

水利水电工程混凝土施工技术 with 质量控制

冯绍宇

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 混凝土作为水利水电工程的核心结构材料,其施工质量直接决定了工程的长期安全性、耐久性与服役性能。本文系统阐述了水利水电工程混凝土施工的关键技术环节,深入剖析了从原材料优选、配合比精细化设计、拌和运输控制到浇筑振捣、养护及大体积混凝土温控防裂等全过程的技术要点。特别聚焦于温控防裂这一核心难题,详细论述了基于“双控”(温度场与应力场)理念的综合防控体系,包括低热胶凝材料体系构建、智能通水冷却技术及分布式光纤测温等前沿手段。同时,文章构建了覆盖全生命周期的质量控制框架,强调了信息化、智能化技术在提升质量管控水平中的关键作用。研究成果旨在为我国大型水利水电工程的高质量建设提供理论支撑与技术路径。

关键词: 水利水电工程;混凝土施工;大体积混凝土;温控防裂;质量控制

引言

水利水电工程作为国家战略性基础设施,其结构体量庞大、服役环境严酷、安全等级极高。混凝土凭借其优异的力学性能、良好的可塑性及相对经济的成本,成为此类工程不可替代的主体建筑材料。然而,水利水电工程混凝土施工面临着一系列独特挑战:大体积混凝土内部水化热积聚易导致温度裂缝;复杂结构形式对施工工艺提出精细化要求;长期处于水下、干湿交替或冻融循环等恶劣环境中,对混凝土的抗渗、抗冻及抗化学侵蚀性能构成严峻考验。因此,如何通过科学的施工技术与严密的质量控制体系,确保混凝土结构的整体性、密实性与耐久性,是保障工程百年大计的核心命题。本文将从施工技术 with 质量控制两大维度,深入探讨关键技术细节与系统性管理策略。

1 水利水电工程混凝土施工关键技术

1.1 原材料选择与质量控制

原材料是混凝土最终性能的物质基础,选择需兼顾力学、耐久性与温控。水泥优先选中热硅酸盐水泥(P·MH)或低热矿渣硅酸盐水泥(P·LS),3天和7天水化热分别控制在251kJ/kg和293kJ/kg以下,可抑制早期温升。骨料质量控制关键,粗骨料用二级或三级配碎石,压碎指标值 $\leq 12\%$,针片状颗粒含量 $< 8\%$,要检验碱活性;细骨料选II区中砂,细度模数2.4~2.8,含泥量 $\leq 1.5\%$ 。矿物掺合料是高性能混凝土标志,粉煤灰达I级标准,矿渣粉满足S95级及以上,可替代30%~60%水泥,提升抗侵蚀能力。外加剂常用聚羧酸系高性能减水剂,减水率高,与胶凝材料相容性需验证。

1.2 配合比设计

配合比设计是实现混凝土各项性能指标平衡的艺术

与科学。其核心在于建立一个低水胶比($W/B \leq 0.45$)、低单位胶凝材料用量($\leq 180 \text{ kg/m}^3$ 水泥+适量掺合料)、高体积稳定性的优化体系。设计过程需依托大量的室内试验数据,采用绝对体积法进行精确计算。首先,根据工程所处环境类别(如水下、冻融、硫酸盐侵蚀等)确定混凝土的最低强度等级和耐久性指标(如电通量、抗冻等级)。其次,通过胶凝材料体系的绝热温升试验,确定不同掺合料比例下的温升曲线,以此反推最大允许的胶凝材料总用量。在此约束下,通过调整水胶比来满足强度要求,利用高效减水剂来保证工作性^[1]。砂率的确定需结合骨料的空隙率试验,以最小空隙率对应的砂率为最优值,这既能保证混凝土的密实度,又能减少胶凝材料浆体的用量。最终的配合比方案必须经过不少于三组的平行试拌验证,全面检测其新拌性能(坍落度、含气量、泌水率)和硬化性能(3d、7d、28d、90d强度,以及收缩、徐变等长期性能),确保其在全生命周期内均能满足设计要求。

1.3 混凝土拌和与运输

拌和与运输是确保混凝土从设计状态向实体结构平稳过渡的桥梁。强制式搅拌机的搅拌时间应根据设备容量和混凝土稠度进行优化,通常不少于90秒,以确保各组份均匀分布。在高温季节,为控制出机口温度,常采用多级预冷技术:首先对粗骨料进行风冷或喷淋冷水降温至8~10℃,然后在拌和水中加入片冰(冰屑),冰的用量可通过热工计算精确确定,公式为:

$$Q_{ice} = \frac{C_p(T_{target} - T_{ambient})}{L_f + C_{pw}(T_{target} - 0)}$$

其中, Q_{ice} 为冰的用量, C_p 为混凝土比热容, T_{target} 为目标出机温度, $T_{ambient}$ 为环境温度, L_f 为冰的熔解潜热,

C_{pw} 为水的比热容。通过此方法,可将夏季出机口温度有效控制在7~10℃。运输过程中,对于长距离或垂直高差大的工况,常采用三级接力运输系统:自卸车→负压溜管/皮带机→布料机,以最大限度减少转运次数和自由落体高度,防止离析。运输车辆的罐体应保持匀速转动(2~4 r/min),并在入仓前高速旋转20~30秒,以恢复混凝土的均匀性。

1.4 混凝土浇筑与振捣

浇筑与振捣是赋予混凝土最终几何形态与内在密实度的关键工序。浇筑前的仓面验收必须严格执行,特别是对施工缝面的处理,需采用高压水枪(压力 ≥ 25 MPa)进行冲毛,形成均匀的乳钉状粗糙面,以保证新老混凝土的有效结合。浇筑层厚的控制至关重要,对于常态混凝土,一般控制在30~50 cm;而对于碾压混凝土(RCC),则采用薄层通仓斜层铺筑法,每层压实厚度为30~35 cm。振捣是排除混凝土内部气泡、实现密实填充的核心操作^[2]。高频插入式振捣器(频率 ≥ 12000 次/分钟)的插入点间距不应大于其作用半径的1.5倍(通常为40~50 cm),插入深度应进入下层混凝土5~10 cm。振捣时间需根据混凝土的坍落度和振捣器功率进行动态调整,一般为20~30秒,以混凝土表面停止下沉、泛出均匀浆体且无大气泡冒出为判据。对于钢筋密集区,应采用直径 ≤ 30 mm的小型振捣棒,并辅以人工插钎,确保无漏振死角。

1.5 混凝土养护

养护是保障水泥持续水化、获得预期强度与耐久性的必要条件。对于暴露在大气中的混凝土表面,应在终凝后(约6~12小时)立即开始保湿养护。一种高效的方法是喷涂养护剂,形成一层不透水的薄膜,其保水率应 $\geq 90\%$ 。更常用的方法是覆盖吸水性材料(如土工布)并持续洒水,确保表面始终湿润。养护周期必须与混凝土的强度发展相匹配,对于掺有大量矿物掺合料的混凝土,其后期强度增长显著,因此养护期不得少于28天。在低温环境下,养护的重点转向保温。可采用双层保温被(内层为无纺布,外层为聚乙烯泡沫)覆盖,其等效导热系数应 ≤ 0.04 W/(m·K),以有效减缓混凝土的降温速率,将日降温梯度控制在1~2℃/d以内,从而避免因温度应力过大而开裂。

1.6 大体积混凝土温控防裂技术(核心难点)

大体积混凝土温控防裂的本质是控制由非线性温度场引发的拉应力不超过混凝土的抗拉强度。完整的温控体系包含“降、散、保、监”四个环节。“降”即从源头降低温升,通过前述的低热水泥、大掺量掺合料及预冷

骨料、加冰拌和等措施,将混凝土最高绝热温升控制在25℃以内。“散”指加速内部热量散发,主要依靠预埋冷却水管网络。水管通常采用HDPE(高密度聚乙烯)材质,外径25~32 mm,按1.5 m×1.5 m的网格间距布置。通水冷却分为两期:一期冷却在浇筑后12~24小时内开始,使用低温水(5~10℃)进行高强度冷却(流量18~25 L/min),目标是削平温升峰值;二期冷却在混凝土达到最高温度并开始降温后进行,使用河水或制冷水(10~15℃)进行温和冷却(流量10~15 L/min),目标是控制降温速率。“保”即表面保温,通过覆盖保温材料,将内外温差控制在20~25℃的安全阈值内。“监”是整个温控体系的眼睛,传统电子温度计已逐渐被分布式光纤测温(DTS)技术所取代。DTS系统利用拉曼散射原理,可沿单根光纤(长达数十公里)实现空间分辨率1米、温度精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的连续、实时监测,为温控决策提供了前所未有的数据支持。通过将DTS采集的海量温度数据输入到有限元分析软件(如MIDAS/Civil或ANSYS),可以反演真实的温度场与应力场,实现温控方案的动态反馈与精准调控。

2 水利水电工程混凝土施工质量控制体系

2.1 质量控制组织与制度

有效的质量管理始于顶层设计。项目应设立独立的质检部门,直接对项目经理负责,并配备足够数量且持证上岗的专业质检工程师。必须建立一套以ISO 9001质量管理体系为基础,融合行业规范(如SL 677-2014)的专项管理制度。该制度的核心是明确各岗位的质量责任矩阵,并通过严格的程序文件(如《混凝土施工质量控制程序》)来规范所有操作^[3]。其中,开盘鉴定制度要求每次浇筑前,由试验、质检、施工三方共同确认原材料状态、配合比通知单、设备状况及天气条件均满足要求后,方可签发开盘令。仓面“三检制”则通过班组自检、施工队复检、质检部终检的层层把关,将质量问题消灭在萌芽状态。

2.2 原材料与半成品质量控制

原材料控制是质量链条的起点。所有进场材料必须执行“一物一码”的追溯管理,其质量证明文件与现场复检报告必须一一对应。现场试验室应具备CMA认证资质,能够独立完成所有常规及非常规检测项目。对于混凝土半成品,其质量控制的核心是过程监控。除了常规的坍落度、含气量检测外,还应引入更为先进的在线监控技术。例如,在搅拌站出口安装微波水分仪和红外温度传感器,可实时、无损地测定混凝土的含水率和温度,数据自动上传至中央控制系统。试件的制作与管理也必须标准化,采用振动台成型,同条件养护试件应放置在

代表性的结构部位，并加装温度记录仪，以真实反映其强度发展历程。

2.3 施工过程质量控制

施工过程控制是质量管理的主战场。模板工程的验收不仅关注几何尺寸，还需检查其脱模剂的涂刷均匀性，避免因局部粘连造成表面缺陷。钢筋工程的控制重点在于保护层厚度，应采用高强塑料定位卡或定制垫块，确保其在浇筑过程中不发生位移。在浇筑过程中，质检人员需全程旁站，使用红外测温枪实时监控入仓温度，并用秒表记录相邻浇筑层的间歇时间，确保其小于混凝土的初凝时间（通常通过维卡仪测定）^[4]。对于温控措施的执行，必须有专人负责记录通水冷却的日志，包括进/出水口温度、流量、持续时间等，这些原始数据是后期温控效果评估的直接依据。

2.4 质量检测与评定

质量检测是验证施工成果的最终手段。除标准试块抗压试验外，应大力推广无损检测技术。超声回弹综合法能更准确地推定混凝土强度，其相关系数 R^2 通常可达0.90以上。冲击回波法（IE）则能有效检测混凝土内部的浅层缺陷，如裂缝深度、剥离层位置等。对于裂缝的评估，应采用高精度裂缝观测仪（分辨率0.01mm）进行长期监测，绘制裂缝宽度随时间、温度变化的曲线，以判断其稳定性。混凝土强度的最终评定必须采用统计方法，依据GB/T 50107的规定，当同一验收批的样本容量 ≥ 10 组时，应采用统计法（标准差已知或未知）进行评定，这比非统计法更能科学地反映整体验收批的质量水平。

2.5 信息化与智能化质量管理

信息化是提升质量管理效能的必由之路。以BIM技术为核心，可以构建项目的数字孪生模型，将混凝土的浇筑单元（仓号）与进度计划、资源配置、质量验评资料进行关联，实现可视化管理。物联网（IoT）技术则打通

了物理世界与数字世界的壁垒。通过在拌和站、运输车、仓面上部署各类传感器，可以自动采集从原材料称量到混凝土入仓的全过程数据，形成不可篡改的“质量区块链”。大数据分析平台能够对这些数据进行深度挖掘，例如，通过机器学习算法，可以建立混凝土28天强度与早期（如6h、12h）温升速率之间的预测模型，实现强度的早期推定，为拆模、预应力张拉等后续工序提供决策支持。这种基于数据驱动的智能质量管理模式，标志着水利水电工程质量管理正迈向一个全新的高度。

3 结语

水利水电工程混凝土施工是一项融合了材料科学、结构力学、热工学与管理学的综合性技术。本文系统论述了从原材料优选到智能温控、从精细化施工到全过程质量控制的关键技术路径。研究表明，解决大体积混凝土温控防裂问题，必须依赖于低热胶凝材料体系、精细化的热工计算、高效的通水冷却系统以及以分布式光纤测温为代表的智能监控技术的协同作用。未来，随着超高性能混凝土（UHPC）、自感知混凝土等新材料的出现，以及人工智能、数字孪生等新技术的深度融合，水利水电工程混凝土施工将朝着更高性能、更绿色、更智能的方向发展。唯有持续推动技术创新与管理升级，方能铸就更多安全可靠、历久弥坚的国家重器。

参考文献

- [1]张朋虎.水利水电工程中的混凝土施工技术与管理控制研究[J].水上安全,2025,(23):188-190.
- [2]黄敬平.水利水电工程混凝土施工技术的应用与展望[J].湖南水利水电,2025,(05):7-10.
- [3]罗小彦.水利水电工程混凝土施工关键技术分析[J].中国水泥,2025,(07):91-93.
- [4]董兴明.水利水电工程中的混凝土施工技术与管理控制[J].智慧中国,2025,(03):86-87.