

# 库水位下降速率对土石坝稳定性分析研究

崔频捷<sup>1</sup>,周清勇<sup>2</sup>,陈芳<sup>2</sup>

(1.江西省水泰工程检测有限公司,江西 南昌 330001;2.江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

**摘要:**库水位下降过程中,坝体黏性土对水份的吸力作用使得黏性土体内的水份不能及时消散,造成黏性坝体内水位高于库内水位,所发生现象对坝坡渗流、稳定与应力均产生较大影响.以大禾田水库为例,基于饱和-非饱和渗流理论,采用二维有限单元方法,分析库水位下降后的渗流稳定、应力及水压荷载作用下位移变形,分析库水位下降速率对土石坝稳定性的影响,研究结果对水库调度运行管理有一定的指导作用.

**关键词:**水位下降;渗流稳定;应力;下降速率;安全系数

**中图分类号:** O357.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-4701(2017)04-0281-04

## 0 引言

库水位下降过程中,土石坝坝体内渗流场在短时间内会发生较大变化,影响着上游坝坡的安全稳定,上游坝坡发生最不利情况是长期蓄水后水位骤降所引起的潜在滑坡.如谢定松<sup>[1]</sup>等利用模型试验模拟和有限元计算分析了库水位快速下降条件下自由水面线变化规律;贺亚魏<sup>[2]</sup>等通过对某土石坝在水位不同升降速度条件下的渗流场进行了数值试验,总结了坝坡最危险滑动面的安全系数变化规律;王冬林<sup>[3]</sup>等研究上游坝坡稳定性随着库水位下降的变化规律;涂国祥等<sup>[4]</sup>采用相关方法计算水位下降期间某堆积体危险水位出现位置;郑颖人等<sup>[5]</sup>证明了在库水位下降过程中存在一个对坡体稳定最不利的水位.库水位下降速率的大小对大坝及库岸边坡的稳定有着一定的影响<sup>[6-8]</sup>,合理控制库水位下降速率是有效避免滑坡发生的有效措施.

影响土石坝渗流稳定的因素包括材料渗透特性、土体各特性参数和库水位下降等,其中库水位下降的影响最为常见也最为明显.所以,本文以黏土斜心墙坝为例,基于饱和-非饱和渗流理论,采用二维有限单元方法,分析库水位下降后的渗流稳定和库水位下降速率对大坝的稳定性的影响,研究结果对确保大坝运行安全有着一定的指导作用.

## 1 饱和-非饱和渗流理论

土石坝长年蓄水过程中,库水位及浸润线以上滑体处于非饱和状态,库水位及浸润线以下滑体处于饱和状态,所以有部分潜在的滑动面处于库水位以上.而随着库水位下降,浸润线也会随之下滑,临界变化处的土体由饱和变为非饱和状态,非饱和区和饱和区中的土壤水运动又是相互联系的,将两者统一起来分析研究即为饱和与非饱和问题.本文将土石坝和地基假定为各向同性多孔介质,则建立的渗流控制方程为:

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

式中: $H$ 为总水头; $k_x$ 、 $k_y$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的渗透系数; $Q$ 为边界上水的流量; $\theta$ 为体积含水率; $t$ 为时间.该方程描述了渗流区单元内某时段流入和流出的总流量等于体积含水率的变化量.

$$\text{水头边界条件为: } k \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{r_1} = h(x, y, t) \quad (2)$$

$$\text{流量边界条件为: } k \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{r_2} = q(x, y, t) \quad (3)$$

式中: $k$ 为渗透系数; $r_1$ 为水头边界; $r_2$ 为流量边界; $n$ 为边界 $r_1$ 或 $r_2$ 的外法线方向; $h(x, y, t)$ 为边界 $r_1$ 上相应时刻的水头; $q(x, y, t)$ 为边界 $r_2$ 上单宽补给流量.初始条件为开始时刻渗流场,即常水位下的稳定渗

流,求解方程时,有限元程序采用 Galerkin 加权残数法原理<sup>[9,10]</sup>。

本文通过二维有限元瞬态渗流分析库水位下降后的自由面,采用有效应力法结合 M-P 法分析大坝边坡稳定性,采用 Old 原位法对大坝进行应力及水压荷载下位移变形分析。

## 2 库水位下降过程分析

### 2.1 工程概况

大禾田水库位于江西省莲花县琴亭镇杨枫村,正常蓄水位 181.23 m(黄海高程,下同),死水位 177.76 m,设计洪水位 181.82 m,校核洪水位 182.00 m,总库容  $15.80 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,大坝为均质土坝坝体,溢洪道为开敞式结构,堰顶高程为 181.23 m,输水涵管位于大坝左端坝体内,为平涵结构,进口底高程为 177.76 m,最大过流能力为  $4.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ,平均过流能力为  $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ,是一座

以灌溉为主,兼顾养殖等综合效益的小(2)型水库,水库地理位置比较特殊,影响着下游人口、农田和公路及电讯基础设施。本文以该水库库水位下降为研究对象,基于饱和-非饱和渗流理论,采用二维有限元方法分析在库水位下降中渗流稳定、应力及水压荷载下位移变形<sup>[11]</sup>,分析库水位下降速率影响下的大坝稳定性。

### 2.2 库水位下降后渗流稳定

在库水位下降过程中,库水位下降会造成坡外水位低于坡体内水位,形成坡内指向坡外的渗流场,浸润线变化范围内,非饱和区范围变大,基质吸力增大,土体有效应力发生相应变化。

选取大禾田水库库水位由常水位 181.23 m 降落至死水位 177.76 m 作为瞬态非饱和计算条件,库水位下降主要靠输水涵管进行,以平均过流流量计算,分析库水位下降过程后的渗流浸润线、稳定安全系数、应力分布、水压荷载下位移变形情况等,计算结果如图 1~图 4 所示,库水位下降后的孔隙水压力如图 5 所示。

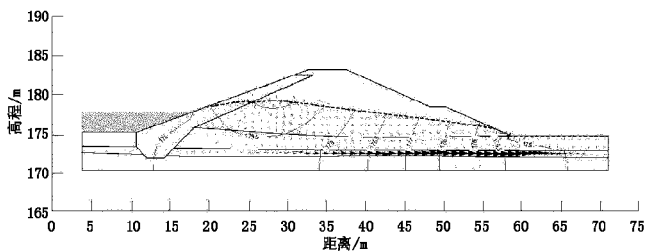


图1 库水位下降后的渗流计算图

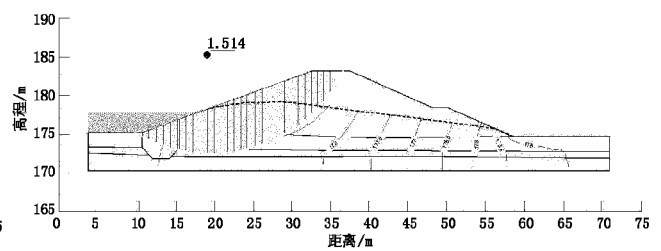


图2 库水位下降后抗滑稳定计算图

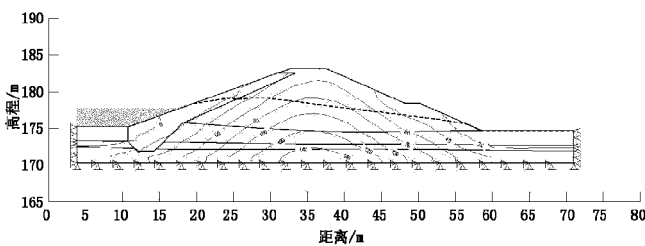


图3 库水位下降后应力分布图

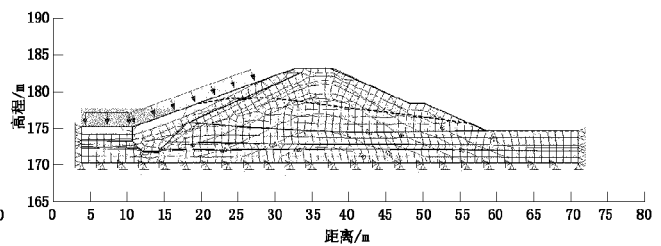


图4 水压荷载作用下位移变形图

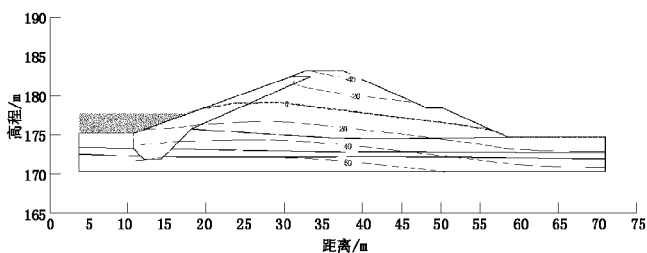


图5 库水位下降后孔隙水压力分布图

从图 1~图 5 分析可知:①随着库水位的下降,坝体内浸润线高度随之下降,但其下降速度远低于库水位的下降速度;②库水位下降后的稳定安全系数为 1.514 大于规范允许值(1.25);③相比于稳定期的有效应力分布,库水位下降后的有效应力呈现下降趋势;④水压荷载作用的位移变形,主要集中在斜心墙上。⑤孔隙水压力的变化受库水位下降的影响比较大,与库水位变化具有同步性。结果表明:在库水位下降过程中,大坝属

安全稳定运行状态。

### 2.3 下降速率对比分析

本文分析多种下降速率情况下的大坝稳定性,选取由常水位 181.23 m 降落至死水位 177.76 m 作为计算工况,采用坝下涵管最大过流流量(4.35 m<sup>3</sup>/s)、平均过流流量(2.35 m<sup>3</sup>/s)和外加常规抽水泵辅助过流量(3.35 m<sup>3</sup>/s)等3种情况分析,基于饱和-非饱和渗流理论,采用二维有限单元方法,通过分析下降过程中浸

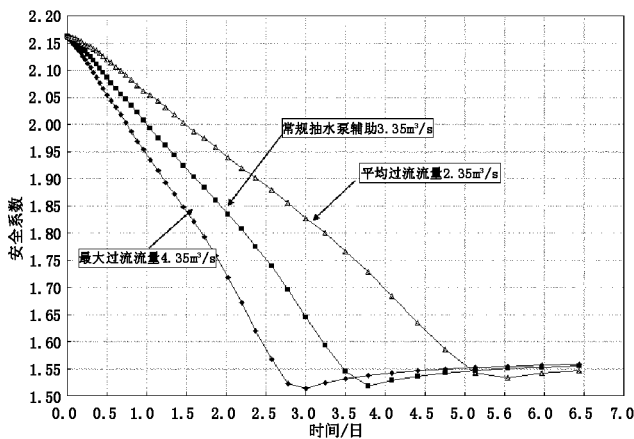


图6 上游坝坡安全系数变化图

由图6和图7可知:①随着时间的增加,上游坝坡稳定系数总体上先减小,当达到一定水位后即稳定系数最小后(为降至死水位时),稳定安全系数逐渐回升趋于稳定;②随着库水位下降速率的变化,即流量 2.35 m<sup>3</sup>/s→流量 3.35 m<sup>3</sup>/s→流量 4.35 m<sup>3</sup>/s,流量越大安全系数越小,且坝坡最小安全系数出现的时间越早;③当库水位下降速率为特殊工况时(即流量为 8.15 m<sup>3</sup>/s),最小安全系数计算值为 1.25,达到土石坝稳定安全系数规范允许值(1.25),上游坝坡可能失稳。所以,合理控制水位下降速率可以预防土石坝坝坡失稳,对水库和库岸失稳破坏防治有一定的指导意义。

## 3 结论

本文以大禾田水库工程为例,分析了库水位下降过程后的渗流稳定、应力及水压荷载下位移变形及库水位下降速率对大坝稳定性的影响。主要结论如下:

(1)库水位下降过程中,上游坝坡稳定安全系数随着水位下降而减小,存在着一个最小安全系数,当达到一定水位后,稳定安全系数逐渐回升趋于稳定;

(2)水压荷载作用的位移变形,主要集中在斜心墙

润线的变化所影响坝坡稳定性变化,计算库水位下降速率对上游坝坡的安全系数的影响如图6所示。通过计算多种下降速率,寻找到最危险情况即在特殊工况下(即流量为 8.15 m<sup>3</sup>/s)安全系数变化,虽然在特殊工况下过流流量发生的可能性不大,但作为判别分析坝坡稳定有着一定的参考作用,图7为特殊工况下上游坝坡安全系数变化图。

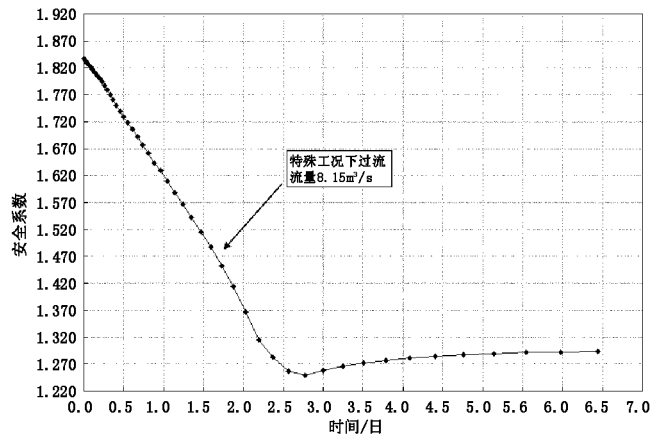


图7 特殊工况下上游坝坡安全系数变化图

上;

(3)库水位下降随时间变化较为明显,下降速率越快,越容易降低土石坝坝坡稳定性;

(4)当库水位下降速率为特殊工况流量 8.15 m<sup>3</sup>/s时,最小安全系数达到规范允许值,上游坝坡可能失稳。所以,合理控制水位下降速率可预防土石坝坝坡失稳,对土石坝水库调度运行管理有一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 谢定松等. 库水位快速变动条件下心墙坝上游坝壳自由水面线变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012(09): 1568 ~ 1573.
- [2] 贺亚魏, 孟军省, 刘雪梅. 水位升降对粘土心墙土石坝渗流稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008(05): 92 ~ 96.
- [3] 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(04): 147 ~ 149.
- [4] 涂国祥, 邓辉, 黄润秋. 水位变动速度对某库区岸坡堆积体稳定性的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011(04): 63 ~ 70.
- [5] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(18): 3203 ~ 3210.
- [6] 廖建建等. 渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006(01): 88 ~ 92.
- [7] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2002(04): 343 ~ 348.

- [8] 张文杰,陈云敏,凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报,2005(12):1510~1516.
- [9] 毛昶熙,段祥宝,李祖貽. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京:河海大学出版社,1999.
- [10] Fredlund Delwyn G,Rahardjo Harianto. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [11] 欧阳君等. 基于ABAQUS的土石坝稳定渗流期应力应变分析[J]. 水资源与水工程学报,2012(02):104~108.

编辑:张绍付

## Study on stability of reservoir water level decreasing rate to earth – rock dams

CUI Pinjie<sup>1</sup>, ZHOU Qingyong<sup>2</sup>, CHEN Fang<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Shuitai Engineering Inspection Co. LTD, Nanchang 330001, China;

2. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** In the process of reservoir water level declining, because of the adsorption of cohesive soil on water moisture, the moisture content of the cohesive soil can not dissipate in time, resulting in viscous dam body water level was higher than the reservoir water level, this phenomenon had a great impact on seepage, stability and stress of dam slope. Taking Dahe Tin reservoir as an example, based on the saturated – unsaturated seepage theory, a two – dimensional finite element method was used, the seepage stability, stress and displacement under hydrostatic load, drawdown rate of reservoir water level were analyzed, the research results play a guiding role in the operation and management of reservoirs.

**Key words:** Water level drop; Seepage stability; Stress; Descent rate; Safety factor

翻译:郭庆冰

(上接第275页)

## Coupling analysis of aqueduct temperature stress in the operation period of the Kezi river

PAN Chongren

(Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The cement hydration heat in the operation period have disappeared, the structure in a more stable state because of temperature, the outside temperature changes will cause the aqueduct internal temperature stress changes, at the same time in the sunshine, environmental temperature changes and sudden cooling structure caused by temperature stress and temperature difference change. The establishment of three – dimensional model of Kezi river aqueduct by 3D finite element simulation software, aqueduct period, temperature and period of running stress distribution, finally effectively crack in the aqueduct during operation, in order to provide the basis for future design of aqueduct design.

**Key words:** The river of Kezi; Aqueduct engineering; Thermal stress; Coupling analysis

翻译:潘崇仁