

# 混凝土面板堆石坝防渗面板施工关键技术分析

陈 琦

中国水利水电第四工程局有限公司 河北 保定 072750

**摘 要：**混凝土面板堆石坝防渗面板施工关键技术涵盖原材料优选、配合比精细化设计、滑模浇筑工艺控制及裂缝预防与治理。采用低热硅酸盐水泥与粉煤灰掺合料，结合抗裂纤维提升混凝土抗裂性。滑模施工需动态调整提升速度，确保模板水平位移偏差小于5mm。通过二次压光、智能养护系统降低表面干缩风险，结合接缝止水带安装与嵌缝材料性能控制，实现防渗体系与堆石体变形的协同适应，保障大坝长期运行安全。

**关键词：**混凝土面板堆石坝；防渗面板；施工关键技术

引言：混凝土面板堆石坝凭借其结构适应性强、施工效率高及经济性好等优势，在水利水电工程中广泛应用。防渗面板作为坝体防渗体系的核心，其施工质量直接关乎大坝的安全性与耐久性。然而，受堆石体沉降变形、温度应力、干缩效应等因素影响，面板易出现裂缝、接缝渗漏等缺陷。本文聚焦防渗面板施工关键技术，从原材料选择、浇筑工艺、裂缝控制及接缝处理等方面展开分析，旨在为提升面板施工质量、保障大坝长期稳定运行提供技术参考。

## 1 混凝土面板堆石坝防渗面板概述

### 1.1 防渗面板的结构与功能

(1) 面板的组成。防渗面板主要由混凝土层、止水带和接缝结构构成。混凝土层是核心部分，通常采用高强度、抗渗性强的混凝土浇筑，厚度根据坝高和受力情况确定，一般在0.3-0.8m之间，能直接阻挡水体渗透。止水带多设置在面板接缝处，常用橡胶或金属材质，可有效填充缝隙，防止渗水通过接缝渗漏。接缝结构分为垂直缝、水平缝和周边缝，垂直缝将面板划分成若干块体，适应坝体横向变形；水平缝协调上下层面板位移；周边缝连接面板与坝基、岸坡，保障整体密封性。(2) 防渗机理。其防渗机理主要体现在两方面：一是阻隔渗流路径，混凝土层自身的低透水性和止水带、接缝结构的密封作用，共同阻断水体在坝体中的渗透通道，减少渗流量；二是适应坝体变形，面板通过合理的分缝设计和材料特性，能随堆石体的沉降、位移发生一定变形，避免因坝体变形导致面板开裂，从而维持防渗性能。

### 1.2 面板的受力与变形特性

(1) 堆石体沉降对面板的影响。堆石体在坝体自重、水压力等荷载作用下会发生沉降，且沉降具有时间效应，初期沉降较快，后期逐渐减缓。堆石体不均匀沉降会使面板产生弯曲应力和剪切应力，若应力超过混凝土

的抗拉强度，易导致面板出现裂缝，影响防渗效果。

(2) 温度应力与干缩裂缝的成因。混凝土浇筑后，在水化热作用下内部温度升高，后期温度逐渐降低，因温度变化产生的温度应力会使面板产生收缩变形，当约束较强时，易引发温度裂缝。同时，混凝土在硬化过程中会发生干缩，若干缩受到坝体或基础的约束，会产生干缩应力，当应力超过混凝土的抗拉强度时，会形成干缩裂缝，这些裂缝会降低面板的整体性和抗渗性。

### 1.3 常见施工缺陷及危害

(1) 表面裂缝、深层裂缝、接缝渗漏。表面裂缝多因混凝土养护不当、温度骤变等导致，深度较浅，但若不及时处理，会逐渐发展为深层裂缝。深层裂缝贯穿面板一定深度，会严重破坏面板的防渗结构，导致渗水进入坝体内部。接缝渗漏则是由于止水带安装不规范、老化损坏或接缝填充材料不合格等原因造成，使水体通过接缝渗入坝体。(2) 缺陷对坝体安全的长期影响。这些施工缺陷若长期存在，会导致坝体渗流量增加，引起堆石体湿陷，降低坝体的稳定性。同时，渗水会对坝体内部结构产生侵蚀作用，加速混凝土的老化和钢筋的锈蚀，进一步削弱坝体的承载能力和防渗性能，严重时可能引发坝体失稳、溃坝等重大安全事故，威胁下游人民的生命财产安全。

## 2 混凝土面板堆石坝防渗面板施工关键技术分析

### 2.1 原材料选择与配合比设计

(1) 低热硅酸盐水泥、粉煤灰等掺合料的应用。优先选用低热硅酸盐水泥，其7天水化热不超过230kJ/kg，可大幅降低混凝土浇筑后内部温升，减少温度裂缝风险。同时掺入Ⅰ级粉煤灰，掺量控制在胶凝材料总量的20%-30%，利用其火山灰活性改善混凝土和易性，延缓水化热释放速度，且能提升混凝土后期抗压强度与抗渗性能。(2) 抗裂纤维、减水剂对混凝土性能的改善。添

加聚丙烯抗裂纤维，掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ ，纤维可在混凝土内部形成三维网状结构，抑制微裂缝扩展，提升混凝土抗拉强度与抗裂性。选用高效聚羧酸系减水剂，减水率不低于25%，在降低水胶比的同时，保证混凝土流动性，减少拌和用水量，避免因水分过多导致的干缩裂缝<sup>[1]</sup>。

(3) 配合比优化。水胶比严格控制在0.45以下，确保混凝土密实度与抗渗性；砂率选取35%-40%，平衡混凝土流动性与抗离析能力，避免砂率过高导致收缩增大或过低影响和易性；根据施工气温调整外加剂掺量，夏季高温时适当提高减水剂掺量0.2%-0.3%，冬季低温时掺加引气剂，引气含量控制在3%-5%，提升混凝土抗冻性。

## 2.2 面板混凝土浇筑技术

(1) 滑模施工工艺。滑模模板采用钢制组合结构，面板厚度30-80cm对应模板高度1.2-1.5m，模板内侧设置耐磨不锈钢板，保证面板表面平整度。提升速度根据混凝土初凝时间动态调整，一般控制在1.5-2m/h，提升过程中采用液压同步系统，确保模板水平位移偏差不超过5mm，避免因提升不均导致面板表面错台。(2) 分层分块浇筑策略。沿坝高方向按2-3m分层浇筑，层间间隔时间控制在混凝土初凝前，避免出现冷缝；沿坝轴线方向按12-15m分块，设置垂直伸缩缝，减少混凝土硬化过程中因约束产生的拉应力。分块浇筑时采用阶梯式推进，相邻浇筑块高差不超过1.5m，降低施工过程中混凝土的温度应力与收缩应力。(3) 浇筑温度控制。夏季施工时对骨料进行预冷处理，采用冷水喷淋骨料，使骨料温度降至 $15^\circ\text{C}$ 以下；混凝土拌和时加入冰水，替代30%-50%的拌和用水，将出机口温度控制在 $10\text{-}15^\circ\text{C}$ 。浇筑完成后在面板内部预埋冷却水管，通 $2\text{-}4^\circ\text{C}$ 冷水循环冷却，冷却水管间距2-3m，通水时间7-10天，使混凝土内部最高温度不超过 $60^\circ\text{C}$ ，内外温差控制在 $25^\circ\text{C}$ 以内。

## 2.3 裂缝控制与养护技术

(1) 二次压光与表面保湿处理。混凝土浇筑至设计高程后，初凝前进行第一次抹面压光，消除表面气泡与不平整；终凝前进行第二次压光，闭合表面微裂缝。压光完成后立即覆盖土工布保湿，24小时内喷洒养护剂，形成封闭保湿层，避免混凝土表面水分快速蒸发产生塑性裂缝。(2) 智能养护系统。在面板表面布置温湿度传感器，监测频率1次/2小时，数据实时传输至智能控制系统。当表面湿度低于80%或温度高于 $35^\circ\text{C}$ 时，系统自动启动喷淋装置，喷淋间隔15-20分钟，每次喷淋时间3-5分钟，确保护养期间混凝土表面始终处于湿润状态，养护周期不少于28天。(3) 低温环境下的保温措施。冬季施工时，混凝土浇筑完成后立即覆盖阻燃保温棉被，棉被

厚度不小于5cm，层间搭接宽度20cm以上；当环境温度低于 $-5^\circ\text{C}$ 时，在棉被外侧布置碘钨灯加热，灯距面板表面1.5-2m，控制加热区域温度在 $5\text{-}10^\circ\text{C}$ ，避免混凝土受冻，确保强度正常发展<sup>[2]</sup>。

## 2.4 接缝与止水结构施工

(1) 垂直缝、水平缝的切割与填缝工艺。垂直缝在混凝土浇筑完成7-10天后，采用金刚石锯片切割，切割深度为面板厚度的 $1/3\text{-}1/2$ ，宽度2-3cm；水平缝在上下层混凝土浇筑间隔期内，人工凿毛处理，去除表面浮浆，露出新鲜骨料。填缝前清理缝内杂物，嵌入聚乙烯泡沫板作为背衬材料，再灌注聚硫密封胶，确保胶层饱满连续。(2) 止水铜片、橡胶止水带的安装与焊接。止水铜片采用T2紫铜，厚度1.2-1.5mm，安装时确保中心线与接缝中心线重合，固定间距不超过50cm，避免位移。铜片焊接采用氧乙炔钎焊，焊缝宽度不小于10mm，焊接后进行打压试验，压力0.2MPa，保压30分钟无渗漏为合格。橡胶止水带安装前检查表面平整度，接头采用热硫化焊接，搭接长度不小于10cm，焊接后拉伸强度不低于母材的80%。(3) 嵌缝材料（聚硫密封胶）的性能要求与施工要点。聚硫密封胶需满足拉伸强度 $\geq 1.0\text{MPa}$ 、伸长率 $\geq 300\%$ 、低温柔性 $-30^\circ\text{C}$ 无裂纹的性能指标。施工前将缝壁涂刷底涂剂，底涂剂表干后灌注密封胶，采用专用灌注枪分层灌注，每层厚度不超过10mm，灌注过程中排除气泡，灌注完成后采用刮板修整表面，确保胶面与面板齐平，养护7天后方可进水<sup>[3]</sup>。

## 2.5 特殊工况下的施工技术

(1) 高寒地区面板防冻胀措施。面板下铺设20-30cm厚级配碎石垫层，垫层内掺加5%水泥进行稳定处理，提升垫层承载力与抗冻性；在面板周边缝处设置保温层，采用聚氨酯泡沫板，厚度10-15cm，阻断冻胀力传递。冬季蓄水前，在面板表面涂刷抗冻涂料，涂料干膜厚度不小于1.5mm，增强面板抗冻融循环能力。(2) 陡坡段面板的抗滑移设计。陡坡段（坡度大于1:1.5）面板浇筑前，在堆石体表面铺设土工格栅，格栅纵横向抗拉强度不低于 $80\text{kN}/\text{m}$ ，格栅之间搭接宽度20cm，采用缝合连接。面板混凝土中增设锚固筋，锚固筋深入堆石体深度不小于1.5m，间距 $2\times 2\text{m}$ ，通过锚固作用提升面板抗滑移稳定性，避免浇筑过程中面板下滑。(3) 地震区面板的柔性连接技术。在面板垂直缝处采用柔性止水结构，将传统刚性止水改为橡胶止水带与遇水膨胀止水条组合形式，提升接缝适应变形能力；在面板与坝基连接的周边缝处，设置弹性垫层，采用氯丁橡胶板，厚度5-8mm，减少地震荷载下坝基变形对面板的冲击。同时在面板分块

处增设位移传感器,实时监测地震后接缝位移,及时采取修复措施。

### 3 混凝土面板堆石坝防渗面板施工质量控制与监测技术

#### 3.1 施工过程质量控制

(1) 原材料检测。原材料严格抽检,水泥3天、28天抗压强度分别不低于23MPa、42.5MPa;骨料检测压碎值与级配。混凝土试块每100m<sup>3</sup>1一组,28天抗压强度达设计值100%以上,抗渗试块检测等级不低于P8,杜绝原材料问题影响质量。(2) 浇筑工艺检查。浇筑过程中采用高频振捣棒振捣,振捣间距控制在30cm内,振捣时间以混凝土表面无气泡逸出、出现泛浆为准,避免漏振或过振导致密实度不足。浇筑完成后,采用2m靠尺检查面板表面平整度,允许偏差不得超过5mm,对超标部位及时打磨修整,确保面板表面平整,减少后期渗漏隐患。

(3) 接缝质量验收。接缝施工完成后,先进行气密性试验,将接缝两端密封,通入压缩空气至0.2MPa,保压30分钟,压力降不超过5%为合格;再进行渗水量测试,向接缝内注水至0.1MPa,观测30分钟,渗水量不超过0.01L/(m·min)方可通过验收,保障接缝密封性能<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 无损检测技术应用

(1) 超声波检测。采用超声波检测仪对面板进行全面检测,探头频率选用50kHz,检测间距为20cm×20cm。通过分析超声波传播速度与波形,定位内部空洞、疏松等缺陷,当波速低于4000m/s时,判定存在缺陷,需标记位置并进行钻孔验证与修复。(2) 红外热成像检测。在面板浇筑完成后24小时内,采用红外热成像仪扫描表面温度场,检测温度分辨率不低于0.1℃。若发现局部温度异常(与周边温差超过2℃),需分析是否存在内部裂缝或振捣不密实问题,及时采取针对性处理措施,防止缺陷扩大。(3) 探地雷达检测。使用1.5GHz高频探地雷达,沿止水带走向连续扫描,通过分析雷达反射波图像判断止水带位置与完整性。若反射波出现明显中断或异常反射,表明止水带存在移位、破损,需立即开挖检查并更换,确保止水带发挥作用。

#### 3.3 长期性能监测系统

(1) 分布式光纤传感技术。在面板浇筑时预埋分布式光纤,光纤布设间距为5m,通过光时域反射技术实时监测面板应变与温度变化。当应变值超过混凝土极限应变的80%或温度变化速率超过2℃/h时,系统自动报警,便于及时调控。(2) 自动化测压管。在坝体不同高程布设自动化测压管,间距50m,通过压力传感器采集渗流压力数据,数据采集频率为1次/10分钟,实时传输至监

测中心。当渗流压力超过设计值的90%时,触发预警,提示工作人员排查渗漏点。(3) 大数据分析平台。整合各类监测数据构建大数据平台,采用机器学习算法分析数据趋势,建立面板性能评估模型。当监测指标异常时,平台自动生成预警信息,并推送维护建议,如裂缝修补方案、止水带更换周期等,为坝体长期安全运行提供决策支持。

## 4 工程案例分析与应用验证

### 4.1 案例背景

选取西南地区某大型面板堆石坝工程作为案例,该坝坝高128m,坝顶长度650m,总库容1.8亿m<sup>3</sup>,主要承担防洪、发电及灌溉任务。工程所在区域属亚热带季风气候,夏季最高气温达38℃,冬季最低气温-2℃,且坝基存在局部风化岩层,施工条件复杂。防渗面板总面积约4.2万m<sup>2</sup>,设计混凝土强度等级为C25,抗渗等级P10,要求面板裂缝发生率控制在0.1条/100m<sup>2</sup>以内,渗流量不超过0.5L/(s·km)。

### 4.2 施工关键技术实施

(1) 抗裂混凝土配合比设计。结合工程气候与地质条件,采用“低热硅酸盐水泥+I级粉煤灰+聚丙烯抗裂纤维”的组合方案。胶凝材料总量380kg/m<sup>3</sup>,其中低热水泥占比75%,粉煤灰占比25%;聚丙烯纤维掺量0.9kg/m<sup>3</sup>,选用聚羧酸系减水剂(减水率28%),水胶比控制在0.42。经试验验证,该配合比混凝土7天抗压强度达22MPa,28天抗压强度达30MPa,抗渗等级P12,且水化热峰值降低18%,有效提升抗裂性能。(2) 滑模施工与温度控制措施。滑模模板采用钢制组合结构,高度1.4m,内侧铺设3mm厚不锈钢板,配备4组液压同步提升系统,提升速度根据混凝土初凝时间动态调整为1.6-1.8m/h。温度控制方面,夏季采用冷水喷淋骨料(温度降至14℃)+冰水拌和(替代40%拌和用水),将出机口温度控制在12-14℃;面板内部预埋Φ40mm冷却水管(间距2.5m),通3℃冷水循环冷却8天,使混凝土内部最高温度控制在58℃,内外温差稳定在22℃以内。(3) 垂直缝止水结构优化。垂直缝采用“铜片止水+橡胶止水带+遇水膨胀止水条”的三重止水体系。止水铜片厚度1.5mm,橡胶止水带选用中埋式651型,遇水膨胀止水条截面积20mm×30mm,膨胀倍率≥300%。施工中优化铜片焊接工艺,采用氧乙炔钎焊+超声波探伤检测,焊缝合格率达100%;垂直缝切割深度为面板厚度的1/2(40cm),填缝时先嵌入聚乙烯泡沫板,再分层灌注聚硫密封胶,确保止水结构完整性。

### 4.3 施工效果评价

(1) 面板裂缝发生率统计。工程完工后,通过超声波检测与红外热成像扫描,共检测面板面积4.2万m<sup>2</sup>,仅发现3条表面微裂缝(长度均小于1m,深度小于5cm),裂缝发生率为0.07条/100m<sup>2</sup>,远低于设计控制值(0.1条/100m<sup>2</sup>),且无深层裂缝与贯穿裂缝,抗裂技术应用效果显著。(2) 渗流量监测数据对比。通过自动化测压管与渗流量观测仪监测,运行初期坝体渗流量为0.32L/(s·km),运行1年后稳定在0.28L/(s·km),较同类型坝体平均渗流量(0.6-0.8L/(s·km))降低55%以上,满足设计要求(≤0.5L/(s·km)),验证了止水结构与抗渗混凝土的可靠性。(3) 经济效益分析。技术优化后,抗裂混凝土减少裂缝修复费用约86万元;滑模施工效率较传统浇筑提升30%,缩短面板施工工期28天,间接减少设备租赁与人工成本约120万元;温度控制措施降低温控成本15%,节约费用45万元。综合计算,工程共节约成本251万元,同时因质量达标避免后期维护投入,长期经济效益显著。

#### 结束语

混凝土面板堆石坝防渗面板施工技术的有效应用,

是大坝安全稳定运行的关键保障。本文围绕原材料优选、浇筑工艺把控、裂缝预防处理及接缝精细施工等关键技术展开探讨,这些技术对于提升面板防渗性能、适应坝体变形具有重要作用。在实际工程中,需结合具体工况与条件,严格落实各项技术措施。同时,持续开展技术创新与优化,强化施工过程管理与质量监测,方能确保防渗面板施工质量,为混凝土面板堆石坝的长久安全奠定坚实基础。

#### 参考文献

- [1]文多志.混凝土面板堆石坝施工与质量控制要点[J].模型世界,2021,(6):63-65.
- [2]程蔚.水库混凝土面板堆石坝施工质量控制[J].价值工程,2020,39(5):177-178.
- [3]程志刚.习水县金家沟水库混凝土面板堆石坝施工中的质量控制探讨[J].工程技术研究,2020,5(5):193-194.
- [4]陈华俊.混凝土面板堆石坝施工质量控制要点分析[J].建筑技术开发,2020,47(13):139-140.