

某滑坡稳定性的 FLAC-3D 数值模拟研究

张艳阳,任光明

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要:在水电站建设过程中,坝址区周边边坡的稳定性状况一直是各部门非常关心的重要问题之一。在对黄河上游某水电站库区滑坡进行现场调查的基础上,利用 FLAC-3D 软件对其在不同蓄水条件下的稳定性进行了数值模拟研究。研究表明:在上围堰水位 2 800 m 时,滑坡前缘局部可能发生垮塌;在蓄水位达到初期蓄水位高程 2 925 m 时,滑坡体变形明显增加,滑坡稳定性有所恶化;当达到正常蓄水位高程 2 990 m 时,滑坡变形进一步加剧,但滑坡整体处于基本稳定状态。

关键词:滑坡;稳定性;蓄水;FLAC-3D

中图分类号:TU 473

文献标志码:A

引言

我国水力资源十分丰富,水电是我国能源组成中一个相当重要的部分。水库岸坡和古滑坡的失稳一直是水电工程中存在的重大难题。在水电站开发过程中,库岸边坡稳定性问题越来越突出,尤其水库蓄水后的库岸边坡稳定性对大坝的安全和水电站的运转至关重要。1942~1953 年间,美国的大古力水库引发了大约 500 处岸坡失稳;1965~1969 年间,奥地利 Cepatsch 坝蓄水及水库运行初期,紧邻大坝的上游几处滑坡发生了 10 余米变形;1963 年意大利瓦依昂水库第二次蓄水时,在库水位上升至 700 m 高程时,左岸大坝 1.8 km 处发生 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的巨型滑坡^[1]。据统计 90% 以上的边坡失稳问题与水有关,库水位周期性的变化必定会引起库岸边坡中地下水位的波动,进而影响库区边坡的稳定性。因此,开展边坡在库水位变化下的稳定性研究,具有重要意义^[2-4]。

1 滑坡区概况

1.1 地质条件概况

滑坡区属于顺向岸坡,地形坡度大致可以分为两

段,以高程 2 860 m 为界:在高程 2 860 m 以下,滑坡地形坡度较陡,地形坡度一般在 40° 以上,前缘甚至达到了 50° ;在高程 2 860 m 以上,滑坡地形坡度变缓,地形坡度总体上在 30° 以下。滑坡基岩为一套薄层~互层状结构的砂岩夹板岩地层。区内出露有灰绿色砂岩夹灰色板岩($T_2-Ss+Sl$)、中~薄层砂岩局部夹板岩(T_2-Ss)和薄~极薄层板岩局部夹砂岩(T_2-Sl),其中 T_2-Sl 是滑坡主要的基岩地层。岩层总体产状 $330^\circ \angle 50^\circ$ 。

1.2 滑坡基本特征

滑坡平面近似呈舌头状。通过布置的钻孔及平硐揭露了滑带的位置,调查发现前缘滑体厚约 30 m,滑带产状 $290^\circ \angle 54^\circ$ 。中部滑体厚约 42.6 m,在平洞内 80 m 处发现明显的弯曲折断面,折断面滑带产状 $286^\circ \angle 55^\circ$,折断面上部岩层产状 $183^\circ \angle 49^\circ$,下部岩层产状 $332^\circ \angle 52^\circ$,整个平硐内岩层倾向坡外。上部滑体厚约 26.2 m,滑带产状 $285^\circ \angle 45^\circ$ 。滑坡地质剖面图如图 1 所示。

滑坡体的物质组成与基岩有所不同,后缘发育有一条张拉裂缝,拉裂缝走向大致为 280° ,拉裂缝后缘发育一个拉裂陡坎,陡坎高度约 0.3~1.1 m。在拉裂缝上部

收稿日期:2015-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41072229)

作者简介:张艳阳(1989-),男,甘肃通渭人,硕士生,主要从事岩土体稳定性及工程环境效应方面的研究,(E-mail)1135594939@qq.com

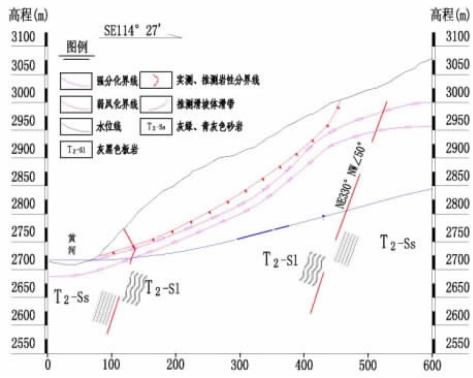


图1 滑坡工程地质剖面图

左侧有一落水洞,洞口直径约70 cm,延伸方向和拉裂缝方向一致,内部扩大呈倒漏斗状,方量约5 m³。滑坡后缘为正常基岩,基岩岩层倾向与滑坡主滑方向接近。滑坡前缘剪出口部位下部岩层发生反翘,岩层倾向坡内。

2 滑坡成因机制分析

滑坡所在岸坡地层为一套层状结构岩体,岩层普遍在30 cm以下,大部分甚至在10 cm以下,因此该滑坡区岩层属于薄层~互层状岩体。滑坡上部岩体层面产状330°∠33°,倾向坡外,与滑坡区基岩倾向一致。而下部岩体由于溃曲折断导致层面产状178°∠26°,倾向坡内,折断面产状140°∠24°。此现象可以认为是岩层在上覆岩体的重力和平行于坡面的最大主应力作用下岩层发生强烈的弯曲折断变形所致。基于以上分析,可以认为滑坡成因机制为滑移~弯曲变形破坏模式。

3 滑坡稳定性数值模拟分析

调查发现滑坡在天然条件下处于稳定状态,而在水电站建成蓄水后滑坡区地质条件发生恶化,滑坡是否还能处于稳定状态对水电站的建设非常重要,因此有必要对滑坡在不同蓄水位条件的稳定性进行FLAC-3D数值模拟研究。

3.1 FLAC-3D 软件简介

FLAC-3D (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions) 是由 Itasca 公司研发推出的连续介质力学分析软件,FLAC-3D 采用了显式拉格朗日法和混合-离散分区技术,能够非常准确的模拟土质、岩石和其他材料的三维结构受力特性和塑性流动,基于较小内存空间就能够求解大范围的三维问题^[5-6]。

3.2 计算模型及参数选取

计算模型如图2所示,顺河方向(y轴方向)长度为411 m,垂直河流方向(x轴方向)长度为477 m,模型最

大高度(z轴方向)为435 m,即海拔3 035 m。模型共划分37 554个节点,197 079个单元。计算时仅考虑滑坡的自重应力场,不考虑构造应力场,将模型四周边界、底部边界设置为单向约束边界^[7],根据模型的坡体结构,在建模时将模型概化为4种材料模型^[8],即构成基岩的一套薄层~互层状结构的砂岩、板岩地层考虑为一种材料,将模型表面风化层考虑为一种材料,坡体考虑为一种材料,滑带考虑为一种材料。对各材料分别在地表、平硐、钻孔中取样,进行相应的实验分析。根据上述室内外试验、物探测试成果的整理分析,在对岩质类型、结构面状态、岩体结构类型和完整性等进行工程特性分析的基础上,考虑岩体各向异性和赋存环境特征,结合有关规范取值原则^[9-10],提出该滑坡的物理力学参数平均值,滑坡物理力学参数平均取值见表1。

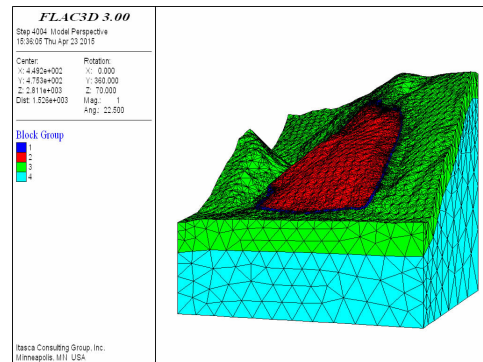


图2 滑坡 FLAC-3D 计算模型

表1 滑坡各岩土体力学参数平均值取值表

材料	E/Gp	u	γ/(g/cm ³)	C/kPa	φ/°
基岩	11	0.25	2.65	1000	47
弱风化	10	0.24	2.6	900	46
滑带	0.3	0.33	2.2	35	36.9
滑坡体	0.5	0.33	2.3	350	38

3.3 计算结果分析

在计算时只考虑上围堰蓄水2 800 m、初期蓄水2 925 m和正常蓄水2 990 m三种工况进行计算。计算前先将模型在天然状态下计算至平衡状态,然后将速度、位移清零,添加蓄水位后继续计算^[11-13],每一蓄水位计算迭代3 000时步,在天然、蓄水条件下,对体系的最大不平衡力进行监测,最大不平衡力是在计算循环中,外力通过网格节点传递分配到体系各节点时,所有节点的外力与内力之差中的最大值。最大不平衡力不可能达到零,当它与作用在体系上的外力相比很小时,认为体系达到了力平衡状态。滑坡的最大不平衡力演化曲线如图3所示。

由图3可知,随着迭代计算的不断进行,系统不平

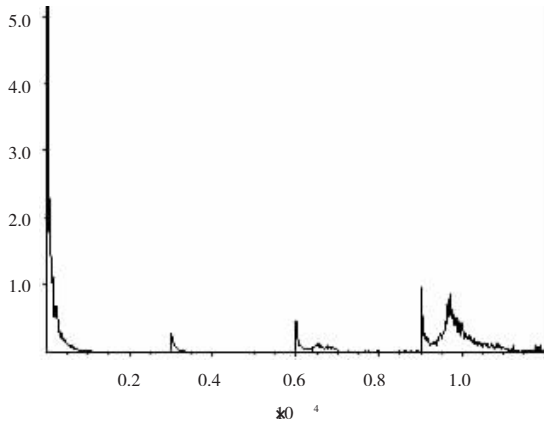


图 3 系统最大不平衡力时步演化曲线

衡力逐渐降低,滑坡在迭代至 1 000 时步时趋于收敛,系统达到一种平衡状态,因此,在天然条件下,滑坡体的变形发展最终是趋于稳定的。

由于滑坡前缘坡脚处发生溃曲破坏使得岩体比较破碎,当蓄水至上围堰水位 2 800 m 高程时,坡脚破碎岩体受到库水浸润,计算时对侵入水中岩体的参数按饱和条件进行折减,由计算结果可知滑坡坡脚部位为剪应变集中分布区(图 4),除此之外坡体内没有其他明显的剪应变增量集中分布区,滑坡处于稳定状态。

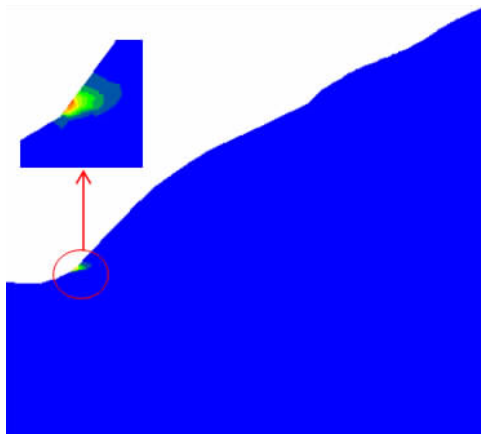


图 4 2 800 m 高程剪应变增量图

蓄水至初期蓄水位 2 925 m 时,随着库水位的抬升,剪应变增量集中带沿着滑带向坡体内部发展,从图 5 可以看出剪应变增量较大的部分占整个滑带的 30%,其中真正能使滑坡体发生破坏的部分不足整个滑带的 5%。从系统不平衡力演化曲线可以看出,蓄水后系统不平衡力迅速增大,之后随着时间的推移衰减较快,最后趋于收敛。说明在 2 925 m 蓄水高程时,滑坡稳定性较之前有所降低,但整体处于稳定状态。初期蓄水位对滑坡稳定性影响不大。

当蓄水至正常蓄水位 2 990 m 时,剪应变增量集中

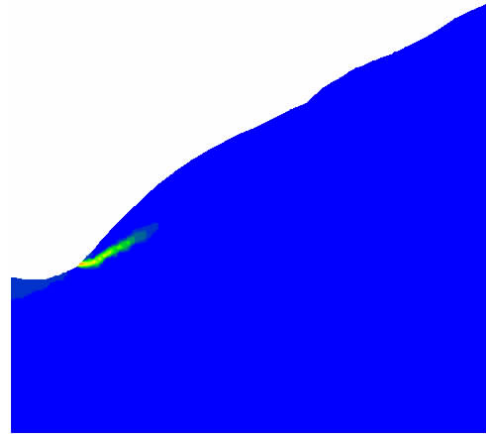


图 5 2 925 m 水位下剪应变增量图

带沿着滑带向坡体内进一步延伸,由图 6 可以看出剪应变增量较大的部分占整个滑带的 70%,但是剪应变增量集中带并没有贯通。另外从系统不平衡力曲线可知,2 990 m 蓄水位下不平衡力迅速升高,之后随着时间的推移出现了较大振幅的跌荡,系统不平衡力趋于收敛所需时间也显著增加,这说明库水位的抬升使系统达到自我平衡的能力有所降低。以上两点表明在 2 990 m 蓄水位下,库水对滑坡稳定性影响较大,滑坡有可能发生局部失稳。

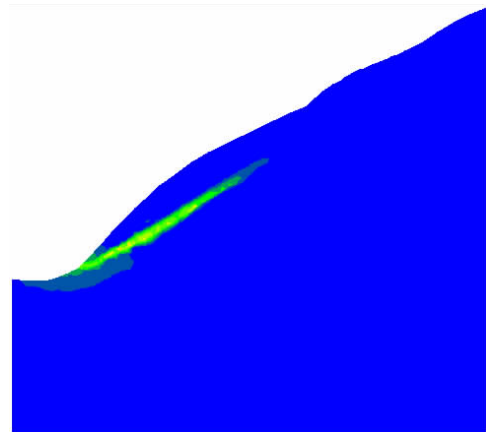


图 6 2 990 m 水位下剪应变增量图

4 结 论

通过 FLAC-3D 数值模拟分析,可以得出以下 4 点结论:

- (1) 天然条件下滑坡处于稳定状态,这一结果与此前对滑坡的现场调查分析结果一致。
- (2) 蓄水后,随着蓄水位的不断抬升,滑坡稳定性有所降低,因此水库蓄水是诱发滑坡的重要因素之一。
- (3) 模拟计算表明,在 2 800 m 库水位时,滑坡坡脚处可能发生局部垮塌,在 2 925 m 库水位时滑坡稳定性

较之前有所恶化,在2 990 m库水位下滑坡稳定性进一步恶化,但整体而言,滑坡在2 800 m、2 925 m库水位下处于稳定状态,在2 990 m库水位下处于欠稳定状态。

(4)鉴于滑坡在正常蓄水位条件下处于欠稳定状态,建议在该条件下对滑坡采取监测控制措施,为滑坡的防治提供预警机制。

参考文献:

- [1] 张倬元.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1993.
- [2] 王明华,晏鄂川.水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J].岩土力学,2007,28(12):2722-2725.
- [3] 卢书强,易庆林,易武,等.库水下降作用下滑坡动态变形机理分析——以三峡库区白水河滑坡为例[J].工程地质学报,2014(5):869-875.
- [4] 朱冬林,任光明,聂德新,等.库水位变化对水库滑坡稳定性影响的预测[J].水文地质工程地质,2002,29(3):6-9.
- [5] 陈育民.FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [6] 陈文胜,冯夏庭,葛修润,等.静态松弛快速拉格朗日分析方法原理[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):680-684.
- [7] 张雪东.呷爬滑坡稳定性的FLAC-3D数值模拟分析[J].岩土力学,2003,24(1):113-116.
- [8] 宋琨,晏鄂川,朱大鹏,等.基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究[J].岩土力学,2011,32(9):2798-2802.
- [9] 夏敏,任光明,马鑫磊,等.库水位涨落条件下滑坡地下水渗流场动态特征[J].西南交通大学学报,2014,49(3):399-405.
- [10] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [11] 朱继良,黄润秋.某大型水电站水文站滑坡蓄水后的稳定性三维数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1384-1389.
- [12] 高圣益,魏学勇,周晁.基于FLAC3D的滑坡稳定性数值模拟分析[J].长江工程职业技术学院学报,2007,24(4):1-4.
- [13] 蒋秀玲,张常亮.三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性评价[J].水文地质工程地质,2010,37(6):38-42.

FLAC-3D Numerical Simulation Study on Stability of a Landslide

ZHANG Yanyang, REN Guangming

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China)

Abstract: The slope stability situation surrounding the dam site area is very important to each correlative department during constructing hydroelectric power station. The stability of landslide is studied by means of FLAC-3D numerical simulation under different impounding conditions based on the field investigation of a hydroelectric power station reservoir area in the upper yellow river. The results show that the partial collapse of landslide leading edge may occur when the cofferdam water level is 2800m, the landslide deformation significantly increase and landslide stability deteriorate to some extent when the water level reaches the initial water level elevation of 2925m. The landslide deformation has been further exacerbated when it reaches the normal water level elevation of 2990m, but the landslide is still stable overall.

Key words: landslide; stability; impoundment; FLAC-3D