

降雨入渗对滑坡稳定性的影响研究

叶俊

(福建省煤田地质勘查院, 福建 福州 350005)

摘要:福建省是台风暴雨诱发生突发性地质灾害的频发区,为研究降雨入渗对台风暴雨型滑坡稳定性的影响,以永泰县泷口乡后亭村滑坡体为例,采用GeoStudio软件建立滑坡体饱和-非饱和渗流数值模型,分析降雨过程中滑坡体孔隙水压力等值线和稳定系数的变化,并对滑坡体监测数据进行分析。研究结果表明:强降雨时,在弱透水性地层会出现短时间的滞水现象,导致地下水水位上升,对坡体稳定性产生不利影响;强降雨会使滑坡安全系数快速降低;在一个干湿循环后滑坡安全系数降低0.1,在多个降雨周期后,安全系数有可能低于1.0。实测滑坡月累计位移量较小,坡体目前相对稳定,但地表位移总体呈现稳步增长的趋势,后续应加强监测。

关键词: 降雨入渗; 滑坡稳定性; 数值模拟; 安全系数; 监测

中图分类号: P642.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0112-08

Analysis of the Impacts of Rainfall Infiltration on Landslide Stability

YE Jun

(Fujian Exploration Institute of Coalfield and Geology, Fuzhou, Fujian 350005, China)

Abstract: Fujian Province is an area frequently prone to sudden geological disasters caused by typhoons and rainstorms. In order to analyze the impacts of rainfall infiltration on the stability of typhoon-storm-type landslides, this work took the landslide in Houting Village, Mukou Township, Yongtai County as an example. GeoStudio was adopted to develop numerical models of saturated-unsaturated seepage in landslides. The changes in pore water pressure contours and stability coefficients of landslides during rainfall were then analyzed. At the same time, the landslide monitoring data were also analyzed. The research results show that during heavy rainfall, short-term water stagnation will occur in weakly permeable strata, causing the groundwater level to rise and adversely affecting the stability of the slope. Heavy rainfall will quickly reduce the landslide safety factor. After a dry-wet cycle, the landslide safety factor is reduced by 0.1. After multiple rainfall cycles, the safety factor may be lower than 1.0. The measured monthly cumulative displacement of the landslide is small, and the slope is currently relatively stable, but the overall surface displacement shows a steady growth trend, and monitoring should be strengthened in the future.

Keywords: rainfall infiltration; landslide stability; numerical simulation; safety factor; monitoring

自然资源部印发的《全国地质灾害防治“十四五”规划》中指出,“十三五”规划期间,地质灾害防治体系和信息化水平有了明显提升。“十四五”规划依然高度重视地质灾害防治工作,灾害调查评价精度、先进技术手段应用、隐患识别和监测预警是未来的研究方向。

降雨是诱发滑坡的重要因素之一^[1]。近年来,众多学者加强了降雨类型和降雨入渗对滑坡稳定性影响的研究^[2-4]。Alsulab 等^[5]通过数值建模分析

了降雨引起的地下水位变化对滑坡的影响规律。付敬等^[6-7]在此基础上通过进一步研究发现,降雨入渗不会引起地下水位大幅度提升,但会在边坡浅层形成一定厚度的入渗影响带或暂态饱和区,从而对滑坡稳定性产生影响。同时,还采用土体饱和-非饱和渗流理论和有限差分方法对某大型堆积体滑坡进行稳定性分析。邱凯等^[8]统计分析了湖南某高速公路滑坡发生与降雨特征的关系,并采用有限元模拟分析了降雨强度、降雨历时和降雨类型对边坡

稳定性的影响。蔡亚飞等^[9]利用件 ABAQUS 软件分析了地下水和降雨入渗对边坡稳定性的影响。试验研究方面,Chinkulkijniwat 等^[10]进行了一系列室内试验来检查临界水文状态,以便评估降雨条件下的边坡稳定性。王刚等^[11]、孙萍等^[12]分别通过室内模型试验和人工模拟降雨方式研究了不同降雨形式、不同雨强对黄土边坡入渗及变形的影响。史振宁等^[13]通过模型试验研究了降雨入渗和初始含水率分布对滑坡稳定性的影响。Zhang 等^[14]则进行了现场试验,研究了飞云江流域降雨入渗过程和边坡破坏机制。

以上研究大多采用数值模拟或室内模型试验对局部区域的滑坡进行普通降雨入渗响应分析。而福建省滑坡灾害是以台风暴雨型滑坡为主要类型之一^[15]。因此,深入研究福建省降雨型滑坡的成灾机制、建立降雨非饱和和入渗非稳定渗流的斜坡渗流场与应力场耦合数学模型,开展不同降雨类型和不同岩性风化层区域的典型单体滑坡数值模拟与数学模型构建研究,建立福建省降雨型滑坡预警模型,对进一步揭示福建省地质灾害形成机理及风险预警判据研究具有实际意义,为防灾减灾工作提供理论依据。

1 滑坡区地质概况

1.1 地形地貌

滑坡位于山体斜坡中下部,属构造侵蚀低山地貌类型,地貌形态主要为山地、沟谷等,区内山峦起伏,沟谷发育,切割较深,多呈“V”字型,山坡坡度以 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 为主。

滑坡区边坡近东西方向,西高东低,坡脚为 $3\text{ m}\sim 4\text{ m}$ 陡坎,陡坎中下部为块石或巨石堆砌的简易挡墙,块石或巨石为中等风化岩,杂乱无章。中上部发生侧鼓或位移,挡墙距离民房约 $0.5\text{ m}\sim 1.5\text{ m}$,南侧坡脚紧贴房屋外墙,坡脚民房为土木结构民房,多

采取浅基础。勘查区北侧为凸起的类似山脊线地形,坡面上为原降险施工的排水沟,部分已断裂破损。南侧为自然缓坡,西侧屋后边坡上方为下缓上陡地形,滑坡区地形平坦,后缘上方地形变陡,地表局部可见堆积碎石层,坡面上可见几块大块滚石,最大粒径达 $2\text{ m}\sim 3\text{ m}$,中等风化状,其根部普遍嵌入坡体内,部分脱离坡体堆积在坡面表层,勘查区汇水面积(集雨面积,水平投影)约 $9\ 000\text{ m}^2$ 。勘查区北侧为已进行降险施工的地灾点,坡脚挡墙未见变形迹象,坡顶上方排水沟破损严重。坡体现状见图1所示。



图1 滑坡现状图

1.2 岩土体物理力学参数

边坡渗流计算中涉及的渗流作用包括饱和渗流和非饱和渗流。进行非饱和渗流计算时,渗透系数的取值不仅与基质吸力大小有关,还与介质的含水率密切相关。岩土在天然状态和饱和状态下相关参数如表1所示。但在计算非饱和渗流时需要知道材料在非饱和条件下的含水率及渗透系数,因此在参数定义时必须给出材料的渗透系数和含水率。由于在非饱和条件下测定材料的渗透系数和含水率较为困难,所以利用类似土体的进行渗透系数和含水率与基质吸力函数关系进行估算。

表1 土体的物理力学性质指标

岩土层序号和名称	重度		抗剪强度				渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$
	天然 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	饱和 γ_{sat} $/(kN \cdot m^{-3})$	天然快剪		饱和快剪		
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	
①含碎石粉质黏土	18.2	18.9	23.92	24.70	19.15	13.80	4.60×10^{-2}
②凝灰熔岩残积砂质黏性土	18.1	18.8	17.90	26.00	10.58	18.10*	1.50×10^{-5}
③砂土状强风化凝灰熔岩	20.5	22.0	27.00*	27.00*	22.00*	23.00*	6.50×10^{-4}
④碎块状强风化凝灰熔岩	23.0*	24.5*	32.00*	35.00*	26.00*	28.00*	7.35×10^{-3}
⑤中等风化凝灰熔岩	26.0*	26.3*	110.00*	55.00*	90.00*	50.00*	2.30×10^{-6}

注:带*的参数为经验值。

1.3 降雨特征

滑坡区所在的永泰县全年降水量在 1 400 mm ~ 2 000 mm 之间,溪谷低丘向高山递增,其 2008 年—2012 年的月平均降雨量如图 2 所示。西部的嵩口、长庆、湫口等地在 1 500 mm 以下,1967 年嵩口年雨量仅为 1 012.3 mm,是该县少雨量地区。东北部的白云、丹云等地,年雨量达 1 700 mm 多。东南部的二楼,年雨量达到 1 800 mm 以上,是该县雨量较多的地区。白云最大年际差值达 1 536.1 mm;樟城的年际差也达 779.1 mm,但多数年份雨量达 1 200 mm ~ 1 800 mm 之间。

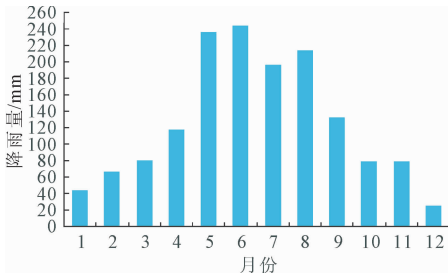


图 2 永泰县月平均降雨量分布图

2 滑坡体饱和-非饱和渗流分析模型

2.1 地质模型

根据滑坡灾害点地质情况,并对该数学模型做如下的处理:

(1) 将边坡地质模型分为 5 层,由上到下分别为:含碎石粉质黏土、凝灰熔岩残积砂质黏性土、砂土状强风化凝灰熔岩、碎块状强风化凝灰熔岩以及中等风化凝灰熔岩。

(2) 地下水位由现场勘察可知其位置位于坡残积层和下部风化岩界面。

用 SEEP/W 软件进行渗流分析,模型高约 72.0 m,长约 137.2 m,模型网格划分由四节点四边形单元与三节点三角形单元共同组成,全局单元尺寸约 1 m,共 5 976 个节点、5 821 个单元,如图 3 所示。

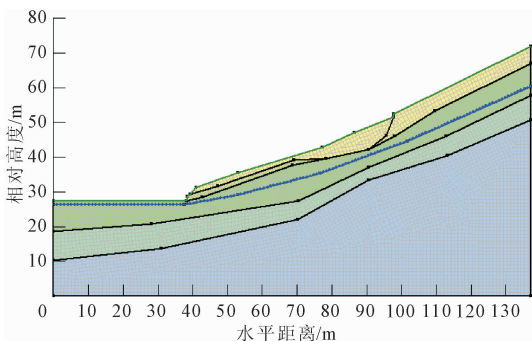


图 3 滑坡计算模型

2.2 计算参数与土水特征曲线

通过早期的勘察取样并进行相关室内试验获得后亭村滑坡岩土体的抗剪强度参数和饱和渗透系数,见前文表 1。同时为探知滑坡在一个降雨周期后稳定性的变化,参考文献[16]对滑坡土体强度指标进行折减,模拟其在一个干湿循环后的安全系数变化情况,其岩土体的参数见表 2。现阶段由于缺乏原状土的试验材料导致无法获得详尽的基质吸力与饱和度及基质吸力与渗透系数的关系,为保证结果的准确性,依据滑坡土层的自身特性,采用 GeoStudio 软件中 SEEP/W 模块的体积含水率数据点函数的方法,根据软件内置样本函数对滑坡各土层进行估计,经过拟合就能分别获取到各土层的土水特征曲线以及渗透系数曲线,结果如图 4 所示。

表 2 一个干湿循环后土体的物理力学性质指标

岩土层序号 和名称	重度		抗剪强度		渗透 系数 /(cm · s ⁻¹)
	天然 γ /(kN · m ⁻³)	饱和 γ_{sat} /(kN · m ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩 擦角 φ /(°)	
①含碎石粉 质黏土	18.2	18.9	18.6	13.0	4.60×10^{-2}
②凝灰熔岩 残积砂质黏性土	18.1	18.8	10.0	17.6	1.50×10^{-5}
③砂土状强 风化凝灰熔岩	20.5	22.0	21.6	22.4	6.50×10^{-4}
④碎块状强 风化凝灰熔岩	23.0*	24.5*	25.6	27.6	7.35×10^{-3}
⑤中等风化 凝灰熔岩	26.0*	26.3*	90.0*	50.0*	2.30×10^{-6}

注:带*的参数为经验值。

2.3 降雨入渗边界的确定

由于精确给定坡体的边界条件较为困难,在最符合滑坡现场实际边界条件的情况下,对该滑坡渗流分析中的各边界条件做出如下假定:①初始地下水水位线以实测水位线为准,模型底部为不透水边界,模型两侧非饱和区域为零流量边界。②边坡上表面接受降雨,其为降雨入渗边界。因模拟过程中雨强均小于土体的入渗能力,设坡表为流量边界,雨水将全部入渗到土体。③边坡模型底边假设只沿潜在滑动面发生渗流,为不透水边界。

为模拟后亭村滑坡在台风暴雨条件下的渗流及稳定性情况,以 2016 年“尼伯特”台风为例进行数值分析。在以上假定的条件下,根据福建省水利信息网的降雨数据,选取永泰县于 2016 年 7 月 8 日至 2016 年 7 月 24 日的降雨数据进行数值模拟,以观

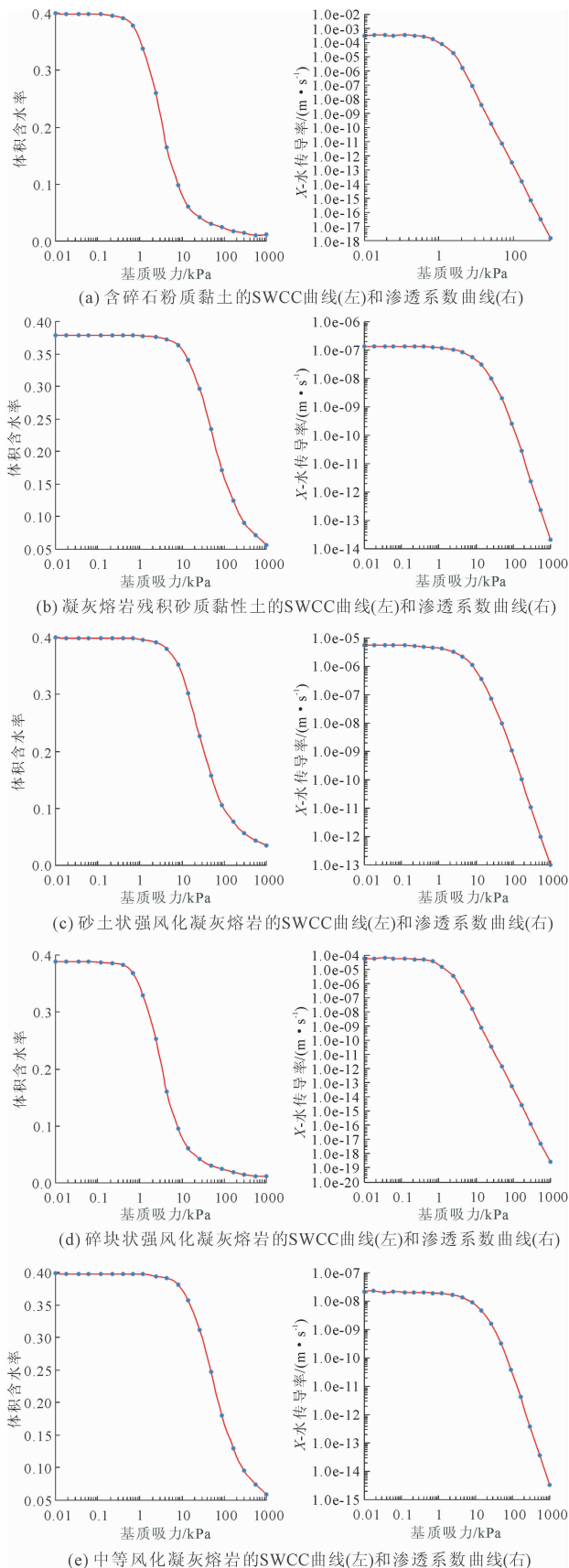


图4 土水特征曲线及渗透系数

察滑坡稳定系数在台风过境前后的变化趋势。模拟期间永泰县日降雨量如图5所示。

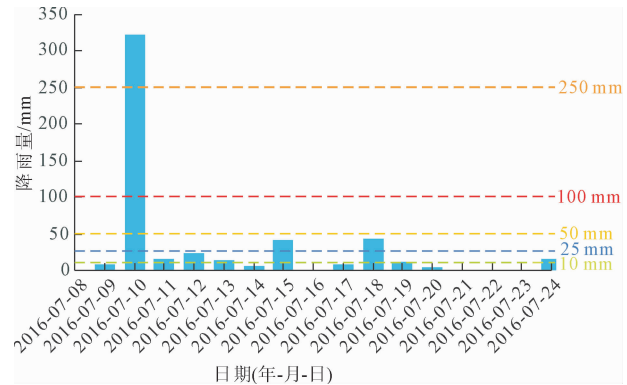


图5 永泰县日降雨量分布图

2.4 数值模拟结果及分析

利用 SEEP/W 模块对滑坡体进行渗流分析。由于篇幅限制,文中仅列出初始降雨状态、降雨3 d、7 d及17 d的孔隙水压力等值线图,如图6所示。

由边坡孔隙水压力等值线变化过程可知,降雨过程中由坡面渗入到坡体内部的水分能够以较快的速度使得部分凝灰熔岩残积砂质黏性土达到饱和,非饱和区逐渐减小,基质吸力随着含水率的上升而减低。在降雨的过程中雨水沿边坡表面近垂直入渗,降雨对深部孔隙水压力影响较小,主要影响在近地表的粉质黏土和残积黏性土层,特别是在边坡的坡顶区域,主要原因是由于坡顶位置处含碎石黏性土较为疏松,渗透性较好。由于表层土渗透系数大,降雨迅速入渗,使得近地表处水头明显增大,孔压上升。滑面后缘下错位置加速了雨水入渗,局部水头升高,土体容重增加的范围也逐渐扩大,增大了对边坡的下滑推力,土体的强度参数在这个过程中也会被弱化,对整个坡体的稳定性也会带来不利的影响,加速了滑坡的发生。

由图6(b)可知,在台风过境后,由于雨强较大,坡表的含碎石粉质黏土渗透系数大,雨水得以迅速入渗,但与之相邻的凝灰熔岩残积砂质黏性土和砂土状强风化凝灰熔岩的渗透性均较差,雨水入渗至此难以快速下渗,以至于在这两个土层出现较大面积滞水区,并迅速形成局部高负孔隙水压力区域,水流有向坡顶高孔压区域汇集的趋势。在降雨第二天的特大暴雨过后永泰县降雨以中雨为主,降雨7 d后的雨水经入渗,滞水区几乎消失,由于含碎石粉质黏土和碎块状强风化凝灰熔岩渗透系数相对较大,地下水主要沿这两个土层进行运移,地下水位趋于稳定。强降雨使得地下水位骤升,坡脚尤为明显,而

后由于雨强有所减弱,地下水位逐渐减低。在降雨 17 d 后坡表雨水亦垂直入渗,在渗透性差的地层中以向下入渗到下一地层为主要运移方式,在渗透性

较强的地层中以水平流动为主要运移方式,坡脚地下水位也在持续缓慢降低。

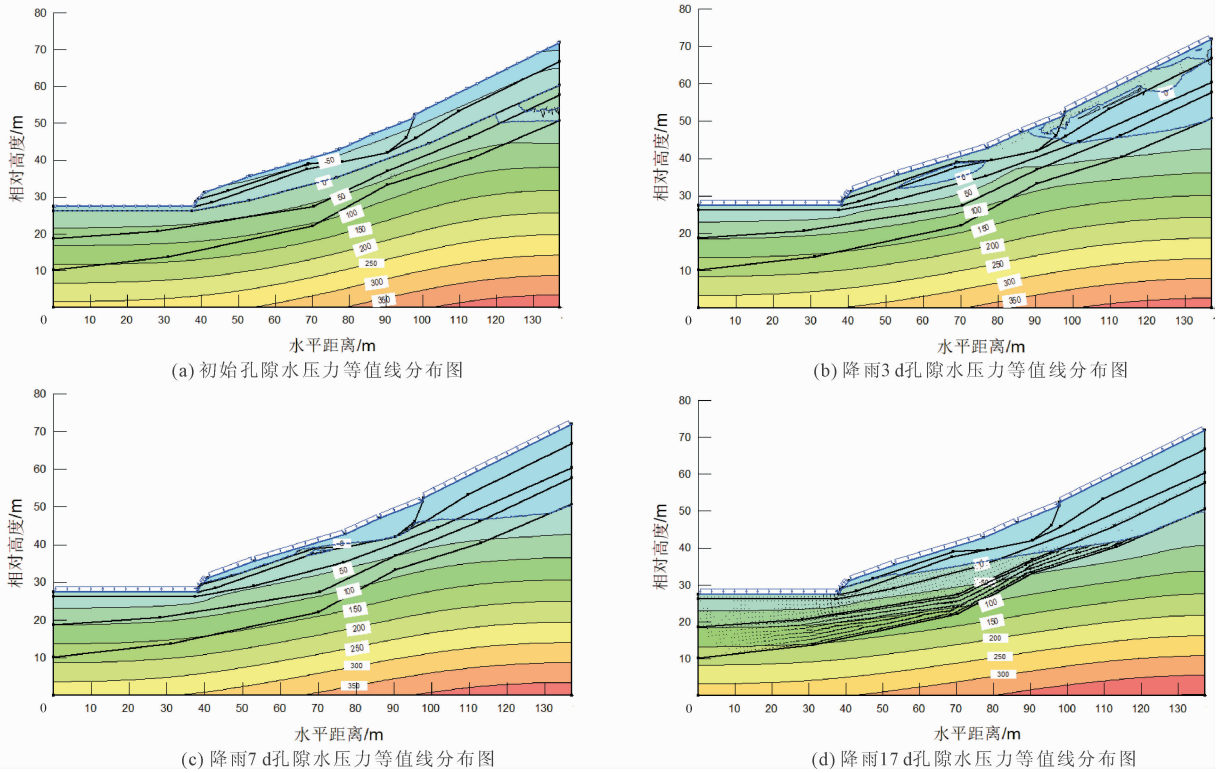


图 6 孔隙水压力等值线(单位:kPa)

3 降雨入渗对滑坡体的影响分析

由现场调查结果可知,后亭村滑坡的已有滑动面是控制该坡体稳定性的主滑动面。针对以上情况,将渗流分析的结果导入到 SLOPE/W 模块并以 M-P 分析方法做为计算基础,通过完全指定滑动面并优化滑动面的方法计算滑坡体沿原有滑动面在台风“尼伯特”过境前后的稳定系数变化情况,判断滑坡体在该降雨条件下是否有可能发生沿原有滑动面的整体滑动。模拟工况为 2016 年 7 月 8 日至 2016 年 7 月 24 日的降雨,其所获得的安全系数与降雨历时的关系曲线图以及潜在滑动面位置图分别如图 7 与图 8 所示。

由图 7 分析可知,强降雨主要集中在降雨第二天即 7 月 9 日,在 323 mm/d 的雨强条件下,雨水入渗导致滑坡安全系数迅速降低,从初始状态的 1.787 降到 1.498,之后由于雨水继续入渗,安全系数降到最低值 1.457,共降低了 0.330,下降幅度较大。降雨第 3 d 开始以中雨为主,个别日期出现大雨或小雨,总体降雨强度不大,滑坡的稳定系数整体呈现稳

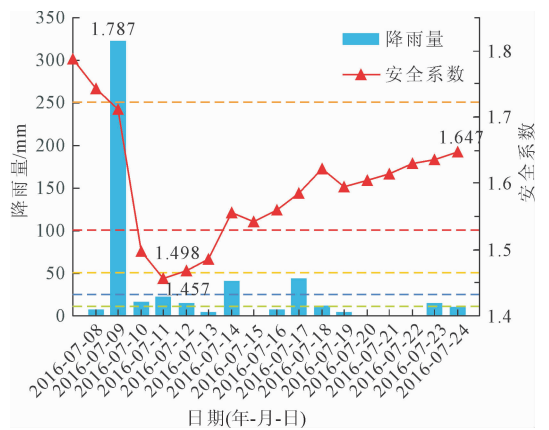


图 7 安全系数与降雨历时关系曲线

定增长的趋势。其中,在第 7 d 的大雨后,安全系数仍存在小范围的降低,而后由于雨强的减弱而继续上升;在第 10 d 的大雨后,安全系数的响应出现滞后现象,滞后时间约为 1 d。因前期出现强降雨,使得地下水位变化较大,绝大多数非饱和区域转变为饱和区域,土体强度指标迅速减小,导致安全系数响应迅速;而后期出现 1 d 的滞后是由于地下水位在较长时间小雨强降雨条件下已趋于稳定,土体在大

面积处于饱和状态的情况下,雨水下渗速度有所减慢,从而导致安全系数响应滞后。在整个降雨过程中,滑坡安全系数从1.457上升到1.647,共恢复了0.190,但相对于初始的安全系数依然降低了0.140。滑坡安全系数的恢复速率相对于其在强降雨后的下降速率明显较低,且难以恢复到初始状态。

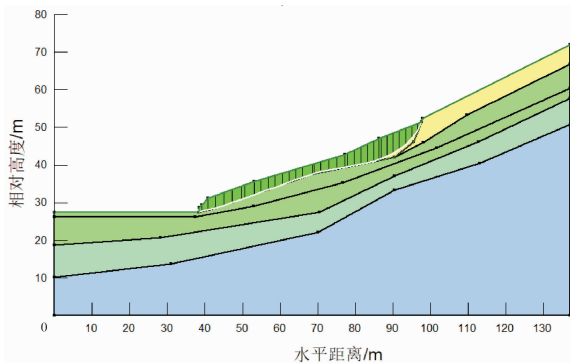


图8 潜在滑动面位置图

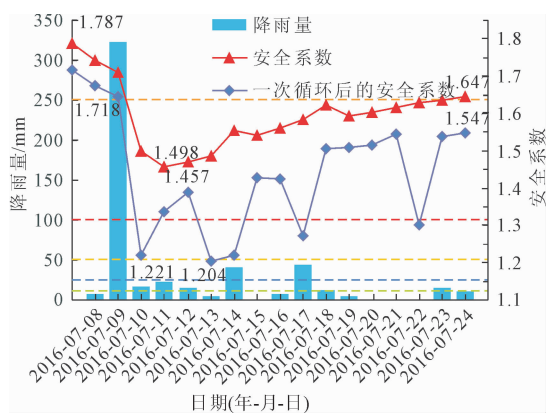


图9 一次干湿循环后安全系数与降雨历时关系曲线

一次干湿循环后安全系数与降雨历时关系曲线如图9所示,从图9可以看出,在一个干湿循环后土体由于结构受到一定程度的扰动,其抗剪强度指标有所降低,即使在降雨前也无法达到干湿循环前的状态,从而导致其安全系数相对地减小。在同一降雨条件下,一个循环后安全系数总体降低0.1,但其随着降雨强度变化的趋势大致与干湿循环前保持一致,这说明抗剪强度指标对滑坡稳定性有着较大影响。从一个干湿循环后滑坡稳定性的变化情况可以预测,在多个降雨周期后,其安全系数有可能低于1.0,因此在多个降雨周期后应密切关注滑坡整体稳定性,做好监测预警。

4 后亭村滑坡监测及数据分析

针对永泰县泷口乡后亭村滑坡的监测情况,选

取2021年8月1日至2021年8月31日的监测数据进行分析。在31d中暴雨天数为3d,大雨天数为2d,中雨天数为3d,其余时间为小雨或无降雨状态。

降雨入渗情况由现场土壤含水率监测结果给出,根据监测资料所得其土壤含水率与降雨量的关系如图10所示。从图10中可知,土壤含水率在埋深6.0m处(HATTR01-1.5)最大,埋深3.5m(HATTR01-1)最小,埋深1.5m(HATTR01-0.5)处中等,含水率的变化趋势与降雨量的变化趋势总体一致,而含水率的变化也反应了降雨实际入渗情况。埋深3.5m处含水率在8月5日出现异常,含水率骤降,不符合实际情况,推测为仪器工作出现短时间异常。结合滑坡的岩土体特征分析,埋深1.5m、3.5m处的土体为含碎石粉质黏土,渗透性好,有利于雨水下渗,含水率受降雨量的影响明显;埋深1.5m处雨水下渗能较快速到达土体,含水率较高,而埋深3.5m处雨水入渗较少,含水率相对较低;埋深6.0m处于含碎石粉质黏土与砂土状强风化凝灰熔岩的界面,由于砂土状强风化凝灰熔岩渗透性较差,为弱透水层,入渗的速率降低,在界面处形成短暂的滞水,使得此处含水率相对较高。整体而言,含水率对降雨的响应迅速,基本不存在滞后现象,这也进一步说明坡表土体渗透性相对较强,雨水入渗迅速。

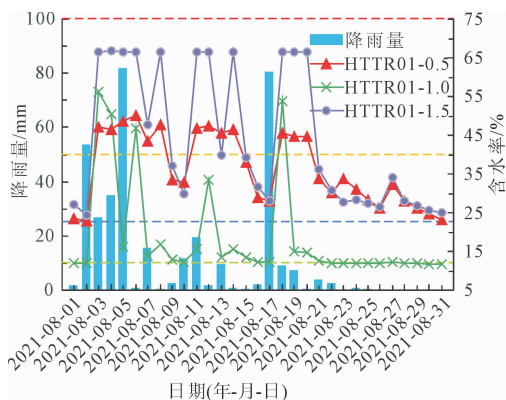


图10 日降雨量-土壤含水率关系图

根据2021年8月泷口乡后亭村的GNSS地表位移监测数据可得日降雨量与地表位移关系图,如图11和图12所示。由图中可以发现,在8月2日至8月5日的降雨期间,滑坡的地表位移变化量有所增长,但幅度很小;在雨强减弱后,每日地表位移变化量有所减小,但幅度依然很小。在8月10日至8月20日期间,地表位移量与雨强的变化基本一致,雨强增大的同时位移也随之增大;在8月20日之后其主要为小雨及无雨状态,但位移变化量依然

出现波动,且有所增长,分析应为前期降雨入渗到滑动面的过程中存在滞后现象,当雨水到达滑动面之后增加了滑带位置的土体容重,且降低其抗剪强度,导致滑坡地表产生进一步位移。从累计地表位移的变化情况也可以看出,随着降雨的进行,滑坡累计地表位移整体呈现稳步上升的趋势,速率相对较为稳定。

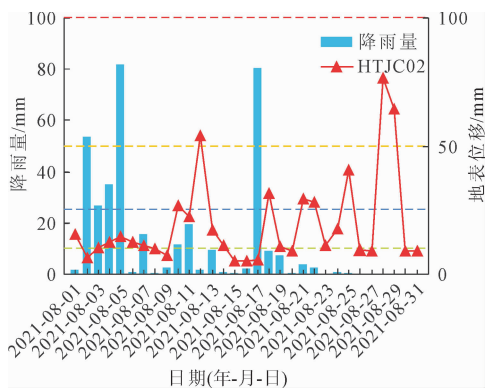


图 11 日降雨量-地表位移关系图

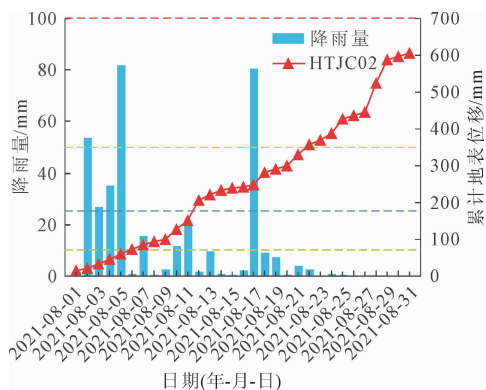


图 12 日降雨量-累计地表位移关系图

永泰县泅口乡后亭村滑坡深部位移如图 13 所示,该深部测斜仪埋设于坡脚。其中 HTSB02-TT1 埋深 6 m,HTSB02-TT2 埋深 12 m,HTSB02-TT3 埋深 15 m。HTSB02-TT1 和 HTSB02-TT3 在 2021 年 8 月期间无明显变化,但在暴雨后位移均有小幅度的增加。相对而言,HTSB02-TT2 随降雨的变化较为明显,在降雨后均有位移,在小雨期间位移数据几乎不变。HTSB02-TT2 对降雨变化比较敏感,而 HTSB02-TT1 和 HTSB02-TT3 整体稳定,可以判断 HTSB02-TT2 埋设位置靠近滑动面,HTSB02-TT1 和 HTSB02-TT3 分别处于滑体和滑床。HTSB02-TT2 月累计位移变化量为 3.32 mm,累计位移较小,说明滑坡目前总体处于稳定状态,暂时不会发生整体滑动。

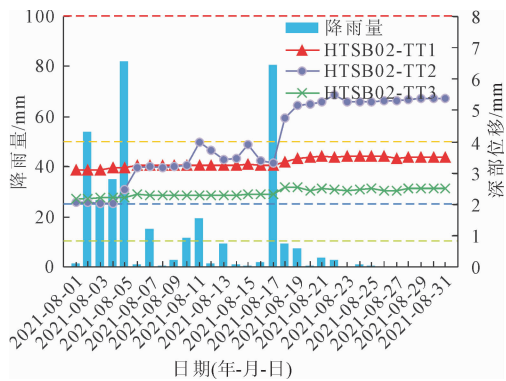


图 13 日降雨量-深部位移关系图

5 结论

(1) 永泰县泅口乡后亭村滑坡对台风“尼伯特”过境前后的饱和-非饱和渗流数值模拟结果表明,强降雨在雨水迅速入渗的过程中会在弱透水性地层出现短时间的滞水现象,形成局部高负孔压区,使周围水流向该区域汇集;潜在滑面后缘下错位置影响了渗流情况,对坡体稳定性产生不利影响;在强降雨过后高负孔压区消失,地下水位会逐渐下降并趋于稳定。

(2) 滑坡在强降雨后由于土体强度迅速减弱,使得其安全系数快速降低,在大雨后存在小幅度的下降,在雨强较小的时间段内土体饱和区域逐渐减小,土体强度会逐渐恢复,安全系数逐步回升,总体恢复速率较为稳定,但回升速率远小于强降雨时下降的速率,且安全系数难以恢复到初始值。滑坡安全系数对降雨的响应迅速,基本无滞后。

(3) 在一个干湿循环后土体由于扰动,使得抗剪强度指标减小,进而降低了其在同一外部条件下的安全系数,总体下降约 0.1。在多个降雨周期后,其安全系数有可能低于 1.0,故应持续关注该滑坡的稳定性。

(4) 土壤含水率受降雨影响较为明显,与降雨量呈正相关,响应及时,可以通过含水率来反映地下水实际入渗情况。

(5) 地表位移总体呈现稳步增长的趋势。且前期对降雨较为敏感,后期经雨水入渗,土体饱和和区域增大后雨水入渗不够及时,使得后期地表位移仍存在一定程度的增长。深部位移监测点 HTSB02-TT2 与滑动面较为接近,对于降雨更为敏感,监测过程中可重点关注。从监测数据来看,该区域总体月累计位移量较小,滑坡目前相对稳定。

参考文献:

- [1] 张卢明,何敏,郑明新,等. 降雨入渗对滑坡渗流场和稳定性的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(7):15-19.
- [2] 徐卫亚,周伟杰,闫龙. 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4):87-94.
- [3] 张祎祎,孙林娜,张兰阁,等. 降雨入渗对树坪滑坡稳定性的影响研究[J]. 土工基础, 2021, 35(5):587-591.
- [4] 龙文华,黎俊显,王莹,等. 降雨入渗对滑坡稳定性系数的影响评价——以惠州市天堂山滑坡为例[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(4):159-165.
- [5] Alsubal S, Bin Sapari N, Harahap I S H. Numerical simulation of groundwater rising due to rainfall at far field in triggering land slide [J]. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 2018, 5(10):76-86.
- [6] Fu J, Huang S L, Ding X L, et al. Influence of rain-fall on transient seepage field of deep landslides: a case study of area II of Jinpingzi Landslide [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(2):022056.
- [7] 付敬,艾凯,施华堂,等. 裂隙及强降雨入渗对堆积体滑坡渗流场及稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(9):112-117.
- [8] 邬凯,杨雪莲,王军. 山区公路降雨型滑坡区域预警研究[J]. 公路工程, 2018, 43(6):127-133.
- [9] 蔡亚飞,綦春明. 渗流-应力耦合及降雨入渗作用下的边坡稳定性分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2019, 33(3):33-39, 43.
- [10] Avirut Chinkulkijniwat, Taworn Tirametatiparat, Chanathip Supotayan, et al. Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(9):2171-2183.
- [11] 王刚,孙萍,吴礼舟,等. 降雨诱发浅表层黄土滑坡机理实验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5):1252-1263.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhang Ming, Yang Long, Ren Xingwei, et al. Field model experiments to determine mechanisms of rain-storm-induced shallow landslides in the Feiyunjiang River basin, China [J]. Engineering Geology, 2019, 262:105348.
- [15] 简文彬,黄聪惠,罗阳华,等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4):1123-1133.
- [16] 王惠卿,丰成君,戚帮申,等. 河北省顺平县李思庄滑坡稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4):595-603.
- [12] 陈家照,黄闽翔,王学仁,等. 几种典型的橡胶材料本构模型及其适用性[J]. 材料导报, 2015, 29(S1):118-120, 124.
- [13] 彭向峰,李录贤. 超弹性材料本构关系的最新研究进展[J]. 力学学报, 2020, 52(5):1221-1232.
- [14] 李晓芳,杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005(1):50-58.
- [15] 雷艳,刘礼华,陈五一,等. 大截面承载传力水封的非线性计算研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2):228-233.
- [16] 韩斌慧. 基于 Mooney-Rivlin 模型的橡胶材料常数实测及应用研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65(5):499-503.
- [17] 屠璐琼,吴佳钊,胡清波. 橡胶压缩 Mooney-Rivlin 本构模型参数拟合分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1):42-45.
- [18] Mooney M A. Theory of large elastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9):582-592.
- [19] Rivlin R S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials [M]. Collected Papers of R. S. Rivlin Springer, New York, 1997.
- [20] 胡坚柯,陈吉丰,汪振宁,等. 基于 Mooney-Rivlin 模型的高水头伸缩式水封非线性仿真[J]. 中国农村水利水电, 2022(4):215-220, 228.
- [21] 刘礼华,欧珠光,陈五一,等. 高压闸门水封的非线性计算理论与应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.

(上接第 78 页)

(3) 分别开展了 PSD-DSNSD 和 PSD 的有限元模拟,数值结果显示,加入 DSNSD 后隔震支座的竖向刚度降低了 30.25%~32.51%,可见该负刚度装置发挥了预先设定的作用。

参考文献:

- [1] 赵 灿,康 钊,江 洋,等.北京化工大学高精尖创新中心隔震设计[J]. 建筑结构,2018,48(20):43-48.
- [2] 束伟农,朱忠义,祁 跃,等.北京新机场航站楼结构设计研究[J]. 建筑结构,2016,46(17):1-7.
- [3] 薛素铎,周 乾. SMA-橡胶复合支座在空间网壳结构中的隔震研究[J]. 北京工业大学学报,2004,30(2):176-179.
- [4] 王秀丽,彭和平,李晓东. 设置抗拔型三重摩擦摆隔震支座框架结构地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(2):129-135.
- [5] 刘 涛,张 强,刘文光,等. 新型自适应刚度隔震装置的力学模型和地震响应分析[J]. 振动与冲击,2021,40(7):53-61,74.
- [6] 赵亚敏,苏经宇,周锡元,等. 碟形弹簧竖向隔震结构振动台试验及数值模拟研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(6):99-106.
- [7] 庄 鹏,薛素铎. 基于 SMA-橡胶支座和碟形弹簧的球面网壳结构多维隔震[J]. 建筑科学,2012,28(1):16-21.
- [8] 薛素铎,常海林,李雄彦,等. 抗拔型三维隔震支座位学性能研究[J]. 建筑结构,2022,52(5):81-87.
- [9] 陈兆涛,丁 阳,石运东,等. 大跨空间结构竖向变刚度三维隔震装置及其隔震性能研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(10):35-42.
- [10] 纪 晗,熊世树,袁 涌,等. 基于负刚度原理的结构减震效果理论分析[J]. 振动与冲击,2010,29(3):91-94,206.
- [11] 杨巧荣,冉茂来,何文福,等. 隔震结构基于阻尼负刚度装置的地震响应研究[J]. 振动工程学报,2018,31(6):920-929.
- [12] 何文福,柳梦宇,许 浩,等. 高静低动刚度型三维隔震系统的力学性能和地震响应研究[J]. 土木工程学报,2020,53(9):41-51.
- [13] Zhuang Peng, Wei Luyao, Wang Wei, et al. Feasibility evaluation of pre-pressed spring devices for vertical isolation of single-layer spherical lattice shell structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,158:107308.
- [14] Zhuang Peng, Zhao Wenxuan, Yang T Y. Seismic protection of a single-layer spherical lattice shell structure using a separated three-dimensional isolation system [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023,172:108026.
- [15] 碟形弹簧:GB/T 1972—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [16] 邢信慧,黄 河,张家云,等. 碟形弹簧力学性能研究[J]. 振动与冲击,2015,34(22):167-172.

(上接第 126 页)

- [8] 赵慧子,梁正召,刘祥鑫. 三点弯曲试验条件下的岩石声发射演化特征[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):6-12.
- [9] 张玉良,吴必胜,赵高峰. 基于声发射监测的岩石热损伤实时演化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2945-2958.
- [10] 范 杰,朱 星,胡桔维,等. 基于 3D-DIC 的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(4):1009-1019.
- [11] 吴秋红,夏宇浩,赵延林,等. 基于 DIC 及 CPG 技术的热冷循环后花岗岩 I 型断裂特性研究[J/OL]. 煤炭学报:1-18[2024-05-24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0974>.
- [12] Todd T P. Effect of cracks on elastic properties of low porosity rocks[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [13] Browning J, Meredith P, Gudmundsson A. Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(16):8417-8425.
- [14] Griffiths L, Lenginé O, Heap M J, et al. Thermal cracking in westerly granite monitored using direct wave velocity, coda wave interferometry, and acoustic emissions [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018,123(3):2246-2261.
- [15] Daoud A, Browning J, Meredith P G, et al. Microstructural controls on thermal crack damage and the presence of a temperature-memory effect during cyclic thermal stressing of rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2020,47(19):e2020GL088693.
- [16] Glover P W J, Baud P, Darot M, et al. α/β phase transition in quartz monitored using acoustic emissions [J]. Geophysical Journal International, 1995,120(3):775-782.
- [17] 邵保平,吴阳春,王 帅,等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(1):69-83.