基于无损检测技术的公路路基压实度精准评价研究

祝朝培

杭州交通工程监理咨询有限公司，浙江杭州，310000；

摘要：公路路基压实度直接决定路基承载能力与公路整体服役寿命，是公路工程建设核心质量控制指标之一。传统压实度检测方法存在破坏性强、检测效率低、评价结果代表性有限等问题，难以满足现代公路工程对压实度精准、快速评价的需求。本文以无损检测技术为核心，分析不同无损检测技术在路基压实度评价中的工作原理与应用特性，探讨技术应用中的精准评价要点，构建适配公路路基场景的压实度无损评价逻辑，为实现路基压实度高效、精准评价提供技术思路，助力提升公路路基工程质量管控水平。

关键词：无损检测技术；公路路基；压实度；精准评价；质量管控

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.034

引言

公路路基是公路结构的基础承载层。它的压实度是否达标，直接影响公路通车后的抗变形能力、稳定性和使用时间。如果路基压实度不够，很容易出现沉降、开裂等问题。这不仅会增加公路后期养护的成本，还可能威胁行车安全。长期以来，行业里常用钻芯取样、环刀法等传统方法，检测和评价路基压实度。这些方法能测出检测点的准确压实度数据，但也有明显缺点。一是检测时会破坏已经建好的路基，影响路基的完整性；二是检测花的时间长，一次能测的范围也小，没法对整条公路做连续检测，不能全面反映路基压实质量在整条路上的分布情况。这和现在公路建设追求“提质、增效、降耗”的要求，不相符合。现在工程检测技术一直在更新，无损检测技术因为不用破坏路基、速度快、能连续检测，慢慢成了评价路基压实度的重要方向。这种技术不用破坏路基结构，能在短时间内检测大范围路段，还能连续收集压实度相关数据，为精准评价路基压实度，提供更全面的数据支持。基于这样的技术发展和工程需求，整理清楚无损检测技术在路基压实度评价里的使用逻辑和步骤，明确不同无损检测技术的主要特点，找出精准评价的关键，对让无损检测技术在公路工程里规范使用，提高路基压实度评价的准确性，很有意义。

1 公路路基压实度评价中常用的无损检测技术及特性

1.1 地质雷达检测技术

地质雷达检测技术，用高频电磁波做传播介质，使用步骤很明确。具体来说，它通过专用的发射天线，向路基内部发射高频电磁波。电磁波在路基里传播时，如果碰到不同介质的界面，比如压实度不一样的土层之间的界面，就会出现反射、折射和能量减少的情况。之后，用配套的接收天线，接住经过界面作用后的反射电磁波信号。再对这些信号做处理和分析，最后算出路基内部土层的密度分布情况。然后根据土层密度和压实度的关系，得出路基对应区域的压实度数据。这种技术的主要特点有两个。第一，检测速度快，能在移动中连续检测，不用停下路基施工，短时间就能测完长路段，大大提高检测效率。第二，检测精度高，能清楚找出路基里压实度不均匀的地方，包括局部松散的区域，还有路基内部可能存在的空洞等看不见的问题，给路基压实度评价，提供能“看见”路基内部结构的信息。不过，这种技术也有不足。它的检测结果容易受路基土层含水量变化的影响，土层里矿物质的种类不一样，也会让检测数据不准。所以实际使用时，要根据不同的路基土质，调整检测参数，减少这些因素的干扰，保证检测数据可靠。

1.2 落锤式弯沉仪检测技术

落锤式弯沉仪检测技术，核心思路是模仿公路上车辆行驶时的荷载，通过特定结构施加荷载并收集数据。具体操作时，把一定重量的落锤，从固定高度往下放。落锤下落产生的冲击力，会对路基表面施加一瞬间的压力，就像车辆行驶时对路基的压力一样。在施加压力的同时，用设备自带的高精度传感器，实时收集路基表面在压力作用下的变形数据，也就是弯沉数据。再分析弯沉数据和路基刚度、土层密度（也就是压实度）之间的关系，建立弯沉值和压实度的换算方法。最后通过这个

方法，间接算出路基的压实度。这种技术的优点也很明显。首先，评价结果和实际工程需求贴合。因为它模仿车辆实际荷载检测，得出的压实度结果，能真实反映路基承受车辆压力时的承载能力，以及路基实际的压实质量，给公路后续安全使用，提供更有用的参考。其次，检测过程自动化程度高。从施加压力、收集弯沉数据，到初步处理数据，都能由设备自动完成。这不仅减少了人工操作带来的误差，还加快了数据收集和处理的速度，能同时测出路基的弯沉、刚度等多个和压实质量相关的指标，给压实度综合评价，提供多方面的数据支持。当然，这种技术也有缺点，它对检测环境要求高。路基表面平不平，会直接影响传感器收集的弯沉数据准不准；土层含水量变了，也会让弯沉数据不稳定、不准确。所以正式检测前，要先处理路基表面，让检测环境符合要求，保证检测结果准确。

1.3 核子密度仪检测技术

核子密度仪检测技术，工作原理和放射性元素与物质的相互作用有关。它主要用特定的放射性元素（常见的有铯-137、镅-241）发射射线，这些射线会和路基土层里的物质发生作用，主要是射线被散射和吸收。实际检测时，把核子密度仪放在路基要检测的位置。设备里的放射性元素发射射线，射线穿过路基土层。同时，设备的检测部件会实时测出射线穿过土层后剩下的强度变化。再根据射线强度减少的程度和土层密度的关系，算出路基土层的实际密度。然后直接根据土层密度和压实度的对应关系，得到这个检测点的路基压实度数据。这种技术的主要特点是检测速度快，一次检测几分钟就能完成，不用在检测前做复杂的准备工作，操作也简单，能快速拿到某个点的压实度数据，特别适合需要快速知道压实质量的场景。但这种技术的使用也有限制。因为它用到了放射性元素，所以检测时必须严格遵守国家和行业的安全规定，不能让放射性元素危害操作人员健康和周边环境。另外，检测结果容易受路基土层里大块颗粒的影响，比如土里的石块，会干扰射线的传播和检测，导致数据不准。所以在土石混合的路基里用这种技术时，要特别注意校准检测数据，修正偏差，保证结果能真实反映路基压实度。

2 公路路基压实度无损精准评价的核心要点

2.1 技术适配性选择

不同的无损检测技术，工作原理不一样，各自的特点、适用范围和使用条件也不同。所以要精准评价路基压实度，首先要选对合适的无损检测技术。选技术主要看两个方面：一是路基的土质类型，不同土质的物理性质差别大，对检测技术的要求也不一样；二是路基的施工阶段，施工前期、中期和后期的检测目的不同，需要的检测技术也得调整。具体来说，对于黏性土路基，这种路基的压实度受含水量影响大，含水量变一点，压实度可能就变很多。而地质雷达检测技术既能测土层密度，还能同时测含水量，能更好满足黏性土路基的检测需求，所以它更合适。对于土石混合的路基，这种路基里有很多大块土石，要是用直接测密度的无损技术，容易被大块颗粒干扰，数据会不准。而落锤式弯沉仪检测技术，能通过弯沉数据看出路基整体的压实硬度，避开大块颗粒对密度检测的干扰，更符合这种路基的评价需求。对于施工过程中快速抽检的情况，这种情况主要是想快速拿到压实度数据，及时判断当前施工段的压实质量，好调整后续施工参数。核子密度仪检测技术速度快、操作简单，能满足即时判断的需求，所以更适合施工时的质量管控。

2.2 检测参数校准

大多数无损检测技术，不是直接测路基压实度，而是先测和压实度相关的其他物理量，再根据这些物理量和压实度的关系，算出压实度，也就是间接得到压实度数据。所以，精准校准检测参数，是提高无损评价精度的关键，直接决定最终评价结果准不准、可靠不可靠。校准检测参数的步骤，要结合路基的实际土质。首先在要检测的路基路段里，选一些有代表性的检测点，这些点要能反映这段路路基土质的整体情况，不能选土质特殊的点。然后，用传统的破坏性检测方法，比如钻芯取样法，测出这些代表性点的准确压实度数据，把这个数据作为评价的基准值。再用对应的无损检测技术，收集这些点的原始检测数据，比如地质雷达的反射波强度、落锤式弯沉仪的弯沉值、核子密度仪的射线强度等。接下来，对基准值和无损检测的原始数据做分析和匹配，建立适合这段路路基土质的参数换算方法。通过这个方法，把无损检测的原始数据转换成压实度数据，不要直接用行业通用的换算方法，避免通用方法和实际土质不匹配，导致评价有误差，保证评价结果准确。同时，校准检测参数不是做一次就够了，要根据路基施工进度，

随时调整和校准。如果施工中，不同路段的路基土质变了，比如从黏性土路变成了土石混合路，原来的换算方法就不适合新土质了。这时候要重新选有新土质特点的代表性点，再测基准值、收集原始数据并匹配，修改和优化换算方法，保证检测参数始终和实际施工情况匹配，一直让压实度评价准确。

2.3 数据整合与分析

只用一种无损检测技术收集数据，得到的结果有局限，不能全面支持路基压实度的精准评价。要想精准评价，就要把多种无损检测技术收集到的数据合在一起，再做深入分析，这样才能让数据更有用，评价结果更科学。具体做的时候，要把不同检测技术得到的核心数据都整合起来，形成多方面的数据体系。首先，要包含地质雷达检测得到的路基内部压实度分布数据，这种数据能清楚显示路基内部压实度在不同位置的情况。然后，要加入落锤式弯沉仪检测得到的路基整体刚度数据，这种数据能直接看出路基作为一个整体，承载压力的硬度如何。另外，还要放进核子密度仪检测得到的单点精准密度数据，这种数据能给压实度评价，提供单个检测点的高精度密度标准。把这三类核心数据合在一起，就能形成“点-线-面”三个维度的路基压实质量评价数据体系，全面、立体地看出路基压实质量的实际情况。从怎么用这些数据来看，第一步，能用核子密度仪的单点精准密度数据，调整和修正路基压实度的整体评价模型，让模型符合路基实际的土质和压实情况。第二步，靠地质雷达的内部压实度分布数据，能准确找到路基内部局部压实不好的地方，比如有些地方松散、压实不够，或者里面有看不见的空洞，这样就能针对性地改进压实方法。第三步，通过落锤式弯沉仪的整体刚度数据，能判断路基整体的压实稳定性，知道路基承受外部压力时，整体抵抗变形的能力怎么样，进而全面判断路基压实质量靠谱不靠谱。这三类数据一起用，能互相验证、互相补充。核子密度仪的单点数据，能检查地质雷达和落锤式弯沉仪数据准不准；地质雷达的分布数据，能弥补核子密度仪单点数据覆盖范围小的问题；落锤式弯沉仪的整体数据，能完善地质雷达局部数据缺少宏观视角的不足。通过三者配合，能避免只用一种技术数据时，因为覆盖范围小、检测角度少而出现的片面问题，让评价结果更全面、更可信。另外，把多种技术的数据整合好之后，还要对这些合在一起的数据做专门的分析和去噪处理。实际检测时，环境因素会影响数据的准确性。比如检测时温度变了，可能让传感器的灵敏度跟着变，导致数据有偏差；周围施工产生的震动，可能让检测设备不稳定，收集到不正常的数据。所以，处理数据的时候，要用专门的方法，找出并删掉那些因为温度、震动等环境因素导致的异常数据，保证最后用来评价压实度的数据准确、靠谱。数据去噪后，还要再核对一遍，确认没有遗漏的异常值，也没有误删正常数据。只有数据没问题，后续的压实度评价才会准确，才能真正帮到路基施工质量的管控。数据去噪后，还要再核对一遍，确认没有遗漏的异常值，也没有误删正常数据。只有数据没问题，后续的压实度评价才会准确，才能真正帮到路基施工质量的管控。这样既保证了评价结果的可靠，也为施工调整提供了明确依据。

3 结语

无损检测技术为公路路基压实度精准评价提供了高效、非破坏性的技术路径，相比传统检测方法，其在检测效率、覆盖范围、数据连续性上的优势，可有效弥补传统方法的不足，满足现代公路工程质量管控的需求。通过明确地质雷达、落锤式弯沉仪、核子密度仪等常用技术的核心特性，结合路基土质、施工阶段做好技术适配性选择，再通过检测参数校准与多技术数据整合分析，可实现路基压实度从“局部检测”向“全面精准评价”的转变，有效提升路基压实质量评价的科学性与可靠性。未来，随着无损检测技术的进一步发展，需持续优化技术参数换算模型，提升复杂土质（如高含水率、高土石比路基）下的评价精度，推动无损检测技术在公路路基压实度评价中实现更广泛、更精准的应用，为公路工程建设质量提升提供更坚实的技术保障。

参考文献

[1]邓亚萍.公路路基压实度试验检测要点[J].运输经理世界,2024(22):59-61.

[2]郑绪珺.公路路基压实度检测试验及结果分析[J].江西建材,2023(12):159-160+165.

[3]王景南.公路路基压实度现场密度试验检测方法实践[J].智能城市,2021,7(03):67-68.