

不飽和条件下での圧縮ベントナイトの高圧一面せん断試験

ベントナイト，一面せん断試験，地層処分

名城大学 国際会員 ○小高猛司
名城大学 学生会員 寺本優子
元名城大学生 今場寿幸

1. はじめに

岩盤層の地質年代が欧州と比べて格段と若く，また地震大国でもある我が国では，あらゆる可能性を考慮して高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性を検討してゆく必要がある。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周辺岩盤に局所的な変形が発生し，人工バリア内の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，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。本報では，最終処分地が閉鎖されて再冠水の途上にある緩衝材を対象とし，不飽和圧縮ベントナイトの供試体の高拘束圧一面せん断試験を実施し，変形・強度特性について検討する。

2. 圧縮ベントナイト用高圧一面せん断試験装置

地層処分は地下 300m 以深の超深層を対象としており，また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。現在までに，高拘束圧下での圧縮ベントナイトの三軸試験が行われてきている¹⁾が，三軸試験ではせん断帯を伴うような破壊形態を観察することはできない。そのため本研究では，強制的にせん断帯を発生させ，その観察を行うために，一面せん断試験を実施した。試験装置は，軟岩の一面せん断試験の開発に成功している澁谷らの研究グループの業績²⁾を参考にして，高圧かつせん断面の観察が可能な一面せん断試験機を開発した。

図 1 に示すように試験機の载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载荷容量はそれぞれ 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 の範囲で可変であり，応力制御，ひずみ制御のいずれでも，また等体積条件，等圧条件のいずれでも試験可能である。垂直荷重を上部から作用させるため，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（図 2）。図 3 にせん断箱を示す。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 の供試体とした。また，せん断箱前面には硬質アクリルを設置し，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固定し，下部せん断箱を水平移動することにより直接せん断をしている。

本試験機の大きな特長の 1 つである，せん断帯の観察手法については，別報³⁾にて詳述する。

3. 供試体作製方法

粉末状のベントナイト（クミネ工業(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 1.6 Mg/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 4 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 4(a)は乾燥密度 1.5 および 1.6 Mg/m³ の正規圧密供試体の圧縮曲線であり，図 4(b)は最終乾燥密度 1.55 Mg/m³ の過圧密供試体の圧縮曲線である。圧縮に伴い垂直応力が大きくなり，1.6N-1, 1.6N-2 では 8MPa まで到達している。過圧密供試体では，乾燥密度 1.6 Mg/m³，垂直応力 8.0MPa になるまで圧縮した後，垂直応力が 0MPa になるまで除荷を行った。なお，図中の供試体の凡例は，目標乾燥密度（供試体厚が 40mm になった時点での乾燥密度）を表しており，(a)図の正規圧密供試体では目標乾

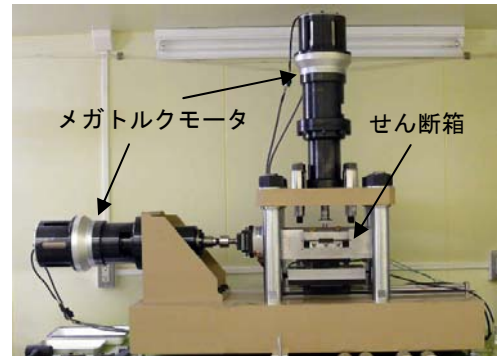


図 1 高圧一面せん断試験装置（全景）

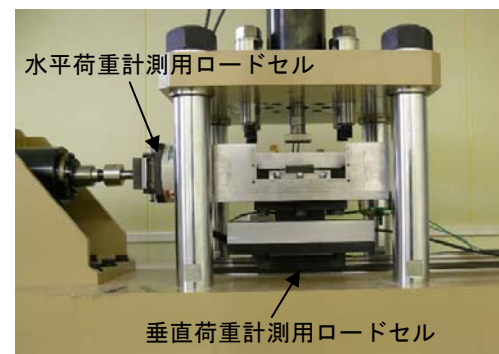


図 2 高圧一面せん断試験装置（拡大）

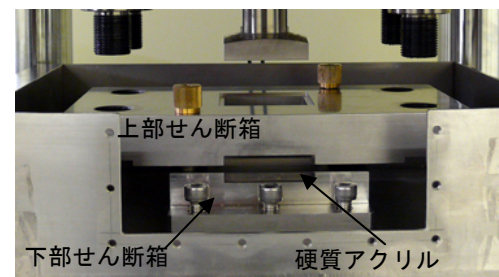


図 3 矩形供試体用せん断箱

乾燥密度は最終乾燥密度に等しいが、(b)図の過圧密供試体では目標乾燥密度が 1.5, 1.6 Mg/m³ のいずれであっても最終乾燥密度は 1.55 Mg/m³ であり、供試体厚さが 38.6 および 41mm と異なるのみである。

4. 一面せん断試験結果

供試体成形に伴う軸圧縮終了後にせん断に移る。本報の実験ではせん断時に上下せん断箱の間隔を 1.0mm としたが、軸圧縮終了時からせん断開始時までの、隙間の設定などの作業中に垂直応力は徐々に緩和する。また、水平変位速度は 0.4 mm/min であり、6mm 変位した段階でせん断を終了した。

図 5 に正規圧密供試体の試験結果を示す。凡例の供試体名は乾燥密度と試験回数を表す。応力経路図を見ると、いずれの乾燥密度の供試体であっても、せん断の初期から負のダイレイタンスに伴う塑性圧縮挙動が見られる。そしてせん断応力のピーク以後においても垂直応力は減少を続け、塑性圧縮を伴うひずみ軟化を呈する。この脆性的な破壊挙動は不飽和圧縮ベントナイトの構造が比較的高位であることを示唆している。また、全試験の軟化後の最終状態は原点を通る直線となり、その時のせん断抵抗角を求めると $\phi=38.7^\circ$ であり、ピーク時のせん断抵抗角でも $\phi=32.3^\circ$ となり、飽和供試体での三軸試験結果 $\phi=16.6^\circ$ ¹⁾ と比べると非常に大きい。

図 6 に過圧密供試体の試験結果を示す。O が付いている過圧密供試体は、せん断応力が緩やかに上昇してピークがないまません断を終える。実験開始時にゼロである垂直応力は、せん断につれて供試体が正のダイレイタンスを発揮することにより増加する。それに応じてせん断応力も増加してくるが、正規圧密供試体に比してその値は小さい。圧縮ベントナイトは不飽和状態でかつ拘束圧もそれほど大きくない場合には、力学的安定性はそれほど多く期待できない。

4. まとめ

現在、飽和圧縮ベントナイト供試体の作製を進めており、その一面せん断試験を実施することにより、変形・強度特性の把握と、せん断帯発生後の緩衝材としての性能評価について検討する予定である。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。最後になりましたが、神戸大学の澁谷教授には一面せん断試験装置の作製について、函館高専の川口助教授には試験装置の操作方法について大変親切にご指導いただきました。ジャコムの増井氏には本研究の試験装置全般について、非常に丁寧に相談に乗っていただきました。また、茨城大学の小峯准教授には、圧縮ベントナイトに関する基礎的事項について、ポイントを抑えて適確にご教示していただきました。この場をかりて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) 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. 3) 小高・寺本・今場: 不飽和条件下での圧縮ベントナイトのせん断破壊挙動の観察, 第 43 回地盤工学研究発表会概要集, 2008.

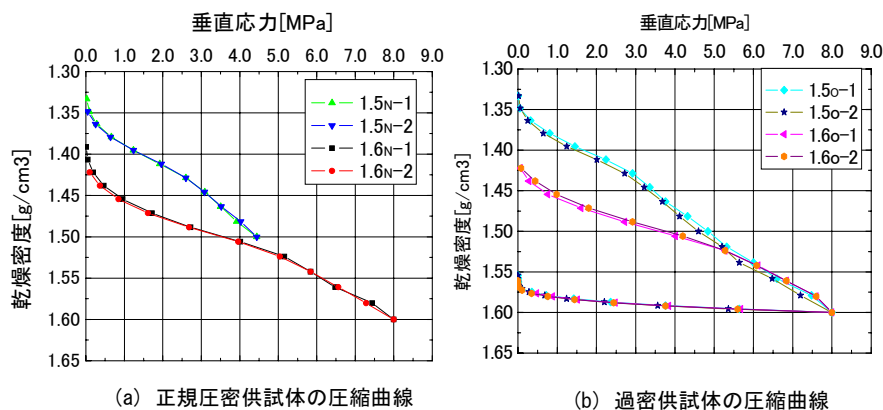


図 4 供試体作製時の軸圧縮過程における垂直応力と乾燥密度の関係

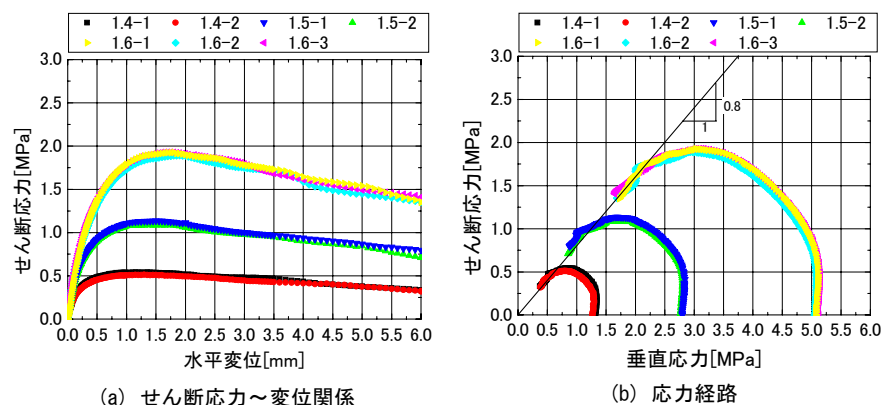


図 5 正規圧密供試体における一面せん断試験結果

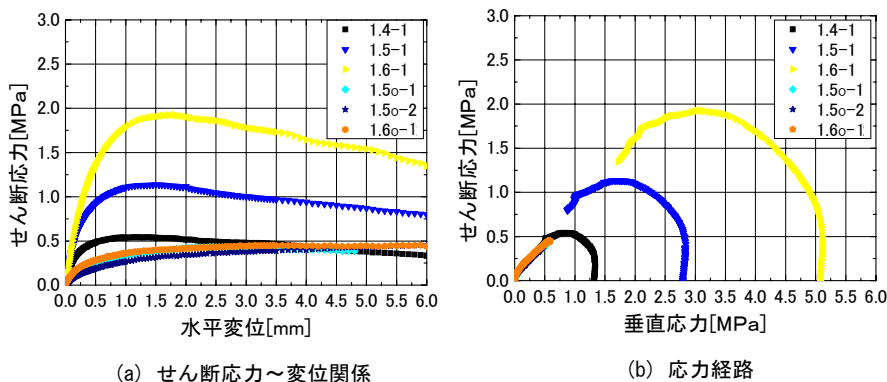


図 6 過圧密供試体と正規圧密供試体の試験結果の比較