

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.011

卡拉水电站田三滑坡体稳定性敏感因素分析

李红英,谭跃虎,李二兵

(解放军理工大学工程兵工程学院,江苏南京 210007)

摘要:为了分析卡拉水电站工程区滑坡体的稳定性,以库区内田三滑坡体为例,对其滑坡成因、地形地貌、地质构造等内在因素进行分析。结果表明:滑坡体随着坡面隆起和坡内扩容加剧,在外界作用下更易失稳破坏;其层面与节理裂隙的不良组合为边坡变形失稳提供了边界;陡倾坡内的裂隙为地下水入渗创造了条件。通过对库水位升降、降雨和地震等外在因素的敏感性分析,可知库水位骤升骤降对滑坡体的稳定性影响较大,短期降雨对滑坡体稳定性影响较小,但是随着降雨时间增长滑坡体失稳概率增加,地震峰值对滑坡体稳定性影响较为明显。根据分析结果对滑坡体进行工况及荷载组合,并对各工况组合进行稳定性计算及评价,结果表明,受蓄水和暴雨影响,滑坡体的稳定性变差,在蓄水地震工况下失稳概率较大。

关键词:电站工程区滑坡体;滑坡体稳定性;失稳概率;滑坡体危险性评价;田三滑坡体
中图分类号:TU457 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2012)04-0420-06

Sensitive factors analysis of stability of Tiansan Landslide at Carla Hydropower Station

LI Hongying, TAN Yuehu, LI Erbing

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: To study the stability of the Tiansan Landslide in the project area of the Carla Hydropower Station, the landslide causes, landform, and geological structure were analyzed. The results show that landslide instability is most likely to take place under the effects of external factors and internal factors including landslide slope uplift and intensification of slope expansion. A poor combination of planes and fissures provides boundaries for slope deformation and instability. The fissures of the steep slope provide favorable conditions for infiltration of groundwater. Through sensitivity analysis of the external factors including rainfall, water level fluctuation, and earthquakes, it was found that a sharp increase or decrease in water level has a significant effect on the landslide stability. Short-term rainfall affects the landslide stability insignificantly, and the instability probability will increase with the increase of time duration of rainfall. The earthquake peak affects the landslide stability. According to the analysis, combinations of landslide conditions and loads were made, and the stability calculation and assessment were conducted. The results show that the instability probability was higher under water storage and seismic conditions, resulting from a low stability of the landslide affected by water storage and rainstorms.

Key words: landslide in project area of hydropower station; landslide stability; instability probability; landslide risk assessment; Tiansan Landslide

拟建的卡拉水电站位于雅砻江干流中游河段,为雅砻江梯级开发 11 级中的第 6 级,上游与杨房沟水电站衔接,下游与锦屏一级水电站毗邻。工程区内滑坡体发育且规模巨大,分布有上田镇、田三、岗尖、下马鸡店、草坪等多个大型滑坡体和崩坡积体。若出现滑坡,将造成水库淤积或河道堵塞,并会危及大坝及其他枢纽建筑的安全。因此,滑坡体的稳定性是决定坝址选择的控制性因素之一。笔者以田三滑坡体为例,对库区内滑坡体进行稳定性分析。田三滑坡体位于雅砻江右岸,处于上坝址与中坝址之间,总体呈长方形展布,平

均厚度为 40 m,总体积为 3 662.2 万 m^3 。

1 滑坡体稳定性敏感因素

1.1 地形地貌

依据滑坡体的不同区段、物质组成及地形差异将滑坡体自上而下分为 A 区、B 区和 C 区,分区要素见表 1;A 区、B 区位于中后部,基本以公路为界;C 区位于前部,以中部台地前缘为界,滑坡体全貌见图 1。在 2.26 km 以上坡度为 $20^\circ \sim 25^\circ$,以下总体坡度为 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。前部地形存在较多变形破坏现象,稳定性较差;中后部未发现破坏现象,稳定性较好,有常住居民^[1]。

图 1 田三滑坡体全貌

Fig. 1 Panorama of Tiansan Landslide

1.2 地层岩性

该滑坡体组成物质较复杂,据钻孔平洞揭露,主要由残坡积层、崩坡积层及中部滑坡堆积层、底部滑带等组成。滑坡堆积层根据破碎程度可细分为 2 个亚层:粉质黏土夹碎石层和块石层。残坡积层为粉质黏土夹碎石,碎石含量为 $10\% \sim 40\%$;崩坡积层为碎块石夹粉质黏土,主要成分砂岩、板岩含量为 $60\% \sim 70\%$ 。粉质黏土夹碎石层以碎块石为主,碎块石含量约为 $30\% \sim 40\%$;块石层主要由变质砂岩、板岩大块石组成。滑带土为粉质黏土夹砾石,并有少量碎石。岩层产状为 $35^\circ N \sim 55^\circ W, NE \angle 20^\circ \sim 55^\circ$,顺坡倾向,局部岩层由于受揉皱影响,岩层产状变化较大^[2]。

表 1 田三滑坡体分区要素

Table 1 Partitioning elements of Tiansan Landslide

分区编号	高程/km	所在土层	体积/万 m^3	变形迹象
A	2.40 ~ 2.65	残坡积层	1 104.2	未发现变形破坏迹象,坡度缓
B	2.26 ~ 2.40	崩坡积层、滑坡堆积块石层	1 052.8	主要为流经该区冲沟两侧岸坡的崩塌
C	1.90 ~ 2.26	崩坡积层、滑坡堆积粉质黏土夹碎石层	1 505.2	发育东西走向的裂缝和沿冲沟发育的裂缝,区内树木倾斜及冲沟两岸崩塌

1.3 滑坡成因及地质构造

中更新世晚期以来本区进入峡谷期,河谷强烈下切,岸坡高度不断增加,在随后长期的地质历史过程中,滑坡形成所需要的条件逐步形成,唯独缺少前缘临空条件。强大的自重应力持续作用于岸坡岩体,滑移变形趋势保持不变,前缘受阻部位产生弯曲变形,导致坡面隆起并伴随岩体扩容破碎。随着坡面隆起和坡内扩容加剧,在地震或暴雨诱发下,易产生溃屈破坏^[3-4]。

区内前波断层距离滑坡体后缘 1.50 km,未发现其他较大断裂构造带通过。滑坡区地处前波断层的下盘,雅砻江右岸边坡为中倾左岸偏下游的顺向坡,河流走向与岩层走向接近一致,沟谷延伸长,切割深。基岩节理发育,主要发育有 3 组:(a) $20^\circ N \sim 30^\circ W, NE \angle 40^\circ \sim 60^\circ$ 面较平直,延伸较长,为层面、顺坡、密集发育。(b) $70^\circ N \sim 80^\circ E, SE \angle 80^\circ \sim 86^\circ$ 面较平直,延伸较长,切坡,面附铁锰质膜。(c) $10^\circ N \sim 20^\circ W, SW \angle 40^\circ \sim 50^\circ$ 面较平直,延伸较长,横切坡,面附铁锰质膜。

1.4 水文地质条件

滑坡体在 2.30 km 以上较缺乏地表水,冲沟均为季节性流水,旱季时均无水,现场调查未发现泉水点出露。在 2.30 km 以下,中部的 1 条大冲沟有常年流水,流量较大,其余冲沟均为季节性流水。地下水接受大气降水补给,向雅砻江排泄。另外,在滑坡体前缘有多处地下水渗出点,出水量较小。滑坡区的地下水为潜水,潜水面形态与地形大致相当,根据钻孔水位观测成果,地下水位埋深较深,一般埋深为 30 ~ 60 m。

1.5 降雨

雅砻江区域地处青藏高原与四川盆地过渡地带,气象条件的垂直分带性明显,每年 6—9 月为雨季,年平均降雨量 950.0 mm 左右。高程 3.00 km 以下的河谷地带,降雨量较充沛(年平均降雨量为 796.7 mm),属较典型的亚热带气候区。气候突变明显,降雨具有集中性和突发性,降雨量大,分布极不均匀。笔者使用 SLOP-SEEP/W 软件对滑坡体进行渗流分析(计算模型如图 2 所示),划分区域为 4 边形单元格,上边界按照降雨量定义,同时坡脚处定义水头高度,初始地下水位按照基岩定义。稳定渗流分析以日为单位步长进行叠加,整



图2 滑坡体Ⅳ-Ⅳ剖面渗流模型

Fig. 2 Seepage model of landslide at profile Ⅳ-Ⅳ

个计算不考虑水分蒸发和地下水位变化。为研究降雨历时对田三滑坡体的影响,模拟了100 mm/d的降雨强度持续10 d的地下水位变化。

从渗流云图可知^[5],降雨第1天滑坡体表层便有微小的局部饱和区;降雨第2天B区的饱和带逐渐向下,C区饱和带逐渐加深;至第5天,B区饱和带与地下水联通并使地下水位抬升,C区至第8天与地下水联通并使地下水位抬升;至第10天,C区上部饱和区域逐渐变大,地下水位继续抬高,地下水情况变复杂,C区和B区结合部的地下水几乎达到滑坡体表面。可以看出,降雨时间长度对田三滑坡体的影响较大,降雨不仅在表层形成局部饱和带,而且随着降雨时间增长滑坡体内地下水位抬升越来越明显,地下孔隙水压力的变化也越来越复杂,使得孔隙水压力消散迅速,进而影响滑坡体的整体稳定性。这说明降雨历时对滑坡体的稳定性起到重要的决定作用。将当日计算得出的渗流场与SLOP软件耦合,可以计算渗流场对应的滑坡体安全系数 F ,如图3所示。



图3 100 mm/d降雨持续10 d田三滑坡体安全系数趋势

Fig. 3 Safety coefficient variation of Tiansan Landslide during 10-day rainfall with intensity of 100 mm/d

从图3可以看出,降雨时间越长,田三滑坡体的安全系数越低,滑坡体越不安全。总体上C区安全系数小于B区和A区,这与现场观测的结果是一致的。在发生滑坡的时间顺序上,A区先于B区和C区。

1.6 库水位升降

库水位突然降低,涉水滑坡体内地下水位下降缓慢,较大的水力梯度形成较大的动水压力,加大了沿地下渗流方向的滑动力,可能引起老滑坡的复活和新滑坡的产生。同时一部分地下水排出,库岸受到的浮托力突然减小,致使库岸陷落压密,可能激发很高的超孔隙水压力,使压密带抗剪强度急剧降低导致岸坡失稳。另外,蓄水后水位上升,库面水域变得更加开阔,山谷风及库水的流动会引起对库案的冲刷作用,使案坡后移,河谷深切,岸坡变陡。库水冲刷坡脚,切断滑动面使之临空,斜坡失去底部支撑,其稳定平衡便会遭到破坏。现场调研结果表明,滑坡体在天然状况下不存在和保持高孔隙水压力的水文地质条件,水库蓄水将改变地下水的赋存条件,通过计算Ⅳ-Ⅳ剖面安全系数可知,在库水位骤升骤降的过程中,地下水将产生较高的水力梯度,对滑坡的稳定性影响较大,滑坡安全系数逐步降低,故滑坡稳定性分析应充分考虑水位变化的影响。

1.7 地震

卡拉水电站近场区内断裂构造较为发育,主要发育有 2 组断裂,均为早、中更新世活动断裂,不具备发生 6.5 级以上强震的构造背景,但 5~6 级左右地震具有较大的随机性。不同地震烈度对应的水平加速度和垂直加速度如表 2 所示。

滑坡稳定性计算结果表明,当地震烈度为 6~8 时,滑坡体整体及分区稳定性均在基本稳定状态之上;当地震烈度达到 9 后,边坡安全系数为 0.872,滑坡体处于失稳的状态。可以看出,安全系数随地震烈度的增加而线性递减,因此地震对滑坡体的安全影响巨大。

2 滑坡体稳定性评价

2.1 工况组合

根据以上分析,滑坡体风险分析需要考虑不同工况组合(不同工况)的影响^[6-7],见表 3。本文计算以 IV-IV 剖面作为计算模型,如图 4 所示。

表 3 田三滑坡体稳定性计算工况及工荷组合

Table 3 Stability calculation conditions and load combinations of Tiansan Landslide

工况类别	状态	荷载组合内容
持久状况	天然状态	自重 + 地下水 + 现状水位
	蓄水	自重 + 地下水 + 正常蓄水位
	暴雨	自重 + 地下水 + 汛期暴雨
短暂状况	蓄水 + 暴雨	自重 + 地下水 + 正常蓄水位 + 汛期暴雨
	水位下降	自重 + 地下水 + 坝前库水位骤降至泄洪水位
偶然状况	地震	自重 + 地下水 + 地震
	蓄水 + 地震	自重 + 地下水 + 正常蓄水位 + 地震

2.2 参数确定

工程现场勘察过程中,通过试验获取了一定数量的样本数据,但数量有限,加之滑坡体巨大,地质情况复杂,无法达到统计要求,因此引入 Bayes 优化法^[8-11]对滑坡体岩土参数进行优化分析。采用工程类比分析法确定滑坡体稳定性计算参数的分布类型及参量,即通过工程类比法对滑坡体物理力学参数进行统计,获得概率分布函数,以此为先验函数,以田三滑坡体自身试验样本概率分布函数为似然函数,通过 Bayes 优化得到后验函数,即稳定性计算的参数取值。由于篇幅有限,仅将 C 区优化计算结果列于表 4 中。

2.3 稳定性计算

为了能有效模拟出滑坡体的实际情况,根据滑坡体参数后验分布改良函数,通过 Risk 软件,采用 Monte-Carlo 方法^[12-14]随机抽取 1 万组数据,同时对各个土层抽取样本进行随机组合。根据随机组合数据进行滑坡体整体稳定性计算,计算方法以 Bishop 法和 M-P 法为基础^[8],以安全系数为直观反映,计算由 GEO-SLOPE 软件进行。为解决 1 万组抽样数据带来的输入难题,利用自编对接程序 Edit and Run 将随机数据导入 GEO-SLOPE 软件,然后结合不同工况及荷载计算。以安全系数小于 1 的组合为失稳组合,统计其在 1 万组数据中所占比例,得到滑坡体在该工况的失稳概率,如表 5 所示。

表 2 不同地震烈度所对应的水平和垂直加速度
Table 2 Horizontal and vertical acceleration with different seismic intensities

地震烈度/ 度	水平加速度/ (m·s ⁻²)	竖直加速度/ (m·s ⁻²)
6	0.05g	0.033 333g
7	0.1g	0.066 667g
8	0.2g	0.133 333g
9	0.4g	0.266 667g

图 4 田三滑坡体 IV-IV 主剖面计算剖面

Fig. 4 Calculation profile of main profile IV-IV of Tiansan Landslide

表4 田三滑坡体C区岩土参数Bayes优化结果

Table 4 Optimization results of rock and soil parameters of of Tiansan Landslide in zone C using Bayes method

土层成分	岩土力学参数	先验分布	样本似然分布	推广 Bayes 法优化
碎石粉质黏土层	表观密度	$N(21.468, 1.803^2)$	$N(21.742, 1.557^2)$	$N(21.636, 1.121^2)$
	黏聚力	$N(96.870, 56.803^2)$	$N(85.000, 8.660^2)$	$N(85.269, 8.561^2)$
	内摩擦角	$N(30.327, 3.156^2)$	$N(34.330, 1.528^2)$	$N(33.570, 1.375^2)$
块石层	表观密度	$N(25.406, 0.687^2)$	$N(24.333, 0.289^2)$	$N(24.494, 0.266^2)$
	黏聚力	$N(147.885, 46.865^2)$	$N(78.750, 8.539^2)$	$N(80.971, 8.400^2)$
	内摩擦角	$N(36.219, 2.057^2)$	$N(37.000, 1.732^2)$	$N(36.676, 1.325^2)$
滑带土碎石粉质黏土	表观密度	$N(21.468, 1.803^2)$	$N(22.560, 0.799^2)$	$N(21.381, 0.730^2)$
	黏聚力	$N(96.870, 56.803^2)$	$N(76.6, 23.587^2)$	$N(79.58, 21.783^2)$
	内摩擦角	$N(30.327, 3.1562^2)$	$N(26.4, 1.157^2)$	$N(26.866, 1.087^2)$

表5 滑坡体IV-IV剖面稳定性计算成果汇总

Table 5 Overall results of stability calculation of profile IV-IV of Tiansan Landslide

计算工况	计算方法	安全系数 F		失稳 概率/%	安全系数分布情况/%			
		均值	方差		$F > 1$	$F > 1.05$	$F > 1.1$	$F > 1.15$
工况 1 (天然)	Bishop 法	1.3377	0.0652 ²	0	100	100	100	100
	M-P 法	1.3493	0.0668 ²	0	100	100	100	100
工况 2 (正常蓄水)	Bishop 法	1.2429	0.0465 ²	0	100	100	100	100
	M-P 法	1.2331	0.0455 ²	0	100	100	100	100
工况 3 (暴雨)	Bishop 法	1.1905	0.0606 ²	0	100	99.92	88.54	
	M-P 法	1.1881	0.0663 ²	0	100	98.98	88.67	
工况 4 (蓄水暴雨)	Bishop 法	1.1068	0.0695 ²	4.89	95.11	79.62	59.25	
	M-P 法	1.1045	0.0627 ²	5.17	94.83	78.68	54.80	
工况 5 (水位骤降)	Bishop 法	1.0856	0.0507 ²	5.24	94.76	79.36	60.87	
	M-P 法	1.0869	0.0488 ²	4.65	95.35	81.52	61.59	
工况 6 (地震)	Bishop 法	1.1259	0.0600 ²	2.08	97.92	87.29		
	M-P 法	1.1273	0.0654 ²	2.49	97.51	87.86		
工况 7 (蓄水地震)	Bishop 法	1.0377	0.0741 ²	20.96	79.04	44.06		
	M-P 法	1.0350	0.0739 ²	21.93	78.07	42.96		

计算结果表明:在工况 1(天然)、工况 2(正常蓄水)条件下,田三滑坡体安全系数均值均在 1.2 以上,失稳概率为 0,稳定性较好,有较高的安全储备。蓄水对田三滑坡体的稳定不利,与工况 1 相比,工况 3(暴雨)下安全系数有较大幅度的降低,但失稳概率为 0,稳定性仍较好。工况 4(蓄水暴雨)和工况 5(水位骤降)条件下,失稳概率分别为 1.05%~5.17%和 2.91%~4.65%,说明受蓄水和暴雨的影响,田三滑坡体稳定性明显下降,存在失稳的可能。工况 6(地震)条件下,田三滑坡体失稳概率为 2.36%~2.49%,2 个剖面稳定性较接近,而在工况 7(蓄水地震)条件下,田三滑坡体的失稳概率为 21.93%,受蓄水影响较大,稳定性差。

3 结 语

a. 卡拉水电站工程区田三滑坡体随着坡面隆起和坡内扩容加剧,在外界作用下更易失稳破坏;其层面与节理裂隙的不良组合为滑坡体变形失稳提供了边界,陡倾坡内的裂隙为地下水入渗创造了条件。通过对降雨、库水水位升降和地震等外在因素的敏感性分析,可知滑坡体在天然状况下不存在产生和保持高孔隙水压力的水文地质条件,水库蓄水将改变地下水的赋存条件,库水位骤升骤降对滑坡体的稳定性影响较大;在短期降雨条件下,滑坡体稳定性降低不多,但是随着降雨时间增长滑坡体失稳概率增加,地震峰值对滑坡体稳定性影响较为明显。

b. 基于蒙特卡洛模拟思想,在岩土参数概率密度函数已知的条件下采用 Risk 软件进行抽样,将数据录入 GEO-SLOPE 软件中进行计算,得到滑坡体 7 种工况下的失稳概率。从计算结果可知,在蓄水地震工况下,C 区失稳概率较大,该工况下处于不安全状态。另外,滑坡体受蓄水和暴雨的影响较大,稳定性变差。

参考文献:

- [1] 崔芳鹏,胡瑞林. 青海八大山滑坡群形成机制及稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4):848-857. (CUI Fangpeng, HU Ruilin. Study on formation mechanism and stability evaluation of badashan landslide group in Qinghai province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4):848-857. (in Chinese))
- [2] 吉锋,钟湖平. 雅砻江中游某特大型滑坡, 基本特征及稳定性初步分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5):92-94. (JI Feng, ZHONG Huping. Characteristics and stability of a large landslide in the Yalong river[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5):92-94. (in Chinese))
- [3] 邓建辉,陈菲. 泸定县四湾村滑坡的地质成因与稳定评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10):1945-1950. (DENG Jianhui, CHEN Fei. Geological origin and stability evaluation of siwancun landslide in luding county[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10):1945-1950. (in Chinese))
- [4] 谢飞鸿,王锦山,尹伯悦. 成南高速公路滑坡稳定性分析及治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2):5795-5798. (XIE Feihong, WANG Jinshan, YIN Boyue. Landslide analysis and treatment in the area of cheng-nan expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2):5795-5798. (in Chinese))
- [5] 李红英,谭跃虎,赵辉. 卡拉水电站上田滑坡体稳定性分析及评价研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2):359-365. (LI Hongying, TAN Yuehu, ZHAO Hui. Stability analysis and assessment research of Shang tian landslide of Kala Hydropower[J]. Geology and Prospecting, 2012, 48(2):359-365. (in Chinese))
- [6] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [7] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理方法程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [8] 张广文,刘令瑶. 确定随机变量概率分布的推广 Bayes 法[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3):91-94. (ZHANG Guangwen, LIU Lingyao. The improving Bayes method to determine probability distribution of random variable[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(3):91-94. (in Chinese))
- [9] 徐军,雷用,郑颖人. 岩土参数概率分布推断的模糊 Bayes 方法探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4):394-396. (XU Jun, LEI Yong, ZHENG Yingren. The research of Probability distribution and Bayes method on geotechnical parameter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4):394-396. (in Chinese))
- [10] 李夕兵,宫凤强. 岩土力学参数概率分布的推断方法研究综述[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2007, 4(1):1-8. (LI Xibing, GONG Fengqiang. A research review of the method to deduce the probability distribution of geotechnical mechanics parameters [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 4(1):1-8. (in Chinese))
- [11] 盛骤,谢式千,潘承毅,等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [12] 赵国藩,金伟量. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [13] 袁景,张秀丽. 基于 Monte-Carlo 方法的边坡可靠性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(增刊):10-12. (YUAN Jing, ZHANG Xiuli. Slope reliability analysis based on the monte-carlo method[J]. Liaoning Engineering Technology University Journals, 2005, 24(Sup):10-12. (in Chinese))
- [14] 赵辉,谭跃虎,徐辉,等. 雅砻江上田边坡可靠性蒙特卡洛方法综合运用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5):938-945. (ZHAO Hui, TAN Yuehu, XU Hui, et al. Application of Monte-Carlo method to Shangtian landslide's reliability analysis. [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5):938-945. (in Chinese))