

斜坡降雨侵蚀破坏机理现场试验研究

吕霞, 范刚, 刘大瑞, 林子钰

Analysis of slope erosion and failure mechanism under rainfall conditions based on field experiments: A case study of the residual slope of landslide and debris flow in Hexiluo gully, Ganluo County, Sichuan Province

LYU Xia, FAN Gang, LIU Darui, and LIN Ziyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析

Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall

胡爱国, 周伟 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 27-34

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92-97

低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理

Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain

冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 吴钟腾, 白慧林 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 35-44

“滞水构造”对降雨型滑坡的控制作用

Controlling influence of the “perched water structure” on rainfall-induced landslide: A case study of the Yaogou landslide in Zhushan County, Hubei Province

魏鹏飞, 李丽华, 杨潇, 汪子奇 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 98-106

融合多源信息的降雨入渗边坡概率反分析及可靠度预测

Probabilistic inverse-analysis and reliability prediction of rainfall-induced landslides for slope with multi-source information

揭鸿鹄, 蒋水华, 常志璐, 黄劲松, 黄发明 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 28-36

开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析

Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province

蒋涛, 崔圣华, 冉耀 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 20-30



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306004

吕霞, 范刚, 刘大瑞, 等. 斜坡降雨侵蚀破坏机理现场试验研究——以四川甘洛黑西洛沟滑坡-泥石流残留边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 82-89.

LYU Xia, FAN Gang, LIU Darui, et al. Analysis of slope erosion and failure mechanism under rainfall conditions based on field experiments: A case study of the residual slope of landslide and debris flow in Hexiluo gully, Ganluo County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 82-89.

斜坡降雨侵蚀破坏机理现场试验研究 ——以四川甘洛黑西洛沟滑坡-泥石流残留边坡为例

吕霞, 范刚, 刘大瑞, 林子钰
(四川大学水利水电学院, 四川成都 610065)

摘要: 滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决洪水链生灾害是我国山丘区最为频繁的地质灾害, 强降雨是其关键诱发因素。选取 2020 年四川省甘洛县黑西洛泥石流沟残留边坡开展现场人工降雨试验。通过分析强降雨作用下边坡孔隙水压力和土壤含水率的变化规律, 并结合 X 射线能谱分析(EDS)测试结果, 探究降雨对边坡稳定性的影响。试验结果表明: 孔隙水压力和土壤含水率在降雨过程中会明显上升, 随着降雨的持续进行, 边坡的侵蚀破坏范围逐渐扩大, 破坏过程中伴随着土壤含水率和孔隙水压力的增大, 并且相应位置的土壤含水率和孔隙水压力变化一致; EDS 测试结果表明边坡土体中含有伊利石和高岭石两类黏土矿物, 降雨会导致边坡表层土体膨胀软化, 土颗粒的黏聚力降低, 坡面产生拉裂缝, 边坡强度降低, 最终发生冲刷和侵蚀破坏。试验结果为揭示降雨作用下边坡侵蚀破坏的发生规律提供重要的理论指导。

关键词: 现场试验; 降雨入渗; 灾害链; 滑坡; 强降雨

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)06-0082-08

Analysis of slope erosion and failure mechanism under rainfall conditions based on field experiments: A case study of the residual slope of landslide and debris flow in Hexiluo gully, Ganluo County, Sichuan Province

LYU Xia, FAN Gang, LIU Darui, LIN Ziyu

(College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Landslide/debris flow, dammed barrier lake, and subsequent dam-break floods constitute the most frequent geological disasters in mountainous regions, with heavy rainfall serving as the critical inducing factor. In 2020, artificial rainfall field tests were carried out on the residual slope of a debris flow in Hexiluo gully, Ganluo County, Sichuan Province. The study investigated the impact of rainfall on slope stability through analysis of variations in soil moisture content, pore water pressure under heavy rainfall, and X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) test results. Results indicate that pore water pressure and soil moisture content increase significantly during rainfall. As rainfall persists, the extent of slope erosion and failure widens. Concurrently, soil moisture content and pore water pressure increase during slope failure, with consistent patterns observed in

收稿日期: 2023-06-01; 修订日期: 2024-04-08

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(西藏)项目(U20A20111)

第一作者: 吕霞(1999—), 女, 重庆人, 硕士生, 研究方向为滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决灾害链。E-mail: lvxia76@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 范刚(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为滑坡灾害防治机理。E-mail: fangang@scu.edu.cn

both parameters. The result of EDS tests reveal the presence of illite and kaolinite clay minerals in slope soil. Rainfall induces surface soil expansion and softening, reduces soil particle cohesion, causes tension cracks on the slope surface, weakens slope stability, and ultimately leads to erosion and failure. The research results contribute theoretically to understanding the patterns of slope erosion and failure induced by rainfall.

Keywords: field test; rainfall infiltration; chain disaster; landslide; heavy rainfall

0 引言

强降雨作用下,山地丘陵区极易发生山洪、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,并且可能阻断河流,形成堰塞湖,威胁堰塞体上下游人民生命财产安全^[1-3]。据统计,近年来我国地质灾害造成的年死亡人数达200~400人^[4]。山地丘陵地区由降雨引发的滑坡、泥石流灾害频发,造成严重的人员伤亡和经济财产损失^[5]。在自然降雨条件下,山区中堆积的松散土体会在强降雨作用下诱发滑坡和泥石流灾害。大体积滑坡和泥石流汇入江河后,极易堵塞河道形成堰塞坝,壅高上游水位,堰塞坝一旦溃决将在下游造成巨大的洪水灾害,形成滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链^[6-8]。

降雨是滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链的主要诱发因素,尤其是强度大、持续时间长的降雨往往是引发滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链的关键控制因素^[9-11]。通过降雨试验揭示降雨诱发滑坡/泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链的机理对防灾减灾工作具有重要意义。目前,众多学者采用物理模型试验揭示降雨诱发地质灾害的机理,王如宾等^[12]基于人工模拟降雨室内大型滑坡模型试验,揭示了降雨诱发滑坡变形破坏机理。胡华等^[13]设计了降雨滑坡模拟试验,研究了降雨强度和斜坡坡度对滑塌破坏的影响。部分学者通过现场试验来揭示降雨诱发地质灾害的机理,谭建民等^[14]开展了降雨边坡破坏现场试验,探究了降雨作用下花岗岩风化土坡的失稳机制。周中等^[15]综合通过人工降雨模拟试验和原位综合监测手段,探究了降雨条件下土石混合体滑坡的失稳机理。王刚等^[16]开展降雨型滑坡现场试验研究,探究了不同雨强条件下天然黄土边坡的入渗规律及变形破坏模式。詹良通等^[17]对非饱和膨胀土进行了降雨试验和原位监测,揭示了降雨入渗对边坡失稳的影响。综上可知,目前在利用模型试验和现场试验揭示降雨滑坡诱发机理方面已经开展了大量研究,取得了一些新的认识,但是,室内模型试验存在尺寸效应,难以还原灾害的真实情况,而现有现场试验多不是在灾害现场开展的原位试验。因此,在灾害现场开展原位试验对进一步探究降雨诱发滑坡、泥石流灾害机理至关重要。

本文选取2020年发生在四川省凉山州甘洛县黑西洛沟的山洪-滑坡-泥石流-堰塞湖灾害链残留边坡开展现场人工降雨试验,综合利用三维激光扫描仪、孔隙水压力计、土壤含水率传感器、EDS能谱分析等多种设备和方法,探究降雨诱发该处滑坡的机理,以期为当地的防灾减灾提供有益借鉴。

1 灾害概况

黑西洛沟位于四川省凉山州甘洛县,为尼日河右侧的一条小山沟,长度约5 km。经现场调查,沟道两侧松散物源分布广泛,植被不发育。在非汛期,沟内仅有较小溪流流出,在枯水季节沟内偶尔断流。2020年8月31日上午8时,在持续的降雨作用下,黑西洛沟内发生了山洪-滑坡-泥石流-堰塞湖灾害链。灾害发生时,黑西洛沟内原有松散物源被山洪裹挟带走,并在运移过程中不断铲刮沟道底部物源,导致沟边两侧边坡失稳,逐渐演变为滑坡灾害。沟内通道不断下切过程中,两侧岸坡持续垮塌,崩塌体进入沟道后,滑坡规模急速扩大,最终演变为泥石流灾害。大量泥石流物源几乎呈垂直状态冲入尼日河,形成堰塞坝,堵塞尼日河,如图1(a)所示。经现场测量,形成的堰塞坝沿河道纵向方向长度约200 m,顺河向长度约为400 m,高度约30 m,堰塞坝体积约 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞坝自然溃决后冲毁下游场镇、村庄、学校和道路,造成阿兹觉乡一千余名群众受灾,3人失踪,黑西洛沟口的成昆铁路桥梁被冲毁,成昆铁路断道数月,堰塞坝下游的国道G245约1.2 km道路和多处桥梁被掩埋、冲毁,多栋房屋损毁,经济损失严重。堰塞坝材料在下游1 km范围内淤积,导致下游阿兹觉村挖哈组、乃牛组两个组被完全掩埋。

通过现场调查和资料收集,本次滑坡-泥石流-堰塞湖灾害链是一次典型的“小水大灾”灾害,本文聚焦该灾害链中的滑坡灾害,通过现场降雨试验和室内EDS能谱分析,以期揭示降雨作用下边坡侵蚀破坏的发生机理。

2 现场试验

2.1 试验边坡概况

本次现场模型试验在2020年黑西洛沟灾害后的残



(a) 处置后的堰塞坝全貌



(b) 黑西洛沟上游影像

图 1 黑西洛沟堰塞坝全貌和沟内上游影像

Fig. 1 Overview of the barrier dam and upper reaches image inside Hexilou gully

余边坡上进行, 试验边坡高度约为 2.2 m, 宽约 2.0 m, 坡长约 3.0 m, 天然坡度约为 49°, 如图 1(b) 所示。降雨试验前对坡面进行简单平整, 清除坡面杂草、大块石等影响坡面径流和入渗的障碍物。现场筛分试验测得黑西洛沟内松散堆积体的颗粒级配曲线如图 2 所示^[18]。

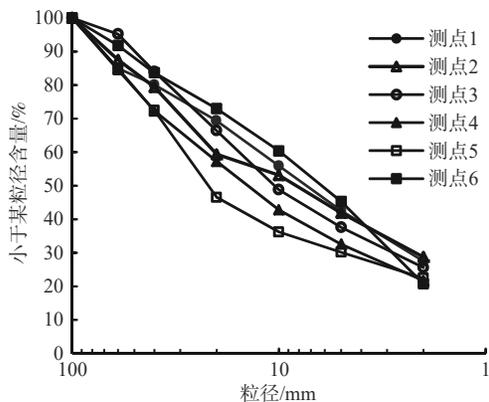


图 2 黑西洛沟土体颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of soil in Hexilou gully

2.2 降雨及监测设备

降雨装置主要包括支架、雨水输送管道、喷头和雨

量计。喷头设置在边坡顶部并延伸至坡面, 喷头顶面可通过调节流量的方式模拟不同的雨强。

试验中设计了两排喷头, 试验中经过多次调试, 最终确定喷头间距约为 0.7 m, 每排喷头间距约为 0.5 m, 经现场观察, 这一间距能够确保坡面降雨的均匀性。雨量计放置在边坡试验区, 位于试验降雨区内, 以实时测量坡面的降雨量, 测得值能代表试验区的平均雨量, 降雨试验装置如图 3 所示。



图 3 现场降雨试验装置

Fig. 3 Field rainfall testing device

试验中数据采集设备包括孔隙水压力传感器、土壤含水率传感器、雨量计以及三维激光扫描仪, 其中孔隙水压力传感器 3 个, 土壤含水率传感器 3 个。孔隙水压力传感器量程是 10 kPa, 准确度误差 $\leq 0.5 F \cdot S$, 土壤含水率传感器测量范围 0 ~ 100%。黑西洛沟滑坡灾害的主要原因就是堆积体浅层物源浸水后被冲出, 故为了与灾害实际情况相似, 本次试验所用传感器埋入边坡表层, 深度为 0.3 m。孔隙水压力计和土壤含水率传感器放入预挖的孔洞后, 利用坡体原样土回填后进行人工夯实, 保证夯实后孔内的土体与天然状态一致。边坡尺寸和传感器埋设的位置如图 4 所示。三维激光扫描仪立于边坡的正面, 通过不同阶段的扫描, 以获取降雨过程中边坡的三维地形点云数据, 由此识别边坡的变形破坏过程。

2.3 降雨试验方案

根据甘洛县水利局的实测数据, 本次灾害发生前后黑西洛沟临近监测站点的降雨数据如图 5 所示。临近监测站点位于苏雄镇, 距离灾害点约 500 m, 本站点降雨数据可以代表真实的降雨量。灾害发生时当地已连续降雨约 15 h, 持续降雨导致沟内的松散物源浸水饱和, 并最终被沟内山洪裹挟冲出, 诱发链生的滑坡、泥

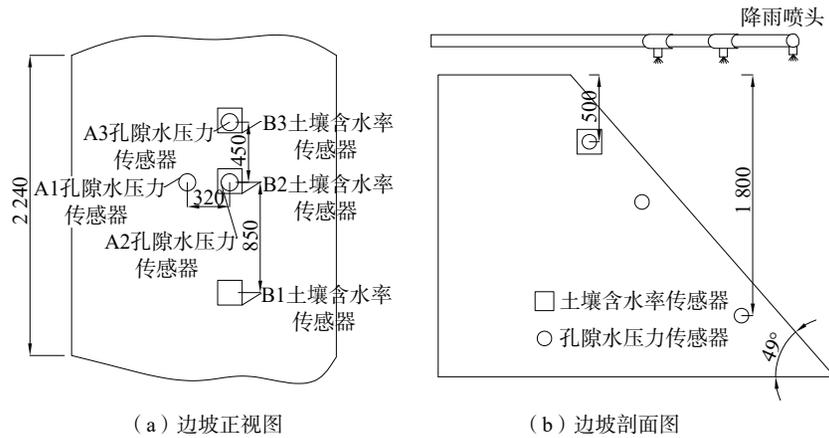


图 4 传感器布置示意图(单位: mm)

Fig. 4 Sensor layout diagram (unit: mm)

石流和堰塞湖灾害, 降雨是此次灾害链发生的主要诱因。为了更好地分析灾害链发生机理, 试验降雨量尽量保证与灾害实际情况相符。受现场试验条件限制, 经雨

量计实测, 此次现场试验共计降雨量为 28 mm, 降雨历时 150 min, 小时降雨量为 11.2mm, 试验小时降雨量与灾害发生时的降雨量接近, 如图 5 所示。

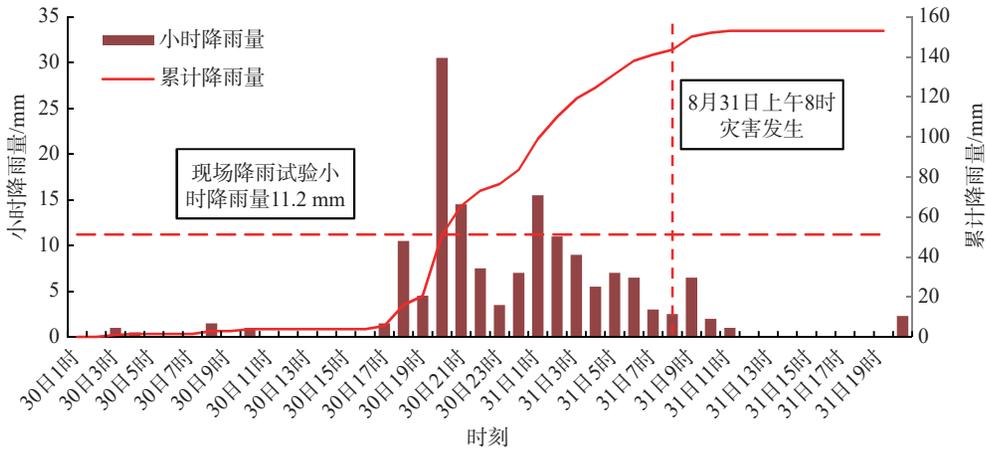


图 5 黑西洛沟临近站点实测降雨量过程

Fig. 5 Process of measured rainfall data at the adjacent site in Hexiluo gully

3 试验结果分析

本研究通过对试验数据的分析, 揭示降雨条件下黑西洛沟内残余边坡内部的孔隙水压力和土壤含水率变化规律, 同时通过三维激光扫描仪精准识别边坡表面的变形破坏过程。

3.1 孔隙水压力监测结果分析

根据现场监测结果, 得出降雨过程中边坡内孔隙水压力随降雨历时的变化规律, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 边坡体内孔隙水压力的变化过程大致可分为三个阶段: 加速上升、下降和趋于稳定。降雨初期, 雨水未入渗至坡体内部, 孔隙水压力传感器监测数据未发生明显变化。随着降雨的持续进行, 雨水在入渗过程中逐渐汇聚在坡面, 形成坡面径流和坡内渗流, 导

致孔隙水压力开始变化, 其中 A1 和 A3 孔隙水压力传感器在 40 min 至 50 min 陡然增加, 边坡表面出现冲刷痕迹。继续降雨, 边坡表面产生拉裂缝, 雨水通过裂缝不断渗入坡体内部, 孔隙水压力持续上升, 致使边

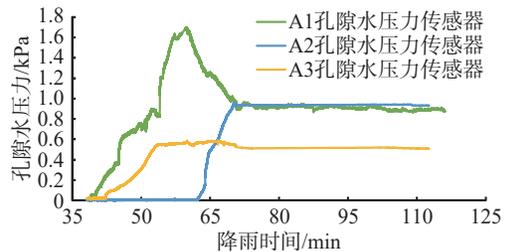


图 6 孔隙水压力随降雨历时的变化规律

Fig. 6 Variation of pore water pressure with rainfall duration in Hexiluo gully

坡的抗剪强度由于有效应力的减少而降低。降雨后期,边坡表面出现局部塌陷,坡体内部渗透路径发生变化,导致孔隙水压力开始下降。

降雨 35 ~ 50 min 时间段内, A1 和 A3 传感器的孔隙水压力开始增加,坡面有明显的降雨冲蚀痕迹。继续降雨, A1 和 A3 传感器的数据持续上升。降雨 65 min 后, A2 孔隙水压力传感器才开始快速增加,并且此位置的含水率传感器也有明显响应,含水率曲线开始发生变化,土体的含水率开始逐渐上升,含水率和孔隙水压力变化一致。此时坡面的雨水冲蚀痕迹加深,侵蚀破坏范围扩大,土体颗粒被水流带走堆积在坡脚,整个坡面有明显的冲刷破坏。继续进行降雨,边坡土体开裂,雨水沿着拉裂缝进入坡体内部,孔隙水软化了边坡土体,土体有效应力减少,边坡稳定性下降,坡面产生了明显的局部塌陷,内部渗流场发生变化,孔隙水压力开始下降,直至不再改变。

不同位置的孔隙水压力传感器变化有明显差异,原因是, A3 传感器位于坡顶, A1 传感器位于边坡中部,降雨过程中, A1 传感器由于受到降雨入渗和上部土体水分沿拉裂缝入渗的补给,上升速度更快,孔隙水压力相较更大。A2 孔隙水压力传感器数据明显滞后,因为该传感器周围有无法清理的大块石,降雨过程中,雨水流经坡面,块石改变了雨水的渗流路径,导致其渗透速度变慢。

3.2 土壤含水率监测结果分析

持续降雨条件下边坡不同位置的土壤含水率变化规律如图 7 所示。

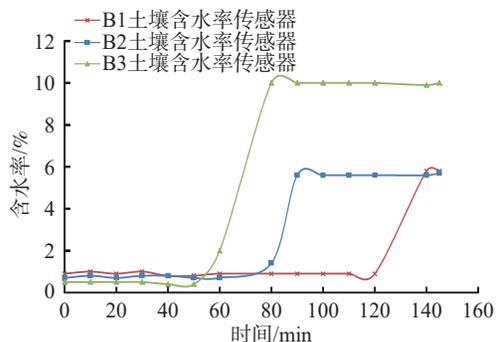


图 7 土壤含水率随降雨历时的变化规律

Fig. 7 Variation of soil water content with rainfall duration in Hexiluo gully

由图 7 可知,降雨过程中,含水率持续增大,并最终趋于稳定。土体含水率随降雨历时共经历 3 个变化阶段:基本不变、加速增大和保持稳定。在降雨初期,边坡雨水入渗量较少,各个监测点的土壤含水率均无明显

变化,坡体处在基本稳定状态。随着降雨历时的增加,雨水逐渐从坡面向

坡体内部渗透,土壤含水率开始增加,降雨入渗使得土体由非饱和状态向饱和状态过渡,坡面土体遇水软化,强度降低,表面出现多处裂缝,在土体内部形成渗流通道, B2 和 B3 位置的土壤含水率处于快速增长阶段,降雨后期, B1 传感器才有明显的变化,最后土壤含水率都保持平稳状态。出现这种现象的原因是,雨水流经坡体表面,表层土体被冲刷而流失,水分子与土粒在表面形成阻碍入渗的结合水膜,土体内部气体无法排出,使得雨水难以下渗,边坡内的水分保持平衡,土壤含水率达到稳定,但此时边坡土体并未达到饱和状态。

土壤含水率明显变化的这段时间内,含水率传感器埋设位置的孔隙水压力也在迅速上升。降雨 50 min 左右,雨水流过坡面形成冲沟,坡面产生侵蚀破坏,如图 8(a)所示。B3 土壤含水率传感器开始快速增加,此时该位置的孔隙水压力也处在快速上升阶段,土体抗侵蚀性下降,坡体表面出现雨水冲蚀痕迹,发生降雨侵蚀破坏;降雨 90 min 左右, B3 含水率传感器达到最大值并保持不变,此时土体孔隙水压力也达到稳定值,不再改变,边坡上部土体侵蚀破坏范围扩大,土体稳定性降低。降雨后期, B1 传感器才开始加速上升。整个坡面的侵蚀进一步扩大,表面出现局部塌陷,如图 8(b)所示。整个降雨过程中,雨水聚集在边坡表面,流经边坡使其受到侵蚀破坏,同时在降雨过程中,坡面产生裂缝,形成渗流优势通道,更有利于雨水的入渗,使得土体含水率不断增大。

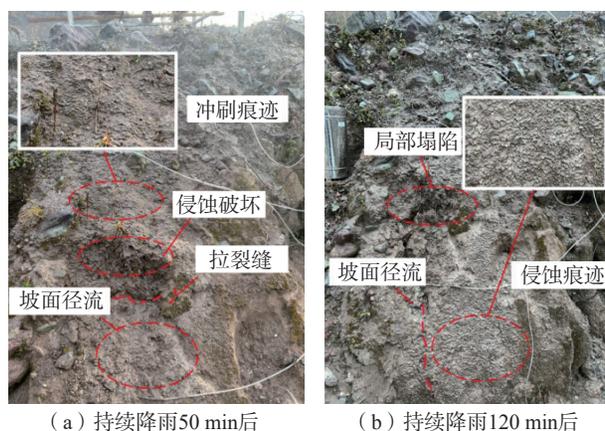


图 8 降雨过程中边坡变形破坏特征

Fig. 8 Slope deformation and failure characteristics during rainfall

3.3 边坡破坏过程分析

降雨试验过程中的边坡坡面形态变化过程如图 9

所示。试验过程中,分别在持续降雨 45, 90, 135 min 三个时间点对坡面的三维形体进行扫描,获取坡面点云数

据,经多期作差后,可以识别出边坡不同阶段的坡面三维形态变化,降雨过程中坡面形态变化云图如图 10 所示。

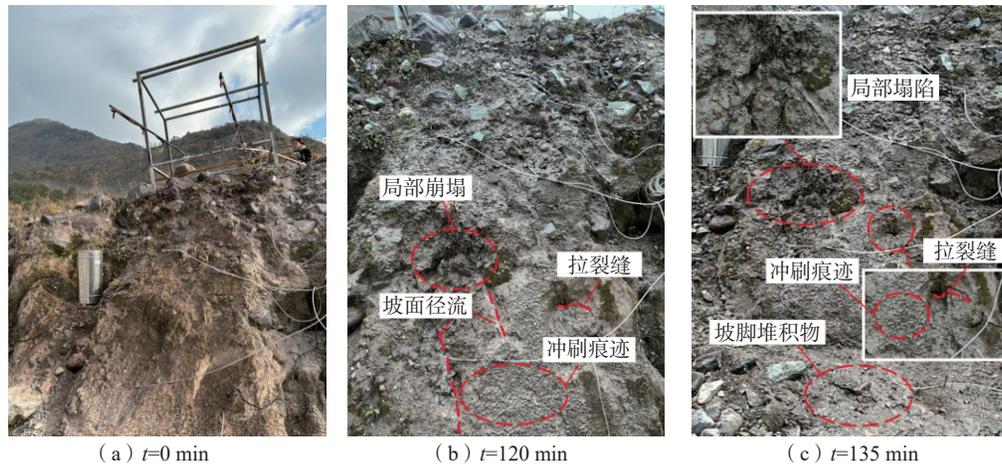


图 9 降雨过程中坡面形态图

Fig. 9 Morphology map of the Slope surface during rainfall

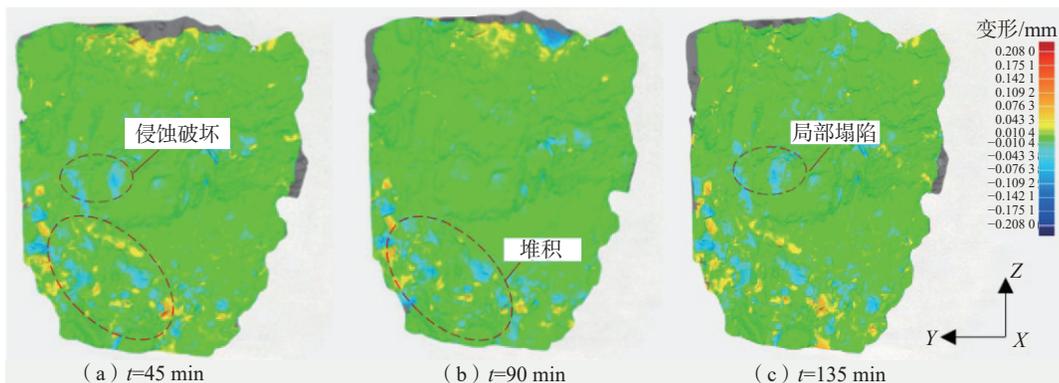


图 10 边坡坡面变形云图(负值表示冲刷,正值表示淤积)

Fig. 10 Nephogram of side slope deformation (negative values indicate erosion, positive values indicate deposition)

由图 10 可知,持续降雨过程中,边坡的破坏过程具体表现为:持续降雨 45 min 后,坡面出现了侵蚀破坏,雨水在坡面聚集,形成表面径流,带走坡体表面的松散颗粒。从边坡坡面变形云图可以看到,边坡表面有明显的冲刷区域,被冲刷掉的土体堆积在了坡脚。随着时间与累计降雨量的增大,试验边坡坡面破坏开始逐渐明显,坡面的冲刷痕迹不断加深,冲刷范围不断扩大,边坡上部土体流失,在边坡中部位置发生局部垮塌现象,如图 9 所示。这段时间,土体内部孔隙水压力也在迅速增大,变形破坏与孔隙水压力之间响应关系明显。降雨 120 min 后,如图 9(b)所示,边坡前缘的冲沟逐渐加深,表面出现多处拉裂缝,雨水沿着裂缝进入土体内部,边坡变形破坏范围不断扩大,此时土壤含水率陡然增加,边坡产生局部垮塌,土体内部渗透路径发生改变,

孔隙水压力开始下降。持续降雨 135 min 后,由图 10 可知,边坡表面有更多的土体流失且在坡脚堆积。从坡面形态图中可以看出,位移变化的对应位置有裂缝产生和局部小范围的塌陷,雨水的冲蚀痕迹明显,坡脚堆积土体明显增多。

基于多次三维激光扫描获取的点云数据,通过计算得到本次整个降雨试验过程中边坡坡面的冲刷物源体积约为 10.0 dm^3 。

3.4 EDS 测试结果分析

为进一步揭示该残余边坡的变形破坏原因,对试验土样开展了 X 射线能谱分析(EDS)测试。能谱仪配合扫描电子显微镜与透射电子显微镜的

使用,可以获取土样成分的元素种类及含量,其测试结果如表 1 所示。

表 1 边坡物质成分组成表
Table 1 Composition of slope material components

| 元素 | 质量百分比/% | 原子百分比/% | 标准样品标签 |
|----|---------|---------|--------------------------------|
| C | 8.08 | 12.91 | C |
| O | 49.38 | 59.23 | SiO ₂ |
| Na | 1.84 | 1.54 | Albite(钠长石) |
| Mg | 0.39 | 0.31 | MgO |
| Al | 6.96 | 4.95 | Al ₂ O ₃ |
| Si | 26.51 | 18.11 | SiO ₂ |
| K | 3.72 | 1.82 | KBr |
| Ca | 0.28 | 0.14 | Wollastonite(硅石灰) |
| Ti | 0.36 | 0.14 | Ti |
| Fe | 2.49 | 0.86 | Fe |
| 总量 | 100 | 100 | |

由表 1 可知, 边坡的物质成分较为复杂, 主要化学成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃, 含少量 Mg、Fe、Na 元素。物质组成表明边坡土体中含有伊利石和高岭石等黏土矿物, 而伊利石和高岭石是影响膨胀土性质的主要矿物。膨胀土吸水膨胀, 遇水崩解或软化, 抗冲刷性能差。因此, 含有伊利石和高岭石等黏性矿物的边坡表面极易吸水膨胀, 抗冲刷能力降低, 导致边坡表层土体强度急剧衰减, 在降雨作用下极易冲刷破坏。

由图 9 可知, 降雨 120 min 后, 边坡表面出现了侵蚀破坏和局部塌陷, 土体被雨水带走堆积在坡脚, 整体稳定性受到影响, 原因在于: 非饱和膨胀土在长时间的持续降雨作用下, 雨水入渗会使得浅表层土体孔隙水压力上升和吸力降低。孔隙水压力的升高会导致坡体滑动力增加, 且土体的有效应力下降, 边坡强度降低, 边坡坡面发生侵蚀冲刷。同时吸力下降将使得土层发生膨胀, 含有高岭石、伊利石等黏性矿物的边坡土体会因为吸水膨胀而软化, 导致土体的抗冲刷性能下降, 土颗粒之间的黏聚力随时间而降低, 在重力和雨水裹挟作用下, 导致边坡出现了多处拉裂缝, 拉裂缝的产生使得雨水进一步入渗, 雨水充满裂缝产生水压力导致边坡强度降低, 加剧边坡的破坏, 最终边坡坡面产生冲刷破坏和局部塌陷。

4 结论

(1) 降雨作用下, 边坡土壤含水率发生明显增加; 同时孔隙水压力在降雨期间也会增大, 后期土体发生变形破坏, 孔隙水压力开始下降。

(2) 三维激光扫描结果表明: 边坡表面有明显的冲刷区域且范围不断扩大, 持续降雨导致边坡的抗侵蚀能力变弱, 土体被雨水冲刷而流失, 流失的土颗粒堆积在坡脚。整个降雨试验过程中, 边坡坡面的冲刷物源体积

约为 10.0 dm³。

(3) EDS 测试结果表明边坡土体含有伊利石和高岭石等黏性矿物, 遇水后极易发生膨胀而软化, 导致土体黏聚力降低, 边坡抗侵蚀能力变弱, 边坡产生拉裂缝, 雨水充满裂缝产生水压力加剧边坡破坏, 恶化了边坡稳定性, 最终发生冲刷破坏和局部塌陷。

(4) 试验对揭示降雨作用下边坡侵蚀破坏机理具有重要意义。降雨入渗使得边坡土体内的含水率和孔隙水压力发生波动陡增, 导致土体基质吸力减小, 土体软化, 从而导致边坡土体强度降低是边坡发生侵蚀破坏的主要原因。

参考文献 (References):

- [1] 南赞, 翟淑花, 李岩, 等. 北京地区“23·7”特大暴雨型地质灾害特征及预警成效分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 66–73. [NAN Yun, ZHAI Shuhua, LI Yan, et al. Analysis on the characteristics of geological disasters and effectiveness of early warning during heavy rainfall on “23·7” in Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 66–73. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 袁东, 张广泽, 王栋, 等. 西部山区交通廊道泥石流发育特征及选线对策 [J]. 地质通报, 2023, 42(5): 743–752. [YUAN Dong, ZHANG Guangze, WANG Dong, et al. Analysis on development characteristics of debris flow and route selection countermeasures along the traffic lines in mountain areas of Western China [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(5): 743–752. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 涂正楠, 冯君, 邓应进, 等. 四川甘洛县比依市村滑坡运动特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 92–99. [TU Zhengnan, FENG Jun, DENG Yingjin, et al. Analysis of the landslide movement characteristics in Biyi Village, Ganluo County, Sichuan Province, through SPH numerical simulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 92–99. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘伟. 我国地质灾害调查统计与分析 [J]. 采矿技术, 2021, 21(5): 100–103. [LIU Wei. Statistics and analysis of geological disasters of our country [J]. Mining Technology, 2021, 21(5): 100–103. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 蒋涛, 崔圣华, 冉耀. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 20–30. [JIANG Tao, CUI Shenghua, RAN Yao. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin Square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023,

- 34(3): 20–30. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9–16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9–16. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 阮合春, 陈华勇, 陈剑刚, 等. 滑坡—堵江—溃决灾害链研究进展 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(6): 56–64. [RUAN Hechun, CHEN Huayong, CHEN Jiangan, et al. Review of investigation on hazard chain triggered by landslide, blocking river and dam outburst flood [J]. *Yellow River*, 2022, 44(6): 56–64. (in Chinese with English abstract)]
- [8] NING Lan, HU Kaiheng, WANG Zhang, et al. Multi-hazard chain reaction initiated by the 2020 meilong debris flow in the Dadu River, southwest China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 827438.
- [9] WANG Huanling, JIANG Zihua, XU Weiya, et al. Physical model test on deformation and failure mechanism of deposit landslide under gradient rainfall [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(1): 66.
- [10] 张佳佳, 杨东旭, 高波, 等. 怒江干流云南段泥石流时空分异特征、驱动因素及演化趋势分析 [J/OL]. *中国地质*, 2024(2024-05-20) [2024-06-02]. [ZHANG Jiajia, YANG Dongxu, GAO Bo, et al. Characteristics, driving factors of spatial and temporal variations and tendency of debris flows in the Yunnan section of the Nu River mainstream [J/OL]. *Geology in China*, 2024(2024-05-20) [2024-06-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20240517.2011.002.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 冯振, 陈亮, 王立朝, 等. 区域地质灾害易发性评价的证据权法原理与实践 [J]. *地质通报*, 2024, 43(7): 1255–1265. [FENG Zhen, CHEN Liang, WANG Lichao, et al. Principle and application of the weight-of-evidence method in regional landslide susceptibility assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(7): 1255–1265. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王如宾, 夏瑞, 徐卫亚, 等. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 47–54. [WANG Rubin, XIA Rui, XU Weiya, et al. Study on physical simulation of rainfall infiltration process of landslide accumulation body [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 47–54. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 胡华, 吴轩, 张越. 基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 92–97. [HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 92–97. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 谭建民, 伍寒浪, 王世梅, 等. 强降雨作用下花岗岩全风化土坡致灾现场模型试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(28): 12307–12314. [TAN Jianmin, WU Hanlang, WANG Shimei, et al. Field model test of disaster caused by granite completely weathered soil slope under heavy rainfall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28): 12307–12314. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1391–1396. [ZHOU Zhong, FU Helin, LIU Baochen, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1391–1396. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙萍, 王刚, 李荣建, 等. 降雨条件下黄土边坡现场试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(2): 466–476. [SUN Ping, WANG Gang, LI Rongjian, et al. Study on field test of loess slope under the artificial rainfall condition [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(2): 466–476. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测 [J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 151–158. [ZHAN Liangtong, WU Hongwei, BAO Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 151–158. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 范刚, 聂锐华, 陈毅, 等. 2020年甘洛县黑西洛沟山洪-滑坡-堰塞湖灾害链成灾机理分析 [C] //中国水利学会. 中国水利学会2021学术年会论文集第二分册. 河南: 黄河水利出版社, 2021: 296–301. [FAN Gang, NIE Ruihua, CHEN Qin, et al. Mechanism analysis of flash flood-landslide-barrier lake disaster chain in Hexiluogou, Ganluo County in 2020 [C] //Chinese Hydraulic Engineering Society. The second volume of the Proceedings of the 2021 Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society. Henan: The Yellow River Water Conservancy Press, 2021: 296–301. (in Chinese with English abstract)]