

Deformation Failure Mechanism and Stability Analysis of Red Layer Landslide

—A Case Study of Caishuzu Landslide

Zhiyong Ma^{1,2}

¹State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing

Email: 358697099@qq.com

Received: Aug. 4th, 2020; accepted: Aug. 18th, 2020; published: Aug. 25th, 2020

Abstract

The landslide of Caishuzu landslide in Xide County is a typical landslide in red stratum. Through on-site investigation and engineering geological exploration, it is revealed that the landslide is caused by many factors, among which rainfall is the main controlling factor. The geological model of landslide deformation, instability and failure can be divided into three stages: 1) in the start-up stage, rainfall induced creep cracking of slope; 2) acceleration and short-range flight stages: the sliding surface runs through, showing “burst” sliding, accompanied by parabolic motion characteristics; 3) the stage of impact, disintegration and river blocking: the landslide impacts the right bank slope of the river, which disintegrates and breaks up the landslide, blocks the valley, and cuts off the flow to form a barrier lake. Landslide deposits are in stability under natural conditions and in understable state under rainstorm conditions. The trailing broken walls of landslide are in an unstable state under natural conditions and produce creep deformation toward the free surface. The landslide wall and the pre-creep deformation body are in an unstable state under rainstorm conditions, and are liable to destabilization and destruction; the rock on the left side of the landslide is in an unstable state. The quality slope is in a stable state as a whole, and it is easy to collapse under the control of local joints and cracks. This article, through field investigation and engineering geological exploration, reveals that the landslide was caused by various factors, including rainfall as the main control factors, and analyzes the landslide deformation failure mechanism and stability of the red layer in detail, providing basic support for the red layer landslide geological disaster prevention and mitigation, to minimize the loss of people’s property.

Keywords

Slope Engineering, Red Bed Soft Rock, Failure Mechanism, Stability Analysis

红层滑坡变形破坏机理及稳定性分析

——以采书组滑坡为例

马智勇^{1,2}¹成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都²中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆

Email: 358697099@qq.com

收稿日期: 2020年8月4日; 录用日期: 2020年8月18日; 发布日期: 2020年8月25日

摘要

近年来, 受极端气候条件影响, 红层地层中发生了较多的滑坡地质灾害, 造成重大人民财产损失。本文以喜德县采书组滑坡为例, 发现滑坡变形失稳破坏地质模式可分为3个阶段, 即: 1) 降雨促使岩土体强度降低, 诱发坡体产生蠕滑拉裂; 2) 滑动面裂隙贯通, 呈突发“溃决”式滑动; 3) 滑体迅速停止滑动, 滑体解体堵江, 形成堰塞湖坝。滑坡堆积体在天然工况下处于稳定状态, 暴雨工况下处于欠稳定状态; 后缘滑坡壁天然工况下处于不稳定状态, 朝临空面产生蠕滑变形, 暴雨工况下滑坡壁以及前期蠕滑变形体均处于不稳定状态, 易发生失稳破坏; 滑坡左侧岩质边坡整体处于稳定状态, 局部受节理裂隙控制易发生崩塌掉块现象。本文通过现场调查、工程地质勘探等手段, 揭示该滑坡为多种因素共同影响形成, 其中降雨为主要控制因素, 并且对红层滑坡变形破坏机理及稳定性进行了详细分析, 为红层滑坡地质灾害防灾减灾工程提供基础支撑, 以减小人民财产损失。

关键词

边坡工程, 红层软岩, 破坏机制, 稳定性分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

红层是含软岩成分较多, 通常是由软岩和硬岩互层组成, 如砂岩和泥岩互层, 软硬层性质差异较大, 且差异风化较严重。主要表现为强度低、变形大、风化严重、遇水后易软化, 有显著流变性[1]。且红层岩体节理裂隙发育, 地下水容易下渗, 岩体强度低, 软弱结构面发育, 不利于坡体稳定。且红层边坡坡面风化作用强烈, 尤其是泥岩和粉砂岩互层的边坡, 风化强烈, 在雨水和地下水作用下, 吸水膨胀, 且软化作用强烈, 岩体强度降低, 对边坡稳定极为不利。近年来, 受极端气候条件影响, 红层地层中发生了较多的滑坡地质灾害, 如2010年7月的四川省万源市花楼乡董家梁滑坡[2], 2011年9月18日的南江县高桥乡窑厂坪滑坡[3]。这些滑坡给一些场镇、村庄的居民带来巨大的财产损失和严重的生命威胁。大量研究人员对红层地层中发育的滑坡特征及成因机制分析和滑坡防治开展了大量研究工作[4] [5] [6] [7]。因此, 对红层区滑坡的变形破坏机理和稳定性分析对减少人员伤亡和财产损失具有重要意义, 并且对今后的边坡设计和施工整治有重要的参考作用。

2. 概况

采书组滑坡位于喜德县热克依达乡依呷河左岸斜坡, 属于顺向倾外斜坡, 地势北西高、南东低, 坡向

约 170° ，平均坡度约 28° 。滑坡体平面形态呈“舌”状，后缘靠近依呷河及其支流分水岭，高程为 2722 m，前缘为斜坡坡脚，高程为 2550 m，纵向长约 550 m，宽约 300 m，厚度 10~40 m，平均厚度约 35 m，总方量可达 $550 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，滑动方向为 150° ，与下伏基岩小角度相交，故滑坡属于大型顺层滑坡(图 1 和图 2)。该坡体发生失稳后，坡体表面变形破坏严重，前缘堆积于河道，堵塞河流形成堰塞湖(图 1)。

滑坡区地层由上覆第四系残破积层(Q_4^{el+dl})、下伏白垩系雷打树组(K_2l^3)组成。滑坡堆积体为原结构坡体在失稳滑动后破碎、解体，最终堆积形成当前形态特征，其主要由散体结构、层状碎裂结构、层状块裂结构组成。根据所收集资料及现场实地调查结果显示，滑动所产生的变形破坏特征按其规模、性质可划分为拉陷槽、变形裂缝、下错阶坎、鼓丘 4 种形式；此外，滑坡后缘陡壁受良好临空条件及岩体风化优势节理组合综合作用，表现出持续牵引变形迹象，形成多处不稳定斜坡体，局部已产生蠕滑变形。

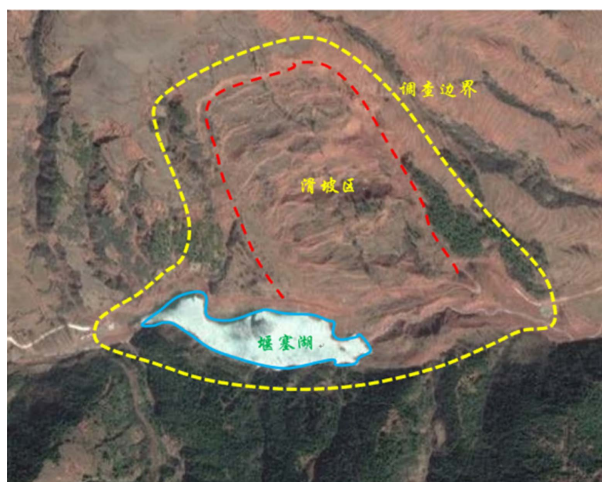


Figure 1. Landslide investigation scope
图 1. 滑坡调查范围



Figure 2. Landslide accumulation
图 2. 滑坡堆积体

3. 滑坡形成演化机制分析

3.1. 变形破坏影响因素

采书组滑坡为多种条件共同控制形成，根据各因素作用方式及程度的不同可分为内部条件、外部条

件两类，其中内部条件包括：地形地貌、地质构造、地层岩性、岩体结构组合；外部条件包括：降雨、河流冲刷、人类工程活动。

3.2. 滑坡形成演化过程及滑坡形成机制

该滑坡主要受强降雨作用控制，滑坡区属砂泥岩互层，渗透特性差异较大，遇水入渗至泥岩层面下渗减慢，呈“滞留”状，泥岩经长时间浸泡而软化、泥化，抗剪强度急剧衰减，从而导致滑坡体前缘在自重作用下先沿软化泥岩层顺坡向产生蠕滑变形，产生变形裂缝，并降雨入渗提供良好通道。随着降雨持续作用，前缘蠕滑变形体潜在滑动面贯通，朝临空面产生滑动，在极短时间内后缘坡体抗滑段消失，在下滑力作用下呈“牵引式”滑动，从而形成两级大型拉陷槽。主滑段滑动形成具有巨大滑坡壁，受限于滑坡堆积体，未滑动坡体在良好临空条件下产生牵引蠕滑变形，形成多级下错阶坎，滑坡壁高度减小，坡度逐渐减缓。

滑坡变形失稳运动地质模式主要表现为：① 由于该滑坡地层岩性属于砂泥岩互交型，且岩体风化较为强烈，持续强降雨导致斜坡沿泥岩和砂岩相交层面产生差异性蠕变，进而促使斜坡产生蠕滑拉裂启动；降雨入渗坡体，对滑坡的形成起到顶托、楔裂和促动作用[8]。强降雨导致采书组滑坡上部岩土体冲水饱和，下层强风化砂岩滞水。且在雨水作用下岩土体强度降低，进一步将定斜坡稳定性，启动阶段表现为地面的开裂、局部失稳、以及整体的缓慢蠕变(图3和图4)。

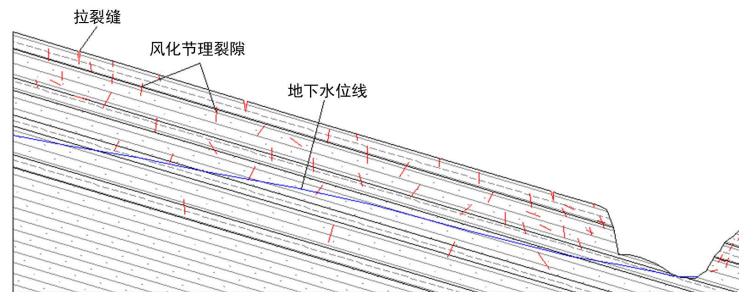


Figure 3. Original slope shape

图3. 原始坡形

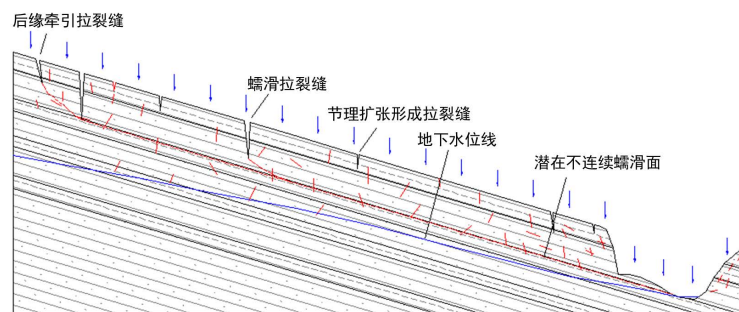


Figure 4. Long term creep stage

图4. 长期蠕变阶段

② 在持续性的强降雨作用下，岩土体中静水压力和动水压力迅速增大，进而滑坡的下滑力增大，促使滑动面裂隙贯通，锁固段破坏，产生突发的“溃决”式滑动[9] [10]。同时滑坡前缘临空条件好，在重力和雨水在砂岩裂隙承压水头产生的浮托力和裂隙静水压力的(水平推力)共同作用下，使滑体产生加速运动，沿滑床高速滑过剪出口后，短程凌空飞行(图5)。

③ 受对岸山体，以及前缘河谷等地形控制和阻挡，高速滑动的滑体急速停止滑动，动能迅速转化，产生巨大的冲击力，致使滑坡体完全破碎、解体成碎屑，并且岩土体碎屑原地堆积，形成堰塞坝(图 6)。

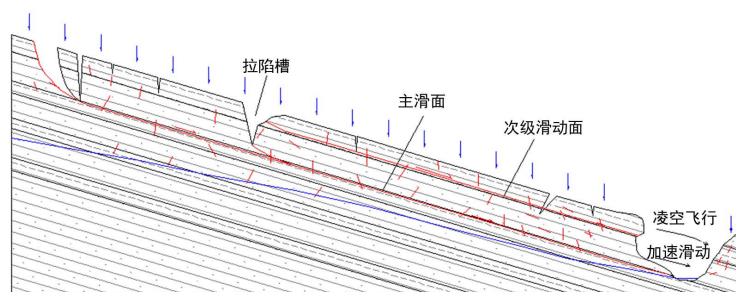


Figure 5. Accelerated sliding of sliding body and gliding in the air

图 5. 滑体加速滑动、凌空飞行

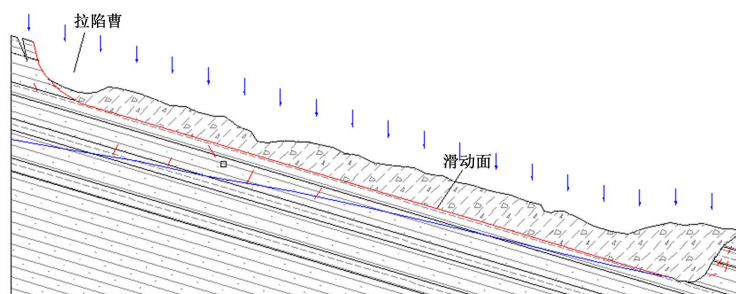


Figure 6. Disintegration, debris flow blocking the river

图 6. 解体、碎屑流堵江

4. 滑坡现状稳定性分析评价

4.1. 滑坡现状稳定性影响因素分析

采书组滑坡失稳滑动后堆积于河道及坡体中前缘滑床，后缘滑坡壁出露形成高陡边坡，左侧边界在滑坡剪切滑动后形成斜向倾内斜坡，临空条件良好，在外界因素影响下仍可能产生持续变形。通过现场调查分析可知，现状稳定性影响因素主要为地形地貌，降雨和河水冲刷、浸泡。

4.2. 滑坡现状稳定性定性分析

针对当前滑坡特征，可分三个方面对其稳定性进行分析：

1) 滑坡堆积体

据调查发现，滑坡堆积体所在范围地形已较为平缓，早期拉张裂缝、下错阶坎等变形迹象仍清晰可见，裂缝多数未被充填，降雨入渗条件良好，且堆积体在滑动撞击过程中岩体结构破碎，孔隙发育，更利于地表水入渗，碎裂泥岩易于软化、泥化，在堆积体局部起伏部位在后期可能会发生次级滑动，但整体规模相对较小。堆积体前缘堆石坝在爆破开挖后形成“V”型河道，断面显示其结构较为松散，前缘稳定性较差，且堆积体上游仍残存未消散的堰塞湖，湖水的浸泡、前缘河水的冲刷极有可能导致前缘开挖断面产生崩滑，大量崩滑物使河床太高，或直接重新堵塞河道，堰塞湖蓄水量继续增大，从而继续恶化。

2) 滑坡壁

堆积体下滑后，后缘形成高陡临空面，后缘滑坡壁表现出持续 3 牵引蠕滑变形迹象，单个变形体规

模较小，多为浅表第四系覆盖层或全~强风化层，但整个滑坡壁都存在变形迹象，随着变形持续发展，可能一条同一的潜在滑动面，从而发生浅层滑动。根据以往科研结果显示，该情况不会一直持续下去，当滑坡壁向后逐渐牵引变形破坏直至斜坡坡度减缓，临空面减小，此时变形趋于稳定。

3) 滑坡左侧岩质边坡

滑坡左侧岩质边坡为滑坡剪切下滑形成，边坡近直立，高约 10~15 m，岩层产状 $125^{\circ} \angle 17^{\circ}$ ，坡向约 247° ，坡向与岩层产状斜交，故该边坡属于斜向倾内斜坡，坡体表面泥岩破碎，砂岩节理裂隙发育，在不同节理裂隙组合下易发生崩塌现象，且根据现场调查结果可知，该情况确实存在，但规模较小，该边坡整体稳定性较好。

4.3. 滑坡现状稳定性数值模拟分析

1) 模型建立

此次采用 Geo-slope 岩土工程软件对滑坡现状稳定性进行分析，计算剖面为现场工程地质实测剖面，考虑滑坡形成机制，计算考虑天然、暴雨两种工况，滑动面选择自动搜索、设置前出口两种模式，计算模型见图 7。

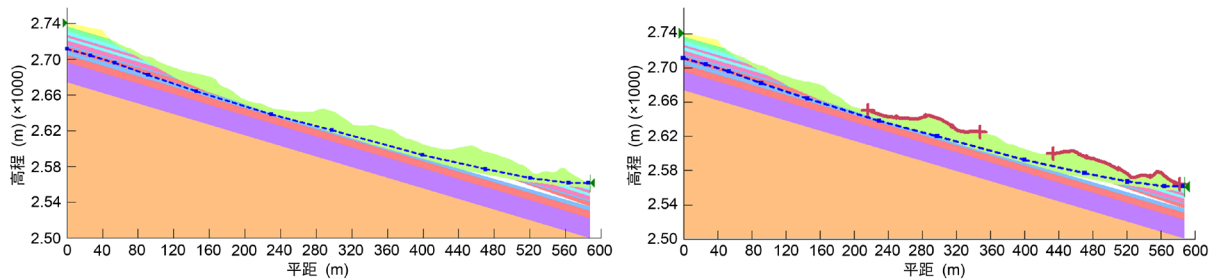


Figure 7. Calculation model of landslide current stability

图 7. 滑坡现状稳定性计算模型

2) 材料参数

根据计算模型结构，数值分析计算所需相关参数见表 1，参数来源于室内试验。

Table 1. Statistical analysis results of sliding body parameters

表 1. 滑体参数统计分析结果表

岩土类别	物理参数	重度(KN/m ³)		天然抗剪强度		饱和抗剪强度	
		天然	饱和	C/(Kpa)	$\Phi/^{\circ}$	C/(Kpa)	$\Phi/^{\circ}$
坡面残积土		17.6	18.5	11	18	8	13
滑坡堆积土		21	22.5	32	26	19	15
强风化泥岩		18.1	18.7	37	26	13	23
强风化砂岩		23.2	23.6	56	33	18	26
中风化泥岩		24.3	24.7	513	38	400	30
中风化砂岩		26.3	26.5	930	41	800	32

3) 稳定性分析

通过 Geo-slope 岩土工程软件对模型计算，获得了天然工况和暴雨工况条件下不同滑动面确定模式计算结果，见图 8~11。

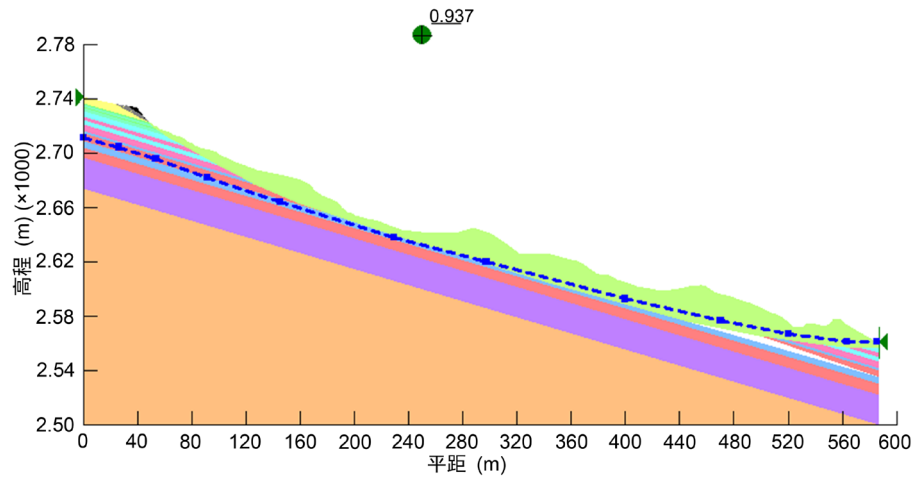


Figure 8. Natural condition and automatic search sliding surface

图 8. 天然工况 + 自动搜索滑面

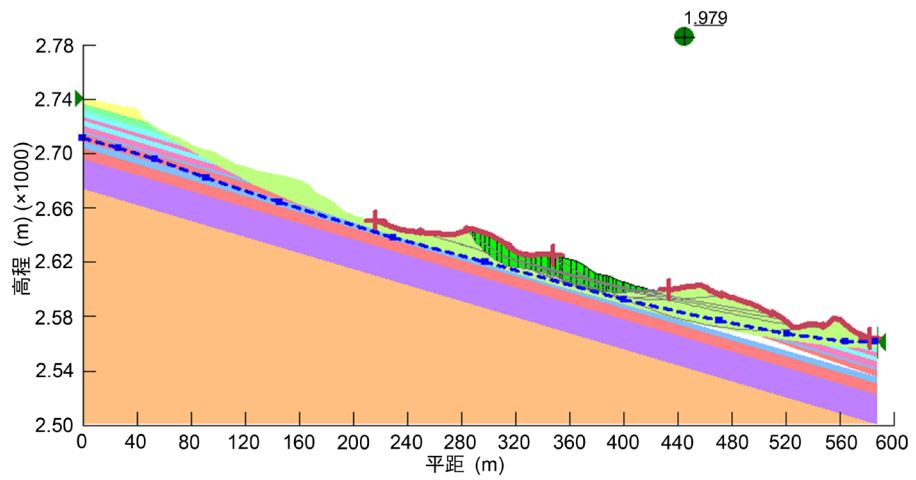


Figure 9. Natural condition and designated shear outlet

图 9. 天然工况 + 指定剪出口

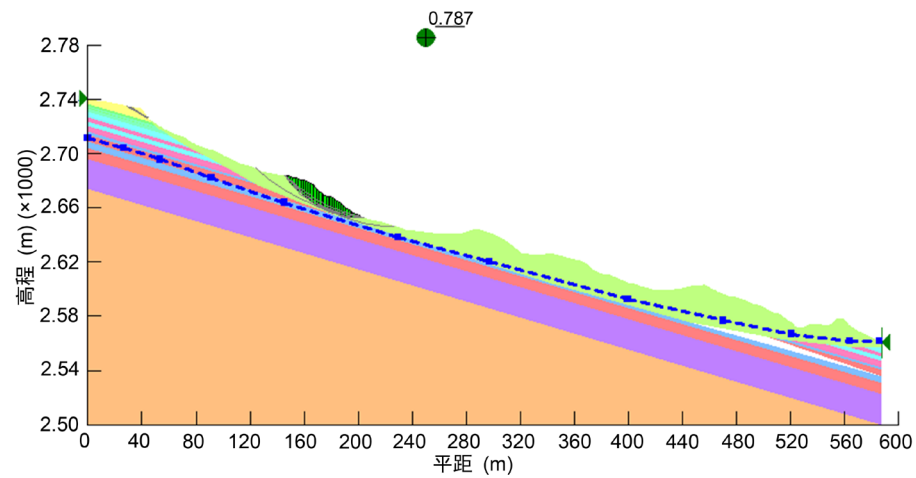


Figure 10. Rainstorm condition and automatic search sliding surface

图 10. 暴雨工况 + 自动搜索滑动面

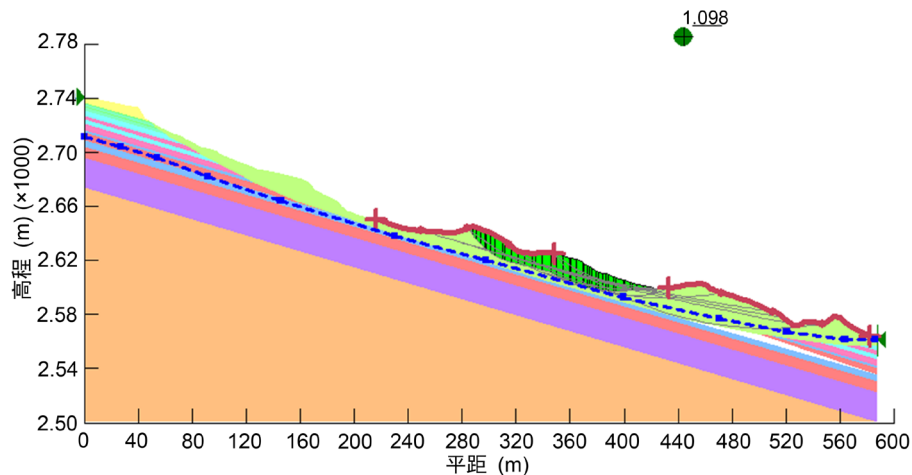


Figure 11. Rainstorm condition and designated shear outlet

图 11. 暴雨工况 + 指定剪出口

从计算结果可知，天然工况下自动搜索滑面得出滑坡后缘陡壁稳定性差，将发生失稳破坏，但规模较小，其结果与实际调查中所查明的后缘蠕滑变形较为符合，堆积体整体处于稳定状态；对其在滑坡堆积体中部及前缘(堆积体厚度最大的部位)进行指定滑动面分析，结果显示堆积体系数为 1.979，稳定性状态好。暴雨工况下自动搜索滑面得出滑坡后缘陡壁以及后缘蠕滑变形体稳定性系数小于 1.0，极有可能发生失稳破坏，而滑坡堆积体整体仍处于稳定状态；再次对堆积体中部及前缘进行指定滑动面分析，结果显示稳定性系数为 1.098，处于欠稳定状态，即可能存在堆积体表层变形，或局部发生次级滑动。

4.4. 滑坡稳定性综合评价与发展趋势预测

采书组滑坡属于顺层岩质滑坡，滑坡体堆积于河道两侧以及滑床中前缘，堆积体目前所处地势已相对平缓，在天然工况下处于稳定状态，暴雨工况下堆积体局部地势较陡坡段将可能发生次级滑动变形，整体处于欠稳定状态。后缘滑坡壁临空条件良好，天然工况下表部岩土层处于不稳定状态，但受限於滑坡堆积体后缘阻滑段，其变形主要表现为蠕滑变形，形成鼓丘或下错阶坎，暴雨工况下蠕滑体潜在滑动面在雨水入渗软化作用下贯通，处于不稳定状态，易发生失稳破坏，堆叠于老滑坡堆积体之上。随着变形持续发展，滑坡壁呈后退式逐渐变缓，则蠕滑变形逐渐减弱，最终趋于稳定。滑坡左侧岩质边坡属于斜向倾内斜坡，坡体陡峭，整体处于稳定状态，由于坡面岩体节理裂隙发育，在降雨、风化等作用下易产生局部崩塌掉块现象，规模小，对整体影响弱。

通过上述分析可知，该滑坡在后期可能仍存在持续变形现象，但变形规模逐渐减小，且滑坡区周围居民已搬迁，故后期变形甚至失稳破坏对当地居民生命财产造成直接影响的程度将极小。

5. 结论

1) 通过对采书组滑坡得变形破坏机制得深入分析，发现该变形失稳破坏地质模式可分为 3 个阶段，即：① 降雨促使岩土体强度降低，诱发坡体产生蠕滑拉裂；② 滑动面裂隙贯通，呈突发“溃决”式滑动；③ 滑体迅速停止滑动，滑体解体堵江，形成堰塞湖坝。

2) 通过数值计算得到滑坡堆积体在天然工况下处于稳定状态，暴雨工况下处于欠稳定状态；后缘滑坡壁天然工况下处于不稳定状态，朝临空面产生蠕滑变形，暴雨工况下滑坡壁以及前期蠕滑变形体均处于不稳定状态，易发生失稳破坏；滑坡左侧岩质边坡整体处于稳定状态，局部受节理裂隙控制易发生崩塌掉块现象。

3) 本文通过现场调查、工程地质勘探等手段,发现红层滑坡为多种因素共同影响形成,其中降雨为主要控制因素。通过此次研究,对红层滑坡变形破坏机理及稳定性进行了详细分析,为红层滑坡地质灾害防灾减灾提供基础支撑,以减小人民财产损失。

参考文献

- [1] 易靖松. 川东红层滑坡的形成条件与早期识别研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [2] 向贵府, 许模, 崔杰, 等. 四川省万源市花楼乡董家梁滑坡特征及成因机制[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 145-149.
- [3] 胡泽铭. 四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [4] 骆银辉, 朱春林, 李俊东. 云南红层边坡变形破坏机制及其危害防治研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 836-839.
- [5] 夏开宗, 刘秀敏, 陈从新. 考虑突变理论的顺层岩质边坡失稳研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 477-486.
- [6] 冯振, 殷跃平, 蔡奇鹏, 等. 斜倾厚层山体滑坡启动机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(s1): 2600-2604.
- [7] 卢海峰, 陈从新, 袁从华, 等. 巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 2): 3569-3577.
- [8] 白永健, 倪化勇, 王运生, 等. 喜德采书组“8·31”滑坡工程地质特征及运动过程[J]. 山地学报, 2014(3): 327-335.
- [9] 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.
- [10] 钟传贵, 裴向军, 吴丹妮, 等. 川东南红层地区平推式滑坡成因机制研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 29(16): 186-193.