

贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究*

刘传正

(中国地质环境监测院 北京 100081)

摘要 2010年6月28日,贵州省关岭县岗乌镇大寨村发生特大型崩滑碎屑(石)流灾害,造成99人死亡或失踪。通过现场考察崩滑区的地质环境与斜坡岩体结构,认为斜坡体由似“干砌块石结构”的裂隙化岩体组成是发生崩溃式破坏的主要内在原因。超常暴雨(过程雨量237mm)条件下斜坡岩体后缘裂缝充水形成持续的“水楔作用”是斜坡岩体松动、倾倒塌塌的主要外部引发因素。碎屑(石)流块度的空间分布具有从源头向沟口逐次减小,碎屑(石)流运动冲击高度逐步降低,冲击速度逐步减小,并显示4个能级4个冲程的特点。根据动势能守恒定律,计算了每个冲程的最大速度,得出第1冲程为高速崩滑,其它冲程属于碎屑(石)流动冲击。未发现区域天然地震、光照水库诱发地震与外围历史采矿活动与本次事件相关的直接证据。由于滑坡后缘仍存在不稳定岩体,碎屑(石)流堆积体上多处分布直径3~5m的堰塞塘,说明碎屑(石)空隙的排泄能力不足,在未来暴雨条件下引发新的崩滑或形成沟谷型泥石流的可能性是存在的。

关键词 裂隙化岩体 干砌块石结构 水楔作用 碎屑(石)流 多能级多冲程

中图分类号:P642.21 **文献标识码**:A

PRELIMINARY FINDINGS ON DAZHAI LANDSLIDE-DEBRIS FLOW DISASTER IN GUIZHOU PROVINCE OF JUNE 28, 2010

LIU Chuanzheng

(China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081)

Abstract The Dazhai event happened on June 28, 2010 in Guling county of Guizhou province of China. It was a sliding in rockfall and debris flow events. Its volume was about $78.8 \times 10^4 \text{ m}^3$. It was oversized geological disaster with 99 missed and killed people. Field inspection of the collapse phenomena indicated that the rockmass broken down was mainly due to the “dry building block structure” in fissured rockmass in internality of Dazhai slope. The sustaining “water wedge” pressure acts on the crown cracks by pouring rainwater from extreme rainstorm was the main external triggering factor. The rainfall was about 237mm. These factors resulted in the loosening, toppling, rotating and falling finally of the slope rock mass. The grain size distribution of debris (crushed stone) flow changed from larger to smaller sizes gradually from the rock fall headstream to the deposition outlet of the ditch. Still, its impact height was to knock down and its strike velocity was to decrease gradually. The total process of the debris flow displayed that a four-level of potential energies transformed into a four-level of kinetic energies accordingly. They occurred in four-strike paths. Based on the law of conservation of energy, the maximum velocity in each strike path is calculated and obtained the following results. The first stage belongs to rockfall and slip in high velocity ($V_1 = 24.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). The others are debris (crushed stone) flows. Direct evidences were not found that the event was relat-

* 收稿日期:2010-08-03;收到修改稿日期:2010-09-15.

基金项目:国家科技支撑计划重大项目(2006BAK01A10).

作者简介:刘传正,主要从事地质灾害防治、工程地质评价等方面的研究工作. Email: liucz@mail.cigem.gov.cn

ed to natural earthquakes, Guangzhao reservoir induced seismic activity and/or historic coal mining in the region. Moreover, it may be predicted that possibility of debris flow happening again is high because there are unstable rockmasses in the collapsed slope and dammed ponds in the debris deposits of 3m to 5m in diameter. They showed that the capacity of drainage in open space of crushed stones was not enough.

Key words Fissured rockmass in slope, Dry building block structure, Water wedge action, Debris (crushed stone) flow, Multilevel of potential energy and multi-strike paths

1 基本情况

2010年6月28日14时许,贵州省关岭县岗乌镇大寨村发生特大型崩滑碎屑(石)流灾害,造成大寨村的永窝、大寨两个村民组共37户99人死亡或失踪。

据目击者称,最开始看到的是山上突然出现了裂缝,并有碎石落下来,过了十多分钟,山上突然冒起了烟尘。随后“砰的一声”,像放大炮似的一声巨响,轰隆隆像爆炸,山体就歪了下来,大团大团的块石滚滚而下,整个过程持续时间不到2min。后来是整个山谷异样的平静。本次灾害发生前,大寨村一带已经下了一天一夜的雨,“雨是惊人的大”。山崩的时候是毛毛细雨。灾害发生前,山坡上一直向外冒水。因为一直下雨,很多村民没有出门劳作而遭此劫难。

有村民反映,2009年插秧时节,永窝组有人注意到对面山体有开裂现象。也有个别村民反映,附近北盘江上的光照水电站建成蓄水后,总觉得大地在震动,“一年有两三次”,村里有的房子出现开裂变形。

2010年6月27~28日,关岭县最大降雨量达到310mm。6月27日8:00至28日11:00,本次地质灾害发生地所在的岗乌镇气象观测记录降雨量达237mm。

2 崩滑碎屑(石)流特征

2.1 基本特征

崩滑碎屑(石)流发生区域的地形东南高西北低,涉及崩滑斜坡的高程分界点为1397.6m,两侧山脊分别向北东转北和北西方向延伸,崩滑就发生在二者构成的扇形斜坡上。

据现场估算,崩滑体后缘高程1115m,前缘高程965m,高差150m,宽度150m,长度220m,平均厚度

12m,体积约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。崩滑体为泥质粉砂岩,综合考虑取其残余碎胀系数为1.25,碎石堆积物体积约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。碎石流沿途冲击铲刮土石体积按沟长1250m,两沟坡斜长115m,平均厚度2m计算,体积约 $28.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。碎屑(石)流(含崩滑碎石流和沿途铲刮的土石流)的总体积约为 $78.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图1)。

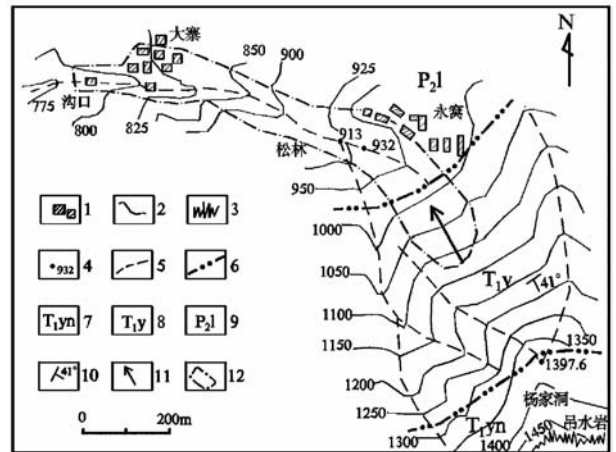


图1 大寨村崩滑碎屑(石)流灾害地质环境图

Fig. 1 Landslide-debris disaster and its geoenvironments in Dazhai village

1. 居民点; 2. 等高线; 3. 陡崖; 4. 高程点(m); 5. 沟谷(岭脊)线;
6. 地层界线; 7. 下三迭系永宁镇组灰岩; 8. 下三迭系夜郎组泥质粉砂岩夹泥岩; 9. 上二迭系龙潭组砂页岩及煤系; 10. 地层产状;
11. 斜坡崩滑方向; 12. 崩滑碎屑(石)流运动范围

2.2 崩滑区特征

崩滑发生在三叠系夜郎组(T_{1y})泥质粉砂岩中。崩塌厚壁沿节理面切层发展,形成的光滑后壁走向NEE,倾角约 $65^\circ \sim 70^\circ$ 。岩层倾向SSE,倾角 41° ,斜坡岩体被层面和节理面均匀切割,形成类似干砌块体的裂隙化岩体。构造上岩层反倾或大角度斜倾、贯通性节理切割。崩滑区表现出“倒石堆”特征,崩塌、翻滚特征明显,而平移滑动不明显,没有树木和坡面草皮残留的痕迹。崩滑区坡脚一带崩积体主要由块度1.0~3.0m的泥质粉砂岩块体组成,边

缘块度变小,向下到主沟段破碎块度 0.10 ~ 0.50m,个别块度 1.0m,向沟口块度逐渐变细,甚至表现为泥(石)流。开裂段裂面长,滑动段(阻滑、剪胀段)短,原斜坡面角度($30^{\circ} \sim 40^{\circ}$)比较稳定,开裂滑面角度由大变小(图2)。宏观上表现为一种“崩塌式滑坡”或“结构崩溃式滑坡”,实质上是一种反倾层状裂隙化松动无黏结块体集合“崩溃式垮塌”,类似于“干砌块石墙”的垮塌。这种散体结构一旦发生“溃崩”就很快解体,而无明显的整体滑动阶段。

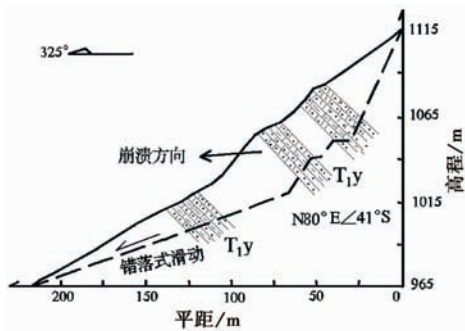


图2 大寨崩滑区剖面示意图

Fig. 2 Dazhai landslide geological profile

2.3 碎屑(石)流运动特征

裂隙化岩体崩塌后冲向谷底(932m)即进入多能级多冲程运动阶段。

在第1阶段,碎屑(石)流主冲方向 325° ,冲击爬坡高度30m(含铲刮深度2m)后到沟谷右岸的永窝村民组(960m),造成部分房屋损毁,多名村民死亡/失踪;第2阶段,碎屑(石)流主体开始沿主沟运动,冲击方向折为 250° ,冲击爬坡高度11m,最大高程900m,破坏了沟谷左岸的部分松树林;第3阶段,碎屑(石)流冲击方向转为 310° ,冲击爬坡高度6m,最大高程825m,对沟谷右岸的大寨村民组造成毁灭性危害;第4阶段,碎屑(石)流冲击方向转为 255° ,基本沿沟谷运动,直至高程780m处的沟口停止运动,并摧毁了沿途散居的民房(图1~图4)。

第1级冲程当然是规模最大的,先俯后仰的冲击能力也是最高的。除第4级只有俯冲外,其它三级冲程中都存在俯冲与仰冲接续问题,每一冲程都存在摩擦和碰撞能量损失,所以冲速逐渐降低,冲高逐渐变小。第4冲程主要是自由滚动,是一个势能消减,加速度为负的过程,直至沟口势能消耗殆尽,速度为零。

裂隙化斜坡岩体崩滑后,转为4能级(4级陡坎)4冲程(4级缓沟道)折转反荡式碎屑(石)流,整



图3 从大寨观察崩滑源区及碎石流冲击左侧永窝和右侧松林(镜向东南)

Fig. 3 Rockfall source area and its debris flow strikes Yongwo resident point in nearside and pine trees off side (lens direct southeast, 2010. 7. 1)

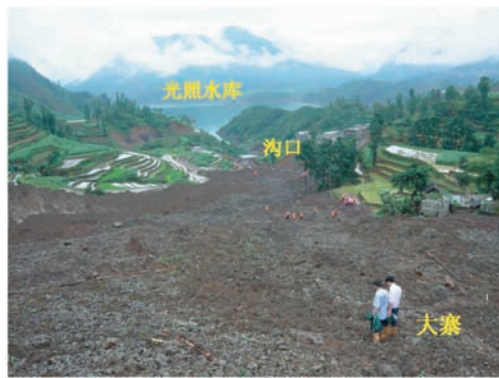


图4 碎屑(石)流冲击大寨组后到沟口停止,前锋变窄,且以沿途铲刮的淤泥为主(镜向西)

Fig. 4 Debris flow strikes Dazhai resident point and stop outlet of the ditch, its width changes narrow and silt composition increases gradually in movement process (lens direct west, 2010. 7. 1)

这个过程从斜坡后缘到前锋沟口平缓段降落高度达335m。碎石流冲击永窝山脊反折后,主体部分顺沟运动,一小部分经历了斜坡崩溃~永窝~松林~大寨~沟口共4个冲程,主要是第1、3冲程造成了灾难。因此,大寨村崩滑碎屑(石)流灾害具有4级动能转化形成4级冲程的特点,除第1级表现为“崩塌冲(击)”与“流(动)冲(击)”相结合外,其它3级都是“流(动)冲(击)”过程,“滑(动)冲(击)”的特征不明显。

4能级是指每个阶段都有势能转化为动能的能量补充,只是随着冲击高度的逐次减小,补充能量小于消耗能量,加之下一级坡高的降低,才使碎屑(石)流最终停止于沟口,而未继续运动进入光照水

库,这是由于运动主体为“碎石流”性质,而不是标准的“碎屑流”,更不是流动性很强的“泥石流”所决定的。4冲程是指碎屑(石)流运动路径可明显的划分为四个接续的部分,每一冲击路程的运动主体的粒度成分、地形特点、运动方向、运动速度和危害对象都不相同。所以,大寨事件的主体是一个多能级

多冲程的碎屑(石)流灾害过程,是一个多级跃下,不断势能转化为动能,形成多级冲程,直至沟口能量耗散完毕停止运动的过程(图5)。由于运动主体是碎石流,破坏力强,而铲刮作用又使运动前锋和两侧带有一定的泥(石),这是只到沟口观察的人员容易认定为泥石流灾害的原因。

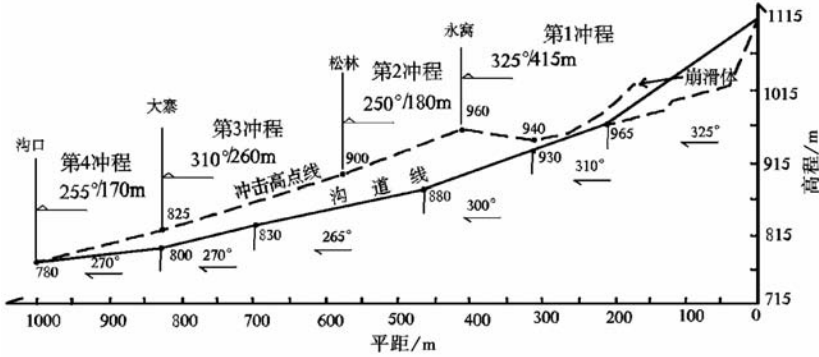


图5 大寨村崩滑碎屑(石)流灾害4级冲程图解

Fig. 5 A scheme consists of four strike stages about Dazhai landslide-debris disaster

考虑岩石块体之间的摩擦、碰撞、铲刮等效应,精确计算整个崩滑与碎屑(石)流运动的速度是困难的。本文提出一个简单方法,即用不同冲程的冲高来估算最大速度,虽然略去了运动过程中的摩擦能损失,但可以作为每一冲程致灾的实际速度或有效速度。

在国际上,Scheidegger A. E. 最先研究了滑坡速度问题^[1],国内潘家铮建立了滑坡速度计算公式^[2],胡广韬提出了剧动式滑坡多级冲程问题,并以陕西宁强县石家坡滑坡(1981年8月23日发生)为例进行了系统研究^[3]。

根据能量守恒定律的动能与势能转化关系可得到:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中, V 为最大冲击速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); g 为重力加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); h 为碎屑(石)流实际冲击高度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

由式(1)可以计算出各冲程最大冲击速度:

第1冲程,冲到永窝的冲高 $h_1 = 30\text{m}$,则 $V_1 = 24.25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

第2冲程,冲到松林的冲高 $h_2 = 11\text{m}$,则 $V_2 = 14.68\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

第3冲程,冲到大寨的冲高 $h_3 = 6\text{m}$,则 $V_3 = 10.84\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

第4冲程,冲到沟口的冲高 $h_4 = 0\text{m}$,则 $V_4 = 0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

4个冲程最大速度的平均值 $V = 12.44\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,沟道总长 $S = 1250\text{m}$,则冲击运动时间: $T = 100.48\text{s}$,即 $T = 1.67\text{min}$ 。

主沟道碎屑(石)流运动速度显然要慢于冲击速度,顺沟运动时间应略大于冲击运动时间(T),目击者称整个运动过程不足2分钟是有道理的。

3 地质环境因素

3.1 气象水文

关岭地区气候属亚热带湿润季风性气候区,多年平均降雨量约为1200mm,年最大降雨量1686.2mm(1993年),最小降雨量691.3mm(1988年)。降雨空间分配不均匀,由北部向东南部呈舌状递减。4~9月的雨季降雨量占全年的83.7%,6~7月雨量占全年的44.54%。

本次发生崩滑碎屑(石)流的沟谷溪水直接汇入北盘江,光照水库蓄水前汇入处高程585m。北盘江属珠江水系,是关岭与晴隆县、兴仁县、贞丰县的界河。

3.2 地形地貌

关岭县地处云贵高原东侧的梯级状斜坡地带,地形起伏较大,切割强烈,地质环境条件脆弱,地质灾害发育。崩滑区原始地形坡脚 $30^\circ \sim 40^\circ$,开裂崩

垮界面倾角约 65° , 崩滑区后缘到局地分水岭杨家洞(1397.6m)的汇水面积有限。

源于分水岭主要汇水区的雨水未进入崩滑斜坡区, 经过其西侧于 913m 高程处进入主沟(图 1)。

3.3 地层构造

区域地层除侏罗系、白垩系及第三系缺失外, 从二叠系下统至第四系均有出露。其中以三叠系地层发育最全, 次为二叠系地层。岩石主要为浅海相碳酸盐岩沉积, 次为陆相碎屑沉积。

崩滑碎屑(石)流发生在三叠系夜郎组(T_{1y}), 其下部为泥质粉砂岩, 上部为较坚硬的泥灰岩, 岩层整体南倾, 倾角 40° 。夜郎组下部为二叠系龙潭组砂页岩夹煤系(P_2l), 上部为三叠系永宁镇组灰岩(T_{1yn})。

区域构造主要由一束大体平行的较紧密褶皱和逆断层组成, 构造线呈北西-南东向展布, 在丙坝、岗乌区段呈东西向展布。崩滑区位于永宁复背斜的南翼、关岭复向斜的北翼。崩滑体所处斜坡为单斜构造, 坡体为反倾坡, 节理发育, 特别是切割岩层面沿斜坡走向外倾的一组, 与岩层面共同切割岩体形成块状结构, 也是追踪形成开裂面的主控因素。

3.4 地震活动

关岭地处弱震区, 但中小地震也曾引发崩塌造成危害。2010年1月17日17:35, 贵州境内贞丰、关岭、镇宁交界处发生 $M_L 4.0$ ($M_S 3.4$) 级地震, 震源深度 7km。地震引发的岩崩(滑坡)多处, 有 2 处造成 7 人死亡、1 人失踪, 损坏渡船一艘, 分别发生在关岭与贞丰交界的董岗码头和关岭县板贵乡田坝村。

3.5 人类活动

直接关系本区的光照水电站位于关岭和晴隆二县交界的北盘江中游, 水库正常蓄水位 745m, 总库容 $32.45 \times 10^8 \text{m}^3$, 装机容量 $260 \times 4 \text{MW}$, 碾压混凝土重力坝最大坝高 200.5m。2007年12月30日下闸蓄水, 2008年8月5日首台机组投产发电。目前没有具有明显破坏性影响的水库诱发地震记录发布。

沿永窝-牛角田-炭窑岭-旧屋基一线斜坡坡脚地带的二叠系龙潭煤系(P_2l)存在开采历史, 与本次崩滑灾害最近的历史采矿点是永窝东约 0.8km 的牛角田。

经调查访问, 没有发现本次崩滑事件与光照水

库诱发地震和龙潭煤系开采相关的直接证据。

4 成因分析

4.1 “水楔”作用问题

6月27日8:00至28日11:00, 由岗乌镇局地降雨量 237mm, 可以得到 27h 平均降水强度 $8.8 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当然, 实际峰值降水强度远大于此值。考虑滑坡后缘等高线和标志分水高程点 1397.6mm 及其向下的分水岭脊线构成的扇形斜坡区(图 1), 可得到:

崩滑体外汇水区面积 $S_1 = 56000 \text{m}^2$;

灌入滑坡后缘裂缝总水量 $Q_1 = 13272 \text{m}^3$;

后缘小时汇水强度 $q_1 = 492.8 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

崩滑体坡面汇水面积 $S_2 = 33000 \text{m}^2$;

崩滑体坡面承水量 $Q_2 = 7821 \text{m}^3$;

坡面小时汇水强度 $q_2 = 290.4 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

假如山体是不透水的或高峰降雨时段来不及排泄, 若初始滑坡后缘裂缝深 50m, 长 100m, 宽 0.1m, 则仅需 1h 崩滑体后缘汇水即可充满裂缝。若初始滑坡后缘裂缝深 100m, 长 150m, 宽 0.1m, 也只需 3h 即可充满水。即使充分考虑斜坡岩体的渗透性, 本次局地强降雨, 特别是超强降雨时段(如小时降水强度达到 $50 \sim 100 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 后缘灌入的水体对崩滑体起动的持续“水楔”推动作用存在的。而斜坡面上的水流灌入一方面阻滞后缘灌入水的溢出, 同时加剧了对斜坡体的浮托和“水楔”外推作用。

到 7 月 1 日中午, 现场观察仍可发现崩滑后壁裂隙中有水流涌出, 可以判断斜坡岩体渗透能力远不及降水汇入速度, 也说明强降雨期间沿斜坡后缘裂缝形成“水楔”作用推动碎裂岩体解体并向外倾倒崩滑是存在的。

4.2 斜坡崩滑的力学平衡条件

为了进一步认识裂隙化岩体斜坡的稳定性, 可以利用图 2 建立块体力学图解(图 6)。

在强降雨期间, 块体主要受到三个力的作用: 一是坡体重力(W); 二是上部开裂段水压推力(P_1), 即“水楔”作用; 三是斜坡下部错落阻滑段水压浮托力(P_2)。坡体重力(W)表现为斜坡下滑作用和下部阻滑段的抗滑作用。

假定强降雨期间发生崩滑的斜坡块体是不透水的, 发生崩滑事件的力学平衡条件须满足:

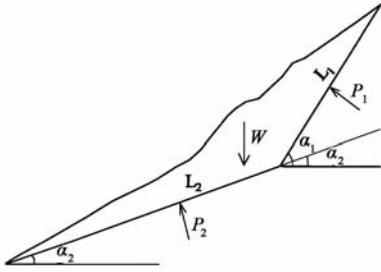


图6 崩滑段块体力学分析图解

Fig. 6 Mechanics scheme of sliding rockmass

$$K = F_1/F_2 \leq 1 \quad (2)$$

其中, $F_1 = (w \cos \alpha_2 - P_2 - P_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)) \operatorname{tg} \varphi + CL_2$

$$F_2 = w \sin \alpha_2 + P_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$W = \gamma V$$

$$P_1 = \gamma_w L_1^2 \sin^2 \alpha_1 / 2$$

$$P_2 = \gamma_w L_1 L_2 \sin \alpha_1 / 2$$

式中, K 为崩滑体的稳定系数; F_1 为充水状态崩滑体总抗滑力($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); F_2 为充水状态崩滑体总滑动力($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); P_1 为上部开裂段水压推力($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); P_2 为下部错落阻滑段水压托力($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); α_1 为上部开裂面倾角($^\circ$); α_2 为下部阻滑面倾角($^\circ$); W 为斜坡崩滑体的重量(t); L_1 为上部开裂面充水长度(m); L_2 为下部阻滑面充水长度(m); γ 为泥质粉砂岩体平均重度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为斜坡岩体体积(m^3); γ_w 为水的重度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); C 为下部阻滑面的内聚力($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); φ 为下部阻滑面饱水残余内摩擦角($^\circ$).

当取 $\gamma = 2.6 \text{t} \cdot \text{m}^{-3}$; $\gamma_w = 1 \text{t} \cdot \text{m}^{-3}$; $V = 40 \times 10^4 \text{m}^3$; $W = 1.04 \times 10^6 \text{t}$; $\alpha_1 = 65^\circ$; $\alpha_2 = 21^\circ$.

得到方程:

$$(9.7094 \times 10^5 - 0.4532L_1L_2 - 0.2954L_1^2) \operatorname{tg} \varphi + CL_2 \leq 3.7274 \times 10^5 + 0.2853L_1^2 \quad (3)$$

根据现场观察和工程经验,可以取 $L_1 = 50 \sim 200 \text{m}$, $L_2 = 180 \sim 400 \text{m}$, $C = 10 \sim 20 \text{t} \cdot \text{m}^{-2}$, 得到: 下部滑动面内摩擦角(φ) 在 $21^\circ \sim 22^\circ$; 相应的“水楔”推力(P_1) 在 $1000 \sim 16000 \text{t}$ 之间变化, 下部滑动面浮托力(P_2) 在 $6500 \sim 18000 \text{t}$ 之间变化是可以接受的(表1)。

也即, 只要降雨时间足够, 满足上述条件就会发生崩滑事件。同时发现, 强降水期间下部滑动面的内聚力对斜坡块体稳定性的影响不大。

4.3 高速远程问题

大寨崩滑事件是高速远程滑坡吗? 特别是初始

表1 开裂“水楔”作用段与阻滑段的关系*

Table 1 Correlation between fissure segment borne from “water wedge” pressure and anti-sliding section in rockfall area

序号	参 数			
	L_1/m	L_2/m	P_1/t	P_2/t
1	50	400	1026.7	9063
2	50	300	1026.7	6797.3
3	100	250	4106.9	11328.8
4	100	180	4106.9	8156.7
5	150	190	9240.5	12914.8
6	200	200	16427.6	18126

* 根据测算, L_1 、 L_2 各自长度不大于 450m 为限。

阶段或第1冲程。前已述及, 大寨事件滑坡特征不明显, 更多表现为块体结构崩溃后的崩塌翻滚特征, 而高速滑坡首先必须是滑坡^[4]。

根据牛顿第二定律, 忽略影响小的内聚力(C)作用, 可以得到斜坡块体运动的加速度公式:

$$a = g(\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi) \quad (4)$$

式中, a 为崩滑块体运动加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); α 为崩滑块体运动坡面角($^\circ$); φ 为崩滑块体内摩擦角($^\circ$).

取 $\alpha = 21^\circ$; $\varphi = 22^\circ$; $g = 9.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 得到:

$$a = 0.184 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

初速度 $V_0 = 0$, $V_1 = 24.25 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 第1冲程需时 137s。

显然, 这样的加速度是不能冲上永窝山梁的, 也是不符合实际的。说明发生崩滑的斜坡底界面不是以缓角度($\alpha = 21^\circ$)滑动为主的, 按滑坡考虑是依据不足的。

事实上, 第1冲程是短暂的。同样取第1冲程的最大速度 $V_1 = 24.25 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, φ 、 g 值当然不变, 可计算出: $a = 2.425 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

代入(4)式, 得到 α 约为 35° , 相应的运动时间为 10s。反过来, 按第1冲程运动时间取 15s, 得到: $a = 1.617 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, 相应的 $\alpha = 31^\circ$ 。

因此, 可以认为, 斜坡岩体是以约 325° 方向, $31^\circ \sim 35^\circ$ 的俯冲角崩溃并发展为高速运动的。也即第1冲程属于崩塌式高速运动, 斜坡主体不是沿底部的缓坡剪出的, 而主要是沿上部的陡坡崩溃俯冲的(图2、图5)。

国际上, 立足于应急响应提出斜坡运动速度大于 $3 \sim 5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 就是极快的^[5,6]。我国一般认为滑坡运动速度大于 $20 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 属于高速的。从防灾减灾角度, 作者建议以一般人能够逃生的最大速度作为高

速的起始界限,取斜坡块体运动大于 $7.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 就是高速的。所以,大寨事件的第 1、2、3 冲程都属于高速运动,造成了重大的人员伤亡和民居的毁灭。

远程的认定似乎尚无公认的定见。本文建议以主滑方向滑出堆积物的长度 (L_s) 与滑床长度 (L_b) 的比值 (Li) 来衡量

$$L_i = \frac{L_s}{L_b} \quad (5)$$

如取 $Li \geq 2.0$ 作为远程滑坡的临界值,则大寨事件在永窝南段二者比值约为 1,即使定性为滑坡,也至多是高速的但不是远程的。

4.4 机理分析

4.4.1 “干砌块石结构”决定崩溃模式

崩塌斜坡因岩层面和南北、东西向节理切割,形成无黏结块体离散式组合结构,类似于扶壁式“干打垒土坯墙”或“干砌块石墙”。岩石块体卸荷后出现球状风化或球状剥离,碎裂后易崩解泥化。这种不规则的“干砌结构”整体性差,一旦块体位错变面摩擦为点摩擦,在侧向力作用下极容易发生结构性解体,形成结构崩溃式破坏。

谷目/长冲一带“村村通”工程公路开挖证明此类结构的岩体极易卸荷松动,逐次向上牵动造成整个斜坡结构离散。

这类结构一旦因降雨、振动而启动,更多地表现为倾倒—崩溃式垮塌,尽管斜坡表观上并不陡倾。具体过程可能是上部张裂溃决式垮塌,下部追踪节理面错落式滑移,但以上部作用过程为主。变形破坏过程可能是岩体松弛—错位—崩塌之三阶段,具体表现是追踪节理开裂—倾倒散解—蠕动挤出一崩落翻滚—碎石流冲击的链式过程。整个过程滑移运动特征不明显,通俗地称滑坡也是“崩塌式滑坡”。

因为不是弹性能积累的释放,而是松动体的倒塌或垮落,所以起始速度不大,基本可以忽略坡体聚集的应变能转化来的启动弹冲速度,主要是势能转化为动能的问题。

岩体崩落很快转化为碎石流。这是一种无黏结块体流,源头块度大,在运动过程中相互碰撞破碎而使其块度逐渐变小,加上沿途铲刮岩土变为碎屑(石)流,直至能量完全消耗而停止于沟口。

由于是大雨 3h 后发生,沟道洪流作用参与少,除边界铲刮外,未见明显的“溅泥”现象,“气浪”作用也不明显,主要表现为岩石块体集团(散粒体碎石流)的滚动与冲撞,少有滑动与黏滞,表现为多级

“流动冲程”碎屑(石)流。

4.4.2 强降水形成“水楔作用”

较长时间的强降水过程孕育了持续的“水楔作用”,在后缘裂缝带造成单侧水压力推动“干砌块石墙(体)”,斜坡体上的外水压力则起到向外拖拽作用。持续“水楔”作用造就了斜坡岩体渐进性贯通松动破坏,而降水过程是在崩滑区形成一个注水—悬浮—软化—外推—崩溃的过程,类似于块石堆积堤坝的溃决。

强降水形成的汇流进入裂缝,使其充水扩张,由于中下部不能及时排出、排泄不及造成暂时性滞水,形成暂态过程的持续的动水压力,自然向外推挤节理/层面切割的整个松动岩体。降雨灌入(持续注水)的水压力推动基本平行于坡面的大型板状岩体(隐蔽地发展成危岩体)追踪节理面和岩层面逐渐张开,上部开裂、下部追踪节理/层面呈错落式剪出(断),最后整体崩塌或崩溃。外水压力不但推动岩体,同时也对岩体起到悬浮减重作用,使外推效应更易于实现。长时间雨水渗入还导致泥质砂岩块体内聚力(C)和内摩擦角(φ)减小,错落架空进一步造成块体之间抗倾倒抗滑移失效的部分逐步扩大。这种外水压力或水推作用类似于裂隙化岩体边坡在水库急剧降水水位时的稳定态势变化。

2010 年初春以来,该区域持续干旱,多个山头树木枯死,证明该地带岩土开裂易于突发降水的快速渗入。能够发生如此大规模的崩滑,说明地表水灌入作用是存在而强烈的,也就可以相信事前山坡已开裂(发育了顺节理面的深大裂缝)的说法。因此,这次事件也可以看作是一个裂隙化斜坡岩体在持续快速充水条件下的稳定问题。

4.4.3 碎屑(石)流多级多冲程问题

崩滑碎屑(石)流经历了多级陡坎不断补充势能,多级缓坡之多冲程又消耗势能转化的动能,形成了碎屑(石)流运动的 4 能级 4 冲程模式。由于下一级的能量补充小于上一级的耗散,每一冲程都残留部分碎块石,至沟口全部耗散完毕,而没有冲出沟口形成堆积扇,这是不同于泥石流的特点。

碎屑(石)流表现为一种散粒体流,沿途在前缘和两侧冲击、铲刮表层过饱水的岩土扩展冲击居民点,加剧了危害破坏范围和强度,特别是其淤堵作用导致对生命的快速窒息效应,遭遇危害的生命几乎没有存活的可能。

由于碎石块度大,一般降雨条件下地表水会沿原沟道以地下潜流或伏流排泄,目前沟口下游已出

现明显的水流。随着碎屑(石)流体的进一步破碎、沉降、密实和固结,地下伏流逐渐会变得不畅,沟道的碎屑(石)流堆积会成为新的泥石流隐患。

5 结论与建议

5.1 初步结论

(1)大寨事件是一次巨型崩滑碎屑(石)流(体积大于 $50 \times 10^4 \text{m}^3$),也是一次特大型地质灾害(死亡/失踪人数大于30人)。

(2)发生斜坡崩滑的泥质粉砂岩体是裂隙化岩体,层面与节理面切割造就了类似“干砌块石结构”,一旦松动开裂就会发生崩溃式破坏,这是事件的主要内在原因。

(3)极端强降雨条件形成地表水流灌入斜坡后缘开裂地带,由于水流注入强度远大于岩体裂隙排泄能力,以致沿主要裂缝带形成持续较长时间的“水楔作用”。这种作用向外推挤与浮托斜坡岩体,是造成事件的主要外在引发因素。

(4)区域天然地震、光照水库诱发地震与外围历史采矿活动可能对区域斜坡演化起到某种作用,但未发现与本次事件相关的直接证据。

(5)特殊岩体结构和外在水动力因素使斜坡岩体发生崩溃式破坏后快速转化为碎屑(石)流。在局地区域地形控制下经过4个能级(陡坎)的冲击跳跃和4个阶段(冲程)的快速流动,形成一个多级多冲程的链式反应过程,并对沿途居民造成重大危害。

5.2 建议

(1)深化研究,建立此次事件精细化成因模式,为类似问题研究提供参照。

(2)滑坡后缘仍存在不稳定岩体,调查评价斜坡开裂范围、划定危险区,进行监测预警或适时治理以消除隐患是必要的。

(3)沟道内碎屑(石)流堆积体上已出现多处直径3~5m的堰塞塘,说明碎石空隙排水能力不足,在未来暴雨条件下引发沟谷型泥石流的可能性是存在的。建议一方面保障潜流出口排泄畅通;另一方面开展土地整理,建设地表排水系统工程。

致谢 本项研究开展过程中,贵州省国土资源厅提供了1:1万地形图、1:20万区域地质资料和野外工作保障条件,贵州省国土资源厅田稼处长、杨胜元院长、张建江总工程师、国土资源部地质环境司熊自立处长、中国地质调查局张作辰处长等在野外考察期间与作者进行了有益的讨论,刘艳辉博士帮助清绘了插图,在此一并说明,并致以衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Scheidegger A. E.. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. *Rock Mech*, 1973, 5(3): 231~236.
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京:水利出版社,1980.
Pan Jiazheng. Analysis on the Anti-sliding Stability of Buildings and Landslides. Beijing: Hydropower Publishing House, 1980.
- [3] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社,1995.
Hu Guangtao. Landslide Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [4] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
Wang Gongxian, Xu Junling, Liu Guangdai. Landslides and Landslide Prevention Technology. Beijing: Railway Publishing House of China, 2006.
- [5] Varnes, D. T. Slope movements, type and processes, in R. L. Schuster and R. J. Krizek (Eds.), *Landslide Analysis and Control* [M]. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, DC, Special report 176, 1978, 11~33.
- [6] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2009.
Liu Chuazheng. The Theory and Its Application on Megageo-hazards Mitigation. Beijing: Science Press, 2009.