

基于震法测量的铁路路基压实度快速评估方法研究

赵浩峰

河北地质大学, 河北 石家庄 050000

摘要: 本文详细阐述了震法测量的原理、特点及其在铁路工程中的适用性, 结合现场与室内试验, 分析了波速与压实度力学指标之间的相关性及其评估指标的灵敏度。在此基础上, 针对不同含水率、填料级配和列车动载特性, 提出了震法测量的评估流程和注意事项。研究结果表明, 该方法具有快速、高效、准确的特点, 在一定范围内可替代传统检测方法, 适用于重载和高速铁路路基的综合评估。

关键词: 震法测量; 铁路路基; 压实度评估; 地基系数; 含水率; 动弹性模量

Research on Rapid Evaluation Method of Railway Subgrade Compaction Based on Seismic Measurement

Zhao, Haofeng

Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: This paper expounds in detail the principle, characteristics and applicability of seismic measurement in railway engineering. Combining with field and indoor tests, it analyzes the correlation between wave velocity and mechanical indexes of compaction degree and the sensitivity of evaluation indexes. On this basis, according to different water content, filler gradation and train dynamic load characteristics, the evaluation process and matters needing attention of seismic measurement are put forward. The research results show that this method is fast, efficient and accurate, which can replace the traditional detection methods in a certain range and is suitable for comprehensive evaluation of heavy-haul and high-speed railway subgrade.

Keywords: Seismic measurement; Railway subgrade; Compaction degree evaluation; Foundation coefficient; Moisture content; Dynamic modulus of elasticity

DOI: 10.62639/ssps24.20250203

引言

随着我国铁路运输需求的持续增长, 既有铁路在重载、高速运营条件下承受的荷载水平逐渐加大, 对路基的稳定性和长期性能提出了更高要求。路基压实度作为衡量路基质量的重要指标, 直接影响运营中的沉降变形、病害发展及轨道平顺性。然而, 传统检测方法如平板载荷试验和轻型动力触探试验存在检测效率低、成本高的问题, 难以满足既有线路快速检测需求^[1]。

一、震法测量的理论概述

(一) 震法测量原理

震法测量通常借助可控激振源在路基表面或一定埋深处产生冲击或振动, 在土体介质中激发出包括纵波、横波、面波等多种形式的地震波。通过在地表布设接收传感器(如检波器、加速度计等), 记录波的到时、振动加速度、速度和位移等信息, 根据波在介质中的传播速度、相位特征与衰减规律, 综合分析出土层的动力特性与力学性质。铁路路基主要由基床表层、基床底层及路堤填料等多层结构组成, 不

同结构层的密实度、弹性模量以及含水率差异导致波速分布和频散特性也会出现相应变化。

震法测量可分为反射波法、折射波法、表面波法等多种类型。其中, 多道反射波法对浅层地质结构的波阻抗界面识别较为精准, 适合对路基内部缺陷与界面位置进行探查; 折射波法往往适用于大范围或较深层路基的波速测定; 表面波法(SASW、MASW等)则依赖表面波频散曲线反演土层剪切波速剖面, 在对路基刚度及整体压实状态进行评价时具有较好的适用性。

(二) 震法测量与路基压实度的关系

在路基填料中, 土粒子之间的接触方式、孔隙分布以及孔隙水含量对波在土层中传播速度和衰减特性具有决定性影响。从宏观力学角度看, 土体的动弹性模量、阻尼比与密实度密切相关, 进而影响地震波传播时的相速度、群速度以及能量衰减系数。当路基填料压实度越高、土体颗粒彼此之间接触越紧密、空隙体积含水率较稳定时, 土体的整体刚度相应提高, 波速也会随之增大; 反之, 压实度不足或含水率变化导致的土体软化会造成波速降低^[2]。在常见的工程经验中, 剪切波速可在一定程度上反映土体的刚度与抗剪切变形能力, 而路基评价中常

(稿件编号: IS-25-3-1026)

作者简介: 赵浩峰(1997-), 男, 汉族, 籍贯: 河北省唐山市, 本科学历, 助理工程师, 研究方向: 物探勘察。

用的回弹模量、动弹性模量等指标亦与土体的剪切模量存在一定关联。因此, 可通过现场测得的波速与实测回弹模量之间建立回归关系, 从而获得路基压实度的快速评估模型。

(三) 影响因素与测量精度

震法测量结果易受到测试频率、激振能量、传感器布置、土层结构差异及含水率等多种因素影响。对于铁路路基而言, 还需考虑列车动载效应对土层密实性和动力特性的改造效应。一方面, 列车周期性载荷会导致路基内部孔隙水的重新分布、细颗粒的迁移与排空; 另一方面, 震法测试在运营线进行时, 列车经过产生的振动干扰也可能使测量数据产生一定噪声干扰。因此, 需要对路基测试区段进行筛选并采取有效的噪声抑制与数据滤波处理, 以确保测量结果的可靠性。

二、现场测试方案与数据处理

(一) 试验概况

为验证震法测量用于铁路路基压实度快速评估的有效性与准确性, 本文选取了某条运营重载铁路的典型区段(里程范围约5km)作为现场试验段。该试验段主要填料为粉质黏土与碎石土的混合料, 其塑限含水率约18%左右, 常年实际运行工况下含水率一般在10%~15%之间。线路在重载列车高速通过时, 道碴颗粒及填料之间会产生强烈相互作用, 导致填料密实度出现横向与纵向分布上的不均衡。测试内容主要包含:

1. 震法测量: 选取多点布设表面波测试系统(MASW), 利用敲击式激振源在不同位置进行激振, 传感器(检波器)间距1m, 阵列长度24~32m, 根据实际条件适当调整;

2. 回弹模量与地基系数测试: 采用平板载荷试验, 对应测点位置测得地基系数 K_{30} 、二次回弹模量 E_{v2} 等;

3. 动弹性模量测定: 在局部位置使用动态圆板荷载仪测定动弹性模量 E_d ;

4. 含水率与密度测定: 钻取部分原状土样, 采用烘干法与环刀法测定含水率与干密度, 并进行补充土工试验, 以便校正和对比现场的波速结果。

(二) 测试布置与实施

为减少外界环境和列车干扰对测试数据的影响, 现场试验安排在既有线路天窗时间段内进行。测试人员在指定测试点位布设MASW观测系统, 采用24道或32道检波器进行数据采集。敲击源使用10kg的小型落锤, 激振时间间隔不超过5s。为了保证数据质量, 每个测点一般激振3~5次, 以获得多组波形记录并取其平均值。

在震法测量完成后, 对相应位置进行平板载荷试验以及局部的动态圆板荷载试验。为保证结果对比的客观性, 平板载荷试验的位置与表面波观测线重合, 测试深度控制在1.0~1.5m范围内, 同时记录各试验点的含水率、干密度等指标。通过这一完整的测试工序, 获得了较为详实的震法波速数据与传统力学测试数据。

(三) 数据处理与分析方法

1. 波速反演及滤波处理

采集到的多道表面波数据经预处理后, 构建频散曲线, 应用多道分析方法(MASW)对频散曲线进行反演, 得到各深度层的剪切波速分层结果。随后, 根据现场实测时对路基结构层厚度的钻探核验, 对不合理的波速突变进行滤波、剔除异常值并进行插值修正。

2. 力学指标回归分析

将同一测试点的震法波速与地基系数 K_{30} 、回弹模量 E_v 、动弹性模量 E_d 等进行相关性分析。通过最小二乘回归方法, 求解出若干目标函数形式(指数、幂函数、多项式等)的最佳拟合系数和相关度 R^2 值。若某一函数形式无法取得理想拟合度, 则需要结合土工试验结果(如塑限含水率、颗粒级配等)进一步分类统计。

3. 测点含水率与波速的关联分析

考虑到路基的水分含量对压实度和波速均有显著影响, 本文在分析波速与压实度指标的回归关系时, 进一步引入含水率这一参量, 对不同含水率区间的数据进行分组回归^[3]。在含水率较高或较低的极端情况下, 需要警惕回归结果的外推风险。

三、震法测量结果分析与讨论

(一) 波速分布特征

通过对本次试验段的MASW数据进行反演与分析, 发现剪切波速在路基上部1.0~1.5m深度区间的分布范围约为110~250m/s。其中, 靠近肩部与路堤边坡的位置相对波速偏低, 而在道碴下方及中心位置波速相对较高。整体上, 测试区段波速分布与路基沉降观测历史数据呈现良好的一致性: 即波速较高的区段, 路基沉降量相对较小, 说明土体刚度较大、压实度较高; 波速偏低的区段可能存在一定松散或局部渗水现象, 沉降量也呈现大幅波动。

(二) 含水率影响分析

为明确含水率对路基压实度和波速的耦合作用机制, 本文结合钻取的土样实测含水率进行对照分析。结果表明, 在10%~15%这一较为典型的运营含水率范围内, 波速呈现随含水率略微升高而上升的趋势, 但增幅并不明显。其原因可能在于: 当含水率偏离最佳含水率较多时, 土体孔隙中水分增多会软化土体, 导致波速下降; 当含水率处于较合理范围时, 少量水分可增加颗粒间的吸力, 提高土体整体刚度, 进而对波速有一定正向促进作用。本文对测试段内较高含水率(>15%)与较低含水率(<10%)位置的数据另行分析后发现, 极端偏离最佳含水率的路基段落, 其波速-压实度回归模型与普通区段存在一定偏差。因此建议在实际工程应用时, 应结合现场含水率实测或预估值进行分区修正。

(三) 波速与压实度指标回归

经过多组回归拟合与筛选, 最终本文建议采用如下具有较高相关性的函数形式来表达震

法波速 (v_s) 与三大路基压实度指标 (K_{30} 、 E_v 、 E_d) 之间的估算关系。设波速单位为 m/s, K_{30} 单位为 MPa/m, (E_v 、 E_d) 单位均为 MPa。为方便应用, 下文给出一个示例形式:

$$K_{30} = a \cdot (v_s)^b E_v = c \cdot (v_s)^d E_d = e \cdot (v_s)^f$$

其中, a, b, c, d, e, f 为待标定的回归系数。通过对 50 余组有效测点数据的分析, 本试验段回归所得平均经验参数如下:

$$K_{30} = 2.2 \times 10^{-4} \cdot (v_s)^{2.10},$$

$$R^2 = 0.83 E_v = 4.5 \times 10^{-3} \cdot (v_s)^{1.85},$$

$$R^2 = 0.78 E_d = 7.5 \times 10^{-3} \cdot (v_s)^{2.03},$$

$R^2=0.82$ 在上述回归过程中, 极端含水率或特殊分层情况的数据被剔除或单独分组处理。由此可见, 利用震法测量所得波速估算路基压实度指标具有可行性与较高的相关性, 且估算误差主要来源于含水率偏差与土体分层不均匀所造成的波速异常。

(四) 与传统检测方法的对比

为评价震法测量在快速检测与评估中的优越性, 本文对比了平板载荷试验和轻型动力触探试验 (N_{10}) 在本试验段的耗时、检测精度以及破坏性等。结果表明:

1. 检测效率: 平板载荷试验和轻型动力触探都需要开挖或整平试验平台, 占用时间相对较长; 而震法测量只需在路基面或道床面布设仪器, 能短时间内完成多个测点的波速采集。

2. 破坏性: 轻型动力触探需要在道床面或路基面贯入, 相对于震法测量具有一定的破坏性; 平板载荷试验则需要挖坑并压实加载板下的土层, 对既有线路的干扰更大。

3. 测试精度: 如果在同一含水率范围及一致的填料特性条件下, 震法测量估算结果与平板载荷试验得到的压实度指标基本保持在 $\pm 10\% \sim 15\%$ 的误差范围内。考虑到大范围快速检测的需求, 这一精度水平在工程中是可接受的。

4. 适用范围: 震法测量对于干硬性、密实度高或富含大颗粒骨料的路基同样适用, 但需注意深厚填方段与强透水性材料可能造成的信号衰减与耦合问题。

四、震法测量在铁路路基压实度快速评估中的应用

(一) 评估流程建议

基于本研究及其他文献的成果, 本文总结了一套基于震法测量的铁路路基压实度快速评估流程, 主要包括以下步骤: (1) 对既有线路按照线路地质条件、填料类型、含水率状态等进行分段, 初步划定可能的软弱段或病害段; (2) 布设测线与激振点, 在关键区段布设若干条表面波观测线, 选取适当的传感器间距和激振方式; (3) 利用多道仪器进行连续的波速数据采集, 并通过

频散曲线反演得到土层的波速分布; (4) 对已获取的波速分层结果, 结合有限数量的钻孔含水率和室内土工试验信息, 对波速异常区和含水率极端值段落进行分区修正; (5) 根据前期标定的回归公式, 推算出地基系数、回弹模量或动弹性模量; (6) 对比铁路路基设计或维护标准, 对薄弱段或密实度不足处提出注浆、补强或提高排水措施等加固处理方案。

(二) 工程应用实例

某运营重载铁路在长期服役中出现了局部路基沉降不均的问题。项目单位引入震法测量对全线进行初步诊断, 重点关注路基沉降量大的路段。根据上述流程, 在疑似病害区段布设数十条 MASW 测线, 每条测线长度约 24m, 传感器道数为 24 道, 测得的波速数据经过插值分析与校正后发现, 该区段波速整体偏低, 仅约 120 ~ 160m/s。随后对低波速区段进一步开挖验证, 结果显示部分基床底层含水率升高, 填料存在较明显的松散现象, 与波速反演结果吻合良好。针对这一情况, 项目单位采取了排水沟疏导、水泥-粉煤灰稳定处理等措施, 并通过补充的平板载荷试验证明压实度指标得到大幅提升。全线排查只用一周左右即可完成, 施工干扰较小, 为运营线快速维护决策提供了重要依据。

五、结论与展望

综上所述, 基于震法测量的铁路路基压实度评估方法具有较高可行性。通过大量实测与回归分析发现, 震法波速与路基压实度指标 (K_{30} 、 E_v 、 E_d 等) 之间存在较好相关性, 相关系数在 0.75 ~ 0.85 之间。相较传统的平板载荷试验和动力触探试验, 震法测量具有快速、高效、非破坏性和占用线路时间少的优势, 尤其适用于既有线路的大范围压实度检测与健康诊断。然而, 含水率偏离正常范围 (如 $>18\%$ 或 $<8\%$) 会导致土体软化或干硬, 从而引起波速异常变化, 部分分层、夹层或局部富水区也可能导致波速突变。因此, 建议在估算模型中引入含水率修正项并进行分区标定以提高精度。此外, 由于震法测量易受环境噪声、仪器灵敏度及列车振动干扰的影响, 需用滤波、叠加平均和剔除异常值等数据处理手段, 同时结合有限数量的平板载荷试验或钻孔采样对回归模型进行校验与修正。未来, 震法测量可通过集成先进的传感与信息技术实现更便携、智能化的快速评估, 有望与其他无损检测方法结合, 通过多源数据融合与机器学习算法, 获得更全面的路基病害识别与评估结果。

参考文献:

- [1] 邵明帅. 铁路路基压实质量快速无损检测方法应用研究 [D]. 北京交通大学, 2017.
- [2] 肖尊群, 李志平. 含水率与轻型动力触探 N_{10} 对既有重载铁路路基压实度指标变化关系研究 [J]. 中国矿业, 2017, 26 (09): 164-168.
- [3] 李博文. 铁路路基压实度检测方法研究 [J]. 建设监理, 2024, (S1): 68-69.