

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.03

贵州惠水鑫朋滑坡变形破坏机制

李洪建^{1,2}, 洪五华², 史文兵², 左双英²

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队, 贵州 都匀 558000;

2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:以贵州省惠水县宁旺乡鑫朋滑坡为例,依据野外调查成果,分析了滑坡结构及变形特征,结合滑坡所处的地质环境条件讨论了其稳定性影响因素,借助 Geostudio 分析了坡体后缘崩塌堆积体加载及降雨对滑坡的作用机制。分析结果表明:持续降雨和坡体后缘加载共同作用使第四系地层与基岩接触面产生压应力集中,坡脚处孔隙水压力持续增大,第四系地层因受到雨水浸润稳定性降低,在堆积体牵引下发生浅层蠕滑变形,因此认为鑫朋滑坡变形失稳机制为整体蠕滑-拉裂。

关键词: 滑坡; Geostudio; 崩塌堆积体; 加载; 降雨; 变形; 蠕滑-拉裂

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0019-08

Deformation and failure mechanism of Xinpeng Landslide in Huishui County, Guizhou Province

LI Hongjian^{1,2}, HONG Wuhua², SHI Wenbing², ZUO Shuangying²

(1. The Exploration Institute of Geophysics and Geochemistry, Guizhou Non-ferrous Metals and Nuclear

Industry Geological Exploration Bureau, Duyun, Guizhou 558000, China; 2. School of Resources

and Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: An example of the Xinpeng Landslide in Huishui county of Guizhou Province, based on the field investigation results, the structure and deformation characteristics of the landslide were analyzed, and the factors affecting the stability of the landslide were discussed in combination with the geological environment conditions of the landslide. With the help of Geostudio, the action mechanism of the landslide was analyzed by the collapse accumulation body loading at the crown of landslide and rainfall. The analysis results showed that the combined action of continuous rainfall and loading at the crown of landslide resulted in the compressive stress concentration in the contact surface between the quaternary strata and bedrock. The pore-water pressure at the foot of the slope continued to increase. The stability of the quaternary strata is decreased by rain infiltration, and the shallow creep deformation occurred under the traction of the accumulation body. Therefore, it was considered that the deformation and instability mechanism of Xinpeng landslide as the creep-sliding and fracturing.

Keywords: landslide; geostudio; collapse accumulation; loading; rainfall; deformation; creep-sliding and fracturing

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-11

基金项目: 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字(2017)77号);贵州省科技厅科技平台及人才团队计划(黔科合平台人才[2017]5402号);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]117号)

第一作者: 李洪建(1984-),男,贵州独山人,本科,工程师,研究方向为地质灾害评价与治理。E-mail:283892028@qq.com

通讯作者: 洪五华(1994-),男,江西乐平人,在读硕士,主要从事地质灾害防治研究。E-mail:2286052789@qq.com

0 引言

在各类边坡的滑坡灾害案例中,加载是滑坡的一个重要诱发因素,主要包括边坡体上的人工加载和天然斜坡体后缘崩塌堆积物产生的天然加载。对于加载诱发型滑坡,明确其演化规律和变形机理对防灾减灾和预测预报评估具有重要的意义^[1]。关于滑坡变形失稳机制,张倬元等^[2]提出5种岩体变形组合形式:蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、弯曲拉裂、塑流-拉裂和滑移-弯曲。李明辉等^[3]分析了丹巴县甲居滑坡在自重、暴雨、地震情况下的滑坡稳定性系数,提出堆积层滑坡在持续大暴雨及地震情况下有可能在前缘覆盖层内产生滑动,进而牵引后侧覆盖层变形,引起更大规模的滑动破坏。黄润秋,王恭先,殷志强等^[4-7]对加载与降雨条件下诱发滑坡的稳定性因素及成因机制分析研究较多。董夫钱等^[8]研究公路滑坡在加载、降雨条件下,认为“在松散堆积体边坡上堆载,直接改变了边坡的稳定性和地下水的渗流条件,降低了坡体的稳定性,最终导致滑坡的发生”。吴迪^[9]总结出:工程加载触发边坡变形破坏可分为三种模式:触发老滑坡复活、触发饱水层蠕滑变形、触发填土区边坡变形破坏;加载触发黄土滑坡滑带的形态及形成过程与荷载值、荷载部位及边坡坡度有关。对于滑坡治理,尤琳等^[10]以四川省青川县银溪窝滑坡为例,判定滑坡体在不利工况下处于欠稳定状态,提出了“后缘截水+裂缝填封+前缘抗滑桩”的综合治理方案,为滑坡体的稳定性评价及治理提供了重要理论指导。在滑坡破坏模式确定上,吴亚子,史文兵等^[11-12]根据坡体的结构及形态特征详细分析了滑坡的形成机制,分析了滑坡产生的主要因素,并判定滑坡的破坏模式为蠕滑-拉裂。数值模拟研究方面,万文^[13]对水位循环升降下库岸边坡渗流与应力耦合分析进行了深层研究,对库岸边坡在水位变化情况下的渗流与应力耦合,来探讨库岸边坡的稳定性,运用 Geostudio 流固耦合对滑坡稳定性进行了合理评价。海龙等^[14]对不同降雨强度及历时影响下边坡稳定性变化进行了研究,为降雨条件下边坡稳定性分析提供了可靠依据。

鑫朋滑坡位于贵州省黔南州惠水县宁旺乡鑫朋煤矿东侧,属于堆积层斜坡。经历强降雨后,滑坡堆积体表现出一定的蠕滑变形迹象,滑坡前缘公路上方局部滑体现象较发育,2012年5月16日,滑坡前缘自发生多处滑塌,阻断了连接白水河村和惠水县的唯一通道,给白水河村村民生产生活造成严重影响。滑坡后缘陡

崖由于采矿等因素崩塌的大量块石堆积滑坡体上,造成滑坡体的变形进一步加剧,中后部形成多条具有一定规模的圆弧状裂缝(带),坡体稳定性进一步降低,严重威胁滑坡前缘公路安全。本文根据滑坡结构及变形破坏特征,结合其所处的地质环境条件,结合 Geostudio 研究鑫朋滑坡的变形失稳机制及稳定性分析,并提出相应的治理措施,对白水河居民的安全有非常重要的实际意义,同时也对贵州山区同类型滑坡具有一定的参考价值。

1 滑坡区地质环境条件

1.1 地形地貌

研究区位于云贵高原东南部,黔中山原边坡地带,区内地势总体呈西高东低,北高南低,属侵蚀—溶蚀中低山谷地貌,地形起伏较大,沟谷切割深,坡度陡峻。滑坡边界主要受地形控制,后缘以陡崖顶部为界,两侧则以凹形地貌为界,切割深度较深,滑坡体为残坡积堆积物,滑坡后缘陡崖基岩出露,前缘以公路为界,后缘海拔标高为1354 m,前缘海拔标高1210 m,相对高差为144 m,滑坡体后缘到前缘地形呈陡—凸—缓变化。滑体总体地貌为一个北高南低的单面长斜坡地貌。剖面形态呈前缓后陡的折线形,滑坡体后缘坡体较陡,1275 m以上平均坡角约为50°;滑坡体前缘地形减缓,坡角约为30°,滑坡全貌图见图1。

1.2 地层岩性

滑坡区堆积层较复杂,主要为滑坡堆积、崩塌堆积及残坡积碎石土。滑坡堆积层主要为碎石及碎石黏土构成,其碎石最大直径超过2 m,物质成分以炭质页岩、砂质页岩及砂为主;崩塌堆积体(Q^{del})主要分布于滑坡后缘陡崖下方及滑坡后缘;残坡积(Q^{di+el})分布于斜坡表部,厚度较小。滑坡体下部为石炭系下统祥摆组(C_{1x})为灰、深灰色中厚层状细粒砂岩与黑色炭质页岩(泥岩)、砂质页岩互层,间夹有煤层或煤线,具体地层岩性见图2。

1.3 地质构造

滑坡区大地构造处于扬子准地台黔南台陷贵定南北向构造变性区中部,黔中南北向构造体系贵阳—惠水褶皱带之畜牧农场背斜东翼。从局部看区内构造形态为一宽缓的向斜构造,断裂较发育,地层总体走向北西335°左右,两翼倾角0°~10°,平均倾角为6°,为近水平的平缓地层。区内有一条走向近南北的左行压扭性平推断层,倾角80°左右,断距约200 m。

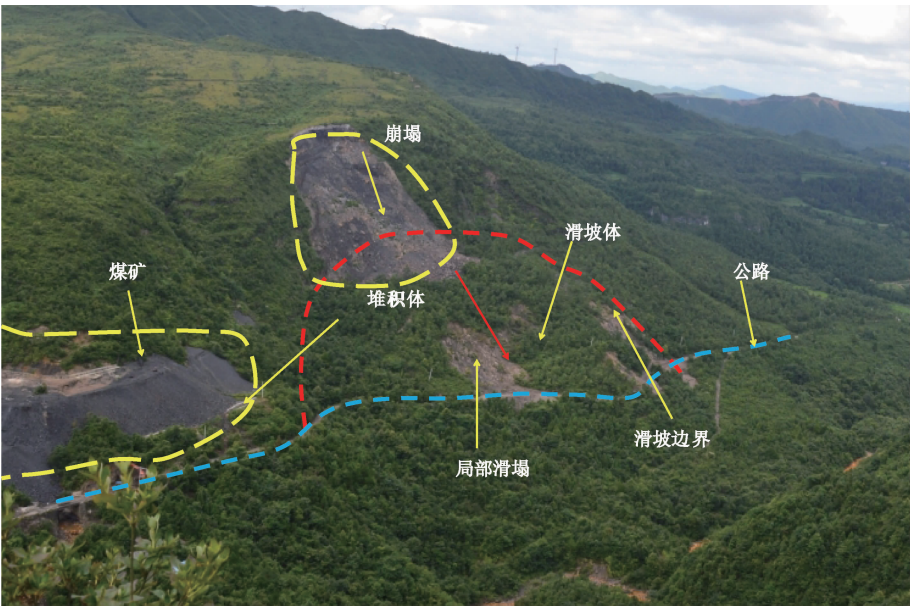


图 1 鑫朋滑坡全貌图(镜向 75°)
Fig.1 Full view of Xinpeng landslide(Mirror to 75°)

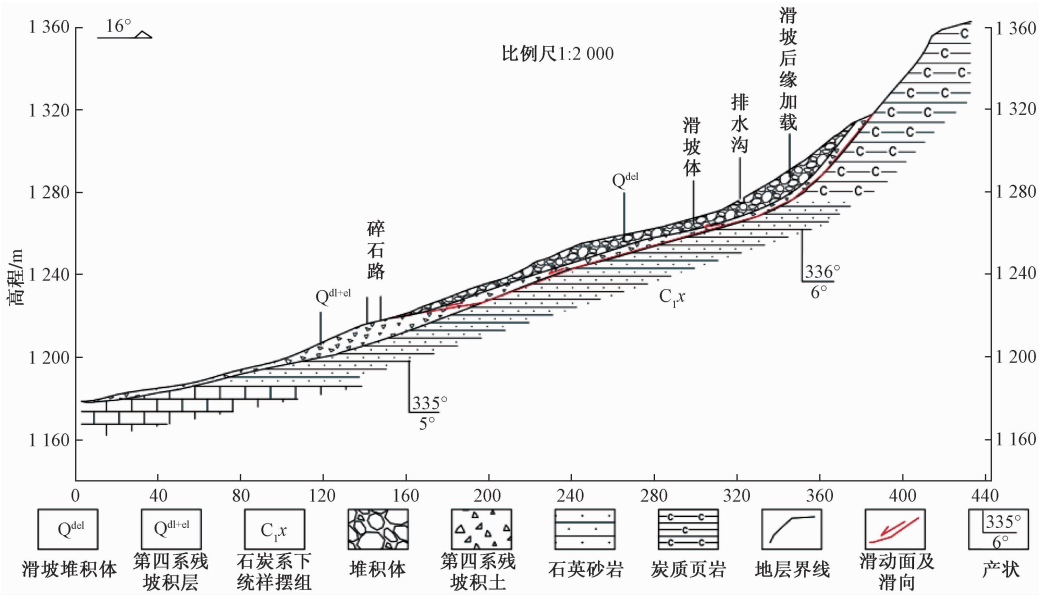


图 2 鑫朋滑坡典型剖面图
Fig.2 The geologic section of Xinpeng landslide

1.4 水文地质条件

滑坡区地下水类型可分为第四系松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水及碳酸盐类岩溶水。松散岩类孔隙水赋存于第四系(Q)松散岩类含水岩组滑坡堆积、坡积、残积的碎石、砂土、亚黏土中;碳酸盐类岩溶水赋存于石炭系下统祥摆组(C_{1x})顶部中厚层状砂岩中;碎屑岩类裂隙水赋存于石炭系下统祥摆组(C_{1x})中

上、下部的中厚层状细粒砂岩中,地下水运动受地形、地貌、岩性、构造控制,地下水总体上有北西向南东径流,最终排泄于地势低洼地带,向南东部汇入掌布河。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡规模及形态

滑坡区前缘发育有较大的天然冲沟,呈西-东走

向,滑坡体位于冲沟北侧天然斜坡之上。滑坡体纵长约 175 m,横宽约 153 m,平均厚度为 7 m,面积 21 150 m²,体积 148 050 m³,为中型滑坡。滑坡体主滑方向 183°。整个滑坡平面呈“长舌状”,相对高差为 144 m,滑体总体地貌为一个北高南低的单面长斜坡地貌。剖面形态呈前缓后陡的折线形。

2.2 滑坡结构特征

鑫朋滑坡物质组成基本为第四系松散崩塌堆积物,分区特征明显:其物质组成为粉质黏土夹碎块石,层厚 3~10 m,褐黄至灰黑色,碎块石岩性为石炭系下统祥摆组(C_{1x})中部中厚层状细粒砂岩与炭质页岩、砂质页岩等,碎石粒径一般为 2~5 cm,块石块径一般为 10~30 cm,风化程度为中-强风化,骨架结构充填粉质黏土,土干-稍湿-湿,可塑-硬塑。滑坡中后部为近期崩塌堆积碎块石,前缘为碎块石夹土。滑坡区长期地下采煤,岩层为软硬互层,易于发生崩塌,后缘陡壁崩塌后形成向前滑动成为滑坡堆积物。滑坡未发现大规模贯通性的蠕滑破坏面,浅井勘探揭露滑坡底面也不存在贯通性的滑动带,说明目前滑坡变形主要以浅表层蠕变为主。滑坡的潜在滑面(带)受老滑坡形成机制的控制,其形态特征整体上呈折线形,倾角变化较大,1 250 m 高程以上受其下滑床岩层面的控制倾角较大,为 30°~40°,1 250 m 高程以下段为滑坡剪出口部位,倾角 15°~25°。

3 滑坡变形特征与形成机制

3.1 滑坡变形特征

根据现场调查,滑坡可见变形破坏的迹象,主要表现在地面拉裂、上部崩塌,下部滑动等现象(图 3、

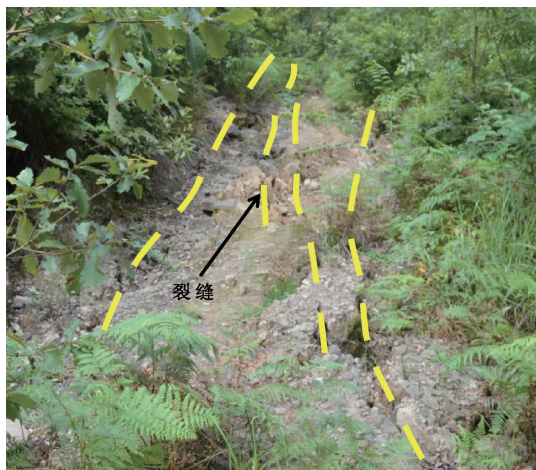


图 3 滑坡裂缝(镜向 65°)

Fig.3 Landslide cracks (Mirror to 65°)

图 4)。近期降雨作用下该滑坡变形特征较为明显。变形主要表现为顶部滑坡区的崩塌、张拉裂缝发育和中部堆积体的张拉裂缝发育。滑坡区后缘发生了大规模的崩塌,滑坡堆积体掩埋了滑坡前缘的公路。已崩滑边界上部自发生崩塌后,在牵引作用下发育了大量张拉裂缝,在滑坡区后缘西侧,拉裂缝明显,张开宽度 10~80 cm 不等,并有上下错动,延伸长度约 100 m。局部滑塌的区域出现羽翼状裂缝,裂缝张开宽度 7~38 cm,上下错动约 5~30 cm。裂缝走向大致与坡面方向垂直,局部有上下错动。由于降雨的作用,变形区裂缝在勘查工作期间仍在进一步发展发育。整体上,滑体内发生的地面变形裂缝的走向以近似垂直坡面方向为主。



图 4 滑坡后缘崩塌体(镜向 30°)

Fig.4 The collapse at the crown of landslide
(Mirror to 30°)

3.2 滑坡形成机制

依据前述滑坡变形特征分析结果,鑫朋滑坡中后部堆载崩塌堆积碎块石,形成多条具有一定规模的圆弧状裂缝(带),但未发现大规模贯通性的蠕滑破坏面,浅井勘探揭露滑坡底面也不存在贯通性的滑动带,说明目前滑坡变形主要以浅表层蠕变为主。鑫朋滑坡主要受降雨和后缘崩塌堆积加载的影响:暴雨季节大量降雨下渗,由于滑坡体滑床为砂页岩互层,页岩为相对隔水层,而且滑床面倾角受岩层面控制,倾角较大,下渗的降水沿滑床面向下渗透,在滑坡体内中下部形成滞水,滑带岩土体软化或泥化,物理力学参数降低,坡体稳定性降低,滑坡体中后部出现蠕滑-拉裂变形迹象,在后缘加载作用下,坡体的下滑力增加,坡体变形破坏加剧。总结鑫朋滑坡形成机制概念模型为蠕滑-拉裂型^[2,14]。

4 不同工况下滑坡失稳过程数值模拟

4.1 数值模型构建

(1)数值模拟分析原理。应用 Geostudio2012 分析鑫朋滑坡变形失稳机制,模拟滑坡后缘加载、降雨对其稳定性的影响,选取 SEEP/W 模块与 SIGMA/W 模块模拟滑坡体渗流场与应力场的耦合分析,同时选取 SLOPE/W 模块计算滑坡安全系数。在 SIGMA/W 中

分析类型是耦合应力孔隙水压力;材料分类是有效的参数孔隙水压力的改变,材料本构关系:线弹性运用模块计算初始应力、弹塑性耦合分析函数设定:体积含水量函数、渗透系数函(运用 SEEP/W 模块计算初始孔隙水压力)。

(2)参数选取。模型材料参数根据室内室外试验,并结合经验材料参数选取(表 1)。

表 1 模型材料参数

Table 1 Parameters of the model material

序号	土(岩)名称	饱和含水率/%	天然/饱和重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然/饱和 黏聚力/kPa	天然/饱和内 摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比	弹性模量/ kPa	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	堆积体(Q^{del})	30.6	19.3/21.5	31.8/29.0	7.2/6.1	0.31	1.06×10^4	1.8×10^{-8}
2	残坡积土($Q^{\text{dl+el}}$)	32.4	19.2/19.6	35.7/33.7	7.4/6.7	0.34	1.02×10^4	1.1×10^{-8}
3	砂岩(C_1x)	/	25.2/26.9	56	38	0.28	2.51×10^7	1.2×10^{-9}

(3)模型简介。选取鑫朋滑坡典型剖面分析,模型与原始尺寸保持一致,长度 460 m,高度 226 m,模型(0,0)点高程为 1 140 m。坡体后缘未加载时模型划分为 1 970 个节点,1 874 个单元,全局单元大小尺寸为 5 m。坡体后缘加载时划分为 2 065 个节点,1 976 个单元,全局单元大小尺寸为 5 m,模型划分见图 5。

4.2 自然工况下坡体后缘加载对坡体应力分布的影响

自然工况下最大总应力为压应力,在坡体底部产生明显集中,约为 4 500 kPa,坡体后缘产生小范围压应力集中,坡体后缘崩塌堆积体加载后堆积体上部、第四系地层顶部产生明显的应力集中。

4.3 坡体后缘加载下降雨对坡体应力应变、孔隙水压力分布的影响

(1)降雨工况下,上覆崩塌堆积体中出现拉应力,降雨持续 24 h 拉应力集中达 500 kPa。降雨 48 h 拉应力区域减小,位置向坡脚移动,拉应力增大为 1 500 kPa。降雨 72 h 拉应力区域继续减小,数值增大至 8 000 kPa,此时第四系地层与基岩接触面上产生较大压应力集中,最高达到 8 000 kPa。由此可见,降雨使坡体后缘的堆载体内拉应力集中,降雨和坡体后缘加载共同作用使第四系地层与基岩接触面产生压应力集中。

(2)降雨导致坡体上覆堆积体及第四系地层内部孔隙水压力持续增大(包括范围和数值大小),由降雨持续 24 h 的 600 kPa 增大为 72 h 的 1 200 kPa,且区域

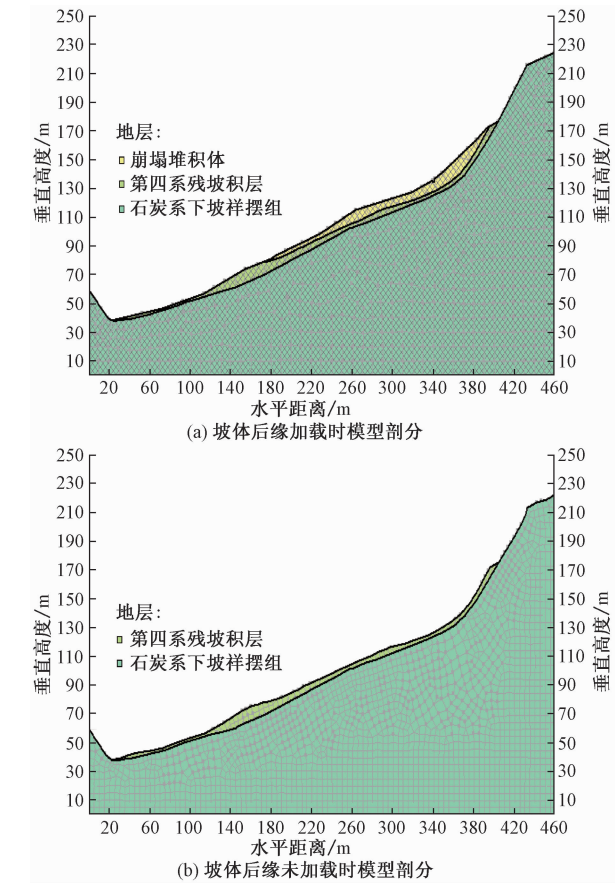


图 5 坡体模型剖分

Fig.5 Model division of the slope

向坡脚移动。随着降雨的持续,坡脚处孔隙水压力持续增大,扰动坡体稳定性。坡体孔隙水压力分布情况见图 6。

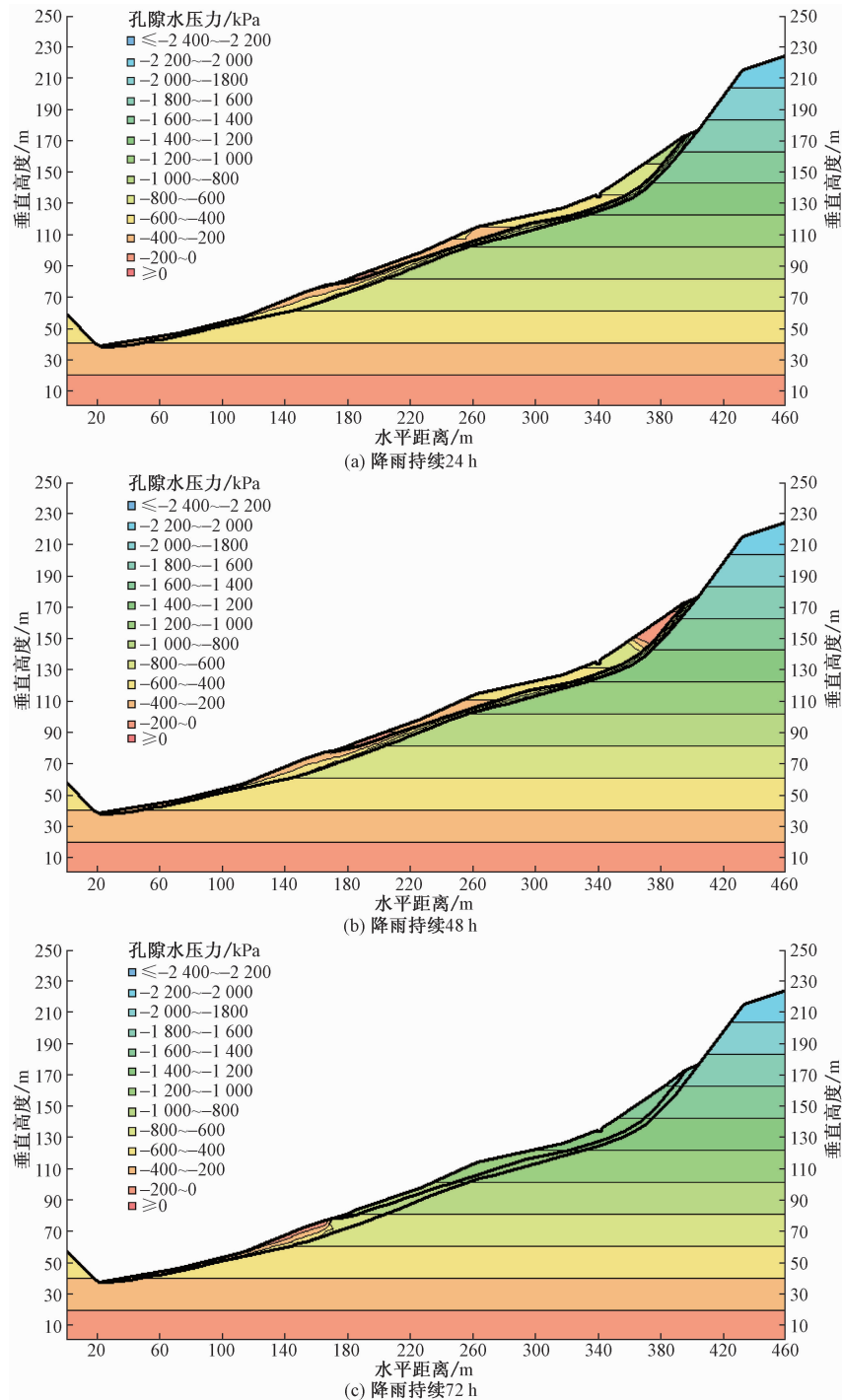


图6 降雨及坡体后缘加载对坡体孔隙水压力分布的影响

Fig. 6 The influence of rainfall and loading at the crown of landslide on distribution of pore-water pressure

(3)降雨持续24 h,上覆堆积体顶部 X 方向产生达2 m的位移,判定此时堆积体顶部产生滑动,但第四系地层与基岩相对稳定。随着降雨的持续,第四系地层也产生了 X 方向的位移,但位移量小于堆积体位移。降雨持续72 h,堆积体与第四系地层 X 方向位移

区域部分移动至坡脚附近(考虑为崩塌堆积体牵引第四系地层产生 X 方向位移),由此可见坡体后缘加载和降雨是坡体失稳的主要诱发因素。此时第四系地层内部裂缝未贯通,判定为产生表层裂缝或浅层滑坡。坡体 X 方向位移变化见图7。

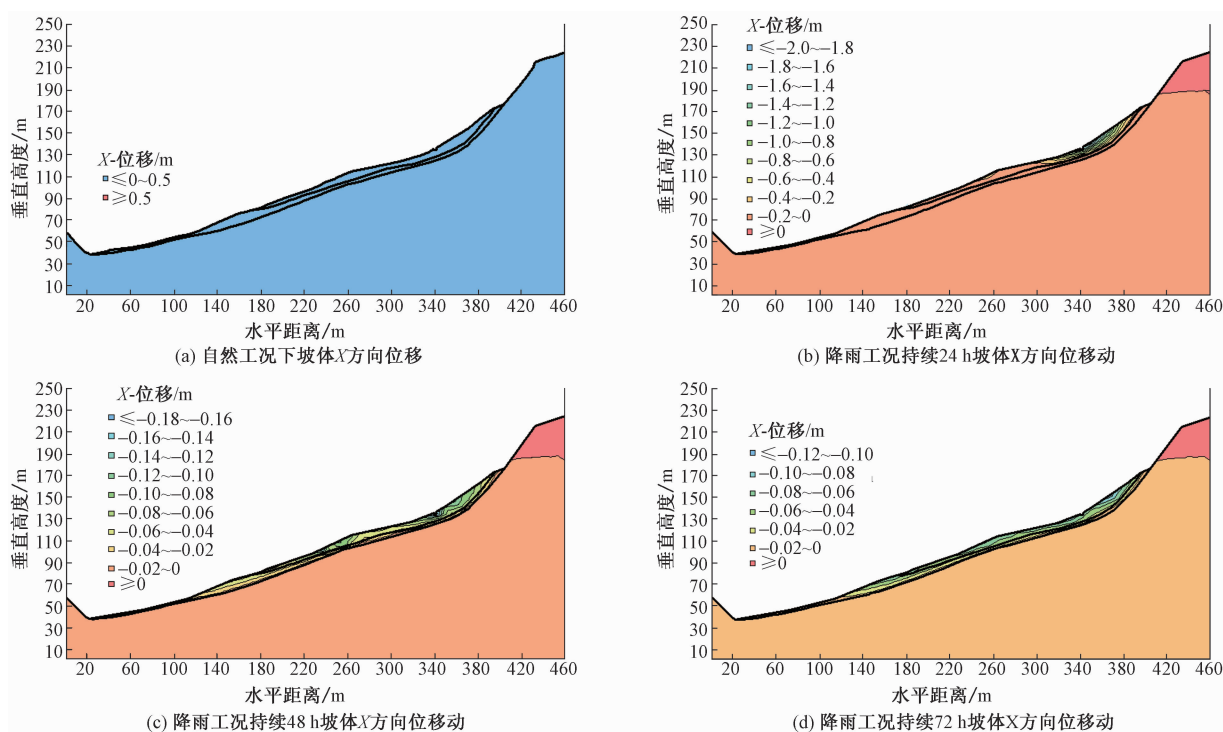


图7 降雨及坡体后缘加载对坡体X方向位移分布的影响

Fig. 7 The influence of rainfall and loading at the crown of landslide on X direction displacement distribution

4.4 数值模拟结论

数值模拟结果表明自然工况下后缘加载导致堆载体上部、第四系地层顶部产生应力集中,持续降雨使坡体后缘的堆积体内拉应力集中,降雨和坡体后缘加载共同作用使第四系地层与基岩接触面产生压应力集中,坡脚处孔隙水压力持续增大;滑坡堆积体逐渐产生了X方向的位移,但其位移量始终小于堆积体位移。推测后缘加载不仅增大了坡体下滑力,而且给雨水下渗提供了条件。第四系地层因坡体后缘堆积体加载而下滑力增大,加之雨水浸润使其稳定性降低,在坡体后缘堆积体产生较大X方向位移情况下被牵引发生浅层蠕滑变形,因此鑫朋滑坡变形失稳机理为整体蠕滑-拉裂。

5 结论与建议

(1)鑫朋滑坡为崩塌加载形成的滑坡体,属于牵引和推移式复合型滑坡,较为少见,其滑坡体形态及结构特征受滑坡体形成机制的控制,产生蠕滑及裂缝的关键因素为崩塌体后缘加载和降雨。

(2)降雨是鑫朋滑坡发生的直接诱因,也是影响滑坡稳定性重要因素,建议在滑坡体后缘修筑截水沟,将其汇水沿到前缘自然冲沟排出,并辅助填封裂缝,以

减小水对滑坡的影响。

(3)后缘崩塌体加载也是诱发滑坡的重要因素,崩塌体不仅增大了坡体下滑力,更主要的是给雨水下渗提供了条件,因此建议清理部分崩塌堆积体,以减轻滑坡体后缘的重量,减小积水面积。

(4)鑫朋滑坡的变形失稳机制为蠕滑-拉裂,可采用在滑坡体前缘公路处设置抗滑桩的方案,能有效的控制其进一步的变形破坏。因此,鑫朋滑坡的治理方案建议采用“后缘截水沟+部分清方+裂缝填封+滑坡前缘设置抗滑桩”的综合治理措施。

6 致谢

由衷感谢给本论文提供野外调查资料的贵州省环境地质监测院陆治斌研究员和陆崇伟工程师。

参考文献:

- [1] 杨胜元. 贵州地质灾害及其防治[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2009.
YANG Shengyuan. Geological hazards and its prevention and control in Guizhou, China [M]. Guiyan: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2009.
- [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 2

- 版.北京:地质出版社,1994.
- ZHANG Zhuoyuan,WANG Shitian,WANG Lansheng. Principles of engineering geological analysis[M]. 2nd edition. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [3] 李明辉,郑万模,石胜伟,等. 丹巴县甲居滑坡复活机制及其稳定性分析[J]. 山地学报,2008,26(5): 577-582.
- LI Minghui,ZHENG Wanmo,SHI Shengwei,et al. The revival mechanism and stability analysis to Jiaju landslide of Danba County in Sichuan Province [J]. Mountain Research, 2008,26(5): 577-582.
- [4] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):434-454.
- HUANG Runqiu. Large-scale landslide and their sliding mechanism in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3): 434-454.
- [5] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京:科学出版社,2008.
- HUANG Runqiu,XU Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [6] 王恭先,许峻峰,刘光代,等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- WANG Gongxian,XU Junling,LIU Guangdai,et al. Landslide science and landslide control technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [7] 殷志强. 黄河上游因人工加载和降雨引发的虎头崖滑坡[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):10.
- YIN Zhiqiang. Hutouya landslide caused by artificial loading and rainfall in the upper reaches of the Yellow River [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2014,25(4):10.
- [8] 董夫钱,缪志顺,吕庆,等. 公路堆载诱发型滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004(增刊1):4517-4520.
- DONG Fuqian,MIAO Zhishun,LYU qing,et al. Mechanism analysis of landslide induced by accumulation loading of highway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(S1): 4517-4520.
- [9] 吴迪. 工程堆载触发黄土滑坡研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- WU Di. Research on the loess landslide triggered by engineering loading [D]. Xi'an: Changan University,2015.
- [10] 尤琳,沈军辉,彭昌翠,等. 四川省青川县银溪窝滑坡复活机制研究及其稳定性评价[J]. 水土保持研究,2011,18(2):44-47.
- YOU Lin,SHEN Junhui,PENG Changcui,et al. Study on the resurrection mechanism and stability of silver creek nest landslide of Qingchuan County in Sichuan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(2): 44-47.
- [11] 吴亚子,傅荣华,王健,等. 大渡河送坪滑坡形成机制及稳定性分析[J]. 水土保持研究,2011,18(2): 62-65.
- WU Yazi,FU Ronghua,WANG Jian,et al. Analysis on formation mechanism and stability for the landslide in Songping beside Daduhe River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(2): 62-65.
- [12] 史文兵,黄润秋,左双英,等. 贵州省贵定县定东小学滑坡形成机制[J]. 水土保持通报,2015,35(1): 287-290.
- SHI Wenbing,HUANG Runqiu,ZUO Shuangying,et al. Landslide formation mechanism at Dingdong primary school of Guiding County in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(1):287-290.
- [13] 万文. 水位循环升降下库岸边坡渗流与应力耦合分析及稳定性研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
- WAN Wen. The analysis about seepage and stress coupling of the bank slope under the cycle of water lifting and the study of stability [D]. Nanchang: Nanchang University,2012.
- [14] 海龙,梁冰. 考虑降雨入渗条件的土坡稳定性分析[J]. 水资源与工程学报,2010,21(4):47-50.
- HAI Long,LIANG Bing. Analysis of land slope stability considering rainfall infiltration[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(4):47-50.