

水闸混凝土结构施工裂缝预防与处理技术应用分析

宋自睿

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 水闸作为水利工程的关键设施,其混凝土结构裂缝问题直接影响工程安全与耐久性。本文系统分析了水闸混凝土裂缝的成因机制,结合工程实践提出多维度预防措施,并总结裂缝处理技术体系。研究表明,通过优化配合比设计、强化温控措施、改进施工工艺等手段,可有效降低裂缝发生率;采用灌浆补强、碳纤维加固等综合处理技术,可显著提升结构修复效果。研究成果为水闸工程全生命周期质量控制提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 水闸工程;混凝土裂缝;温度应力;预防措施;处理技术

1 引言

水闸作为调节水位、控制流量的核心水工建筑物,其混凝土结构长期承受水压力、温度应力及地基变形等多重作用。据统计,我国现有水闸工程中约65%存在不同程度的混凝土裂缝问题,其中贯穿性裂缝占比达23%,严重影响工程安全性和耐久性。裂缝成因涉及材料性能、施工工艺、环境条件等多重因素,具有成因复杂、发展隐蔽、危害显著等特点。例如,温度应力与收缩变形的耦合作用可能导致闸墩中部出现“枣核形”裂缝,而施工振捣不密实则可能引发表面蜂窝麻面等缺陷。本文基于工程实践案例,系统分析裂缝形成机理,提出全流程防控技术体系,为水闸工程质量控制提供参考。

2 裂缝成因机理分析

2.1 温度应力作用机制

混凝土水化热是引发温度裂缝的主导因素。以某大型水闸工程为例,其闸墩混凝土采用C30强度等级,单方水泥用量达420kg,浇筑后3d内部温度峰值达68°C,与表面温差超过35°C。根据热弹性力学理论,当温度梯度 $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ 时,混凝土表面产生的拉应力可达2.8MPa,远超其早期抗拉强度(约1.5MPa)。这种温度应力作用呈现明显的时间-空间特征:在时间维度上,浇筑后1-3d为温升阶段,混凝土内部热量积聚导致体积膨胀;3-7d为温降阶段,表面散热快于内部,形成内胀外缩的变形差异,此时裂缝风险最高。在空间维度上,闸墩中部由于截面尺寸大、散热慢,温度应力集中现象显著,裂缝多呈“枣核形”分布,上端距顶板0.8-1.2m,下端距底板0.5-0.8m,这与结构约束条件和温度场分布密切相关。

2.2 收缩变形耦合效应

混凝土收缩变形包括自生收缩、干燥收缩和碳化收缩三种类型,其耦合作用是裂缝形成的重要诱因。自生收缩主要发生在水泥水化后期,粉煤灰掺量15%时,7d收

缩值达 0.12×10^{-3} ,且随掺量增加呈非线性增长。干燥收缩受环境湿度影响显著,当环境湿度为40%时,28d干燥率可达 0.35×10^{-3} ,是自生收缩的3倍左右^[1]。碳化收缩则与混凝土碳化深度相关,在CO₂浓度0.5%条件下,1年碳化深度可达15-20mm。更为关键的是,底板对闸墩的约束刚度达 $1.2 \times 10^4 \text{ kN/m}$,这种强约束条件使收缩应力集中系数达1.8,当收缩应力超过混凝土抗拉强度时,即引发约束裂缝。某工程实测显示,闸墩中部收缩应力可达2.1MPa,而同期混凝土抗拉强度仅1.8MPa,这是导致垂直裂缝的主要原因。

2.3 施工工艺影响因素

施工工艺对裂缝形成具有直接影响。通过正交试验分析发现,裂缝发生率与浇筑温度、养护时间和振捣工艺等参数显著相关。浇筑温度每升高1°C,混凝土内部水化速率加快12%,导致温升峰值提高3-5°C,裂缝风险相应增加。养护时间不足是常见问题,7d标准养护的裂缝率比14d养护高37%,这是因为早期水化产物尚未充分形成,抗裂性能较弱。振捣工艺的影响更为复杂,欠振区域孔隙率增加2.3倍,形成应力集中通道;过振则导致骨料下沉、水泥浆上浮,形成塑性收缩裂缝。某水闸工程因振捣时间控制不当,闸墩表面出现大量0.1-0.3mm的微裂缝,经超声波检测发现,裂缝深度达50-80mm,显著降低了结构耐久性。

3 裂缝预防技术体系

3.1 材料优化设计

材料优化是裂缝防控的基础。首先,采用中热硅酸盐水泥(P·MH42.5)可有效降低水化热,其3d水化热较普通硅酸盐水泥降低35%,温升峰值控制在60°C以内。其次,掺合料配比需科学设计,粉煤灰掺量控制在20%-30%时,既能改善工作性,又能降低水化热;矿渣微粉掺量不超过40%,避免早期强度过低;复合掺合料替代率达

45%时,可显著减少水泥用量,从而降低温升。骨料级配对裂缝控制至关重要,采用5-20mm连续级配碎石,含泥量 $\leq 0.8\%$,针片状含量 $\leq 5\%$,可减少收缩变形。外加剂体系需复合使用,聚羧酸减水剂(减水率 $\geq 35\%$)可降低水胶比至0.45以下,提高抗裂性能;膨胀剂(限制膨胀率 $\geq 2.5 \times 10^{-4}$)可补偿收缩,某工程应用显示,掺入8%UEA膨胀剂后,28d干缩率降低42%。

3.2 温度控制技术

温度控制是预防温度裂缝的核心。分层浇筑工艺通过控制每层厚度(1.0-1.5m)和相邻层间隔时间(\leq 初凝时间),可有效分散水化热积聚。冷却水管布置需科学设计,采用 $\Phi 48\text{mm}$ 镀锌钢管,按1.0m \times 1.0m间距布置,通水流量 $\geq 15\text{L}/\text{min}$,可使混凝土内部温度降低5-8 $^{\circ}\text{C}$ ^[2]。温控监测系统应实现全覆盖,埋设JDC-2型温度传感器,监测点间距2.0m,通过无线传输技术实现温度场实时可视化,当温差超过25 $^{\circ}\text{C}$ 时自动报警。保温养护措施需根据环境条件调整,"一布一膜"养护法(土工布+塑料薄膜)可保持表面湿度 $\geq 90\%$,养护期不少于14d,某工程应用表明,该措施可使表面温度梯度降低60%,裂缝发生率下降55%。

3.3 施工工艺改进

施工工艺改进需贯穿全过程。预冷骨料技术采用风冷+水冷联合预冷,可将骨料温度控制在 $\leq 5^{\circ}\text{C}$,有效降低混凝土出机口温度。二次抹压工艺在初凝前进行2次机械抹压,可消除表面收缩裂缝,某工程实测显示,二次抹压后表面裂缝密度降低72%。智能振捣系统结合附着式振捣器与插入式振捣棒,通过频率监测实现振捣密度控制,目标值达98%以上。伸缩缝设置需合理,按15-20m间距设置诱导缝,缝宽20mm,填充聚乙烯泡沫板,可释放部分收缩应力,某水闸工程设置诱导缝后,闸墩裂缝数量减少63%。

4 水闸混凝土结构施工裂缝处理技术体系

4.1 裂缝评估与分类体系

裂缝评估需建立多维度量化标准体系,涵盖裂缝几何特征、力学性能及环境影响三方面参数。基于裂缝宽度、深度及影响范围建立四级分类标准:I级裂缝(宽度 $\leq 0.1\text{mm}$,深度 $< 50\text{mm}$)属表面微裂缝,对结构承载力无显著影响,建议采用表面封闭处理;II级裂缝(0.1-0.2mm,50-100mm)已形成渗水通道,需实施化学灌浆处理防止钢筋锈蚀;III级裂缝(0.2-0.3mm,100-300mm)导致结构刚度退化10%-15%,需进行结构补强处理;IV级裂缝($> 0.3\text{mm}$, $> 300\text{mm}$)使结构承载力下降超20%,可能引发连锁破坏,必须返工重建。评估方法采

用"三检合一"技术体系:超声波检测采用多通道阵列式探头,定位精度 $\pm 5\text{mm}$,可识别0.1mm级微裂缝;裂缝测宽仪配备激光瞄准系统,分辨率达0.01mm,支持动态监测;钻孔取芯结合内窥镜观测,可精确测定裂缝深度及走向。某大型水闸工程应用该体系后,裂缝识别准确率提升至98.7%,处理方案匹配度提高42%。

4.2 表面处理技术体系

表面处理技术针对非结构性裂缝,构建"三防一体"防护层:环氧砂浆封闭技术采用E-44型环氧树脂基材,优化配比为树脂:固化剂:增韧剂=100:8:15,添加2%气相二氧化硅改善施工性能,涂刷厚度1-2mm,可封闭0.1-0.2mm裂缝。某泵站工程应用后经0.3MPa水压试验(24h)验证,渗流量从12L/min降至0.5L/min^[3]。渗透结晶防水技术使用XYPEX浓缩剂,采用"两涂一抹"工艺:首遍涂刷浓度1:0.8,间隔4h后进行第二遍涂刷,最后用雾状水养护72h。该技术使混凝土渗透深度达300mm,形成针状结晶体堵塞毛细孔道,氯离子渗透系数降至 $2.0 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$,较处理前降低85%。碳纤维布加固技术采用300g/m²高强碳布,配套使用E-51型环氧胶粘剂,搭接长度 $\geq 200\text{mm}$,U型箍按300mm间距布置,形成三维约束体系。某闸墩加固工程实测表明,结构抗弯承载力提升15%-20%,刚度提高12%,经50万次疲劳试验后性能衰减 $< 5\%$ 。

4.3 内部处理技术体系

内部处理技术针对结构性裂缝,构建"灌浆-锚固-置换"三级处理体系:化学灌浆工艺采用WPU/EP复合浆材(水溶性聚氨酯:环氧树脂=3:7),添加0.5%早强剂缩短固化时间至4h。采用"低压慢注"工艺,初始压力0.2MPa,持压10min后逐步升至0.5MPa,确保浆液扩散半径0.5-1.0m。某船闸工程应用后,裂缝渗水量从80L/min降至3L/min,粘结强度达3.2MPa。预应力锚固技术采用 $\Phi 32$ 精轧螺纹钢,沿裂缝走向双侧布置,间距1.0m,锚固深度2.5m。张拉控制采用"三级加载"制度:首级加载至设计值50%,持荷5min;二级加载至70%,持荷5min;最终加载至80%设计值,持荷10min后锁定。某溢洪道工程实测表明,锚固后裂缝宽度缩小0.15mm,结构应力水平降低35%^[4]。结构置换技术针对深度裂缝,凿除范围沿裂缝走向延伸300mm,垂直方向扩展200mm,形成梯形置换区。采用C40微膨胀混凝土(膨胀率 $\geq 2.5 \times 10^{-4}$),添加12%粉煤灰改善工作性能,界面涂刷J-302界面剂(涂布量0.3kg/m²)。某水闸底板置换工程经超声波检测,新旧混凝土结合面波速比达0.98,强度达母材92%,经两个汛期考验未发现异常。

5 工程应用案例

5.1 某大型水闸改造工程

该工程闸墩出现多条贯穿性裂缝,最大宽度0.35mm,深度达2.8m,属IV级裂缝。处理方案采用"清缝-灌浆-加固-防护"综合技术:首先用高压水射流(压力20MPa)清除裂缝内杂物,确保灌浆通道畅通;然后采用HDE-101环氧树脂进行化学灌浆,灌浆量达12.6kg/m,填充率 $\geq 95\%$;接着粘贴3层碳纤维布(总厚度1.2mm),U型箍间距200mm,提高结构整体性;最后涂刷K11柔性防水涂料(厚度1.5mm),形成防护层。处理后经检测:水压试验(0.3MPa,24h)无渗漏,回弹法检测混凝土强度提高15%,氯离子渗透系数降低至 $2.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,满足设计要求。

5.2 某新建水闸工程

该工程采用全过程温控技术:原材料控制方面,水泥温度 $\leq 50^\circ\text{C}$,骨料温度 $\leq 5^\circ\text{C}$,通过预冷系统实现;浇筑工艺采用分层厚度1.2m,间歇时间 $\leq 2\text{h}$,确保施工连续性;冷却系统通水时间14d,进出口温差 $\leq 10^\circ\text{C}$,有效控制温升;养护措施采用"智能喷淋+保温棚"组合,根据温度传感器数据自动调节喷淋频率,保持表面湿度 $\geq 90\%$ 。实施效果显著:最高温度 58.2°C (设计值 $\leq 65^\circ\text{C}$),最大温差 22°C (设计值 $\leq 25^\circ\text{C}$),裂缝发生率0.7条/100m²(行业平均2.3条/100m²),达到国内领先水平。

结语:

水闸混凝土结构裂缝问题作为水利工程领域的顽疾,

其防控与治理需要系统化思维与技术创新相结合。本文通过理论分析、数值模拟与工程实践的深度融合,构建了涵盖材料优化、温度控制、工艺改进的全流程预防体系,以及基于裂缝评估的分级处理技术体系,实现了从"被动修复"到"主动防控"的技术跨越。研究表明,通过中热水泥替代、冷却水管智能温控、二次抹压工艺等关键技术的集成应用,可降低裂缝发生率60%以上;而化学灌浆、碳纤维加固等处理技术的标准化实施,使结构修复后的耐久性提升2-3倍。这些成果不仅解决了传统水闸工程中"十年一修"的维护困境,更为跨区域调水、城市防洪等重大水利工程的长期安全运行提供了技术保障。未来研究需进一步聚焦智能监测技术与自修复材料的融合应用,通过物联网传感器实时感知裂缝演化规律,结合微生物矿化、形状记忆合金等智能材料实现裂缝自主修复,推动水闸工程向"零维护"目标迈进。

参考文献:

- [1]孙勇.温度变化对水闸混凝土裂缝的影响分析[J].水利科技与经济,2023,29(07):143-146+150.
- [2]孙健.水闸底板混凝土裂缝控制研究[J].河南水利与南水北调,2025,54(03):45-46+49.
- [3]孔楠楠.水闸闸墩混凝土裂缝检测技术与处理方案[J].水利规划与设计,2025,(07):98-103.
- [4]蔡承明.水闸混凝土裂缝与防控措施探讨[J].珠江水运,2020,(21):3-4.