

浅谈帷幕灌浆处理岩溶坝基渗漏问题——以石林县团结水库副坝坝基及坝肩帷幕灌浆为例

包崇国

云南能阳水利水电勘察设计有限公司, 云南曲靖, 655000;

摘要:帷幕灌浆是岩石坝基防渗处理的一种有效方法,具有防渗效果显著,质量可靠,适应性广等特点。团结水库副坝坝基防渗处理采用常规帷幕灌浆,施工中保证每一灌段“灌饱灌透”,取得了较好的防渗效果。副坝帷幕灌浆工程的成功实例,对岩溶地区中小型水库的防渗处理,具有较高的参考价值。

关键词:团结水库;岩溶坝基;帷幕灌浆;渗漏

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.093

1 工程概况

团结水库位于石林县城北面,乃古石林风景区旁,距县城24公里,地理位置为东经 $103^{\circ}21'30''$,北纬 $24^{\circ}54'00''$ 。始建于1963年,1969年加固扩建为小(一)型水库。2008年再次加固扩建后规模仍为小(一)型,主坝坝顶高程1844.20m,最大坝高19.20m,坝顶长1024m,顶宽5m,坝型为土石分区坝;新建副坝坝型为粘土心墙风化料坝,坝顶高程1844.20米,最大坝高13.7米,坝顶长319米,坝顶宽4.0米,坝顶为混凝土路面;控制径流面积 41.9 km^2 (含引流区面积 15.2 km^2),年径流量1195万 m^3 ,为多年调节水库。总库容810万 m^3 ;正常蓄水位1843.0m,死水位1835m。设计洪水标准30年一遇($P=3.33\%$),校核洪水标准300年一遇($P=0.33\%$),校核洪水位1843.99m,工程等级IV等,主要建筑物级别四级,地震基本烈度VIII,设防烈度VIII。设计正常使用年限30年。

2 副坝坝基地质情况

团结水库副坝位于水库右岸照壁山与哑巴山之间,距白云洞暗河平均距离约400~600m。坝址区地形平坦、开阔,属岩溶地貌区,地表岩溶发育,岩溶形态为溶沟、石牙、落水洞、漏斗等;副坝坝基岩溶形态主要为溶洞、暗河、溶隙等,两坝肩为溶蚀残丘。出露地层为二迭系下统阳新组(P1y)灰白色厚层块状白云岩化灰岩,夹灰白色中厚-厚层状泥晶灰岩、条带状亮晶内砂屑灰岩夹亮晶生物碎屑灰岩。构造节理主要为 18° 、 20° 、 70° 、 80° 、 310° 。~ 320° 。三组。

坝基0+000~0+040段开挖至弱风化白云质灰岩,但

岩溶发育,有多处溶洞、溶沟及溶槽,溶隙广泛分布;该段坝基浅部岩溶内充填物已作掏槽处理,其溶洞、溶沟、溶槽在防渗灌浆盖板浇筑前用C15混凝土回填。坝基0+040~0+065段开挖至残积褐红色粉质粘土,结构密实。基岩承载力为350~400KPa,土层承载力120~180KPa,承载力满足设计要求。

3 帷幕灌浆设计与施工

3.1 主要设计指标

1.坝基及坝肩防渗处理采用帷幕灌浆,副坝左岸延长线(帷幕0+657.5m~0+891.52m段)布置单排孔,孔距2.0m;副坝(帷幕0+338.0m~0+657.5m段)布置双排孔,孔距1.5m,排距1.0m;右岸延长线(帷幕0+50.0m~0+338.0m段)布置双排孔,孔距2.0m,排距1.0m。副坝及左、右岸延长线共布设帷幕灌浆生产孔875个。

2.孔位:孔位与设计位置的偏差不得大于10cm。

3.孔深:灌浆顶界为正常蓄水位,高程为1843.0m;灌浆底界原则上按 $q < 10L_u$ 进行控制(连续两个灌段达到此标准),但若孔深超过1800.00m高程仍达不到上述标准,则以1800.00m高程为限,采用悬挂式帷幕。

4.灌浆段长:顶部为1.5~2.0m,下部一般为5.0m,最长不超过6.0m,遇到溶洞或大裂隙,则尽可能缩小段长。

5.孔斜:孔底偏差不得大于孔深的2%。

6.灌浆压力:

①孔深5~10m,孔口压力0.02~0.25MPa;

②孔深10~20m,孔口压力0.25~0.55MPa;

③孔深大于20m时,按每米增加0.03MPa压力控制。

压水压力为该段灌浆压力的80%。

7.灌浆材料:采用P.O42.5复合硅酸盐水泥及机制砂。机制砂混合浓水泥浆在充填溶洞或大裂隙中使用。

8.浆液比重:坝基采用纯水泥浆液灌注,水灰比采用5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1等七个比级。

9.结束标准:采用自上而下分段灌浆法,灌浆段在最大设计压力下,注入率不大于1L/min后,继续灌注60min,可结束灌浆。

10.设计防渗标准:坝基 $q \leq 10Lu$ 。

3.2 帷幕灌浆施工准备

3.2.1 混凝土灌浆盖板浇筑

C15混凝土灌浆盖板浇筑于0+000~0+319段,宽3.0m,板厚50cm。

3.2.2 帷幕灌浆试验

帷幕灌浆生产性试验目的

(1)验证灌浆设计的布孔形式、排距、孔距的合理性。

(2)通过试验提出合理可行的灌浆工艺及施工方法,推荐适宜的灌浆压力、灌浆材料、浆液配比、浆液变换、最优的水灰比等技术参数;

(3)研究遇破碎带、溶蚀带、溶洞、溶隙、裂隙等特殊地质情况下应采取的一些特别处理措施及钻灌参数。

(4)研究适合本工程特点与要求的灌浆质量标准及检查方法,为编制灌浆工程施工技术要求、制定验收评价标准提供技术依据。

(5)提供地层耗材资料,估算灌浆用料数量,选定合理的劳动组合,安排合理的施工进度。

试验区布置:副坝帷幕灌浆试验区分试验区一区(副坝右岸)、试验区二区(副坝左岸)及试验区七区(副坝中部)三个试验区。

帷幕灌浆试验得出的结论:

(1)帷幕灌浆试验取得成功,为后期生产性帷幕灌浆的防渗处理方案提供了有力的依据。

(2)从I、II、III序孔钻孔、灌浆情况及检查孔压水试验成果分析,地层的可灌性较好,通过灌浆能够形成合格的防渗帷幕体。

(3)试验区地层灌浆设计参数——排距、孔距、段长、压力值等能满足设计要求。

施工单位完成灌浆试验后及时编写《帷幕灌浆试验

报告》,报监理、勘察设计单位审核确认。

3.3 帷幕灌浆施工

3.3.1 施工顺序:

基岩帷幕灌浆按分序加密的原则进行,分I、II、III序孔。先进行先导孔和I序孔施工,再进行II、III序孔施工。

3.3.2 施工主要工序

施工主要工序包括钻机定孔校正、钻孔、洗孔、测斜、压水试验、灌浆、终孔验收、封孔等八个工序。

3.3.3 施工工序控制

(1) 钻孔

①采用重探XY-2PC岩芯钻机。钻机安装平整稳固,必须保证孔位准确,开孔位置与设计孔位的偏差不得大于10cm;在钻孔过程中必须进行孔斜测量,要求每钻进10m~15m测斜一次,灌浆孔孔底偏差按不得大于孔深的2%控制。

②开孔直径为 $\Phi 110\text{mm}$,终孔直径不小于 $\Phi 75\text{mm}$ 。

(2)钻孔冲洗及简易压水:每段钻进完成后,首先进行钻孔冲洗,直至外管回水返清,且孔内沉积物厚度不超过20cm,一般冲洗时间不小于20min,然后进行简易压水,先导孔、I、II、III序孔都要进行,连续读取的四个数中最大值与最小值之差小于最终值的10%,或最大值与最小值之差小于1L/min时,压水试验即可结束。

(3)灌浆浆液配置:基岩采用纯水泥浆灌注。浆液水灰比采用选定为5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1等七个比级,由稀至稠逐级调配使用。用5:1、3:1引导开灌,2:1、1:1、0.8:1主灌,0.6:1、0.5:1用于特殊情况处理。遇大吃浆段也可采用由稠至稀进行灌注。

(4) 灌浆

①灌浆按自上而下分段的原则进行。由两排孔组成的帷幕,先进行下游排孔的灌浆,然后进行上游排孔的灌浆。灌浆孔的基岩段长小于6m时,可采用全孔一次灌浆法,大于6m时,采用自上而下分段灌浆法。

②灌浆工艺采用自上而下分段循环灌浆(灌具为双管双塞)。

③灌浆段的施工程序为:钻进→冲孔→压水试验→灌浆结束→下一灌浆段的施工。

(5)灌浆压力:设计灌浆压力按公式 $P=P_0+mD$ 计算,

式中：P—为灌浆全压力值（MPa）；

P0—为最大允许孔口劈裂灌浆压力值取 0.05MPa（初拟值）；

D—孔段埋深（m）；

m—孔段每深 1m 的递增系数，坝体及接触带取值为 0.015~0.02 MPa（初拟值），基岩取值 0.02~0.03 MPa（初拟值）。

根据灌浆试验成果，确定灌浆压力为：

①孔深 5~10m，孔口压力 0.02~0.25MPa。

②孔深 10~20m，孔口压力 0.25~0.55MPa。

③孔深大于 20m 时，按每米增加 0.03MPa 压力控制。

④施工中可根据孔内情况进行调整。

（6）浆液变换：帷幕灌浆浆液浓度遵循由稀到浓的原则逐级改变，施工过程中按以下要求控制，

①灌浆过程中，当灌浆压力保持不变，吸浆量均匀减少，或者吸浆量变化不大而灌浆压力均匀升高时，不得改变水灰比；

②当某一比级浆液注入量已达 300L 以上，或灌注时间已达 1h，而灌浆压力和注入率均无显著改变时，换浓一级水灰比浆液灌注；

③当注入率大于 30L/min 时，根据具体情况越级变浓；

④当采用最浓级浆液灌浆，而吸浆量仍很大、不见减小时，可采用限流、低压、限量、间歇、待凝及加入水玻璃等方法处理；

⑤改变浆液水灰比后，如灌浆压力突增或吸浆量突减，应立即换回到原水灰比进行灌注；

⑥如发生回浆变浓现象，换用相同水灰比的新鲜浆液进行灌注，若效果不明显，延续灌注 30min，即可停止灌注；

⑦灌浆过程中，每隔 30~60min 测量一次浆液比重，另外定时测量浆液温度。浆液搅拌时间超过 4 小时应弃浆。

（7）灌浆结束标准及封孔

①帷幕灌浆采用自上而下分段灌浆法时，灌浆段在最大设计压力下，注入率不大于 1L/min 后，继续灌注 60min，可结束灌浆。

②灌浆封孔采用“分段压力灌浆封孔法”。

（8）特殊情况处理

①灌浆过程中，发现冒浆、漏浆，根据具体情况采

用嵌缝、表面封堵、低压、浓浆、限流、限量、间歇灌浆等方法进行处理。

②帷幕灌浆过程中如发生串浆时，采用以下方法处理：

a 如被串孔正在钻进，要立即停钻。

b 串浆量不大于 1L/min 时，可在被串孔内通入水流。

c 串浆量较大，在串浆孔具备灌浆条件时，尽可能与被串孔同时进行灌浆，应一泵灌一孔。否则应将串浆孔塞住，待灌浆孔灌浆结束后，串浆孔再行扫孔、冲洗、压水检查，而后继续钻进或灌浆。

③灌浆工作必须连续进行，若因故中断，按照下述原则进行处理：

a 尽可能缩短中断时间，及早恢复灌浆。

b 若中断时间超过 30min，则要冲洗钻孔，如无法冲洗或冲洗无效，则应进行扫孔，而后恢复灌浆。

c 恢复灌浆时，使用开灌比级的水泥浆进行灌注。如注入率与中断前的相近，即可改用中断前比级的浆液继续灌注；如注入率较中断前的减少较多，则浆液应逐级加浓继续灌注。

d 恢复灌浆后，如注入率较中断前减少很多，且在短时间内停止吸浆，应采取补救措施。

4 讨论

团结水库副坝坝基及坝肩防渗处理采用常规帷幕灌浆，而未采用高压灌浆，是勘察设计单位综合考虑的结果。在副坝（帷幕 0+338.0m~0+657.5m 段）布置双排孔，且孔距 1.5m，看似保守，浪费投资，实则贯彻“结硬寨，打呆仗”的战术思想，乃针对复杂的岩溶地质情况和目前的施工技术水平而选定的。

①要求拟定终孔段钻孔取芯，观察芯样是否完整，是否有裂隙分布；若岩芯不完整，有裂隙分布，需再加深一灌段。

②分析上一灌段的水泥单耗量，若水泥单耗量大于 80kg/m，拟定的终孔段不宜终孔，最好加深一灌段。

③生产孔灌前压水试验，由于施工单位采用的方法为简易压水试验，测得的透水率不太准确，需保证终孔段透水率 $q < 8Lu$ 才能稳妥终孔（八、九不离十嘛），当透水率 $q \geq 8Lu$ 时，最好加深一灌段。

4.3 钻遇溶洞或大裂隙等特殊地质情况的处理措施：当钻孔“掉钻”，钻遇溶洞、大裂隙时，在孔口用浆液水灰比为 0.5:1 的浓浆混合机制砂注入孔内空洞中，填

充满孔,适当加压,待凝之后扫孔。若扫孔后还有空洞,第二次注入、扫孔,第三次注入、扫孔...,反复进行多次,直至空洞内砂浆充填密实,再次进行扫孔→灌前压水试验→灌浆(按设计灌浆压力施灌)→扫孔→灌后压水试验,复灌多次,直至该溶洞段“灌饱灌透”,灌后透水率合格后再钻下一灌段。该方法虽然“笨拙”,费时费力,水泥耗量高,但溶洞或大裂隙内水泥砂浆扩散范围大、充填密实,能有效形成防渗帷幕,而且采用常规的灌浆材料——水泥和机制砂,其防渗帷幕的耐久性、稳定性都能得到保证。

5 帷幕灌浆效果

5.1 检查孔检查结果

帷幕灌浆孔(不包含试验区)875个,灌浆孔结束后共布置检查孔99个,压水试验711试段,试验结果 $q_{\max}=9.51\text{Lu}$, $q_{\min}=0.03\text{Lu}$, $q_{\text{平均}}=1.62\text{Lu}$,属于弱~微透水性,符合设计—基岩 $q\leq 10\text{Lu}$ 防渗标准要求。

5.2 坝后渗水观测分析

由于副坝坝后地形较高,排水棱体顶高程1836.50m,下游坝脚最低点—排水沟底高程1835.10,且排水沟外用开挖料回填,副坝(帷幕0+338.0m~0+657.5m段)帷幕灌浆生产孔结束2010年4月18日至2010年9月底,最高库水位1836.10m,只稍高于排水沟底,未观测到渗水现象。

5.3 质量验收评定

副坝坝基及坝肩帷幕灌浆工程于2008年12月20

日开工,2010年8月12日完工。该帷幕灌浆工程共有875个灌浆孔,划分为88个单元工程,全部88个单元工程的施工质量验收评定为合格。

6 结语

帷幕灌浆是岩石坝基防渗处理的一种有效方法,具有防渗效果显著,质量可靠,适应性广,设备工艺简单,施工方便快捷,技术成熟,造价低等特点,因而被广泛采用。团结水库副坝坝基防渗处理采用常规帷幕灌浆,施工中保证每一灌段“灌饱灌透”,取得了较好的防渗效果。作者为当年团结水库加固扩建工程的地质专业监理工程师,本文是对副坝帷幕灌浆工程的回顾。副坝帷幕灌浆工程的成功实例,对岩溶地区中小型水库的防渗处理,具有较高的参考价值。

参考文献

- [1] 保胜军. 石林县团结水库加固扩建工程施工管理质量研究[J]. 广东科技, 2014, 23(12): 2. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5423.2014.12.051.
- [2] 施田昌. 降水径流关系法在石林县团结水库除险加固扩建工程中的应用[C]//2008年昆明市生态城市建设与水资源水环境论坛. 0[2026-04-20].

作者简介: 包崇国(1966~),男,1987年毕业于成都地质学院物探系,水利水电工程地质专业高级工程师,注册全国水利工程建设监理工程师,长期从事水利水电工程施工监理及项目建设管理工作。