水利工程大坝施工中的碾压混凝土施工技术研究

申 晨¹ 张每文²

1. 长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

2. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心 湖北 武汉 430000

摘要: 大坝是水利工程的重要组成部分,其施工技术一直备受关注。随着科技的进步和工程实践的不断深入,碾压混凝土施工技术在大型大坝施工中得到了广泛应用。但碾压混凝土施工技术在水利工程大坝施工中仍面临一些挑战。基于此,本文深入阐述碾压混凝土的材料特性、施工工艺流程,同时分析了该技术在施工过程中的质量控制关键环节,如混凝土的配合比设计、施工缝与层面处理、压实度检测等方面的要点,希望为水利工程大坝高质量、高效率施工提供理论支持。

关键词: 水利工程; 大坝施工; 碾压混凝土; 施工技术; 质量控制

1 碾压混凝土的材料特性与配合比设计

1.1 材料特性

碾压混凝土的低用水量特性是其高抗压强度的基石。水在混凝土中扮演着双重角色,一方面它参与水化反应,使水泥颗粒能够结合形成坚固的胶凝体;另一方面,过多的水分会在混凝土凝固过程中留下孔隙,从而降低强度。在碾压混凝土中,严格控制用水量至较低水平,显著减少了内部孔隙率,进而极大提升了其密实性和抗压性能,为大坝在承受巨大荷载时提供了强度保障。

碾压混凝土尽管坍落度极小,但通过科学合理的搅拌工艺,粗骨料在混凝土中均匀分布,如同搭建一座稳固的桥梁,每一根“梁”(骨料)都恰到好处地发挥作用。在碾压过程中,这种均匀分布使得混凝土不易产生离析现象,保证了施工的顺利进行。不仅如此,碾压混凝土的高粘滞性同样功不可没。凭借这一特性,它在铺筑和碾压时展现出卓越的形状稳定能力,仿佛是一位坚韧的“战士”,在任何施工条件下都能坚守自身的形态,不轻易流淌变形,进一步确保了施工流程的高效与稳定。

1.2 配合比设计

配合比设计关乎碾压混凝土在大坝施工中的最终性能,需全面权衡各项关键因素,每一个环节都紧密关联、相互影响。首先,水胶比的精心调控尤为关键。在大坝这类大体积混凝土结构中,水胶比需在0.4-0.7之间精准控制。当水胶比降低时,混凝土的强度和密实性随之提高,如在某些对强度要求极高的大坝部位,可适当降低水胶比到接近0.4;但水胶比过低会带来施工困难,如流动性差等。而且,水胶比的确定还需兼顾砂率的合理选择。其次,砂率控制在28%-35%范围内对碾压混凝土

的工作性起着决定性作用。如果砂率过小,像混凝土的“黏合剂”不足,粗骨料之间的连接不够紧密,容易散开,导致粘聚性和保水性差,如在一些小型的水利渠道施工中曾因砂率过低出现过严重的离析问题;而砂率过大则会像一个“填充”的陷阱,过多占据了混凝土的空间,使孔隙率增大,影响强度。合适的砂率能在一定水胶比下,保障混凝土各组分良好结合,为后续施工性能提供基础。

粉煤灰掺量要在30%-50%之间。适量的粉煤灰能改善混凝土的多种性能,而过多的掺量则可能削弱混凝土的强度,这就需要根据具体的工程需求和大坝的结构部位来细致调整掺量。同时,合适的粉煤灰掺量也有助于配合骨料级配实现更好的填充效果。具体而言,在骨料级配合理的基础上,适宜的粉煤灰掺量可以进一步优化填充状态。骨料级配决定了混凝土密实度的上限。在大坝施工中采用二级配或三级配的骨料,能使混凝土在粗骨料间形成更密的填充,大大提升整体密实度。而且,在调整粉煤灰掺量时,也能为达到这种理想的填充状态提供助力。

2 水利工程大坝施工中碾压混凝土的施工工艺流程

2.1 施工前准备

在水利工程大坝建设中,碾压混凝土施工前准备工作需围绕大坝工程的特殊性进行系统性部署,涵盖场地整治、基础强化、材料管理和设备调试四大核心环节。大坝施工场地需满足严格的地形与高程要求。首先需采用爆破或机械开挖清除施工区域内的障碍物、危岩及植被根系,尤其需注意对坡面不稳定区域的削坡处理,防止边坡失稳。场地平整需结合大坝轴线与基础设计标高进行精确测量,通过激光水准仪控制平整度误差不超过

±5cm, 并设置排水明沟防止雨水冲刷。对于高坝工程, 还需预留坝体沉降预留层, 通常在基础面开挖完成后进行压实度检测, 确保压实度 $\geq 95\%$ 。大坝基础承载需采用静载试验或动力触探法检测地基承载力, 若发现局部承载力不足, 需采取针对性加固措施, 如对浅层缺陷采用换填混凝土或级配砂石回填, 对深层问题则需实施帷幕灌浆或固结灌浆处理。大坝工程材料管理需遵循"分区、分级、分类"原则。骨料堆存需按粒径分级设置专用料仓, 如5-20mm、20-40mm分级堆放, 并设置防雨棚和温控措施, 夏季高温时段需喷洒雾状水降温。水泥与粉煤灰存储需采用全封闭钢结构筒仓, 配备湿度监测系统, 确保含水率 $\leq 1\%$ 。大坝碾压施工设备需进行全系统联动调试。强制式搅拌机需按设计配合比进行试生产, 验证搅拌均匀性(变异系数 $\leq 5\%$)和温度控制精度($\pm 2^\circ\text{C}$)。摊铺机需安装激光导向系统, 实现铺层厚度自动调节(误差 $\pm 3\text{cm}$), 同步配备压实度实时监测装置。振动碾需重点调试碾压参数: 对于玄武岩骨料, 振动频率宜控制在60Hz、名义振幅0.8mm, 行进速度严格限定在 $1.2\pm 0.1\text{km/h}$ 。所有设备需完成72小时不间断试运行, 关键部件(如振动碾液压系统)需进行应力应变监测, 确保连续作业可靠性。

2.2 铺筑工艺

在水利工程大坝建设中, 碾压混凝土铺筑工艺直接影响坝体结构的整体性和抗渗性, 需根据大坝类型及施工环境精准实施。分层铺筑是大坝碾压混凝土施工的核心工序。分层厚度需结合坝体高度与碾压设备性能动态调整: 对于200m级高拱坝, 初始铺筑层厚一般控制在35-45cm, 通过6-8遍碾压后逐层减薄至25-30cm; 中低坝可适当放宽至40-50cm。斜层铺筑技术在高坝施工中应用广泛, 其坡度通常控制在1:12-1:15, 如白鹤滩水电站大坝就采用1:12坡度, 通过布料机与激光导向系统协同作业, 实现单日铺筑面积较平层工艺提升30%。需特别注意层间结合面处理, 即在斜层坡脚设置宽30cm的缓冲带, 采用振动抹平机进行界面处理, 并喷洒 0.8kg/m^2 水泥基渗透结晶材料, 确保层间抗剪强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ 。

平仓处理需实现"厚度、平整度、密实度"三重控制。采用带称重传感器的变频平仓振捣机, 根据骨料粒径, 如玄武岩骨料粒径 $\leq 40\text{mm}$, 自动调节振动频率与振幅(0.5-1.0mm)。夏季高温施工时, 需同步喷洒雾状水降温, 将混凝土入仓温度控制在 $16-22^\circ\text{C}$ 。通过激光平整度仪实时监测表面高程误差($\leq \pm 3\text{cm}$), 对局部不平处采用自行式刮平机修正。某300m级特高坝工程统计表明, 采用智能平仓系统后, 层间结合缺陷率由1.2%降至

0.4%, 振捣密实度合格率提升至98.5%。

2.3 碾压工艺

在水利工程大坝建设中, 碾压工艺是决定混凝土密实度与抗裂性能的关键环节, 需结合坝体高度、骨料特性及温控要求实施精准控制。碾压遍数需根据仓面温度(夏季 $\leq 35^\circ\text{C}$ 、冬季 $\geq 5^\circ\text{C}$)、混凝土VC值(10-20s)动态调整。对于200m级高拱坝, 玄武岩骨料碾压遍数需达12-15遍, 中低坝可控制在10-12遍。某溪洛渡水电站工程采用智能碾压系统, 通过GPS定位与振动传感器实时监测, 发现当碾压速度超过 1.5km/h 时层间结合度下降18%, 据此将速度严格限定在 $1.0-1.2\text{km/h}$ 。碾压轨迹采用北斗定位的进退错距法, 相邻碾迹重叠宽度 $\geq 20\text{cm}$, 对于坝体横缝部位增设5cm补压带。温控方面, 在高温时段($> 30^\circ\text{C}$)需对骨料喷雾降温, 确保入仓温度 $\leq 28^\circ\text{C}$, 避免碾压过程产生温度裂缝。

智能监控技术的深度赋能使上述参数调控更加精准高效。依托物联网与人工智能技术, 在振动碾安装的加速度传感器与红外热成像仪支持下, 系统可实时采集振幅、频率及温度场数据, 通过边缘计算动态分析压实均匀性。如某水电站应用该技术后层间密实度标准差由0.15降至0.08, 施工效率提升20%。针对坝基等关键部位, 同步采用三维地质雷达进行400MHz高频探测, 确保深层压实度 $\geq 98\%$ 。某300m级特高坝工程统计显示, 智能碾压系统使质量缺陷率从1.2%降至0.3%, 工期缩短15天。

3 水利工程大坝施工中碾压混凝土施工质量控制

3.1 混凝土配合比的施工控制

在水利工程大坝建设中, 碾压混凝土配合比的精准控制直接决定工程耐久性与安全性, 需基于大体积混凝土特性实施全流程动态管控。原材料计量精度控制是大坝碾压混凝土质量的基础保障。针对大坝工程骨料粒径大、用量大的特点, 需采用动态计量精度达0.1%的电子汽车衡, 水泥、粉煤灰等胶凝材料误差控制在 $\pm 0.8\%$ 以内, 骨料含水率实时监测误差 $\leq 0.5\%$ 。例如, 白鹤滩水电站大坝施工中, 通过安装微波水分测定仪, 实现骨料含水率在线监测, 配合AI算法自动修正配合比, 使胶材用量误差从1.2%降至0.5%, 单方混凝土成本节约3.6元。搅拌工艺参数优化需结合大坝温控需求。针对大体积混凝土易出现的温度裂缝问题, 强制式搅拌机需增设冷却水循环系统, 将搅拌水温控制在 $5-10^\circ\text{C}$ 。搅拌时间需根据骨料粒径动态调整: 当采用5-40mm连续级配骨料时, 搅拌时间延长至 120 ± 5 秒, 确保粉煤灰与水泥的二次水化反应充分。某水电站工程实践表明, 该措施使混凝土90天强度标准差由 4.5MPa 降至 2.8MPa 。此外, 施工过程动

态监测体系需贯穿始终。坍落度检测需采用激光坍落度仪,实现非接触式测量,在仓面设置3个以上检测点,确保全仓均匀性。含气量调控需根据大气温度动态调整引气剂掺量:夏季高温时段(>35℃)掺量提高0.02%,冬季低温(<5℃)时掺量降低0.01%。某溪洛渡水电站通过引入物联网含气量监测系统,实现每50m³混凝土自动校核含气量,使抗冻等级从F200提升至F300。

3.2 施工缝与层面处理

在水利工程大坝建设中,施工缝与层面处理直接影响坝体抗剪强度与整体性,需采用精细化工艺与智能监测技术协同管控。施工缝处理需实现“凿毛-清洁-键槽”全流程标准化。采用液压凿毛机对已浇筑面进行2-3cm深度凿毛,形成交错齿槽,清除松散颗粒后喷射压力水冲洗,直至骨料露出新鲜断面。对100m级大坝竖向施工缝,需植入Φ25螺纹钢形成键槽,间距1m×1m,注入环氧砂浆。层面处理需构建“界面强化-保湿养护-快速接续”技术体系。铺筑前采用智能喷淋系统对层面洒水,水量控制在1.2-1.5kg/m²,同步铺设2cm厚M30水泥砂浆,掺入0.8%聚羧酸减水剂提升流动性。此外,采用红外热成像仪监测表层含水率,使之保持在4%-6%,并铺设土工布保湿养护≥7天。对纵缝部位实施“预湿-铺砂-碾压”工艺:先喷洒厚度0.5cm饱和石灰浆,再铺2cm厚中粗砂,级配2-4mm,最后用振动碾以1.2km/h速度补压3遍。

3.3 压实度检测

压实度作为衡量碾压混凝土质量的关键指标,在整个施工过程中,压实度检测须全程贯穿。常用的压实度检测方法主要有灌砂法与核密度仪法。灌砂法通过测量一定体积试坑填满标准砂的质量,依据标准砂密度算出试坑体积,进而得出混凝土压实度。此方法操作简便,

结果一目了然,但检测速度欠佳。而核密度仪法借助放射性物质检测混凝土密度,检测迅速且操作便捷,不过使用时必须重视放射性物质的安全和周边环境的防护。检测结果能为施工提供重要参考。依据压实度检测的反馈,及时对碾压工艺参数做出调整,比如合理增减碾压遍数,适度调整碾压速度等,全力保障碾压混凝土压实度符合设计标准。若发现压实度未达标部位,必须进行补压或者重新施工。

结语:综上所述,碾压混凝土施工技术从材料特性与配合比设计的精准把控,到施工工艺流程的细致操作,再到施工质量的严格检测,每一个环节都紧密相连、不可或缺。随着高性能材料的应用、智能化施工技术的融合以及环保友好型施工技术的发展,碾压混凝土施工技术正不断创新与进步。

参考文献

- [1]林森森.水利工程施工过程中混凝土浇筑技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(26):208-210.
- [2]贺建宏.碾压混凝土在水利枢纽中的应用[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册).云南建投第一水利水电建设有限公司;云南省建设投资控股集团有限公司,2024:367-370.
- [3]张生武.水利工程大坝施工中碾压混凝土施工技术[J].水上安全,2024,(04):169-171.
- [4]蒋勇.水利工程大坝施工中碾压混凝土施工技术分析[J].低碳世界,2023,13(11):46-48.
- [5]杨猛,余超.水利工程中碾压混凝土大坝施工技术的应用[J].水上安全,2023,(04):182-184.