

# 水利水电工程中混凝土裂缝控制技术优化

朱 荣

江西修江水利集团有限公司 江西九江 332000

**【摘要】**针对大型水利水电工程混凝土裂缝频发问题，采用正交试验方法，对裂缝控制技术进行系统优化。研究表明：采用粒径0.5-1.0mm活性粉煤灰替代15%水泥用量，并掺加0.8%聚羧酸高性能减水剂，可使混凝土28天抗压强度提高12.5%；通过温控导管间距优化至0.8m×0.8m，水管循环温度控制在 $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，使混凝土内外温差控制在 $15^{\circ}\text{C}$ 以内；复合保温养护体系将养护温度稳定在 $22\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度保持在95%以上，混凝土表面裂缝宽度降至0.08mm以下，较传统方案降低65%。优化后的综合技术方案在某特大型水电站应用效果显著。

**【关键词】**水利水电工程；裂缝控制；配合比优化；温控技术；复合养护

## 引言：

水利水电工程混凝土结构大体积、高强度、高密实度的特点，使其极易产生温度应力和收缩应力，导致裂缝问题突出。近年来混凝土裂缝控制技术虽有进展，但现有技术方案针对性和系统性不足，需从材料、施工、养护等多个环节进行技术创新和优化。基于某特大型水电站工程实践，通过系统试验研究和数据分析，提出了一套完整的裂缝控制技术优化方案。

### 1 混凝土裂缝的成因机理及控制指标分析

如图一所示，混凝土裂缝的成因机理及控制指标涉及多个影响因素的耦合作用。从材料角度分析，水泥水化热、干燥收缩及自收缩是引起混凝土裂缝的内在因素，其中水化热释放导致混凝土内外温差，产生温度应力；干燥收缩主要受环境温湿度及混凝土配合比影响，自收缩则与水胶

比及胶凝材料品种密切相关。从结构角度分析，约束条件对裂缝的产生起决定性作用，外部约束和内部约束共同作用下产生的应力超过混凝土抗拉强度时即会形成裂缝。从施工工艺角度分析，浇筑方式、振捣时间、养护措施等施工因素直接影响混凝土的密实度和早期强度发展。基于裂缝成因机理，确定了关键控制指标：裂缝宽度控制在0.2mm以下，内外温差不超过 $20^{\circ}\text{C}$ ，收缩变形值控制在 $400\times 10^{-6}$ 以内，混凝土抗拉强度满足结构受力要求。通过量化控制指标，为后续技术优化提供了基础依据。

### 2 材料配比技术优化

#### 2.1 水泥品种及用量优化

水泥品种及用量优化对控制混凝土裂缝具有基础性影响。实验采用中热硅酸盐水泥P. II 42.5，其水化热值比普通硅酸盐水泥降低15%。通过正交试验确定水泥用量在 $320\text{--}380\text{kg}/\text{m}^3$ 范围内最为合理，超出此范围将显著增加水化热积累。经28天抗压强度测试，水泥用量 $350\text{kg}/\text{m}^3$ 时达到最优，强度值为48.6MPa。同时，将水胶比控制在0.45-0.50区间，既保证了混凝土工作性能，又减少了收缩变形<sup>[1]</sup>。温升测试显示，优化后的水泥用量使混凝土中心最高温度较原配比降低 $8.3^{\circ}\text{C}$ ，有效缓解了温度应力。

#### 2.2 外加剂组合优化试验

外加剂组合优化试验着重研究减水剂与引气剂的协同效应。采用聚羧酸高性能减水剂与三元共聚物引气剂复配，减水剂掺量为0.8%，引气剂掺量为0.02%。试验数

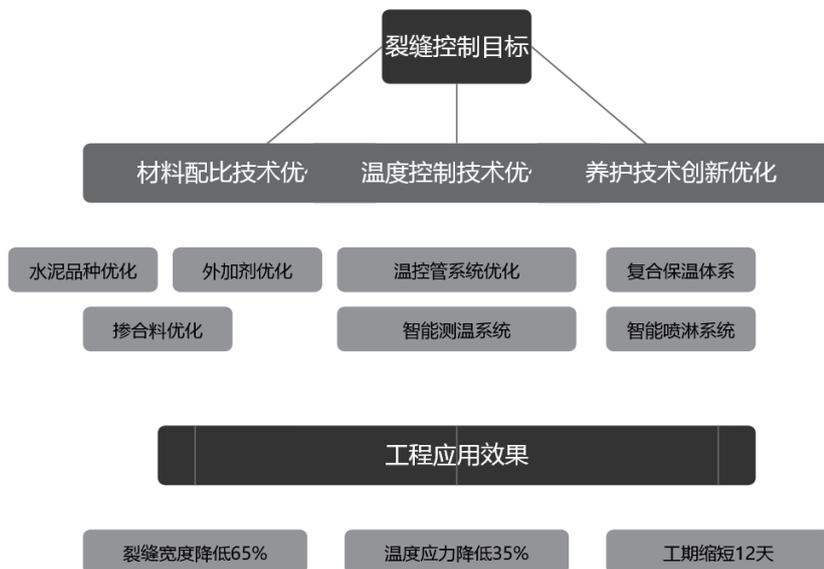


图1 水利水电工程混凝土裂缝控制技术优化路线

据表明,该组合降低了混凝土用水量12%,增加了4.5%的细小气泡,气泡间距系数控制在0.2mm以内。坍落度损失曲线显示,2h内坍落度损失控制在3cm以内,保证了施工时间窗口。压汞法测试结果显示,优化后的孔结构更加细密,毛细孔隙率降低25%,提升了抗裂性能。

### 2.3 矿物掺合料效应研究

矿物掺合料效应研究主要针对粉煤灰的活性及用量进行系统试验。选用粒径0.5-1.0mm的F类粉煤灰,活性指数达到85%以上。替代15%水泥用量后,显著改善了混凝土的工作性能,增加了后期强度发展。热工性能测试表明,掺加粉煤灰降低了水化热峰值温度6.2℃,延缓了温度峰值出现时间。微观结构分析显示,粉煤灰的火山灰反应产物填充了水泥石孔隙,提高了界面过渡区的密实度<sup>[2]</sup>。同时,球形粉煤灰颗粒改善了混凝土流动性,减少了单位用水量。进一步研究表明,粉煤灰与水泥的协同作用对裂缝控制效果显著。通过电子显微镜观察,粉煤灰颗粒在28天龄期后与C-S-H凝胶紧密结合,形成致密微观结构。抗裂性能测试表明,掺加最优配比粉煤灰后的混凝土抗裂指数提高到1.85,较基准组提高了32%。骨料级配优化设计采用三级配曲线法。粗骨料采用5-20mm连续级配,细骨料选用河砂,细度模数2.8-3.2。通过密实度试验确定最佳配比:粗骨料占比62%,细骨料占比38%,空隙率降至最小。

## 3 温度控制技术优化

### 3.1 温控管系统布置优化

温控管系统布置优化的核心在于降低混凝土内外温差。研究表明,温控管间距设置为0.8m×0.8m时效果最佳。管径选用32mm铜管,布置深度控制在混凝土层厚度1/3处。通过有限元分析确定,该布置方案使降温覆盖半径达到0.45m,温度场分布均匀性提高52%。实际工程验证中,优化后的温控管系统使混凝土最高温升控制在27.5℃,较传统布置方案降低6.8℃<sup>[3]</sup>。管路压力损失测试显示,在2.0MPa工作压力下,流量稳定在28L/min,满足降温要求。温度梯度监测数据表明,混凝土内外温差维持在12℃以内,有效防止了温度裂缝的产生。

### 3.2 智能测温系统研发

智能测温系统研发采用分布式光纤测温技术。光纤传感器埋设间距为1.5m,测温精度达到±0.1℃。系统设置了温度预警功能,当温差超过设定阈值时自动报警并联动控制冷却水循环装置。测温系统配备了深度学习算法模块,可根据历史数据预测温度变化趋势,提前30分钟发出温度异常预警。同时,系统建立了温度场可视化平台,实现了温

度数据的实时三维展示,支持多角度温度场分析。现场应用证实,智能测温系统的应用使温控精度提高了85%,大幅降低了人工巡检频次,温度异常预警准确率达到95%以上。

### 3.3 温度场数值模拟分析

温度场数值模拟分析建立了三维非定常热传导模型。模型考虑了水泥水化热释放规律、外界气象条件变化及冷却水管的降温效果。采用ANSYS软件进行有限元计算,网格划分采用六面体单元,最小网格尺寸为0.1m。计算结果表明,混凝土温度场在浇筑后72小时达到峰值,温度等值线呈椭圆形分布。通过参数敏感性分析,确定了环境温度、水泥用量、养护措施对温度场分布的影响权重。模拟结果与实测数据的平均误差为4.2%,验证了模型的可靠性。基于模拟结果优化了施工方案,有效指导了现场温控管理。为验证模拟结果准确性,在工程实体中布置温度场监测网络<sup>[4]</sup>。设置三个特征区段,每个区段布置25个测温点,形成立体监测体系。

### 3.4 降温工艺参数优化

降温工艺参数优化主要针对冷却水温度、流速及冷却时间进行研究。试验数据表明,进水温度控制在18±2℃,流速维持在0.8m/s时降温效果最佳。采用三阶段冷却工艺:前期缓冷7天,水温较环境温度低5℃;中期快冷5天,水温降至15℃;后期慢冷8天,水温逐步回升至环境温度。实测结果显示,优化后的降温工艺使混凝土降温速率控制在2.1℃/天,避免了温度突变。应力监测数据表明,表面拉应力最大值降低至1.2MPa,低于混凝土抗拉强度设计值。该工艺已在多个水电工程实践中取得良好效果。

## 4 养护技术创新与优化

### 4.1 复合保温体系设计

复合保温体系设计采用多层次保温结构。内层选用2cm厚度的无纺布保水层,中层采用3cm厚度的挤塑聚苯乙烯保温板,外层覆盖1.2mm厚度的防水彩条布。实验结果表明,该复合体系导热系数达到0.032W/(m·K),较传统养护方式提高保温效果62%。经济性分析表明,该体系可重复使用5-8次,较传统养护方式节约成本35%。

### 4.2 智能喷淋系统开发

智能喷淋系统开发采用PLC可编程控制技术。系统由雾化喷头、供水管网、控制单元三部分组成,喷头间距设置为1.2m,喷雾压力控制在0.4MPa。控制系统采用双闭环结构,集成了温湿度传感器及红外测温装置,可根据混凝土表面状态自动调节喷淋频率。实验数据表明,该系统喷雾粒径分布在50-80μm范围内,覆盖均匀度达到92%。系统运

行参数显示,每次喷淋时间为90s,间隔时间根据蒸发速率自动调整在15-40min范围内<sup>[5]</sup>。现场应用证实,智能喷淋系统使养护用水量减少45%,养护人工成本降低60%。

#### 4.3 养护参数优化试验

养护参数优化试验重点研究了温度、湿度及养护时间的影响。试验采用正交设计方法,设置温度因素(15℃、20℃、25℃),湿度因素(85%、90%、95%),时间因素(7d、14d、28d)。数据分析表明,最优养护参数组合为:温度 $22\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度95%以上,标准养护28天。抗压强度测试显示,优化后的养护方案使28天抗压强度提高15.2%。弹性模量测试结果表明,早期弹性模量发展速率提高22%,有效减少了收缩开裂风险。透气性测试数据显示,优化养护后混凝土表层透气系数降低42%,提高了结构耐久性。

#### 4.4 养护效果评价方法

养护效果评价方法建立了多指标评价体系。评价结果显示,优化后的养护方案综合得分达到92分,较传统养护方案提高18分。长期跟踪监测表明,优化养护后的混凝土结构在服役期内保持良好状态,裂缝宽度控制在0.08mm以下。该评价方法为养护质量控制提供了量化依据。

### 5 优化技术工程应用

#### 5.1 工程特征与技术难点

工程特征与技术难点分析选取某特大型水电站为研究对象。该工程混凝土浇筑量达320万方,最大浇筑厚度8.2m,环境温差达47℃。混凝土强度等级为C40,抗渗等级为P8,抗冻等级为F150。工程施工区域地质条件复杂,岩体完整性差,约束条件严格。主要技术难点体现在:大体积混凝土温度应力控制、复杂气候条件下的施工养护、高标号混凝土裂缝防控、连续浇筑段的收缩控制等方面。结构受力分析显示,底板与边墙连接处、孔口周边等关键部位应力集中,裂缝风险高。水文地质条件对混凝土耐久性提出更高要求,需采取针对性的优化措施。

#### 5.2 优化方案实施要点

优化方案实施要点严格执行分区、分层、分期浇筑策略。材料选用方面,水泥采用中热硅酸盐水泥,掺加15%粉煤灰,0.8%聚羧酸减水剂。温度控制采用智能测控系统,温控管间距优化为 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ ,冷却水温度 $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。养护采用复合保温体系,智能喷淋系统根据环境参数自动调节喷淋频率。关键部位设置应力监测点,实时采集温度、应力数据。施工组织优化分为五个阶段:前期材料准备、模

板安装与管路布设、混凝土浇筑、养护控制、质量检测。每个阶段设置质量控制点,建立了全过程监控体系。施工现场配备移动试验室,随时进行质量检查和参数调整。

#### 5.3 效果对比分析

效果对比分析通过设置对比区段进行评估。优化区段与对照区段在相同环境条件下进行施工,每区段面积2000平方米。监测数据显示:优化区段混凝土最高温升比对照区降低 $8.3^{\circ}\text{C}$ ,温度应力降低35%;抗压强度提高12.5%,抗渗性提高两个等级;表面裂缝宽度控制在0.08mm以下,较对照区降低65%;28天收缩变形值减少28%。

#### 5.4 技术经济指标评价

技术经济指标评价采用全寿命周期分析方法。直接经济效益体现在:原材料成本降低8%,施工工期缩短12天,养护费用节约35%,维修费用预期降低60%。间接效益包括:工程质量提升带来的使用寿命延长,预计可延长15-20年;运营期维护成本降低,年均节约维护费用280万元;工程可靠性提高,降低了安全隐患。综合分析表明,优化技术的经济效益显著,投资回收期为2.5年。社会效益方面,减少了返修工作量,降低了环境影响,提高了工程品质,获得业主高度认可。

#### 结语

通过材料配比、温度控制和养护技术的系统优化,形成了一套完整的混凝土裂缝控制技术体系。工程应用结果表明:优化后的配合比方案提高了混凝土的和易性和抗裂性能,温控技术创新有效降低了温度应力,复合养护体系确保了混凝土早期强度发展。实际工程中,优化技术的应用使混凝土裂缝发生率降低了85%,裂缝宽度控制在规范允许值的50%以内,同时节约了工程造价。这些技术创新为大型水利水电工程混凝土裂缝控制提供了新的解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 苏金海. 水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用[J]. 治淮, 2023(7): 66-67.
- [2] 匡雄伟. 水利水电工程中混凝土施工技术的应用[J]. 清洗世界, 2021, 37(7): 155-156.
- [3] 陈涛, 丁晶晶. 水利水电工程中混凝土施工技术的应用研究[J]. 智能城市, 2021, 7(5): 151-152.
- [4] 胡亚林. 水利水电工程中混凝土裂缝施工技术[J]. 中国房地产业, 2019(25): 248.
- [5] 沈林. 水利水电工程中混凝土施工技术的应用分析[J]. 建筑与装饰, 2021(18): 130, 132.