

高堆尾矿坝堆积特性及三维渗流数值分析研究

郭振世^{1,4}, 仵彦卿^{1,2}, 詹美礼³, 丁卫华¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240
3. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 金堆城铝业集团有限公司, 陕西 华县 714102)

摘要: 栗西尾矿坝深钻孔勘探试验指标统计及多种原位测试结果分析表明, 高堆尾矿坝深部的干容重指标要显著高于浅部, 堆积坝体同一空间位置, 同样埋深下干容重指标具有随时间明显增长的规律。提出了高堆尾矿坝稳定性分析中对同一类尾矿材料(如尾中砂、尾粉砂), 可按早、中、后期分区统计选取力学指标的观点。采用改进子排水结构法精细模拟尾矿坝密集排水孔, 采用减小干区渗透系数的不变网格模拟分析方法处理浸润面之上的虚拟流动, 得到更加接近实际的尾矿坝三维渗流数学模型。采用复杂三维渗流控制分析计算程序, 反演分析了现状坝高 135 m 的渗流场、浸润线及渗流量。计算分析结果与勘察剖面地下水水位、观测总渗流量比较一致, 误差不大于 13%。同时表明在辐射井排渗系统作用下, 可显著降低尾矿坝体潜水面, 因此建立的渗控模型, 可以应用于后期加高的计算分析中。

关键词: 尾矿坝 堆积特性 参数选取 三维渗流 数值分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)03-0188-05

中图分类号: S152.4

Seepage Parameter Selection and Three-dimensional Seepage Inverse Analysis for Lixigou High Stack Dam

GUO Zhen-shi^{1,4}, WU Yan-qing^{1,2}, ZHAN Mei-li³, DING Wei-hua¹

(1. Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Jinduicheng Molybdenum Group Co Ltd, Huaxian, Shanxi, 714102 China)

Abstract: Index statistic on deep borehole prospecting test and verification of various in-situ tests in Lixigou indicate that deep part survey index of high tailing dam is greater than shallow part. Under the circumstance of the same spatial location and the same depth of piling dam body, gravity index increases significantly with time. Physical indexes are selected by the early, middle, and late stages in the stability analysis of high tailing dam for the same material (medium sand silt). Improved drainage structure method is adopted to simulate densely distributed drainage holes. By using complex three-dimensional seepage software (SPGCR-3.FOR), the inverse analysis of saturation line and seepage discharge is made for a status dam of a height of 135 m. According to the fitting inverse analysis of drainage and seepage facilities, the mathematical model which conforms to the reality is obtained. The outcome from the analysis mentioned above coincides with the groundwater level in the survey section and observed seepage discharge, with the error less than 13%. Accordingly, the seepage model and stack-pile sedimentary seepage parameter are found, which can be applied to the analysis of dam heightening in late stage. It also demonstrates that radial wells can lower saturate line obviously.

Key words: tailing dam; accumulation characteristics; 3D seepage analysis; parameter selection; numerical analysis

随着国家对矿产资源的巨大需求, 用于堆存金属及非金属等矿山选矿废弃物的尾矿坝的数量及坝体高度亦随之快速增加。由于尾矿坝溃坝造成人员伤

亡和有害污染物下泄的事故屡屡发生, 给人民生命财产造成巨大损失, 对环境安全构成重要威胁。2008年9月8日中国山西襄汾发生了震惊国际社会的“9

·8特大尾矿库溃坝事故,尾砂流失量约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,沿途淤积大量泥沙,流经长度达 2 km,最大扇面宽度约 300 m,过泥面积 30.2 hm^2 。巨大的泥石流冲毁集贸市场、办公楼及下游部分村庄。遇难人数 277 人,给当地生态环境造成严重破坏。

事故原因有如下几方面。堆积外边坡过陡;坝体浸润线偏高;在坡面浸润线出溢的情况下,没有及时采取科学降低浸润线或反滤贴坡措施,错误地用黄土贴坡堵水,形成阻水斜墙,导致浸润线快速抬高,坝体边坡失稳导致溃坝。

国内外数百起尾矿坝溃坝事故统计结果表明^[1],大部分失事原因是由于渗流控制不当导致的。由于尾矿坝分层堆坝及不均匀放矿造成各向异性,浸润线高等特点,决定了其渗流的复杂性,渗流状态及排渗设施难于模拟。

目前,渗流控制分析的理论研究主要是对带有复杂防渗和排水系统渗流场求解方法进行研究。对于实际工程渗流问题的研究,关键在于解决具有自由面渗流场的模拟求解方法和渗流控制分析中密集排水孔模拟及快速求解两大问题。还未解决快速求解问题,阻碍了渗控布置优化方案的比较与选择。

在渗流计算参数选取上,目前国内外对尾矿堆积坝进行渗流分析时均采用一个有代表性的物理力学指标及渗透系数,这样的取值用来进行坝体渗流和稳定性分析与实际存在较大出入^[2],尤其是高堆尾矿坝具有堆积持续时间长,坝体较高等特点,对其坝体渗流分析预测存在更大差异。因此,深入开展高堆尾矿坝渗流控制的研究及应用有重要的理论及现实意义。

本文以金堆城栗西尾矿坝为研究对象,系统进行了尾矿坝现场试验、三维渗流分析,为坝体排渗设计及管理提供依据。

1 栗西尾矿坝工程背景和工程地质条件

栗西尾矿库位于陕西省金堆城镇大栗西村上游的栗西沟内,为山谷型尾矿库。设计总库容 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,基础坝底标高 1 135.5 m,设计最终标高 1 300 m,总坝高 164.5 m,服务年限 32 a,属于二等尾矿库。采用上游法尾矿堆坝,坝顶平均上升速度为 4.3 m/a 。按照金钼集团公司规划,拟加高到 1 330 m 高程,可满足公司近中期堆存尾矿的需要。

该库位于秦岭山地南麓,区内地层为震旦系(Z_2)变质石英岩、厚层硅质板岩、薄层硅质板岩、硅质(条带)灰岩,第四系($Q_3^{\text{el-dl}}$)残—坡积层,近代人工堆积—冲积($Q_4^{\text{ml-dl}}$)的尾矿层及人工堆积(Q_4^{ml})层。

2 栗西尾矿坝筑坝材料力学特性

2.1 堆积尾矿的组成、结构及沉积规律

坝区尾矿主要以尾中砂、尾粉砂为主,尾细砂、尾粉土、尾粉质黏土参杂其中。堆积尾矿宏观上具有上粗下细,坝前粗库尾细,西边粗东边细的特点。在垂直方向沉积尾矿中普遍分布粗细相间的夹层、互层、千层饼结构现象,总体上尾矿在结构上表现为不均一性和各向异性。

2.2 尾矿砂土特性与深度的关系

(1) 标准贯入试验(SDT)结果显示,标准贯入击数坝外坡比库内滩面大,标准贯入击数随尾矿的埋深增大而增大。

(2) 根据尾矿坝静力触探结果,干滩区和坝体区尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土的静力触探孔锥尖阻力 q_c 值都随深度增加而增大。

(3) 根据波速测试结果,库区地层纵波、剪切波的统计值和平均值从上而下波速均越来越高,即随着密度的增大,波速值也越来越大。

由尾矿砂土标准贯入试验、静力触探试验及波速测试结果看尾矿坝下部尾矿砂土比上部密实。

2.3 不同年份尾矿砂土的渗透性变化规律

为研究尾矿砂土的渗透性随时间变化规律,对 1989,2005 年 1—12 子坝相同钻孔位置进行钻孔,取原状样,研究相同位置处尾矿物理力学指标随时间的变化规律^[3](见图 1,2)。

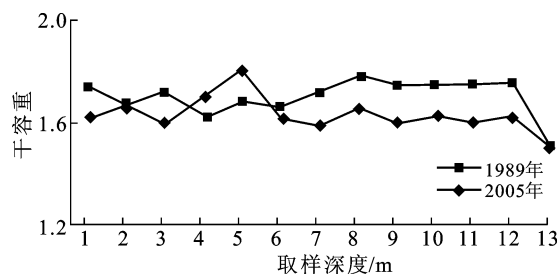


图1 不同年份尾矿干容重随土层深度变化曲线图

1. 22.4—22.9 m; 2. 20.5—21.0 m; 3. 18.4—18.9 m;
4. 16.8—17.3 m; 5. 14.8—15.3 m; 6. 13.5—14.0 m;
7. 12.0—12.5 m; 8. 9.0—9.5 m; 9. 7.5—8.0 m;
10. 5.7—6.2 m; 11. 4.0—4.5 m; 12. 3.0—3.5 m;
13. 1.0—1.5 m

从图 1-2 中看出,2005 年比 1989 年干容重增加约 10% 左右。浅层(埋深 0—9 m)渗透系数降低约 6 倍,而深层(12—21 m)降低幅度更大,约 12 倍。

2.4 高堆尾矿砂土物理力学参数的选取

尾矿的主要物理性能指标全区及分区统计值见表 1。

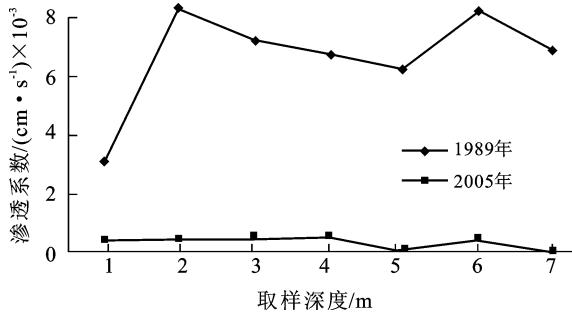


图 2 不同年份尾矿渗透系数随土层深度曲线图

1. 9.0—9.5 m; 2. 12.0—12.5 m; 3. 13.5—14.0 m;
4. 14.8—15.3 m; 5. 16.8—17.3 m; 6. 18.4—18.9 m;
7. 20.5—21.0 m

表 1 尾矿的主要物理性能指标统计值

土类名称	天然重度 / (kN · m ⁻³)	干重度 _d / (kN · m ⁻³)	天然孔隙比 <i>e</i>	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)		
				垂直 <i>K_v</i>	水平 <i>K_H</i>	
全 区	尾中砂	1.81	1.50	0.89	7.96 × 10 ⁻⁴	1.27 × 10 ⁻³
	尾细砂	1.85	1.51	0.87	4.09 × 10 ⁻⁴	6.34 × 10 ⁻⁴
	尾粉砂	1.89	1.54	0.83	2.74 × 10 ⁻⁴	4.16 × 10 ⁻⁴
	尾粉土	1.94	1.55	0.81	1.55 × 10 ⁻⁵	2.18 × 10 ⁻⁵
	尾粉质黏土	1.97	1.54	0.82	6.79 × 10 ⁻⁷	8.15 × 10 ⁻⁷
分 区	尾中砂(上)	17.6	14.7	0.93	1.10 × 10 ⁻³	1.76 × 10 ⁻³
	尾中砂(下)	19.2	15.7	0.81	2.37 × 10 ⁻⁴	3.79 × 10 ⁻⁴
	尾粉砂(上)	17.7	14.4	0.94	6.46 × 10 ⁻⁴	9.68 × 10 ⁻⁴
	尾粉砂(下)	19.4	15.8	0.79	1.83 × 10 ⁻⁴	2.81 × 10 ⁻⁴

3.2 干区虚拟流动不变网格模拟分析方法

尾矿坝由干区和饱和区两部分组成,根据工程实践经验和数值计算分析总结,将干区介质的渗透性缩小 100 ~ 1 000 倍,即可达到模拟自由面相对隔水性的物理特性,将干区与饱和区进行统一求解。统一求解的流场,在干区内是没有实际物理意义的,是属于一种虚拟流动^[6-7]。

具有自由面渗流饱和区域与干区的统一描述为如下几个函数式:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

其中

$$K_x = K_x(p) = \mu(p) K_{x,s} \quad (2)$$

$$K_y = K_y(p) = \mu(p) K_{y,s} \quad (3)$$

$$K_z = K_z(p) = \mu(p) K_{z,s} \quad (4)$$

$$\mu(p) = \begin{cases} 1.0 & p \geq 0 \\ 1.0 \times 10^{-3} & p < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K_{x,s}$, $K_{y,s}$, $K_{z,s}$ ——介质的饱和渗透系数。

(1) 水平渗透系数普遍大于垂直渗透系数,反映了尾矿的各向异性特征。随深度增加,干容重增大,孔隙比减小,其渗透系数逐渐减小。

(2) 上层的物理力学指标明显低于下层,更能反映高堆尾矿坝坝高,堆积时间长的特点,与实际较为接近。

3 尾矿坝渗流分析的几个关键问题

3.1 具有自由面渗流场的模拟求解方法

具有自由面渗流场的数值分析计算,通常用迭代逼近的方法来求其近似解。其核心是在计算中保持网格不变,即固定网格法^[1-7]。

3.3 密集排水孔模拟方法

排水孔是实际尾矿坝工程中极为重要的渗控措施之一,应用广泛。然而,由于排水孔的孔径尺寸较小(约 5 ~ 10 cm),排列密集,数量众多。从而导致在渗控分析中对排水孔模拟的困难。

根据已有的关于渗控分析中对排水孔模拟的文献,大致可分为以沟代井法、节点水位约束法、排水子结构法 3 类方法。

“排水子结构”用于众多排水孔时,其子结构形成和计算工作是浩繁和巨大的。从研究单个排水孔作用的准解析表达式,然后应用于干扰井群的叠加原理,推广到一个单元内含多个排水孔的情况。推得 n 个排水孔段联合作用下,于孔段群几何形心处的降深与总体排渗流量之间的关系^[8-9]。

$$Q = \frac{8 k \cdot n R \cdot L \cdot s_0}{2nL - R \ln[F_{01}, F_{02}, F_{03}, \dots, F_{0n}]} \quad (6)$$

式中: n ——排水孔段个数; R ——影响半径; L —— n 个排水孔段平均长度之半; s_0 —— n 个排水孔段几

何形心处的降深; F_{0i} ——第 i 个排水孔段对 n 个排水孔段几何形心 O 点处降深的影响函数。

3.4 计算程序

采用河海大学渗流实验室研制开发的复杂三维渗流控制分析计算程序(SPGCR-3.FOR)。

4 三维渗控模型的建立

4.1 整体模型网格图

全面充分利用地质工程勘察中的剖面资料,建立了栗西尾矿库三维渗流控制网格模型。

尾矿坝体是具有典型的非均质各向异性的三维特点,根据尾矿坝体勘察尾砂分区,并进行必要的归并,共划分如下尾矿沉积层:尾中砂(上)、尾中砂(下)、尾细砂、尾粉砂(上)、尾粉砂(下)、尾粉土、尾粉质黏土、黏土夹碎石。此外,还考虑了初期坝、建坝前的天然地基、施工交通廊道混凝土及其填筑料的材料分区。按最终坝高 1 330.0 m 考虑。最终坝高三维有限元网格模型如图 3 所示。模型单元总数 37 165 个,节点总数 39 095 个。其中,包含已建辐射井 9 个。

4.2 栗西尾矿库尾矿渗透性参数及边界条件

在尾矿库各层尾矿分区的渗透性参数采用方面,主要以地质勘察提供的资料为依据。结合渗控模型的部分宏观等效性,以当前坝高渗控拟合形式,对尾中砂(下)、尾粉砂(下)的渗透性实行拟合计算分析,目标是尽量使得渗控浸润线埋深与观测地下水位埋深相当,排渗总流量相当。经达数十组次的计算分析比较,提出了渗控计算分析的参数,与本文建议采用的分区渗透参数统计值基本一致,说明采用分区参数更合理并更接近实际。计算采用的其它材料渗透系数参数见表 2。

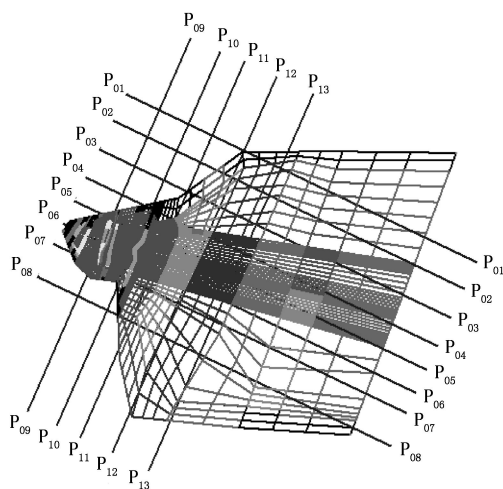


图3 整体模型网格图及显示剖面位置

表2 栗西尾矿库渗控计算分析材料渗透性参数

材料名称	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	水平向 K_x	水平向 K_y	垂直向 K_z
地基上层	4.32×10^{-7}	4.32×10^{-7}	4.32×10^{-7}
地基下层	2.16×10^{-7}	2.16×10^{-7}	2.16×10^{-7}
廊道混凝土	2.16×10^{-9}	2.16×10^{-9}	2.16×10^{-9}
廊道填充料	9.68×10^{-3}	9.68×10^{-3}	9.68×10^{-3}
初期坝体	1.27×10^{-3}	1.27×10^{-3}	1.27×10^{-3}
初期坝混凝土板及反滤淤堵层	2.18×10^{-6}	2.18×10^{-6}	2.18×10^{-6}

4.3 边界条件

(1) 计算区域左右岸切取边界。根据勘察资料,在左右岸切取边界上,切取边界的地下水位按距离该处最近的尾矿库勘察剖面的地下水位外延,并抬高 2.0~3.0 m 确定。(2) 基底切取边界。选取的基底最低高程为 1 100.0 m 处。将该切取边界拟按不透水边界(零流量边界)考虑。(3) 上游水下边界。按已知水头边界计算。3 种坝高分别为:当前坝高(1 270.0) —水位 1 262.1 m;中间坝高(1 300.0) —水位 1 292.3 m;最终坝高(1 330.0) —水位 1 322.28 m。干滩长度按对应工况确定;(4) 区域地表边界:按可能出渗边界计算,根据计算迭代。

5 当前坝高渗流控制计算分析

当前坝高渗流控制计算分析是栗西尾矿库渗流研究整个课题的基础^[13]。在研究分析中,干滩长度和尾矿库水位资料,均采用调洪组合资料,即库水位为 1 262.1 m,勘测干滩长度为 880.0 m。通过大量的模拟计算分析,拟合了与现场勘察地下水位较为相近的一组结果。在辐射井排渗系统作用下,非常有效地改善了地下水位 1 180~1 210 m 区间的渗流状况,显著降低了尾矿库当前坝高的坝体浸润线。

5.1 典型剖面渗流场

为了较细致地描述当前坝高尾矿库的渗流状况,这里选取了 1 个典型剖面,其对应的具体位置如图 3 所示。现将所选剖面的渗流场示于图 4 中。从图 4 看出,在当前坝高运行情况下,当库水位以 1 262.1 m 运行时,以中部的较大断面(剖面 05)地下水位相对低些,最大地下水位埋深为 18.0 m,最小埋深约 7.0 m。与实测浸润线埋深基本一致^[10]。

从剖面 P_{05} 渗流场可以清楚看出,在辐射井作用下,坝体渗流场得到较显著的改善,使得坝坡高程 1 200~1 240 m 范围的浸润线有明显降低。而在 1 240~1 250 m 高程范围,浸润线埋深又有所减小,但最小埋深亦达 7.0 m 左右。

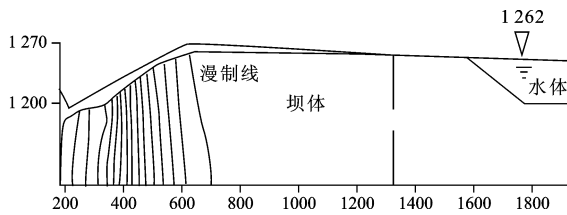


图 4 当前坝高 P₀₅ 典型剖面渗流场

5.2 渗流量计算分析

当前坝高各排渗井的总渗流量计算值为 12 964 m³/d,与辐射井实测渗流量 11 586 m³/d 十分接近,二者相差约 10%。这也从另一方面论证了在建模过程中强调宏观整体效应的合理和必要性。此外,经过对初期坝上游混凝土面板及反滤淤堵层上游侧的渗流量计算,将其视之为汇入施工交通廊道的排渗流量,计算值为 22 605 m³/d,与实测流量 20 073 m³/d 相比,二者相差约 13%。

6 结论

(1) 现场测试与试验结果表明,高堆尾矿坝深部的干容重指标要显著高于浅部;堆积坝体同一空间位置,同样埋深下干容重指标随时间明显增加(约 10%),渗透系数明显降低(约 6~12 倍),提出了高堆尾矿坝稳定性分析可按早、后期分区统计选取力学指标的观点。

(2) 根据实测坝体剖面,首次采用分区渗透系数进行渗流计算。采用改进子排水结构法精细模拟尾矿坝密集排水孔,减小干区渗透系数的不变网格模拟分析方法处理浸润面之上的虚拟流动,得到更加接近实际的尾矿坝三维渗流数学模型。

(3) 以实测流量和坝面浸润线位置为约束条件,拟合实际排渗设施反演分析得到符合实际的数学模

型。通过计算分析,认为该结果与地下水位、观测比较一致。渗流量计算值与观测值十分接近,二者相差不大于 13%。

因此本文建立的渗控模型和拟合得到的尾矿沉积层渗透性参数,可以应用于中、后期尾矿坝加高的计算分析中。

[参 考 文 献]

- [1] 王涛,侯克鹏,郭振世. 层次分析法(AHP)在尾矿库安全运行分析中的应用[J]. 岩土力学,2008,29(11): 680-686
- [2] 欧孝奇,易念中,陆增建,等. 尾矿砂土渗透系数与其埋深之间的关系分析[J]. 广西大学学报,2001,26(3): 219 - 221.
- [3] 郭振世,贺金刚,张红梅,等. 金堆城栗西尾矿库延长服务年限与环境保护报告[R]. 金堆城铝业集团有限公司,2006.
- [4] 速宝玉,詹美礼,郭振世,等. 金堆城栗西尾矿坝三维渗流控制研究[R]. 河海大学,金堆城铝业集团有限公司,2006.
- [5] 吴梦喜. 有自由面渗流分析的虚单元法[J]. 水利学报,1994(8): 68 - 71.
- [6] 毛昶熙主编. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社,1990.
- [7] 詹美礼,速宝玉,较高天然地下水位下渗控分析的边界处理方法[J]. 水电站设计,2001,17(1): 1-4.
- [8] 詹美礼,速宝玉,渗流控制分析中密集排水孔模拟的新方法[J]. 水力发电,2000(4): 36-39.
- [9] Zhan mei-li, Su bao-yu. New method of simulating concentrated drain holes in seepage control analysis[J]. Journal of Hydrodynamics 1999, 11(3): 27-35
- [10] 郭振世,贺金刚. 栗西尾矿坝漏砂治理技术研究与实践[J]. 中国铝业,2007(2): 6-10