

复杂岩溶地质条件下水库大坝帷幕灌浆关键技术与工程实践研究

叶磊 吴俊 曹聪聪

江苏省水利建设工程有限公司, 中国·江苏 扬州 225000

摘要: 针对江苏地区某库容 115 万 m^3 、存在强岩溶渗漏风险的小(1)型水库大坝, 本文系统研究了其防渗帷幕灌浆的施工关键技术。针对坝址区强风化、强岩溶发育的不利地质条件, 通过现场灌浆试验优化了孔距、排距及灌浆压力等核心参数。工程采用“分序加密、自上而下分段”的钻灌工艺, 并针对两岸岩溶区、河床段及左岸隧洞等不同施工场景实施了差异化技术对策, 如采用水泥-粘土复合浆液处理大吸浆量溶洞、在隧洞内实施帷幕以减少无效进尺等。实践表明, 通过严格的过程控制与质量检查, 最终形成的防渗帷幕透水率全部小于 5Lu 的设计标准, 合格率达 98%, 有效解决了绕坝渗漏问题。本文总结的成套技术为类似复杂地质条件下的坝基防渗处理提供了可借鉴的经验。

关键词: 帷幕灌浆; 岩溶地质; 分序加密; 参数优化; 质量控制; 工程实践

Research on Key Technologies and Engineering Practice of Curtain Grouting for Reservoir DAMS under Complex Karst Geological Conditions

Ye Lei, Wu Jun, Cao Congcong

Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., LTD., China Jiangsu Yangzhou 225000

Abstract: This paper systematically studies the key construction technologies of anti-seepage curtain grouting for a small (1) type reservoir dam with a storage capacity of 1.15 million cubic meters and a strong risk of karst seepage in Jiangsu Province. In view of the unfavorable geological conditions of strong weathering and strong karst development in the dam site area, the core parameters such as hole spacing, row spacing and grouting pressure were optimized through on-site grouting tests. The project adopts the drilling and pouring process of "sequential densification and top-down sectioning", and implements differentiated technical countermeasures for different construction scenarios such as the karst areas on both banks, the riverbed section and the left bank tunnel. For instance, cement-clay composite slurry is used to treat large slurry absorption volume karst caves, and curtains are installed in the tunnel to reduce ineffective advance. Practice has shown that through strict process control and quality inspection, the permeability rate of the final formed anti-seepage curtain is all less than the design standard of 5Lu, with a qualification rate of 98%, effectively solving the problem of seepage around the dam. The complete set of technologies summarized in this article provides referential experience for the anti-seepage treatment of dam foundations under similar complex geological conditions.

Keywords: Curtain grouting; Karst geology; Sequential encryption; Parameter optimization; Quality control; Engineering practice

0 引言

大坝坝基及两岸山体的渗漏控制是保障水利工程长期安全运行的核心课题之一^[1]。帷幕灌浆作为一项成熟的基础防渗技术, 通过在坝基岩体中构筑一道连续的、低透水性的浆液帷幕, 能够有效延长渗径、降低渗透压力, 从而确保大坝的稳定^[2]。然而, 在岩溶发育、断层破碎带广泛分布等复杂地质区, 传统的帷幕灌浆技术常面临浆液流失难以控制、帷幕连续性不易保证、施工效率低下等挑战^[3]。

本文依托江苏省某典型小(1)型水库除险加固工程。该水库最大坝高 18.0m, 总库容 115 万 m^3 , 工程等别为 IV 等。水库蓄水后, 坝址区工程地质勘察揭示, 坝基存在沿 T1f4、T1f6-2 等地层的强岩溶发育带, 形成了明确的渗漏通道, 严重威胁大坝安全并造成水资源浪费。为解决这一特定工程难题, 项目组开展了一项针对性的帷幕灌浆技术研究与实践。本研究旨在探索一套适用于强岩溶、高渗透且地形条件复杂坝基的, 兼具可靠性、经济性与高效性的

帷幕灌浆施工与全过程质量控制方法。

1 工程地质难题与总体防渗方案

1.1 地质条件与渗漏机理分析

坝址区地层岩性复杂，左岸 T1f6-1、T1f6-2 层及右岸 T1f4 层为强岩溶发育的灰岩，溶隙、溶洞甚至地下管道系统较为发育，透水性强 ($q>50Lu$)，且地下水位低缓，构成主要渗漏通道。河床段基岩为中等透水岩体 ($q=10\sim 50Lu$)。左岸地形陡峭，若完全采用地表钻孔，将产生大量无效进尺，不仅成本高昂，且钻孔偏斜难以控制，影响帷幕搭接质量。

1.2 防渗帷幕设计方案

针对上述地质难题，设计采用了“封闭通道、接续隔水层、分区差异化”的防渗理念。

(1) 帷幕线路：左岸帷幕线向上游延伸，封闭 T1f6-1、T1f6-2 岩溶层并接至 T1f7 相对隔水层；右岸封闭 T1f4 强岩溶层并接 T1f3 相对隔水层。

(2) 帷幕结构与深度：鉴于强岩溶带渗漏风险高，设计采用双排帷幕，主帷幕下游设副帷幕以增强封闭效果。主帷幕孔距 3m，排距 1.5m。帷幕底界以满足深入 $q \leq 5Lu$ 的弱透水岩体及不低于 0.6 倍坝高（约 10.8m）的双重标准控制，河床段实际深度约 29m。

(3) 施工通道优化：创新性地利用左岸已有的导流隧洞（城门洞型，3.0m×3.5m）作为灌浆廊道，实施洞内钻孔灌浆，彻底解决了陡峭左岸的施工难题，大幅减少了无效钻进，确保了钻孔精度与施工安全。

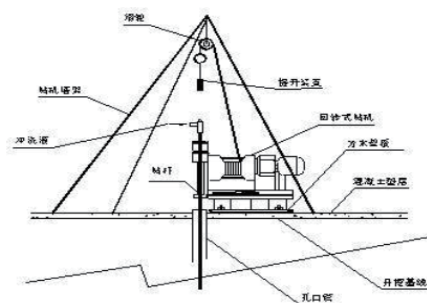


图1 为帷幕灌浆钻孔施工图

2 灌浆试验与关键施工参数优化

施工前，在具有代表性的岩溶发育区设立了灌浆试验区，旨在将理论设计转化为可操作的施工参数。

2.1 材料性能试验与选择

对料场粘土进行了粒径分布、矿物成分及阳离子交换容量分析，最终选定塑性指数大于 17 的优质粘土。通过对比试验，确定了以强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥为主材，在遇特大溶洞或通道时，采用水泥：粘土 = 1:1 的复合

稳定浆液。该浆液具有析水率低、流动性适中、经济性好的特点，能有效充填大空间并控制扩散范围。

2.2 灌浆压力与工艺验证

通过抬动观测装置，实测了不同深度下混凝土垫层与基岩的抬动变形规律。试验确定了“分级升压、动态控制”的压力原则，最大灌浆压力在保证不引起有害抬动（变形 $\leq 200 \mu m$ ）的前提下，较原设计提高了约 20%，达到了 1.8~2.0 倍坝前水头压力，从而确保在岩溶裂隙中实现有效劈裂与充填。

表1 帷幕灌浆关键参数试验优化结果

孔 深	20	30	40	50	60
允许	单排孔 0.25	0.45	0.70	1.00	1.30
偏差	二或三排孔 0.25	0.50	0.80	1.15	1.50

岩溶区孔距 3.0m、2.5m 依据先导孔压水试验 ($q>50Lu$)，加密布孔以增强幕体密度；灌浆压力（底部）1.5 倍水头 1.8~2.0 倍水头 结合抬动观测，在安全前提下提高压力以增强渗透与挤密效果；浆液类型（主 / 特）纯水泥浆 水泥浆 / 水泥 - 粘土复合浆 针对大吸浆量 ($>500kg/m$) 溶洞，采用复合浆液控制流速与成本；结束标准 $\leq 1L/min$, $60min \leq 0.4L/min$, $90min$ 为提升幕体密度与耐久性，采用更严格的结束标准。

3 分序加密施工工艺与过程控制

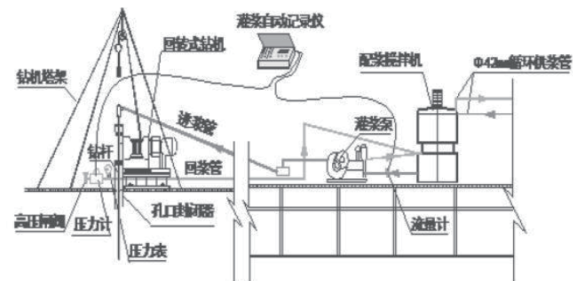


图2 为防渗灌浆步骤工艺图

本工程严格遵循“分序加密、逐序提高”的原则组织施工，总体程序为：先导孔→I 序孔→II 序孔→III 序孔→质量检查孔。同一单元内，要求先序孔施工至基岩以下 15m 后，方可开始后序孔施工，以实现对地层情况的逐步揭示与灌浆效果的相互保障。

3.1 钻孔精度与取芯管理

所有钻孔均采用 XY-2PC 型地质钻机配金刚石钻头回转钻进。开孔时使用角度仪精确校准立轴，确保孔向。施工中每 10m 测斜一次，终孔偏差严格控制在《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL62-2014) 允许范围内（如表 2）。先导孔与质量检查孔进行全程取芯，岩芯按次序编号、装箱并绘制柱状图，为分析地质条件与灌浆效果提

供第一手资料。孔深 (m) 最大允许偏距 (m):

表2 帷幕灌浆孔孔底允许偏差

	孔深 (m)	允许偏差 (m)	备注
1	20	0.25	
2	30	0.50	
3	40	0.8	
4	>60	1.5	

3.2 裂隙冲洗与压水试验

钻孔结束后, 采用 80% 灌浆压力进行高压脉动冲洗, 直至回水清澈, 确保裂隙通道畅通。先导孔采用“五点法”进行正规压水试验, 以精确获取各段的透水率 (q 值), 为灌浆提供定量依据。常规灌浆孔则采用简易压水法, 结合冲洗进行, 在了解地层透水性的同时提高工效。

3.3 灌浆过程动态控制

(1) 灌浆方法: 覆盖层采用孔口封闭循环钻灌法; 基岩段采用成熟的孔口封闭、孔内循环、自上而下分段灌浆法。分段长度一般不超过 5m, 遇溶洞、断层时缩短至 3m 以内。

(2) 浆液变换与特殊处理: 起始水灰比为 5:1, 根据注入率情况按规范逐级变浓。施工中遇到三个典型大吸浆量溶洞, 单段水泥注入量超过 10 吨。对此, 果断换用 1:1:6 (水泥:粘土:水) 的复合浆液, 并采取间歇灌浆 (每次灌注一定方量后停顿 30-60 分钟)、限流灌注 (控制泵送速率) 等措施, 最终顺利完成灌注且未造成远距离浆液浪费。

(3) 结束标准与待凝: 严格执行优化后的结束标准 (注入率 $\leq 0.4L/min$, 持续 90min)。对于孔口有涌水 (压力 $>0.1MPa$) 的孔段, 在达到结束标准后, 采取“屏浆”1 小时的措施, 以抵抗地下水压力对浆液的析出与冲刷。

3.4 孔口管镶铸与封孔

每一灌浆段结束后, 均注入 0.5:1 浓浆置换孔内稀浆。孔口管采用直径 $\Phi 73mm$ 的无缝钢管, 其埋入完整基岩的深度不少于 2m, 在破碎带则加深, 待凝 72 小时后经扫孔和压水检验合格方可继续下钻。全孔灌浆结束后, 采用“置换和压力灌浆封孔法”进行封孔, 确保孔口段密实无缺陷。

4 工程应用效果与质量评价

本工程共完成帷幕灌浆钻孔 271 个, 总进尺 16326m (主帷幕 10729m, 副帷幕 5597m), 形成防渗面积约 2.6 万 m^2 。

4.1 质量检查体系

帷幕灌浆质量采用“施工过程监控 + 最终实体检验”的综合体系。过程监控依托灌浆自动记录仪, 实时记录压

力、流量、密度等参数。实体检验包括:

(1) 检查孔压水试验: 在所有灌浆单元结束后, 按总孔数 5% 的比例布置质量检查孔, 进行分段压水试验。

(2) 物探辅助检测: 在重点部位, 采用单孔声波测试, 对比灌浆前后岩体波速的变化, 间接评价灌浆对岩体完整性的改善效果。

4.2 效果分析与评价

检查孔压水试验结果表明, 所有试验段的透水率 (q) 均满足设计不大于 5Lu 的要求, 且绝大多数集中在 1-3Lu 区间, 幕体防渗性能优良。具体统计见表 3。

表3 帷幕灌浆质量检查成果统计

检查部位	检查孔数	压水试验总段数	合格段数	透水率主要区间 (Lu)	合格率
左岸岩溶发育段	5	42	0.5 ~ 3.5	41	97.6%
河床段	4	35	0.2 ~ 2.1	35	100%
右岸强风化带	3	28	0.8 ~ 4.8	27	96.4%
合计/综合	12	105	0.2 ~ 4.8	103	98.1%

水库蓄水至正常水位后的长期观测数据显示, 坝后渗流量较灌浆前减少了 95% 以上, 两岸地下水位雍高明显, 绕坝渗流现象基本消失, 达到了工程防渗的预期目标。

5 结语

通过在本工程中的系统研究与实践, 可以得出以下结论:

(1) 针对性的方案设计是前提: 针对强岩溶渗漏通道, 采用“排帷幕、封闭接隔水层、洞内与廊道内施工相结合”的差异化设计方案, 有效解决了复杂地形地质条件下的防渗布置难题。

(2) 科学的参数优化是关键: 基于现场灌浆试验, 对孔距、灌浆压力、浆液配比及结束标准等关键参数进行动态优化, 是确保帷幕灌浆在特殊地层中取得实效的核心环节。

(3) 严格的工艺控制是保障: 严格执行“分序加密、自上而下分段”的工艺流程, 并对大吸浆量、涌水等特殊情况进行妥善处理, 是形成连续、均匀、密实防渗帷幕的工艺保障。

(4) 综合的质量评价是依据: 结合检查孔压水试验与物探检测等多种手段进行质量评价, 结果客观可靠, 证明本工程所采用的成套施工技术是成功且高效的。

本工程的成功实践, 为华东乃至全国类似复杂岩溶地质条件下的水库大坝除险加固与防渗处理, 提供了一套完整、可操作的技术路径与工程管理经验, 具有广泛的推广

价值。

参考文献:

- [1] 百度百科. 帷幕灌浆[EB/OL].
- [2] 循环式自上而下分段帷幕灌浆施工在花崖河水库坝基处理中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021.
- [3] 杈头水库扩建坝体分层帷幕防渗灌浆施工技术[J].

云南水力发电, 2023.

- [4] 中华人民共和国水利部. SL62-2014 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

- [5] 寺桥水库大坝趾板灌浆施工全部完成[EB/OL]. 中国水利水电第十二工程局.