

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240287

基于PFWD的路基压实质量快速检测方法研究

王巍¹, 蒋锦毅¹, 胡智²

(1. 浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州 311112; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 以公路路基压实质量控制和检测为背景, 利用PFWD开展了路基压实质量快速检测的方法研究, 并从人为操作、仪器设备、检测环境3个方面总结分析了测试误差来源。结果表明: PFWD方法具备良好的测试可重复性, 各组测试结果的变异系数均小于0.1; 基于PFWD的路基模量与弯沉呈幂函数负相关, 与承载板反力呈指数函数正相关, 故该方法能够有效地反映路基压实质量优劣和不均匀性; 严格控制由落锤、承载板接触面处理、传感器标定、计算参数选取等因素引起的测试误差, 有利于使该方法得到更广泛的应用。

关键词: PFWD; 公路路基; 压实质量; 快速检测

中图分类号: U416.03

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0226-06

Research on Rapid Detection Method of Subgrade Compaction Quality Based on PFWD

WANG Wei¹, JIANG Jinyi¹, HU Zhi²

(1. Zhejiang Vocational and Technical College of Communications, Hangzhou 311112, China; 2. Zhejiang Academy of Transportation Science, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Based on the background of highway subgrade compaction quality control and detection, PFWD is used to study the rapid detection method of subgrade compaction quality, and the sources of test errors are summarized and analyzed from three aspects of human operation, instrumentation and equipment, and testing environment. The results show that the PFWD method has good test repeatability, and the coefficients of variation for each set of testing results are below 0.1. The subgrade modulus based on PFWD is in negative correlation as a power function with deflection, while in positive correlation as an exponential function with bearding plate force. Thus, the method can effectively reflect the quality and non-uniformity of subgrade compaction. The test errors caused by drop hammer control, bearing plate contact surface processing, sensor calibration, and calculation parameter selection should be strictly controlled, which is helpful for the method to be applied more widely.

Keywords: PFWD; road subgrade; compaction quality; rapid detection

0 引言

路基是道路结构的重要组成部分, 承载着上部路面结构的自重及交通荷载, 同时还能将传递下来的荷载均匀分散到地基土层。路基压实质量控制对于确保道路的安全、耐久和性能至关重要, 质量不合格的路基施工可能导致道路出现沉降、变形、裂缝等病害, 降低道路综合使用寿命, 增加后期路面养护的成本, 甚至引发路基失稳等严重的安全问题。因此, 对路基压实质量采取有效管控是道路工程建设中的

关键任务之一^[1-3]。

为了确保路基能够承受交通荷载并为路面结构提供稳定支持, 开展路基压实质量控制和检测显得尤为重要。目前, 路基压实质量主要采用三类指标进行控制, 即物理参数指标、力学强度指标与施工工艺参数指标^[4-7]。其中, 采用最多的为施工工艺参数指标控制方法。利用试验段的测试数据或同一区域其他工程的相关施工经验, 可确定不同压实指标与施工工艺参数之间的定量关系, 如按规定需要达到一定的压实遍数、路表沉降差等, 以实现对路基压实质量的控制; 物理参数指标类方法则主要通过采集路基填筑体压实度或密度, 通过判断其是否满足路基设计压实度要求来评判路基质量; 力学强度法有别于上述两类方法, 主要通过测试得到的土体模量值来判断路基的压实质量, 如FWD(Falling Weight

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 浙江省道桥检测与养护技术研究重点实验室开放课题(202303Z)

作者简介: 王巍(1978—), 女, 硕士, 副研究员, 从事道路桥梁相关研究工作。

Deflectometer)方法与现场 CBR (California Bearing Ratio)等方法。FWD 等方法的测试结果虽然能够准确直观地反映路基质量,但相关设备投入较高、运输繁琐。鉴于此,已有部分学者引入更为便捷的 PFWD (Portable Falling Weight Deflectometer)测试方法来对路基压实质量进行控制^[8-10]。同时,国内有个别省市制定了关于 PFWD 的测试技术标准,已出台的地方标准中着重对测试方法流程提出了要求,但对于测试过程中误差影响因素的考虑却尚不够全面,且未系统给出控制测试误差的措施^[11-12]。通过文献调研可知,目前对该方法尚未形成统一的行业测试标准,因此有必要对 PFWD 检测方法(尤其是针对公路路基领域)的标准化开展进一步研究。

本文将依托实际工程,采用 PFWD 方法开展路基压实质量现场测试,全面深入分析该方法的测试结果,并总结测试误差的来源,为后续 PFWD 方法在路基施工质量控制中的推广应用提供参考。

1 PFWD 检测技术分析

1.1 PFWD 方法原理简介

便携式落锤弯沉仪(PFWD)是一种用于测试填筑材料模量的动力承载板试验装置,也被称为轻型落锤弯沉仪。典型的 PFWD 装置结构示意图如图 1 所示,主要组成部分包括落锤、导杆、缓冲器、承载板、力传感器、检波器和通讯模块等。

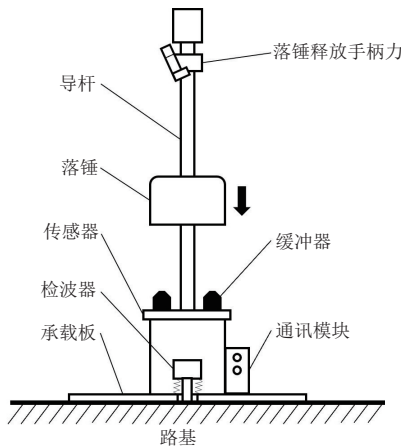


图 1 PFWD 装置结构示意图

该设备主要是通过圆形承载板向土体施加一个脉冲力来完成测试。当落锤接触到缓冲器后,力会传递给承载板,最终传递到被测土体表面。PFWD 和土体构成一个力学耦合系统,可以简化为自由度为 2 的“质量-弹簧-阻尼”系统,如图 2 所示。

图 2 中, h 为落锤高度, m_1 为落锤质量, m_2 为承载板质量, k_1 、 c_1 分别为缓冲器刚度和阻尼系数, k_2 、 c_2 分

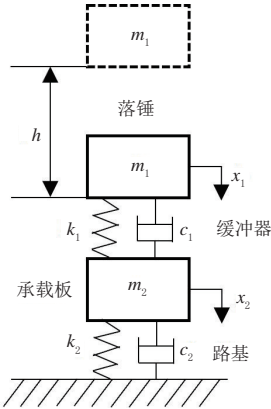


图 2 PFWD 检测原理简化模型示意图

别为路基刚度和阻尼系数, x_1 、 x_2 分别为落锤和承载板竖向位移。

1.2 模量计算方法

在承载板中心处需安装一个检波器,用于采集土体或承载板的动态弯沉响应。同时,由落锤引起的力的加载过程和峰值荷载可通过位于缓冲器下的力传感器采集记录。典型的“荷载-时间”曲线和“弯沉-时间”曲线如图 3 所示。根据峰值荷载和峰值弯沉,可利用式(1)计算得到承载板下一定深度范围内填筑层的模量值^[13]。

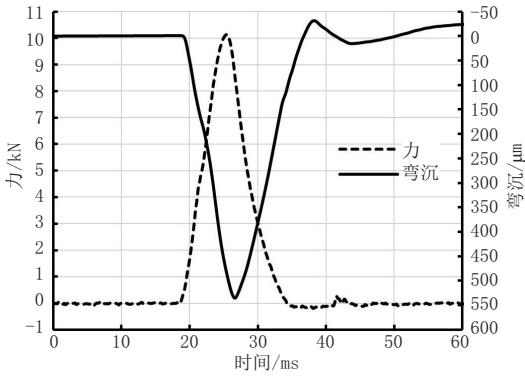


图 3 PFWD 检测结果典型曲线

$$E = \frac{f(1 - \nu^2)pr_0}{l} \tag{1}$$

式中: E 为路基动态模量,MPa; f 为应力分布系数; p 为实测承载板峰值单位压力,MPa; l 为实测承载板中心峰值弯沉,mm; ν 为泊松比; r_0 为承载板半径,mm。

式(1)中将被测对象假设为线弹性、各向同性且均质的半无限空间连续介质。由式(1)可见,除了实测得到的荷载与弯沉值外,还需要应力分布系数和泊松比两个参数。应力分布系数 f 主要用来反映承载板与土体之间的接触应力分布形状,当接触应力均匀分布时, $f=2$;泊松比则与被测材料的特性有关,通常取值为 0.15(水泥混凝土)、0.35(沥青混凝土)或 0.5(土基、基层等)。

1.3 PFWD 检测步骤

采用PFWD开展路基压实质量的检测,其过程通常可以分为以下3个步骤。

(1)测试准备:结合工程现场情况与检测需求来确定测点,设备组装完成后,测试设备与采集端之间进行数据传输,在采集软件中设置测试参数。

(2)预冲击:将设备放置在指定测点区域,采用预定落锤高度对测试面进行3次冲击,以确保承载板与路基表面充分接触。

(3)检测:完成预冲击后,进行正式加载测试,测试次数不低于3次,测试过程中需保证导杆与承载板垂直,利用采集端收集测试数据。

每一个测试区域可得到不少于3组有效数据,取最后3组测试结果的平均值作为该区域的路基模量值。当单组测试值与该处测试结果平均值之间偏差超过10%时,将该组测试剔除。

2 试验方案

2.1 依托工程概况

本研究依托某国道改建工程填方路段开展路基压实质量检测的现场试验工作,该工程采用一级公路标准,双向6车道设计速度为80 km/h,路基宽33 m。

本研究所用试验场地为一高填方路段,如图4所示。根据工程设计资料,该段高填方长200 m,设计最大路堤填高21 m,路堤采用分层填筑,每填筑3 m厚后采用冲击碾压工艺补强,以确保路基密实度和整体强度,避免路基不均匀沉降。



图4 测试区域现场图片

2.2 试验材料与设备

本研究路段采用土石混合填料,填料来源为从该依托工程沿线路堑边坡开挖的土石方,其中岩质部分主要为泥岩和泥质粉砂岩,经现场机械破碎后,填料最大粒径控制在150 mm以内。

本研究现场试验采用的设备主要包括振动压路机与PFWD装置。振动压路机采用山推SR26-H型单钢轮压路机,其工作质量为26 t,激振力为315 kN,压实宽度为2 170 mm。PFWD装置采用由Sweco生产的PRIMA100型手持轻型落锤弯沉仪,该设备具有手机无线采集数据及实时浏览数据等功能,技术参数如表1所示,其测试设备及采集软件界面如图5所示。

表1 PFWD 设备技术参数

项目	技术参数
落锤质量/kg	10
最大落高/cm	85
承载板半径/mm	150
脉冲时间/ms	15~30
脉冲曲线	半正弦曲线
检波器精度/mm	>0.02
检波器分辨率/mm	1/1 000
力传感器量程/kN	0~20
力传感器精度/kN	1%F.S.±0.1
力传感器分辨率/kN	0.1
采样频率/Hz	5 000

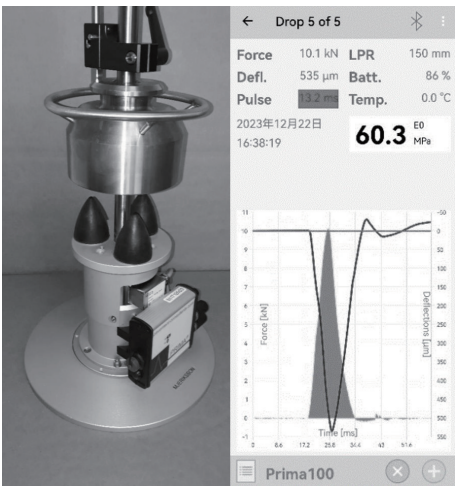


图5 试验设备及数据采集软件界面

2.3 试验方案设计

为测试PFWD方法对于评价路基压实质量的效果,选取长度为50 m的压路机单车道作为研究区域,测试点布置如图6所示。每间隔5 m设置一排测试点,每排设置3个测试点,分别位于压路机轮迹中心以及左右各0.8 m处,总共设置33个测试点。

在进行测试前,首先应采用压路机对研究区域进行充分碾压,使其满足施工工艺要求以及压实度控制指标,测试区域距离路床顶面需超过1.5 m,并根据设计文件将该处路基固体体积率控制到不低于82%。

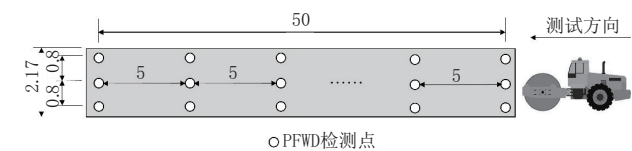


图6 PFWD测试点分布图(单位:m)

3 结果分析

3.1 测试可重复性分析

选取3处测点,分别对同一位置进行6次检测,通过对多次检测的数据进行统计分析,可以评价PFWD检测方法的可重复性。其中,对测点1、测点2、测点3(测点3-1)的检测在同一天完成,间隔3 d后,对测点3(测点3-2)区域进行重复检测。

其中对1处测点进行不同检测次数的弯沉和力随时间的变化曲线如图7所示,峰值弯沉和承载板峰值力的统计分析结果如表2所列。由图7可见,不同检测次数得到的“弯沉-时间”曲线和“力-时间”曲线的形状基本相同。表2中各参数的变异系数波动范围为0.004~0.045,均小于0.1,说明该测试方法的可重复性较好。此外,测点2处得到的平均模量较大,峰值弯沉和模量变异系数相对更小。

3.2 路基模量数据分析

承载板反力与路基模量之间的关系如图8所示。可以看到,模量与力近似呈指数关系,作用于承载板

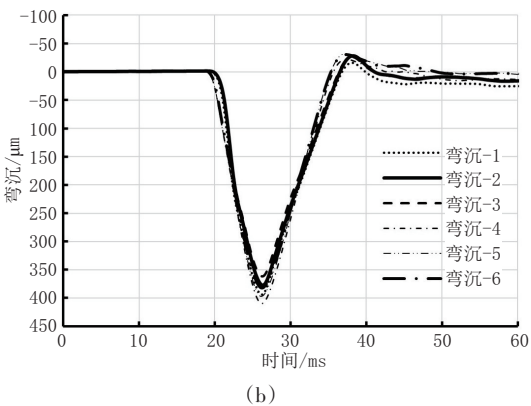
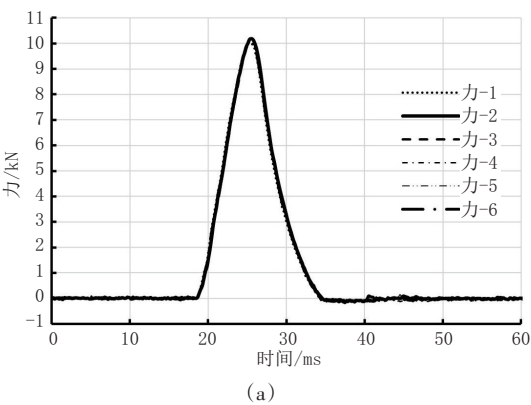


图7 测试参数随时间分布图

上的荷载主要集中于9.75~10.45 kN,而路基模量则在12.3~210.3 MPa之间变化。其中,部分承载板反力小于或等于9.5 kN,与实际落锤提供的数量冲击力

表2 不同检测次数下峰值数据统计分析表

序号	测点1			测点2		
	峰值力/kN	峰值弯沉/ μm	模量/MPa	峰值力/kN	峰值弯沉/ μm	模量/MPa
1	10.04	394.18	81.1	9.86	239.87	130.9
2	10.18	377.13	85.9	10.20	246.95	131.5
3	10.09	361.65	88.8	10.10	235.47	136.6
4	10.10	409.97	78.4	10.29	236.77	138.4
5	10.11	397.01	81.1	10.31	236.13	139.0
6	10.09	382.49	84.0	10.29	234.62	139.6
平均值	10.10	387.07	83.2	10.18	238.30	136.0
标准差	0.04	16.97	3.8	0.17	4.60	3.9
变异系数	0.004	0.044	0.045	0.017	0.019	0.028

序号	测点3-1			测点3-2		
	峰值力/kN	峰值弯沉/ μm	模量/MPa	峰值力/kN	峰值弯沉/ μm	模量/MPa
1	9.64	330.01	145.9	9.88	306.10	161.3
2	9.73	332.10	146.4	9.78	308.80	158.3
3	9.75	310.57	156.9	9.80	323.50	151.5
4	9.79	309.51	158.1	9.86	323.50	152.3
5	9.76	300.50	162.4	9.84	303.60	161.9
6	9.80	307.79	159.2	9.94	322.30	154.1
平均值	9.75	315.08	154.8	9.85	314.63	156.6
标准差	0.06	12.88	7.0	0.06	9.43	4.6
变异系数	0.006	0.041	0.045	0.006	0.030	0.029

相比明显偏小。这是由于在本研究中,现场路段局部存在含石率偏小的土料异常集中的情况,相比于含石率正常或偏大的区域,这些异常区域反映在测试结果中会表现为落锤冲击力偏小。

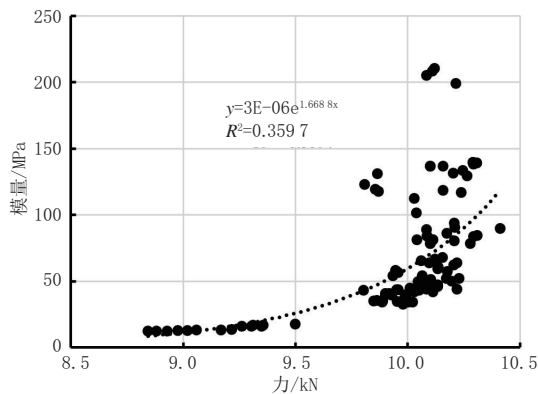


图8 力与模量相关关系图

承载板中心弯沉与路基模量之间的关系如图9所示。由图可知,模量与弯沉表现出明显的幂函数关系。根据前文介绍的基于PFWD的路基模量计算公式,模量值是由弯沉和承载板力等参数共同确定的。在这些参数中,路基弯沉的变化范围最大,而其他参数变化相对较小。因而,弯沉与路基模量之间呈现出非常规律的相关性。同时,可以发现有部分测点的弯沉数据大于1 500 μm ,在实际测试过程中应当特别关注这些点,结合人工目视判断路基质量。与图8中落锤冲击力偏小的原因相似,图9中弯沉数据偏大也主要是由于路基中存在含水率偏低的异常区域。同时,可以从图9中看到数据点存在不连续的情况,这主要是因为本研究仅涉及到50 m长度路段,数据样本总量不大。路基填料技术指标在满足设计要求的一定范围内存在波动或小幅跳动,也会导致测试数据出现间断。

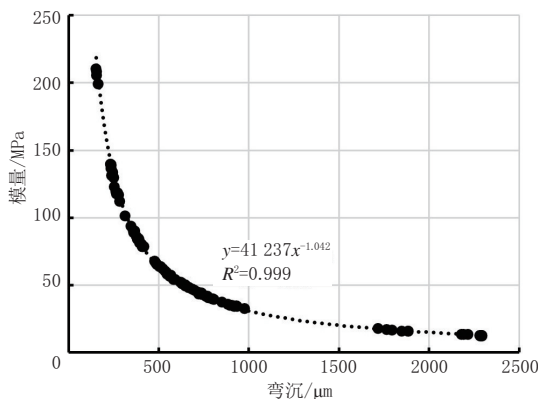


图9 弯沉与模量相关关系图

承载板中心弯沉与承载板反力之间的关系为如图10所示,可以发现弯沉与力之间近似呈线性关系,承载板的反力越大则弯沉越小。通过上述图表

也可以清晰筛选得到可能存在测试异常的点,如在图8中左上部分的测点数据。

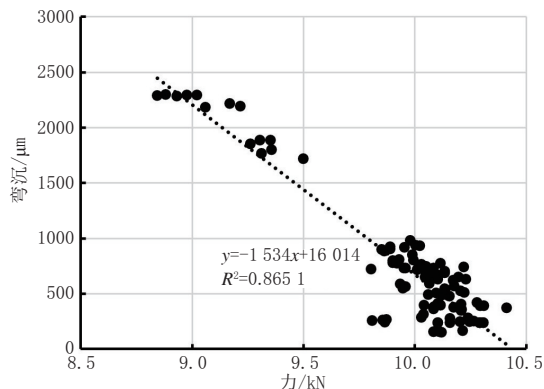


图10 力与弯沉相关关系图

图11为路基模量随着测试距离的变化分布曲线。根据现场试验设计,本研究共布置33个测点,其中得到有效测点数据31个,从图中可以清晰看到模量沿着长度方向的变化趋势。路基模量平均值为70.7 MPa,整个测试区域存在两个模量低的异常区,即0~10 m和20~35 m;而40~50 m区域路基模量则较整体水平偏高。针对测试结果,建议对低模量区域进行补压,以提高路基压实水平和均匀性。

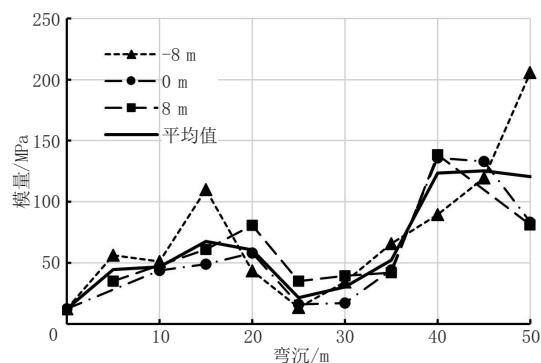


图11 模量分布图

3.3 测试方法误差分析

基于上述研究的开展,说明PFWD测试方法能够很好地对路基压实质量进行快速检测,较为准确地反应路基填筑质量优劣和不均匀性。但与此同时,也可以发现该方法存在一定测试误差,如不能对这些误差因素进行有效控制,可能会大大降低测试结果的可靠性。为此,本研究将从人为操作、仪器设备、检测环境这三个方面对PFWD检测方法进行误差分析。

(1) 人为操作误差

a. 落锤高度控制:不同的落锤高度会引起施加荷载的能量差异,进而造成检测影响深度不同,可能会引起检测结果偏差。

b. 落锤复位:落锤与导杆上端采用机械卡扣连

接,当落锤完成一次冲击动作后,需要人工将落锤沿导杆提升至卡扣高度进行复位;若提升过程忽略对落锤上升速度的控制,可能导致落锤向上大力撞击卡扣,进而牵动导杆和承载板向上小幅运动;而承载板向上运动可能会使其与路基面脱开,改变预冲击形成的承载板与路基面之间的接触位置,进而影响测试数据。

c. 导杆垂直度控制:落锤沿导杆自由下落过程中,若导杆不能尽量保持与地面垂直,会使落锤作用在承载板上的力垂直分量减小;若每次测试导杆的垂直程度都存在偏差,也会造成数据偏差。

(2) 检测环境误差

a. 承载板接触面处理:承载板为平面,理论上为保证承载板与被测体表面的充分接触,被测体表面也应为平面,因而在测试前应尽量整平地表,尤其应避免地表上存在凸出硬质石块,否则可能造成荷载集中传递到地表凸起之处,引起测试数据误差。

b. 温湿度:设备传感器通常会受到温湿度的影响,同时填料性能可能与温湿度也有关系,有条件的情况下可采集现场的温湿度数据,以备分析数据时予以考虑。

(3) 设备自身误差

a. 传感器检定:应当定期对设备采用的传感器进行检定标定,主要涉及检波器、荷载传感器,超过检定有效期的设备不能保证测试数据的可靠性。

b. 计算参数选取:根据模量计算公式,主要涉及到材料泊松比、应力分布系数等参数的选取设置;在实际应用中,需要特别注意对路基填料性质的分析,并利用常规检测方法进行测试结果验证比对,不断积累参数选取的经验,如果计算参数选取不合适,会造成测试数据较大的变化;对于同一工程而言,若填料来源相近,模量计算参数可以设置为相同,若填料来源差异性较大,应当结合填料性质动态调整计算参数的设置。

综上所述,在实际应用过程中,影响PFWD用于路基压实质量检测的误差因素较多,但总体上这些因素可以通过规范化测试流程得以减小甚至消除。因此,后续应当加强PFWD测试方法标准化方面的

研究工作,为该方法得以被大规模推广应用奠定基础。

4 结 语

本文以某公路路基工程为依托,采用PFWD方法开展了路基压实质量快速检测的方法研究,得到主要结论如下:

(1) 采用PFWD方法对同一位置路基进行多次测试得到的模量数据变异系数波动范围为0.004~0.045,均小于0.1,说明该检测方法的可重复性较好;

(2) 基于PFWD的路基模量与弯沉呈幂函数负相关,与承载板反力呈指数函数正相关,说明PFWD方法能够有效反映路基压实质量优劣和不均匀性;

(3) PFWD方法主要存在人为操作、检测环境、仪器设备自身这三方面误差因素,开展对该测试方法的标准化研究有利于其后续的推广应用。

参考文献:

- [1] 周志军. 土石混填路基压实质量控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [2] 崔晓倩. 公路路基压实施工的影响因素及质量控制方法[J]. 交通世界, 2020(15): 122-123.
- [3] 赵国卫. 大粒径碎石路基压实质量控制方法研究[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(1): 40-41.
- [4] 胡志文, 程培峰, 李泽闯, 等. 基于沉降差和动态变形模量的含巨粒土路基压实质量控制[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 124-131.
- [5] 罗列. 固体体积率检测方法在填石路基压实质量控制中的应用[J]. 福建建设科技, 2011(4): 50-51.
- [6] 刘树阁. 基于GeoGauge的高速公路路基压实质量快速检测技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [7] 周伟红. 动态回弹模量在路基压实质量评定中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(18): 145-148, 152.
- [8] 李丹枫, 杨广庆, 刘伟超. PFWD模量控制的路基承载力动力学指标评价方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 117-128.
- [9] 郭旺, 杨贤, 朱燕文, 等. 基于连续压实控制技术的土质路基压实质量评估研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(3): 81-85, 92.
- [10] 李盛, 鄧梦棵, 刘玉龙, 等. 基于PFWD的公路填石路基压实质量快速检测方法研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 10-15.
- [11] DB65/T 3919—2016, 土石混填公路路基压实质量检测方法 便携式落锤弯沉仪法[S].
- [12] DB36/T 1135—2019, 公路路基连续压实质量控制与PFWD检测技术指南[S].
- [13] 王龙, 夏浩然. PFWD冲击荷载的影响深度及参数配置[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 62-67.