

# 川西高原某水库坝址区渗流场模拟及渗漏量计算

崔宇龙, 黄涛, 彭道平, 贺玉龙

(西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756)

**摘要:** 为定量评价某水库坝址坝肩渗漏量, 以期为大坝防渗处理提供依据。运用 Visual MODFLOW 三维渗流软件, 模拟坝址区在水库蓄水前后的三维渗流场, 同时计算坝址断面处水库蓄水前的渗流量和水库蓄水后的渗漏量。模拟结果表明由于大坝的修建, 坝址上游的地表水位抬升, 使得地下水流动方向发生逆转, 坝址断面处的渗漏量也有较大增长, 工程对区域地下水环境造成了较为明显的影响。故从工程安全角度考虑, 需要对坝基、坝肩进行防渗处理。

**关键词:** 渗流场数值模拟; 渗漏量; 水库坝址区; 川西高原

中图分类号: TV640.32

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0051-04

## Simulation of seepage field and calculation of leakage in reservoir dam site of Western Sichuan Plateau

CUI Yulong, HUANG Tao, PENG Daoping, HE Yulong

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In order to provide the basis for dam seepage treatment, this paper quantitatively evaluated the abutment seepage of a reservoir dam. Visual MODFLOW was applied to simulate the change of groundwater flow field around the reservoir dam site. Meanwhile, the seepage flows before the impoundment of reservoir and after the impoundment of the reservoir at dam site section are both calculated. Simulation results show that because of the construction of dam, the surface water table rises up, which reverses the direction of groundwater flow. The amount of leakage at the section of dam site also has great growth. The dam has produced obvious effect on the regional groundwater environment. Hence, from the consideration of engineering safety, it is necessary to carry out some measures to protect the dam.

**Key words:** numerical simulation of seepage field; leakage; reservoir dam site; western sichuan plateau

绕坝渗漏是水坝的主要工程地质问题之一, 严重的渗漏将影响水库效益, 威胁坝区安全, 因此, 绕坝渗流分析、渗漏量计算及其渗透稳定性评价显得尤为重要。

水库的修建主要是为了达到利国利民的目的, 但是如果水库渗漏量超出规定范围, 将会产生异常渗漏, 进而带来许多危害, 因此针对如何计算水库的渗漏国内外学者做了许多研究, 并得出了很多分析评价水库渗漏的基本方法, 其类型主要分为定性分析法、半定量的数值分析方法和定量数值模拟方法, 其中半定量的数值分析方法有逻辑信息法、模糊综合评判法、数量化理论分析方法、环境同位素示踪等方法。对于水库影响区域地下水流场的分析评价

主要是通过建立非稳定流三维数值模型来模拟地下水渗流场, 并分析其在水库建设前后的变化。目前国内外主流的模拟软件有 Visual MODFLOW、FEFLOW、GMS、MT3D、PEST2000 等。其中, Visual MODFLOW 软件逐渐被广泛应用, 李文跃、贾金生、李宏卿等运用该软件进行地下水资源评价和水位预测都达到了很好的效果<sup>[5-7]</sup>。本文以四川甘孜州某水利水电工程为例, 运用 Visual MODFLOW 软件模拟坝址区在水库蓄水前后的三维渗流场, 定量评价坝肩渗漏量, 以期为大坝防渗处理提供依据。

## 1 工程概况

本项目位于四川省甘孜藏族自治州乡城县境

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-06-05

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0710)

作者简介: 崔宇龙(1988-), 男, 江苏盐城人, 在读博士, 研究方向: 工程水环境效应及其控制。

通讯作者: 黄涛(1970-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 环境规划与管理、工程环境地下水效应与控制、固体废弃物处置与资源化。

内,是硕曲河干流乡城、得荣段“一库六级”梯级开发方案的“龙头水库”电站。项目区属云贵高原与青藏高原的过渡地带,地貌上表现为构造剥蚀类型的高原高山区,地形多以条形山体为主。

项目坝址区周边被基岩山体围限,库盆远离分水岭,不存在跨流域渗漏问题,库区也未发现顺河断裂。库区未来蓄水后,主要为绕坝渗漏问题较为突出。工程采用混合式开发,拦河大坝位于擦金许沟沟口下游约 620 m 处,最大坝高 139 m,水库正常蓄水位 3 398 m,相应库容为 2.396 亿  $m^3$ ,总库容为 2.458 亿  $m^3$ 。

### 1.1 地形地貌

坝址地处高山峡谷区,两岸山体雄厚,基岩大多裸露,临河坡高大于 300 m。左岸临河为高 20 ~ 50 m 的基岩陡崖,自然坡度  $70^\circ \sim 85^\circ$ ,局部为反坡。右岸在坝区上游基岩大多裸露,高程 3 345 ~ 3 385 m 以上为顺基岩层面形成的斜坡,坡度  $40^\circ$  左右,以下为基岩陡崖,坡度  $45^\circ \sim 65^\circ$ 。

### 1.2 地层岩性

坝址区出露地层为三叠系上统拉纳山组下段灰色、灰黑色中厚~厚层状变质粉、细砂岩夹板岩,变质砂岩单层厚度一般为 0.5 ~ 1.0 m,部分 1.5 ~ 2.0 m 和 0.2 ~ 0.4 m。岩石致密、坚硬,单轴湿抗压强度 110 ~ 195 MPa,属坚硬岩石。地表地质调查和勘探平硐揭示,坝区板岩约占 2 ~ 8%,厚度一般为 1 ~ 5 cm,局部 15 ~ 30 cm,出现频率一般 2 ~ 4 m/条,强卸荷带内多强风化,重锈,局部夹泥。

### 1.3 水文地质条件

坝区地下水主要为第四系松散堆积层孔隙潜水和基岩裂隙水。孔隙潜水赋存于松散堆积层中,基岩裂隙水主要分布于两岸基岩裂隙中。地下水主要受大气降水补给,由两岸向河谷及下游排泄,地下水位随季节变化而变化。

(1)孔隙潜水。主要埋藏于河床、漫滩、阶地等松散堆积层中,含水较丰富,受大气降水和地表径流补给,随季节性变幅大,排泄于沟谷或入渗补给下伏基岩裂隙中。

(2)基岩裂隙水。主要埋藏于基岩裂隙中,与孔隙潜水具有一定的水力联系,同样受大气降水的补给,以下降泉形式排水泄于沟谷或河流。基岩裂隙水含水性不均一,富水程度与裂隙发育程度、岩石的风化程度以及地层岩性有关,故岩体的透水性及富水度也具有成层分布特征。其水量受地形、补给条件、地层岩性和地质构造的限制,变化较大。

## 2 坝址区地下水渗流场模拟预测

### 2.1 预测方法

根据《环境影响评价技术导则—地下水环境》(HJ610-2011),地下水渗流场模型的数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) + W = 0 \quad (1)$$

式中:  $h$  为水位, m;  $K_x, K_y, K_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的渗透系数, m/d;  $W$  为水流的源和汇, L/d。

### 2.2 模拟范围

项目的坝址所处位置为擦金许沟沟口下游约 150 m 处,两侧为高山峻岭。因此模拟区南北以硕曲河为界,东西以山脉为界,范围南北长 1 620 m,东西宽 960 m,如图 1。垂向上,根据区域水文地质资料概化为四层:孔隙潜水含水层(覆盖层)和基岩裂隙水含水层(砂岩层、板岩层、砂岩层)。

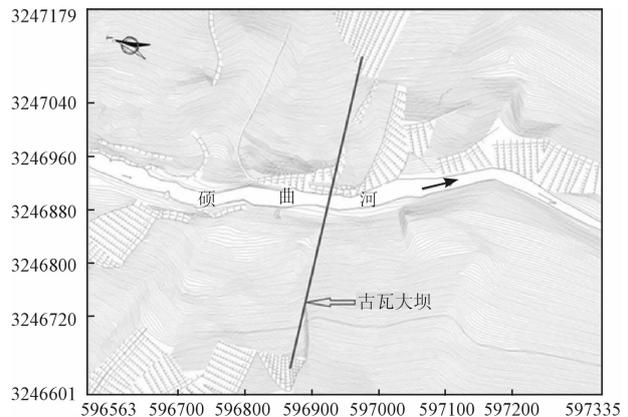


图1 模型平面图

### 2.3 模型时空离散

按照 10 m 网格划分为 162 行、96 列,模型分为 4 层,共划分 6 2208 个单元,如图 2。

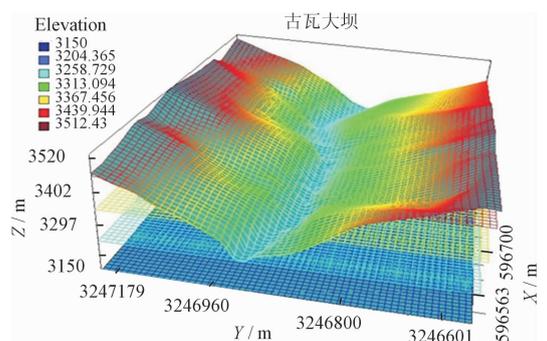


图2 3D模型概化图

时间上,模拟期为 10 a,假设水库已经完成蓄水并达到正常蓄水位 3398.00m。分别模拟在坝址建

成前工程区孔隙潜水含水层的地下水流动场状态和达到正常蓄水位后区域内的地下水环境变化情况。

## 2.4 模型边界条件概化

能否正确的处理模型的边界条件,是保证地下水数值模拟工作结果正确与否的关键问题之一。地下水模型中的边界条件一般有以下3类:

第一类边界条件——给定水头边界,指边界上的所有点水头是给定的。这种边界出现在渗流区与地表水体的连接处。

第二类边界条件——给定流量边界,在这种类型的边界条件上,垂直于边界面上各点的流量是给定的,该流量可表示为:

在垂直方向上:

$$q_n = f(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中: $f$ 是已知函数,而 $q_n = q \cdot \ln$ 表示单位流量 $q$ 在垂直方向上的分量。这种类型边界条件的特例是隔水边界,在不透水边界上,垂直于边界的流量处处为零。

第三类边界条件——混合边界条件,指由第一类和第二类边界混合组成的边界。这种类型的边界条件存在于多孔介质渗流区与地表水体(或另一多孔介质水流区)有联系的地方,但有比较薄的弱透水层将这两个区域隔开。

边界条件具有两重意义:一是它与初始条件一起构成地下水数学模型的定解条件,用来说明具体目标系统的边界所具有的特定状态,从而使模型的求解能够得到切合实际状况的特解。二是它描述了目标系统与其周围环境之间的相互作用关系,即它们之间物质、能量和信息的交换。也就是说,周围环境的变化会对目标系统产生影响,而目标系统的变化,也会对周围环境产生作用。

对于一个渗流区而言,边界条件的存在通常很复杂,可能需要交替利用三类标准来描述不同的边界,因此,在确定边界条件时,应根据水文地质条件以及现有资料来综合考虑。

根据模拟区内流场特征和地层结构的分析,将模拟区边界条件类型确定如下:模拟区东部和西部的硕曲河,根据相关资料概化为河流边界(已知水头边界),北部边界和南部边界的山脉概化为通用边界。在分析大坝施工对研究区内地下水天然渗流场的影响时,将大坝坝址基础概化为隔水边界。

## 2.5 模型的源汇项

模型的源汇项主要是指研究区的补给和排泄项。硕曲河流域径流主要由降水形成,其次有少量

融雪、化冰,径流的年内分配和降水的年内分配基本相应。据古瓦坝址 1960-06 - 2005-05 共 45 a(水文年)径流系列统计,多年平均流量为 43.4 m<sup>3</sup>/s,折合年水量为 13.7 亿 m<sup>3</sup>,年径流深为 443.2 mm。大气降水为面状补给,冰雪融水为线状补给,近似认为入渗是均匀的。自然条件下,渗入河流、蒸发和蒸腾是地下水的主要排泄方式,概化为面状排泄。

## 2.6 模型参数选取

对于模型的不同层,不同区按照所属岩层岩性进行水文地质参数赋值,模型涉及的主要参数渗透系数值( $K$ ),给水度( $S$ )根据工程地质勘察报告确定,以上参数在模型调试中通过进一步修正。

(1) 渗透系数。结合工程区的水文地质试验结果,来确定各含水层的渗透系数如表 1 所示。

表 1 各岩层渗透系数值 m/s

岩层岩性		$k_{xx}$	$k_{yy}$	$k_{zz}$
强透	全新统崩积层	$5.5 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-4}$
	全新统冲击层	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-5}$
中透	全新统崩积层	$5.1 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-5}$
	上更新统冰川冰水堆积层	$2.3 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-5}$
弱透	砂岩层	$3.03 \times 10^{-7}$	$3.03 \times 10^{-7}$	$3.03 \times 10^{-8}$
	板岩层	$2.43 \times 10^{-7}$	$2.43 \times 10^{-7}$	$2.43 \times 10^{-8}$
	砂岩层	$1.11 \times 10^{-7}$	$1.11 \times 10^{-7}$	$1.11 \times 10^{-8}$

(2) 给水度。根据本地区含水层岩性及颗粒组成,参照《水文地质手册》中不同岩性地层的给水度经验值,取给水度为 0.04。

通过模型校验,计算所得已知钻孔的水位与天然水位相差很小,为此模型的建立比较符合实际,能够较好的反映坝址区地下水的渗流场特征。

## 3 渗漏量计算与结果分析

对于坝肩处的渗漏量计算,可以根据水利水电工程地质手册中的计算公式进行计算,计算过程中把坝肩处的地下水视为潜水。

$$Q = b_1 K \left( \frac{H_1 + h_1}{2} \right) \frac{H}{l_i} = b_1 K J \left( \frac{H_1 + h_1}{2} \right) \quad (3)$$

式中: $Q$ 为渗漏量,m<sup>3</sup>/d; $K$ 为岩体渗透系数,m/d; $b_1$ 为过水断面宽度,m; $H$ 为渗漏过程水头损失,m; $H_1$ 为过水断面最大高度,m; $h_1$ 为过水断面最小高度,m; $l_i$ 为渗漏途径长度,m; $J$ 为水力坡度。

为了说明工程施工对坝址区潜水含水层地下水渗流场的影响,将大坝基础模拟成隔水边界,通过运行得出天然状态下和工程建成之后的坝址区潜水含水层地下水渗流场特征变化。

由图3可以看出,工程修建前坝址区两岸地下水高程为3 260~3 340 m左右,高于区内地表水位,因此地下水主要由河谷两侧补给地表水,与现场实际踏勘现场地势判别地下水流向相同。同时以坝址轴线为断面,计算通过该断面各层的渗流量,总计渗流量为 $633.75 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

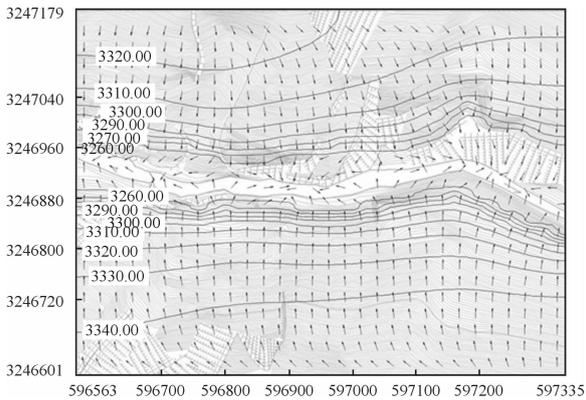


图3 工程施工前坝址区天然的地下水渗流场

由图4可以看出,当水库达到正常蓄水位(3 398 m)后,库区两岸高程较低的台阶被掩埋,地下水水位也相应抬升。由于大坝坝基的隔水作用,地下水绕过大坝两侧,向下游补给;因此,在大坝两肩处,水头压力也相应的增大(3 380 m左右),坝址断面的渗流量增大至 $7 6332.67 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

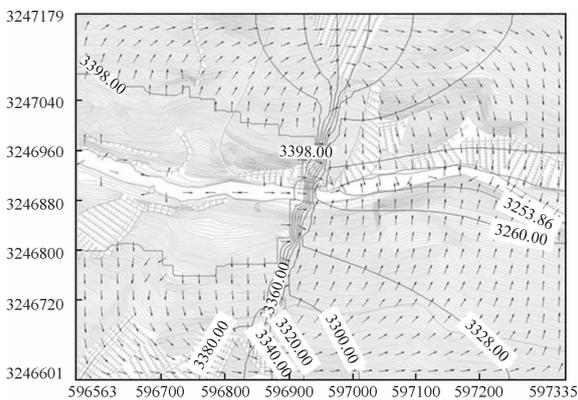


图4 工程施工后坝址区的地下水渗流场

由上述模拟和计算结果可知,由于大坝的修建,地表水水头抬升较高,而大坝作为一个隔水边界,其坝基处的地下水流场被隔断,该处的水头压力较高,而在水库两侧呈现出地下水绕流现象,从而产生绕坝渗漏问题。因此建议在大坝坝基及坝肩处进行防

渗处理,尽量减少由于地下水渗漏造成坝基受损。

## 4 结 语

通过大坝蓄水前后地下水渗流场模拟和渗流量计算结果可以看出,大坝的修建造成了地下水流向发生改变,对区域的地下水环境有较大的影响,同时坝址断面处的渗流量增大至 $76332.67 \text{ m}^3/\text{d}$ ,存在绕坝渗流问题,需要对坝基、坝肩进行防渗处理。在进一步的工作中可考虑将解析法与数值模拟计算分析法相结合,提高计算准确性,并提出具体的防渗处理措施。

### 参考文献:

- [1] 冯 瑞,任光明,张志渊,等. 某水电站绕坝渗流及渗透稳定性研究[J]. 人民黄河,2012,34(10):145-148.
- [2] 李宏广. 某水电站坝区渗流场模拟及蓄水后渗流量评价[J]. 中国水运(下半月),2008,8(12):172-173.
- [3] 赵 瑞,许 模. 水库岩溶渗流及防渗研究综述[J]. 地下水,2011,33(2):20-22.
- [4] 王庆苗. 磨子潭水库坝基渗漏分析[J]. 大坝与安全,2000,14(4):43-45.
- [5] 张洪霞,宋 文. 地下水数值模拟的研究现状与展望[J]. 水利科技与经济,2007,13(11):794-796.
- [6] 李宏卿,吴 琼,李宏罡,等. Visual MODFLOW 在地下水资源评价中的应用[J]. 工程勘察,2005(3):27-28.
- [7] 李文跃,张 博,洪 梅,等. Visual MODFLOW 在大庆龙西地区地下水数值模拟中的应用[J]. 世界地质,2003,22(2):161-165.
- [8] 朱学愚,谢春江. 地下水运移模型[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [9] 丁 飞,何 霖,张奇林,等. Visual MODFLOW 在平原型水库水环境数值模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(2):79-81+84.
- [10] 王庆永,贾忠华,刘晓峰,等. Visual MODFLOW 及其在地下水模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(5):90-92.
- [11] 庞国兴,李金轩,杨 强,等. Visual MODFLOW 在甘肃某矿区地下水数值模拟中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2009,32(4):307-312.
- [12] 胡亚召,李 晓. Visual MODFLOW 三维数值模拟及渗流量计算研究——以云南某水电站下坝址为例[J]. 甘肃水利水电技术,2009,45(12):20-23.