

岩溶地貌某尾矿坝灾害评价与安全监测阈值设定

贺跃光¹, 杨小礼², 何继善³

- (1. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙, 410076;
2. 中南大学 土木建筑工程学院, 湖南 长沙, 410075;
3. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 影响岩溶地貌某尾矿坝坝体稳定问题最突出的因素是: 北西向、北东向构造的“棋盘格式”; 岩体整体性差、节理化; 岩溶、洞隙、地表—地下“阶梯”水流运动模式; 洪水和地震影响。在坝体损伤潜在破坏模式分析基础上, 认为极限平衡法是坝体稳定性分析有效实用的方法。通过对坝体岩土力学参数弱化的工程处理, 以及天然地震影响和坝体孔隙压力分析处理, 获得了各坝体抗滑稳定最小安全系数及稳定安全评价结果; 同时, 分析坝体安全监测阈值设定应考虑的因素是: 安全监测的测量中误差; 变形趋势线的形状; 潜在滑动、破坏的模式, 并确定目前坝体安全监测阈值以每季度坝顶下沉量 10 mm 为宜。

关键词: 岩溶地貌; 尾矿坝; 灾害评价; 监测阈值

中图分类号: TU926.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2007)04-0778-06

Karst landform tailings dam disaster appraisal and setting of safety monitor threshold

HE Yue-guang¹, YANG Xiao-li², HE Ji-shan³

- (1. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
3. School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The karst landform tailings dam disaster appraisal and the safe monitor are important for reducing the risk and the accident. The most prominent factors of influencing the stability of Karst landform in some tailing dams are NW-Trending and NE-Trending Structure's "tabular pattern", bad rock mass globality, highly-jointed, karst, miarolitic, the earth's surface -underground "ladders" fluent movement pattern; the effect of the flood and the earthquake. After the analysis of the dam body damage latent destruction pattern, it is thought that the limit balance method is an effective, practical method on the dam body stability analysis. Through project processing which is applied to the dam body rock and soil mechanics parameter, the natural earthquake influence and the dam body pore pressure analysis, the result of the dam body stability appraisal can be obtained. Simultaneously the hypothesis of the dam body safe monitor threshold should include the survey error, the shape of distortion trend line, the latent slide and destruction pattern, and the present monitor threshold is that the subsidence of dams is 10 mm per season.

Key words: karst landform; tailings dam; disaster appraisal; monitor threshold

尾矿坝的安全、稳定与坝址岩基的水文、工程地质条件、特征, 岩基的稳定程度、洪水、地震、筑坝

材料、设计思想、施工质量、排水设施、库岸边坡环保等一系列影响因素有关, 因此, 尾矿坝工程是一项

收稿日期: 2007-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408020)

作者简介: 贺跃光(1966-), 男, 湖南桃江人, 博士, 教授, 从事灾害监测与防治方面的教学与科研工作

通讯作者: 贺跃光, 男, 教授; 电话: 0731-2309592(O); E-mail: hyg@csust.edu.cn

非常复杂的专家系统工程^[1-2]。

地区降水主要以地下水流失, 导致岩溶非常发育, 地下水流通道发达。库区堆积矿泥后, 库区承载增加, 应力重分布, 库区内隐蔽的溶洞若发生坍塌, 可影响附近库岸边坡稳定。此外, 库区(包括坝址)勘察结果表明: 众多的岩溶形态地质构造特征是影响坝址岩基稳定的首要因素, 棋盘式地质构造使岩体切割, 整体性差, 多为块状和碎裂状, 这也是影响坝址岩基稳定的重要因素。在地下溶洞水、溶隙水的作用下, 坝基可能产生不均匀沉降。而地下水对边坡的影响也很敏感, 这种敏感的准确程度主要依赖于对地下水试验规模、类别和勘查程度^[3]。

1 坝体损伤潜在破坏模式及计算公式

某岩溶地貌尾矿坝(见图 1)分为 A 库和 B 库, 影响其坝体的坝基地层岩性均为坚硬的灰岩、白云岩, 岩块的抗压强度较高, 状况良好。其中, B 库坝址灰岩产状为 $35^{\circ} \angle 30^{\circ}$, 对西端坝肩的稳定有一定影响; A 库区岩体节理裂隙密集, 其线节理率为 17 条/m, 主要优势节理走向 78° , 倾向 NE, 倾角 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 与其他缓倾斜的节理裂隙组合, 可能产生小规模坍塌及楔形体破坏。坝址的断裂构造都较发育, 棋盘格式构造明显; 特别是岩溶、岩洞、岩隙、石芽众多, 地下水以岩溶、岩隙赋存于灰岩之中, 地下水的渗漏也以岩溶、岩洞、岩隙为导水渠道。而这种大面积、普遍呈典型岩溶形态地质特征的地基稳定问题, 主要以工程勘察和工程处理来具体解决, 根据岩土力学计算结果来判断难以得出可信的结果。

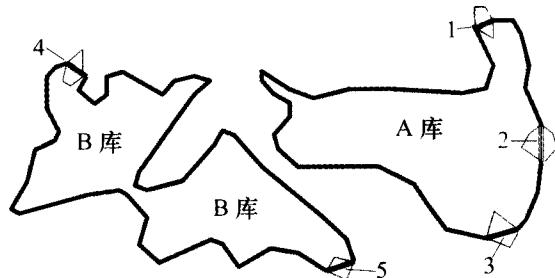
构筑物的损伤破坏主要表现为剪切破坏。除不均

匀沉降产生的竖向剪切破坏之外, 滑坡是剪切破坏的主要形式, 而滑坡推力产生的力矩, 则来自水平侧压相对增大到坝体破坏的临界值, 即极限值。因此, 极限平衡法是滑坡稳定性分析的一种有效方法^[4-5]。

圆弧形破坏模式的定弧方法为双切线定弧法, 其原理如图 2 所示。在自重作用下, 潜在滑坡体上切线倾角应在 $(45^{\circ} + \phi/2)$ 附近, 下缘切线应在 $(45^{\circ} - \phi/2)$ 附近, 这符合各向同性均质体的剪切破坏角原理。中间部分是两相交切线的圆弧段。每隔一定间距, 用计算机可画出许多个圆弧形滑面, 每画 1 个, 即进行稳定性计算, 最后选出安全系数 K 最小者。对于坝体, 间距 2~3 m。如图 2 所示, 上切线 A_i 要与下切线 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ 组合, 下切线 B_i 要与上切线 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 组合, 从中选出安全系数最小者。

采用上述方法可在自重作用下搜索滑动面。当有外力作用(如库容液压、地震力和滑坡体内地下水等)时, 滑面的上切线倾角小于 $(45^{\circ} + \phi/2)$, 下切线倾角小于 $(45^{\circ} - \phi/2)$, 所得圆弧滑动面变缓。

采用该方法分析岩土体滑坡时, 上、下切线均可



1, 4—碾压堆石坝; 2, 3, 5—浆砌坝

图 1 某岩溶地貌尾矿库示意图

Fig.1 Diagram of one karst landform tailing dam

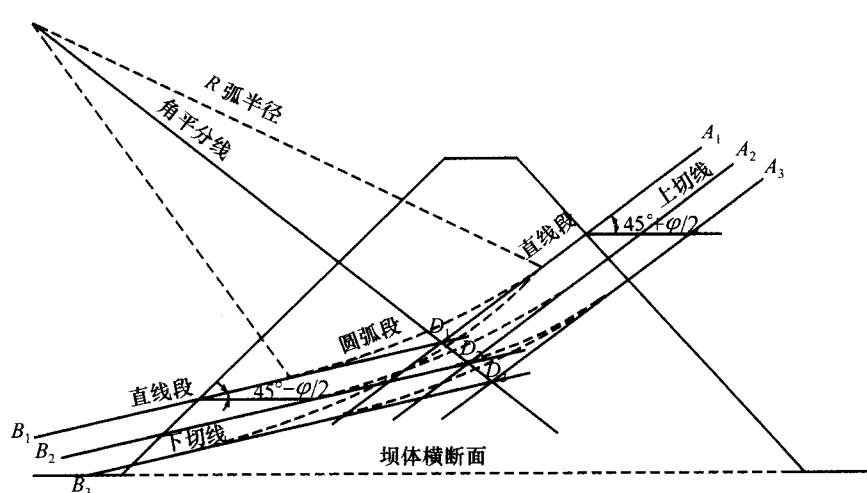


图 2 双切线定弧法原理

Fig.2 Principle of double tangent determination curve method

依顺坡向控制弱面或优势节理面产状作出, 控制弱面及优势节理面不连续贯通的中间部分, 以圆弧连接。

瑞典条分法的一般公式如下^[6]:

$$K = \frac{\sum c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin \alpha_i - U_i) f_i}{\sum (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i)} \quad (1)$$

潘家铮改进后的瑞典条分法^[7]公式如下:

$$K = \frac{\sum \{ f[(W_1 + W_2'') \cos \alpha - W_2' \sin \alpha \tan \alpha - \bar{h} \Delta h \sin \alpha] + cl \}}{\sum [(W_1 + W_2) \sin \alpha_i + \bar{h} \Delta h \cos \alpha_i]} \quad (2)$$

在潘家铮改进后的瑞典条分法公式基础上, 扩展为适合于尾矿大坝的公式:

$$K = \sum \{ f[(W_1 + W_3'' + W_3'') \cos \alpha_i - s_2 \sin \alpha_i \tan \alpha_i - \bar{h} \Delta h \sin \alpha_i - W_3' \sin \alpha_i \tan \alpha_i - k_3 \gamma_3' \bar{h}_3 \Delta h_3 \sin \alpha_i - Q_i \sin \alpha_i] + cl \} + \sum [(W_1 + W_2' + W_3') \sin \alpha_i + \bar{h} \Delta h \cos \alpha_i + h_3 \gamma_3 \bar{h}_3 \Delta h_3 \cos \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i] \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} W_1 &= s_1 \gamma_1; \quad W_2'' = s_2 \gamma_2''; \quad W_3'' = s_3 \gamma_3''; \\ W_2' &= s_2 r_2'; \quad W_3' = s_3 r_3'; \quad \bar{h} = (h_{\text{上}} + h_{\text{下}})/2; \\ \Delta h &= (h_{\text{上}} + h_{\text{下}}); \quad \bar{h}_3 = (h_{3\text{上}} + h_{3\text{下}})/2; \\ \Delta h_3 &= (h_{3\text{上}} - h_{3\text{下}}); \quad k_3 = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta}; \\ Q &= K_H (W_1 + W_2' + W_3') \end{aligned}$$

式中: K 为潜在滑体安全系数; f 为滑面上内摩擦因数, $f = \tan \varphi$; φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); c 为滑面上内聚力, t/m^2 ; l 为分条滑面的长度, m ; W_1 为滑体分条内不含水部分岩土物料质量, t ; s_1 为不含水部分体积, m^3 ; γ_1 为不含水部分容重, t/m^3 ; W_2'' 为滑体分条内水下部分材料浮重, t ; s_2 为水下部分体积, m^3 ; r_2'' 为水下材料浮容重, t/m^3 ; W_3'' 为滑体分条内矿泥浮重, t ; s_3 为水下矿泥体积, m^3 ; r_3'' 为该水下矿泥浮容重, t/m^3 ; α_i 为滑体第 i 分条底面的滑动角, ($^{\circ}$); 容重取 $1 \text{ t}/\text{m}^3$; W_2' 为滑体分条内水下部分饱和重, t ; r_2' 为饱和容重, t/m^3 ; W_3' 为滑体分条上部矿泥饱和容重, t ; s_3 为滑体分条上部矿泥体积, m^3 ; r_3' 为矿泥饱和容重, t/m^3 ; \bar{h} 为滑体分条两侧水体高度平均值, m ; Δh 为滑体分条两侧水位高度差, m (若 $h_{\text{上}} > h_{\text{下}}$, 则 Δh 为正, 若 $h_{\text{上}} < h_{\text{下}}$, 则 Δh 为负); \bar{h}_3 为滑体分条两侧矿泥液面高度平均值, m ; Δh_3 为滑体分条两侧矿泥高度差, m ; k_3 为矿泥水平侧压系数; θ 为矿泥内摩擦角, ($^{\circ}$); Q 为地震水平影响力, t/m ; K_H 为地震水平面影响系数。

2 岩土力学参数弱化的工程处理

岩石、岩体、岩体工程、地质体四者之间在质的方面显著不同, 因此, 对岩土工程勘察试验所获取的岩石力学参数, 须经过工程研究处理才能应用于岩体工程的定量分析计算^[8-10]。

研究采用经验折减法, 将岩石力学参数弱化为岩体力学参数, 此外, 尚需考虑工程区的最显著“岩溶”地质特征, 然后, 考虑岩体质量特征(或节理化特征), 最后进行软化处理, 即考虑水对岩土力学指标的降低程度。本区水对大坝稳定的影响有 4 种方式:

- a. 水对坝体及岩基力学参数的软化;
- b. 库容液体(水化而成)对大坝的压力;
- c. 坝体内地下水形成的孔隙压力;
- d. 坝体地下水使取用的坝体水下部分材料容重参数发生变化。

研究表明, 岩体工程的不稳定主要表现为剪力破坏, 无论是构造应力、地震力、重力、水力, 对岩体工程的影响多为剪力。而岩体的抗剪强度的表征函数 $\tau = \delta \cdot \tan \varphi + C$ 中的内摩擦角 φ , 与规范的抗剪试验获得的岩石摩擦角 φ_k 相比二者相差甚小, 一般相差 2° ~ 3° , 而凝聚力 C 则与岩体的凝聚力相差甚大, 一般相差数倍甚至几十倍。因此, 岩石力学参数弱化的工程处理, 主要是对凝聚力 C 进行处理。

将岩石凝聚力 C_k 弱化为岩体凝聚力 C_m , 按经验折减法, 考虑其折减系数为 0.05。岩溶系数考虑岩体深度, 即考虑岩体风化程度的工程地质按 5 级分级(由浅到深分为剧风化、强风化、弱风化、微风化、新鲜 5 级), 取深度 5 m 以内为剧、强风化, 取 0.1~0.5; 10 m 以内取 0.7; 10~12 m 深处取 0.8; 12~20 m 深处取 0.85; 20~30 m 深处取 0.9; 深度大于 30 m 时取 0.95。岩体质量系数取各工程体各自岩性的岩性指标为 0.44~0.68。各岩石的凝聚力 C_k 的弱化系数为 $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$, 其中经验折减系数 $K_1 = 0.05$; 岩溶折减系数 $K_2 = 0.7$ ~0.95; 岩体质量系数 $K_3 = 0.44$ ~0.68; 软化系数 $K_4 = 0.85$ ~0.9。坝基主要岩体抗剪强度弱化成果如表 1 所示。

3 天然地震影响及坝体孔隙压力

大坝安全地震设防设计中确定为 7 度地震设防。

表1 岩体抗剪强度弱化成果

Table 1 Weakening effect of rock mass shear strength parameters

岩性	岩石		岩体	
	$\phi_k/^\circ$	C_k/MPa	$\phi_m/^\circ$	C_m/MPa
大塘阶灰岩	38	12.0	35.0	0.197
岩关阶灰岩	31	15.0	28.5	0.220
构造角砾岩	32	10.0	28.0	0.152
构造碎裂岩	34	8.0	30.0	0.138
大埔组白云岩	35	12.0	31.0	0.225
C ₁ y 灰岩⑦	36	15.5	33.0	0.314
构造角砾岩⑧	35	11.0	31.0	0.164
构造碎裂岩⑨	36	12.5	32.0	0.193

分析地震影响时, 将岩基类别、坝体类别(刚体、散体), 3种结构体体系综合考虑, 得坝体地震水平向影响系数 $\alpha_H=0.1$, 坚向运动分量平均为水平分量的50%, 即 $\alpha_V=0.5\alpha_H=0.55$ 。

由于尾矿坝的存在年限以数百年计, 在此期间可能会经受不同程度的地震, 设计、施工和稳定性分析时应对7度地震的大坝安全进行综合考虑, 但当发生7度及低于7度地震时, 并不能保证大坝不出现微裂隙。对于浆砌石坝, 若心墙或上游坡面产生裂隙, 则会透水; 对于碾压堆石坝, 低烈度地震的振动会使坝体内部物料位置重新调整, 整体重心下移, 堆石坝的小粒径物料将下移明显。坝体地下水位抬高, 甚至造成局部“空壳”, 上、下游浆砌坡面裂缝透水等现象^[11-13]。

基于上述考虑, 为了使大坝安全稳定, 需要偏安全考虑坝体内地下水的孔隙压力。

在缺少坝体内钻孔水压观测资料的情况下, 对于新坝, 当坝基全封闭不透水时, 坝体内应有施工期的残留水(静水); 当坝基渗水时, 坝体内应无水。考虑到大坝的长远安全, 对于这2种条件, 都应考虑坝体内会有地下水孔隙压力存在, 坝区渗入、坝体两端山体(坝肩)渗入, 甚至岩基地下承压水浸入, 均会使坝体含水等问题。

坝体内地下水位, 在没有坝内钻孔水压观测资料和地下水渗流网络分析计算的情况下, 一般以影响半径公式:

$$r_i = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{2.25T\bar{t}}{u^*}} \quad (4)$$

和水均衡原理及二次曲线:

$$y = ax^2 + b \quad \text{或} \quad y = a\sqrt{x} + b \quad (5)$$

及其他形式的曲线方程来预计。式中: r_i 为非完整井

影响半径, m; T 为导水系数, m/d , $T=KM$; K 为渗透系数, 对于碾压堆石坝土工布, K 为 $0.50\sim 0.52 \text{ cm/d}$, 粒度低于 $0.75 \mu\text{m}$ 的矿泥部分堵塞后取 $K=0.05 \text{ cm/d}$, 与浆砌坝一样, 处于相对隔水状态; M 为含水层厚度, m, 本次取坝基平面至封库后洪水水面高度; u^* 为贮水系数, 对于碾压堆石坝, 取 $u^*=0.36$, 对于浆砌坝, 取 $u^*=0.007$; \bar{t} 由下式确定:

$$\lg \bar{t} = \frac{1}{t} \lg \frac{t}{t-1} + \frac{2}{t} \lg \frac{t-1}{t-2} + \cdots + \frac{t-1}{t} \lg 2$$

式中: t 为库容封起用至废库的时间即使用年限, 这里取 500 a; x 和 y 分别为以坝体下游边缘为原点的横坐标和纵坐标; a 和 b 为待定系数, 依地下水位方程(这里采用 $y=a\sqrt{x}+b\sqrt{x}$)、边界条件和水均衡方程求出。

水均衡方程为:

$$L_1 K_1 = L_2 K_2 \quad (6)$$

式中: L_1 为坝体进水面积; K_1 为坝体进水渗透系数; L_2 为坝体出水面积; K_2 为坝体出水渗透系数。

在预计地下水位时, 分2种情况: 对浆砌坝, 考虑心墙相对隔水和顾及心墙在长期服务中受损透水分别预计; 对块石堆, 考虑坝基不透水和透水2种情况分别计算, 结果如表2所示。

4 安全监测阈值的设定

尾矿坝的安全监测、预报是尾矿坝生产管理过程中重要的工作。准确的安全监测阈值的确定必须建立在高精度监测资料获取以及监测目的分析的基础上, 且可以用最大变形值和变形速率作为安全性判据。安全监测阈值的设定与监测对象的变形性质及所采用的监测方法有关, 尾矿坝监测安全阈值设定取决于以下几个因素^[14-15]:

a. 安全监测的测量中误差。一般按观测仪器、观测方法所确定的中误差的2~3倍设定。

b. 变形趋势线的形状。土石坝的变形分为竖直方向的变位(沉降), 上、下游方向的变位和沿坝轴线方向的变位3个分量。

c. 潜在滑动、破坏的模式。坝体的不同结构形式, 不同潜在滑动、破坏的模式, 其安全监测阈值存在很大差异。

据此, 准确的安全监测阈值的确定必须建立在高精度监测资料获取, 以及对前述3个方面因素进行分析的基础上, 且可以用最大变形值和变形速率二者作为安全性判据。

表2 坝体抗滑稳定最小安全系数及稳定安全评价

Table 2 Minimum safety factor and safety evaluation of stability of dams against slide

潜在滑面	常水位、无地震	常水位、7度地震	洪水位、无地震	洪水位、7度地震
A 库 1 号碾压堆石坝 2 号、6 号、8 号潜在滑面	$K_8=1.543\ 1$ 很稳定	$K_2=1.266\ 6$ 很稳定	$K_6=1.363\ 2$ 很稳定	$K_6=1.057\ 3$ 较稳定
	很安全	很安全	很安全	较安全
A 库 2 号浆砌块石坝 2 号、3 号潜在滑面	$K_2=1.303\ 7$ (心墙透水) 较稳定	$K_3=1.086\ 3$ 较稳定	$K_3=1.234\ 3$ 较稳定	$K_3=1.030\ 5$ 稳定性较差
	较安全	较安全	较安全	安全性较差
A 库 3 号浆砌块石坝 2 号潜在滑面	$K_2=1.451\ 0$ 稳定	$K_2=1.233\ 6$ 稳定	$K_2=1.389\ 5$ 很稳定	$K_2=1.180\ 1$ 很稳定
	安全	安全	很安全	很安全
B 库 1 号碾压堆石坝 6 号、15 号、17 号 潜在滑面	$K_{15}=1.352\ 6$ 较稳定	$K_{15}=1.074\ 9$ 较稳定	$K_6=1.376\ 9$ 很稳定	$K_{17}=1.033\ 9$ 稳定性较差
	较安全	较安全	很安全	安全性较差
B 库 2 号浆砌块石坝 5 号潜在滑面	$K_5=1.405\ 7$ 稳定	$K_5=1.191\ 9$ 稳定	$K_5=1.274\ 8$ 稳定	$K_5=1.086\ 5$ 较稳定
	安全	安全	安全	较安全
	$K_5=1.345\ 1$ (心墙透水)较稳定	$K_5=1.134\ 7$ 较稳定	$K_5=1.174\ 9$ 较稳定	$K_5=1.000\ 6$ 稳定性较差
	较安全	较安全	较安全	安全性较差

从尾矿坝安全考虑设定监测安全监测阈值, 坝体、坝基水平和垂直位移为(中误差 ± 1.0) mm的10~20倍, 反求监测限差, 并根据实际情况, 以每监测周期内10~20 mm为宜。然而, 随着尾矿坝的封库, 碾压堆石坝变形监测垂直位移安全阈值的设定应当随时间的推移逐渐减小, 目前取低值, 即10 mm。对浆砌坝, 由于其本身及坝基的压实量微小, 因此, 仅从监测限差的10倍考虑设定安全阈值, 取垂直位移为(中误差 ± 1.0) mm的10倍, 即以每季度下沉量10 mm作为垂直位移安全阈值。并据目前观测精度和坝体运行实际情况, 考虑观测量之间的联系, 各坝体的水平位移安全阈值分别暂取与垂直位移安全阈值对等值。

安全阈值应当根据高精度监测结果分析确定, 同时, 随着时间的推移, 其值应相应调整降低, 即可为变动值。因为土石坝的沉降变形初期量大, 曲线较陡, 随着时间的推移逐渐减少, 并趋于平缓, 有逐渐衰减收敛的趋势, 特别是在蓄水后长期监控期间, 这种趋势总体上非常明显。这种特性为建立变形方程提供了方便, 并据此可求出变形的监控指标。在变形曲线拟合过程中, 还可对式中各方程进行试算, 选取其中均方差较小者作为综合方程, 并由此方程求出坝体沉降的极限值并进行安全监控^[16~17]。

5 结 论

a. 获得了A库2号、3号和B库2号浆砌块石坝, 在洪水期库液标高按设计调控洪水位, 并有7度地震同时作用的特殊运行条件下, 从坝体应力、坝基强度、抗倾稳定3个方面进行分析, 得出坝体都是安全或较安全的。

b. 针对碾压堆石坝和浆砌块石坝, A库1号碾压堆石坝需在坝体附近采备石块, 作为异常情况下的应急措施; 在有条件的情况下, 将下游坡面浆砌护坡增厚, 提供凝聚力; 由于A库2号浆砌块石坝本身兼有矿山运输通道功能, 承受动载, 下游又有村庄, 可在坝体下游部位加建扶壁。

c. 严格控制、定期检测库容液面标高不能超过设计标高; 定期检测, 保持各排水、泄洪工程系统的正常通畅运行状态, 发现阻塞、损伤情况及时报告, 及时检修、疏通; 降低坝体地下水孔隙压力, 通过降低库容液面标高, 到库容液面标高在设计标高之下时, 或疏通坝体下游坡面的泄水孔, 必要时, 要用机械方法加深(加长)下游坡面的泄水孔; 加强水文工程地质观测巡视, 特别要注意前面强调的本地区地下水运动模式, 可能使坝体承受承压水。还应预防库岸边坡失稳造成库液涌浪对坝体的冲击和漫坝。

d. 尾矿坝安全评价与监测是确保生产运营安全, 实现信息化施工的前提。正确的尾矿坝安全监测阈值设定依赖于监测的精度、坝体变形趋势线的形状、潜在滑动与破坏的模式, 因此, 必须确定尾矿坝安全监测测点的埋设、监测方法与要求, 建立监测制度, 确定最大变形值和变形速率, 以及在此基础上建立变形分析和监测管理信息系统。

参考文献:

- [1] 张 卫, 覃小群, 易连兴. 滇黔桂湘岩溶水资源开发利用[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2004.
- ZHANG Wei, QIN Xiao-qun, YI Lian-xing. Karst water natural resources develop and make use of Yunnan, Guizhou, Guangxi, Hunan[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2004.
- [2] 何继善. 防灾减灾的理论与实践[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2001.
- HE Ji-shan. Theory and practice of reduction and prevention of disasters[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2001.
- [3] 贺跃光. 岩溶地貌某尾矿坝灾害评价与监测预报体系研究[R]. 长沙: 中南大学信息物理工程学院, 2005.
- HE Yue-guang. Hazards evaluation and monitoring prediction system research of one tailing dam in the Karst geomorphology area[R]. Changsha: School of Info-physics Geomatics Engineering, Central South University, 2005.
- [4] 郦能惠. 土石坝安全监测分析评价预报系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- LI Neng-hui. Analysis evaluation and prediction system for earth-rockfill dam safety monitoring[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Power Press, 2003.
- [5] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Ertan Water and Electricity Develop Co Ltd. Rock soil project security monitoring manual[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Power Press, 1999.
- [6] 张国祥, 刘宝琛. 潜在滑面理论及其在边坡分析中的应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- ZHANG Guo-xiang, LIU Bao-chen. Potentially sliding surface theory and application in the slope analysis[M]. Changsha: Central South University Press, 2003.
- [7] 潘家铮. 建筑物抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- PAN Jia-zheng. Stability and slope analysis of building[M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980.
- [8] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996.
- LIN Zong-yuan. Geotechnical engineering surveys and design manual[M]. Shenyang: Liaoning Technology and Science Press, 1996.
- [9] 谢谋文, 蔡美峰. 信息边坡工程学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- XIE Mo-wen, CAI Mei-feng. Theory and practice of information slope engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [10] 陈绍裘, 陈灿华. 电阻率测深探测红层中的地下水[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 1998, 29(3): 212-215.
- CHEN Shao-qi, CHEN Can-hua. Using resistivity sounding method to explore underground water in redbeds[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1998, 29(3): 212-215.
- [11] 张世文, 王红艳. 影响尾矿坝安全稳定性因素分析及对策[J]. 矿业工程, 2004, 2(2): 61-63.
- ZHANG Shi-wen, WANG Hong-yan. Analysis of factors influencing stability of tailing dam and measures for improving dams stability[J]. Mining Engineering, 2004, 2(2): 61-63.
- [12] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- WU Zhong-ru. Security monitoring theory and application of hydraulic structure[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1990.
- [13] 张锦瑞, 王伟之, 李富平, 等. 金属矿山尾矿综合利用与资源化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- ZHANG Jin-rui, WANG Wei-zhi, LI Fu-ping, et al. Metal mine tails comprehensive utilization and reclamation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [14] 朱建军, 贺跃光, 曾卓乔. 变形测量的理论与方法[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
- ZHU Jian-jun, HE Yue-guang, ZENG Zuo-qiao. Theory and method of deformation measurement[M]. Changsha: Central South University Press, 2004.
- [15] 蒋卫东, 李夕兵, 吴大志, 等. 德兴铜矿 2 号尾矿坝的安全自动监测系统[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(1): 33-35.
- JIANG Wei-dong, LI Xi-bing, WU Da-zhi, et al. An automatic safety monitoring system for the No.2 Tailings Dam in Dexing Copper Mine[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(1): 33-35.
- [16] 陈灿华, 廖秀英, 陈绍裘. 高速公路不同地层路基中岩溶洞穴的探测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 1014-1018.
- CHEN Can-hua, LIAO Xiu-ying, CHEN Shao-qi. Explore different karst stratas of highway roadbed[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(6): 1014-1018.
- [17] 张 超, 杨春和, 孔令伟. 某铜矿尾矿砂力学特性研究和稳定性分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 858-862.
- ZHANG Chao, YANG Chun-he, KONG Ling-wei. Study on mechanical characteristics of tailing dam of a copper mine and stability analysis of tailing dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 858-862.