

河川堤防土を適正に強度評価するための室内試験法

A Laboratory test method for appropriate strength evaluation of river embankment soils

中山雄人¹, 小高猛司², 李圭太³, 久保裕一⁴, 李朝暉¹, 石原雅規⁵

1 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻

2 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp

3 日本工営株式会社

4 中部土質試験協同組合

5 国立研究法人土木研究所

概 要

本研究グループではこれまで、礫質土から粘性土まで様々な現地河川堤防土を採取し、その室内土質試験を実施してきた。その結果、過去に被災経験が無いにも拘わらず、三軸圧縮試験においてせん断強度が低く評価される礫質堤体土や、細粒分を多く含む比較的硬質であるにも拘わらず湿潤時にすべり破壊した粘性土質堤体土があり、現行の試験法だけでは材料特性の評価が難しい堤体土が存在することが判明してきている。本論文では、河川堤防土の浸透時のせん断強さを適正に評価するための室内試験法を提案する。具体的には、浸透時の低有効応力条件下では、摩擦によるせん断抵抗しか発揮しない粘性土堤体土や、逆にゆる詰めながらも高いせん断強さを発揮する礫質堤体土のような事例を示し、現行の三軸圧縮試験では評価が難しい河川堤防土の浸透時のせん断強さを適切に評価するために考案した吸水軟化試験を示す。

キーワード：河川堤防，浸透，せん断，三軸試験，吸水軟化試験

1. はじめに

近年、集中豪雨などにより長時間に及ぶ降雨が発生し、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。降雨による河川堤防の浸透破壊やすべり破壊のメカニズムとしては、降雨や河川水が堤体内に浸透し、堤体内の有効応力が低下し、せん断強度が低下することによって崩壊が生じることが考えられる。従来の河川堤防の照査法では、透水性が高く、かつ、一般にゆる詰めであるためにせん断強度が低く評価されがちな礫質土堤防は、浸透破壊やすべり破壊に対して脆弱であると判断されやすい。その一方で、透水性が低く、かつ、粘着力を有する粘性土の堤体は、円弧すべり解析による安全率は高く計算され、安全性が高いと評価されることが多い。

現行の圧密非排水三軸圧縮試験（以下、 \overline{CU} 試験）で得られる土の強度定数は、完全非排水条件で土を定体積に拘束したまま無理矢理に到達させた軸差応力の最大時点の有効応力状態で決定される。しかし、浸透による堤防崩壊は、堤体内部の間隙水圧上昇に伴う有効応力の低下によって発生するため、現行の三軸試験では破壊時に到達させるせん断条件も有効応力経路も大きく異なることから、堤体土によっては、 \overline{CU} 試験で得られる強度定数では堤防の浸透時の安定性評価が難しい場合がある。

本研究グループではこれまで、礫質土から粘性土まで

様々な現地堤体土の室内三軸試験を実施してきた。その中には、過去に被災経験が無いにも拘わらず、安全率が低く評価される礫質土堤防や、逆に細粒分を多く含む比較的硬質な粘性土堤体であるにも拘わらず湿潤時にすべり破壊した粘性土堤防から採取した試料も含まれており、現行の室内試験を含む照査法の問題点が明らかとなってきた。本論文では、河川堤防の浸透時の破壊条件、すなわち低有効応力条件下で適正な強度評価を行うための吸水軟化試験を用いた堤防照査のための室内試験法を提案する。

2. 対象とした試験試料の概要

本研究で使用する試験試料は岐阜県の犀川²⁾と青森県の二ツ森川³⁾の細粒堤体土、ならびに岡山県の小田川⁴⁾と高知県の物部川⁴⁾の礫質堤体土である。犀川と二ツ森川はそれぞれ被災しており、すなわち、犀川は平成29年台風21号により延長約100m、法肩部の段差約1.2mにわたって大雨による降雨のみで法すべりを起こしており、一方の二ツ森川は、平成28年の台風10号の出水によって越流はせずに浸透のみにより破壊した。

試料のサンプリング方法について説明する。犀川と二ツ森川の堤体土は内径71mm、長さ500mmの塩ビ管VU65を内管とする特製の2重管サンプラーを打ち込む方法を用いた。これを被災箇所付近で試料を乱さないよう丁寧に

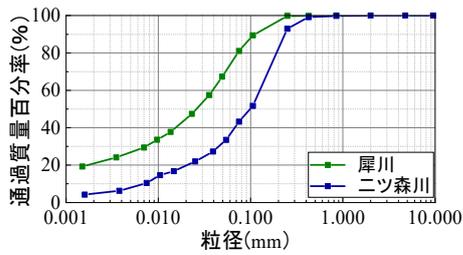


図1 細粒土堤防土の粒径加積曲線

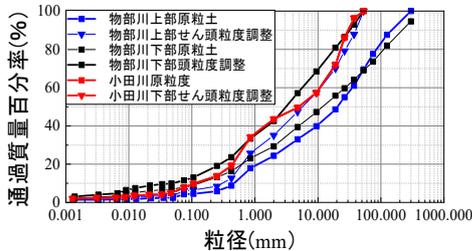


図2 礫質土堤防土の粒径加積曲線



写真1 物部川試料（堤体上部で採取）



写真2 物部川試料（堤体下部で採取）



写真3 小田川試料



写真4 犀川試料



写真5 二ツ森川試料

打ち込み採取した。犀川の被災箇所は細粒分を多く含むため、凍結させずに自然状態で直径 50mm、高さ 100mm の供試体に成形した。一方、二ツ森川については含水状態も低く、自然状態では成形は難しいと判断し、一旦凍結させてから、直径 50mm、高さ 100mm の供試体に成形した。また、小田川、物部川の礫質堤体土はバックホウを用いて大量に採取し、細粒分に注意しながら自然乾燥させ、四分法を用いて規定量まで均等に小分けした。その後、最大粒径 53mm でせん頭粒度調整して、3層で現場密度に調整し直径 200mm、高さ 400mm の供試体を作製した。

図1に犀川と二ツ森川の細粒堤体土の粒径加積曲線を示す。二ツ森川は全体的にシルト～砂分で構成されており、細粒分含有率は約40%の細粒分質砂である。一方、犀川堤体土はシルト分を約60%含む細粒土である。図2に物部川と小田川の礫質堤体土の粒径加積曲線を示す。どちらも最大粒径 53mm のせん頭粒度調整試料とともに原粒度試料も示す。いずれも石混じり礫質土である。写真1～5に試験に用いた試料の状況を示す。

3. 吸水軟化試験

吸水軟化試験とは、三軸試験装置を用いた試験法である。まず、 \overline{CU} 試験と同様に等方圧密過程を行う。そして、排水条件で所定の軸差応力の異方応力状態にした後、軸差応力を一定に保ちつつ間隙水圧を上昇させて供試体を破壊に至らしめる。間隙水圧は、供試体の軸変位が落ち着くことを確認しながら、1kPa ずつ徐々に上昇させる。この試験は、有効応力を精密に制御することによって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し、浸透条件下での破壊条件を正確に把握できる。なお、破壊に至る直前まで、間隙水圧を上昇させても供試体内へ吸水もせず、軸ひずみもほとんど発生しないが、ある有効応力状態に到達した途端に急激に軸ひずみが発生して破壊に至る。

本研究グループではこれまで複数の細粒土現地堤体試料を用いて吸水軟化試験を実施し、河川堤体土の浸透すべりに対する耐性の評価を行った⁴⁾。この結果3つのパターンに分類可能なことを明らかにした。図3は吸水軟化試験での有効応力経路のパターンを示したものである。図の実線は \overline{CU} 試験での限界応力比を、点線は吸水軟化試験での有効応力比（破壊応力比 q/p' ）を示す。パターン1（図3(a)）は、吸水軟化試験での q/p' が \overline{CU} 試験と同程度の比較的小さな応力比を示すものであり、土が摩擦抵抗以上のせん断強度を発揮しない砂質土に近い性質の堤防土がこのパターン1に分類できる。すなわち、浸透条件下での低有効応力では、摩擦抵抗角に応じたそれなりのせん断抵抗しか発揮しないので浸透に対しては脆弱な堤体土である。逆に、パターン3（図3(c)）は、低有効応力を含む広い応力条件下において、高い破壊応力比 q/p' 、すなわち引張破壊を表す最大値3に近い値を示すもので、浸透時の低有効応力条件下においても粘着力に相当する高いせん断強度を示す堤体材料であり、浸透に対しては比較的強固と判断

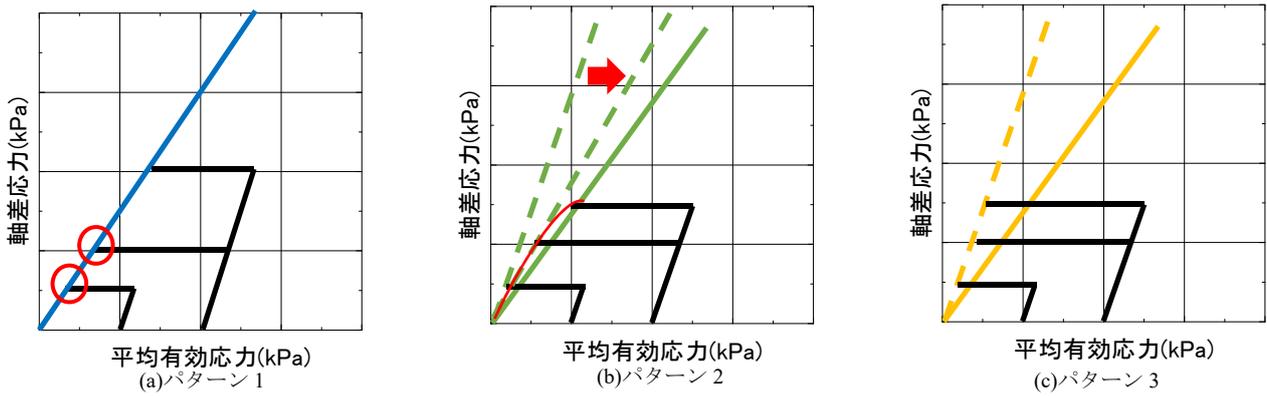


図3 吸水軟化試験による浸透すべり耐性の分類

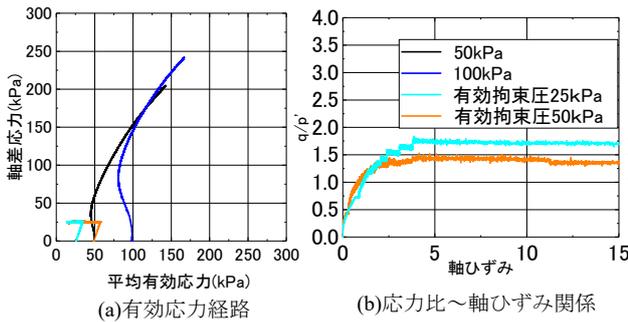


図4 犀川堤体土試験結果

できる。一方、パターン2 (図3(b)) は、低有効応力条件下での破壊応力比は引張強度相当の3に近い値を示すが、有効拘束圧が高くなるにつれて、せん断強度は通常の摩擦抵抗程度に減少するものであり、パターン1と3の中間に相当する。

4. 試験結果

4.1 細粒土堤体試験結果

図4に犀川堤体土の試験結果を示す。図4(a)には \overline{CU} 試験と吸水軟化試験のどちらの有効応力経路も示しており、図4(b)には吸水軟化試験のみの軸ひずみ～応力比 q/p' 関係を示している。 \overline{CU} 試験の有効応力経路は、変相後に塑性膨張を伴う硬化によって軸差応力は上昇し続け、限界応力比は1.5程度となった。また、別途実施した一軸圧縮試験による q_u は80kPaとなり、 \overline{CU} 試験の結果とあわせて判断すると写真5の見た目どおりに比較的硬質な過圧密粘性土と判断できる。一方、吸水軟化試験の結果に着目すると、破壊応力比は1.5～1.7程度となり、今回の有効応力条件下においては破壊応力比が小さく、図3におけるパターン1に分類すべき堤体材料と判断できる。すなわち、細粒分非常に多く、物理試験からは粘性土と判断される土であっても、浸透を伴う低有効拘束圧下においては、摩擦抵抗のみにしか期待できない砂質土に近い性状の堤体土であることが示された。

図5は、二ツ森川堤体土の試験結果を図4の犀川の結果と同様のグラフで示す。図5(a)の \overline{CU} 試験の有効応力経路から、ゆる詰め傾向の塑性圧縮を伴う正規圧密的な挙動を

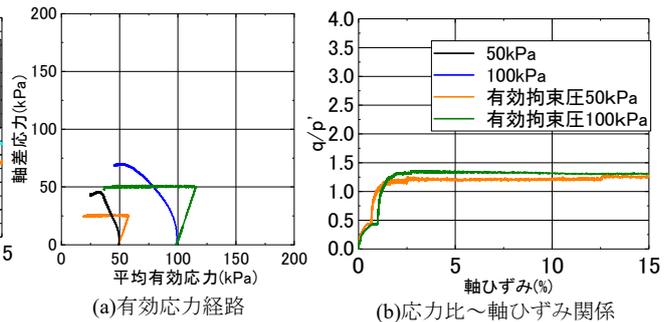


図5 二ツ森川堤体土試験結果

示しており、破壊応力比は1.3程度となった。吸水軟化試験においても、破壊応力比は1.3程度となった。したがって、犀川堤体土と同様に、図3のパターン1に分類でき、浸透条件下においては脆弱な堤体材料であると判断できた。なお、前述のとおり二ツ森川では、越流せずに堤体が浸透破壊したと推測されており、この試験結果はその推測を裏付けるものとなった。

4.2 礫質土堤体試験結果

次に物部川と小田川の堤防で採取した堤体土の \overline{CU} 試験と吸水軟化試験の結果を図6～8に示す。物部川では堤体上部と下部に分けて採取している。いずれの試料の \overline{CU} 試験結果においても、軸ひずみ1%程度で軸差応力が最大値となるひずみ軟化挙動を示し、有効応力経路は原点に向かう静的液状化を示している。これらの \overline{CU} 試験結果だけを見ると、これら礫質土堤防はゆる詰め構造であり、脆弱な地盤材料と判断せざるを得ない。一方、吸水軟化試験で到達する有効応力は、 \overline{CU} 試験の軟化時の有効応力経路の左側にわずかに飛び出しており、吸水軟化試験での破壊応力比は、最大軸差応力で評価する \overline{CU} 試験の限界応力比よりも大きくなるのがわかる。図6～8には(c)と(d)にそれぞれ、 \overline{CU} 試験と吸水軟化試験のモールの応力円を示すが、吸水軟化試験での破壊時有効応力のモールの応力円から得られる破壊規準線((d)の実線)は、 \overline{CU} 試験での破壊規準線((c)の実線と(d)の破線)と比べて、上部に位置しており、せん断強度が大きく評価される。すなわち、河川堤防の浸透レベルで発生する低有効応力状態においては、 \overline{CU} 試験だけでは礫質土のせん断強度を過小評価する可能性を示唆している。

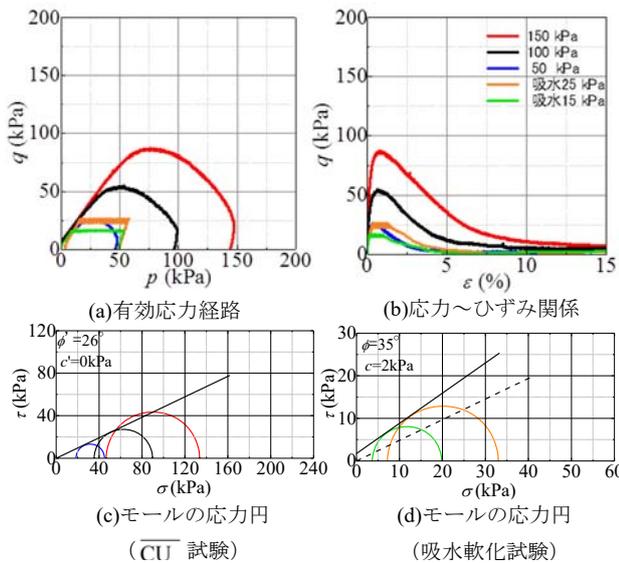


図6 物部川堤体土（上部採取試料）の試験結果

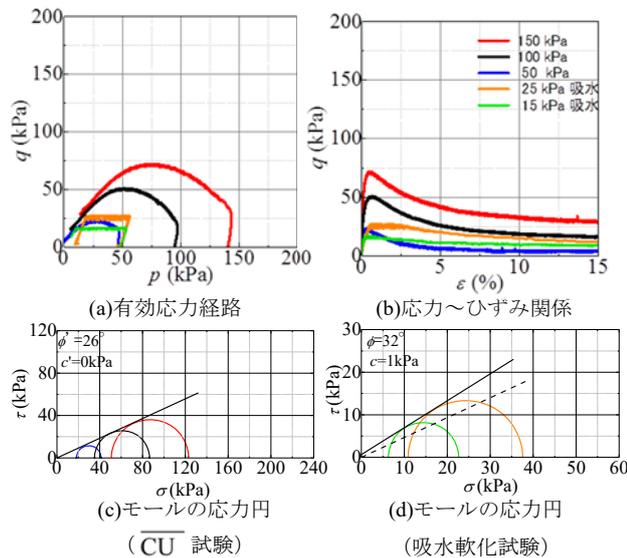


図7 物部川堤体土（下部採取試料）の試験結果

質土の場合には、過小評価をすることにつながり、過剰な対策をしてしまうことにつながる事が示された。

具体的には、犀川堤防土は細粒分 50%以上あることから粘性土と分類され、せん断強度は UU 試験や CU 試験で粘着力主体の強度評価がなされる。しかし、吸水軟化試験からわかるように、浸透時の低有効応力条件下においては、砂質土と同様の摩擦抵抗しか発揮せず、浸透に脆弱であることが明らかとなった。

一方、物部川や小田川のような礫質土堤体は、一般的に自然状態ではゆる詰め傾向であり、CU 試験で評価する強度定数は非常に小さくなる。しかし、吸水軟化試験の結果を踏まえると、礫質土堤防は低有効応力条件下においては比較的高いせん断強度を発揮することが確認でき、安全性はそれほど低くはない。そのことは、礫質土堤防で過去に大きな被災事例がない事実とも一致する。

以上より、現行の照査法では河川堤防の安全性を過大にも過小にも評価している可能性があるが、堤体土のせん断強度を評価する室内試験として吸水軟化試験を採用することにより、より精度の高い堤防の照査が可能となる。

参考文献

- 1) 小高猛司, 崔瑛, 李圭太: 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, pp.505-506, 2015.
- 2) 小高猛司, 李圭太, 久保裕一, 石原規則, 中山雄人: 細粒分が卓越した疑似粘性土堤防の強度評価の注意点, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.1013-1014, 2019
- 3) 小高猛司, 李圭太, 石原規則, 久保裕一, 森智彦, 中山雄人: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムと評価手法に関する研究, 河川技術論文集, ジウム, 第 24 巻, pp. 559-564, 2018.
- 4) 小高猛司, 李圭太, 石原規則, 久保裕一, 田中貴之, 梅村逸遊: 吸水軟化試験による河川堤防土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, pp.45-48, 2017.

CU 試験では完全非排水条件で無理矢理に軸圧縮応力を載荷するために、最大軸差応力に達した時点で相当量の塑性体積ひずみが発生、すなわち土の骨格構造が変化している。一方、吸水軟化試験では、破壊時の有効応力状態まで土の構造変化がほとんど発生しないため、初期状態の堤体が有するせん断強度の評価が可能となる。なお、吸水軟化試験の破壊規準線が低有効応力条件下で CU 試験の破壊規準線を上回るのは、礫粒子同士の噛み合わせによるせん断抵抗の発現などの要因が考えられる。

5. まとめ

本論文では、三軸圧縮試験機を用いた吸水軟化試験を実施することで、礫質土から細粒土までの様々な河川堤防土の浸透時に発揮するせん断強度を適正に評価できる試験法を示した。現状の河川堤防の照査法を適用すると、本論文で示した 2 つの事例においては、細粒土の場合には過剰な過大評価、すなわち危険側の評価をする恐れがあり、礫