抽水蓄能电站上水库面板混凝土防裂施工技术及应用研究

赵江涛　马宏强
中国水利水电建设工程咨询西北有限公司　陕西　西安　710100

摘　要：抽水蓄能电站上水库面板长期服役于高海拔、大温差、干湿交替的复杂工况，混凝土开裂是影响面板防渗性能与结构安全的核心病害。本文依托山区抽水蓄能电站施工实际，系统分析面板混凝土裂缝类型、形态特征及环境致裂机理，从原材料配比、拌和浇筑、温控养护等环节梳理核心防裂施工技术，结合新型防裂材料、智能监测预警及特殊工况保障技术开展应用研究，构建全流程施工质量控制体系。工程实践表明，整套技术可有效抑制面板裂缝产生，提升混凝土成型质量，可为同类抽水蓄能工程面板防裂施工提供技术参考。

关键词：抽水蓄能电站；上水库面板；混凝土；防裂施工；质量控制

引言：抽水蓄能电站是新型电力系统调峰储能的核心设施，上水库混凝土面板作为主要防渗承重结构，施工质量直接决定电站运行稳定性与使用寿命。相较于常规水利工程，山区上水库施工环境恶劣，温差变化大、风力强、天气多变，混凝土极易产生温度裂缝与干缩裂缝，易引发面板渗漏、结构破损等病害。当前常规施工工艺针对性不足，裂缝控制效果有限。基于此，本文结合现场施工工况，开展面板混凝土防裂施工技术及应用研究，优化配套施工工艺与管控体系，切实解决现场开裂难题。

1 抽水蓄能电站上水库面板混凝土开裂概述

1.1 上水库面板混凝土服役环境特征

抽水蓄能电站上水库多建于山区高地，面板混凝土长期处于复杂恶劣的露天服役环境，区别于常规水库工程，工况条件更为严苛。库区昼夜温差、季节温差幅度较大，混凝土面板反复经历升温、降温循环，极易产生温度应力引发结构变形。上水库需频繁进行蓄水、放水循环作业，面板交替处于泡水湿润和风干暴晒状态，干湿交替作用会持续损耗混凝土结构性能。山区大风、霜冻、暴雨等极端天气频发，加之紫外线长期直射，会加速混凝土表层老化、收缩变形，大幅提升面板开裂风险，对混凝土抗裂性能和施工工艺提出了更高要求。

1.2 混凝土裂缝主要类型及形态特征

结合上水库面板施工及运行实际，混凝土裂缝主要分为温度裂缝、干缩裂缝及施工裂缝三类。温度裂缝多呈规律性分布，宽窄不均、走向无固定规律，多出现于面板浇筑完成早期，由内外温差应力超标导致。干缩裂缝以表层细微裂纹为主，分布密集、长度较短，多产生于养护不到位、表层水分快速流失的面板区域。施工裂缝多为贯通性裂缝，走向规整、宽度较大，主要由浇筑分层衔接不当、振捣不密实、模板变形等施工工艺问题造成，此类裂缝易引发渗水、结构破损，是影响上水库面板防渗及运行安全的主要病害[1]。

2 上水库面板混凝土防裂施工关键技术

2.1 原材料优选与配比防裂优化技术

抽水蓄能上水库面板混凝土防裂施工，首要把控原材料质量与配合比设计，从源头降低混凝土收缩变形与应力开裂概率，所有选材及配比参数均贴合高地露天面板施工工况。（1）胶凝材料选型。优先选用低水化热、稳定性高的普通硅酸盐水泥，严格管控水泥细度、凝结时间及3天、7天水化热指标，杜绝快硬、高发热水泥进场。粉煤灰选用Ⅰ级优质粉煤灰，等量替代部分水泥，有效降低混凝土整体水化温升，减少温度收缩应力，提升混凝土和易性与密实度。（2）骨料质量控制。粗骨料选用粒径5～31.5mm连续级配碎石，要求质地坚硬、孔隙率低、含泥量 ≤ 1%、针片状含量 ≤ 5%，避免杂质与劣质骨料引发混凝土不均匀收缩。细骨料采用中粗天然砂，含泥量 ≤ 2%，严控砂石含水率波动，施工期间定时检测，及时调整施工用水量。（3）配合比精准优化。结合上水库温差大、干湿交替的工况，以低水胶比为核心设计原则，控制水胶比在0.35～0.40区间。合理掺加高效减水剂，在保证混凝土坍落度满足溜槽施工要求的前提下，最大限度减少拌合用水量。根据现场试配结果微调砂率，优化混凝土密实性，降低干缩变形，不盲目追求高强度，重点保障混凝土抗裂稳定性。

2.2 混凝土拌和与输送防裂控制技术

混凝土拌和、输送阶段的工艺稳定性，直接影响混凝土匀质性与成型质量，施工中通过标准化流程管控，避免物料离析、温度异常引发后期开裂。（1）标准化拌和施工。采用大型强制式拌和设备，严格按照试配参数

设定投料顺序与拌和时间，保证水泥、骨料、外加剂混合均匀。夏季高温施工时，采取骨料遮阳、冷水拌合等降温措施，控制混凝土出机温度不高于28℃；冬季低温时段做好骨料保温，避免混凝土受冻产生内部缺陷。每批次拌和完成后抽检坍落度、含气量，不合格物料严禁入仓浇筑。（2）溜槽覆盖管控。面板混凝土统一采用溜槽浇筑方式，溜槽提前固定、保湿润湿，避免阳光直射造成混凝土水分散失。浇筑过程保持连续浇筑，杜绝中途长时间停歇，防止混凝土离析、骨料分离。若出现短暂间歇，应保证混凝土运输罐处于正传工作状态，保证混凝土状态稳定，杜绝二次加水调整和易性，避免破坏配合比引发收缩开裂[2]。

2.3 面板浇筑成型精细化施工技术

浇筑成型是面板防裂的核心施工环节，通过分层、分段、精细化作业，消除浇筑缺陷，减少施工裂缝产生。（1）分层分段浇筑施工。结合上水库面板坡面结构特点，采用斜面分层、分段跳仓浇筑工艺，单仓浇筑宽度、厚度严格按照专项方案执行，控制单次浇筑体量，分散水化热聚集。上下层浇筑间隔时间控制在混凝土初凝前，杜绝冷缝产生，保证面板结构整体性。（2）精准振捣作业。采用插入式振捣器配合平板振捣器联合施工，振捣遵循快插慢拔原则，重点加强边角、止水下部、分层接缝、钢筋密集区域振捣，杜绝漏振、欠振。同时严控过振问题，防止骨料下沉、砂浆上浮，避免表层砂浆过厚引发表面收缩裂缝。振捣完成后及时整平、收面，消除表面气泡与孔隙。（3）二次压面处理。混凝土初凝后、终凝前开展二次抹压收面作业，压实混凝土表层塑性收缩产生的细微裂纹，封闭表层毛细孔隙，提升面板表层密实度，有效抑制后期表层干缩裂缝发育。

2.4 混凝土温控保湿养护防裂技术

针对上水库高地温差大、风大干燥的特点，全程落实温控与保湿养护措施，平衡混凝土内外温度、湿度，防控温度裂缝与干缩裂缝。（1）全程温度管控。浇筑完成后实时监测面板混凝土内部温度与表面温度，严格控制内外温差不超过25℃。高温时段采取覆盖遮阳、洒水养护措施，降低表面温度；低温时段铺设保温棉被，减少温度骤变产生的温度应力。（2）常态化保湿养护。混凝土浇筑收面完成后及时覆盖土工布、防水薄膜，杜绝表层水分快速蒸发。养护周期根据设计要求养护至蓄水前，前期保持连续湿润状态，避免干湿反复交替。大风、暴晒天气增加洒水养护频次，持续保持面板表层湿润，从根本上防控干缩裂缝产生，保障混凝土强度稳步增长[3]。

3 防裂施工配套关键技术研发与应用

3.1 新型防裂材料与外加剂应用

结合抽水蓄能上水库面板混凝土干湿交替、温差幅度大、表层易收缩开裂的工程特点，针对性开展专用防裂材料及外加剂适配研发与现场应用，替代常规通用型建材，匹配面板特殊施工工况。（1）高性能减缩剂适配研发与应用。依托室内多组配比试验，筛选适配高地露天面板施工的新型减缩剂，对比不同掺量下混凝土的自收缩、干燥收缩及强度发展规律。结合现场施工温度、风速、养护条件，确定最优掺量参数，控制混凝土早期塑性收缩与后期干燥收缩变形。施工中采用分次掺加工艺，拌和阶段定量掺入，保证减缩剂与胶凝材料充分融合，避免局部掺量不均造成的收缩差异，提升混凝土整体体积稳定性。（2）玄武岩纤维应用优化。针对面板表层微裂纹多发问题，掺入玄武岩纤维，通过试验确定纤维长度、规格及掺量标准，规避纤维团聚、分散不均等问题。在拌和工序中调整投料顺序，保障纤维均匀分布于混凝土内部，形成立体网状结构。现场应用过程中，严格把控纤维掺加量，杜绝过量掺加影响混凝土和易性与密实度，有效限制混凝土硬化阶段微裂缝扩展延伸。

3.2 智能监测与预警系统构建

为解决传统人工测温、巡检数据滞后、隐患发现不及时的问题，构建适配上水库面板施工的智能化监测预警系统，实现混凝土施工全过程参数实时采集、数据分析与风险预警。（1）智能监测点位布设与设备安装。根据面板浇筑分仓分区情况，在混凝土内部、表层及基底分层布设温度、应力、应变智能传感器，重点在坡面中部、边角、浇筑接缝等易开裂区域加密布设监测点位。设备浇筑前固定预埋，做好防护处理，避免振捣、收面施工造成设备移位、损坏，保障监测数据连续、准确。（2）数据采集与阈值预警设置。系统实时采集混凝土内外温度、温度梯度、内部约束应力、表层应变等核心数据，自动生成动态变化曲线。结合本工程施工环境与结构参数，划定开裂风险预警阈值，区分低温、高温、应力超标、变形异常等不同预警等级。系统触发预警后自动推送信息至现场管理人员，实现问题早发现、早处置。（3）数据指导现场施工调整。依托实时监测数据，动态调整温控、养护、浇筑节奏。温差超标时及时增减保温覆盖层，应力异常时调整浇筑间隔与单次浇筑体量，彻底改变传统经验化施工模式，提升防裂施工的精准度与可控性。依托整套智能监测预警体系，可实现上水库面板混凝土施工裂缝风险的全过程动态管控，有效弥补传统人工巡检的短板。系统长期连续的数据积累，

能够精准梳理不同工况下混凝土应力、温度变化规律。

3.3 特殊工况下的防裂施工保障技术

抽水蓄能上水库多处于高海拔山区，高温暴晒、低温霜冻、雨季降雨、大风天气频发，常规施工工艺难以适配复杂工况，针对性研发配套专项防裂保障技术。（1）高温大风天气防裂保障技术。夏季高温施工时，搭建全域遮阳棚覆盖作业面，对骨料、拌合设备、泵送管道进行遮阳隔热，采用低温水拌合工艺，严控混凝土出机温度。浇筑完成后即刻覆盖保湿材料，增加洒水养护频次，抑制表层水分快速蒸发，规避塑性干缩裂缝。大风天气密闭作业面，减少空气对流造成的表层失水过快问题。（2）冬季低温防寒防裂技术。低温施工阶段优化施工时段，集中在日间高温时段完成浇筑作业。施工原材料提前保温预热，杜绝骨料结冰、拌合水温过低问题。混凝土浇筑完成后，立即覆盖保温棉被与密封薄膜，严控内外温差，防止低温收缩裂缝与冻胀缺陷。同时延长保温养护时长，匹配低温环境下混凝土强度增长规律。（3）雨季防雨施工保障技术。雨季施工搭设移动式防雨棚，杜绝雨水直接冲刷新浇混凝土。短时降雨立即停止浇筑，及时对已浇筑面层进行覆膜防护，严格处理施工接缝，清除表层积水、浮浆，保证二次浇筑结合密实，避免雨水侵入造成混凝土配比失衡、结构松散开裂[4]。

4 面板混凝土防裂施工质量控制体系构建

结合抽水蓄能电站上水库面板混凝土施工特点，依托现场防裂施工工艺流程，构建全流程、可落地的防裂施工质量控制体系，覆盖施工筹备、现场作业、监测预警及验收管控各个环节，保障面板混凝土施工整体质量稳定可控。（1）施工前期防裂筹备管控，严格落实原材料进场复检、配合比现场试配、施工设备校验及作业人员技术交底工作，结合工程高地、温差大、干湿交替的工况条件，编制专项防裂施工方案，明确各工序施工参数、管控标准及责任分工，提前排查场地、设备、材料存在的致裂隐患。（2）施工过程动态质量管控，针对拌和输送、浇筑振捣、收面养护等关键工序实行全过程旁站管控，严格执行分层浇筑、精准振捣、二次收面及恒温保湿养护工艺，实时调整施工参数，杜绝冷缝、过振、养护滞后等常见施工问题。（3）施工后期监测预警管控，布设温度、形变监测点位，定期开展面板外观巡查，记录混凝土成型状态及裂缝发展情况，建立隐患台账，对微小缺陷及时处理，规避裂缝持续扩展。（4）标准化验收管控，结合行业规范及项目设计要求，明确防裂施工验收指标，对混凝土密实度、表层平整度、裂缝控制效果逐项核验，未达标准的工序及时整改，形成闭环质量管控模式。

结束语：本文结合抽水蓄能上水库特殊施工环境，梳理了面板混凝土开裂的主要诱因与病害特征，优化完善了从原材料管控、现场浇筑到养护防护的全套防裂施工工艺。通过应用新型防裂材料、智能监测预警技术及特殊工况保障措施，建立了覆盖施工全周期的质量控制体系。实践证实，针对性的防裂施工技术可有效适配山区复杂工况，显著降低面板裂缝发生率，提升混凝土结构整体性与耐久性，对提升抽水蓄能电站面板施工质量、保障工程长期安全运行具备实际工程价值。

参考文献

[1]史朝辉,衡斌杰,李东,等.智能化施工技术在抽水蓄能电站面板混凝土质量管控中的应用研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技,2026,(7):153-156.

[2]李绪佳.抽水蓄能电站堆石坝面板混凝土配合比优化与关键施工技术[J].四川水泥,2026,(2):107-108+111.

[3]李东,赵旭,史朝辉,等.数字化智能管控下抽水蓄能面板混凝土防裂施工技术分析[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026,(7):144-147.

[4]曾斌杰,冯海波.抽水蓄能电站面板堆石坝混凝土温控与防裂[J].西北水电,2025,(6):139-142.