

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.04

降雨条件下多层结构喷出岩滑坡 孔隙水压力变化与稳定性分析

康璇¹, 徐光黎¹, 刘府生², 董同新²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 多层结构喷出岩滑坡的形成条件和内部岩层组合都十分特殊。以浙江省下个寮滑坡为例, 分析滑坡变形与降雨之间的关系, 并采用数值模拟对坡体内部孔隙水压力和稳定性进行分析。结果表明: 因为多次间隔喷发形成的强、中风化交替岩层, 致使坡体内部岩体力学性质不统一。当降雨持续进行时, 由于渗透性低的中风化夹层存在, 深部岩体比浅部接受降雨入渗相对滞后, 且前部岩体孔压变动较后部更迟缓, 雨水入渗易在渗透系数较低的中风化层中受阻, 并顺层面排泄, 从而产生软化作用, 联合坡体内部渗流场的变动, 推动滑坡变形。

关键词: 火成岩滑坡; 多次喷出; 持续降雨; 孔隙水压力; 变形滞后

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0015-08

Pore pressure and stability analysis of a multi-layered volcanic rock landslide under continuous rainfall

KANG Xuan¹, XU Guangli¹, LIU Fusheng², DONG Tongxin²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. China Railway Siyuan Survey and Design Group CO., LTD, Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: The formation and combination of the internal strata in a multi-layered volcanic rock landslide were very special. Taking Xiageliao landslide in Zhejiang Province as an example, the relationship between rainfall and its deformation was analyzed; then obtain the internal pore pressure and stability analysis of this landslide by numerical simulation. The consequence indicate that highly-moderately weathered layer caused by several intermittent eruptions result in mechanical properties of the landslide were different. When the rainfall continues, deep layer influenced by rain infiltration behind shallow layer and the pore pressure change in the front part of landslide behind the rear because of the lower permeability moderately weathered layer, on the surface of these layers rain infiltration will be easily blocked and flow, causing a softening effect between two layers. Furthermore, the internal seepage field variation combined with softening effect in the interbed induced deformation of landslide.

Keywords: volcanic rock landslide; repeatedly eruptions; continuous rainfall; pore pressure; deformation delay

收稿日期: 2017-05-09; 修订日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472263)

第一作者: 康璇(1994-), 女, 硕士, 主要从事工程地质、岩土体稳定性方向的研究。E-mail: kangx1994@163.com

0 引言

浙江省丽水市位处台风地区,由于地理位置特殊,多为山区地带,在近几年多发现规模较大的山体滑坡。其中 2015 年 11 月 13 日发生的里东村滑坡,塌方体积约有 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$,造成 38 人遇难,27 户房屋被埋。而在 2016 年 9 月 28 日,遂昌县苏村发生的山体滑坡塌方体积约 $4 \times 10^5 \text{ m}^3$,造成 27 人失联,20 户房屋被埋。正是由于独特的气候环境和地质条件共同作用,才使得丽水市频发大规模的滑坡地质灾害^[1],因此,探究该研究区典型滑坡发生和降雨之间的关系显得尤为必要。

降雨是激励多数岩质滑坡发生的因素之一^[2-6]。对于坡表裂缝分布的岩质滑坡而言,降雨通常由后缘裂缝渗入并进入滑动面形成渗流通道由此引起滑动破坏^[7]。雨水对于坡内岩土体的作用除了使孔隙水压力迅速聚集与消散,同时也对力学性质相对较差的滑带土进行软化^[8]。例如川东的红层滑坡,雨水通过坡表的裂隙进入,滑坡内静孔隙水压力的增大和滑带土力学性质的减弱是滑坡发生的主要原因^[9-10]。不同于一般的岩质滑坡,因多次喷发而形成的滑坡因中间具有的软弱层而导致力学性质极为不统一,更容易在降雨条件下,发生软弱层面的泥化、崩解现象,导致滑坡变形,特别是长时间、高强度的雨水入渗,极易使得夹层内部含水量剧增,无形之中削弱了滑坡自身大部分的抗滑力,加速变形^[11]。在雨水作用下,层面间的软弱泥质夹层,成为滑坡变形的控制性因素,使坡体的强度大幅减弱^[12],而该类滑坡的变形也对降雨、开挖或其他影响因素的响应有不同的规律可循^[13-14]。

多层结构喷出岩滑坡由于其独特的地质形成条件,造成坡体内部力学性质差异颇大。本文以丽水市下个寮滑坡为研究对象,通过总结该滑坡对降雨的响应关系,提出影响滑坡变形的主要因素为降雨的入渗,并且滑坡位移对于降雨的响应具有一定程度上的滞后。同时依据当地气候特点设置不同强度的持续降雨,分析滑坡的入渗能力和稳定性,并与地质成因结合,进一步说明降雨对这类多层结构喷出岩滑坡的作用。研究结果为浙江省台风地带类似滑坡的形成机制和变形控制具有参考意义。

1 多层结构喷出岩滑坡及其基本特征

1.1 下个寮滑坡地质概况

下个寮滑坡位于浙江省丽水市锦水村瓯江右岸,

丽水-宁波隆起区丽水断陷盆地的南东侧。场区属剥蚀低山地貌,地形上总体呈现西北低东南高的特点,地形陡峭,地势起伏较大,东、西侧均以冲沟为界,山坡整体自然坡度 $35^\circ \sim 60^\circ$ 。滑坡主滑方向 $\text{NW}320^\circ$,平面呈圆弧形,长 560 m,宽 560 m,前后缘高差约 270 m,面积 $2.74 \times 10^5 \text{ m}^2$,铅直厚度约为 50~85 m,最厚可达 95 m,体积 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$,为一特大型、超深层岩质古滑坡。下个寮滑坡平面图见图 1。

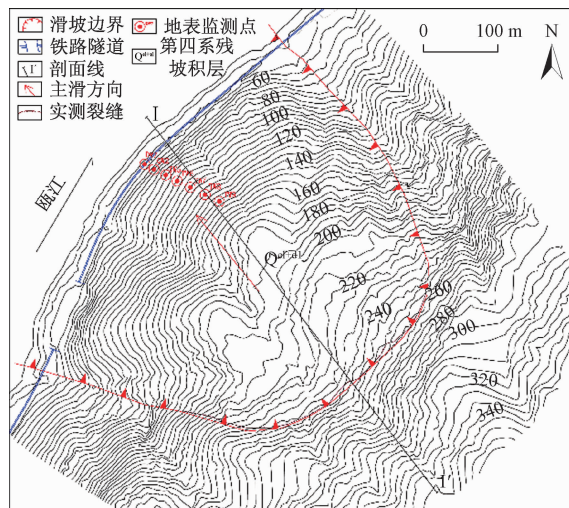


图 1 下个寮滑坡平面示意图

Fig. 1 Geomorphologic map of Xieliao landslide

下个寮滑坡前缘较陡,中部平缓,发育两级平台,后壁陡峭,坡脚建有人工切坡所建铁路。坡体表层覆盖第四系残坡积含碎块石粉质黏土,部分为碎石土,主要由碎石、角砾及粉质黏土等组成,土石比为 7:3~4:6,层厚 0.5~2.5 m。下部滑体为强、中风化凝灰岩交替组成,内部裂隙、节理相互切割贯通,岩体呈块状、碎块状。滑坡滑带物质以粉质黏土与凝灰岩碎块为主,其中含有大量片状绢云母和黏土矿物,亲水性强,结构松散,易软化。滑床岩体为下白垩统西山头组火山碎屑微风化凝灰岩(K_1x),岩体较完整,孔隙裂隙发育相对较少,倾角 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。典型工程地质剖面图见图 2。

1.2 地质成因

下个寮滑坡滑体主要由强-中风化凝灰岩层交替构成,这种具有一定韵律性的强弱力学性质交替的坡体结构非常特殊。

滑坡的发生地层为白垩系下统凝灰岩地层(K_1x),在早燕山期地壳构造运动过程中,早白垩世火山初次喷出凝灰岩岩体,这部分凝灰岩岩体经受风化和剥蚀时,再一次的火山喷发覆盖了原来的岩体,被覆盖的岩层保留了当时的风化状态,新岩层开始接受风

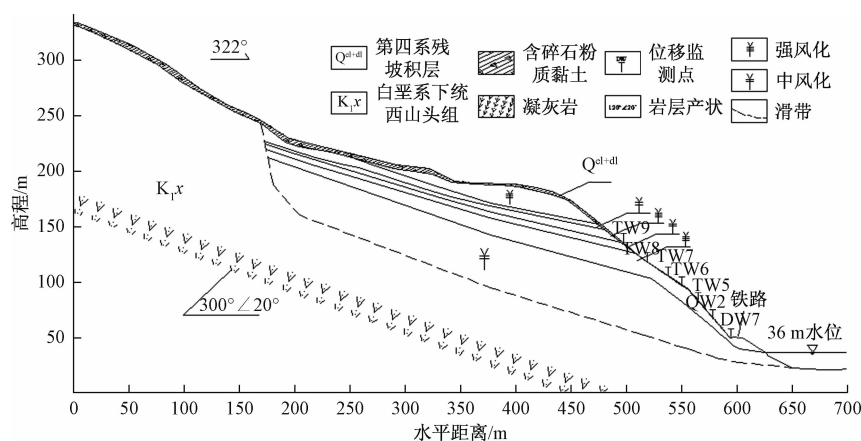


图 2 下个寮滑坡典型工程地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of Xiageliao landslide

化和剥蚀。多次间隔喷发的凝灰岩,经间隙风化后形成了上下两层性质不一的岩层。晚燕山期,岩浆喷出的岩墙、岩脉沿层间节理裂隙侵入到凝灰岩中。晚燕山期的入侵的泥化物会首先在具有空隙、性质较差的两层面间附着,故每一层性质交替的岩层都因其非连续的特点更易成为滑坡的控制层面。

2 滑坡变形特征

2.1 宏观变形

下个寮滑坡坡脚处铁路挡墙于 1998 年修建完毕后,2006 年开始出现鼓出、沉降等变形现象,2007 年初,距滑坡前缘瓯江下游 4.5 km 的水电站蓄水完成后,铁路靠滑坡部分边坡发生了小范围的塌岸现象。2015 年至 2016 年 5 月,滑坡体坡脚排水沟出现了挤压破坏现象,山体沟谷内的护墙发生了不同程度的坍塌,坡脚铁路明洞衬砌开裂,经记录,上部边坡偶发小规模落石、崩塌现象。

坡体表层前、后部各分布一条张拉裂缝,其中后缘裂缝延伸较长,纵向延伸 400 m,宽 0.05 ~ 0.4 m,据槽探揭露最大延深 1.8 m,错落高度 0.05 ~ 0.5 m。滑坡前缘附近 2 号张拉裂缝(图 3),前部的裂缝延伸较短,距离约 10 m,宽度在 0.04 ~ 0.07 m,延伸 0.1 ~ 0.2 m,错落高度 0.05 ~ 0.15 m。除滑坡体分布张拉裂缝之外,坡脚铁路挡墙发现多处裂缝,贯穿整个墙体,裂缝宽者达到 120 mm,窄者约 2 mm 左右。

2.2 变形数据分析

滑坡典型剖面处布设的水平位移监测点布置见图 1。图 4 为自 2014 年底滑坡出现明显变形以来,典型监测点水平累计与日降雨和库水位变动之间的关系图。图 5 为 2016 年各 GPS 监测点的水平累计位移与



图 3 滑坡前缘张拉裂缝

Fig. 3 Front crack of Xiageliao landslide

累计降雨量的对比关系图。

从图 4 可以看出,除 2015 年 11 月和 2016 年 1 月水位明显下降外,总体上库水位的波动幅度不大。滑坡的变形并未随着库水位的急速下降而出现明显增长,也基本不受库水位变动影响。

根据监测数据显示,2015 年 4 月,随雨量增长,DW7 监测点位移值突增,这是自实施专业监测后,滑坡第一次明显变形。从响应关系图中不难看出,每年 4 月至 8 月的雨季,滑坡变形明显,速率较快。雨季过后,变形不会立即停止,而是仍会处于低速增长。在 9 月到 3 月,无论是降雨强度还是持续时间都相比雨季要小,滑坡变形很缓慢,累计位移量没有突增的现象。可见滑坡变形主要由降雨控制,并呈正相关。

图 5 中 4 月 12 日至 5 月 6 日是 2016 年累计降雨量最大、最集中的时间段,而滑坡的变形集中反映在 4 月 24 日至 5 月 22 日;当 4 月 12 日至 24 日的累计雨量减少,滑坡的变形速率则在 5 天后变缓。在的 5 月 6 日至 22 日期间,两次累计雨量分别为 44 mm 和 29.8 mm,而滑坡的累计位移增长速率达到了监测以

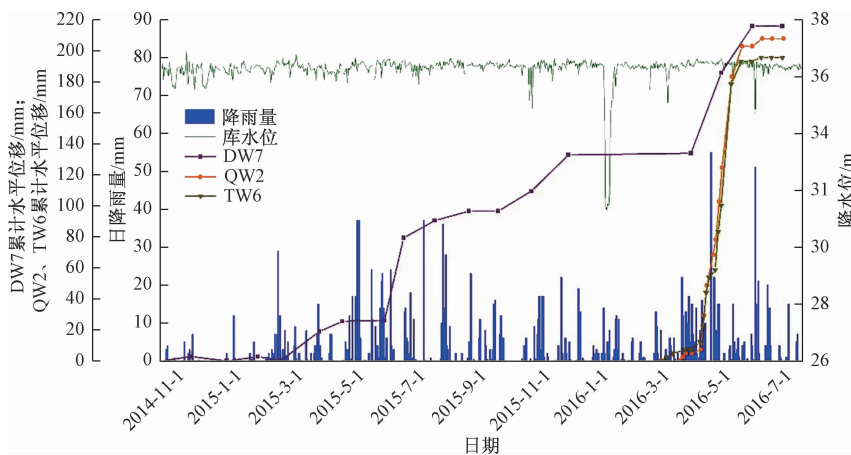


图 4 滑坡累计水平位移与降雨量和库水位关系图

Fig. 4 The correlation curves of accumulative displacement, reservoir level and rainfall with time

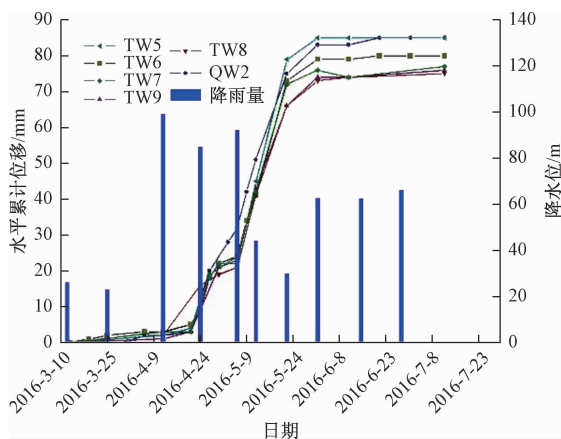


图 5 各 GPS 监测点水平累计位移与累计雨量关系图

Fig. 5 The correlation curves of accumulative displacement and rainfall with time

来的最大值(约 3mm/d),总增量约 50 mm。这种滑坡变形增长相较降雨推迟约 5~20 d 的现象说明:水平累计位移与降雨存在某种滞后关系,滑坡变形对应降雨并不存在及时性的响应性。

3 降雨条件下的数值模拟分析

3.1 模型的建立

为了验证滑坡体内部渗流场在降雨条件下的演化规律,采用 GeoStudio 中的地下水渗流分析软件 seep/w 对典型滑坡剖面进行计算。为使软件计算中的渗流场分布均匀,更直观的反映滑坡特点,对坡体内部的多层凝灰岩进行了简化(图 6)。

分析十年间(2006~2016 年)滑坡下游水库变动的高程统计数据,并结合钻孔水位反演水力学参数,最终确定 36 m 水位以上坡面为降雨入渗边界(流量随

时间变化),36 m 水位以下至基岩为定水头边界,滑带土与基岩的接触面设置为零流量边界。

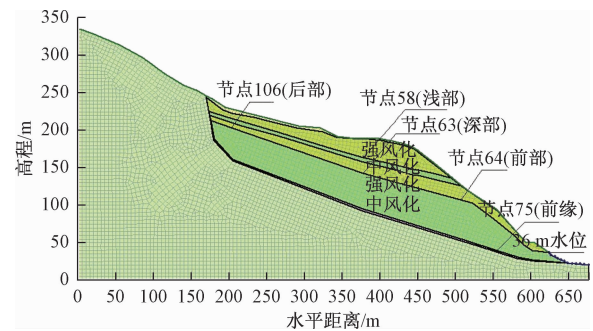


图 6 下个寨滑坡计算模型

Fig. 6 The numerical model of Xieliao landslide

3.2 参数选取与工况设置

在前期勘察资料的基础上,结合室内试验和前人经验,用类比和反演等方法得到该滑坡岩土体物理力学参数(表 1)。对于渗透性较差的滑坡来说,一般选择多日累计降雨来进行分析模拟,并且考虑到坡体渗流的滞后性,需要设置较长的时间的计算天数。在模拟计算过程中,为讨论坡体内部的孔隙水压力变化特征,设置表层强风化凝灰岩监测点 58,深层强风化凝灰岩监测点 63,前缘监测点 75,同时在深层强风化凝灰岩层后部和前部分别设置了监测节点 106 和 64。

通过统计 1997~2016 年丽水市气象和水文资料,可以得知研究区降雨特点为:雨季降雨量较多,且持续时间长,频发降雨和连续降雨的情况很常见。为了在模拟过程中体现不同程度降雨对坡体内渗流场的影响,分别选取 20 mm/d、40 mm/d、80 mm/d、100 mm/d、150 mm/d 五种降雨强度。由于岩质滑坡不同于浅

层土质滑坡,降雨入渗时间较长,故每种降雨强度均持续 5 d。

表 1 下个寨滑坡岩土体物理力学参数

Table 1 The physical and mechanics parameters of Xiageliao landslide

岩性	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/kPa	泊松比	内聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	渗透系数/cm
碎块石粉质黏土	18	2 500	0.32	16	15	2.00×10^{-3}
强风化凝灰岩	23	3 200	0.30	32	29	1.96×10^{-3}
中风化凝灰岩	25	3 800	0.30	37	34	1.00×10^{-3}
滑带土	20	2 500	0.33	17	22	1.00×10^{-4}
微风化凝灰岩	27	8 000	0.20	49	46	1.16×10^{-7}

4 计算结果与分析

4.1 渗流计算结果

为分析降雨条件下,滑坡内部、前缘的孔隙水压力变化规律,图 7(a)为 100 mm/d 降雨下坡体表层、深层强风化岩层内部节点的孔压随时间变化曲线。降雨初期,各监测节点孔压的上升规律为先增大后减小。降雨结束后,表层强风化岩体负孔隙水压力会在达到最大值后慢慢降低,而在深层,这种规律的反映更加滞后。不同于滑体内部,滑坡前缘在降雨后会聚集坡体内部和表面排出的部分雨水,由于雨水的入渗,监测节点孔隙水压力逐渐增加至 0,最终达到正值,降雨结束后,滑坡前缘仍接受上部滑体渗流路径较长未立即排

出的雨水,浸润线会保持抬升状态,前缘的正孔隙水压力趋于稳定。

为说明雨水在滑体内部的渗流途径,图 7(b)为 100 mm/d 雨强下深层强风化岩层底部三个监测节点孔压的变化曲线。降雨初始,后部节点孔压上升较快,5 d 内达到最大值,而中部和前部监测节点的孔隙水压力都在 3 d 后才开始明显增长,其中中部比前部更早上升到峰值,前部点孔隙水压力在 9 d 升到最大。孔压在达到最大值后慢慢减小,在 20 d,后部节点的孔隙水压力最小,前部节点的末期孔压最大。这种规律可以由降雨在坡体内的入渗说明,降雨初期,由于后部节点坡表较近且坡面坡度较缓,所以雨水很快入渗,其孔压迅速增大,待降雨结束,雨水消散或流走后,孔压又会慢慢降低。中部节点距坡表稍远,接受雨水入渗较慢,故孔隙水压力增长较为滞后,最大值相比前、后部较低。前部监测节点由于表层坡度较大,大部分雨水从坡表直接冲刷流走,小部分流进深层岩体内部,同时,由于下部中风化层面的存在,由后、中部节点排出的一部分水流会在重力作用下随该层面排出,流经前部岩层监测节点,这种由各岩层渗透性和重力作用共同造成的滞后性也反映在图中最后阶段前部孔隙水压力保持最大的现象。

不同降雨强度持续 5 d,表层强风化岩体内部的孔压变化曲线见图 8(a),坡体内的负孔压的增幅和速率都和雨强密不可分,增长的趋势也有不同程度的滞后性。降雨强度为 20 mm/d 时,孔压在第 5 天才缓慢上升,并在后期速率慢慢减缓,最终保持相对稳定。当雨强达 150 mm/d 时,负孔压迅速上升趋近于 0,8 d 后明显减弱,并在计算结束时一直保持下降趋势。从图 8(a)中可见,当雨强在 40 ~ 150 mm/d 时,表层强风化岩体内部的负孔压都遵循着先大幅增长,再维持稳定,后缓慢回落的规律,并在降雨第 20 天后逐渐趋于稳定。雨强越大,孔压初期增长的幅度越大,维持较高负孔压的时间就越长。这一规律印证了当强降雨时,坡

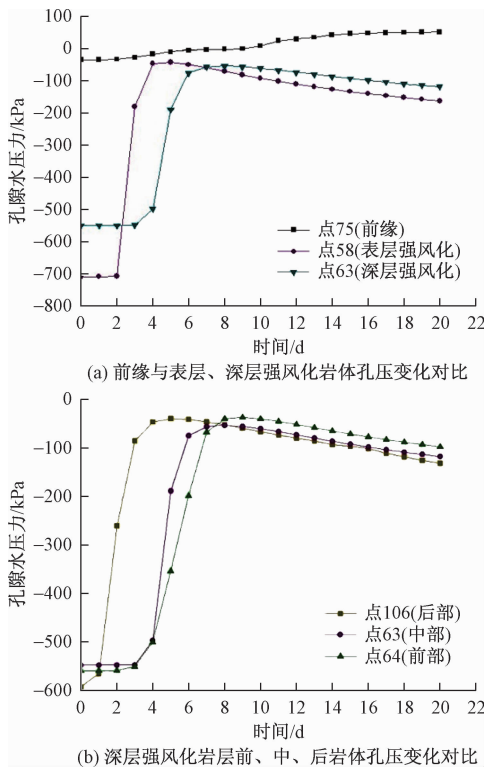


图 7 100 mm/d 雨强下滑坡内各点孔隙水压力变化对比图
Fig. 7 Comparison of pore water pressure variation at 100 mm/d rainfall intensity

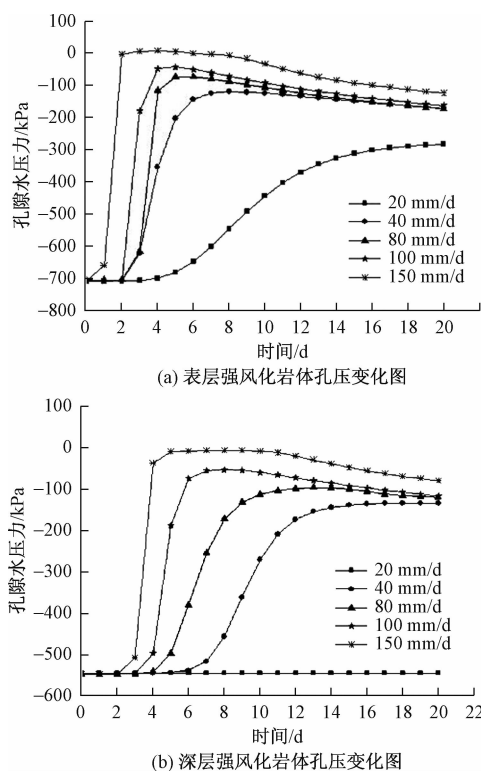


图 8 不同强度持续降雨作用下表、深层强风化岩体孔压变化图

Fig. 8 Pore water pressure variation of shallow and deep layer with different rainfall intensity

体表层岩体内部较快接受入渗,经过一定时间,雨水不会一直存留,而是会逐渐下渗或由层面排出。

而对比图 8(b) 中深层强风化岩体孔压变化规律,可以看出孔压随降雨的变化规律和表层岩体相似,但初始变动更加缓慢,增幅也更小。而降雨强度为 40 mm/d 时,负孔压不会升至峰值后回落,而是逐渐增长趋于稳定。雨强降至 20 mm/d 时,深层强风化岩体孔压几乎不变。

由图 8 可以看出:坡内两层强风化岩层的孔压会随雨水入渗而增大,增量和增速与雨强有关,计算末期孔压值都会趋于稳定。深层岩体的孔压对降雨的响应比表层滞后,当雨强较小时,深层强风化岩体孔压无增长趋势。这一结果充分印证了,表层渗透系数较大的强风化岩层对降雨响应稍有滞后,随着雨水的下渗,孔压在达到峰值后会下降,当雨水进入下部岩层后,孔压逐渐趋于稳定;由于中风化层的存在,雨水在入渗时会受到阻隔并随层面排泄,少部分进入下部深层岩体,这也体现了正是由于中间渗透性相对差的中风化岩层,导致深层岩体孔压上升小,滞后迟缓,孔压消散也更缓慢。而雨强小至 20 mm/d 时,深层岩体孔压无增大趋势,可以认为雨水入渗后多在表层浅部坡体汇集并排

出,对深层岩体影响不大。

4.2 稳定性计算结果

将上述分析结果导入边坡稳定性分析模块 slope/w 中,不同强度降雨结束后稳定性分析结果见图 9。由图 9 可知,对滑坡稳定性影响最小的雨强为 20 mm/d,当强度达到 40 mm/d 时,在降雨结束后的第 10 天稳定性开始降低,最终在第 17 天后稳定性系数维持恒定值。当降雨强度在 80 ~ 150 mm/d 时,降雨停止的 1 ~ 4 d 内滑坡稳定性普遍开始递减,降雨强度减弱至 100 mm/d 时,稳定性在 10 d 明显下降,计算后期 22 ~ 23 d 时达到最低后保持不变。而 150 mm/d 的条件下,滑坡稳定性在 8 d 开始大幅减弱,22 d 后维持不变,处于最不稳定的状态。故滑坡体的稳定性和内部渗透性一样,并非在降雨发生时就存在突变,而是具有一定的滞后性,滞后时间的长短与降雨强度、持续时间、坡体内部岩土体性质有着密切的联系。

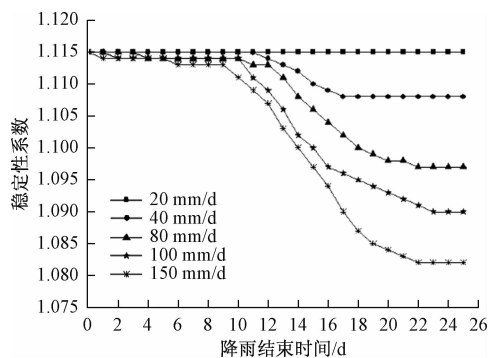


图 9 不同强度持续降雨结束后滑坡的稳定性变化曲线

Fig. 9 Variation curve of stability coefficient with different rainfall intensity

5 降雨入渗对滑坡的作用

下个寮滑坡由于其多次喷出成岩的特殊地质成因,导致滑体内部各层岩体的强度和渗透性具有很大差异。降雨入渗情况由于坡体内部性质不一的交互岩层而变得十分复杂。

降雨条件下滑体自重应力上升,岩体裂隙充水形成静水压力。入渗过程中,滑坡表层松散的碎块石堆积土层饱水,长时间的风化作用使得滑体内部的凝灰岩裂隙极为发育,为降雨的下渗提供良好的排水渗流通道。下渗后雨水充斥岩体裂隙,后缘发育的张拉裂缝和内部的陡倾节理同时充水加宽加深,形成了指向滑坡临空面的静水压力。入渗的雨水不会立即消散,残存充斥的水体增大了坡体的重度,引起下滑力上升。

随着降雨入渗的深入,由于多次喷出成岩形成的

强、中风化岩层交替现象,使得渗透系数较低的中风化岩层在滑体内起到了相对隔水层的作用,水流更易在低渗透性的岩层顶面汇集。下伏完整基岩的存在,同样造成入渗水流沿基岩面排泄。两者在滑体内部形成的,由于水流随层面排泄产生的动水压力,对滑坡产生不利影响。

在后期岩浆喷发过程中,一些性质较差的泥化物多会沿两层间隔喷发的岩层空隙中侵入,导致岩层交互面处遇水更易发生泥化、软化作用,成为滑体性质的软弱控制面。

最后,雨水迟缓下渗至基岩,由于微风化凝灰岩节理不发育,水流随基岩顶层流出,在重力作用下排泄,与松散的滑带土物质相互浸泡、侵蚀,致使剪切面贯通,进一步推动滑坡变形。

6 结论

本文以下个寮滑坡这一典型的多次喷出型岩质滑坡为例,分析了引起其变形的的主要因素,设定不同强度的持续降雨条件,得到了坡体内部孔隙水压力的变化规律和稳定性,进一步说明降雨对该类滑坡的作用,并得到以下结论:

(1)相比长年变动甚微的库水位而言,下个寮滑坡变形对雨季持续高强度降雨响应更加明显,特别是在2016年4~5月的集中降雨,造成滑坡的大幅变形,从累计降雨和变形量的关系图中得知,这种变形对于降雨存在5~20 d的滞后性。

(2)位于深层强风化岩层的三个监测节点反映出,后部、中部、前部的孔压依次随降雨的入渗而升高,由于下伏渗透性较低的中风化岩层的存在,雨水入渗大部分会随岩层界面流至前部,即前部监测节点孔压升高较后部、中部更滞后,而峰值最大。

(3)深层强风化岩层的孔压对降雨的响应相对表层更滞后,孔压变动更小。40~80 mm/d的雨强下,孔压不再有陡增现象,40 mm/d条件下孔压平稳增大,无回落现象;在20 mm/d的低强度降雨作用下,深部强风化岩层内的孔压变化很小。

(4)相同的降雨历时内,滑坡的稳定性变化也随入渗有所延迟,当雨强在40~150 mm/d时,坡体稳定性系数减小随雨强增大而提前,并在17~23 d降至最低。20 mm/d降雨条件下,由于雨水并未入渗到深层坡体,故对滑坡稳定性影响不大。

(5)下个寮滑坡的形成是由地质成因和降雨共同控制的。不同间隔段的多次喷发导致了坡内强、中风

化凝灰岩独特的交互层现象,而由于坡体内部渗透性和力学性质的各向异性,使得降雨入渗更容易在性质不同的岩层面上聚集,从而发生复杂的泥化、软化作用,推动滑坡进一步变形。

参考文献:

- [1] 麻士华,李长江,孙乐玲,等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 20-25.
MA Tuhua, LI Changjiang, SUN Leling, et al. Rainfall intensity-duration thresholds for landslides in Zhejiang region, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2): 20-25.
- [2] Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration [J]. Water Resources Research, 2000, 36(7): 1897-1910.
- [3] Wilkinson P L, Anderson M G, Lloyd D M. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 27(12): 1285-1297.
- [4] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2001, 59(3-4): 253-266.
- [5] 杜国梁,张永双,姚鑫,等. 都江堰市五里坡高位滑坡-碎屑流成因机制分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 493-501.
DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, YAO Xin, et al. Formation mechanism analysis of Wulipo landslide-debris flow in Dujiangyan City [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 493-501.
- [6] 刘礼领,殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1061-1066.
LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066.
- [7] 路为,白冰,陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑动破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 204-207.
LU Wei, BAI Bing, CHEN Congxin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 204-207.
- [8] 李龙起,罗书学,王运超,等. 不同降雨条件下顺层边坡力学响应模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 755-762.

- LI Longqi, LUO Shuxue, WANG Yunchao, et al. Model tests for mechanical response of bedding rock slope under different rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (4): 755 – 762.
- [9] 李江, 许强, 王森, 等. 川东红层地区降雨入渗模式与岩质滑坡成因机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (S2): 4053 – 4062.
- LI Jiang, XU Qiang, WANG Sen, et al. Research on rainfall infiltration models of slopes and formation mechanism of rock landslides in red stratum in the east of Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (S2): 4053 – 4062.
- [10] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (S2): 3783 – 3790.
- ZHANG Ming, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Study of mechanism of landslide induced by rainfall in gently inclined red stratum in east sichuan basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S2): 3783 – 3790.
- [11] 冯振, 金福喜, 龚裔芳. 红砂岩顺层边坡监测及变形破坏分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (S2): 4078 – 4086.
- FENG Zhen, JIN Fuxi, GONG Yifang. Monitoring and deformation failure analysis of red sandstone bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (S2): 4078 – 4086.
- [12] 肖国峰, 冯光乐, 陈从新, 等. 硬岩中倾顺层边坡变形特征和破坏机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S2): 4458 – 4464.
- XIAO Guofeng, FENG Guangle, CHEN Congxin, et al. Research on deformation and failure mechanism of moderate-dip cataclinal hardrock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S2): 4458 – 4464.
- [13] 李龙起, 罗书学, 魏文凯, 等. 降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (9): 1772 – 1778.
- LI Longqi, LUO Shuxue, WEI Wenkai, et al. Model tests of rainfall infiltration effect on bedding rock slope with weak interlayer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (9): 1772 – 1778.
- [14] 徐兴华, 尚岳全, 唐小明, 等. 降雨作用及坡脚开挖激发路堑滑坡的灾变效应 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24 (4): 6 – 15.
- XU Xinghua, SHANG Yuequan, TANG Xiaoming, et al. Catastrophic effect of landslide under rainfall condition and excavation at foot [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24 (4): 6 – 15.

封面照片说明

贵州纳雍张家湾普洒村山体崩塌

2017 年 8 月 28 日 10 时 40 分左右, 贵州省纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩组发生山体崩塌, 主崩方向约北西 320°, 体积约 $6 \times 10^5 \text{ m}^3$, 掩埋了下部普洒村大树脚组部分房屋, 共造成 35 人遇难。

(国土资源部地质灾害应急技术指导中心 陈红旗 供稿)