

碾压混凝土坝快速施工工艺与质量控制研究

李 华

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 碾压混凝土 (Roller Compacted Concrete, RCC) 坝因其施工速度快、水泥用量少、温控防裂性能好、经济性显著等优势, 在全球范围内得到广泛应用。然而, RCC坝在追求高效快速施工的同时, 其层间结合质量、温度裂缝控制、施工过程稳定性等问题对工程质量构成潜在威胁。本文系统梳理了RCC坝的核心施工工艺流程, 重点分析了快速施工条件下影响质量的关键因素, 并提出了针对性的质量控制策略。研究认为, 通过优化配合比设计、强化仓面管理、实施全过程温控措施、引入智能化监控技术以及完善质量检测体系, 可有效实现RCC坝快速施工与高质量建设的有机统一。研究成果可为类似工程提供理论参考与实践指导。

关键词: 碾压混凝土坝; 快速施工; 施工工艺; 质量控制; 层间结合; 温控防裂

引言

随着全球水资源开发与能源需求的持续增长, 大坝作为重要的水利枢纽工程, 在防洪、供水、灌溉、发电等方面发挥着不可替代的作用。传统常态混凝土重力坝施工周期长、温控难度大、成本高, 难以满足现代工程建设对效率与经济性的双重诉求。在此背景下, 碾压混凝土 (RCC) 筑坝技术应运而生并迅速发展。自20世纪80年代初日本建成世界首座RCC坝——岛地川坝以来, 该技术凭借其“干硬性、薄层铺筑、振动碾压”的核心特点, 实现了混凝土坝施工方式的革命性变革。我国自1986年建成第一座RCC坝——福建坑口坝以来, 已建成数百座RCC坝, 包括龙滩、光照、黄登等世界级高坝, 积累了丰富的工程经验。RCC坝的快速施工能力尤为突出, 日上升速度可达0.5~1.0米甚至更高, 显著缩短了工期。然而, “快”并非无条件的追求。在高速施工节奏下, 若质量控制措施不到位, 极易引发层间冷缝、渗漏通道、内部缺陷及温度裂缝等质量问题, 严重威胁大坝结构安全与长期耐久性。因此, 如何在保障施工速度的同时, 确保RCC坝的工程质量, 成为当前水利水电工程领域亟待解决的关键课题。

1 碾压混凝土坝快速施工核心工艺

RCC坝的快速施工建立在一套高度集成化、流水线化的作业体系之上, 其核心工艺主要包括原材料准备、拌和、运输、摊铺、碾压及层面处理等环节。

1.1 原材料选择与配合比优化

碾压混凝土区别于常态混凝土的根本特征在于其干硬性, 通常以维勃稠度 (VB值) 控制在5至25秒之间。为了保证施工效率的同时兼顾结构性能, 配合比设计必须在工作性、强度、耐久性与经济性之间取得平衡。

胶凝材料体系通常大量掺入粉煤灰、矿渣粉等工业副产品, 不仅有效降低了水泥用量 (一般仅占胶凝材料总量的30%至50%), 还显著减少了水化热释放, 从而改善了温控条件并提升了后期密实度。骨料则需采用连续或间断级配, 并严格控制超径与逊径颗粒含量, 以确保混合料具有良好的填充性和低孔隙率。此外, 高效减水剂是必不可少的组分, 它能够在低水胶比条件下赋予混凝土必要的施工流动性; 缓凝剂的加入则可延长初凝时间, 为大规模仓面作业和长距离运输争取宝贵的时间窗口。这种多组分协同优化的配合比设计理念, 是RCC实现快速、优质施工的技术基础。

1.2 高效拌和与运输系统

拌和与运输环节直接决定了RCC施工的连续性与节奏稳定性。拌和站需具备高产能 (通常不低于300立方米/小时) 和高可靠性, 强制式搅拌机因其对于干硬性混凝土优异的混合均匀性而成为主流选择。在运输方面, 传统依赖自卸汽车的方式虽灵活但效率受限且易造成仓面干扰, 尤其在高坝工程中更为明显^[1]。因此, 越来越多的项目采用“皮带机+转运车”的复合运输模式。皮带机系统能够实现混凝土从拌和楼到仓面的连续、低扰动输送, 大幅减少车辆调度压力, 提升物流效率, 并有效避免因频繁倒车、卸料造成的摊铺不均或离析现象。这种高效、稳定的物流保障, 是RCC坝实现日均数千立方米浇筑强度的关键支撑。

1.3 薄层连续摊铺与碾压

摊铺与碾压是RCC快速施工的核心作业环节, 其本质是通过机械手段实现混凝土的快速成型与密实。施工中通常将RCC按30至35厘米的厚度进行摊铺, 由大型推土机或专用摊铺机完成初步整平。随后, 重型振动碾

(自重常达10吨以上)紧随其后进行压实作业,碾压遍数一般为6至8遍,具体参数需通过现场压实试验确定。整个过程强调“连续、快速、均匀”,任何中断都可能形成施工冷缝。为此,工程实践中普遍采用“斜层平推法”或“台阶法”进行仓面组织,将大面积作业面划分为若干平行条带,各工序在不同条带上依次推进,形成高效的流水作业线。这种高度协同的机械化施工模式,使得RCC坝能够在极短时间内完成大体积混凝土的浇筑与成型,充分体现了其“快速”的核心优势。

1.4 层面处理与间歇控制

RCC坝由数百乃至上千个薄层逐层碾压叠加而成,其整体性高度依赖于层与层之间的有效结合。在快速施工条件下,层间间隔时间(Interlift Interval Time, IIT)的控制至关重要。理想状态下,上层混凝土应在下层初凝前覆盖并碾压,形成所谓的“热缝”,此时新旧混凝土界面能实现良好的物理化学粘结,层间强度接近本体强度。然而,一旦因设备故障、组织协调不畅或恶劣天气导致覆盖延迟,IIT超过初凝时间,便会形成“冷缝”。冷缝界面存在泌水膜、浮浆层或微裂缝,显著削弱层间抗剪与抗渗能力^[2]。因此,施工中必须制定严格的层面处理规程:对于热缝,应及时清除表面泌水和杂物;对于不可避免的冷缝,则需在覆盖前铺设一层富浆砂浆或喷洒专用界面剂,并加强该区域的碾压能量,以最大限度恢复层间粘结性能。这种对时间窗口的精准把控和对界面状态的主动干预,是确保RCC坝结构整体性的关键所在。

2 快速施工条件下的主要质量风险分析

尽管RCC工艺具有诸多优势,但在追求极致速度的过程中,若干质量风险被显著放大。

2.1 层间结合不良与渗漏风险

层间结合质量是RCC坝安全的生命线,也是快速施工中最易受损的环节。当施工组织不力导致层间覆盖时间过长,或仓面管理粗放致使层面被雨水浸泡、杂物污染、乳皮未清理时,新旧混凝土之间便难以形成有效粘结。这种结合不良不仅会显著降低坝体的水平抗剪强度,更会在水库蓄水后成为优先的渗流通道。由于RCC本身渗透性相对较高,若层间再存在连续的薄弱面,渗漏路径将迅速贯通,不仅造成水量损失,还可能诱发管涌、溶蚀等渗透破坏,严重威胁大坝的长期安全运行。因此,层间结合问题绝非单纯的施工瑕疵,而是关乎工程成败的核心质量隐患。

2.2 温度裂缝控制难题

虽然RCC因低水泥用量而具有较低的绝热温升,但其导热系数小、散热缓慢的特性,加之快速连续浇筑带

来的热量持续累积效应,使得坝体内部温度仍可能达到较高水平。尤其是在夏季高温季节或高坝工程中,内外温差极易超过混凝土的抗拉极限,从而在坝体表面或内部产生温度裂缝。这些裂缝一旦形成,不仅削弱结构的整体性和承载能力,更会成为水分子渗透的捷径,加速混凝土碳化、钢筋锈蚀(如存在)及冻融破坏等劣化过程。快速施工虽缩短了总工期,但也压缩了温控措施的响应时间,使得温度场的动态调控更加复杂和紧迫,对温控方案的预见性与执行力提出了更高要求。

2.3 压实度不均与内部缺陷

RCC的压实质量直接决定其力学性能与耐久性。在实际施工中,由于仓面面积广阔、地形复杂,加之模板边缘、廊道周边、止水片附近等区域存在碾压盲区,极易出现局部压实不足的情况。此外,若摊铺不平整或运输过程中发生骨料离析,也会导致混凝土内部密度分布不均,形成孔洞、架空等隐蔽缺陷。这些缺陷虽在表面难以察觉,却会显著降低局部区域的强度和抗渗能力,成为结构中的薄弱点。在快速施工节奏下,碾压作业往往追求效率而忽视细节,使得此类质量问题的发生概率进一步增加,对后续的质量检测与评估构成了严峻挑战。

2.4 施工组织协调挑战

RCC快速施工本质上是一个多工种、多设备、高强度协同的复杂系统工程。从拌和站出料、运输车辆调度、仓面摊铺整平,到振动碾压、层面处理,每一个环节都紧密相扣,形成一条高速运转的“生产线”。任一环节出现延误或失误——如拌和站故障、运输道路堵塞、碾压设备掉队——都可能引发连锁反应,打乱整个施工节奏。一旦节奏被打断,不仅直接影响当日浇筑方量,更可能导致层间冷缝的产生,进而触发一系列质量风险。因此,高效的施工组织、训练有素的作业队伍、完善的应急预案以及强有力的现场指挥体系,是保障RCC快速施工顺利推进并维持高质量水平不可或缺的实力支撑。

3 碾压混凝土坝质量控制关键技术与策略

针对上述风险,须构建覆盖“事前预防、事中控制、事后检验”全过程的质量控制体系。

3.1 事前控制:设计与准备阶段

质量控制的源头在于科学的设计与充分的准备。首先,配合比设计必须超越简单的强度指标,转向多目标优化。通过系统的室内试验与现场模拟,综合考量施工性(维勃稠度)、力学性能(抗压、抗拉强度及弹性模量)、热学性能(绝热温升值)以及长期耐久性,最终确定最优配比方案。特别是对初凝时间的精确调控,是

为快速施工预留合理时间窗口的关键。其次,原材料的质量稳定性是配合比效果得以实现的前提。必须建立严格的供应商准入机制和批次检验制度,对水泥活性、粉煤灰细度与烧失量、骨料级配与含泥量、外加剂相容性等关键指标进行全链条监控^[3]。最后,详尽的施工组织设计是将技术方案落地的蓝图。应编制专项RCC施工方案,明确设备选型与配置、工艺流程与节拍、人员分工与职责,并利用BIM等数字化技术进行施工全过程模拟,提前发现并解决物流冲突、空间干涉等问题,为现场高效协同奠定坚实基础。

3.2 事中控制:施工过程精细化管理

施工过程是质量形成的决定性阶段,必须实施精细化、动态化的管理。仓面作为所有工序的交汇点,应设立专职指挥员,实时监控各环节进度与衔接状态,确保“一条龙”作业无缝对接,将从卸料到碾压完成的全过程严格控制在混凝土初凝时间之内。层面处理必须标准化、程序化,无论热缝还是冷缝,都应有明确的操作规程和验收标准。全过程温控体系的构建尤为关键:在夏季,可通过骨料预冷、加冰拌和等手段降低入仓温度;在浇筑过程中及之后,通过预埋冷却水管进行分期通水冷却,主动导出内部热量;同时,在碾压完成后立即覆盖保温保湿材料,以减小内外温差,抑制表面裂缝的产生^[4]。此外,引入基于北斗/GPS的智能碾压监控系统,可实时采集碾压轨迹、遍数、激振力等数据,自动生成碾压质量电子地图,精准识别漏压、欠压区域,实现碾压作业从“经验判断”向“数据驱动”的转变,极大提升了过程控制的客观性与可靠性。

3.3 事后控制:质量检测与评估

施工完成后的质量验证是闭环管理的最后也是最重要的一环。压实度是衡量RCC密实程度的核心指标,通常采用核子密度仪进行快速无损抽检,并辅以钻孔取芯进行校准,确保相对密度不低于98%。对于层间结合质量,需专门钻取跨越层面的芯样,通过劈裂抗拉或直剪试验,定量评估其粘结强度是否满足设计要求。温度监

测则通过在坝体内预埋的分布式光纤或热电偶传感器网络,构建三维温度场数据库,为温控效果评估和后期运行安全分析提供依据。对于可能存在内部缺陷的区域,可应用地质雷达(GPR)或超声波层析成像(CT)等无损检测技术进行精细探测。所有这些检测数据,连同施工过程中的原材料记录、配合比通知单、设备运行日志等,都应汇编成完整的质量追溯档案,实现工程全生命周期的质量可查、可溯、可控。

4 结语

碾压混凝土坝的快速施工是现代水利水电工程发展的必然趋势,但其“快”必须建立在坚实的“质”的基础之上。本文研究表明,RCC坝的质量风险主要集中在层间结合、温度裂缝、压实均匀性及施工组织协调等方面。通过系统性的质量控制策略——即以优化的配合比设计为前提,以精细化的仓面管理和全过程温控为核心,以智能化监控与无损检测为手段,完全可以化解快速施工带来的质量挑战。未来,RCC坝的质量控制将朝着更加智能化、绿色化、精准化的方向发展。人工智能、物联网、数字孪生等新一代信息技术的深度融合,将使施工过程从“经验驱动”迈向“数据驱动”;新型低碳胶凝材料(如碱激发材料、硫铝酸盐水泥)的应用,将进一步提升RCC的可持续性;而基于性能的设计理念也将推动质量控制标准从“符合性”向“功能性”转变。

参考文献

- [1]武孔学.碾压混凝土大坝快速施工研究与应用[J].陕西水利,2023,(11):187-189.
- [2]王国飞,姚鹏飞.100 m级碾压混凝土拱坝快速施工方法研究[J].工程与建设,2023,37(04):1249-1251.
- [3]韩国松,杨海燕,姜一天,等.官地水电站大坝碾压混凝土快速施工关键技术[J].山西建筑,2020,46(18):179-181.
- [4]刘禹博.水利施工中碾压混凝土施工技术分析[J].水与水技术,2025,(00):214-215.