

透明土试验技术在滑坡降雨入渗中的研究与应用

王橧橧^{1,3}, 陈 盟², 唐莹影², 袁仁茂³

(1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘 要: 由于滑坡体内部结构的复杂性和不可视性, 使得滑坡降雨入渗及其渗流过程无法直观观测, 从而难于查明滑坡灾变演化全阶段中降雨入渗的具体作用过程, 导致降雨诱发滑坡成灾机制的认识存在不确定性, 因此, 发展可以观测滑坡内部降雨入渗灾变过程的新技术手段, 对深入理解降雨诱发滑坡灾变机理具有重要意义。而透明土试验技术则使岩土体内部非介入式、连续、无损、可视化测量得以实现。从透明土材料特性、岩土工程性质、试验设备与图像处理解析技术等方面, 总结透明土试验技术发展现状及其在不同领域的应用, 重点概述该技术在边坡工程领域的应用和渗流过程可视化模拟中的实践, 并讨论将其应用于滑坡渗流直观观测的可行性。在此基础上, 针对透明土材料进行筛选和对制备方法进行优化, 利用透明土替代传统土工模型材料建立适用于渗流过程观测的滑坡透明土物理模型, 开展降雨条件下滑坡渗流物理模拟试验, 获取降雨入渗诱发滑坡灾变全过程信息, 确定滑坡体内部地下水渗流过程及其变化特征。该模型试验是透明土试验技术在滑坡渗流可视化观测领域一次有效的应用实践, 拓展了滑坡灾害可视化模拟新途径, 进一步确定地下水渗流对滑坡的复杂影响, 有利于揭示降雨诱发滑坡演化规律、深入探索滑坡滑动机制, 为降雨滑坡灾害防治和灾害规划提供科技支撑。

关键词: 滑坡; 透明土试验技术; 降雨入渗; 可视化; 室内物理模拟

中图分类号: TU449 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3051-12

Research and application of transparent soil test technology in rainfall infiltration of landslide

WANG Xiaotong^{1,3}, CHEN Meng², TANG Yingying², YUAN Renmao³

(1. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The detailed seepage process and rainfall infiltration temporal variation cannot be observed visually due to the complexity and non-visibility of the internal structure of landslide body, thus making it difficult to identify the specific process of rainfall in the whole process of landslide catastrophic evolution, which leads to the incomplete understanding of the formation mechanism of rainfall-induced landslide. Therefore, the new technological methods for directly observing and monitoring the infiltration and seepage process of rainfall-induced landslide is of great significance for deep understanding the formation mechanism of landslide induced by raining. Transparent soil test technology enables non-invasive,

收稿日期: 2023-06-29 修回日期: 2023-11-07 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0795

基金项目: 广西科技基地和人才专项基金资助项目 (AD23026192); 广西高校中青年教师科研基础能力提升资助项目 (2023KY0262); 广西自然科学基金资助项目 (2020GXNSFBA297050)

作者简介: 王橧橧 (1986—), 女, 四川成都人, 副教授, 博士。E-mail: Lorraine0731@glut.edu.cn

通讯作者: 袁仁茂 (1972—), 男, 江西丰城人, 研究员, 博士。E-mail: yuanrenmao@ies.ac.cn

引用格式: 王橧橧, 陈盟, 唐莹影, 等. 透明土试验技术在滑坡降雨入渗中的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3051-3062.

WANG Xiaotong, CHEN Meng, TANG Yingying, et al. Research and application of transparent soil test technology in rainfall infiltration of landslide[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3051-3062.



移动阅读

continuous, non-destructive and visual measurement or monitoring inside soil or rock mass bodies. In this paper, the current status of the development of transparent soil testing technology and its application in different fields especially in the application of slope engineering and practice in the visual simulation of seepage processes are summarized from the aspects of transparent soil material properties, geotechnical engineering properties, experimental equipment and image processing analysis technology, and the feasibility of applying it to the visual observation of seepage in landslide is discussed. On this basis, the transparent soil material is screened and the preparation method is optimized. The transparent soil is used to replace the traditional geotechnical model material to establish a landslide transparent soil physical model suitable for seepage process observation. The physical simulation test of landslide seepage under rainfall conditions is carried out to obtain information on the whole process of rainfall infiltration-induced landslide disaster, and to determine the process and characteristics of the seepage process of the groundwater. The model test is an effective application of transparent soil test technology in the field of landslide seepage visual observation, expanding a new way of landslide disaster visual simulation, and further determining the complex impact of groundwater seepage on landslide. It is conducive to reveal the evolution law of rainfall-induced landslide, explore the sliding mechanism of landslide, and provide a scientific and technological support for rainfall landslide disaster prevention and disaster planning.

Key words: landslide; transparent soil test technology; rainfall infiltration; visualization; indoor physical simulation

我国是一个滑坡灾害极为频发的国家,发生过众多规模巨大、机制复杂、危害严重的滑坡灾害,面对严重的滑坡灾害威胁,有深化滑坡灾害机制研究的必要。而降雨是滑坡灾害主要诱发因素之一,研究降雨入渗过程有助于深入理解滑坡灾变的机制。

降雨型滑坡研究方法以理论分析、试验研究和数值模拟为主。然而,室内物理模拟使用传统土工不可透视模型材料,无法对土体破坏过程进行直接观测;现场试验难于触及深部岩土体;CT扫描等表征分析侧重微观尺度等^[1-6]。这些特点增添了降雨滑坡灾变研究的难度。

因此,发展可以观测滑坡内部降雨入渗灾变过程的新技术,即寻找一种与天然土体工程性质相似的透明材料替代传统土工模型材料,使用非侵入性的光学可视化技术测量土体的连续响应,使土体内部变形及渗流实现可视化观测对滑坡致灾本质认识具有重要意义。20世纪末以来,透明土材料的研制及透明土试验技术的发展,使岩土体内部非介入式、连续、无损测量逐步获得实现^[7]。

透明土材料是人工合成的、与天然土体工程性质相似的透明模拟材料的总称,由具有相同或相近折射率的透光骨架材料和透明孔隙流体制备而成^[8],其透光原理是基于克里斯欣森效应,当光线经过折射率相匹配的“水土”两相介质时,不同透光介质的交界面上散射光减少,有效隐藏光学分界面,保证“土体”视觉上呈现透明状态^[9]。国内外学者利用透明土材料高度透明特性,结合数字图像处理和解析技术发展了透明土试验技术,开展了全面系统的试验研究,可以模拟砂岩、泥岩和淤泥等不同天然岩土,实现土体内部温

度场^[3]、位移场^[10]和渗流场^[11-13]直接可视化,结合离心机技术还可获取应力场演化数据^[14]。

笔者主要对透明土常规材料及其物理力学性质、其与天然岩土体相似特性、基于透明土试验技术的实验室物理模拟、图像处理解析技术等方面进行综述,梳理透明土试验技术在不同领域、特别是在边坡工程中的工程实践。在此基础上,通过选择适宜透明骨架材料和孔隙流体制作滑坡模型,多次试验以筛选合适的示踪剂标识流体,测试不同动态图像捕捉和解析技术,建立了滑坡渗流透明土物理模型可视化试验系统,开展滑坡降雨入渗过程观测和分析,为降雨滑坡机理研究奠定了基础。

1 透明土试验技术

1.1 透明土材料及其配置方法

1.1.1 固体骨架材料和孔隙流体

常用透明土固体骨架材料有无定形硅粉(Amorphous silica powder)、熔融石英砂(Fused silica)和硅胶颗粒(Silica gels)等,根据试验的具体需要还可以使用水凝胶(Aquabeads)和硅酸镁锂(Laponite RD)或开发新型骨架材料^[15]。无定形硅粉在宏观性质上代表低塑性黏土^[16];硅胶颗粒可以模拟砂土的静态和动态特征^[17];熔融石英砂在工程物理力学性质上与天然砂土非常相似^[18];水凝胶常用作土体渗流观测^[19];硅酸镁锂可模拟海洋沉积底泥等淤泥质土^[20]。

孔隙流体在固体骨架空隙空间中渗流,自身需要有良好的透明性并具备稳定的物理、化学性质,需要与模拟骨架材料相近的折射率,且不能与骨架材料发生反应^[21]。试验常用孔隙流体以水溶型无机溶液和

油溶型有机溶液为主^[22-24],以矿物油、溴化钙、石蜡和正十二烷较为常用^[21,25]。

1.1.2 制配方法

透明土材料的制配包括骨架材料预洗、孔隙流

体配比、试样混配、真空饱和和静置等步骤(详细过程见 3.1 节中透明土制备)。试验常用透明土骨架材料和孔隙流体配置方法及对应透明土特性详见表 1。

表 1 试验常用透明土骨架材料与孔隙流体配比

Table 1 Ratio of solid material and pore fluid of transparent soil

骨架材料	孔隙流体	模拟天然岩土体	特性	文献
熔融石英砂	正十二烷:15号白油=1:4(质量比)	砂土	矿物油化学性质较稳定 模型透亮度高,制作流程简单	[26]
	正十二烷:白油=1:10.02(质量比)			[27]
	正十二烷:白油=1:0.34(质量比,12℃)			[28]
	15号白油:3号白油=3:1(体积比,22℃)		性质稳定,透明度高,	[29]
	15号白油:3号白油=1:7~5:6(体积比)		无毒害,安全性好	[25]
	Norpar 12(正构烷烃<石蜡>):5号白油=1:1(质量比)		成本高,采购困难	[30]
	溴化钙(质量分数75.5%) 溴化钙(质量分数60%)		成本低、操作简单, 有刺激性味道,易沉淀	[31]
无定形硅粉	硫代硫酸钠处理后的碘化钠水溶液(STSI)	黏土	黏度低,对温度变化敏感性低,可循环使用	[32]
	15号白油:正十二烷=2.5:1(体积比)		需固结排液,透明度有限	[33]
	15号白油:正十二烷=10:3(体积比)			[34]
	白油:正构烷烃溶剂=1:1(质量比,25℃)			[35]
	溴化钙卤液			[36]
硅胶颗粒	无定形硅粉:正十二烷:2号白油=1:7:77(质量比)	超软土	固结系数和渗透系数偏大	[37]
	硅胶颗粒:水=1:160(质量比)	软黏土	容重和透明度受质量比配影响较大	[38]
硅酸镁锂	硅酸镁锂(锂皂石)+水	超软黏土	透明度较高、成本低	[20]
	Laponite RD(质量分数3%~4%)+去离子水			[39]
其他材料/ 新型材料	聚丙烯酸钠交联聚合物+蒸馏水(完全饱和)	饱和土	透明度高、成本低	[12]
	固化水凝胶(聚丙烯酰胺:丙烯酰胺:去离子水=5:2:3(体积比))+蒸馏水	多孔介质孔隙含水层	模拟流体在多孔介质中渗流	[40]
	丙烯酰胺二甲基牛磺酸/VP共聚物(AVC)+去离子水	黏土	流变性较好,在高剪切力下稳定性好	[41]
	Carbopol Ultrez 10(新型聚丙烯酸钠交联聚合物):NaOH:纯净水=1:0.4:98.6(质量比)	泥炭土	可见透明厚度40 cm,高孔隙比(>50),低强度(<0.5 kPa)	[42]
	Gelita(质量分数5%)+水	黏土	环保性强,物理力学特性与天然黏土有一定差别	[43]
	全氟磺酸树脂+三梨糖醇溶液	土体	植物可存活,材料成本高	[44]
	PMMA+苯甲基硅油/丁香油	砂土	获取形态可控的透明砂土	[45]
	光敏树脂+15号白油+苯甲基硅油	砂土		

1.2 透明土材料工程性质

国内外学者对比分析了透明土材料与天然岩土体的物理力学特性。ISKANDER 等^[7]最早使用无定形硅粉与混合矿物油或溴化钙制备透明土,通过固结压缩和三轴试验发现透明土岩土工程性质与黏土相似。LIU 等^[46-47]验证无定形硅粉在固结性、孔隙度和渗透率等水力学特性上与部分天然砂土具有相似性,可以模拟天然砂土中的流体流动问题。孔纲强等^[24]和周航等^[48]发现混合矿物油与熔融石英砂制备的透明土动变形和动强度特性与天然砂土相似,可用于替代天然砂土开展动力模拟。试验常用透明土材料的

物理力学性质总结见表 2,数据显示熔融石英砂和无定形硅粉等,普遍具有 19°~59°内摩擦角,剪切试验和三轴试验进一步表明它们与天然砂土或黏土的物理力学性质相似。以熔融石英砂或无定形硅粉为固体骨架的透明土材料,可以代表天然砂土或黏土物质。

1.3 图像采集与分析

透明土试验技术中应用较广泛的高速动态图像采集技术包括 XCT、MRI 和粒子图像测速系统(Particle Image Velocimetry, PIV)。XCT 和 MRI 可以对岩土体内部进行无损实时动态扫描观测,主要应用于岩土体细微观特性研究^[51],但测试费用昂贵,且岩

样尺寸受限、不超过 5 cm×5 cm×5 cm, 仅在少量物理模型试验中应用^[3]。PIV 融合了计算机技术、激光技术、数字信号处理、图像处理与解析技术等, 适用于流场瞬时、无损、多点的高精度测量, 是较为成熟的二维流场测量手段^[30,40]。

PIV 利用脉冲激光光源入射至以示踪剂标记的待

测流场中形成动态激光面, 使用 CCD 相机或高清数码相机记录激光照射面上的粒子图像; 图像后处理和解析基于自相关、互相关理论, 通过开源软件获取流场信息图或建立渗流三维立体模型, 实现土体内部非嵌入式可视化观测^[52]。开源 PIV 图像处理软件特性整理详见表 3。

表 2 试验常用透明土骨架材料岩土工程性质^[8,26,39,49-50,60]

Table 2 Geotechnical engineering properties of transparent soil solid material^[8,26,39,49-50,60]

透明土	无定形硅粉	硅胶颗粒	熔融石英砂	水凝胶	硅酸镁锂	玻璃砂	气相二氧化硅
折射率	1.442	1.442	1.458	1.333	1.336	1.458	1.458
密度/(g·cm ⁻³)	2.10	2.20	2.20	0.98	3.21	2.19	2.20
泊松比	0.20~0.30	0.45~0.50	0.16	0.50	—	0.25	—
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	2.3×10 ⁻⁷ ~	1.5×10 ⁻⁴ ~	1.3×10 ⁻³ ~	2.0×10 ⁻⁵ ~	5.0×10 ⁻⁹ ~	—	4.8×10 ⁻⁷ ~
	2.5×10 ⁻⁵	7.0×10 ⁻³	2.4×10 ⁻²	7.0×10 ⁻²	1.6×10 ⁻⁶	—	2.4×10 ⁻⁵
内摩擦角/(°)	19~36	29~42	44~59	—	—	—	31~37
黏聚力/kPa	44	0	0	—	0.30~0.42	0	0
不排水黏聚力/kPa	35~250	0	0	(5~12)×10 ⁻³	—	0	0
压缩指数	1.60~3.00	—	0.34~0.54	0.10~0.15	16.60~20.60	—	—
再压缩指数	0.15~0.30	—	0.12~0.17	0.002~0.005	9.40	—	—
适宜孔隙流体	矿物油和石蜡溶剂混合液, 溴化钙卤液	矿物油和石蜡溶剂混合液, 溴化钙卤液	矿物油混合液, STSI	水	水	矿物油和石蜡混合液	矿物油混合液
适宜观测厚度/cm	2~5	2~5	5~20	—	10	3	2~5
宜模拟岩土类型	黏土	砂土/黏土	砂土	超软海洋沉积物	海洋沉积物	砂土	超细黏土

表 3 开源 PIV 图像处理软件
Table 3 Open source PIV software

软件	GUI	图像互相关	PIV 个人身份验证	特点	应用领域	文献
GeoPIV	否	频率和时间	是(手动)	应变计算, 图像校准	岩土力学	[53]
GeoMAGIC	是	频率和时间	是	微观运动学, 粒子追踪, 自适应拉格朗日, 应变计算, 多尺度粒子测速图像互相关分析	岩土力学	[54]
MatPIV	否	频率	是	批处理	流体动力学	[55]
PIVlab	是	频率和时间	是	自适应PIV, 批处理	流体动力学	[56]
OpenPIV	是	频率	是	PIV后处理	流体动力学	[57]

注: GUI(Graphical User Ineterface)图形用户界面, 以图形方式显示的计算机操作用户界面。

PIV 示踪方法包括: ① 激光激发散斑切面, 利用激光光源产生片状光束, 在透明土模型内部形成片状激光散斑面方便观测; ② 人工制斑作为散斑切面, 在模型内部布置一层染色同质材料^[58]。常用玻璃微珠和杂质或气泡为示踪点, 或使用有机荧光示踪剂或无机高锰酸钾溶液作为渗流路径指示。

1.4 透明土试验技术瓶颈

WANG 等^[59]、WEI 等^[60-61]、杜建明等^[58]、冷先伦等^[62]和 WANG 等^[63]总结当前透明土试验技术发展现状, 认为透明土应用仍存在诸多不足: ① 模拟土体种类偏少, 无法涵盖大部分天然岩土体类型; ② 模拟土

体难以复制天然岩土体风化、胶结、各向异性等特征; ③ 透明土工程性质研究不够系统, 尚未建立一套与天然砂土物理力学性质相类比的完整指标体系; ④ 骨架材料黏聚力较弱或强度较低, 制备形状较为复杂的物理模型困难, 如较大坡角边坡、基坑或硐室; ⑤ 透明度受模型尺寸限制, 部分骨架材料在试制过程中, 随着模型体积增大透明度会降低; ⑥ 散斑切面效果仍不稳定, 易受激光器运作、示踪粒子效果和图像获取技术等因素影响。

目前, 透明土试验技术所涉及透明土材料制备、岩土工程性质、试验设备与技术、图像捕捉与处理方

法等已累积大量基础工作, 并仍在不断深入探索、测试新材料新方法、克服技术瓶颈, 扩展其应用领域。

2 透明土试验技术在边坡工程中的应用

2.1 透明土试验技术在边坡工程中的应用实例与不足

国内外学者利用透明土材料构建水下滑坡模型并开展滑坡机理相关试验研究。SUI 和 ZHENG^[64]观测了透明土水下滑坡模型在水位持续下降条件下变形破坏过程, 为海岸滑坡防治研究提供参考(图 1(a))。WANG 等^[50]综合考虑了岩体 Barton 节理粗糙度系数、

坡体高度和坡角等因素对土岩边坡稳定性的影响, 探讨了土石边坡的滑动机制(图 1(b))。蔡松林^[65]分析孔隙流体液面降低引起的边坡失稳机理, 将滑动过程概化为非饱和边坡入渗和饱和边坡失稳破坏 2 个阶段。XIE 等^[10]和师晓康^[66]进行基于双排抗滑桩与荷载诱发滑坡的相互作用模型试验, 确定透明土技术在研究土拱效应方面具有优势(图 1(c))。张建伟等^[67-68]获取了坡角 30°的斜坡在加载和卸载条件下土体变形和位移数据, 分析 2 种条件下斜坡破坏规律。ZHOU 等^[69]讨论了水位快速下降条件下伞形锚加固边坡的变形和破坏模式特征(图 1(d))。

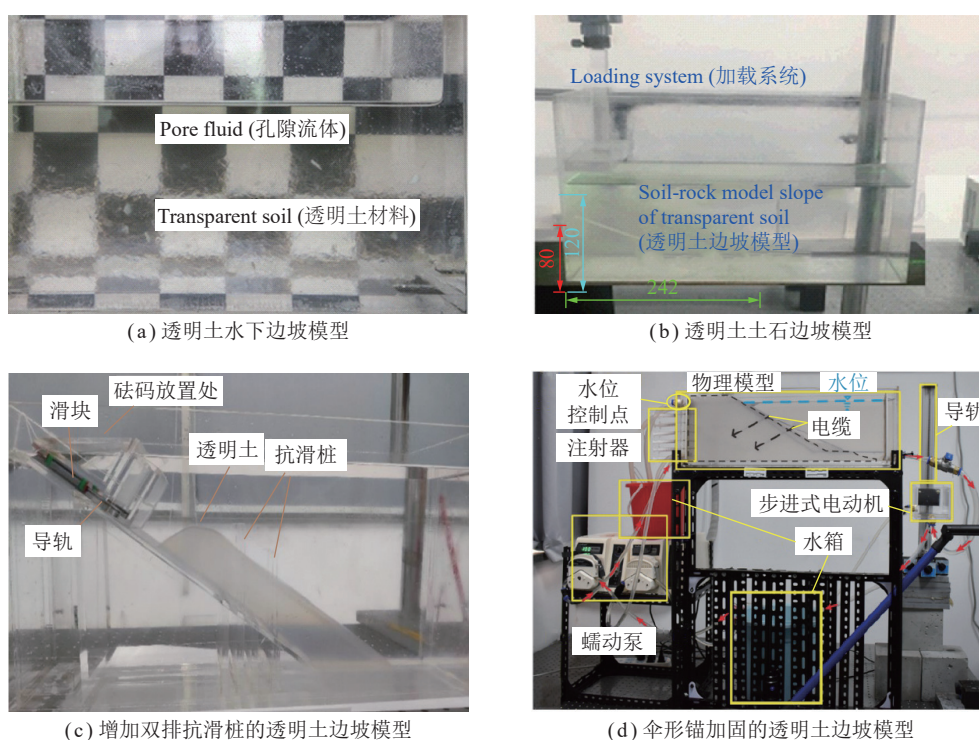


图 1 水下透明土边坡物理模型

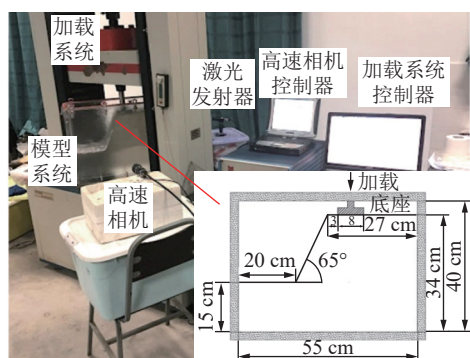
Fig.1 Various physical models of underwater transparent soil slopes

前期透明土在边坡工程中的应用主要是针对水下地层进行模拟, 不适宜陆地边坡; 伴随研究的深入, 透明土必须处于液面以下才能取得较好透明效果的限制得到了一定程度改善。WEI 等^[60]和冷先伦等^[62]基于熔融石英砂透明骨架材料和混合矿物油, 加入疏水性气相二氧化硅黏结剂, 制备得到透明胶结土, 通过三轴试验确定其强度特性。WEI 等^[61,70]利用透明胶结土建立均质透明边坡模型, 研究顶部荷载条件下滑坡剪切带力学行为与坡面空间变形问题(图 2(a))。陈建峰等^[71]以不同锚固长度抗滑桩对均质边坡进行加固试验, 可视化观测边坡内部变形破坏和滑移全过程(图 2(b))。总体上, 边坡试验用到的固化胶结土, 虽无需补充孔隙流体且坡体外部无液体分布, 但胶结剂

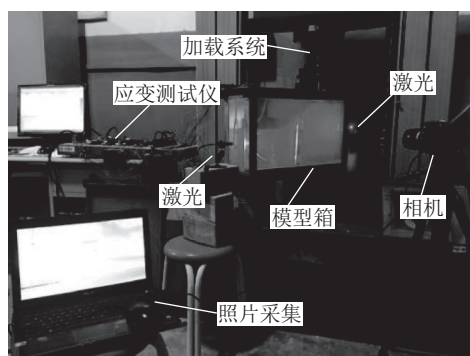
质量分数较大, 影响材料透明度, 在一定程度上会降低土体渗透性, 不适宜滑坡体内部地下水渗流研究。

2.2 透明土试验技术在边坡工程中的渗流可视化模拟

受限于天然土体的不透明性而无法直观观察到土体内部流动过程, 土体渗流的研究方法通常是观察性的、基于表面和宏观的, 无法得到土体内部流体渗透路径或轨迹, 对土体内部流体流动和流体赋存规律的透彻了解较为困难。透明土试验技术可以突破传统研究模式, 实现土体内部变形和渗流的可视化模拟; 透明土试验技术对土体渗流的研究是非侵入性的, 排除了预埋传感器设备引起的土体扰动, 不会形成流体绕流或流速改变, 避免了常规测量手段对试验结果的



(a) 透明胶结土边坡模型



(b) 不同锚固长度抗滑桩加固透明胶结土边坡模型

图 2 固态透明胶结土边坡物理模型

Fig.2 Physical models of solid transparent soil slope

干扰;透明土试验技术能够连续记录试验全过程高清图像,一定程度上提高了试验精度。

目前国内外研究人员已经开展了基于透明土模型的水下滑坡渗流可视化研究。EZZEIN 和 BATHURST^[18]测定粗粒和细粒熔融石英砂透明土的渗透系数。SUI 和 ZHENG^[64]开展透明土体渗流研究,观测到水下滑坡在水位下降条件下渗流路径是水平的。蔡松林^[65]讨论持续降雨引起斜坡降雨入渗下均匀流及非均匀流(大孔隙流)的运移特征。ZHOU 等^[69]模拟水库泄洪条件下,水位快速下降对边坡稳定性影响。

综合上述讨论,透明土边坡物理模型的构建面临 2 个问题:①复杂地层模拟困难,当前多见将透明土技术应用于单一粒径骨架材料构成的均匀地层的相关物理模拟研究,较少涉及级配和多类别骨架材料透明土模拟,尤其罕见特殊地层环境研究成果;②现有利用透明砂土制备滑坡模型的技术方案,受透明土特性限制,滑坡体大多位于液面以下,这与陆地边坡发育条件不尽相同,且有机类孔隙流体黏聚力更大,会增加滑移破坏的难度。

在后续利用透明土构建滑坡物理模型开展滑坡降雨入渗研究中,需进一步改进透明土体特性,保证滑坡体无需整体浸放于孔隙流体中而仍然保持高透

明度。

基于上述研究成果,笔者认为使用透明土模拟天然岩土体开展滑坡渗流可视化研究是可行的。选择合适的骨架材料和适配的孔隙流体,严格依据可靠的制备方法,可以确保透明土材料物理力学性与天然砂土或黏土的相似性,结合高清图像处理技术可以便捷、直观地反映土体内部的变形和渗流的变化,基于已有透明土边坡研究和渗流研究实践,开展透明土流体渗流室内物理可视化模拟,对明晰滑坡渗流机制具有重要的推动意义。

3 滑坡渗流透明土物理模拟实例

透明土滑坡物理模型的制备参考 WEI 等^[60]和冷先伦等^[62]的方法,采用不同粒径熔融石英砂模拟砂岩、粉砂岩;利用无定形硅粉材料模拟泥岩软弱夹层。气相二氧化硅具亲油性,折射率为 1.458 5、与熔融石英砂一致,与熔融石英砂和孔隙流体混合后,不改变透明度且能够吸附到熔融石英砂表面使石英砂之间相互黏结,本次试验以疏水性气相二氧化硅制备黏结剂铺设在边坡表层,可有效控制孔隙流体分布范围,降低边坡外部液面高度。试验过程需要控制熔融石英砂的粒径和级配、熔融石英砂与气相二氧化硅的配比、气相二氧化硅混合方式和添加顺序、示踪剂的选用以及混合矿物油的调配比例等。

3.1 材料选取和透明土制备

透明土固体骨架使用熔融石英砂(图 3(a)、(b))和无定形硅粉(图 3(c))。熔融石英砂粒径为 0.25~0.50、0.50~1.00、1.00~2.00、2.00~5.00 和 5.00~10.00 mm;无定形硅粉粒径为 20.00~35.00、35.00~45.00 和 45.00~75.00 μm 。

黏结剂选用 100 nm 疏水性气相二氧化硅(以下简称“气相二氧化硅”)与熔融石英砂和孔隙流体混合,以增加骨架材料强度和黏聚力(图 3(d))。

孔隙流体使用食品级有机白矿油,选用 3 号白油(上海摩润克生产)和 15 号(塔里木石化)白油,按一定比例配置混合矿物油孔隙流体,保证其与配置好的固体骨架折射率相同。使用阿贝折射仪(型号 WZS-1)测定混合矿物油折射率,经多次调整配制比例,确定不同室温下 15 号白油和 3 号白油混合所得折射率为 1.458 5 孔隙流体的体积比,如室温 21 $^{\circ}\text{C}$ 时,15 号白油和 3 号白油以 1:2.5 混合时所得孔隙流体折射率为 1.458 5。2 种白油折射率及孔隙流体混合如图 4、5 所示。配制好的孔隙流体放置在真空饱和桶内排气 6 h 以上可减少液体中的气泡,提高透明度。

本次试验对前文提到的 3 种示踪剂进行了对比

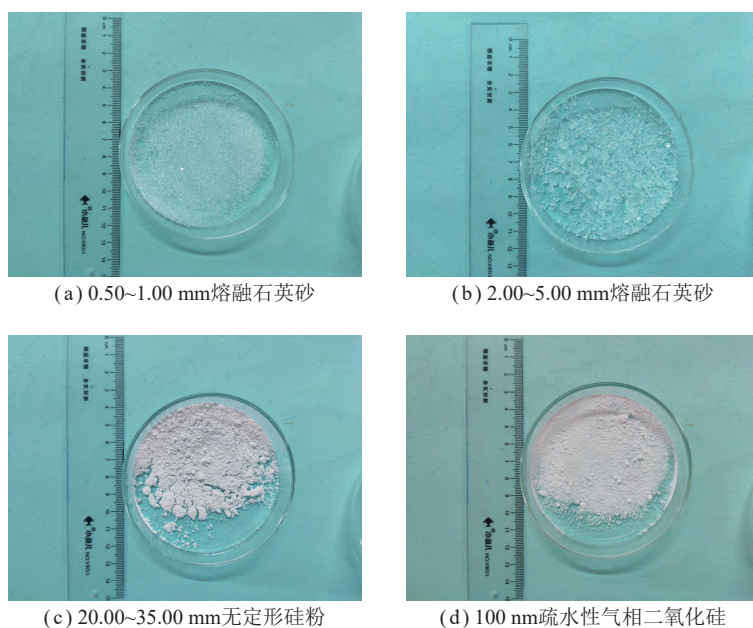


图3 透明骨架材料

Fig.3 Solid materials of transparent soil

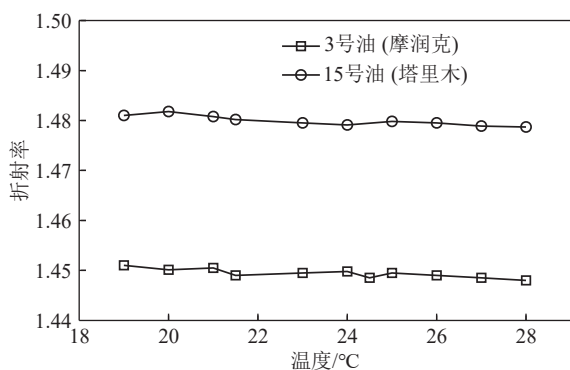


图4 不同温度下15号白油和3号白油折射率

Fig.4 Refractive index of No. 15 white oil and No. 3 white oil at different temperatures

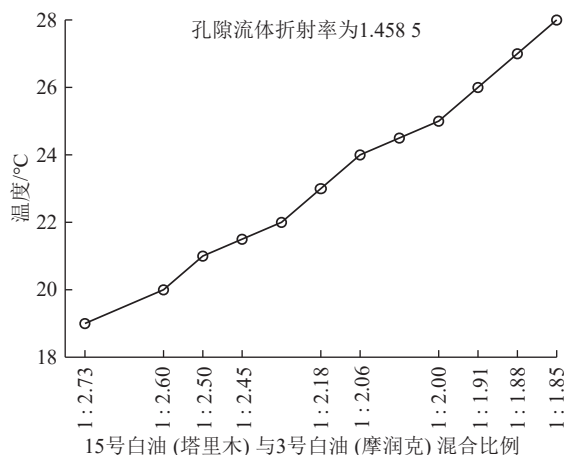


图5 不同温度下孔隙流体混合比例

Fig.5 Pore fluid mixing ratio at different temperatures

研究,发现玻璃微珠和气泡指示微小变形效果较好,但流动性较差,不适宜渗流研究;高锰酸钾溶液在室

内自然光条件下呈鲜亮紫红色(图6(a)),PIV系统下呈灰黑色(图6(b)),尼罗红荧光试剂经激光激发在室内自然光条件下呈现荧光橙色(图6(c)),PIV系统特制滤镜下呈明亮荧光反应(图6(d)),选用尼罗红荧光示踪剂或高锰酸钾指示剂作为示踪剂,均可清晰指示流体渗流路径。

3.2 透明土滑坡物理模型制备

透明土滑坡模型制备步骤包括充分拌合、抽真空、静置和人工切坡。熔融石英砂用硝酸浸泡24 h,后使用大量超纯水清洗干净、烘干备用。将称量后熔融石英砂和混合矿物油充分拌合(试样a),此时呈半透明状且有大量气泡(图7(a));将试样a放入真空箱中排气6~12 h得到试样b(图7(b));试样b在真空状态下加入大量混合矿物油至液面没过固体表面,获取试样c,此时试样c呈半透明状且有微量气泡(图7(c)),后关闭真空泵;试样c静置24 h以上,得到试样d(图7(d)),此时试样d呈透明状态。制备多层结构、复杂透明土物理模型需分层控制,每层厚度不超过5 cm,将每层分别压实、重复真空饱和和静置过程。透明土试样d经人工挖取边坡制得滑坡物理模型,后重复抽真空和静置过程,完成透明土滑坡模型制备。

黏结剂制备首先需要确定熔融石英砂、气相二氧化硅和混合矿物油的配合比。气相二氧化硅取熔融石英砂质量的1%~3%(该质量分数可最大程度降低对流体渗流的影响),对应孔隙液体量为气相二氧化硅质量的2.5倍,该配比指示润湿干燥熔融石英砂同时使气相二氧化硅饱和和所需最少量孔隙流体。黏结剂制备步骤参考试样a~d的过程。黏结剂铺设在斜坡

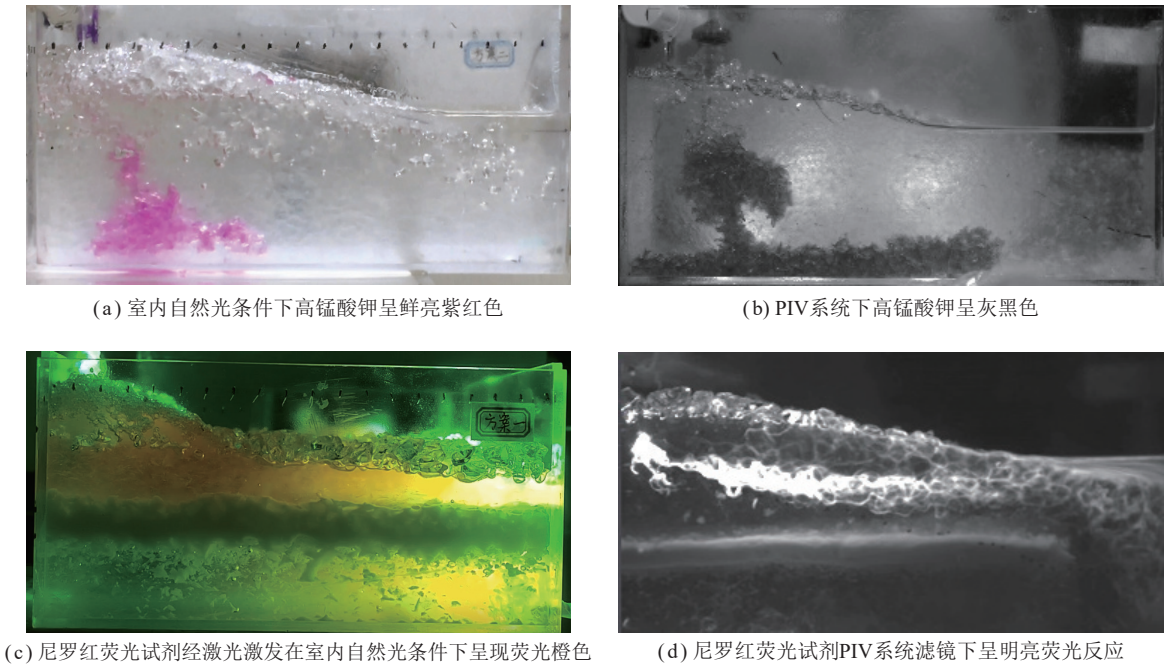


图 6 高锰酸钾和尼罗红荧光示踪剂效果

Fig.6 Potassium permanganate tracer and nile red fluorescent tracer

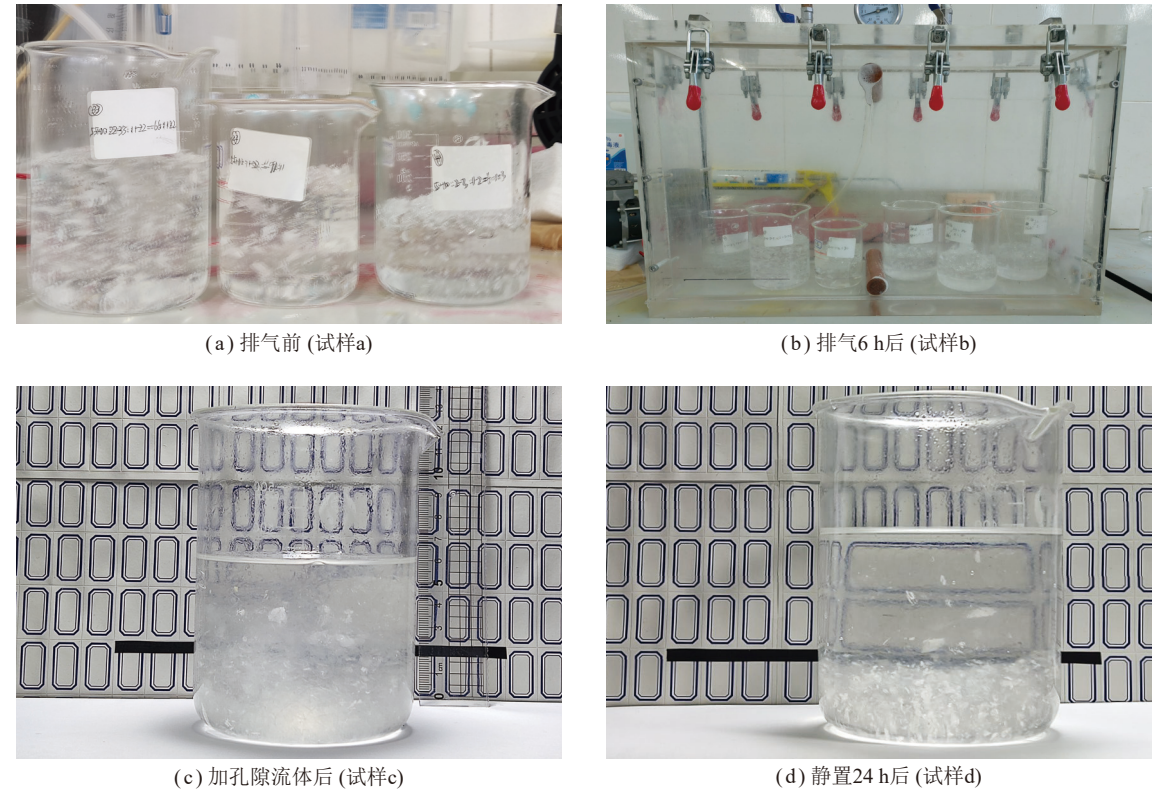


图 7 透明土试样

Fig.7 Transparent soil samples

表层,可以起到双向阻水的作用,控制孔隙流体分布在滑坡模型内部,无需将模型整体置于孔隙流体液面以下,既满足陆地滑坡发育条件,亦可保持模型透明度。

将承装孔隙流体的装置连接模型槽的降雨装置,使用蠕动泵控制进水流速。待流速稳定后,将示踪剂

匀速缓慢注入透明土,记录模型从降雨开始至滑坡启动全过程图像信息,便于后期分析。

3.3 渗流可视化观测

滑坡体地下水渗流观测和启滑过程监控,使用 1 台 532 nm、20 W 激光发射器作为激光光源布置在模

型正前方,使用1台高速相机作为动态拍摄系统,结合5台2400万以上像素的智能手机采集模型四周和正上方动态图像(图8)。使用高速相机或智能手机获取的图像信息,通过PIV软件处理后,可获取滑坡体内部真实流场信息(图9,其中, t 为时间),实现渗流可视化观测。

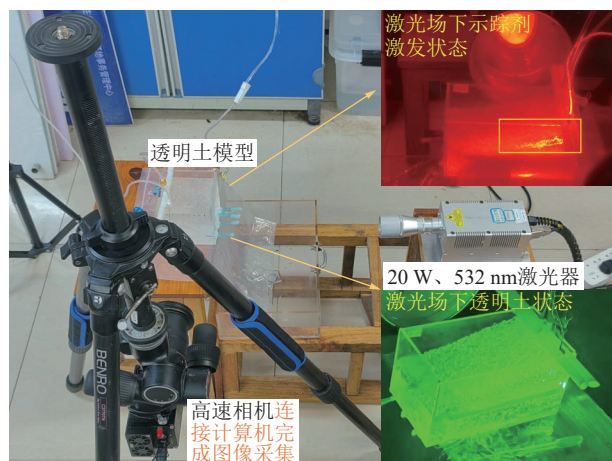


图8 滑坡模型图像采集系统

Fig.8 Acquisition system for landslide transparent soil model

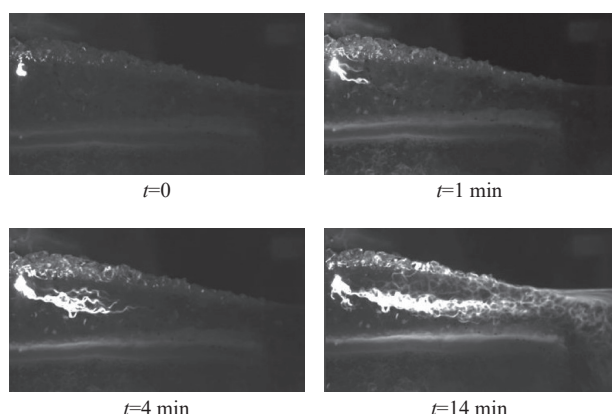


图9 荧光示踪剂下不同时刻渗流过程

Fig.9 Seepage processes at different moments under fluorescent tracer

本次研究优化了适宜滑坡渗流的图像采集方法,建立了透明土滑坡模型降雨入渗可视化观测方法,可以获取大量人工降雨条件下透明土滑坡理想模型渗流数据,以期为滑坡灾害过程中降雨入渗作用机制与透明土可视化模拟研究提供基础依据。

4 结 论

(1) 详细整理了透明土试验技术发展与应用,并对国内外相关研究成果进行综述;对比不同骨架材料和孔隙流体适配问题,比较不同透明土材料适合模拟的土体类型,整理透明土室内物理模拟采用常规仪器和

试验设备、常用数字图像处理技术和图像解析软件,梳理透明土试验技术在降雨滑坡入渗中的研究现状,总结现有研究中存在的不足及未来发展趋势。

(2) 采用不同粒径熔融石英砂模拟砂岩、粉砂岩,利用无定形硅粉材料模拟泥岩软弱夹层,在透明土中添加1%~3%疏水性气相二氧化硅制备黏结剂铺设在边坡表层,控制孔隙流体分布范围和降低边坡外部液面高度,完成滑坡透明土物理模型构建。

(3) 选用尼罗红荧光示踪剂或高锰酸钾示踪剂作为渗流场指示剂,进一步优化适用于滑坡渗流过程图像采集技术,建立起滑坡渗流透明土物理模型可视化试验系统,开展降雨条件下滑坡渗流物理模拟,获取降雨入渗诱发滑坡灾害全过程信息,论证基于透明土试验技术用于滑坡地质灾害等领域可视化观测的可行性,进一步拓宽滑坡可视化模拟的思路,有助于深入探索滑坡滑动机制及其运动规律。

参考文献(References):

- [1] 范宣梅, 许强, 张倬元, 等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3753-3759.
FAN Xuanmei, XU Qiang, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3753-3759.
- [2] 包小华, 廖志广, 徐长节, 等. 不同渗流边界条件下粉砂边坡失稳模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3789-3796.
BAO Xiaohua, LIAO Zhiguang, XU Changjie, et al. Model test study of the failure of silty sand slope under different seepage boundary conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3789-3796.
- [3] 孔纲强, 沈扬, 杨庆, 等. 三维透明土实验技术平台开发及在实践教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 94-97, 115.
KONG Gangqiang, SHEN Yang, YANG Qing, et al. Development of 3D transparent soil experimental technology platform and its application in practical teaching[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(5): 94-97, 115.
- [4] BAO Y D, SUN X H, ZHOU X, et al. Some numerical approaches for landslide river blocking: Introduction, simulation, and discussion[J]. *Landslides*, 2021, 18(12): 3907-3922.
- [5] DENG H, ZHONG C Y, WU L Z, et al. Process analysis of causes of Luanshigang landslide in the Dadu River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(22): 737.
- [6] ZHANG Y S, CHEN J P, ZHOU F J, et al. Combined numerical investigation of the Gangda paleolandslide runout and associated dam breach flood propagation in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau[J]. *Landslides*, 2022, 19(4): 941-962.
- [7] ISKANDER M G, LAI J, OSWALD C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(4): 425-433.

- [8] ISKANDER M, BATHURST R J, OMIDVAR M. Past, present, and future of transparent soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 20150079.
- [9] ZHANG Y P, QUE X Z, HU M X, et al. 3D reconstruction of a single bubble in transparent media using three orthographic digital images[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 5803.
- [10] XIE Q, CAO Z L, SHI X K, et al. Model test of interaction between load-caused landslide and double-row anti-slide piles by transparent soil material[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(5): 4841–4856.
- [11] SIEMENS G A, PETERS S B, TAKE W A. Comparison of confined and unconfined infiltration in transparent porous media[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 851–863.
- [12] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1133–1140.
LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1133–1140.
- [13] 阙云, 翁斌, 蔡松林, 等. 非饱和透明土优先流迁移规律分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 857–867, 878.
QUE Yun, WENG Bin, CAI Songlin, et al. Analysis of preferential flow migration in unsaturated transparent soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 857–867, 878.
- [14] 孔纲强, 李辉, 王忠涛, 等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 1935–1940, 1947.
KONG Gangqiang, LI Hui, WANG Zhongtao, et al. Comparison of dynamic properties between transparent sand and natural sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 1935–1940, 1947.
- [15] GUZMAN I L, ISKANDER M, SUESCUN-FLOREZ E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 187–206.
- [16] 隋旺华, 高岳. 透明土实验技术现状与展望[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 577–582.
SUI Wanghua, GAO Yue. Status and prospect of transparent soil experimental technique[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 577–582.
- [17] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(5): 525–535.
- [18] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(6): 590–601.
- [19] LO H C J, TABE K, ISKANDER M, et al. A transparent water-based polymer for simulating multiphase flow[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(1): 1–13.
- [20] WALLACE J F, RUTHERFORD C J. Geotechnical properties of LAPONITE RD®[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 20140211.
- [21] KONG G Q, LI H, YANG G, et al. Investigation on shear modulus and damping ratio of transparent soils with different pore fluids[J]. *Granular Matter*, 2018, 20(1): 8.
- [22] 孔纲强, 孙学谨, 李辉, 等. 孔隙液体对玻璃砂透明土强度特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 377–384.
KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LI Hui, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 377–384.
- [23] 孔纲强, 孙学谨, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. *水利学报*, 2017, 48(11): 1303–1310.
KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LIU Hanlong, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(11): 1303–1310.
- [24] 孔纲强, 张鑫蕊, 许文宾, 等. 透明土中孔隙液体折射率、黏度系数与稳定性[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(4): 25–29.
KONG Gangqiang, ZHANG Xinrui, XU Wenbin, et al. Refractive index, viscosity coefficient and stability of pore fluids in transparent soil[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(4): 25–29.
- [25] 张仪萍, 李亮, 王思照. 透明土中孔隙流体的实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(10): 1828–1834.
ZHANG Yiping, LI Liang, WANG Sizhao. Experimental study on pore fluid for forming transparent soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(10): 1828–1834.
- [26] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(6): 1140–1146.
KONG Gangqiang, LIU Lu, LIU Hanlong, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1140–1146.
- [27] 吴跃东, 罗如平, 刘坚, 等. 基于透明土的取土管贯入扰动变形试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1507–1512.
WU Yuedong, LUO Ruping, LIU Jian, et al. Soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube based on transparent soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1507–1512.
- [28] 张婉璐, 陈永辉, 齐昌广. 利用透明土模型试验的细长桩压曲研究[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(2): 66–72.
ZHANG Wanlu, CHEN Yonghui, QI Changguang. Research on buckling of slender pile based on transparent soil model test[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(2): 66–72.
- [29] 陈建峰, 许强, 郭鹏辉, 等. 基于透明土技术的加筋地基模型试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 330–335.
CHEN Jianfeng, XU Qiang, GUO Penghui, et al. Model tests of reinforced foundation based on transparent soil technique[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(3): 330–335.
- [30] SADEK S G. Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation[D]. New York: Polytechnic University, 2001: 13.

- [31] SUN J Z, LIU J Y. Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40: 236–240.
- [32] CARVALHO T, SUESCUN-FLOREZ E, OMIDVAR M, et al. A nonviscous water-based pore fluid for modeling with transparent soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 20140278.
- [33] AHMED M, ISKANDER M. Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 27(1): 101–110.
- [34] 雷华阳, 翟塞北, 刘英男, 等. 透明砂土可视透明度及物理力学特性研究[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(S1): 35–40.
- LEI Huayang, ZHAI Saibei, LIU Yingnan, et al. Study on visual transparency and physical and mechanical properties of transparent sand[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(S1): 35–40.
- [35] ISKANDER M G, SADEK S, LIU J Y. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2002, 2(4): 13–26.
- [36] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical properties of transparent silica[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 111–124.
- [37] 姜海波, 武亚军, 孔纲强, 等. 超软土真空预压透明土模型试验及土桩形成机理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 33–40.
- JIANG Haibo, WU Yajun, KONG Gangqiang, et al. Transparent soil model test of vacuum preloading method on ultra-soft soil and formation mechanism of “soil pile” [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 33–40.
- [38] 张春会, 张海霞, 赵全胜, 等. 偏心系数和锚锭角对固定锚锭拖曳锚运动的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 515–522.
- ZHANG Chunhui, ZHANG Haixia, ZHAO Quansheng, et al. Effects of padeye offset ratio and fluke angle on travel of fixed fluke drag embedded anchor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 515–522.
- [39] 叶恬, 易立达, 胡孟娴, 等. Laponite RD 透明土模拟软黏土的适用性分析[J]. *科技通报*, 2019, 35(6): 154–159, 164.
- YE Tian, YI Lida, HU Mengxian, et al. Applicability analysis for laponite RD transparent clay in simulating natural soft clay[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(6): 154–159, 164.
- [40] LI L, ISKANDER M. Visualization of interstitial pore fluid flow[J]. *J Imaging*, 2022, 8(2): 32.
- [41] 吴跃东, 陈明建, 周云峰, 等. 新型透明黏土的配制及其基本特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(S1): 141–145.
- WU Yuedong, CHEN Mingjian, ZHOU Yunfeng, et al. Study on preparation and basic characteristics of new transparent clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S1): 141–145.
- [42] 孔纲强, 周杨, 刘汉龙, 等. 新型透明黏土制配及其物理力学特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2208–2214.
- KONG Gangqiang, ZHOU Yang, LIU Hanlong, et al. Manufacture of new transparent clay and its physical and mechanical properties [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2208–2214.
- [43] HAKHAMANESHI M, BLACK J A. Shear strength of transparent gelita-effect of mixture ratio, displacement rate and over-consolidation ratio[C]//Geo-Chicago 2016: Sustainable Materials and Resource Conservation. Chicago, 2016: 443–452.
- [44] DOWNIE H, HOLDEN N, OTTEN W, et al. Transparent soil for imaging the rhizosphere[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e44276.
- [45] 李颖臻. 3D 打印透明砂土及其基本力学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 25–29.
- LI Yingzhen. 3D printing transparent sand technology and basic mechanical properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 25–29.
- [46] LIU J, ISKANDER M G, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(4): 390–401.
- [47] LIU J Q, TANG H M, ZHANG J Q, et al. Glass landslide: The 3D visualization makes study of landslide transparent and virtualized[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(10): 3847–3856.
- [48] 周航, 袁井荣, 刘汉龙, 等. 基于球形硅微粉的新型透明黏土基本力学特性试验[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(9): 172–180.
- ZHOU Hang, YUAN Jingrong, LIU Hanlong, et al. Basic mechanical properties of transparent clay made from spherical silica powder: An experimental study[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(9): 172–180.
- [49] GUZMAN I L, ISKANDER M, BLESS S. Observations of projectile penetration into a transparent soil[J]. *Mechanics Research Communications*, 2015, 70: 4–11.
- [50] WANG Z, LI C, DING X M. Application of transparent soil model tests to study the soil-rock interfacial sliding mechanism[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(4): 935–943.
- [51] 王章琼, 王亚军. 微观实验用于岩石力学课程教学的探索[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(1): 234–237.
- WANG Zhangqiong, WANG Yajun. Exploration on application of micro experiment to teaching of rock mechanics course[J]. *Experimental Technology and Management*, 2018, 35(1): 234–237.
- [52] GANIYU A A, RASHID A S A, OSMAN M H. Utilisation of transparent synthetic soil surrogates in geotechnical physical models: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4): 568–576.
- [53] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 619–631.
- [54] BAO H, ZHANG G B, LAN H X, et al. Geometrical heterogeneity of the joint roughness coefficient revealed by 3D laser scanning[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105415.
- [55] SVEEN J K, COWEN E A. Quantitative imaging techniques and

- their application to wavy flows[J]. *PIV and Water Waves*, 2004: 1–49.
- [56] OCHOWIAK M, WIODARCZAK S, KRUPIŃSKA A, et al. Particle image velocimetry based on Matlab and PIV lab for testing flow disturbing elements[J]. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021: 268–276.
- [57] TAYLOR Z J, GURKA R, KOPP G A, et al. Long-duration time-resolved PIV to study unsteady aerodynamics[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(12): 3262–3269.
- [58] 杜建明, 房倩, 刘翔, 等. 透明土物理模拟试验技术现状与趋势[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 852–861.
- DU Jianming, FANG Qian, LIU Xiang, et al. The present and development trend of physical simulation experiment technology for transparent soils[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 852–861.
- [59] WANG J X, LIU X T, LIU S L, et al. Physical model test of transparent soil on coupling effect of cut-off wall and pumping wells during foundation pit dewatering[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(1): 141–162.
- [60] WEI L T, XU Q, WANG S Y, et al. Development of transparent cemented soil for geotechnical laboratory modelling[J]. *Engineering Geology*, 2019, 262: 105354.
- [61] WEI L T, XU Q, WANG S Y, et al. The morphology evolution of the shear band in slope: Insights from physical modelling using transparent soil[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(4): 1849–1860.
- [62] 冷先伦, 王川, 庞荣, 等. 透明胶结土材料强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2059–2068, 2077.
- LENG Xianlun, WANG Chuan, PANG Rong, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2059–2068, 2077.
- [63] WANG B, HOU H J, ZHU Z W. Transparency and applications of transparent soil: A review[J]. *Geotechnical Research*, 2021, 8(4): 130–138.
- [64] SUI W H, ZHENG G S. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(3): 977–985.
- [65] 蔡松林. 降雨入渗下土壤水分运移机理的透明土试验模拟[D]. 福州: 福州大学, 2022: 94–98.
- CAI Songlin. Transparent soil experimental simulation of soil moisture transport mechanism under rainfall infiltration[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022: 94–98.
- [66] 师晓康. 基于透明土试验的双排抗滑桩桩土作用机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 11–22.
- SHI Xiaokang. Research on pile-soil interaction mechanism of double-row Anti-slide pile based on transparent soil test[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 11–22.
- [67] 张建伟, 李贝贝, 樊亚龙, 等. 基于透明土模型试验的斜坡加载土体破坏特征研究[J]. *河南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 50(6): 717–723.
- ZHANG Jianwei, LI Beibei, FAN Yalong, et al. Study on loading failure characteristics of slope based on transparent soil model test[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2020, 50(6): 717–723.
- [68] 张建伟, 丁乐, 樊亚龙, 等. 基于透明土模型试验的卸载后土体变形分析[J]. *中国科技论文*, 2022, 17(2): 127–132, 140.
- ZHANG Jianwei, DING Le, FAN Yalong, et al. Analysis of soil deformation after unloading based on transparent soil model test[J]. *China Sciencepaper*, 2022, 17(2): 127–132, 140.
- [69] ZHOU C, MA W C, SUI W H. Transparent soil model test of a landslide with umbrella-shaped anchors and different slope angles in response to rapid drawdown[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106765.
- [70] WEI L T, WANG S Y, XU Q, et al. Shear band propagation and mechanical behaviours of landslides under top loading[J]. *Transportation Geotechnics*, 2022, 37: 100882.
- [71] 陈建峰, 郭小鹏, 田丹, 等. 抗滑桩锚固长度对均质边坡滑动面及抗滑能力影响研究[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50(1): 42–49.
- CHEN Jianfeng, GUO Xiaopeng, TIAN Dan, et al. Effect of anti-slide piles anchorage lengths on slip surface and anti-slide capacity of homogeneous[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2022, 50(1): 42–49.