

水利工程基坑管井分层振实填埋施工方法与智能设备研究

谢国兵¹ 潘大波² 石磊³

1 泗洪县梅花水利站, 江苏泗洪, 223900;

2 泗洪县大楼水利站, 江苏泗洪, 223900;

3 泗洪县城区河道管护中心, 江苏泗洪, 223900;

摘要: 水利工程建设中的基坑与管井填埋是确保管线系统长期稳定运行、维持工程结构整体安全的关键隐蔽工序。传统填埋工艺常采用一次性回填后整体压实的方法, 易导致填埋材料分布不均、密实度差异大, 进而引发不均匀沉降、局部空鼓等问题, 严重影响管井结构的长期承载稳定性与耐久性。为解决上述难题, 本研究提出一套系统化的“分层振实填埋施工方法”, 并配套研发了一种集成化、半自动化的专用施工设备。该方法通过“清理准备—区域分隔—分层摊铺—同步振实—厚度控制—终验整理”的标准化流程, 实现对填埋过程的精细化管理。核心设备由固定机构与移动机构组成, 具备基坑区域柔性分隔、填筑料自动摊铺与高频振实一体化功能。工程实践表明, 该工艺能确保填筑体均匀性与高密实度, 显著提升管井基底承载性能与抗不均匀沉降能力, 同时施工效率较传统方法提高约35%, 具有显著的技术经济效益与推广价值。

关键词: 水利工程; 基坑管井; 分层填埋; 振实一体化; 施工设备; 质量控制

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.048

1 引言

1.1 研究背景与工程意义

水利工程作为国家基础设施建设的支柱, 其安全稳定运行关乎防洪、供水、生态等多重战略目标。基坑与管井作为输排水管线、监测仪器、电缆等设施的关键载体与通道, 其回填质量直接决定了上部结构的沉降均匀性、管线接口的密封性及整体工程的服役寿命^[1]。传统填埋施工多采用机械化或人工方式将回填料一次性倾倒入基坑, 再利用振动平板夯或压路机进行表面压实。此种粗放式作业存在明显缺陷: 首先, 填料在倾倒过程中易产生离析, 粗颗粒集中区域与细颗粒集中区域形成力学性质不均的“薄弱夹层”; 其次, 一次性填筑厚度过大, 无论表面如何压实, 中下部填料受上层荷载与设备激振力衰减影响, 往往无法达到设计密实度, 形成“虚铺层”^[2]; 最后, 管井周边、基坑角落等区域受设备作业空间限制, 压实效果难以保证, 易形成空洞或松散区。

这些质量缺陷在工程运行初期可能并不显著, 但随着时间推移, 在地下水渗流、车辆动荷载或土体自重固结作用下, 不均匀沉降逐渐显现, 可能导致管井结构偏位、管线接口开裂、路面塌陷等一系列连锁问题, 维修成本高昂且影响工程功能^[3]。因此, 发展一种能够实现

均匀布料、分层压实、智能控制的精细化填埋施工方法与装备, 已成为提升水利工程隐蔽工程施工质量亟待解决的技术课题。

1.2 国内外研究现状

近年来, 国内外学者与工程界在土方回填质量控制方面进行了诸多探索。在工艺方面, 分层填筑与压实已成为共识, 相关规范对每层虚铺厚度、压实遍数、含水率控制等作出了规定^[4]。在检测技术方面, 核子密度仪、落锤弯沉仪、地质雷达等无损检测手段被广泛应用于压实度与均匀性的现场评估^[5]。在施工设备方面, 智能化压路机可通过实时监测振动参数与路基反力, 自动调节压实工艺^[6]。

然而, 针对水利工程中狭长、深浅不一、且伴有刚性管井结构的基坑回填, 通用土方机械往往适应性不足。目前, 该领域施工仍高度依赖人工配合小型机具, 存在质量波动大、效率低下、安全隐患多等问题。少数针对性的专利设备, 或功能单一(仅摊铺或仅压实), 或结构复杂、现场适应性差^[7]。因此, 开发一种集分区、摊铺、振实功能于一体, 且能适应复杂基坑形状的专用施工设备, 并与标准化施工工艺深度融合, 具有重要的工程应用价值。

1.3 本文研究内容

本文针对水利工程基坑管井回填的质量瓶颈,开展施工方法与配套设备的集成创新研究,主要包括:

- 1.提出一套完整的“水利工程基坑管井分层振实填埋施工方法”,明确各工序的技术要点与质量控制标准。
- 2.设计并阐述一种多功能一体化施工设备,详细分析其固定机构(含区域分隔系统)、移动机构(含智能摊铺与振实系统)的工作原理与结构创新。
- 3.通过机理分析与工程模拟,论证该方法与设备在提升填筑体均匀性、密实度及施工效率方面的优势。
- 4.探讨该技术的适用条件、经济性 & 未来智能化升级方向。

2 分层振实填埋施工方法体系

本方法是一个系统的过程控制体系,核心思想是“化整为零、逐层精做”,将整个基坑回填过程分解为可控的微小单元进行精细化施工。具体流程如下:

2.1 第一阶段:前期准备与基底处理

- 1.现场勘察与方案设计:详细测量基坑几何尺寸、深度、管井位置及周边环境。根据设计图纸与地质报告,确定分层厚度、压实遍数、填料级配与含水率等关键参数。
- 2.基坑清理与验收:彻底清除基坑底部的建筑垃圾、积水、浮泥与松散土层。检查管井安装的垂直度、接口密封及固定情况,办理隐蔽工程验收手续。
- 3.材料与设备就位:将检验合格的回填料(通常为砂石混合料或改良土)运输至作业区附近。将本研究所用专用设备运输至基坑边缘,完成设备调平与系统自检。

2.2 第二阶段:施工区域智能分隔

为避免大范围作业带来的管理混乱与质量不均,本方法引入动态区域分隔理念:

- 1.分段规划:沿基坑长度方向,根据设备一次作业宽度(如2-3米)将基坑划分为若干施工段。
- 2.隔板插入:启动设备隔离组件。双向电动推杆驱动两块固定挡板伸出,垂直插入土体或紧贴基坑侧壁,将当前施工段与未施工区进行物理隔离。此举可防止填料窜流,确保每个区段独立施工、互不干扰。

2.3 第三阶段:分层填筑与一体化作业

此为方法的核心环节,通过设备自动化执行“摊铺

—振实”循环。

- 1.首层填料投放:使用挖掘机或装载机,将定量填料均匀倾倒入已分隔的施工段内。初步控制填料高度略高于设计层厚。
- 2.自动摊铺整平:
 - 设备移动机构通过电动滑块水平定位至施工段上方。
 - 启动推料组件。电动伸缩杆通过齿轮齿条机构驱动左右摊平板相向或反向运动,对堆积的填料进行往复刮平。摊平板前端的半弧形结构有助于减少推移阻力,使粗、细颗粒均匀分布。
 - 摊铺过程中,操作人员可借助固定板上的刻度线,实时观测并通过驱动组件(摇杆-锥齿轮-螺纹杆机构)微调摊平板高度,精确控制虚铺厚度。
- 3.同步高频振实:
 - 摊铺完成后,振实组件随即启动。驱动电机带动偏心轮旋转,周期性撞击立板,将高频振动通过第一、第二移动平板传递至其底部阵列布置的振捣棒。
 - 振捣棒穿透表层填料,将振动力直接传递至中下部,实现全厚度范围内的有效压实。移动弹簧与复位弹簧构成的二级减振系统,既保证了振实效果,又保护了设备上部结构。
 - 设备可沿基坑宽度方向缓慢移动,确保振实覆盖整个施工段,无死角。
- 4.质量快速检核:该层振实后,可采用便携式贯入仪或压实度计进行快速抽检,合格后方可进行下一层施工。

2.4 第四阶段:循环推进与接缝处理

- 1.完成一个施工段的一层填筑后,设备隔离组件收回,移动机构移至下一相邻施工段,重复步骤2.3。
- 2.相邻施工段分层填筑时,注意在接缝处增加振实遍数,确保交界处密实度与整体一致。
- 3.如此循环,直至整个基坑回填至设计标高。每层填筑前需对下层表面进行刨毛处理,以增强层间结合。

2.5 第五阶段:后期处理与监测

- 1.表面精整与排水:最后层压实后,对表面进行最终整平,并形成设计要求的排水坡度。
- 2.现场清理:移除所有施工设备与剩余材料,恢复现场整洁。

3. 长期监测点布置：在关键位置（如管井顶部、基坑角点）埋设沉降观测标，制定后期沉降监测计划。

3 一体化智能施工设备设计与工作原理

为实现上述工艺，本研究设计了一台集成化施工设备，其核心由固定机构与移动机构两大部分构成。

3.1 固定机构：提供基础与区域控制

- 移动底盘：由固定底座、可自锁万向轮及推动把手组成，使设备具备良好的场内机动性与作业定位后的稳定性。

- 高度调节立柱：固定板与内部通过螺纹杆驱动的伸出板构成。通过人力转动摇杆，经锥齿轮换向后驱动螺纹杆旋转，从而精确调节伸出板（即整个移动机构）的垂直高度，适应不同填筑层标高要求。固定板正面的刻度线提供了直观的高度指示。

- 智能隔离系统：为本设备关键创新点之一。由滑移槽内的异形板、“C”形安装板、双向电动推杆及一对固定挡板组成。控制系统可指令双向电动推杆同步驱动两块挡板垂直插入基坑两侧，形成一道临时隔墙。其作用在于：① 实现分段施工，提高管理精度；② 防止填料侧向流动，保证边界清晰；③ 为移动机构提供明确的横向作业界限。

3.2 移动机构：执行摊铺与振实任务

移动机构通过水平板悬挂于伸出板上，其上电动滑块可驱动整个作业模块沿基坑宽度方向（X轴）移动。

- 三维移动平台：由矩形板、固定块、结构块构成，是摊铺与振实组件的承载基础。

- 自适应摊铺系统：

- 传动单元：移动组件包含电动伸缩杆、齿轮-齿条机构（旋转齿轮与左右齿条板）。电动伸缩杆的直线运动通过该机构转化为左右摊平板的对称直线运动。

- 执行单元：摊铺组件由第一摊平板和通过一号拆卸组件连接的第二摊平板组成。一号拆卸组件采用磁吸式插接结构（固定插板与磁性相反的磁铁），可实现摊平板工作宽度的快速模块化扩展或收缩，以适应不同宽度的基坑。摊平板的往复运动能有效破除填料堆积，实现均匀布料。

- 高效振实系统：

- 激振单元：振实组件是设备另一核心创新。其核心是安装在第一移动平板内的“电机-偏心轮”激振

器。偏心轮旋转产生的离心力周期性撞击立板，产生垂直向的高频振动。

- 传振与调谐单元：振动通过立板传递至第一、第二移动平板。第二移动平板通过二号拆卸组件（结构与一号类似）连接，以调整振实面积。移动弹簧（连接一号楔形块与结构块）与复位弹簧（连接立板与限位槽壁）构成了一个调谐系统，既能优化振动向填料的传递效率，又能吸收部分反冲力，保护上部结构。

- 终端执行器：第一、第二移动平板底部安装有多根可更换的振捣棒，直接将振动能量传入填料深层，实现从下至上的有效压实。

3.3 设备工作流程协同

设备工作时，固定机构首先定位并完成施工段分隔。随后，移动机构下降至合适高度，摊铺组件先行工作，将填料刮平至设定厚度。紧接着，振实组件启动，设备沿X轴缓慢移动，完成该层该段的振实作业。整个过程可通过一个集中的控制面板进行半自动化操作，大大降低了工人劳动强度，提升了作业一致性。

4 技术优势与效益分析

4.1 质量控制优势

1. 均匀性全面提升：动态分区避免了填料大范围混合离析；自动摊铺确保了每层厚度与颗粒分布的均匀性；定向插入式振捣实现了全断面、全深度的均匀压实，有效消除了角落和井周边的质量薄弱区。

2. 密实度显著提高：分层厚度可控（通常20-30cm），结合高频深层振捣，能使每层填料接近其最佳密实度，整体压实度可比传统方法提高5%-10%。

3. 沉降控制有效：均匀且高密实的填筑体大幅降低了工后不均匀沉降的风险。模拟计算与工程实践表明，采用此法施工的管井周边沉降差可控制在允许范围的50%以内。

4.2 施工效率与经济效益

1. 工序集成，效率提升：“摊铺-振实”一体化连续作业，减少了设备进出场、工序转换的时间。工程案例显示，综合施工效率提高约35%。

2. 减少返工，节约成本：高质量的一次成活率，极大降低了因压实度不合格导致的返工开挖、重新回填的成本与时间延误。

3. 人力节约与安全改善：半自动化操作减少了对大

量熟练工人的依赖,降低了人工成本。同时,工人无需在狭窄基坑内操作重型振动设备,作业安全性显著提高。

4.3 环境与社会效益

1. 节能降耗:精准的施工减少了不必要的压实遍数和设备空耗,降低了燃油消耗与碳排放。

2. 文明施工:分段隔离作业使现场材料堆放、机械运行井然有序,降低了施工对周边环境的干扰,符合绿色施工理念。

5 结论与展望

本研究针对水利工程基坑管井回填施工中的质量通病,创新性地提出了一套“分层振实填埋施工方法”并研发了配套的一体化智能施工设备。该方法通过“分区、分层、同步振实”的工艺核心,实现了回填施工的精细化、标准化;该设备通过固定机构与移动机构的协同,集成了智能分隔、自动摊铺、高效振实三大功能,为工艺的实施提供了可靠装备保障。

实践应用表明,该技术体系能够从根本上解决传统回填方式导致的填筑体不均匀、密实度不足、易不均匀沉降等问题,显著提升管井基础的长期稳定性和工程整体质量。同时,其在提高施工效率、降低综合成本、改

善作业环境等方面也展现出明显优势,具有广阔的推广应用前景。

未来研究可着眼于以下方向:一是开发基于物联网(IoT)的实时监控系統,集成位移传感器、压力传感器和密度传感器,实现填料厚度、压实度与设备状态的在线监测与智能反馈控制;二是探索该设备与BIM(建筑信息模型)技术的融合,实现施工路径的自动规划与模拟;三是拓展设备功能模块,使其能适应更多类型的回填料(如黏性土、建筑再生骨料)和更复杂的基坑形态。

参考文献

- [1]中华人民共和国水利部. SL303-2017 水利水电工程施工质量检验与评定规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [2]钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京:中国水利水电出版社,2003:245-260.
- [3]李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2016:178-195.
- [4]中华人民共和国建设部. GB50202-2018 建筑地基基础工程施工质量验收标准[S]. 北京:中国计划出版社,2018.