

*The Nondestructive Detection Technique of  
Highway Maintenance*

# 高速公路养护 无损检测技术

曾胜 等 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

**The Nondestructive Detection Technique of  
Highway Maintenance**  
**高速公路养护无损检测技术**

曾胜 等 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书介绍了高速公路养护质量无损检测的方法和技术,包括路面弯沉检测技术、沥青路面车辙检测技术、路面破损状况检测技术、路面平整度无损检测技术、路面抗滑性能检测技术、路基病害无损检测技术、无损检测数据在高速公路养护管理系统的应用等,具有较强的针对性、操作性和规范性。

本书可供从事公路养护、施工、监理、检测的技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速公路养护无损检测技术 / 曾胜等编著. —北京:  
人民交通出版社股份有限公司, 2014. 11

ISBN 978-7-114-11834-0

I. ①高… II. ①曾… III. ①高速公路—公路养护—  
无损检测 IV. ①U418

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 261824 号

书 名: 高速公路养护无损检测技术

著 者: 曾胜 等

责任编辑: 王文华(wwh@ccpress.com.cn)

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 14.25

字 数: 331 千

版 次: 2014 年 11 月 第 1 版

印 次: 2014 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11834-0

定 价: 39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

道路使用性能直接关系到道路的舒适性、快捷性、安全性等服务水平,关系到道路本身的使用寿命。为了客观反映公路技术状况,促进公路路况检测评价工作规范化、精细化和标准化,交通运输部先后颁布了一系列标准和规范,对检测方法、技术状况评价等作出了明确的规定。随着道路养护管理系统的推广应用,对基础数据的要求越来越高,数据采集手段相对落后的问题日益突出。传统的数据采集设备耗时、费力,有些还会对道路结构产生破坏。近年来,国内外针对道路检测技术进行了大量研究,取得了一些成效,道路检测技术也开始由人工检测向自动化检测、由破损类检测向无损检测技术发展。加强道路无损检测与性能评价,提高数据采集的时效性和精度,充分利用道路无损检测评价数据判别道路状况是否适应目前的交通状况和使用要求,研讨和寻求路基路面破坏的机理与原因,以此确定路基路面需要采取的养护维修和改(扩)建措施,并进行中长期养护、维修管理的规划设计成为公路界广泛关注的热点。

本书作者在国内外研究和自身实践的基础上编著本书,总结了路基、路面主要无损检测技术和相关研究的最新进展,分析了其在我国的应用与研究情况及发展趋势。本书第1、2章由曾胜编写,第3、4章由赵健、韦慧、郭昕编写,第5、6、7章由李振存、李文、郭昕编写,第8章由曾胜、赵健、韦慧编写。

全书文字和图表的输入和校对工作由韦慧完成,在此表示感谢。本书引用了“高等级公路路基病害快速综合诊断及加固新技术”“高速公路路面典型病害养护维修决策技术研究”“高速公路养护管理智能化技术研究”等课题的部分研究成果以及王才保、曾小军、黄雄立、邵春华、许佳等硕士研究生的论文研究成

果,在此谨向所有参加研究的人员及硕士研究生表示感谢!另外,本书的编写得到了人民交通出版社股份有限公司的大力支持,借此向为本书出版付出艰辛劳动的王文华编辑表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有不当和疏漏之处,恳请各位专家、同行及读者不吝赐教。

作者

2014年7月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 检测评价的必要性 .....	1
1.2 传统路面检测技术的缺陷 .....	1
1.3 无损检测代表性设备 .....	2
1.4 现代检测技术的主要特征 .....	3
第 2 章 路面动态弯沉检测及其应用 .....	5
2.1 概述 .....	5
2.2 基于 FWD 动态弯沉数据的路面结构层动态模量反算 .....	5
2.3 水泥路面板接缝传荷能力检测 .....	26
2.4 基于弯沉指标的水泥板底脱空检测 .....	31
2.5 FWD 弯沉检测应用实例 .....	44
第 3 章 沥青路面车辙检测技术 .....	63
3.1 概述 .....	63
3.2 路面车辙检测指标 .....	64
3.3 路面车辙检测设备 .....	65
3.4 车辙深度计算及评价标准 .....	66
3.5 车载式路面激光车辙仪 .....	70
3.6 测试数据的分析与修正 .....	73
3.7 工程实例 .....	74
第 4 章 路面破损状况检测技术 .....	76
4.1 概述 .....	76
4.2 路面破损指标检测及评价标准 .....	76
4.3 现有主要路面破损快速检测仪器 .....	79
4.4 路面破损状况检测技术工程应用 .....	83
第 5 章 路面平整度无损检测技术 .....	87
5.1 概述 .....	87
5.2 平整度对路面使用特性的影响 .....	88
5.3 路面平整度评价指标 .....	89
5.4 路面平整度快速检测仪器发展现状 .....	96
5.5 平整度快速检测技术工程应用 .....	98
第 6 章 路面抗滑性能检测技术 .....	100
6.1 概述 .....	100

6.2	路面抗滑性能检测指标及其检测方法 .....	101
6.3	摩擦系数测试系统 .....	104
6.4	JGMC-2 横向力系数检测系统在高速公路上的检测应用 .....	108
<b>第7章</b>	<b>路基病害无损检测技术 .....</b>	<b>111</b>
7.1	概述 .....	111
7.2	基于病害产生机理的路基病害分类及状况评价方法 .....	111
7.3	路基病害无损检测技术介绍 .....	116
7.4	路基病害无损检测发展新方向 .....	160
<b>第8章</b>	<b>高速公路养护管理系统的应用 .....</b>	<b>165</b>
8.1	概述 .....	165
8.2	养护管理系统的发展 .....	165
8.3	湖南省养护管理系统简介 .....	168
<b>参考文献 .....</b>		<b>210</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 检测评价的必要性

自高速公路建成通车以来,在交通荷载和外部环境因素的共同作用下,路基路面会出现不同程度的破坏。为了了解现有的高速公路工作状况,以决定哪些路段在什么时间需要采取处治措施,以及采取什么样的处治措施,就需要对路基路面进行科学、合理的检测评价。这种评价必须紧密结合实际路况和日后的养护计划,以便管理部门根据统一标准制订具体的处治方案,采取合理的养护维修方案,科学地分配养护资金,并最大限度地利用现有的道路资源<sup>[1-4]</sup>。可以说路基路面检测评价伴随着道路的整体使用过程。

随着高速公路养护维修要求的逐步提高,以及高速公路预防性养护的要求,对道路结构进行检测并进行科学客观综合评价已经成为国际公路界广泛关注的课题之一。加强道路无损检测与性能评价,通过对检测资料进行回归分析、归纳整理,可制订道路养护维修和改(扩)建养护时间与养护方案<sup>[4]</sup>,利用道路结构检测与性能评价数据可以正确判别道路状况是否适应目前的交通状况和使用要求,研讨和寻求路基路面破坏的机理与原因,确定路基路面需要采取的养护维修和改(扩)建措施,并进行中长期养护、维修管理的规划设计<sup>[1-4]</sup>。因此,对现有道路的使用性能进行客观、准确的评价是道路养护管理中一项必不可少的基本工作,也是道路经济分析和路面管理系统的重要组成部分,对于分析路基路面病害的成因,改进和提高养护、维修的水平和质量有着重要的指导意义。

## 1.2 传统路面检测技术的缺陷

目前我国有相当一部分道路路面面临着改造和加铺任务。在进行养护维修或改(扩)建之前,应该对道路的使用状况及病害成因进行调查,同时对检测数据进行系统、客观、全面的评定,以便科学合理地进行改造,加铺工作。

传统的道路结构检测与性能评价方法存在着下列缺陷:

(1)传统的评价方法只局限于逐个考虑各单项评价指标,诸如路面平整度、强度指标、摩擦系数、破损率等指标,有些指标人为因素影响较大,样本数据较多。如在路面破损的测定中,破损率靠人为的因素进行调查,工作量大,所建立的评价模型只对应于且只适用于特定的区域和特定的路况,有较大的局限性<sup>[2,4]</sup>。

(2)在目前的养护管理系统中,用于性能评价的指标普遍过于单一,没有总体考虑综合评价和各评价指标之间的相互关系,也就是说,没有建立路况调查中各评价指标体系数据库系统,并研究它们之间的作用机理及相互关系。由于路基路面缺乏长期分析和观测数据,难以建立养护长期工作性能分析系统<sup>[2,4,5]</sup>。



(3)传统的道路结构检测与使用性能评价仅从日常养护管理的角度进行,即破坏状况、强度、平整度和抗滑性能等。由于路面损坏状况比较明显,通常成为人们考虑的主要因素,而忽略了路面破损与路面结构强度、平整度和抗滑性能之间必然的、潜在的相互联系,而实际养护管理中要求路面评价的出发点往往要从路面维修、改(扩)建(比如加铺罩面)的角度来考虑。事实表明,单从上述几点因素进行考虑,对路面评价及日后的养护改造有很大的局限性。比如就水泥混凝土路面加铺罩面而言,除了上述各项指标外,路面板底脱空、接缝传荷能力、基础强度、交通荷载、排水情况等各种因素直接制约并决定着加铺方案,而传统的检测评价方法此时无能为力<sup>[2,4,5-7]</sup>。

(4)路基病害具有隐蔽性,使得检测难度大大增加。由于有效检测手段的缺乏,国内外对路基的检测评价指标体系与模型仍然只停留在外观损坏的层面,对于既有公路路基病害发展程度由哪些指标来表征、不同发展程度各表征指标的阈值、路基病害的检测频率、检测指标、检测方案等关键性问题的研究仍处于初级阶段。

(5)由于数据样本的局限性及检测设备落后,采用传统的评价方法得到的评价结果会受评价人的经验和偏见的影响,带有较大的主观片面性。众所周知,路面破损的原因较为复杂,严格地将各种破损产生原因分类和将各种破坏进行定量统计尚有困难,即使在道路设计使用年限内,损坏一旦产生,将失去其功能,但评定使用性能的极限状况却相当困难。这是因为在性能众多的评定因素中,某种因素即使达到了某种损坏程度,但道路仍能使用,决定道路在哪个服务水平上发挥其怎样的功能还必须从经济、技术、维修方案等众多方面考虑。实践证明,即使是设计良好的道路,由于各种原因也会随着使用年数的增加而发生多种类型的损坏<sup>[1-2,4]</sup>。

(6)传统的检测手段和检测设备制约着评价体系和评价方法的发展。以往公路检测评价方法不仅检测速度慢,评价周期长,而且容易对道路造成损坏,给高速公路运营使用带来了安全隐患。随着大量先进的现代无损检测设备的引入,必须调整相应的指标体系,甚至是思想。比如,传统的强度评价只是采用了基于静态荷载作用下的评价指标,而随着落锤式弯沉仪(FWD)等现在无损检测设备和技术手段的引入,必须建立以弯沉盆为基础的动态评价体系,以及利用动态参数进行路面强度评价的思想<sup>[1-2,4-5]</sup>。

### 1.3 无损检测代表性设备

无损检测技术检测方法日臻成熟,为达到同一检测目的,可以选用具有不同工作原理的检测设备,检测人员可根据实际工作需要与趋利避害原则加以利用。常用无损检测代表性设备如表 1-1 所示<sup>[8-11]</sup>。

无损检测代表性设备一览表

表 1-1

检测内容	设备名称	工作方式/原理	检测指标	开发国别/机构
路面弯沉	贝克曼梁	静力/固定采样	回弹弯沉	美国
	自动弯沉仪	静力/行驶采样	总弯沉/弯沉盆	法国 LGPC 等
	动力弯沉仪(Dynaflect)	稳态动力/固定采样	动态弯沉/弯沉盆	美国 HPIDC
	道路测定仪(Road Rater)	稳态动力/固定采样	动态弯沉/弯沉盆	美国 FMI
	落锤式弯沉仪(FWD)	脉冲动力/固定采样	动态弯沉/弯沉盆	丹麦、瑞典等
	滚动车弯沉仪			

续上表

检测内容	设备名称	工作方式/原理	检测指标	开发国别/机构
路面平整度	水准仪、水准尺	断面类/静态检测	路表高程	世界银行
	三米直尺	断面类/静态检测	最大间隙	英国 TRL
	MERLIN 梁	断面类/静态检测	位移偏差分布	英国 TRL
	连续式平整度仪	断面类/静态检测	位移标准偏差	中国、日本等
	惯性断面仪(GMR)	断面类/静态检测	路表纵断面	美国通用汽车公司
	纵断面分析仪(APL)	断面类/静态检测	路表纵断面	法国 LCPC
	激光断面仪(RSP)	断面类/静态检测	路表纵断面	丹麦、瑞典等
	颠簸累积仪(BI)	反映类/动态检测	位移累积值	英国 TRL
	NAASRA 平整度仪	反映类/动态检测	位移累积值	澳大利亚 ARRB
	Maya 平整度仪	反映类/动态检测	位移累积值	美国
路面抗滑性	摆式摩擦系数仪	单点固定检测	摩擦摆值 <i>BPV</i>	英国 TRL
	DF 测试仪	单点固定检测	路面磨光值 <i>PSV</i>	日本
	激光纹理测试仪	行驶连续检测	构造深度 <i>MTD</i>	英国 WDM 等
	SCRIM 测试车	单轮偏角	横向力系数 <i>SFC</i>	英国 TRL
	Mu - Meter 拖车	双轮合角	横向力系数 <i>SFC</i>	英国 DOUGLAS
	Griptester 拖车	纵向制动轮/固定滑移 15%	滑移指数 <i>SN</i>	英国 Findlay
	SAAB SFT 测试车	纵向制动轮/固定滑移率 12%	滑移指数 <i>SN</i>	瑞典 ASFT
	ASTM E274 Trailer	纵向制动轮/完全锁定	制动力系数 <i>BFC</i>	美国 ASTM
路面破损	PCR 路况数据采集仪	人工测量	各种路面病害	中国交通运输部公路科学研究院
	路面破损摄影车	胶片摄影/室内人工判读	各种路面病害	法国
	RT2000 系统	CCD 数字摄像/人工判读	各种路面病害	加拿大 Stantec
	ARAN 系统	CCD 数字摄像/图像自动识别	路面裂缝	加拿大 RoadWare
	WayLink 系统	CCD 数字摄像/图像自动识别	路面裂缝	美国阿肯色大学
路面雷达	SIR 系列	反射波在不同介质的反射	结构层厚度、均匀性	美国 GSSI
	Pulse EKKO 系列			加拿大 SSI
	Rodar 系列			美国脉冲雷达
	GPR 系列			美国 Penetradar
	GPR - 1			中国东南大学
路基	LTD - 2000 型冲激脉冲探地雷达	BP 成像算法	厚度	中国电波传播研究所
	高密度电法仪器	以岩土体电性差异为基础	电阻率	长春地质学院
	Goe Pen Miniseis 24 浅层地震仪	波速随波长、频率变化而变化	深度、波速	骄鹏科技(北京)有限公司

## 1.4 现代检测技术的主要特征

运营高速公路使用性能直接关系到道路运行的舒适性、安全性、快捷性等,因此,必须加强养护管理,确保提供可接受的服务水平。自 20 世纪六七十年代以来,许多国家都陆续建立了较为完善的道路养护管理系统,这些系统的建立有效地保证了养护的科学性,但普遍面

临数据采集手段相对落后的问题;大量的设备在使用时费时、费力,对交通影响大,有些还要破坏路面结构的完整性,而且数据的精度也难以得到保证,传统的检测技术与设备已经不能满足道路检测的具体要求<sup>[11-16]</sup>。

为此,各国针对道路检测技术开展了深入研究,并且随着计算机技术、自动化控制技术、高精度测微技术的进步,在最近的20年里有了突破性的进展。我国从20世纪80年代后期开始,通过设备与技术引进和自主开发,在无损检测方面也有了巨大的发展。道路检测技术由人工检测向自动化检测技术发展,由破损类检测向无损检测技术发展,由低速度、低精度向高速度、高精度发展。现代无损检测技术的主要特点是<sup>[11-19]</sup>:

#### (1) 无损性

由于公路线路很长,要检测它的质量,传统的钻孔挖坑等“有损”检测方法效率低、代表性差,且对路面有破坏性,检测完毕后需重新进行维护。无损检测技术是通过光学、力学传感器、振动、电磁等快速检测方法来分析评价路基路面结构特性或诊断病害,对路面没有任何破坏性。

目前,许多国家都对无损检测技术作出了规定,美国测试与材料学会(ASTM)、国际标准组织(ISO)、英国标准研究院(BSI)等提出公路无损检测应满足下列条件:

- ①能精确确定缺陷区的形状、大小和深度;
- ②无损;
- ③能在大范围内进行检测与定位;
- ④劳动强度小、装备轻;
- ⑤不受周围环境的影响;
- ⑥方便使用。

#### (2) 高精度、高稳定性

野外环境恶劣、复杂,无损检测主要采用自动化检测设备,人为因素干扰小,具有很高的稳定性,尤其能够抵御温度、湿度、振动和各类干扰的影响,保持测试结果的准确性、稳定性。

#### (3) 快速、实时化

随着自动化技术的飞速发展,无损检测设备能够对现场大量数据进行快速采集、实时分析和统计计算,提高了测试评价的时效性。此外,利用宽带网实现测试数据的现场远程通信传送,使室内工作站能够与测试现场保持同步监控。

#### (4) 智能化、标准化

由于检测对象复杂多样,无损检测应建立统一的标准体系,使不同类型设备的测试结果具有相关性和可比性,还要利用高性能计算机并编制完善的智能处理软件,使操作人员能进行复杂试验,并轻松、灵活地完成工作,在目前的技术水平下,智能化、标准化已能够实现。

#### (5) 多功能、集成化

应用各类自动化技术,能够将各种检测功能汇集在同一个系统中,提高测试效率,减少重复投资。

正是由于无损检测存在的上述种种优点,目前各类先进的现代无损检测技术已经逐步在公路特别是高速公路检测中得到广泛应用。

## 第 2 章 路面动态弯沉检测及其应用

### 2.1 概述

采用弯沉来评价路面性能曾经是公路检测的一项革命性的创举。路面弯沉示意图见图 2-1。近年来,有关弯沉的测量和分析技术发展很快,人们已从单一的最大弯沉值发展到对整个弯沉盆的分析,从静态荷载下的弯沉发展到对模拟行车轮载下动态弯沉的研究与评价。

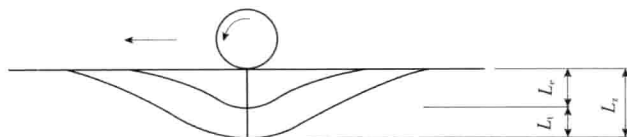


图 2-1 路面弯沉示意图

$L_i$ -回弹弯沉; $L_e$ -残余弯沉; $L_r$ -总弯沉

目前通过对路面的弯沉测量主要可以达到以下目的:

- (1) 利用弯沉仪测量路面表面在标准荷载作用下的轮隙回弹弯沉值,用作评定路面强度的指标。
- (2) 通过对路面结构分层测定所得的回弹弯沉值,根据弹性体系垂直位移理论,反算路面各结构层的材料回弹模量值,分析路面结构层的病害状况。
- (3) 通过对水泥混凝土路面板中、板角的弯沉测试,判定水泥混凝土路面板底脱空状况。
- (4) 通过对水泥混凝土路面接缝受荷板和非受荷板的弯沉测试,检测评定水泥混凝土路面的接缝传荷能力。

本章将在系统分析路面弯沉检测技术的基础上,重点对 FWD 的测试方法、工程应用进行介绍和探讨。

### 2.2 基于 FWD 动态弯沉数据的路面结构层动态模量反算

#### 2.2.1 路面结构动态模量描述

材料在荷载作用下的力学响应,除了与在静力作用下的影响因素有关以外,与荷载作用时间、大小、频率及重复效应等有关,具有一定的应力依赖性。弹性模量是表征材料力学强度的一个重要参数。在动态荷载作用下,材料内部产生的应力、应变响应均为时间的函数,相应地,弹性模量在荷载作用过程中也不是一成不变的,路面材料动态弹性模量

定义为应力与幅值的比值[式(2-1)],以表征材料在不同的外荷载作用下不同的响应特性<sup>[1-2,4,20-21]</sup>。

$$E(t) = \frac{|\sigma(t)|}{|\varepsilon(t)|} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-1)$$

式中: $E(t)$ ——动态模量;

$\sigma(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ ——应力、应变时间函数;

$\sigma$ 、 $\varepsilon$ ——应力和应变的振幅。

材料的动弹模量较之于静弹模量在数值上是不相同的。在静载作用下,由于荷载的恒定,材料变形响应充分,不仅有弹性范围内的瞬间变形,还有流动发生的黏弹变形,而在动载作用下,荷载周期是变化的,使得材料变形响应滞后,进而使得模量值在一定程度上有所增大。试验结果表明:动弹模量一般为静弹模量的2~4倍,并且随着荷载级位的增加,动、静模量的差别逐渐减小。动弹模量具有一定的应力依赖性,与荷载之间关系为:当动态加载频率不变时,动弹模量随应力幅值的增大而增大,动模量随着加载频率而变化,应选用与实际交通荷载最接近的频率进行试验,这样确定的动模量相当于设计用的回弹模量。ASTM(1989b)“D3497—79 沥青混合料动模量标准试验方法”对动模量试验作了规定。在ASTM法中,在温度为5℃、25℃和40℃时,每一温度以荷载频率1Hz、4Hz和16Hz对试件施加半正弦压应力至少30s,并且不得超过45s。在试件中间高度两侧贴有电阻丝应变片,量测轴向应变。轴向应力与可恢复轴向应变的比值为动模量。

以上结论表明,若用HMA的动模量按弹性理论进行设计,可以采用上述三种方法中的任何一种。然而,若用动模量和相位角作为设计变量按黏弹性理论进行设计,应该采用与实际加载条件一致的试验方法。

动模量也可用弯曲试验确定。Shell提出了用两点弯曲仪确定沥青混合料的模量(Bonnaure等,1977年)。在此试验中,将梯形试件底部固定,在自由端作用一正弦荷载。连续作出自由端荷载和变形曲线,就可计算试件的劲度模量。另一计算劲度模量的方法是用应变仪测梁中间长度表面的应变,由于采用正弦荷载,由Shell诺谟图所得劲度模量实际上是动模量。在用试验确定相位角后,由劲度模量和相位角可得复合模量应力幅值,在相同时间的周期内,材料内应力增大速率加快,导致模量值增大。国内外对动弹模量的这种依赖性采用了多种数学模型进行定量表示,代表性的有折线型、双对数型、双曲线型、半对数型等。一般认为抛物线型的相关性最好,建议采用荷载与变形的方程为<sup>[1-2,4,20-21]</sup>:

$$P_0 = a_0 + a_1 l_0 + a_2 l_0^2 + a_3 l_0^3 \quad (2-2)$$

显然,当 $P_0 = 0$ 时, $l_0 = 0$ ,则 $a_0 = 0$ 。

根据动态模量的定义, $E_d = p_0/l_0 \times A$ ,则得到动态模量与变形振幅的关系为:

$$E_d = (a_1 + a_2 l_0 + a_3 l_0^2) \times A \quad (2-3)$$

即动态模量 $E_d$ 与变形振幅(或应变振幅)的关系为二次曲线。根据二次曲线的性质,可求出某一变形响应值所对应的最大动态模量。

当 $l_0 = -\frac{a_2}{2a_3}$ 时,最大的动态模量为:

$$E_{d\max 1} = A \times \frac{4a_1 a_3 - a_2^2}{4a_3} \quad (2-4)$$

同样,也可得到动态模量与荷载振幅(或应力振幅)关系的二次曲线方程<sup>[1-2,4]</sup>:

$$E_d = (b_1 + b_2 P_0 + b_3 P_0^2) \times A \quad (2-5)$$

当  $P_0 = -\frac{b_2}{2b_3}$ , 最大的动态模量为:

$$E_{d\max 2} = A \times \frac{4b_1 b_3 - b_2^2}{4b_3} \quad (2-6)$$

下面,简单介绍在动态荷载条件下测定材料的弹性模量的概念和方法。对于一种材料,采用连续弹性假定,材料的振动表示为<sup>[1-2,4]</sup>:

$$u = u(x, t) \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_r^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2-8)$$

$v_r$  为纵波波速,它与弹性模量有如下关系:

$$v_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-9)$$

另:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2-10)$$

$v_s$  为横波波速,它与剪切量有如下关系:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-11)$$

弹性模量和剪切模量的关系为:

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (2-12)$$

相应测量模量的方法有时距法和共振柱法。时距法是通过电子仪器测定弹性波沿着材料杆移动一段距离( $l_0$ )时所需时间计算模量。如果  $t_r$ 、 $t_s$  分别为测定的纵波时距和横波(扭转波)时距,弹性模量和剪切模量分别为<sup>[1-2,4]</sup>:

$$E = \frac{\gamma l_0^2}{g t_r^2}, G = \frac{\gamma l_0^2}{g t_s^2} \quad (2-13)$$

共振柱方法是采用某一种纵向或扭转的标准振型激振一相柱体试件,然后根据共振时的频率和试件尺寸来计算波速。通用的计算公式为<sup>[1-2,4]</sup>:

$$E = \rho (2\pi L)^2 (f_L / F_L)^2 \quad (2-14)$$

式中: $\rho$ ——试件密度;

$L$ ——试件长度;

$f_L$ ——纵向运动共振频率;

$F_L$ ——无量纲频率系数。

以上讨论的模量概念与本文中的动态模量概念考虑问题的角度不同,存在一定的关

系。以弹性模量为例,将杆的纵向运动微分方程两边同作拉氏变换,并设初始条件为零,则<sup>[1-2,4]</sup>:

$$S^2 U(s, x) = a^2 \frac{d^2 U(s, x)}{dx^2} \quad (2-15)$$

由上式可知,上式为以  $x$  为变量的常微分方程,其解可表示为:

$$U(s, t) = c_1(s) \operatorname{ch} \frac{2}{a} x + c_2(s) \operatorname{sh} \frac{s}{a} x \quad (2-16)$$

式中: $c_1(s)$ 、 $c_2(s)$ ——待定系数,由边界条件决定。

当一端固定,一端自由时,边界条件为:

$$x = 0, U = 0; x = l, EA \frac{\partial U}{\partial x} = F_l(s)$$

代入上式,可确定待定系数:

$$c_1(s) = 0, c_2(s) = F_l(s) / EA \frac{s}{a} \operatorname{ch} \frac{sl}{a}$$

在  $l$  点激励、在  $x$  点测量的传递的阻抗为<sup>[4]</sup>:

$$Z_{xl}(\omega) = EA \frac{\frac{\omega}{a} \cos \frac{\omega}{a} l}{\sin \frac{\omega}{a} x} \quad (2-17)$$

驱动点的阻抗为:

$$Z_u(\omega) = EA \frac{\frac{\omega}{a} \cos \frac{\omega}{a} l}{\sin \frac{\omega}{a} l} = EA \frac{\omega}{a} \cot \frac{\omega}{a} l \quad (2-18)$$

这里的阻抗概念是荷载振幅与变形振幅的比,实际上就是本文所定义的动态模量<sup>[1-2,4,20]</sup>。由此可见动态模量与弹性模量之间有一定的关系,弹性模量在振动过程中保持不变,而动态模量则随频率的变化而变化。弹性模量和动态模量成正比关系<sup>[1-2,4]</sup>。

## 2.2.2 FWD 实测弯沉盆曲线特征与路面结构层强度关系

在 FWD 的大量应用过程中,国内外主要对 FWD 实测弯沉盆数据进行了大量详细的分析研究。研究表明 FWD 弯沉盆曲线蕴含着丰富的路面结构强度信息。国内外学者对此进行了大量的研究,并得到了一些重要结论。

### 1) 弯沉盆与沿荷载中心轴路面中竖向变形的关系

FWD 是通过一定质量的重物自由落下锤击一块具有一定刚性的承载板作用于路面,然后通过按一定间距布置的传感器测定路表的变形响应(所谓的弯沉盆)。图 2-2 为 Dynatest-8000 型 FWD 在荷载作用下的路面的应力分布曲线及 7 个传感器的布置示意图。

由图 2-2 可以看出,路面结构表面弯沉盆与路面结构的竖向变形有较密切的关系,它能够反映垂直方向路面结构层强度(模量)的变化规律。这一点是通过弯沉盆反算路面各结构层模量的理论基础。国外有关研究文献也证实了上述关系,并给出了关系图,如图 2-3 所示<sup>[2]</sup>。

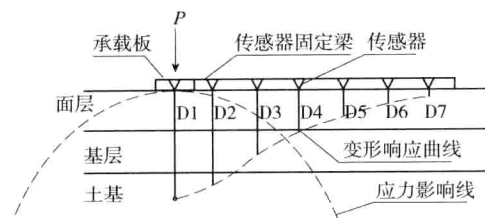


图 2-2 FWD 的应力分布曲线和传感器布置示意图

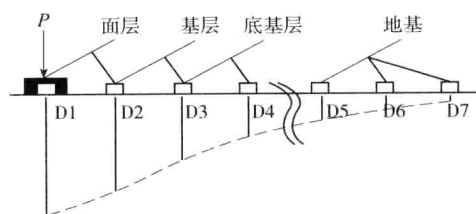


图 2-3 弯沉盆与路面结构层关系图

为了验证上述关系,根据传感器布置间距,对某段的路面结构,运用静弹性层状体系理论计算表面和竖向弯沉。令沥青面层厚 15cm,水泥碎石基层厚 20cm,底基层厚 39cm,各层模量取三种水平:高 {1 500MPa, 1 200MPa, 650MPa, 60MPa};中 {1 200MPa, 1 100MPa, 600MPa, 45MPa};低 {900MPa, 900MPa, 500MPa, 30MPa}。一是计算路表弯沉盆,二是计算垂直方向路面结构中的变形,计算结果见表 2-1。从表中数据看到,对于三种模量范围,路面弯沉盆与竖向变形之间有一定关系,距荷载中心 30cm 处路表弯沉与距路表荷载中心以下 40cm 处的路中变形基本一致,依次类推,水平方向 40cm 与垂直方向 70cm,水平方向 100cm 与垂直方向 130cm,水平方向 130cm 与垂直方向 160cm 基本一样。该路面结构总厚 74cm,因此可以认为水平方向 0~30cm 的弯沉盆反映面层的变形情况,30~40cm 的弯沉盆反映基层的变形情况,40~70cm 弯沉盆反映底基层变形情况,100cm 后的弯沉盆变形反映路基变形情况<sup>[2]</sup>。

理论计算路表弯沉与荷载中心以下结构垂直变形成系统统计表

表 2-1

弯沉项 \ 垂直深度 (cm)	0	20	30	40	70	100	130	160	190
路表 <sub>高</sub>	0.039 9	0.030 9	0.027 8	0.026 1	0.022 2	0.019 2	0.016 7	0.014 5	0.013 2
垂直 <sub>高</sub>	0.039 9	0.032 6	0.030 3	0.028 2	0.026 6	0.022 8	0.019 5	0.017 0	0.014 8
路表 <sub>中</sub>	0.049 4	0.038 6	0.035 0	0.033 7	0.028 7	0.025 0	0.022 0	0.019 3	0.017 1
垂直 <sub>中</sub>	0.049 4	0.040 4	0.038 1	0.035 2	0.033 8	0.029 2	0.025 1	0.022 2	0.019 6
路表 <sub>低</sub>	0.067 8	0.053 7	0.049 2	0.046 8	0.040 9	0.036 1	0.031 9	0.028 3	0.024 7
垂直 <sub>低</sub>	0.067 8	0.056 7	0.053 8	0.049 7	0.047 2	0.041 3	0.036 1	0.032 1	0.028 5

## 2) 弯沉盆形状与面层刚度及地基支撑强度之间的关系

弯沉盆形状与路面结构层强弱有密切关系。对于双层体系的路面结构,笔者采用四种典型结构:强面层弱地基、强面层强地基、弱面层强地基和弱面层弱地基;给出六种组合的弯沉盆形状对比关系图,这六种组合为:强面层弱地基与弱面层强地基、强面层强地基与弱面层强地基、强面层弱地基与强面层强地基、弱面层弱地基与强面层强地基、弱面层弱地基与弱面层强地基、强面层弱地基与弱面层弱地基。

根据模量反算与实际路况调查结果,以大量的 FWD 检测弯沉盆数据为试验数据,对这四种典型路面结构的弯沉盆数据和弯沉盆形状分别作了大量的计算和分析,表明不同的弯沉盆形状对应着路面结构层强度的强弱。为了分析方便起见,仅选取四组典型实测弯沉盆数据作为算例进行分析,这四组弯沉盆数据如表 2-2 所示<sup>[2]</sup>。



典型路面结构类型的 FWD 实测弯沉盆数据

表 2-2

路面结构类型	测点位置(m)与弯沉盆数据(mil)							面板模量 (MPa)	地基模量 (MPa)
	0	0.3	0.4	0.7	1	1.3	1.6		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7		
强面弱基	3.93	3.82	3.72	3.49	3.31	2.83	1.63	32 675.40	112.50
强面强基	4.57	4.34	4.25	3.75	3.35	2.18	1.05	38 490.30	284.20
弱面强基	34.01	27.17	22.67	11.30	7.16	4.89	1.46	2 645.30	264.20
弱面弱基	26.36	21.70	18.29	10.43	7.20	5.31	2.23	1 876.40	123.50

注: 1 mil = 0.025 4mm。

用正态分布函数对表 2-2 的弯沉盆数据进行拟合, 并设正态分布函数为:

$$y = ae^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2-19)$$

采用 MATLAB 进行编程拟合, 拟合结果如表 2-3 所示。

典型路面结构弯沉盆拟合结果一览表

表 2-3

路面结构类型	a	$\sigma$	相关系数 r	最大绝对偏差 w
强面弱基	4.074 7	1.273 9	0.952 3	0.409 2
强面强基	4.798 0	0.956 9	0.976 9	0.570 7
弱面强基	28.302 8	0.667 2	0.969 4	5.707 2
弱面弱基	21.812 9	0.754 1	0.964 7	4.547 1

图 2-4 ~ 图 2-9 给出六种组合的拟合弯沉形状对比图, 从这些图中, 可以得出如下结论:

(1) 对于地基强度相似, 面层强度不同的路面结构, 其弯沉盆形状仅表现出深浅, 在宽窄上并无太大差异。

(2) 对于面层强度相似, 地基强度不同的路面结构, 其弯沉盆形状表现出了宽窄的不同, 通常, 弱地基的弯沉盆宽度大于强地基的弯沉盆宽度。

(3) 对于面层强度和地基强度均不同的路面结构, 其弯沉盆形状表现出了深浅和宽窄的不同, 一般的, 面层强度弱的, 其弯沉盆形状较深, 反之则较浅; 地基强度弱的, 其弯沉盆形状较宽, 反之则较窄<sup>[2]</sup>。

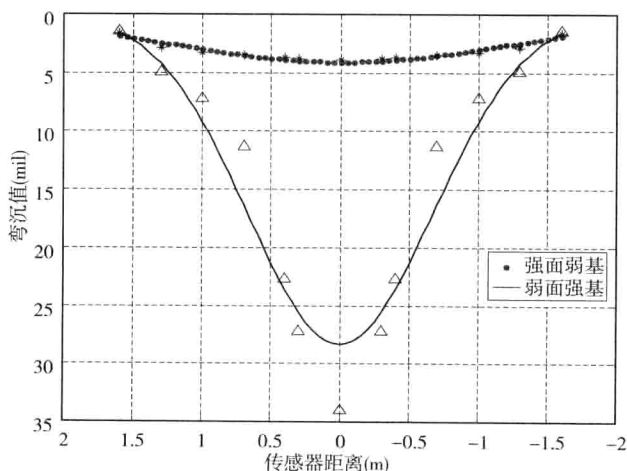


图 2-4 强面层弱地基与弱面层强地基弯沉盆对比图