



上海市科技专著出版基金资助

孙立军 等 著

沥青路面结构行为学



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



上海市科技专著出版基金资助

孙立军 等 著

沥青路面结构行为学

学园区图书
藏书
LIC

$$PCI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{y} \right)^\beta \right] \right\}$$

$$\varepsilon_r = a \cdot N^{-b}$$

$$\sum_{i=1}^n T^{\xi} \left(\frac{N}{d + eV^p} \right)^{\lambda} \left(\frac{r}{[r]} \right)^{\eta}$$

同济大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了沥青路面结构行为学的主要学术思想、体系和研究过程,阐述了沥青路面的温度场分布、荷载作用下的路面力学响应、路面损坏特征与损坏机理、路面结构行为演变过程与描述方法、全寿命费用分析、基于性能的路面设计方法、路面分析的桥渡原理、路面变形分析方法以及“按性能设计,按力学验算”的方法和过程,阐述了基于数字图像分析的沥青混合料均匀性分析方法,最后讨论了需要进一步研究的问题。

本书可供从事公路、城市道路和机场工程的研究、设计、施工和养护管理的相关人员以及高等院校相关专业的教师和研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面结构行为学/孙立军等著. —上海:同济大学出版社,2013. 05

ISBN 978-7-5608-5101-3

I. ①沥… II. ①孙… III. ①沥青路面—路面结构—行为学 IV. ①U416.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 236974 号

沥青路面结构行为学

(本书出版由上海科技专著出版资金资助)

孙立军 等著

策划编辑 杨宁霞 责任编辑 季 慧 马继兰 助理编辑 陆克丽霞

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 59.25

字 数 1 478 000

版 次 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5101-3

定 价 198.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

当我们过去的知识无法解释我们所遇到的问题时，
与其在纷乱的现实中深情留恋和简单修补我们曾经奉为经典的、零散的经验认知，不如尊重内心的感悟去洞察和把握路面世界完整而优美的本质规律，并使对她的表达能够反映我们思想的高度。

路面世界是如此复杂，使
我们一直看不清前进的道路。但茫茫迷雾中似乎总有一团模糊的光影引导着我们的追求，虽然若隐若现，忽快忽慢，却始终令人难以割舍，萦绕于心，不见真相，断难释怀。

前 言

《沥青路面结构行为学》(原书名为《沥青路面结构行为理论》)首版至今已经十年,而我们起始于 1991 年的关于沥青路面结构行为的研究也伴随着时代的蓬勃发展持续了二十多年。二十多年来,我国公路建设突飞猛进,路面技术日新月异,但路面理论的进展却举步维艰。交通量和重载、超载现象的激增催生并加剧了对新技术的需求,改性沥青、SMA、旋转压实、长寿命路面、高模量沥青和温拌沥青混合料等技术被密集地引入我国,一时间莫衷一是、乱花迷眼。在此期间,为了应对重交通的挑战,各国都开展了大量的研究,尤其是美国于 1993—1994 年和 2003—2004 年前后推出的 SHRP 研究成果和 ME 设计方法,产生了广泛的影响。但这些面向重交通的成果和方法在理论上却只是传统轻交通路面的简单延伸,并且仅适用于采用常规沥青混合料的路面分析,无法考虑大量出现的新材料和新技术,无法指导路面结构组合设计,不能反映路面的使用性能,对于实践中迫切需要解决的重交通带来的新问题帮助十分有限。吊诡的是,虽然美国的这些成果在理念上一直引领着我国的沥青路面研究,但上述那些在我国普遍使用、成效明显的新技术却无一例外地起源于欧洲,而不是美国;这种设计理论与有效技术相分离的现实令人深思。如何构建新的理论以应对越来越普遍的重交通,如何在设计中考虑层出不穷的新材料和新技术,如何将新技术、新材料和新理念融为一体,是我们面临的重大挑战。

正是这样的挑战促使我们开展这项研究,并成为我们将这一研究坚持了二十多年的主要驱动力。现实是如此繁杂、矛盾,使我们始终看不清前进的道路,但茫茫迷雾中似乎总有一团模糊的光影引导着我们的追求,虽然若隐若现,忽快忽慢,却令人难以割舍,萦绕于心,不见真相,终难释怀。一些前辈的鼓励振奋了我们时常倦怠的信心,一些同行的质疑、争论帮助我们不断对阶段成果进行改进;阶段成果的陆续成功应用让工程界看到了理论研究的价值,愿意对我们的基础性研究鼎力支持,令人感动;对困惑问题的反复思考、顿悟、重构、确认、求精和等待验证的崎岖过程帮助我们去粗存精,优化对概念的理解并使之精细化。漫长岁月中的艰辛、坎坷、无奈、沮丧和偶有的乐趣如影随形,可谓五味杂陈、难以言表。至 2001 年底,我们汇总了 1991—2001 年间的研究,出版了关于沥青路面新理论的初步成果;至 2005 年,已经形成了较为清晰的理论体系,但其中变形分析和车辙控制的内容尚未完成。之后,在国家 863 项目和一些行业、地方科研项目的支持下,我们完成了路面变形分析和车辙控制的系统研究,使得本书的理论成果趋于完整。

本书的出版标志着我们起始于 1991 年的这一轮探索和研究接近尾声(似乎也意味着下一轮探

索的起点),早期参与本研究的“新学子”大多也已成了我国道路领域的“老战士”。二十多年的坚持,使我们逐步认识到了路面这类结构的行为特点,认清了力学分析中长期存在的简单化倾向及其局限性:沥青路面是如此之复杂,以至于现代力学的常规方法在路面分析和设计中不足以反映该类结构和材料的准确特征,对实践的指导作用十分有限,这也是大量的基于力学分析的研究成果在实践中没有得到有效应用,而经验法依然起着主导作用的基本原因。要准确把握路面的行为,需要提出新的思路。

为了准确把握重交通路面的行为特点,人们对结构和材料的分析越来越精细,这使得分析中的尺度效应(这里指连续性问题)越发显著。当将路面材料看作连续性结构层时,更适合从一种宏观的角度关注其整体响应,但作为分析指标的应力应变却是微观尺度的描述。这种微观尺度的指标受到材料组成所固有的颗粒性的影响,表现出显著的“颗粒”效应(我们戏称为“量子”效应);在轻交通场合,路面材料的整体性占据主导作用,而在重交通的场合,这种颗粒效应则不可忽略。在路面性能分析中要平衡这种整体作用与颗粒效应,这单靠传统的连续体力学分析指标——不管是弹性分析方法还是弹黏塑性分析方法——来直接解决问题是十分困难的,需要提出新的指标方法和新的机制,以充分发挥力学在路面分析和设计中潜在的作用和优势。离散元法可以分析颗粒之间的作用,但离路面的宏观性能还很遥远。我们提出了“定性要正确,定量要合理”的研究准则,并建立了一种“桥渡原理”;通过这个原理,有效地屏蔽了材料颗粒“量子”效应的影响,形成了一种在路面分析中可靠地使用力学方法的技术途径,并与试验或观测结果相结合,进行合理的定量。这意味着,力学作为理性分析的手段,在路面领域更擅长作为凝炼并定量推广成功经验的有力工具,构成了一种行之有效的新的研究方法。采用这种方法,我们构思了力学分析和使用性能相结合的逻辑框架,在茫茫迷雾中摸索了一条通往光明之道,从而将宏观(路面使用性能)与微观(路面力学响应)、结构与材料、整体与局部统一了起来,使路面分析和设计从经验趋向科学。

我们的这种认识是在研究实践中逐渐形成的,并及时指导着我们的研究实践。通过大量的现场调查和研究分析,我们阐明了重交通沥青路面的损坏机理,提出了一种“双向制约”的路面设计机制,改变了传统上在路面结构组合分析时的单向的思维方式,保证了路面结构整体的均衡性和相容性;积累了大量的第一手路面性能数据,建立了路面结构行为方程,准确地反映了路面性能的演变过程;提出了桥渡原理,将结构行为方程与疲劳方程统一了起来,证明了疲劳方程只是结构行为方程的一个特例,实现了实验室试验结果与现场疲劳寿命之间的定量转换;建立了路面变形分析方法。路面结构行为方程、疲劳方程和变形分析方程形成了一个内禀自洽的整体,我们称之为

路面结构行为方程组。简单地说,“一种机制,一个原理,一组(3个)方程”反映了本书的理论核心,这是二十多年来数十名研究人员集体智慧的结晶。

本书各章的写作大纲、书稿的修改、定稿以及第1章、第5章的§5.6、第8章的§8.1、第10章(其中的模型和计算由刘黎萍协助完成)、第11章的§11.2和第14章由孙立军完成;第2章在秦健等研究成果的基础上,由孙立军补充了贾璐、郑莘莢、刘黎萍、吴建良等的研究成果;第3章由陆辉、胡小弟、李峰先后完成研究,由胡小弟撰写;第4章和第5章主要由张宏超完成研究并执笔撰写,胡小弟、杜群乐补充了一些调查资料,由孙立军整合到书稿中;第6章由刘喜平、许志军、陈子建、罗芳艳、刘黎萍完成研究,刘黎萍执笔撰写;第7章、第8章由刘黎萍完成研究并执笔撰写;第9章由鲁正兰、苏凯、刘黎萍、汤文等先后开展研究,孙立军整理撰写,其中的§9.7由刘黎萍完成;第10章的§10.4.3由李峰完成研究并执笔撰写,§10.5由胡春华完成研究和撰写,§10.6由刘黎萍完成;第11章由毕玉峰、崔鹏、刘黎萍等完成;第12章由王翼、刘黎萍、许严、王刚等完成,刘黎萍撰写;第13章由彭勇近年在张婧娜、杨宇亮和彭勇上一版研究成果的基础上开展了持续的研究并执笔撰写。

谨将本书献给所有支持我们研究的人们!同时,感谢同济大学出版社编辑们的精心审编,他们的有益建议和辛勤工作保证了本书的出版质量。

对于书中的错误、疏漏和不完善之处,欢迎批评指正;来信请寄上海曹安公路4800号同济大学交通运输工程学院,邮政编码201804,或用电子邮件发至 ljsun@tongji.edu.cn。

孙立军

2012年10月

2005 年版前言

2003 年初,同济大学出版社出版了拙作《沥青路面结构行为理论》一书。此书完成于 2001 年底,汇总了我们 1991—2001 年间的研究成果,描述了关于沥青路面新理论的初步框架。不过,由于一些关键问题的研究或验证尚在进行之中,没能在书中详细阐述,所以该书描述的理论框架还很不完整。该书阐述了目前路面研究和实践中的一些深层次问题,给出了解决这些问题的思路,但没有给出完整的理论描述和可以在实践中使用的答案。尽管如此,仍然因其全新的视角和全新的理论框架而受到同行的鼓励和欢迎。

2001 年以后,我们并没有停止对沥青路面结构行为理论的研究。在国家自然科学基金(杰出青年基金 50325825)、教育部长江学者奖励计划、交通部西部交通科技项目和上海市优秀学科带头人计划等多个课题的资助下,我们对《沥青路面结构行为理论》中尚未完成的内容进行了集中研究,在路面温度场预估、轮胎-路面接地压力测试、沥青混合料抗剪强度试验和统一路面核心方程等领域取得了进展,与原有成果相结合,形成了较为完整清晰的理论框架。

深入的研究使我们对沥青路面的复杂性有了进一步的认识和更加切身的体会,同时也使我们对目前我国重交通沥青路面上出现的一些问题有了更为清醒的认识。2004 年,美国终于以 NCHRP 报告的形式公布了人们期待已久并寄予厚望的 AASHTO2002 设计方法草案,而没有颁布正式的 AASHTO2002 设计指南,这足以说明在重交通条件下进行沥青路面设计的困难。可以说,在目前重交通条件下,我们在技术上遇到了真正的挑战。

在这期间,沥青路面界一些德高望重的前辈给了我们许多鼓励和支持,并督促我们去不断完善我们的研究;我们应邀参加了一系列学术会议并作发言,从中体会到了人们对新理论的渴求和支持。这些直接和间接的支持增强了我们继续开展这些基础性研究的信心,促使我们认真对待所从事的工作,并尽快在 2003 年《沥青路面结构行为理论》的基础上增加新的内容,使原先不够完整的理论框架清晰完整起来。

全书秉承了 2003 年版《沥青路面结构行为理论》的基本框架和技术风格,在原来 7 章内容的基础上增加了 5 章新的内容,仍然定名为《沥青路面结构行为理论》。各章的写作大纲、书稿的修改、定稿以及第 1 章、第 5 章的 § 5.6、第 6 章的 § 6.2、第 9 章的 § 9.1、第 10 章的 § 10.1~§ 10.4(其中的模型和计算由刘黎萍协助完成)和第 12 章由孙立军完成;第 2 章由秦健(2002 级硕士生)完成;第 3 章由胡小弟(2001 级博士生)完成;第 4 章和第 5 章由张宏超(1999 级博士生)完成研究并

执笔撰写;第6章由毕玉峰(2001级博士生)完成;第7章(1990级硕士生刘喜平、1993级硕士生许志军、1994级硕士生陈子建、1996级硕士生罗芳艳完成研究,2000级博士生刘黎萍进行补充整理并执笔撰写)基本保持原来的内容;第8章、第9章由刘黎萍完成研究并执笔撰写;第10章的§10.4.3由李峰(2002级硕士生)完成研究并执笔撰写,§10.5由胡春华(2002级博士生)完成研究和撰写,§10.6由刘黎萍完成;第11章先后由张婧娜(1997级博士生)、杨宇亮(2000级博士生)和彭勇(2002级博士生)完成研究,由彭勇执笔撰写。感谢他(她)们的辛勤劳动!

谨将本书献给所有支持我们研究的人们!

孙立军

2005年7月

2003 年版前言

沥青路面的研究和应用已有很久的历史,发达国家大量高速公路沥青路面的修建预示着人们在这一领域已经取得了辉煌的科技成就;同期出现的许多具有划时代意义的路面力学理论和设计方法,表明了人们已经掌握了沥青路面的关键技术。但随着交通量和轴载的不断增加,路面上越来越频繁地出现了许多难以理喻的损坏现象,人们在用自信的目光反复搜寻施工工艺过程而久无成效后,变得迷茫起来,终于转向了一直令人倍感自信的路面分析和设计理论领域——尽管这是不情愿的、不自觉的。

为了回答沥青路面实践中遇到的新问题,美国公路工作者促使美国国会拨出了 1.5 亿美元的巨额资金,于 1987 年开始实施一个为期 5 年的大规模科学研究计划,即 SHRP(Strategic Highway Research Program)计划。遗憾的是,SHRP 计划未能很好地实现其预定的目标,这使人们对沥青路面的复杂性又有了进一步的认识,也使沥青路面的发展方向变得更加扑朔迷离。但这不仅没能阻止各国道路工作者继续探索沥青路面的步伐,反而激发了人们更大的研究热情,以至于 1993 年以来(SHRP 之后)各国又开展了持续的研究,而且研究规模越来越大,范围越来越广。虽然这些研究迄今尚未得出系统的、实用的成果,但人们已经越来越真切地达成了共识:“沥青路面远比人们所认识的要复杂得多”,探索新的理论和新的方法不仅是十分必要的,而且是十分迫切的。

本书是作者十年思考与探索的总结。1991 年,本人开始走上了独立从事科学研究、独立指导研究生的艰难之路。此前几年的路面调查和评价使本人直观地认识到路面损坏的复杂性,直觉地认识到路面问题并不是单纯的力学理论所能完全解决的。从那时起便制定了研究目标,并带领研究生开始了沥青路面的研究,闯入了这个充满着困惑、争议而又丰富多彩的世界。十年来,尽管研究经费的拮据常使本人颇感无奈,资助来源的多样又使本人的研究内容多少有些飘忽不定,但始终没有忘却对沥青路面研究的喜爱、思考与探索,并随着研究的深入,不断地修正我们的研究目标。应用领域的基础性研究资助者甚少;研究虽几度中断,庆幸的是没有停止。在这里,衷心感谢教育部长江学者奖励计划、国家自然科学基金委员会、上海市青年科技启明星计划、北京市公路局、上海市政工程管理局和上海浦东路桥公司,他们的及时资(帮)助才使本人关于沥青路面的研究有了起码的条件,才使这项还需多年努力的事业有了一个良好开端。

十年的不懈研究已经初步形成了较为完整的框架——尽管微不足道,但可能预示着一个新的体系和新的进展;在目前高速公路路面的非常规损坏越来越严重并已引起从政府到学者广泛关

注的今天,在国际沥青路面技术即将产生整体性突破的前夜,将初步的研究内容系统化,并理出章节、汇集成书、定名为“沥青路面结构行为理论”,目的是便于广大同行参考,也便于广泛倾听批评改进的意见和建议。

全书的写作大纲、书稿的修改、定稿以及第1章、第7章、第3章的§3.8和第6章的§6.1由孙立军负责完成;第2章和第3章的§3.1至§3.5由张宏超(1999级博士生)完成研究和撰写,§3.6和§3.7由胡小弟(2001级博士生)、陆辉(1998级博士生)完成研究,由胡小弟撰写;第4章由刘喜平(1990级硕士生)、许志军(1993级硕士生)、陈子建(1994级硕士生)、罗芳艳(1996级硕士生)完成研究,由刘黎萍(2001级博士生)进行补充整理并完成撰写;第5章、第6章由刘黎萍完成研究和撰写。感谢他(她)们所做的研究和对本人坚持从事这一领域基础性研究工作的支持。

孙立军

2001年12月

目 录

前言

2005 年版前言

2003 年版前言

1	引论	1
1.1	对路面设计的要求	2
1.2	路面设计方法	2
1.3	我国的路面研究	34
1.4	沥青路面的性能及其设计考虑	37
1.5	目前路面实践中的问题	44
2	路面结构内的温度分布	47
2.1	研究的背景	48
2.2	国内外研究综述	49
2.3	路面温度的实测	58
2.4	环境因素对路面温度场的影响	61
2.5	路面温度场的预估模型	64
2.6	路面温度场的简化预估模型	82
2.7	路面特征温度的预估模型	85
2.8	温度预估模型的改进	88
2.9	考虑非周期性温度变化的热传导模型	113
2.10	连续升温温度场	127
2.11	等效温度的确定	134

3	路面结构荷载应力分析	143
3.1	概述	144
3.2	计算参数	144
3.3	重型轮胎作用下的路面力学响应	157
3.4	轻型轮胎作用下的路面力学响应	186
3.5	小结以及对车辆超载的重新定义	199
4	沥青路面的损坏特征	203
4.1	沥青路面的常规损坏特征	204
4.2	沥青路面的损坏研究	209
4.3	沥青路面的损坏调查	220
4.4	初期损坏现象及其特征	223
5	路面初期损坏的机制	241
5.1	初期损坏的试验研究	242
5.2	级配分析	252
5.3	空隙率的影响	256
5.4	沥青面层的分层	276
5.5	动水压力的作用	277
5.6	路面初期损坏的产生机理	282
6	沥青路面的结构行为方程	309
6.1	路面性能指标及其计算	310
6.2	数据调查与积累	320
6.3	使用性能衰变方程形式的选择	330
6.4	结构行为方程的建立	345
6.5	环境因素的影响	362
6.6	综合方程及验证	378
6.7	不同因素对路面性能的影响分析	380
6.8	路面结构行为的图示	385

7	复合式沥青路面的结构行为	393
7.1	复合式沥青路面结构行为的研究	394
7.2	数据采集与处理	409
7.3	复合沥青路面结构的耦合行为模型	410
7.4	有效厚度模型的应用	426
8	沥青路面的全寿命设计方法	435
8.1	设计考虑	436
8.2	路面结构的概念设计	441
8.3	路面设计中的费用模型	444
8.4	路面厚度的设计与优化	451
8.5	面层材料的设计原则	478
9	路面车辙分析与预估	483
9.1	引言	484
9.2	预估模型的基本结构	487
9.3	室内轮辙试验数据的变异性分析和处理方法	494
9.4	室内永久变形预估模型	510
9.5	车辙预估模型	530
9.6	隆起系数的确定	546
9.7	车辙模型在设计中的使用	567
10	力学性能与使用性能的统一——桥渡原理	573
10.1	结构行为方程与疲劳方程的统一	575
10.2	材料、环境因素对疲劳特性的影响	581
10.3	室内材料疲劳寿命与现场结构疲劳寿命的关系	587
10.4	统一的路面设计系统:按性能设计,按力学验算	592
10.5	弯沉修正与路面验收	610
10.6	长寿命设计的比较	618

11	沥青混合料单轴贯入抗剪强度测试方法	625
11.1	相关研究背景	626
11.2	抗剪试验方案设计	629
11.3	试验数据的分析方法	643
11.4	试验参数确定与验证	654
11.5	不同尺寸试件的抗剪试验参数	675
11.6	沥青混合料抗剪强度影响因素分析	686
12	路面结构、材料设计的一体化	699
12.1	引言	700
12.2	车辙分析模型的优化和验证	700
12.3	结构与材料一体化设计方法示例	733
12.4	剪应力简化计算及车辙分析模型的简化	737
12.5	基于简化模型的设计示例	747
13	沥青混合料均匀性研究	751
13.1	研究意义	752
13.2	国内外研究现状	753
13.3	沥青混合料数字图像处理	760
13.4	沥青混合料细观结构分析软件 MASAC 指标体系	767
13.5	沥青混合料均匀性指标	774
13.6	沥青混合料均匀性指标影响因素	787
13.7	沥青混合料均匀性与其性能变异性	801
13.8	沥青混合料均匀性与路面力学反应参数	819
14	路面研究面临的几个问题	827
14.1	结构设计与材料设计的精确耦合	828
14.2	荷载换算的研究	832
14.3	环境影响分析和设计考虑	833
14.4	路面材料研究的结构化趋势	837

14.5 路面变形叠加方法 839

14.6 沥青材料研究的数字化技术 841

14.7 动荷载的影响 843

14.8 按需设计:路面设计的新境界 843

附录 A 轮地接触压力分布的静态测试仪研制..... 846

附录 B 轮地接触压力测试 859

附录 C 轮胎接地压力的测量结果分析 885

附录 D 六个地区的气候资料 and 全国直辖市及各省会城市 1951—1980 年间月平均气温 910

附录 E 单轴贯入抗剪强度测试方法指南 913

索引 920

1 引论
