

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

河川堤防 浸透 吸水軟化試験
堤防土, せん断強度

名城大学
建設技術研究所
土木研究所
中部土質試験協同組合
名城大学大学院
正会員 小高猛司
正会員 李 圭太
正会員 石原雅規
正会員 ○久保裕一
学生会員 田中貴之・梅村逸遊

1. はじめに

近年, 集中豪雨などにより堤防の漏水や越水, 場合によって決壊に至る被災も発生し, 河川災害対策が喫緊の大きな課題となっている。堤防決壊の多くは越流によるものが多いが, 2012 年の矢部川堤防の決壊に見られるように浸透による被災事例も報告されている。また, 堤防は古くから現地の河床材料で作られてきたものが多く, 築堤材料は地域によっても異なるばかりか, 同じ堤防断面の中にも複数の土質が存在する場合も少なくない。堤防土の安定解析を実施する場合の強度定数を求めるために, 堤体土質材料の粒径の大きさにかかわらず三軸圧縮試験が一般に用いられている。しかしながら, 浸透による堤体変状は, 堤体内部や堤体直下の基礎地盤内の有効応力の低下に起因して発生することから, 高い拘束圧やひずみレベルでせん断強度を評価する通常の三軸圧縮試験では浸透時の堤防の応力状態とは異なっており, それから得られる強度定数に対する評価も難しい。このため筆者らは, 低有効応力条件下でのせん断強度を評価することに適した吸水軟化試験を提案し¹⁾, 全国各地の開削調査で得られた礫質土から粘性土まで幅広い土質を対象とした実験を重ねている²⁻³⁾。本報ではこれらで得られた知見をいくつか紹介する。

2. 吸水軟化試験

吸水軟化試験の試験方法を概説する。まず「土の圧密非排水三軸圧縮 \overline{CU} 試験 (JGS-0523)」に準じ, 圧密過程を終了させる。次に実堤防法面の異方応力状態を再現するため, 等方圧密を終了させた供試体を排水条件で所定の軸差応力まで増加させ, 初期せん断を与える。この際, 細粒分が多い場合は, 軸差応力を与える載荷速度や載荷時の圧密に留意する。次に, 堤体内への浸透に伴う有効応力の低下を考慮するため, 初期せん断状態にある供試体を応力制御にて軸差応力を一定に保ちながら, 徐々に間隙水圧のみを上昇させ破壊に至らしめる。この際, 細粒分が多い場合は供試体内部に間隙水が十分浸透するように, 間隙水圧の上昇速度に留意する必要がある。また使用機器では小容量ロードセルを使用するなど, 機械に対する配慮も必要である。

3. 6号珪砂を用いた吸水軟化試験

3.1 実験条件

まず, 基礎的研究として珪砂を用いて実験を試みた⁴⁾。試料は三河珪砂 6号を使用し, 空中落下法にて $D_r=30, 40, 50, 60$ および 80%の密度の異なる 5種類の供試体を作製した。供試体はごく僅かな負圧を作用させ自立させ, 二重負圧法と背圧 200kPa を加え飽和化し, 飽和度 B 値 0.95 以上を確認し実験を行っている。今回は破壊応力比の確認のため通常の三軸圧縮試験も実施している。試験の拘束圧は 50kPa と 100kPa の 2種類, 吸水軟化として与える初期せん断応力は 25kPa と 50kPa とした。三軸試験のせん断速度は 0.1%/min, 吸水軟化試験の背圧の上昇速度は 5kPa/min とした。

3.2 試験結果

図 1 に吸水軟化試験の有効応力経路と三軸圧縮試験の限界応力比を示す。灰色実線で示す三軸圧縮試験の限界応力比は約 1.4 であるが, これは密詰め供試体の硬化挙動時の有効応力経路を参考に求めた値である。吸水軟化試験の有効応力経路では, x 軸から上昇する部分は排水条件で初期せん断を与えた部分であり, 傾きは 1:3 となり, ここから左に折れた水平部分が過剰間隙水圧を上昇させている部分を示す。左下に折れる崩壊部分に着目すると, ゆる詰め $D_r=30\%$ では緩やかに折れているが, 密詰め $D_r=80\%$ では急激に折れている。これは, 相対密度が高く密詰めの砂ほど急激に崩壊することを示している。三軸圧縮試験の限界応力比と比較して, $D_r=80\%$ では変曲点が左に位置し, $D_r=30\%$ では右に位置していることから, 密詰めになるほど低拘束圧条件下での浸透耐性は大きくなるのがわかる。時間~軸ひずみ関係の最大曲率部分を崩壊点とみなして, 相対密度と破壊応力比の関係を整理したものを図 2 に示す。破壊応力比は相対密度が高くなる程大きな値となる。いずれの拘束圧ならび初期せん断力によって大きな差異はないものの, 拘束圧 50kPa の低拘束圧条件において $D_r=30\%$ と $D_r=80\%$ で破壊応力比はやや高い値を示した。

Evaluation of shear strength of river embankment soils under low confining pressure using by water absorption softening test

T. Kodaka (Meijo Univerisy), K.-T. Lee (CTi Engineering),
M. Ishihara (PWRI), Y. Kubo (Geo-Labo Chubu),
T. Tanaka, I. Umemura (Meijo University)

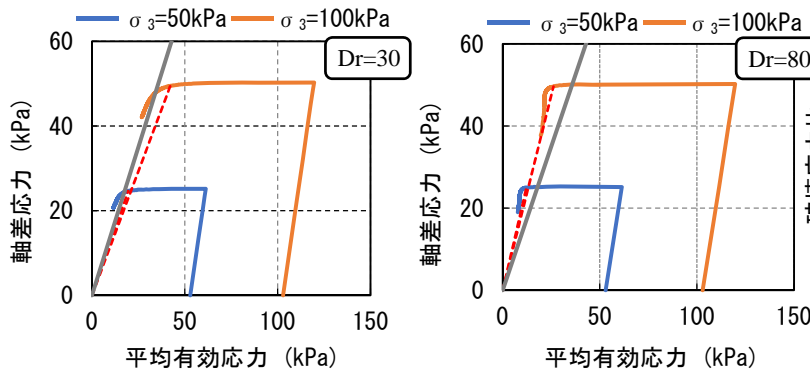


図1 6号珪砂での有効応力経路

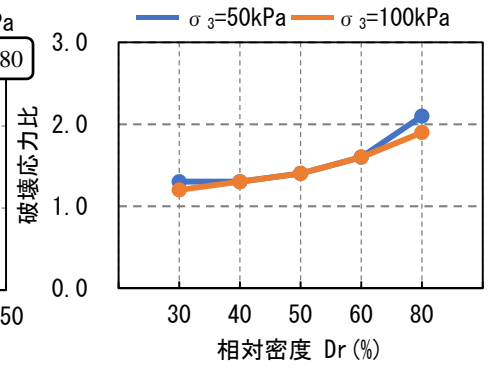


図2 相対密度～破壊応力比関係

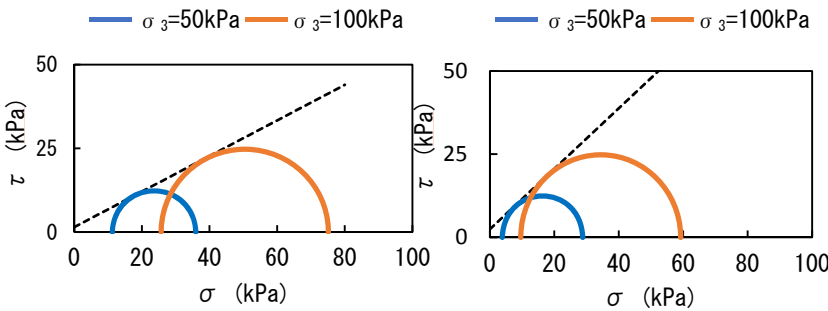


図3 吸水軟化時で評価したモールの応力円

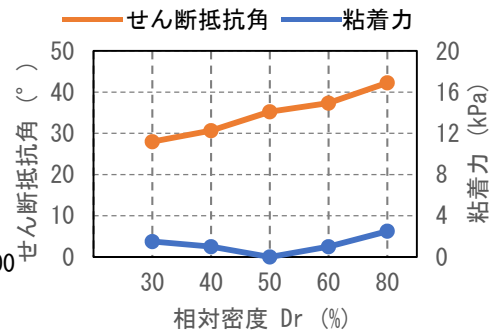


図4 相対密度～せん断抵抗角と粘着力関係

次に、これらの数値からモールの応力円を描いた結果を図3に示す。今回は2種類の拘束圧から求められた包絡線を使い、あえて粘着力を0に固定せずに包絡線を引いた。相対密度が低いDr=80%ではせん断抵抗角は42.2度の高い値となり、Dr=30%と比較して14度以上の差異となった。これら相対密度とせん断抵抗角と、粘着力の関係を図4に示す。これらから相対密度が高くなるほどせん断抵抗角は高い値を示すことがわかった。

4. 中間土の吸水軟化試験

4.1 実験条件

次に、全国各地の実堤防から採取した細粒分が卓越した3試料について吸水軟化試験を試みた。こちらも珪砂の実験と同様に三軸圧縮試験も実施した。試料は、宮城県渋井川、石川県梯川⁵⁾、秋田県子吉川である。これらは、筆者らが提案している簡易サンプラーを用い丁寧に採取した不攪乱試料である。それぞれの粒度試験結果を図5に示す。拘束圧は50kPaと100kPaの2種類とし、与える初期せん断応力は25kPa、50kPa、75kPaとし、珪砂と同様に二重負圧法と背圧200kPaを加え飽和化した。また、試験条件と供試体の諸元を表1に示す。

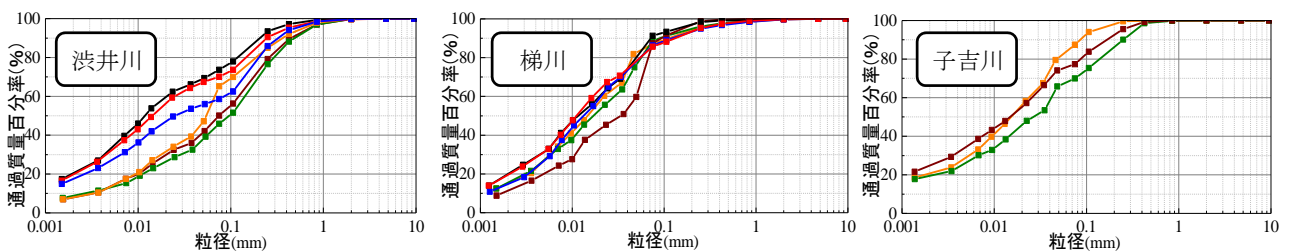


図5 各河川の粒度試験結果

4.2 実験結果

図6～8に吸水軟化試験の結果と三軸圧縮試験結果を示す。図6の梯川堤防土の応力比 q/p' ～軸ひずみ関係を見ると、三軸圧縮試験で得られる限界応力比を大きく超えて $q/p'=3$ 近くに到達している。 $q/p'=3$ に達するまで軸ひずみは1%程度しか発生しておらず、到達して以降は軸ひずみが急激に発生することがわかる。この $q/p'=3$ の値は側方の有効圧がゼロとなったことを表している。したがって、この梯川堤防土は浸水に伴って有効拘束圧が急激に低下しても一定のせん断強度を保持することを示唆している。一方、初期せん断の軸差応力が大きくなるにしたがい到達する q/p' の値は2以下となり、徐々に三軸圧縮試験で得られた限界応力比に近づいている。

表 1 試験条件と供試体の諸元

試料名	拘束圧 (kPa)	軸差応力 (kPa)	含水比 (%)	初期間隙比	圧密後間隙比
梯川	50	25	35.0	1.00	1.02
	100	50	-	-	-
	100	75	35.4	1.00	0.96
渋井川	50	25	33.3	1.85	1.71
	100	50	26.1	1.53	1.39
	100	75	30.5	1.76	1.53
子吉川	50	25	50	1.38	1.36
	100	50	52.7	1.49	1.36
	100	75	53.1	1.47	1.32

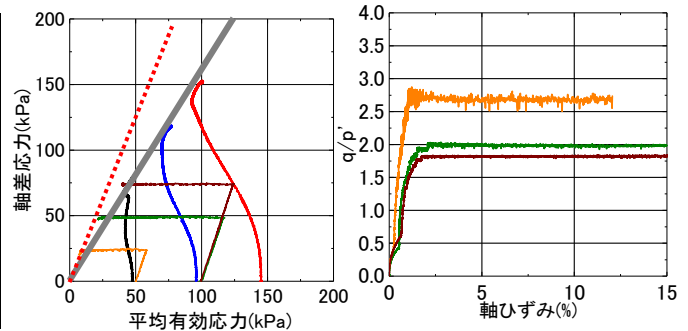


図 6 梯川の有効応力経路と q/p' 関係

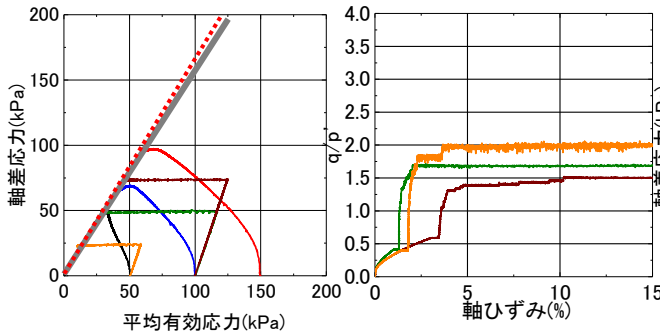


図 7 渋井川の有効応力経路と q/p' 関係

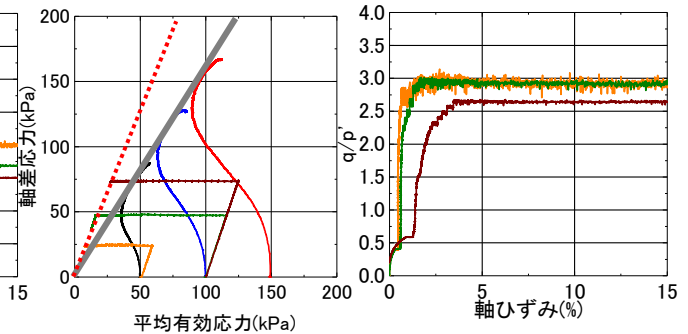


図 8 子吉川の有効応力経路と q/p' 関係

図 7 の渋井川堤防土の場合、三軸圧縮試験の限界応力比とほぼ同じ q/p' に到達した時点で軸ひずみが急激に発生しはじめ、一気に破壊した。平成 27 年関東・東北豪雨時の渋井川堤防の破堤は堤体のパイピング破壊が疑われているが、本実験の結果からも渋井川堤防土が浸潤に伴い弱化する懸念のある材料であることが示された。図 8 の子吉川堤防土の場合、どの軸差応力であっても q/p' は 3 に近い値を維持しており、梯川堤防土以上に浸透耐性が高いことがわかる。

現在、堤防土の吸水軟化試験において、①応力比 $q/p'=3$ まで到達できるもの。②軸差応力が小さい場合には $q/p'=3$ となるもの。③三軸圧縮試験の破壊応力比で破壊するもの。この 3 種類のパターンがあることを確認している (図 9)。細粒分が多く粘性土と判定されても③のパターンでは危険側となることに留意する必要がある。

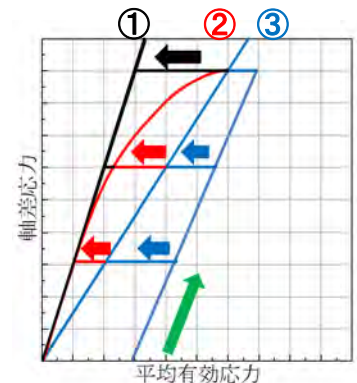


図 9 吸水軟化試験のパターン

5. 礫質土の吸水軟化試験

5.1 実験条件

全国の開削調査時に採取された礫質土について共に直径 20cm の吸水軟化試験と大型三軸圧縮試験を実施し、浸透耐性について検証した。採取した試料は岡山県小田川⁹⁾、高知県物部川 (上部・下部)⁹⁾ の 3 種類である。物部川については現場密度を水置換法により計測し、せん頭粒度と補正乾燥密度 (53mm以下の試料のみで構成する部分の乾燥密度を新たに算出したもの) により供試体を作製した。小田川については現場密度が不明なため、締固め試験を実施し最大乾燥密度の 90% (締固め度 90%) として供試体を作製した。ただし、初期含水比は全て 5%とした。また、三軸圧縮試験の拘束圧は、50, 100, 150kPa, 吸水軟化試験において初期せん断として与えた応力は 15kPa と 25kPa の 2 種類を実施した。今回、実施した試験試料の粒径加積曲線を図 10 に、試験条件と供試体の諸元を表 2 に示す。

5.2 実験結果

各河川での三軸圧縮試験と吸水軟化試験の有効応力経路を図 11 に示す。三軸圧縮試験の有効応力経路より、現場密度の物部川試料のせん断特性は、締固め度 90%の小田川試料と類似性が高く、かつ、ゆる詰め傾向を示していることがわかる。すなわち、礫質堤防は締固め度が 90%程度であっても、通常の三軸圧縮試験の拘束圧レベルで評価すれば、比較的ゆる詰め傾向と評価されることを示しており、実際の密度を再現した礫質土堤防においても同様の傾向であることがわかる。一方、今回提案する吸水軟化試験から得られた有効応力経路に着目すると、全てのケースで三軸圧縮試験の破壊応力比を超えている。そこで吸水軟化試験結果から図 3 に示した珪砂 6 号のモールの応力円と同様な方法で求めたモールの応力円と三軸圧縮試験から得られたモールの応力円を図 12 に示し、比較を行った。その結果、全ての試料において三軸圧縮試験よりも大きなせん断抵抗角を示す結果となり、同時に粘着力も確認することができた。すなわち、通常

の三軸試験では評価できない礫質土の低拘束圧下でのせん断強さを吸水軟化試験で評価できることが確認できた。なお、物部川（下部）の乾燥密度が、上部と比較しても非常に小さい値を示している。今回の密度計測には水置換法を用いたが、掘削孔内の壁面の凹凸が大きい礫質土堤防では、隅々まで水が行き渡るために体積は大きく評価される一方、すべての試料回収には多大な手間がかかるため、密度は小さめに評価される可能性がある。物部川（下部）のせん断抵抗角が若干小さく評価されているが、密度評価の精度の影響も考えられる。現場密度計測は今後の課題としたい。

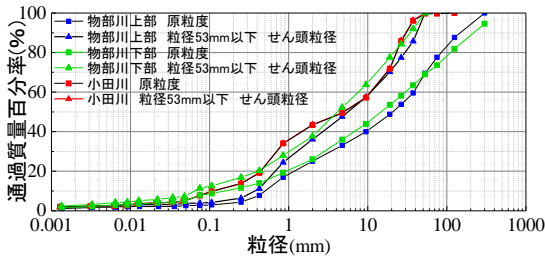


図 10 各河川の粒径加積曲線

表 2 試験条件と供試体の諸元

試料	乾燥密度 [g/cm ³]	初期含水比	試験条件	締固め度
小田川	1.86	5%	CU 試験 吸水軟化試験	90%
	1.96			95%
物部川(上部)	1.84			補正乾燥密度
物部川(下部)	1.58			補正乾燥密度

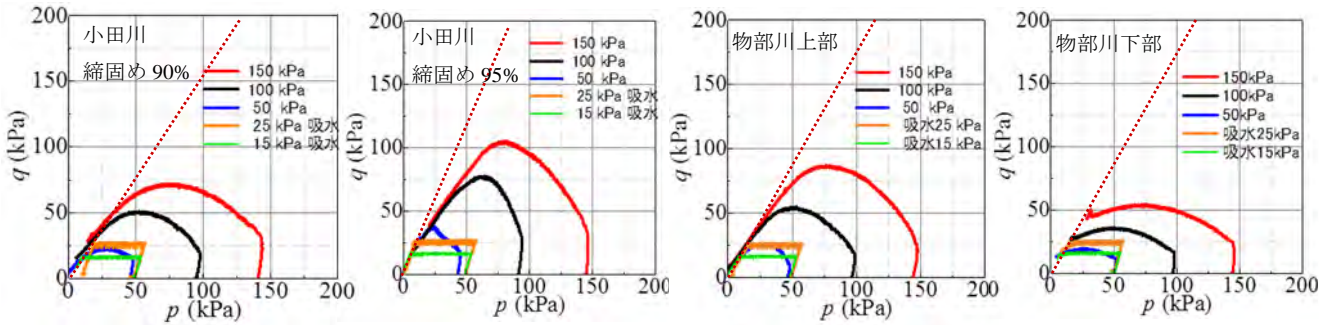
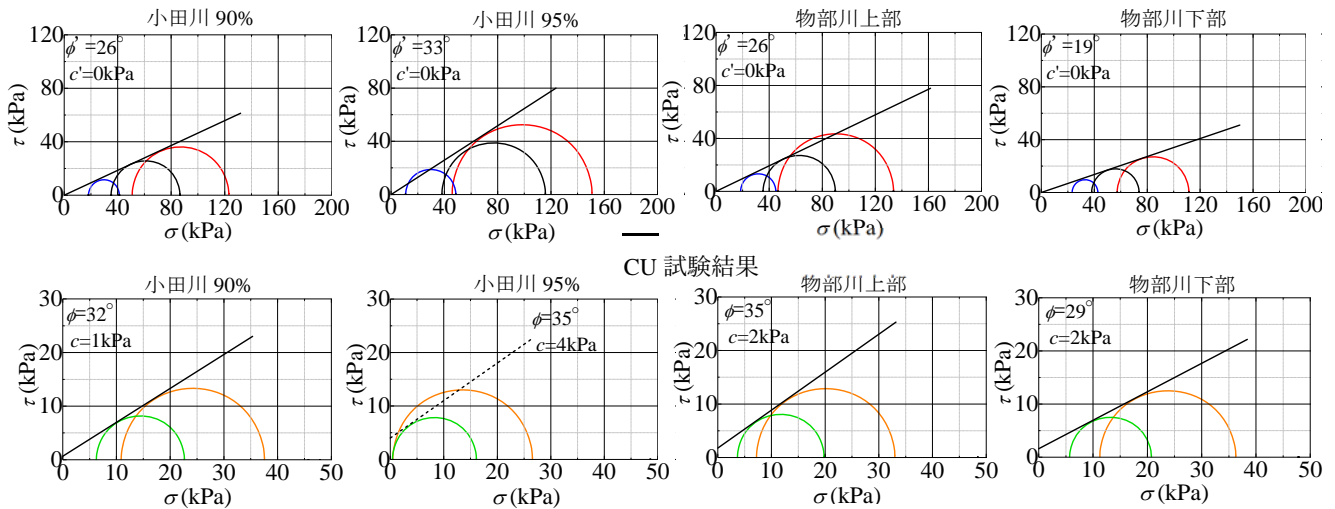


図 11 各河川の吸水軟化試験と三軸圧縮試験の有効応力経路



吸水軟化試験結果
図 12 試験結果から得られたモールの応力円

6. まとめ

複数の種類の試験結果より、河川堤防の浸透耐性を吸水軟化試験によって検討するうえで、いくつかの知見が得られた。まず、砂質土においては密詰め傾向であるほど、破壊応力比や内部摩擦角が大きくなり、浸透耐性が高くなることが示された。また、実堤防の中間土では、供試体密度や粒度分布により吸水軟化に 3 パターンがあることが確認され、細粒分が多く粘性土とされる場合でも適正な浸透耐性を評価することが可能となった。礫質土では通常の三軸圧縮試験からでは、ゆる詰め傾向と評価され、同時に非常に小さなせん断強度しか得られないが、吸水軟化試験においては、低拘束圧条件下での礫質堤防土の比較的大きなせん断強度を評価することができた。今後、様々な実堤防での試験を継続することで吸水軟化試験のデータの蓄積を行い、堤防土の適正な強度評価につなげたい。

参考文献：1)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。2)小高ら：「粘性土」堤体土の浸透時の力学特性の評価，第 4 回河川堤防技術シンポジウム，2016。3)小高ら：吸水軟化試験による細粒分が卓越した堤防土の浸透耐性の評価，第 52 回地盤工学研究発表会，2017。4)久保ら：吸水軟化試験による砂質土の浸透耐性の評価，第 72 回土木学会年次学術講演会，2017。5)石原ら：梯川旧堤で実施した現地堤防地盤調査，第 4 回河川堤防技術シンポジウム，2016。6)梅村ら：三軸試験による礫質土の力学特性の評価における供試体密度の影響，第 72 回土木学会年次学術講演会，2017。