

水利水电工程混凝土施工质量控制的技术分析

董 强

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：鉴于水利水电工程具有规模宏大、服役环境复杂、使用年限长等特点，对混凝土施工质量提出了极高要求。本文系统梳理了水利水电工程混凝土施工过程中影响质量的关键因素，重点围绕原材料质量控制、配合比优化设计、拌合与运输管理、浇筑与振捣工艺、温控防裂技术、养护措施以及质量检测与评估等核心环节，深入分析了当前应用的关键技术及其发展现状。同时，结合现代信息技术如BIM、物联网和智能传感等在质量控制中的融合应用趋势，探讨了未来水利水电工程混凝土质量控制的发展方向。研究表明，构建全过程、全要素、智能化的质量控制体系是提升水利水电工程混凝土施工质量的根本路径。

关键词：水利水电工程；混凝土施工；质量控制；温控防裂；智能监测；配合比设计

引言

水利水电工程是国家基础设施的关键部分，在防洪、水资源调配、清洁能源开发等方面作用重大。其工程结构体量大、服役周期长，常达50 - 100年，且工作环境严酷，处于水下、冻融等复杂条件，对结构材料性能要求极高。混凝土因可塑性好、抗压强度高、耐久性优、成本经济，成为应用最广的结构材料。但混凝土是非均质复合材料，最终性能受原材料和施工工艺参数影响大。施工质量控制不佳，会引发裂缝、渗漏等病害，影响工程外观与功能，甚至危及结构安全，造成重大损失，国内外多座大型工程就曾因此加固处理。所以，科学高效控制水利水电工程混凝土施工质量是亟待解决的核心问题。

1 混凝土施工质量影响因素分析

水利水电工程混凝土施工质量受多重因素交织影响，可归纳为“人、机、料、法、环”五大方面。其中，人员的技术水平、质量意识与操作规范性构成了质量保障的人力基础，经验不足或责任心不强的操作人员往往难以保证振捣密实度或养护的连续性；机械设备的性能稳定性、计量精度及其日常维护状况，则直接影响混凝土拌合物的均匀性与施工效率；原材料作为混凝土性能的物质载体，其品质波动会直接传导至最终结构性能；施工方法涵盖从配合比设计到养护结束的全过程，任何一道工序的偏差都可能成为质量隐患的源头；而环境条件，特别是温度、湿度与风速的变化，对混凝土早期水化反应速率、水分蒸发速度乃至开裂风险具有显著调控作用，尤其在大体积混凝土施工中表现得尤为突出。综合来看，“料”与“法”构成了技术层面最核心的控制对象，也是后续章节深入探讨的重点内容。

2 原材料质量控制技术

水泥作为胶凝材料的核心，应优先选用低热或中热水泥，以有效抑制水化热释放速率，降低温度裂缝风险，同时必须严格控制其强度等级、安定性、凝结时间及碱含量，并在进场时查验出厂合格证并按批次复检，确保其性能稳定可靠。骨料占混凝土总体积的70%以上，其质量对混凝土的力学性能、热学特性及长期耐久性具有决定性影响。粗骨料宜采用连续级配的碎石，严格限制含泥量、泥块含量、针片状颗粒比例及压碎指标；细骨料则推荐使用中粗砂，同样需控制含泥量及有害杂质含量，机制砂虽应用日益广泛，但其石粉含量与颗粒形貌需特别关注。拌合用水不得含有影响水泥正常水化的油类、糖类、酸碱物质及过量氯离子、硫酸根离子，必须符合《混凝土用水标准》（JGJ 63）的相关规定。现代高性能混凝土离不开外加剂与矿物掺合料的协同作用^[1]。高效减水剂可显著降低水胶比，提升强度与密实度；缓凝剂有助于延缓水化放热峰，引气剂则增强抗冻性能，但各类外加剂必须通过严格的相容性试验，确保与所用水泥及其他组分匹配良好。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料不仅能部分替代水泥以降低成本，更能改善工作性、降低水化热、提升后期强度及抗渗、抗化学侵蚀能力，但其活性指数、烧失量与细度等指标亦需严格把关。为确保原材料质量可控，必须建立完善的进场检验制度，实行“先检后用”，对不合格材料坚决清退，并加强仓储管理，防止受潮、污染或混杂。

3 配合比优化设计技术

水利水电工程混凝土配合比设计需摒弃仅满足强度要求的传统思路，转向以“低水胶比、低水泥用量、高耐久性”为核心的设计原则，将抗渗、抗冻、抗冲磨、

抗裂等长期服役性能纳入设计目标。全计算法相较于传统的经验图表法,能够更精确地确定各组分用量,尤其适用于掺加多种矿物掺合料的复杂体系,为实现性能精准调控提供了理论支撑。在此基础上,耐久性导向设计强调将氯离子扩散系数、抗冻等级(F值)等关键指标作为反推依据,从而合理确定水胶比、胶凝材料总量及矿物掺合料的最佳掺量。对于大体积混凝土结构,温控导向设计尤为重要,通过调整胶凝材料组成(如大幅提高粉煤灰掺量)和总用量,可从源头上显著降低绝热温升,为后续温控措施减轻压力。值得注意的是,任何配合比方案都必须经过严格的试配与验证,模拟现场实际施工条件(如运输时间、环境温度)进行坍落度损失、泌水率、含气量及早期强度等性能测试,并根据试配结果进行动态优化,确保设计方案在工程实践中切实可行。

4 拌合与运输过程控制技术

在拌合环节,所有原材料必须依赖高精度的电子计量系统进行称量,确保水泥、水、外加剂的计量误差控制在 $\pm 1\%$ 以内,骨料误差不超过 $\pm 2\%$,这是保证配合比准确执行的前提。强制式搅拌机因其剪切力强、混合均匀度高,成为水利水电工程的标配,且必须保证足够的搅拌时间,使水泥浆体充分包裹骨料,外加剂均匀分散。现代商品混凝土搅拌站普遍配备生产管理系统,可实时记录每盘混凝土的配料数据、搅拌时长及异常报警信息,实现全过程可追溯。在运输过程中,首要任务是防止混凝土发生离析与泌水。搅拌运输车在行进中应保持罐体低速转动,避免急刹、急转弯等剧烈操作;同时,必须严格控制运输时间,防止因时间过长导致坍落度损失过大甚至初凝^[2]。此外,环境温度对混凝土状态影响显著,夏季运输需采取遮阳棚覆盖、罐体洒水降温等措施,而冬季则需对罐体进行保温处理,必要时对拌合水或骨料预热,确保混凝土入模温度符合温控要求。整个拌运过程需建立从搅拌站到浇筑仓面的无缝衔接机制,确保混凝土在最佳状态下完成浇筑。

5 浇筑与振捣工艺控制技术

对于重力坝、闸墩等大体积结构,必须科学划分浇筑仓面与层厚(通常为2~3米),合理安排浇筑顺序与层间间歇时间,既要保证连续作业避免冷缝形成,又要为下层混凝土提供必要的散热时间。入模温度是温控防裂的第一道防线,夏季可通过预冷骨料、拌合水中掺冰、选择夜间低温时段浇筑等方式有效降低;冬季则需对原材料适度加热,防止入模温度过低影响早期强度发展。为防止高落差浇筑导致骨料与浆体分离,当自由下落高度超过2米时,必须采用串筒、溜槽或泵管等辅助工具引

导混凝土入仓。振捣是消除内部气泡、提高密实度的核心操作,应遵循“快插慢拔”的基本原则——快速插入可避免表层浆体先行下沉造成分层,缓慢拔出则有利于气泡沿振捣棒路径顺利排出。振捣布点需均匀,间距不应大于振捣棒有效作用半径的1.5倍,每点振捣时间以混凝土表面泛出均匀水泥浆、不再有大气泡冒出为宜,既要杜绝欠振造成的蜂窝麻面,也要防止过振引发的骨料下沉与浆体上浮。对于易产生塑性沉缩裂缝的部位,如墙柱顶部或大平面结构边缘,在初凝前实施二次振捣,可有效弥合早期微裂缝,显著提升表层密实度与抗裂性能。所有这些工艺细节的落实,离不开充分的技术交底与现场管理人员的严格监督。

6 温控防裂关键技术

温控防裂其根本原因在于水泥水化反应释放大量热量,而混凝土导热性差,导致内部温度急剧升高,外部则因与环境接触而散热较快,由此产生的内外温差在结构内部形成拉应力场。当该拉应力超过混凝土尚处于低强度发展阶段的抗拉能力时,便会在表面或内部诱发温度裂缝,严重削弱结构的整体性与耐久性。针对这一难题,必须采取“内降外保”的综合温控策略。所谓“内降”,即从源头减少热量产生并主动导出内部热量:一方面通过优化配合比,大量掺加粉煤灰、矿渣粉等低热水化活性材料,降低单位体积胶凝材料总量;另一方面在混凝土内部预埋蛇形冷却水管,通入循环冷水,主动带走水化热,有效削减温峰并控制降温速率。所谓“外保”,则是通过在混凝土终凝后立即覆盖保温保湿材料(如聚乙烯薄膜+草帘或专用保温被),减缓表面散热速度,缩小内外温差,同时防止水分过快蒸发引发干缩裂缝。此外,合理的结构分缝分块设计,如设置永久伸缩缝或后浇带,可为温度变形提供释放通道,降低约束应力^[3]。整个温控过程必须依托详细的三维温度场仿真计算,制定科学的冷却通水方案与保温拆除时机,并在施工中布设分布式温度传感器网络,对关键部位进行实时监测,根据实测数据动态调整温控参数,实现精准调控。

7 养护技术

养护的核心目标是为水泥持续水化提供充足的水分和相对稳定的温度环境,防止因早期失水过快而产生塑性收缩裂缝或干缩裂缝。理想的养护方式是蓄水养护,尤其适用于底板、顶板等水平结构面,能同时满足保湿与恒温需求。对于闸墩、墙体等立面结构或无法蓄水的部位,则普遍采用覆盖保湿养护法,即在混凝土表面覆盖吸水性强的土工布、麻袋片或草帘,并安排专人定时

洒水,保持覆盖物始终处于湿润状态;另一种高效方式是喷涂成膜型养护剂,其能在混凝土表面形成一层不透水薄膜,有效锁住内部水分。无论采用何种方式,养护的及时性、连续性与充分性至关重要。普通硅酸盐水泥混凝土的养护期不应少于14天,而对于掺加了大量粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料的混凝土,由于其后期强度增长显著,养护时间应相应延长至21天甚至28天,以确保其潜在活性得到充分发挥。只有将养护视为与浇筑同等重要的工序,杜绝“重浇筑、轻养护”的短视行为,才能真正保障混凝土的长期性能。

8 质量检测与评估技术

过程检测贯穿于施工始终,包括在搅拌站出料口及浇筑点分别测定混凝土的坍落度、扩展度与含气量,以监控工作性是否满足泵送与振捣要求;通过预埋的温度传感器对混凝土内部不同深度的温度进行连续自动采集,为温控方案的动态调整提供实时依据;同时,制作与结构同条件养护的混凝土试块,用于判定拆模、预应力张拉等关键工序的实施时机。在结构成型后,还需借助无损检测技术对实体质量进行客观评价。回弹法或超声回弹综合法可快速、大面积地推定混凝土强度分布;地质雷达或红外热成像技术则擅长探测内部空洞、不密实区或渗漏通道;当对上述结果存在争议或需获取精确数据时,钻芯取样作为最终仲裁手段,可直接获取芯样进行抗压强度、氯离子含量、碳化深度等实验室测试。所有检测数据应纳入统一的质量管理平台,与设计指标及规范限值进行比对分析,形成完整的质量档案,不仅服务于当前工程验收,也为后期运维与寿命预测提供基础数据支撑。

9 智能化与信息化技术的应用展望

BIM技术可在设计阶段进行4D/5D施工模拟,优化大体积混凝土的浇筑顺序、冷却水管的空间布置及施工资源调度;在施工阶段,BIM模型作为信息集成载体,可关联构件的原材料批次、配合比、浇筑时间、养护记录等全生命周期数据,实现质量可追溯。物联网技术通过在

搅拌车、泵车、智能振捣棒、环境监测站等设备上部署各类传感器,能够实时采集混凝土状态、设备工况、振捣轨迹、环境温湿度等海量数据,并通过无线网络上传至云端管理平台^[4]。基于这些实时数据,智能温控系统可利用AI算法自动调节冷却水流量与温度,实现温控的精准闭环控制;大数据分析技术则能整合历史项目数据库与当前工程数据,构建混凝土强度发展、裂缝风险预测等模型,为配合比动态优化与施工风险预警提供智能决策支持。这些技术的深度融合,将促使混凝土施工质量控制模式从依赖人工经验的“事后检验”转向基于数据驱动的“事前预防、事中精准调控”,最终构建一个覆盖全要素、贯穿全过程、响应实时化的智能质量控制新范式。

10 结语

水利水电工程混凝土施工质量控制是贯穿原材料进场到实体结构形成的复杂系统工程。经对关键环节深入分析,结论如下:源头控制是根本,要严把原材料质量,科学设计配合比,为高性能混凝土筑牢物质基础;过程控制是核心,拌合、运输等每道工序都得严守工艺标准,否则易致质量缺陷;温控防裂是重点,针对大体积混凝土,需采取“内降外保”综合措施并严密监测调控,防控温度裂缝;检测评估是保障,完善检测体系能客观全面评价施工质量,为验收和运维提供依据;智能化是未来方向,融合现代信息技术构建智能质控平台,是高质量建设的必然趋势。

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]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.
- [3]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.
- [4]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.