

水利水电工程混凝土坝施工质量控制关键技术实践

文 / 铁 林 湖南省核地质调查所

摘要: 水利水电工程中, 混凝土坝的施工质量至关重要, 它直接关系到工程的安全性、耐久性和经济效益。本文围绕水利水电工程混凝土坝施工质量控制展开研究, 首先对混凝土坝施工进行概述, 包括其类型和特点、主要施工流程以及施工质量控制的重要性; 接着详细阐述混凝土坝施工质量控制的关键技术实践, 涵盖材料选择与配合比优化、浇筑工艺与密实度控制、温度控制与裂缝防治以及施工过程动态监控等方面; 最后得出结论, 以为水利水电工程混凝土坝施工质量控制提供参考。

关键词: 水利水电工程; 混凝土坝; 施工质量控制; 关键技术实践

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.081

引言

水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 对于保障水资源合理利用、防洪减灾以及发电等方面具有不可替代的作用。混凝土坝作为水利水电工程中常见的坝型, 其施工质量直接关系到整个工程的安全性、稳定性和耐久性。一旦混凝土坝出现质量问题, 如裂缝、渗漏等, 不仅会影响工程的正常运行, 还可能引发严重的安全事故, 造成巨大的经济损失和社会影响。因此, 深入研究混凝土坝施工质量控制关键技术实践具有重要的现实意义。

一、水利水电工程混凝土坝施工概述

(一) 混凝土坝的类型和特点

混凝土坝按结构特点可分为重力坝、拱坝和支墩坝, 按施工方式不同可分为常态混凝土坝、碾压混凝土坝和装配式混凝土坝等。重力坝依靠自身重力抵抗水压力, 结构简单、适应性强、耐久性好, 能有效利用坝身设置泄水建筑物, 适合在岩基上建造高坝, 但混凝土用量大, 材料强度利用不充分。拱坝利用拱形结构将水压力传递到两岸, 适用于峡谷地形, 节省混凝土用量, 超载能力和抗震性能好, 但对地形和地质条件要求高。支墩坝由倾斜面板和支墩组成, 水压力经面板传给支墩再到地基, 按面板型式分平板坝、连拱坝和大头坝, 不过因施工不便等缺点如今极少采用。常态混凝土坝通过现场浇筑施工, 施工技术成熟; 碾压混凝土坝施工效率高, 可缩短工期; 装配式混凝土坝使用预制混凝土块装配, 建造速度快。混凝土坝整体结构坚固、抗震能力强、稳定性高, 混凝土材料耐久性强、抗腐蚀性能好, 正常维护下使用寿命可达百年以上, 且材料价格相对便宜, 建造施工技术成熟, 成本相对较低。

(二) 混凝土坝施工的主要流程

混凝土坝施工是一个系统且复杂的过程, 涉及多个关键步骤。基坑开挖是基础, 需按设计要求在修筑坝体的位置挖掘, 保证基坑底部平整坚实, 为后续施工奠定稳定基础。基床处理紧随其后, 对基坑底部去除松软土壤并填充夯实, 确保坝基稳固, 提升坝体整体稳定性。

坝体浇筑是核心环节, 涵盖多个具体操作。先进行

测量放样、模板架立、钢筋安装和预埋件埋设, 为混凝土浇筑搭建框架并预留必要设施接口。接着组织浇筑仓号, 进行下料、平仓和振捣, 使混凝土均匀充实, 保证坝体结构密实。收盘后处理施工缝面, 做好表面养护, 防止裂缝产生, 提升混凝土耐久性。表面处理和通水冷却同步进行, 前者优化坝体外观, 后者降低水泥水化热, 减少温度裂缝。最后进行表面保护, 增强坝体抗外界环境侵蚀能力。

对于碾压混凝土坝, 还需铺设砂浆提供良好粘结面, 运输卸料时降低骨料分离可能, 平仓作业用平仓机推扒确保混凝土均匀分布, 碾压作业提高混凝土密实度和强度, 切缝处理便于后续施工, 接缝碾压增强坝体整体结构。完成浇筑后要要进行强度检测, 确保符合设计要求, 整个施工过程需严格控制, 保障混凝土坝质量和安全。

(三) 施工质量控制的重要性

混凝土坝施工质量控制意义重大, 对工程的安全、成本和进度有着深远影响。从安全层面看, 混凝土坝施工质量直接关系到建筑工程的质量和安, 混凝土强度不足可能导致建筑物出现严重的安全问题, 甚至引发坍塌事故, 这不仅会对财产造成巨大损失, 还可能威胁到人员的生命安全, 一旦发生这样的事故, 其社会影响也会非常恶劣, 可能会引发公众的恐慌, 甚至导致公共秩序的混乱。

在成本控制方面, 施工质量控制可以有效避免出现质量问题, 从而减少工程返工, 节约成本。若施工质量不达标, 需要对出现问题的部分进行重新施工, 这无疑会增加额外的人力、物力和财力投入, 造成资源的浪费。

从工程进度角度而言, 质量控制能够保障工程顺利推进。施工过程中, 若质量问题频发, 会导致施工停滞, 延误工期。例如在雨季, 施工现场容易积水, 若施工质量控制不到位, 可能会导致施工延误和质量隐患, 影响整个工程的进度。

此外, 在水利工程的混凝土施工过程中, 加强对原材料的质量控制以及对混凝土的生产和浇筑进行严格把关, 能使混凝土的施工质量处在受控状态并保证最终质量的可靠性, 只有对工程的验收合格之后, 在工程质量

得到保证的前提下，才能进行下一步的有关工作。

二、混凝土坝施工质量控制关键技术实践

(一) 材料选择与配合比优化

材料选择与配合比优化对混凝土坝施工质量至关重要，不仅影响坝体性能，还关系到成本控制和工程进度。材料选择是基础，不同材料性能差异大，选料不当会严重影响混凝土整体性能。

水泥作为关键材料，种类多样，如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等^[3]。选择时要考虑稳定性和对外加剂的适应性，强度并非唯一决定因素。有实验表明，使用 32.5 级与 42.5 级水泥，或 42.5 级与 52.5 级水泥配制高强混凝土，结果并无显著差异；而 42.5 级水泥却能制备出 28 天强度高达 125-130MPa 的高

强混凝土，62.5 级水泥却无法做到。

骨料方面，砂一般选用 II 区中砂，细度模数为 2；石子要关注最大粒径等参数。活性掺合料如 II 级粉煤灰和矿粉，能改善混凝土性能并控制成本。II 级粉煤灰需水量比通常为 105%，矿粉则为 95%，不同掺合料及其掺量比例会直接影响混凝土用水量。

配合比优化是提升混凝土性能和降低成本的关键。在我国，JGJ55-2011《普通混凝土配合比设计规程》被广泛采用，依据包罗米公式（水灰比法则）设计，但随着水泥技术进步、外加剂性能提升和活性掺合料广泛运用，该公式适用性逐渐不足。理论上，水泥完全水化所需最小水灰比约为 0.23，而实际混凝土用水量远高于此，多余水分会影响混凝土性能。

表 1 不同材料对混凝土性能影响的数据统计

材料类型	材料名称	需水量比	对混凝土性能影响
掺合料	II 级粉煤灰	105%	部分替代水泥，降低用水量，改善流动性
掺合料	矿粉	95%	改善混凝土性能，控制成本
水泥	42.5 级水泥	-	可制备 28 天强度达 125-130MPa 高强混凝土

通过构建材料选择标准，定期更新材料库，建立与供应商合作机制，确保材料质量稳定；同时优化配合比设计，预计项目整体成本可降低 10%-15%，优化后的混凝土强度和耐久性有望提高 20% 以上，减少后期维护成本。

(二) 浇筑工艺与密实度控制

混凝土坝浇筑工艺与密实度控制是保障工程质量的关键环节，直接影响坝体的稳定性和耐久性。在浇筑前，需做好充分准备。设置振捣控制导轨，如在钢筋骨架上采用绑扎形式固定 12 号槽钢，槽钢开口朝下落在地坪上层钢筋上，槽钢下的钢筋固定架用 $\Phi 18$ 钢筋，间距 2m，用水准仪在固定架立杆上给出水准点并与横杆焊接牢固，槽钢间用两根 $\Phi 14$ 钢筋连接防止侧向位移。同时，要进行施工高程控制，在地坪四周墙体或结构物上弹出高程控制线，将钢筋骨架牢固固定在浇筑垫层时设置的固定钢筋上并调平，拉设高程控制线。

浇筑过程中，合理的振捣方法至关重要。先采用插入式振动器振实，待混凝土浇筑至设计标高后，用自制平板振动器整平。自制平板振动器搁置在槽钢上，由两名工人牵拉从头到尾同步滑行两遍，整平完毕后移至第二作业单元继续操作，取出上一单元一排槽钢，并对取槽钢处进行补灰，局部不平处人工找平。不同类型的混凝土，其坍落度控制也有所不同，如桩基混凝土坍落度需控制在 7-9cm 范围内，这可通过使用减水剂来实现，并使拌合时间维持在 2.5 分钟。

密实度控制是浇筑工艺的核心。密实的标志是混凝土停止下沉、不再冒出气泡，且表面呈现均匀平坦、乏浆状态。由于不同棒的振捣时间会随混凝土塌落度的变化而调整，所以不能将每棒振捣时间作为判断密实度的唯一标准。

在压光环节，操作人员要穿平底胶鞋，防止将初凝混凝土面踩出凹点，遇有石子或较大砂粒时要拣去，以免影响混凝土压光。局部磨光机打磨不到的地方用人工清平压光。待混凝土具有上人强度后，用 MGS800、900 型四叶电动、汽油磨光机打磨压光不少于三遍，过程中派专人修补地坪上的局部气孔，修补用的灰浆必须与混凝土同配合比。

此外，为保证混凝土的质量，现场要设技术人员进行坍落度的测试，详细填写测试记录表。加强混凝土的早期养护，及时排除表面泌水和浮浆，提高混凝土的密实度和抗拉强度，减少收缩，消除表面微裂纹。

(三) 温度控制与裂缝防治

温度控制与裂缝防治在混凝土坝施工中至关重要，关乎坝体的稳定性和耐久性。大体积混凝土在浇筑初期，水泥水化产生的热量会使其迅速升温，3 至 5 天内达到



图 1 混凝土坝浇筑现场

峰值,最高可达 55-65℃,且持续时间长。由于混凝土导热性差,内部热量难以及时散发,表面散热较快,从而形成较大的内外温差,产生温度应力,温差越大,温度应力越大。当温度应力超过混凝土的抗拉强度时,就会产生裂缝,其中贯穿裂缝危害最大,会破坏结构整体性和稳定性,深层和表面裂缝危害相对较小,但也会损害结构耐久性。

控制混凝土温度,关键在于降低出机温度,进而控制总温升和缩小内外温差,最有效的方法是降低石子温度。夏季高温时,可在砂、石堆场搭建遮阳设施,必要时向骨料喷洒水雾或淋水。还可通过埋置冷却水管进行循环冷却,利用热交换降低不同界面和深度的温度,减小内外温差。同时,可使用缓凝减水剂,如 SF-1 缓凝高效减水剂,延缓水泥水化过程,推迟水化热峰值出现。

在混凝土配合比设计上,粗骨料宜采用连续级配,细骨料选用中砂;推荐使用缓凝剂和减水剂,掺合料选择粉煤灰、矿渣粉等;在满足强度和坍落度要求的前提下,增加掺合料和骨料比例,降低水泥用量;优先选用水化热低、凝结时间长的水泥,如中热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥等。

做好温度监测和记录分析对施工有指导意义,要随时掌握混凝土内部温度变化,及时调整保温及养护措施,确保混凝土中心与表面、表面与大气的温差不超过 25℃。另外,混凝土收缩也是产生裂缝的因素之一,约 80% 的水分蒸发会引起体积收缩,干湿交替会导致体积反复变化,不利于混凝土结构。使用水化热低的矿渣水泥时,析水性高,需及时排除析水或用干硬性混凝土处理,配合振捣器振实,保证施工质量。

(四) 施工过程动态监控

施工过程动态监控是确保水利水电工程混凝土坝施工质量、安全和进度的重要手段,其原理基于现代传感技术、通信技术和信息处理技术,通过实时采集、传输和处理施工过程中的各类数据,实现对施工活动的全面监控和管理。

传感技术是施工过程动态监控的基础,常用的传感器类型多样,位移传感器可测量施工结构或构件的变形情况,像激光位移传感器测量精度可达微米级,超声波位移传感器适用于大范围位移测量,电阻应变片则用于结构应力分析;振动传感器用于监测施工机械和结构的振动情况,加速度计能分析结构的动态响应特性,速度传感器可评估结构的疲劳损伤情况,这些传感器多采用 MEMS 技术制造,体积小、重量轻、响应速度快。

数据采集系统是施工过程动态监控的核心,由数据采集器、信号调理电路和存储单元组成。数据采集器采用高精度模数转换器,采样率达千赫兹级别,能将模拟信号转换为数字信号并进行处理;信号调理电路对传感

器传输的信号进行滤波、放大、线性化等预处理,采用专用集成电路设计,确保信号处理的效率和精度;存储单元用于存储采集到的数据,常见的有 Flash 存储器和 SD 卡等。

数据传输技术包括有线传输和无线传输。有线传输通过电缆将数据传输到监控中心,以太网传输速度快、稳定性高,适用于长距离数据传输,串行通信成本低、抗干扰能力强,适用于短距离数据传输;无线传输通过无线信号将数据传输到监控中心,Wi-Fi 传输速度快、覆盖范围广,蓝牙低功耗、适用于近距离数据传输。

在监控策略上,利用深度学习模型分析视频与图像数据,可自动识别施工安全违规行为;结合强化学习动态调整监控策略,对高风险区域优先分配计算资源,提升异常检测的适应性与效率;通过迁移学习,将历史事故数据与实时监测特征结合,构建风险预警系统,可降低误报率至 5% 以内。同时,基于 OPCUA 协议建立设备间通信标准,能确保不同厂商传感器数据的一致性与互操作性。

结语

水利水电工程混凝土坝施工质量控制是保障工程安全、稳定与经济运行的关键。材料选择与配合比优化为基础,合理选料、优化配比可提升混凝土性能、降低成本并控制进度,如选用合适水泥、骨料及掺合料,优化配合比能使成本降低、强度和耐久性提高。浇筑工艺与密实度控制是核心,通过合理振捣、控制坍落度、做好压光和养护等工作,确保混凝土密实度和整体性,提高坝体质量。温度控制与裂缝防治是重点,采取降低出机温度、埋置冷却水管、使用缓凝减水剂等措施,可减小内外温差,降低裂缝产生风险。施工过程动态监控是保障,利用传感、通信和信息处理技术,实时采集和处理数据,实现全面监控管理,结合先进技术和策略,提升监测效率和异常检测精度。综合运用这些关键技术,可有效提升混凝土坝施工质量,推动水利水电工程可持续发展。

参考文献

- [1] 张琢玥,刘佳辉.水利水电工程中混凝土坝施工技术分析[J].水利电力技术与应用,2024(9).
- [2] 李栋.水利水电工程大坝混凝土施工质量问题及解决方法[J].水利电力技术与应用,2025(17).
- [3] 邓植炎.水利水电工程中碾压混凝土大坝的施工技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(002):000.

作者简介:铁林(1988年8月—),男,回族,陕西省西安市人,本科,水利水电工程建筑-工程师,现就职单位:湖南省核地质调查所,研究方向:水利水电工程建筑施工。