



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.026

赵瑞, 张强, 许模, 等. 基于数值模拟的复杂岩溶库区渗漏研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 150-155. ZHAO Rui, XU Mo, ZHANG Qiang, et al. Reservoir leakage of complex karst area based on numerical simulation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 150-155. (in Chinese)

# 基于数值模拟的复杂岩溶库区渗漏研究

赵瑞<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 许模<sup>1</sup>, 张楠<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 在复杂地质环境条件下的岩溶地区, 抽水蓄能电站建设的可行性和安全性评价愈来愈受到重视。以陕西某岩溶地区的抽水蓄能电站为例, 分析库区岩溶发育特征和水动力条件, 利用数值模拟方法精细刻画库区复杂岩溶通道的空间形态, 测算了潜在岩溶渗漏通道的渗漏量。结果显示, 水库建成后, 三个岩溶通道会发生严重渗漏, 其中“一线天”渗漏量最大, 为 4 058.89 m<sup>3</sup>/d, 坝基和黑松梁渗漏量分别为 3 564.69 m<sup>3</sup>/d 和 3 085.23 m<sup>3</sup>/d, 在施加防渗帷幕措施后, 各个岩溶通道的渗漏量明显减小。

**关键词:** 水库渗漏; 岩溶介质; 数值模拟; 抽水蓄能电站

**中图分类号:** P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0150-06

## Reservoir leakage of complex karst area based on numerical simulation

ZHAO Rui<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, XU Mo<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. The China College of Geological Environmental Monitoring, Beijing, 100081 China)

**Abstract:** It is thought highly on feasibility and safety evaluation in karst region particularly in complex geological environmental conditions. In this article, a pumped storage power station in a karst area of Shaanxi province was taken as an example, karst development law and hydrodynamic condition of upper reservoir were analyzed, and a numerical simulation method was used to make fine description of space form of complex karst channel in reservoir, so as to predict potential karst leakage channel. The prediction results showed that three karst channels would be serious leakage after the completion of the reservoir, of which the maximum was "First day", with the leakage of 4 058.89 m<sup>3</sup>/d, and the leakages of foundation and lodgepole pine beam were 3 564.69 m<sup>3</sup>/d and 3 085.23 m<sup>3</sup>/d respectively. However, the leakages of karst channels decreased obviously after being applied the impervious curtain measures.

**Key words:** reservoir leakage; karst medium; numerical simulation; pumped storage power station

在我国西部山区的人类工程活动中, 经常会遇到岩溶水库工程建设<sup>[1]</sup>。岩溶是复杂地质环境的主要表现, 此不良地质体的存在, 对工程稳定性、安全性以及水库能否成功蓄水均有重大影响<sup>[2]</sup>。同时, 在一定的地质条件下, 水库蓄水抬高的水头有可能

驱使库水通过某些岩溶通道向邻区或下游发生渗漏, 从而影响水库效益的正常发挥<sup>[3-5]</sup>。

对于水库的岩溶渗漏问题, 早期研究主要集中于定性分析水动力条件和渗漏通道等, 同时, 受限于不同渗漏模式和地下水在各方向上单位流量的变

收稿日期: 2015-12-25 修回日期: 2016-03-26 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1130.014.html>

作者简介: 赵瑞(1985), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事水文地质、环境地质方面研究。E-mail: jiajingtingrandly@163.com

通讯作者: 许模(1963), 男, 重庆人, 教授, 从事水文地质、工程地质与环境地质教育研究工作。E-mail: xm@cdu.edu.cn

化,量化预测不易获得精准数据。采用数值模型模拟地下水渗流场,可以准确反映地下水时空变化特征,另外可根据模拟中的水均衡原理测算渗漏量,最终获得相对较为准确的量化结果。

岩溶发育具强烈各项异性,而数值方法对于不连续介质的三维渗流模拟本身具有一定难度,需要利用合理模块进行精细的空间形态表征<sup>[67]</sup>。本文以陕西某抽水蓄能电站为例,对上库区岩溶通道和地下水动力条件进行研究,分析可能产生的渗漏问题,利用数值模拟手段对复杂岩溶渗漏通道进行具体刻画,从而预测水库的岩溶渗漏量,为工程措施提供科学建议。

## 1 工程概况

某抽水蓄能电站地处陕西省西南部中高山区的秦岭山脉腹地的断块构造之中<sup>[8]</sup>,沟谷切割强烈,山高沟深,植被茂密,地形地势交错复杂。电站上库位于金盆沟内,库容  $1\ 000 \times 10^4\ \text{m}^3$ ,正常蓄水位 13 92 m。库区地表有第四系崩积覆盖物,下伏中泥盆统可溶大理岩,底部为印支期侵入花岗岩及由热液蚀变作用产生的变质岩,接触面呈不规则状。金盆沟由三条支流汇合而成,两岸地势较陡,呈不对称的“V”型谷。左岸坡度  $40^\circ - 60^\circ$ ,多为岩质边坡,局部形成陡崖;右岸坡度较缓,表面覆盖有薄层坡崩积物。坝址位于沟口上游 1 km 处,左右岸库盆封闭,具有良好的建库地形条件见图 1。

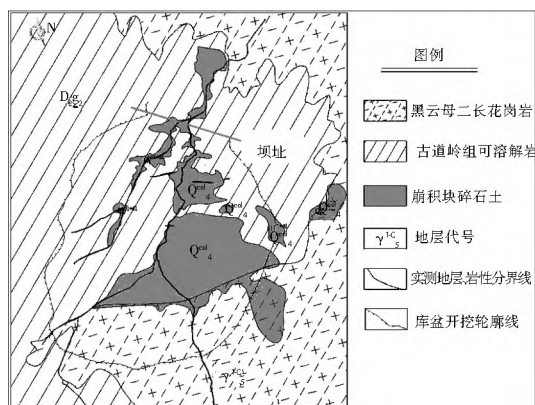


图 1 水库工程区平面地质简图

Fig. 1 The planar geological diagram of the reservoir area

区内包含了第四系松散层孔隙水、基岩裂隙水以及岩溶裂隙水三种地下水类型。孔隙水分布在崩积物的粉质黏土中,水量极小,基岩裂隙水赋存于花岗岩中,水量不均匀,可溶岩富水性一般,岩溶泉点很少。总体来说,库区地下水露头少,水位埋深普遍较浅,主要受沟谷的切割分散排入金盆沟中。

## 2 库区岩溶特征及渗漏问题分析

### 2.1 岩溶发育特征

区内发育三类基岩层组:泥盆系可溶岩主要分布于库区中下游地带,岩性以大理岩与结晶灰岩为主,局部地段表层有第四系覆盖;印支期黑云母花岗岩则集中于库区尾部,岩体坚硬,完整性好,裂隙发育程度中等偏弱;此外,两岩组之间还有一层厚度不大且不均匀的蚀变带岩体,是由热液蚀变大理岩构成。整个研究区面积约为  $1.66\ \text{km}^2$ ,其中裸露型和覆盖型可溶岩分布面积为  $1.12\ \text{km}^2$ 。花岗岩从底部侵入,切断了上覆可溶岩层与库区周边其它含水层组的水力联系,同时阻碍了近现代岩溶的垂向发育,为形成库盆创造了独特的地质条件。

库区内可溶岩地表岩溶发育程度中等~较弱,以规模小、数量多为主要特征,大部分岩溶均顺层发育。根据平硐资料显示,位于坝轴线两岸的 PD3 和 PD4 揭示的岩溶现象以小型溶孔和溶隙为主,而大坝上游左岸 PD13 内揭露了一条大型岩溶管道,平均宽度为 20~40 cm,局部扩容至 60 cm,发育高程在蓄水位之下。同时,结合库区 29 个钻孔资料显示,地下发育溶蚀的钻孔有 14 个,除 ZK24 线溶蚀总长度达 2.25 m 外,其余钻孔溶蚀均较少,分布零星,溶蚀总长度都小于 0.25 m,见图 2。

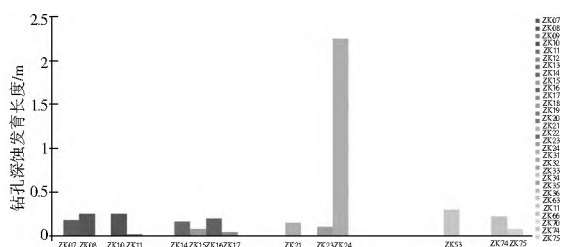


图 2 库区各钻孔内溶蚀发育总长度统计

Fig. 2 Statistics of the total length of karst development in each hole of the reservoir

此外,库盆左岸山脊黑松梁处钻孔揭示,ZK51 在孔深 43~103 m 段内呈无岩芯空腔状态。据孔内摄像成果显示:该孔浅部岩体发育层间小溶孔溶隙,向下逐渐出现大型溶蚀孔洞,在埋深 43 m 处长大的垂向溶蚀裂隙彻底展露,倾角近乎直立。同时,调查发现右坝肩处也发育一条近 NE 向的陡倾裂隙,倾角接近  $90^\circ$ ,宽度 2 m,切割形成“一线天”地势。长大裂隙的切割使右坝肩山体变的更加单薄,库岸边坡形成临空陡壁,根据其延伸规模和趋势推测该裂隙切割深度可能贯通至邻谷近谷底处图 3。

### 2.2 潜在的渗漏通道分析

综上岩溶发育特征,“一线天”山体单薄,黑松梁

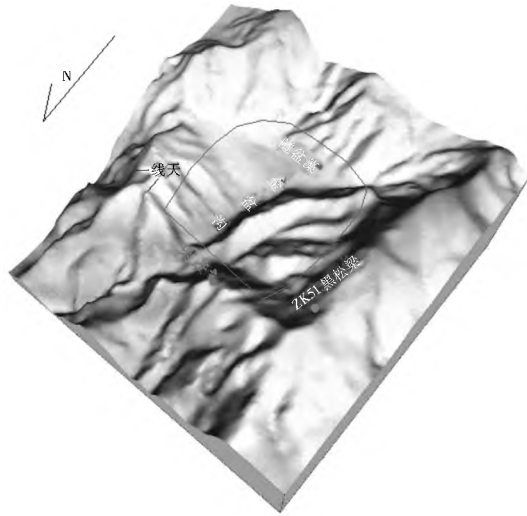


图 3 库区岩溶渗漏通道位置三维形态

Fig. 3 Three dimensional diagram of karst leakage channel

溶蚀发育, 水库蓄水后会通过这些通道向邻谷发生渗漏<sup>[9][11]</sup>。同时, 坝基处库水径流途径短、水头坡降大, 也具有发生孔隙- 裂隙型渗漏的风险<sup>[12]</sup>。

黑松梁 ZK51 揭示的溶蚀空腔规模大, 沿垂向不规则延伸达 60 多 m, 钻探没有揭示地下水位, 推测其地下水分水岭可能会受到裂隙通道的影响而发生变化。同时, 黑松梁库外发育一个大型潮湿溶洞, 有水滴滴渗而出, 溶洞走向与山体内部的裂隙发育方向和高程几乎一致, 推测山内溶蚀与库外洞穴相连通。因此, 水库蓄水后地下水位雍高超过库外溶洞发育高程, 黑松梁会成为向邻谷管道型渗漏的主要部位见图 4。

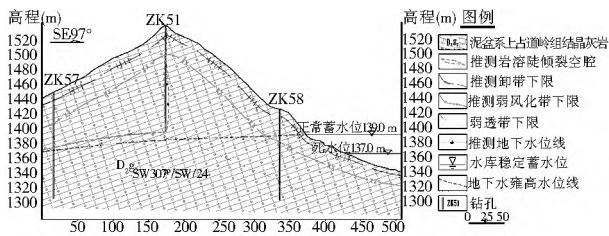


图 4 黑松梁空腔管道渗漏剖面

Fig. 4 The cavity pipe leakage section diagram of Heisongliang

“一线天”垭口位于库区右坝肩附近, 高程为 1430 m。根据钻孔资料进行剖面分析, 可能发生两种情况的渗漏: 如果裂隙延伸没有深切, 则在钻孔揭示的大理岩与花岗岩破碎接触带发生渗漏; 如果陡倾裂隙切割至邻谷谷底, 水库蓄水后必将淹没地下分水岭, 库水直接从裂隙切割的破碎带发生渗漏(图 5)。

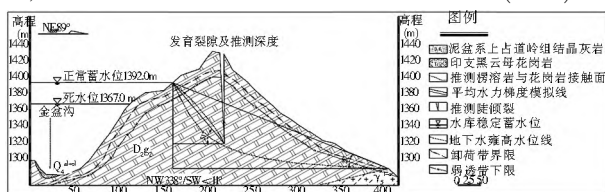


图 5 “一线天”邻谷渗漏剖面

Fig. 5 Leakage section diagram of the Sight

### 3 数值模型的建立与模拟预测

#### 3.1 复杂岩溶的模拟方法

水库蓄水后地下水渗流场将发生一定变化, 采用一般的地下水动力学公式计算渗漏量可能有失精确<sup>[13]</sup>。本文采用 Visual Modflow 来计算水库三个部位的渗漏量, 做出预测评价。

在复杂岩溶介质中, 由于岩溶形态存在小尺度的溶缝到大尺度的岩溶管道的变化, 岩溶地下水流动呈现为层流- 紊流多种流态共存的复杂系统。因此, 对含水层中岩溶管道的准确概化是精确模拟复杂岩溶介质地下水流动的前提<sup>[14]</sup>。对于黑松梁和“一线天”渗漏通道运用 Drain 模块, Drain 模块具有岩溶含水介质向岩溶管道排水过程无水头损失的特性, 用以反映管道和含水介质间的水力交换较为恰当, 可以很好的表现一般岩溶管道的控水作用, 而在岩溶介质的岩溶通道附近岩体导水能力强, Drain 模块可以采用较大的等效水力传导系数反映岩溶管道快速掠夺地下水的特性。

根据前述孔内摄像资料, 成果显示黑松梁岩溶空腔的空间形态近似为椭圆形, 长约 64 m, 延伸方向为 NW83°, 上部宽为 5.8 m, 最宽处为 12 m, 位于腔体上三分之一处, 底部最窄为 2.4 m, 在 NE7° 方向上, 厚度基本相同, 概化后约为 2.2 m, 结合三维空间网格细化进行局部刻画, 单元网格细化为 1 m, 长度不足 1 m 时按一格计算, 具体形态和空间模型模拟概化情况见图 6。

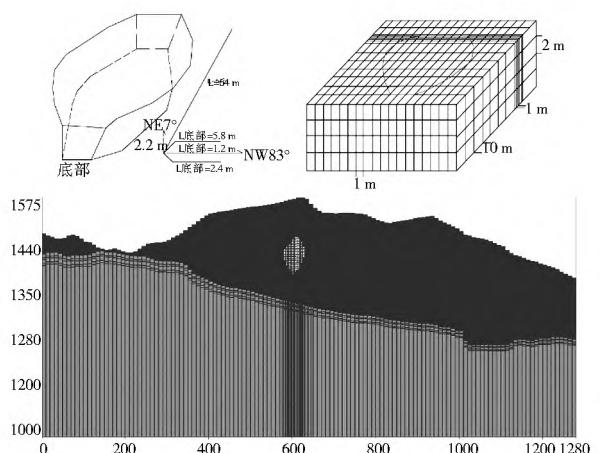


图 6 黑松梁岩溶洞穴模拟

Fig. 6 Simulation diagram of karst cave of Heisongliang

白色区域赋值 Drain 模块后便成为刻画的黑松梁空间溶洞剖面, 局部网格的细化均以 1 m 为一个基准单元格, 由于该洞穴处于垂向径流带, 水力传到系数取值为 10。同样, “一线天”部位也可用上述方法

进行细化网格刻画。其次,对于岩溶孔隙、裂隙介质,在风化较强的垂直入渗带中,将其概化为垂向入渗系数较大、孔隙度较大的各向异性介质体,在模型中起到垂向导水作用,透水性好而实际储水较少;潜水位以下的水平径流带以溶蚀裂隙为主,岩溶发育程度变弱,对大尺度模拟来说采用连续介质模型即可。

### 3.2 模型建立与概化

模型空间范围 X 轴方向为 1 300 m, Y 轴方向为 1 280 m, Z 方向范围 1 000~ 1 600 m,垂向上根据含水层特性分为 3 层,第一、第二层分别为大理岩和蚀变带可溶岩岩溶裂隙含水层 D2 和 D2', 第三层为火成岩相对隔水层  $\nu_5$ , 由此建立起 130 行  $\times$  128 列  $\times$  3 层的概念模型,共剖分单元格 49 920 个,刻画的岩溶通道均位于第一层可溶岩内,局部加密后黑松梁网格为 224 个,“一线天”网格为 581 个。

时间上,模拟期为 10 年。工作区内气象资料显示,降雨量年内分配不均匀,按照降雨量将一年分为 2 个水文期,每个水文期内包括 6 个时间步长。

对于模型边界的概化,考虑将模拟区内水库蓄水高度设定为定水头边界;金盆沟由南向北流动,所以将南侧定为流入边界,北侧为流出边界,溪沟为河流定水头边界;库区左右两侧分别以黑松梁和右岸分水岭带作为变水头边界,也可视为通用流入流出边界(图 7)。

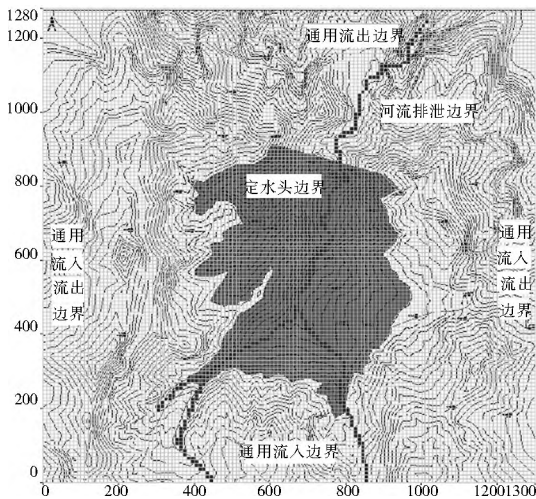


图 7 工程区水库蓄水渗流模拟边界概化

Fig. 7 Simulation boundary generalization of reservoir water seepage in the project area

### 3.3 时空离散及参数选取

结合研究区的水文地质条件,输入含水层参数,利用现场钻孔压水试验资料进行分析、筛选和整理,在此范围内反复试算,分别获取可溶岩与非可溶岩的渗透参数以及岩、土体样品的物理性质,具体参数见表 1。

表 1 库区模型参数取值表

Tab. 1 Model parameters selection table of the reservoir

地层	参数					
	渗透系数/( $m \cdot d^{-1}$ )			贮水率 /( $L \cdot m^{-1}$ )	重力给 水度	有效孔 隙度
	$k_x$	$k_y$	$k_z$			
D <sub>2</sub> g <sub>2</sub> 大理岩	0.034	0.034	0.023	0.06	0.062	0.082
蚀变带可溶岩	0.024	0.024	0.018	0.03	0.058	0.058
$\nu_5$ 花岗岩	0.022	0.022	0.016	0.0058	0.0218	0.028

跟据研究区多年气象统计数据,平均年降水量 804.8 mm,并且呈季节性变化,6 月- 9 月为丰水期,12 月- 2 月份为丰水期,其余月份为平水期,降雨入渗系数参考区域水文地质资料,取 0.25,而库区多年平均蒸发量为 806.3 mm,蒸发深度为 3~ 5 m 见表 2。降水和蒸发分别用补给模块 Recharge 与 Evapotranspiration 进行分时段刻画。

表 2 降雨量、蒸发量前度划分

Tab. 2 Former division of rainfall and evaporation

时间	水文期划分	降雨补给量 /mm	蒸发量 /mm	时间长度 /d
6 月- 9 月	丰水期	123.82	118.58	122
10 月- 11 月	平水期	23.56	22.41	61
12 月- 2 月	枯水期	18.48	32.23	90
3 月- 5 月	平水期	35.34	36.18	92

### 3.4 渗流场模拟和渗漏量计算及防渗措施

根据钻孔长期的观测水位对模型进行拟合校验,得出库区天然的渗流场状态,随后水库蓄水加载运行定水头边界模块进行计算,地下水渗流场见图 8- 图 11。

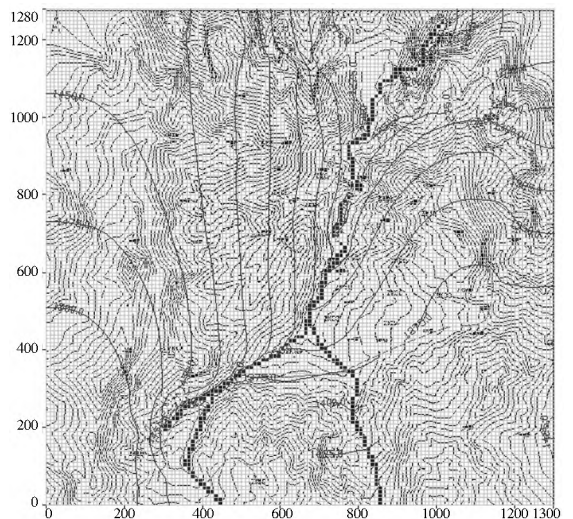


图 8 水库建成前地下水天然渗流场

Fig. 8 Natural groundwater seepage field before the reservoir was built

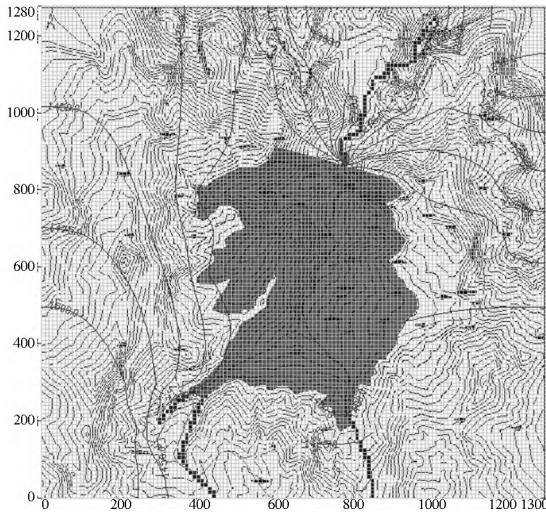


图 9 水库建成蓄水后地下水渗流场

Fig. 9 Groundwater seepage field after impounding of the reservoir

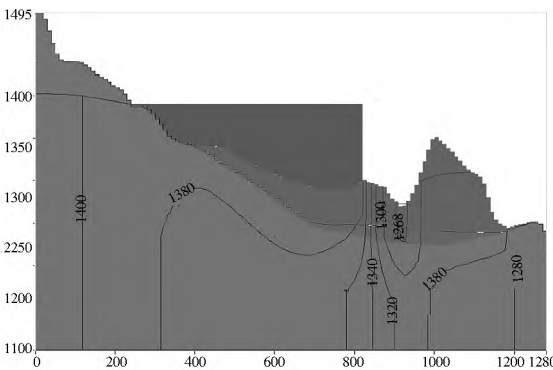


图 10 水库蓄水后地下水渗流场纵剖面

Fig. 10 Longitudinal section of groundwater seepage field after impounding of the reservoir

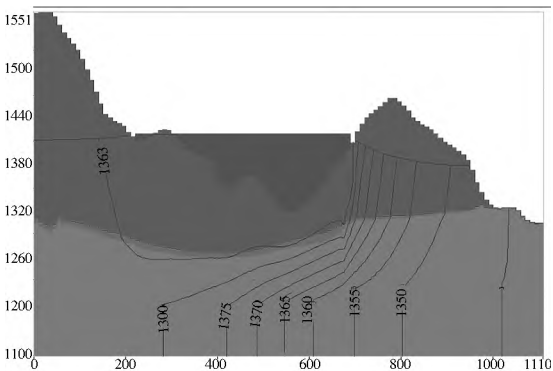


图 11 水库蓄水后地下水渗流场横剖面

Fig. 11 Longitudinal section of groundwater seepage field after impounding of the reservoir

计算稳定后,同时运用 zone budget 模块,对上述分析的岩溶通道的渗漏情况进行模拟,计算库水的渗漏量。通过区域水均衡计算,结果显示“一线天”渗漏量最大,为  $4\ 058.89\ \text{m}^3/\text{d}$ ,坝基的绕坝渗漏量为  $3\ 564.69\ \text{m}^3/\text{d}$ ,黑松梁岩溶通道的渗漏量为  $3\ 085.23\ \text{m}^3/\text{d}$ ,三个通道均发生了严重渗漏,与上述分析相吻合。

根据现场勘查资料分析,结合钻孔揭示成果及

岩溶发育特征,需要对库区几处渗漏通道做出防渗措施<sup>[15-18]</sup>。按照设计要求,我们在库区可溶岩库盆内盆底施加防渗铺盖措施,同时在坝基底部、“一线天”与黑松梁施加设计深度的防渗帷幕,分别为  $85\ \text{m}$ 、 $98\ \text{m}$  和  $88\ \text{m}$ ,具体工程措施布置见图 12。

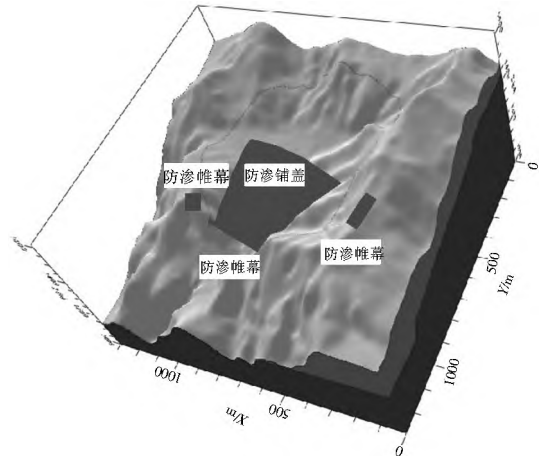


图 12 各岩溶渗漏部位防渗措施空间

Fig. 12 Longitudinal section of groundwater seepage field after impounding of the reservoir

地下水渗流场在防渗措施条件下会发生一定程度的变化,同时,各岩溶通道渗漏量也有相应的变化,运用 zone budget 模块再次进行计算后,“一线天”、坝基和黑松梁对应的各部位渗漏量分别为  $224.22\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $95.81\ \text{m}^3/\text{d}$  和  $58.24\ \text{m}^3/\text{d}$ ,均有了大幅度的减小。

#### 4 结语

综上所述,根据岩溶的空间展布规律、可溶岩完整性程度和岩体陡倾裂隙结构面特征,结合钻孔资料可以判断,水库向邻谷渗漏、绕坝基渗漏以及左库岸山体内部的管道型岩溶渗漏是最为显著的,并且渗漏通道主要发育在“一线天”、坝基和黑松梁三个部位。

利用 visual modflow 地下水模拟软件,对工程建设现状以及工程建设后进行了数值模拟,预测工程建成水库岩溶通道的渗漏量,其中“一线天”渗漏量最大,为  $4\ 058.89\ \text{m}^3/\text{d}$ ,坝基和黑松梁渗漏量分别为  $3\ 564.69\ \text{m}^3/\text{d}$  和  $3\ 085.23\ \text{m}^3/\text{d}$ ,这些渗漏都会对水库的运营和效益产生影响。

工程库区可溶岩库盆内施加防渗铺盖,同时在坝基底部、“一线天”与黑松梁施加  $85\ \text{m}$ 、 $98\ \text{m}$  和  $88\ \text{m}$  深度防渗帷幕后,各岩溶通道的渗漏量明显较小,“一线天”渗漏量为  $224.22\ \text{m}^3/\text{d}$ ,坝基渗漏量  $95.81\ \text{m}^3/\text{d}$ ,黑松梁渗漏量  $58.24\ \text{m}^3/\text{d}$ ,因此工程防渗措施起到了一定的效果。

## 参考文献(References):

- [1] 邹成杰. 水库岩溶渗漏地质模型和数学模型的初步研究[J]. 中国岩溶, 1999, 9(3): 231-240. (ZOU Cheng-jie. A preliminary study on geological model and mathematical model of reservoir leakage in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 1999, 9(3): 231-240. (in Chinese))
- [2] 孙维兵. 黄河羊曲水电站坝址岩溶发育特征及对工程影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. (SUN Wei-bing. Study on the characteristics of the karst developing at the dam of Yangqu reservoir on the Yellow river and its influence on the project [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [3] 许模, 王士天. 工程水文地质学及其在水电工程中的应用概述[J]. 工程地质学报, 2003, 11(4): 397-401. (XU Mo, WANG Shi-tian, A brief of engineering hydrogeology and its application to hydroelectric power project[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(4): 397-401. (in Chinese))
- [4] 杨艳娜, 许模. 新坝水库区岩溶渗漏问题研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(8): 90-91. (YANG Yan-na, XU Mo. Study on the karst reservoir leakage problem of Xinba[J]. Yellow River, 2009, 31(8): 90-91. (in Chinese))
- [5] 卢耀如. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (LU Yao-ru. Research on the evolutions of karst hydrogeological environments and their engineering impacts[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 张国新. 流形元法与结构模拟分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(1): 63-69. (ZHANG Guo-xin. Structure analysis by second order manifold method[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(1): 63-69. (in Chinese))
- [7] 韩凤霞, 崔栋. 改扩建水库土坝段三维渗流问题仿真研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 145-147. (HAN Feng-xia, CUI Dong. Simulation of three dimensional seepage problem of earth dam in reservoir extension project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 145-147. (in Chinese))
- [8] 陈亚峰, 张强, 赵瑞, 等. 岩溶区渗漏通道的示踪试验[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 169-172. (CHEN Ya-feng, ZHANG Qiang, ZHAO Rui, et al. Tracer experiment in karst seepage channel[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 169-172. (in Chinese))
- [9] 田茂中, 叶明. 毛家河水电站库区岩溶发育特征及邻谷渗漏分析[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(6): 18-23. (TIAN Mao-zhong, YE Ming. Analysis on karst developing feature & seepage of neighbor valley in reservoir area of Maojiahe hydropower station [J]. Guizhou Water Power, 2006, 20(6): 18-23. (in Chinese))
- [10] 徐平. 洪屏抽水蓄能电站库盆渗漏研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (XU Ping. The study on reservoir leakage of Hongping Pumped storage Power Station [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [11] 熊德森. 水工建筑物岩溶渗漏问题综述[J]. 贵州地质, 2003, 20(2): 106-110. (XIONG De-sen. On the Karst percolation of hydrotechnical construction [J]. Guizhou Geology, 2003, 20(2): 106-110. (in Chinese))
- [12] 邹成杰, 徐福兴. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994. (ZOU Cheng-jie, XU Fu-xing. Karst water resources and hydropower engineering geological [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (XUE Yu-qun. Underground water dynamics [M]. Beijing: Geological Press, 1997. (in Chinese))
- [14] 肖斌, 许模, 曾科, 等. 基于 Modflow 的岩溶管道概化与模拟探讨[J]. 地下水, 2014, 36(1): 53-55. (XIAO Bin, XU Mo, ZENG Ke, et al. Study on karst conduit generalization and simulation [J]. Journal of Groundwater, 2014, 36(1): 53-55. (in Chinese))
- [15] 赵瑞, 许模. 水库岩溶渗漏及防渗研究综述[J]. 地下水, 2011, 33(2): 20-22. (ZHAO Rui, XU Mo. Summary on reservoir karst seepage and anti-seepage research [J]. Journal of groundwater, 2011, 33(2): 20-22. (in Chinese))
- [16] 黄静美. 岩溶地区水库渗漏问题及坝基防渗措施研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (Huang Jingmei. Study on reservoir leakage and anti-seepage measurement of dam foundation in Karst region [D]. Chengdu: SiChuan University, 2006. (in Chinese))
- [17] 刘三虎. 岩溶地区帷幕灌浆研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004. (Liu Sanhu. The research of purdah's grouting in the Karst area [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese))
- [18] 脱云飞, 王克勤, 张振伟, 等. 斜孔帷幕灌浆在病险水库防渗处理中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 145-147. (TUO Yun-fei, WANG Ke-qin, ZHANG Zhen-wei, et al. Application of inclined holes curtain grouting in the seepage control of the reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 145-147. (in Chinese))