

·学科进展·

路面无损检测与评价技术的研究与应用

王复明* 刘文廷

(郑州工业大学, 郑州 450002)

[摘要] 本文综合介绍路面无损检测与结构性能评价方面的研究现状和应用前景。主要内容包括: 路面强度无损检测技术的发展概况; FWD 路面检测系统的工作原理; 路面结构反分析基本方法和路面评价软件系统的开发与应用。

[关键词] 路面, 无损检测, 落锤式弯沉仪, 反算

1 路面强度无损检测技术的发展概况

路面检测与评价是公路建设与管理中的关键性、基础性技术。它不仅对检验和控制工程质量是至关重要的, 而且决定着路网养护决策的科学化水平, 从而直接影响养路资金分配的合理性。近 20 年来, 路面无损检测与评价技术的研究和应用在国内外受到日益广泛的重视, 其中路面强度检测与结构性能评价一直是道路工程领域的热点课题。

弯沉作为反映路面强度的重要力学指标, 其检测技术的发展十分迅速。自从 1953 年贝克曼 (Benkelman) 发明了梁式弯沉仪以来, 路面弯沉检测设备已从静态弯沉仪发展到模拟行车荷载作用的落锤式弯沉仪 (FWD), 从单点弯沉测试发展到完整弯沉盆的测试。相应地, 路面结构性能评价也从以最大弯沉为依据评价路面整体强度, 发展到以弯沉盆为基础反演路面结构层刚度组成。

目前, FWD 已被普遍认为是较理想的弯沉检测设备^[1]。至今已有 50 多个国家和地区先后应用 FWD。美国是 FWD 应用最为广泛的国家, 现已拥有 130 余套 FWD 检测系统, 并在 FWD 数据分析和路面结构层刚度反演方面开展了大量的研究工作。

1988 年, 美国实施了著名的战略性公路研究计划 (SHRP), 其中路面跟踪检测与长期使用性能研究将进行 20 年, 近 20 个国家和地区参加了该项目的国际合作研究。该项研究在美国和加拿大地区建立了 1140 个长期观测路段, 选用 FWD 作为路面弯沉检测的标准设备, 并对 FWD 检测规程、精度指标及标定方法制定了具体的要求和规定, 从而使 FWD 检测技术的应用步入了规范化、标准化的阶段^[2]。

由于我国高等级公路建设起步较晚, 路面检测技术总体上还比较落后。以弯沉检测为

* 1996 年度国家杰出青年科学基金获得者。

本课题获国家自然科学基金、国家教委优秀青年教师基金资助, 并被列入“八五”国家重点科技攻关项目。

本文于 1997 年 4 月 7 日收到。

例,至今国内仍依赖60年代引进的贝克曼梁。这种以人工操作为主的检测手段不仅难以准确检验工程质量,而且也无法满足养护管理工作对路网进行长时期、大范围检测的需要。因此,虽然我国公路养护规范要求对二级以上的公路每年必须全部实测现有强度,但实际上难以实施。由于缺乏先进而实用的路面检测与评价手段,公路管理部门主要根据对现有路况的直观或定性了解,采用经验方法来制定路网养护对策,因而难免受主观因素的影响。这种传统的决策方法,不仅效率低,而且存在明显的不合理性,难以使有限的养路资金充分发挥效益。80年代后期以来,交通部公路研究所、东南大学、航天部第一计量测试研究所、同济大学、哈尔滨建筑大学、郑州工业大学等单位,先后开展了FWD应用技术研究。在FWD设备研制、测试技术开发、路面结构反分析理论与方法研究和路面评价软件开发等方面均取得了显著的成果。

近年来,我国正兴起一场大规模的高等级公路建设热潮,发展高新检测技术是高等级公路建设与管理的必然要求,不少单位已引进FWD等快速、无破损路面检测系统。新实施的路面路基现场测试规程,将FWD、贝克曼梁和自动弯沉仪一起列入路面弯沉检测基本设备,对于加快FWD检测技术的研究开发和推广应用将起到有力的推动作用。

2 FWD路面检测系统的工作原理

本文以Dynatest FWD为例,简要介绍FWD的工作原理。Dynatest FWD是由Dynatest国际集团公司研制开发的高科技路面强度检测系统,其技术指标的先进性和可靠性代表了当前路面无损检测技术的发展水平,并在国际上得到广泛应用。

Dynatest FWD检测系统主要包括FWD挂车、9000型信息处理系统和微机操作系统。FWD挂车由加载系统和传感器系统构成。其基本工作原理是:通过液压系统提升一重锤,然后释放下落,从而对路面施加一冲击荷载。荷载的大小通过改变提升高度或锤重来调节,并由压力传感器精确测定。这种加荷方式较好地模拟了行车荷载对路面的作用。路面的变形(弯沉)由一组传感器测定。Dynatest FWD通常在距荷载中心1.8m的范围内布置7—9个速度传感器。9000型信息处理系统记录荷载和路面变形的全部时程信息。整个操作过程均通过微机实现。

Dynatest FWD主要技术指标如表1。由于FWD检测系统可精确测试路面所受荷载和完整的变形(弯沉)信息,从而可以应用力学反分析法确定路面材料性能,并对路面结构进行较为深入的分析评价。

表1 Dynatest FWD主要技术指标

荷载范围	0.7—12.0t
位移传感器分辨率	1 μ m
位移传感器系统误差	< \pm 2%
系统测速	每测点约35s
FWD挂车自重	1.0t
位移传感器数量	9个
脉冲荷载形状	近似半正弦波

3 路面结构反分析研究现状

3.1 路面结构反分析问题的提出

自1953年贝克曼梁式弯沉仪问世以来,路面弯沉一直被用于路面结构性能评价,然而

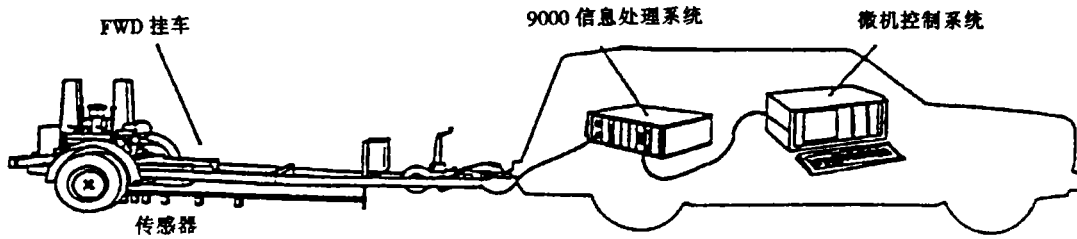


图1 Dynatest FWD 检测系统构成

这种传统的弯沉评价法存在明显的缺陷。由于路面结构是一个多层体系，仅用单点弯沉来评价路面结构性能是不充分的。

虽然路面使用性能劣化的机理十分复杂，但一般认为：路面开裂造成的结构性劣化主要与面层材料中的最大拉应力或最大拉应变有关；而路面辙槽或平整度降低造成的功能性劣化，主要与基层或路基散离体材料中的最大压应力或最大压应变有关。因此，为了准确评价路面承载能力，必须首先确定路面结构层材料性能，进而分析路面结构的应力状态。

路面材料性能的确定分为破损和非破损两类方法。破损类方法（如取芯法）不仅周期长、效率低，而且取样过程中材料不可避免地受到“扰动”，造成室内试验结果难以全面反映路面结构的现场特性。因此，70年代以来，随着以落锤式弯沉仪为代表的快速、高效、无破损检测技术在国际上得到广泛应用，根据弯沉盆信息反演路面材料性能，逐步得到学术界和工程界的普遍关注。

3.2 路面结构反分析的研究现状

根据弯沉盆检测数据反算路面结构层模量的早期的研究，以推理法、图解法及回归法为基础。近年来，力学反分析法成为人们研究的重点，它大致可分为数据库搜索法和迭代法两类。

美国德克萨斯 A&M 大学在数据库法方面做了长期而系统的研究，开发出了实用化的软件系统 MODULUS，其基本原理和实现过程为^[3]：首先根据路面各层厚度、材料的泊松比和弹性模量的可能范围，应用多层弹性体理论（BISAR 程序）建立一个路面弯沉盆数据库，然后利用模式搜索和拉格朗日插值方法确定一组模量，使计算弯沉盆与实测弯沉盆最为接近。数据库法的优点在于避开了反分析中的“病态”问题，求解过程稳定；一旦建立了数据库，可以快速实现模量的反算。缺点是对于不同的路面结构，必须建立相应的数据库，即数据库不具有通用性。

迭代法的研究成果较为丰富，代表性的软件有 MODCOMP2^[4]，BISDEF^[5]，CHEVDEF^[5] 等。迭代法的基本过程为：（1）输入已知的路面各层厚度、泊松比及荷载值；（2）假定一组模量初始值；（3）应用路面力学模型计算相应于 FWD 传感器位置各点的弯沉；（4）比较计算结果与试验结果之间的误差；（5）调整各层模量值；（6）重复（3）、（4）、（5），直至计算结果与试验结果之间的误差达到最小。

迭代法的关键在于如何保证计算过程的稳定性。现有研究成果大多对初始值的选取要求非常苛刻。初始值选取不当将使计算过程不收敛，或者对不同的初始值有不同的收敛结果，其根本原因在于未能有效地处理反算方程的“病态”问题。为此，美国战略性公路研究计划路面长期使用性能研究采用数据库法（MODULUS 软件）作为 FWD 数据分析的基本方法。

4 系统识别反分析方法

4.1 基本原理

系统识别的目的是根据系统的输入和输出来确定系统的特性。较直观的方法是建立一个数学模型来模拟未知系统,然后修改模型使其与实际系统之间的误差在某种意义上达到最小。常用的误差极小化方法是在相同输入条件下使模型与系统的输出误差达到最小。其基本过程如图2所示。根据这一识别过程可建立路面结构反分析方法:(1)利用FWD检测系统对路面进行现场非破坏性试验,观测路面结构在已知荷载作用下的变形(弯沉盆);(2)应用路面力学模型,计算在相同荷载作用下路面的变形(正分析);(3)建立模型修改算法,逐步调整模型参数,使计算结果与观测结果之间的误差达到最小。

由此可见,系统识别反分析不仅要求试验数据精确,理论模型合理,而且需要具有较好的稳定性和收敛性的参数修改算法。作者以灵敏度分析为基础,建立了较有效的迭代方法^[6]。

4.2 计算实例

作者应用系统识别方法计算了大量实例。表2给出一实际路面结构在不同初值情况下各层模量的反演结果。弯沉检测试验由Dynatest FWD完成,落锤荷载48.3 kN,传感器布置位置及测试结果如图3所示。为了考察反演过程的稳定性,本例初始模量取值相差达100倍以上。从表中可以看出初始模量对最终反演结果几乎无影响,而且反演结果与数据库方法给出的结果是十分接近的。

5 路面结构性能评价软件系统 SIDMOD

SIDMOD软件系统是“八五”国家重点科技攻关项目“高等级公路无损检测与CAE技术研究”的重要成果之一。它是以Dynatest FWD检测数据为基础,以系统识别反分析方法为核心的路面评价软件系统。与现有路面评价软件相比具有明显的特色和创新:

(1) 系统识别反分析方法理论严谨,算法稳定,精度高,收敛快,从工程实用意义上反演结果不受初始值的影响;

(2) SIDMOD可用于柔性、刚性路面及机场道面的分析和评价,适用性强;

(3) SIDMOD综合应用了图文数据库、数据可视化及地理信息处理等技术,信息管理能

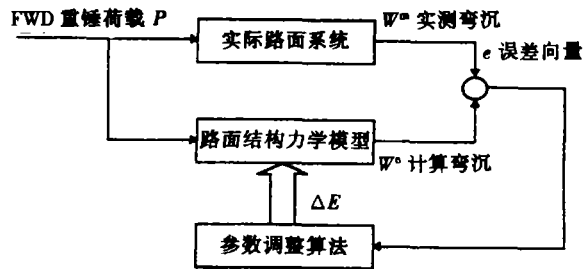


图2 系统识别反分析过程

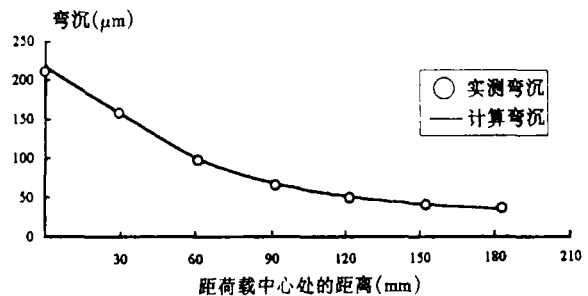


图3 计算弯沉与实测弯沉的逼近结果

力强,操作直观,数据处理手段丰富;

(4) SIDMOD采用全图形界面、全菜单操作、事件驱动、全中文显示,内嵌一独立的汉字系统,用户界面友好,操作通俗易懂,利于推广。

表2 三层路面结构在不同初值情况下模量反演结果

	初始模量 (MPa)	系统识别反演模量 (MPa)	MODULUS结果 (MPa)
1	$E_1 = 1\ 000.0$	$E_1 = 12\ 788.0$	$E_1 = 11\ 914.0$
	$E_2 = 6\ 000.0$	$E_2 = 317.0$	$E_2 = 330.0$
	$E_3 = 2\ 000.0$	$E_3 = 219.1$	$E_3 = 214.0$
2	$E_1 = 120\ 000.0$	$E_1 = 12\ 845.9$	
	$E_2 = 6\ 000.0$	$E_2 = 316.6$	
	$E_3 = 1\ 000.0$	$E_3 = 219.1$	
3	$E_1 = 1\ 200.0$	$E_1 = 12\ 269.4$	
	$E_2 = 60.0$	$E_2 = 324.1$	
	$E_3 = 10.0$	$E_3 = 218.5$	

6 结 语

(1) 路面无损检测与评价技术在公路建设与管理中具有重大应用价值和显著的社会经济效益。在工程检测方面,应用快速、无破损检测技术和路面力学反演方法,能够及时准确地分析路面结构各层强度,从而防止因材料强度不足而造成的质量隐患,从根本上避免路面过早破坏;在养护决策方面,对路网进行定期检测和结构性能评价,可以科学地制定养护方案,合理地分配养路资金;在道路改造方面,准确地检测和评价待改造路段的剩余强度,可以实现路面补强优化设计。

(2) 路面无损检测与评价技术的研究涉及许多学科分支:在学术上以路面力学反问题等现代力学理论为基础;在技术上涉及自动化检测、信息处理、计算机辅助工程(CAE)等高新技术;在应用上密切结合工程实践。因此,它是一个综合性很强的科研方向,要求理论研究、技术开发和工程应用密切结合。

(3) 本方法在国际上发展很快,在理论研究、设备研制和软件开发等方面都取得了较丰富的成果。由于我国高等级公路建设正处于迅速发展时期,加快开发先进、高效的路面检测技术和配套、实用的路面评价软件系统已成为当务之急。

参 考 文 献

- [1] Lytton R L., Roberts F L. Determination of Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties by NDT, NCHRP report 10—27, 1986.
- [2] SHRP-LTPP Manual for FWD Testing Operational Field Guidelines, Version 1.0, Prepared for Strategic Highway Research Program by P-001 Technical Assistance Staff, 1989.
- [3] Uzan J, Lytton R L et al. A Microcomputer Based Procedure For Backcalculating Layer Moduli From FWD. Research report No. 1123-1, Texas Transportation Institute, 1988.

- [4] Irwin L H. Users Guide to MODCOMP2, Report No. 83-8, Cornell University Local Roads Program, Cornell University, 1983.
- [5] Bush A J. Nondestructive Testing for Light Aircraft Phase II: Development of the Nondestructive Evaluation Methodology, Report No. FAA-RD-80-9-II, Federal Aviation Administration, Washington, DC, November 1980.
- [6] Wang Fuming, Lytton R L. System Identification Method for Backcalculating Pavement Layer Properties. TRR 1384, 1993.

RESEARCH AND APPLICATION OF PAVEMENT NON-DESTRUCTIVE TESTING & EVALUATION TECHNOLOGY

Wang Fuming Liu Wenting

(Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002)

Abstract This paper summarily reviews the research progresses in pavement non-destructive testing (NDT) and structural evaluation. It includes the technical principle of FWD test system, the general backcalculation method for pavement structures, and the development and application of pavement evaluation software.

Key words pavement, non-destructive testing, falling weight deflectometer (FWD), backcalculation

· 信 息 ·

“九五”第三批重大项目即将受理申请

国家自然科学基金委员会于1998年3月22日发布了《“九五”第三批重大项目申请指南》。欢迎具有研究工作基础、条件与研究能力者提出申请,参与竞争。国家自然科学基金委员会将按照“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”的原则,对所有申请组织评审,择优给予资助。受理申请时间为1998年7月20—31日,序号(4)、(6)领域受理申请时间为1998年5月20—31日。详见《国家自然科学基金委员会关于发布“九五”第三批国家自然科学基金重大项目申请指南的通告》。(1)大型旋转机械非线性动力学问题;(2) τ -聚物理若干前沿课题研究;(3)电子聚合物中基本化学问题研究;(4)《中国植物志》、《中国动物志》、《中国孢子植物志》的编研;(5)蛋白质组以及蛋白质结构动态变化与其生物功能的研究;(6)中华民族基因组结构和功能的研究;(7)荒漠化发生机制与综合防治优化模式的研究;(8)恶性肿瘤易感人群预警的基础和方法;(9)新型功能陶瓷材料的制备科学;(10)日地空间灾害性扰动过程及其对人类活动的影响;(11)金属熔体凝固控制与直接成形过程基础研究;(12)先进制造技术中的若干基础性研究;(13)能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究;(14)航天技术和信息器件中的微细尺度传热;(15)WDM全光网基础研究;(16)支持宏观经济决策的人-机结合系统集成体系研究。

(综合计划局 陈雨果 供稿)