

陈帅,王永奇,何玉琼,等.人工堆积体相似材料与物理模型试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):333-339.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240191

CHEN Shuai,WANG Yongqi,HE Yuqiong,et al.Experimental study on similar materials and physical models of artificial deposits[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):333-339.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240191

人工堆积体相似材料与物理模型试验研究

陈帅¹,王永奇^{1*},何玉琼¹,张家明²,唐磊³

(1.昆明理工大学交通工程学院,云南昆明650500;2.昆明理工大学建筑工程学院,云南昆明650500;
3.云南省交通投资建设集团有限公司,云南昆明650032)

摘要:针对人工堆积体边坡在降雨作用下易发生滑坡灾害的问题,依托某堆积体工程实例,以黏聚力、内摩擦角和渗透系数为主控因素,制备可表征堆积体渗流特性的相似材料。通过开展降雨物理模型试验,研究堆积体边坡在降雨入渗作用下的响应规律、裂隙发育、坡体变形与破坏模式。研究表明:堆积体边坡内部存在的孔隙与裂缝为雨水入渗提供优势通道;降雨强度越大,孔隙水压力与坡体变形越大,降雨滞后作用越强;堆积体破坏过程可分为坡体浸润侵蚀-坡顶冲沟产生-坡脚局部破坏阶段、破坏加剧阶段和整体破坏阶段。研究成果可为堆积体边坡模型试验提供参考。

关键词:堆积体边坡;相似材料;降雨入渗;模型试验;破坏模式;裂隙发育;坡体变形

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)03-0333-07

Experimental study on similar materials and physical models of artificial deposits

CHEN Shuai¹, WANG Yongqi^{1*}, HE Yuqiong¹, ZHANG Jiaming², TANG Lei³

(1. College of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Communications Investment & Construction Group Company Limited, Kunming 650032, China)

Abstract: Aiming at the problem that artificial accumulation slope is prone to landslide disaster under the action of rainfall, materials with similar seepage characteristics of accumulation body are prepared with cohesion by taking internal friction angle and permeability coefficient as the main controlling factors. The rainfall physical model test is carried out based on an engineering example of an accumulation body. Response law, fracture development, slope deformation and failure mode of accumulated slope under rainfall infiltration are explained. The results show that the pores and cracks in the slope of the accumulation body provided an advantageous channel for rainwater infiltration. The greater the rainfall intensity, the greater the pore water pressure and slope deformation, and the stronger the rainfall lag effect. The failure process of accumulation can be divided into slope infiltration and erosion-gully generation at slope top-local failure stage at slope foot, failure aggravation stage, overall failure stage. The research results can provide reference for the model test of accumulation slope.

Keywords: accumulation slope; similar materials; rainfall infiltration; model tests; failure mode; fracture development; slope deformation

0 引言

随着我国交通基础设施向西南山区持续延伸,大批公路、铁路及相应附属相继建成,大型人工

堆积体工程日益增多。如何科学地开展堆积体工程边坡稳定性研究成为重要课题^[1-2]。现场试验、数值模拟和室内缩尺物理模型试验是岩土工程的主要研究方法^[3-5]。鉴于现场试验成本高、数值模

收稿日期:2024-07-11 修回日期:2024-10-10 接受日期:2024-10-13 责任编辑:朱含露

基金项目:国家自然科学基金项目(41807258)

作者简介:陈帅(2000-)男,云南昭通人,硕士研究生,主要从事公路工程与斜坡稳定方面的研究。E-mail:543982761@qq.com

通信作者:王永奇(1969-)男,云南临沧人,博士,讲师,主要从事边坡工程和隧道工程方面的研究。E-mail:13317035@kust.edu.cn

拟需假设条件,具有方便观察、可重复操作和成本低等优势,室内缩尺模型试验被广泛应用。该技术通过构建与原型环境类似的模拟试验,获取相关数据并进行验证补充^[6-8]。因此,大型人工堆积体工程研究,除采用现场试验与数值模拟外,需辅以室内缩尺物理模型试验,以实现安全、经济、绿色的目标。

相似材料的研制是物理模型试验开展的前提条件,也是决定模型能否真实反映原型物理性质的关键因素^[9-11]。学者们针对相似材料研制与物理模型试验方面开展了大量的研究。在相似材料研制方面,ZHAO等^[12]用河砂、重晶石粉、黏土、石膏和硅藻土配制了湿陷性黄土相似材料,成功应用于煤层开采试验。陈帆等^[13]选用黏土、重晶石粉、河砂和水成功配置黏土相似材料,再现了地铁隧道涌水涌砂灾害演化过程。杜家庆等^[14]基于正交试验以铁粉、锯末、膨润土和水,获得了郑州市轨道交通盾构掘进粉质黏土地层相似材料。在物理模型试验方面,WEI等^[15]通过野外调查、室内模型试验,分析了降雨入渗条件下滑坡破坏部位区域差异特征。窦晓东等^[16]采用物理模型试验、理论分析等方法,研究强降雨作用下裂缝发育古滑坡破坏机理。翟淑花等^[17]通过降雨入渗作用下不同颗粒物质组成堆积体失稳模型试验,系统分析了密实度、物质组成、坡度等对边坡稳定性影响。曹硕鹏等^[18]通过红黏土边坡裂隙演化、降雨入渗及冲刷模型试验,揭示了红黏土边坡裂隙演化规律与渗流冲刷特征。上述研究成果为进一步研究自然边坡破坏机理提供了理论参考,但是对于人工堆积体边坡的相关研究较少。

因此,本文以某人工堆积体边坡工程为研究对象,基于正交试验开展相似材料配比研究,并利用自制模型开展降雨模拟试验,分析降雨作用下人工堆积体边坡变形规律,为人工堆积体边坡模型试验提供参考。

1 相似材料配比试验研究

1.1 材料特性相似理论

物理模型试验基于相似理论,通过建立模型与原型的定量相似关系,揭示复杂现象的内部规律。在降雨模型试验中,选取几何相似比 C_L 为 n ,容重与重力加速度相似比为1,原型与模型参数相似比见表1。

表1 相似参数关系

Tab.1 similar parameter relationships

物理量	量纲	相似量	相似比
几何尺寸 L	L	C_L	n
密度 ρ	$FL^{-3}T^0$	C_ρ	1
黏聚力 c	$FL^{-1}T^2$	C_c	n
内摩擦角 φ	1	C_φ	1
变形模量 E	$FL^{-1}T^2$	C_E	n
含水率 ω	1	C_ω	1
渗透系数 k	F^0LT^1	C_k	$n^{1/2}$

1.2 相似原材料选择

依据现场土质材料特性与文献[13-14]研究成果,考虑模型试验相似材料的粒径效应,相似材料需为粉质散体,且具备高容重、低强度特性。本次模型试验采用标准砂、重晶石粉、膨润土和堆体土(过1 mm标准筛)作为原料,原料参数见表2。

表2 相似材料原料参数

Tab.2 similar raw material parameters

原料	性状	主要成分	密度/($g \cdot m^{-3}$)
标准砂	黄白相间	石英>90%	2.4
重晶石粉	白色粉末	BaSO ₄ >95%	4.0
膨润土	黄色粉末	钠基铝硅酸盐	1.5
堆体土	黄色颗粒		

标准砂用于调节相似材料密度、渗透系数;重晶石粉调整相似材料密度、黏聚力、内摩擦角;堆体土具有与原型土体相似的软化效果和吸水作用,用于调节相似材料的黏聚力、内摩擦角;膨润土调整相似材料的内摩擦角、变形模量。

1.3 相似材料配比方案

本次相似材料配比试验采用正交设计方法。选取标准砂、重晶石粉、膨润土、堆体土为骨料,加水配置。以标准砂质量/骨料质量(影响因素A)、重晶石粉质量/骨料质量(影响因素B)、膨润土质量/骨料质量(影响因素C)作为正交试验的3个因素,每个因素设置4个水平。同时,为更好地对比分析相似材料中各影响因素作用,消除无关条件对试验结果的影响,相似材料含水量均设置为14%。相似材料正交设计水平见表3。

表3 相似材料正交设计水平

Tab.3 level of orthogonal design for similar materials

水平	影响因素A/%	影响因素B/%	影响因素C/%
1	30	5	4
2	40	10	6
3	50	15	8
4	60	20	10

1.4 相似材料试样制备

根据正交试验设计配比方案准备原料、制样并进行相关参数测试试验, 材料制备流程见图 1, 具体如下。

(1) 原料准备: 根据相似材料配比方案, 称取一定量的标准砂、重金石粉、膨润土、堆体土及水溶液。

(2) 试样制作: 将按配比称重的干料投入搅拌

机内, 干拌均匀后缓慢加入水溶液, 再次搅拌均匀后利用制样机制样进环刀内, 覆盖玻璃片并以保鲜膜密封, 防止水分蒸发, 贴上标签。

(3) 闷料称重: 将贴好标签的材料试样移至养护箱, 静置一昼夜完成闷料, 待闷料结束, 称重并计算密度。

(4) 室内试验: 依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020) 开展直剪试验、渗透试验, 并记录相关试验数据。

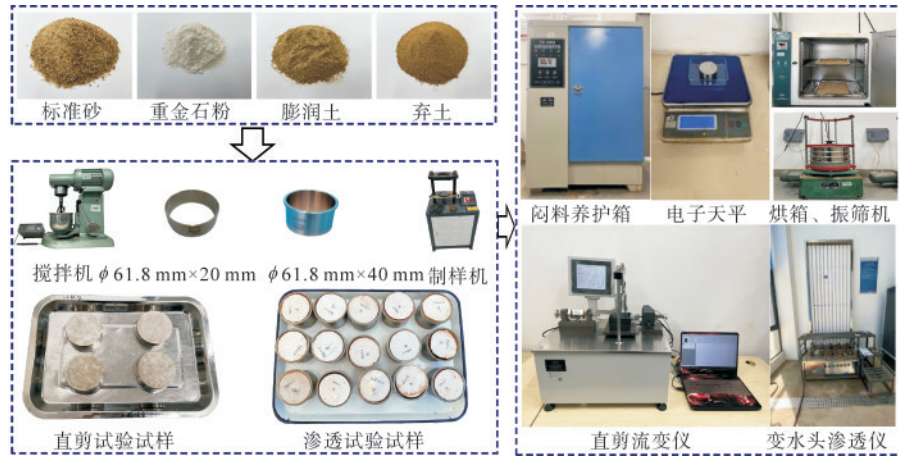


图 1 相似材料制备流程

Fig.1 process for preparing similar materials

1.5 相似材料试验结果分析

根据正交试验设计方案, 对制备的 16 组相似材料开展测量称重、直剪试验、渗透实验, 得到各组相似材料的密度、黏聚力、内摩擦角、渗透系数, 见表 4。在设定相似材料配比范围内, 密度为 1.74 g/cm³~1.79 g/cm³, 黏聚力为 0.50 kPa

~42.15 kPa, 内摩擦角为 16.97°~30.64°, 渗透系数为 4.50×10⁻⁷ cm/s~4.12×10⁻⁵ cm/s。通过配比试验结果的敏感性分析发现, 密度受重晶石粉含量影响较大; 黏聚力、内摩擦角对膨润土含量更敏感; 渗透系数主要受标准砂含量调整。

表 4 相似材料配比试验结果

Tab.4 similar material proportioning test results

试验编号	因素			密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
	A%	B%	C%				
S1	30	5	4	1.76	32.65	20.26	6.60×10 ⁻⁷
S2	30	10	6	1.79	24.85	22.68	4.50×10 ⁻⁷
S3	30	15	8	1.76	2.35	25.64	1.60×10 ⁻⁶
S4	30	20	10	1.77	42.15	19.63	6.50×10 ⁻⁷
S5	40	5	6	1.78	8.95	26.92	7.60×10 ⁻⁷
S6	40	10	4	1.78	0.50	30.64	1.30×10 ⁻⁶
S7	40	15	10	1.78	22.85	23.84	9.40×10 ⁻⁷
S8	40	20	8	1.78	32.65	18.73	1.70×10 ⁻⁶
S9	50	5	8	1.75	36.50	16.97	8.80×10 ⁻⁶
S10	50	10	10	1.78	32.50	17.21	6.80×10 ⁻⁶
S11	50	15	4	1.76	19.80	24.14	4.70×10 ⁻⁶
S12	50	20	6	1.75	1.40	25.71	6.10×10 ⁻⁶
S13	60	5	10	1.74	19.50	20.46	2.70×10 ⁻⁵
S14	60	10	8	1.77	6.20	26.75	2.50×10 ⁻⁵
S15	60	15	4	1.78	1.10	26.52	2.60×10 ⁻⁵
S16	60	20	6	1.77	13.20	28.06	4.12×10 ⁻⁵

2 堆积体降雨试验设计

2.1 试验材料

相似模拟试验以云南某人工堆积体为研究对象,见图2。该堆积体共设九级平台,平均堆高8 m,最大土层埋深约110 m,在堆积体下方设有重力式挡土墙,试验选取几何相似系数 $n=150$ 。堆体土与相似材料物理力学参数理论值见表5。

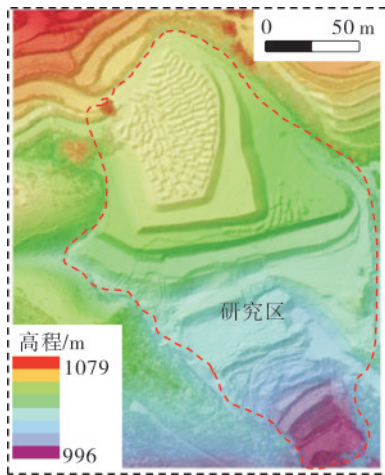


图2 研究区域

Fig.2 research area

表5 原型及相似材料理论值

Tab.5 theoretical values for prototypes and similar materials

材料种类	含水率	密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	渗透系数 ($cm \cdot s^{-1}$)
原型	14%	1.78	25.15	30.389	1.170×10^{-4}
相似材料	14%	1.78	0.17	30.389	2.625×10^{-5}

由表4和表5可知,S6号配比与相似材料理论值最为接近,但仍有一定差距。在该配比基础上适当减小黏聚力和增大内摩擦角即可。结合相似材料敏感性分析因素与相似材料参数指标的变化规律,以S6号配比为基准,每次按1%的比例调整膨润土、标准砂含量,参照1.4节制备方法开展多轮配比试验,最终确定相似材料配比为: w (标准砂): w (重晶石粉): w (膨润土): w (堆体土)=1:0.26:0.14:0.59,所得相似材料物理力学参数见表6。

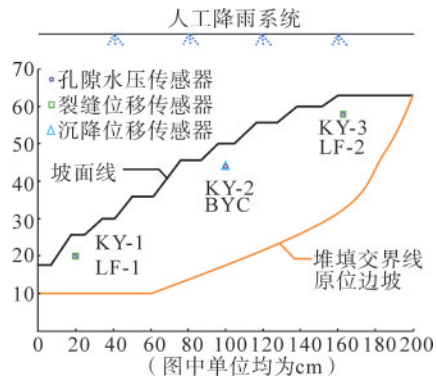
表6 相似材料参数测试结果

Tab.6 test results for similar material parameters

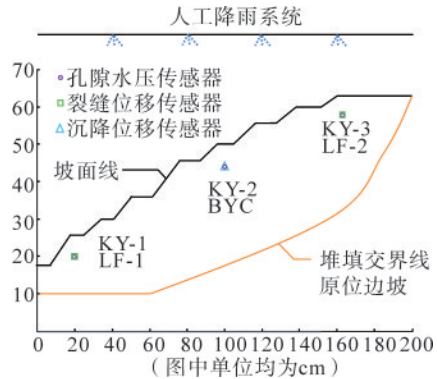
含水率	密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	渗透系数 ($cm \cdot s^{-1}$)
14%	1.78	0.17	30.389	2.425×10^{-5}

2.2 试验装置

降雨模型试验装置包含人工降雨系统、模型试验平台及测量系统。其中,人工降雨系统包括CMI2-5T型变频自吸泵、TG分体式喷头、水箱;模型试验平台包括试验底座与降雨系统支撑外框;测量系统包括DH5922D动态采集仪、BLT-PW型孔隙水压力计、BLT-YC-20沉降位移计及BLT-YWL-20裂缝传感器。传感器布设位置见图3。堆填交界线采用大疆M300无人机对现有地形进行扫描,与原地形图贴合后导入Rhino 6软件处理生成。



(a) 剖面图



(b) 平面图

图3 传感器布设

Fig.3 sensor deployment

2.3 试验方案

模型试验堆积体采用分层堆砌方式,共4层,每层堆砌完成后利用环刀进行容重控制,刨毛后再进行下一层堆砌,如此往复直至堆砌完成。根据原型所在地近20年来最大日降雨量为158 mm/d,依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)的划分标准,试验采用特大暴雨工况,工况设置情况见表7。

表7 降雨工况设置

Tab.7 rainfall condition setting

工况种类	降雨时长/h	降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)	静置时长/h
G1	6	24	6
G2	6	48	6

3 试验结果与分析

3.1 孔隙水压力变化

孔隙水压力是岩土混合物中地下水作用于微粒或孔隙间的压力。在降雨入渗过程中,随着雨水入渗到传感器位置,孔隙水压力计同步记录压力变化。试验共布设3个孔隙水压力计,其压力的时程变化曲线见图4。

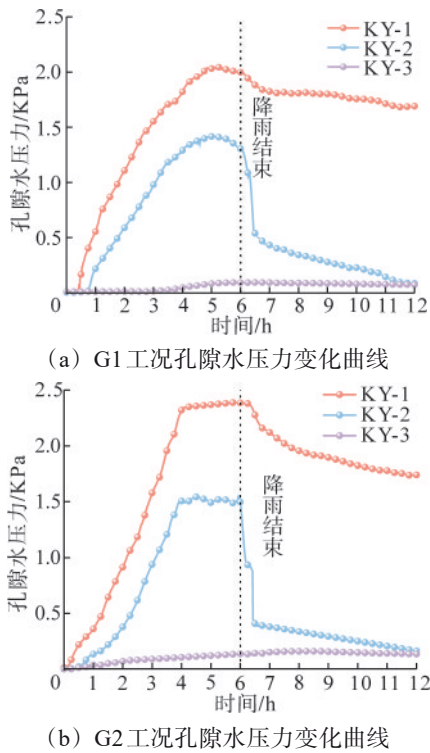


图4 不同降雨工况孔隙水压力变化

Fig.4 variation of pore water pressure under different rainfall conditions

由图4可见,在不同的降雨强度条件下,各测点的孔隙水压力变化情况基本一致,可分为缓慢增长、快速增长及快速下降3个阶段。在降雨前期,随着雨水的不断入渗,土体含水率(质量分数)增加、渗流作用增强,逐步形成稳定的渗流通道,此时孔隙水压力缓慢增长。随着降雨的持续进行,土体表层出现暂态饱和区域,产生超静孔隙水压力,孔隙水压力快速增加达到一定值后处于稳定状态。当降雨结束后,土体渗流作用逐渐停止,孔隙水压力逐渐消散下降。

由图4(a)可见,在相同降雨强度下,KY-1(坡底)响应速度最快,维持在峰值的时间更长,其次是KY-2(坡中),KY-3(坡顶)整体变化幅度较小。随着降雨的持续进行,雨水一部分入渗

至坡体内,另一部分由地表径流的形式向坡底、坡中汇集,坡底孔隙水压力计率先响应。

在降雨结束后,KY-2(坡中)下降速率最大,其次是KY-1(坡底),KY-3(坡顶)变化情况不明显。当降雨结束后,土体表层渗流作用停止,坡体内部渗流作用持续,来自坡中与坡顶的水分向坡底进行补充,坡底孔隙水压消散速度减缓。

在不同的降雨强度条件下,降雨强度越大,土体渗流作用越强,孔隙水压响应速率越快,变化速率越大。

3.2 坡体位移变化

在试验中共使用2个裂缝位移计与1个沉降位移计,位移的时程变化曲线如图5所示。

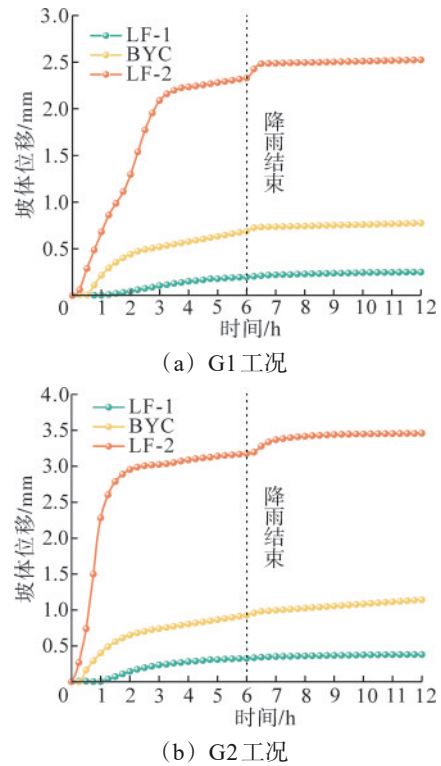


图5 不同降雨工况坡体位移变化

Fig.5 variation of slope displacement for different rainfall conditions

由图5可见,在不同降雨强度下,各测点位移变化情况大体一致。随着降雨持续,雨水入渗至坡体,土体饱和度增加,抗剪强度减小,坡体位移增大。降雨强度越大,坡体位移变化情况越大,达到极值所需时间越短。

由图5(a)可见,在同一种降雨强度条件下,坡顶产生的裂缝位移总是大于坡底,这是由于在降雨过程中,坡顶处土体向下滑动位移增大,坡底因前方挡土墙的支挡作用,位移发展受到限制。

在降雨结束后,坡体裂缝和沉降位移都有一定程度的增大。在降雨过程中,坡体由非饱和区向暂态饱和区向变化,土体饱和度重分布,孔隙气压力被压缩,当降雨结束后,孔隙气压力向薄弱地方突出,有一定的滞后作用。

3.3 坡体变形过程

在模型试验中,用高清摄像机全程记录坡体的变化过程。降雨初期,雨水以入渗为主,表层土体饱和度增加,坡体无明显破坏现象。随着降雨的持续,以坡体在G2工况为例,坡体的破坏过程见图6。



(a) 侵蚀浸润 (b) 破坏加剧 (c) 整体破坏

图6 坡面变形破坏过程

Fig.6 slope deformation and damage process

(1) 坡体浸润侵蚀、坡顶冲沟产生、坡脚局部破坏阶段。随着降雨过程的持续进行,坡体表面被浸润产生坡面径流,细颗粒被冲刷;在水流冲刷作用下,部分坡体产生冲沟,雨水汇集于坡脚处,坡脚出现局部侵蚀,见图6(a)。

(2) 破坏加剧阶段。随着雨水的不断入渗,土体出现暂态饱和区,孔隙水压力增大基质吸力减小,土体应力重分布,裂缝逐渐加深;坡体后缘受拉裂缝影响,下滑力大于土体有效应力,出现滑动现象,见图6(b)。

(3) 整体破坏阶段。随着降雨入渗作用持续,孔隙气压力进一步被压缩,坡体表面趋于饱和,土体抗剪强度减小;当降雨结束一定时间后,坡体位移继续增大,出现溜滑现象,后缘破坏加深,坡体整体出现滑移式破坏,见图6(c)。

3.4 降雨滞后效应分析

在降雨模型试验中,滞后效应表现为在降雨结束后土体内部物理过程仍持续进行,表现形式为:降雨结束后,坡底孔隙水压力计监测数据并

未立即快速下降,而是呈缓慢下降趋势;坡体最大位移并未出现在降雨结束时刻,而是发生在降雨结束后一定时间。这是因为在降雨结束后,坡体内部水分转移仍在继续,坡体上部土体水分向下部土体流动,坡底孔隙水压力计响应滞后,这与王力等^[9]所得试验结论相符合。

降雨在堆积体内的传导过程,是雨水逐渐渗透进入坡体内部孔隙并推动气体排出的过程。在降雨入渗前期,堆积体表层土体体积含水量增加,渗流作用增强,内部渗流通道逐步形成,表层土体饱和度增大,暂态饱和区形成;随着降雨的持续进行,暂态饱和区向下延伸,下渗的水分对气体产生持续的压缩作用,累积的气压形成反向的顶托力进而阻缓雨水入渗,堆积体内部出现气相与液相交替的过程^[20-21]。水气传导过程见图7。降雨结束后,失去水源补充,入渗过程减缓,孔隙气压力突出,威胁坡体安全,出现一定滞后效应。

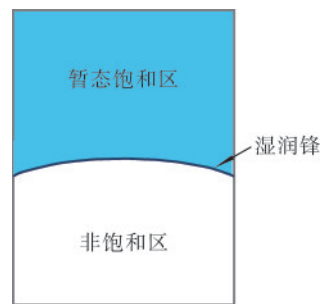


图7 水气传导过程

Fig.7 process of water vapor transmission

4 结论

基于正交试验开展相似材料配比研究并自制降雨模型试验装置,开展降雨模型试验,得出如下结论。

(1) 基于正交试验,以标准砂、重晶石粉、膨润土和堆体土为原料开展相似材料配比研究,满足本次模型试验的相似材料配比为 w (标准砂): w (重晶石粉): w (膨润土): w (堆体土)=1:0.26:0.14:0.59。

(2) 大型人工堆积体因自重大、局部密度不均,且内部存在较多孔隙与裂缝,为雨水入渗提供优势通道,降雨作用具有一定滞后性。

(3) 在降雨作用下,堆积体破坏模式可分为3个阶段:坡体浸润侵蚀-坡顶冲沟产生-坡脚局部破坏阶段、破坏加剧阶段、整体破坏阶段。

参考文献(References):

- [1] 高玉峰,王玉杰,张飞,等.边坡工程与堤坝工程研究进展[J].土木工程学报,2024,57(8):97-118.
GAO Yufeng, WANG Yujie, ZHANG Fei, et al. State-of-the-art review on slope and embankment dams[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(8):97-118.
- [2] 刘彦,马小军,王彪龙,等.弃土场边坡稳定性和可靠性的多工况对比分析[J].安全与环境工程,2022,29(1):93-100.
LIU Yan, MA Xiaojun, WANG Biaolong, et al. Comparative analysis of stability and reliability of spoil dump slope under multiple working conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1):93-100.
- [3] LUO Y, ZHANG J M, ZHOU Z, et al. Effects of improper emergency mitigations on a large-scale landslide triggered by road excavation: a case study of the Fengping landslide, Hubei province, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6):258.
- [4] 钟源,李远耀,殷坤龙,等.基于物理模型试验的厚层堆积层滑坡强降雨触发机制[J].地球科学,2023,48(10):3912-3924.
ZHONG Yuan, LI Yuanyao, YIN Kunlong, et al. Failure mechanism of thick colluvium landslide triggered by heavy rainfall based on model test[J]. Earth Science, 2023, 48(10):3912-3924.
- [5] 赵宽耀,许强,高登辉,等.坡底饱和型黄土滑坡离心模拟试验[J].岩土力学,2023,44(11):3213-3223.
ZHAO Kuanyao, XU Qiang, GAO Denghui, et al. Study on the failure mode of a bottom-saturated loess slope by conducting a centrifuge test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11):3213-3223.
- [6] 王来贵,纪宇轩,赵娜.充水作用下露天煤矿内排土场边坡稳定性分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(3):257-264.
WANG Laigui, JI Yuxuan, ZHAO Na. Slope stability analysis of open-pit coal mine dump under water filling [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(3):257-264.
- [7] DAI Z J, HUANG K, CHI Z C, et al. Model test study on the deformation and stability of rainfall-induced expansive soil slope with weak interlayer[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(3):76.
- [8] FU Y Y, LIU Z H, ZENG L, et al. Seepage characteristics test of carbonaceous mudstone soil-rock mixture considering rock content and rainfall infiltration angle[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(10):3467-3480.
- [9] 刘永莉,周文佐,郭斌,等.相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2795-2803.
LIU Yongli, ZHOU Wenzuo, GUO Bin, et al. Study on marl similar materials in similar simulation test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl.1):2795-2803.
- [10] 冷先伦,王川,盛谦,等.基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究[J].岩土力学,2023,44(5):1283-1294, 1308.
LENG Xianlun, WANG Chuan, SHENG Qian, et al. Evolution mechanism of deformation and failure of rock slope with controlling fissure through transparent physical model experiments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5):1283-1294, 1308.
- [11] 许超,薛雷,崔远,等.岩质滑坡模型相似材料试验研究[J].公路交通科技,2023,40(11):1-9,26.
XU Chao, XUE Lei, CUI Yuan, et al. Experimental study on similar materials of rock landslide model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11):1-9, 26.
- [12] ZHAO B C, MA Y X, GUO Y X, et al. Study and application of similar material ratio in collapsible loess[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1):9736900.
- [13] 陈帆,王迎超,郑顺华.地铁隧道涌水涌砂诱发地面塌陷的大型模型试验研究[J].土木工程学报,2023,56(11):174-183.
CHEN Fan, WANG Yingchao, ZHENG Shunhua. Large-scale model experiment of ground collapse induced by water and sand gushing in subway tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(11): 174-183.
- [14] 杜家庆,杨捷,杨振兴,等.郑州市域粉质黏土相似材料配比试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(5):665-669,720.
DU Jiaqing, YANG Jie, YANG Zhenxing, et al. Experimental study on the proportioning of similar materials for silty clay in Zhengzhou City [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(5):665-669, 720.
- [15] WEI H, WU D Y, WU H G, et al. Coordinated evolution and mechanism characteristics of the tunnel-landslide system under rainfall conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 146: 107118.
- [16] 窦晓东,杨校辉,强远文,等.基于室内模型试验的深层堆积层古滑坡破坏机理[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(2):235-242,247.
DOU Xiaodong, YANG Xiaohui, JIANG Yuanwen, et al. Failure mechanism of an ancient landslide in the thick accumulation layer based on an indoor model test[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024, 60(2):235-242, 247.
- [17] 翟淑花,于家烁,齐干,等.降雨入渗条件下堆积体边坡致灾因子试验分析[J].地质科技通报,2023,42(3):9-15.
ZHAI Shuhua, YU Jiashuo, QI Gan, et al. Triggering factor analysis of deposit slope under rainfall infiltration based on laboratory experiments[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3):9-15.
- [18] 曹硕鹏,付宏渊,高乾丰,等.降雨作用下裂隙红黏土边坡渗流特征与冲刷模式[J].中国公路学报,2022,35(5):33-43.
CAO Shuopeng, FU Hongyuan, GAO Qianfeng, et al. Seepage characteristics and scouring modes of a cracked red clay slope under rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5):33-43.
- [19] 王力,李高,陈勇,等.赣南地区人工切坡降雨致灾机制现场模型试验[J].岩土力学,2021,42(3):846-854.
WANG Li, LI Gao, CHEN Yong, et al. Field model test of failure mechanism of artificial cut-slope rainfall in Southern Jiangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3):846-854.
- [20] LIU G, ZHA X Y, GUAN J K, et al. Field experiment of rainfall infiltration on a soil slope and simulations based on a water-air two-phase flow model[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(8): 2159-2167.
- [21] CHO S E. Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration[J]. Engineering Geology, 2016, 211:184-197.