

基于渗流理论的尾矿坝坝体稳定性分析研究

李兆炜, 胡再强

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 尾矿坝安全现状令人堪忧, 尤其以渗流引起的坝体失稳事件屡屡出现, 为了获取尾矿坝因渗流引起失稳的相关技术参数, 对尾矿坝坝体稳定性进行了分析研究; 在总结尾矿坝溃坝原因的基础上, 分析了浸润线的影响因素并给出了计算方法, 以山东玲珑尾矿坝为例, 采用瑞典圆弧法和毕肖普法, 对尾矿坝的整体稳定性进行计算; 得到了玲珑尾矿坝相关的力学参数及计算成果, 并从设计和管理两个方面讨论了尾矿坝安全稳定的防范措施; 分析结果对于尾矿坝今后的设计和安全监测管理有重要的借鉴意义。

关键词: 渗流理论; 尾矿坝; 稳定性; 浸润线; 防范措施

中图分类号: TV649

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2010)01—0056—04

Analysis of Tailing Dam's Stability Based on Seepage Theory

LI Zhao-wei, HU Zai-qiang

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The security of tailing dams has been in an anxious situation recently. In order to get the relative technical parameters about the unstability of tailing dams caused by seepage, the impact factors of the saturation line are analyzed and a calculation method is given. Taking Linglong tailing dam in Shandong for example, Sweden circular arc method and Bishop method are adopted to calculate the overall stability of the tailing dam, and from two aspects of design and management, the preventive measures of security and stability are discussed, so as to provide the important references for the design and safety of tailing dams in the future.

Keywords: seepage theory; tailing dam; stability; saturation line; preventive measures

0 引言

尾矿坝作为矿产资源开采后由生产废弃料堆积而成的大体积坝体, 是非煤矿山企业的重大危险源之一, 其安全稳定一直是坝体稳定研究领域的重点课题。我国现有大小规模的尾矿坝6260余座, 在选取的具有代表性的2692座尾矿坝中, 经过正规设计的仅占43.9%, 定期进行过风险评估的占7.7%, 目前尚有58.7%的尾矿坝未取得安全生产许可证, 且不少未取证的尾矿坝仍在非法生产^[1]。可见, 尾矿坝的安全现状并不乐观。近两年, 尾矿坝溃坝事故已达20余起, 造成人员伤亡和有污染物下泄的事故屡屡发生, 对下游居民的生命财产安全造成严重威胁^[2]。尾矿坝溃坝的原因大致有三: 第一, 设计、评估、安全运行管理的体制机制不完善。多数的尾矿坝无正规的施工和监理队伍, 未遵循先勘察设计、后施工建设、再投产运行的设计程序; 一半以上的尾矿坝属于无证生产, 且没有健全的安全管理机制; 不同行业(如黑色、有色、化工等)的尾矿坝设计规范不完善。第二, 人为因素。对尾矿坝的溃坝损失和日常管理的认识不够, 缺乏尾矿坝运行管理和安全监管的专业人员。第三, 自然因素。如大洪水、地震等造成的尾矿坝坝坡失稳、漫顶等破坏。在我国已建成的尾矿坝中, 90%的尾矿坝均采用上游法筑坝^[3], 造

成坝体的稳定性较差, 沉积密度较低, 浸润线偏高, 渗流难以控制, 且在众多的尾矿坝溃坝案例的成因分析中, 由渗流引起的坝体坝坡失稳、渗透破坏的尾矿坝屡见不鲜。因此, 对于尾矿坝的渗流稳定进行进一步的深入研究, 有助于分析尾矿坝的溃坝事故原因, 为制定相关对策措施提供技术支持, 具有重要的实际应用价值。

1 尾矿坝的浸润线

1.1 影响浸润线的因素

浸润线是反映坝体渗流的特征线, 浸润线的位置是坝体排水性能的综合反映。在影响尾矿坝稳定的诸因素中, 浸润面位置的高低是极为重要的因素之一。由于浸润线位置的高低取决于矿渣的物理力学特性、渗透性能、排水设施的布置等要素, 在实际工程中, 为了降低浸润线位置, 降低坝体渗透压力, 提高上游式尾矿坝的动力稳定性, 对于浸润面高低的控制主要从渗透系数、干滩长度、坝体分块材料的各向异性以及排渗设施等要素进行控制。

不同坝体位置处, 筑坝材料对浸润线的影响也各有差异。一般来说, 尾矿坝筑坝材料的渗透系数在 10^{-4} cm/s左右^[4]。对初期坝而言, 渗透系数越小, 受坝体的不透水性影响, 浸润线会抬高, 易造成渗流沿坝顶逸出, 对坝体造成严重

收稿日期: 2009-08-04

修回日期: 2009-08-27

作者简介: 李兆炜(1985—), 男(汉族), 陕西澄城人, 在读硕士, 研究方向为岩土工程数值仿真分析。

破坏。对于坝体入渗区,渗透系数越大,浸润线越高。对于由不同渗透系数的矿渣填筑的尾矿坝,对浸润线的影响也有所差异。上下层渗透系数之比越大,下层阻水能力加强,浸润线就会有抬高趋势,且由上向下延伸,使得下层的阻水作用在上游发展。在尾矿坝出口区,浸润线会随渗透系数的降低而明显抬高,且随着渗透系数的逐步减小,浸润线将从下游向上游延伸。

实例证明,干滩长度越长,对下游浸润线降低的效果越明显,对坝体稳定越有利,且在坝体运行期,对干滩长度的控制可以有效地改变坝体内浸润线的高低,以保证大坝的安全。

尾矿坝坝体填筑材料的沉积由其自身的规律性,即坝体内的材料经沉积后,自上而下依次为尾中砂、尾细沙、尾粉砂、尾亚砂和尾矿泥,也因此产生了坝体填筑材料的各向异性。实例结果表明,坝体材料水平向与竖直向渗透系数越大,浸润线越高。

尾矿沙层中经常含有狭长的尾矿泥夹层的存在,造成尾矿泥上部的浸润线抬高,夹层越厚,抬高效果越明显,且由于尾矿泥的透水性差,浸润线会在尾矿泥内发生转折,夹层很长时,浸润线就会沿坝坡逸出,对坝体稳定产生不利影响。

在坝体中设置的排水设施可有效地降低浸润线的高度。如坝脚处的棱体排水、虹吸井、垂直水平联合排渗等。坝体下游的平均坡度也对浸润线有一定的影响。在坝高一定、相同的干滩长度的情况下,尾矿坝下游坡度越缓,实际渗径越长,浸润线越低。

1.2 浸润线的计算

根据《选厂尾矿设施设计规范》,结合实际的勘察资料,在合理分析各项因子对浸润线影响机理的基础上,对不同运行条件下的坝体浸润线进行计算。

首先根据尾矿坝的相关参数确定坝体的等级,在确定化引滩长和化引库水位之后,就可以得到浸润线方程。以坝基不透水、无排渗措施的均质尾矿坝为例,其浸润线方程为^[5]:

$$y = (h_i^2 - \frac{h_i^2 - a^2}{L - ma} x)^{1/2} \tag{1}$$

式中: h_i 为化引库水位,且 $h_i^2 = H + (L_c - 3.3L_c^{0.48})/m_0 - Z$, 其中 H 为实际库水位; L_c 为实际滩长,即干滩长; m 为下游坡度系数; m_0 为沉积滩坡度系数; L 为化引滩长; a 为出逸点高度,且 $a = L/m - (L^2/m^2 - h_i^2)^{1/2}$ 。

选取不同工况下的水位,如正常运行水位、校核洪水位等,根据上式(1)即可推求尾矿坝的浸润线,将求得的浸润线与勘察观测的实际浸润线进行对比分析,来验证所求浸润线的合理性。如果二者之间能有较好的吻合,说明影响浸润线的各参数选择合理,否则,应该结合各项因子对浸润线的影响关系,调整参数或者设置排水措施,使得二者能够较好的吻合。

2 尾矿坝稳定性分析

坝体的稳定性分析是确定坝剖面 and 评价坝体安全的主

要依据,其分析方法主要是建立在极限平衡理论基础之上的,常见的方法有瑞典圆弧法、毕肖普法和滑楔法^[6]。根据尾矿坝设计规范,对于三级以上的尾矿坝需进行渗流、抗滑稳定性的计算,而对于三级及三级以下的只需进行抗滑稳定性计算。下面以山东招远玲珑尾矿坝为例,对尾矿坝的稳定性进行分析。

2.1 工程概况

玲珑尾矿坝位于山东招远市和龙口市交界处,初期坝坝型为透水堆石坝结构,采用上游法尾矿堆积筑坝方式,坝型为透水堆石坝,设计总库容量为 $290 \times 10^4 \text{ m}^3$,坝顶宽 2 m,上、下游边坡均为 1:1.75,子坝 2 m 一级,形成总外坡平均比为 1:4.2,坝高为 96.5 m,按照《选厂尾矿设施设计规范》规定为三等别。

2.2 计算参数与计算工况

尾矿坝的填筑材料有其自身的力学参数,稳定性计算中的参数通常采用材料的勘察指标建议值,如表 1。计算包括正常运行工况、最高洪水运行工况和地震工况。按照放水形成稳定渗流时入渗点作为坝内水位,此工况为正常运行工况。假设库内洪水达到最大,最小安全滩长时的水位作为坝内洪水位,求取坝内浸润线,此工况为最高洪水工况。按照以上两种工况,加载地震作用力,将地震时的坝内应力应变状态代入计算工况,此工况为地震工况。

表 1 玲珑尾矿坝坝体尾矿力学计算参数

材料名称	密度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)		有效应力抗剪指标			
	天然密度	浮密度	水上		水下	
			c	$\varphi / (^\circ)$	c	$\varphi / (^\circ)$
初期坝	18.0	10.0	0	35	0	34
尾细砂	17.5	9.6		31.8	0	29.8
尾粉砂	15.9	9.2		30.8	0	28.8
尾粉土	15.6	9.0	8	24	4	21
第四系残坡	17.0	10.0	10	26	5	23
基岩	24.00	24.00	30	38	30	38

2.3 稳定性计算结果

本次计算采用瑞典圆弧法进行计算,简化毕肖普法进行校核。计算结果如表 2 所示。由于篇幅有限,这里只列出了正常运行工况和最高洪水位工况下的计算结果图,如图 1~图 4。

表 2 尾矿库坝体瑞典法稳定性计算结果

运行工况	规范标准	瑞典法结果		毕肖普法结果		评价
		稳定系数	计算滑弧数	稳定系数	计算滑弧数	
正常运行	1.20	1.57	6785	1.76		满足规范要求
最高洪水位	1.10	1.46	6884	1.63		
地震动力		1.31	6735	1.62		
特殊最高洪水+地震	1.05	1.22	6823	1.35		

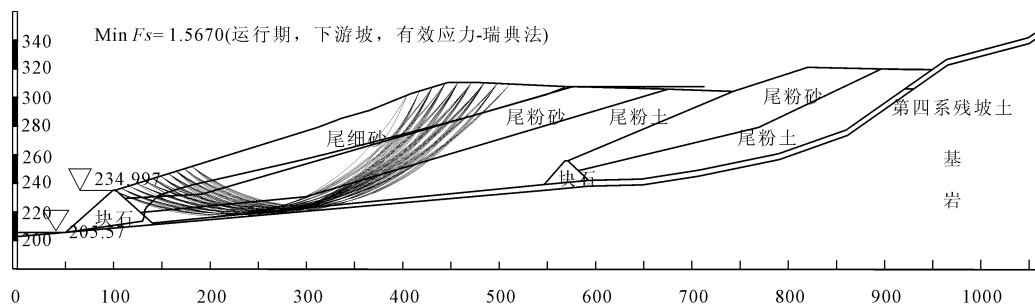
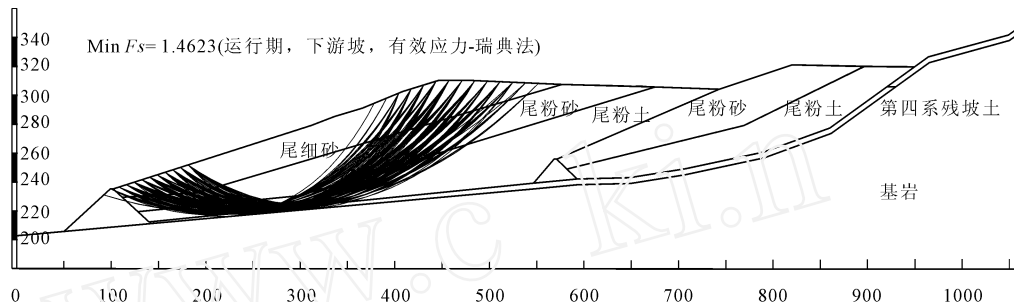
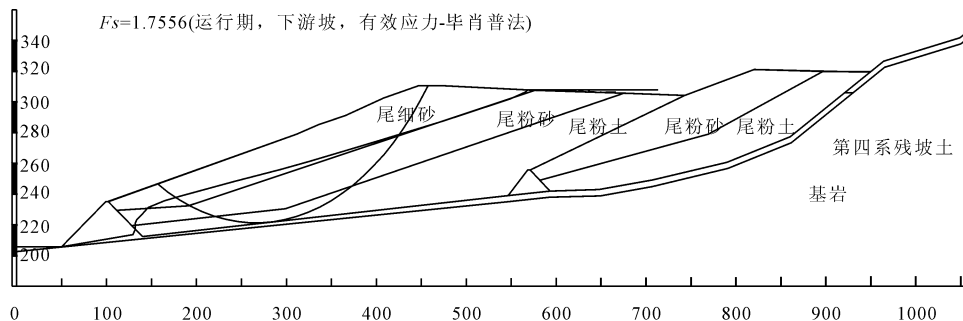
图 1 正常工况瑞典法稳定性计算结果(图中滑弧为 $F_s < 1.65$)图 2 最高洪水水位瑞典法稳定性计算结果(图中滑弧为 $F_s < 1.55$)

图 3 正常工况毕肖甫法稳定性计算结果

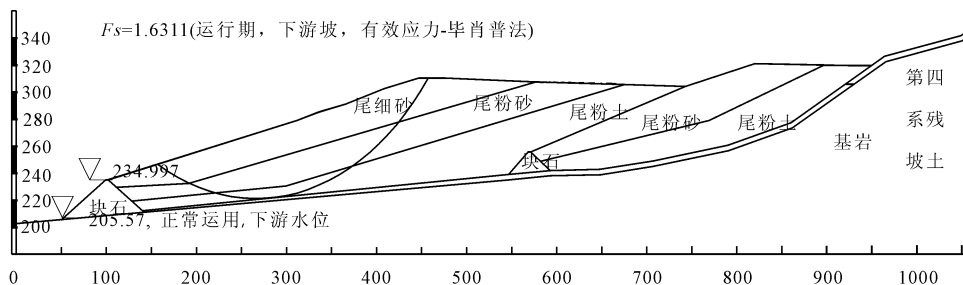


图 4 最高洪水水位毕肖甫法稳定性计算结果

从稳定计算结果来看,无论是何种荷载组合,无论是静力稳定性还是动力稳定性,尾矿坝边坡稳定性均满足规范要求的最小安全系数,说明该尾矿坝是稳定的。

除了上述稳定性分析的方法,还可以在不考虑各种工况的情况下,建立坝体的计算模型,对其静力稳定性和动力稳定性进行分析。与瑞典圆弧法一样,静力稳定性选取的模型为摩尔-库伦模型,若计算求的抗滑稳定安全系数大于规范要求值,则其静力是稳定的。再以静力状态结果作为动力分析的初始状态,输入地震波,来分析地震过程中坝体孔隙水

压力的增长情况,以此判断发生液化的可能性,具体计算方法可以参考文献^[7],这里不以赘述。

3 尾矿坝安全稳定性的防范措施

3.1 尾矿库常见故障及处理措施

通过缜密勘察、正规设计、严格施工的尾矿坝,坝体的渗流稳定、抗滑稳定都能达到规范要求。但是在实际投产运行中,难免会出现一些异常事故,对于这些现象,必要时应采取应急措施。部分异常迹象的处理措施见表 3。

表 3 尾矿库常见故障及处理措施参考表

迹象	原因	处理措施
坡脚隆起	坝脚基础变形 浸润线过高	先降库水位,坡脚压重 先降库水位,加长沉积干滩, 采取降低浸润线措施。
后期坝坡 渗水及沼 泽化	不透水初期坝导致 浸润线高矿泥夹层 引起水的逸出	在高于初期坝顶部位设贴坡 排渗设施或增设排渗管并穿 透矿泥夹层。
坝坡或坝 基冒砂	渗流失稳	先降库水位,铺反滤布,压上 碎石或块石,设导流沟,必要 时加排渗设施。
坝坡隆起	边坡太陡 矿泥集中、强度低	先降库水位,再放缓边坡或加 固定边坡; 先降库水位,加排渗设施或加 固边坡。
坝坡向下 游位移或 沿坝轴向 裂缝	基础强度不够 边坡剪切失稳	先降库水位,坝脚压重加固 基础 先降库水位,再降低浸润线或 加固边坡
堆积坝塌 陷	排水管破坏或漏 矿 排渗设施破坏	先降库水位,加固或新建排水 管,再填平塌坑; 开挖处理或做反滤后回填。
洪水位过 高	调洪库容小或泄 流能力小	先降低库内水位,改造排洪设 施,增大泄洪能力或采取截洪 分流设施。

3.2 库区安全监督管理

对尾矿库的正常运行来说,库区安全管理也是一项至关重要的环节。为确保安全生产,依据国家安全生产的相关规定,应成立专门尾矿坝管理班组,并建立严格的奖惩制度,按下述要求执行:(1) 当实际情况与设计要求不符时,应在汛前及时通知设计单位进行调洪演算和泄流能力复核,以指导防洪工作;(2) 执行巡坝和护坝制度。遇到坝体出现裂缝、滑坡、沉陷等现象时,要查明原因,妥善处理并做好记录;要经常观测坝体浸润线及逸出点的位置以及渗水量与水质,当出现浸润线骤升或渗漏浑水等异常现象时,要查明原因,妥善处理并做好记录;(3) 尾矿库的排洪设施需经常进行检查,确保排洪畅通;(4) 做好坝体位移、沉降、渗水和库水位等的观测记录,出现异常,立即报告;(5) 汛期前,必须对排洪系统进行全面检查,发现问题,及时解决。加强值班和巡视,密切注视库内水情变化和坝体两侧沟谷地表径流动态,发现险情及时报告,采取紧急措施,严防事态恶化;(6) 尾矿

库使用期满而停止使用时,应进行闭库设计。库内不宜蓄水,防范发生溃坝和污染环境的危害事故。

3.3 其他安全措施

对于尾矿坝坝区内地质灾害的防范、化学污染物监测、粉尘处理、库区水质检测等细节问题也需要考虑。入库水流中不可避免地含有化学药品的残留物,管理不善会酿成严重事故。如果进入尾矿库的化学药品残留物超标,若尾矿库调洪库容小、水在库内停留曝气时间短、尾矿库的回水利用率低、尾矿库外泄水量大,都会造成污染物的超标排泄。可以采取设置水质监测井的措施,随时对水质进行检测,企业设专职人员对污染物进行检测分析,为进行环境管理、评价企业的环境质量、防止污染、保护和改善环境提供依据。尾矿坝的粉尘主要来自于库内的干滩扬尘,需要定期洒水,避免大风天气粉尘飞扬,污染周围的空气环境。

4 结 语

从设计、管理两方面对尾矿坝的稳定性进行分析,有助于提高坝体稳定、确保尾矿坝安全万无一失。我国已建的尾矿坝安全问题较为突出,在今后的勘察和设计工作中,只要做到严谨、科学、合理,加强施工过程的规范化,严把质量关,剔除一切违规操作,并把尾矿坝的日常管理和监督作为一项长期任务去抓,采取妥善处理方式,防患于未然,就可以将尾矿坝溃坝造成的损失减小到最低程度,有效维护社会稳定和人民生命财产安全。

参考文献:

[1] 杨丽红,李全明,程五一,王云海.国内外尾矿坝事故主要危险因素的分析研究[J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(5):28-31.
[2] 徐宏达.我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑,2001,31(1):69-71.
[3] 赵杰,李淑英.尾矿坝浸润线控制[J]. 西部探矿工程,2005,(2):69-70.
[4] 赵坚,沈振中.尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法的改进[J]. 河海大学学报,1997,25(2):110-113.
[5] 祝进兵,孙亮,郑小毅,卢雪松.某尾矿坝抗滑稳定性分析[J]. 中国水运,2007,5(1):62-63.
[6] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:233-245.
[7] 陈殿强,王来贵,李根.尾矿坝稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2008,27(3):359-361.

(上接第 55 页)

参考文献:

[1] 腾志国.关于尾矿坝地震稳定性的分析及评价[J]. 河北冶金,2003,(1):16-17.
[2] 罗晓辉,白世伟,万凯军,等.尾矿坝渗透静力稳定分析[J]. 岩土力学,2004,25(4):560-564.
[3] 潘建平,孔宪京,邹德高.尾矿坝地震液化稳定的简化分析[J].

水利学报,2006,37(10):1224-1229.
[4] 谢定义.土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1990.
[5] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
[6] 朱百里,沈珠江.计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.
[7] 高艳平,王余庆,辛鸿博.尾矿坝地震液化简化判别法[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):72-79.