

库水位骤降条件下均质土石坝渗流稳定分析

罗春¹, 罗园², 王锋³

(1. 江西省崇义县水利局, 江西 崇义 341300; 2. 江西省崇义县水土保持局, 江西 崇义 341300;
3. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 本文基于 Van Genuchten 非饱和渗流模型综合分析了土石坝饱和—非饱和渗流, 以工程实际为例, 研究了水位骤降工况下土石坝渗流稳定问题。结果表明: 库水位骤降工况下, 上游水位的变化对坝体渗流量的影响较大; 库水位急剧降落易使浸润线形成逆向渗流形态, 并造成土石坝坝坡稳定性的降低, 但是当孔隙水压力消散时间足够长时, 上游坝坡稳定性有一定程度的提高。

关键词: 土石坝; 库水位骤降; 非稳定渗流; 坝坡稳定

中图分类号: TV139.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2016)03-0202-06

土石坝失事事故频发, 因渗流引起的滑坡、渗透破坏尤为严重, 其安全问题一直是水利工作者研究的重点。大量工程事故调查发现, 洪水和干旱交替季节库水位上升与下降是导致土石坝坝坡失稳破坏的重要原因之一^[1]。由于库水位上升导致的坝坡浸水部分抗剪强度下降和库水位下降降低潜在滑动面抗滑能力都有可能诱发土石坝坝坡失稳。因此, 系统地研究库水位变化条件下的土石坝渗流稳定问题具有重要的理论意义和工程价值。

目前国内外学者在这方面开展了大量有价值的研究工作。如王薇^[2]基于土石坝3种主要失效模式对土石坝失事综合风险进行了评估。Cho^[3]将传统渗流分析方法推广为评估层状土中渗透系数的不确定性和空间变异的概率方法, 并对堤防—地基系统进行了渗流分析。毛昶熙等^[4]以小浪底水库为研究对象对坝体心墙进行了稳定渗流的数值模拟分析。陈晓平等^[5]以多孔介质的渗流特性及土的本构关系为基础, 分析了渗流场和应力场的耦合模型。田东方等^[6]提出了坡面径流—非饱和渗流的渗流场与应力场的耦合计算方法, 并编制了相应的程序对渗流进行计算。秦茂洁^[7]以某土石坝为计算分析依据, 提出了水位骤降情况下坝坡稳定简化算法。沙成刚等^[8]以青海大寺沟水库大坝为研究典型, 建立了二维土石坝渗流和边坡稳定分析的数值模型。宋国涛等^[9]以土石坝渗流稳定计算的几种工况为理论分析基础, 得出了各种工况下影响边坡稳定的因素

及渗透水流对边坡稳定的影响。曹平等^[10]通过大量多层边坡算例分析了 FLAC3D 强度折减法在不同强度及不同层厚的情况下, 安全系数与滑动面位置的变化规律, 并与极限平衡法进行对比, 揭示多层边坡的破坏机制。

尽管目前考虑库水位变化的土石坝渗流稳定分析取得了可喜的进展, 但是大多大坝渗流研究中通常只考虑了自由面以下的饱和区渗流情况, 而实际工程建设中, 饱和区和非饱和区是相互变化影响的, 非饱和区的非稳定渗流会造成渗流量的增加, 从而加剧渗流破坏。因此, 在渗流分析时顾及非饱和区渗流比只考虑饱和区渗流更接近实际情况。本文基于 Van Genuchten 非饱和渗流模型及抗剪强度理论, 采用极限平衡分析法建立土石坝非饱和坝坡安全系数计算公式, 并对某均质土石坝进行非稳定渗流稳定分析。

1 土石坝坝坡渗流分析

1.1 微分控制方程

在二维空间进行渗流分析, 可以采用有限元渗流分析方法。假设在稳定渗流条件下, 任一土壤单元的渗流量为0。当最大和最小渗流系数方向均不平行于 X 轴和 Y 轴, 则渗流微分控制方程可以写成^[11]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2016-05-20

作者简介: 罗春(1976-), 男, 大学本科, 工程师。

式中, h 为总水头, 包括压力水头和程水头, m ; k_x 和 k_y 分别为渗透系数在 X 轴和 Y 轴方向上的分量。式 (1) 为稳定渗流非线性微分方程, 可以通过有限次连续迭代至计算结果不再改变进行求解。水力梯度为总水头的一次导数, 对每一节点总水头求导获得, 详细求解过程参考文献^[12]。

1.2 非饱和和渗流分析

实际情况中若直接测量非饱和土渗透系数函数会有一定难度, 一般通过测量或估计的体积含水量函数和饱和渗透系数来预测非饱和渗透系数函数。现有大量的经验公式和半经验公式可以表示渗透系数, 本文选取 Van Genuchten (1980)^[13] 提出的一组闭合形式的方程来描述渗透参数, 该方程是基质吸力的函数, 如下式所示:

$$S_e(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha h|^n]^m \quad (2)$$

其中, $m = 1 - \frac{1}{n}$, $n > 1$, 并且

$$k = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

式中, S_e 为饱和含水量; θ_s 和 θ_r 分别为饱和和残余体积含水量; h 为基质吸力; α 、 m 、 n 为曲线拟合参数; k 为渗透系数; k_s 为饱和渗透系数。

2 土石坝坝坡稳定分析

Morgenstern 和 Price 在 1965 年研究出了一种类似于 Spencer 法的土坡稳定分析方法^[14], 称之为 Morgenstern - Price 法^[15]。Morgenstern - Price 方法同时考虑土条间法向力和切向力的作用, 其次充分考虑孔隙水压力对边坡稳定性的影响, 另外其平衡方程需同时满足力的平衡和力矩的平衡。因此, Morgenstern - Price 法不仅可以确定任意滑面形状的边坡稳定性, 也能较好地反映出最危险滑面各土条间相互作用力的情况, 其计算结果可以快速准确地指导边坡和滑坡处理的设计。

假定竖向作用力与横向作用力之间的关系为 $y = \lambda f(x)x$, 系数常取 1, $f(x)$ 为土条间横向作用力与纵向作用力的关系函数。通过考虑力平衡或弯矩平衡, 迭代计算边坡安全性系数。

根据弯矩平衡求得安全系数:

$$FS = \frac{\sum (c\Delta LR + RN \tan \varphi)}{\sum WL_w - \sum NL_N} \quad (4)$$

根据水平力平衡求得安全系数:

$$FS = \frac{\sum (c\Delta LR \cos \alpha + RN \tan \varphi \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha} \quad (5)$$

$$N = \frac{W + \lambda f(x) \left(\frac{c\Delta LR \cos \alpha}{FS} \right) - \frac{c\Delta L \sin \alpha}{FS}}{\left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{FS} \right) - \lambda f(x) \left(\frac{\cos \alpha \tan \varphi}{FS} - \sin \alpha \right)} \quad (6)$$

式中, c 为土体粘聚力, kPa ; φ 为土体内摩擦角, $^\circ$; ΔL 为各土条在滑动面上的长度, m ; L_w 为各土条形心到滑动面圆心的力臂长度, m ; L_N 为各土条在滑动面处的中点到对应法线之间的距离, m ; α 为各土条切线与水平面的夹角, $^\circ$; R 为对圆心取矩力臂长度, m ; N 为土条的法向作用力, 其中包含了孔隙水压力; λ 为条间作用力变化系数; $f(x)$ 为条间作用力函数。根据以上弯矩和水平力平衡条件, 便可通过迭代计算可得出对应滑动面的安全系数 FS 。此外, 根据坝的级别按照碾压式土石坝设计规范 (SL274 - 2001)^[16] 选取坝坡抗滑稳定的最小安全系数。

3 工程实例

3.1 工程概况

某水库设计洪水位 109.00 m, 校核洪水位 109.50 m, 正常蓄水位为 106.00 m, 死水位 94.00 m, 下游水位为 85.50 m。工程由大坝、溢洪道和放水设施组成, 该水库大坝为均质土石坝, 最大坝高 26.00 m, 坝轴线长 360.00 m, 下游坝脚处采用棱体排水, 坝底宽 137.00 m, 坝顶宽 5.00 m, 基础高程 84.50 m, 坝顶高程 110.50 m, 相应下游水位为 85.50 m (详见图 1)。

3.2 有限元模型与材料参数

现参考该水库资料, 取该水库大坝的最大坝高断面作为此次蓄水期的稳定渗流分析的计算模型, 建立大坝模型 (最高横断面) 如图 2 所示。在 SEEP/W 模块中建立有限元计算模型。为考虑坝基对坝体渗流的影响, 根据工程实际及相关经验, 取坝基影响深度为 69.00 m, 取坝基宽度约为坝底宽度的 2 倍为 257.00 m, 即坝基上游边界距坝踵 60.00 m, 下游边界距坝趾 60.00 m。此外, 水库蓄水正常工作后, 还考虑上游水库淤泥层的影响。有限元单元选用边长为 1.50 m 的非结构化四边形四节点和三角形三节点单元, 共剖分 10 722 个单元, 10 915 个节点。有限元模型的边界条件为: 土石坝上、下游水位以上区域为隔水边界; 上、下游水位以下区域为定水头边界, 上游水位为正常蓄水位 108.50 m, 下游水位为 85.50 m, 为揭示库水位骤降对坝坡稳定最大程度的影响, 本文假设水位在 1 h 从正常蓄水位骤降至死水位; 下游坡面以及下游水位以上的排水棱体内侧均视为潜在溢出面, 即流量 $Q = 0$; 坝基面也为隔水边界。有限元模型及边界条件如图 2 所示。此外, 坝体各材料参数包括饱和渗透系数 k_s 、重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 和泊松比 ν 见表 1 所示。

坝体材料模型采用 VG 饱和-非饱和渗流本构模型, 根据该水库已有资料, 本文选取坝体土土水特征曲

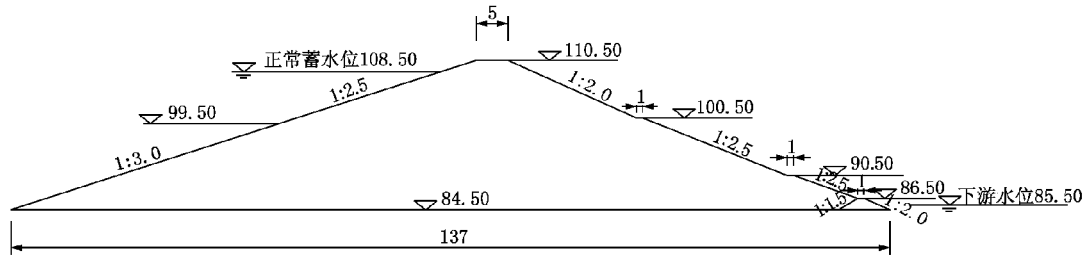


图1 土石坝最高横断面图(单位:m)

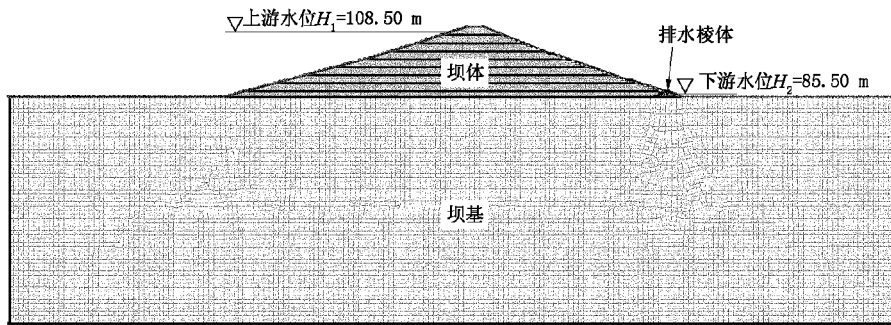


图2 有限元模型及边界条件

表1 坝体及地基部分材料参数

材料	$k_s / (\text{cm/s})$	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	C / kPa	$\varphi / ^\circ$	E / MPa	ν
坝体	5.60×10^{-5}	18.31	20.00	26.4	35.25	0.3
排水棱体	1.55×10^{-2}	19.92	0.00	30.0	10.00	0.3
坝基	2.14×10^{-5}	21.02	0.00	40.0	46.32	0.3

线拟合参数 α 、 m 和 n , 分别为 1.478、0.627 和 2.680, 土体饱和含水量 θ_s 为 0.43, 残余含水量 θ_r 取 0.045。其

中坝体材料的基质吸力与体积含水量的关系如图 3; 坝体水平渗透系数函数关系如图 4。

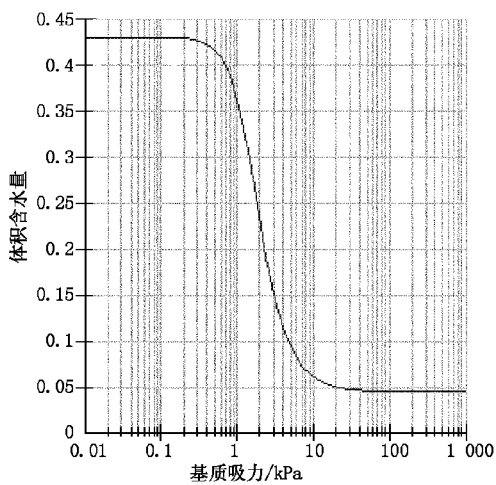


图3 坝体体积含水量随基质吸力的变化关系曲线

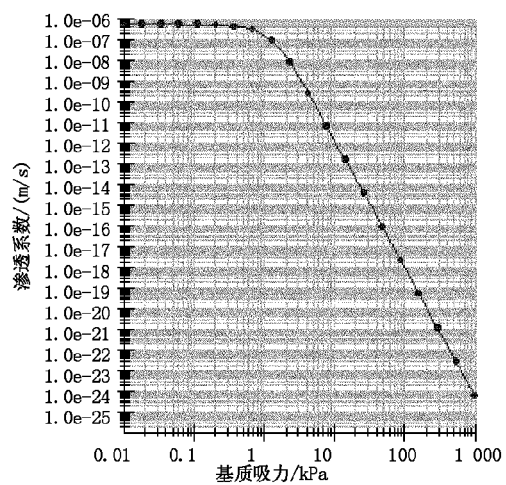


图4 坝体水平渗透系数随基质吸力的变化关系曲线

3.3 水位骤降工况下渗流计算结果与分析

为探究水库水位骤降工况下的坝体渗流稳定情况,本文假设水库上游库水位 H_1 在 1 h 内由正常蓄水位 108.50 m 降至死水位 94.00 m,并选取计算时取总历时为 200×10^4 s,分 200 步计算,选取其中 8 个时刻:2 028 s(33.8 min)、23 900 s(6.64 h)、96 232 s(1.11 d)、

444 720 s(5.15 d)、566 122 s(6.55 d)、1 014 917 s(11.7 d)、1 598 187 s(18.5 d)、 200×10^4 s(23.1 d)。限于篇幅,本文只给出部分时刻渗流计算结果浸润线分布云图,分别如图 5 ~ 图 10 所示,并将各时刻上游坝坡渗流分析结果包括土石坝单宽渗流量列于表 2 中。

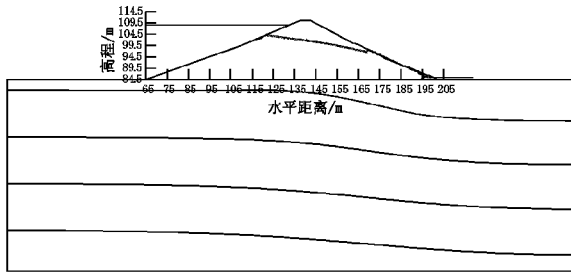


图 5 2 028 s 时渗流浸润线分布云图

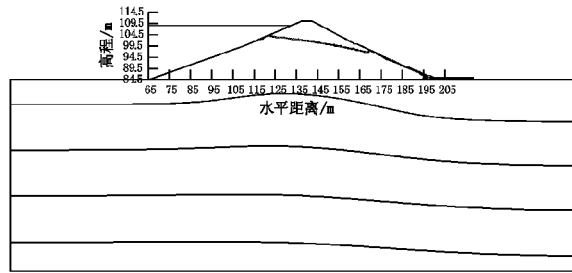


图 6 23 900 s 时渗流浸润线分布云图

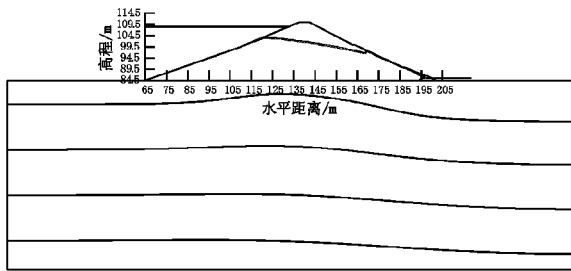


图 7 96 232 s 时渗流浸润线分布云图

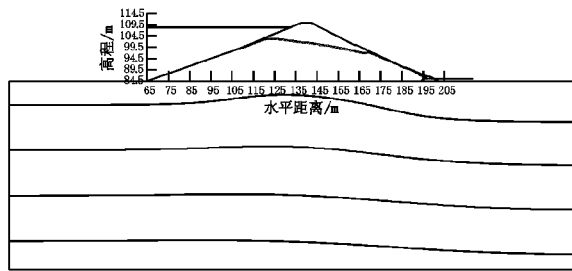


图 8 444 720 s 时渗流浸润线分布云图

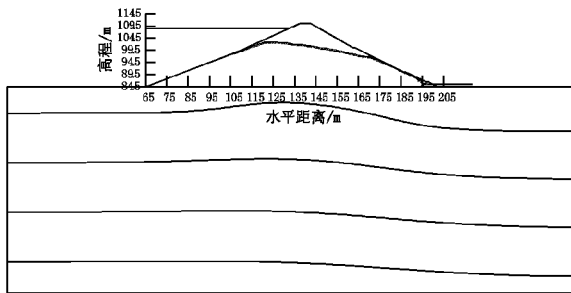


图 9 1 598 187 s 时渗流浸润线分布云图

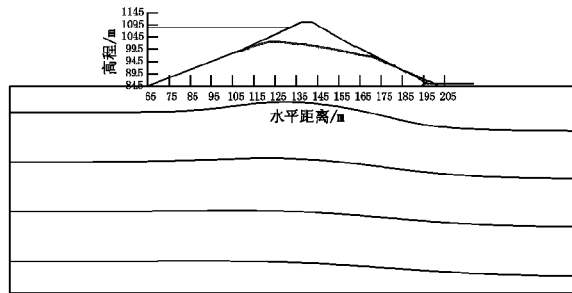


图 10 200×10^4 s 时渗流浸润线分布云图

对比上述渗流浸润线分布云图图 5 至图 10 可以看出,随着时间的推移、水位的下降,坝体内浸润线缓慢下降,库水位在 1h 内从正常蓄水位骤降至死水位,而坝体内浸润线降落至死水位所需要的时间远远大于 1h,可见坝体内渗流自由面降落滞后于库水位的降落,在同样的降幅情况下,库水位降落速度愈大、坝体渗透系数越小,滞后现象越明显,坝体内部渗流路径越陡,相应的水力坡降越大,从而导致坝体内部渗流水头增加,对土石坝稳定性的影响也就越大。因此,在分析大坝渗流时选取合适的计算荷载工况对坝型方案选择、坝体结构设计

以及采用何种防渗措施都有很大影响,故须慎重考虑。

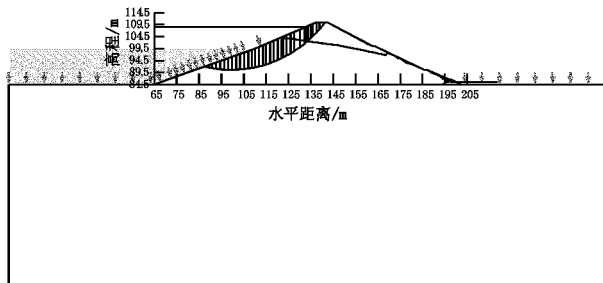
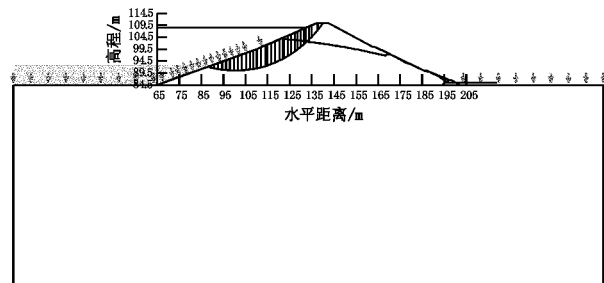
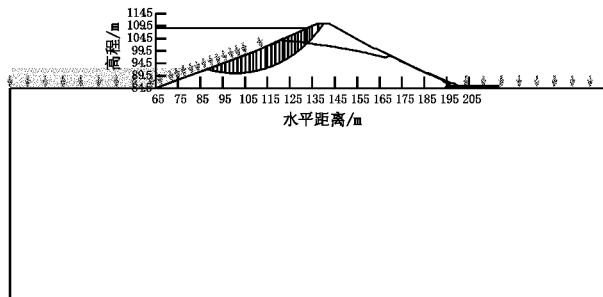
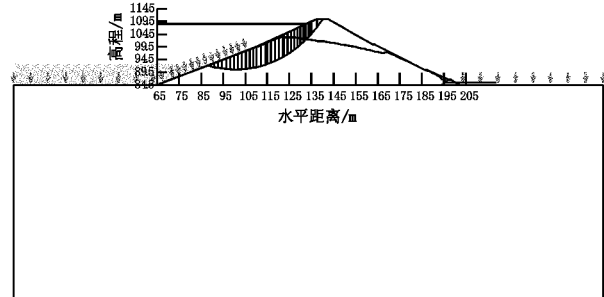
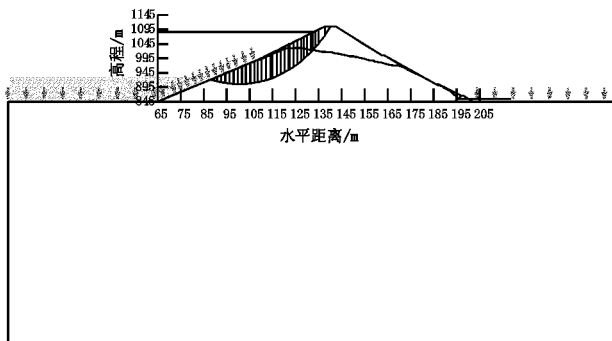
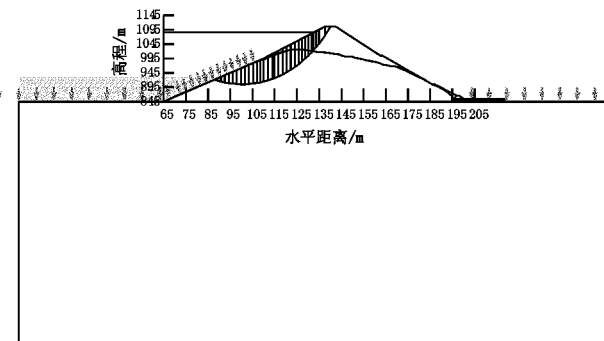
由表 2 可知,该水库大坝在库水位后的第 2 028 s 时单宽渗流量为 $0.064 167 \text{ m}^3/\text{s}$;第 23 900 s 时单宽渗流量为 $0.232 952 \text{ m}^3/\text{s}$;第 96 232 s 时单宽渗流骤降量为 $0.136 645 \text{ m}^3/\text{s}$;第 444 720 s 时单宽渗流量为 $0.001 005 \text{ m}^3/\text{s}$,第 200×10^4 s 时单宽渗流量为 $3.52 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。综上,水位骤降工况下的上游坝坡单宽渗透流量随着时间的推移、水位的下降先增大后减小,由此可见,即使在有效的防渗措施下,上游水位升降的变化仍会对坝体渗流量产生重要影响。

表2 库水位骤降条件下土石坝渗流与稳定分析结果

计算工况	上游坝坡单宽渗流量/(m ³ /s)	上游坝坡 FS
2 028 s(33.8 min)	0.064 167	1.809
23 900 s(6.64 h)	0.232 952	1.413
96 232 s(1.11 d)	0.136 645	1.462
444 720 s(5.15 d)	0.001005	1.532
566 122 s(6.55 d)	2.32×10^{-4}	1.534
1 014 917 s(11.7 d)	1.19×10^{-4}	1.541
1 598 187 s(18.5 d)	6.16×10^{-5}	1.550
200×10^4 s(23.1 d)	3.52×10^{-5}	1.661

3.4 水位骤降工况下稳定性计算结果与分析

与水位骤降工况下的渗流分析相同,本文对水库上游库水位 H_1 在 1 h 内由正常蓄水位 108.50 m 降低到死水位 94.00 m,下游水位为 $H_2 = 85.50$ m 工况下的上游坝坡稳定性进行了分析,计算时取总历时 200×10^4 s,分 200 步计算,选取其中 8 个时刻:2 028 s(33.8 min)、23 900 s(6.64 h)、96 232 s(1.11 d)、444 720 s(5.15 d)、566 122 s(6.55 d)、1 014 917 s(11.7 d)、1 598 187 s(18.5 d)、 200×10^4 s(23.1 d)。限于篇幅,本文只给出部分时刻坝坡稳定性计算结果,上游坝坡最危险滑动面如图 11 至图 16 所示,对应的上游坝坡稳定系数 FS 如图中所示,所有时刻的坝坡稳定性计算结果如表 2 所示。

图 11 2 028 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.809$)图 12 23 900 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.413$)图 13 96 232 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.462$)图 14 444 720 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.532$)图 15 1 598 187 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.550$)图 16 200×10^4 s 时上游坝坡最危险滑动面 ($FS = 1.661$)

由图 11 ~ 16 可以看出,在库水位骤降工况下,上游坝坡安全系数 FS 先降低,经过很长时间后安全系数 FS

又逐渐增大,在非饱和稳定渗流基础上分析水位骤降工况下上游坝坡安全系数 FS ,在水位骤降过程中, FS 首

先下降,大坝稳定安全系数由 1.809 逐渐降至 1.413,经过很长时间后,上游坝坡安全系数又缓慢增大至 1.661,但小于库水位骤降前的安全系数,可见在水位骤降过程中上游坝坡稳定性降低,并且由以上坝坡稳定分析图可以看出水位降落使浸润线形成逆向渗流形态,对上游坝坡稳定不利,库水位骤降工况坝坡需要很长时间才能达到渗流稳定状态。由表 2 可以得出结论:当上游库水位发生骤降时,坝坡稳定性将降低。

5 结 语

(1)土石坝的渗流稳定分析是土石坝安全设计中非常关键的问题。本文基于 Van Genuchten 非饱和渗流模型综合考虑土石坝饱和区渗流和非饱和区渗流,建立了非饱和土坝坡安全系数计算公式,并对水位骤降工况下的某均质土石坝工程进行了渗流稳定分析。

(2)库水位骤降时会使浸润线形成逆向渗流形态,对上游坝坡稳定不利,但是当孔隙水压力消散时间足够长时,上游坝坡稳定性有一定程度的提高。

参考文献:

- [1] 魏晶,卢敏,蒋浩. 边坡渗流及稳定性分析的现状与发展[J]. 水利科技与经济,2014,20(3):67~69.
- [2] 王薇. 土石坝安全风险分析方法研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [3] Cho S E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation[J]. Engineering Geology,2012,133:30~39.
- [4] 毛昶熙,陈平,李祖贻,等. 裂隙岩体渗流计算方法研究[J]. 岩土工程学报,1991,13(6):1~10.
- [5] 陈晓平,茜平一,梁志松,等. 非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析[J]. 岩土力学,2004,25(6):860~864.
- [6] 田东方,刘德富,王世梅,等. 土质边坡非饱和渗流场与应力场耦合数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(3):810~814.
- [7] 秦茂洁. 水位骤降情况下的坝坡稳定分析研究[D]. 华南理工大学,2012.
- [8] 沙晓刚. 基于 Geo-Studio 的土石坝渗流与稳定分析研究[D]. 兰州理工大学,2014.
- [9] 宋国涛. 渗流作用对土石坝边坡稳定的影响分析[J]. 黑龙江水利科技,2015,2(43):27~28.
- [10] 曹平,张科,汪亦显,等. 多层边坡破坏机制数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):872~878.
- [11] Papagiannakis, A T, Fredlund, D G. A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3):419~430.
- [12] Cho, S E, Lee, S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(3):185~208.
- [13] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(5):892~898.
- [14] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surface[J]. Géotechnique, 1965, 15(1):79~93.
- [15] Rong F, Chen L, Yu Y X, et al. Study on slope reliability method response surface method based on Morgenstern-Price method[J]. Global Geology, 2009, 12(3):179~182.
- [16] 中华人民共和国水利部. SL 274-2001. 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

编辑:张绍付

Seepage and slope stability analysis of uniform embankment dams under rapid drawdown of water level

LUO Chun¹, LUO Yuan², WANG Feng³

(1. Chongyi County Water Resources Bureau of Jiangxi Province, Chongyi 341300, China;

2. Chongyi County Soil and Water Conservation Bureau of Jiangxi Province, Chongyi 341300, China;

3. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

Abstract: Van Genuchten unsaturated seepage model is adopted for comprehensive saturated and unsaturated seepage analysis in this paper, and then an embankment dam is taken as an example to investigate the seepage and slope stability problems of embankment dams under rapid drawdown of water level. The results show that the fluctuation of the upstream water level has a great influence on the seepage flow of the dam under rapid drawdown of water level. The reverse seepage formed during the rapid drawdown of water level significantly reduce the slope stability of the embankment dams. However, the factor of safety for the upstream slope increase to an extent when the dam pore water pressure is sufficiently dissipated.

Key words: Embankment dam; Rapid drawdown of reservoir water level; Transient seepage; Slope stability

翻译:王 锋