

## 不飽和圧縮ベントナイトのせん断破壊挙動に及ぼす供試体密度の影響

ベントナイト, 一面せん断試験, 密度

名城大学 国際会員 小高猛司  
 名城大学大学院 学生会員 ○平手寿大・元山泰久  
 元名城大学院生 国際会員 寺本優子

### 1. はじめに

本研究では, 高レベル放射性廃棄物の地層処分において地震等の外力によって周辺岩盤に亀裂が生じ, 緩衝材にも破壊が伝播した場合を想定して, 緩衝材の基本性能の維持について検討を行っている<sup>1)</sup>。本報では, 比較的高密度な不飽和圧縮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, 供試体密度がせん断破壊特性に及ぼす影響について検討した。また, その際に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を行うとともに, せん断後の供試体に対して X 線 CT による供試体内部の観察も行った。

### 2. 試験方法

図 1 に今回の試験で用いた高圧一面せん断試験機を示す。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要求される。そのため, 载荷機構にはメガトルクモータを使用し, 垂直および水平応力の载荷容量はそれぞれ 15MPa および 12.5MPa である。使用する供試体は, ベントナイト(クニゲル V1) と三河珪砂 6 号を質量比 7:3 の割合で配合した試料を所定の乾燥密度になるように一面せん断試験機内で圧縮成型して作製する。垂直応力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応力を 0MPa まで除荷した過圧密供試体を水平変位 6.0mm になるまで定体積一面せん断試験を行った。また, せん断帯の観察はせん断箱の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出来る箇所にマイクログラフを設置して, せん断終了まで撮影する。撮影時の様子を図 2 に示す。撮影した画像より PIV 画像解析を行い, 速度ベクトルを計測する。さらに, 供試体内部の破壊状況を観察するため, せん断後の供試体を専用の器具を用いてせん断箱から取り出し, 真空パックをした後, 京都大学に搬入し, マイクロフォーカス X 線 CT 装置 KYOTO-GEO $\mu$ XCT (東芝製 TOSCANER-32250 $\mu$ HDK) を用いて供試体内部の観察を行った。

### 3. 試験結果

図 3 に一面せん断試験結果を示す。凡例の数字は供試体の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。まず, 図 3 (a) のせん断応力~水平変位関係を見ると, 正規圧密供試体ではせん断開始直後にせん断応力は急激に増加し, 水平変位 1.5mm 付近で最大せん断応力に達して減少している。乾燥密度が高くなるほど最大せん断応力は大きく, その後の減少幅も大きくなっている。一方, 過圧密供試体では水平変位 1.0mm 付近で一定もしくはわずかな減少となり, 明確な最大値は見られない。次に, 図 3 (b) の応力経路を見ると, 正規圧密供試体では, 密度が高くなるほど供試体の加圧成形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, せん断が進行すると負のダイレイタンスにより塑性圧縮を伴うひずみ軟化を示している。また, 原点とそれぞれの乾燥密度のピーク強度を直線で結ぶことによってせん断抵抗角を求めると  $\phi' = 33^\circ$  となる。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の増加とともに垂直応力も増加する挙動になっている。

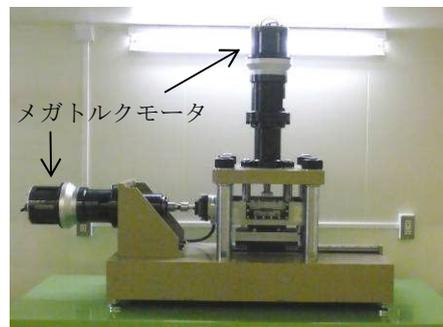
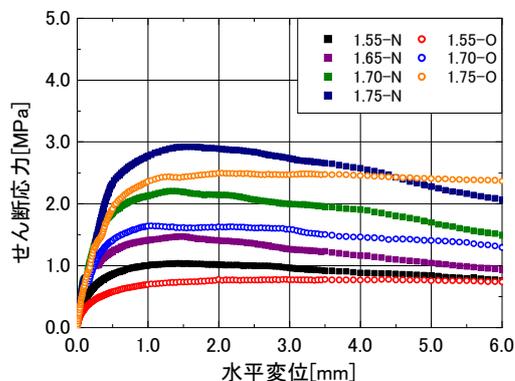


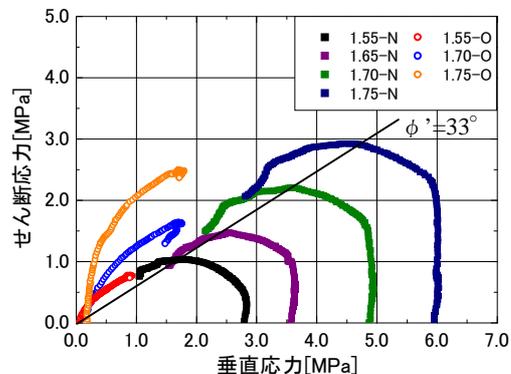
図 1 高圧一面せん断試験機



図 2 せん断帯の観察時の様子



(a) せん断応力~水平変位関係



(b) 応力経路

図 3 一面せん断試験結果

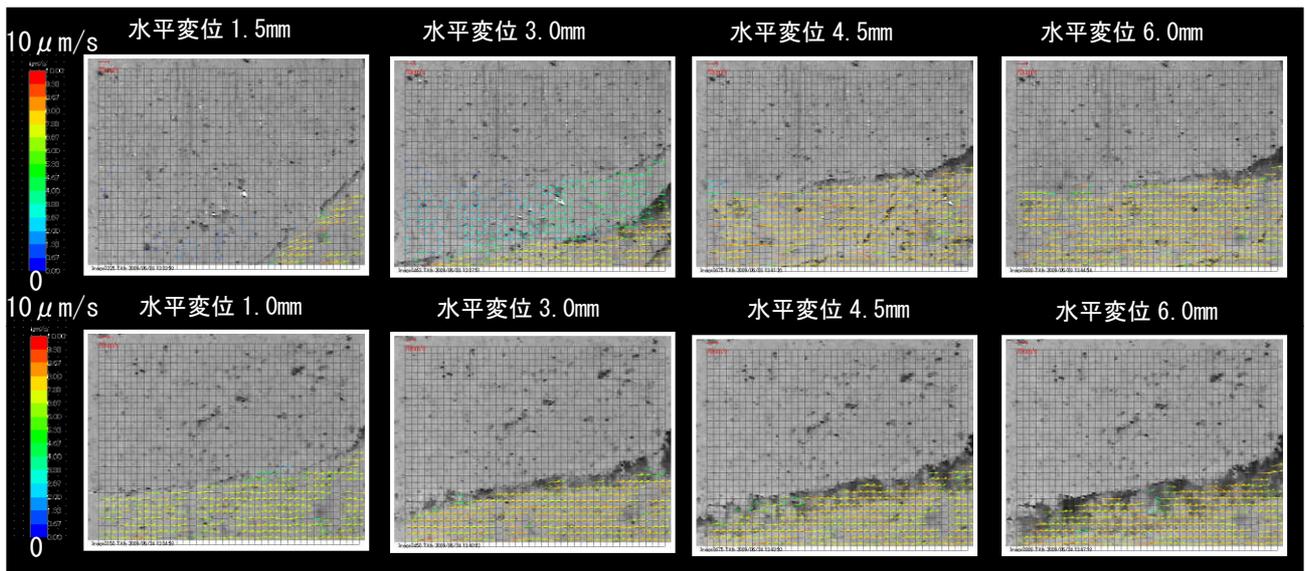


図4 速度ベクトル；(a) 正規圧密供試体（上図），(b) 過圧密供試体（下図）

#### 4. せん断帯に現れる亀裂の観察

図4に供試体写真に速度ベクトル分布を重ねて示した図である。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要素で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。ベクトルの速度は色表示に最大値10 $\mu\text{m/s}$ を赤色、最小値0 $\mu\text{m/s}$ を青色で評価した。まず、図4(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ながら、斜めに入った亀裂は徐々に水平に近づく。次に、図4(b)の過圧密供試体の速度ベクトルを見ると、正規圧密供試体よりも早い水平変位1.0mmで観察領域全体に水平の亀裂が生じ、これ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がそのまま観察でき、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。

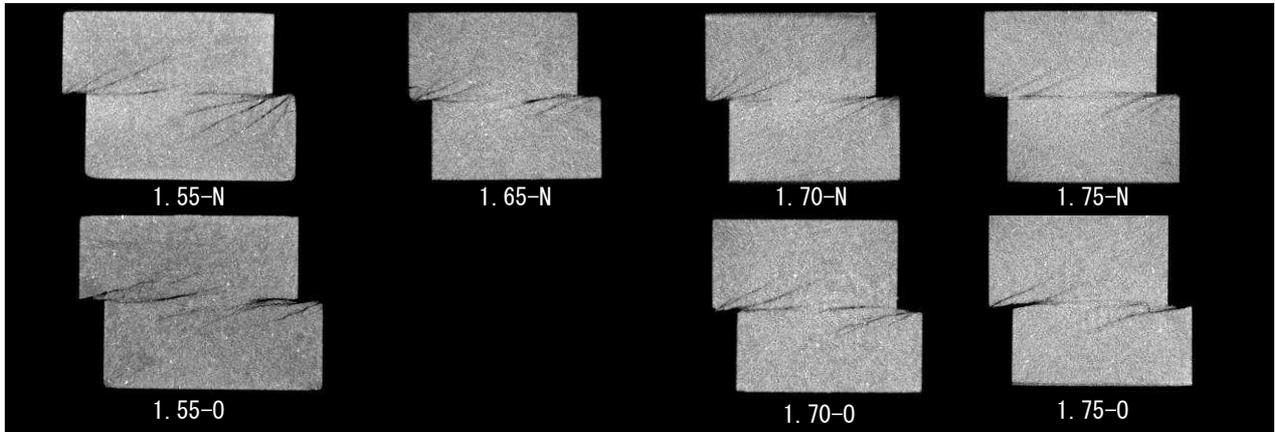


図5 X線CT結果

#### 5. X線CTによる観察

図5に正規圧密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3と同様である。X線透過量が多いほど黒くなり、低密度領域と判断される。正規圧密供試体及び過圧密供試体両者とも端部から内部に向かって斜めの亀裂の確認が出来るが、供試体中心部では連続した水平な低密度領域は確認できない。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出来る。

#### 6. まとめ

今回の不飽和圧縮ベントナイトの一面せん断試験により、供試体密度が変わってもせん断抵抗角は同一になることが示された。一方、X線CTによって、供試体端部から供試体内部に向かって斜めの亀裂が進展してゆく様子が観察できた。供試体中心部では明確な亀裂は発生しにくい、高密度供試体ほど連続した水平な亀裂が生じやすかった。これは、高密度供試体では4cm角断面の小さな供試体を採用したこと、高密度になるほど珪砂の脆性的な性質が強く現れることが理由として考えられる。本研究は中部電力基礎研究所の研究助成により実施したものである。また、X線CTによる観察に関し、京都大学の岡研究室にご協力いただきました。記して謝意を示します。

参考文献 1)小高・寺本：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，4(1)，2009。