

基于三维渗流模拟的坝基渗漏和渗透稳定分析

——以哇沿水库为例

李 铎^{1,2}, 白 云³, 魏爱华^{1,2}

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 河北 石家庄 050031;
3. 青海省水利水电勘测设计研究院, 青海 西宁 810001)

摘 要: 水库坝基渗漏不但损失水库蓄水量, 更重要的会引起大坝渗透变形失去稳定。应用三维地下水流数值模拟计算坝基渗漏量和分析渗透稳定, 较好地解决了周边与底面边界的不规则问题和垂向上地层的非均质问题, 提高了计算精度。以青海省哇沿水库为例, 在充分分析水库坝基水文地质条件的基础上, 建立了坝基渗漏三维地下水流数值模型, 模拟了设置不同深度防渗墙时的渗漏量和坝后出溢段水力坡度。评价了大坝的渗透稳定性, 为防止哇沿水库发生渗透变形, 设置防渗墙深度应大于 50m。当防渗墙深度为 50m 时, 水库渗漏量为 12 012m³/d。

关键词: 坝基渗漏; 渗透稳定; 渗透变形; 渗流模拟; 哇沿水库

中图分类号: TV697.32

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)05-0046-04

1 引言

水库蓄水后, 坝上下游形成水位差, 当坝基有透水岩层存在, 库水在一定压力下就会向下游渗漏。渗透水流的渗透压力超过一定值时, 坝基岩土体的某些颗粒以潜蚀、管涌和流土的形式被渗透水流冲刷带走, 逐渐淘空, 引起坝基变形, 危及大坝的安全^[1]。因此, 选用适当的方法, 正确评价坝基渗漏量和渗透稳定对坝体安全具有非常重要意义。

目前坝基渗漏量计算方法主要有断面流量法和数值法。断面流量法是依据达西定律, 计算通过坝下地基断面的流量^[2-6]。数值法主要采用剖面二维渗流模型和三维渗流模型, 如, 姬永尚等建立了新疆某水库剖面有限元模型^[7], 刘晓庆等建立了某水库大坝剖面二维渗流模型^[8], 曹剑波等建立了锡崖沟水库坝基渗流剖面二维渗流模型^[9], 王恩志等建立了天生桥一级水电站三维渗流模型^[10], 王钢城等建立了江雄水库坝基渗漏三维渗流模型^[11], 任杰等建立了哈达山水利枢纽右岸三维渗流模型^[12], 郑华康等建立了卡拉水电站坝区渗流三维模型^[13], 张剑等建立了某水电站深厚覆盖层坝

基渗流三维模型^[14], 毛海涛等建立了西北干旱区某大坝及坝基无限元法三维模型^[15]。本文应用三维地下水流数值模型计算哇沿坝基渗漏量和分析渗透稳定, 较准确逼近了周边与底面边界的不规则形状和在垂向上地层分层参数不相同的非均质问题, 提高了计算精度。

拟建的哇沿水库位于都兰县东南部热水乡境内的察汗乌苏河中游段, 见图 1。哇沿水库坝址主要建筑物有挡水坝、溢洪道及导流洞等, 拟建坝高 30m,



图 1 地理位置图

Fig.1 The geographic position

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 河北省教育厅科研项目: 地面沉降流固耦合模型的研究及应用(QN2015149)

作者简介: 李铎(1963-), 男, 山西阳高人, 教授, 博士, 主要从事水文地质和环境地质研究。E-mail: Liduo556688@126.com

正常蓄水位3 397m,水库回水长度 2.85km,相应总库容3 573×10⁴m³,兴利库容为 1 608×10⁴m³,死库容为 800×10⁴m³,工程规模为中型。

2 区域地质概况

2.1 地形地貌

工程区位于柴达木盆地东南部边缘,鄂拉山西北部,区内山脉呈北西-北西西向走向。察汗乌苏河发源于布尔汗布达山,为常年性河流,由东南流向北西。区内海拔在 3300m 以上,相对高差 400~700m,总体地势东南高西北低,属中山峡谷地貌。

工程区位于察汗乌苏河中下游,区内以剥蚀堆积地貌为主,两岸山体高大陡峻,多为尖脊状山,少量低山呈浑圆状,山体基岩裸露,两岸基岩坡体边坡较陡,多在 40°~50°,局部为陡崖。山地与河谷交汇处以洪积扇和坡积裙为主。

2.2 地层岩性

工程区内出露的地层有三迭系喷出岩和第四系松散堆积物。

三叠系喷出岩,主要分布于察汗乌苏河两侧,是工程区内主要岩性,成分以安山岩、少量英安岩、凝灰岩组成,安山岩多为暗绿色,半晶-隐晶质结构,块状构造,矿物成分以长石、辉石为主。

第四系堆积物,第四系地层主要分布于河谷、部分冲沟及山前,成因类型主要为坡积、坡洪积、冲洪积和冲积等。全新统冲积砾石层,分布于工程区、级阶地及河床部位,层厚在 25~70m,结构稍密-中密,分选性较差,磨圆较差,多呈次棱角状,最大粒径 50cm,以砾石为主,砾、卵石成分以花岗岩、安山岩为主;全新统洪积砂碎石层,主要分布于河谷两侧各冲沟内及沟口,以砂、碎石为主,含泥量较高,结构稍密-中密,分选及磨圆较差,碎石多呈棱角、次棱角状,最大粒径 20cm;全新统坡洪积碎石土层,主要分布于山前坡脚处,结构松散,厚度变化较大。

2.3 水文地质特征

工程区地下水按其赋存形式及介质类型可分为基岩裂隙水与第四系孔隙潜水两类。

基岩裂隙水主要分布于察汗乌苏河两岸的基岩山体中,由大气降水补给,呈脉络状分布,无稳定地下水位,总体水量小,水量随季节变化较大,径流流程较短,多以泉水形式排泄于地表河流或直接补给于第四系孔隙潜水。

第四系孔隙潜水主要分布于现代河谷内,含水层厚度为 30~80m,含水层为第四系冲洪积砂砾卵石层。河漫滩地下水位埋深在 0.8~1.5m,阶地中地下水位埋深一般在 6~20m 左右。地下水受大气降水与基岩裂隙水补给,沿河谷向下游径流。沿坝轴线施工有 6 个勘探孔,全部进行了岩心采取率统计,在 4 个钻孔中进行了分层抽水或压水试验,依据这两组数据可将坝基剖面自上而下分为五层:第一层底板埋深在 8~10m,渗透系数在 5~10m/d;第二层底板埋深在 16~22m,渗透系数在 20~65m/d;第三层底板埋深在 32~36m,渗透系数在 12~23m/d;第四层底板埋深在 62m 左右,渗透系数在 4~9m/d;第五层底板埋深在 80m 左右,渗透系数约 20m/d。根据水质资料,地下水矿化度 0.56g/L,水质较好,可以饮用、灌溉。

3 坝基渗漏数值模拟

3.1 水文地质条件概化

3.1.1 模拟计算区域

模拟计算区域以大坝轴线为基准,向上推 800m,向下推 400m,沿河流长 1 200m。由于河流在不同位置宽度的差异,模拟的宽度取 600m,各个部位实际宽度不统一,实际模拟面积 524 800m²。

3.1.2 含水层概化

(1)含水层结构概化

根据钻孔揭露,坝基主要岩性为卵、砾石层,最大厚度 84.4m 左右,从上到下分为五层,各砾石层均属强透水层,但各层之间由于密实度及成因的不同,在透水性上存在一定差异,同一层水平方向与垂直方向的透水性也存在差异,因此,含水层为非均质各向异性。

当水库蓄水后,水库正常蓄水位 3 397m,渗流区内无源汇项,地下水渗流将形成稳定流,因此,将地下水流概化为稳定渗流。

考虑到坝基的防渗问题,地下水绕坝基防渗墙流动,将形成三维流,因此,将地下水流概化为三维流。

(2)边界条件概化

库区松散堆积物在两侧和底部均与安山岩接触,由于安山岩裂隙不发育,将两侧与底部边界概化为隔水边界;上游边界根据水库蓄水位的高低,取水正常设计水位作为该边界的定水头边界;下游边界取地面高程作为定水头边界;顶部边界,在库区内取水正常设计水位为定水头边界;大坝下游的顶部边界设置为零流量边界。

哇沿水库正常设计水位 3 397m,因此,库区内第一模拟层定水头和上游各层定水头边界地下水水位取 3 397m。下游边界处各层地下水水位接近地表,设置为定水头边界,地下水水位取 3 372m。

3.1.3 水文地质概念模型

经过对水文地质条件概化处理,计算区水文地质概念模型为非均质各向异性的松散岩类含水层组成的具有一、二类边界三维稳定流模型。

3.2 数学模型

描述坝基渗漏地下水渗流的数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0$$

$$(x, y, z) \in G$$

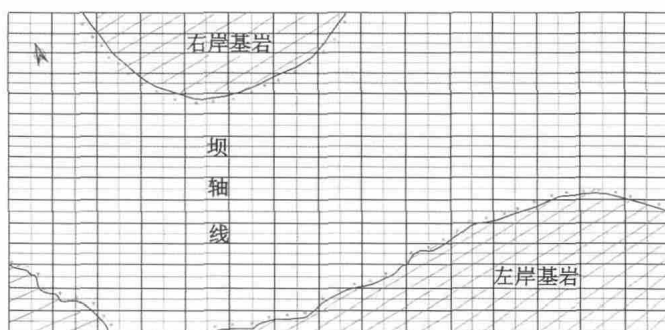
$$H(x, y, z)|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1$$

$$\frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 \quad (x, y, z) \in \Gamma_2$$

式中: H 为含水层地下水水位; H_1 为渗流区域一类边界地下水水位; K_h 为含水层水平渗透系数; K_z 为含水层垂直渗透系数; n 为边界外法线; G 为计算区域; Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界。

3.3 计算区域剖分

选用长方体网格对模拟区域进行剖分。沿河流方向网格长 40m,剖分 30 列,垂直河流方向网格长 20m,剖分 30 列,含水层垂直方向分为 8 层,每层厚 10m,将模拟计算区域剖分成 7 200 个单元,其中有效单元 3 770 个,第一层网格剖分见图 2,坝轴线垂直剖面剖分图见图 3。



图例: 有效单元 无效单元 地层分界线

图 2 平面网格剖分图

Fig.2 The subdivision graph of the planar grid mesh

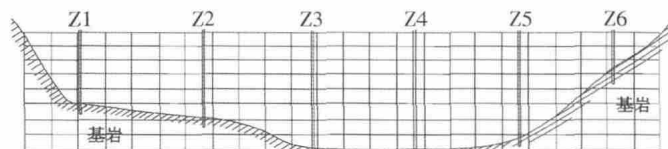


图 3 坝轴线垂直剖面剖分图

Fig.3 The vertical section subdivision graph of the axis of dam

3.4 模型参数确定

依据水文地质勘探资料和水文地质条件概化,在垂向上离散的 8 个模型层中,4、5、6 层渗透性接近,7、8 层渗透性也接近。模型各层参数取值,见表 1。

表 1 模型各层渗透系数

Table1 The permeability coefficient of each layer

模型层	水平渗透系数 / m·d ⁻¹	垂直渗透系数 / m·d ⁻¹
1	8.0	1.6
2	47.5	9.5
3	17.8	3.6
4	6.4	1.3
5	6.4	1.3
6	6.4	1.3
7	20.0	4.0
8	20.0	4.0

3.5 渗漏量模拟结果

根据以上模型概化和参数设置,对坝基渗漏进行模拟,模拟结果见表 2。

表 2 渗漏量模拟结果表

Table2 The simulation results of leakage

防渗墙深度 / m	模拟渗漏量 / m ³ ·d ⁻¹
0	71 908
10	65 417
20	40 967
30	24 046
40	15 299
50	12 012
60	9 309

3.6 坝基渗透稳定分析

根据青海省水利水电勘测设计研究院对都兰县察汗乌苏河哇沿水库工程地质勘察,坝基砾石允许水力坡降为 0.13。

坝基各部位水力坡度的大小是不同的。坝前入渗段和坝后出溢段的水力坡度比坝底板以下径流段的水力坡度大。水力坡度随着距坝脚距离的增大而减小,随着距坝底板的深度增大而减小。因此,坝后实际水力坡度最大处位于坝脚处近地表的土层。

哇沿水库最上层地层厚度为 10m,坝底宽度为 160m,拟设防渗墙距坝后坝脚 95m,设置不同深度的防渗墙进行模拟,计算出最上层底板和顶板水位,从而计算坝后坝脚处近地表地层的出溢段水力坡度,见表 3。

表3 坝后出逸段水力坡度表

Table3 The computation result of the maximum values of hydraulic gradient of foundation seepage

防渗墙深度 / m	坝后出逸段水力坡降
0	0.164
10	0.155
20	0.149
30	0.138
40	0.132
50	0.128
60	0.123

根据以上计算分析,为防止哇沿水库发生渗透变形,防渗墙深度应大于 50m。

4 结论

通过模拟计算分析,得出以下结论:

(1)应用三维地下水数值模拟计算哇沿水库坝基渗漏量和分析渗透稳定,较好地解决了周边与底面边界的不规则问题和垂向上地层的非均质问题,提高了计算精度。

(2)当不设置防渗墙时,模拟渗漏量为71 908m³/d。当防渗墙设置深度为 20m 时,模拟渗漏量为40 967m³/d。当防渗墙设置深度为 40m 时,模拟渗漏量为15 299m³/d。当防渗墙设置深度为 50m 时,模拟渗漏量为12 012m³/d。

(3)为防止哇沿水库发生渗透变形和减小水库渗漏量,应设置防渗墙,深度应大于 50m。

参考文献:

- [1] 张成恭. 地下水对工程和环境的作用 [J]. 工程地质学报, 1993,(1): 1-6. (ZHANG Xiangong. The action of groundwater on the engineering project and their environments [J]. Journal of Engineering Geology, 1993,(1):1-6. (in Chinese))
- [2] 周延国, 王耀军, 郭晓峰. 甘肃某水库工程坝基渗漏量计算分析[J]. 河南水利与南水北调, 2014,(12):41-42. (ZHOU Yanguo, WANG Yaojun, GUO Xiaofeng, et al. Seepage computation analysis for one reservoir dam in Gansu [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2014,(12):41-42. (in Chinese))
- [3] 郭山峰. 某尾矿库地下水渗漏量预测及渗透性分析 [J]. 地下水, 2014,36(2):25-26+53. (GUO Shanfeng. Permeability analysis and forecasting of groundwater seepage quantity for one tailing dam [J]. Ground Water, 2014,36(2):25-26+53. (in Chinese))
- [4] 武中强, 刘长征, 刘兰芳. 千里堤强渗段坝基渗流量的计算与分析[J]. 地下水, 2013,35(6):36-38+143. (WU Zhongqiang, LIU Changzheng, LIU Lanfang, et al. Seepage computation and analysis for the long dike seepage section of the dam foundation [J]. Ground Water, 2013,35(6):36-38,143. (in Chinese))
- [5] 陈伊清. 溪西水库右岸土坝坝基渗漏问题和防渗处理[J]. 资源环境与工程, 2010,24(5):516-518. (CHEN Yiqing. The earth dam foundation seepage and its countermeasures for the right part of Xixi reservoir [J]. Resources Environment & Engineering, 2010,24(5): 516-518. (in Chinese))
- [6] 廉铁辉, 张海生, 黄国秀. 于桥水库渗漏损失水量的估算[J]. 水利水电技术, 2001,32(8):45-46. (LIAN Tiejui, ZHANG Haisheng, HUANG Guoxiu. Seepage loss estimation for Yuqiao reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001,32(8):45-46. (in Chinese))
- [7] 姬永尚, 储春妹. 基于 GeoStudio 的新疆某水库坝基渗流有限元计算[J]. 中国西部科技, 2011,10(10):32-34+27. (JI Yongshang, CHU Chunmei. Seepage finite element calculation of dam foundation of a reservoir in Xinjiang based on GeoStudio [J]. Science and Technology of West China, 2011,10(10):32-34, 27. (in Chinese))
- [8] 刘晓庆, 杨耀, 何成龙. 库水位快速升降对有集水廊道土石坝渗流的影响[J]. 工程勘察, 2013,(9):32-36. (LIU Xiaoqing, YANG Yao, HE Chenglong. Effect on seepage of earth-rock dam with the collection gallery under rapid fluctuation of reservoir water level [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013,(9):32-36. (in Chinese))
- [9] 曹剑波, 贾洪彪, 朱异云, 等. 锡崖沟水库坝基渗流有限元分析[J]. 人民黄河, 2010,32(1):81-82+84. (CAO Jianbo, JIA Hongbiao, ZHU Yiyun, et al. The seepage finite element analysis for Tiyaogou reservoir dam [J]. Yellow River, 2010,32(1):81-82+84. (in Chinese))
- [10] 王恩志, 邓旭东, 王远亮, 等. 天生桥一级水电站岩体三维渗流初步分析 [J]. 水力发电学报, 2000,(4):25-32. (WANG Enzhi, DENG Xudong, WANG Yuanliang, et al. Principium analysis of three dimension seepage flow in fractured rock masses of tianshengqiao1st hydro-power station [J]. Journal of Hydroelectrical Engineering, 2000,(4):25-32. (in Chinese))
- [11] 王钢城, 黄超. 江雄水库坝基和坝肩渗漏分析与渗控方案评价[J]. 世界地质, 2009,28(3):367-340. (WANG Gangcheng, HUANG Chao. Seepage analysis for dam foundation and abutment of Jiangxiong reservoir and its leakage-proof plan evaluation [J]. Global Geology, 2009,28(3):367-340. (in Chinese))
- [12] 任杰, 沈振中, 王谊, 等. 哈达山水利枢纽右岸三维渗流场特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2010,(3):89-94. (REN Jie, SHEN Zhenzhong, WANG Yi, et al. 3D seepage flow field characteristics research for the right bank of Hadashan hydroproject [J]. Hydro-science and Engineering, 2010,(3):89-94. (in Chinese))
- [13] 郑华康, 张枫, 李毅, 等. 卡拉水电站坝区渗流控制效应精细模拟与评价[J]. 岩土力学, 2012,33(9):2743-2748. (ZHENG Huakang, ZHANG Feng, LI Yi, et al. Simulation and assessment of seepage control effects at dam site in Kala hydropower project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(9):2743-2748. (in Chinese))
- [14] 张剑, 张勇, 冯毅. 深厚覆盖层坝基渗流特征及渗漏量计算[J]. 地质灾害与环境, 2012,23(1):83-85. (ZHANG Jian, ZHANG Yong, FENG Yi. Characterizing and calculation the (下转第 78 页))

Calculating Annual Runoff by Condition Adjustment and Accuracy Assessment

ZHANG Yanli, ZHANG Liuzhu, ZHANG Jiajun, LIU Yan-e

(Hydrological Bureau of Yellow River Water Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: According to the imbalance problem of the observed upstream and downstream annual runoff data, this paper put forward the conditional adjustment calculation method using the least square condition adjustment model, and discussed the principle of the least square method, the mathematical model and the deduction calculation process of the annual runoff data by conditional adjustment method. By the calculation results of the 8-year observed annual runoff data and the water change amount at the 6 hydrometry stations in the reach between the Huayuankou and Lijin hydrometry stations, it shows that the conditional adjustment can eliminate the contradiction between the annual runoff data of the various hydrometry stations and the water change amount of the adjacent hydrometry stations, so as to achieve the special and yearly water amount balance, give the scientific accuracy assessment, and make the adjusted runoff data more reliable and practical.

Key words: condition adjustment method; water balance; annual runoff; accuracy assessment

(上接第 49 页)

seepage of a dam foundation with deep and thick covering [J].
Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,
2012,23(1):83-85. (in Chinese))

[15] 毛海涛,王晓菊,付亚男,等. 无限元法在无限深透水坝基渗流计算

中的应用[J]. 人民黄河, 2014,36(2):90-92. (MAO Haitao, WANG
Xiaojun, FU Yanan. A infinite element coupling method for the
infinite deep pervious foundation seepage [J]. Yellow River,
2014,36(2):90-92. (in Chinese))

Three Dimensional Numerical Simulation Researches for Foundation Seepage and Analysis of Seepage Stability: A Case Study of Wayan Reservoir

LI Duo^{1,2}, BAI Yun³, WEI Aihua^{1,2}

(1. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China;

2. Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization and Development of Water Resources, Shijiazhuang 050031, China;

3. Qinghai Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Xining 810001, China)

Abstract: Dam foundation seepage of reservoir induces the loss of reservoir storage, but more important, it causes dam seepage stability and deformation. This paper used numerical simulation of 3-D groundwater flow to calculate seepage quantity and analyze seepage stability, which has solved the problem of surrounding, bottom boundary of irregular and heterogeneity on vertical sequence well. Meanwhile, the calculation accuracy was enhanced. This study was applied to the Wayan Reservoir in Qinghai Province. According to the hydrogeological characteristics of dam foundation, a model for the three-dimensional numerical simulation of flow was established to solve the seepage problem of this reservoir. To evaluate the seepage stability of dam, this paper analyzed the leakage quantity and hydraulic gradient of egress section in conditions of different depth of impermeable wall. The results show that the dam foundation of Wayan Reservoir is in the steady seepage state, when the depth of anti-seepage wall is more than 50m. The seepage quantity reach 12 012m³/d with the depth of anti-seepage wall is 50m.

Key words: dam foundation seepage; seepage stability; seepage deformation; seepage simulation; Wayan Reservoir