

水电站边坡坍塌堆积体边坡稳定与变形分析

霍家平^{1,2}, 傅中志^{1,2}, 刘若星^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝溃决机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 水利部农村电气化研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:以西部某水电站坍塌堆积体边坡的变形监测资料为基础,开展了大量的资料分析和反演计算研究,得到了堆积体的强度和变形参数以及湿化变形参数,预测了蓄水过程中边坡的变形趋势,并计算了正常和非常运行工况下的安全系数以及各工况下边坡失稳的变形阈值,为依据边坡位移监测资料判断边坡稳定性提供了重要依据。

关键词:水电站;坍塌堆积体;边坡稳定

中图分类号:TV223

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)S2-0098-04

坍塌堆积体是我国西南高山峡谷地区水电工程建设中常见的复杂工程地质问题,其稳定性是水电站安全建设与稳定运行的重要前提^[1]。由于多数坍塌堆积体粒径范围广,空间分布不均,通过现场或室内试验确定其力学参数的难度极大,给边坡稳定性评价带来了许多不确定因素^[2]。典型坍塌堆积体的长期变形监测结果表明,坍塌堆积体边坡滑坡的发育是一个由局部破坏逐渐扩展以至贯通形成滑动面的渐进过程^[3],滑坡发生前边坡表面一般会出现环向裂缝、隆起等局部破坏。从局部破坏到滑坡发生常常需要经历相当长的时间,如三峡库区的新滩滑坡从孕育到致灾共经历了20年左右^[1]。水电工程的建设周期一般较长,充分运用建设期间与下闸蓄水前坍塌堆积体的变形监测资料,对于掌握坍塌堆积体的力学特性具有重要的意义。本文以某水电站库区坍塌堆积体为例,阐述运用变形监测资料反演分析强度和变形参数,并评估坝坡稳定性及边坡失稳变形阈值的方法。

1 工程地质概况

某水电站位于乌江Ⅰ级支流印江河中下游,是1座以发电为主兼顾防洪和其他功用的中型水利枢纽。由于河谷岩体上硬下软,岩体中顺河向裂隙较发育,溶蚀严重,在长期内外地质营力作用下在左坝肩形成了104万m³左右的坍塌堆积体。经钻探和

槽探等勘察手段查明,坍塌堆积体物质成分主要由巨石、块石、碎石及黏土组成,其中巨石最大直径达15~20m,质量分数为40%;块石质量分数为30%;碎石为10%~15%;黏土为15%~20%。在坍塌堆积体表层有0.3~0.5m含黏土40%的松散碎石和1~3m的钙华胶结层,胶结层开挖呈块状,在地表形成相对硬壳,但分布不均匀,下伏坍塌堆积体呈稍密状,结构松散,小空隙发育。连续电导率成像系统勘察结果显示,该坍塌堆积体的视电阻率在20~450Ω·m,基岩与覆盖层分界面在横测线剖面上角度为21°~25°,局部略有起伏。

2 监测结果分析

图1是该坍塌堆积体监测点的平面布置图,在水电站建设过程中共对9个表面位移测点和3个测斜孔进行了长期观测,施测时间自2010年7月至2012年1月,观测期间库水位在419.2~431.3m之间经历了2次上升和2次下降。图2为450m高程处4个测点的顺坡向水平位移过程线,其中正值表示指向河谷中心。根据监测结果,2011年2月16日至2011年2月20日,水位由429.6m降至419.2m,2011年2月20日至2011年6月20日水位由419.2m升至431.3m。表1为2011年2月16日至2011年2月20日水位降落期间和2011年2月20日至2011年6月20日水位升高期间所有表面位移测点的顺

坡向位移变化量。

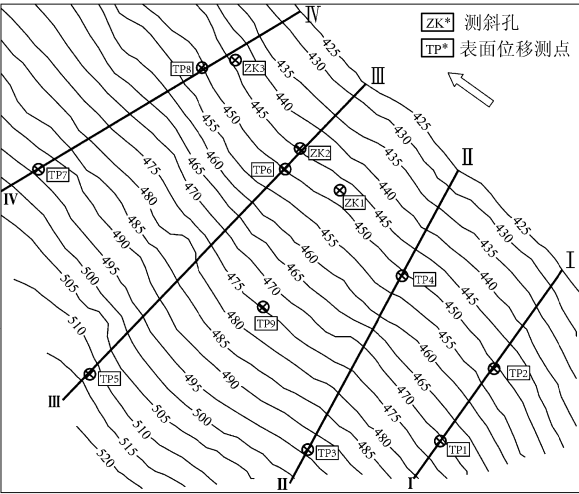


图1 坍塌堆积体表面位移测点布置平面图

表1 表面监测点的顺坡向位移变化量

观测时间	位移变化量/mm								
	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9
2011-02-16— 2011-02-20	-7.9	-0.3	-3.6	0.8	-7.0	-3.9	0.9	1.9	-6.0
2011-02-20— 2011-06-20	9.1	5.4	5.9	5.1	7.2	4.5	3.5	4.4	4.7

从图2和表1可以看出,2011年2月水库水位消落期间,各测点顺坡向位移均随库水位降低有明显减小的趋势,也就是说此次降低库水位对保障边坡稳定起了有益的作用。2011年2月至6月库水位再次上升期间,各测点水平位移逐步增加,因该坍塌堆积体主要由巨石、块石和碎石等散粒体组成,故水位上升期间的顺坡向水平位移增量可能主要与水和风化岩石矿物相互作用导致岩石软化有关,类似于高土石坝工程中堆石料的湿化机理。2011年6月20日以后,库水位再次降低,但在本次水位消落过程中,各测点顺坡向位移非但未出现降低趋势,部分测点的顺河向位移速率反而有所增加,变形速率0.03~0.05 mm/d,该崩塌堆积体已出现了顺坡向滑移的迹象。

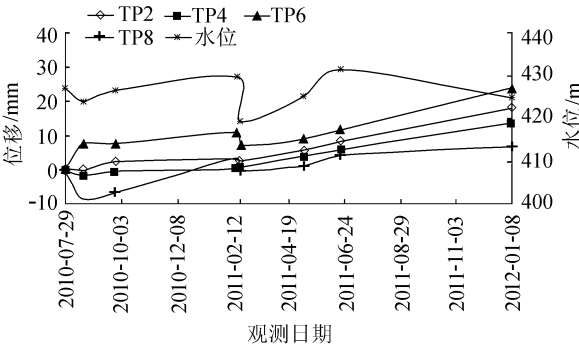


图2 典型测点的水平位移观测结果

目前,该水电站即将下闸蓄水,有必要根据现有

监测资料评价蓄水过程中坍塌堆积体的稳定性并评估边坡失稳的变形阈值。

3 强度和变形参数反演

首先,根据表面位移观测点布置,沿左岸截取了24个剖面,共计130多m山体建立了三维有限元模型,形成8303个单元和9360个结点,如图3所示。根据连续电导率试验结果,模型中覆盖层与基岩接触面的倾角取为22°。模型的边界条件为:左、右两侧面顺河向(即图中x方向)约束;前、后两侧面横河向(即图中y方向)约束;底面竖直向(即图中z方向)约束。

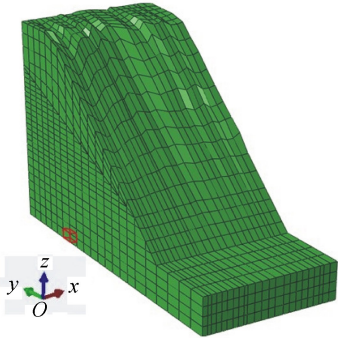


图3 坍塌堆积体的三维有限元模型

反演分析时,基岩按线弹性材料处理,弹性模量 $E=5.0\text{ GPa}$;泊松比 $\nu=0.25$ 。覆盖层材料本构模型选用Duncan $E-B$ 模型,其切线弹模 E_t 和体积模量 B_t 公式分别为^[4]

$$\begin{cases} E_t = (1 - R_f S)^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \\ B_t = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_a 为大气压力; R_f, K, K_b, n, m 为模型参数; S 为应力水平,即

$$S = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2(c \cos\varphi + \sigma_3 \sin\varphi)} \quad (2)$$

式中: c 和 φ 是强度参数。

为计算水位上升过程中坍塌堆积体的位移值,采用下述经验公式计算湿化过程中的应变势,然后将其转化成结点力施加于坍塌堆积体边坡,从而得到湿化变形:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rw} = c_w \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{m_1} \\ \gamma_w = d_w \left(\frac{S}{1 - S} \right)^{m_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_w, d_w 和 m_1, m_2 为湿化参数。

该反演问题共涉及7个Duncan模型参数和4个湿化参数,若基于有限元的监测资料全部反演,

得到可靠解的难度极大,故此处参考以往散粒体材料室内试验资料,首先确定取值范围较窄的参数,然后反演坍塌堆积体的其他参数。坍塌堆积体的 Duncan 模型中已定参数 $n = 0.25, m = 0.20, R_f = 0.70, \gamma = 20.4 \text{ kN/m}^3, \gamma_s = 22.6 \text{ kN/m}^3$; 待定参数为 K, K_b, c, φ 。坍塌堆积体的湿化参数中已定参数为 $m_1 = 0.60, m_2 = 0.60$; 待定参数为 c_w, d_w 。

运用表 1 中的监测数据,采用复合形法对模型待定参数进行了反演,由于 450 m 高程处的 4 个测点 TP2, TP4, TP6 和 TP8 受水位变动影响更加明显,故反演时主要依据这 4 个测点的数据。表 2 为反演分析结果,表 3 为库水位上升过程计算结果与观测数据之间的差异。从表 2 和表 3 可以看出,基于反演参数得到的有限元计算值与实测值大多吻合良好,表明表 2 中参数可以较好地反映坍塌堆积体的力学性质。图 4 为 1 个典型剖面在库水位从当前水位 425.0 m 上升至正常蓄水位 434.5 m 过程中的顺河向位移等值线分布。坍塌堆积体在水位上升过程中受到浮力的作用从而具有向山体位移的趋势,湿化作用则使其有向河床位移的趋势,坍塌堆积体表面上任意点的最终位移方向取决于 2 种趋势的叠加效果。由图 4 可以看出,水位变动区以上坍塌堆积体水平位移指向河流,这与表 1 所有测点在水位上升过程中向河流位移的观测结果是吻合的。此外,图 4 中越接近水位变动区,顺河向位移值越大,即受水位变动的影响越大,故水位上升过程中加强 450 m 高程附近 4 个测点的观测工作十分重要。

表 2 反演分析得到的力学参数

K	K_b	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$c_w/\%$	$d_w/\%$
605.0	497.5	40.0	37.0	0.025	0.15

表 3 有限元计算值与实测值对比 mm

监测点	顺坡向位移变化量		沉降量	
	实测值	计算值	实测值	计算值
TP2	5.4	5.1	-4.8	-3.7
TP4	5.1	4.8	-3.0	-0.6
TP6	4.5	4.4	-2.1	-2.0
TP8	4.4	5.0	-0.3	-0.4

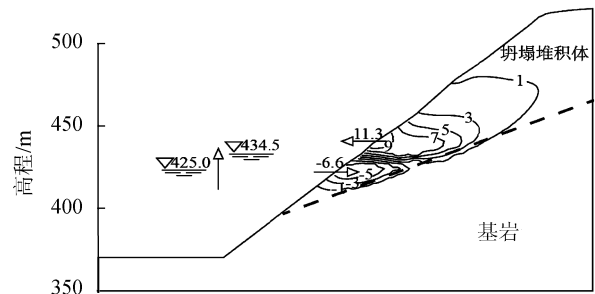


图 4 III—III 剖面顺河向位移分布 (单位:m)

4 边坡失稳的变形阈值

运用 Morgenstern-Price 法^[5]和反演得到的强度参数对坍塌堆积体边坡进行了稳定分析,图 5 是正常蓄水位 434.5 m 时的最危险滑弧范围,安全系数为 $F_s = 1.22$,比水利水电工程边坡设计规范 SL 386—2007^[6]允许的 1.15 ~ 1.20 略大。表 4 为其余工况的安全系数及规范允许值。从表 4 可以看出,水位从校核洪水位 436.5 m 骤降时安全系数降低至 1.07,低于规范允许的最小值 1.10,故进入汛期后应提前降低库水位,尽量避免库水位提高至校核洪水位。

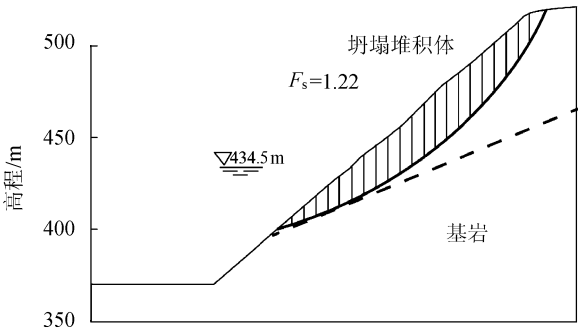


图 5 III—III 剖面正常蓄水位时的最危险滑弧 (单位:m)

表 4 不同工况下 III—III 剖面的安全系数

计算工况		F_s	$[F_s]$
正常 运行工况	正常蓄水位 434.5 m	1.22	1.20 ~ 1.15
	大坝竣工无水	1.25	1.15 ~ 1.10
非正常 运行工况	校核洪水位 436.5 m 骤降	1.07	
	正常蓄水位 434.5 m+ 地震 ($a_h = 0.05g$)	1.16	1.10 ~ 1.05

根据表 4 中的安全系数,可以计算出各工况达到极限平衡状态时的强度参数,如水库正常蓄水位时安全系数为 1.22,故临界状态对应的强度参数为

$$c_c = \frac{c}{F_s} = 32.8 \text{ kPa}$$

$$\varphi_c = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) = 31.7^\circ$$

运用达到临界状态的强度参数,重新对坍塌堆积体边坡正常蓄水位蓄水期和库水位从校核洪水位降落期间产生的位移进行了计算,并将该值作为边坡达到极限状态时的位移阈值,见表 5。

表 5 蓄水和库水降落并达到临界状态时的位移

蓄水并达到临界 状态时的位移/mm				库水降落并达到临界 状态时的位移/mm			
TP2	TP4	TP6	TP8	TP2	TP4	TP6	TP8
11.6	10.3	12.7	15.4	25.4	25.0	27.1	16.5

对比表 5 和表 3 可以发现,在强度不衰减的情况下,各剖面 450 m 高程附近测点的水平位移值均在 10.0 mm 以下;强度衰减后,各剖面 450 m 高程附近测点的水平位移值均超过 10.0 mm,故建议将 450 m

高程附近测点水平位移 10 mm 作为蓄水过程中坍塌堆积体边坡达到极限平衡状态时的水平位移阈值。同理,库水位降落过程中,除 TP8 测点水平位移较小外,其余测点位移普遍达到或超过 25.0 mm,故将以 450 m 高程附近测点水平位移 25.0 mm 作为库水位消落过程中坍塌堆积体边坡达到极限平衡状态时的水平位移阈值。在水位上升或消落过程中,一旦这些测点位移接近或超过了上述位移阈值,即表明坍塌堆积体已经接近或达到临界状态,应立即加强监测频次,必要时采取一定的工程措施,确保坍塌堆积体稳定。

5 结 语

坍塌堆积体的稳定问题是许多水利水电工程中难以避开的工程地质问题,因其特殊的物质组成和赋存环境,开展室内和现场试验难度较大,从而给强度和变形参数的确定带来极大的困难。水电工程建设周期较长,在建设期内或试验性蓄水阶段对坍塌堆积体变形开展连续监测,对于了解其力学性质和稳定状态具有重要的意义。

本文以西部某水电站左岸坍塌堆积体的变形监测资料为基础,开展了大量的资料分析和反演计算研究,得到了堆积体的强度和变形参数以及湿化参数,预测了蓄水过程中边坡的变形趋势并计算了正常和非常运行工况下的安全系数。计算结果表明,坍塌堆积体在竣工期和正常蓄水位以及地震等工况下安全系数均满足规范要求;但在校核洪水位骤降时,安全系数将降低至规范允许值以下,故应加强汛

(上接第 68 页)

3 结 语

本方法采用了技术领先的高精度、大功率的激光发生器和高频率、高分辨率的数字摄像机,应用先进的数字图像处理技术及三维数字仿真实景重现技术,技术优势明显,为泥沙实验研究提供了高效、精确、先进的测量平台,为推移质规律的研究提供了重要的技术手段。

参考文献:

[1] 何娟,陈立,鲍倩,等. 水库下游近坝段卵石推移质输沙率的研究[J]. 泥沙研究,2008(4):69-73.
[2] 彭润泽,常德礼,张振秋,等. 用水槽模拟试验求卵石河床推移质输沙率[J]. 泥沙研究,1984(3):32-38.
[3] 段志科,彭润泽,许德风,等. 非均匀卵石推移质分组输沙率水槽试验资料初步分析[J]. 泥沙研究,1990(3):

期管理,避免出现此类工作条件。
笔者以蓄水期和库水位降落期安全系数为基础,计算了坍塌堆积体达到临界状态时的强度参数,并计算了上述工况下边坡的位移。根据计算结果建议将 450 m 高程附近测点水平位移值 10 mm 作为蓄水过程中坍塌堆积体边坡达到极限平衡状态时的水平位移阈值;将 450 m 高程附近测点水平位移 25.0 mm 作为库水位消落过程中坍塌堆积体边坡达到极限平衡状态时的水平位移阈值。一旦这些测点位移接近或超过了上述位移阈值,应立即加强监测频次,必要时采取稳控措施,确保边坡稳定。

参考文献:

[1] 贺可强,阳吉宝,王思敬. 堆积层滑坡位移动力学理论及其应用:三峡库区典型堆积层滑坡例析[M]. 北京:科学出版社,2007.
[2] 李树武,聂德新,刘惠军. 大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(Sup2):4126-4131.
[3] 董倩,朱正伟,刘东燕. 崩塌堆积体的渐进破坏及稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报,2010,42(3):358-364.
[4] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
[5] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:水利水电出版社. 2003.
[6] SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S].

(收稿日期:2012-08-01 编辑:胡新宇)

56-64.

[4] 张立科. 数字图像处理典型算法及实现[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
[5] 张乐. 基于 Visual C++的沙波测量成像系统[J]. 自动化与仪器仪表,2010(4):131-133.

(收稿日期:2012-08-03 编辑:熊水斌)

