文章编号:1673-0062(2014)01-0024-05

# 降雨人渗对尾矿坝稳定性的影响

王 洁,刘 永\*,张志军,桂 荣

(南华大学城市建设学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:通过对某尾矿坝进行 ABAQUS 二维建模,运用了修正 Mohr-Coulomb 破坏准则
 建立了在降雨入渗条件下坝体的非饱和土流固耦合有限元计算模型;通过采用合适的
 土—水特征曲线得到了非饱和边坡变形与应力的若干模拟结果并与实测结果进行对比
 分析.研究成果为继续研究尾矿坝在降雨入渗条件下的稳定性分析提供了基础.
 关键词:降雨入渗;尾矿坝;数值模拟;稳定性
 中图分类号:TU431 文献标识码:B

# Effect on Tailing Dam Stability of Rainfall Infiltration

### WANG Jie, LIU Yong\*, ZHANG Zhi jun, GUI Rong

(School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001)

**Abstract**: Flow-deformation coupled unsaturated soil model is built based on rainfall infiltration condition and modified Mohr-Coulomb failure criterion according to modeling a tailing dam with ABAQUS software. A few conclusions are obtained by adopting proper hydraulic curve soil water characteristic curve and compared with actually measured data. Study yields provide foundations for simular analysis on tailing dam on the condition of rainfall infiltration. **key words**: rainfall infiltration; tailing dam; simulation; stability

0 引 言

尾矿坝是一种特殊的工业构筑物,一旦溃坝, 造成的损失不可估量.据统计<sup>[1]</sup>,在世界的各种 重大灾害事故中,尾矿库灾害仅次于地震,洪水, 霍乱和氢弹爆炸等居于 18 位. 截至 2010 年底全 国共有尾矿库近 13000 座. 国内外尾矿坝溃坝事 故时常发生. 比如 1997 年圭亚那尾矿垮坝事故造 成重大的人员伤亡<sup>[2]</sup>,尾矿溃坝死亡 20 多人,流 失尾矿严重. 2001 年, Kwang. Koo Kim<sup>[3]</sup>研究了尾

收稿日期:2013-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51004067);环保部科研基金资助项目(监管 1209&调查 1204);2010 年度高 等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20104324120001);湖南省教育厅基金资助项目(12C0347);南 华大学"铀矿山岩土工程灾害预测与控制"校级创新团队建设项目资助.

**作者简介:**王 洁(1986-),女,山东菏泽人,南华大学城市建设学院硕士研究生.主要研究方向:尾矿坝的稳定性分 析.\*通讯作者.

25

矿排除的有害气体对人类的环境的影响. 2008 年<sup>[4]</sup>,山西临汾尾矿溃坝导致 128 人死亡,造成 35 人受伤. 我国每年产生的尾矿有 3 亿多吨,大 雨降下对尾矿坝的影响尤其显著<sup>[5]</sup>. 尾矿坝坝体 发生溃坝,周围的居民有可能失去家园和生命,周 围的环境将会受到污染,流出的矿砂将会大面积 的流失. 可见分析尾矿坝坝体的稳定性极大的现 实意义和经济意义. 尾矿坝的溃坝大多数都是在 降雨期间发生的<sup>[6-7]</sup>. 所以研究降雨入渗对尾矿坝 稳定性的影响意义深远. 降雨入渗增加了坝体的 饱和度,基质吸力下降,使其抗剪强度大大下降, 当降水达到一定程度,坝体可能失稳破坏,最终可 能导致溃坝. 所以研究降雨入渗中非饱和土的水 分运移规律对尾矿坝具有重要的现实意义.

本文从实际工程应用出发,采用有限元数值 模拟,以某尾矿坝为研究对象利用简化模型研究 了降雨条件下坝内水分运移规律以及降雨对坝体 的安全系数影响规律.

1 计算模型

1.1 控制方程级定解条件

饱和—非饱和渗流的基本控制方程可以表示成<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} k_r(p) \ \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \rho_w g m_2^w \ \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

其中 $h = h_w + z$ , h 为总水头,  $h_w$  为压力水头(饱和 为正, 非饱和为负), z 为位置水头;  $k_{ij}$ 表示沿坐标 方向的渗透系数(m/s), 在饱和区为饱和渗透系 数, 与 $h_w$ 无关, 在非饱和区是压力水头 $h_w$ 的函数;  $k_r(p)$ 为相对渗透系数;  $\rho_w$  为水的密度(g/cm<sup>3</sup>);  $m_v^{v}$ 为水—土特征曲线斜率的绝对值.

1) 压力边界条件

$$p(x,y,z) = \bar{p}(x,y,z)$$
(2)  
2)流量边界条件

$$k_{ij}k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_i} n_j = I \tag{3}$$

3) 饱和溢出面边界条件

$$p(x,y,z) = 0 \tag{4}$$

4)降雨边界条件

$$k_{ij}k_r(p) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_j = I(I < f)$$

$$n = 0 \qquad (I \ge f)$$

$$(5)$$

式中:I为降雨强度;f为土壤渗入率,不考虑地表积水;h为压力总水头, $h = p/\gamma_w + x_3$ .

#### 1.2 尾矿坝稳定性分析原理

借助有限元分析软件 ABAQUS 对该矿坝进 行稳定性分析,通过建立坝体计算范围内的离散 单元的本构方程、几何方程和平衡方程来求解坝 体边坡弹性、弹塑性及非线性等问题,可以分别求 得在各个单元的应力、位移、应变及屈服和破坏等 情况.本文视土为孔隙材料,假设孔隙材料是具有 固体架构中均布孔隙的多孔介质,引入 Mohr-Coulomb 破坏准则,进行降雨入渗下非饱和土坡渗流 场合应力场的耦合分析并采用 Mohr-Coulomb 屈 服准则进行土体的破坏接近度 η 计算. η 按以下 方法计算确定:

$$\eta = \frac{f(\sigma)}{K(\kappa)} \tag{6}$$

式中:  $f(\sigma)$  为由应力状态决定的函数;  $K(\kappa)$  为 屈服条件. 由式(6)可知,  $\eta$  为表示接近破坏程度 的量值,所以被称为破坏接近度,其具体表达式为

$$\eta = \frac{f(\sigma)}{K(\kappa)} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)/2}{[c/\tan\varphi - (\sigma_1 + \sigma_2)/2]\sin\varphi}$$
(7)

当 $\eta < 1$ 时,应力函数 $f(\sigma)$ 在屈服面内部, 土体未破坏;当 $\eta \ge 1$ 时,应力函数在屈服面外, 土体已破坏.

# 2 数值计算分析

#### 2.1 计算模型的建立

对于雨水入渗对坝体稳定性的影响根据已有 学者的研究,对其断面进行适当的简化,模型的比 例是1:1,该坝高98m,坝坡40°.弹性模量,泊松 比等尾矿坝岩土计算参数见表1.本参数是根据 勘测设计单位所得到的结果.下图所示采用平面 应变问题进行分析.单元为4节点四边形等参单 元,网格划分及边界条件如图1所示.



假定尾矿坝渗透系数各向同性,离排放管较 近区域渗透系数大于远的区域,稳定渗流场的计 算归结为求解满足具体问题边界条件的拟调和方程,排水管按抽水井,流量为长流量,下边界确定为包气带透水边界.

表 1 土层计算参数 Table 1 Calculating parameter of soils

土类	E∕ MPa	$\mu$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c∕kPa	<i>φ</i> ∕(°)
尾矿粉	6	0.25	17.1	10	27
沙砾石坝体	8	0.22	21.8	10	35

#### 2.2 边界条件

降雨边界条件以降雨强度表示,在分析时采用 的表现方式是阶梯函数形式,降雨强度为 20 mm/h, 历时 72 h(259 200 s),此降雨强度是根据该地区最 近 30 年最大降雨量来计算.停止降雨后,超孔隙水 压力随之消散.计算中采用的渗透系数随饱和度的 变化曲线以及吸湿曲线<sup>[9]</sup>如图 2 与图 3.



Fig. 2 The permeability coefficient vs saturation



如图 2 所示,当土处于完全饱和状态时,渗透系数的最大值为 0.97 m/s,且随着饱和度的增大,渗透

系数逐渐大.图3中完全饱和时土的基质吸力为0, 而残余饱和度5%时对应的基质吸力约400 kPa.

### 2.3 结果分析

图 4、图 5 为降雨强度为 20 m/h,降雨前与降 雨 72 h 后的坝体水平位移与竖向位移模拟结果. 从图 4 可以看出,降雨 72 h 后,坡顶水平位移大 约有 21.1 mm,随着水压的增大,其位移主要集中 在坝体斜坡附近.从图 5 可以看出,坝体顶部最大 竖向位移大约达到了 71 mm,与水平位移相较可 以发现在雨水渗入的情况下坝体的竖向位移占坝 体变形的主要部分.



选取沿竖向方向 a,b,c 三个监控点(如图 1 所示)分别绘制了各点的孔隙水压力随时间的变 化情况.从图 6 可以看出随降雨的进行,孔隙水压 力有逐渐上升额趋势.从靠近坝体顶部的 a 点相 比远离顶部的 c 点可以得出孔隙水压力有随着高 差变高而降低的趋势.从下图还可以看出孔隙水 压力与时间呈近乎线性的关系,而雨水在设置时 也设为线性,于是可以得出孔隙水压力与降雨量 也近乎呈线性关系.



从图 7 与图 8 中可以清晰地看出降雨前后坝体 孔隙水头等值线的变化情况. 降雨前后,靠近坝体顶 部的孔隙水头等值线变化较小,而基岩部分则变化 相对较大. 该现象与膨胀土等情况下的孔隙水压力 变化情况<sup>[10]</sup>不大一样,并不是发生在边坡表面,而是 向深部开始发展,因为尾矿坝这种土质,其渗透系数 较大,降雨发生后很快就渗入到基岩部分,在降雨时 间内也没有出现先增大后减小的趋势.



Fig. 7 Initial rainfall pore pressure contour

在雨水入渗以及只有重力作用下,尾矿坝模 型塑性发展如图9所示.从图中可以看出塑性区 首先出现在矿坝坡体下部,随着折减系数的增大, 塑性区逐渐的向土体内部扩展,最终贯穿整个边 坡,形成一个半弧形.之所以出现这种塑性区的发 展,是因为尾矿坝体特殊的土质的孔隙比比较大, 具有明显的收缩性,压缩性不高,液限比较大,很 容易出现失稳破坏.模型计算不收敛塑性区贯通, 且塑性应变和位移都呈急剧增长的趋势,表面突 破已经达到了失稳的临界状态.此时 ABAQUS 给 出的安全系数为1.15.



图 8 降雨 72 h 后孔隙水头等值线 Fig. 8 Pore pressure contour after the 72 hours' rainfall



a η=0.5



b η=0.9



c η=1.15

图 9 雨水渗入时塑性区发展过程 Fig. 9 The plastic zone developing processes when rainwater infiltrating

从图 10 可以看出监测点的实测竖向位移值和

模拟位移随时间变化的趋势是基本吻合的.随着降雨的进行,a点的竖向位移随时间先变大后减小,并且其位移的变化具有滞后的现象.当降雨时间持续50000s左右时,监控点位移达到了最大值.这时入渗由于饱和土的缘故达到最小.当降雨继续时,孔压力达到最小,饱和区土壤处于悬浮流动状态,此时与下层未饱和土之间的摩擦角将变大,导致竖向位移减小,该现象符合模拟规律和现场的实际.



### 图 10 竖向监测点的实测值和模拟值的比较图 Fig. 10 Comparison of simulated and actually measured data of vertical monitoring points

从图 11 可以看出现场模拟值和实测值在误差的合理范围内,水平位移整体趋势是上升的,其 原因是因为随着降雨的进行,坝体土坡坡面下滑, 土体抗剪强度降低,所以位移会呈现上升的趋势. 无论土体处于饱和还是非饱和状态,其水平位移 都是持续增大,直到降雨停止,降雨停止后,空隙 水压力以及摩擦角等因素的变化对水平位移几乎 没有影响.该模拟值与理论值得出的结论相似.



图 11 水平监测点的实测值和模拟值的比较图 Fig. 11 Comparison of simulated and actually measured data horizontal monitoring points

# 3 结 论

通过对尾矿坝边坡降雨入渗模型的建立与分 析,得到的主要结论如下:

1)在降雨入渗的条件下尾矿坝矿体的位移 主要是竖向方向.随着降雨的进行,其位移变化有 从基岩向坝体顶部移动的趋势.现场实测值和模 拟值基本达到吻合,说明此种模拟方法是可以应 用于现场工程的.

2)降雨的进行加速了土颗粒之间裂隙的闭 合,使得坝体下部孔隙水压力较大而表层孔隙水 压力较小.

3)降雨入渗条件下的塑性破坏与无降雨条件的下的规律大致一样,但是降雨入渗条件下失稳的时间短,得到的安全系数相比无降雨条件下的数值也相对较小.

4)降雨入渗造成非饱和土中孔隙的水压力 大大上升,基质吸力逐渐减少甚至最后丧失,使非 饱和土抗剪强度降低,从而大大影响了坝坡稳定 性,安全系数下降.当持续降雨达到一定程度,坝 体失稳出现.

#### 参考文献:

- [1] 王秀兰,马德元. 尾矿坝危险因素分析及补救除险措 施[J]. 矿业工程研究,2009,24(3):49-50.
- [2] Vick S G. Tailings dam failure at omail in gu yana [J]. Mining Engineering, 1996, 48(11):34-37.
- [3] Azizli K Mohd, Kyoung-Woong kim. Characteristics of tailings form the closed metalmines as potential contamination source in South Korea [J]. Environmental Geology, 2001, 41(3/4):358-364.
- [4] 郭娟.木梓沟尾矿堆积坝的物理力学特性及坝体渗流 场与应力场的耦合分析[D].西安市:西安理工大 学,2009.
- [5] 易丽平. 尾矿坝渗流稳定性分析及监测技术研究 [D]. 长沙:中南大学,2010.
- [6] 张本卓. 降雨作用下尾矿坝的性质分析[D]. 哈尔滨 市:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] 陈铁林,邓刚,陈水生,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定 性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215.
- [8]魏宁,茜平一,傅旭东.降雨和蒸发对土质拟边坡稳定 性的影响[J].岩土力学,2006,27(51):778-780.
- [9] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等. 降雨入渗条件下非饱和土 边坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2005,26(12): 1958-1959.