地盤工学会誌
公益社団法人 地盤工学会
報告

堤防土のせん断強度の評価　～吸水軟化試験～

Evaluation of shear strength of levee soils　- Water absorption softening test -

小高　猛司（こだか　たけし）　名城大学理工学部　教授
e-mail: kodaka@meijo-u.ac.jp
李　圭太（り　けいた）　日本工営（株）　執行役員／名城大学　特任教授
石原　雅規（いしはら　まさのり）　（国研）土木研究所　上席研究員
久保　裕一（くぼ　ゆういち）　中部土質試験協同組合技術部　部長
児玉　直哉（こだま　なおや）　名城大学大学院理工学研究科　修士課程

キーワード：河川堤防，三軸圧縮試験，せん断強度，砂質土，吸水軟化試験

1. はじめに

我々の研究グループでは，表－1 に示す河川の堤防で現場調査を実施してきた。堤体土の力学特性を理解するために，自前で試験データを収集する必要に迫られて始めた活動であるが，2011 年に土木学会に堤防研究小委員会が発足し，翌年に堤防土の力学特性 WG が設置されたことで，土木研究所の情報収集力も加わり，産官学連携の本格的な調査活動が加速した。ほとんどの調査は，被災後の復旧時や樋管取替時の堤防開削工事に合わせて実施しており，物理探査に凝った時期もあるが，一貫して，試験試料採取と室内土質試験を必須とし，可能な限り現場透水試験を実施してきた。

本稿では，本調査活動を通して得た，浸透時の堤体土の強度特性の適正な評価法について述べる。特に，著者らが提案している吸水軟化試験とそれから得られる河川堤防の締固め管理の重要性について述べる。

表－1　堤防の現場調査した河川と堤防土の土質

島根県・	高津川	（2007. 9）	礫・砂
島根県・	江の川	（2007. 9）	礫・砂
鳥取県・	小鴨川	（2008. 9）	礫・砂
大阪府・	淀川	（2012. 2）	砂・粘
宮城県・	江合川，吉田川	（2012. 12）	砂・粘
高知県・	仁淀川	（2013. 9）	礫
北海道・	千歳川	（2013. 12）	砂・粘
愛知県・	庄内川	（2014. 1）	砂・粘
島根県・	斐伊川	（2014. 3）	砂
和歌山県・	紀の川	（2014. 4）	礫
大阪府・	大和川	（2014. 8）	砂・粘
新潟県・	信濃川	（2014. 9）	礫
京都府・	木津川	（2014. 11）	砂
山梨県・	釜無川	（2014. 12）	礫
鹿児島県・	川内川	（2015. 1）	砂（シラス）
宮城県・	渋井川	（2015. 11）	砂・粘
秋田県・	子吉川	（2016. 1）	礫・砂・粘
石川県・	梯川	（2016. 6）	砂・粘
岡山県・	小田川	（2016. 9）	礫・砂
熊本県・	緑川，白川	（2016. 11）	砂・粘
高知県・	物部川	（2017. 2）	礫
青森県・	二ツ森川	（2017. 2）	砂・粘
岐阜県・	犀川	（2018. 2）	粘
岡山県・	小田川	（2018. 11, 12, 2019. 3）	砂・粘
島根県・	国府川	（2020. 2）	礫
鹿児島県・	川内川	（2020. 11）	砂（シラス）
静岡県・	狩野川	（2020. 12）	粘・砂
岐阜県・	揖斐川	（2022. 1）	礫・砂
福井県・	九頭竜川	（2022. 5）	粘
愛知県・	半場川	（2023. 3）	粘・砂
岐阜県・	揖斐川	（2023. 12）	砂

※礫：礫質土，砂：砂質土，粘：粘性土

2. 堤防土のせん断強度評価

2.1 三軸圧縮試験

浸透時のすべり破壊の安定性評価に用いる強度定数は三軸圧縮試験で求められる。「河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）」[1)]では，砂質土・礫質土は，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験と CD 試験を推奨のうえ，CU 試験も可とされている，一方，粘性土は，CU 試験を推奨のうえ，UU 試験と $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験も可とされている。しかしながら，堤防の浸透時の法すべりは低有効応力レベル下で主働崩壊的に低ひずみレベルで発生し始める現象であるため，透水性の高い礫質土や砂質土であっても，高有効応力，高ひずみレベルに到達した状態でせん断強さを評価する CD 試験より，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験が適切である。$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の強度定数は，非排水せん断条件下において有効応力で整理し

て得られるものであるが，低ひずみレベルにおいてはCD 試験で得られる強度定数とほぼ等しいことから，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験は砂質土が低ひずみレベルで発揮する排水せん断強さを評価するための試験であると解釈する。

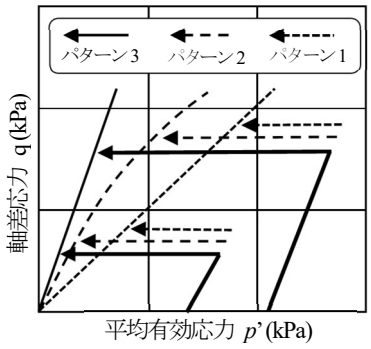
一方，粘性土とは，細粒分含有率 F_c が 50%以上の土質であるが，土堤のような人工盛土の場合には，自然堆積粘土地盤とは性質が異なる。CU, UU 試験ともに，地盤材料を粘着力が卓越した c 材として非排水せん断強さを評価することを前提としているため，平常時は良くても，浸透時に粘着力を消失するような土質であると，それらの試験で得た強度定数で安定解析を行うと危険側となる。後述のように，河川堤防の場合，粘性土と分類される堤体土のほとんどは，浸透時には粘着力を消失し，砂質土と同様の力学特性を呈する。そのため，浸透時のすべり破壊を対象とする場合，分類上は粘性土であっても $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験を採用すべきである。ただし，全土質に共通して，非現実的な非排水条件下で正のダイレイタンシーによって軸差応力が増加し続ける密詰め構造の土質では，すべり破壊発生時を想定して変相状態で強度定数を決定することが望ましい。

以上は地盤工学会基準の三軸圧縮試験に限定した話であるが，次節ではより有効な試験法について述べる。

2.2 吸水軟化試験

浸透による堤体変状は有効応力の低下によって発生する。$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験は，非現実的な非排水せん断条件下で軸圧縮を増加させることによって破壊に至らしめる試験であり，強度定数を決定する際の有効応力状態は，出水時の堤防法面の有効応力状態とは異なる。そのため筆者らは，低有効応力条件下でのせん断強さの評価に特化した「吸水軟化試験」[例えば2),3)]を提案している。

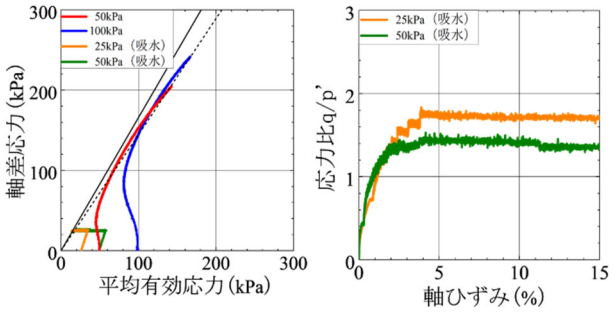
まず吸水軟化試験について概説する。圧密過程終了後，堤防法面での異方応力状態を模擬するために排水せん断条件で所定の軸差応力まで初期せん断を与える。ここまでは CD 試験と同様の手順である。次に，セル圧と軸差応力を一定に保ったまま，浸水による有効応力の低下を模擬して，排水条件下で間隙水圧のみを徐々に上昇させる。間隙水圧は，供試体の軸変位が落ち着くことを確認しながら，1～数 kPa ずつ徐々に上昇させる。この試験は，有効応力を精密に制御することによって対象土の骨格構造が急激に変化しはじめる有効応力状態を探索し，浸透条件下での破壊条件を正確に把握できる。なお，間隙水圧を上昇させても，破壊に至る直前まで供試体内への吸水も軸ひずみの増加もわずかずつしか発生しないが，限界の有効応力状態に到達した途端に急激に軸ひずみが増加し，供試体内への吸水も急増して破壊に至る。



図－1　吸水軟化試験の 3 パターンの有効応力経路

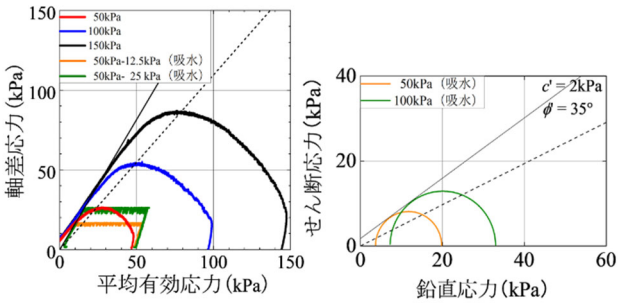
著者らの研究グループでは，これまで多くの堤防土を用いて吸水軟化試験を実施し，耐浸透すべり性能の評価を行ってきた結果，図－1 に示す有効応力経路において三つのパターンに分類した。すなわち，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の破壊応力比 q/p' で破壊するパターン 1，引張破壊を意味する有効応力比 $q/p'=3$ まで到達するパターン 3，そして，パターン 1 と 3 の中間的なパターン 2 である。パターン 3 の堤体土は，浸透時の低有効応力条件下においても粘着力に相当する高いせん断強度を示す堤体材料であるが，著者らの試験においても堤体土ではほとんど経験がない。表－1 に示す粘性土堤防のほとんどの堤体土はパターン 1 を示す。すなわち，浸透時の低有効応力条件下では粘着力を発揮せず，砂質土と同様に内部摩擦角に応じたせん断抵抗しか発揮しない ϕ 材として扱うべき堤体土であった。

図－2 に F_c=80%の犀川堤体土の試験結果 [4), 5)]を示す。図－2(a)は $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験と吸水軟化試験の有効応力経路，図－2(b)は吸水軟化試験のみの軸ひずみ～有効応力比 q/p' 関係である。別途実施した一軸圧縮試験による q_u は 80kPa であり，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験結果とあわせると比較的硬質な過圧密粘土と判断できる。しかし，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 程度で $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の限界応力比とほぼ同一であり，図－1 に示すパターン 1 に分類される堤体材料である。すなわち，



(a) 有効応力経路　(b) q/p'～軸ひずみ関係

図－2　犀川堤防土の試験結果



(a) 有効応力経路　(b) モールの応力円

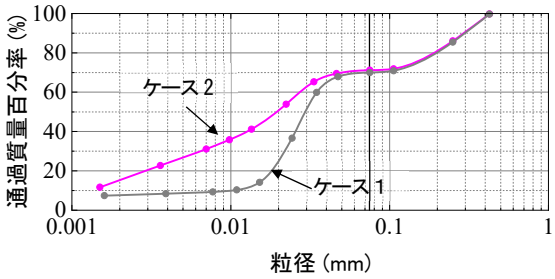
図－3　物部川堤防土の試験結果

F_c が大きく粘性土と分類される堤体土であるが，浸透を伴う低有効拘束圧下においては，摩擦抵抗しか期待できない砂質土に近い性状であることが示された。実際，この犀川堤防では，大雨により大規模法すべりを起こしている[6]が，q_u 値や CU 試験の強度定数での安定解析ではそのすべり破壊を説明することはできず，吸水軟化試験による評価がもっとも合致した[7]。

次に礫質土への適用性を示す。図－3 に物部川の礫質堤体土の $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験と吸水軟化試験の結果[5]を示す。図－3(a)の $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の有効応力経路を見ると，軸差応力が最大となった後，塑性圧縮を伴うひずみ軟化をしていることから，この礫質堤体土はゆる詰め構造の脆弱な地盤材料と判断することになる。一方，吸水軟化試験の有効応力経路で最終的に到達している破壊応力比は，最大軸差応力で評価する $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の限界応力比よりも大きくなる。図－3(b)に吸水軟化試験のモールの応力円と破壊規準線を示すが，破線で示した $\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の破壊規準線と比べて，せん断抵抗を大きく評価できることがわかる。物部川に限らず著者らが調査した礫質土堤防土のほとんどが同様のゆる詰め傾向であり，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験で評価すると ϕ' は非常に低い値となる。しかし，吸水軟化試験の結果は，浸透時の低有効応力状態では，粗い土粒子主体で構成される礫質土は比較的大きなせん断抵抗を発揮することを示唆しており，我が国の礫質土堤防で過去に浸透による大きな被災事例がない事実とも一致する。

3. 細粒土堤体の締固め管理の重要性

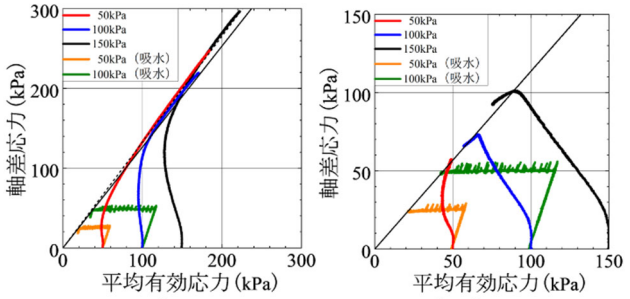
図－4 は人工的に再構成した粘性土供試体の粒径加積曲線である。いずれも細粒分含有率は F_c＝70％であり，粗粒分の 30％は三河珪砂 6 号であり，細粒分の 70％については，ケース 1 は DL クレイのみを混合した試料（非塑性），ケース 2 はカオリン 30％と DL クレイ 40％を混合した試料（塑性指数 I_p＝7.8）としている。締固め試験を実施して各ケースの最大乾燥密度を求めた上で，締固め度 D_c＝90％と 95％で供試体を作製し，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験と吸水軟化試験を実施した。



図－4　再構成細粒土試料の粒径加積曲線

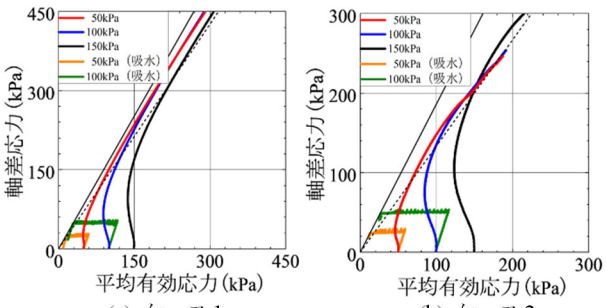
図－5 に D_c＝90％の場合の有効応力経路を示す。ケース 2 は，ケース 1 より粒度が良い締め固まりやすい土であることを反映して，最大乾燥密度が大きい。そのため，供試体の乾燥密度はケース 1 と 2 でそれぞれ，1.47 と 1.65g/cm^3 であり，ケース 2 の方がかなり大きい。しかし，試験結果を見ると，ケース 2 の方がゆる詰め傾向を示しており，図－6 に示す ϕ' の値もケース 2 の方が小さい。これは，締め固まりやすい細粒土においては，D_c＝90％の密度は容易に達成できる値であり，締固め基準値として不十分であることを示唆している。

図－7 に D_c＝95％の場合の有効応力経路を示す。供試体の乾燥密度はケース 1 と 2 でそれぞれ，1.55 と 1.74 g/cm^3 である。試験結果を見ると，ケース 2 も密詰め傾向となることがわかる。特筆すべきは，D_c＝90％の場合には，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験の限界応力比と吸水軟化試験の破壊応力比はほぼ等しかったが，D_c＝95％の場合には，明



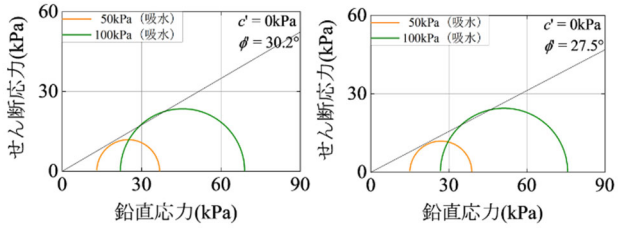
(a) ケース 1　(b) ケース 2

図−5　有効応力経路（D_c=90%）



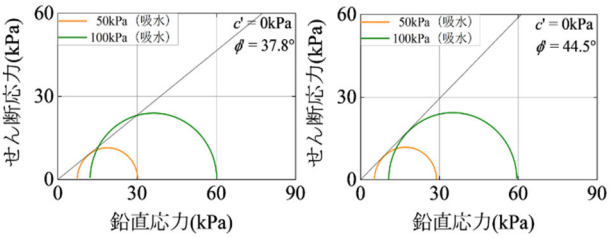
(a) ケース 1　(b) ケース 2

図−7　有効応力経路（D_c=95%）



(a) ケース 1　(b) ケース 2

図−6　モールの応力円と破壊規準線（D_c=90%）

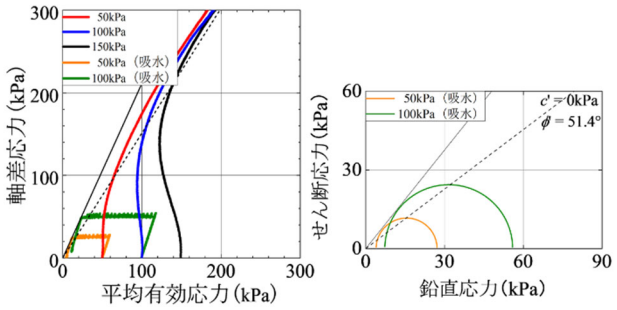


(a) ケース 1　(b) ケース 2

図−8　モールの応力円と破壊規準線（D_c=95%）

らかに吸水軟化試験の破壊応力比は大きくなっている。それを反映して，図−8 に示すように，ケース 2 の吸水軟化試験で得られるϕ'は極めて大きい。この結果は，締め固まりやすい粒度の良い土は，十分に締め固めることによって，はじめて強固なせん断強度を発揮することを示唆している。ただし，粘着力が発生するわけではなく，あくまで摩擦性材料，すなわちϕ材としてのせん断特性である。UU 試験で得られた粘着力c_uは，ケース 1 と 2 でそれぞれ 65 と 72 kPa と非常に大きい値であったが，浸透時にはそのような粘着力は決して発現しないことが吸水軟化試験から判断できる。

著者らの現地堤防調査では，堤体の現場密度を計測したうえで，その際に採取した試料で実施した締固め試験結果から現地堤体の締固め度を算定すると，ほとんどの粘性土堤体において D_c=90%を下回る。一方，例外的に十分な締固め度を示す粘性土堤防もある。図−9 は，九頭竜川堤防の試験結果[8]である。F_cはおよそ 70%であり，D_cは 100%近い値であった。吸水軟化試験の破壊応力比は$\overline{\mathrm{CU}}$試験の限界応力比を上回って 2 近くまでに到達し，吸水軟化試験で得られるϕ'は破線で示す$\overline{\mathrm{CU}}$試験（変相時）による値を大きく上回る 50 度以上となり，ϕ材としての性質ではあるものの，浸透時のすべり破壊耐性は大きいと判断できる。



(a) 有効応力経路　(b) モールの応力円

図−9　九頭竜川堤防土の試験結果

4. まとめ

吸水軟化試験は，浸透時における低有効応力条件下での堤防土のすべり耐性を評価するうえで非常に有効である。粘性土堤防であっても，浸透時には砂質土と同様に摩擦に起因するせん断抵抗しか発揮せず，さらに低いϕ'の場合が多い。これは，吸水軟化試験を実施することによってのみ，はじめてわかることである。一方，一見ゆる詰めと思われるような礫質土堤防，あるいは十分に締め固まった細粒土堤防においては，$\overline{\mathrm{CU}}$試験だけからはわからない高い耐浸透すべり性能を評価することができる。なお，細粒分をブレンドした購入土を用いて築堤する場合には，D_c=95%以上の締固め度を目標とすることが望ましい。

参考文献

1) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），2012.
2) 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講演集，Ⅲ-253, 2015.
3) 小高猛司・李圭太・石原雅規・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論文集, pp. 45-48, 2017.
4) 中山雄人・小高猛司・李圭太・石原雅規・久保裕一：降雨時に法すべりした犀川堤体土の力学特性の検討，平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会講演集，pp. 243-244, 2019.
5) 小高猛司・李圭太・久保裕一・石原雅規・中山雄人・李朝暉・藤田薫：河川堤防の浸透時のせん断強度，第 7 回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp. 35-36, 2019.
6) 石原雅規・佐々木哲也・富澤彰仁・佐々木亨・東拓夫・小高猛司・李圭太：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法，第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp. 983-984, 2019.
7) 富澤彰仁・佐々木亨・石原雅規・佐々木哲也：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講演概要集，pp. 985-986, 2019.
8) 児玉直哉・小高猛司・李圭太・久保裕一：吸水軟化試験による九頭竜川堤防土の浸透時の力学特性の評価，土木学会第 79 回年次学術講演会講演集，Ⅲ-444, 2024.

（原稿受理　2025.1.11）