

# 浸透対策ベントナイト混合堤防土の力学特性

河川堤防 堤防強化 ベントナイト

名城大学 国際会員 小高猛司  
名城大学大学院 学生会員 ○盛 哲・中山雄人  
日本工営 国際会員 李 圭太  
中部土質試験協同組合 国際会員 久保裕一

## 1. はじめに

令和元年台風 19 号では全国 140 箇所の堤防が決壊した。その多くが越水による裏法侵食に起因する破堤であるが、事前降雨や洪水による堤体内浸透が破堤時間を早めていると思われる事例も見られる。特に、実際の河川堤防では室内透水試験での評価よりも大きな透水性を有していることが指摘されており<sup>1)</sup>、降雨および河川水の堤体への浸透抑制が堤防被災を抑制するために必要不可欠である。本研究グループでは、堤体飽和度の上昇を抑制させるために、遮水性能が高い自然材料であるベントナイトを用いた法面被覆工法を提案している。すなわち、実堤防土にベントナイトを乾燥質量比 3~5% 程度混合するだけで、その透水性を 1~2 オーダー小さくすることができることを示してきた<sup>2)3)</sup>。本報では実堤防土を模擬した砂質土試料に透水性の低いベントナイトを 3%と 5%混合した供試体を作製して三軸試験を実施し、低混合率のベントナイト混合堤防土のせん断強度特性について検討する。

## 2. 試験方法

本研究で使用する試験試料は、三河珪砂 4 号、珪砂 6 号とシルト分に富む野間精配砂を質量比 3 : 1 : 3 の割合に調整したものである。この試料は、実際の堤防土（北海道千歳川北島堤防砂）を模擬したものであり、これを基本ケースとする。図 1 に調整試料、ベントナイトと北島堤防砂の粒径加積曲線を示す。また、その調整試料（本報ではベントナイト無混合砂と呼ぶ）に、粉末ベントナイト（クニゲル V1、クニミネ工業製）を乾燥質量比 3%と 5%で混合したベントナイト混合砂を使用した。供試体の作製においては、自然乾燥状態に蒸留水を霧吹きで含水比 10%まで調整を行った後、5 層に分けて間隙比 0.7 となるように締め固めることによって、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体を作製した。なお、ベントナイトの混合にあたっては、混合した質量分だけ調整試料を減じ、同一の乾燥質量としている。

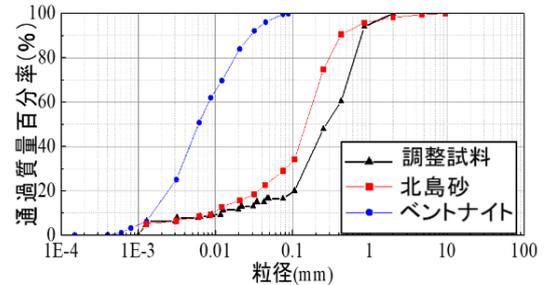


図 1 粒径加積曲線

供試体を三軸試験装置に設置後、二重負圧法による完全飽和化を行った後、初期有効拘束圧 50kPa、100kPa および 150kPa で圧密を行い、載荷速度 0.1%/min で軸ひずみが 15%に達するまで非排水せん断条件（CU 試験）でせん断を行った。

## 3. CU 試験結果

図 2 に基本ケースとしてのベントナイト無混合砂（混合率 0%）の CU 試験結果を示す。軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの初期有効拘束圧においても、軸差応力は急激に上昇し、軸ひずみ 2~3%程度でピークに到達した後、せん断過程が進むにつれて緩やかに減少しつづける。すなわち、顕著なひずみ軟化挙動が確認された。有効応力経路は、平均有効応力が減少しており、軸差応力のピーク後は大幅に塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す。

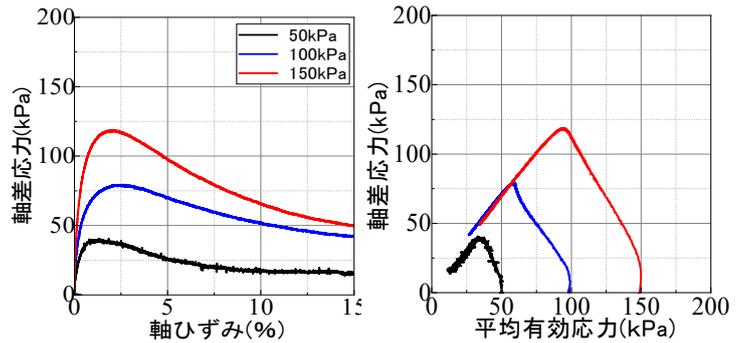


図 2 ベントナイト無混合砂（混合率 0%）の試験結果

図 3 にベントナイト混合砂（混合率 3%）の CU 試験の結果を示す。いずれの初期有効拘束圧においても、ゆるい詰め傾向を示して、せん断初期から塑性圧縮している。特に、無混合砂の試験結果に比べると、軸差応力に明確なピークは現れず、急激なひずみ軟化も生じない。すなわち、わずか 3%のベントナイト混合によって、正規圧密粘土のようなせん断挙動に変化したように見ることができる。ただし、本研究で使用したベントナイト無混合砂は、初期含水比 10%で供試体を作製することによって比較的高位な骨格構造を作ることがわかっているが<sup>4)</sup>、今回ベントナイトを混合することによって、この骨格構造の形成に影響を与えたとも考えられ、三軸試験によって骨格構造の違いが最も現れ

る、明確なピーク強度の発現とその後のひずみ軟化を伴う脆性的な破壊が観察できなくなった可能性もある。

図4に、ベントナイト混合砂（混合率5%）のCU試験の結果を示す。軸差応力～軸ひずみ関係より、せん断初期から大きく塑性圧縮することや明確なピーク強度が発現しないことなど、ベントナイト混合率3%供試体と類似した挙動を示す。ただし、有効応力経路より、変相後に若干の正のダイレイタンスの拘束による硬化傾向が見られ、それに伴う軸差応力の緩やかな増加を示している。これは、混合したベントナイト粒子の膨潤によって、基本となる砂質土部分が若干密詰めになるために、正のダイレイタンスがやや強く表れた結果であるとも解釈できる。

有効応力で整理したモールの応力円と破壊規準線を図5に示す。ベントナイトを混合することにより、内部摩擦角は明らかに低減しており、通常の砂質土のせん断抵抗と比較しても、かなりのゆる詰めと評価できるほどに小さい。ただし、先述のように、無混合砂にのみ発現するピーク荷重が、ベントナイト混合によって消失した影響も含まれている。そのため、この内部摩擦角の低下が、河川堤防の構造物としてのせん断抵抗の低下に直接結びつくものであるのかについては、土の骨格構造の変化やせん断モードの影響<sup>9)</sup>などの観点を含めて慎重に検討する必要がある。一方、見かけの粘着力については、無混合砂のデータばらつきから判断は難しいが、低拘束圧側で評価を行えば、ベントナイト混合により見かけの粘着力は上昇していると判断できる。

#### 4. まとめ

低混合率のベントナイト混合砂のせん断強度特性を検討した。わずかな質量比であっても、ベントナイトを混合することによって、砂質土から粘性土に近い力学特性に大幅に変化することを確認した。ただし、元の砂質土の骨格構造の変化やベントナイト粒子の膨潤による周辺の高密度化の影響など、詳細に検討すべき事項は多く、異なる粒度や構造の左室試料の使用や、異なるせん断モードでの試験の実施など、残された検討事項は多い。そもそも、このベントナイト混合は、浸透対策のための堤防強化に用いることから、混合砂の大部分を占める砂質土部分の構造変化や密度変化がもたらす遮水性能の変化についての検討も必要である。さらに、ベントナイトは、一般に乾燥収縮による遮水性能の劣化を指摘されることも多いので、乾湿繰り返し履歴を含めた長期耐久性についての検討も必要である。

**参考文献:** 1)李ら：河川堤防盛土の原位置透水特性に関する考察，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集，2017。 2)小高ら：ベントナイト混合砂の堤体法面被覆材としての適用性の検討，第50回地盤工学研究発表会，2015。 3)竹内ら：ベントナイト混合砂の堤防浸透対策材料としての適用性に関する検討，第71回土木学会年次学術講演会，2016。 4)御手洗ら：砂質土の供試体作製時における初期含水比の違いが力学挙動に及ぼす影響，第72回土木学会年次学術講演会，2017。 5)小高ら：三軸圧縮並びに単純せん断による構造的砂質土と疑似粘性土の力学特性の検討，第55回地盤工学研究発表会，2020。

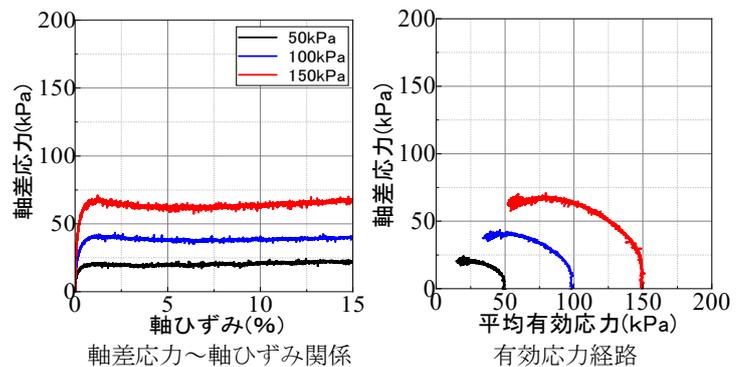


図3 ベントナイト混合砂（混合率3%）の試験結果

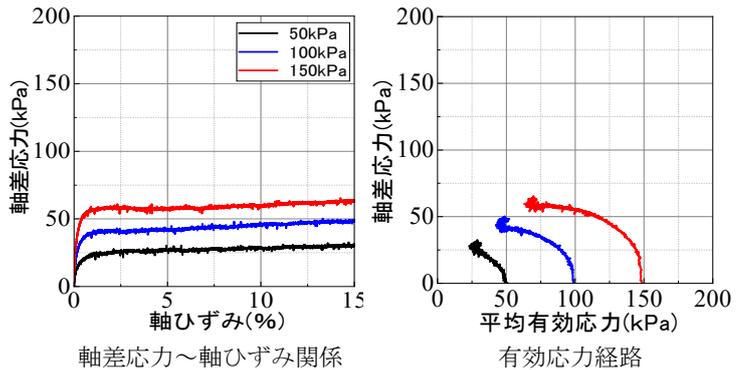
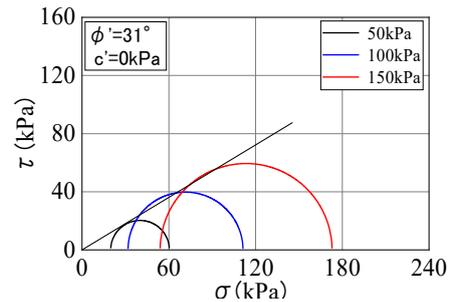
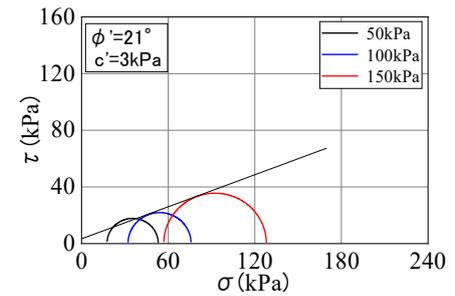


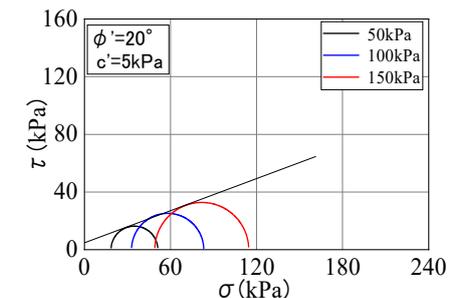
図4 ベントナイト混合砂（混合率5%）の試験結果



(a) ベントナイト混合砂（混合率0%）



(b) ベントナイト混合砂（混合率3%）



(c) ベントナイト混合砂（混合率5%）

図5 モールの応力円（有効応力）