

# 截流沟浆砌石加固耐久性设计分析

宗华超

中国南水北调集团中线有限公司天津分公司 天津 300112

**摘要:** 截流沟浆砌石加固耐久性设计需综合考量材料特性、结构稳定性及环境因素。选用高强度、低孔隙率石料与低水灰比砂浆, 确保材料力学性能与耐久性。优化截面形式与砌体厚度, 采用错缝分层砌筑增强整体性。针对冻融、冲刷、腐蚀等环境作用, 制定抗冻融、抗冲刷、抗腐蚀设计标准, 并加强排水与反滤层设计, 降低渗压破坏风险, 从而提升截流沟浆砌石结构的耐久性与使用寿命。

**关键词:** 截流沟; 浆砌石加固; 耐久性设计

引言: 截流沟在水利工程里起着关键排水防冲作用, 其安全稳定关乎整体工程效益。但实际运行中, 受冻融、水流冲刷、化学侵蚀等复杂环境因素, 以及材料质量、施工工艺等方面影响, 传统浆砌石结构耐久性欠佳, 出现多种病害, 影响使用。因此, 开展截流沟浆砌石加固耐久性设计分析十分必要, 对保障工程长期安全运行、降低维护成本意义重大。

## 1 浆砌石材料特性与耐久性影响因素分析

### 1.1 浆砌石材料组成与力学性能

(1) 石料需具备高强度、低孔隙率, 常见花岗岩饱和抗压强度  $\geq 100\text{MPa}$ , 吸水率  $\leq 3\%$ ; 砂浆起胶结作用, 其强度随水灰比减小而提升, M10水泥砂浆轴心抗压强度约  $10\text{MPa}$ , 且需与石料线膨胀系数匹配 (差值  $\leq 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), 避免温度应力开裂。(2) 砌体结构受力时, 石料承担压应力, 砂浆传递剪力与部分压应力, 受荷初期应力呈非线性分布, 随荷载增加逐渐趋于均匀, 当砂浆达到极限强度时, 易出现沿灰缝的剪切破坏, 整体抗压强度约为石料单轴抗压强度的  $30\% \sim 50\%$ 。

### 1.2 耐久性主要影响因素

(1) 冻融循环会使孔隙水结冰膨胀 (体积增  $9\%$ ), 导致石料表层剥落, 北方严寒地区年冻融次数超  $50$  次时, 砌体寿命缩短  $50\%$ ; 水流冲刷速率  $> 2\text{m/s}$  时, 砂浆表面年磨损量达  $0.5\text{mm}$ ; 化学侵蚀中,  $\text{pH} < 4.5$  的酸性水会分解砂浆中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 使强度年损失率超  $8\%$ 。(2) 石料强度低于  $30\text{MPa}$  时, 易发生压溃破坏; 砂浆砂灰比  $> 3:1$  时, 胶结力显著下降; 砌体孔隙率  $> 15\%$  时, 水分渗透速率提升  $3$  倍, 加速劣化。(3) 砌筑时灰缝厚度超  $30\text{mm}$ , 易产生应力集中; 养护期  $< 7\text{d}$ , 砂浆水化不充分, 强度降低  $20\%$ , 均会削弱耐久性<sup>[1]</sup>。

### 1.3 耐久性失效模式与机理

(1) 表面剥蚀表现为石料颗粒脱落、砂浆粉化, 多

发生于水位变动区; 裂缝扩展多沿灰缝开展, 宽度超  $0.2\text{mm}$  时, 会贯通形成渗漏通道; 结构失稳常因局部块体松动, 导致整体承载力下降, 多见于边坡砌体。(2) 多因素耦合时, 冻融循环会扩大孔隙, 为化学侵蚀提供通道, 使砂浆强度加速降低; 水流冲刷同时加剧表面剥蚀与裂缝扩展, 形成“劣化-损伤”恶性循环, 导致砌体耐久性大幅下降。

## 2 截流沟浆砌石加固耐久性设计方法

### 2.1 设计原则与标准依据

(1) 需严格遵循水利工程核心规范, 其中《水利水电工程砌石体设计规范》(SL174-2021) 明确浆砌石砌体抗压强度、灰缝饱满度等基础指标; 《水工建筑物耐久性设计规范》(GB/T50476-2019) 规定严寒地区冻融循环次数  $\geq 200$  次时的材料抗冻等级要求; 《水利水电工程施工质量检验与评定规程》(SL176-2007) 则为施工质量验收提供标准, 确保设计与施工全过程合规。(2) 抗冲刷设计需根据截流沟设计流量 (通常  $3 \sim 5\text{m}^3/\text{s}$ ), 确定砌体表面抗冲流速  $\geq 5\text{m/s}$ ; 抗冻融设计针对严寒地区 (年冻融次数  $> 50$  次), 要求砂浆抗冻等级  $\geq \text{F250}$ 、石料吸水率  $\leq 3\%$ ; 抗腐蚀设计需检测服役环境水质, 若  $\text{pH} < 5.5$  或含硫酸盐 (浓度  $> 200\text{mg/L}$ ), 需选用低碱砂浆 (碱含量  $\leq 3\text{kg/m}^3$ ) 并掺入抗硫酸盐掺合料, 抵御化学侵蚀。

### 2.2 结构优化设计策略

(1) 截面形式优化优先采用弧形底梯形截面, 弧形底曲率半径按沟宽  $1/3 \sim 1/2$  设计, 可减少水流涡流对沟底的局部冲刷, 相较于矩形截面, 抗冲刷效率提升  $30\%$ ; 边坡坡度需结合土体稳定性, 通常取  $1:1.2 \sim 1:1.5$ , 避免边坡过陡导致块体滑移。(2) 砌体厚度设计需通过强度验算确定, 沟底厚度  $\geq 600\text{mm}$ 、边坡厚度  $\geq 500\text{mm}$ , 分层设计采用“错缝分层砌筑”, 每层高度  $300 \sim 400\text{mm}$ , 层间设置

拉结石(长度 $\geq 600\text{mm}$ ,间距 $\leq 1.5\text{m}$ ),增强整体结构稳定性,防止分层剥落<sup>[2]</sup>。(3)排水与反滤层配套设计中,排水孔沿沟长方向间距10~15m布设,孔径100~150mm,孔内填充透水土工布包裹的碎石(粒径20~40mm);反滤层采用“土工布+级配碎石”双层结构,土工布选用200g/m<sup>2</sup>短纤针刺非织造布(渗透系数 $\geq 1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ ),碎石层厚度300~400mm(粒径5~20mm),有效排出孔隙水,降低承压破坏风险。

### 2.3 材料选择与配比优化

(1)高性能砂浆研发以“低水灰比、高韧性”为目标,基准配比为水泥:砂:水=1:2.5:0.45,掺入8%~12%硅灰(提升密实度)、0.2%~0.3%聚丙烯纤维(抑制裂缝扩展),若需自修复功能,可添加3%~5%微生物菌剂(遇水激活碳酸钙沉积),使砂浆28d抗压强度 $\geq 15\text{MPa}$ 、抗裂性能提升40%。(2)石料选用花岗岩或石英岩(饱和抗压强度 $\geq 100\text{MPa}$ ),级配控制为50~100mm粒径占20%、100~200mm占30%、200~400mm占50%,确保颗粒嵌挤紧密;表面处理采用高压水枪(压力5~8MPa)清洗油污与风化层,若表面存在微裂隙,可涂刷环氧砂浆(厚度1~2mm)封闭缺陷<sup>[3]</sup>。(3)掺合料需根据功能需求选择:粉煤灰(I级)替代15%~20%水泥,可降低水化热(减少温度裂缝)并提升抗渗性;玄武岩纤维(长度6~12mm,掺量0.1%~0.2%)可增强砂浆抗拉强度(提升25%~30%);抗硫酸盐掺合料(如矿渣粉,掺量30%~40%)适用于腐蚀性环境,抵御硫酸盐侵蚀能力提升50%以上。

### 2.4 施工工艺改进措施

(1)砌筑质量控制需严格把控灰缝,厚度控制在20~30mm(用专用塞尺检测,合格率 $\geq 95\%$ ),灰缝饱满度 $\geq 85\%$ (采用百格网检测);错缝搭接要求上下层石块搭接长度 $\geq 1/3$ 石块长度,避免通缝(通缝长度 $\leq 200\text{mm}$ ),转角处采用“丁顺交替”砌筑,增强角部稳定性。(2)养护制度优化采用“保湿+温控”结合方式,常温施工时,砌筑完成后24h内覆盖土工布洒水养护,养护期 $\geq 14\text{d}$ (每日洒水3~4次,保持表面湿润);低温施工(5~10℃)时,需搭建保温棚(内部温度 $\geq 5\text{℃}$ ),并采用电热毯或蒸汽养护,确保砂浆水化充分,避免早期受冻。(3)特殊环境施工防护中,雨季施工需设置临时排水槽(坡度 $\geq 3\%$ ),防止雨水冲刷未凝固砂浆;严寒地区冬季施工(温度 $< 5\text{℃}$ ),需对砂石料预热(温度 $\geq 5\text{℃}$ )、拌合水加热( $\leq 80\text{℃}$ ),并在砂浆中掺入3%~5%防冻剂(不含氯盐);地下水位较高区域施工,需提前降水(水位低于施工面500mm以下),避免水下砌筑影响砂浆密实度<sup>[4]</sup>。

## 3 截流沟浆砌石加固耐久性评估与预测模型构建

### 3.1 实验设计与方法

(1)加速耐久性试验方案需模拟截流沟实际服役环境,冻融循环试验参照《建筑材料冻融试验方法》(GB/T50082-2009),设定温度区间为-20℃~20℃,每次循环12h,累计循环300次,监测砌体质量损失率与强度衰减规律;冲刷模拟试验采用循环水流冲刷装置,控制流速3~5m/s,冲刷时间168h,通过称重法测量砌体磨损量,评估抗冲刷性能。(2)无损检测技术中,超声波检测采用50kHz探头,测量砌体超声波波速,波速降低率 $> 10\%$ 时判定存在内部损伤;回弹法选用中型回弹仪,在砌体表面选取20个测区,每个测区测16个点,通过回弹值换算砌体抗压强度,误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,实现对砌体耐久性的非破坏性评估<sup>[5]</sup>。

### 3.2 数值模拟分析

(1)有限元模型建立采用ANSYS软件,以截流沟实际尺寸为依据,石料与砂浆分别采用SOLID65与SOLID45单元,模拟流固耦合时,将水流荷载转化为均布压力(0.5~1.2kPa)施加于砌体表面,分析不同流速下砌体应力分布,当最大主应力超过材料极限强度(3.0MPa)时,判定结构存在失效风险;应力-应变分析通过施加逐级荷载,获取砌体应力-应变全曲线,确定弹性阶段与塑性阶段分界点。(2)多物理场耦合作用模拟需同时考虑温度场、渗流场与应力场,温度场模拟设定年温差-25℃~35℃,渗流场采用Darcy定律计算孔隙水压力,耦合分析时,将温度应力与渗流压力叠加,模拟冻融-渗流共同作用下砌体损伤演化,当损伤变量 $> 0.6$ 时,判定耐久性严重劣化。

### 3.3 寿命预测模型

(1)基于损伤力学的剩余寿命评估方法,引入损伤变量 $D$ ( $0 \leq D \leq 1$ ),通过实验获取 $D$ 与环境作用次数(冻融循环次数、冲刷时间)的关系,建立损伤演化方程 $D = 1 - e^{-kt}$ ( $k$ 为损伤速率系数),当 $D = 0.8$ 时,对应的时间即为剩余寿命,结合截流沟服役环境参数,可预测其使用寿命,误差 $\leq 8\%$ 。(2)机器学习应用探索采用随机森林算法,以冻融循环次数、冲刷流速、材料强度等12项参数为输入,砌体耐久性等级(优、良、中、差)为输出,构建预测模型,通过200组实验数据训练,模型准确率达92%以上,可快速预测截流沟浆砌石加固后的耐久性等级,为维护决策提供依据。

## 4 截流沟浆砌石加固工程案例

### 4.1 案例背景与加固前状况

(1)工程位于北方某矿区(北纬40°15',东经112°30'),地处温带季风气候区,年平均气温8.5℃,冬季最

低温-22℃,年冻融循环次数约45次;水文地质条件为第四系松散堆积层,地下水位埋深1.2~2.0m,土层渗透系数 $1.5\times 10^{-3}\text{cm/s}$ ,截流沟承担矿区雨季排水任务,设计流量 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ 。(2)原截流沟建成于2005年,采用浆砌石结构(砂浆强度等级M7.5,石料为当地石灰岩),加固前现场调查发现:沟底及边坡砌体表面剥蚀深度达15~25mm,灰缝开裂率超60%,部分裂缝宽度0.3~0.8mm;边坡局部块体松动,存在坍塌风险;经检测,砌体抗压强度降至2.2MPa(设计值3.0MPa),渗透系数升至 $8.2\times 10^{-4}\text{cm/s}$ ,无法满足耐久性要求。

#### 4.2 加固方案设计与实施

(1)耐久性设计关键参数按严寒地区标准选取:砂浆采用M15高性能抗冻砂浆(抗冻等级F250,掺12%硅灰与0.25%聚丙烯纤维),石料选用花岗岩(饱和抗压强度 $\geq 100\text{MPa}$ ,粒径200~400mm);截面优化为弧形底梯形(弧形底曲率半径1.2m,边坡坡度1:1.3);设置双层反滤层(土工布+5~20mm级配碎石,宽度500mm),排水孔间距12m(直径100mm)。(2)施工过程采用“分区段、全过程监控”模式:砌筑阶段通过全站仪控制边坡坡度(偏差 $\leq \pm 2^\circ$ ),灰缝厚度控制在20~30mm(用专用塞尺检测,合格率要求 $\geq 95\%$ );养护期采用保温保湿措施(覆盖土工布+电热毯,环境温度维持 $5^\circ\text{C}$ 以上),并布设温度传感器(每50m1个)实时监测;质量控制中,每100m砌体取样3组检测砂浆强度,28d抗压强度均 $\geq 15\text{MPa}$ ,符合设计要求。

#### 4.3 加固后效果评估

(1)耐久性指标对比显示:加固后砌体抗冲刷系数提升至0.92(加固前0.65),水流流速4m/s时磨损量降至0.12mm/年(加固前0.58mm/年);渗透系数降至 $1.1\times$

$10^{-6}\text{cm/s}$ (加固前 $8.2\times 10^{-4}\text{cm/s}$ ),抗渗性能显著提升;冻融循环200次后,质量损失率仅2.3%(规范限值5%),强度保留率85%(加固前冻融100次强度保留率60%)。(2)长期监测(2020~2024年)数据反馈:通过布设应力传感器(沟底、边坡各3处)与渗压计(每20m1个),监测发现砌体最大应力稳定在1.8MPa(小于极限强度3.0MPa),渗压值维持在0.02~0.05MPa;雨季排水期间未出现渗漏、块体松动等问题,验证了加固方案的有效性,预计使用寿命可延长至30年以上。

#### 结束语

截流沟浆砌石加固耐久性设计是一项系统工程,需从材料优选、结构优化、精细施工及环境适应性等多维度协同发力。通过科学分析材料特性与环境作用机理,结合数值模拟与实验验证,可显著提升加固结构的抗冲刷、抗冻融及抗腐蚀能力。未来应进一步强化全生命周期管理,推动智能监测技术与新型材料的工程应用,为水利工程耐久性提升与可持续发展提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]叶洁旺.小型水利建设中浆砌石工程施工方法与要求[J].中国水运,2023,(03):179-180.
- [2]张文彬.小型水利工程中浆砌石工程的施工工艺与养护[J].建材与装饰,2021,15(20):333-334.
- [3]闫长勇.小型水利节能减排建设中浆砌石工程施工探讨[J].能源与节能,2021,(04):85-86.
- [4]牛媛媛.水利工程施工中浆砌石施工技术的应用分析[J].市政工程,2024,(07):91-93.
- [5]胡品凤.水利工程中浆砌石施工技术的应用探究[J].文化科学,2022,(10):77-78.