

三軸試験による令和4年7月に決壊した半場川堤防土の力学特性の評価

名城大学大学院 学生会員 ○児玉 直哉
名城大学 正会員 小高 猛司
日本工営／名城大学特任教授 正会員 李 圭太
中部土質試験協同組合・技術部 正会員 久保 裕一

1. はじめに

河川堤防の質的検討にあたり、堤体盛土の締固め度およびせん断強度などの力学特性の評価は非常に重要である。我々の研究グループでは、これまで模型実験や現地堤体土を用いた室内試験を実施し、河川堤防の堤体崩壊は強度特性が大きく影響することを示してきた。本報では、令和4年7月27日、大雨による川の増水により決壊した愛知県安城市の半場川の右岸堤防4.4km付近（高さ約2.6m、幅約10m）を題材とする。令和5年2月の被災堤体の復旧工事にあわせて実施した被災箇所における堤防の開削調査¹⁾にて、堤体から直接採取した乱れの少ない試料と乱した試料を用いて、その力学特性を三軸試験（通常の $\overline{\text{CU}}$ 試験と本研究グループがこれまで提案してきた吸水軟化試験²⁾）によって検討する。

2. 試料の概要と試験の条件

吸水軟化試験とは、比較的低い一定軸差応力条件下で間隙水圧を徐々に増加させ破壊に至らしめることで、低ひずみレベル、低い平均有効応力レベル下での土の軟化時の強度定数を高精度で探索できる試験である。今回使用した三軸試験用の試料は、川表、川裏の2か所で採取した乱れの少ない試料と乱した試料である。川表、川裏における乱した試料の粒度分布を図1に示す。乱れの少ない試料は川表、川裏それぞれの地点で簡易打ち込みサンプラーを用いて直径65mm、長さ500mmの塩ビ管で採取した後に凍結させた上で規定寸法（直径50mm、高さ100mm）に成型したものを供試体（以下、不攪乱供試体）として三軸試験を実施した。三軸試験に用いた不攪乱供試体の間隙比は川表0.59~0.79、川裏0.47~0.57であり、川表では大きなばらつきが見られた。これはサンプリング時の乱れが要因の一つとして考えられる。乱した試料については、自然乾燥後に初期含水比10%に調節した後、川表、川裏でそれぞれ所定の締固め度になるよう突き固めて再構成した供試体を用いて三軸試験を実施した。供試体の締固め度 D_c は、現場締固め度（川表83.3%、川裏83.1%）と90%のそれぞれ2通りである。今回の三軸試験について、 $\overline{\text{CU}}$ 試験は拘束圧50、100、150kPaの3通り、吸水軟化試験は拘束圧50、100kPaの2通りで実施した。

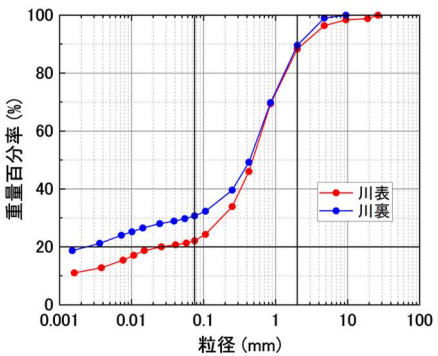


図1. 粒径加積曲線

3. 三軸試験結果

表1に三軸試験の有効応力経路から読み取った応力比、図2と3は有効応力経路である。表1について、限界応力比は $\overline{\text{CU}}$ 試験の軸差応力のピーク値または変相点で整理した応力比、破壊応力比は吸水軟化試験の破壊点で整理した応力比を示す。図2、3について、赤、青、黒色の3線で $\overline{\text{CU}}$ 試験、橙、緑色の2線で吸水軟化試験の有効応力経路を示す。また黒色の直線で $\overline{\text{CU}}$ 試験の限界応力比、桃色の直線で吸水軟化試験の破壊応力比を示す。なお、グラフ(c)、(f)の凡例に示す数字は不攪乱供試体に用いた試料番号を示す。

表1. 応力比（有効応力経路より）

試料採取位置	川表			川裏		
供試体	(a) 再構成 $D_c=83.3$	(b) 再構成 $D_c=90$	(c) 不攪乱	(d) 再構成 $D_c=83.1$	(e) 再構成 $D_c=90$	(f) 不攪乱
限界応力比($\overline{\text{CU}}$)	0.87	1.41	1.03	0.84	0.84	1.19
破壊応力比(吸水軟化)	1.08	1.47	1.15	0.65	1.19	1.43

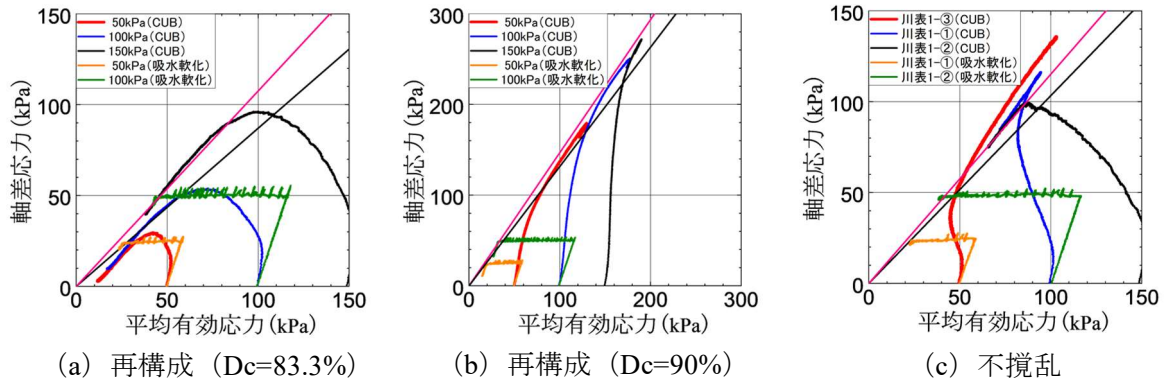


図 2. 有効応力経路 (川表)

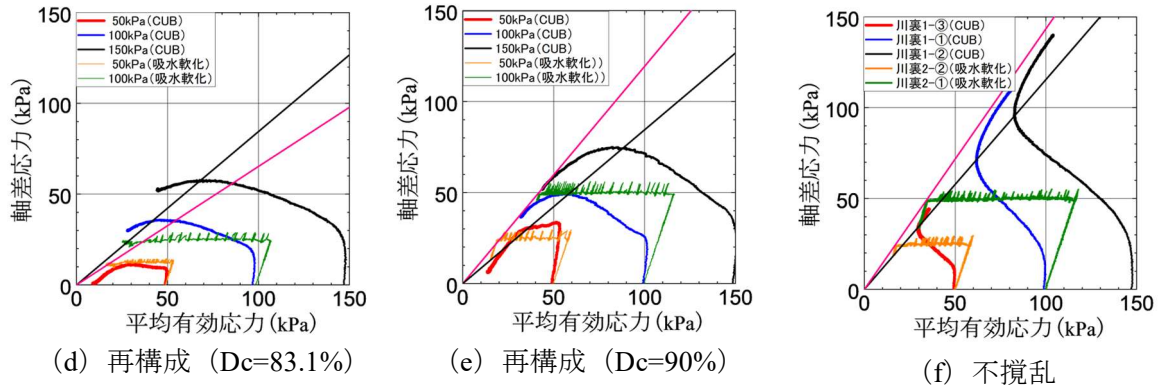


図 3. 有効応力経路 (川裏)

まず、 $\overline{CU}$ 試験結果における再構成供試体の締固め度が力学特性に及ぼす影響に着目する。図2の川表のグラフ(a), (b)を比較すると、 $D_c=90\%$ あれば初期に弾性が卓越した密詰めの砂質土に見られる挙動を示し、限界応力比 1.41 と比較的高いせん断強度を有することが分かる。図3の川裏のグラフ(d), (e)を比較すると、いずれも軸差応力のピークを示した後に塑性圧縮を伴うひずみ軟化挙動に転じる傾向を示し、 $D_c=90\%$ あっても限界応力比 0.84 と低いせん断強度を示した。

次に、 $\overline{CU}$ 試験結果における不攪乱供試体に着目する。図2のグラフ(c)と図3のグラフ(f)を見ると、川表、川裏ともにせん断初期に塑性圧縮挙動を示し、変相後は正のダレイタンシーの拘束によりひずみ硬化挙動を示した。これは中密な砂質土にみられる挙動である。グラフ(c)を見ると拘束圧ごとにそれぞれ異なる挙動を示しているが、これは供試体ごとの間隙比のばらつきが原因の一つと考えられる。表1から、限界応力比は川表 1.03, 川裏 1.19 である。また、限界応力比について川表、川裏それぞれで再構成（現場締固め度）と不攪乱を比較すると、ともに不攪乱の方が高いせん断強度を示しており、川裏ではそれが顕著である。

最後に吸水軟化試験結果について着目する。特に不攪乱供試体について見ていく。図2の川表のグラフ(c)では、破壊応力比と限界応力比は同程度であり、破壊応力比は 1.15 である。したがって、低平均有効応力レベル下で高いせん断強度は期待できないといえる。図3の川裏のグラフ(f)では、破壊応力比は限界応力比に比べてやや傾きが大きく、破壊応力比は 1.43 である。したがって、川表と比較すると、低平均有効応力レベル下で比較的高いせん断強度が期待できるといえる。すなわち、川表は川裏に比べて浸透時のすべり破壊への耐性が低い堤防材料であるといえる。

4. おわりに

半場川決壊箇所周辺堤防の川表法尻において、洗堀や吸出しが原因と考えられる大小の陥没が複数確認されていた。今回の吸水軟化試験で示した川表材料の浸透時における脆弱性は、その現場状況と調和的な一面もある。本報で得られた強度特性を用いて決壊の原因等の検討を今後行う予定である。

参考文献：1)児玉ら：令4年7月に決壊した半場川堤防の力学特性の評価，第35回中部地盤工学シンポジウム論文集，2023。 2)小高ら：河川堤防の浸透時のせん断強度試験法，第7回河川堤防技術シンポジウム論文集，2019。