

碾压混凝土坝层间结合面施工质量保障

王帅勇

河南省水利第一工程局集团有限公司，河南郑州，450000；

摘要：碾压混凝土坝层间结合面作为坝体结构的薄弱环节，其施工水准直接左右坝体整体稳定性、抗渗效能及耐久性能，因此保障该部位施工质量，是碾压混凝土坝工程建设的核心关键。本文围绕碾压混凝土坝层间结合面施工质量管控展开研究，重点关注结合面粘结强度欠缺、层间渗水等典型质量隐患，明确施工全过程各关键环节的质量管控要点，优化施工工艺参数，提出针对性质量防控手段，破解层间结合面施工中的技术瓶颈，确保层间结合紧密、受力均衡，为碾压混凝土坝工程安全稳定运行提供可靠技术支持，进一步提升工程整体施工水准与服役年限。

关键词：碾压混凝土坝；层间结合面；施工质量；质量保障；抗渗性

DOI：10.69979/3060-8767.26.05.057

引言

碾压混凝土坝依托施工效率高、成本经济合理、建设周期紧凑等突出优势，已在水利水电工程建设领域获得广泛应用。层间结合面作为碾压混凝土坝施工的核心环节，是坝体分层碾压作业中自然形成的薄弱界面，其施工水准直接关联坝体抗渗效能、抗剪强度及整体承载能力，若出现结合不紧密、裂缝发育等问题，极易诱发坝体渗漏、结构失稳等安全风险，严重缩短工程服役年限。基于上述背景，本文围绕碾压混凝土坝层间结合面施工质量保障开展研究，衔接前文质量管控核心思路，进一步细化施工关键技术及防控措施，为破解实际工程中的层间质量难题提供实践指导，助力碾压混凝土坝施工质量的整体提升。

1 碾压混凝土坝层间结合面施工背景及工程意义

1.1 碾压混凝土坝的工程应用现状

碾压混凝土坝是当前水利水电工程建设中应用极为广泛的坝型，凭借施工工序简洁、机械化程度高、浇筑速度快、建设周期短以及综合造价低等突出优势，在大中型水利枢纽、防洪蓄水及水电开发项目中得到大量推广。该坝型采用分层摊铺、振动碾压的方式施工，具有工序连续、适用性强等特点，已成为水利工程选型中的重要方案。层间结合面是分层施工形成的天然界面，贯穿坝体竖向结构，直接关系坝体整体性、受力传递与防渗性能。由于结合面易受施工工艺、环境条件、间隔时间等多重因素影响，往往成为坝体结构中的薄弱部位，其质量控制水平也直接决定工程长期运行安全。

1.2 层间结合面施工的核心地位

碾压混凝土坝的层间结合面，并非简单的上下层混

凝土衔接界面，而是坝体内部受力传导、抗渗止水的核心关键节点，其施工质量与工艺水准，直接决定坝体整体力学性能、抗渗能力及耐久性能的优劣。相较于坝体其他构造部位，层间结合面受混凝土分层凝结特性、施工间隔时长、铺筑工艺差异、环境温湿度变化等多重因素影响，极易形成强度偏低、密实度不足的力学薄弱区域。这一薄弱区域不仅会影响坝体荷载的均匀传递，更易成为坝体渗漏、裂缝萌生与扩展的首要突破口，直接威胁坝体结构安全与长期运行稳定。因此，层间结合面施工质量的精准管控，是碾压混凝土坝施工全过程中的核心环节，更是保障工程整体质量的关键抓手。

1.3 层间结合面质量保障的工程意义

切实加强碾压混凝土坝层间结合面施工质量控制，能够有效预防层间粘结不足、渗水、裂缝等常见质量问题，保证坝体整体结构安全稳定，显著提升工程耐久性与服役年限^[1]。同时，优良的层间结合状态可有效提高坝体抗剪、抗渗及整体承载能力，确保水利枢纽在防洪、发电、灌溉等工况下持续稳定运行。通过构建系统完善的层间质量控制体系，不仅能解决实际施工中的技术难题，还可促进碾压混凝土施工技术的规范化与精细化发展，为同类工程提供可借鉴的实践经验，具有重要的工程应用价值与推广意义。

2 碾压混凝土坝层间结合面施工质量存在的问题及成因分析

2.1 层间结合面粘结强度不足

层间结合面粘结强度不足是碾压混凝土坝施工中最具代表性的质量通病，主要表现为层间结合松散、局部脱空剥离、接触面起砂脱灰等现象，直接破坏坝体受力的连续性，导致荷载传递不畅，严重影响结构整体稳定性与安全度。造成这一问题的核心原因是层间铺筑间

隔时间控制不合理,当下层混凝土已进入初凝甚至终凝阶段、表面硬化结壳后,上层混凝土未能及时摊铺,致使上下层无法有效胶结形成整体。此外,下层基面处理工序不到位,表面浮浆、松散颗粒、泥土杂物等清理不彻底,会形成薄弱隔离层,大幅降低界面粘结性能,最终造成层间粘结强度偏低,给坝体长期运行埋下结构性安全隐患。

2.2 层间渗漏水隐患突出

层间渗漏水是碾压混凝土坝施工中较为突出的质量问题,也是影响坝体长期耐久性的重要因素,主要表现为层间界面形成贯通渗水通道、坝体下游面出现明显渗水或漏水量偏大等情况。长期渗漏会造成混凝土内部胶凝材料溶蚀、骨料松动,甚至引发内部钢筋锈蚀,直接缩短工程服役年限。该问题的主要成因在于现场碾压密实度控制不足,施工速度与碾压遍数不匹配,使层间遗留孔隙、蜂窝等缺陷。同时混凝土配合比管控不严,骨料级配失衡、和易性偏差,也会导致界面密实度不足^[2]。再加上止水结构安装不规范、搭接密封不严密等问题,多重因素叠加,显著增大层间渗漏水风险,对坝体整体安全运行构成严重威胁。

2.3 层间裂缝隐患频发

层间裂缝是碾压混凝土坝施工与运行阶段较为突出的质量问题,裂缝形成后易在水压与温度作用下持续扩展,严重威胁坝体结构整体性与安全稳定,主要分为收缩裂缝和温度裂缝两种。收缩裂缝多产生于混凝土硬化过程,因上下层浇筑间隔、龄期差异导致收缩速率不同步,在界面处形成拉应力,当应力超过混凝土抗拉强度时便产生裂缝。温度裂缝则源于施工期温控措施缺失或不足,混凝土水化热散热不均,上下层温差过大引发显著温度应力,进而造成界面开裂。加之施工工艺把控不严、层面处理粗糙、后期养护不及时等问题,进一步加速裂缝萌生与扩展,直接影响坝体受力性能与长期运行安全。

3 碾压混凝土坝层间结合面施工质量保障技术及实施措施

3.1 优化施工工艺,强化层间粘结性能

针对层间粘结强度欠缺这一核心质量痛点,需以施工工艺优化为核心抓手,从铺筑衔接、表面处理、结合层布设及碾压作业等关键环节精准发力。严格把控上下层混凝土铺筑间隔时长,结合施工环境温度、混凝土凝结特性及配合比参数,科学测算并确定合理衔接时间,杜绝下层混凝土表面出现过度硬化、结壳现象,为上下层有效粘结奠定基础。铺筑作业开展前,必须对下层混凝土表面实施彻底清理,采用高压水冲洗工艺,全面清

除表面浮浆、残留杂物及松散颗粒,确保接触面达到洁净、粗糙的标准,增强上下层混凝土的粘结附着力^[3]。此外,可在下层混凝土表面铺设一层同配合比的水泥砂浆结合层,将厚度严格控制在 3-5cm 的合理区间内,进一步提升层间粘结效能,铺筑完成后立即采用高频振动碾开展碾压作业,确保碾压均匀、密实,使上下层混凝土紧密结合,形成整体受力体系,从根本上解决层间剥离、起砂等质量问题。见图 1 所示:



图1 优化施工工艺强化层间粘结流程

3.2 完善防渗措施,消除层间渗漏水隐患

为切实解决碾压混凝土坝层间易出现渗漏水的突出问题,从混凝土原材料控制、配合比设计、现场碾压施工及止水构造安装等多个维度构建全过程综合防渗体系。施工过程中严格把控混凝土配合比,根据工程实际条件科学优化胶凝材料用量、骨料级配比例与外加剂掺量,有效提升混凝土工作性能与成型后的密实程度,最大限度减少拌和、浇筑过程中产生的孔隙、蜂窝等易渗漏缺陷。碾压作业采用高频振动碾匀速施工,合理控制碾压遍数、行走速度及搭接宽度,确保层间结合区域充分压实,从结构上阻断潜在渗水通道。同时严格执行止水结构施工规范,选用耐久性与抗渗性能优良的止水材料,精准控制止水带埋设位置、高程及搭接长度,采用可靠方式固定以防偏移、扭曲或密封不严。通过多环节协同管控,显著降低层间渗漏水风险,全面提升坝体防渗能力,为坝体长期安全稳定运行提供可靠保障。

3.3 加强温控与裂缝防控,保障层间结构完整性

为有效控制层间裂缝产生、保持坝体结构完整连续,

需建立贯穿施工全过程的温度监测、动态调控与裂缝综合治理体系。施工阶段优先选用低热水泥,优化骨料级配与配合比参数,从材料源头降低水化热温升,减小温度应力对层间结合面的不利影响。施工中采用分层分块有序浇筑,合理控制分层厚度、浇筑强度及间歇时间,降低混凝土内外温差与上下层温差,同时及时覆盖保温保湿材料,延缓表面降温速度,避免因温度骤变产生收缩裂缝与温度裂缝。现场布设多点测温元件进行实时监测,根据温度变化动态调整养护方式、浇筑节奏与防护措施,提升温控方案的针对性与有效性^[4]。对施工中出现的浅层细微裂缝,及时采用压力灌浆进行封闭处理,填充内部空隙并抑制裂缝进一步扩展,确保层间结合面连续完整,显著提升坝体抗裂能力、结构安全性与长期运行稳定性。

4 碾压混凝土坝层间结合面施工质量保障措施的应用成效

4.1 层间粘结性能显著提升,筑牢坝体受力基础

通过优化碾压混凝土整体施工工艺、严格控制上下层铺筑间隔时间、精细化开展下层基面处理等多项质量保障措施,层间结合面的粘结状态得到显著改善,以往施工中常见的层间剥离、接触面起砂、结合松散等质量问题得到有效控制。经现场芯样检测与原位力学测试验证,层间粘结强度较传统施工方式大幅提高,上下层混凝土粘结更为密实牢固,可协同承受水推力、坝体自重及外部各类荷载,有效避免因层间粘结薄弱造成的应力集中与受力不均问题。同时,水泥砂浆结合层的合理铺设与充分碾压,进一步提升了层间连续性与整体工作性能,使坝体内部传力路径更加连续顺畅,结构刚度与承载能力显著增强,为碾压混凝土坝长期安全稳定运行、抵御复杂工况荷载提供了坚实可靠的受力保障。

4.2 层间防渗能力全面增强,消除渗漏安全隐患

通过优化混凝土配合比、改进碾压施工工艺以及精细化布设止水构造等综合防渗措施,层间渗水通道得到有效封堵,坝体整体抗渗能力实现大幅提升。施工过程中严格把控骨料级配、胶凝材料比例及外加剂掺量,配合高标准碾压作业,有效减少层间蜂窝、孔隙及松散薄弱区域,让结合面更加致密均匀,从源头切断渗漏产生的条件^[5]。同时严格执行止水结构安装标准,精准控制止水带埋设位置、高程与搭接长度,确保固定牢固、密封可靠,避免因安装偏差形成渗漏通路。工程应用效果显示,经多环节、全过程防渗质量控制后,层间抗渗指标均满足设计及规范要求,可有效防止渗水对坝体混凝土产生侵蚀、溶蚀与内部淘刷,避免结构性能持续劣化,彻底消除渗漏带来的安全隐患,显著提升坝体运行稳定性与长期耐久性。

4.3 层间裂缝得到有效防控,保障坝体结构完整

建立全过程温度控制与裂缝综合防控体系后,层间收缩裂缝与温度裂缝得到显著抑制,层间结合面的结构连续性与完整性得到充分保障。施工中通过优选低热混凝土原材料、精细化优化配合比设计,结合分层分块有序浇筑、及时覆盖保温保湿养护层等措施,有效控制混凝土水化热温升幅度,减小内外温差及上下层混凝土温差,从源头降低温度应力与收缩应力引发的开裂风险。依托现场实时在线温度监测系统,动态调整养护措施与施工节奏,使温控方案更具针对性与可操作性,最大限度减少裂缝萌生。对施工阶段出现的细微裂缝及时采用压力灌浆等工艺进行修补封闭,阻止其在运行期持续扩展,避免层间结合面受力与防渗性能下降。整套防控措施有效保障坝体结构稳定,延长工程服役年限,为水利枢纽防洪、发电等核心功能持续可靠运行提供坚实保障。

5 结语

本文围绕碾压混凝土坝层间结合面施工质量保障开展系统研究,阐述了其工程背景、实践意义及坝体核心地位,深入分析了层间粘结强度欠缺、渗漏水、裂缝等典型质量问题及成因,明确施工管控痛点。在此基础上,针对性提出优化施工工艺、完善防渗防控、强化温控与裂缝治理三大类保障技术,并细化实施流程与要点。通过成效分析,验证了各项措施在提升层间粘结效能、增强防渗能力、遏制裂缝隐患方面的有效性。本文完善了层间结合面施工质量管控体系,破解了实际施工核心技术瓶颈,为同类工程提供实践参考,助力提升碾压混凝土坝施工质量,保障水利水电工程长期安全稳定运行。

参考文献

- [1] 杨学舟. 碾压混凝土坝浇筑过程中层间结合质量控制及抗裂措施[J]. 新发现, 2025, (16): 82-84.
- [2] 陶其礼, 刘艳, 闫浩静, 等. 宁利水库碾压混凝土层间结合工艺[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 云南润诺建筑工程检测有限公司; , 2023: 228-232.
- [3] 陈红娟. 外部因素对碾压混凝土层间抗裂性能的影响[J]. 东北水利水电, 2023, 41(05): 36-37+49.
- [4] 柴嘉启. 碾压混凝土层面处理方式对层间力学及抗冻性能影响研究[D]. 西安理工大学, 2024.
- [5] 柳波, 曾祥超, 但鑫陆. 碾压混凝土坝层间开裂过程模拟[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(04): 14-20.

作者简介: 王帅勇(1994-)男, 民族: 汉, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 水利水电。