

水利工程施工中土石方作业技术的理论与实践

王细金

南昌市新建区河道圩堤维护中心, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/WCEST.2024090008

摘 要 : 在现代水利工程建设过程中, 土石方作业既是工程实体形成的物质载体, 又是决定项目经济指标的关键变量。作为连接设计蓝图与实体建筑的转化界面, 该工序承载着地形重塑、地基处理、防渗体系构建等多重功能目标。随着我国水资源配置工程向地质条件复杂区域延伸, 传统施工范式正面临岩土力学特性突变、生态保护红线约束、极端气候频发等复合挑战, 这种现实矛盾倒逼着施工技术体系必须实现从经验驱动向数据驱动的模式转换。

关 键 词 : 水利基础设施; 土石平衡; 机械联合作业; 地质适配性; 过程控制

Theory and Practice of Earthwork Operation Technology in Water Conservancy Engineering Construction

Wang Xijin

Nanchang New District River embankment Maintenance Center, Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : In the construction of modern water conservancy projects, earthwork and rock excavation serve as both the material foundation for the formation of the project's physical structure and a critical factor in determining its economic performance. Acting as the interface between design plans and the actual construction, this process is responsible for multiple functions, including terrain reshaping, foundation treatment, and the establishment of waterproofing systems. As China's water resource allocation projects expand into areas with complex geological conditions, traditional construction methods are facing challenges such as sudden changes in soil mechanics, ecological protection red lines, and frequent extreme weather events. These real-world challenges compel the construction technology system to shift from being data-driven to being experience-driven.

Keywords : water conservancy infrastructure; earth and rock balance; mechanical joint operation; geological adaptability; process control

二十世纪后期大规模水利建设积累的土石方施工经验, 在应对常规地质条件时已形成相对稳定的技术路径。然而当工程选址逐步向喀斯特地貌区、强震断裂带、深厚覆盖层区域推进时, 既有的土方开挖系数、石方爆破参数、压实度控制标准等基础数据频繁出现系统性偏差^[1]。这种偏差不仅造成施工成本的非线性增长, 更潜藏着边坡失稳、基础沉降等重大风险。特别是近年来绿色施工理念的强制性推广, 要求作业过程必须同步解决弃渣场生态修复、施工扬尘动态控制等新命题, 这使得传统以机械效能最大化为导向的施工组织模式面临多维重构压力^[2]。在此背景下, 如何建立兼顾施工效率与风险防控的技术决策系统, 已成为制约现代水利工程高质量发展的瓶颈问题^[3]。

一、水利工程施工中土石方作业技术应用的基础理论

(一) 岩土力学特性与施工荷载耦合机理

土石方作业技术的理论根基建立在岩土材料力学响应与施工荷载的动态平衡之上, 不同地质构造中的土层与岩体在挖掘、运输、压实过程中呈现差异化的应力应变特征, 这种材料属性与外部作用力的相互作用直接决定了施工工艺的选择边界^[4]。岩土体的内摩擦角、粘聚力、渗透系数等固有参数构成了施工可行性分

析的基准指标, 在制定开挖边坡角度或填筑碾压方案时, 必须将土石混合料的颗粒级配、含水率波动范围纳入力学计算模型, 特别是在遭遇断层破碎带或软弱夹层区域时, 需要依据莫尔-库仑强度准则重新评估临时支护结构的承载能力。施工机械的动荷载传递路径与岩土介质蠕变特性的匹配程度同样是理论研究的重点领域, 当振动碾压设备的激振频率接近土体固有频率时可能引发共振效应, 此时需通过调整行进速度与碾压遍数形成新的能量耗散机制^[5]。

（二）土石方量动态平衡与调配路径优化模型

工程区域内土石方的挖填平衡不仅涉及几何体积的简单匹配，更需要建立考虑运输损耗、压实系数、临时堆存损耗等多因素影响的动态计算体系。基于三维地形曲面拟合技术生成的数字高程模型，可将地表起伏特征转化为土方量的空间分布函数，配合地质勘探数据中的岩层产状信息，能够预判不同施工阶段的开挖难度系数与石方占比变化规律^[6]。运输路径优化理论需要综合机械转向半径、爬坡能力、重载下坡制动性能等参数，运用图论中的最短路径算法构建包含时间成本与燃油消耗的多目标规划模型。

（三）地质环境与施工工艺的适配性判据体系

不同成因类型的地质单元对土石方作业技术存在选择性适应的内在规律，冲积平原区的粉细砂层与冰川堆积区的漂石层在施工工艺选择上表现出截然不同的技术路线。第四纪松散沉积物的空间变异性要求施工前必须建立基于概率统计的地质参数置信区间，通过蒙特卡洛模拟预测潜在的地质异常体对施工进度的影响概率。在喀斯特地貌区实施爆破作业时，溶洞发育密度与地下水位波动幅度的耦合作用会改变爆破冲击波的传播衰减规律，这需要修正传统的爆破参数计算公式中的能量分配系数^[7]。针对高陡边坡开挖过程中的卸荷回弹现象，地应力测试数据与岩石质量指标的结合分析能够预警潜在滑动面的形成趋势，进而指导分级开挖高度的确定原则。

（四）施工过程控制的信息熵理论应用框架

土石方作业系统的有序性程度可通过信息熵值进行量化表征，从土料开采、运输中转、摊铺整平到最终压实的每个环节都存在能量耗散与信息损失。运用熵增原理分析施工机械群组的协作效率，能够识别装载机与自卸卡车匹配数量失衡导致的系统混乱度上升现象，据此建立的设备配置优化模型可降低非生产性等待时间的发生概率。质量检测数据的离散程度反映施工过程控制水平，通过计算压实度检测值的香农熵指数，可动态评估碾压工艺参数的合理性并及时触发调整机制^[8]。在复杂气候条件下，降雨强度与蒸发量的信息熵变化会改变土料含水率的稳定状态，基于马尔可夫链的预测模型能够提前预判需要进行防雨覆盖作业的关键时段。

二、水利工程施工中土石方作业技术应用时的常见问题

（一）地质勘察数据与施工动态的匹配偏差

土石方作业实施阶段频繁出现前期地质勘探成果无法准确反映施工揭露地质条件的现象，勘察报告中标注的岩土层分布规律、地下水位线高程等关键参数与开挖面实际揭露情况存在系统性偏离，这种数据断层导致施工方案中的边坡支护强度、排水沟布置密度等设计要素失去指导价值。勘探点布设间距过大时难以捕捉断层破碎带或软弱夹层的局部突变特征，当挖掘设备进入未探明区域后，原先确定的爆破孔距、装药量等参数往往引发超挖或欠挖问题，继而造成边坡轮廓线超限修正的连锁反应^[9]。施工

期间地下水位的季节性或突发性变化未被及时纳入动态监测体系，导致基坑降水方案中的井点布置模式与真实渗流场产生显著偏差，这种水文地质条件的实时演变若未被施工方有效捕获，极易诱发流砂或管涌事故。岩土体物理力学指标的实验室测定值与现场原位测试结果之间的统计差异未被纳入施工风险预警模型，使得填筑体压实度控制标准与真实土料性质之间出现适配性错位。

（二）施工机械群组协同作业效率损耗

土石方施工机械配置方案常出现单机性能参数与群体作业需求不匹配的问题，装载设备斗容与运输车辆厢体容积的整数倍关系未达成最优比例，导致装车作业时产生等待卸料或空载循环的无效工时。不同功率等级的压实设备在同一作业面的交替使用缺乏振动参数衔接机制，不同型号压路机的激振力幅值差异引发填筑层内部形成刚度突变界面，这种隐性质量缺陷往往在后续沉降观测中才被察觉。机械转场路线的平面交叉设计未充分考虑设备转弯半径与爬坡角度的物理限制，自卸卡车在狭窄工作面调头时频繁发生倒车拥堵，造成燃油效率下降与工期延误的双重损失^[10]。操作手技能水平参差不齐导致同类机械的作业效能波动幅度超过工艺允许范围，推土机铲刀切入深度控制偏差引发原地表植被土与下层填料的非预期混合，这种人为因素引起的材料污染问题直接降低土石方利用率。

（三）土石方调配路径的时空冲突

施工平面布置图中规划的土方运输路线在实际操作中常因交叉作业干扰失去通行效率，混凝土搅拌车与弃渣运输车的路径重叠区域形成周期性交通瓶颈，这种未预见的路权冲突使得运输机械的有效作业时间占比下降至理论值的60%以下。临时堆土场容量设计与开挖进度之间缺乏弹性缓冲空间，雨季来临前突击转运土方时发生的机械密集排队现象，暴露出静态调度模型无法适应天气突变引发的作业强度陡增需求。填筑区不同高程工作面的进料优先级未建立动态调整规则，高处作业面的供料中断与低处作业面的集料过剩同时存在，这种空间维度上的资源配置失衡导致压路机不得不反复碾压局部过厚铺料层。石方爆破区与土方回填区的工序衔接存在时间窗口计算误差，爆破后石料解小工序未能在运输机械到达前完成备料任务，致使装载机面临“等料作业”的非正常工况。

三、水利工程施工中土石方作业技术的实践策略

（一）地质数据动态融合与施工参数实时修正机制

建立基于多源信息融合的地质模型更新体系，将施工揭露的地层界面产状、裂隙发育程度等实时数据与原始勘察资料进行空间叠加分析，通过地质雷达扫描与无人机倾斜摄影技术的联合应用，构建可动态扩展的三维地质信息数据库。针对开挖过程中遇到的未探明软弱夹层，开发嵌入式传感器网络实时监测岩土体应力释放速率，结合有限元反演算法快速修正支护结构的锚杆间距与喷射混凝土厚度参数。实施地下水位的分布式光纤监测方案，在降水井群中部署压力变送器阵列，依据渗流场重构结果自动调

节水泵启停组合模式。当填筑料含水率受天气影响超出击实试验确定的最优区间时，启动级配改良剂自动掺混装置，通过土石料输送带上的在线含水率检测仪触发石灰或水泥的定量添加指令。爆破作业参数库引入机器学习迭代优化功能，每次爆破后收集岩石块度分布数据与设计值的偏差量，自动调整后续孔网密度与装药结构计算系数。

（二）施工机械群组效能协同提升方案

构建机械性能参数与施工场景的匹配度评估矩阵，根据运输距离、爬坡角度、转弯半径等工况特征，建立装载机斗容与自卸卡车载重量的黄金分割比例模型，通过离散事件仿真预演不同设备组合下的作业流程瓶颈。开发振动压路机多机协同控制系统，利用北斗定位模块实时追踪相邻设备的碾压轨迹，自动生成激振力梯度变化方案以避免刚度突变界面形成。针对狭窄作业面的机械调度难题，设计基于 UWB 定位技术的动态路权分配算法，当自卸卡车进入弯道区域时，系统自动推送减速指令并激活两侧防撞雷达的监测频次。建立操作手技能数字画像系统，通过驾驶室内的压力传感器与操纵杆位移监测装置采集操作行为数据，对推土机铲刀切入深度偏差超过阈值的情况触发实时纠偏指导提示。

（三）土石方全流程智能调度与路径优化

开发基于数字孪生技术的土石方调配仿真平台，将实时开挖进度、运输车辆位置、堆料场库存量等数据映射到虚拟施工场景中，通过多智能体协同算法预测未来两小时内的机械冲突热点区域。构建运输路径动态权重评估模型，综合考虑路面扬尘浓度、轮胎附着系数、急弯陡坡分布等动态因子，生成包含安全风险系数与燃油经济性指标的实时导航路线。针对交叉作业导致的交通堵塞问题，设计分时分区通行控制策略，根据混凝土浇筑进度与

土方开挖强度的时空分布特征，动态划分不同机械群组的通行时间窗口。建立填料需求预测与供应匹配系统，利用填筑区高程变化速率与碾压设备行进速度的耦合关系，提前触发特定堆料场的备料指令。

（四）全过程质量监控与工艺参数自适应调整

部署压实度连续检测系统，在压路机钢轮内部嵌入介电常数传感器，通过土体电磁特性变化实时反演压实度分布云图，当检测值波动超过预设阈值时自动调整振动频率与碾压遍数组合参数。构建基于机器视觉的摊铺平整度监测网络，利用布置在摊铺机两侧的高清摄像头捕捉填料扩散形态，通过边缘计算设备即时计算横向坡度偏差并生成刮板高度调节指令。开发含水率闭环控制系统，在取土场、运输车厢、摊铺现场分别设置微波含水率检测节点，当检测到填料含水率超出最优区间时，联动现场雾炮设备实施精准加湿或启动快速晾晒作业区。建立碾压轨迹智能规划算法，根据填筑层厚度与边界几何特征自动生成无重复无遗漏的碾压路径，通过压路机群组间的通信模块实现碾压带重叠宽度的毫米级控制。

四、总结

水利工程土石方作业技术经过理论与实践的双向迭代，已逐步形成覆盖地质适配、机械协同、路径优化与质量控制的完整技术体系。通过构建跨学科交叉的技术创新平台，推动土石方作业从机械化向智能化、从经验化向知识化的根本性转变，为新时代水利工程高质量建设提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 赵风海. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (05): 177-180.
[2] 史永鹏. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 四川水泥, 2021, (07): 145-146.
[3] 庄桂亮. 水利水电工程施工土石方调配方法及其施工工艺 [J]. 科技创新与应用, 2021, (11): 127-129.
[4] 李坤. 水利水电工程中土石方工程施工技术的研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2018, (44): 212.
[5] 骆荣江. 水利工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 建材与装饰, 2017, (07): 270-271.
[6] 韩朝胜. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 建材与装饰, 2016, (39): 281-282.
[7] 胡谊国. 水利工程施工中的土石方施工技术探析 [J]. 科技展望, 2016, 26 (17): 40.
[8] 林江莉. 水利水电工程施工土石方的调配与计算方式探析 [J]. 中国水运 (下半月), 2016, 16 (10): 192-193.
[9] 孙福权. 某水利工程施工场内交通运输系统研究 [D]. 天津大学, 2016.
[10] 邢磊磊. 论水利工程施工过程中的质量控制措施 [J]. 山东工业技术, 2015, (21): 80.