

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1458

强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究

王 斌^{1,2}, 李洁涛^{1,2}, 王佳俊^{1,3}, 陈鹏林^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 降雨诱发堆积体边坡失稳破坏是一种较为突出的滑坡灾害形式, 近些年随着强降雨天气频率增大, 诱发的堆积体滑坡问题尤为突出。围绕堆积体边坡在强降雨下的破坏机制, 开展相关研究, 探究了不同基质含量以及含石量分布对于堆积体边坡破坏模式的影响规律。首先, 通过室内大三轴试验确定堆积体边坡试样在固定黏土含量 10%, 碎石含量分别为 30%、50%、70% 下的应力-应变关系; 随后, 开展降雨诱发堆积体滑坡的模型试验, 研究强降雨条件下不同级配堆积体边坡的失稳破坏模式, 分析坡顶位移以及堆积体内部含水率、土压力、孔隙水压力的变化规律, 阐明堆积体不同部位细粒含量变化及细颗粒竖向迁徙过程; 最终, 揭示降雨诱发不同含石量堆积体边坡的失稳与破坏机制, 相关成果能为堆积体滑坡的预警提供科学的理论依据。

关 键 词: 堆积体; 滑坡; 降雨; 土体基质; 含石量; 模型试验

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023) 增刊-0234-15

Model tests on accumulation landslides induced by extreme rainfall

WANG Bin^{1,2}, LI Jie-tao^{1,2}, WANG Jia-jun^{1,3}, CHEN Peng-lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Rainfall-induced accumulation landslide is one of the most widespread geo-hazards. In recent years, due to more extreme rainfall events brought on by climate change, the scale and frequency of the rainfall-induced accumulation landslides have further increased. Centering on the slope failure mechanisms due to the extreme rainfalls, this research carries out a series of model tests in order to explore the influence of different gradations of the slope materials on the slope failure mechanism. A series of large-scale triaxial tests is carried out first, where three different colluvium materials are remolded, with the clay content fixed at 10% and the rock contents at 30%, 50%, and 70%, respectively, so that stress-strain relationships of the samples considering different gradations can be obtained. Thereafter, three slope models are built, consisting of the designed gradations. Extreme rainfalls are then applied to cause the slopes to fail, aiming to reveal different slope failure modes. Meanwhile, the changes of the water content, soil pressure, and pore water pressure inside the slope during the slope failure process are also monitored and analyzed, and the changes of fines content and its moving trajectories during the rainfall infiltration process are also illustrated. Finally, the failure mechanism of the accumulation landslide under extreme rainfall is summarized, which can hopefully provide some theoretical basis for the early warning of the accumulation landslide.

Keywords: accumulation; landslide; rainfall; soil matrix; rock content; model test

1 引 言

滑坡是各类地质灾害中较为严重的灾害之一, 每年都造成重大的人员伤亡和经济损失^[1-2]。据自然资源部发布的《全国地质灾害通报》统计^[3], 2011—2020 年, 我国共发生地质灾害 100 025 起, 其中滑坡 70 355 起, 占比超过 70%, 而其中以堆积体形式

滑坡灾害最为突出, 由于堆积体透水性强, 稳定性差, 极易受降雨及地下水等因素影响, 继而引发失稳破坏, 相关数据显示我国长江上游滑坡中, 堆积体滑坡占比达到 64%^[4]。另一方面, 相关降雨滑坡分布统计显示^[5], 滑坡的高频发区往往在强降雨地带的山区, 如 2010 年由于暴雨天气引发的保山松散堆积体滑坡, 造成 29 人死亡, 19 人失踪; 2013 年

收稿日期: 2022-09-20

录用日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51979270, No.51709258); 中国科学院青年人才引进项目。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979270, 51709258) and the Overseas Recruiting Program for Outstanding Young Scientists of CAS.

第一作者简介: 王斌, 男, 1989 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土计算力学与试验相关研究工作。E-mail: bwang@whrsm.ac.cn

由于强降雨天气引发的赵家沟滑坡,造成 46 人死亡,2 人受伤;2017 年云南镇沅县遭遇强降雨天气,每小时降雨量达 50 mm 以上,局部地区每小时降雨量达 100 mm,诱发滑坡地质灾害,造成部分群众财产损失严重,3 人遇难;2019 年受超强台风“利奇马”产生的暴雨影响,浙江省永嘉县岩坦镇山早村发生山体滑坡,形成的堰塞湖溃决,造成 30 余人遇难。与此同时,据中国气象局发布的《中国气候变化蓝皮书(2021)》^[6]称,1961 年至 2020 年我国平均年降水量呈增加趋势,强降雨引发相关自然灾害概率增大。因此,针对强降雨下堆积体滑坡开展相关研究对于理解以及进一步防止堆积体滑坡灾害具有重要的意义。

目前,围绕降雨诱发堆积体滑坡,研究人员从现场实测、数值模拟、模型试验等角度,对降雨诱发堆积体滑坡的机制及影响因素开展了一系列研究。

在现场实测方面,林松等^[7]采用高密度电法进行现场地实测,通过实测电阻率查明了滑坡体地层结构,为滑坡形成机制分析提供了大量数据支撑;张毅等^[8]通过原位双环渗水试验,结合高密度电法,分析了降雨对堆积体滑坡的影响机制,提出了诱发堆积体滑坡的可能原因为堆积体内部渗透系数差异性形成优势通道。在数值模拟方面,赵永红等^[9]针对三峡树坪滑坡建立有限元分析模型,探讨了降雨和库区水位下降对滑坡的影响权重,得出了降雨是诱发树坪滑坡的决定因素;张大权等^[10]利用饱和-非饱和渗流有限元模拟降雨入渗堆积体边坡的过程,提出了降雨是滑坡持续变形并失稳的诱发原因,总雨量、降雨时长、峰值雨强相同,雨强逐渐减小的降雨雨型对边坡稳定性影响最大。

在模型试验方面,陈宇龙等^[11]进行了大尺寸滑坡模型试验,结果表明边坡失稳与坡面径流和细粒迁移密切相关;雷先顺等^[12]研究了不同滑道坡度和滑道宽度下,细颗粒堆积体和粗颗粒堆积体的碎屑流堆积状态,结果表明不同颗粒组成的堆积体,滑坡形态存在显著差异;陈玺文^[13]通过研究坡度和降雨强度对边坡稳定性的影响,发现降雨强度与滑坡变形破坏关系密切,但并非是线性关系;Orense 等^[14]开展了砂性土坡室内模型试验,提出了可通过监测土坡含水率和位移预测滑坡产生时间;左自波等^[15]通过降雨模型试验研究了降雨条件下不同级配松散堆积体的渗流、变形、破坏和颗粒运移的规律;徐颖^[16]开展了中雨、大雨、暴雨、大暴雨及不同降雨历时对边坡稳定性的影响研究,结果表明,久雨型低强度降雨易引发边坡整体破坏,而短历时

强降雨易引发边坡局部破坏,且具有诱发速度快的特点。

另一方面,在堆积体力学特性方面,堆积体结构作为一种从均质土体过渡到岩体的特殊地质体,研究人员针对含石量及基质材料对堆积体力学性质的影响也开展了相应研究,以揭示不同堆积体滑坡模式在宏观上的差异性。Simoni 等^[17]进行了多组砾石混合体直剪试验,发现含石量会影响混合体密实度,进而导致其内摩擦角发生变化;魏厚振等^[18]通过室内现场两用大型直剪仪对蒋家沟砾石土开展试验,结果表明粗粒含量 48.7%为砾石土黏聚力分界点,此时试样黏聚力最小;杨继红等^[19]选择三峡库区典型堆积体进行室内大型直剪试验,研究了含石量对堆积体物理力学性质的影响规律;Chen 等^[20]开展降雨试验探讨了黏粒含量对砾石混合体边坡破坏影响,发现中等黏粒含量(5%~10%)最易触发泥石流破坏。

综上所述,降雨诱发堆积体滑坡是一个非常复杂的过程,是一个颗粒组成结构、雨强、坡脚等内外部众多因素作用的综合结果。因此,研究人员围绕这个问题,从众多方面开展了大量的研究,包括模型试验,认为堆积体中土体基质^[20]与碎石含量^[21]对边坡破坏模式和稳定性有着显著的影响。此外,也通过堆积体力学特性试验研究,指出了含石量及黏粒含量对堆积体力学特性的影响。

因此,本文从堆积体结构组成展开,汲取前人的研究成果,认为堆积体结构的组成是引起堆积体结构不同破坏模式、不同破坏形态的主要原因之一。通过配比不同的碎石以及基质含量,构建不同堆积体结构的重塑土试验样本,开展室内的大三轴试验,从而获得碎石土强度随含石量变化的演化规律,并进一步围绕着极端条件下地质灾害的发生与发育特征,展开相应的模型试验研究。希望相关研究成果能够丰富极端条件下不同含石量堆积体滑坡的发育特征,为强降雨条件下堆积体滑坡的预警分析提供进一步科学的数据和理论依据。

2 堆积体室内三轴试验研究

岩土体的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,是影响边坡安全系数的重要参数,直接影响边坡是否破坏及其可能发生的破坏模式。堆积体作为一种碎石与基质组成的特殊地质体,其抗剪强度主要来自于颗粒间的相互摩擦、咬合和胶结等作用,碎石含量与基质性质对堆积体的抗剪强度有着重要的影响^[22]。因此,在开展室内降雨滑坡试验前,需

要厘清不同含石量与基质含量下,堆积体基本物理力学性质的变化规律。本节通过开展室内大三轴试验,考虑了含石量与土体基质共同变化对堆积体整体力学性能的影响。

2.1 三轴试验方案

为研究不同土体基质和含石量对堆积体物理力学性质的影响,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[23]开展多组大型固结不排水三轴剪切试验。堆积体由黏土、砂、碎石组成,黏土和砂共同构成土体基质,其中,碎石采用粒径大于 2 mm 的砾石,砂土粒径为 0.075~2.000 mm,黏土粒径小于 0.75 mm。本研究以碎石的质量分数(后文简称含石量)为变化量,据 Chen 等^[20]研究,黏粒含量为 5%~10%的堆积体最易滑坡,考虑到后续需进一步开展降雨滑坡模型试验,为进一步提高降雨诱发堆积体滑坡的目的,故试样中黏粒含量设定为 10%,含石量分别为 30%、50%、70%的 3 种土样^[24],各堆积体级配曲线如图 1 所示。试样尺寸 $\phi 300\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 。

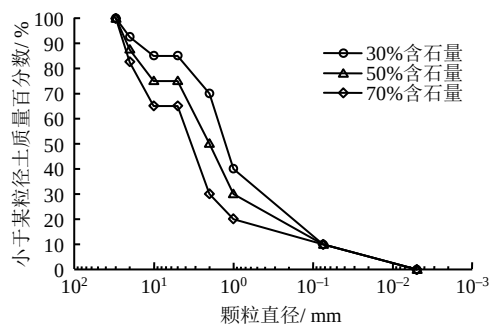


图 1 堆积体颗粒级配曲线

Fig.1 Particle gradation curves of accumulation

3 组试验方案见表 1。为实现重塑土的均匀性,试验前根据不同含石量粒径配比,确定黏土、砂、碎石的质量,通过搅拌机充分混合土样,进而根据设计的干密度、含水率和土样体积,计算每层土样所需质量,将土样倒入制样器进行击实,为避免各层有明显分界,对表面进行刨毛处理,使土样形成一个整体。其中,大型三轴试验轴向应变达到 15% 时停止试验。

表 1 三轴试验方案
Table 1 Triaxial test scheme

试样 编号	黏粒含量 / %	砂土含量 / %	含石量 / %	黏土占基质含量 / %	试样干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 / %	围压 σ_3 / kPa	剪切速率 /(mm·min ⁻¹)	试验方法	试验装置
S1		60	30	14.3						
S2	10	40	50	20.3	1.84	8	200, 400, 600	3	固结不排水	大型多功能动静三轴仪
S3		20	70	33.3						

2.2 试验结果分析

土体在偏应力作用下的轴向应变变化规律反映了土体的强度及变形的特性,基于室内大三轴试验结果,绘制了不同含石量试样在不同围压下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 关系曲线,如图 2 所示。除 200 kPa 围压下 50%含石量的试样,不同含石量试样偏应力均随着轴向应变的增大而增大,属于应变硬化型曲线,可分为两个主要阶段:①弹性阶段,在轴向应变较小时,各试样所受偏应力和应变近似成比例增长;②应变硬化阶段,在应变硬化前期,偏应力仍然随轴向应变逐渐增加,但增长速率远小于弹性段,且速率逐渐降低,直到应变硬化后期偏应力几乎不变,逐渐趋近平缓。而 50%含石量的试样在 200 kPa 围压下,偏应力随着轴向应变的增加出现了一定程度的下降,这可能是由于试样制备时内部碎石排列与分布较好,试样结构较为稳定,宏观强度较高^[25],因此,当试样产生剪切破坏后,试样产生了一定的软化现象。

不同含石量试样在不同围压下的孔压变化 $u - \varepsilon$ 关系曲线,如图 3 所示。可以看出,不同含石量下,孔隙水压力在轴向压力施加初期,响应速度快,基本达到峰值,之后受持续增加的轴向应力作用,孔隙水压力基本稳定,产生轻微波动,并未出现明显增长或减小情况。且随着围压增大,孔隙水压力峰值并无显著区别。

整体来看,随着试样含石量的增加,其黏结效果更好,由其构成的堆积体边坡将具有更好的整体性。

另一点值得关注的是, S1、S2 试样应力-应变曲线的变化趋势大体一致,即随着轴向应变的增大,偏应力先迅速增大,然后其增长速率逐渐减小,最后趋于稳定而 S3 试样应力-应变曲线则与前两组试样有一定区别,当轴向应变较大时,其偏应力增长幅度依旧很大。分析认为这是由于在高含石量条件下,土体基质中黏土含量占比从 14.3%增至 33.3%,其物理力学性质较 S1、S2 试样基质差异较大导致

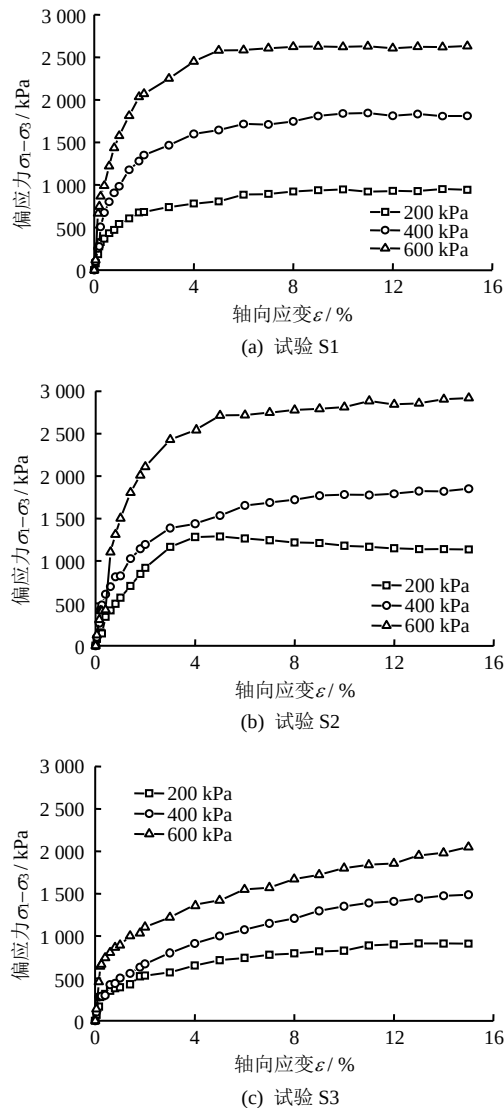


图2 不同含石量土石混合体试样的三轴剪切应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of soil-rock mixture samples with different rock contents in triaxial test

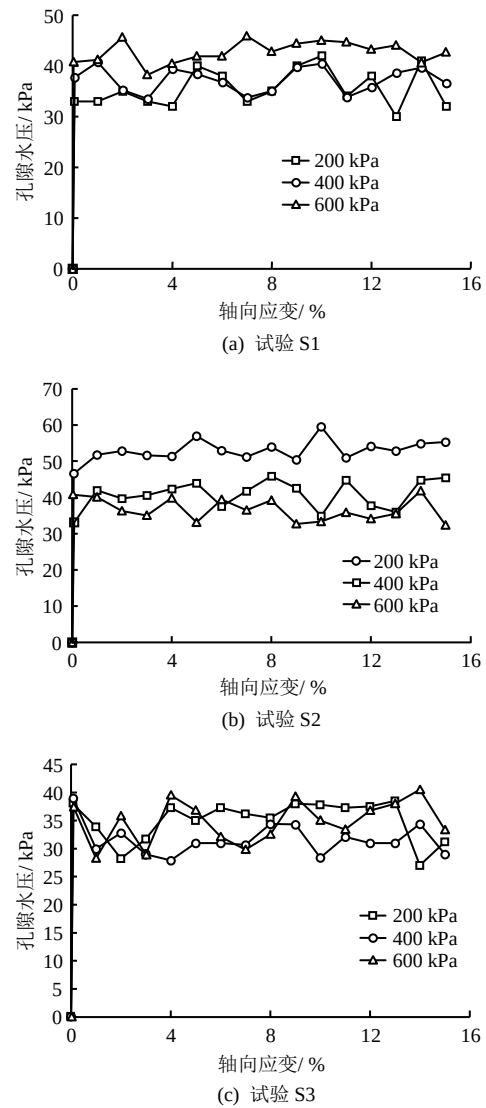


图3 不同含石量土石混合体试样的三轴剪切孔压-应变曲线
Fig.3 Pore water pressure-strain curves of soil-rock mixture samples with different rock contents in triaxial test

该现象发生。如图4所示, 试验后的土样状态也较好地佐证了上述分析, 低含石量试样在脱去橡皮膜后无法保持柱状, 散落在地, 这是由于低含石量对应的土体基质中, 黏土含量较低, 试样强度更多来自于颗粒间的咬合、摩擦作用, 在失去橡胶膜约束后易坍塌; 而高含石量 S3 试样在脱去橡皮膜后则可以维持柱状, 说明高含石量对应的土体基质中黏土含量高, 土样黏聚力较高, 土体基质逐渐向黏土转化^[26], 使堆积体宏观上性质与 S1 和 S2 有较大差异。

2.3 抗剪强度及参数变化

按规范取各堆积体试样峰值强度或15%轴向应变所对应的强度作为试样的抗剪强度, 如表2所示。根据表2可得到含石量对堆积体抗剪强度及参数影响的折线图, 如图5所示。

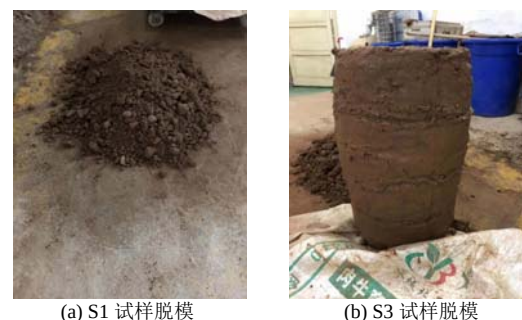


图4 土样试验后形态
Fig.4 Soil sample after test

表2 不同围压下试样抗剪强度参数
Table 2 Shear strength parameters of samples under different confining pressures

试样 编号	抗剪强度 q / kPa			黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
	$\sigma_3=200$ kPa	$\sigma_3=400$ kPa	$\sigma_3=600$ kPa		
S1	904.3	1 801.4	2 628.6	11.26	43.1
S2	1 302.9	1 867.1	2 918.6	14.73	44.9
S3	1 404.3	1 972.9	2 535.7	17.92	39.4

从图 5 可以看出,随着围压增大,各试样抗剪强度均有所增强,而在相同围压下,除 600 kPa 围压外,试样的抗剪强度均随含石量增大而增大。当堆积体含石量小于 50% 时,含石量增大会使堆积体内部块石之间发生摩擦、咬合的可能性增大,由于块石之间的摩擦通常大于基质与基质、基质与块石之间的摩擦力,故堆积体整体强度也会不断上升。但当含石量过高时,此时基质中黏土占比逐渐增高,土颗粒间的黏结力增强,但由于含石量过高,空隙多,颗粒级配中的细颗粒含量不足以较好地填充堆积体内部孔隙,甚至部分细粒在堆积体内呈现悬浮态,导致堆积体内部结构之间的摩擦缺少来自基质的阻力作用,即高含石量堆积体由于土体基质中黏粒占比增加,黏聚力提高,但可能存在因级配不良造成的内摩擦力下降,使得高含石量堆积体的抗剪强度随围压增长的速率较慢,甚至在同等围压下抗剪强度低于低含石量堆积体。

总而言之,基质与含石量的分布不同对于堆积体结构整体形态影响十分显著,因此,对于理解后续不同含石量下堆积体破坏模式的差异,总结相应的演化规律有重要的意义。

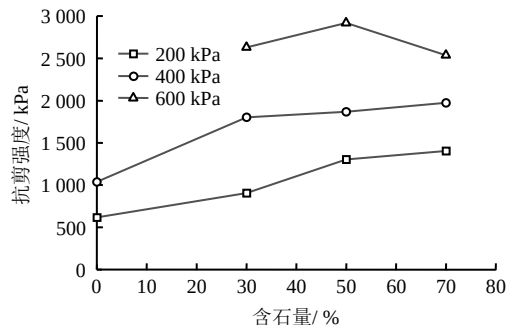


图 5 抗剪强度与含石量关系
Fig.5 Relationship between shear strength and rock content

3 堆积体降雨滑坡模型试验

物理模型试验能定性或定量地描述岩土体在外力作用下各物理量的变化规律,本研究基于堆积体滑坡降雨模型试验,模拟了不同含石量堆积体边坡在强降雨条件下失稳破坏的全过程,分析了滑坡过程中坡顶位移、含水率、土压力、孔隙水压力等物理量的响应规律,并通过不同部位细粒含量变化,探讨了堆积体内部细颗粒竖向迁徙规律,进一步同边坡裂隙发展情况进行对应。

3.1 试验装置与试验方案

降雨模型试验装置主要包含模型槽、降雨系统和多物理量测量系统 3 部分,如图 6 所示。

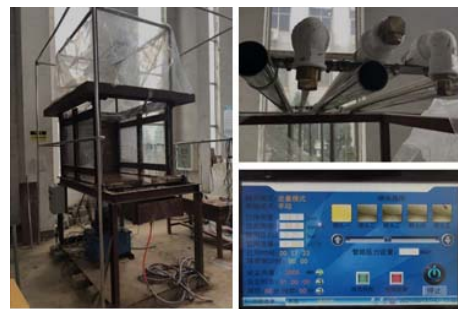


图 6 模型槽和降雨系统
Fig.6 Model troughs and rainfall systems

模型槽是本次降雨滑坡模型试验的主要设备,其骨架是由槽钢、角钢及螺栓锚固而成,模型槽尺寸为 1.5 m×1.0 m×1.0 m。两侧采用 10 mm 厚的有机玻璃制成,底部设有液压千斤顶,可根据具体需求实现模型箱角度的抬升。

降雨模拟系统主要由供水设备、雨强控制设备和降雨喷头组成。雨强控制系统采用高精度双闭环控制,通过触控屏进行操作,可实时调控雨强、管路压力,将降雨量等信息显示在屏幕上。

多物理量测量系统包括位移传感器、孔压传感器、土压力传感器、体积含水率传感器和数据采集仪。

其中,土压力传感器的直径为 20 mm,厚度为 5 mm,在安置传感器时需要将其水平放置在土体上,且不会发生移动,若是位置和角度发生偏差,则会影响结果准确性。同时与光洁面接触的最大土体粒径不得超过传感器直径的 1/10。试验中埋设土压力传感器时需对传感器放置状态及周围土样直径进行确认,避免影响测量准确性。

值得注意的是,本文并非基于真实边坡的相似模型试验,而主要侧重探究我国西南地区较为典型的降雨诱发堆积体滑坡这一类滑坡灾害。因此,在模型试验的设置上做了简化,并未考虑相似比设计。

为探究含石量对堆积体破坏模式的影响,探讨降雨过程中堆积体压力、渗流、变形和颗粒迁徙等变化,本次试验配制 30%、50% 和 70% 含石量的堆积体土样进行试验,黏粒含量设定为 10%。各个传感器埋设位置如图 7 所示,同一位置标号 1~6 均布设有体积含水率传感器、孔压传感器、土压力传感器,传感器间间隔一定距离,用少量土体分隔,避免相互干扰。

为反映滑坡的位移水平,模型试验中主要通过边坡顶部布设位移传感器监测由于降雨引起的边坡整体沉降;同时,结合布设的高速照相机以及视频录像整体反映降雨下边坡的滑动过程。这里值得

注意的是, 试验中并未就边坡的内部位移以及坡表面位移进行细致地观测。现有研究中, 通过在坡表面不同位置进行布设位移传感器, 以及在坡内部利用测斜仪, 亦或者光纤传感器, 可以获得滑坡过程更为精细的描述。

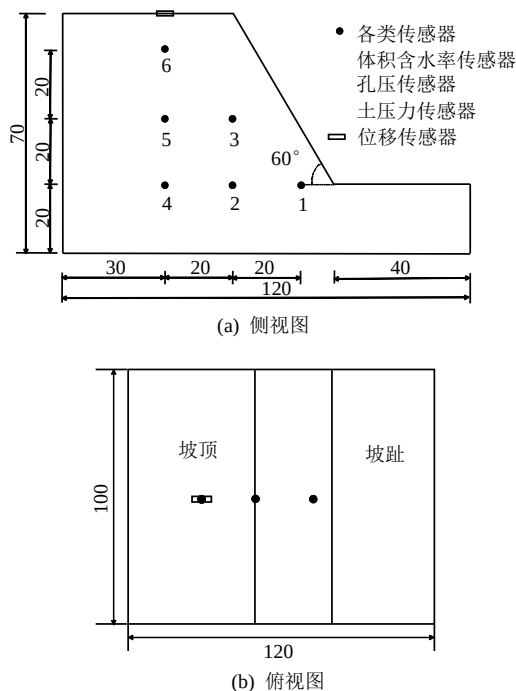


图7 传感器布置图(单位: cm)
Fig.7 Layout of sensors (unit: cm)

根据三峡库区的滑坡灾害与当日降雨量间的关系相关研究显示, 当雨型达到暴雨级别, 即雨量达到 50~100 mm, 滑坡发生概率接近 90%^[27]。因此, 本文将雨强设定为 50 mm/h, 以近似模拟强降雨条件下的试验环境, 达到强降雨诱发堆积体滑坡的目的。堆积体滑坡多发育于 20°~40° 坡脚的斜坡, 但考虑到模型试验的安全系数要高于实际边坡, 故设坡角为 60°。王俊杰等^[28]对松散堆积体的研究显示, 堆积体在干密度较大的情况下, 表明其密实度更好, 其整体强度会较高, 不易发生破坏, 因此, 此处将试样干密度设为 1.6 g/cm³, 含水率设为 8%, 考虑实际过程中损耗, 故实际配制含水率为 10%, 具体相关试验数据如表 3 所示。

表3 模型试验方案
Table 3 Model test plan

工况	堆积体含石量 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	降雨强度 /(mm·h ⁻³)	坡角 /(°)	含水率 /%
G1	30				
G2	50	1.6	50	60	8
G3	70				

针对上述模型设置参数, 结合三轴试验获得的土体强度参数, 通过有限元软件以及渗流分析软件, 基于强度折减法验算了 60° 堆积体边坡的稳定性, 以确保试验中的堆积体天然状态下的稳定性。进一步通过 50 mm/h 的降雨入渗分析, 确定了试验设定雨强具备诱发堆积体滑坡的条件。

堆积体在制备过程中包括筛分、拌合等阶段。制作模型过程采用水平分层填筑法, 其步骤如下:

(1) 勾画轮廓: 在模型槽两侧有机玻璃上按照规定边坡尺寸分层做好标记。

(2) 分层填筑: 根据设计的干密度、含水率和堆积体体积, 计算每层堆积体所需质量, 将堆积体均匀的倒入模型槽对应的分层中, 进行击实, 为避免各层有明显分界, 对表面进行刨毛处理, 使堆积体形成一个整体。为便于观测试验过程中堆积体的位移, 在每层表面撒上一层薄石英砂。

(3) 埋设仪器: 为减少干扰边坡, 在填筑过程到达相应的高度时, 便埋设相应的仪器, 同一位置的仪器间隔一定距离, 避免相互干扰。

(4) 调整坡形: 在坡体完全填筑完成后, 参考边坡轮廓线, 将边坡破面削平, 完成边坡模型制作。

完成边坡模型后, 使其静置 12 h, 根据数据采集仪的采集信息, 确保边坡自身达到稳定, 成型边坡如图 8 所示。在边坡前方和一侧设置有摄像机, 用于观测记录边坡在降雨过程中的破坏变形。通过数据采集仪自动监测各传感器接收的数据, 并将其传送到电脑上进行记录。试验过程中的降雨历时结合边坡实际的破坏过程控制, 当边坡不再发生持续性破坏时结束。最终 G1 试验降雨历时 298 min, G2 试验降雨历时 244 min, G3 试验降雨历时 138 min。



图8 成型边坡图
Fig.8 Arrangement of test slope

3.2 滑坡过程体积含水率变化

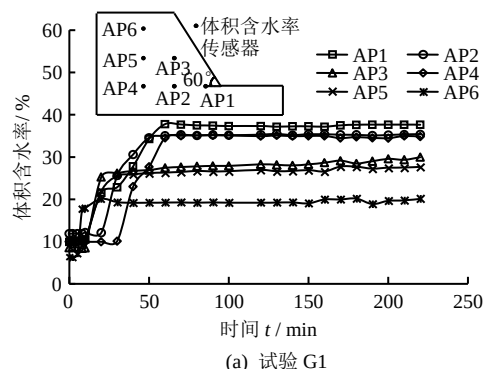
湿润锋是指水分渗入过程中, 土壤被湿润的先头部位与干土层形成的明显交界面。在降雨入渗过程中, 水分运移收到基质吸力的影响, 随着湿润锋面到达, 基质吸力减小, 体积含水率增大。根据非饱和的 Green-Ampt 模型^[29], 在湿润锋面处, 体积

含水率从初始的非饱和状态迅速增长至饱和状态。模型试验过程中,由于测点数量有限,很难准确描述湿润锋的运移过程。Li 等^[30]在一维土柱渗透试验中通过观测发现,湿润锋的运移过程分为 3 个阶段:湿润锋到达前的初始阶段(体积含水率保持初始状态不变)、浸润过程(体积含水率迅速增大)、土体浸润(体积含水率增大至某一稳定值,或缓慢增大至稳定)。可见,体积含水率的变化可以作为标定湿润锋位置的标志。左自波等^[15]在研究中也采用相同方法,基于体积含水率的变化描述降雨入渗湿润锋的运移。

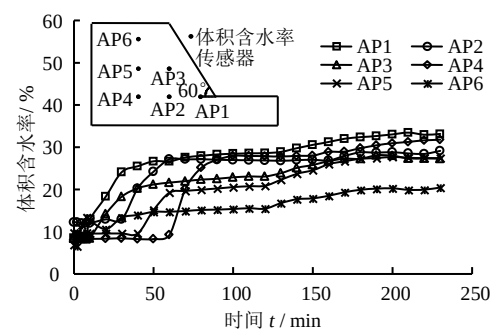
G1 试验体积含水率传感器所测边坡含水率变化如图 9(a)所示。在降雨入渗作用达到传感器位置之前(降雨历时 7 min),各测点的体积含水率保持稳定,当降雨持续一段时间后,降雨入渗达到监测点,土体体积含水率急剧增大。从各测点响应时间来看,降雨入渗湿润锋最先影响到坡体表面 AP1 (20 min)、AP3 (12 min)、AP6 (7 min) 测点,自坡顶至坡脚,响应逐渐滞后,且越深入坡体内侧,响应速度越慢。降雨入渗湿润锋最早到达坡顶 AP6 测点,最晚到达坡体内部测点 AP4。各测点处体积含水率峰值依据深度也有明显的分层现象,随深度增加,体积含水率峰值逐渐增大,且相同深度处体积含水率接近。在 11 min 时降雨入渗到达了坡脚 AP1 测点处,其体积含水率迅速上升,并在 64 min 时达到最大值 37.7%,随后保持稳定。30 min 降雨入渗到达了坡脚 AP4 测点处,其体积含水率迅速上升,并在 65 min 时达到最大值 34.3%,随后保持稳定。

G2 试验体积含水率传感器所测边坡含水率变化如图 9(b)所示。降雨入渗湿润锋最早在降雨持续 2 min 后到达坡顶 AP6 测点,最晚到达坡体内部 AP4 测点。AP4 测点处体积含水率传感器响应时间为 58 min,急剧上升之后在 98 min 到达相对最大值 27.9%,随后缓慢上升,最终其体积含水率为 31.8%。由于滑坡发生,AP2 测点处体积含水率在后期中回落至与 AP3 和 AP5 处近乎相等。

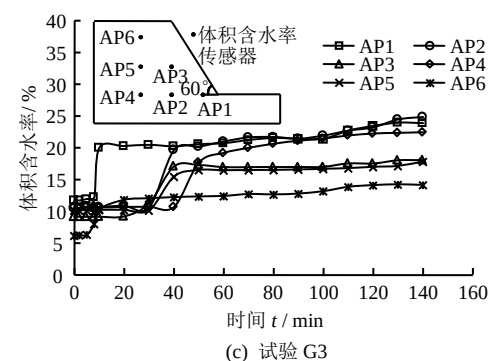
G3 试验体积含水率传感器所测边坡含水率变化如图 9(c)所示。降雨入渗湿润锋最早在降雨持续 13 min 后到达坡顶 AP6 测点,最晚到达坡体内部 AP4 测点。各测点中最终体积含水率最大的是 AP2 测点处,为 24.9%,相比于 30%和 50%含石量堆积体中的最大值 34.6%和 33.1%来说,明显减小。其他测点体积含水率在达到平稳后,随着滑坡的发生也有所波动,但最终值也显著降低,说明高含石量边坡土体性质与普通堆积体有一定差异。



(a) 试验 G1



(b) 试验 G2



(c) 试验 G3

图 9 不同含石量边坡体积含水率变化曲线

Fig.9 Volume water content curves of slopes with different rock contents

3.3 强降雨条件下滑坡发展过程

不同含石量堆积体在降雨过程中有不同的滑坡发展过程,该过程通过摄像机记录下来,用于具体分析滑坡破坏模式。

G1 堆积体破坏模式前期属于冲蚀引起的局部浅层坡面破坏模式^[15],后由于基质流失,而坡体较陡,局部失稳进一步发展为块状滑动破坏^[5],其发展过程和坡顶位移分别如图 10(a)和图 11 所示。该破坏过程虽主要为表层侵蚀,但随着降雨入渗,坡顶存在阶段性竖向位移变化,仍以其作为重要参数进行分析。在降雨初期,边坡坡顶迅速发生沉降,在 30 min 时沉降停止;在 60 min 时,发展出了明显的冲蚀沟(虚线框区域内),沉降从 14.1 mm 突变为 21.6 mm,原因是传感器探头处的碎石原先与基质土有序排列,在雨水冲蚀下,基质土流失,碎

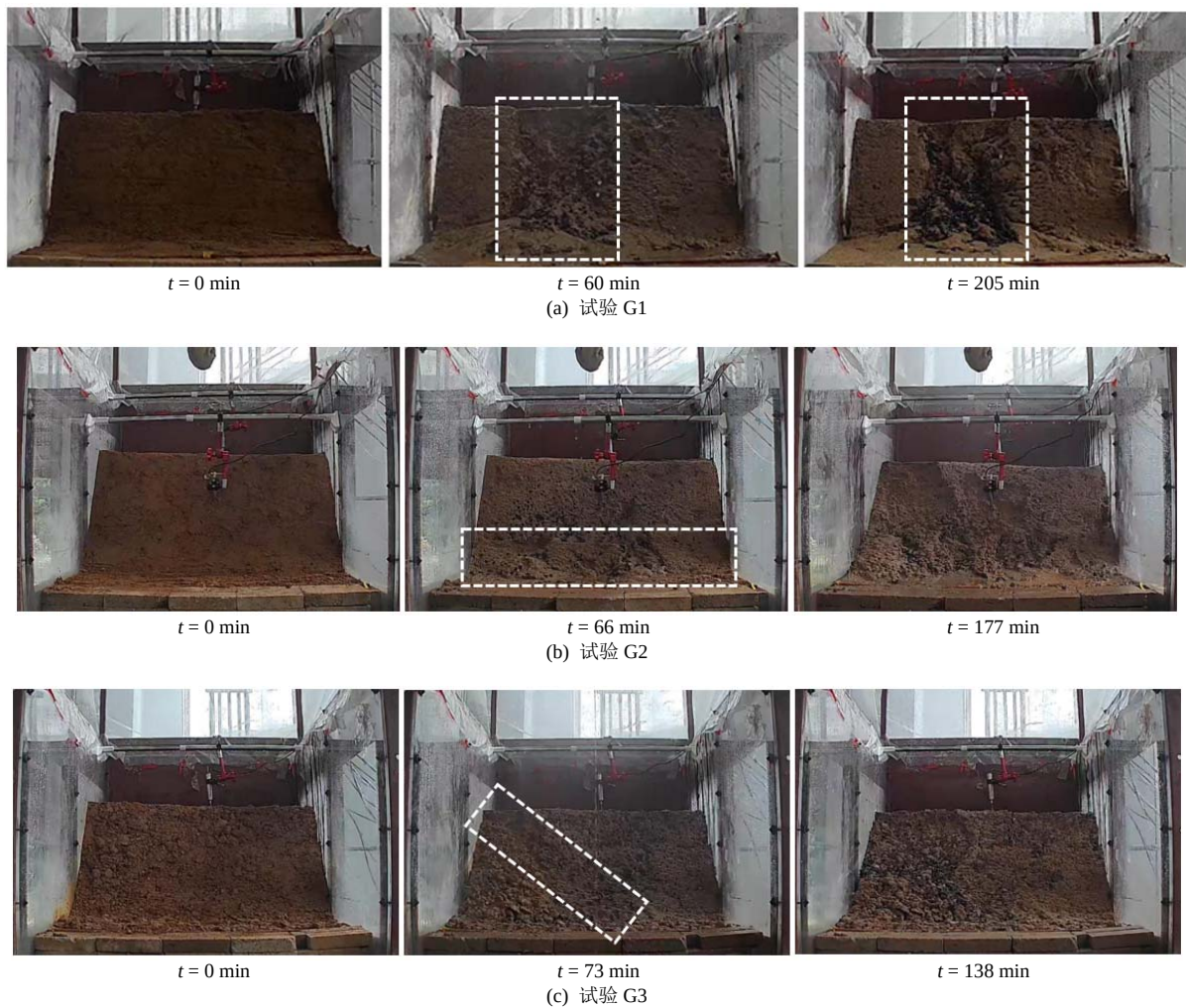


图 10 不同含石量边坡试验发展过程

Fig.10 Experimental development process of the slopes with different rock contents

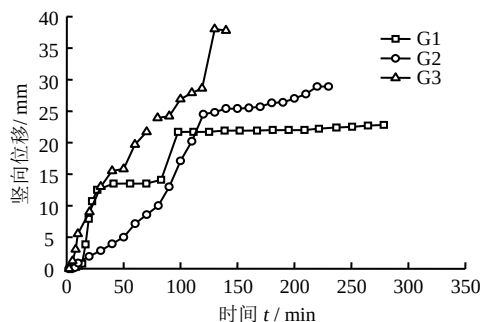


图 11 不同含石量坡顶竖向位移变化曲线

Fig.11 Vertical displacement curves of slope crest with different rock contents

石突破锁固段发生了一次较大位移, 后续坡顶沉降缓慢增长, 直至最大值 22.9 mm; 可以观察到右部边坡坡肩开始有明显的沉降, 滑坡开始发生, 205 min 时滑坡体已经产生较大沉降, 同时滑坡体本身出现裂隙 (虚线框区域内), 在原有冲蚀滑坡基础上再次发生滑坡, 最终在坡脚处堆积, 降雨结束。

G2 堆积体破坏模式属于坡脚部位土体破坏导

致坡体上方失去支撑后的多级后退式滑坡^[31-32], 其发展过程和坡顶位移分别如图 10(b)和图 11 所示。降雨初期, 坡面受到雨水冲刷, 边坡内部碎石裸露, 在坡面上形成大小凹坑, 边坡整体沉降均随时间匀速变化; 在 66 min 时, 坡脚土体开始软化并发生滑动 (虚线框区域内), 随着降雨的进行, 土体滑动自下而上缓慢发展, 其余方位的坡脚也在逐渐发生滑动; 到 122 min 时位移增长均变平缓, 边坡左部的土体从下往上依次发生规模较大的近圆弧状土体整体滑动; 在 177 min 时, 边坡中部的土体也在降雨和重力影响下发生滑动坍塌, 最终各部位的滑坡体堆积在坡脚, 降雨结束。

G3 堆积体破坏模式为崩塌型破坏^[33], 属于岩质堆积体边坡的常见破坏形式, 其发展过程和坡顶位移分别如图 10(c)和图 11 所示。降雨开始后, 表层浮土很快就在雨水的冲刷作用下剥蚀, 表层碎石出露; 在 73 min 时, 边坡由于不均匀沉降产生纵向裂隙并迅速贯通 (虚线框区域内), 在不到 1 min 内

发生破坏, 滑坡体堆积在坡脚; 在 138 min 时坡体完全崩塌破坏, 降雨结束。整个过程坡顶沉降速度较为平稳, 直到 122 min, 因位移传感器从碎石上脱落达到量程最大值。

3.4 滑坡过程土压力变化

G1 试验土压力传感器所测边坡土压力变化如图 12(a)所示。降雨初期, 各测点处的土压力迅速上升, 由于土体的非均质性, 边坡各点土压力响应时间和上升速度不同, 导致坡体内部土压力变化复杂。由于降雨入渗作用, 土体逐渐饱和, 饱和土体在自重应力作用下逐渐固结, 土体孔隙减小, 有效应力持续增加, 各测点土压力上升, 随着固结过程完成, 土压力逐渐趋于平稳状态, 其中坡角附近 BP1 测点处土压力在降雨模拟过程中波动最大。降雨过程中, 随着土体深度增大, 土压力值变化越大, 浅层土体

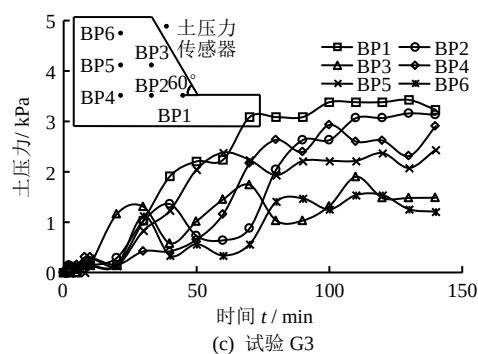
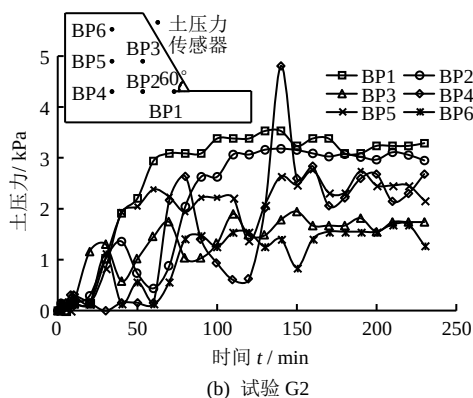
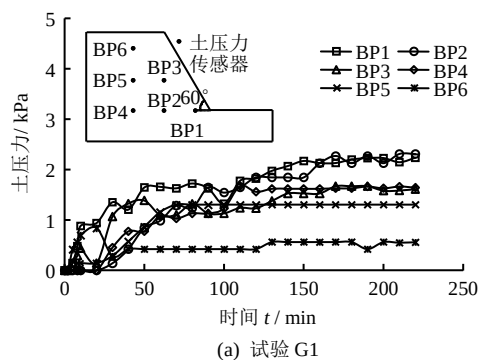


图 12 不同含石量边坡土压力变化曲线

Fig.12 Soil pressure curves of slopes with different rock contents

土压力受降雨影响的响应速度更快, 两者综合影响导致坡脚处土体土压力有着较大波动, 且变化迅速, 加之坡脚是径流和渗流水出露处, 从而导致坡脚成为边坡稳定性分析中最为薄弱的环节。

G2 试验土压力传感器所测边坡土压力变化如图 12(b)所示。由于边坡整体在降雨过程中发生较大沉降, 导致坡体内部土压力变化复杂, 尤其是 BP4 测点处在降雨过程中土压力发生巨大的起伏, 推测应该是测点附近有大块碎石在边坡沉降过程中发生了摩擦滚动, 导致局部区域出现应力减小和应力集中现象。除此之外, 其他测点在本次降雨滑坡试验中土压力也是波动变化, 进一步说明含石堆积体边坡整体稳定性受含石量影响较大。

G3 试验土压力传感器所测边坡土压力变化如图 12(c)所示。可以明显地看出, 在边坡降雨沉降过程中, 各测点均表现为震荡上升, 在高含石量条件下, 边坡内部应力更多是在碎石间传递, 细砂和黏土主要充当填充作用, 使得坡体内部应力呈现波动特征。不过, 从整体上看, 土压力变化大小仍然与深度呈正相关, 随着降雨持续进行, 土压力逐渐稳定。

3.5 滑坡过程孔隙水压力变化

G1 试验孔隙水压力传感器所测边坡孔隙水压力变化如图 13(a)所示。降雨过程中, 各测点孔隙水压力响应过程与体积含水率响应过程一致。坡顶 CP6 测点处响应速度最快, 并在 40 min 时达到最大值 0.60 kPa, 随后保持相对稳定。由于在 60 min 时开始发生滑坡, 整体边坡孔隙水压力呈现波动, 最后达到最大值并保持稳定。

G2 试验孔隙水压力传感器所测边坡孔隙水压力变化如图 13(b)所示。随着降雨的不断进行, 各测点孔隙水压力迅速增加, 随后达到其最大值并保持稳定。177 min 时, 由于边坡中部发生局部滑坡, 导致 CP2 测点处孔隙水压力有所下降, 最终为 1.48 kPa。

G3 试验孔隙水压力传感器所测边坡孔隙水压力变化如图 13(c)所示。CP4 测点处传感器响应时间为 40 min, 相比于前几次滑坡试验响应更快, 说明边坡整体渗透性更强。随着降雨的进行, 各测点处孔隙水压力均快速上升, 最终趋于稳定, 从坡顶到坡脚, 各处孔隙水压力逐渐上升。

3.6 滑坡过程细粒迁徙

在降雨滑坡过程中, 经常会见到浑浊的径流携带泥沙而下, 堆积在坡脚, 在边坡表面经常能够观察到该现象, 这种现象的本质就是颗粒迁徙。而在坡体内部, 由于难以用肉眼直接观察, 于是在降雨

结束后, 针对 3 组堆积体边坡试样, 从坡顶开始, 每隔 20 cm 对边坡相同位置取样 300 g, 并配置悬浊液通过 0.075 mm 筛, 随后将其烘干并测量质量, 分析细颗粒在坡体内部的变化规律。

G1 试验, 在降雨结束后, 对相应位置进行采集, 坡体内部各部位细粒含量如图 14(a)所示, 可以看出, 各部分细粒含量有较大差异, 坡顶部分细粒流失较为严重, 从初始 10% 下降到 8.5%, 坡中细粒含量为 8.77%, 坡底为 9.47%。说明边坡内部各部分细粒含量都在流失, 且流失的部分有的从坡面渗出, 最后堆积在坡脚, 有的则在坡体内部发生纵向迁徙, 导致坡底细粒含量会明显大于上覆土体。如图 14(a) 为降雨结束后坡脚的堆积物, 可以看出堆积物有明显的分层现象, 最底层为黏土, 其次为砂粒, 最上层为碎石, 说明边坡破坏最开始便是从细颗粒迁徙开始, 随着细颗粒从渗流通道流失, 大粒径砂粒失去支撑, 对边坡稳定性产生较大影响, 等坡体内部粗颗粒之间孔隙渐渐增大, 又会加剧细粒流失, 导致边坡强度降低, 最终引发破坏。

G2 试验, 在降雨结束后, 对相应位置进行采集, 坡体内部各部位细粒含量如图 14(b)所示, 坡顶部位土样细粒含量在试验结束后从初始的 10% 降低为 8.23%, 坡体中部细粒含量为 8.53%, 坡底为 9.33%。各部位细粒流失都较为严重, 坡顶也存在大片裸露的碎石。此外, 如图 14(b)所示, 在坡脚处依然存在明显的分层现象, 与 30% 含石量堆积体不同的是, 50% 含石量堆积体坡脚处泥浆厚度更大, 已经与碎石混合在一起, 说明在 50% 含石量下, 堆积体细粒流失更为严重。

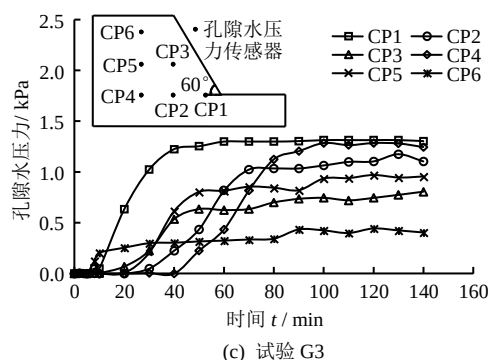
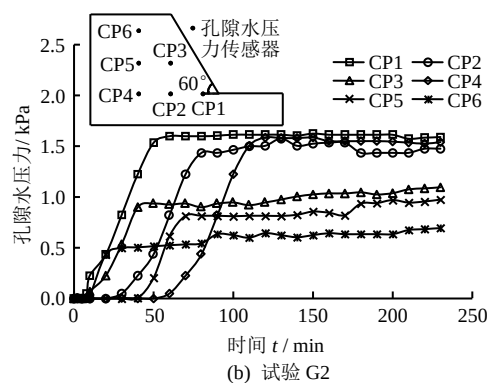
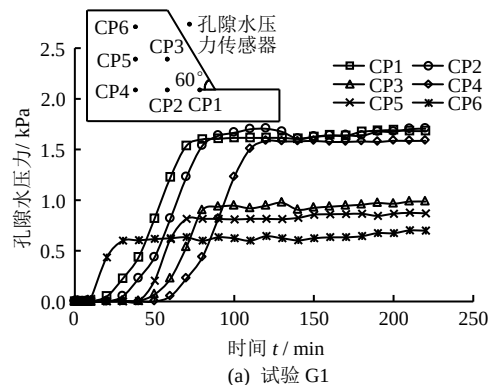


图 13 不同含石量边坡孔隙水压力变化曲线
Fig.13 Pore water pressure curves of slopes with different rock contents

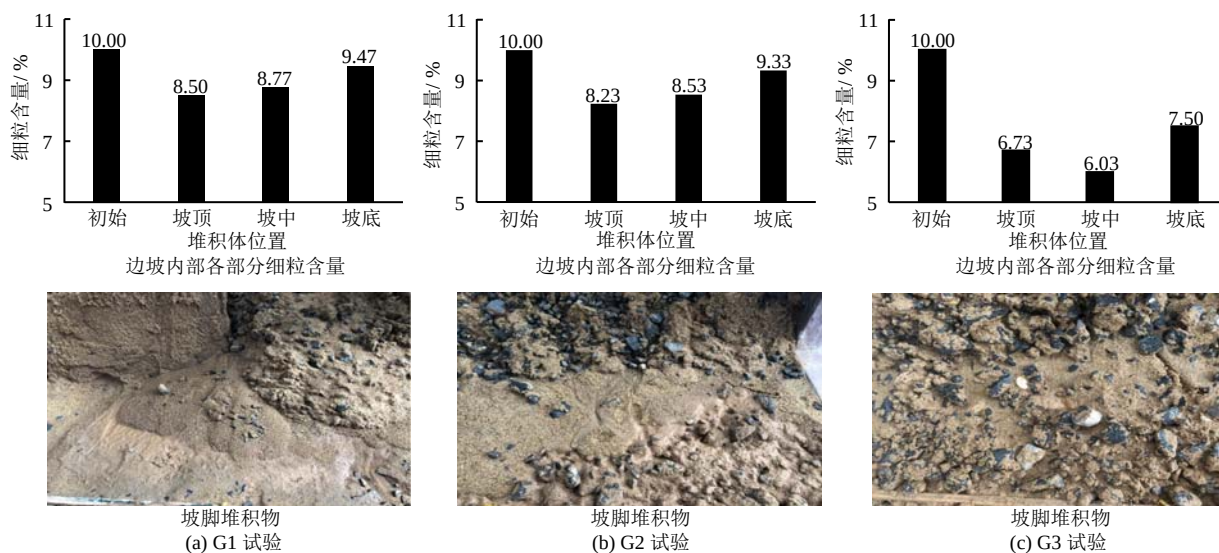


图 14 不同含石量边坡各位置细粒含量
Fig.14 Fines content at different positions of slopes with different rock contents

G3 试验,在降雨结束后,对相应位置进行采集,坡体内部各部位细粒含量如图 14(c)所示,坡顶处细粒含量从初始的 10%降低为 6.73%,坡中为 6.03%,坡底为 7.50%。在此次降雨中,坡中细粒流失最为严重,说明坡体内部土体疏松,孔隙性较大,细粒沿渗流通道迅速迁徙流失。坡顶处的各类大小裂隙,使得雨水能够快速下渗入坡体内部,减少了表面径流的发生,使得坡顶部位细粒含量高于坡中。此外,从图 14(c)可以看出,坡脚部位堆积物主要为砂土和碎石混合体,仅有少量黏土残留,这可能是由于堆积体孔隙较大,细粒难以堆积,从渗流通道流出。

4 讨 论

G1 试验 30%含石量堆积体边坡在降雨初期(15 min)就产生了第 1 道裂隙,且边坡沉降速度较大,但边坡整体依旧保持稳定,没有发生破坏,随着基质土体逐渐被剥蚀,破坏了坡面的完整性,逐渐诱发坡体中部出现规模较大且深的冲蚀沟,发生滑坡。由于破坏过程从浅层局部坡面侵蚀模式开始,与 Acharya 等^[34]对低含石量堆积体的研究一致。因此,建议对于此类堆积体边坡的降雨滑坡防控,应重点关注坡面的完整程度,坡体表面冲蚀沟的产生与持续的强降雨天气,可能会进一步导致边坡失稳破坏。

G2 试验 50%含石量堆积体边坡所发生的多级后退式滑坡是一类较为典型的滑坡,与左自波^[15]、练浩^[35]等在模型试验研究中的滑坡现象类似。根据该类型滑坡的典型特点,结合高速摄像机记录的边坡破坏过程,坡体破坏过程属于连续性过程,未观察到裂隙的出现,且其沉降速度也没有明显增大。因此,针对此类型潜在滑坡的风险防控,应重点关注坡角处土体的运移过程。

G3 试验 70%含石量堆积体边坡在降雨过程中整体沉降速度较为均匀,坡顶出现裂隙后仅仅几十秒就发生了崩塌型破坏,没有较为明显的启动特征。这表明高含石量边坡受到降雨入渗影响,更易引发堆积体边坡内部结构劣化,其破坏往往具有瞬发性。研究人员对我国典型岩质边坡的变形破坏分析^[33],提出了岩质边坡受降雨过程影响,坡体变形存在急增段,这与本文研究结论相一致。同时,还提出岩质边坡的变形过程存在不连续性,即便滑坡体总体上表现为整体性变形,但在局部也包含着转动、开裂等不连续变形因素,坡面碎石滚落表明坡体结构受到破坏,进一步的降雨入渗将加速高含石量堆积体边坡内部的劣化过程。因此,建议对高含石量的

堆积体边坡,应尤其注意坡面大量碎石滚动这一特征。

另一方面,含石量对于堆积体边坡在降雨条件下的细粒流失程度有着较明显的影响。从各堆积体边坡不同深度细粒含量分布统计图(见图 14)可以看出,降雨过后各边坡土体细粒含量均有所减少,坡体表层土受到了雨水冲刷致使细粒流失;特别的,坡顶碎石裸露,表明坡顶是细粒流失重灾区。随着含石量的上升,细粒流失愈发明显,从降雨过程中流入排水管道的水体颜色也能在一定程度上反映细粒流失的程度,高含石量堆积体边坡试验排水管道的水体更为浑浊。

本文研究的 G1、G2、G3 模型试验,在不同含石量下,体积含水率和孔隙水压力均表现为,降雨入渗初期,增长速度较快,随着降雨持续进行,饱和度与饱和区域不断扩大,体积含水率和孔隙水压力增长缓慢,这与孙乾征^[36]、刘坤^[37]等对强降雨影响下非饱和堆积体的水文响应过程基本一致。但从孔隙水压力增长幅度上来看,本文研究中,坡角处孔隙水压力增长幅度大于坡顶。而蔡欣育等^[38]对于天然边坡有限元分析认为,强降雨条件下,坡角处水压力增长幅度小于边坡上部,这主要由于雨强增大导致坡面径流量增大,坡角处入渗水量减小。结合对本文降雨过程中模型的观察,本文的降雨条件并未能在坡面引起足够的坡面径流,这可能是出现不同结论的原因。可见孔隙水压力的增长与降雨强度、边坡的入渗能力相关。

从入渗量来看,随着含石量的增大,相同时刻,相同测点处体积含水率减少,说明,随着含石量的增大,堆积体的入渗量减少。从入渗速率来看,以坡脚处 AP1 体积含水率响应过程为例, G1 模型(30%含石量)在降雨进行约 12 min 后,坡脚处测点 AP1 响应,湿润锋到达,随后经过约 50 min,在降雨 60 min 后,体积含水率基本稳定; G2 模型(50%含石量)在降雨进行约 10 min 后,坡脚处测点 AP1 响应,湿润锋到达,随后经过约 40 min,在降雨 50 min 后,体积含水率基本稳定; G3 模型(70%含石量)在降雨进行约 8 min 后,坡脚处测点 AP1 响应,湿润锋到达,随后经过约 4 min,在降雨 12 min 后,体积含水率基本稳定。整体来看, 30%含石量堆积体入渗速率最慢, 50%含石量略快, 70%含石量渗透速率骤增。王炎廷^[39]对不同含石量的堆积体渗透性能的研究表明,随含石量增大,堆积体渗透系数增大,且更易形成优势渗流管网,使得堆积体边坡的入渗速率和入渗量增大。本文在坡角处入渗

速率的研究结论与现有研究结论一致, 但入渗量存在出入, 其重要原因在于 G1 模型在试验初期, 由于局部冲蚀, 出现块状滑动, 由于表层侵蚀, 部分降水可以直接侵入坡体内部, 增大了入渗量。G2 模型的多级后退式滑坡, 在堆积体中形成多条裂缝, 提高了入渗效果。可见, 入渗速率通常与堆积体的渗透系数相关, 而堆积体整体的入渗量, 往往是坡体优势渗流、雨强等与坡体破坏形式相互耦合的过程。

综合 3 组试验的边坡破坏模式和试样室内三轴试验的相关结论可以看出, 在本文所探究的 3 种颗粒级配下, 随着含石量增加, 试样抗剪强度逐渐增大, 这也表征在不受降雨入渗的初始状态, 随含石量增加, 堆积体边坡整体性逐渐增强。这使得在低含石量情况下, 更易发生坡面径流, 使得在前期降雨入渗产生冲蚀引起的局部破坏, 坡面侵蚀后在降雨入渗作用下进一步产生了块状滑动破坏, 而随含石量增大至 50%, 堆积体强度增大, 黏结性提高, 边坡整体性增强, 从而易形成贯通滑裂面, 发生多级后退式滑坡; 但当含石量继续增大, 初始状态堆积体边坡黏聚力虽有所提高, 但在降雨入渗作用下细粒流失严重, 坡体倾向于高陡岩质边坡, 从而在持续强降雨下发生崩塌型破坏。

5 结 论

结合室内三轴试验和模型试验, 本文针对松散堆积体边坡在强降雨条件下的失稳破坏过程进行了研究, 探讨了不同含石量对于堆积体物理力学性质的影响, 以及不同含石量的堆积体边坡在强降雨作用下, 失稳破坏过程中坡体内部体积含水率、孔隙水压力、土压力和位移等物理量的响应变化规律, 分析了细粒在边坡内部的竖向迁徙规律以及含石量对堆积体边坡破坏模式的影响, 得出了以下结论:

(1) 堆积体应力-应变曲线以应变硬化特征为主, 但在内部块石初始结构排列较为优良时会出现应变软化现象, 如 S2 试样在 200 kPa 围压下的应力-应变曲线, 应变硬化现象则随含石量的增大更加明显。

(2) 在相同坡度和降雨条件下, 不同含石量的堆积体的破坏模式不同, 30% 含石量堆积体边坡会发展出局部冲蚀沟, 沿着该部位不断扩大边坡破坏程度, 最终形成块状滑动破坏; 50% 含石量堆积体边坡从坡脚开始破坏, 逐渐向坡顶蔓延发展, 破坏过程沉降速度较为稳定, 属多级后退式破坏; 70% 含石量堆积体边坡破坏模式为崩塌型滑坡, 沉降速

度全程稳定, 但其破坏过程较为迅速。

(3) 降雨滑坡试验过程中, 坡顶孔隙水压力响应速度最快, 其次为坡脚, 孔隙水压力初期迅速上升, 随后小幅上升。坡脚处土压力在降雨过程中变化最为剧烈, 这也与各试验中坡脚部位均呈现不同程度的变形破坏一致。坡顶部位受边坡不均匀沉降影响, 在降雨过程中会产生规模、形态不一的裂隙, 加剧了边坡的破坏。各含石量堆积体边坡在降雨过程中均有细粒迁徙流失现象, 含石量越大, 细粒流失愈发明显; 坡顶部位为细粒流失重灾区, 坡中细粒流失较严重, 坡体内部则较轻。

值得注意的是, 目前的工作仍然存在一定的不足, 重塑土样在一定程度上不能完全反映天然堆积体的力学行为与性状演化, 未能较好体现坡内优势渗流管网的分布。而天然堆积体边坡的破坏是一个复杂的物理过程, 是颗粒组成结构、降雨、地下水、降雨与地下水耦合等内外部众多因素作用的综合结果。后续工作中, 可通过进一步考虑相似比设计, 原位取样, 甚至包括离心机试验等, 尽可能还原与表征天然堆积体的相关特性, 丰富细致相关研究成果。

参 考 文 献

- [1] 陈剑, 杨志法, 李晓. 三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3052-3056.
CHEN Jian, YANG Zhi-fa, LI Xiao. Relationship between landslide probability and rainfall in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3052-3056.
- [2] 向子林. 基于无味变换的三峡库区滑坡可靠性分析及风险评价[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
XIANG Zi-lin. Reliability analysis and risk assessment of landslides in the Three Gorges reservoir area based on unscented transformation-Taking Muyubao landslide as an example[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021.
- [3] 中国地质调查局. 全国地质灾害通报(2019)[EB/OL]. (2020-03-31)[2022-10-10]. <http://219.142.70.148/auto/db/detail.aspx?db=1006&rid=4883>.
China geological survey. National geological disaster notification (2019)[EB/OL]. (2020-03-31)[2022-10-10]. <http://219.142.70.148/auto/db/detail.aspx?db=1006&rid=>

- 4883.
- [4] 夏金梧, 郭厚桢. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 16-18.
- XIA Jin-wu, GUO Hou-zhen. landslide distribution characteristics and controlling factors of the upper reaches of the Yangtze River[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1997, 24(1): 19-25.
- [5] HONG Y, ADLER R F, HUFFIMAN G. An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets[J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2007, 45(6): 1671-1680.
- [6] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- Climate Change Center of China Meteorological Administration. China climate change blue book (2021)[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [7] 林松, 王薇, 邓小虎, 等. 三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义: 以万州区四方碑滑坡为例[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 3135-3146.
- LIN Song, WANG Wei, DENG Xiao-hu, et al. Geophysical observation of typical landslides in three gorges reservoir area and its significance: a case study of Sifangbei landslide in Wanzhou district[J]. **Geosciences**, 2019, 44(9): 3135-3146.
- [8] 张毅, 乔良, 曾润强, 等. 基于原位双环渗水试验的堆积层滑坡入渗规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 666-670.
- ZHANG Yi, QIAO Liang, ZENG Run-qiang, et al. Rainfall infiltration on colluvial landslides based on in-situ double-ring infiltration test[J]. **Journal of Lanzhou University (National Science)**, 2014, 50(5): 666-670.
- [9] 赵永红, 王航, 邓凯, 等. 三峡树坪滑坡动力学的有限元模拟[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2217-2224.
- ZHAO Yong-hong, WANG Hang, DENG Kai, et al. The finite element simulation of dynamics of the Three Gorges Shuping landslide[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2016, 32(7): 2217-2224.
- [10] 张大权, 江兴元, 邹姐姐, 等. 降雨渗流对堆积型滑坡稳定性影响的数值模拟——以贵州大榕滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 338-344.
- ZHANG Da-quan, JIANG Xing-yuan, ZOU Niu-niu, et al. Numerical simulation of the influence of rainfall and seepage on the stability of accumulation type landslide: taking Darong landslide in Guizhou as an example[J]. **Science and Technology and Engineering**, 2019, 19(26): 338-344.
- [11] 陈宇龙, 黄栋. 降雨型堆积体滑坡大尺寸模型试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 576-580.
- CHEN Yu-long, HUANG Dong. Large-scale model test on rainfall induced colluvium slope failure[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2017, 38(4): 576-580.
- [12] 雷先顺, 朱大勇, 刘诚, 等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1281-1288.
- LEI Xian-shun, ZHU Da-yong, LIU Cheng, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1281-1288.
- [13] 陈玺文. 堆积碎石土滑坡降雨致滑模型试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- CHEN Xi-wen. The model test study on rainfall-induced eluvial gravel soil landslides[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [14] ORENSE R P, SHIMOMA S, MAEDA K, et al. Instrumented model slope failure due to water seepage[J]. **Journal of Natural Disaster Science**, 2004, 26(1): 15-26.
- [15] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1319-1327.
- ZUO Zi-bo, ZHANG Lu-lu, WANG Jian-hua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: effects of particle-size distribution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1319-1327.
- [16] 徐颖. 强降雨作用下类土质滑坡演化过程及破坏机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- XU Ying. Research on evolvement process and failure mechanism of pseudo-soil under heavy rainfall action[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [17] SIMONI A, HOULSBY G T. The direct shear strength

- and dilatancy of sand-gravel mixtures[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2006, 24(3): 523-549.
- [18] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48-57.
- WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48-57.
- [19] 杨继红, 董金玉, 黄志全, 等. 不同含石量条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 161-166.
- YANG Ji-hong, DONG Jin-yu, HUANG Zhi-quan, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(Suppl.2): 161-166.
- [20] CHEN N S, ZHOU W, YANG C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. **Geomorphology**, 2010, 121(3-4): 222-230.
- [21] 胡自然. 等效降雨入渗下碎石土滑坡体变特征颗粒流分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- HU Zi-ran. The granular flow analysis for volume change characteristics of gravel soil slope the under equivalent rainfall infiltration[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [22] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50-56.
- XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2009, 36(4): 50-56.
- [23] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123 — 2019 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [24] 龚健, 刘君. 基于 PIV 分析的含石量对土石混合体边坡破坏过程及模式的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 696-704.
- GONG Jian, LIU Jun. Influences of rock proportion on failure process and failure mode of soil-rock-mixture slope with PIV analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 696-704.
- [25] 孙韬, 潘春雷, 余旭, 等. 不同含石量下土石混合体的剪切特性研究[J]. 路基工程, 2020(3): 61-65.
- SUN Tao, PAN Chun-lei, YU Xu, et al. Study on shearing characteristics of soil-rock mixture in different percentage of rock[J]. **Subgrade Engineering**, 2020(3): 61-65.
- [26] MONKUL M M, OZDEN G. Compressional behavior of clayey sand and transition fines content[J]. **Engineering Geology**, 2007, 89(3-4): 195-205.
- [27] 乔娟, 张立仁, 阮祥明. 三峡库区滑坡土体降雨产流及入渗试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 183-188, 193.
- QIAO Juan, ZHANG Li-ren, RUAN Xiang-ming. Experimental study on rainfall runoff and infiltration of landslide soil in three gorges reservoir area[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2013, 11(5): 183-188, 193.
- [28] 王俊杰, 邓文杰. 相对密实度对松散堆积土体强度变形特性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1186-1189, 1241.
- WANG Jun-jie, DENG Wen-jie. Effects of relative denseness on shear strength and deformation behaviors of loose deposit[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)**, 2013, 32(6): 1186-1189, 1241.
- [29] 李强, 贾森, 李鑫, 等. 考虑非饱和浸润区的改进 Green-Ampt 模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3484-3492, 3502.
- LI Qiang, JIA Sen, LI Xin, et al. An improved Green-Ampt model considering unsaturated infiltration zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(12): 3484-3492, 3502.
- [30] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(12): 1431-1445.
- [31] HUANG Ching-chuan, JU Yih-jang, HWU Lih-kang, et al. Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures[J]. **Journal of Hydrology**, 2009, 370(1-4): 39-51.
- [32] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1-2):

- 92-103.
- [33] 孙玉科, 姚宝魁. 我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1):67-76.
- SUN Yu-ke, YAO Bao-kui. Principal geological models of deformation and failure of rock slopes in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1983, 2(1): 67-76.
- [34] ACHARYA G, COCHRANE T A. Rainfall induced shallow landslides on sandy soil and impacts on sediment discharge: a flume based investigation[C]//The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India: [s. n.], 2008.
- [35] 练浩. 基于三维点云数据的降雨诱发滑坡表面形态演化规律研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2021.
- LIAN Hao. A study on the evolution of landslide surface morphology induced by rainfall based on 3D point cloud data[D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2021.
- [36] 孙乾征, 江兴元, 周江, 等. 降雨条件下松散堆积体滑坡破坏试验研究[J]. 金属矿山, 2022(10): 185-190.
- SUN Qian-zheng, JIANG Xing-yuan, ZHOU Jiang, et al. Experimental study on landslide failure of loose accumulation under rainfall condition[J]. **Metal Mine**, 2022(10): 185-190.
- [37] 刘坤, 韩长玉, 郝艺丹, 等. 基于降雨入渗的非饱和土边坡稳定性影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 183-186.
- LIU Kun, HAN Chang-yu, HAO Yi-dan, et al. Analysis of influence factors of unsaturated soil slope stability based on rainfall infiltration[J]. **Water Resources and Power**, 2022, 40(10): 183-186.
- [38] 蔡欣育, 任旭华, 张继勋, 等. 不同降雨类型对边坡稳定性影响的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 34-39.
- CAI Xin-yu, REN Xu-hua, ZHANG Ji-xun, et al. Study on the influence of different rainfall types on slope stability[J]. **Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)**, 2020, 42(2): 34-39.
- [39] 王炎廷. 降雨诱发碎石土边坡变形破坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- WANG Yan-ting. Study on deformation and failure mechanism of debris landslide induced by rainfall[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.