

基于模拟试验的停淤渗水工程在排导困难型 泥石流灾害防治中的应用*

陆泽龙, 张紫昭[†], 张艳阳, 史光明, 黄军朋, 于喜坤

(新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐 830017)

摘要: 我国新疆北部区域存在众多排导困难型泥石流灾害, 其出山口冲积扇上修建了省道、加油站等工民建设施, 阻挡了泥石流进入主河的正常排泄, 下游无法设置排导措施, 故研究不具备排导条件或排导困难区域的泥石流治理方法及工程效应具有重要意义。本文以我国新疆阿勒泰地区布尔津县科克逊沟为对象(其在下游设置了拦水渗流排导区域), 通过两组不同降雨强度的物理模型试验, 基于过程影像和监测数据, 研究排导困难区域泥石流渗流排导过程中坝前土压力、孔隙水压力和含水率变化特征, 归纳泥石流的渗流排导模式, 揭示渗流排导机理。结果表明: 排导过程可概括为5个阶段。在50年一遇降雨强度汇流条件下, 为沟道面蚀和下蚀阶段、沟岸侧蚀阶段、渗流排导阶段、渗流减速阶段、渗流结束阶段; 在100年一遇降雨强度汇流条件下, 则为渗流排导阶段、渗流减速阶段、水流漫坝阶段、坝后堆积体起动阶段、渗流结束阶段。沟道上游土压力曲线先升后降, 下游因堆积导致土压力增大。孔隙水压力曲线与含水率曲线具有相关性, 抬升特征明显滞后于土压力曲线; 水砂分离后渗水区排水留砂, 一定程度上影响了渗流速度, 但渗流排导过程整体通畅, 渗水防治工程具有较高的可行性。

关键词: 泥石流; 物理模拟; 排导困难; 灾害防治

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.06.28.0001

中图分类号: P66 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)01-0116-013

引文格式: 陆泽龙, 张紫昭, 张艳阳, 史光明, 黄军朋, 于喜坤. 基于模拟试验的停淤渗水工程在排导困难型泥石流灾害防治中的应用[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2026, 43(1): 116-128.

英文引文格式: Lu Zelong, Zhang Zizhao, Zhang Yanyang, Shi Guangming, Huang Junpeng, Yu Xikun. Application of seepage engineering based on simulation tests in the prevention and control of debris flow disasters with difficult drainage[J].

Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(1): 116-128.

Application of Seepage Engineering Based on Simulation Tests in the Prevention and Control of Debris Flow Disasters with Difficult Drainage

Lu Zelong, Zhang Zizhao, Zhang Yanyang, Shi Guangming, Huang Junpeng, Yu Xikun

(School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: Numerous debris flow disasters with difficult drainage exist in northern Xinjiang of China. Civil engineering facilities such as provincial highways and gas stations built on alluvial fans at the mountain outlets block the normal discharge of debris flows into the main river, making it impossible to implement drainage measures downstream. Therefore, studying mitigation methods and engineering effects for debris flows in areas with inadequate or difficult drainage conditions is of great significance. This study focuses on the Coxon ditch in Burqin County, Altay Prefecture, Xinjiang, China. At present, a water-intercepting seepage drainage zone has been established downstream of the Coxon ditch. Through two sets of physical model tests under different rainfall intensities, and based on process imaging and monitoring data, we investigate the variation characteristics of soil pressure, pore water pressure, and moisture content during the seepage drainage process of debris flows in drainage-challenged areas. The seepage

* 收稿日期: 2024-06-28; 修回日期: 2025-12-31; 录用日期: 2026-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金“伊犁谷地冰雪融水叠加降雨入渗黄土滑坡形成机理与预警判据”(42367021); 新疆维吾尔自治区天山英才培养计划“天山北坡矿山开采地质灾害-水文地质-生态环境耦合互馈机制及其工程地质意义”(2023TSYCCX0010).

作者简介: 陆泽龙(2000—), 男, 硕士生, 从事地质灾害与矿山地质环境的研究, E-mail: 2318081247@qq.com.

† 通信作者: 张紫昭(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害与矿山地质环境的研究, E-mail: zhangzizhao@xju.edu.cn.

drainage patterns are summarized, and the underlying mechanisms are revealed. The results show that the drainage process can be divided into five stages: under the condition of 50-year rainfall intensity confluence, which is, channel surface erosion stage, ditch bank erosion stage, seepage discharge stage, seepage deceleration stage, and seepage end stage; under the condition of 100-year rainfall intensity confluence, which is, seepage drainage stage, seepage deceleration stage, water overflow stage, accumulation starting behind the dam stage, and seepage end stage. The soil pressure curve in the upstream channel first rises and then declines, while downstream, soil pressure increases due to sediment deposition. The pore water pressure curve correlates with the moisture content curve, but its rising phase lags significantly behind the soil pressure curve. After water-sediment separation, the seepage zone retains sediment while draining water, which slightly reduces the seepage rate. However, the overall seepage drainage process remains efficient, demonstrating the high feasibility of seepage-based mitigation engineering.

Key words: debris flow; physical simulation; difficult drainage; disaster prevention

0 引言

泥石流具有高流动性和长运距特性,是山区常见的自然灾害,同时也是山区环境中最为普遍的高危险性水文过程及块体运移过程^[1]。由于泥石流暴发时的突发性和超强的破坏力,已被联合国列入“国际减灾十年”项目,我国也是泥石流灾害频发率最高的国家之一^[2-3]。泥石流灾害威胁受灾地区的基础设施、公共设施、道路、房屋、桥梁、定居群众等,灾害发生后造成的人员安全及经济损失较大^[4-7]。以我国新疆阿勒泰地区布尔津县科克逊沟为例,2003年6月30日布尔津县科克逊沟暴发50年一遇的泥石流灾害,贯穿科克逊沟堆积区的217国道、省道319线被淤埋,受灾区域内房屋、加油站、农田和额尔齐斯河大桥亦被冲毁,造成直接经济损失达119万元,所幸未造成人员伤亡^[8]。

泥石流多形成于山区,因其具有源头汇水区较偏远、突发性强、成灾速度快等特点,一般难以观测到启动→发展→堆积的全过程^[9]。物理模拟试验是研究泥石流起动机理及堆积后效的重要手段之一,目前国内外的泥石流物理模拟试验方案一般是在野外调查明确泥石流孕灾环境后,选择合适的缩尺模型,于室内进行水槽试验,叠加降雨等影响因子,还原泥石流形成、流通、堆积特征^[10-14]。现有泥石流物理模拟试验主要针对泥石流的起动机理及堆积体二次复活机制^[15-18],对于泥石流排导效应的模拟研究较少,排导困难区域泥石流治理方案的研究也较少。

国内外学者对于渗流和排导的研究多是分开进行,大量试验结合实地调查佐证:随着松散堆积物被水流裹挟移动,孔隙水压力逐渐增加,从而导致液化^[19-20]。基于室内试验及野外调查,有学者详细分析土壤中的饱和渗流情况,据此阐明浮力和渗流力的关系,得出土壤表面水压力可以改变渗流力的结论^[21]。同样通过试验和野外观测,研究人员发现物源斜坡体不会随着孔隙水压力的增加而滑动,但孔隙水压力却在触发斜坡灾害及提升泥石流流动性上起关键作用^[22]。近年来,针对泥石流灾害防治工程的研究愈发完善,如拦砂坝、刚性墙、柔性屏障、滤坝和排导槽等^[23-33]。泥石流的防治思路多以拦挡物源、排导水流为主,进行水砂分流,从而达到治理泥石流灾害的目的^[34-35]。

布尔津县科克逊沟属于排导困难区域,出山口距主河约1.5 km,其间修筑了省道、加油站、垃圾场等工民建设施并存在大面积农田,泥石流下游排导受限。当地结合渗流、排导因地制宜,在科克逊沟下游设置了渗流排导区,沟内以拦水堤坝拦截储水后,在坝前剥离表层渗透性较差的粉砂土以出露下层渗透性较好的圆砾层。通过下渗的方式排导储蓄的下泄水流至地下水层,间接排导至主河中。

综上所述,泥石流排导困难区域,特别是布尔津县科克逊沟这种典型区域,现有渗流用于泥石流排导的研究较少。本文针对我国新疆北疆地区排导困难区域泥石流防治工作,以阿勒泰地区布尔津县科克逊沟为原型,根据现场孕灾环境条件,通过物理模拟试验装置,基于高速摄影机影像及传感器监测数据,研究排导困难区域泥石流渗流排导过程中坝前土压力、孔隙水压力和含水率变化特征,总结分析泥石流渗流排导模式及效果,为我国新疆北疆地区排导困难区域的泥石流防治工作提供一定借鉴。

1 研究区概况

1.1 泥石流形成条件

根据科克逊沟泥石流灾害专项勘察报告等资料的实测数据,其沟口地理坐标为86°51'01.98" E、

47°41'18.40" N, 位于布尔津县城南约5 km处, 自南向北为低山区过渡至山前冲洪积平原. 科克逊沟谷流域面积36.44 km², 主沟总长23.9 km, 最高点位于南部科克逊沟源头, 海拔1451 m, 最低点位于北部额尔齐斯河边缘, 海拔483 m, 相对高差968 m. 研究区为科克逊沟出山口至山前冲洪积平原, 如图1(a)所示, 研究区面积19.95 km², 由于集水区面积较大, 实地踏勘存在一定难度, 故仅对集水出口至下游冲洪积平原进行实际踏勘调查. 自集水出口以上为研究区泥石流上游集水区, 沟床平均比降约58.9‰, 集水面积28.01 km², 两侧山坡坡度15°~30°, 集水区基岩裸露, 坡面发育稀疏的低矮草本植被, 较利于水及碎屑固体物质聚集; 中游流通区及下游堆积区沟床变缓, 平均比降约37.2‰, 雨季汇水冲出后具有较强的水动力条件, 促使沟内水流挟带泥沙下泄形成泥石流灾害; 沟道部分区段发育坡积物, 受水流冲刷形成陡坎, 坡积物受侧蚀作用形成物源. 研究区地形条件为地表汇流和泥石流形成提供了适宜环境.

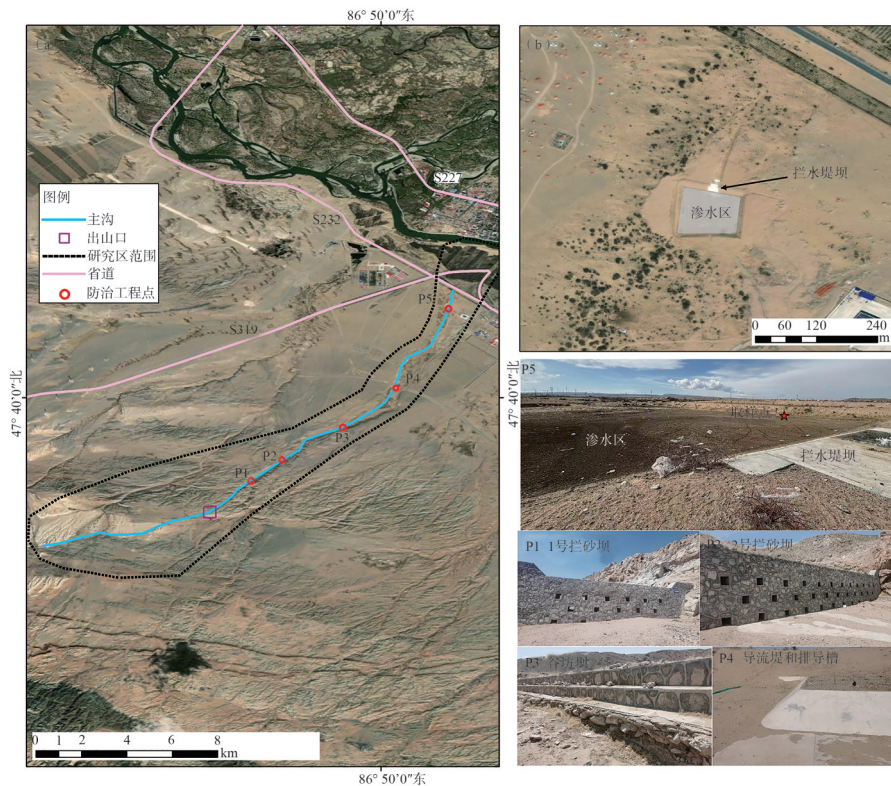


图1 科克逊沟流域(a)概况、(b)下游拦水堤坝影像

Figure 1 Overview map of the Coxon ditch watershed (a), image of the downstream water-blocking dam (b)

受西风带和北冰洋冷湿气流影响, 地处欧亚大陆中心腹地的布尔津县整体表现为北温带大陆性半干旱气候. 根据布尔津县气象资料, 该地区多年平均气温5.2℃, 多年平均降雨量280.8 mm, 4~8月降雨量占全年降雨量的72.1%, 同时4月转暖后冰雪融水也为地表汇流提供水源. 研究区水源情况为泥石流暴发提供了充分的水源条件.

布尔津县科克逊沟中上游岩性以华里西中期钾长花岗岩为主, 节理、裂隙极其发育, 岩层较破碎, 经长期风化剥蚀, 在谷坡坡面、坡脚及沟床形成大量堆积, 根据探井揭露断面控制残坡积、坡面及冲洪积松散堆积物厚度, 结合实地情况, 由每条勘探线控制一段沟道的长度, 计算得出: 松散堆积物一般厚度2.0 m, 储量约 $96.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 沟岸崩塌堆积物物源量约 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 总物源量约 $103.7 \times 10^4 \text{ m}^3$. 堆积物及崩积物主要分布在主沟和各支沟的谷坡中下部及中游沟床, 导致沟道堵塞加剧, 为泥石流暴发提供了物源条件. 下游地表岩性为洪积的第四系粉砂, 厚度1.3~2.0 m, 根据现场钻孔及区域地质资料, 其下部为圆砾地层, 厚度大于20 m.

1.2 泥石流运动过程及防治思路

泥石流集水面积较大, 形成区两侧谷坡较陡, 泥石流集水后挟带上游崩积物及松散堆积物下泄; 流通区峡谷段沟谷狭窄, 径流至此泥石流迅猛直泄; 堆积区呈喇叭口状向北开口, 沟谷宽阔, 纵坡比降变缓, 在沟口向北

至额尔齐斯河区段地形为开阔的洪积扇,泥石流携带的物质堆积于此.根据布尔津县气象局及自然资源局地质灾害史相关资料,2003年科克逊沟50年一遇的泥石流灾害中,平均泥位约1.04 m,平均流速3.84 m/s,一次泥石流冲出总量20 559.2 m³,冲出范围约2.102 km²,淤埋319省道、国道217线、防风治沙林、疏水渠道,毁坏加油站、额尔齐斯河老大桥及少数民房,冲走牲畜等,虽未造成人员伤亡,但对布尔津县造成的直接经济损失达119万元.对照泥石流沟易发程度数量化评分表^[36]的15项影响因素指标,对科克逊沟泥石流综合评判打分为86分,科克逊沟泥石流易发程度判定为轻度易发.因泥石流下游影响范围内分布较多重要建设项目(如省道、垃圾场等),根据地质灾害危险性评估分级表^[37],科克逊沟泥石流地质灾害危险性大.

基于实际情况,科克逊沟防治工程采用“上游拦挡物源、中游稳固沟道和消能、下游综合排导”的防治模式^[8].如图1(a)所示,泥石流沟流通区上游修建了两处拦砂坝P1、P2,用于拦挡泥石流沟汇集的固体物源;中游修建谷坊坝P3,防止沟道侧蚀和下切、减弱下泄水流势能并改变泥石流流速;同时为防止沟道内垃圾堆放场受泥石流冲刷形成新的物源,在垃圾堆放场迎水面修建导流坝,过水一侧修建排导槽和导流堤P4进行避让和防护;在泥石流沟沟口地形开阔处修建拦水堤坝P5,坝前设渗水区,借助地层良好的渗透性,使水流快速下渗转化为地下水进行排泄.坝上设溢流口,使下泄水流能够顺畅排导至额尔齐斯河.

2 试验方案

2.1 试验方案设计

如图1(b)所示,对渗水区及其南侧沟道共240 m进行物理模拟试验研究,模拟段沟道整体形态呈直线型,模拟上方汇水冲击拦水堤坝后的蓄水下渗过程,总结泥石流径流及渗流排导过程规律.

2.1.1 试验参数选取(表1)

表1 试验参数
Table 1 Test parameters

试验工况	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	设计流量/(m ³ ·h ⁻¹)	泥石流重度/(t·m ⁻³)	冲出总量/m ³
工况一	19.5	32.41	1.60	5.76
工况二	23.5	39.03	1.60	6.91

由于泥石流径流及排导过程的现场数据有限,难以通过现场监测反映真实泥石流与防治工程相互作用的结果.为重现泥石流暴发过程,物理模型试验成为研究泥石流与防治工程作用过程的常用方法^[10].但泥石流汇水、暴发、下泄过程具有复杂规律,物理模拟试验应根据现场泥石流孕灾条件选择最可行的泥石流试验装置.通过野外实地勘察,综合分析科克逊沟下游沟道宽度、渗水区面积及试验室已有条件,按照相似理论^[38],确定本次试验几何相似性应满足的相似比 λ_L 为:

$$\lambda_L = \frac{\text{模型尺寸}}{\text{原型尺寸}} = \frac{1}{40}. \quad (1)$$

科克逊沟下游渗水区及拦水堤坝排导工程根据泥石流峰值流量为50年一遇时进行设计,故试验选取的主要影响因子为不同降雨强度下汇水区集水下泄的径流量.目前我国水文计算规范SL/T 278—2020推荐水文变量统一服从P-III型分布理论,基于最小二乘适线法拟合P-III型曲线和样本点求取,通过分析研究区降雨数据,得到重现期下的两个降雨强度:19.5 mm·h⁻¹(2%)和23.5 mm·h⁻¹(1%).其对应的地表径流量及汇流时间参考公路排水设计规范JTG/T D33—2012中的计算公式:

$$Q = \frac{\sum qs\psi}{1000}, \quad (2)$$

$$t = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8(H_m - H_0)^{0.5}}, \quad (3)$$

式中: Q 为后方汇水流量(m³·h⁻¹); q 为设计重现的降雨强度(mm·h⁻¹),即19.5 mm·h⁻¹和23.5 mm·h⁻¹; $s=A$ 为后方汇水面积(km²),取值28.01; ψ 为径流系数,研究区为起伏的山地,取值0.60; t 为汇流时间(min); L 为主沟长度(km),取值23.9; H_m 、 H_0 为主沟起点及出口高程(km),取值1.451和0.483.

经计算,汇流时间为72.18 min,降雨强度 $19.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $23.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 对应的汇水流量分别为 $3.28\times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $3.95\times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. 根据水流运动相似性理论^[39],时间相似比 λ_T 和流量相似比 λ_Q 为:

$$\lambda_T = \lambda_L^{0.5} = 40^{0.5}, \quad (4)$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 40^{2.5}. \quad (5)$$

确定试验设计流量分别为 $32.41 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $39.03 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,设计汇流时间为11.41 min,计算设计后方汇水量为 6.16 m^3 和 7.42 m^3 .

2.1.2 试验流程

本次试验设计了两个重现降雨强度下的后方汇水总量,分别为防治工程设计基础的50年一遇降雨强度及计算预测的100年一遇降雨强度,命名为工况一及工况二,共进行两组试验. 通过预试验控制可调节水闸以改变每组试验径流量,设计径流时间为20 min,略大于汇流时间以监测渗水区排导过程. 试验模拟主体为实际泥石流流下游渗水区段240 m的沟道,水流自泥石流上游水砂分离漫坝后径流而下至渗流排导储蓄水的过程. 图2中a、b、c段为模型泥石流流的上中下游段,对应实际泥石流流下游渗水区段的沟道.

2.2 试验装置

根据现场勘察情况,科克逊沟下游位于洪积扇之上,洪积扇前缘分布有省道、加油站、垃圾场等工民建设施. 基于此确定室内物理模拟装置以模拟泥石流流下游拦水、储水、渗水、排导区域为主,试验装置主要由两部分组成:模拟试验槽和数据采集系统,如图2所示.

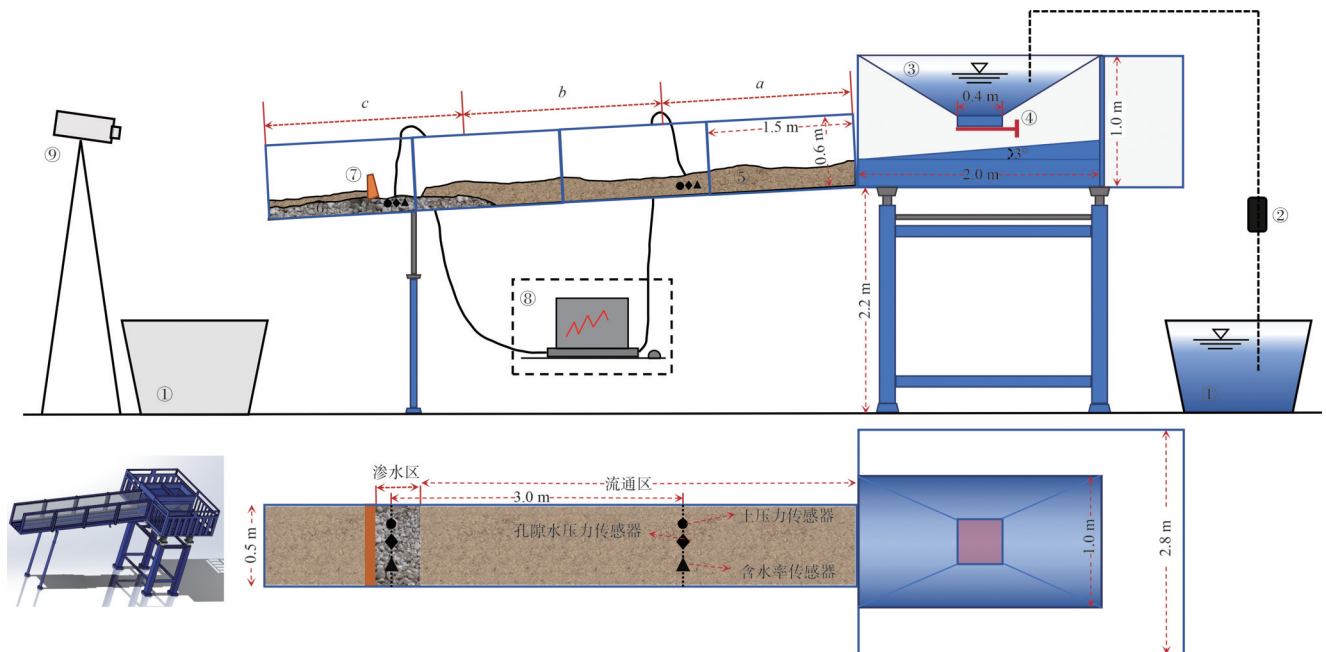


图2 科克逊沟试验装置

Figure 2 Experimental equipment of Coxon ditch

注:①蓄水箱;②水泵;③水槽;④可调节水闸;⑤粉砂层模型;⑥圆砾层模型;⑦拦水堤坝模型;⑧数据采集系统;⑨高速摄影机

2.2.1 模拟试验槽

基于相似比设计本次试验使用的中大型模拟试验槽,试验槽由供水系统、模型沟道组成. 供水系统包括蓄水箱、水泵、水槽及可调节水闸,水泵选用老水工JET17-57-1.8自吸喷射泵,额定流量 $17 \text{ m}^3/\text{h}$,3台可满足试验需要;水槽蓄水体积 0.54 m^3 ;水槽出口设计一可调节水闸,通过前期预试验确定水闸开口与水流速度的关系,以控制泥石流流径流速度及流量.

结合泥石流流下游渗水区沟道形态,设计模型沟道长6.0 m、宽0.50 m、深0.60 m. 沟道整体为钢结构,分4截,可根据模拟相似比进行组装,两侧安装可拆卸矩形亚克力板;同时根据科克逊沟下游平均坡度,通过支撑杆将模型沟道坡度调节至 3° ,铺土重现沟道形态时控制坡度大小.

2.2.2 数据采集系统

数据采集系统由高速摄影机、数据采集器和传感器组成。千眼狼 X113 高速摄影机全幅分辨率 $1\,280 \times 1\,024$ PPI,如图 3(a)所示,可以获得 6 500 FPS 高帧率视频,对高速视频的特征时间点进行提取并回传相应视频片段,满足试验坝后监测需求。DH3818Y 静态应力测试仪及其配套传感器用于监测土压力和孔隙水压力,通过计算机软件控制实现实时控制采集分析,如图 3(c)、图 3(e)、图 3(f)所示,其配套土压力盒探头为直径 28 mm、高度 6.5 mm 的圆片;孔隙水压力传感器探头为直径 15.8 mm、高度 21 mm 的圆柱体。CR1000 测量与控制数据采集器及 MTD05 传感器用于监测土壤含水率,如图 3(b)、图 3(d)所示,含水率传感器探头为 $95\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 的长方体,分辨率 0.1%。



图 3 数据采集系统

Figure 3 Data acquisition system

2.3 土样制备及沟道铺设

试验所用土样取自科克逊沟下游拦水堤坝前渗水区出露的圆砾及粉砂,即泥石流挟带的物源,物理力学参数见表 2。对含大粒径颗粒的圆砾土样进行颗分试验得到级配曲线。科克逊沟下游粉砂层下为级配良好的圆砾土,不均匀系数 30.8、曲率系数 1.1、砾粒含量约 52.6%、砂粒含量约 44.5%,其余为黏粒。试验圆砾土样具宽级配特性,但受室内物理模拟试验设备尺寸限制,须对土样中存在的超粒径颗粒进行剔除,弱化土样尺寸效应对试验的影响,试验运用缩尺办法对物源进行处理^[9]。根据已有研究结果^[40],超粒径的剔除替换旨在还原现场的土样粒径范围,通过缩尺办法尽可能减小对于土样原始渗透性的变化。模型沟道上部铺设松散堆积物厚度 20 cm,试验定义超粒径即粗颗粒最大中值粒径 d_{50} 小于铺设厚度的 1/5,剔除粒径大于 20 mm 的颗粒,保留累计百分含量 30% 对应粒径 1 mm 内的颗粒,等量替换大于 20 mm 的超粒径颗粒,同时维持 1~20 mm 范围内的粒组,试验土样粒径分布为 0.02~20 mm。等质量替换前后的土样级配曲线如图 4 所示。

表 2 科克逊沟土样物理力学参数

Table 2 Coxon ditch physical and mechanical parameters of soil samples

土样	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
粉砂土	2.70	1.88	10.88	10.23
圆砾土	4.62	2.56	36.73	32.84

依据现场钻孔资料,泥石流上游粉砂层厚度大于 20 m,下游第四系粉砂层厚度约 2.80 m,其下圆砾层厚度大于 30 m,地下含水层厚度约 15 m。根据相似比在沟道下游铺设 7 cm 粉砂及 14 cm 圆砾模拟原始地层情况,同时在渗水区清除粉砂层。拦水堤坝原型高 4 m,模型设置高度 10 cm,置于渗水区后。铺设过程分层压实,坡度控制在 3° ,通过试坑灌水法试验确保沟道模拟地层土体密度与原位土体一致。传感器埋设在地层中部位置,上下游各布设一组传感器,下游传感器布设于渗区内,两组传感器间距 3 m,试验开始前静置模型 3~5 d^[41],避免模型被扰动,以恢复土样至原位状态。

3 试验结果与监测数据分析

3.1 渗流排导过程特征分析

渗流排导与管涌类似,基础土层中含有强透水层,且表层均有细粒土(如粉砂),粗颗粒构成的孔隙直径大

于细颗粒直径的同时,渗流的水动力可以带动细颗粒在孔隙间移动^[42].不同的是,渗流排导工程将强透水层圆砾层之上的粉砂层通过工程开挖清除,增强渗水区土层渗透性、避免产生管涌现象,通过地下水层与主河的联系达到排导目的^[8].通过高速摄影机记录模拟试验泥石流渗流排导过程.

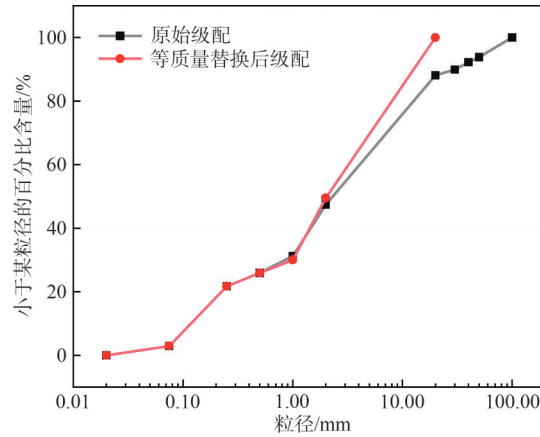


图4 科克逊沟试验土样级配曲线

Figure 4 Gradation curve of tested soil samples from Coxon ditch

图5为降雨强度 $19.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 下泥石流径流排导特征影像.根据影像回溯试验过程,工况一汇流径流条件下,泥石流径流排导过程分为以下5个阶段:1)沟道面蚀和下蚀阶段;2)沟岸侧蚀阶段;3)渗流排导阶段;4)渗流减速阶段;5)渗流结束阶段.

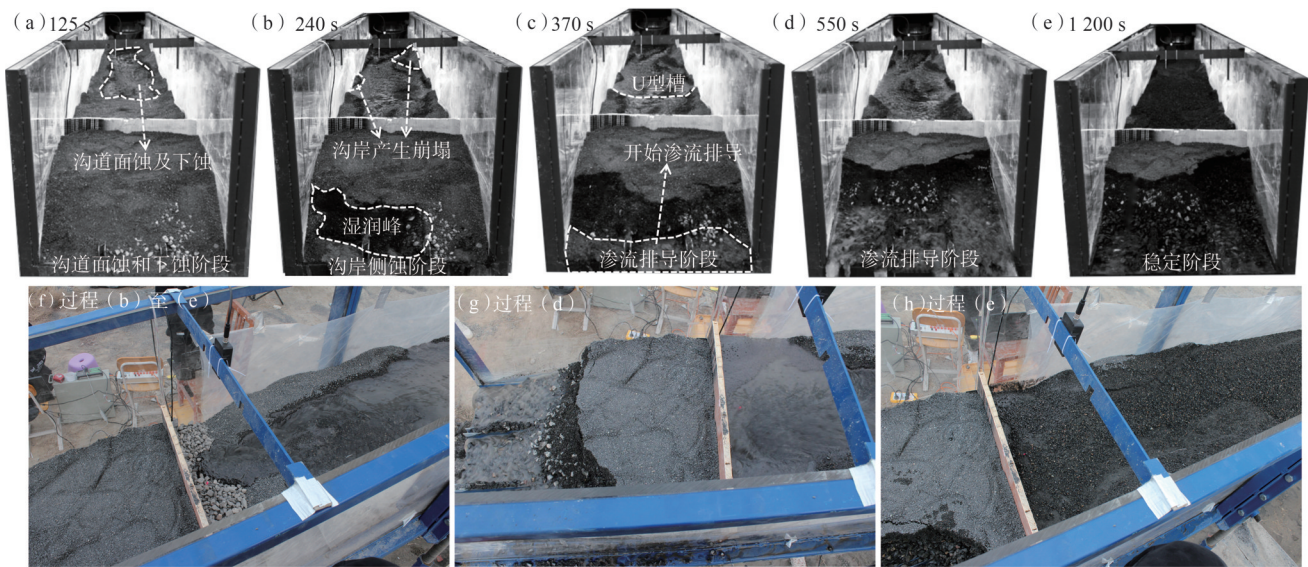


图5 工况一停淤渗水过程

Figure 5 Process of diversion by percolation in condition 1

模拟泥石流沟道经历了面蚀和下蚀、侧蚀、渗流排导、稳定的全过程.如图5(a)所示,0~125 s过程中,水流沿沟道迅速流动,挟带沟内松散堆积物下泄,土中粗颗粒被水流冲击而下,细颗粒由于水流与松散堆积物的速度差形成压力差,被裹挟进入水中,形成泥石流,该阶段水流速度较慢,侵蚀较缓,为沟道面蚀和下蚀阶段.如图5(b)所示,125~240 s过程中,上游不断的径流补充使泥石流对沟岸的侧蚀加强,沟岸形成临空面以及明显的湿润峰,诱发崩塌危岩体塌落补给泥石流物源,沟内形成U型槽,水流更加集中,侵蚀能力加强,此时为沟岸侧蚀阶段.如图5(c)、图5(f)所示,240~370 s过程中,拦水堤坝挡水蓄水,发挥下渗排导效应,达到水砂分离目的以降低泥石流灾害危险性,同时下渗水流将沟口土层冲出,可清晰观察水流下渗至地下水圆砾层后的排导情况,240~753 s为渗流排导阶段.图5(d)、图5(e)、图5(g)、图5(h)展示了模型渗流排导至稳定过程,泥石流挟

带的松散堆积物在渗水区堆积,覆盖了挖开的圆砾层,渗水速度降低,坝前开始蓄水,此时为渗流减速阶段,坝前U型槽变浅,侧蚀影响宽度变大,沟道两侧形成凹岸,沟岸两侧不断发生崩塌补给大量物源,水流浑浊,试验685 s时上游汇水放完,坝前蓄水未漫坝,继续下渗排导,753~1 200 s为稳定阶段,此时泥石流沟道形态不再进一步发生变化。

图6为降雨强度 $23.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 下泥石流关键时刻的径流排导特征影像。工况二汇流径流条件下,泥石流径流流量变大,拦水堤坝蓄水量无法满足上方汇水量全部拦挡排导的需求,坝后出现漫坝情况。泥石流径流排导过程分为以下5个阶段:1)渗流排导阶段;2)渗流减速阶段;3)水流漫坝阶段;4)坝后堆积体起动阶段;5)渗流结束阶段。

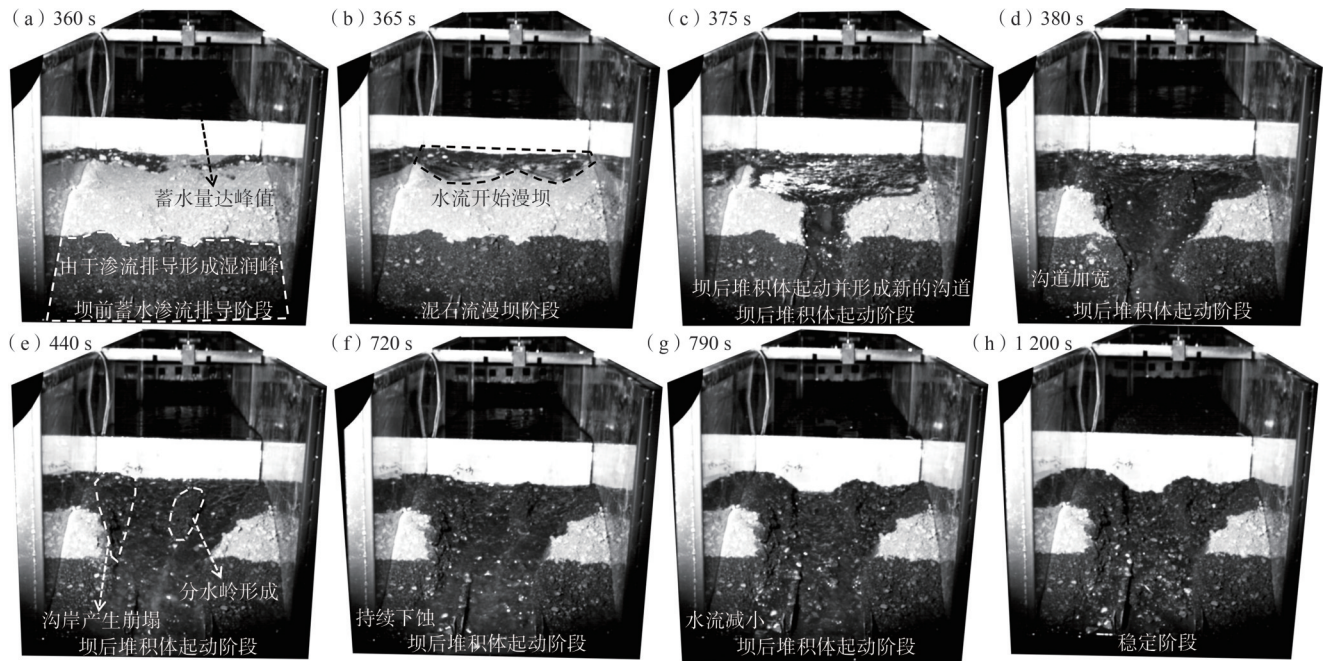


图6 工况二停淤渗水过程

Figure 6 Process of diversion by percolation in condition 2

由于径流量增大, $23.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨汇流下泄后,坝前沟道整体被淹没,如图6(a~e)所示,0~360 s为渗流排导阶段,泥石流挟带沟道内松散堆积物至坝前,降低了坝前渗流速度,蓄水速度大于排导速度,渗流排导开始后20 s渗流即进入减速阶段;360 s时,坝前蓄水量达到峰值,随后出现水流漫坝情况,360~440 s为水流漫坝阶段。如图6(e~g)所示,440~500 s内漫坝水流在坝后汇集,迅速破坏坝后沟道内堆积体,不断面蚀及下蚀作用启动了坝后堆积体,形成V型沟槽,由于漫坝水流的不断补给,V型沟槽不断拓宽加深,产生溯源侵蚀现象,溯源至坝底,坝后堆积物不断被掏蚀,被水流挟带冲出,440~882 s为坝后堆积体起动阶段。如图6(e~f)所示,V型沟槽两侧出现明显湿润峰,沟岸因侧蚀掏底形成崩塌,为漫坝水流提供物源。由于上游泥石流挟带的泥沙在坝前不均匀堆积,坝前区域下渗速度不一致,漫坝水流量亦不均匀,故坝后出现分水岭,形成2条V型沟槽,水流在漫坝和渗流的双重作用下进行排导。如图6(g~h)所示,685 s后水流不再漫坝,泥石流逐渐进行稳定排导,882~1 200 s为稳定阶段,但由于前期泥石流挟带泥沙堆积在渗水区,水流下渗速度降低,拦水堤坝蓄水量逐渐排导完毕。

3.2 传感器监测结果分析

试验在泥石流沟道模型上下游各布设了一组传感器(每组3个)。工况一汇流径流条件下,上游布设土压力传感器T1、孔隙水压力传感器S1、含水率传感器H1,下游布设T2、S2、H2;工况二汇流径流条件下,上游布设T3、S3、H3,下游布设T4、S4、H4。

3.2.1 土压力监测结果分析

如图7所示,工况一条件下,0~125 s沟道面蚀和下蚀阶段汇水下泄过程中,试验前期土压力无明显变化。

125~240 s 沟岸侧蚀阶段过程中,上游土压力出现明显上升,峰值为0.44 kPa,同时下游渗水区土压力增大,这是由于面蚀、侧蚀阶段水流挟带沟顶松散堆积物及径流产生压力导致土压力增大. 240~753 s 渗流排导阶段,上游土压力开始减小,下游土压力不断升高,其中685~753 s 汇水放完至沟道稳定过程中,下游土压力达到0.37 kPa后骤降,此时渗流速度大于补给速度,渗水区水量减少. 稳定阶段自753 s至试验结束过程中,下游由于水流的不断渗流排导,水间土颗粒沉淀在渗水区,渗流速度降低,同时土压力不断升高,峰值为0.60 kPa,由于表层土因冲刷流失,上游土压力从0.07 kPa降至0.05 kPa.

工况二条件下,坝前蓄水渗流排导阶段径流情况与工况一相似,由于水量变大,工况二上游90 s时土压力上升,峰值为0.50 kPa. 108 s时下游渗水区开始渗流排导,当下游土压力为0.35 kPa时,泥石流水力条件达到峰值,在水流漫坝及渗流双重排导作用下,曲线骤降,进入短暂的水流漫坝阶段. 同时工况二坝后堆积体起动阶段结束时间延后,这是由于水流挟带的松散堆积物相比工况一多,降低了后续渗水区渗流速度. 685 s后水流不再漫坝,坝后堆积体起动阶段经历渗流速度由大到小的变化,随着坝前松散堆积物的增加,渗流速度变缓,且变缓速率大于工况一,高速水力条件下挟带的松散堆积物在坝前堆积更快更多,提示工程应及时清淤,避免下渗区域过多堆积物降低渗流排导的防治效应. 下游于1 043 s时稳定,渗水区土压力峰值为0.82 kPa,稳定在0.78 kPa,上游土压力则从0.10 kPa降至0.07 kPa,这是由于上游沟道内下蚀程度加深,松散堆积物随水流下泄,被拦于坝前堆积.

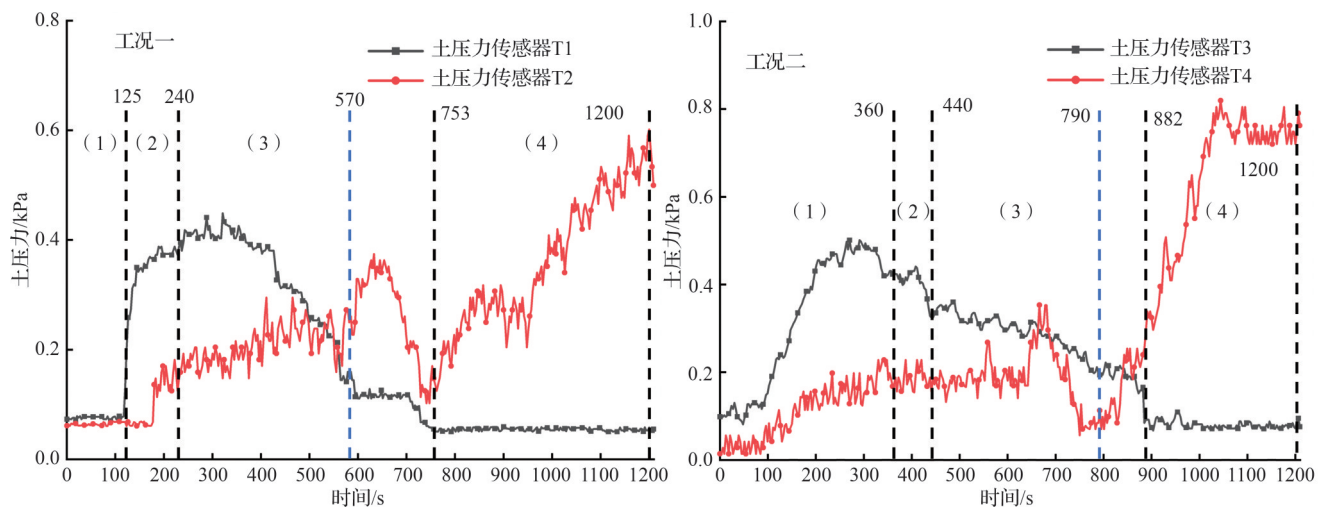


图 7 土压力传感器监测曲线
Figure 7 Soil pressure sensor monitoring curve

3.2.2 孔隙水压力监测结果分析

工况一上下游孔隙水压力随时间变化特征曲线如图8所示,试验初期沟道面蚀和下蚀阶段孔隙水压力未见明显变化,随着时间推移,沟道因水流面蚀和下蚀影响而不断加深,曲线陡升. 沟岸侧蚀阶段135 s时上游孔隙水压力开始上升,下游渗水区在171 s时上升,相比土压力的上升趋势,上游孔隙水压力上升展现出明显的滞后性. 下游孔隙水压力更快达到峰值0.47 kPa,这是由于渗水区水流下渗速度更快,传感器受力更大,孔隙水压力累计较快. 486 s上下游孔隙水压力达到峰值后,上游松散堆积物内部压力释放,随水流下泄,导致孔隙水压力降低;此时下游因物源堆积导致渗水速度下降,孔隙水压力也随之降低. 753 s后泥石流逐渐进入稳定阶段,随着径流量的减小及渗流速度的降低,孔隙水压力降低速率也随之变缓.

工况二孔隙水压力特征与工况一类似,不同之处在于工况二流量更大,相比工况一传感器响应更迅速,峰值数据更大,90 s时上游孔隙水压力出现响应,113 s时下游孔隙水压力出现响应,为0.63 kPa,同时上游孔隙水压力的激增在348 s时开始,下游孔隙水压力的激增却在传感器出现响应后激增,原因是下游卵砾石渗透性较好,传感器响应迅速,上游粉砂层渗透性较差,孔隙水压力相应上升较慢. 360 s水流漫坝阶段,此时堆积物降低渗流速度,漫坝降低渗流流量,导致下游孔隙水压力逐渐降低. 同时在坝前蓄水量达到峰值漫坝后,排导速度小于径流速度,水流向上蓄积,坝后堆积体起动阶段中685 s后不再有漫坝水流.

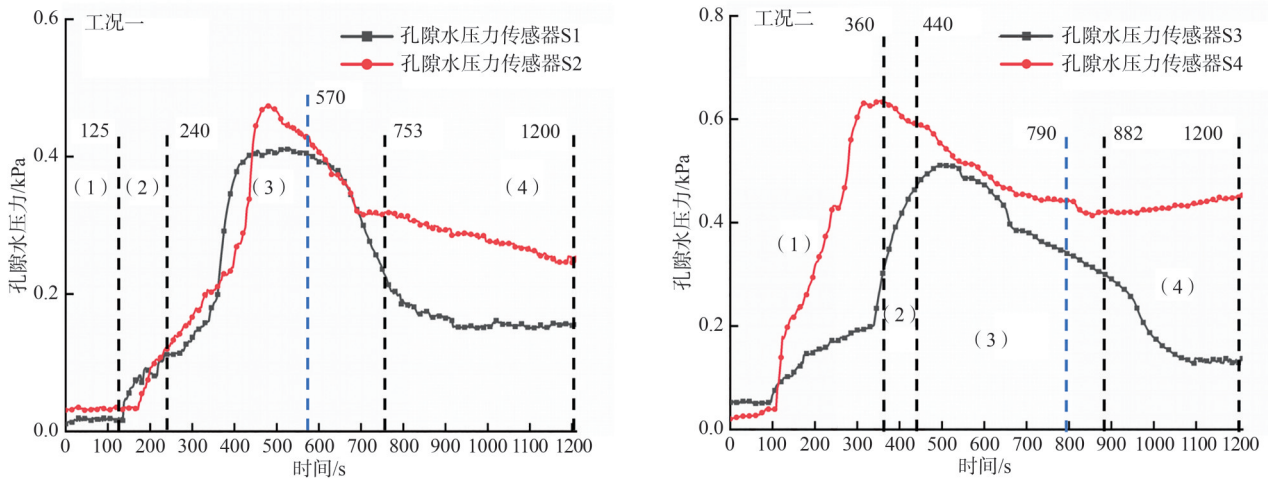


图 8 孔隙水压力传感器监测曲线

Figure 8 Pore pressure sensor monitoring curve

3.2.3 含水率监测结果分析

如图9所示,工况一实测数据沟道面蚀和下蚀阶段曲线水平,传感器数据未发生较大波动,原因是前期面蚀和侧蚀阶段侵蚀深度较浅,上游粉砂层渗透性较差,沟岸侧蚀阶段134 s时水流下渗至上游传感器埋设位置,含水率陡升;下游含水率则在168 s时开始升高,由于圆砾层渗透性较好,含水率上升速度较快,渗流排导阶段489 s时下游含水率达到峰值14.9%。含水率曲线特征关键时刻与孔隙水压力对应,孔隙水压力达到峰值时含水率也达到峰值。上游含水率在汇流放完后的753 s时陡升后达到峰值10.2%,这是沟道下蚀加速下渗导致的。

工况二坝前蓄水渗流排导阶段在100 s前的含水率数据亦无过大波动,但传感器出现响应的时刻明显早于工况一,水流速度、径流量的增加是直接影响因素。同时径流量的增加使工况二下游含水率曲线上升较快,113 s含水率开始激增,此时水流径流至下游。当360 s水流漫坝阶段时,含水率达到峰值25.7%,但上游含水率曲线相比工况一滞后达到峰值,这是由于径流量较大,拦水堤坝拦水后径流速度降低,坝后堆积体起动阶段685 s汇流放完稳定渗流排导后径流加快,上游含水率在下蚀作用下加快了水流下渗的速度,逐渐达到峰值19.4%。

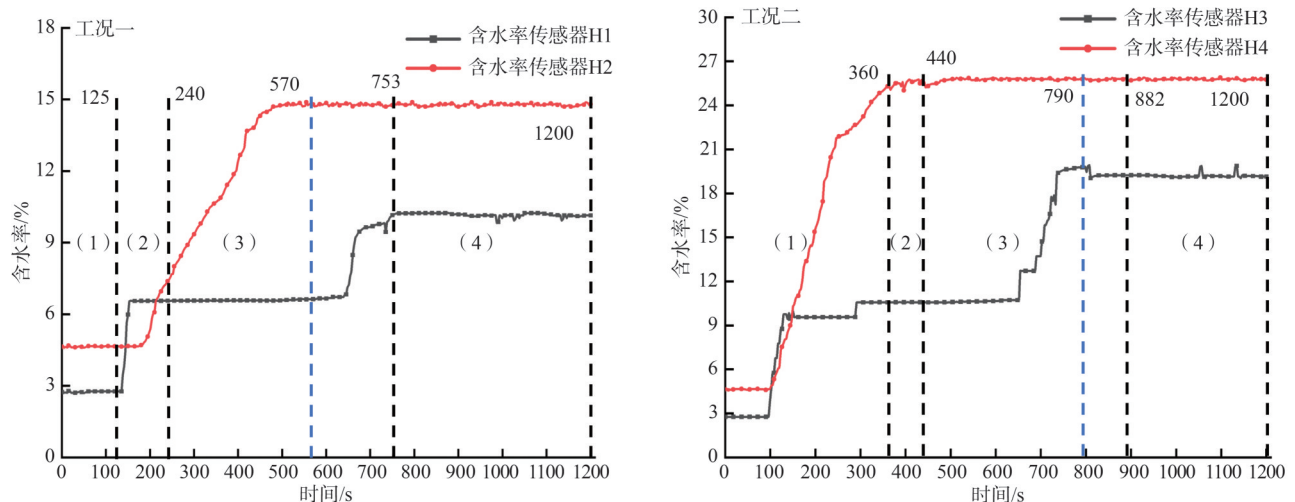


图 9 含水率传感器监测曲线

Figure 9 Water content sensor monitoring curve

4 结论

本文通过设计1:40物理模拟试验,开展了布尔津县科克逊沟泥石流堆积区渗流排导机制的研究,得到以下结论:

1) 泥石流径流排导过程可概括为5个阶段。在50年一遇降雨强度汇流条件下,为沟道面蚀和下蚀阶段、沟岸侧蚀阶段、渗流排导阶段、渗流减速阶段、渗流结束阶段;在100年一遇降雨强度汇流条件下,则为渗流排导阶段、渗流减速阶段、水流漫坝阶段、坝后堆积体起动阶段、渗流结束阶段。

2) 土压力曲线试验结果中,沟道上游土压力先升后降,下游则因堆积土压力增大。孔隙水压力曲线与含水率曲线具有相关性,抬升特征明显滞后于土压力曲线。孔隙水压力先升后降;含水率在上游出现陡升特征,下游含水率曲线抬升较稳定。

3) 通过缩尺泥石流沟道模型验证了渗水设计的可行性,为我国新疆北疆地区同类排导困难区域的泥石流防治设计提供了借鉴。相比未设置防治工程时的泥石流灾害史,设置渗水区蓄水排水,能有效避免堆积区外工民建设施遭受泥石流灾害的威胁。

4) 水砂分离后渗水区排水留砂,一定程度上影响了渗流速度,为保证科克逊沟渗水区排导渗流畅通,应定期开展渗水区清淤工程。

5) 停淤渗水工程适用于沟口纵坡宽缓、降水量和沟谷洪峰流量较小的干旱地区,对于无法快速下渗排泄较大洪峰流量的其他泥石流区域适用性较差,且必须考虑停淤场下伏地层与主河之间的渗流路径是否畅通,该工程可为同类排导困难区域的泥石流防治工作提供参考,但推广范围有限。

参考文献:

- [1] Qiao Z T, Shen W, Berti M, et al. An advanced SPH model for protective constructions of debris flows adopting the modified HBP constitutive law[J]. *Landslides*, 2023, 20: 2437-2453.
- [2] Jakob M. Debris-flow hazard assessments: A practitioner's view[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2021, 27(2): 153-166.
- [3] Liu M, Zhang Y, Tian S F, et al. Effects of loose deposits on debris flow processes in the Aizi Valley, southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 156-172.
- [4] Blasone G, Cavalli M, Marchi L, et al. Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning[J]. *Catena*, 2014, 123: 23-36.
- [5] Jakob M, Hungr O. Debris-flow hazards and related phenomena[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [6] Dowling C A, Santi P M. Debris flows and their toll on human life: A global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011[J]. *Natural Hazards*, 2014, 71: 203-227.
- [7] Marra F, Nikolopoulos E I, Creutin J D, et al. Radar rainfall estimation for the identification of debris-flow occurrence thresholds[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1607-1619.
- [8] 陈德斌, 韩庆洋, 付晶, 等. 排导困难区域的泥石流灾害防治模式研究: 以新疆布尔津科克逊泥石流为例[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(4): 1429-1437.
Chen D B, Han Q Y, Fu J, et al. A study on the prevention and control model of debris flow disaster in difficult drainage area: A case study of Kekexun debris flow in Burqin, Xinjiang[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(4): 1429-1437. (in Chinese)
- [9] 张宗硕. 降雨及漫坝水流影响下泥石流堆积体的侵蚀与起动特征研究: 以汶川县锄头沟为例[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Zhang Z S. Study on erosion and initiation characteristics of debris flow deposition under the influence of rainfall and over-dam flow: A case study of Chutou Gully, Wenchuan, Sichuan[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [10] 贺拿, 陈宁生, 曾超. 泥石流起动机理研究现状及趋势[J]. *灾害学*, 2013, 28(1): 121-125.
He N, Chen N S, Zeng C. Current situation and tendencies of debris flow initiation mechanism[J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(1): 121-125. (in Chinese)
- [11] 熊木齐. 白龙江流域泥石流拦挡工程的效应模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
Xiong M Q. Simulation research on effects of check dams for debris flow mitigation in Bailong River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [12] Klubertanz G, Laloui L, Vulliet L. Identification of mechanisms for landslide type initiation of debris flows[J]. *Engineering Geology*, 2009, 109: 114-123.
- [13] Chen N S, Zhou W, Yang C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with dif-

- ferent clay content[J]. *Geomorphology*,2010,121: 222-230.
- [14] Hutchinson J N, Bhandari R K. Undrained loading, a fundamental mechanism of mudslide and other mass movement[J]. *Geotechnique*,1971,21(4):353-358.
- [15] 倪化勇. 人工降雨条件下冲沟型泥石流起动试验研究[J]. *工程地质学报*,2015,23(1):111-118.
Ni H Y. Field experiments for groove-type debris flow initiation with artificial rainfall[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015,23(1):111-118. (in Chinese)
- [16] Okura Y, Kitahara H, Ochiai H, et al. Landslide fluidization process by flume experiments[J]. *Engineering Geology*,2002,66: 65-78.
- [17] Cui P. Study on conditions and mechanisms of debris flow initiation by means of experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992,37(9):759-763.
- [18] Okada Y, Ochiai H. Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests[J]. *Engineering Geology*, 2008,97:1-14.
- [19] Wang G H, Sassa K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content[J]. *Engineering Geology*,2003,69:109-125.
- [20] Iverson R M. Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005,110:F02015.
- [21] 毛祖熙,段祥宝. 关于渗流的力及其应用[J]. *岩土力学*,2009,30(6):1569-1574+1582.
Mao C X, Duan X B. On seepage forces and application[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2009,30(6):1569-1574+1582. (in Chinese)
- [22] 周公旦. 孔隙水压力在滑坡泥石流起动和运动中的作用[J]. *自然杂志*,2014,36(5):325-335.
Zhou G D. Effect of pore water pressure on the triggering and mobilization of landslides[J]. *Chinese Journal of Nature*,2014, 36(5):325-335. (in Chinese)
- [23] Shen W, Wang D P, Qu H N, et al. The effect of check dams on the dynamic and bed entrainment processes of debris flows[J]. *Landslides*,2019,16:2201-2217.
- [24] Shen W, Wang D P, He S M, et al. Numerical assessment of the impeding effect of check dams in the Hongchun debris flow gully, Sichuan Province, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2020,79:2833-2845.
- [25] Yu X B, Chen X Q, Wang H L, et al. Numerical study on the interaction between debris flow slurry and check dams based on fluid-solid coupling theory[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*,2020,38:2427-2445.
- [26] Armanini A, Rossi G, Larcher M. Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall[J]. *Journal of Hydraulic Research*,2020,58(2):314-325.
- [27] Calvetti F, di Prisco C G, Vairaktaris E. DEM assessment of impact forces of dry granular masses on rigid barriers[J]. *Acta Geotechnica*,2017,12:129-144.
- [28] Faug T. Depth-averaged analytic solutions for free-surface granular flows impacting rigid walls down inclines[J]. *Physical Review E*,2015,92(6):062310.
- [29] Li X Y, Zhao J D. A unified CFD-DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*,2018,42:1643-1670.
- [30] Ng C W W, Choi C E, Goodwin S R, et al. Interaction between dry granular flow and deflectors[J]. *Landslides*,2017,14: 1375-1387.
- [31] Tan D Y, Yin J H, Feng W Q, et al. New simple method for calculating impact force on flexible barrier considering partial muddy debris flow passing through[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2019,145(9):04019051.
- [32] 杨东旭,游勇,陈晓清,等. 泥石流排导槽磨蚀行为特征研究[J]. *灾害学*,2021,36(1):48-53.
Yang D X, You Y, Chen X Q, et al. Study on the characteristics of abrasion behavior of debris flow drainage channel[J]. *Journal of Catastrophology*,2021,36(1):48-53. (in Chinese)
- [33] 栗帅,陈晓清,陈剑刚,等. “阶梯+消力墩”型排导槽调控泥石流性能研究[J]. *工程科学与技术*,2021,53(3):68-76.
Li S, Chen X Q, Chen J G, et al. Regulation performance of debris flow by “step+baffle” drainage channel[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2021,53(3):68-76. (in Chinese)
- [34] 李宁,唐川,卜祥航,等. “5·12”地震后汶川县泥石流特征与演化分析[J]. *工程地质学报*,2020,28(6):1233-1245.
Li N, Tang C, Bu X H, et al. Characteristics and evolution of debris flows in Wenchuan County after “5·12” earthquake[J].

- Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1233-1245. (in Chinese)
- [35] 潘青,张清照,李艺灵. 基于EDEM的碎屑流运动规律及冲击性能研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1057-1065.
Pan Q, Zhang Q Z, Li Y L. Discrete element simulation study of debris flow movement law and impact performance[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1057-1065. (in Chinese)
- [36] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T 0220—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [37] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 地质灾害危险性评估规范: GB/T 40112—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for risk assessment of geological hazard: GB/T 40112—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [38] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 106-116.
Chen X Q, Cui P, Feng Z L, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 106-116. (in Chinese)
- [39] Tecca P R, Genevois R. Field observations of the June 30, 2001 debris flow at Acquabona (Dolomites, Italy)[J]. Landslides, 2009, 6: 39-45.
- [40] 周健, 杜强, 于仕才. 泥石流启动试验的数值模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9): 96-103.
Zhou J, Du Q, Yu S C. Numerical simulation study on the experiments of the initiation of debris flow[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(9): 96-103. (in Chinese)
- [41] Scheidl C, Chiari M, Kaitna R, et al. Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach[J]. Surveys in Geophysics, 2013, 34: 121-140.
- [42] 汪鑫. 藏南湖盆谷地区泥石流发育特征及防治工程有效性评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2022.
Wang X. Study on the characteristics of debris flow and the effectiveness evaluation method of preventions in basin-valley area of Southern Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022. (in Chinese)

责任编辑: 岳荣强