

水利工程混凝土施工质量控制关键影响因素研究

薛俊法

沂水县久远水利水电建筑安装有限公司 山东 临沂 276400

摘要：混凝土作为水利工程中最主要的建筑材料之一，其施工质量直接关系到工程的安全性、耐久性和使用寿命。本文以水利工程为背景，系统分析了影响混凝土施工质量的关键因素，涵盖原材料质量、配合比设计、拌合与运输、浇筑与振捣、养护管理、环境条件及施工管理等多个维度。识别出各阶段的质量控制薄弱环节，并提出针对性的优化策略。研究表明，原材料控制不严、施工工艺执行不到位、养护措施缺失以及管理体系不健全是当前水利工程混凝土质量问题的主要成因。本文最后构建了“全过程—多维度”质量控制模型，为提升水利工程混凝土施工质量提供理论支撑和实践指导。

关键词：水利工程；混凝土施工；质量控制；关键影响因素；全过程管理

引言

水利工程是国家基础设施的重要组成部分，承担着防洪、灌溉、供水、发电、生态保护等多重功能。在各类水利设施（如大坝、水闸、渡槽、隧洞、渠道等）中，混凝土因其高强度、耐久性和可塑性而被广泛应用。然而，混凝土结构一旦出现裂缝、渗漏、强度不足或碳化等问题，不仅会降低工程效能，还可能引发重大安全事故，造成巨大的经济损失和生态破坏。近年来，随着我国水利工程建设规模不断扩大、技术标准不断提高，对混凝土施工质量提出了更高要求。然而，实际工程中仍频繁出现因混凝土质量问题导致的返工、加固甚至结构失效事件。究其原因，多源于施工过程中对关键影响因素的忽视或控制不力。因此，系统识别并深入研究影响混凝土施工质量的关键因素，对于提升水利工程质量、保障工程安全具有重要意义。

1 混凝土施工质量控制的理论基础

1.1 混凝土质量的内涵

混凝土施工质量不仅指其抗压强度是否达标，更包括密实性、均匀性、耐久性、体积稳定性及外观质量等多个方面。在水利工程中，由于长期处于水环境或干湿交替条件下，对混凝土的抗渗性、抗冻性、抗冲刷性和抗化学侵蚀能力要求尤为严格。

1.2 质量控制的基本原则

混凝土施工质量控制应遵循“预防为主、过程控制、全员参与、持续改进”的原则。强调从原材料进场到最终验收的全过程管理，注重各工序间的衔接与协同，确保每一道工序都处于受控状态。

1.3 全过程质量管理理念

借鉴全面质量管理（TQM）和PDCA循环（计划—

实施—检查—处理）思想，将混凝土施工划分为若干关键控制节点，通过标准化作业、信息化监控和制度化管理，实现质量目标的动态达成。

2 水利工程混凝土施工质量关键影响因素识别

影响混凝土施工质量的关键因素可归纳为原材料质量、配合比设计、拌合与运输、浇筑与振捣、养护管理、环境气候以及施工组织管理等七大方面，这些因素贯穿施工全过程，共同决定最终结构性能。

2.1 原材料质量因素

原材料是混凝土性能的根本基础。水泥若安定性不合格或水化热过高，易引发体积变形或温度裂缝；骨料含泥量超标会削弱界面粘结，级配不良则影响密实度，而碱活性骨料在特定条件下可能诱发膨胀破坏。拌合用水若含有氯离子或硫酸盐，将加速钢筋锈蚀或引起化学侵蚀。外加剂虽能改善工作性或耐久性，但若与水泥相容性差或掺量失控，反而导致离析、泌水或凝结异常。矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉的质量波动亦会影响强度发展和长期稳定性^[1]。实践中，因骨料清洗不彻底或供应商管理松懈导致的早期裂缝问题屡见不鲜，凸显原材料源头控制的重要性。

2.2 配合比设计因素

配合比是连接材料性能与工程需求的核心纽带。水胶比过高虽便于施工，却显著降低强度与抗渗性；过低则影响工作性，难以振捣密实。胶凝材料总量需兼顾强度目标与温控要求，尤其在大体积结构中，过量使用易加剧水化热积聚。更重要的是，配合比必须结合工程所处环境进行针对性设计：寒冷地区应引入引气措施以提升抗冻性，大体积混凝土则需通过掺加矿物掺合料或选用低热水泥来抑制温升。脱离实际工况的“通用型”配

合比往往埋下耐久性隐患。

2.3 拌合与运输过程因素

拌合与运输是确保设计配合比得以实现的关键环节。计量系统若未定期校准，将导致实际配比偏离设计值；搅拌时间不足或过长均影响均匀性。运输过程中，长时间等待或高温环境会造成坍落度损失，部分现场为图便利擅自加水，严重破坏水胶比，直接削弱混凝土强度与耐久性。此外，运输设备密封不良在雨天或大风条件下易引入外部水分或加速蒸发，进一步改变混凝土状态，影响浇筑质量。

2.4 浇筑与振捣工艺因素

浇筑与振捣直接决定混凝土的密实程度与结构整体性。分层过厚会导致下层振捣不实，形成蜂窝、孔洞甚至冷缝；振捣不足造成内部空隙，过振则引起骨料下沉、浆体上浮，产生分层离析。施工缝若凿毛不彻底、冲洗不净或未涂刷界面剂，将显著降低新旧混凝土粘结强度，成为渗漏通道。模板系统若刚度不足或接缝不严，不仅影响几何尺寸，还可能因漏浆导致表面缺陷和内部不密实。

2.5 养护管理因素

养护是保障混凝土强度正常发展、抑制早期开裂的关键措施，却常被忽视。初凝后若未及时覆盖保湿，表面水分快速蒸发极易诱发塑性收缩裂缝。仅靠间歇洒水而无覆盖，难以维持有效湿度；冬季若无保温措施，低温将延缓水化甚至引发冻害^[2]。尤其对于掺矿物掺合料的混凝土，其后期强度依赖长期水化反应，养护周期应不少于14天，但现场常因赶工提前终止。据相关统计，超六成的早期裂缝与养护不到位密切相关。

2.6 环境与气候因素

水利工程多处于露天复杂环境，气候条件对施工质量影响显著。高温加速水分蒸发与水化反应，增大开裂风险；低温抑制强度发展，0℃以下易致冻损；大风干燥天气加剧表面失水；雨季则可能稀释表层混凝土或造成基坑积水。这些环境变量若未纳入施工组织考量，即使材料与工艺达标，仍难避免质量缺陷。

2.7 施工组织与管理因素

再科学的技术方案也需有效管理予以落实。技术交底流于形式、操作人员对质量要点理解不清，易导致工艺执行偏差；质量责任制不明确，使关键工序缺乏责任主体；检测频次不足，无法及时发现异常；工期压力下盲目赶工，压缩必要工艺时间，牺牲质量换取进度。这些管理短板往往是技术措施失效的根本原因，凸显健全质量管理体系的必要性。

3 关键影响因素的作用机理分析

上述因素并非孤立存在，而是相互关联、共同作用于混凝土质量。劣质骨料往往需要更多胶凝材料包裹以保证工作性，这反过来推高水胶比或胶材总量，形成恶性循环；外加剂与水泥若相容性差，施工人员可能被迫调整配合比或掺量，进一步偏离设计初衷。环境条件与养护措施之间也存在强耦合关系，即便配合比设计充分考虑了温控需求，若在高温环境下未能及时启动有效养护，混凝土仍会因表面失水过快而开裂。尤为突出的是大体积混凝土的温控问题，水泥水化放热导致内部温升可达50-70℃，而表面散热较快，形成显著内外温差。当由此产生的拉应力超过混凝土当时的抗拉强度时，温度裂缝便不可避免。这一过程受到配合比（胶材用量）、入模温度、冷却通水措施、保温覆盖效果及养护持续时间等多重因素的综合影响，体现了多因素协同作用的复杂性。此外，再科学的技术方案若缺乏强有力的施工管理支撑，也难以在实际操作中得到忠实执行，导致“纸上标准”与“现场现实”脱节。

4 混凝土施工质量控制优化策略

4.1 强化原材料全过程管控

应建立严格的供应商准入与评价机制，实行原材料进场复检制度，确保每一批次材料符合规范要求。对骨料应进行筛分和冲洗处理，将含泥量控制在1%以内；外加剂在使用前必须与工程所用水泥进行相容性试验，确定最佳掺量范围；掺合料应选择来源稳定、质量可靠的供应商，并对每批次产品检测其活性指数和烧失量等关键指标，杜绝不合格材料进入拌合系统。

4.2 科学优化配合比设计

配合比设计应超越单一强度目标，采用全算法或正交试验法进行多目标优化。对于大体积混凝土，优先选用中热或低热水泥，并掺加适量粉煤灰或矿渣粉以降低水化热总量；在寒冷地区，应通过引气剂将混凝土含气量控制在4%至6%之间，以提升抗冻性能；同时可借助BIM平台或智能配比系统，根据实时原材料数据和环境参数动态调整配合比，实现精准化设计。

4.3 规范拌合与运输管理

搅拌站应配备高精度自动计量与实时监控系統，确保各组分计量误差控制在±1%以内；运输车辆可加装GPS定位及温湿度传感器，实现对混凝土状态的全程追踪；现场应严禁随意加水，确因工作性损失需调整时，应在技术人员指导下使用高效减水剂进行调节，确保水胶比不被破坏^[3]。

4.4 严格控制浇筑与振捣工艺

浇筑应采用分层方式进行,单层厚度不宜超过50厘米,并合理设置施工缝位置;振捣应使用高频振捣器,遵循“快插慢拔、插点均匀、不过振不漏振”的操作原则;在钢筋密集区域,可推广自密实混凝土(SCC)技术,减少对人工振捣的依赖;模板系统应选用刚度大、密封性好的钢模或覆膜木模,防止漏浆和变形。

4.5 实施精细化养护制度

混凝土初凝后应立即覆盖土工布并加盖塑料薄膜,形成保水屏障;夏季可采用蓄水养护或自动喷雾系统维持表面湿润;冬季则需搭设保温棚,并辅以加热设备防止冻害;养护时间应根据胶凝材料类型确定,普通硅酸盐水泥不少于7天,掺矿物掺合料的混凝土应延长至14天以上,重要结构建议养护28天;有条件项目可引入智能养护系统,自动监测温湿度并联动调节养护措施。

4.6 应对环境挑战的技术措施

针对高温季节,可采取骨料预冷、拌合水中加冰、选择夜间低温时段施工等措施降低入模温度;低温环境下,应对水、骨料进行加热,并采用暖棚法施工,必要时掺防冻剂;雨季施工应提前搭设防雨棚,基坑周边设置排水沟,混凝土浇筑应尽量避免大雨时段,确保施工环境可控。

4.7 完善施工质量管理体系

全面推行“三检制”(自检、互检、专检)和样板引路制度,确保每道工序质量受控;应用智慧工地平台,实现原材料检测、配合比下发、施工参数、养护记录等质量数据的实时采集、存储与预警;加强一线人员技术培训,实行持证上岗,明确各岗位质量责任;建立质量追溯机制,确保每一仓混凝土均可回溯至原材料批次、配合比编号、施工班组及检测报告,形成闭环管理。

5 构建“全过程—多维度”质量控制模型

基于上述分析,本文提出一个适用于水利工程的混凝土施工质量控制模型。该模型以设计—材料—施工—验收为主线,贯穿事前预防、事中控制、事后评估三个

阶段,融合技术、管理、环境、人员四个维度,形成闭环控制系统。在事前阶段,重点完成配合比验证、技术交底、设备校准及应急预案制定;事中阶段依托信息化手段,对原材料、拌合、运输、浇筑、养护等环节的关键参数进行实时监控与干预;事后阶段则通过回弹法、超声波检测、钻芯取样等手段对实体质量进行客观评估,并将结果反馈至设计与施工环节,驱动持续改进^[4]。该模型强调“数据驱动”和“风险前置”,利用物联网、大数据等现代技术提升质量管控的精准性、预见性和系统性。

6 结语

本文系统研究了影响水利工程混凝土施工质量的关键因素,得出以下结论:混凝土质量受原材料、配合比、施工工艺、养护、环境及管理等多因素综合影响,其中原材料控制、养护管理和施工执行力是当前最薄弱环节;大体积混凝土的温度裂缝、早期塑性收缩裂缝及耐久性不足是主要质量病害,其根源在于全过程控制缺失;构建“全过程—多维度”质量控制模型,结合信息化手段,可显著提升质量管控水平。未来研究方向包括智能混凝土(如自感知、自修复)在水利工程中的应用;基于数字孪生的混凝土施工质量预测与调控;绿色低碳混凝土配合比优化及其长期性能评估。只有坚持“质量第一、预防为主”的理念,强化全链条、全要素、全周期管理,才能真正实现水利工程“百年大计、质量为本”的目标。

参考文献

- [1]孟磊.水利工程混凝土施工中存在的质量隐患与防治对策[J].产品可靠性报告,2025,(10):178-179.
- [2]程有锋,陈攀峰.水利工程混凝土施工过程中的技术要点与质量控制方法研究[J].水上安全,2025,(19):160-162.
- [3]张炳辉.水利工程混凝土施工质量隐患识别与应对措施探讨[J].低碳世界,2025,15(08):124-126.
- [4]徐建,杨莉,孙国焕.水利工程混凝土施工质量控制技术研究[J].现代工程科技,2025,4(09):181-184.