

市政道路基层压实度不足的成因分析与施工技术优化策略研究

黄骏

广东邦拓建设工程有限公司，广东省广州市，510630；

摘要：压实度是衡量市政道路基层施工质量的核心指标，直接关系到道路的强度、稳定性和使用寿命。本文深入分析了导致市政道路基层压实度不足的关键成因，主要包括材料性能不均、含水率控制不当、碾压工艺参数不合理及过程质量控制缺失等。针对这些成因，论文系统性地提出了从材料设计、含水率精准控制、智能化碾压工艺到全过程质量监测的综合性施工技术优化策略。通过引入压实度与含水率的数学模型、优化碾压工艺参数组合，旨在为提升市政道路基层施工质量提供理论依据和实践指导。

关键词：市政道路；基层压实度；成因分析；含水率；碾压工艺；优化策略

DOI：10.69979/3029-2727.25.12.004

引言

市政道路作为城市交通的动脉，其使用寿命和服务质量至关重要。道路结构通常由面层、基层和底基层组成，其中基层主要承担来自面层的荷载并将其扩散至土基，是保证道路整体结构强度的关键层次。基层的压实度是指现场实际达到的干密度与室内标准击实试验所得最大干密度的比值（以百分比表示），它是评价基层密实程度和施工质量的核心参数。

压实度不足会导致基层材料孔隙率增大，进而引发一系列严重问题：首先，基层整体强度和模量降低，在车辆荷载反复作用下易产生塑性变形，导致面层出现车辙、裂缝；其次，孔隙水压力增大，抗水损害能力减弱，在季节性冰冻地区还会加剧冻胀破坏；最后，道路结构过早损坏，大幅增加后期养护维修成本。因此，系统分析压实度不足的成因，并制定科学有效的施工技术优化策略，对保证市政道路工程质量和长期性能具有重大现实意义^[1]。

1 基层压实度不足的主要成因分析

导致市政道路基层压实度不足的原因错综复杂，贯穿于材料、机械、工艺和管理的各个环节。这些因素往往相互影响、共同作用，形成复杂的因果关系网络。深入分析这些成因，是制定有效防治措施的前提和基础。

1.1 材料因素

材料是压实工作的物质基础，其性能特征直接影响最终的压实效果。首先，集料级配不良是最常见的材料问题。理想的道路基层材料应具有连续且合理的级配曲线，其中粗集料形成主要骨架，细集料和填料有效填充

孔隙。当级配出现“断档”或不连续时，会导致材料内部孔隙率显著增大，即使在较大压实功作用下也难以达到理想的密实状态。特别是当细集料含量过高时，材料对含水率变化的敏感性会明显增强，容易在碾压过程中出现“弹簧土”现象，表现为表面松软、碾压轮迹明显、压实度无法提升等特征。

其次，最大干密度标准的确定方法也存在潜在问题。实验室通过标准击实试验确定的最大干密度是现场压实度计算的基准值，但这个基准值的准确性受到多种因素影响。例如，实验室采用的击实功可能与现场实际碾压能量不匹配，或者实验室试样与现场材料的级配、含水率等参数存在差异，这些都可能导致最大干密度标准失真。更严重的是，在实际施工过程中，由于料源变化或生产波动，进场材料的实际性质可能与实验室试样有较大差别，如果仍然沿用原有的最大干密度标准，就会导致压实度评价结果偏离实际情况。

此外，材料的均匀性也是影响压实质量的重要因素。在材料生产、运输和摊铺过程中，如果发生离析现象，会导致现场材料分布不均匀，不同区域的压实特性产生差异。这种不均匀性使得统一的碾压工艺参数难以适应全作业面的实际情况，容易造成局部区域压实不足。

1.2 含水率控制因素

含水率是影响压实效果的最关键因素之一，其重要性可以用“水是压实的催化剂”来形象描述。在压实过程中，水分子在颗粒表面形成水膜，起到润滑作用，有助于颗粒在外力作用下重新排列，达到更密实的状态。然而，含水率的控制需要精确到最佳范围，偏离这个范围

都会对压实效果产生不利影响。

当含水率低于最优值时,材料颗粒间的摩擦阻力较大,颗粒难以移动和重新排列。此时,即使增加碾压遍数或提高碾压能量,压实效果的改善也很有限,而且可能造成集料破碎等副作用。相反,当含水率过高时,虽然颗粒间的润滑作用增强,但过量的水会占据材料孔隙空间,产生不可压缩的孔隙水压力。这种压力会抵消部分碾压能量,使有效压实功降低,同时可能导致材料出现塑性流动,形成软弹状态。

1.3 碾压施工工艺因素

碾压工艺是实现材料压实的直接手段,其参数设置的合理性直接决定压实效果。在实际工程中,碾压工艺方面存在的问题往往最为突出。首先是碾压设备的选择和组合问题。科学的碾压作业应当遵循“先轻后重、先静后振、先慢后快”的基本原则。然而,在实际操作中,经常出现设备选型不当或组合不合理的情况。例如,过早使用重型振动压路机进行强振碾压,可能导致表面材料推移或粗集料破碎;而碾压设备吨位不足,则无法提供足够的压实能量。

碾压参数设置不当是另一个常见问题。碾压遍数不足直接导致压实功不够,这种情况在赶工期时尤为常见。碾压速度过快则使得碾压轮对同一位置的作用时间过短,应力无法充分传递和扩散,导致压实深度不足。铺层厚度过大会产生更严重的问题,由于压实能量的衰减效应,下层材料获得的压实功显著不足,容易形成所谓的“夹生层”。这种缺陷具有隐蔽性,表面检测合格,但下层压实度不足,为道路长期使用埋下隐患。

1.4 过程质量控制与检测因素

质量管理体系的完善程度和执行效果直接影响压实质量的稳定性。当前市政道路施工在质量控制方面存在的主要问题体现在以下几个方面。首先是质量检测的时效性问题。传统的压实度检测方法,如灌砂法、环刀法等,虽然精度较高,但操作复杂、耗时较长。从取样到获得结果往往需要数小时,这种滞后性使得检测结果无法及时指导施工调整。当发现不合格情况时,作业面往往已经推进较远,返工处理难度大、成本高。

其次是检测样本的代表性问题。由于时间和成本限制,现场检测通常采用抽样方式进行,抽样点的选择和数量可能无法全面反映整个作业面的压实质量状况。这种抽样检测的方式容易漏检局部缺陷,特别是当缺陷分布具有随机性或不规律性时。此外,检测人员的操作水平、仪器设备的精度状态、环境因素的影响等都可能引入检测误差。

2 施工技术优化策略

针对市政道路基层压实度不足的多重成因,需要建立系统化的解决方案,从事前预防、事中控制和事后验证三个维度入手,形成完整的质量控制闭环。优化策略应当注重技术可行性和经济合理性的平衡,确保措施能够有效落地实施。

2.1 材料设计与生产优化

材料优化是保证压实质量的基础环节。首先应当重视配合比设计的科学性和精细化。在配合比设计阶段,不仅要满足规范的基本要求,还应通过系统的试验研究,寻求最优的级配曲线。可以引入粒子干涉理论、堆积密度理论等现代材料设计方法,通过计算机模拟和试验验证相结合的方式,确定最能满足压实要求的材料组成。特别要注意控制细集料的含量和性质,确保其在填充孔隙的同时不会对压实敏感性产生负面影响。

建立材料质量的动态管理体系至关重要。这包括建立严格的料源审核制度,确保原材料质量的稳定性;实施进厂材料的快速检测机制,及时发现材料性质的波动;建立材料使用过程中的监控系统,跟踪材料从生产到使用的全过程质量状态。当发现材料性质发生显著变化时,应及时调整施工工艺参数,必要时重新进行配合比设计和标准击实试验。

对于最大干密度标准的确定,建议建立更加科学灵活的方法。可以考虑采用现场大型击实试验与室内标准试验相结合的方式,更好地反映实际施工条件。同时,建立最大干密度与材料关键参数(如级配、含水率等)的关联模型,实现基于材料实际状态的动态调整。这种方法虽然增加了前期工作量,但能够显著提高压实度评价的准确性^[2]。

2.2 含水率的精准控制与实时监测

含水率控制是压实质量管理的关键环节,需要建立全过程、多层次的监控体系。在技术层面,首先要在拌和站建立精确的含水率控制系统。现代拌和设备通常配备在线含水率检测装置,可以实现出料含水率的实时监测和自动调节。关键是要根据材料特性、天气条件和施工进度,科学设定含水率控制目标。例如,在高温、大风天气下,应适当提高出料含水率,以补偿运输和摊铺过程中的水分损失。

在施工现场,需要配备快速可靠的含水率检测设备。传统的烘干法虽然准确,但耗时较长。可以推广使用时域反射法、微波法等快速检测技术,这些方法能够在几分钟内获得检测结果,为施工决策提供及时依据。检测点的布置要有代表性,应覆盖不同部位和不同时段,确

保能够反映全作业面的含水率分布状况。

建立含水率预测和调控模型是实现精准控制的高级阶段。这种模型应考虑材料特性、环境条件、施工工艺等多重因素,能够预测含水率在施工过程中的变化规律。模型的基本形式可以表示为:现场含水率=拌和站出料含水率-运输过程损失-摊铺过程损失-等待碾压过程损失。通过历史数据的积累和分析,可以确定各环节水分损失的影响因素和量化关系,从而实现出料含水率的精确设定^[3]。

2.3 智能化碾压工艺优化

碾压工艺的智能化升级是提高压实质量的有效途径。智能压实技术通过安装在压路机上的多种传感器,实时采集碾压过程中的各种参数,如振动频率、振幅、碾压速度、遍数等,并结合 GPS 定位系统,形成完整的碾压作业数据库。这些数据经过专业软件处理,可以生成直观的压实质量分布图,实现碾压过程的可视化管理。

基于智能压实系统的反馈,可以建立科学的碾压工艺优化方法。首先是通过试验段施工,确定不同材料、不同厚度条件下的最优碾压参数组合。这包括确定合理的碾压设备组合、各阶段的碾压遍数、适宜的碾压速度等关键参数。在正式施工过程中,根据实时监测结果动态调整碾压参数,实现“按需碾压”,避免不足碾压或过度碾压。

建立标准化的碾压作业流程同样重要。这包括明确碾压区域的划分、碾压路线的规划、特殊部位的处理方法等具体规定。同时,要加强对操作人员的技术培训,确保其能够正确理解和执行碾压工艺要求。特别是对于智能压实设备的操作,需要培养专业人员,使其能够正确解读系统反馈信息,并及时作出调整^[4]。

2.4 全过程、数字化的质量管理

现代信息技术为压实质量管理提供了新的工具和方法。建立数字化的质量管理平台,可以实现施工全过程数据的自动采集、存储和分析。这个平台应当集成材料检测数据、含水率监测数据、智能压实数据、传统检测数据等多种信息源,形成完整的质量数据库。通过数据挖掘和分析,可以发现质量问题的规律性,为质量改进提供依据。

在检测技术方面,应当建立多层次的质量验证体系。智能压实系统提供全作业面的连续质量评估,传统检测方法提供精确的定点验证,快速无损检测方法(如落锤式弯沉仪)则提供大范围的抽样验证。三种方法相互补

充,形成点、线、面结合的质量控制网络。这种综合检测体系既保证了检测的全面性,又确保了关键部位检测的准确性。

最重要的是实现质量管理模式的转变,从被动的事后检验转向主动的过程预防。通过实时监测和预警机制,在质量问题发生初期就能发现迹象,及时采取纠正措施。同时,建立完善的质量追溯系统,记录施工全过程的关键参数,为质量问题的分析和责任认定提供依据。这种预防性的质量管理模式不仅能够提高工程质量,还能降低返工成本,提高施工效率。

3 结论

市政道路基层压实度不足是一个涉及材料、机械、工艺、管理等多方面的系统工程问题。通过系统的成因分析可以看出,单一因素的改进往往难以取得理想效果,必须采取综合性的治理策略。本文提出的优化策略强调系统性和协同性,注重技术手段与管理方法的有机结合。

在技术层面,重点是实现压实过程的精确控制和智能化管理。材料优化的目标是保证基础的稳定性,含水率控制的重点是实现最佳压实状态,智能碾压的核心是提高工艺的科学性,数字化管理则是实现全过程质量控制的手段。这四个方面相互支撑,共同构成完整的技术解决方案^[5]。

在管理层面,需要建立完善的质量保证体系。这包括明确的质量标准、科学的检测方法、严格的过程控制、及时的信息反馈和有效的纠正机制。同时,要重视人员培训和技术交底,提高各级人员的质量意识和专业技能。只有技术和管理双管齐下,才能确保压实质量控制的各项措施落到实处。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. JTGE51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 中华人民共和国行业标准. CJJ1-2008 城镇道路工程施工与质量验收规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 刘建,王哲.连续压实控制技术在路基工程中的应用研究[J].中外公路,2020,40(2):45-49.
- [4] 张宏伟,李建国.道路基层材料压实特性试验研究[J].土木工程学报,2019,52(3):112-120.
- [5] 王小明,刘志强.基于智能压实的路基施工质量控制技术[J].公路交通科技,2021,38(4):56-62.