

細粒分が卓越した疑似粘性土堤防の強度評価の注意点

三軸試験 中間土 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
 中部土質試験協同組合 国際会員 久保 裕一
 土木研究所 国際会員 石原 雅規
 名城大学大学院 学生会員 ○中山 雄人

1. はじめに

近年、集中豪雨などにより河川堤防の浸透破壊やすべり破壊による被災が多数報告されている。本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力学特性に大きく影響することを示してきた。本報では、平成 29 年台風 21 号による大雨によって、延長約 100m、法肩部の段差約 1.2m にわたって法すべりを起こした長良川の支川である犀川の堤防の変状箇所での調査時に不攪乱試料を採取し、 \overline{CU} 試験と浸透時のせん断強さを評価できる吸水軟化試験²⁾を実施した。本研究グループでこれまでに実施してきた現地堤防土の物理特性と吸水軟化試験結果^{例えば 3),4)}を参照しつつ、犀川堤防のすべり崩壊の要因を検討する。

2. 試料概要

被災箇所付近で採取した犀川堤防土試料は細粒分を多く含むため、自然状態で直径 50mm、高さ 100mm の供試体に成形した。図 1 は三軸試験後の供試体の粒径加積曲線を示す。細粒分含有率 $F_c=80\sim 90\%$ (シルト分 60%程度) の細粒土であり、液性限界 $w_L=37.5\%$ 、塑性指数 $I_p=15.5$ の低液性限界の砂混じり粘土に分類される。図中のすべり上方およびすべり下方 (以降、上方および下方と略す) とは、すべり面の上側および下側の土塊で採取した試料であり、数字は採取チューブの番号である。図 2 に一軸圧縮試験結果を示す。比較的小さな破壊ひずみで $q_u=80\text{kPa}$ 以上を發揮する比較的硬質な粘性土と評価できる。

3. 三軸試験結果

図 3, 4 にチューブ毎に実施した \overline{CU} 試験結果を示す。変相後に軸差応力が増加する一見過圧密粘土の挙動を示し、限界応力比は 1.5 程度となった。また、変相後の硬化に転じるひずみは 1~2% 程度と小さく、この \overline{CU} 試験結果のみで判断すると犀川堤体土は比較的硬質な過圧密粘土と判断できる。

本研究グループでは、浸透時のすべり破壊の耐性を適切に評価するため、三軸試験機を用いた吸水軟化試験を提案している^{2),3),4)}。吸水軟化試験は、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、低拘束圧、低ひずみ条件下で破壊に到達する有効応力を高精度で探索する試験法である。これまで複数の現地堤体試料を用いた吸水軟化試験によって、堤体土の浸透すべり破壊に対する耐性をパターン化して評価できることを示しており⁴⁾、ここで簡単に説明する。図 5 の実線は \overline{CU} 試験での限界応力比を、破線は吸水軟化試験での破壊応力比を示す。左図は低有効応力下においても両試験の応力比が同程度の値を示し、低応力下でも高いせん断強度が期待できず、浸透に脆弱である (パターン 1)。中図は低応力下でのみ、高いせん断強度を發揮する (パターン 2)。右図はどの応力下でも高いせん断強度を發揮する (パターン 3)。図 6, 7 に吸水軟化試験の結果を示す。有効応力経路には、図 3, 4 の \overline{CU} 試験の結果も重ねて再掲する。有効応力が大きく減少して破壊応力比に

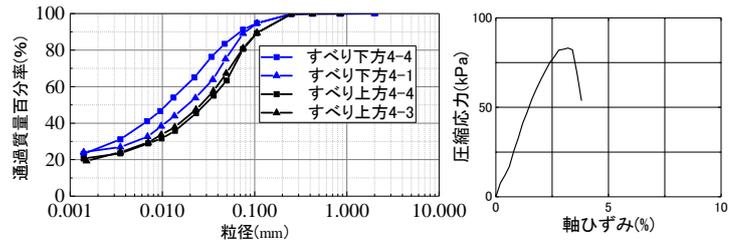


図 1 犀川堤体土粒径加積曲線

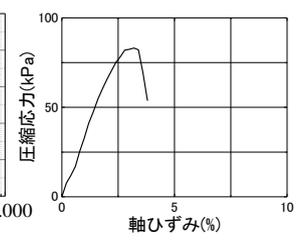


図 2 一軸圧縮試験結果

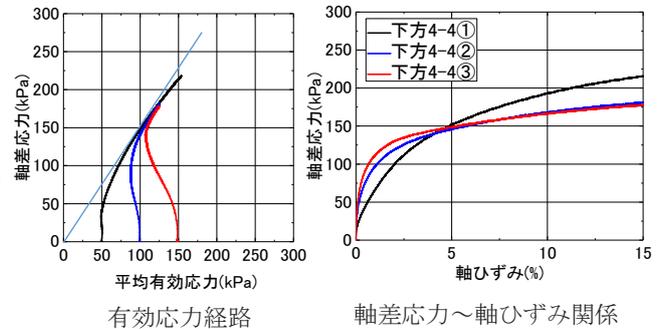


図 3 すべり下方試料の \overline{CU} 試験結果

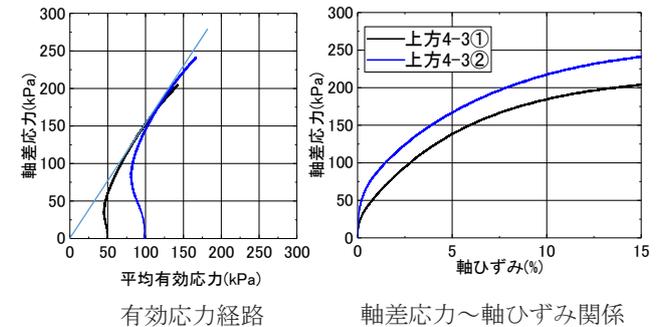


図 4 すべり上方試料の \overline{CU} 試験結果

到達する時の軸ひずみはわずか 1~3%であり、到達後に一気に軸ひずみが増加する。図には示していないが、破壊応力比の到達前にはほとんど発生していない体積ひずみも、到達後に軸ひずみの増加とともに急激に増加する。すなわち、吸水軟化試験によって決定される破壊状態は、骨格構造が急激に崩壊する有効応力状態である。吸水軟化試験で得られる破壊応力比 q/p' は 1.5 程度となり、 \overline{CU} 試験の破壊応力比とほぼ

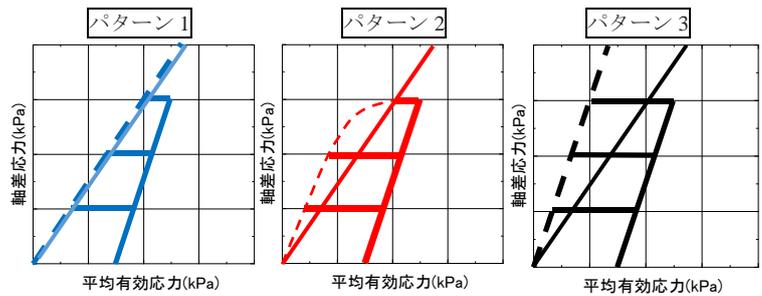


図5 吸水軟化試験パターン分類

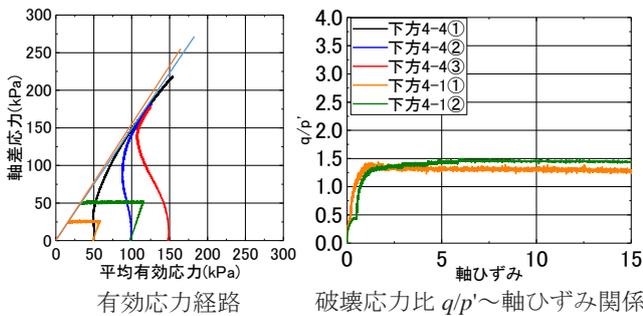


図6 すべり下方試料の吸水軟化試験結果

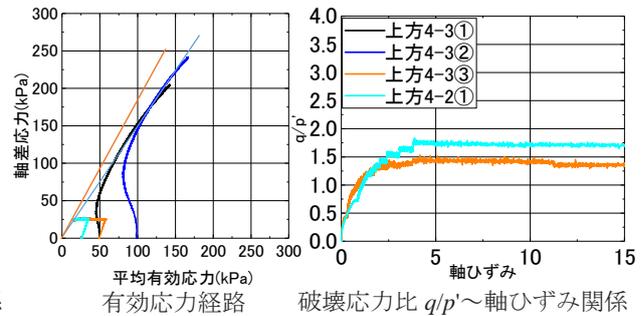


図7 すべり上方試料の吸水軟化試験結果

同じであるが、図7に示す初期有効拘束圧 50kPa の試験においては、 \overline{CU} 試験の破壊応力比と比べやや大きくなるものもあった。また、別途土木研究所で実施した吸水軟化試験では、さらに低有効応力条件下では、せん断強度を發揮することが示されており⁵⁾、パターン2に分類されると判断した。すなわち、ごく低い有効応力条件下では比較的高いせん断強度を發揮するが、有効応力状態がある程度大きくなると浸透に対して脆弱な砂質土に近い性状を示す。

4. 浸透すべり耐性と土質特性との関連性

犀川堤体土の浸透すべり耐性をより詳細に評価するため、これまで本研究グループで実施した3種の現地堤防土、すなわち、石川県の梯川³⁾、宮城県の渋井川²⁾および青森県の二ツ森川⁴⁾の粒径加積曲線を図8~10に示す。梯川、渋井川、二ツ森川の堤防土の塑性指数 I_p は、それぞれ 8, NP (非塑性), 1.4 であり、吸水軟化試験による図5による浸透すべり耐性は、梯川がパターン2で、他の2つはパターン1であった。本報の犀川堤防土は、粒度分布と I_p から図8に示す梯川堤体土に近いと判断でき、吸水軟化試験においても梯川堤体土と同様にパターン2に分類できた。ただし、せん断強度が低下する有効応力は、犀川堤防土の方が小さかったため、梯川堤防土よりも浸透すべり耐性は低いと考えられる。

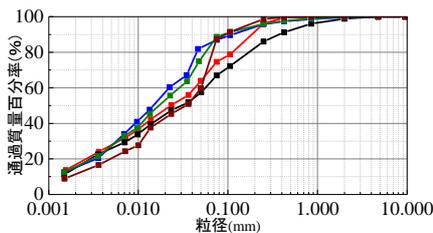


図8 梯川堤体土粒径加積曲線

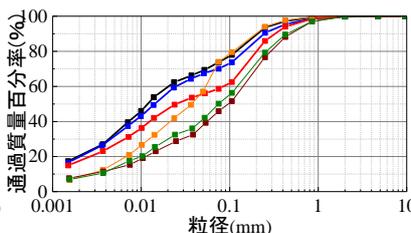


図9 渋井川堤体土粒径加積曲線

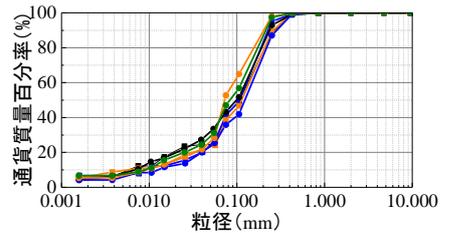


図10 二ツ森川堤体土粒径加積曲線

5. まとめ

降雨による法すべりを起こした犀川堤防土は、粒度試験や一軸圧縮試験、さらには \overline{CU} 試験の結果からも硬質な粘性土と判断でき、通常では比較的すべり破壊に対しては安全性の高い堤防と判定されると考えられる。しかしながら、吸水軟化試験の結果からは、有効応力レベルがやや高くなると砂質土の性状を示す堤体材料であることも判明した。人工盛土である河川堤防は、粘性土と雖も砂質土として扱うべき事例があることに注意すべきである。今回のすべり破壊を円弧すべり解析で説明するために適切なせん断強度については土木研究所のチームが別途詳細に検討している⁵⁾。本研究を実施するにあたり、中部地方整備局及び木曽川上流河川事務所に多大なる協力を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献: 1)石原ら：法すべりが生じた犀川堤防における崩壊範囲に係る調査，第54回地盤工学研究発表会，2019。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察，第70回土木学会年次学術講演会，2015。3)小高ら：吸水軟化試験における河川堤防の低拘束圧下のせん断強度の評価，第5回河川堤防技術シンポジウム，2017。4)小高ら：河川堤防の浸透破壊と堤体材料の土質試験との関連，第6回河川堤防技術シンポジウム，2018。5)富澤ら：細粒分を多く含む犀川堤防の法すべり箇所におけるせん断強度の推定，第54回地盤工学研究発表会，2019。