

库水位升高对尾矿坝稳定性的影响

梁冰, 白云鹏, 金佳旭

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对库水位变化对尾矿坝稳定性影响问题, 建立考虑超孔隙水压力作用下的流固耦合数学模型, 利用有限差分程序进行数值求解。对不同库水位工况下的尾矿坝稳定性进行了仿真试验, 结果表明: 库水位的升高对尾矿坝稳定性影响显著, 随着库水位升高, 尾矿坝浸润线升高, 孔隙水压力增大, 有效应力减小, 安全系数降低, 尾矿坝的稳定性随着库水位的升高按照指数形规律衰减。

关键词: 流固耦合; 水位升高; 有限差分; 尾矿坝稳定性

中图分类号: TV697.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2010)04-0011-04

Influence of the water level rising on tailings dam stability

LIANG Bing, BAI Yun-peng, JIN Jia-xu

(Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: According to the problem of tailings dam stability by variation of water level, the paper established a mathematic model of fluid-solid coupled that considered the excess pore water pressure, using the finite difference method to solve the equations, and made a simulated test on the tailing dam stability in different water levels. With rising of water level, the seepage line was rising, the pore-water pressure was increasing, the effective stress and safety factor lowered. The stability of tailings dam lowered with the rising of the water level in accordance with exponential rule.

Key words: fluid-solid coupled; water level rising; finite difference; stability of tailings dam

0 引言

尾矿坝的组成多是颗粒状多孔介质, 渗流安全在尾矿坝整体安全中有着十分重要的地位, 国内外大量统计资料表明, 由于渗流问题直接造成坝体失事的比例约占 30%~40%, 当水在尾矿中运动时, 坝体可能发生破坏性渗流变形, 甚至发生溃坝事故^[1~3]。国内外研究人员就渗流作用下尾矿坝稳定性问题进行了大量研究, 并取得一定的成就, 本文基于多孔介质渗流力学、选矿学、土力学和水力学等理论, 建立尾矿坝渗流场和应力场耦合作用的数学模型^[4~6], 探讨尾矿坝稳定性, 为我国尾矿坝设计、建设及后期运营维护奠定理论基础。

1 尾矿坝流固耦合数学模型

1.1 基本方程:

应力场方程为:

$$\frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + G \nabla^2 W_x + \varphi \frac{\partial p}{\partial x} + \bar{B} \frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + G \nabla^2 W_y + \varphi \frac{\partial p}{\partial y} + \bar{B} \frac{\partial \sigma'_y}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{G}{(1-2\nu)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} + G \nabla^2 W_z + \varphi \frac{\partial p}{\partial z} + \bar{B} \frac{\partial \sigma'_z}{\partial x} + f_z = 0 \quad (3)$$

假定地层为等温情况下, 考虑孔隙流体压力作用的孔隙度为^[7]:

$$\phi = \frac{\phi_0 + \varepsilon_v + (1 - \phi_0) \Delta p / K_s}{1 + \varepsilon_v} \quad (4)$$

$$- \nabla \left[\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho_f g \nabla D) \right] + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} +$$

$$\left[\frac{(1 - \varphi)}{K_s} + \frac{(1 - \varphi)}{K_f} + \frac{\varphi}{K_f} \right] \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

式中: W_x, W_y, W_z 为固体骨架三个方向的位移, ε_v 为骨架体积应变, $\varepsilon_v = \nabla \cdot \bar{W}$, p 为孔隙压力, φ 为孔隙度, K_s 是孔介质骨架固体颗粒的体积弹性压缩模量, K_f 为孔隙流体的体积弹性压缩模量, $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ 表示上覆土压力, 是关于 x, y, z 的函数, 孔隙压力系数 \bar{B} 通过实验可以获得其具体表达式, $f_x = [(1 -$

收稿日期: 2010-04-22; 修回日期: 2010-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974070); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(2009A3334)

作者简介: 梁冰(1962-), 女, 辽宁盘锦人, 教授, 工学博士, 从事环境污染与渗流力学、矿山安全等方面的教学与研究。

$\varphi) \rho_s + \varphi \rho_w]g$ 其中 ρ_s 为固体颗粒密度 ρ_w 为水的密度。

综上,式(1)、式(2)、式(3)、式(4)和式(5)就构成了描述单相流体的流固耦合渗流的数学模型。该模型共有5个方程,求解变量为 $W_x, W_y, W_z, \varphi, p$ 总计5个,可见控制方程组是封闭的。

1.2 模型的边界条件

$$(1) \text{ 初始条件: } p|_{t=0} = p_i \quad (6)$$

其中 p_i 是原始地层孔隙压力,即坝体前水位高度造成的压力分布。

(2) 边界条件(渗流场边界通常有两种类型,即应力边界条件和位移边界条件)。

$$\text{定压边界: } p|_{\text{边界}} = p_1 \quad (7)$$

定流量(产量)边界条件:

$$\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho_w \nabla D) = \vec{n}|_{\text{边界}} = q \quad (8)$$

式中: \vec{n} 是边界的法向量; q 是流量或者产量。

位移边界条件:

$$\vec{W}|_{\text{边界}} = \vec{W}_1 \quad (\vec{W} \text{ 为边界上的位移}) \quad (9)$$

应力边界条件:

$$\sigma_{ij}\vec{n}_j|_{\text{边界}} = T_i \quad (T_i \text{ 为应力边界上的面力}) \quad (10)$$

2 尾矿坝稳定性分析流固耦合的数值模拟研究

2.1 数值计算模型的确定

(1) 工况设计。初期坝高 35 m,坝顶宽度 15 m,内外坡度分别为 1: 1.8 和 1: 2.0,坝顶高度 95 m,库内最高水位高程 90 m,模型右端取到水边线处,模型总长 600 m,高度 135 m,计算不同水位(0、30、60、90 m 即四种工况)时流固耦合作用下坝体的稳定性及剪应力、剪切变形、安全系数等的发展变化情况。根据流固耦合的计算原理及上述计算模型,首先模拟坝体的自重应力场和初始渗流场,将历史位移归零。

(2) 模型参数选取,详见表 1。

表 1 模型各组参数表

	体积模量	剪切模量	抗拉强度	渗透系数	密度	内摩擦角	粘聚力
	/Pa	/Pa	/Pa	/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	/ $(^\circ)$	/kPa
基 岩	1.0e8	1.2e8	8e6	1.6E-8	2.40	45	16.00
尾 中 砂	0.2e8	0.3e8	5.3e5	1.5E-3	1.80	34	7.84
尾 细 砂	0.3e8	0.4e8	5.8e6	1.3E-3	1.85	34	7.84
尾 粉 砂	0.5e8	0.5e8	6.3e6	3.75E-4	1.90	34	7.84
尾 粉 土	0.6e8	0.7e8	6.5e6	1.25E-4	2.00	28	9.80
尾粉质粘土	0.8e8	0.8e8	6.8e6	3.0E-6	1.95	33	7.84
尾 粘 土	0.8e8	0.8e8	7e6	2.0E-7	1.80	33	7.84

2.2 有限差分软件模拟结果及分析

2.2.1 最大剪应力分析 图 3 为不同工况尾矿坝剪切应力分布云图,从图中可以看出,随着出渗点位置的升高,坝体中部的剪切应力逐渐增大,在初级坝和二级坝坝中都有较大剪切应力,是坝体失稳比较容易破坏的位置。应力集中发生在初期坝内侧坡脚处。由于受浸润线升高的影响,水进入坝体孔隙,对固体骨架有一个向上的支撑力,在这一支撑力的作用下,使固体骨架颗粒的范德华力降低,即增加了上覆土体的重度。同时水在坝体孔隙也起到一定的润滑作用,降低了坝体的抗剪强度。随着浸润线升高,这种被润滑的坝体体积增大,整个坝体容易在初级坝和二级坝出现破坏。

2.2.2 剪应变分析 图 4 描述的是不同水头高度条件下尾矿坝剪切应变的变化情况。从图 4 中可以

看出,随着浸润线的升高,降低了滑坡体的有效应力。模型发生剪切应变的区域在逐渐扩大,这是因为渗流对土颗粒产生动水力,随着浸润线的不断升高,更多的水进入到了模型原来浸润线的上部,增加了上覆坝体的含水率,从而增加了上覆坝体的重度,而在尾矿坝孔隙中的水同时还能起到润滑作用,使固体颗粒之间发生相对运动更加容易,摩擦角和粘聚力同时减小,所以这个坝体剪切变形的影响范围逐渐增大。最大值出现在新沉积的尾矿砂与水面相接触的位置,这是因为尾矿砂刚刚沉积,还不稳定,孔隙度较大,随着自身重力和上覆水压力的综合作用,有一个固结沉积的过程,在此过程中孔隙度逐渐变小,固体颗粒之间充分接触,所以剪应变最大。由图 4 可知,坝体所发生的剪切应变随着浸润线的升高变化显著。水的渗流导致岩土体自重和应力发生

改变,最大剪切应变发生在坝体顶部,从 1.3347×10^4 一直上升至 1.6767×10^4 破坏形式为明显的圆

弧破坏。研究结果表明,剪应变云图与剪应力云图基本吻合。

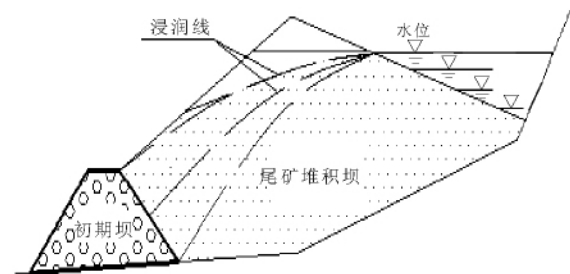


图 1 尾矿坝稳定性数值模拟工况设计

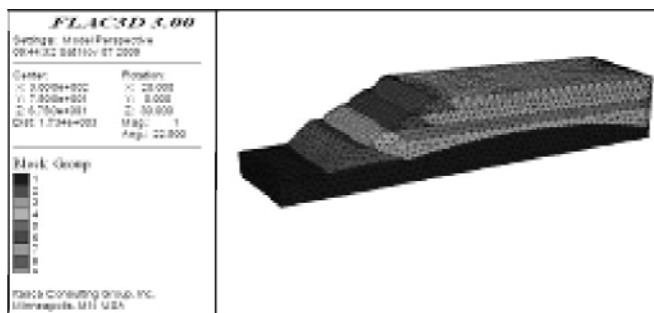
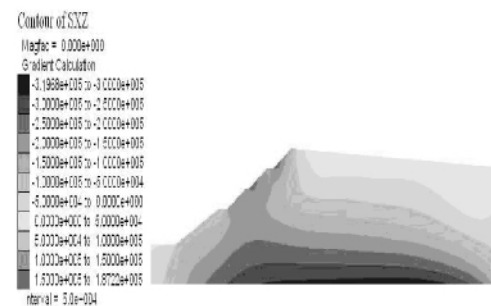
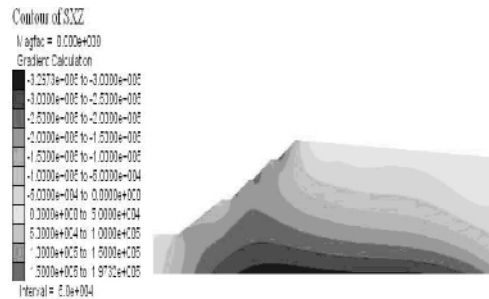


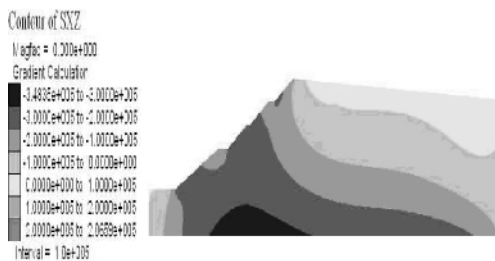
图 2 几何模型



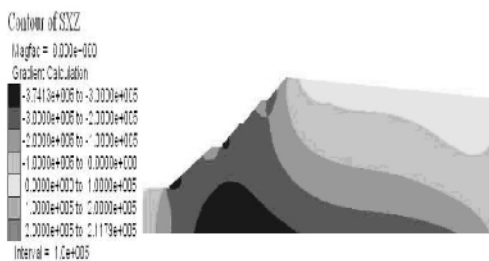
a. 工况①



b. 工况②

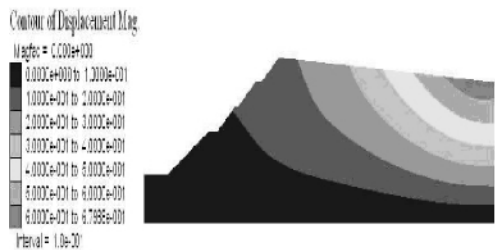


c. 工况③

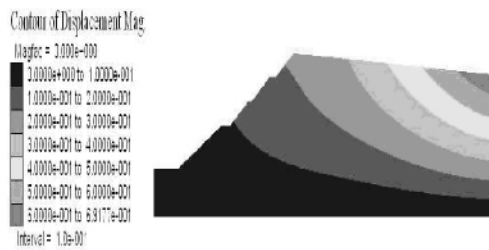


d. 工况④

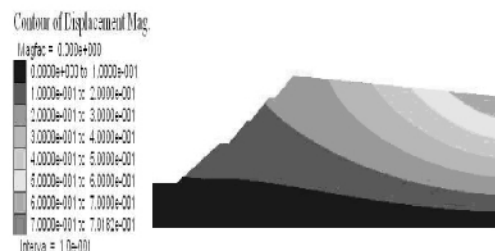
图 3 剪切应力分布云图(MPa)



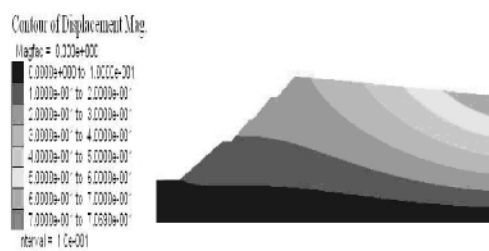
a. 工况①



b. 工况②



c. 工况③



d. 工况④

图 4 剪应变分布云图

2.2.3 安全系数分析 图5为不同水头高度(0 m、30 m、60 m、90 m)与安全系数关系曲线,从结果来看,随着水头升高,安全系数逐渐降低,曲线符合指数规律。

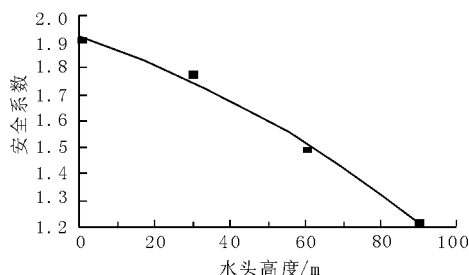


图5 安全系数~水头高度关系曲线

3 结 语

本文针对渗流作用下的尾矿坝稳定性分析问题,考虑超孔隙水压力作用,建立了尾矿坝流固耦合的数学模型,并采用有限差分软件进行数值求解,对不同水头条件下尾矿坝稳定性进行仿真试验,并对剪应力、剪应变等问题进行了分析。结论如下:

(1) 应用有效应力原理,通过相关项孔隙度 ϕ 和孔隙流体压力 p ,建立渗流场与应力场的耦合方程,确定边界条件和初始条件;

(2) 通过四组工况对比,可以看出水头越高,尾矿坝安全系数越低,坝体容易失稳。通过数值模拟,对生成的结果进行分析,与实际情况相符。

参考文献:

- [1] 路美丽,崔莉.复杂地形尾矿坝的三维渗流分析[J].岩土力学,2006,27(7):1176-1180.
- [2] Sammarco O. A Tragic Disaster Caused by the Failure of Tailings Dams Leads to the Formation of the Stava 1985 Foundation[J]. Mine Water and the Environment, 2004, 23(2): 91-95.
- [3] 柳厚祥,李宁,廖雪,等.考虑应力场与渗流场耦合的尾矿坝非稳定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17):2870-2875.
- [4] 梁冰,薛强,王起新.边坡失稳系统的岩体与水固流耦合作用机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(1):18-20.
- [5] 柴军瑞,仵彦卿.均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J].陕西水力发电,1997,13(3):4-7.
- [6] 张伟.渗流场及其与应力场的耦合分析和工程应用[D].武汉大学博士学位论文,2004,5:76-97.
- [7] 李培超,孔祥言,卢德唐.饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型(A辑)[J].水动力学研究与进展,2003,18(4):420-422.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 刘庚山,郭安红,任三学,等.人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J].生态学报,2003,23(11):2342-2352.
- [2] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J].中国农村水利水电,2007,(8):18-21.
- [3] 李运生,王菱,刘士平,等.土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响[J].生态学报,2002,22(10):1680-1687.
- [4] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000:22-24.
- [5] 郑纯辉,康跃虎,姚素梅,等.基于地理信息系统的植物根系分析方法[J].农业工程学报,2004,20(1):181-183.
- [6] 刘巧玉.喷灌条件下土壤水分运动状况分析[J].中国农村水利水电,2001,(9):22-23.
- [7] 王绍仁,曾江海,吕富宝.生态农业实验研究[M].北京:中国科学技术出版社,1994.
- [8] Sun Z Q, Kang Y H, Liu H J. Studies on soil water and nitrate distribution under sprinkler irrigation conditions [C]//Proceedings of the 2004 CIGR International Conference, Beijing 2004.