

岩溶地下河水资源开发利用工程实践

谢常茂

(广西水文地质工程地质勘察院,广西柳州 545006)

摘要:开发利用地下水资源,对促进干旱缺水地区的社会经济发展具有重要的作用。长期以来,地下水开发利用多以钻井开采为主,通过堵截地下河成库的方式开发利用是一种全新的思维。通过对岩溶洼地成库条件和受淹及干枯机理的调查分析,提出了堵截地下河成库方案,并详细论述了堵截施工方法和工艺。

关键词:地下河;洼地;堵截成库;回填封堵;注浆

中图分类号:TV213.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)05-0050-06

Engineering Practice of Water Resource Development and Utilization in Karst Subterranean Stream/XIE Chang-mao (Guangxi Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Liuzhou Guangxi 545006, China)

Abstract: Development and utilization of groundwater resource is important for social economic development in water shortage area. Groundwater exploitation has mainly been with drilling for a long time, the paper introduced a new idea of reservoir formed by subterranean stream blocking. Investigation and analysis were made on the karst depression reservoir formation conditions and submergence & dry-out mechanism; the scheme of reservoir formation by subterranean stream blocking was put forward with discussion on the construction technology.

Key words: subterranean stream; depression; reservoir by blocking; plugging by backfilling; grouting

1 项目概况

广西忻城县隆光地下河水资源开发工程是中国地质调查局部署的“广西典型地区岩溶地下水调查与环境整治示范”项目。工程总体特征是通过对流经福六浪洼地的隆光地下河道实施堵截,以截住或减少雨季地下水向下游的排量,减少洼地积水通过天窗、落水洞向下游的渗漏量,从而增加天窗向洼地的溢洪量,延长库水的蓄积时间,以达到引水灌溉的目的。为解决岩溶石山区干旱农田引水灌溉和改善居民饮水条件做出示范,为岩溶石山区脱贫致富做出贡献。项目在2003~2005年的调查访问、水文观测、深洞调查、地面测绘、地下水连通试验、物理探测、钻探、测量等勘查工作的基础上,于2006年12月~2007年4月进行了堵截施工,由于当年4月中旬的一场大雨,洼地迅速被淹,施工未能尽善尽美,但已取得了初步成功,2007年雨季洼地积水达30 m左右,到年底枯水期洼地不再与往年一样干枯,水位甚至只下降了3~4 m,洼地变成了一个天然水库。

2 福六浪洼地成库条件分析

隆光地下河集雨面积46 km²,发育在峰丛山

区,地形起伏;地下河道埋藏深度大,洼地地段埋深在60 m以下,穿过山体时埋深在100 m以下。

位于隆光地下河中上游地区的福六浪洼地,洼地面积0.7 km²,洼地内发育有多个溢洪洞、消(溢)洪天窗、消洪洞和落水洞。雨季期间,由于溢洪量大于消水量,洼地积水深30 m左右;在枯水期,洼地积水通过天窗和落水洞向地下河下游排泄而干枯,地下河水位埋深>60 m。洼地年受淹时间4~6个月,年水位变幅近百米,具有暴涨暴落动态特征。该洼地具有如下良好的成库条件。

2.1 库容量大

福六浪洼地呈不对称哑铃状,北东—南西向展布,长1500 m,宽250~900 m,最窄处80 m。根据多年的水位观测资料,洼地最大淹没深度枯水年为20 m,正常年为30 m,丰水年为35 m。按水深30 m计,正常年库容1450.2万m³,达到了中型库容标准。

2.2 库区地貌条件好

该洼地东面及东南面为大面积的峰丛洼地区,是地下河的上游、地下水的补给区;西面及西南面为峰丛洼地、谷地区,是地下水的径流、排泄区。洼地

收稿日期:2009-03-31

基金项目:中国地质调查局“广西典型地区岩溶地下水调查与环境整治示范”项目(编号:20041040009)

作者简介:谢常茂(1963-),男(汉族),广西贵港人,广西水文地质工程地质勘察院副总工程师、高级工程师,钻探工程专业,从事锚固与注浆工程、岩土工程勘察与施工、地基与基础工程、地质灾害防治工程勘察与施工等技术、质量管理及施工管理工作,广西柳州市东环路12号, xcm801@126.com。

四面环山,即使是3个与外界连接的山口,其高程与洼地的相对高差也达到24.36~70m。因此,宏观上洼地的封闭条件良好。

2.3 水资源丰富

水资源包括2个含义:一是福六浪洼地上游地下水的天然补给量,二是地下水通过溢洪洞和地下河天窗涌入洼地的实际蓄水量。依前人研究结果,该地区多年平均降雨量为1443.7mm,降雨入渗系数为0.58,福六浪上游补给面积为24.8km²,由此计算福六浪正常年的地下水天然补给量为 $Q=0.58 \times 1.4437 \times 24.8 \times 1000^2 = 2077$ 万m³。地下溢洪实质是地下河排泄不畅造成,所以实际蓄水量在很大程度上受每次降雨量及降雨强度的控制,降雨强度越大,涌入洼地的水量越大。2003年的蓄水量为363.07万m³,2004年的蓄水量为507.38万m³,也就是说,在没有对地下河道实施堵截的情况下,洼地的天然来水量只占上游天然补给量的17%~25%,对地下河道实施堵截,只要有50%的效果,洼地的蓄水量就将超过千万立方米。

洼地落水洞、溢洪洞、地下河天窗分布情况见图1。

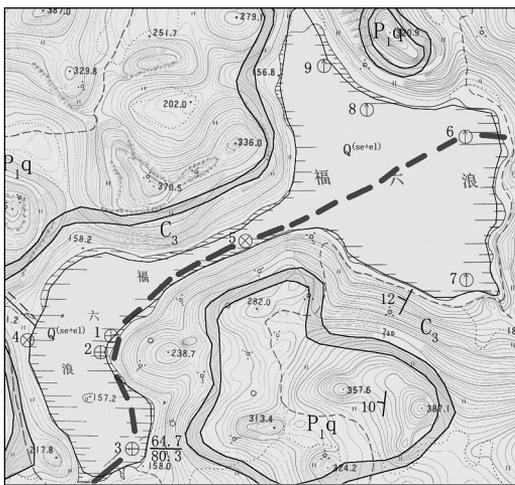


图1 福六浪洼地落水洞、溢洪洞、地下河天窗分布图

2.4 库盆、库岸防渗漏条件好

洼地底部至库岸坡脚覆盖有黄色粘土,中心部位厚约10m,向边缘地带逐渐变薄。此层为弱透土层,能起到较好的防渗作用。库岸四周都是雄厚山体,无明显渗漏,防渗条件较好。库水的外漏通道主要是洼地内1、2、3、5和9号落水洞,5、9号渗漏量合计为0.1m³/s,1、2、3号的渗漏量合计为0.8787

m³/s,1、2、5、9号消水通过地下通道流向3号落水洞或旁侧排向下游,3号落水洞规模最大,垂直深度60m,是洼地积水的最大补给源,也是洼地积水最大的集中渗漏通道。因此,若能采取工程措施对3号落水洞(天窗)咽喉部位实施堵截,库盆渗漏量将极其有限。

3 堵截方案分析

3.1 堵截方案

根据对福六浪洼地内发育的溢洪洞、消(溢)洪天窗、消洪洞和落水洞的溢水和消水机制的研究,拟定3个成库方案:(1)在落水洞中施工堵体;(2)堵、导结合;(3)堵截地下河咽喉地段。

3.1.1 在落水洞中施工堵体

2号落水洞,洞口斜下6m后,近水平前进40m,宽1~2m,洞高2~7m,之后垂下10m,洞径1.2~1.4m,再前进9m左右,通道狭窄,宽仅1.4m,高1.1m,洞壁基岩完整。村民常深入该处安置鱼网捕鱼(见图2)。

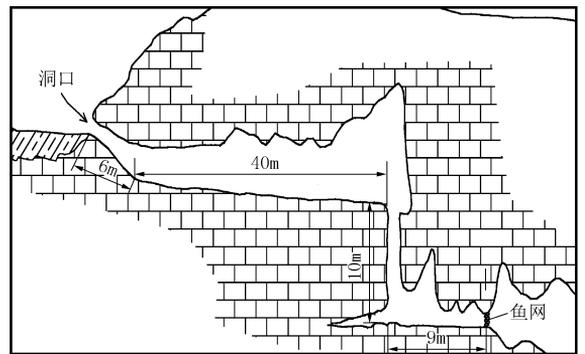


图2 2号消、溢洪洞剖面示意图

3号落水洞,洞口覆盖10m土层,土层因流水作用坍塌成漏斗状,顶面直径60m,深9.7m,基岩洞口径人工砌成竖井状,斜度约70°,宽0.5~2m,长5~6m,竖井深35m处也安置有鱼网,洞壁基岩较完整(见图3)。

2、3号落水洞是洼地积水的集中排泄通道,因此可在两个鱼网处施工堵体,堵洞成库。

3.1.2 堵、导结合

2号落水洞仍在鱼网处施工堵体。

3号落水洞是消(溢)水竖井,一场暴雨持续冒水4~5天后,溢水量逐渐减小,雨停半月后开始消水。雨季时,随着每场雨量大小及两场降雨间隔长短,该洞会发生溢水或消水,雨季过后只起到消水作用。

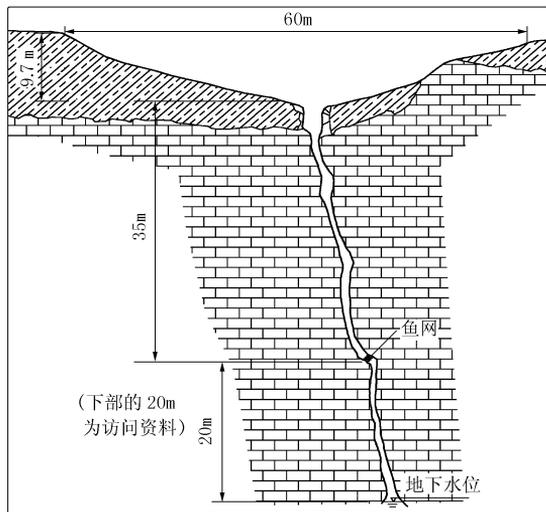


图3 3号消、溢洪洞剖面示意图

该洞是福六浪洼地积水最大的补给源,并且有较大的水头压力;同时又是最大的集中渗漏通道。因此,可在3号落水洞口施工大型井筒(井筒直径10 m,井筒高35 m),在井壁的不同高程设置闸门,基础置于基岩上,基础埋深约12~15 m,降雨时打开闸门可溢水入库。

3.1.3 堵截地下河咽喉地段

福六浪洼地雨季积水30 m左右,当积水水深20 m左右时,3号洞水面还可见冒水浪花,说明3号洞下面有一较长的来水通道。观测资料表明,雨季过后洼地漏水量 $3 \text{ m}^3/\text{s}$,而入洞调查证实3号洞是福六浪洼地中规模最大的落水洞。由此可以推测3号洞下面的地下河通道中存在大通道段和小通道段。当暴雨时,大通道中来水量大于小通道的过水断面,便从3号洞口溢出。雨季过后,大通道中来水量小于通道的过水断面,洼地中大量积水又从3号洞回灌地下。可见,地下河道中的咽喉地段位于3号洞的下游,而且距离不会太远。因此,堵截地下河咽喉地段可令洼地积水成库。

3.2 方案比较

3.2.1 堵、导结合

主要优点:暴雨时打开闸门溢水入库,关闸后蓄水库中;枯水期能有效防止积水回灌地下河。

主要缺点:(1)深基坑开挖工程量较大,土质边坡稳定性差,边坡开挖工程量更大;(2)井筒砌体约 44000 m^3 ,投资约600.0万元,耗资巨大;(3)持力层为单斜岩层,对巨型构筑物稳定性不利;(4)工作面小,交通运输不便,深基坑开挖及砌体难以在一个枯水季节施工完毕。

3.2.2 在落水洞中施工堵体

主要优点:(1)投资较少,估算费用255.9万元;(2)工期较短,可在一个枯水季节施工完毕;(3)在明洞中施工,便于质量检测。

主要缺点:堵体位于季节变动带当中,枯水期地下水位在堵体下20 m,可能存在库区渗漏补给地下水。因此施工前必须作闸水试验才能确定具体的渗漏量。

3.2.3 堵截地下河咽喉

主要优点:从根本上解决问题,既保证水库的补给源,又不会产生集中渗漏。

主要缺点:探测技术难度大。地形起伏大,地下河管道埋藏深度大,物探方法的应用及解译受到很大影响,因此必须采取多种勘察方法进行综合分析判断。

经过综合分析,堵截地下河咽喉方案作为首选方案。

4 堵截工程施工

根据调查研究结果,已确认地下河咽喉部位位于3号天窗附近,因此,堵截施工的实质是查明3号天窗下游渗漏通道(咽喉)位置,然后对其实施堵截。

4.1 地下河咽喉位置的确定

鉴于3号天窗洞穴巨大深长,岩溶发育情况复杂,要确定地下河咽喉位置,除入洞调查外,还需采用物探、钻探和电磁波CT等综合探测手段。

4.1.1 地面物探

地面物探的目的是初步查明地下河通道位置、规模和埋藏深度,为进一步勘探布孔提供依据。采用高密度三极装置视电阻率断面法及其提取的联合剖面及高密度温纳装置反演法是可行的。

4.1.2 钻探

根据地面测绘及物探资料,在初步确定的地下河道范围内布置若干勘探钻孔,探测地下河道及低水位槽的动态变化特征。

4.1.3 孔内电磁波CT

在地下河道上方布孔1个(ZK5)、在河道两侧布孔2个(ZK1和ZK2),钻孔间距10~16 m,分别对ZK1~ZK2、ZK1~ZK5和ZK5~ZK2等3对钻孔进行对孔电磁波CT探测,获取3对CT剖面,确定I类强岩溶化异常位置。

4.1.4 钻孔检验电磁波CT成果

根据CT探测结果,布置验证钻孔4个,编号为2、4、5、7号。钻探结果与CT结果基本吻合。通过

以上勘探工作,地下河道位置与规模基本明确,可以进行堵截施工。钻孔布置见图4,3号天窗下游渗漏通道剖面见图5和图6。

4.2 地下河道堵截施工

4.2.1 堵截方法分析

勘查结果表明,3号天窗下的地下河通道底板埋深113 m,底板以下有更深的岩溶裂隙发育,枯水期水位埋深57.50 m。岩溶通道最大高度55 m,宽约2.5 m。钻孔 ZK5 至钻孔 8 之间是需要堵截地段,长约10 m,堵截方量约1000 m³(见图6)。

地下河道顶板以上地层条件:0~10 m为黄色粘土,以下为灰色灰岩,隐晶结构,质纯、坚硬性脆,溶洞及裂隙发育,溶洞充填物主要有粘土、碎石和砂砾。

工程所在地交通条件较差。洼地距忻城县城约12 km,经机耕路(约4 km)与外界二级公路相通。机耕路小而陡,是当地村民生产生活通道,在天气晴好的条件下,也只能通行小型拖拉机。

确定堵截方法应充分考虑以上因素。

4.2.1.1 水下灌注混凝土法

类似钻孔灌注桩施工,进行水下灌注混凝土堵截。该法混凝土流动性好,可充满整个通道,堵水效果好,因混凝土骨料的存在可有效控制漏失,但需要施工深度约70 m、直径<500 mm的钻孔,需配置大型钻机和灌注系统,混凝土细骨料需从外部运入。由于地层岩溶发育,钻孔及灌注混凝土施工难度较

大。现有道路无法达到运输要求,需先行修筑道路。由于洼地为洪淹洼地,施工时间只有4个月左右,一旦降雨,洼地便被淹没,大型设备撤退困难,投资相对较大。

4.2.1.2 回填封堵注浆固结法

该方法是指采用小型岩心钻机钻孔,回填碎石、砂砾封堵后注水泥砂浆和水泥浆固结形成堵体。较小直径钻孔难度较小,并可利用原勘探钻孔,回填材料可现场开采加工,由于钻孔及注浆设备都为小型设备,现有交通条件可满足要求,一旦洼地因降雨被淹,可快速撤离,投资相对较少。缺点是工序较多,技术控制较难。经专家评审,采用该方案。

4.3 施工方法与工艺

4.3.1 钻孔布置和施工

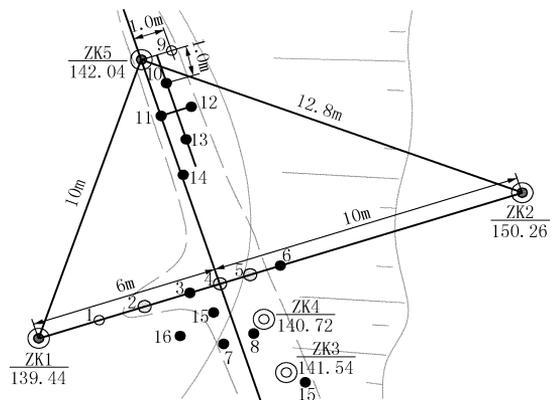


图4 勘探、回填与注浆钻孔布置图

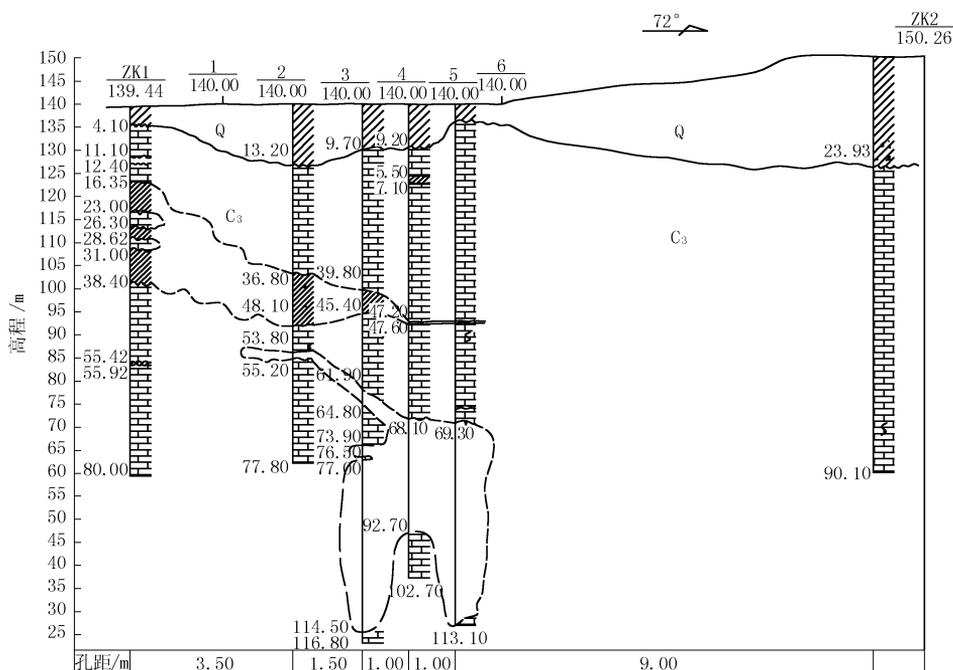


图5 福六浪 ZK1~ZK2 号孔剖面图

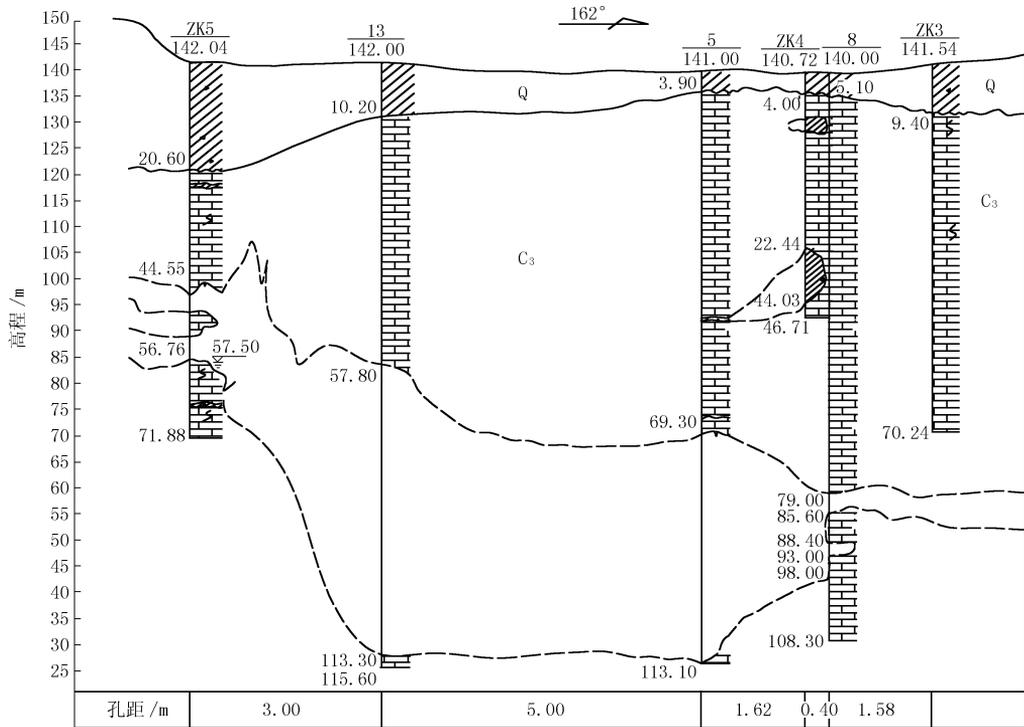


图6 福六浪 ZK5 ~ ZK3 号孔剖面图

布置3个回填与注浆共用钻孔和3个备用与检验钻孔(见图4中的4、5、13、14、7、8号孔),其中4、14、7号为备用和检验孔。钻孔采用金刚石钻进工艺,对原有勘探钻孔实施扩孔,钻孔直径 ≤ 150 mm,遇溶洞和裂隙下入套管护壁,以便于回填施工。

4.3.2 回填材料选择

磨圆度较好的河卵石因其运动摩阻力较小是较理想的回填材料,机打碎石由于棱角分明,运动摩阻力较大,不利于灌填。但就本工程而言,洼地周边山体可供开采、加工碎石,使用河卵石需从外部运入,受交通条件限制,且成本较高。因此,选择就地加工碎石作为填料。填料粒径应根据存在的裂隙的大小、钻孔直径和水流条件进行选择,该工程采用5~10、5~40、20~50 mm三种规格。

4.3.3 回填封堵工艺

4.3.3.1 搭建回填系统

在孔口安装灌料漏斗,搭建与孔口高差约8 m、倾角约 30° 、截面为半圆状的回填斜道,斜道下端接孔口漏斗,上端连受料斗。采用人工回填,填料经受料斗、斜道、漏斗、钻孔到达岩溶管道。搭建斜道的目的,一方面是提高填料的位能,使填料进入孔口时有较大的初速度,另一方面是迫使填料有序地进入孔内,避免发生孔内“架桥”而形成堵塞。斜道可采用2~3 mm钢板卷制,也可采用厚壁PVC管制作,但需更换数次;斜道截面半径 ≤ 168 mm,斜道支架

可采用脚手架或木料搭建。

4.3.3.2 回填方法与工艺

采用混水人工回填法,即人工进料的同时,供水系统向受料斗给水,水石(砂)混合后通过回填斜道进入孔内。混水的主要目的是一是冲洗岩粉,避免岩粉积聚在孔壁上,造成钻孔缩径,避免回填时形成堵塞,二是减少填料与回填斜道及孔壁的阻力。

4.3.3.3 回填速度

为避免填料在孔内架桥形成堵塞,必需控制回填速度,钻孔直径为150 mm时,回填速度应控制在 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 以内。人工进料时必需是有节奏地限量给料,让碎石按序列进入孔内,避免一次性大量给料,以防孔内“架桥”的形成。

4.3.3.4 不同粒径填料的回填次序

由于地下管道底板下存在溶隙,因此先回填小粒径碎石,后回填大粒径碎石。该工程回填 220 m^3 小粒径碎石后,填料面已高出底板,换大粒径碎石,共回填碎石近 1200 m^3 。

4.3.3.5 采用多孔回填

封堵管道长约10 m,单孔回填无法充满整个管道空间,设计采用3个回填孔,呈直线分布,先从上、下游2个钻孔同时回填,最后从中间钻孔进行补充。

4.3.4 注浆施工

4.3.4.1 注浆方法

注浆目的是充填填料孔隙并固结填料,从而形

成具有一定强度的堵体,因此注浆方法以充填注浆为主,采用纯压式注浆。注浆时将注浆花管打入回填料体底部,自下而上分段注浆。灌注水泥-水玻璃浆液时,采用双液注浆法施工。

4.3.4.2 注浆浆液

一般先注入水泥砂浆,待凝固后原位钻孔灌注水泥浆,或待吸浆量减少后改注水泥浆;也可直接注入浓水泥浆;当需要控制凝胶时间时采用水泥-水玻璃浆液。浆液配比如表1所列。

表1 浆液配合比

浆液名称	水灰比	水泥:砂	水玻璃加量 (占水泥重/%)	水泥浆:水玻璃 (体积比)
水泥砂浆	0.4~0.5	1:1		
纯水泥浆液	0.6~0.5		5~8	
水泥-水玻璃浆液	0.8~0.6			1:0.5~1:0.3

4.3.4.3 注浆次序

注浆长度约10 m,呈直线布置注浆孔3个,根据逐渐加密原则,按二个次序施工,先灌注下游孔,再灌注上游孔,最后灌注中间孔;各注浆孔均采用上行式注浆,即将注浆管打入孔底,自下而上分段注浆。

4.3.4.4 注浆控制

4.3.4.4.1 注浆压力控制

注浆压力以低压为主,根据地下水压力、管路压力损失、浆液在填料中流动和扩散压力损失等确定注浆压力,注浆过程可根据实际情况进行动态调整。一般情况下注浆压力取2~2.5倍水头压力即可满足要求。

4.3.4.4.2 注浆量的控制

首先根据公式 $Q = \pi R^2 Lnab$ (其中: L 为注浆段长, R 为扩散半径, n 为孔隙率, a 为有效充填率, b 为无效消耗系数)进行理论估算,以理论值为控制依据;其次,一段注浆结束,待凝后采用触探法对注浆效果进行中间检查,注浆效果不佳的,要进行补灌或复灌,并根据检查结果调整注浆压力和注浆量计算参数,修正各段理论注浆量。

4.3.4.4.3 浆液类型和性能控制

出于节约成本考虑,优先采用水泥砂浆和纯水泥浆液,施工过程根据中间检查结果调整水灰比和外加剂的加量,若纯水泥浆无法克服地下水的稀释作用或因凝胶时间过长而过度漏失,则应更换为水泥-水玻璃浆液,并采用双液注浆法施工。

4.3.4.4.4 注浆结束标准

在规定的压力下,吸浆量 $< 50 \text{ L/min}$,或当单位吸浆量 $< 0.5 \text{ L/min}$ 时再延续灌浆30 min,即可结束灌浆。

4.3.4.4.5 注浆效果检查

注浆施工除进行中间检查外,完工后应进行注浆质量检验,可采用取心、压水试验等方法进行。注浆效果存在缺陷的要进行补充注浆。

5 结语

广西隆光地下河堵截成库在工程技术上获得了成功,也取得了预期效果。封堵施工后第一个枯水期库区渗漏非常有限,洼地成为了天然水库。但在经历2个水文年之后,库区渗漏逐渐加剧,枯水期水位回落明显。这表明因施工时间不足,回填封堵不充分和注浆量不足,堵截体的整体性和强度存在缺陷,并在地下水冲蚀、水位涨落和高水头压力作用下受到了某种程度的破坏,工程还需进一步施工完善。

忻城县经济以农业为主,是国家重点扶贫县,全县97%为岩溶地区,易涝易旱,是典型的干旱缺水地区,但地下水资源丰富。干旱缺水是该县社会经济不发达的主要原因。广西大部分岩溶石山区的现实情况与该县类似,开发利用地下河水资源对岩溶石山区具有重大的现实意义。

广西隆光地下河堵截成库的工程实践,为今后开发利用地下河水资源提供了新思路,是一次有益的探索。

参考文献:

- [1] 莫日生,等.广西忻城县隆光地下河岩溶地下水资源开发工程可行性研究报告[Z].广西水文地质工程地质勘察院,2004.

中交集团连续梁桥支座更换技术研究填补国内空白

本刊讯 日前,由中国交通建设集团承担的北京市重点科研项目“连续梁桥支座更换关键技术研究”,通过专家立项评审。

该项研究将形成适用于不同桥型、不同跨径的桥梁支座更换关键技术,能在不中断交通的情况下进行支座更换。该

项技术具有安全、经济、快速的特点,较常规支座更换技术可节约成本50%以上。该项关键技术研究完成后,将填补我国该领域研究的空白,对我国发展桥梁支座更换标准化,促进桥梁养护领域技术进步具有重要意义。