

强降雨作用下白云岩砂化土的入渗特性试验研究

冯晓东¹, 王新悦¹, 唐佳玥¹, 吉锋^{1,2}, 路涵裕^{1,2}

1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

摘要: 土体渗透特性是斜坡地质演化和稳定性评价的重要指标, 为揭示强降雨作用下白云岩砂化土的入渗特性及变化规律, 对边坡稳定性评价提供可靠参数, 本次研究采用常水头渗透实验和不同强降雨条件下的土柱入渗试验方法, 分析砂化土的降雨入渗系数及入渗特性。研究结果表明白云岩砂化土的渗透系数基本在 0.204~0.211; 随降雨时间的延长, 湿润峰下移速度变缓; 雨强为 60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h 下的湿润锋平均下移速率分别为 0.996 cm/min、1.53 cm/min、2.058 cm/min; 雨强条件对土体含水率峰值影响较小。此外, 白云岩砂化土的渗透系数大, 垂直土柱的入渗率均为其对应的降雨强度, 研究成果对于白云岩砂化土斜坡致灾的预测预报模型及边坡治理有积极意义。

关键词: 常水头渗透; 土柱; 垂直入渗; 渗透系数; 入渗率

中图分类号: P694; P426.616; TU41; TV131.6 **文献标识码:** A

Experimental Research on Infiltration Characteristics of Sandified Dolomite Soil under Heavy Rainfall

FENG Xiaodong¹, WANG Xinyue¹, TANG Jiayue¹, JI Feng^{1,2}, LU Hanyu^{1,2}

1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The permeability characteristics of soil are crucial indicators for evaluating slope geological evolution and stability. To reveal the infiltration properties and variation patterns of sandified dolomite soil under heavy rainfall and provide reliable parameters for slope stability assessment, this study employs constant-head permeability tests and soil column infiltration experiments under different heavy rainfall intensities to analyze the rainfall infiltration coefficient and infiltration characteristics of sandified soil. The results demonstrate that the permeability coefficient of sandified dolomite soil ranges between 0.204 and 0.211. As rainfall duration increases, the descent rate of the wetting front slows down. The average wetting front migration rates under rainfall intensities of 60 mm/h, 120 mm/h, and 180 mm/h are 0.996 cm/min, 1.53 cm/min, and 2.058 cm/min, respectively. Rainfall

收稿日期: 2024-06-19 改回日期: 2024-09-14

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2022Z013)

第一作者简介: 冯晓东(2001—), 男, 地质工程专业本科生。E-mail: 3120892959@qq.com

通讯作者: 吉锋(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事重大地质灾害稳定性预测评价方向的研究。E-mail: 65341207@qq.com

引文格式: 冯晓东, 王新悦, 唐佳玥, 等. 强降雨作用下白云岩砂化土的入渗特性试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 33-38.

FENG Xiaodong, WANG Xinyue, TANG Jiayue, et al. Experimental research on infiltration characteristics of sandified dolomite soil under heavy rainfall[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 33-38.

intensity exhibits minimal influence on the peak moisture content of the soil. Additionally, the sandified dolomite soil displays high permeability, and the infiltration rate of the vertical soil column equals the corresponding rainfall intensity. These findings hold significant implications for developing predictive models for disasters in sandified dolomite soil slopes and guiding slope stabilization measures.

Key words: Constant-head permeability; Soil column; Vertical infiltration; Permeability coefficient; Infiltration rate

0 引言

降雨是导致滑坡失稳的重要因子,降雨入渗过程中,水体与滑坡土体相互作用,进而破坏滑坡稳定形态。通过人工降雨土柱入渗实验以及常水头渗透实验的研究,可对降雨诱发滑坡灾害提供有力的数据支撑。目前,降雨型滑坡机理研究受到了国内外学者的广泛关注,同时,土柱、常水头渗透实验在监测和评估土体情况方面也处于重要地位。例如,刘斌等^[1]研究土柱条件下水分在黄土中的渗透规律并采用有限元分析法,得到了不同降雨条件下边坡表层土体的渗流场变化规律;陈洪凯等^[2]对重庆地区侏罗系强风化泥岩在6种不同降雨强度条件下进行了渗透试验,并据此提出了一种能够表征此类泥岩渗透过程的降雨渗透公式;覃小华等^[3]通过对非饱和和重塑黄土土柱一维入渗实验,提出了一种计算非饱和土壤渗透系数的新方法,并确定了土壤样本的非饱和渗透系数与基质吸力之间的关系;罗璟等^[4]通过土柱实验,研究了TBM渣料在不同含量条件下的降雨渗透规律,填补了当前对具有针片状定向排列结构的土石混合体在降雨渗透方面的研究空白;梁健伟等^[5]利用可调节水头的常水头渗透实验设备,对超细颗粒人造土和广州南沙地区的天然软土进行了渗透测试,应用了“微电场效应”和“微尺度效应”,揭示了孔隙中离子浓度和水力梯度对超细颗粒黏土渗透特性的影响;刘礼领等^[6]通过有限元方法模拟了暴雨条件下斜坡内部瞬态渗透场的特性变化,并发现裂缝的存在显著影响了降雨的渗透效果;陈浩等^[7]指出,GeoStudio软件在分析土坡的饱和与非饱和渗透流问题时,能够较为精确地模拟边坡的渗透场变化;张一希等^[8]指出深圳“12·20”滑坡土体渗透系数明显大于一般黏土,且渗透系数随着初始含水率和干密度的增大均呈指数函数关系。

综上,前人在非饱和和重塑黄土和土石混合体渗流特性及规律方面做了较深入的研究。然而,目前针对白云岩砂化土方面的研究相对较少。本研究针对白云岩砂化土,利用自行布置的人工降雨装置、土

柱入渗实验装置、常水头渗流实验装置,进行不同强降雨条件下砂化白云岩的降雨入渗特性试验,为强降雨诱发滑坡及边坡稳定性治理提供重要依据。

1 研究区条件概况

1.1 研究区基本地质条件

试验研究的白云岩砂化土样取自云南省金沙江支流普渡河左岸(图1)。研究区近5a来年降雨量峰值为820.17 mm,谷值为584.45 mm,单日最大降雨量为61.72 mm,且降雨具有明显的季节分布,夏季暴雨、大暴雨天气比较集中,雨季(5月~10月)降雨量接近全年的85%。

研究区位于云南境内金沙江支流,边坡近东西走向,坡向朝南,高程范围为1 125~1 637 m,地形坡度平均为35°,边坡沿走向长约1 063 m。基岩岩性为震旦系灯影组白云岩,目前边坡表部为白云岩风化土,坡面可见土体溜滑现象。



图1 白云岩砂化土边坡全貌

1.2 土体级配特征

进行筛分试验并对结果进行分析,得到砂化土的级配曲线(图2)。由图2可得出 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ,根据公式(1)计算出砂化土土样的不均匀系数 $C_u = 17.5$, C_u 大于5时表示颗粒级配不良,所以试验土样属于级配不良砾。

级配不均匀系数按式(1)计算:

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1)$$

式中, C_u 为不均匀系数; d_{10} 为土有效粒径; d_{60} 为土

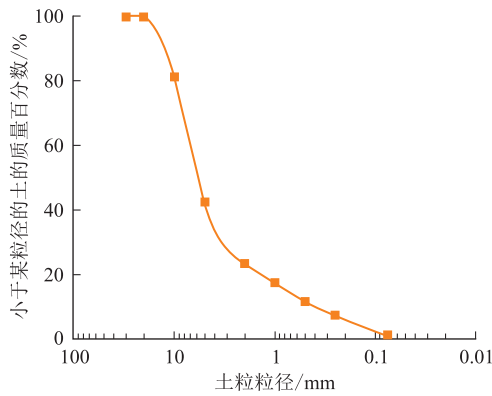


图 2 颗粒级配曲线图

控制粒径。

2 土体渗透性特征

常水头渗透实验通过使用恒定水头设备测量渗透流量和不同位置的水头高度(图 3),来计算渗透速度和水力梯度,并据此确定渗透系数,主要用于砂土等渗透性较大的土体。在同一水力梯度下,完成多次接取渗透水,且控制渗透时间相同,接取水量误差不可过大。而且实验时的水温宜略高于实验室室温,本次实验水温约 26℃。土体被水透过的能力即土的渗透性,通常用渗透系数定量地表征这一现象。目前,室内外渗透试验均以达西定律为原理依据。本次实验在确定渗透仪器高 L 的基础上,通过测量各点的水头 H 、渗流量 Q ,求取水力梯度 I 、渗透速率 v ,代入达西公式,获得土体的渗透系数^[8]。

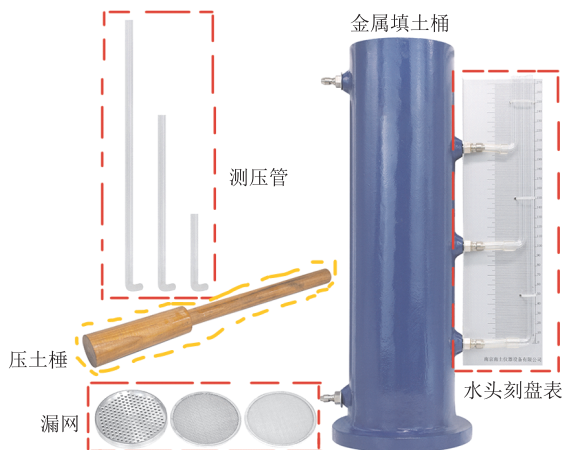


图 3 TST-70 常水头渗透仪

土样采用烘干后的白云岩砂化土,但由于砂化土样中细砂较多,容易堵塞出水孔,在试验仪器内壁加装了一圈细孔铁丝网防止堵塞。实验包括安装仪器、分层击实法装样与数据测量 3 个过程,分别在金属板上与试样顶部铺设 4 cm 厚的卵石作为缓冲

层,以防止细颗粒被水冲走。本次实验每组之间水头高度分别上升 3.5 cm、5 cm、6.5 cm,共试验 12 次。通过试验记录的渗流量 Q 和玻璃测压管 H 以及渗透仪器高度 L ,结合达西定律求得土样的渗透系数。表 1 为各水力梯度下砂化白云岩边坡试样的流量和渗透系数。

表 1 各水力梯度下砂化土试样的流量和渗透系数

水力梯度 I	流量 $Q/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	渗透系数 k
0.35	7	0.221
0.5	9.5	0.211
0.65	12	0.204

砂土渗透系数的范围一般在 1×10^{-3} 至 1×10^{-1} 之间,渗透系数大于 1×10^{-1} 的砂土被称为透水砂土。砂化白云岩边坡试样土体的物质组成主要为砂化白云岩,以粉粒和细角砾为主,黏粒含量极少,其渗透性比一般砂土渗透性好。

3 土柱入渗试验

3.1 土柱试验设备

土柱入渗试验装置(图 4)主要由 HCSC 数据采集仪,HC-3 土壤水分传感器(图 5),基质吸力传感器,一维土柱装置和降雨模拟系统组成。HCSC 数据采集仪可以采集模拟传感器数据,将数据实时传输至计算机存储为 Excel 文件,并支持数据实时统计分析。一维土柱装置为有机玻璃材质的圆柱筒,柱体高 100 cm,内径 25 cm,外径 27 cm,顶部开口,底部设置有 2 cm 直径的排水口。降雨模拟系统采用小型花洒来控制雨强。

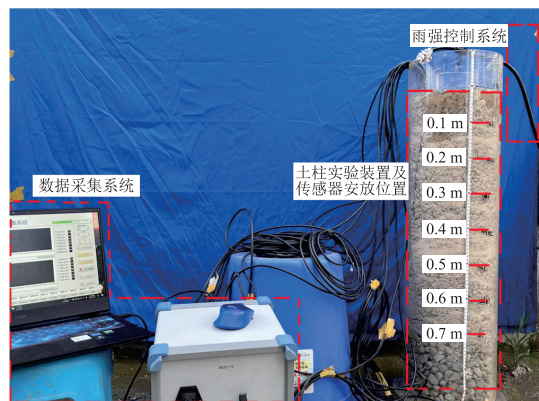


图 4 土柱试验装置图

3.2 降雨方案

由于白云岩砂化土中砂砾居多,室内常水头渗透实验所测得的渗透系数较大,本试验将降雨强度设置为 60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h,对比不同降雨强度下的人渗规律。试验步骤如下:

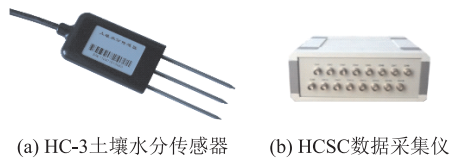


图 5 水分传感器及数据采集仪

(1) 装填土样之前在圆筒内壁均匀涂抹一层凡士林,减小光滑的内壁与土样的边缘效应。

(2) 在圆筒底部铺设 20 cm 高度的粗颗粒碎石,并在粗颗粒碎石顶部铺一层滤网,避免上部试验土样透过粗碎石堵塞底部出水口。

(3) 填土过程中,每 10 cm 土层进行一次夯实和打毛处理,以调整每层土样的物理力学指标一致,并在预设深度埋设相应的传感器,由下至上共铺设 7 层土样,7 组 HC-3 土壤水分传感器,3 组基质吸力传感器,最后在试验土样顶部铺设一层粗碎石,防止模拟降雨过程对土样扰动过大。

(4) 将各传感器与 HCSC 数据采集仪连接,调设好设备的试验参数,设置降雨强度,在降雨的同时进行数据记录和录像。

(5) 待土样完全饱和,各传感器数值稳定后,停止降雨,结束试验。

3.3 试验结果及分析

图 6 表示不同雨强条件下,不同深度的水分传感器所测得的体积含水率时程曲线图。据图 6 分析,不同降雨强度下各测点的体积含水率具有如下特征:由于土样渗透系数较大,不同降雨强度下,入渗试验时土柱表面均未出现积水,降雨全部入渗。不同降雨强度下砂化土的入渗率均为恒定值,即入渗率等于其相应的降雨强度。图 7 为不同降雨强度下土柱入渗量的时程曲线图,降雨全部入渗,即入渗量等于降雨量,降雨累计量为时间的一次函数,呈正相关。

纵观所有测点的体积含水率时程曲线,不同降雨条件对含水率峰值影响不大,最大含水率为 33%,稳定后的最小含水率只有 27%左右。

由图 6 可知,降雨强度为 60 mm/h、120 mm/h 和 180 mm/h 时,体积含水率时程曲线在各个监测点的的变化趋势基本一致。水分传感器含水率数值开始增大的时间节点与传感器深度直接相关,距上表面越近,时间越短,且达到峰值含水率的时间也相应靠前。降雨入渗至位置最高的两个监测点的时间间隔最短,监测点位置越低,间隔时间逐渐增大,离上表面最远的两个监测点体积含水率开始增大的时间间隔最长。

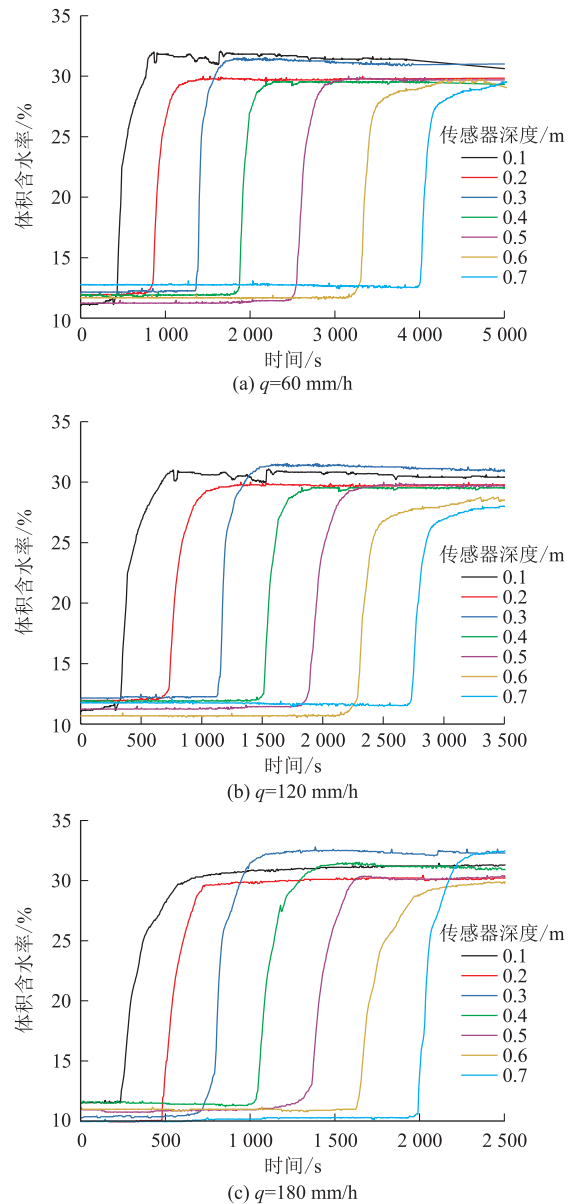


图 6 不同降雨条件下各水分传感器含水率时程曲线图

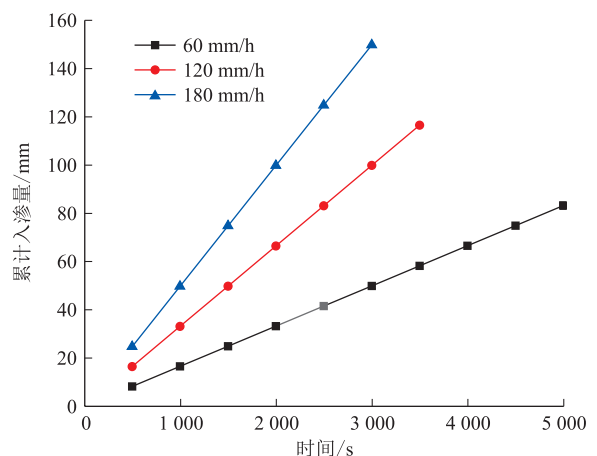


图 7 3 种雨强下累计入渗量时程曲线图

由图 6 可知,随降雨时间延长,湿润峰不断下

移,而湿润峰经过的上半土柱含水率几乎不变。也可获得不同降雨强度条件下,各监测点水分传感器含水率数值开始增大的时间节点,表征降水入渗至各位置传感器的时间,并列于表2。由表2可知,降水进入相同传感器所需的时间随雨强的增加而缩短。以入渗至深度为0.1 m的传感器为例,当降雨强度为60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h时,所需时间分别为430 s、330 s、240 s。

表2 不同降雨强度下入渗至各传感器的时间表

降雨强度 /mm·h ⁻¹	水流渗入至不同深度传感器的时间/s						
	0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m
60	430	855	1 365	1 870	2 525	3 300	3 985
120	330	730	1 135	1 515	1 890	2 245	2 730
180	240	490	770	1 040	1 360	1 640	1 995

图8为3种雨强下湿润峰下降过程中,湿润峰深度的时程曲线。由曲线可知,相同雨强下随着雨水不断入渗,湿润峰下降速度变缓;不同雨强下,雨强越大,湿润峰下降速度越快,经线性拟合可得到雨强为60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h下的平均下降速率为0.996 cm/min、1.53 cm/min、2.058 cm/min。

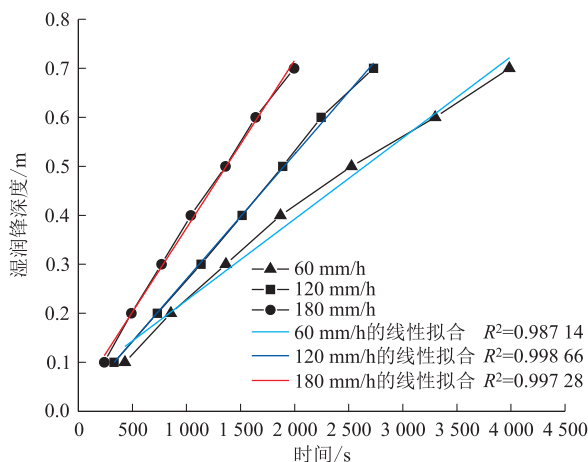


图8 不同降雨条件下湿润峰深度时程曲线

目前边坡表部风化严重,坡面可见土体溜滑现象,且研究区白沙坡变形体内发育有多条横向拉张裂缝,虽部分地段裂缝已被掩埋,但土体渗透较强,降雨入渗至坡体内,将影响土体的变形参数及强度参数,易导致变形体失稳。同时,裂缝集水将增大其水压力,利于潜在滑动面的形成与贯通,进而对边坡稳定性产生直接影响。虽边坡部分地段已修筑挡土墙,但降雨入渗仍对其稳定性有潜在威胁,应进一步进行降雨影响下的稳定性研究。因此,强降雨条件下砂化土的土体入渗特性及规律对于边坡治理和变形体稳定性评价具有实际意义。

4 结论

(1) 研究结果表明白云岩砂化土的渗透系数基本在0.204~0.211,且土柱入渗率等于其对应的降雨强度值。不同降雨条件对含水率峰值影响不大,峰值含水率在27%~33%之间。

(2) 体积含水率时程曲线在各个监测点的变化趋势基本一致。距上表面越近,水分传感器含水率数值开始增大的时间越早,达到峰值含水率的时间也相应靠前。降雨入渗至相邻监测点的时间间隔随深度的增加而增大。随着降雨强度的增大,雨水入渗至同一传感器的时间也相应越短。

(3) 相同雨强下随着雨水不断入渗,湿润峰下降速度变缓,湿润峰经过的上半土柱含水率几乎不变。雨强越大,湿润峰下降速度越快,经线性拟合可得到雨强60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h下的平均下降速率为0.996 cm/min、1.53 cm/min、2.058 cm/min。

(4) 本次试验为稳定雨强条件,所得结论存在一定局限性,需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 刘斌. 降雨入渗条件下的高速铁路黄土路堑高边坡稳定性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [2] 陈洪凯, 唐红梅, 唐云辉, 等. 强降雨作用下强风化泥岩降雨入渗特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2755-2760.
- [3] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 476-484.
- [4] 罗璟, 裴向军, 魏玉峰, 等. 不同含石量条件下TBM渣料降雨入渗特性试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(3): 55-61.
- [5] 梁健伟, 房营光. 极细颗粒黏土渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1222-1230.
- [6] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1061-1066.
- [7] 陈浩, 黄静, 林锋. GeoStudio软件在土坡饱和和非饱和渗流分析中的应用[J]. 四川建筑, 2008, 28(6): 67-68.
- [8] 张一希, 许强, 彭大雷, 等. 深圳“12·20”滑坡土体渗透性模拟试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 131-136, 149.
- [9] 施威, 刘刚, 徐昊, 等. 南京某堆积层滑坡稳定性评价及治理措施研究[J]. 勘察科学技术, 2023, 249(3): 1001-3946.
- [10] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1873-1679.
- [11] 戴经梁, 伍石生, 盛安连. 压实黄土路基积水入渗规律研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3): 155-158.
- [12] FABG K, MIAO M H, TANG H M, et al. Model test on deformation and failure behaviour of arching-type slope under

- excavation condition [J]. *Engineering Geology*, 2022, 302: 106628. <https://doi.org/10.1016/i.enggeo.2022.106628>.
- [13] TAKASHI O, SUMIO M, JAN O L, et al. The response of pore water pressure to snow accumulation on a low-permeability clay landslide [J]. *Engineering Geology*, 2018, 242:130-141.
- [14] CHEN R, LI , et al. Discussion of “Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity” [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47 (10): 1159-1161.
- [15] BUCKLEY R M, JARDINE R J, KONTOE S, et al. Ageing and cyclic behaviour of axially loaded piles driven in chalk [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(2):146-161.
- [16] LEPORE C, SAMEER A K, SHANAHAN P, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6):1667-1681.