

水利枢纽工程混凝土施工技术研究

张良群¹, 梁骏宇²

1. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 淮安新水建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI: 10.61369/ETQM.2025080012

摘 要 : 水利枢纽工程混凝土施工技术对工程整体质量和安全性具有决定性作用。为满足结构稳定性、耐久性和抗渗性的要求, 施工中需科学选择原材料, 优化配合比设计, 严格控制浇筑温度和养护条件。大型水工混凝土的温度裂缝控制是关键难点, 常借助分层分块浇筑、温控系统和外加剂协同调控。此外, 现代施工技术如滑模、智能监测和信息化管理也不断提高施工效率与工程质量, 推动水利建设高质量发展。

关 键 词 : 水利枢纽; 混凝土施工; 温度控制; 结构耐久性; 智能建造

Research on Concrete Construction Technology of Hydro-junction Projects

Zhang Liangqun¹, Liang Junyu²

1. Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd. Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huai'an Xinsui Construction Co., Ltd. Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : Concrete construction technology in hydro-junction projects plays a decisive role in the overall quality and safety of the engineering. To meet the requirements of structural stability, durability, and impermeability, it is necessary to scientifically select raw materials, optimize mix design, and strictly control pouring temperature and curing conditions during construction. Temperature crack control in large-scale hydraulic concrete is a key challenge, often addressed through layered and blocked pouring, temperature control systems, and the coordinated use of admixtures. Additionally, modern construction techniques such as sliding formwork, intelligent monitoring, and information management continuously improve construction efficiency and engineering quality, promoting high-quality development in water conservancy construction.

Keywords : hydro-junction; concrete construction; temperature control; structural durability; intelligent construction

引言

随着水资源调控与开发利用需求的不断增长, 大型水利枢纽工程日益增多, 其施工质量直接关系到防洪、灌溉、发电等多重功能的实现。混凝土作为主体结构的核心材料, 其施工工艺在保障工程安全与使用寿命中占据重要地位。如何在复杂环境中实现高强度、高耐久性与施工效率的统一, 已成为技术攻关的关键。探索并优化混凝土施工技术, 正是提升水利工程质量与可持续发展的必由之路。

一、水利枢纽工程混凝土施工的技术要求与工程特点

水利枢纽工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 肩负着防洪、供水、发电、航运等多重职能, 对工程结构的稳定性和安全性提出了极高要求。混凝土是水利枢纽的主体结构材料, 其施工技术直接关系到工程的整体性能和运行寿命。由于水利工程多处于地质复杂、水位变化频繁的环境中, 混凝土施工必须具备良好的抗渗性、抗冻性和耐久性, 确保在长期服役条件下结构不出现渗漏、裂缝或强度衰减等问题。同时, 大体积混凝土在施工中容易产生温度裂缝, 如何有效控制水化热、避免内部结构应力

集中, 是施工过程中必须重点解决的技术难点之一。

在施工组织方面, 水利枢纽工程通常规模庞大, 周期长, 施工面广, 对混凝土连续供应能力、施工机械配套性和多工种协调提出了更高要求。为了满足不同结构部位的性能需求, 需根据坝体、闸墩、引水渠等构造特点合理选择混凝土配比方案, 调整骨料粒径、水胶比、外加剂种类与掺量, 从而在保证强度的同时, 提高工作性与可泵性。此外, 水利工程施工常常需要面对雨季、高温或低温等复杂气候条件, 施工技术必须具备良好的适应性, 例如通过设置遮阳棚、防雨设施或加热系统, 保障混凝土浇筑质量和养护效果^[1]。施工过程中的测量控制、振捣密实、表面处

理等环节也需严格把控，以防止蜂窝麻面、冷缝和空洞等质量问题。

随着科技的发展，水利枢纽混凝土施工技术不断向智能化、绿色化方向迈进。信息化技术的引入使施工过程更加可控，通过温控系统、自动化监测设备及三维建模平台实现施工数据的实时采集与分析，提升了质量管理水平和决策效率。新型施工工艺如滑模、塔吊远程控制、高性能混凝土泵送等技术的应用，不仅提高了施工效率，也降低了人工操作误差。同时，节能环保理念在混凝土施工中逐步得到贯彻，绿色外加剂、再生骨料和低碳生产工艺的应用日益增多。水利枢纽混凝土施工已从传统经验驱动转向多因素协同优化和科技创新支撑的新阶段，对保障工程高质量建设和运行发挥着越来越关键的作用。

二、原材料选择与混凝土配合比优化方法

在水利枢纽工程中，混凝土结构的质量直接受原材料性能的影响，因此科学选择原材料是确保施工质量的前提。水泥作为混凝土的重要胶结材料，必须具备良好的稳定性和适宜的水化热释放速率，常采用硅酸盐水泥或中热水泥，以减少水化过程中的温度升高，降低大体积混凝土开裂风险。骨料的选择同样关键，应具备较高的强度和良好的级配，粗骨料粒径分布合理、颗粒坚硬、洁净，有助于提高混凝土的密实性和抗渗性。细骨料则需保证含泥量低、细度模数适中，过细或含泥量高会影响水泥浆的包裹性与流动性，进而降低混凝土的施工性能与强度发展。此外，掺合料如粉煤灰、矿粉和硅灰等能够显著改善混凝土的工作性和耐久性，同时降低水化热和收缩变形，已被广泛用于水利枢纽工程中^[2]。

在外加剂的选择与应用方面，减水剂、缓凝剂和引气剂的合理搭配对优化混凝土性能具有重要作用。高性能减水剂可在保持工作性的前提下降低水胶比，提高混凝土的强度与密实度；缓凝剂适用于大体积混凝土施工，延缓初凝时间，避免施工过程中冷缝产生；引气剂则可改善抗冻性，提高混凝土的耐久性能。针对不同气候条件和施工环境，需结合实际情况调整外加剂掺量及配比策略。例如，在高温施工环境中，应适当提高缓凝剂掺量以延长施工时间窗；而在寒冷地区施工，则需考虑防冻剂的使用，防止早期冻害。此外，原材料之间的相容性也是混凝土配合比优化的关键因素，应通过室内试验全面评估各组分材料的匹配性能，确保混凝土在拌合、运输、浇筑及养护全过程中保持稳定性与可靠性。

混凝土配合比设计需综合考虑工作性、力学性能、耐久性 & 经济性等多方面因素。在水利枢纽工程中，为实现高抗渗、高强度及优异的耐久性能，常采用低水胶比、大掺合料量的设计方案。优化配合比不仅有助于提高结构的服役年限，还能在一定程度上降低施工成本。设计初期应开展系列性能试验，确定目标强度与坍落度，通过正交试验或灰色关联分析等方法找出最佳配比参数。在生产过程中，应严格控制各原材料称量精度、拌合时间和出料顺序，并根据现场气温、湿度等实际工况灵活调整用水量

和外加剂掺量。通过动态反馈机制及时修正配比方案，可有效提升混凝土的稳定性与施工适应性^[3]。

三、温控与裂缝控制技术在施工中的应用

在水利枢纽工程的大体积混凝土施工中，温度控制是保障结构整体稳定性与耐久性的重要环节。由于水泥水化过程中会释放大量热量，若温差控制不当，将导致混凝土内部与表面之间产生较大温差，诱发温度应力，从而引起裂缝。为避免这种情况发生，施工中需制定科学的温控方案，合理安排浇筑顺序与时间，尽量避免高温或骤冷天气对混凝土温度的剧烈影响。通过采用分层、分块、跳仓等浇筑工艺，可有效减小单次浇筑体积，降低内部水化热累积。此外，采取浇筑前预冷骨料、拌合用水以及使用低热水泥等措施，也可降低混凝土初始入仓温度，为后续温度梯度控制创造有利条件^[4]。

在实际应用中，温控系统通常由内埋测温管道、温度传感器和智能监测平台组成，可实现对混凝土内部温度的实时监测和数据反馈。根据监测数据动态调整养护方式，如采用表面保温棉毯覆盖、喷水养护或风机降温等手段，确保温差控制在安全范围内。部分关键部位还可设置强制冷却系统，通过内部水管通冷水或循环制冷液体，降低核心区温度，减少水化热聚集带来的风险。在施工调度上，需加强施工进度与温控策略之间的协同管理，避免因施工节奏过快或不均匀造成不同区域温升差异过大，影响结构整体性。

裂缝控制作为温控工作的延伸目标，既要预防温度裂缝的产生，也要兼顾干缩、塑性收缩以及结构约束引起的非温度型裂缝。控制裂缝的关键措施包括优化混凝土配合比，采用低收缩、低水胶比的设计方案，同时提高混凝土自身的抗裂性能。在结构设计层面，可通过设置伸缩缝、后浇带、止水带等手段释放温度变形能量，减缓约束应力集中。施工过程中应加强模板拆除时间控制、振捣密实质量及养护制度的执行力度，尤其是早期养护要及时到位，防止表面水分迅速蒸发引起的收缩开裂。综合温控与裂缝控制技术的应用，不仅提升了水利枢纽混凝土结构的安全性与耐久性，也为高质量、高标准施工提供了坚实保障^[5]。

四、现代施工工艺在水利枢纽工程中的实践探索

现代施工工艺在水利枢纽工程中得到了广泛应用，显著提升了施工效率与结构质量。随着工程规模不断扩大、施工环境日益复杂，传统施工方式已难以满足高强度、高精度、高安全性的要求。为此，滑模施工、预冷混凝土、智能振捣、高性能泵送系统等新技术被逐步引入。例如，在高坝心墙浇筑中，滑模技术可实现连续升模作业，每天提升速度达15~20厘米，不仅节省了大量模板拼装与拆卸时间，还显著提高了混凝土表面质量和成型精度。针对深部或狭小区域结构，采用多点分布泵送系统，最远泵送距离可达500米以上，解决了传统泵送因压力衰减造成混凝土离析或堵管的问题，保障了连续稳定浇筑^[6]。

智能施工装备的投入使用是现代化施工的核心亮点。以混凝土智能拌合站为例，集成了自动称量、水灰比调节、温度控制与实时监测系统，可将配合比误差控制在 $\pm 1\%$ 以内，大幅提升混凝土拌合质量与生产效率。在某水电站枢纽工程中，使用该系统后，每天生产能力提高至3000立方米，混凝土强度合格率达到99.5%以上。此外，振捣作业从人工转向智能振捣设备控制，可根据混凝土拌合物流动性自动调整振捣频率和时间，避免过振或漏振，有效降低孔隙率和表面缺陷率。塔吊和混凝土运输系统也实现远程控制与路径优化，减少施工现场人员调度压力，提高作业协同效率^[7]。

数字化管理平台在水利枢纽混凝土施工中的应用也取得了良好成效。通过BIM建模、GIS地理信息系统、物联网感知与大数据分析，实现对施工进度、温度数据、养护条件、施工质量等关键指标的可视化管理。在某大型枢纽工程中，通过数字化平台协同调度，使混凝土浇筑进度提前完成5天，节省人工成本约8%。同时，这些数据可沉淀为工程数字档案，为后期运行维护与技术总结提供详实依据。随着5G网络、人工智能和机器人技术的不断进步，水利枢纽工程的施工工艺正加速迈向“少人化、自动化、智能化”方向发展。现代技术的系统集成不仅提升了施工质量控制水平，也为今后更大规模、更复杂结构的水利工程提供了可复制、可推广的技术路径。

五、施工信息化与智能化管理技术的发展趋势

随着信息技术和智能装备的持续发展，水利枢纽工程施工正逐步迈向数字化、智能化的新阶段。传统依赖人工经验和手工记录的管理方式已无法满足当前工程体量大、技术要求高、协同复杂的施工需求。施工信息化管理技术通过将BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）、IoT（物联网）、大数据等多种技术融合应用，实现对施工全过程的数字化管控。施工进度、资源调配、质量监测、安全巡查等关键环节均可通过可视化平台实时

掌握，有效提升了现场管理的效率与透明度，减少了人为失误和资源浪费。

在混凝土施工过程中，智能化设备的引入大大提高了施工的精度与一致性。例如，自动化拌合站可根据实时传感数据调整原材料投放比例，保证混凝土配比精准稳定；智能泵送系统可根据施工区域混凝土需求自动调节流量，确保连续供应；温控传感系统和应力监测模块实时采集施工过程中的温度变化和结构受力状态，为施工管理人员提供决策支持。部分工程还配备了基于无人机的空中巡检系统与AI图像识别技术，对施工现场的进展、异常情况自动识别与记录，提高了监督响应的及时性与准确性^[8]。

展望未来，水利枢纽工程的施工管理将进一步朝着“云端协同、数据驱动、智能决策”的方向发展。基于云平台的多方协作机制使设计、施工、监理、运维等各参与方实现高效数据共享和跨地域调度，大幅提高项目整体运转效率。同时，随着AI算法和数字孪生技术的逐步成熟，施工管理将不仅限于信息记录和过程控制，更将转向预测性管理与智能优化，通过对历史数据和现场信息的融合分析，实现对工程质量风险、施工进度瓶颈和资源使用效率的提前预判与自动调整。信息化与智能化的深度融合，正在重塑水利枢纽施工管理模式，为行业迈向高质量、智能化发展提供坚实技术支撑。

六、结语

水利枢纽工程作为国家重大基础设施，其混凝土施工技术直接关系到工程的安全、稳定与耐久。通过科学选材与配合比优化，强化温控与裂缝控制，融合现代施工工艺与智能管理手段，极大提升了施工质量与效率。当前，施工技术正向绿色、智能、数字化方向迈进，推动水利工程建设水平不断提升。未来，应继续深化技术融合与应用创新，构建更加高效、安全、可持续的施工体系，为水资源的科学利用与国家基础设施现代化提供坚强支撑。

参考文献

- [1] 杨永强, 王达, 史立新, 等. 滑模技术在大兴水利枢纽工程调压井混凝土施工中的应用 [J]. 水利水电工程设计, 2019, 38(03): 41-44.
- [2] 任艳. 大石峡水利枢纽工程导流洞进口渐变段混凝土衬砌施工技术 [J]. 西北水电, 2020, (04): 69-73.
- [3] 黄志文. 峡江水利枢纽工程船闸断层混凝土施工技术研究 [J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 211-212+214.
- [4] 李凤来. 水利枢纽工程面板混凝土配合比与施工技术分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(10): 50-53+75. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2022.10.042.
- [5] 郭冉, 李志鹏. 水利枢纽工程施工技术及优化研究 [C]// 江西省工程师联合会. 2024年智能工程与经济建设学术会议论文集（工程管理与经济建设专题）. 河南黄河河务局信息中心, 2024: 135-137. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.068870.
- [6] 张立阳. 水利枢纽隧洞工程混凝土衬砌施工技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2024, (05): 55-57.
- [7] 李琪. 水利枢纽工程中的混凝土防渗技术及施工方案研究 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(02): 31-33. DOI: 10.20259/j.jzjskf.2025.02.0031.
- [8] 严伟. 基于实时监控与仿真技术的碾压混凝土坝施工优化研究——以韩庄水利枢纽工程为例 [J]. 海河水利, 2025, (06): 83-87.