

# 令和6年7月に決壊した子吉川支川石沢川堤防の粘性堤体土の力学特性

名城大学 国際会員 小高猛司  
名城大学 正会員 (学生) ○加藤凌英  
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  
土木研究所 国際会員 青柳悠大  
ジオラボ中部 国際会員 久保裕一

## 1. はじめに

令和6年7月の出水により、子吉川本川を含む子吉川水系において直轄区間で2箇所、県管理区間で5箇所の堤防が決壊した。本報では、子吉川支川石沢川左岸 1.0km 付近において、令和7年10月に東北地方整備局による開削調査に併せてサンプリングした乱れの少ない試料と乱した試料で再構成した試料を用いて実施した力学試験の結果を示す。

## 2. 試験試料の概要

本報の試験で用いた試料は、図1に示す石沢川左岸堤防の下流側開削断面のBc層にて採取した粘性堤体土である。下流側の開削断面の土層構成は、下部から、基礎地盤の粘性土層(Ac)、旧堤と想定される粘性土(Bc層)、拡幅・嵩上げ盛土と想定される礫を混入する粘性土層(Bcg)・礫層(Bg)が確認された。Bc層は練ると粘性があるが、表面はぼろぼろと崩れる性状であった。サンプリングの詳細は、別報<sup>2)</sup>に示すが、乱れの少ない試料を土研式サンプラーによって、図1のF・G区画の白矢印で示す箇所で6本採取した。また、同じ場所で乱した試料も採取し、土嚢袋で持ち帰った。土研式サンプラーである塩ビ管に封入された乱れの少ない試料は、先述のようにぼろぼろと崩れやすいため、自然状態のまま塩ビ管からの取り出すことや、もし取り出せたととしても、それから三軸試験のために円柱供試体に成形することは困難であると判断し、塩ビ管のまま一旦凍結させ、凍結したまま直径5cm、高さ10cmの円柱供試体に成形した。本報ではこの供試体を不攪乱試料と呼び、3本をCUB三軸試験に用いた。

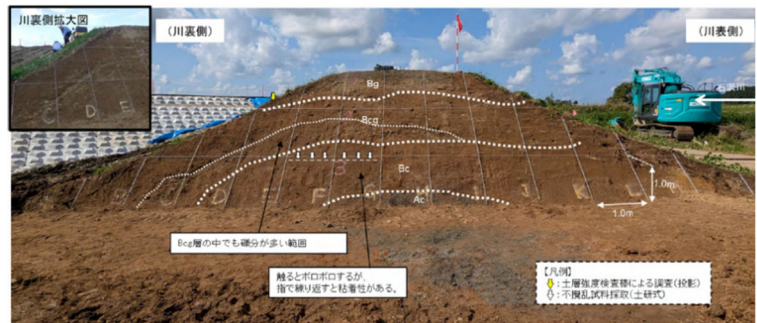


図1 試験試料を採取した石沢川左岸堤防の下流側開削断面

表1 各供試体の諸元

		拘束圧 (kPa)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 (%)
不攪乱供試体	CUB 試験	50	49.44	1.082	89.51
		100	46.15	1.139	91.26
		150	47.52	1.115	90.52
再構成供試体	CUB 試験	50	54.66	1.084	99.33
		100	56.14	1.039	95.18
		150	55.16	1.059	96.43
	吸水軟化試験	50	54.94	1.066	97.09
		100	55.22	1.069	98.05
	UU 試験	50	54.29	1.071	96.74
		100	54.65	1.080	98.64
150		52.92	1.084	96.08	

一方、土嚢袋に入れて持ち帰った乱した試料を自然含水比の状態のまま用いて、不攪乱試料と同一の乾燥密度となるように、鋼製モールド内で3層に分けて密度管理しながら木槌で叩いて締め固めることによって円柱供試体を作製した。この供試体を再構成供試体と呼び、CUB試験、吸水軟化試験、UU試験を実施した。表1に試験に用いた各供試体の諸元を示す。不攪乱供試体でCUB試験を実施した後に、それぞれの供試体の乾燥密度を算出し、その平均値1.11 g/cm<sup>3</sup>となるように再構成供試体を作製した。しかし、自然含水比が高含水であったことから、再構成供試体の乾燥密度は表1に示すように、不攪乱供試体の乾燥密度にわずかに届かなかった。表1に示す飽和度は、供試体作製時点の値であるが、自然含水状態の土を現場の密度で締め固めた状態の飽和度が100%近い値となることから、現地堤防のBc層はほぼ飽和状態であったと考えられる。ただし、現地Bc層はぼろぼろと崩れやすい砂質土的な堤体土であり、飽和土のように感じられなかった。なお、表1の不攪乱供試体の含水比と飽和度が再構成供試体と比べて低い値であるが、これは凍結により水分が蒸発したためであり、自然状態ではない。

CUB試験を行った不攪乱供試体3本と再構成供試体2本について、試験後に実施した粒度試験結果を図2に、物理試

験結果を表 2 に示す。Fc は 66~77%の細粒土であり、塑性指数は 36~43%と堤体土としてはかなり高く、高液性限界の砂質粘土に分類される。

図 3 は不攪乱試料による CUB 試験の有効応力経路である。せん断初期から塑性圧縮を顕著に示すが、変相後には塑性膨張に転じ、過圧密粘土の特性を示す。図中の点線は変相線であり、変相応力比は 1.42 であった。図 4 は再構成供試体の CUB 試験の結果を示す。不攪乱供試体の結果と極めて類似しており、再構成供試体で十分に不攪乱状態の力学特性を再現出来ていると考えられる。変相応力比は 1.45 であり、不攪乱供試体より若干多くなった。図 5 および 6 はそれぞれ、不攪乱および再構成供試体の CUB 試験の変相状態で整理したモールの応力円である。内部摩擦角は 35~37 度と比較的高い値であるが、粘着力はいずれもゼロであり、摩擦性材料であることがわかる。

図 4 には、吸水軟化試験結果も示している。吸水軟化試験<sup>3)</sup>は、低有効応力条件下でのせん断強さを評価する試験であり、試験手順は基本的には CUB 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しながら、破壊時の有効応力状態を探索する。図 4 に示すように、吸水軟化試験による破壊応力比は 2.4 程度に至っており、CUB 試験の破壊応力比を大きく上回る。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 4 に示すように吸水軟化試験において高い破壊応力比を示す堤体土は比較的浸透すべり耐性が高いと判断できる。図 7 は吸水軟化試験によるモールの応力円である。粘着力はゼロであるものの、かなり大きな内部摩擦角を示しており、低有効応力条件下においてもある程度大きなせん断強さを発揮すると考えられる。これは、高塑性の粘性堤体土であるためと考えられる。参考として、c 材としての力学特性を得るために、再構成供試体を用いて UU 試験を実施した結果を図 8 に示す。供試体作製時点の高い飽和度を反映して  $\phi_u=0$  となり、非排水せん断強さは 12kPa と比較的小さく、粘性土としては軟質と判断できる。図 7 の吸水軟化試験で得られた内部摩擦角に当てはめると、有効拘束圧 8kPa 程度におけるせん断強さに相当する。

### 3. まとめ (謝辞)

本報では、下流側断面で採取した Bc 層の粘性堤体土の力学特性について報告した。今後、不攪乱試料の吸水軟化試験を行うとともに、上流側断面の Fc が下流側と比べてやや低い試料についても検討を行う予定である。なお、本調査は、土木学会地盤工学委員会堤防研究小委員会石原 WG の活動の一環で実施したものであり、試料採取にあたっては、国土交通省の東北地方整備局秋田河川国道事務所子吉川出張所と水管理・国土保全局治水課の関係各位、並びにパシフィックコンサルタンツの薄井隆義氏に大変お世話になった。記して謝意を表す。

参考文献：1) 子吉川堤防調査委員会：子吉川堤防調査委員会報告書，国土交通省東北地方整備局，2025。  
[https://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/k00360/saigai-info/240724\\_zensen/koyoshi\\_houkoku.pdf](https://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/k00360/saigai-info/240724_zensen/koyoshi_houkoku.pdf) 2) 青柳ら：令和 6 年 7 月に決壊した子吉川支川石沢川堤防の粘性堤体土の土質特性，第 71 回地盤工学研究発表会 (静岡)，2026。 2) 小高・李・石原ら：砂質堤体土の簡易サンプリングとその強度特性の評価，第 3 回河川堤防技術シンポジウム論文集，2015。 3) 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。

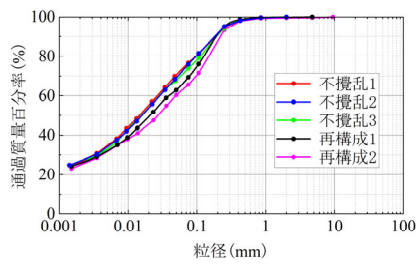


図 2 試験後試料の粒径分布

表 2 試験後試料の物理特性

	上流
礫分(%)	0~0.5
砂分(%)	23.4~33.9
シルト分(%)	34.0~42.3
粘土分(%)	31.6~34.3
Fc(%)	65.6~76.6
液性限界(%)	64.7~71.3
塑性限界(%)	27.0~32.9
塑性指数(%)	35.7~42.7

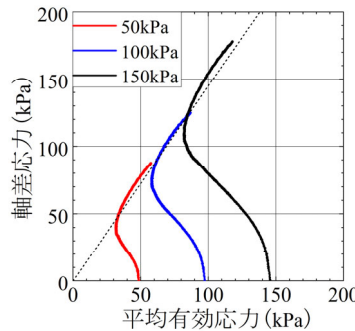


図 3 有効応力経路 (不攪乱)

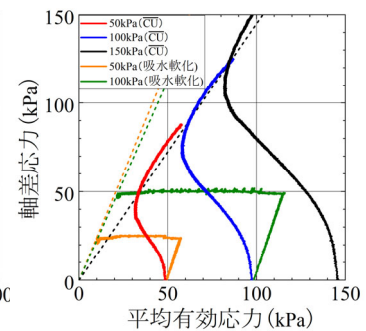


図 4 有効応力経路 (再構成)

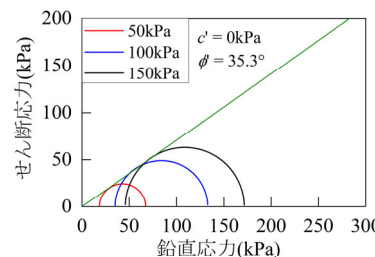


図 5 モールの応力円 (不攪乱)

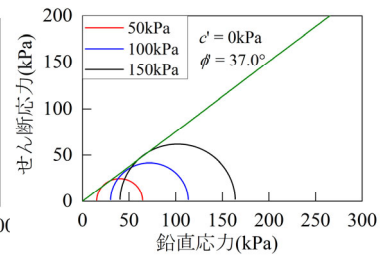


図 6 モールの応力円 (再構成)

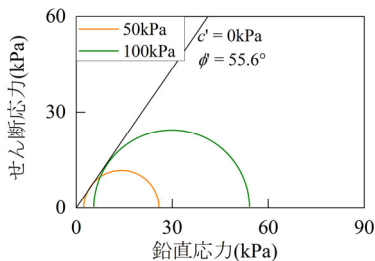


図 7 モールの応力円 (吸水軟化)

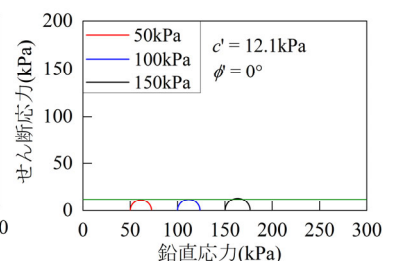


図 8 UU 試験結果 (再構成)