

圧縮粒状ベントナイトの力学特性と破壊挙動

名城大学大学院	学生会員	○高田英典
名城大学	正会員	小高猛司
日特建設（元名城大院生）	正会員	元山泰久
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

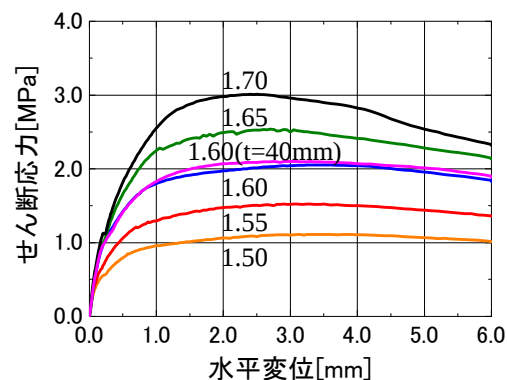
余剰深度処分で用いられるベントナイト緩衝材は、施工時の不飽和状態から再冠水に伴い飽和状態に遷移することから、長期にわたる処分場の力学挙動を予測するためには、飽和のみならず不飽和状態の力学特性を把握しておく必要がある。本報では、圧縮粒状ベントナイト緩衝材の高圧一面せん断試験結果を示す。

2. 試験方法

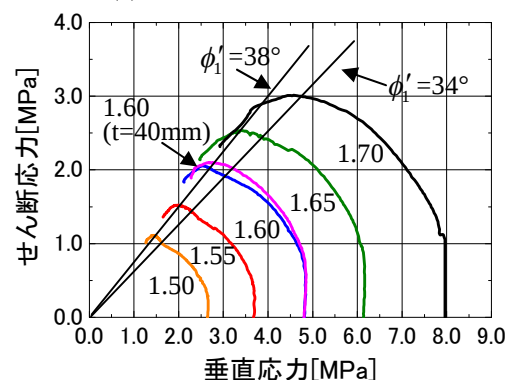
試験試料は粒状ベントナイト・クニゲル GX（自然含水比状 $w_0=8.3\%$ ）を最大粒径 2.0mm に粒度調整を行ったものである。不飽和供試体は、高圧一面せん断試験装置で圧縮成型して作製する。供試体の乾燥密度は 1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 Mg/m^3 とし、供試体寸法は 50mm×50mm の正方形断面、厚さ 20mm を基本とするが、乾燥密度 1.60 Mg/m^3 については厚さ 40mm の供試体も作製し、供試体厚さによる影響を検討した。飽和供試体は、自然含水状態の試料を直径 80mm、高さ 20mm の高剛性リング内に圧縮成型した後、完全拘束型モールドに設置し、膨潤圧を計測しつつ飽和化を行った。その後、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。なお加水法では、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 1 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 1(a)のせん断応力～水平変位関係より、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。クニゲル V1 と珪砂を混合して圧縮成型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¹²⁾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 1(b)の応力経路を見ると、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、乾燥密度 1.50, 1.55, 1.60, 1.65 Mg/m^3 ではせん断抵抗角 $\phi'_1=38^\circ$ となり、1.70 Mg/m^3 では $\phi'_1=34^\circ$ となった。また、供試体厚さによる力学特性へ



(a) せん断応力～水平変位関係



(b) 応力経路

図 1 不飽和供試体の一面せん断試験結果

キーワード 粒状ベントナイト、一面せん断試験、密度、飽和度、X 線 CT

名城大学 理工学部 建設システム工学科（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel 052-838-2347）

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が、 $\phi'_1=33^\circ$ 程度である¹⁾²⁾ことから、粒状ベントナイト供試体のせん断抵抗角の方が、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、粒状体としての破壊を示しており、延性的な性質を有していると考えられる。

図2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、加水法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2(a)のせん断応力～水平変位関係より、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2(b)の応力経路を見ると、計測した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/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、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により、計測された膨潤圧が異なったためと考えられる。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、浸水によって飽和化が進み、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3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。せん断後の供試体の含水状態を維持したまま京都大学に移送し、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低密度部分の明暗が明確であり、せん断に伴う亀裂が供試体内部に進展している。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濃淡が均一化している。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観察できなかった。

5. まとめ

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。ただし、飽和供試体の作製方法によりせん断抵抗角に違いが見られた。不飽和状態においては、珪砂ベントナイト混合体では固結材料として脆性破壊を示すのに対して、粒状ベントナイト供試体は粒状体としての性質が明確に表れ、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, 5(2), 2010.

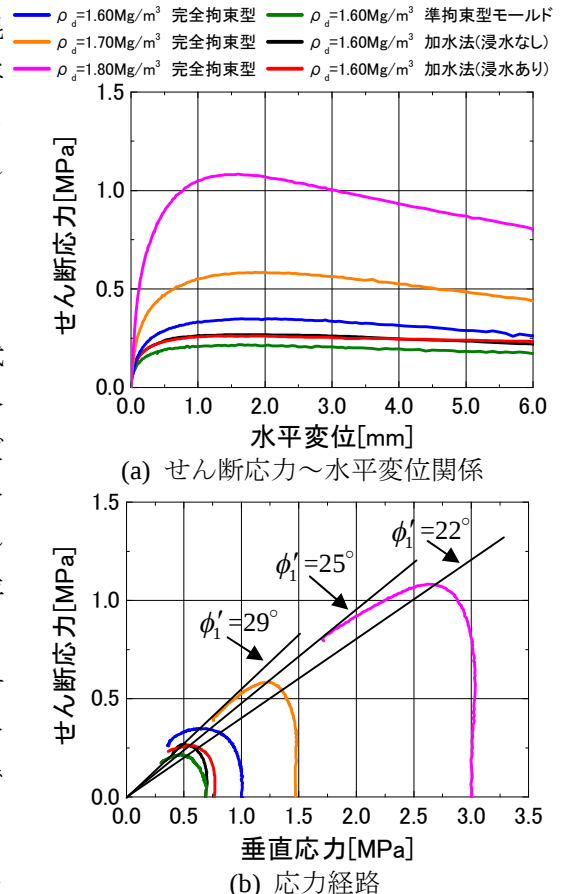


図2 飽和供試体の一面せん断試験結果

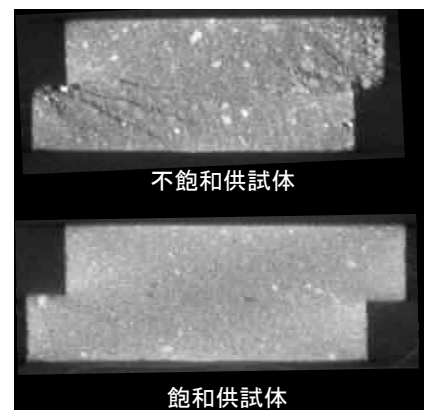


図3 X線CT結果 ($\rho_d=1.60 \text{ Mg/m}^3$)