金沙江白格堰塞湖应急抢险与处置技术

周兴波^{1,2*}, 周建平^{2,3*}, 杜效鹄^{1,2}, 陈祖煜⁴

1. 水电水利规划设计总院, 北京 100120;

2. 国家能源水电工程技术研发中心, 北京 100120;

3. 中国电力建设股份有限公司, 北京 100048;

4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038

* E-mail: zhou_xingbo@126.com; zjp@powerchina.cn

收稿日期: 2021-07-17; 接受日期: 2021-09-15; 网络版发表日期: 2022-01-25

国家自然科学基金(批准号: U19A2049)和中国科学院学部咨询评议项目(编号: 2018-Z16-A-099)资助

摘要 山体滑坡堵塞江河形成堰塞湖, 应急抢险时间紧迫、环境复杂、条件险恶、交通不便, 处置难度大, 一旦失控下泄将严重威胁下游梯级电站和沿岸人民生命财产安全. 为系统研究堰塞湖应急处置技术, 明晰堰塞湖溃决与抢险过程, 结合2018年金沙江上游“10·11”和“11·03”白格堰塞湖应急抢险与风险处置, 在分析两次白格堰塞湖特征及成因的基础上, 采用基于冲刷侵蚀的双曲线溃坝计算模型预测两次堰塞湖溃决洪峰分别为10000和44300 m³/s, 据此提出“11·03”堰塞湖抢险处置必须人工开挖引流槽、在建苏洼龙电站围堰破拆、已建梨园水电站泄水腾库等一系列应急处置措施. 结果表明, “11·03”堰塞湖开挖深13.5 m引流槽将洪峰流量降低至33900 m³/s, 与预测的34400 m³/s基本一致; 在建苏洼龙电站围堰破拆避免溃决洪峰叠加放大, 如不破拆围堰, 溃决洪峰可能由19800 m³/s增加至32200 m³/s; 在运梨园水库泄水腾库, 成功拦洪削峰, 使得溃决洪峰由7190 m³/s削减至4500 m³/s, 减轻了下游各梯级电站水库防洪压力, 并通过梯级水电站库群联合调度, 将沿岸灾害损失降至最低. 本文系统反演分析了两次白格堰塞湖抢险过程和应急处置关键技术及措施, 为类似堰塞湖应急抢险和流域梯级水电站库群风险防控提供借鉴.

关键词 堰塞湖, 溃堰洪水, 应急抢险, 风险处置

1 引言

2018年10月10日和11月3日, 西藏自治区江达县波罗乡白格村与四川省白玉县绒盖乡则巴村交界处金沙江右岸(西藏侧)同一地点(图1)先后发生山体滑坡, 堵塞金沙江干流, 形成库容约 2.2×10^8 和 7.75×10^8 m³的大型堰塞湖^[1~4]. “10·11”堰塞湖库容小, 漫顶自流后影响

范围有限, 据推算溃决洪峰流量约10000 m³/s. “11·03”堰塞湖库容大、影响范围广, 据分析在不采取人工干预措施的情况下, 漫顶自流溃决洪峰将超过44300 m³/s, 下游损失严重. 在反演“10·11”堰塞湖溃决洪水对下游梯级电站影响的基础上, 作者团队作为应急抢险风险分析主要技术人员, 提出“堰塞坝顶人工开挖引流槽、在建苏洼龙电站围堰破拆、在运梨园水电

引用格式: 周兴波, 周建平, 杜效鹄, 等. 金沙江白格堰塞湖应急抢险与处置技术. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 343–356

Zhou X B, Zhou J P, Du X H, et al. Emergency rescue and disposal technology for Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 343–356, doi: 10.1360/SST-2021-0299

图1 金沙江上游白格堰塞湖

Figure 1 Baige Barrier Lake in the upper reaches of Jinsha River.

站腾空水库”等应急处置建议措施,最大程度减少了溃决洪水对下游的影响。

滑坡堵江后,堰塞湖水位快速上涨,极易发生失控性溃坝,及时有效的应急处置措施至关重要。20世纪80年代以来,国内外堰塞湖处置有不少成功案例。1987年意大利瓦尔泊拉(Val Pola)滑坡形成的堰塞湖,采用水泵抽水、开挖导流槽、下游修建拦砂坝等措施消除险情^[5,6];1999年新西兰颇尔(Poerua)河堰塞湖采用直升机巡查、疏散居民、密切监测等措施,考虑当时自然形成泄流槽侵蚀小,通过漫顶自流消除险情^[7];2000年西藏贡嘎堰塞湖采取人工挖渠降低水位的处理措施解除险情^[8,9];2008年四川唐家山堰塞湖采取人工开挖引流渠的方案成功泄流^[10,11];2014年云南鲁甸红石岩堰塞湖采取人工开挖导流槽、泄洪洞导流泄洪等措施,成功放空库水,消除险情^[12]。当前,针对2018年金沙江白格滑坡和堰塞湖的研究较多,主要集中在白格滑坡形成的地质条件、动力机制、滑动过程及应急监测^[13~16],白格堰塞体形态与溃决特征^[17],”10·11”和”11·03”白格堰塞湖溃决洪水分析反演^[18~23],但均未对两次白格堰塞湖应急抢险、风险处置的关键技术与工程措施进行全面系统的分析研究。

在白格堰塞湖灾害一线抢险处置和后方分析研判工作基础上,本文系统阐述支撑两次堰塞湖应急抢险、风险处置及科学决策的关键技术,为类似堰塞湖应急处置与流域风险防控提供借鉴。

2 白格堰塞湖形成过程及特征

2.1 堰塞体特征及其成因分析

2.1.1 白格滑坡概况

白格滑坡距上游西藏江达县波罗乡政府所在地约15 km,距下游四川白玉县盖玉乡叶巴滩水电站约54 km,距白玉县城约52 km。所在河谷呈不对称的100~130 m宽的”V”形,海拔高程3720~2880 m,高差达800 m以上,左右两侧山坡陡峭,坡度约为40°~80°,覆盖着残留的土壤和植被。

白格滑坡早在2011年已被识别为灾害隐患点,估计约 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2013年,叶巴滩水电站库区查勘时,由于白格滑坡距坝址较远,未对其详细勘测。2014年,江达县政府将白格滑坡列为地质灾害隐患点,并对滑坡影响区域的16户居民约110人搬迁避让,见图2。据卫星影像及地灾调查,白格滑坡失稳之前,滑坡体已经呈圈椅状地形、裂缝、错台等变形破坏现象,滑坡处于蠕动挤压至初滑阶段^[13],但由于未设监测设备,10月10日22:06发生的滑坡直至11日08:30才排查发现白格滑坡堵江。

2.1.2 白格滑坡成因分析

白格滑坡从逐级解体的蠕滑、塌滑演变为一次下滑数千万方的高速滑动,经历数年时间。该滑坡地层岩性为绢云母石英片岩,力学参数强度低,黏聚力 c 约70 kPa,内摩擦角 f 约10°,最大不超过25°。受云母含量影响, c 值离散性大, c 和 f 值水敏性强。其次,该河段岸坡地形陡峻,自然坡在36°~65°,局部达到75°。基本地质条件和地形条件决定了缓慢蠕变引起高位逐级拉

图2 白格滑坡及搬迁居民点

Figure 2 Baige landslide and relocation of residential area.

裂、局部塌滑不可避免。

地震和降水恶化了白格边坡的稳定性。2017年, 受昌都“8·12” $M6.1$ 级地震影响, 白格滑坡后缘上部裂缝增多, 一定范围岩体经受地震作用后由片状向碎裂状发展, 力学参数已是残余强度, 整体有效抗力降低。2018年8月至“10·11”滑坡时, 白玉县降雨达到214 mm, 占到以往全年650 mm的1/3。

白格边坡上部蠕滑逐级解体, 遵循边坡极限小值原理, 局部抵抗失效后向下部堆积形成挤压, 势能逐渐积累; 下部岩体强度遵循极大值原理充分调整, 即使发挥至最大值也难以抵抗时, 抗力岩体瞬间崩塌瓦解, 积累的势能转化为动能。

2.1.3 “10·11”滑坡及堰塞湖

据地震台网测定, “10·11”滑坡发生于2018年10月10日22:06, 历时约120 s。但其被发现是下游叶巴滩水电站导流洞施工人员11日05:30换班时, 发现金沙江几乎断流; 经联系得知波罗水文站水位暴涨, 通过分析研判于08:30确定是白格滑坡堵塞金沙江。

“10·11”滑坡初始滑动区位于高程3400 m以上, 方量约 $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$, 加上高速滑动沿途铲刮, 总方量达 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$, 入江约 $2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡形成的堰塞体顺河堆积长约1400~2000 m, 横河向宽度约540~620 m。堰塞体呈现左岸高右岸低的形态, 最低高程2925 m, 堰高58 m, 堰塞湖库容 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 详细特征参数见表1。10月12日17:20堰塞体漫顶过流, 溃决洪峰约 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。“10·11”滑坡及堰塞湖见图3。

2.1.4 “11·03”滑坡及堰塞湖

11月3日17:00左右, 白格滑坡残留体后缘再次滑动, 下滑方量约 $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, 沿程铲刮物质约 $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, 总方量约 $8.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。二次滑坡叠加第一次残留在河床的物质, 堰塞体总量约 $30.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

二次滑坡多为“10·11”的残留体。由于残留体开裂破坏已处在极不稳定状态, 高壁悬挂塌滑直冲江中, 堵塞了“10·11”堰塞体溃堰后束窄的过流断面, 并与原河床残留堆积体叠加形成“11·03”堰塞湖。堰顶最低高程2966 m, 最高高程3010 m, 顺河向约1400 m, 横河向长约600 m, 最大库容达 $7.75 \times 10^8 \text{ m}^3$, 详细特征参数见表1。“11·03”滑坡及堰塞湖见图4。

表 1 白格滑坡及堰塞湖特征参数^{a)}

Table 1 Characteristic parameters of Baige landslides and barrier lakes

项目	内容	特征参数	
		“10·11”	“11·03”
滑坡体	滑坡高度 (m)	700	800
	滑坡后缘高程 (m)	3700	3670
	山顶高程 (m)	3718	3718
堰塞体	滑坡体方量 (m^3)	2.38×10^7	8.2×10^6
	最高处高程 (m)	2999	3010
	最低处高程 (m)	2925	2966
	最大高度 (m)	138	149
	顺河向长度 (m)	1400~2000	1400
	横跨河谷长度 (m)	540~620	600
堰塞湖	最高水位高程 (m)	2926.7	$2952.5^*/2966$
	最大库容 (m^3)	2.2×10^8	$5.3^*/7.75 \times 10^8$
	原河床高程 (m)	2861	2861

a) * 为人工开挖引流槽底板高程和对应的堰塞湖库容

图 3 “10·11”滑坡及堰塞湖
Figure 3 “10·11” landslide and barrier lake.

2.2 金沙江梯级电站及堰塞湖泄流演进

2.2.1 金沙江梯级水电规划与开发利用

金沙江干流规划25座梯级电站, 已建成中下游10座梯级电站(梨园至向家坝), 上中游15座中叶巴滩、巴塘、苏洼龙正在建设, 其余均处于待建或前期工作,

图4 “11·03”滑坡及堰塞湖

Figure 4 “11-03” landslide and barrier lake.

详见表2.

2.2.2 “10-11”堰塞湖泄洪流量及演进过程

“10-11”堰塞湖漫顶溃决过程未来得及测量水位、流量过程, 但下游叶巴滩、拉哇、苏洼龙等电站水文站均有行洪实测资料, 见图5. 故“10-11”堰塞湖溃决流量是由叶巴滩实测流量反向推算而得.

堰塞湖漫顶过流: 据上游岗托站实测, 10月10日22:06堰塞湖形成时, 上游平均来流量约1300 m³/s, 堰塞湖水位上涨速度较快. 10月12日17:20, 堰塞湖水位涨至堰顶垭口高程2925 m. 13日0:00左右, 溃口冲刷侵蚀加剧, 洪水流量急剧增大, 至13日05:40左右达到约10600 m³/s的洪峰流量, 并历经约2 h演进至叶巴滩, 叶巴滩电站实测13日08:00达到峰值流量7770 m³/s^[4].

叶巴滩电站过流: 10月11日05:30, 金沙江几乎断流, 仅约200 m³/s, 并持续至13日01:00. 13日02:00堰塞湖溃坝流量入库, 06:00流量增至5850 m³/s, 08:00达到峰值流量7770 m³/s. 此后流量开始减小, 至13日22:00流量维持在2000 m³/s左右. 在此过程中, 叶巴滩电站导流洞被迫参与过流.

苏洼龙电站过流: 由于河道区间洪水, 10月13日14:00之前, 上游来流量为400 m³/s, 14:00溃堰洪水入

库, 来流量增大, 15:00入库流量为2670 m³/s, 17:00入库流量增至7200 m³/s, 18:30入库流量达到峰值7800 m³/s, 至23:00流量降至4750 m³/s. 14日14:00, 洪水流量降至2250 m³/s, 洪水顺利完成过流. 在此过程中, 苏洼龙电站导流洞参与泄洪过流, 13日07:00, 泄流量为850 m³/s, 17:00泄流量增大至4110 m³/s, 22:00泄洪流量达到峰值5650 m³/s.

梨园电站过流: 10月14日20:00, 溃堰洪水演进至梨园水库, 入库流量约1000 m³/s; 15日07:00达到峰值流量4800 m³/s; 16日07:00入库流量降至2700 m³/s, 梨园电站顺利过流. 通过叶巴滩、苏洼龙电站围堰水库的调蓄削峰, 溃堰洪水演进至梨园电站的险情消除.

2.2.3 “11-03”堰塞湖泄洪流量及演进过程

为尽可能减小“11-03”堰塞湖溃决洪峰流量, 应急抢险中采取了人工开挖引流槽, 将堰塞坝顶高程由2966 m降低至2952.5 m, 堰塞湖库容由7.75×10⁸ m³减小至5.3×10⁸ m³. “11-03”堰塞湖引流记录了完整的水位和流量过程, 下游叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙等站点也记录了完整的行洪实测数据, 见图6.

堰塞湖引流泄洪: 据实测资料, 11月12日05:00堰塞湖水位上涨至引流槽龙口底高程2952 m, 13:00水位

表 2 金沙江干流梯级电站基本特征

Table 2 Basic characteristics of cascade hydropower stations on the main stream of Jinsha River

序号	项目名称	坝型	最大坝高 (m)	坝顶高程 (m)	总库容 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	正常蓄水位 (m)	正常蓄水位以下 库容 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	调节库容 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	装机容量 (MW)	状态	距离 白格 (km)
1	西绒	—	90	—	—	3515	2.34	0.51	320	待建	—
2	晒拉	—	103	—	—	3447	2.33	0.36	380	待建	—
3	果通	—	53	—	—	3366	0.75	0.21	140	待建	—
4	岗托	混凝土面板堆石坝	223	3218	59.62	3215	55.42	40.9	1200	待建	—
5	岩比	—	52	—	—	3030	1.552	0.377	300	待建	—
6	波罗	混凝土双曲拱坝	128	2993	6.676	2989	6.37	0.99	960	待建	-20.0
7	叶巴滩	混凝土双曲拱坝	240	2894	11.85	2889	12.16	8.64	1980	在建	54.0
8	拉哇	混凝土面板堆石坝	235	2709	24.67	2702	19.93	7.2	1900	在建	135.0
9	巴塘	沥青混凝土心墙堆石坝	69	2549	1.41	2545	1.547	0.2	750	在建	158.5
10	苏洼龙	沥青混凝土心墙堆石坝	108	2480	6.74	2475	6.38	0.72	1200	在建	223.5
11	昌波	混凝土闸坝	45	2389	0.14	2385	0.1345	0.081	1060	前期	250.1
12	旭龙	混凝土双曲拱坝	217	2308	8.47	2302	7.08	0.74	2220	前期	310.4
13	奔子栏	碾压混凝土重力坝	186	2155	14.24	2150	13.73	2.59	2100	前期	379.9
14	龙盘	混凝土拱坝	276	2016	371	2010	369	215	4200	规划	597.1
15	两家人	混凝土重力坝	81	1795	0.0074	1781	0.007	0.007	3000	规划	606.7
16	梨园	混凝土面板堆石坝	155	1626	7.27	1618	6.24	1.73	2400	已建	671.3
17	阿海	混凝土重力坝	138	1510	8.82	1504	8.06	2.38	2000	已建	735.8
18	金安桥	混凝土重力坝	160	1424	9.13	1418	8.47	3.46	2400	已建	802.6
19	龙开口	混凝土重力坝	116	1303	5.58	1298	5.07	1.13	1800	已建	841.9
20	鲁地拉	混凝土重力坝	140	1228	17.18	1223	17.18	3.76	2160	已建	939.8
21	观音岩	混凝土重力坝+ 黏土心墙堆石坝	159	1139/ 1141	22.50	1134	20.72	5.55	3000	已建	1034.3
22	乌东德	混凝土双曲拱坝	265	988	74.08	975	58.63	26.15	8700	已建	1275.1
23	白鹤滩	混凝土双曲拱坝	289	834	206.27	825	190.06	104.36	16000	已建	1445.6
24	溪洛渡	混凝土双曲拱坝	278	610	126.7	600	126.7	64.6	12600	已建	1617.4
25	向家坝	混凝土重力坝	162	383	51.63	380	49.77	9.03	6000	已建	1759.3

壅高至2953.43 m, 引流槽贯通, 但流量仅10~90 m^3/s ; 13日13:00水位壅高至2956.28 m, 流量为245 m^3/s , 之后流量迅速增大; 15:00水位为2956.02 m, 过流量增至5900 m^3/s ; 17:00流量增至25000 m^3/s ; 18:20流量达到峰值33900 m^3/s ; 之后流量迅速减小, 20:00流量降至7700 m^3/s . 堰塞湖在人工引流作用下, 完成泄洪过程.

叶巴滩电站过流: 11月13日17:00堰塞湖引流洪水演进至叶巴滩, 其入库流量为201 m^3/s ; 18:00入库流量骤增至17400 m^3/s ; 20:00达到峰值流量28300 m^3/s ; 22:00入库流量减小至14800 m^3/s ; 24:00入库流量减小至7950 m^3/s . 在此过程中, 叶巴滩导流洞被迫过流

泄洪.

苏洼龙电站过流: 11月14日01:30溃堰洪水演进入库, 洪水流量由此前217 m^3/s 迅速增大至1910 m^3/s ; 02:00流量增至8190 m^3/s ; 03:50流量达到峰值19800 m^3/s ; 06:00流量减小至14000 m^3/s ; 12:00减小至4240 m^3/s . 在此过程中, 苏洼龙导流洞参与泄洪, 并破拆围堰以避免洪峰流量叠加放大.

梨园电站过流: 11月15日04:00溃堰洪水演进至梨园电站, 入库流量由此前550 m^3/s 增大至2120 m^3/s ; 06:00入库流量增大至4800 m^3/s ; 13:00入库流量达到峰值7190 m^3/s ; 22:00入库流量减小至5100 m^3/s . 梨园

图 5 “10·11”堰塞湖泄流各站点洪水流量过程
Figure 5 The flood process of “10·11” barrier lake discharge at each hydropower station.

图 6 “11·03”堰塞湖泄流各站点洪水流量过程
Figure 6 The flood process of “11·03” barrier lake discharge at each hydropower station.

电站提前泄洪腾出库容, 在此过程中充分发挥调洪作用, 调洪流量和水位变化过程详见图7。

3 应急抢险技术方案与工程措施

3.1 溃坝洪水计算分析

3.1.1 溃坝计算原理与模型

在两次白格堰塞湖应急抢险中, 采用基于冲刷侵蚀的溃堰洪水计算模型, 较好地分析预测了“10·11”和“11·03”堰塞湖溃决洪峰, 计算原理有关成果已发表^[4,9,11,12], 现简要回顾计算原理。

(1) 溃口流量: 采用宽顶堰流公式近似计算, 通常采用下式:

$$Q = m_q m_b B \sqrt{2g} (H - z)^{3/2}, \quad (1)$$

式中, B 为溃口断面宽度, H 为库水位高程, z 为溃口底板高程, m_q 为流量系数, m_b 为侧向收缩系数, 分别取0.36和0.9。

(2) 溃口扩展: 将土力学中简化的Bishop法用于溃口扩展模拟, 替代传统的线性内插模拟。计算中, 假定初始滑裂面, 通过搜索临界滑裂面, 使得圆弧通过斜坡的坡址(图8中的D点)。当溃口侧壁被水流冲刷侵蚀, 坡址逐渐降低并向河岸靠近, 在模拟过程中, 坡址同时向上下下切 Δz , 并以此点(图8中的E点)开始搜索临界滑裂面, 即完成一次溃口的横向坍塌和纵向下切。重复这个过程, 直至溃口边坡稳定, 即可形成最终的弧形溃口。

(3) 溃口侵蚀: 采用具有物理含义的双曲线冲刷侵蚀模型计算溃口冲刷侵蚀的过程, 可采用下式:

$$\frac{dz}{dt} = \Phi(\tau) = \frac{k(\tau - \tau_c)}{a + bk(\tau - \tau_c)}, \quad (2)$$

式中, dz/dt 为侵蚀率, 即水冲刷侵蚀土石料的速率; a, b

图 7 梨园电站调洪过程
Figure 7 The flood regulation process of Liyuan Hydropower Station.

图 8 溃口扩展过程
Figure 8 The process of the breach development.

为冲刷侵蚀参数; k 为单位变换因子, 取 100; τ_c 和 τ 分别为临界剪应力和剪应力, 可按下式计算:

$$\tau = \gamma R J = \gamma n^2 V^2 / R^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

其中, γ 为水容重, J 为引流槽坡降, R 为水力半径, V 为流速, n 为糙率, 取 0.025.

具有实际物理含义的双曲线模型认为水流冲刷侵蚀时, 土石料抵抗能力是有“强度”的, 其值即 dz/dt 的极值 $1/b$; $1/a$ 表示 $\tau = \tau_c$ 时, 双曲线的斜率.

3.1.2 参数取值与分析计算

科学合理的参数取值对准确预测溃坝洪水至关重要. 双曲线模型中, 冲刷侵蚀参数 a 和 b 对分析结果影响极大, 其值取决于土石料的物理力学特性, 即黏聚力 c 和内摩擦角 f . 该模型此前反演了唐家山、易贡、小岗剑等堰塞湖的溃决流量, 可供白格堰塞湖分析借鉴, 参数取值见表 3^[9,24,25]. 白格堰塞湖库容水位关系曲线见图 9.

(1) “10·11”堰塞湖溃决反演分析: 由于“10·11”堰塞湖库容小、时间紧, 10月11日08:30发现滑坡堵江, 至12日17:20漫顶过流仅 33 h, 故抢险中未测得漫顶溃决洪水流量过程, 但下游 54 km 处的叶巴滩电站测得了完整的洪水过程, 见图 5. 据此, 通过“10·11”堰塞湖溃决洪水计算, 演进至叶巴滩电站, 确保计算值与实测值基本一致, 从而反演溃决过程.

反演结果表明^[4], 10月13日0:00左右, 溃口冲刷加剧, 流量急剧增大, 至13日05:40左右达到 10600 m³/s 的洪峰流量. 同时, 率定出白格溃决冲刷侵蚀参数 $a=1.1$, $b=0.0005$, 即冲刷侵蚀速率为 2 mm/s.

(2) “11·03”堰塞湖溃决预测分析: 据表 3 参数取值经验和“10·11”堰塞湖反演分析率定的参数, “11·03”堰

图 9 白格堰塞湖库容水位关系曲线

Figure 9 The capacity and water level relation curve of Baige Barrier Lake.

塞湖溃决洪水分析侵蚀参数 $a=1.1$, $b=0.0005$. 但由于“11·03”堰塞湖库容约为“10·11”堰塞湖的 3.5 倍, 如自流漫顶泄流, 对下游梯级电站和沿岸城镇威胁极大, 故人工开挖引流槽, 减小库容, 以削减溃决洪峰流量, 确保下游沿岸风险可控.

考虑堰塞湖溃决洪水计算的不确定性, 结合抢险现场开挖引流槽的施工进度及可能性, 在预测开挖深 11, 12, 13, 13.5 和 14 m 引流槽方案的溃决洪水预测中, b 值上下浮动, 分别取 0.0004 和 0.0007, 预测计算分析结果详见表 4. 其中, 工况 4 开挖深 13.5 m 的方案为现场抢险最终完成的方案, 该方案溃决洪水流量过程与实测对比结果如图 10 所示^[4].

3.2 洪水演进计算分析

3.2.1 计算原理

目前, 洪水波演进主要以水力学方法为主, 其实质

表 3 堰塞湖溃坝计算参数取值

Table 3 The parameters for barrier lake breach calculation

工程实例	a	$b (\times 10^3 \text{ s/mm})$	$1/b (\text{mm/s})$	洪峰流量 $Q_m (\text{m}^3/\text{s})$	
				计算值	实测值
唐家山	1.1	0.0007	1.42	7610	6500
易贡	0.3	0.00038	2.63	106061	94013
小岗剑	0.2	0.0002	5.00	3329	3950
红石岩 ^{a)}	1.1	0.0007	1.42	7342	—

a) 红石岩堰塞湖经原电站泄洪洞分流, 未漫顶溃决; 计算值为考虑 5 年一遇洪水, 开挖 8 m 深引流槽的工况

表 4 “11·03”堰塞湖溃决洪水预测分析

Table 4 The flood forecast analysis of “11·03” barrier lake breach

计算工况	人工引流槽开挖深度 (m)	人工引流槽底板高程 (m)	堰塞湖			
			冲刷侵蚀参数 b (s/mm)	洪峰流量 (m^3/s)	达到洪峰时间 (h)	洪峰时流速 (m/s)
0	0	2966	0.0005	44370	7.43	8.41
1	11	2955	0.0004	43170	6.40	8.50
			0.0005	35510	7.21	8.25
			0.0007	26550	8.70	7.89
2	12	2954	0.0004	42600	6.33	8.46
			0.0005	35110	7.13	8.22
			0.0007	26180	8.67	7.85
3	13	2953	0.0004	37430	7.47	8.42
			0.0005	34610	7.10	8.18
			0.0007	25840	8.58	7.82
4	13.2	2952.5	0.0004	41910	6.22	8.41
			0.0005	34400	7.06	8.16
			0.0007	25660	8.54	7.81
5	14	2952	0.0004	41570	6.23	8.39
			0.0005	34160	7.02	8.14
			0.0007	25510	8.48	7.79

图 10 “11·03”堰塞湖溃决洪水计算值与实测值对比

Figure 10 The breach flood comparison of calculated and measured values of “11·03” barrier lake.

是通过附加边界条件, 数值求解圣维南方程而推演下游河道洪水. 当今计算机水平, 技术上均可实现一维、二维、三维的洪水波演进数值计算, 但二维、三维需要详细的河道地形资料, 且计算时间较长, 故无法解决应急抢险的实际问题, 一维计算简便快捷, 可指导应急抢险科学决策.

针对一维浅水波运动方程, 采用中心格式的有限体积法, 通过修正的HLL(Harten-Lax-van Leer)格式离

散水流演进方程, 并采用近似求解的Riemann解代替其精确解. 一维浅水波方程为

$$\mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S}, \quad (4)$$

式中,

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} Z \\ Q \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAJ \end{bmatrix},$$

其中, B 为水面宽度, Z 为水位, h 为水深, Q 为断面流量, A 为过水断面面积, g 表示重力加速度, t 为时间; J 为沿程水流损失, $J = (n^2 Q |Q|) / (A^2 / R^{4/3})$; R 为水力半径, n 为糙率.

3.2.2 参数取值与分析计算

(1) “10·11”堰塞湖溃决洪水演进反演: 本次白格堰塞湖溃决过程未能测得数据, 下游叶巴滩、苏洼龙、奔子栏、石鼓、梨园均有实测洪水流量过程, 见图5. 采用分段反演分析的方法率定“叶巴滩-苏洼龙-奔子栏-石鼓-梨园”河段的洪水演进参数, 如用叶巴滩

表 5 “10·11”堰塞湖溃决洪水演进反演计算参数取值**Table 5** The inversion calculation parameters for “10·11” barrier lake breach flood routing

河段	糙率	时间步长 (s)	坡降	河道底宽 (m)	河岸边坡
叶巴滩-苏洼龙	0.08	300	0.0004	70	1.5
苏洼龙-奔子栏	0.08	300	0.0025	95	1.5
奔子栏-石鼓	0.15	300	0.0006	105	0.6
石鼓-梨园	0.10	300	0.0033	125	0.5

的实测流量演进至苏洼龙, 再与苏洼龙的实测流量过程对比拟合, 从而率定参数. 经反演率定, 各段洪水演进计算参数见表5, 反演拟合结果见图11.

由图11反演拟合结果可知, 通过各段实测流量过程演进至下游站点的成果, 叶巴滩演进至苏洼龙的结果拟合较好, 苏洼龙至奔子栏、奔子栏至石鼓、石鼓至梨园的流量过程拟合相对偏差较大, 奔子栏和石鼓尤为突出.

(2) “11·03”堰塞湖溃决洪水演进分析: 据表4反演“10·11”堰塞湖溃决洪水演进计算参数取值, 并补充取堰塞湖至叶巴滩断的糙率为0.08, 坡降为0.0006, 河道底宽为45 m, 河岸边坡为2.0, 时间步长为300 s. “11·03”堰塞湖溃决洪水及其演进过程分析结果与实测过程对比见图12.

由图12计算结果可知, 通过“10·11”反演的溃坝洪水演进参数计算的各站点的洪水流量过程, 在叶巴滩相对较好, 随着演进距离增长, 苏洼龙、奔子栏、石鼓、梨园各站点的洪水过程偏差较大.

图 11 “10·11”堰塞湖溃决洪水演进反演拟合结果**Figure 11** The inversion of fitting results of “10·11” barrier lake breach flood routing.

3.3 人工干预设备进场方式

“11·03”白格堰塞湖发生时, 金沙江流域已进入汛期, 金沙江上游来流量由“10·11”白格堰塞湖的1700 m³/s降低至700 m³/s, 为人工干预措施实施留得了时间. 根据唐家山、红石岩堰塞湖应急处置经验, 人工干预设备可考虑采用空运、水路、陆路三种途径抵达堰塞坝顶.

空运方式: 空运方式快捷, 2008年唐家山堰塞湖抢险中, 主力直升机机型有米-17、S-70C(黑鹰)、米-26, 其空载重量分别为28.2, 7.1, 5.1 t. 白格堰塞湖抢险受制于可用机型及高山峡谷的气候因素, 空运设备难度较大, 故未考虑.

水路方式: 金沙江上游为山区河流, 历来不通航. 滑坡堵江后, 堰塞湖上游水流平缓, 水面宽深可行驶快艇、冲锋舟等小船运输, 配套采用漕渡门桥即可实现设备运输, 但运输能力有限. 事实上, 白格堰塞湖抢险采用改装船和漕渡门桥成功运输了2台设备.

陆路方式: 从堰塞湖下游在建的叶巴滩电站施工营地调运. 由白玉县城到则巴村公路约44 km, 可直接抵达; 则巴村至金沙江边的则巴沟口约4.7 km, 则巴沟口至堰塞坝2~3 km, 均没有路, 需沿沟右岸谷底边修路边前进, 行进路线及现场过程情况见图13.

3.4 人工开挖引流槽

3.4.1 引流槽设计

引流槽布设: 借鉴唐家山堰塞湖处置经验, 引流槽轴线宜布设于易于开挖的堰塞体坝口处. “11·03”堰塞体主要堆积于“10·11”堰塞体自流泄洪冲刷形成的槽渠内, 且考虑新形成的堆积体结构破碎松散, 易于开挖, 故引流槽布设在“11·03”堰塞体内靠近左岸一侧, 见图14.

引流槽开挖尺寸: 引流槽开挖断面为倒梯形, 底宽

图 12 “11·03”堰塞湖溃决洪水及演进与实测过程对比
Figure 12 Comparison of the “11-03” barrier lake breach flood and routing with the measurement process.

图 13 人工干预设备陆路进场路线
Figure 13 The land route of manual intervention equipment.

图 14 引流槽布设
Figure 14 The layout of drainage channel.

为3~5 m, 开挖深度为10~15 m, 开挖两侧坡比为1:1.3~1.5, 开挖方量约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$. 在开挖过程中, 可考虑二次加深, 形成复式断面.

此外, 为防止右岸侧滚石下落和第三次滑塌, 设计了拦挡坎, 布置了24 h在线自动化专业监测设施, 制定

了监测预警方案和撤离路线, 以保障施工安全.

3.4.2 引流槽快速施工

11月8日14:45, 首台反铲通过陆路由则巴村抵达堰塞坝顶, 开始施工. 至11月10日08:00, 堰顶各型反铲13台, 装载机5台. 堰上共配备52名操作手连续施工. 11月11日11:00, 堰顶人工引流槽开挖贯通. 引流槽总长220 m, 槽底宽3 m, 顶部宽42 m, 最大开挖深度13.5 m. 11月11日17:00, 除留下少量水文、监测人员外, 施工人员大部分乘冲锋舟由水路撤退至波罗乡, 少部分乘挖机由陆路撤至则巴村.

施工期间, 滑坡体区域滑沙落石不断, 共发生小型垮塌3次. 为了能提前预警, 现场除布设24 h在线自动化专业监测设施外, 使用无人机开展航测, 增加人工观

测点, 摇旗、信号弹等预警措施。

3.5 在建苏洼龙电站围堰破拆

“10·11”白格堰塞湖溃决洪峰抵达苏洼龙坝址时为 $7800 \text{ m}^3/\text{s}$, 最高水位 2426.341 m , 距上游围堰堰顶约 5.66 m (上游围堰堰顶高程 2432 m), 最大下泄流量 $5600 \text{ m}^3/\text{s}$, 削峰 $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。经计算分析, “11·03”白格堰塞湖溃决必然导致围堰漫顶溃决, 故采取了围堰破拆的工程措施。

3.5.1 围堰破拆设计与施工

在充分考虑施工条件和工期的基础上, 经方案对比, 设计上游围堰开挖深度 33 m , 底宽 10 m , 两侧坡比 $1:1.5$, 开挖设计断面见图15。投入反铲挖机15台, 推土机10台, 历经3天施工, 于11月10日22:00完成, 实测底部宽度 10.89 m , 顶部槽口宽度 120.57 m , 现场见图16。

3.5.2 破拆效果

11月14日02:25苏洼龙上游围堰水位达最高值 2417.6 m , 03:50白格溃决洪峰入库, 峰值流量达到 $19800 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪水过后的围堰见图17。

白格堰塞湖溃决洪水演进至苏洼龙电站坝址的峰值流量超过电站可能最大洪水(PMF)设计洪峰流量 $12500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。经计算, 如围堰不破拆, 苏洼龙围堰处的溃决洪峰将从 $19620 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $32201 \text{ m}^3/\text{s}$ (见图18), 增大至实测值的164%, 洪峰叠加较大, 将对下游产生更大影响。苏洼龙围堰破拆削减了峰值流量, 减轻了溃决洪水对下游的影响, 工程措施取得预期效果。

3.6 梨园水电站腾库与梯级水库群联合削峰

梨园水电站于11月6日以 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右的下泄流

图15 上游围堰破拆开挖设计断面

Figure 15 The design cross-section of upstream cofferdam demolition and excavation.

量开始降低库水位, 腾空水库。入库洪水、出库洪水及库水位变化过程见图7。至11月12日17:00, 梨园库水位至最低水位 1590.08 m 。11月15日03:00, 梨园水库入库

图16 破拆后的上游围堰

Figure 16 The upstream cofferdam after being demolished.

图17 白格溃决洪水过后上游围堰

Figure 17 The upstream cofferdam after the Baige breach flood.

图18 苏洼龙破拆围堰减灾对比

Figure 18 The comparison of disaster reduction of Suwalong cofferdam demolished.

流量增大,至11月15日14:00洪峰流量 $7190\text{ m}^3/\text{s}$ 入库,11月16日0:00梨园库水位达到最高水位 1612.02 m 。梨园水库成功拦截白格堰塞湖溃堰洪水,入库洪峰通过水库调蓄作用,峰值流量由 $7190\text{ m}^3/\text{s}$ 削减至 $4500\text{ m}^3/\text{s}$,减轻了下游各梯级水库的防洪压力,调洪效果明显。

同时,金沙江中游梯级水电站水库联合调度,控制水位以应对洪水。2018年11月13日16:00,梨园水电站以不高于 1592 m 水位运行,阿海水电站以不高于 1493.3 m 水位运行,金安桥水电站以不高于 1406 m 水位运行,龙开口水电站、鲁地拉水电站和观音岩水电站分别以不高于 1294 、 1220 、 1130 m 运行,共调度防洪库容 $13.5\times 10^8\text{ m}^3$ 。经各梯级水库联合调度后,白格堰塞湖洪水以 $7190\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量入库梨园水电站。经过梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩大型水电站的拦蓄调节,阿海电站的出库流量仅为 $854\text{ m}^3/\text{s}$,低于11月1日堰塞湖发生断流前的下游天然河道中的流量 $2040\text{ m}^3/\text{s}$ 。梨园、阿海等大型电站水库发挥了拦洪削峰调蓄的良好作用,将洪水灾害截断于中游梯级电站水库当中。

4 结论

2018年金沙江上游川藏段“10·11”和“11·03”白格堰塞湖应急抢险与风险处置均取得成功,本文分析白格堰塞湖形成过程,在分析成因和堰塞体特征的基础

上,反演论证了应急抢险关键技术方案与工程措施,得到以下结论。

(1) 白格滑坡首要原因是自身稳定条件差,其次是地震作用进一步降低整个坡体的抗力范围,降雨入渗更进一步加大整体的下滑力。内因叠加多种外因,由多年的缓慢蠕变演化为高速碎屑流状滑坡,且由于滑坡位势高、方量大,故两次形成堵江堰塞湖。

(2) 采用基于冲刷侵蚀的双曲线溃坝计算模型预测两次堰塞湖溃决洪峰分别约为 10000 和 $44300\text{ m}^3/\text{s}$,据此提出“11·03”堰塞湖抢险处置应人工开挖引流槽、在建苏洼龙电站围堰破拆、在运梨园水电站腾空水库的应急处置技术方案。

(3) “11·03”堰塞湖开挖深 13.5 m 引流槽将洪峰流量降低至 $33900\text{ m}^3/\text{s}$,与预测的 $34400\text{ m}^3/\text{s}$ 基本一致;在建苏洼龙电站围堰破拆避免溃决洪峰叠加放大,如不破拆围堰溃决洪峰可能由 $19800\text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $32200\text{ m}^3/\text{s}$;在运梨园水库泄水腾库,成功削峰使得溃决洪峰由 $7190\text{ m}^3/\text{s}$ 削减至 $4500\text{ m}^3/\text{s}$,减轻了下游各梯级电站水库防洪压力,并通过梯级水电站库群联合削峰,将沿岸灾害损失降至最低。

(4) 详细记录两次白格堰塞湖溃决过程,系统反演分析应急抢险和风险处置关键技术方案及工程措施,不仅为今后溃坝洪水计算和洪水演进分析提供了完整的实例数据,也对类似堰塞湖应急抢险、流域梯级水电站库群开发利用和风险控制具有一定的借鉴意义。

致谢 本文研究工作尤其是“10·11”和“11·03”白格堰塞湖应急抢险处置相关资料收集得到水电水利规划设计总院白格堰塞湖应急抢险处置专家团队、中国电建集团成都勘测设计研究院现场专家团队的大力支持,谨向参与应急抢险的各位领导和专家致敬,并向郑声安正高级工程师、彭土标正高级工程师、赵全胜副总工、武明鑫博士、刘超博士、王仁坤勘察设计大师、张冲副总工等致谢。

参考文献

- 1 China Renewable Energy Engineering Institute. Summary report on Baige landslide dam emergency treatment on Jinsha River (in Chinese). Technical Report. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2018-12 [水电水利规划设计总院.金沙江白格堰塞湖应急处置总结报告.技术报告.北京:水电水利规划设计总院,2018-12]
- 2 China Renewable Energy Engineering Institute. Report on Baige barrier lake on Jinsha River (in Chinese). Technical Report. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2018-10-14 [水电水利规划设计总院.金沙江白格堰塞湖情况报告.技术报告.北京:水电水利规划设计总院,2018-10-14]
- 3 China Renewable Energy Engineering Institute. Brief report on Baige barrier lake emergency treatment (in Chinese). Technical Report. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2018-11-04 [水电水利规划设计总院.金沙江白格堰塞湖应急处置工作简报.技术报告.北京:

水电水利规划设计总院, 2018-11-04]

- 4 Zhou X B, Du X H, Yao Y. Research and analysis on Baige landslide dam break flood in Jinsha River (in Chinese). *Water Power*, 2019, 45: 12–16 [周兴波, 杜效鹤, 姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水分析. *水力发电*, 2019, 45: 12–16]
- 5 Ermini L, Casagli N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth Surf Process Landforms*, 2003, 28: 31–47
- 6 Evans S G, Hermanns R L, Strom A, et al. *Natural and Artificial Rockslide Dams*. Cham: Springer, 2011
- 7 Hancox G T, McSaveney M J, Manville V R, et al. The October 1999 Mt Adams rock avalanche and subsequent landslide dam-break flood and effects in Poerua river, Westland, New Zealand. *N Z J Geol Geophys*, 2005, 48: 683–705
- 8 Wang L, Chen Z, Wang N, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode. *Eng Geol*, 2016, 209: 70–81
- 9 Zhou X B, Chen Z Y, Li S Y, et al. On the standard of flood return period for high risk barrier lake in emergency disposal (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 405–413 [周兴波, 陈祖煜, 李守义, 等. 高风险等级堰塞湖应急处置洪水重现期标准. *水利学报*, 2015, 46: 405–413]
- 10 Liu N, Chen Z, Zhang J, et al. Draining the Tangjiashan barrier lake. *J Hydraul Eng*, 2010, 136: 914–923
- 11 Chen Z, Ma L, Yu S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake. *J Hydraul Eng*, 2015, 141: 05014011
- 12 Zhou X, Chen Z, Yu S, et al. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyan barrier lake. *Nat Hazards*, 2015, 79: 1933–1959
- 13 Xu Q, Zheng G, Li W L, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 (in Chinese). *J Eng Geol*, 2018, 26: 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. *工程地质学报*, 2018, 26: 1534–1551]
- 14 Fan X, Xu Q, Alonso-Rodriguez A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: Prime investigation, early warning, and emergency response. *Landslides*, 2019, 16: 1003–1020
- 15 Deng J H, Gao Y J, Yu Z Q, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China (in Chinese). *Adv Eng Sci*, 2019, 51: 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. *工程科学与技术*, 2019, 51: 9–16]
- 16 Ouyang C, An H, Zhou S, et al. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China. *Landslides*, 2019, 16: 1397–1414
- 17 Cai Y J, Luan Y S, Yang Q G, et al. Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River (in Chinese). *Yangtze River*, 2019, 50: 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. *人民长江*, 2019, 50: 15–22]
- 18 Chen Z Y, Zhang Q, Hou J M, et al. Back analysis on dam-breach flood of “10.10” Baige barrier lake on Jinsha River (in Chinese). *Yangtze River*, 2019, 50: 5–8 [陈祖煜, 张强, 侯精明, 等. 金沙江“10·10”白格堰塞湖溃坝洪水反演分析. *人民长江*, 2019, 50: 5–8]
- 19 Hou J M, Ma L P, Chen Z Y, et al. High-performance numerical simulation for dam-break flood propagation of Baige barrier lake in Jinsha River (in Chinese). *Yangtze River*, 2019, 50: 12–15 [侯精明, 马利平, 陈祖煜, 等. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水演进高性能数值模拟. *人民长江*, 2019, 50: 12–15]
- 20 Zhang L, Xiao T, He J, et al. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018. *Landslides*, 2019, 16: 1965–1979
- 21 Chen Z, Zhang Q, Chen S, et al. Evaluation of barrier lake breach floods: Insights from recent case studies in China. *WIREs Water*, 2020, 7: e1408
- 22 Chen Z Y, Chen S S, Wang L, et al. Back analysis of the breach flood of the “11.03” Baige barrier lake at the Upper Jinsha River (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 763–774 [陈祖煜, 陈生水, 王琳, 等. 金沙江上游“11.03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 763–774]
- 23 Cai Y J, Cheng H Y, Wu S F, et al. Breaches of the Baige Barrier Lake: Emergency response and dam breach flood. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 1164–1176
- 24 Zhou X B, Chen Z Y, Huang Y F, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part III: Risk analysis of embankment break in cascade (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 765–772 [周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究III: 梯级土石坝连溃风险分析. *水利学报*, 2015, 46: 765–772]
- 25 Chen S, Chen Z, Tao R, et al. Emergency response and back analysis of the failures of earthquake triggered cascade landslide dams on the

Mianyuan River, China. [Nat Hazards Rev](#), 2018, 19: 05018005

Emergency rescue and disposal technology for Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China

ZHOU XingBo^{1,2}, ZHOU JianPing^{2,3}, DU XiaoHu^{1,2} & CHEN ZuYu⁴

¹ China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;

² Research and Development Center of National Energy and Hydropower Engineering Technology, Beijing 100120, China;

³ POWERCHINA Limited, Beijing 100048, China;

⁴ China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

When a landslide blocks the river and forms a barrier lake, the need for emergency rescue is urgent, the environment is hazardous, environmental conditions are harsh, transportation is inconvenient, and disposal is difficult. Once the lake is out of control and released, it will endanger people's lives, property, and the safety of cascade hydropower stations safety downstream. Based on the analysis of the characteristics and causes of "10·11" and "11·03" Baige barrier lakes in the upper reach of Jinsha River, a hyperbolic dam erosion model is used to predict the peak discharge of the two Baige barrier lakes to be 10000 and 44370 m³/s, respectively, to investigate emergency disposal technology and explain the process of landslide dam failure and rescue. Therefore, it is proposed that the emergency disposal of the "11·03" barrier lake should be a series of emergency measures for manual excavation of drainage channel, destruction of the cofferdam for the Suwalong Station under construction, and discharge of the reservoir of Liyuan Station in operation. The results show that for the "11·03" barrier lake, (1) the excavation of the 13.5-m deep drainage channel reduced the peak discharge to 33900 m³/s, which is the same as the predicted 34400 m³/s; (2) the destruction of the cofferdam for the Suwalong Station under construction avoids superimposition and magnification of the flood peak, and if the cofferdam is not destructed, the peak discharge may be increased from 19800 to 32200 m³/s; (3) the water discharge of the Liyuan reservoir successfully reduced the peak discharge from 7190 to 4500 m³/s, reducing the flood control pressure of downstream cascade stations and minimizing the coastal disaster loss through the joint dispatch of the cascade reservoirs. This study provides a systematic back analysis of the rescue process and key technologies and emergency measures of the Baige barrier lakes and a reference for the emergency rescue of similar landslide dams and the risk prevention and control of cascade hydropower stations in the basin.

barrier lake, landslide dam-break flood, emergency rescue, risk disposal

doi: [10.1360/SST-2021-0299](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0299)