

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241023005

2024年7·10湖北秭归张家红屋场滑坡基本特征 与成因机制研究*

邓茂林^{1,2}, 彭旭^{1,2}, 魏东³, 左清军^{1,2}, 梁之康^{1,2}, 周梦婷^{1,2},
苏鹏民^{1,2}, 朱晓涵^{1,2}, 李雨洲^{1,2}, 童率^{1,2}

(1. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北宜昌 4430021; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002; 3. 湖北省水文地质工程地质勘察院, 湖北宜昌 443000)

摘要: 为了深入研究张家红屋场滑坡的形成过程和成灾机理, 为我国山区存在类似条件的地质灾害隐患点的减灾防灾工作提供理论依据和实践指导, 通过现场调查和钻孔资料分析, 结合降雨数据和数值模拟方法, 探讨滑坡发生的动力学过程和成因机理。现场调查及钻孔资料分析结果表明, 滑坡滑体物质为第四系碎石土, 土石比6:4; 滑面为基覆界面呈“光面”型特征, 坡体后缘汇水面积为27 545 m²。数值模拟结果表明, 7月3~4日累计16 h的持续降雨造成滑坡稳定性大幅下降, 7月9日的强降雨作用直接导致该滑坡发生破坏。初步研究认为, 滑坡位于秭归向斜西翼的单面斜坡上, 松散的第四系碎石土和“光面”型的基覆界面是该滑坡发生的内因; 前期的7月3~4日累计212 mm的持续降雨和7月9日高达170 mm的强降雨、滑坡外侧大面积坡体降雨汇集地表径流进入滑坡体、滑坡体坡表排水系统废弃为该滑坡发生的外因。

关键词: 浅层土质滑坡; 光面型; 强降雨; 数值模拟; 成因机制

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0329-09

Study on Basic Characteristics and Genesis Mechanisms of Zhangjiahongwuchang Landslide in Zigui, Hubei on July 10, 2024

DENG Maolin^{1,2}, PENG Xu^{1,2}, WEI Dong³, ZUO Qingjun^{1,2}, LIANG Zhikang^{1,2},
ZHOU Mengting^{1,2}, SU Pengmin^{1,2}, ZHU Xiaohan^{1,2}, LI Yuzhou^{1,2}, TONG Shuai^{1,2}

(1. National Field Science Observation and Research Station of Three Gorges University, Yichang 4430021, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Yichang 443002, China; 3. Institute of Hydrogeology and Engineering Geological Survey of Hubei Province, Yichang 443000, China)

Abstract: At about 11:00 a.m. on July 10, 2024, a shallow soil landslide triggered by heavy rainfall occurred in Sanxingdian Village, Shazhenxi Town, Zigui County, Yichang City, Hubei Province. The landslide volume was approximately 30×10^4 m³. Thanks to the timely detection by community-based monitoring and prevention staff, 206 individuals from 74 households were successfully evacuated. To investigate the formation process and disaster-inducing mechanism of Zhangjiahongwuchang Landslide, this study explored its dynamic processes and genesis mechanisms through field surveys, bore-

* 收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2025-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(42172303)、河北省自然科学基金(D2023403055)资助

作者简介: 邓茂林(1980—), 男, 副教授, 博士。主要从事地质灾害机理研究。E-mail: 624350911@qq.com

通信作者: 梁之康(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事地质灾害机理研究。E-mail: 1627410149@qq.com

hole data analysis, rainfall data, and numerical simulations. The results of field surveys and borehole data analysis showed that the landslide material consisted of Quaternary gravelly soil with a soil-to-rock ratio of 6:4. The sliding surface was characterized by a "smooth" bedrock-overburden interface, and the catchment area at the rear edge of the slope was 27 545 m². Numerical simulation results demonstrated that 16 hours of cumulative rainfall from July 3rd to July 4th led to a significant decrease in landslide stability, and the heavy rainfall on July 9th directly triggered landslide failure. Preliminary research suggested that the landslide was located on a unilateral slope on the western flank of the Zigui Syncline. Loose Quaternary gravelly soil and a "smooth" bedrock-overburden interface were internal factors triggering this landslide. External factors included cumulative rainfall of 212 mm from July 3rd to July 4th and heavy rainfall of 170 mm on July 9th, surface runoff from rainfall on the extensive slope outside the landslide that converged into the landslide mass, and abandoned drainage systems on the slope surface of the landslide mass.

Keywords: shallow soil landslide; smooth surface; heavy rainfall; numerical simulation; genesis mechanism

0 引言

2024年7月10日11时,湖北省宜昌市秭归县沙镇溪镇场镇西侧三星店村发生浅层土质滑坡,滑坡滑面为“光面”型基覆界面,滑坡发生前未纳入地质监测预警系统。此类滑坡一般发生在单斜顺向斜坡中,在土-岩交界面形成一个光滑斜面,坡度多为10°~30°,滑床为光面,土体厚度多小于10 m,因此将这类滑坡界定为“光面型”浅层土质滑坡。此类滑坡隐蔽性高、突发性强,对周围居民的生命和财产威胁性大,特别是在强降雨作用下,极易发生滑坡,造成难以估计的损失。

目前,国内外一些学者对此类滑坡进行了研究。张群等^[1]通过设计室内降雨入渗实验,建立A-G入渗模型及考虑大气对坡体的影响来分析此类滑坡的成因机制,认为降雨入渗导致基覆界面滞水,水位上升致岩土体软化是“光面”型土质滑坡发生的主要原因。亓星等^[2]通过多个滑坡的降雨分析,建立了顺层土质滑坡的动态预警力学模型,并以2011年四川省南江县“9·16”强降雨诱发的窑厂坪滑坡和石板沟滑坡进行了验证。许强等^[3]分析、总结了红层地区的主要地质灾害类型,结果表明平缓红层区坡残积层中存在大气影响深度和基覆界面存在界面效应,是导致强降雨期间群发性浅层土质滑坡发生的主要原因,并由此决定了滑体的厚度。王一兆等^[4]分析浅层滑动面在降雨期和停雨期的渗透系数和孔隙水压力,认为降雨期间,坡脚

处孔隙水压力增大至饱和,坡顶处孔隙水压力持续增大接近饱和,停雨后坡顶处孔隙水压力降幅大于坡脚处。史振宁等^[5]结合非饱和土抗剪强度理论与极限平衡理论,得到降雨入渗条件下土质边坡浅层稳定性计算方法,对土质边坡稳定性进行分析得出,降雨强度相同时,初始表面含水率越大引起边坡失稳所需的降雨时间越短;降雨时间相同时,初始表面含水率越大引起边坡失稳所需的降雨强度越小。

Y.Luo等^[6]考虑了陆上水流对降雨诱发的浅层滑坡影响并建立了物理模型,对浅层滑坡进行研究。认为陆上水流对浅层滑坡有明显影响,在浅层滑坡危险性评估中考虑陆上水流非常重要。A.Chinkulkijniwat等^[7]根据稳定性分析提供了对受土壤特性、坡角和降雨强度变化影响的边坡稳定性的见解,并通过该分析确定了由此产生的破坏平面深度的变化。Q.Ran等^[8]使用了一个基于物理的分布式水文模型(InHM)来模拟不同降雨模式和地形特征,对地表径流和土壤侵蚀过程的影响。研究发现先增后减的降雨模式产生的总径流量和土壤侵蚀量最大;而当投影坡长小于100 m时,恒定降雨模式下的总径流量和土壤侵蚀量最小。T.L.Tsai等^[9]采用完整的Richards方程,并考虑坡角影响,开发了一种物理模型,用于评估变饱和土壤中的浅层滑坡。研究发现,降雨强度和持续时间对浅层滑坡的影响相似,且随着降雨强度增加,降雨持续时间阈值降低,但在较大降雨强度下保持不变。T.L.Tsai^[10]研究了不同雨型对浅层滑坡的影响,结果表

明,对于大于触发滑坡滑动的降雨量,延迟暴雨对滑坡发生的降雨持续时间阈值最大,其次是集中暴雨,然后是均匀型暴雨。

尽管众多学者已深入探究浅层土质滑坡的影响因素,但对滑坡区外围汇水区域面积及汇水量的分析却相对匮乏。在构建动态预警力学模型时,坡体外汇水区地表水对坡体的潜在影响也常被忽视。本文基于前人研究,将进一步整合雨型特征和前期累积降雨量信息,深入分析滑坡区外围汇水区域地表水形成对滑坡稳定性的影响。同时,借助数值模拟方法验证这一分析,并探讨“光面”型浅层土质滑坡的成因机制,旨在为该类型滑坡的早期识别及预警模型的构建提供坚实的理论基础与技术支持。

1 滑坡概况

1.1 区域地质环境条件

(1) 地形地貌

张家红屋场滑坡位于秭归县沙镇溪镇三星店村锣鼓洞河左岸,沙镇溪镇西侧,地理坐标为E: 110°36'21.6",N:30°57'39.9"(图1)。此地属秭归盆地中低山区,地貌特征鲜明,地势自西北向东南逐渐降低,坡度平缓,大致朝向110°,地形坡度为15°~20°,平均坡度约为16°。滑坡前缘的锣鼓洞河,其流向总体呈向北的“S”型分布。而滑坡所处的锣鼓洞河岸坡分水岭山脊,自西北向东南延伸,与锣鼓洞河的流向基本保持一致。

(2) 地质构造及地层岩性

滑坡区域为秭归向斜西翼,单斜构造,顺向坡,

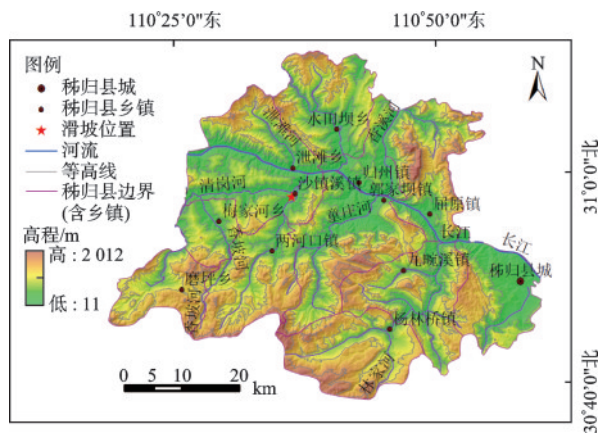


图1 滑坡区域位置

Fig.1 Location map of landslide area

如图2所示。秭归向斜走向为北北东,核部一般为倾角20°左右的侏罗系岩层,翼部一般为三叠系岩层,倾角为30°~40°。滑坡区岩层为侏罗系下统聂家山组(J1-2n)紫红色泥岩、灰黄色粉砂岩及灰绿色砂岩。该区域及附近曾发生过千将坪滑坡、杉树槽滑坡、桑树坪滑坡、土地岭滑坡和马家坝滑坡等^[11-14]多个滑坡。

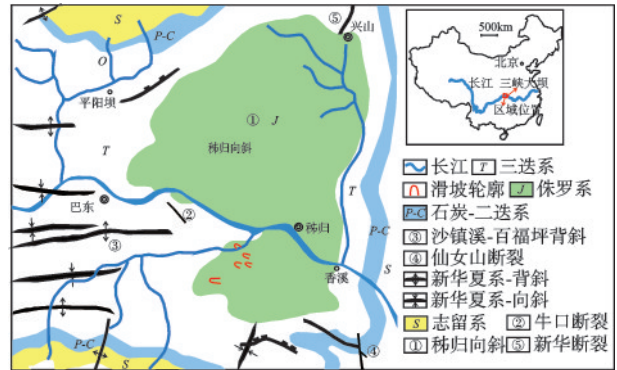


图2 滑坡区区域构造纲要

Fig.2 Overview of regional tectonics in landslide area

1.2 滑坡基本特征

滑坡平面形态呈舌形,上陡下缓,后缘高程380 m,前缘高程280 m,相对高差100 m。剖面近直线状,主滑方向100°,纵长约310 m,横宽约200 m,平均厚约5 m,面积约 $6.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,为中型土质滑坡。滑体空间分布具有中前部略厚,中后部薄的特点,后缘左侧后方局部可见基岩裸露。

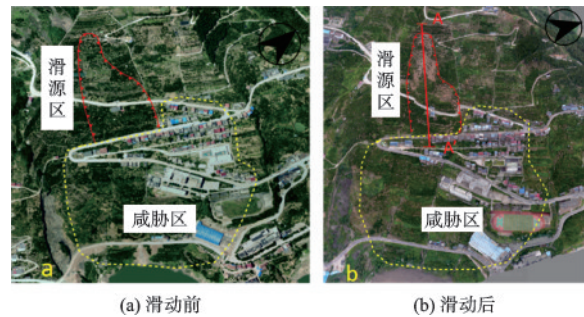


图3 滑动前后对比

Fig.3 Comparison before and after landslide

1.3 滑坡物质组成及结构特征

滑体物质为第四系残破积(Q^{col+dl})粉砂质粘土夹碎石为主,紫红色,稍湿,可塑。碎石成份主要为

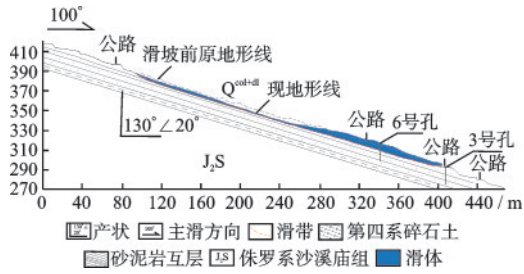


图4 工程地质剖面

Fig.4 Engineering geological profile

砂岩,粒径一般为1~5 cm,次棱角状,土石比约6:4。局部可见零星块石,块径为30~80 cm,如图5所示。



图5 滑体物质组成

Fig.5 Composition of landslide materials

滑床主要为侏罗系中统下沙溪庙组砂岩夹泥岩(J_{2x}):灰绿色,较硬岩,砂质结构,泥质胶结,薄-中厚层层状构造,产状为 $130^\circ/20^\circ$ 。表部岩体强风化,在区内分部广泛。据钻孔资料分析,ZK3(3号孔)滑体厚度为6.7~7.0 m,ZK6(6号孔)滑体厚度为6.60~6.90 m,如图6所示。滑面为呈“光面”的基覆界面,表面较为平整,粗糙度较低,如图7所示。

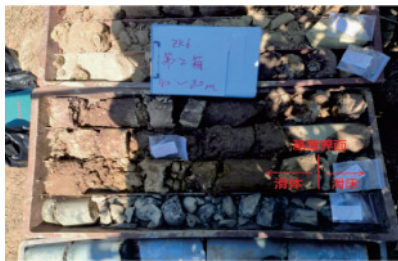


图6 6号钻孔岩芯

Fig.6 Borehole core No.6

1.4 水文地质条件

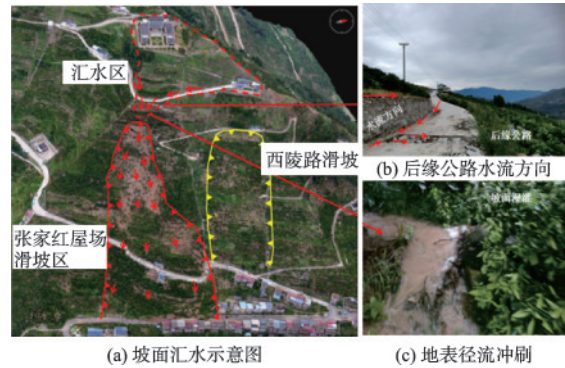
沙镇溪镇地处湖北省秭归县西南部,位于长江南岸,过去30多年的平均年降雨量为1193 mm,夏季(7月、8月、9月)的降雨量占全年的43.4%,雨量充沛。



图7 后部出露光面基岩

Fig.7 Exposed smooth bedrock at the rear

滑坡区内第四系覆盖层较薄,后缘左侧后方局部有基岩出露。滑坡后部的山体植被覆盖率小,汇水面积较大,而排水仅靠一条村道内侧小水沟,排泄缓慢,易在滑坡后缘积水。道路左右两边高,中间低,整个山顶部分的降水通过村道内侧水沟汇聚到张家红屋场滑坡后部并进入滑坡体内,如图8(a)和(b)所示。滑坡体内排水沟隐患柑橘种植废弃,进入滑坡体范围内的水沿着坡面漫灌,如图8(c)所示。地表水入渗土体中,土体软化,抗剪强度降低,坡体启滑。而与其工程地质条件基本相同的西陵路滑坡排水通畅,后缘无地表汇水,受此次暴雨影响很微小,并未发现明显变形。



(a) 坡面汇水示意图

(c) 地表径流冲刷

(b) 后缘公路水流方向

图8 滑坡后缘外围汇水情况

Fig.8 Water catchment conditions in peripheral area at rear edge of landslide

2 滑坡变形破坏过程与成因机理

2.1 坡体变形破坏过程

2024年7月9日19时至22时,沙镇溪镇遭遇特大暴雨,3 h降雨量达153 mm。7月9日23时,群测群防人员发现沙镇溪镇三星店村张家红屋场下方香山路产生开裂变形,发现变形后立即上报上级主管部门并组织威胁范围内74户206人撤离避险。7月10日6时,公路裂缝宽度增大,出现约与路沿呈

45°方向的剪切裂缝,如图9(a)所示。7月10日9时,公路一侧的电杆已发生倾斜,如图9(b)所示。

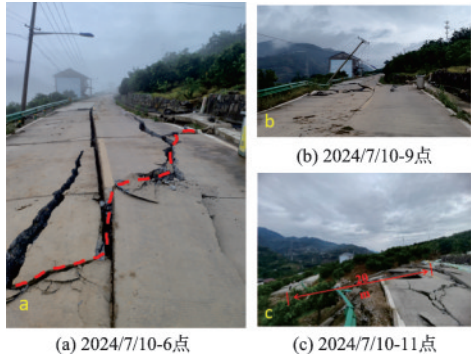


图9 滑动前后西陵路变形情况

Fig.9 Deformation of Xiling Road before and after landslide

7月10日11时,该滑坡发生失稳破坏,约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的土体整体向下滑动,坡体向下滑动过程中获得巨大的动能,致使滑坡前缘的挡土墙被推倒掩埋;前缘公路被推移致使近滑坡一侧被抬高约1 m,道路路面被剪断成3~4 m的长条形;位于滑坡中部的张家红房屋发生大幅度倾斜并被向下推行20 m,如图9(b)所示。滑坡前缘左侧2栋房屋均受滑坡影响产生裂缝。坡体后缘最大裂缝宽度达2 m。

2.2 降雨入渗规律分析

降雨是土质滑坡的重要致滑因素,降雨渗入土体后导致土体自重增加,土体 c 、 φ 随含水量的变化而变化,从而影响土体抗剪强度。若土体后缘有拉裂缝的存在,则降雨会通过拉裂缝进入土体内部并到达潜在滑动面,增加滑动面附近的孔隙水压力,由于软化作用和有效应力减小双重作用削弱土体抗剪强度最终导致滑坡。

张家红屋场滑坡为典型的浅层土质滑坡,滑床岩性为侏罗系中统下沙溪庙组砂岩夹薄层泥岩,由于砂岩透水性较差,地下水只能沿着砂岩表面顺坡向渗透,造成滑带土吸水饱和、软化,在抗剪强度降低和土体自重增加的双重作用下,促使滑坡的发生。经过调查,滑坡后缘出露的基岩表面平整,为砂岩与泥岩互层,软硬相间,易风化,表层为一层较薄泥岩,属于三峡库区典型易滑地层之一。

坡体中的碎石含量对土体的渗透系数也有显著的影响,汤明高等^[15]通过对三峡库区396个滑坡体中的1 188个试坑样本进行测试分析,发现该区域滑坡体的渗透系数与岩石的原始性质强度和碎

石含量正相关。随着岩石强度的提高,渗透系数也呈现出增加的趋势。同样,滑坡体中碎石含量的增加也会导致渗透系数的提高。然而,对于没有完全破碎的裂隙岩滑坡体,其渗透性却低于那些碎石土滑坡体。

张家红屋场滑坡后部的土体中夹杂大量碎石,粒径1~10 cm,含量约为40%;除此之外,土体中还夹杂着较大的块石,块径为30~80 cm,含量约为5%。坡体中大量碎石,增大了土体的渗透系数,使降雨能更快的浸润土体,是滑坡突发的一个重要影响因素。

坡体前缘香山公路内侧修筑的抗滑桩和挡土墙,在滑坡滑动过程中起到了关键的控制作用,如图10所示;其中抗滑桩位于滑坡体右前部,挡土墙位于滑坡体左前部。由于抗滑桩深到基岩,所以抗滑桩起到了较好的阻滑作用,抗滑桩发生大角度倾斜,挡土墙被完全推倒。因此,滑坡左侧滑动距离明显大于右侧,坡体中部的西陵公路左侧下错约12 m,右侧下错约4 m,同样印证了这一影响因素的作用。



图10 左侧前部挡土墙及路面变形

Fig.10 Deformation of retaining wall and road surface at front left section

2.3 滑坡成因机理研究

降雨是滑坡发生的主要影响因素之一,但降雨的雨型不同,对坡体稳定性的影响也明显不同;罗渝等^[16]结合无限边坡理论,建立浅层滑坡的稳定性计算模型,研究不同降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响,研究发现,递减型、峰值型、均匀型、递增型降雨对坡体稳定性系数的影响逐渐依次增大。黄晓虎等^[17]通过降雨对滑坡稳定性的影响持续时长的分析表明,单次降雨对滑坡的影响持续时长为7 d。

对滑坡发生前7 d(2024年7月3日~7月9日)的降雨情况分析发现,7月3日、7月4日、7月9日的

单日降雨量分别为 75.4、136.6、172.6 mm,如图 11(a)所示。7月3日、7月4日两天的累计降雨为 212.0 mm,且为递增型,此时,坡体虽未失稳或达到极限平衡状态,但其稳定性系数已大幅度下降。7月9日,发生暴雨,降雨集中在7月9日17时至20时,降雨雨型为峰值型,如图11(b)所示。

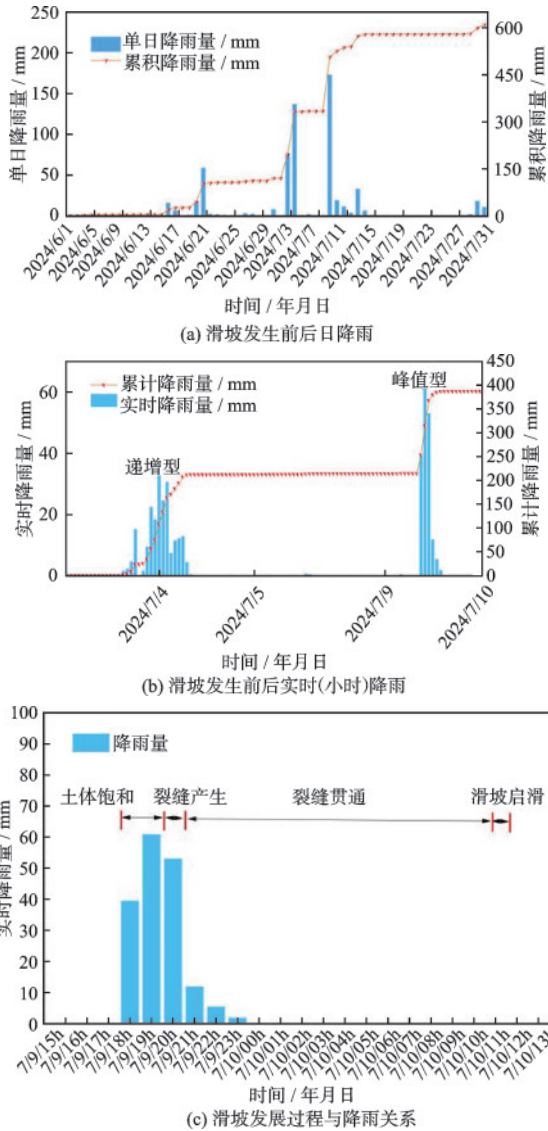


图 11 滑坡发生前后降雨-时间情况

Fig.11 Rainfall-time relationship before and after landslide

滑坡体处于所在斜坡中上部,滑坡体近顶部汇水面积约为 27 545 m²,如图 8(a)所示,坡面汇集的地表水通过两侧公路内侧边沟流入坡体后缘,进而顺着坡体表面向下冲刷。短时间内坡体后缘出现裂缝,坡体后缘汇集的地表水通过裂缝渗入坡体内部。在这过程中,坡体后缘的裂缝不断扩展,加速了雨水的渗透,进而导致岩土体的剪切强度降低,

其抗滑能力也随之减弱。即使降雨结束,坡体内部的雨水渗透仍在持续,这使得坡体中的湿润线不断上升并发生移动。随着湿润深度的增加,土体基质的吸力逐渐减小,边坡稳定性降低。随着渗透过程的深入,地下水在隔水层界面处积聚,形成孔隙水,水压力迅速增加,水压力积累推动滑坡失稳。

7月9日23时,坡体出现初始变形。降雨及地表水的入渗,一方面降低了岩土体的物理力学参数,另一方面抬高地下水,使浸润线不断上升,提高了动静水压力,降低了坡体的稳定性。据村民拍照片以及描述,7月10日6时左右,坡体前缘挡土墙便发生局部垮塌;坡体中部的西陵公路出现多条裂缝,最大的裂缝宽度约为 30 cm,7月10日11时,变形开始加剧。

综上,前期的累积降雨以和当日的暴雨共同作用,促使了张家红屋场滑坡发生。

3 滑坡变形破坏数值模拟分析

3.1 模型建立

张家红屋场滑坡为典型浅层顺向土质滑坡,滑坡变形破坏过程与降雨特征耦合性强,采用数值模拟方法分析7月3日~7月4日持续性降雨和7月9日暴雨对该滑坡影响。如图12所示,以张家红屋场1-1剖面为研究对象建立二维模型,考虑坡体前缘抗滑桩作用,在模型前部布置抗滑桩,采用数值模拟软件Geo-Studio分析滑坡应力场以及稳定性变化规律。根据实际地形及地层建立模型,并分别赋予滑体、滑带和滑床相应的物理力学参数,见表1,参数参考附近岩土体比较相似的三门洞滑坡^[18]。

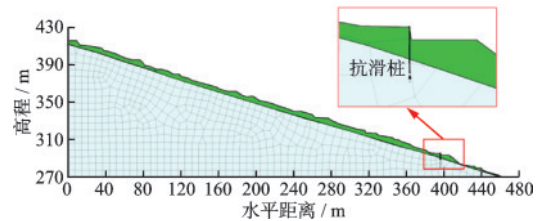


图 12 张家红屋场滑坡数值模型

Fig.12 Numerical model of Zhangjiahongwuchang Landslide

3.2 工况设置

由于张家红屋场滑坡后部山顶降水汇集于滑坡后缘,进入滑坡体,导致张家红屋场滑坡坡体上的降

表1 数值模拟参数

Table 1 Parameters for numerical simulation

材料	容重 γ / ($\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦 角 φ / ($^{\circ}$)	渗透系数 K / ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
滑体	20	27	17.0	0.500
滑带	20.1	12	15.5	0.005
滑床	26.1	3000	37.1	0.001

水要大于滑坡体本身接收到的降雨。因此在模拟过程中,将降雨做增大处理,对7月3日~7月9日的157小时的实时降雨进行滑坡的实际降雨工况模拟。

3.3 应力场分析

对7月3日到7月9日的降雨,按小时划分进行降雨模拟。如图13所示,模拟结果表明,7月9日17时前由于未发生强降雨,坡体自重未发生较大变化,自身结构稳定,抗滑桩所受剪应力较小。17时突发暴雨,降雨由地表向坡体内渗流,浸润线逐渐升高,坡体自重随之增大,此时抗滑桩所受剪应力也不断增大。直到21时,此时,坡体浸润线已接近坡体表面,此时坡体含水率已达到饱和状态。后部坡体启滑,推动前部坡体一起向前滑动,在坡体前缘形成堆积,抗滑桩所受剪应力数值达到最大,随后大角度倾斜,公路的沥青路面隆起错断。

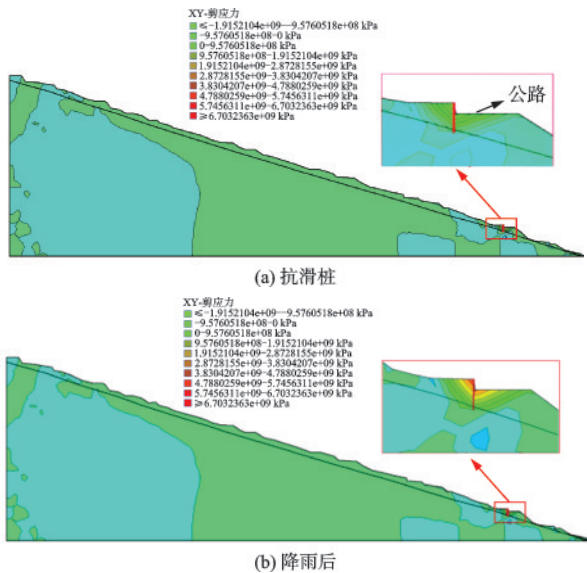


图13 滑坡应力场模拟

Fig.13 Diagram of landslide stress field simulation

3.4 稳定性分析

由图14分析可知,在7月3日15时至7月4日7

时合计16h累计211.6mm的持续强降雨,坡体稳定性系数已经大幅度下降,其稳定系数最低下降至1.117。滑体物质组成为粉砂质粘土夹碎石,碎石含量较高,渗透性较好,7月5日至7月8日,坡体稳定性系数出现回升,但比7月5日降雨前仍要小得多。这也印证了7月3日至7月4日的前期降雨,对滑坡破坏存在明显影响。7月9日17时突发暴雨,该日17~18时、18~19时、19~20时、20~21时的实时降雨分别为39.4、60.8、53、11.8mm。7月9日18时,坡体稳定性开始下降,19时,坡体稳定性已接近极限平衡状态,但仍大于1.00。20时,坡体稳定性系数下降至0.989。此时,坡体后缘由于土层较薄,且后缘汇水,坡体开始出现裂缝。伴随着后缘地表水持续灌入滑体,导致滑带土由后向前迅速饱和,坡体也开始发生缓慢的滑动。但由于坡体中前部土层较厚,加上坡体前缘抗滑桩和挡土墙的阻滑作用,坡体中前部尚未发生明显滑动,坡体中部公路发生剪切产生裂缝。在7月9日21时到23时3h的地表水持续灌入后,坡体自重不断增大土体达到饱和状态。

由于坡体前方凌空条件较好,坡体变形破坏由中后部开始,后缘发生蠕滑拉裂,推动坡体向下滑动,致使坡体前缘挡土墙倒塌,抗滑桩发生大角度倾斜,并在坡体前缘堆积。

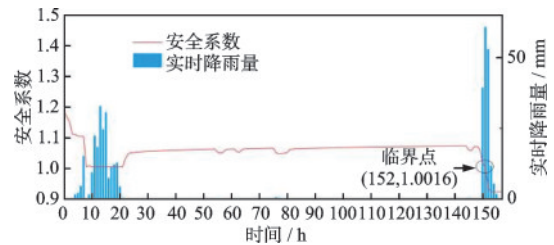


图14 稳定系数与降雨关系(7.3~7.9)

Fig.14 Relationship between stability coefficient and rainfall (7.3~7.9)

4 结论与认识

(1)坡体结构是滑坡发生的内在因素。张家红屋场滑坡地处秭归向斜秭归向斜西翼,单斜构造,顺向坡,地势呈西北高东南低,坡向为 110° ,坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,平均坡度 16° 。张家红屋场滑坡滑面为“光面型”,平均厚度约5m,体积约 $30\times 10^4\text{m}^3$,为光面型浅层土质滑坡。滑坡体表面覆盖的第四系残坡

积物结构松散,渗透性较大,自身稳定性较差。

(2)强降雨为此次滑坡发生的直接诱发因素。滑坡体外侧顶部近 27 545 m²面积因公路内侧排水沟将降雨汇集于张家红屋场滑坡后部,部分沿坡表形成地表径流,部分渗入地下软化土体、提高水压力,降低了坡体的稳定性。滑坡体排水沟因常年种植柑橘而废弃,灌入坡体表面的雨水沿坡面漫流、冲刷。通过数值模拟,进一步验证了降雨对滑坡稳定性的影响,模拟结果显示降雨导致的地下水位上升和坡体饱和是滑坡发生的关键因素。

(3)群测群防是张家红屋场滑坡成功预警关键。群测群防人员发现沙镇溪镇三星店村张家红屋场下方香山路产生开裂变形,威胁范围内 74 户 206 人撤离避险,避免了人员伤亡。

(4)“十滑九水”的说法在光面型浅土层质滑坡中更为显著。工程建设必须重视水的排放问题,切忌将汇水直接简单地排放到坡体上,以免造成人为灾害。三峡库区长江两岸满山的橙果树是农户的“金山银山”,为了保护好这些宝贵的资源,必须确保坡体上的排水沟通畅无阻。

参考文献:

[1] 张群,许强,易靖松,等.南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机理研究[J].岩土工程学报,2016,38(8):1447-1455.
Zhang Q, Xu Q, Yi J S, et al. Rainfall infiltration depth and formation mechanism of slow-inclination soil landslides in nanjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1447-1455. (in Chinese)

[2] 元星,许强,郑光,等.降雨诱发顺层岩质及土质滑坡动态预警力学模型[J].灾害学,2015,30(3):38-42.
Qi X, Xu Q, Zheng G, et al. Dynamic mechanics early warning model of rainfall induced bedding rock and soil landslide[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 38-42. (in Chinese)

[3] 许强,唐然.红层及其地质灾害研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):28-50.
Xu Q, Tang R. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 28-50. (in Chinese)

[4] 王一兆,隋耀华.降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J].长江科学院院报,2017,34(4):122-125.
Wang Y Z, Sui Y H. Influence of rainfall infiltration on slope stability at shallow layer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4):

122-125. (in Chinese)

[5] 史振宁,戚双星,付宏渊,等.降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J].岩土力学,2020,41(3):980-988,1085.
Shi Z N, Qi S X, Fu H Y, et al. A study of water content distribution and shallow stability of earth slopes subject to rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 980-988, 1085. (in Chinese)

[6] Luo Y, He S, Chen F, et al. A physical model considered the effect of overland water flow on rainfall-induced shallow landslides[J]. Geoenvironmental Disasters, 2015, 2(1): 1-11.

[7] Chinkulkijniwat A, Tirametiparat T, Supotayan C, et al. Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(9): 2171-2183.

[8] Ran Q, Wang F, Gao J. Modelling effects of rainfall patterns on runoff generation and soil erosion processes on slopes[J]. Water, 2019, 11(11): 2221.

[9] Tsai T L, Chen H E, Yang J C. Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils[J]. Environmental Geology, 2008, 55(6): 1269-1277.

[10] Tsai T L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide[J]. Environmental Geology, 2008, 53(7): 1563-1569.

[11] 周剑,邓茂林,李卓骏,等.三峡库区杉树槽滑坡成因及视向滑动机制分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):860-866,883.
Zhou J, Deng M L, Li Z J, et al. Analysis on the formation and apparent-dip lateral sliding mechanism of Shanshucao Landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 860-866, 883. (in Chinese)

[12] 汪发武,宋琨.库水位涨落条件下不同结构边坡的变形破坏机制分析:以干将坪滑坡和树坪滑坡为例[J].工程地质学报,2021,29(3):575-582.
Wang F W, Song K. Analysis of deformation and failure mechanism of bank slopes with different structures under reservoir water level fluctuation-taking Qiangji-angping Landslide and Shuping Landslide as examples[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 575-582. (in Chinese)

[13] 吕泓霖,宋琨,董志鸿,等.强降雨诱发平缓滑坡复活变形与稳定性演化分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2023,45(3):32-36.
Lyu H L, Song K, Dong Z H, et al. Analysis of reactivated deformation and stability evolution of gentle landslide induced by heavy rainfall[J]. Journal of China

- Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45 (3): 32-36. (in Chinese)
- [14] 吴绵拔,徐天平,高建光,等.湖北省秭归县马家坝滑坡调查及力学分析[J].岩土力学,1987,8(2):37-47.
Wu M B, Xu T P, Gao J G, et al. The survey and mechanical analysis of Majiaba slope in Zigui, Hubei [J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 37-47. (in Chinese)
- [15] 汤明高,杨何,许强,等.三峡库区滑坡土体渗透特性及参数研究[J].工程地质学报,2019,27(2):325-332.
Tang M G, Yang H, Xu Q, et al. Study on the permeability characteristics and parameters of landslide soil in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 325-332. (in Chinese)
- [16] 罗渝,何思明,何尽川.降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响[J].地球科学(中国地质大学学报),2014,39(9):1357-1363.
Luo Y, He S M, He J C. Effect of rainfall patterns on stability of shallow landslide [J]. Earth Sciences (Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(9): 1357-1363. (in Chinese)
- [17] 黄晓虎,雷德鑫,夏俊宝,等.降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用[J].岩土力学,2019,40(9):3585-3592,3602.
Huang X H, Lei D X, Xia J B, et al. Forecast analysis and application of stepwise deformation of landslide induced by rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3585-3592, 3602. (in Chinese)
- [18] 易庆林,周瑞,梁卫,等.三峡库区三门洞滑坡稳定分析及抗滑桩模拟研究[J].人民长江,2021,52(11):111-116.
Yi Q L, Zhou R, Liang W, et al. Stability study on Sanmendong Landslide in Three Gorges Reservoir Area and simulation of anti-slide pile [J]. Yangtze River, 2021, 52(11): 111-116. (in Chinese)
- [19] 邓茂林,周剑,易庆林,等.三峡库区靠椅状土质滑坡变形特征及机制分析[J].岩土工程学报,2020,42(7):1296-1303.
Deng M L, Zhou J, Yi Q L, et al. Characteristics and mechanism of deformation of chair-shaped soil landslides in Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (7) : 1296-1303. (in Chinese)
- [20] 邓茂林,易庆林,韩蓓,等.长江三峡库区木鱼包滑坡地表变形规律分析[J].岩土力学,2019,40(8):3145-3152,3166.
Deng M L, Yi Q L, Han B, et al. Analysis of surface deformation law of Muyubao Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (8) : 3145-3152, 3166. (in Chinese)
- [21] 黄海峰,周红,张瑞,等.三峡库首顺层岩质滑坡典型孕灾模式及遥感识别标志[J/OL].地质通报,1-12(2024-07-04)[2024-10-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20240703.1730.002.html>.
Huang H F, Zhou H, Zhang R, et al. Typical disaster-pregnant patterns and remote sensing identification marks of bedded rock landslides in the Head Area of the Three Gorges Reservoir [J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-12(2024-07-04)[2024-10-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20240703.1730.002.html>.
- [22] 杨戒,李绍红,吴礼舟.降雨作用下川东红层地区浅层土质滑坡稳定性数值分析[J].水力发电,2017,43(5):37-42.
Yang J, Li S H, Wu L Z. Numerical analysis on the stability of rainfall-induced shallow landslide in Red-bed Area of East Sichuan [J]. Water Power, 2017, 43(5) : 37-42. (in Chinese)
- [23] 王森,许强,罗博宇,等.南江县浅层土质滑坡降雨入渗规律与成因机理[J].长江科学院院报,2017,34(8):96-100,105.
Wang S, Xu Q, Luo B Y, et al. Rainfall infiltration and formation mechanism of shallow soil landslides in Nanjiang [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research, 2017, 34(8) : 96-100, 105. (in Chinese)
- [24] 张群,许强,甯娜.降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J].水文地质工程地质,2014,41(5):90-94,117.
Zhang Q, Xu Q, Ning N. A study of the stability influence factors and coupling for inclined-shallow soil landslides under the condition of rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5) : 90-94, 117. (in Chinese)
- [25] 李江,许强,胡泽铭,等.红层缓倾角土质滑坡发育环境、分布规律及影响因素研究[J].科学技术与工程,2014,14(12):88-93.
Li J, Xu Q, Hu Z M, et al. Study on development environment, distribution characteristics and factors of soil landslides on low-angled rock formation of Red Bed [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(12) : 88-93. (in Chinese)
- [26] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
Lin H Z, Yu Y Z, Li G X, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (1) : 198-204. (in Chinese)
- [27] 许强,汤明高,徐开祥,等.滑坡时空演化规律及预警预报研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1104-1112.
Xu Q, Tang M G, Xu K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6) : 1104-1112. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)