

段乔文, 俞富有, 张天柏, 等. 滇东高原罗平湾子水库岩溶渗漏机理及库外补漏设想[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 287-297.

DOI: 10.11932/karst20220209

滇东高原罗平湾子水库岩溶渗漏机理及库外补漏设想

段乔文, 俞富有, 张天柏, 何伟, 段春林

(云南地质工程勘察设计研究院有限公司红河分院, 云南 开远 661600)

摘要: 在总结和分析前人研究成果的基础上, 结合云南省罗平湾子水库地层岩性、地质构造、水文地质工程地质条件、岩溶发育特征、水库汇流条件、多次补漏未遂等因素, 对影响水库渗漏的主要因素进行分解, 结果表明: 岩溶强发育带地层中溶蚀孔、洞发育, 土工膜铺盖封闭库底, 蓄水后便在土工膜之下、地下水位之上的岩溶空隙中形成真空, 在库水位频繁、大幅度波动条件下易发生真空吸蚀作用, 充填物部分被淘空; 库底以上的蓄水压力与库底以下的真空产生的负压叠加后形成附加应力, 当附加应力大于孔洞之上岩土体的抗剪强度, 或大于孔、洞充填物与洞壁之间的粘结强度时发生冲切破坏, 这是导致水库多次补漏未遂, 且同一渗漏片区重复发生岩溶塌陷、出现落水洞的主要原因。在库区内补漏具有很大的局限性, 而在库区外适当部位设置防渗帷幕, 不仅可根治渗漏, 还可明显抬高地下水位, 改善蓄水条件, 扩大原设计库容数倍。

关键词: 水库渗漏; 机理; 负压; 冲切破坏; 补漏; 扩大库容

中图分类号: P642.25; TV697.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0287-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

滇东是典型的岩溶地区, 石漠化分布面积高达 70 602.6 km², 占滇东片区总面积的 47.34%^[1]。强烈的岩溶作用导致地表干旱缺水, 地下水丰富但分布极不均匀, 是这一地区水资源的总特征。岩溶渗漏是该区目前最主要的水库渗漏类型^[2], 一直是该区水利水电工程建设中面临的难题之一。国内外学者对岩溶库区渗漏的机理研究取得了一些有益成果: 邹成杰^[3]研究了水库岩溶渗漏的地质模型和数学模型, 熊道锟^[4-5]、王宇^[6]分别研究了岩溶发育强度垂直分带和地下水径流系统垂向分带, 蒋海飞等^[7-8]研究认为, 高压孔隙水压力作用时会导致岩石发生蠕变, 造成岩石裂隙面扩展, 从而引发渗漏通道的形成, 徐卫国等^[9]较早提出了真空吸蚀致塌机理, 康彦仁^[10]提出了八种致塌模式, 肖先焯^[11]研究了覆盖型

岩溶区几种典型盖层结构在水气相互驱动影响下的变形演化过程和塌陷机理, 贾连杰^[12]研究了水库岩溶塌陷机理, 程峰等^[13]揭示出尾矿砂堆积和地下水共同形成的附加应力作用对尾矿库岩溶渗漏的影响机制。但以上都未对水库岩溶多次塌陷诱发机制进行深入研究。本文以滇东典型岩溶病害水库罗平湾子水库为研究对象, 在总结前期勘察、补漏经验教训的基础上, 分析讨论该水库多次补漏未遂的塌陷渗漏机理: 库底土工布铺盖等封闭处理后, 在土工膜之下、地下水位之上的岩溶空隙中形成真空、负压; 随着雨季蓄水后库水位上升, 形成蓄水压力。库底之上的蓄水压力与库底之下的负压叠加形成附加应力, 当附加应力大于孔、洞之上岩土体的抗剪强度, 或大于孔、洞充填物与洞壁之间的粘结强度时, 便产生冲切破坏, 继而形成岩溶塌陷、导致水库渗漏。又结合水文地质特征和岩溶发育规律进一步说明了

第一作者简介: 段乔文(1967—), 男, 正高级工程师, 主要研究方向: 水文地质及环境地质。E-mail: 787579281@qq.com。

收稿日期: 2021-03-28

库区内补漏的局限性和不彻底性,提出库区外适当部位设置防渗帷幕的解决方案,这不仅可根治渗漏,还可明显改善蓄水条件,扩大原有库容,此补漏设想具有创新性。

1 研究区概况

1.1 水库概况

湾子水库位于云南省罗平县城南西约 13 km 的罗平盆地边缘湾子村,珠江水系南盘江流域多依河支流上游大干河上,为滇东典型岩溶病害水库。其坝址高程为 1 518.0 m,高于罗平盆地(坝子)30~50 m,控制流域面积 104 km²,控制多年平均径流量 8 843 × 10⁴ m³。湾子水库于 1959 年建成,设计坝高 23.5 m,设计正常蓄水位 1 540.36 m,设计正常库容 1 046 × 10⁴ m³,总库容 1 240 × 10⁴ m³,设计灌溉面积 2 133 × 10⁴ m²,防洪面积 1 333 × 10⁴ m²;建库施工时曾经填补落洞 63 个,蓄水在 1 530 m 时渗漏量高达 0.8 m³·s⁻¹,建库多年来一致带病运行;1986 年至 1995 年曾连续四次补漏,中水位时漏水量仍达 0.5 m³·s⁻¹ 以上^[14],治漏效果仍不甚理想,下游有近 13 333 × 10⁴ m² 农田,未能充分发挥应有的灌溉效益,主要起防洪作用,现仅承担着罗平县罗雄街道办、大水井乡、鲁布革布依族苗族乡 3 个乡镇(街道办)3.38 万人的饮水供给,年供水量为 141.7 × 10⁴ m³,日供水量为 3 882.19 m³。

1.2 地形地貌

湾子水库处于滇东构造侵蚀溶蚀高中山,南盘江一级支流多依河、五洛河与九龙河分水岭地带的多依河上游。库区流域内最高点大白腊山海拔高程为 2 467.0 m,与北部九龙河及东北部罗平盆地相对高差约 1 000 m,与南部五洛河相对高差约 500 m;坝址高程(大干河河床)为 1 518.0 m,坝址与大白腊山相对高差 949 m;坝址以上库区两岸的侵蚀溶蚀峰丛、垅岗及坡地高程为 1 600 ~ 2 200 m,坝址与上游地表分水岭相对高差约 500 m,河流长约 16.5 km,流域内大干河平均纵坡降 1%,岸坡坡度多在 25°~35°。

1.3 地层岩性

湾子水库流域及附近区域,主要出露地层为三叠系下统洗马塘组(T_{1x})、永宁镇组(T_{1y}),中统个旧组(T_{2g})和法郎组(T_{2f}),其次为古近系路美邑组(E_{2L})。其中的 T_{1y}^a、T_{2g}^a、T_{2g}^c、T_{2g}^d 和 T_{2f}^a 为纯碳酸盐岩含

水层组,也为强透水层;T_{2g}^b 为非纯碳酸盐岩地层,即包括纯碳酸盐岩的互层或夹层,为中等透水性的含水层组;T_{1x}、T_{1y}^b、T_{2f}^b 和 E_{2L} 为碎屑岩隔水层。各地层分布情况见图 1^[14-16]。地层的展布受控于地质构造,走向以北东向为主,部分呈南东向和近南北向。

1.4 地质构造

湾子水库区域构造形迹以北东向为主,与库区渗漏有关的断裂主要表现为南东向至近南北向(图 2),主干断裂为湾子一大龙潭断裂组,由三条大致平行的断裂自南向北穿过库区,性质为张扭性,倾角 70°~85°,延伸长达 20 km 以上,平面上呈舒缓波状,垂直断距 20~320 m;除主干断裂外,库区内外尚发育多条与之斜交的次级断裂,性质具有压性、压扭性和张扭性等多种。在主干断裂两侧,有序的排列着个旧组(T_{2g})各段,核部则出露(T_{1x}和 T_{1y})地层,形成一个基本完整的背斜构造,西翼岩层主要倾向南西,倾角约 20°;东翼岩层倾向北东,倾角为 45°~60°。

在断裂、褶皱形成的同时,岩体中尚发育了不同规模和序次的次级微观构造节理,发育达五组之多,这些断层和节理与原生层面一起,共同控制了区内地表和地下岩溶发育,以及地表水和地下水的补给、径流和排泄条件^[14]。

1.5 水文地质条件

湾子水库流域面积为 104 km²,库水以大气降雨形成的地表径流补给为主,其次为河头起、以且、腊古等地的泉水补给^[14];岩溶含水层中的地下水主要沿着溶蚀裂隙、孔洞或岩溶管道径流,碎屑岩中的地下水则主要赋存、径流于风化裂隙和构造节理中。库区范围内 F₂ 以西所有泉点的出露位置和钻孔水位标高均高于 1 520 m,部分泉水位甚至高达 1 750~1 900 m,说明 F₂ 以西大干河左岸的地表水和地下水,受库底一带的 T_{1y}^{a-2} 砂泥岩阻隔,向大干河汇聚、排泄,大干河为左岸地表水和地下水排泄基准;F₂ 以东大干河床及右岸岸坡不但没有泉点出露,还发育较多串珠状落水洞,钻孔水位相差悬殊,有高达 1 590 m 者,也有低至 1 479 m 者,普遍低于 1 500 m,并随着相对透水岩层或构造的分布,地下水位呈现出 2 个明显的低槽区(图 2,图 3),如火莫村和小渡槽水位低槽区等^[14,17-18]。库区(大干河)仅为地表水排泄区,为河水补给地下水,地下水存在循顺层裂隙和断层甚至岩溶管道向其南部 15 km 外的五洛河暗河渗漏排泄的途径。

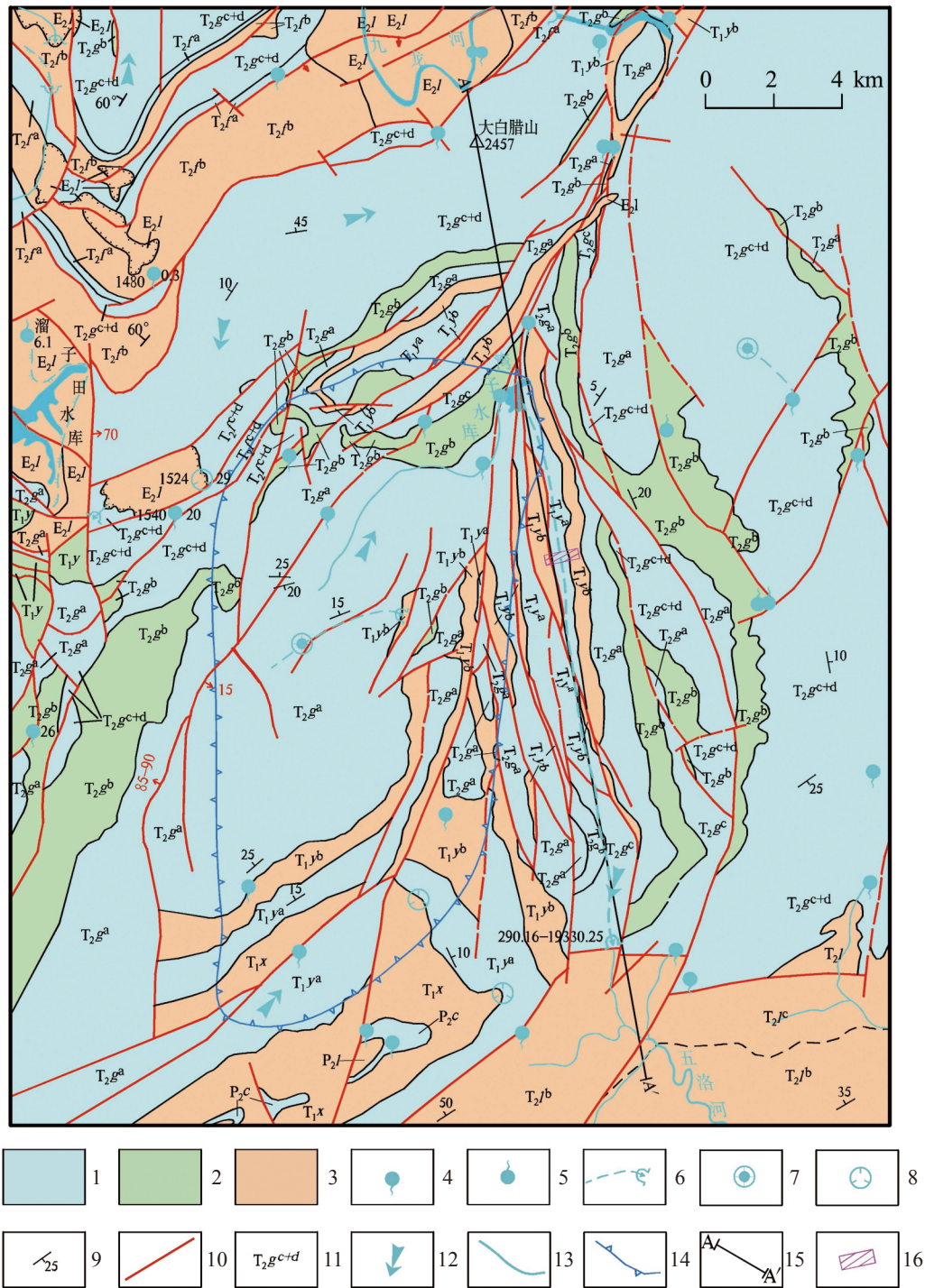


图 1 湾子水库区域水文地质图

1-碳酸盐岩含水层 2-碳酸盐岩夹(或互)非碳酸盐岩含水层 3-隔水层 4-下降泉 5-上升泉 6-暗河 7-天窗 8-溶洞 9-岩层产状 10-断层 11-地层代号 12-地下水流向 13-地表河流 14-地表分水岭 15-剖面线

Fig. 1 Hydrogeological map of Wanzi reservoir area

2 岩溶渗漏

2.1 岩溶发育情况

水库位于滇东典型岩溶区,地表溶蚀沟槽、溶洞、落水洞等岩溶形态均比较发育,建库时已填补落水

洞 63 个^[15],后期补漏先后填补落水洞 146 个^[17]。多次勘察和补漏资料表明,库区落水口呈两种类型:一是主要沿着断裂和溶蚀裂隙发育,地表可见很多小溶洞,直径在 0.1~0.2 m,地表以下 10 m 左右则少见明显溶洞,溶隙宽度一般在 0.1 m 以内;二是沿着 F₁、

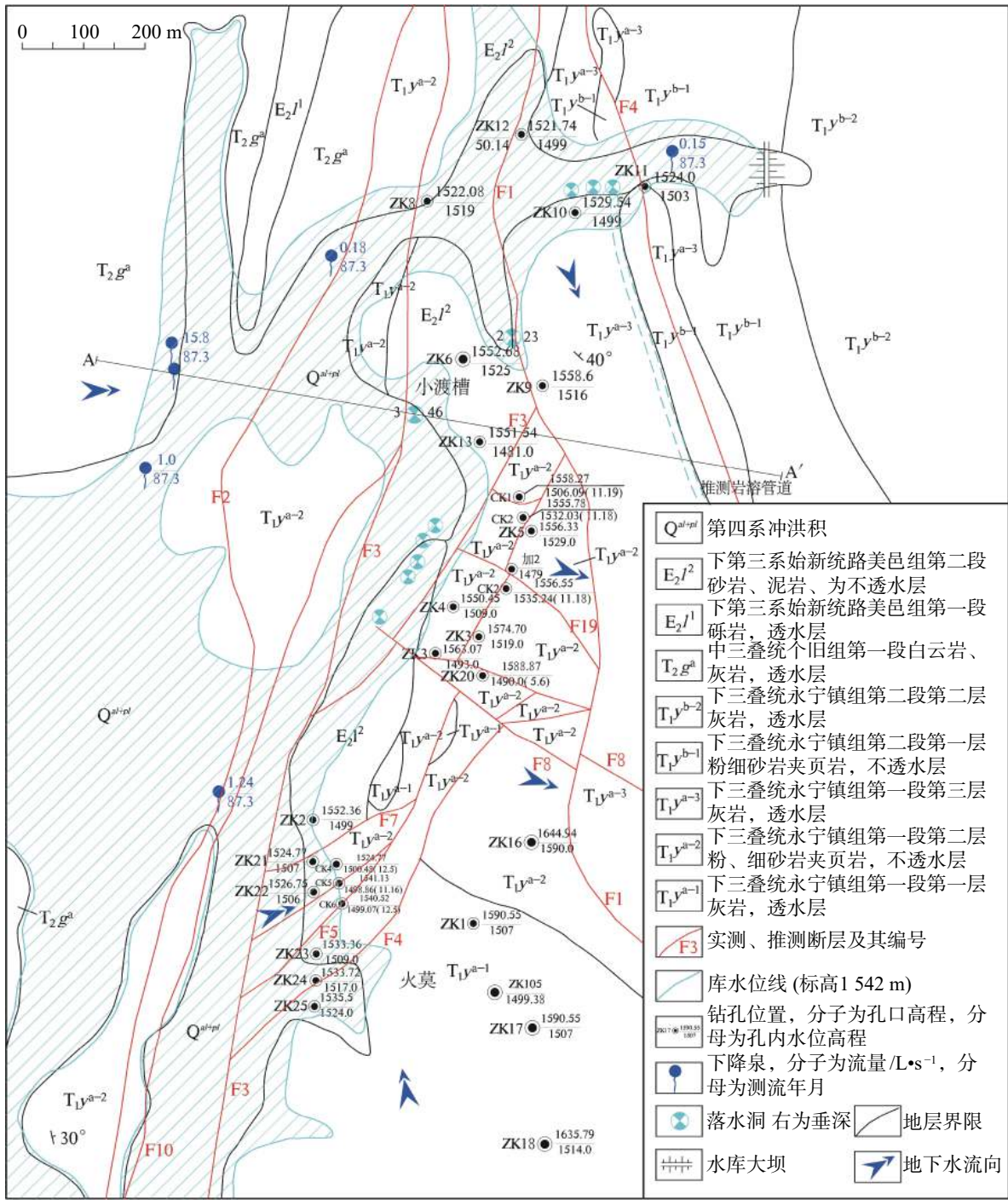


图 2 湾子水库主要渗漏区小渡槽—火莫渗漏带水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of Xiaoducao-Huomuo seepage zone in the main seepage area of Wanzi reservoir

F₃、F₄ 断裂带发育, 尤其是断裂带交汇处、断裂带附近可溶岩与非可溶岩接触带岩溶发育更甚, 主要表现为不规则的溶洞。例如, F₁ 断裂带上的 2 号落水洞和 F₁₀ 与 F₃ 交汇处发育的 3 号落水洞, 直径约 2 m, 可进深度分别为 23 m 和 46 m; 坝前(上游)320 m 以内, F₄ 断裂带附近, 发育多处溶洞, 直径多在 1 m 以上, 漏水量占库区总漏水量的 70%^[17] 以上, 成为库水

顺层流向库外的主要通道。依据补漏时直接观察到的岩溶形态和钻孔编录资料^[17-20], 按照岩溶发育强度垂直分带方法^[5]、地下水径流系统垂向分带标志^[6] 以及岩土渗透性分级^[20], 把库区岩溶发育垂向分带如表 1。

以上分带结果表明: 火莫村北西库区一带, 岩溶主要发育段分布在高程 1 516~1 530 m(相当于原始

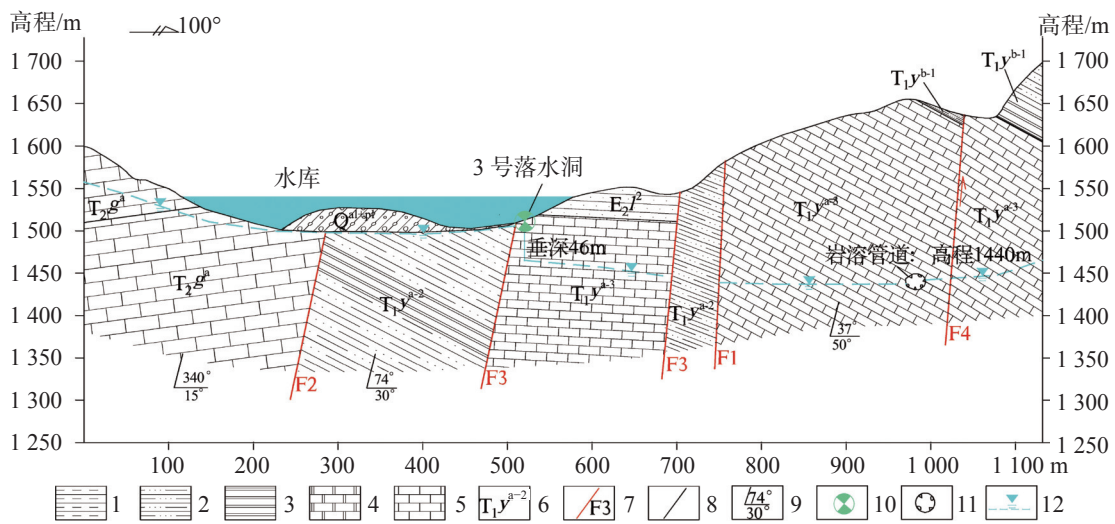


图 3 库区两岸水位差异剖面图

1-泥岩 2-泥质粉砂岩 3-页岩 4-白云岩 5-灰岩 6-地层代号 7-断层及编号 8-地层界线 9-地层产状 10-落水洞 11-岩溶管道 12-地下水位线

Fig. 3 Sectional diagram of water level difference on both sides of reservoir

表 1 库区岩溶垂向发育分带指标一览表

Table 1 Indexes of vertical karst development belts

岩溶发育强度	定量指标		定性指标		
	溶洞规模/m	钻孔单位吸水率/Lu	岩组特征	地质构造	地下水运动
强烈	≥1	≥100	纯碳酸盐岩各类风化带, 与非碳酸盐岩接触带	断裂破碎带, 节理裂隙发育	垂向径流带、季节波动带及水平循环带上部
中等	0.2~1	10~100	非纯碳酸盐岩、纯碳酸盐岩强风化带	断裂影响带, 节理较发育	水平循环带下部
微弱	≤0.2	≤10	非纯碳酸盐岩、纯碳酸盐岩中风化带以下	断裂影响有限, 节理不发育	深部循环带

河床附近)及 1485~1505 m(相当于原始河床以下, 人可进入落水洞), CK2 在高程 1489.51 m 处, 透水性仍然高达 21762.3 Lu, 岩体透水性达到中等的高程在 1460~1480 m 之间。小渡槽至坝前 F₄ 一带, 岩溶发育成 3 层溶洞, 分布高程分别为 1518 m(河床)、1508~1515 m、1493~1498 m, 3 号落水洞人可进深度 46 m, 岩溶强烈发育带位于 1475 m 之上, 钻孔控制的岩溶中等发育带高程在 1460~1470 m。由于岩溶发育的复杂性和不均一性, 结合区域岩溶发育规律^[17-19], 库区一带弱岩溶发育带顶部(深部循环带)推测在库底以下 80~100 m, 高程为 1420~1440 m。

2.2 水库渗漏类型

水库渗漏分为坝基渗漏、坝肩绕坝渗漏、库区向下游渗漏和库区侧向低邻谷渗漏四种^[2]。湾子水库坝址位于 T₁y^b 砂泥岩中, 坝基渗漏和绕坝渗漏可以不考虑, 也没有发现明显的贯穿库区和坝址下游之间的断层或其他导水通道, 向下游渗漏可不考虑, 则

湾子水库渗漏类型为右岸侧向低邻谷渗漏。

结合库区内外的水文地质条件分析可知, F₂ 以东大干河右岸, 无论是从微—弱透水层的顶界高程还是从水位高程上看, 均低于设计蓄水位 1540.36 m, 且有低于大干河约 500 m 的侧向低邻谷, 具备侧向渗漏的水位条件和渗透条件。由于受 T₁y^b 或 T₂g^b 相对隔水层的挟持, 所渗漏的库水最后均集中向 T₁y^a 可溶岩中发育的顺层管道汇集, 穿过库区右岸地表分水岭向东南部低邻谷五洛河江龙大龙潭(暗河)集中排泄。物探资料显示^[17], T₁y^a 灰岩中渗漏带宽 500~700 m, 强渗漏带宽度不超过 200 m, 岩溶集中发育带宽 50~80 m, 岩溶管道宽度小于 30 m, 厚(高)约 5 m。为查明库区漏水与五洛河大龙潭之间的关系, 1987 年枯季于库底右侧 3 号落水洞, 投入荧光素示踪剂, 经过 19 个昼夜在五洛河大龙潭排出^[17], 3 号落水洞与五洛河大龙潭(暗河)之间平距约 15000 m, 高差约 500 m, 水力坡度为 30.6%, 渗透速度为

894.74 m·d⁻¹。

2.3 补漏工程实践总结

湾子水库自1986年勘察,1990-1992、1993、1994、1995年连续四次补漏,共采取了铺、灌、封堵等多种方法,补漏面积约占下库区面积的11%,其中灌浆钻孔进尺8 022.7 m,填堵落水洞、塌陷坑146个,使用土工合成材料560 000 m²,铺盖面积174 458 m²,开挖回填土193 418.04 m³,开炸石方5 630.37 m³,回填反滤料117 736.4 m³[17]。

(1)铺 铺盖材料选用国产的合格防渗土工材料,土工织物规格有150、200和270 g·m⁻²三种,对应渗透系数均为 $2 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,聚乙烯膜厚0.12~0.18 mm,断裂延长率330%~360%,0.8 MPa压力下不渗水,涂塑料玻璃丝布(890~1 390 g·m⁻²),断裂延长率3%~5%,采取一布一膜进行铺盖,再根据所处具体位置的不同采用黏性土、干砌石、浆砌石等作保护层,有厂家派人现场指导铺设,验收合格。

(2)灌 帷幕灌浆,主要针对溶蚀裂隙发育带进行。帷幕深度下限高程为1475 m,灌浆材料以水泥:黏土(1:1)为主要灌浆材料,大漏段加砂和水玻璃。灌浆压力为孔口压力(土层为0.05~0.1 MPa,岩石为0.25 MPa)。灌浆后经过检查,大部分地段连续三段单位吸水率小于5 Lu,但仍有个别地段,在连续三段单位吸水率小于5 Lu以下,有5 m的漏水段,单位吸水率大于100 Lu,达到岩溶发育强烈级别,这既说明岩溶发育的不均匀性,也说明勘察时对岩溶发育分带的认识不足。

(3)封堵 针对集中漏水的落水洞进行,主要采取机械灌浆,部分采用人工自流灌浆处理,对部分可进深度较大的落水洞结合浆砌石进行封堵,并在洞口和洞内浇筑150~200号混凝土塞子。洞中一般用纯1:1纯水泥浆,然后逐级变浓为0.8:1、0.6:1、0.5:1,对于吃浆量较大的,则加细砂灌注,甚至加部分水玻璃。灌浆以洞口返浆,压力升至0.2~0.8 MPa为合格。

水库蓄水量1998-2000年4月底为826万~857万 m³,2001年以后4月底蓄水量则减为661万 m³,2008年4月底蓄水量仅为498.17万 m³,并有逐年减少的趋势,2011、2012年5月底蓄水量仅为152.61万 m³、123.00万 m³ [18],从1998-2013年每年均有落水洞发生。

综合分析已实施过的补漏方法,铺盖和帷幕灌浆的用料、基本工法和可靠性本身均没有问题;单个溶洞的封堵处理方面,在工法上可能存在堵漏材料与周围岩石的衔接方面粘结强度不够,灌浆压力过低,其他方面问题也不大。前三次补漏后显示“铺盖区以外很少再出现落水洞,但在铺盖区内年年都要出落水洞,并且几年出现的落水洞大部分都是在那一片,或者沿断层线出现,或者在原有位置出现,或者在那一条带出现”。结合图2显示,小渡槽南部测得的最低水位为1 479 m,以及2号、3号落水洞垂直可进深度为23~46 m分析,库区溶洞、溶蚀裂隙较为发育且极不均一,这表明:库区水文地质条件复杂,勘察工作量不足,综合分析不够深入,对岩溶发育的不均匀性、多层性、垂直分带性和岩溶发育的方向性判定存在一定误差;对岩溶发育区蓄水后反复塌陷机理认识不足,导致帷幕灌浆深度不够,落水洞堵漏灌浆压力过低,例如,正常库容20 m深水头产生的正压力与库底以下至地下水位以上(垂直渗漏带—季节波动带)50~70 m真空形成的负压之和,此二者压力水头可高达0.7~0.9 MPa,远大于灌浆压力;对库区内补漏的局限性和不彻底性认识不到位。针对点状集中渗漏的落水洞、溶蚀裂隙发育的极不均匀性而采取适用于相对均匀受力的土工布“局部满铺”措施,也存在适用性差的问题。客观地说,比起省内的岩溶盲谷堵漏建库的五里冲水库[21-22],堵塞升高暗河水位利用的文山白石岩暗河、鱼塘暗河等成功案例[23],湾子水库补漏至今,不能算是成功之作。

2.4 塌陷机理

从渗漏位置和破坏形式看,渗漏反复发生于多次补漏时确定的大致位置,或为新产生塌陷,或为新贯通裂隙;土工布的破坏则先以小孔击穿,后成洞陷落。岩溶塌陷形成需具备岩溶空间、一定厚度的盖层和触发因素三个基本条件[10],渗漏机理主要体现在以下几方面[11-12,24-27]。

(1)断裂构造带、可溶岩与非可溶岩接触带发育的溶蚀裂隙、溶洞等提供了岩溶空间。

(2)溶洞上方的碳酸盐岩和松散层顶板、甚至新填堵的浆砌石、混凝土等材料也可构成新的顶板。

(3)库区右岸地下水位年变幅可达到50 m以上,频繁、大幅度的水位波动,导致库底堆积的自然土体

和人工填土被软化、潜蚀及冲刷,形成空洞,为真空的形成创造了条件。真空形成后进一步产生潜蚀—吸蚀作用,降低土体的抗剪强度。

(4)在渗流、水压力增减等季节性反复作用下,支撑土体和新填塞的混凝土产生蠕动变形,也会造成堵体松动、防渗层拉裂破坏。

(5)铺盖时落水洞或裂隙被封闭,封闭后便在库底与地下水位之间形成真空,随着地下水位的下降负压逐渐增大,产生负压吸蚀作用;随着库水位升高,蓄水压力逐渐增大。封闭溶洞中的负压和蓄水压力相对于溶洞上面的盖层而言均为附加应力,当此附加应力大于覆盖层的抗剪强度或封堵材料与溶洞边壁的粘结强度或侧向摩擦力时,则塌陷的产生便不可避免,破坏模式主要为冲切破坏。以真空吸蚀和蓄水作用形成的附加应力为主要触发因素。

岩溶发育区蓄水后塌陷反复发生,其破坏机理复杂,破坏模式主要受溶洞大小、溶洞顶板及盖层厚

度及强度、溶洞充填物、蓄水位变幅及作用位置和地下水位变幅等多种因素影响。现以图4的力学模型阐述产生塌陷的破坏模式和机理,数学表达式可以表示为式(1)^[11-12]。

$$K = \frac{f}{|P \pm G|} = \frac{\int_0^D r(K_0 \rho g z \tan \varphi + c) dz}{\left| \int_r \rho' g \Delta H r dr \pm \int_r \rho g D r dr + \int_r \rho_w g h r dr \right|} \quad (1)$$

式中: f 为土体的侧向摩擦力(N); P 为洞内气体压力(N); G 为盖层及蓄水压力(N); D 为覆盖层厚度(m); r 为溶洞半径(m); K_0 为土的侧向压力系数(无量纲); ρ 为盖层岩土密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); z 为盖层微小单元柱深度(m); φ 为盖层岩土的内摩擦角($^\circ$); c 为盖层岩土的内聚力(Kpa); ρ' 为气体的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ΔH 为地下水位变幅(m); g 为重力加速度($9.8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ_w 为水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); h 为蓄水深度(m)。

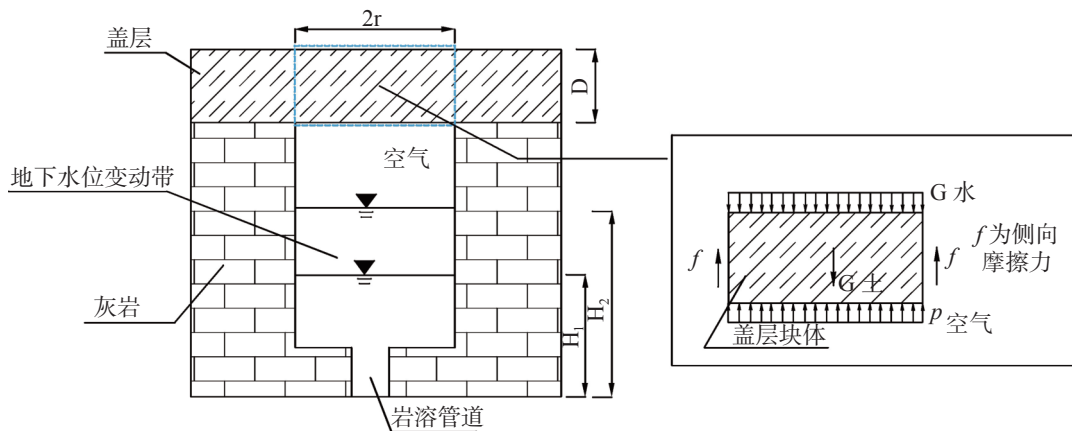


图4 库区岩溶塌陷机理力学分析模型图

Fig. 4 Mechanical analysis model diagram of karst collapse mechanism in reservoir area

当 $K > 1$,盖层稳定;当 $K = 1$,盖层稳定性达到临界状态;而当 $K < 1$,塌陷发生。

3 根治渗漏、扩大库容的初步设想

如前所述,库区内治漏带有很大的局限性和不彻底性。库区及区域地质环境条件表明,库区左岸及右岸 F_2 以西,即使库水位上升60 m,达1600 m左右,水动力条件仍然不会发生根本性变化,地表水和地下水仍然向库区排泄,水位完全能满足扩容蓄水要求。右岸或 F_2 以东存在侧向低邻谷渗漏,尽管库

区内存在相对独立的多条渗漏带,但在库区外各渗漏带均汇流于受 T_1y^b 碎屑岩挟持中的 T_1y^a 可溶岩顺层发育的岩溶管道中,集中后可能的渗漏带宽500~700 m,严重渗漏带宽度推测不超过200 m。由于库区内补漏点多、面广工程量巨大,可在现坝址以南约5 km的深沟村附近(图5)截流,采取高压帷幕灌浆后形成地下帷幕,帷幕深度约200 m,长约800 m,地下水位可抬升至1600 m左右,则库区右岸所有渗漏带的渗漏可望在此一并得到根治。若蓄水位升至1600 m时,蓄水量估算可达 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,相当于在满足原湾子水库库容的同时,再建3个中型

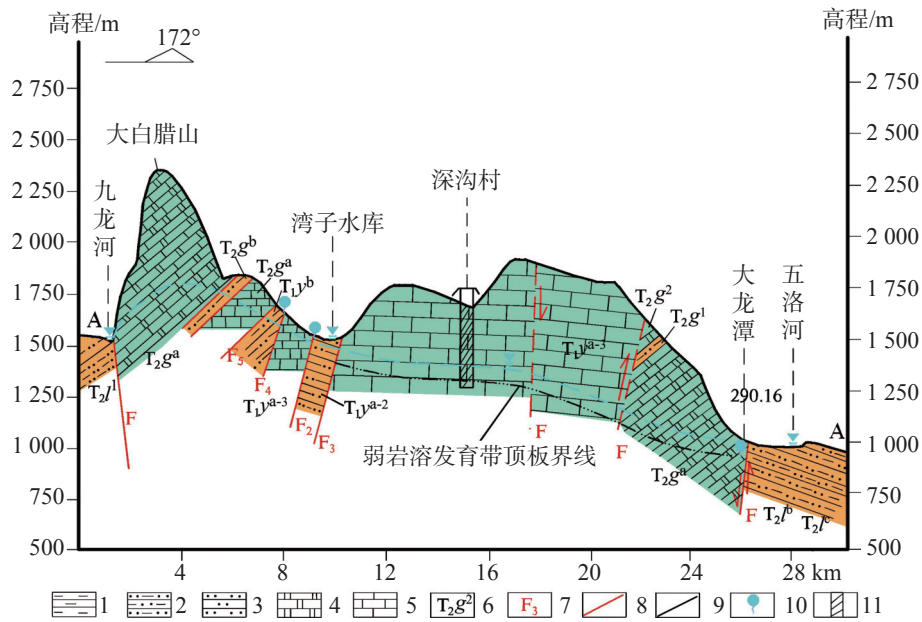


图5 侧向低邻谷渗漏及补漏设想工程布置剖面图

1-泥岩 2-泥质粉砂岩 3-粉细砂岩 4-白云岩 5-灰岩 6-地层代号 7-断层及编号 8-断层线 9-地层界线 10-下降泉(枯季流量 $L \cdot s^{-1}$) 11-拟防渗帷幕

Fig. 5 Section diagram of lateral low adjacent valley leakage and leakage filling project layout

水库。只要认真作好勘察工作^[20-22, 28-35], 堵漏方法和工艺均比较成熟。

4 结论

(1)湾子水库受岩性、断裂构造作用控制的溶蚀裂隙、孔、洞发育;库底 F_2 断裂以西(左岸)地下水补给库水,以东(右岸)库水补给地下水,库水侧向渗漏出库区外低邻谷;

(2)长期的蓄水位和地下水位波动导致地下水潜蚀、淘空、吸蚀作用加剧,岩石和裂隙渗透性增强,为地下真空的形成创造了基本条件;

(3)蓄水压力和库底与地下水位之间产生的负压叠加组成的附加应力大于溶洞上方岩土体抗剪强度或落水洞(溶洞)充填物与洞壁之间的粘结强度时便发生冲切破坏。未充分考虑负压和岩溶发育下限深度是库区多次补漏未遂并重复出现在特定范围的根本原因,也是湾子水库岩溶渗漏的主要机理;

(4)库区内补漏具有很大的局限性和不彻底性,库区外寻求碎屑岩挟持中的可溶岩顺层发育的岩溶管道带是补漏的最佳位置,库区外帷幕灌浆堵漏除能根治湾子水库历年渗漏痼疾外,还可扩大原设计库容3倍以上。

参考文献

- [1] 王宇,张贵.滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J].地球科学进展,2003,18(6):933-938.
WANG Yu, ZHANG Gui. On the desertification and genesis of karst stone mountain area in east Yunnan[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(6): 933-938.
- [2] 赵瑞,许模.水库岩溶渗漏及防渗研究综述[J].地下水,2011,33(2):20-22.
ZHAO Rui, XU Mo. Summary on reservoir karst seepage and anti-seepage research[J]. *Groundwater*, 2011, 33(2): 20-22.
- [3] 邹成杰.水库岩溶渗漏地质模型和数学模型的初步研究[J].中国岩溶,1990,9(3):231-240.
ZOU Chengjie. A preliminary study on geological model and mathematical model of reservoir leakage in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(3): 231-240.
- [4] 莫跃支译.岩溶发育的垂直分带性[J].水文地质工程地质译丛,1991(6):30-35.
MO Yuezhi (translator). Vertical zoning of karst development[J]. *Hydrogeology&Engineering Geology*, 1991(6): 30-35.
- [5] 熊道锐,傅荣华.岩溶发育强度垂直分带方法[J].岩土工程技术,2005,19(3):113-117,122.
XIONG Daokun, FU Ronghua. Vertical zonation method for intensity of karst development[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(3): 113-117,122.
- [6] 王宇.岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J].中国岩溶,2018,37(1):1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.

- [7] 蒋海飞,刘东燕,黄伟,夏毓超,刘芳语.高围压下不同孔隙水压作用时岩石蠕变特性及改进西原模型[J].*岩土工程学报*, 2014, 36(3): 443-451.
JIANG Haifei, LIU Dongyan, HUANG Wei, XIA Yuchao, LIU Fangyu. Creep properties of rock under high confining pressure and different pore water pressures and a modified Nishihara model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 443-451.
- [8] 郭富利,张顶立,苏洁,肖丛苗.地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2007, 26(11): 2324-2332.
GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, XIAO Congmiao. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(11): 2324-2332.
- [9] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].*煤炭学报*, 1986(2): 1-11.
XU Weiguo, ZHAO Guirong. On mechanism of karst collapse[J]. *Journal of China Coal Society*, 1986(2): 1-11.
- [10] 康彦仁.论岩溶塌陷形成的致塌模式[J].*水文地质工程地质*, 1992, 19(4): 32-34,46.
KANG Yanren. Collapse-causing models in karstic collapse process[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992, 19(4): 32-34,46.
- [11] 肖先焯.覆盖型岩溶区水气相互驱动盖层变形演化及塌陷机理研究[D].成都:成都理工大学, 2018.
XIAO Xianxuan. Deformation behavior evolution and collapse mechanism of karst covers under water-air interaction in karst area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [12] 贾连杰.尼山水库岩溶塌陷机理研究[D].青岛:中国海洋大学, 2006.
JIA Lianjie. Study on karst collapse mechanism in the Nishan reservoir area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [13] 程峰,苏夏征,周洁军,郭尚其.岩溶区尾矿库渗漏机理与综合防治技术:以环江北山铅锌矿尾矿库为例[J].*中国岩溶*, 2017, 36(2): 242-247.
CHENG Feng, SU Xiazheng, ZHOU Jiejun, GUO Shangqi. Leakage mechanism and comprehensive prevention control technology of tailing pond in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 242-247.
- [14] 张明远,段乔文.罗平县湾子水库小渡槽、火莫村岩溶渗漏带补充勘察报告[R].云南地质工程勘察设计院, 2003.
ZHANG Mingyuan, DUAN Qiaowen. Supplementary investigation report on karst leakage zone of Xiaoducao and Huomo village of Wanzi reservoir in Luoping county[R]. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute, 2003.
- [15] 朱培秋,杨金山,王玉龙,石希三,陶钦行,廖忠福,魏家侗,李建元,白声贵.区域水文地质普查报告罗平幅[R].云南省地质局水文地质工程地质大队, 1979.
ZHU Peiqiu, YANG Jinshan, WANG Yulong, SHI Xisan, TAO Qinxing, LIAO Zhongfu, WEI Jiati, LI Jianyuan, BAI Shenggui. Regional hydrogeological survey report (Luoping map sheet)[R]. Hydrogeology Engineering Geology Brigade of Yunnan Geological Bureau, 1979.
- [16] 李盛瑜,端德埠,尹青,刘清州,张寿怡,沈廷义,李运寿,周世忠,王理帮,刘帮等,孙光玉.区域水文地质普查报告邱北幅[R].云南省地质局水文工程地质公司, 1981.
LI Shengyu, DUAN Debu, YIN Qing, LIU Qingzhou, ZHANG Shouyi, SHEN Tingyi, LI Yunshou, ZHOU Shizhong, WANG Libang, LIU Bangdeng, SUN Guangyu. Regional hydrogeological survey report (Qiubei map sheet)[R]. Hydrogeological Engineering Geology Company of Yunnan Geological Bureau, 1981.
- [17] 杜联凡,杨祖扩.云南省罗平县湾子水库补漏加固配套工程竣工技术总结[R].罗平县湾子水库工程指挥部, 1996.
DU Lianfan, YANG Zukuo. Technical summary on completion of leakage repair and reinforcement supporting project of Wanzi reservoir in Luoping county, Yunnan Province[R]. Headquarters of Wanzi reservoir project in Luoping county, 1996.
- [18] 赵勇.滇东山区水库岩溶渗漏系统工程地质研究[D].成都:成都理工大学, 2015.
ZHAO Yong. Systematic engineering geological research of reservoir leakage in karst in mountain plateau of Eastern Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [19] 尹青,段乔文,姚明波,王懋贤,李金孟,和书琼,聂可武,代启.南昆铁路(云南境内)沿线经济开发区水文地质工程地质环境地质综合勘察报告[R].云南地质工程第三勘察院, 1995.
YIN Qing, DUAN Qiaowen, YAO Mingbo, WANG Maoxian, LI Jimeng, HE Shuqiong, NIE Kewu, DAI Qi. Comprehensive survey report on hydrogeology, engineering geology and environmental geology of economic development zones along Nanning-Kunming railway (within Yunnan) [R]. The Third Survey Institute of Yunnan Geological Engineering, 1995.
- [20] 中华人民共和国水利部.中小型水利水电工程地质勘察规范(SL55—2005)[S].北京:中国水利水电出版社, 2005.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification of engineering geological investigation for medium-small water conservancy and hydropower development (SL55—2005)[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [21] 康彦仁.岩溶地区建库的先例 溶洞工程处理的典范:介绍五里冲水库工程及其特征[J].*中国岩溶*, 1997, 16(2): 186-188.
KANG Yanren. Precedent of reservoir construction in karst area Example of karst cave engineering treatment: an introduction to Wulichong reservoir project and its characteristics[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(2): 186-188.
- [22] 张邦仞,康彦仁.高压灌浆技术在云南五里冲水库的应用[J].*中国岩溶*, 2002, 21(3): 212-220.
ZHANG Bangren, KANG Yanren. Application of high-pressure grouting technique in Wulichong reservoir in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(3): 212-220.
- [23] 王宇,张贵,段乔文,李继红,戴文敏.云南省严重缺水地区地下水勘查示范工程实例[C].严重缺水地区地下水勘查论文集,中国地质调查局, 2003.

- WANG Yu, ZHANG Gui, DUAN Qiaowen, LI Jihong, DAI Wenmin. Example of groundwater exploration demonstration project in severe water shortage area of Yunnan Province [C]. Collection of papers on groundwater exploration in severe water shortage areas, China Geological Survey, 2003.
- [24] 杨立中, 王建秀. 国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(S1): 6-10.
- YANG Lizhong, WANG Jianxiu. Karst collapse study's development abroad and domestic present studying situation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(S1): 6-10.
- [25] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.
- MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411-417.
- [26] 孙映霞, 张智浩, 王金安. 岩溶区桩基破坏模式研究及稳定性分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(9): 96-102.
- SUN Yingxia, ZHANG Zhihao, WANG Jin'an. Failure pattern study and stability analysis of pile foundation in karst area[J]. Industrial Construction, 2012, 42(9): 96-102.
- [27] 赵明华, 雷勇, 张锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 524-530.
- ZHAO Minghua, LEI Yong, ZHANG Rui. Study of punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 524-530.
- [28] 王宇. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 823-830.
- WANG Yu. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 823-830.
- [29] 周洪文, 邹成杰. 马畔塘水库岩溶渗漏研究[J]. 中国岩溶, 1996, 15(4): 325-334.
- ZHOU Hongwen, ZOU Chengjie. Study on karst leakage of Mapantang reservoir[J]. Carsologica Sinica, 1996, 15(4): 325-334.
- [30] 田茂中, 叶明. 毛家河电站库区岩溶发育特征及邻谷渗漏分析[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(6): 18-23.
- TIAN Maozhong, YE Ming. Analysis on karst developing feature & seepage of neighbor valley in reservoir area of Maojiahe hydropower station[J]. Guizhou Water Power, 2006, 20(6): 18-23.
- [31] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1994.
- ZOU Chengjie. Karst engineering geology of water conservancy and hydropower [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1994.
- [32] 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.
- [33] 邹成杰. 国内外岩溶地区水库坝址防渗帷幕设计中工程地质问题的综述与分析[J]. 水利水电技术, 1987(1): 31-39, 57.
- ZOU Chengjie. Summary and analysis of engineering geological problems in seepage control curtain design of reservoir dam sites in karst areas at home and abroad[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987(1): 31-39, 57.
- [34] 杨欣祥, 罗鲁生. 乌江渡水电站岩溶坝基的高压帷幕灌浆[J]. 水力发电, 1983(3): 49-55, 10.
- YANG Xinxiang, LUO Lusheng. High pressure curtain grouting for karst dam foundation of Wujiangdu hydropower station[J]. Water Power, 1983(3): 49-55, 10.
- [35] 杨忠兴. 岩溶地区复杂地质条件下的堵漏防渗施工技术[J]. 四川水力发电, 2013, 32(2): 20-25.
- YANG Zhongxing. Construction technology of plugging and seepage prevention under complex geological conditions in karst area[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(2): 20-25.

Karst leakage and its sealing at Wanzi reservoir in Luoping county on the plateau of eastern Yunnan

DUAN Qiaowen, YU Fuyou, ZHANG Tianbai, HE Wei, DUAN Chunlin

(Honghe Branch of Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute Limited Company, Kaiyuan, Yunnan 661600, China)

Abstract Built on the Dagan river—a three-tier tributary of the Nanpan river from the Zhujiang river system, Wanzi reservoir is located at Wanzi village on the edge of Luoping basin 13 km from the southwest of Luoping county of Yunnan Province. It is a typically karst-damaged reservoir in eastern Yunnan, with its lateral leakage toward lower adjacent valley. The landform of this reservoir belongs to erosion-corrosion alpin and medium-height mountains of eastern Yunnan structure. The control drainage area of Wanzi reservoir is 104 km² with the average runoff of 8,843×10⁴ m³. This medium-sized reservoir covers a designed irrigation area of 2,133×10⁴ m² with its designed height of 23.5 m and normal capacity of 1,046×10⁴ m³. It has experienced four times of leakage sealing since its construction in 1959, but the leakage reaches more than 0.5 m³·s⁻¹ at medium water level with water supply of only 141.7×10⁴ m³.

In order to provide the theoretical foundation for further successful sealing and even the expanding of reservoir capacity, we investigate the main causes of the failure of leakage sealing. Meanwhile, we also profoundly analyze the

factors of leakage according to the previous studies as well as the data about Wanzi reservoir such as stratum lithology, geological structure, geological conditions of hydrogeological engineering, characteristics of karst development, conditions of flow concentration, the failure of sealing, etc. Results show that because the study area is located on the strong karst development zone controlled by stratum lithology and structure, the vacuum suction erosion and the groundwater erosion caused by frequent and substantial water-level fluctuation result in corrosion fissures and the scouring of holes. The additional stress, composed of the water storage pressure and the negative pressure caused by the vacuum due to the coverage and enclosure of reservoir bottom, is larger than the shear strength, or larger than the strength bonding karst cave fillings and cave walls. Consequently, there exist failures of leakage sealing, sinkholes and the repeated karst collapse in the same leakage area, all of which are the main causes of leakage.

In spite of several relatively separate leakage belts inside the reservoir area, all the leakage belts outside converge into the karst pipelines on both sides of the reservoir. These karst pipelines characterized by bedded development are narrow due to the holdup of clastic rocks. The leakage sealing spots scattering over a large area bringing huge engineering work and the failure of leakage protection. However, the water-tight curtain properly laid out outside the reservoir area can not only eradicate the leakage, but it can also effectively raise the groundwater level to improve storage conditions. In the way of laying out water-tight curtain, the reservoir capacity can be expanded more than 3 times as large as the previous one, equal to 3 other medium-sized reservoirs.

Key words reservoir leakage, mechanism, negative pressure, damage caused by punching shear, sealing, expanding of reservoir capacity

(编辑 黄晨晖)