

尾矿坝加高渗流和液化稳定性分析

冯美生^{1,2}, 王来贵¹, 张红珠^{1,2}

1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000

2. 山西大同大学土木工程系, 山西大同 037003

摘要 尾矿库加高扩容, 需对尾矿坝进行稳定性评价。依钻孔资料, 结合加高设计方案, 建立尾矿坝地质模型。对洪水及地震作用双重工况下, 应用强度折减法进行了尾矿坝渗流稳定性、静力稳定性和动力液化稳定性计算。结果表明, 浸润线没有从坝坡出溢, 渗流稳定。从坝体动力反应及液化结果得出该坝是动力稳定的, 安全系数满足规范要求。本研究基于有效应力原理, 结果对尾矿坝渗流、静力及动力稳定性评价方面有一定的借鉴意义。

关键词 尾矿坝; 加高设计; 边坡稳定安全系数; 有效应力; 液化

中图分类号 TU41

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.16.005

Seepage and Liquefaction Stability on the Heightening Tailings Dam

FENG Meisheng^{1,2}, WANG Laigui¹, ZHANG Hongzhu^{1,2}

1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

2. Department of Civil Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, Shanxi Province, China

Abstract For the heightening designing of tailings dam, the dam's stability assessment is needed. In accordance with the borehole data, by combined with the heightening design scheme, the geological model of the tailings dam is established. Tailings dam's seepage stability, static stability, and dynamic stability under the flood and earthquake work condition are calculated. The results show that there is no infiltration of the overflow from the slope and the seepage is stable; the safety factor meets the regulatory requirements and the dam is in the static stability; dynamic responses and liquefaction results of the dam show that the dam is stable. A comprehensive assessment of the stability line is provided. It possesses certain significance in the evaluation of seepage, static stability, and dynamic stability based on the principle of effective stress.

Keywords tailings dam; heightening design; safety factor of slope; effective stress; liquefaction

0 引言

中国每年由黑色、有色、黄金、化工、核工业、建材等行业的矿山产出尾矿约 3 亿 t, 堆存在大约 1500 座尾矿库中。这些库中最大设计坝高 260m, 超过 100m 的有 26 座, 有 10 座库容大于 10^8m^3 , 坝高小于 30m 的小库占 80% 左右。但是 20% 的大、中型库的库容占总设计库容的 80%。同时上游法尾矿坝占全部尾矿堆积坝的 90% 以上, 其数量及坝体高度随国家对矿产资源的巨大需求而快速增加, 而相关尾矿库扩容研究所提供的技术支撑却无法与大型工程建设发展的规模和速度相适应, 尾矿库扩容存在一定风险, 国内尚无尾矿扩容的全面技术规范。扩容加高后的渗流稳定、动力稳定及各种因

素综合影响是扩容设计的关键所在。

辽宁某尾矿坝堆积高度将达到设计高度的 50%, 据《尾矿库安全技术规程》AQ 2005—2006 及《选矿厂尾矿设施设计规范》ZBJ1—90 的有关规定, 当尾矿坝堆积高度达 1/2—2/3 最终设计坝高时, 应对坝体进行一次全面勘查与评价, 以校核坝体现状的稳定性; 尾矿库的扩容加高存在与原有设施衔接问题, 排洪系统、回水系统、排渗系统、尾矿输送系统、增加副坝工程等改造问题。针对该工程现状条件, 坝高 118m 及加高到 170m 的工况进行评价, 对加高条件下的坝体进行了流固耦合、动力液化研究。计算地质剖面、计算参数由勘查单位提出, 加高部分地质结构依据现有的钻孔资料和坝坡比推断

收稿日期: 2010-12-06; 修回日期: 2011-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10972096, 50434020)

作者简介: 冯美生, 博士研究生, 研究方向为环境岩土力学、地质灾害, 电子邮箱: daokedaoke@163.com

给出,洪水位标高以库区水边线距离干滩长度 100m 确定。

1 数值计算模型

为了进行理论上的计算,需要对实体模型进行必要的简化,该坝最危险计算剖面的选取,来源于现状条件下的钻孔实测资料。坝体需要经过合理的简化和延伸,其基本过程如下:分析钻孔所得到的颗粒分布状况,归并粒径相近的尾矿层,较大的尾矿层兼并较小的夹层,最后将属性组成相近的夹层连在一起。底部有断续分布的细小夹层亦归并为大层之内,底部基岩按钻孔位置处连线。现状未加高的模型总长约 545m,高约 118m。到最终设计高程,推得地质结构分层图及计算模型如图 1 所示,模型总长约 760m,高约 170m。按平面应变问题进行分析,单元都统一采用四面体单元,并通过网格检验达到网格最优化。最终,该模型被划分为 26689 个四面体单元,节点 8940 个。

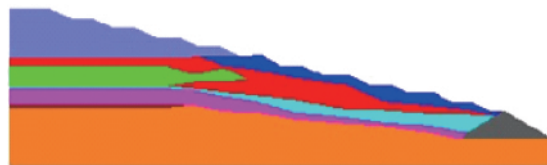


图 1 模型和地质结构分层图

Fig. 1 Model and geological structure layered figure

2 渗流和静力稳定性分析

2.1 各岩土层渗流参数选取及计算边界条件

渗流边界条件:模型基岩视为不透水;初期坝视为堆石透水坝;按现场实测水压施加水头边界,堆积坝面为自由透水面。静力边界条件:模型左右两侧施加水平向约束;模型底部施加竖直方向约束。尾矿砂渗流及静力计算所需参数如表 1 所示。

表 1 尾矿坝各岩土层渗流和静力学参数取值

Table 1 Seepage and statics parameter values of each rock and soil layer of tailings dam

编号	岩土层名称	干密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
① ₁	尾中砂(松散)	1680	1.0	33.0	12	0.35	2.5×10 ⁻²
① ₂	尾中砂(稍密)	1720	1.0	34.0	18	0.35	1.25×10 ⁻²
① ₃	尾中砂(中密)	1800	2.0	35.0	40	0.30	9.5×10 ⁻³
②	尾粉砂	1720	1.0	31.0	3.70	0.35	6.5×10 ⁻³
② ₁	尾粉细砂(松散)	1740	1.0	31.0	10	0.35	3.5×10 ⁻³
② ₂	尾粉细砂(稍密)	1800	1.8	32.0	20	0.35	2.5×10 ⁻³
② ₃	尾粉细砂(中密)	1850	2.0	33.0	40	0.3	2.3×10 ⁻³
② ₄	尾粉细砂(密实)	1970	2.5	35.0	70	0.3	2.0×10 ⁻³
③	尾粉质黏土	1800	18	17.0	10	0.38	1.8×10 ⁻⁶
④	块石	1950	0.5	38.0	120	0.25	0.4
⑤	中风化基岩			看作刚性不透水基岩			

2.2 静力稳定性计算及结果分析

土体的静力本构模型选用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)模型,以反映土体的非线性弹性及剪塑性力学行为。坝坡安全系数及潜在滑裂面位移的确定采用有限差分强度折减法。其基本原理是:将坡体强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值,同时除以折减系数 F_{trial} ,得到一组新的 $c_{\text{trial}},\varphi_{\text{trial}}$ 值,表达式为

$$c_{\text{trial}}=\frac{1}{F_{\text{trial}}}c \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{trial}}=\arctan\left(\frac{1}{F_{\text{trial}}}\tan\varphi\right) \quad (2)$$

然后作为新的材料属性参数输入进行计算。当满足相应的失稳判据时,对应的 F_{trial} 称为坝坡的最小安全系数 F ,此时的坝坡达到极限平衡状态,发生剪切破坏,同时可得到临界滑动面^[1-2]。

2.3 计算结果和分析

浸润面发生在孔隙水压力为 0 与不为 0 的分界面上,所

以用孔隙水压力等值线图既可以显示浸润线的位置,又可以显示坝体内部孔隙压力的分布。从预测的浸润线埋深数据分布图(图 2)可以看出,浸润线均没有在堆积坝坝坡处出溢,浸润线距离坝坡表面仍有一段安全距离,浸润线埋深均较深,不会对坝坡产生渗流破坏。从剪应力 τ_x 等值线图(图 3)可以发现坡脚处、坡体内部均呈现压应力状态,坝体沉积滩区域部分呈现拉应力状态,由于其拉应力分布主要集中在坝顶及沉积滩表层区域,故不会对整个坝体的稳定性构成显著影响。由图 3 还可以发现最大剪应力分布在初期坝及坝体与基岩的接触部位。

经过计算,该坝潜在的滑裂面的位置如图 4 所示,其抗滑稳定安全系数为 1.49,符合现行的《选矿厂尾矿设施设计规范》中关于“二级尾矿库在正常运行工况下坝坡抗滑稳定最小安全系数不得小于 1.25”的规范要求。因此,该坝是静力稳定的。



图 2 孔隙水压力等值线图

Fig. 2 Isolines of pore water pressure



图 3 剪应力等值线图

Fig. 3 Isolines of shear stress

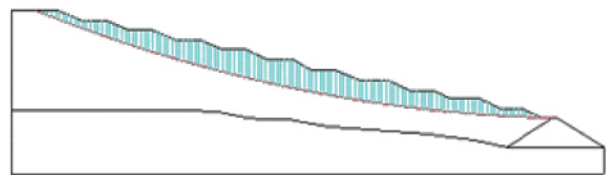


图 4 坝体潜在滑裂面位置及安全系数 $F=1.49$

Fig. 4 Potential slip surface and safety factors of the cross section

3 加高后尾矿坝动力稳定性计算及结果分析

使用渗流及静力状态结果作为动力分析的初始条件,计算参数见表 2。按最不利工况组合,即洪水加地震作用条件下,对该尾矿坝进行加高稳定性分析,由于地震时间很短,故假定在地震期间的孔隙水不向外排出,而是封闭在土体骨架中^[3-5]。动力计算的边界条件:下部边界采用静态边界(黏滞边界)条件;水平向施加自由场边界条件。通过施加自由场边界条件的办法处理弹性波的能量逸散。

在分析坝体的性状中,不考虑地震引起的垂直运动影响,因为理论分析和实验观察均发现,动剪应力和动力破坏

表 2 动力分析参数取值表

Table 2 Parameter values of dynamics analysis

岩土层编号	岩土层名称	参考剪应变 $\gamma_{ref}/10^{-4}$	相对密度 $D_r/\%$
① ₁	尾中砂(松散状态)	3.45	30
① ₂	尾中砂(稍密状态)	3.45	30
① ₃	尾中砂(中密状态)	3.45	38
②	尾粉砂	3.45	50
② ₁	尾粉细砂(松散状态)	3.45	85
② ₂	尾粉细砂(稍密状态)	3.45	32
② ₃	尾粉细砂(中密状态)	3.45	40
② ₄	尾粉细砂(密实状态)	3.45	70
③	尾粉质黏土	3.45	85
④	块石	7.58	—
⑤	中风化基岩	刚化处理	

影响主要取决于地震水平运动,故本文只按剪切波输入计算。按要求,假定基本地震加速度峰值为 $0.1g$,其中 g 为重力加速度。采用现有地震波,经过处理,按设计地震参数进行调整后,得到地震波加速度时程曲线如图 5 所示,输入地震波时程为 $15s$ 。

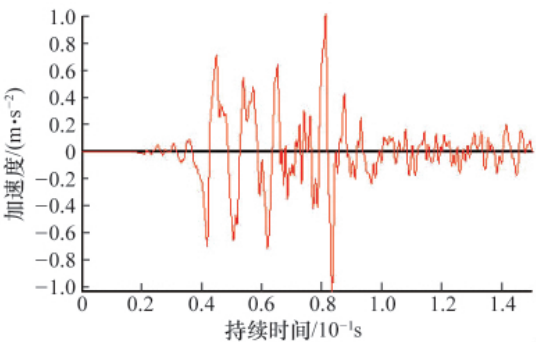


图 5 输入地震波加速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration-time curve of input earthquake waves

此地震波加速度时程曲线为冲击型,相应的认为孔隙水在地震过程中不发生流动不向外排出,也即采用不排水有效应力动力分析方法。动力计算方法采用完全非线性法^[6-7],采用 MC 模型并内嵌 Hardin 模型为滞后阻尼。经计算得坝体的自振频率约为 $0.4Hz$ (周期约为 $2.5s$)。饱和砂土振动孔隙水压力的增长采用 Byrne 于 1991 年提出的经验公式^[8]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ul}}{\gamma} = C_1 \exp \left[-C_2 \left(\frac{\varepsilon_{ul}}{\gamma} \right) \right] \quad (3)$$

式中参数通常都有

$$C_1 \cdot C_2 = 0.4 \quad (4)$$

C_1 可取

$$C_1 = 7600 D_r^{-2.5} \quad (5)$$

其中, ε_{ul} 为不可恢复的积累体积应变; $\Delta \varepsilon_{ul}$ 为体积应变增量; γ 为循环剪应变副值, D_r 为砂土相对密度, C_1, C_2 为取值系数。

判断液化危险性的方法,在有效应力基础上,直接从液化的本质出发,分析地震过程中坝体孔隙水压的增长情况,从而判断发生液化的可能性以及液化发生的过程。认为当超孔隙压力与平均有效固结应力之比大于 0.8 时,岩土介质达到初始液化状态^[9],其判别式为

$$\frac{p}{(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z)/3} > 0.8 \quad (6)$$

其中, p 为超孔隙压力; $(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z)/3$ 为平均有效固结应力, $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ 为 3 个方向的正应力。

坝顶水平向的地震反应加速度(图 6)约在 $7s$ 达到峰值,约为 $2.1m/s^2$,放大系数约为 2.1 。竖直向的地震反应加速度(图 7)约在 $8s$ 达到峰值,约为 $2.5m/s^2$,放大系数约为 2.5 。总体而言,坝体对此地震波的动力反应不大。动剪应力峰值(图 8)输入波形图取为 $8s$ 时刻,峰值分布在坝底与基岩接触处,峰值在 $8000kPa$ 左右变化。

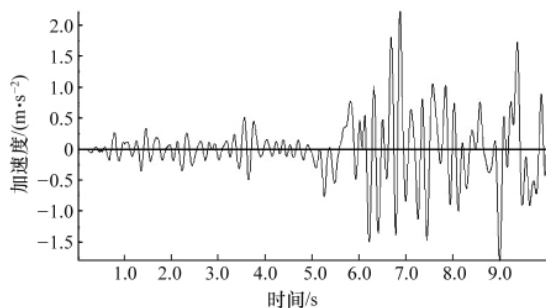


图 6 坝顶 x 向加速度-时间图

Fig. 6 Acceleration-time curve of the top dam at x direction

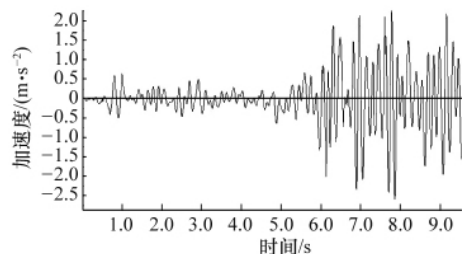


图 7 坝顶 z 向加速度-时间图

Fig. 7 Acceleration-time curve of the top dam at z direction



图 8 动剪应力峰值等值图

Fig. 8 Isogram of dynamic shear stress peak value

由地震液化区域(图 9)可以看出,液化区域距离沉积滩滩顶较远,且液化范围不大,但是对比现状高程,液化深度有所加深,液化范围仍集中分布在沉积滩内部自由面位置处,下游尾矿堆积坝体内的各单元未见液化发生,其趋势也未见沿下游坝坡变化,故液化并不会对坝体稳定造成实质影响。从最终液化区域可以看到,距离沉积滩滩顶仍较远,下游尾矿堆积坝体内的各单元未发生液化,其趋势也不易出现在下游坝坡,故液化并不会对坝体稳定造成实质影响。



图 9 坝体的液化区域

Fig. 9 Lequefaction zone of the dam body

4 结论

(1) 坝体各工况下,拉应力区域分布随着坝体的加高及水位而变动,呈现向坡顶及沉积滩顶部逐渐扩大的趋势,坝

体应力状态总体稳定。坝体浸润线未见从坝坡出溢,坝坡不会发生渗流破坏。

(2) 动力分析表明,随着坝体加高及水位升高,动力反应剧烈程度有所增加。剪应力峰值集中在坝体与基岩接触处附近,不会对坝体稳定构成威胁;液化区域在各种工况下主要分布在沉积滩内部区域,且距离坝坡坝顶较远处,未出现大范围的扩散。

(3) 基于钻孔数据简化的地质模型,采用折减强度法,对尾矿坝渗流、静力、动力稳定性进行评价,为类似的尾矿坝稳定性评价提供了一套完整的路线。

参考文献 (References)

- [1] 陈殿强, 王来贵, 李根, 等. 尾矿坝稳定性分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(3): 359-361.
Chen Dianqiang, Wang Laigui, Li Gen, et al. *Journal of Liaoning Technical University*, 2008, 27(3): 359-361.
- [2] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.
Zhang Luyu, Zheng Yingren, Zhao Shangyi, et al. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(1): 21-27.
- [3] 张超, 杨春和. 尾矿坝液化判别简化方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3730-3735.
Zhang Chao, Yang Chunhe. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S2): 3730-3735.
- [4] 李再光, 罗晓辉. 尾矿坝地震反应的拟静力稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1138-1142.
Li Zaiguang, Luo Xiaohui. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1138-1142.
- [5] 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.
Pan Jianping, Kong Xianjing, Zou Degao. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1224-1229.
- [6] 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.
Liu Bo, Han Yanhui. *FLAC principle, examples and application guide* [M]. Beijing: People's Traffic Press, 2005.
- [7] 吴邦强, 吴仲雄. 尾矿库安全运行及其评价 [J]. 矿业工程, 2010, 8(2): 44-47.
Wu Bangqiang, Wu Zhongxiong. *Mining Engineering*, 2010, 8(2): 44-47.
- [8] Das B M. Advanced soil mechanics [M]. New York: Taylor & Francis Publishing Company, 2008.
- [9] 楼建东, 李庆耀, 陈宝. 某尾矿坝数值模拟与稳定性分析[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(2): 58-61.
Lou Jiandong, Li Qingyao, Chen Bao. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2005, 20(2): 58-61.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“走向职场”栏目征稿

“走向职场”栏目期望通过业内专家撰文,或有关人士讲述自己求职、就业的经历和成功事例,帮助博士生和博士后学会如何应聘、如何创业和发展,给即将走上职场的读者朋友启迪和帮助。欢迎投稿,择优录用,每篇文章约 2200 字。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。