

基于地震面波勘探的道路无损检测技术研究综述

王怡, 李瑜*, 王向荣, 张卓祥

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月26日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

摘要

随着时代的发展, 道路路基的健康检测变得尤为重要。地震面波勘探技术是一种广泛应用的无损检测技术, 可以有效检测道路路基的健康状况。本文系统地描述了基于地震面波勘探的道路无损检测技术, 介绍了基于地震面波勘探的检测原理和方法, 以及基于地震面波勘探的道路无损检测技术的有效性和优势。最后, 对基于地震面波勘探的道路无损检测技术进行了总结, 认为基于地震面波勘探技术的道路无损健康检测是一种准确的、有效的检测方法, 可以持续检测道路路基的健康状况。

关键词

地震面波, 道路路基, 无损检测

Summary of Research on Road Nondestructive Testing Technology Based on Seismic Surface Wave Exploration

Yi Wang, Yu Li*, Xiangrong Wang, Zhuoxiang Zhang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 26th, 2023; accepted: Apr. 22nd, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

With the development of the times, the health detection of road subgrade becomes particularly important. The seismic surface wave exploration technology is a widely used non-destructive

*通讯作者。

文章引用: 王怡, 李瑜, 王向荣, 张卓祥. 基于地震面波勘探的道路无损检测技术研究综述[J]. 土木工程, 2023, 12(4): 508-516. DOI: 10.12677/hjce.2023.124056

testing technology, which can effectively detect the health of road subgrade. This paper systematically describes the road nondestructive detection technology based on seismic surface wave exploration, introduces the detection principle and method based on seismic surface wave exploration, and the effectiveness and advantages of the road nondestructive detection technology based on seismic surface wave exploration. Finally, the paper summarizes the road nondestructive detection technology based on seismic surface wave exploration, and considers that the road nondestructive health detection based on seismic surface wave exploration technology is an accurate and effective detection method, which can continuously detect the health condition of road subgrade.

Keywords

Seismic Surface Wave, Road Subgrade, NDT

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

截至 2020 年底, 中国有 16 万公里高速公路通车, 位居全球第一; 20 万或以上人口城市的公路覆盖率超过 98% [1]。对于设计寿命为 20 年的公路, 使用沥青混合料路面, 但它们易受重载、高温、雨水和其他不利耦合因素的影响[2]。此外, 在使用的前 1~2 年内, 它们容易出现早期严重损坏, 如车轮车辙、坑洼、松动、漏油和膨胀[3]。由于这些现象在使用初期并不明显, 因此很难控制早期故障的发展, 增加了后期道路的维护和维修成本, 影响了车辆行驶的舒适性和安全性, 并降低了道路的正常使用寿命。主要原因是沥青路面孔隙率过大会导致水和空气进入路面, 导致路基路面损坏、老化、剥落和开裂[4], 如图 1 所示。

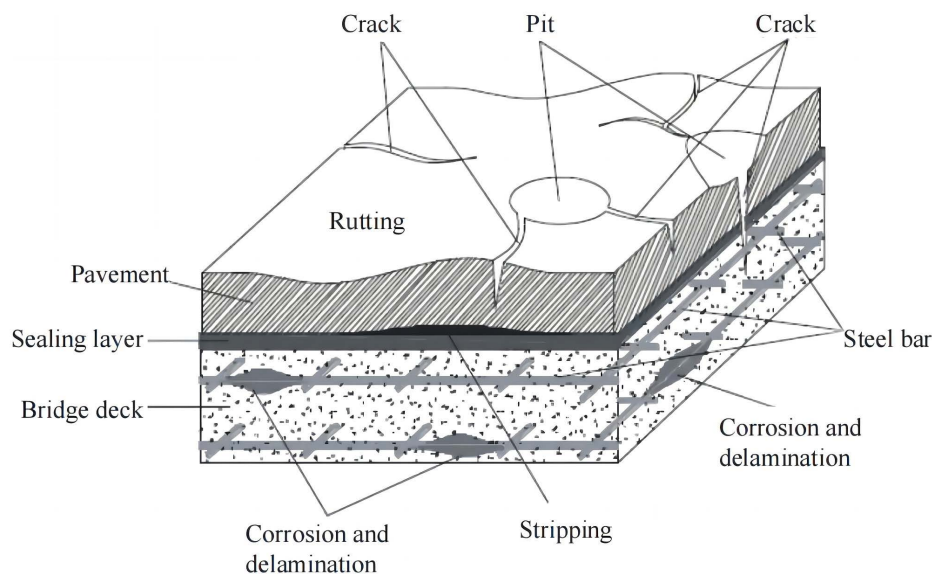


Figure 1. Schematic diagram of pavement degradation [5]

图 1. 路面退化示意图[5]

目前,中国道路的检测方法主要通过目视对受损路段进行病害和损坏的检查。这种方法不适用于因交通拥挤而增加的道路设施和压力。因此,迫切需要能够经济有效地监测道路网络状况的技术,并为其准确和及时地维护提供优先信息,以便能够从定期的局部检查发展出检测道路故障的方法,并持续监测道路网络的健康状况。近年来,随着无损检测技术的发展,地震面波勘探技术在路基路面健康检测中得到了广泛的应用[6] [7]。地震面波勘探技术是一种利用其频散曲线探测地层结构的无损检测技术,可以有效进行公路工程的质量检测与评估[8]。

但是,目前国内外针对基于地震面波勘探的道路无损检测技术总结的还不够全面,针对于此,本文在大量检索国内外文献的基础上,对面波勘探技术无损检测公路工程的研究现状进行了系统的总结和分析。

2. 地震面波无损检测的原理和方法

地震面波技术是一种基于传播面波的无损检测技术[9]。传播面波是一种可以沿介质表面传播的弹性波,其传播速度与介质的弹性模量、密度和泊松比有关。地震面波沿路基基础表面传播时,由于路基基础材料的不同,地震面波的传播速度会发生变化。通过分析地震面波的传播速度,可以检测路基基础的健康状况。

地震面波勘探无损检测技术通常分为两步[10]。第一步是测量地震面波在路基基础表面的传播速度,第二步是分析传播速度数据,判断路基基础的健康状况。在第一步中,利用地震源产生沿路基基础表面传播的表面波,利用路基基础上的测量点来测量表面波的传播速度。第二步中,对传播速度数据进行分析,计算出路基基础材料的弹性模量、密度和泊松比,进而确定路基基础的健康状况,如图2所示。

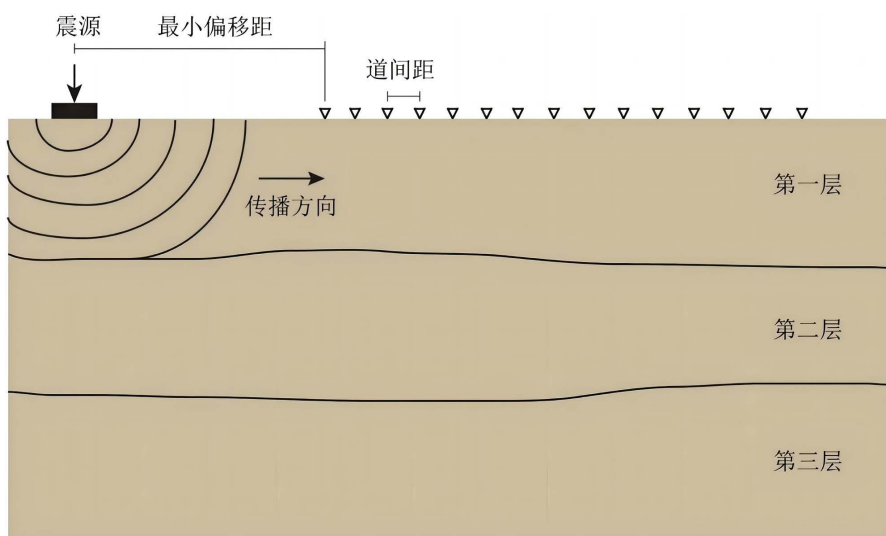


Figure 2. Schematic diagram of surface wave data acquisition [11]

图2. 面波数据采集示意图[11]

3. 基于面波勘探的道路无损检测技术研究现状

目前,在我国的基础设施管理方面,存在维修工作安排不当、养护维修不及时、维修预算支出庞大等问题。因此,为了保障道路安全,防止发生灾难性的破坏,需要采取快速、有效的养护管理方法,以提高道路的使用寿命[12] [13] [14]。根据美国材料与试验协会(ASTM)路面状况评价标准,郭成超[15]总结了五种道路无损检测技术和设备:落锤式弯沉仪、探地雷达、宏观构造深度、国际平整度指数和面波的

频谱分析, 并分别介绍了每种检测技术的工作原理和运用方法, 以指导相关人员结合实际合理选用, 如表 1 所示。运用这几种检测方法将会在不封闭交通的情况下加快评估速度, 并为搭建一个高效、智能的路网监测系统提供技术支持, 为道路的可持续发展、资金的高效利用提供切实可行的方法[16] [17]。

Table 1. Product functions, advantages and disadvantages of NDT commercial companies

表 1. 无损检测商业公司产品功能及优缺点评价

公司名称	无损检测方法	主要功能	优点	缺点
维视数字图像技术(深圳)有限公司	光学相机法	路面破损检测	采集速度快	人工评估, 后期处理工作量大
美国 SSI 公司	CS8800 手推式断面仪	路面平整度检测	可用于道路、机场、地面和其他特殊应用	效率低, 最大速率是人的行走速度
美国 ICC 公司	惯性激光断面仪	路面平整度检测	非接触式测量	精确度较低
美国 ICC 公司	APRES-K 车载式车辙自动检测仪	道路车辙检测	高速、连续的检测, 可靠性高、操作安全、不影响车辆正常通行	价格昂贵, 检测费用成本高
美国 K.J.Law	落锤式弯沉仪	道路承载力检测	动态检测, 监测效率高	稳定性差、易受外界温度影响
加拿大 Sensors & Software 公司	GPR 法	用无线电波来确定地下介质分布的一种无损检测方法	快速检测路面厚度, 无损、高效、快捷	缺乏配套的技术和相应的标准规范
美国东北大学(NEU)	SASW 法	估计地下层的厚度和弹性模量	不阻断交通、不破坏路面、精度高、效率高测试速率低	运算迭代次数多,

探地雷达从 1970 年代开始用于南极的冰调查, 此后在国际上得到了广泛的认可, 如今已成功并越来越多地应用于各种实际工程[18] [19] [20]。在土木工程中, GPR 可用于检查运输基础设施[21] [22] (道路、公路、机场跑道、铁路、桥梁和隧道); 用于检测和定位空隙、空洞和埋地设施(管道和电缆); 用于监测挡土墙、路堤和大坝[23] [24]; 调查建筑物和基础; 用于绘制土层图、测量基岩深度以及识别岩石中的断层和断裂带[25] [26] (用于岩土工程和地质研究或基础设计)。检测运输基础设施结构缺陷的传统方法包括目视检查、锤击、链拖和破坏性取芯[27]。自上世纪初以来, 这些方法一直在使用, 但它们可能不准确, 在某些情况下对运营商不安全(例如, 在繁忙的高速公路上) [28]。在过去的 30 年中, 各种无损检测技术得到了发展, 如今被定期用于补充或替代传统的检测方法; GPR 被广泛认为是最强大、最通用的无损检测方法[29] [30] [31]。GPR 在交通基础设施评估和监测领域取得成功的基础是 GPR 的主要优势, 主要与高速、非接触模式和使用移动采集单元收集数据的可能性以及测量的可靠性和代表性有关[32] [33] [34]。在柔性、半刚性和刚性路面上使用探地雷达可以有效完成的常见任务包括层厚评估、路面状况评估和损伤识别、含水量估计、沥青密度计和压实度。当 GPR 用于钢筋混凝土路面时, 还可以详细绘制加固元件并估计其尺寸; 检测蜂窝、空隙和氯化物侵蚀区域; 并识别恶化和分层区域[35] [36] [37]。

目前, 探地雷达系统通常在 10~10.000 MHz 范围内工作[38]。用于发射和接收电磁信号的天线必须具有与信号波长相当的尺寸; 因此, 工作频率范围基本上决定了探地雷达仪器的尺寸[39]。通常, 雷达发射的电磁波的频率与可获得分辨率之间存在直接关系。相反, 频率和穿透深度之间存在反比关系。因此, 高频用于检测小而浅的目标, 低频用于检测更大、更深的目标。对于交通基础设施的检查, 探地雷达发射的频谱中心频率通常在 250 至 2000 MHz 之间, 具体取决于调查目标和条件。对于某些系统, 可

以同时使用更多的天线，在不同的频率范围内工作；这是一个非常好的解决方案，可以在一次记录过程中实现高分辨率和深度穿透，从而减少总体测量时间和成本。

Plati 等人[40]通过 GPR 研究了热拌沥青的压实性。特别是，他们进行了一系列实验室实验和现场测试，在那里他们评估了压实过程中的沥青密度。使用并比较了三种不同的基于电磁混合理论的密度模型。此外，使用了不同的压实程序，并分析了它们对估计沥青密度的影响。结果表明，探地雷达是改进沥青混合料压实过程和现场密度评估的有效工具。Tosti 等人[41]使用地质雷达研究了非饱和条件下粘性土的财产(路面中通常存在粘性土)。在不同的湿度条件下，对几种土壤进行了测试，从干燥到饱和。通过使用跨越 1~3 GHz 频率范围的矢量网络分析仪和具有地面耦合天线和 500 MHz 中心频率的脉冲探地雷达，对不同水平的含水量进行了测量[42]。在承载层和路基土中粘土的影响及其对路面层电磁响应的影响方面，取得了令人满意的结果。Simonin 等人[43]在法国交通、空间规划、发展和网络科学技术研究所(IFTTAR)的加速路面测试设施上测试并比较了分别具有 8 个和 11 个通道的 n 脉冲探地雷达和阶跃频率探地雷达。Stubstad [44]测试了澳大利亚开发的噪声调制探地雷达；该系统专门设计用于道路评估，具有 8 个发射器和 20 个接收器，位于 4 个相邻的地面耦合吊舱内，每个吊舱包含 2 个发射器和 5 个接收器；通过对不同的发射机和接收机进行配对，在车道宽度上实现了一系列虚拟天线，这些虚拟天线排列成八个部分重叠的 WARR 组。

这些实验工作的主要结论是，多通道系统除了能够更快地检查广域外，还可以更容易地构建所研究结构(和水平切片)的三维视图；这种视图极大地促进了异常的检测、定位和识别。此外，多通道系统的使用提高了厚度估计的准确性，特别是在可变路面条件的情况下。通过瞬态瑞雷面波及地质雷达两种物探方法综合进行现场质量监控试验，经与灌沙法取样验证分析比较，表明瑞雷面波法在检测路基碾压实度方面效果较好。而地质雷达能定性检测路基碾压质量，它检测周期短、效率高、成本低，可进行大范围、全程性路基检测。两种物探方法综合应用是高速公路建设中进行现场质量监控的有效途径。

在高速公路质量检测中，路堤土压实度是衡量土方路基重要的质量指标。顾汉明[45]等提出了提高压实度计算精度的处理流程，应用 τ - p 变换提取面波，获取高信噪比的频散曲线，采用瞬态面波反演横波速度，提高横波速度计算精度，进而计算压实度。用上述方法对商开高速公路振冲碾压效果进行了无损检测，其结果与取样分析及开挖结果一致。王笑风[46]等人阐述了探地雷达、激光检测、数字化图像识别以及瞬态瑞雷面波分析等无损检测技术在道路工程中的工作原理和技术特点；通过对这几种无损检测技术的应用分析，论述了每种检测技术在实际工程应用中存在的不足；针对每种检测技术提出了相关需要深入研究的问题；最后总结提出制定相应执行标准是十分必要的[47]。林有贵[48]等人以路面基层注浆加固试验路为依托，采用 3 种无损检测手段对注浆加固前后的基层进行检测评价，并取芯验证。艾尼·热合曼[49]提出将频谱分析无损检测技术应用到水泥路面强度检测中，通过工程实践应用与室内试验研究对比发现，该技术完全满足水泥路面强度检测要求，为无损技术在水泥混凝土结构公路项目的使用提供了借鉴。李嘉[50]等人针对目前水泥混凝土路面强度检测的缺陷，提出了利用瞬态瑞雷面波法无损检测路面强度的基本原理和方法。周婷婷[51]等人结合多年来从事的高速公路工程质量检测的项目经验，介绍了瞬态瑞雷面波法的概念和测试原理，并简要叙述了瞬态瑞雷面波法在高速公路工程质量检测中的优点，结合工程案例，阐述了瞬态瑞雷面波法在高速公路工程检测中的具体应用。

结果表明：注浆前后，2D 地质雷达同轴图像、高频弹性波反射波法的主频幅值和瞬态面波法的剪切波速度等的变化明显，其中地质雷达法可以实现对路面注浆加固效果的定性描述，后两者可作为半定量评价，而瞬态面波法的剪切波波速对路面结构技术状况变化更敏感。通过工程试验实例验证：瞬态瑞雷面波法能较好地实现对水泥混凝土路面强度的无损检测，且检测方法简单、可靠，具有较高的工程实用价值。

水泥公路在建造及使用过程中,对公路路面的质量进行检测是必不可少的环节,其中路面结构层厚度是评定高等级公路路面质量的重要指标[52]。传统的打孔取芯法有很大局限性,而超声波、探地雷达等这些新无损检测技术也存在着一些弊端。张慧静[53]等利用瞬态瑞雷波法对混凝土模块进行无损检测,结合提取的面波频散曲线解释出模块厚度。通过对三组不同厚度的小尺度模块和实际楼板层厚进行了地震信号采集。首先用 τ - p 变换法分离提取出四组实验面波记录,进而在频率-慢度域提取面波频散曲线,然后对每组实验分别进行数据处理及解释,最后将四组实验做综合对比分析。结果表明,该实验所解释的路面厚度与实际测厚较为吻合,误差小于 3.5%。刘强[54]等人研制了“瑞雷面波资料处理与解释软件”并结合公路检测实际应用,验证了本软件系统的适用性,同时也证明瑞雷波方法不仅可以检测路基压实度、地基承载力及复合地基承载力,同时也可以通过 CT 成像较好的检测深层搅拌桩的桩身质量。为公路质量无损检测提供了一种方便快捷的检测方法。张浩[55]对瞬态瑞雷面波法应用到公路工程质量检测领域进行了相关的研究和探讨,在吸收前人研究成果基础上,采用改进的 Knopoff 算法对频散曲线进行正演模拟,通过建立不同的结构模型分析瑞雷波频散曲线的影响因素;对目前现有的瑞雷波频散曲线提取方法对比分析,提出一种改进算法 f - v 法,提高了频散曲线的提取精度和应用效果。在此基础上,通过大量的现场试验,从参数设置、仪器选择、试验步骤、影响因素等方面较为系统地研究了瞬态瑞雷波的现场测试方法的适用性和合理性。

研究成果说明利用瞬态瑞雷波来确定路面厚度,不仅可以实现公路工程的质量检测,完善其检测方法,而且也体现了瞬态瑞雷波在确定水泥混凝土路面厚度中的应用价值和发展前景。通过建立瑞雷波方法进行公路质量检测的数学模型及指标统计,来求取合理的相关因子,为无损检测实现由定性为主上升到定量解释奠定了理论基础。

4. 结论

综上所述,地震面波勘探无损检测技术作为检测路基基础健康状况的检测方法之一,具有非破坏性、高代表性的优点,能很好地适应公路工程快速发展的需求。但地震面波勘探无损检测技术在路基路面质量检测的应用中依然存在着不少问题需要解决,本文在大量阅读国内外文献的基础上,总结了以下几点:

1) 通过地震面波勘探技术进行公路工程无损探测时,路基路面结构不同,检波器的间距以及面波检测仪的采样频率也分别不同,这两项在分层界面的区分中具有关键性因素。另外,在路基路面无损检测时,在检波器与接触面之间涂上石蜡能有效提升频散曲线的精度。

2) 当环境噪声较强(如高速公路等)或其他波污染具有比基本 R 波模式强的能量含量时,预计面波探测结果在位置和时间上不可靠。因此,最好在非高峰时间(如凌晨或深夜)进行路面探测。

3) 通过地震面波勘探技术进行路基路面质量检测时,面波波速与路基土干密度、路面强度的拟合经验公式必须根据具体工地通过一定的采样数据现场建立。不同的工地,路基土与水泥混凝土不同,经验回归公式的系数不同。实测频散曲线的拐点与路基路面的分层界面的对应关系必须结合现场的实际情况进行判定。

基金项目

西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0148);陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研项目(22JK0597);2022 年省级大学生创新创业训练计划项目(X202212715040)。

参考文献

[1] Wang, L. (2021) Significance Analysis of Influencing Factors of Highway Freight Transportation in China and Mul-

- ti-Variable Grey Prediction for Its Development. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **41**, 1237-1246. <https://doi.org/10.3233/JIFS-210141>
- [2] Sun, L., Li, X. and Wang, X. (2015) Study on the Damage of Semi Rigid Base Asphalt Pavement under High Temperature Condition. *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*, Xi'an, 12-13 December 2015, 955-958. <https://doi.org/10.2991/icmmce-15.2015.209>
- [3] Tutu, K.A. and Timm, D.H. (2022) A Recursive Pseudo Fatigue Cracking Damage Model for Asphalt Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, **23**, 2654-2674.
- [4] Nobakht, M., Zhang, D., Sakhaeifar, M.S. and Lytton, R.L. (2020) Characterization of the Adhesive and Cohesive Moisture Damage for Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials*, **247**, Article ID: 118616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118616>
- [5] Guo, C., Xu, P. and Zhong, Y. (2018) Nondestructive Testing Method to Assess and Detect Road Performance. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, **19**, 72-79.
- [6] ASCE (2014) U.S. Infrastructure Report. The American Society of Civil Engineers, New York.
- [7] Dondi, G., Barbarella, M., Sangiorgi, C., et al. (2011) A Semi-Automatic Method to Identify Road Surface Defects. *Minutes of the 2011 International Conference on Sustainable Design and Construction*, Kansas City, 23-25 March 2011, 704-711. [https://doi.org/10.1061/41204\(426\)86](https://doi.org/10.1061/41204(426)86)
- [8] Meng, A., Xu, H., Feng, X., et al. (2020) Feasibility of Freeze-Thaw Damage Analysis for Asphalt Mixtures through Dynamic Nondestructive Testing. *Construction and Building Materials*, **233**, Article ID: 117220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117220>
- [9] Song, H., Hong, J., Yoon, Y.G., et al. (2022) Application of a Wireless and Contactless Ultrasonic System to Evaluate Optimal Sawcut Time for Concrete Pavements. *Sensors*, **22**, 7030. <https://doi.org/10.3390/s22187030>
- [10] Gouveia, F., Gomes, R.C. and Lopes, I. (2019) Shallow and in Depth Seismic Testing in Urban Environment: A Case Study in Lisbon Miocene Stiff Soils Using Joint Inversion of Active and Passive Rayleigh Wave Measurements. *Journal of Applied Geophysics*, **169**, 199-213. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.022>
- [11] Wang, G., Wang, H., Li, H., et al. (2019) Research Status and Progress of Surface Wave Exploration Technology. *Advances in Geosciences*, **9**, 799-815.
- [12] Evans, R.D. (2009) Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements. PhD Thesis, Loughborough University, Loughborough.
- [13] Fontul, S. (2004) Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests. PhD Thesis, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [14] Domitrovic, J. and Rukavina, T. (2013) Application of GPR and FWD in Assessing Pavement Bearing Capacity. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, **2**, 11-21. <https://doi.org/10.1515/rjti-2015-0015>
- [15] 郭成超, 许鹏飞, 钟燕辉. 无损检测技术评估和检测道路性能[J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 72-79.
- [16] Baral, A. and Roesler, J.R. (2023) Early Age Monitoring of High Cement Replacement Mixtures for Pavement. *Transportation Research Record*, **2677**, 1646-1657. <https://doi.org/10.1177/03611981221105500>
- [17] Baral, A., Roesler, J.R., Ley, M.T., et al. (2021) High-Volume Fly Ash Concrete for Pavements Findings: Volume 1. FHWA-ICT-21-025. <https://doi.org/10.36501/0197-9191/21-030>
- [18] Pearson, D. (2012) Deterioration and Maintenance of Pavements. ICE, London. <https://doi.org/10.1680/dmp.41141>
- [19] Chen, M. and Chen, C.-C. (2012) UWB In-Situ Soil Permittivity Probe with a Novel Iterative Permittivity Calibration Method. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Shanghai, 4-8 June 2012, 98-102.
- [20] Noureldin, A., Zhu, K., Li, S. and Harris, D. (2003) Network Pavement Evaluation with Falling-Weight Deflectometer and Ground-Penetrating Radar. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1860, 90-99. <https://doi.org/10.3141/1860-10>
- [21] Irwin, L.H. (2002) Backcalculation: An Overview and Perspective. *Pavement Evaluation Conference*, Roanoke, 21-25 October 2002, 24-26.
- [22] Al-Qadi, I.L. and Lahouar, S. (2005) Measuring Layer Thicknesses with GPR—Theory to Practice. *Construction and Building Materials*, **19**, 763-772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.005>
- [23] Scullion, T. and Saarenketo, T. (2000) Integrating Ground Penetrating Radar and Falling Weight Deflectometer Technologies in Pavement Evaluation. In: Tayabji, S.D. and Lukanen, E.O., Eds., *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume*, ASTM International, West Conshohocken, 23-37.
- [24] Morey, R.M. (1998) Ground Penetrating Radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportation Facilities. National Academy Press, Washington DC.
- [25] Jol, H.M. (2009) Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam.

- [26] Daniels, D.J. (2004) Ground Penetrating Radar. 2nd Edition, IET Digital Library. <https://doi.org/10.1049/PBRA015E>
- [27] Saarenketo, T. and Scullion, T. (2000) Road Evaluation with Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, **43**, 119-138. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
- [28] ASTM D4694 (1996) Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight Type Impulse Load. ASTM International, West Conshohocken, 2-4.
- [29] ASTM D4748-10 (2015) Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers. ASTM International, West Conshohocken, 1-7.
- [30] Bituminum Business Group (1998) BISAR 3.0 User Manual, Shell International Oil Products B.V.
- [31] Hu, J. (2015) Nondestructive Field Assessment of Flexible Pavement and Foundation Layers. Iowa State University, Ames.
- [32] Vin Quintus, H.L. and Simpson, A.L. (2002) Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II: Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid Pavements FHWA-RD-01-113.
- [33] AASHTO (2008) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. https://bookstore.transportation.org/item_details.aspx?ID=1249
- [34] Seeds, S., Alavi, S., Ott, W., Mikhail, M. and Mactutis, J. (2000) Evaluation of Laboratory Determined and Nondestructive Test Based Resilient Modulus Values from WesTrack Experiment. In: Tayabji, S.D. and Lukanen, E.O., Eds., *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume*, ASTM International, West Conshohocken, 72-94.
- [35] Mehta, Y. and Roque, R. (2003) Evaluation of FWD Data for Determination of Layer Moduli of Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **15**, 25-31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(25))
- [36] ASTM D4695 (2003) Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. In: *Road and Paving Materials: Vehicle-Pavement Systems*, Vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, 7.
- [37] Stubstad, R., Carvalho, R., Briggs, R., Selezneva, O., Mustafa, E. and Ramachandran, A. (2012) Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis: Guide for Assessment of Pavement Structural Performance for PMS Applications, Georgetown Pike.
- [38] (2009) I. Geophysical Survey Systems, RADAN Manual. Version 6.6. Geophysical Survey Systems, Inc., Nashua.
- [39] Almeida, J.R. (1993) Analytical Techniques for the Structural Evaluation of Pavements. Nottingham University, Nottingham. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=464698>
- [40] Plati, C., Georgiou, P. and Loizos, A. (2016) A Comprehensive Approach for the Assessment of *in Situ* Pavement Density Using GPR Technique. *Near Surface Geophysics*, **14**, 117-126. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015043>
- [41] Tosti, F., Benedetto, A., Bianchini Ciampoli, L., Calvi, A. and D'Amico, F. (2016) Prediction of Rutting Evolution in Flexible Pavement Life Cycle at the Road Network Scale Using an Air-Launched Ground-Penetrating Radar System. *Proceedings 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2016)*, Hong Kong, 13-16 June 2016, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572604>
- [42] Antunes, M.L. (1993) Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaio Dinâmicos. PhD Thesis, Technical University of Lisbon, Lisbon.
- [43] Simonin, J.-M., Balthazart, V., Hornych, P., *et al.* (2014) Case Study of Detection of Artificial Defects in an Experimental Pavement Structure Using 3D GPR Systems. *Proceedings 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2014)*, Brussels, 30 June-4 July 2014, 847-851. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970547>
- [44] Stubstad, S., Lukanen, R.N., Richter, E.O. and Baltzer, C.A. (1998) Calculation of AC Layer Temperatures from FWD Field Data. *Proceedings of the 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, 6-8 July 1998, 919-927.
- [45] 顾汉明, 宋先海, 刘江平, 张学强. 用瞬态瑞雷波反演横波速度评价高速公路压碾效果[J]. 地质科技情报, 2001(2): 100-102.
- [46] 王笑风, 戴经梁. 无损检测技术在道路工程中的应用[J]. 光通信技术, 2007(2): 52-54.
- [47] Gouveia, F., Lopes, I. and Gomes, R.C. (2016) Deeper vs. Profile from Joint Analysis of Rayleigh Wave Data. *Engineering Geology*, **202**, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.006>
- [48] 林有贵, 周德存, 易强, 农彬艺. 路面基层注浆加固质量评价的无损检测方法应用研究[J]. 西部交通科技, 2021(2): 8-11+184.
- [49] 艾尼·热合曼. 无损技术在公路水泥混凝土结构强度检测中的应用[J]. 西部交通科技, 2017(8): 29-31.
- [50] 李嘉, 董海文. 瞬态瑞雷面波法检测路面强度的应用研究[J]. 公路, 2005(2): 146-149.
- [51] 周婷婷. 瞬态瑞雷面波法在公路工程质量检测中的应用[J]. 科技信息, 2009(21): 690+754.

- [52] Iodice, M., Muggleton, J.M. and Rustighi, E. (2021) The *In-Situ* Evaluation of Surface-Breaking Cracks in Asphalt Using a Wave Decomposition Method. *Nondestructive Testing and Evaluation*, **36**, 388-410.
<https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1764553>
- [53] 张慧静. 瑞雷面波法在水泥路面厚度无损检测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [54] 刘强. 基于瑞雷波理论的公路无损检测方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [55] 张浩. 基于瞬态瑞雷波法的公路质量无损检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2015.