

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202100608



本刊网刊

金沙江白格滑坡残留体失稳堵江风险分析

蔡耀军^{1,2}, 徐复兴^{1,2}, 朱 萌², 李亚虎², 高建华²

(1.长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2.水利部长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430011)

摘 要:2018年10月10日和11月3日, 金沙江上游白格滑坡两次滑动形成堰塞湖, 对下游造成了巨大破坏; 且其滑源区边界外仍存在K1、K2和K3等3处规模较大的残留体, 有再次失稳堵江的可能性, 对下游4座在建水电站构成威胁。受滑坡区自然地理地质条件制约, 现阶段对白格滑坡残留体的规模、可能的失稳模式、一次失稳体积等方面的研究工作较少, 不能为金沙江上游相关建设风险管理提供支撑。针对上述问题, 2019年, 对滑坡残留体开展了精细地形测量、变形现象详细调查、深部结构探测等工作, 系统分析了3处残留体的体积、失稳方式、可能的失稳组合; 在考虑失稳体的铲刮效应、运动轨迹、松方系数等基础上, 对残留体入江规模进行了分析; 根据河谷地形数据, 基于PFC3D软件模拟和“10·10”“11·3”两次白格堰塞体的形态特征, 对不同失稳规模进行了堰塞体堆积形态预测。结果表明: 3处残留变形体体积分别为 159.3×10^4 、 460×10^4 、 142×10^4 m³。滑坡残留体存在小规模坍塌、大范围卸荷变形、一定规模岩土滑移失稳3种变形破坏形式。最危险失稳工况以1-4、2-1、3-1、3-2这4个亚区同时失稳可能性最大, 失稳总体积达 271×10^4 m³。白格滑坡残留体不同失稳工况下, 沿主滑槽入江堆积最大堆积高度47.5 m, 堆积高程2 937.5 m; 沿白格滑坡凹槽上游斜坡入江堆积最大堆积高度28.7 m, 堆积高程2 923.7 m。

关键词:白格滑坡; 残留体; 失稳堵江; 风险分析

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)06-0033-10

River Blocking Risk Analysis for the Residual Unstable Masses of the Baige Landslide at the Jinsha River

CAI Yaojun^{1,2}, XU Fuxing^{1,2}, ZHU Meng², LI Yahu², GAO Jianhua²

(1.Changjiang Inst. of Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan 430010, China;

2.Changjiang Inst. of Exploration Technique, MWR, Wuhan 430011, China)

Abstract: On October 10 and November 3, 2018, the Baige landslide blocked the Jinsha River twice, causing huge damage to the downstream. There are still three large-scale residual deformation bodies K1, K2, and K3 around the previous sliding source area, which may be slide and block the river again. Restricted by the natural geological conditions of the landslide area, there is little research work on the residual Baige landslide, which cannot provide support for the risk management of the Jinsha River hydropower project construction. Based on the topographic survey, deformation measurement, and deep structure detection in the deformation area, the volume, destabilization mode, and possible sliding combinations of the three residual bodies were analyzed. The scale of the unstable body entering the river was evaluated on the basis of scraping effect, motion trajectory, loose factor, etc. Based on the current valley topographic data, the previous barrier body morphology analysis and PFC3D software simulation, the future barrier body parameters were predicted for different sliding modes. The results showed that the volume of three unstable areas reached 159.3×10^4 m³, 460×10^4 m³, and 142×10^4 m³ respectively; there were three types of destabilization in the residual body of Baige landslide, namely, the small-scale collapse, the large-scale unloading deformation, and the sliding; the possible and the most dangerous combination was that the four sub-zones 1-4, 2-1, 3-1, and 3-2 slide at the same time with the volume of 271×10^4 m³; under different sliding conditions of the deformable rock, the maximum height of barrier body was 47.5 m with the ground elevation 2 937.5 m when sliding along the

收稿日期:2021-06-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508600)

作者简介:蔡耀军(1963—),男,教授级高级工程师,博士。研究方向:岩土工程及地质灾害防治。E-mail: 1761939361@qq.com

网络出版时间:2021-11-12 15:56:00 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211111.1657.002.html

main chute into the river, and 28.7 m with the ground elevation 2 923.7 m when sliding along the upstream slope of the Baige landslide groove.

Key words: Baige landslide; residual unstable masses; river blockage; risk analysis

白格滑坡位于西藏自治区江达县波罗乡白格村金沙江右岸,于2018年10月10日、11月3日分别失稳,形成两次堰塞湖险情,给上下游影响区人民生命财产造成重大威胁和损失^[1-4]。在白格岸坡长期蠕变及白格滑坡形成深达80~110 m的深槽临空条件下,在滑源区两侧和后缘较大范围内地表裂缝十分发育且在持续变形,由这些裂缝所圈定的变形体称为白格滑坡残留体或残留变形体。白格滑坡残留体目前不时发生小规模坍塌变形,存在再次发生大规模滑坡和堵江的风险^[5-6]。

金沙江上游河段是中国重要的水电基地,白格滑坡下游连续分布有叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、旭龙等5座在建电站。水电站施工期间挡水围堰抵御上游超标准洪水的能力较弱,若白格滑坡残留体再次下滑堵江,由此引发的溃堰洪水将对下游在建电站构成严重威胁^[7-8]。为了防范灾情再次发生,四川省和西藏自治区分别在2019年汛前对白格左岸残留堰塞体和右岸滑坡后缘变形体进行了部分开挖减载,降低了滑坡残留体再次下滑堵江对下游造成的风险。国内多家单位也对白格滑坡残留体的稳定性和再次下滑堵江的可能性进行了数值模拟分析^[9-12]和定量定性评价^[13-15],得到了大量有价值的分析成果。

白格滑坡区基本地质条件、边坡结构、变形失稳机制十分复杂^[16-17],所形成的堰塞湖灾害链造成的次生危害巨大^[18-19]。受滑坡区自然地理地质条件制约,白格滑坡区的勘测深度十分有限,对残留体开展失稳堵江分析难度较大^[20-21]。

本文在对白格滑坡区开展精细地形测量、变形现象详细调查、深部岩体结构探测等现场工作的基础上,分析了白格滑坡残留体的体积、稳定现状、失稳方式、失稳组合;在考虑失稳体的铲刮效应、运动轨迹、松方系数等基础上,对变形体入江规模进行了分析计算;根据当前实测河谷地形数据,基于PFC3D软件模拟和“10·10”“11·3”两次白格堰塞体的形态特征,对不同失稳规模的堰塞体堆积参数进行了预测,取得了较为合理的结果,为该地区相关工程的风险分析和防范处置提供依据。

1 白格滑坡区地质条件

白格滑坡位于羌塘—昌都陆块与松潘—甘孜造山带西部碰撞结合带之间,大地构造位置属区域性断裂金沙江断裂带的金沙江西支断裂(JF2)、金沙江主断裂/东界断裂(JF3/4)之间(图1)。受区域断裂活

动的影 响,次级断层极为发育,根据现场地质测绘及地球物理勘探资料,白格滑坡区发现f1~f7共计7条次级断层(图2)。近南北向展布的金沙江断裂带西支断裂(JF2)、金沙江断裂带主干断裂(JF3)为白格滑坡区控制性构造,在区域断裂右旋走滑作用影响下,滑坡区发育NNW向(f1、f2)及NEE向(f3~f6)两组优势剪切面,并发展成f1~f6等派生性右行、左行剪滑断层。

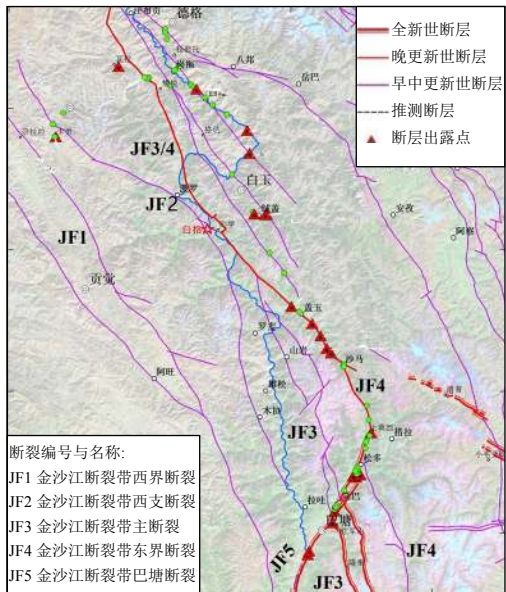


图 1 金沙江断裂北段区域性断裂分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of regional fault distribution in the northern section of the Jinshajiang fault

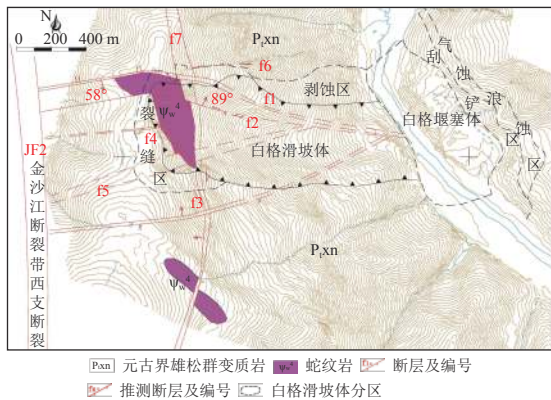


图 2 白格滑坡区构造简图

Fig. 2 Structural diagram of the Baige landslide area

以上7条次级断层中:f1断层位于白格滑坡体北缘,断层带宽约7~13 m,未见断层泥(图3),断面产状为170°∠58°;北侧断层下盘为雄松群绿泥石片岩,南侧断层上盘为华里西期蛇纹岩。该断层基本控制了白格滑坡上部的北侧边界。



图3 f1断层(白格滑坡北西侧乡道路边)

Fig. 3 Fault f1 (located on the road in the northwest of Baige landslide)

f3断层位于白格滑坡体南缘,断层面近直立,沿断层带发育构造角砾岩及断层泥(图4),断层带宽约3~7 m,断面产状为 $350^{\circ}\angle 81^{\circ}$ 。沿该断层带可见明显沟槽状负地形,基本控制了白格滑坡上部的南侧边界。

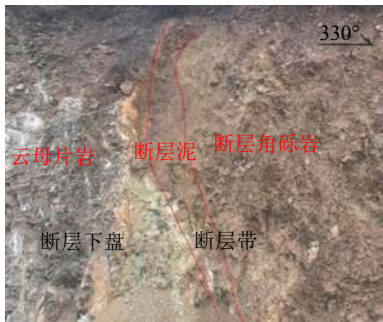


图4 f3断层(白格滑坡南侧乡道路边)

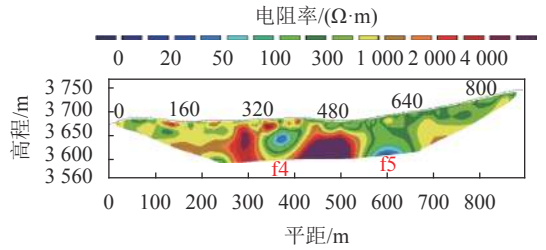
Fig. 4 Fault f3 (located on the road in the south of Baige landslide)

根据地球物理勘探资料(图5),白格滑坡区的次级断层破碎带在高密度电法剖面中呈明显的低阻带,宽约6~50 m不等,局部可达70 m,断层带以断层角砾岩、碎裂岩为主。

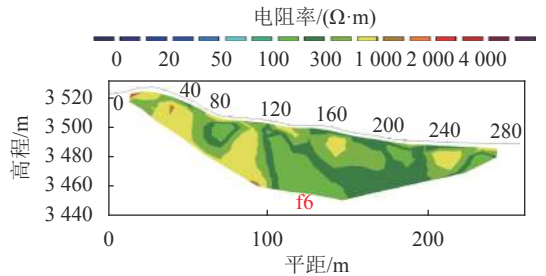
白格滑坡区出露地层主要有元古界雄松群变质岩、华里西期蛇纹岩。其中,华里西期蛇纹岩(ψ_{ω}^4)属金沙江蛇纹岩群的一部分,主要分布在白格滑坡后缘。岩体呈暗绿灰色,具鳞片变晶结构、交代网状结构,呈斑杂状-块状构造,由蛇纹石、铁质及少量绿泥石组成,与周围岩层呈断层接触关系,岩体较破碎,强度较低。元古界雄松群变质岩在白格滑坡区出露岩性较复杂,有浅灰绿色白云母片岩和深灰色~深灰绿色长英质云母片岩,另有灰黑色透闪透辉片岩、浅棕色方解石白云母片岩、灰黑色千枚岩呈薄夹层状出露。滑坡区断裂构造发育有厚度不等的浅红棕色长英质碎裂岩。

白格滑坡区地下水贫乏,只在3 500 m高程处南侧冲沟内出露有一小泉点,其余均为局部上层滞水形成的散浸点,如滑坡后缘削方区第4级马道(高程

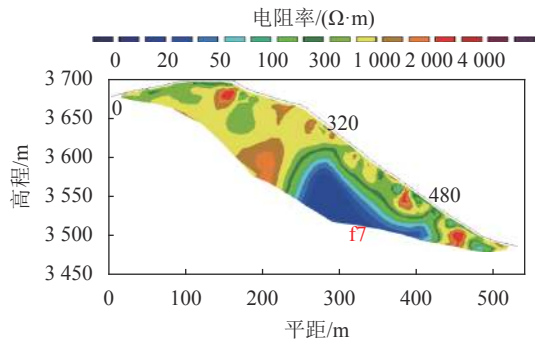
3 702.0 m)坡脚沿f4断层出露的一处散浸水点(图6),水量很小。



(a) f4、f5 断层的低阻特征



(b) f6 断层的低阻特征



(c) f7 断层的低阻特征

图5 白格滑坡高密度电法剖面中断层的低阻特征

Fig. 5 Low-resistance characteristics of the faults in the high-density electrical method profiles of the Baige landslide



图6 白格滑坡后缘削方区第4级马道(高程3 702.0 m)散浸点

Fig. 6 Scattering point of the four-level slope (elevation 3 702.0 m) in the Baige landslide

综合白格滑坡发生后的滑槽形态、堰塞体物质结构及粒径组成,白格滑坡属于破碎风化岩体迁就长大结构面,以整体快速滑动入江的高位、高剪出口、

高速滑坡。滑坡平面形态呈圈椅状，主滑体呈楔形，失稳岩土侧向受两组相向结构面控制，底界面剪断风化破碎岩体，没有特定的结构面，这也是右岸斜坡能持续变形数十年、累计位移量达到数十米才最终整体滑动的原因。“10·10”滑坡破坏方式为推移式，滑动后滑坡后缘形成数十米的临空面，为“11·3”滑坡变形提供了条件；后续变形体失稳，受失稳规模及运动路径地形地貌因素的影响，将以碎屑流形式入江，失稳岩体的解体扰动程度与“11·3”类似。

2 白格滑坡残留体特征

2.1 残留体分区及规模

白格滑坡残留体分为后缘不稳定区(K1)、下游侧不稳定区(K2)和上游侧不稳定区(K3)3个区。在K2、K3区外侧，目前尚存在卸荷变形较轻微的潜在变形区。

对白格滑坡区长大裂缝(长度>10 m)进行了实测，取得了39条长大裂隙的变形方向、力学特征等资料。根据残留体裂缝分布情况、岩土体变形方向及岸坡地形条件，将各区进一步细化为几个亚区(如K1区的亚区编号为1-1、1-2等)，其位置分布见图7。

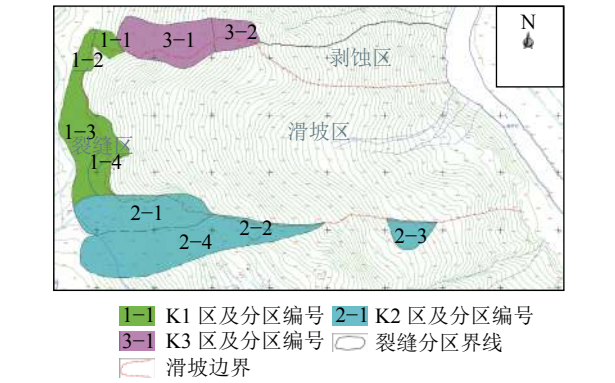


图 7 白格滑坡残留体裂缝区分区示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the zoning of the crack area of the residual body of Baige landslide

采用地震法、电法探测，揭示了残留体深部断层带、破碎岩体的分布范围。以残留体深部的连续低阻软弱界面作为潜在滑动面(图8)，得到各亚区的变形规模^[22]，如表1所示。K1区南北向长约500 m，东西向最宽约150 m，总面积约69 900 m²，呈向前凸出的三角形块体，总体积约159.3×10⁴ m³。K2区南北宽约270 m，东西向长约420~820 m，向斜坡下部顺主滑区边界延伸，总面积约159 500 m²，总体积约460×10⁴ m³。K3区呈东西顺坡向的长条状，纵向长约480 m，宽100~150 m，总面积约59 300 m²，总体积约142×10⁴ m³。

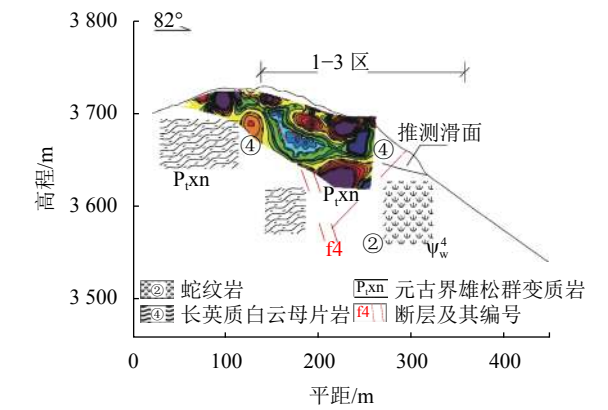


图 8 白格滑坡残留体典型坡段高密度电法剖面
Fig. 8 High-density electrical method profile of typical slope section of Baige landslide residue

表 1 白格滑坡残留体分区及规模统计
Tab. 1 Statistical of zoning and scale of Baige landslide residue

区域	亚区	前缘 高程/m	后缘 高程/m	面积/ m ²	平均 厚度/m	体积/ (10 ⁴ m ³)
K1	1-1	3 675	3 732	6 700	9	6.0
	1-2	3 700	3 728	7 100	6	4.3
	1-3	3 630	3 730	48 400	28	135.0
	1-4	3 660	3 710	11 700	12	14.0
K2	2-1	3 560	3 750	52 800	15~25	115.0
	2-2	3 410	3 430	3 700	8	3.0
	2-3	3 140	3 180	12 000	10	12.0
	2-4	3 420	3 775	91 000	35~40	330.0
K3	3-1	3 480	3 690	44 500	20~35	130.0
	3-2	3 380	3 500	14 800	7~10	12.0

2.2 残留体变形破坏特征

K1、K2、K3这3个变形区的变形方式、机制较为复杂，从残留体所处岸坡地质结构、目前的变形表现、物探深部探测结果来看，存在3种变形破坏形式：1)在2018年滑坡形成的凹槽周边，由于存在50~80 m的高陡临空条件，3个变形区的外侧边坡时常发生数方至数十方的小规模坍塌，特别是K2区东北侧缘；2)2018年滑坡后，滑坡周边产生大范围的卸荷变形，根据滑坡凹槽规模及边坡地形地质条件分析计算推断，其后缘影响宽度达150~200 m，侧缘宽度达200~300 m，深度达50~80 m，变形自地面向下逐渐减小，没有确切的底界面；3)在卸荷变形范围内，迁就长大侧向结构面和浅部软弱岩体，构成一定规模的潜在滑移变形体。

第1种变形失稳的规模小，不会构成堰塞湖威胁。第2种变形不会整体失稳，变形发展到一定量级后，会以第1种和第3种变形方式分块失稳。第3种变形失稳具有一定规模和突发性，是堰塞湖风险评估关注的重点。

3 白格滑坡残留体失稳规模分析

白格滑坡残留体的失稳、运移、堆积过程十分复杂,残留体失稳入江规模不仅取决于其自身变形失稳的规模,而且与失稳轨迹密切相关。白格滑坡残留体分布在滑坡后缘及两侧缘,各残留体的主要变形方向、失稳前缘高程、运移路径等各有差异,失稳运移过程中对滑槽中既有堆积物的裹挟铲刮能力不一。

表 2 白格滑坡残留体稳定性综合评价

Tab. 2 Comprehensive evaluation for the stability of Baige landslide residue			
区域	亚区	稳定性评价	变形破坏及危险评价
K1	1-1	不稳定	持续浅表层解体变形,滑源位置较高,具较强的铲刮能力,但方量较小,堵江可能性低
	1-2	欠稳定	前缘局部渐进式解体,单次解体方量小,堵江可能性低
	1-3	基本稳定	经削方处理,目前变形微弱,基本稳定
	1-4	不稳定	变形持续发展,滑源位置较高,具一定的铲刮能力,但方量较小,堵江可能性低
K2	2-1	不稳定	持续变形,顺坡向整体滑移,滑源位置较高且方量较大,具备较强的铲刮能力,堵江可能较大
	2-2	欠稳定	前缘局部渐进式解体,单次解体方量小,堵江可能性低
	2-3	欠稳定	前缘局部渐进式解体,单次解体方量小,堵江可能性低
	2-4	基本稳定	为潜在变形体,目前变形发展缓慢,基本稳定
K3	3-1	不稳定	变形持续发展,顺坡向滑移为主,次为往南侧滑槽解体滑移,滑源位置较高且方量较大,铲刮能力较强,具备堵江可能
	3-2	欠稳定	前缘局部渐进式解体,单次解体方量小,堵江可能性低

3.2 残留体失稳工况分析

K1、K2、K3这3个变形区内可能以整体滑移模式变形的亚区主要有2-1和3-1亚区,1-3、2-4亚区基本稳定,其余亚区的破坏模式为局部渐进式解体。考虑到一些相邻较近的区域变形会引起关联反应,白格滑坡残留体可能的失稳工况有以下几种:

- 1) 2-1亚区单独失稳:失稳体积约 $115\times10^4\text{ m}^3$ 。
- 2) 2-1亚区带动1-4亚区一起失稳:如果2-1亚区整体失稳,对临近的1-4亚区牵引作用较大,将带动其一起失稳,失稳总体积约 $129\times10^4\text{ m}^3$ 。
- 3) 3-1亚区带动3-2亚区一起失稳:如果3-1亚区整体失稳,位于其主要运动方向下方的3-2亚区将会被牵动失稳,失稳总体积约 $142\times10^4\text{ m}^3$ 。
- 4) 1-4、2-1、3-1、3-2这4个亚区同时失稳:遭遇暴雨或强烈地震极端工况时,考虑稳定性较差的4个亚区同时失稳,失稳总体积为 $271\times10^4\text{ m}^3$ 。由于1-1、2-2、2-3等亚区日常小规模坍塌频繁,因此不考虑其与2-1、3-1亚区组合失稳。

3.3 失稳运动轨迹研究

变形体失稳后,其运移轨迹将依据最小势能原理,沿其运动方向上的主要沟槽运移。白格滑坡发生后,在坡体上形成了一个上宽下窄、上陡下缓的滑槽(图9)。

从图9可以看出:1-4区前缘位置较高,变形方向与主滑槽基本一致,失稳岩土体直接进入滑槽;2-1区前缘临空面较高,变形方向与主滑槽小角度相交,

“11·3”滑坡为白格滑坡的二次滑移,发生在第1次滑坡后缘形成的不稳定区,其运移过程可以为本次分析提供参考。

3.1 残留体稳定性综合评价

白格滑坡残留体K1、K2、K3区内不同亚区的变形模式、破坏特征、稳定程度不一致,故对3个变形区的稳定性进行综合评价,如表2所示。

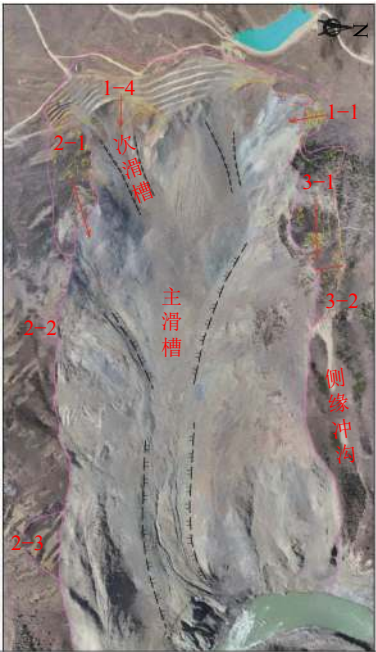


图 9 白格滑坡滑槽形态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of chute shape of Baige landslide

一旦失稳将很快入槽并对槽内岩土体产生较大的铲刮;3-1区南侧缘临空面较高,但主滑方向是顺坡向朝东,其一旦失稳,大部分岩土体不会进入主滑槽,将沿北侧缘的一条冲沟入江。根据对K3区的失稳运动轨迹进行定性分析和数值模拟,认为3-1区失稳后约35%的岩土进入主滑槽,65%的岩土将顺坡下滑入江。

3.4 失稳岩土体铲刮能力研究

岩土运动过程中,将铲刮沿途松散岩土,伴随能量消耗,也会有部分岩土停积下来。定义运动过程中增加的岩土与失稳岩土体积之比为裹挟系数。影响裹挟系数的因素主要有失稳体积、剪出口高程、运动轨迹与主滑槽夹角,故裹挟系数难以准确量化。

白格“11·3”滑坡体位于滑坡后缘,失稳前缘高程3 570 m,失稳方量约 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。失稳岩土体正对主滑槽,运移过程中铲刮滑槽内堆积物约 $90 \times 10^4 \text{ m}^3$,最终入江堆积约 $260 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。按此推算,其失稳方量与裹挟方量之比为1.00:0.56,裹挟系数为0.56。

综合考虑残留体各区失稳规模、剪出口高程和运动轨迹,1-4亚区失稳裹挟系数取值0.56,2-1亚区取0.45,3-1亚区取0.35。

3.5 残留体失稳入江堆积规模分析

按各变形体的失稳规模、裹挟能力、变形方向,推算不同失稳工况下的入江规模:

1) 2-1亚区单独失稳:失稳体积为 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$,考虑1.1的松方系数和0.45裹挟系数,入江堆积规模为 $183 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆积位置在主滑槽下方的新河道。

2) 2-1亚区带动1-4区一起失稳:失稳总体积为 $129 \times 10^4 \text{ m}^3$,考虑1.1的松方系数和2-1、1-4区不同的裹挟能力,入江堆积规模为 $209 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆积位置在主滑槽下方的新河道。

3) 3-1亚区带动3-2亚区失稳:3-1亚区 $130 \times 10^4 \text{ m}^3$ 岩体首先失稳,其中: $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 进入主滑槽,铲刮 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 松散土体一起沿滑槽进入下方的新河道,考虑1.1的松方系数,入江堆积规模为 $67 \times 10^4 \text{ m}^3$;另有 $85 \times 10^4 \text{ m}^3$ 顺坡向下滑动并牵动3-2亚区 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的岩体,堆积于新流道上游河流弯道一带,考虑1.1的松方系数,入江堆积体积为 $107 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆积范围与下游侧 $67 \times 10^4 \text{ m}^3$ 基本不重叠,见图10。



图 10 白格残留体失稳后入江堆积位置预测

Fig. 10 Prediction of the accumulation position of Baige's residual body in the river after its instability

4) 1-4、2-1、3-1、3-2这4个亚区同时失稳:失稳总体积为 $271 \times 10^4 \text{ m}^3$,入江堆积规模为 $383 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中, $276 \times 10^4 \text{ m}^3$ 堆积于主滑槽下方河道, $107 \times 10^4 \text{ m}^3$

堆积于主滑槽上游侧河道转弯一带。

4 白格滑坡残留体入江堆积参数预测

4.1 残留体入江堆积数值模拟

4.1.1 模拟计算程序

白格滑坡残留体失稳入江采用离散元颗粒流软件进行模拟。PFC颗粒流软件在模拟崩塌、碎屑流等灾害成灾过程时有很好的适应性,并且可以监测模型的能量、力链的变化,有助于分析崩塌、滑坡的变形机制^[23]。

4.1.2 模拟参数的标定

在建立滑坡模拟分析模型后,首先,确定滑坡物的容重与摩擦系数。根据滑坡区出露的几种岩性,取滑坡物容重为 25.0 kN/m^3 。摩擦系数根据“10·10”滑坡的堆积体形态(图11)进行反演得到。

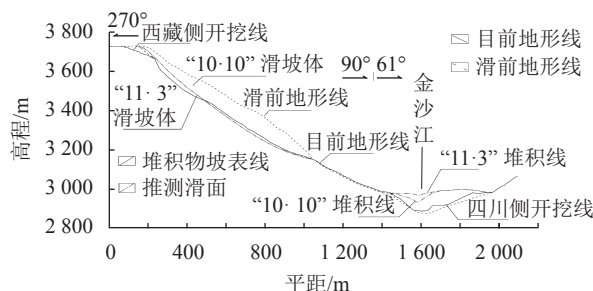


图 11 白格滑坡滑移-堆积示意剖面

Fig. 11 Schematic section of Baige landslide slip-accumulation

应用PFC软件建立的2维多面体颗粒流数值模型如图12所示,模型包括“10·10”滑坡体。



图 12 白格“10·10”滑坡2维颗粒流数值模型

Fig. 12 Two-dimensional polyhedral particle flow numerical model of Baige “10·10” landslide

对滑坡物质赋以不同的摩擦系数,计算得到的堆积情况如图13所示。经过对比,发现摩擦系数为0.42时,堆积情况与实际较为相符。因此,取0.42作为通过2维标定得到的滑坡物质摩擦系数。

4.1.3 滑坡运动堆积数值模型建立

在PFC3D中建立滑坡区域3维模型,包括K1~K3这3个残留体的各亚区(图14),模型平面范围为 $1\,400 \text{ m} \times 2\,300 \text{ m}$,高程范围自河床至山脊。主滑槽入江部位河床高程2 890 m, K3斜坡入江部位河床高程2 895~2 900 m。3维模拟采用与2维标定一致的多面体颗粒,边界条件未考虑河道水流条件,只考虑河道地形。

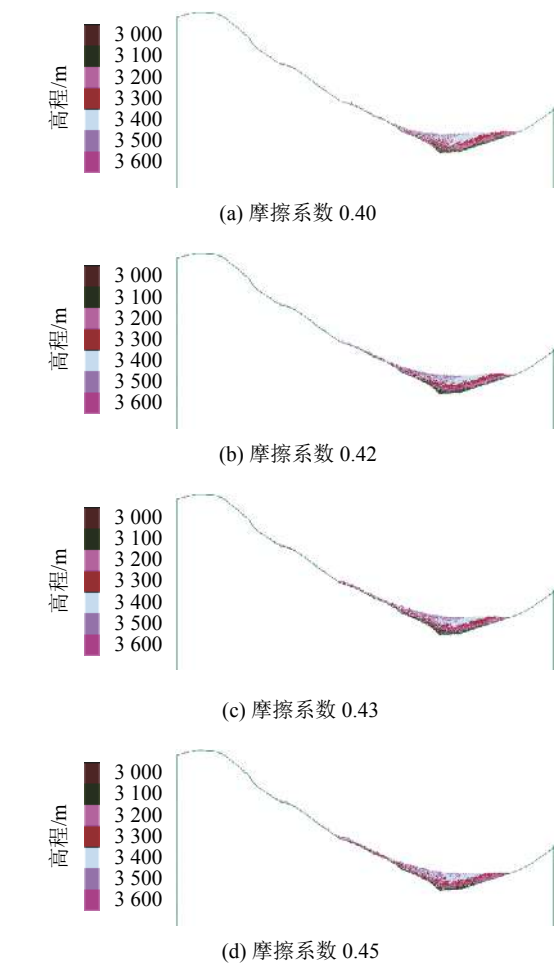


图 13 不同摩擦系数下白格“10·10”滑坡堆积情况

Fig. 13 Accumulation of Baige “10·10” landslide under different friction coefficients

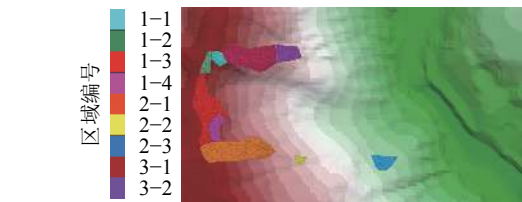


图 14 3维模型中的不稳定区域分区

Fig. 14 Unstable areas partition in 3D model

4.1.4 残留体失稳堵江模拟

采用PFC刚性多面体块体技术, 基于建立的3维滑坡地质模型, 开展残留体各部位失稳时崩塌—运动—堆积的全过程3维离散元数值模拟, 模拟考虑如下失稳工况:

- 工况1: K2区不稳定体, 即2-1、2-2、2-3同时失稳;
- 工况2: K3区失稳, 即3-1与3-2同时失稳;
- 工况3: 2-1区和1-4区同时失稳;
- 工况4: 2-1、1-4、3-1、3-2同时失稳。

数值模拟获取各计算工况下残留体失稳后最大滑速、堵江长度、堵江高度、堆积形态等特征值见表3。

表 3 各工况堵江规模数值模拟成果

Tab. 3 Simulation results of barrier body under various working conditions

工况编号	失稳规模/ (10 ⁴ m ³)	最大滑速/ (m·s ⁻¹)	堵江长度/m	堵江形态		
				高度/m	高程/m	堰口高程/m
1	130	60~70	500	30~40	2 920~2 930	2 922
2	142	80~90	800	20~30	2 910~2 920	2 909
3	129	60~70	500	25~35	2 915~2 925	2 918
4	271	80~90	900	40~50	2 930~2 940	2 928

4.2 以“10·10”和“11·3”堰塞体为参照模型的残留体入江堆积参数分析

堰塞体的规模取决于滑坡规模、入江轨迹、河床地形、堆积形态等因素。采用2019年12月实测的河谷地形, 以“10·10”和“11·3”两次白格滑坡形成的堰塞体堆积形态为参照模型, 分析残留变形体下滑堵江后的堰塞堆积形态及高程。

4.2.1 河床地形特征

“11·3”堰塞体溃决后, 形成的新河道顶宽200~230 m, 水面宽100~130 m, 两侧坡比1.0:0.5~1.0:1.0。2019年11月20日, 实测堰塞体上游金沙江水位2 895.7 m, 河道转弯后水位降为2 890.8 m, 下游顺直河道水位高程2 890.0 m左右(图15)。白格堰塞体一带河道地形横剖面见图16。

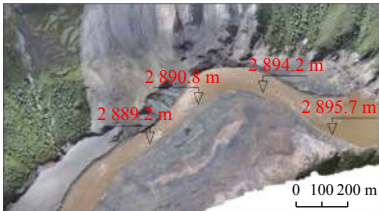


图 15 白格堰塞体附近金沙江河道形态

Fig. 15 Channel form of Jinsha River near Baige dam

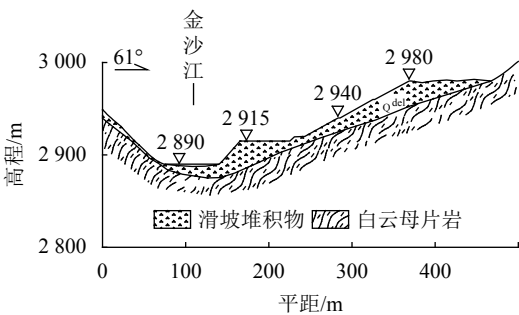


图 16 白格堰塞体河道地形横剖面示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the topographic cross-section of the river at Baige barrier body

4.2.2 碎屑流出口宽度

根据对白格滑坡残留体失稳运动轨迹的分析, K1、K2区的失稳岩土体将进入白格滑坡中下部已经

成形的滑槽,运动轨迹基本与“11·3”滑坡类似。3维模拟显示,变形体入江堆积有发散现象,在计算堆积高度时仍假设滑坡物质全部沿主滑槽入江,这样计算的堆积高度较实际可能偏大。

K3区的失稳岩土体只有少部分进入原滑槽内,大部分将沿着滑坡北侧斜坡坡面呈碎屑散体状下滑入江。

对于沿原滑槽入江的失稳岩土体,参照“11·3”堰塞体形态特征,拟定白格滑坡残留体再次下滑堵江形成的堰塞体顶部顺河方向长度与碎屑流出口同宽,为230 m。

对于K3区沿斜坡坡面入江的滑体,入江宽度考虑与滑体宽度相同。3-1区变形体宽100~150 m,取滑坡入江顶面宽度为150 m。

4.2.3 堰塞体横河向及上下游坡比

根据“10·10”及“11·3”两次白格堰塞体的横河向形态特征和顺河向形态特征(图17)^[24-25],拟定白格滑坡变形体失稳在新流道形成的堰塞体顶面在横河方向为水平堆积,顺河向上游坡比为1:4、下游坡比为1:5。考虑到3-1及3-2主体入江堆积区江面更宽,以及湖水垫层效应,上下游堆积坡比均按1:5考虑。

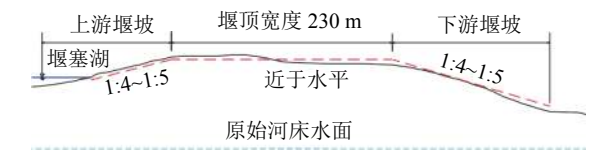


图 17 “11·3”白格堰塞体顺河向形态^[24-25]
Fig. 17 “11·3” Baige barrier body morphology along the river direction^[24-25]

从3维模拟结果看,K1、K2区失稳后的入江堆积体上下游坡比与上述假设基本一致,K3区失稳后入江堆积体上下游坡比较上述假设更缓,因此采用这一坡比预测堆积形态有一定的安全裕度。

4.2.4 各工况计算边界条件

按残留体4种入江工况,河道地形采用2019年11月实测结果,各工况计算条件如表4所示。

表 4 白格滑坡残留体堵江计算边界条件
Tab. 4 Computational boundary conditions of river-blockage of the Baige landslide residue

工况编号	沿主滑槽入江规模/(10 ⁴ m ³)	沿斜坡入江规模/(10 ⁴ m ³)	堵江河段河床高程/m	
			沿主滑槽入江	沿斜坡入江
1	183	—	2 890.0	—
2	209	—	2 890.0	—
3	67	107	2 890.0	2 895.0
4	276	107	2 890.0	2 895.0

4.2.5 堰塞体规模分析

采用3维地形模型,结合表4的边界条件,对不同

的失稳规模进行堰塞体堆积高度分析,各工况下堵江堰顶高程见表5。

表 5 白格滑坡残留体堵江堆积规模分析成果
Tab. 5 Analysis results of river-blockage caused by Baige landslide residues

工况编号	主滑槽河段堰塞体堆积高程/m	上游侧堰塞体堆积高程/m	堰塞体最大堆积高度/m
1	2 929.3	—	39.3
2	2 931.7	—	41.7
3	2 912.9	2 923.7	28.7
4	2 937.5	2 923.7	47.5

1)沿上游斜坡入江堆积:工况3和4存在沿白格滑坡凹槽上游斜坡入江堆积情况,最大堆积高度28.7 m,堆积高程2 923.7 m。

2)沿主滑槽入江堆积:工况1~4都存在沿主滑槽堵江情况,各工况的最大堆积高度为47.5 m,堆积高程为2 937.5 m,堆积体形态见图18。



图 18 白格滑坡残留体沿主滑槽入江最大堆积体形态
Fig. 18 Largest barrier body derived from Baige landslide residue along the main chute

4.3 对比分析

对比表3与5可知:以“10·10”和“11·3”堰塞体为参照模型计算的堰塞体高度明显大于3维数值模拟的计算结果,原因主要有2个:1)顺江堆积长度,数值模拟结果显示滑坡入江发散明显,堆积长度大于参照模型计算时的假设;2)堆积地面形态,数值模拟显示,K3区入江堆积体左高右低,K2区入江堆积体左低右高。更长的堆积长度和非水平的地面形态,致使模拟的堰塞体垭口高程相对较小。因此,参照“10·10”及“11·3”堰塞体计算的后续堰塞体高度有一定的安全裕度。

5 结 论

1)通过详细的现场调查和勘测工作,进一步厘清了白格滑坡K1、K2、K3这3个残留体的规模。K1区体积为149×10⁴ m³,K2区体积为460×10⁴ m³,K3区体积约为142×10⁴ m³。

2)根据残留体裂缝分布情况、岩土体变形方向及岸坡地形条件,将白格滑坡残留体各区进一步划分亚区并进行了稳定性评价。K1区分4个亚区,1-1及1-2区为分块解体失稳模式,1-3区现状基本稳定,

1-4区变形较快。K2区分为4个亚区,其中:2-1区具有整体失稳可能,变形发展较快;2-2及2-3区规模小,为分块解体失稳模式;2-4区目前基本稳定。K3区分为2个亚区,3-1区变形较快,滑坡特征明显;3-2区为浅层分块解体失稳模式。

3)通过崩塌—运动—堆积的全过程3维离散元数值模拟,分析了残留体的失稳运动轨迹。基于残留体失稳铲刮、松方系数、运动轨迹,评估了4种不同失稳组合的入江规模。2-1区单独失稳,失稳体积为 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$,入江堆积规模为 $183 \times 10^4 \text{ m}^3$;2-1连同1-4区一起失稳,失稳总体积为 $129 \times 10^4 \text{ m}^3$,入江堆积规模为 $209 \times 10^4 \text{ m}^3$;3-1牵动3-2区一起失稳,失稳总体积为 $142 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中,沿白格滑槽入江堆积 $67 \times 10^4 \text{ m}^3$,沿上游坡面入江规模为 $107 \times 10^4 \text{ m}^3$;极端工况下,以上4个小区同时失稳,失稳总体积 $271 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中,沿白格滑槽入江堆积规模为 $276 \times 10^4 \text{ m}^3$,沿上游坡面入江堆积规模为 $107 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4)对不同工况分别以“10·10”“11·3”堰塞体为参照模型和PFC3D软件计算了堰塞体堆积高度及垭口高程,并进行了对比分析,以“10·10”“11·3”堰塞体为参照模型的计算结果比3维模拟结果更偏于安全。白格滑坡残留体沿主滑槽入江的最大堆积高度为47.5 m,堆积高程为2 937.5 m;沿白格滑坡上游斜坡入江的最大堆积高度为28.7 m,堆积高程为2 923.7 m。

5)白格滑坡残留体变形尚在继续发展,后期需加强监测,关注残留体内裂缝扩展变形与滑移变形速度。

中国青藏高原周缘高山峡谷区断裂活动发育、卸荷作用强烈,类似白格滑坡堰塞湖的地质灾害威胁是一个日益突出的现实问题,应高度重视并加强对构造破碎岩体在强卸荷变形条件下的滑坡—堰塞湖灾害链的发育过程及机理研究。

参考文献:

- [1] Xu Qiang,Zheng Guang,Li Weile,et al.Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3,2018[J].*Journal of Engineering Geology*,2018,26(6):1534-1551.[许强,郑光,李为乐,等.2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J].*工程地质学报*,2018,26(6):1534-1551.]
- [2] Zhang Yongshuang,Ba Renji,Ren Sanshao,et al.An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River,Tibet[J].*Geology in China*,2020,47(6):1637-1645.[张永双,巴仁基,任三绍,等.中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J].*中国地质*,2020,47(6):1637-1645.]
- [3] 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.]
- [4] Wang Lichao,Wen Mingsheng,Feng Zhen,et al.Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River,Tibet,China[J].*The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,2019,30(1):1-9.[王立朝,温铭生,冯振,等.中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2019,30(1):1-9.]
- [5] Chen Fei,Wang Sai,Gao Yunjian,et al.Evolution of the cracking zones at the site of the Baige landslides and their future development[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(5):71-78.[陈菲,王塞,高云建,等.白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析[J].*工程科学与技术*,2020,52(5):71-78.]
- [6] Yang Zhongkang,Wei Jinbing,Gao Yunjian,et al.Instability probability analysis of the cracking zones at the site of the Baige landslide in Jinsha River[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(6):95-101.[杨仲康,魏进兵,高云建,等.金沙江白格滑坡裂缝区失稳概率分析[J].*工程科学与技术*,2020,52(6):95-101.]
- [7] Zhu Deming,Li Pengyue,Hu Xiaohong,et al.Stability analysis and prevention countermeasures for residual bodies of Baige landslide in Jinsha River[J].*Geoscience*,2021,35(1):56-63.[朱德明,李鹏岳,胡孝洪,等.金沙江白格滑坡残留体稳定性分析与防治对策[J].*现代地质*,2021,35(1):56-63.]
- [8] 陈祖煜,雷盼,张强,等.白格堰塞体风险后评估:再次堵江洪水分析和应对措施[J].*水利规划与设计*,2020(1):1-5.
- [9] Zhou Li,Fan Xuanmei,Xu Qiang,et al.Numerical simulation and hazard prediction on movement process characteristics of Baige landslide in Jinsha river[J].*Journal of Engineering Geology*,2019,27(6):1395-1404.[周礼,范宣梅,许强,等.金沙江白格滑坡运动过程特征数值模拟与危险性预测研究[J].*工程地质学报*,2019,27(6):1395-1404.]
- [10] Meng Tian,Xu Xiaolu,Liu Hanhu.Landslide risk assessment in high altitude areas based on slope unit optimization: Taking the Baige landslide in Jinsha River as an example[J].*Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*,2021,40(1):65-73.[孟田,许晓露,刘汉湖.基于斜坡单元优化的高海拔地区滑坡危险性评价——以金沙江白格滑坡为例[J].*河南理工大学学报(自然科学版)*,2021,40(1):65-73.]
- [11] Zhao Chuan,Jiang Linlin,Li Xiaopeng,et al.Sliding features of “10·11” large-scale landslide in Jinsha River based on DEM[J].*Journal of Shenyang University(Nature Science)*,2019,31(4):324-330.[赵川,蒋琳琳,李晓鹏,等.基于DEM的“10·11”金沙江大型山体滑坡运动特征分析[J].*沈阳大学学报(自然科学版)*,2019,31(4):324-330.]
- [12] Peng Shuangqi,Xu Qiang,Zheng Guang,et al.Recognition and analysis of deposit body grain of Baige Landslide-Debris Flow[J].*Water Resources and Hydropower Engineering*,2020,51(2):144-154.[彭双麒,许强,郑光,等.白格滑坡—碎屑流堆积体颗粒识别与分析[J].*水利水电技*

术,2020,51(2):144–154.]

- [13] Wang Lin,Duan Qingwei,Liu Lipeng,et al.Analysis of key engineering measures for barrier lakes:Taking the “11·03” Baige Barrier Lake in 2018 as an example[J].*Journal of Water Resources and Water Engineering*,2020,31(5):135–141. [王琳,段庆伟,刘立鹏,等.堰塞湖关键工程措施快速、定量分析方法研究——以2018年“11·03”白格堰塞湖为例[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(5):135–141.]
- [14] Liu Qing,Wang Wei,Gao Xing,et al.Analysis of the effects of dammed lake outburst floods on geomorphology of river basin:A case study of the valley slope erosion within 50 km downstream of the Baige landslide,Tibet,China[J].*Mountain Research*,2021,39(2):226–237.[刘青,王伟,高星,等.大型滑坡坝溃决对下游河谷边坡的影响分析——以白格滑坡下游50 km内的河谷边坡为例[J].*山地学报*,2021, 39(2):226–237.]
- [15] Gao Yunjian,Zhao Siyuan,Deng Jianhui.Developing law of damming landslide and challenges for disaster prevention and mitigation in the Three-river-parallel Territory in the Tibetan Plateau[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020, 52(5):50–61.[高云建,赵思远,邓建辉.青藏高原三江并流区重大堵江滑坡孕育规律及其防灾挑战[J].*工程科学与技术*,2020,52(5):50–61.]
- [16] Feng Wenkai,Zhang Guoqiang,Bai Huilin,et al.A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha River on October 11,2018[J].*Journal of Engineering Geology*,2019,27(2): 415–425.[冯文凯,张国强,白慧林,等.金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J].*工程地质学报*,2019,27(2):415–425.]
- [17] 崔玉龙,许冲,焦其松,等.金沙江白格两次滑坡几何形态分析与体积计算[C]//2019年全国工程地质学术年会论文集.北京:中国地质学会,2019:278–284.
- [18] Zhang Xinhua,Xue Ruiying,Wang Ming,et al.Field investigation and analysis on flood disasters due to Baige landslide dam break in Jinsha river[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(5):89–100.[张新华,薛睿瑛,王明,等.金沙江白格滑坡堰塞坝溃决洪水灾害调查与致灾浅析[J].*工程科学与技术*,2020,52(5):89–100.]
- [19] Nian Tingkai,Wu Hao,Chen Guangqi,et al.Research progress on stability evaluation method and disaster chain effect of landslide dam[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2018,37(8):1796–1812.[年廷凯,吴昊,陈光齐,等.堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J].*岩石力学与工程学报*,2018,37(8):1796–1812.]
- [20] Zheng Hongchao,Shi Zhenming,Peng Ming,et al.Review and prospect of the formation mechanism of landslide dams caused by landslide and avalanche debris[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(2):19–28.[郑鸿超,石振明,彭铭,等.崩滑碎屑体堵江成坝研究综述与展望[J].*工程科学与技术*,2020,52(2):19–28.]
- [21] Zhu Zheng,Bao Tengfei,Zheng Dongjian,et al.3D reconstruction of Baige landslide area based on UAV oblique photographs[J].*Advances in Science and Technology of Water Resources*,2020,40(5):81–88.[朱征,包腾飞,郑东健,等.基于无人机倾斜摄影的白格堰塞区三维重建[J].*水利水电科技进展*,2020,40(5):81–88.]
- [22] 长江勘测规划设计研究有限责任公司.金沙江白格滑坡残留体失稳堵江风险分析和影响评价研究报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2020.
- [23] Wu Jianchuan,Zhang Shishu,Wu Shuang,et al.Simulation on accumulation process and form of a barrier dam based on PFC3D[J].*Yangtze River*,2020,51(4):135–141.[吴建川,张世殊,吴爽,等.基于PFC3D的滑坡堰塞坝堆积过程与形态模拟[J].*人民长江*,2020,51(4):135–141.]
- [24] Cai Yaojun,Cheng Haiyun,Wu Shuaifeng,et al.Breaches of the Baige Barrier Lake:Emergency response and dam breach flood[J].*Science China Technological Sciences*,2020, 63(7):1164–1176.
- [25] Cai Yaojun,Luan Yuesheng,Yang Qigui,et al.Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River[J].*Yangtze River*,2019, 50(3):15–22.[蔡耀军,栾约生,杨启贵,等.金沙江白格堰塞体结构形态与溃决特征研究[J].*人民长江*,2019,50(3):15–22.]

(编辑 李轶楠)

引用格式: Cai Yaojun,Xu Fuxing,Zhu Meng,et al.River blocking risk analysis for the residual unstable masses of the baige landslide at the jinsha river[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):33–42.[蔡耀军,徐复兴,朱萌,等.金沙江白格滑坡残留体失稳堵江风险分析[J].*工程科学与技术*,2021,53(6):33–42.]