

水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术分析

文 / 莫敏捷 深圳市东江水源工程管理处

摘要: 为提升水利水电工程质量,有必要结合工程实际要求和设计细节,全面优化坝基固结关键工程质量固结灌浆技术能够明显提升水库大坝坝基岩体强度,同时降低岩体透水性,因此在工程准备、落实、预埋管和钻孔等多个环节把控技术要点,能够有效改善水利水电工程水库大坝坝体渗流沉降变形的问题。本文结合实际工程案例,分析了坝基固结灌浆施工技术要点,希望能为后续相关工程的落实提供合理参考。

关键词: 水利工程; 水库大坝; 灌浆施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.083

引言

采用坝基固结灌浆工艺能够有效地增强坝体的抗压强度、岩体的弹模系数,并降低岩体的渗透性,提升水利水电工程落实便利性。且经过灌浆技术处理的水库大坝坝基,整体工程的费用也相对较低,因此在各种水利工程的建设中得到了广泛的应用。

一、水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术要点

(一) 准备环节

表1 勘查结果汇总

项目	具体内容
岩层分布	确定地下岩层分布范围、厚度、岩性等特征参数
地质构造	分析地下断层、裂隙、破碎带等地质构造分布及其与地下水的关联性
地下水条件	掌握地下水位、水压、流向、水质及流速等参数

除地质调查之外,还要根据工程实际,选择合适的水泥灌浆材料。一般水泥灌浆材料仅适合常规岩石层的灌浆,造价低廉但固化周期较长,容易出现干燥开裂等问题。因此大部分的水库大坝,在施工中都会选择能够符合特定的地质条件和工程需要的灌浆材料,其整体抗渗性和耐久性都需要和工程设计要求相符,并且具有快速硬化的效果。同时灌浆材料配比应从硬化时间、抗压强度和渗透性等方面进行综合优化设计,还要根据工程项目的具体条件和操作需要,调整标准化的组织管理方案。同时保证施工、监理、设计部门参与可控化的技术交底,对可能出现的风险问题进行预测并做好预案,从而保持整个工程项目的质量水平。

(二) 预埋管作业

水利水电工程水库大坝施工单位应按照设计方案及具体要求,严格执行规范中的规定,确保灌浆孔位置的合理性^[2]。一般情况下的水利水电工程施工过程中,灌浆孔预埋管道的管径应保持 $< 50\text{mm}$,并严格按照工程设计要求预埋。现场安装实例如图1所示。

(三) 钻孔作业

在预埋管道的范围内,要严格按照钻孔设计要求作业。一是要选择合适的设备,并确保钻孔的孔距、排距等均符合设计规范,使水库大坝坝基固结质量得到提高。二是在确定了钻孔深度之后,也要保障深度严格符合要求。三是在钻孔完毕后,用清水或压力水进行钻孔冲洗,

为了确保水利水电工程项目的质量等级达到规范要求,必须对准备工作的内容进行优化,并保持整体控制的科学性。例如在工程准备阶段要对建设工程区进行全面的地质调查,采用钻探、物探和井间示踪等方法进行勘探^[1]。在工程准备阶段,物理勘查是一种较为普遍的手段,它可以通过地震波、电磁波等多种物理手段,对深层地质结构和地质结构进行实时监测,为后续的工程落实提供依据。勘测工作需要收集的水利水电工程信息如表1所示。



图1 水库坝基灌浆预埋管现场安装实例

将残留在孔中的杂物、泥浆等杂物及时清理干净,确保下一步工作的顺利进行。若孔内存在比较明显的沉渣结构,则要进行二次清理,以保证坝体的固结灌浆施工的最终质量和后续水利水电工程应用效果。在整个坝基结构二次冲洗之后,使用灌浆机对裂隙进行冲洗,当返水变为清水时,这样就能避免冲洗孔不到位的问题^[3]。四是要进行初步压力测试,通过测试结果及时掌握钻孔施工区段有无渗漏或结构渗漏的情况。压力测试通常采用

单测点压水方式,水质稳定度也会控制在 $> 10\%$ 。

(四) 灌浆作业

在完成水利水电工程水库大坝坝基固结的初期工作后,就需要正式进行灌浆作业^[4]。坝基固结灌浆通常采用“孔内循环”的施工方式,采用“全孔一次性灌浆”与“全孔纯压灌浆”技术相结合,再保持盖层混凝土强度 $> 50\%$ 。还要按照上游、下游、后中间排的环状顺序处理灌浆工作,确保前一阶段的工作质量达到标准后,为了保持水库坝基固结灌浆的质量和效果,可以采用现场测试的方式确定压实参数,提升工程整体运行效率。

另外,在施工期间要严格控制水灰比,根据从稀到浓的原则开展工作,在开灌时,水灰比一般为 $3:1$ 、 $2:1$ 、 $1:1$ 、 $0.5:1$ 。在不增加灌浆压力的前提下,通过变更注水量,使灌浆速率维持在 $30\text{L}/\text{min}$ 以上,然后对灌浆动力参数实行统一的控制,采用间断调节水泥用量的方法,以保证后期施工的稳定性。在对灌浆体进行补强灌浆时,应安排专人检查,并对灌浆进行单独检查。灌浆作业完成后,应及时清除浆液,并对钻孔深度进行复核,保证灌浆的总体质量满足设计标准。

(五) 封孔及质量检测

灌浆作业完成后,应对钻孔部位进行标准化封闭防止返浆,还要根据工程实际情况和特点,制定合理的质量检验方案,确保各方面的施工内容相互衔接,并且及时地找到问题进行整改。当前比较常用的质量检验方法,有钻孔取样分析法、压水试验分析法、弹性波速分析法、静载试验分析法等。以静载荷试验法为例,该方式就是通过对灌浆段岩体的承载力及变形特征进行测试,综合各相关参数,就能实现对灌浆施工的综合加固效果的直接评价,保证工程质量标准。

(六) 落实管理机制

首先对水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工进行标准化管理,可以建立职务与职级相结合的责任制。并在各级相关领导、项目负责人、工程技术人员、施工人员等方面,对水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆的工作进行详细的界定,与分级管理制度相结合,能使工程项目的质量得到进一步提升。

其次要完善监管体制,为了保证水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆的成功实施,必须建立健全的监理制度,保持整体工作的科学性^[5]。加强质量检验工作,可以从对施工过程中出现的不稳定因素分析入手。监理单位应与建设单位一起对施工内容进行监督,充分利用动态监理的优势,保证后续工作的顺利进行。

最后可以定期召开会议,要根据工程项目的建设进度与流程,定期召开例会,对现场工作实时汇总,确定了工程项目的整体操作水平之后,达到统筹管理的目的。

(七) 制定安全保障措施

在施工开始之前,可以对施工单位进行标准化的安全技术交底,保证在施工项目中,有关的工作人员能够清楚地知道工作过程和关键点的工作要点,并且要按照

安全规范进行有关工作^[6]。同时为了保证水利水电工程水库大坝坝基灌浆施工的安全性和质量,需要制订详尽的安全应急计划,对潜在的危险因素进行评估,制订相应的紧急处置方案。

另外,还要强化对工程中的安全预防措施,按照水利水电工程的水库大坝坝体地基灌浆施工的步骤和要求,对施工现场进行常规的安全巡视。并对出现的问题进行总结,及时排除安全隐患。

二、水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术项目应用案例

(一) 项目概况

A水利水电工程水库位于气候干燥、降雨稀少的柯林土石山区,是一座年调水量较小的水库,主要用于灌溉和防洪。

库区为土石山森林,主沟道长 25km ,沟道坡度为 2% ,具有较好的生态环境。坝型为均质土坝基高 1042.7m 。原设计防洪标准为50年一遇、洪峰 $155\text{m}^3/\text{s}$ 、设计洪水位 1664m 。水库工程设计的校核洪水位为200年一遇、 $226\text{m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量,防洪设计方案为 106583m 。设计时的兴利水位为 1662.7m ,汛限水位为 1046.5m 。水库总库容为 $155\text{万}\text{m}^3$,有效库容 $108\text{万}\text{m}^3$,滞蓄 $47,000\text{m}^3$,死蓄 1500m^3 ,目前已淤积 $18,000\text{m}^3$ 。

(二) 施工设计

在坝体地基固结灌浆的设计中,该工程止点设为 $0+010.000+448.32$,并在坝体的下游两侧设置了两列,每行间距为 2.5m ,孔距为 3.0m 。

一般紧靠帷幕的钻孔深度 $> 9.0\text{m}$,而在远离帷幕的地方,孔深仅为 7.2m ,而在断层带处,因地质情况比较复杂,孔深仍需进一步加大。当坝体的固结灌浆渗透系数 q 减小至 $< 5\text{Lu}$,其强度才能满足设计要求。技术人员根据施工图纸,采取孔口封堵的方法进行测试。在此基础上技术人员对原有的施工设计方案作了修正,按照坝体的高度,将上下游分别划分为1,2,3排,排距为 1.7m ,孔间距离为 2.0m 。

(三) 施工过程

该水库大坝基础灌浆工程中,技术人员采用逆时针循环分段灌浆方法,按游河区-中部河区-下游河区的河床水平面顺序分段施工。当施工过程中坝体实际碾压高度提升时,会注意确保间断灌浆时边坡灌浆孔数 $> 5\text{m}$ 。

在灌浆时,应遵循序I,序II,加密孔加密的顺序展开工作。本项目采用气囊灌浆塞,洛克660液压钻及3#SNS灌浆设备。本系统采用LJ-III型灌浆装置,实现了压力、流量、水灰比等数据的采集与记录。

工程所采用的是P.042.5普通硅酸盐水泥,当灌浆速率过高时,应该采取分步增压的方式,在灌浆位置临近最大压力时,要根据灌浆量的变化,对灌浆压力进行合理的设定,如表2所示,将灌浆压力控制在一个合理的区间。

表 2 灌浆压力与注入率之间的关系

最大灌浆压力 P/MPa	灌浆注入率 /L · (min) ⁻¹
0.5	30
0.8	30 ~ 20
1.0	20 ~ 10
1.5	< 10

灌浆时水浆比例应控制在 0:6:1, 若在水浆比为 0:6:1 时, 灌浆量 >300L, 或在 1 小时后, 压力和注入量仍无显著改变, 可将水浆比调节到 0:1:1 再继续灌注。若灌浆速率始终 < 1.0L/min, 则灌浆 30min 即可完成。基础固结灌浆结束后, 可以马上用水灰比为 0:1 的高浓度浆液, 对灌浆孔进行封孔作业, 并把孔口抹平。

在钻孔工作中根据预先埋好的 76mmPVC 管材的具体位置, 用宣化钻机将其固定, 并进行钻孔施工, 在施工期间严格按照施工设计来确定孔深、孔方向。在进行坝体灌浆时, 冲洗水压应控制在灌浆压力的 80%, 灌浆气压应 < 500MPa, 当灌浆压力 > 0.5MPa, 取 0.5MPa 即可。在对裂缝进行冲洗时, 要在返水澄清 10min 后停下, 并将整个冲洗时间控制在单孔冲洗 30min 以上, 并使串联孔冲洗 2h 以上, 返水变得清澈后再灌浆, 保证钻孔中剩余的沉渣厚度不超过 20cm。

该项目在压水实验过程中, 将灌浆压力控制在 80% 左右, 但不高于 1MPa, 并保证 20 分钟以上。且每 5 分钟测量一次具体的压力流速, 所算得流速结果数据相对稳定, 渗透率用 q (Lu) 表示, 具体数值用以下公式计算:

$$q=Q/PL$$

式中:

Q ——压入流量 (m^3/s)

P ——试验阶段全部压力

工程设计中要求对钻孔部位无渗漏现象的孔段, 灌浆作业结束后, 不必等待回顾。但若在灌注之前出现涌水或灌注后出现返浆等现象的孔段, 则要进行待凝处理, 并根据具体的施工条件来确定待凝的持续时间。对工程中的部分灌注点, 如抽水量比较大, 或是计划上提抬动, 该工程采取分段增压的办法, 当提升问题比较严重的时候, 还会对灌浆技术进行相应的调整。比如采取渐进增压或低压缓慢灌的措施, 严格按照工程的规定对注浆的压力进行控制。同时为防止混凝土表面胎动, 还会按照“一泵灌一孔”的原则来进行混凝土浇筑。

该工程灌浆方式为孔内分段, 从上到下进行阻塞灌浆, 将灌浆分成两个区段, 灌浆塞设在已灌浆结束后的 0.5m 以上位置防止漏灌。工程采用的水泥浆体的水灰比有 4 种, 即 3:1、2:1、0:1、0:1。设计方案中

规定, 在开灌时水灰比为 3:1, 当灌浆压力恒定时, 若灌浆量持续减少或持续上升, 则不必调节水灰比。水灰比灌浆泵注水量大于 300L 而灌浆的压力、吸力都没有明显变化时, 将水灰比调整为一级, 然后再继续灌浆。当浆液抽流量大于 30L/min 时, 应根据具体的灌井条件, 对浆液进行超增稠处理。且当灌浆过程中, 当浆液返浆较厚时, 要用原来的水灰比再次注入, 若浆液还是偏浓, 则需要再灌半个小时。同时该工程的回填封孔采取置换加加压灌浆的方法, 封孔完毕后, 再用干燥的预缩胶浆压实, 以保证封孔的面与混凝土面等高。

(四) 质量评价

在该水库大坝基础灌浆施工中, 通过设置压水检测检验孔, 对其灌浆质量进行了有效检验。共有 124 个检测孔, 287 个试验区, 各试验区的渗透系数都满足工程设计要求。水库大坝基础灌浆结束后, 又进行了声波检测, 通过设置声波检测孔, 发现仅有一孔不满足设计要求, 在补灌后又在此位置设置了声波检测孔, 经检验, 已达到工程设计规范。

此外在灌注结束后, 通过对岩石的声波检测, 发现在灌注结束后, P 波传播速度显著增加, 基岩的均质程度也有了很大的提高。综合以上分析, 可以得出结论: 本水库大坝基础灌浆施工质量满足设计和有关规程的要求。

结语

总之, 在水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工过程中, 必须按照规范的工作程序来进行具体的施工, 在此基础上进一步强化施工质量管理, 发挥好“以人为本”的管理理念, 营造稳定科学的施工作业环境。并与规范化的工程验收处置措施相配合, 减少潜在的安全隐患, 可保障工程的可持续、健康发展。

参考文献

- [1] 司利斌, 郭雷. 帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固处理中的应用研究 [J]. 价值工程, 2025, (11): 128-130.
- [2] 冯保兴, 丁凯. 水电站大坝坝基引管固结灌浆施工研究 [J]. 四川水利, 2024, 45 (S2): 67-69.
- [3] 罗康权. 坝基固结灌浆施工技术研究 [J]. 广东建材, 2024, 40 (04): 119-121.
- [4] 张绍莹. 岩溶区拱坝坝基灌浆施工关键技术要点 [J]. 中国水运, 2023, 23 (24): 116-117.
- [5] 姜红斌. 洪水河水库坝基帷幕灌浆施工工艺 [J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59 (03): 61-64.
- [6] 季晓冬. 水库除险加固工程坝基固结灌浆施工方法设计 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6 (01): 102-104.

作者简介: 莫敬捷 (1993.03--), 男, 汉族, 广东省湛江市, 本科, 毕业于嘉应学院, 助理工程师; 研究方向: 水利水电。