

广西忻城福六浪洼地堵洞成库施工实践

邓 忠¹, 韦兴标¹, 何德顺²

(1.广西水文地质工程地质勘察院,广西柳州 545006; 2.广西贺州市平桂区自然资源局,广西贺州 542827)

摘要:为解决广西忻城县城关镇弄长村一带万余人饮水问题及该岩溶石山区干旱农田引水灌溉问题,在广西忻城县隆光地下河福六浪洼地 3 号天窗下游钻取了投料孔和帷幕灌浆孔,先在投料孔投放碎石骨料,后在帷幕灌浆孔内灌入水泥砂浆或水泥浆液对先期投放的碎石骨料进行固结,修筑地下堵体防渗帷幕对流经福六浪洼地的隆光地下河管道实施堵截,成功地截住了隆光地下水向下游排泄量,减少了洼地积水通过天窗、落水洞向下游的渗漏量,增加了天窗向洼地的溢洪量,建成了库容约 250 万 m³ 的溶洼水库,基本解决了城关镇弄长村一带万余人生活饮水难的问题,提高了该溶洼水库周边、岩溶大石山区干旱农田灌溉水平和改善了当地村民的饮水条件。

关键词:地下河;溶洼水库;帷幕灌浆;地下水堵截;投料孔

中图分类号:P634;TV62⁺3 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2020)11-0061-09

Reservoir construction through cutting off the underground water course at the Forululang depression in Xincheng, Guangxi

DENG Zhong¹, WEI Xingbiao¹, HE Deshun²

(1.Guangxi Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Liuzhou Guangxi 545006, China;

2.Bureau of Natural Resources of Pinggui District, Hezhou, Guangxi, Hezhou Guangxi 542827, China)

Abstract: In order to provide drinking water for more than 10000 people in Nongchang Village, Chengguan Town, Xincheng County, and divert water for irrigation of arid farmland in the karst rocky mountain area, feeding holes and curtain grouting holes were drilled in the lower reaches of the No.3 opening at the Fuliulang depression over Longguang Underground River, Xincheng County, Guangxi. Crushed stone aggregates were dropped through the feeding hole; then cement mortar or cement slurry was poured into the curtain grouting hole to consolidate the crushed stone aggregates to build the seepage proof curtain to block the underground river course which flows through the Fuliulang depression, which successfully intercepted the discharge of Longguang Underground River to the downstream, and reduced the leakage of water from the depression to the downstream through surface openings and underground caves; meanwhile increasing water overflowing from surface openings to the depression. As a result, A depression reservoir with the capacity of about 2.5 million cubic meters was built, resolving the difficulty in drinking water for more than 10000 people in Nongchang Village, Chengguan Town, alleviating the irrigation of dry farmland, and improving drinking water conditions for local villagers.

Key words: underground river; karst depression reservoir; curtain grouting; groundwater blocking; feeding hole

0 引言

隆光地下河位于广西来宾市下辖忻城县城关镇隆光村东部石山地区和忻城谷地南段清水河左岸靠山地段;福六浪洼地位于隆光村福六屯,地处隆光地下河的中游段。隆光地下河发育于峰丛洼地区,集雨面积 55.8 km²,福六浪上游集雨面积 24.8 km²。

根据忻城县城关水文观测站统计,该区多年平均降雨量为 1443.7 mm,降雨入渗系数为 0.58,由此推算福六浪正常年的地下水天然补给量为 2077 万 m³,地下水资源丰富。

福六浪库区地貌景观为峰丛洼地,洼地东段地面较平坦开阔,平均高程 149.28 m,洼地西段地面

收稿日期:2019-12-27;修回日期:2020-07-27 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.11.011

作者简介:邓忠,男,瑶族,1974 年生,总工程师,高级工程师,注册岩土工程师,水文地质与工程地质专业,硕士,从事水文地质、工程地质、环境地质技术与管理工作,广西柳州市东环路 12 号,denzhong2004@163.com。

通信作者:韦兴标,男,汉族,1967 年生,高级工程师,注册一级建造师,注册安全工程师,探矿工程专业,从事钻孔灌注桩、基坑支护、软土地基加固、地质灾害与环境地质技术与管理工作,广西柳州市东环路 12 号,weixb_110@163.com。

引用格式:邓忠,韦兴标,何德顺.广西忻城福六浪洼地堵洞成库施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):61-69.

DENG Zhong, WEI Xingbiao, HE Deshun. Reservoir construction through cutting off the underground water course at the Forululang depression in Xincheng, Guangxi[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):61-69.

起伏较大,平均高程146.7 m。从宏观看,福六浪洼地地形封闭条件良好,具有成为天然溶洼水库的条件,其平面形态呈不对称的哑铃状,呈北东—南西向展布,长1500.0 m,宽250.0~900.0 m,最窄处约80.0 m。而造成福六浪洼地“夏涝冬旱”的主要原因是地下河3号天窗管道过水面积有限。雨季来临期间,因上游来水量(溢洪量)大于其过水能力(消水量)时,地下河水通过天窗和消溢洪洞涌入洼地,形

成积水;而雨季过后,洼地主要消水点是3号天窗,其次是1、2号消溢洪洞及5、9号落水洞;而1、2号消溢洪洞及5、9号落水洞的消水最终通过洼地内近南北向的地下河管道流向3号天窗向下游排泄,洼地逐渐干涸,形成干旱。因此,只要堵截3号天窗附近的地下河管道就能使洼地成为终年积水的溶洼水库。洼地、3号天窗、溢洪洞、落水洞的相对位置见图1^[1]。

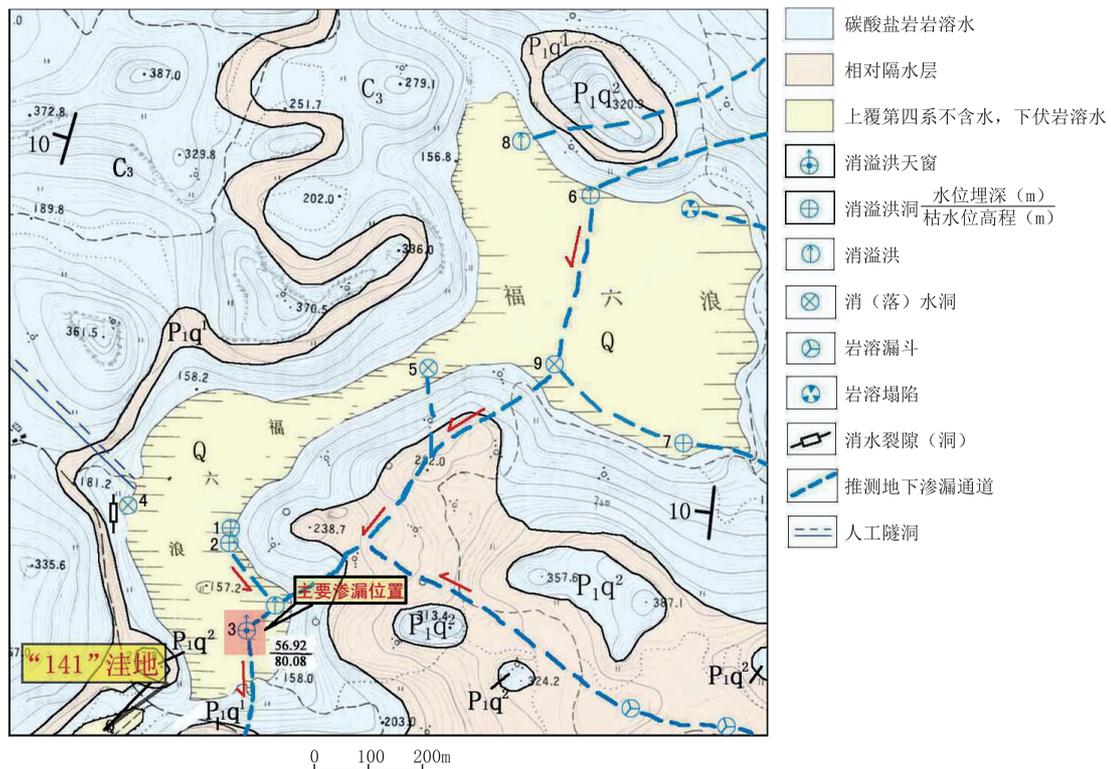


图1 福六浪洼地平面展布

Fig.1 Layout of the Fuliulang depression

为确保本次堵截地下河水能圆满成功,在前期地下河试验堵截(C5孔)初见成效的基础上,选择在3号天窗下游、以C5孔为中心且过水面积较窄的地下河水流主管道设计投料孔6个,帷幕灌浆孔14个,补充勘探孔、检测孔兼作灌浆补强孔28个,对流经福六浪洼地的隆光地下河管道实施堵截。

本次地下河堵截施工共完成:投料孔6个,累计钻探进尺约650 m,向溶洞空腔投入碎石料回填量14500 m³;帷幕灌浆孔12个,累计钻灌进尺约1300 m;补充勘探孔、检测孔兼作灌浆补强孔22个,累计钻灌进尺约3000 m,灌入水泥砂浆约500 m³,帷幕灌浆消耗42.5普通硅酸盐水泥约2000 t。本次基本完成对地下河水的堵截,建成了库容约250万m³的溶

洼水库,基本解决了城关镇弄长村一带万余人生活饮水困难,极大缓解了该溶洼水库周边、岩溶大石山区干旱农田灌溉困难和改善了当地村民的饮水条件。

1 库区内工程地质特征与地下水特征

1.1 库区内工程地质特征

各地层的岩性特征简述如下:

(1)第四系(Q):黄褐色、棕黄色亚砂土及亚粘土层组成,一般厚0.5~2.5 m,局部厚度>5 m;主要分布在谷地和洼地,忻城谷地的局部和少数洼地还见有较厚的含碎石粘土。

(2)二叠系合山组(P₂h):主要为灰—深灰色含燧石灰岩组成,夹3~9层薄煤及炭质页岩,底部有

0.6~9.0 m 厚的铁铝岩,出露于忻城向斜核部。

(3)二叠系茅口组(P_1m):主要由浅灰—深灰色含燧石条带灰岩、灰岩组成,局部夹白云岩,主要分布在清水河两岸。

(4)二叠系栖霞组上段(P_1q^2):为深灰色含燧石结核条带灰岩,主要分布在忻城谷地东部边缘至福六屯一带的山区。

(5)二叠系栖霞组下段(P_1q^1):为泥质灰岩及泥灰岩夹页岩,厚度 20 m;呈条带状沿 P_1q^2 底部出露,具有标志层的特征,其顶(P_1q^2)底(C_3m)均为厚层灰岩组成的陡坎,高 5~10 m。

(6)石炭系马平组(C_3m):为浅灰—灰白色灰岩夹白云岩及白云质灰岩。为背斜轴部出露的地层,主要分布在隆光地下河福六浪溶洼以东的中上游地区^[1]。

1.2 地下河堵截部位岩溶发育特征

1.2.1 岩溶发育的复杂性

(1)岩溶发育深度:堵截部位岩溶发育主要受 3 组裂隙(近南北向、东西向及北东向)控制,裂隙发育深度大(深度多在 100 多米以上),3 号天窗往下游方向通道小,上游高水头来水至此受阻上涌,形成了复杂的水动力条件,加上古岩溶的存在而导致了岩溶发育深度大大低过了区域侵蚀基准面。据本次钻探揭露最深溶洞底板高程为 -34.15 m,较当地红水河河床高程低约 60 多米。

(2)平面上的复杂性:根据钻探及物探结果,堵截部位岩溶很发育,钻孔遇洞率高,溶洞系统错综复杂,这是由于岩体原生节理、裂隙发育的不连续性造成的,而该区受 3 组陡倾角裂隙控制,各裂隙间互相切割,于地下水溶蚀、侵蚀作用下,形成了复杂的地下岩溶系统,如 3 号天窗人可探测底部便是两头尖灭的溶蚀大裂隙。

1.2.2 岩溶垂向分带上的岩溶发育规律

(1)浅部岩溶带:高程 100 m 至地表,该段地下水以垂直运动为主,溶洞发育垂向上连通性好,由于岩体浅部裂隙较发育,加上浅部岩溶水及下部地下水的共同作用,该段岩溶较为发育,洞体发育规模较小,但很复杂。

(2)水位波动带:高程 100~80 m,该段主要位于枯水位波动带,地下水以垂直运动为主,兼有地下水的水平径流,由于岩体裂隙发育相对较弱,岩溶发育相对较差。

(3)水平径流带:高程 80~20 m,该段地下水主要为水平径流,由于地下水作用强烈,该段地下岩溶最为发育,洞体发育规模巨大,钻孔揭露最高溶洞主要发育于该段。

(4)深部循环带:高程 20 m 以下,由于 3 号天窗的高水头的向下循环作用,岩溶向深部发育,岩溶发育强度较弱,个体较小,连通性差。

1.3 福六浪地下水特征

(1)地下水的动态特征受降雨影响十分明显,其流量和水位都具有暴涨暴落的特点,最大水位变幅可达 70 m 以上。

(2)从福六浪洼地取样进行水化学分析,根据分析结果,水质为 Ca^{2+} 含量 43.96~79.94 mg/L, HCO_3^- 含量 137.17~257.62 mg/L,为 $HCO_3^- - Ca^{2+}$ 型水;pH 值 7.20~7.34,为中性水;水样为无色、无味、无臭、无肉眼可见物,浑浊度小于 2 的饮用清水,所检测的各项指标均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

2 地下河堵截方案

为确保本次堵截地下河水能圆满成功,在前期地下河试验堵截(C5 孔)初见成效的基础上,选择在 3 号天窗下游、以 C5 孔为中心且过水面积较窄的地下河水流主管道实施堵截。为避免灌入的混凝土、水泥砂浆或水泥浆被地下水冲走,造成成本提高,在 3 号天窗下游、以 C5 孔为中心且过水面积较窄的地下河水流主管道上设置大直径投料孔,大量碎石料用清水冲灌法通过大直径投料孔回填到地下河的溶洞、溶槽或溶沟及其大裂隙中去。在水流带动下和地下水作用下,回填碎石料在溶洞、溶槽或溶沟及其大裂隙中流动、推移和沉积,颗粒经分选作用形成由粗到细的反滤层堆积在地下河管道上;然后在回填碎石料堆积范围内钻孔,灌入水泥砂浆或水玻璃-水泥浆,使水泥砂浆或水泥浆与回填碎石胶结在一起,形成结构较稳定、强度较高的地下堵体;再在 3 号天窗与地下堵体之间设置一道防渗帷幕,防止地下河水流失;最后避免地下河水沿补充勘查孔和灌浆检测孔漏失,对其灌浆进行加固处理。具体堵截部位详见图 2。

2.1 堵截方案

因福六浪洼地的消水最终归结于 3 号天窗去水方向的渗漏,故堵截 3 号天窗附近及其地下河管道就能使洼地建成终年积水的溶洼水库。而 3 号天窗

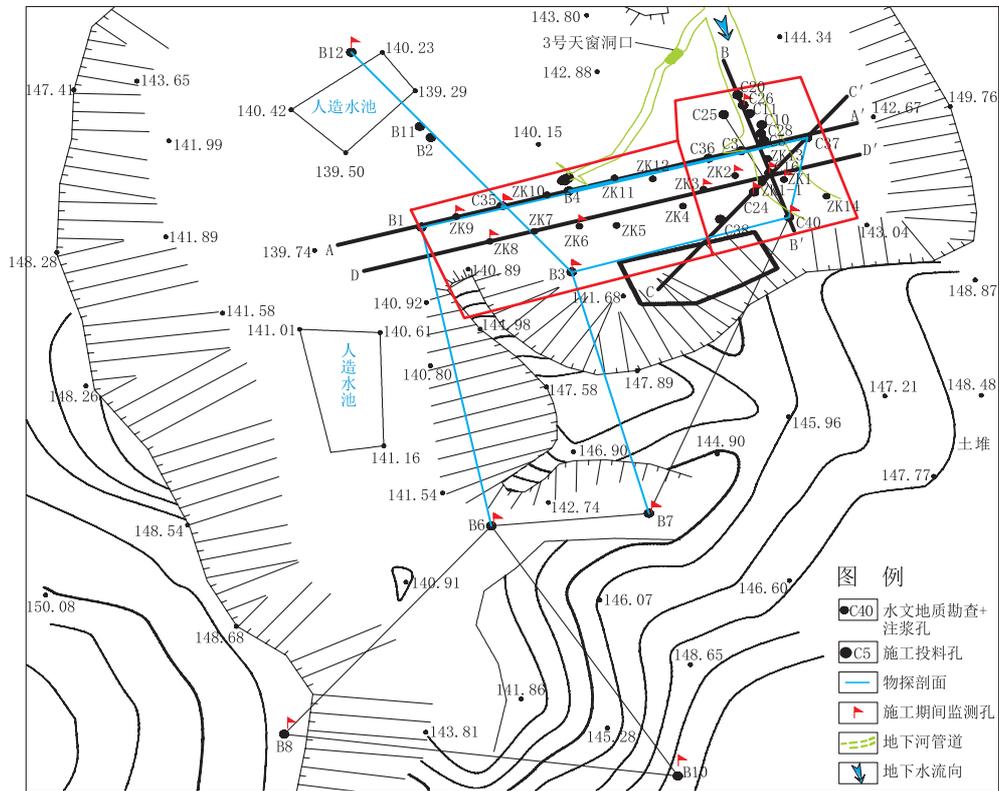


图2 地下河堵截施工平面布置

Fig.2 Layout of underground river blocking construction

附近及其地下河下游岩溶极其发育,存在高约 75 m 溶洞,局部地段出现 2~4 层“串珠式”溶洞、溶沟或溶槽发育,地质条件极其复杂;加上隆光地下水流动,为避免孔洞、裂隙太大和地下水带走浆液而造成灌入水泥浆大量浪费,故在 3 号天窗下游地下河主管道选用级配料灌浆法对隆光地下河进行堵截较为适合,既能较好地解决大溶洞等岩溶发育地层和大裂隙构造地层灌浆量不可控的问题,使其成为既可控又可灌的灌浆地层,同时能节约大量水泥或混凝土,因而降低工程成本;同时为避免洼地积水流失,对岩溶发育的 3 号天窗附近采取钻孔、帷幕灌浆方式进行封堵,形成一道防渗帷幕。

所谓的级配料灌浆,就是先用清水冲灌碎石骨料,碎石骨料经钻孔通道回填到溶洞、溶沟及大裂隙中去;在水流带动下,碎石骨料在溶洞或裂隙中流动、推移和沉积,颗粒由大到小和由大到小的分选,并形成由粗到细分层反滤的结构,为灌浆的可控性和可灌性创造条件;再对其灌注水泥浆,灌浆量处于可控状态,水泥浆流失少,形成地下坝体或堵体^[2]。

2.2 堵截部位和帷幕灌浆部位

2.2.1 地下堵体位置的确定

在前期地下河试验堵截(C5 孔)初见成效的基础上,依据本次补充勘查,该地下河主管道展布走向为 C20—C5—C16—C24—C38(详见图 2),其余钻孔所揭露溶洞与地下河通道水力联系较差,故本次堵截位置选择在 C20—C5—C16—C24—C38 位置修筑地下堵体。

2.2.2 帷幕灌浆部位的确定

据补充勘查资料,3 号天窗附近地下岩溶很发育,规律性差,因此在修筑地下堵体的同时还应进行帷幕灌浆。根据钻探资料,本次揭露岩溶(高程 20 m 以下,相对地面孔深 120 m)主要位于 B1、ZK9、C35、ZK10、B4、ZK11、ZK12、C36、C3、C5、C37 钻孔连线上及地下河上游钻孔,因此本次选择 B1—C37 剖面作为帷幕灌浆剖面。

2.2.3 帷幕灌浆控制高程的确定

补充勘查时揭露最深溶洞底板高程为 -34.15 m(相当于地面孔深约 174 m),为防止岩溶的渗漏,帷幕灌浆应低过此高程,因此帷幕灌浆控制高程为 -40 m(相当于地面孔深 180 m)。

3 地下河堵截施工技术

3.1 总体施工顺序

依据“福六浪洼地每年 4 月中旬开始积水,雨季结束后逐渐消水至 11 月底干枯,12 月至次年 4 月中旬为干枯期,可以安排施工”实际情况,结合本次地下河堵截工程各项工作顺序和工作量大小,分 3 个阶段、历时近 3 年间断性地进行了勘查与堵截施工。第一阶段补充勘查(地质调查、水文地质钻探和物探工作)、投料孔钻凿和备料工作;第二阶段投料回填、帷幕注浆施工、勘查孔注浆等工作;第三阶段堵体质量自检与补强并对补充勘查孔进行灌浆。具体施工顺序如下:

(1)第一阶段:修筑地下河堵体在堵截部位地下河展布方向上施钻编号 C20、C10、C5、C16 的大直径投料孔,通过投料孔投放碎石料填堵地下河主管道;投料完成后,施钻编号 C25、C26、C11、C28、C3、C36、C37、C38、C24、C40、C16 的 11 个灌浆孔,采用自下而上、分段灌浆法对回填地下河和管道的碎石进行灌注水泥砂浆或水泥浆实施固结加固处理,修筑地下河堵体。

(2)第二阶段:地下帷幕灌浆在 3 号天窗附近布置 ZK4~ZK12 钻孔,钻孔间距基本按 2 m 进行布

置,钻孔深度控制至 -40 m 高程(相对地面孔深 180 m),并同 C35、B4、B3 共计 12 个钻孔,采用自下而上、分段灌浆进行帷幕灌浆防渗,修筑一道地下防渗帷幕。

(3)第三阶段:堵体质量自检与补强并对补充勘查孔灌浆在地下河堵体和地下帷幕范围内布置 ZK1、ZK1-1、ZK2、ZK3、ZK13、ZK14 共计 6 个钻孔对地下河堵体和地下帷幕进行压水试验检查,并根据试验结果,对其薄弱孔段进行灌浆补强。同时为防止库水自补充勘查孔漏失,对补充勘查孔(B2、B11、B12、B6、B7、B8、B10 共计 7 个钻孔)进行灌浆加固处理。

3.2 测量放样,确定钻孔位置

依据前期试堵和补充勘查资料,由测量工程师采用全站仪进行测量放样,确定大直径投料孔、灌浆孔和帷幕灌浆孔位置,其偏差控制在 20 mm 以内,并用埋桩标明其位置。

3.3 钻探成孔技术

3.3.1 投料孔成孔技术

投料孔典型钻孔结构见图 3,投料孔施工设备和投料施工见 4、图 5。

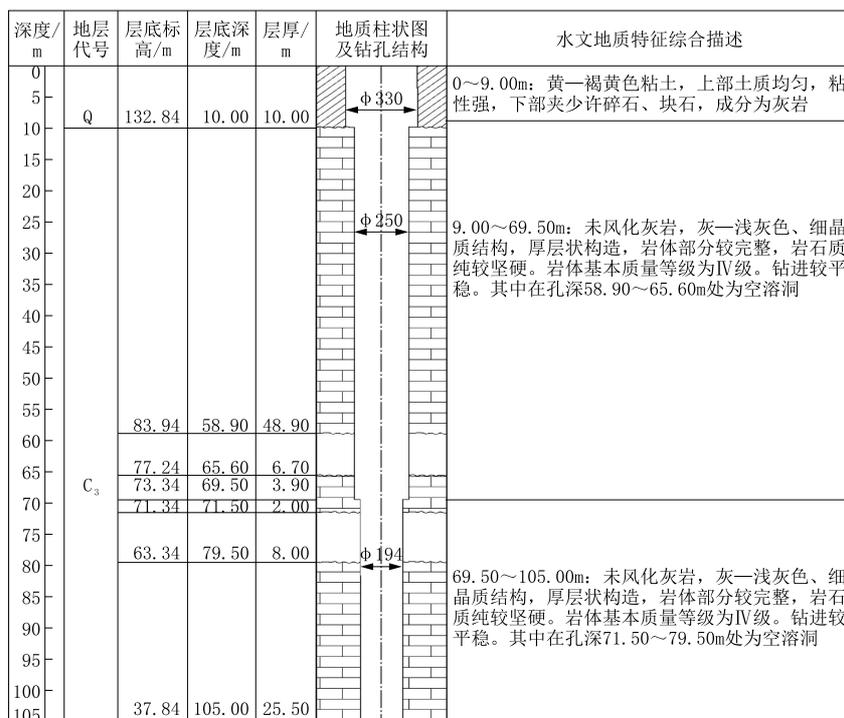


图 3 C20 投料孔结构示意图

Fig.3 C20 feeding hole structure



图4 投料孔施工

Fig.4 Construction of the feeding hole



图5 投料回填施工

Fig.5 Backfilling of feeding materials

3.3.1.1 钻探设备与钻探工艺

针对投料孔直径大、钻孔较深的特点,结合施工现场缺少施工用电用水的情况,选用自带柴油动力、改装式 SP-15 型钻机 1 台套,采用多工艺空气钻进工艺成孔。

钻机安装必须稳固、水平、周正,确保在钻孔过程中不得发生倾倒或移位现象;同时在成孔过程中,应经常检查钻机是否发生倾倒或移位现象,确保钻孔倾斜度控制在 1/100 以内。

3.3.1.2 一开

土层钻进采用双腰带灯笼式钻头清水正循环全面钻进,钻遇岩面后,改用同径取心钻具扫孔并进入完整基岩 1.0 m 以上,下入相应规格的钢套管护壁;通常情况下,开孔直径 330 mm,下入 $\varnothing 325$ mm 钢套管护壁。

3.3.1.3 二开

坚硬岩层采用多工艺空气潜孔锤反循环钻进成孔,采用球状硬质合金钻头、冲击器、 $\varnothing 127$ mm 双壁钻杆,“慢转速、大风量、高风压、钻具自重加压”钻进规程,终孔直径 ≥ 91 mm^[3]。

3.3.1.4 钻孔垂直度控制

为保证钻孔垂直度,钻孔遇溶沟或溶槽、溶洞时,应采取“低压、慢转、减压钻进”等措施控制钻进速度;如发现钻孔严重倾斜时,应采取回填法进行纠斜处理。

3.3.2 注浆孔成孔技术

3.3.2.1 钻探设备的选用

因注浆孔(包括灌浆孔、帷幕灌浆孔和后期检测孔)深度多在 100 m 以上的钻孔,现场施工选用 9 台 GY-200 型钻机。

3.3.2.2 注浆孔钻孔结构

开孔直径 170 mm,终孔直径 110 或 91 mm,换径次数视地质条件而定。

3.3.2.3 钻进方法

土层采用冲击取心后扩孔修整成孔,或直接采用翼状钻头正循环全面钻进成孔,成孔后下入相应的套管护壁;岩层采用相应规格钻头钻进成孔,采用清水正循环金刚石取心钻进或 PDC 取心钻头正循环钻进,裂隙、溶槽、溶洞等视需要采用钢套管护壁。帷幕灌浆孔钻遇裂隙、溶槽、溶洞等情况时,采取“注浆—候凝—透孔—钻进”的程序进行施工。

3.3.2.4 钻孔质量控制

因注浆孔密度大,孔距小,如钻孔发生严重倾斜,会造成串孔、错判或漏判岩溶发育情况,因此要严格控制钻孔垂直度。施工过程中,应采取以下技术措施加以控制:

(1) CT 透视孔须经测量精确定位,其它钻孔根据物探资料综合分析后进行定位。

(2) 应采用刚、直、满粗径钻具,且粗径钻具长度 < 6 m,粗径钻具上、下端安装扩孔器。

(3) 严把钻机设备安装和开孔关,确保钻机安装稳固、水平、周正和孔口管安装的垂直度。

(4) 钻进过程中,回转钻进时应采用较小钻压,局部孔段甚至采取减压钻进,避免追求高钻进效率而盲目加压。

(5) 变径和扩孔应使用上导向和超前领路短管。

3.3.2.5 注意事项

钻进过程中,如发现钻孔深度满足连续 10 m 内,岩心无明显的溶蚀现象;全孔未发现岩溶,则及时用水泥砂浆封孔。

钻进过程中,应做好钻探施工记录,如遇到溶蚀裂隙带或溶洞时,对岩心的溶蚀裂隙、裂缝的长、宽或直径及其充填物和充填程度等进行详细的记录和

描述。

3.4 投料施工

3.4.1 搭建投料系统

依地形条件,在每个投料孔孔口和料场边缘之间搭建与孔口高差约 10 m、倾角约 30°、截面为槽状的过料溜槽,溜槽下端连接孔口漏斗,上端连接集料斗,采用木料支架支撑;溜槽采用厚 2 mm 钢板制作,截面尺寸为 350 mm×250 mm。

3.4.2 投料方法

采用小型装载机上料(就地生产的 5~60 mm 碎石料)、人工控制投放速度的方法,回填碎石料经集料斗、溜槽、孔口漏斗、钻孔通道回填到地下河岩溶管道。投料回填采用清水冲灌回填法进行,即装载机上料、人工控制投放填料的同时,采用水泵供水系统向集料斗和溜槽送水,碎石及砂与水混合后,沿溜槽经孔口漏斗、投料孔进入地下河管道(溶洞、溶槽或大裂隙)内。采用清水冲灌回填法的主要作用有:一是冲洗岩粉,避免岩粉积聚在孔壁上,造成钻孔缩径,避免形成架桥堵塞,二是减少碎石回填料与溜槽及孔壁的摩擦阻力。

3.4.3 采用多孔回填法回填

因封堵地下河管道长约 15 m,地下河管道(溶洞、溶槽或大裂隙)空间较大,加上地下河水流会带走回填料,采用单孔回填无法充满整个管道空间,且地下河管道走向呈线状分布,故采取 2 个投料孔同时投料回填:先从上、下游 2 个钻孔同时投料回填,后从中间 2 个钻孔进行投料回填。

3.4.4 投料

(1)在投料过程中,如发生碎石料堵管时,应先扫孔,再投细粒径的碎石料。

(2)在投料过程中,如发现碎石料投放量远远大于预计回填量时,说明遇到大溶洞或被地下河水冲走,应选用粗粒径的碎石料。

(3)在投料过程中,如发现碎石料投放量远远大于预计回填量时,也可以暂时停止该投料孔投料,改换其它投料孔投料,先把周边围堵,后再在该投料孔投料回填。

3.5 灌浆施工技术

3.5.1 灌浆施工顺序

对于地下坝体,完成投料回填后,先从上游、下游钻孔灌浆,再在中间部位钻孔进行投料回填;而对于 3 号天窗附近的帷幕灌浆,分 I、II 号序孔灌浆施

工,先施工 I 号序孔,再施工 II 号序孔^[4-6]。

3.5.2 灌浆方法选用

采用纯压式灌浆进行灌浆。级配料灌浆:地下河主管道充填、固结灌浆采用自下而上分段灌浆,即在投料回填、封堵后,钻孔到设计孔深、安放灌浆管至孔底,水泥砂浆或水泥浆自下而上分段灌浆。帷幕灌浆:对于钻孔未遇溶洞时,采用自下而上分段灌浆;而钻孔遇强岩溶发育段(溶洞)时,采用自上而下分段灌浆进行施工。

3.5.3 灌浆浆液

因地下坝体(回填碎石堆体)空隙多且大,同时考虑地下河水冲刷作用,上、下游灌浆孔直接灌入水泥砂浆,中间部位灌浆孔先水泥砂浆,后改灌纯水泥浆液。帷幕灌浆:对于遇溶沟、溶槽和溶洞的孔段,直接灌入水泥砂浆;对于破碎、裂隙发育带的孔段,灌入纯水泥浆。纯水泥浆液的水灰比 0.8:1~0.5:1,水泥砂浆配合比 1:1~1:2(按水泥质量比),适当掺入速凝剂(水玻璃),水玻璃掺量按水泥质量的 5%~8%掺入,并在地面做胶凝试验,确定混合浆液的胶凝时间,避免浆液堵管^[6-7]。

3.5.4 灌浆压力控制

地下河主管道充填、固结灌浆应以低压为主,根据覆盖层厚度、地下水压力、管路压力损失、浆液在填料中流动和扩散压力损失等确定灌浆压力,终压为 0.7~0.8 MPa。灌浆过程中,应根据实际情况进行适当调整。帷幕灌浆压力应采用压力注浆,灌浆终压 1~2 MPa。

3.5.5 灌浆量的控制

无论是地下坝体充填、固结灌浆,还是地下帷幕灌浆,先应根据注浆段长 L 、扩散半径 R 、孔隙率 n 、有效充填率 a 、无效消耗系数 b 进行理论估算,即理论灌浆量 $Q = \pi R^2 L n a b$ ^[4-6],以理论值为控制依据;其次,某一段灌浆结束,待凝后采用钻孔取心、动力触探等原位测试法对灌浆效果进行中间检查,灌浆效果不佳者(如未发现水泥浆脉),应进行灌浆补强处理,并根据实际情况调整灌浆压力和灌浆量等技术参数,修正其理论灌浆量;在遇溶洞的情况下以浆液溢出孔口为准。对于地下河主管道碎石堆体灌浆量,为确保地下坝体施工质量,除应根据堆体体积和孔隙率、有效充填率、无效消耗系数等估算理论灌浆量外,应以水泥浆溢出孔口为准^[5-10]。

3.5.6 灌浆结束标准

对未遇溶洞的帷幕灌浆孔,各灌浆孔段应在规定的压力下,吸浆量 ≥ 0.4 L/min时,并持续30 min,或不大于1 L/min时,并持续60 min,即可结束灌浆。对遇到溶洞的钻孔和主管道注浆以浆液溢出孔口为准^[4-6]。

3.5.7 浆液浓度^[11-15]

灌浆过程中,应根据实际情况变换浆液浓度:

(1)当某一浓度的浆液持续灌注30~60 min,或灌入浆量达到400 L,而压力无明显变化,则应改用浓一级浆液。

(2)若压力增加很快,或吸浆量很小时,应改用稀一级浆液,或用清水洗孔后,再灌稀浆。

3.5.8 注意事项^[13-16]

(1)在帷幕灌浆孔和补充勘察孔的灌浆过程中,在溶洞、大裂隙孔段,为节约成本,可先向钻孔内投入粗砂和小砾石作为回填料,后进入灌浆;也可采取直接灌入水泥砂浆。

(2)对于回填料饱满而灌浆不止的孔段,可采取减压限流、浓浆掺砂或水泥砂浆、掺水玻璃等速凝剂、间歇灌浆等方式进行灌浆。

4 灌浆效果检测与灌浆补强

4.1 灌浆效果检测

4.1.1 单孔压水试验

灌浆完成后,在地下坝体和帷幕灌浆范围内重新钻孔,采取自上而下、分段进行全孔各段压水试验,直到设计灌浆孔底。压水试验孔口压力0.3 MPa持续4 h, $\omega \leq 0.05$ L/(min·m·m)时为合格;否则为不合格。

4.1.2 钻孔取心及原位测试^[12-16]

采用钻孔取心、动力触探等原位测试对地下坝体和帷幕灌浆质量自检,观察取上来的心样是否有水泥浆脉、与碎石胶结情况等,同时对地下坝体采取心样送实验室进行抗压试验。但本次地下坝体采取心样不规整,试样抗压强度不具代表性。

4.2 灌浆补强处理及封孔

对于帷幕灌浆孔,检测不合格的,严格按原灌浆要求进行灌浆补强处理。对于地下坝体,因检测孔采取芯样不规整且抗压强度不具代表性,所有检测孔严格原灌浆要求进行灌浆加固处理。

合格孔做灌浆封孔处理,封孔用水灰比为0.5:1的水泥浆或1:1~1:2水泥砂浆对检测孔进

行封闭处理。

5 治理效果

本次地下河堵截,使堵截体部位以上地下河流域在枯水期地下河水位抬高了60 m,大大降低了上游地区地下水开发利用成本,基本解决了上游地区干旱缺水现状,改善了上游地区生态环境地质条件;同时本次地下河堵截,实现了一个枯水期蓄水水位高程达154.5 m(对应地表库容约250万 m^3),能通过引水方式对下游进行灌溉,为隆光地下河地下水系统进一步开发利用打下了坚实的基础,达到了广西大石山区地下水开发利用的目的。治理效果见图6。



图6 2016年11月初福六浪洼地水库景观
(水位高程约157.5 m)^[4]

Fig.6 Landscape of the Fuliulang depression reservoir in early November, 2016 (water elevation is about 157.5m)

6 结语

(1)该洼地堵洞成库项目为广西首次于人无法到达且地质条件极其复杂的地下河管道中实施堵截工程,本次堵截采用先充填碎石,后灌浆加固,从而形成地下堵体,为今后地下堵截工程提供了一定的经验。

(2)本次地下河堵截施工受到资金限制和因一场暴雨水位暴涨被迫停工,还有2个帷幕灌浆孔未完成帷幕灌浆和4个补充勘探孔未进行封孔或灌浆补强及2个检测孔未完成检测与灌浆补强,未能按照设计完成所有的检测和查漏补缺,地下堵截体渗漏是存在问题的,工程尚需从地下堵体强度及防渗、堵体下部防渗和堵体两侧防渗3个方面进行完善。该地下河堵截项目完工4年,并通过了由业主组织的有关专家组的竣工验收,水库水位变化不大。

参考文献 (References):

- [1] 蒙荣国. 广西忻城县福六浪堵洞成库施工竣工报告[Z]. 柳州: 广西水文地质工程地质勘察院, 2017.
MENG Rongguo. Report on completion of construction of Fuliang blocking cave and reservoir in Xincheng County, Guangxi[Z]. Liuzhou: Guangxi Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, 2017.
- [2] 白永年, 等. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
BAI Yongnian, et al. New technology of dam seepage control and reinforcement in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001.
- [3] 王剑, 王虎, 李勇, 等. 气举反循环钻进工艺在贵州地热井中的推广应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 18—23.
WANG Jian, WANG Hu, LI Yong, et al. Popularization and application of air-lift reverse circulation drilling technology in Guizhou geothermal deep wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 18—23.
- [4] SL 62—2014, 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].
SL 62—2014, Technical specification for cement grouting of hydraulic structures[S].
- [5] JGJ/T 211—2010, 建筑工程水泥—水玻璃双液注浆技术规程[S].
JGJ/T 211—2010, Technical specification for cement-silicate grouting in building engineering[S].
- [6] SL 564—2014, 土坝灌浆技术规范[S].
SL 564—2014, Technical specification of earth dam grouting[S].
- [7] YBJ 44—92, 注浆施工技术规程[S].
YBJ 44—92, Technical specification for grouting[S].
- [8] 张兴高, 张炜, 朱慧, 等. 固体推进剂贮存老化研究进展[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 232—237.
ZHANG Xinggao, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Review on the aging of solid propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(2): 232—237.
- [9] 赵永俊, 张兴高, 张炜, 等. 国外固体推进剂及其粘界面贮存老化研究进展[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 35—38, 12.
ZHAO Yongjun, ZHANG Xinggao, ZHANG Wei, et al. Review on the aging property of solid propellant and bonding interface abroad[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(3): 35—38, 12.
- [10] 杨小震. 分子模拟与高分子材料[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG Xiaozhen. Molecular simulation and polymer materials [S]. Beijing: Science Press, 2001.
- [11] GB/T 50448—2015, 水泥基灌浆材料应用技术规范[S].
GB/T 50448—2015, Technical code for application of cementitious grout[S].
- [12] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].
JGJ 79—2012, Technical code for ground treatment of buildings[S].
- [13] 韦兴标, 何德顺, 冯周飞. 某尾矿库灌浆防渗堵漏施工实践[J]. 地基处理, 2020(2): 148—152.
WEI Xingbiao, HE Deshun, FENG Zhoufei. Practice of grouting for leakage-block of a tailing pond[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020(2): 148—152.
- [14] 韦兴标, 邓勇, 沈树连, 等. 岩溶塌陷区地基基础注浆加固施工实践[J]. 地基处理, 2019(2): 49—53.
WEI Xingbiao, DENG Yong, SHEN Shulian, et al. Construction practice of grouting reinforcement for foundation in karst subsidence area [J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019(2): 49—53.
- [15] 龙艺芳, 叶建伍. 高压旋喷注浆法在钻孔灌注岩桩底持力层补强加固中的应用[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2009, 8(2): 23—25.
LONG Yifang, YE Jianwu. Application of high-pressure rotary concrete-jetting technology in the reinforcement of the bearing layer of rock-socketed cast-in-place pile bottom[J]. Journal of Guangdong Communications Polytechnic, 2009, 8(2): 23—25.
- [16] 梁政林, 韦兴标, 黎家初. 强夯法在大块石回填软弱地基土加固中的应用[J]. 土工基础, 2013, 27(3): 26—28.
LIANG Zhenglin, WEI Xingbiao, LI Jiachu. The application of dynamic compaction in the thick boulder fills[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(3): 26—28.

(编辑 王建华)