

库水位下降的饱和-非饱和土坝渗流数值模拟

徐杨军¹, 夏元友¹, 李新军²

1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 (430070)

2. 西南交通大学力学与工程学院, 成都 (610031)

E-mail: superbill68@163.com

摘要: 基于非饱和土渗流的理论, 借助 Geo-slope 的有限元数值模拟软件, 对库水位下降过程中的饱和-非饱和土坝进行了数值模拟分析, 分析结果给出了坝体在库水位下降的过程中, 坝体中孔隙水压力的消散状况以及坝体中自由水面位置、形态的变化情况等。与将坝体视为完全饱和状况下分析结果进行对比发现: 自由水面在库水位下降的各个时刻, 两者计算得出的自由水面的位置、形态均存在较大的差异, 并且, 两者计算得出的坝体稳定系数也存在差异, 库水位降低的过程中, 前者的稳定系数要低; 库水位稳定一年后, 前者的稳定性会高于后者。

关键词: 非饱和土; 非稳定渗流; 数值模拟; 自由水面

中图分类号:

文献标识码: A

1 引言

在过去的常规渗流分析中, 常常只考虑水在饱和土中的流动, 这是由于非饱和区的渗流对孔隙水压力场的分布造成了极大的影响, 从而影响了工程的分析与评价^[1]。刘志华等^[2]利用 ANSYS 软件中热分析模块分析了稳定渗流条件下土坝的浸润线和渗透水压力; 吴越等^[3]对水位下降作用下的边坡渗流场及其安全系数作了分析; 罗胜平^[4]等利用有限元的数值分析方法, 分析了稳定渗流下土坝坝基防渗体的布置位置对坝体浸润线影响, 文献[2~4]均将研究对象视为完全饱和状态, 而对研究对象所存在的非饱和区域未作考虑, 然而, 在地球表面广泛分布的地表天然沉积土大多是低含水量的土。张培文^[5]等对饱和-非饱和渗流的计算程序作了介绍; 袁俊平^[6]对饱和-非饱和非稳定渗流数值分析中的初始状态作了研究; 金生^[7]将坝体的饱和区、毛细区、壤水区表述成统一的非线性抛物型方程形式, 建立了一种饱和-非饱和的渗流模型。本文在前述理论成果的基础上, 将研究对象的非饱和区域考虑在内, 采用非稳定渗流的分析方法对某一挡水土坝在库水位下降时的渗流状况作了分析。计算考虑了坝体中所存在的非饱和区域, 其计算结果更加能贴合工程实际, 对以后类似的工程设计更具有借鉴意义。

2 非饱和土体非稳定渗流的计算原理

2.1 不考虑土骨架变形的土的渗透性函数

Fredlund^[8]给出了一种求和形式的经验公式, 直接由土—水特征曲线计算渗透系数 k_w :

$$k_w(\theta_\omega)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \frac{T_s \rho_w g}{2\mu_w} \frac{\theta_s^p}{N^2} \sum_{j=1}^m \left\{ (2j+1-2i)(u_a - u_\omega)_j^2 \right\}, i=1, 2, \dots, m$$

其中 $k_w(\theta_\omega)_i$ 为第 i 次间段的特定体积含水量 $(\theta_\omega)_i$ 的计算透水性系数, k_s 为实测饱和和渗透系数, k_{sc} 为计算饱和渗透系数, T_s 为水的表面张力, μ_w 为水的绝对粘度, θ_s 为饱和体积含水量, p 为不同尺寸孔隙的相对作用的常数, 可以假设为 2.0, m 为土—水特征曲线上在饱和体积含水量与最小体积含水量之间等分的总数, N 为在饱和体积含水量与零体积含水量之间的计算间段的总数, $(u_a - u_\omega)$ 为基质吸力。

2.2 非饱和土中的二维非稳定流控制方程

非饱和土中的二维非稳态渗流的控制方程如下^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{wx} \frac{\partial h_w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{wy} \frac{\partial h_w}{\partial y}) = \rho_w g m_2^\omega \frac{\partial h_w}{\partial t}$$

其中, k_{wx} 为水平方向上的渗透系数, k_{wy} 为竖直方向上的渗透系数, h_w 为总水头, ρ_w 为水的密度, m_2^ω 是与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 变化有关的水的体积变化系数。

边界条件可以分为两类^[9]:

1) 已知水头边界 A_1 , 则

$$h(x_1, y_1, t) = h_b(x_1, y_1, t)$$

式中 $h_b(x_1, y_1, t)$ 为固定压力水头值

2) 已知流量边界 A_2 , 则

$$k_{ij}(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = -f(x_i, t)$$

式中, n_i 为边界面单位法向矢量; f 为边界的法向流量

2.3 有限元解法^{[5][10]}

为了进行数值求解, 将渗流场划分成有限个单元的单元组合体。迭代方程如下:

$$([D] + \frac{[E]}{\Delta t}) \{h^n\}_{t+\Delta t} = \frac{[E]}{\Delta t} [h^n]_t + \{f\}$$

$$([D] + \frac{2[E]}{\Delta t}) \{h^n\}_{t+\Delta t} = (\frac{2[E]}{\Delta t} - [D]) [h^n]_t + 2\{f\}$$

式中 $[D]$ 为总渗透矩阵, 由各单元矩阵 $[D]^e$ 叠加而得, 矩阵 $[D]^e$ 的元素可以表示为:

$$D_{ij} = \iint_S [B_i]^T [k] [B_j] ds, \{h\} = [h_1 h_2 \cdots h_n]^T, \text{ 矩阵 } [E], \text{ 由各单元矩阵 } [E]^e \text{ 叠加而成,}$$

矩阵 $[E]^e$ 的元素可表示为: $E_{ij} = \iint_S \rho_w g m_2^\omega N_i N_j ds$ 。

3 库水位下降的非饱和土坝的渗透数值模拟

库水位下降的过程中, 坝体的稳定一直为人们所重视。坝体的稳定性计算, 弄清坝体中浸润线的位置及其形态随库水位降落过程中的变化规律是稳定性计算的先决条件。库水位下降, 坝体内的渗流是非稳定的, 并且, 水位线以上的坝体是非饱和的, 这种复杂的边界条件和初始条件必然给我们的分析造成不便。借助 Geo-slope 有限元分析软件, 结合具体工程, 本文将对这种复杂边界条件和初始条件下的坝体进行分析。

3.1 Geo-slope 的 seep-w 模块介绍

Geo-slope 是一个多模块的大型边坡分析软件, 是由全球著名的加拿大岩土软件开发商 GEO-SLOPE 公司在 70 年代开发的面向岩土、采矿等领域的一套仿真分析软件。其中 seep-w 是渗流计算模块, 以非饱和土渗流理论为基础, 渗流的基本微分方程为^[3]:

$$k_w \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中 m_w 为比水容量。

3.2 数值模拟分析

某水库土坝，坝底宽 50m，坝顶宽 8m，坝高 20m，两侧边坡对称，大坝内侧坡面采用浆砌片石护坡，大坝外侧采用草皮防护，坝下游有一排水棱体，整个坝体建于不透水地基上。坝身由粘性土填筑，土体重度 $\gamma = 19 \text{ KN} / \text{m}^3$ ，弹性模量 $E=30\text{Mpa}$ ，内聚力 $c=15\text{Kpa}$ ，内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ ，坝体材料的饱和渗透系数为 $8.64 \times 10^{-3} \text{ m/d}$ ，土体的土水特征曲线见图 1，渗透性函数见图 2，坝上游起始水位为 16m，且每天以 0.1m/d 的速度进行降水，直至水位降至 10m，然后稳定在这一水位，坝下游无水。在进行模拟计算前，先作如下假设：（1）边坡的变形和位移是微小的，按平面应变处理；（2）土坝按连续材料考虑，且各向渗透性相同；（3）模型单元采用四边形节点。

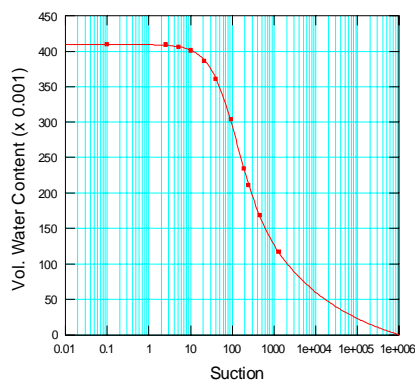


图 1 坝体材料的土水特征曲线

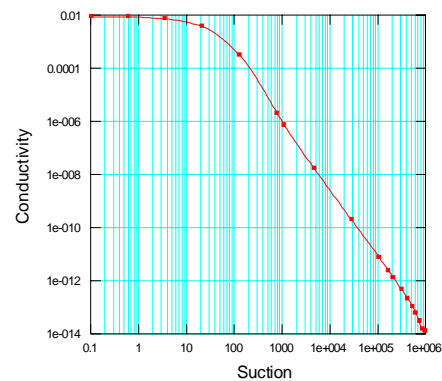


图 2 坝体材料的渗透性函数

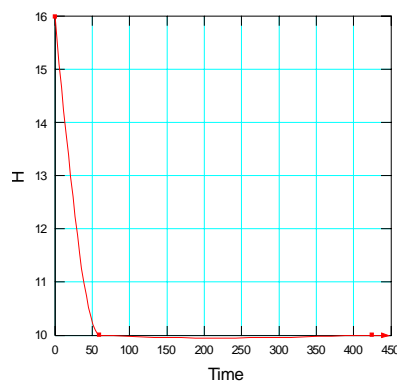


图 3 库水位的变化情况图

为对考虑了坝体非饱和区域和未考虑坝体非饱和区域的数值分析结果进行比对，建立了两种情况下的有限元分析模型：（1）将土水特征曲线、渗透性函数等参数定义在坝体材料内；（2）将坝体按照完全饱和的进行对待，即渗透系数 $K=K_{\text{sat}}=8.64 \times 10^{-3} \text{ m/d}$ 。

3.2.1 有限元模型的建立

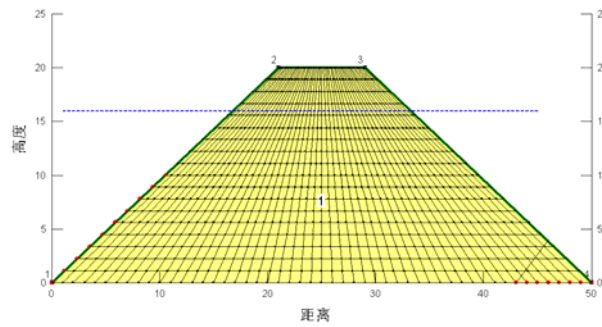


图4 坝体的有限元网格划分图

3.2.2 各个降水阶段坝体内孔隙水压力的分布云图

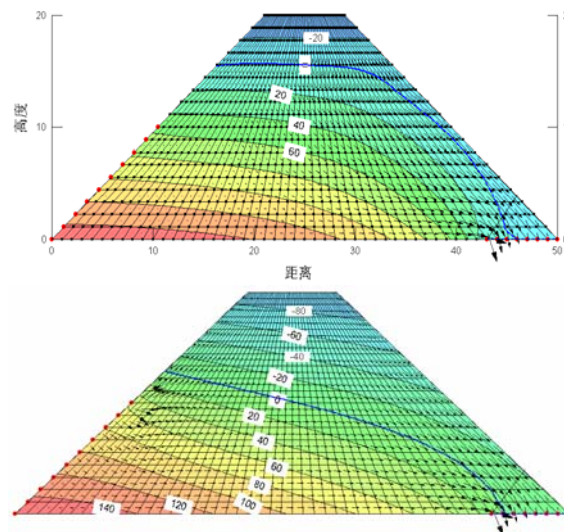


图5 降水的初始时刻（库水位=16m）孔隙水压力云图（左侧为非饱和、右侧饱和）

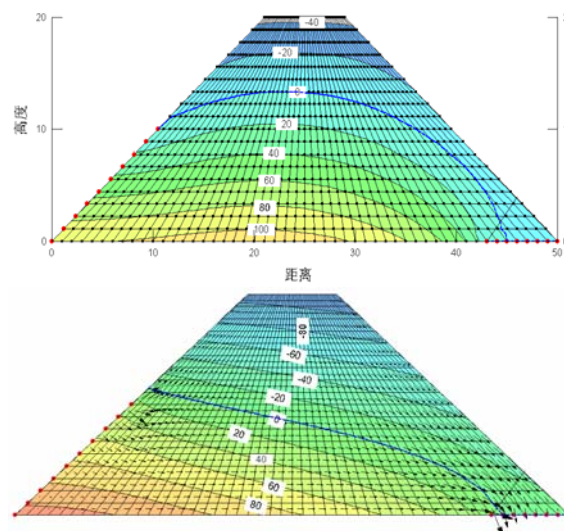


图6 降水 20d 后的（库水位=14m）孔隙水压力云图（左侧为非饱和、右侧饱和）

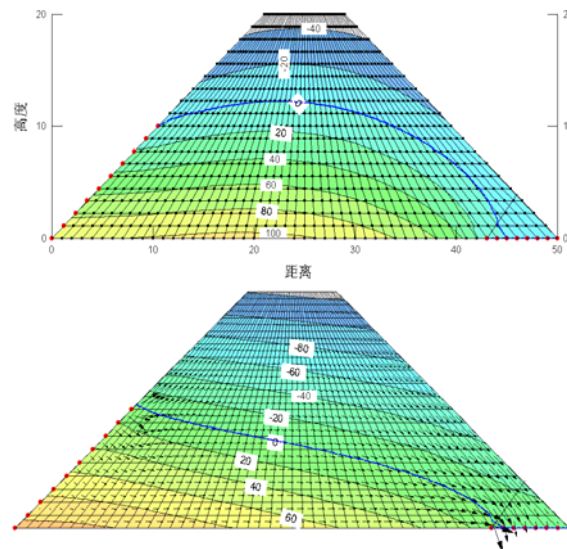


图7 降水40d后的（库水位=12m）孔隙水压力云图（左侧为非饱和、右侧饱和）

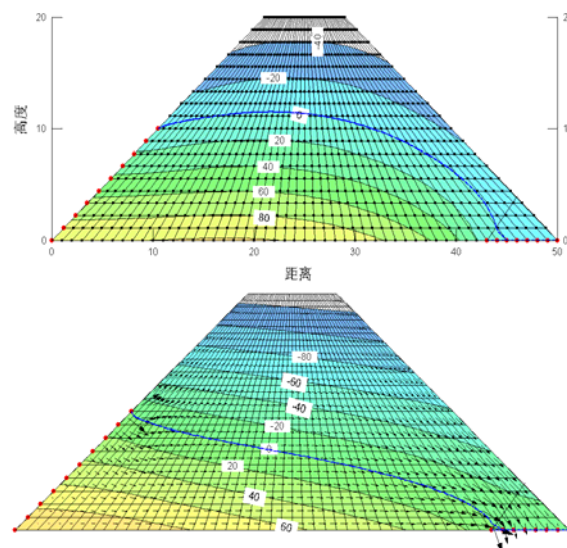


图8 降水60d后的（库水位=10m）孔隙水压力云图（左侧为非饱和、右侧饱和）

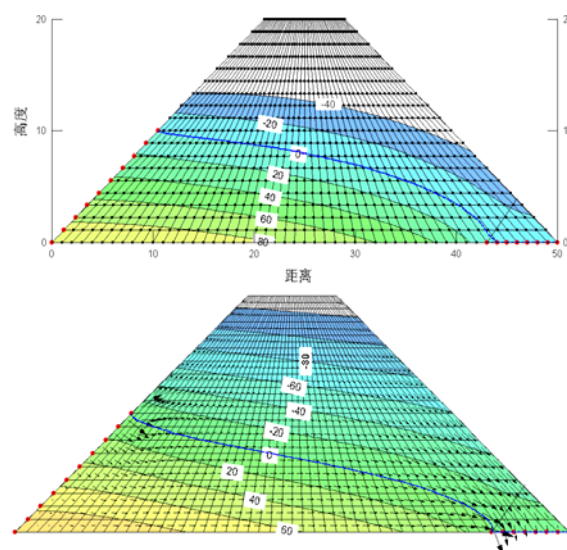


图9 一年后（库水位=10m）孔隙水压力云图（左侧为非饱和、右侧饱和）

从图(6)~图(9)可以看出, (1) 各个时刻, 将坝体视为非饱和的情况下, 相比将坝体视为饱和的情况下, 其自由水面要高; (2) 将坝体视为非饱和的情况下, 其自由水面呈现向上凸起的形态, 即坝体内的水力坡降呈现负增长的状况, 而在饱和的坝体中, 其自由水面较为平缓; (3) 将坝体视为非饱和, 计算得出的坝体内孔隙水压力等值线最高点的位置随库水位的降低, 有逐步向下游偏移的现象。

3.2.3 降水过程中坝体自由水面的变化情况

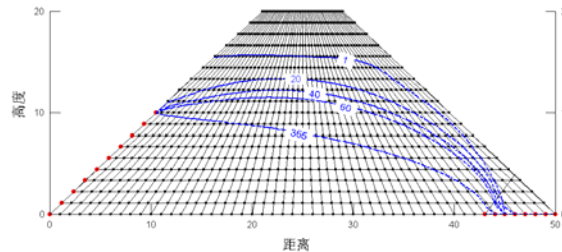


图 10 坝体各个时间点的自由水面 ($t=1, 20, 40, 60, 365d$) (坝体视为非饱和)

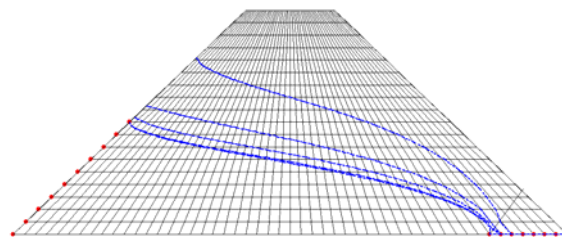


图 11 坝体各个时间点的自由水面 ($t=1, 20, 40, 60, 365d$) (坝体视为饱和)

通过对图 10、11 的分析比对, 可以发现: (1) 库水位降低的初期, 将坝体视为非饱和情况下的自由水面的降低速度, 要比将坝体视为饱和情况下的自由水面降低速度要慢; (2) 图 11 中, $t=60d$, 和 $t=365d$, 其自由水面重合; 而将坝体视为非饱和的情况下, $t=60d\sim 365d$ 这段时间内, 虽库水位不再降低, 但自由水面依然在持续的变化着, 其形态也从凸起逐渐变得平缓。

3.2.4 两种情况下的坝体稳定性系数对比

将 seep-w 模块中计算的各个时刻的自由水面的情况, 导入 slope/w 模块, 并且将非饱和土体中因基质吸力增加而引起的土体抗剪强度的变化这一因素考虑在内^[8], 采用极限平衡分析方法(摩根斯坦-普利斯法)计算得来的坝体稳定系数如下表:

表 1 坝体的稳定性系数对比						
情 况	时 间	t=0d	t=20d	t=40d	t=60d	t=365d
	稳 定 系 数					
将坝体视为非饱和		0.989	1.076	1.116	1.144	1.297
将坝体视为饱和		1.165	1.170	1.179	1.189	1.189

通过计算结果的比对发现: (1) 库水位下降的过程中, 将坝体视为非饱和情况下计算得出的稳定系数比将坝体视为饱和情况下的稳定系数低; (2) 库水位稳定后, 两种情况下计算得出自由水面的高度与形态趋于一致, 因非饱和土体中所存在的基质吸力会造成抗剪强度的增加, 故计算得出的稳定性系数要比饱和情况下大。

4 结论

将坝体视为以下两种情况：一是将坝体视为非饱和的，二是将坝体视为完全饱和的，通过对两者的计算结果进行分析比对，有以下结论：

- 1) 库水位下降的各个时刻，前者比后者的自由水面要高；
- 2) 前者的自由水面呈现向上凸起的形态，即坝体内的水力坡降呈现负增长的状况，而后者的自由水面较为平缓；
- 3) 前者计算得出的坝体内孔隙水压力等值线最高点的位置随库水位的降低，且有逐步向下游偏移的现象；
- 4) 库水位降低的初期，前者自由水面的降低速度，要比后者慢；
- 5) 库水位不再降低后，后者的自由水面也不再发生变化，而前者的自由水面依然在持续的变化着，其形态也从凸起的形态逐渐变得平缓；
- 6) 通过定量分析发现：库水位下降的过程中，前者计算得出的稳定系数比将后者的稳定系数小；库水位稳定后，两种情况下计算得出自由水面的高度与形态趋于一致，因前者所存在的基质吸力会造成抗剪强度的增加，计算得出的稳定性系数要比后者大。

参考文献

- [1] 张在明.地下水与建筑基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 刘志华, 龚文惠.渗流作用下水库土坝稳定性的有限元分析[J].华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 第25卷(第3期): 1~2
- [3] 吴越, 刘东升, 袁兴平.水位下降作用下边坡渗流场及稳定性分析[J].地下空间与工程学报, 2008, 第4卷(第6期): 1~3
- [4] 罗胜平, 许光祥, 钟亮.土坝坝基防渗体对浸润线和渗流量的影响分析[J].重庆交通大学学报, 2009, 第28卷(第5期): 1~2
- [5] 张培文, 刘德富, 黄达海等.饱和-非饱和非稳定渗流的数值模拟[J].岩土力学, 2003, 第24卷(第6期): 1~2
- [6] 袁俊平, 褚飞飞, 季李通.饱和-非饱和非稳定渗流数值分析中初始状态的研究[J].水力水电技术, 2006, 第37卷(第9期): 1~2
- [7] 金生, 耿艳芬, 王志力.利用饱和-非饱和渗流模型计算坝体自由面渗流[J].大连理工大学学报, 2004.1
- [8] D.G 弗雷德隆德, H•拉哈尔佐.非饱和土力学[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [9] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京: 水力电力出版社, 1990
- [10] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京: 中国水力水电出版社, 1998

Numerical simulation of saturated-unsaturated earth dam during descent of reservoir water level

Xu Yangjun¹, Xia Yuanyou¹, Li Xinjun²

1.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan (430070)

2.School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu (610031)

Abstract

Based on the theory of seepage in unsaturated soil, the infinite numerical simulation software named Geo-slope was adopted, to simulate the earth dam during the descent of reservoir water level. The analysis results were obtained, including the pore water pressure, the position and configuration of seepage line, etc. Compared with the results calculated under saturated state, difference such as the height and the configuration of seepage line existed between each other, also, the stability factor calculated of each other were not the same, the former was lower than the later during the descent of reservoir water level, but the later was lower than the former when the reservoir water level achieved stability for one year.

Key words: unsaturated soil; transient-seepage; numerical simulation; seepage line