

沿海地区高速公路病害精确诊断评价 及维修关键技术研究

吴景海 王德群 邓国瑞 芮勇勤 编著



东北大学出版社
Northeastern University Press

沿海地区高速公路病害精确诊断评价 及维修关键技术研究

吴景海 王德群 邓国瑞 芮勇勤 编著

东北大学出版社

• 沈阳 •

© 吴景海 王德群 邓国瑞 芮勇勤 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

沿海地区高速公路病害精确诊断评价及维修关键技术研究 / 吴景海等编著.
— 沈阳: 东北大学出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5517-1143-2

I. ①沿… II. ①吴… III. ①沿海—高速公路—病害—诊断—研究 ②沿海—高速公路—维修—研究 IV. ①U418

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 269133 号

内 容 提 要

本书针对沿海地区高速公路特有的软土路基不均匀沉降、路基路面失稳性开裂和大量半刚性结构层废料三种典型病害, 提出软土路基注浆加固技术、采用抗滑桩与注浆综合处理失稳性路基技术、泡沫沥青再生半刚性基层技术, 从维修效果、施工速度、养护投资、交通压力以及社会环境效益等多方面综合考虑, 多种维修手段合理选择, 综合利用, 标本兼治, 大大提高维修效果, 弥补单一维修技术的不足, 并缩减施工周期和降低维修成本, 有效改善路用性能, 延长道路使用寿命。本书成果在工程中进行广泛应用, 还需深入研究; 同时开展的研究可供相关领域工程技术人员教学、研究学习参考。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 11

字 数: 278 千字

出版时间: 2015 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 汪彤彤

责任校对: 潘素梅

封面设计: 刘江旸

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1143-2

定 价: 50.00 元

序

随着我国经济的快速发展,早期建设的高等级公路运输功能已很难满足快速增加的交通状况和今后的发展需求,现有公路工程扩建或拓宽改造成为必然。道路工作者对公路建设经验的积累和技术水平的提高,建设更加耐久的路面结构已成为可能。随着我国综合国力的不断增强,各种先进的试验仪器和施工设备,为修建更加耐久的路面提供了必要的保障,修建使用功能更耐久的路面是工程拓宽建设的需要,也是投资效益最大化的基本要求。

本研究应对天津市经济的快速发展,作为连接滨海新区与市区重要纽带的津滨高速公路的运输功能已很难满足现代交通发展的需要,而且沥青路面破损较为严重,急需进行维修和扩建改造。改扩建工程中,保证新旧路面结构都具有足够的耐久性必须面对的新项目。路面各结构层材料的使用寿命不仅取决于合理的材料设计,而且与施工质量(其中施工技术水平是达到施工质量的根本保障)有密切的关系,因此有必要进行路面结构耐久性 & 施工技术的研究。另外,津滨高速公路在改扩建过程中将产生大量的废料,如何在保障路面结构耐久性的前提下,循环利用旧路面材料,保护生态环境,减少资源浪费,也是一项亟待解决的项目。

总之,津滨高速公路改扩建工程中路面结构和材料设计以及施工质量控制直接关系到路面功能和服务水平,必须进行深入系统的研究,确定合理的结构设计方案和施工方法。因此,本项目结合国内其他高速公路改扩建工程的经验,开展“高速公路改扩建耐久性沥青路面结构关键技术与应用研究”,通过理论分析、室内试验,结合实体工程,对耐久性沥青路面结构进行优化设计,开展路面材料(包括水泥冷再生沥青面层材料、基于振动设计法的水泥冷再生基层材料、泡沫沥青冷再生混合料、基于振动设计法的水泥稳定碎石、基于 GTM 法胶粉改性沥青混合料研究、基于 GTM 法温拌沥青混合料等)设计和性能研究;同时开展施工工艺和质量控制技术的研究。力争做到结构经济、方案合理、资源重复再利用,对又快又好的进行津滨高速公路改扩建工程建设是十分必要的,对天津地区乃至国内其他高等级公路的拓宽改造也具有十分重要的指导意义。

我国高等级公路的路面结构主要有三大类型:半刚性基层沥青路面、水泥混凝土路面、刚性组合式路面(包括在水泥混凝土或碾压混凝土板上铺筑沥青面层的结构)。在我国高等级公路建设中,之所以普遍采用半刚性基层沥青路面结构,是与我国沥青路面结构的发展过程及满足我国国情要求相适应的。我国的沥青路面结构有其自身的特点,其发展过程实际上就是半刚性基层沥青路面发展史;且与我国国产沥青的发展密切相关。

我国东部沿海地区软土分布广泛,特别是海相软土分布量大。海相软土一般具有高含水率、高压缩性、高孔隙比、低强度、低渗透性、高灵敏度、高有机质含量、流变性能显著等特点。另外,路基填土多为黏土及粉质黏土,模量较低,受早期施工质量及设计水平的影响,很多高速公路通车几年就产生了早期破坏,同时沿海城市多为经济发达地区,承接较大的过境及货运港口运输的作用,交通量较大且重载车较多,这也加剧了病害的发展。目前,规范中的常规检测技术及评价方法对由于基层、路基等问题诱发的病害尚不能实现

成因的准确分析,导致维修决策与技术针对性不强、寿命成本不合理。因此,研究结合沿海地区高速公路的现状,针对沿海地区高速公路病害精确诊断、沿海地区高速公路维修后劣化模型和基于寿命成本的维修方案优化开展研究,提出沿海地区高速公路病害精确诊断及维修关键技术,在国内外进行推广应用,具有重要的理论意义及应用价值,将会产生巨大的经济、社会和环境效益。

针对沿海地区高速公路特有的软土路基不均匀沉降、路基路面失稳性开裂和大量半刚性结构层废料三种典型病害,提出软土路基注浆加固技术、采用抗滑桩与注浆综合处理失稳性路基技术、泡沫沥青再生半刚性基层技术共三项内容,这三种新技术从维修效果、施工速度、养护投资、交通压力以及社会环境效益等多方面综合考虑,多种维修手段合理选择,综合利用,标本兼治,能够大大提高维修效果,弥补单一维修技术的不足,并缩减施工周期和降低维修成本,有效改善路用性能,延长道路使用寿命,具有显著的经济效益和社会效益。

本书得到一些省交通厅高速公路管理局、公路管理局和北京路桥总公司的大力支持和科研技术项目的资助。

在本书的编写过程中,借鉴了一些相关的技术设计、现场管理和软件应用,受益匪浅,在此深表感谢!

特别感谢东北大学资源与土木学院李超、陈明苹、刘一虎、王建、于洁等研究生,长沙理工大学交通运输工程学院和公路工程地质灾害研究所刘威研究生参与本书编写工作,以及给予的支持和帮助。

希望本书在实际工程中的设计、研究和分析等方面,能给予广大读者启迪和帮助。

由于编著者的水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和错误之处,恳请读者不吝赐教。

编著者于望湖苑

2015年8月18日

目 录

第 1 章 沿海地区高速公路病害精确诊断评价及维修关键技术研究现状	1
1.1 研究意义	2
1.2 国内外研究概况	3
1.3 主要研究内容及技术路线	10
第 2 章 沿海地区高速公路典型病害特征研究	13
2.1 沿海地区高速公路概述	13
2.2 天津市高速公路病害特征研究	22
2.3 本章小结	30
第 3 章 沿海地区高速公路病害检测及精确诊断技术研究	31
3.1 精确诊断的必要性	31
3.2 现有路基路面检测技术的优缺点	31
3.3 精确诊断技术	32
3.4 实例应用	43
3.5 本章小结	45
第 4 章 沥青路面弯沉演化模型研究	47
4.1 沿海地区高速公路历年交通量变化	47
4.2 标准轴载次数计算	48
4.3 路面维修后弯沉变化规律分析	49
4.4 本章小结	53
第 5 章 路面使用性能衰变方程研究	55
5.1 路面使用性能典型衰变模式	55
5.2 沿海地区沥青路面使用性能衰变曲线的建立	57
5.3 本章小结	62
第 6 章 基于振动成型方式半刚性基层材料配合比与路用性能研究	63
6.1 半刚性基层结构及材料设计现状与不足	63
6.2 半刚性基层原材料实验分析	65
6.3 半刚性基层材料实验分析	66
6.4 水泥稳定碎石混合料抗裂特性评价方法	66
6.5 振动成型方式水泥稳定碎石配合比优化	67
6.6 振动成型方式水泥稳定碎石混合料设计及路用性能对比	75
6.7 本章小结	84
第 7 章 半刚性基层材料抗疲劳特性及其性能关联分析	85
7.1 半刚性基层材料疲劳分析基本理论	85
7.2 半刚性基层材料的疲劳试验	87
7.3 半刚性基层材料疲劳方程的建立与修正	92
7.4 半刚性基层材料疲劳特性对比分析	96
7.5 半刚性基层水泥稳定碎石抗疲劳性能关联分析	100
7.6 本章小结	101

第 8 章 基于散体强度理论的沥青路面混合料综合配合比设计方法	103
8.1 “骨架密实型混合料”的再认识	103
8.2 确定粗细集料尺寸	103
8.3 粗细集料选择密度的确定	105
8.4 控制级配走向的参数确定	106
8.5 沥青混合料的体积参数研究	107
8.6 沥青混合料配合比的设计计算方法	108
8.7 沥青混合料配合比设计计算实例	109
8.8 本章小结	109
第 9 章 基于级配碎石过渡层的沥青路面结构力学分析	111
9.1 选取级配碎石过渡层材料力学参数	111
9.2 选取级配碎石过渡层计算参数	112
9.3 级配碎石过渡层计算结果分析	114
9.4 典型级配碎石路面结构推荐	118
9.5 级配碎石配合比设计方法	120
9.6 试验路级配碎石混合料配合比设计	121
9.7 级配碎石混合基层路面结构与施工控制	124
9.8 本章小结	126
第 10 章 基于寿命成本的沿海地区高速公路维修方案优化研究	127
10.1 我国现行规范对沥青路面性能的评价	127
10.2 沥青路面评价指标的分类	128
10.3 天津高速公路养护维修对策	129
10.4 基于寿命成本的沿海地区高速维修方案优化	131
10.5 沿海地区高速公路维修方案寿命成本分析	133
10.6 本章小结	137
第 11 章 沿海地区高速公路维修关键技术研究	139
11.1 沿海地区高速公路传统维修技术现状	139
11.2 软土路基化学注浆加固技术	140
11.3 采用抗滑桩与注浆综合处理失稳性路基技术	149
11.4 泡沫沥青再生半刚性基层技术	153
11.5 本章小结	161
第 12 章 结 论	163
主要参考文献	165

第 1 章 沿海地区高速公路病害精确诊断评价 及维修关键技术研究现状

1978 年底,我国一、二级公路总里程约 2 万 km,其中一级公路仅 200km。在一、二级公路建设中,基层材料主要以石灰土、水泥土为主,面层材料以薄层沥青(3~5cm)为主;设计理论以满足三级公路表面处治的双层弹性体系理论为基础;基层及面层材料谈不上设计方法,基本上是按照经验进行材料生产。在当时修建一、二级公路的过程中,由于技术落后,沥青路面“当年修当年坏、一年修两年坏”,路面损害面积超过 20%,有的路面尚未交付使用就彻底返修。1980 年底,针对极早破坏问题,为了提高路面质量,交通部公路科学研究所完成了“高等级公路路面修建技术的研究”工作,该研究成果为我国半刚性基层沥青路面结构的广泛应用奠定了基石,使得半刚性材料由“一个石灰剂量到处用”,进入了系统设计阶段。经过北京、广东、黑龙江及广西四条试验路验证,对半刚性材料的路用性能有了更加明确的认识。

随着“高等级公路半刚性基层沥青路面成套技术”(交通部公路科学研究所 1991 年完成,研究成果获国家科技进步二等奖)、“半刚性基层沥青路面典型结构的研究”(1994 年完成)及“京津塘高速公路半刚性基层沥青路面的成功应用”(1991 年完成)研究工作的完成,半刚性基层沥青路面设计已成为我国高等级公路主体路面结构形式,“强基薄面”的设计理念初步形成。在此基础上修订了《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—1997),基本上成为半刚性基层沥青路面设计规范。半刚性基层沥青路面的成功应用,有效地解决了当时的路面承载能力不足及水稳性和冰冻稳定性的问题,尤其是与柔性路面相比,节省了大量的建设资金。

同时,随着《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—1997)、《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ 032—1994)、《公路沥青路面基层施工技术规范》(JTJ 034—1993)以及《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057—1994)的颁布实施,柔性基层沥青路面除了在早期修建的几条高速公路得到应用外,以后修建的 95% 的高等级公路都采用了半刚性基层沥青路面结构。从 20 世纪 90 年代中期开始至今,我国高速公路建设速度一直保持高速增长,从半刚性基层沥青路面全面应用开始,1996 年高速公路里程 4771km,2010 年高速公路里程 7.1 万 km,并且位居世界第二。15 年左右的时间,我国已达到了美国 40 年的建设里程。在 15 年的建设过程中,我国经济一直保持高速增长,交通量的增加远远超过了预估水平,而且超载相当严重。

15 年来,一直用半刚性基层沥青路面,虽然我国对半刚性基层沥青路面的研究很深入,但对半刚性基层的某些特点并未全面认识,比如对半刚性基层沥青路面的裂缝问题采取了回避态度,对半刚性基层沥青路面寿命问题的认识更少之又少,在 15 年之内想要有效解决这些问题非常困难,加上形成的惯性思维,使得半刚性基层的优点被过于放大而缺点却被隐藏起来,导致我国高速公路路面结构过于单一。到 1999 年后,以半刚性基层沥青路面为代表的高速公路的路面早期破坏问题凸显,水损害、车辙和开裂等问题暴露出来,2003 年后,以寿命短为代表的破坏问题更加明显。

1.1 研究意义

我国东部沿海地区软土分布广泛,特别是海相软土分布量大。海相软土一般具有高含水率、高压缩性、高孔隙比、低强度、低渗透性、高灵敏度、高有机质含量、流变性能显著等特点。另外,路基填土多为黏土及粉质黏土,模量较低,受早期施工质量及设计水平的影响,很多高速公路通车几年就产生了早期破坏,同时沿海城市多为经济发达地区,承接较大的过境及货运港口运输的作用,交通量较大且重载车较多,这也加剧了病害的发展。目前,规范中的常规检测技术及评价方法对由于基层、路基等问题诱发的病害尚不能实现成因的准确分析,导致维修决策与技术针对性不强、寿命成本不合理。因此,研究结合沿海地区高速公路的现状,针对沿海地区高速公路病害精确诊断、沿海地区高速公路维修后劣化模型和基于寿命成本的维修方案优化开展研究,提出沿海地区高速公路病害精确诊断及维修关键技术,在国内外进行推广应用,具有重要的理论意义及应用价值,将会产生巨大的经济、社会和环境效益。

(1) 沿海地区高速公路病害检测及精确诊断技术研究

针对沿海地区高速公路路基路面病害缺乏可操作性强的成套诊断技术的现状,将多功能路况检测车、自动弯沉仪、落锤弯沉仪、地质雷达、动力锥贯入仪、瑞雷波等快速无损检测设备以及钻孔取芯等勘察手段集成应用到路基路面病害检测中,通过多种检测手段的优势互补和有机结合对路基路面使用性能、病害行为特征、结构强度、结构完整性、交通荷载等多项指标进行综合分析,建立各检测指标对不同损坏程度的路面、基层、路基的评估标准,实现路基路面病害程度和成因的精确诊断,并具有实际操作性和结果可靠性。

(2) 沿海地区高速公路路面强度劣化研究

沿海地区高速公路路基性能、路龄、路面交通量等导致路面表现出不同特征的病害。随着道路的实际使用性能和研究人员的调查研究,发现在沥青路面结构服务期内,设计弯沉指标及路基顶面压应变、沥青层底部拉应变指标均不能真实地反映实际道路的破坏情况,即弯沉较小的路面不一定具有较高的使用性能,弯沉较大的路面也可能具有良好的使用性能。此外,相关规范对道路通车或维修后路面弯沉的变化规律描述不够充分。因此,研究路面维修后弯沉变化规律显得十分必要,得到弯沉变化规律将对路面性能劣化及路面维修指导具有重要的应用价值。

(3) 沿海地区高速公路沥青路面使用性能衰变方程研究

路面使用性能评价和预测历来是交通管理部门十分重视的问题。路面在使用过程中,由于承受自然因素和车辆荷载的不断作用,并伴随着路面材料的持续老化,会产生各种各样的破损,路面使用性能也随时间逐渐降低。当路面的使用性能降低到某一程度时,就必须采取相应的养护和改建措施,以恢复或提高其使用性能。为选择最佳养护对策,公路养护管理部门要及时准确地了解路面的使用状况,做出科学的评价及预测,才能在适当的时刻选择适宜的养护措施,这就要预估其性能随时间演化的规律。因此,对沥青路面性能评价与预测进行深入研究,可以为路面养护决策提供依据。

(4) 基于寿命成本的沿海地区高速公路维修方案优化研究

根据精确诊断成果及路面性能退化模型,利用经济分析手段中的现值分析法,对沿海地区高速公路不同维修方案进行寿命成本分析,得出最适合沿海地区高速公路维修的最优方案,使高速公路的维修养护更具针对性和经济性。

(5) 维修关键技术研究

针对沿海地区高速公路特有的软土路基不均匀沉降、路基路面失稳性开裂和大量半刚性结构层废料三种典型病害,提出软土路基注浆加固技术、采用抗滑桩与注浆综合处理失稳性路基技术、泡沫沥青再生半刚性基层技术共三项内容,这三种新技术从维修效果、施工速度、养护投资、交通压力以及社会环境效益等多方面综合考虑,多种维修手段合理选择,综合利用,标本兼治,能够大大提高维修效果,弥补单一维修技术的不足,并缩减施工周期和降低维修成本,有效改善路用性能,延长道路使用寿命,具有显著的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 国内外检测技术研究现状

(1) 多功能路况检测车

国外的第一辆路面破损自动检测设备是 20 世纪 60 年代诞生的,当时就开始利用车载 16mm 摄像机的摄影车来采集路面破损图像信息。至今,国外的路面自动检测技术大致经历了四代,第一代和第二代检测技术是基于摄影技术的,以法国的 GERPHO 系统、加拿大的 ARAN 系统和日本的 Komatsu 系统为代表,其关键技术是利用摄像机和定位系统实现图像数据的同步采集;第三代快速检测设备是基于数字摄像技术的;第四代快速检测系统是基于线结构光检测技术的,以美国 ICC 公司生产的多功能路况检测系统为代表,它在路面破损、车辙检测、路面照明以及图像识别方面跨出了很大一步,该系统的主要技术采用的是线结构光扫描技术,使采集的图像数据比较稳定,提高了检测系统的稳定性和检测精度,其车辙检测系统采用的是当前最顶尖的激光三维检测技术,检测精度可达 1mm。

我国从 20 世纪 90 年代中后期开始陆续引进路面破损自动检测系统。为了满足公路养护管理工作的需求,国内一些企业及科研院,如武大卓越科技有限责任公司、交通部公路科学研究院和江苏沪宁高速公路股份有限公司等通过引进设备以及先进技术,开始了自主开发路面检测技术,并获得了巨大的发展。

目前,有些研究机构如南京理工大学,从 2000 年开始对相应的设备和算法进行了深入的研究,并取得了阶段性的成果。2002 年 11 月, N-1 型路面状况智能检测车正式通过鉴定;2004 年 11 月 23 日, JG-1 型路面状况智能检测系统正式通过交通部技术认定,该系统是由南京理工大学的贺安之、贺斌、徐友仁、贺宁等共同研制的;2006 年 9 月,东南大学研制出亚普勒斯车辙仪;同年,长安大学通过对多路激光传感器进行研究,研制出一种路面车辙激光检测系统;武大卓越科技有限责任公司以武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室为技术依托,于 2004 年成功研制了 ZOYON-RTM 智能道路检测车。多功能路况检测车及其数据处理工作站如图 1.1 所示。

(2) 雷达物探检测技术

1975 年第一个商用探地雷达系统首次问世,20 世纪 80 年代,便有学者开始利用探地雷达来探测土壤及土层调查。近年来,探地雷达的设计越来越方便轻巧,性能、解析度以及速度上有了显著的改善,也促使探地雷达成为应用于各领域的高效率的无损检测法。1991 年前后,美国联邦公路局对探地雷达在道路工程中的应用进行了深入研究,在分层厚度、覆盖脱黏、路基内空洞探测方面获得成功。1994 年, W.M.Kim Roddis 等人对美国堪萨斯州

的 11 种不同种类的道路,利用探地雷达进行了分层探测,与钻孔取样结果相比,偏差仅为 $\pm (5\% \sim 10\%)$ 。地质雷达物探如图 1.2 所示。

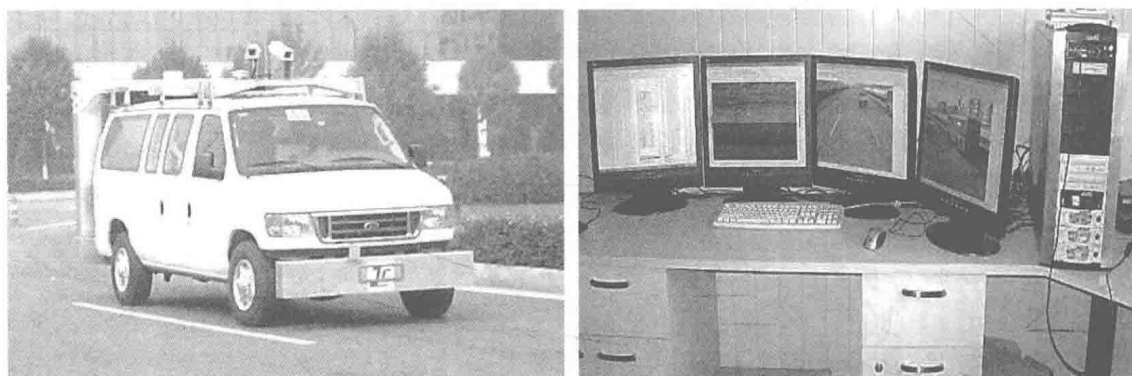


图 1.1 多功能路况检测车及其数据处理工作站

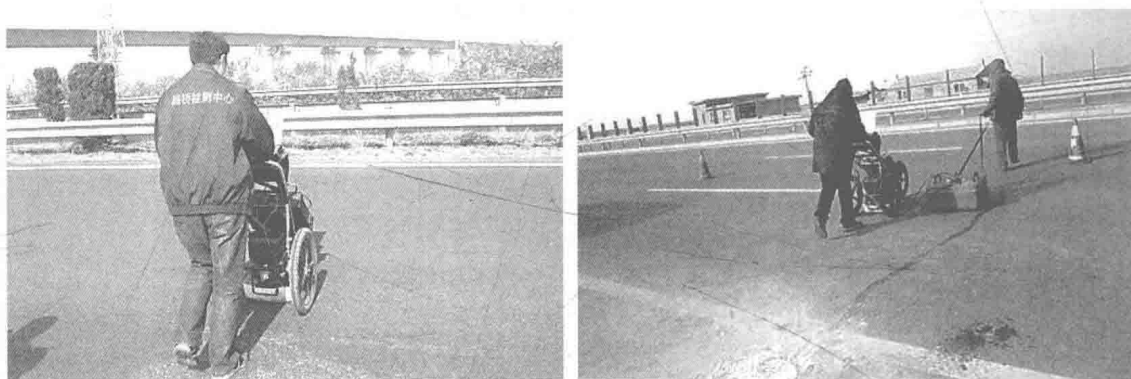


图 1.2 地质雷达物探

中国地质勘察技术院的牛一雄等人用探地雷达对西安—宝鸡高速公路进行了质量检测;1999 年,吕绍林利用 SIR-10H 型探地雷达系统对益常高速公路进行了检测试验,对结构层中高频电磁波的传播特征进行了研究,并通过大量的现场检测试验对雷达技术参数进行了分析。

(3) 落锤式弯沉仪及模量反算

20 世纪 70 年代后期,丹麦和瑞典首先研制成落锤式弯沉仪(FWD),80 年代以后,美国、英国和日本等相继引进和仿制了这种弯沉仪。目前,市场上主要有三种型号的 FWD: Dynatest(丹麦)、KUAB(瑞典)和 Phoeix(丹麦)。自 80 年代初以来,FWD 在国际上得到日益广泛的应用,至今已有 50 多个国家和地区引进了 FWD。美国联邦公路局经过对比分析,确认 FWD 是较理想的路面承载能力评定设备,并应用于美国战略公路研究计划 SHRP 的研究工作中,采用 FWD 来评价 2000 多条实验路的强度,根据 FWD 的测试数据来反算动回弹模量,作为研究室内动回弹模量的测试方法的基准。壳牌路面设计手册也已将 FWD 的应用纳入其中。落锤式弯沉仪及其数据处理系统如图 1.3 所示。

20 世纪 70 年代 FWD 引入路面结构评价以来,为了通过 FWD 的实测弯沉盆进行路面结构承载能力的评价,路面模量反分析问题引起了路面工程界的广泛关注,模量反算也就成为目前路面工程研究的热点之一。①美国德州运输学院的 F. HScriver(1968)等人采用分析法首次提出了 FWD 弯沉盆反算模量的方法,并编制了反算的诺漠图;②丹麦工程大学的 Ullidtz 等人(1978)根据 Odemark.N 的假设,采用当量层的方法反算路面模量;③1980 年,华盛顿州交通厅开发了 BISDEF 和 CHEVDEF,这些程序都是基于多层弹性理论

体系的迭代方法；④1988年，德州交通厅的 Uzah 等人开发了基于数据库搜索法的 MODULUS 程序；⑤唐伯明（1990）基于理论分析和试算迭代相结合，提出了有效避免反演结果不唯一的改进连续迭代法；⑥倪富健等人（1994）基于弹性层状体系理论，以弯沉数据库和优化法相结合的方法，编制了模量反算程序 DMBM；⑦黄晓明（1996）首次使用了均方根误差最小的目标函数，从而将实测弯沉盆反算模量的过程归结为一个最优化的过程；⑧王复明（1996）针对落锤式弯沉仪（FWD）的动力荷载的时程曲线，建立了路面材料性能时域反演的加速收敛算法。



图 1.3 落锤式弯沉仪及其数据处理系统

（4）瑞雷波

1887年，Raylei 首先发现了瑞雷波的存在，并揭示了瑞雷波在弹性半空间介质中的传播特性。1982年，日本 VIC 株式会社研制出稳态法的 GR-810 型佐藤全自动勘察机，用以解决工程地质勘察问题。1983年，Stoke II and Nazarian 等提出了所谓的面波频谱分析方法（SASW），通过分析面波的频散曲线建立近地表的 S 波速度剖面。1999年，夏江海（Xia J）博士等人提出了瑞雷波反演估算近地表剪切波速的新方法，对瞬态瑞雷波法进行了十分有效的改进。瑞雷波法测量如图 1.4 所示。

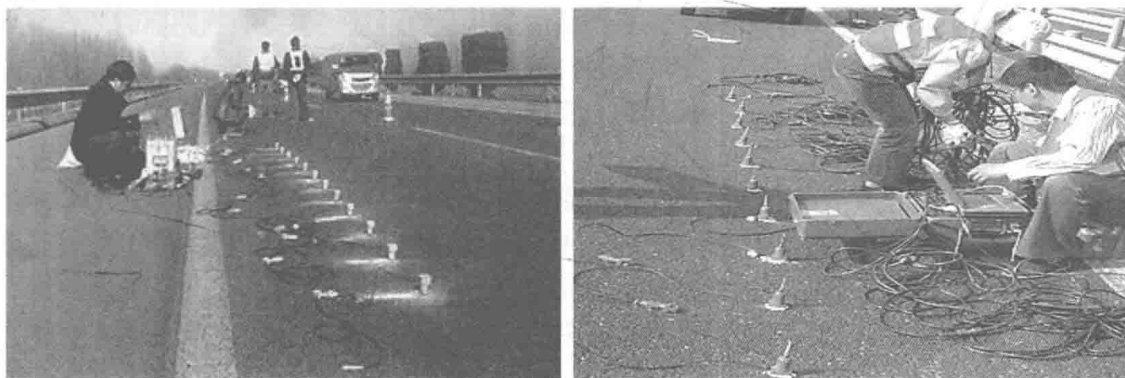


图 1.4 瑞雷波法测量

我国瑞雷波法工程勘探的研究始于 20 世纪 80 年代中期。1987 年，铁路系统首先引进 GR-810 型面波勘探，用以解决铁路和公路路基的勘探问题。1988 年，吴世明等人采用瞬态瑞雷波法测试土层波速，随后展开了一系列研究；1996 年，出版了专著《土介质中的波》，书中对瑞雷波勘探方面的一些问题进行了系统阐述。1989 年，杨成林等人利用 TERRALOG 浅震仪配国产可控震源以及自制的附属设备，组成了稳态瑞雷波法勘探系统，进行了第四纪地层划分、地基处理效果评价等方面的研究。1991 年，铁道部第四勘测设计院朱裕林等利用 GR-810 型仪器展开了地基勘察、地基加固效果评价、人工洞穴以及岩溶洞穴探测的

工作。1993 年,刘云帧等利用自制的多道地震数据采集处理系统把瞬态面波的深度由 10m 提高到 30 m,条件好的情况下可以达到 50m 以上,基本能够满足岩土工程勘察的需要。

(5) 其他

此外,路基路面检测技术中关于路面结构强度检测还有贝克曼梁法、自动弯沉仪法,激光弯沉仪法;关于路基强度的检测中除地质钻探外,还有土基承载板法、DCP 动力锥贯入仪法等,限于篇幅不一一列举,如图 1.5 和 1.6 所示。



图 1.5 路基钻探



图 1.6 DCP 现场检测

国内外路基路面病害诊断过程中,往往采用单一检测手段或多种检测手段结合的方法对路基路面病害进行诊断,且尚未形成病害精确诊断体系,传统方法中无损检测设备的应用较少,不宜进行大规模养护工程推广。沿海地区受土质、交通及施工水平的影响,由基层及路基引起的病害较为普遍,针对病害成因分析的检测手段及合理选择首先应对路面破损、路基病害以及两者相关性选定对应判据并进行初步评价。

一般检测方法难以发现道路基础内部的病害隐患;以钻孔取芯、地质钻探等为代表的传统检测方法路上作业危险性大,根据规范随机选点、钻孔取样,进行分析处理,从而获得道路质量状况参数。这些常规方法由于随机选择测点,因而检测结果随机性大、检测深度有限而难以发现道路基础内部病害隐患,通常只有等到路基病害影响到路面时才会被发现,而且检测效率低、安全性差、影响交通,对公路具有很强的破坏作用。因此,单一的检测方法不能预先发现和查明路基内部病害隐患的分布状况和严重程度,难于监控和评估路基质量状况,并有针对性地制定处理措施,只能头痛医头、脚痛医脚,难以根治病害。

在高速公路飞速发展的今天,现代化路面检测技术也日趋成熟。目前,国内的检测技术包括多功能路况检测车、自动弯沉仪、横向力系数测试车、FWD 落锤式弯沉仪、雷达物探检测技术等。但是,这些技术在检测手段和检测指标上都有各自的缺点和不足。另外,由于缺乏有效的路面和路基病害定量化检测手段,目前公路病害的决策主要由养护技术人员根据路面破损状况,结合实际工作经验进行,已远远不能满足我国高速公路发展的需要。因此,应在分析各检测设备的适用类型、检测精度等特性的基础上,综合采用多种有损和无损检测设备进行路面病害的联合检测。

1.2.2 路面疲劳性能国内外研究现状

自 20 世纪四五十年代,Heveem 发现沥青路面的疲劳破坏并建立了荷载作用下路表弯沉与路面疲劳寿命的关系以来,现象学方法一直是研究沥青混合料疲劳性能的主要方法。俄亥俄州大学应用断裂力学的概念,从裂纹的扩展规律出发来研究疲劳性能。Heukelom 认

为,疲劳现象可以能耗理论进行分析和解释。Monismith, vanDijk, Pronk 等相继采用能量法来研究沥青混合料疲劳特性。Chaboche, Wang, Lemaitre 等分别提出了不同的考虑应力幅影响的疲劳损伤演化模型。

在国内,周志刚采用 Chaboche 的疲劳损伤演化模型分别对直接拉伸、悬臂梁弯曲、三点弯曲和往返轮载 (APA) 等沥青混合料疲劳试验进行了损伤分析,针对不同的试验方法建立了相应的疲劳损伤模型和疲劳损伤计算方法。葛折圣等对 Alliche.A 和 Francois.D 提出的水泥混凝土疲劳损伤模型进行了修正,并采用修正模型进行了疲劳寿命预测,取得了较好的效果。哈尔滨建筑大学王绍怀和张肖宁利用唯象损伤力学方法研究了沥青混合料疲劳和蠕变试验结果间的相互关系,建立了运用劈裂蠕变试验方法预估沥青混合料疲劳破坏的经验方法。同济大学张婧娜也进行了类似的研究。

综上所述,对沥青混凝土路面疲劳的研究尚不够全面,大多停留在室内试验和理论研究上,对道路实测数据的调查分析还不够,理论与实际结合不够紧密,导致研究结果较复杂、实际应用较困难。因此,对路面疲劳性能有待进一步深入研究,路面检测指标如弯沉等对疲劳性能的影响还有待进一步明确。

1.2.3 沥青路面使用性能衰变规律国内外研究现状

国外关于路面使用性能的研究开始得较早,1962 年 Caray 和 Irick 首次提出了路面使用性能概念;到 20 世纪 60 年代初期,美国国家公路与运输协会 (AASHTO) 提出了路面使用 (服务) 性能评价指标,建立了现时服务能力指数 PSI 路面评价模型。随着科技与技术的发展,许多国家和国际机构先后建立了不同类型的路面评价模型,包括加拿大的行驶舒适性指数 (RCI) 评价模型、日本的路面养护质量评价指数 (MCI) 评价模型和美国军事机构开发的路面状况指数 (PCI) 评价模型。上述路面评价模型包含了多变量模型和单参数模型,共同的特点是将客观数据与标准统一的评价尺度建立联系,利用统一的标尺评价不同的路面损坏。

我国公路路面使用性能评价理论体系的建立起步较晚,“七五”期间,由姚祖康教授主持的“七五”国家重点攻关项目,根据交通量、路面的使用性能、路面破损和路面的结构承载能力四个方面来综合评价路面的使用性能,并在此基础上建立了 CPMS;潘玉利博士随后提出了基于回归分析的路面使用性能评价模型;上海同济大学孙立军教授建立了能够定量描述各种衰变模式的路面使用性能的标准衰变方程,该方程将复杂的路面使用性能衰变过程通过一组简单的回归常数 (α , β) 表示出来,方程简单,可移植性好;王茵、胡昌斌等人利用多元回归理论建立了主观评价同客观数据之间的回归模型;长安大学蒋红妍将物元分析方法应用于路面使用性能评价中;近 20 年来,交通部陆续颁布了一系列的标准和规范,以指导和规范我国公路路面使用性能评价体系。

由于国内外公路在施工、管理、维护和交通量等方面存在差异,国外路面使用性能模型不能很好地表征国内公路路面使用性能,国内关于路面使用性能的研究往往是基于特定的地理位置、交通、环境以及地质条件等进行的研究,受地域影响大,因此国内现有的路面使用性能模型难以全面、准确地评定软土、盐渍土分布广的沿海地区高速公路路面使用性能。同时,沿海地区由于经济发展迅速,高速公路交通流量大、汽车轴载重、交通渠化明显、行车速度快等原因,导致了沿海地区公路路面使用性能与国内其他使用性能模型存在差异性。

为了更好地保持沿海地区公路的良好运营状况,进行沿海地区公路路面使用性能研究,已经成为目前亟待解决的重要课题。

1.2.4 半刚性基层沥青路面现状及分析

我国改革开放 30 多年来,公路发展速度最快、规模最大。1984 年 4 月,国务院正式批准建设我国第一条京津塘高速公路,1988 年 10 月,沪嘉高速公路建成通车,高速公路发展异常迅速。截至 2013 年,全国高速公路通车里程已达 10.4 万 km,位居世界第二。根据我国公路交通规划,预计 2020 年高速公路通车总里程将增至 15 万 km。我国用短短的 20 年时间走完了发达国家半个世纪的发展历程。我国高速公路在取得了数量上的飞速发展的同时,在质量的问题上也存在着很大的隐患。高速公路作为国民经济的大动脉,其行车舒适性、抗疲劳程度、抗冻性能、防雨水冲刷能力及抗重轴载的破坏能力等,无疑是人们关注的重心,尤其是对行车质量的保持程度,始终是公路使用者和建设者关心的热点。而这些性能的实现和保持无疑与路基路面主要受力层及其结构转换层息息相关。我国通车建成的高速公路中早期损害现象的普遍出现,固然有交通量、重轴载及使用环境等因素,但公路建设质量无疑是其中最关键的因素。针对这一问题,国内有不同的看法,有很多人认为是路基施工质量不好,由路基不均匀沉陷造成路面过早开裂、变形;也有人认为是路面施工质量不能适应使用要求,造成提前出现纵横裂缝、交叉裂缝及龟裂现象。但是,在许多路基和面层设计施工质量都很好的路段,路面早期损坏现象依然很多,这就说明路面基层质量好坏关系重大。在建成的高速公路沥青路面中半刚性基层沥青路面是我国的主要形式。据统计,我国 90% 以上高等级公路的沥青路面基层、底基层采用半刚性材料。而半刚性基层的最大特点是板体性强,有很高的承载力,且可就地取材,造价经济。

半刚性基层沥青路面在我国有一个长期的历史发展过程:在 20 世纪 60 年代,沥青路面基层材料采用的是石灰稳定土;到 20 世纪 70 年代,水泥、石灰、粉煤灰等无机结合料稳定粒料成为最普遍的基层,进入 20 世纪 80 年代以后,在“强基薄面”思想的指导下,半刚性基层沥青路面建设发展;近年来,人们逐步认识到半刚性基层沥青路面在使用过程中的早期损坏现象日益严重,即建成不久沥青路面就发生了车辙、坑槽、网裂等不同程度的早期破坏,其中大多为水损害或伴随疲劳而产生的损坏。另外,半刚性基层沥青路面普遍达不到路面设计要求的设计年限,而实际上,我国沥青路面一般 3 年小修,7~8 年大修,大修既对沥青面层进行维修,还对基层甚至底基层进行维修,维修费用很高,而且造成交通拥堵等不良社会影响。分析其早期病害的原因,一方面是由于施工质量不到位造成的,这类损坏通常与管理上的抢工、使用的原材料质量控制不严、路基压实不够等施工因素有关,可以通过加强施工管理及质量控制得以改善;但更为重要的是,半刚性基层沥青路面结构本身存在温缩及干缩开裂不可避免、不耐冲刷,其强度及模量在反复荷载作用下随时间衰减、对重载交通的敏感性高等固有特性未引起人们足够的重视。

随着半刚性基层在高速公路的长期建设与研究,对它的固有缺陷已有了深刻的认识。但是,由于现有规范的基层结构单一,设计单位在选择基层结构类型时,即使参照国外或国内零散的试验路段试验数据,也因其系统性差,无法对比地择优选。大量国外的路面结构设计及使用年限一般达到 40 年,长寿命路面设计年限可以提高至 50 年。国外重载交通、公路等级越高,越倾向于采用柔性基层沥青路面,在轻、中等交通水平才采用我国道路所推荐的半刚性基层沥青路面。大量国外路况的调查表明,没有像我国半刚性基层沥青

路面一样出现大量结构性开裂和车辙损坏。我国幅员辽阔,各个地区气候、地质条件、交通组成等存在着差异,而我国当前高速公路的结构形式过于单一,很难适应全国范围内各个地区的使用要求。

目前,国内有些省市开始考虑适当地发展柔性基层、贫混凝土基层沥青路面结构形式,并得到合理的使用。两种类型的基层结构初期投资造价可能会增加,但可以解决半刚性基层沥青路面结构带来的一些问题,能够有效地避免半刚性基层沥青路面结构早期病害的发生,所增加的投资可以从维修养护费用中节省返回,实现全寿命成本经济效益,形成建设—使用—维护全寿命周期成本核算的理念。

因此,我国高速公路已经开始铺筑试验路,探讨使用可行性,改进单一沥青路面结构的问题。解决好我国高速公路半刚性基层沥青公路早期破坏及使用年限短的问题,就必须深入了解半刚性基层沥青路面在行车作用下的破坏状态及深层次的破坏原因。只有通过认真仔细的调查和深入的分析,才能深入了解破坏原因并针对性地提出解决措施。本项目将基于高速公路病害调查结果,对高速公路水破坏、车辙破坏、裂缝破坏等方面路面病害现象及原因进行分析,其研究成果可推动天津市交通基础设施建设事业的发展,并为其他省市的高速公路路面早期病害防治提供有益的经验,具有巨大的应用前景。

1.2.5 国内外高速公路维修决策及经济分析发展现状

寿命周期成本分析主要针对项目投资决策阶段,寿命周期成本管理则是控制项目从决策设计到报废的整个寿命周期各阶段的成本,以公路养护工程总效益为出发点寻求最佳方案,以实现寿命周期成本最小化的目标。

首先,美国进行了路面养护管理技术的相关研究,提出了路面使用性能的概念,对路面实际状况进行了科学的评价,为养护决策提供了基础;随后,路面使用性能评价体系也得到了较大的发展,养护对策呈现多样化趋势,针对不同路面损坏,可以制定出多种比选方案;最后,基于路面使用性能、经济效益的决策指标体系得到了发展与完善,能够方便合理地制定养护规划,选择出最优养护对策。

Fazil T.Najafi 提出了基于费用—效益分析的五步分析法,即路况采集、路网信息汇总、养护计划费用、养护优先次序、养护实施方案。

Liu Fengxian 在论文中指出路面管理系统主要是研究路面养护费用与路用性能指标之间的关系,使费用小与性能高之间形成一个平衡,它对提高公路养护工程投资效益和投资费用管理效益有着很大的作用。章静敏等对公路养护进行费用—效益分析,以效益费用比(B/C)、净现值(NPV)和内部收益率(IRR)3个主要经济评价指标对路面养护的投资做定量的分析,进而对我国公路养护所投入的资金和其养护状况做出经济评价。

何兆益认为,在分析沥青路面养护改建对策时可以采用系统分析方法,即层次分析法,利用该方法可以得到基于单一指标和考虑各指标间不同权重分配的路面养护决策,在考虑单一指标时,可以采用孙立军给出的隶属函数。

周传斌从价值工程和系统工程两个角度出发,分别对公路养护效益如何评价进行了探讨,提出了公路养护效益值的计算方法。

以上的养护维修决策考虑因素不够全面,没有充分考虑维修资金限制、贴现率对维修费用的影响等因素,同时对于维修成本分析中的预期寿命主要依赖经验的总结,对于结果分析势必产生较大影响。基于此,本研究拟针对高速公路沥青混凝土路面建立强度、路面

使用性能的退化曲线得出维修后的寿命成本,用实例进行寿命成本分析,对高速公路科学地进行养护维修具有重要意义。

1.3 主要研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

本研究采用数据分析拟合与试验研究相结合的方法,以天津地区高速公路为例,从高速公路发展概况、病害特征分析、病害精确诊断技术、道路强度及使用性能衰变规律、道路维修寿命成本、维修关键技术等方面进行系统的研究,主要研究内容如下。

(1) 沿海地区高速公路典型病害特征研究

首先分析沿海地区高速公路软土特性,同时以天津地区高速公路为例总结高速公路里程、新建及养护路面结构的发展情况;然后对天津高速公路的交通发展特性进行研究,在交通荷载及软基情况下对病害特征进行研究,得出沿海地区高速公路典型病害的种类、程度、比重及主要成因。

(2) 病害检测及精确诊断技术研究

研究中,拟先从病害调查开始,结合历史维修历史,运用一般检测方法确定出研究路段;然后采用钻孔取芯、雷达、FWD、瑞雷波、DCP 等方法,对各路段内的路面、基层、路基进行检测分析,综合这些检测技术,从不同层面对路面、基层、路基的状况进行研究,最终归纳出各检测指标对不同损坏程度的路面、基层、路基的评估标准,综上研究最终形成综合互补的病害精确诊断技术。

(3) 沥青路面弯沉演化模型研究

通过对天津地区多条典型高速公路交通量的分析调查,研究各条高速公路标准轴载次数的变化规律。选定典型路段,结合累计轴载次数,通过数据回归分析,得出路面弯沉随累计标准轴载次数的演化规律。拟通过研究成果来进一步补充路段精确诊断过程中路面性能变化的内在机理,同时为路面其他指标的衰变提供科学依据,为路面维修时机及维修方案的选用提供参考价值。

(4) 路面使用性能衰变方程研究

在国内外关于路面性能研究的基础上,结合沿海地区特点,以时间为变量,考虑交通荷载、结构强度和面层厚度影响,对沿海地区沥青路面使用性能衰变方程进行研究。拟利用回归分析法、空间代时间法和数理统计方法,将交通荷载、结构强度和面层厚度对使用性能衰变模型影响进行精确表达,明确参数的物理意义。

(5) 基于振动成型方式的半刚性基层材料配合比与路用性能研究

在认识半刚性基层结构及材料设计现状与不足为前提,开展半刚性基层原材料实验分析和半刚性基层材料实验分析,建立水泥稳定碎石混合料抗裂特性评价方法,进行振动成型方式水泥稳定碎石配合比优化,开展振动成型方式水泥稳定碎石混合料设计及路用性能对比研究。

(6) 半刚性基层材料抗疲劳特性及其性能关联分析研究

基于半刚性基层材料疲劳分析基本理论,进行半刚性基层材料的疲劳试验,开展半刚性基层材料疲劳方程的建立与修正,进行半刚性基层材料疲劳特性对比分析和半刚性基层水泥稳定碎石抗疲劳性能关联分析研究。