

公路工程路基路面压实施工技术措施分析

张康阳

河南中州路桥建设有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8526

[摘要] 压实质量直接关系到公路工程的承载能力、耐久性与全寿命周期成本。依照“材料—设备—工艺—检测—管理”链条展开，本文在完成压实机理与控制要点梳理的基础上，全面剖析路基及沥青路面压实的关键技术手段，涉及到含水量与密实度的控制情况、分层厚度与碾压制度的优化情况、振动参数与温度窗口的匹配情况、接缝与边部的加固处理情况以及质量检测与过程的管控情况。进而从施工准备、过程控制与风险预控三个角度，提出针对不同土质、不同气候和不同结构层的压实对策，又给出“某”项目的实际实施事例，以证实措施的可操作性及工程效果。研究表明：控制最佳含水量附近的施工含水、精细化组织分区碾压、合理选配压实机械并匹配层厚与振动频幅、强化接缝与边部密实以及采用过程—结果一体化检测，是确保压实成效和均匀性的核心抓手。本文结论可为同类工程压实方案编制与现场质量控制提供参考。

[关键词] 公路工程；路基路面；技术分析

Analysis of Technical Measures for Compaction Construction of Roadbed and Pavement in Highway Engineering

Zhang Kangyang

Henan Zhongzhou Road and Bridge Construction Co., Ltd.

[Abstract] The compaction quality is directly related to the bearing capacity, durability, and full life cycle cost of highway engineering. Following the chain of "materials equipment process testing management", this article comprehensively analyzes the key technical means of roadbed and asphalt pavement compaction based on the sorting of compaction mechanism and control points, involving the control of moisture content and compactness, optimization of layer thickness and rolling system, matching of vibration parameters and temperature windows, reinforcement treatment of joints and edges, and quality inspection and process control. Furthermore, from the perspectives of construction preparation, process control, and risk pre control, compaction strategies are proposed for different soil types, climates, and structural layers. An actual implementation example of a "certain" project is also provided to demonstrate the operability and engineering effectiveness of the measures. Research has shown that controlling the construction moisture content near the optimal moisture content, refining the organization of zone rolling, selecting compaction machinery reasonably and matching layer thickness and vibration frequency, strengthening joint and edge compaction, and adopting process result integrated detection are the core measures to ensure compaction effectiveness and uniformity. The conclusion of this article can provide reference for the preparation of compaction schemes and on-site quality control in similar engineering projects.

[Key words] highway engineering; Roadbed and pavement; technical analysis

引言

公路工程质量失效的大量病害，如沉陷、车辙、松散与裂缝等，均与压实不足或压实不均匀有显著相关性。压实的本质是在外力作用下使土颗粒或混合料骨架趋于最紧密排列、孔隙率下降、强度与刚度提升。路基土受含水量情况的影响十分显

著，沥青混合料受温度与黏度特性的掌控，可见二者在压实目标一致的当口，控制参数跟有效范围不一样：前者突出含水量和能量输入的相互匹配，后者聚焦于温度、黏度、层厚与能量的耦合效应，工程实践里常出现的问题有：分层厚度过大让能量难以抵达底部；含水量偏离最佳导致“弹簧土”或“流塑”；

振动参数设置单一引起过振或欠振; 接缝与边部得不到有效约束; 检测与过程脱节等。为此, 有必要从体系化角度重构压实技术措施, 形成“目标—参数—工艺—检测—纠偏”的闭环。

1 路基与路面压实机理与目标

路基压实的机理可概括为颗粒重排、孔隙压缩与水分再分配三个过程: 在外力与振动作用下, 土颗粒克服内摩阻从松散向致密转变, 孔隙水与空气被逐步排出或压缩, 密实度提高、CBR 与回弹模量随之增长; 最佳含水量附近的润滑作用让颗粒更易重新排列, 且不会过度软化, 沥青混合料压实遵循的是骨架颗粒在黏—弹—塑性基质中受外力作用而重新排列与嵌挤, 温度影响黏度, 进而影响可压实性, 层厚左右着能量与温度在厚度方向的传递效率, 碾压能量影响着空隙率的下降速度以及最终的密实程度, 两类材料压实的共同目的是得到满足规范的密实度(或空隙率)及均匀性, 同时杜绝骨料过度破碎和沥青上浮现象的发生, 杜绝土体结构被破坏和“弹簧”效应的出现, 杜绝层间剪切性能的弱化。因而技术路径应围绕“材料可压实性评估—设备参数匹配—分层与温度窗口控制—边缝与细部加固—过程检测与即时纠偏”展开。

2 路基压实施工技术措施

2.1 含水量—能量匹配与分层厚度控制

路基压实首先应通过重/轻型击实试验确定最大干密度与最佳含水量, 施工前依据现场土类(粉质黏土、砂类土、级配碎石土等)与气候条件制定含水调节方案: 对于干土采用预洒水分层闷料、短时翻耙均匀湿化; 对偏湿土设置表层翻松晾晒或掺入一定比例透水性材料协同处理。分层厚度要把压实能量有效传递当作标准, 黏性土与填石混合料一般会控制在 20~30cm, 强振动压路机可适度放宽范围, 不过要靠试验段验证, 碾压制度恪守“先轻后重、先静后振、先低后高、先边后中、先慢后快”的原则: 先通过首轮静压稳固表面, 再用振动工况进行主压, 终压用静压消除表面波纹与轮迹, 谈到能量匹配方面, 振动频率与振幅的选择要结合土体颗粒级配跟层厚, 一般中至高频、小至中振幅有利于能量均匀传导, 同时降低过振的几率, 行驶速度控制在 1.5~2.5km/h 以保证单位面积作用次数。碾压遍数以弯沉或干密度趋于稳定为准, 结合砂锥法、环刀法或核子密度法抽检, 及时调整含水与遍数, 避免“欠压—补压—扰动”的低效循环。

2.2 边部、软弱区与结构过渡段加固

边部易因侧向约束不足而密实度偏低, 应设置临时侧模或边缘加宽带以提供反压, 采用轮迹跨边法“外高内低”行车, 逐道向内收拢, 终压时以钢轮静压封边。路槽软弱区(如淤泥质土、湿陷性黄土、回填沟槽处)应先进行换填、加筋或加固: 对局部软基采用碎石土换填并分层碾压; 对广泛软弱层可辅以石灰/水泥就地固化, 并严格控制固化剂掺量与养护湿度; 在结构过渡段(涵背、台背、路堤—路堑交界)设置台背回填分级台阶, 采用小型夯实设备细密碾压, 必要时设置土工格栅或

土工织物增强以抑制差异沉降。雨季施工时, 开挖成形后应及时封闭表面, 避免反复浸润引起强度回落; 冬季低温施工需评估冻胀风险, 严禁在冻结或融冻未稳定土体上强行压实。

2.3 过程检测与质量均匀性控制

为避免“抽检合格、整体离散”的风险, 应建立“面—线—点”三维度检测: 面上以工后红外扫描或表面平整度快速检测研判均匀性; 线上就每车道/每工作带设置固定检测断面, 跟进干密度、弯沉与回弹模量的数值; 点上采取随机抽检和对风险点加密抽检相结合的方式, 试验段预先明确不同土类、不同层厚对应的目标遍数与速度、振幅频率组合, 并归整为标准作业卡片。施工过程实行首件确认与参数自检记录, 班组自检合格后报验交接; 对出现“弹簧土”、轮迹反弹、表层起皮等早期征兆, 立即按“水一遍—速一振”四项参数快调原则调整。完工后结合弯沉与动力变形指标对承载能力进行校核, 以结果反控工艺, 形成闭环。

3 沥青路面压实施工技术措施

3.1 温度—黏度—层厚的窗口化控制

在沥青混合料压实作业中, 压实窗口的精准把控直接决定路面最终强度与耐久性, 而这一窗口的核心主导因素是沥青黏度。从工程实践经验与材料特性分析, 主压工序需严格锁定在沥青黏度 0.28~0.32Pa·s 的区间内完成, 此黏度范围能最大化平衡混合料的流动性与稳定性, 既避免因黏度过低导致骨料推移、离析, 又防止黏度过高增加碾压阻力、难以达到设计压实度。初压环节的时间把控的重要性极高, 应在混合料出厂之后、摊铺作业刚完成便启动, 首要目标是最大程度降低热量流失——温度每下降 5℃, 沥青黏度也许会上升超 10%, 直接压缩有效压实的合理时间段, 就典型的 AC-20 型沥青混合料举例说明, 在常温(20~25℃)、风微弱或没有风的环境里面, 摊铺温度要严格把控在不低于 150℃的要求; 然而在实际进行施工的时候, 应结合粘结料具体品种, 采用试验段施工的方式进行参数校核与调整, 保障摊铺温度与现场条件相吻合。层厚控制需与矿料公称最大粒径建立科学匹配关系, 通常要求层厚为公称最大粒径的 3~4 倍, 例如公称最大粒径为 20mm 的 AC-20 混合料, 层厚宜控制在 60~80mm。这一匹配关系能为混合料骨架结构提供充足的重排空间, 确保碾压过程中骨料能充分咬合形成稳定骨架, 避免因层厚过薄导致骨架嵌挤不足、路面承载能力下降, 或因层厚过厚导致内部压实度不足、易出现温缩裂缝。

3.2 机械组合与碾压制度优化

沥青混合料压实质量的提升, 需依托科学的机械组合与精细化碾压制度。设备选用上, “双钢轮+胶轮”的组合为优选方案: 初压阶段, 利用钢轮静碾压或弱振碾压模式, 通过较小作用力快速稳固混合料表面, 同时压印出平整基础, 避免后续碾压出现表面推移; 按照混合料特性启用强振钢轮或者胶轮, 强振钢轮可形成高接触应力, 有效增进混合料的密实水平, 胶

轮可借助“揉搓”功效，提升骨料嵌挤成效，填充细小空隙；采用以钢轮静压的模式，精准消除路面上的微波浪和碾压痕迹，维持路面的平整状态。设定碾压参数应兼顾压实效果以及材料保护，频率和振幅的挑选以“高频中小振幅”为主，该参数搭配能传递足够多的压实能量，又可防止因振幅过大让骨料破碎，破坏混合料的骨架布局；碾压速度通常控制在 2.5~4.0km/h，速度过快易导致压实不充分，过慢则可能因局部温度过度损失影响压实质量。碾压路线规划遵循“先低后高、先薄后厚、先边后中、纵向为主横向辅助”的策略：“先低后高”“先薄后厚”可适配混合料温度梯度，“先边后中”能减少边缘压实不足问题，纵向为主可降低横向推移风险。同时，严格遵循热接茬优先原则，纵缝处需让压实机后轮对齐，且在跨缝 1/3 轮宽处搭接，确保接缝密实。针对超宽幅施工，采用分区分带、错峰组织方式，避免因不同区域温度差异形成温度梯度，导致横向密实度不均，影响路面整体承载性能。

3.3 接缝、边部与细部构造处理

接缝处理是保障沥青路面整体性的关键，纵缝施工优先采用错缝摊铺或热接缝工艺：错缝摊铺可通过相邻摊铺带错开一定距离（通常为 10~15cm），减少接缝处应力集中；热接缝需在相邻摊铺带未降温前完成碾压，确保接缝融合紧密。若施工中中断引发了冷缝产生，应当先采用切缝机将接缝切得平齐，清理掉缝隙内的杂物与松散料，再均匀喷洒黏层油，把用量控制在 0.3~0.5 千克每平方米，开始摊铺新混合料的时候，碾压轮应跨缝 1/3~1/2 个轮宽实施压实，并逐步往内收拢碾压轮，防止接缝处压实不达标，横缝处理要做到垂直又齐整，先利用切缝机将横缝切割成垂直台阶，台阶的高度与摊铺层厚度一样，摊铺前清理台阶表面并喷洒黏层油，碾压时自下而上采用阶梯式压实，即先压实下层台阶，再逐步向上压实上层，防止因压实顺序不当形成“槛口”，影响行车平顺性。边部因无约束且散热快，易出现压实度不足，施工中需设置临时侧向阻挡装置（如钢挡板）固定边部，或采用胶轮压路机多遍补压（通常比正常区域多 1~2 遍），确保边部密实度达标。

3.4 质量检测与性能校核

沥青路面施工质量管控需坚持过程检测与结果校核并重的原则，构建全周期检测体系。在过程检测阶段，采用红外热像扫描技术实时监测摊铺后路面温度分布，精准识别冷料带及温度离散区域，及时调整施工参数以避免温度异常影响压实质量；混合料压实完成后，以实测压实度和空隙率作为核心指标，同时辅以渗水系数测试和渗透试验，综合评估路面结构的致密性，防止因密实度不足导致雨水渗入基层，引发路面早期损坏。结构层性能的判定需借助多维度试验达成，主要凭借弯沉检测评估路面承载能力，结合 FWD 弹性回弹模量测试对结构层的刚度特性加以分析，之后用车辙试验验证路面高温稳定性，保障路面在长期行车荷载与环境作用期间能符合使用标准，抽检布点须兼顾随机性以及针对性，采用随机布点反映整体施工质量

水平，又重点涵盖接缝、边部、桥头过渡这些薄弱环节，展现检测结果的代表性，若检测表明局部密实度不足或是渗水性偏大时，必须严格按照“切割—修补—再次检测”的闭环流程处理，先切除不合格区域，重新摊铺合格混合料并压实，再对修补部位进行二次检测，直至指标达标。

4 案例分析：某高速公路路段压实实施与成效

“某”项目位于季节温差较大的地区，路基以粉质黏土夹碎石土为主，面层采用 SMA-13，中面层 AC-20，下面层 AC-25。项目设立试验段分别确定路基分层厚度 25cm、最佳含水量±1.0%控制带与振动参数组合（频率约 35~45Hz、振幅 0.8~1.2mm、速度 2.0km/h），并形成标准作业卡。施工团队把工作带划分成 3.5m 的车道单元，边部配备临时侧模并执行跨边碾压；软弱回填沟槽要先换填级配碎石，然后再铺设单向土工格栅，提高侧向的约束性，沥青路面摊铺采用“两机双幅热接缝以及三机联动碾压”方案，初压在 150~160℃这个温度窗口开启，把温度控制在 130~140℃，终压在 110~120℃区间内结束，以后轮跨缝 1/3 轮宽开展多遍稳压，就质量检测而言，按分区进行统计，路基干密度合格率达标且离散系数受控，弯沉平均值满足设计所定限值，变异系数呈降低态势；面层压实度与空隙率满足规范，渗水系数改善，FWD 回弹模量均值提升并在接缝与边部处布点加密后仍保持均匀。运营早期路面巡查显示边部与纵缝病害明显减少，台背过渡的差异沉降得到抑制，综合评价达到优良目标，验证了含水—能量匹配、窗口化温控、接缝细化与过程—结果一体化检测的有效性。

结束语

压实是公路工程质量控制的“牛鼻子”，其成效取决于材料可压实性、设备参数与分层厚度的协调匹配、温度与时间窗口的精细组织、边缝与细部的专门化处理以及过程检测与即时纠偏。需以最佳含水量附近的水分管理为核心要点，让振动能量与合理层厚实现匹配，强化边部及过渡段的约束条件，以“面—线—点”多维检测把控均匀情况；面对沥青路面，需在窗口化温度范围中安排“初—主—终”压的节奏顺序，对“钢轮+胶轮”的组合做优化调整，切实严控接缝、边部和离析状况，借助性能指标校核结构承载性能。建议在后续工程中进一步完善试验段数据与过程台账的关联，推进压实参数的全过程记录、偏差即时纠偏与结果反控，使压实质量由“经验型达标”迈向“数据化稳态”，以支撑公路工程的高质量与长寿命服务目标。

[参考文献]

- [1]贾兰生.公路工程路基路面压实机械施工技术措施探讨[J].中国设备工程, 2024(10): 239-241.
- [2]蒲鹏.公路工程项目路基路面压实施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版), 2023(14): 109-111.
- [3]廖俊雯.公路工程路基路面压实施工技术要点分析[J].运输经理世界, 2023(12): 13-15.