

路基压实度检测方法与施工质量控制

殷佳豪

湖北楚维工程咨询监理有限责任公司 湖北 荆门 448124

【摘要】：路基压实质量决定公路工程承载能力与使用寿命，是路基施工核心管控环节。湖北武汉绕城高速、湖北十巫高速等工程实践中，环刀法、灌砂法、核子密度仪法三种现场压实度检测方法，各有其适用范围、操作要点及应用效果。含水率、土类及填料性质、压实功能、压实厚度，四大核心因素影响压实效果。填料与击实标准、含水率、分层填筑碾压、压实度均匀性，可通过针对性措施实现质量控制。研究为公路路基压实施工现场管控、检测优化及质量提升提供实践参考，保障路基工程长期稳定性。

【关键词】：路基压实；压实度检测；影响因素；质量控制；工程应用

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.094

引言

路基作为公路工程基础结构，压实质量关系路面平整度、承载能力及工程使用寿命，压实不足会引发路基沉降、开裂等病害，影响公路通行安全与耐久性。我国公路建设规模持续扩大，路基填料类型愈发复杂，施工环境差异明显，压实质量管控要求不断提高。明确路基压实度现场检测方法，剖析压实效果主要影响因素，制定科学可行质量控制措施，是解决路基施工质量问题、提升工程建设水平的关键。结合实际工程案例，对上述内容系统探讨，为路基压实施工提供理论与实践支撑。

1 路基压实度常用现场检测方法

1.1 环刀法检测

环刀法多用于公路路基浅层素土压实度原位取样，属于行业沿用已久的非破损取样手段，土体内部夹杂碎石、卵石等粗颗粒时无法使用，仅适配细粒粘性土、粉质黏土填筑路基，松散砂土、高塑性膨胀土不得采用该手段。检测依靠定制不锈钢环刀，环刀内径6~8cm、高度2~5.4cm、壁厚1.5~2mm，现场还需搭配分度值0.01g的电子天平、削土刀、铝盒与酒精烘干器具。作业时环刀垂直平稳嵌入原位土层，控制侧面土体形变干扰，取出试样后修平环刀两端外露土体，消除土样与刀体的缝隙，称量带环刀湿土质量后，借助酒精灼烧判定土体含水率，依托环刀固有容积核算土体湿密度，推演得到干密度后核算路基压实度^[1]。整套器具体量小巧，单人可独立开展现场检测，单组试样检测时长控制在20分钟内，配套器具整体购置成本低于一千元。

1.2 灌砂法检测

灌砂法列入现行《公路路基路面现场测试规程》，作为路基压实度仲裁检测手段，可适配细粒土、砂砾土、级配碎石等主流路基填料，检测数值偏差维持在±1%以内。灌砂筒型号要对照填料最大粒径、碾压层实际厚度选配。集料粒径低于13.2mm且测定层厚不超150mm，选用Φ100mm小型灌砂筒；粒径低于31.5mm且层厚不超200mm，选用Φ150mm中型灌

砂筒；粒径低于63mm且层厚不超300mm，选用Φ200mm大型灌砂筒。试验用量砂要预先晾晒，筛分至0.3~0.6mm粒径后静置24h，释放颗粒内部孔隙应力，野外检测优先选用10~30kg量程、1g感量的电子秤，规避野外温度波动带来的电子秤数据偏移。现场依次完成圆锥砂质量标定、圆柱形试洞开挖、洞内土体湿重采集，借助标准砂置换测算洞体容积，结合土体含水率推导干密度。湖北宜来高速路基填料多为砂砾混合物，粒径离散性较强，现场主要采用Φ200mm灌砂筒，双车道每200m填筑层抽取3处断面检测，弥补环刀法不适配粗粒土、单点取样代表性弱的缺陷，稳定路基横向密实状态。

1.3 核子密度仪法检测

核子湿度密度仪依托γ射线散射、中子透射机理采集土体指标，仪器包含散射、直接透射两种作业模式，两类模式应用边界互不重叠。散射法适配沥青混合料面层，测点无需开孔，被测结构层厚度不能超出仪器额定量程，市面常规设备量程上限为20cm；土质路床与水稳基层统一采用直接透射法，测点竖向开凿32mm孔径探孔后放入放射源探头，该模式最大检测厚度为30cm。测点表层浮土需提前清除，保持接触面平整，用干燥细砂填充探头和孔壁缝隙，削弱射线杂乱散射对读数的影响。单测点检测耗时2-3分钟，土体开挖量偏少，路基本体损伤程度低，能够开展多点不间断抽检。宜昌、恩施山区公路路基地势起伏明显，填筑区块碎片化分布，传统灌砂法检测吞吐速度缓慢。项目选取20组同位置测点，同步采用核子仪、灌砂法比对读数校准系统误差，抵消山区高湿环境、坡积松散土层引发的读数偏移。仪器全程跟进路基碾压施工，记录碾压6遍、8遍、10遍对应的土体密实度波动，压缩现场检测时长，匹配连片路基动态质量管控需求。

2 路基压实效果主要影响因素

2.1 含水率对压实的影响

含水率决定压实效果，偏低时土粒间引力大、水膜润滑作用弱，压实功难以推动土粒位移，密实度提升受限。含水率增

加，水膜增厚润滑，土粒易重新排列，压实效果逐步优化。超最优值后，孔隙自由水抵消压实功，有效压力降低，易出现“弹簧土”现象，密实度反而下降。湖北江汉平原堤防道路工程施工中，天然砂砾填料含水率控制在最佳值±2%区间，避免过干碾压密实不足，防止过湿出现回弹变形，保障路基水稳性与强度稳定性（见图1）。

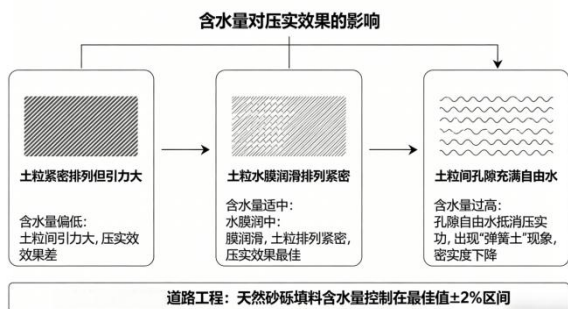


图1 含水率对压实的影响

2.2 土类及填料性质影响

土类属性与填料颗粒级配主导路基压实内源特性，直接影响最大干密度、最佳含水率两项现场管控参数。压路机输出恒定压实功时，粗砾、碎石填料内部空隙孔径偏大，颗粒相互嵌锁约束能力突出。粗颗粒占比上涨，颗粒接触面咬合范围随之扩大，土体内部水体排出速率加快，最大干密度随之抬升，最佳含水率逐步回落。粉质黏土、淤泥质土这类细粒土颗粒表面延展面积更大，表层吸附游离水体的能力更强，内部密布闭合微小孔隙，压实响应规律和粗粒填料呈反向变化。路拌法用于石灰、水泥土体改性施工时，人机协同拌和作业普遍存在3-5cm竖向深度偏差。拌和深度不足会在填筑层间生成2-4cm贯通素土夹层，阻隔改性土体内部应力传导；拌和深度超标会摊薄表层固化掺料，削弱土体颗粒胶结能力^[2]。

2.3 压实功能控制因素

压路机吨位、振动频率、碾压遍数共同构成压实功能指标，指标数值和路基压实成效呈非线性增长，压实增益不会随指标上调永久提升。均质填料处于合理受力区间时，上调压实参数可打散颗粒絮凝聚合形态，排出孔隙内游离水体，土体最大干密度同步上升，最佳含水率同步下降。压实参数超出土体结构承受上限后，持续振动会磨损粗颗粒边缘、瓦解细粒聚合团，改变土体微观排布形态。该工况下路床压实度增幅低于0.2%，现场能源消耗上涨幅度达到40%。土体含水状态决定压实参数适配边界，含水率偏低的填料颗粒摩擦阻力更高，激振作用可压缩颗粒间隙；含水率偏高时孔隙水体无法快速疏排，后续碾压会累积孔隙水压，催生弹簧土、表层翻浆病害。湖北高速试验段选用22t高频振动压路设备，落实“1静+5强振+1静”碾压排布，贴合96%路床压实管控要求，规避土体内部结构破坏。

2.4 压实厚度影响因素

松铺压实厚度影响振动压实能量竖向传递损耗，也是施工现场改动频次最高的施工参数。振动碾压输出的剪切、挤压作用力会沿路基竖向指数衰减，表层0-15cm土层能承接七成压实能量。土层超出有效压实深度后，下层能量损耗突破55%，路基断面会形成上部密实、下部疏松的分层结构，车辆往复荷载会进一步引发层间滑移病害。土体硬度、压路机激振幅值会约束松铺厚度取值，高塑性细粒土应力传导速率缓慢，对应的有效压实深度也相对有限。江汉平原堤防道路贴合区域软基地下水分布规律，把素土单次松铺厚度限定为30cm，施工时优先碾压路基边缘，弱化边坡土体松散问题。砂砾填料透水能力优异，内部应力传导阻力更小，松铺厚度可放宽至35cm，仅四轮强振就能满足上路堤94%压实标准。现场原位监测数据显示，松铺厚度私自增加5cm，下层土体压实度平均下降3.2%，路基长期服役后易产生不均匀沉降，连带诱发路面反射裂缝。

3 路基填筑压实质量控制措施

3.1 填料与击实标准控制

路基正式分层填筑前，需完成取土场全域土工取样，表层单点取样无法体现土体真实性质。取样点位沿场地纵横布设不少于5处，单点位采集地表、地下1m、地下2m三层土样。剔除腐殖土、植物根系与风化软弱夹层后开展室内击实试验，测定填料最大干密度、最佳含水率。现场优先采用公路重型击实标准，其击实功更高，适配通车后车辆荷载与雨水入渗叠加作用，相比轻型击实参数更贴合现场工况，减少土体塑性残余形变，降低路堤后期沉降、层间滑移风险。江汉平原临水堤防道路以天然级配砂砾为填筑主材，限制填料粒径不超53mm，剔除针片状颗粒，依靠平行重型击实试验确定碾压参数。区域同期高速项目在拌合站增设双层筛分装置，拦截粒径、含泥量超标填料，以重型击实数据作为压实验收标准，保障路基长期抗变形与承载稳定性（见图2）。

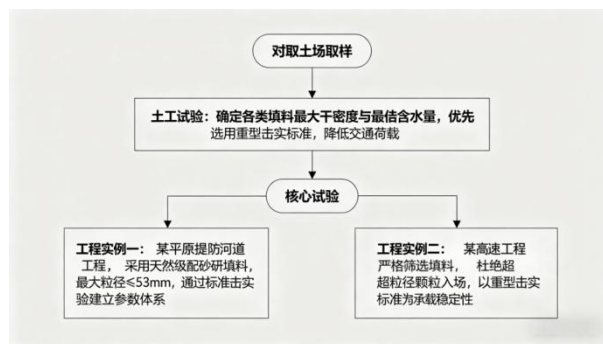


图2 填料与击实标准控制

3.2 含水率现场控制

填料含水状态左右路基现场压实成效，施工统一参照试验室最佳含水率，设置±2%的现场管控区间。淤泥质土、粉质黏

土透水能力偏弱,这类细粒土料含水波动范围收紧至 $\pm 1\%$,防止孔隙水体滞留形成内部压实空隙。偏干填料不得局部集中补水,采用稳压洒水车匀速喷淋,洒水后封闭料堆静置2-4小时,让水分均匀渗入土粒间隙。偏湿填料借助铧犁搭配旋耕机分层翻晒,阴雨天气晾晒条件不足时,掺入5%-8%风干素土或3%消石灰改良土体塑性。湖北雨季路堤修筑布设环形临时排水构造,控制作业面雨水积留时长不超2小时,安排专人持续翻晒表层饱和土层。沿线高速配备微波含水率便携检测设备,每20m²设置一处检测点位,根据实时含水数据调整施工步骤,消解含水率异常带来的弹簧、表层起皮病害^[1]。

3.3 分层填筑与碾压控制

路堤填筑落实分层摊铺、压实、检测的闭环施工流程,不允许单次超厚度整体填筑。作业时对路基全幅同步摊铺材料、同步开展碾压作业,规避单侧先后摊铺引发的横向压实不均匀问题。路堤边坡外侧土体缺少侧向土体约束,每层填筑需向外拓宽40-50cm,路基填筑至设计高程后,结合人工与机械设备修整边坡坡面,根除边坡局部漏压、密实度不达标的常见病害。不同填料松铺厚度执行差异化管控,细粒素土单次摊铺厚度上限为30cm,砂砾填料孔隙通透、排水速度更快,摊铺厚度上限可上调至35cm。碾压作业遵循先静压后振压、低速先行、从边缘向中心推进的作业逻辑,静压行车速度低于2km/h,振压行车速度低于4km/h,碾压轮横向搭接宽度保留三分之一轮宽,前后施工段落纵向搭接距离不少于2m。高速现场设置25cm、30cm、35cm三组摊铺对照试验区,实测得出22t振动压路机搭配18t光轮压路机适配30cm素土松铺工况,实测指标符合行业规范,该参数被推广为全线填筑控制标准。

参考文献:

- [1] 肖崇禹.路基压实度快速检测方法现场对比试验[J].时代汽车,2026,(02):187-189.
- [2] 罗争,程杰,张保启,等.路基连续振动碾压智能检测技术应用研究[J].黑龙江科学,2025,16(24):107-108+113.
- [3] 罗争,程杰,张保启,等.路基连续振动碾压智能检测技术研究[J].建筑机械化,2025,46(12):185-188.

3.4 压实度均匀性控制

路基压实均匀性依托全流程管控实现,贯穿填料摊铺、碾压、完工核验、工序交接各个施工环节。单层局部密实缺陷会受上层填筑荷载挤压持续沉降,最终诱发路面开裂、路基不均匀形变。工序交接落实上承层核验要求,单层全断面检测达标后才能开展上层填筑作业。现场检测划分两类应用场景,灌砂法出具的数据可作为竣工验收依据,承担主控检测职能,核子密度仪多用于大面积现场抽查,缩短整体检测耗时。检测重心偏向新旧路基拼接部位、台背回填区、路基边角等机械碾压盲区。湖北山区公路搭载车载智能压实设备,依托北斗定位同步收录碾压轨迹、行车速率、碾压次数与激振参数,系统标记压实不足区域并即时整改。区域项目吸纳堤防道路成熟管控范式,对齐摊铺、碾压、沉降观测三条控制线,把控填筑厚度、密实度、路床拱度与表层平整度,保障路基竖向全层、横向全幅压实状态统一合规。

4 结语

路基压实质量管控是系统性工程,需贯穿检测、工艺、工序全流程。梳理路基压实度常用检测方法,明确不同方法的适用场景与应用要点,灌砂法精度可靠、适用性广,可作为主控检测手段,环刀法与核子密度仪法配合用于快速抽检与动态监控。含水率、填料性质等四大因素直接影响压实效果,需采取针对性管控措施。实践证明,严格落实填料标准、动态控制含水率、规范分层碾压工艺、强化压实度均匀性监控,能有效提升路基压实质量。后续可结合智能施工技术,优化检测与管控模式,推动路基压实施工向高效化、精准化发展。