

# 公路路基工程的试验检测方法

董思晗

新疆生产建设兵团建设工程质量检测中心有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 843900

**摘要:** 公路路基作为道路结构的基础部分,其质量直接关系到整个道路工程的稳定性、耐久性与行车安全。科学、系统的试验检测是保障路基工程质量的关键环节。本文系统阐述了公路路基工程中常用的试验检测方法,包括压实度检测、承载能力评价、含水率测定、颗粒分析、CBR(加州承载比)试验、回弹模量测试等核心内容,并对各类方法的原理、适用条件、操作流程及优缺点进行了详细分析。同时,结合现代无损检测技术的发展趋势,探讨了智能化、信息化在路基检测中的应用前景。研究表明,合理选择并综合运用多种试验检测手段,可有效提升路基工程质量控制水平,为高等级公路建设提供坚实技术支持。

**关键词:** 公路路基; 试验检测; 压实度; CBR; 承载能力; 无损检测

## 引言

路基作为道路结构的承重层,承担着来自路面结构及车辆荷载的全部作用力,其性能直接影响道路的使用寿命和行车舒适性。若路基存在压实不足、含水率失控、承载力不达标等问题,极易引发沉降、翻浆、车辙等病害,严重时甚至导致道路结构破坏。因此,在路基施工过程中,必须通过科学、规范的试验检测手段,对其物理力学性能进行全过程监控与评估。试验检测不仅是施工质量验收的重要依据,也是优化施工工艺、指导现场作业的关键技术支持。当前,我国《公路路基施工技术规范》(JTG/T3610—2019)、《公路土工试验规程》(JTG3430—2020)等标准文件对路基检测提出了明确要求,但实际工程中仍存在检测方法选择不当、操作不规范、数据解读偏差等问题。本文旨在系统梳理公路路基工程中常用的试验检测方法,深入剖析其技术原理与工程适用性,并结合现代检测技术发展趋势,提出优化建议,以为工程实践提供理论参考和技术指导。

## 1 路基工程试验检测的意义与目标

### 1.1 检测意义

路基试验检测的核心目的在于确保路基满足设计要求的强度、稳定性和耐久性。这一过程不仅关乎工程实体的质量,更关系到后期运营的安全与经济性。通过试验检测,可以实现对填料性质、压实效果等关键参数的量化验证,从而形成闭环的质量控制体系。在施工过程中,实时反馈的检测数据能够帮助技术人员及时调整碾压遍数、控制含水率、优化摊铺厚度等工艺参数,避免因盲目施工造成返工或隐患。此外,检测结果还是工程交工验收不可或缺的技术依据,为责任界定和质量追溯提供客观支撑。更为重要的是,早期识别如软弱夹层、

局部含水异常等潜在问题,有助于在结构尚未承受长期荷载前进行干预,有效预防后期结构性病害的发生。从长远看,系统积累的检测数据也为新材料、新工艺的研发与推广提供了宝贵的工程实证基础。

### 1.2 检测目标

根据《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1—2017),路基检测主要围绕若干核心指标展开。其中,压实度是衡量土体密实程度的最基本参数,直接反映施工压实效果;弯沉值则用于表征路基在标准轴载作用下的整体变形能力,是评价其承载性能的重要指标;CBR值(加州承载比)则侧重于评估路基材料抵抗局部压入变形的能力,广泛应用于路面结构厚度设计;含水率作为影响土体压实特性和强度发展的关键变量,必须严格控制,在最优含水率附近;颗粒组成决定了填料的分类、适用部位及其工程行为,是材料选用的前提;而回弹模量则是弹性层状体系理论中用于路面力学计算的关键输入参数,其准确性直接影响结构设计的合理性。上述指标共同构成了路基工程质量控制的技术框架。

## 2 常用试验检测方法详解

### 2.1 压实度检测

压实度作为路基质量控制的核心指标,其检测方法的选择直接影响验收结果的可靠性。灌砂法因其原理清晰、操作规范、精度较高,被现行规范列为基准方法。该方法通过开挖试坑,利用已知密度的标准砂填充空腔以测定体积,再结合试样湿重与含水率计算干密度,最终与室内击实试验所得最大干密度比较得出压实度。尽管其适用于细粒土至中等粒径的砾类土,但操作过程繁琐、耗时较长,且在粗粒含量较高的填料中因试坑边缘塌陷或大颗粒架空效应导致体积测量偏差,影响结果准

确性<sup>[1]</sup>。相比之下,环刀法仅适用于黏性较强的细粒土,其通过将固定体积的金属环刀压入土体取样,虽设备简单、操作快捷,但对砂性土扰动极大,难以获取完整试样,故应用范围受限。为提高效率,核子密度仪和无核密度仪等快速检测设备逐渐普及。前者利用 $\gamma$ 射线衰减测密度、中子散射测含水率,虽能实现无损快速检测,但存在辐射安全风险,且需针对不同土质频繁校准;后者基于电磁波传播特性反演介质参数,无辐射、便携高效,但其精度依赖于前期标定质量,在复杂地质条件下仍需以灌砂法进行验证。因此,在高等级公路建设中,通常以灌砂法作为最终验收依据,辅以无核密度仪进行过程动态监控,形成“快检+精验”的双重保障机制。

## 2.2 承载能力检测

路基承载能力的评价主要通过弯沉检测实现,其中贝克曼梁法作为传统静态检测手段,已有数十年应用历史。该方法在标准轴载(BZZ-100)作用下,测量路表中心点的回弹弯沉值,以此反映路基整体刚度。其优势在于标准成熟、与路面设计体系衔接紧密,但检测效率低、易受交通干扰,且仅能获取单点响应,难以全面反映结构横向均匀性。为克服上述局限,落锤式弯沉仪(FWD)应运而生。FWD通过液压系统释放重锤模拟车辆冲击荷载,利用多个位移传感器同步采集弯沉盆数据,不仅能快速完成检测,更能通过反演分析估算各结构层的模量分布,尤其适用于新建路基验收及既有道路结构性能评估。FWD所获得的动态响应更接近真实行车状态,其数据还可用于建立路基性能数据库,支持全生命周期管理。因此,尽管贝克曼梁法仍在部分项目中使用,FWD正逐步成为承载能力检测的主流技术。

## 2.3 CBR (California Bearing Ratio) 试验

CBR试验是评价路基土抗局部压入能力的经典方法,自20世纪30年代由美国加州公路局提出以来,已被全球广泛采纳。室内CBR试验严格按照《公路土工试验规程》执行,首先将土样按设计压实度击实成圆柱形试件,随后浸泡96小时以模拟最不利含水状态,再以恒定速率贯入标准压头,记录贯入2.5mm和5.0mm时的单位压力,并与标准碎石的压力值比较得出CBR百分比。该指标直接关联路面结构设计厚度,例如高速公路路床填料CBR值通常不得低于8%<sup>[2]</sup>。然而,室内试验周期长、代表性受限,难以满足大规模施工的快速反馈需求。为此,工程中常采用便携式CBR仪或通过动力触探击数经验公式进行现场快速推算,虽便捷高效,但精度较低,多用于初步筛查或辅助判断。未来,如何建立更可靠的现场CBR快速测定模型,仍是值得深入研究的方向。

## 2.4 含水率测定

含水率是影响土体压实效果与强度发展的关键物理参数。过高或过低的含水率均会导致压实干密度下降,进而削弱路基承载力。烘干法作为标准方法,通过将土样置于105-110℃烘箱中恒重,计算失水质量占比,具有精度高、重复性好的优点,是实验室和现场仲裁检测的首选。但在施工一线,为追求效率,常采用酒精燃烧法进行初判,该方法虽操作迅速,但因燃烧不完全或有机质损失易引入误差。近年来,微波炉法因其加热均匀、时间短而受到关注,但仍需注意防止高温导致土样成分变化。更前沿的是将电导或电容传感器集成于智能压实系统中,实现含水率的连续在线监测,使施工人员能在摊铺后立即掌握材料状态,动态调整洒水或晾晒措施,显著提升过程控制水平。

## 2.5 颗粒分析试验

颗粒组成决定了填料的工程分类与适用性,是路基材料设计的基础。对于粒径大于0.075mm的粗颗粒部分,通常采用筛分法进行分级称重,绘制级配曲线;而对于细粒部分,则依赖密度计法(比重计法),通过测量悬液沉降速度推算粒径分布。两者结合可完整描述土的颗粒特征。根据《公路路基设计规范》,不同路基部位对填料有明确要求,如路床区宜采用级配良好、CBR值高的粗粒土,严禁使用高液限黏土或膨胀土。近年来,激光粒度分析仪凭借其全粒径覆盖、自动化程度高、重复性好等优势,在科研和高端工程中逐渐应用,但其设备成本较高,尚未普及至常规工地试验室。无论如何,准确的颗粒分析是确保填料“适材适用”的前提,对控制路基均匀性与长期稳定性具有不可替代的作用。

## 2.6 回弹模量测试

回弹模量是路面结构设计中表征路基刚度的核心参数,其准确性直接影响沥青层或水泥板厚度的计算结果。理论上,最精确的方法是室内重复加载三轴试验,但该方法设备昂贵、周期长,主要用于科研。工程实践中,承载板法曾是主流现场测试手段,通过在路基表面放置刚性圆板,分级加载卸载,记录回弹变形,再依据弹性半空间理论反算模量。然而,该方法扰动大、效率低,且对测试面平整度要求极高。随着弯沉检测技术的发展,由FWD或贝克曼梁实测弯沉数据反演回弹模量已成为更可行的路径<sup>[3]</sup>。借助专业软件(如EVERCALC、MODULUS),结合多层弹性体系模型,可较为准确地估算路基 $E_0$ 值。这种方法不仅效率高,还能反映结构整体响应,正逐步取代传统承载板法,成为现代路基设计与评估的重要工具。

## 3 现代检测技术的发展与应用

随着智能建造与数字交通理念的深入,路基检测技术正经历深刻变革。智能压实技术(IC)将GPS定位、加速度传感、红外测温等模块集成于压路机,实时采集压实遍数、振动频率、表面刚度(CMV值)等参数,并生成可视化压实质量云图,实现“碾压即检测、过程即验收”的闭环管理。地质雷达(GPR)则利用高频电磁波穿透路基,通过反射信号识别内部空洞、含水层或分层界面,特别适用于病害诊断与隐蔽工程验收。无人机搭载高精度相机或激光雷达,可快速获取大范围路基三维点云模型,用于沉降监测、边坡稳定性分析及工程量复核。更进一步,物联网(IoT)技术将各类检测设备接入统一云平台,实现数据自动上传、智能分析与预警推送,推动“智慧工地”从概念走向落地。这些技术的融合应用,不仅提升了检测效率与精度,更构建了覆盖“感知—分析—决策—反馈”全链条的数字化质量管控体系。

#### 4 工程应用案例分析

某高速公路项目K50+000~K55+000段路基填筑采用天然砂砾土,具有良好的透水性与承载潜力。施工过程中,项目部建立了多层次检测体系:压实度控制以灌砂法为主,每2000平方米检测不少于8点,同时辅以无核密度仪进行每层全覆盖扫描;含水率在每层摊铺前检测,严格控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内;CBR值按每5000立方米取样一次进行室内试验,结果均高于12%,满足高速公路路床要求;路床顶面完工后,采用贝克曼梁法检测弯沉,代表值控制在210(0.01mm)以内。颗粒分析显示填料最大粒径小于100mm,级配连续,无超粒径块石。通车两年后回访表明,该路段未出现明显沉降、裂缝或车辙,路表平整度良好,充分验证了所采用检测方案的科学性与有效性。

#### 5 存在问题与改进建议

尽管检测技术不断进步,当前路基试验检测仍面临若干挑战。一方面,部分新兴设备如无核密度仪、智能压实系统缺乏统一的校准标准与验收准则,导致不同项目间数据可比性差;另一方面,现场检测人员技术水平

参差不齐,操作不规范现象时有发生,直接影响数据真实性。此外,大量检测数据仍以纸质或孤立电子表格形式存在,未能有效整合至BIM或智慧工地平台,形成“数据孤岛”,限制了其在全过程管理中的价值挖掘<sup>[4]</sup>。尤为突出的是,对于含大粒径漂石或块石的巨粒土路基,传统灌砂法因试坑体积测量困难而误差显著,亟需发展新型检测手段。对此,建议加快修订相关检测规范,明确智能化设备的技术要求与验证流程;强化检测人员岗前培训与持证上岗制度,提升操作标准化水平;推动建立“检测—设计—施工”一体化信息平台,实现数据自动流转与智能分析;同时鼓励科研机构与企业合作,研发适用于粗粒土的三维激光扫描体积测定法或声波密度反演技术,填补技术空白。

#### 6 结语

公路路基工程的试验检测是保障道路质量与安全的生命线。传统方法如灌砂法、CBR试验、弯沉检测等经过长期工程验证,仍是当前质量控制的基石;而智能压实、FWD、地质雷达等现代无损检测技术则以其高效、精准、信息化的优势,正在重塑检测模式。未来,路基检测将不再是孤立的“抽样验证”环节,而是深度融入智能建造全流程的动态感知系统。唯有坚持标准引领、推动技术创新、强化数据驱动,才能构建起覆盖设计、施工、运维全生命周期的高质量路基检测体系,为我国迈向交通强国提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]杨巧凤.公路路基工程中常用的试验检测方法[J].汽车周刊,2025,(08):131-133.
- [2]师天明.公路路基工程常用试验检测方法研究[J].运输经理世界,2025,(11):47-49.
- [3]王浩.公路路基工程中常用的试验检测方法[J].黑龙江交通科技,2024,47(11):16-19.
- [4]王孙喆.公路路基工程的试验检测方法[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(07):118-120.