

路基填筑施工中压实遍数与压实度关系的现场验证分析

毛明强¹ 陈 春² 史明先³

1.浙江省江山市贺村镇八里坂村 浙江 江山 324100

2.福建省宁德市寿宁县解放街 234-9 号 福建 宁德 352000

3.福建省宁德市寿宁县解放街 234-9 号 福建 宁德 352000

【摘 要】：本研究围绕路基填筑施工过程中压实遍数与压实度之间的关系开展现场验证，通过对不同施工区段进行分层碾压试验，记录压实遍数对应的干密度与压实度变化趋势，分析压实质量随遍数增加的增长特性与稳定点位置。结果表明，压实度在初期遍数内上升显著，随后逐渐趋缓，并在达到一定遍数后接近稳定值，过度碾压对压实度提升作用有限。研究进一步探讨含水量变化、填料类别及机械组合方式对压实效果的影响，揭示压实遍数与压实度间的实际控制区间，为现场压实工艺参数选择提供可操作依据。

【关键词】：压实遍数；压实度；现场验证；路基填筑；碾压试验

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.065

引言

路基压实质量直接影响道路结构的整体稳定性，而压实遍数作为施工过程中的关键控制指标，其与压实度之间的关系始终是现场关注的重点。不同材料、不同含水量以及不同设备组合都会改变压实反应，使压实遍数的设定呈现不确定性。通过现场验证，可将理论参数与真实施工状态相联系，呈现压实度随遍数变化的实际趋势，使压实控制具备更准确的依据。围绕压实遍数与压实度之间的对应关系展开分析，有助于进一步理解碾压过程中的质量增长规律，为工程施工提供更具可靠性的参数参考。

1 压实遍数与压实度矛盾点的提出

路基填筑施工中，压实遍数的设定常在经验判断与施工标准之间摇摆，而压实度的实测结果又常呈现区段差异，使压实质量控制面临不确定性。施工过程中，填料类别、含水量波动、机械组合方式与施工节奏共同作用，使压实反应在不同层位产生差异。部分区段压实遍数偏少会导致干密度增长不足，压实度难以达到规范要求；而碾压遍数过多时，填料结构可能因反复扰动产生颗粒破碎，导致压实曲线在高遍数阶段出现滞后甚至轻微下降，使常规经验无法准确给出适宜的遍数区间^[1]。现场管理往往依赖经验调整，每当出现压实度偏离预期时，需要在水分控制、碾压顺序和机械参数之间不断试探，使压实遍数成为影响施工效率与质量稳定性的关键问题。

在实际操作层面，填方区域往往受到含水量不均、填料级配偏差、施工组织节奏变化等因素的干扰，使压实遍数与压实度之间的关系难以呈现标准化曲线。部分土质在最佳含水量附近对振动能量极为敏感，振动碾产生的动应力会使孔隙水压力暂时升高，影响压实度的即时测定；若含水量偏离最佳范围，压实反应呈现显著的滞后性，即便增加遍数，干密度的增长幅度仍偏低。此外，不同机械类型产生的压实能量分布不同，如

振动压路机的激振力、轮胎压路机的揉搓效应、静压碾的表层整形作用，在不同填料中表现出的压实贡献比例并不一致，使压实度随遍数的增长曲线呈现分段性特征。施工区段若存在厚度偏差或局部软弱夹层，其压实响应又会与常规区域不同，加剧了压实遍数设定的不确定性。

在此背景下，压实遍数与压实度之间的矛盾逐渐凸显：理论指导给出的是最佳含水量与最大干密度对应的压实要求，而现场条件却呈现动态变化，致使压实质量难以单纯依据经验或规范参数进行预测。为了使压实遍数的设定更加合理，需要识别影响压实反应的实质因素，并通过现场验证揭示压实度随遍数增长的真实趋势。仅从施工经验难以判断压实增长的拐点位置以及趋于稳定的区间，若缺乏系统的现场验证，压实遍数常被迫在保守与过度之间选择，使施工质量与效率均受到影响。因此，需要将实践中的不确定性问题明确化，并基于现场工况暴露压实遍数与压实度之间的矛盾来源，使后续研究能够在真实数据的基础上揭示压实过程的客观规律。

2 影响压实反应的关键因素识别

路基填筑过程中，压实反应的形成受多种因素共同驱动，其中填料本身的工程性质往往决定压实过程的基础特征。不同类型的填料在颗粒组成、孔隙结构和级配状态上存在差异，颗粒之间的嵌挤作用、骨架稳定性以及受力传递路径均会影响压实能量的有效传递。细颗粒含量偏高的材料易出现结构性含水，压实时孔隙水排出受阻，使压实反应呈现阶段性滞后；而砂性土或碎石土在激振力作用下密实速度较快，但当级配不佳时，颗粒重新排列难以形成稳定骨架，使干密度增长幅度受限^[2]。此外，填料的塑性指数、最大干密度与最佳含水量之间的匹配性，也会直接影响碾压过程中能量吸收效果，使压实度随遍数增长的曲线呈现不同特征。

含水量的变化是影响压实反应的核心变量之一。填土状态

若处于最佳含水量附近,颗粒润滑性增强,孔隙空气更易逸散,压实能量能够有效转化为干密度的提升;若含水量偏低,颗粒间摩阻力增大,振动能量难以促使结构重排,使压实次数增加也难达到预期压实度;含水量偏高时,孔隙水压力会在振动过程中迅速升高,使结构短时呈现“假密实”现象,导致实测干密度偏低。含水量分布的不均匀性更会造成压实响应的差异化,同一填筑层的局部区域可能因水分偏差而表现出完全不同的压实敏感性,使压实遍数的设定难以统一。同时,现场施工多受气候条件影响,日照、降雨、蒸发速度等因素均会改变土体的含水状态,使压实度的变化呈现动态特性,为压实反应增加更多不确定因素。

压实机械的类型与能量输出方式也是影响压实反应的重要组成部分。振动压路机通过激振力形成深层影响区,使颗粒结构在动荷载作用下发生重排,是控制干密度增长的主要设备;而轮胎压路机依靠橡胶轮胎的接触压应力和揉搓效应改善表层密实性,并对微裂隙结构具备一定修复能力;静压压路机则担任整形与表层稳定的任务,使压实效果更为均匀。机械配置若不匹配,会导致不同层次的能量叠加不足,致使压实过程出现表层密实但深层不足的情况。此外,行走速度、激振频率、激振幅值、碾压轨迹与重叠宽度等参数均会改变施工能量的传递路径,使压实反应呈现复杂变化。现场施工组织若未能对机械参数进行协调,使得压实能量在空间与时间上的分布不均,也会影响压实度随遍数增长的规律,使压实区段出现明显差异,进一步增加压实遍数设定的难度。

3 压实遍数—压实度关系的现场验证路径

在探讨压实遍数与压实度之间的对应关系时,现场验证路径的构建成为关键环节。为了捕捉压实反应随遍数变化的真实规律,需要在填筑区段中划分不同试验单元,使各单元在材料来源、填料级配和含水量控制方面保持一致,以减少外界变量对压实结果的干扰。试验区段的厚度、摊铺方式与整平工序需严格按照规范执行,使压实能量能够在土层内均匀分布^[3]。通过设置不同的碾压次数组别,逐遍记录干密度与压实度指标,使压实过程的动态变化得以量化。试验设计的核心在于保持变量单一,使压实遍数成为唯一可控因子,使压实度的变化曲线更具代表性,为后续分析提供可靠基础。

在测试实施阶段,需要采用具备精确性的测定方法对压实过程中各遍数节点进行监测。核子密度仪、灌砂法、环刀法等测定方式可根据材料特性与施工环境灵活选择,使干密度和含水量的测定数据保持稳定性。部分区域若存在振动影响或水分扰动,可通过增加重复测点的方式提升数据有效性。在压实过程中,应记录振动频率、激振幅值、压路机速度、轮迹重叠幅度等参数,使试验条件与机械能量输出形成可追溯记录。为了观察土体结构在不同遍数下的内部变化,还可在必要时设置沉降观测点或采用便携式剪切波速测试设备,用于反映土体结构

压实状态,以辅助验证压实度趋势的真实性。通过对多项参数同步记录,使压实遍数与压实效果之间的耦合关系能够在数据层面得到充分体现。

在结果收集和分析阶段,需要将不同遍数对应的干密度、压实度及含水量结合区段条件进行系统整理,使压实度随遍数变化的曲线更加清晰。为识别增长阶段、拐点位置和稳定区间,可采用分段拟合方法对干密度增长趋势进行分析,同时观察含水量波动是否引起短时异常点,从而筛除不具代表性的数据。对于不同试验单元,可通过横向对比判断材料差异、施工条件或机械能量分布对压实响应的影响程度,使压实遍数的最优区间逐步成型。通过现场验证路径的系统化设计,使压实遍数与压实度之间的对应关系从经验判断转变为可量化的实测规律,为压实参数的确定提供充分的数据支撑。

4 压实度变化规律及控制区间的解析

压实度在填筑施工中的变化呈现渐进式特征,颗粒结构在压实能量的持续作用下逐步趋于稳定,使压实曲线具备可识别的阶段性的。初始阶段的土体内部孔隙率较高,颗粒接触面数量有限,结构尚未形成有效的受力体系,外加载荷主要促使孔隙空气排出与颗粒局部滑移。随着振动能量不断传入,颗粒开始重新排列并建立骨架体系,干密度出现明显提升,压实度在短时间内表现出较大的增长幅度^[4]。此阶段的压实响应往往受含水量左右,处于最佳含水量附近时,润滑效应增强颗粒流动性,使密实过程更为充分;若含水量偏离最佳区间,则可能因摩阻力增大或孔隙水压力累积而削弱密实效率,使压实曲线在不同位置呈现差异。

在压实进入中段时,结构重排逐渐接近完整状态,颗粒之间形成多向嵌挤关系,孔隙压缩率显著降低,压实度增长速度随之减缓。此时,增大遍数能够继续改善密实性,但单位能量对干密度提升的贡献呈下降趋势。部分材料在振动条件下会产生微颗粒剥离或局部破碎,使结构出现短暂的扰动现象,使压实曲线在特定遍数区段出现轻微波动。若填料颗粒级配较差或存在弱夹层,振动能量的作用深度会受到限制,使表层与深层的密实度差异加大,进一步影响压实变化规律的连续性。机械配置变化、行走速度调节不当或压路机激振参数偏差,也会在此阶段对压实反应施加影响,使压实度的增长趋势更加依赖现场控制。

压实过程进入后段后,土体结构基本形成稳定受力体系,内部孔隙趋近饱和和压缩状态,使压实度变化曲线呈明显平台化特征。此时的压实能量主要用于细微结构的再紧密,而不足以显著提高整体干密度,压实增长率接近零。继续增加遍数会使压实行为转变为表层反复揉压,使深层密实度难以进一步提升。为了确定压实的有效控制区间,需要对不同阶段压实反应的趋势进行数据拟合,通过增长率变化判断拐点位置,并结合干密度与含水量的稳定性分析压实度的临界范围。快速增长

区、缓慢增长区与稳定区的划分,使压实遍数的控制具备明确依据,可将能量利用效率最高的区段作为目标范围,使压实质量与施工效率达到协调状态。

5 压实遍数优化依据与规律归纳

压实遍数的优化依托于现场数据所呈现出的压实规律,需要在干密度增长趋势、含水量稳定性与机械能量分布之间寻找可量化的控制参数。压实度随遍数变化的曲线体现出压实能量利用效率的差异,使增长区、缓慢区与稳定区的界限成为优化遍数的重要判断依据。当增长速率处于较高水平时,压实能量能够显著促使颗粒结构重排,填料骨架形成更紧密的受力体系;当增长速率下降至某一临界点后,再增加遍数已难以提升密实度^[5]。压实遍数的设定便需围绕这一临界区间展开,通过分析增长曲线斜率变化与数据离散度,确定最具施工效率的能量投入范围,使压实控制具备明确的参数基础。

在不同工况下,含水量分布与材料特性的耦合作用对压实遍数优化产生关键影响。材料若处于接近最佳含水量条件,压实反应对能量变化的敏感性较高,适宜遍数区间更容易被识别;而含水量偏离最佳范围时,压实过程往往需要额外能量补偿,使曲线拐点位置发生偏移。填料颗粒级配、塑性指数、压缩模量等工程参数也会影响压实反应速率,使不同土质呈现出不同的最佳遍数区段。通过分析试验区段的结构响应特征,可对不同填料类型建立对应的压实参数,从而形成可跨区域应用

的控制体系。机械作业模式同样构成压实遍数优化的依据,包括压路机的激振频率、碾压轨迹、行走速度与荷载分布等因素,它们决定压实能量的传递深度与有效范围,使遍数优化的判断更加依赖现场工况的协调性。

在实际施工策略制定中,可通过数据拟合与区段对比,使适宜遍数范围得到明确区分,将压实增长效果最显著的阶段作为重点控制区。通过对曲线拐点位置、干密度增幅以及含水量稳定性的综合分析,可建立压实遍数的判定指标,使不同区段的压实控制更具针对性。当压实度趋于稳定时,可将该范围视为压实完成的判定依据,使机械投入与能量消耗处于合理区间。规律归纳的核心在于通过现场验证形成可复核的控制方式,使压实遍数的设定不再依赖单一经验判断,而是基于材料—能量—结构反应的系统关联,实现压实质量的连续可控。

6 结语

压实遍数与压实度之间的关联在现场条件下呈现出复杂性,但其变化规律依然能够在数据分析中展现清晰脉络。随着试验区段的系统化验证,压实反应的阶段特征、拐点位置与控制区间逐步明确,使施工决策具备可靠依据。材料特性、含水量分布与机械能量输出共同塑造压实过程,使压实遍数的优化具有可量化基础。围绕这些实测规律形成的控制体系,使路基填筑的质量管控从经验操作转向科学判断,为稳定施工品质奠定技术条件。

参考文献:

- [1] 李明宇,姜哲,刘鑫磊. 堤防工程土石方现场压实度规律分析与预测[J].水利技术监督,2025,(12):185-186+261.
- [2] 郭承崑,朱志武,徐硕艺,等. 压实度对冻土冲击力学性能影响及其动态本构模型[J/OL].兵工学报,1-10[2025-12-10].
- [3] 唐世禄. 公路工程路基压实度控制关键技术与影响因素[J].大众标准化,2025,(20):37-39.
- [4] 李文亮,谢永军,雷鹏飞,等. 热拌沥青混合料温度和压实遍数对其热传导的影响试验研究[J].机械工程师,2025,(08):132-135+139.
- [5] 季征,刘绍平. 不同配重压路机对路基压实度与碾压遍数关系的影响[J].黑龙江交通科技,2023,46(11):11-15.