

再構成疑似粘性土を用いた吸水軟化試験による浸透すべり耐性の評価

河川堤防 三軸圧縮試験 粘性土

元名城大学大学院 正会員 ○児玉直哉
 名城大学 国際会員 小高猛司
 日本工営/名城大学 国際会員 李 圭太
 土木研究所 国際会員 石原雅規
 中部土質試験協同組合 国際会員 久保裕一

1. はじめに

実河川堤防では、粘性土であっても浸透時は摩擦抵抗のみしか期待できない砂質土に近い性質を有する粘土もどき細粒土が多く確認されている^(例えば 1),2)。小高らが提案する吸水軟化試験^(例えば 3),4)では、浸透すべり破壊への耐性のパターンより、粘土もどき細粒土が卓越した粘着力を発揮する本当の粘土であるのかを評価することが可能である。しかし、粘性土の物理特性と浸透すべり耐性の関係性は明らかではない。そこで本論文では、人工的に粘土分の配合割合を設定した再構成疑似粘性土を用いて吸水軟化試験を実施することで、粘性土の塑性指数 I_p および締固め度 D_c が浸透すべり破壊への耐性に与える影響について検討する。

2. 試験概要

再構成疑似粘性土は（三河珪砂 6 号，DL クレー，カオリン粘土）を所定の乾燥質量比で混合したものとなる。質量比は 3 通りで設定し、ケース 1（3：7：0），ケース 2（3：4：3），ケース 3（3：0：7）である。砂主体の三河珪砂 6 号の質量比は変化させず、細粒分のうちカオリン粘土 ($I_p=30.5$) と DL クレー（非塑性）の質量比を変化させることで、細粒分含有率は一定のまま粘土分含有率とそれに伴う I_p を変化させた。締固め度はそれぞれ $D_c=90\%$ ， 95% の 2 通りで供試体を作製している。図 1 に各ケースの粒度分布，表 1 に各供試体の諸元を示す。表 1 より、ケース 2 が最も乾燥密度が高い。これは、粒度分布をみても分かるように、ケース 2 は粒度が良く、締め固まりやすい土であることに起因する。 \overline{CU} 試験と吸水軟化試験を実施するにあたり、UU 試験も実施しており、モールの応力円より得られた強度定数は $D_c=90\%$ では $c_u=65.2\text{kPa}$ ， $D_c=95\%$ では $c_u=72.0\text{kPa}$ ，と非常に高い粘着力を有している。UU 試験結果のみで判断すると、ケース 2 のどちらの供試体も硬質な粘性土であり、粘着力が卓越した c 材として評価することになる。

3. 吸水軟化試験について

\overline{CU} 試験は、非排水せん断条件下で無理矢理に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。そのため小高らは、低有効応力条件下でのせん断強さを評価できる「吸水軟化試験」^{2),3)}を提案している。試験手順は基本的には \overline{CU} 試験を基本とするが、堤防のり面付近での湿潤時の有効応力低下を模擬する操作を行う。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 2 に示す有効応力経路において 3 つのパターンに分類した³⁾。 \overline{CU} 試験の限界応力比 q/p' で破壊するパターン A，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 C，そして、パターン A と B の中間的なパターン B である。過去実施した試験では、粘性土堤防のほとんどの堤体土はパターン A 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。

4. 試験結果

図 3～8 に \overline{CU} 試験と吸水軟化試験の試験結果について有効応力経路とモールの応力円を示す。有効応力経路については、橙と緑の破線で吸水軟化試験の破壊応力比，黒の破線で \overline{CU} 試験の限界応力比を示す。モールの応力比については、黒の実線で吸水軟化試験，黒の破線で \overline{CU} 試験の破壊規準線を示す。まず、図 3～5 の $D_c=90\%$ に着目する。有効応力経路

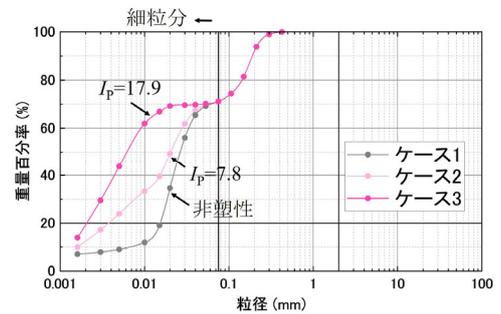


図 1. 各ケースの粒度分布

表 1. 供試体諸元

締固め度(%)	ケース	乾燥密度(g/cm ³)
90	1	1.47
	2	1.65
	3	1.55
95	1	1.55
	2	1.74
	3	1.63

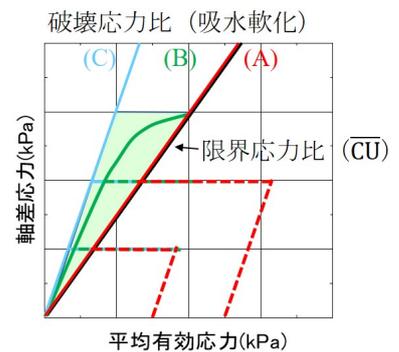


図 2. 吸水軟化試験の 3 パターンの有効応力経路

を見ると、全てのケースにおいて破壊応力比と限界応力比は同程度である。本研究グループの分類によれば、これはパターン A に該当する。浸透時の低有効応力条件下では摩擦強度のみしか発揮できず、浸透すべり破壊の耐性は低いと評価される。モールの応力円を見ると、やはり粘着力は発揮せず、内部摩擦角は $\phi=27.5\sim 30.2^\circ$ を示す。ここで最も高い乾燥密度を有するケース 2 を見ると、最も低い ϕ を示していることが分かる。

次に、図 6~8 の $D_c=95\%$ に着目する。有効応力経路を見ると、全てのケースにおいて破壊応力比は限界応力比に比べて高い値を示している。本研究グループの分類によれば、これはパターン B に該当する。浸透時の低有効応力条件下では摩擦強度に加えて粘着力に相当するせん断抵抗を発揮しており、浸透すべり破壊の耐性は比較的高いと評価される。モールの応力円を見ると、粘着力は発揮しないが、 $\phi=34.8\sim 44.5^\circ$ と高いせん断抵抗を示す。ここで最も高い乾燥密度を有するケース 2 を見ると、 $D_c=90\%$ の場合とは対照的に最も高い ϕ を示していることが分かる。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はケース 2 の $D_c=90\%$ と 95% でそれぞれ 65 と 72kPa 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。

5. まとめ

今回、人工的に粘土分の配合割合を設定した再構成疑似粘性土を用いて吸水軟化試験を実施した結果、塑性指数による浸透すべり耐性の影響は見られなかったが、締め固め度の違いが浸透すべり耐性に大きな影響を与えることが示された。細粒分が卓越した粘性土であっても、 $D_c=90\%$ 程度では、十分な浸透すべり耐性を発揮しない粘土もどきの細粒土であると判断されるが、 $D_c=95\%$ 以上あれば、非塑性や $I_p=20$ 程度のどの粘性土であっても粘着力は発揮せずとも比較的高い浸透すべり耐性を発揮した。したがって、細粒分をブレンドした購入土を用いて築堤する場合は、 $D_c=95\%$ 以上の締め固め度を目標とすることが望ましい。特に、粒度が良く、締め固めが容易な試料では締め固め管理に注意する必要がある。

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法，第 54 回地盤工学研究発表会，2019. 2) 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. 3)小高ら：三軸試験による河川堤防土の強度定数決定法，中部地盤工学シンポジウム論文集，2015. 4) 小高ら：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，2017.

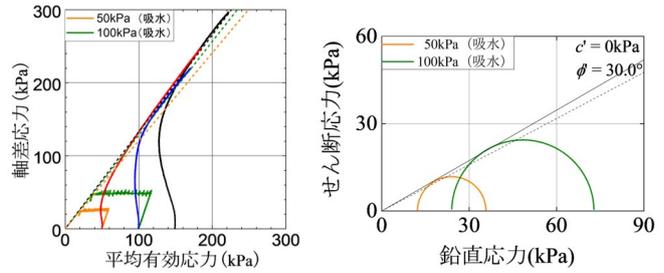


図 3. $D_c=90\%$ ，ケース 1 の試験結果
(←有効応力経路，→モールの応力円)

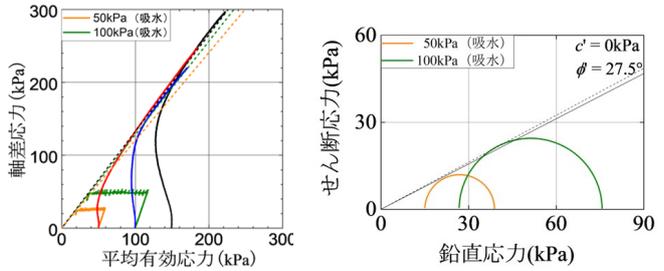


図 4. $D_c=90\%$ ，ケース 2 の試験結果

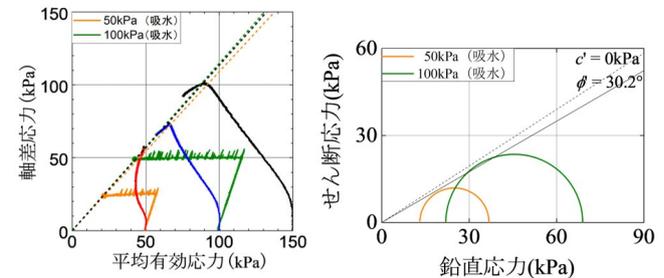


図 5. $D_c=90\%$ ，ケース 3 の試験結果

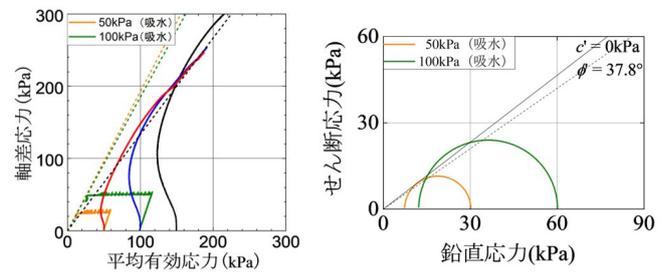


図 6. $D_c=95\%$ ，ケース 1 の試験結果

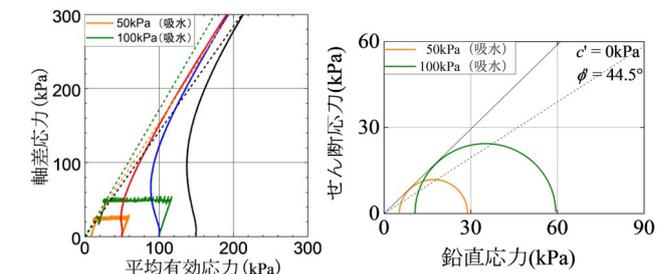


図 7. $D_c=95\%$ ，ケース 2 の試験結果

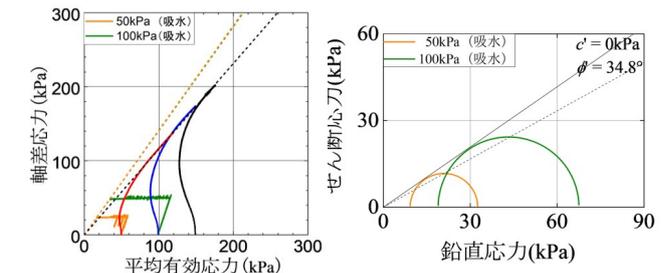


図 8. $D_c=95\%$ ，ケース 3 の試験結果