

国家自然科学基金资助项目

当代科技重要著作·交通领域

路面 分析与设计

(美)黄仰贤

余定选 齐 诚

邓学钧

著

译

主审

人民交通出版社

当代科技重要著作丛书·交通领域

路面分析与设计

Lumian Fenxi Yu Sheji

(美)黄仰贤 著

余定选 齐 诚 译

邓学钧 主审

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

路面分析与设计/(美)黄仰贤著;余定选,齐诚译.

—北京:人民交通出版社,1998.2

书名原文:Pavement Analysis and Design

ISBN 7-114-02833-4

I. 路… II. ①黄… ②余… ③齐… III. ①路面-分析

②路面-设计 IV. U416.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 24783 号

Copyright©本书英文版本由 Prentice-Hall, Inc. 1993 年出版。本书中文简体版经 Prentice-Hall, Inc. 授权由人民交通出版社独家出版和发行。

著作权合同登记号:图字 01—98—0508

当代科技重要著作丛书·交通领域

路面分析与设计

(美)黄仰贤 著

余定选 齐 诚 译

邓学钧 主审

版式设计:刘晓方 责任校对:尹 静 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京京东印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:36 字数:920 千

1998 年 5 月 第 1 版

1998 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4 500 册 定价:70.00 元

ISBN 7-114-02833-4

U·02022

内 容 提 要

本书是作者黄仰贤教授根据自己几十年的研究成果和教学经验总结的柔性路面和刚性路面的分析理论和设计方法的综合专著。本书内容涵盖路面分析的理论、设计、使用、评定等各方面,既有力学原理,又有经验方法,内容全面系统而又广泛详实。本书还将美国及西方诸权威机构提出的最新设计方法和最先进的实验设备逐一介绍,代表了当前国际最先进的水平。书中还提供了作者自己开发的计算机程序。另外,书中所举的大量实例及每章之后的习题为广大读者迅速理解提供了良好帮助。本书已被美国 60 多所院校采纳为教科书,三年内已重印四次。

本书适合于从事公路路面、机场道面和铁路道床结构分析与设计的科研与设计技术人员及公路专业的大学本科生及研究生使用。

(本书附有著者开发的程序软盘,需要者请与人民交通出版社联系。地址:北京和平里东街 10 号人民交通出版社公路图书部 100013 电话:010-64237738)

《当代科技重要著作丛书》总序

科学技术作为生产力,在人类社会的发展过程中,越来越发挥着日益重要的作用。而作为人类生产实践、科学实验的积累和结晶的现代科学技术著作,则是科学技术知识潜在的生产力。它们所传播的正确的、先进的科学技术内容,一旦为人们所掌握,并运用到社会生产实践中去,便会物化成现实的、巨大的社会生产力,起着推动社会物质文明和精神文明迅猛发展的重大作用。

在当今世界新技术革命迅速发展的形势下,要振兴我国的国民经济,缩短我们在经济技术上同发达国家之间的差距,促进我国经济向前发展,就必须积极引进、吸收国外的先进科学技术,并使之同国内的科学研究和生产实践密切结合起来,而在我国及时翻译出版世界重要科技著作,并使之在国内广为传播,就是其中一个重要方面。

有鉴于此,中国出版工作者协会科技出版工作委员会,本着科技出版工作要面向世界、面向未来、面向现代化的方针,为使科技出版工作在吸收引进外国先进科学技术方面作出应有的贡献,于1986年在全国科技出版社社长总编辑第四届年会上发出倡议,要求发挥科技出版社的优势,协作出版《当代科技重要著作丛书》,在国内系统地翻译出版当代世界有重大影响的科技著作。这一有建设性的倡议,得到全国各家科技出版社的大力支持。在中国出版工作者协会科技出版工作委员会和各科技出版社的共同努力下,这一工作得到了国内科技界专家、学者的广泛注意和热情支持,各项工作正在逐步开展。

根据我国科学技术研究和发展的总体规划,考虑到国家的现行体制和专业门类,经统筹安排,该套大型丛书划分为两大类共三十六个单元。第一类为高科技领域图书,主要包括的学科有生物技术、信息工程、航天航空、自动化、能源、激光、新材料等;第二类为应用科学领域图书,主要包括的学科有地质、煤炭、石油、冶金、机械、化工、建筑、水利、电力、交通、铁道、邮电、轻工、纺织、农业、林业、医学、海洋科学、气象学、环境科学、国防科学、数学、力学、物理、化学、天文、地理、生物学、交叉科学、培训图书等。

《当代科技重要著作丛书》的出版工作,数量大,时间长,涉及面广,是一项非常复杂而又艰巨的工作,需要国内科技界的专家、学者以及全国各科技出版社的共同努力,并且需要有志于祖国建设的海外侨胞和人类共同进步事业的外国学者的大力支持。中国出版工作者协会科技出版工作委员会,为此专门成立了《当代科技重要著作丛书》总编委员会和各单元编委会,负责协调丛书的出版工作和各单元出版计划的具体实施。

尽管丛书的出版工作是非常艰巨的,但我们相信,为了祖国的科技进步,为了中华民族的繁荣昌盛,经广大同仁携手努力,丛书必定陆续付梓,以滋国内读者。

中国出版工作者协会
科技出版工作委员会

《当代科技重要著作·交通领域》

丛书编委会成员

主 任	李家本	人民交通出版社
副主 任	陈国华	机械工业出版社
副主 任	黄国新	同济大学出版社
副主 任	李光炜	四川科学技术出版社
编 委	高景和	上海交通大学出版社
编 委	杨秀雯	天津大学出版社
编 委	李汝船	大连理工大学出版社
编 委	袁林新	大连海事大学出版社
编 委	宋淑萍	天津科学技术出版社
编 委	李亚平	安徽科学技术出版社
编 委	蔡荣波	广东科技出版社
编 委	洪文逵	东南大学出版社
编 委	吴德心	人民交通出版社
兼秘书长		

《当代科技重要著作·交通领域》序言

为了及时总结、推广国内专家、学者的科研成果,系统地引进吸收国外先进科学技术,遵照中国出版工作者协会科技出版工作委员会的工作部署,由人民交通出版社和机械工业出版社牵头,联系大连海事大学出版社、大连理工大学出版社、天津大学出版社、同济大学出版社、上海交通大学出版社、天津科学技术出版社、安徽科学技术出版社、广东科技出版社、四川科学技术出版社等十一家出版社,于1988年6月在京共同组成了《当代科技重要著作·交通领域》出版工作协调小组,以统筹规划实施该套丛书的出版工作。由于丛书涉及的专业面广,而每一出版社又具有不同专业的出版优势,为了充分发挥各出版社的特长,经出席协调小组成立大会的代表共同商议,决定按照学科专业优势将交通领域当代科技重要著作丛书划分为六个单元,分别组成相应的六个评委会,具体负责选题评定和出版工作。六个评委会及其分工如下:

一、公路、桥梁工程和工程机械单元评委会,由同济大学出版社牵头,安徽科学技术出版社、东南大学出版社、四川科学技术出版社参加,共同负责;

二、港口、航道工程单元评委会,由天津大学出版社牵头,大连理工大学出版社和天津科学技术出版社参加,共同负责;

三、船舶设计、制造单元评委会,由上海交通大学出版社牵头,大连理工大学出版社和天津大学出版社参加,共同负责;

四、船舶运输和营运管理单元评委会,由大连海事大学出版社牵头,广东科技出版社和人民交通出版社参加,共同负责;

五、汽车、起重搬运和港口装卸机械单元评委会,由机械工业出版社牵头,天津大学出版社和人民交通出版社参加,共同负责;

六、交通运输管理和交通工程单元评委会,由人民交通出版社牵头,安徽科学技术出版社、同济大学出版社和东南大学出版社参加,共同负责。

出版这套丛书是一项艰巨复杂的系统工程,需要广大专家学者和十二家出版社同仁持续不断的共同努力。为了我国交通运输业的发展,为了我国科技出版事业的繁荣兴旺,我们深信这一工作将会得到社会各界的大力支持。这套丛书必将融入发展我国交通运输业的同一范畴,对我国交通运输科学技术的发展起到积极的推动作用。

《当代科技重要著作·交通领域》丛书编委会

1994年10月20日

前 言

在过去的二十年中,我在肯塔基大学为研究生和本科高年级学生讲授路面分析与设计课程。由于可用的书很少,我很难找到一本适合此课程的教科书。教授不愿写路面分析与设计的教科书至少有两个原因。首先是内容太广泛,它涵盖了公路路面和机场道面,并包括分析、设计、使用、评定、维护、修复和管理。要将所有这些议题详尽地编入学生的教科书,并附有足够的例题和课外习题,虽然并非做不到,但也是相当困难的。其次,路面分析与设计广泛应用经验法,而根据经验法编写的书在很短时间里就会过时。没有人愿意写一本使用期如此短的书。由于这些困难,我写此书是有所选择的。我将内容限于公路路面的结构分析与设计,主要涵盖力学—经验设计方法,而不是纯经验法。

为了便于讲授力学—经验方法,书中附有两个我开发的用于路面分析和设计的计算机程序。十多年来我的程序已被学生广泛使用,并且不断加以更新和完善。这些原版程序有其特殊性,不能用于其它场合。例如,柔性路面的 KENLAYER 程序适用于静态或移动的多轮荷载作用下的多层体系,各层可以是线性弹性的、非线性弹性的,也可以是粘弹性的。刚性路面的 KENSLABS 程序适用于完全支承或部分支承在液体、固体或层状地基上的多板系统,并考虑了接缝处弯矩或剪力的传递。两个程序用于损伤分析均可将一年划分为若干时段,每个时段可具有不同的材料性质、不同的施加轴载和不同的重复作用次数。这些程序原先是为 IBM 计算机编写的,经修改后适用于 IBM PC,用本书提供的软盘即可运行这些程序。

本书除提供计算机程序外,还介绍了路面设计理论以及由美国各州公路与运输工作者协会(AASHTO)、地沥青学会(AI)和波特兰水泥协会(PCA)等单位提出的路面设计方法述评。本书已将大部分深奥的理论和详细资料放在附录中,因此既可略去附录,用作大学课程的教材,也可以包括附录在内,作为研究生的教材。虽然此书仅涵盖公路路面的分析与设计,但是其一般原理也可用于机场道面和铁路道床。

此书分为 13 章。第 1 章介绍路面设计的历史回顾、主要的道路试验、各种设计要素,以及公路路面、机场道面及铁路道床设计概念的差别。第 2 章讨论柔性路面的应力和应变,其中包括对均质体和层状体系的分析,材料可以是线性弹性、非线性弹性和线性粘弹性的。还提供了计算应力和应变的简易图表。第 3 章介绍基于波密斯特(Burmister)层状理论的 KENLAYER 计算机程序,其中包括理论公式的推演、程序说明、与已获得的解作比较和各种因素对路面响应的敏感性分析。第 4 章讨论刚性路面由于翘曲、荷载和摩擦力产生的应力和挠度,以及传力杆和接缝的设计。还提供了确定应力和挠度的影响图。第 5 章介绍基于有限元法的 KENSLABS 计算机程序,其中包括理论公式的推演、程序说明、与已获得的解作比较和敏感性分析。第 6 章讨论当量单轮和单轴荷载的概念,以及交通的预测。第 7 章叙述路面设计力学—经验法的材料特性,其中包括回弹模量、疲劳和永久变形性质、地基反应模量的确定方法。还介绍了与其它经验测试值的相互关系。第 8 章概述地下排水的设计,其中包括一般原理、排水材料 and 设计方法。第 9 章讨论路面的特性,其中包括损坏、服务能力、摩擦力、非破损检测和路面性能的评定。第 10 章阐述路面设计的可靠度概念,其中对交通、材料和几何参数的变异性均

加以考虑。介绍了最先由鲁森勃莱斯(Rosenblueth)提出的简单实用的概率统计方法,并讨论了两个概率统计计算机程序,其中包括用于柔性路面的 VESYS 和用于刚性路面的 PMRPD 程序。第 11 章概述柔性路面设计的理想力学方法,并详细介绍了地沥青学会法和 AASHTO 法,以及柔性路面路肩的设计。第 12 章概述刚性路面设计的理想力学方法,并详细介绍波特兰水泥协会法和 AASHTO 法。还包括连续配筋混凝土路面和刚性路面路肩的设计。第 13 章概述柔性和刚性两种路面的加铺层设计,其中包括 AASHTO 法、AI 法和 PCA 法。与一些章节有关的较深理论和详细资料,以及符号说明和参考文献均列入附录中。

与许多州公路局所用的 AASHTO 经验法不同,此书主要强调设计的力学—经验法。随着个人计算机和先进的材料试验方法的普及,路面设计向力学—经验法发展的趋势是显而易见的。根据力学—经验法所写的书,比之于按经验法所写的书,肯定更有意义和具有挑战性。本书连同计算机程序和大量的例题可作为课堂教材,对于有兴趣学习公路路面结构分析与设计的人员也是一本有用的参考书。

尽管本书相当部分的材料为我自己通过多年的研究、讲授和工程实践所获得,但许多资料是从公开出版物上引用的。我仍然要对允许我使用其研究成果的 AASHTO、地沥青学会、联邦公路局、波特兰水泥协会、运输研究委员会和许多其它机构和个人表示感谢。佐治亚工学院土木工程教授杰姆斯(James Lai)对本书提出了宝贵的意见,在此深表谢意。

肯塔基大学土木工程教授
黄仰贤(Yang H. Huang)专业工程师

为中译本序

我很高兴这本书能和中国的广大读者见面,它是我多年来从事路面研究和教学的心得总结,书中不仅包括我个人和他人的研究成果,而且还介绍了美国某些著名机构目前所采用的路面设计法,所以,这是一本兼顾理论和实务的书,已被美国六十多所院校采纳为教科书,三年内已重印四次。

我于1949年毕业于厦门大学后,即往台湾省公路局任职。1953年考取公费留美,在美国公路局实习一年,专攻公路路面。回台后任公路局道路课长。1961年自费留美,入维吉尼亚大学进修。1963年获土木工程硕士,受聘为维州公路局研究工程师,并在原校继续深造,1966年获科学博士学位。1967年在肯塔基大学任教,于1993年退休,现为该校名誉退休教授。我虽已退休,但对中国的发展和进步也时在关心之中,本书如能对中国读者有所助益,将是我最大的快慰。

对于诸位译者的辛劳,著者谨在此表示谢意。

黄仰贤

目 录

1 概论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 路面类型	6
1.3 道路试验	14
1.4 设计要素	19
1.5 公路路面、机场道面和铁路道床	27
1.6 小结	29
习题和问题	31
2 柔性路面的应力和应变	32
2.1 均质体	32
2.2 层状体系	40
2.3 粘弹性解	55
2.4 小结	64
习题	64
3 KENLAYER 计算机程序	67
3.1 理论的发展	67
3.2 程序说明	75
3.3 与已获得的解作比较	83
3.4 敏感性分析	97
3.5 小结	109
习题	111
4 刚性路面的应力和挠度	113
4.1 翘曲应力	113
4.2 荷载产生的应力和挠度	117
4.3 摩擦产生的应力	125
4.4 传力杆和接缝设计	130
4.5 小结	136
习题	137
5 KENSLABS 计算机程序	141
5.1 理论的发展	141
5.2 程序说明	154
5.3 与已获得的解作比较	166
5.4 敏感性分析	178
5.5 小结	185
习题	186
6 车辆荷载和交通量	192

6.1	设计方法	192
6.2	当量单轮荷载	192
6.3	当量轴载系数	200
6.4	交通分析	206
6.5	小结	212
	习题	213
7	材料特性	215
7.1	回弹模量	215
7.2	沥青混合料的动模量	227
7.3	疲劳特性	236
7.4	永久变形参数	240
7.5	其它性质	246
7.6	小结	248
	习题	249
8	排水设计	252
8.1	一般原理	252
8.2	排水材料	255
8.3	设计方法	263
8.4	小结	272
	习题	273
9	路面性能	275
9.1	损坏	275
9.2	服务能力	290
9.3	表面摩擦力	299
9.4	弯沉非破损量测	305
9.5	路面性能	314
9.6	小结	323
	习题	325
10	可靠度	327
10.1	统计概念	327
10.2	概率统计法	335
10.3	变异性	341
10.4	鲁森勃莱斯法	345
10.5	概率统计计算机程序	348
10.6	小结	361
	习题	361
11	柔性路面设计	364
11.1	调正的力学设计方法	364
11.2	地沥青学会法	374
11.3	AASHTO 法	387

11.4 柔性路面路肩设计.....	398
11.5 小结.....	402
习题.....	403
12 刚性路面设计	406
12.1 调正的力学设计方法.....	406
12.2 波特兰水泥协会法.....	414
12.3 AASHTO 法	434
12.4 连续配筋混凝土路面(CRCP)	445
12.5 刚性路面路肩设计.....	451
12.6 小结.....	454
习题.....	455
13 加铺层设计	457
13.1 加铺层类型.....	457
13.2 设计方法.....	460
13.3 地沥青学会法.....	463
13.4 波特兰水泥协会法.....	471
13.5 AASHTO 法	476
13.6 小结.....	489
习题.....	492
附录 A 粘弹性理论	494
A.1 微分算子	494
A.2 弹性—粘弹性对应法则	495
A.3 逐次残数法	499
A.4 复合模量	501
附录 B KENLAYER 的详细介绍	504
B.1 层状理论	504
B.2 子程序	507
B.3 流程图	509
B.4 例题	512
附录 C KENSLABS 的详细介绍	517
C.1 集中荷载作用下的层状地基	517
C.2 子程序	517
C.3 流程图	518
C.4 例题	521
附录 D 输入程序	524
D.1 概况	524
D.2 LAYERINP	526
D.3 SLABSINP	529
附录 E 符号说明	533
附录 F 参考文献	546

1 概 论

1.1 历史回顾

虽然路面设计已经由工艺技巧向科学技术方向逐步发展,但时至今日,经验仍起着重要的作用。早在 1920 年前,路面厚度完全由经验确定。对于同一个公路路段,即使土质的差别很大,路面仍采用相同的厚度。随着经验的逐年累积,各个部门提出了确定所需路面厚度的各种方法。要罗列所有迄今使用过的方法,这既不可能,也无必要。这里仅引用一些常用的方法,以说明发展的趋势。

在本章概论和回顾中,将引用一些技术术语。相信以本书作为教科书的学生,都学过运输工程、土木工程材料和土力学课程,熟悉这些术语的研究生和高年级大学生。如果不是这样,可暂时不管这些术语,因为大部分将在以后的章节中解释清楚。

1.1.1 柔性路面

柔性路面是由沥青和粒状材料筑成的。美国第一条沥青路于 1870 年修筑于新泽西州的纽瓦克。用沥青结合料与干净、有棱角、有级配的砂子和矿粉热拌混合料铺筑成的第一条薄层沥青路面,于 1876 年铺设于美国哥伦比亚特区华盛顿的宾夕法尼亚大街,沥青是由特立尼达湖运来的。到 1990 年为止(FHWA,1990)美国约有 352 万公里(220 万英里)铺有路面的道路,其中 94%为沥青路面。

一、设计方法

柔性路面设计方法可分为五类:测定或不测定土的强度的经验法、限制剪切破坏的方法、限制挠度的方法、基于路面性能和道路试验的回归法和力学—经验法。

(一)经验法

不测定土强度的经验法的应用,可追溯到霍琴托格拉和太沙基(Hogentogler、Terzaghi)于 1929 年提出(Public Roads,简称 PR)的公路土分类系统,该系统将均匀土质划分为 A—1 至 A—8,不均匀土质划分为 B—1 至 B—3。后来,1945 年,美国公路研究委员会(Highway Research Board-HRB)对 PR 分类系统作了修订,把土划分为 A—1 至 A—7,并增加分组指数,以区分不同土组的差异。史帝尔(Steele,1945)介绍了应用 HRB 分类和分组指数而无须强度试验估算基层和整个路面厚度的方法。要求强度试验的经验法是加利福尼亚公路局于 1929 年(Porter,1950)首先采用的,将路面厚度与加州承载比(CBR)建立关系。CBR 为贯入路基土的阻力与贯入标准碎石阻力的比值。在第二次世界大战期间。CBR 设计方法被美军工程兵进一步开发研究,从而在战后成为一种广泛使用的方法。

经验法的缺点主要是只能应用于给定的环境、材料和荷载条件之下。如果这些条件改变

了,设计就不可靠了,又必须通过反复试验提出适应于新情况的新方法。

(二)限制剪切破坏的方法

用限制剪切破坏的方法确定路面厚度将保证不会发生剪切破坏。路面结构层和土基需要考虑的主要性质是它们的粘结力和内摩擦角。巴勃(Barber)1946年应用太沙基承载力公式(1943)确定路面厚度。马克略特(Mcleod)1953年提出用对数螺旋曲线确定路面的承载力。约特(Yoder)1959年曾在它的著作《路面设计原理》一书中讨论了这些方法,但是在第二版(1975)中却没有提及。这并不奇怪,因为随着车速和交通量的日益增长,路面必须按行车舒适性进行设计,而不是单纯考虑防止剪切破坏。

(三)限制弯沉的方法

用限制弯沉的方法确定路面厚度将保证竖向弯沉度不超过允许的限值。堪萨斯州公路委员会1947年对布辛涅斯克公式(Boussinesq, 1885)作了修正,并限定土基的弯沉为2.54mm(0.1in)。美国海军1953年应用波密斯特双层理论(Burmister, 1943),并限定表面弯沉为6.35mm(0.25in)。应用弯沉作为设计标准具有明显的优点,因为在野外很容易测量。但是令人遗憾,路面的破坏是由于过度的应力和应变,而不是挠度所引起的。

(四)基于路面性能和道路试验的回归法

以道路试验成果为基础的AASHTO设计法是应用回归公式进行路面设计最好的实例。这种方法的缺点是设计公式只能用于条件和道路试验地点相同的情况。当条件不符合建立公式的情况时,必须根据理论或实践对公式作修正。回归公式也可以根据现有路面的性能来建立,例如路面评定系统COPES(Darter等, 1985)和EXPEAR(Hall等, 1989)中的回归公式。它们和道路试验的不同点是这些路面的材料和施工不易控制,因此数据较为离散,标准误差较大。不过,这些公式可以表明各种因素对路面性能的影响程度。由于这些公式中不确定的因素较多,因此在路面设计中的应用受到了限制。

(五)力学—经验法

力学—经验设计法是以材料的力学特性为基础的一种设计方法,它将轮载等输入因素与路面响应或应力、应变等输出因素联系起来。根据室内试验和野外性能测定数据,可以用计算结果预测损坏的程度。由于纯理论不能完全证明路面设计是否符合实际,因此必须以观察的路用性能作为依托。克霍芬(Kerkhoven)和笃蒙(Dormon)1953年首次提出了将土基表面的竖向压应变作为破坏标准,以减小永久变形;而赛尔(Saal)和皮尔(Pell)1960年则建议限制沥青层底部的水平拉应变,使疲劳开裂减到最低程度,如图1.1所示。在美国首次应用上述概念进行路面设计的是笃蒙和梅特可夫(Metcalf)(1965)。

用竖向压应变来控制永久变形,是认为铺路材料的塑性应变与弹性应变成正比。这样,限制了土基的弹性应变,土基以上其它层位的弹性应变也就得到了控制,因此,路面表面的永久变形值同样得到控制。这两个标准后来为壳牌石油跨国公司(Shell Petroleum International)(Claussen等, 1977)和地沥青学会(Shook等, 1982)所采纳,并用于他们的力学—经验设计方法。力学法的优点在于改进了设计的可靠度,提高了预测各类损坏的能力,并且使根据有限的野外和室内试验数据进行推算成为可能。

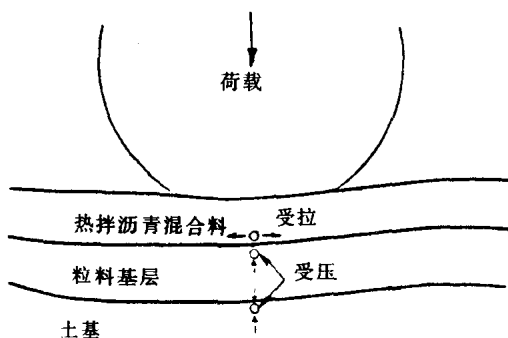


图 1.1 柔性路面中的拉应变和压应变

图 1.1 中的术语“热拌沥青混合料”就是常用的“沥青混凝土”的同义词,它是一种在间歇式或连续式拌和设备中制备,在高温条件下拌和、摊铺和碾压的沥青集料混合料。为了避免将波特兰水泥混凝土(PCC)与沥青混凝土(AC)相混淆,本书经常用热拌沥青混合料(HMA)这一术语代替沥青混凝土。

二、其它发展情况

有关柔性路面设计的其它发展情况包括计算机程序的应用、服务能力和可靠度的结合,以及动载的考虑方法等。

(一)计算机程序

根据波密斯特理论开发了各种计算机程序。最早的也是最著名的是雪佛隆(Chevron)研究公司(Warren 和 Dieckmann,1963)开发的 CHEV 程序,这个程序仅适用于线弹性材料;地沥青学会在 DAMA 程序中作了改进,可考虑非线性弹性的粒状材料(Hwang 和 Witczak,1979)。另一个众所周知的是壳牌公司开发的 BISAR 程序,它不仅考虑竖向荷载,还考虑水平荷载的作用(De Jong 等,1973)。另一个开始由加利福尼亚大学贝克莱(Berkeley)开发,后来用于微机的程序 ELSYM5,可用于多轮荷载作用下的五层弹性体系的计算(Kopperman 等,1986)。根据材料性质与应力相关的层状体系理论,方恩(Finn)等 1986 年开发了 PDMAP(沥青路面损伤概率统计模型)计算程序,能预测沥青路面的疲劳开裂和车辙。人们发现由 PDMAP 算得的临界响应,与加利福尼亚大学贝克莱开发的有限元应力分析程序 SAPIV 所得结果非常吻合。

层状体系理论的主要缺点是假设每一层是均质的并在整个层体中具有同样的性质。由于这一假设,非线性材料组成的层状体系难以分析,如未处理的粒料基层和底基层等。这些材料的弹性模量值随应力而变,而且在层体中也是不等的。这随之会产生这样一个问题:用非线性层中的哪一点来代表整个这一层呢?按通常的路面设计方法,只需知道最不利的应力、应变和挠度,那么选择靠近荷载作用点是合理的。然而,假如希望知道某些靠近荷载作用点又要知道某些远离荷载作用点处的应力、应变和挠度,就难以应用层状理论来分析非线性材料。应用有限元法则可以克服这一缺点。

邓肯(Duncan)等于 1968 年首先应用有限元法分析柔性路面。这一方法后来编入了 ILLI-PAVE 计算机程序(Raad 和 Figueroa,1980)。由于需要大量的计算机时和存储单元,程序在常规设计中没有得到推广。但是,根据 ILLI-PAVE 算得的响应建立的一些回归公式,在设计中却得到了应用(Thompson 和 Elliot,1985;Gomez-Achecar 和 Thompson,1986)。密歇根州立大学开发的 MICH-PAVE 计算机程序(Harichandran 等,1989)也应用了非线性有限元法。关于 ILLI-PAVE 和 MICH-PAVE 的详细情况及其不足之处将在 3.3.2 节中介绍。

(二)服务能力和可靠度

作为 AASHO 道路试验的成果,凯里(Carey)和依里克(Irick)于 1960 年提出了路面服务能力的概念,并指出路面厚度还应取决于最终所需的服务能力指数。莱贸(Lemer)和摩纹扎达(Moavenzadeh)于 1971 年提出了以可靠度概念作为路面设计的要素,并开发了可供三层粘弹性路面系统使用的概率统计计算机程序(Moavenzadeh 等,1974)。这一个将服务能力和可靠度结合起来的程序,经美国联邦公路局(FHWA,1978)修改后更名为 VESYS II。VESYS 已经开发了若干个版本,在 10.5.1 节介绍的是 VESYS IV-B(Jordahl 和 Rauhut,1983)。可靠度概念还被编入得克萨斯柔性路面设计系统(Darter 等,1973b)和 AASHTO 设计指南(AASHTO,

1986)。虽然 AASHTO 法主要是经验性的,但如果将经验的土基承载值代之以土基回弹模量,将经验的各层结构系数代之以回弹模量,可明显地看出,它与力学法是一致的。回弹模量是在重复荷载作用下的弹性模量,可由实验室试验确定。关于回弹模量、服务能力、可靠度的详细情况将分别在 7.1 节、9.2 节和第 10 章中介绍。

(三)动力荷载

到目前为止所介绍的各种方法,都是以静荷载或移动荷载为依据的,没有考虑由动力荷载产生的惯性作用。曼洛克(Mamlouk)于 1987 年开发了一个计算机程序,可以考虑惯性作用,并指出,当遇到浅层基岩或冰冻土基时,惯性作用是很明显的,这时,振动荷载比冲击荷载更重要。该程序需要大量的计算机运行时间,且只限于分析线弹性材料。在常规路面设计中,对于非线性弹性和粘弹性材料,考虑惯性作用仍是一个只有将来才能实现的理想。

摩奈斯密斯(Monismith)等于 1988 年的最新研究表明,对于沥青混凝土路面,必须完全按动力荷载分析,惯性作用可以忽略不计,这样,局部动力响应基本上可以用静力法确定。而所用材料的性质要和加载速率相适应。然而,由于冲击荷载的作用,当前最感兴趣的动力问题是车辆动力对路面设计的影响。目前的设计方法不考虑由于路面的不平整度造成的破坏。随着车辆愈来愈大,愈来愈重,设计适当的悬挂系统来减小破坏作用,可能是有益的。

1.1.2 刚性路面

刚性路面是由波特兰水泥混凝土铺筑成的。第一条混凝土道路于 1908 年建于密歇根州底特律市。及至 1990 年,美国约有 20 万公里(13 万英里)刚性路面。刚性路面设计方法的发展不象柔性路面那样变化大,因为混凝土的弯曲应力长期以来作为主要的甚至是唯一的设计要素。

一、解析解

从简单的确定型公式到复杂的演算,都可以利用解析解来确定混凝土路面中的应力和挠度。

(一)哥尔德贝克(Goldbeck)公式

哥尔德贝克于 1919 年假设路面为悬臂梁,在角隅上作用一集中荷载,推导出设计刚性路面的简易公式,如第 4 章式(4.12)所示。欧尔德(Older)(1924)在贝茨道路试验中用过同样的公式。

(二)基于液体地基的威斯特卡德(Westergaard)解

威斯特卡德(1926a,1926b,1927,1933,1939,1943,1948)对混凝土路面的应力和挠度作了广泛的研究,推导了由于温度翘曲以及三种荷载情况下的计算公式:即荷载作用在大板板角附近,荷载作用在大板边缘远离任意角隅的位置,以及荷载作用在大板远离任意板边的板中位置。分析是根据简单的假设来展开的,即板与土基之间任意点的反力与该点的挠度成正比,而与其它点的挠度无关,这类地基称之为液体地基或文克勒(Winkler)地基。威斯特卡德还假设板与地基完全接触。

美国公路局配合威斯特卡德的研究,在弗吉尼亚州的阿灵顿试验场,对混凝土路面的结构性能进行了广泛的研究,成果发表在 1935 年至 1943 年的《公路》杂志上,一共六篇文章,再版时合订成一册并广为流传(Teller 和 Sutherland,1935—1943)。

皮克(Pickett)将威斯特卡德板角公式所得极限板角应力与野外测量结果作比较后发现,