

库水位骤降对非饱和坝坡稳定性的影响

钟启明^{1,2}, 霍家平^{1,2}, 刘若星³

- (1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;
2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 水利部农村电气化研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:基于非饱和土体抗剪强度理论,采用极限平衡法,考虑非饱和非稳定渗流对坝坡稳定性的影响,通过体积含水量与基质吸力之间的非线性关系,模拟超静孔隙水压力的消散过程,将不同时段渗流分析结果导入稳定分析模块计算其安全系数的变化。选取某黏土心墙坝,模拟其在不同灌溉条件下的渗流状况及上游坝坡稳定性。计算结果表明:库水位骤降引起坝坡安全系数的降低,但随着超静孔隙水压力的消散,坝坡稳定性逐渐增强,降水速度越快,坝坡安全系数越低。

关键词:库水位骤降;非饱和渗流;非稳定渗流;浸润线;坝坡稳定;敏感性参数

中图分类号:TV698.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)06-0084-03

Influence of rapid drawdown of reservoir level on stability of unsaturated dam slope//ZHONG Qiming^{1,2}, HUO Jiaping^{1,2}, LIU Ruoxing³ (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Research Institute of Rural Electrification, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The reduction of the safety factor caused by the rapid drawdown of the reservoir level leads to the instability of the dam slope. Therefore, it is important for reservoir flood control and irrigation to research influences of different drawdown velocities of the reservoir level on the dam slope stability. With consideration of the effects of unsaturated transient seepage on the stability of the dam slope, the process of the excess pore water pressure was simulated using the limit equilibrium method based on the shear strength theory for unsaturated soil and the nonlinear relationship between the volume water content and matric suction. Then, the seepage analysis results for different times were incorporated into the stability analysis module to calculate the safety factor of the dam slope. The calculated results show that rapid drawdown of the reservoir level can result in a decrease of the dam slope safety factor, and the faster the drawdown of the reservoir level is, the smaller the safety factor will be. However, the stability of the dam slope was enhanced with the dissipation of excess pore water pressure. The simulation method can provide a theoretical basis for determining the flood discharge during reservoir flood control operation.

Key words: rapid drawdown of reservoir level; unsaturated seepage; transient seepage; seepage line; dam slope stability; sensitivity parameters

土石坝的坝坡稳定性取决于它的几何形状、坝体材料属性及其内外受力情况,研究表明,孔隙水压力和库水压力是影响坝坡稳定性的主要荷载^[1-3]。库水位的变化对土石坝坝坡的稳定性有着重要的影响,由于坝前水位常处在变动之中,坝坡内外水分的相互补给使坝体内渗流场不断变化,呈现非饱和非稳定渗流特征^[4]。当库水位骤降时,坝体内孔隙水压力常常不能很快消散,在渗透力的作用下使上游坝坡形成下滑的趋势,甚至酿成滑坡事故^[5-9]。因此,在实际工程中为了防止因库水位下降过快而导致滑坡事故的发生,必须进行上游坝坡稳定性分析。

本文以某黏土心墙坝为研究对象,研究库水位从正常蓄水位按3种不同降水速度骤降6.5m过程中的安全系数。考虑体积含水量与基质吸力之间的非线性关系,计算水位骤降后不同时间的坝体孔隙水压力分布,选取有效应力强度指标,采用极限平衡法,模拟考虑库水位骤降引起的非饱和坝坡稳定性问题。

1 非饱和非稳定渗流基本微分方程及定解条件

将达西定律和质量守恒定律结合起来可以推导出非饱和非稳定土体水流运动的基本方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为总水头; k_x 和 k_z 分别为 x 和 z 方向的渗透系数; Q 为边界流量; θ 为体积含水量; t 为时间。

体积含水量的改变取决于应力状态的改变和土体的性质,饱和与非饱和情况下的应力状态都可以用两个状态变量 $\sigma - u_a$ 和 $u_a - u_w$ 来表达,其中 σ 是总应力, u_a 是孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力^[10-11]。假定:①总应力不变,即没有土体的卸载和加载;②对于瞬态问题孔隙的气压保持为恒定的大气压。体积含水量的变化通过下面的方程与孔隙水压力的变化发生联系:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w = m_w \rho_w g \partial (H - z) \quad (2)$$

式中: m_w 为储水曲线的斜率; ρ_w 为水的密度; z 为位置水头。

由于位置水头是个常量, z 对时间的导数为零,将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + Q = m_w \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

初始条件为

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

第一类边界条件(已知水头边界 Γ_1):

$$H(x, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x, z, t) \quad (t > 0) \quad (5)$$

第二类边界条件(已知流量边界 Γ_2):

$$K_n \frac{\partial H(x, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = f(x, z, t) \quad (t > 0) \quad (6)$$

式中: $H_0(x, z, 0)$ 为初始时刻坝体内各点的水势; Γ_1 和 Γ_2 分别为已知水头边界和流量边界; $H_1(x, z, t)$ 为 t 时刻 Γ_1 边界处的水势; $f(x, z, t)$ 为 t 时刻 Γ_2 边界处的流量; n 为边界 Γ_2 外法向向量。

2 有限元渗流方程

将分析区域划分为有限单元网格,建立单元水势插值函数,应用加权余量的伽辽金方法建立渗流有限元支配方程^[12]:

$$Kh + S \frac{\partial H}{\partial t} = F \quad (7)$$

式中: K 为传导矩阵; h 为单元节点水势列阵; S 为储量矩阵; F 为边界条件列阵,包括已知水头和流量边界。求解式(7)时,时间变量采用差分法离散,由此可得:

$$Kh_{t+\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} Sh_{t+\Delta t} - \frac{1}{\Delta t} Sh_t = F_{t+\Delta t} \quad (8)$$

3 实例分析

3.1 渗流分析

某黏土心墙砂砾石坝,坝高 70.6 m,坝顶长约

320.0 m,水库正常蓄水位 645.0 m,设计洪水位 645.4 m,校核洪水位 647.8 m,总库容 2.82 亿 m^3 ,大坝断面如图 1 所示。

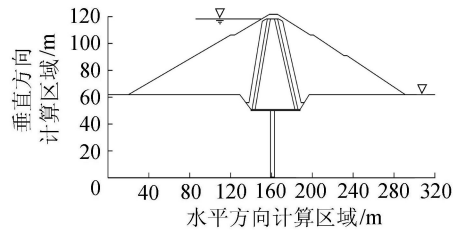


图 1 大坝断面

通过试验得到大坝各部分材料体积含水量与基质吸力之间的关系曲线,如图 2 所示。

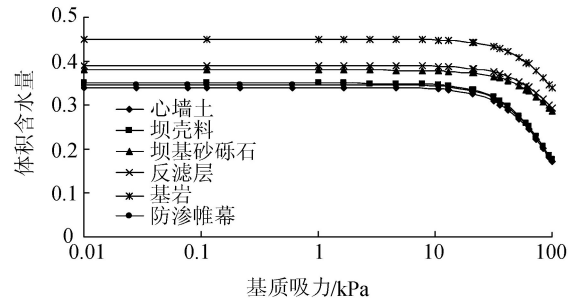


图 2 大坝各部分材料土水特征曲线

为了满足该水库下游的灌溉需求,经过调度分析,库水位需在短时间内骤降 6.5 m,现模拟库水位分别在 12 h、24 h 和 48 h 内从正常蓄水位 645.0 m 高程骤降至 638.5 m 情况下的渗流情况及边坡稳定性,假定初始浸润线为上游蓄水位 645.0 m、下游无水时的浸润线。3 种工况下的浸润线如图 3 所示。

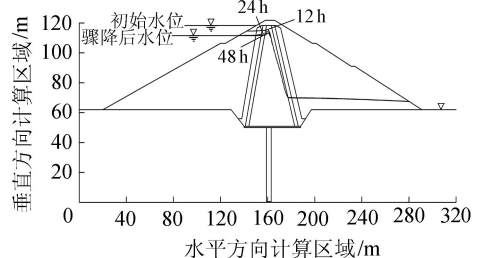


图 3 3 种工况下浸润线

由计算结果可以看出,随着库水位的下降,坝体内浸润线的高度也在下降,但是坝体土壤的持水性导致坝体内浸润线的最高点下降速度低于库水位的下降速度,表现为浸润线前半段向下弯曲的程度越来越明显,随着库水位下降速度的减缓,超静孔隙水压力消散速度加快,浸润线向下弯曲的程度减弱,浸润线趋于平缓。

3.2 稳定性分析

库水位骤降期坝坡稳定性分析可采用两种不同的方法:有效应力法和总应力法^[13]。有效应力法使用有效应力强度指标,优点在于参数易于确定,缺点

在于需要额外的工作来评价水位降落过程中坝体材料中的孔隙水压力;总应力法使用总应力强度指标,缺点在于忽略了材料的水力学特性,不能评价坝体在水位降落不同阶段的稳定性。本文采用有效应力法模拟水位骤降时的坝坡稳定性,选取有效应力强度指标,基于材料的水力学特性模拟不同时间段的坝坡稳定性,计算整个水位降落过程中不同时间土石坝的安全系数。具体计算方法为:利用坝体材料的土水特征曲线,通过非饱和和非稳定渗流分析计算不同时间坝体孔隙水压力分布,将孔隙水压力的计算结果导入边坡稳定分析程序,依据 SL274—2001《碾压式土石坝设计规范》的规定,采用简化毕肖普法(Bishop 法)计算不同时间坝体安全系数。

在非饱和和非稳定计算结果的基础上进行上游坝坡稳定性分析,根据坝料物理力学特性试验成果,结合工程经验,稳定分析计算参数见表 1,考虑到岩土材料的不确定性以及工程施工过程中取料和碾压等可能存在的均匀性,进行了强度参数敏感性分析,对表 1 中强度指标进行了适当降低,见表 2。土料的强度指标采用摩尔-库伦强度准则,强度指标为黏聚力 c 、内摩擦角 φ_0 ;堆石料的强度包线则考虑其非线性特性,其黏聚力为 0 kPa,强度指标为内摩擦角 φ_0 、内摩擦角增量 $\Delta\varphi$ 。

表 1 稳定分析基本参数

材 料	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
防渗心墙	1.60	20	25.6	0
坝壳料	2.28	0	49.3	4.1
过渡料	2.17	0	48.0	4.1
反滤料	2.11	0	46.2	2.1

表 2 稳定分析敏感性参数

材 料	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
防渗心墙	1.60	15	20	0
坝壳料	2.28	0	46	4.1
过渡料	2.17	0	44	4.1
反滤料	2.11	0	42	2.1

同样考虑 3 种工况下的边坡稳定性,采用敏感性参数计算出上游坝坡的安全系数,结果如图 4 所示。由计算结果可以看出,上游坝坡的安全系数随着库水位的下降急剧减小,库水位下降 3 m 后安全系数变化趋于平缓,库水位下降 6 m 后安全系数略

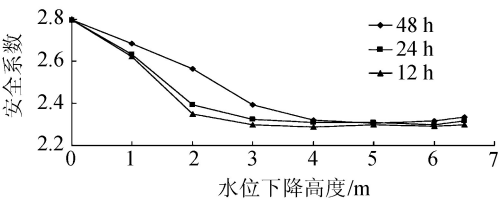


图 4 水位下降高度与安全系数的关系

有提高,究其原因,应为坝体的超静孔隙水压力逐渐消散引起有效应力增加导致。3 种工况下最小安全系数分别是:12 h 骤降时为 2.26,24 h 骤降时为 2.32,48 h 骤降时为 2.34,可见 3 种降水工况对本坝的安全系数影响不大。

4 结 论

- a. 水位骤降的速度越快,浸润线前半段向下弯曲的程度越明显,随着库水位下降速度的减缓,向下弯曲的程度减弱,浸润线趋于平缓。
- b. 库水位骤降时,坝坡安全系数迅速下降,但随着超静孔隙水压力的消散,坝坡稳定性逐渐增强,降水速度越快,坝坡安全系数越低。
- c. 库水位骤降速度的控制对于坝坡安全性及水库防洪调度具有重要意义,采用本文的考虑孔隙水压力变化计算安全系数的有效应力法可为水库安全调度预案的制定提供理论依据。

参考文献:

[1] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报,1996,18(2): 1-9.

[2] 刘新喜,夏元友,张显书,等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8): 1439-1444.

[3] 刘英泉,王成言. 库水位骤降时坝坡稳定性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(6): 55-58.

[4] 王冬林,李宗利,张洪泉. 库水位骤降对均质土坝坝坡稳定的影响分析[J]. 人民黄河,2011,33(4): 147-149.

[5] 王学武,许尚杰,党发宁,等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定分析[J]. 岩土力学,2010,31(9): 2760-2764.

[6] 贾苍琴,黄茂松,王贵和,等. 水位骤降对土坡稳定性的影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(3): 304-309.

[7] 刘钊,柴军瑞,陈兴周,等. 库水位骤降时坝体渗流场及坝坡稳定性分析[J]. 西安理工大学学报,2011,27(4): 466-470.

[8] 杨国祥,张忠令. 库水位骤降时平原水库均质土坝稳定分析[J]. 大坝与安全,2010(3): 52-55.

[9] 张大伟,严文群. 库水位下降时土坝上游面渗流稳定性研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(7): 62-66.

[10] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Constitutive Relations for volume change in unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal,1976(13): 261-276.

[11] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,1977,103(5): 447-466.

[12] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2003.

[13] 郭蓬捷,何秉顺,袁辉. 改进的库水位骤降期边坡稳定分析方法[J]. 水利规划与设计,2006(5): 29-33.

(收稿日期:2012-08-24 编辑:周红梅)