

路基填筑施工工艺及压实质量控制研究

狄 雄

吴忠市市政建设管理中心 宁夏 吴忠 751100

摘 要：路基填筑是公路（市政道路）与铁路工程建设中的核心环节，其施工工艺选择与压实质量控制直接决定路基的承载能力、稳定性及耐久性。本文系统梳理了当前主流的路基填筑施工工艺，包括分层填筑法、水平分层碾压法及冲击压实法，并分析了填料类型、含水率、碾压参数及施工环境对压实效果的影响机理。在此基础上，从压实度检测、沉降差控制及动态变形模量评估三个维度构建了压实质量综合评价体系，探讨了智能压实监控系统与连续压实检测技术等自动化检测手段的应用前景。研究表明，精细化工艺控制与全过程动态质量监测相结合，是提升路基填筑压实质量的有效路径，相关结论可为类似工程提供理论参考。

关键词：路基填筑；施工工艺；压实质量；压实度；智能压实；连续检测

引言

路基作为公路（市政道路）与铁路结构物的基础载体，其填筑质量直接关系到上部结构的安全服役与使用寿命。近年来，随着我国交通基础设施建设的快速推进，高速铁路、高速公路等高等级线路对路基变形控制与长期稳定性提出了更为严格的要求，而填筑压实质量则是实现上述性能目标的关键约束条件。然而，实际工程中因填料选择不当、含水率控制失准、碾压工艺参数设置不合理等因素导致的路基发生不均匀沉降、边坡失稳乃至结构性破坏事件时有发生，反映出当前路基填筑施工工艺与质量控制体系尚存在改进空间。压实是路基填筑中最核心的工艺环节，其本质原理是通过外力使填料颗粒重新排列、孔隙比减小，从而提高土体密实度与强度。为此，本文立足于现有研究成果，对路基填筑施工工艺体系进行系统分类与机理分析，并在此基础上构建压实质量的多维度控制框架，以期为施工实践与质量控制提供相应参考。

1 路基填筑施工工艺体系

1.1 填料类型与技术要求

路基填料按其来源可分为土质填料、石质填料及土石混合填料三大类，不同填料具有差异显著的物理力学特性，因而对施工工艺提出不同要求。细粒土填料压实性能受含水率影响极为敏感，宜在最优含水率附近进行碾压；粗粒土与碎石类填料则具有较好的透水性与承载力，但级配不良时易出现离析现象，影响压实均匀性；土石混合填料兼具两者特点，施工中需重点关注含石率与最大粒径的控制。现行规范对各类填料的粒径、液塑限、CBR 值等指标均有明确规定，施工单位应根据填料

检测结果动态调整施工参数，避免“一刀切”式的固定工艺套用。

1.2 分层填筑与摊铺整平工艺

分层填筑是目前路基施工中最广泛采用的作业方式，其核心在于控制每层填筑厚度与摊铺均匀性。一般而言，松铺厚度应根据压实机具的压实功、填料类型及设计压实度综合确定，细粒土宜控制在 20~30cm，粗粒土可适当增大至 30~40cm，但不宜超过压实机具的有效作用深度。摊铺整平作业通常采用推土机初平配合平地机精平，确保填筑表面平整度满足碾压要求，同时形成 2%~4% 的双向横坡以利于排水。在实际操作中，应严格避免超厚填筑或薄层贴补，前者导致底部压实不足，后者则易形成软弱夹层，两者均会对路基整体稳定性造成隐患。

1.3 碾压施工工艺参数

碾压是压实质量形成的决定性环节，其工艺参数主要包括碾压速度、碾压遍数、压实机具类型及振动频率与振幅。光轮静压路机适用于黏性土及细粒土的初步压实，但压实效率较低；振动压路机依靠激振力使颗粒重新排列，适用于粗粒土及碎石类填料，也是当前应用最广的压实设备；冲击压路机则凭借大振幅低频率的特点，可用于高填方路基的补强压实^[1]。碾压速度通常控制在 2~4km/h 范围内，速度过快会使压实能量无法充分传递，速度过慢则影响施工效率。碾压遍数应通过试验路段确定，一般为 6~8 遍，其中前 2 遍为静压，中间遍数为振压，最后 1~2 遍为静压收面。此外，振动频率与振幅的选择应匹配填料自振频率，粗粒土宜选用高频低幅，而黏性土则适用低频高幅。

1.4 特殊条件下的工艺调整

在雨季、低温或高地下水位等特殊施工条件下,常规施工工艺往往难以保证压实质量,需进行针对性调整。雨季施工时,应密切关注填料含水率变化,采取翻晒、掺灰等措施降低含水率至最优范围,同时加强排水设施建设,避免路基积水浸泡。低温季节施工时,应避免使用冻土作为填料,并缩短填筑与碾压之间的时间间隔,防止填料在碾压前即发生冻结。对于高填方路段,建议采用分层强夯或冲击碾压进行补强,以减少工后沉降;对于软弱地基过渡段,则应通过调整填筑速率、铺设土工格栅等方式,确保压实过程中地基不发生剪切破坏。

2 压实机理与影响因素分析

2.1 压实机理的力学阐释

从土力学角度分析,压实过程实质上是外荷载作用下土体内部有效应力增加、孔隙气体排出、颗粒重新定向排列的过程。在振动压实条件下,振动荷载产生的周期性应力波使土颗粒产生强迫振动,从而克服颗粒间的摩擦力和黏聚力,实现颗粒向更紧密状态的迁移。对于黏性土,压实效果受结合水膜厚度影响显著,当含水率接近最优值时,水膜的润滑作用最为有利,颗粒排列最为紧密;而对于无黏性土,压实主要依赖颗粒级配的重组,良好的级配可使小颗粒充填大颗粒间的孔隙,形成良好的嵌挤,从而提高密实度。

2.2 含水率对压实效果的影响

含水率是影响压实密度的首要因素。大量试验表明,在含水率低于最优值时,土体呈干硬状态,颗粒间摩擦阻力大,难以被有效压实;当含水率逐渐增加至最优值附近,水膜润滑作用使颗粒易发生相对滑动,压实密度达到峰值;若含水率继续增大,孔隙水压力上升,有效应力降低,反而不利于压实,甚至出现“弹簧土”现象^[2]。因此,施工过程中必须对填料含水率实施动态监测,偏干时应适量洒水,偏湿时应进行翻松晾晒或掺入生石灰等改良剂。

2.3 碾压参数与压实质量的关联规律

碾压参数对压实质量的影响呈现非线性耦合特征。碾压遍数与压实度之间的关系通常表现为初期增长显著、后期趋于平缓的对数型曲线,当碾压遍数超过经济遍数后,继续增加遍数对密实度提升效果有限,反而可能导致颗粒破碎或表面松散。碾压速度通过影响单位面积上振动荷载的作用次数来调节压实效果,速度每提高1km/h,有效作用次数约减少20%~30%,需相应增加碾压遍数以补偿。此外,压实层厚度与压实功存在匹配关系,当层厚超过压实机械的有效影响深度时,下层密实

度难以保证;而当层厚过薄时,则易造成过度破碎或表层起皮。此外,还需综合考量土体含水率、振动频率及振幅等关键参数,以优化整体压实效果。

2.4 填料级配与颗粒破碎效应

填料级配的优劣直接影响压实的难易程度与最终密实度。连续级配的填料,其粗颗粒构成骨架,细颗粒填充孔隙,在碾压过程中能够形成较为致密的嵌挤结构,压实密度高且稳定性好。间断级配或单一粒径的填料则因缺乏中间粒径颗粒,不均匀系数与曲率系数不满足设计要求,孔隙率较大,压实后仍存在较多空隙,且易发生颗粒离析难以密实。值得关注的是,在振动压实过程中,粗颗粒尤其是软质岩石颗粒可能发生破碎,从而改变原有级配,对压实质量产生双向影响:适度的破碎有利于填充孔隙,但过度破碎则会削弱骨架作用,降低承载能力。

3 压实质量控制方法与评价体系

3.1 压实度检测法及其适用性

压实度(K)定义为现场实测干密度与室内标准击实试验所得最大干密度的比值,是目前工程中最常用且最直接的压实质量评价指标。现场检测方法主要有灌砂法、灌水法及环刀法。灌砂法适用于各类细粒土及粗粒含量较少的混合料,不适用于填石路基等有大孔隙材料的压实度检测,其精度较高但操作繁琐;环刀法简便快捷,但仅适用于细粒土,对含碎石较多的粗粒土不适用;灌水法则可用于粗粒土及砾石土。压实度检测的抽样频率与点位布置应遵循数理统计抽样原则,按照公路工程质量检验评定标准,每200m每压实层测2处。

3.2 沉降差控制法

沉降差控制法是基于碾压过程中填筑层在特定碾压遍数下的沉降量差值来间接评价压实质量的方法,尤其适用于粗粒土和碎石类填料。其基本原理是:当填料达到较高密实度后,继续碾压产生的沉降量将显著减小。通过每隔20m设置一个观测断面,每个断面沿横断面方向每隔5~10m均匀布设沉降观测点,测量最后两遍碾压前后的高程差,若该差值小于规定限值(通常为2~5mm),则判定压实合格^[3]。沉降差法不需进行现场取样,检测速度快,适合大面积连续施工作业的快速评估。但该方法受下承层刚度、碾压速度及振动参数波动影响较大,需结合试验路段标定结果合理确定沉降差控制标准。

3.3 动态变形模量评价方法

动态变形模量(Evd)是通过落锤式弯沉仪或手持式轻型落锤测试仪测定路基表面在冲击荷载下的动态响

应,从而反映路基整体刚度与压实均匀性的指标。Evd 检测具有无损、快速、可重复性强的优点,且与路基承载能力具有较好的相关性,已逐步在高速铁路和高速公路路基质量验收中得到推广应用。研究表明,Evd 值与压实度之间存在一定的正相关关系,但由于二者反映的物理本质不同(压实度为密度指标,Evd 为刚度指标),不宜简单替代,而应作为互补性指标。在实际控制中,可建立填料类型与压实标准对应的 Evd 阈值,用于施工过程的实时质量监控。

3.4 智能压实与连续检测技术

近年来,智能压实技术(Intelligent Compaction, IC)的发展为压实质量控制的实时化与智能化提供了有力工具。智能压实系统通过在振动压路机上集成加速度传感器、GPS 定位模块及数据采集处理单元,实时监测压实过程中振动轮与填料的相互作用力响应,并计算得到连续压实检测值(如 CMV 或 CCV),从而实现对压实质量的“逐点、连续、全覆盖”评估。其核心优势在于能够即时识别压实薄弱区域,指导操作人员调整碾压遍数或速度,避免欠压或过压,并生成完整的压实质量电子档案。目前,基于机器学习的智能压实预测模型也在快速发展中,通过对大量现场数据的训练,可实现基于填料参数与碾压参数的压实质量超前预判。尽管智能压实技术的推广应用尚面临传感器标定、不同填料适应性及数据管理标准不统一等问题,但其代表了压实质量控制从“事后抽样”向“过程动态控制”转变的必然趋势。

4 施工过程质量控制策略

4.1 施工前的准备与试验路段

在正式填筑施工前,必须进行试验路段施工,其长度不宜小于 200m,宽度覆盖路基全幅。通过试验路段,确定合理的松铺厚度、碾压遍数、碾压速度、振动参数及含水率控制范围,并建立压实度、沉降差及 Evd 等指标之间的相关性关系,为后续大规模施工提供工艺参数基准^[4]。试验路段的检测数据应经监理单位及建设方共同确认后方可作为施工控制依据。

4.2 施工中的动态控制机制

施工过程中应建立“实时检测—反馈调整—再检测”的动态闭环控制机制。每层填筑碾压完成后,及时进行压实度或 Evd 检测,若发现不合格区域,应分析原因(如含水率偏离、碾压遍数不足或局部离析)并采取相应补压或换填措施。同时,应做好施工记录,包括填料来源、含水率检测值、碾压遍数、环境温度及湿度等

信息,为质量追溯提供数据支持。对于采用智能压实系统的项目,现场管理人员应充分利用实时显示的压实图谱,有针对性地对颜色异常(即压实值偏低)区域进行重点检查和补强。

4.3 工序衔接与层间处理

路基填筑的工序衔接直接关系到压实质量的连续性与均匀性。上层填筑前,应对下层顶面进行检查,确保其平整度、压实度及横坡满足要求,并清除表面浮土、杂物或松散颗粒。若下层表面已干燥,应适当洒水湿润后再进行上层摊铺,以利于层间结合。对于压实层间的纵横向接缝处,应错缝搭接,避免形成贯通的软弱界面。此外,雨季施工时,每一层填筑完成后应将表面做成路拱状,以利排水,且雨后需待表面晾干后方可进行下一层填筑。

5 结语

路基填筑压实质量是交通基础设施服役性能的关键,涉及填料、工艺、检测及管理等多层面。本文从施工工艺出发,分析填料类型、分层摊铺及碾压参数,探讨含水率、级配等对压实机理的影响。针对质量控制,指出压实度、沉降差与动态变形模量各有局限,智能压实技术为全过程动态监控提供新路径。提升压实质量核心在于三点:一是试验先行,通过试验路段确定匹配填料特性的工艺参数;二是过程严控,建立含水率、遍数及速度的实时监测反馈机制;三是多维评价,融合传统检测与智能监控,实现从结果验收向过程控制的转变。未来研究应聚焦智能压实模型普适性优化、检测数据与力学性能的定量关系建立,以及全流程数字化追溯平台构建,推动路基施工技术向高质量、高效率方向发展。

参考文献

- [1] 张明,王海涛,李志强.高速铁路路基粗粒土填料压实特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(4): 956-964.
- [2] 陈建勋,刘伟,赵建华.基于连续压实检测技术的路基压实质量评价方法研究[J].岩土工程学报,2023,45(2): 312-320.
- [3] 刘松玉,周正明,吴志刚.路基填料含水率对压实效果影响规律分析[J].公路交通科技,2021,38(7): 45-53.
- [4] 王复明,李勇,张鹏.智能压实系统的力学原理与工程应用进展[J].中国公路学报,2022,35(10): 1-14.