

大型均质坝高效填筑施工工艺及现场管理

方 超

中国水利水电第九工程局有限公司 贵州 贵阳 550081

摘 要：大型均质坝填筑施工具有工程体量巨大、作业面时空约束强、质量指标敏感性强等显著特征，传统施工模式常因工艺参数选取粗放、管理响应滞后于现场变化，导致施工效率与压实质量之间的矛盾突出。本文立足系统思维，首先剖析大型均质坝填筑的施工特点与核心难点，进而从料场动态备料、分区流水铺填、碾压参数实时优化及接缝结合部专项处置四个维度构建高效施工工艺体系，并围绕资源调配调度、全层位质量检测、风险防控及信息化辅助决策提出现场管理的关键措施。研究认为，工艺优化侧重提升单机作业效率与工序衔接流畅度，管理强化则致力于减少无效时间损耗与质量偏差，二者协同方能实现填筑速度与压实质量的双重保障。本文成果可为同类工程的设计施工及现场组织提供参考。

关键词：均质坝；填筑施工；碾压参数优化；施工管理；质量控制

引言

均质坝因坝体材料单一、结构受力明确、对地基适应性良好且施工经验成熟，在中低水头水利枢纽及堤防工程中得到广泛应用。近年来，随着坝体高度向百米级发展、填筑总量突破千万立方米，施工工期和资源投入压力陡增，高效填筑成为工程建设的核心诉求。高效填筑并非单纯追求速度，而是要求在保证压实度、均匀性、层间结合质量及防渗性能的前提下，最大限度地缩短每层填筑循环时间，提高有效作业时长占比。然而，实际施工中普遍存在三方面制约：其一，料源含水率受降雨和蒸发影响波动剧烈，导致碾压参数需频繁调整；其二，坝面作业空间随高程升高而逐步收缩，大型机械调头、错车难度增大，效率降低；其三，质量检测结果反馈滞后，往往在问题累积多层后才启动纠偏，造成返工损失。因此，亟需构建一套将工艺细化与现场管理紧密耦合的高效施工体系。本文不依赖具体工程数据，而是从施工组织原理和方法论层面进行系统论述，力求提炼出具有普适指导意义的技术与管理框架。

1 大型均质坝填筑施工特点与难点

1.1 施工特点的系统梳理

大型均质坝填筑施工的特点可从体量、时序、环境、质量四个维度加以认识。体量维度：填筑方量动辄数百万立方米，高峰期日填筑强度常要求在1.5万~3.0万 m^3 之间，意味着每天需要完成数百车次运输、数万平方米摊铺和碾压作业，物流和组织流高度密集^[1]。时序维度：填筑沿坝高逐层上升，每层作业面面积随高度增加而阶梯式缩减，前期底宽大、可展开多个作业面平行施工，后期顶部狭窄、仅能维持单工作面顺序作业，施工

节奏呈“前快后慢”的自然规律，要求前期抢出富余工期。环境维度：均质土料对含水率极为敏感，最优含水率附近 $\pm 1\%$ 的偏差即可能造成压实度显著下降，而施工期不可避免遭遇晴雨交替、昼夜温差，露天作业环境下含水率控制难度极大。质量维度：坝体一旦建成，内部缺陷难以修复，每一层的压实质量、层间结合强度均属隐蔽工程范畴，必须做到“层层面面可追溯”，对过程记录 and 即时检测提出极高要求。

1.2 制约高效施工的核心难点解析

将上述特点转化为工程语言，高效施工面临三项核心矛盾。第一，进度驱动力与质量保障力之间的张力：为追赶工期，现场常倾向于增大铺层厚度、减少碾压遍数、缩短刨毛洒水时间，这些行为虽能短期内提高日填筑量，却可能留下压缩变形大、渗透系数偏高的隐患，而坝体填筑的质量后果具有滞后显现特征，事后补救代价高昂。第二，施工参数的静态设计与现场动态条件之间的矛盾：碾压试验通常在施工前于特定料源和气候条件下完成，得出推荐参数，但实际施工中料源开采部位变化、土料级配波动、气温风速影响蒸发速率，固定参数难以适配所有场景，需要现场快速调整能力，而多数项目缺乏简便有效的调参工具和判定准则。第三，多工序交叉作业的空间冲突：填筑面上，卸料、摊铺、碾压、检测、削坡、排水管理设、监测仪器安装等工序须同时或交替进行，机械行走路线相互干扰，若交通组织不善，有效碾压时间占比可降至50%以下。破解上述矛盾，必须从工艺改进（减少工序耗时、提升单次合格率）和管理升级（压缩等待时间、提高决策响应速度）两条主线同步推进。

2 高效填筑施工工艺体系

2.1 料场规划与备料工艺

高效填筑的前提是料源供应连续且质量稳定。料场规划应遵循“先勘后采、分区开采、动态平衡”原则，根据坝体填筑强度确定料场开采能力和储备系数，通常设置不少于三个备采区以应对含水率调整需求。备料工艺中，重点控制土料天然含水率与最优含水率的偏差，偏差超出 $\pm 2\%$ 时需采取翻晒或洒水闷料措施。为提升备料效率，可采用“条带式开采+堆土预存”模式，即在料场分区内按条带顺序开采，同时预留一定比例的堆存土料作为雨期或含水率异常时的调节库容。运输道路布置应避免与坝面施工干扰，宜设置专用上坝道路，并依据运距优化自卸汽车型号与数量配比，确保卸料节奏与摊铺设备能力匹配。

2.2 填筑分区与层厚控制

合理划分填筑区段是实现流水作业、减少机械空转的核心手段。通常将坝面沿坝轴线方向划分为若干施工段，每段长度控制在50~80m，段内再按卸料、摊铺、碾压、质检四道工序形成连续作业链。相邻区段之间设置搭接带，宽度不小于1.0m，防止漏压。层厚控制直接决定压实效果与施工速度，规范规定的松铺厚度一般为30~50cm，但高效施工中可依据碾压机械激振力适当加厚至45~55cm，同时必须通过现场碾压试验验证^[2]。为保障层厚均匀性，应采用“网格布点+标杆控制”方法，即在坝面按5m×5m网格埋设可调式层厚标杆，摊铺机或推土机按标杆高度整平，辅以激光测距仪抽检。每层填筑完成后，实测压实厚度与松铺厚度之比即为松铺系数，用于动态修正下一层的标杆高度。

2.3 碾压施工参数优化

碾压是填筑质量形成的核心环节，也是工艺优化的重点。高效碾压要求合理匹配碾重、碾压速度、振动频率、振幅及碾压遍数。对于大型均质坝，推荐采用20~25t自行式振动碾，碾压速度控制在2.0~3.0km/h，振动频率25~30Hz，振幅1.8~2.2mm。碾压遍数并非越多越好，过量碾压反而破坏土体结构，一般设定为静碾1遍、振碾4~6遍、再静碾1遍收面。关键优化策略在于“错距碾压”与“搭接碾压”的结合——错距即相邻碾压轮迹重叠宽度不小于轮宽的1/3，搭接即相邻碾压带之间重叠0.3~0.5m，确保无薄弱带。此外，应建立碾压参数实时反馈机制，即每完成一个施工段后，立即采用核子密度仪或灌砂法检测压实度，若未达设计值，则依据检测结果微调下一段的碾压遍数或振幅，实现“以检促调、以调保质”。

2.4 接缝与岸坡结合部位处理

坝体接缝（包括纵向施工缝、横向分期缝）及坝体与岸坡结合面是渗流和变形破坏的易发部位，其处理工艺直接决定坝体整体性。对于水平层间结合，上一层面经碾压后需进行刨毛处理，刨毛深度不小于1.5cm，并洒水至含水率接近最优值，然后铺筑新料，确保层间紧密咬合。对于岸坡结合面，需清除表层松动岩块，开挖成台阶状，台阶宽度不小于1.0m、高宽比以1:2为宜，填筑时第一层土料厚度适当加大并采用小型夯具加强边角碾压。纵向施工缝处应留设缓坡，坡比不陡于1:3，结合前将旧面刨毛并涂刷泥浆，泥浆水灰比控制在1:3左右。为提高接缝处理效率，可配置专用刨毛机和泥浆喷涂设备，减少人工操作时间，同时将接缝处理纳入碾压作业的固定工序，避免遗漏。

3 现场管理关键措施

3.1 进度与资源配置动态管理

高效填筑依赖于资源投入与施工进度精确匹配。现场管理应以日填筑强度为目标，倒推所需的自卸汽车数量、推土机台数、振动碾台数以及操作人员班次。建立“日计划—半日调度—小时跟踪”的三级进度管控机制，即每日晨会发布当日填筑计划，午间根据实际完成量调整下午设备调配，每小时由现场调度员统计卸料车次与碾压面积。资源配置方面，采用“设备备用冗余”原则，关键机械（如振动碾）配备不少于两台备用机，避免因故障导致全线停工。同时，推行“两班倒”或“三班倒”连续作业，但须保证每班交接时对碾压遍数、含水率等关键数据进行书面交接，避免因换班造成质量盲区。

3.2 质量检测与过程控制管理

质量管理的核心在于从“事后验收”转向“过程预控”。现场应设置专职质量检测组，按“每层必检、每段抽检”的原则开展检测工作。具体而言，每填筑一层，在压实后采用核子密度仪快速检测干密度，检测点按每200m²不少于1个的密度布设，同时取土样进行含水率测定。若检测合格率低于95%，则该段应立即补碾或挖除重填^[3]。过程控制还需建立“质量状态标识”制度，即在已完成且检测合格的区段插绿旗，待检区插黄旗，不合格区插红旗，使全场施工人员一目了然。此外，应保留完整的检测记录，绘制压实度随填筑高程变化的趋势曲线，一旦出现连续下降趋势，立即启动原因排查（检查是否料源变化、碾压设备性能衰减等），做到“早发现、早纠偏”。

3.3 安全施工与环境管理

大型均质坝填筑现场机械密集、交叉作业频繁,安全管理必须严于常规。核心措施包括:划定明确的“人机分离”作业区,所有人员佩戴定位标签,机械运行半径内禁止非操作人员进入;制定“车辆行驶限速与避让规程”,上坝道路设置单向循环路线,避免会车拥堵;夜间施工配备充足照明,每台碾压机械安装倒车影像及声光报警器。环境管理方面,重点管控扬尘和噪声。施工道路应定时洒水降尘,土料装卸过程中控制卸料高度以减少扬尘,振动碾压作业时间避开居民休息时段,必要时设置临时隔声屏障。对于施工废水及生活污水,须收集处理后回用或达标排放,不得直接排入坝下游河道。

3.4 信息化与智能管理手段

现代信息技术为现场管理提供了高效辅助工具。建议建立填筑施工数字化管理平台,集成GPS定位、物联网传感器与数据库系统。具体应用包括:在每台振动碾上安装GPS定位终端和碾压轨迹记录仪,实时生成碾压遍数热力图,直观显示漏压或过压区域,管理人员通过移动终端即可远程监控。同时,将料场开采量、运输车次、坝面摊铺面积、检测合格率等数据自动上传至平台,形成“施工—检测—分析—调整”的闭环管理^[4]。智能化手段还包括基于含水率传感器的自动洒水系统——在摊铺后、碾压前,通过插入式湿度探头实测表层30cm范围内含水率,若低于最优含水率,则自动启动喷雾装置进行补充洒水,直至达标。信息化管理的最终目标是实现施工过程的“透明化”和“可追溯性”,为后期运维提供完整的数据档案。

4 高效填筑的综合保障机制

工艺和管理要真正落地,还需建立三道保障机制。第一是技术交底与培训机制:每班开工前由技术负责人进行5~10分钟的班前交底,重点强调当日含水率控制目标、碾压遍数要求和特殊部位处理要点,并定期组织操作手进行技能考核。第二是考核激励机制:将填筑质量、施工速度、安全记录三项指标与班组绩效挂钩,设立“质量之星”“进度先锋”等奖励,激发一线人员的

主观能动性。第三是应急响应机制:针对极端天气(暴雨、大风)、机械故障、料源异常等突发事件,提前制定应急预案,例如暴雨来临前配备足够覆盖面积的防雨布,机械故障时启动备用机并外协维修力量现场待命,料源异常时启用在备料区预存的调整土料。只有将上述机制常态化,才能确保高效填筑不会因偶然因素而中断,实现稳产高产。

结束语

大型均质坝高效填筑是一项涉及材料、机械、工艺、管理、环境等多因素的综合性工程活动,其核心在于以最少的资源消耗和最短的循环时间获得稳定可靠的压实质量。本文从施工特点和难点出发,系统提出了包括料场动态规划、分区流水层厚控制、碾压参数精细调整、接缝专项处理在内的工艺优化路径,以及包括资源调度、质量纠偏、安全环保、信息化辅助在内的现场管理措施,进而构建了培训、考核、应急、协调四位一体的保障机制。工艺和管理如同车之两轮,缺一不可;工艺优化解决“怎么做得好”的问题,管理强化解决“怎么能持续做得好”的问题。当前,智能建造技术快速发展,未来无人碾压、机器视觉层厚识别、数字孪生坝体模拟等手段有望将高效填筑推向新高度,但无论技术如何演进,对施工规律的深刻理解和现场细节的严格把控始终是质量安全的基石,也是每一位工程技术人员应持之以恒的追求。

参考文献

- [1]张宏远,王振宇.大型土石坝填筑碾压参数优化方法研究[J].水利水电技术,2022,53(4):78-85.
- [2]李明辉,陈志刚,赵海涛.均质土坝施工质量全过程控制技术进展[J].岩土工程学报,2023,45(增刊1):212-218.
- [3]王志强,刘建国.基于物联网的填筑工程现场管理信息系统开发[J].水力发电学报,2021,40(9):102-110.
- [4]陈思远,吴国华.高土石坝填筑层厚与压实度相关性试验研究[J].人民黄河,2024,46(2):56-61.