

不飽和圧縮ベントナイトのせん断破壊挙動

ベントナイト，一面せん断試験，X線CT

名城大学 国際会員 小高猛司
名城大学大学院 学生会員 ○寺本優子・平手寿大
元名城大学学生 松村竜樹
京都大学 国際会員 岡二三生・肥後陽介

1. はじめに

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，人工バリアの一つである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，その際に緩衝材の基本性能が維持され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，緩衝材に求められている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。本報では，不飽和圧縮ベントナイト供試体を対象に定体積および定圧条件で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X線CTによって観察した結果を示す。

2. 試験方法

試験は本研究のために開発した高拘束圧一面せん断試験機を用いて行った。供試体の乾燥密度は1.55, 1.57, 1.6および1.65 Mg/m³とし，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）に三河珪砂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作製する。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応力を0MPaまで除荷した過圧密供試体を定体積条件および定圧条件でせん断した。また，せん断帯の観察は，せん断箱の前面に設置した硬質アクリル板を通して，せん断箱のエッジの部分から伝播してくるせん断帯を撮影できる箇所にマイクロスコープを設置し，水平変位6mmまでの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。さらに，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，真空パックした状態で，京都大学に搬入し，マイクロフォーカスX線CT装置KYOTO-GEOμXCT（東芝製TOSCANER-32250μHDK）を用いてせん断帯生成過程の観察を行った。

3. 定体積一面せん断試験結果

図1にせん断速度0.4mm/minで，水平変位6mmになるまで定体積せん断した試験結果を示す。応力経路を見ると，正規圧密供試体ではせん断の進行とともに負のダイレイタンシーにより塑性圧縮を伴うひずみ軟化を示している。原点と最大せん断応力を結んでせん断抵抗角を求めると $\phi' = 33^\circ$ となる。一方，過圧密供試体では載荷初期から正のダイレイ

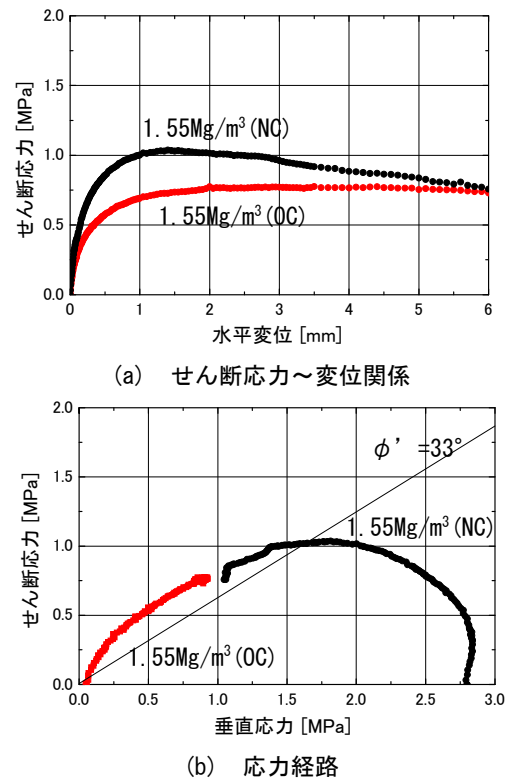


図1 定体積一面せん断試験結果

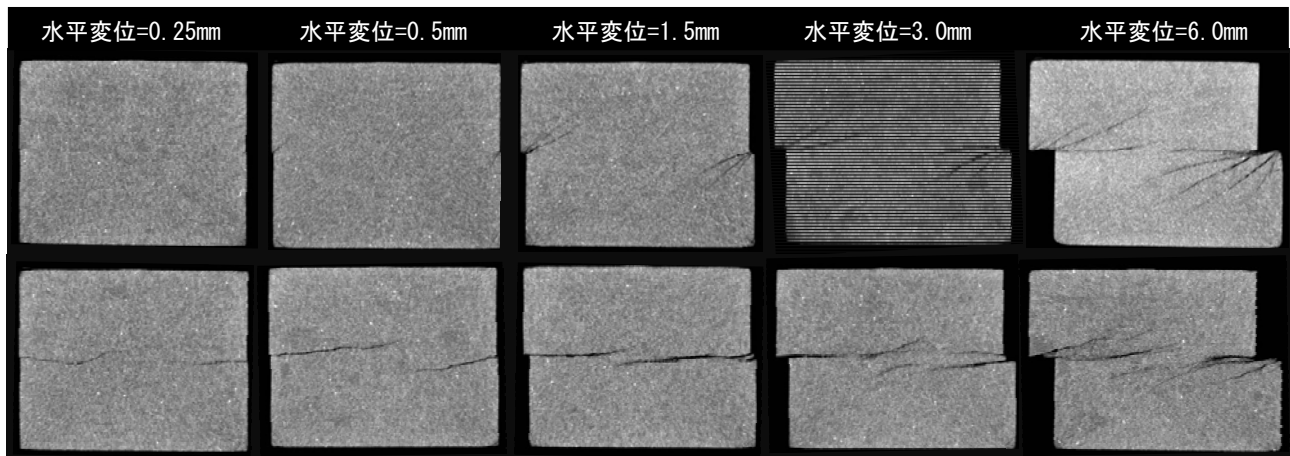


図2 乾燥密度1.55 Mg/m³のX線CT結果；正規圧密供試体(上段)，過圧密供試体(下段)

Shear failure behavior of unsaturated compacted bentonite: Takeshi KODAKA, Yuko TERAMOTO, Toshio HIRATE, Tatsuki MATSUMURA (Meijo University), Fusao OKA and Yosuke HIGO (Kyoto University)

タンシ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、過圧密の違いによりせん断挙動が大きく異なる。

次に、せん断に伴う供試体内部のせん断帯の発達状況をマイクロフォーカス X 線 CT で観察した結果を、正規圧密供試体、過圧密供試体それぞれについて図 2 に示す。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シー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顕著には見られない。また、図 1 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いてもほぼ同じであるために、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。

4. 定圧一面せん断試験結果

正規圧密供試体では定体積条件と同様にせん断速度 0.4mm/min としたが、過圧密供試体では垂直応力を一定に保つために若干遅くして、ここではせん断速度 0.2mm/min とし、図 3 に定圧一面せん断試験結果を示すが、正規圧密供試体には N、過圧密供試体には O と付け、数字は乾燥密度と試験回数を示している。

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終了時までせん断応力が増加し続けているため、ピークは見られないが、過圧密供試体ではせん断初期にピークが現れ、その後ひずみ軟化している。過圧密供試体は同じ乾燥密度ではあるが、せん断初期の垂直応力に違いがあるため、垂直応力の大きなものほどせん断応力も大きくなっている。次に垂直変位～水平変位関係を見ると、正規圧密供試体ではせん断が進行するにつれ、供試体は圧縮される傾向にある。これは負のダイレイタンシーによって垂直応力が減少するためであると言える。一方、過圧密供試体は正のダイレイタンシーによって垂直応力が増加するため、定圧試験では垂直応力を緩和させるために供試体は膨張する。そして応力経路において、最大せん断応力は原点を通る直線となり、せん断抵抗角を求めると $\phi' = 34^\circ$ となった。これは定体積一面せん断試験結果による値とほぼ同じである。

また、定体積試験と同様に定圧試験での水平変位 6mm せん断させた供試体 1.55N および 1.60N をマイクロフォーカス X 線 CT で撮影した結果を図 4 に示す。どちらもせん断箱の端部から斜めのせん断帯が発生しており、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ている。前節の正規圧密供試体での水平変位 6.0mm と比較してみると、定圧試験の方がせん断帯は細く、水平面からの角度も大きいため、供試体中心部に低密度なせん断帯は入っていない。これはせん断終了時まで初期の垂直応力が作用しているため、定体積に比べてせん断帯が発達しにくいと考えられる。

5. まとめ

PIV による観察結果は講演時に報告する。X 線 CT によるせん断帯の生成過程を観察した結果、過圧密供試体は正規圧密供試体よりも早い段階でせん断帯が現れ、せん断初期から低密度なせん断面が生じていることが分かった。しかしながらせん断帯は正のダイレイタンシーによって閉合され、正規圧密供試体と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。そして、定圧試験では定体積試験と同等のせん断強度があり、せん断帯に関しては供試体中心部には低密度なせん断帯が観察されなかった。再冠水の途上にある不飽和圧縮ベントナイト緩衝材は脆性的な材料であるため、拘束圧が十分に作用している条件下での使用が望まれる。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（研究代表者：小高猛司）として実施したものである。記して謝意を表します。

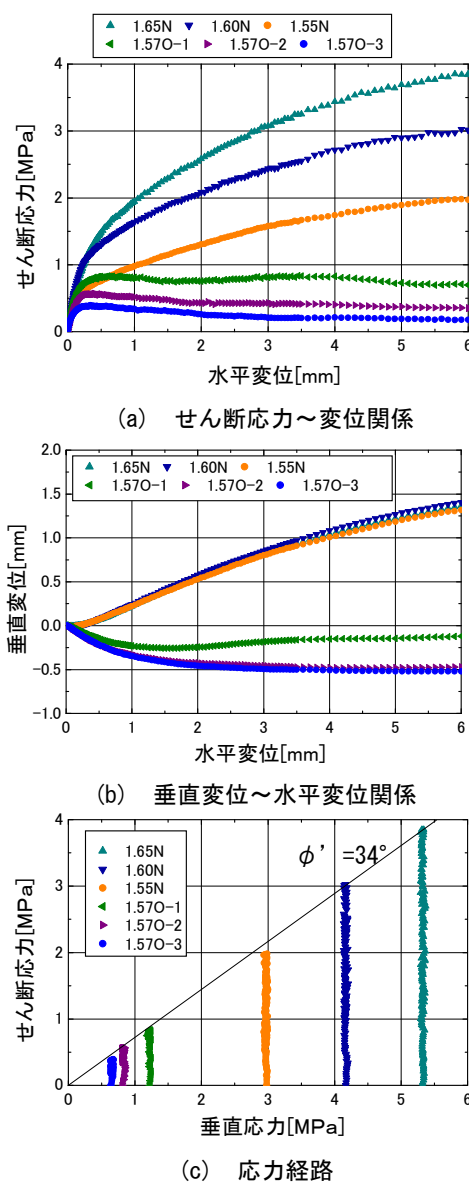


図 3 定圧一面せん断試験結果

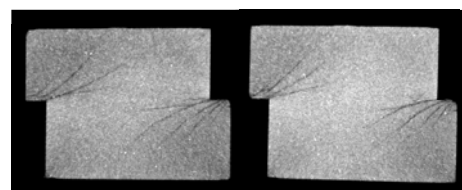


図 4 定圧一面せん断試験の X 線 CT 結果