

上游型尾矿坝液化前后渗流场与孔压分布数值模拟^①

刘 洋^{1,2}, 马利超³, 包德荣¹

(1.北京科技大学土木系,北京 100083; 2.金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京科技大学,北京 100083;
3.浙江大学土木系,浙江 杭州 310058)

摘要:针对地震(或静力)液化作用对尾矿坝渗流场和孔压分布的影响进行研究,基于多孔介质渗流理论,考虑到尾矿坝渗流特性,编写分析程序 SAFTD。根据程序假设的初始浸润面,通过调整浸润面处网格迭代求解最终浸润面的位置,选取一个经典算例验证程序的可靠性。针对典型的上游法尾矿库,采用 SAFTD 程序分析液化前后尾矿坝的渗流场与孔压分布特征。数值模拟结果表明,液化后尾矿坝的浸润面中间部分发生明显抬升,而在入渗点处和出渗点附近变化不大;液化后尾矿坝的孔压明显增加,坝体内部孔压增大约 18%~280%,最大的孔压增量发生在初期坝的右下部,数值模拟结果与 Ishihara 对 Mochikoshi 2 号坝的分析结果相似。

关键词: 尾矿坝; 渗流; 液化; 数值模拟

中图分类号: P642.14; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0383-007

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0383

Numerical Simulation of Seepage Field and Pore Pressure Distribution for Tailings Dam by Upstream Method before and after Liquefaction

LIU Yang^{1,2}, MA Li-chao³, BAO De-rong¹

(1. *Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;* 3. *Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China*)

Abstract: The impact of the liquefaction of tailings on a seepage field and the pore pressure distribution in a tailings dam are studied in this paper. A program named SAFTD is created based on the theory of seepage for porous media considering the characteristics of seepage in a tailings dam. SAFTD could predict the final phreatic surface by adjusting the mesh grids near the phreatic surface on the assumption of the initial phreatic surface, and a classic example is given to validate the reliability of this program. Then, SAFTD is used to simulate the seepage field and pore pressure change of the typical upstream tailings dam prior to and after the liquefaction. The numerical results indicate that the center section of the phreatic surface raises remarkably after liquefaction, but changes little near infiltration points and frozen points. The pore pressure in the tailings dam increases by 18%~280% approximately, and the lower right of the initial starter dam has the largest pore pressure increment. The simulation result is consistent with the analytical result of Mochikoshi's #2 tailings dam discussed by Ishihara.

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 新世纪优秀人才资助项目(No. NCET-11-0579); 北京市青年英才计划资助项目(YETP0340); 北京市优秀人才资助项目; 中央高校基本科研业务费资助项目

作者简介: 刘 洋(1979-), 男, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 主要从事土细观力学和砂土液化方面的研究与教学工作。

E-mail: ly-ocean@sohu.com

Key words: tailings dam; seepage flow; liquefaction; numerical simulation

0 引言

随着我国矿产资源的大力开采,尾矿坝数量与日俱增,随之带来的尾矿库溃坝事故也逐年增加。自2001年至今,我国大的尾矿坝事故已发生近百起^[1],给人民生命财产和当地经济环境造成了严重的威胁。这些事故多起因于坝内地下水位控制不当,或排洪设施不利,或侵蚀和管涌,或地震液化作用,基本上都与地下水的渗流有关。地震液化作用导致的尾矿溃坝事故在国内虽然未见直接报道,但在1976年唐山地震中有人观察到大石河尾矿坝有喷水冒砂现象,后来的实地勘察和计算分析都表明确实曾有液化发生^[2]。而国外地震液化造成的尾矿坝失稳事故时有发生,如1978年日本的Mochikoshi 1#尾矿坝由于地震液化破坏,2#尾矿坝在地震后约24小时倒塌^[3];1965年智利La Ligua地震中Cobre尾矿坝发生液化而溃坝,造成200多人死亡或失踪^[4];1994年南非Merriespruit尾矿坝发生了静态液化,导致溃坝事故。不管是静态液化还是地震液化,液化后渗流场的改变对尾矿坝稳定性的影响是显著的,对其研究也是非常有必要的。

近年来,随着人们对尾矿库安全问题的关注,尾矿液化对坝体渗流稳定性的研究也取得了一定的进展。D. Chakraborty等^[5]分别应用传统拟静力法和拟动力法对尾矿坝在地震作用下的稳定性进行了分析,指出拟静力法在分析地震液化时的不足;李再光等^[6]将尾矿坝动力液化分析确定的动态孔隙水压力增量应用于拟静力法的条间水压力计算中,提出了拟静力法的改进有效应力分析方法;LIU等^[7]根据对Baizhishan尾矿坝的地质资料、动静试验及稳定性分析,提出了改进的尾矿坝地震反应分析有效应力法;N. T. Ozcan等^[8]基于极限平衡分析和数值模拟对尾矿坝加高后的稳定性进行了分析;刘洋等^[9]分析快速冲填尾矿坝的静力液化问题;张超等^[10-11]研究了细粒含量对尾矿坝材料液化特性的影响规律,提出了适用于尾矿材料的细粒含量对标准贯入击数的修正式,并在现有尾矿坝液化判别研究成果的基础上,提出利用尾矿坝在不同深度和不同沉积滩距离处的放大系数和折减系数来计算动剪应力的方法;徐志英等^[12]采用静力有限单元法和动力有限单元法,并结合尾矿材料的静力非线性和动力非线性,分析了高尾矿坝的静应力和动应力;张进等^[13]采用Seed和Idriss提出的剪应力对比法,研究了尾

矿坝在动力液化作用下的稳定性,为尾矿坝设计提供有效的建议;周舒伟、朱士江等^[14-15]在渗流模型和应力模型的基础上,建立了渗流-应力耦合数学模型,研究了渗流场与应力场的耦合作用对尾矿坝稳定性的影响规律;潘建平等^[16]依据抗液化度与孔压比的关系,提出了尾矿坝超静孔压的简化计算式;除此之外,李宗伟、金家旭等一些学者^[17-22]基于有限元和有限差分等方法,应用ANSYS、FLAC、GEO-studio等软件对尾矿坝的渗流场进行了数值模拟分析。

地震(或静力)液化对尾矿坝影响的实质是改变尾矿坝原有稳定的渗流场,使得孔隙水压力增加,进而抬高尾矿坝浸润线的位置,当浸润线溢出尾矿坝下游坡面时,坝体整体饱和,尾矿坝处于不稳定状态^[20]。因此,对尾矿坝液化问题的研究归根到底是研究尾矿坝的浸润线在液化后的变化规律以及孔隙水压力分布特征。本文基于多孔介质渗流理论,考虑尾矿坝渗流特性编写分析程序SAFTD,对易于破坏的典型上游筑坝法尾矿坝在液化前后的渗流场及孔压分布特征进行数值模拟。

1 尾矿坝二维渗流有限元程序

1.1 有限元分析原理

(1) 控制方程

稳定渗流场的三维渗流连续性方程为:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, V_x 、 V_y 、 V_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的渗透速度,单位为 m/s 。式(1)表明,对于稳定渗流情况,单位时间内流入和流出的渗流量相等。对于二维平面渗流情况,式(1)简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \quad (2)$$

式中, H 为水头; k_x 、 k_z 为 x 、 z 方向上渗透系数。若假设土体渗透性为各向同性,即 $k_x = k_z$,则上式简化为:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

(2) 初始和边界条件

渗流初始条件为:

$$H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (4)$$

式中, $H_0(x, y, z)$ 为已知函数。

渗流边界条件一般包括第一类边界条件及第二

类边界条件。对于渗流区域边界上水头已知的情況,一般称为第一类边界条件,可表示为:

$$H(X,Y,Z) = f(x,y,z,t) \mid (x,y,z) \in \Gamma_1 \quad (5)$$

式中, Γ_1 表示第一类渗流区边界; $f(x,y,z,t)$ 为已知函数,其中坐标点 (x,y,z) 位于渗流边界上。

对于渗流区域边界上水头未知,但边界流量 q 已知的(流出时为负值)情况,一般称为第二类边界,其边界条件可表示为:

$$k \frac{\partial H}{\partial n} \mid \Gamma_2 = q(x,y,z,t) \mid (x,y,z) \in \Gamma_2 \quad (6)$$

式中, Γ_2 表示第二类边界; n 是 Γ_2 的外法线向量。若边界为隔水边界,即 $q=0$,则上式变为 $\partial H/\partial n=0$ 。

1.2 二维渗流程序编制

假设 S_1+S_2 为整个分析区 R 的边界,针对无流量输入和输出的稳定渗流问题,对式(2)进行变分,定义变分函数

$$U = \frac{1}{2} \int_R \left[k \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + k \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (7)$$

式中,函数 U 以 $h=f$ 为边界条件,当 h 满足渗流方程时取得最小解。

采用三角形单元对区域 R 进行离散,每个离散单元 R_j 对应一个函数 U_j ,则有

$$U = \sum_{j=1,m} U_j$$

单元内部水头 h 根据线性插值求得:

$$h = p_1 x + p_2 y + p_3 \quad (8)$$

式中, p_1, p_2, p_3 为常数,式(8)带入式(7)得到

$$U_j = 1/2 \int_{R_j} \left[k p_1^2 + k p_2^2 \right] dx dy \quad (9)$$

由于划分单元格很小,可以假设每个单元中的渗透系数 k 是常数,而三角形单元的面积为 $1/2 |\Delta|$,所以上式变成

$$U_j = 1/4 k_j \mid \Delta \mid (p_1^2 + p_2^2) \quad (10)$$

从而得到

$$U_j = 1/2 \sum_{l=1,3,m} \sum_{n=1,3} P_{lm}^j h_l h_m \quad (11)$$

式中 P_{lm}^j 是 3×3 的矩阵,即:

$$P_{lm}^j = \frac{1}{2} k \mid \Delta \mid (b_l b_m + c_l c_m) \quad (12)$$

将区域 R 中的所有 n 个单元相加得到,

$$U = 1/2 \sum_{l=1,n} \sum_{m=1,n} P_{lm}^j h_l h_m \quad (13)$$

函数 U 是连续可导的,且存在最小值,则有

$$\frac{\partial U}{\partial h_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

根据式(12)可以得到,

$$\sum_{l=1,n} P_{il} h_l = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

P 满足对称性,即 $P_{lm} = P_{ml}$,因此水头 h_m 可以通过求解标准的线性方程组得到。

基于上述理论和算法,考虑到尾矿坝渗流特性,采用 Fortran 语言编写尾矿坝渗流分析程序 SAFTD(Seepage Analysis for Tailings Dam)。程序具体计算过程如下:

首先对分析模型进行初始的网格划分,并将网格信息及对应的结点渗透系数输入到程序中,然后输入固定边界结点水头,渗流区域上边界各结点组成浸润线,各结点纵向坐标表示对应节点的水头值,并以这些纵坐标作为假设浸润线的初始水头值代入程序进行计算。

通过计算可得到渗流模型中各个单元结点的水头值,从而确定一条新的计算浸润线。将计算浸润线和假设浸润线之间的水头数据进行对比,如果两者之间的误差超过了给定的精度,则将本次计算得到的浸润线作为假设浸润线代入下一次计算,并根据浸润线上结点的水头值修改网格,重新计算直至假设浸润线和计算浸润线之间的误差满足精度为止。

1.3 验证程序

为验证计算程序 SAFTD 的可靠性,选取一个边界条件简单的经典模型^[23-24]进行分析,模型可看作是一个静定状态下的尾矿坝或挡水坝。图 1 为模型示意图,假定挡水坝上下游水头分别为 $D=16$ m 和 $d=4$ m,挡水坝材料渗透系数为 0.01 m/d,假设初始浸润线为线段 1-5。假设大坝地面对应 0 水头面,底部不透水,模型的边界条件为:

$$\begin{cases} h = D & \text{边界 1-2} \\ h = y_1 & \text{边界 1-5} \\ h = y_2 & \text{边界 4-5} \\ h = d & \text{边界 3-4} \\ \frac{\partial h}{\partial y} = 0 & \text{边界 2-3} \end{cases} \quad (16)$$

式中, y_1, y_2 分别表示浸润面 1-5 上各点以及 4-5 边界各点的纵坐标。

采用三角形单元对渗流区进行划分,为提高计算精度,对浸润面及出渗点附近的网格加密。模型网格划分后共有 47 个结点,67 个单元,如图 2 所示。

图 3(a)中浸润面 1 为迭代 9 次后的计算结果。

浸润面 2、3 为 Verruijt^[23] 和 Muskat^[24] 的计算结果。从图中可以看出浸润面 1 与 2、3 非常相近,说明程序 SAFTD 适用于分析渗流问题,且具有较高的准确度。图 3(b)为孔隙水压力分布图,也比较符合实际情况。

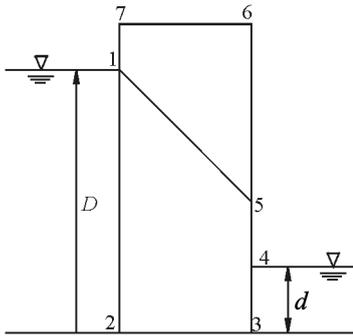


图 1 算例模型示意图

Fig.1 Sketch of the calculation model

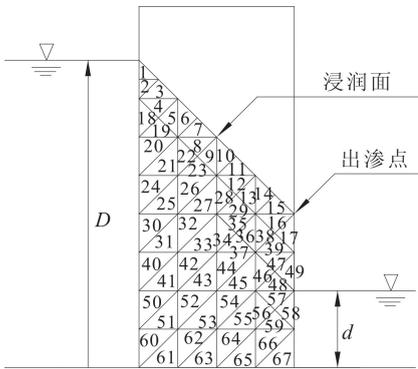


图 2 模型网格划分

Fig.2 Mesh of the model

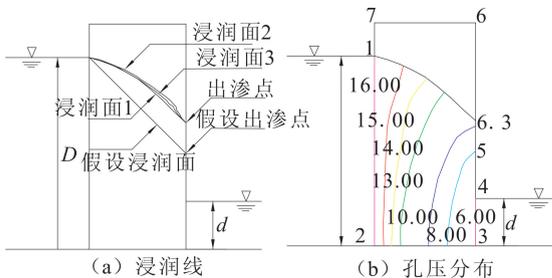


图 3 程序计算结果

Fig.3 Calculated results by SAFTD

2 液化前后尾矿坝渗流及孔压分布模拟

2.1 尾矿坝模型

为研究液化作用对上游堆积式尾矿坝渗流场的影响,本文选取一个典型的上游堆积式尾矿坝作为计算模型(图 4)。假定尾矿坝已建立三期坝且完成封库,其中坝高 $H = 10$ m,整个尾矿库长度为 60

m,即 $L = 20$ m。尾矿坝筑坝材料为干净的粗粒尾矿,渗透系数 $k_1 = 10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm/s,尾矿库中尾砂渗透系数 $k_2 = 10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/s, k_1 约为 k_2 的 100 倍,为简化计算,取 $k_1 = 1.00, k_2 = 0.01$ 。

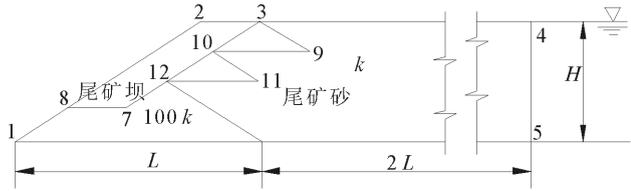


图 4 尾矿坝计算模型

Fig.4 Calculation model for the tailings dam

2.2 液化前尾矿坝渗流分析

(1) 网格划分与边界条件

采用三角形单元将液化前尾矿坝渗流场区进行网格划分。由于浸润面附近的水头分布比较复杂,为保证计算精度,将该区域的网格加密。网格划分后共有 204 个结点,339 个单元,如图 5 所示。

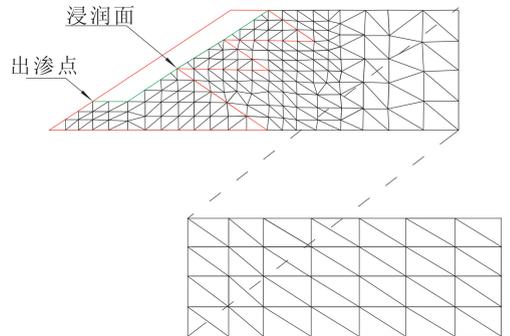


图 5 液化前尾矿坝渗流场网格划分图

Fig.5 Mesh of the model for the tailings dam before liquefaction

液化前尾矿库中的静水面是一个等水头平面,如图 4 所示。设 8-7-3 折线为假设的初始浸润面,结点 8 为出渗点,出渗点以下到坝趾部分水头随高度下降,模型底面边界不透水。设尾矿库的底面边界对应 0 水头基准面,模型边界条件为:

$$\begin{cases} h = H & \text{边界 } 3-4-5 \\ h = y_1 & \text{边界 } 3-7-8 \\ h = y_2 & \text{边界 } 1-8 \\ \frac{\partial h}{\partial y} = 0 & \text{边界 } 1-5 \end{cases} \quad (17)$$

式中, y_1, y_2 分别表示浸润面 3-7-8 上各点以及 1-8 边界各点的纵向坐标。

(2) 浸润面分析

经过反复迭代计算,最终计算浸润面与假设浸润面之间的误差满足 1% 的精度要求。收敛后的浸

润面如图 6 所示,其中由入渗点 3 开始的曲线为计算得到的浸润面,而折线段 3-7-8 为初始假设的浸润面。

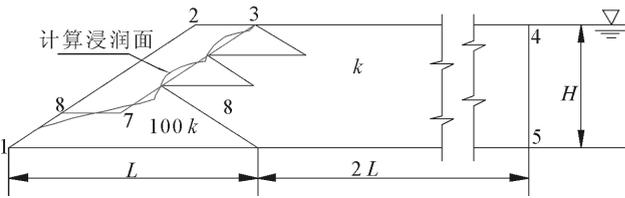


图 6 液化前尾矿坝浸润面示意图

Fig.6 Phreatic surface of the tailings dam before liquefaction

从图 6 可知,浸润面位于下游坡面一定深度处,在经过每一期尾矿坝坝顶后有一小段呈现快速下降趋势,然后逐渐上升为一段平滑的上凸抛物线,最终通过前一期尾矿坝顶点。

(3) 孔压分布

图 7 为液化前尾矿库内孔隙水压力分布。由图中可知,库内孔隙水压力从右向左,由上到下逐渐降低,库中孔隙水在重力作用下从渗透系数小的尾矿砂向渗透系数较大的尾矿坝流动。孔压等值线在尾矿坝与尾矿砂交界附近较密,说明该区域渗流速度较快。

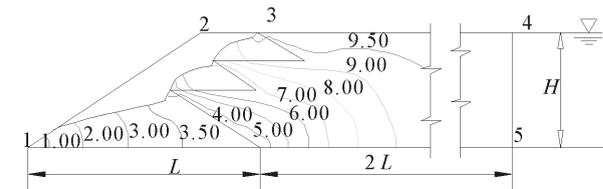


图 7 液化前尾矿库内孔隙水压力分布图

Fig.7 Pore pressures distribution in the tailings dam before liquefaction

2.3 液化后尾矿坝体渗流分析

(1) 网格划分与边界条件

尾矿液化对尾矿坝体渗流场的影响可以通过库内增加的超静定孔隙水压力来实现,因此在分析液化对尾矿坝体渗流场影响时,只考虑尾矿坝体部分,而将完全液化的尾矿砂看成流体,以超静定水头赋予尾矿砂与尾矿坝之间的交界面各结点来模拟液化作用。因此仅对尾矿坝坝体部分进行三角网格划分。图 8 为划分网格后的坝体示意图,网格包括 72 个结点和 94 个单元。

图 4 中结点 1-2-3-9-10-11-12-6-1 所包围的尾矿坝部分即为液化后尾矿坝渗流场分析数值模型。折线段 3-10-12-7-8 仍为假设的初

始浸润面,结点 8 为出渗点。液化作用相当于在尾矿库与尾矿砂交界面沿竖向方向增加一个三角形的超静定水头,其底部平面增加的水头最大值为:

$$h_{\max} = \gamma'_{\text{sat}} \times \Delta H / \gamma_w \quad (18)$$

式中, γ_{\max} 为尾矿砂饱和容重; γ_w 为水重度; $\Delta H = H - y$, 即坝高 H 减去尾矿坝与尾砂交界面各结点的纵坐标值 y 。

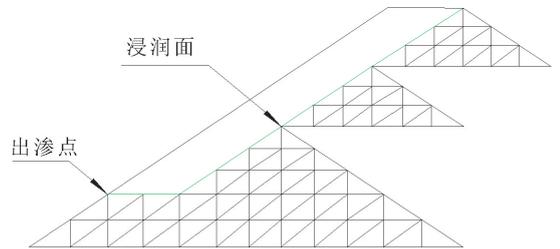


图 8 液化后尾矿坝网格划分示意图

Fig.8 Mesh of the model for the tailings dam after liquefaction

根据工程经验,取尾矿砂的饱和容重 $\gamma_{\text{sat}} = 17.7$,则浮容重 $\gamma'_{\text{sat}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 7.7$ 。代入式(18)即得到增加的超静定水头最大值 $h_{\max} = 0.77\Delta H$,则尾矿砂与尾矿坝交界面上各结点水头分布为:

$$h = H + 0.77\Delta H \quad (19)$$

根据式(19)可以确定在尾矿砂与尾矿坝交界面上由于液化产生的超静定水头,又因为尾矿坝出渗点以下到坝址部分水头随高度下降,尾矿库底面边界不透水,假设尾矿库的底面边界对应 0 水头基准面,则可得到液化后尾矿坝渗流场的边界条件为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} h = 10.00 \sim 11.92 & \text{边界 } 3-9 \\ h = 11.92 & \text{边界 } 9-10 \\ h = 11.92 \sim 13.85 & \text{边界 } 10-11 \\ h = 13.85 & \text{边界 } 11-12 \\ h = 13.85 \sim 17.70 & \text{边界 } 12-6 \\ \frac{\partial h}{\partial y} = 0 & \text{边界 } 1-6 \\ h = y_1 & \text{边界 } 3-7-8 \\ h = y_2 & \text{边界 } 1-8 \end{array} \right. \quad (20)$$

(2) 浸润面分析

经过一定次数的迭代之后,新增加的单元格已经布满整个尾矿坝区域,如图 9 所示。浸润面与尾矿坝临空面重合,表明整个坝体已经完全饱和。

(3) 孔压分布

图 10 为迭代收敛后的尾矿坝液化后孔隙水压力等值线图。从图中可看出,坝体内孔压升高,孔压等值线相比液化前有明显的变化。

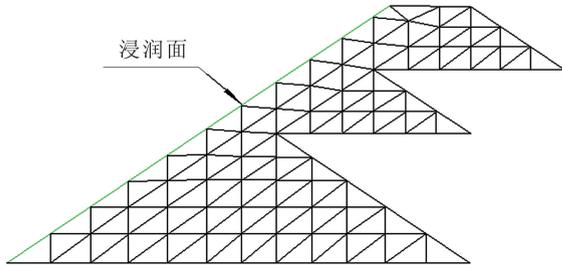


图9 液化后尾矿坝浸润面示意图

Fig.9 Phreatic surface of the tailings dam after liquefaction

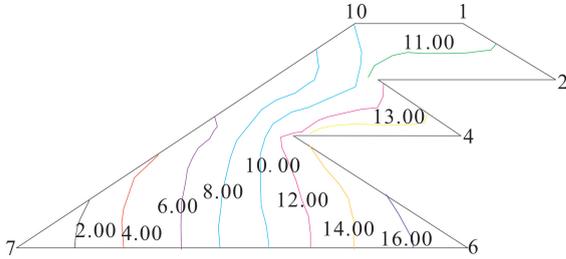


图10 液化后尾矿坝内部孔隙水压力分布图

Fig.10 Pore pressures distribution in tailings dam after liquefaction

3 液化前后尾矿坝渗流及孔压变化分析

根据 SAFTD 程序对液化前后尾矿坝渗流场的模拟结果,对上游型尾矿坝在液化前后的浸润面和孔压变化进行简单的比较分析。

3.1 浸润面变化

比较液化前后的浸润面位置(图6和图9)可以看出,液化后尾矿坝的浸润面中间部分明显升高,比液化前抬高约1.0~3.0 m,而在入渗点处和出渗点附近变化不大。Ishihara^[3]在研究日本 Mochikoshi 2#坝失稳时曾发现,液化前尾矿坝的浸润面大约在坝表面以下约3 m处,而地震液化后浸润面有明显升高。根据他的分析,尾矿坝破坏前浸润面与下游坡面位置非常接近,本文的分析结果与 Mochikoshi 2#坝液化后破坏前浸润面的位置很相似。

3.2 孔压分布变化

比较液化前后尾矿坝坝内的孔压分布(图7和图10)可以看出,液化后尾矿坝内的孔压明显增加:液化前孔压值在0~10 m之间,而液化后的孔压值在0~17 m之间。为了具体分析坝体内部孔压的增加情况,选取7个结点比较液化前后孔压的变化情况,发现孔压增加率从18%到280%左右,最大的孔压增量发生在初期坝的右下部。Mochikoshi 2#坝在液化后破坏前的孔压重分布也可能经历了类似变化。

显然,升高的浸润面使得坝体饱和度增加,而坝体内部孔隙水压力的增加使得坝体渗流力增加,都会导致液化后坝体流滑破坏的发生。

4 结论

针对液化作用对尾矿坝渗流场和孔压分布的影响进行研究,基于多孔介质渗流理论,考虑到尾矿坝渗流特性编写分析程序 SAFTD,采用该程序分析液化前后尾矿坝的渗流场与孔压分布特征。数值模拟初步得出以下几点结论:

(1) 典型挡水坝的渗流场分析得到的浸润线位置与其他学者计算得到的结果一致,说明 SAFTD 程序可以用于尾矿坝的渗流模拟。

(2) 液化后尾矿坝的浸润面中间部分发生了明显抬升,比液化前抬高了大约1.0~3.0 m;而在入渗点处和出渗点附近变化不大。

(3) 液化后尾矿坝的孔压明显增加,坝体内部孔压大约增加了18%到280%左右,最大的孔压增量发生在初期坝的右下部。

文中浸润面和孔压分布的模拟结果与 Ishihara 对 Mochikoshi 2#坝的分析结果很相似。但应该指出的是,本文分析中只是简单将液化后尾矿库中尾矿看成流体,没有分析尾矿坝库在地震作用下的液化过程,进一步的研究应考虑这种过程,并模拟更接近工程实际的三维渗流情况。

参考文献(References)

- [1] 梅国栋,王云海.我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(3):211-213.
MEI Guo-dong, WANG Yun-hai. Statistic Analysis and Counter Measure Study on Tailings Pond Accidents in China[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(3): 211-213. (in Chinese)
- [2] 王余庆,王治平,辛鸿博,等.大石河尾矿坝1976年唐山大地震震害及有关震观测记录[J].工业建筑,1994(7):38-42.
WANG Yu-qing, WANG Zhi-ping, XIN Hong-bo, et al. Earthquake Safety of Chinese Tailings Dam-Seismic Behavior of Dashihe Tailings Dam During the 1976 Tangshan Earthquake and Strong Earthquake Records[J]. Industrial Construction, 1994(7): 38-42. (in Chinese)
- [3] Ishihara K. Post-earthquake Failure of a Tailings dam Due to Liquefaction of the Pond Deposit[C]//International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. St. Louis, Geotechnical Engineering, 1994, 13: 1129-1143.
- [4] Thomas G Harper, Harvey N Mcleod, Micheal P Davies. Seismic Assessment of Tailings Dams[J]. Civil Engineering, 1992, 12: 64-66.

- [5] D Chakraborty, D Choudhury. Pseudo-static and Pseudo-Dynamic Stability Analysis of Tailings Dam Under Seismic Conditions[J]. Proc Natl Acad Sci India Sect A Phys Sci, 2013, 63-71.
- [6] 李再光, 罗晓辉. 尾矿坝地震反应的拟静力稳定分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1138-1142.
LI Zai-guang, LUO Xiao-hui. Equivalent Static Stability Analysis of Earthquake Response of Tailings Dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1138-1142. (in Chinese)
- [7] LIU Hou-xiang, LI Ning, LIAO Xue, et al. Effective Stress Analysis Method of Seismic Response for High Tailings Dam [J]. J Cent South Univ Technol, 2007, 14(1): 129-134.
- [8] N T Ozcan, R Ulusay, N S Isik. A Study on Geotechnical Characterization and Stability of Downstream Slope of a Tailings Dam to Improve its Storage Capacity (Turkey) [J]. Environ Earth Sci, 2013, 69: 1871-1890.
- [9] 刘洋, 赵学同, 吴顺川. 快速冲填尾矿库静力液化分析与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学, 2014, 33(6): 1158-1168.
LIU Yang, ZHAO Xue-tong, WU Shun-chuan. Analysis of Static Liquefaction and Numerical Simulation for Tailings Pond under High Deposting Rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1158-1168. (in Chinese)
- [10] 张超, 杨春和. 细粒含量对尾矿材料液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1133-1142.
ZHANG Chao, YANG Chun-he. Effect of Fines Content on Liquefaction Properties of Tailings Material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1133-1142. (in Chinese)
- [11] 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(2): 3730-3736.
ZHANG Chao, YANG Chun-he. Study on a Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential of Tailings Dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 3730-3736. (in Chinese)
- [12] 徐志英, 沈珠江. 高尾矿坝的地震液化和稳定分析[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(4): 22-32.
XU Zhi-ying, SHEN Zhu-jiang. Liquefaction and Stability Analysis of a High Tailings Dam under Earthquake Excitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 1981, 3(4): 22-32. (in Chinese)
- [13] 张进, 乐陶, 曹纪刚. 头石山尾矿坝的动力液化分析[J]. 金属矿山, 2012, 6: 13-18.
ZHANG Jin, YUE Tao, GAO Ji-gang. Dynamic Liquefaction Analysis of Toudishan Tailing Dam[J]. Metal Mine, 2012, 6: 13-18. (in Chinese)
- [14] 周舒伟, 李庶林, 李青石, 等. 基于渗流-应力耦合分析的野鸡尾尾矿坝稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 494-500.
ZHOU Shu-wei, LI Shu-lin, LI Qing-shi, et al. Stability Study for Yejiwei Tailings Dam Based on Coupling Analysis of Seepage-stress[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 494-500. (in Chinese)
- [15] 朱士江, 杨永恒, 孙爱华. 尾矿坝渗流场与应力场耦合作用的数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 127-130.
ZHU Shi-jiang, YANG Yong-heng, SUN Ai-hua. Numerical Analysis of Coupled Stress and Seepage Fields in Tailings Dam[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 127-130. (in Chinese)
- [16] 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 Jian-ping, KONG Xian-jiang, ZHOU De-gao. Simplified Analysis of Liquefaction and Stability of Tailing Dam During Earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1224-1229. (in Chinese)
- [17] 李宗伟, 孙丹, 尹大娟. 吊水壶尾矿坝渗流特性三维有限元分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(6): 65-69.
LI Zong-wei, SUN Dan, YIN Da-juan. Analysis on Seepage Behavior of Diaoshuihu Tailing Dam by 3-D FEM [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(6): 65-69. (in Chinese)
- [18] 金佳旭, 梁力, 陈天宇, 等. 基于液化流动模型的尾矿坝地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 232-238.
JIN Jia-xu, LIANG Li, CHEN Tian-yu, et al. Analysis of Tailings Dam Earthquake Responses Based on Liquefaction Flow Model[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 232-238. (in Chinese)
- [19] D Chakraborty, D Choudhury. Seismic Behavior of Tailings Dam Using FLAC 3D[J]. Geo-Frontiers, 2011: 3138-3147.
- [20] 秦晓鹏, 陈立宏, 孙洪月, 等. 基于拟静力法和有限差分法的细沙尾矿坝动力稳定性分析与评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(12): 46-51.
QIN Xiao-peng, CHEN Li-hong, SUN Hong-yue, et al. Analysis and Evaluation on Dynamic Stability of Sand Tailings Dam Based on Pseudo-static Method and Finite Difference Method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(12): 46-51. (in Chinese)
- [21] 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.
LU Mei-li, CUI Li. Three-dimensional Seepage Analysis for Complex Topographical Tailings Dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1176-1180. (in Chinese)
- [22] 王东, 沈振中, 陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 307-312.
WANG Dong, SHEN Zhen-zhong, TAO Xiao-hu. Three-dimensional Finite Element Analysis and Safety Assessment for Seepage Field of a Tailings Dam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(3): 307-312. (in Chinese)
- [23] Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, N Y, 1937.
- [24] Verruijt A. Groundwater Flow [M]. Hong Kong: The Macmillan Press Company, 1982.