

# 公路路基填料含水率控制不当对压实质量的影响分析

袁彦飞

中交一公局第八工程有限公司 天津 300170

**【摘要】**：公路路基填料含水率的控制精度，直接决定路基压实质量与道路整体稳定性。本文系统剖析含水率控制不当对压实质量的影响机制，梳理填料自身特性、施工工艺、外部环境条件三大关键影响因素，提出精准测定、过程调控、动态监测的全链条优化控制技术路径。研究成果为公路路基施工含水率精细化管控提供了理论和实践支撑。

**【关键词】**：公路路基；填料含水率；控制不当；压实质量；具体影响

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.015

公路路基填料含水率作为压实效果的关键调控参数，其管控质量直接关乎工程整体效益。当前施工场景中，受填料特性差异、工艺操作偏差及外部环境波动等多重因素叠加影响，含水率失控问题频发，易诱发压实度不足、路基沉降等系列病害。基于此，本文聚焦含水率控制不当对压实质量的影响展开深度探析，旨在为施工管控优化提供实操性支撑。

## 1 含水率控制不当对压实质量的具体影响

含水率控制不当可分为过低、过高及波动不均三类情形，需结合填料力学特性和压实机理逐一剖析。

### 1.1 含水率过低

当填料含水率较最佳含水率偏低3%及以上时，填料颗粒表面易呈现水膜缺失或过薄状态，这一现象会直接引发颗粒间滑动与滚动摩擦力的急剧增大。此时施加的外部压实功绝大部分消耗于克服颗粒间的滑动与滚动阻力，难以有效传递至土体内部以驱动颗粒重新排列及孔隙压缩。试验研究数据表明<sup>[1]</sup>，该含水率条件下，路基压实度会降低5%—8%；压实成型后的路基还会形成孔隙率偏高、颗粒联结松散的结构缺陷，其内部凝聚力与内摩擦角相较于最佳含水率状态下降10%—15%，进而显著降低路基承载能力。与此同时，路基内部的松散孔隙为雨水渗透提供便捷通道，易诱发后期土体软化及不均匀沉降。在碾压施工过程中，还常伴随颗粒破碎与扬尘现象，不仅破坏填料级配的连续性，进一步弱化路基整体稳定性，扬尘产生的污染还会干扰施工检测数据的精准性，对工程质量控制造成不利影响。

### 1.2 含水率过高

当填料含水率较最佳值超出3%及以上时，其孔隙内部会积存大量自由水，此类水分难以在压实作业过程中快速排出，在外部压实功作用下极易催生明显的孔隙水压力效应。这一压力可抵消30%—40%的外部压实功，直接造成有效压实效率的大幅下滑。过量水分会使填料颗粒间的水膜厚度显著增加，颗粒间黏结作用急剧衰减，土体随之呈现明显流动性特征，进而形成工程领域典型的“橡皮土”病害。此时若持续施加碾压作业，不仅无法提升路基压实度，反而会加剧土体侧向位移及鼓

包变形，严重破坏路基整体结构完整性。压实后残留的自由水会大幅削弱土体抗冻及抗渗性能：寒冷区域易引发冻胀、融沉等病害，多雨地区则易形成路基渗沟并导致土体软化；现场实测数据显示<sup>[2]</sup>，当含水率较最佳值超出5%时，路基后期沉降量可达3—5cm，远超1—2cm的设计允许限值，将直接威胁路面结构的长期运营安全。

### 1.3 含水率波动不均

路基施工中，含水率空间分布失衡这一关键问题易被忽视，其核心隐患体现为压实质量呈现局部达标与局部超标的非均衡状态，进而诱发路基结构应力集中现象。该类问题的产生，多与填料堆放防护措施不到位及洒水调控方式不当相关：填料堆放过程中未同步落实防雨遮盖与遮阳防晒措施，导致填料表层因日晒蒸发快速变干，底层则因雨水积存或潮气聚集逐渐变湿；洒水调控阶段采用“点状喷洒”模式，致使水分在摊铺层内分布失衡，同一摊铺层内含水率偏差可达4%—6%。压实作业完成后，路基内部易形成显著的“密实度差异区域”，低密实度区域成为承载体系中的薄弱环节，在车辆反复荷载作用下率先发生塑性变形，进而牵引周边高密实度区域出现开裂、沉降病害<sup>[3]</sup>。与此同时，含水率不均还会干扰压实度检测精度，导致检测结果偏离路基实际质量状况，造成质量控制误判，给路基长期稳定性埋下隐性风险。因此，需采用定点监测与随机抽检相结合的方式开展含水率动态监测，及时规避上述质量隐患。如下图1所示，为公路路基填料含水率控制不当对压实质量的影响关系图。

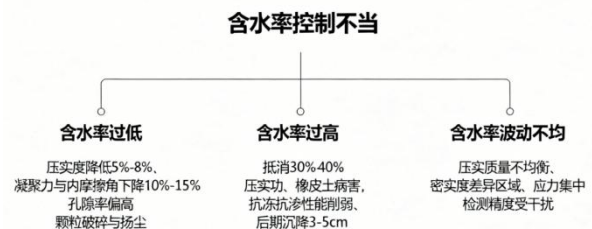


图1 公路路基填料含水率控制不当对压实质量的影响关系图

## 2 影响路基填料含水率控制的关键因素

影响路基填料含水率控制的关键因素可归纳为填料自身特性、施工工艺操作、外部环境条件三大维度，各维度因素通过直接作用和间接关联的方式影响控制精度。

### 2.1 填料自身特性

填料自身固有特性，是含水率控制难度的根本决定因素，核心影响因子可归纳为三项：颗粒级配、矿物成分、初始含水率。细颗粒（粒径 $<0.075\text{mm}$ ）占比越高，填料比表面积越大，水分吸附能力越强，含水率的稳定控制难度则同步提升；若填料中亲水性矿物（如蒙脱石，含量 $>10\%$ ）占比较高，其遇水膨胀、失水收缩的特性会尤为显著，其含水率波动幅度可达5%—8%。初始含水率与最佳值偏差过大时，调控工作量会显著增加，若调控环节存在滞后，极易造成压实作业阶段的含水率偏离最佳控制区间。

### 2.2 施工工艺操作

施工工艺的规范执行程度，是路基填筑阶段含水率控制效果的直接决定因素，其核心管控环节可归纳为摊铺厚度、洒水与晾晒方式、碾压时机三项。摊铺厚度若超30cm，易造成层内、层表含水率出现显著差异；不足15cm则会加快表层水分的自然蒸发速度。采用“大水漫灌”或点状喷洒的方式，均会引发洒水不均的问题；晾晒时间不足（或过长），则会分别导致填料过湿（或过干）<sup>[4]</sup>。碾压作业若偏离最佳含水率区间的 $\pm 2\%$ 范围，不仅会直接造成压实质量不达标，还需额外增加压实功的消耗，进而提升整体施工成本。

### 2.3 外部环境条件

外部环境通过蒸发与渗透的双重作用直接干扰填料含水率，核心影响因素为气温、降雨和风力。当日最高温超 $30^\circ\text{C}$ 与大风的组合天气出现时，表层含水率在30min内即可下降2%—3%；无防护措施填料，遇降雨会出现含水率急剧攀升的情况。此外，梅雨季高湿环境会延缓蒸发引发过湿问题，干旱区低湿环境则会加速蒸发导致过干，环境条件的频繁波动会大幅提升含水率控制难度，需配套针对性防护措施。

## 3 路基填料含水率优化控制的技术路径

针对上述影响因素与压实质量问题，需从精准测定、过程调控、动态监测三个核心环节构建优化控制体系，实现含水率的精细化控制。

### 3.1 精准测定最佳含水率

在试验室精准测定环节，需严格参照《公路土工试验规程》（JTGE40-2007）规范要求开展试验工作。针对进场填料，按批次随机选取取样点，每批次设置不少于3个取样层，每层取样深度控制在20-30cm，确保样品具有代表性，随后采用标准重型击实试验流程完成最佳含水率与最大干密度的基准测定。

对于土石混填等特殊填料，考虑到其颗粒级配不均、大粒径颗粒占比高的特性（当粒径大于5cm颗粒含量超30%时），需选用直径20-25cm的大尺寸击实筒开展试验，避免因试样尺寸与现场填料粒径不匹配导致试验结果偏离实际工况，保障基准数据的可靠性。

考虑到施工过程中，填料经破碎、筛分及运输作业后颗粒级配易发生波动，需建立动态复检机制，对每批次进场填料实施1-2次复检，及时更新最佳含水率基准值。同时，结合现场压实功参数进行针对性修正，以常用的20t压路机为例，其碾压遍数从6遍增至8遍时，压实功提升约33%，相关工程试验研究数据显示<sup>[5]</sup>，压实功每提升10%，最佳含水率可相应下降0.5%-1%，据此计算该碾压参数调整下，最佳含水率需修正下降1.65%-3.3%，确保测定值与现场压实作业条件相适配。

为保障检测时效性，避免因检测滞后导致填料含水率偏离最佳控制区间，需配备酒精燃烧法检测仪、核子湿度密度仪等现场快速检测设备。其中，酒精燃烧法适用于中小型施工段落，单次检测时长可控制在5-8分钟；核子湿度密度仪则适用于大规模路基施工，检测效率更高，单次检测耗时不超过10分钟，可实现含水率的即时测定与数据反馈。通过快速检测设备的应用，可实时捕捉填料含水率变化动态，为现场洒水或晾晒调控措施的实施提供及时数据支撑，保障路基压实质量的稳定性。

### 3.2 优化施工过程调控

对于填料特性差异引发的含水率失衡问题，应按填料级配与矿物成分分类施策：针对细颗粒含量超30%或亲水性矿物占比偏高的填料，采用“预拌预处理+分层精准调控”组合模式，填料进场后先通过含水率快速检测确定初始湿度，随后进行2-4小时自然晾晒，再依据最佳含水率标准计算需补洒水量，采用定点定量洒水方式精准补水，补水后静置3-5小时，期间通过插入式湿度探测器抽检不同深度填料含水率，确保水分均匀渗透至填料内部，彻底规避“表层湿润、内部干燥”的局部含水率失衡问题；对于粗颗粒主导的填料，重点采用“薄层摊铺+及时碾压”管控策略，借助平地机精准控制摊铺厚度在20-25cm区间，缩短填料暴露时间，减少水分蒸发损耗，摊铺完成后30分钟内启动碾压作业，提升水分锁闭效果。

针对施工工艺缺陷导致的含水率波动，需从洒水与晾晒两个关键环节规范操作流程。洒水作业采用分区段轮流喷洒的方式，配套安装雾化洒水喷头，根据填料类型及初始含水率精准调控洒水强度，控制在 $0.5\sim 1\text{L}/\text{m}^2$ 范围内，杜绝大水漫灌引发的局部含水率超标；晾晒环节推行“机械翻拌+实时动态监测”管控模式，选用旋耕机进行深层翻拌，翻拌频率设定为每小时1次，翻拌深度不小于摊铺厚度，同时搭配便携式含水率测定仪实时监测填料湿度变化，确保含水率呈均匀下降趋势，避免局部晾晒过度或不足。

面对外部环境干扰带来的含水率失控风险,需构建“主动防护+应急调控”双重保障体系。高温大风天气下,填料摊铺完成后30分钟内覆盖土工布进行保湿防护,降低风力与高温叠加导致的水分快速蒸发;降雨预警发布前,对已摊铺未压实的填料全面覆盖防雨布,防止雨水浸泡;降雨结束后,先清理填料表层积水,再通过机械翻拌松散受雨浸润的填料,同步开展含水率抽检,待填料含水率回归最佳区间 $\pm 2\%$ 范围,经复检合格后再启动碾压工序,确保压实质量符合设计要求<sup>[6]</sup>。

### 3.3 构建动态监测体系

在填料进场验收阶段,需在验收区域划定3~5个固定检测点位,覆盖填料堆体的不同区域(如堆顶、堆中、堆边),每批次进场填料均需完成3~5组含水率平行试验,检测不合格的填料严禁入场卸料。同时建立专项管理台账,详细录入填料产地、初始含水率检测值、堆放时长、环境温湿度等关键信息,形成可追溯的含水率管理链条,为后续调控工作提供基础数据支撑。

摊铺作业阶段采用“定点布控+随机抽检”相结合的监测模式:定点监测按 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 网格布设检测点,随机抽检则按每 $1000\text{m}^2$ 不少于5个点的标准执行,重点核查摊铺层边缘与中间

区域的含水率差值,确保实测偏差控制在 $2\%$ 以内。碾压施工阶段需同步开展含水率与压实度双指标监测,采用核子密度仪与环刀法联合检测方案<sup>[7]</sup>。若检测发现压实度未达设计标准(高速公路路段 $\geq 96\%$ ),首先排查含水率是否偏离最佳压实区间,一旦确认偏差需立即停工,通过洒水增湿或晾晒降湿方式调控后重新检测,合格后方可恢复碾压作业。

引入智能化监测手段提升管控效能,在路基关键断面(如填挖交界、高填方路段)布设无线含水率传感设备,设定15~30分钟的数据传输间隔,实时绘制含水率动态变化曲线。当监测数据超出预警阈值(最佳含水率区间 $\pm 3\%$ )时,系统自动触发声光报警,指导现场管理人员及时开展调控作业。

## 4 结语

公路路基填料含水率控制不当会通过多重路径破坏压实质量,诱发一系列路基病害,其影响与填料特性、施工工艺、环境条件密切相关。精准测定、过程调控、动态监测的优化体系,可有效解决含水率控制难题,保障压实质量达标。未来需进一步强化特殊填料调控技术研究,结合智能化手段提升管控精度,为公路工程长期稳定提供更坚实的技术保障。

### 参考文献:

- [1] 陈龙,王刚强,杨敬礼,等.黄土填料路基压实质量快速检测技术控制标准[J].中国建材科技,2024,33(6):102-106.
- [2] 马保典.公路路基施工的路基压实处理及质量管控研究[J].交通世界(下旬刊),2021(8):136-137.
- [3] 罗茂冰,农钰.花岗岩残积土公路路基压实质量研究[J].西部交通科技,2024(11):22-24,118.
- [4] 饶雪兰.公路路基压实质量快速检测技术研究[J].交通世界,2023(21):54-56.
- [5] 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.
- [6] 向广林.高填方公路路基压实度控制要点[J].建材与装饰,2025,21(24):124-126.
- [7] 马月鹏.公路路基施工中冲击碾压施工技术要点研究[J].交通建设与管理,2024(4):148-150.