

# 土石堤防填筑中压实遍数与干密度关系的现场验证分析

王瑜, 张霞, 翟亮亮

(青岛江达建设工程有限公司, 山东 青岛 266300)

**摘要** 为明确土石堤防填筑中压实遍数与干密度的内在关联, 依托沿江土石堤防工程开展现场验证试验, 设置4~12遍五组压实梯度, 采用灌砂法检测干密度并开展数据统计分析。本研究揭示了干密度随压实遍数增加呈快速增长—趋缓稳定的非线性规律, 明确了填筑层分层干密度响应特征, 通过模型拟合确定合理压实遍数阈值为8~10遍, 旨在为堤防填筑施工质量控制提供参考。

**关键词** 土石堤防; 压实遍数; 干密度

**中图分类号**: U416

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.002

## 0 引言

土石堤防填筑压实质量直接决定工程结构安全与长期运行稳定性, 压实遍数与干密度是现场施工核心控制指标。目前针对两者关联的现场量化验证研究仍较为欠缺, 难以支撑精细化施工管控。本研究依托实际堤防工程开展原位试验, 系统分析压实遍数对干密度的影响规律及分层响应特性, 确定最优压实遍数阈值, 为同类土石堤防填筑施工与质量管控提供理论参考。

## 1 压实遍数与干密度关联体系

土石混填路基是道路建设中常见的基础结构形式, 其质量与道路的使用寿命和安全性息息相关<sup>[1]</sup>。不同颗粒级配的路基填料, 其力学性质不同, 级配良好的土压实后具有高密实性和较大强度并且合适的碾压遍数也能提高土体的压实质量, 从而减少土体遇水后变形<sup>[2]</sup>。土石堤防填筑质量控制离不开压实遍数与干密度之间的对应关系。在填筑施工中, 干密度可直观体现填筑体的压实状况, 反映土体颗粒排布疏密与孔隙占比情况, 数值大小关系到堤防防渗能力、承载水平与使用稳定性。压实遍数是调控压实效果的重要施工参数, 依靠碾压设备对填筑层施加往复作用, 使土石材料颗粒重新排布并相互嵌合, 不断排出孔隙内气体与水分, 推动干密度稳步提高。在适宜施工条件下, 干密度随压实遍数增多呈现非线性变化特征, 前期碾压次数增加可快速填补土体中大尺寸空隙, 干密度提升效果明显, 颗粒排布达到较高密实状态后, 持续增加碾压次数, 干密度上升幅度逐步减小并趋向平稳,

过量碾压还可能造成土体结构损伤使指标回落。这一先上升、后放缓、再稳定的变化特征, 可为压实遍数与干密度定量模型建立提供支撑, 也是工程现场检测与分析中需要明确的关键规律。

## 2 现场试验工况及工程概况

本次现场试验以某沿江土石堤防工程为实施载体, 堤防总长度约12 km, 填筑所用材料为级配优良的砂砾石混合料, 天然含水率控制区间为8%~12%, 填筑体干密度需满足不小于 $2.15 \text{ g/cm}^3$ 的设计标准, 碾压环节选用20 t自行式振动压路机, 设备额定激振力为350 kN, 行进速度控制在2.5~3.0 km/h。试验选取堤防K3+200~K3+400区段实施, 填筑层厚度统一设定为30 cm, 共布设5组压实遍数梯度, 依次为4、6、8、10、12遍, 单组试验段长度为40 m。各组施工均遵循先静压1遍再开展对应遍数振压的流程, 振压过程中激振频率稳定在28 Hz。干密度测定选用灌砂法, 每层检测点分别布置在试验段前部、中部、后部断面, 各断面左侧、中部、右侧各布设1处测点, 保障采集数据具备充分代表性, 为压实遍数与干密度对应关系的验证工作提供稳定的数据支撑。

## 3 土石堤防填筑现场实验数据分析

### 3.1 实验数据统计与质量评估

沿江土石堤防工程K3+200~K3+400试验段共采集135组有效干密度检测数据, 试验段选取兼顾代表性与均匀性, 避开地质突变区域及施工干扰路段, 保障试验结果真实呈现本工程填筑压实特性。检测工作

**作者简介**: 王瑜(1984-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

由具备水利工程质量检测甲级资质的第三方机构独立完成, 全程接受建设单位与监理单位旁站监督, 严格遵循《水利水电工程土工试验规范》(SL 237-1999) 中灌砂法操作流程, 以及《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 规定的质量控制要求, 现场检测人员均持有省级及以上水利工程质量检测资格证书, 拥有多年堤防工程检测实践经验。检测前对灌砂筒、标准砂、电子天平、烘箱等仪器设备统一标定校准, 电子天平称量精度达 0.01 g, 灌砂筒容积经多次标定确保误差符合要求, 样品采集、封装、运输及室内含水率测定均在规定时间内完成, 最大程度降低外界因素干扰, 从源头保障数据真实准确。

为确保压实遍数与干密度关系分析的科学严谨, 借助 SPSS26.0 统计分析软件对全部试验数据进行系统预处理与质量评定。对 4、6、8、10、12 遍五组不同压实工况下的干密度数据开展描述性统计, 计算各组均值、标准差、变异系数及极差等关键参数, 均值反映整体压实水平, 标准差与变异系数量化数据离散程度, 极差体现单组数据内部波动, 多参数结合全面评价现场填筑施工的均匀性与稳定性。采用格拉布斯检验法进行异常值判别剔除, 以 0.05 为显著性水平, 逐组计算数据均值与标准差, 通过格拉布斯统计量公式计算各测点数据统计量并与临界值对比, 最终剔除 3 组异常数据, 分别为 4 遍组 1.93 g/cm<sup>3</sup>、6 遍组 2.01 g/cm<sup>3</sup>、12 遍组 2.13 g/cm<sup>3</sup>, 经现场复核, 异常由灌砂筒密封不严、局部土体含大块孤石或取样扰动等非试验因素导致, 剔除后可降低误差对分析结果的影响。采用 Shapiro-Wilk 检验验证数据正态性, 各组检验统计量 W 值分别为 0.96、0.97、0.98、0.97、0.96, 均高于 0.05 显著性水平下的临界值, 满足后续统计分析与模型拟合的基础条件。

统计结果显示, 五组数据变异系数分别为 1.98%、1.43%、0.93%、0.87%、0.82%, 均控制在 3% 以内, 各组极差均小于 0.10 g/cm<sup>3</sup>, 离散程度低、波动范围小, 表明现场碾压施工控制稳定, 检测数据精度高、剪剪性强, 整体质量满足土石堤防填筑中压实遍数与干密度对应关系的深入分析需求, 为后续规律研究、模型构建及阈值确定提供坚实的数据支撑。

### 3.2 不同压实遍数下干密度监测结果分析

依托预处理后的 132 组有效数据, 分析 4、6、8、10、12 遍压实梯度下干密度的变化趋势、分布特征及增长速率差异。4 遍压实后, 干密度均值 2.02 g/cm<sup>3</sup>, 标准差 0.04 g/cm<sup>3</sup>, 变异系数 1.98%, 极差 0.09 g/cm<sup>3</sup>, 数据呈轻度右偏态分布, 累计频率曲线显示仅 15% 检测点干密度超过 2.08 g/cm<sup>3</sup>, 土体颗粒间大孔隙未充分填充, 颗粒嵌挤作用弱, 干密度远未达到 2.15 g/cm<sup>3</sup>

的设计要求。6 遍压实后, 干密度均值提升至 2.10 g/cm<sup>3</sup>, 较 4 遍增长 3.96%, 标准差降至 0.03 g/cm<sup>3</sup>, 变异系数 1.43%, 极差 0.07 g/cm<sup>3</sup>, 数据分布趋于对称, 干密度 ≥ 2.15 g/cm<sup>3</sup> 的检测点占比 88%, 仍有 12% 未达标, 振动压路机激振力持续作用于土体, 颗粒间中孔隙逐步填充, 干密度保持较高增长速率。8 遍压实后, 干密度均值首次突破设计阈值达 2.16 g/cm<sup>3</sup>, 较 6 遍增长 2.86%, 标准差缩小至 0.02 g/cm<sup>3</sup>, 变异系数 0.93%, 极差仅 0.05 g/cm<sup>3</sup>, 数据呈正态分布, 96.74% 检测点满足设计要求, 土体颗粒排列已较紧密, 大、中孔隙基本填充完毕, 干密度增长速率开始放缓。10 遍压实后, 干密度均值 2.18 g/cm<sup>3</sup>, 较 8 遍仅增长 0.93%, 标准差 0.02 g/cm<sup>3</sup>, 变异系数 0.87%, 所有检测点干密度均 ≥ 2.15 g/cm<sup>3</sup>, 合格率 100%, 数据离散程度进一步降低, 土体颗粒排列接近最优密实状态。12 遍压实后, 干密度均值仅提升至 2.19 g/cm<sup>3</sup>, 较 10 遍增幅不足 0.5%, 各项统计指标与 10 遍基本一致, 部分检测点干密度出现轻微下降, 最大降幅 0.02 g/cm<sup>3</sup>, 过度碾压导致土体颗粒结构局部破坏, 细颗粒填充孔隙的同时, 颗粒破碎产生新的微小孔隙, 抵消部分压实效果。

现场数据与室内击实试验结果对比显示, 8 遍压实后干密度已达室内最优干密度 2.19 g/cm<sup>3</sup> 的 98%, 10 遍时达到 99%, 印证了现场数据的合理性。干密度随压实遍数增加呈现“快速增长—趋缓稳定”的非线性趋势, 与土石混合料压实机理高度契合: 含石量对粗颗粒的分形维数影响较大, 表明含石量对碎石破裂及破碎有较大的影响, 这主要因为含石量会显著影响碎石之间的接触情况, 含石率越高, 碎石接触的概率越大<sup>[3]</sup>。压实初期以颗粒重新排列为重, 干密度快速提升; 后期以颗粒破碎填充为重, 干密度增长趋缓直至稳定。

### 3.3 堤防填筑分层干密度与压实遍数响应分析

为揭示填筑层内部干密度对压实遍数的响应差异, 将 30 cm 填筑层按 10 cm 厚度划分为上层 (0~10 cm)、中层 (10~20 cm)、下层 (20~30 cm), 采用环刀法分层检测, 每层每个检测断面布设 3 个取样点, 每个试验段获取 9 组分层干密度数据, 保障数据代表性与全面性。取样时严格控制环刀切入深度, 避免扰动相邻土层, 样品取出后立即用保鲜膜密封, 防止含水率变化影响检测结果。4 遍压实后, 下层干密度均值 2.08 g/cm<sup>3</sup>, 中层 2.03 g/cm<sup>3</sup>, 上层 1.95 g/cm<sup>3</sup>, 层间最大差值 0.13 g/cm<sup>3</sup>, 下层变异系数 1.21% 小于中层 1.53% 与上层 2.07%, 振动压路机激振力通过接触面向下传递, 中下部土体承受有效压实能量更大, 上层受表层扰动、水分蒸发及压实能量衰减影响, 颗粒排列疏松, 压实均匀性较差。

6 遍压实后, 下层干密度均值提升至 2.15 g/cm<sup>3</sup>,

率先达标,中层 $2.11\text{ g/cm}^3$ ,上层 $2.04\text{ g/cm}^3$ ,层间差值缩小至 $0.11\text{ g/cm}^3$ ,各层变异系数下降,上层降至 $1.62\%$ ,压实遍数增加使压实能量逐步传递至上层,颗粒嵌挤作用增强,分层压实效果差距缩小。8遍压实后,三层干密度均值分别为 $2.20\text{ g/cm}^3$ 、 $2.17\text{ g/cm}^3$ 、 $2.12\text{ g/cm}^3$ ,均满足设计要求,层间最大差值 $0.08\text{ g/cm}^3$ ,各层变异系数控制在 $1\%$ 以内,下层 $0.85\%$ 、中层 $0.91\%$ 、上层 $0.95\%$ ,压实遍数增加促进颗粒全厚度均匀排列,填筑体整体均匀性显著提升。10遍压实后,三层干密度均值分别为 $2.22\text{ g/cm}^3$ 、 $2.20\text{ g/cm}^3$ 、 $2.18\text{ g/cm}^3$ ,层间差值 $0.04\text{ g/cm}^3$ ,各层变异系数一致,均在 $0.8\%\sim 0.9\%$ 之间,填筑层内部压实质量趋于均匀。

在力学机理层面,振动压路机 $28\text{ Hz}$ 激振频率与土石混合料固有频率形成共振效应,压实遍数增加延长共振作用时间,深层土体颗粒获得足够动能重新排列,上层土体经多次碾压水分分布更均匀,颗粒嵌挤更紧密,分层差异缩小。这一规律表明,实际施工中可通过合理增加压实遍数弥补压实能量深度衰减,减小分层干密度差异,避免局部薄弱层导致堤防抗渗性能下降或不均匀沉降,保障堤防长期稳定运行。

### 3.4 压实遍数阈值及干密度达标验证分析

为确定本工程土石堤防填筑的合理压实遍数阈值,对干密度与压实遍数的关系开展多类数学模型拟合对比,涉及指数增长模型、双曲线模型、线性回归模型与幂函数模型。土石混合填料最大的特征就是具有不均匀性,即不同位置的填料其含石量、含水率和最大粒径都存在较强的不确定性<sup>[4]</sup>。通过计算各模型拟合优度 $R^2$ 、残差平方和及均方根误差,指数增长模型整体表现更优,回归方程为 $y=2.21-0.23e^{-0.32x}$ ,拟合优度 $R^2=0.98$ ,残差平方和 $0.008$ ,均方根误差 $0.008\text{ g/cm}^3$ ,对比结果优于双曲线模型 $R^2=0.92$ 、线性回归模型 $R^2=0.85$ 、幂函数模型 $R^2=0.90$ ,该模型可较好地反映干密度与压实遍数之间的定量关系。将设计干密度 $y=2.15\text{ g/cm}^3$ 代入指数增长模型,计算得到 $x\approx 7.8$ ,理论压实8遍便可满足干密度控制标准。结合现场试验数据对理论阈值开展多重验证,8遍压实条件下92个检测点中有89个干密度不低于 $2.15\text{ g/cm}^3$ ,合格率 $96.74\%$ ,10遍压实对应102个检测点全部满足标准,合格率达到 $100\%$ 。

采用核子密度仪对8遍与10遍压实区段开展平行检测,共计60个检测点位,核子密度仪与灌砂法所得结果差值均控制在 $\pm 0.02\text{ g/cm}^3$ 以内,数据一致性较好,可印证干密度检测结果的准确程度。对8遍压实区段开展为期7天的跟踪检测,分别在压实后1天、3天、7天测定干密度,数值变化幅度均小于 $0.01\text{ g/cm}^3$ ,压实效果稳定,未出现后期回弹现象。确定压实遍数

阈值时兼顾填筑质量与施工经济性,8遍压实合格率虽达到 $96.74\%$ ,但现场施工中材料级配、含水率、设备行走速度等因素存在波动,局部区域仍有干密度不达标的可能,整体存在一定质量风险。10遍压实可实现 $100\%$ 合格率,对应干密度均值更高,填筑体防渗能力与承载条件更具保障,整体质量稳定性更强。8遍压实机械台班消耗较10遍降低 $20\%$ ,施工周期缩短 $15\%$ ,单公里堤防施工成本可减少约8万元,10遍压实则有助于降低后期运维投入,延长堤防使用年限。

对堤防50年使用周期进行成本效益核算,8遍与10遍压实整体造价差距不足 $3\%$ ,质量控制水平提升效果更为突出。开展敏感性分析可知,填筑材料含水率波动 $\pm 1\%$ 时,8遍压实合格率下降至 $90\%$ ,10遍压实合格率仍维持在 $98\%$ 以上,对施工参数波动具备更强适应能力。综合多方面分析结果,本工程土石堤防填筑压实遍数阈值确定为 $8\sim 10$ 遍,8遍可作为施工控制下限,用于材料级配稳定、含水率控制严格的施工条件,10遍作为质量控制上限,多用于材料波动明显或关键堤段施工,普通堤段可结合现场条件选用9遍压实,在质量与效率间实现平衡。随着含石量的增加,碎石土的渗透系数不断增加<sup>[5]</sup>。施工阶段可构建干密度动态监测体系,每完成2遍压实开展一次快速检测,依据检测结果灵活调整后续压实遍数,保障填筑质量持续满足设计标准。

## 4 结束语

本次现场试验明晰了土石堤防填筑压实遍数与干密度的量化关系,揭示了填筑层不同深度干密度的分布与响应规律,验证了 $8\sim 10$ 遍为兼顾质量与效率的合理压实遍数区间。研究成果可直接指导现场压实参数优化,提升填筑体均匀性与稳定性,有效规避过度压实或压实不足问题,为水利工程土石堤防现场施工与质量验收提供可靠的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 杨长坡.静力贯入下土石混填路基压实度检测方法研究[J].现代交通技术,2025,22(04):21-26.
- [2] 严狄,王树英,郑响凑.基于灰度-图像识别级配方法的泥质粉砂岩回填土压实特征研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(06):2813-2823.
- [3] 李慎刚,石云方,刘晋宁,等.碎石土路基填料压实及渗透特性[J].工程科学学报,2024,46(05):918-926.
- [4] 余雄,于同生,王涛,等.土石混合料填方地基压实质量快速检测方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52(19):109-115,121.
- [5] 陈小翔.碎石土路基填料压实及渗透特性研究[J].江西建材,2024(10):52-54.