

连通试验在山区沟谷岩溶水库渗漏 勘察中的应用

刘 胜^{1,2}, 郑克勋^{1,2}, 王森林^{1,2}

(1. 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院岩土工程有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 云南岩溶高原山区某水库工程,自建成以来因水库渗漏一直未蓄到正常蓄水位;水库位于沟谷上游区域地形裂点附近,库坝区分布灰岩和白云岩,区内断层等构造较发育,岩溶水文地质条件复杂。基于岩溶水文地质勘察和试验,查明水库渗入点和地下水各排泄点的分布与流量特征后,以“盐类法”连通试验查明该水库的渗漏原因、渗漏类型和渗漏通道,为工程后续处理提供地质依据。勘察分析结果表明该水库为溶隙型渗漏,库水主要沿断层区破碎带溶隙和白云岩溶隙多通道向下游渗漏。

关键词: 岩溶沟谷;溶隙型渗漏;水文地质勘察;裂点;连通试验

中图分类号: TV62

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0108—06

Application of Connectivity Test in Leakage Investigation of Karst Reservoir in Mountain Valley

LIU Sheng^{1,2}, ZHENG Kexun^{1,2}, WANG Senlin^{1,2}

(1. Highdro China Guiyang Engineering Corporation Geotechnical Engineering Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Since the completion of a reservoir project in the Karst plateau mountainous area of Yunnan province, it has not been stored to the normal storage level due to reservoir leakage. The reservoir is located near the topographic crack point in the upper reaches of the gully, with limestone and dolomite distributing in the project area. Faults and other Geo-structures are relatively developed in the area, and the Karst hydrogeological conditions are complex. Based on the Karst hydrogeological survey and test, the distribution and water flow characteristics of the reservoir infiltration points and groundwater discharge points were fully identified. The salt method connection test was subsequently adopted to find out the leakage causes, leakage types and leakage channels of the reservoir, so as to provide geological basis for the follow-up treatment of the project. The investigation and analysis results show that the reservoir leakage mainly occurs along the fissures in the fault fractured zone and dolomite solution area cause by Karst.

Keywords: Karst valley; dissolution fissure leakage; hydrogeological survey; fracture point; connectivity test

水利水电工程是解决岩溶山区水资源分布不均、工程性缺水的有效措施,而水库渗漏却是岩溶地区水利水电工程主要的工程地质问题之一,是决定工程成败的关键。水库渗漏产生的影响,轻则影响水库功能的正常发挥,降低工程经济效应;重则成为废库,亦或因渗漏引发其他负效应,影响岸坡稳定或

危及枢纽建筑安全,造成生命财产损失等重大社会影响^[1-2]。

水库岩溶渗漏根据其渗漏部位、渗漏通道及与水系的相对位置等可分为库区、库底、库首、库周渗漏;管道型、溶隙型渗漏;邻谷、河湾、隐伏低邻谷等渗漏形式^[3]。通过岩溶水文地质调查,研究工程区地形地

貌、地层岩性、地质构造、岩溶发育及分布、水系分布、分水岭位置、地表水及地下水补—径—排条件等基础地质条件,可初步判定岩溶渗漏条件及可能的渗漏类型,以岩溶水文地质试验、钻探、物探等手段相互对比,可分析其具体渗漏通道和范围,该勘察方法在岩溶水库渗漏分析中具有很好的效果,其中连通试验往往起着支撑和验证勘察结论的决定性作用^[4-6]。

本文以云南岩溶高原山区沟谷上游区域地形裂点附近某水库工程为例,根据水库渗漏特征,通过水文地质勘察,查明工程区基本地质、水文地质条件,判断水库渗漏类型及范围,后以连通试验确认其渗漏通道,为工程后期防渗处理提供依据。

1 工程概况

该水库是一座小型水利工程,总库容 123.8 万 m³。其枢纽建筑物由黏土心墙堆石坝、右岸导流兼输水隧洞、左岸溢洪道组成,坝顶高程 2 212.8 m,正常蓄水位 2 210 m。水库建成后出现了严重渗漏问题,至今未完成蓄水功能的使用。

1.1 基本地质条件

水库位于云南北部岩溶山区,其地表分水岭高程在 2 500 m 左右,坝址在某高原山间溪谷的源头区域,山顶与河床相对高差 300 m 左右,岸坡坡度 15°~40°,坝址下游为溪谷裂点,水库悬托于溪流侵蚀基准面上。

区内构造发育强烈,致使地层层序不完整,出露的地层以元古界震旦系上统碳酸盐岩地层为主,同时分布有燕山期侵入辉绿岩脉,覆盖层主要为第四系冲洪积和残坡积黏土夹碎石。库坝区主要出露的基岩地层如表 1 所示。

表 1 库坝区主要基岩地层岩性

地层系统			地层代号	岩性
界	系	统	组	
元古界	震旦系	上统	灯影组	灰白色薄至中厚层泥质条带状白云岩,局部夹黄色、紫红色泥岩、泥质白云岩。
			Zbd	
			Zbg ³⁻²	深灰色、紫红色灰岩,中间夹有灰黄色泥岩和灰黄色、紫红色钙质砂岩,局部夹灰黄色泥灰岩。
			Zbg ³⁻¹	紫红色页岩夹灰白色、灰黄色泥岩和页岩。
			Zbg ²	灰白色白云岩夹少量黄色页岩。
燕山期			Zbg ¹	灰白色石英砂岩、长石石英砂岩。
			ζπ ₅ ³	灰黄色辉绿岩。

将工程区主要基岩地层按岩体透水性分为强岩溶透水层、中等岩溶透水层及隔水层或相对隔水层。库坝区含水岩组划分如表 2 所示。

表 2 库坝区含水岩组划分

地层	岩性	含水岩组
灯影组(Zbd)	白云岩夹泥岩、泥质白云岩	中等岩溶含水层
观音崖组(Zbg ³⁻²)	灰岩夹泥岩、钙质砂岩、泥灰岩	强岩溶含水层
观音崖组(Zbg ³⁻¹)	页岩夹泥岩	隔水层
观音崖组(Zbg ²)	白云岩夹页岩	中等岩溶含水层
观音崖组(Zbg ¹)	石英砂岩、长石石英砂岩	相对隔水层
辉绿岩脉(ζπ ₅ ³)	辉绿岩	相对隔水层

坝基地层岩性主要为 Zbd 白云岩夹泥岩和 Zbg³⁻²灰岩夹钙质砂岩,均为含水层夹隔水岩层,隔水层空间发育不连续。Zbg³⁻²地层为强岩溶含水层,Zbg²和 Zbd 地层为中等岩溶含水层,其余地层为隔水层或相对隔水层。

工程区构造主要有断层 F1、F2 及 F3 和岩体节理裂隙。岩溶形态以岩溶泉、岩溶洼地、落水洞和溶蚀裂隙为主,溶蚀裂隙发育广泛,库区及大坝下游分别发育 S8—S14 泉和 S1—S7、S15 岩溶泉。

区内地下水类型主要有覆盖层孔隙水、基岩裂隙水及岩溶水。坝基附近地下水埋藏较深,受左岸白云岩溶蚀破碎带及右岸断层构造影响,坝基附近地下水位基本处于同一水平面,低于正常蓄水位 52 m 左右,地下水运动特征为地表水补给地下水,因此溪谷由库区辉绿岩脉至大坝下游钻孔 ZK7 附近表现为悬托河,其余河段表现为地下水补给河水的水动力类型。从钻孔压水试验来看,坝基岩体总体为中等透水层。工程区岩溶水文地质平面示意简图如图 1 所示。

2 水库渗漏特征

在岩溶水文地质勘察过程中,对水库进行试蓄水,从中调查库坝区库水入渗点和渗出点分布情况。试蓄水勘察过程中发现库盆内有多个人渗点,大部分集中在坝前右岸 K1 落水洞和导流洞进口附近,库水渗出点则主要分布在坝后溢洪道出口附近、左岸灌渠边及右岸下游 S7 泉点。

库盆内入渗点分布具有一定规律性:(1) 主要分布在 Zbd 白云岩和 Zbg³⁻²灰岩地层内,入渗点尺寸主要集中在 20 cm×70 cm 左右;(2) 分布高程集

则^[3,7],本工程采用食盐作为示踪剂在 2018 年和 2019 年进行两期试验。

3.1 一期连通试验

试验原理是在投源点投食盐,在拟接收点取样滴入 AgNO₃ 溶液,根据化学反应式:Cl⁻ + AgNO₃ = AgCl↓ + NO₃⁻,水样中滴入 AgNO₃ 溶液变浑浊的位置即与投源点有连通关系。为验证下游各泉群与库水间的连通关系,在 2018 年枯期将库水蓄至 1 000 m³ 左右,将 4 500 kg 盐溶解在桶内,再用水泵均匀喷洒向水库。其试验结果如表 4 所示。

结果表明 S1、S2、S3、S4 和 S5 与库水有直接连通关系,S6 和 S7 泉未检测到示踪信号,认为 S6 与库水无连通性,而 S7 泉在试蓄水过程中出流,说明 S7 与库水存在连通关系,本次未接收到信号可能是试验过程中蓄水位抬升有限所致。

3.2 二期连通试验

为查明具体的渗漏通道,2019 年从库区右岸导流洞附近的水库渗漏入口 K1 落水洞注水投放食盐示踪剂 500 kg,在库坝区钻孔及下游各泉点进行电导率监测,通过监测各排泄点电导率值在示踪剂投放前后的变化来分析水库渗漏的主要通道。

试验前在投源点及库坝区钻孔、泉水等地表地下水点测定电导率背景值,次日进行示踪剂投放,投源后 24 h 内对各钻孔和泉水每 2 h 取一次水样做电

导率检测,其中钻孔每 5 m 一段进行分层取水。考虑到工程区示踪剂主要在岩体溶蚀裂隙中运移,弥散速度较缓,取样时间间隔可逐渐扩大,因此在投源后 24 h~48 h 之间每 4 个小时取一次水样,投源后 48 h~72 h 之间每 6 h 取一次水样。投源点与接收点位置分布示意图见图 1 所示,试验点情况如表 5 所示。

表 4 库水与泉水连通试验成果表

泉点 编号	取样时间	是否 浑浊	首次接收时 间间隔/h
S1	22 日 19:00—25 日 09:00	否	72
	25 日 17:00	是	
	26 日 09:00—26 日 17:00	否	
S2	22 日 19:00—23 日 09:00	否	24
	23 日 17:00—25 日 17:00	是	
	26 日 09:00—26 日 17:00	否	
S3	22 日 19:00—23 日 09:00	否	24
	23 日 17:00—26 日 17:00	是	
S4	22 日 19:00—26 日 17:00	是	2
S5	22 日 19:00—25 日 09:00	是	2
	25 日 17:00—26 日 17:00	否	
S6	22 日 19:00—26 日 17:00	否	—
S7	22 日 19:00—26 日 17:00	否	—

表 5 连通试验投源点、接收点统计表

点类型	取水类型	位置	孔口高程 /m	钻孔水位 /m	距投源点 直线距离/m	接收到示踪剂 异常时间/h	峰型
投源点	落水洞取水	库盆 K1	2185.1	—	—	—	—
		ZK2	2211.0	55	160	8~20	非连续性单峰
		ZK3	2212.8	55	106	25~45	非连续性单峰
		ZK4	2212.8	55	60	5~18;31~38	不规律双峰
	钻孔取水	ZK7	2212.8	43	260	20~22	非连续性单峰
		ZK302	2212.8	53	108	~38	非连续性单峰
接收点	泉水	S1	2105.6	—	830	—	—
		S2	2098.4	—	870	—	—
		S3	2098.3	—	945	—	—
		S4	2090.1	—	1110	—	—
		S5	2117.5	—	1050	—	—
		S6	2118.7	—	1077	—	—

本次示踪试验中,部分钻孔在一定时间和一定深度范围内接收到由示踪剂产生的电导率异常值。从坝址附近钻孔至下游泉水各接收点电导率变化过程线如图 2—图 6 所示。

如图 2 所示,距离投源点直线距离最短的 ZK4 钻孔在投源后约 5 h 开始接收到电导率异常值,其中在孔深 100 m 以上只是零星接收到电导率异常,孔深 100 m~150 m 深度能在较连续的时间段内接

收到电导率异常值,且呈“双峰”,表明渗漏通道较深,上部水中的电导率异常多是受上下层水交换所致,主要渗漏高程约在 2 107 m~2 063 m 左右。以孔深 140 m 处表示,第一段峰线出现在投源后 5 h~18 h 之间,峰值为 307. 19 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 226. 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了约 35. 4%;第二段峰线出现在投源后 31 h~38 h 之间,峰值为 350. 61 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值增加了约 54. 6%;按最先接收到的最大电导率异常值折算出的示踪反映速度约为 3. 16 m/h。

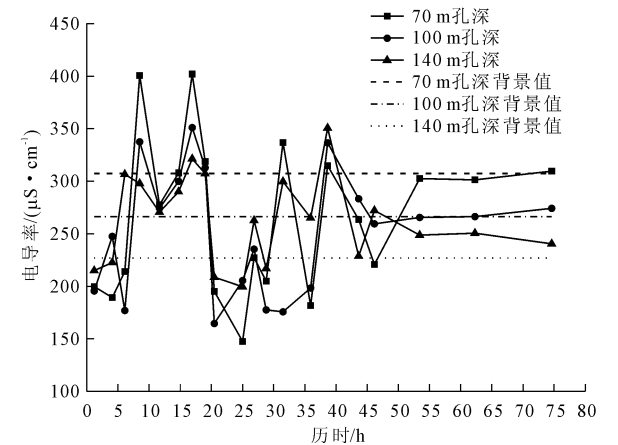


图 2 ZK4 钻孔部分深度电导率过程线图

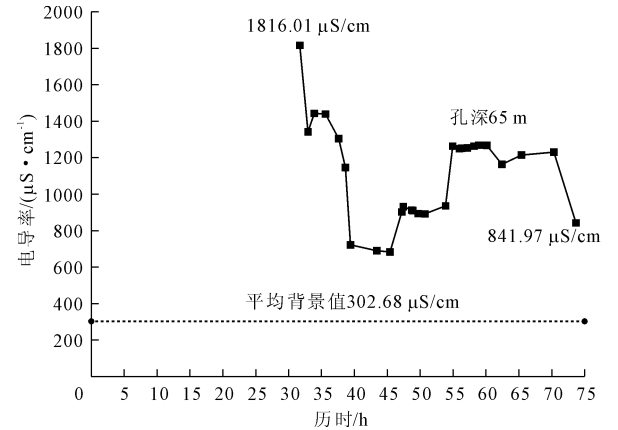


图 3 ZK302 钻孔 65 m 孔深处电导率过程线图

在试验过程中因检测设备迟到,ZK302 钻孔未检测到峰值上升过程,见图 3。以 65 m 孔深处为代表,检测到的电导率最大值为 1 816. 01 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 302. 68 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了 499. 97%。最大电导率异常值折算出的示踪反映速度为 3. 52 m/h。孔深 62 m 以下电导率异常值相对背景值变幅较大,可确定其受示踪剂影响,表明该点位于渗漏通道范围,该钻孔位于灰岩地层中,受构造作用影响显著,岩溶较发育,但从示踪剂消散速率来看,其渗漏不具大规模岩溶管道特征,应以溶蚀裂隙为主。

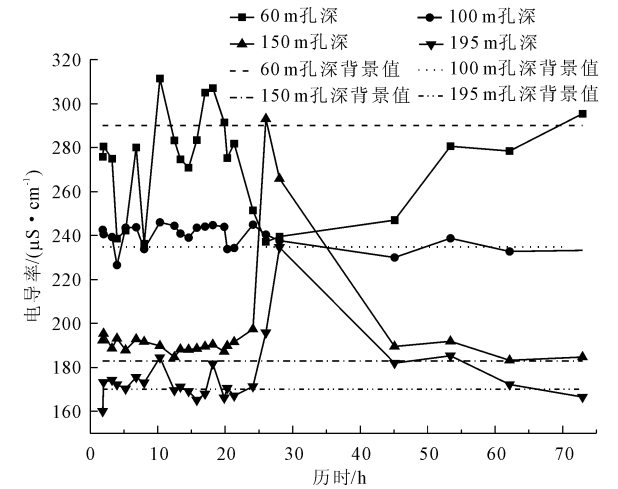


图 4 ZK3 钻孔部分深度电导率过程线图

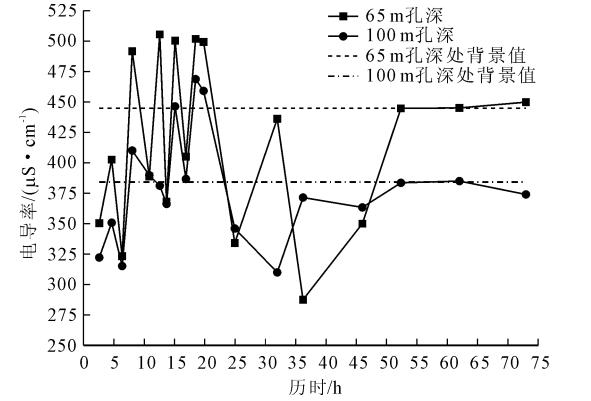


图 5 ZK2 钻孔部分深度电导率过程线图

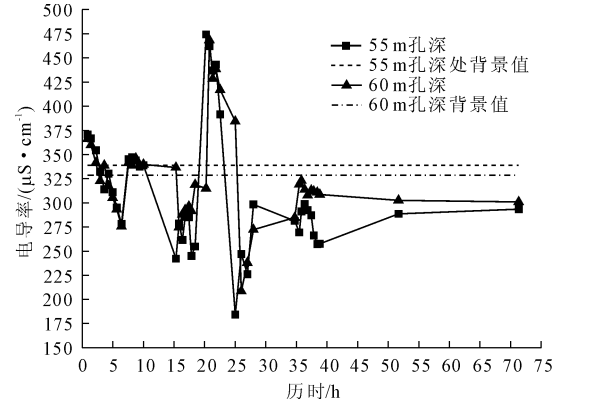


图 6 ZK7 钻孔 55 m、60 m 孔深处电导率过程线图

位于坝轴线右岸侧的 ZK3 钻孔中,孔深 105 m 至 195 m 范围均收到较大的电导率异常单峰曲线,表明该点位的渗漏通道主要集中在高程 2 107 m~2 018 m 范围,渗漏通道埋深较大。图 4 以 150 m 孔深为例,最大电导率异常值为 293. 03 $\mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 182. 93 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了 60. 1%,示踪反映速度约为 4. 08 m/h。

位于左坝肩的 ZK2 钻孔在投源后各段均为零星收到不连续电导率异常值,见图 5。最大电导率值为 $505.44 \mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 $444.94 \mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了 13.6%。示踪剂反应弱,流速慢,与其白云岩地层的溶隙性渗漏特点相关。

ZK7 钻孔位于大坝下游,图 6 显示在孔水位 50 m 以下均检测到电导率变化的完整峰值曲线过程,距离投源后约 21 h 接收到电导率峰值异常值,其中 55 m 孔深处的电导率峰值为 $474.26 \mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 $338.94 \mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了 39.9%;60 m 孔深处电导率峰值为 $468.44 \mu\text{S}/\text{cm}$,相对背景值 $328.54 \mu\text{S}/\text{cm}$ 增加了 42.6%。该孔的示踪反映速度为 $12.84 \text{ m}/\text{h}$,为溶蚀性渗漏。

下游泉群均未收到显著的示踪剂异常,究其原因在于投源点 K1 落水洞消落能力有限,示踪剂投放剂量偏小,同时下游泉群距离投源点较远,非库水渗漏的泉水流量本身较大,示踪剂弥散后,地下水中示踪剂浓度下降,使得下游泉群中电导率未能检测出异常。

由此试验结果表明,右坝肩 ZK4—ZK302—ZK3 区域所体现出的地下水径流速度较快,接收到的示踪剂异常值较高且频率大,表明其与 K1 落水洞的连通性较强。ZK4 最先接收到异常且呈双峰,距离投源点近,其连通关系显著;ZK302 接收到的示踪剂异常值最大,速度快,ZK3 与 ZK7 接收到示踪剂异常的时间相近,但 ZK7 的异常最值和示踪反映速度都较 ZK3 大,综合分析认为 ZK3、ZK4、ZK7 和 ZK302 与 K1 落水洞存在直接的连通关系。示踪剂在投源后主要通过右岸灰岩地层中 F2 断层及其周边溶蚀破碎带从 K1 落水洞和导流洞进口附近入渗点向下游方向渗漏;渗漏流速缓慢,表明径流通道中无较大岩溶管道发育,主要为溶隙型渗漏通道。ZK2 位于白云岩地层中,其示踪剂信息弱,速度慢,表现为白云岩地层的溶隙性渗漏。

3.3 连通试验综合结果

综合两期“盐类法”连通示踪试验成果,库水与 ZK3、ZK4、ZK302 和下游 ZK7、S1—S5、S7 存在直接连通性,其渗漏形式为灰岩溶隙型渗漏。左岸白云岩也存在溶隙性渗漏,但其渗漏量与速度均较右岸弱。在平面上库水渗漏范围左至 ZK2 岸坡处,右至 ZK4 岸坡处,向下游可至 S4 泉,距离库首直线距离约 1.03 km;其渗径主要向下游方向,侧向运移渗漏

能力有限。在竖向上,ZK2—ZK4 深孔的异常段在 100 m 以下,相对较浅的 ZK7 和 ZK302 异常段在 60 m 以下,对应高程分别在 2 111 m~2 018 m 和 2 152 m~2 117 m 范围,表明裂隙型渗漏通道具有成层性。当水库蓄水时,其主渗漏通道为向下游方向展布的右岸 F2 断层及其周边溶蚀裂隙破碎带,在坝后下游再顺倾向往河床方向运移;左岸的渗漏相对右岸较弱。

4 结 论

根据岩溶水文地质勘察及连通试验结果,主要得出以下结论:

(1) 水库坝址区位于溪谷裂点,岩性主要为灰岩和白云岩可溶性岩,溶蚀裂隙发育,且有断层切割,溪谷为地表水补给地下水水动力类型,水库渗漏问题突出。

(2) 库水向两岸的渗漏有限,渗漏主要发生于坝轴线及右坝肩,主要由 K1 渗漏沿右坝肩 F2 断层及周边溶蚀裂隙破碎带向下游方向渗流,左岸白云岩地层存在的渗漏较右岸弱。

(3) 各钻孔检测出示踪剂的深度差异明显,说明岩溶发育和渗漏具有成层性。

(4) 基于岩溶水文地质勘察和试验,查明岩溶水文地质基本特征后,以连通试验验证水库渗漏成因、渗漏类型和渗漏通道,为工程后续处理提供地质依据的方法是有效的。

参考文献:

- [1] 韩文娟,顾梅.示踪试验在水库大坝渗漏检测中的应用[J].治淮,2018(1):19-21.
- [2] 薛伟,袁宗峰,周密.西南地区某水库渗漏分析[J].中国岩溶,2019,38(4):508-514.
- [3] 沈春勇,余波,郭维祥.水利水电工程岩溶勘察与处理[M].北京:中国水利水电出版社,2015:136-187.
- [4] 郑克勋.地下水人工化学连通示踪理论及试验方法研究[D].南京:河海大学,2007.
- [5] 赵兴品.山区水库渗漏的勘察分析及工程对策[J].科技与企业,2014,(15):200-203.
- [6] 蒋伟伟,宋金平,汪新健.等.地下水示踪技术在水库渗漏勘察中的应用研究[J].工程技术研究,2019,(21):79-80.
- [7] 韩啸,陈鑫,郑克勋.等.示踪试验在岩溶大泉修复中的应用——以丽江黑龙潭为例[J].中国岩溶,2019,38(4):524-531.