

水利水电施工中混凝土施工技术的应用

王凯生

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：在水利水电施工中，混凝土施工技术至关重要。其应用涵盖大坝、水闸等核心构筑物，需适应结构规模大、施工环境复杂、耐久性要求高等特点。通过优化原材料选择与配合比设计、采用分缝分块与特殊模板技术、实施分层浇筑与精准振捣、强化温控与裂缝防治、应对水下及寒冷等特殊环境，可确保混凝土施工的质量与效率，延长工程使用寿命，为水利水电工程的安全运行提供坚实保障。

关键词：水利水电施工；混凝土施工技术；应用

引言：水利水电工程作为国家基础设施建设的重中之重，其结构安全与长期稳定运行依赖于高质量的混凝土施工。受工程规模庞大、地质条件复杂、水环境长期作用及气候多变等因素影响，混凝土施工面临大体积温控、抗裂防渗、耐久性提升等技术挑战。本文聚焦水利水电工程中混凝土施工技术的实践应用，从材料优化、工艺创新、智能监控及特殊工况处理等方面展开探讨，旨在为提升工程建设质量、延长工程寿命提供技术参考与经验借鉴。

1 水利水电工程混凝土施工特点与要求

1.1 工程特点分析

(1) 结构规模大：水利水电工程核心构筑物如大坝、水闸等，通常具备超大规模、超长跨度特征。以混凝土重力坝为例，单坝体混凝土浇筑量常达数十万甚至数百万立方米，且结构整体性要求极高，需通过分缝分块浇筑与温控措施，避免因体积效应引发裂缝，施工周期往往跨越多个年度，对施工组织与资源调配提出严苛挑战。(2) 施工环境复杂：工程多建于江河、峡谷等自然环境中，常面临特殊工况。水下施工如导流洞封堵、基础防渗墙浇筑，需采用水下不分散混凝土与特殊振捣工艺；寒冷地区施工需应对低温冻害，需采取预热骨料、掺加防冻剂、覆盖保温等措施；高湿度环境则易导致混凝土表面碳化加速，需加强养护与表面防护，环境因素直接影响施工效率与混凝土质量稳定性^[1]。(3) 耐久性要求高：混凝土需长期承受水力作用与恶劣环境侵蚀，抗渗性是关键指标，如大坝挡水部位混凝土需满足P8及以上抗渗等级，防止水体渗透引发结构破坏；泄洪建筑物需具备高抗冲磨性能，应对高速水流裹挟泥沙的冲刷；在沿海或盐碱地区，混凝土还需抵抗氯离子、硫酸盐等腐蚀性介质侵蚀，通过优化配合比、掺入矿物掺合料等提升耐久性，保障工程使用寿命达50年以上。

1.2 混凝土性能核心要求

(1) 强度与耐久性平衡：需在满足设计强度等级（如大坝基础部位常用C25-C30）的同时，优先保障耐久性。通过调整水胶比、选用优质骨料与水泥，掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，在降低水化热、减少收缩的同时，提升混凝土密实度，避免因单纯追求高强度而牺牲抗渗、抗腐蚀性能，实现强度与耐久性的协同优化。

(2) 抗裂性与变形控制：水利水电工程混凝土体积大、施工周期长，易因温度应力与收缩变形产生裂缝。需从配合比设计入手，选用低热水泥、控制水泥用量，掺加膨胀剂或纤维改善抗裂性能；施工中通过分层浇筑、控制浇筑温度、预埋冷却水管等措施，降低内外温差；养护阶段加强保湿保温，延长养护时间，减少早期收缩，确保混凝土结构在长期运行中保持完整性，避免裂缝引发渗漏风险。(3) 施工工艺适应性：混凝土需适配多样化施工工艺，如大坝浇筑常用泵送工艺，要求混凝土具备良好的流动性与黏聚性，避免离析、堵管；分层浇筑时需控制混凝土初凝时间，确保层间结合紧密，通常要求初凝时间不小于6小时；水下施工则需采用自密实混凝土，无需振捣即可填充模板，同时具备抗分散性，保障施工质量与效率，满足不同工况下的施工技术要求。

2 水利水电施工中混凝土施工技术的键应用

2.1 原材料选择与配合比设计

(1) 水泥、骨料、外加剂的特殊要求：水泥优先选用低热矿渣硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥，如大坝施工常用42.5级低热水泥，可降低水化热峰值30%以上，减少温度裂缝风险；骨料需满足抗冲磨、高强度要求，泄洪道等部位选用抗压强度 $\geq 120\text{MPa}$ 的花岗岩骨料，同时控制骨料级配，确保空隙率 $\leq 22\%$ ；外加剂根据工况适配，寒冷地区掺加引气型防冻剂（掺量2%-3%），提高混凝土抗冻等级至F200，水下施工选用聚羧酸系

抗分散剂,保证混凝土水下不离析。(2)高性能混凝土(HPC)的配比优化案例:某大型水电站泄洪闸施工中,HPC配比采用“水泥+粉煤灰+硅灰”三元胶凝体系,水胶比0.32,粉煤灰取代率30%,硅灰掺量5%,掺入钢纤维(体积率1.2%),经试验检测,混凝土抗压强度达C60,抗冲磨强度比普通混凝土提升2.5倍,抗渗等级达P12,成功解决高速水流冲刷问题,满足工程长期运行需求^[2]。

2.2 模板与支护技术

(1)大体积混凝土模板体系设计:大坝浇筑常用滑模与爬模体系,滑模装置采用液压驱动,提升速度控制在1.5-2m/d,模板高度2.4m,适配分层浇筑厚度,减少施工缝;爬模多用于高耸结构如进水塔,采用附着式爬升系统,模板与混凝土面贴合度 $\leq 2\text{mm}$,单次爬升高度1.2m,同步完成钢筋绑扎与混凝土浇筑,施工效率较传统模板提升40%。(2)特殊结构模板应用:弧形闸门闸墩采用定制钢模,模板弧度误差 $\leq 1\text{‰}$,通过全站仪实时监测调整,确保闸门启闭顺畅;异形结构如消力池扭面段,采用木塑复合模板与定型钢骨架组合,模板拼接缝采用遇水膨胀止水条密封,混凝土表面平整度达3mm/2m,满足外观与功能要求。

2.3 浇筑与振捣工艺

(1)分层分段浇筑技术:大坝混凝土分层厚度根据振捣能力确定,常态混凝土分层厚度 $\leq 30\text{cm}$,碾压混凝土分层厚度 $\leq 50\text{cm}$,分段长度控制在15-20m,层间间歇时间 $\leq 72\text{h}$,浇筑时采用阶梯式推进,推进速度2-3m/h,避免冷缝产生;浇筑前对下层混凝土面进行凿毛处理,清除浮浆,铺设2-3cm厚同配合比水泥砂浆,增强层间结合。(2)振捣设备选择与振捣时间控制:常态混凝土采用插入式振捣器,振捣半径30-40cm,振捣时间15-30s,以混凝土表面泛浆、无气泡逸出为准;碾压混凝土采用振动碾,激振力 $\geq 300\text{kN}$,碾压遍数8-10遍(先静压2遍,再振动碾压6-8遍),避免过振导致骨料分离或漏振出现蜂窝麻面,确保混凝土密实度 $\geq 98\%$ ^[3]。

2.4 温控与裂缝防治技术

(1)大体积混凝土温度场仿真分析:采用有限元软件如ANSYS建立温度场模型,模拟混凝土浇筑后7-14d内温度变化,预测最高温升与温差,据此优化浇筑方案,如某水电站大坝施工中,通过仿真分析将浇筑温度控制在10-15℃,降低内外温差至25℃以内,减少温度应力裂缝。(2)预冷混凝土、冷却水管通水冷却等温控措施:预冷系统通过骨料风冷、冷水拌合、加冰等方式,将混凝土出机温度降至10℃以下;大坝内部预埋 $\phi 40\text{mm}$ 冷却水管,管距1.5m \times 1.5m,浇筑完成后通入10-15℃冷水,

通水时间15-20d,使混凝土最高温升控制在45℃以内,有效抑制温度裂缝。(3)表面保温与养护技术:混凝土浇筑完成后,及时覆盖土工布与保温被,养护期 $\geq 28\text{d}$;冬季施工采用电热毯+保温被复合保温,确保混凝土表面温度 $\geq 5\text{℃}$;对于大面积混凝土表面,喷涂高分子养护剂(用量0.2kg/m²),形成密闭保湿膜,减少水分蒸发,提升混凝土早期强度与抗裂性能。

2.5 特殊环境施工技术

(1)水下混凝土浇筑:采用导管法施工,导管直径250mm,底口距基岩面30-50cm,首批混凝土方量确保导管埋深 $\geq 1\text{m}$,浇筑过程中导管埋深控制在2-6m,提升速度 $\leq 0.5\text{m/min}$;深水浇筑(水深 $> 10\text{m}$)采用泵送法,选用水下不分散混凝土,坍落度控制在200-220mm,确保混凝土在水下自流平、自密实。(2)寒冷地区混凝土抗冻施工:采用电热法时,在钢筋骨架上铺设电加热丝,功率密度20-30W/m²,通电养护温度控制在5-20℃;蓄热法通过覆盖阻燃保温被与发热剂(如生石灰,掺量5kg/m²),使混凝土在-10℃环境下核心温度保持 $\geq 0\text{℃}$,避免冻害,确保混凝土早期强度正常发展^[4]。(3)高流速环境抗冲磨混凝土施工:采用钢纤维混凝土或聚合物混凝土,钢纤维混凝土施工时采用强制式搅拌机,搅拌时间延长60s,确保纤维分散均匀;聚合物混凝土(如环氧混凝土)采用分层浇筑,每层厚度 $\leq 15\text{cm}$,振捣采用平板振捣器,养护温度控制在20-25℃,养护期 $\geq 14\text{d}$,提升表面抗冲磨能力。

2.6 质量检测与缺陷修复技术

(1)无损检测技术:混凝土浇筑完成28d后,采用超声波检测内部密实度,声速 $\geq 4.5\text{km/s}$ 为合格;采用地质雷达扫描检测混凝土厚度与内部空洞,扫描分辨率 $\leq 2\text{cm}$,对大坝、水闸等关键部位进行100%全覆盖检测,及时发现内部缺陷;表面质量采用回弹法检测强度,回弹值修正后与钻芯法结果对比,误差控制在5%以内。(2)裂缝修补材料与方法:宽度 $< 0.2\text{mm}$ 的微裂缝采用表面封闭法,涂刷环氧树脂浆液(厚度1-2mm);宽度0.2-0.5mm的裂缝采用低压注浆法,注入环氧树脂灌浆材料(黏度 $\leq 50\text{mPa}\cdot\text{s}$),灌浆压力0.2-0.4MPa;宽度 $> 0.5\text{mm}$ 的裂缝采用高压灌浆法,选用水泥-水玻璃双液浆,灌浆压力0.5-1.0MPa,灌浆后采用超声波复检,确保裂缝填充率 $\geq 95\%$,恢复结构整体性。

3 水利水电施工中混凝土施工技术发展趋势与挑战

3.1 技术创新方向

(1)智能化施工:物联网监测技术广泛应用,通过在混凝土内部植入温度、应变传感器,实时采集数据并

传输至云端平台,实现浇筑温度、裂缝发展等指标的动态监控,如某水电站大坝施工中,物联网系统将温控误差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$;3D打印混凝土技术逐步突破,针对异形构件如导流洞衬砌,采用机器人臂架式打印机,以特种打印混凝土(初凝时间可调至30-60min)实现快速成型,施工效率较传统模板提升3倍,且材料利用率达95%以上。(2)绿色混凝土材料:再生骨料应用比例持续提升,将水利工程拆除的旧混凝土破碎筛分,替代30%-50%天然骨料,配合优化级配与改性处理,再生混凝土抗压强度可达C30-C40,满足非承重结构需求;低碳水泥技术加速研发,采用工业固废(如钢渣、磷渣)替代40%以上水泥熟料,每吨低碳水泥碳排放较普通水泥降低50%,某抽水蓄能电站已试点应用,混凝土耐久性未受影响。(3)极端环境适应性技术:深海水利工程如海底隧道防渗施工,研发超抗渗混凝土(抗渗等级P20),掺入纳米硅灰与玄武岩纤维,提升抗水压能力;高海拔地区(海拔 $> 3000\text{m}$)施工,开发低温早强混凝土,通过调整外加剂配方(掺加早强剂与引气剂),在 -5°C 环境下7d强度可达设计强度的70%,同时采用封闭式拌合站与保温运输罐,解决低温、低气压对混凝土性能的影响。

3.2 现存问题与对策

(1)施工质量控制标准化不足:问题表现为不同项目质量标准不统一,部分工序依赖人工经验。对策方面,需建立国家级水利混凝土施工质量标准体系,明确原材料检验、浇筑振捣等关键工序的量化指标;推广智能质检设备,如采用AI视觉检测系统自动识别混凝土表面裂缝、蜂窝等缺陷,检测精度达0.1mm,减少人为误差。(2)耐久性设计与实际工况的匹配性:存在设计参数与工程实际环境脱节问题,如沿海工程未充分考虑氯离子侵蚀。对策是构建“环境-材料-性能”匹配数据库,

根据工程所在地的温度、湿度、腐蚀性介质等参数,定制耐久性设计方案;施工前开展足尺模型试验,验证混凝土在模拟实际工况下的耐久性,确保设计方案可行^[5]。

(3)大型设备与工艺的国产化率提升:高端设备如大型混凝土搅拌楼、滑模系统仍依赖进口,核心工艺专利较少。对策需加大研发投入,支持国内企业攻关核心技术,如某企业已自主研发出产能 $600\text{m}^3/\text{h}$ 的国产化搅拌楼,性能达国际先进水平;建立产学研合作机制,推动高校、企业联合开发新型施工工艺,加快专利转化,降低对进口设备与技术的依赖。

结束语

水利水电工程中混凝土施工技术的科学应用,是保障工程安全、耐久与经济性的核心环节。通过精细化材料配比、创新模板支护体系、智能化温控防裂及特殊环境专项技术,有效解决了大体积浇筑、复杂地质适配等难题。未来,随着绿色建材、智能监测及极端环境施工技术的突破,混凝土施工将向更高效、环保、可持续发展的方向发展。持续优化技术标准与工艺创新,是推动水利水电工程高质量建设的关键路径。

参考文献

- [1]李朦,蔡崇杰,董宇,等.水利水电工程混凝土施工技术及其裂缝控制研究[J].中国水泥,2024(11):103-105.
- [2]吴照龙.建筑工程混凝土施工裂缝控制技术及其最佳实践探讨[J].佛山陶瓷,2024,34(10):162-164.
- [3]杨帆.水利水电工程施工中控制混凝土裂缝技术研究[J].东北水利水电,2024,42(9):16-18.
- [4]董艳.混凝土施工技术在水利施工中的应用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(01):122-124.
- [5]尹晓冰,刘亮,陈俊全.混凝土施工技术在水利水电工程中的应用研究[J].工程技术研究,2023,8(07):72-74.