

水利水电工程混凝土施工质量控制关键技术分析

杨 鹏

四川山语城建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘要：水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，其结构安全性和耐久性直接关系到人民生命财产安全与社会经济稳定。混凝土作为水利水电工程中最主要的建筑材料，其施工质量直接影响工程的整体性能和使用寿命。本文围绕水利水电工程混凝土施工全过程，系统分析了原材料控制、配合比设计、拌合运输、浇筑振捣、温控防裂、养护管理及质量检测等关键环节的质量控制技术。重点探讨了大体积混凝土温度裂缝防控、高性能混凝土应用、智能监测与信息化管理等前沿技术。研究结果可为类似工程提供理论支撑与实践指导。

关键词：水利水电工程；混凝土施工；质量控制；温控防裂；配合比设计

引言

随着我国“双碳”战略的深入推进和能源结构的持续优化，水利水电工程在清洁能源供应、水资源调控、防洪减灾等方面发挥着不可替代的作用。水利水电工程普遍具有规模宏大、结构复杂、服役环境严酷等特点，对混凝土材料的强度、耐久性、抗渗性及体积稳定性提出了极高要求。混凝土施工是水利水电工程建设的核心环节，其质量受原材料、配合比、施工工艺、环境条件等多重因素影响。一旦出现裂缝、蜂窝、麻面、强度不足等问题，不仅会降低结构承载能力，还可能引发渗漏、钢筋锈蚀乃至结构失效等严重后果。尤其在大体积混凝土结构中，水化热引起的温度应力极易导致贯穿性裂缝，成为威胁工程安全的重大隐患。因此，深入研究水利水电工程混凝土施工质量控制的关键技术，构建科学、系统、高效的质控体系，对于保障工程安全、延长使用寿命、提升综合效益具有重要的理论价值与现实意义。

1 混凝土施工质量控制的关键环节与技术要点

1.1 原材料质量控制

原材料是混凝土质量的基础。水利水电工程对水泥、骨料、掺合料、外加剂及拌合用水均有严格标准。水泥应优先选用低热水泥（如中热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥），以降低水化热峰值，减少温升。同时需严格控制其安定性、凝结时间及强度等级。粗细骨料应洁净、级配良好、含泥量低。粗骨料宜采用连续级配，最大粒径不宜过大（通常 $\leq 80\text{mm}$ ），以减少水泥用量并提高密实度。细骨料宜采用中粗砂，细度模数控制在2.6-3.0之间。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料可有效改善混凝土工作性、降低水化热、提高后期强度与耐久性。其中，I级粉煤灰可显著减少早期温升，矿渣粉则有助于提升抗硫酸盐侵蚀能力。高效减水剂（如

聚羧酸系）可大幅降低水胶比，在保证流动性的同时提高强度与耐久性。缓凝剂可用于延缓初凝时间，适应长距离运输或高温季节施工。拌合用水应符合《混凝土拌合用水标准》（JGJ63），严禁使用含油、酸、碱或有机物超标的水源。所有原材料进场前须进行复检，建立可追溯台账，确保来源可靠、性能稳定。

1.2 配合比优化设计

混凝土配合比设计是连接材料性能与工程需求的桥梁，其科学性直接决定最终结构的服役表现。水利水电工程混凝土的配合比不仅要满足强度指标，更需兼顾耐久性、体积稳定性及施工可操作性，尤其要突出温控导向。设计过程中应坚持低水胶比原则，在保证泵送与振捣可行性的前提下，将水胶比控制在0.45以下，甚至更低（如白鹤滩工程采用0.38），以提升密实度和抗渗能力。同时，通过试验确定粉煤灰或矿渣粉的最佳掺量，通常占胶凝材料总量的20%至40%，在不显著削弱早期强度的基础上最大化温控效益^[1]。骨料级配亦需精细优化，依据紧密堆积理论调整粗细骨料比例，减少内部空隙，从而降低胶材用量并提升匀质性。现代配合比设计已不再依赖经验试配，而是结合混凝土性能预测软件或大量室内试验，对不同方案下的绝热温升曲线、自身体积变形、弹性模量发展等关键参数进行模拟比选，最终优选出技术经济综合最优的配合比。这种以性能为导向的设计理念，使混凝土从“满足强度”向“全生命周期性能可控”转变。

1.3 拌合与运输过程控制

拌合与运输虽属施工前期环节，但其质量直接影响混凝土入仓状态和最终成型质量。拌合过程必须确保各组分充分、均匀混合，避免局部富浆或骨料集中。目前普遍采用双卧轴强制式搅拌机，搅拌时间不少于90秒，

以保障微观均匀性。计量环节则依赖高精度电子自动称量系统,对水泥、骨料、水及外加剂的称量误差严格控制在 $\pm 1\%$ 以内,杜绝因计量偏差导致的性能波动。运输阶段需特别关注混凝土的稳定性,防止离析、泌水及坍落度损失。在采用搅拌车或皮带机运输时,应合理规划路线与时长,一般运输时间不宜超过90分钟。夏季高温环境下,运输车辆需加装遮阳棚或喷淋降温装置,必要时对罐体进行冷水循环冷却;冬季则需采取保温措施,防止混凝土在途中温度骤降而影响初凝与早期强度发展。整个拌运过程应实现标准化、可视化管理,确保混凝土以最佳状态进入浇筑环节。

1.4 浇筑与振捣工艺

浇筑与振捣是混凝土由流态转变为固态结构的关键工序,其操作质量直接决定内部密实度与外观完整性。针对水利水电工程中常见的大体积结构,必须采用分层分块的浇筑策略,每层厚度控制在2至3米,并合理设置施工缝或诱导缝,以分散温度应力并避免冷缝形成。入仓方式应优先选择塔带机、缆索起重机或高压泵送系统,严格控制混凝土自由下落高度不超过2米,防止因冲击力过大导致骨料与浆体分离。振捣作业需由经验丰富的工人操作高频插入式振捣器,遵循“快插慢拔、插点均匀、不过振不漏振”的基本原则。振捣间距不应超过振捣器作用半径的1.5倍,时间以混凝土表面泛出均匀水泥浆、无明显气泡冒出为宜^[2]。过振会导致骨料下沉、浆体上浮,形成薄弱层;漏振则易产生蜂窝、孔洞等缺陷。因此,振捣过程需全程旁站监督,确保每一部位均达到充分密实。

1.5 温度控制与防裂技术(核心难点)

1.5.1 温度裂缝成因

在水利水电工程中,大体积混凝土温度裂缝问题尤为突出,其根本原因在于水泥水化反应释放大热量,导致混凝土内部温度迅速升高,可达50至70摄氏度,而表面因与空气或模板接触散热较快,形成显著的内外温差。这种非均匀温变在结构内部产生拉应力,当该拉应力超过混凝土当时的抗拉强度时,便会在约束区域(如基础约束区、结构突变处)引发裂缝。此类裂缝若为贯穿性,将严重削弱结构整体性,成为渗漏通道,进而加速钢筋锈蚀和材料劣化,威胁工程长期安全。

1.5.2 综合温控措施

为有效防控温度裂缝,必须实施“内降外保、动态调控”的综合温控策略。在拌合阶段,可通过预冷骨料、使用低温地下水甚至在拌合水中加入冰屑(替代部分拌合水)等方式,将混凝土出机口温度控制在7至12

摄氏度,从源头降低初始热源。浇筑后,立即在混凝土内部预埋蛇形布置的冷却水管,通入循环冷水进行初期强制降温,待温峰过后再转为常温水或间歇通水,以协调降温速率。近年来,白鹤滩等工程已推广智能通水系统,可根据埋设光纤测温数据实时调节水温与流量,实现精准温控。与此同时,拆模后的表面保温至关重要,需及时覆盖聚乙烯泡沫板、土工布等保温材料,减缓表面散热速度,缩小内外温差梯度^[3]。此外,保湿养护亦不可忽视,持续洒水或喷涂养护剂可有效抑制干缩与塑性收缩叠加效应。施工组织上,应尽量避免高温季节,优先选择夜间或气温较低时段进行浇筑,进一步降低环境热负荷。

1.5.3 诱导缝与施工缝设置

除主动降温外,结构设计层面也需引入“引导裂缝”理念。在应力集中区域或结构几何突变处,合理设置诱导缝或后浇带,通过削弱局部截面刚度,引导裂缝在预定位置有序开展,避免无序、随机开裂。此类构造措施与温控技术相辅相成,共同构成“防—导—控”一体化的裂缝防控体系。

1.6 养护管理

养护是混凝土强度发展与耐久性形成的最后保障环节,其重要性常被低估却影响深远。普通混凝土的湿养护时间不得少于14天,而对于大体积或高性能混凝土,养护期应延长至28天甚至更久。养护方式包括蓄水养护、覆盖湿麻袋、自动喷淋系统等,核心目标是维持混凝土表面持续湿润,防止水分过早蒸发导致毛细管负压增大而引发收缩裂缝。在寒冷地区,还需兼顾保温防冻,可采用蒸汽养护、电热毯或保温棚等措施,确保混凝土在正温环境下完成早期水化;而在干旱或大风地区,则需加强保湿频率,必要时使用成膜型养护剂封闭表面。科学的养护不仅是技术要求,更是质量管理责任的体现,必须纳入施工日志并接受监理验收。

1.7 质量检测与验收

完善的质量检测体系是施工质量可控可溯的重要支撑。现场应建立常态化检测机制,对每班次混凝土的坍落度、含气量及入仓温度进行不少于两次的抽检,并按规范要求留置标准养护与同条件养护试块(通常每100立方米不少于一组)。对于已浇筑结构,可采用超声波、回弹法、雷达扫描等无损检测技术评估内部密实度、均匀性及潜在缺陷。更为重要的是,在关键部位(如坝踵、闸墩、廊道周边)预埋温度计、应变计、测缝计等传感器,构建长期健康监测网络,实现对结构真实状态的动态感知。所有检测数据应归档保存,作为工程验收

与后期运维的重要依据。

2 前沿技术与发展趋势

2.1 高性能混凝土（HPC）与超高性能混凝土（UHPC）应用

随着工程要求日益严苛，传统混凝土已难以满足部分关键部位的性能需求。高性能混凝土凭借高强、高耐久、低渗透等优势，已在水工闸墩、压力钢管外包、溢流面等区域广泛应用。其通过优化配合比、掺加优质矿物掺合料及高效外加剂，显著提升了抗冲磨、抗冻融及抗化学侵蚀能力。而超高性能混凝土（UHPC）则代表了更高技术水平，其抗压强度可达150兆帕以上，且具备优异的韧性和自密实性，适用于结构加固、接缝修复或特殊薄壁构件。尽管当前成本较高限制了其大规模应用，但随着制备工艺成熟与规模化生产，UHPC有望在未来重大水利工程中扮演更重要的角色。

2.2 智能建造与BIM技术融合

数字化转型正深刻重塑水利水电工程建设模式。BIM技术不仅用于三维建模与碰撞检查，更可集成混凝土浇筑顺序、冷却水管路径、温控参数等信息，实现施工方案的虚拟推演与可视化交底。在此基础上，物联网技术通过部署无线传感器网络，实时采集温度、湿度、应变等数据并上传至云平台，结合大数据分析 with 人工智能算法，实现“感知—分析—预警—调控”闭环管理^[4]。更进一步，数字孪生技术将实体工程与虚拟模型动态映射，为施工优化与长期运维提供决策支持，推动水利水电工程迈向“智慧建造”新阶段。

2.3 绿色低碳混凝土技术

响应国家“双碳”战略，绿色低碳已成为混凝土技术发展的必然方向。一方面，大力推广工业固废资源化利用，如将钢渣、磷石膏、建筑垃圾再生骨料等纳入混凝土原料体系，在减少天然砂石开采的同时实现固废消纳；另一方面，积极探索碳捕捉与矿化养护技术，通过将二氧化碳注入新鲜混凝土或预制构件中，促使其与钙质成分反应生成稳定碳酸盐，不仅提升早期强度，还可实现负碳排放。此类技术虽尚处试点阶段，但代表了未来可持续发展的核心路径。

3 存在问题与对策建议

尽管技术不断进步，当前水利水电混凝土施工仍面临若干挑战。首先，基层施工队伍素质参差不齐，部分项目存在振捣不规范、养护流于形式等问题，亟需加强技术交底与岗前培训，并推行“样板引路”制度，以标准化带动规范化。其次，现有温控仿真模型对边界条件简化过多，预测精度有限，建议结合机器学习算法，利用历史监测数据训练高精度预测模型，提升温控方案的科学性。再次，智能监测系统成本较高，中小型工程难以普及，应鼓励开发低成本、模块化的便携式监测设备，推广“轻量化”智慧工地解决方案。最后，部分新技术如UHPC、碳捕捉混凝土尚缺乏统一标准，需加快编制专项技术规程，推动产学研用协同创新，打通技术落地“最后一公里”。

4 结语

水利水电工程混凝土施工质量控制是一项贯穿全生命周期的系统工程。研究表明，原材料优选与配合比优化是质量控制的源头保障，应始终坚持“低热、低水胶比、高掺合料”的设计原则；温控防裂作为大体积混凝土施工的核心难点，必须依靠“内降外保、动态调控”的综合技术体系加以应对；智能化、信息化技术正深刻改变传统施工模式，数字孪生与物联网监测将成为未来主流发展方向；而绿色低碳与高性能化则是混凝土技术演进的必然趋势，需持续推进固废利用与新材料研发。未来，应进一步强化全过程精细化管理，完善标准体系，促进技术创新与工程实践深度融合，为建设“百年工程、精品工程”提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张伟亚.水利水电工程中混凝土工程施工与质量控制[J].水利科技与经济,2025,31(07):165-168.
- [2]董兴明.水利水电工程中的混凝土施工技术与管理[J].智慧中国,2025,(03):86-87.
- [3]邓渠江.水利水电工程坝体混凝土施工质量管理分析[J].低碳世界,2024,14(10):103-105.
- [4]庞永波,李晶.水利水电工程混凝土施工关键技术研究[J].地下水,2024,46(05):316-317+322.