

胡安龙, 俱永升, 魏勇, 等. 降雨作用下堆积体滑坡物理力学参数沿高程演化规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 634-641.

HU Anlong, JU Yongsheng, WEI Yong, et al. Laws of evolution of physico-mechanical parameters along the elevation of landslides under the effect of rainfall[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 634-641.

降雨作用下堆积体滑坡物理力学参数沿高程演化规律研究

胡安龙¹, 俱永升¹, 魏勇¹, 尚志鹏¹, 白永利¹, 黄鹏²

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050;

2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 降雨是引发山体滑坡的主要因素之一。为研究降雨对堆积体滑坡物理力学参数的影响, 以我国西部地区堆积体滑坡为研究对象, 制作室内堆积体滑坡物理模型, 通过模拟典型降雨效应, 在堆积体物理模型的不同高程取样, 进行渗透和直接剪切试验, 研究了堆积体的矿物含量、孔隙率、渗透系数和抗剪强度参数等物理力学参数沿着高程的演化规律。结果表明: 降雨结束后, 坡表顶部的孔隙率是坡表底部的2.2倍, 代表河沙、黏土等细颗粒的矿物 SiO_2 与 Al_2O_3 的含量增加了约7%与3%; 堆积体渗透系数、内摩擦角均随着高程的增加逐渐增大, 而黏聚力 c 值则表现出相反的规律, 逐渐降低; 坡表的渗透系数、内摩擦角和黏聚力与坡体内部相比, 其变化幅度更加明显。结合参数的定量变化规律分析和试验过程的现象观察, 表明在降雨的径流与渗流作用, 促进了堆积体的细颗粒向坡体的低高程处发生了迁移与堆积。研究过程和结果对降雨条件下堆积体滑坡的稳定性分析具有重要意义。

关键词: 降雨作用; 堆积体; 物理模型试验; 高程; 参数演化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.096

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0634-08

Laws of evolution of physico-mechanical parameters along the elevation of landslides under the effect of rainfall

HU Anlong¹, JU Yongsheng¹, WEI Yong¹, SHANG Zhipeng¹, BAI Yongli¹, HUANG Peng²

(1. Economic and Technological Research Institute of Gansu Electric Power Company, State Grid, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: To investigate the impact of rain on the physical and mechanical components of accumulation body landslides, a physical model was created in the western of China. Rainfall is a primary factor in such landslides. By simulating typical rainfall effect, samples were taken at different elevations of the accumulation body physical model, and permeability and direct shear tests were carried out. The evolution of mineral content, porosity, permeability coefficient and shear strength parameters along the elevation are analyzed in detail. The results show that the porosity at the top of the slope surface is 2.2 times that at the bottom of the slope surface, and the content of SiO_2 and Al_2O_3 representing fine particles such as river sand and clay increases by about

收稿日期: 2024-11-22

作者简介: 胡安龙(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程材料的研究。E-mail: 807095067@qq.com

7% and 3%. The permeability coefficient and internal friction Angle of accumulation body increase gradually with the increase of elevation, but the c value of cohesion shows the opposite law and gradually decreases. The permeability coefficient, internal friction Angle and cohesiveness of slope surface change more obviously than that of slope interior. Combined with the quantitative analysis of parameters and the observation of phenomena in the test process, it is shown that the runoff and seepage of rainfall promote the migration and accumulation of fine particles to the low elevation of the slope. The research process and result are of great significance to the stability analysis of accumulative landslides under rainfall conditions.

Keywords: rainfall effect; accumulation body; physical model test; elevation; parameter evolution

0 引言

我国西南地区由于地形破碎、土质脆弱、气候多雨等自然条件,加之人类活动的影响,使得这些区域成为滑坡灾害频发的典型代表;且这些滑坡灾害多数为堆积作用形成的第四系松散堆积物,其规模大、变形机理复杂,发生灾害突发性强、危害大,防治难度高等特点,加之夏季频发的强降雨^[1-2]等作用,使原本复杂的地质条件更加复杂,严重影响着滑坡的稳定性。

滑坡的发生是一种复杂的自然现象,会给人类的经济活动造成巨大损失甚至威胁生命安全,但引起滑坡形成的因素众多,其形成过程和滑坡机制难以解释与描述。目前,大量学者将物理模型试验与理论相结合以探明滑坡的致灾机理及演化规律。王珊珊等^[3]以库岸涌浪滑坡灾害为切入点,设计了水上和下水滑坡的散粒体地质模型试验,分析了散粒体的运动规律与涌浪方向、波幅之间的关系。占清华等^[4]通过物理模型试验研究了库水升降对含软弱夹层的库岸边坡稳定性的影响,结果表明库水升高降低了库岸边坡的稳定性,且岸坡出现了稳定、缓慢变形和整体滑移的三个失稳阶段。王乐华等^[5]开展了降雨-库水联合作用下不同坡角的岸坡三维物理模型试验,发现降雨-库水联合作用下坡体主要为软化剥蚀、蠕动变形、明显滑动三个破坏变形阶段,且坡角在 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间浅层滑坡较明显, $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 坡体更容易出现深层滑动破坏,坡角低于 35° 时坡体未有明显变形。由于松散堆积体的结构复杂,它们的力学特性、变形破坏特征都极为复杂,与普通岩石和土壤相比,存在着巨大的差异,并且受到内部因素和外部环境影响的共同作用,使得它们在土体参数、模型、试验和统计方面都具有极高的不确定性^[6]。目前,国内外针对堆积体物理力学特性与参数不确定性的研究有很多,且得到了一些有益结论。例如,在堆积体强度特性方面,GUDEHUS等^[7]和GAN等^[8]指出滑坡堆积体自身具有结构复杂和力学特征随机性强的特点,并且在雨

水、地震等外界作用下堆积体内部结构极易发生改变,强度和稳定性会显著降低。在参数不确定性方面,1966年LUMB^[9]、CONNELL等^[10]接连提出土体与堆积体在空间上具有变异性的特点。高大钊等^[11]、谭文辉等^[12]和彭普等^[13]利用随机场、地质统计学和上限法理论以及有限元离散技术研究了堆积体岩土参数的空间变异性与边坡系统失效概率之间的相关性。LIAO等^[14]考虑了降雨作用对土壤参数的不确定性,并分析了降雨条件下滑坡随时间变化的稳定性,揭示了滑坡失稳过程中参数变形性与时间之间的影响机制。仇文岗等^[15]将岩石抗压强度、材料常数和地质强度视为随机变量并考虑这些变量的空间变异性分析了某边坡的失效概率。

目前国内外很多学者针对滑坡堆积体进行了大量的理论研究,但多数从概率与易发性的角度考虑参数之间相关性和随机性分析滑坡的整体稳定性,针对堆积体的物理力学参数沿高程分布的具体演化规律研究相对较少。但大量文献表明不同高程处堆积体的物理力学参数有着明显差异,尤其在雨水入渗后的差异性更加显著,需要进一步探究。因此,本文以堆积型滑坡为对象,在室内通过制作缩尺物理模型试验,探讨降雨作用下堆积体物理力学参数沿高程的演化规律。研究成果可量化降雨作用下岩土体物理力学参数的演化规律,对库区乃至全国范围内降雨引起的滑坡稳定分析与防治具有重要的实践意义。

1 滑坡模型试验方案

1.1 研究对象

西北和西南地区广泛分布着由堆积作用形成的第四系松散堆积物^[16],其规模大、变形机理复杂、突发性强以及防治难度高等特点,严重影响着库岸边坡的稳定性。综合考虑堆积体的物质组成、坡体结构等特征信息,选取某一典型的堆积型滑坡为原型对象(见图1),开展室内物理模型试验研究。

1.2 相似比与原材料

在物理模型试验中,缩尺模型的相似性设计需要

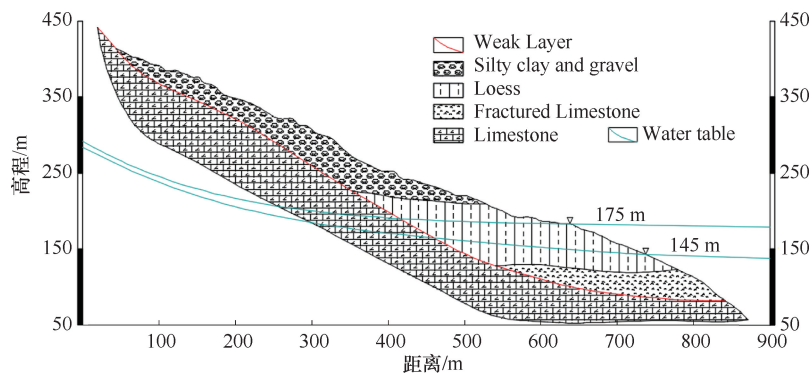


图1 树坪滑坡的典型地质剖面

考虑三个关键因素^[17]: 材料、几何特征和物理性质。然而, 由于各种复杂因素的存在, 这三个因素往往无法同时得到充分的满足。本次研究所选材料为某滑坡现场所取卵石、河沙与土颗粒如图2所示, 其中河砂分为粒径1~2 mm和2~5 mm的两类, 卵石粒径分别为0.5~1 cm和1~3 cm, 经过室内搅拌混合, 制作与滑坡现场级配接近的卵石堆积体。 $C_l = 32$, $C_\phi = 0.33$, $C_c = 0.87$, $C_k = 6.6$, 这些系数表明了物体的几何相似性, 以及它们的内摩擦角和渗透系数。最终确定的滑坡堆积体模型的相似材料的相关系数如表1所列。

表1 滑坡原型及相似材料物理参数

土样	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	含石量 /%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	渗透系数 $k/cm \cdot s^{-1}$
树坪土样	2.01	68	20.7	23.5	1.02×10^{-2}
卵石土样	2.0	68	62.5	26.79	1.54×10^{-3}

1.3 试验方案设计

1.3.1 模型制作

室内缩尺物理模型试验, 主要由堆积体模型和降雨控制系统两部分组成, 其中堆积体模型为模型槽和卵石、河沙等原材料, 降雨控制系统包括支架框、抽水泵、雨水喷头和流量计。堆积体模型按照先由砖块砌筑成一个长、宽、高分别为2.2 m、1 m、1.3 m, 且四周封闭、顶面敞开的模型斜槽如图3(a)所示。为防止雨水外溢影响雨水入渗效果需对砖墙进行防渗处理, 在斜槽的最低处设置排水口, 保证入渗之外多



(a) 黏土 (b) 河砂1 (c) 河砂2 (d) 卵石1 (e) 卵石2

图2 堆积体原材料

余的雨水能及时排出模型外。

堆积体模型采用分层击实法进行填筑, 填筑过程如图3(b)所示, 具体填筑步骤如下: (1) 预设标记。(2) 分层击实填筑, 从下自上分层填筑, 每层填筑厚度约为11 cm, 共填筑10层。填筑过程中计算称重原材料充分拌和后倒模成型并击实、凿毛。(3) 修坡处理, 堆积体模型填筑完成之后, 对坡面进行修平以保证初始降雨时雨水均匀流淌。(4) 防水处理, 为防止雨量损失, 降雨过程中在模型的四周采用塑料薄膜进行遮挡。堆积体填筑结束24 h后开始降雨。



(a) 模型试验槽 (b) 试验槽填筑

图3 堆积体模型试验槽

1.3.2 降雨量设计

查阅相关资料及文献可知, 陇南、陕南至三峡库区1 h降雨量为55~110 mm, 平均年降雨量为1 100~1 200 mm。考虑到试验中喷头以及其他影响对雨量可能会造成损失, 最终降雨强度选择为45 mm/h, 降雨时长60 h。

1.3.3 参数测试方案

本文主要研究降雨作用下堆积体的抗剪强度参数、渗透系数、孔隙率等物理力学参数沿高程的演化规律。因此, 在坡体纵剖面上设置了5个沿高程分布的测量点位DW1—DW5, 横坡方向设置了9个取样点, 取样点点位如图4所示。

(1) 矿物含量与孔隙率测试。降雨前后分别在DW1—DW5取样点进行取样, 采用EDX-7000型X-射线荧光光

谱分析仪(XRF)进行矿物含量测定,如图5(a)所示。降雨结束后在各取样点处取 $\phi 50\text{ mm}\times 156\text{ mm}$ 的圆柱体,采用MacroMR12-150 H-I核磁共振系统,如图5(a)所示,获得孔隙率。

(2)渗透性与直接剪切测试方案。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行了0.2 MPa、0.3 MPa和0.4 MPa水压下的渗透试验,再根据达西定律计算得到各取样点的渗透系数。直接剪切试验在YZW1000型电动直剪仪上进行,如图5(a)所示,试样尺寸为试样为圆柱其尺寸为 $\phi 24\text{ cm}\times 19\text{ cm}$,法向应力值分别为100 kPa、200 kPa、300 kPa。

2 试验结果分析

2.1 堆积体滑坡变形破坏过程分析

在降雨过程中,堆积体滑坡的变形破坏过程可大致分为如下几个阶段:(1)降雨开始时刻,雨水向坡体内入渗明显,局部区域有少量气泡产生,且坡面出现向坡角流动的小股径流,如图6(a)所示。(2)降雨持续1 h后,雨水入渗效果更加明显,坡体的含水率增大,坡表的雨水流量增多,如图6(b)所示。(3)降雨1~8 h阶段,坡体基本饱和,雨水入渗现象不明显,坡表有更大的径流出现并在坡表形成冲沟,坡角逐渐出现变形且有积水,坡表部分细颗粒发生迁移,大面积的白色卵石裸露出来,如图6(c)所示。(4)降雨8~20 h阶段,在雨水的持续冲刷作用下,左右坡肩位置出现两条斜拉裂缝,坡表冲沟数量增多且冲沟深度越来越深,如图6(d)所示。(5)降雨20~30 h阶段,破肩斜拉裂缝与坡表冲沟越来越明显,坡角出现

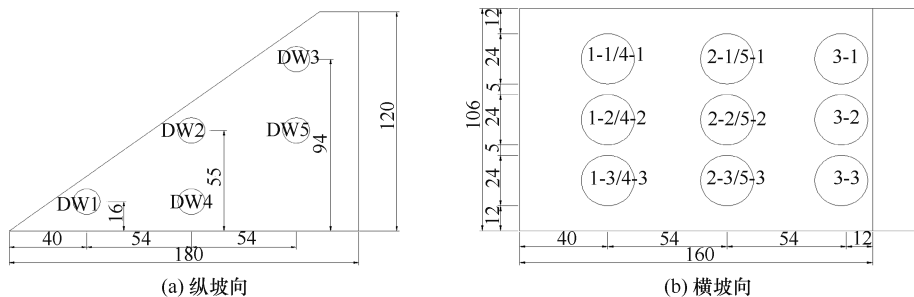


图4 取样点位置示意(单位: cm)



(a) X-射线荧光光谱分析仪

(b) 核磁共振系统

(c) YZW1000型电动直剪仪

图5 试验测试设备



(a) 降雨开始时刻

(b) 降雨1 h

(c) 降雨8 h



(d) 降雨20 h

(e) 降雨30 h

(f) 降雨55 h



(g) 破体最终沉降(侧视)

图6 卵石堆积体降雨变形过程

局部垮塌, 有夹杂着细颗粒的浑浊水从垮塌部位流出, 坡表裸露的白色卵石逐渐增多, 如图 6(e) 所示。(6) 降雨 30~55 h 阶段, 坡角垮塌的范围增大并沿着坡体向上, 坡肩斜拉裂缝延伸, 冲沟变大变宽, 坡脚处的水流逐渐变清, 如图 6(f) 所示。从图 6(g) 可以看出, 降雨结束后坡体较降雨前出现整体沉降, 且坡体上部位置的沉降明显大于中下部的位置, 分析其原因是降雨作用将坡体上部的细颗粒(河沙、黏土)运移到坡体中下部位, 上部卵石与卵石之间出现明显空隙, 在雨水与时间的作用下卵石与卵石之间出现位置结构调整, 因此出现了明显的沉降。

2.2 堆积体矿物含量与孔隙率的变化规律

对降雨前后各取样点的样品进行 X-射线荧光光谱分析(XRF), 获得各样品的化学成分含量及矿物含量, 通过测试结果可知坡体中主要含有 Si、Al、Fe、K、Ca、Mn、Sr 和 S 等元素, 经分析对比后可将各元素对应的矿物看作为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、SrO、 K_2O 、MnO 和 SO_3 等物质。依据测定结果可绘制各矿物含量的变化曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 降雨过后各取样点中 SiO_2 与 Al_2O_3 的含量变化规律最明显, 以 DW1 点为例, 相较于降雨之前, SiO_2 与 Al_2O_3 含量分别增加了 6.62% 和 9.45%, 均高于其他点位的变化幅度。在沿着坡体向下的方向, 坡表(即取样点 DW3 至 DW1)的 SiO_2 与 Al_2O_3 含量的增加幅度分别约为 7%、3%。坡体内部取样点 DW5 与 DW4 相比, SiO_2 与 Al_2O_3 含量的降低幅度均超过 4%; 而根据矿物的属性 SiO_2 与 Al_2O_3 主要来源于黏土与河沙等细颗粒物质, 故可以表明, 降雨作用使坡体内黏土、河沙等细颗粒物质的位置发生

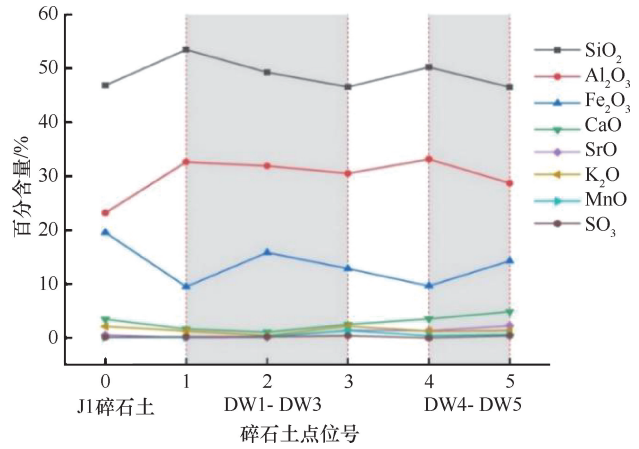


图 7 坡体矿物含量变化曲线

了从高向低的变化, 使细颗粒聚集在低海拔处。同时, 作为卵石粗颗粒的 Fe_2O_3 、CaO、SrO、 K_2O 、MnO 和 SO_3 等矿物, 除 Fe_2O_3 在降雨作用下含量发生了较小的波动之外, 其矿物的含量几乎没有发生变化, 进一步表明降雨作用并未使坡体内的粗颗粒发生明显的位置变化。

降雨结束后各取样点的核磁共振结果如图 8 所示。由图 8(a) 各取样点 T2 谱分布规律可以看出, T2 谱曲线总共出现了 3 个谱峰, 且各取样点谱峰出现的弛豫时间各不相同, 表明各取样点内部的孔隙存在较大差异性。在 3 个谱峰中, 第一谱峰的值最大, 第二谱峰次之, 第三谱峰最小几乎不存在, 表明降雨后各取样点以小孔径的孔隙为主。随着取样高程的增加, 各取样点 T2 谱的 3 个谱峰值越大。DW1 取样点第一谱峰出现的弛豫时间最短, 说明降雨后坡角位置的小孔隙数量较少, 孔隙分布密集。从图 7(b) 可以看出, DW1—DW5 取样点经历降雨作用后的孔隙率在

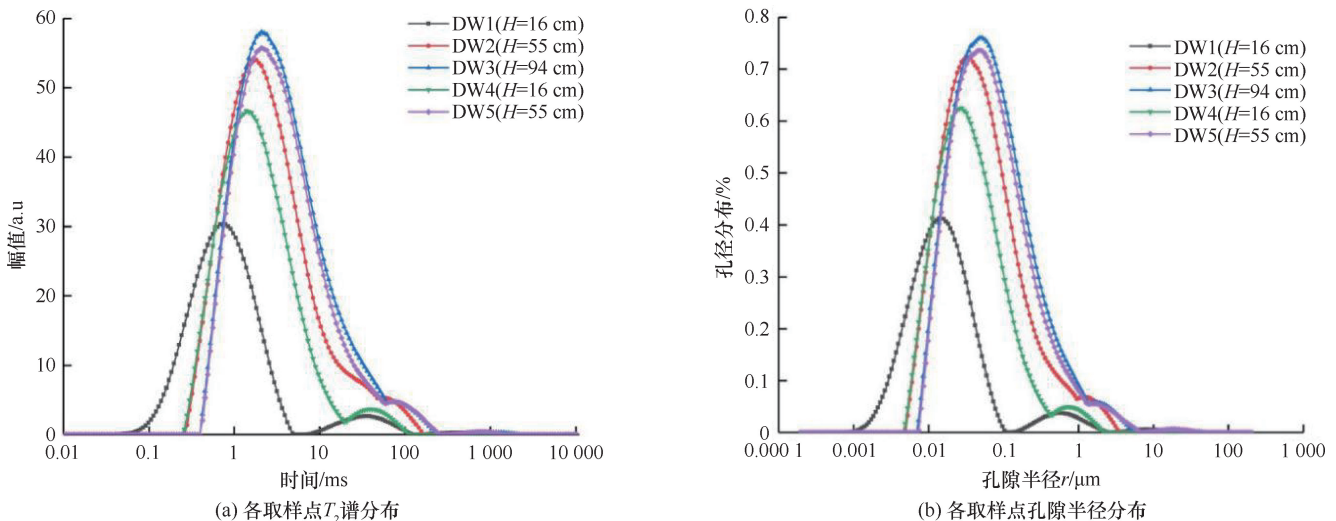


图 8 各取样点核磁共振试验结果

15.0%~35.0%之间,且以微孔隙居多,微孔孔隙半径在 $0\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间。对比DW1、DW2和DW3, DW2和DW4, DW3和DW5可以发现,随着高程的增加小孔隙的数量逐渐增多且孔隙尺寸相对也越来越大。此外,对比DW1和DW4, DW2和DW5可以发现,在同一高程,坡表的孔隙数量和孔径尺寸均要比坡体内取样点的要多、要大。

以上分析可以基本确定,降雨过程中,坡体内部的孔径分布发生了变化,具体表现为,坡体中的细颗粒随着雨水的径流与渗透作用发生了高处向低处的迁移作用,使细颗粒积聚在坡角与坡体内部低海拔处;而较高高程处由于细颗粒的减少,原来的粗颗粒之间的孔隙会相对增多与变大,因此出现了较高高程处孔隙数量与孔隙尺寸均要比低海拔处要多、要大的现象。

2.3 堆积体渗透性能与抗剪性能响应特征

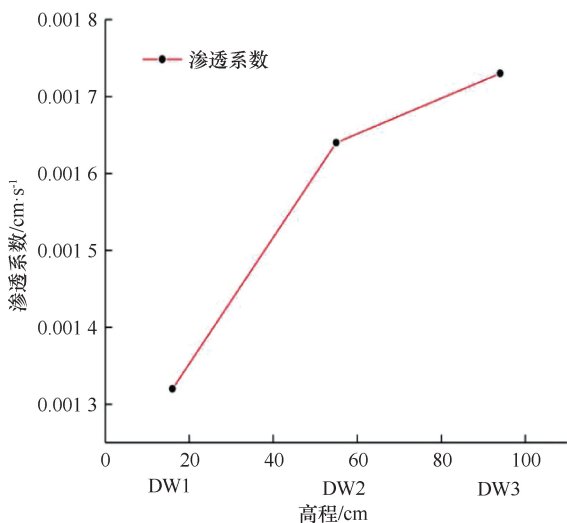
根据渗透试验结果,分别得到各取样点的渗透系数,按照坡表取样点(DW1、DW2、DW3)和坡体内部取样点(DW4、DW5)分别绘制渗透系数沿坡体高程变化的关系曲线,如图9所示。在降雨前卵石堆积体的渗透系数值为 $1.54\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$ 。

由图9(a)可知,坡表上的渗透系数沿着坡体高程的增高而增大,与降雨前的初始渗透系数相比,在16 cm处取样点的渗透系数有所降低,54 cm、94 cm取样点的渗透系数反而增大,具体表现为坡角DW1的渗透系数为 $1.32\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$,取样点DW2为 $1.64\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$,增大了约24%;坡顶DW3增大到 $1.73\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$,其增幅约为31%。坡体内部取样点DW4、DW5渗透系数从 $1.42\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$ 升高

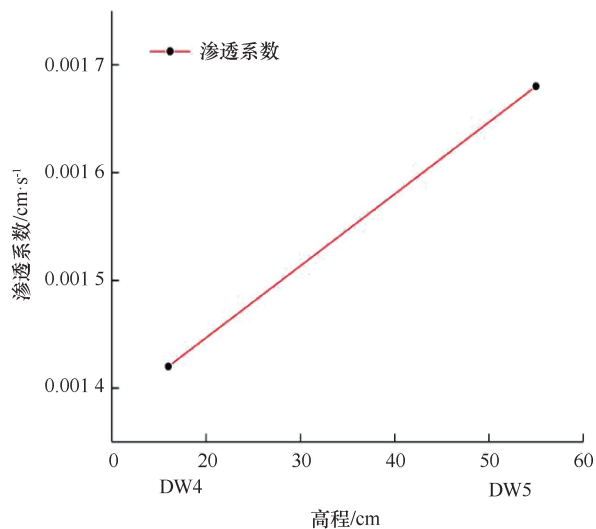
到 $1.68\times 10^{-3}\ \text{cm/s}$,升高了18.3%,可以得出坡体内部的颗粒分布结构发生了改变,细颗粒随着雨水流动作用向低处发生了迁移。对比分析坡表与坡体内部相同高程的渗透系数涨幅,可以发现坡表的渗透系数较坡体内的涨幅更加明显,表明坡表在相同高差情况下,坡表由于降雨产生的径流作用对坡表的渗透性能改变较大;而坡体内部受径流的影响不大,几乎仅受雨水入渗的影响,因此对颗粒的迁移作用并不明显。

通过对各取样点开展不同法向应力得剪切试验,得到了如图10所示的各取样点法向应力与剪切强度的关系曲线。再采用摩尔库伦准则根据剪切试验结果计算出各取样点的抗剪强度参数(内摩擦角、黏聚力),并绘制了如图11所示的抗剪参数与采样点的关系曲线。由图10可知,各取样点的剪切强度随着法向应力的增大而增大,且高程较低处的剪切强度明显大于高程较高处。分析其原因是降雨作用使细颗粒向低处发生迁移,低处在中粗颗粒含石量不变的情况下细颗粒填充在孔隙中,使坡体变得更加密实从而提升了抗剪强度;而较高处中粗颗粒的相对含量变高,但坡体的颗粒级配已经发生改变降低整体的抗剪性能。

由图11可以看出,坡表与坡体内部从低处到高处内摩擦角呈现出增大的趋势,而黏聚力出现了正好相反的规律,随着高程的增加黏聚力呈减小的趋势。由Mohr-Coulomb准则可知,土颗粒的抗剪强度是由颗粒间相互阻挡、颗粒间胶结和静电吸引所产生的摩擦阻力。摩擦阻力一般用摩擦角 φ 表示,黏聚力 c 表示。而当堆积体的含石量越多, φ 值越大;颗粒间胶结作用强、静电吸引大,则 c 值越大。因此,根据 c



(a) 坡表取样点



(b) 坡体内部取样点

图9 渗透系数沿高程变化的关系曲线

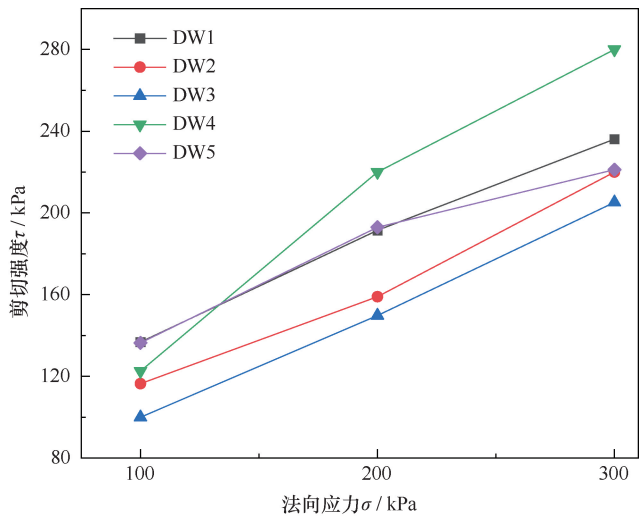


图 10 法向应力与剪切强度关系曲线

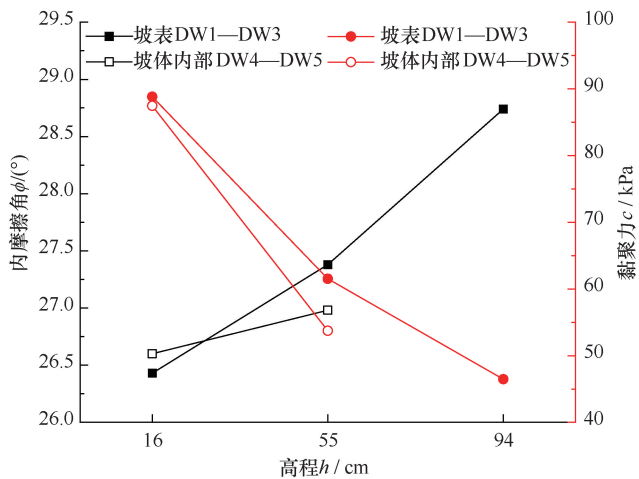


图 11 抗剪强度参数与高程关系曲线

和 φ 的变化规律我们可以推测出, 在 高程越高的地方中粗颗粒较多; 而坡体的低处细颗粒聚集较多、整体更加密实、孔隙率降低, 从而渗透性能减弱, 黏聚力越大。

图 12 为取样点在法向应力 200kPa 下进行剪切试验后的破坏面。根据图 11 的剪切破坏后形态图可以知, 在 DW1、DW2 处的试样未发生明显的颗粒剪断现象, 破坏面主要为 滑坡破坏且较为平整; 而坡顶处的 DW3 取样点, 破坏面起伏大, 有中粗颗粒明显被剪断的新鲜破坏面。因此, 可认为在 高程较低处的剪切先由细颗粒的抵抗变形, 再由中粗颗粒提供抗剪力, 而此时剪切位移已经较大, 试样发生破坏。较高高程处试样中的含石量相对较大, 抵抗剪切变形作用主要由中粗颗粒提供, 因此在剪切破坏面中会有部分卵石被剪断。从破坏形态也进一步印证了在降雨作用下细颗粒向低处迁移的现象。

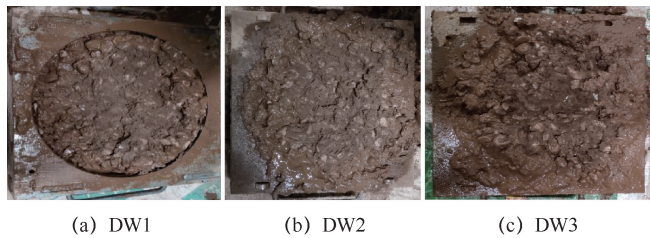


图 12 坡表取样点剪切破坏面(法向应力 200 kPa)

4 堆积体物理力学参数沿高程演化规律

为了直观分析降雨对坡体渗透和抗剪性能的影响, 在此引入参数变化率如下

$$L_i = \frac{l_i - l_0}{l_0}, \quad i = n, \dots, 2, 1 \quad (1)$$

式中, L_i 为参数变化率; l_0 为初始参数值; l_i 为目标点参数值。

计算渗透系数、抗剪强度参数的参数变化率, 如表 2 所列。

表 2 各参数变化率计算值

参数	高程		
	16 cm	55 cm	94 cm
渗透系数变化率	-0.143	0.065	0.123
内摩擦角变化率	-0.013	0.022	0.036
黏聚力变化率	0.420	-0.016	-0.256

对表 2 中渗透系数、内摩擦角、黏聚力的参数变化率与高程之间的关系曲线进行拟合, 可得到如下关系

$$\begin{cases} L_{k_i} = -0.133 + 4.74 \times 10^{-3}h_i - 2.27 \times 10^{-5}h_i^2 \\ L_{\varphi_i} = 0.614 + 2.48 \times 10^{-3}h_i - 1.22 \times 10^{-4}h_i^2, \\ \quad i = n, \dots, 2, 1 \\ L_{c_i} = 9.359 \times 10^{-4}h_i - 0.07 \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_{k_i} 为堆积体渗透系数变化率; L_{φ_i} 为内摩擦角变化率; L_{c_i} 为黏聚力变化率; h_i 为堆积体模型中目标点高程(cm)。

根据试验可得坡角处 ($h = 0$ cm) $L_{k_1} = -0.133$ 、 $L_{c_1} = 0.614$ 、 $L_{\varphi_1} = -0.07$ 。那么可采用初始值表示降雨后坡脚的渗透系数、内摩擦角、黏聚力值, 公式如下

$$\begin{cases} k_i = k_0(1 + L_{k_1}) + 4.23 \times 10^{-6}h_i \\ \varphi_i = \varphi_0(1 + L_{\varphi_1}) + 0.007h_i \\ c_i = c_0(1 + L_{c_1}) - 0.279h_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, k_i 、 φ_i 、 c_i 分别为降雨后堆积体模型 h_i 处的渗透系数、黏聚力和内摩擦角值; k_0 、 c_0 、 φ_0 分别为堆

积体在降雨作用前的初始渗透系数、黏聚力和内摩擦角值。

考虑几何相似比后, 堆积体模型抗剪强度参数变化率与高程的对应关系式可表示为

$$\begin{cases} k_i = k_1 + 4.23 \times 10^{-6} H_i \\ \varphi_i = \varphi_1 + 0.007 H_i, \quad i = n, \dots, 2, 1 \\ c_i = c_1 - 0.279 H_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, H_i 为堆积体目标点高程(m), $H_i = C_l \times h_i$ 。

5 结论

为研究含卵石土堆积体物理力学参数沿高程演化的规律, 制作了室内缩尺物理模型, 开展堆积体降雨模型试验, 对堆积体抗剪强度参数、渗透系数沿高程的演化规律进行了研究, 取得了以下研究结论。

(1) 降雨过程中堆积体在坡脚处发生块状滑塌破坏, 堆积体无明显的滑动面但存在轻微的下沉; 破坏形式主要包括坡表侵蚀破坏、坡脚局部块体破坏和坡面块体群破坏三个阶段。

(2) 降雨后堆积体中的细颗粒含量随着高程的增加逐渐降低。堆积体矿物含量沿高程的变化规律明显, 与坡脚相比, 坡顶矿物 SiO_2 与 Al_2O_3 的含量增加幅度分别约为 7%、3%。随着高程的增加 T2 谱峰面积逐渐增大, 堆积体内部孔隙数量增大; 而在坡脚处孔隙数量最少, 以孔隙半径在 $0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 范围内的微孔隙数量为主, 表明细颗粒土的迁移增大了堆积体孔隙率。

(3) 坡脚堆积体的渗透系数较试验前明显降低, 且堆积体渗透系数随着高程的增加渗透系数逐渐增大, 内摩擦角 φ 值略有增加, 黏聚力 c 值明显降低。坡体内部孔隙率、渗透系数和抗剪强度参数的变化幅度始终弱于坡表的变化幅度。

参考文献:

[1] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分

析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239-3248.

- [2] 李险峰. 三峡库区蔡坡堆积体库水位联合降雨工况下的渗流特性及边坡稳定性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 194-200.
- [3] 王珊珊, 张检召, 王东坡, 等. 基于物理模型试验的库岸散粒体滑坡涌浪特性[J/OL]. 工程科学与技术, 1-16 [2024-07-13].
- [4] 占清华, 王世梅, 赵代鹏. 库水上升对含软弱夹层滑坡稳定性影响模型的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(2): 86-90.
- [5] 王乐华, 尹思杰, 许晓亮, 等. 降雨作用下堆积体岸坡变形破坏模式模型试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(32): 77-82.
- [6] 曹少刚. 土体参数空间分布对边坡稳定性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [7] GUDEHUS G. Mechanisms of partly flooded loose sand deposits[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(3): 505-517.
- [8] GAN B R, YANG X G, CHEN M L, et al. Effects of fine particle content and sample scale on the failure properties of loose landslide deposits[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(7): 152.
- [9] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 3(2): 74-97.
- [10] CORNELL C A. First-order Uncertainty Analysis of Soil Deformation and Stability[M]. Hong Kong: University of Hong Kong, 1972.
- [11] 高大钊. 岩土工程的可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 105-113.
- [12] 谭文辉, 王家臣, 周汝弟. 岩体强度参数空间变异性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 546-549.
- [13] 彭普, 李泽, 张小艳, 等. 土质边坡的单元失效概率与失效模式研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 193-207.
- [14] LIAO W, JI J. Time-dependent reliability analysis of rainfall-induced shallow landslides considering spatial variability of soil permeability [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129: 103903.
- [15] 仇文岗, 王琦, 陈福勇, 等. 考虑岩体空间变异性的边坡可靠度分析及抗滑桩随机响应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3157-3168.
- [16] 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.
- [17] 姜鑫, 刁显锋, 任永忠, 等. 地震后降雨作用下堆积体滑坡模型试验研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 801-809.

(责任编辑 王海锋)