

圧縮粒状ベントナイトの一面せん断試験と X 線 CT による観察

名城大学	学生会員	○高田英典・元山泰久
名城大学	正会員	小高猛司
京都大学	フェロー	岡二三生
京都大学	正会員	肥後陽介

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分で低透水層として用いられるベントナイトは、施工後の不飽和状態から再冠水に伴い飽和状態に遷移するまでに長時間を要する。そのため、飽和のみならず不飽和状態の力学特性も把握しておく必要がある¹⁾。本報では、定体積一面せん断試験を通して、粒状状態のベントナイト試料であるクニゲル GX のせん断特性の検討を行う。

2. 試験方法

試験試料はベントナイト・クニゲル GX（自然含水比状 $w_0=8.3\%$ ）を最大粒径 2.0mm に粒度調整を行ったものである。不飽和供試体は、図 1 に示す高圧一面せん断試験装置のせん断箱内で圧縮成型して作製する²⁾。供試体は 50mm×50mm の正方形断面、厚さ 20mm の短形供試体とし、乾燥密度は 1.50, 1.55, 1.60, 1.65 Mg/m^3 とした。一方、飽和供試体は、自然含水状態の試料を油圧ジャッキで直径 80mm、高さ 20mm の高剛性リング内に圧縮成型した後、完全拘束型モールドに設置（図 2 参照）し、膨潤圧を計測しつつ 1 週間脱気水を注水して飽和させた。その後、50mm×50mm 角のガイドカッターによって矩形供試体を成型して一面せん断試験装置に設置し、せん断速度 0.4mm/min で定体積せん断した。なお、乾燥密度は 1.60, 1.70, 1.80 Mg/m^3 とした。

3. 一面せん断試験結果

図 3 に不飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は各供試体の乾燥密度を示している。

図 3(a)のせん断応力～変位関係より、いずれの乾燥密度においても水平変位 3.0mm 程度まで緩やかにせん断応力が増加している。また、乾燥密度が高くなるほど、ピークを迎えた後のせん断応力の減少幅が大きくなっている。図 3(b)に示す応力経路を見ると、供試体の乾燥密度が高くなるほど圧縮成型時に高い垂直応力を必要とするため、初期の垂直応力に違いがある。また、いずれの乾燥密度においても、せん断が進むにつれ、負のダイラタンシーの発現により塑性圧縮を伴うひずみ軟化の挙動を示している。粘性土の一面せん断試験結果の整理法にならいせん断抵抗角を求めると、いずれの乾

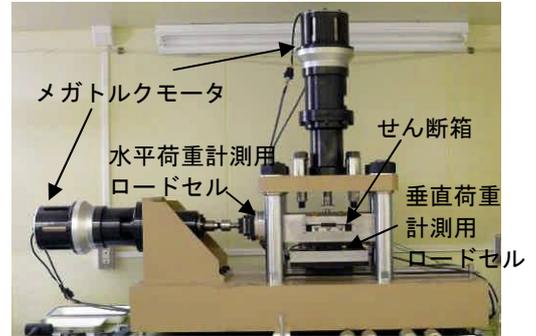
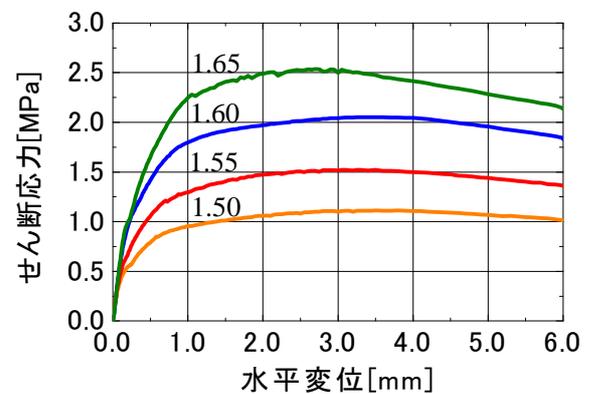


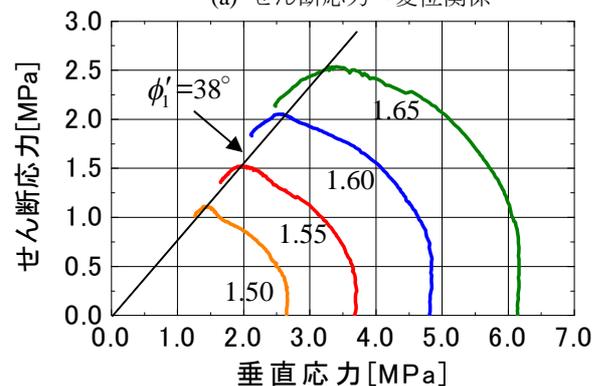
図 1. 高圧一面せん断装置



図 2. 完全拘束型モールド



(a) せん断応力～変位関係



(b) 応力経路

図 3. 不飽和供試体の試験結果

乾燥密度でも $\phi'_1=38^\circ$ を示した。

図 4 に飽和供試体の一面せん断試験結果を示す。凡例は不飽和供試体と同様に乾燥密度を示している。なおせん断の際には、各供試体に膨潤圧相当の垂直応力を負荷させている。

図 4(a)のせん断応力～変位関係より、水平変位 1.5mm 程度でピークを迎えている。図 4(b)に示す応力経路を見ると、各供試体の膨潤圧から設定した初期垂直応力に応じて、最大せん断応力が小さくなっている。不飽和供試体と同様にせん断抵抗角を求めると、総じて不飽和供試体のせん断抵抗角よりも小さい値を示すとともに、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 で $\phi'_1=29^\circ$ 、 1.70 Mg/m^3 で $\phi'_1=25^\circ$ 、 1.80 Mg/m^3 で $\phi'_1=22^\circ$ となり、乾燥密度の増加に応じて、せん断抵抗角が小さくなっている。

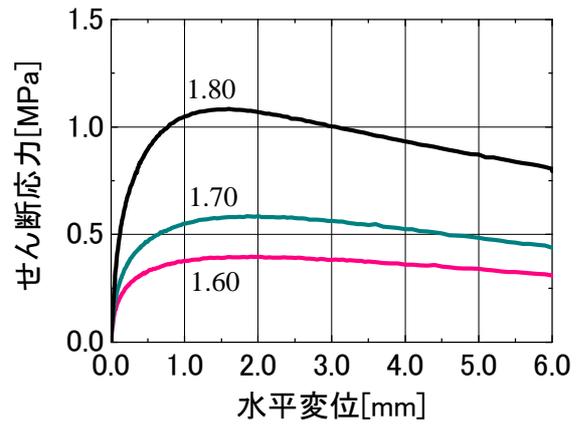
4. X線 CT による供試体内部の観察

図 5 に一面せん断試験後の不飽和および飽和圧縮粒状ベントナイト供試体の CT 画像を示す。試験後、せん断箱より専用器具によって供試体を取り出し、含水状態を変えないように真空パックを施した状態で京都大学に移送し、マイクロフォーカス X 線 CT 装置 (KYOTO-GEO μ XCT: 東芝 TOSCANER-32250 μ HDK) を用いて観察した。CT 画像においては X 線の透過量が多いところほど黒くなり、低密度を表している。不飽和供試体では、高密度な粒状部分とそれ以外の低密度部分のコントラストが明確であり、さらにせん断に伴う亀裂が供試体内部に進展している様子がわかる。一方、飽和供試体においては、高密度な粒状部分は依然として存在するが、それ以外の部分においては全体的に濃淡が均一化しているように見える。これは、飽和化に伴いベントナイトが膨潤し、間隙を充填したことを示唆している。さらに、不飽和供試体で見られるせん断に伴う亀裂は、飽和供試体中では観察できない。また、いずれの供試体でも、せん断箱から大きな圧力を受ける供試体側面では高密度化が見られる。

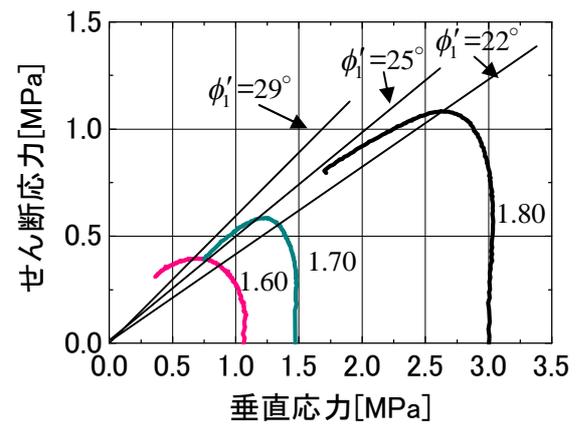
5. まとめ

粒状ベントナイトの力学特性の検討のため不飽和および飽和状態の供試体において高圧一面せん断試験を実施した。試験結果より、飽和化に伴いせん断抵抗角が小さくなることが示された。これは、地層処分で緩衝材として用いる珪砂・ベントナイト混合体においても同様な傾向となる²⁾。ただし、不飽和状態においては、粉体ベントナイトを圧縮成型する珪砂・ベントナイト混合体では顕著な脆性破壊を示すのに対して、今回使用した圧縮粒状ベントナイトは比較的延性的な破壊挙動を示しており、固結度が高い珪砂・ベントナイト混合体よりも粒状体としての力学特性が明確に表れるものと考えている。なお、本試験に用いたクニゲル GX はハザマの千々松正和氏にご提供いただいた。記して謝意を表します。

参考文献：1) 土木学会，余裕震度処分における地下施設の設計，品質管理，検査の考え方，2009. 2) 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.



(a)せん断応力～変位関係



(b)応力経路

図 4. 飽和供試体の試験結果

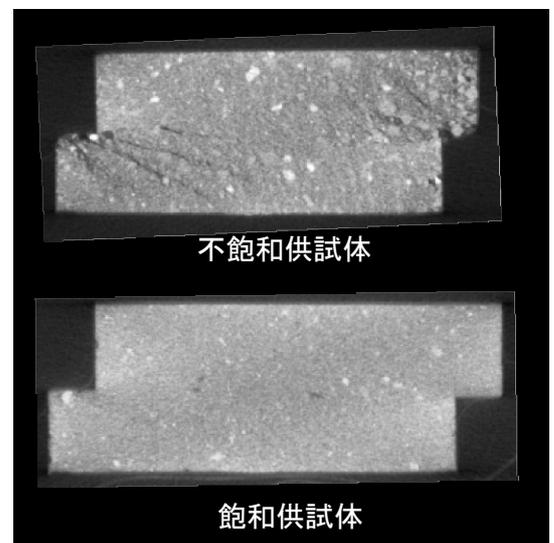


図 5. X 線 CT 結果 ($\rho_a=1.60 \text{ Mg/m}^3$)