

高レベル放射性廃棄物処分における圧縮ベントナイト緩衝材のせん断特性

名城大学 学生会員 寺本優子
名城大学 学生会員 今場寿幸
名城大学 正会員 小高猛司

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の超深地盤内への地層処分の実現に向けて、現在数々の検討が行われている。ガラス固化した高レベル放射性廃棄物を金属容器で包み込んだオーバーパックは、安定な岩盤層の坑道内に永久的に保管される計画であるが、岩盤とオーバーパックの間の空間には緩衝材が充填されることになっている。緩衝材の役割は、地震等の衝撃からオーバーパックを守ることに加えて、地下水環境内から隔離することもあるため、材質は高圧で圧縮したベントナイトが有力である。

本研究は、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、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、その際に上記のような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、その検討のために試作した圧縮ベントナイト用の高拘束圧一面せん断試験機の基本性能について説明するとともに、浸潤過程下での不飽和圧縮ベントナイトのせん断特性を示す。

2. 高拘束圧一面せん断試験装置の試作

図1は試作した高拘束圧一面せん断試験装置である。高レベル放射性廃棄物は、地下300m以深の超深地層に保管されるために、高圧環境を再現する必要がある。試験装置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、パソコンからの制御により、応力制御、ひずみ制御ともに実施可能であり、さらに等体積条件、等圧条件いずれの条件でもせん断できる。図2に試験装置中心部を示す。上部より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。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定量的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、本研究では50mm×50mmの正方形断面の供試体とした。厚さは40mmを基準とした。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直接せん断を実施している。

せん断帯は上下せん断箱の隙間を通して、CCDマイクロスコープによりデジタル画像を撮影し、それをPIV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

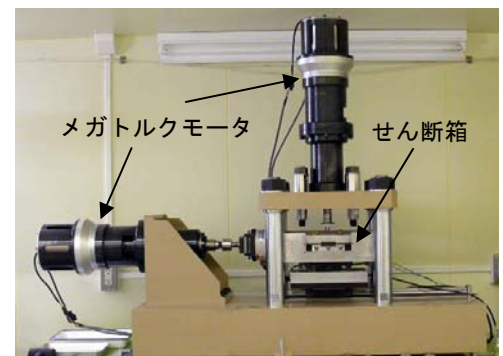


図1 高拘束圧一面せん断試験装置（全景）

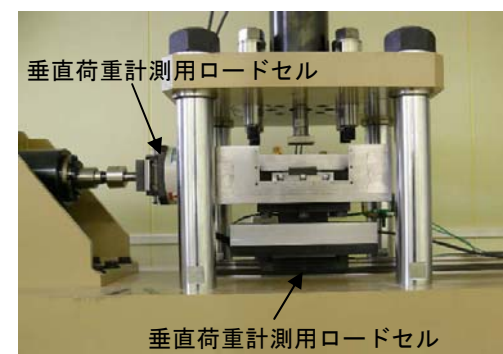


図2 高拘束圧一面せん断試験装置（拡大）

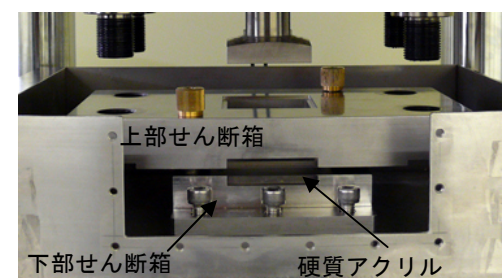


図3 矩形供試体用せん断箱

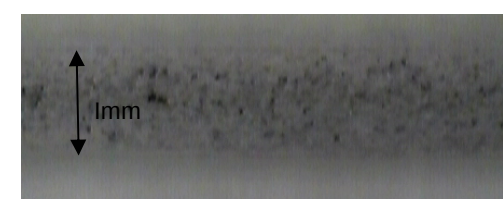


図4 上下せん断箱間の隙間のデジタル画像

することを試みる。図4に予備実験にて撮影した、上下せん断箱の隙間から見た供試体のデジタル画像を示す。後述するように、圧縮ベントナイトには珪砂を混合しているために、珪砂の砂粒子が供試体表面に程良いパターンを形成しており、画像相関法を用いるPIV画像解析の適用性は高いと判断した。

3. 供試体作製方法および試験手順

今年度の実験は、地層処分場が運用し始められ、緩衝材が再冠水の途上にある時期を想定していると仮定し、不飽和状態の圧縮ベントナイトを用いている。なお、ベントナイトの透水性の低さから、実際の地層処分場では、再冠水に数年～100年程度かかるものと考えられている。

圧縮ベントナイトは粉末状のベントナイト（クニゲル V1）に珪砂 6 号を質量比 30% 配合する。乾燥密度 1.4, 1.5 および 1.6 g/cm³ となるよう、それぞれの質量を決定し、あらかじめよく混合してからせん断箱に詰める。乾燥密度 1.4 g/cm³ の場合は、試料が少ないために、1 回の圧縮によって高さ 40mm の供試体を作製することが可能であるが、乾燥密度 1.5 および 1.6 g/cm³ の場合には、せん断箱の厚さの関係もあり、1 回での圧縮による作製は困難であった。そのため、1 回目に質量全体の 85% を詰め、鉛直応力で供試体高さ 36 mm になるまで圧縮し、2 回目に残りの 15% を詰めて 40 mm になるまで圧縮させる。

以上の手順で供試体を作製した直後、応力緩和によって鉛直応力が減少しないうちに、水平変位 6 mm になるまで等体積条件で直接せん断を行った。

4. 試験結果

図5は供試体の目標乾燥密度を 1.6 g/cm³ とし、不飽和ベントナイト圧縮過程において、0.5 mm 圧縮毎に計測した垂直応力をプロットしたものである。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、1.6 g/cm³ では許容限界の 8MPa まで到達している。図のように同じ条件で 2 回実施したが、供試体は再現性高く作製できることが確認できた。

図6にせん断応力～変位関係を示す。いずれの乾燥密度においても、ひずみ軟化挙動を呈することがわかる。図7に応力経路を示す。乾燥密度によって初期の垂直応力が異なるものの、応力経路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。軟化後の最終状態で得られる内部摩擦角は $\phi=38.7^\circ$ であり、JAEA（旧核燃料サイクル開発機構）で実施され、現在緩衝材基本特性データベース¹⁾でも公開されている三軸試験結果 $\phi=16.6^\circ$ と比べると、今回の値は非常に大きい。データベースの値は飽和試料での試験結果であり、それが両者に差が生じた原因のひとつと考えている。

5. まとめ

せん断帯内部の観察結果については、講演時に報告する。また、今後は再冠水後に半永久的に継続することが想定されている完全飽和条件下での実験をすすめ、その際のせん断帯生成・発達を含む緩衝材の力学挙動について検討してゆく。

参考文献：1) 緩衝材基本特性データベース，日本原子力研究開発機構 HP，<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>

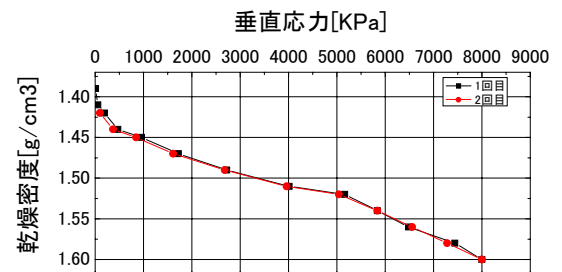


図5 垂直応力と乾燥密度との関係

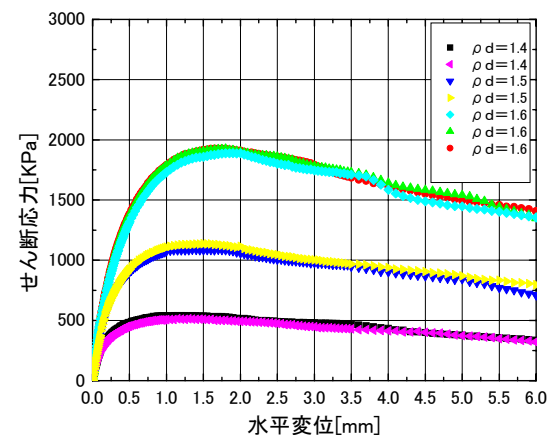


図6 せん断応力～変位関係

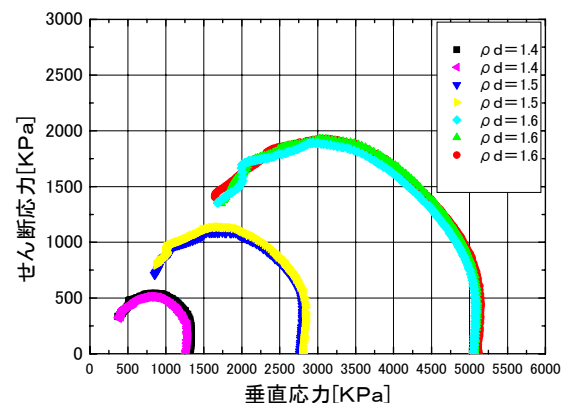


図7 応力経路