

粒状ベントナイト緩衝材の変形・強度特性

粒状ベントナイト，一面せん断試験，飽和度

名城大学	国際会員	小高猛司
名城大学大学院	学生会員	○高田英典
日特建設（元名城大院生）	正会員	元山泰久
京都大学	国際会員	岡二三生
京都大学	国際会員	肥後陽介

1. はじめに

余裕深度処分における人口バリアに用いられる圧縮ベントナイト緩衝材は，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。本報では，粒状ベントナイト緩衝材の不飽和状態および飽和状態の変形・強度特性を把握することを目的とし，高圧一面せん断試験を実施した。

2. 試験方法

試験試料は粒状ベントナイト・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で圧縮成型して作製する。供試体の乾燥密度は 1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 Mg/m^3 とし，供試体寸法は 50mm×50mm の正方形断面，厚さ 20mm の矩形供試体を基本とするが，乾燥密度 1.60 Mg/m^3 については厚さ 40mm の供試体も作製し，供試体厚さによる影響を検討した。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，図 2 に示す完全拘束型モールドに設置し，膨潤圧を計測しつつ 1 週間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試験を実施した。なお，乾燥密度は 1.60, 1.70, 1.80 Mg/m^3 とした。また，乾燥密度 1.60 Mg/m^3 において図 3 に示す上部分離型モールドを用いる方法および，供試体が飽和状態となるように含水比を調整した試料を圧縮成型する方法（以下，加水法と呼ぶ）も実施した。なお，後者の方法では，飽和度をさらに上昇させるために，圧縮成型後に 1 日水浸させることで飽和供試体の作製方法の違いが力学特性に与える影響も検討した。せん断はせん断速度 0.4mm/min で水平変位 6.0mm まで定体積条件で行った。

3. 一面せん断試験結果

図 4 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 4(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ことがわかる。クニゲル V1 と珪砂を混合して圧縮成型して作製した珪砂ベントナイト混合体による試験では，水平変位 1.0 mm 程度で最大せん断応力に到達する¹⁾²⁾ことから，粒状ベントナイト供試体は延性的な材料であると考えられる。図 4(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要するため，初期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，負のダイレ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ひせん断抵抗角を求めると，乾燥密度 1.50,

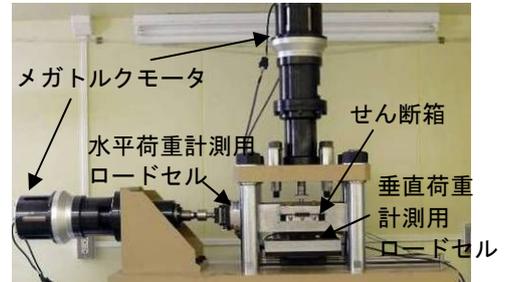


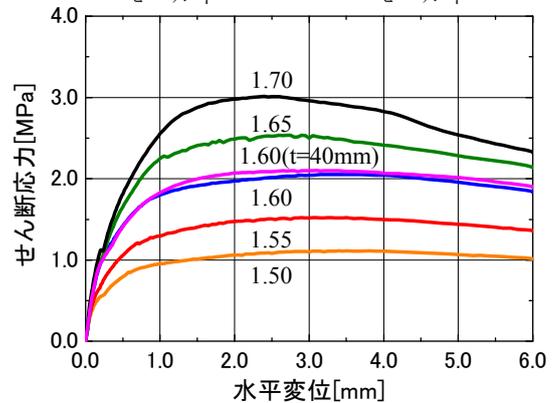
図 1. 高圧一面せん断試験装置



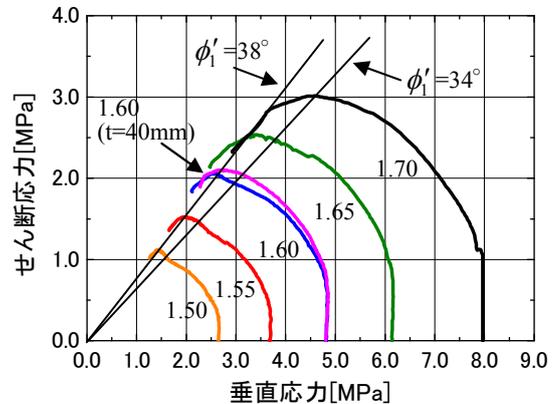
図 2. 完全拘束型モールド



図 3. 上部分離型モールド



(a) せん断応力～水平変位関係



(b) 応力経路

図 4. 不飽和供試体の一面せん断結果

1.55, 1.60, 1.65 Mg/m³ではせん断抵抗角 $\phi'_1=38^\circ$ となり, 1.70 Mg/m³では $\phi'_1=34^\circ$ となった。また乾燥密度 1.60 Mg/m³の試験結果より, 供試体厚さによる力学特性への影響は認められない。さらに不飽和状態の珪砂ベントナイト混合体のせん断抵抗角は, $\phi'_1=33^\circ$ 程度である¹⁾²⁾ことが示されており, 粒状ベントナイト供試体の方が, せん断抵抗角が若干大きい結果となった。これらの結果より, 珪砂ベントナイト混合体が固結材料としての脆性的な破壊を示すのに対し, 粒状ベントナイト供試体は, より粒状体としての破壊形態を示しており, 比較的延性的な性質を有していると考えられる。

図5に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と飽和方法を示している。なおせん断の際には, 各供試体に計測した膨潤圧相当の垂直応力を負荷させている。ただし, 一面せん断試験装置で作製した供試体に関しては圧縮成型時の垂直応力をせん断開始時の初期垂直応力としている。

図5(a)のせん断応力～変位関係より, いずれの乾燥密度, 飽和方法においても水平変位 1.5mm 程度でピークを迎えている。図5(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, 最大せん断応力が異なっている。不飽和供試体と同様にせん断抵抗角を求めると, 完全拘束型モールドにおける乾燥密度 1.60 Mg/m³で $\phi'_1=29^\circ$, 1.70 Mg/m³で $\phi'_1=25^\circ$, 1.80 Mg/m³で $\phi'_1=22^\circ$ となり, 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した。また, 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。さらに, 上部分離型モールドにおける乾燥密度 1.60 Mg/m³では $\phi'_1=25^\circ$ となり, 飽和供試体の作製方法によって, せん断強度に若干の差が見られた。これは, 飽和の際の拘束方法の違いなどにより, 計測された膨潤圧が異なるためと考えられる。加水法によって作製した供試体では, 浸水無しでは $\phi'_1=29^\circ$, 浸水ありでは $\phi'_1=25^\circ$ となり, 供試体作製後の浸水によってより飽和化が進み, せん断強度が低下したと考えられる。

4. X線 CT による供試体内部の観察

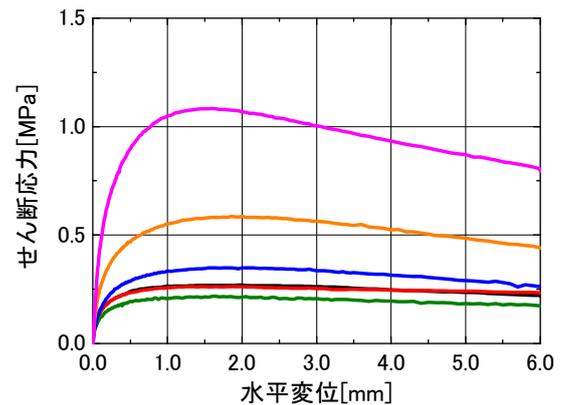
図6に試験後の不飽和および飽和圧縮粒状ベントナイト供試体のCT画像を示す。試験後, せん断箱より供試体を取り出し, 含水状態を変えないように真空パックを施した状態で京都大学に移送し, マイクロフォーカス X線 CT 装置 (KYOTO-GEO μ XCT: 東芝 TOSCANER-32250 μ HDK) を用いて観察した。CT画像においては X線の透過量が多い箇所ほど黒くなり, 低密度を表している。不飽和供試体では, 高密度な粒状部分とそれ以外の低密度部分の明暗が明確であり, さらにせん断に伴う亀裂が供試体内部に進展している様子がわかる。一方, 飽和供試体では, 高密度な粒状部分は依然として存在するが, それ以外の部分で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, せん断に伴う亀裂は, 飽和供試体中では観察できなかった。

5. まとめ

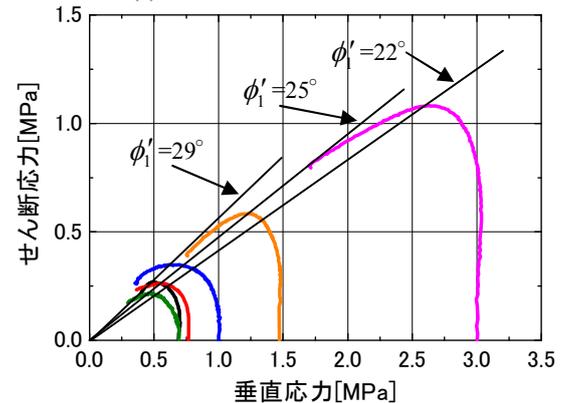
粒状ベントナイトの力学特性の検討のため不飽和および飽和状態の供試体において高圧一面せん断試験を実施した。試験結果より, 飽和化に伴いせん断抵抗角が小さくなること示された。また, 飽和供試体の作製方法によらずほぼ同一のせん断抵抗角を得た。ただし, 不飽和状態においては, 粉体ベントナイトを圧縮成型する珪砂ベントナイト混合体では顕著な固結材料として脆性破壊を示すのに対して, 今回使用した圧縮粒状ベントナイトは粒状体としての力学特性が明確に表れ, 比較的延性的な破壊挙動を示した。なお, 本試験に用いたクニゲル GX はハザマの千々松正和氏にご提供いただいた。記して謝意を表します。

参考文献: 1)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. 2)小高・寺本・平手・元山, 圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価, 地盤工学ジャーナル, 22, 2010.

— $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ 完全拘束型 — $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ 準拘束型モールド
 — $\rho_d=1.70\text{Mg/m}^3$ 完全拘束型 — $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ 加水法(浸水なし)
 — $\rho_d=1.80\text{Mg/m}^3$ 完全拘束型 — $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ 加水法(浸水あり)



(a) せん断応力～水平変位関係



(b) 応力経路

図5. 飽和供試体の一面せん断試験結果

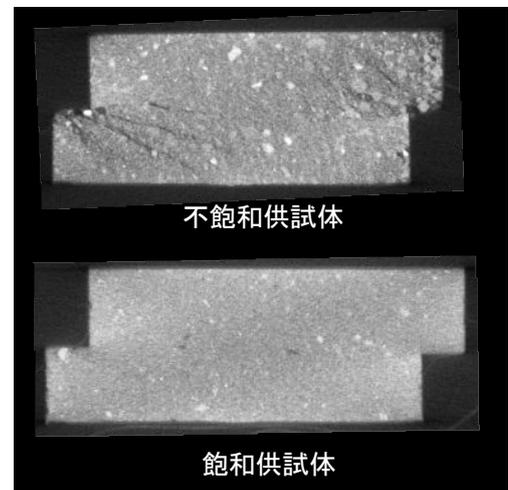


図6. X線 CT 結果(乾燥密度: $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$)