DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.05.012

梨园水电站下咱日堆积体稳定性分析

安彦勇[1,2],王保田[1,2],汪莹鹤[1,2]

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:结合工程地质勘察,研究位于梨园水电站坝前左岸的下咱日堆积体的工程地质特性和成因。应用极限分析能量法 EMU 程序,计算了 4 个典型剖面在不同工况下的安全系数。建立三维模型,通过 FLAC 程序得到的位移云图,分析该堆积体在天然、蓄水以及地震工况下的变形特性,并对Ⅲ号危险剖面用不平衡推力法进行了计算。计算分析结果表明,该堆积体整体稳定性较好,但存在局部滑动的可能。针对该堆积体的情况,提出了相应的防护、加固处理措施。

关键词:下咱日堆积体;堆积体稳定性;极限分析能量法;FLAC

中图分类号:P642;TU311.3 **文献标识码**:B **文章编号**:1006-7647(2008)05-0045-04

Stability analysis of Xiazanri deposits in the Liyuan Hydropower Station//AN Yan-yong[1,2], WANG Bao-tian[1,2], WANG Ying-he[1,2](1. *Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 2. *Research Institute of Geotechnical Engineering and Science, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The Xiazanri deposits are located on the left bank of the Liyuan Hydropower Station. The geological characteristics and origin of the deposits have been studied based on field investigation. The EMU (energy method upper-bound limit analysis) method is applied to calculate the safety factor of four typical sections of the slope under different conditions. The calculation results show that section Ⅲ is in danger of sliding. A 3-D model is established using FLAC software, and the deformation characteristics under natural, seismic and water storage conditions of the deposits are analyzed with displacement nephograms. The unbalanced thrust method is applied to the dangerous section Ⅲ for further study. Results show that the slope is in integrated stability, but there is a possibility of partial sliding failure. To enhance the security and stability of the slope, several corresponding measures are put forward.

Key words: Xiazanri deposits; deposit stability; energy method upper-bound limit analysis; FLAC (fast Lagrangian analysis of continua)

梨园水电站位于云南省丽江市玉龙县(右岸)与迪庆藏族自治州香格里拉县(左岸)交界的金沙江中游界河上,为金沙江中游河段规划的 8 个梯级电站的第 3 个梯级,上游与两家人水电站衔接,下游为阿海水电站。梨园水电站初拟最大坝高 145.8 m,水库正常蓄水位 1 618 m,库长约 58 km,总库容 8.11×10^8 m^3,装机容量 2 400 MW,属一等大(1)型工程。坝段范围内大面积分布有第四系冰碛、冲积堆积物,且分布范围广、厚度大,对电站工程存在不利影响。下咱日堆积体位于梨园水电站坝前左岸,该堆积体规模大,组成物质总体较松散,且正常蓄水位附近部分地段地形较陡,同时大坝泄洪雾化对堆积体的稳定可能产生不利影响,因此存在滑坍失稳的可能。由于堆积体距离坝址较近,其位置和稳定性将影响到大坝安全、枢纽布置以及部分建筑物的边坡和基础,因此,有必要对该堆积体的稳定性进行研究分析。

1 下咱日堆积体工程地质特性

下咱日堆积体距坝轴线约 360 m,分布范围从金沙江边至高程 1 780 m,面积约 1.2 km^2,估计方量约 $5\,084\times10^4$ m^3。底界面呈一倾向河床下凹的缓"锅底"型,"锅底"靠近现代河床,堆积物底部南、北两端翘起,河边平缓往山里翘起。

下咱日堆积体属于冰水冰碛堆积型堆积体,规模较大,埋藏较深,表面平缓,基岩面起伏较大,冰水、冰川沉积为其主要成因。组成物质有 2 部分:上部为冰碛、部分崩塌堆积形成的灰岩漂石、碎块石及

作者简介:安彦勇(1980—),男,河北石家庄人,博士研究生,从事膨胀土特性及边坡稳定性研究。E-mail:anyanyong@sina.com

少量粉土,表部为钙泥质胶结,呈半胶结状态;下部为冲积而成的卵、砾石及少量粗砂,中等密实。底部在局部低凹处有不连续分布的粉砂土或粉土层,呈透镜状。堆积体形成两级缓坡台地,两台地之间以及前缘部分地段地形较陡。据钻孔揭露,地下水位于堆积体内靠近底部,埋深不大,靠近河床部位的地下水埋藏较浅,向两岸谷坡渐深。临近江边地下水位线平缓,往里水位线比地形坡度略缓,左岸地下水平均水力坡降约 3.8%,右岸地下水平均水力坡降约 5.7%。天然状况下堆积体整体稳定,仅前缘陡坎处局部有小坍塌[1]。

对下咱日堆积体野外调查以及地质特性分析的结果表明,堆积体表层冰水堆积物结构完整,后缘及中后部未见变形拉裂缝,说明堆积体未发生滑动变形破坏,初步判定该堆积体整体稳定性较好。

2 基于 EMU 的堆积体稳定性计算

通过对堆积体工程地质特性进行调查研究,定性分析了其稳定状况。在对物探、钻探成果进行分析整理的基础上,结合现场地质勘测情况,采用边坡稳定极限分析能量法对堆积体稳定性进行定量计算分析。

极限分析能量法简称 EMU,对滑坡体采用倾斜条块的极限分析上限解,使用摩尔库仑破坏准则,是一个功能比较齐全、具备应用最优化方法自动寻找最小安全系数和临界滑裂面、临界斜分条模式能力的稳定分析程序[2]。

下咱日堆积体按网络状布置钻孔 14 个,平硐 1 个,纵横向分别划分为 4 个控制剖面,剖面间距约 260 m。

根据坝址区 21 组岩石物理力学试验和岩体力学特性成果,并结合工程类比及简化计算原则综合确定堆积体及下伏基岩物理力学参数(表 1)。

表 1 岩土体物理力学指标

土层编号	类别	E/GPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})	φ/(°)	c/kPa
1	堆积体	0.3	0.30	24	32	20
2	风化岩	1.0	0.24	26	36	800
3	基 岩	24.0	0.20	28	46	2000

据国家地震局地质研究所鉴定,该坝址区地震基本烈度为 7 度,地震动参数为:50 年超越概率 5%,10% 以及 100 年超越概率 2% 的基岩水平峰值加速度分别为 0.179 g,0.139 g,0.285 g[1]。

EMU 计算选取由坡顶延伸至金沙江边的Ⅰ号,Ⅱ号,Ⅲ号,Ⅳ4 个纵向控制剖面,能够较好地概括和反映实际的工程地质状况。首先对堆积体的整体稳定性进行评价,然后搜索堆积体中最危险滑动面,得出堆积体按最危险滑动面滑动的安全系数,进而对堆积体在天然状况、蓄水工况、暴雨工况、地震工况以及暴雨和地震组合工况下的稳定性进行分析评价(表 2)。

表 2 堆积体各剖面安全系数

工况	Ⅰ号剖面		Ⅱ号剖面		Ⅲ号剖面		Ⅳ号剖面	
	F	F_{min}	F	F_{min}	F	F_{min}	F	F_{min}
天然状态	2.434	2.015	3.127	2.466	2.364	1.933	2.618	1.947
蓄水工况	2.321	1.952	3.040	2.389	2.252	0.818	2.541	1.829
地震工况	2.111	1.678	2.876	2.255	2.102	0.801	2.224	1.710
暴雨工况	2.191	1.602	2.882	2.197	2.006	0.789	2.359	1.662
地震+暴雨工况	1.990	1.455	2.630	1.998	1.921	0.710	2.004	1.440

通过 EMU 程序的计算结果可以看到:①堆积体在天然状态下整体稳定安全系数较高,最危险滑动面的安全系数也达到 2.0 左右,说明天然状态下堆积体边坡是稳定的。②当水库蓄水至正常蓄水位时,堆积体稳定安全系数有所降低,但仍具有很高的安全储备。虽然在Ⅲ号剖面搜索到安全系数小于 1.0(F_{min} = 0.818)的危险滑动面,蓄水后存在局部牵引式逐级滑动的可能性,但没有搜索到沿堆积体底界面的整体滑动面。③考虑地震以及暴雨等最不利情况的组合工况时,也仅在Ⅲ号剖面发现局部危险滑动面,其余部分稳定性较好。EMU 程序计算结果表明,边坡总体上是稳定的,满足正常以及蓄水期间的稳定性要求,但Ⅲ号剖面所在区域存在局部滑动破坏的可能性。

3 基于三维 FLAC 的堆积体变形特性分析

三维快速拉格朗日分析是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为[3]。采用强度折减的思想,可以计算边坡的安全系数,使得该算法在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独特的优点[4-5]。

计算模型简化为堆积体与基岩 2 层,采用四面体单元将模型离散为 47522 个单元、9268 个节点(图 1)。计算模型坡面设为自由边界,底部设为固定约束边界,四周设为铰支。在初始条件中不考虑构造应力,仅考虑自重应力产生的初始应力场。计算时,首先生

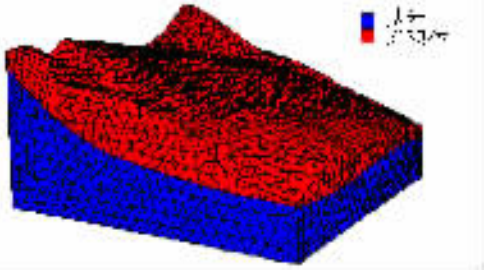

图 1 堆积体三维计算模型

成静水压力,选择弹性本构模型,在只考虑重力作用的情况下进行弹性求解,计算至平衡后对位移场和速度场清零,生成初始应力场。然后进行本构为 Mohr-Coulomb 模型的弹塑性求解,直至系统达到平衡。

3.1 天然工况下堆积体的稳定性分析

由图 2 可以看出,总变形较大的部分主要有 2 处:①Ⅲ号和Ⅳ号剖面间的斜坡上,变形最大值为 20.8 cm,位于堆积体的表部,分布在高程 1 630 m 左右。变形很大的部分范围较小,变形较大(10 ~ 18 cm)部分主要分布在堆积体的中部和上部,变形方向向前向下,且向深部延伸,表现出滑移下沉的特点。这表明滑动面可能沿堆积体表层发育,出现浅层滑动,但由于分布不广,不会造成整体滑动。②Ⅰ号断面上部、下咱日沟右侧的山坡上,分布高程 1 780 m 左右。变形最大值为 16.4 cm,产生在堆积体的表部,分布范围不大,该部分变形较大主要缘于下咱日沟右岸坡度较陡。由于下部变形较小,对上部变形较大的部分具有一定的阻挡作用,因此整体滑动的可能性较小,但浅部滑动面可能在堆积体表层发育,形成局部小范围滑坡。

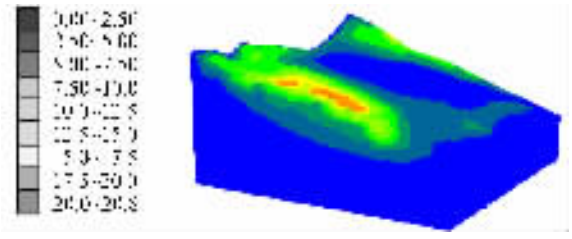

图 2 天然状态下堆积体变形云图(单位:cm)

堆积体的(潜在)滑动面(带)可根据其剪应变增量的大小来判断:剪应变增量较大的部位则为其(潜在)滑动面(带),变形破坏多沿此处发生;剪应变增量较小或基本上没有发生变化的部位一般不会有潜在滑动面产生,因此这些部位不会发生较大的变形或破坏。

由图 3 可以看出:堆积体剪应变增量较大的部位大致位于下咱日沟右岸陡坡处和 ZK125 探测点附近的陡坡处,与变形云图较为一致。

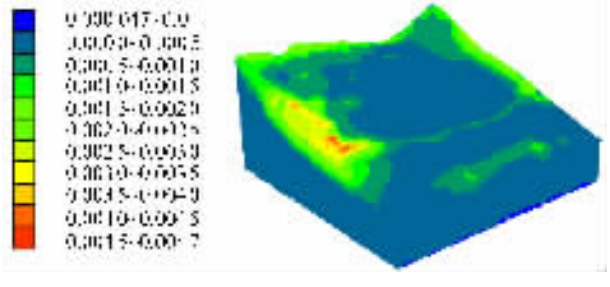

图 3 剪应变增量云图

综上,堆积体在天然工况下整体较稳定,但由于局部坡度较大,造成局部位移与剪应变增量较大,可能形成局部滑动,但由于分布范围不大,不能形成连贯的滑裂面,因而堆积体整体滑动的可能性不大。

3.2 Ⅲ号剖面的稳定性分析

通过计算分析可知,Ⅲ号剖面所在区域附近位移较大,可能发生局部滑动破坏。究其原因,主要是由于该区域存在 2 个粉土软弱夹层,若滑坡,很可能沿此处发生,因此对该剖面做进一步的分析。根据计算所得的位移云图,设定滑裂面,采用不平衡推力法计算安全系数。

将粉土以上堆积体划分为 3 个区域(图 4),天然状况下土体密度为 2 200 kg/m^3,粉土的摩擦角一般比较小,在 20° ~ 28°之间。滑动面以上的土体几何参数如表 3 所示。

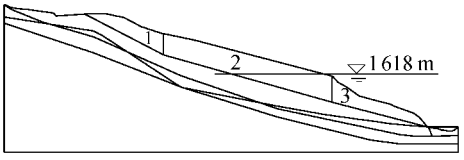

图 4 Ⅲ号剖面计算简图

表 3 土体几何参数

区域	面积 A/m^3	长度 L/m	底角 θ/(°)
1	6 670	236	22.56
2	24 650	479	12.66
3	7 756	270	11.68

计算的安全系数为 1.28,比 EMU 计算结果要小。如果此粉土夹层分布范围较广,加之在地震作用下粉土易液化,摩擦角将急剧减小,极易沿此面发生滑动破坏,因此该部分应进行相应的处理以确保稳定安全。

3.3 蓄水工况下堆积体的稳定性分析

水库蓄水至正常蓄水位时,变形云图如图 5 所示。沿 x = 500 m 处切片如图 6 所示,可以更清楚地显示和分析水面线以上堆积体的位移变化情况。

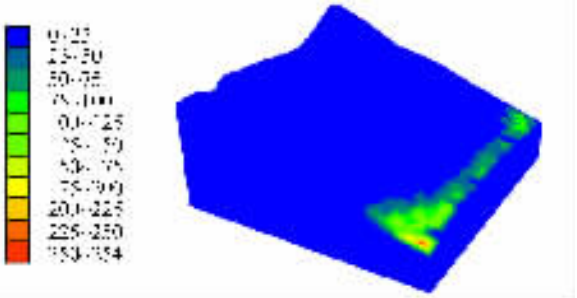

图 5 蓄水状态下堆积体整体变形云图(单位:m)

对照自然工况下的变形云图(图 2)可以看出,水面以上堆积体部分位移变化不大,因此不会形成连贯的滑裂面。而水面以下部分区域变形很大,说明发生了塑性流动。水面以下部分堆积体由于水的浸泡,使得力学性质降低,加之渗流的影响,因而产

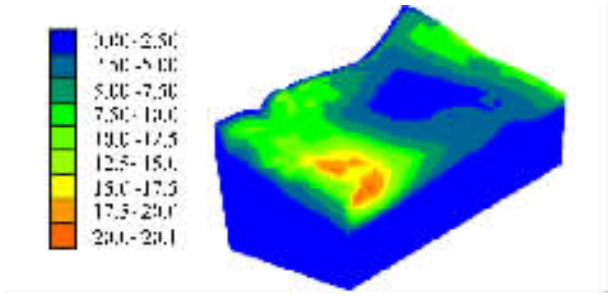

图 6　蓄水状态下水面线以上堆积体变形云图(单位:cm)

生了较大的位移,有可能发生局部的牵引式逐级滑动,但因在水面以下,且大变形区域较小,估计产生一次性滑动的方量不会太大,对大坝的安全不至于产生太大的影响。

3.4　地震工况下堆积体的稳定性分析

地震动参数采用 50 年超越概率 10% 基岩水平峰值加速度为 0.139 g,频率为 10 Hz,持续时间为 3 s,计算时间为 5 s。地震工况下堆积体的变形云图如图 7 所示。

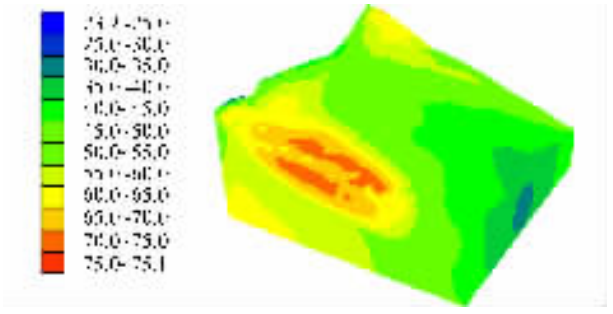

图 7　地震工况下堆积体变形云图(单位:cm)

由堆积体的变形云图和剪应变增量云图(图 8)可以看出,在地震作用下,堆积体的形变以及剪应变增量均有所增加,主潜在滑动带的范围相对减小,没有形成对边坡的贯通,因而具有一定的稳定性。次级潜在滑动带范围扩大,形成了一定的贯通性,所以在此工况下易发生局部滑动破坏。

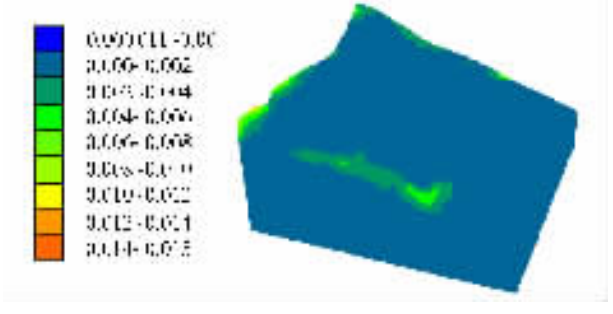

图 8　地震工况下堆积体剪应变增量云图

4　结　语

从不同角度和方法对梨园水电站下咱日堆积体的稳定性进行了研究分析,结果表明,下咱日堆积体整体稳定性较好,发生整体滑动的可能性很小,但Ⅲ号剖面所在区域存在局部牵引式滑动破坏的可能性。因此,应采取相应的工程处理措施以保证堆积体边坡的稳定与安全:①尽量减少对堆积体进行陡开挖,避免破坏堆积体的天然状况,从而减少开挖卸荷作用对堆积体的不利影响。②做好边坡表面排水防护工作,及时旁引坡面水,汇集疏导地下水,设置相应数量的截、排水沟。③加强坡面防护,以植被护坡为主,重点区域适当结合骨架护坡。④对Ⅲ号剖面存在粉土软弱夹层的区域应加强监测,如发现变形较大可布置抗滑挡墙或抗滑桩以保证堆积体的稳定安全。

参考文献:

[1] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院.梨园水电站预可行性研究地质报告[R].昆明:中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,2006.

[2] 陈祖煜.岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

[3] 刘波,韩彦辉.FLAC 原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.

[4] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.

[5] 连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.

(收稿日期:2007-11-16　编辑:高建群)

·简讯·

全国地下水污染学术研讨会将在杭州市召开

全国地下水污染学术研讨会将于 2008 年 11 月底在浙江省杭州市召开。会议主题包括:区域地下水污染调查;地下水污染场地调查;地下水污染调查与取样技术;地下水有机污染测试技术;地下水污染原位修复;地下水污染物迁移转化物理试验与数学模拟;地下水污染风险评价与区划;地下水污染监测。主办单位为中国地质调查局、国家自然科学基金委员会(地学部);协办单位为浙江省国土环境资源厅、浙江省地质矿产勘查开发局、中国地质学会水文地质专业委员会、中国地质大学(武汉)、中国地质大学(北京)、清华大学、北京大学、南京大学、吉林大学、长安大学、成都理工大学、石家庄经济学院;承办单位为中国地质科学院水文地质环境地质研究所、浙江省地质环境监测总站。会议详情见 http://www.cags.net.cn/2008/20080912-1.htm。

(本刊编辑部供稿)