子である。供試体のほぼ中央の断面を撮影しており、黒く見える部分ほどX線の透過量が大きい低密度の領域を表している。せん断箱の端部から斜めのせん断帯が供試体内部に向かって何本も発生している。端部ではせん断箱の変位に伴い応力解放されるために、マイクロ스코ープの観察でも見ることができた膨張性の亀裂が発生していると考えられる。しかしながら、全体で6mmも変位しているにも拘わらず、供試体の中心部では低密度領域が確認できず、体積膨張は発生していないことがわかる。いずれにしても、再冠水の途上にある不飽和ベントナイトは、大きな変形が作用すると亀裂を伴うせん断帯が生成されると考えられる。

7. せん断帯への注水による膨潤挙動の観察

乾燥密度 1.55 Mg/m^3 の正規圧密供試体において一面せん断試験を終了後、写真-6に示すせん断箱右側の枠で囲ったせん断帯が発生している部分に、上下せん断箱の1mmの隙間から供試体に蒸留水を注入し、ベントナイトが膨潤する過程をマイクロSCOPEで観察した。

供試体への注水直後から5時間経過までの結果を写真-7に示す。せん断終了時の注水時には、供試体の崩壊に伴って大きな空隙があるが、写真の右上方向から注水されて徐々に浸潤することでベントナイトの膨潤性が発揮され、40分後には上部せん断箱と供試体との隙間が埋まり、およそ5時間後には画面全域が飽和され、崩壊した供試体同士でも隙間が埋められている様子が分かる。

以上のように、不飽和圧縮ベントナイトにせん断帯が生成した場合には、亀裂に沿って水は簡単に入ってしまうが、ある程度時間が経過すればベントナイトの自己シール性により、せん断帯は閉合する。

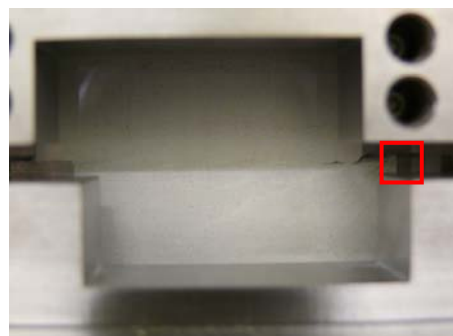


写真-6 観察位置

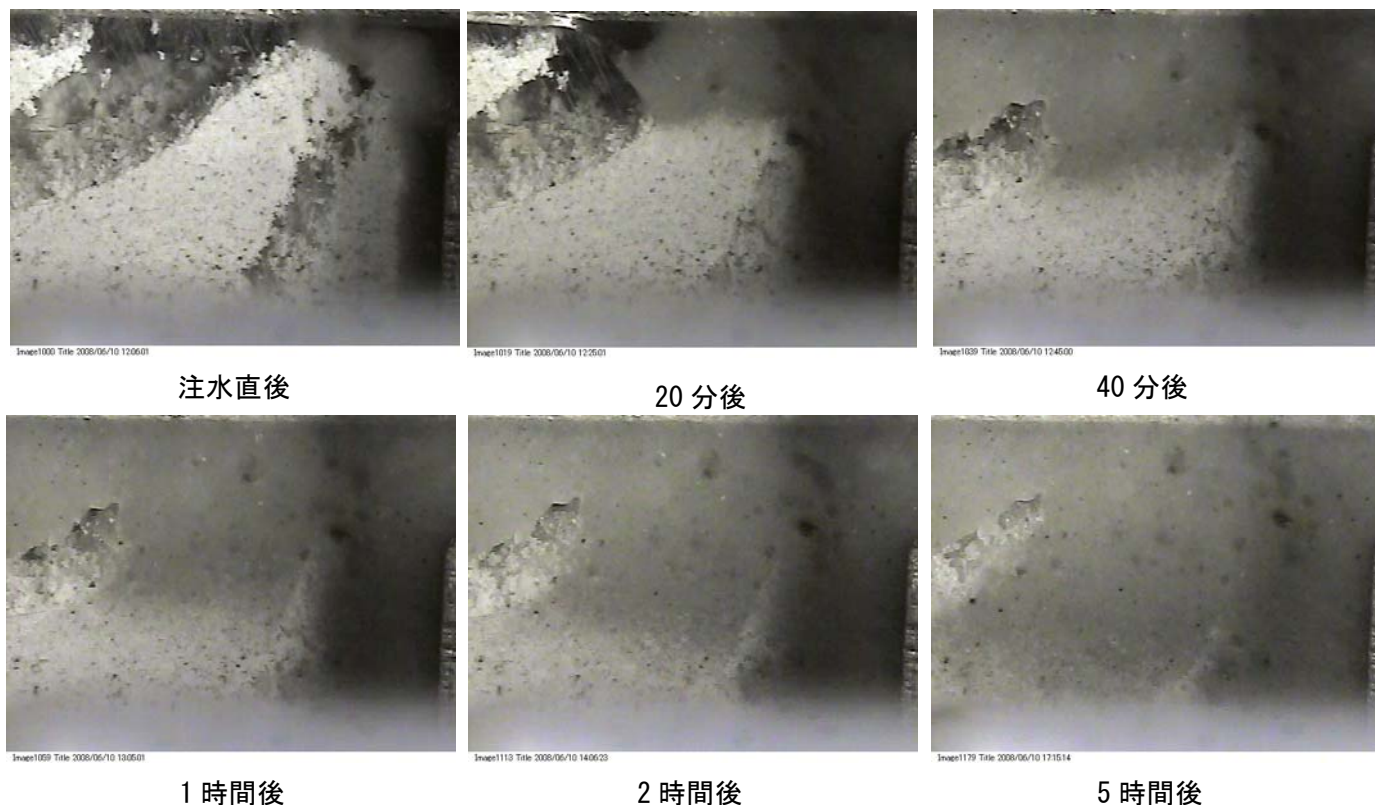


写真-7 せん断帯部への注水に伴うベントナイトの膨潤挙動のマイクロSCOPEによる観察

7. 飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験結果

不飽和試料との比較のために、飽和試料でも一面せん断試験を実施した。供試体は飽和容器で膨潤圧を計測しながら約2ヶ月間水浸飽和したものを使用した。垂直応力は膨潤圧とほぼ同様に0.6MPaまで载荷したケース（飽和A）とさらに1.3MPaまで载荷したケース（飽和B）の2ケースを実施した。

図-8に実験結果を示す。図には不飽和試料の過圧密供試体の実験結果も載せている。飽和化に伴いせん断強度は急激に低下するが、飽和Aのピーク強度からせん断抵抗角を求めると $\phi'=18^\circ$ であり、既往の三軸試験結果¹⁾から得られる値とほぼ同様となる。一方、飽和過程で発生した膨潤圧よりも大きな垂直荷重を载荷して実験した飽和Bにおいては、せん断強度は飽和Aと同様の値まで到達するものの、その後残留状態ではせん断強度が全く消失してしまう。もともと膨潤圧以上の垂直荷重を载荷した段階で、供試体内に過剰間隙水圧が発生していると考えられるが、膨潤圧にしても過剰間隙水圧にしても、供試体内での水圧の発生がベントナイトのせん断抵抗を急激に低下させる要因になっていると考えられる。図-9に飽和ベントナイトのせん断後のX線CT画像を示す。どれだけ拡大して撮影しても、供試体内にせん断帯に伴う密度変化は全く確認できなかった。飽和後であれば、万一せん断帯が発生しても遮水機能には影響ない可能性が高い。

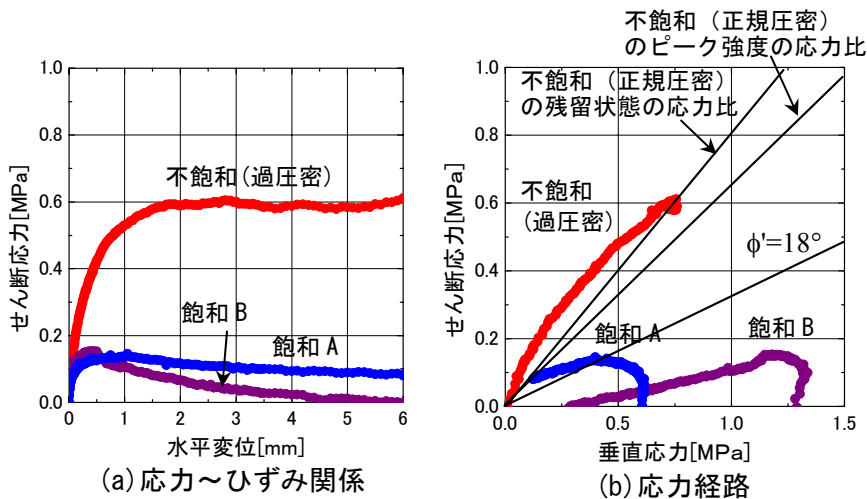


図-8 飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験結果

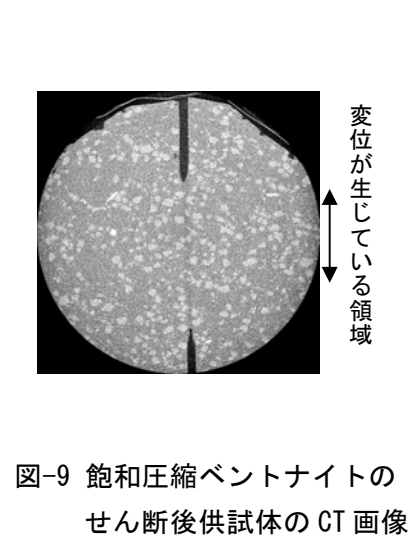


図-9 飽和圧縮ベントナイトのせん断後供試体のCT画像

8. まとめ

再冠水の途上にある緩衝材で想定される過圧密な不飽和圧縮ベントナイトは、脆性的な破壊挙動を示し、亀裂を伴うせん断帯が生成される。この亀裂により一時は遮水性能の低下が懸念されるが、水の侵入に伴いベントナイトの自己シール性が発揮され亀裂は時間とともに閉合することが確認できた。さらに、飽和化に伴い圧縮ベントナイトのせん断強度は大幅に低下するものの、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確認できた。今後は、せん断帯を含む供試体による透水試験などを実施し、せん断帯を含む緩衝材の遮水性について詳細な検討を行う。また、膨潤圧を考慮すると共に、不飽和から飽和の挙動を統一して説明できる構成モデルの開発が必要である。なお、本研究は(財)原子力環境整備促進・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ているものである。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，緩衝材の静的力学特性，JNC TN8400 99-041, 1999. 2) 並河・平井・棚井・由井・重野・高治・大沼：圧縮成型ベントナイトの力学挙動に対する弾粘塑性モデルの適用性に関する研究，土木学会論文集，No.764/III-67, 367-372, 2004. 3) 平井・重野・飯塚：膨潤性を有する緩衝材の弾塑性構成モデル化，応用力学論文集，Vol.8, 395-402. 2005. 4) Sasakura, Kobayashi, Sahara, Murakami, Ohi, Mihara, Ito: Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, DisTec 2004, 498-507, 2004. 5) 佐野・三田地・澁谷：地すべり面強度定数決定のための軟岩用繰返し一面せん断試験機の開発，地すべり学会論文集，31(2), 41-45, 1994.