

锦屏二级水电站隧洞涌水的数值反演与预测

夏 强^{1, 2}, 王旭升¹, POETERE², 万 力¹

(1. 中国地质大学 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 科罗拉多矿业学院 国际地下水模型中心, 美国 戈尔登 80401)

摘要: 锦屏二级水电站位于河间高山峡谷岩溶区, 大规模隧洞群的开挖会显著改变地下水循环条件, 形成隧洞涌水, 辅助洞施工期间的涌水特征表明, 锦屏山体存在 12 条陡倾导水裂隙带。利用 MODFLOW 建立 5 种工况下的三维稳定流模型, 着重刻画对涌水起重要作用的导水裂隙带。以各涌水点的实测涌水量为拟合依据, 使用 UCODE 数值反演软件对模型进行校正, 关键参数得到优化, 从而提高模型可靠度。参考辅助洞的防渗模式, 模型预测防渗前后隧洞群的总涌水量分别为 40.35 和 31.19 m³/s, 隧洞开挖致使工程区内两大泉断流。泉水的恢复需要更有效的防渗措施。

关键词: 隧道工程; 锦屏二级水电站; 隧洞涌水; 反演; 预测

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3247 - 07

INVERSE PROBLEMS AND PREDICTION OF WATER INFLOW IN TUNNELS OF JINPING II HYDROPOWER STATION

XIA Qiang^{1, 2}, WANG Xusheng¹, POETERE², WAN Li¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden 80401, USA)

Abstract: Jinping II hydropower station is situated in a karst area with mountains and valleys. The excavation of large size tunnels will significantly change the conditions for groundwater flow, causing inflow in the tunnels and impacts on surrounding environment. As indicated by the discharge patterns of groundwater in the auxiliary tunnel during its construction, 12 fractured zones with high vertical conductivity are existing in the Jinping mountain. Five three-dimensional steady state flow numerical models are built with MODFLOW. In the models, these fractured zones are typically considered. UCODE is employed to calibrate the models according to observations of groundwater inflow, and key parameters are identified and optimized for better modeling. Based on the waterproofing technique in the auxiliary tunnel, the models predict water inflows in all tunnels before and after waterproof protections, and the results are 40.35 and 31.19 m³/s, respectively. Excavation of the tunnels will cause drying of two major springs in the area, and the springs could not be recovered unless more effective waterproof protection is applied.

Key words: tunnelling engineering; Jinping II hydropower station; water inflow; inverse problem; prediction

1 引 言

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州的雅砻江干流锦屏大河湾上, 它利用雅砻江下游河段

150 km 长大河湾的天然落差, 通过开挖 4 条长约 17 km, 直径 11 m 的引水隧洞, 截弯取直, 引水发电^[1, 2]。工程区地处青藏高原向四川盆地过渡的斜坡地带, 隧洞沿线由白山组大理岩组成主分水岭, 主体山峰高程在 4 000 m 以上, 沟谷深切, 最大高

收稿日期: 2009 - 12 - 16; **修回日期:** 2010 - 03 - 28

基金项目: 国家自然科学基金、雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639090)

作者简介: 夏 强(1982 -), 男, 2007 年毕业于中国地质大学(北京)水文与水资源工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下水数值模拟等方面的研究工作。E-mail: qiangwa@163.com

Fig.2 Geological profile and distribution of major water inflow points^[1]

可溶岩。而上三叠统深灰色变质砂岩、板岩与下三叠统深灰色 - 灰绿色变质砂岩、绿帘石或绿泥石片岩(局部夹大理岩)等非可溶岩层组成了本区的地下水边界或地表分水岭^[4]。

锦屏山体中部比东西两侧的岩溶发育程度强而形成一系列排泄高程较高的泉, 如老庄子泉群、磨房沟泉、三股水泉等, 正是以这些泉为排泄基准面, 对岩溶向深部发育有抑制作用^[2]。溶蚀裂隙是本区最主要的渗流通道。区内主要断层有 F4, F5, F6, F8, F10, F11; 倾角 50°~70°, 节理以 NNE 向的顺层节理和 NWW 向张扭性节理最为发育。

2.2 辅助洞涌水及其规律

辅助洞在开挖掘进过程中单点涌水量大于 0.1 m³/s 的共发生约 20 次。吴世勇等^[3]对 7 次较大突涌水作了详细的介绍, 总结认为涌水主要发生在断层、褶皱核部等强烈发育结构面的部位^[7, 8]。

根据辅助洞揭露的岩溶水文地质条件, 将隧洞的东部盐塘组地层划分为 4 个出水带, 中部白山组地层划分为 6 个出水带, 西部杂谷脑组划分为 2 个出水带^[5], 辅助洞贯通各出水带稳定涌水量见表 1。

表 1 辅助洞贯通各出水带稳定涌水量^[5]

Table 1 Stable water inflow after completion of auxiliary tunnels^[5] m³/s

出水带	稳定流量	防渗后流量	主要涌水点
东部	东一	0.20	AK14 - 762 BK14 - 888
	东二	0.50	AK13 - 878
	东三	1.30	AK13 - 520
	东四	0.50	AK12 - 907
中部	中一	2.80	BK10 - 980
	中二	0.65	BK10 - 658
	中三	0.10	BK10 - 262
	中四	0.09	AK8 - 597
	中五	0.70	BK6 - 472 AK5 - 163
	中六	1.80	BK5 - 072
西部	西一	0.05	AK1 - 117
	西二	0.05	BK2 - 633
合计	8.74	6.29	

辅助洞西部杂谷脑组大理岩的涌水点初期渗水量较大, 但由于都没有恒定和充足的补给源, 涌水

量均衰减较快, 最终水量均较小。进入白山组地层后, 由于白山组大理岩属强富水地层, 地下水有恒定和充足的补给源, 其水压力大、水量稳定^[4]。经粗略统计, 辅助洞总涌水量中约 60%来自于 14 个主要涌水点, 而余下 40%可视为隧洞的均匀渗水量。

3 模型概化

模型三维形态图见图 3。本文利用 MODFLOW 建立三维渗流模型。MODFLOW 是由美国地质调查局发布的一套专门用于孔隙介质中地下水运动数值模拟的三维有限差分计算程序^[9], 在国际上使用十分广泛。锦屏工程区水文地质条件复杂, 为典型的有溶蚀岩体渗流问题, 大裂隙渗流通道特别是溶洞的渗流运动可能偏离达西定律。不过, 工程区岩体导水通道以裂隙为主, 溶洞规模较小, 且本文模型并不研究渗流的微观过程, 因此宏观上仍可视岩体为服从达西定律等效多孔介质^[2], 适用于 MODFLOW 建模。

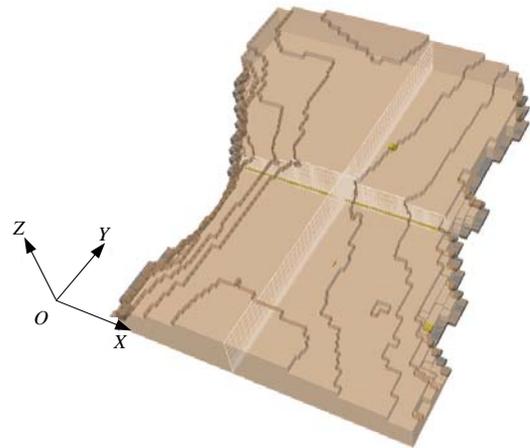


图 3 模型三维形态图

Fig.3 Three-dimensional shape of the model

模型 X 轴方向沿隧洞平行, 为近 EW 向。Y 轴方向为近 SN 向。模拟中心区域以东、西雅砦江为界, 取为第一类边界即定水头边界, 西边界水位为隧洞取水的设计水位 1 646 m, 东边界为 1 330 m。以 A 辅助洞为中心线, 向南北各平行延伸 15 km 为边界。采用更大尺寸的模型试算表明, 即使整个隧洞群都不采取防渗措施, 在隧洞群总涌水量达到 40 m³/s 的情况下, 除导水裂隙带之外, 南北边界的水头都可以保持稳定, 因此取 15 km 作为隧洞涌水的

影响范围基本合理。模型 Z 轴范围从山体表面向下至高程约 1 100 m 处，底边界作为隔水边界。辅助洞中心线高程近似取为 1 623 m，施工排水洞和 4 条引水隧洞位于同一平面，中心线高程为 1 595 m，暂不考虑其坡降。

模型共剖分为 16 层(Z 向)、128 行(Y 向)、149 列(X 向)，总计 305 152 个单元。隧洞群区域网格进行了加密，辅助洞、施工排水洞和引水隧洞单元尺寸分别为 6, 7 和 11 m。主要涌水点处也进行了网格加密。

导水裂隙带及网格剖面示意图见图 4。根据主要涌水点的位置，模型重点处理了 12 条导水裂隙带，其垂向渗透系数赋较大值。导水裂隙带东西宽为 150~350 m，纵贯模型南北，Z 方向切穿模型，基本刻画出工程区导水带的实际特征。

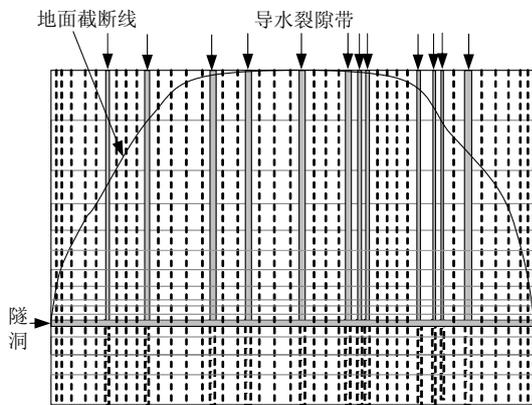


图 4 导水裂隙带及网格剖面示意图

Fig.4 Schematic profile of fractured zones and the meshes

模型中用 DRAIN 模块来处理隧洞，它是由水头决定流量的第三类边界条件。DRAIN 的流量，即本文隧洞的涌水量由下式计算得到

$$\left. \begin{aligned} QD &= CD(HD - h_{i,j,k}) \quad (h_{i,j,k} > HD) \\ QD &= 0 \quad (h_{i,j,k} \leq HD) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：QD 为从含水层进入 DRAIN 的流量，CD 为排水系数，HD 为 DRAIN 的高程， $h_{i,j,k}$ 为 DRAIN 所在单元的计算水头。

关键参数为排水系数，它表示单位时间，单位水头差作用下由含水层进入 DRAIN 的流量^[9]。该参数由隧道围岩特性、裂隙或溶洞发育情况、地下水流速、防渗措施等因素决定。工程没有进行有助于确定该参数的相应尺度的试验，且该参数具有较大的不确定性，本文将其作为反演的参数。在模型中，隧洞由一排 DRAIN 单元组成。

泉的流量同样由所在区域的水位分布决定，属于第三类边界条件。因此将磨房沟、老庄子两大泉所处单元也处理为 DRAIN，由隧洞施工前天然状态下其稳定流量反演得到排水系数。

工程区地下水的补给来源为大气降雨和降雪，且降水的高山效应十分明显^[2]。多年统计资料回归可以得到降水的高山效应公式为

$$y = 0.236 3x + 733.69 \quad (2)$$

式中：x 为高程(m)，y 为降雨量(mm)。

根据降雨量的分布特征，结合对应的入渗系数即可得到等效的入渗补给强度。工程区水文地质条件复杂，是典型的有溶蚀岩体渗流问题，但由于目前关于岩溶的定量资料有限，只能采用连续介质模型，把水在裂隙中的流动概化到整个岩体。除导水裂隙带之外，本文将岩体渗透性处理为各向同性，渗透系数如表 2 所示^[1]。

表 2 各介质入渗系数及渗透系数^[1]

Table 2 Infiltration coefficients and hydraulic conductivities of various media^[1]

介质	入渗系数	渗透系数/(m·s ⁻¹)
P ₁	0.350	4.63×10 ⁻⁷
T ₁	0.150	9.26×10 ⁻⁸
T _{2z}	0.380	4.63×10 ⁻⁷
T _{2b}	0.462	4.63×10 ⁻⁷
T _{2y}	0.350	4.63×10 ⁻⁷
T ₃	0.150	9.26×10 ⁻⁸
导水裂隙带	0.380	6.94×10 ⁻⁵ (水平向) 2.72×10 ⁻⁴ (垂向)

4 模拟结果及讨论

本文建立了隧洞群施工前天然状态下、辅助洞贯通防渗前后、隧洞群全部贯通防渗前后，5 种状态下的 5 个稳定流模型。5 个模型的关系及模拟流程如图 5 所示。参数敏感度图见图 6。

4.1 UCODE 参数反演

本文运用 UCODE 软件^[10~12]来实现非线性回归以校正 MODFLOW 模型。UCODE 参数反演软件采用改进的高斯-牛顿法优化参数取值，使观测值和模拟值之差的加权平方和最小。软件能方便地判别对拟合结果不敏感的参数，评价参数之间的相关性。这些可以较好地用以改进概念模型，使之更好地代表渗流区的实际情况。

数值反演过程是在 UCODE 环境下反复运行 MODFLOW, 比较 14 个主要涌水点的模拟流量和观测流量, 自动调整参数值, 使之满足观测和模拟值之差的加权平方和最小。当相邻 2 次迭代的参数值改变量小于 1% 时, 认为模型校正达到收敛, 此时得到的参数作为拟合效果最佳的优化参数。

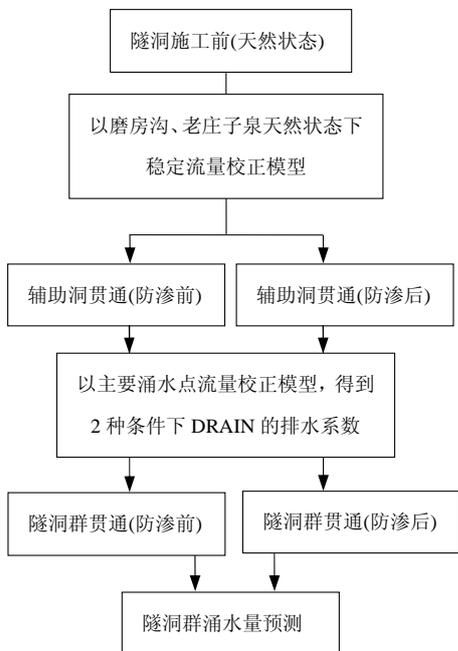


图 5 模拟流程图

Fig.5 Flow chart of the modeling

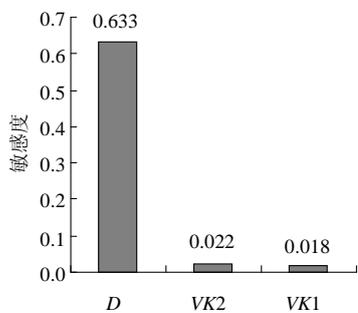


图 6 参数敏感度图

Fig.6 Sensitivities of parameters

以辅助洞贯通后 14 个主要涌水点的流量为观测值, 反演得到局部最优的排水系数。局部最优的排水系数不确定性较大, 且通过参数敏感度分析(模型中以 D 表示)对模拟涌水量的敏感度远大于导水裂隙带垂向渗透系数($VK2$)和非裂隙带垂向渗透系数因子($VK1$), 因此将其作为优化的惟一参数。经过 UCODE 反演, 得到了辅助洞贯通, 防渗前后 2 种条件代表隧洞的最优排水系数分别为 2.191×10^{-4}

和 $1.210 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

图 7 为辅助洞贯通主要涌水点流量拟合曲线(横轴为隧洞西端至涌水点的距离, 纵轴表示涌水量)。观测值与模拟值的拟合还可以用散点图来表示。如图 8 所示, 防渗前、后两者间的相关系数分别为 0.965, 0.939, 一般情况下相关系数大于 0.900, 就认为模拟值与观测值实现了较好的拟合^[13]。

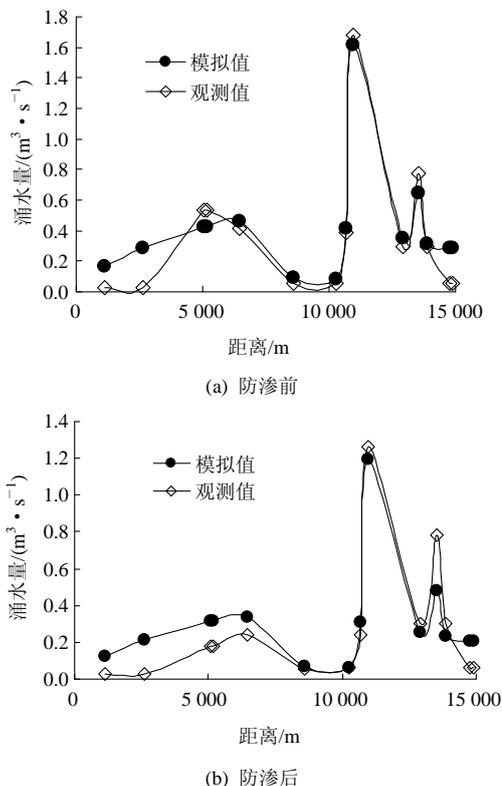
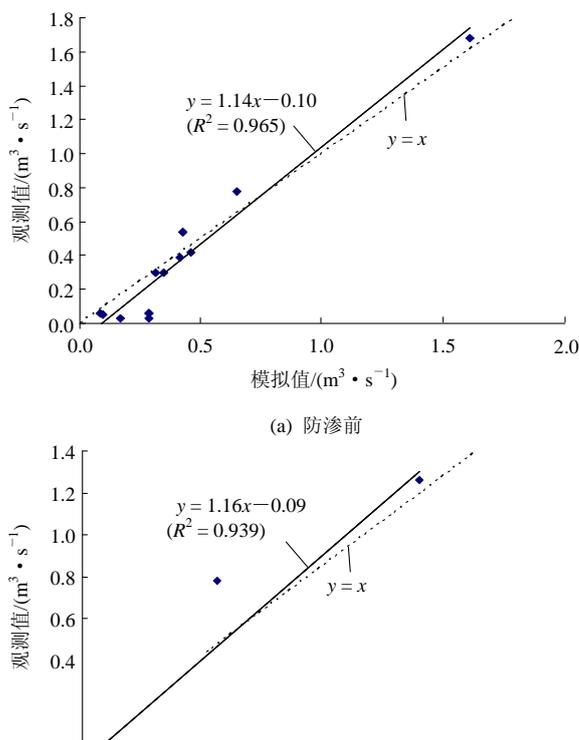


图 7 辅助洞贯通主要涌水点流量拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of measured and simulated water inflow at different points in the auxiliary tunnel



(a) 防渗前

$$y = 1.16x - 0.09$$

$$(R^2 = 0.939)$$

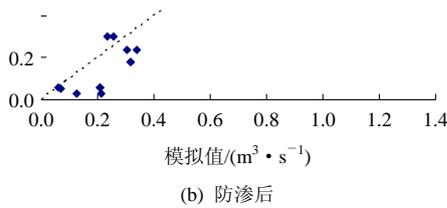


图8 辅助洞涌水模拟值和观测值对比图
Fig.8 Comparison between measured and simulated water inflow in the auxiliary tunnel

4.2 隧洞群贯通涌水量预测

将优化后的参数输入预测模型，可以得到防渗前后隧洞群涌水量预测值，见表3(其中，辅助洞均为防渗后流量)。整个隧洞群采用类似辅助洞堵水的防渗措施后，稳定涌水量将由 40.35 m³/s 减少到 31.19 m³/s，预测值较大，可能是本文除考虑对导水裂隙涌水之外，还考虑了围岩均匀渗水的出水量。防渗前后隧洞的均匀渗水量分别为 16.47 和 12.34 m³/s，约占总涌水量的 40%，说明小型裂隙的渗水也有较大的累积规模。4 条引水隧洞的涌水量和分布特征都较一致，中部白山口组涌水量最大。

表3 隧洞群贯通涌水量预测表

Table 3 Estimated water inflow before waterproof protection for the tunnel group m³/s

状态	洞号	涌水量				合计
		西部	中部	东部	均匀渗流	
防渗前	辅助洞 A	0.11	0.36	1.08	1.14	2.70
	辅助洞 B	0.20	2.01	0.20	1.13	3.53
	施工排水洞	0.22	1.42	0.75	1.58	3.97
	1 [#] 引水隧洞	0.40	2.60	1.38	3.15	7.53
	2 [#] 引水隧洞	0.40	2.60	1.38	3.15	7.52
	3 [#] 引水隧洞	0.40	2.60	1.38	3.15	7.53
	4 [#] 引水隧洞	0.39	2.61	1.38	3.17	7.56
	合计	2.12	14.20	7.56	16.47	40.35
防渗后	辅助洞 A	0.12	0.37	1.10	1.15	2.73
	辅助洞 B	0.20	2.05	0.20	1.14	3.59
	施工排水洞	0.16	1.06	0.56	1.12	2.90
	1 [#] 引水隧洞	0.30	1.94	1.02	2.23	5.49
	2 [#] 引水隧洞	0.30	1.94	1.02	2.23	5.49
	3 [#] 引水隧洞	0.29	1.94	1.03	2.23	5.49
	4 [#] 引水隧洞	0.29	1.94	1.03	2.24	5.50
	合计	1.66	11.23	5.96	12.34	31.19

4.3 水头分布的变化

图9给出了3种状态下隧洞群所在平面的水头

分布。可以看出，隧洞的开挖引起导水裂隙带水位显著下降，且影响范围较广。天然状态下，磨坊沟和老庄子泉可分别保持 5.20 和 1.96 m³/s 的稳定流量^[2]，辅助洞开挖之后，隧洞涌水引起周围水位降低，两泉所在区域中心水位分别降低了 107 和 140 m，导致两泉全年干枯。隧洞全部贯通后，总涌水量由 40.35 m³/s 减少到 31.19 m³/s，两泉依然干枯。因此，恢复泉水应该采用更有效的防渗措施。

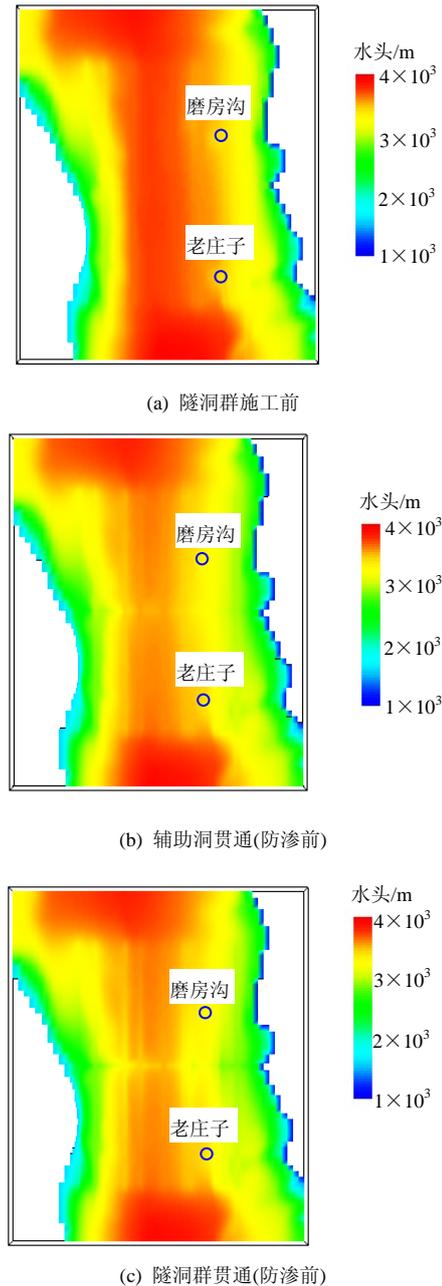


图9 3种状态下隧洞群所在平面水头分布图
Fig.9 Distributions of hydraulic heads of tunnel under three different conditions

由于缺少山体地下水位实测数据，目前还很难

判断水头计算的误差有多大。对于天然流场, 通过地形控制和泉点模拟已经得到较为合理的水头分布。辅助洞开挖后泉点干涸这一点也得到证实。因此, 水头分布的模拟结果从定性的角度上看是可靠的。

5 结 论

锦屏二级水电站工程区隧洞涌水主要通过大型导水裂隙带发生。根据辅助洞施工期间涌水特征, 锦屏山体存在 12 条优势导水带。

利用 MODFLOW 建立了 5 种工况下的三维稳定流模型。结合工程区水文地质情况, 以及辅助洞贯通后反映的涌水特征, 模型重点刻画了对涌水起重要作用的导水裂隙带。模型用 DRAIN 模块来处理隧洞, 能够反映隧洞围岩综合因素对涌水量的影响。通过 UCODE 软件反演得到了与观测涌水量实现局部最优拟合的隧洞排水系数。

以辅助洞防渗模式为参考, 预测防渗前后隧洞群的总涌水量分别为 40.35 和 31.19 m³/s。隧洞开挖引起导水裂隙带水位降低, 袭夺了工程区磨坊沟、老庄子两大泉的流量, 即使有隧道防渗工程泉水仍然断流。为恢复泉水, 需采取更有效的防渗措施。

致谢 感谢国家留学基金管理委员会“建设高水平大学公派研究生项目”的资助。

参考文献(References):

- [1] 任旭华, 束加庆, 单治钢, 等. 锦屏二级水电站隧洞群施工期地下水运移、影响及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2 891 - 2 897.(REN Xuhua, SHU Jiaqing, SHAN Zhigang, et al. Research on groundwater transport, influence and control in tunnel group of Jinping II hydropower station during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 891 - 2 897.(in Chinese))
- [2] 许国安, 邵 宇. 锦屏二级水电站引水隧洞三维渗流分析[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(增): 18 - 22.(XU Guoan, SHAO Yu. Three dimensional seepage analysis of diversion tunnel of Jinping II hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(Supp.): 18 - 22.(in Chinese))
- [3] 吴世勇, 王 坚, 王 鹤. 锦屏水电站辅助洞工程地下水及治理对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1 959 - 1 967.(WU Shiyong, WANG Jian, WANG Ge. Underground water and its treatment strategy in auxiliary tunnels of Jinping hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 1 959 - 1 967.(in Chinese))
- [4] 马祖陆, 周春宏, 张之淦, 等. 四川锦屏落水洞岩溶地下水示踪[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 201 - 210.(MA Zulu, ZHOU Chunhong, ZHANG Zhigan, et al. Tracer test to karst groundwater in Luoshuidong area, Jinping, Sichuan[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(3): 201 - 210.(in Chinese))
- [5] 夏泽勇, 李 军, 吴旭敏, 等. 雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞和辅助洞施工期导水及地下水处理规划报告(咨询本)[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2008.(XIA Zeyong, LI Jun, WU Xumin, et al. Planning report of water inflow and groundwater treatment of headrace and auxiliary tunnels during construction, Yalong River Jinping II hydropower station(for reference only)[R]. Hangzhou: East China Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., 2008.(in Chinese))
- [6] 陈昌礼, 杨 谦. 锦屏水电枢纽辅助洞工程关键技术问题及对策分析[J]. 四川水力发电, 2004, 23(1): 58 - 59, 61.(CHEN Changli, YANG Qian. Main technical problems and the treatment strategy in the Jinping auxiliary tunnels[J]. Sichuan Water Power, 2004, 23(1): 58 - 59, 61.(in Chinese))
- [7] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573 - 576.(HUANG Runqiu, WANG Xianneng, CHEN Longsheng. Hydraulic fracturing analysis in water-spouting process in deep-buried tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573 - 576.(in Chinese))
- [8] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217 - 225.(LI Shucui, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217 - 225.(in Chinese))
- [9] HARBAUGH A W. MODFLOW - 2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model—the groundwater flow process[R]. [S. l.]: US Geological Survey, 2005.
- [10] POETER E P, HILL M C, BANTA E R, et al. UCODE_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation[R]. [S. l.]: US Geological Survey, 2005.
- [11] GEZA M, POETER E P, MCCRAY J E. Quantifying predictive uncertainty for a mountain-watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1 - 2): 170 - 181.
- [12] POETER E P, HILL M C. Inverse models: a necessary next step in groundwater modeling[J]. Ground Water, 1997, 35(2): 250 - 260.
- [13] HILL M C, TIEDEMAN C R. Effective Groundwater Model

Calibration, with Analysis of Sensitivities, Predictions, and Uncertainty[M].

New York: Wiley and John Sons, Inc., 2007.