

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201801438

堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析

邓建辉¹, 高云建¹, 余志球¹, 谢和平^{1,2*}

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065;
2.深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060)

摘要:2018年10月10日和11月3日, 西藏自治区江达县白格村金沙江右岸先后2次发生滑坡堵江事件, 堰塞湖与溃坝洪水给金沙江上游沿岸居民及其生产和生活设施带来巨大灾害。滑坡发生后, 作者先后2次赶赴现场, 参与灾害调查与救灾工作。基于现场调查, 结合相关资料, 对滑坡的形成机制与过程进行系统分析。结果表明: 1) 白格“10·10”滑坡是一个高位、高剪出口、高速非完全楔形体基岩滑坡, 方量约 10^7 m^3 。2) 滑坡地处金沙江缝合带, 岩性为元古界熊松群片麻岩组, 具有多期、多次变形与变质特点, 糜棱岩化和蚀变很严重。3) 滑坡按高程划分为3区, 即前缘的阻滑区、中部的滑区和后缘的牵引区, 分割高程大致为3 500和3 000 m。滑区为楔形体, 系2组发育良好的结构面切割形成; 阻滑区为四面体, 由2组发育较差的结构面切割形成; 牵引区为完全风化的岩土体夹团块状碎裂岩体。4) 滑坡存在2个滑动方向, 即滑区的S80°E方向和阻滑区的N70°E方向, 剪出口高程约2 950 m。5) 滑区楔形体重力是滑坡的主要动力来源, 滑坡的孕育过程是相对完整的阻滑区岩体在滑区重力驱动下的渐进破坏过程。6) 滑坡过程如下: 首先, 滑区和阻滑区启动; 其次, 失去支撑的牵引区再启动; 随后, 先启动的滑体高速撞击四川岸, 逆坡爬高约95 m, 并在两侧形成碎屑冲刷区; 然后, 先启动的滑体折返, 并与后启动的滑体在河面上方相撞, 冲击河水形成高速水砂射流, 在两岸形成水砂射流冲刷区; 而后, 堰塞坝下游坡滑动, 形成次级滑移区; 最后, 冲击产生的雨雾降落, 完成滑坡坝表面冲刷。7) 白格“11·3”滑坡是牵引区的部分岩土体在起阻滑作用的碎裂岩体渐进解体后下滑的结果, 方量约 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。8) 牵引区目前严重变形的方量约 $5.50 \times 10^6 \text{ m}^3$, 存在再次滑坡与堵江的风险, 需要采取合理的工程措施消除隐患。

关键词:金沙江; 白格滑坡; 高速滑坡; 形成机制; 形成过程; 滑坡坝; 堰塞湖

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)01-0009-08

Analysis on the Formation Mechanism and Process of Baige Landslides Damming the Upper Reach of Jinsha River, China

DENG Jianhui¹, GAO Yunjian¹, YU Zhiqiu¹, XIE Heping^{1,2*}

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;
2.Inst. of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen Univ., Shenzhen 518060, China)

Abstract: In October 10th and November 3rd 2018, two landslides happened successively on the right bank of the upper reaches of Jinsha River, which dammed the river at Baige village, Jiangda county, Tibetan Autonomous Region. The dammed lakes and their breaching flood brought about severe disaster to local residents and their production and life facilities along the river. Based on the field investigation immediately after the slides and other related materials, a systematic analysis is made on the formation and process of the slides in the paper. Results show that: 1) the “10·10” slide is a high position, high shear crack, high speed and incomplete wedge slide and its volume is around 10^7 m^3 ; 2) geologically the slide is situated in the suture zone of Jinsha River and the bedrock is Xiongfeng gneiss group of Proterozoic, which is characterized by multiphase repeated deformation and metamorphism and is severely mylonitized and altered; 3) the sliding area can be vertically divided into 3 zones of anti-sliding zone, major sliding zone and hauling zone, which are separated roughly at elevation 3 500 m and 3 000 m, respectively. The major sliding

收稿日期:2018-12-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505004)

作者简介:邓建辉(1965—),男,教授,博士。研究方向:边坡工程与地质灾害。E-mail: jhdeng@scu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: xiehp@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-01-21 16:25:56

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190119.1155.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

zone is of wedge shape cut by two well-developed structural planes, the anti-sliding zone is of tetrahedron shape formed by two undeveloped structural planes, while the hauling zone is completely weathered earth mass mixed with clumped and heavily fractured rock; 4) the slide has two sliding directions of S80°E in the major sliding zone and N70°E in the anti-sliding zone and the elevation of shear crack is around 2 950 m above sea level; 5) the power driving the slide is mainly from the gravity of the wedge in the major sliding zone and the developing process of the slide is the progressive failure of the comparatively intact rock mass in the anti-sliding zone under the gravity of the major sliding zone; 6) the sliding process can be divided into 6 steps. Firstly the major sliding zone and the anti-sliding zone begins, secondly the support-losing hauling zone starts up, thirdly the first started mass collides with the left bank of the river (the bank in Sichuan Province) at high speed, then moves up the slope for around 95 m and laterally to form the debris-scouring zone, fourthly the first started mass moves downward and collides with the mass from the hauling zone above the river and the merged mass punches the river water to form high-speed sandy water jet, resulting in jet-scouring zones on the both banks, fifthly the downslope of the landslide dam fails, resulting in the secondary landslide and finally the punch-induced misty rain leads to the flush of the dam surface; 7) the “11·3” landslide is the local failure of the earth mass in the hauling zone due to the progressive disintegration of the fractured rock mass acting as retaining wall and its volume is around $3 \times 10^6 \text{ m}^3$; 8) there still exist badly deformed mass in the hauling zone and the estimated volume is $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, so further sliding and damming risk is big and feasible control measures should be taken.

Key words: Jinsha River; Baige landslide; high-speed landslide; formation mechanism; formation process; landslide dam; dammed lake

2018年10月10日22时06分(根据邻近地震台网校正后的滑坡发生时间),西藏自治区江达县波罗乡白格村发生山体滑坡,堵塞了金沙江上游干流河段,形成堰塞湖。2018年10月13日凌晨0时45分左右,滑坡坝漫顶溢流后自然泄洪,逐渐冲刷形成泄流槽。11月3日17时40分,白格滑坡后缘再次滑坡,堵塞了泄流槽,形成了规模更大的堰塞湖。11月8日晚,相关各方开始在原泄流槽部位人工开挖泄流槽,11月12日10时50分,人工开挖的泄流槽开始过流。

白格滑坡是继1935年12月22日云南省巧家县沙坝沟滑坡堵江^[1]以来,金沙江干流最为严重的堵江事件。滑坡堰塞湖淹没了上游的村庄和各种生产生活设施,同时,溃坝洪水对滑坡下游的村庄、农田、公路、桥梁等基础设施的冲毁也十分严重。据统计,灾害共造成西藏、四川、云南三省(自治区)10.2万人受灾,8.6万人紧急转移安置;3 400余间房屋倒塌,1.8万间不同程度损坏;农作物受灾面积 $3.5 \times 10^3 \text{ hm}^2$,其中绝收 $1.4 \times 10^3 \text{ hm}^2$;沿江部分地区道路、桥梁、电力等基础

设施损失较严重^[2]。仅云南省直接经济损失74.3亿元^[3]。

为弄清滑坡灾害成因,作者在2次滑坡后均迅速前往现场进行调查。本文基于调查报告,补充了相关数据,重点分析了滑坡的形成机制与形成过程,以及目前需要关注的主要问题,以期为进一步防灾减灾任务的实施提供参考。

1 滑坡区地质环境条件

滑坡位于西藏自治区江达县波罗乡白格村,其后缘顶点地理坐标为东经 $98^{\circ}42'17.98''$,北纬 $31^{\circ}4'56.41''$ 。

滑坡地处藏东横断山脉、金沙江流域的河谷地带,为典型的构造侵蚀地貌。滑坡后缘为一走向N19°E的条形山脊,高程约3 720 m,波罗乡至白格村的简易公路自此通过。滑坡前缘为金沙江的一小河湾,平水位高程2 880 m。滑坡区岸坡较为陡峻,平均坡度33°。发育3级平台(图1, BR1、BR2为基岩区域编号):第1级最大,高程3 550~3 450 m;第2级次之,高



图1 白格滑坡前的地貌特征(基于Google Earth 2015-02-22影像修改)

Fig. 1 Landform of Baige area before landslide (revised after Google Earth image 2015-02-22)

程3 200~3 100 m;第3级很小,高程2 940~2 970 m,位于滑坡剪出口右侧。第1、2级平台原有居民均已搬迁。各平台形态规整,顺坡向发育2条平行的浅小冲沟,无双沟同源现象,因此,应为河流侵蚀平台。

滑坡区位于金沙江缝合带上,由于受多期构造运动的影响,区域构造形迹较为复杂。主要断裂构造

形迹为近北南向的江达-波罗-金沙江断裂带及NW向断裂(图2)。据1:20万白玉幅区域地调报告^[4],滑坡区岩性为元古界熊松群片麻岩组(Ptxnb),包括黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩和绿片岩等,具有多期、多次变形与变质特点,糜棱岩化和蚀变均很严重。

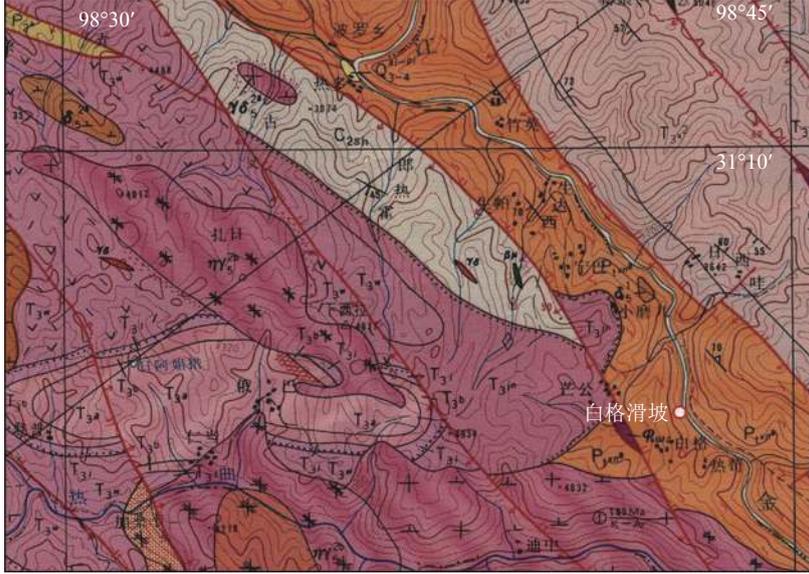


图2 白格滑坡地区地层岩性与地质构造

Fig. 2 Geological strata and structures near Baige landslide

江达县2018年9月的降雨量为103.2 mm,较往年有所增加。但滑坡前滑坡区并无明显的降雨过程,2次现场调查未见滑床及后壁存在地下水出露现象,仅在滑坡右侧冲沟有可见水流,估算流量不足1 L/s。

滑坡区抗震设防烈度为Ⅶ度^[5]。2013年8月12日5时23分,邻近的左贡县、芒康县交界处(北纬30.0°、东经98.0°)曾发生6.1级地震。滑坡前区域无显著地震活动。

2 “10·10”滑坡成因分析

2.1 滑坡堆积区特征

滑坡区与堆积区整体形貌见图3,其中,C1、C2、C3为裂缝区编号,BR1、BR2为基岩区编号,MA1、MA2为主堆积区编号,SS为次级滑移区,DS1、DS2为滑坡碎屑冲刷区编号,JS1、JS2为水砂射流冲刷区编号。具体特征如下:

1)金沙江左岸(四川岸)不存在滑坡,光滑面为冲刷面。

四川岸(左岸)总体上为坡积层和残留阶地岸坡,表面生长着柏树、灌木与杂草。岸坡物质胶结良好,不存在滑坡,但是岸坡表面冲刷严重,植被和壤土层清除殆尽。冲刷面(DS1和JS1)的平面面积约 $2.4 \times 10^5 \text{ m}^2$,按其形成原因可分为2大类:一是,滑坡

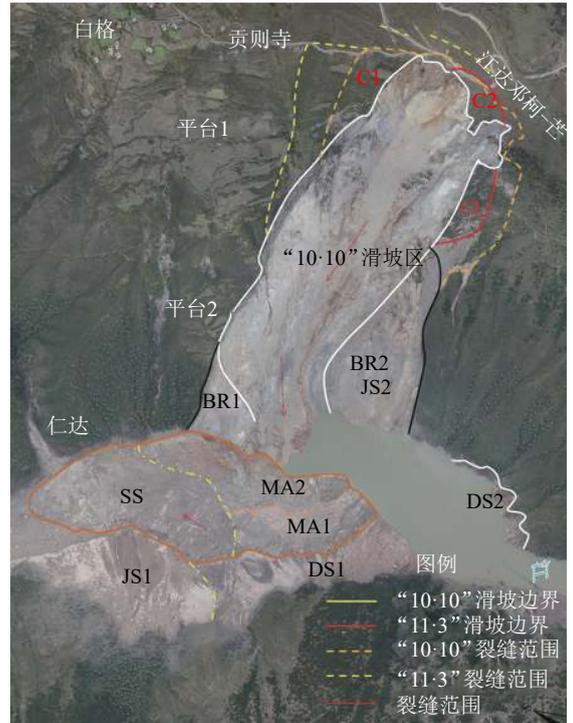


图3 白格“10·10”滑坡(基于四川测绘地理信息局2018年10月12日航片修改)

Fig. 3 Baige “10·10” landslide (revised after aerial photo by Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation in October 12th, 2018)

碎屑冲刷(DS1),位于上游一侧,表面残留物质为碎石土(图4),最大冲刷高程3 045 m;二是,水砂射流冲刷(JS1),位于下游一侧,表面残留物质为泥皮(图5),最大冲刷高程3 005 m。两类冲刷的面积大致相当。



图 4 左岸滑坡碎屑冲刷区DS1特征

Fig. 4 Characteristics of debris-scouring zone DS1 on the left bank



图 5 左岸水砂射流冲刷区JS1特征

Fig. 5 Characteristics of jet-scouring zone JS1 on the left bank

金沙江右岸也存在岸坡冲刷现象,包括上游的滑坡碎屑冲刷区(DS2)和基岩区(BR2)下部的水砂射流冲刷区(JS2)。由于BR2上部下滑的碎屑冲刷,JS2的水砂射流冲刷痕迹不显著。

2)滑坡坝可分为2部分,上游侧为主堆积区MA1和MA2,下游侧为次级滑移区SA(图6)。



图 6 次级滑移区及其横向拉张裂缝

Fig. 6 Secondary landslide and its transverse tension cracks

滑坡坝沿河长度约1 200 m,横河宽度约470 m。

漫坝溃决前,其堆积区平面范围约 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^2$,其中,主堆积区 $1.67 \times 10^5 \text{ m}^2$,次级滑移区 $1.83 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。与滑坡前地形对比分析,堆积体方量约 10^7 m^3 。主堆积区可进一步划分为MA1和MA2这2个分区,其中,MA1的物质来自主滑区和阻滑区,MA2的物质来自牵引区。次级滑移区后缘发育3级滑坡台阶,前缘发育横向拉裂缝。

滑坡坝物质整体上较为破碎、密实。大块石绝大部分为片岩和片麻岩,主要分布于主堆积区表面,碎屑的成分复杂。2018年10月13日凌晨,滑坡坝漫顶溢流时的堰塞湖水位高程为2 930 m。冲刷形成的泄流槽总体上沿原河道展布,长约1 000 m,底宽80 m,上宽152 m,右岸高52 m,左岸高76 m。其左岸,即滑坡坝主堆积区存在一些纵向裂缝,但并不显著;右岸(即滑坡区一侧)为崩坡积层,未受太多扰动。因此,整体稳定性较好(图7),在现场调查的7个小时内,未见泄流槽两岸出现塌岸现象。



图 7 泄流槽

Fig. 7 Flood discharge channel

2.2 滑坡区地形地质特征

滑坡区面积约 $5 \times 10^5 \text{ m}^2$,整体形态呈中、后缘宽,前缘收窄的特点(图1和3)。结合地形地貌、滑床形态和堆积体特征,滑坡区按照高程自上而下可划分为3个区,即牵引区、主滑区和阻滑区,其分隔高程分别为3 500和3 000 m(图8)。

牵引区为强风化岩体,下部夹团块状碎裂岩体。主滑区右侧岩性为黑色片麻岩,表面全风化,呈黑色土状;左侧表面为强风化绿片岩。底滑面由2组发育较好的结构面控制,根据滑坡后的地形测算产状为 $150^\circ \angle 35^\circ$ (左侧)和 $52^\circ \angle 33^\circ$ (右侧),交线方向 $S80^\circ E$,倾角 24° 。阻滑区结构面发育较差,且控制性结构面产状发生了变化,形态收窄,最后在约2 950 m处剪出。剪出口高于河面70 m,其下部原崩坡积层上的杂草在滑坡之后仍然保存良好,因此滑坡为高剪出口滑坡。阻滑区岩体相对完整,存在明显的基岩剪断现象。

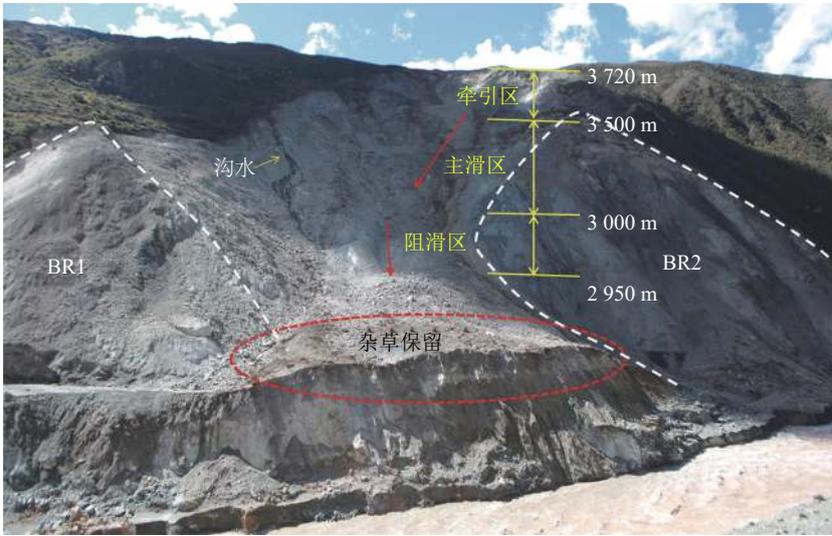


图 8 滑坡区特征

Fig. 8 Characteristics of landslide area

滑坡存在2个主滑方向。中后缘滑动方向受主滑区的2组结构面控制,滑动方向约S80°E;下部阻滑区的主滑方向偏向上游侧,为N70°E。滑坡区前缘两侧存在2个基岩区,平面面积约 $3 \times 10^5 \text{ m}^2$,其表面被后缘散落的滑坡碎屑冲刷。早期航片解译将基岩区误认为滑坡区,导致滑坡估算方量偏大。

除滑坡右边界外侧小冲沟有小股流水外,滑坡区其他部位无可见水流。

2.3 滑坡机制与过程分析

早在2009年,中国电建集团成都勘测设计研究院就发现滑坡后缘存在严重变形。滑坡是否为古滑坡复活,尚可争论。作者倾向于新生滑坡,原因有:1)滑坡的阻滑段基岩剪断特征十分显著;2)滑坡的启

动速度很快,不但剪出口下部的杂草完全保留,且主滑区和阻滑区部分滑体未直接撞击河水,直接从河面以上飞到了对岸;3)滑坡速度很快,主滑区和阻滑区部分滑体撞击对岸后逆坡爬高达95 m(最大高程为3 045 m),远高于“11·3”滑坡的速度;4)滑坡原地形上的平台发育规整,2条小沟顺坡向平行发育,未见双沟同源现象。滑坡的孕育时间至少达10年之久,可以理解为阻滑段的渐进破坏时间。

根据滑坡堆积体和滑床结构特征分析,导致滑坡的原因:首先是主滑区的2组结构面贯通,其次是主滑区与牵引区的推挤作用导致阻滑区的渐进破坏。历史地震和降雨过程可能会加速上述进程,但最终破坏主要动力来源于重力。滑坡过程(图9)简要分析如下:

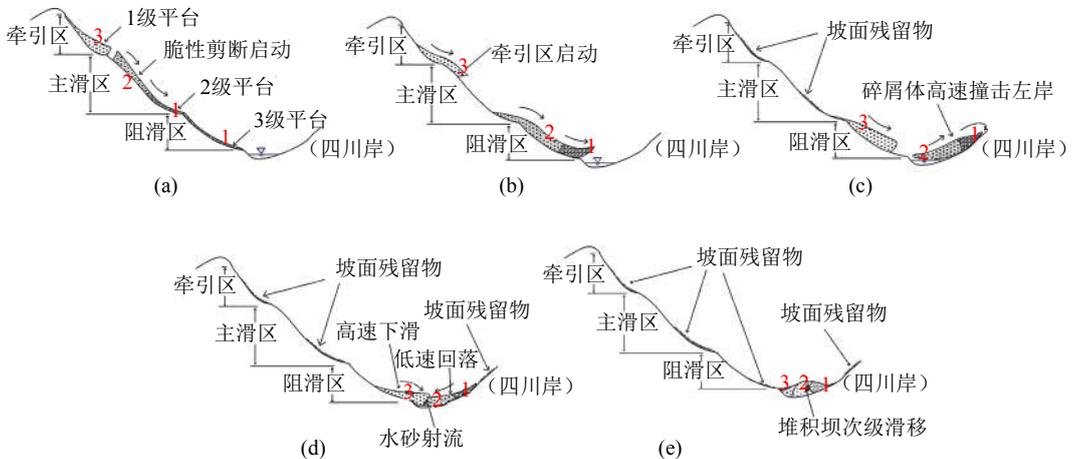


图 9 滑坡形成过程

Fig. 9 Sliding process

1)阻滑区突然脆性剪断,主滑区和阻滑区以一定初速度高速剪出。初速度的产生原因与岩爆类似。
2)主滑区与阻滑区启动后,牵引区失去支撑也

开始启动。
3)主滑区与阻滑区在重力作用下加速,高速撞击金沙江左岸(四川岸),逆坡爬行,并向左岸上、下

游扩散形成滑坡碎屑冲刷区(DS1)。由于四川岸为凸岸,部分碎屑返回金沙江右岸(西藏岸),形成小范围冲刷(DS2)。滑坡碎屑爬行至最高高程3 045 m后,在重力作用下顺坡下滑,形成类似滑动面擦痕的碎屑条带,部分碎屑残留在左岸相对平缓部位(图4)。

4)牵引区在重力作用下加速下滑,然后在河床部位与返回的主滑区和阻滑区碰撞。碰撞形成的合力向下高速挤压河水,形成高速水砂射流。考虑河水流速和河道弯曲因素,水砂射流主要冲刷下游侧四川岸坡,将表层壤土与植被清理干净,并在速度较低的边缘灌木树叶上留下尘迹(图5)。右岸上游侧基岩区(BR2)下部也应是高速水砂射流冲刷的结果,但由于上部碎屑下滑覆盖,表面痕迹不显著。右岸下游侧基岩区(BR1)是牵引区沿第一滑动方向下滑过程中部分碎屑翻越基岩区小山脊在其表面冲刷的结果。由于滑坡速度大,加之碰撞发生时牵引区碎屑比返回的主滑区与阻滑区部分碎屑速度大,滑坡碎屑主要堆积于左岸一侧(最大高程达3 000 m),右岸一侧堆积高程较低(最大高程仅为2 930 m),部分甚至淹没于水下(上游部分)。考虑靠右岸一侧堆积体成分为来自后缘牵引区的强风化层,颗粒较细,10月13日凌晨滑坡坝漫坝后很快就冲刷形成泄流槽。

5)由于阻滑区滑动范围收窄和主滑方向转向,主堆积区范围较为集中,滑坡坝下游坡的坡度较大,加之其颗粒较细,失稳后形成次级滑移区(SS)。

6)上述碰撞过程产生的雨雾较大,降落后在滑坡表面产生冲刷,其中主堆积区冲刷较小,次级滑移区和滑坡边界因高程较低,流水汇集冲刷相对严重。

综合,“10·10”滑坡为高位、高剪出口、高速非完全楔形体基岩滑坡。

3 “11·3”滑坡成因分析

“10·10”滑坡后,滑坡后缘及其两侧仍存在3个裂缝区(图3)。其中:裂缝区C1和C2前缘均存在碎裂岩体(图10和11);裂缝区C3破坏最为严重,但滑坡深度不大。现场调查期间,3个裂缝区均未见明显的块体崩落现象,因此判定暂时稳定是合适的。

2018年11月3日17时40分,裂缝区C2和C3发生局部滑动(图3)。根据“10·10”和“11·3”2次滑坡后的DEM对比分析,2个区域的面积分别为 3.3×10^4 、 1.9×10^4 m²,总体积约 3×10^6 m³。“11·3”滑坡均产生于牵引区,滑动过程中裹挟了原滑床部分松散物质。

裂缝区C2的滑动机制见图12^[6],碎裂基岩一定程度上起到挡墙的作用。但是,一方面,碎裂岩体本身完整性不足,处于渐进解体过程之中(图13);另一方面,I区的下沉改变了II区的受力条件,底部拉



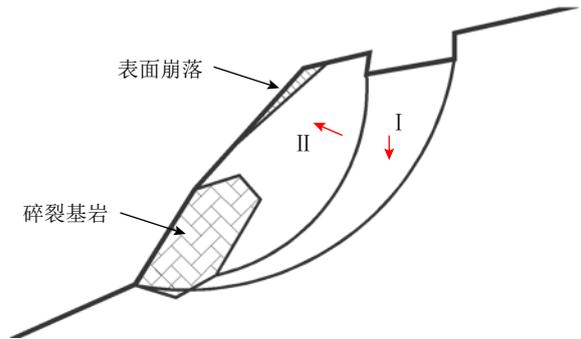
图 10 裂缝区C1前缘碎裂基岩

Fig. 10 Fractured bedrock at the front of cracking zone C1



图 11 裂缝区C2前缘碎裂基岩

Fig. 11 Fractured bedrock at the front of cracking zone C2



(a) 破坏模式



(b) 后缘沉降区 I

图 12 裂缝区C2破坏模式

Fig. 12 Failure mode in the cracking zone C2

张,表面崩落,会加剧碎裂岩体的解体进程。这类滑坡的特点是启动前变形较小,具有突发性。裂缝区C3的滑动机制则为两相对完整的碎裂基岩之间的土体滑坡。



图 13 裂缝区C2碎裂基岩解体现象

Fig. 13 Disintegration of fractured bedrock at the front of cracking zone C2

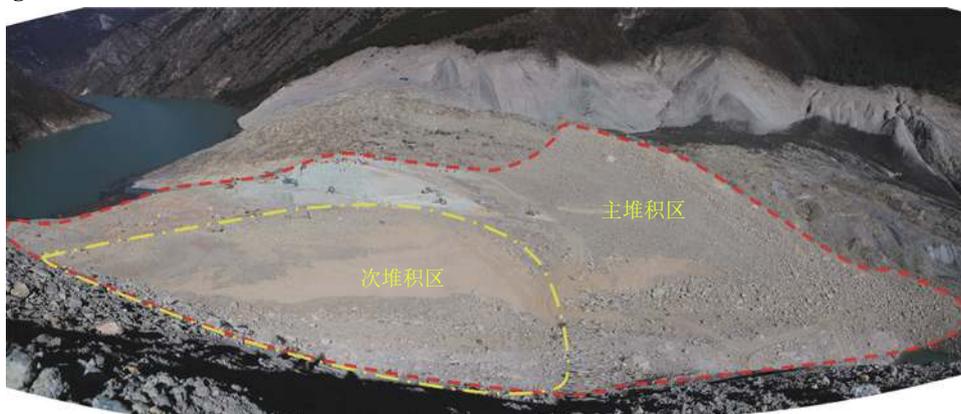


图 14 “11·3”滑坡堆积体特征

Fig. 14 Characteristics of accumulation zones by “11·3” landslide

4 遗留问题

“11·3”滑坡虽然经人工干预减轻了灾情,但滑坡坝溃决洪水在下游产生的灾害仍然十分严重。滑坡后缘的3个裂缝区仍然存在,其危险并未完全消除。估算的裂缝区残余方量约 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ (图15)。相对于“10·10”滑坡,裂缝区C1的范围由橙色区域扩展到了黄色区域,C2的范围也由公路边界外扩30余米,3个裂缝区的变形也更为严重。图15中,橙色区域未来启动的概率较高,红色区域更高,其临空部位存在块体频繁崩落现象。但从危险角度而言,红色区域的估算方量仅 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,逐渐解体堵江的可能性较低;橙色区域的方量近 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$,一旦启动再次堵江的危险性较大。

在滑坡后缘适度削方是目前消除隐患最可行的方案之一,前提是要尽快修复自波罗乡至白格村的简易公路,解决设备进场问题。

“11·3”滑坡堵塞了“10·10”滑坡自然溃决产生的泄流槽。从堆积体形态来看:

1)此次滑坡分2次完成:第1次为裂缝区C2产生,速度相对较高,块体相对较粗(图14的主堆积区);第2次为裂缝区C3滑坡,颗粒较细,叠加在第1次的堆积体之上,靠近剪出口部位(图14的次堆积区)。第1次滑坡虽然完全堵塞了泄流槽,但速度远低于“10·10”滑坡,因此,其堆积范围较小,特别是叠加在“10·10”滑坡上的残留方量极为有限。

2)“11·3”滑坡的堆积范围主要位于河道的右侧,原滑坡坝高程较低部位。“11·3”滑坡发生后,滑坡坝的溢流高程由10月10日的2 930提高至2 966 m,整体增加了36 m。鉴于其危险性剧增,11月8日晚开始在滑坡坝上机械开挖人工泄流槽,开挖部位与“10·10”滑坡的自然泄流槽一致。

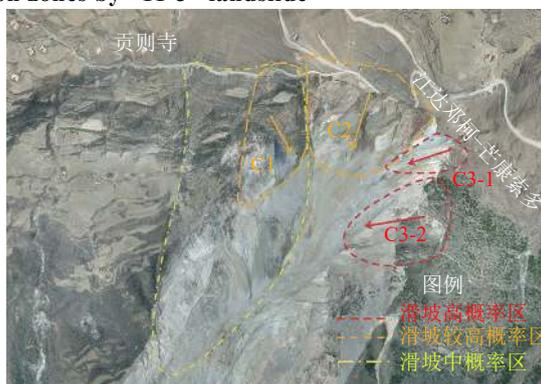


图 15 “11·3”滑坡后的裂缝区与滑坡危险性(基于四川测绘地理信息局2018年11月5日航片修改)

Fig. 15 Cracking zones after “11·3” slide and their risk of sliding (revised after aerial photo by Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation in November 5th, 2018)

5 结论

经过现场调查,结合背景资料分析,总结白格滑

坡的形成机制与过程如下:

1) 白格“10·10”滑坡是一个高位、高剪出口、高速非完全楔形体基岩滑坡,堆积体方量约 10^7 m^3 。

2) 滑坡地处金沙江缝合带,岩性为元古界熊松群片麻岩组,具有多期、多次变形与变质特点,糜棱岩化和蚀变均很严重。

3) 滑坡按高程可划分为3区,即前缘的阻滑区、中部的滑区和后缘的牵引区,分割高程约为3 500和3 000 m。主滑区为2组发育良好的结构面切割形成的楔形体,阻滑区为2组发育较差的结构面切割形成的四面体,牵引区为完全风化的岩土体夹团块状碎裂岩体。

4) 滑坡存在2个滑动方向,即主滑区的 $S80^\circ E$ 方向和阻滑区的 $N70^\circ E$ 方向,剪出口高程约2 950 m。

5) 主滑区的楔形体重力是滑坡的主要动力来源,滑坡孕育过程是相对完整的阻滑区岩体在主滑区驱动下的渐进破坏过程。

6) 滑坡过程如下:主滑区和阻滑区先启动;失去支撑的牵引区再启动;随后先启动的滑体高速撞击四川岸后逆坡爬高约95 m,并在两侧形成碎屑冲刷区;然后折返与后启动的滑体在河面上方相撞,冲击河水形成高速水砂射流,在两岸形成水砂射流冲刷区;之后堰塞坝下游坡滑动,形成次级滑移区;最后冲击产生的雨雾降落,完成滑坡坝表面冲刷。

7) 白格“11·3”滑坡是牵引区岩土体因阻滑碎裂岩体渐进破坏部分下滑的结果,方量约 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

8) 牵引区目前严重变形的方量约 $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,存

在潜在滑坡和堵江的风险,需要采取合理的工程措施消除隐患。

由于滑坡区未进行详细的工程地质勘察,本文工作定性成分偏多,这是下一步研究需要解决的问题。

参考文献:

- [1] Chai Hejun, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan. The catalog of Chinese landslide dam events[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Protection, 1995, 6(4): 1-9. [柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国滑坡堵江事件目录[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(4): 1-9.]
- [2] 应急管理部与国家减灾办: 11月全国自然灾害直接经济损失75.4亿元[EB/OL]. (2018-12-12)[2018-12-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1619615238182618387&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 金沙江白格堰塞湖泄流致云南损失70余亿元[EB/OL]. (2018-11-19)[2018-12-19]. http://www.scjz.gov.cn/zqkx_3475/gnzq/201811/t20181119_49091.htm.
- [4] 西藏自治区地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告(白玉县幅, 熊松区幅1:200000)[R]. 拉萨: 西藏自治区地质矿产局, 1992.
- [5] 中国地震动参数区划图: GB18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] Min H, Deng J H, Wei J B, et al. Slope safety control during mining below a landslide[J]. Science in China, Series E: Engineering & Materials Science, 2005, 48(Supp 1): 47-52.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 9-16. [邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9-16.]