

胡大儒, 郑克勋, 赵代尧, 等. 复杂岩溶水系统势汇区建坝成库可行性研究: 以北盘江流域普岔河水库为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 736-745.

DOI: 10.11932/karst20220507

复杂岩溶水系统势汇区建坝成库可行性研究 ——以北盘江流域普岔河水库为例

胡大儒, 郑克勋, 赵代尧, 陈占恒

(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: 北盘江流域沿线山高谷深, 岩溶水文地质条件复杂, 局部区域水资源短缺, 岩溶渗漏问题成为水利水电工程建设的瓶颈。文章综合地质调查测绘、钻探及物探、水文地质试验、岩溶水系统分析、地下水均衡分析等方法, 论证了PCH水库不会发生邻谷渗漏及绕坝基深部的岩溶管道型渗漏, 但发生溶隙型渗漏的可能性较大。采用有限元法模拟溶隙渗漏显示: 随着 T_{12} 灰岩溶蚀率的增大, 坝基抗滑稳定系数稍有降低, 潜在失稳模式为后缘剪断 T_{12} 岩体, 前缘沿 T_{12} 层内岩屑夹泥型软弱结构面剪出; 坝基渗漏量呈线性增加, T_{12} 灰岩溶隙密集带为坝基主要渗漏区。当溶隙密集带沿 T_{12} 灰岩与 T_{12} 泥灰岩接触带水平发育且集中分布时, 坝基抗滑稳定系数将明显减小, 坝基渗漏量将明显增大; 当溶隙密集带垂直发育、分散发育或主要分布于坝后区域时, 其对坝基抗滑稳定及坝基渗漏量影响微弱。岩溶水文地质分析及数值模拟均显示, 复杂岩溶水系统势汇区下游区域多以溶隙渗漏为主, 其工程影响有限, 具备建坝成库条件。

关键词: 水库渗漏; 溶隙密集带; 岩溶; 数值模拟; 北盘江

中图分类号: TV221.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1001—4810 (2022) 05—0736—10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶是可溶性岩石长期受水溶蚀以及由此引起的各种地质现象和形态的总称, 工程上对岩溶的研究以碳酸盐岩为主^[1]。我国碳酸盐岩系分布面积约为136万 km^2 , 占国土总面积的14%, 其中, 西南地区分布面积约为54万 km^2 , 是全球三大岩溶集中分布区中连片出露碳酸盐岩面积最大的区域^[2-4]。岩溶地区地质条件复杂, 生态环境脆弱, 开展水利水电工程建设可能存在渗漏、涌水、地基塌陷等问题, 严重时可能导致坝基及边坡失稳, 诱发岩溶型水库地震等。业内主流岩溶水文地质分析方法主要有地质调查法、

示踪剂法、水均衡法、场分析法、水文网演化分析法、岩溶水系统分析法、地下水基准面分析法等^[5-8]。水库岩溶渗漏评价和预测方法主要有理论公式法、流网图解法、数值模拟法^[9-11]。李天祺等^[12]利用层析成像反演算法进行岩溶场地解译分析, 得到了高精度的岩溶空间形态分布。张祯武等^[13]利用示踪探测技术进行水库渗漏流场通道定位分析, 验证了鹿角坝洼地水库不存在深层渗漏通道, 优化了水库防渗方案。梁添才等通过高密度电法进行了某铁路大桥场地岩溶探测分区, 得到无覆盖层或覆盖层较薄情况下, 视电阻率探测剖面与数值模拟及反演结果相对吻合^[14]。郑克勋等^[15]综合利用场分析、示踪试验、钻探和物

第一作者简介: 胡大儒(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地质、岩溶水文等领域研究工作。E-mail: hudaru@ghidri.com.cn。

通信作者: 郑克勋(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事工程地质、岩溶水文等领域研究工作。E-mail: zhengkexun@ghidri.com.cn。

收稿日期: 2022—01—01

探等方法查明了窄巷口水电站的暗河渗漏通道,并对暗河进行了成功的封堵。赵瑞等^[16]利用数值方法精细模拟了库区复杂岩溶通道的空间形态,得到了各潜在岩溶渗漏通道施加防渗帷幕措施前后的渗漏量,进而评估工程防渗措施的有效性。上述各方法均为现阶段业内认可度较高、使用范围较广、可靠性较强的主流分析方法,但多为单一的探测技术应用或单一分析方法研究,不同地区岩溶发育特征的差异性较大,需要在充分把握岩溶发育的空间特征、边界条件、主控因素等条件的基础上,采用多种探测手段或分析方法相结合,才能更快速、更精准、更高效的掌握岩溶发育规律及特征,进而对其工程影响做出准确判断。

北盘江流域沿线山高谷深,岩溶水文地质条件复杂,局部区域水资源短缺,岩溶渗漏成为水利水电工程建设的瓶颈。快速精准地探测水库岩溶渗漏通道可大幅缩短工期并降低防渗成本,科学地评价岩溶场地渗透稳定性可为工程质量及居民安全提供保障。本文在岩溶水文地质分析的基础上,对北盘江右岸支流普岔河水库在岩溶地下水系统势汇区建坝成库的可行性进行了论证分析,得出了坝基可能的渗漏模式为溶隙渗漏,并对溶隙渗漏的工程影响进行了数值模拟研究,为工程设计拓展思路,为同类研究提供参考。

1 基本地质条件

拟建水库工程位于北盘江右岸支流普岔河中段,属普安旋扭构造变形区,中营向斜构造经过坝址附近,区域构造稳定性较差。工程初拟混凝土重力坝,最大坝高 90 m,正常蓄水位 1 035 m,相应库容 473 万 m^3 。库区由普岔河干流与滴水沟支流组成,以溶蚀侵蚀之岩溶中山地貌为主。干流呈 $\text{S}60^\circ\text{W}$ 走向,地形西高东低,两岸地形坡度一般 $30^\circ\sim 85^\circ$,局部为陡壁,为峡谷型水库。坝址下游 700 m 处发育岩溶盲谷,谷长 300 m,深 35 m,盲谷以下为地下暗河段,长约 1.2 km,于 DC 转为明流,直至汇入北盘江。工程区岩溶水文地质图见图 1,三维地质模型见图 2。

经勘探及试验揭示,坝址区河床覆盖层厚约 30 m,主要为冲洪积(Q^{pal})砂卵石,局部为崩积(Q^{col})块碎石土、静水沉积(Q')淤泥质粉土。基岩自上而下分别为:三叠系下统永宁镇组第一段第三、四层(T_{yn}^{1-3+4})泥质灰岩,厚度约 60 m;第一段第二层(T_{yn}^{1-2})泥灰岩夹泥岩,厚度约 90 m。此外,该层沿层面发育一组岩屑夹泥型软弱结构面,厚度 2~10 cm;第一段第一层(T_{yn}^{1-1})薄至中厚层灰岩,整体厚度约 125 m;飞仙关组(T_{f})泥页岩,整体厚度约 500 m。坝址区岩层缓倾上游,发育中营倒转倾覆向斜,主要不

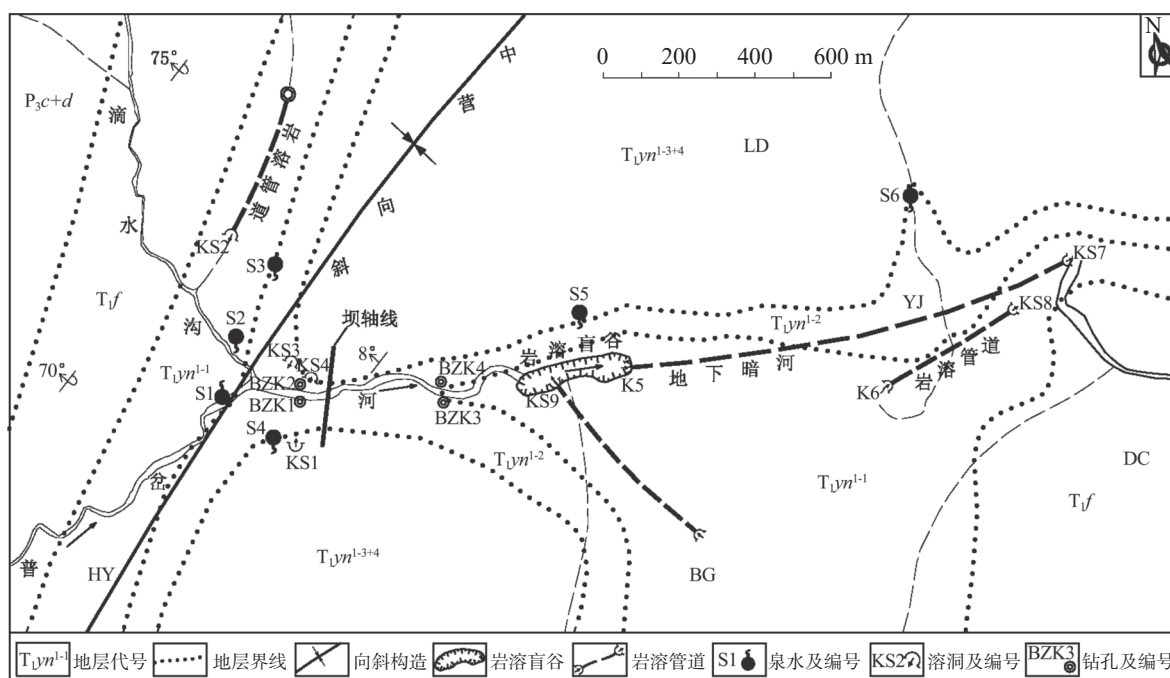


图1 工程区岩溶水文地质图

Fig. 1 Karst hydrogeological map of the project area

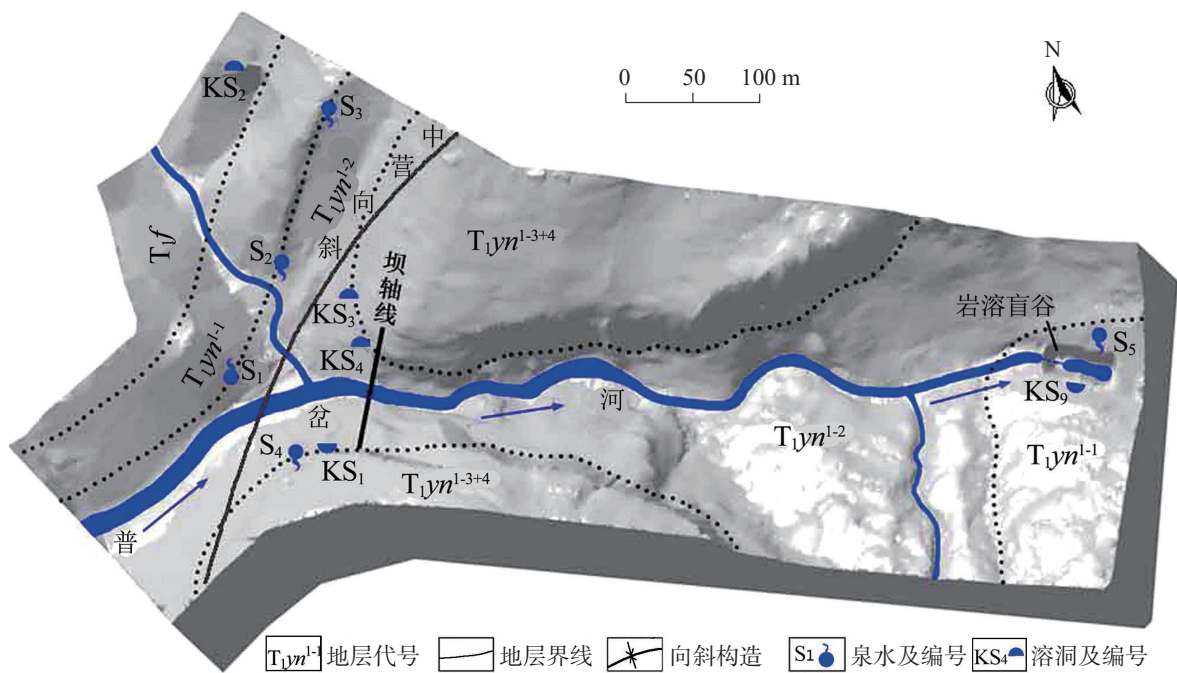


图2 工程区三维地质模型示意图

Fig. 2 3D geological model of the project area

良地质现象为岩体风化、卸荷,地下水主要为第四系覆盖层孔隙水及基岩裂隙溶隙水,补排关系为地下水补给河水,此外,库坝区岩溶发育强烈,坝基可能存在岩溶渗漏问题。

2 岩溶发育特征

岩溶水系统势汇区即地下水的集中排泄区或基准面,一般发育在强可溶岩与弱可溶岩组、可溶岩组与非可溶岩组的分界处。势汇区下游一定范围内岩体透水性相对较弱,且地下水大部分已排出地表,形成地表径流汇入河道,少部分基岩裂隙水处于准滞流状态,无水流动或水流动滞缓,因此,势汇区下游岩溶发育程度通常较上游弱,发育岩溶渗漏通道的可能性小,可考虑作为建坝河段。

普盆河水库工程区内发育岩溶类型主要有:溶洞、岩溶泉、岩溶管道、岩溶盲谷、地下暗河等(图3,图4),各岩溶基本特征统计见表1。

库坝区内强岩溶区出露的岩组主要有(T_{1yn}^{1-3+4})泥质灰岩、(T_{1yn}^{1-1})灰岩,弱岩溶岩组主要为(T_{1yn}^{1-2})泥灰岩夹泥岩, (T_1f)泥页岩为相对隔水层。根据各岩组的分布高程、水力联系特点将坝址区划分为5个水系统,各含水系统基本特征见表2。

普盆河水库研究河段中低高程处岩溶发育强烈,

表1 工程区岩溶基本特征统计表

Table 1 Statistics of the basic karst features in the project area

编号	分布位置	出口高程/m	流量/ $L \cdot s^{-1}$		
			汛期	枯期	极枯
S1	普盆河干支汇合处	990	75	50	17
S2	滴水沟左岸1#冲沟上游	1 017	5	1	0
S3	左岸1号冲沟源头	1 125	2	1	0
S4	坝轴线右岸上游侧	1 019	5	1	0
S5	岩溶盲谷左岸后坡	1 004	15	15	15
KS1	坝轴线右岸	1 130	10	3	0
KS2	滴水沟左岸吊水岩	1 100	50	10	0.5
KS3	坝轴线左岸	1 035	8	3	0
KS4	坝轴线左岸	995	5	2	0
KS7	坝址下游暗河出口	851	300	200	40
KS8	坝址下游岩溶管道出口	900	12	5	1.5
KS9	岩溶盲谷内侧右壁	945	7	2	0

各岩溶点主要集中分布于坝址上游干支流交汇区及下游岩溶盲谷区2处,岩溶发育规模不等,小至岩溶泉,大至地下暗河均有发育。从岩溶发育边界条件看,各岩溶点多发育于 T_{1yn}^{1-1} 灰岩与其上下地层接触带附近,少量发育于两岸 T_{1yn}^{1-3+4} 泥质灰岩地层, T_{1yn}^{1-2} 泥灰岩夹泥岩地层未见岩溶发育;从地下水补排关系看,S1岩溶泉为坝址上游I号岩溶地下水系统 T_{1yn}^{1-1} 灰岩的势汇区,KS7岩溶泉则是下游IV号岩溶地下水系统 T_{1yn}^{1-1} 灰岩的势汇区,两势汇区之



图 3 KS1 溶洞出口图

Fig. 3 Karst cave exit of KS1



图 4 K5 地下岩溶暗河进口图

Fig. 4 Karst underground river entrance of K5

间水循环模式主要为地表径流；从岩溶发育的控制因素看，区内岩溶发育程度及规模与地下水的活动性密切相关，地下水活动性强的区域岩溶发育强烈，地下活动性弱的区域岩溶发育程度弱。拟建坝址位于地下水活动相对较弱的上、下游两个岩溶水势汇区之间。

3 水库渗漏模式分析

水库与低邻谷北盘江、石古河之间无断裂构造切错，两岸分水岭高大雄厚，且被飞仙关组(T_{if})泥页岩、永宁镇组(T_{yn}^{1-2})泥灰岩夹泥岩形成的相对隔水

表 2 工程区岩溶水系统区划表

Table 2 Division of the karst water system in the project area

编号	地层	岩性	分布位置	发育岩溶统计
I	T_{yn}^{1-1}	灰岩	库区	S1、S2、KS2
II	T_{yn}^{1-3+4}	泥质灰岩	坝址左岸	S3、S5、KS3、KS4
III	T_{yn}^{1-3+4}	泥质灰岩	坝址右岸	S4、KS1
IV	T_{yn}^{1-1}	灰岩	坝址下游	K5-KS7、K6-KS8
V	T_{yn}^{1-1}	灰岩	河床深部	潜在岩溶渗漏通道

层阻隔，因此，水库蓄水后不存在邻谷渗漏问题。考虑到 T_{yn}^{1-1} 灰岩为强可溶岩组，与上部 T_{yn}^{1-2} 泥灰岩夹泥岩、下部 T_{if} 泥页岩分界面处可能存在岩溶管道，即可疑渗漏通道为：由坝前库盆区 T_{yn}^{1-1} 灰岩地层(水系统 I)垂直下渗，随后绕过坝基防渗帷幕沿 T_{yn}^{1-1} 地层(水系统 V)上、下边界向下游岩溶盲谷(水系统 IV)的纵向岩溶管道型渗漏。坝基可能的渗漏模式见图 5。

3.1 岩溶管道型渗漏分析

(1)地形地貌 工程区河段地形切割强烈，岸坡陡峻，大气降雨入渗量小、下渗深度浅，不具备形成地下水深循环的地形条件。

(2)地层岩性 坝址区河床覆盖层厚 25~30 m，其中淤泥质粉土厚 15~18 m，坝址下游约 150 m 处有明显的崩塌堵江痕迹，说明坝址区早期形成过堰塞湖。若 I、IV 号含水系统之间曾存在相互连通的岩溶管道，则不会形成堰塞湖，且 S1、KS2 泉水也不会在地表出露，而是沿深部管道流走。

(3)钻孔及物探 钻孔及物探声波显示， T_{yn}^{1-1} 灰岩完整性较好，无大的溶洞、空腔、管道发育。

(4)地下水分层水位 BZK2、BZK3 钻进至 T_{yn}^{1-1} 与上、下地层分界面处，钻孔内外管水位均未出现大幅下降。因 T_{yn}^{1-2} 、 T_{if} 地层具有相对隔水性，各地层

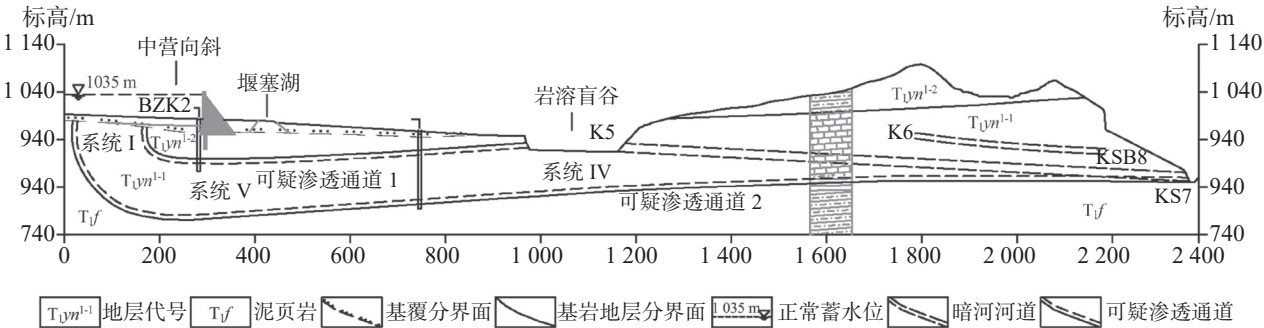


图 5 坝基渗漏模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the leakage mode of dam foundation

稳定水位分层特征明显,且各水位均高于 T_{1yn}^{1-1} 灰岩层顶,若存在岩溶管道,则各层稳定水位将位于 T_{1yn}^{1-1} 灰岩层内中下部,低于现状水平。

(5)地下水势汇区 S1、KS2 等岩溶泉的存在,说明库区 T_{1yn}^{1-1} 灰岩(水系统 I)为坝址上游岩溶地下水系统的势汇区,KS7 岩溶泉则是下游 T_{1yn}^{1-1} 灰岩(水系统 IV)势汇区,两势汇区之间 T_{1yn}^{1-1} 灰岩(水系统 V)的地下水处于准滞流状态,无水流动或水流动滞缓,形成岩溶管道的可能性较小。

(6)地下水均衡 经枯期实测,坝址上游干流河尾及左岸支流滴水沟内(飞仙关及其下地层汇入)流量分别为 $30 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,S1 泉水流量为 $50 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,KS2 泉水流量为 $10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,合计坝址附近河水流量约 $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,暗河入口 K5 实测流量约 $120 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (包括了左岸 KS9 流量约 $15 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$),从坝址至暗河进口未见其他明显的岩溶大泉水汇入,未见河水流失。暗河

出口 KS7 流量约 $200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,工程范围内 T_{1yn}^{1-1} 、 T_{1yn}^{1-2} 灰岩补给区面积约 22 km^2 ,根据区域水文地质图,地下水枯期径流模数按 $7.0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ 计算,流量约 $155 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,加上坝址上游干流河尾及左岸支流滴水沟内(飞仙关及其下地层汇入)流量,总计流量约 $195 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,与 KS7 出口流量相当,说明坝址与暗河出口 KS7 之间河床底部无直接连通的岩溶管道。

综上所述,坝基以下不会发生连通 I、IV 号水系统的顺河向岩溶管道型深部渗漏。因此,岩溶地下水系统势汇区下游区域发育岩溶管道型渗漏通道的可能性较小。

3.2 溶隙型渗漏分析

BZK1 与 BZK2、BZK3 与 BZK4 两对孔间 CT 测试及钻孔录像显示, T_{1yn}^{1-1} 与 T_{1yn}^{1-2} 地层分界面沿线零星发育溶隙密集带,垂向上,溶隙密集带多分布在地层界面及以下 10~15 m 深度范围,钻孔 CT 测试成

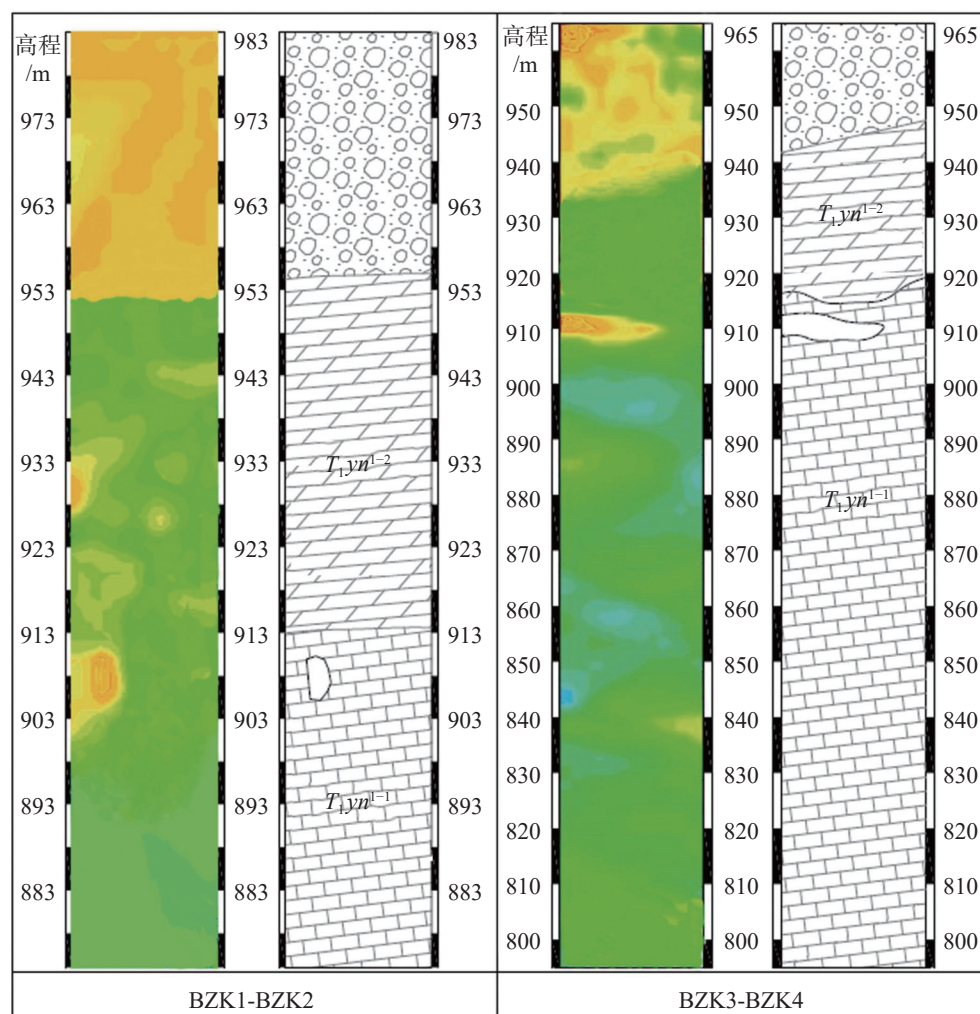


图 6 钻孔 CT 测试成果图

Fig. 6 CT test results in drill hole

果见图 6。因此,坝基可能的渗漏模式为溶隙型渗漏,即岩溶地下水系统势汇区下游区域多以溶隙型渗漏为主。

4 溶隙渗漏工程影响模拟分析

4.1 岩土体物理力学参数

结合现场原位剪切、室内直剪、压水试验、注水试验成果,坝址区岩土体物理力学参数建议值见

表 3。

运用 Rocscience 软件基于莫尔—库仑准则的有限元法模拟溶蚀率、溶隙密集带形态及分布特征等因素对坝基抗滑稳定性、坝基渗流场形态及总渗漏量的影响,进而定量评价溶隙型渗漏对岩溶水势汇区建坝成库的影响。各岩土层按均质各向同性材料考虑,模型底边界按固定约束考虑,采用平面应变条件的 3 节点三角形等参元进行网格划分,模型示意图见图 7。

表 3 岩土体物理力学参数建议值表

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock and soil

地层	类别	物质成分	密度 /g·cm ⁻³	抗剪断强度		渗透系数 /cm·s ⁻¹
				tgφ	c/Kpa	
T ₁ yn ¹⁻¹	岩体	灰岩	2.65	1.00	850	10 ⁻⁴
T ₁ yn ¹⁻²	岩体	泥灰岩	2.60	0.80	650	10 ⁻⁵
	层面	岩屑夹泥	2.15	0.45	50	10 ⁻³
T ₁ f	岩体	泥页岩	2.55	0.65	550	10 ⁻⁶
Q ^{al}	冲积	砂卵砾石	2.20	0.45	0	10 ⁻²
Q ^l	湖积	淤泥质粉土	2.15	0.25	10	10 ⁻⁵
Q ^{col}	崩积	块碎石土	2.20	0.55	10	10 ⁻¹

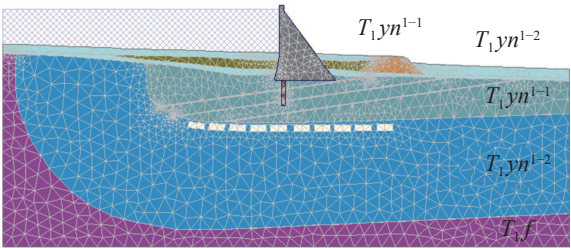


图 7 有限元网格划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the finite element mesh

4.2 溶蚀率模拟分析

考虑到溶隙密集带主要分布在 T₁yn¹⁻¹ 与 T₁yn¹⁻² 地层分界面及以下 10 m 深度范围内,溶隙密集带厚度约 5 m,因此,模型中溶隙密集带按矩形模拟,高度取 5 m,长度按溶蚀率换算得到,材料参数按渗透性较强的细砂模拟(图 7)。溶蚀率分别取 0%、10%、20%、25%、30%、40%、50%,防渗帷幕深度取工程推荐的 0.3 倍坝高(27 m),得到溶蚀率模拟计算结果见表 4、图 8。溶蚀率为 0%、25%、50% 时,坝基抗滑稳定性系数(Fs)、渗漏量(Q)及渗流场形态计算结果见图 9、图 10、图 11。

据图可知,各模拟工况下,坝基抗滑稳定系数

2.678~2.638,均小于设计安全系数 3.0,当逐渐增大 T₁yn¹⁻¹ 灰岩接触带溶蚀率时,坝基抗滑稳定系数稍有降低,回归方程: $y_1 = -0.081x + 2.678$,潜在失稳模式为后缘剪断 T₁yn¹⁻² 岩体,前缘沿 T₁yn¹⁻² 层内岩屑夹泥型软弱结构面剪出。各模拟工况下,坝基渗漏量将

表 4 溶蚀率模拟计算结果表

Table 4 Simulation results of the karst fissure rate

溶蚀率/%	0	10	20	25	30	40	50
Fs	2.678	2.668	2.663	2.660	2.656	2.643	2.638
Q/m ³ ·d ⁻¹	225.0	236.3	248.5	257.0	261.0	275.0	283.5

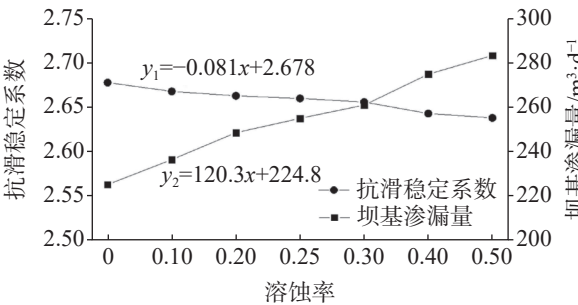


图 8 稳定系数及渗漏量与溶蚀率关系曲线

Fig. 8 Relationship between stability factor, leakage and karst fissure rate

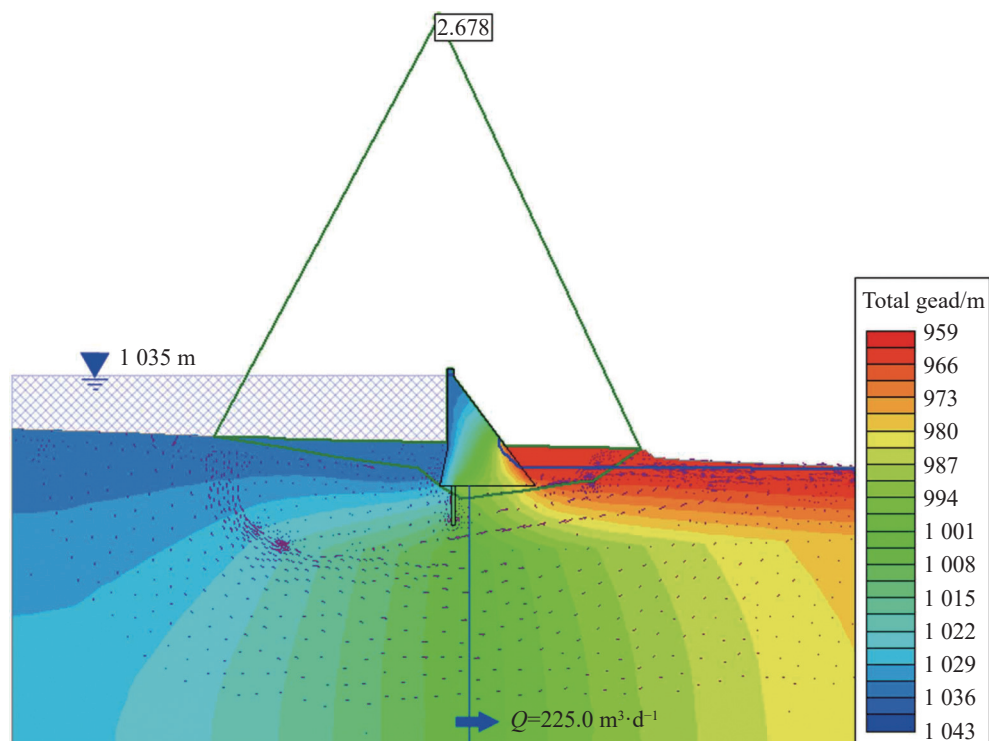


图 9 0% 溶蚀率时总水头渗流场云图

Fig. 9 Field nephogram of the total head seepage with the karst fissure rate of 0%

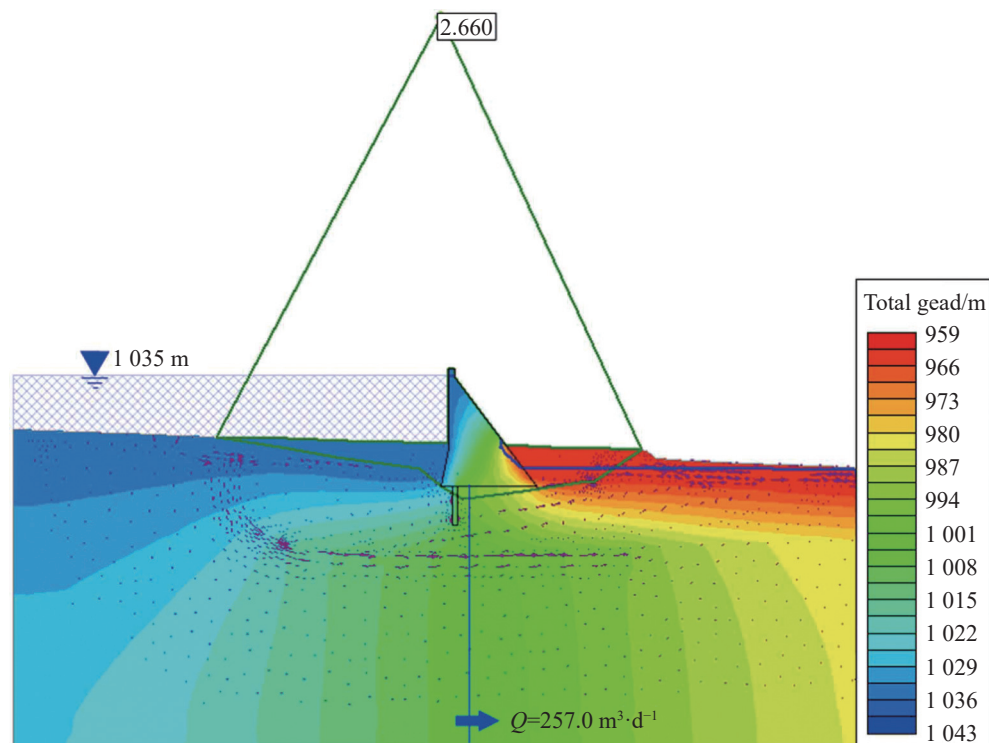


图 10 25% 溶蚀率时总水头渗流场云图

Fig. 10 Field nephogram of the total head seepage with the karst fissure rate of 25%

呈线性增加, 回归方程: $y_2=120.3x+224.8$, 随着溶蚀率的增加, $T_1 y n^{-1}$ 灰岩溶隙密集带区域内, 等势线及流线逐渐加密, 最终发展为主要渗漏区。因此, 岩溶地

下水系统势汇区下游区域溶隙密集带的存在, 将一定程度降低坝基抗滑稳定系数, 增加坝基渗漏量, 但其影响程度有限。

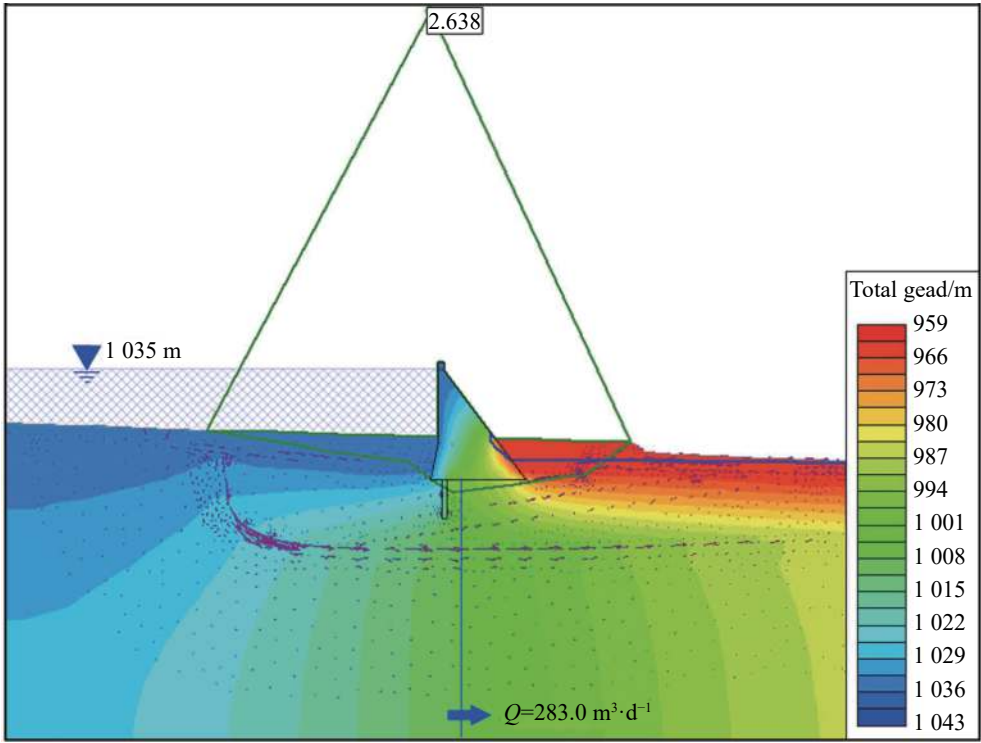


图 11 50% 溶蚀率时总水头渗流场云图

Fig. 11 Field nephogram of the otal head seepage with the karst fissure rate of 50%

4.3 溶隙密集带形态及分布模拟分析

溶蚀率取 25%, 防渗帷幕深度取 27 m, 分别模拟溶隙密集带水平发育、垂直发育、分散发育、集中发育等空间形态, 及坝前、坝后等分布位置对坝基抗滑稳定及渗漏量的影响, 计算结果见表 5、图 12。据图可知, 当溶隙密集带沿 T_{Jyn}^{1-1} 灰岩与 T_{Jyn}^{1-2} 泥灰岩接触带水平发育, 且溶隙密集带集中分布时, 坝基渗漏量将明显增大, 坝基抗滑稳定系数将明显减小; 当溶隙密集带垂直发育、分散发育或主要分布于坝后区域时, 其对坝基抗滑稳定性系数(F_s)、渗漏量(Q)影响不大。

表 5 溶隙密集带形态模拟结果表

Table 5 Simulation results with different karst fissure forms

发育形态	水平分散坝前	垂直分散坝前	分散水平坝前	集中水平坝前	坝前水平分散	坝后水平分散
F_s	2.660	2.670	2.665	2.630	2.653	2.698
$Q/m^3 \cdot d^{-1}$	257.0	232.0	240.0	291.5	237.5	243.0

5 结 论

(1)综合地质调查测绘、钻探及物探、水文地质

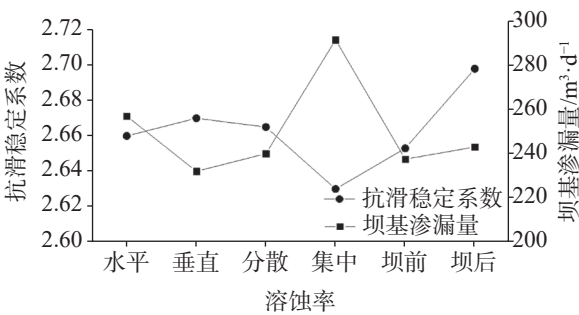


图 12 稳定系数及渗漏量与溶隙密集形态关系曲线

Fig. 12 Relationship between stability factor, leakage and karst fissure forms

试验、岩溶水系统分析、地下水均衡分析等方法, 论证了普岔河水库不会发生邻谷渗漏及绕坝基深部连通 I、IV 号水系统的岩溶管道型渗漏, 但 T_{Jyn}^{1-1} 与 T_{Jyn}^{1-2} 地层界面发生溶隙型渗漏的可能性较大;

(2)采用有限元法进行溶蚀渗漏工程影响模拟, 结果显示, 随着 T_{Jyn}^{1-1} 灰岩溶蚀率的增大(0~50%), 坝基抗滑稳定系数稍有降低(2.678~2.638), 且满足回归方程: $y_1=-0.081x+2.678$, 潜在失稳模式为后缘剪断 T_{Jyn}^{1-2} 岩体, 前缘沿 T_{Jyn}^{1-2} 层内岩屑夹泥型软弱结构面剪出, 采取一定处理措施即可; 坝基渗漏量一定程度增加, 且满足回归方程: $y_2=120.3x+224.8$, T_{Jyn}^{1-1} 灰岩溶隙密集带为坝基主要渗漏区;

(3)溶隙密集带发育形态及分布特征模拟显示,当溶隙密集带沿 T_{1yn}^{1-1} 灰岩与 T_{1yn}^{1-2} 泥灰岩接触带水平发育,且溶隙密集带集中分布时,坝基渗漏量将明显增大,坝基抗滑稳定系数将明显减小;当溶隙密集带垂直发育、分散发育或主要分布于坝后区域时,其对坝基渗漏量及坝基抗滑稳定影响不大;

(4)岩溶水文地质分析及数值模拟均显示,岩溶地下水系统势汇区下游区域发育岩溶管道型渗漏通道的可能性较小,多以溶隙型渗漏为主,其工程影响有限。因此,研究区复杂岩溶地区岩溶地下水系统势汇区下游区域建坝成库是可行的。

参考文献

- [1] 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.
SHEN Chunyong, YU Bo, GUO Weixiang. Karst survey and treatment of water conservancy and hydropower engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [2] 韩行瑞. 岩溶水文地质学[M]. 北京:地质出版社,2015.
HAN Xingrui. Karst Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [3] 潘欢迎. 岩溶流域水文模型及应用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2014.
PAN Huanying. Study and application of hydrologic model in karst basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [4] 石朋,侯爱冰,马欣欣,陈喜,张志才. 西南喀斯特流域水循环研究进展[J]. 水利水电科技进展,2012,32(1):69-73.
SHI Peng, HOU Yuanbing, MA Xinxin, CHEN Xi, ZHANG Zhicai. Advances in Science and Technology of Water Resources[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 69-73.
- [5] 陈静,罗明明,廖春来,马瑞,周宏,邹胜章,陈植华. 中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J]. 地质科技情报,2019,38(6):221-230.
CHEN Jing, LUO Mingming, LIAO Chunlai, MA Rui, ZHOU Hong, ZUO Shengzhang, CHEN Zhihua. Review of eco-hydrological process in karst wetlands of China[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 221-230.
- [6] 万佳威,张勤军,石树静. 岩溶塌陷不确定性预测评价综述[J]. 中国岩溶,2017,36(6):764-769.
WAN Jiawei, ZHANG Qinjun, SHI Shujing. Overview of uncertainty assessment on karst collapse prediction[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 764-769.
- [7] 任新红. 南广铁路岩溶路基注浆效果检测方法 with 评价指标研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
REN Xinhong. Study on grouting detection method and assessment indicators of karst roadbed grouting effect in Nanning-Guangzhou railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [8] 杨雄兵,王立志,刘高,黄迪,李京泽,杨发军. 某水库右坝段坝基渗漏特征及原因分析[J]. 水电能源科学,2018,36(11):76-80.
YANG Xiongbing, WANG Lizhi, LIU Gao, HUANG Di, LI Jingze, YANG Fajun. Analysis of seepage characteristics and causes of dam foundation of the right dam of a reservoir[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 76-80.
- [9] 金仁祥. 某水库坝基渗透稳定性研究[J]. 岩土力学,2004,25(1):157-159.
JIN Renxiang. Study on seepage stability of a gravity dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 157-159.
- [10] Olivier Kaufmann, John Deceuster, Yves Quinif. An electrical resistivity imaging-based strategy to enable site-scale planning over covered palaeokarst features in the Tournais area (Belgium)[J]. Engineering Geology, 2012, 133-134: 49-65.
- [11] Asbjornsen H, Goldsmith G R, Alvarado-barrientos I M S, Rebel K, Van Osch F P, Rietkerk M, Chen J, Gotsch S, Tobon C, Geisert D R, Gomez-Tagle A, Vache K, Dawson T E. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review[J]. Journal of Plant Ecology, 2014, (1/2): 3-22.
- [12] 李天祺,彭涛,郭印. 井间地震层析成像技术在岩溶勘察中的应用[J]. 水文地质工程地质,2009,36(6):127-130.
LI Tianqi, PENG Tao, GUO Yin. Application of cross-hole seismic computerized tomography technology to karst caves survey[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 127-130.
- [13] 张祯武,陈志强,高成城,任水源. 用示踪探测技术优化岩溶水库防渗设计[J]. 水利水电技术,2017,48(2):148-154.
ZHANG Zhenwu, CHEN Zhiqiang, GAO Chengcheng, REN Shuiyuan. Tracing detection technique based optimization of anti seepage design for karst reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 148-154.
- [14] 梁添才,陈清. 高密度电法三极装置在岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(5):770-774.
LIANG Tiancai, CHEN Qing. Application of high-density electrical three-pole device to karst exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 770-774.
- [15] 郑克勋,张国军. 窄巷口水电站左岸防渗线喀斯特渗漏管道探测研究[J]. 贵州水力发电,2012,26(2):10-20.
ZHENG Kexun, ZHANG Guojun. Study on the detection of karst leakage pipeline along the left bank anti seepage line of Zhaixiangkou hydropower station[J]. Guizhou Water Power, 2012, 26(2): 10-20.
- [16] 赵瑞,张强,许模,张楠. 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, ZHANG Qiang, XU Mo, ZHANG Nan. 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.

Feasibility study on dam and reservoir construction in the catchment area of complex karst water system: Taking Pucha Reservoir of Beipan River as an example

HU Daru, ZHENG Kexun, ZHAO Daiyao, CHEN Zhanheng

(Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract The topographic and geological conditions in the basin of Beipan River are complex with high mountains and deep valleys on both banks, strong karst development and deeply buried groundwater. Consequently, water resources are in great shortage in this area. The construction of water conservancy projects can effectively solve the problem of water shortage. However, karst leakage has become a difficult problem restricting the construction. By comprehensively using the methods of geological survey and mapping, drilling and geophysical exploration, hydrogeological test, karst water system analysis and groundwater balance analysis, this paper demonstrates that a leakage to the adjacent valley or along the karst pipeline deep under the dam foundation will not occur in the Pucha reservoir, but the possibility of solution crack leakage is great. The finite element method is used to simulate the solution crack leakage and analyze the engineering impact. Results show that with the increase of the dissolution rate of T_{1yn}^{1-1} limestone, the anti-sliding stability coefficient of the dam foundation decreases slightly, and there is an inverse correlation between them. The regression equation is $y_1 = -0.081x + 2.678$. The potential instability mode of the dam foundation is that the T_{1yn}^{1-2} marl rock mass is sheared at the upstream, and the bottom is sheared along the gently inclined upstream with weak structural plane of rock debris mixed with mud in T_{1yn}^{1-2} layer. With the increase of dissolution rate of T_{1yn}^{1-1} limestone, the leakage of dam foundation increases significantly, and there is a positive correlation between them. The regression equation is $y_2 = 120.3x + 224.8$. The concentrated belt of solution crack is the main leakage area of dam foundation. When the concentrated belt develops horizontally and distributes intensively along the contact belt between T_{1yn}^{1-1} limestone and T_{1yn}^{1-2} marl, the anti-sliding stability coefficient of dam foundation will significantly reduce and the leakage of dam foundation will significantly increase. Therefore, the concentrated belt should be treated as a key area. When the concentrated belt is vertically developed, dispersed or mainly distributed in the area behind the dam, it has little impact on the anti-sliding stability and leakage of the dam foundation, and can be used as a secondary treatment area. Karst hydrogeological analysis and numerical simulation show that in complex karst areas, after groundwater is discharged from the surface in the potential catchment area, it mainly influxes in the form of runoff to the downstream river channel, and the vertical infiltration of water flow is relatively weak, so it is difficult to form karst pipelines bypassing the anti-seepage curtain and connecting the upstream and downstream in the deep part of the riverbed. The leakage form of dam foundation is mainly solution crack leakage, and its engineering impact is limited. Therefore, the catchment area of karst groundwater is suitable for dam and reservoir construction. In addition, according to the spatial distribution characteristics of the concentrated belt of solution crack, the targeted treatment of zoning grouting can improve the treatment efficiency and save investment.

Key words reservoir leakage, concentrated belt of solution crack, karst, numerical simulation, Beipan River

(编辑 张玲)