

曾荣福, 郑克勋, 王钦权. 岩溶水库渗透破坏型渗漏勘察与评价[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 119-127.  
DOI: 10.11932/karst2021y29

# 岩溶水库渗透破坏型渗漏勘察与评价

曾荣福<sup>1,2</sup>, 郑克勋<sup>1,2</sup>, 王钦权<sup>1,2</sup>

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 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)

**摘 要:**以重庆市南川区肖家沟水库蓄水多年之后库首右岸发生的岩溶渗漏为例,探讨了岩溶水库长期运行过程中防渗体系因高压渗透破坏产生的岩溶渗漏的勘察与评价方法。通过地质分析、渗漏历史调查、钻孔、水文地质测试、物探及连通试验等方法,查明了水库右岸岩溶渗漏的范围及原因。水库渗漏边界清晰,渗漏范围主要是右岸可溶岩区的 630 m 高程以上,防渗体渗透破坏是水库产生渗漏主要原因。其渗漏途径一是沿原封堵堵头的薄弱区域或溶洞封堵体周边发生渗透破坏产生新的通道向下游溶洞出口集中的渗出,二是穿过右岸防渗线绕过右岸坝肩后沿岩体溶蚀裂隙或管道汇入下游右岸岸坡溶洞集中的渗出地表。通过此工程实例,提出了岩溶水库防渗体渗透破坏型渗漏的勘察与评价方法,宜以历史资料分析为基础,初判渗漏成因及范围,采用勘探、试验及物探等多种手段进行验证,为防渗处理提供可靠依据。

**关键词:**岩溶水库; 渗透破坏; 渗漏勘察; 地下水温度场; 物探 CT

**中图分类号:** TV697.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2023)01-0119-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引 言

20 世纪 90 年代开工建设了大批水利工程,水库作为饮用水与灌溉水源发挥着至关重要的作用。水库渗漏<sup>[1]</sup>问题直接影响水库效益及大坝安全,尤其是在岩溶地区建设的水利工程,随着时间推移,部分水库运行多年后出现了水库渗漏现象,部分成为了病险水库<sup>[2]</sup>。严重的渗漏问题威胁着大坝安全及城镇稳定水源地。通过研究工程区岩溶渗漏<sup>[3-4]</sup>原因,有针对性进行防渗处理,对水库尤其重要。

通过 60 多年的发展,国内岩溶地区大型水利、水电工程建设,以及岩溶科学技术的发展与创新,岩

溶水库渗漏勘察技术手段和分析方法逐渐完善,常规的勘察手段有工程地质测绘、钻探、水文地质试验及物探等,随着物探技术的发展,使得探测地下洞穴准确性逐渐提高,水文地质测试中渗流场、温度场和化学场(电导率)测试和分析在岩溶渗漏勘察中成效显著。

岩溶水库渗漏按渗漏部位可分为库区渗漏、库首渗漏和坝址渗漏三类。渗透破坏<sup>[5-6]</sup>形式可分为防渗体渗透破坏、岩溶管道渗漏破坏和坝体变形破坏。渗透破坏主要是由渗流引起的,由于渗透力、水压力或浮力的变化,导致土体颗粒或土体结构变化,引起堤坝、防渗体或坝基(肩)岩土体等遭到破坏的现象。而防渗体渗透破坏是岩溶地区早期兴建水库

第一作者简介:曾荣福(1981—),男,高级工程师,研究方向水文地质工程地质。E-mail: 94031252@qq.com。

通信作者:郑克勋(1982—),男,正高级工程师,研究方向为水文地质工程地质。E-mail: 848545331@qq.com。

收稿日期:2021-05-30

常见的渗透破坏型式。

本文以重庆市南川区肖家沟水库右岸蓄水多年之后新发生的岩溶渗漏为例,探讨了岩溶水库防渗体系渗透破坏后的渗漏勘察<sup>[7]</sup>与评价方法。通过地质分析、渗漏历史调查、钻孔、水文地质测试、物探及连通试验等手段,查明了水库右岸岩溶渗漏的范围及原因,可为水库工程渗漏处理提供依据。

### 1 工程概况

肖家沟水库位于重庆市南川区东面,水库水质优良,是南川城区极为重要的饮用水源地,也是南川工业园区的工业供水源,对南川经济发展起着重要的作用。大坝为混凝土双曲拱坝,坝址河床高程 612 m,坝顶高程 680.8 m,正常蓄水位 677.0 m,最大坝高 74.8 m,总库容 2 400 万 m<sup>3</sup>。坝址位于峡谷河段,库区出露的地层以古生界志留系中、下统碎屑岩地层为主,坝址区出露地层以古生界二叠系下统灰岩、少量灰岩夹页岩及页岩地层;坝址区为近横向谷,

无大规模断层分布,裂隙发育。

原防渗采用垂直帷幕防渗处理<sup>[8]</sup>方案,其防渗控制标准为  $q \leq 3 \text{ Lu}$ 。水库沿坝基弧形布置帷幕、固结灌浆,帷幕灌浆双排孔,坝基孔间距 1.5 m,坝肩孔间距 2.0 m;右岸帷幕灌浆为单排孔,孔间距 2.0 m,帷幕灌浆压力为 0.6~3.0 MPa,帷幕线设置在库岸边坡上,右岸帷幕底界为 612 m 高程,已连接至相对隔水岩体。

水库前期勘察期间在两岸坝肩、坝基揭示大型溶洞,右岸原 PD5 勘探平洞顺层掘进,从坝前贯穿至坝后,揭示了 5 个大型溶洞(图 1)。溶洞底板高程 625 m 左右,规模  $L(1.2\sim 24) \text{ m} \times H(2\sim 16) \text{ m}$ ,体积约 195~992 m<sup>3</sup>,溶洞均发育在  $P_1q^4$  灰岩地层,基本沿裂隙横向展布。施工期间对坝基底部及下游 Kpd5-1 及 Kpd5-2 溶洞进行了混凝土回填,并对 PD5 平洞下穿坝基段设置了混凝土堵头,封堵效果较好,水库建成从 2003 年开始正常蓄水,右岸未发生过大流量渗漏现象,仅坝后右岸高程 627 m 处渗漏点位置有小股水流。但在 2019 年初大坝右坝肩下游渗漏点流

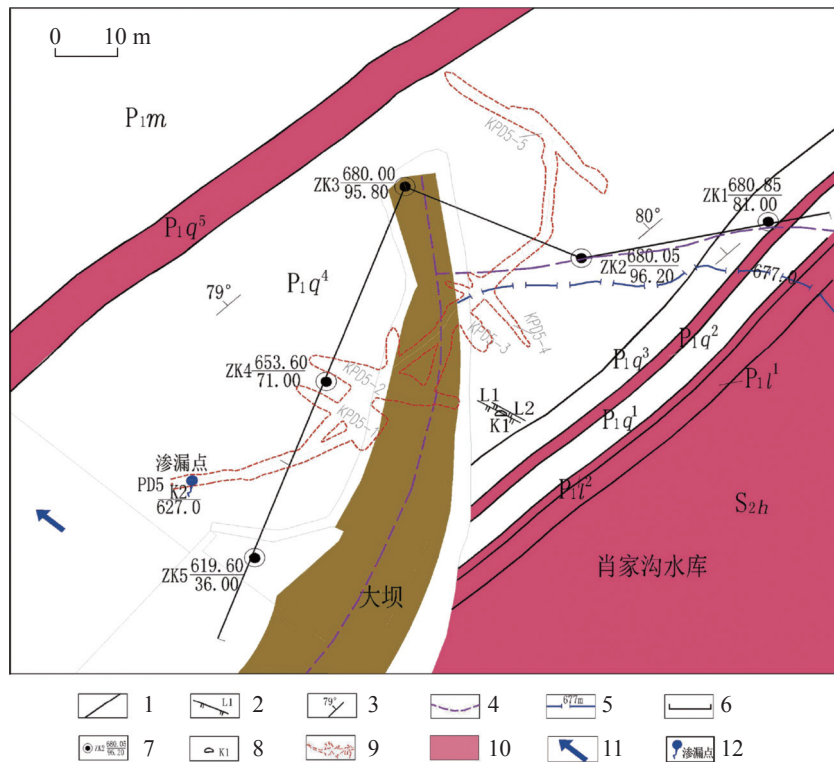


图 1 坝区右岸平面示意图

$P_{1,m}$ -茅口组灰岩  $P_{1,q^5}$ -栖霞组第五段页岩夹灰岩  $P_{1,q^4}$ -栖霞组第四段灰岩  $P_{1,q^3}$ -栖霞组第三段灰岩夹页岩  $P_{1,q^2}$ -栖霞组第二段钙质页岩  $P_{1,q^1}$ -栖霞组第一段灰岩夹页岩  $P_{1,l^2}$ -梁山组第二段炭质页岩  $P_{1,l^1}$ -梁山组第一段黏土岩  $S_{2,h}$ -韩家店组页岩夹粉砂岩  
1-地层界线 2-裂隙 3-岩层产状 4-原防渗线 5-正常蓄水位 6-勘探剖面 7-钻孔 8-溶洞 10-岩溶管道 11-隔水层

Fig. 1 Schematic diagram of the right bank of the dam area

量由原来  $1\sim 30\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  突然增大至  $200\sim 300\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , 影响水库效益和供水安全, 需要尽快查明渗漏原因, 渗漏范围, 并进行有效的处理。

针对水库右岸渗漏问题进行了专门的勘察, 结合地质调查, 在右岸原防渗线上及大坝下游沿近坝面共布置了 5 个钻孔, 并对各钻孔进行物探测试及相关水文地质试验, 进一步了解了水库区的地质结构及地下水渗流的温度场、化学场和渗流场, 基本查明了大坝右岸地质结构和地下水循环的异常区, 分析总结了水库右岸渗漏原因。

## 2 岩溶水文地质条件

### 2.1 岩溶层组划分

坝区出露的  $P_1q^1$  灰岩夹钙质砂岩、 $P_1q^3$  灰岩夹钙质页岩, 为中等岩溶含水层,  $P_1q^4$  厚层灰岩及  $P_1m$  灰岩, 为强岩溶含水层;  $P_1q^2$  页岩、 $P_1q^5$  钙质页岩夹灰岩、 $P_1l^1$  铝土岩、 $P_1l^2$  页岩夹炭质页岩及煤线和  $S_2h$  黏土岩, 为隔水层。按岩组的岩溶发育程度工程区含水岩组划分如表 1 所示。

表 1 库坝区含水岩组划分表  
Table 1 Division of aquifer groups in the dam area

地层		厚度/m	岩性	含水岩组
志留系	中统	韩家店组( $S_2h$ )	页岩夹粉砂岩	隔水层
		梁山组第一段( $P_1l^1$ )	铝土岩	隔水层
		梁山组第二段( $P_1l^2$ )	页岩夹炭质页岩及煤线	隔水层
		栖霞组第一段( $P_1q^1$ )	灰岩夹钙质页岩	中等岩溶含水层
二叠系	下统	栖霞组第二段( $P_1q^2$ )	粉砂质页岩及钙质页岩	隔水层
		栖霞组第三段( $P_1q^3$ )	灰岩夹薄层钙质页岩	中等岩溶含水层
		栖霞组第四段( $P_1q^4$ )	灰岩	强岩溶含水层
		栖霞组第五段( $P_1q^5$ )	钙质页岩夹灰岩	隔水层
		茅口组( $P_1m$ )	生物碎屑灰岩	强岩溶含水层

### 2.2 岩溶发育特征

图 1 为坝区右岸平面示意图。工程区可溶岩地层主要有  $P_1m$  灰岩、 $P_1q^4$  厚层灰岩、 $P_1q^3$  灰岩夹薄层钙质页岩、 $P_1q^1$  中厚层灰岩夹钙质页岩。库坝区溶洞主要发育在坝址两岸, 右岸原始溶洞规模巨大, 宽度可达 5 m, 高度可达 16 m, 底部充填少量黏土外, 多无充填。库坝区两岸灰岩地层中均发育不同程度的溶蚀裂隙, 大坝上游 653 m 高程发育溶洞 K1 及溶蚀裂隙 L1、L2, 大坝下游右岸坡 627 m 高程发育溶洞 K2(原 PD5 平洞)(图 2, 图 3)。

据水库建设期勘察资料, 其右岸岩溶发育<sup>[9]</sup>, 原 PD5 平洞从坝前贯穿至坝后, 并揭露了多个大型溶洞, 溶洞发育高程 624~652 m, 体积 195~992 m<sup>3</sup>, 渗漏点 K2 为 PD5 平洞口并有水流, 表明溶洞发育在  $P_1q^4$  灰岩层, 基本顺层发育, 并沿卸荷裂缝横向展布。大坝施工期间对揭露的大型溶洞进行了混凝土回填, 并对 PD5 平洞内坝基段设置了专门的堵头。溶洞回填混凝土周边岩体溶蚀裂隙较发育, 裂隙多顺层发育, 主要充填黏土夹碎石及方解石, 局部无充填, 水

泥浆对碎石及方解石的胶结情况较好, 与黏土的胶结情况较差, 土体临界水力坡降为 1.85。

大坝右岸前期施工钻孔出现掉钻现象。本次勘察布置的 5 个钻孔均未发生掉钻现象, 所揭露的岩



图 2 主要入渗点(枯水期)

Fig. 2 Main infiltration points (in the dry season)



图3 K2集中出水点

Fig. 3 Centralized water outlets

芯可见溶蚀裂隙发育,偶见小溶孔。据本次岩溶水文地质调查,除大坝右岸上、下游各发育一小型溶洞外,其余地段地表未见溶洞发育,但见溶蚀裂隙发育。大坝下游右岸渗漏点为灰岩岩溶管道与平洞相通形成,地下水及库水沿岩溶裂隙连通的岩溶管道流出地表。岩溶泉和岩溶裂隙等的发育方向主要是沿岩层面和岩体裂隙面,尤其在灰岩与泥页岩分界面处岩溶发育较强烈。

### 2.3 地下水补排关系

根据肖家沟水库所处地形地貌、岩性分布特征、构造发育特征,结合钻孔水位长期观测,ZK1钻孔(图1)水位高于库水位,其余钻孔水位均低于库水位;两岸以地表分水岭为界,属地下水补给河水型的水动力状态。

大坝下游右岸岸坡有出水点(图4),大坝建成后蓄水期间,该出水口流量较小,1~5 L·s<sup>-1</sup>。近几年,出水量增大,枯期较小,为5~10 L·s<sup>-1</sup>;汛期较大,为20~30 L·s<sup>-1</sup>。至2019年初,出水口流量增大至现在的状态,流量在200~300 L·s<sup>-1</sup>。本次勘察期间出水口渗漏量与、库区水位的观测曲线见图5。



图4 大坝右岸下游渗漏点

Fig. 4 Leakage points downstream of the right bank of the dam

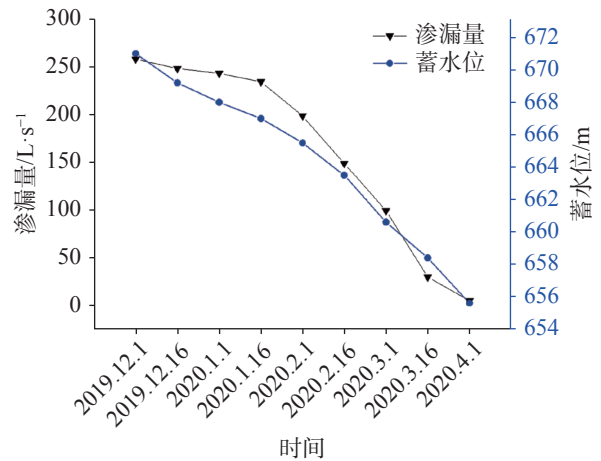


图5 出水点渗漏量、库区水位观测曲线图

Fig. 5 Curves of leakage at watered points and of water level observation in the dam area

## 3 水库右岸渗漏条件探测

### 3.1 地下水位观测及透水率特征

根据钻孔水位观测及压水试验,地下水位统计结果见表2。据此分析,ZK2地下水位高程为630.05 m,低于库水位37.95 m,仅高于渗出水口3 m,与ZK1、ZK3钻孔水位相比,存在地下水凹槽。对ZK2钻孔进行注水试验,观测水位变化情况,发现注水后钻孔水位缓慢下降,注水后4 h,孔内水位下降16 m;注水后8.3 h,孔内水位下降至35 m;注水16 h后,孔内水位下降并稳定在孔深50 m左右。由此验证,ZK2钻孔所测稳定水位可靠,分析认为ZK2附近存在岩溶渗漏。

大坝右岸坝头,ZK3钻孔附近地下水位高于ZK2钻孔水位23.5 m,低于水库蓄水位14.5 m,因与岩溶管道相距较远,受其影响相对较小,但存在浅层裂隙型绕坝渗漏的条件。在ZK2区域的水位升高之后,绕坝渗漏可能较为突出。

根据5个钻孔透水率特征,可看出岸坡弱风化岩体总体呈现中等的透水性,部分区域在10 Lu以上,与建设期防渗设计对比,防渗帷幕局部存在渗透破坏,坝址右岸一定范围内不具备<3 Lu的相对隔水岩体条件,因此岸坡岩体较高的透水性是产生渗透破坏的条件。

### 3.2 地下水温度场及电导率特征

对右岸低温季节的地下水温度场<sup>[10]</sup>进行测试和

表 2 钻孔地下水位统计表  
Table 2 Statistics of groundwater level in borehole

孔号	高程/m	具体位置	地层揭露情况	地下水位特征		
				稳定地下水位埋深及高程/m	地下水位与库水位关系/m	地下水位与河水关系/m
ZK1	680.85	坝前防渗线端头	$P_1f^2$ 页岩、 $P_1q^{1-3}$ 灰岩、页岩	7.1/673.75	+5.75	+63.75
ZK2	680.05	坝前防渗线中部	$P_1q^4$ 灰岩	50.0/630.05	-37.95	+20.05
ZK3	680.00	坝端附近	$P_1q^4$ 灰岩	26.5/653.5	-14.5	+43.5
ZK4	653.60	坝下游岸坡高位	$P_1q^4$ 灰岩	13.8/639.8	-28.2	+29.8
ZK5	619.60	坝下游岸坡低位	$P_1q^4$ 灰岩	0.7/618.9	-49.1	+8.9

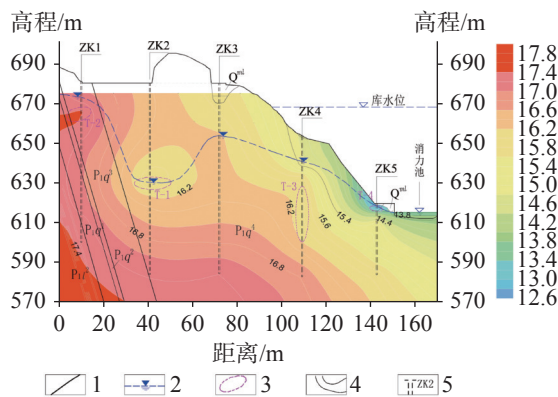


图 6 钻孔地下水位温度等值线图

$P_1q^4$ -栖霞组第四段灰岩  $P_1q^3$ -栖霞组第三段灰岩夹页岩  $P_1q^2$ -栖霞组第二段钙质页岩  $P_1q^1$ -栖霞组第一段灰岩夹页岩  $P_1f^2$ -梁山组第二段炭质页岩  
1-地层界线 2-地下水位线 3-温度异常区 4-温度等值线 5-钻孔

Fig. 6 Contour diagram of groundwater temperature in borehole

分析(图 6)可知,在坝基附近存在 4 个地下水温度变化异常区,即 T-1、T-2、T-3 及 T-4。其中 T-1 和 T-4 为低温异常区,低温异常区 T-1 主要分布在钻孔 ZK2 高程 630 m 左右,为钻孔稳定水位,最低水温为 15.3 °C,受库水渗漏影响大;低温异常区 T-4 主要分布在钻孔 ZK5 高程 614.0 m 以上,为钻孔上层水位,最低温度为 12.6 °C,主要是钻孔岩性透水性较差,水位较高,与地表接近,水温变化受外部气温影响较大。异常区 T-2 主要分布在钻孔 ZK1 高程 665 m 左右,地下水温度为 16.98 °C;异常区 T-3 主要分布在钻孔 ZK4 高程 600~630 m 之间,地下水温度为 16.0~16.1 °C,受一定库水影响。

ZK2 和 ZK5 稳定水位附近地下水温度较周围偏低,说明该区域地下水温度受库水影响较大,地下水交换较活跃。

根据各钻孔地下水、库水及出水口水原始电导

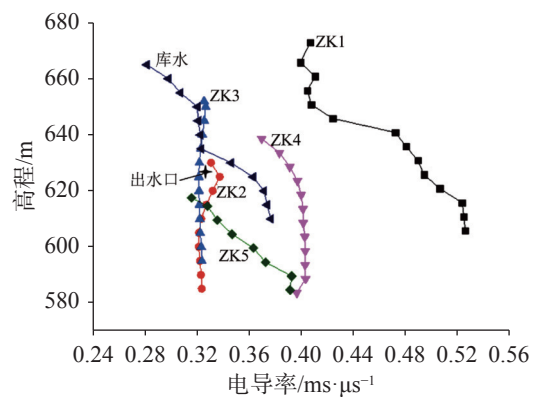


图 7 库水、地下水电导率曲线图

率<sup>[11]</sup>测试资料分析(图 7),出水口水质电导率与库水 630~650 m 高程库水电导率基本相同,认为,出水口水质直接受库水影响最大。ZK1 钻孔电导率较高,与库水差异较大,主要是天然地下水,下部受炭质页岩影响,电导率较高。ZK2 钻孔电导率与库水位 630~650 m 高程内库水电导率相近,推测认为入渗口库水直接影响钻孔地下水可能性较大。ZK3 钻孔电导率与库水位 630~650 m 高程内库水电导率相近,推测认为库水与 ZK3 钻孔地下水也有一定影响。ZK4 钻孔深部电导率较库水电导率高,推测认为库水与 ZK4 钻孔深部地下水联系不明显。ZK5 钻孔电导率随孔深逐渐增大,推测认为上部钻孔水受河水影响较大,下部为天然地下水。

### 3.3 地下水化学特征

对库水、钻孔地下水<sup>[12-14]</sup>及泉水进行水质分析,水质特征见表 3。

根据水质分析,库水矿物成分为  $Ca^{2+}$ 为 0.87  $mmol \cdot L^{-1}$ ,  $Mg^{2+}$ 为 0.21  $mmol \cdot L^{-1}$ ,  $K^+ + Na^+$ 为 1.51

表 3 水质特征表  
Table 3 Characteristics of water quality

取样位置	深度/m	离子浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$				
		$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$	$\text{HCO}_3^{-}$	矿化度
泉水S2		2.92	0.23	2.13	4.67	507.97
右岸近坝库水		0.87	0.21	1.51	2.14	239.51
坝后渗漏点水		1.08	0.15	1.32	1.95	247.10
ZK2	60	0.76	0.38	1.15	1.75	216.90
	70	0.8	0.32	1.35	1.95	230.62
	80	0.74	0.25	1.19	1.75	203.56
ZK3	30	0.74	0.44	1.32	2.14	234.09
	50	0.87	0.34	1.31	1.95	238.62
	70	0.72	0.34	2.09	1.75	319.16
ZK4	30	1.33	0.17	1.61	2.53	297.20
	45	1.23	0.23	1.72	2.73	297.09
	60	1.29	0.17	3.02	3.8	414.76
ZK5	15	0.76	0.30	1.56	2.16	242.1

注: S2为大坝左岸上游附近泉水点。

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ 为  $2.14 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。纯地下水  $\text{Ca}^{2+}$ 为  $2.92 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$ 为  $2.13 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ 为  $4.67 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其含量较高, 矿化度较高。

对比右岸库水矿物质成分: ①坝后右岸出水口水(S1)各矿物含量与库水相当, 矿化度相当, 表明出水口水与库水关系紧密; ②ZK2 钻孔各矿物含量与库水相当, 矿化度相当, 表明 ZK2 钻孔水与库水关系紧密; ③ZK3 钻孔孔深 30 m, 其矿物含量与库水相近, 其含量与库水相当, 矿化度相当, 表明 ZK3 钻孔水与库水关系紧密; ④ZK4 钻孔孔深 30 m, 其矿物含量及矿化度在库水与地下水之间, 下部水质分析离子含量较库水高, 较地下水低, 表明 ZK4 钻孔水与库水存在一定关系; ⑤ZK5 钻孔水质分析离子含量及矿化度接近库水, 表明 ZK5 钻孔水与河水关系紧密。

### 3.4 连通试验

为验证岩溶通道, 用“食盐”法, 在水库大坝上游右岸溶洞 K1 与坝后渗漏点之间做连通试验。对大坝下游渗漏点取水样进行水质分析, 水质检测结果显示, 出水口中水含有大量食盐成分, 比未投放食盐前水中  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 的含量明显增大, 试验表明大坝上游右岸溶洞(溶蚀裂隙)与渗漏出水口连通性较好。

### 3.5 物探测试

对右岸 5 个钻孔之间采用电磁波 CT 物探技术<sup>[15]</sup>

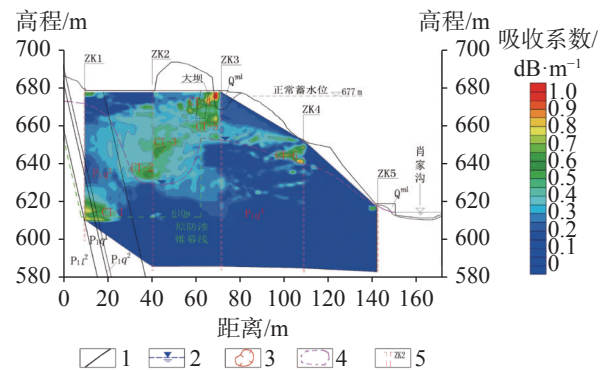


图 8 坝区右岸部位物探异常区  
 $P_1q^4$ -栖霞组第四段灰岩  $P_1q^3$ -栖霞组第三段灰岩夹页岩  $P_1q^2$ -栖霞组第二段钙质页岩  $P_1q^1$ -栖霞组第一段灰岩夹页岩  $P_1r^2$ -梁山组第二段炭质页岩 1-地层界线 2-地下水位线 3-小型岩溶区管道区 4-岩溶裂隙区 5-钻孔

Fig. 8 Geophysical anomaly area on the right bank of the dam area

进行了勘察, CT 成果图 8 可知, 防渗线附近部位发育有 6 个明显的 CT 异常带, 其中异常带 CT-1 主要分布在右岸 ZK1 钻孔底部区域, 因该区岩性为炭质页岩, 电磁波属岩性控制影响原因; 异常带 CT-2 主要发育在大坝与 ZK2 钻孔中间稳定水位附近, 分布高程 630 m, 异常带 CT-3 主要分布 650 m 高程; 异常带 CT-4、CT-5 主要发育在大坝与 ZK3 钻孔之间部位, 高程在 655~670 m 之间; 异常带 CT-6 主要发育在坝后岸坡中部(ZK4 钻孔附近), 高程在 640~650 m 之间, 结合地表调查及压水试验, 为表层岩层

风化、岩溶脉管及溶蚀裂隙发育区。

根据物探成果 CT 异常区 CT-2、CT-3、CT-5 该异常带为右岸裂隙型渗漏的主要通道,分布高程在 630 m 以上,主要控制右岸的绕坝及坝基渗漏。

## 4 水库右岸渗漏分析

### 4.1 水库渗漏原因

根据前期资料,坝基底部岩溶发育,岩溶地下水位一般为 619~623 m 高程,原 PD5 平洞揭示的大型溶洞顺层发育,延伸至大坝上游,并沿顺河向裂隙分布支洞。溶洞不封堵的条件下,大坝右岸将发生严重的岩溶渗漏。坝基渗漏主要是大坝库水通过溶隙、或管道形式连通坝基底部溶洞向下游的渗漏,绕坝渗漏主要是库水通过中至强可溶灰岩,因溶蚀管道及溶蚀裂隙发育,沿溶隙、或小型溶蚀管道等形式的绕坝渗漏。经溶洞封堵和灌浆封堵后,水库长期稳定运行。

坝址区岩性主要为灰岩及灰岩夹钙质页岩,为可溶岩,存在溶蚀现象,裂隙发育,局部透水率较大,具备渗漏的基础条件;坝址附近地下水补给有限,河床纵坡较缓,受灰岩岩溶影响,地下水位较低平,水库运行期间,为库水补给地下水,具备绕坝渗漏<sup>[16-17]</sup>的水动力条件;水库长期运行之后,水库在长期的高水头渗透作用下运行,岸坡发育的溶蚀裂隙及风化卸荷裂隙中的充填物可能发生渗透破坏,形成了新的渗漏通道;再结合水库与渗漏点温度场、化学场分析认为,渗漏点水质未经过深层地下水循环,渗漏路径较短,亦可能通过坝址右岸入渗口处溶蚀裂隙及小型溶洞贯通至大坝与右岸防渗线之间 PD5 平洞段,右岸坝基以下施工期间揭露大型岩溶管道系统,规模巨大,曾进行了封堵和帷幕灌浆处理,但是经过长期高压渗透水流作用,溶洞回填混凝土周边岩体的充填溶蚀裂隙可能存在渗透破坏,形成新的渗漏通道,渗漏出口位于该岩溶管道系统出口。

### 4.2 水库渗漏范围及途径

从地质结构来看,右岸坝址附近地层岩性以  $P_1q^4$  灰岩为主,其上游至库尾主要为页岩,钻孔岩芯完整性较好,局部存在小溶孔,裂隙发育,灰岩岸坡发育有导水长大溶蚀裂隙。根据钻孔地下水位,ZK1 的水位较高,高于库水位约 6 m,但钻孔 ZK2 的水位较低,低于库水位约 38 m,ZK3 的水位低于库水

位约 14 m,以 ZK2 为中心附近存在地下水凹槽,水位在钻孔 ZK1、ZK2 和 ZK3 之间出现了大幅跌落。物探成果表明坝基右岸附近发育有多处异常带,表现有小型灰岩管道和溶蚀裂隙。温度场表明右岸地下水温度异常区主要集中在 ZK2 和 ZK4 地下水位附近的部位。连通试验表明出水点与库区右岸岩溶已知的渗漏进口连通性较好。

①渗漏型式:灰岩溶隙发育,岩体透水率局部较大,在原有的岩溶管道渗漏处进行了封堵和灌浆处理,但在长期的高压渗透作用下,局部发生渗透破坏,目前以小型岩溶管道和溶蚀裂隙型分散性渗漏为主。

②渗漏范围:ZK2 对应异常区 CT-2、CT-3 等右岸溶蚀小型岩溶及溶蚀裂隙带可以视为水库右岸相对集中的渗漏区域。渗漏带主要位于 630 m 高程以上,上游边界至  $P_{11}$  隔水层,下游边界至大坝端头。

③渗漏途径:库水进入 ZK2 附近的岩溶管道之后,一是沿原坝基以下封堵堵头的薄弱区域或溶洞封堵体周边发生渗透破坏产生的新的通道向下游溶洞(平洞)出口集中的渗出。二是穿过右岸防渗线绕过右坝肩后沿岩体溶蚀裂隙或管道汇入下游右岸岸坡溶洞集中的渗出地表。如果右岸 ZK2 附近的地下水位升高,右岸绕坝渗漏的问题可能变得更加突出。

## 5 结论

(1)肖家沟水库右岸渗漏边界清晰,水库运行 16 年未发现渗漏问题,但前期已实施的防渗帷幕单薄,孔间距较大,溶洞周边的充填溶蚀裂隙或小型管道,物质成分变化较大,以及受混凝土施工工艺影响,帷幕范围内和溶洞封堵体周边岩体可能受水流影响发生渗透破坏,局部防渗失效产生了新的渗漏问题;

(2)右岸库水通过地表溶隙进入 ZK2 附近的岩溶管道之后,存在两个渗漏方向。一是沿原封堵堵头的薄弱区域或溶洞封堵体周边发生渗透破坏产生的新的通道向下游溶洞(平洞)出口集中的渗出;二是穿过右岸防渗线绕过右坝肩后沿岩体溶蚀裂隙或管道汇入下游右岸岸坡溶洞集中的渗出地表;

(3)通过对肖家沟水库右岸岩溶渗漏的研究,提出了岩溶水库防渗体渗透破坏型渗漏勘察与评价方法,宜以历史资料分析为基础,初判渗漏原因及范围,

采用勘探、试验及物探等多种手段进行验证,为防渗处理提供可靠依据。

## 参考文献

- [1] 薛伟,袁宗峰,周密.西南地区某岩溶水库渗漏分析[J].中国岩溶,2019,38(4):508-514.  
XUE Wei, YUAN Zongfeng, ZHOU Mi. Analysis on leakage of a karst reservoir in Southwestern China[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 508-514.
- [2] 脱云飞,王克勤,张振伟,郭涛,杨路华.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 Yunfei, WANG Keqin, ZHANG Zhenwei, GUO Tao, YANG Luhua. 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.
- [3] 彭仕雄,陈卫东,肖强.官地电站库首左岸河湾地块岩溶渗漏分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4030-4037.  
PENG Shixiong, CHEN Weidong, XIAO Qiang. Karst seepage analysis on left river bend in the head area of Guandi hydropower station reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4030-4037.
- [4] 郭铁柱,谢宝瑜,魏红.海子水库岩溶渗漏分析及帷幕灌浆防渗效果评价[J].水利水电技术,2009,40(4):73-75.  
GUO Tiezhu, XIE Baoyu, WEI Hong. Analysis on karstic seepage and evaluation on anti-seepage effect from curtain grouting for Haizi reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(4): 73-75.
- [5] 贺强.基于渗透破坏试验的黏土临界坡降影响因素分析[J].水电能源科学,2017,35(9):110-112,21.  
HE Qiang. Influencing factor analysis of clay critical hydraulic gradient based on experiment of seepage failure[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(9): 110-112, 21.
- [6] 张贵金,徐卫亚.岩溶坝区溶蚀岩体的渗透性变异研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1527-1534.  
ZHANG Guijin, XU Weiya. Study on variability of permeability of corroded rock mass in karst dam region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1527-1534.
- [7] 肖万春.水库岩溶渗漏勘察技术要点与方法研究[J].水力发电,2008,34(7):52-55.  
XIAO Wanchun. Keystones and methods study of karst reservoir leakage investigation[J]. Water Power, 2008, 34(7): 52-55.
- [8] 李乐晨,李子阳,赵兆.河口村水库坝肩裂隙岩体防渗处理分析[J].人民黄河,2017,39(10):98-101,105.  
LI Lechen, LI Ziyang, ZHAO Zhao. Seepage control analysis of fractured rock mass at dam abutment of Hekoucn reservoir[J]. Yellow River, 2017, 39(10): 98-101, 105.
- [9] 张可能,张岳,廖阳,万浩然,许培浩,张云毅.贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析[J].中国岩溶,2018,37(2):300-306.  
ZHANG Keneng, ZHANG Yue, LIAO Yang, WAN Haoran, XU Peihao, ZHANG Yunyi. Analysis on karst development and water burst in a subway station[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(2): 300-306.
- [10] 王家乐,贾宝杰,王志刚.岩溶含水层地下水源热泵运行对地下水温度场的影响[J].水电能源科学,2019,37(2):55-58.  
WANG Jiale, JIA Baojie, WANG Zhigang. Influence of water source heat pump on groundwater temperature field in karst aquifer[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(2): 55-58.
- [11] 朱彪,陈喜,张志才,彭韬,张乐辰,陈波,赵美刚.西南喀斯特流域枯季地下水导电率特征及水-岩作用分析[J].地球与环境,2019,47(4):459-463.  
ZHU Biao, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, PENG Tao, ZHANG Lechen, CHEN Bo, ZHAO Meigang. Characteristics of groundwater conductivity in dry season and water-rock interaction implications in a southwest karst basin[J]. Earth and Environment, 2019, 47(4): 459-463.
- [12] 唐春雷,郑秀清,梁永平.龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J].环境科学,2020,41(5):2087-2095.  
TANG Chunlei, ZHENG Xiuqing, LIANG Yongping. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in Longzici spring catchment[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2087-2095.
- [13] 张浪,李俊,潘晓东,黄晓荣,彭聪.西南某岩溶区地下水系统示踪试验与解析[J].中国岩溶,2020,39(1):42-47.  
ZHANG Lang, LI Jun, PAN Xiaodong, HUANG Xiaorong, PENG Cong. Tracer test and analysis of karst groundwater system in karst area of Southwest China[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(1): 42-47.
- [14] 熊亮萍,汪集咏.钻孔地温分布与地下水活动[J].地质科学,1992(S1):313-321.  
XIONG Liangping, WANG Jiyang. Geotemperature distribution in borehole and groundwater activity[J]. Chinese Journal of Geology, 1992(S1): 313-321.
- [15] 程亚平,蒋灵芝,黎柳月,李善民,冯志秦.综合物探技术探测平果铝厂赤泥堆场岩溶发育特征[J].中国岩溶,2016,35(6):688-698.  
CHENG Yaping, JIANG Lingzhi, LI Liuyue, LI Shanmin, FENG Zhiqin. The application of integrated geophysical method to karst pipeline distribution[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(6): 688-698.
- [16] 黄朝焯,王贺瑶.坝基渗流与坝肩绕渗实用计算方法探讨[J].水电能源科学,2015,33(3):71-75.  
HUANG Chaozhan, WANG Heyao. Discussion on computing method of dam foundation seepage and bypass seepage of dam a butment[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 71-75.
- [17] 康迎宾,李琳.洞里水库大坝右岸坝肩绕渗稳定分析[J].人民黄河,2009,31(4):109-110,113.  
KANG Yingbin, LI Lin. Stability analysis of seepage around dam abutment on the right bank of Jianli reservoir[J]. Yellow River, 2009, 31(4): 109-110, 113.



## Investigation and evaluation of the leakage caused by seepage failure in karst reservoir

ZENG Rongfu<sup>1,2</sup>, ZHENG Kexun<sup>1,2</sup>, WANG Qinquan<sup>1,2</sup>

( 1. Power China Guiyang Survey and Design Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. Geotechnical Engineering Corporation Limited, Sinohydro Guiyang Survey and Design Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China )

**Abstract** The karst leakage that occurred after the impoundment on the right bank of Xiaojiagou Reservoir in Nanchuan district of Chongqing has been taken as an example in the investigation and evaluation of karst leakage caused by high-pressure infiltration of the anti-seepage system during the long-term operation of karst reservoir. By means of geological analysis, historical investigation of leakage, drilling, hydrogeological test, geophysical prospecting and connectivity test, the range and causes of karst leakage on the right bank of the reservoir have been identified. According to the geological analysis, groundwater level observation and water permeability characteristics, the dam area is composed of karst rock, where dissolution occurs and fracture develops, and the local water permeability rate is large, hence there exist basic conditions for leakage. Besides, the limited groundwater recharge near the dam site and the low and flat groundwater level under the influence of limestone karst contribute to the hydrodynamic conditions for leakage. Combined with the analysis of temperature field, conductivity field and chemical field of reservoir and leakage point, the areas of abnormal groundwater temperature and conductivity on the right bank are mainly concentrated near the groundwater level of ZK2 and ZK4, and the water of the seepage point does not go through the deep groundwater circulation. The leakage path is short, which may penetrate through the dissolution fracture and small karst hole at the inlet on the right bank of the dam site to the PD5 flat cave section between the dam and anti-seepage line on the right bank. The connectivity test shows that the karst cave (dissolution fracture) on the right bank upstream of the dam have good connectivity with the leakage outlet. Geophysical exploration results show that CT-2, CT-3 and CT-5, the main channels of fracture-type leakage distributed above the elevation of 630 m on the right bank, mainly control the leakage of dam foundation and around dam.

Study results are shown as follows. (1) The leakage boundary of the reservoir is clear, and the leakage range is mainly above the elevation of 630 m in the soluble rock area on the right bank. The seepage failure of the anti-seepage body is the main reason for the leakage of reservoir. (2) The first leakage path is through the weak area of the original plugging plug or the surrounding of the karst plugging body, resulting in a new channel for leakage to converge into the karst cave outlet downstream. The second bypasses the dam shoulder on the right bank through anti-seepage line before leakage converges into the karst cave downstream of the right bank slope along the erosion fissures or pipelines of rock mass, and then it seeps out on the surface. In this study, the method of investigating and evaluating the leakage caused by seepage failure of anti-seepage body in karst reservoir has been proposed as illustrated by the project. To preliminarily determine the cause and range of seepage, it is advisable for us to analyze historical data and use such methods as exploration, testing and geophysical prospecting. The study results may provide a reliable basis for anti-seepage treatment.

**Key words** karst reservoir, seepage failure, leakage investigation, groundwater temperature field, geophysical prospecting CT

( 编辑 张玲 )