

引用格式: 韦文智, 赵瑞华, 廖丽萍, 刘政委. 广西容县花岗岩残积土人工切坡诱发滑坡过程分析 [J]. 山地学报, 2022, 40(3): 396-410.

WEI Wenzhi, ZHAO Ruihua, LIAO Liping, LIU Zhengwei. Granite residual soil landslide induced by artificial slope cutting in Rong county, Guangxi province, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(3): 396-410.

# 广西容县花岗岩残积土人工切坡诱发滑坡过程分析

韦文智<sup>1,2,3</sup>, 赵瑞华<sup>1,2,3</sup>, 廖丽萍<sup>1,2,3\*</sup>, 刘政委<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;

3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

**摘要:** 广西容县花岗岩残积土属于中国华南地区特殊土, 人工切坡频繁失稳诱发大量滑坡, 严重威胁当地居民生命财产安全。过去研究多数聚焦于岩质或黄土切坡失稳问题, 未考虑降雨激发下特殊土切坡引发滑坡的动力学过程。本文以花岗岩残积土人工切坡为研究对象, 采用数值模拟和人工降雨土槽模型试验, 定量揭示切坡坡度和切坡高度对无裂隙边坡稳定性的影响规律, 对比分析自然、无裂隙、含裂隙边坡的稳定性, 探讨切坡诱发滑坡的动力学过程。结果表明: (1) 当切坡坡度由 50° 增至 70° 或切坡高度由 2 m 增至 14 m, 切坡无裂隙边坡稳定性系数的减小幅值约为 0.2; 观测点 *a* 与 *c* 的孔隙水压力的响应时间分别提前 3 h 与 11 h, 4 h 与 16 h。 (2) 当切坡坡度为 60° 和高度为 8 m 时, 降雨前后自然边坡、切坡无裂隙边坡的稳定性系数分别由 1.30、1.21 缓慢地下降至 1.26、1.17, 而切坡含裂隙边坡的稳定性系数却由 1.21 急剧下降至 0.98, 切坡与裂隙对边坡稳定性的耦合负面影响不容忽视。 (3) 坡脚的体积含水率响应时间最短; 体积含水率的响应时间较孔隙水压力的早; 孔隙水压力的增减波动与其消散的时间尺度、降雨入渗、土体剪切变形有关。 (4) 花岗岩残积土切坡诱发滑坡的动力学过程为卸荷裂隙形成→坡脚失稳→表面侵蚀与沟道侵蚀→张拉裂隙形成与局部土体滑动。研究成果将为花岗岩残积土工程边坡的防护治理提供理论依据。

**关键词:** 花岗岩残积土; 人工切坡; 滑坡形成过程; 广西; 容县

**中图分类号:** P642

**文献标志码:** A

玉林市容县位于广西东南部大容山、云开大山之间, 境内山峦叠嶂、丘陵起伏, 山地面积约占总面积的 85%<sup>[1]</sup>, 土地资源稀缺。随着城镇经济蓬勃发展与人口持续增长, 削坡修路、倚坡建房等平山造地<sup>[1-2]</sup>活动日益强烈, 在花岗岩残积土分布区形成大范围的人工切坡。在强降雨和其他人为因素共同激发作用下, 人工切坡频繁地失稳诱发滑坡、崩塌等次生地质灾害<sup>[3-4]</sup>。2010 年 6 月 2 日, 强降雨引发的滑坡造成 32 人死亡, 1049 间民房损毁, 直接经济

损失为 1717.2 万元<sup>[5]</sup>。此类工程滑坡虽然规模小, 但是数量众多、影响范围广, 具备群发性和突发性的显著特征, 已严重威胁人民生命财产安全。区域滑坡的监测预警与防治正面临严峻的考验<sup>[6-7]</sup>。

人工切坡失稳问题备受关注。陈洪凯等将公路高切坡划分为 3 大类和 9 小类<sup>[8]</sup>, 推进了高切坡的研究工作。已有研究根据实际工程案例, 分析其破坏模式<sup>[9]</sup>、变形演化机理、影响因素<sup>[10-11]</sup>, 提出防护治理措施<sup>[12-14]</sup>。各类岩土体工程切坡的失稳模

收稿日期 (Received date): 2021-05-19; 改回日期 (Accepted date): 2022-06-13

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41901132); 广西科技厅基金 (2018GXNSFAA138187)。[National Natural Science Foundation of China (41901132); Natural Science Fund Project of Guangxi Province of China (2018GXNSFAA138187)]

作者简介 (Biography): 韦文智 (1997-), 男, 广西梧州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地质灾害机理与防治技术。[WEI Wenzhi (1997-), male, born in Wuzhou, Guangxi province, M. Sc. candidate, research on mechanism of geological hazards and control technology] E-mail: weiwzmz@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 廖丽萍 (1985-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 地质灾害机理与防治技术。[LIAO Liping (1985-), female, Ph. D., lecturer, research on mechanism of geological hazards and control technology] E-mail: 01llp@163.com

式存在较大差异,例如,岩质切坡多出现崩塌与风化剥落,岩土质切坡多数为差异性风化破坏,土质切坡以崩滑破坏为主要模式<sup>[15]</sup>。人工切坡失稳除了受控于地质构造、岩土体类型等内部因素,还与切坡形态、降雨等外部因素密切相关<sup>[16]</sup>。只有当开挖角度与方式同时满足坡体稳定与坡面安全的需求时,切坡设计方案才合理<sup>[17]</sup>。部分学者采用数值模拟方法揭示了开挖位置<sup>[18]</sup>、深度与进尺<sup>[19]</sup>对边坡应力应变特征及其稳定性的影响。这些影响主要体现在以下方面:切坡打破了斜坡原有的应力平衡状态<sup>[20]</sup>,弱化坡体前缘的支撑力<sup>[21]</sup>,引起坡脚和坡顶出现应力集中、局部发生屈服破坏,致使岩体和节理的强度衰减<sup>[22]</sup>,导致坡体在切坡面处产生较明显的变形<sup>[23]</sup>,从而使边坡稳定性显著下降,甚至促使坡体沿着软弱夹层滑动<sup>[24-25]</sup>。上述影响通过野外调查、原位渗水试验与模型试验得以进一步证实与深化,例如,在无降雨条件下,切坡引起的坡体内部变形是蠕动变形向加速滑动转变的缓慢累积过程<sup>[26]</sup>。然而,强降雨会促使变形进程加快,导致工程滑坡迅速形成,原因是切坡强化了水土耦合作用对变形的影响<sup>[27]</sup>。

综上所述,过去研究多数聚焦于岩质或黄土切坡失稳问题,虽然均指出切坡影响边坡稳定性<sup>[27]</sup>是滑坡的主要诱发因子<sup>[28]</sup>,但是尚未考虑降雨激发的不利影响。容县花岗岩残积土属于中国华南地区特殊土,粒度分布呈粗细颗粒均匀混杂的特征<sup>[29]</sup>,具

有黏性土与砂性土的双重力学性状<sup>[30]</sup>。现有的研究结论是否适用于花岗岩残积土,在区域强降雨耦合作用下该类特殊土人工切坡如何失稳诱发滑坡,其过程与其他土质工程滑坡有何区别,仍是有待解决的科学问题。本文以花岗岩残积土为主要研究对象,采用数值模拟定量地揭示切坡坡度和切坡高度对无裂隙边坡稳定的负面影响规律,对比分析自然边坡、切坡无裂隙边坡、切坡含裂隙边坡的稳定性,选取最不利工况开展人工降雨土槽模型试验,探讨花岗岩残积土切坡诱发滑坡的动力学过程。以期为花岗岩残积土工程边坡的防护治理提供理论依据。

# 1 研究区和研究方法

## 1.1 研究区与数据

容县位于亚热带季风气候区,年平均降雨量为1737.4 mm,最大日降雨量为244.9 mm。花岗岩残积土滑坡呈夏汛突发的特点<sup>[1-2]</sup>,并在六王镇人工边坡集中发育<sup>[3]</sup>。本文统计了该区域典型滑坡的数据<sup>[5]</sup>(表1),切坡坡度 $\theta$ 为 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,切坡高度 $h$ 为2~13 m,切坡高度 $h$ 与总坡高 $H$ 的比值 $\lambda$ 为0.038~0.271。花岗岩残积土的厚度、物质成分与粒度组成如表2所示,残积土的粒度主要由砂粒( $0.075\text{ mm}<\text{粒径 }d\leq 2\text{ mm}$ )和细粒( $d\leq 0.075\text{ mm}$ )构成。斜坡表面分布着多条裂缝,裂隙的最大延伸深度约2 m,最大宽度为0.15 m。地下水有2种

表 1 六王镇典型滑坡数据<sup>[5]</sup>  
Tab.1 Data for typical landslide in Liuwang town

滑坡地点	总坡高 $H/\text{m}$	自然坡度 $\alpha/(^{\circ})$	切坡坡度 $\theta/(^{\circ})$	切坡高度 $h/\text{m}$	$h$ 与 $H$ 的比值 $\lambda$
龙头大园	53.00	35~40	50~70	2.00~8.00	0.04~0.15
龙头上塘	48.00	35~40	50~70	7.00~13.00	0.15~0.27
石岭地雷	53.00	30~40	50~70	6.00~8.80	0.11~0.17
陈村	55.00	30~50	40~70	5.00~10.00	0.09~0.18

表 2 花岗岩残积土的厚度、物质成分与粒度组成  
Tab.2 Thickness, material composition, and particle size of granite residual soil

土层 类型	厚度/ $\text{m}$	物质成分	各粒组质量百分含量/%				
			$2<d\leq 5$	$0.5<d\leq 2$	$0.25<d\leq 0.5$	$0.075<d\leq 0.25$	$d\leq 0.075$
残积土	10.30~16.80	石英、高岭土、云母、少量暗色矿物	10.41~13.38	31.53~36.58	10.06~12.11	16.16~20.19	20.14~24.07

注: $d$ 为粒径(mm)。

类型。一种是花岗岩网状风化裂隙水,对滑坡形成无影响;另一种是松散岩类孔隙水,含量极少,在钻孔揭露深度内未出露。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 数值模拟

#### (1) 计算模型

六王镇龙头村大园屯的龙头大园斜坡(110°46′36″E,22°50′32″N)位于居民房屋后,是典型的工程切坡,在2010年6月2日强降雨作用下,失稳诱发滑坡(图1),致使30间房屋损毁。目前滑坡存留残余滑体,仍对前缘的居民生命财产安全构成潜在威胁<sup>[5]</sup>。本文以该滑坡为原型,以I-I工程地质剖面作为计算剖面(图2a)。图2b中的模型长78 m,左

侧高18 m,右侧高53 m,共划分为2639个单元,2707个节点。单元类型为四边形与三角形单元。本文采用Geo-studio软件中SEEP/W模块分析渗流场,将渗流场导入SLOPE/W模块中,采用Mohr-Coulomb屈服准则计算边坡稳定性。边界条件是依据工程地质调查中的地下水位等信息设置:①边坡表面为流量边界,稳态分析中流量边界根据年降雨量1734.4 mm设置,瞬态分析中的流量为2010年群发性滑坡发生当天对应的小时降雨强度<sup>[5]</sup>(图3),即每天1时—15时降雨(12时的降雨强度最大,为 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),16时—24时无雨,降雨历时为7天;②模型左右两侧上部为零流量边界,左侧下部113 m与右侧下部117 m处设置水头边

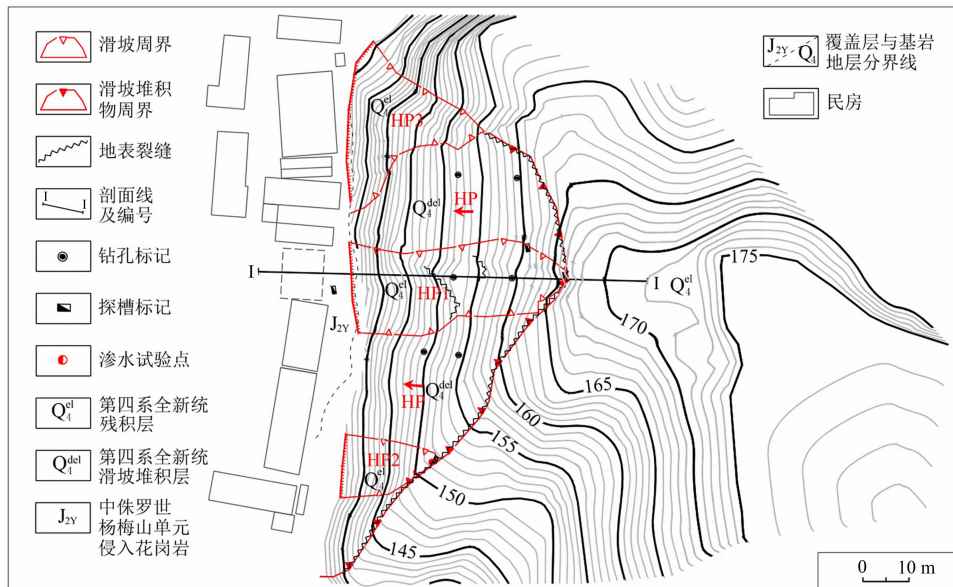


图1 大园滑坡的工程地质平面图<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Engineering geological plan view of the Dayuan landslide<sup>[5]</sup>

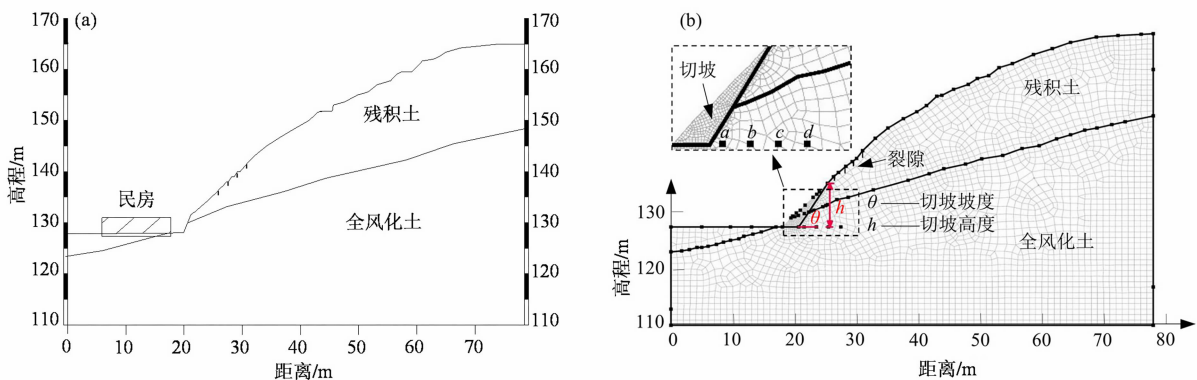


图2 滑坡剖面图<sup>[5]</sup>: (a) I—I工程地质剖面图; (b) 有限元计算模型

Fig. 2 Landslide profile<sup>[5]</sup>: (a) I—I engineering geological profile; (b) finite element calculation model

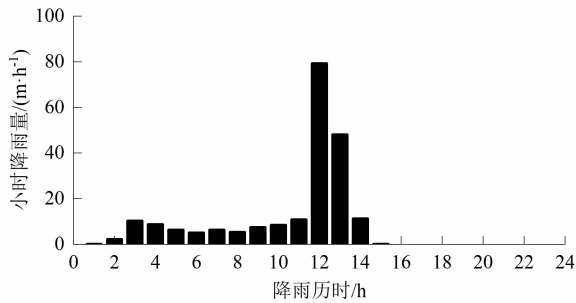


图3 滑坡发生当天的小时降雨量<sup>[5]</sup>

Fig. 3 Hourly rainfall on the day the landslide occurred<sup>[5]</sup>

界；③模型底部为不透水边界。模型的左右两侧设置水平位移约束，底部设置水平和竖直位移约束。为了达到模拟切坡的效果，计算时对切坡的区域进行删除。

本文在坡顶、坡中、坡脚不同深度位置均设置了诸多观测点，并综合分析了各观测点的孔隙水压力（简称孔压）的变化规律。然而，切坡坡脚处的孔压变化较为显著，而远离切坡处的孔压却不受切坡的影响。因此，本文重点分析坡脚的特征观测点（观测点*a*坐标为*x* = 21 m，*z* = 18 m；观测点*c*坐标为*x* = 27 m，*z* = 18 m）的数据。

(2) 计算参数

残积土和全风化土的物理力学参数见表3。本文采用 van Genuchten 模型<sup>[31]</sup>模拟得到残积土与全风化土的土水特征曲线，通过代入饱和渗透系数获得渗透系数曲线（图4）。

表3 土体物理力学参数

Tab. 3 Soil physical and mechanical parameters

土层	天然容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比	变形模量/ MPa
残积土	18.34	32.84	23.14	0.33	14.80
全风化土	18.84	38.71	26.99	0.30	30.00

(3) 计算方案

①切坡无裂隙的计算方案：根据表1将切坡坡度*θ*设置为50°、55°、60°、65°、70°；每个切坡坡度下的切坡高度与总坡高的比值*λ*依次为0.04、0.08、0.12、0.16、0.20、0.24、0.28，总坡高为50 m，因此，切坡高度*h*依次为2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m。

②切坡含裂隙的计算方案：因切坡形成的卸荷

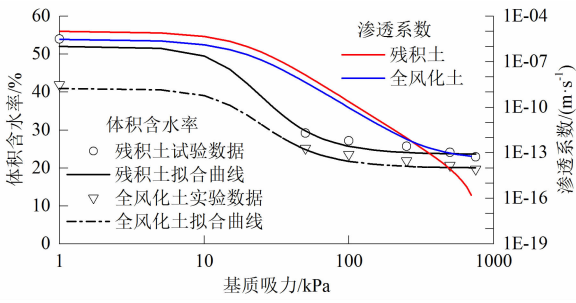


图4 残积土与全风化土的土水特征曲线和渗透系数曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of residual soil and fully weathered soil

裂隙会进一步扩展为剪切裂隙面，这类裂隙也被称为主裂隙。主裂隙对边坡稳定性的影响远大于次生裂隙的影响<sup>[32-33]</sup>，所以，本文仅考虑主裂隙。裂隙的模拟有2种方法：一是将主裂隙假定为合理的水头边界；二是含裂隙的土层被当作强透水材料<sup>[32-34]</sup>。本文采用第1种方法，对裂隙施加总水头边界，总水头*h<sub>w</sub>*为裂隙标高。此外，龙头大园滑坡的主裂隙位于坡脚表层，裂隙深度为2 m，间距为3 m，共4条，在强降雨条件下处于积水状态。上述裂隙特征在计算模型中被考虑。

1.2.2 人工土槽模型试验

本文选取数值模拟中的最不利方案开展人工降雨土槽模型试验，分析体积含水率和孔隙水压力的变化规律，探讨切坡诱发滑坡的动力学过程。试验设备包括模型箱（长3 m、宽0.8 m、高1.1 m）、降雨设备和数据监测系统。降雨设备主要为控制系统、储水箱、抽水泵以及降雨杆等。数据监测系统包括体积含水率监测系统（传感器型号为MP-406B和采集器型号为M-16）和孔隙水压力监测系统（传感器型号为HC-25和采集箱型号为MCU）

残积土边坡的长度为1.5 m、宽度为0.8 m、高度为0.6 m（图5），分为6层，每层厚度0.1 m。根据野外详查结果<sup>[5]</sup>，每层土样的干密度被设定为1.4 g·cm<sup>-3</sup>，初始质量含水率控制在8%~10%。为达到预设的初始干密度，每层土样均用木锤夯实。试验设备不能模拟小于20 mm·h<sup>-1</sup>的降雨强度，且突发性特大暴雨和长历时强降雨是残积土滑坡的主要诱发因素，因此，试验的降雨强度被设定为滑坡发生当天最大的降雨强度80 mm·h<sup>-1</sup>（图3）；降雨时段为2个，每个时段为8 h，降雨的时间间隔为16 h。坡体分别布置5条监测线（*F*~*J*），中心剖面共有12

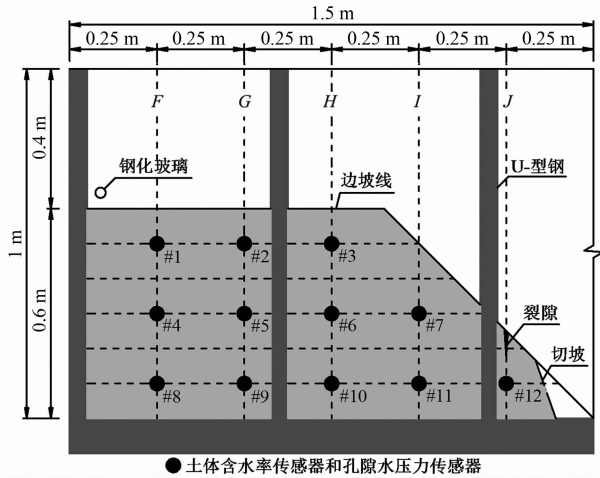


图 5 模型剖面图

Fig. 5 Cutaway view of model

个观测点(编号为#1~#12),每个观测点埋设1个土壤水分传感器和1个微型孔隙水压力计(图5)。

## 2 结果分析

### 2.1 数值模拟结果

#### 2.1.1 切坡无裂隙边坡

第2天12时坡脚处的孔压等于0(图6),而坡顶与坡中的孔压均为较大的负值,这说明雨水入渗对坡脚土体的负面影响最大。由图7可知,稳定性系数在降雨前均大于1.1,在降雨结束时均下降0.1~0.2,个别工况的稳定性系数小于1.0。可见,降雨入渗不利于边坡稳定,这与已有研究成果相符合<sup>[33]</sup>。当切坡坡度由50°增至70°时,稳定性系数随切坡高度增大而减小的幅值由0.06(降雨前)与0.03(降雨结束)增至0.22(降雨前)与0.24(降雨结束)。当切坡高度由2 m增至14 m时,稳定性系数随切坡坡度增加而减小的幅值由0.03(降雨前)与0.02(降雨结束)增至0.19(降雨前)与0.23(降雨结束)。上述结果说明,当切坡坡度或切坡高度增大后,稳定性系数会随着切坡高度或切坡坡度的增加而显著减小。基于上述结果,为了探明切坡坡度、切坡高度对边坡稳定性的单独影响,本文详细分析两种工况(同一切坡高度,5个切坡坡度的边坡;同一切坡坡度,7个切坡高度的边坡)的模拟结果。两种工况的分析结果适用于整个计算方案。

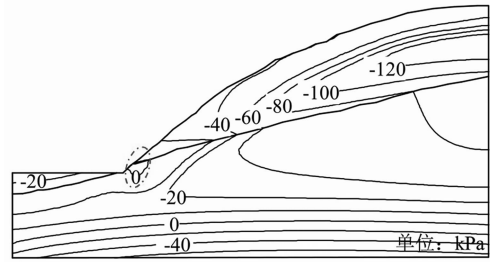


图 6 第2天12时的孔隙水压力

Fig. 6 Pore water pressure at 12:00 on the 2nd day

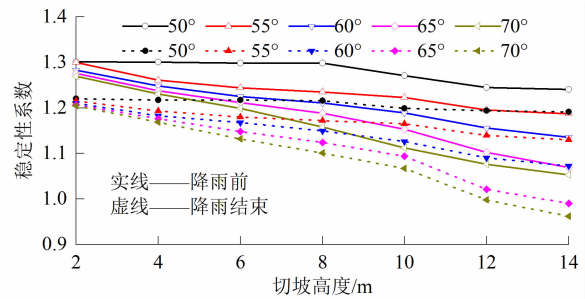


图 7 稳定性系数与切坡坡度、切坡高度的关系

Fig. 7 Relationship between stability coefficient and cutting slope degree, cutting slope height

#### 2.1.1.1 切坡坡度 $\theta$ 的影响

第7天14时的稳定性系数最小,此时潜在滑移面上的孔压与坐标 $x$ 的关系如图8所示。由图8可知,当 $\theta = 50^\circ$ ,潜在滑移面的总水平长度(坐标 $x$ 范围)为21.76~65.06 m,正孔压对应的坐标 $x$ 为21.76~32.32 m;当 $\theta = 70^\circ$ ,潜在滑动面的总水平长度为22.99~48.11 m,正孔压对应的坐标 $x$ 为22.99~33.15 m。由此可见,坡脚(坐标 $x$ 范围:21~32 m)出现正孔压,这说明雨水入渗促使坡脚一定范围的土体饱和,导致基质吸力消失,孔压增大。当 $\theta$ 由50°增至70°,虽然潜在滑移面的总水平

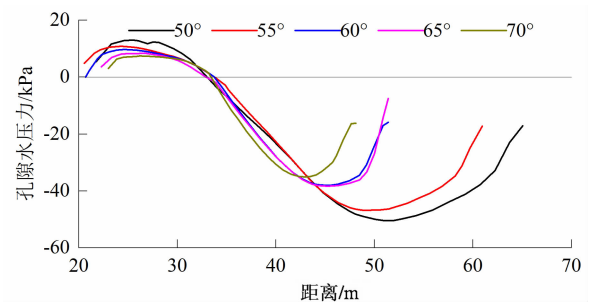


图 8 第7天14时潜在滑移面的孔隙水压力

Fig. 8 Pore water pressure on the potential slip surface at 14:00 on the 7th day



长度减小约 18 m,但是正孔压对应的长度基本不变。

当  $h = 8$  m, 5 种  $\theta$  ( $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $65^\circ$ 、 $70^\circ$ ) 条件下的观测点  $a$  和  $c$  的孔压如图 9a、图 9b 所示。两个观测点孔压的变化均包含 2 个阶段,即初始急剧增加、后期波动变化。观测点  $a$  的孔压在第 1 天降雨初期便急剧增加,当降雨至 12 时(此时的降雨强度最大,为  $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),孔压增幅最大;在 16 时—24 时无雨期间,孔压减小;后续 6 天的孔压变化规律和第 1 天的类似。观测点  $c$  的孔压在第 1 天处于初始恒定的状态,在第 2 天缓慢增加,在第 3 天急剧上升,自第 4 天始,孔压波动。上述数据说明观测点  $a$  的孔压对降雨的响应时间较观测点  $c$  的早,且波动变化幅度相对较大。在观测点  $a$  中, $70^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $60^\circ$  的孔压在降雨第 1 天 2 时基本同时响应, $55^\circ$  和  $50^\circ$  的孔压分别第 1 天 3 时、5 时响应。在观测点  $c$  中, $70^\circ$ 、 $65^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $55^\circ$  及  $50^\circ$  的孔压分别第 1 天 19 时、第 1 天 23 时、第 2 天 1 时、第 2 天 2 时及第 2 天 6 时响应。这说明当  $\theta$  由  $50^\circ$  增至  $70^\circ$ ,观测点  $a$  的孔压响应时间提前 3 h,观测点  $c$  的孔压响应时间提前 11 h。这是因为当  $\theta$  增加后,观测点的上覆土体

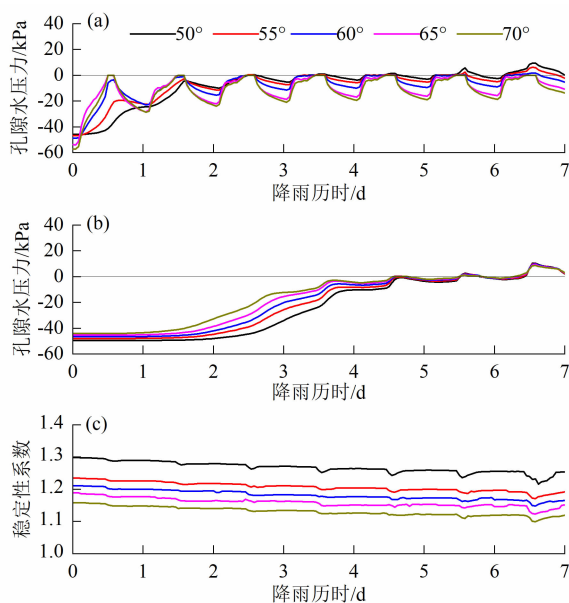


图 9 切坡高度 8 m 时孔隙水压力与稳定性系数:

(a) 观测点  $a$  的孔隙水压力;(b) 观测点  $c$  的孔隙水压力;  
(c) 稳定性系数

Fig. 9 Pore water pressure and stability coefficient with a cutting

height of 8 m; (a) pore water pressure of monitoring point  $a$ ;

(b) pore water pressure of monitoring point  $c$ ; (c) stability coefficient

被移除,其厚度变薄致使雨水相对入渗路径缩短,导致观测点的孔压响应时间提前。

由图 9c 可知,5 种  $\theta$  条件下的稳定性系数均缓慢下降,并在每天的 12 时—15 时出现小幅度的“V”型波动,此现象在第 4—7 天最为显著;16 时—24 时的稳定性系数出现小幅度回升。这是因为每天的 1 时—15 时为降雨时段,降雨会致使孔压增大,导致抗剪强度与稳定性持续减小。16 时—24 时为无雨时段,此时上层土体的孔隙水会扩散到下层土体,促使稳定性得到一定程度的恢复,所以稳定性系数会波动变化。

#### 2.1.1.2 切坡高度 $h$ 的影响

由图 10 可知,当  $h = 2$  m,潜在滑移面的总水平长度为 19.03 ~ 65.03 m,正孔压的坐标  $x$  为 19.03 ~ 33.50 m;当  $h = 14$  m,潜在滑移面的总水平长度为 22.91 ~ 51.39 m,正孔压的坐标  $x$  为 22.91 ~ 33.32 m。由此可知,当  $h$  由 2 m 增至 14 m,潜在滑移面总水平长度减小 17.5 m,且正孔压对应的长度大致减小 4 m。

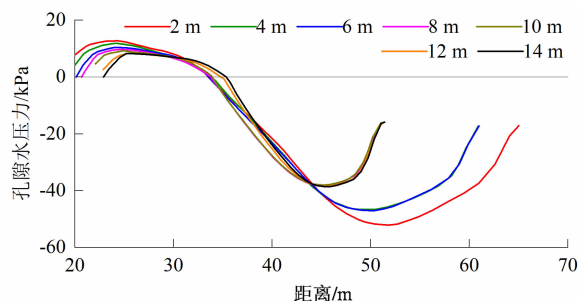


图 10 第 7 天 14 时潜在滑移面的孔隙水压力

Fig. 10 Pore water pressure on the potential slip surface at 14:00 on the 7th day

当  $\theta = 60^\circ$ , 7 种  $h$  (2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m) 条件下的观测点  $a$  和  $c$  的孔压如图 11a、图 11b 所示。图 11a、图 11b 的孔压变化趋势和图 9a、图 9b 的类似。在观测点  $a$  中,14 m、12 m、10 m 和 8 m 的孔压在第 1 天 2 时基本同时响应,而 6 m 和 4 m 的孔压在第 1 天 3 时响应,2 m 的在第 1 天 6 时响应;在观测点  $c$  中,14 m、12 m、10 m、8 m、6 m、4 m 和 2 m 孔压分别第 1 天 11 时、15 时、18 时、21 时、24 时、第 2 天 1 时以及第 2 天 3 时分别响应。这说明当  $h$  由 2 m 增至 14 m,观测点  $a$  的孔压响应时间提前 4 h,观测点  $c$  的孔压响应时间提前 16 h。

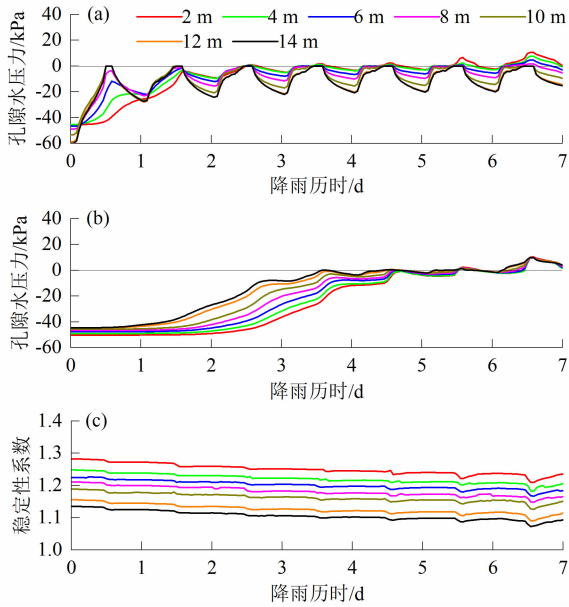


图 11 切坡坡度  $60^\circ$  时孔隙水压力与稳定性系数:

(a) 观测点  $a$  的孔隙水压力; (b) 观测点  $c$  的孔隙水压力;  
(c) 稳定性系数

Fig. 11 Pore water pressure and stability coefficient with a cutting

angle of  $60^\circ$ : (a) pore water pressure of monitoring point  $a$ ;

(b) pore water pressure of monitoring point  $c$ ; (c) stability coefficient

由图 11c 可知, 7 种  $h$  条件下的稳定性系数总体呈下降趋势。稳定性系数在第 1—4 天并没有因每天的停雨而表现出上升的态势, 而是保持下降的趋势。这是因为: (1) 降雨前期坡内积累的雨水较少, 暂态饱和区较小, 对整体稳定性影响不显著<sup>[35]</sup>; (2) 雨水入渗存在滞后性, 停雨后入渗仍在进行<sup>[36]</sup>, 稳定性系数仍能下降。然而, 第 5—7 天的稳定性系数并未在每天 12 时即降雨强度最大的时刻降至最小, 而是在 15 时才降至“V”型凹点, 甚至在无雨期间 (16 时—24 时) 缓慢的增大, 但增幅较小。

### 2.1.2 切坡含裂隙边坡

本文分析了切坡 ( $\theta = 60^\circ$ 、 $h = 8$  m) 含裂隙边坡

的孔压与稳定性系数, 并将其与自然边坡、切坡 ( $\theta = 60^\circ$ 、 $h = 8$  m) 无裂隙边坡进行对比, 探讨切坡、裂隙对边坡稳定的共同影响。由于切坡含裂隙边坡的稳定性系数在降雨第 4 天小于 1.0, 故本文只展示 3 类边坡第 1—4 天的孔压和稳定性系数。由图 12 可见, 当坡顶无裂隙时, 降雨入渗的影响深度仅为表层, 坡顶表层的孔压等值线较为密集, 且均为负值。当坡脚有裂隙时, 雨水能沿着裂隙快速入渗至坡体内部, 促使大范围饱和区在坡脚形成。由图 13 可知, 坡脚处剪应力集中, 高达 120 kPa, 剪应变为 0.03; 残积土与全风化土的交界处剪应变最大, 为 0.05。由此推测, 坡脚残积土与全风化土的交界处为滑坡前缘的潜在剪出口。

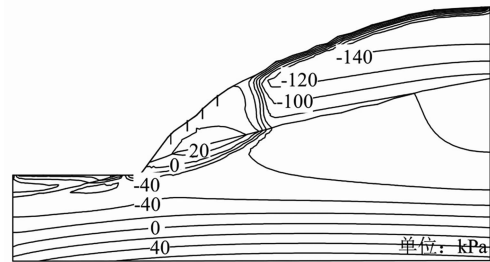


图 12 第 1 天 12 时切坡含裂隙边坡的孔隙水压力

Fig. 12 Pore water pressure in the cutting fissured slope at 12:00 on the 1st day

由图 14a、图 14b 可知, 在观测点  $a$  中, 切坡无裂隙、切坡含裂隙边坡的孔压均在降雨第 1 天 3 时响应, 自然边坡孔压在 10 时开始响应, 其响应时间落后于前 2 类边坡; 在观测点  $c$  中, 切坡含裂隙边坡的孔压最先响应, 其次为切坡无裂隙边坡, 最后为自然边坡。此外, 在每天无雨期间 (16 时—24 时), 切坡含裂隙边坡的孔压并未减小, 这是因为裂隙内囤积的雨水能持续入渗至坡体内部, 在一定程度上抵消了孔压的消散损失<sup>[34]</sup>。由图 14c 可知, 3 类边坡

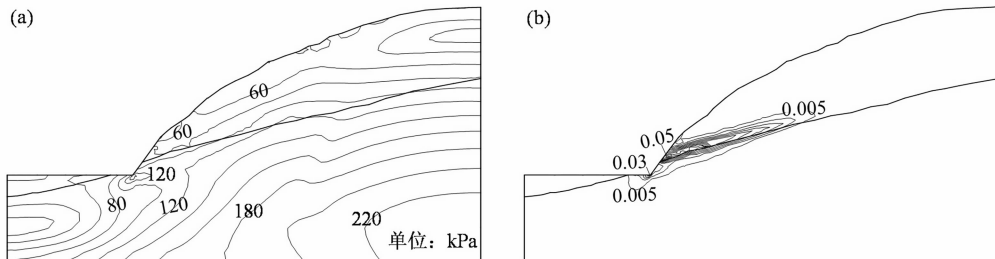


图 13 应力应变分布图: (a) 最大剪应力; (b) 最大剪应变

Fig. 13 Distribution of stress and strain: (a) maximum shear stress; (b) maximum shear strain

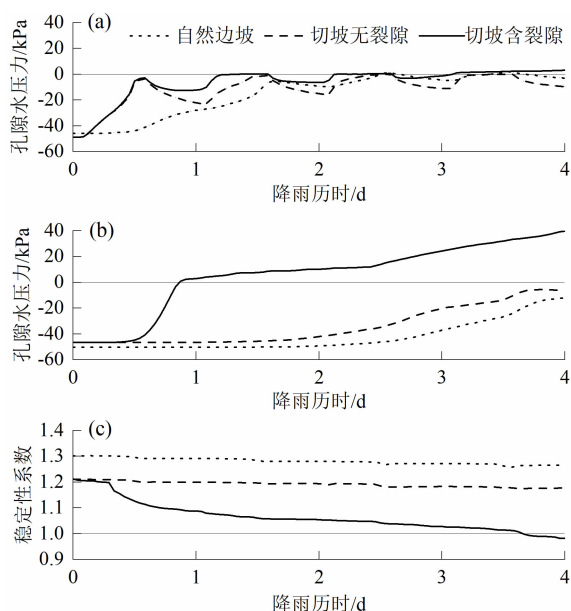


图 14 孔隙水压力与稳定性系数:

(a) 观测点 *a* 的孔隙水压力; (b) 观测点 *c* 的孔隙水压力;  
(c) 稳定性系数

Fig. 14 Pore water pressure and stability coefficient;

(a) pore water pressure of monitoring point *a*; (b) pore water pressure of monitoring point *c*; (c) stability coefficient

的稳定性系数均逐渐下降。自然边坡、切坡无裂隙边坡的稳定性系数分别由 1.30、1.21 缓慢地下降至 1.26、1.17, 坡体仍能保持稳定状态。然而, 切坡含裂隙边坡的稳定性系数在第 1 天就由 1.21 降至

1.10, 并于第 4 天降至 0.98。综上可见, 切坡不利于边坡稳定, 卸荷裂隙能放大其负面影响, 对边坡失稳具有显著的催化效应。这是因为裂隙不仅能为雨水的入渗提供优势通道, 而且其积水特性会改变渗流场。

## 2.2 试验结果

由数值模拟的分析结果可知最不利工况, 即切坡坡度  $70^\circ$ , 切坡高度与总坡高比值 0.28, 坡脚有裂隙。因为多条裂隙的设置会对模型的扰动过大, 所以, 模型的裂隙仅设置为 1 条, 深度为 0.1 m, 位于坡脚 (图 5)。

### 2.2.1 试验现象

在第 1 个降雨时段, 雨水顺着坡脚裂隙以优先流的形式快速入渗, 导致坡脚的含水率迅速增大、基质吸力减小, 暂态饱和区形成。然而, 坡顶的含水率和孔压却相对较小。此时, 坡脚与坡顶的水压差显著。这一现象也存在于无黏性土坡中<sup>[37]</sup>。当降雨 15 min 时, 坡脚临空面的土体滑动 (图 15a), 坡脚的局部力学平衡状态随之被打破, 滑动面的后缘土体开始蠕动变形。当降雨 33 min 时, 左侧坡面浅层土体中的细颗粒被地表径流冲刷带走, 冲沟形成, 其深度和宽度随着侵蚀作用的加剧而不断增大 (图 15b)。当降雨 175 min 时, 坡中土体滑动, 导致张拉裂隙形成 (图 15c), 裂隙附近的土体失稳, 致使陡峭

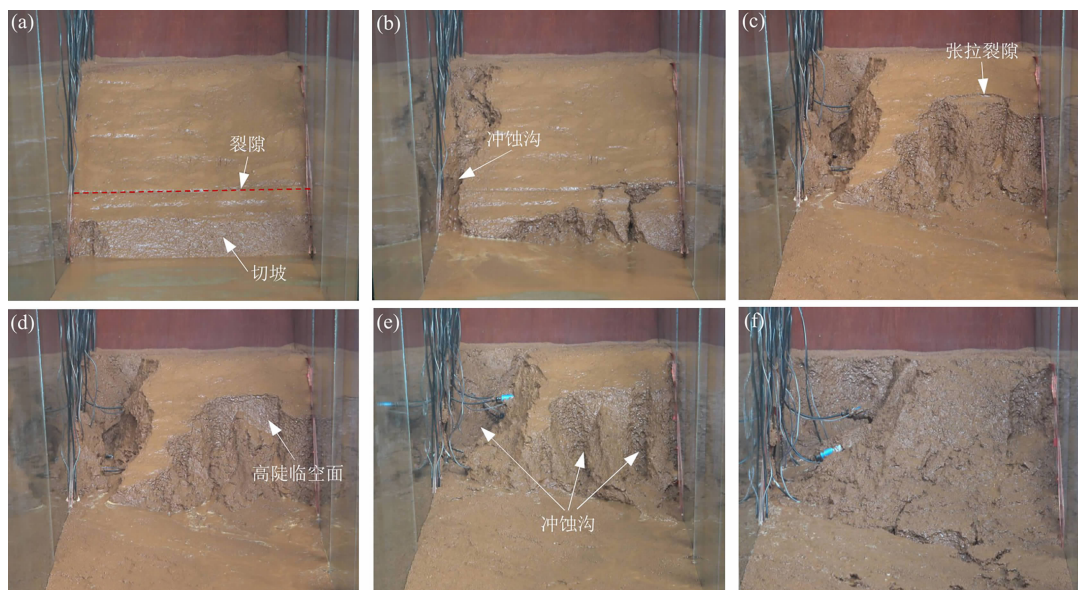


图 15 不同降雨历时的试验现象:

(a)  $t = 15$  min; (b)  $t = 33$  min; (c)  $t = 175$  min; (d)  $t = 180$  min; (e)  $t = 480$  min; (f)  $t = 721$  min

Fig. 15 Experimental phenomena of different rainfall duration:

(a)  $t = 15$  min; (b)  $t = 33$  min; (c)  $t = 175$  min; (d)  $t = 180$  min; (e)  $t = 480$  min; (f)  $t = 721$  min



的新临空面形成(图 15d)。当降雨 480 min 时,坡面分布有 3 条冲蚀沟(图 15e)。当降雨 721 min 时,整个坡面土体已全部失稳破坏(图 15f)。综上所述,在雨水入渗和坡体自身重力的作用下,临空面土体的蠕滑变形能促使张拉裂隙在后缘形成;当裂隙前缘的土体失稳后,新的临空面会再次形成。

### 2.2.2 体积分水率和孔隙水压力

坡顶监测线 *H*、坡面监测线 *I*、坡脚监测线 *J* 的体积分水率(简称含水率)的变化规律具有以下 3 个共性(图 16):(1)变化过程包含初始恒定、急剧上升和维持稳定 3 个阶段;(2)在降雨的间隔时段,除 #10、#11 和 #12 的含水率基本不变,其余含水率均因水分的蒸散发与垂直入渗而出现小幅度的下降;(3)随着土层深度增加,同一监测线的含水率对降雨的响应时间随之增大。这是因为雨水入渗导致孔隙气体被压缩,在气阻性作用下入渗速率降低<sup>[38]</sup>。然而,坡顶、坡面与坡脚浅层的含水率对降雨的响应差异较大,例如,坡脚 #12 的响应时间最短(33 min),坡顶 #3 的次之,坡面 #7 的最长。这是因为 12# 上方的裂隙能为雨水入渗提供良好通道,致使坡脚含水率迅速增大。当深度(0.3 m、0.5 m)相同时,坡面的响应时间较坡顶的早。导致含水率响

应时间存在差异的原因包含 2 个方面:(1)传感器的深度是以坡顶面为基准面计算得到,在相同深度条件下,坡面的上覆土层厚度较坡顶的薄;(2)坡面侵蚀、频繁的土体失稳和张拉裂隙的发育导致坡面土体结构松散,有利于雨水渗透。

监测线 *H*、*I* 和 *J* 的孔压均经历初始恒定、增加、平缓变化这 3 个阶段(图 16)。同一监测线的孔压对降雨的响应时间随着深度增加而增大。坡脚 #12 的响应时间最短(57 min),坡面 #3、坡顶 #7 的依次次之。然而, #3 的孔压变化量最大, #12 的孔压变化量却最小。上述差异出现的原因有 2 个方面:(1)坡顶表面的积水能补充孔压因土体局部剪切变形而造成的消散损失;(2)坡脚土体的失稳限制了 #12 孔压的增大。此外,孔压的响应时间均大于含水率的响应时间。在第 1 个降雨时段,坡顶、坡面、坡脚的孔压变化趋势与含水率的基本一致。然而,在含水率稳定阶段,坡顶和坡面的孔压仍持续增大,坡脚的孔压却在达到峰值后减小。孔压增大的原因为:(1)雨水入渗导致孔隙水增加;(2)上层土体自重增加,对下层土体的垂直压密效应增大,导致颗粒间的孔隙缩小。坡脚土体的剪切变形会致使孔隙增大,是坡脚孔压减小的主要原因。在第 2 个降雨时段,

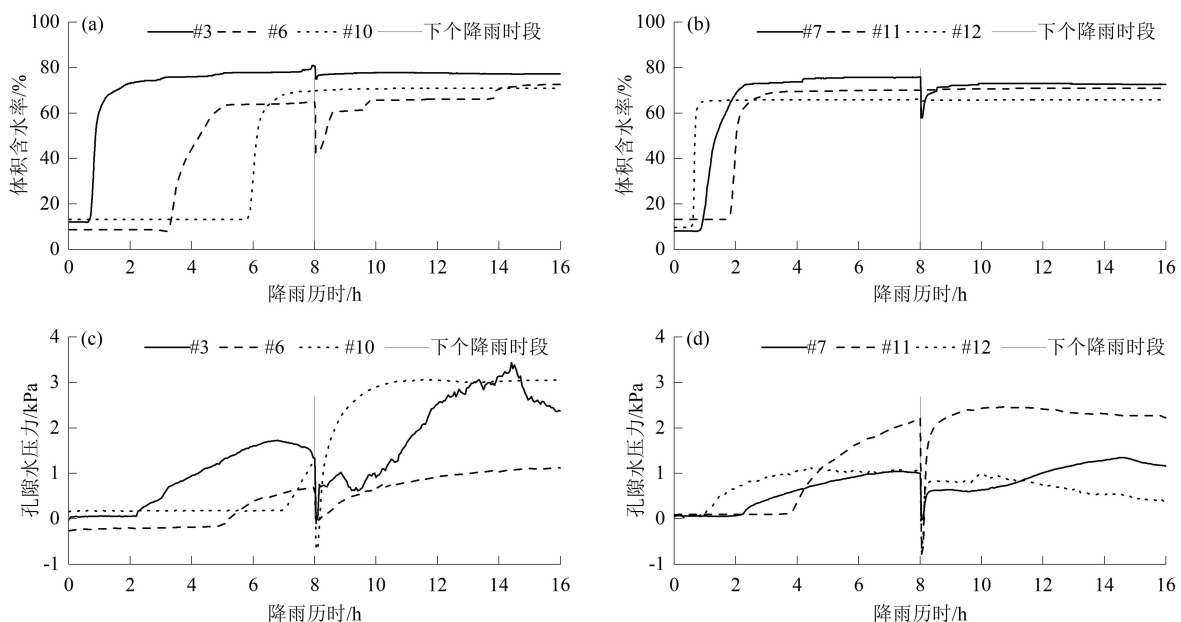


图 16 体积分水率与孔隙水压力:

(a) 监测线 *H* 的体积分水率;(b) 监测线 *I* 和 *J* 的体积分水率;(c) 监测线 *H* 的孔隙水压力;(d) 监测线 *I* 和 *J* 的孔隙水压力

Fig. 16 Volumetric moisture content and pore water pressure:

(a) volumetric moisture content of monitoring line *H*; (b) volumetric moisture content of monitoring line *I* and *J*;

(c) pore water pressure of monitoring line *H*; (d) pore water pressure of monitoring line *I* and *J*

坡顶#3的孔压波动频繁,在降雨6 h左右达到峰值,继而减小。坡顶其他两个深度的孔压仅经历缓慢增大、稳定2个阶段。坡面、坡脚的孔压均经历增大、稳定、减小3个阶段。然而,坡面与坡脚的孔压并未在土体滑动期间显著减小。这是因为土体的蠕变变形与雨水对坡面的冲蚀作用改变了土体的初始结构,致使渗流路径中的大孔隙形成,导致降雨入渗的影响深度增大,所以,雨水对孔隙水的及时补给能促使因土体滑动而消散的孔压得以恢复。这可能也是土体持续滑动的主要原因。上述结果进一步证实了已有的研究成果,即孔压波动依赖于土体剪切变形与消散的时间尺度<sup>[39]</sup>。

### 3 切坡诱发滑坡的动力学过程

基于数值模拟与模型试验结果,切坡诱发花岗岩残积土滑坡的动力学过程被概括为4个阶段:(1)卸荷裂隙形成。切坡打破坡体原有的力学平衡状态<sup>[40]</sup>,导致卸荷带形成。由于坡体失去前缘支撑,卸荷带应力得以释放,蠕滑变形继而出现,卸荷裂隙便会产生(图17a)。然而,此时的边坡仍能保持整体稳定性。(2)坡脚失稳。试验发现坡脚的含水率和孔压率先响应,这与2种优先流有关:一种是大孔隙优先流,这是因为切坡卸荷效应致使高陡临空面在坡脚形成,临空面土体结构被扰动,大孔隙形成;另一种是裂隙优先流,例如,第12号传感器上方的裂隙能为雨水入渗提供优先通道,导致传感器对降雨的响应时间最短。在2种优先流的作用下,坡脚浅层土体饱和区逐渐出现,进而与裂隙尖端处的暂态饱和区连接,促使坡脚的抗剪强度迅速减小,剪切变形产生,剪应力和剪应变集中(图13),坡脚随之失稳(图17b)。(3)表面侵蚀与沟道侵蚀。随着降雨持续,浅层土体饱和,地表径流形成且呈浑浊

状。这表明残积土中黏粒和粉粒等细颗粒出现迁移现象。一部分细颗粒被地下径流裹挟,进而堵塞入渗通道,导致土体渗透能力下降。一部分随着地表径流移至坡脚,表面侵蚀出现。这是因为残积土含有 $10 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可溶性氧化物( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ),它们能包裹着粗颗粒让其实现连接。然而,可溶性氧化物遇水易溶解,随后,土颗粒间的连接状态被破坏,细颗粒随着地下与地表径流迁移。地表侵蚀导致水流汇聚和分流,促使冲沟的形成。冲沟形成会加剧地表径流的聚集,是沟道侵蚀恶化的重要外部因素(图17c)。(4)张拉裂隙形成与局部土体滑动。坡脚失稳不仅改变斜坡的几何形态,而且致使后缘土体受到的支撑弱化甚至丧失,内力不平衡状态进一步恶化。在雨水入渗和自身重力作用下,后缘土体具有向下运动趋势,蠕变变形随即出现,新的张拉裂隙形成。雨水在裂隙中的累积效应会对周围土体产生动静水压力作用<sup>[41]</sup>,促使雨水向深层土体发生不利于边坡稳定性的有压渗透,在一定程度上抵消孔压因土体剪切变形而消散的损失,从而导致深处的土体含水率和孔压增加,抗剪强度大幅度降低。当下滑力大于抗滑力时,张拉裂隙附近的局部土体滑动(图17d),高陡的临空面再次形成,为后缘土体再次滑动提供有利条件。阶段3和4在降雨过程中重复出现,直至整个斜坡面失稳。综上所述,切坡诱发残积土滑坡的形成过程是由坡脚向坡顶演化的渐进型模式。

### 4 讨论

无裂隙边坡的稳定性系数虽然随着切坡坡度和切坡高度的增大而减小,但是减小后的稳定性系数仍大于1,坡体并未失稳。在相同的降雨条件,自然边坡、切坡无裂隙边坡稳定性系数分别由1.30、

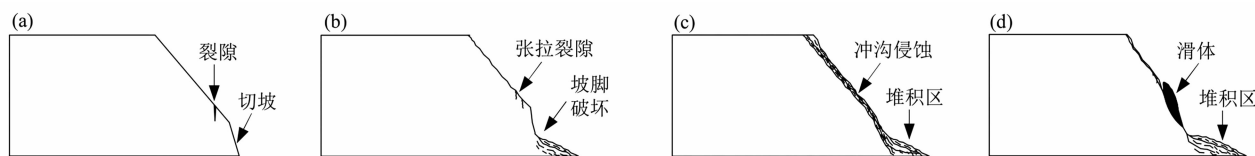


图17 切坡诱发花岗岩残积土滑坡的动力学过程:

(a) 卸荷裂隙形成;(b) 坡脚失稳;(c) 表面侵蚀与沟道侵蚀;(d) 局部滑动

Fig. 17 Dynamic process of granite residual soil landslide induced by cutting slope:

(a) unloading fissure formation; (b) instability at slope foot; (c) surface and gully erosion; (d) local soil slip

1.21 缓慢地降至 1.26、1.17,而切坡含裂隙边坡稳定性系数却由 1.21 急剧降至 0.98。综上可见,切坡可导致边坡稳定性小幅度降低,而卸荷裂隙却能强化切坡的负面作用,对坡体失稳起着催化作用。这是因为卸荷裂隙能为降雨入渗提供优先渗流通道,加速了坡脚饱和区的形成,该现象在人工降雨模拟实验中得以印证。本研究与黄土切坡失稳过程具有类似性,例如,卸荷裂隙形成,坡脚率先失稳<sup>[42]</sup>,这主要与坡脚卸荷引发相似的水土耦合链锁效应有关,水土作用的加剧是坡脚变形破坏的主要原因<sup>[43]</sup>。然而,两者在滑坡形成机制与爆发规模等方面存在差异。残积土未能形成贯通的滑移面,失稳模式以土体小规模滑动为主,表面与沟道侵蚀伴随着整个失稳过程。然而,黄土存在贯通的屈服面<sup>[44]</sup>,失稳模式以整体溃滑为主<sup>[45]</sup>。这可能与 2 种土的优势入渗通道类型差异、地下水位深浅有关。残积土分布区的地下水位深,雨水即便沿着卸荷裂隙渗透至坡体内部,也难以引起地下水位上升,所以,雨水的影响深度仅限于表层,表层的饱和程度控制着坡体失稳。黄土的地下水位浅,且存在多元化的优势入渗通道,如节理、裂隙、落水洞。这些通道能促使地表水入渗至深层,引起地下水位上升,进而导致高饱和含水层在深层形成,为深层整体滑动提供底滑带<sup>[45]</sup>。

本文虽然已对花岗岩残积土切坡诱发滑坡的动力学过程进行初步探讨,但是仍存在以下不足有待改进。数值模拟未考虑切坡时间效应的影响,因为夏季和冬季的切坡对坡体应力路径的影响程度不同<sup>[27]</sup>。Geo-studio 软件的局限性导致其不能模拟卸荷裂隙的形成过程,虽然计算方案考虑了卸荷裂隙,但是卸荷裂隙是作者预先设定的,且被假定为垂直裂隙。然而,自然界中卸荷裂隙不完全是垂直的。软弱夹层因其空间分布的不确定性而未被考虑,但它却在实际边坡中存在<sup>[2]</sup>,对坡体应力分布有着不容忽视的影响,例如,应力不一定率先在坡脚集中<sup>[46]</sup>。土槽模型设计仅考虑极端强降雨和 1 种最不利的切坡工况,但未能全面考虑其他因子(坡体密实度、初始含水率、坡度、降雨情景)对滑坡形成的综合影响。作者在不久的将来,将进一步考虑上述因素,更好地还原残积土人工切坡模型,系统揭示切坡诱发滑坡的内在机理。

## 5 结 论

(1)当切坡坡度或切坡高度增大后,切坡无裂隙边坡的稳定性系数逐渐减小,观测点的孔隙水压力响应时间提前,潜在滑移面水平长度减小。

(2)相同的降雨条件下,自然边坡、切坡无裂隙边坡稳定性系数缓慢下降,而切坡含裂隙边坡稳定性系数急剧减小。切坡无裂隙的工况仅能致使稳定性小幅度降低,而卸荷裂隙却能放大其不利影响,对边坡失稳具有催化效应。

(3)坡脚的体积含水率和孔隙水压力的响应时间最短,饱和区最先出现。同一位置的体积含水率的响应时间早于孔隙水压力的响应时间。孔隙水压力增减变化与其消散的时间尺度、雨水入渗、土体剪切变形有关。

(4)切坡诱发滑坡的形成是由坡脚向坡顶演化的渐进型模式,其动力学过程包含 4 个阶段:卸荷裂隙形成→坡脚失稳→表面侵蚀与沟道侵蚀→张拉裂隙形成与局部土体滑动。

**致谢:**广西地质环境监测站文海涛高工提供了滑坡的地质与气象等资料。在此表示诚挚的感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] 文海涛,韦朝华,廖丽萍,等. 桂东南容县地质灾害发育与时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(5): 182 - 188 + 197. [WEN Haitao, WEI Chaohua, LIAO Liping, et al. Occurrence and temporal-spatial distribution characteristics of geological hazards in Rongxian county in southeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(5): 182 - 188 + 197] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170919.001
- [2] 韦朝华,文海涛,廖丽萍,等. 桂东南花岗岩残坡积土边坡破坏特征与防治对策[J]. 地球与环境, 2017, **45**(5): 576 - 586. [WEI Chaohua, WEN Haitao, LIAO Liping, et al. Failure characteristics and prevention measures of granite residual soil slope in the southeast of Guangxi province, China [J]. Earth and Environment, 2017, **45**(5): 576 - 586] DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.05.011
- [3] 廖丽萍,于森,文海涛,等. 广西东南容县崩塌滑坡的易发性评价[J]. 地球与环境, 2019, **47**(4): 518 - 526. [LIAO Liping, YU Miao, WEN Haitao, et al. Evaluation on the susceptibility of collapse and landslide in Rongxian county, southeastern Guangxi [J]. Earth and Environment, 2019, **47**(4):

- 518-526] DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.070
- [4] 何思明,王全才. 人工高切坡的长期强度指标研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, **37**(6): 29-33. [HE Siming, WANG Quancai. Study on long-term strength index of high cut slope [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2005, **37**(6): 29-33] DOI: 10.3969/j.issn.1009-3087.2005.06.006
- [5] 文海涛. 广西容县地质灾害详细调查报告[R]. 桂林:广西地质环境监测总站, 2015. [WEN Haitao. A detailed survey report of geological disasters in Rongxian county, Guangxi [R]. Guilin: Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environmental Monitoring Station, 2015]
- [6] 马惠民,王恭先,周德培. 山区高速公路高边坡病害防治实例[M]. 北京:人民交通出版社, 2006: 37-41. [MA Huimin, WANG Gongxian, ZHOU Depei. Instance of mountainous highway disease prevention and treatment of high slope [M]. Beijing: People's Communications Press, 2006: 37-41]
- [7] 章勇武,马惠民. 山区高速公路滑坡与高边坡病害防治技术实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2007: 12-17. [ZHANG Yongwu, MA Huimin. Control technology practice of mountainous highway landslide and high slope disease [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007: 12-17]
- [8] 陈洪凯,杨世胜,叶四桥,等. 公路高切坡分类及其破坏模式[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, **26**(5): 92-96. [CHEN Hongkai, YANG Shisheng, YE Siqiao, et al. Classification of high-cutting slope along road and its failure models [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, **26**(5): 92-96] DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2007.05.025
- [9] 曹春山,吴树仁,潘懋,等. 宝鸡市黄土工程边坡抗滑挡墙防治失效问题研究[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(1): 237-245. [CAO Chunshan, WU Shuren, PAN Mao, et al. Research on failure problem of loess engineering slope anti-sliding retaining wall prevention and mitigation in Baoji city [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(1): 237-245] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.01.031
- [10] 董金玉,杨继红,伍法权,等. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 151-157. [DONG Jinyu, YANG Jihong, WU Faquan, et al. Research on collapse of high cutting slope with horizontal soft-hard alternant strata in Three Gorges Reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 151-157] DOI: 10.16285/j.rsm.2010.01.019
- [11] 袁从华,吴振君. 平缓反倾红砂岩高陡切坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 805-811. [YUAN Conghua, WU Zhenjun. Stability analysis of high-steep cutting slope in gentle anti-dip red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 805-811] DOI: 10.16285/j.rsm.2012.03.031
- [12] 祝介旺. 蓟县矿山高切坡地质灾害致灾模式及环境综合治理研究—以蓟县大兴峪北矿区高切坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(2): 348-355. [ZHU Jiewang. Geological hazard modes and integrated environmental management of highly incised slope in Jixian mines illustrated with example of northern Daxingyu mine, Jixian [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(2): 348-355] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-027
- [13] CHEHLAFI A, KCHIKACH A, DERRADJI A, et al. Highway cutting slopes with high rainfall erosion in Morocco: Evaluation of soil losses and erosion control using concrete arches [J]. Engineering Geology, 2019, **260**(1): 1-7. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105200
- [14] 戴敬儒,周泽平,吴昕. 山丘区工程滑坡分类与灾害防治[J]. 山地学报, 2005, **23**(6): 709-713. [DAI Jingru, ZHOU Zeping, WU Xin. Classification and controlling on human effected landslides [J]. Mountain Research, 2005, **23**(6): 709-713] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2005.06.010
- [15] 祝介旺,伍法权,苏天明,等. 三峡库区万州段高切坡破坏模式和防护措施研究[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(1): 8-15. [ZHU Jiewang, WU Faquan, SU Tianming, et al. Failure modes and stabilization methods of highly incised slopes in Wanzhou, mountainous region of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(1): 8-15] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2007.01.002
- [16] 张帆宇,刘高,谌文武,等. 袁家湾滑坡在切坡开挖过程中的演化机理[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1248-1254. [ZHANG Fanyu, LIU Gao, CHEN Wenwu, et al. Evolution mechanism of Yuanjiawan landslide in the process of slope cutting and excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1248-1254] DOI: 10.3321/j.issn.1000-4548.2009.08.015
- [17] 宋飞,李亚兰,陈志新. 考虑坡面稳定的黄土高切坡设计研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, **19**(2): 45-48. [SONG Fei, LI Yalan, CHEN Zhixin. Design on high cutting loess slope considering slope surface stability [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, **19**(2): 45-48] DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2008.02.009
- [18] 陈晓利,王明明,张凌. 道路开挖位置对边坡稳定性影响的数值模拟[J]. 地震地质, 2018, **40**(6): 1390-1401. [CHEN Xiaoli, WANG Mingming, ZHANG Ling. Simulation study of road-cut effects on slope stability [J]. Seismology and Geology, 2018, **40**(6): 1390-1401] DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2018.06.014
- [19] 杜显祥,房浩,曹佳文. 建房切坡条件下边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, **31**(5): 40-47. [DU Xianxiang, FANG Hao, CAO Jiawen. Analysis of slope stability under the condition of cutting for house-building [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, **31**(5): 40-47] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.06
- [20] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 530-540. [ZHANG Maosheng,



- LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(4): 530 – 540] DOI: 10.3969/j.issn.1004 – 9665.2011.04.014
- [21] 闫茂华,魏云杰,李亚民,等. 云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机理[J]. *地质通报*, 2020, **39**(12): 1971 – 1980. [YAN Maohua, WEI Yunjie, LI Yamin, et al. Development characteristics and formation mechanism of Deqin Riyinka landslide in Yunnan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, **39**(12): 1971 – 1980] DOI: 10.12097/j.issn.1671 – 2552.2020.12.011
- [22] KAYA A, AKGUN A, KARAMAN K, et al. Understanding the mechanism of slope failure on a nearby highway tunnel route by different slope stability analysis methods: A case from NE Turkey [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, **75**(3): 945 – 958. DOI: 10.1007/s10064 – 015 – 0770 – 5
- [23] 王俊,赵建军,瞿生军,等. 卸荷条件下高边坡大规模开挖的“地质-力学”响应研究——以西藏如美水电站右坝肩为例[J]. *水文地质工程地质*, 2018, **45**(4): 37 – 44. [WANG Jun, ZHAO Jianjun, QU Shengjun, et al. A study of the geological-mechanical response during large-scale excavation of high slope under unloading condition: Exemplified by the right abutment of the Tibet Rumei Hydropower Station [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, **45**(4): 37 – 44] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.2018.04.06
- [24] 宋子岭,杨添,赵立春. 含多层软弱夹层的顺向岩质边坡稳定性评价方法对比分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, **27**(2): 20 – 25. [SONG Ziling, YANG Tian, ZHAO Lichun. Application of combination algorithm in stability analysis of rock slope with contains multilayer weak bedrock layers [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, **27**(2): 20 – 25] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 – 8035.2016.02.03
- [25] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. *工程地质学报*, 2020, **28**(3): 626 – 638. [ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, **28**(3): 626 – 638] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019 – 377
- [26] 许旭堂,简文彬,张少波,等. 基于 PhotoInfor 的边坡开挖效应模型试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, **39**(3): 36 – 44. [XU Xutang, JIAN Wenbin, ZHANG Shaobo, et al. Model test on slope excavation effect based on PhotoInfor [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, **39**(3): 36 – 44] DOI: 10.19721/j.cnki.1671 – 8879.2019.03.005
- [27] 曹春山,吴树仁,潘懋,等. 工程切坡诱发黄土滑坡成因机制研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(4): 1049 – 1060. [CAO Chunshan, WU Shuren, PAN Mao, et al. Mechanism research on artificial slope cutting-induced loess landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(4): 1049 – 1060] DOI: 10.16285/j.rsm.2016.04.018
- [28] 王姣,万军伟,左帅,等. 福建省建瓯市地质灾害发育特征及形成机制[J]. *水土保持通报*, 2015, **35**(3): 267 – 272 + 365. [WANG Jiao, WAN Junwei, ZUO Shuai, et al. Development characteristics and formation mechanism of geological disasters in Jian'ou city, Fujian province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(3): 267 – 272 + 365] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.055
- [29] 廖丽萍,文海涛,赵艳林,等. 桂东南容县花岗岩残积土粒度分形与物理参数的关系[J]. *山地学报*, 2019, **37**(2): 222 – 229. [LIAO Liping, WEN Haitao, ZHAO Yanlin, et al. The relationship between particle fractal and physical parameters of granite residual soil in Rong county, southeastern Guangxi province, China [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(2): 222 – 229] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000416
- [30] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(12): 2299 – 2304. [WU Nengsen. Study on classification of granite residual soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(12): 2299 – 2304] DOI: 10.16285/j.rsm.2006.12.041
- [31] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892 – 898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- [32] 平扬,刘明智,郑少河. 降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(S1): 4478 – 4484. [PING Yang, LIU Mingzhi, ZHENG Shaohu. Stability analysis of expansive soil slope with rainfall infiltration [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(S1): 4478 – 4484] DOI: 10.3321/j.issn:1000 – 6915.2004.zl.044
- [33] 刘金龙,栾茂田,王吉利,等. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流及稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(S1): 103 – 107. [LIU Jinlong, LUAN Maotian, WANG Jili, et al. Seepage and stability analysis of saturated-unsaturated soil slope under rainfall infiltration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(S1): 103 – 107] DOI: 10.16285/j.rsm.2006.s1.058
- [34] 杜光波,倪万魁. 降雨诱发型残积土滑坡形成机理分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, **36**(4): 565 – 571. [DU Guangbo, NI Wankui. Analysis of the formation mechanism of rainfall-induced residual soil landslide [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, **36**(4): 565 – 571] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2016.04.009
- [35] 朱元甲,贺拿,钟卫,等. 间歇型降雨作用下缓倾滑坡稳定性数值模拟[J]. *灾害学*, 2020, **35**(3): 208 – 212. [ZHU Yuanjia, HE Na, ZHONG Wei, et al. Numerical simulation of the stability of gently landslides under intermittent rainfall [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, **35**(3): 208 – 212] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 811X.2020.03.038
- [36] 刘金涛,李晓鹏,陈喜,等. 间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(5): 96 – 100. [LIU Jintao, LI Xiaopeng, CHEN Xi, et al. Distribution characteristics of initial soil water content in profile during hiatus

- rainfall-infiltration events and its effects on infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(5): 96 – 100] DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2009.05.020
- [37] 周健,杜强,李业勋,等. 无黏性土滑坡型泥石流形成机理的离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2010 – 2017. [ZHOU Jian, DU Qiang, LI Yexun, et al. Centrifugal model tests on formation mechanism of landslide-type debris flows of cohesiveless soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2010 – 2017] DOI: 10.11779/CJGE201411006
- [38] 张硕,裴向军,黄润秋,等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, **32**(9): 32 – 41 + 50. [ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, **32**(9): 32 – 41 + 50] DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.09.003
- [39] IVERSON R M, REID M E, LAHUSEN R G. Debris-flow mobilization from landslides [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1997, **25**(1): 85 – 138. DOI: 10.1146/annurev.earth.25.1.85
- [40] 林孝松,陈洪凯,许江,等. 山区公路高切坡岩土安全分区研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3237 – 3242. [LIN Xiaosong, CHEN Hongkai, XU Jiang, et al. Safety zoning of high-cutting slope along highway in mountainous area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3237 – 3242] DOI: 10.16285/j.rsm.2010.10.015
- [41] 杨世豪,苏立君,张崇磊,等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报, 2020, **42**(4): 1 – 9. [YANG Shihao, SU Lijun, ZHANG Chonglei, et al. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda formation slope under heavy rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, **42**(4): 1 – 9] DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.024
- [42] 张子东,裴向军,张晓超,等. 黄土边坡开挖卸荷力学响应与破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(3): 684 – 693. [ZHANG Zidong, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. Study on mechanical response and failure mechanism of excavation unloading in loess slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(3): 684 – 693] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-168
- [43] 贾杰,裴向军,谢睿,等. 延安市阳崖黄土边坡开挖破坏离心模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(1): 1 – 9. [JIA Jie, PEI Xiangjun, XIE Rui, et al. Centrifugal simulation experiment for a loess cutting-slope at Yangya, Yan'an city, NW China [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(1): 1 – 9] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.01.001
- [44] 侯晓坤,李同录,李萍. 开挖黄土高边坡的应力路径及变形破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(S2): 548 – 555. [HOU Xiaokun, LI Tonglu, LI Ping, et al. Analysis of stress path and deformation-failure mechanism of high cutting loess slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 548 – 555] DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s2.019
- [45] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. 地质力学学报, 2020, **26**(5): 714 – 730. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2020, **26**(5): 714 – 730] DOI: 10.12090/j.issn.006-6616.2020.26.05.059
- [46] 苏培东,唐雨生,马云长,等. 开挖工况下基于应变软化的软弱夹层边坡渐进破坏研究[J]. 长江科学院院报, 2021, **39**(6): 1 – 8. [SU Peidong, TANG Yusheng, MA Yunchang, et al. Research on progressive failure of weak interlayer slope based on strain softening under excavation conditions [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **39**(6): 1 – 8] DOI: 10.11988/ckyyb.20210305

## Granite Residual Soil Landslide Induced by Artificial Cutting Slope in Rong County, Guangxi Province, China

WEI Wenzhi<sup>1, 2, 3</sup>, ZHAO Ruihua<sup>1, 2, 3</sup>, LIAO Liping<sup>1, 2, 3\*</sup>, LIU Zhengwei<sup>1, 2, 3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The granite residual soil developed in Rong county, Guangxi province is the special soil in south China. Massive landslides occurring in the slopes of granite residual soils due to engineering excavations are posing great

threats to the safety of life and property of local community. Most of the past efforts focused on the instability of rock or loess slopes. The dynamic process of landslide induced by special soil excavation under rainfall excitation has not been studied. In this paper, granite residual soils and associated cutting slopes were targeted for investigation. Numerical simulation was conducted to quantitatively observe the effects of the cutting angle and height on the stability of soil slopes, which were initially remolded into a unity with no cracks inside or on the surface. Then, it followed by the comparative study, in which natural slope, non-cracked slope and cracked slope was included as control condition separately. Finally, the dynamic process of landslide induced by cutting slope was discussed by employing the artificial flume model test. The following results are obtained: (1) As the cutting angle was increased from  $50^{\circ}$  to  $70^{\circ}$  or the cutting height was increased from 2 m to 14 m, the stability factor of the non-cracked cutting slope decreased by 0.2. The response time of pore water pressure at the observation point (a, c) was advanced by 3 h and 11 h, 4 h and 16 h, respectively. (2) Prior to artificial rainfall, the stability coefficient of natural slope and non-cracked cutting slope at cutting angle  $60^{\circ}$  with height 8 m was 1.30 and 1.21 separately; then they decreased to 1.26 and 1.17 slowly after rainfall, whereas the stability factor of cracked cutting slope dropped from 1.21 to 0.98 in a sharp manner. The coupled negative effect of slope cutting and cracks on stability could not be ignored. (3) The volume moisture content had the most direct response at the slope foot. The response time of water content was earlier than that of pore water pressure. Fluctuations in pore water pressure were related to its dissipation time scale, rainfall infiltration, and shear deformation. (4) The dynamic process of soil landslide induced by cutting slope could be summarized as follows: unloading fissure developing, instability at slope foot, surface and gully erosion, growth of tension cracks and local soil slip. The research results would provide a theoretical basis for the protection and management of residual soil engineering slope.

**Key words:** granite residual soil; artificial cutting slope; landslide formation process; Guangxi; Rong county