

越水時に粘りを発揮する礫質堤体土の力学特性

礫質土 三軸圧縮試験 河川堤防

名城大学 国際会員 小高猛司
建設技術研究所 国際会員 李 圭太
名城大学院 学生会員 ○梅村逸遊

1. はじめに

平成 28 年に被災した北海道空知川のように、近年、ゲリラ豪雨や大型台風の上陸などの要因による河川水位の急上昇に伴い、既往最大外力の作用による堤防の越水やそれに伴う決壊の被害が各地で発生している。杉井らは堤高 1m の比較的大きな堤体模型を作製し、湛水実験を実施した結果¹⁾、越水させても礫質土で築堤した堤体は破堤に拡大していらず、礫質土堤体の耐浸透破壊、耐越流侵食の性能が非常に高いことを確認している。本報では、模型堤体を使用した礫質土を用いて、築堤時の密度と同じ供試体を作製し、大型三軸試験による単調載荷せん断試験および吸水軟化試験²⁾を実施し、その礫質堤体土の浸透耐性を含めた力学特性の評価を行った結果を示す。

2. 模型実験概要¹⁾

模型実験の概略と実験時の様子をそれぞれ図 1 と写真 1 に示す。堤体には写真 2 の礫質土が使用され、堤体基礎には河川からの浚渫土（ほぼ不透水）が使用された。築堤時には、RI 密度計による密度管理が行われた。築堤後には、堤防を跨ぐ鋼管が組まれ、ノズルを付けた降雨発生装置が設けられたほか、外水位を負荷させるために堤防表側に貯水池を設けて湛水ならびに越流実験が行われた。

実験はまず、徐々に水位を上昇させて堤体の変状観察が行われた。裏法からかなりの漏水があったものの変状は全く確認されなかった。水位が天端高まで達して、部分的に越流しても侵食を確認することができなかった。そこで、堤体の越流を促進させるため、写真 3 のように天端の一部を切削した。切削直後は越水によって細粒分を巻き込みながら法面を侵食するが、すぐに清水となり安定状態を維持した。その後、同箇所を同様に 4 回切削したが同様に安定を維持したため、最終的には切削面下を掘ることにより、堤体の自重による破堤を促した。その後、70cm ほどの幅で決壊したのを確認し、実験を終了した。

3. 三軸試験概要

模型実験後、堤体試料を実験室に搬入し、自然乾燥させた後、4 分法を用いて均等に小分けした。図 2 に堤体試料の粒度分布を示す。礫分が全体の 8 割を占める礫質土である。細粒分が少ないために締固め試験は困難と判断し、本報では礫の最大・最小密度試験を実施した。試験供試体は、室内試験で得られた最大乾燥密度（ $1.874\text{g}/\text{cm}^3$ ）と現場で RI 計測した堤体の乾燥密度を参考に、相対密度 60%（ $1.713\text{g}/\text{cm}^3$ ）となるように作製した。供試体作製時の試料の含水比は、現場で測定した堤体部分の含水比に近い 8%に調整し、所定の密度となるように 5 層に分けて慎重に密度管理を行いながら締固めを行い、直径 20cm、高さ 40cm の大型三軸試験用の供試体を作製した。

さて、堤防法面の浸透時のすべり崩壊は、有効応力の低下による主働破壊であるため、大きな前兆もなく一気に発生する。そのため、堤防のせん断抵抗を正確に評価するには、堤防土の骨格構造が変化する閾値を把握する必要がある。その方法が提案する吸水軟化試験²⁾であ

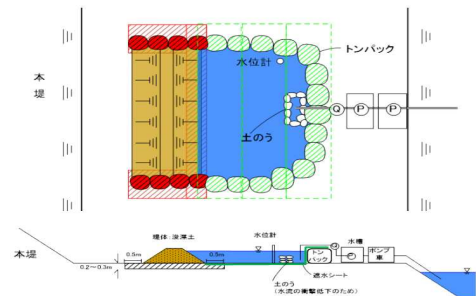


図 1 堤体模型概略図¹⁾



写真 1 堤体模型全体の様子



写真 2 堤体使用材料



写真 3 切削による越流の様子

る。吸水軟化試験は三軸試験装置を用いた試験であるが、所定の異方応力状態から、軸差応力を一定に保ちつつ間隙水圧を徐々に上昇させることによって土を破壊に至らしめる試験である。有効応力経路を精密に制御することにより、対象土の骨格構造が急激に変化しはじめる有効応力条件を探索することを目的とする。実際に、供試体は破壊に至る直前まで軸ひずみ、体積ひずみともにほとんど発生しない。通常の $\overline{CU}$ 三軸試験でも、変相状態を用いてその閾値を評価することはある程度可能であるが、低有効応力条件下にある土の「軟化」の閾値を精度良く見つけることは容易ではない。たとえ低応力条件下で丁寧に三軸試験を実施しても、土の構造を壊して強度を評価する通常の圧縮試験では、軟化の閾値を求めることには必ずと限界があり、吸水軟化試験の方がはるかに合理的、高精度かつ簡便である。

本報では、載荷速度 0.1%/min の単調載荷で行った圧密非排水せん断試験($\overline{CU}$)試験と上記の方法で初期せん断として 15kPa と 25kPa の軸差応力を与えて実施した吸水軟化試験の結果を示す。

4. 三軸試験結果

図 3 に三軸試験結果を示す。 $\overline{CU}$ 試験の結果より、せん断初期に大きく塑性圧縮を起こし、軸ひずみ 5%程度でわずかに変相が見られることから、ややゆる詰め材料であることがわかる。吸水軟化試験の有効応力経路は水平線で表され、有効応力の低下に伴い右から左に推移するが、 $\overline{CU}$ 試験の破壊線の左側まで到達している。土の軟化の閾値を破壊応力比で評価する場合、本試験においては、吸水軟化試験による低有効応力条件下での破壊応力比は、通常の $\overline{CU}$ 試験で得られるものより大きく、低有効応力では軟化しづらいことがわかる。

図 4 に示すモールの応力円より、 $\overline{CU}$ 試験の内部摩擦角は 39 度と比較的大きい。一方、吸水軟化試験においては、軸ひずみが急増して急激に吸水軟化し、供試体の骨格構造が大きく変化する時点の有効応力状態を用いてモールの応力円を作成している。その結果、 $\overline{CU}$ 試験結果と比較すると内部摩擦角は小さくなったものの粘着力は 6kPa と比較的大きな値を示し、低拘束圧下では吸水軟化試験の破壊規準線の方が、 $\overline{CU}$ 試験による破壊規準線を上回ることが示された。ここでは、実務の設計を意識して内部摩擦角と粘着力の強度定数を示しているが、個々の値に物理的な意味があるわけではなく、せん断強さを規定する破壊規準線のパラメータと考えるべきである。そのように考える場合、必ずしも破壊規準線は直線である必要はないが、仮に直線とした場合には、吸水軟化試験によってせん断応力に大きな切片、すなわち粘着力が評価される。これは礫材料が極低有効拘束圧条件下でも粒子のかみ合わせによってある程度のせん断強さを有するためと考えて良い。模型実験の際、越流後も安定していた堤防法面の状態等から判断すると、今回の吸水軟化試験で評価された比較的大きな粘着力、すなわち最小せん断強さは、実際の模型堤防においても発揮されていたと考えられる。

以上より、一見ゆるづめの礫質土であっても、低有効拘束圧条件下においては、礫粒子同士の噛み合わせによって、浸透力時のすべり外力や越流水のせん断力に抵抗しうるせん断強さが発揮されると考えられる。

5. まとめ

浸透時のすべり破壊などを正確に評価するためには、低有効応力条件下にある土の「軟化」の閾値を精度良く見つけることが必要不可欠である。本報では、模型実験で越水しても破堤が進行しなかった礫質土の浸透耐性の評価を吸水軟化試験を用いて行った。その結果、低有効拘束圧条件下において、比較的大きなせん断強さが確認され、当該礫質堤体土が越流時に発揮した「粘り」を評価することができた。礫堤防の脆弱性が懸念される事例が山間河川の各地で散見されるが、本報のように材料特性を適正に判断すれば、対策優先度を下げることにつながれると考えている。

参考文献：1)杉井ら：小型堤防による越水から決壊現象における堤体粒度の影響，第 72 回土木学会年次学術講演会，2017。

2)小高ら：弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数に関する考查，第 70 回土木学会年次学術講演会，2015。

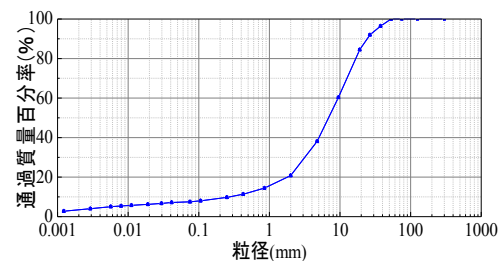


図 2 堤体試料 粒度分布

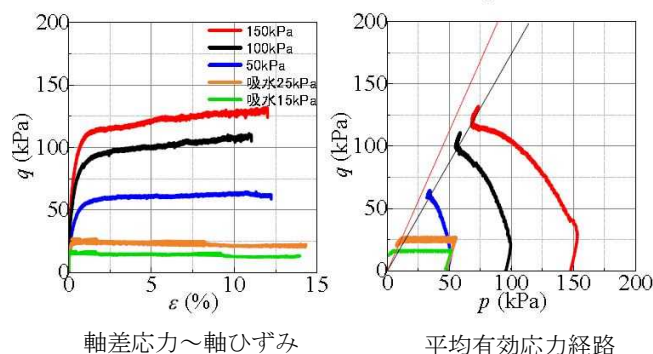
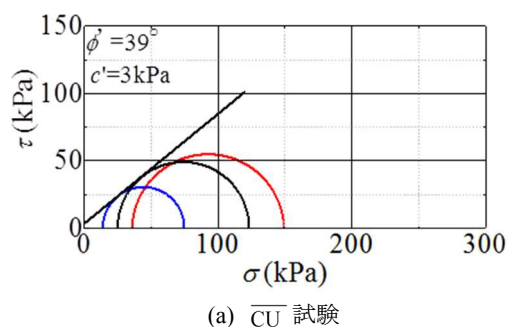
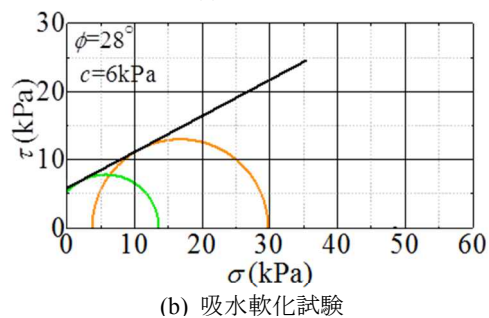


図 3 三軸試験結果



(a) $\overline{CU}$ 試験



(b) 吸水軟化試験

図 4 モールの応力円