

水利工程大体积混凝土施工技术研究

李殿雄

河北省水务中心石津灌区事务中心魏桥管理处, 河北 深州 053800

DOI:10.61369/WCEST.2025060012

摘 要： 本文聚焦于水利工程大体积混凝土施工面临的诸多技术难题，深入分析了混凝土制备与运输、分层分块浇筑与智能化振捣、温度监控与通水冷却,以及全过程精细化养护等关键技术的具体应用与集成方法。同时，结合相关工程经验，探讨了数值模拟、BIM技术及自动化等现代信息技术在施工模拟、过程控制与质量追溯中的融合应用，以期为提升我国水利工程大体积混凝土施工提供实践参考。

关 键 词： 水利工程；大体积混凝土；施工技术；质量控制

Research on Construction Technology of Large Volume Concrete in Water Conservancy Project

Li Dianxiong

Hebei Provincial Water Affairs Center Shijin Irrigation District Affairs Center Weiqiao Management Office, Shenzhou, Hebei 053800

Abstract： This paper addresses the technical challenges in large-volume concrete construction for water conservancy projects, providing an in-depth analysis of key technologies including concrete preparation and transportation, layered block pouring with intelligent vibration, temperature monitoring and water-cooling systems, as well as comprehensive curing methods. Drawing from practical engineering experience, it explores the integration of modern information technologies such as numerical simulation, BIM (Building Information Modeling), and automation in construction simulation, process control, and quality traceability. The study aims to offer practical references for improving large-volume concrete construction in China's water conservancy projects.

Keywords： water conservancy engineering; large volume concrete; construction technology; quality control

引言

水利工程作为国家基础设施建设的基石，其构筑物的耐久性与安全性直接关系到国计民生。大体积混凝土结构作为水坝、泵闸、大型基础等水利枢纽的核心承重单元，其施工质量是决定工程成败的关键。如何强化对大体积混凝土施工技术的优化运用，全面提高工程施工质量，减少病害问题发生，成为水利工程建设领域亟待解决的重要课题。

一、大体积混凝土施工的核心技术难题

（一）温度控制

混凝土在硬化过程中会释放大量化水热，而大体积结构因体积庞大，内部热量难以快速散失，内外温差显著，更容易引发开裂风险。研究表明，当内外温差超过25℃时，混凝土内部将产生拉应力，而混凝土抗拉强度远低于抗压强度，从而形成开裂。当水化热峰值过后，内部混凝土开始降温收缩，该过程同时会受到外部约束和内部约束的阻碍，从而在内部产生拉应力，导致更深

层的贯穿性裂缝。裂缝会破坏工程结构的整体性，为有害介质的侵入提供通道，严重威胁结构的耐久性和安全性^[1]。

（二）配合比优化

传统混凝土配合比使用高含量、高标号水泥，虽然可获得高强度，但同时也意味着更高的水化热和更大的收缩。若提高水泥用量可增强强度，但会加剧水化热释放，增加开裂风险；减少水泥用量虽能降低温度应力，但可能削弱混凝土密实性，影响耐久性。因此，大体积混凝土的配合比设计需在强度、工作性、耐久性与体积稳定性之间保持良好平衡。此外，矿物掺合料可改善工

作性能并降低水化热,但过量使用会导致早期强度发展缓慢,影响施工进度,因而需通过试验确定最佳胶凝材料用量、水胶比及掺合料比例。

(三) 施工工艺控制

大体积混凝土施工涉及模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑、振捣、养护等多道工序,任何环节的失误都可能影响整体质量。以混凝土浇筑为例,若浇筑过程中分层厚度过大,会导致热量积聚,而振捣不密实则可能形成冷缝或蜂窝麻面,降低结构耐久性。再如,在温度监控与冷却系统方面,仅靠优化配合比往往不足以控制温升,通常需要在混凝土内部预埋冷却水管,利用循环水进行主动散热,而这要求冷却水管的布置间距、通水流量和时间等均须与实时监测的内部温度数据紧密联动,实现动态精确控制。

二、水利工程大体积混凝土施工技术及应用

(一) 混凝土配合比优化设计

大体积混凝土的配合比设计应注重最大限度地降低水化热、延缓温升,提高混凝土的体积稳定性,以抵抗开裂。对此,可采用中热或低热硅酸盐水泥,由于其中的矿物成分含量得到了控制,因而有助于从源头上减少水化热的产出量和放出速度。同时掺入粉煤灰和矿渣粉,前者的形态效应、活性效应和微集料效应等可有效改善混凝土和易性,并替代大量水泥,而后的活性更高,后期强度贡献大,且其水化热远低于水泥。在满足泵送和结构要求的前提下,尽可能采用较大粒径的粗骨料,并确保其级配连续^[2]。采用高性能减水剂,为混凝土赋予高流动性和良好的坍落度保持能力。与减水剂复配使用缓凝剂,延长混凝土的初凝时间,为温度控制赢得时间,防止出现施工冷缝。

(二) 混凝土制备与运输技术

采用双卧轴强制式搅拌机,按骨料、水泥、掺合料、水、外加剂的顺序投料,确保混凝土均匀性,避免水泥与水直接接触产生结块。夏季施工时,对骨料喷水降温或使用冰水拌合,控制混凝土出机温度 $\leq 25^{\circ}\text{C}$,减少内外温差。混凝土的短距离运输可使用混凝土搅拌运输车,并在运输过程中保持搅拌筒低速旋转(2~4r/min),防止离析,而长距离、大批量运输则可采用皮带机和自卸汽车联合运输方式,以减少转运次数,降低VC值损失^[3]。运输过程中保持混凝土匀速搅拌,避免急刹车或颠簸。若出现离析,需二次搅拌后方可使用。在运输时间控制方面,需根据气温与运输距离确定允许运输时间,若夏季高温,则应适当缩短混凝土允许运输时间,以防止初凝。混凝土到达现场后,立即检测坍落度,不满足要求时需调整或退料。

(三) 混凝土浇筑与振捣技术

1. 分层分块浇筑原则

水利工程大体积混凝土浇筑需遵循分层分块原则,以控制水化热、减少温度裂缝风险,同时适应结构受力与施工能力要求。在具体施工中,分层浇筑需根据结构尺寸、施工条件及温控要求选择合理方式。以全面分层为例,浇筑时在整个结构内全面分层推进,每层厚度不超过振捣器作用部分长度的1.25倍,确保上下

层混凝土在初凝前结合。分段分层则将结构分成若干段落,每段内再分层浇筑,适用于面积较大但厚度较薄的工程。根据振捣方法、混凝土坍落度及结构特点确定分层厚度,避免过厚导致振捣不密实或过薄增加施工缝数量。对于分块浇筑,则应根据结构尺寸、施工能力及温控要求确定分块大小,以减少单次浇筑水化热积聚,且分块间施工缝需按设计或规范要求处理,包括凿毛、清理、铺设砂浆等。

2. 智能化振捣技术与质量控制

为提高振捣效果,可引入智能振捣设备,采用穿戴式智能振捣棒,集成GNSS-RTK定位系统、IOT通讯模块及AI评价模型,利用定位系统控制振捣轨迹误差,并实时传输振动时长、振幅、频率等振捣参数至云端平台。结合BIM模型生成浇筑块数字孪生体,模拟振捣路径与密实度分布,实时映射振捣过程,若发现异常立即调整振捣参数,辅助优化振捣方案,减少漏振区域。振捣时,应在插入时快、拔出时慢,每次插入时间20~30秒,以混凝土不再显著下沉、不出现气泡、开始泛浆为准,避免过振导致砂与水泥浆分离。在振捣棒的插入深度方面,需插入下层混凝土10cm,加强上下层结合,同时避免碰到模板、钢筋和预埋件^[4]。

(四) 温度监控与冷却技术

1. 温度监控系统

温度监控系统负责采集数据、揭示规律、指导施工,是水利工程大体积混凝土施工的重要工具。测点通常布置在混凝土结构的中心、边缘、角部以及不同厚度交接处,该类区域温度梯度大、易产生裂缝。同时,还需在基础约束区、新旧混凝土结合面等应力集中区域加密布点。温度传感器的导线需集中引至专用的保护箱,并做好明确标识,严防在施工过程中被损坏,确保数据链完整。采用基于数字传感器的自动采集系统,传感器在浇筑前预埋到位,通过线缆连接到数据采集箱,可设定采集频率,保持24小时不间断监测。监测工作应持续至混凝土内部温度降至稳定状态,特别是降温阶段的监控同样重要,以防收缩裂缝的产生。

2. 预冷技术

预冷技术旨在降低混凝土的出机口温度和浇筑温度,减少混凝土内部的蓄热量,削低水化热温升的峰值。对于骨料预冷方法,可在骨料堆场设置喷淋系统,用3~5℃冷水喷洒骨料,降低其温度,或在拌和楼料仓内通冷风,使骨料在料仓内停留50~60分钟,以降低温度。对于拌和用水预冷方法,则可用片冰或碎冰替代部分拌和水,降低混凝土温度。在水泥罐外包裹橡塑海绵等隔热材料,减少阳光直射导致温度升高,对水泥罐予以保温。需要注意的是,浇筑前需对混凝土出机口温度进行实测,确保满足设计要求,且骨料预冷需在拌和前1~2小时完成,避免温度回升。此外,根据工程规模和降温需求选择预冷方式,避免过度冷却导致成本增加。

3. 冷却水管技术

冷却水管技术属于主动降温措施,用于带走已产生的水化热。对此,在冷却水管的布置与安装中,可采用导热性能好的金属管或柔韧性好、便于安装的HDPE塑料管,以蛇形盘管形式分层、分片布置在混凝土内部。严格控制管道距混凝土边缘和表面

的距离，防止局部降温过快引起应力集中。通水冷却可分为两期进行，其中一期冷却在混凝土浇筑后立即开始，此时冷却水温与混凝土内部温差不宜过大，目的是削减水化热温峰，控制最高温度，二期冷却则在峰值过后进行，用于加速混凝土的冷却过程，使其尽快降至稳定温度或接缝灌浆要求的温度。冷却工作全部结束后，必须对管道系统用水泥浆液进行压力灌浆封堵，以确保其与混凝土共同工作，恢复结构的整体性，并防止内部锈蚀。

（五）养护与表面保温保湿技术

1. 表面保温保湿技术

正如前文所述，水利工程大体积混凝土体积庞大、内部水化热积聚显著，易因内外温差过大导致开裂，因而做好保温保湿至关重要。表面保温保湿技术可减少温度梯度、延缓水分蒸发，有效控制裂缝产生。对此，可优先选用聚乙烯泡沫板、岩棉板或玻璃棉毡等导热系数低、吸水率小的材料进行表面保温。对于水平结构的覆盖，可在混凝土终凝后立即覆盖保温材料，边缘用砂袋或钢筋压紧，防止大风掀翻；对于垂直结构的覆盖，则可采用挂式保温被或喷涂聚氨酯泡沫，确保与混凝土表面紧密贴合。在保湿方面，则可采用水养护法，即在保温层上覆盖湿麻袋、草帘或土工布，定期喷水保持湿润。对于高空结构等难以持续喷水的区域，则可喷涂水性养护剂，形成致密保护膜。

2. 养护期的确定与后期养护措施

养护期需根据混凝土强度发展、环境条件及设计要求综合确定，并需结合条件养护试块强度测试。一般而言，根据《水工混凝土施工规范》，大体积混凝土养护期不宜少于28天，对于抗渗、抗冻结构等有特殊要求的部位，养护期应适当延长。当环境温度超过30℃时，需通过预冷骨料、冰水拌和及表面覆盖降温材料，将养护期延长至30天以上，防止因温差过大导致表面干缩裂缝。养护期结束后，仍需保持混凝土表面湿润7~14天。拆除保温层时，应分阶段进行，避免温度骤变。养护期结束后，采用超声波检测仪检查混凝土内部缺陷，对宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ 的裂缝进行注浆修复。建立养护档案，记录温度、湿度、强度等数据，便于质量追溯与验收。

三、现代技术在大体积混凝土施工中的应用探讨

（一）数值模拟技术的应用

随着信息技术与工程技术的深度融合，数值模拟逐渐成为优

化施工流程、提升质量的重要技术之一。在实践中，数值模拟技术可建立数学模型，对混凝土温度场、应力场及裂缝发展进行动态预测，为施工参数优化提供科学依据。对于内外温差导致的拉应力，数值模拟可集成热传导方程与力学平衡方程，量化不同浇筑方案下的温度梯度与应力分布，为制定更具针对性的技术方法提供辅助。同时，数值模拟还可分析水泥用量、环境温度、养护条件等变量的交互影响，支持多方案对比，减少试错成本。

（二）BIM技术的应用

现代BIM技术打破了设计、施工、运维各阶段的信息壁垒，通过三维建模与信息集成，对施工全过程进行可视化管理与协同优化。传统施工交底依赖二维图纸，往往容易因不同参与方对空间理解的偏差而导致返工，而BIM模型则可直观展示混凝土分层浇筑顺序、冷却水管布局及钢筋绑扎节点，可在工程实践中实现三维可视化施工交底。在实践领域，某泵站工程将混凝土浇筑路径、振捣设备运行轨迹与模板安装位置集成至BIM平台，自动检测出多处空间冲突，优化后的机械空转时间明显减少，大大降低了能耗^[9]。

（三）自动化技术

通过智能设备与控制系统，自动化技术可替代人工操作，减少人为因素导致的质量波动，提升施工精度与效率。以自动化温控系统为例，其可在自动化技术辅助下，利用传感器网络与执行机构保持对特定参数的动态监测，当某区域温度超过设定值时，系统自动对冷却水流量、浇筑温度等进行调节。此外，无人驾驶技术可通过5G网络实现路径规划与协同作业，应用于混凝土运输与浇筑，减少人工干预，同时降低高温环境下工人劳动强度，同时减少安全风险与人力成本。

四、结语

综上所述，水利工程大体积混凝土施工是保障结构安全的核心环节，理应在实践中予以强化控制。因此，技术人员应密切结合水利工程项目实际，构建全流程的施工工艺流程体系，保持对温度控制的动态调控，最大限度上消除潜在影响因素的干扰，并积极有效引入智能振捣设备、BIM技术与自动化技术等方法，为全面优化提升大体积混凝土施工质量奠定基础，为推动水利工程建设事业高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1] 钱桂花. 水利水电工程大体积混凝土施工控制技术研究 [J]. 散装水泥, 2024, (04): 56-58.
- [2] 钟琦皓, 王启凡, 蒋晓艳, 等. 水利枢纽泵闸大体积混凝土开裂风险精准预测研究 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30(02): 141-146.
- [3] 孙莉, 冯展平. 黄金峡水利枢纽泵站、电站大体积混凝土施工机械选型及应用 [J]. 水利水电施工, 2024, (01): 53-57.
- [4] 李景宏. 水利工程建设中基础大体积混凝土施工技术探究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(04): 45-48.
- [5] 郝瑞凯, 耿萌. 浅谈水利水电工程大体积混凝土智能通水冷却系统应用 [J]. 陕西水利, 2024, (09): 130-132.