

水利工程堤防施工关键技术应用探析

李东旭

河北省水建水电工程有限公司, 河北 保定 071000

[摘要]堤防工程是水利基础设施的核心构成, 关乎防洪安全与区域可持续发展, 文中针对水利工程堤防施工中的关键技术展开剖析, 梳理当前常用的填筑技术、碾压工艺、施工组织及质量控制措施, 并结合“白沟河治理工程(涿州段)第 I 标段”碾压试验的实施情况进行案例分析, 研究显示, 合理选配施工机械、优化碾压参数控制、强化含水率与压实度监测, 是保障堤防质量与施工效率的关键所在。研究成果可为同类工程提供技术指导与参考借鉴。

[关键词]堤防工程; 关键技术; 碾压试验; 施工管理; 水利工程

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17106

中图分类号: TV87

文献标识码: A

Analysis of the Application of Key Technologies in the Construction of Hydraulic Engineering Embankments

LI Dongxu

Hebei Shuijian Hydropower Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: Embankment engineering is the core component of water conservancy infrastructure, which is related to flood control safety and regional sustainable development. This article analyzes the key technologies in the construction of water conservancy engineering embankments, sorts out the commonly used filling techniques, rolling processes, construction organization, and quality control measures, and combines the implementation of the rolling test of the "Baigou River Treatment Project (Zhuzhou Section) Section I" for case analysis. The study shows that rational selection of construction machinery, optimization of rolling parameter control, and strengthening of moisture content and compaction monitoring are the key to ensuring the quality and construction efficiency of embankments. The research results can provide technical guidance and reference for similar projects.

Keywords: embankment engineering; key technologies; rolling test; construction management; water conservancy project

引言

堤防作为防洪减灾的重要屏障, 其施工质量直接影响水利工程的安全与稳定, 实际施工中, 土料选择欠佳、压实工艺失当、含水率控制偏差等问题屡见不鲜, 严重威胁工程寿命与使用效能, 随着施工技术与监测手段的革新, 如何科学运用关键技术实现堤防填筑的高效、稳定与经济, 成为工程建设的核心议题, 掌握并应用先进施工技术, 是提升堤防工程整体质量的关键路径。

1 堤防施工中常见问题与技术需求

1.1 填筑不均导致堤身沉降不一致

在堤防填筑作业中, 若忽视土料的工程特性, 尤其是未能精准把控最佳含水率与干密度, 极易引发压实质量失衡, 形成结构薄弱点, 这些局部填筑缺陷会在工程运营阶段引发不均匀沉降, 致使堤身变形、裂缝产生, 甚至出现渗漏现象, 大幅削弱防洪能力, 加剧运行隐患。同时, 不同产地或批次的填料在物理性能上存在天然差异, 若未及时开展检测分析与分层处置, 将显著降低堤身稳定性, 特别是在大规模施工场景下, 若对含水率变化疏于管控, 填料经碾压后的干密度往往难以达到设计要求, 对工程质量造成严重影响。

1.2 碾压机械参数选择不合理

碾压设备的合理选用是保障堤防填筑质量的核心要

素, 然而在工程实践中, 设备选型及运行参数的确定常缺乏科学支撑, 碾压遍数不足会致使压实度不达标, 而遍数过度则可能引发土体结构扰动, 甚至出现“弹簧土”问题。此外, 设备行驶速度的不当选择, 无论是过快导致压实能量传递不足, 还是过慢影响施工效率, 均会对压实效果产生不利影响。

铺土厚度控制失准同样是造成碾压效果不佳的重要因素, 当虚铺土层过厚, 振动碾的压实能量难以有效传递至下层土体, 极易形成深层压实缺陷, 因此, 工程现场需通过系统的土样试验, 精准确定适宜的铺土厚度与碾压参数, 从而实现土体压实的均匀性与有效性, 确保堤防工程质量。

1.3 监测手段不足

传统堤防施工中, 压实度与沉降量作为核心质量指标, 常因监测手段落后或缺失而未受重视, 致使施工状况难以及时把控, 碾压质量难以精准评估, 依赖经验的粗放式碾压模式, 不仅易引发虚压、漏压等质量隐患, 更因缺乏数据支撑导致施工调整迟滞, 造成返工率攀升与材料浪费, 严重掣肘工程效率与质量提升。

为扭转这一局面, 现代堤防施工需引入核子密度仪、水准仪、GPS 定位等高精度智能设备, 搭建完备的现场监测体系, 通过全流程数字化监控与数据实时传输, 实现

对压实度、沉降量等关键指标的动态跟踪，形成高效的质量反馈闭环，在数据驱动下，各施工工序得以精准执行，既强化了施工过程管控，又提升了项目质量追溯能力，为打造高品质堤防工程筑牢技术根基。

1.4 施工组织协调不到位

堤防施工作业流程复杂，各环节衔接紧密，组织管理若存在漏洞，极易引发施工秩序紊乱与资源配置失衡，以土方运输与摊铺作业为例，若二者未能有效衔接，填料易因长时间滞留导致水分过度蒸发，含水率偏离最佳范围，对后续碾压质量产生显著影响。

管理效能不足还会造成设备闲置、人员调度无序，降低机械利用率，进而影响施工效率并导致工期延误，为提升组织协调水平，需依据施工进度与现场实际，科学制定并动态更新施工计划，合理分配作业任务，明确各作业小组职责分工，强化协调监督机制。

2 堤防填筑施工中的关键技术解析

2.1 土料选用与含水率控制

优质土料是实现高质量堤防填筑的基础保障，依据《堤防工程施工规范（SL 260—2014）》，用于填筑的壤土需将黏粒含量精准控制在 10%~35% 区间，同时确保塑性指数处于合理范围，以此保障成型堤身具备优良的抗渗性与压实性能，若土料中混入植物根系、砖瓦碎块、膨胀性黏土或淤泥等杂质，将严重干扰压实效果，甚至埋下工程安全隐患，因而必须开展严格的土料筛选与清理作业。

填料含水率的精准调控是确保干密度达标的关键要素，需将其控制在最优值±3% 的范围内，现场施工过程中，需根据天气变化灵活运用翻晒、通风干燥或洒水搅拌等手段，动态调整土料状态，维持其最佳可压实性，含水率控制不仅直接影响碾压作业效率，更与压实后堤身的结构稳定性及防渗性能密切相关。

2.2 碾压机械与工艺参数确定

碾压设备选型与参数设定是堤防填筑压实质量控制的核心要点，工程实践中，常选用 22t 自重的凸块振动碾，采用“首遍静压、后续多遍振压”的标准化作业流程，以此强化压实能量向土体深层的传导，提升压实度的均匀性与稳定性，通过灵活调节振动频率与激振力，确保压实能量完整覆盖整个压实层，有效消除传统碾压易产生的松散层或夹层缺陷。

施工参数控制方面，振动碾行进速度需严格限定在 4km/h 以内：速度过快将削弱能量传递效率，导致压实度不达标；速度过慢则会降低施工效率，为实现土层受力均衡，虚铺厚度宜控制在 45cm 以内，科学匹配机械性能与施工参数，既能显著提升压实作业效率，又可减少返工与材料损耗，为堤身结构的长期稳固提供有力保障。

2.3 分区压实与搭接控制技术

为保障压实效果的均一性与连续性，施工现场需采用“进占法卸料搭配进退错距法碾压”的作业模式，这种模

式能够有效规避碾压盲区与过度重复碾压问题，确保碾压轨迹全面覆盖填筑区域，通过将施工区域科学划分为多个作业单元，有序推进碾压作业，可精准把控压实顺序与施工节奏，降低机械交叉作业干扰，减少误差累积。

在搭接处理环节，相邻碾压带的重叠宽度须严格控制，原则上不小于 10cm。规范的搭接操作既能防止压实边缘出现松散缺陷，又可避免形成局部薄弱部位，从而保障堤身结构的整体稳定性与连续性，该技术不仅有助于提升压实质量，还能增强碾压作业的过程可控性，推动施工工艺标准化水平的提升。

2.4 压实度与沉降量监测技术

在堤防填筑施工里，对压实度和沉降量进行实时监测是质量控制的核心内容，借助核子密度仪能够快速、精准地测量土体干密度，以此判断其是否符合设计压实度标准，同时，运用 DSZ32 水准仪结合 GPS 技术，可高精度测量地面高程的变化情况，以此反映碾压后的沉降效果。

施工时，需建立压实度-遍数以及沉降量-遍数的统计曲线，将其作为动态调整施工参数的关键依据，该数据模型不仅能用于评估当下的施工效果，还能为后续大规模的堤防填筑提供标准化指导，推动施工过程从经验驱动向数据驱动转变，实现工程质量的精细化管控。

3 现代信息技术在堤防施工管理中的融合

3.1 施工全过程数字化监控

现代堤防工程压实施工中，GPS 技术的应用实现了碾压路径的精准定位，有效规避漏压、重压问题，通过在压实机械上搭载高精度定位模块，实时记录并回传碾压轨迹与遍数，生成可视化作业图层，为施工质量追溯提供直观依据，同时，碾压覆盖率、遍数分布等关键参数通过管理平台动态呈现，显著提升现场管理效率。

水准测量与数字分析软件的深度融合，突破传统人工记录与比对的局限，实现沉降量的自动化统计分析，施工人员仅需输入测点编号与数据，系统即可自动生成沉降图表、趋势曲线等分析结果，精准反映压实均匀性与填筑变形趋势，为后续工序决策提供科学支撑。

3.2 BIM+GIS 联动优化施工组织

BIM（建筑信息模型）与 GIS（地理信息系统）的协同应用，可构建可视化三维堤防模型，动态模拟各填筑工序在时空维度的协同关系，通过模型预演施工流程与节奏，优化作业顺序，合理配置人力与设备资源，有效减少工序冲突导致的等待、返工现象，提升整体施工效率。

在运输组织层面，GIS 系统通过高精度定位土料取料点与施工区域，智能规划最优运输路径，降低运输成本与能耗，BIM 模型则实时追踪施工进度、材料消耗及机械运行状态，为管理者提供精准决策数据，推动施工组织从粗放型向精细化、信息化模式转型，全面提升堤防工程建设效能。如图 1 所示。

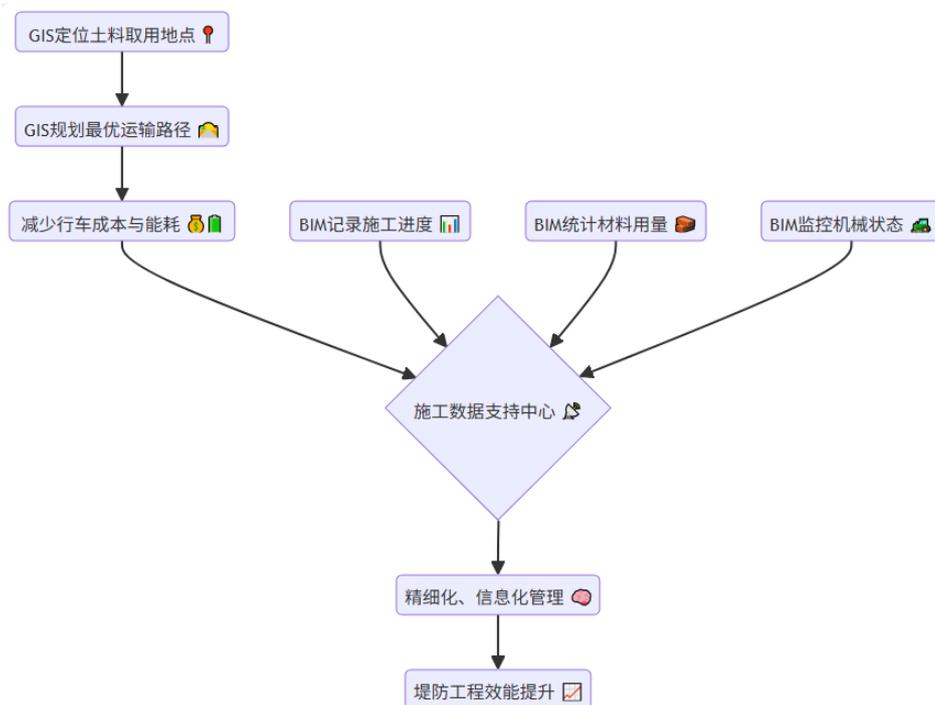


图1 GIS与BIM在施工组织中的应用

3.3 质量实时回馈机制构建

在堤防施工全流程中,通过在关键工序节点部署高频数据采集点,对压实度、含水率、沉降量等核心指标实施持续监测,构建覆盖施工全过程的质量实时回馈体系,该体系依托核子密度仪、智能水准仪及物联网传感器等设备,实现数据的自动化采集与实时上传,使管理人员能够动态掌握施工现场的真实状态,当监测数据出现偏离设计标准的迹象时,系统将自动触发预警机制,引导施工单位及时调整碾压遍数、土料含水率或机械运行参数,实现施工过程的精准纠偏,确保质量始终处于可控范围。

借助该系统,所有施工数据与进度计划实现动态关联,形成可量化、可对比的控制指标,实时评估各工序的完成效率与质量达标情况,构建“施工-监测-调整”的闭环管理模式,这一机制有效减少因信息滞后导致的返工和无效作业,提升现场决策的科学性与响应速度。

4 典型工程案例分析——白沟河治理工程堤防填筑碾压试验应用

4.1 项目背景

白沟河治理工程(涿州段)第I标段作为重点水利建设项目,其堤防工程遵循国家1级标准建设,防洪设计标准达百年一遇,对堤身结构稳定性与施工质量把控提出严格要求,为精准确定填筑施工参数、保障堤体安全,项目组于桩号Z19+460区域开展现场碾压试验,系统研究不同碾压工艺对填筑效果的影响。

试验所用土料采自码头镇取土场,经现场击实试验验证,其物理力学性质稳定,满足施工要求,试验场地总面

积约600m²,科学划分为4个独立子区,确保各碾压工艺在相同地质条件与气候环境下进行对比测试,从而为后续主堤大规模施工提供精准参数支撑。

4.2 关键参数设定与实施

依据土样击实试验结果,土体最大干密度为1.77g/cm³,最优含水率为14.2%。结合设计规范,将含水率控制范围设定为最优值±3%,填筑压实度标准不低于0.96,现场试验据此设计多种碾压组合方案,包括“静压1遍+振压3遍”“静压1遍+振压4遍”“静压1遍+振压5遍”等,系统检测各区域压实度与沉降指标。

试验统一采用45cm虚铺厚度,选用22t凸块振动碾开展作业,采用进占法卸料、进退错距法进行碾压施工,每个试验区均匀布置12个监测点位,通过实时采集干密度及压实沉降数据,确保试验数据覆盖全面、具备充分代表性。

4.3 技术亮点

试验过程深度融合核子密度仪、水准仪、GPS等数字化测量设备,实现压实度与沉降量的高精度原位检测,通过实时采集各测点数据,构建干密度-碾压遍数、沉降量-遍数等多组关系曲线,为碾压工艺优化提供量化分析依据。

经数据图表处理与统计分析发现,随着碾压遍数递增,土体干密度呈先升后稳趋势,沉降量则逐步减小至稳定状态,这一量化规律为精准控制压实工艺提供技术指引,有效规避“过碾”导致的土体结构破坏与“欠碾”引发的压实不足问题,显著提升施工效率与填筑质量的均匀性。如表1所示。

表 1 测点数据

碾压遍数	平均干密度 (g/cm ³)	平均沉降量 (cm)
3 遍	1.68	6.3
4 遍	1.75	5.2
5 遍	1.76	4.9

4.4 技术优化成果

综合各试验区数据分析,最终确定最优施工方案为:虚铺厚度 45cm,采用“静压 1 遍+振压 4 遍”组合工艺,控制沉降量 5.2cm,干密度满足设计标准,同时实现施工效率与能源消耗的平衡,该方案在保障堤身结构稳定的基础上,兼顾成本控制与工期优化,达到质量、效率、经济性的统一。

试验成果通过监理工程师审核后,作为本标段大规模填筑施工的技术标准全面推广应用,显著提升了堤防工程质量可控性,此次技术实践不仅实现了工程安全与经济目标的协同达成,更形成了可复制、可推广的区域水利工程示范经验。

5 结语

堤防工程作为水利基础设施的核心环节,其施工质量直接关乎防洪安全与工程生命周期,通过系统剖析堤防填筑关键技术,涵盖土料质量控制、碾压工艺优化、施工组

织管理及数字化监测手段,并结合白沟河治理工程实践案例,验证了科学参数设计与先进设备应用对提升填筑质量的决定性作用,实践表明,精准的技术路径选择既能提高施工效率,又能保障堤体稳定性与安全性,未来堤防施工应持续深化技术融合,推动管理精细化与过程智能化升级,为水利工程高质量发展提供更强支撑。

[参考文献]

- [1]徐超.水利工程堤防防渗施工技术应用[J].水上安全,2024,11(16):169-171.
- [2]徐曦.水利工程堤防防渗施工技术的应用研究[J].水上安全,2025,13(4):7-9.
- [3]王海霞.水利工程中河道生态护坡施工技术的融合应用及关键点分析[J].数字农业与智能农机,2024,11(11):71-73.
- [4]格日乐,方伟.水利工程中堤防防渗施工技术分析与应用[J].大众标准化,2025,11(5):59-61.
- [5]王存鹏.水利工程堤防防渗施工技术的应用[J].河南水利与南水北调,2024,53(8):58-59.

作者简介:李东旭(1996.12—),毕业院校:河北建筑工程学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:河北省水建水电工程有限公司,职务:技术员,职称级别:助理工程师。