



Structural Behavior Study for Asphalt Pavements

沥青路面结构行为理论

孙立军 等著



人民交通出版社
China Communications Press



Structural Behavior Study for Asphalt Pavements

沥青路面结构行为理论

孙立军 等著

人民交通出版社

内 容 提 要

为了建立沥青路面在重交通荷载作用下的结构行为和设计理论,作者对路面结构的温度分布、路面结构内的轮载应力、路面损坏特征、路面初期损坏机制、沥青混合料抗剪强度测定方法等课题进行了长达十余年的研究,建立了能够覆盖整个寿命周期的路面结构行为方程,提出了基于性能的路面全寿命设计方法。本书是这些研究的汇总和集成。以这些研究为基础,作者统一了国内外目前使用的沥青路面核心设计方程,建立了路面力学性能与使用性能之间的内在关系;提出了“按性能设计、按力学验算”的统一路面设计系统,实现了结构设计和材料设计的并轨;提出了沥青混合料的均匀性评价方法和指标。最后,指出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设计、施工、养护、管理和研究的有关人员使用,亦可供高等院校的教师和研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面结构行为理论/孙立军等著. —北京:人民交通出版社,2005.11
ISBN 7-114-05792-X

I. 沥... II. 孙... III. 沥青路面-损坏-研究
IV. U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 113374 号

交通科技丛书

书 名: 沥青路面结构行为理论

著 作 者: 孙立军 等

责任编辑: 沈鸿雁 张 斌

出版发行: 人民交通出版社

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)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787×980 1/16

印 张: 45.5

字 数: 741 千

版 次: 2005 年 11 月第 1 版

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05792-X

印 数: 0001~3500 册

定 价: 70.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

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,书中未有详细阐述,当时的理论框架还很不完整。该书阐述了当时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广大同行的鼓励和欢迎。

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、交通部西部交通建设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,对同济大学出版社出版的《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—路面接触压力测试、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重要进展,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研究报告的形式公布了人们期待已久并寄予厚望的“力学—经验设计指南”,而没有采用正式的“AASHTO 2002设计指南”的名义颁布,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,在目前的重交通条件下,路面技术遇到了真正的挑战!

在这期间,沥青路面界一些德高望重的前辈对我们的工作给予许多鼓励和支持,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发表演讲,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,促使我们认真对待我们所从事的工作,并尽快在同济版《沥青路面结构行为理论》的基础上增加了新的内容,使原先不够完整的理论框架清晰完整起来。

全书秉承了同济版《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)基本保持了原来的内容;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

目 录

1 引论	1
1.1 对路面设计的要求	1
1.2 路面设计方法	2
1.2.1 基于经验的设计方法	2
1.2.2 基于力学的设计方法	5
1.2.3 基于性能的设计方法	21
1.2.4 路面设计方法的基本评价	30
1.3 我国的路面研究	37
1.4 沥青路面的性能及其设计考虑	39
1.4.1 路面使用性能与路面结构行为	39
1.4.2 路面性能的研究	40
1.4.3 设计中关于路面性能的考虑	46
1.5 目前路面实践中的问题	46
参考文献	48
2 路面结构内的温度分布	51
2.1 研究的背景	51
2.2 国内外研究综述	52
2.2.1 国外的研究	52
2.2.2 国内的研究	61
2.2.3 国内外研究方法的评价	61
2.3 路面温度的实测	62
2.4 环境因素对路面温度场的影响	65
2.4.1 影响机理	65
2.4.2 主要影响因素	66
2.4.3 主要环境因素和路面温度场的日变化 规律	66
2.5 路面温度场的预估模型	68

2.5.1	预估模型的基本形式	68
2.5.2	预估模型的地区差异	72
2.5.3	地区差异的产生原因	73
2.5.4	地区差异的解决途径	74
2.5.5	考虑地区修正系数的预估模型	75
2.5.6	预估模型的预测效果	79
2.6	路面温度场的简化预估模型	81
2.6.1	简化预估模型的基本形式	81
2.6.2	简化预估模型的预测效果	82
2.6.3	简化预估模型的适用范围	82
2.7	路面特征温度的预估模型	84
2.7.1	路面日最高温度的预估模型	85
2.7.2	路面日最低温度的预估模型	87
2.8	等效温度的确定	88
2.8.1	疲劳等效温度的确定	89
2.8.2	车辙预估等效温度	91
2.8.3	计算实例	93
2.8.4	与 SHRP 模型的比较	94
	参考文献	95
3	路面结构轮载应力分析	98
3.1	轮地接触压力分布	98
3.1.1	概述	98
3.1.2	轮地压力的静态测试仪研制	103
3.1.3	轮胎接地压力的测量结果及分析	117
3.2	计算参数	146
3.2.1	路面结构及计算模型	146
3.2.2	轮胎接地面形状及压力的简化	148
3.3	重型轮胎作用下的路面力学响应	161
3.3.1	走向花纹轮胎作用分析	161
3.3.2	横向花纹轮胎作用分析	179
3.4	轻型轮胎作用下的路面力学响应	197
3.4.1	计算结果及分析	197

3.4.2	路面基层模量的影响分析	209
3.5	小结以及对车辆超载的重新定义	209
	参考文献	212
4	沥青路面的损坏特征	214
4.1	沥青路面的常规损坏特征	214
4.1.1	裂缝	214
4.1.2	变形	216
4.1.3	表面损坏	217
4.1.4	其他损坏	218
4.2	沥青路面的损坏研究	219
4.2.1	早期损坏现象	220
4.2.2	早期损坏的评价方法及评价指标	224
4.3	沥青路面的损坏调查	232
4.4	初期损坏现象及其特征	235
4.4.1	典型损坏类型和特征	235
4.4.2	调查发现的其他一些问题	248
4.4.3	路面损坏的时间特征	250
	参考文献	251
5	路面初期损坏的机制	254
5.1	初期损坏的试验研究	254
5.1.1	道路 A	255
5.1.2	道路 B	256
5.1.3	道路 C	258
5.1.4	道路 D	259
5.1.5	道路 E	260
5.1.6	道路 F	262
5.1.7	道路 G	263
5.1.8	道路 H	264
5.1.9	道路 I	265
5.2	级配分析	266
5.3	空隙率的影响	270
5.3.1	空隙率的测量	270

5.3.2	空隙率与路面初期损坏的关系	275
5.3.3	空隙率与透水性的关系	276
5.3.4	空隙率对沥青混合料耐久性的影响	278
5.3.5	空隙率与沥青混合料强度的关系	280
5.3.6	空隙率与沥青混合料水稳定性的关系	289
5.3.7	沥青/集料的粘附性	292
5.4	沥青面层的分层	293
5.5	动水压力的作用	294
5.5.1	行车产生的动水压力	294
5.5.2	动水压力的理论计算	295
5.5.3	实测动水压力	297
5.6	路面初期损坏的产生机理	299
5.6.1	沥青在路面中的迁移	299
5.6.2	路面初期损坏的解释	301
5.6.3	新型龟裂的产生	302
5.6.4	车辙	309
5.6.5	初期损坏的机理	311
	参考文献	318
6	沥青混合料抗剪强度测定方法	322
6.1	相关研究背景	322
6.2	抗剪试验方案设计	325
6.2.1	试验方案设计	325
6.2.2	试验参数的初步确定	328
6.3	试验数据的分析方法	342
6.3.1	第一种方法	342
6.3.2	第二种方法	348
6.4	试验参数确定与验证	353
6.4.1	试验材料及材料参数	354
6.4.2	加载速率的影响	355
6.4.3	试验结果及初步分析	356
6.5	沥青混合料抗剪标准初探	370
6.5.1	预备的力学知识	370

6.5.2	Mcleod 设计方法	371
6.5.3	Smith 设计方法	373
6.5.4	对 Smith 设计方法的改进	374
6.5.5	现场取样试件的初步试验结果	376
	参考文献	377
7	沥青路面的结构行为方程	380
7.1	路面性能指标及其计算	380
7.1.1	路面性能指标选择	380
7.1.2	路面状况指数 PCI	381
7.1.3	路面行驶质量指数 RQI	387
7.1.4	路面弯沉	391
7.2	数据调查与积累	391
7.2.1	路面数据的采集与积累	391
7.2.2	交通数据的调查与换算	397
7.3	使用性能衰变方程形式的选择	402
7.3.1	国际上代表性的方程形式	403
7.3.2	方程形式选择	414
7.3.3	统一模型形式的意义	418
7.4	结构行为方程的建立	419
7.4.1	数据分析方法	419
7.4.2	数据整理	420
7.4.3	数据分类分级	421
7.4.4	PCI 的衰变方程	423
7.4.5	RQI 的衰变方程	426
7.4.6	路面弯沉的变化规律	431
7.5	环境因素的影响	436
7.5.1	环境的影响及环境参数	436
7.5.2	地区系数的确定	441
7.5.3	环境参数和地区系数的关系模型	449
7.5.4	全国主要城市的环境系数	452
7.6	综合方程及验证	457
7.7	不同因素对路面性能的影响分析	459

7.7.1	外部因素的影响	459
7.7.2	内部因素的影响	460
7.8	路面结构行为的图示	463
7.8.1	行为图示的含义	463
7.8.2	行为函数曲线作法	464
7.8.3	不同路面结构的函数示例	465
7.8.4	行为函数曲线的应用——剩余寿命 预估	466
	参考文献	470
8	复合式沥青路面的结构行为	473
8.1	复合式沥青路面结构行为的研究	473
8.1.1	研究的目的和意义	473
8.1.2	研究的现状	474
8.1.3	典型的考虑方法	489
8.2	数据采集与处理	490
8.2.1	数据采集	490
8.2.2	数据预处理	491
8.3	复合沥青路面结构的耦合行为模型	492
8.3.1	复合结构的耦合行为模型	492
8.3.2	有效厚度系数的反演	493
8.3.3	有效厚度系数预测模型的建立	493
8.3.4	沥青路面罩面后的结构行为方程	508
8.4	有效厚度模型的应用	508
8.4.1	寿命周期费用组成	509
8.4.2	应用程序介绍	510
8.4.3	应用实例	510
	参考文献	516
9	沥青路面的全寿命设计方法	518
9.1	设计考虑	519
9.2	路面结构的概念设计	524
9.2.1	面层的功能和要求	525
9.2.2	排水层	526

9.2.3	基层	526
9.2.4	垫层和土基	527
9.2.5	交通	527
9.3	路面设计中的费用模型	527
9.3.1	养护费用模型	528
9.3.2	用户费用模型	529
9.3.3	残值模型	534
9.3.4	有关说明	535
9.4	路面厚度的设计与优化	535
9.4.1	设计指标与设计标准的选取	535
9.4.2	结构厚度优化设计流程	537
9.4.3	结构设计方法中考虑的主要因素	537
9.4.4	寿命周期费用分析	541
9.4.5	设计软件简介	547
9.4.6	结构组合的详细设计	547
9.4.7	厚度设计示例	549
9.5	面层材料的设计原则	563
9.5.1	面层材料的设计	563
9.5.2	半刚性材料的设计	567
	参考文献	567
10	统一的分析理论和系统	569
10.1	设计方程的统一	570
10.1.1	基本原理	570
10.1.2	疲劳方程的建立与比较	571
10.1.3	基层类型的影响	574
10.1.4	路面分析理论的综合	575
10.2	材料、环境因素对疲劳特性的影响	575
10.2.1	基本原理	575
10.2.2	材料性能影响系数	576
10.2.3	环境因素的影响	578
10.3	室内疲劳寿命与现场疲劳寿命的关系	581
10.3.1	基本原理	581

10.3.2	室内疲劳方程	582
10.3.3	室内外比较	585
10.3.4	综合现场疲劳方程	586
10.4	统一的路面设计系统	586
10.4.1	损坏模式、设计指标与力学图式	586
10.4.2	设计流程	589
10.4.3	结构模量组合分析	591
10.4.4	路面厚度设计	604
10.4.5	力学验算和材料设计	604
10.4.6	最终方案选择	606
10.5	弯沉修正与路面验收	606
10.5.1	试验概况	607
10.5.2	试验结果	608
10.5.3	建议的弯沉修正式	613
10.6	长寿命设计的比较	614
10.6.1	长寿命的概念	614
10.6.2	长寿命路面设计	615
10.6.3	路面设计比较	618
	参考文献	619
11	沥青混合料均匀性指标研究	621
11.1	研究意义	621
11.2	国内外研究现状	622
11.3	沥青混合料数字图像处理	630
11.3.1	数字图像处理	630
11.3.2	沥青混合料数字图像处理	633
11.3.3	集料颗粒形状与测量	635
11.3.4	分析系统软件 MASAC 的功能简介	638
11.4	沥青混合料均匀性指标	645
11.4.1	截面上沥青混合料均匀性评价	645
11.4.2	沥青混合料整体均匀性	655
11.4.3	沥青混合料均匀性指标	656
11.5	影响沥青混合料均匀性的因素	657

11.5.1	试验材料	657
11.5.2	不同因素对沥青混合料均匀性的 影响	659
11.6	沥青混合料均匀性与其性能变异性	669
11.6.1	试验材料	669
11.6.2	沥青混合料均匀性与空隙率	670
11.6.3	沥青混合料均匀性与高温稳定性	671
11.6.4	沥青混合料均匀性与力学强度	671
	参考文献	673
12	路面研究面临的几个问题	679
12.1	结构设计与材料设计的统一	679
12.2	荷载换算的研究	681
12.3	环境影响分析和设计考虑	682
12.3.1	地下水的作用	682
12.3.2	高速行驶产生的动水压力的影响	683
12.3.3	温度的影响	684
12.3.4	材料的老化和材料性能的变化	684
12.3.5	荷载、环境的相互作用对路面性能的 影响	685
12.4	路面材料研究的结构化趋势	685
12.4.1	材料设计的力学要求	685
12.4.2	结合料和集料在混合料中的作用	686
12.4.3	路面结构和环境对材料性能的要求	687
12.4.4	高性能的路面材料	687
12.5	路面车辙的研究	688
12.6	沥青材料研究的数字化技术	690
12.7	动荷载的影响	692
12.8	按需设计:路面设计的新境界	692
	参考文献	693
	附录	695

1 引 论

1.1 对路面设计的要求

路面结构由路基(顶部)、垫层、基层和面层组成,它是道路工程中最直接承受荷载和环境作用的部分。对路面或路面设计的最基本要求是耐久、平整和抗滑。耐久是指路面具有足够长的使用寿命,这要求整个路面结构具有足够的强度和抗变形能力;事实上,迄今为止所有的设计方法都是围绕着耐久性这个核心而提出的。平整要求是为了保证路面的行驶舒适性;对高等级公路(道路),由于行车速度快,保证平整度尤为必要。保证了平整度,也就减少了因动荷载冲击造成路面损坏的可能性,达到延长路面寿命的目的。要做到路面平整,就必须有正确的厚度设计、正确的材料设计和正确的施工方法。抗滑是对路面表面特性的要求,表征了路面的行驶安全性,传统上不属于路面结构设计的内容,主要通过表层材料的选择和材料的设计予以保证。

路面的过早损坏意味着路面的耐久性不足。路面的损坏具有各种类型和各种形态。一般而言,高等级公路(道路)的路面损坏,包括变形(车辙)、开裂(疲劳开裂、低温开裂和反射裂缝)以及目前出现的一些新的损坏类型。过多的路面损坏意味着路面寿命的终结,限制、延迟这些损坏的发生和发展是路面设计的主要任务。

相对于整个道路(公路)的寿命而言,路面的寿命是很短的,通常设计寿命只有 15~20 年。这一规定的主要目的是为了节省道路的初期造价,而将节省的费用用于路面的养护。随着交通量的增加,虽然路面结构的造价在整个工程中所占比例越来越小,但其绝对数值却越来越大,所起的作用也越来越大。另一方面,路面的维修对道路通行的影响变得越来越难以忍受,并容易引发恶性交通事故,所以越来越多的国家将沥青路面的设计寿命定为 20 年,并逐步形成了长寿命的设计理念。

路面设计的主要任务就是确保其寿命期间不发生不可接受的损坏,

这是不同设计方法的共同目标。要达到这一目标,就要综合考虑路面的“结构、材料、荷载、环境和经济”这五个方面的因素,而最终的判据则是路面的使用性能。所以,根据使用性能设计路面是一种合理的选择,这不仅是发展的趋势,也是发展的必然。

下面简要地回顾一下几个有代表性的设计方法的学术思想,看其如何满足路面的设计要求。

1.2 路面设计方法

1.2.1 基于经验的设计方法

1) CBR 设计法^[1,2]

CBR 是美国加利福尼亚州交通部于 1928 ~ 1929 年提出的表征道路材料抗力的指标,以材料的贯入抗力与标准碎石贯入抗力的百分比值表示。根据当时的调查,路面破坏的主要类型是:路面因吸水而导致的路基材料的侧向位移;路面下的材料不均匀沉降;路面下材料的过大弯沉。根据这些调查结果,提出了 CBR 设计法,给出了适用于美国加利福尼亚州交通状况的设计曲线,以控制路基的剪切破坏。

第二次世界大战初期,美国陆军工程师兵团对各种柔性路面设计方法进行了广泛的调研,并决定采用 CBR 方法作为其机场道面的设计方法。由于荷载差别很大,所以按照“等剪切”的原则,将设计标准外延到各类飞机荷载的范围。通过多年研究和经验的积累,1956 年提出了路面厚度与轮载、轮胎压力的关系式,之后又根据荷载的重复作用和重载的作用,对该路面厚度公式进行了多次修正。

1972 年,美国全国碎石协会根据美国工程师兵团的 CBR 法制定了适用于公路的路面 CBR 设计方法。该方法的设计思想是,路面应提供足够的厚度和质量,以防止任一路面层内产生重复剪切变形;冰冻是一个重要影响因素,应设法减小到可以接受的程度。

CBR 设计法是一种经验性的方法,设计过程简单,概念明确,适用于重载、低等级的路面设计;所提出的 CBR 指标已被作为路面材料的一种参数指标得到了广泛应用。

2) AASHTO 方法^[3,4]

AASHTO(现为 AASHTO)设计方法产生于 1958 ~ 1962 年间的 AASHTO

道路试验,是一个有着重大影响的设计方法。试验工作于 1961 年底完成,1962 年 5 月做出总结,并发表了 7 本研究报告,提供了大量关于路面设计、施工的宝贵资料。1961 年提出暂行设计指南,1972 年出版了第一版《AASHTO 路面中期设计指南》,经过 1986 年和 1993 年的两次修订,正式成为《AASHTO 路面设计指南》。

AASHTO 方法提出了路面现时服务能力指数 PSI 的概念,以表征路面的服务质量。通过对相同路段的主观评价与客观评价,建立了 PSI 与路面状况的关系,如式(1-1)所示。主观评价指组成评分小组,由评分小组成员对路面进行评分(0~5),所得到的评分值即表示 PSI 的试验值;客观评价指量测路面的坡度变化、车辙深度、裂缝面积等指标。

$$PSI = 5.03 - 1.91 \lg(1 + \overline{SV}) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01(\sqrt{C + P}) \quad (1-1)$$

式中:PSI——路面现时服务能力指数(Present Serviceability Index),是一个无量纲量,反映了道路使用者对路面服务质量的平均评价,其数值在 0~5 之间;

$\overline{SV}$ ——坡度变化量的平均;

$\overline{RD}$ ——车辙深度平均值(cm);

C ——已发展成网状的裂缝面积;

P ——修补的面积。

该设计方法最初的基本设计方程是:

$$\lg W_{18} = 9.36 \lg(SN + 1) - 0.2 + \frac{\lg \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \quad (1-2)$$

式中: W_{18} ——累计 18kip 标准单轴荷载(ESAL)作用次数;

ΔPSI ——PSI 从路面新建至使用年限末的差值($4.2 - P_1$),依道路等级定;

SN——路面结构数,表征路面结构的总的等效厚度。

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (1-3)$$

式中: a_i ——第 i 层的材料系数;

D_i ——第 i 层的厚度。