

建筑弃土场物料成分对强降雨诱发 泥石流灾害的影响

王浩^{1,2,3}, 陈海波¹, 夏传安^{1,2,3}, 俞奎皓¹, 郭朝旭^{2,3,4}

(1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 自然资源部丘陵山地

地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 福建省地质工程勘察院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 开展极端降雨条件下山区建筑弃土场不同物料成分触发泥石流灾害的预测与评价, 揭示山区建筑弃土场灾害链的链式演化机制与时空分布规律, 为山区水土流失防控提供科学依据。[方法] 以典型弃土场为研究对象, 设置了杂填土、淤泥及陶瓷废料等典型物料单一堆填或不同比例混合堆填的 5 种典型工况, 分析了不同物料成分下锁口拱坝和堆填体的稳定性, 以及溃坝转化为泥石流的运动特征。结合 Massflow 软件建立滑坡泥石流耦合动力学模型, 开展泥石流危险性分区评价和受物料比例影响的关键模型参数的敏感性分析。[结果] ①在极端降雨和满库条件下工况 1—3 的拱坝安全系数分别为 1.049, 1.002, 1.034, 堆填体安全系数分别为 1.172, 0.826, 0.959, 可触发锁口拱坝溃决, 诱发坝后堆填物质失稳, 沿下游沟道发生泥石流灾害链。②工况 1—3 导致的泥石流最高流速分别为 21.04, 25.36, 18.73 m/s, 主沟道最大泥深分别为 19.2, 8.2, 12.7 m, 最远堆积距离分别为 356.0, 674.8, 545.4 m, 高危险强度区面积分别为 36 068.1, 77 254.9, 82 887.0 m²。③结合工况 1—5 模拟结果及弃土场泥石流运动特征敏感性因子排序(内摩擦角 > 超孔隙水系数 > 容重), 表明内摩擦角及超孔隙水系数受物料成分影响, 是泥石流运动特征的主控参数。[结论] 在满库和极端降雨条件下, 山区建筑弃土场容易发生坝体垮塌—堆填体失稳—沟谷泥石流灾害链, 严重威胁下游居民区与工业设施安全; 采用合理物料混填比例可改善堆填体整体强度, 减少高危险强度区面积, 显著减小灾害影响范围。

关键词: 山区弃土场; 失稳; 泥石流; 灾害链; 危险分区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0082-12

中图分类号: X43

文献参数: 王浩, 陈海波, 夏传安, 等. 建筑弃土场物料成分对强降雨诱发泥石流灾害的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 82-93. Wang Hao, Chen Haibo, Xia Chuan'an, et al. Effects of material composition in construction waste sites on debris flow disasters induced by heavy rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 82-93. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.023; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.023.

Effects of material composition in construction waste sites on debris flow disasters induced by heavy rainfall

Wang Hao^{1,2,3}, Chen Haibo¹, Xia Chuan'an^{1,2,3}, Yu Kuihao¹, Guo Zhaoxu^{2,3,4}

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian

350108, China; 2. Key Laboratory of Geohazard, Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China;

3. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources of China,

Fuzhou, Fujian 350002, China; 4. Geological Engineering Survey in Fujian Province., Fuzhou, Fujian 350005, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to predict and evaluate debris flow disasters accompanied by material composition in construction waste sites to diverse mixed ratios of different spoils under heavy rainfall conditions

收稿日期: 2025-03-17

修回日期: 2025-04-25

采用日期: 2025-04-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“强降雨条件下阶梯状茶园边坡的水文响应及浅层失稳机制”(42477165); 福建省科技厅产学研创新项目“复杂环境下建筑弃土场灾变机制及风险防控关键技术”(2022Y4002); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室开放资助项目“有效降雨量作用下坡体稳定性的敏感性研究”(FJKLGH2024K008)

第一作者: 王浩(1978—), 男(汉族), 江苏省盐城市人, 博士, 教授, 从事岩土工程与工程地质方面的研究。Email: h_wang@126.com。

通信作者: 夏传安(1991—), 男(汉族), 福建省三明市人, 博士, 副研究员, 从事水文地质与工程地质数值建模研究。Email: chuan-an.xia@fzu.edu.cn。

and reveal the chain evolution mechanism and spatiotemporal distribution of the disaster chain in construction waste sites in mountainous areas under extreme rainfall conditions. These results provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion in mountainous regions. [Methods] Five cases (denoted as cases 1—5) comprising five different spoil compositions of miscellaneous fill, silt, and ceramic waste were designed to analyze and simulate debris flows accompanied by typical construction waste sites. Cases 1—5 involved single-material stacking or mixed stacking with different spoil composition proportions. The stability of the dam and slopes formed by the spoil, together with the characteristics of the debris flow after a dam break in the spoil ground, were systematically analyzed. A coupling dynamic model for landslides and debris flows was established using Massflow software. A hazard zonation evaluation of debris flows was performed based on the simulation results provided by the model. The sensitivity of the debris flow characteristics to the key model parameters impacted by the mixing ratios was investigated. [Results] ① The safety factors for the dam were 1.049, 1.002, and 1.034 when extreme rainfall occurred and building spoil ground was fully filled. The values for the filled materials were 1.172, 0.826, and 0.959, respectively. This indicates that extreme rainfall events triggers dam breaks, inducing instability in the filled material behind the dam, leading to debris flow along the downstream channel. ② The numerical simulation results showed that the maximum velocities of the debris flow in cases 1—3 were 21.04, 25.36, and 18.73 m/s, respectively. The maximum mud depths of the debris flows were 19.2, 8.2 and 12.7 m respectively. The farthest accumulation distances of the debris flows in cases 1—3 were 356.0, 674.8, and 545.4 m respectively. The areas of the high-hazard zones of debris flows in cases 1—3 were 36 068.1, 77 254.9, and 82 887.0 m² respectively. ③ A joint analysis of the simulation results of cases 1—5 and ranking of factors (i.e., internal friction angle > excess pore water pressure coefficient > unit weight) revealed that the internal friction angle and excess pore water pressure coefficient, which were affected by the mixing ratio, were the main controlling parameters for the debris flow characteristics. [Conclusion] Under the conditions of a full reservoir and extreme rainfall, construction waste sites in mountainous areas are associated with a high probability of causing a disaster chain of dam breaks, construction waste site destabilization, and debris flows, posing a serious threat to the safety of downstream residential areas and industrial facilities. The use of a reasonable proportion of materials in a mixed landfill scheme can effectively enhance the overall stability of construction waste sites and significantly reduce the area of high-hazard debris flow zones. A scientifically mixed landfill scheme can effectively control the influence of debris flow.

Keywords: mountain soil field; instability; debris flow; disaster chain; hazard zonation

随着中国城镇化进程加快,建筑弃土量剧增,城市建设弃土约77%^[1-3]需要填埋处理,形成集中消纳难题。在东南丘陵区的福建、浙江、广东等地的山地城镇,由于土地资源紧缺,建筑弃土场多选择在废弃采石场或山间凹地。由于其地形地质条件复杂,堆填无序且成分杂乱,而且经常受台风暴雨影响,容易引发滑坡泥石流灾害,严重威胁下游居民、工程设施和生态环境,可能发生类似深圳光明新区红坳弃土场这样的灾害事件^[4-5]。

建筑弃土场的灾害类型主要有滑坡^[6]和泥石流^[7]。弃土场滑坡灾害依据滑动面位置及成灾机理可分为3类:局部坍塌、整体滑塌与远程流滑。其中远程流滑以散体结构、高饱和度堆填体为特征,失稳后滑体动能大、运动距离长^[4-5]。滑坡与泥石流在一定条件下会发生灾种转化,目前研究已明确其转化的基本条件(固体物源、水源、地形坡度),但目前对转化的物理机制仍未形成统一认识。主要在于滑坡

—泥石流的转化涉及地质、水文、地形等多因素动态耦合,且其动态过程较为复杂;含水率、剪切速率等临界条件因地而异,转化阈值的模糊使得水土耦合的非线性行为难以试验复现;数据与模型的局限性使得物源侵蚀、降雨入渗等动态参数难以获取^[8]。山区建筑弃土场边坡松散堆积物源丰富,且没有经过良好的固结作用^[9],在陡峭地形与极端降雨条件下,弃土场失稳后可达到滑坡—泥石流转化基本条件^[10],但因工程地质条件特殊,滑坡—泥石流的转化机制和临界条件还比较模糊,仍需加强研究。

山区建筑弃土场现有的研究主要关注滑坡问题,对泥石流的研究相对较少。泥石流起动、运动及堆积过程复杂,受多种要素影响^[11],在地质灾害和水土流失领域备受关注。国内外学者根据起动机理将其总结分为水力类泥石流与土力类泥石流^[12];对运移过程中的下垫面地形因素影响与植被生长特征的减灾模式等进行了详细研究^[13];对物质颗粒级配

堆积固结过程的影响也进行了探讨。山区建筑弃土场泥石流灾害大多以降雨入渗作用下的滑坡或崩塌形式整体起动,弃土场的建设往往伴随植被破坏带来的地表固土能力下降^[13],土质松散与地形陡峭,它的灾害强度相较于传统泥石流可能更大。

此外,值得指出的是,建筑弃土场物料成分极其复杂,且在运营过程中物料混填比例会不断变化。物料比例的变化对弃土场自身稳定性和触发的泥石流灾害运动特征、致灾强度均有影响。目前,相关的研究主要针对动力学参数估计^[14]、起动机制解析^[15]及形成模式总结^[16],对于弃土体松散特性以及弃土物料成分对泥石流运动特征的影响研究较为空缺。

数值模拟作为一种有效的定量分析手段,常被用于泥石流的动力学特征研究^[17-18]、预警预报^[19]和防治工程优化^[20]。Savage S B等^[21]构建的平均积分方法可解析碎屑流的流动特征;Wang Guangjin等^[22]基于FLO-2D软件揭示了沟道坡度对泥石流沉积形态的控制作用;Ouyang Chaojun等^[23]研发的Massflow软件通过深度积分原理,实现了滑坡—泥石流耦合过程的跨尺度模拟,开发的地形自适应算法显著提升了计算效率^[24-27]。该模型已成功应用于尾矿库溃决影响评估(如桥墩冲击响应、溃砂运动路径预测等)^[28],结合无人机DEM数据进一步拓展了灾害风险评估的精度边界^[29]。此外,现有的研究也很少结合数值模拟技术预测不同物料构成及其参数(超孔隙水系数、内摩擦角)对山区建筑弃土场泥石流灾害的影响。

鉴于此,本文针对不同物料混填比例,首先开展福建某建筑弃土场锁口拱坝及堆填体的稳定性分析,定量揭示溃坝后堆填体整体失稳风险,然后利用Massflow开展多工况下泥石流数值模拟,并计算了不同模型参数的局部敏感性,揭示了不同物料成分下该弃土场在满库和极端降雨下的泥石流动力学特征,并获得了泥石流的危险分区。研究成果为山区建筑弃土场的弃土堆填、灾害防治和水土保持提供重要的科学参考。

1 研究区概况

1.1 基本概念

本研究以福建某典型建筑弃土场为对象,于2024年1月至10月进行现场勘察和无人机数据扫描。根据现场调查结果发现,场地建于原始冲洪积“U”型沟谷地貌单元,占地面积 $1.23 \times 10^5 \text{ m}^2$,设计库容 $2.20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。场地呈南高北低走向,北部冲沟出

口处设有混凝土拱坝拦挡,堆填弃土包括地铁建设淤泥(40%)、陶瓷废料(40%)和杂填土(20%),不同弃土混杂堆填。场地平均坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$,局部达 45° ,相对高差170 m,自然斜坡顶部高程276 m,弃土场周围地表植被以乔木、灌木及草地复合生态系统为主。

地质结构上,第四系含砾砂黏土覆盖层与侏罗系凝灰岩基岩构成基底,北侧挡墙发育3组节理,外围存在2条非活动性断层。地下水受季风降雨驱动显著,中央沟谷延伸450 m,谷底基岩裸露,东西两侧分别分布残坡积土层(2~3 m)与砂土状强风化凝灰岩带。场地工程地质剖面AA'如图1所示。

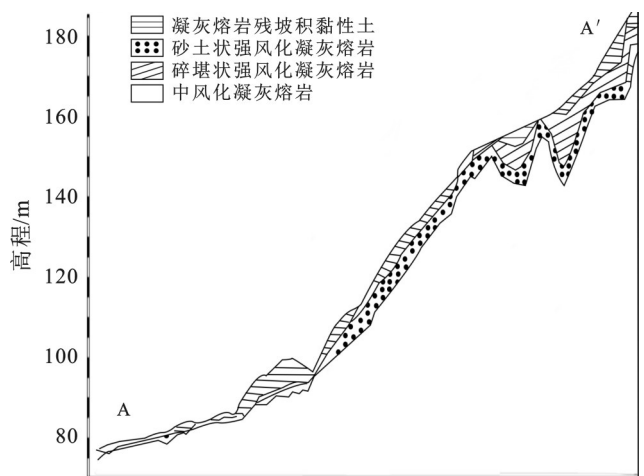


图1 研究区AA'工程地质剖面

Fig.1 Engineering geological cross-section AA' of study area

研究区年均降水量1364.7 mm,台风季(7—9月)短时强降雨占全年70%以上。弃土场地形陡峭(局部坡度 45°),下游沟道发育。此外,弃土场内物料丰富,具备泥石流发生的物源、水文和地形条件。

研究区所在的梅溪流域属闽江水系一级支流,发源于莲花山北麓。全流域呈扇形展布,流域位置及高程信息见图2。流域总面积 956 km^2 ,主河道全长78.6 km,总落差1077 m,平均纵比降13.7%。梅溪2条较大支流(芝溪、金沙溪)分布在左侧。芝溪全长40 km,总落差1060 m,流域面积 229.4 km^2 ,年径流量 $2.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。金沙溪全长37.6 km,总落差920 m,流域面积 180.38 km^2 ,年径流量1.6亿 m^3 。其中芝溪、金沙溪等左岸支流平均纵比降分别为26.5%和24.5%。

1.2 运行现状

该建筑弃土场采用了双曲拱坝作为建筑弃土场

收口支挡措施,堆填平台设计标高为105 m,拱坝建设见图3。

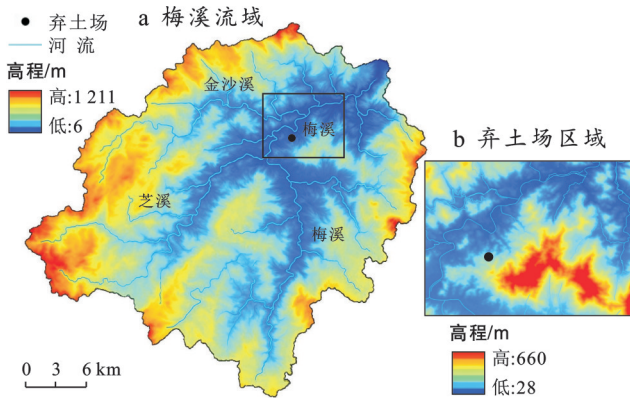


图2 研究区流域位置及高程信息
Fig.2 Location of study area watershed and elevation information

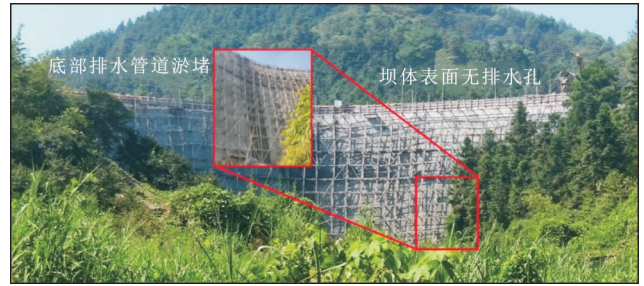


图3 建筑弃土场拱坝建设
Fig.3 Construction site of arch dam at waste dump site

现场调查显示,弃土场内局部滑塌现象普遍,存在明显工程隐患:①排水系统老化淤塞失效,导致场区大量积水(图4a,4b);②堆填体呈松散堆积状态(图4c),压实度低;③表面裂缝发育(图4d),增大了雨水入渗强度。

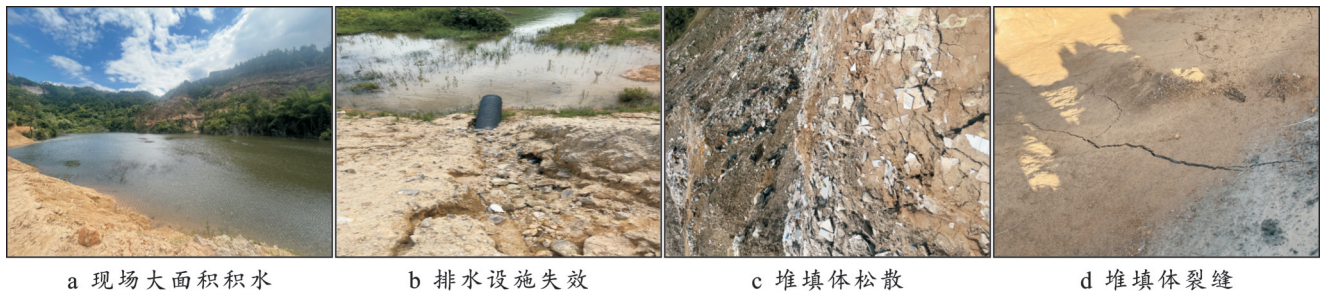


图4 弃土场运行现状
Fig.4 Operational status of waste dump site

随着弃土场运营持续,堆积体与天然沟道松散物质耦合效应日益显著。在满库情景下,若遭遇极端降水诱发现体失稳,水体入渗导致的土体强度劣化可能触发链式灾害:初期土体崩滑启动后,沟道堆积物源将参与泥石流运动,形成体量达 10^6 m^3 级地质灾害,直接威胁下游16户居民生命财产安全,并可能造成区域交通动脉452 m路段瘫痪。这种工程措施与地质环境的特殊耦合机制,构成了极端气候条件下灾害链式演化的典型场景。

1.3 弃土场泥石流发生条件定性评价

地形要素是构成泥石流灾害的基础地质条件。根据《水土保持工程设计规范》(GB 51018—2014),场地地形坡度超过 25° 时易形成潜在滑动势能。研究区平均坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$ 且局部达 45° ,远超规范建议综合坡度控制值,叠加170 m高差形成的重力势能,构成土体失稳的基底动力条件。该地形特征同时符合《泥石流灾害防治工程勘察规范》(DZ/T 0220—2006)中关于陡峭沟谷易发泥石流的地形条件描述。

水文条件是驱动泥石流灾害的触发因素。研究区靠近芝溪与金沙溪分流区域,沟床比降较大,年均降水量1364.7 mm且70%集中于雨季,暴雨强度指

标(R)值达5.86,远超《泥石流灾害防治工程勘察规范》(DZ/T 0220—2006)物源启动的水力临界条件。

填土物质材料是导致泥石流灾害的关键物源。研究区流域内松散固体物源加上弃土场所在次级沟谷人工堆积体估算储量约 $2.20 \times 10^6 \text{ m}^3$,且研究区弃土场黏性土占比达60%(淤泥+杂填土),其中40%为高亲水性淤泥质土。根据《水土保持工程调查与勘测标准》(GB/T 51297—2018),含黏粒量超过30%的堆渣体需强化渗透稳定性监测,而该场地的非均质特性加剧了潜在滑动面发育风险。参照《岩土工程勘察规范》(GB50021)黏性土渗透性分级标准,此类高黏粒含量土体在饱和状态下抗剪强度劣化显著。

研究区稳定性受地形、物质、水文多因素影响,极端降雨情况下可能发生溃坝,引起堆填体整体失稳,进而触发泥石流。

2 结果与分析

2.1 满库条件下弃土场稳定性分析与评价

2.1.1 数值模型构建

基于无人机高精度扫描数据与地质勘察资料,

运用 ArcGIS 处理所采集数据模拟弃土场满库容(堆填体积 $2.20 \times 10^6 \text{ m}^3$)情景,并采用有限差分法建立三维精细化数值模型(图 5)进行稳定性分析。弃土场现状堆填弃土类型共有 4 类,分别为碎块回填土、强风化回填土、地铁建设淤泥以及陶瓷厂废料。模型涵盖弃土体、拱坝以及下伏基岩 3 个部分。下伏基岩采用 Mohr-Coulomb 本构模型,堆填体考虑非饱和一饱和状态转变特性,拱坝结构按线弹性体模拟。堆填体和拱坝安全系数采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 模型以及强度折减法进行计算。

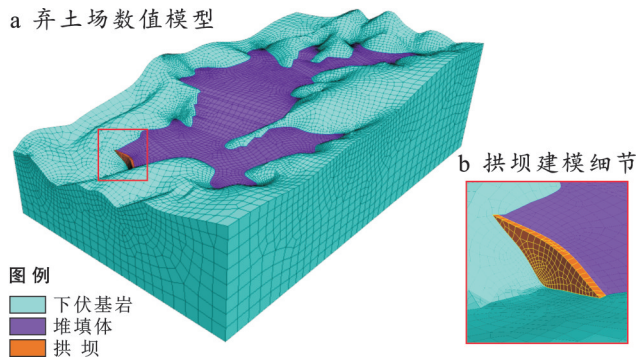


图 5 弃土场三维数值模型

Fig.5 Three-dimensional numerical model of spoil site

将淤泥、陶瓷废料和杂填土现状混合堆填比例至满库记为工况 1,用于研究弃土场现状堆填方式满

库条件下稳定性及泥石流的特征和危险强度。结合工况 1,将地铁建设淤泥和陶瓷废料分别单一堆填考虑为工况 2 和工况 3,用于分析和讨论建筑弃土场物料成分对弃土场稳定性以及泥石流运动特征和危险强度的影响。

2.1.2 极端降雨情况设置

2016 年超强台风“尼伯特”引发极端降雨事件,坂东镇等区域过程降雨量达 473 mm,最大 3 h 雨量 245 mm;2023 年台风“杜苏芮”在福州市最高降雨量达 444.5 mm;而同年台风“海葵”突破福州历史极值,单日累计雨量达 548.9 mm,其短历时强度尤为突出(雨量 3 h 达 334.1 mm,6 h 达 418.5 mm),远超“杜苏芮”同期水平。故本次模拟为充分研究弃土场在遭遇特大暴雨极端情况可能存在的灾害隐患,设置降雨条件为 20 mm/h 持续 24 h,总降雨量达 480 mm。结合地质勘察与室内试验数据确定岩土参数以及各岩土层渗透参数(表 1、表 2),包括容重(γ)、弹性模量(E)、泊松比(μ)、黏聚力(c)、内摩擦角(φ)、渗透系数、孔隙率和比奥系数。岩土层的物理力学参数和渗透参数为场地建设之初专业勘察报告、前人针对该场地已进行的研究以及本次研究进行室内外试验获得。计算时将岩土体视为不可压缩,故比奥系数全按 $\alpha=1$ 取值,拱坝排水管道堵塞失效,渗透率设置为极小值。

表 1 稳定性模拟采用岩土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil layers adopted in stability simulation

材料类型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		$E/(\text{MPa})$	μ	$c/(\text{kPa})$		$\varphi/(\text{°})$	
	天然	饱和			天然	饱和	天然	饱和
下伏基岩	23		2.00×10^4	0.28	60		40	
碎块回填土	22	22.5	75	0.30	0	0	35	30
强风化回填土	20	21	8	0.35	20	16	30	24
地铁建设淤泥	19	20	2	0.42	15	13	10	8
陶瓷厂废料	20	22	6	0.35	22	18	26	22
拱坝	25		2.50×10^4	0.20	84		57	

表 2 各岩土层渗透参数
Table 2 Permeability parameters of each rock and soil layer

岩土层	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙率	天然 饱和度	比奥 系数
下伏基岩	8.00×10^{-8}	0.21	1.00	1
地铁建设淤泥	2.10×10^{-8}	0.35	0.67	1
陶瓷生产废料	3.00×10^{-3}	0.43	0.46	1
强风化回填土	4.00×10^{-6}	0.41	0.49	1

进行降雨入渗模拟时,为准确反映降雨入渗对弃土场稳定性的影响,结合工程实际做出以下假设:

①堆填体假设为各向同性均质连续介质,并忽略土体压缩变形;②重点聚焦于降水入渗,忽略植被蒸腾效应与根系吸水;③将实际降雨强度简化为恒定入渗,提高计算效率;④模型底部边界为完整中风化凝灰岩,故设定为不透水边界。

2.1.3 稳定性模拟结果

拱坝和堆填体的安全系数如图 6、图 7 和表 3 所示。天然状态下,工况 1 拱坝区域折减系数达 1.5 时,出现了潜在的破坏面。极端降雨条件下拱坝安全系数降至 1.087,降幅达 20.2%。工况 1,2,3 在极端降

雨条件下拱坝区域皆处于临界状态。天然状态下工况 1 堆填体安全系数明显高于工况 2 和工况 3。极端降雨条件下工况 1 堆填体安全系数降至 1.214 欠稳定状态,工况 2 和工况 3 堆填体安全系数降至 1 以下发生失稳。

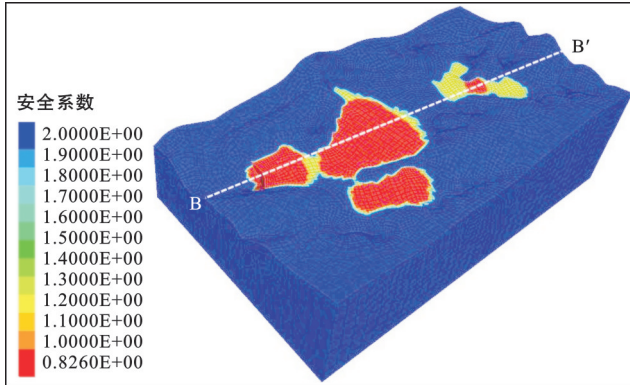


图 6 弃土场满库极端降雨条件安全系数云图

Fig.6 Safety factor contour nephogram of spoil ground under full-reservoir extreme rainfall conditions

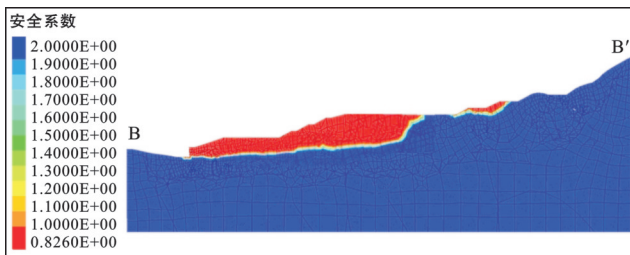


图 7 弃土场 BB' 安全系数云图剖面

Fig.7 Safety factor contour map at BB' cross-section of spoil ground

在极端条件下工况 1—3 拱坝安全系数皆处于临界状态,降雨入渗增大堆填体孔隙水压力,减弱土体强度,严重降低了堆填体稳定性(图 6、图 7),显著增加拱坝坝后压力。此外,堆填体失稳下滑产生的动态荷载(冲击力、推力)也可能作用于拱坝,加剧拱坝破坏过程。拱坝破坏溃决后,在高孔隙水压力的影响下,堆填体可能形成整体性失稳,转变为泥石流灾害。安全系数计算结果表明(表 3),混合堆填方式堆填体稳定性明显优于单一堆填方式,且满库情景下强降雨易诱发溃坝和堆填体失稳,进而导致泥石流起动。

2.2 满库条件下泥石流预测与评价

2.2.1 高精度数字地形模型建立

集成先进陆地观测卫星(12.5 m 分辨率)与无人机航测(0.5 m 分辨率)数据,卫星 DEM 与无人机点云数据空间配准采用基于地面控制点的特征匹配算法,结合无人机高精度 RTK 定位数据进行坐标系统

一;地形修正模型通过融合点云滤波生成的局部高精度 DSM,利用克里金残差修正消除卫星 DEM 的低频地形误差;通过 ArcGIS 实现多尺度数据拼接,采用不规则三角网(TIN)算法优化地形表达,经栅格重采样生成 5 m×5 m 精度均匀网格 ASCII 格式地形文件,有效平衡 Massflow 软件 10 万网格计算上限与地形细节保留需求。模型覆盖弃土场及下游 1 km 潜在影响区,确保模型能完整地模拟泥石流运动全过程。

表 3 弃土场各区域安全系数变化

Table 3 Variation of safety factor in spoil dump area

工况	堆填体		拱坝	
	天然状态	极端降雨	天然状态	极端降雨
工况 1	1.584	1.172	1.363	1.049
工况 2	1.095	0.826	1.274	1.002
工况 3	1.257	0.959	1.295	1.034

2.2.2 模型参数设定

Massflow 软件内置库伦模型可模拟滑坡、碎屑流等灾害运动特征。考虑典型山区建筑弃土场特点和岩土物理参数,选用库伦模型开展模拟。相关参数包括黏聚力、内摩擦角、基底摩擦系数和孔隙水压力。

综合试验取值、现场实际堆填情况以及前人研究,确定工况 1—3 模拟采用参数见表 4。泥石流容重(γ)与内摩擦角(φ)参照表 1 土体饱和情况取值;摩擦系数(f)取值为内摩擦角的正切值;在极端情况下弃土场处于超饱和状态,黏聚力(c)接近 0;超孔隙水系数(λ)范围一般在 0.6~0.8 之间,基于场地实际情况与极端降雨天气模拟 λ 取值 0.72^[30-31]。模型时间剖分采用变步长离散,基于 MacCormack-TVD 有限差分方法计算。

表 4 泥石流模拟采用参数

Table 4 Parameters used in debris flow simulation

工况	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$	f	$c/(kPa)$	λ
工况 1	21	16	0.287	0	0.72
工况 2	20	8	0.141	0	0.72
工况 3	22	22	0.404	0	0.72

2.2.3 泥石流运动过程分析

图 8 所示为工况 1 在时间步长为 0, 10, 50, 100, 150 和 200 s 的模拟结果。

运动初期(0—10 s),受重力势能驱动,前缘堆积厚度变化显著,由初始最大厚度 19.8 m 骤降至 15.6 m,随后进入沿主沟方向的蠕滑阶段。弃土在 50 s 突破出山口,经 100—200 s 沟口泛滥堆积后完全

停止运动,形成主沟中游集中堆积(最大厚度 19.2 m, 平均 8.9 m)与沟口次生堆积的复合沉积体系。模拟

结果表明,整体过程呈现突发性泥石流运动特征,其演化过程具有显著时空分异规律。

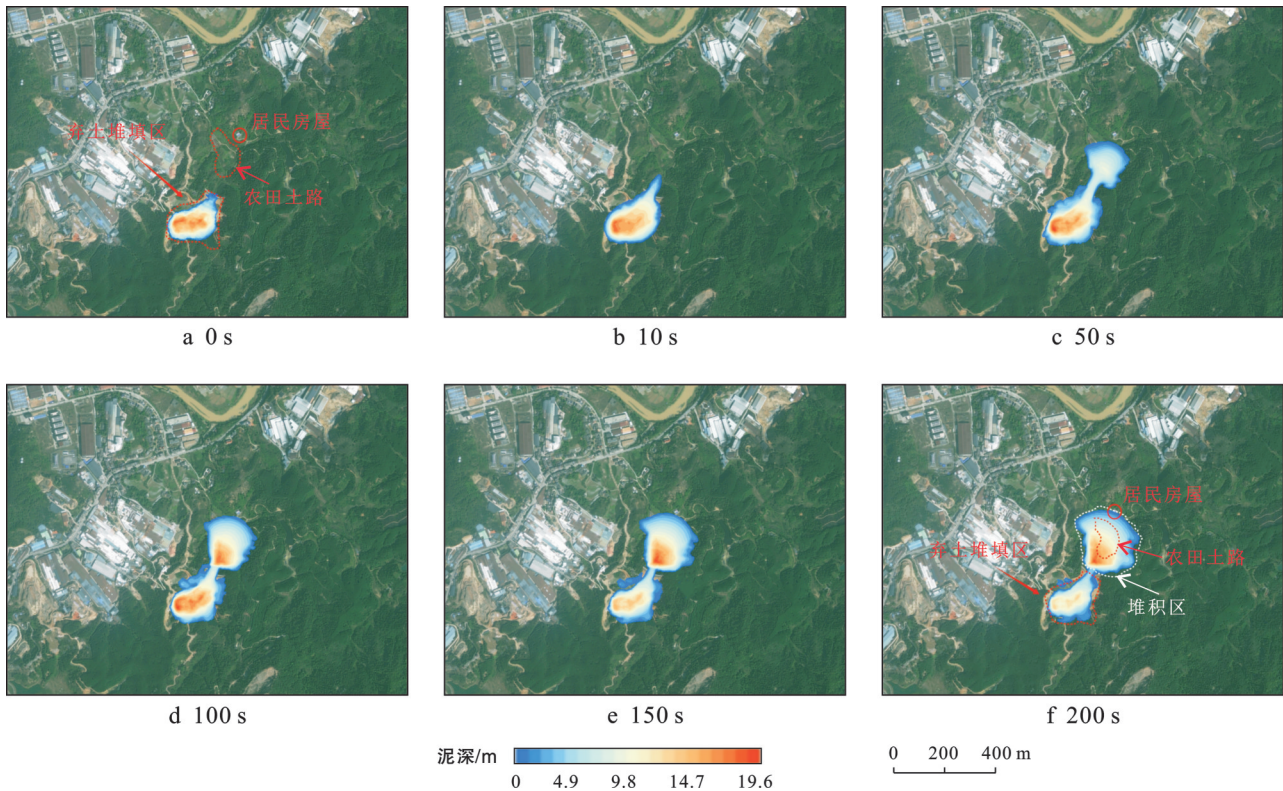


图 8 工况 1 不同时间堆填体泥深

Fig.8 Burial depth of mixed stacking body at different times under case 1

根据表 5 数据综合分析,现状混合堆填(工况 1)导致的泥石流关键运动特征显著不同于单一堆填(工况 2, 3)的结果。工况 1 的泥石流运移距离(356.0 m)为工况 2 的 52.8% 和工况 3 的 65.3%,形成局部高密度堆积特征。这种运动特性使主要淤埋区域集中于沟口段 5.4~19.1 m 的沉积带,有效避免了工况 2(低泥深大范围广域浅层淤埋)和工况 3(深槽浅滩式扩散)造成的连片农田淹没问题。工况 1 导致的居民建筑受灾程度(1 栋民房)低于工况 2(10 栋民屋)和工况 3(6 栋民屋)。

表 5 不同工况下关键参数比较分析

Table 5 Comparative analysis of key parameters under different cases

参数指标	工况 1	工况 2	工况 3
最大泥深/m	19.2	8.2	12.7
峰值速度/($m \cdot s^{-1}$)	21.04	25.36	18.73
运移距离/m	356.0	674.8	545.4
堆积范围/ m^2	82 838.9	186 967.3	155 744.1

2.2.4 泥石流流速泥深分析

为揭示泥石流在不同空间的动力特征,在工况 1 最终堆积形态的前缘、中部及后缘特征区段布设 6 个

监测点位(图 9),系统性捕捉泥石流 200 s 内运动速度与堆积厚度,用于解析泥石流在不同区段的动力特征及能量传递规律。

图 10 表明,泥石流整体过程呈现明显时空分异特征。在流速方面, T_1 — T_3 监测点揭示溃坝后泥石流内部动力学差异:形成区后缘(T_1)受扰动最小,中部(T_2)峰值速度 2.89 m/s,前缘(T_3)以 10.28 m/s 高速起动并主导初期运动。流通区(T_4)在 20 s 出现 21.04 m/s 冲击极值,反映高势能转化形成的超常动力;堆积区后缘(T_5)在 20 s 达 10.40 m/s 后急剧衰减,前缘(T_6)则在 40 s 后仅残余不足 1 m/s 的蠕滑运动。整个流速演化呈现“瞬时加速—高速冲击—稳定蠕滑—减速堆积”四阶段模式,整体符合泥石流运动特征。

图 11 表明,形成区后缘(T_1 和 T_2)因物质流失导致厚度持续下降,前缘(T_3)受后续物质补给出现短暂增厚;流通区(T_4)在 100 s 内堆积厚度呈现波动递增,反映泥石流的波动特性;堆积区后缘(T_5)的厚度在 20 s 突增后变化缓慢,前缘(T_6)则因能量耗散仅形成浅层沉积。弃土主体沿主沟道形成厚度 5.4~19.1 m 连续堆积带。



图 9 模型中监测点布置

Fig.9 Layout of monitoring points in model

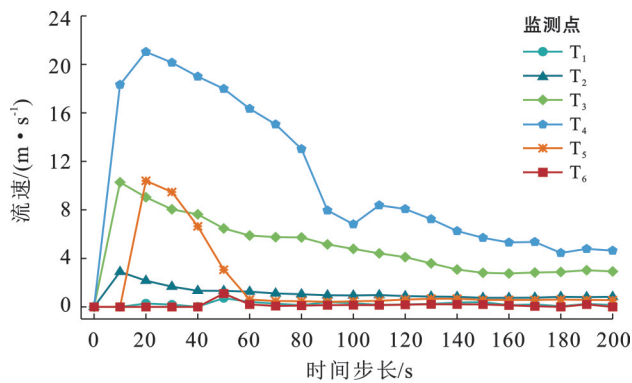


图 10 监测点流速

Fig.10 Monitoring point flow velocity

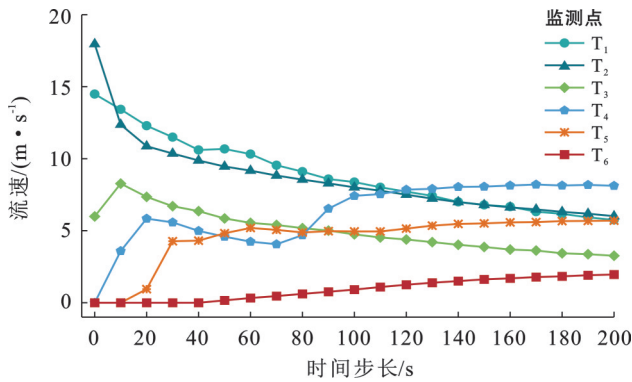


图 11 监测点泥深

Fig.11 Monitoring point flow depth

2.2.5 泥石流危险强度分区

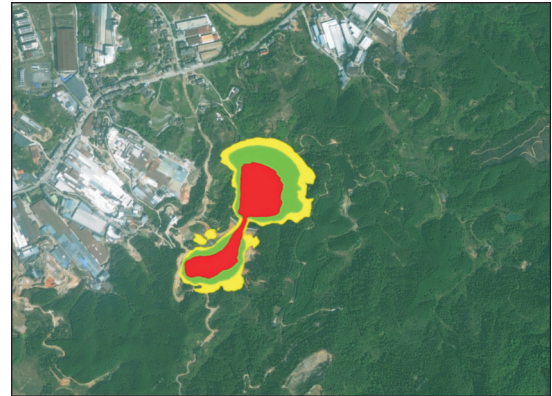
根据常鸣^[32]建立泥石流强度影响及危险强度分区标准(表 6),对典型山区建筑弃土场溃坝后的泥石流灾害进行危险强度分区。该危险分区标准的泥深(H)阈值($H \geq 2.5$ m)与《泥石流灾害防治工程勘查规范》基本一致,且通过引入H和最大流速(V)乘积作为判据,提出了更侧重动力学特征的简化评价方法。

运用 ArcGIS 对模拟结果进行后处理,得到危险强度分区结果(图 12)。

表 6 危险强度划分标准

Table 6 Classification criteria for hazard intensity

溃坝后危险强度	泥深/m	关系	泥深与最大流速乘积/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)
高度	$2.5 \leq H$	或	$2.5 \leq HV$
中度	$0.5 \leq H < 2.5$	和	$0.5 \leq HV < 2.5$
低度	$0.0 \leq H < 0.5$	和	$HV < 0.5$



危险强度分区
 低危险度区 中危险度区 高危险度区
 200 m

图 12 工况 1 灾后危险强度分区

Fig.12 Post-disaster hazard intensity zonation for case 1

综合以上分析,在泥深厚、流速大的地方危险性也较高,符合表 5 的危险强度划分规则。工况 1 中高危险强度区占 43.54%,中危险强度区占 30.37%,低危险强度区占 26.09%。低危险强度区和中危险强度区主要集中在弃土场后缘和泥石流龙头处,高危险强度区主要集中在弃土场中部以及泥石流主沟内部。模拟结果显示,泥石流危险区覆盖 1 处居民房屋。

工况 2 和工况 3 的泥石流危险强度分区如图 13 所示。结果显示,单一淤泥堆填工况高危险强度区占 41.32%,虽占比略小于工况 1,但实际面积却是工况 1 的 2.1 倍;单一陶瓷生产废料堆填工况高危险强度区占 53.22%,实际面积为工况 1 的 2.3 倍。

3 讨论

3.1 物料混填现状对弃土力学强度的影响

结合不同工况数值模拟结果,从泥石流的致灾效应考虑,混合堆填总体优于单一废料堆填。根据室内土工试验数据可知(图 14),现状混填比例土体孔隙率由单一材料 0.35,0.41(表 2)降低至 0.30,渗透率为 1.20×10^{-6} m/s。混合堆填将 3 种废料混合,弃土颗粒级配更优,孔隙率、渗透性与力学强度均发生了改变。粗细混合的土体可形成以粗粒料作为“骨架”,细粒料作为发挥填充和咬合作用的“基质”。这种复合结构体系不仅可以实现材料密实度的提升,同时强化了粗细颗粒界面间的黏结性能^[33]。

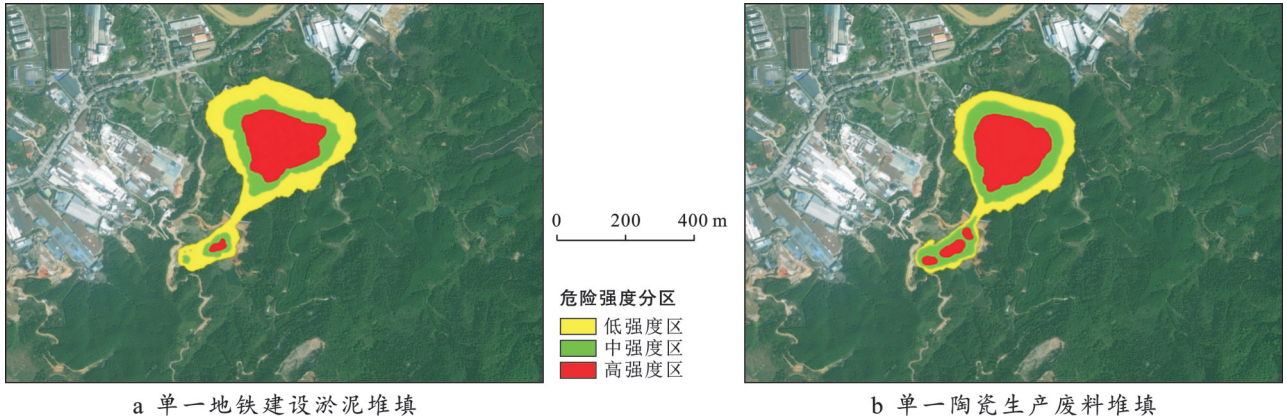


图 13 工况 2 和工况 3 灾后危险强度分区

Fig.13 Post-disaster hazard intensity zonation for cases 2 and 3

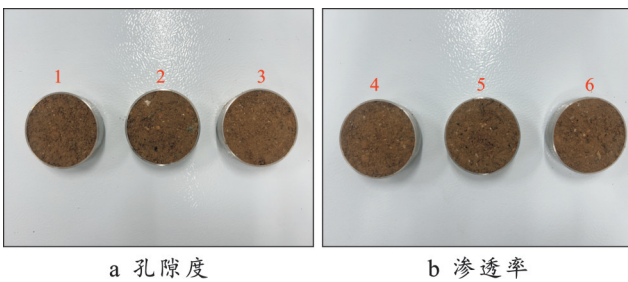


图 14 室内土工试验环刀取样

Fig.14 Ring knife sampling for in-house geotechnical tests

混合堆填工况中,地铁建设淤泥和杂填土可以充填陶瓷废料孔隙,实现优势互补。淤泥渗透性差,力学强度低;陶瓷废料渗透性好,不同废料单体之间黏聚力低,整体抗剪强度主要受内摩擦角影响^[33]。相比

于单一淤泥堆填,混合堆填具有更高黏聚力、内摩擦角及其他力学强度;相比于单一陶瓷废料堆填,混合堆填可降低陶瓷废料孔隙率和渗透性,提升陶瓷废料整体黏聚力。此外,较小的孔隙率和渗透性可有效降低孔隙水压力积聚速率^[34],使其达到临界饱和状态所需时间延长,延长土体抗剪强度衰减过程。

3.2 物料混填比例变化对泥石流运动特征的影响

为进一步分析物料混填比例对泥石流的影响,增设工况 4(10% 杂填土,30% 地铁建设淤泥,60% 陶瓷生产废料)与工况 5(10% 杂填土,60% 地铁建设淤泥,30% 陶瓷生产废料),图 15 为工况 2—5 泥石流最后时刻的泥深空间分布,其中红色虚线表示工况 1 泥石流最后时刻在坝后的堆积范围。

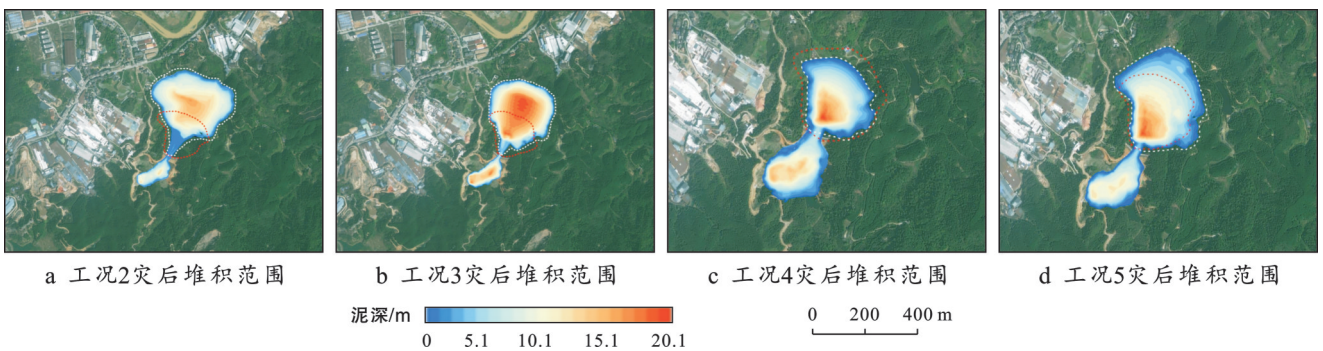


图 15 工况 2—5 满库极端降雨情景灾害泥深

Fig.15 Disaster deposition depth under full-reservoir extreme rainfall scenarios for cases 2—5

模拟结果表明,混合堆填通过材料互补效应显著改变泥石流堆积特征,泥石流堆积范围和最大泥深总体上成反比。单一淤泥堆填(工况 2)因细颗粒含量高、渗透系数低,极端降雨时排水失效引发快速饱和,抗剪强度大幅降低,呈流塑态运移^[35],形成“低强度,大范围”灾害模式;单一陶瓷废料堆填虽因陶瓷废料粗颗粒占比高、排水性强,但粒间孔隙率大导致局部积水诱发非均匀破坏,高内摩擦角延缓了运

动速度但加剧了冲击破坏力^[35]。当陶瓷废料占比提升至 60%(工况 4),堆积范围较工况 1 缩减,最大泥深增加;淤泥占比增至 60%(工况 5)则堆积范围扩大,最大泥深减小。可见在弃土场混合堆填中,淤泥含量越高,致灾范围越大。

因此,弃土场泥石流运动核心机制在于运动中细颗粒对粗颗粒的相互作用^[35]。细颗粒是影响泥石流运动均质性的重要因素,能够限制粗颗粒之间发生明

显的相对运动。工况1,4,5泥石流粗细颗粒之间的摩擦作用较大,重力势能转化为内摩擦力做功较多而转化为动能较少,降低泥石流影响范围;工况2,3缺乏粗细颗粒的相互作用,重力势能转化为内摩擦力做功较少而转化为动能较多,泥石流影响范围较大^[35]。

3.3 物料混填现状下关键模型参数敏感性分析

为进一步揭示物料成分对弃土场泥石流的影响,开展了相关参数的敏感性特征研究,采用单因素局部敏感性分析法对工况1的泥石流运动特征指标

(包括最大泥深、最大流速和最远距离)开展局部敏感性分析。选取 φ , γ 及 λ 作为敏感性因子,以工况1参数为基准值(表4),分别按 $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ 调整参数值,共设计18组变化工况。

取曲线斜率作为敏感性依据,计算均值可获得弃土场泥石流运动特征的敏感性因子排序为: $\varphi > \lambda > \gamma$ 。敏感性结果表明(图16),通过粗颗粒掺杂优化级配可增大 φ ,保障弃土场排水系统效能可有效减小 λ ,可有效抑制泥石流灾害强度。

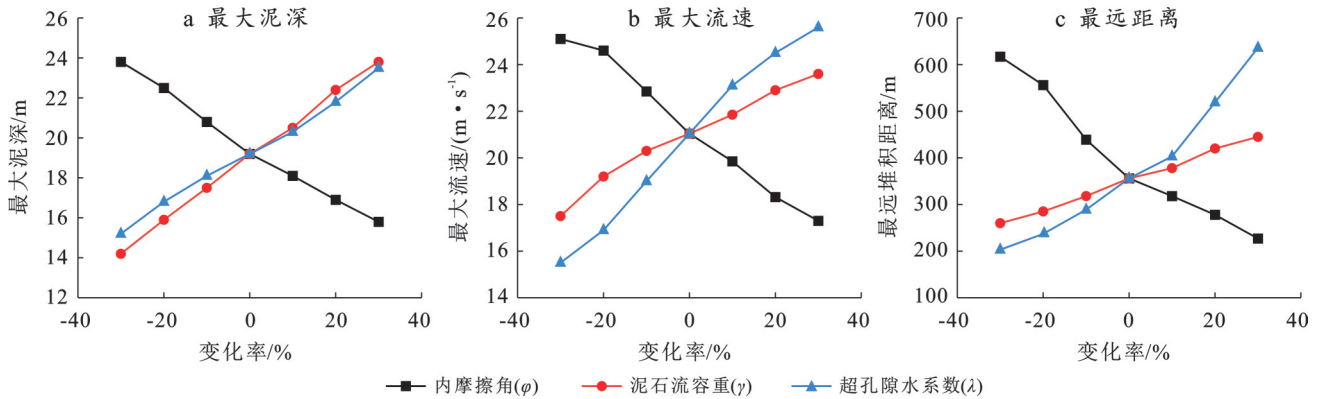


图16 泥石流敏感性曲线

Fig.16 Sensitivity curves of debris flow parameters

山区建筑弃土场在极端降雨条件下具有溃坝,整体失稳、进一步诱发泥石流的风险。本文分析锁口拱坝和堆填体在极端降雨条件下的稳定性,对不同堆填工况下泥石流的运动特征及危险强度分区等方面进行了系统性研究,但仍然存在一些不足。第一,虽然揭示了通过调整物料混填比例可削弱溃坝后泥石流的影响范围,但并未对该比例开展优化研究;第二,建筑弃土场物料成分较多,不同物料之间在堆填体稳定性及泥石流运动过程中协同作用机制尚未清晰,需要进一步研究。

4 结论

(1) 研究区弃土场物料混填的稳定性优于单一堆填方式。场地在满库和极端降雨条件下拱坝的安全系数可降至1.049,存在溃坝风险;溃坝后可能转化为沟谷泥石流,形成坝体垮塌—填筑体失稳—沟谷泥石流灾害链。

(2) 物料现状混填工况下溃坝后堆填体运动符合泥石流运动特征,预测最大运移速率达21.04 m/s。弃土物源以坡面流形式沿主沟道运移,形成最大淤积深度19.15 m,平均深度8.94 m的堆积区,影响范围可达356 m,对下游农田、土路及居民建筑造成淤埋威胁。

(3) 现状混填工况下高危险强度区占比43.54%,集中分布于主沟道中段(泥深5.4~19.1 m,流速峰值

区);其高危险强度区范围(36 068.1 m²)明显小于采用单一的淤泥堆填(77 254.9 m²)或陶瓷废料堆填(82 887.0 m²)的工况。

(4) 弃土场泥石流运动特征的敏感性因子排序为:内摩擦角>超孔隙水系数>容重。物料混填比例对泥石流运动特征有重要影响,通过改变物料混填比例可影响泥石流的运动特征,从而减小致灾强度。

参考文献 (References)

- [1] Huang Yu, Dai Zili, Zhang Weijie, et al. SPH-based numerical simulations of flow slides in municipal solid waste landfills [J]. Waste Management & Research, 2013, 31(3):256-264.
- [2] Huang Yu, Dai Zili. Large deformation and failure simulations for geo-disasters using smoothed particle hydrodynamics method [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 86-97.
- [3] Huang Yu, Zhu Chongqiang. Simulation of flow slides in municipal solid waste dumps using a modified MPS method [J]. Natural Hazards, 2014, 74(2):491-508.
- [4] 刘传正.深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):1-5.
Liu Chuazheng. Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong'ao dumping place in Shenzhen, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Con-

- trol, 2016, 27(1):1-5.
- [5] 高杨. 人工堆填体滑坡远程滑动机理研究: 以深圳光明新区滑坡为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Gao Yang. The study on long run-out mechanism of artificial landfill landslide [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [6] Ouyang Chaojun, Zhou Kaiqi, Xu Qiang, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China [J]. Landslides, 2017, 14(2):705-718.
- [7] 刘海知, 马振峰, 范广洲. 四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):73-77.
Liu Haizhi, Ma Zhenfeng, Fan Guangzhou. Relationship between landslide/debris flow and rainfall in typical region of Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(6):73-77.
- [8] 郭剑. 滑坡-泥石流灾害链形成及转化机制研究[D]. 陕西西安: 长安大学, 2022.
Guo Jian. Research on formation and transformation mechanism of landslide-induced debris flow disaster chain [D]. Xi'an, Shaanxi: Changan University, 2022.
- [9] 戴维森. 弃土场松散堆积体边坡稳定性研究[D]. 河北石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
Dai W S. Study on slope stability of loose accumulation body in spoil ground [D]. Shijiazhuang, Hebei: Tiedao University, 2024.
- [10] 赵立财. 降雨条件下弃土场滑坡力学参数敏感性反演研究[J]. 地质与勘探, 2023, 59(3):627-636.
Zhao Licai. Sensitivity inversion of landslide mechanical parameters in spoil ground under rainfall conditions [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(3):627-636.
- [11] 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6):281-287.
Li Yu, Gan Binrui, Wang Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6):281-287.
- [12] 周易辰, 陈华勇, 阮合春, 等. 沟道堆积体失稳破坏引发泥石流的起动机理研究进展[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(5):1-11.
Zhou Yichen, Chen Huayong, Ruan Hechun, et al. Research progress on initiation mechanism of debris flow triggered by the destabilisation of gully loose deposits [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(5):1-11.
- [13] 汪超. 贵州省泥石流与下垫面因素关系分析[J]. 贵州气象, 2010, 34(3):11-14.
Wang Chao. Analysis on the relationship between debris flow and underlying surface factors in Guizhou Province [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2010, 34(3):11-14.
- [14] 周小军, 向灵芝, 郝春华. 杨家屋场桥下弃土型泥石流调查与防治设计[J]. 路基工程, 2020(5):188-194.
Zhou Xiaojun, Xiang Lingzhi, Hao Chunhua. Field investigation on spoil triggered debris flow under Yangs village bridge and the engineering prevention design [J]. Subgrade Engineering, 2020(5):188-194.
- [15] 周海波, 李双江. 公路弃渣次生泥石流成灾机制及防护措施[J]. 四川地质学报, 2020, 40(1):130-136.
Zhou Haibo, Li Shuangjiang. Genetic mechanism and control measures of road waste debris flow [J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(1):130-136.
- [16] 崔纯纯, 陈宁生, 王元欢, 等. 地震灾区新建蒲虹公路弃土泥石流成灾特征与防治建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(2):7-10.
Cui Chunchun, Chen Ningsheng, Wang Yuanhuan, et al. Characteristics and prevention strategy of spoil debris flow along newly-built Puyang-Hongkou highway in earthquake-stricken area [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(2):7-10.
- [17] 龙飞, 龚诚, 黄海, 等. 藏东南直白沟冰崩型泥石流孕灾条件与动力特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6):31-38.
Long Fei, Gong Cheng, Huang Hai, et al. Formation conditions and dynamic characteristics of debris flow triggered by an ice avalanche at Zhibai gully in southeast Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):31-38.
- [18] 裴来政, 谭建民, 李明, 等. 安化县澄坪村“7·16”泥石流形成机理及其动力学特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):34-37.
Pei Laizheng, Tan Jianmin, Li Ming, et al. Formation mechanism and dynamic characteristics of chengpin debris flow on July 16, in Anhua County of Hu'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):34-37.
- [19] 李林, 李涛, 何治林, 等. 基于试验模拟的滑坡泥石流灾害链风险监测预警[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2):167-175.
Li Lin, Li Tao, He Zhilin, et al. Monitoring and early warning of landslide and debris flow disaster chain risk based on experimental simulation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2):167-175.
- [20] 唐海, 唐川, 陈明, 等. 强震区泥石流防治工程效果数值模拟分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4):196-201.
Tang Hai, Tang Chuan, Chen Ming, et al. Numerical simulation and analysis of debris flow prevention engineering effects in strong earthquake area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4):196-201.

- [21] Savage S B, Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989,199:177-215.
- [22] Wang Guangjin, Tian Sen, Hu Bin, et al. Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams [J]. *Water*, 2019,11(11):2388.
- [23] Ouyang Chaojun, He Siming, Xu Qiang, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 52:1-10.
- [24] Wang Dongpo, Zhou Ye, Pei Xiangjun, et al. Dam-break dynamics at Huohua Lake following the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China [J]. *Engineering Geology*, 2021,289:106145.
- [25] 熊朝正,吉锋,石豫川.基于Massflow模型的青龙沟台风暴雨型泥石流运动特征研究[J].*人民珠江*,2023,44(3):17-22.
Xiong Chaozheng, Ji Feng, Shi Yuchuan. Movement characteristics of typhoon rainstorm-triggered debris flow in Qinglong gully based on massflow model [J]. *Pearl River*, 2023,44(3):17-22.
- [26] 周琪,许强,周书,等.基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究:以黑方台陈家8[#]滑坡为例[J].*山地学报*,2019,37(4):528-537.
Zhou Qi, Xu Qiang, Zhou Shu, et al. Movement process of abrupt loess flowslide based on numerical simulation: A case study of Chenjia 8[#] on the Heifangtai Terrace [J]. *Mountain Research*, 2019, 37(4): 528-537.
- [27] 王学良,孙娟娟,周书,等.尾矿库溃坝运动特征模拟研究[J].*工程地质学报*,2019,27(1):144-151.
Wang Xueliang, Sun Juanjuan, Zhou Shu, et al. Numerical simulation study on movement characteristics of tailings dam break [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019,27(1):144-151.
- [28] 丁邦政.基于GIS和Massflow仿真的尾矿库溃坝危害下的桥梁风险评估[D].湖北 武汉:华中科技大学,2019.
Ding Bangzheng. Bridge risk assessment under tailings dam failure hazard with GIS and massflow simulation [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [29] 林小莉,刘英,张清凌,等.基于无人机航空摄影的尾矿库溃坝数值模拟[J].*水利水电技术(中英文)*,2021,52(5):71-81.
Lin Xiaoli, Liu Ying, Zhang Qingling, et al. UAV aerial photography-based numerical simulation on failure of tailings reservoir dam [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021,52(5):71-81.
- [30] 刘建麟,吕义清,徐博.基于MacCormack-TVD有限差分算法的二维泥石流数值计算模型[J].*科技通报*, 2019,35(4):222-228.
Liu Jianlin, Lv Yiqing, Xu Bo. Two dimensional debris flow numerical calculation model based on maccormack-tvd finite difference algorithm [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019,35(4):222-228.
- [31] 任赞松.尾矿库坝体稳定性与溃坝危险性评价:以洛阳大沟河尾矿库和攀枝花白马尾矿库为例[D].四川 成都:成都理工大学,2018.
Ren Zansong. Assessment of the stability of tailings dam and the risk of dam failure [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2018.
- [32] 常鸣,窦向阳,唐川,等.降雨驱动泥石流危险性评价[J].*地球科学*,2019,44(8):2794-2802.
Chang Ming, Dou Xiangyang, Tang Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2794-2802.
- [33] 孔静雯.矿渣型泥石流的起动过程与机理研究[D].陕西 西安:长安大学,2023.
Kong Jingwen. Study on starting process and mechanism of mine waste debris flow [D]. Xi'an, Shaanxi: Changan University, 2023.
- [34] 何晓英,张展,于泽清,等.两相物质组成对泥石流固相流速特征的影响[J].*科学技术与工程*,2024,24(16):6617-6625.
He Xiaoying, Zhang Zhan, Yu Zeqing, et al. Effects of the two-phase compositions on the solid-phase velocity of debris flows [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(16):6617-6625.
- [35] 吕庆贤.粗颗粒泥石流的流动行为试验研究[D].云南 昆明:昆明理工大学,2024.
Lv Qingxian. Experimental study on flow behavior of coarse-grained debris flow [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2024.