

公路路基施工中的压实度控制方法

唐钊城

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘要 针对公路路基压实施工中工艺参数经验化、含水率管控滞后、质量依赖事后抽检、过程管控精细化不足等问题, 本文以推动压实质量管控从事后检测向全过程动态控制转型为目标, 从碾压工艺优化、含水率精准调控、检测体系升级、数字化平台搭建四个方面提出多源数据融合的全过程动态管控体系, 明确核心控制要点与技术路径, 以期对推动压实质量管控模式转型有所裨益, 进而提升路基施工精细化管控水平。

关键词 公路路基; 压实度控制; 智能压实; 含水率控制; 工艺参数优化

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.013

0 引言

路基压实度是公路路基施工质量控制的核心指标, 直接决定路基结构的承载强度、抗变形能力与长期服役稳定性, 是保障公路工程全生命周期运营安全的关键环节。当前路基压实施工中普遍存在工艺参数凭经验确定、含水率管控滞后、质量依赖事后抽检、过程管控精细化不足等问题, 极易引发路基不均匀沉降、路面开裂等病害。本文系统探究路基施工全过程压实度控制方法, 推动压实质量管控从事后检测向全过程动态控制转变。

1 碾压工艺参数的控制要点

碾压工艺是决定路基压实度的关键, 参数设置直接影响压实能量传递、填料密实度及均匀性。从流体力学机理看, 碾压是通过静压、振动、冲击等作用, 克服填料颗粒间摩擦力与黏聚力, 使颗粒嵌挤密实、减小孔隙, 形成稳定结构。该过程需科学匹配松铺厚度、碾压遍数等工艺参数^[1]。施工前应通过试验段, 结合填料、机械与设计标准开展多参数对比, 建立“填料—机械—参数—效果”的对应关系, 形成标准化工艺体系。试验段既可确定合理参数, 也能提升操作人员技能, 保证大规模施工质量稳定。以下从松铺厚度、碾压遍数及碾压组合三方面说明碾压工艺控制要点。

1.1 松铺厚度的合理确定

松铺厚度直接影响压实能量的传递效果和压实均匀性, 厚度过大时, 难以为深层填料提供足够的压实能量, 导致底部压实度不足; 厚度过小则影响施工效率。针对不同类型填料, 应通过试验段确定合理的松铺厚度。对于细砂填料, 采用推土机按纵横方向交替碾压时,

松铺厚度控制在 35 cm 左右可获得最佳压实效果^[2]。这一结论的得出是基于对不同松铺厚度 (25 cm、30 cm、35 cm、40 cm) 的对比试验: 厚度 35 cm 时, 压实后各测点压实度变异系数最小, 且压实度平均值满足设计要求; 厚度 40 cm 时, 底部压实度明显低于上部, 出现明显的层间差异。对于土石混填路基, 由于填料粒径较大、级配复杂, 松铺厚度应根据最大粒径控制, 一般不宜超过最大粒径的 1.5 倍, 且最大松铺厚度不应超过 40 cm。

1.2 碾压遍数与碾压速度的优化

在振动压路机作业时, 碾压速度过快会导致在表层过度耗散振动能量, 深层压实效果下降; 速度过慢则影响施工效率。施工单位应根据压路机型号和填料特性, 在试验段中采用不同速度组合进行对比。从智能压实系统的应用实践来看, 将初压速度控制在 2.6 ~ 2.9 km/h 范围内, 相比传统的 2.5 ~ 4.4 km/h 速度区间, 速度变异系数明显减小, 压实度的均匀性显著提升^[3]。这一控制区间的价值在于: 速度过低时 (< 2.5 km/h), 在振动作用下容易产生过压破坏填料, 粗颗粒可能发生破碎; 速度过高时 (3.5 km/h), 振动能量来不及向深层传递, 表层虽已密实但底部仍较松散。细砂填料试验表明, 采用推土机纵横方向交替碾压 6 遍后, 压实度增长率趋缓, 继续增加碾压遍数对压实度提升贡献有限。土石混填路基由于粗颗粒含量高, 需要更多的碾压遍数以促进颗粒重排和嵌挤, 一般控制在 8 ~ 10 遍。

1.3 碾压组合与作业方式

在机械选型与组合上, 应根据填料类型合理搭配。细砂填料宜用推土机纵横交替碾压, 利用履带低接地

作者简介: 唐钊城 (1996-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 高速扩容施工。

比压使颗粒稳定排列；黏性土填料采用“静压+弱振+强振”振动压路机组合，以高频振动克服土粒黏聚力；土石混填路基按“推土机初压—振动压路机复压—静压收光”梯次作业，依靠大吨位振动压路机实现粗颗粒嵌挤密实。碾压速度与频率需协同控制，常规路段速度宜为3.0~4.0 km/h，保证能量传播深度与工效平衡。高液限黏土、台背回填等特殊部位降至2.0~2.5 km/h，延长作用时间提升压实效果。作业应遵循“由边向中、由低向高”顺序，轮迹重叠30~50 cm，采用进退错距法施工，轨迹交错无漏压。桥涵台背、管线沟槽等狭小区域，用小型振动压路机或冲击夯补强，松铺厚度不大于15 cm，补压遍数增加2~4遍、夯实不少于4~6次，完工后检测确保压实质量达标。

2 填料含水率的精准控制措施

含水率过高时，土体内孔隙水压力增大，抑制颗粒重排和相互嵌挤，压实机械作用力主要被孔隙水吸收，不仅压实困难，还容易形成“弹簧土”现象，严重时需翻晒处理甚至返工；含水率过低时，颗粒间润滑作用不足，摩擦阻力过大，压实能量主要用于颗粒破碎而非重排密实，即使增加碾压遍数也难以达到设计压实度。因此，建立覆盖填料源头、运输过程、摊铺现场和碾压作业全流程的含水率精准控制体系，是保障路基压实质量的重要前提。

2.1 填料含水率的实时检测

近年来，近红外光谱检测技术为含水率实时监测提供了新手段。集成近红外水分计的智能压实系统，可通过1 300~2 500 nm波长的近红外传感器，以10 Hz的采样频率实时检测填料含水率，检测结果与烘干法相关性 R^2 达到0.96。这一技术可帮助操作人员实时掌握含水率变化，及时采取洒水或翻晒措施^[4]。对于施工单位而言，在预算允许的情况下，可在压路机上集成近红外水分检测模块，实现含水率与压实度的协同控制。

2.2 不同填料的含水率控制策略

对于黏性土填料，含水率控制的难度在于其最佳含水率窗口较窄（通常为±2%），且水分在土体内部分布不均匀。施工中应重点加强以下几个方面：一是取土场提前翻松、晾晒或洒水，使含水率接近最佳值；二是填筑过程中检测含水率，超标时及时处理；三是黏性土包边的砂土路基，包边层对内部砂土的保湿作用明显，可减少水分蒸发引起的压实度衰减。对于砂性土和土石混填填料，含水率的影响相对较小，但仍需注意：砂性土在干燥状态下松散难压实，适当洒水

增加润滑有助于密实；土石混填料含水率过高时，细料容易黏附在振动轮上形成“糊轮”，影响压实效果。

2.3 含水率与压实度的耦合控制

含水率和压实度之间存在耦合关系，在高含水率条件下（10%），单纯依赖振动压实指标评价质量会产生8%~15%的偏差，原因在于细颗粒的润滑作用改变了振动响应特征。因此，施工单位在进行压实度控制时，应结合含水率检测结果综合判断。对于含水率偏高的区段，可适当增加碾压遍数或调整振动频率；对于含水率偏低的区段，应先补水闷料后再碾压。

3 压实度检测方法的选择与应用

压实度检测是验证路基施工质量、完善质量闭环的关键手段，主要承担质量判定、工艺反馈、数据追溯三重功能。不同检测方法在原理、效率、代表性等方面差异显著，单一方法难以满足全流程质量控制需求：传统点式检测直观但效率低、代表性有限，智能连续检测全覆盖但设备投入大。因此，需结合填料类型、精度要求和成本，构建梯次检测体系，提升检测效率与质量。下文将从传统检测、Evd应用、智能连续检测三个方面阐述其特点与适用场景。

3.1 传统检测方法的适用性

灌砂法是目前现场压实度检测的主要方法，其原理简单、结果直观，但存在明显的局限性：一是检测点代表范围小，一个直径20 cm的试洞仅能代表局部情况，对于土石混填等非均质填料，检测结果的变异系数可达15%以上；二是检测效率低，单个测点从挖坑到完成检测约需30~40分钟；三是破坏性检测，补挖的坑洞回填压实质量难以保证。环刀法适用于细粒土，操作简便但易受人为因素影响。对于粗颗粒含量超过30%的填料，环刀法不适用，应采用灌砂法或水袋法。

3.2 动态变形模量Evd的应用

动态变形模量Evd是一种通过落锤冲击测量路基刚度的快速检测方法，与传统的压实度指标（K30、压实系数）相比，具有检测速度快（单个测点约2~3分钟）、操作简便、数据离散性小等优势。对于细砂填料，Evd在检测效率、数据准确性和现场适应性方面均优于地基系数K30，宜作为砂土路基压实质量的核心控制指标。在实际应用中，施工单位可建立Evd与压实系数之间的相关关系，通过Evd快速检测来推断压实度，提高检测效率。

3.3 智能连续检测技术

智能压实系统在振动压路机上安装加速度传感器，实时采集钢轮振动响应信号，经过频谱分析后得到压

实度值 (CMV) 或者压实控制值 (CCC), 从而完成全路段的连续检测。智能压实技术最新发展就是把振动响应检测和实时变形监测结合起来, 用土壤压缩变形连续监测系统实时记录碾压过程中土体变形量, 从而成为压实质量评价的物理指标, 结合多源数据建立压实度评价模型, 大大提高了评估的泛化能力。对施工单位来说, 智能压实系统的价值在于可以实时显示压实度分布云图, 直观地反映出欠压区域, 可以记录碾压轨迹、遍数, 防止漏压、超压, 生成数字化的质量档案, 便于后期的追溯、分析。土石混填路基中智能压实系统遇到的难题是粗颗粒含量多的时候, CMV 指标会因为石块跳动而受到影响。为此, 可以采用基于 CMV 和近红外水分检测融合的双模控制方法, 用边缘计算模块 (50 ms 处理时间) 识别异常数据来提高压实合格率。

4 数字化管控系统的构建

随着新一代信息技术的发展, 路基压实控制由依靠人工管理向数字化转变。数字化管控依靠传感器感知、实时传输等技术来达成压实过程透明化, 包含数据采集、传输处理、应用决策这三个层次。应用可以防止漏压、过压问题, 使工艺向数据驱动发展。下文从系统组成、动态优化、实施要点三个方面来阐述它的构建和应用。

4.1 智能压实监控系统的组成

智能压实监控系统是由车载传感器模块 (加速度计、红外测温传感器、GPS 定位)、数据采集与传输模块 (LoRa/Wifi/5G)、数据处理与显示终端、云平台管理后台等组成的系统。系统可以对压路机的行驶速度、碾压遍数、振动状态、压实度等进行实时采集, 并将采集到的数据传送到操作手的车载终端上, 同时将数据上传到管理平台供质量管理人员查看。例如: 软基智控平台可以实时检测掺灰量、含水率, 结合压路机速度、轨迹数据来智能识别欠压区和过压区, 并给出现场纠偏指导, 保证路基压实的稳定。

4.2 基于多源数据的动态优化

数字化管控的更高层次是根据采集到的数据来动态调节工艺参数, 如智能混合方法, 现场试验得到不同振动模式、碾压速度下土体的压实情况, 用遗传算法动态优化碾压参数, 提高了压实土体的密实度和均匀性^[5]。对于施工单位来说, 压实控制不再只是经验驱动的静态过程, 而是数据驱动的动态优化过程。施工过程中系统根据实时反馈的压实度数据对碾压速度、振动频率等参数进行调节, 保证路基压实质量的均匀、稳定。

4.3 数字化管控的实施要点

构建数字化管控系统需要把握以下几个实施要点: 首先, 系统选型应匹配工程实际, 对于高等级公路大型项目可选择功能完备的智能压实系统, 而对于中小项目或试验段则可采用便携式监测设备进行重点控制, 避免盲目追求高端配置造成资源浪费。其次, 数据采集的准确可靠是系统发挥作用的基础, 传感器应定期标定以确保测量精度, GPS 定位精度需满足要求, 数据传输通道要保持稳定通畅, 从源头保证数据的可信度。再者, 数据分析必须与现场决策紧密结合, 系统生成的压实度云图、欠压区域标识等信息不能仅作为质量档案留存, 而应直接用于指导补压作业, 避免“只采集、不应用”的形式主义倾向。最后, 人员培训要落实到位, 操作手和管理人员不仅需要掌握系统的基本操作, 更应理解其工作原理, 能够正确解读系统提示信息, 并根据提示及时采取相应措施, 真正实现人机协同的精细化管控。

5 结束语

公路路基压实度控制是一项系统性工程, 涉及工艺参数优化、含水率精准控制、检测方法选择和数字化管控等多个方面。从施工单位的角度出发, 应建立全过程控制的理念, 实现从“事后检测”向“过程控制”的转变。在工艺控制方面, 通过试验段确定松铺厚度、碾压遍数、碾压速度等参数, 并根据现场反馈动态调整; 在含水率控制方面, 引入近红外光谱等实时检测技术, 实现含水率与压实度的协同控制; 在检测方法方面, 综合运用传统检测、Evd 快速检测和智能连续检测, 提高检测效率和代表性; 在管理方面, 构建数字化管控系统, 实现压实过程的可视化、可追溯、可优化。通过综合应用上述措施, 可有效提升路基压实质量控制的精细化水平, 保障公路工程的长期服役性能。

参考文献:

- [1] 唐世禄. 公路工程路基压实度控制关键技术 with 影响因素 [J]. 大众标准化, 2025(20):37-39.
- [2] 李云. 公路工程路基填方施工技术要点及压实度控制研究 [J]. 建筑机械, 2025(10):270-273.
- [3] 苟红军. 公路路基施工过程的压实度控制方法 [J]. 大众标准化, 2025(13):96-98.
- [4] 花远东, 温小华. 路基填筑技术及质量控制措施研究 [J]. 运输经理世界, 2025(18):25-27.
- [5] 田雨. 公路路基施工过程中的压实质量控制与评估方法 [J]. 工程机械与维修, 2025(05):129-131.