

岩溶区渗漏通道的示踪试验

陈亚峰, 张强, 赵瑞, 廖小超

(成都理工大学, 成都 610059)

摘要: 岩溶管道的发育是水利水电工程的重大安全隐患, 所以查清渗漏管道的存在与否是岩溶区水利水电工程的一项重要基础性工作。示踪方法在检测渗漏通道存在性方面占有着特殊的地位, 因为这种方法能够证实各试验点连通关系并且直接了解地下水运动的过程。通过示踪试验对西部地区某一水电站左坝肩的进行调查研究, 最终确定各试验点之间存在渗漏通道。

关键词: 示踪试验; 示踪剂; 荧光素; 分光光度计; 示踪通道; 水电工程; 回收率

中图分类号: TV 697.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0169-04

Tracer Experiment in Karst Seepage Channel

CHEN Yafeng, ZHANG Qiang, ZHAO Rui, LIAO Xiaochao

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The development of Karst seepage channel is a major safety hazard to the hydropower projects, and therefore the identification of the presence or absence of seepage channel in the water conservancy and hydropower project is an important work. Tracer method is a popular method in terms of detecting the existence of seepage channel, because this method can detect the connection between each test points and then determine the process of groundwater movement. In this paper, tracer test was applied in the left abutment of a hydropower station in Western China, which detected the presence of seepage channel between each test points.

Key words: tracer experiment; tracer; fluorescein; spectrophotometer; tracer channel; hydropower engineering; recovery rate

某一水电站工程区地处陕西省西南部, 秦岭山脉腹地, 东秦岭主峰——太白山东麓, 坝址区可溶岩层发育。大规模、集中的岩溶洞穴的发育, 对坝区岩体的利用十分不利, 且蓄水后对电站存在较大的岩溶渗透危害性。为调查确定库区的岩溶渗漏通道发育情况, 本文拟采用示踪试验法进行调查, 研究各试验点渗漏通道存在性^[1-2]。

坝址区的 ZK51 与 ZK51-1 钻孔资料揭示, 在黑沟梁处, 由于同组裂隙的剪胀效应导致局部扩容, 产生大型的隐伏状溶蚀空间, 由此推测黑沟梁存在较大规模的岩溶管道。同时 ZK51 东侧陡坎下部库内 PD13, 在库盆的外沿靠近库盆线的位置。内部裂隙发育同时揭露大规模岩溶空腔, 近东西走向, 产状 EW/S $\angle 67^\circ \sim 72^\circ$, 壁面波状起伏, 石幔发育, 钙膜厚度 2~20 mm。裂隙最大张开约 60 cm, 局部充填岩块, 见黄色次生泥。同时, 在库内库外蓄水高程以下均存在地下水的天然出露点如泉点 1、沟水 1、泉点 2 和 ZK35 旁的沟水。

1 试验设计

水库蓄水以后, 水在适宜的地形、地质条件下, 将会经过地下通道向库外渗漏, 从而可能危及工程的安全或影响工程的效益。地下水示踪试验的主要目的是查明库区内外地下水的水力联系, 尤其库内与库区左岸附近各水点的水力联系, 确定地下水的主导流向, 计算地下水流速^[3]。在这些渗漏通道中, 岩溶渗漏是值得特别重视的。因为岩溶渗漏问题比其他问题更复杂, 导水能力往往更强, 也是水利水电建设中较为突出的水文地质问题。

1.1 试验目的和内容

(1) 探测查明 ZK51、ZK50 与库内库外地下水的天然出露点之间的水力联系, 定性判断二者是否存在连通关系; (2) 判定地下水流向; (3) 定量计算的库内、库外地下水流量比例。

收稿日期: 2013-10-07 修回日期: 2014-05-15 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

作者简介: 陈亚峰(1990), 男, 安徽安庆人, 主要从事水文地质、工程地质方面的研究。E-mail: 376713591@qq.com

通讯作者: 张强(1971-), 男, 辽宁营口人, 副教授, 博士, 从事水文地质、环境地质的教学和科研工作。E-mail: zhangqiang@cdut.cn

1.2 试验点的选取

本次选取可能存在通道的地点作为投放和接收示踪剂的试验点,从而准确分析各个通道的连通情况。各试验点的

信息见表 1,在地形三维模型中的位置见图 1。库内的试验点包括:泉点 1、沟水 1;库外的试验点包括:ZK 35 旁的沟水、ZK 50、ZK 51、ZK 51-1、PD13 和黑沟的泉点 02。

表 1 试验点的信息

Table 1 Basic condition at each experimental point

试验点名称	地理位置 X/km	地理位置 Y/km	高程/m	流量/(L·s ⁻¹)	备注
PD13	558 376.955	3 711 110.798	1 450.123	0.7	投放点、接收点
泉点 1	558 493.553	3 711 064.275	1 391.613	1	接收点
黑沟外泉点 2	557 919.645	3 711 182.428	1 340.000	0.5	接收点
沟水 1	558 529.286	3 711 111.783	1 381.248	0.01	接收点
ZK51	558 303.792	3 711 138.938	1 537.060	注水 0.22	投放点
ZK51-1	558 303.495	3 711 134.955	1 537.060	注水 0.22	投放点
ZK50	558 577.934	3 711 218.051	1 448.381	未注水	投放点
ZK35 旁沟	558 760.188	3 711 537.756	1 175.585	0.01	接收点

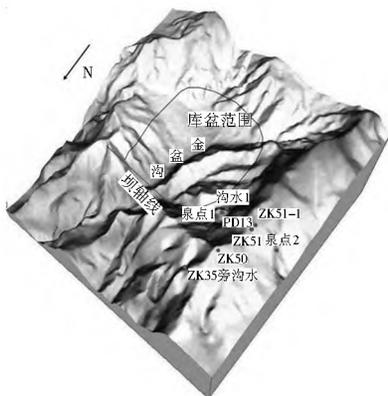


图 1 库区地形三维模型及各试验点

Fig. 1 Three dimensional terrain model and experimental points of the reservoir

1.3 试验方法

示踪探测的原理是在质量守恒定律的基础上,根据示踪剂在不同类型不同结构地下水流场中的弥散规律识别和了解流场的面貌并计算各种流场参数的技术手段。

由于荧光光谱分析法比其他分析方法检测极限低 1~2 个数量级^[4],因此对于大型岩溶水流场的示踪探测,选用这种示踪剂,具有极高的可靠性和良好的经济性^[5-7]。本次试验购买的示踪剂为四氯四碘荧光素二钠,其分子式为 C₂₀H₂Cl₄I₄Na₂O₅;分子量:1 017.64;蓝红色粉末,溶于水呈蓝红色无荧光;溶于浓硫酸呈棕色,稀释后有肉红色沉淀;其最大吸收波长会在室内试验室内通过光谱扫描得出为 548 nm;性质较稳定,对环境无公害,在地质体中无天然赋存,且现场利用检测快捷方便。本次抽水蓄能电站左岸预测通道示踪连通试验采用国产精密仪器 722S 型分光光度计作为检测仪器^[8-10]。

当某单色光通过溶液时,其能量就会被吸收而减弱,光能量减弱的程度与溶液中物质的浓度 C 有一定的比例关系,即符合 Lambert Beer(朗伯比耳)定律。其关系式可表示为

$$A = K \cdot C \cdot L = \log I/I_0 \quad (1)$$

式中: A 为光密度又称为吸光度; K 为溶液的吸收系数; C 为溶液的浓度; L 为溶液的光径长度; I 为透射光强度; I_0 为入射光强度。

1.4 试验设计

(1) 将试验点 PD13 作为预测 PD13 和泉点 1 或沟水 1 处接收示踪剂通道的投放点,分别在泉点 1 和沟水 1 处接收水样并检测。

(2) 为了预测 PD13 与 ZK51 或 ZK51-1 的渗漏通道,从 ZK51 和 ZK51-1 分时段投放示踪剂,在 PD13 内部溶蚀裂隙流出的地下水接收水样并检测。

(3) 为了预测 ZK50 与 ZK35 旁沟的渗漏通道,从 ZK50 内投入示踪剂,在 ZK35 旁的沟水处接收水样并检测。

(4) 为了预测泉点 2 与 ZK51 或 ZK51-1 的渗漏通道,在 ZK51 和 ZK51-1 分时段投放示踪剂,并在黑沟外泉点 2 取样检测。

2 示踪探测过程

第一天在投放点 ZK50 投示踪荧光剂,考虑 ZK50 与接收点 ZK35 的距离,在接收点 ZK35 旁的水沟分两个批次取样检测。第一批次在投下示踪荧光剂后取水样,第二批次在第二天取水样。与此同时,ZK51 与 ZK51-1 投放点准备开始供水,直到 ZK51 和 ZK51-1 下部溶蚀空腔内部充水,使试验过程中的示踪剂荧光素能顺畅随着供水流动。在 ZK51 与 ZK51-1 供水条件未满足的条件下,第二天进行 PD13 与泉点 1 或沟水 1 的各点之间的渗漏通道示踪试验,PD13 内部溶蚀裂隙出露地下水流,可以直接配对示踪剂进行试验。

(1) 预测 ZK50 与 ZK35 旁的沟内有水力联系,由于 ZK50 距离 ZK35 旁边的沟外距离较远,对 ZK35 旁边的沟水的检测时间分为两段,在投下荧光素溶液后取 5 组水样后,隔一天后继续取样,取得样品十组,共十五组水样,利用分光光度计分析检测水样中荧光素浓度。

(2) 由于试验前期 ZK51 和 ZK51-1 供水条件未得到满足,利用该阶段对 PD13 中的裂隙是否与泉点 1 和沟水 1 存在渗漏通道,再后期对 ZK51-1 及 ZK51 与 PD13 做出示踪判断,从而得出 ZK51-1 及 ZK51 与泉点 1 及沟水 1 的水力联系。PD13 中的裂隙长时间渗水且流量约 0.7 L/s,试验前段时间的降雨对 PD13 中裂隙渗水的流量有较明显的影响。PD13 下方的泉点 1 出水量较大,约在 1 L/s。

(3) 供水条件满足后,首先向 ZK51-1 抽水,水流量在 0.22 L/s,第一天供水 8 h, ZK 内未见水位,第二天供水 40

min 后可见 ZK51-1 水位, 停止抽水后水位下降明显。根据 ZK51-1 内裂缝宽度和抽水的流量可判断 ZK51-1 内宽缝的体积约为 7 m^3 。ZK51 距离 ZK51-1 约 5 m , 在 ZK51-1 水满的情况下 ZK51 未见水位, 开始对 ZK51 连续注水约 7 h , 但 ZK51 始终未见水位, 说明 ZK51-1 与 ZK51 水力联系较弱。

表 2 各示踪试验点示踪剂回收率

Table 2 Tracer recovery rates at each experiment point

试验点名称	投剂量/g	时间	历时/min	回收点	最大浓度/ppb	回收率(%)	渗漏流量/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)
ZK50	7	7月11日	760	ZK35旁沟	210	3.55	0.01
PD13	2	7月12日	340	泉点1	150	78.6	0.78
			340	沟水1	/	/	/
ZK51-1	4	7月14日	270	泉点1	/	/	/
ZK51	10	7月15日	385	PD13	190	21.42	0.14
			270	黑沟外泉点2	290	20.56	0.1

3 试验结果

ZK50 距离 ZK35 旁的沟较远, 根据平面布置图的计算, 投放点与接收点的距离为 1000 m , 渗漏途径长且裂隙发育, 所以对接收点 ZK35 旁边的沟水取样检测时间要更长。在对 ZK50 投入 7 g 的荧光素溶液后, 立即对 ZK35 旁的沟水取样。第一阶段取样时间为 20 min 每组, 取样 5 组, 间隔 9 个多小时后进行第二段取样, 同样为 20 min 一组, 取 10 组样品共 15 组样品。结果表明, ZK35 旁沟内所取得的水样中含有明显的荧光素反应, 荧光素浓度波动也较为明显。该接收点发育在冲沟的一个小裂隙中, 流量较小约 0.01 L/s , 经过取样检测计算得出该点的接收率为 3.55% , 若考虑冲沟的沟水水流量, 估算约为 0.2 L/s , 可得整个沟水接收率为 71% , 由此可证明 ZK50 内水体与 ZK35 旁的沟水存在渗漏通道。

PD13 投放点内, 将示踪剂沿着裂隙水缓慢投放并即时在 PD13 下方的泉点 1 处进行取样检测, 取样时间为 340 min 。取样分析得出的泉水水样中荧光素的浓度与时间的变化曲线见图 2, 最大浓度在 90 min 时候出现, 并且有较明显的多波峰形态, 而且经过 340 min 的测样, 泉水中荧光素浓度逐渐减少并趋近于 0, 由泉点 1 流量以及检测得出的泉水浓度曲线与时间的关系经过计算得出本次检测过程中荧光素的回收率为 78.6% , 表明 PD13 中的裂隙与泉点 1 存在渗漏通道且较为畅通^[11-12]。

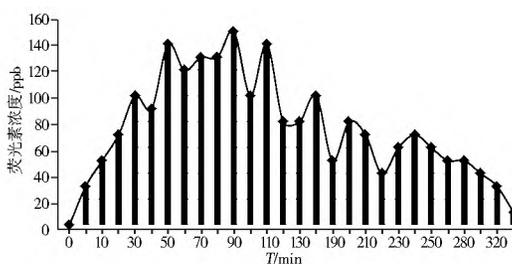


图 2 PD13 投放泉点 1 接收水样荧光素浓度-时间关系

Fig. 2 The concentration-time diagram of fluorescein in the water sample at the spring point 1 of experimental point PD13

在对 ZK51 投放荧光素溶液之前, 预先向 ZK51 内注水, 注水两小时后向 ZK51 内开始投放荧光素溶液, 投放量为 10

示踪试验过程中, 首先对 ZK51-1 投入示踪荧光素溶液, 在接收点未接收到荧光素反应的前提下, 再对 ZK51 投入荧光素溶液, 分别在 PD13 裂隙内和黑沟外的泉点 2 接收。

各试验点信息情况和完成情况及试验点回收率见表 2。

g, 分别在 PD13 内的裂隙处和黑沟外泉点 2 处接收。PD13 内取样为即时取样, 而黑沟外泉点 2 取样时间为投样 90 min 以后开始。

PD13 接收点的取样起始浓度就显示为较高浓度, 这与该接收点与 ZK51 距离近且水力坡度大有关, 在此两个接收点接收的水样中开始都含有高浓度的荧光素, 且在长时间的检测中, PD13 所取得水样中的荧光素浓度变化起伏较黑沟外泉点 2 明显, 表现为多波峰的状态, PD13 接收点在投放示踪剂后即时取样检测得出, PD13 接收点在有效接收时间内接收率 21.42% 。而黑沟外泉点 2 接收点, 由于地形条件的限制, 在投样后 90 min 后开始取得第一个水样, 取样总时间为 270 min , 较之 PD13 接收点的取样总时间略短, 检测计算后得出该接收点的荧光素接收率为 20.56% , 在相同时间内黑沟外泉点 2 取得水样中的荧光素浓度比 PD13 中取得水样的荧光素浓度要高。由此可说明 ZK51 与 PD13 中所处裂隙以及黑沟外的泉点 2 拥有渗漏通道, 且 ZK51 中的水体向黑沟外排泄的水量更多, 裂隙的畅通性更好。由上也可知在试验接收时间段内所取水样的总接收率为 41.98% 。通过对上述两幅图的延展趋势分析得出 PD13 接收点的荧光素浓度约在 6 h 后趋近于 0, 而黑沟外泉点 2 接收点处的荧光素浓度约在 3 h 后趋近于 0, 对其延展性分析计算得出 PD13 点的总接收率约为 32.13% , 同时黑沟外泉点 2 的总接收率约为 30.84% , 在有效的测试时间内两个接收点总的接收率约为 62.97% , 反映或有其他地下水分散出露点未被检测接收、或者该溶蚀宽缝具有较大的储水空间。

4 结语

(1) 本次试验选用荧光素为其作为复杂岩溶水环境示踪剂, 其良好的肉眼可见性, 可以发现事先未估计到的连通点, 从而避免重大的失误。尤其是经抗吸附和提高溶混性能处理的荧光素, 是很好的示踪材料。

(2) 利示踪试验法勘察岩溶区渗漏通道时, 试验前期准备工作要十分充分, 特别是应首先预测渗漏通道, 再设计投放点与接收点。

(3) 本次试验结果证实, 利用荧光素示踪剂试验能够确定渗漏通道, 更为重要的是根据示踪剂排放量与接收量的比

例以及示踪剂随时间的变化曲线,可以分析渗漏通道的渗漏量的大小。

参考文献(References):

- [1] 袁道先,李彬,刘再华.中国岩溶[M].桂林:广西师范大学出版社,1996.(YUAN Daoxian, LI Bin, LIU Zaihua. China Karst [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 卢耀如.岩溶地区主要水利工程地质问题与水库类型及其防渗处理途径[M].水文地质工程地质,1982.(LU Yaoru. The Main Hydraulic Engineering Geological Problems in Karst Areas with Impermeable Reservoir Types and their Treatment Approach [M]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982. (in Chinese))
- [3] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[K].2版.北京:中国建筑工业出版社,1992.(Engineering Geology Handbooks Committee. Engineering Geology Handbook [K]. Edition. Beijing: China Building Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [4] 戴树桂.仪器分析[M].高等教育出版社,1984.(DAI Shugui. Instrumental Analysis [M]. Higher Education Press, 1984 (in Chinese))
- [5] 李敬兰,李益民.广西龙布排泥库地下水多元示踪试验研究[J].安全与环境工程,2004(11):59-62.(LI Jinglan, LI Yimin. Experimental Study of Guangxi Mud Cloth Dragon Diverse Library Groundwater tracer [J]. Safety and Environmental Engineering. 2004(11): 59-62. (in Chinese))
- [6] 裴建国,谢运球,章程.湘中溶蚀丘陵地区示踪试验-以湖南新化为例[J].中国岩溶,2000,19(4):366-371.(PEI Jianguo, XIE Yunqiu, ZHANG Cheng. Dissolution Hilly Region in Central Hunan Tracer Tests [J]. China Karst, 2000, 19(4): 366-371. (in Chinese))
- [7] 黄保健,张之淦,陈伟海,等.高山峡谷岩溶水示踪试验-以川西锦屏地区为例[J].中国岩溶,1995,14(4):362-371.(HUANG Baojian, ZHANG zhiyu, CHEN Weihai, et al. Mountains and Canyons Karst Water Tracer Test-A Case Study in Western Sichuan Jinping [J]. China Karst, 1995, 14(4): 362-371. (in Chinese))
- [8] 梅瑛.荧光素钠试验方法与试验装置[J].核技术,2008,31(7):546-550.(MEI Ying. Sodium Fluorescein Test Methods and Test Equipment [J]. Nuclear technology, 2008, 31(7): 546-550. (in Chinese))
- [9] 罗云,刘刚.荧光素钠滴眼液的制备及质量控制[J].医院制剂,2008,19(4):284-285.(LUO Yun, LIU Gang. Preparation and Quality Control of Sodium Fluorescein Eye Drops [J]. Hospital Preparation, 2008, 19(4): 284-285. (in Chinese))
- [10] 刘贞,崔艳,胡志军,等.紫外分光光度法检测水中微量溴酸盐的含量[J].中国无机分析化学,2012,2(2):14-16.(LIU Zhen, CUI Yan, HU Zhijun, et al. UV Spectrophotometry Content of Trace Bromate [J]. China Inorganic Analytical Chemistry, 2012, 2(2): 14-16. (in Chinese))
- [11] 张祯武.岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系及在生产中的应用[J].中国岩溶,1990,9(3):211-219.(ZHANG Zhenwu. Karst Groundwater Pipe Flow Field Type Relationship and Application in Production with the Corresponding Curve Tracer [J]. China Karst, 1990, 9(3): 211-219. (in Chinese))
- [12] 杨立铮,刘俊业.试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J].成都地质学院学报.1979(4):211-219.(YANG Lizheng, LIU Junye. Try Tracer Concentration-time Curve Analysis of Structural Features of Karst Conduit [J]. Journal of Chengdu College of Geology. 1979(4): 211-219. (in Chinese))
- [9] 漆力健,廖华胜,李连侠.闸坝地基岩土体各向异性渗流边界条件的影响分析[J].水电能源科学,2012,30(8):56-59.(QI Lijian, LIAO Huasheng, LI Lianxia. Influence Analysis of Seepage Boundary Conditions of Anisotropy in Rock-soil Body of Gate Dam Foundation [J]. Water Resources and power, 2012, 30(8): 56-59. (in Chinese))
- [10] 陈松滨,陈共建.无基坑水下筑坝技术的探索和实践[J].人民珠江,2008(3):31-34.(CHEN Songbin, CHEN Gongjian. Non Foundation Pit Under water Dam Construction Technology Research and Practice [J]. Pearl River, 2008(3): 31-34. (in Chinese))
- [11] 汤用泉,王维忠.振冲加密砂砾石基础筑坝工艺[J].水利水电工程设计,2011,30(1):21-23.TANG Yongqun, WANG Weizhong. The Damming Technology of Vibrator Encryption on Sand Gravel Base [J]. Journal of Design for Hydropower Engineering, 2011, 30(1): 21-23
- [12] 刘武,何旭海.大隆水利枢纽坝体防渗土料利用研究与实施[J].水利水电技术,2005,36(12):20-23.(LIU Wu, HE Xuhai. Study and Implementation of Anti-seepage Earth Material Utilization for Dam Filling in Dalong Water Control Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36, (12): 20-23. (in Chinese))
- [13] Sam Helwany. Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications [M]. John Wiley & Sons, Inc 2007.
- [14] 费康,张建伟. ABQUS在岩土工程中的应用 [M]. 北京:水利水电出版社,2010.(FEI Kang, ZHANG Weijian. Application in Geotechnical Engineering of ABQUS [M]. Beijing: Hydraulic and Hydroelectricity Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 欧阳君,林飞,刘秋英,钟翔熹.基于ABAQUS的土石坝稳定渗流期应力应变分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):104-108.(OUYANG Jun, LIN Fei, LIU Qiuying, et al. Stress and Strain Analysis for Earth Rock fill Dam during Stable Seepage Period Based on ABAQUS [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 104-108 (in Chinese))

(上接第164页)