

库区围堰复合防渗体系施工技术研究

刘 虎 余勇扬

中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300222

【摘要】：水利工程导流洞围堰的防渗性能直接决定施工期度汛安全与基坑作业稳定性，西南山区岩体裂隙发育、地下水文条件复杂的地质特征，对围堰防渗体系提出更高要求。贵州省黔南州凤山水库工程导流洞进口围堰由土石围堰优化为刚性围堰，针对堰基强风化岩体裂隙发育、防渗路径复杂的问题，创新性采用高压旋喷防渗墙 + 帷幕灌浆复合防渗体系，通过浅层连续成墙与深部裂隙封堵的协同作用，构建全封闭、高可靠的防渗结构。本文结合工程施工技术要求与平面、横断面设计图纸，重点细化高压旋喷与帷幕灌浆两大核心工艺的施工控制要点、质量保障、安全保障及异常应急措施，系统阐述复合防渗体系的设计依据、参数配置、施工工艺流程及应用效果。工程实践数据表明，该复合防渗体系可实现围堰渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 、帷幕灌浆检查孔透水率 $q \leq 3 \text{Lu}$ 、基础承载力 $\geq 350 \text{kPa}$ ，完全满足设计挡水标准与度汛要求。研究成果可为西南山区同类地质条件下水利枢纽导流洞围堰、深基坑防渗工程提供可复制的技术方案与实践参考。

【关键词】：高压旋喷灌浆；帷幕灌浆；复合防渗体系；刚性围堰；质量管控

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.006

1 引言

导流洞是水利枢纽工程施工期实现河道水流导流、保障主体工程干地施工的核心临时建筑物，围堰则是导流洞进口/出口的关键挡水结构，其防渗能力是衡量围堰设计与施工质量的核心指标。在西南喀斯特山区，水库工程堰基多为强风化岩体，岩体裂隙发育、连通性强、地下水流通性大，单一防渗工艺难以实现全断面、深层次的防渗封堵，易出现基坑渗漏、基础沉降、堰体失稳等安全隐患，严重影响工程施工进度与度汛安全。

凤山水库工程原设计导流洞进口采用土石围堰，受供水取水口限制、地质条件与度汛标准约束，经方案优化调整为刚性混凝土围堰，挡水标准、流量、水位及堰顶高程保持不变。为解决堰基强风化岩体防渗难题，工程采用高压旋喷防渗墙+帷幕灌浆复合防渗体系，以高压旋喷形成浅层连续防渗墙体，阻断表层与浅层渗漏通道，以帷幕灌浆深入岩体深部，封堵裂隙与节理，二者协同形成“浅层封表、深层堵隙”的复合防渗结构。项目重点强化高压旋喷灌浆与帷幕灌浆两大核心工艺的施工控制要点、全过程保障措施，从工程概况、复合防渗体系设计、核心工艺施工控制、全流程保障措施、应用效果等方面展开系统研究，验证复合防渗体系的技术可行性与工程适用性。

2 工程概况

凤山水库工程位于贵州省黔南州境内，导流洞进口围堰为工程施工期关键临时挡水构筑物，位于原有老坝取水口右侧200m位置。库区常年平均水位860.5m，施工期设计挡水位865.1m，围堰挡水水头21m。施工期既要保障正常供水避免对取水口产生影响，又要对围堰的抗冲刷、自身稳定以及防渗能力严格要求，确保基坑内部施工安全。围堰堰基地层以强风

化岩石为主，岩体裂隙发育、节理连通性强，地下水补给充足，渗漏路径复杂且隐蔽。强风化岩体孔隙率高，单一防渗工艺无法实现全断面封堵，同时施工期受洪水影响，需保证防渗体系施工连续性与快速成型。核心控制指标有高压旋喷防渗墙：有效厚度 $\geq 0.6 \text{m}$ ，渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，抗压强度 $\geq 3.0 \text{MPa}$ ；帷幕灌浆：检查孔透水率 $q \leq 3 \text{Lu}$ ，孔深至强风化岩石下限（约8m）；基础承载力：灌浆后地层基础承载力 $\geq 350 \text{kPa}$ 。

3 复合防渗体系设计与选型依据

3.1 防渗体系选型原则

围堰防渗体系选型遵循安全可靠、工艺适配、经济高效、施工便捷的原则，结合工程地质条件、度汛要求、施工条件综合比选：（1）适配强风化岩体地质，实现浅层与深部防渗全覆盖；（2）施工工艺成熟，可快速成型，满足施工工期要求；（3）防渗指标达标，保障施工期基坑干地作业；（4）与刚性围堰结构协同，提升基础承载与抗滑稳定性。

3.2 复合防渗体系工作原理

高压旋喷防渗墙+帷幕灌浆复合防渗体系采用“分层防渗、协同封堵”的工作机制：（1）高压旋喷防渗墙：通过高压喷射水泥浆液，切削、搅拌堰基土体与岩体表层，形成连续、完整的刚性防渗墙体，阻断围堰浅层、表层渗漏通道，同时提升基础表层承载力；（2）帷幕灌浆：在高喷墙成型后，对深部岩体进行扫孔灌浆，水泥浆液渗入岩体裂隙、节理，凝固后形成防渗帷幕，封堵深部渗漏路径；（3）二者结合形成浅层成墙、深层成幕的全封闭防渗体系，彻底阻断围堰上下游水力联系，满足防渗与承载双重要求。

3.3 核心设计参数

(1) 高压旋喷防渗墙：共布设 11 排钻孔，孔间距 1.0m，排距 0.8~1.0m，交错布置；灌浆压力 0.2~0.8Mpa；高喷灌浆深度进入强风化岩石不小于 1.0m；墙体有效厚度 $\geq 0.6m$ ，渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，抗压强度 $\geq 3.0 \text{MPa}$ ，基础承载力 $\geq 350 \text{kPa}$ 。

(2) 帷幕灌浆：高压旋喷灌浆完成后，对第 3 排、第 4 排钻孔进行扫孔，对下部岩石层实施帷幕灌浆；孔间距 1.0m，排距 0.8m，孔深约 8m（至强风化岩石下限）；灌浆压力 0.8~1.2MPa，采用自下而上灌浆法，段长 8m。

4 复合防渗体系核心施工技术

4.1 高压旋喷灌浆施工

高压旋喷灌浆是复合防渗体系的浅层核心防渗工序，直接决定表层防渗效果与基础承载力，施工需严格把控钻孔、制浆、喷射、分序等全流程细节，配套完善质量、安全、应急保障措施。

(1) 钻孔定位与成孔控制：采用全站仪精准放样，孔位偏差 $\leq 5 \text{cm}$ ，排距偏差 $\leq 3 \text{cm}$ ，确保 11 排钻孔交错布置符合设计要求；钻机安装调平，垂直度偏差 $\leq 1.0\%$ ，全程采用测斜仪监测，防止孔斜导致墙体搭接失效；钻孔完成后立即下入 PVC 套管，套管埋深至设计底高程，管口高出平台面 $\geq 20 \text{cm}$ ，防止塌孔与杂物落入；终孔深度必须进入强风化岩石 $\geq 1.0 \text{m}$ ，采用测绳复核孔深，严禁浅孔、短孔施工。

(2) 浆液制备与配比控制：使用 P.O 42.5 级合格水泥，严禁使用受潮、结块、过期水泥，每批次水泥进场需复检强度、安定性；严格按 1.6~1.8g/cm³ 比重配制，采用电子秤计量，搅拌时间 $\geq 3 \text{min}$ ，保证浆液均匀无结块；每 30min 检测一次浆液密度，密度不达标立即调整水灰比，不合格浆液严禁注入孔内；制备完成的浆液静置时间 $\leq 2 \text{h}$ ，防止浆液沉淀、离析，影响喷射成墙质量。考虑临水侧渗漏浆液问题，根据渗流量添加水玻璃加速浆液凝固，使临水侧第一排形成止水墙。

(3) 高压喷射作业控制：喷头下至设计深度后，必须原位喷射 30~60s，待浆液稳定返出孔口、压力正常后，方可开始提升喷射；提升速度严格锁定 0.2~0.25m/min，旋转速度固定 20r/min，采用变频控制器自动控制，严禁人工随意调速；灌浆压力保持 0.2~0.8MPa，根据地质情况动态微调，压力波动范围 $\leq \pm 0.1 \text{MPa}$ ，防止压力过大劈裂岩体、过小成墙不密实；相邻孔喷射搭接宽度 $\geq 15 \text{cm}$ ，先施工上游排、后施工下游排，确保墙体连续无缺口。

(4) 分序施工：分一序孔、二序孔间隔施工，一序孔全部完成并检测合格后，方可施工二序孔，避免串孔、扰孔。

4.2 帷幕灌浆施工

帷幕灌浆是复合防渗体系的深部防渗关键工序，主要封堵岩体深部裂隙，与高喷墙形成封闭防渗体系，施工需严控扫孔、灌浆、压力、终止标准等核心环节，配套全维度保障措施。

(1) 扫孔与钻孔控制：高压旋喷墙施工完成 14d、强度达标后，对第 3、4 排钻孔进行扫孔，清除孔内水泥结石与杂物；扫孔至强风化岩石下限，终孔深度 $\geq 8 \text{m}$ ，孔深偏差 $\leq 10 \text{cm}$ ；

扫孔后孔壁完整、无塌孔、无缩径，保证灌浆管顺利下入，浆液顺畅扩散。

(2) 浆液配比与浓度控制：用 3:1 的稀浆开灌，避免浓浆堵塞裂隙；根据注入率逐级变浆，依次为 3:1→2:1→1:1→0.5:1；最终采用 0.5:1 浓浆灌注，保证裂隙充填密实、防渗效果达标；每 15min 检测一次浆液水灰比，采用比重计实时监测，确保浓度符合设计要求。

(3) 灌浆压力与作业控制：灌浆压力严格控制在 0.8~1.2MPa，自下而上逐级升压，严禁一次性加压导致岩体劈裂；先下游排、后上游排，同排分两序孔间隔施工，一序孔完成后再施工二序孔，防止串浆、绕渗；采用自下而上纯压式灌浆，段长固定 8m，灌浆过程连续，不得中途停灌超过 30min。

(4) 灌浆终止标准控制：严格执行设计终止条件，满足任一条件方可终止灌浆，严禁提前停灌：1)设计压力下，注入率 $\leq 1.0 \text{L/min}$ ，继续灌注 30min；2)回浆变浓至高一级浆液比重，继续灌注 30min；3)地质复杂、地下水流速大时，延长灌注时间至 60min。

(5) 封孔与质量检查：灌浆完成后，采用 0.5:1 浓浆静压封孔，孔口封堵密实，防止后期渗水；按总孔数 10%布设检查孔，采用压水试验检测透水率，必须满足 $q \leq 3 \text{Lu}$ ；检查孔透水率超标时，立即加密补灌，直至达标。

5 施工质量与安全管控措施

5.1 全过程质量管控体系

库区围堰施工质量直接关系到基坑作业安全与工程整体推进，需建立全流程、全要素的闭环质量管控体系，覆盖前期准备、施工过程、完工验收全阶段，针对高水头、高渗压的特殊工况，强化关键工序专项管控，杜绝质量隐患。施工前对班组进行专项交底，明确压力、水灰比、终止标准等核心参数，考核合格后方可上岗；采用自动灌浆记录仪，实时监测压力、注入率、浆液浓度，数据自动存储，杜绝人工造假；注入率过大时，采用间歇灌浆、掺速凝剂等方式，确保浆液充分充填岩体裂隙；检查孔检测合格后，形成专项验收报告，方可进入下一工序。

5.2 全方位安全管控措施

围堰施工面临库区水位波动大、边坡临空面高、水下作业风险多等问题,需构建全方位安全管控体系,聚焦汛期防汛、边坡防护、水上作业、现场用电四大核心风险点,落实常态化防控与应急处置相结合的管控模式,保障施工全程零安全事故。

汛期防汛安全是库区施工的管控重点,提前与当地水文、气象部门建立联动机制,实时掌握上游来水与天气变化情况,设置三级水位预警机制。施工现场足额储备防汛沙袋、大功率抽水设备、应急照明与救生器材,划定专门防汛物资存放区;汛期来临前完成堰顶加高加固与下游边坡防护,安排专人24小时巡查围堰渗流、沉降情况,遇水位骤升或暴雨天气,立即暂停基坑作业,人员设备撤离至安全区域。

边坡与临边作业安全实行刚性防护,围堰上下游边坡施工前,沿边坡顶部与底部设置标准化防护栏杆,悬挂安全警示标识与边坡防滑提示牌,严禁非施工人员进入作业区域。边坡填筑与护坡施工时,作业人员佩戴安全防护用具,严禁在边坡底部停留或堆放重物,避免边坡失稳引发坠物、滑移风险;临边作业区域设置防滑坡道与防护网,高空作业全程系挂安全带,落实全方位防护措施。

6 工程实施效果

6.1 核心施工指标检测结果

围堰工程完工后,联合建设、监理、施工三方开展全方位质量检测,对照设计指标与规范限值逐项核验,满足设计要求,无质量缺陷与安全隐患。

防渗性能: 高压旋喷防渗墙渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$,帷幕灌浆检查孔透水率 $q \leq 3 \text{Lu}$,基坑无集中渗漏、无管涌、无绕渗;

基础承载: 灌浆后地层基础承载力 $\geq 350 \text{kPa}$,围堰无沉降、无位移、无滑移;

度汛安全: 经历施工期洪水考验,防渗体系完整有效,保障基坑干地施工与导流洞施工顺利进行。

参考文献:

- [1] DL/T 5200-2019,水电水利工程高压喷射灌浆技术规范[S].
- [2] 水利水电工程施工手册编委会.水利水电工程施工手册(混凝土工程)[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 李军.高压旋喷与帷幕灌浆复合防渗技术在水利围堰中的应用[J].水利水电技术,2018,49(05):112-116.
- [4] 张磊.山区水利工程导流洞围堰防渗施工技术研究[J].水利规划与设计,2020(07):123-126.

6.2 结构稳定与防渗效果验证

围堰投入使用后,进入全程动态监测阶段,监测周期覆盖整个基坑施工期,期间经受库区汛期高水位、水位大幅波动的双重考验,最高挡水位接近设计值,围堰整体结构保持稳定,未出现任何沉降超标、边坡滑移、渗流泄漏等问题。防渗体系发挥了良好的阻渗效果,高压旋喷+帷幕灌浆复合复合防渗体系双重防护,彻底阻断堰体与堰基渗流通道,渗流量远低于规范限值,基坑内部始终保持干地作业条件,未出现积水、涌水现象。结构变形监测数据显示,围堰沉降与位移数值均处于可控范围,且后期逐渐趋于稳定,无持续变形趋势,说明堰基处理到位,整体结构承载力与抗滑稳定性完全满足高水头挡水要求,能够有效抵御库区水压力与渗流压力的长期作用,为基坑开挖、结构施工提供了坚实的安全保障。

7 结论与展望

7.1 结论

(1) 针对凤山水库导流洞进口围堰强风化岩体裂隙发育的防渗难题,高压旋喷+帷幕灌浆复合防渗体系技术可行、效果显著,高压旋喷的浅层成墙控制、帷幕灌浆的深部裂隙封堵控制是保障防渗效果的核心,配套的质量、安全、应急措施为施工提供了全流程支撑;

(2) 高压旋喷施工需严控孔位、浆液、喷射速度与压力,帷幕灌浆需严控扫孔深度、灌浆压力、浆液浓度与终止标准,二者协同形成全封闭防渗结构,各项防渗、承载指标均满足设计与规范要求;

(3) 该复合防渗体系适配西南山区裂隙岩体地质条件,施工工艺流程清晰、保障措施完善、安全环保可控,可有效保障施工期度汛安全与基坑作业稳定性,具备良好的技术经济性与推广应用价值。

7.2 展望

未来可进一步优化复合防渗体系的施工参数,结合智能化监测技术,实现灌浆过程实时监控、质量动态调控,提升施工自动化水平;同时可拓展该体系在市政基坑、隧道防渗、尾矿库防渗等工程中的应用,丰富防渗技术体系,为工程建设提供更安全、高效、经济的防渗解决方案。