

# 岩溶发育地质条件下的库区三维渗流场 分析及渗控效果评价

张文兵<sup>1,2</sup>, 沈振中<sup>1,2</sup>, 陈官运<sup>1,2</sup>, 张琬琳<sup>3</sup>, 魏舒萌<sup>4</sup>, 汪千敢<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 中建中东有限责任公司, 迪拜 63932; 4. 巨野县水务局, 山东 菏泽 274900)

**摘 要:** 我国是世界上岩溶地貌分布较为广泛和典型的国家之一,因而在岩溶发育地质条件下建库筑坝成为坝工界普遍重视的技术难题。库址区的渗流分析和控制评价是大坝设计及运行过程中的一个重要环节,对库址区岩土体及水工建筑物的安全和水库运行的经济合理性有着重要的影响。选取某岩溶发育地质条件下的水库大坝工程,结合工程特点,建立反映主要坝体结构和库址区水文地质特征的渗流分析三维有限元模型,采用饱和-非饱和渗流计算理论计算分析运行期库址区渗流场,并研究库址区坝体、坝基及两岸岩体渗流特性和变化规律,进而对工程所采取的防渗体系的合理性进行评价。结果表明:设计防渗体系能够有效降低库址区地下水位,库址区各部位渗透坡降总体较小,能够满足渗透稳定要求,并且在当前防渗系统作用下,库址区渗流量得到有效控制。

**关键词:** 岩溶地貌; 库址区; 渗流分析; 三维有限元模型; 防渗体系

中图分类号: TV223.4; TV139.14

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0218-07

## Three-dimensional seepage field analysis and seepage control effect evaluation of a reservoir site under karst development geology

ZHANG Wenbing<sup>1,2</sup>, SHEN Zhenzhong<sup>1,2</sup>, CHEN Guanyun<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Wanlin<sup>3</sup>, WEI Shumeng<sup>4</sup>, WANG Qiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. China State Construction Engineering Corporation Middle East, Dubai 63932, United Arab Emirates; 4. Juye County Water Authority, Heze 274900, China)

**Abstract:** China is one of the typical countries with a wide range of karst landforms in the world, it has been a technical problem to build a dam under the geological conditions of karst development. The seepage analysis and control evaluation of the reservoir site plays an important role in the process of dam design and operation, and has an important impact on the safety of the rock mass and hydraulic structures in the reservoir site, as well as the economic rationality of reservoir operation. Here, a reservoir dam project under the geological condition of karst development was selected as the research object, combined with the engineering characteristics, a three-dimensional finite element model of seepage analysis was established based on the characteristics of the main dam structure and the hydrogeological conditions of the reservoir site. The saturated – unsaturated seepage calculation theory was used to calculate and analyze the seepage field in the reservoir site during the operation period. In addition, the seepage characteristics and change laws of the dam body, dam foundation and rock mass on both banks of the dam in the reservoir site were studied to evaluate the applicability of the anti-seepage system adopted in this project. The results show that the designed seepage control system in use can effectively reduce the groundwater level in the reservoir site, and the seepage gradient of each part of the reservoir site is generally small, which can

收稿日期: 2020-02-01; 修回日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金/雅砻江联合基金项目(U1765205); 江苏高校优势学科建设工程项目(水利工程)

作者简介: 张文兵(1993-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要从事工程渗流特性分析与控制方法研究。

meet the requirements of seepage stability. Moreover, under the effect of the current seepage control system, the leakage in the reservoir site is effectively controlled.

**Key words:** karst landform; reservoir site; seepage analysis; three-dimensional finite element model; anti-seepage system

## 1 研究背景

根据我国“十三五”期间能源结构调整的总体趋势和要求,水资源作为一种高效且清洁的能源,将继续在我国的能源发展战略中发挥不可或缺的作用。随着对水资源的不断开发与利用,在复杂地质条件下修库筑坝成为高效开发利用水电能源不可避免的挑战。常见的库址区复杂地质条件主要包括深厚覆盖层<sup>[1-2]</sup>、地质断层<sup>[3]</sup>和岩溶<sup>[4]</sup>等类型。岩溶地貌在我国分布较为广泛,特别是在西南地区,一些水库大坝工程在建设过程中需要穿越岩溶发育区<sup>[5]</sup>。溶洞是岩溶地层中最为常见的产物,其存在将影响坝基及库岸边坡的渗透稳定性。因此,对相关工程进行渗流分析和渗控效果评价具有重要的工程参考价值。

目前,对于复杂地质条件下的库区渗流研究多集中在地质断层和深厚覆盖层上的坝体、坝基及两岸坝肩的渗流特性分析<sup>[6-10]</sup>。Jiang等<sup>[11]</sup>根据四川广安龙滩水库所处的地质环境,构建了岩溶发育地质条件下的水库地下水渗流模型,并对库底岩溶渗漏通道的涌水量进行了模拟;Mohammadi等<sup>[12]</sup>以伊朗 Khersan 大坝为案例进行研究,提出了一种研究岩溶区坝址渗漏的方法;柳昭星等<sup>[13]</sup>针对某矿区岩溶发育地层突水灾害帷幕灌浆防渗工程,开展了岩溶发育地层帷幕灌浆材料的性能及适用性研究;刘胜<sup>[14]</sup>基于同位素-水文地球化学方法对岩溶区水电工程灌浆帷幕的可靠性进行了综合评价研究。尽管有关岩溶发育地质条件下的工程渗流研究成果颇为丰硕,但针对岩溶发育地质条件下的库区渗流特性研究鲜见报道。

本文结合位于华阳河干流上某岩溶地质发育的水库大坝工程,基于等效连续介质模型,采用饱和-非饱和渗流计算理论,依托此枢纽工程的水文地质条件和工程设计资料,对库区主要建筑物、复杂地质以及防渗结构进行精细化模拟,建立水库运行期的三维渗流分析有限元整体模型,开展三维渗流计算。并在此基础上,结合防渗设计方案,对坝体、坝基和库岸的渗透稳定性等关键性问题进行分析,综合评价所采取的防渗型式的渗控效果。研究成果可为类似地质条件下的水库大坝工程防渗系统设计与优化

布置提供参考。

## 2 饱和-非饱和渗流计算理论

### 2.1 基本微分方程

土坝及其库岸边坡中的水体运动属于饱和-非饱和渗流问题,其研究难点不仅在于非饱和渗流是一个多因素(固-液-气三相的体积比、空气压力、土体骨架变形和温度等)相互耦合作用的过程,而且还在于寻求非饱和土体的渗透系数<sup>[15]</sup>。与利用达西定律求解饱和土体渗流所不同的是,非饱和土体的渗透系数不再是一个常量,而是随着含水量变化的函数<sup>[16]</sup>。

目前,对于饱和-非饱和土体中的渗流问题主要采用多孔介质饱和-非饱和渗流理论来进行计算,其基本方程如下<sup>[17-18]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $k_{ij}^s$ 为饱和渗透系数张量,m/s; $k_r(h_c)$ 为非饱和带相对渗透系数( $0 \leq k_r(h_c) \leq 1$ ); $h_c$ 为压力水头,m; $k_{i3}^s$ 为饱和渗透系数张量中只与第3坐标轴有关的渗透系数张量,m/s; $Q$ 为渗流源汇项,m<sup>3</sup>/s; $C(h_c)$ 为容水度,m<sup>-1</sup>; $S_s$ 为弹性贮水率,m<sup>-1</sup>; $\beta$ 为饱和-非饱和选择常数,在非饱和带等于0,在饱和带等于1。

土壤水力函数选用 van Genuchten 模型进行描述<sup>[19]</sup>:

$$k_r(h_c) = \frac{\{1 - (\alpha h_c)^{n-1} [1 + (\alpha h_c)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h_c)^n]^{m/2}} \quad (2)$$

$$\theta(h_c) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h_c)^n]^{-m} \quad (3)$$

$$C(h_c) = \frac{\partial \theta}{\partial h_c} = \alpha (\theta_r - \theta_s) (n-1) (\alpha h_c)^{n-1} [1 + (\alpha h_c)^n]^{1/n-2} \quad (4)$$

式中: $\theta_r$ 为残余含水率,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>; $\theta_s$ 为饱和含水率,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>; $\alpha$ 为水分特征曲线进气值的倒数,m<sup>-1</sup>; $n$ 为水分特征曲线坡度的指示参数,通过拟合土壤水分特征曲线得到; $m = 1 - 1/n$ 。



表 1 库址区岩溶空洞位置信息统计表

| 序号 | 空洞断面编号                  | 溶蚀深度/m      | 溶蚀段高程/m       | 岩溶发育特征                                         |
|----|-------------------------|-------------|---------------|------------------------------------------------|
| 1  | 1 <sup>#</sup> 溶腔       | 31.1 ~ 31.6 | 121.8 ~ 122.1 | 溶隙性溶蚀,泥质充填。                                    |
| 2  | 右岸 4 <sup>#</sup> 溶腔(1) | 49.1 ~ 55.0 | 95.0 ~ 109.9  | 溶隙性溶蚀,溶隙分布不均,泥质充填。                             |
|    |                         | 72.9 ~ 87.3 | 62.6 ~ 76.9   | 溶腔竖直发育深度大于 15.0m,泥质充填,溶腔未揭穿底部。                 |
|    | 6 <sup>#</sup> 溶腔(1)    | 28.8 ~ 35.4 | 109.3 ~ 115.9 | 溶腔长 6.6m,局部充填物为粘土夹砾石、卵石,卵石分布不均,粒径 2 ~ 4cm,次圆状。 |
|    |                         | 36.4 ~ 37.1 | 107.6 ~ 108.3 | 溶腔发育长度 70cm,无充填物。                              |
| 3  | 副坝 6 <sup>#</sup> 溶腔(3) | 53.0 ~ 54.0 | 90.7 ~ 91.7   | 溶腔发育长度 100cm,宽度 5 ~ 10cm,形状不规则,无充填物。           |
|    |                         | 57.3 ~ 58.5 | 86.2 ~ 87.4   | 溶腔发育长度 120cm,宽度 5 ~ 10cm,形状不规则,无充填物。           |
|    |                         | 59.6 ~ 60.0 | 84.7 ~ 85.1   | 溶腔发育长度 40cm,无充填物。                              |
| 4  | 10 <sup>#</sup> 溶腔      | 13.5 ~ 17.1 | 155.5 ~ 159.0 | 溶腔发育长度 8m,宽度约 260cm,无充填物。                      |
|    |                         | 18.3 ~ 20.0 | 147.2 ~ 148.6 | 溶腔发育长度 8m,宽度约 500cm,无充填物。                      |
| 5  | 左岸 11 <sup>#</sup> 溶腔   | 73.6 ~ 74.4 | 118.1 ~ 119.5 | 溶腔发育长度 25m,宽度约 800cm,无充填物。                     |
| 6  | 12 <sup>#</sup> 溶腔      | 70.7 ~ 72.1 | 89.8 ~ 90.7   | 溶腔发育长度 10m,宽度约 1000cm,无充填物。                    |

3.2 有限元模型

根据水库大坝、副坝及左右岸采取的防渗型式,结合工程的实际情况,构建水库运行期的三维渗流分析有限元模型,以期分析正常蓄水位工况下的坝体、坝基及左右岸坝肩山体的渗流分布规律,判断防渗设计方案的有效性以及坝体、坝基和防渗帷幕的渗透稳定性,综合评价所采取的防渗型式的防渗效果。有限元模型计算坐标系定义如下:原点  $o$  取自大地坐标  $(x, y) = (3\ 398\ 121.687, 379\ 443.924)$ ;  $x$  方向为垂直河流方向,平行于坝轴线,以指向左岸为正;  $y$  方向为垂直坝轴线方向,以指向上游库区为正;  $z$  轴垂直向上,以高程为坐标。另外,为了简化模型计算,所构建的有限元模型上游边界为防渗线上游 200 m,左岸边界为左岸主坝灌浆帷幕终点以左 1.5 倍坝高,右岸边界为右岸主坝灌浆帷幕端头以右 200 m,下游边界为下游坝脚以外 150 m,顶高程取实际地形,底高程截至 0。有限元模型截取范围如图 1 所示。

综合分析库址区计算区域内地形地貌、地层岩性及岩溶等特征,建立库址区三维有限元渗流计算模型超单元网格。根据建筑物的布置、地质分层及计算要求等信息,选取 13 个控制断面,其中 1、4、6、10 ~ 12 断面存在空洞,2、3、5、7 ~ 9、13 断面无空洞

(见图 1),加密细分后生成的三维有限元网格结点总数为 21 437 个,单元总数为 22 136 个。图 2 为库址区三维有限元模型及网格剖分示意图。

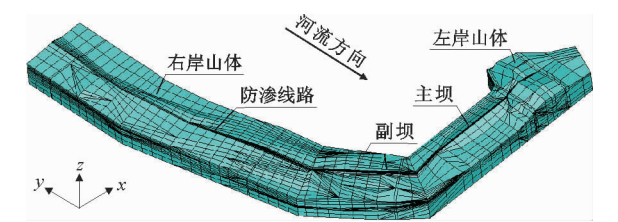


图 2 三维有限元模型及网格剖分

3.3 计算参数及边界条件

根据坝体各区材料特性、主要结构面的概化情况和各地层的钻孔注水试验成果,将库区材料按渗透性的不同划分为 17 个参数区,见表 2。

本文中的模型边界主要可分为水头边界、出渗边界以及不透水边界 3 种。水头边界为库址区水位线以下的河床及地下水位截取边界,其中左、右岸截取边界天然地下水位最大高程为 128.3 和 140.0 m,并由山体高处向河道逐渐降低,最终与河道水位衔接,根据已知资料,取下游河道水位高程为 124.1 m;出渗边界为水位线以上的边界,即与大气相接触的所有边界;不透水边界包括模型上、下游截取边界及模型底边界。

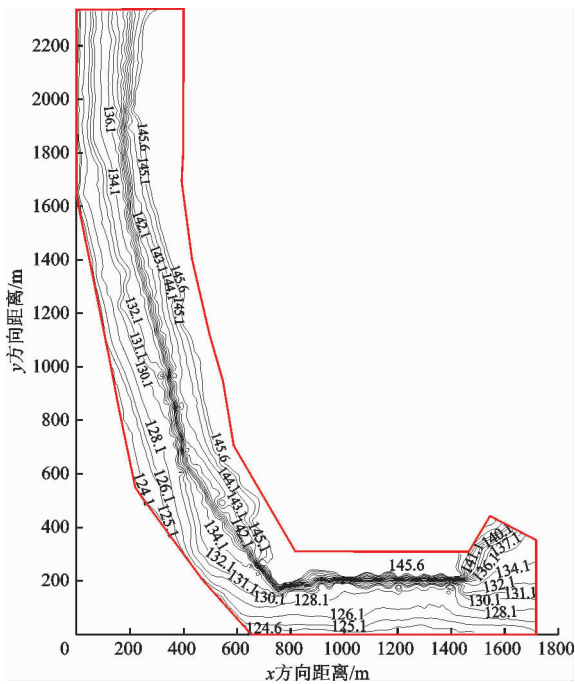
表2 库区各材料渗透系数

| 序号 | 材料      | 渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 序号 | 材料 | 透水性  | 渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----|---------|------------------------------------------|----|----|------|------------------------------------------|
| 1  | 坝体砂砾石料  | $1.00 \times 10^{-3}$                    | 10 | 砂岩 | 微透水  | $5.98 \times 10^{-6}$                    |
| 2  | 黏土心墙    | $1.00 \times 10^{-5}$                    | 11 |    | 弱透水  | $7.18 \times 10^{-5}$                    |
| 3  | 混凝土防渗墙  | $1.00 \times 10^{-7}$                    | 12 |    | 中等透水 | $2.94 \times 10^{-4}$                    |
| 4  | 灌浆帷幕    | $5.00 \times 10^{-5}$                    | 13 |    | 强透水  | $1.00 \times 10^{-2}$                    |
| 5  | 河流冲积物   | $6.00 \times 10^{-2}$                    | 14 | 灰岩 | 微透水  | $5.98 \times 10^{-6}$                    |
| 6  | 人工堆积层   | $1.00 \times 10^{-2}$                    | 15 |    | 弱透水  | $4.60 \times 10^{-5}$                    |
| 7  | 粉质黏土夹碎石 | $1.72 \times 10^{-5}$                    | 16 |    | 中等透水 | $3.17 \times 10^{-4}$                    |
| 8  | 粉质黏土    | $6.00 \times 10^{-5}$                    | 17 |    | 强透水  | $1.00 \times 10^{-2}$                    |
| 9  | 泥质卵砾石   | $6.00 \times 10^{-4}$                    |    |    |      |                                          |

## 4 结果分析与评价

### 4.1 库址区平面渗流特性分析

因库址区左、右岸及副坝处均存在岩溶空洞,其存在将会改变库址区地下水等值线分布,即在岩溶空洞位置处的地下水等值线会出现突降现象。因此,岩溶空洞可能会成为地下水富集区或库水渗漏通道,进而对整个水库工程产生不利的影响。为此,在水库建设过程中采用混凝土砂浆对岩溶空洞先进行填塞,再进行灌浆处理。图3给出了经防渗处理后的库址区地下水位等值线图。



下水等势线图,从图中可以看出,浸润线在由黏土心墙、混凝土防渗墙和灌浆帷幕形成的组合防渗处的上、下游形成了突降,并且在组合防渗体系下游坝体内的浸润线较为平缓,防渗体的联合阻渗作用共削减水头 16.12 m,占总水头的 74.98%,防渗效果明显。图 4(i)、4(j)为截取的左岸山体处地下水等势

线图,相较于混凝土防渗墙、黏土心墙和灌浆帷幕组合防渗体系,由灌浆帷幕单独形成的防渗处浸润线突降变化不明显,但削减水头 13.15 m,占总水头的 61.16%,并且在溶洞断面 11 处的地下水等值线分布规律正常,表明对左岸溶洞群的防渗处理方式合理有效,能够起到有效控渗作用。

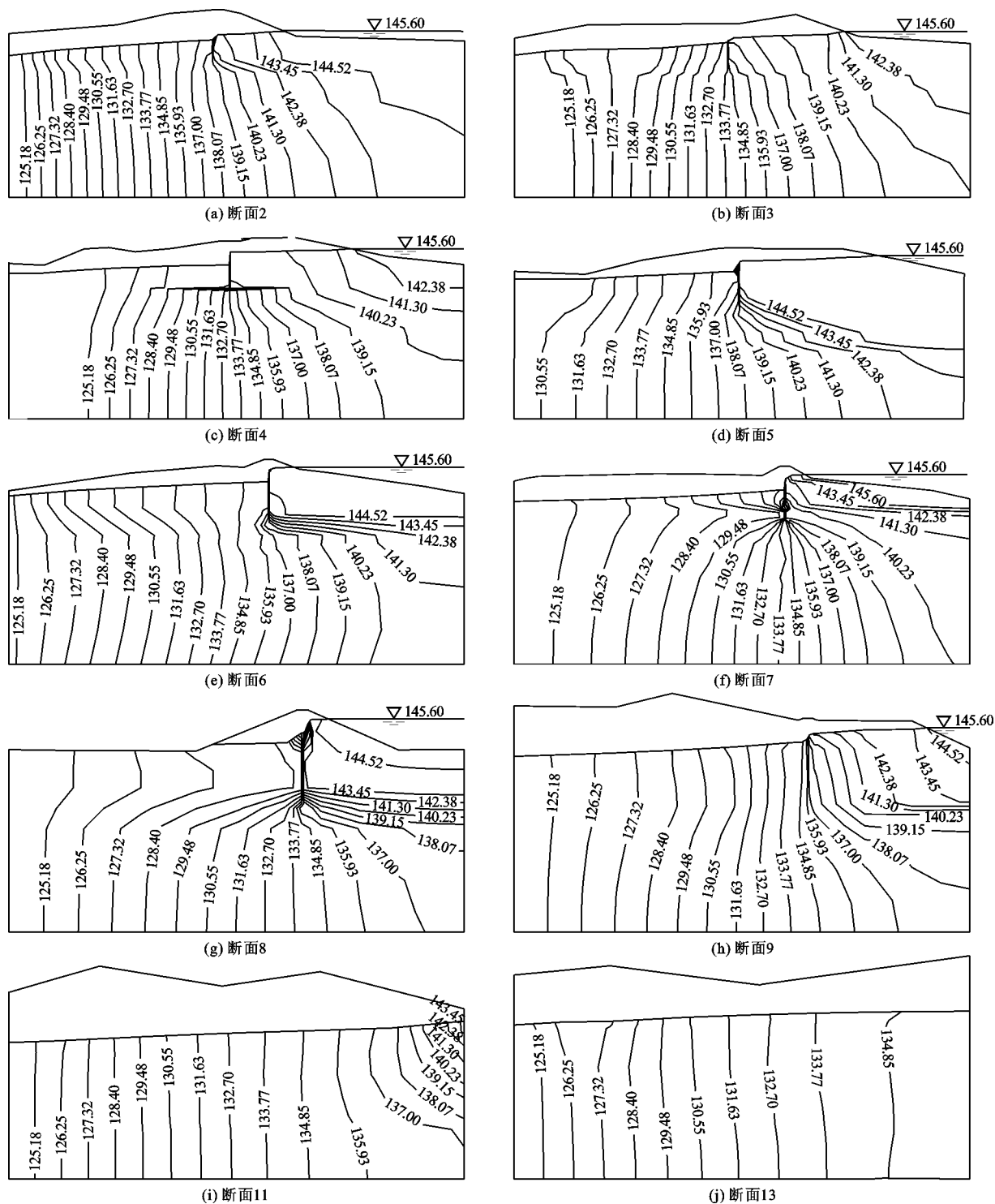


图4 库址区各断面地下水等势线图(单位:m)

表3 库址区各断面浸润面的最高位置及削减水头百分率

| 部位   | 浸润面最高位置/m | 削减水头百分率/% |
|------|-----------|-----------|
| 右岸岩体 | 128.40    | 80.00     |
| 副坝   | 132.70    | 60.00     |
| 主坝   | 129.48    | 74.98     |
| 左岸岩体 | 132.45    | 61.16     |

注:表中削减水头百分率 =  $(H_{\text{上}} - H_{\text{部位}}) / (H_{\text{上}} - H_{\text{下}}) \times 100\%$

### 4.3 渗透坡降及渗漏量分析

表4给出了库址区各部位的最大平均渗透坡降和渗透流量。由表4中可以看出,在正常蓄水位工况下,主坝防渗部位的渗透坡降较大,其最大平均渗透坡降出现在主坝黏土心墙起始部位地下水表面附近,达到10.31,表明在组合防渗体上下游水头差较大时,防渗体系能够起到有效阻渗作用;相比较而言,左岸的防渗体系的渗透坡降较小,其最大平均渗透坡降为0.13;副坝防渗部位的最大平均渗透坡降为9.68,出现在副坝黏土心墙起始部位地下水表面附近;右岸山体防渗部位的最大平均渗透坡降为10.75,出现在右岸山体混凝土防渗墙起始部位地下水表面附近。从表4中计算所得到的渗透流量来看,库水主要通过坝基、副坝以及左岸的绕坝渗流至下游,库址区整体渗透流量为8.636 L/s,渗漏量较小。由此可见,该工程所采取的防渗设计效果明显,库区渗漏量能够得到有效控制。

表4 库址区各部位的最大平均渗透坡降和渗透流量

| 位置    | 渗透坡降  | 渗透流量/(L·s <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------|---------------------------|
| 右岸山体  | 10.75 | 1.527                     |
| 副坝    | 9.68  | 3.65                      |
| 主坝    | 10.31 | 0.924                     |
| 坝基    |       | 1.377                     |
| 左岸山体  | 0.13  | 1.156                     |
| 总渗透流量 |       | 8.636                     |

## 5 结 论

本文采用饱和-非饱和渗流计算理论,结合等效连续介质三维有限元模型对某岩溶发育地质条件的库址区三维渗流场进行分析,得出如下结论:

(1)在当前的防渗体系下,库址区各位置地下水位能够得到控制,对于溶洞的防渗处理措施可以起到有效阻渗作用。

(2)库址区各部位的渗透坡降总体较小,能够

满足渗透稳定性要求,防渗设计方案可以满足库址区控渗要求,其设计在技术上是合理的。

(3)该工程总渗漏量为8.636 L/s,库水主要通过坝基、副坝及左岸绕渗至下游河道,在现有的防渗体系下,库址区渗漏量能够得到有效控制。

### 参考文献:

- [1] 沈振中,邱莉婷,周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 27-35.
- [2] 王正成,毛海涛,申纪伟,等. 深厚覆盖层中局部强透水层对渗流的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 159-166.
- [3] 黄青富,雷红军,程凯. 复杂地基心墙堆石坝三维建模及渗流特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 798-804.
- [4] 任爱武,柯柏荣,程建设,等. 岩溶地区水库渗漏原因分析与无损检测验证[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 119-124+129.
- [5] 赵明华,袁腾方,陈言章,等. 基于Schwarz交替法的岩溶区双孔土洞地基稳定性分析[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 49-55.
- [6] 刘豪杰,任杰,杨杰,等. 深厚覆盖层土石坝渗流控制及三维数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 219-224+228.
- [7] 江浩源,孙新建,刘东康,等. 隐伏断层作用下深厚覆盖层三维渗流分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(5): 13-21.
- [8] 赵叶,王瑞骏,王睿星,等. 深厚覆盖层上高土石围堰地基混凝土防渗墙应力变形的敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 177-183.
- [9] 唐少龙,王敏,彭佩,等. 孟底沟水电站厂坝区三维渗流场分析及渗控效果评价[J]. 水电能源科学, 2016, 34(7): 70-73+15.
- [10] 王旭辉,李博勇,洪佳敏,等. 复杂地质条件下高拱坝工程三维渗流场分析及渗控效果评价[J]. 中国水运, 2017, 17(9): 197-199+203.
- [11] JIANG Chengxin, SHI Huapeng, LI Ya, et al. Numerical simulation of groundwater under complex karst conditions and the prediction of roadway gushing in a coal mine: A case study in the Guang'an Longtan Reservoir in Sichuan Province, China [J]. Acta Geochimica, 2016, 35(1): 72-84.
- [12] MOHAMMADI Z, RAEISI E, BAKALOWICZ M. Method of leakage study at the karst dam site. A case study: Kher-san 3 Dam, Iran [J]. Environmental Geology, 2007, 52(6): 1053-1065.
- [13] 柳昭星,尚宏波,石志远,等. 岩溶裂隙发育地层帷幕注浆材料性能及适用性研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 256-265.

(下转第234页)

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1350 - 1354.
- [15] 谭青, 朱逸, 夏毅敏, 等. 节理特征对 TBM 盘形滚刀破岩特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4040 - 4046.
- [16] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对 TBM 滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155 - 163.
- [17] 张桂菊, 谭青, 夏毅敏, 等. 岩石温度对盘形滚刀掘进参数破岩特性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 40 - 47.
- [18] WANG Feng, LUO Feiyu, HUANG Yubing, et al. Thermal analysis and air temperature prediction in TBM construction tunnels [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 113822.
- [19] 张流, 王绳祖, 施良骥. 我国六种岩石在高围压下的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 10 - 19.
- [20] 曹平, 林奇斌, 李凯辉, 等. 节理倾角和间距对 TBM 双刃盘形滚刀破岩效率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1293 - 1299.
- [21] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 不同贯入度对掘进机滚刀破岩效率的影响[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 62 - 68.
- [22] CHANG Yushuo, YUE Jianfeng, GUO Rui, et al. Penetration quality prediction of asymmetrical fillet root welding based on optimized BP neural network [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 247 - 254.
- [23] 邓志鑫, 晏启祥. 不同贯入度下铁路隧道 TBM 盘形滚刀的破岩效率分析[J]. 路基工程, 2017(3): 49 - 54.
- [24] 罗华, 陈祖煜, 龚国芳, 等. 基于现场数据的 TBM 掘进速率研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1566 - 1574.
- [25] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 基于盾构掘进参数分析的隧道围岩模糊判别[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 107 - 113.
- [26] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. 全断面岩石掘进机滚刀最优刀间距计算公式研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 883 - 892.

(上接第 224 页)

- [14] 刘胜. 基于同位素 - 水文地球化学法的防渗帷幕可靠性分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [15] 张文兵, 任杰, 杨杰, 等. 基于正交试验土石坝热 - 流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 147 - 154.
- [16] 姜媛媛. 饱和 - 非饱和渗流影响下非连续性岩体边坡稳定分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [17] REN Jie, SHEN Zhenzhong, YANG Jie, et al. Back analysis of the 3 D seepage problem and its engineering applications [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 113.
- [18] 沈振中, 江沅, 沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和 - 非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1091 - 1095.
- [19] 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.